

DOI: 10.20103/j.stxb.202408041833

阔冬冬,渠丽萍.武夷山国家公园功能评价及分区研究.生态学报,2025,45(19): - .

Kuo D D, Qu L P. Study on the functional evaluation and zoning of Wuyishan National Park. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(19): - .

武夷山国家公园功能评价及分区研究

阔冬冬^{1,2}, 渠丽萍^{1,*}

1 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074

2 三峡集团云南能源投资有限公司, 昆明 650051

摘要: 科学合理的分区是实现国家公园多目标管理、差异化管控的重要手段。然而现有分区方法侧重层级属性, 较少考虑国家公园各功能之间的相互联系, 不利于分区后续管理。综合运用 InVEST 模型、MaxEnt 模型以及评价体系定量分析方法对武夷山国家公园生态服务、物种保护、科教游憩、社区发展 4 项功能展开评价, 以此为基础结合生态脆弱性评价, 采用权衡协同关系分析、自组织映射神经网络聚类分析等方法划分功能区。结果表明: 研究区生态服务功能良好, 空间上呈现出由西北向东南递减的特征。生态服务功能指数的高值区集中分布在园区的北部和西部, 低值区则主要分布于福建片区的东部。物种保护功能突出, 空间上呈现出“中部高、周围低”的分布格局。物种保护功能指数的高值区集中分布于园区的中部和西部, 低值区则分布于园区的边缘。科教游憩功能和社区发展功能集聚, 空间上呈现出东南局部偏高的特点。综合分区特征将武夷山国家公园划分为核心保护区、生态涵养区、生态保育区、多元发展区以及生态提升区五大功能区, 并提出差异化分区管控措施。研究从国家公园多功能视角制定分区策略, 为明晰功能分区、编制区域开发保护规划提供科学参考。

关键词: 国家公园; 功能评价; 功能分区; 武夷山国家公园

Study on the functional evaluation and zoning of Wuyishan National Park

KUO Dongdong^{1,2}, QU Liping^{1,*}

1 School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 Three Gorges Group Yunnan Energy Investment Company, Kunming 650051, China

Abstract: Scientific and rational zoning is critical to achieve multi-objective management and differentiated control in managing national parks. However, current zoning methods primarily focus on hierarchical attributes. These methods rarely consider the interconnections between various functions of a national park, hindering effective management and control of the national park in later periods. Thus, it is vital to develop a more comprehensive zoning method incorporating multiple functions of a national park. To bridge the gap, this study aimed to delineate functional zones and conduct zonal evaluations of the Wuyishan National Park by incorporating four functions of the national park and evaluate ecological vulnerability assessment. First, we assessed the four functions of the Wuyishan National Park: ecological services, species protection, science and education recreation, and community development using InVEST model, MaxEnt model, and quantitative evaluation methods. Second, we combined the assessment of four functions and ecological vulnerability assessment with methods such as trade-off synergy analysis and self-organizing mapping neural network clustering. Third, we delineated functional zones and conducted zonal evaluations based on the combination of comprehensive assessment of the four functions and the ecological vulnerability assessment. The results indicated that the ecological services function of Wuyishan National Park was in good condition in general. We observed that the spatial patterns of the ecological services function exhibited a spatial gradient of decline from northwest to southeast. High values of the ecological services function index were

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42071254)

收稿日期: 2024-08-04; **网络出版日期:** 2024-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lp_qu@163.com

predominantly clustered in the northern and western sections of the park, while low values were mainly observed in the eastern area of Fujian Province. The species protection function is prominent. The spatial patterns of the species protection function were heterogeneous in different areas of the national park; featuring high values at the core areas of the national park and diminishing values towards the periphery of the national park. High values of the species protection function index were concentrated in the central and western sections of the national park, while low values were found at the edges of the national park. The functions of science and education recreation, as well as community development, were clustered, with higher values in the southeastern area. Based on the comprehensive zoning characteristics, Wuyishan National Park was divided into five functional zones: core protection area, ecological conservation area, ecological preservation area, diversified development area, and ecological enhancement area. We proposed differentiated management and control measures for each zone. This research provides strategic insights for managing and protecting Wuyishan National Park by clarifying functional zones and guiding regional development plans.

Key Words: national park; functional evaluation; functional zoning; Wuyishan National Park

以国家公园为主体、自然保护区为基础、各类自然公园为补充的自然保护地体系^[1]正在逐步建立,标志着生态文明建设进入新的阶段。国家公园拥有着完整的、具有国家代表性的自然生态系统,是我国自然生态系统中最重要、自然景观最独特、自然遗产最精华、生物多样性最富集的部分。功能分区作为国家公园建设的重要一环,其实质是根据各区域本底特征,评价其所具备的最优功能,将国家公园划分为不同功能区并对其实行差别化管理^[2]。合理分区不仅可以协调国家公园保护与利用的矛盾冲突,而且有助于提高国家公园管理效率,从而实现国家公园合理利用与精细管理^[3-4]。

随着社会经济和生态理念的发展,许多国家根据其本国情况相继建立了国家公园、自然保护区等保护地,以此守护自然生态、保护自然资源^[5-6]。自 20 世纪 30 年代,Wright 等人提议在黄石国家公园周边建缓冲区以来^[7],国外分区模式先后经历了同心圆分区模式^[8]、“核心区-缓冲区-过渡区”模式^[9]以及精细化管理模式^[10-11]。由于我国国家公园及自然保护地体系建设起步较晚,致使分区管理的研究相对滞后,我国保护地分区模式经历了两区变三区^[12]、继而三区变两区^[13]的发展,形成了当前核心保护区、一般控制区的分区格局,然而这类分区模式是一种较为宏观的管理方式,如何有效的进行区域划分是分区模式实施的关键。功能评价是深入了解国家公园生态系统、资源状况、社会经济价值和管理效果的重要途径,以评价为基础可有效实现合理的功能分区。国内外早期关于国家公园功能评价的研究集中于园区整体功能的评价,涉及自然资源保护^[14-15]、可持续发展^[16]、资源价值评定^[17-19]等方面。但当前关于国家公园功能评价的研究多聚焦于单项功能,如生态服务功能评价^[20-21]、物种适宜生境评价^[22-24]、科教游憩适宜性评价^[25-27]、生态系统完整性评价^[28]等,国家公园的多功能评价研究较为缺乏。目前关于国家公园分区的研究多基于数理统计分析和空间格局分析等方法,以树形结构对国家公园具有特定功能的区域与不具有该功能的区域区分开来^[29],该分区方式层级属性和分区绝对性较强,较少考虑国家公园各功能之间的相互关系。而多功能评价的聚类分析则对各功能以平行结构来划分,该分区方式使各功能之间存在较高的平等性,能够更有效识别国家公园各区域的主导功能。同时已有研究多聚焦于原有核心区、缓冲区、试验区三圈模式或现有核心保护区、一般控制区两区模式下的管控分区研究^[30-31],对于国家公园功能分区的研究较少,而功能分区相较于当前两区模式下的管控分区更加细化,便于分区后续的精细管理和差异管控。

武夷山国家公园作为我国首批设立的国家公园之一^[32],拥有着最完整、最典型的亚热带森林生态系统,珍稀动植物资源丰富,是世界著名的生物模式标本采集地,同时还具有丰富的自然历史文化遗产,使得武夷山国家公园也是科研考察和旅游观光的宝地,此外园区内还有部分原住民生产生活。如何协调保护与利用之间的矛盾,促进武夷山国家公园协调有序发展是目前规划中面临的关键问题。本研究以武夷山国家公园为研究区,从生态服务、物种保护、科教游憩、社区发展 4 项功能出发,探究武夷山国家公园各项功能的空间分布特

征,在此基础上结合生态脆弱性评价,采用权衡协同关系分析、自组织映射神经网络聚类分析等方法划定功能区,进而依据各功能区特点提出分区分管管控对策,以期为国家公园差异化管控与治理提供借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

武夷山国家公园位于闽赣交界武夷山脉北段(27°31′21″—28°2′53″ N, 117°24′15″—117°59′33″ E),涉及福建省、江西省 2 省,南平市、上饶市 2 市,武夷山市、建阳区、光泽县、邵武市、铅山县 5 县(区、市)12 乡(镇),总面积 1279.82 km²(图 1)。园区位于中亚热带季风气候区,温暖湿润、降水丰富、四季分明、垂直地带气候差异显著,同时区域内地质地貌奇特,江河水系纵横,物种资源丰富,具有极高的科考保护价值。

