

陈思淇, 张玉钧, 高云, 等. 基于 AHP-PROMETHEE-GIS 的半干旱地区生态旅游活动适宜性分析——以宁夏灵武市白芨滩沙漠公园为例[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2): 121-133.

基于 AHP-PROMETHEE-GIS 的半干旱地区 生态旅游活动适宜性分析 ——以宁夏灵武市白芨滩沙漠公园为例

陈思淇, 张玉钧, 高云, 肖书文, 张娇娇

(北京林业大学 园林学院, 北京 100083)

摘要: 半干旱地区生态旅游业的发展需要充分考虑生态资源的脆弱性和特殊性, 生态旅游活动的适宜性研究可促进对生态脆弱区旅游资源的科学保护与利用。提出一套基于 AHP-PROMETHEE-GIS 的半干旱地区生态旅游活动适宜性分析框架, 并在宁夏灵武市白芨滩沙漠公园大泉片区进行实验。根据适宜性分析框架, 得出适合进行各类生态旅游活动的潜在区域。研究方法的主要创新点在于: (1) 利用 PROMETHEE (偏好顺序结构评估法), 突破了 AHP 评价方法的补偿性局限; (2) 实现了针对 418 个样本量的 11 类生态旅游活动适宜性排序结果的批量输出; (3) 结合 GIS 的 PROMETHEE, 将生态旅游活动排序评价结果与空间布局叠合, 针对性提出生态旅游活动规划的优化建议和具体的生态保护措施, 为半干旱地区的生态旅游发展提供一定参考价值。

关键词: 适宜性分析; 生态旅游; 半干旱地区; 多准则决策分析; PROMETHEE (偏好顺序结构评估法)

文章编号: 1000-694X(2022)02-121-13

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00132

中图分类号: X321

文献标志码: A

0 引言

中国干旱半干旱区面积约占国土面积的 47%, 由于脆弱的生态环境条件, 这些地区社会经济发展相对滞后, 旅游资源开发受到制约。生态旅游由于强调保护生态环境与当地经济发展相结合^[1], 被认为是一种可有效缓解自然资源保护与地方生计发展之间矛盾与冲突的手段和工具^[2]。生态旅游 (Ecotourism) 最初用于描述以自然为基础、以教育为重点的在相对未受干扰地区的旅行^[3]。半干旱地区具有广漠之美和生物适应逆境的生命活力之美, 生态旅游价值极高^[4]。在半干旱地区适当规模地开展生态旅游活动, 可以促进发挥该区域潜在旅游资源的价值, 增加居民就业机会, 拓宽收入渠道, 保护生物多样性, 进而实现经济、社会与生态的可持续发展^[5]。

由于半干旱地区可直接开发的资源有限, 在开

展生态旅游活动之前, 十分有必要对这类生态脆弱地区的环境资源进行适宜性分析。适宜性分析是一类根据需求、偏好或预测因素等, 对特定用途最合适的空间格局进行评估和分类的过程和程序^[6], 通常涉及不同科学领域的多种方法, 其结果可用于可持续发展的各个领域^[7]。分析过程一般在一组潜在地点中, 为某些活动确定最佳地点, 即确定特定区域开展特定活动便利性以及适宜性的程度^[8-9]。针对半干旱地区生态旅游活动开展适宜性分析, 涉及对沙化土地和特色植物的生态旅游价值评估, 对生态脆弱区资源的保护和利用、当地社会经济文化环境的可持续发展都具有重要意义。

生态旅游适宜性评价是土地利用适宜性评价的一种^[10], 针对生态旅游开展的适宜性评价, 国内已基本形成了一套基于自然环境资源评价的定量方法体系。例如利用模糊综合评价法和熵权法^[11], 结合 GIS 空间分析功能与叠图法划分不同等级生态

收稿日期: 2021-08-15; 改回日期: 2021-09-29

资助项目: 宁夏回族自治区科技研发计划项目(2018HXFWYL24); 国家重点研发计划项目(2019YFD11004032)

作者简介: 陈思淇(1994—), 女, 江西吉安人, 博士研究生, 研究方向为文化景观、生态旅游、乡村生态景观。E-mail: siqisuer@163.com

通信作者: 张玉钧(E-mail: yjzhang622@foxmail.com)

旅游适宜区域^[12];采用层次分析(AHP)与德尔菲法相结合确定各项指标权重,结合GIS技术得到生态旅游适宜性定量综合评价结果^[13-14]。在对生态旅游潜力进行评估和分区时,国外研究中最常用的方法是结合AHP与各类3S技术的综合评价方法,例如生态旅游场地适宜性评价^[15]、结合游客喜好识别森林生态旅游区^[16]、山区健康旅游的潜在区域评价^[17]。但是,AHP这类基于绩效聚合的多准则决策方法(Multi-Criteria Decision Making, MCDM)是一种补偿性方法,即某些标准上的不良表现可被其他标准上的良好表现抵消^[18],最后的综合权重并不能完全反映实际情况。并且,这些生态旅游适宜性研究多将研究区的整体生态发展潜力进行评估,以进一步进行适宜度区划,很少有研究针对研究区内部不同地区的不同生态旅游活动的开展进行适宜性比较。

为了在半干旱区开展生态旅游活动之前,确定不同地区最适宜开展的活动类型,需要一种更综合的适宜性分析方法,以评估半干旱地区生态系统的生态旅游潜力,进而促进生态脆弱地区自然资源旅游业的可持续发展。本研究提出一套基于AHP-PROMETHEE-GIS的半干旱地区生态旅游活动适宜性分析框架,重点回答应在半干旱地区的何处发展何种生态旅游活动类型,即分析适合进行各类生态旅游活动的潜在区域,为半干旱地区的生态旅游发展提供一定参考价值。

1 基于AHP-PROMETHEE-GIS的生态旅游活动适宜性分析框架

1.1 多准则决策方法类型及PROMETHEE(偏好顺序结构评估法)

关于环境适宜性分析方法的研究集中于多准则决策方法(MCDM)和评价制图方法^[19],集成地理信息系统GIS工具的多准则决策分析(GIS-MCDA)被认为是环境决策分析中最有益和应用最广泛的工具^[20]。MCDM方法是一种将模糊性初始信息纳入解决复杂自然实践问题的方法,可以充分考虑复杂客观信息和利益相关者价值观^[21],以支持许多领域的决策。近年来MCDM方法在包括旅游业在内的环境决策应用中显著增多,大量研究已证明了多种MCDM方法在生态系统服务评估管理^[22]、可持

续评估^[23]、自然保护决策^[24]及农业用地适宜性^[25]等环境领域评估的成功应用和重要价值。除了层次分析法(AHP)外,MCDM方法还包括决策和评估实验(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)、网络分析法(the Analytic Network Process, ANP)、逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions, TOPSIS)、所有条件优化和折衷解决方案(Vlsekriterijumska Optimizacija Ikompromisno Resenje, VIKOR)、选择消去法(Elimination and Choice Translating Reality, ELECTRE)、多属性效用理论(Multi Attribute Utility Theory, MAUT)、偏好顺序结构评估法(Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations, PROMETHEE)等多种分析方法。对不同MCDM方法优缺点^[26-27]进行评述,并进一步梳理总结国际上近年来在旅游环境评估方面的MCDM方法应用案例(表1)^[7,15,17,28-34]。

