



学 校 代 码 10459

学号或申请号 201212020366

密 级

郑 州 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于生态足迹理论的龙门石窟景区
生态安全动态评价研究

作 者 姓 名： 刘 蕤

导 师 姓 名： 任 瀚 教授

学 科 门 类： 管理学

专 业 名 称： 旅游管理专业

培 养 院 系： 旅游管理学院

完 成 时 间： 2015 年 5 月

A thesis(dissertation) submitted to
Zhengzhou University
for the degree of Master

**A Research on Dynamic Evaluation of Ecological Security
in Longmen Grottoes Scenic Spot Based on the Ecological
Footprint**

By Rui Liu
Supervisor: Prof. Han Ren
Tourism Management
Tourism Management School
May,2015

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者：刘蕊

日期：2015年5月31日

学位论文使用授权声明

本人在导师指导下完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属郑州大学。根据郑州大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权郑州大学可以将本学位论文的全部或部分编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或者其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。本人离校后发表、使用学位论文或与该学位论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为郑州大学。保密论文在解密后应遵守此规定。

学位论文作者：刘蕊

日期：2015年5月31日

摘要

随着旅游业的飞速发展，粗放的旅游经济发展方式造成了一系列的生态安全隐患和资源环境问题。龙门石窟景区作为世界文化遗产，由于自身存在的自然环境风化侵蚀作用，加上游客的不文明行为和过度的旅游开发，生态环境问题凸显，这一历史文化遗产亟待进行生态安全保护。

本文以龙门石窟景区为研究对象，通过实地调研和一手数据资料的搜集，运用生态足迹模型和时间序列分析方法，对景区 2003-2013 年人均旅游生态足迹、人均旅游生态承载力、人均生态赤字等数据进行时间序列动态计算，并选取生态压力指数（ETI）、生态占用指数（EOI）、生态经济协调指数（EECI）作为衡量旅游生态安全的重要指标，对景区 2003-2013 年生态安全状况进行时间序列的定量评估。在具体研究过程中，基于 ETI、EOI、EECI 三项重要指标，利用主成分分析法建立了适用于景区生态安全评价的综合指标体系，并对龙门石窟景区生态安全等级进行划分评定。最后，通过预测模型的构建，对龙门石窟景区未来 2014-2020 年的生态安全指数进行预测计算；同时，构建景区预警等级评定标准，对景区生态安全警情现状和未来发展趋势进行分析和预测。结果显示，龙门石窟景区总体发展处于生态极不安全、不可持续状态，预计 2014-2020 年生态安全综合评价得分明显下降，年均降幅 28.49%，生态安全位于第六等级——状态恶劣阶段，警情状态更加严重，生态环境系统恶化速度加快，旅游业发展与生态环境系统保护矛盾日益凸显，生态压力日益增大，整体生态安全发展趋势不容乐观。对此，本文提出实施游客分流、优化能源结构、加强游客管理等策略，以提高龙门石窟景区生态安全等级，实现景区可持续发展。

关键词：生态足迹理论 生态安全 动态评价 龙门石窟景区

Abstract

With the rapid development of tourism, the extensive mode of economic development of tourism has brought a series of ecological safety hazards and resources and environmental problems. Because of the uncivilized misconduct tourism development and tourists, plus weathering erosion grotto inherent aspects of the natural environment, Longmen Grottoes scenic spot, which as the world's cultural heritage, needs to conduct ecological security protection research as a result of the growing environmental problems.

This paper takes Longmen Grottoes scenic spot as the research object, through field research and collecting data as well as the use of ecological footprint model and time series analysis method, conducts the dynamic calculation analysis on the per capita ecological footprint, per capita ecological carrying capacity of tourism and ecological deficit per capita of the scenic from 2003 to 2013. In addition, it selects the ecological pressure index (ETI), ecological footprint index (EOI), ecological and economic coordination index (EECI) as an important indicator of tourism ecological security, and carries on quantitative research of ecological security on the scenic from 2003 to 2013. In particular the research process, based on three important indicators of ecological pressure index (ETI), ecological footprint index (EOI), ecological economic coordination index (EECI), we construct the comprehensive evaluation index system of ecological security of Longmen Grottoes scenic area by the method of principal component analysis and assess the ecological safety level division. Finally, the forecasting model is established for forecasting and analysis of ecological security index of scenic area in the future 7 years. At the same time, we build scenic warning grading standards to analyze and forecast the status of the scenic and ecological security alarm future development trend. The results show that the overall development in the Longmen Grottoes scenic is extremely unsafe and unsustainable. It is estimated that comprehensive evaluation

of ecological safety score decreased significantly from 2014 to 2020 , with an average annual decline of 28.49%.The ecological security is located at sixth levels in bad condition stage,which means warning condition is more serious and ecological environment system starts to deteriorate rapidly. Furthermore,the contradiction between tourism development and ecological environment protection has become increasingly prominent,increasing ecological pressure,and the overall development trend of ecological security is not optimistic. In this regard, this paper presents some strategies ,such as scientific planning area, optimizing the energy structure and strengthening tourist management in order to improve the ecological security level of Longmen Grottoes scenic, and achieve the sustainable development of scenic areas.

Key Words: ecological footprint theory ecological security dynamic evaluation Longmen Grottoes scenic spot

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
1 引言.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状及评述.....	3
1.2.1 国外生态安全研究现状.....	3
1.2.2 国内生态安全研究现状.....	5
1.2.3 国内外研究评述.....	7
1.3 研究内容、方法及技术路线.....	8
1.3.1 主要研究内容与方法.....	8
1.3.2 技术路线.....	9
2 研究的理论基础.....	10
2.1 生态足迹理论.....	10
2.1.1 生态足迹内涵.....	10
2.1.2 生态足迹模型.....	10
2.1.3 旅游生态足迹理论.....	13
2.2 生态安全理论.....	19
2.2.1 生态安全内涵.....	19
2.2.2 生态安全评价方法.....	20
2.3 生态安全预警理论.....	20

2.3.1 生态安全预警内涵.....	21
2.3.2 生态安全预警方法.....	21
3 龙门石窟景区旅游生态足迹测算.....	23
3.1 龙门石窟景区概况.....	23
3.1.1 景区自然环境概况.....	23
3.1.2 景区旅游资源条件.....	23
3.1.3 景区旅游发展现状.....	24
3.2 研究数据来源及处理.....	25
3.2.1 研究区域与时段的选取.....	25
3.2.2 统计数据的来源.....	25
3.2.3 数据计算说明.....	26
3.3 测算结果动态分析.....	27
3.3.1 景区旅游生态足迹动态分析.....	27
3.3.2 景区旅游生态承载力动态分析.....	46
3.3.3 景区旅游生态赤字动态分析.....	48
4 龙门石窟景区生态安全动态评价.....	51
4.1 基于生态足迹模型的生态安全综合评价方法.....	51
4.1.1 评价指标的选取.....	51
4.1.2 生态安全评价综合指数的构建.....	52
4.2 龙门石窟景区生态安全动态评价计算.....	53
4.2.1 景区生态安全动态评价单项指数计算.....	53
4.2.2 景区生态安全动态评价综合指数计算.....	55
4.3 龙门石窟景区生态安全动态评价结果分析.....	56
5 龙门石窟景区生态安全预测与预警研究.....	59
5.1 景区生态安全预测分析.....	59
5.1.1 预测模型构建.....	59

5.1.2 预测实证研究.....	60
5.1.3 景区生态安全预测.....	60
5.2 景区生态安全预警分析.....	62
5.2.1 预警等级评定.....	62
5.2.2 景区生态安全警情现状分析.....	62
5.2.3 景区生态安全警情趋势分析.....	63
5.3 景区生态安全评价及预警结果对比分析.....	64
6 提高龙门石窟景区生态安全等级的对策研究.....	66
6.1 科学规划分区，实施游客分流.....	66
6.2 优化能源结构，推行绿色生产.....	67
6.3 管理游客行为，培育生态居民.....	68
6.4 理顺管理体制，加强从业人员管理.....	69
6.5 实施生态补偿，加强安全监测.....	69
7 结论与展望.....	71
7.1 主要研究结论.....	71
7.2 主要创新点.....	72
7.3 研究局限与展望.....	72
参考文献.....	74
致谢.....	78
个人简历、在学期间发表的学术论文及研究成果.....	79

表目录

表 2.1 不同类型生态生产性土地均衡因子和中国各类型土地产量因子.....	12
表 2.2 旅游生态足迹计算账户.....	14
表 2.3 各种交通工具的人均单位距离能源消耗量.....	15
表 2.4 世界单位化石燃料生产土地面积的平均发热量及折算系数.....	15
表 2.5 不同类型住宿设施每个床位的建筑用地面积与能源消耗.....	16
表 2.6 全球部分食物的年平均生态生产力与生态生产性土地类型.....	17
表 2.7 生态安全主要评价模型和评价方法.....	20
表 2.8 五种预警方法的比较.....	22
表 3.1 龙门石窟景区旅游资源概况.....	24
表 3.2 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游交通生态足迹.....	29
表 3.3 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游住宿生态足迹.....	31
表 3.4 日人均食物消费量和能源消耗量.....	34
表 3.5 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游餐饮生态足迹.....	34
表 3.6 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游消费.....	37
表 3.7 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游购物生态足迹.....	38
表 3.8 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游观光生态足迹.....	40
表 3.9 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态足迹分类汇总.....	42
表 3.10 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态足迹分类汇总.....	43
表 3.11 龙门石窟景区旅游生态承载力计算.....	46
表 3.12 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态承载力及人均旅游生态承载力.....	46
表 3.13 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态赤字汇总.....	48
表 3.14 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态赤字汇总.....	49
表 4.1 ETI、EOI、EECI 指数变化范围及等级划分标准.....	52
表 4.2 标准化处理后的单项指标汇总.....	55
表 4.3 方差分解主成分提取分析表.....	56
表 4.4 主成分矩阵.....	56

表目录

表 4.5 景区生态安全综合评价指数等级划分标准及安全状态.....	57
表 4.6 龙门石窟景区 2003-2013 年生态安全评价单项指标值及评定等级.....	57
表 4.7 龙门石窟景区 2003-2013 年生态安全综合评价得分及生态安全等级.....	58
表 5.1 龙门石窟景区 2014-2020 年人均旅游生态足迹及承载力预测.....	60
表 5.2 龙门石窟景区 2014-2020 年生态安全评价单项指标值及评定等级预测.....	61
表 5.3 龙门石窟景区 2014-2020 年生态安全综合评价得分及生态安全等级预测.....	61
表 5.4 景区生态安全预警等级划分.....	62
表 5.5 龙门石窟景区 2003-2013 年生态安全警情状态.....	63
表 5.6 龙门石窟景区 2014-2020 年生态安全警情状态预测.....	63

图目录

图 3.1 龙门石窟景区客源市场分布.....	29
图 3.2 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游交通生态足迹.....	30
图 3.3 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游交通生态足迹.....	30
图 3.4 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游交通生态足迹中建筑用地和化石能源地部分.....	30
图 3.5 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游住宿生态足迹.....	32
图 3.6 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游住宿生态足迹.....	32
图 3.7 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游住宿生态足迹中建筑用地和化石能源地部分.....	32
图 3.8 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游餐饮生态足迹.....	35
图 3.9 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游餐饮生态足迹.....	35
图 3.10 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游餐饮生态足迹中六种生态生产性土地汇总.....	35
图 3.11 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游餐饮生态足迹中六种生态生产性土地比例汇总..	36
图 3.12 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游购物生态足迹.....	38
图 3.13 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游购物生态足迹.....	38
图 3.14 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游购物生态足迹中建筑用地和化石能源地部分.....	39
图 3.15 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游观光生态足迹.....	40
图 3.16 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游观光生态足迹.....	41
图 3.17 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游观光生态足迹中建筑用地和化石能源地部分.....	41
图 3.18 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游总生态足迹.....	43
图 3.19 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态足迹.....	44
图 3.20 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态足迹中六大子项目比重汇总.....	44
图 3.21 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态承载力.....	47
图 3.22 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态赤字.....	49
图 3.23 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态赤字.....	50
图 4.1 龙门石窟景区 2003-2013 年生态压力指数动态变化.....	53
图 4.2 龙门石窟景区 2003-2013 年生态占用指数动态变化.....	54
图 4.3 龙门石窟景区 2003-2013 年生态经济协调指数动态变化.....	54
图 4.4 龙门石窟景区 2003-2013 年生态安全综合评价得分.....	58

1 引言

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

改革开放以来,随着工业化、城镇化、区域经济一体化进程的加快,我国旅游业进入快速发展时期,成为各级政府高度重视、常抓不懈、保增长、促发展的重要产业之一。旅游业的发展不仅拉动了国民经济的增长,而且在促进不同国家民族之间沟通交流、维护世界和平等方面发挥着重要作用。另一方面,在我国旅游业飞速发展的同时,旅游资源破坏、旅游景区环境质量下降等问题日益凸显,积累了大量生态安全隐患,固体垃圾、水污染、空气污染等负面效应不仅影响旅游地居民的日常生活和身心健康,而且严重威胁到景区生态环境系统的平衡、协调和可持续性。旅游景区是一个完整的经济—社会—生态复合系统,具有综合性、复杂性、脆弱性等特点,而旅游交通、住宿、游览、娱乐、购物、餐饮等某一环节出现问题,都会对景区生态系统造成负面影响,甚至带来巨大损失。因此,对旅游景区生态环境系统进行全方位的动态监测和安全评价,实现生态、经济、社会全方面的可持续协调发展已经成为经济社会和生态环境保护关注的重点。

1992年,加拿大学者 William Rees 提出“生态足迹”(Ecological Footprint)的概念及模型^[1],得到世界各国学者的关注,并迅速运用于旅游业可持续发展的研究中。生态足迹理论通过分析生态环境系统承载力,并引入生态生产性土地面积这一衡量单位来表示旅游者消费及旅游活动对资源的消耗。该方法对一定时空范围内资源和能源的耗费与供给进行统一单位的计算,并通过两者的对比判断该区域的综合发展是否超出其生态承载力的范围,从而衡量区域的生态安全状况。目前,生态足迹理论和评价方法的相关研究正逐步展开和深入,并被广泛运用到景区生态环境系统安全性和可持续性研究中。

龙门石窟景区位于河南省洛阳市区南部,是我国三大佛教石窟艺术宝库之一。自2000年11月被列入《世界遗产名录》起,龙门石窟景区国内外知名度得到极大提高,旅游人次迅猛增加。据统计,2013年龙门石窟景区实现接待游客量288万人次,年门票收入2.56亿元,旅游综合收入达3.72亿元,已经发展

成为洛阳市龙头景区，在推动洛阳市乃至河南省旅游业和旅游经济飞速发展中发挥重要作用。在旅游业飞速发展的同时，游客的不文明行为和过度的旅游开发带来的负面影响日益显露，加上石窟本身存在的自然环境方面的风化侵蚀作用，其经济、社会、自然生态复合系统正面临巨大的压力，这一历史文化遗产亟待进行全方位的生态安全的评价及预警研究，以便及时发现生态环境系统的安全问题，实施积极有效的生态安全规划、监测和维护等应对措施，从而提高遗产地的旅游可持续发展能力，维护龙门石窟景区生态安全。

1.1.2 研究意义

本研究的开展，正值十八大报告提出大力推进生态文明建设，坚持低碳绿色发展，实现生态环境的优化和国家生态安全。因此，本研究选题具有一定的理论意义与实践价值。

1.1.2.1 理论意义

首先，本研究将生态足迹分析方法应用于遗址遗迹类景区研究领域，在传统旅游生态足迹静态计算模型的基础上加以改进，进行时间序列的动态分析，拓宽了不同层面的旅游可持续发展定量研究范围，有助于旅游生态足迹研究理论的深入；

其次，本选题以旅游生态足迹模型为基础，构建了适于区域研究的生态安全评价单项和综合指数，丰富了旅游地生态安全评价体系研究，为该领域后期相关探讨提供了新思路；

最后，本选题在生态安全动态评价的基础上建立预测模型，并将生态安全预警研究纳入生态安全评价体系，突破了传统静态分析局限，拓展了生态安全理论相关研究领域。

1.1.2.2 实践意义

通过对国内外现有生态足迹和生态安全研究相关文献的阅读，并进行访谈调查获得详实数据，借助定量分析模型和工具进行实证研究，从而揭示景区现存生态安全问题及未来发展趋势，科学的量化评价龙门石窟景区旅游发展的可持续状况，为景区科学管理政策和相关保护措施制定提供借鉴和理论依据；同时，培养生态旅游消费群体，倡导大众群体健康出行、生态旅游、绿色消费，

促进景区生态环境系统优化协调，从而实现国内旅游业的可持续发展。

1.2 国内外研究现状及评述

1.2.1 国外生态安全研究现状

随着生态环境资源和人类社会发展之间的矛盾日益凸显，生态安全领域的相关研究已经成为前沿课题和研究热点。国外相关研究可追溯至 20 世纪 40 年代，主要集中在以下三个方面：

1.2.1.1 生态安全的概念

Aldo Leopold 于 1941 年首次提出“土地健康”的概念并将其应用于土地功能状态评价^[2]，此后生态环境系统安全问题相关研究也逐步开展；1989 年，生态安全(ecological security)这一明确概念由国际应用系统分析研究所首次提出，即人类生存发展各个方面不受风险威胁的状态，包括人们的身体健康、生活保障、基本生存权益保障、社会秩序、生存与发展必需资源以及人类适应环境变化的能力等^[3]；美国生态学家 Norman Myers 曾对生态安全相关理论进行了深入研究，并于 1999 年发表相关著作《生态安全》，通过对大量生态能源问题的相关案例进行分析，指出区域生态环境系统是否安全将会直接影响一个国家和地区政治和经济的安全性^[4]。总之，广义的生态安全概念涵盖自然、社会和经济等多个方面生态安全状况（Costanza,R, 1997^[5]；Dobsn, 1997^[6]），狭义的生态安全则仅反映整个生态环境系统的完整性、健康性和可持续性水平（Norton S B, 1992^[7]）。

1.2.1.2 生态安全的评价标准和指标体系

在生态安全评估研究中，客观科学的指标体系和评价标准的构建成为众多学者研究的重点，目前相关研究成果主要有：①单因子评价指标，该指标多应用于因环境污染而导致的微观生态环境系统安全维护和安全风险测度，Karr 提出利用生物完整性指数对河流水体生态环境系统的安全状态进行测度和衡量，在具体研究过程中主要通过对物种多样性、鱼群种类的组成及分布等多个因素的变化发展进行动态分析^[8]；②多因子小综合评价指标，主要用于自然生态系统的资源环境和生物安全评价方面，其中具有代表意义的包括美国环境保护局

(USPEA)构建的一套针对河流生态系统的综合评价体系,衡量标准涵盖了河流的物理环境、化学环境、水文条件及流域内的生物状态等多项指标;③多因子大综合评价指标,这种衡量指标不仅包括生物资源和自然生态环境方面,同时考虑生态环境对人类生存和社会经济发展的作用与影响,20世纪80年代联合国环境规划署和经济合作与发展组织共同提出了生态环境系统评价指标的压力(Pressure)—状态(State)—响应(Response)概念模型,简称P-S-R模型,目前该模型被各国相关研究领域认可并广泛应用;欧洲环境局(EEA)则在压力(Pressure)—状态(State)—响应(Response)基础上添加了“驱动力”(Driving force)和“影响”(Impact)两项指标,构成了D-P-S-I-R评价理论框架^[9]。

20世纪90年代,生态学者William Rees首次提出生态足迹模型^[1],并由其博士生Wackernagel进行了完善^[10],它以生态生产性土地面积为量化单位,通过一系列指标的计算,测算生产消费活动对自然生态环境资本的消耗,从而衡量人类的生存发展与生态环境系统之间的协调程度^[9]。这种定量分析模型可操作性强,逐渐成为评价一个地域生态安全与否的重要方法。世界著名非政府机构WWF(World Wide Fund for Nature)即应用该模型评估人类活动对自然环境资源耗用的影响,从而进行世界各国各区域生态足迹研究,并每两年公布一次研究成果——《地球生命力报告(The Living Planet Report)》。在现有生态安全评价研究中,不仅包括评估方法的丰富和拓展上,评价研究的对象也越来越细致,如水体资源的生态安全评估(Susan J. NICHOLS, 2013)^[11]、矿产地生态安全对策探讨(E.V. Kislov, 2010)^[12]、湿地生态安全分析(Wellington Jogo, 2010)^[13]等。

1.2.1.3 生态安全预警研究

预警(early-warning)最早由法国经济学家Alfred Founille提出并进行研究,他指出预警就是对危险状态和危机灾难的一种预前信息警告^[14]。随着预警理论的发展和深入,学者们开始将其运用于更多的领域,包括经济危机、地震灾害预警、饥荒预警、环境监测等(Alcik et al, 2011^[15]; Tan et al, 2010^[16]; Son et al, 2009^[17])。

20世纪70年代,随着环境污染事件的增加,预警理论开始被应用于生态环境领域。二十世纪七十年代起,联合国环境开发署率先建立了全球生态环境监测系统(GEMS),并利用该项系统对全球生态环境进行全方位的监控,并

及时发布预警信息，在生态安全预警理论和方法研究上取得了跨越性的发展^[19]；Borcherding 等研究建立生物预警体系，在有毒物质进入水体 30 分钟后，这一系统便发出预警警报，从而有效保证水体的生态安全^[20]；Jongsch 等利用遥感技术建立了预警模型，对土地生态安全进行分析和评估，但指标选取及构成较少，且在综合性方面还存在欠缺^[21]；Yang 等基于 P-S-R 模型，构建了一个包含三个维度、六个指标、三项权重的景观生态安全指标体系模型，并根据研究的数据及当前的趋势分析，指出预警方法分为四类：安全和降解、亚安全和缓慢降解、亚安全和快速降解以及不安全感^[22]；Jiang 等研究发现生态承载力理论、生态系统服务理论、可持续发展理论等在生态安全预警研究中具有较多的应用^[23]；Timothy M. Lenton 基于动力系统的角度，确定了环境冲击的三个主要类别：极端事件、突然的波动、临界点，并解释了分叉临界点预警的潜在性，指出科学技术的进步更需提高预警能力^[24]。

1.2.2 国内生态安全研究现状

国内生态安全相关研究起步相对较晚，始于 20 世纪 90 年代末，但发展迅速。史培军于 1999 年发表《建立人造系统动力学，加强环境与生态问题的研究》一文，标志着我国生态安全专业领域研究的开始；2000 年 12 月，国务院批准正式发布《全国生态环境保护纲要》，文件首次提出“维护国家生态环境安全”的明确目标，指出要加强国家生态环境系统安全保护工作并坚持不懈^[25]；在生态安全研究的基础上，中科院开展了对国家生态环境系统的安全状况进行实时监测调控的相关研究，标志着生态安全相关研究正逐渐受到政府和广大学者的关注和重视^[26]。国内研究主要集中在以下三个方面：

1.2.2.1 理论探讨

国内生态安全的理论研究主要包括生态安全的概念阐述、研究内容等基本理论体系。尹希成认为生态安全是人口、资源、环境处于和谐可持续发展的状态，它的重要性和迫切性毫不亚于军事安全和经济安全，是一种全新的安全理念^[27]；肖笃宁研究认为，人类的生存与发展不受生态环境污染影响的状态就是生态安全，具体衡量要素包括空气质量、饮用水和食物的安全性、绿色无污染的环境等方面^[28]；陈星等则在国内外近十余年生态安全相关研究的基础上进行综合分析，全面概括并构建了国内研究相关内容的框架体系^[29]。

1.2.2.2 生态安全评价分析

在生态安全评价方面,学者们主要从评价方法理论、评价指标选取及指标体系构建等方面进行研究。林彰平等选取了一系列生态指标和环境指标,包括土壤类型、风力大小、植被覆盖率等,作为镇赉县生态安全系统衡量标准^[30];左伟等从生态系统的本质特征出发,在几个常用生态安全评价方法的基础上进行综合,构建了层次分析—变权—模糊—灰色关联复合模型,既综合考虑了生态安全研究的综合性、区域性特征,又保证了测度结果的可认知性和易理解性,从而成为区域生态安全综合评价方法中相对最佳评价模型^[31];刘勇等从维护区域土地资源生态安全角度出发,构建了包括自然、经济、社会三大系统层的评价指标体系,并基于科学性、完整性等指标获取原则,选取了二十四项变量层指标,最终构建了适用于区域土地资源生态安全系统的评价指标体系^[32];曹新向等根据 P-S-R 模型,构建了旅游地生态安全评价体系,主要包括资源环境压力、资源环境状态和人文环境响应三大系统层,并对开封旅游生态安全进行定量评估^[33]。