1.2 数据来源

本研究所用数据包括基础地理数据、土地利用数据、气候土壤数据、河流水系数据、物种分布数据、地形地貌数据、社会经济数据以及其他相关辅助数据。其中武夷山国家公园矢量范围数据来源于《武夷山国家公园总体规划(2023—2030 年)》图集矢量化;年度/月度降雨量数据、月度潜在蒸散发数据来源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/>);土壤质地数据、土壤有机碳含量数据来源于世界土壤数据库(<https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/>);数字高程模型数据(DEM)来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>);物种分布数据来源于全球生物多样性信息数据库平台(<https://www.gbif.org/>)和 Map of Life 平台(<https://mol.org/>);气候因子数据来源于全球气候数据库(<https://www.worldclim.org/>);土地利用遥感数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>);人口密度数据来源于 WorldPop(<https://hub.worldpop.org/>);河流水系数据、道路交通数据、居民点数据、景观分布 POI 数据、游憩设施 POI 数据来源于 Open Street Map(<https://www.openstreetmap.org/>)。所有数据的空间参考统一为 CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_39,栅格数据的空间分辨率均重采样为 30 m×30 m。其中植被净初级生产力(NPP)数据基于朱文泉等人改进的 CASA 模型^[33-34]估算。

2 研究方法

2.1 研究技术路线

本研究以系统学、地理学、生态学、景观学等相关理论为指导,综合运用 GIS 分析技术,充分挖掘遥感影像、移动地图兴趣点、土地利用、气象等多源大数据,对武夷山国家公园生态服务功能、物种保护功能、科教游憩功能、社区发展功能进行评价,并以功能评价结果为基础,采用“优先级+主导功能”相结合的方法开展功能分区,总体思路见图 2。

功能分区中的优先级即基于植被净初级生产力(NPP),评估生态敏感性和适应性,进而计算生态脆弱性,以生态脆弱性作为功能区划分优先条件。生态脆弱性能够反映一个生态系统在面对外界干扰和压力时的稳定性和恢复能力。生态脆弱性高的地区,其生态环境往往较为敏感,容易受到自然或人为因素的干扰而发生退化或变化,因此需要重点保护和修复。主导功能识别即基于生态系统服务簇的思想,以生态服务、物种保护、科教游憩、社区发展 4 项功能为基础,结合功能权衡协同关系分析和聚类分析识别服务簇的主导功能,以此初步划分国家公园功能区。在此基础上,融合乡镇边界和区域子流域边界调整分区单元,对功能区初划结

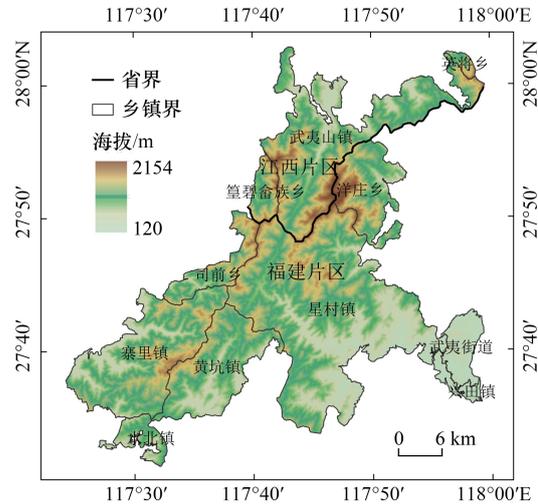


图 1 研究区位图

Fig.1 Research area map

果进行优化,以便于武夷山国家公园的分区管理。

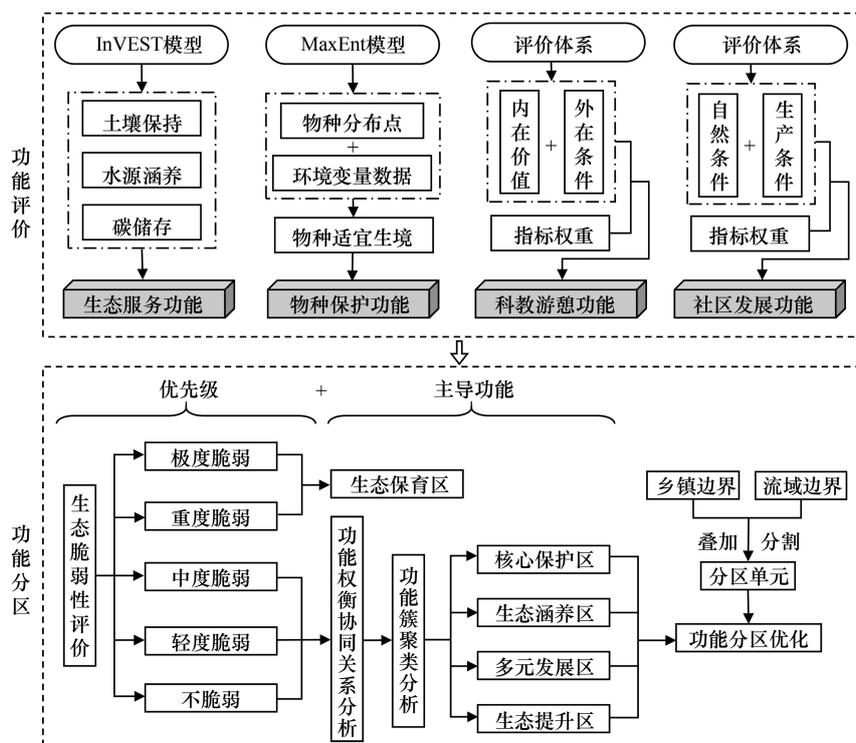


图2 研究技术路线图

Fig.2 Research technology roadmap

2.2 功能评价

2.2.1 生态服务功能评价

作为世界同纬度带最完整、最典型、面积最大的中亚热带原生性森林生态系统,武夷山国家公园生态本底突出,发挥着重要的生态屏障作用。园区内植被类型丰富,拥有从低海拔的热带雨林到高海拔的针叶林等多种植被类型,这种独特的垂直生态分布格局使得武夷山国家公园具有强大的水土保持能力。此外作为东南沿海的重要水源涵养地,园区内的森林和水资源对于维护区域生态平衡和供水安全至关重要。同时园区内峰峦叠嶂,溪流纵横,森林覆盖度极高,具有较强的碳储存能力,为双碳目标的实现提供有力支持。因此本研究从生态服务功能内涵出发,结合武夷山国家公园实际,运用 InVEST 模型从水土保持、水源涵养、碳储存 3 个方面对武夷山国家公园的生态服务功能进行综合评价。

(1) 水土保持

基于通用水土流失方程,通过计算流域内潜在土壤侵蚀量、实际土壤侵蚀量来量化水土保持功能,具体计算公式如下:

$$RKLS_i = R_i \times K_i \times LS_i \quad (1)$$

$$USLE_i = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i \quad (2)$$

$$SD_i = RKLS_i - USLE_i \quad (3)$$

式中, $RKLS_i$ 和 $USLE_i$ 分别表示第 i 个栅格单元的潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量; SD_i 表示土壤保持量; R_i 表示降雨侵蚀力因子; K_i 表示土壤可蚀性因子; LS_i 表示坡长坡度因子; C_i 表示植被覆盖管理因子; P_i 表示水土保持措施因子。

(2) 水源涵养

通过 InVEST 生态系统服务评估法和水量平衡法计算水源涵养量,并以此评估武夷山国家公园的水源涵

养功能,具体计算公式如下^[35]:

$$Q_i = P_i - R_i - ET_i \quad (4)$$

$$R_i = P_i \times \alpha_i \quad (5)$$

式中, Q_i 表示水源涵养量; P_i 表示年降雨量; R_i 表示地表径流量; ET_i 表示年蒸散量; α_i 表示年平均地表径流系数。在没有人为干扰的情况下,降雨量与蒸散量之差即为产水量^[36]。