由于AHP方法在权重计算中的指标补偿性缺陷,越来越多的学者认为应结合其他方法修正。例如Gigović等^[28]提出了GIS-DEMATEL空间模型,用于评估塞尔维亚地区生态旅游发展的土地适宜性;Çetinkaya等^[33]提出GIS-MCDM模型评估生态旅游潜在地理位置。然而,这些基于多种MCDM方法的生态旅游适宜性研究集中于评估目的地发展潜力,多将生态旅游当作一个整体概念,很少有研究针对不同生态旅游活动方案的选择进行适宜性排序比较。PROMETHEE被认为适合选择多个活动方案的成对比较和确定优先级^[35],且是软件支持最广泛的方法。

目前,PROMETHEE方法已成功应用于包括旅游业在内的多领域决策^[36]。PROMETHEE系列排名法存在针对性解决不同情况的多种版本^[37]。PROMETHEE计算操作通常依靠Smart Picker Pro、D-sight或R等软件平台完成,前两个平台提供了多种交互式 and 可视化工具,适用于单一决策对象的方案排序。然而,旅游活动的土地适宜性排序通常涉及较大规模的景观单元量及复杂指标信息,本研究利用R语言平台,首次在生态旅游活动决策中引入相关程序包“PROMETHEE Package for R”^[38],创新性实现在生态旅游适宜度评价领域的较大样本量的快速计算。

表1 不同MCDM方法优缺点及旅游决策应用案例
Table 1 Advantages and disadvantages of different MCDM methods and application cases of tourism decision-making

MCDM方法	优点	缺点	应用于旅游领域决策的MCDM代表性文献
AHP	适应性强;不涉及复杂的计算;因为层次结构,每个指标可以更好地集中和透明化;能够利用专家经验;易于使用;有效地测量一致性	可能因为指标间的相关性和可替代性产生错误结论;分配权重更为主观,指标过多易使专家产生反感和混乱	基于GIS-AHP的生态旅游场地适宜性评价 ^[15] 山区健康旅游的潜在区域评价 ^[17]
DEMATEL	能够考虑索引交互;数据需求更少;能够确定因果关系的因素	计算过程很复杂;结果缺乏客观性	生态旅游开发地点评估 ^[28]
ANP	适合构建复杂的指标体系;能够处理影响反馈和指标依赖问题	不能评估单一要素;成对矩阵复杂	海岸带最优旅游点选择 ^[29]
TOPSIS	对方案可进行选择排序;结合使用所有指标;各指标不必是独立的;易于使用和理解;样本数量和指标数量没有限制	难以表现出决策者的偏好;无法考虑方案相对重要性	绿色雨水基础设施策略效率 ^[30]
VIKOR	计算正负理想解的比值从而消除影响	很难对实时模型进行更新;未能提供改进方案	旅游项目融资风险评估 ^[31]
ELECTRE	可处理标准化的定量和定性特征;可处理不同尺度;能够处理指数补偿的问题	通用性较差,特别是在处理定量特征时,要求对目标有很好的理解;计算过程很复杂	乡村旅游活动评估 ^[7]
MAUT	排序标准的差异性考虑较全;可同时计算多种备选方案顺序;动态更新性能较强	难以获得决策者的准确输入;决策标准的结果尚不确定	制定旅游行程优化方案 ^[32]
PROMETHEE	无需处理原始数据,减少信息丢失;反映对象的各种属性;涉及小组级别的决策;合并不确定和模糊的信息	计算复杂;取决于决策者来分配权重复杂,忽略决策者的主观性	生态旅游潜在地理位置评估 ^[33] 区域旅游竞争力 ^[34]

1.2 适宜性评估方法体系构建

本文提出了一套基于AHP-PROMETHEE-GIS的半干旱地区生态旅游活动环境适宜性评估方法体系。首先结合AHP方法构建半干旱地区生态旅游活动适宜性指标,进一步利用PROMETHEE方法得出所有景观单元的生态旅游活动类型适宜度排序结果,并结合GIS技术进行生态制图,使生态旅游活动排序结果与半干旱地区景观环境属性结合,助力旅游管理及规划决策,并在生态旅游活动筛选、指标构建、权重赋分等方面体现半干旱地区特征。

主要步骤包括:①半干旱地区生态旅游活动筛选;②利用AHP法构建生态旅游活动的评价指标体系;③获取景观单元的适宜性指标数据并进行空间制图;④为不同活动不同指标进行适宜度赋分;⑤确定不同判断指标的权重;⑥设置PROMETHEE适宜性排序方法的参数;⑦计算每个景观单元旅游活动的净流量,并进行活动偏好排序;⑧结合GIS,输出生态旅游活动适宜性等级评价可视化结果(图

1)。将这套适宜性分析方法,运用在宁夏回族自治区灵武市白芨滩沙漠公园大泉片区。

2 实证分析——以白芨滩沙漠公园大泉片区为例

2.1 研究区概况

研究区白芨滩沙漠公园大泉片区位于宁夏回族自治区灵武市大泉乡,总面积2 817.69 hm²,属于荒漠型生态系统(图2)。该沙漠公园属国家级自然保护区白芨滩自然保护区的实验区范围(截止到2020年),为弱限制开发建设区,可进行对生态功能不造成破坏的生态旅游活动。白芨滩沙漠公园地处毛乌素沙地和鄂尔多斯台地区域,地势东高西低,区内河水向西流入黄河,地表水、地下水较为匮乏。其生态系统集干草原、荒漠和干草原向荒漠过渡三带为一体,三带合一的特点造就了区域内特色多样的植被类型。丰富的荒漠动植物资源以及人



图1 基于 AHP-PROMETHEE-GIS 的半干旱地区生态旅游活动适宜性分析框架

Fig.1 A framework for suitability analysis of ecotourism activities in semi-arid areas based on AHP-PROMETHEE-GIS