自 2006 年以来,越来越多的专家学者尝试运用各种方法对特定区域的生态环境系统安全进行实证评估,其中运用较多的就是生态足迹分析方法。曹新向以生态足迹模型为理论基础,计算人均旅游生态足迹和人均旅游生态承载力,并进行对比分析,从而衡量旅游地生态安全状况,具有较好的应用前景^[34];肖建红等从海岛旅游地的角度出发,在定义区域刚性生态足迹和区域弹性生态足迹的基础上,分别从广义和狭义两个方面分析了海岛旅游地生态安全评价模型,从而构建了海岛旅游地生态可持续发展衡量标准,并以 2008 年舟山群岛为例进行了实证分析^[35];刘伟杰在传统的生态足迹分析方法的基础上,进一步提出了基于 GIS 空间技术的生态足迹方法,并以 1990 年到 2007 年为评估年份,运用这两种分析方法对东北亚地区这十八年生态足迹、生态承载力等进行动态计算,在此基础上,提出生态赤字和生态压力指数两项指标,从而对东北亚地区生态安全状况进行评价^[9];郭文等借鉴生态系统服务功能相关理论,对传统的生态足迹模型进行改进,将生态系统服务功能价值当量因子引入生态足迹模型均衡因子和产量因子的计算中,体现了生态系统功能的完整性,并将这一改进后的模型应用于江苏省 2010 年生态压力指数的计算中^[36]。

1.2.2.3 生态安全预警研究

生态安全预警 (ecological security early warning), 广义上包括在减轻危机和维护生态系统安全的过程中, 从明确警义、寻找警源、分析警兆、预报警度及采取科学有效的措施排除警情的全过程 (葛京风等, 2011^[37]); 狭义上则指在生态环境系统质量动态监测的基础上, 对其产生严重恶化的可能性预先提出警告 (丁晓静, 2011^[38])。

傅伯杰通过深入研究, 选取了自然资源禀赋、环境污染程度、生态破坏程度和社会经济发展水平等指标, 并在此基础上构建区域生态系统安全预警评价指标体系, 以此对我国各省区范围内的生态环境现状进行测度和预警分析, 这是我国生态安全预警研究领域的较早研究成果^[39]; 舒帮荣等在分析构建的生态安全预警指标体系基础上, 以苏州市为案例, 借助超载度模型对其 1996—2005 年的生态安全状况进行预警分析评价, 研究证明了 BP-ANN 用于生态安全预警研究的可行性^[40]; 吴冠岑等在传统土地生态安全预警研究基础上引入变权理论, 构建了适用于土地生态环境系统安全预警研究的惩罚型变权模型, 并以淮安市 1996—2010 年土地生态安全预警情况的时间序列变动趋势为例对所建模型进行验证分析, 结果显示研究构建的评价模型兼具了土地生态安全评价的复杂性、综合性和动态性特征, 更加科学合理^[41]; 张五美等在压力—状态—响应概念模型的基础上, 运用综合指数分析方法, 并以湖南省为例, 对其土地生态安全状况进行时间序列动态综合评价, 并利用 GM(1,1)模型对未来十余年土地生态安全综合指数的动态变化进行预测分析, 结果显示湖南省土地生态安全综合评价指数由 2010 年的 0.47 增长至 2019 年的 0.86, 湖南省土地生态安全总体呈现良好发展趋势, 在维持现有发展模式的基础上, 2015 年湖南省将能达到总体土地生态环境系统良好状态^[42]; 徐美基于压力—状态—响应概念模型框架, 综合运用多种分析方法, 从时间和空间两个研究角度对湖南省土地生态安全警情现状进行全面综合评价分析^[43]。

1.2.3 国内外研究评述

1.2.3.1 国外研究评述

目前, 国外生态安全研究在其概念框架和评价标准的构建方面取得了一定的进展, 但由于其研究时间不长, 相关基础理论仍不够深入完善, 而在评价指

标体系研究方面, 尚未形成一套科学统一的体系标准, 且仍以定性研究为主。因此, 生态安全的基本理论框架有待进一步深入, 而综合评价体系和标准仍需进一步研究探索并加以完善。而生态安全预警研究则尚处于探索阶段, 大多集中于农业、土壤、土地、水文等方面, 理论系统尚不完善。

1.2.3.2 国内研究评述

相较之下, 国内学者研究内容主要以对生态安全的认识为主, 包括概念体系、理论框架、研究内容、国内外相关研究进展等, 且以静态的定性研究居多, 而评价体系多借鉴国外研究成果, 以单一的指标为主, 而对于生态安全评价标准、时空动态研究、生态安全预测等方面有待在今后的发展中进一步深入探究; 在案例地的选择上, 现有研究大多以区域、省域、城市为尺度, 侧重于宏观区域层次, 微观领域的研究相对缺乏, 龙门石窟景区作为世界文化遗产, 尚未有生态安全评价及预警方面的相关研究, 该空白领域尚需进一步研究完善。

1.3 研究内容、方法及技术路线

1.3.1 主要研究内容与方法

(1) 运用传统的旅游生态足迹计算模型, 计算并动态分析龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态足迹 (TEF)、旅游生态承载力(TEC)和旅游生态赤字 (TED)/盈余(TER)情况;

(2) 运用生态足迹理论模型中的生态安全评价指标体系, 选取生态压力指数、生态占用指数、生态经济协调指数三项指标, 并在此基础上构建生态安全评价综合指数;

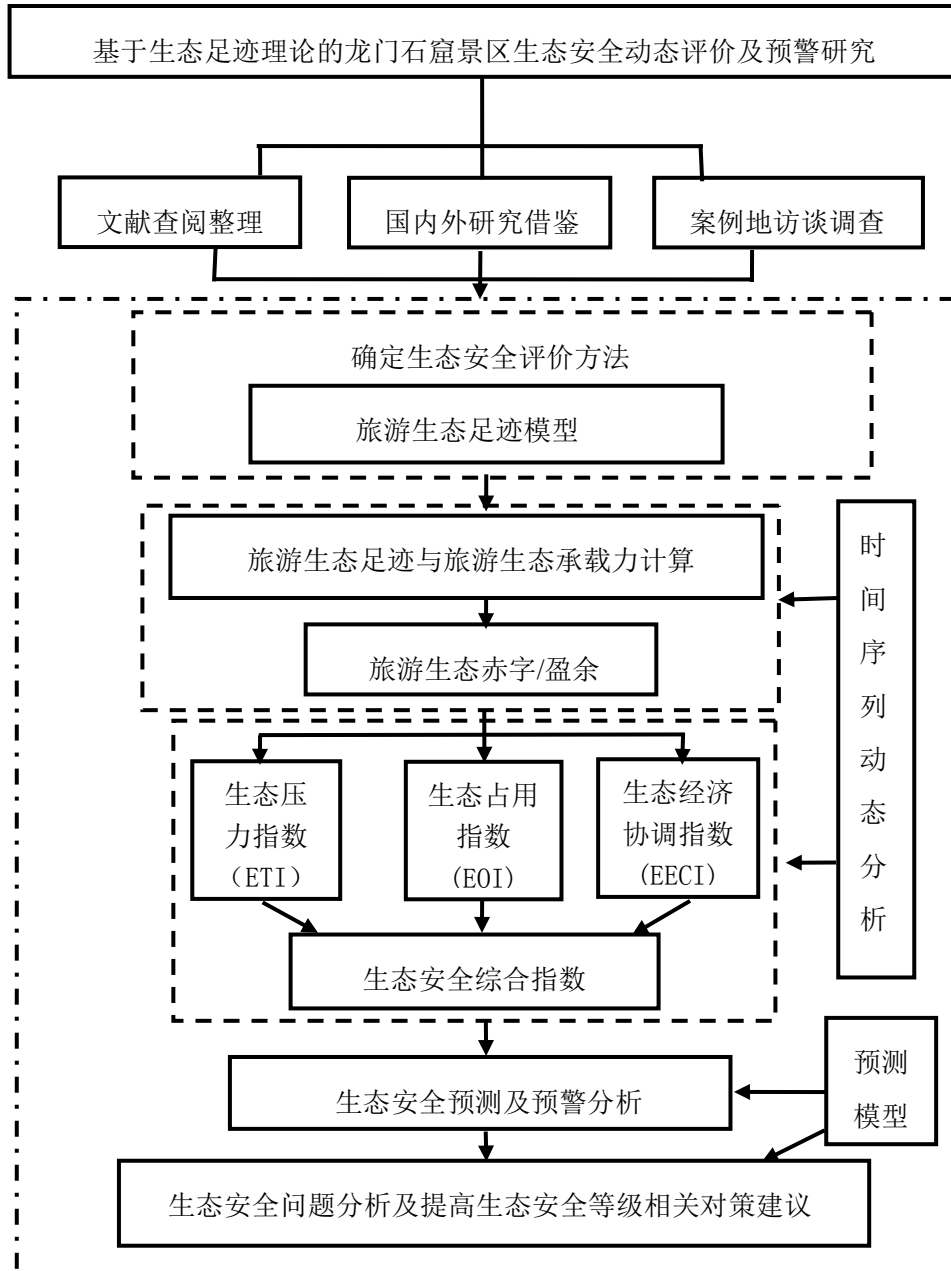
(3) 计算并动态分析龙门石窟景区 2003-2013 年三个单项指数以及生态安全综合指数, 并对龙门石窟景区 2003-2013 年生态安全等级进行划分评定, 对景区生态安全现状进行分析;

(4) 运用线性回归模型, 对龙门石窟景区 2014-2020 年的旅游生态足迹和旅游生态承载力进行预测分析, 并根据预测结果对景区未来生态安全综合指数及生态安全等级进行计算分析;

(5) 构建景区预警等级评定标准, 对龙门石窟景区生态安全警情现状和未来发展趋势进行分析和预测;

(6) 针对以上计算结果，从多个方面提出相关对策，以提高龙门石窟景区生态安全等级，实现景区可持续发展。

1.3.2 技术路线



2 研究的理论基础

2.1 生态足迹理论

2.1.1 生态足迹内涵

生态足迹 (Ecological Footprint, 简称 EF), 又称“生态占用”。著名生态经济学家 William 曾将其进行形象描述为“一只负载着人类生存与发展活动消耗的巨脚踏在地球上留下的脚印”^[44]; William 的博士生 Wackernagel 在此研究的基础上, 对相关理论进行了完善, 他研究指出生态足迹就是为满足人类的生存发展所消耗的所有资源需要, 并吸纳他们消费活动产生的废弃物, 而提供的生态生产性土地面积, 同时, 这种供给必须是持续且不间断的^[43]。

生态足迹理论的基本思想是人类社会的生存与发展, 必须消费各种资源、能源、产品和服务, 同时向自然界排放大量的污水、废气、固体垃圾等废弃物, 而人类的对生态环境系统的每一部分消费都可以运用相对应的生态生产性土地面积进行测度和衡量, 主要包括提供该项消耗所需的资源、能源和物质, 这种自然资本的占用与消耗即为人类的生态足迹。

在具体计算过程中, 存在以下假设前提: (1) 人类在生存与发展过程中所产生的能源和资源的消耗数量是可以确定的; (2) 人类在生存发展消费中资源能源的消耗和废弃物的吸纳都可以按照相对应的生态生产性土地进行分门别类, 化成统一的计量单位后进行综合分析计算。旅游生态足迹既反映了人类旅游活动对自然资源的消耗, 同时展示了旅游消费对生态环境系统的影响, 并成为测度区域旅游业生态系统可持续性的重要方法。

2.1.2 生态足迹模型

生态足迹模型就是在一定时空区域范围内, 将人类生存与发展所耗费的资源以及排出的废弃物共同折算成相应的生态生产性土地面积, 即为该区域生态足迹, 将其与同一时空范围内该区域生态环境系统所提供的生态生产性土地面积进行比较, 从而测度人类生产消费活动对生态环境系统的影响, 衡量区域的生态安全状态和可持续发展状况。

2.1.2.1 生态生产性土地

在生态足迹模型中,生态生产性土地是指具有生态生产能力的土地的总称,主要包括陆地、水域等。在生态足迹分析方法中,这一概念的引入为比较人类自然资本消耗和自然供给提供了统一的测度单位,从而简化了评价因子,方便了自然资本总量的计算。不同种类的土地,其生态生产能力也存在一定的差异,据此可将地球表面的所有具有生态生产能力的土地划分为六大基本类型:耕地、林地、牧草地、建筑用地、化石能源地、水域^[45]。

(1) 耕地

从生态环境学的角度看,耕地聚集了人类大部分的生物量,是粮食、油料作物、经济作物的主要来源地,生态生产力水平是最高的。联合国粮农组织(FAO)报告显示,目前世界优良的可耕地均处于利用状态,而每年由于污染、荒漠化等原因,耕地面积呈现日益减少的趋势。

(2) 林地

按照生产的木材产品,林地主要有人造林和天然林两种类型。林地是提供木材产品的重要土地资源,同时在维护生态环境系统健康方面发挥着重要作用。

(3) 草地

草地是指用来发展畜牧业的未进行改良的天然土地。草地的生态生产能力要远远低于耕地,不仅由于草地上植物物种单一,积累生物量的能力要低于耕地,还在于植物能量在向动物能量转化的过程中,存在“十分之一定律”,即人类实际利用的生物能量在这一过程中减少了十分之一^[46]。

(4) 化石能源地

理论上,化石能源地是人类应该预备留出的一种生态生产性土地类型,主要用于吸纳化石能源燃烧所排放的CO₂等废气污染物,从而弥补化石能源耗费所减少的自然资本量。但在实际生产和生活过程中,这部分土地并没有得到理想中的预留,也就是说人类所消耗的是化石能源,而非其替代品,其产生的污染废弃物也未能得到吸纳,作为不可再生性能源,人类正直接消耗着自然资本的存储量。

(5) 建筑用地

建筑用地是指人类生产生活所必需的居住、道路、企业生产等设施用地。在人类城市化和工业化的进程中,建筑用地主要分布在肥沃的土壤上,因此,在六种生态生产性土地中,建筑用地面积的增加将导致整个区域生态生产能力

的下降。

(6) 水域

生态生产性土地中的水域面积是指能为人类提供水产品的区域，主要包括海洋和淡水湖泊。

2.1.2.2 生态承载力

在传统研究中，生态承载力（Ecological Capacity，简称 EC）是一个区域所能提供的有限资源可以供养人类生存发展活动的最大人口数，同时这种供养要以不破坏该区域生态生产能力为前提，又称生态容量^[47]。但这一定义仅以供养的最大人口数作为单一测度指标评估区域生态承载力，而忽视了不同区域生产和生活方式上的差异造成的影响。因此，杨开忠教授研究认为，某一区域的生态承载力即该区域在一定时间范围内能够持续不断地提供给人类的生态生产性土地面积之和，也可以用来表示该区域的生态容量体积^[45]。

2.1.2.3 均衡因子和产量因子

由于六种生态生产性土地类型在生态生产能力上存在巨大的差异，而且不同时空尺度下不同区域的同一种土地类型的生态生产能力也有所不同，因此二十世纪九十年代末 Wackernagel 提出了均衡因子的概念，从而将六种类型的生态生产性土地的生态生产能力进行等量化处理，方便了叠加计算以及全球范围内不同区域之间的比较^[48]。在本文具体计算过程中，将六种生态生产性土地面积乘以相应的均衡因子标准（表 2.1），从而将生产能力各有差异的六种土地类型转化为全球范围内均可直接相加减的生态生产性土地面积。

表 2.1 不同类型生态生产性土地的均衡因子和中国各类型土地产量因子

土地类型	均衡因子 ^[48]	产量因子 ^[49]
耕地	2.8	1.66
林地	1.1	0.91
草地	0.5	0.19
化石能源地	1.1	0.00
建筑用地	2.8	1.66
水域	0.2	1.00

不同种类的生态生产性土地由于国家区域自然环境的差异，其生态生产能力在实际过程中往往存在区别，甚至同种类别的生态生产性土地的生态生产能力也存在着较大差别。因此，为了不同国家、不同区域的不同类型的生态生产性土地进行比较，本文在计算中引入产量因子对不同类型的土地进行调整（表 2.1），从而将全球范围内不同国家区域生态环境系统的生态生产能力转换成为全球统一可比的测度单位面积。

2.1.2.4 生态赤字和生态盈余

生态足迹反映了人类生产消费活动所必需占用和消耗的生态生产性土地面积，而生态承载力则表现了一定时空区域范围内最大幅度所能供给的生态生产性土地面积。二者经过等量化处理转换成标准的单位后可直接进行比较，从而判断一个区域人类的生产和消费活动对自然资本的需求能否保持在该区域自然资本供给的承载力范围之内，而同一时空区域范围内生态足迹和生态承载力两者之间的差额就是生态赤字或者生态盈余。区域可持续发展状态和生态安全程度即可用这两项指标进行衡量，其计算公式如下：

$$ES/ED = EC - EF \quad (2.1)$$

其中， ES 代表生态盈余，即该区域内自然资本的供给量大于人类社会的需求量，人类活动处于自然生态系统的承载力范围之内，该区域的生态环境系统现状和未来发展趋势总体具有生态安全、协调、可持续发展状态； ED 表示生态赤字，即该区域生态负荷超出了生态容量范围，人类生产活动对自然资源资本的需求量已经超过现有生态资源系统的承载能力，该区域的发展现状及未来发展趋势总体处于相对不均衡、不可持续状态，生态安全受到威胁。

2.1.3 旅游生态足迹理论

旅游生态足迹（Tourism Ecological Footprint，简称 TEF）是将生态足迹基本理论应用到旅游活动研究中而产生的延伸拓展理论，从而衡量旅游者消费活动对旅游地生态环境系统的影响程度，科学系统的分析旅游业协调可持续发展状态。在生态足迹定义和内涵相关理论体系的基础上，旅游生态足迹可以理解为其消费活动持续期间某旅游目的地能够保证连续的向一定数量旅游者提供其消费活动过程中所必需的生态生产性土地面积^[49]。这种生态生产性土地面积是全球统一单位的，不同时间段内不同区域范围内都具有直接的可比性，从而

更加直观的衡量旅游活动对生态环境系统的消耗。

2.1.3.1 旅游生态足迹计算模型

在旅游生态足迹账户计算分析过程中,根据不同生态生产性土地类型生态生产能力的大小,主要可以划分为六大类,分别是耕地、林地、牧草地、化石能源用地、建筑用地和水域;根据旅游活动消费过程中的特点,在具体计算过程中,旅游生态足迹则主要由六大子项目构成:旅游餐饮、旅游住宿、旅游交通、游览观光、旅游购物和休闲娱乐^[50]。本文拟在众多学者研究的基础上,构建旅游生态足迹的测度计算账户,全面科学衡量旅游景区可持续发展状态(表2.2)。

表 2.2 旅游生态足迹计算账户

账户	构成因子	生态生产性土地类型
旅游交通	旅游交通设施生态足迹	建筑用地
	交通工具能源消耗生态足迹	化石能源地
旅游住宿	住宿设施生态足迹	建筑用地
	能源消耗生态足迹	化石能源地
旅游餐饮	餐饮设施生态足迹	建筑用地
	食物消耗生态足迹	耕地、草地、林地、水域
	能源消耗生态足迹	化石能源地
旅游购物	购物设施生态足迹	建筑用地
	旅游商品能源消耗生态足迹	耕地、草地、林地、水域
游览观光	游览设施生态足迹	建筑用地
	能源消耗生态足迹	化石能源地
休闲娱乐	娱乐设施生态足迹	建筑用地
	能源消耗生态足迹	化石能源地

(1) 旅游交通生态足迹

旅游交通生态足迹主要由两部分组成:旅游目的地区域范围内旅游交通设施所占用消耗的建筑用地面积及提供服务过程中各种类型交通工具的能源耗费。计算模型为:

$$TEFt = \sum (S_i \cdot K_i) + \sum (N_j \cdot D_j \cdot C_j / r) \quad (2.2)$$

式中 $TEFt$ ——旅游交通生态足迹；

S_i ——第 i 种交通设施的建筑用地面积 (hm^2)；

K_i ——第 i 种交通设施的游客使用率 (%)；

N_j ——选择第 j 种交通工具的游客数量 (人次)；

D_j ——第 j 种交通工具的游客平均旅行距离 (km)；

C_j ——第 j 种交通工具人均单位距离的能源消耗量 ($\text{GJ}/\text{人} \cdot \text{km}$) (表

2.3) [51]；

r ——世界单位化石燃料生产面积平均发热量 (GJ/hm^2) (表 2.4) [52]。

表 2.3 各种交通工具的人均单位距离能源消耗量

交通方式	单位距离能源消耗量 ($\text{GJ}/\text{人} \cdot \text{km}$)
飞机	0.0020
火车	0.000535
长途巴士	0.000381
小轿车 (汽车)	0.00091

表 2.4 世界单位化石燃料生产土地面积的平均发热量及折算系数

能源种类	发热量 (GJ/hm^2)	折算系数 (GJ/t)
煤炭	55	20.934
原油	93	41.868
汽油	93	43.124
柴油	93	42.705
天然气	93	38.978
液化石油气	71	50.200

(2) 旅游住宿生态足迹

旅游住宿生态足迹则主要由两部分组成, 第一部分是为旅游者消费提供高、中、低档住宿接待设施所消耗占用的建筑用地面积以及为游客提供加热、制冷、光照、上网等服务过程中所产生的能源耗费。计算模型为:

$$TEFa = \sum (S_i \cdot N_i) + \sum (365 \cdot N_i \cdot K_i \cdot C_i / r) \quad (2.3)$$

式中 $TEFa$ ——旅游住宿生态足迹；

N_i ——第 i 种住宿设施拥有的床位数（床）；

S_i ——第 i 种住宿设施每个床位的建筑用地面积（ $\text{m}^2/\text{床}$ ）（表 2.5）^[50]；

K_i ——第 i 种住宿设施的年平均客房出租率（%）；

C_i ——第 i 种住宿设施每个床位的能源消耗量（ $\text{GJ}/\text{床}$ ）（表 2.5）^[53]；

r ——世界单位化石燃料生产土地面积的平均发热量 $71\text{GJ}/\text{hm}^2$ ^[52]。

在具体分析计算不同类型住宿设施建筑占地面积和服务过程中能源消耗总量的过程中，为方便统计，可选取床位为统一测度计量单位。根据不同档次、不同类型住宿接待设施生态消耗的差异，可将旅游住宿设施划分为六大层次类别，分别是五星级酒店、三星级酒店、一二星级酒店、公共旅馆、私人旅馆和游轮，每个类型住宿设施的床位建筑用地面积和能源消耗量如下表所示（表 2.5）。

表 2.5 不同类型住宿设施每个床位的建筑用地面积与能源消耗

类型	用地系数（ $\text{m}^2/\text{床}$ ）	能源消费（ $\text{GJ}/\text{床}$ ）
五星级酒店	2000	0.11
四星、三星级酒店	300	0.07
两星、一星级酒店	100	0.04
公共旅馆	100	0.03
私人旅馆	50	0.03
游轮	15	0.04

（3） 旅游餐饮生态足迹

旅游餐饮生态足迹主要由三部分组成：餐饮设施所占用的建筑用地面积、旅游过程中旅游者消费食物所需的相对应的生态生产性土地面积以及为游客提供餐饮接待服务过程所产生的能源消耗转化而成的化石能源地面积。计算模型为：

$$TEF_f = \sum S_f + \sum (N \cdot D \cdot C_i / p_i) + \sum (N \cdot D \cdot E_j / r_j) \quad (2.4)$$

式中 TEF_f ——旅游餐饮生态足迹；

S_f ——餐饮设施的建筑用地面积 (hm^2);
 N ——景区年游客量 (人次);
 D ——景区游客人均旅游天数 (天);
 C_i ——游客人均每日消费的第 i 种食物的消费量 (kg);
 P_i ——第 i 种食物对应生态生产性土地的年平均生产力 (表 2.6) [47];
 E_j ——游客人均每天消耗的第 j 种能源的消费量 (GJ);
 r_j ——世界第 j 种能源单位化石燃料生产土地面积的平均发热量 (GJ/hm^2) (表 2.4)。

表 2.6 全球部分食物的年平均生态生产力与生态生产性土地类型

食物种类	年均生态生产力 (kg/hm^2)	生态生产性土地类型
粮食	2744	耕地
鲜菜	18000	耕地
鲜瓜果	18000	耕地
酒	1871	耕地
茶叶	566	耕地
猪肉	74	草地
牛羊肉	33	草地
食用动物油	50	草地
食用植物油	1856	草地
家禽	457	草地
蛋类	400	草地
奶及制品	502	草地
水产品	29	水域

(4) 旅游购物生态足迹

旅游购物生态足迹主要由两部分组成, 分别是销售旅游商品设施场所占用消耗的建筑用地面积以及产品设计、生产、制造和销售过程中所耗费的能源两部分组成。计算模型为:

$$TEFs = \sum S_i + \sum [(R_i/P_i) \div g_i] \quad (2.5)$$

式中 $TEFs$ ——旅游购物生态足迹;

S_i ——第 i 种旅游商品生产与销售设施的建筑用地面积 (hm^2);

R_i ——游客购买第 i 种旅游商品的消费总支出 (元);

P_i ——第 i 种旅游商品当地的平均售价 (元);

g_i ——第 i 种旅游商品生态生产性土地的年平均生产力 (件/hm²)。

(5) 旅游观光生态足迹

旅游观光生态足迹主要由两个部分组成, 即旅游目的地区域范围内游览步道、行车干道、公路、观景空间等设施所占用的建筑用地面积, 以及游客在景区游览观光过程中能源消耗的化石能源地面积。在实际计算过程中, 游客游览过程中的能源消耗多为照明、供暖等耗用的化石能源地面积, 因此, 计算模型为:

$$TEF_v = \sum P_i + \sum H_i + \sum V_i + \sum (C/r) \quad (2.6)$$

式中 TEF_v ——旅游观光生态足迹;

