

DOI: 10.20103/j.stxb.202306271369

马小宾, 章锦河, 马天驰, 陶洁怡, 王培家, 郭丽佳, 杨良健. 国家公园生态系统健康测度模型构建及黄山实证研究. 生态学报, 2024, 44(13): 5746-5760.

Ma X B, Zhang J H, Ma T C, Tao J Y, Wang P J, Guo L J, Yang L J. National park ecosystem health measurement model construction and empirical study in Huangshan National Park. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5746-5760.

国家公园生态系统健康测度模型构建及黄山实证研究

马小宾^{1,2}, 章锦河^{1,2,3,*}, 马天驰^{1,2}, 陶洁怡^{1,2}, 王培家^{1,2}, 郭丽佳^{1,2}, 杨良健^{1,2}

1 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

2 黄山国家公园生态系统教育部野外科学观测研究站, 黄山 245899

3 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016

摘要: 国家公园是中国生态文明建设的重要制度实践, 其生态系统健康的科学评估是国家公园分区管理、空间管制、生态保护的基础。国家公园生态系统具有特殊性和复合性, 区别于城市、流域、湿地等生态系统, 亟需建立一套适合国家公园生态系统的生态系统健康测度模型。基于国家公园生态系统的特殊性和生态系统健康概念的多维性, 探讨了现有模型存在的问题和不足, 从生态系统与人类活动交互的视角, 建立了“VSR”(生态活力 Vigor、服务能力 Service、抗干扰力 Resilience) 国家公园生态系统健康测度模型。此外, 将“VSR”模型应用到黄山国家公园生态系统健康的测度中, 可视化了黄山国家公园生态系统健康的时空过程和格局, 通过随机森林回归模型和增强回归树模型验证了“VSR”模型的有效性和稳定性。“VSR”国家公园生态系统健康测度模型有效量化了国家公园生态系统健康的时空差异性和时空动态性, 为国家公园空间管制、生态保护等目标实施提供了科学支撑。

关键词: 国家公园; 生态系统健康; 测度模型; “VSR”模型; 黄山国家公园

National park ecosystem health measurement model construction and empirical study in Huangshan National Park

MA Xiaobin^{1,2}, ZHANG Jinhe^{1,2,3,*}, MA Tianchi^{1,2}, TAO Jieyi^{1,2}, WANG Peijia^{1,2}, GUO Lijia^{1,2}, YANG Liangjian^{1,2}

1 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 Huangshan National Park Ecosystem Observation and Research Station, Ministry of Education, Huangshan 245899, China

3 Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810016, China

Abstract: National parks are an important institutional practice in the construction of ecological civilization in China. The scientific assessment of their ecosystem health is the basis for national park zoning management, spatial control and ecological protection. National park ecosystems are unique and complex while different from urban, watershed and wetland ecosystems. It is urgent to establish a set of ecosystem health measurement models suitable for national park ecosystems. Based on the special characteristics of national park ecosystems, the multidimensional nature of the concept of ecosystem health and the current situation of ecosystem health assessment, the problems and shortcomings of existing models are discussed. On this basis, the species indicator method and the indicator system method are combined with the ecosystem characteristics of Chinese national parks, taking into account the reality that national park ecosystems interact closely with human activities. The VSR (Vigor, Service, Resilience) model is constructed to measure ecosystem health in national parks from three aspects of ecosystem health: internal biological attributes, external service attributes and internal and external

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42271251, 42101218)

收稿日期: 2023-06-27; **网络出版日期:** 2024-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjinhe@nju.edu.cn

integration of resilience to interference. In accordance with the three principles of indicator selection: relevance, feasibility and systematicity, the VSR model for measuring ecosystem health in national parks contains nine variables, namely, NPP, carbon stocks, soil retention, water conservation, habitat quality, tourism income, agroforestry products, fire risk and flood risk. In addition, the validity and stability of the “VSR” model are confirmed in the empirical analyses of Huangshan National Park. Specifically, the assessment results of ecosystem health in Huangshan National Park show that there are significant regional differences and spatial dependence in ecosystem health. The phenomenon of spiralling and spatial locking of ecosystem health in Huangshan National Park is present here through temporal changes in ecosystem health, regional spatial distribution, and inter-annual variations in ecosystem health. This contributes to a more scientific understanding of the specificity of national park ecosystems and the complexity of ecosystem health. Finally, by applying random forest regression and boosted regression tree models, the VSR model performs well in measuring ecosystem health in Huangshan National Park. In national parks, complex human-land relationships affect changes in ecosystem health, which act in a way that is not necessarily linear, but more often occurs in a coupled linear and non-linear way. For the ecosystem health of national parks, it is particularly important to strengthen the comprehensive knowledge of their ecological vitality, service capacity and resistance to disturbance, as well as the differentiated knowledge of ecosystem health in different types of national parks. The VSR national park ecosystem health measurement model effectively quantifies the spatial and temporal variability and spatial and temporal dynamics of national park ecosystem health, providing scientific support for the implementation of national park spatial control and ecological protection objectives.

Key Words: national park; ecosystem health; measurement model; Vigor-Service-Resilience model; Huangshan National Park

自美国设立第一个国家公园——黄石国家公园以来,历经百余年发展,国家公园从早期保护为主、辅以游憩的观念转变为兼具生态保护、科学研究、环境教育、游憩、社区发展等多功能融合的人地关系新范式^[1-2]。2021年10月,中国已经正式设立5个国家公园。中国国家公园的发展历程历经方案提出、实践试点到正式设立,国家公园的生态、经济、文化价值不断凸显^[3]。建立国家公园的核心目的是保持自然生态系统的原真性和完整性,保护生物多样性,保护生态安全屏障。与此同时,国家公园核心目的的实现面临多重困难和挑战,国家公园如何处理发展与保护的辩证关系,如何扭转居民生计与生态质量的矛盾关系,如何解决跨区域间的发展非均衡现象,如何科学管理和监测国家公园生态系统质量变化等等。以上种种,皆充分突出国家公园存在较为复杂的人地关系,同时也表明国家公园建设核心目的的顺利实现是化解上述种种困难和挑战的关键所在。因此,为确保国家公园核心目的得以顺利实现^[4],强化其生态系统的研究势在必行。

作为一种新型的自然保护地类型,国家公园存在特殊性。从人类活动来看,人多地少是中国最为典型的人地矛盾关系,绝大部分的自然保护地均有人类活动。中国的国家公园内往往存在多种不同类型的人类活动^[1-3],导致中国在国家公园建设中不可能采用“画地为牢”的孤岛式保护模式^[4]。国家公园建设中不像美国^[5]、加拿大^[6]等国家可以实施完全的自然状态,中国必须考虑本地社区居民生计等关键性人地关系问题^[7];从生态系统来看,国家公园生态系统具有独特性,主要表现在:(1)国家公园生态系统与城市、森林等生态系统相比,其是更加具有中国代表意义的自然生态系统(国家公园设立的原则)。这突出国家公园生态系统在功能方面的典型性,具体表现在国家公园生态系统的完整性和原真性、生物物种和自然景观的独特性等。在此基础上,国家公园生态系统不仅为人类提供多种生态系统服务功能,同时也具有保持内部自身信息传递、能量流动和物质循环的自然功能;(2)国家公园生态系统更加脆弱和敏感,中国国家公园内部往往存在多种复杂的人类活动干扰,其生态系统的状态容易受到诸如火灾、涝灾、水土流失、生物入侵等一系列不同程度和类型的风险影响,保证这些复杂的扰动在合理的阈值范围内是对国家公园生态系统发生剧烈不可逆的潜在风险变化的有效预防,也是提升其抗干扰能力的重要举措;(3)国家公园生态系统往往随时间处于不断变化过

程,生态系统的要素、结构和功能具有明显的时间特征和差异,在不同时段表现出不同状态,关注其长时间变化过程是了解国家公园生态系统演进的关键,也是国家公园生态系统与人类活动相互互动、交流、权衡过程波动性的体现。国家公园作为生态保护第一、国家代表性、全民公益性理念的重大实践,其生态系统健康与否直接关系到国家公园管理理念的实现与人民福祉的提升。