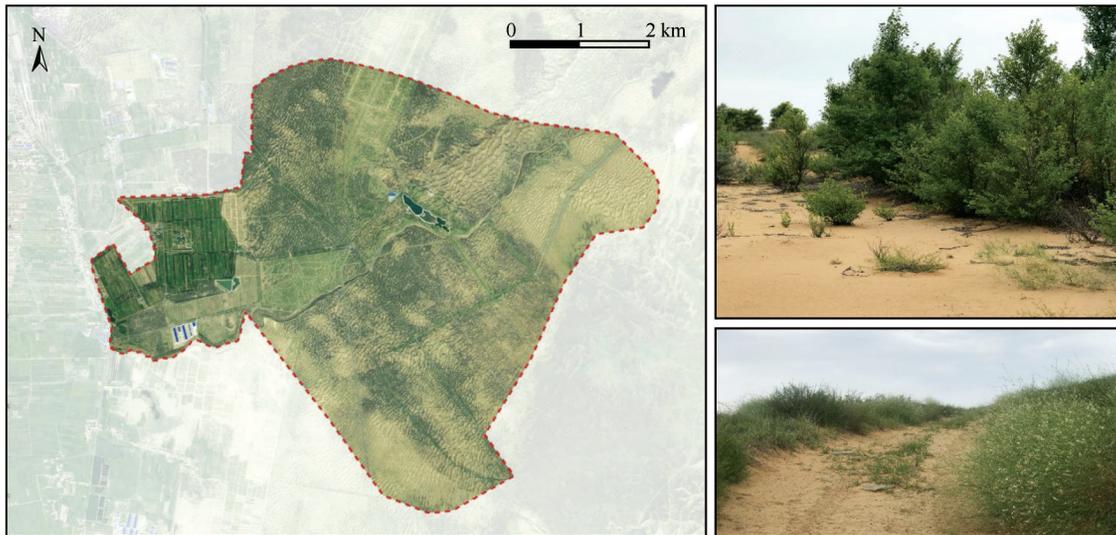


图2 研究区卫星影像图及照片

Fig.2 Satellite imagery and photos of the case area

工湖、经济果林等休闲观光资源,是其开展生态旅游活动的重要基础。同时,书记植树点、中外友谊林以及各种室内外宣教展示基础设施,完善了其环境宣教设施基础。

2.2 生态旅游活动筛选与适宜性指标构建

目前,国内学者通常基于资源或生态系统类型对生态旅游活动进行分类,结合吴宝清等^[39]、陈丽红等^[40]等研究对干旱半干旱地区的旅游活动分类,以及李玲^[41]对沙漠型旅游体验特征分析,初步将半

干旱地区生态旅游活动划分为沙漠体验类、环境教育类、运动探险类和观光休闲类4个大类。进一步以案例地的地貌、水文、生物、森林本底等生态资源为基础,结合其旅游发展现状,突出半干旱地区的环境特殊性,将可开展的生态旅游活动筛选为4大类、11小类(图3)。其中沙漠体验类包括滑沙游乐、沙雕挖沙、沙漠越野,环境教育类包括生态科普、专业考察,运动探险类包括户外徒步、探险拓展,观光休闲类包括森林游赏、田园休闲、野外露营、滨水休闲。

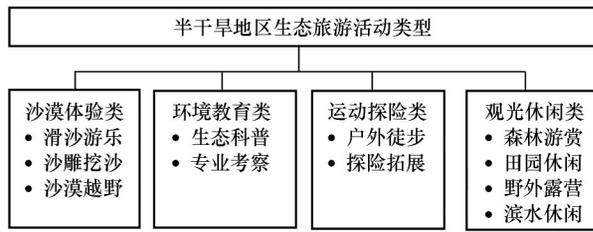


图 3 半干旱地区生态旅游活动主要类型

Fig.3 Main types of eco-tourism activities in semi-arid areas

半干旱地区开展生态旅游活动项目,不可避免地对资源环境产生影响,仅从活动适宜度分析无法

全面考虑生态旅游行为对脆弱荒漠系统的影响。需要从多角度、多层次、理性地衡量各方面造成的影响,避免对当地生态环境造成毁灭性的破坏^[42]。参考陈勇等^[43]研究,从可持续发展视角来看,需考虑地貌、动植物保护等环境限制性指标。基于此,从半干旱区生态系统保护的局限性和生态旅游活动发展的适宜度两方面,构建适宜性指标层,具体包括土壤地貌、动植物保护、基本环境、基础设施、植被覆盖和科普教育等 6 个一级指标层及 10 个二级指标(表 2)。

表 2 基于生态系统保护与可持续利用的生态旅游活动适宜性指标

Table 2 Suitability indicators for eco-tourism activities based on ecosystem protection and sustainable use

目标层	准则层	指标层	具体分类					
生态系统保护的 限制性指标	土壤地貌	土壤沙化类型	流动沙丘	半固定沙丘	固定沙丘	露沙地	非退化土地	
		坡度/(°)	0—2	2—6	6—12	12—20	20—30	
	动植物保护	野生动物活动分布距离/m	<250	250—500	500—750	750—1 000	>1 000	
生态旅游活动开展的 适宜度指标	基本环境	土地利用现状	林地	灌木林	未成林地/宜林地	耕地	水域	建设用地
		水体距离/m	<250	250—500	500—750	750—1 000	>1 000	
	基础设施	主要道路距离/m	<250	250—500	500—750	750—1 000	>1 000	
		服务设施距离/m	<250	250—500	500—750	750—1 000	>1 000	
	植被覆盖	植被覆盖度/%	<10	10—20	20—30	30—40	40—50	>50
	科普教育	特色植被分布	荒漠植物群落组合	特色沙生植物群落	一般荒漠灌丛	果园	其他	
	监测设施距离/m	<250	250—500	500—750	750—1 000	>1 000		

2.3 数据获取与景观单元适宜度分析

利用 ArcGIS 10.6 软件,并结合白芨滩国家级自然保护区管理处、中国科学院计算机网络信息中心等机构提供的相关数据(表 3),将研究区信息数字化后,形成了专属地理空间数据库。

采用景观单元(Landscape Unit),作为旅游活动适宜性研究的基本对象,即由表达景观特征类型的多边形围合的空间范围,以缓解传统旅游点描述法空间范围模糊的问题。参考吴波等^[44]以植被和地貌为景观分类指标对毛乌素山地荒漠化景观进行分类与制图,Li 等^[45]以地形和土地覆盖类型等关键景观特征对西南武陵山多民族地区景观类型识别,本研究选取沙漠植被分布类型、土地沙化类型和土地利用类型,结合森林资源二类调查小斑数据,得到研究区域内的 418 个景观单元,进一步针对范围内所有景观单元的适宜性指标进行分

析(图 4)。

限制性指标包括 3 类。①坡度:研究区主要地貌类型为缓坡丘陵和沙漠低山丘陵两种类型,海拔 1 131—1 260 m,采取等值线法得出高精度 DEM 地形高程数据,以此分析出案例地的坡度信息。②土壤沙化类型:参考《沙化土地监测技术规程(GB/T24255-2009)》,根据沙物质流动状态、植被盖度及土质等沙化属性,将沙化土地划分为流动沙地(丘)、半固定沙地(丘)、固定沙地(丘)、露沙地、沙化耕地、非生物治沙工程地、风蚀残丘、风蚀劣地和戈壁等类型。研究区的土壤沙化类型包括露沙地、固定沙丘、半固定沙丘、流动沙丘等(表 4)。其中半固定沙丘在退化土壤中所占比例最高,为 31.70%,其面积高达 893.18 hm²;其次是固定沙丘占比 18.79%;分布最少的是水体、建筑等其他类型。③野生动物活动分布距离:根据保护区监测报告,试

表3 数据来源
Table 3 Data Source

数据分类	原始数据类型	数据来源
高程数据	ASTER GTM 30mdem 数据	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)
土壤沙化类型	《宁夏灵武大泉国家沙漠公园总体规划》(2015–2020年), 结合实地调查	白芨滩国家级自然保护区管理处
土地利用现状类型	森林资源二类调查小班数据库	白芨滩国家级自然保护区管理处
植被覆盖度	Landsat8 影像数据(FILE_DATE=2019-05-20T09:30:13Z),	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)
特色植被分布	《宁夏灵武白芨滩自然保护区植被图》	《宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区综合科学考察报告》——白芨滩国家级自然保护区管理处
重点野生动植物	《宁夏灵武白芨滩自然保护区重点保护野生植物分布图》 《宁夏灵武白芨滩自然保护区重点保护野生动物分布图》	
保护监测设施	白芨滩国家级自然保护区基础设施数据集	白芨滩国家级自然保护区管理处