P_i ——第 i 个旅游景区 (点) 游览步道的建筑用地面积 (hm²);

H_i ——第 i 个旅游景区 (点) 内公路的建筑用地面积 (hm²);

V_i ——第 i 个旅游景区 (点) 内观景空间的建筑用地面积 (hm²);

C ——游览观光过程中的化石能源消耗量 (GJ);

r ——世界单位化石燃料生产土地面积的平均发热量 (GJ/hm²)。

(6) 旅游娱乐生态足迹

旅游娱乐生态足迹主要包括两个部分, 第一部分是娱乐相关设施建设所需占用的建筑用地面积, 第二部分则是休闲娱乐服务过程中能源消耗产生的化石能源地面积。在实际计算过程中, 旅游景区的游泳池、健身房、棋牌室、网球场等休闲娱乐设施往往已包含在住宿和餐饮设施的建筑用地面积中, 而休闲娱乐活动过程中的能源消耗相对较少可忽略不计, 因此, 两个部分均不纳入实际计算。旅游娱乐生态足迹计算主要考虑室外大型休闲娱乐场所, 如主题乐园、室外高尔夫球场等的建筑用地面积, 计算模型为:

$$TEF_e = \sum S_i \quad (2.7)$$

式中 TEF_e ——旅游娱乐生态足迹;

S_i ——第 i 类游客户外休闲娱乐设施的建筑用地面积 (hm²)。

根据旅游消费活动的构成特点, 在交通、住宿、餐饮、观光、娱乐、购物六个子项目的生态足迹分别定量测算的基础上, 最终叠加求和即为景区旅游生态足迹。

$$TEF = TEF_f + TEF_a + TEF_t + TEF_v + TEF_s + TEF_e \quad (2.8)$$

2.1.3.2 旅游生态承载力计算模型

根据生态承载力基本理论，景区的旅游生态承载力（Tourist Ecological Capacity，简称 TEC）的计算模型为：

$$TEC = \sum (S_j \cdot r_j \cdot y_j) \quad (2.9)$$

式中 TEC ——景区旅游生态承载力；

S_j ——景区第 j 种生态生产性土地面积 (hm^2)；

r_j ——第 j 种生态生产性土地的均衡因子；

y_j ——第 j 种生态生产性土地的产量因子。

在景区生态承载力的实际计算过程中，考虑到生态系统的平衡性和可持续发展，应扣除 12% 的生物多样性保护面积。

2.1.3.3 旅游生态赤字或盈余计算模型

为准确测度旅游地可持续发展的程度，衡量旅游地生态安全状况，在景区旅游生态足迹和旅游生态承载力计算的基础上，将二者进行比较，即可得到景区旅游生态赤字或者盈余情况，计算模型为：

$$TES / TED = TEC - TEF \quad (2.10)$$

式中 TES ——旅游生态盈余；

TED ——旅游生态赤字。

2.2 生态安全理论

2.2.1 生态安全内涵

国内外不同领域的专家学者从不同的角度对生态安全内涵进行研究并有着独特的见解。一般而言，生态系统是平衡的、稳定的、可持续的，在一定时间上能够维持自身组织结构，保持对风险威胁的恢复能力，生态系统的这种状态即为生态安全；反之为生态不安全^[54]。在众多学者相关研究的基础上进行综合分析，生态安全的主要内涵可理解为：第一，生态安全是一个区域生态环境系统可持续发展的必要条件，是经济社会健康协调发展的基本保障；第二，人类生存发展和消费活动应该处于一种安全、健康、和谐、可持续性的外部系统环

境；第三，生态安全是一种动态的平衡状态，会随着影响因素的变化而发生变化，具有动态性和表现形式的多样性；第四，生态安全是可以调控的，人类可以采取有效措施，调控自身行为，从而减轻生态环境的威胁，维持整个生态系统的良性发展，实现生态安全。

2.2.2 生态安全评价方法

在生态安全评估标准和评价方法上，众多国内外学者进行了研究和探索，而现阶段国内外尚没有形成统一的、有针对性的生态安全评价指标体系和评价方法。目前现有的生态安全评估方法主要有生态学法、数字模型法等（表 2.7）。而本文将采用生态足迹分析方法，从生态环境系统的角度，评估景区生态承载力能否负荷景区的生态足迹，直观的反映景区生态安全状况。在具体分析过程中，主要采用单项指标和综合指标相结合的方法，对景区的生态安全等级进行测度，以此评估生态安全。

表 2.7 生态安全主要评价模型和评价方法

评价模型	评价方法	方法的优势
数学模型	主成分投影法	避免了各单项指标间的信息叠加影响，更加综合科学地反映理想样本和评价样本指标值间的差异程度 ^[55]
	综合指数法	具有明显的地域特征
	熵权灰色关联法	克服了主观确定权重的不确定性 ^[56]
生态模型	生态足迹分析法	简化了评价因子，便于结果之间的区域横向比较
景观模型	景观空间邻接度法	现状评价与动态评价相结合，相对宏观
数字地面模型	数字生态安全法	逻辑运算过程相对简单易操作，对数据和软件要求高

2.3 生态安全预警理论

2.3.1 生态安全预警内涵

“预警”一词起源于军事学，即时刻监测某一现象的现状和未来发展趋势，对非正常状态及时进行预报，并采取具有针对性的科学预防措施^[57]。生态安全

预警是在生态安全评价基础上,对工程建设、国土整治、资源开发等人类生产活动以及自然灾害对生态环境系统造成的影响进行评价、分析和预测,确定在内部和外部双重因素影响下,区域生态环境系统状况和质量的变化趋势、发展速度以及达到某一临界阈值点的时间,并根据需要适时提出防止恶化的警戒信息及相应的应对措施^[36]。生态安全预警在加强生态环境系统风险防范意识、改善环境系统质量、促进区域协调可持续发展等方面发挥着重要作用。

生态安全预警作为一种评估区域生态安全发展现状、预测未来发展趋势的信号系统,贯穿于区域社会经济发展、生态环境保护的过程中,主要包括四个重要环节,其中,明确警义是前提,是预警研究的基础;寻找警源、分析警兆是对警情的根源和临界点等因素的分析;预报警度则是预警的结果。此外,还包括警情的防范和排除阶段^[36]。

2.3.2 生态安全预警方法

综合现有的国内外学者的研究,生态安全预警方法主要有黑色预警方法、红色预警方法、绿色预警方法、白色预警方法、黄色预警方法五大类^[36]。每种预警方法都有一套具备自身优势的完整程序,但在具体运用上又存在差别。

(1) 黑色预警方法

黑色预警方法主要是在选取一个代表性指标的基础上,对其发展变化规律进行时间序列的动态变化分析,既包括该项指标的过去及现在发展现状,同时包括其未来发展趋势,从而进行综合评价,并提出相应的预警对策措施。

(2) 红色预警方法

红色预警方法通过对影响生态环境因素进行综合全面分析,并进行时间纵向对比研究,同时结合众多专家的意见经验进行生态系统预警。红色预警方法主要为定性分析,常适用于一些复杂情况下的预警研究,且预警实际效果明显。

(3) 绿色预警方法

绿色预警方法主要用于农作物的成长预警,一般借用遥感技术,根据研究对象趋于成长变化的现状,预测其成长趋势和未来变化状况,进行相应的预警。

(4) 白色预警方法

白色预警方式适用于对产生警情的源头十分了解,运用计量技术对警因指标进行因素分析和预测。目前,该方法的相关研究运用尚不广泛。

(5) 黄色预警方法

黄色预警方法是依据警情预报的严重程度,进行由原因到结果逐渐分析预警的过程,是现有研究中应用最为广泛的预警分析方法,又称灰色分析方法。在具体操作过程中主要有指数预警、统计预警、模型预警^[58]。

各种预警方法在指标确定和分析上各有不同(表 2.8),在实际运用过程中要根据区域条件及时空的变化而进行相应的调整。本文主要采用黄色预警方法中的模型预警方法,在建立变量模型的基础上进行预测分析,并构建预警模型,对景区生态安全系统进行预测、评价和分析。

表 2.8 五种预警方法的比较

	黑色预警	红色预警	绿色预警	白色预警	黄色预警
定性或定量	定量	定性	定量	定量	定量
纵向或横向	纵向	纵向和横向	纵向	纵向	纵向和横向
指标确定	关键指标	综合指标	成长指标	警因指标	多种指标
分析方法	波动分析	模型分析	趋势分析	因素分析	统计分析

3 龙门石窟景区旅游生态足迹测算

3.1 龙门石窟景区概况

龙门石窟景区位于历史文化名城洛阳市，与大同云冈石窟、敦煌莫高窟并称为中国三大佛教石窟艺术宝库，是国家首批重点文物保护单位、首批国家级风景名胜区、全国文明风景旅游区、全国首批“5A 级旅游景区”。2000 年 11 月，龙门石窟被联合国教科文组织列入《世界遗产名录》，世界遗产委员会评价：“洛阳龙门地区的石窟和佛龕详实描述了佛教宗教题材，集中展示了中国北魏晚期至唐代（公元 493~907 年）期间，最为优秀和最具规模的山窟塑像艺术。”2009 年，龙门石窟作为中国现存窟龕最多的石窟被中国世界纪录协会收录，创造了我国现存窟龕数量最多、规模最大的石窟记录。

3.1.1 景区自然环境概况

龙门石窟景区位于“十三朝古都”洛阳市洛龙区龙门镇伊河两岸的龙门山（又名西山）与香山（又名东山）上，地理坐标为北纬 34° 33′，东经 112° 28′^[59]。景区所处的洛阳市地处河南省西部，亚欧大陆桥东段，横跨黄河中游两岸，东接河南省省会郑州市，西临三门峡，南连平顶山、南阳，北与焦作隔黄河接壤，位居天地之中，故有“九州腹地”之誉。

龙门石窟景区所在区域属于暖温带大陆性季风气候，四季分明，气候温和，年降雨总量充沛，平均日照时间充足，年平均气温 14.5℃。景区所在山区的岩石属于石灰岩层，整体呈现青灰色，主要是由寒武纪（5 亿年前）和石炭纪（2.7 亿年前）两个时期的造山运动形成的，石质良好，易于雕琢，同时宜于保存。山顶表层由中性沙质粘土覆盖，土质肥沃，易于植被生长，树种品类齐全，月桂、百日红、毛白杨、椿树、法桐、银杏、水杉等植被错落有致，形成了整个景区清幽如画、山水相宜的自然环境，自古皆为礼佛朝圣之地。

3.1.2 景区旅游资源条件

龙门石窟开凿于公元 494 年前后，时值北魏孝文帝年间，后历经东魏、西

魏、北齐、隋唐、五代、宋等朝代的连续大规模修建，历经了四百多年。如此长远的时间的积累终于造就了现今南北绵延一公里，分布于伊河东西两岸山崖峭壁上的壮丽石窟景观。据统计数据显示，景区现存大小规模各具佛龕多达两千三百四十五个，造像多达十万余尊，碑刻题记多达两千四百八十余品，石刻佛塔则由六十余座^[60]。景区内主要旅游资源可分为自然旅游资源和人文旅游资源两大类，具体景观包括西山石窟群、东山石窟群、香山寺、白居易墓园等。根据《中华人民共和国国家标准（GB/T 18972—2003）》及龙门石窟景区旅游资源调查统计，景区旅游资源主要包括以下类型（表 3.1 所示）^[61]：

表 3.1 龙门石窟景区旅游资源概况

	资源类型	单体名录
自然景观	地文景观类	伊阙、箩圈沟、吊桥沟、万佛沟、红石沟、乾元沟
	水域风光类	禹王池、珍珠泉、香山泉、牡丹泉、伊水、锣鼓洞
	生物景观类	侧柏林、百年乌柏
	天象与气候景观类	关塞气色
人文景观	遗址遗迹类	西山石窟群、东山石窟群、白居易墓园、魏唐碑刻、 龙门十二品、唐奉先寺遗址、八节滩、擂鼓台
	建筑设施类	香山寺、龙门大桥、广化寺、海洋馆、商业街、斗母庙
	旅游购物类	牡丹瓷、唐三彩等
	人文活动类	夜游龙门等

3.1.3 景区旅游发展现状

龙门石窟景区旅游资源禀赋优良，交通条件便利，加上政府的高度重视及政策支持，众多内外部的积极因素和优越条件都促进了景区旅游业的飞速发展，龙门石窟景区的旅游市场得到开拓，年接待游客量和旅游收入也呈现逐年增长的趋势。据洛阳市旅游局发布的数据，申遗成功前一年，龙门石窟景区年旅游收入仅 71.4 万元；申遗成功后，2002 年龙门石窟景区年接待游客量迅猛增长至 85 万人次，旅游综合收入达 3500 万元；2013 年，龙门石窟景区接待量和旅游

收入再创新高,共接待游客量 288 万人次,实现门票收入 2.56 亿元,旅游综合收入达 3.72 亿元。

但作为世界文化遗产景区和国家重点文物保护单位,龙门石窟景区旅游业发展存在资源保护和旅游开发之间的矛盾,如何在合理保护世界文化遗产的基础上进行科学合理的旅游开发是龙门石窟景区旅游业发展面临的重要挑战;景区发展也面临“观光有余、休闲不足”的劣势,打造的旅游产品和服务仅限于龙门石窟的静态观赏形式,未能深度发掘其文化艺术内涵,产品创新不足,游客体验缺乏,同时缺少一个集食住行游购娱于一体的观光休闲平台和旅游服务设施;而景区现有的开发空间主要集中在西山石窟、东山白园和香山寺区域,由于旅游人次的增长以及线路不能实施有效的分流,西山石窟游览区的环境容量长期处于超饱和状态,空间范围和格局已不能满足景区发展的需求,必将威胁景区未来的协调可持续发展;同时,随着国民经济发展,大批的旅游资源得到开发,旅游目的地的可选择性不断扩大,必然导致游客分流,而龙门石窟景区和云冈石窟、敦煌莫高窟景区存在着同类产品的竞争威胁。因此,如何在激烈的市场竞争中,处理好龙门石窟景区同其他景区之间的竞争合作关系,对景区未来发展将产生重要影响。

3.2 研究数据来源及处理

3.2.1 研究区域与时段的选取

本文将选用洛阳龙门石窟景区为研究区域,通过实地考察,景区于 2002 年开始实施封闭式管理,并进行相关基础设施建设,包括龙门大桥、过境公路、商业步行街、停车场、绿地等的整治改造。因此,本文选取 2003-2013 年作为研究时段,通过对景区十余年旅游生态足迹的动态测算,对景区生态安全现状和未来发展进行科学评估及预测,动态反映龙门石窟景区生态环境系统和可持续发展的现状及发展趋势。

3.2.2 统计数据的来源

根据旅游生态足迹模型,本研究所需的统计数据来源主要分为四类:

(1) 基础数据

龙门石窟景区旅游者食物消费和能源消耗的年人均量及类型构成、国内外

入境旅游者的客源地分布等，这些数据可通过查阅《洛阳市统计年鉴》（2004—2014）、《中国旅游统计年鉴》（2004—2014）获取；

（2）调查数据

龙门石窟景区总面积、景区主要土地类型及构成比例、景区内交通、餐饮、住宿、观光、购物、娱乐等各类设施的面积及游客使用率、游客人均旅游天数及消费支出、景区主要旅游商品及平均销售价格等，这些数据可通过实地访谈调查和相关资料查询获取。实地访谈式调查对象包括洛阳市旅游局相关工作人员、龙门石窟世界文化遗产园区管委会、景区游客、景区各旅游餐饮住宿企业等，可查阅相关资料包括《洛阳市龙门风景区旅游发展总体规划（2006-2020）》、《龙门风景名胜区规划（2007-2025年）》、《龙门石窟景区旅游总体规划》等；

（3）标准数据

六种具有生态生产能力的土地的均衡因子和中国各类型土地产量因子、不同种类交通工具的单位生态足迹、不同类型不同档次住宿设施每个床位所占用的建筑用地面积与服务过程中的能源消耗、全球部分食物的年平均生态生产力与所对应的生态生产性土地类型、每一单位生态生产土地面积的化石能源的种类及每一类别的平均散发热量等，这些数据可参考国内外相关研究文献及国家或相关行业规定（见表 2.1、2.2、2.3、2.4、2.5、2.6）；

（4）估算数据

由于所需数据的复杂性及时间跨度较长，部分数据无法通过资料的查阅和实地调研获取，在实际计算分析过程中可根据已获取的相关数据进行相应的计算，从而获得估算数据。

3.2.3 数据计算说明

在龙门石窟景区旅游生态足迹计算过程中，生态生产性土地主要包括耕地、林地、牧草地、化石能源地、建筑用地、水域六种类型，并从这六个方面对景区旅游生态足迹的供给进行测度衡量；同时，按照旅游活动消费的构成特点，旅游者的消费需求和能源消耗则主要由旅游交通、旅游住宿、旅游餐饮、旅游观光、旅游购物、旅游娱乐六个方面加和而成。在实际计算过程中，将旅游需求和旅游供给相结合，并进行对比分析，从而评估景区的生态安全状况和可持续发展状态。

旅游活动的异地性决定旅游者来源于不同的客源地，呈现跨区域的流动性，

从而引起旅游景区与外部环境生态系统之间物质能量的流通,并导致旅游生态足迹总量在不同区域间进行转移运动。但在旅游景区微观层次旅游生态足迹的实际研究过程中,从旅游地可持续发展的角度,研究对象应主要针对于景区内部生态环境系统,这才是影响景区旅游业可持续发展的关键,而不可能对景区外部生态系统同时进行全面分析和监测。因此,本文以龙门石窟景区为研究区域,构建了较小尺度范围的景区内部生态环境系统,进行景区的旅游生态足迹测算和生态安全评估,

在上述分析说明的基础上,对收集的统计数据进行处理,并通过 EXCEL 软件对 2003-2013 年的数据进行处理和计算,依据所得的计算结果进行相关分析和预测。

3.3 测算结果动态分析

3.3.1 景区旅游生态足迹动态分析

旅游消费和旅游活动是一个复杂连续的动态过程,包括食、住、行、游、购、娱等多个消费环节。根据第二章构建的旅游生态足迹总体计算模型,对龙门石窟景区 2003-2013 年旅游交通、旅游住宿、旅游餐饮、旅游购物、旅游观光、旅游娱乐六个方面进行测算及时间序列的动态分析,并进行加和,即为景区旅游生态足迹总量。

3.3.1.1 旅游交通生态足迹动态分析

由测算模型(公式 2.2)可知,旅游交通生态足迹包括旅游交通设施生态足迹和交通能源消耗生态足迹两个部分。在对龙门石窟景区进行实地调研的过程中发现,龙门石窟景区交通便利,通达性强,包括民航、铁路和公路多种交通类型。其中洛阳机场距景区 20 公里,是国内净空条件最好的二级机场,已开通洛阳至北京、上海、广州等多条国际、国内航空线路;焦枝铁路、陇海铁路横跨洛阳境内;连霍高速、郑少洛高速、两广高速以及洛阳市绕城高速公路共同组成环状将洛阳市和龙门石窟景区围绕起来,形成便捷的交通联系。在旅游交通生态足迹计算过程中,作为交通设施占用计算的机场、火车站、汽车站等均不在研究区域范围之内,因此,在实际计算过程中仅考虑停车场的建筑用地面积。

龙门石窟景区原有东山停车场、西山停车场两处，总面积共计 1.68hm^2 ，在 2002 年建成 1.4hm^2 的生态停车场 1 座；2007 年景区对三处停车场进行了扩建，到 2007 年景区停车场总占地面积达 10hm^2 ；2012 年景区新增东北服务区停车场，占地约 5.8hm^2 。

通过对洛阳市旅游局、龙门石窟世界文化遗产园区管委会相关工作人员及景区游客的访谈调查，同时查阅洛阳市旅游局提供的《洛阳市 1996-2013 年旅游业主要经济指标及相关情况说明》等资料，整理得出龙门石窟景区国内主要客源市场以河南、河北、北京、山西、陕西、广州、江苏、山东、上海等距离较近的省份和沿海经济发达地区为主。根据客源地距景区的空间距离，可将国内客源市场进行划分：

(1) 远程客源地，即空间距离 $>1000\text{km}$ ，包括广东省、福建省、广西省、香港、澳门、台湾、黑龙江省、吉林省、辽宁省等，假定这些客源地旅游者均选择飞机出行，平均旅行距离则取客源地到景区空间距离的平均值，约 1400km ；

(2) 中程客源地，即 $300\text{km} < \text{空间距离} < 1000\text{km}$ ，包括江苏省、河北省、陕西省、山西省、北京、上海、重庆等地区，假定这些客源地旅游者均选择火车出行，平均旅行距离为 810km ；

(3) 短程客源地，即空间距离 $< 300\text{km}$ ，主要为河南省范围内地区，假定这些地区游客主要交通工具为长途巴士或小轿车，平均旅行距离为 250km 。

同时，龙门石窟景区作为世界文化遗产，具有一定的国际知名度，考虑到景区是洛阳市发展旅游的重点和龙头景区，因此，景区国外客源市场构成分析则主要以洛阳市入境客源市场分析为依据，参考《中国旅游统计年鉴》，结果显示，景区国外客源市场主要包括东亚地区（日本、韩国）、东南亚地区（马来西亚、泰国）、北美地区（美国）、欧洲地区（法国、德国、英国、西班牙）。入境游客均选择飞机为出行工具，平均旅行距离约为 7000km 。

综上所述，龙门石窟景区客源市场分布，如图 3.1 所示。通过对景区管理人员的实地访谈，景区 2003-2013 年客源市场分布基本保持这一比例，变化范围不大，在实际计算中可忽略。

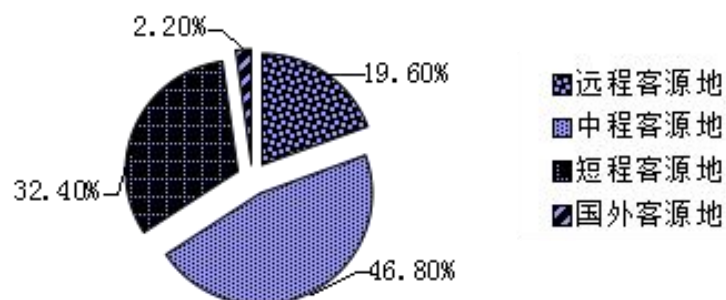


图 3.1 龙门石窟景区客源市场分布

根据公式 2.2，计算龙门石窟景区 2003-2013 年旅游交通生态足迹，包括六类生态生产性土地部分，如表 3.2 所示。

表 3.2 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游交通生态足迹（单位： hm^2 ）

年份 (年)	化石 能源地	建筑 用地	林 地	草 地	耕 地	水 域	总量	人均量
2003	10246.84	8.62	0	0	0	0	10255.46	0.0134513
2004	14876.72	8.62	0	0	0	0	14885.34	0.0134483
2005	16643.06	8.62	0	0	0	0	16651.68	0.0134475
2006	20070.65	8.62	0	0	0	0	20079.27	0.0134463
2007	20981.65	28.00	0	0	0	0	21009.65	0.0134584
2008	21559.86	28.00	0	0	0	0	21587.86	0.0134579
2009	22714.40	28.00	0	0	0	0	22742.40	0.0134571
2010	24583.02	28.00	0	0	0	0	24611.02	0.0134558
2011	28456.47	28.00	0	0	0	0	28484.47	0.0134537
2012	29492.04	44.24	0	0	0	0	29536.28	0.0122370
2013	34432.83	44.24	0	0	0	0	34477.07	0.0119712

由表可得 2003-2013 年龙门石窟景区旅游交通生态足迹时间序列变化曲线（图 3.2）、人均旅游交通生态足迹时间序列变化曲线（图 3.3）、旅游交通生态足迹中建筑用地和化石能源地部分时间序列变化曲线（图 3.4）。