(3) 碳储存

不同土地利用类型的碳库对应不同的碳密度,通过碳密度和面积,计算栅格单元每个碳库的碳储量,将每个碳库的碳储量相加最终得到栅格单元碳储存总量。具体计算公式如下:

$$C_{i-total} = C_{i-above} + C_{i-below} + C_{i-soil} + C_{i-dead} \quad (6)$$

式中, $C_{i-total}$ 表示总碳储量; $C_{i-above}$ 表示地上碳储量; $C_{i-below}$ 表示地下碳储量; C_{i-soil} 表示土壤碳储量; C_{i-dead} 表示死亡碳储量。

(4) 生态服务功能测算

采用极差标准化法对土壤保持、水源涵养和碳储存 3 项功能指标进行标准化处理,并依据改进的 CRITIC-熵权法^[37]确定各指标权重(表 1),继而计算生态服务功能评价指数,以此评价生态服务功能,具体计算公式如下:

$$F_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} \times W_j \quad (7)$$

式中, F_i 表示第 i 个栅格单元的生态服务功能评价指数; y_{ij} 表示第 j 项指标第 i 个栅格单元的标准化数值; W_j 表示 CRITIC-熵权法求出的第 j 项指标的权重。

表 1 生态服务功能评价指标权重表

Table 1 Weight table of ecological service function evaluation indicators

生态服务功能 Ecological service function	CRITIC 法 CRITIC method	熵权法 Entropy weighting method	CRITIC-熵权法 CRITIC-Entropy weighting method
土壤保持功能 Soil conservation function	0.2325	0.6852	0.4588
水源涵养功能 Water conservation function	0.2295	0.0729	0.1512
碳储存功能 Carbon storage function	0.5380	0.2419	0.3900

CRITIC:通过族间相关性确定标准重要性 Criteria importance through intercriteria correlation

2.2.2 物种保护功能评价

依据动植物的濒危程度和保护级别,以园区内国家一级保护野生植物和国家一级保护野生动物为研究对象(表 2),分别对收集到的物种样本数据及环境因子进行相关性处理,并运用 MaxEnt 模型对武夷山国家公园核心物种适宜生境进行预测。在此基础上,运用 ArcGIS 对各物种适宜生境进行叠置分析,输出栅格叠置的最大值,最终得到武夷山国家公园物种适宜生境的综合结果,以此评价国家公园各区域物种保护功能。

MaxEnt 软件中,模型特征选择 LQPH 组合特征,并选择创建 ROC 曲线,同时使用刀切法分析环境因子的重要性。模型的设置中,将随机测试百分比设置为 25%,最大背景点个数设置为 10000,最大迭代次数设置为 500,输出格式选择“logistic”,重复运行 10 次,最终以 10 次计算后的平均值作为各物种栖息地适宜性模拟结果。

2.2.3 科教游憩适宜性评价

从内在价值和外在条件两个方面,结合相关文献^[25,38-39]构建科教游憩适宜性评价指标体系,以其适宜程度来评价科教游憩功能,具体指标见表 3。利用极差标准化法对各项指标进行标准化处理,依据指标权重加权平均计算后最终生成评价指数栅格数据,以此表征科教游憩功能强弱。

表 2 核心物种及样本数量表

Table 2 Core species and sample size

核心物种 Core species	学名 Scientific name	样本数量 Sample quantity/个
黑麂 Black muntjac	<i>Muntiacus crinifrons</i>	9
穿山甲 Pangolin	<i>Manis pentadactyla</i>	30
大灵猫 Large indian civet	<i>Viverra zibetha</i>	29
小灵猫 Small indian civet	<i>Viverricula indica</i>	41
黑鹳 Black stork	<i>Ciconia nigra</i>	15
海南鵞 Chinese night heron	<i>Gorsachius magnificus</i>	11
乌雕 Greater spotted eagle	<i>Clanga clanga</i>	13
蓝冠噪鹛 Blue-crowned laughingthrush	<i>Garrulax courtoisi</i>	12
黄胸鹀 Yellow-breasted bunting	<i>Emberiza aureola</i>	11
黄腹角雉 Cabot's tragopan	<i>Tragopan caboti</i>	56
白颈长尾雉 White-necked long-tailed pheasant	<i>Syrmaticus ellioti</i>	113
中华秋沙鸭 Chinese merganser	<i>Mergus squamatus</i>	33
水松 Water pine	<i>Glyptostrobus pensilis</i>	8
红豆杉 Yew	<i>Taxus wallichiana</i> var. <i>chinensis</i>	6
南方红豆杉 Southern yew	<i>Taxus wallichiana</i> var. <i>mairei</i>	25

表 3 科教游憩适宜性评价指标体系

Table 3 Evaluation index system for suitability of scientific and educational recreation

准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	指标分类及分值 Indicator classification and score					权重 Weight
		1	0.75	0.5	0.25	0	
内在价值 Intrinsic value	景观分布密度	>0.086	0.064—0.086	0.039—0.064	0.017—0.039	<0.017	0.2073
	景观独特性/分	>8	6—8	4—6	2—4	<2	0.0710
	景观美感度/分	>8	6—8	4—6	2—4	<2	0.0856
外在条件 External conditions	距水系距离/m	<500	500—1500	1500—2500	2500—4000	>4000	0.0691
	距主要道路距离/m	<500	500—1000	1000—1500	1500—2500	>2500	0.0895
	距主要居民点距离/m	<2000	2000—4000	4000—6000	6000—8000	>8000	0.1018
	游憩设施密度	>0.416	0.307—0.416	0.171—0.307	0.060—0.171	<0.060	0.3756

2.2.4 社区发展适宜性评价

从自然条件 and 生产条件两个方面,参考相关文献^[40—41]构建社区发展适宜性评价指标体系,以此来评价社区发展功能,具体指标见表 4。与科教游憩功能评价的方法相同,计算各指标权重值并加权平均获得社区发展适宜性评价指数。

表 4 社区发展适宜性评价指标体系

Table 4 Evaluation index system for suitability of community development

准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	指标分类及分值 Indicator classification and score					权重 Weight
		1	0.75	0.5	0.25	0	
自然条件 Natural condition	高程/m	<500	500—1000	1000—1500	1500—2000	>2000	0.1218
	坡度/(°)	<3	3—8	8—15	15—25	>25	0.0805
	土壤质地/分	3	2	1	—	0	0.1022
生产条件 Production conditions	土壤有机质含量/%	>3	2—3	1—2	0.5—1	<0.5	0.1785
	人口密度/(人/km ²)	>800	400—800	200—400	50—200	<50	0.3717
	道路密度/(km/km ²)	>2	1.5—2	1—1.5	0.5—1	<0.5	0.1191
	土地利用	城镇用地、农村居民点	水田、旱地、其他林地	有林地、高覆盖度草地	灌木林地、疏林地等 ^①	滩地、裸岩石砾地	0.0263

①灌木林地、疏林地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、河渠、水库坑塘

土壤质地指标的得分参考国际土壤质地分类标准^[42],以性能较好的壤土颗粒组成(砂粒含量为 40%—55%,粉粒含量为 30%—45%,粘粒含量为 0—15%)为标准,满足一个含量标准得一分。

2.3 功能分区

2.3.1 生态脆弱性评价

参考前人研究成果^[43—44],以植被净初级生产力(NPP)作为评价指标,采用敏感性、适应性定量评价方法计算生态脆弱性,具体计算公式如下:

$$V = S - A \quad (8)$$

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n |F_i - \bar{F}|}{\bar{F}} \quad (9)$$

$$A = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (10)$$

式中, V 表示生态脆弱性指数; S 表示生态敏感性指数; A 表示生态适应性指数; F_i 表示第*i*年的NPP; \bar{F} 表示NPP多年均值; n 表示数据总年数; x 表示时间序列,其值为1、2、3…,分别对应数据年份; y 表示NPP的际变率,即每年NPP减去多年NPP均值。