验区无重点保护植物分布;在白芨滩公园大泉片区的西部以及中北部区域,均监测到凤头百灵、珠颈斑鸠、崖沙燕等鸟类,以及沙狐、狗獾等哺乳类动物等保护动物活动记录。

适宜度指标包括6类。①土地利用现状:以灌木林(51.62%)、宜林沙荒地(16.10%)等为主(表5)。②水体距离:水体分布在西部和中北部。③主要道路距离:研究区内部可进入性较好,已有狼永公路等乡级公路呈东西向穿过,南北向也有一定的道路连通,研究范围内距离主要道路分布在250—500 m。④服务设施距离:目前白芨滩沙漠公园大泉片区以防沙治沙展、主席枣树、治沙成果展示区等治沙文化展示类设施为主,另还有几处接待中心和管理服务建筑闲置。根据实地调研,体验设施主要集中分布在西部和中东部区域,集中区域距离设施较近,约在250—500 m;其他区域分散分布,距离较远,约在750—1000 m。⑤监测设施距离:目前保护监测设施集中分布在西部区域,主要包括管理站、防疫站、监测中心、宣教中心等四大类,其中监测中心包括科研监测中心、生物多样性监测中心以及气象、水文、土壤等环境质量监测中心。⑥植被覆盖度:借助研究区 Landsat8 影像数据,在 ENV4.8 平台进行植被归一化处理,经几何校正、大气校正和配准等预处理后,得到植被指数(NDVI)及植被覆盖度分布信息(表6)。研究区的植被覆盖度主要为10%—20%,其次是20%—30%。⑦特色植被分布:区域内沙生植物包括沙米、天然柠条、沙柳、乌柳等,分布面积较广,具有典型的荒漠生态系统特征。其中沙米群落属于特色沙生群

落,生态科普和观赏价值较高。

2.4 不同活动下的指标权重确定

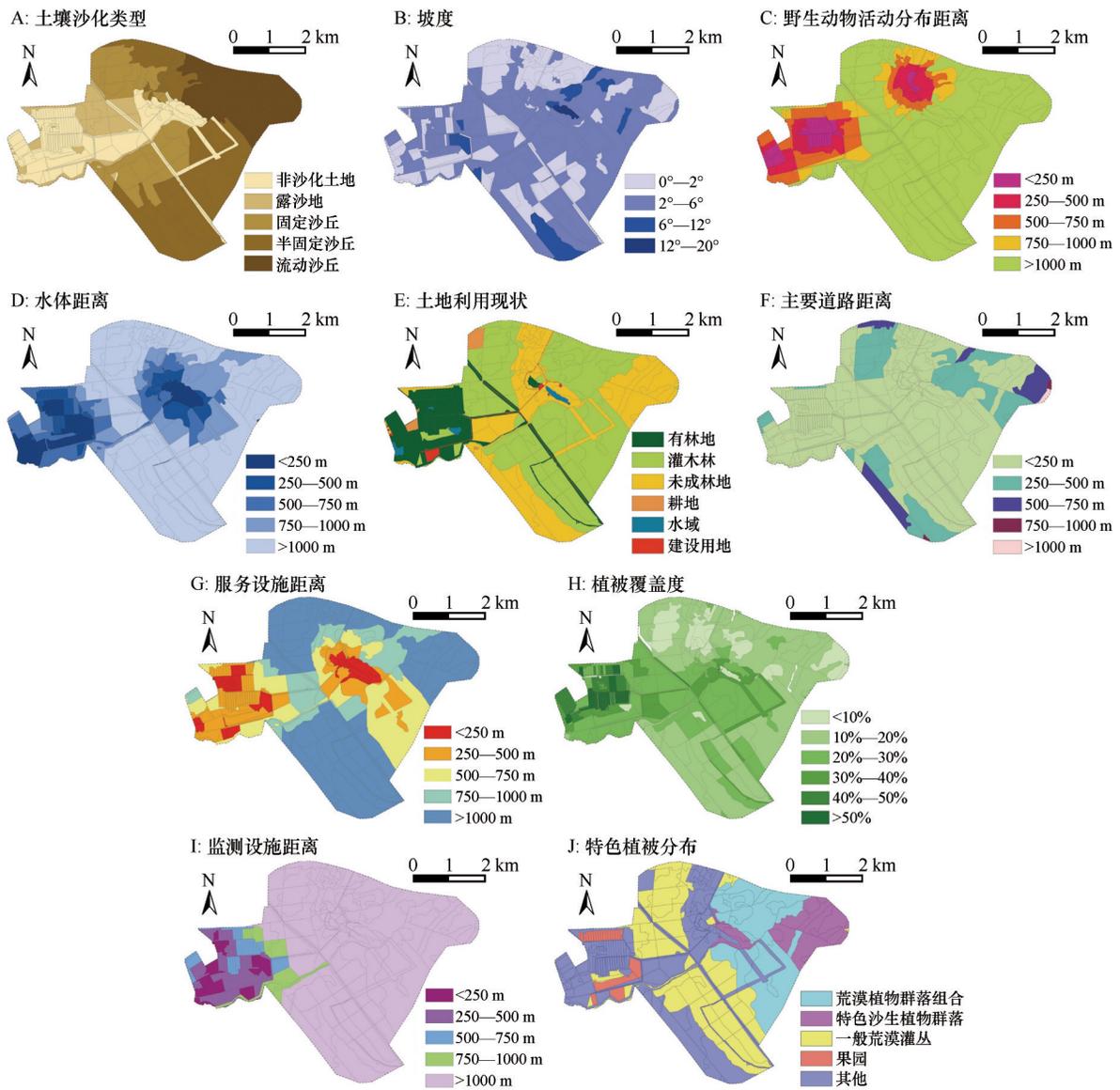
进一步以研究区实地情况为基础,结合专家意见,为拟定的生态旅游活动的每个指标赋予分数,这些专家包括项目团队以及旅游、地理和景观专业背景的科研人员。指标的分数范围为1—5,其中1为“最不适合”,5为“最适合”。

根据建立的指标体系,制作生态旅游活动评价指标重要性专家评判表,对各指标重要程度做出判断。在专家意见基础上,对每一层次各个元素相对重要性进行两两比较,在 Yaahp10.1 软件中得到判断矩阵,并最终形成各指标权重(表7)。对各评价指标权重逐一进行一致性检验,检验系数 CR 均小于0.1,即所有权重结果都通过一致性检验。

2.5 基于 PROMETHEE 的适宜性排序及可视化输出

2.5.1 适宜性排序

本研究的 PROMETHEE 相关分析利用“PROMETHEE Package for R”语言包,在 R Studio1.3 软件平台中进行操作。根据语言程序包操作流程,偏好函数设置为 Linear 类型^[46],偏好阈值(Preference thresholds)设置为5,无差异阈值(Indifference threshold)设置为1,矩阵偏好标准设置越大越好(max)。即指标分值小于等于无差异阈值(1度)时,活动选择时不存在偏好差异;分值大于等于偏好阈值(5度)时,该活动具有强烈偏好。



A—C:生态系统保护的限制性指标分析;D—J:生态旅游活动开展的适宜度指标分析

图 4 不同适宜性指标分析下的景观单元分类制图

Fig.4 Classification mapping of landscape units under different suitability index analysis