生态系统健康研究由来已久,其概念^[8]、内涵、测度以及与城镇化^[9]、交通^[10]、气候变化^[11]、土地利用^[12]等相关关系的研究受到广泛关注。目前一般认为,生态系统健康是指生态系统自我维持与发展的综合特性,表征为生态系统所具有的活力、稳定性和自我调节能力。相关研究主要关注城市群^[10]、城市^[13]、乡村^[14]、农业^[15]、湿地^[16]、流域^[17]、湖泊^[18]、海洋^[19]、草原^[20]等不同类型的生态系统健康测度与评估,并将生态系统健康的科学测度视为提升人类福祉^[21]、化解人地矛盾^[22]、保持生态系统稳定^[23]的重要基础支撑。在自然保护地方面,已有相关研究涉及到自然保护地的类型和尺度探析,例如云南苍山洱海自然保护区^[24]、甘肃安西自然保护区^[25]、东洞庭湖自然保护区^[26]、黑龙江洪河自然保护区^[27]等自然保护地生态系统健康得到关注,但作为自然保护地体系的主体——国家公园,其生态系统健康测度的案例分析有待进一步完善,尤其是相关测度模型的科学性、适用性等缺少全面审视,因此,有必要开展对国家公园生态系统健康测度模型的理论探讨和实证验证。本文在回顾有关生态系统健康、国家公园以及自然保护地生态环境研究的基础上,提出适用于国家公园生态系统健康评估的测算模型体系,并且通过实证案例分析验证模型的科学性,以期为国家公园生态系统健康的科学测算提供参考。

1 生态系统健康评估现状与测度模型构建

1.1 生态系统健康评估现状

目前,学者从不同视阈构建和实证了多种生态系统健康测度模型。总体上,大致可以分为物种指示法和指标体系法等^[28]。物种指示法采用特定群落的结构与功能等指标来监测生态系统的健康程度。该方法多应用于湖泊、流域、海洋、森林等生态系统,它的优势在于能较为直观地反映出生态系统的健康状况,但其更适用于单一类型的自然生态系统,难以对多物种、多结构、受人类活动影响的生态系统健康进行有效识别。指标体系法包括 VOR (Vigor 活力, Organization 组织, Resilience 弹性) 模型法^[29]、PSR (Pressure 压力, State 状态, Response 响应) 模型法^[30]、层次分析法、主成分分析法、模糊综合评判模型^[31]、健康距离法^[32]等方法,该类型方法主要采用多项指示代理变量从不同角度表征生态系统健康程度,能够实现针对多物种、多功能、复杂性的生态系统健康程度的测度。表 1 汇总了现有生态系统健康的主要测度模型方法。其中,VOR 模型和 PSR 模型得到推崇,应用最为广泛。VOR 模型不仅考虑了生态系统自身的结构与功能,还考虑了其抵御干扰、维持稳定的能力,符合生态系统健康的概念内涵;PSR 模型得益于其创设之初三种要素之间较为清晰、完整、逻辑性强的特征,在生态系统健康评估中广泛使用,既表现了生态环境质量,也反映了人类活动的威胁和措施。相比于物种指示法,指标体系法对数据收集的要求相对更低,适用的生态系统类型也更广。

在生态系统健康的实证研究中,学者广泛关注到其存在的尺度效应和类型效应。一方面,生态系统健康伴随着尺度的变化,呈现出不同的空间差异,相关研究讨论了全球^[40]、国家^[41]、区域^[42]、城市^[43]等不同尺度。另一方面,生态系统健康存在因系统类型的差异导致其在时空变化、驱动因素、作用机理等方面的不同,相关研究涉及到湿地^[16]、流域^[17]、草原^[20]等不同类型的生态系统。当前,生态系统健康的相关研究取得积极进展,然而仍有待完善之处,主要表现在:(1)在研究视角方面,多数生态系统健康的研究主要从“生物生态学”或“生态经济学”视角出发,割裂了人类活动与自然生态密切交互的事实;(2)在研究方法方面,定量评估模型主要为物种指示法和指标体系法,两种方法存在适用的局限性、比较的障碍性、模型的针对性等问题,导致评估结果差异较大;(3)在研究内容方面,生态系统健康的尺度效应和类型效应需要持续深入,尤其是针对国家公园新型人地关系模式的研究。因此,创新和构建多层次、多尺度、多类型的生态系统健康测度模型势在必行。

表 1 生态系统健康测度方法比较

Table 1 Comparison of ecosystem health measurement methods

测度方法 Methods	指标模型 Indicator models	核心要素 Elements	案例地 Study area	作者 Authors
物种指示法 Species indicator method	物种指示法	①结构指标:生态系统各组成部分间的相互联系; ②功能指标:生态系统的整体活动情况。	粤港澳大湾区鹤山森林生态系统;	汪雁佳等 ^[33]
			新西兰 Motueka 与 Mangaokewa 流域	Young 和 Collier ^[34]
指标体系法 Indicator system method	VOR 模型	①活力(V)指标:系统的初级生产力或新陈代谢情况; ②组织(O)指标:系统的多样性和连通性; ③弹性(R)指标:系统抵御损害或从中恢复的能力。	意大利泻湖;	Mistri 等 ^[35]
			广州城市生态系统	郭秀锐等 ^[36]
	PSR 模型	①压力(P)指标:对生态系统健康产生威胁的外在因素; ②状态(S)指标:生态系统当前的状态; ③响应(R)指标:生态系统面临压力时所能采取的应对措施。	印度恒河下游;	Das 等 ^[37]
	其他复合指标体系:层次分析法、主成分分析法、模糊综合评判模型、健康距离法	构建包含经济和资源环境维度的指标体系,综合表征区域生态系统健康的发展水平和协调度	黔东南苗族侗族自治州 黄土丘陵区; 长江中下游城市群; 美国旧金山地区	卢应爽等 ^[30] 刘国彬等 ^[38] 陈万旭等 ^[9] Breux 等 ^[39]

1.2 国家公园生态系统健康测度模型建模路径

承上所述,国家公园生态系统具有特殊性,其生态系统健康的测度相较于其他生态系统也具有独特性。因此,构建一套符合国家公园生态系统特点的生态系统健康测度模型是现实所需,亦是理论创新。国家公园生态系统健康已经成为公园管理目标^[44]。回顾有关国家公园生态系统健康的研究,在指标体系法中,Oh 等选择 13 个指标构建了韩国国家公园的生态系统健康评估模型^[45];Shu 等利用活力-组织-弹性(VOR)模型构建了神农架国家公园生态系统健康评价指标体系^[46]。在物种指示法中,蓝藻毒素^[47]、森林植被^[48]、蝴蝶物种^[49]、水生鸟类疾病和死亡率^[50]等在墨西哥国家公园、孟加拉国和印度国家公园、巴厘岛国家公园的生态系统健康评估中得到了应用,单一物种或多物种的方案均有涉及。此外,也有学者对国家公园生态系统健康的测度体系进行了优化和完善,在现有指标侧重濒危物种、生态系统干扰、多样性、水质、生境破碎化等的基础上提出考虑海洋生态评估、政策变化和时间波动的指标系统^[51]。尽管国家公园生态系统健康的研究已有涉及,但是多数研究未能有效体现国家公园生态系统的独特性特点,以及并未对测度模型科学性进行详细探究和理论思辨。为实现物种指示法和指标体系法的优势互补,有必要将二者结合起来,构建符合中国国情的国家公园生态系统健康测度模型。主要路径如下:

(1) 建模思路

针对国家公园生态系统的特点,立足生态系统与人类活动交互的视角,将物种指示法和指标体系法结合起来。从指征生态系统健康的“生态活力(生态系统本身的活力,内在的生物学属性指标)、服务能力(生态系统服务人类,外显的健康状态测度指标)和抗干扰力(生态系统抵御外来干扰、维持稳定的能力,内外结合的健康状态测度指标)”三维角度,构建国家公园生态系统健康测度指标体系 VSR(Vigor, Service, Resilience)模型。该思路突破传统生态系统健康评价的 VOR 模型与 PSR 模型,将生态“服务能力”纳入测度体系,内外结合,能较全面、客观、有效评估生态系统健康状况及其变化。