2.3.2 功能权衡协同关系

功能权衡协同关系是指不同功能之间在特定时空背景下存在的相互作用,其中权衡表现为一种功能的增加可能导致另一种功能的减少,而协同则表现为多种功能同增同减的趋势^[45]。相关性分析是识别和量化功能权衡协同关系的重要手段之一,通常用相关系数来衡量。本文采用 Spearman 秩相关系数衡量各功能间权衡协同关系,该系数具有对原始变量要求低、应用范围广等优点,适用于不满足正态分布或线性关系的数据,其具体计算方法如下:

$$r(X_i, Y_i) = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (11)$$

式中, P_i 表示 X_i 在序列 $\{(X_i)\}$ 中第*k*个位置; Q_i 表示 Y_i 在序列 $\{(Y_i)\}$ 中第*k*个位置; n 表示样方数。当*r*为正时,两功能之间呈现相互促进的空间协同关系;当*r*为负时,两功能之间呈现相互抑制的空间权衡关系;若*r*不显著,两功能空间关系相互独立。

2.3.3 自组织映射神经网络

自组织映射神经网络是一种非监督型的人工神经网络模型,通过网络初始化、训练和检验等步骤自动形成并调节各要素间的权重,最终以系统终态的连接权重对客体进行识别或分类。该神经网络是由2层网络(竞争层和输入层)组成的二维阵列,2层神经元完全相互连接。输入层接收样本,其节点数等于能够代表分类问题模式的维数,神经元功能相同的输入距离比较近,不同的距离比较远,以此将一些无规则的输入自动排除,最终形成一个二维节点矩阵。竞争层则对样本进行分类,输出节点数视具体应用问题确定,学习算法包括以下几步^[46]:

- 1) 初始化权重系数 W_{ij} ,即被赋予 $[0,1]$ 区间的随机值,选择邻域半径 r ,以及学习速率 $\beta(t)$ 。
- 2) 输入样本 P_k ,并对权重矢量做归一化处理。
- 3) 计算 W_{ij} 与 P_k 间的欧氏距离,找出最小的距离 d ,确定获胜神经元 g ,

$$d_g = \min [d_j], (j=1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

- 4) 调整处于获胜神经元邻域内的所有神经元。
- 5) 更新学习速率 $\beta(t)$ 和拓扑邻域 $N_g(t)$,

$$\beta(t) = \beta(0) \left[1 - \frac{t}{T} \right] \tag{13}$$

式中, $\beta(t)$ 为初始学习率; t 为学习次数; T 为总的学习次数。

$$N_g(t) = \text{int}\{Ng(0)\} \left[1 - \frac{t}{T} \right] \tag{14}$$

式中, $N_g(0)$ 为 $N_g(t)$ 的初始值。

重复上述 3) — 5), 直至满足停止条件 (例如最大的迭代次数)。通过训练, 最终输出层中的获胜神经元及其邻域内的权值向量逼近输入矢量, 进而实现模式分类。

3 结果分析

3.1 武夷山国家公园功能评价

3.1.1 生态服务功能评价

生态服务功能评价结果如图 3 所示。从生态服务单功能来看, 武夷山国家公园土壤保持功能在空间上呈现出“西高东低”的特点, 土壤保持能力的最大值达到 $2941.97 \text{ t/hm}^2/\text{a}$; 水源涵养功能在空间上呈现出“西部、北部高, 东部、南部低”的特点, 水源涵养能力的最大值达到 1785.21 mm ; 碳储存功能在空间上呈现出“整体高, 零星低”的特点, 碳储存能力的最大值达到 188.37 t/hm^2 。

生态服务功能总体在空间上呈现出“西北高、东南低”的特点, 与单服务功能对比, 表现出大体一致性、局部差异性。生态服务功能指数的高值区域集中分布在公园的北部和西部, 具体分布于江西片区的南部、福建

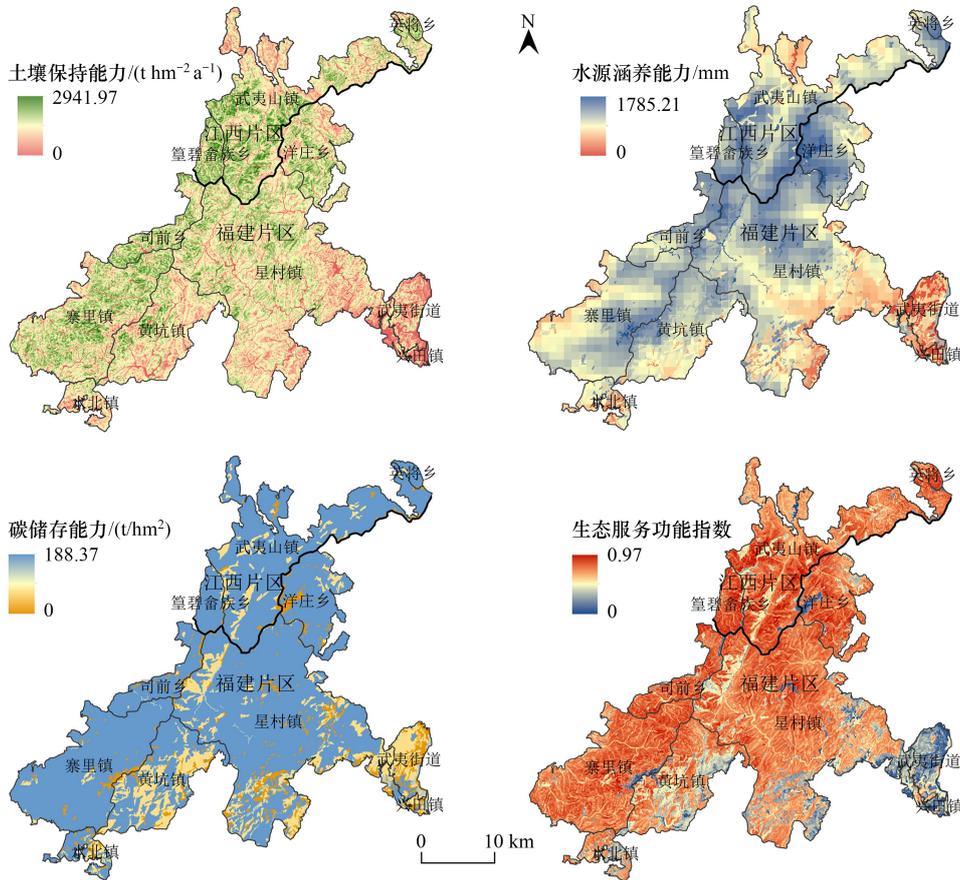


图 3 生态服务功能评价结果图

Fig.3 Ecological service function evaluation result chart

片区的中部和西部,该分布特征主要与土地利用类型和地表植被覆盖有关,公园大部分地区土地利用类型为有林地和灌木林地,生态服务功能整体良好,拥有良好的生态本底也是设立国家公园的首要条件。生态服务功能指数的低值区域则主要分布于福建片区的东部,该地区土地利用类型复杂,林地多为疏林地和其他林地,并伴有耕地和草地,相较于其余区域生态服务功能偏弱,同时作为公园对外展示的窗口,东部的武夷山景区人为活动较为频繁,对生态服务功能也有一定的影响。在中部地区,沿着河流的谷地区域,生态服务功能也欠佳,铅山河沿岸尤为明显,其原因为河谷地带带有林地较少,多为低覆盖度植被,土壤保持功能和碳储存能力较低。

3.1.2 物种保护功能评价

从 MaxEnt 模型运行 10 次的平均 ROC 曲线(图 4)可以看出,各物种的模型预测 AUC 值均 >0.87 ,标准偏差均 <0.07 ,表明模型预测结果良好,由此得出的各物种适宜性生境具有较高的可信度和可靠性,可用于武夷山国家公园物种保护功能分析。