表 4 土壤沙化类型

Table 4 Soil desertification types of the case area

土壤沙化类型	面积/hm ²	比例/%
非退化土地	659.95	23.42
露沙地	257.17	9.13
固定沙丘	529.31	18.79
半固定沙丘	893.18	31.70
流动沙丘	466.76	16.57
其他(水体/建筑)	11.32	0.40
合计	2 817.69	100.00

以编号为“0”的景观单元为示范,在R平台中输入相关指标数据和排序函数参数,得到包括正、负

流量的PROMETHEE I排序结果(图5A),以及显示最终净胜出流量的PROMETHEE II完全排序结果(图5B)。根据净流量大小排序,得到示范单元的11个生态旅游活动适宜度等级,前四名活动结果分别是A3(专业科考)、A2(生态科普)、A4(田园休闲)及A6(户外徒步),结果与该景观单元现有环境属性一致。最后,在每个景观单元中都重复了上述的PROMETHEE排序步骤。获得了所有景观单元生态旅游活动的优势等级,并将所有排序结果关联到ArcGIS10.6软件平台。

2.5.2 可视化结果输出

对所有景观单元的生态旅游活动排序结果进行

表5 研究区土地利用类型

Table 5 Land use types of the case area

用地类型	有林地	疏林地	苗圃地	辅助生产林地	国家特别规定灌木林	宜林荒山荒地	宜林沙荒地	未成林造林地	封育未成林地	农地	水域	建设用地	合计
面积/hm ²	260.39	33.51	106.15	9.90	1454.47	17.81	453.75	384.64	10.78	34.24	22.63	29.42	2 817.69
比例/%	9.24	1.19	3.77	0.35	51.62	0.63	16.10	13.65	0.38	1.22	0.80	1.04	100.00

表6 研究区植被覆盖度

Table 6 Vegetation cover of the case area

植被覆盖度	百分比/%
<10%	10.12
10%—20%	44.77
20%—30%	30.98
30%—40%	8.62
40%—50%	3.06
>50%	2.45
合计	100

汇总统计,得到白芨滩沙漠公园大泉片区范围内的所有景观单元活动适宜度排名(1—11度),将每个景观单元的活动排序结果前四级(即最适合的前4项活动)在ArcGIS中显示。结果显示,在所有景观单元的一级适宜活动中,适宜开展滑沙游乐的区域面积占比最大(23.29%),面积为656.09 hm²,沙雕挖沙、生态科普、专业考察、户外徒步等紧跟其后。二级适宜活动中,最适合的生态旅游活动的最大面积是生态科普,总面积为1 071.71 hm²,其他被确定为二级适宜活动类型分别是专业科考、沙雕挖沙、沙漠越野等,剩余详细排序结果及活动适宜度分布见表8及图6。

表7 不同生态旅游活动下的指标权重赋值

Table 7 Assignment of indicator weights under different eco-tourism activities

活动	指标											合计
	土壤沙化类型	坡度	野生动物活动分布距离	水体距离	土地利用现状	主要道路距离	服务设施距离	植被覆盖度	特色植被分布	监测设施距离		
A1 森林游赏	0.0739	0.0298	0.0642	0.047	0.0881	0.0809	0.1273	0.3282	0.1094	0.0513	1	
A2 生态科普	0.0875	0.0353	0.2618	0.0556	0.0536	0.0276	0.0482	0.061	0.244	0.1254	1	
A3 专业考察	0.0727	0.0182	0.3978	0.0363	0.0544	0.0208	0.0208	0.0334	0.2003	0.1454	1	
A4 田园休闲	0.0989	0.0494	0.0698	0.0247	0.2062	0.0491	0.0924	0.3266	0.0653	0.0174	1	
A5 野外露营	0.1141	0.1141	0.0464	0.038	0.0727	0.1509	0.2669	0.1395	0.0232	0.0341	1	
A6 户外徒步	0.1741	0.0745	0.1207	0.0471	0.105	0.029	0.1159	0.1379	0.1379	0.058	1	
A7 沙漠越野	0.2867	0.1337	0.0492	0.0369	0.2108	0.0668	0.1049	0.0313	0.0626	0.0171	1	
A8 沙雕挖沙	0.3294	0.0911	0.0483	0.0501	0.1638	0.0663	0.1421	0.0302	0.0604	0.0183	1	
A9 滑沙游乐	0.3741	0.1602	0.0639	0.034	0.1697	0.0186	0.0742	0.0341	0.0341	0.0371	1	
A10 探险拓展	0.2296	0.132	0.0694	0.0505	0.154	0.0287	0.0652	0.1637	0.0819	0.0251	1	
A11 滨水休闲	0.0396	0.0237	0.0395	0.1945	0.5031	0.0711	0.0326	0.0424	0.0424	0.0111	1	

2.6 建议

研究结果回答了白芨滩沙漠公园应在何处发展何种生态旅游活动类型的问题。滑沙玩沙等沙漠体验类及生态科普等环境教育类活动是应优先考虑开展的生态旅游活动类型,森林游赏、田园休闲等观光类活动及沙漠越野等运动探险类活动,宜根据不同生态环境情况局部开展。

滑沙游乐等沙漠特色活动的适宜性排序结果靠前,且相应景观单元集中分布在东部沙化区域,今后可根据活动适宜性分布结果,在东部开展相应生态旅游活动。但是,根据二三级适宜度评价结果,东边沙化土地仍适合开展以生态科普为主的环境教育类生态旅游活动,主要因为沙化土壤区域分布着大量特色沙生植物群落景观,这也为半干旱地