3 龙门石窟景区旅游生态足迹测算

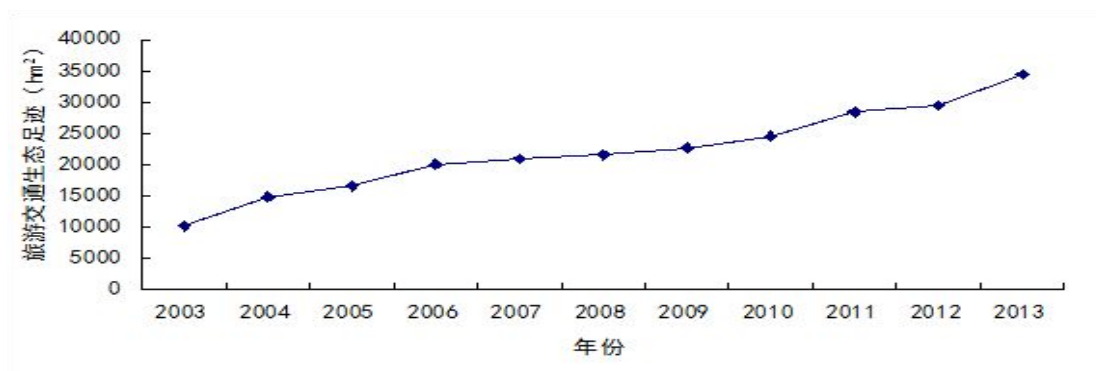


图 3.2 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游交通生态足迹

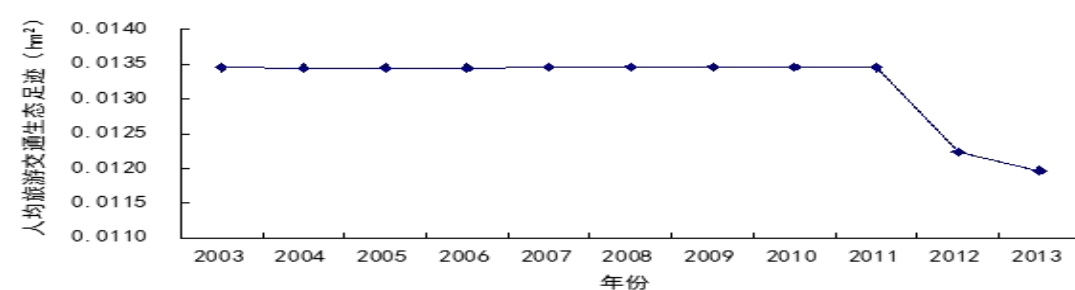


图 3.3 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游交通生态足迹



图 3.4 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游交通生态足迹中建筑用地和化石能源地部分

由上图可得：龙门石窟景区 2003-2013 年旅游交通生态足迹总量呈现明显的逐年增长趋势，主要原因在于景区年游客量的增加，旅游者的数量和规模直接决定了景区旅游交通生态足迹的大小。同时，越来越多的旅游者倾向于更为方便快捷的交通方式出行，如飞机、自驾车等，也导致了旅游交通生态足迹中

能源消耗部分的持续增长。人均旅游交通生态足迹则保持平稳并有下降趋势，反映了旅游人次的增长速度逐渐超过景区交通生态足迹的增加速度。

3.3.1.2 旅游住宿生态足迹动态分析

由测算模型（公式 2.3）可知，旅游住宿生态足迹主要由旅游住宿设施生态足迹和旅游住宿能源消耗生态足迹两部分组成。据实地考察，龙门石窟景区内住宿设施仅有一处，即东山宾馆，它是洛阳市首家五星级园林山水式涉外饭店。宾馆于 2003 年 9 月 28 日正式营业，拥有客房 99 间，床位数 200 个；2009 年进行扩建，截止 2009 年底，酒店共有豪华温泉标准间、贵宾温泉套房等多种房型客房 177 间，300 床位。随着景区旅游人数的增加，客房年出租率整体呈上升趋势。

根据公式 2.3，计算龙门石窟景区 2003-2013 年旅游住宿生态足迹，包括六类生态生产性土地部分，如表 3.3 所示。

表 3.3 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游住宿生态足迹（单位： hm^2 ）

年份 (年)	化石 能源地	建筑 用地	林 地	草 地	耕 地	水 域	总量	人均量
2003	9.61	112.00	0	0	0	0	121.61	0.0001595
2004	39.81	112.00	0	0	0	0	151.81	0.0001372
2005	42.30	112.00	0	0	0	0	154.30	0.0001246
2006	43.54	112.00	0	0	0	0	155.54	0.0001042
2007	44.79	112.00	0	0	0	0	156.79	0.0001004
2008	47.28	112.00	0	0	0	0	159.28	0.0000993
2009	48.52	112.00	0	0	0	0	160.52	0.0000950
2010	72.78	168.00	0	0	0	0	240.78	0.0001316
2011	70.91	168.00	0	0	0	0	238.91	0.0001128
2012	74.65	168.00	0	0	0	0	242.65	0.0001005
2013	78.38	168.00	0	0	0	0	246.38	0.0000856

由表可得 2003-2013 年龙门石窟景区旅游住宿生态足迹时间序列变化曲线（图 3.5）、人均旅游住宿生态足迹时间序列变化曲线（图 3.6）、旅游住宿生态

足迹中建筑用地和化石能源地部分时间序列变化曲线（图 3.7）。

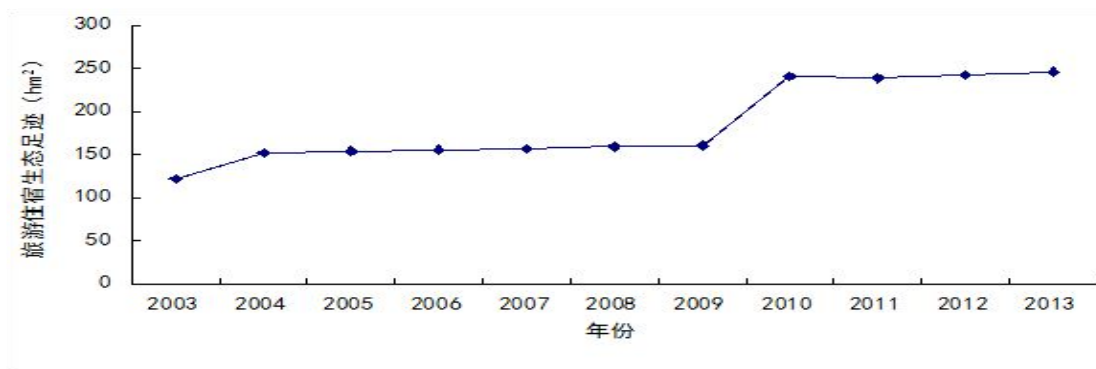


图 3.5 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游住宿生态足迹

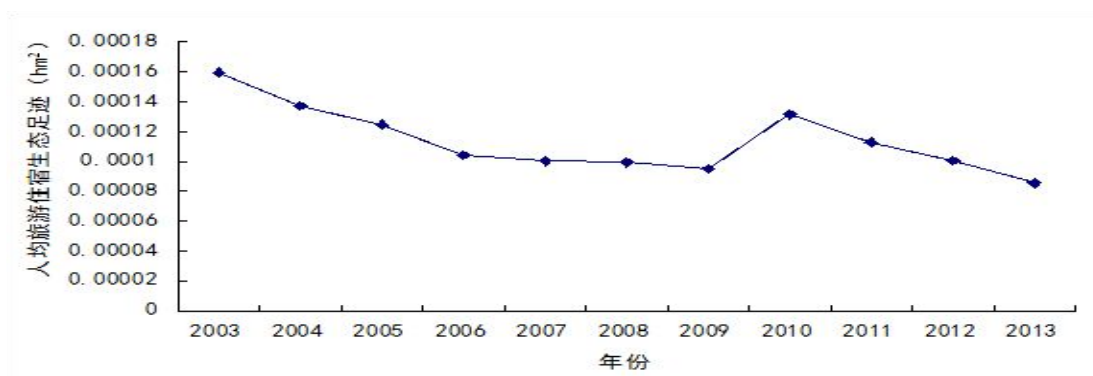


图 3.6 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游住宿生态足迹

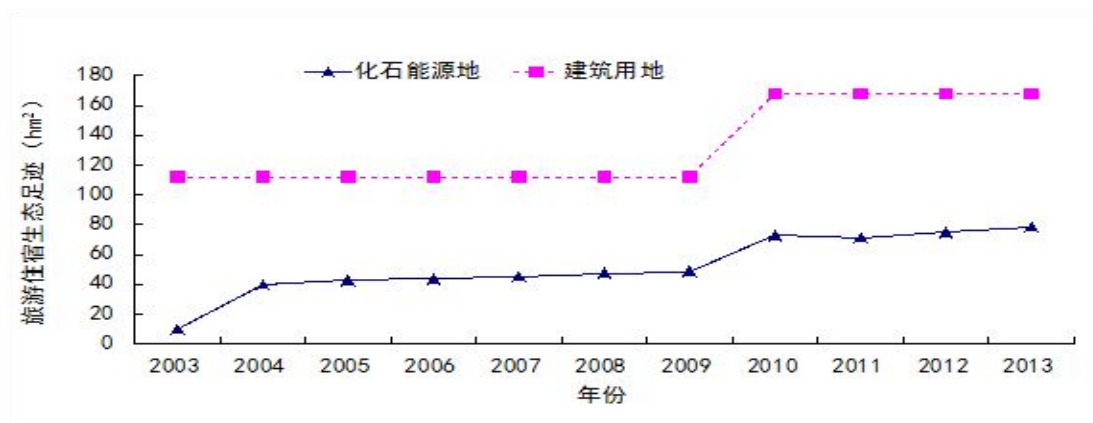


图 3.7 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游住宿生态足迹中建筑用地和化石能源地部分

分析图表可得：龙门石窟景区 2003-2013 年旅游住宿生态足迹总体呈现上升趋势，主要受到游客量逐年增加的影响，其中 2009 年以前，景区住宿服务设施始终保持不变，而随着游客量的增长，人均旅游住宿生态足迹则呈现逐年减少的趋势；2010 年住宿设施的增加，导致旅游生态足迹和人均旅游生态足迹均大幅上升，但此后人均值又呈现逐年下降的趋势；伴随着龙门石窟景区旅游业的发展，游客数量日益攀升，酒店客房出租率整体呈上升趋势，从而导致景区旅游住宿生态足迹中化石能源地部分逐年增长，而建筑用地部分除 2009-2010 年增加之外，其他年份并无变化。

综上所述，旅游客流量大小是影响旅游住宿生态足迹总量的重要因素，景区旅游人次迅猛增长，相关旅游消费需求增加，直接造成宾馆床位出租率的上升，从而导致了住宿服务过程中能源耗用增加；此外，从不同类型、不同档次住宿接待设施单位床位的建筑用地面积和服务过程中的能源消耗量方面进行考虑，酒店的数量规模，包括床位的数量和档次也会影响旅游住宿生态足迹总值，住宿床位数量越多、水平档次越高，每个床位的建筑用地和能源消耗部分的生态足迹越多，从而影响着旅游住宿生态足迹总量上的增长。

3.3.1.3 旅游餐饮生态足迹动态分析

由测算模型（公式 2.4）可知，旅游餐饮生态足迹主要由三部分组成：旅游餐饮设施建筑用地占用生态足迹、餐饮生物资源消耗生态足迹和能源消耗生态足迹。通过景区实地调研，龙门石窟景区内餐饮设施主要有东山宾馆餐饮部和服务区小吃街，为避免重复计算，本研究仅将龙门小吃街纳入餐饮设施的测度范围，建筑用地面积为 10hm^2 。同时，龙门石窟作为世界文化遗产，景区内部建筑的修建必须遵循严格的规定，因此，从 2003 年到 2013 年，龙门石窟景区内部餐饮设施基本没有发生变化。通过对洛阳市旅游局和景区相关管理人员的实地访谈，景区对外交通便利，旅游者平均旅游天数为 1 天。

在旅游者在旅游消费过程中单位时间内食物和能源消耗量的数据资料查询方面，官方并没有相关的统计，而实地调查测算也无法确定。因此，本研究假定旅游者在龙门石窟景区游览过程中食物消费量和能源消耗量与洛阳市当地居民相同，可通过查阅 2004-2014 年《洛阳市统计年鉴》获取（表 3.4）。根据公式 2.4，计算龙门石窟景区 2003-2013 年旅游餐饮生态足迹，包括六类生态生产性土地部分，如表 3.5 所示。

3 龙门石窟景区旅游生态足迹测算

表 3.4 日人均食物消费量和能源消耗量 (单位: kg)

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
粮食	0.2324	0.2379	0.2198	0.2076	0.2062	0.2114	0.2328	0.2445	0.2563	0.2341	0.2432
食油	0.0226	0.0228	0.0219	0.0222	0.0208	0.0332	0.0255	0.0231	0.0218	0.0213	0.0221
鲜菜	0.3681	0.4247	0.3742	0.3690	0.4060	0.4267	0.4056	0.3408	0.3447	0.3210	0.3310
猪肉	0.0487	0.0475	0.0472	0.0474	0.0337	0.0355	0.0396	0.0421	0.0373	0.0428	0.0416
牛羊肉	0.0109	0.0154	0.0116	0.0126	0.0121	0.0105	0.0108	0.0116	0.0094	0.0100	0.0104
禽类	0.0175	0.0173	0.0170	0.0131	0.0132	0.0123	0.0118	0.0188	0.0187	0.0180	0.0182
蛋类	0.0367	0.0364	0.0346	0.0354	0.0353	0.0383	0.0370	0.0399	0.0411	0.0424	0.0431
鲜奶	0.0735	0.0843	0.0795	0.0763	0.0764	0.0592	0.0620	0.0598	0.0587	0.0515	0.0602
水产品	0.0158	0.0152	0.0152	0.0160	0.0159	0.0174	0.0215	0.0207	0.0173	0.0189	0.0182
白酒	0.0059	0.0057	0.0052	0.0043	0.0044	0.0045	0.0049	0.0047	0.0025	0.0028	0.0030
鲜瓜果	0.1499	0.1667	0.1782	0.1861	0.1860	0.1425	0.1571	0.1630	0.1788	0.1751	0.1723
煤炭	0.2381	0.2336	0.1627	0.1559	0.1005	0.3333	0.1384	0.0845	0.0481	0.0533	0.0510
液化气	0.0789	0.0745	0.0677	0.0603	0.0570	0.0538	0.0564	0.0352	0.0244	0.0192	0.0204

表 3.5 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游餐饮生态足迹 (单位: hm^2)

年份	化石能源地	建筑用地	林地	草地	耕地	水域	总量	人均量
2003	122.79	28.00	0	486.82	479.88	83.08	1200.57	0.0015747
2004	172.39	28.00	0	784.56	703.83	116.03	1804.81	0.0016306
2005	149.55	28.00	0	794.49	724.31	129.81	1826.16	0.0014748
2006	167.50	28.00	0	973.39	784.51	164.78	2118.18	0.0014185
2007	134.89	28.00	0	860.63	835.10	171.18	2029.80	0.0013003
2008	290.97	28.00	0	825.60	869.41	192.49	2206.47	0.0013755
2009	172.06	28.00	0	944.69	936.87	250.59	2332.21	0.0013800
2010	114.78	28.00	0	1090.92	1053.82	261.11	2548.63	0.0013934
2011	82.82	28.00	0	1123.45	1005.77	252.61	2492.65	0.0011773
2012	89.90	28.00	0	1376.85	1106.91	314.61	2916.27	0.0012082
2013	107.19	28.00	0	1665.67	1380.04	361.49	3542.39	0.0012300

由上表可得 2003-2013 年龙门石窟景区旅游餐饮生态足迹时间序列变化曲线（图 3.8）、人均旅游餐饮生态足迹时间序列变化曲线（图 3.9）、旅游餐饮生态足迹中化石能源地、建筑用地、草地、耕地、水域、林地六种生态生产性土地（图 3.10）及各部分比例分配的时间序列变化曲线（图 3.11）。

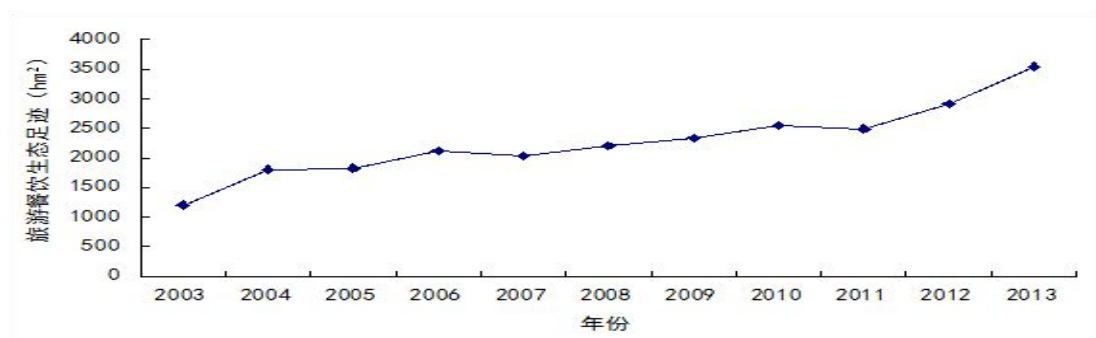


图 3.8 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游餐饮生态足迹

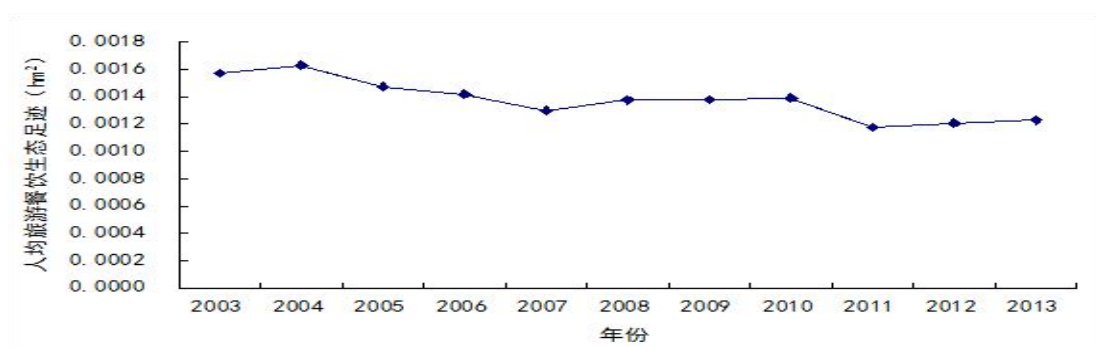


图 3.9 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游餐饮生态足迹

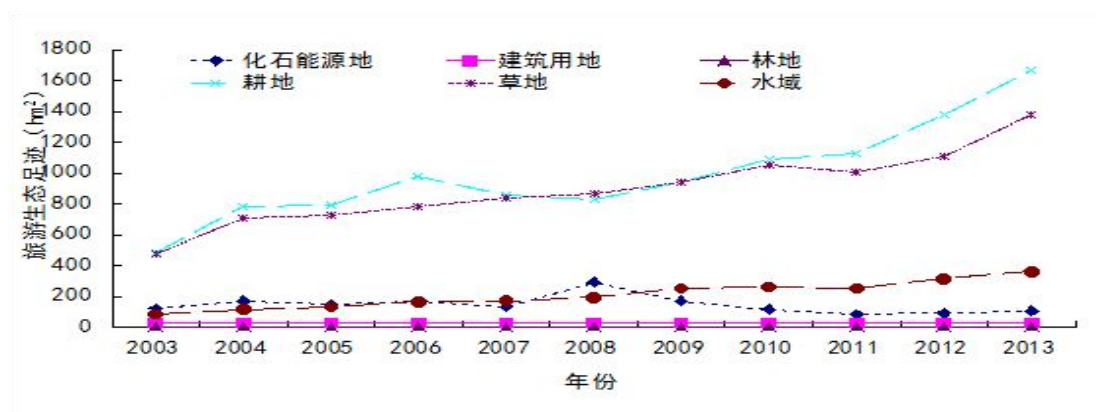


图 3.10 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游餐饮生态足迹中六种生态生产性土地汇总

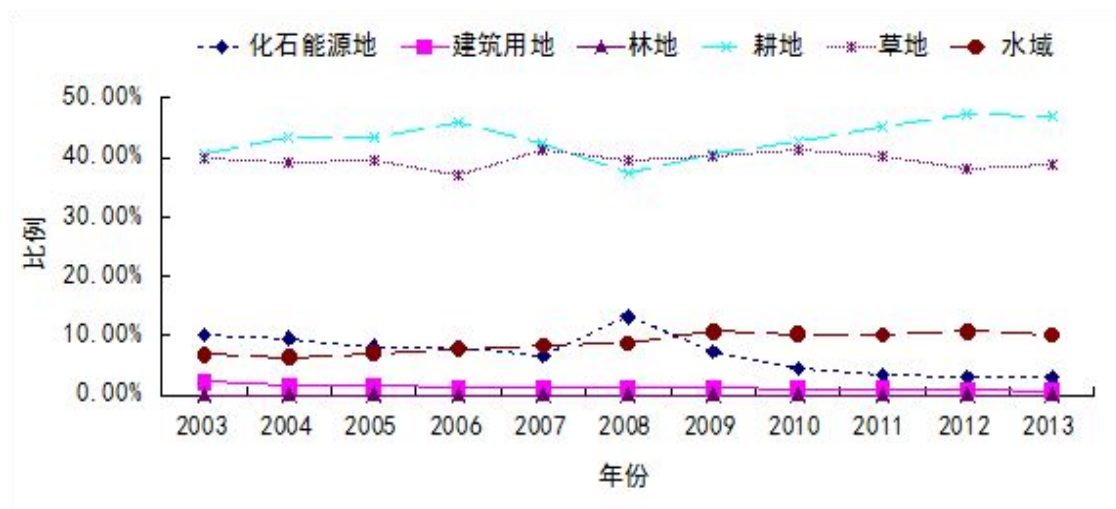


图 3.11 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游餐饮生态足迹中六种生态生产性土地比例汇总

由上图可得：龙门石窟景区 2003-2013 年间，旅游餐饮生态足迹呈现平稳上升趋势，主要是由于景区旅游人次迅猛增加，因此，人均旅游餐饮生态足迹则出现平稳下降。在餐饮消费结构上，耕地和草地始终保持较高的比例，除化石能源地自 2008 年以后呈现逐年下降趋势，建筑用地、林地保持平稳，其他生态生产性土地，包括耕地、草地、水域均稳步增加。

综上所述，旅游者数量是影响景区旅游餐饮生态足迹的重要因素，此外，旅游者饮食消费习惯和餐饮消费结构直接会对旅游餐饮生态足迹中所消耗的六种生态生产性土地的比例构成产生重要影响。

3.3.1.4 旅游购物生态足迹动态分析

由测算模型（公式 2.5）可知，旅游购物生态足迹主要包括购物设施生态足迹和旅游商品生产销售过程中能源消耗生态足迹。龙门石窟景区内购物设施主要集中在服务区的购物商业步行街，建筑用地面积为 5hm^2 。通过实地调研得知，景区主要旅游商品包括唐三彩、牡丹字画、龙门石窟相关图书音像制品等，其中所占比重较大的是唐三彩；2010 年之后，牡丹瓷工艺品也成为重点开发的旅游商品之一。因此，本研究假定 2003-2009 年龙门石窟景区旅游者的旅游商品消费支出均用于购买唐三彩，而 2010-2013 年期间旅游商品支出则用于牡丹瓷和唐三彩的消费。洛阳市旅游局提供的相关数据资料显示，龙门石窟景区游客

各种消费支出中购物消费约占消费总额的 11%，假定景区旅游者购物支出比例基本保持不变。可得 2003-2013 年龙门石窟景区人均旅游购物消费情况(表 3.6)。

表 3.6 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游消费 (单位: 元)

年份	人均旅游消费	人均旅游购物消费
2003	233.86	25.73
2004	229.94	25.29
2005	254.32	27.98
2006	242.83	26.71
2007	248.08	27.29
2008	238.81	26.27
2009	246.41	27.11
2010	260.10	28.61
2011	261.24	28.74
2012	266.63	29.33
2013	288.80	31.77

根据对龙门石窟景区 15 家旅游商品零售店的实地调查访谈,一件中等型号的唐三彩平均售价为 40 元,而一件中等型号的牡丹瓷工艺品售价为 60 元,假定近几年唐三彩和牡丹瓷的价格保持不变。牡丹瓷主要采用瓷土基料、釉原料和彩色瓷土进行烧制,唐三彩则主要是选取高岭土,经过一系列程序加工成陶泥,并进行两次焙烧制作而成。两种工艺品制作原料所消耗的生物资源均可忽略不计,通过查阅相关资料和咨询相关工艺制作者,其制作过程中能源消耗为每件 1kg 标准煤炭。

根据公式 2.5,可计算龙门石窟景区 2003-2013 年旅游购物生态足迹,包括六类生态生产性土地部分,如表 3.7 所示,并可得 2003-2013 年龙门石窟景区旅游购物生态足迹时间序列变化曲线(图 3.12)、人均旅游购物生态足迹时间序列变化曲线(图 3.13)、旅游购物生态足迹中化石能源地和建筑用地部分时间序列变化曲线(图 3.14)。

3 龙门石窟景区旅游生态足迹测算

表 3.7 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游购物生态足迹（单位：hm²）

年份 (年)	化石 能源地	建筑 用地	林 地	草 地	耕 地	水 域	总量	人均量
2003	1862.04	14.00	0	0	0	0	1876.04	0.0024607
2004	1830.20	14.00	0	0	0	0	1844.20	0.0016662
2005	2024.87	14.00	0	0	0	0	2038.87	0.0016465
2006	1932.96	14.00	0	0	0	0	1946.96	0.0013038
2007	1974.94	14.00	0	0	0	0	1988.94	0.0012741
2008	1901.12	14.00	0	0	0	0	1915.12	0.0011939
2009	1961.91	14.00	0	0	0	0	1975.91	0.0011692
2010	1656.37	14.00	0	0	0	0	1670.37	0.0009133
2011	1663.90	14.00	0	0	0	0	1677.90	0.0007925
2012	1698.05	14.00	0	0	0	0	1712.05	0.0007093
2013	1839.32	14.00	0	0	0	0	1853.32	0.0006435