(2) 测度指标系统

围绕测度模型建模思路,按照指标选择的三原则:针对性、可行性、系统性。其中,针对性主要考虑到生态系统健康评估和国家公园的特殊性,一方面,本研究不同于生态安全、生态风险问题的评估,另一方面,国家公园生态系统区别于城市、湿地、土地等生态系统。本文中针对性具体体现在国家公园的独特物种、特定风险、特有农林产品等。可行性主要考虑到构建指标系统代理变量选择的可操作、可比较、可量化,具体体现在各项指标的时间性、空间性、统计性等方面。系统性主要考虑相关代理变量的层次性、区分度、相关性等,避免产生各项系统内部和外部的内生现象,具体体现在国家公园生态系统健康的不同维度指标,促使维度划分更加契合生态系统健康的内涵。

具体来讲:(1)在相关研究中,生态活力多数通过植被生长状态来表征,主要采用诸如 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)、FVC(Fraction Vegetation Coverage)、NPP(Net Primary Productivity)、EVI(Enhanced Vegetation Index)等^[52]。如果同时使用,则存在高度的内生性,会降低模型的系统性和稳定性,因此,本文选择常用且具有代表性的 NPP 指标作为生态活力的代理变量,内化国家公园生态系统健康的生物学属性指标,NPP 的计算主要通过获取相关 NPP 数据集来进行量化,在案例分析中采用极差标准化方式对研究期内的 NPP 指标进行标准化。(2)服务能力是从人地互动的生态经济学视角衡量外显的生态系统健康状况。生态系统为人类社会所提供的福祉价值主要表现在供给、调节、文化等方面^[53-54]。但由于国家公园受到人类影响的强度弱于城市、农田等生态系统,其生态系统服务价值更多体现在调节方面。为此,本文选择碳汇量、土壤保持、水源涵养、生境质量、旅游收入和农林产品作为国家公园的典型生态系统服务,表征外显的健康状态测度指标,其中碳汇量、土壤保持、水源涵养、生境质量主要使用 InVEST 模型进行计算,相关具体计算方法参考文献^[55]。旅游收入和农林产品主要通过相关统计年鉴、统计公报、田野调查等收集获得。各项服务能力指标均采用极差标准化后,利用熵权法获取权重,进行加权求和获得总服务能力。(3)生态系统保持健康最为显化的特征是对抗风险和维持内部稳定,即抗干扰力的强弱。在构建模型中主要从反向风险发生程度来衡量生态系统健康的抗干扰能力大小。以生态系统的防火、防旱等功能变化指征生态系统抗干扰力,主要选择火灾风险和涝灾风险等作为二级指标,参考相关研究^[56],火灾风险采用人类活动强度和干燥度指数表征,涝灾风险采用坡度、年降雨量和降雨侵蚀力表征。计算方式如下:火灾风险通过干燥度指数和人类活动强度相乘表征;涝灾风险通过年降雨量、坡度、降雨侵蚀力三者相乘获得。然后在此基础上对火灾风险和涝灾风险进行标准化处理,最后以二者的均值大小衡量区域抗干扰力程度。

(3) 国家公园生态系统健康测度指标体系

根据上文分析,从生态活力、服务能力、抗干扰力三个维度构建国家公园生态系统健康指标体系,具体指标及含义见下表 2。

表 2 国家公园生态系统健康“VSR”测度模型

Table 2 National park ecosystem health “VSR” measurement model

目标 Target	维度 Dimension	代理变量 Variable	指标视角 Indicator perspective
生态系统健康 Ecosystem health	生态活力	植被净初级生产力	内在的生物学属性指标
	服务能力	碳汇量	外显的健康状态测度指标
		土壤保持	外显的健康状态测度指标
		水源涵养	外显的健康状态测度指标
		生境质量	外显的健康状态测度指标
		旅游收入	外显的健康状态测度指标
		农林产品	外显的健康状态测度指标
	抗干扰力	火灾风险	内外结合的健康状态测度指标
		涝灾风险	内外结合的健康状态测度指标

(4) 国家公园生态系统健康测度 VSR 模型

国家公园生态系统健康测度“VSR”模型包含生态活力、服务能力和抗干扰力。生态活力采用 NPP 进行表征;服务能力通过碳汇量、土壤保持、水源涵养、生境质量、旅游收入和农林产品表征;抗干扰力通过火灾风险和涝灾风险表征。计算公式如下:

$$EH = (V \times S \times R)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中, EH 指国家公园生态系统健康指数, V 、 S 、 R 分别代表生态活力、服务能力和抗干扰力水平。

2 案例实证

2.1 研究区概况

黄山国家公园创建区由黄山风景区、九龙峰自然保护区、五溪山自然保护区、天湖自然保护区及汤口镇山岔村等连接区域构成,总面积 330.3km²。黄山国家公园毗邻区以与创建区内行政村直接所属的乡镇为边界划定范围,共涵盖 9 个乡镇,包括黄山区的汤口镇、耿城镇、谭家桥镇、焦村镇和三口镇;黟县的宏潭乡、洪星乡和宏村镇;徽州区的富溪乡,除去黄山国家公园创建区外的范围,面积约 882.92km²。考虑加入毗邻区的主要原因在于:创建区和毗邻区功能定位不同,创建区主要为旅游活动、生态环境保护、环境教育等提供支撑,毗邻区主要为创建区各种活动开展提供配套,是创建区的缓冲区,该区域土地利用强度较高、人类活动较为密集,且与创建区关联密切。本文将创建区和毗邻区简称为黄山国家公园。研究区位如下图 1。

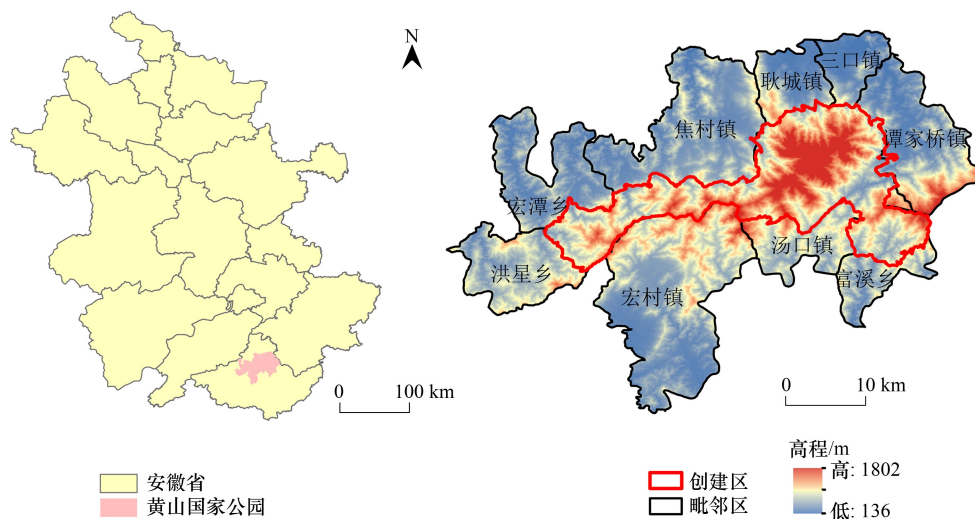


图 1 黄山国家公园区位图

Fig.1 Location of Huangshan National Park

2.2 数据来源

本文主要涉及自然地理数据,包括土地利用数据、气象数据、高程数据、土壤数据、植被覆盖,经济社会数据和 POI(Point of Interest)数据集。数据来源具体见表 3。

2.3 分析方法

(1) 黄山国家公园生态系统健康测度“VSR”模型的数据处理

文章在构建国家公园生态系统健康测度模型中介绍了生态活力、服务能力、抗干扰力的具体指标和计算方法。文章主要对相关数据集进行如下处理:首先,针对栅格数据,文章通过 ArcGIS 软件将所有数据集的分辨率统一为 500m。其次,针对统计数据和 POI 数据,文章通过农作物产量与土地利用类型的匹配来空间化农林产品指标,通过 POI 的密度来表征人类活动强度,以及以餐饮、风景名胜、酒店住宿等与旅游密切相关的