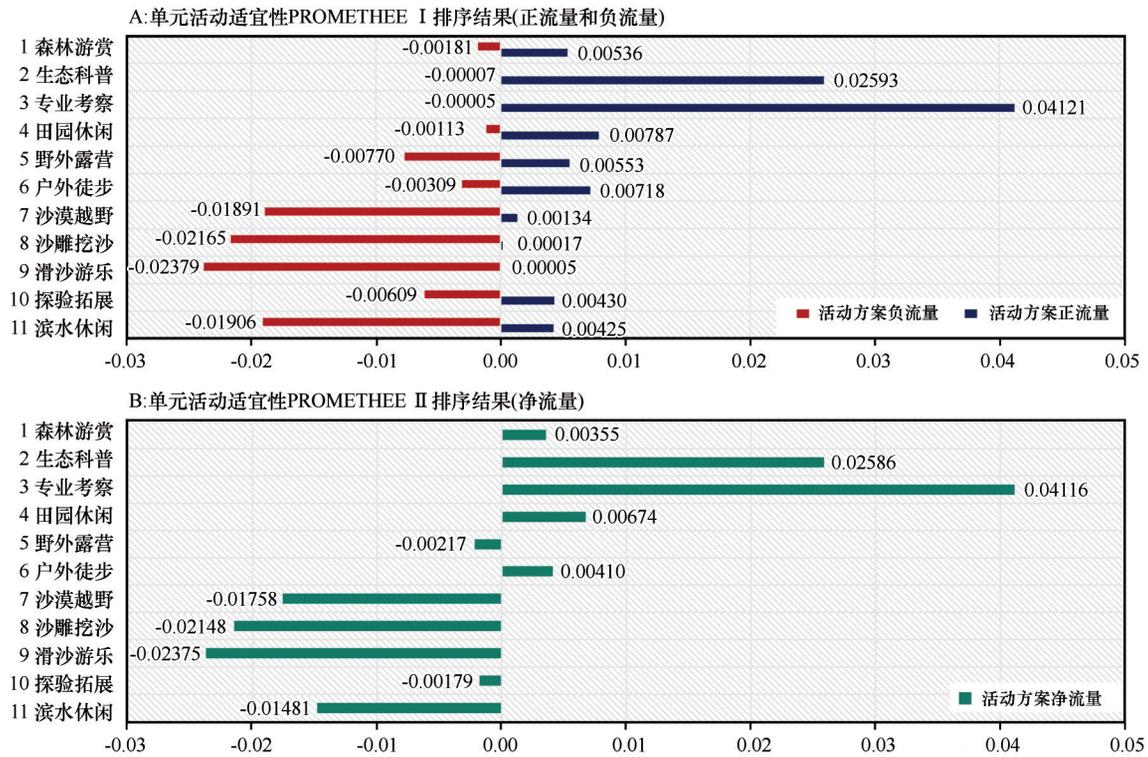


图 5 示范单元的生态旅游活动适宜性排序结果

Fig.5 The results of the suitability ranking of eco-tourism activities of the demonstration units

表 8 生态旅游活动的适宜度(1—4级)排序汇总

Table 8 Summary of the suitability rankings of ecotourism activities (levels 1-4)

一级适宜活动	面积/hm ²	二级适宜活动	面积/hm ²	三级适宜活动	面积/hm ²	四级适宜活动	面积/hm ²
滑沙游乐	656.09	生态科普	1071.71	户外徒步	497.05	生态科普	439.55
沙雕挖沙	640.45	专业考察	419.19	田园休闲	414.69	沙雕挖沙	419.85
生态科普	639.89	沙雕挖沙	349.34	专业考察	406.42	户外徒步	410.30
专业考察	374.48	沙漠越野	292.81	沙漠越野	366.20	专业考察	403.35
户外徒步	235.49	探险拓展	185.08	沙雕挖沙	331.42	沙漠越野	347.09
森林游赏	107.01	户外徒步	168.85	森林游赏	285.37	探险拓展	325.44
沙漠越野	76.69	森林游赏	164.13	生态科普	198.52	森林游赏	325.12
田园休闲	61.26	滑沙游乐	160.03	探险拓展	175.82	田园休闲	74.24
探险拓展	16.42	田园休闲	4.88	滑沙游乐	128.47	滑沙游乐	48.90
滨水休闲	9.91	滨水休闲	1.69	滨水休闲	12.93	野外露营	22.63
				野外露营	0.81	滨水休闲	1.23
合计	2 817.69		2 817.69		2 817.69		2 817.69

区林下经济发展向生态旅游和深度体验游转型提供思路。未来可结合现有科普、监测、体验和综合服务设施点开展多种半干旱地区生态体验活动。

在研究区域西侧,植被覆盖率较高且果园种植集中,常伴随着凤头百灵、珠颈斑鸠、沙狐等动物活动,目前这些地块的活动适宜性评价结果前3名分

别是专业考察、生态科普和田园休闲活动,可根据实际需求和设施布局,选择性发展适当的环境教育类活动和生态康养活动。

从整体区域范围来看,除沙漠体验类和科普教育类活动外,排序结果显示徒步也是一种十分适宜在半干旱地区开展的生态旅游活动,融合了观光休

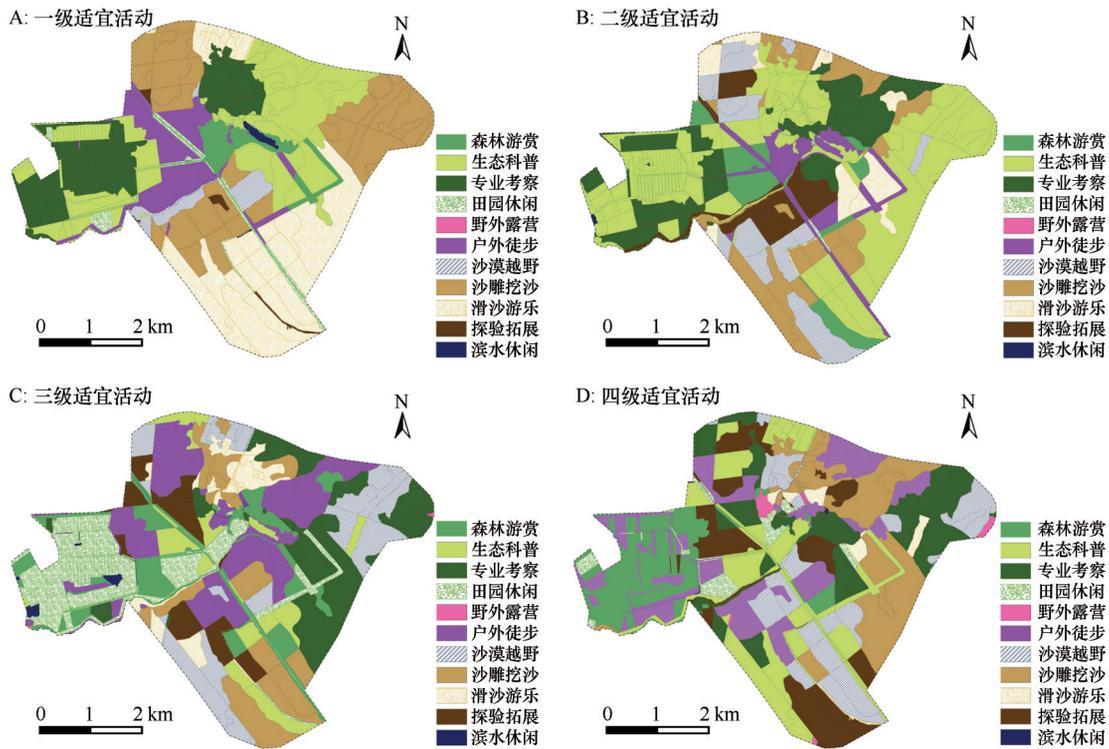


图6 不同景观单元的生态旅游活动的适宜度(1—4级)排序

Fig.6 The suitability ranking of ecotourism activities in different landscape units (level 1-4)

闲和运动探险特征,在植物覆盖率较高的植物景观和沙化土壤环境中均可开展,并且具有引起人们兴趣并增强视觉体验的风景价值,成为了三级适宜度活动排序中面积占比最多的类型。

探险拓展等运动探险类活动和森林游赏等观光休闲类活动,适宜度排序占比较低。前者主要因为研究区总体地势平坦且流动沙丘范围较小,只有局部坡度变化大的沙化区域适合开展探险拓展和沙漠越野类活动;后者主要因为现有植被覆盖率高的区域集中在西部和中部水景观附近,但西部高覆盖率植被以果园为主且观测到重点保护动物,更适宜进行开展田园休闲或环境教育类活动。