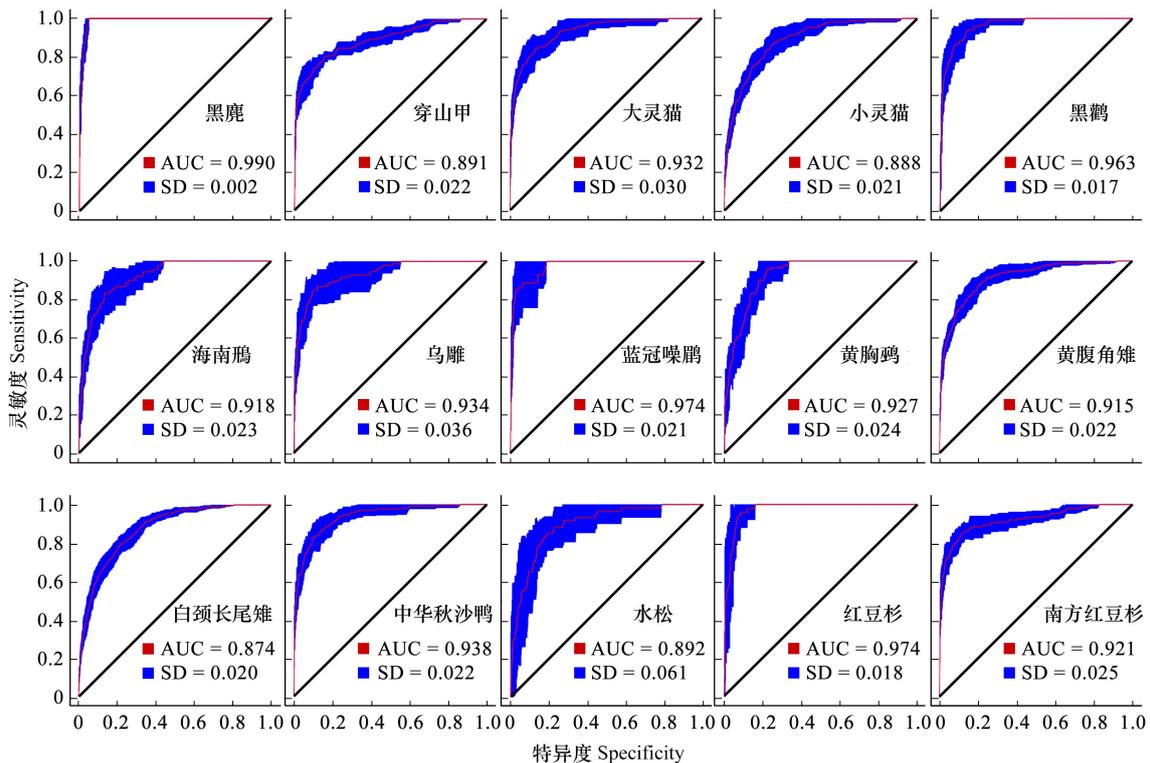


图 4 核心物种地理分布预测 ROC 曲线图

Fig.4 ROC curve for predicting the geographic distribution of core species

ROC:接受者操作特性 Receiver operating characteristic;AUC:曲线下面积 Area under curve;SD:标准差 Standard deviation

通过 ArcGIS 叠置分析,筛选各物种适宜生境概率的最大值,得到物种保护功能评价结果(图 5)。武夷山国家公园物种保护功能具有明显的空间分异特征,总体呈现出“中部高、周边低”的特点。物种保护功能指数的高值区域集中分布在公园的中部,具体分布于福建片区的西北部、江西片区的南部和东北部。物种保护功能指数的低值区域则主要分布于福建片区的西南、东南部以及江西片区的北部。从地形和土地利用上来看,物种保护功能指数的高值区多为海拔高、植被郁闭度高的地区,物种保护功能指数的低值区则多为海拔较低,土地利用类型多样,人为活动频繁的地区。

3.1.3 科教游憩功能评价

武夷山国家公园科教游憩功能沿西北-东南方向向两侧逐渐递减,总体呈现出“东南高,东北、西南低”的

空间分布格局(图 6)。该功能高值区域集中分布在公园的东南部,具体包括武夷街道、兴田镇以及星村镇东部,其分布特征主要与景观分布密度、游憩设施分布密度有关。武夷街道及兴田镇具有开发较为完备的武夷山景区,该地区交通条件便利、公共服务设施齐全、极具特色的景区较多,不仅有九曲溪、一线天等山水自然风光,还有武夷宫、朱熹园等人文景观,同时还建有濒危动植物研究基地,因此具有较强的科教游憩功能。园区的中西部也具有一定的科教游憩功能,具体包括司前镇、星村镇西部、武夷山镇南部等地区,该区域景观分布相对较少,但其独特性和美感度较高,同时交通条件也相对便利,不仅具有武夷大峡谷、断裂带等独特景观,还有桐木茶文化基地和三港科普宣教基地。科教游憩功能指数的低值区域则主要分布于园区的南部和北部,主要原因为该地区交通便利程度较低,公共服务设施以及人为活动较少,同时西南部地区具有较为原真的自然生态系统。

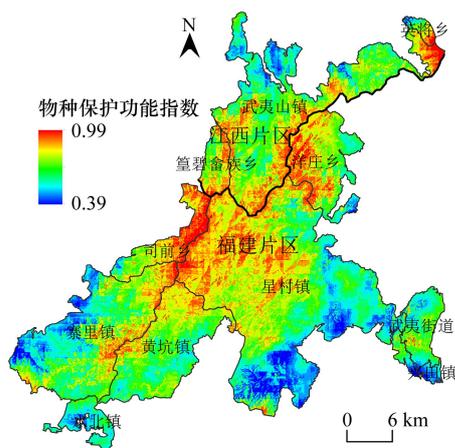


图 5 武夷山国家公园物种保护功能空间分布图

Fig.5 Spatial distribution map of species protection functions of Wuyishan National Park

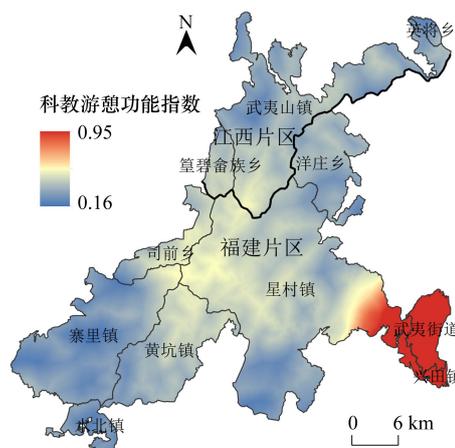


图 6 武夷山国家公园科教游憩功能空间分布图

Fig.6 Spatial distribution map of science, education and recreation functions of Wuyishan National Park

3.1.4 社区发展功能评价

武夷山国家公园社区发展功能总体呈现出“东南高,西南低”的分布格局(图 7)。社区发展功能指数的高值区域集中分布在武夷街道和兴田镇,该区域对于社区发展来说有较好的地形和基础设施条件,同时有一定的人口分布。社区发展功能指数的低值区域则主要分布于园区的西南部和中部,具体分布于寨里镇和星村镇中部,主要原因为该地区海拔较高、土壤条件较差、基础设施覆盖度较低,不利于社区的经营管理。

3.2 武夷山国家公园功能分区

3.2.1 生态脆弱性分析

基于 CASA 模型估算的 NPP 数据计算武夷山国家公园的生态敏感性和生态适应性,进而对园区生态脆弱性展开评价,根据自然间断点法将研究区生态脆弱性划分为五级。由表 5 可知,武夷山国家公园的整体生态脆弱性较低,重度脆弱和极度脆弱等级地区面积占比仅为 14.4%,轻度脆弱和不脆弱等级地区面积占园区总面积的 54.9%,表明武夷山国家公园整体上具有一定的抗风

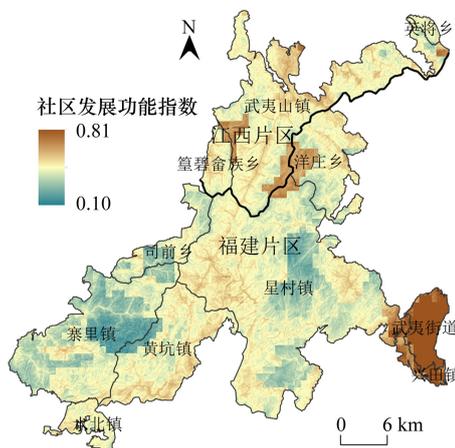


图 7 武夷山国家公园社区发展功能空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of community development functions of Wuyishan National Park

险和抗干扰能力,得益于其自然生态系统的高度原真性与完整性。

表 5 武夷山国家公园生态脆弱性等级面积及比重

Table 5 Wuyishan National Park ecological fragility level area and proportion

生态脆弱性等级 Ecological fragility level	生态脆弱性指数 Ecological fragility Index	面积/km ² Area	比重/% Proportion
极度脆弱 Extremely fragile	0.0406—0.9466	2.08	0.2
重度脆弱 Severe fragile	-0.2048—0.0406	184.59	14.2
中度脆弱 Moderate fragile	-0.2867—-0.2048	399.71	30.7
轻度脆弱 Mild fragile	-0.3685—-0.2867	442.10	34.0
不脆弱 Not fragile	-0.5438—-0.3685	272.48	20.9