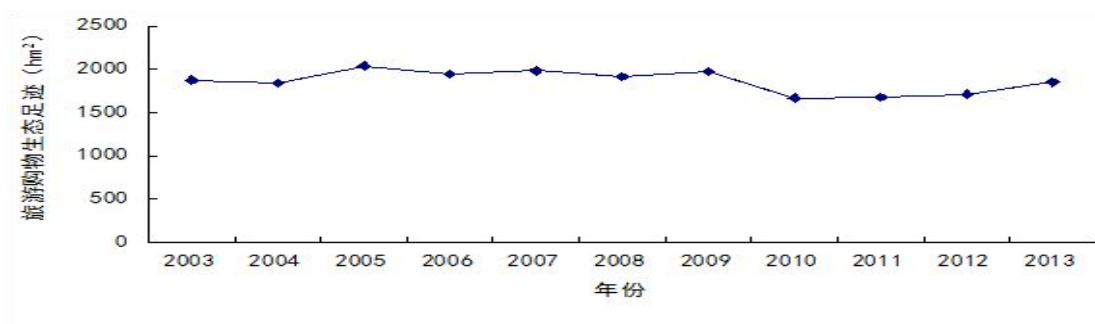


图 3.12 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游购物生态足迹

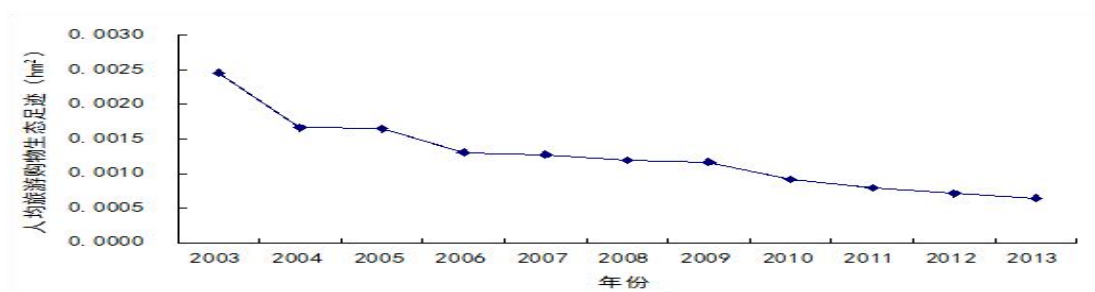


图 3.13 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游购物生态足迹

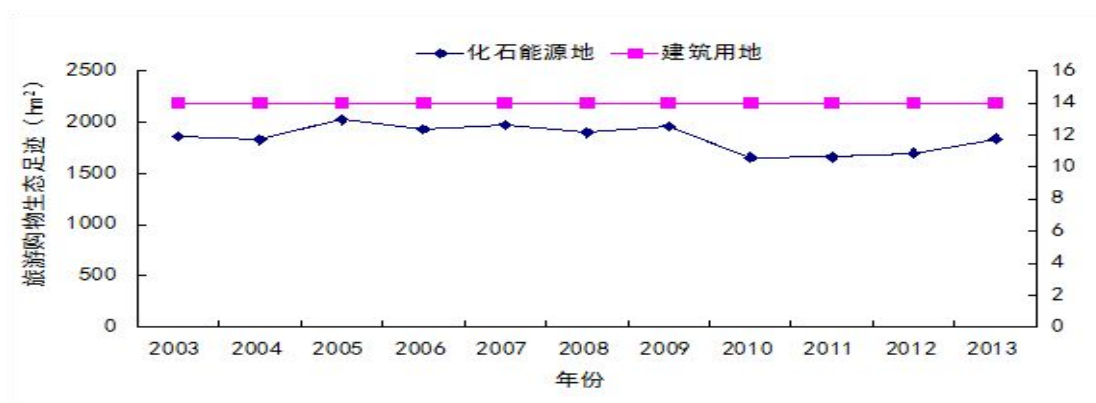


图 3.14 龙门石窟景区 2003-2013 旅游购物生态足迹中建筑用地和化石能源地部分

由上述图表可以看出，2003-2013 年龙门石窟景区旅游购物总生态足迹及化石能源地部分基本保持平稳趋势，波动幅度不大，而随着旅游人次的增长，人均旅游购物生态足迹呈现逐年下降的趋势。究其原因，龙门石窟景区内旅游商品虽然种类较多，但大多千篇一律，与其他景区雷同，其销售地点大多是普通商店，商品同质化问题突出，缺乏特色精品旅游商品和购物专营店。这些因素都导致景区旅游者购物支出偏低，仅占消费总额的 11%，远远低于我国 20% 至 45% 的平均水平。

综上所述，旅游者的购物消费水平直接影响景区旅游购物生态足迹的大小，购物消费支出越多，相应的旅游购物生态足迹越多；此外，景区旅游商品所对应的生态生产性土地的年平均生态生产能力水平也会对景区总体旅游购物生态足迹产生重要影响，二者成反向关系。

3.3.1.5 旅游观光生态足迹动态分析

由测算模型（公式 2.6）可知，旅游观光生态足迹主要包括观光设施生态足迹和游览观光过程中能源消耗生态足迹。根据实地调研，龙门石窟景区内行车公路总长 9100m，宽约 7m，总占地面积 6.37 hm²；主要游览步道包括西山石窟游道、东山石窟游道、白园游道，长度分别为 1000m、1500m、800m，宽度分别为 10m、4m、5m，总面积为 2 hm²；主要观景游览区域包括西山石窟区域、东山石窟区域、香山寺区域、白园区域，总占地面积为 6.3 hm²。而游览过程中能源消耗主要为“夜游龙门”项目，于 2007 年 4 月正式启动，共安装灯具 2886 盏，每晚开放四个小时；2012 年该项目进行升级改造，从 4 月 20 日持续至 10

3 龙门石窟景区旅游生态足迹测算

月 7 日，每晚开放三个小时，对原有灯具进行修整完善，除太阳能节能灯外，还安装灯具 1950 盏。

根据公式 2.6，可计算龙门石窟景区 2003-2013 年旅游观光生态足迹，包括六类生态生产性土地部分，如表 3.8 所示。

表 3.8 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游观光生态足迹（单位： hm^2 ）

年份 (年)	化石 能源地	建筑 用地	林 地	草 地	耕 地	水 域	总量	人均量
2003	0	41.08	0	0	0	0	41.08	0.0000539
2004	0	41.08	0	0	0	0	41.08	0.0000371
2005	0	41.08	0	0	0	0	41.08	0.0000332
2006	0	41.08	0	0	0	0	41.08	0.0000275
2007	3.06	41.08	0	0	0	0	44.14	0.0000283
2008	3.06	41.08	0	0	0	0	44.14	0.0000275
2009	3.06	41.08	0	0	0	0	44.14	0.0000261
2010	3.06	41.08	0	0	0	0	44.14	0.0000241
2011	3.06	41.08	0	0	0	0	44.14	0.0000209
2012	2.21	41.08	0	0	0	0	43.29	0.0000179
2013	2.21	41.08	0	0	0	0	43.29	0.0000151

由上表可得 2003-2013 年龙门石窟景区旅游观光生态足迹时间序列变化曲线（图 3.15）、人均旅游观光生态足迹时间序列变化曲线（图 3.16）、旅游观光生态足迹中化石能源地和建筑用地部分时间序列变化曲线（图 3.17）。

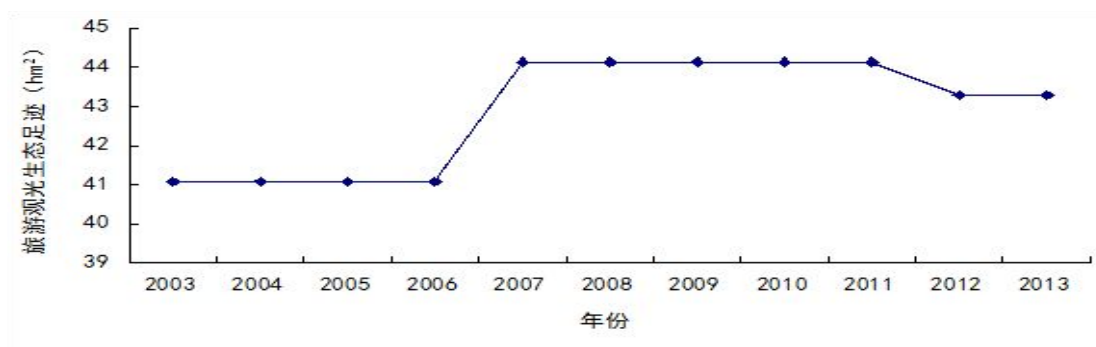


图 3.15 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游观光生态足迹

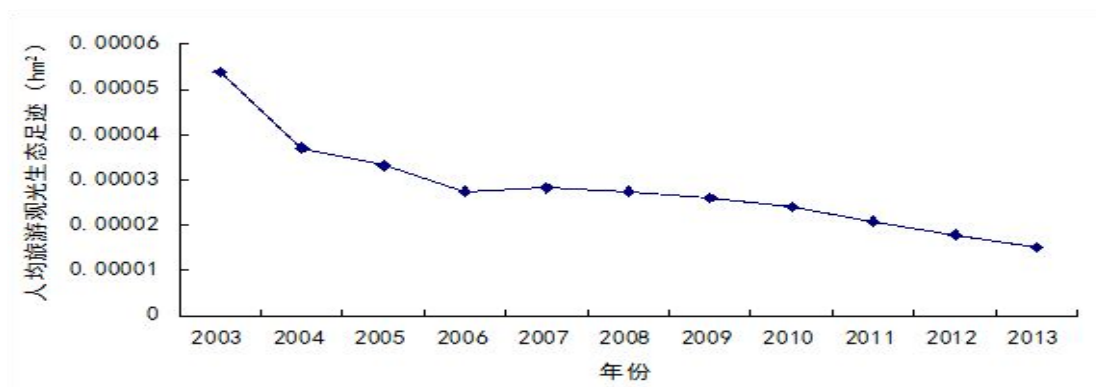


图 3.16 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游观光生态足迹

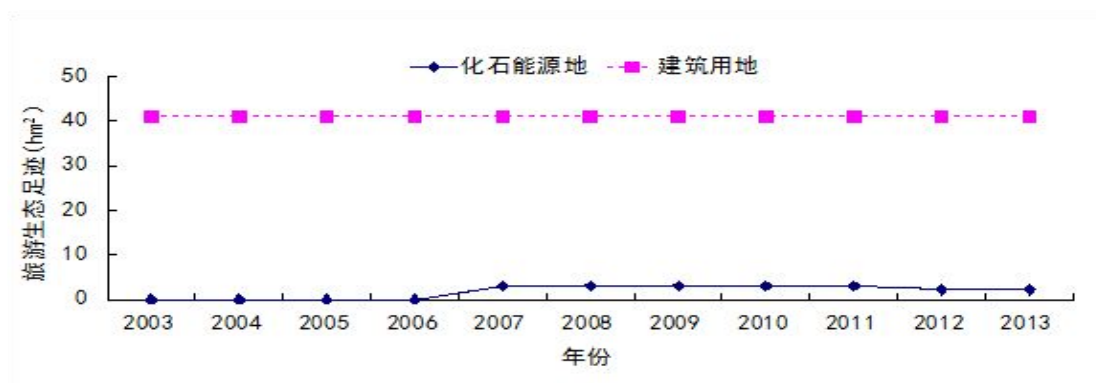


图 3.17 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游观光生态足迹中建筑用地和化石能源地部分

由图表分析可得：在景区旅游观光生态足迹中，建筑用地是重要组成部分。龙门石窟景区作为世界文化遗产地，其景区内部建筑及步道修建都受到严格控制，因此，景区旅游观光生态足迹中建设用地部分基本保持不变。而作为文物古迹类游览景区，在观光过程中能源消耗所占比重相对较小且变化幅度不大。所以，龙门石窟景区 2003-2013 年旅游观光生态足迹中，建筑用地部分保持不变，化石能源地部分小幅度增减，总体观光生态足迹变化不大。而随着旅游人次的增加，人均旅游观光生态足迹呈现逐年递减趋势。

综上所述，在游览观光类景区中，建筑用地面积在景区旅游观光生态足迹中占绝对的比重，两者成绝对的正比关系，建筑用地面积的增加或减少都会影响旅游观光生态足迹的大小，而在建筑用地面积保持基本不变的情况下，旅游人次与景区人均旅游观光生态足迹成反比例关系；与休闲度假类景区相比，观

光类景区游客体验项目缺乏,因此能源消耗所需的化石能源地面积相对较小,随着景区休闲娱乐项目的开发,该部分的比重会慢慢上升。

3.3.1.6 旅游娱乐生态足迹动态分析

根据公式 2.7 可得,旅游娱乐生态足迹主要由娱乐设施建筑用地面积构成。经过实地考察,龙门石窟景区内旅游娱乐设施主要包括温泉游泳池、KTV 包房、乒乓球室、台球厅、棋牌室、游戏机室等,但都包含于东山宾馆的配套服务设施中,尚没有大型室外主题乐园等娱乐场所,因此,为避免重复计算,设定龙门石窟景区内旅游娱乐生态足迹为 0。

3.3.1.7 景区旅游生态足迹综合分析

在上述计算和分析的基础上,将 2003-2013 年龙门石窟景区旅游交通、旅游餐饮、旅游住宿、旅游购物、旅游观光、旅游娱乐六个子项目的旅游生态足迹进行汇总加和,即可得到龙门石窟景区 2003-2013 年旅游总生态足迹(表 3.9)及人均旅游生态足迹(表 3.10)。

表 3.9 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态足迹分类汇总(单位: hm^2)

年份 (年)	旅游交通 生态足迹	旅游住宿 生态足迹	旅游餐饮 生态足迹	旅游购物 生态足迹	旅游观光 生态足迹	旅游娱乐 生态足迹	合计
2003	10255.46	121.61	1200.57	1876.04	41.08	0	13494.76
2004	14885.34	151.81	1804.81	1844.20	41.08	0	18727.24
2005	16651.68	154.30	1826.16	2038.87	41.08	0	20712.09
2006	20079.27	155.54	2118.18	1946.96	41.08	0	24341.03
2007	21009.65	156.79	2029.80	1988.94	44.14	0	25229.32
2008	21587.86	159.28	2206.47	1915.12	44.14	0	25912.87
2009	22742.40	160.52	2332.21	1975.91	44.14	0	27255.18
2010	24611.02	240.78	2548.63	1670.37	44.14	0	29114.94
2011	28484.47	238.91	2492.65	1677.90	44.14	0	32938.07
2012	29536.28	242.65	2916.27	1712.05	43.29	0	34450.54
2013	34477.07	246.38	3542.39	1853.32	43.29	0	40162.45

3 龙门石窟景区旅游生态足迹测算

表 3.10 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态足迹分类汇总（单位： hm^2 ）

年 份	人均交通 生态足迹	人均住宿 生态足迹	人均餐饮 生态足迹	人均购物 生态足迹	人均观光 生态足迹	人均娱乐 生态足迹	合计
2003	0.0134513	0.0001595	0.0015747	0.0024607	0.0000539	0	0.0177001
2004	0.0134483	0.0001372	0.0016306	0.0016662	0.0000371	0	0.0169194
2005	0.0134475	0.0001246	0.0014748	0.0016465	0.0000332	0	0.0167266
2006	0.0134463	0.0001042	0.0014185	0.0013038	0.0000275	0	0.0163003
2007	0.0134584	0.0001004	0.0013003	0.0012741	0.0000283	0	0.0161615
2008	0.0134579	0.0000993	0.0013755	0.0011939	0.0000275	0	0.0161541
2009	0.0134571	0.0000950	0.0013800	0.0011692	0.0000261	0	0.0161274
2010	0.0134558	0.0001316	0.0013934	0.0009133	0.0000241	0	0.0159182
2011	0.0134537	0.0001128	0.0011773	0.0007925	0.0000209	0	0.0155572
2012	0.0122370	0.0001005	0.0012082	0.0007093	0.0000179	0	0.0142729
2013	0.0119712	0.0000856	0.0012300	0.0006435	0.0000151	0	0.0139454

由表可得龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态足迹时间序列变化曲线（图 3.18）、人均旅游生态足迹时间序列变化曲线（图 3.19）、旅游生态足迹中六大子项目所占比重汇总（图 3.20）。

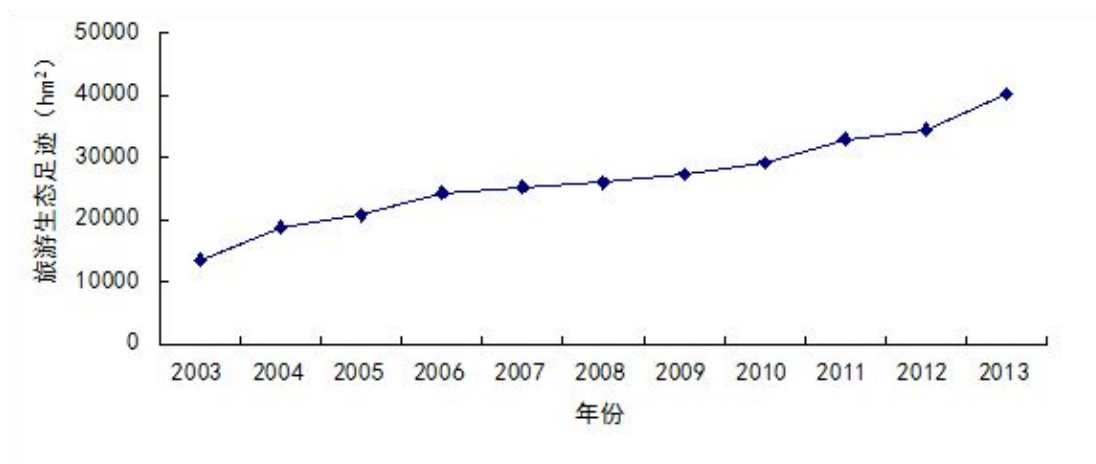


图 3.18 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游总生态足迹

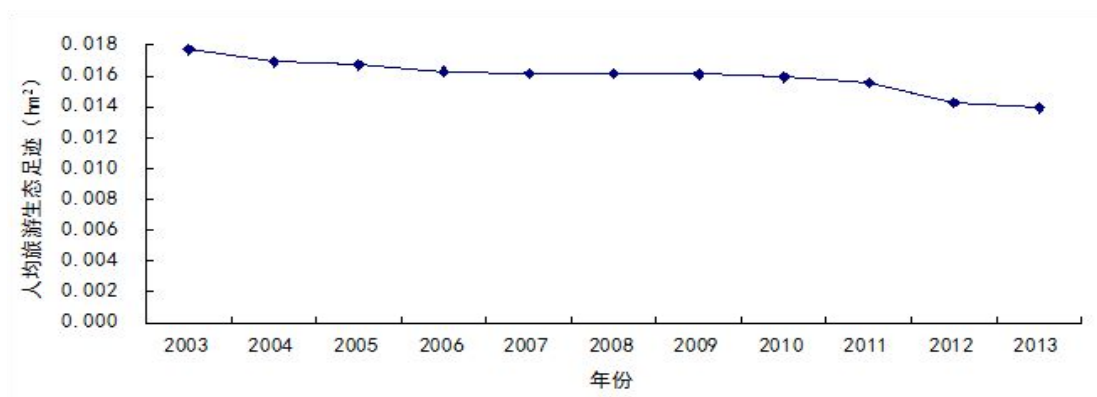


图 3.19 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态足迹

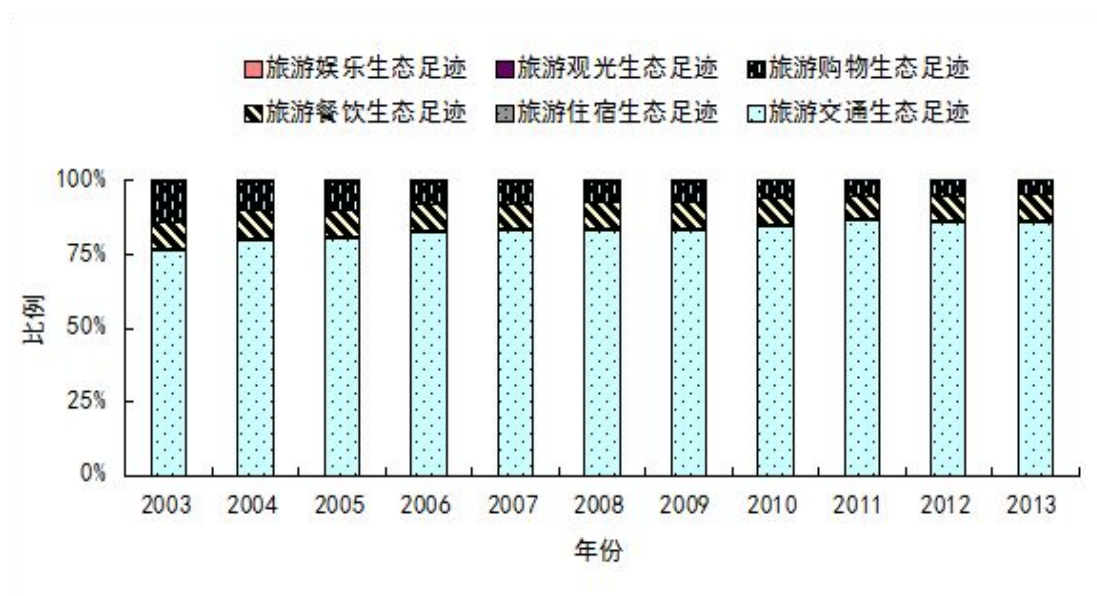


图 3.20 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态足迹中六大子项目比重汇总

根据以上图表分析及相关计算结果, 可得:

(1) 龙门石窟景区旅游生态足迹总量从 2003 年到 2013 年总体呈稳步上升趋势, 年平均增长率 11.19%, 增量明显, 而人均值则呈现平稳下降趋势。究其原因, 主要在于龙门石窟景区近十余年来旅游客流量的迅猛增长, 直接导致了龙门石窟景区内旅游空间密度和游客密度的增加, 同时伴随着人民生活水平的提高和消费水平的提高, 导致旅游者总体生态消费需求也呈现逐年上升趋势, 另一方面景区各种旅游设施和旅游服务的利用率也得到了提高, 从而导致人均旅游生态足迹需求的缓慢减少, 年均下降幅度为 2.36%。对此, 龙门石窟景区

必须坚持合理科学的开发旅游资源,调节客流量,从而实现旅游者在时间和空间上的分流,减缓游客迅猛增长对景区自然生态系统造成的压力,实现景区旅游业的可持续发展。

(2) 通过旅游生态足迹六大子项目分类对比分析发现,旅游交通生态足迹占绝对比重,在 2003 至 2013 年均保持在 70%以上的比例,且有逐年上升的趋势;其次是旅游餐饮生态足迹,始终平稳保持 9%左右的比重;旅游住宿、旅游购物、旅游观光三部分生态足迹所占比例相对较少,不超过 20%,且在 2003 至 2013 年所占比重呈现下降趋势。

由此可得,龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态足迹构成主要来源于旅游交通,景区内外部方便快捷的交通条件既促进了旅游业发展,也为景区带来了高额的旅游生态足迹;而旅游交通生态足迹主要由化石能源地组成,源自于旅游者乘坐交通工具往返于旅游客源地和目的地过程中的能源消耗,产生于景区之外,这表明旅游者消费活动对龙门石窟景区以外的影响要比对景区本身的影响大得多;在化石能源用地上,飞机、自驾车等交通工具的单位距离能源消耗量远远高于火车和长途巴士,对化石能源地的需求量更多,因此,就不同交通工具的单位距离能源消耗量而言,游客出游交通工具的选择也是影响旅游交通生态足迹的重要因素,选择火车或者长途巴士作为旅游出行的交通工具,更有助于减少交通生态足迹,从而实现低碳出行。

在旅游餐饮消费中,从全球部分食物的年平均产量来看,生产 1kg 肉类或鱼所需的生态生产性土地面积是生产 1kg 蔬菜或瓜果所需面积的 600 倍,所以在旅游消费活动中,可鼓励旅游者尽量减少鱼肉类的消费,而选择蔬菜、瓜果类代替,从而减少旅游餐饮食物消费的生态耗用。

在龙门石窟景区旅游生态足迹总量中,旅游住宿所占用消耗的生态足迹比重很小,主要原因在于龙门石窟景区作为世界文化遗产,景区内住宿设施的新建、扩建及建造档次水平等都受到严格控制;而且景区对外交通十分便利,游客平均在景区停留时间为一天,大部分游客选择住宿于洛阳市区,而不会在景区内部宾馆留宿。

龙门石窟景区内旅游观光活动对景区的生态影响也比较小,主要原因在于龙门石窟景区作为遗址遗迹类景区,旅游景点比较集中,可供游客游览观光的区域面积较小,而除游览观光外,其他休闲度假区域的开发尚处于初步阶段,所产生的能源消耗量也比较小,旅游娱乐生态足迹则基本可以忽略不计。随着