POI 类型为权重基础,空间化旅游收入指标。最后,得到生态活力、服务能力、抗干扰力的基础上,采用栅格计算器获得最终的国家公园生态系统健康水平。

表 3 数据来源
Table 3 Data sources

数据 Data	描述 Descriptions	来源 Source
气象数据 Weather data	2010 年、2015 年和 2020 年黄山国家公园年平均气温、年降水量、年蒸发量,分辨率为 1000m	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn); 国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/)
土地利用数据 Land use data	2010 年、2015 年和 2020 年黄山国家公园土地利用类型,分辨率为 30m	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn)
高程数据 DEM data	数字高程模型 (DEM) 数据,空间分辨率为 30m	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云系统 (http://www.gscloud.cn)
土壤数据 Soil data	土壤深度等,分辨率为 1000m	世界土壤数据库 (HWSD) (https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-anddatabases/harmonized-world-soil-database-v12/en/)
植被数据 Vegetation data	2010 年、2015 年和 2020 年植物净初级生产力 (NPP),分辨率为 1000m	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/DataList.aspx)
社会经济数据 Social and economic data	2010 年、2015 年和 2020 年人口密度空间分布数据,分辨率为 1000m; 相关统计数据 (旅游收入、农作物产量)	WorldPop 网站中国人口密度空间栅格数据集 (https://www.worldpop.org/); 统计年鉴、统计公报
空间数据 Spatial data	2010 年、2015 年和 2020 年 POI 数据集、黄山国家公园矢量地图	Bigemap、中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/DataList.aspx)

DEM: 数字高程模型 Digital elevation model; NPP: 植物净初级生产力 Net primary productivity; POI: 兴趣点 Point of Interest

(2) 随机森林回归模型 (Random Forest Regression Algorithm, RF)

随机森林回归模型是一种包含多个决策树分类器的机器学习方法,由 Breiman 在 2001 年提出^[57]。该模型利用 Bootstrap 抽样方法,从原始样本中抽取多个样本,对每个 Bootstrap 样本进行决策树建模,然后将这些决策树组合起来,通过投票得规则获得最终结果,在数据分类、样本回归、模型预测等方面具有高度的准确性和有效性,并且受到异常值和噪声的影响较小。其已经被广泛地用于经济管理学^[58]、生态学^[59]、地理学^[60]等研究中。变量重要性在随机森林回归中通过均方误差增加量 (Inc MSE 值) 的大小进行衡量,本文利用随机森林回归模型刻画国家公园生态系统健康各项驱动因子的重要程度。

(3) 增强回归树模型 (Boosted Regression Trees, BRT)

增强回归树模型 (Boosted Regression Trees, BRT) 是由 Elith 在 2008 年提出的^[61],主要用于生态学统计模型中的解释和预测,对某些典型特征如非线性的变量和变量之间的相互关系有很好的解释和预测能力。BRT 是一种拟合统计模型,与传统的拟合模型有很大不同,其将回归树 (regression tree) 和增长 (boosting) 两种方法结合起来。其主要优势在于能够适应缺失值、异常值、噪声点的影响,能够拟合复杂非线性关系,并能自动处理预测因子之间的相互影响。BRT 拟合多个树的过程,能最大程度地弥补单一树模型预测能力弱的缺点,比大多传统模型方法有更强的预测能力。BRT 模型在生态统计^[62]、空间分析^[63]、灾害评估^[64]等方面得到了较为广泛的应用,其适用性逐步得到证实。本文利用 BRT 模型计算各驱动因子对生态系统健康差异的贡献度,刻画国家公园生态系统健康各项驱动因子的重要程度。

3 实证结果

3.1 黄山国家公园生态系统健康“V”“S”“R”的时空分布

根据前文构建的国家公园生态系统健康测度模型,分别计算生态活力、服务能力、抗干扰力,并对结果进行可视化得到下图 2。结果显示,在构建的国家公园生态系统健康评估体系中,生态活力、服务能力、抗干扰力存在显著的时空差异,表现出创建区优于毗邻区的分布特征。黄山国家公园创建区和毗邻区在功能定位上

存在显著差异,创建区内部是重要的生态保护源,区域内部物种多样性、结构完整性、人类干扰性程度显著区别于毗邻区,尤其是自然植被的覆盖度和完整度,促使创建区生态系统健康各子系统水平优于毗邻区。毗邻区作为人类生产生活活动密集开展的区域,在物种丰度、土地覆盖、社会功能等方面存在自身特点,例如毗邻区缺少创建区的地理与森林垂直带谱,该区域土地开发强度较高,社会生产任务较重,旅游开发力度较大,这些促使毗邻区的生态系统健康各子系统水平弱于创建区。

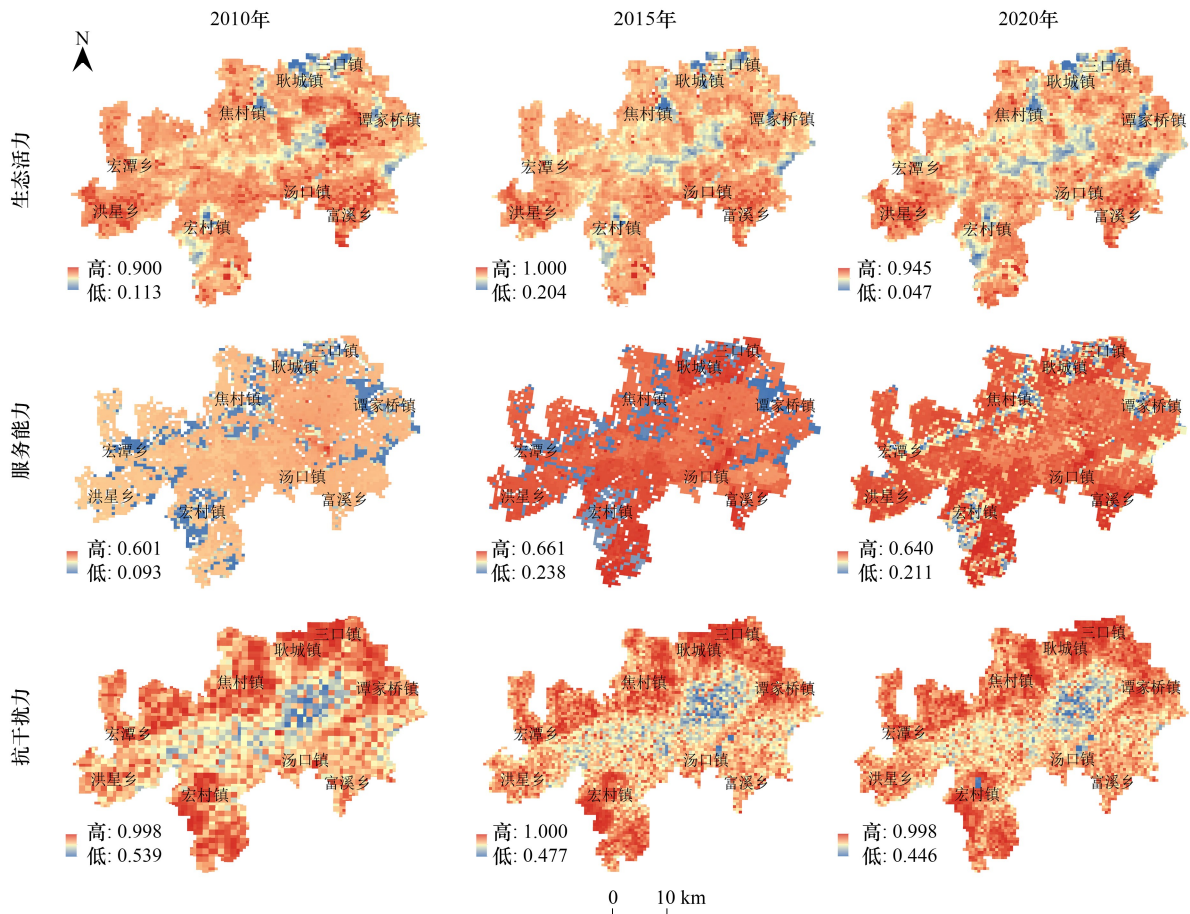


图2 黄山国家公园生态系统健康“V”“S”“R”的时空分布

Fig.2 Spatial and temporal distribution of “V”“S”“R” of ecosystem health in Huangshan National Parks