如图 8 所示,武夷山国家公园生态脆弱性表现出显著的空间分异特征,中部和南部地区生态脆弱性等级高,东北部、西南部、东南部等园区周边地区生态脆弱性等级低。敏感性与脆弱性在空间分布上相似,适应性等级与脆弱性在空间分布上截然相反,适应性等级在空间上呈现出周边地区高,中部地区低的分布格局。具体来看,极度脆弱区零星分布于武夷街道、星村镇;重度脆弱区主要分布于洋庄乡、星村镇、黄坑镇等地,分布范围较为广泛,该区域大部分敏感性较高,适应性较低;中度脆弱区主要围绕在重度脆弱区的外围,与重度脆弱区分布区域较为一致,但中度脆弱区的面积远远大于重度脆弱区;轻度脆弱区是五类脆弱性等级中面积最大的区域,占园区总面积的 1/3,该区域无明显的空间分异特征,分布广泛且零散;不脆弱区分布较为集中,主要分布于武夷街道、兴田镇、星村镇、寨里镇以及武夷山镇。

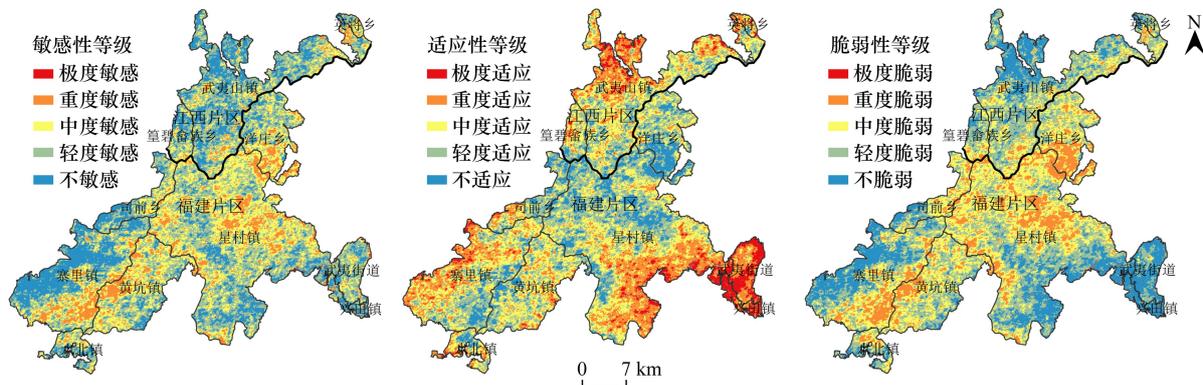


图 8 武夷山国家公园生态敏感性、适应性、脆弱性空间分布图

Fig.8 Spatial distribution map of ecological sensitivity, adaptability and vulnerability of Wuyishan National Park

3.2.2 功能权衡协同关系分析

使用 R 语言中的 Hmisc 包和 corrplot 包对武夷山国家公园土壤保持(SC)、水源涵养(WC)、碳储存(CS)、物种保护(SP)、科教游憩(ER)、社区发展(CD)6 项功能的评价结果进行 Spearman 相关性分析并可视化(图 9)。其中[0,0.1)为不相关,[0.1,0.3)为弱相关,[0.3,0.5)为中等相关,[0.5,1]为强相关。

由图 9 可知,武夷山国家公园各功能之间相关关系显著,但相关性较弱,各功能间存在一定的权衡协同关系。具体分析来看:

(1)土壤保持、水源涵养、碳储存、物种保护 4 项功能之间呈现协同关系。该 4 项功能均与土地利用类型和植被覆盖度有较大关联,受土壤质地、降水量、气候等自然环境因素的影响,因此两两之间呈现出协同关系,反映出国家公园在发挥单一生态功能的同时也促进其余生态功能的提升。同时水源涵养与物种保护功能正相关关系较强,表明水源涵养功能的提升能较大程度上促进物种保护功能的发展,因此物种保护应着重考虑其栖息地的水源涵养功能。

(2) 科教游憩功能与社区发展功能之间呈现协同关系。这两项功能均为国家公园资源利用方面的功能,受园区内的基础设施、公共服务设施、人口密度等因素的影响较大,使得两者之间呈现出较强的协同关系。因此科教游憩资源的利用应结合现有社区状况实施,充分利用现有设施资源,避免园区的过度开发。

(3) 水土保持、水源涵养、碳储存、物种保护 4 项功能与科教游憩、社区发展两项功能均呈现权衡关系。这是由于前 4 项功能受自然生态环境的影响较大,后 2 项功能受人为开发利用的影响较大,对应于国家公园保护和利用的两大方面,在利用的同时或多或少会对环境造成影响,但在利用过程中应尽可能降低影响的程度,因此后续发展可以以绿色生态、森林康养等环境友好型项目展开。同时各功能之间均为中等权衡和弱权衡,表明当前武夷山国家公园发展利用较为合理,对生态环境的影响较小,符合保护优先的绿色发展理念。

3.2.3 功能簇聚类分析

利用自组织映射神经网络方法,使用 RStudio 中的 Kohonen 包综合聚类,对武夷山国家公园各单元的主导功能进行识别。前期功能评价的数据基础为栅格数据,因此主导功能分区以栅格像元尺度展开。经过调试运行,最终在最佳聚类下识别出 4 类功能簇(图 10)。功能簇 1 中生态服务功能与物种保护功能较强,科教游憩功能和社区发展功能较弱;功能簇 2 中以生态服务功能为主,且生态服务功能远高于其他功能;功能簇 3 与功能簇 1 的结果截然相反,科教游憩功能和社区发展功能较强,而生态服务功能与物种保护功能较弱;功能簇 4 中所有功能均较弱。

3.2.4 功能分区结果

按照各功能簇的具体特征,结合各功能间的权衡协同关系,将武夷山国家公园初步划分为核心保护区(功能簇 1)、生态涵养区(功能簇 2)、多元发展区(功能簇 3)以及生态提升区(功能簇 4)。并根据“优先级+主导功能”的功能分区思路,将生态脆弱性评价结果与初步划定的功能区叠加,将极度脆弱和重度脆弱地区优先划为生态保育区,中度脆弱、轻度脆弱以及不脆弱地区以功能簇为准,最终将武夷山国家公园划分为 5 类功能区。为保证分区的完整性,基于乡镇界,叠加区域子流域,划分出 158 个功能分区单元。以分区单元内面积占比最大的功能区作为该单元的功能类型输出,得到武夷山国家公园的功能分区结果(图 11)。

从图 11 中可以看出,各功能区集中连片,符合分区的完整性原则,为分区管理措施的制定和实施奠定了基础。功能分区结果呈现出核心保护区中部集聚、生态涵养区边缘分布、生态保育区片状分散、多元发展区集中武夷、生态提升区位于南部的空间分布格局。

核心保护区分布在园区中部,主要分布在武夷山镇、篁碧乡、洋庄乡、司前乡、星村镇等地区,面积 565.18 km²,占比 43.4%,是五类功能区中面积最大的一类。该区处于公园腹地,林深草密,物种资源丰富,生态服务功能和物种保护功能极高。区域内海拔较高,生态系统完整,自然景观独特,是自然遗产最精华、生物多样性

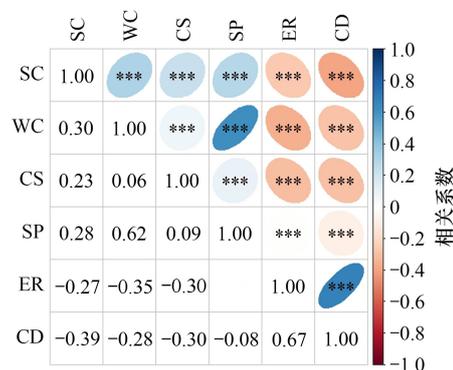


图 9 武夷山国家公园各功能相关性分析图

Fig.9 Correlation analysis of functions of Wuyishan National Park

SC: 水土保持 Soil conservation; WC: 水源涵养 Water conservation; CS: 碳储存 Carbon storage; SP: 物种保护 Species protection; ER: 科教游憩 Education recreation; CD: 社区发展 Community development; *** 表示显著性 $P < 0.001$