龙门石窟景区的进一步开发和休闲度假旅游的发展,景区游览娱乐产生的能源消耗将有所增加,而旅游观光生态足迹的比重也会有所上升。

3.3.2 景区旅游生态承载力动态分析

根据计算公式 2.9,景区的旅游生态承载力主要是由研究区域范围内的具有生态生产能力的生态生产性土地的类型和相应的面积所决定的。本文的研究区域范围为龙门石窟景区,通过实地走访景区并查阅景区规划等相关资料,得知景区总规划面积 1526hm²,其中重点保护区 354 hm²,建设控制地带占地面积 1172 hm²。作为山岳型景区,龙门石窟景区范围内山地面积所占比重最大,约为 84.8%,建设用地面积占 8.4%,水域面积占 6.8%^[62],在景区旅游生态承载力计算分析中,则主要按照林地、建筑用地、水域三种生态生产性土地类型进行划分和相应的计算。

据龙门石窟世界文化遗产园区管委会相关工作人员介绍,因为景区作为世界文化遗产地,属于严格的建设控制地带,在研究区域时段内,景区土地类型及面积基本没有较大的变化,而从全文整体性的研究角度讲,细微的变化并不会对最终结果造成影响。因此,在本文研究中可忽略不计,从而假设景区生态生产性土地类型及面积保持基本不变,而景区 2003-2013 年旅游生态承载力总量保持不变,具体计算如下:(表 3.11)

表 3.11 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态承载力(单位:hm²)

土地类型	面积	均衡因子	产量因子	旅游生态承载力
林地	1294.05	1.1	0.91	1295.34
建筑用地	128.18	2.8	1.66	595.78
水域	103.77	0.2	1.00	20.75
合计	1526.00			1911.87
扣除 12%生物多样性面积				229.42
总计				1682.45

在假定龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态承载力基本保持不变的情况下,可得景区人均旅游生态承载力的变化情况(表 3.12)。

3 龙门石窟景区旅游生态足迹测算

表 3.12 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态承载力及人均旅游生态承载力（单位： hm^2 ）

年份	旅游生态承载力	人均旅游生态承载力
2003	1682.45	0.0022067
2004	1682.45	0.0015200
2005	1682.45	0.0013587
2006	1682.45	0.0011267
2007	1682.45	0.0010778
2008	1682.45	0.0010488
2009	1682.45	0.0009955
2010	1682.45	0.0009199
2011	1682.45	0.0007947
2012	1682.45	0.0006971
2013	1682.45	0.0005842

由表可得龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态承载力时间序列变化曲线（图 3.21）。

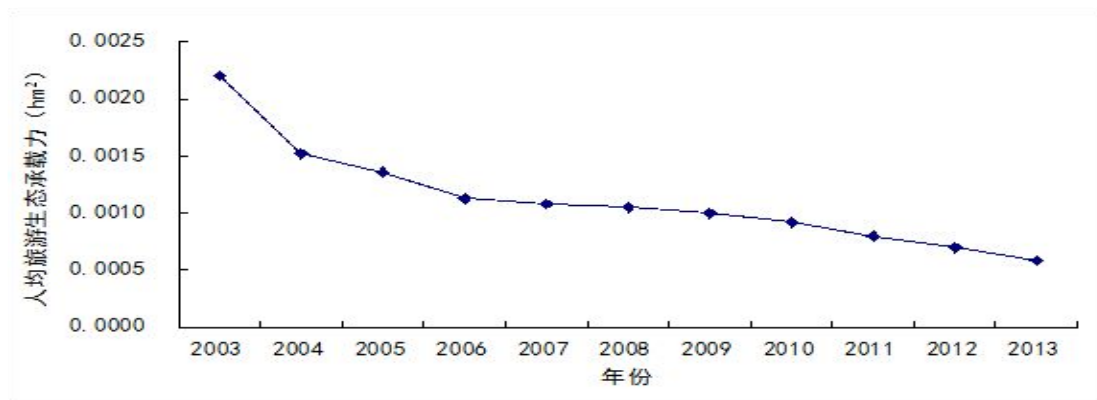


图 3.21 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态承载力

由图表可得：龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态承载力总量基本保持不变，而从景区旅游生态承载力的构成来看，林地这种生态生产性土地在龙门石窟景区中占相当大的比重，成为了景区旅游生态承载力的重要组成部分；在六种生态生产性土地中，林地的均衡因子和产量因子均处于较低水平，表明林地的生态生产力产出较小，而生态生产力供给量较大的建筑用地和耕地在龙门石

窟景区土地类型中所占比例较小,甚至为 0,导致龙门石窟景区所能提供的总体生态生产面积较少,相较于其他旅游景区(衡山 26233.66hm²、武夷山 61284.61hm²、青海湖 16514.48hm²等),景区总体生态承载力处于较低水平。

而随着旅游人次的不断增长,在旅游生态承载力总量保持基本不变的情况下,龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态承载力呈现下降趋势,年平均下降幅度达 12.52%,其中 2003-2004 年下降幅度最大,达 31.12%,主要原因在于 2003 年遭遇“非典”影响,导致游客数量下降,而 2004 年景区旅游人次得到迅猛增长,在旅游生态承载力总量保持不变的情况下,人均旅游生态承载力则迅速下降,这也充分体现了旅游行业发展的敏感性,容易受到外界各种因素的影响。人均旅游生态承载力则是反映生态环境系统对旅游生态消费压力负荷能力的最直观的衡量指标,承载力的逐年下降意味着龙门石窟景区自然生态系统所能提供给旅游者的生态资源和服务逐年减少,必将与消费者日益增长的需求产生矛盾,从而影响景区的协调可持续发展。

3.3.3 景区旅游生态赤字动态分析

在 2003-2013 年龙门石窟景区旅游生态足迹和旅游生态承载力计算的基础上,将两者进行对比分析,可得景区的旅游生态赤字情况(表 3.13)。

表 3.13 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态赤字汇总(单位:hm²)

年份	旅游生态足迹	旅游生态承载力	旅游生态赤字
2003	13494.76	1682.45	11812.31
2004	18727.24	1682.45	17044.79
2005	20712.09	1682.45	19029.64
2006	24341.03	1682.45	22658.58
2007	25229.32	1682.45	23546.87
2008	25912.87	1682.45	24230.42
2009	27255.18	1682.45	25572.73
2010	29114.94	1682.45	27432.49
2011	32938.07	1682.45	31255.62
2012	34450.54	1682.45	32768.09
2013	40162.45	1682.45	38480.00

3 龙门石窟景区旅游生态足迹测算

将人均旅游生态足迹和人均旅游生态承载力进行比较，即可得到龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态赤字情况（表 3.14）。

表 3.14 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态赤字汇总（单位： hm^2 ）

年份	人均旅游生态足迹	人均旅游生态承载力	人均旅游生态赤字
2003	0.0177001	0.0022067	0.0154934
2004	0.0169194	0.0015200	0.0153994
2005	0.0167266	0.0013587	0.0153679
2006	0.0163003	0.0011267	0.0151736
2007	0.0161615	0.0010778	0.0150837
2008	0.0161541	0.0010488	0.0151053
2009	0.0161274	0.0009955	0.0151319
2010	0.0159182	0.0009199	0.0149983
2011	0.0155572	0.0007947	0.0147625
2012	0.0142729	0.0006971	0.0135758
2013	0.0139453	0.0005842	0.0133611

由表可得龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态赤字（图 3.22）和人均旅游生态赤字时间序列变化曲线（图 3.23）。

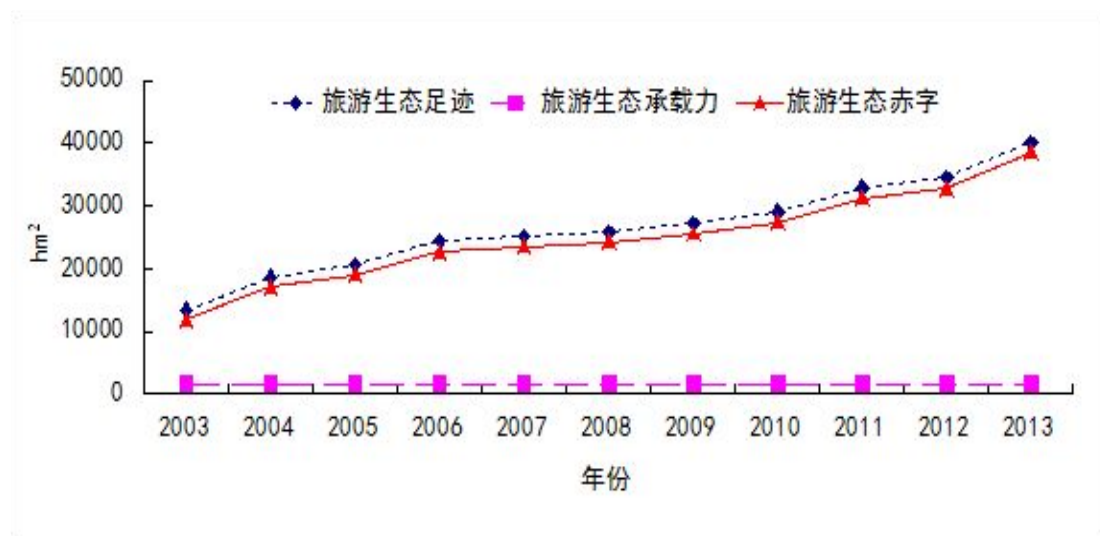


图 3.22 龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态赤字

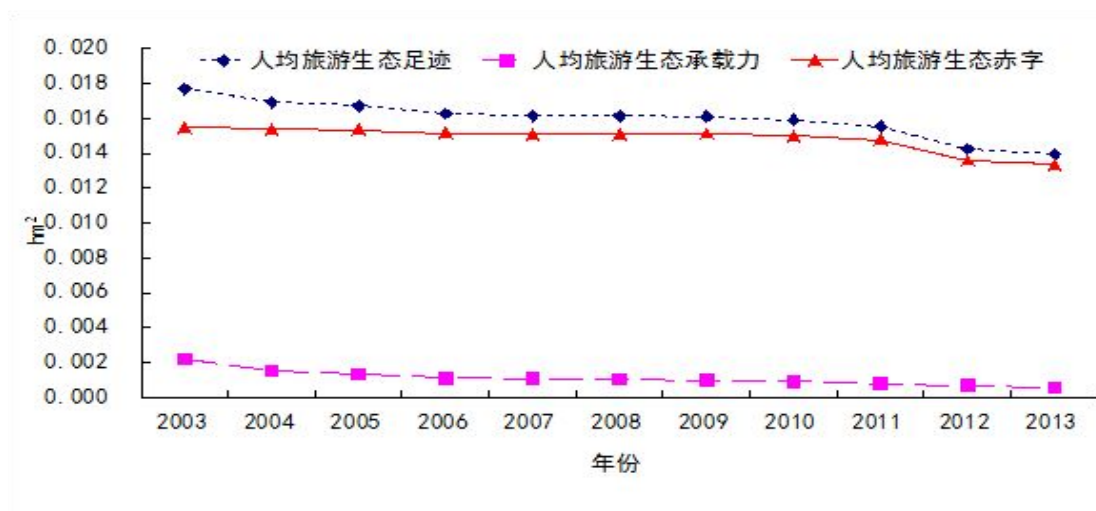


图 3.23 龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态赤字

旅游生态赤字作为测度生态安全的重要指标，能够最直观的衡量旅游活动开展和旅游者生态消费对景区生态环境系统的压力程度。由图表可以看出，龙门石窟景区旅游生态赤字呈现逐年上升的趋势，因假定景区旅游生态承载力保持不变，景区旅游生态赤字的上升幅度与旅游生态足迹基本保持一致。旅游生态赤字的逐年上升反映了随着龙门石窟景区旅游的发展和旅游人次的增长，景区生态环境和自然资源的利用力度和消耗强度在逐年增大，旅游者的生态消费需求已经超出了景区生态自然系统的承载力范围，旅游生态足迹和旅游生态承载力之间的矛盾加剧，自然生态环境供给和需求之间的差距逐年增加，景区生态系统修复功能退化，旅游业的发展处于不可持续状态。

人均旅游生态赤字则呈现平稳中下滑的趋势，由 2003 年的 0.0154934hm^2 下降至 2013 年的 0.0133611hm^2 ，年均减少率为 1.47%，这一缓慢下降趋势表明龙门石窟景区相关保护生态环境的对策措施是卓有成效的。面对难以遏制的生态总赤字不断增大的趋势，采取积极的应对措施，加以调整和控制，坚持合理开发、高效利用现有的生态资源，提高能源利用效率，维持和保证整体旅游业的健康、协调、可持续发展；而在生态承载力方面，应积极采取切实有效的措施巩固现有成效，保持和扩大现有的生态生产性土地的生态优势，切实保持并提高龙门石窟景区的旅游生态承载力。

4 龙门石窟景区生态安全动态评价

4.1 基于生态足迹模型的生态安全综合评价方法

4.1.1 评价指标的选取

生态安全评价标准对衡量景区生态环境系统安全性具有重要意义，而其评价指标体系的构建必须遵循科学性、目的性、可操作性等原则。首先，评价指标的选取必须依托于科学的理论基础，指标客观合理，避免主观意愿的影响；其次，选取的指标都必须建立在科学有效评估景区生态安全状态这一共同目标基础之上；最后，选取评估指标的过程中必须考虑指标数据的可获得性和评估方法的可操作性，同时保证数据的正确严谨和方法的科学有效，从而确保最终评估结果的可靠性。

在龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态足迹和旅游生态承载力计算与分析的基础上，本文选取生态压力指数（ETI）、生态占用指数（EOI）、生态经济协调指数（EECI）等指标对龙门石窟景区生态安全状况进行评价，从而构建景区生态安全综合评价指标体系。

（1）生态压力指数

生态压力是指一定区域范围内单位面积的生态生产性土地所能承受的人均生态足迹压力，一般用区域范围内可更新资源的人均生态足迹和人均生态承载力两者之间的比值进行衡量，即生态压力指数（ETI），从而反映该区域生态环境系统承受压力的能力。其计算公式为：

$$ETI = ef / ec \quad (4.1)$$

式中： ef ——区域人均生态足迹；

ec ——区域人均生态承载力。

（2）生态占用指数

生态占用指数（EOI）即一个国家或地区人均生态足迹与全球人均量之间的比值，从而反映了与世界平均标准相比，该区域社会经济发展程度和社会人口平均消费水平的差距，其计算公式为：

$$EOI = ef / ef_w \quad (4.2)$$

式中： ef ——区域人均生态足迹；

ef_w ——全球人均生态足迹。

在具体计算过程中,为保证数据的更新性和科学性,全球人均生态足迹采用 2014 年世界自然基金会(WWF)发布的最新数据^[63]。

(3) 生态经济协调指数

生态经济协调指数(EECI)则是上述两个指数,即生态占用指数和生态压力指数之间的比值,从而衡量研究地区生态环境系统与社会生活、经济发展之间的协调程度,其计算公式为:

$$EECI = EOI / ETI \quad (4.3)$$

式中: EOI ——生态占用指数;

ETI ——生态压力指数。

根据 2004 年世界自然基金会(WWF)公布的数据,详细计算并分析了全球共 147 个国家和地区 2001 年的生态足迹和生态承载力状况^[64],构建 ETI 、 EOI 、 $EECI$ 三个单项指标的数值变化范围及相应的等级划分标准(表 4.1)^[65]。

表 4.1 ETI 、 EOI 、 $EECI$ 指数变化范围及等级划分标准

等级	EFI 指数	表征状态	EQI 指数	表征状态	EECI 指数	表征状态
1	<0.50	很安全	>4.00	极富裕	>8.00	协调度极好
2	0.51~0.80	较安全	3.01~4.00	很富裕	4.01~8.00	协调度很好
3	0.81~1.00	稍不安全	2.01~3.00	较富裕	3.01~4.00	协调度较好
4	1.01~1.50	较不安全	1.01~2.00	稍富裕	2.01~3.00	协调度稍好
5	1.51~2.00	很不安全	0.51~1.00	较贫穷	1.01~2.00	协调度较差
6	>2.00	极不安全	<0.50	很贫穷	<1.00	协调度很差

4.1.2 生态安全评价综合指数的构建

本研究选取的生态压力指数、生态占用指数、生态经济协调指数三项变量指标都在不同程度上反映了研究区域的生态安全状况,但三个单项指标两两之间都可能存在一定的相关关系,从而导致统计数据中反映的相关信息重叠,并增加问题分析的复杂性。因此,本文将采用主成分分析方法,利用降维理论,将多指标转换成为少量的综合指标,构建旅游地生态安全评价的综合指标体系,更加全面系统对旅游地生态安全问题进行深入分析。这种分析方法有效剔除了指标权重确定过程中的主观因素影响,确保最终综合评价指数的构建和评价结

果分析更加的科学客观。主要操作步骤如下：

第一步，选取指标。本研究选取的生态压力指数、生态占用指数、生态经济协调指数三个单项指标分别从生态系统承压能力、区域社会经济发展程度及其与生态环境系统之间的协调性等方面描述区域生态环境安全状况，是测度衡量景区生态环境系统安全性的重要衡量标准。

第二步，原始数据的标准化处理。为使各指标数据之间具有可比性，必须对数据进行标准化处理，从而消除变量之间的量纲关系，进行科学的对比分析。

第三步，主成分指标的选取及综合评价指标的构建。将数据处理之后的各主成分指标乘以各自的权重贡献率，并进行加权求和，即可得到综合评价指标。

4.2 龙门石窟景区生态安全动态评价计算

4.2.1 景区生态安全动态评价单项指数计算

4.2.1.1 生态压力指数

根据上文计算结果及计算公式，可得龙门石窟景区 2003-2013 年生态压力指数变化趋势（图 4.1）。由图可以看出，景区在 2003 至 2013 年时间段内人均生态足迹和人均生态承载力的比值始终大于 1，且生态压力指数呈现逐年上升的趋势，由 2003 年的 8.02 增长到 2013 年的 23.87，年均增长幅度达 11.51%。作为衡量旅游者消费活动对生态环境系统影响程度的重要指标，龙门石窟景区的生态压力指数在 2003-2013 年间均处于第六等级——生态极不安全状态，且呈现越来越大的趋势，这表明景区范围内生态环境系统的完整持续性已遭到破坏，难以承载旅游者日益增长的生态消费需求，且生态环境压力越来越大。

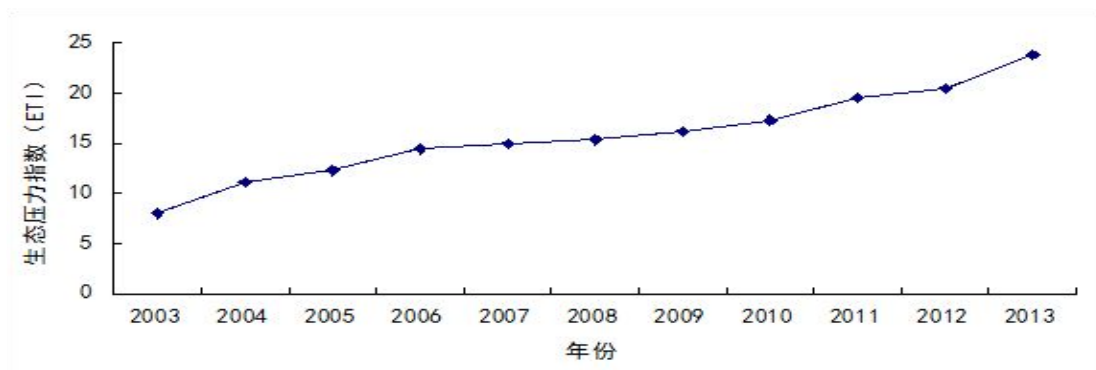


图 4.1 龙门石窟景区 2003-2013 年生态压力指数动态变化

4.2.1.2 生态占用指数

根据上文数据和计算公式,可得龙门石窟景区 2003-2013 年生态占用指数变化曲线(图 4.2)。由图可得,景区 2003-2013 年间生态占用指数缓慢下降,整体处于很低水平,由 2003 年的 0.0066 下降至 2013 年的 0.0052,相对下降了 0.0014 个百分点,年平均下降幅度达 2.37%,整体下降幅度不大。总体上看,龙门石窟景区生态占用指数处于六级——很贫穷的状态,较之世界平均水平而言,景区所在区域的经济的发展水平处于落后状态。

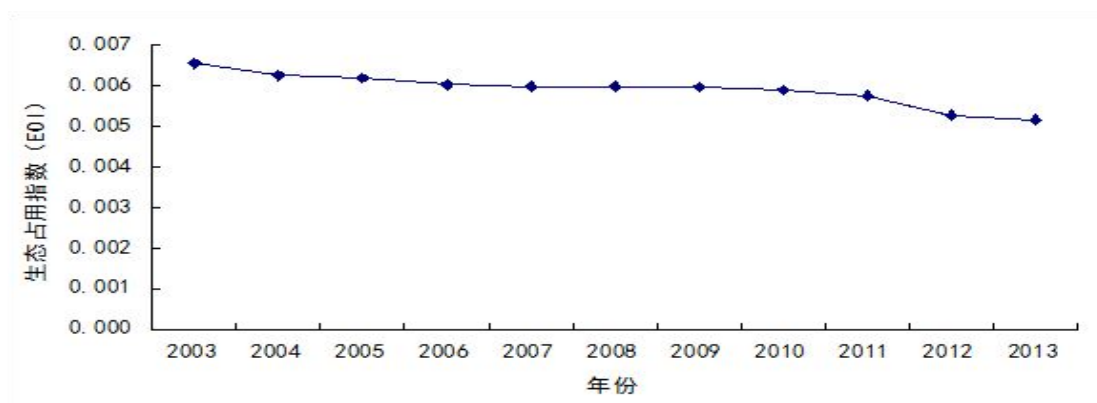


图 4.2 龙门石窟景区 2003-2013 年生态占用指数动态变化

4.2.1.3 生态经济协调指数

根据前文数据及计算方法,可得龙门石窟景区 2003-2013 年生态经济协调指数变化曲线(图 4.3)。

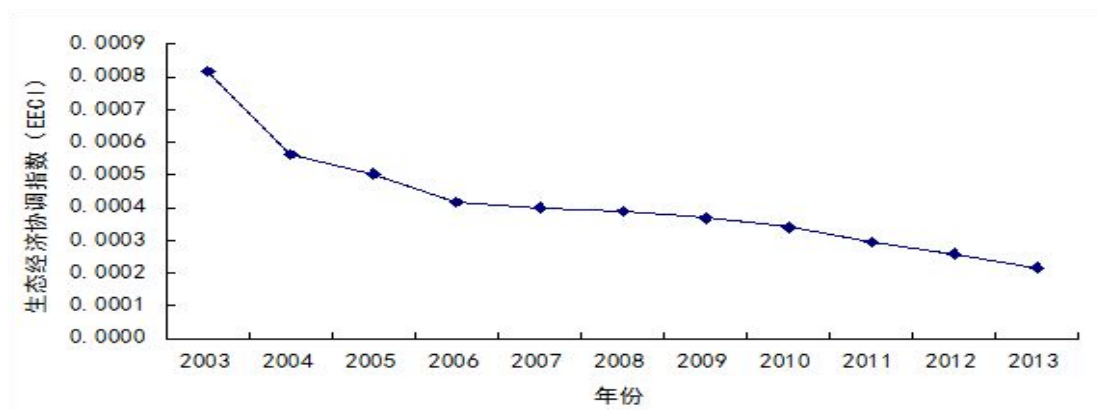


图 4.3 龙门石窟景区 2003-2013 年生态经济协调指数动态变化

由图可得, 景区在 2003-2013 年间生态经济协调指数整体呈下降趋势, 由 2003 年的 0.00082 下降至 2013 年的 0.00022, 下降了 0.00060 个百分点, 年平均下降幅度为 12.33%。整体而言, 整个景区的生态经济协调指数处于第六等级——协调度很差, 这表明龙门石窟景区 2003-2013 年旅游业的飞速发展导致了旅游者生态消费的迅猛增长, 产生了资源环境的巨大消耗, 加大了对自然生态环境的负债压力, 与生态环境保护之间极不协调, 经济、社会与环境之间的矛盾呈现越来越突出之势。

4.2.2 景区生态安全动态评价综合指数计算

在生态压力指数、生态占用指数、生态经济协调指数计算的基础上, 采用主成分分析法, 运用 spss17.0 软件对生态安全综合指数进行计算分析。首先, 对龙门石窟景区 2003-2013 年 ETI、EOI、EECI 三个单项指标十一年的原始计算数据进行标准化处理 (表 4.2)。

表 4.2 标准化处理后的单项指标汇总

年份	标准化的生态压力指数	标准化的生态占用指数	标准化的生态经济协调指数
2003	-1.73528	1.58179	2.40865
2004	-1.04112	0.86365	0.88552
2005	-0.77785	0.68635	0.52735
2006	-0.29652	0.29426	0.01285
2007	-0.17876	0.16662	-0.09556
2008	-0.08779	0.15992	-0.16025
2009	0.09028	0.13533	-0.27824
2010	0.33668	-0.05711	-0.44595
2011	0.84376	-0.38911	-0.72386
2012	1.04430	-1.57012	-0.94008
2013	1.80229	-1.87158	-1.19044