总体而言,白芨滩沙漠公园宜以半干旱生态系统保护和可持续利用为主题,围绕荒漠生态教育、荒漠科学研究、半干旱森林养生、荒漠休闲游憩、荒漠农业展示、荒漠运动拓展等设计生态旅游产品。进一步分析白芨滩国家级自然保护区管理处提供的2015—2020年沙漠公园总体规划(图7A),发现原分区规划较粗范——被划定为保护区实验区的大部分沙化土地未根据保护限制性情况进行分级管控,导致荒漠生态教育以及荒漠休闲游憩等低强度沙地生态旅游难以进行;其次,在西侧植被覆盖度较高的地区仍设置沙漠体验区,不利于开展半干

旱森林养生及农林业科普展示等具有荒漠特征的林下活动。

基于研究分析,针对上述现有规划分区和景点设置情况,提出初步规划优化方案。①基于活动适宜度排序前2位结果和现有设施分布情况,提出针对性更强、细节性更高的空间分区策略;②根据活动适宜度的空间分布情况,在不建设新设施的前提下,针对现有荒漠特征的生物资源和沙地风光,布局若干生态旅游节点(图7B)。

3 结论

本研究提出一套基于 AHP-PROMETHEE-GIS 的半干旱地区生态旅游活动适宜性分析框架,即利用 AHP 法构建生态旅游活动的评价指标体系,获取景观单元的适宜性指标数据并进行空间制图,为不同活动不同指标进行适宜度赋分并确定不同判断指标的权重,用 PROMETHEE 方法进行生态旅游活动的偏好排序,最后结合 GIS 输出适宜性等级评价结果,进而提出在半干旱地区开展生态旅游活动的若干优化建议。

研究方法的主要创新点在于:①利用 PROMETHEE 排序方法,强化了活动偏好阈值的选择和不同活动的多权重赋值,突破了常规 AHP 评价方法

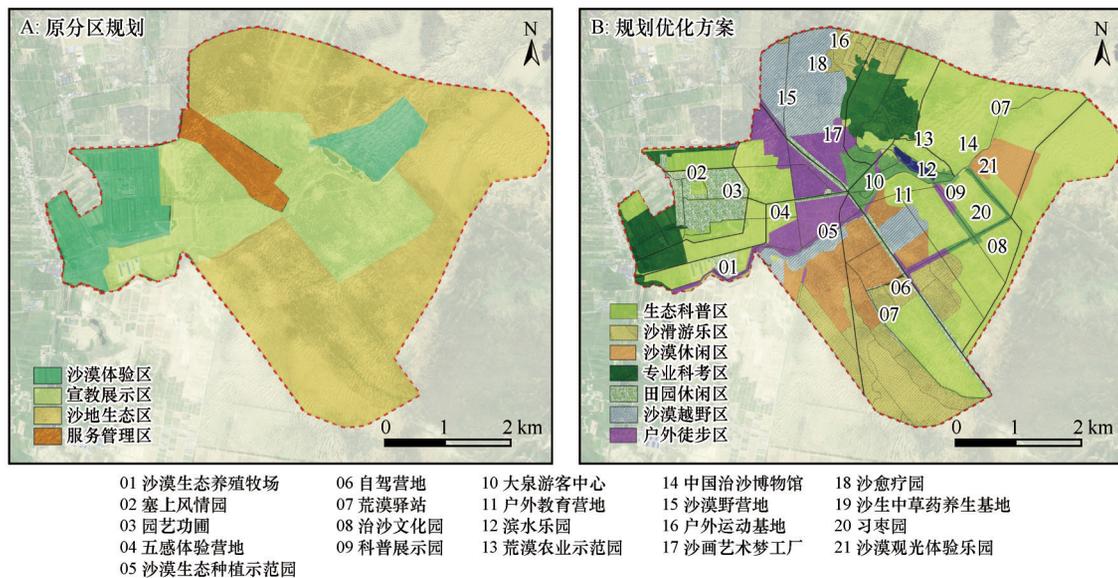


图 7 规划优化方案

Fig.7 Optimized planning

导致的高分弥补低分的补偿性局限；②首次将“PROMETHEE Package for R”工具包应用于生态旅游活动适宜性分析，突破了决策筛选对象的单一性局限。由于这类排序方法计算过程较复杂，目前多被应用于一个区域的适宜性选择，本研究实现了针对 418 个样本量的 11 类生态旅游活动排序结果的批量输出；③结合 GIS 的 PROMETHEE 方法，联接大规模数学数据集与地理空间数据，将生态旅游活动排序评价结果与案例研究区空间布局叠合，缓解传统旅游点描述法的空间范围模糊问题，更有利于针对性提出活动规划布局的优化建议和具体的生态保护措施。本研究重点在于回答在半干旱地区的哪些地方适宜发展何种生态旅游活动类型，未来研究可在此方法基础上进一步拓展，例如考虑另一种生态脆弱地区开展其他旅游活动类型的规划决策。

参考文献：

[1] Weaver D B, Lawton L J. Twenty years on: the state of contemporary ecotourism research[J]. *Tourism Management*, 2007, 28(5): 1168-1179.

[2] 王瑾, 张玉钧, 石玲. 可持续生计目标下的生态旅游发展模式: 以河北白洋淀湿地自然保护区王家寨社区为例[J]. *生态学报*, 2014, 34(9): 2388-2400.

[3] Kiper T. Role of ecotourism in sustainable development [M]// Özyavuz M. *Advances in Landscape Architecture*. 2013.

[4] 董瑞杰, 董治宝, 曹晓仪, 等. 中国沙漠生态旅游资源及其竞争力分析研究[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 911-917.

[5] Das M, Chatterjee B. Ecotourism: a panacea or a predicament? [J]. *Tourism Management Perspectives*, 2015, 14: 3-16.

[6] Malczewski J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview [J]. *Progress in Planning*, 2004, 62(1): 3-65.

[7] Ayhan Ç K, Taşlı T C, Özkök F, et al. Land use suitability analysis of rural tourism activities: Yenice, Turkey [J]. *Tourism Management*, 2020, 76: 103949.

[8] Steiner F. Resource suitability: methods for analyses [J]. *Environmental Management*, 1983, 7(5): 401-420.

[9] Hopkins L D. Methods for generating land suitability maps: a comparative evaluation [J]. *Journal of the American Institute of Planners*, 1977, 43(4): 386-400.

[10] 钟林生, 赵士洞, 向宝惠. 生态旅游规划原理与方法 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 147-155.

[11] 刘倩, 张超, 马立军, 等. 基于模糊评价: 三维魔方的村级生态旅游规划研究 [J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(8): 221-228.

[12] 卫淑芸, 吴明作, 赵勇, 等. 河南省自然禀赋潜力的适宜性评价及其生态旅游 GAP 分析 [J]. *河南科学*, 2018, 36(11): 1824-1829.

[13] 袁维, 张杰, 谭继强, 等. 基于 GIS 的朗乡自然保护区露营地适宜度空间格局 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(9): 2785-2793.

[14] 闫丽丽, 杨青林, 黄中奕, 等. 山地景区生态旅游适宜性分析及功能区划: 以黑竹沟风景名胜为例 [J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(1): 123-131.

[15] Bunruamkaew K, Murayam Y. Site suitability evaluation for ecotourism using GIS & AHP: a case study of Surat Thani province, Thailand [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2011, 21: 269-278.

[16] Dhami I, Deng J, Burns R C, et al. Identifying and mapping forest-based ecotourism areas in West Virginia-incorporating visitors' preferences [J]. *Tourism Management*, 2014, 42: 165-176.