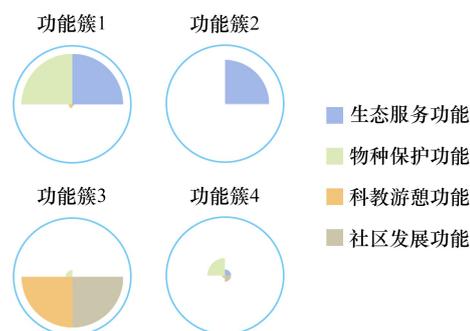


图 10 武夷山国家公园功能簇结构模式图

Fig.10 Structure pattern of function cluster of Wuyishan National Park

最富集的区域,担负着国家公园在生态保护方面的责任。

生态涵养区广泛分布于国家公园外围地区,是核心保护区的过度地带,主要包括武夷山镇北部、寨里镇、水北镇以及星村镇东部和南部地区,面积 466.32 km²,占比 35.8%。该区土壤保持、水源涵养、碳储存等生态服务功能突出,物种保护功能、科教游憩功能和社区发展功能较弱,是典型的具有高生态服务价值的区域。区域内海拔较低,土地利用类型多为林地,植被类型主要为落叶阔叶混交林,植被覆盖度高。

生态保育区均分布在福建片区,主要包括洋庄乡南部、星村镇北部、黄坑镇西部以及寨里镇南部,面积 106.21 km²,占比 8.2%。该区生态服务功能和物种保护功能空间差异较大,科教游憩功能和社区发展功能较弱。

区域内海拔高、坡度大、降水充沛,容易发生水土流失,生态系统较为脆弱。

多元发展区集中分布在武夷街道、兴田镇以及与其接壤的星村镇地区,区域面积 68.81 km²,占比 5.3%,是五类功能区中面积最小的一类。该区科教游憩功能和社区发展功能显著,是园区内典型的开发利用区域。区域内海拔较低,地势平坦,社区人口集聚,具有良好的基础设施和公共服务设施,游憩资源丰富,旅游开发程度高,是园区内经营较好的入口社区。

生态提升区分布于园区最南部的黄坑镇、星村镇和水北镇地区,面积 94.45 km²,占比 7.3%。该区生态服务功能相对较低,同时缺乏独特的景观资源,科教游憩等利用功能也较低。区域内植被类型多为竹林,是园区竹业发展的重要地区,有利于园区居民经济条件的改善,但与落叶阔叶混交林相比,竹林地水源涵养、土壤保持功能较弱。

4 讨论

4.1 武夷山国家公园功能分区管控措施

《国家公园管理暂行办法》《福建省武夷山国家公园条例》《中华人民共和国国家公园法(草案)》等相关法律法规均明确了核心保护区和一般控制区的分区管控政策,规定核心保护区除法律法规允许的特殊情形外禁止人为活动,一般控制区除法律法规允许的活动外禁止开发性、生产性建设活动^[47-49]。本研究基于相关政策法规,结合武夷山国家公园实际情况,探讨各功能区的管控措施。

本研究的功能分区是在继承现行国家公园规范中核心保护区和一般控制区的基础上对一般控制区的进一步细化。核心保护区具有极高的生态服务功能和物种保护功能,因此应加强区域内保护监管,除调查监测、防灾减灾、应急救援、国防建设等确需开展的活动外,原则上禁止人为活动。生态涵养区具有较高的土壤保持、水源涵养等生态服务功能,该区域也是一般控制区细分后面积较大的分区,可以适度开展生态旅游、野外探险、科研考察等不破坏生态功能的活动,但需严格履行审批程序。针对武夷山国家公园的特点,可在划定的生产区域内,在不扩大规模前提下开展竹林采伐经营、茶叶种植等活动,在保护生态的情况下保障社区居民的生产生活。受自然环境和地形地貌的影响,生态保育区生态系统较为脆弱,易受破坏且恢复困难,抗风险和抗干扰能力较差,建议实施严格保护,在生态系统修复和治理期间,应严格限制人为活动,经过长期监测和评估,若生态系统得到恢复和稳定,该区域可调整为核心保护区或生态涵养区,实现区域保护的针对性和动态性。多元发展区科教游憩功能和社区发展功能显著,区域内的武夷山景区是武夷山国家公园对外宣传展示的重要窗口,虽然该区域生态脆弱性较低,但在发展过程中仍应注重绿色环保,通过合理布局游憩设施^[50]、控制游客

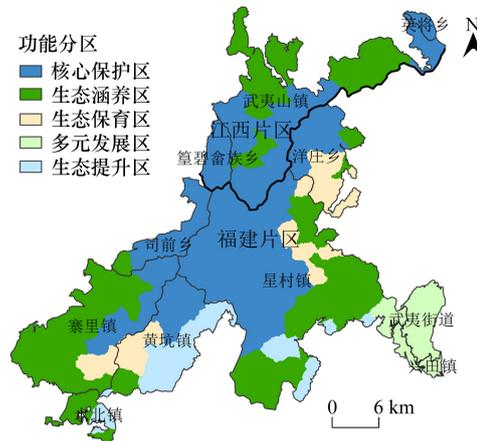


图 11 武夷山国家公园功能分区图

Fig.11 Functional zoning map of Wuyishan National Park

数量、制定详细发展规划,进而明确发展方向和目标,确保发展与生态保护相协调,同时加强当地产业的引导和扶持,实施精细化的特许经营制度^[51],优先安排社区居民参与国家公园的建设和管理工作,保障社区居民生产生活,实现保护与利用的双赢。生态提升区各项功能普遍偏低,没有明显的主导功能类型,该区域可通过实施植树造林、草地恢复等项目提高植被覆盖度,并严格控制竹林地扩张,增强区域生态系统服务功能,维护生物多样性。

4.2 武夷山国家公园功能分区结果解析

武夷山国家公园总体规划(2023—2030年)将园区划分为核心保护区和一般控制区。其中核心保护区面积为622.40 km²,占园区总面积的48.6%;一般控制区面积为657.42 km²,占园区总面积的51.4%。与本研究相比,核心保护区划定的总面积相差不大。将总体规划中的分区与本研究的分区结果进行空间叠加分析显示,核心保护区的重叠面积约350 km²,重叠面积约占总体规划中核心保护区面积的56%。核心保护区的未重叠区域主要集中在园区西南部的寨里镇,该区域仅水源涵养、土壤保持生态服务功能突出,被划为了生态涵养区。本研究采用定量分析方法,在流程化、标准化方面存在一定优势,但相较于定性分析,仍存在政策落实、经验评判等方面的不足,因此在未来的研究中可在定量分析的基础上纳入定性分析对分区结果适度调整。

4.3 政策法规对国家公园分区的影响

在《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》(以下简称《意见》)出台之前,许多专家学者对国家公园的分区模式进行探讨。他们基于不同区域生态系统的主导功能、未来发展规划、自然和社会经济特征等因素,提出了多种分区方案。例如,付梦娣等人将三江源国家公园划分为四个区域^[52],唐芳林等人构建了国家公园功能分区指标体系并提出四级分区模式^[53],黎国强等人在总结试点经验的基础上,提出了两大类五小类的分区方式^[54],而孙鸿雁等人则提出了“管控—功能”的二级分区模式^[2]。随着《意见》的出台,明确了国家公园的二级管控分区管理方式,后续的政策法规也均采用了核心保护区和一般控制区的分区管理方式。此后关于分区模式的研究相对减少,分区实践也多以《意见》中的二级管控分区为主。但不少学者认为国家公园应注重分区的细致性和动态性,赵智聪、彭琳分析了发达国家的分区模式,认为其细致性和灵活性值得借鉴^[55],而高媛等人则进一步指出动态分区对于提升国家公园复杂人地系统管理效果的重要性^[56]。国家公园精细化和动态化管理能够显著提升管理效率与质量,保障环境可持续与游客体验,促进公园创新与长远发展。