V: 生态活力; S: 服务能力; R: 抗干扰力水平

具体来讲,在空间上,黄山国家公园生态活力整体为中间高、周围低的特征,高值区域出现在黄山国家公园的创建区,低值区域出现黄山国家公园的毗邻区,如宏村镇、耿城镇、三口镇等地区;在时间上,2010年、2015年和2020年生态活力均值分别为0.647、0.706和0.644,表现为升高降低的倒U型特征,但整体变化幅度不大。黄山国家公园服务能力在空间布局与生态活力较为相似,也存在中心—外围结构,高值区域出现在内部(创建区),低值区域出现在外围(毗邻区);在时间变化上,2010年、2015年和2020年服务能力均值分别为0.433、0.478和0.543,呈现逐步增加趋势。经过计算2010年、2015年和2020年黄山国家公园抗干扰力均值分别为0.877、0.876、0.888,整体稳定,在空间上表现为中间低,四周高的特征。这也是山岳型黄山国家公园典型地理与森林垂直带谱生态系统的表现。

3.2 黄山国家公园生态系统健康的时空演化格局

依据本文构建的国家公园生态系统健康测度模型“VSR”模型,计算得到2010—2020年黄山国家公园生态系统健康水平,统计和可视化得到下图3和表4。2010年、2015年和2020年黄山国家公园生态系统健康的

平均值分别为 0.622、0.662 和 0.674。即在整个研究期内,黄山国家公园生态系统健康呈现上升趋势。从极值角度来看,2010—2020 年黄山国家公园生态系统健康的极值处于波动上升状态,最小值由 2010 年的 0.297 增长到 2020 年的 0.328,最大值由 2000 年的 0.728 增长到 2020 年的 0.800。近年来,黄山国家公园在生态保护、景区管理、环境教育、社区增权、科学防护等方面做出积极进展,形成“垃圾下山”的三废管理,“迎客松保护”的生态治理,“封闭轮休”的制度安排,“社区参与”的增权增收等措施。有效的制度和管理促使黄山国家公园生态系统健康稳中求进,呈现上升趋势。

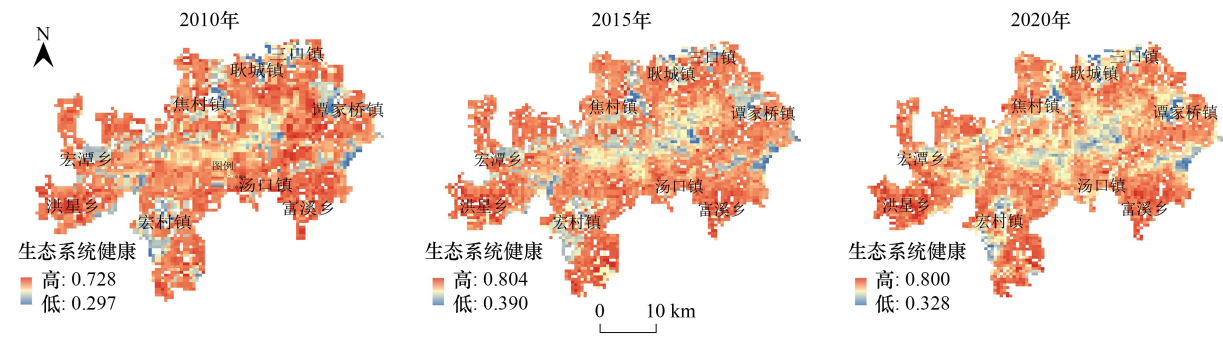


图 3 黄山国家公园生态系统健康的时空分布

Fig.3 Spatial and temporal distribution of ecosystem health in Huangshan National Park

表 4 黄山国家公园生态系统健康的描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of ecosystem health in Huangshan National Park

年份 Year	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean
2010	0.297	0.728	0.622
2015	0.390	0.804	0.662
2020	0.328	0.800	0.674

在时空格局变化中(图 3),研究期内,黄山国家公园生态系统健康的空间布局较为稳定,高值区出现在创建区,低值区出现在创建区内海拔较高区域和毗邻区,呈现与自然环境和人类活动密切联系的依赖关系,也是山岳型黄山国家公园典型地理与森林垂直带谱生态系统的体现。具体来讲,2010—2020 年,人类活动密集的区域生态系统健康水平处于较低水平,如汤口镇、宏村镇、耿城镇、谭家桥镇等;海拔较高区域由于自然环境条件,在植被类型、地形地貌、温度降水等方面有别于低海拔区域,相对于低海拔区域,其生态系统健康处于较低水平。但是随着时间的推移,无论创建区还是毗邻区,生态系统健康水平皆趋向良好发展。

3.3 模型检验与对比

本文通过随机森林回归模型和增强回归树模型验证国家公园生态系统健康测度模型“VSR”模型的有效性和稳定性。为了全面对比分析,本文首先通过 OLS 回归方法得到每个年份各驱动因子的系数,见下表 5,涝灾风险(抗干扰力)、水源涵养(服务能力)、NPP(生态活力)的驱动程度位居前三。然后,通过 Rstudio 平台编写随机森林回归模型和增强回归树模型,相关参数设置原则参考文献^[63—64]。经过多次迭代,得到黄山国家公园生态系统健康各驱动因子的重要性和贡献度(图 4)。

随机森林回归结果显示,黄山国家公园生态系统健康的各项驱动因子重要性存在年际变化,在整个研究期内,涝灾风险(抗干扰力)、水源涵养(服务能力)、NPP(生态活力)对生态系统健康起到主导作用,其他相关驱动因子在各个时期的重要程度存在一定差异性。同时,增强回归树结果显示,各项驱动因子的贡献度较为稳定,整体变化不大,呈现以涝灾风险(抗干扰力)、NPP(生态活力)、水源涵养(服务能力)等为主导的状态。结合 OLS 回归模型、随机森林回归模型和增强回归树模型关于黄山国家公园生态系统健康各项驱动因子影响程度的结果,表明国家公园生态系统健康测度模型“VSR”指标系统较为完善,具有有效性和稳定性。

表 5 黄山国家公园生态系统健康驱动因子 OLS 回归结果和影响程度排序

Table 5 OLS regression results of ecosystem health in Huangshan National Park and the ranking of the degree of drivers

驱动因子 Driving factor	2010 年	2015 年	2020 年	均值 Mean	位序 Rank
涝灾风险 Flood risk	0.372	0.244	0.284	0.300	1
水源涵养 Water conservation	0.287	0.148	0.217	0.217	2
NPP Net primary productivity	0.175	0.219	0.191	0.195	3
生境质量 Habitat quality	0.225	0.289	0.064	0.193	4
农林产品 Agroforestry products	-0.089	-0.006	-0.063	-0.053	5
土壤保持 Soil retention	0.045	0.054	0.055	0.051	6
火灾风险 Fire risk	-0.001	0.055	0.096	0.050	7
碳储存 Carbon storage	-0.067	-0.135	0.061	-0.047	8
旅游收入 Tourism income	-0.005	0.045	0.053	0.031	9