- [17] Pan X M, Yang Z P, Han F, et al. evaluating potential areas for mountain wellness tourism: a case study of Ili, Xinjiang Province[J]. Sustainability, 2019, 11(20): 5668.
- [18] Rowley H V, Peters G M, Lundie S, et al. Aggregating sustainability indicators: beyond the weighted sum[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 111: 24–33.
- [19] 石垚, 张微, 任景明, 等. 生态敏感区旅游开发适宜性评价及生态制图方法[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7887–7898.
- [20] Jelokhani-Niaraki M, Sadeghi-Niaraki A, Choi S M. Semantic interoperability of GIS and MCDA tools for environmental assessment and decision making[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 100: 104–122.
- [21] Huang I B, Keisler J, Linkov I. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: ten years of applications and trends [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(19): 3578–3594.
- [22] Blattert C, Lemm R, Thees O, et al. Management of ecosystem services in mountain forests: review of indicators and value functions for model based multi-criteria decision analysis [J]. Ecological Indicators, 2017, 79: 391–409.
- [23] Cinelli M, Coles S R, Kirwan K. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment[J]. Ecological Indicators, 2014, 46: 138–148.
- [24] Esmail B A, Geneletti D. Multi-criteria decision analysis for nature conservation: a review of 20 years of applications[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2018, 9(1): 42–53.
- [25] Paul M, Negahban-Azar M, Shirmohammadi A, et al. Assessment of agricultural land suitability for irrigation with reclaimed water using geospatial multi-criteria decision analysis [J]. Agricultural Water Management, 2020, 231: 105987.
- [26] Kumar A, Sah B, Singh A R, et al. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 596–609.
- [27] Wu Y N, Tao Y, Zhang B Y, et al. A decision framework of offshore wind power station site selection using a PROMETHEE method under intuitionistic fuzzy environment: a case in China [J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 184: 105016.
- [28] Gigović L, Pamučar D, Lukić D, et al. GIS-Fuzzy DEMATEL MCDA model for the evaluation of the sites for ecotourism development: a case study of “Dunavski ključ” region, Serbia[J]. Land Use Policy, 2016, 58: 348–365.
- [29] Morteza Z, Reza F M, Seddiq M M, et al. Selection of the optimal tourism site using the ANP and fuzzy TOPSIS in the framework of integrated coastal zone management: a case of Qeshm Island[J]. Ocean & Coastal Management, 2016, 130: 179–187.
- [30] Luan B, Yin R X, Xu P, et al. Evaluating green stormwater infrastructure strategies efficiencies in a rapidly urbanizing catchment using SWMM-based TOPSIS[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 223: 680–691.
- [31] Wu L P, Gao H, Wei C. VIKOR method for financing risk assessment of rural tourism projects under interval-valued intuitionistic fuzzy environment[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 37(2): 2001–2008.
- [32] Baizal Z A, Rahmawati A A, Lhaksana K M, et al. Generating travel itinerary using ant colony optimization[J]. Telkomnika, 2018, 16(3): 1208–1216.
- [33] Çetinkaya C, Kabak M, Erbaş M, et al. Evaluation of ecotourism sites: a GIS-based multi-criteria decision analysis[J]. Kybernetes, 2018, 47(8): 1664–1686.
- [34] Lopes A P F, Muñoz M M, Alarcón-Urbistondo P. Regional tourism competitiveness using the PROMETHEE approach[J]. Annals of Tourism Research, 2018, 73: 1–13.
- [35] Segura M, Maroto C, Belton V, et al. Collaborative management of ecosystem services in natural parks based on AHP and PROMETHEE[M]//Huber S, Geiger M J, de Almeida A T. Multiple Criteria Decision Making and Aiding. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2019: 231–255.
- [36] Brans J-P, De Smet Y. PROMETHEE Methods[M]//Greco S, Ehrgott M, Figueira J R. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. New York, USA: Springer, 2016: 187–219.
- [37] Behzadian M, Kazemzadeh R B, Albadvi A, et al. PROMETHEE: a comprehensive literature review on methodologies and applications[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 200(1): 198–215.
- [38] Resce G, Tasiou M, Vidoli F. PROMETHEE Package for R [CP]. (2019–03–6) [2021–08–15]. <https://cran.r-project.org/web/packages/PROMETHEE/index.html>
- [39] 吴宝清, 吴晋峰, 刘佳, 等. 基于网络文本的巴丹吉林沙漠旅游者偏好研究[J]. 中国沙漠, 2015, 35(4): 1041–1047.
- [40] 陈丽红, 武法东, 王彦洁. 干旱半干旱区地质公园低碳旅游开发研究: 以巴彦淖尔国家地质公园为例[J]. 生态经济, 2015, 31(9): 137–140.
- [41] 李玲. 基于方法-目的链的沙漠型旅游区体验特征分析: 以库木塔格沙漠旅游区为例[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 67–74.
- [42] 刘芳, 郑江华, 韩林芝. 国内外沙漠旅游研究综述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 82–92.
- [43] 陈勇, 周立华, 王伟伟, 等. 典型沙漠化逆转区人地系统脆弱性及其障碍因子[J]. 中国沙漠, 2020, 40(4): 63–70.
- [44] 吴波. 沙质荒漠化土地景观分类与制图: 以毛乌素沙地为例[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 52–57.
- [45] Li G, Zhang B. Identification of landscape character types for trans-regional integration in the Wuling Mountain multi-ethnic area of southwest China [J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 162: 25–35.
- [46] Ishizaka A, Nemery P. Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2013: 137–160.

Suitability analysis of ecotourism activities in semi-arid areas based on AHP-PROMETHEE-GIS: A case study of Baijitan Desert Park in Lingwu City, Ningxia, China

Chen Siqi, Zhang Yujun, Gao Yun, Xiao Shuwen, Zhang Jiaojiao
(School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: It is necessary to fully consider the fragility and particularity of ecological resources for the development of ecotourism in semi-arid areas. The suitability analysis of ecotourism activities can promote the scientific protection and utilization of tourism resources in ecologically fragile areas. A set of AHP-PROMETHEE-GIS suitability analysis framework for eco-tourism activities in semi-arid areas was proposed, and experiments were conducted in the Daquan area of Baijitan Desert Park in Lingwu City, Ningxia. According to the suitability analysis framework, potential areas suitable for various eco-tourism activities were obtained. The results show that in the Baijitan Desert Park in Ningwu City, desert experience and environmental education activities are the types of eco-tourism activities that should be prioritized. At the same time, sightseeing activities and sports adventure activities should be carried out locally according to different ecological environments. The main innovations of the research method are: (1) The use of the PROMETHEE (preference ranking organization methods for enrichment evaluations) breaks through the compensatory limitations of the AHP evaluation method; (2) The 11 types of ecotourism activity suitability ranking results for 418 samples are realized in the R language; (3) Combining the PROMETHEE method and GIS, we superimpose the evaluation results of eco-tourism activities with the spatial layout of the study area, and put forward specific eco-tourism activities planning optimization suggestions and specific ecological protection measures. Furthermore, it provides a certain reference value for the development of ecotourism in semi-arid areas.

Key words: suitability analysis; ecotourism; semi-arid area; multi-criteria decision analysis; PROMETHEE