之后, 利用方差最大法对标准后的数据进行正交旋转处理, 即可得到每个主成分的方差, 从而反映对应的主成分对原有信息的描述程度 (表 4.3)。这种影响力度一般以 1 为标准, 在实际操作中, 我们一般仅提取特征值大于 1 的主成分, 同时遵循提取特征值的累计贡献率必须大于 85%的原则。

表 4.3 方差分解主成分提取分析表

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%
1	2.862	95.407	95.407	2.862	95.407	95.407
2	0.115	3.839	99.245			
3	0.023	0.755	100.000			

在上述计算的基础上，我们可得到一个新的综合指标，包含所选取的生态压力指数、生态占用指数和生态经济协调指数三个指标的所有信息，进而得到主成分矩阵，而各影响因子的得分即为主成分的分值（表 4.4）。由表可知，三个单项指标均能在不同程度的反映景区的生态环境系统安全状况，既包含景区生态环境系统所能负荷旅游者消耗的程度，又能体现该区域经济水平、人均消费和可持续发展程度，以及与世界平均水平的差异。

表 4.4 主成分矩阵

	成分
	1
生态压力指数	-0.992
生态占用指数	0.974
生态经济协调指数	0.964

综上所述，可得到景区生态安全综合评价指标表达式： $F=0.964*EECI$ （生态经济协调指数）+ $0.974*EOI$ （生态占用指数）— $0.992*ETI$ （生态压力指数）。

4.3 龙门石窟景区生态安全动态评价结果分析

在生态压力指数、生态占用指数、生态经济协调指数三个单项指标的变化范围及等级划分标准（表 4.1）基础上，结合上文分析获得的生态安全综合评价指标表达式，本文拟定了六个等级标准，并根据景区生态安全综合评价得分的变化范围，确定等级划分标准及相应的安全状态，从而综合评判景区生态安全状况（表 4.5）。生态安全综合评价指数得分越低，生态安全状况却差，不安全度越高。

4 龙门石窟景区生态安全动态评价

表 4.5 景区生态安全综合评价指数等级划分标准及安全状态

等级	生态安全综合评价指标	生态安全状态
1	>11.1120	良好
2	$5.9844\sim11.1120$	较好
3	$3.8480\sim5.9844$	一般
4	$1.4140\sim3.8480$	稍差
5	$-0.5330\sim1.4140$	很差
6	<-0.5330	恶劣

根据上文对龙门石窟景区 2003-2013 年旅游生态足迹和旅游生态承载力人均值的时间序列计算,可得到景区各个年份的三个单项评价指标数值及相应的等级(表 4.6)。根据计算结果,并结合所构建的景区生态安全综合评价指标表达式及相应的等级划分标准,即可得到 2003-2013 年龙门石窟景区生态安全综合评价得分及生态安全等级(表 4.7)。

表 4.6 龙门石窟景区 2003-2013 年生态安全评价单项指标值及评定等级

年份	生态压力指数 (ETI)			生态占用指数 (EOI)			生态经济协调指数 (EECI)		
	指标值	等级	表征状态	指标值	等级	表征状态	指标值	等级	表征状态
2003	8.0210722	6	极不安全	0.0065556	6	很贫穷	0.0008173	6	协调度很差
2004	11.1311842	6	极不安全	0.0062664	6	很贫穷	0.0005630	6	协调度很差
2005	12.3107382	6	极不安全	0.0061950	6	很贫穷	0.0005032	6	协调度很差
2006	14.4672939	6	极不安全	0.0060371	6	很贫穷	0.0004173	6	协调度很差
2007	14.9948970	6	极不安全	0.0058957	6	很贫穷	0.0003992	6	协调度很差
2008	15.4024600	6	极不安全	0.0059830	6	很贫穷	0.0003884	6	协调度很差
2009	16.2003014	6	极不安全	0.0059731	6	很贫穷	0.0003687	6	协调度很差
2010	17.3042722	6	极不安全	0.0058956	6	很贫穷	0.0003407	6	协调度很差
2011	19.5761923	6	极不安全	0.0057619	6	很贫穷	0.0002943	6	协调度很差
2012	20.4746808	6	极不安全	0.0052863	6	很贫穷	0.0002582	6	协调度很差
2013	23.8707634	6	极不安全	0.0051649	6	很贫穷	0.0002164	6	协调度很差

4 龙门石窟景区生态安全动态评价

表 4.7 龙门石窟景区 2003-2013 年生态安全综合评价得分及生态安全等级

年份	生态安全综合评价得分	等级	表征状态
2003	-7.949730591	6	生态安全状态恶劣
2004	-11.03548852	6	生态安全状态恶劣
2005	-12.20573323	6	生态安全状态恶劣
2006	-14.34527306	6	生态安全状态恶劣
2007	-14.86872291	6	生态安全状态恶劣
2008	-15.27303837	6	生态安全状态恶劣
2009	-16.06452570	6	生态安全状态恶劣
2010	-17.15976724	6	生态安全状态恶劣
2011	-19.41368688	6	生态安全状态恶劣
2012	-20.30548567	6	生态安全状态恶劣
2013	-23.67455811	6	生态安全状态恶劣

根据上表即可得到龙门石窟景区 2003-2013 年生态安全综合评价得分的时间序列曲线（图 4.4）。由图表可以看出，龙门石窟景区 2003-2013 年生态安全综合评价值总体处于平稳下降趋势，年平均降幅 11.53%，且都低于-0.5330，处于第六等级——生态极不安全状态。伴随着旅游业的快速发展，旅游活动对资源的需求量不断上升，对生态环境系统的压力越来越大，旅游活动消耗的旅游生态足迹和景区所能提供的旅游生态承载力之间的差距正逐步加深，龙门石窟景区生态不安全的程度也越来越严重。

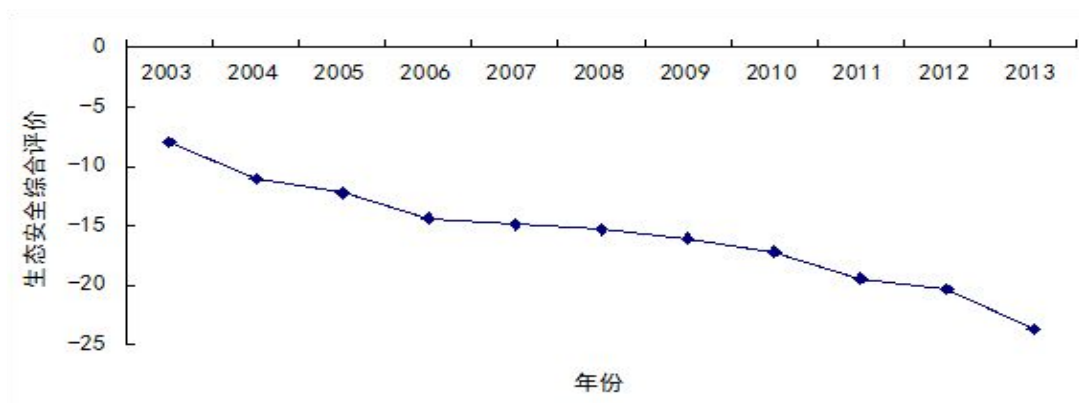


图 4.4 龙门石窟景区 2003-2013 年生态安全综合评价得分

5 龙门石窟景区生态安全预测与预警研究

在 2003-2013 年龙门石窟景区生态安全评价分析的基础上,为衡量景区未来的生态安全状况,本文运用 SPSS17.0 软件构建线性回归预测模型,对龙门石窟景区 2014-2020 年旅游生态足迹和旅游生态承载力的人均值进行预测计算,在此基础上,计算分析景区未来七年的人均旅游生态赤字、生态压力指数(ETI)、生态占用指数(EOI)、生态经济协调指数(EECI)及生态安全综合评价指数,并结合前文构建的生态安全等级划分标准,对龙门石窟景区未来的生态安全状况进行综合预测及动态评价。同时,结合生态安全综合评价构建预警机制,分析景区生态安全预警警情现状及未来发展趋势。

5.1 景区生态安全预测分析

5.1.1 预测模型构建

线性回归分析预测方法即根据自变量和因变量之间的相关关系,建立两变量间的线性回归方程模型,从而进行预测分析。在生态安全评价指标体系中,生态压力指数、生态占用指数、生态经济协调指数以及生态安全综合评价指数都是在人均旅游生态足迹和人均旅游生态承载力的原始数据基础上获取所得,因此,在本文研究过程中,分别构建人均旅游生态足迹预测模型和人均旅游生态承载力预测模型,设定人均旅游生态足迹和人均旅游生态承载力为被解释变量 Y_1 和 Y_2 ,年份基数 X ($X=1, 2, 3, 4, \dots, 18$) 为解释变量,年份基数 1 为 2003 年,年份基数 2 为 2004 年,以此类推,年份基数 18 为 2020 年。

将龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态足迹计算获取的数据输入 SPSS 软件,由结果可得,两变量之间的相关系数(R)为 0.934,判定系数(R Square)则为 0.872,回归方程 F 值为 61.051,显著性为 0.00,由此可见,两变量 X 与 Y_1 之间存在线性关系,且样本回归线拟合度较好,综上所述,可得龙门石窟景区人均旅游生态足迹预测模型回归方程:

$$Y_1 = 0.0178166 - 0.0003061X \quad (4.1)$$

同理,将龙门石窟景区 2003-2013 年人均旅游生态承载力计算数据输入 SPSS 软件,可得两变量之间的相关系数(R)为 0.909,判定系数(R Square)

为 0.826, 回归方程 F 值为 42.869, 显著性为 0.00, 由此可见, 两变量 X 与 Y_2 之间存在线性关系, 且样本回归线拟合度较好, 可得龙门石窟景区人均旅游生态承载力预测模型回归方程:

$$Y_2=0.0018623 - 0.0001236X \quad (4.2)$$

5.1.2 预测实证研究

假定龙门石窟景区未来七年内旅游人次增长率、旅游者消费模式和活动特点仍保持 2003-2013 年间的发展态势, 则可以利用预测回归方程模型 4.1 和 4.2, 运用 Excel 软件对龙门石窟景区 2014-2020 年的旅游生态足迹和旅游生态承载力的人均数据进行分析评估, 即可得到结果 (表 5.1)。

表 5.1 龙门石窟景区 2014-2020 年人均旅游生态足迹及承载力预测 (单位: hm^2)

年份	人均旅游生态足迹	人均旅游生态承载力
2014	0.0141434	0.0005003
2015	0.0138373	0.0004868
2016	0.0135321	0.0003733
2017	0.0132251	0.0003001
2018	0.0129190	0.0002598
2019	0.0126129	0.0001463
2020	0.0123068	0.0000967

由表可知, 龙门石窟景区在未来七年的时间里, 预测人均旅游生态足迹呈现平稳下降趋势; 而作为建设严格控制地带, 假定龙门石窟景区内部各生态生产性土地面积的种类和大小保持不变, 因此景区旅游生态承载力总量保持基本不变, 而旅游人数的日益增长, 导致人均旅游生态承载力数值呈现反向的明显减少趋势。预计到 2020 年, 龙门石窟景区人均旅游生态足迹达 0.0123068, 人均旅游生态承载力则降至 0.0000967, 人均生态赤字则达到 0.0122101。

5.1.3 景区生态安全预测

在旅游生态足迹和旅游生态承载力人均数值预测结果的基础上, 根据上文公式, 即可预测得到龙门石窟景区 2014-2010 年生态压力指数、生态占用指数以及生态经济协调指数, 从而得到各预测指数对应的生态安全状态 (表 5.2)。

表 5.2 龙门石窟景区 2014-2020 年生态安全评价单项指标值及评定等级预测

年份	生态压力指数 (ETI)			生态占用指数 (EOI)			生态经济协调指数 (EECI)		
	指标值	等 级	表征 状态	指标值	等 级	表征 状态	指标值	等 级	表征 状态
2014	28.2698381	6	极不安全	0.0052383	6	很贫穷	0.0001853	6	协调度很差
2015	28.4250205	6	极不安全	0.0051249	6	很贫穷	0.0001803	6	协调度很差
2016	36.2499330	6	极不安全	0.0050119	6	很贫穷	0.0001383	6	协调度很差
2017	44.0689770	6	极不安全	0.0048982	6	很贫穷	0.0001112	6	协调度很差
2018	49.8995751	6	极不安全	0.0047848	6	很贫穷	0.0000959	6	协调度很差
2019	86.2125769	6	极不安全	0.0046715	6	很贫穷	0.0000542	6	协调度很差
2020	127.267839	6	极不安全	0.0045581	6	很贫穷	0.0000358	6	协调度很差

由表可以看出, 预测未来几年龙门石窟景区生态压力指数在原有基础上大幅增加, 将由 2014 年的 28.27 增长至 2020 年的 127.28, 年均增幅 28.66%, 远远超过现有的增长速度, 龙门石窟景区生态环境系统面临的压力越来越大; 生态占用指数缓慢下降, 预计年均降幅 3.3%, 下降速度基本平稳; 生态经济协调指数预计下降速度较之现状有所增加, 年均降幅达 23.97%。

利用 ETI、EOI、EECI 三项单项评价指标预测计算数据结果, 并根据前文构建的景区生态安全综合评价指标表达式, 即可预测分析 2014-2020 年龙门石窟景区生态安全状况, 确定景区未来生态安全等级水平 (表 5.3)。

表 5.3 龙门石窟景区 2014-2020 年生态安全综合评价得分及生态安全等级预测

年份	生态安全综合评价得分	等级	表征状态
2014	-28.03839866	6	生态安全状态恶劣
2015	-28.19245487	6	生态安全状态恶劣
2016	-35.95491862	6	生态安全状态恶劣
2017	-43.71154714	6	生态安全状态恶劣
2018	-49.49562566	6	生态安全状态恶劣
2019	-85.51827400	6	生态安全状态恶劣
2020	-126.24522220	6	生态安全状态恶劣

由表可以看出, 预计 2014-2020 年, 龙门石窟景区生态安全综合评价得分明显下降, 年均降幅 28.49%, 生态安全位于第六等级——状态恶劣阶段, 且生态环境系统恶化速度加快, 生态安全形势严峻。

5.2 景区生态安全预警分析

5.2.1 预警等级评定

景区生态环境系统的利用和资源的开发都必须遵循一定的临界原则, 保持在一定限度范围内, 否则会对景区生态系统和社会经济活动以及景区旅游业的可持续发展造成严重的负面影响。本文在龙门石窟景区生态安全现状评价及未来预测分析的基础上, 参考前文构建的景区生态安全综合评价指数等级划分标准(表 4.5), 将景区生态安全预警等级与生态安全综合评价等级联系起来, 将景区预警分为 1-6 六个等级, 包括: 安全——生态安全状态良好、较安全——生态安全状态较好、预警——生态安全状态一般、轻警——生态安全状态稍差、中警——生态安全状态很差、重警——生态安全状态恶劣, 并以生态安全综合评价指数的数值划分各个预警等级(表 5.4)。

表 5.4 景区生态安全预警等级划分

预警等级	警情状态	生态安全综合评价指标	生态安全状态
1	安全	>11.1120	良好
2	较安全	$5.9844 \sim 11.1120$	较好
3	预警	$3.8480 \sim 5.9844$	一般
4	轻警	$1.4140 \sim 3.8480$	稍差
5	中警	$-0.5330 \sim 1.4140$	很差
6	重警	<-0.5330	恶劣

5.2.2 景区生态安全警情现状分析

根据前文构建的景区生态安全预警等级划分标准, 结合龙门石窟景区 2003-2013 年景区生态安全综合评价指数计算结果, 即可得到景区 2003-2013 年间生态安全警情状态(表 5.5)。由表可得, 龙门石窟景区在 2003-2013 年, 生态环境系统始终处于极不安全状态, 预警级别为 6 级——重警, 生态系统正

遭受日益严重的破坏,系统自我修复和重建功能的发挥正面临越来越大的威胁,人类旅游消费活动与自然生态之间的冲突和矛盾日益加深,景区各种旅游服务设施正遭到破坏,整个景区系统的正常运转正受到严重影响。

表 5.5 龙门石窟景区 2003-2013 年生态安全警情状态

年份	生态安全综合评价得分	预警等级	警情状态
2003	-7.949730591	6	重警
2004	-11.03548852	6	重警
2005	-12.20573323	6	重警
2006	-14.34527306	6	重警
2007	-14.86872291	6	重警
2008	-15.27303837	6	重警
2009	-16.06452570	6	重警
2010	-17.15976724	6	重警
2011	-19.41368688	6	重警
2012	-20.30548567	6	重警
2013	-23.67455811	6	重警

5.2.3 景区生态安全警情趋势分析

在前文对龙门石窟景区 2014-2020 年生态安全综合评价指数进行预测的前提下,即可得到景区未来七年的生态安全警情状态(表 5.6)。

表 5.6 龙门石窟景区 2014-2020 年生态安全警情状态预测

年份	生态安全综合评价指数预测值	预警等级	警情状态
2014	-28.03839866	6	重警
2015	-28.19245487	6	重警
2016	-35.95491862	6	重警
2017	-43.71154714	6	重警
2018	-49.49562566	6	重警
2019	-85.51827400	6	重警
2020	-126.24522220	6	重警

由表可知,在维持现有旅游发展状态下,预计到2014-2020年,龙门石窟景区的生态安全状态进一步恶化,警情状态更加严重,生态环境将遭受更严重的破坏,生态环境系统结构将发生一定的变化,如不采取有效措施维护景区生态系统,其生态功能将会呈现一定的退化,从而产生严重的生态问题,并威胁到景区经济、社会、生态环境这一复合系统的健康、协调、可持续发展。

5.3 景区生态安全评价及预警结果对比分析

作为景区生态环境系统研究的重要内容,生态安全的评价分析和预警研究二者相互联系,都围绕着景区“自然—经济—社会”这一复合生态系统的变化进行研究。生态安全评价即构建科学合理的评价指标体系,对景区生态环境系统整体及各个部分的生态安全状况进行评估,并根据确定的生态安全等级范围值,将景区生态系统质量现状进行分级,通过构建生态安全综合评价指数这一指标对景区生态环境系统的安全现状进行综合评估,从而分析衡量景区生态安全状态;生态安全预警则在生态安全评价的基础上,进行深化和发展,通过建立合理的预警标准,研究生态环境系统状态的变化过程和发展规律,从而为人类活动导致的生态环境系统状态或者质量的逆向变化进行预测、警告,并提出相应的对策。

对比而言,二者研究各有其侧重之处,生态安全评价研究重点在于对景区生态环境系统的现状及人类旅游活动对其影响程度进行等级划分,其评价等级指数相对静态;而生态安全预警则着重研究旅游活动消费引发的景区生态安全状况的未来变化趋势,并对变化结果进行预测、分析和警示,侧重于时间序列的动态变化分析,包括与生态环境现状相比、景区生态安全状况的发展方向、变化趋势和幅度,以及产生质变的警戒点,从而提出相应的警报,其分析评价结果呈现动态性和多维性。因此,将生态安全评价和生态安全预警有机结合,是研究景区生态安全的有效方法。

根据本文研究结果,依据构建的生态安全综合评价指数值,将景区生态安全评价结果划分为状态良好、状态较好、状态一般、状态稍差、状态很差、状态恶劣六个等级的生态安全分区。在生态安全评价的基础上,建立了具有一定对应关系的景区生态安全预警评价标准:安全等级对应生态状态良好分区,赋予特征值1;较安全等级对应生态状态较好分区,赋予特征值2;预警等级对应

生态状态一般分区，赋予特征值 3；轻警等级对应生态状态稍差分区，赋予特征值 4；中警等级对应生态状态很差分区，赋予特征值 5；重警等级对应生态状态恶劣分区，赋予特征值 6。

通过对龙门石窟景区旅游生态足迹和旅游生态承载力的测算，可得景区 2003-2013 年生态安全评价结果及预警结果：景区在 2003-2013 年间生态安全综合评价指数均低于 -0.5330，生态安全位于第六等级——生态状况恶劣分区，预警等级也位于第六等级——重警状态；通过预测分析模型，可分析得到未来 2014-2020 年间，龙门石窟景区生态安全状况将进一步恶化，生态预警等级愈加严重。

6 提高龙门石窟景区生态安全等级的对策研究

6.1 科学规划分区，实施游客分流

为实现龙门石窟景区的生态旅游管理和资源保护，可根据其历史文化遗存的分布、保存现状、完整性程度及周边环境等因素，对这一世界文化遗产地进行分区管理和保护：（1）核心保护区，即历史文化遗产保护的区界，除一些必要的、经严格控制的科学研究观测，严格保护区内的佛龕、造像、石碑、石刻等资源，保留现有空间布局及各种构成要素组合，不得随意破坏和修建，对西山石窟群、东山石窟群、白居易墓园、魏唐碑刻等重点保护建筑可确定其保护级别，并进行标识，实施挂牌保护；（2）建设控制区，即遗产地保护的缓冲区界，可适当安排不宜在核心保护区内进行的建设活动项目，但必须进行严格控制，新建、改建、扩建的建筑物在色彩外观、高度比例、建筑风格上都必须与石窟现有的风貌协调一致；（3）环境协调区，即龙门石窟景区所在的周边山水环境区域，作为景区赖以生存的景观环境基础，周边的水系、村庄和农田也必须加以控制和保护，严格限制大型建筑项目的开发和建设，禁止任何导致工业污染或其他产生恶劣环境影响的建设项目，保护现有山水、植被。景区功能分区和基础设施建设必须科学规划，实现土地资源利用的合理最大化。

此外，旅游交通生态足迹在景区总生态足迹中占有相当大的比重，而交通也是旅游活动中的重要组成部分。因此，开发实施绿色旅游交通，是降低景区旅游生态足迹，维护景区生态安全的重要保证。在龙门石窟景区绿色旅游交通的开发中，不仅要考虑景区交通系统内部结构的优化，具备舒适性、便捷性和高效性，同时要兼顾其自然性、环保性，寻求与外部环境系统的协调共生，从而减少对生态环境的压力负荷。景点的修葺、景区道路以及停车场等设施建设要尽量避免对生态环境的破坏，观景空间、游览步道线路的开发更要注意科学合理、因地制宜，有效利用每一片土地。

游客量的迅猛增长是旅游生态足迹逐年上升的重要原因，同时降低了游客的体验水平，也会对龙门石窟景区旅游资源和生态环境系统产生破坏。因此，景区管理部门必须适当控制景区游览人数，减轻景区生态系统的压力，编制合理科学的旅游发展规划；根据每个观景空间区域的承载量，调控旅游客流，适

度安排旅游项目,及时实施游客引导分流计划,保证人类的旅游活动和旅游消费始终处于景区每个区域生态环境系统的承载力范围之内,将旅游生态消费对龙门石窟景区造成的能源消耗和环境污染控制在最小范围之内,从而实现景区自然环境生态系统与旅游业社会经济协调发展的协调统一。

针对景区淡旺季旅游人数不均的现状,通过淡旺季差额价格策略、建立客流信息系统、完善预订系统、丰富旅游产品、合理规划多条旅游线路等方法,对旅游客流进行时间、空间的分流和疏导,缓解旅游旺季的景区客流压力,保障旅游淡季景区环境容量的合理利用,提高景区游览效率。

6.2 优化能源结构,推行绿色生产

龙门石窟景区作为世界文化遗产,其生态环境系统具有脆弱性,住宿餐饮设施的开发与建设都会对生态环境带来负面影响,而旅游服务过程中废弃物的排放更会造成整体景观质量的下降和生态系统破坏。因此,在景区旅游发展过程中,应继续对景区内部修建工程进行严格限制;在龙门石窟景区能源消费构成中,天然气占能源总消耗的重要比重,必须积极推进使用太阳能等新能源和其他可再生能源,使用高效节能的旅游设备,坚持能源开发和节约双管齐下;在旅游服务设施的改造过程中,尽可能节约能源材料消耗,与原生环境、地质地貌特征保持一致,尽量减少现代化建筑造成的光污染、大气污染等;积极推行光生电系统、太阳能热水系统、生物燃料等绿色工艺,鼓励旅游者积极消费环保服务。

鼓励景区住宿、餐饮企业降低能耗,打造“绿色餐饮”、“绿色酒店”,积极推行无废或者少废工艺和清洁生产,使用无污染或再生资源,减少在服务旅游者过程中产生的有机废物量;在餐饮、酒店服务设施的设计中采用生态装饰材料,使用能源节约技术和循环利用技术,服务用具尽量采用纯天然制品,真正保证旅游者的绿色消费;餐饮上坚持食品天然无污染,可直接与景区周边农家菜园联合,共建绿色餐饮基地,推广生态有机食材;在服务过程中,严禁使用泡沫饭盒、塑料袋等不可降解物品,改用纸袋等易处理材料进行包装,推行旅游垃圾分类收集制度,积极实施旅游废弃物的回收、利用,实现旅游废弃物的再循环。

旅游购物商品的开发应鼓励就地取材,融入石窟艺术风格,体现龙门石窟

景区地方特色，突出旅游商品的原生性，打造绿色旅游商品；限制商品的过度包装，降低不必要的资源耗用，制作过程尽量采用无公害、无污染的环保生态工艺，可适度开发体验型旅游商品，既保证旅游商品的吸引力和审美价值，又满足了生态和环保要求，从而减少旅游购物活动能耗。