OLS: 普通最小二乘 Ordinary least square

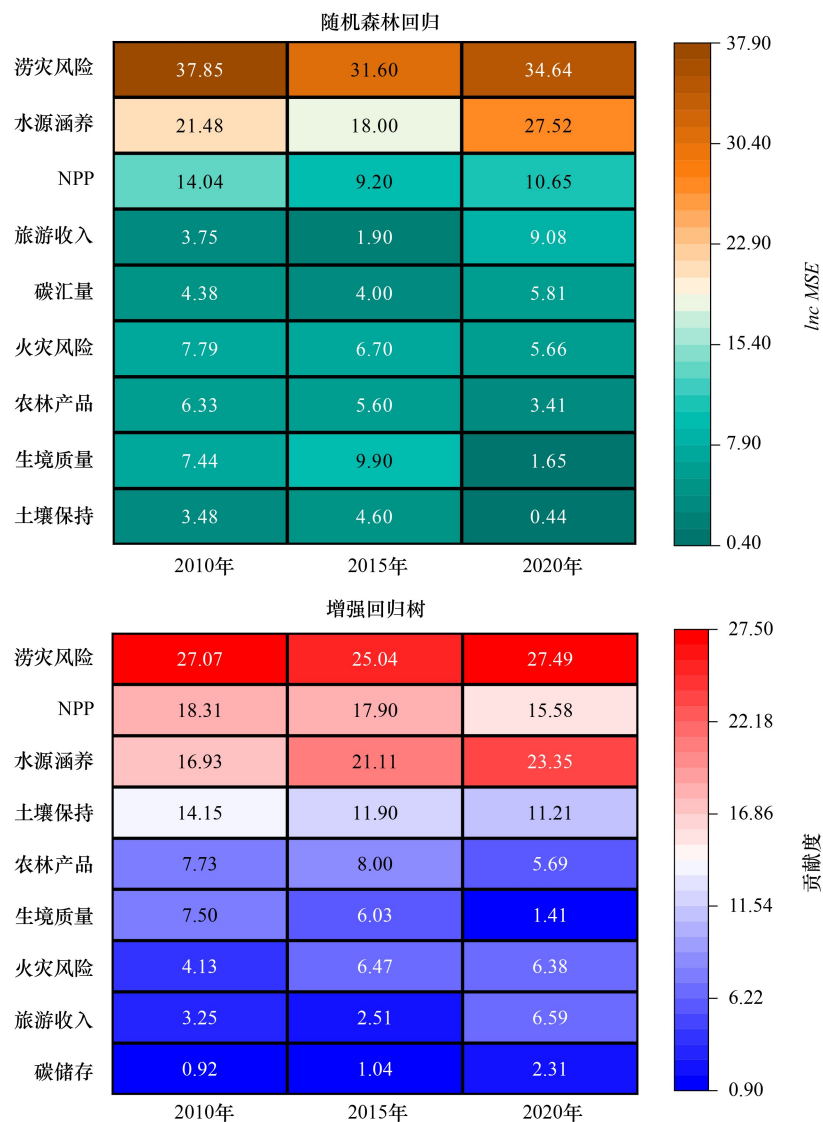


图 4 各驱动因子重要性和贡献度

Fig.4 Importance of each driving factor

NPP: 净初级生产力

为进一步分析模型有效性,本文采用排序法去除随机森林回归模型和增强回归树模型关于驱动因子影响程度评判准则的差异,得到下图 5。结果显示,涝灾风险(抗干扰力)、水源涵养(服务能力)、NPP(生态活力)位于第一梯队,与 OLS 回归结果保持一致,对黄山国家公园生态系统健康的重要性排名稳定在前列。此外,对比相同年份各项驱动因子的排序,在研究期内呈现出位序相近度高、差异性小的特征。因此,整体上看,“VSR”模型在测度国家公园生态系统健康中具有有效性和稳定性。

黄山国家公园是典型的山岳型国家公园,同时地处亚热带季风气候区内,地形复杂,容易产生洪涝灾害,并对区域生态系统产生负面影响;其次,黄山国家公园雨量充沛,涵养着长江和新安江两大水系;最后,黄山国家公园也是华东地区重要的动植物保护区,植被类型丰富多样,植物群落结构完整,功能多样,且具有独特的垂直分布特征。本文构建的国家公园生态系统健康测度模型“VSR”模型在黄山国家公园的实证分析体现了模型的有效性和稳定性。

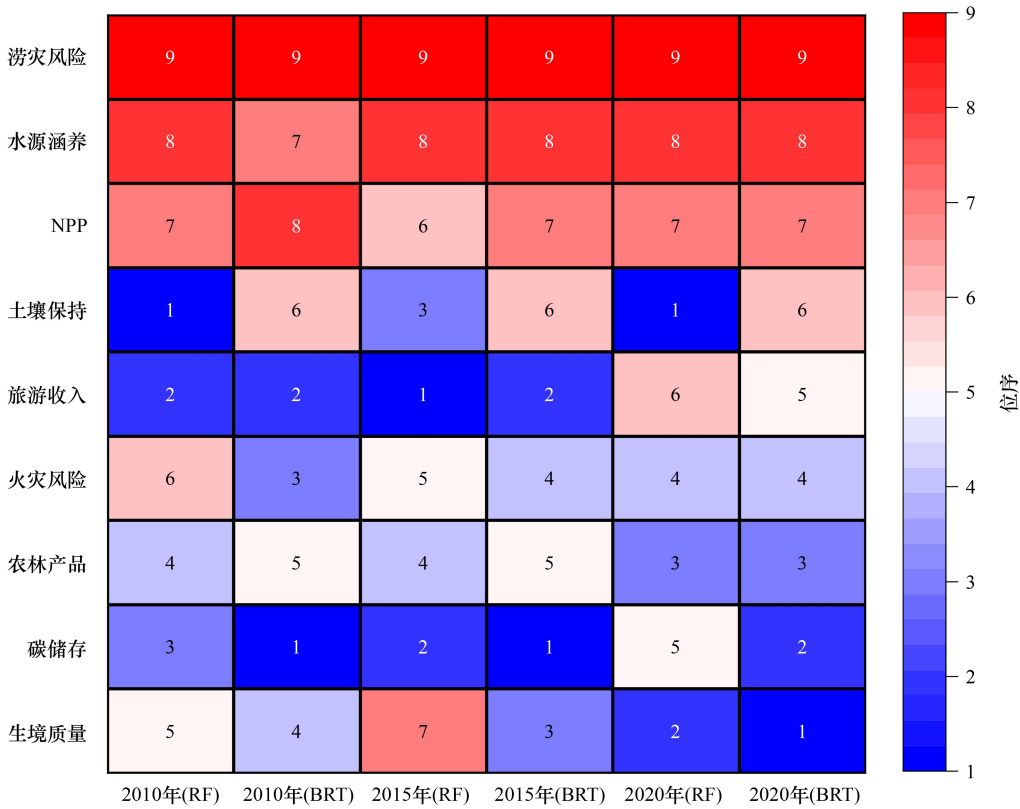


图 5 黄山国家公园生态系统健康驱动因子重要性排序(随机森林回归和增强回归树)

Fig.5 Ranking the importance of ecosystem health drivers in Huangshan National Park (random forest regression and boosted regression trees)

RF: 随机森林回归模型; BRT: 增强回归树模型

4 讨论和结论

4.1 讨论

本文为国家公园生态系统健康的科学测度提供了理论参考,创新了测度评估体系,构建了一套适合国家公园生态系统健康的测度范式,为国家公园生态系统长时间、动态化、多尺度、多目标的系统监测提供了路径和范式。尤其是在刻画生态系统健康抗干扰力中,弥补以往研究多采用土地利用类型赋值方式的依赖,将代表生态系统特殊性的特征考虑到模型中,用于量化抗干扰力。同时,将生态系统服务能力纳入到生态系统健康评估中,选择了具有代表性的服务类型,例如在农林产品中选择黄山国家公园的茶叶产量等典型产品,强化

了模型的针对性,为后续其他类型国家公园生态系统健康评估提供参考和示范价值。总体上看,本文建立的国家公园生态系统健康测度模型“VSR”指标模型,从内部生态活力、外部服务能力和内外结合的抗干扰力方面,对国家公园生态系统健康的特殊性、典型性、差异性等进行了综合考虑。与此同时,“VSR”模型在指标遴选中兼具针对性和适用性。其次,本文将“VSR”模型应用到黄山国家公园生态系统健康测度中,考虑了模型的适用性。通过相关数据获取、处理、计算、空间差异分析等步骤,刻画了黄山国家公园生态系统健康的时空分布、演化格局和年际变化特征,为黄山国家公园生态系统健康在时间和空间上的变化格局和过程提供了一套有效的可视化、差异化的测度方案。最后,本文结合随机森林回归模型和增强回归树模型验证了国家公园生态系统健康测度模型“VSR”模型的有效性和稳定性。结合随机森林回归模型和增强回归树模型呈现的各项指标影响程度,涝灾风险(抗干扰力)、水源涵养(服务能力)、NPP(生态活力)对黄山国家公园生态系统健康驱动能力较强。

本文对国家公园生态系统健康质量的长期动态化监测与评估以及国家公园的生态管理、功能分区、空间管制等具有现实意义。国家公园是中国生态文明建设的重要实践,国家公园被赋予“生态保护第一”的独特属性。本研究系统地提出了一套适合国家公园生态系统健康监测的指标模型,这对国家公园的管理具有重要现实意义。在中国,国家公园的“生态保护第一性”与本地区经济发展、人类活动存在复杂的相互作用关系。生态敏感区域生活着大量本地居民,在国家公园内部如何平衡本地居民生计和生态系统保护对国家公园的建设至关重要。国家公园生态系统健康快速有效、长时间、跨区域的测量为居民生计、科学教育、设施建设、游憩活动、特许经营等多种活动提供基础参考。本地居民从事的打猎、农耕、放牧物质材料消耗等均会对国家公园生态系统健康产生重要影响。其次,基础设施建设也会带来对国家公园生态系统的影响,如铁路、公路、管道等,会产生对国家公园生态系统的“线状”影响,其周围的生态环境需要得到重视。再者,国家公园需要满足“全民公益性”的特征,不可避免地需要建设提供游憩服务、满足访客基本需求的配套设施,这些区域是人类活动密集的场所,平衡其与生态系统保护的关系尤为重要。在这些背景下,本文提供了一种量化的、综合的、动态的测度模型,为国家公园的分区调控、空间管制提供科学有力支撑。

本文构建的国家公园生态系统健康测度模型“VSR”模型为管理者理解国家公园生态系统保护的复杂内涵提供参考价值。本文证明了国家公园生态系统健康存在的复杂性和动态变化性,为国家公园生态系统健康程度的有效识别提供了可行方案。基于随机森林回归模型和增强回归树模型的指标影响分析,不仅验证了“VSR”模型的有效性,同时也为国家公园各项生态、自然、人类要素的管理提供参考。具体来讲,国家公园生态环境如土壤、植被、森林、水体等是基础的物质禀赋,是国家公园保持生态系统健康的基底,加强对水、土、气的监测是非常重要的。在接下来的管理和建设中,建立一套系统化、动态化、可视化的生态环境监测系统势在必行。其次,生态系统服务能力,尤其是调节服务,受到人类活动影响较为直接。同时,以黄山国家公园为代表的实证分析表明,涝灾风险(抗干扰力)、水源涵养(服务能力)、NPP(生态活力)等对国家公园生态系统健康呈现重要价值,这也是山岳型国家公园——黄山国家公园的主要自然特性。即国家公园生态系统健康测度模型“VSR”模型的针对性也为公园管理者、科研人员、访客、社区居民等不同群体的国家公园生态系统认知提供参考,在国家公园生态系统维护中,在管理政策制定中,在科学研究过程中,在参观体验游览中,在生产生活生态协调中进一步强化主体保护意识。

4.2 结论

本文通过系统梳理国家公园生态系统的特殊性以及生态系统健康研究的理论和内涵等,透析国家公园生态系统健康在生态保护研究中的核心地位,梳理现有关于生态系统健康研究的现状和不足,尤其是典型的国家公园生态系统类型的生态系统健康研究,构建了国家公园生态系统健康的测度体系——“VSR”模型。结合生态系统健康内部生物属性、外部服务属性和内外融合抗干扰属性,从三个方面耦合了生物生态学和生态经济学的研究视阈,建立了人类活动与自然生态交互的对话。据此,搭建起国家公园生态系统健康定量评估系统。此外,本文选择了典型的、受人类影响强烈的国家公园——黄山国家公园作为实证案例,进一步检验模型

的有效性和稳定性。从量化分析结果可以看出,国家公园生态系统健康测度模型“VSR”模型有效实现了对黄山国家公园生态系统健康的评估以及区域差异的表征。

同时,黄山国家公园生态系统健康的评估结果显示生态系统健康存在显著的区域差异和空间依赖特征,不同区域表现出特殊性和异质性。生态系统健康的时序变化、区域空间分布以及年际变化均证实了黄山国家公园生态系统健康水平存在螺旋上升、空间锁定现象,这有助于更加科学理解国家公园生态系统的特殊性以及生态系统健康的复杂性。

最后,随机森林回归模型和增强回归树模型的应用揭示了“VSR”测度模型的有效性和稳定性。在国家公园中,复杂的人地关系会影响生态系统健康的变化,这种作用方式不一定是线性的,更多是线性和非线性耦合发生的,针对国家公园生态系统健康,强化对其生态活力、服务能力和抗干扰力的综合认知以及对不同类型国家公园生态系统健康的差异化认知尤为重要。

参考文献(References):

- [1] 章锦河,苏杨,钟林生,吴承照,张玉钧,李鹏,薛华菊,徐菲菲,张宏梅,张香菊.国家公园科学保护与生态旅游高质量发展——理论思考与创新.中国生态旅游,2022,12(2):189-207.
- [2] 张晓禄,范建红,蔡云楠.荒野景观再野化发展及其对我国国家公园建设的启示.国家公园(中英文),2023,1(3):201-212.
- [3] 胡欢,章锦河,刘泽华,于鹏,陈敏.国家公园游客旅游生态补偿支付意愿及影响因素研究——以黄山风景区为例.长江流域资源与环境,2017,26(12):2012-2022.
- [4] 黄宝荣,王毅,苏利阳,张丛林,程多威,孙晶,何思源.我国国家公园体制试点的进展、问题与对策建议.中国科学院院刊,2018,33(1):76-85.
- [5] Madej M A, Weaver W E, Hagans D K. Analysis of bank erosion on the Merced River, Yosemite Valley, Yosemite National Park, California, USA. Environmental Management, 1994, 18(2): 235-250.
- [6] 张玉钧,宋秉明,张欣瑶.世界国家公园:起源、演变和发展趋势.国家公园(中英文),2023,1(1):17-26.
- [7] Yu P, Zhang J H, Wang Y R, Wang C, Zhang H M. Can tourism development enhance livelihood capitals of rural households? Evidence from Huangshan National Park adjacent communities, China. Science of the Total Environment, 2020, 748: 141099.
- [8] Rapport D J. What constitutes ecosystem health? Perspectives in Biology and Medicine, 1989, 33(1): 120-132.
- [9] Chen W X, Gu T C, Zeng J. Urbanisation and ecosystem health in the Middle Reaches of the Yangtze River urban agglomerations, China: a U-curve relationship. Journal of Environmental Management, 2022, 318: 115565.
- [10] 陈万旭,卞娇娇,钟明星,曾杰,梁加乐,曾源源.交通通达度对生态系统健康的影响——以长江中游城市群为例.生态学报,2022,42(14):5721-5733.
- [11] Ren Y T, Zhang F, Li J P, Zhao C L, Jiang Q S, Cheng Z Q. Ecosystem health assessment based on AHP-DPSIR model and impacts of climate change and human disturbances: a case study of Liaohe River Basin in Jilin Province, China. Ecological Indicators, 2022, 142: 109171.
- [12] Li W J, Wang Y, Xie S Y, Cheng X. Spatiotemporal evolution scenarios and the coupling analysis of ecosystem health with land use change in Southwest China. Ecological Engineering, 2022, 179: 106607.
- [13] Peng J, Liu Y X, Wu J S, Lv H L, Hu X X. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: a case study in Shenzhen City, China. Landscape and Urban Planning, 2015, 143: 56-68.
- [14] 曹艺凡,杨春,王旭.重庆市乡村生态系统健康时空格局演化及规划调控研究.山地学报,2022,40(6):902-918.
- [15] Sarkar A, Patil S, Hugar L B, VanLoon G. Sustainability of current agriculture practices, community perception, and implications for ecosystem health: an Indian study. EcoHealth, 2011, 8(4): 418-431.
- [16] 舒远琴,宋维峰,马建刚.哈尼梯田湿地生态系统健康评价指标体系构建.生态学报,2021,41(23):9292-9304.
- [17] 蒋啸,周旭,肖杨,罗雪,杨大方.面向湖泊生态系统健康维护的生态管控分区研究——以红枫湖流域为例.生态学报,2021,41(7):2571-2581.
- [18] Jing L D, Bai S, Li Y H, Peng Y, Wu C X, Liu J T, Liu G X, Xie Z C, Yu G L. Dredging project caused short-term positive effects on lake ecosystem health: a five-year follow-up study at the integrated lake ecosystem level. Science of the Total Environment, 2019, 686: 753-763.
- [19] 祁帆,李晴新,朱琳.海洋生态系统健康评价研究进展.海洋通报,2007,26(3):97-104.
- [20] 赵玉婷,李文龙,陈迪,余翠,赵新来,许静,郭旭临.高寒牧区草地生态系统健康动态评价——以甘南地区为例.草业科学,2017,34(1):16-29.
- [21] Norton B. Sustainability, human welfare, and ecosystem health. Environmental Values, 1992, 1(2): 97-111.