6.3 管理游客行为，培育生态居民

作为世界文化遗产和国家级文物保护单位，龙门石窟景区自身也会受到自然环境方面的风化侵蚀作用，景区生态环境系统十分脆弱，必须积极实施科学有效的措施保护资源和生态环境。除政府和景区管理部门加大人力物力上的投入外，加强对旅游者的管理、宣传和教育，增强游客的生态旅游意识也是十分重要的。

作为一种绿色健康的特殊旅游形式，生态旅游的施行也对旅游活动主体提出了一定的要求，包括旅游消费者必须具有较高的素质，对生态环境保护有一定的认识和理解，积极参与保护环境生态的有益活动，尽量减少自身旅游活动对目的地自然生态系统造成的负面影响等。而针对我国公民环保意识相对淡薄的现状，必须通过一系列的教育和引导实现游客行为的生态化管理。首先，设计科学合理的旅游步道，控制游客对景区环境的可进入性，从而有效约束旅游者的不文明行为；其次，通过门票、导游手册、导游图等资料附印龙门石窟景区生态保护的重要意义、景区的生态脆弱性以及基本的生态环境保护知识，即对旅游者进行生态安全和生态环境保护宣传教育；最后，可通过组织生态环保活动，如在旅游者购买门票的时候免费赠送垃圾袋，游览结束后以垃圾换取纪念品，号召每位游客真正参与到生态环境保护的努力中，培养游客的生态旅游意识，对龙门石窟景区乃至整个国家旅游业的绿色、协调、可持续发展都具有长远的意义。

社区居民参与生态旅游对景区生态保护和可持续健康发展具有重要影响。在注重景区生态旅游综合效益的前提下，必须兼顾当地社区居民效益，积极鼓励居民参与，从而实现全方位保护的目，不仅能让当地居民从旅游业发展中真正受益，而且增强了景区的地方特色文化氛围。首先，可加强当地居民的宣传，利用广播、电视等媒介，宣传介绍加强龙门石窟景区生态安全保护的重要性及力所能及的保护措施，让当地居民真正参与到龙门石窟景区生态保护和管

理中, 不仅解决了其就业问题, 带动了周边经济发展, 而且提高了居民参与的积极性。此外, 当地村民可以种植无公害绿色蔬果, 经营农家乐, 满足旅游者品尝特色餐饮的需要, 还可以加工制成景区特色旅游商品, 不仅增加了经济收益, 带动了龙门镇及周边地区发展, 还满足了旅游者享受田园生活的消费需求, 同时, 促进了绿色餐饮的发展, 有利于减少景区旅游生态足迹, 促进龙门石窟景区可持续协调发展。

6.4 理顺管理体制, 加强从业人员管理

龙门石窟景区现行管理机构为龙门石窟世界文化遗产园区管理委员会, 采取属地管理体制。因此, 必须理顺地方政府和管理委员会之间的管理体制, 明确各自的权利和义务, 管理委员会全权负责景区的日常经营活动, 实时监控景区生态环境系统, 对生态环境变化动态及时获取把握并定期公布生态安全现状; 但景区的一切资源开发和规划都必须经由政府相关部门严格论证审查, 总体统筹规划, 各司其职, 建立高效统一的决策管理体制, 并督促实施; 同时, 双方必须确保环境保护和景区管理的资金投入。而国家遗产管理部门可构建一套科学合理全面的评估体系, 对遗产地景区资源的规划开发、生态环境的保护管理以及景区的运营状况进行全方位、系统性、科学性的考核和评估, 从而保证对景区管理委员会和地方政府的调控和监管。

而旅游从业人员, 既是景区生态环境保护的践行者, 又是培育生态旅游者的引导者和教育者, 对其加强环境保护和生态旅游的科普知识教育, 有利于提高管理决策水平, 保证景区生态环保旅游开发战略的实施。对于龙门石窟景区的从业人员, 必须坚持上岗前职业培训教育, 包括行政管理人员、基层服务人员、导游人员等, 提高从业者个人素养、职业技能, 努力把每位从业人员都培养成为生态旅游和环境保护的积极倡导者和宣传者。同时, 景区管理过程中要积极引进现代的旅游人力资源开发和管理模式, 建立科学有效的宏观调控和监督机制, 健全员工自我管理和表彰激励机制, 完善景区从业人员的社会保障机制, 从多个方面完善管理职能, 激发员工工作潜能, 实现景区的现代化管理。

6.5 实施生态补偿, 加强安全监测

从根本意义上讲, 生态补偿就是生态环境系统和生态服务受益者向生态功

能提供者支付一定的费用,用于回报补偿的行为。在生态旅游发展过程中,生态环境系统也是一项重要的投入要素。龙门石窟景区旅游业发展目前处于不可持续状态,人均旅游生态足迹需求是人均生态供给的十倍,旅游者的旅游活动和能源消耗,造成了区域环境资源的巨大压力,必须提供应有的生态补偿而合理的旅游生态补偿机制和补偿标准是促进景区旅游业和区域生态环境系统健康、协调、可持续发展的重要保障。龙门石窟景区作为世界文化遗产和国家重点文物保护单位,必须不断完善政府作为主要责任者的生态补偿机制,以保护龙门石窟景区生态安全作为根本出发点,采取财政转移支付方式,在龙门石窟景区设立生态补偿转移支付专项基金,直接用于景区生态修复;可通过科学调研论证,每年从景区旅游综合收入中抽出一定比例,专款用于龙门石窟景区生态安全的维护保障和总体生态环境系统的保护,可建立生态环境系统保护、修复和建设专项基金;此外,还可通过社会捐赠、社会公众补偿、寻求国际相关组织机构援助等多种途径大规模筹集民间资本,加大生态补偿资金投入。资金必须专款专用,严禁用于其他方面,可充分发挥社会和公众的参与监督作用,保障景区生态补偿专项资金到位。

而通过监测系统,景区管理人员能够准确快捷的获取景区目前所处状态的相关信息,从而制定相应的对策,实现景区可持续发展。龙门石窟景区要建立全方位的生态环境安全监测体系,包括石窟风化监测设施、水域污染监测设施、荒漠化监测设施、森林火灾监测设施、旅游者流量监测设施,全方位快速获取景区生态系统状况的动态信息,并建立生态安全预警系统,以便及时发现景区生态问题,并对旅游活动消费对生态环境影响进行预测评估分析,衡量景区生态环境质量现状及未来发展趋势,采取具有针对性、时效性、科学性的预警应对策略。

7 结论与展望

7.1 主要研究结论

本文通过对龙门石窟景区 2003—2013 年旅游生态足迹和旅游生态承载力的动态计算, 分析了这十一年间景区的旅游生态赤字情况; 随后根据汇总所得的人均旅游生态足迹和人均旅游生态承载力, 对景区的生态安全状况进行动态的综合评价; 最后, 通过建立预测模型, 对龙门石窟景区 2014—2020 年的生态安全状况进行预测及预警研究。文章主要得出以下结论:

第一, 从旅游生态足迹和旅游生态承载力的计算来看, 龙门石窟景区的旅游生态足迹总体呈现稳步上升趋势, 由 2003 年的 13494.76 hm^2 上升至 2013 年的 40162.45 hm^2 , 年平均增长率达到 11.19%, 而人均值则由 2003 年的 0.0177001 hm^2 缓慢下降至 2013 年的 0.0139454 hm^2 ; 旅游生态承载力总量基本保持不变, 而人均值则由 2003 年的 0.0022067 hm^2 降至 2013 年的 0.0005842 hm^2 ; 旅游总生态赤字由 2003 年的 11812.31 hm^2 增加至 2013 年的 38480.00 hm^2 , 人均旅游生态赤字呈现平稳中下滑趋势, 由 2003 年的 0.0154934 hm^2 下降至 2013 年的 0.0133611 hm^2 , 年均减少率为 1.47%。数据表明随着景区旅游业的发展和旅游人次的迅猛增加, 龙门石窟景区旅游者的生态消费需求已经超出了景区生态自然系统的承载力范围, 旅游生态足迹和旅游生态承载力之间的矛盾加剧, 旅游业的发展与景区生态环境系统总体处于不协调、不可持续状态。同时, 现行的保护措施是有一定成效的, 应加以巩固, 从而实现景区的旅游可持续发展。

第二, 从景区生态安全状况的综合评价结果来看, 龙门石窟景区 2003—2013 年生态压力指数呈现逐年上升的趋势, 由 2003 年的 8.02 增长到 2013 年的 23.87, 相对上升了 15.65 个百分点, 均处于第六等级——生态极不安全状态, 且呈现越来越大的趋势; 同期, 生态占用指数缓慢下降, 由 0.0066 降至 0.0052, 相对下降了 0.0014 个百分点, 处于六级——很贫穷的状态; 生态经济协调指数整体呈下降趋势, 由 2003 年的 0.00082 下降至 2013 年的 0.00022, 下降了 0.00060 个百分点, 处于第六等级——协调度很差状态; 根据构建的综合评价指标表达式及相应的等级划分标准, 可得龙门石窟景区 2003-2013 年生态安全综合评价价值总体处于平稳下降趋势, 年平均降幅 11.53%, 总体处于第六等级——生态极

不安全状态。数据表明, 龙门石窟景区旅游活动消费对生态环境系统的压力越来越大, 景区生态不安全的程度也越来越严重, 生态环境系统的自身修复完善能力正面临严峻挑战。

第三, 从景区未来七年的生态安全预测和预警结果来看, 龙门石窟景区在 2014-2020 年生态安全综合评价得分明显下降, 年均降幅 28.49%, 生态安全位于第六等级——状态恶劣阶段, 警情状态更加严重, 生态环境系统恶化速度加快, 生态安全形势总体发展趋势不容乐观。

7.2 主要创新点

综合国内外学者现有的相关研究, 本文主要实现了以下几点创新:

第一, 研究对象。本文首次以龙门石窟景区为案例地进行旅游生态足迹的动态测算, 并以生态安全分析和评价为重点, 进行了 2003—2013 年的时间序列动态评估及 2014—2020 年的预测预警分析;

第二, 研究方法。本文在前人提出的生态安全评价单项指标的基础上, 首次采用主成分分析法, 构建了景区生态安全综合评价指标表达式及相应的等级划分标准, 更加科学全面的衡量景区的生态安全状态;

第三, 研究数据。本文以 2003—2013 年为研究时限, 在研究数据上较前人具有一定的时效性, 从而提高了研究结论的科学性。

7.3 研究局限与展望

因本人学术研究水平有限, 数据收集的局限性以及生态足迹模型本身的缺陷, 本文研究还存在一定的不足之处, 有待于在今后的研究中进一步完善和改进。

第一, 生态足迹模型作为测度区域生态环境平衡、协调、可持续性的重要分析方法, 重在评估衡量人类活动消费对生态系统的影响, 而忽视了经济、技术、社会等方面的可持续发展, 也未能考虑旅游者对现有消费模式的满意程度, 具有一定的生态偏向性。在今后旅游地可持续性研究中, 为尽量避免生态足迹模型本身的局限性, 可引入旅游生态足迹的单位经济能耗产出、生态旅游景区游客满意度等相关影响因子, 将生态测度指标与经济指标、社会指标进行组合, 相互完善, 从多个角度全面衡量和测度景区协调可持续发展程度。

第二，在研究过程中，数据资料的缺乏增加了旅游生态足迹计算分析的难度。旅游地生态足迹的计算与分析是建立在大量的调查和统计数据基础上的，而旅游业的复杂多样性和高度的产业关联性，加大了获取旅游生态足迹计算数据资料的难度，数据的真实性和精准性也会影响研究结论的科学性。而在实际研究过程中，获取资料途径不同、研究视角差异、部分经验数据采用以及调查对象限制等因素，都会导致最终结果出现不可避免的偏差。因此在今后的研究中，应逐步健全旅游统计制度管理，尽力完善数据调研收集方法和途径，保证数据资料搜集的科学性。

第三，本研究主要是针对龙门石窟景区旅游业的可持续发展和生态环境系统的安全状态，采取纵向的时间序列比较的方法。在今后的研究中，可进一步更新数据，并进行不同类型景区之间的横向比较，保证评估结果的规范性和科学性。

参考文献

- [1] Ree WE. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121~130
- [2] Leopold A. Wilderness a land laboratory[J]. *Living Wilderness*, 1941, 4(7): 3
- [3] 任志远, 艳芳. 土地利用变化与生态安全评价[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 18
- [4] Norman Myers. Sustainable society: A society that balances the environment, other life forms, and human interactions over an indefinite time Period[M]. Washington, DC: Island Press, 1999. 15~36
- [5] Costanza R. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 287: 253~260
- [6] Dobson, Andy P, et al. Hopes for the future: Restoration ecology and conservation ecology [J]. *Science*, 1997, 277: 515~524
- [7] Norton B G. A new paradigm for environmental management[M]. Washington, DC: Island Press, 1992. 23
- [8] Karr J R. Defining and Measuring River Health[J]. *Freshwater Biology*, 1999, 32(41): 221~234
- [9] 刘伟杰. 基于 GIS 和生态足迹方法的东北亚地区生态安全评价[D]. [硕士学位论文]. 长春: 中国科学院研究生院, 2012
- [10] Mathis Wackernagel, William E Rees. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economies from an ecological footprint perspective[J]. *Ecological Economics*, 1997, (20): 3~24
- [11] Susan J. Nichols, Fiona J. Dyer. Contribution of national bioassessment approaches for assessing ecological water security: an AUSRIVAS case study[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2013, 7(5): 669~687
- [12] E. V. Kislov, A. B. metkhenov, D. M. Sandakova. The Yermakovskoye fluorite—beryllium deposit: avenues for improving ecological security of revitalization of the mining operations[J]. *Geography and Natural Resources*. 2010, 31(4): 324~329
- [13] Wellington Jogo, Rashid Hassan. Balancing the use of wetlands for economic well-being and ecological security: The case of the Limpopo wetland in southern Africa[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1569~1579
- [14] Scheffer M, Bascompte J, Brock WA. Early-warning signals for critical transitions[J]. *Nature*, 2009, (461): 53~59
- [15] Alcik H, Ozel O, Wu YM, et al. An alternative approach for the Istanbul earthquake early warning system[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(2): 181~187
- [16] Tan YY, Wang X. An Early Warning System of Water Shortage in Basins Based on SD Model[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 399~406

- [17] Son IS, Oh KJ, Kim TY, et al. An early warning system for global institutional investors at emerging stock markets based on machine learning forecasting[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3): 4951~4957.
- [18] 文传浩. 流域环境变迁与生态安全预警理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 32~46
- [19] Borcharding J, Jantz B. Valve movement response of the mussel *Dreissena polymorpha*: the influence of pH and turbidity on the acute toxicity of pentachlorophenol under laboratory and field conditions[J]. *Ecotoxicology*, 1997, 6(3): 153~165
- [20] Jonsch. Runtime calibration of simulation models by integrating remote sensing estimates of leaf area index and canopy nitrogen[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 24(4): 316~324
- [21] Yangfan Li, Xiang Sun, Xiaodong Zhu. An early warning method of landscape ecological security in rapid urbanizing coastal areas and its application in Xiamen, China[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(19): 2251~2260
- [22] Jiang Zhong, Dong Wei, Zhang Xiang, et al. Progress on forewarning of ecological security[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(12): 97~100
- [23] Timothy M. Lenton. What early warning systems are there for environmental shocks? [J]. *Environmental Science & Policy*, 2013, (27): 60~75
- [24] 冀东怡. 旅游地生态安全评价——以漓江旅游带为例[D]. [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2005
- [25] 崔胜辉, 洪华生, 黄凤. 生态安全研究进展[J]. *生态学报*, 2005, 25(4): 861~868
- [26] 尹希成. 科技安全与国家安全其他要素的关系[J]. *国际技术经济研究*, 1999, 2(3): 28~33
- [27] 肖笃宁. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 354~358
- [28] 陈星. 生态安全: 国内外研究综述[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(6): 8~21
- [29] 林漳平. 东北农牧交错带土地利用生态安全模式案例研究[J]. *生态学杂志*, 2002, 21(6): 15~19
- [30] 左伟. 区域生态安全综合评价模型分析[J]. *地理科学*, 2005, 25(2): 209~215
- [31] 刘勇, 刘友兆. 区域土地资源生态安全评价——以浙江嘉兴市为例[J]. *资源科学*, 2004, 26(3): 69~76
- [32] 曹新向, 陈太政. 旅游地生态安全评价研究——以开封市为例[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(2): 209~213
- [33] 曹新向. 基于生态足迹分析的旅游地生态安全评价研究——以开封市为例[J]. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(2): 70~76
- [34] 肖建红, 于庆东. 海岛旅游地生态安全与可持续发展评估——以舟山群岛为例[J]. *地理学报*, 2011, 66(6): 842~852
- [35] 郭文, 孙涛, 高明美. 基于生态足迹改进模型的生态安全及其预测研究[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(6): 172~176

- [36] 葛京凤, 梁彦庆, 冯忠江等. 山区生态安全评价预警与调控研究——以河北山区为例[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 35~50
- [37] 丁晓静. 基于系统动力学的城市生态安全预警研究——以辽宁省为例[D]. [硕士学位论文]. 大连: 辽宁师范大学, 2011
- [38] 傅伯杰. 区域生态环境预警的理论及其应用[J]. 应用生态学报, 1993, 4(4): 36~39
- [39] 舒帮荣, 刘友兆, 徐进亮等. 基于 BP-ANN 的生态安全预警研究——以苏州市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(9): 1080~1086
- [40] 吴冠岑, 牛星. 土地生态安全预警的惩罚型变权评价模型及应用——以淮安市为例[J]. 资源科学, 2010, 32(5): 992~999
- [41] 张五美, 张正栋, 田楠楠等. 基于 P-S-R 模型的湖南省土地生态安全评价与趋势预测[J]. 可持续发展, 2012, 12(2): 117~123
- [42] 徐美. 湖南省土地生态安全预警及调控研究[D]. [硕士学位论文]. 长沙: 湖南师范大学, 2013
- [43] William E. Rees. Revisiting carrying capacity: Area-based indicators of sustainability. In: Wackernagel M, Ecological Footprint of Nations [EB]. 1997. <http://www.ecouncil.ac.cr/rio/focus/report/English/footprint/>
- [44] Vuren D P V, Smeets E M W. Ecological footprints of Benin, Bhutan, Costa Rica and the Netherlands [J]. Ecological Economics, 2000, 34: 115~130
- [45] 杨开忠, 杨咏. 生态足迹分析理论与方法[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 630~636
- [46] 孟繁斌. 基于生态足迹分析方法的旅游可持续发展研究[D]. [硕士学位论文]. 泉州: 华侨大学, 2006
- [47] Wackernagel M, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375~390
- [48] Wackernagel M, William E Rees. Our Ecological Footprint Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriela Island: New society Publishers, 1996. 75~90
- [49] 张志强, 徐中民, 程国栋等. 中国西部 12 省 (区市) 的生态足迹[J]. 地理学报, 2001, 56(5): 599~611
- [50] 章锦河, 张捷. 旅游生态足迹模型及黄山市实证分析[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 763~771
- [51] Taozaipu. Ecological rucksack and ecological footprint — The weight and the area concept of sustainable development[M]. Beijing: Economical Sciences Publishing House, 2003. 61~206
- [52] Colin Hunter. Sustainable tourism and the ecological footprint[J]. Environment, Development and Sustainability, 2002, 4: 7~20
- [53] Stefan Gossling, et al. Ecological footprint analysis as a tool to assess tourism sustainability [J]. Ecological Economics, 2002, 43: 199~211
- [54] 张东华. 基于生态足迹改进模型的昆明市生态安全评价研究[D]. [硕士学位论文]. 昆明: 云南财经大学, 2012
- [55] 吴开亚. 主成分投影法在区域生态安全评价中的应用[J]. 中国软科学, 2003, (9):

123~127

- [56] 张风太, 苏维词, 周继霞. 基于熵权灰色关联分析的城市生态安全评价[J]. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1249~1254
- [57] 李凤全, 吴樟荣. 半干旱地区土地盐碱化预警研究——以吉林省西部土地盐碱化预警为例[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 57~59
- [58] 胡淑恒. 巢湖流域的生态安全预警研究[D]. [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2004
- [59] 国务院法制办公室. 洛阳市龙门石窟保护管理条例[EB]. 2013. <http://www.chinalaw.gov.cn/article/fgkd/xfg/dfxfg/201302/20130200384246.shtml>
- [60] 中国世界遗产网. 中国世界遗产: 龙门石窟[EB]. 2014. <http://www.whcn.org/sjyc017.htm>
- [61] 河南大学规划设计研究院. 洛阳市龙门风景区旅游发展总体规划(2006—2020)[R]. 开封: 大河旅游规划设计中心, 2006. 10~16
- [62] 牛智慧. 旅游景区生态足迹定量测算模型研究[D]. [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2007
- [63] WWF Global. 2012 Living Planet Report[EB]. 2014. http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/living_planet_report/2012_lpr/
- [64] WWF. 2001 Living Planet Report[EB]. 2004. http://www.panda.org/news_facts/publications/general/living_planet/index.cfm
- [65] 赵先贵, 肖玲, 马彩虹等. 基于生态足迹的可持续评价指标体系的构建[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1202~1207

致谢

时光如梭，光阴似箭，随着毕业论文的完稿，三年的硕士研究生的学习即将结束，不知不觉中我在郑州大学这所美丽的校园已经度过了七个春秋，回首往事，使我获益匪浅。在此离别之际，我要对帮助过我的老师、同学们和我最亲爱的家人敬以最真诚的感谢。

首先，我要感谢我的研究生导师任瀚教授。回想三年来我的研究生路程，能选择任瀚教授作为我的导师，我感到无比荣幸！任老师为人平易近人、朴实无华、清静淡然，学术上更是博学严谨、诲人不倦、精益求精，从她的身上我学到了做学术研究的精髓，更是从中学到了许多做人的道理，我的每一点进步，都得益于任老师的悉心教导，这篇论文也是在任老师的悉心指导下完成的，从论文的选题、构思，到中间的写作，再到最终的定稿，任老师都给出了宝贵的意见，并给论文做了详细的修改，总之，本论文的顺利完成凝聚了任老师的巨大心血。

其次，我要感谢杜书云、龚绍方、王淑华、饶品样、薛建红、田孝蓉、史灵歌、耿亚新、王庆伟、郑鹏、王亚红等老师，正是有了他们的精心授业，我的专业知识才得以拓展，才有可能在将来的工作中得以运用，他们严谨的学术态度、敬业的工作热情和高度负责的精神将对我带来积极深远的影响。

此外，我还要感谢那些在调研中给予我帮助的社会从业人员，尤其是洛阳市旅游局、龙门石窟管理委员会相关工作人员；感谢翟东方、侯杨杨、马红、赵丽辉、王彩妮以及2010级本科旅游管理专业的王蓓、韩梦洁等学弟学妹们，为我的论文收集第一手的数据资料并给予指导和帮助。另外，我还要感谢这三年陪我度过快乐时光的室友以及班级其他同学，在大家的共同努力下，我们始终拥有一个良好的生活学习环境；感谢我的父母和家人，谢谢他们多年来对我无私的爱和支持，这才使我能安心快乐地学习，顺利完成学业；感谢苏先生一直以来对我的支持和鼓励，能和你在一起是我莫大的幸福。

最后，向所有关心我、支持我、帮助我的家人、老师、朋友、同学表示最诚挚的谢意，衷心祝愿你们平安幸福！

刘蕤

2015年5月于郑州大学松园

个人简历、在学期间发表的学术论文及研究成果

刘蕤，女，1991年8月出生，河南信阳人，中共党员。2008年考入郑州大学旅游管理学院就读，并于2012年7月获得郑州大学管理学学士学位；2012年以专业第八名的成绩被保送至郑州大学旅游管理学院攻读旅游管理专业硕士研究生，主要研究旅游规划。硕士研究生就读期间发表论文5篇，还参与了导师主持的旅游相关项目。

发表的学术论文：

- [1] 刘蕤. 我国旅游生态足迹研究进展[J]. 河南商业高等专科学校学报, 2014(4).
- [2] 刘蕤. 基于层次分析法的旅游企业品牌竞争力评价[J]. 宜春学院学报, 2013(10).
- [3] 刘蕤, 丁莹. 河南新县红色旅游产品创新研究[J]. 赤峰学院学报, 2013(5).
- [4] 刘蕤. 河南省旅游收入影响因素的计量分析[J]. 周口师范学院学报, 2013(3).
- [5] 刘蕤, 丁莹. 中原经济区低碳旅游发展探析[J]. 旅游纵览, 2013(3).

参与的科研项目：

- (1) 项目名称：旅游法实施背景下河南省旅游市场“零负团费”问题研究（2013年河南省旅游局项目，已结项，项目第4参与人）；
- (2) 项目名称：中原经济区文化旅游资源的合理开发与利用研究（2012年河南省国土资源厅课题项目，已结项，项目第5参与人）；
- (3) 项目名称：中原城市群文化旅游资源的合理开发与利用研究（2012年河南省国土资源厅课题项目，已结项，项目第6参与人）。