- [22] Liu X P, Zhang Z, Li M X, Fu Y H, Hui Y. Spatial conflict simulation of land-use based on human-land-landscape elements intercoordination; a case study in Tianjin, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194(4): 317.
- [23] 刘焱序, 彭建, 汪安, 谢盼, 韩忆楠. 生态系统健康研究进展. *生态学报*, 2015, 35(18): 5920-5930.
- [24] 王有兵, 张士平, 李子光, 杨建军, 姜健发. 云南苍山洱海国家级自然保护区生态系统健康变化研究. *生态科学*, 2022, 41(2): 131-136.
- [25] 陈军纪, 王蕾, 刘彬, 杨更强, 曹秋梅, 陈艳锋, 尹林克. 极旱荒漠生态系统健康评价——以安西国家级自然保护区为例. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(12): 98-103.
- [26] 杨波, 廖丹霞, 李京, 蒋卫国, Claudia Kuenzer, 周斌. 东洞庭湖湿地生态系统健康状态与水位关系研究. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(8): 1145-1152.
- [27] 王一涵, 周德民, 孙永华. RS 和 GIS 支持的洪河地区湿地生态健康评价. *生态学报*, 2011, 31(13): 3590-3600.
- [28] O'Brien A, Townsend K, Hale R, Sharley D, Pettigrove V. How is ecosystem health defined and measured? A critical review of freshwater and estuarine studies. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 722-729.
- [29] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态系统健康评价初探. *中国环境科学*, 2002, 22(6): 525-529.
- [30] 卢应爽, 韩蕊, 石宇, 郭泳. 黔东南苗族侗族自治州生态系统健康的时空变化. *生态学报*, 2021, 41(14): 5557-5569.
- [31] Ge F J, Tang G L, Zhong M X, Zhang Y, Xiao J, Li J F, Ge F Y. Assessment of ecosystem health and its key determinants in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(2): 771.
- [32] 张峰, 杨俊, 席建超, 李雪铭, 陈鹏. 基于 DPSIRM 健康距离法的南四湖湖泊生态系统健康评价. *资源科学*, 2014, 36(4): 831-839.
- [33] 汪雁佳, 陆宏芳, 林永标, 周丽霞, 蔡洪月, 周笛轩. 粤港澳大湾区不同恢复模式植物群落结构与生态系统健康的动态变化. *生态学报*, 2021, 41(9): 3669-3688.
- [34] Young R G, Collier K J. Contrasting responses to catchment modification among a range of functional and structural indicators of river ecosystem health. *Freshwater Biology*, 2009, 54(10): 2155-2170.
- [35] Mistri M, Borja A, Aleffi I F, Lardicci C, Tagliapietra D, Munari C. Assessing the ecological status of Italian lagoons using a biomass-based index. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 126: 600-605.
- [36] 郭秀锐, 毛显强, 杨居荣, 杨志峰. 生态系统健康效果-费用分析方法在广州城市生态规划中的应用. *中国人口·资源与环境*, 2005, 15(5): 126-130.
- [37] Das S, Bhunia G S, Bera B, Shit P K. Evaluation of wetland ecosystem health using geospatial technology: evidence from the lower Gangetic flood plain in India. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(2): 1858-1874.
- [38] 刘国彬, 胡维银, 许明祥. 黄土丘陵区小流域生态经济系统健康评价. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 44-49.
- [39] Breaux A, Cochran S, Evens J, Martindale M, Pavlik B, Suer L, Benner D. Wetland ecological and compliance assessments in the San Francisco Bay Region, California, USA. *Journal of Environmental Management*, 2005, 74(3): 217-237.
- [40] Ran C, Wang S J, Bai X Y, Tan Q, Wu L H, Luo X L, Chen H, Xi H P, Lu Q. Evaluation of temporal and spatial changes of global ecosystem health. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(3): 1500-1512.
- [41] Wu J S, Cheng D J, Xu Y Y, Huang Q, Feng Z. Spatial-temporal change of ecosystem health across China: Urbanization impact perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 326: 129393.
- [42] Das M, Das A, Mandal A. Research note: Ecosystem Health (EH) assessment of a rapidly urbanizing metropolitan city region of eastern India-A study on Kolkata Metropolitan Area. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 204: 103938.
- [43] Peng J, Liu Y X, Li T Y, Wu J S. Regional ecosystem health response to rural land use change: a case study in Lijiang City, China. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 399-410.
- [44] Brussard P F, Reed J M, Tracy C R. Ecosystem management: what is it really? *Landscape and Urban Planning*, 1998, 40(1/2/3): 9-20.
- [45] Oh J G, Won H J, Myeong H H. A study on the method of ecosystem health assessment in National Parks. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 2016, 49(2): 147-152.
- [46] Shu H, Xiao C W, Ma T, Sang W G. Ecological health assessment of Chinese National Parks based on landscape pattern: a case study in Shennongjia National Park. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(21): 11487.
- [47] Fernández R, Alcocer J, Oseguera L A. Microcystins presence threatens the ecosystem health of a tropical National Park: Lagunas de Montebello, Chiapas. *Brazilian Journal of Botany*, 2021, 44(1): 207-212.
- [48] Ishtiaque A, Myint S W, Wang C Y. Examining the ecosystem health and sustainability of the world's largest mangrove forest using multi-temporal MODIS products. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570: 1241-1254.
- [49] Winarni N L, Afifah Z, Nuruliawati. Are butterfly species useful indicators of ecosystem health in Bali Barat National Park? *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 481(1): 012001.
- [50] Newman S H, Chmura A, Converse K, Kilpatrick A M, Patel N, Lammers E, Daszak P. Aquatic bird disease and mortality as an indicator of

- changing ecosystem health. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 352: 299-309.
- [51] Myeong H H, Kim J E, Kim H, Oh J G. Comparison of the National Park ecosystem health assessment and an advanced assessment system. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 2021, 8(2): 112-119.
- [52] Su M R, Fath B D, Yang Z F. Urban ecosystem health assessment: a review. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(12): 2425-2434.
- [53] Jiang W, Lü Y, Liu Y X, Gao W Y. Ecosystem service value of the Qinghai-Tibet Plateau significantly increased during 25 years. *Ecosystem Services*, 2020, 44: 101146.
- [54] 王立, 陆林, 杨永峰, 程亚文, 王原. 基于生态系统服务权衡的自然保护区功能区划——以安徽升金湖国家级自然保护区为例. *国家公园 (中英文)*, 2023, 1(3): 151-162.
- [55] Wang P J, Zhang J H, Ma J X, Guo L J, Yang L J, Ma X B, Sun F, Cao S S. What impacts ecosystem services in tropical coastal tourism cities? A comparative case study of Haikou and Sanya, China. *Journal of Environmental Management*, 2023, 342: 118227.
- [56] 蒋飞阳, 田健, 艾合麦提·那麦提, 曾坚. 应对暴雨洪涝灾害的平原城市生态水文调节服务供需评估——以天津市为例. *生态学报*, 2023, 43(12): 4928-4942.
- [57] Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45: 5-32.
- [58] Choi W J, Choi T S. Automated pulmonary nodule detection based on three-dimensional shape-based feature descriptor. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2014, 113(1): 37-54.
- [59] Larivière B, Van den Poel D. Predicting customer retention and profitability by using random forests and regression forests techniques. *Expert Systems with Applications*, 2005, 29(2): 472-484.
- [60] 马小宾, 章锦河, 周乐莹, 孙怡, 杨良健, 郭丽佳, 王培家. 长三角区域经济与旅游规模异速关系的时空识别及成因分析. *地理研究*, 2023, 42(11): 2984-3002.
- [61] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees. *The Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802-813.
- [62] 李红琴, 张亚茹, 张法伟, 马文婧, 罗方林, 王春雨, 杨永胜, 张雷明, 李英年. 增强回归树模型在青藏高原高寒灌丛通量数据插补中的应用. *植物生态学报*, 2022, 46(12): 1437-1447.
- [63] 尹上岗, 杨山, 龚海波. 长三角工业经济规模与污染排放异速关系及互动机制. *地理学报*, 2022, 77(9): 2202-2218.
- [64] Youssef A M, Pourghasemi H R, Pourtaghi Z S, Al-Katheeri M M. Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Landslides*, 2016, 13(5): 839-856.