4.4 不足与展望

由于国家公园社区发展功能评价的已有研究较少,本研究借鉴国土空间规划中对于“三生空间”的研究成果,从自然条件 and 生产条件两方面出发对社区发展功能展开评价,未能完全涵盖国家公园社区发展的内涵,因此有待于从社区经济发展、社区功能完整性以及社区治理等方面进一步探讨国家公园社区发展功能评价。

此外,本研究在物种保护功能评价中用到的 MaxEnt 模型是基于最大熵原理的概率模型,通过调节模型特征和正规化系数可以提高模型预测的精确度,但由于研究选取的核心物种数量较多、模型参数调节的排列组合种类较多,且使用 R 语言进行模型调优对计算机性能的要求较高,调优运行时间较长,因此本研究采用默认的参数对物种适宜生境进行预测,后续有待调优进一步提高模型精度。

5 结论

本文以武夷山国家公园为研究对象,从园区功能特征出发,采用“优先级+主导功能”相结合的思路进行功能分区。结果表明:

(1)武夷山国家公园生态服务功能整体良好,生态服务质量较高,生态服务功能呈现由西北向东南递减的空间特征。从单一的生态服务功能来看,土壤保持功能较高的区域分布较为零散,高值区集中在江西片区,低值区则多分布于福建片区;水源涵养功能则相对集聚,高值区集中分布在江西片区和福建片区的交界地带,低值区仍多分布于福建片区;碳储存能力除武夷街道、兴田镇和黄坑镇外,其余区域功能水平整体较高。各单

一生态服务功能与整体生态服务功能空间分布特征相似。

(2) 武夷山国家公园珍稀濒危野生动植物众多, 园区物种保护功能突出、空间分异显著, 物种保护功能的高值区集中分布于园区的中部和西部, 低值区则分布于园区的边缘, 主要分布于武夷山镇、寨里镇、水北镇、星村镇以及兴田镇。

(3) 武夷山国家公园科教游憩功能和社区发展功能集聚, 两项功能的高值区均集中分布于武夷街道和兴田镇, 其余地区两项功能指数均较低, 除武夷街道和兴田镇外, 呈现出“中部相对高, 周边普遍低”的空间分布特征。

(4) 综合园区功能特征与生态脆弱性将武夷山国家公园划分为核心保护区、生态涵养区、生态保育区、多元发展区和生态提升区 5 个功能区。功能区划分结果完整度高, 便于后续的保护治理, 其中核心保护区和生态涵养区的面积最大, 生态保育区、生态提升区和多元发展区的面积较小。功能分区呈现出核心保护区中部集聚、生态涵养区边缘分布、生态保育区片状分散、多元发展区集中武夷、生态提升区位于南部的空间分布格局。

参考文献 (References):

- [1] 中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》. 2019. https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635405.htm.
- [2] 孙鸿雁, 余莉, 蔡芳, 罗伟雄, 唐芳林. 论国家公园的“管控—功能”二级分区. 林业建设, 2019, 37(3): 1-6.
- [3] 虞虎, 陈田, 钟林生, 周睿. 钱江源国家公园体制试点区功能分区研究. 资源科学, 2017, 39(1): 20-29.
- [4] 张广海, 曲正. 我国国家公园研究与实践进展. 世界林业研究, 2019, 32(4): 57-61.
- [5] 张茂莎, 周亚琦, 盛茂银. 建立以国家公园为主体的自然保护地体系的思考与建议综述. 生态科学, 2022, 41(6): 237-247.
- [6] 苏盼盼. 亚洲国家公园的建设实践及其启示. 世界地理研究, 2023, 32(7): 160-168.
- [7] Shafer C L. US National Park buffer zones: historical, scientific, social, and legal aspects. Environmental Management, 1999, 23(1): 49-73.
- [8] Forster R P. Planning for man and nature in National Parks: reconciling perpetuation and use. Morges, Switzerland, International Union of Conservation of Nature and Natural Resources, 1973.
- [9] UNESCO. Action Plan for Biosphere Reserves, 1984.
- [10] Lary M D. America's national park system: The critical documents. Journal of Historical Geography, 2019, 64(4): 119-120.
- [11] Thede A K, Haider W, Rutherford M B. Zoning in National Parks: are Canadian zoning practices outdated? Journal of Sustainable Tourism, 2014, 22(4): 626-645.
- [12] 侯鹏, 高吉喜, 陈妍, 翟俊, 肖如林, 张文国, 孙晨曦, 王永财, 侯静. 中国生态保护政策发展历程及其演进特征. 生态学报, 2021, 41(4): 1656-1667.
- [13] 唐小平, 刘增力, 马炜. 我国自然保护地整合优化规则与路径研究. 林业资源管理, 2020, 42(1): 1-10.
- [14] Framarin F. Evaluation of a natural park system. Environmental Conservation, 1982, 9(4): 287-292.
- [15] Stevenson A C, Skinner J, Hollis G E, Smart M. The el kala National Park and environs, Algeria: an ecological evaluation. Environmental Conservation, 1988, 15(4): 335-348.
- [16] Patten D T. Human impacts in the greater Yellowstone ecosystem: evaluating sustainability goals and eco-redevelopment. Conservation Biology, 1991, 5(3): 405-411.
- [17] 李渤生. 羌塘高原美马错自然保护区的初步评价. 自然资源学报, 1989, 4(3): 281-288.
- [18] 屠玉麟. 自然保护区评价的“自然度”方法. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1991, 9(2): 9-14.
- [19] 郑允文, 薛达元, 张更生. 我国自然保护区生态评价指标和评价标准. 农村生态环境, 1994, 10(3): 22-25.
- [20] 孙孝平, 李双, 余建平, 方彦君, 张银龙, 曹铭昌. 基于土地利用变化情景的生态系统服务价值评估: 以钱江源国家公园体制试点区为例. 生物多样性, 2019, 27(1): 51-63.
- [21] Zhao X D, He Y J, Yu C, Xu D Y, Zou W T. Assessment of ecosystem services value in a National Park pilot. Sustainability, 2019, 11(23): 6609.
- [22] 李芳菲, 李丽, 吴巩固, 袁磊, 孟春林, 国洪艳, 周跃, 马存新, 高雅月, 薛亚东, 李迪强, 代云川. 基于最大熵模型的青海祁连山雪豹生境适宜性评价. 生态学报, 2023, 43(6): 2202-2209.
- [23] An L, Bohnett E, Battle C, Dai J, Lewison R, Jankowski P, Carter N, Ghimire D, Dhakal M, Karki J, Zvoleff A. Sex-specific habitat suitability

- modeling for *Panthera tigris* in chitwan National Park, Nepal; broader conservation implications. *Sustainability*, 2021, 13(24): 13885.
- [24] 杨文平, 邵怀勇, 黄佳容, 黄宝荣. 青藏高原国家公园群生境质量评估. *国家公园(中英文)*, 2023, 1(2): 99-109.
- [25] 陈东军, 钟林生, 肖练练. 国家公园研学旅行适宜性评价指标体系构建与实证研究. *生态学报*, 2020, 40(20): 7222-7230.
- [26] Nahuelhual L, Vergara X, Kusch A, Campos G, Droguett D. Mapping ecosystem services for marine spatial planning: recreation opportunities in sub-Antarctic Chile. *Marine Policy*, 2017, 81: 211-218.
- [27] Dollma M. Geotourism potential of thethi National Park (Albania). *International Journal of Geoheritage and Parks*, 2019, 7(2): 85-90.
- [28] 蒋亚芳, 田静, 赵晶博, 唐小平. 国家公园生态系统完整性的内涵及评价框架: 以东北虎豹国家公园为例. *生物多样性*, 2021, 29(10): 1279-1287.
- [29] 叶雅慧, 张婧雅. 国家公园“管控—功能”二级分区规划划定方法——以神农架国家公园体制试点区为例. *自然资源学报*, 2023, 38(4): 1075-1088.
- [30] 崔晓伟, 杨明星, 孟宇辰, 罗伟雄, 汪家军, 孙鸿雁. 基于多源数据空间分析的国家公园管控分区研究——以钱江源国家公园体制试点区为例. *生态学报*, 2021, 41(21): 8443-8455.
- [31] 王子芝, 李玥, 华世明, 周俊宏, 刘文斗, 廖声熙. 基于生态保护加权的普达措国家公园功能分区研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2021, 45(6): 225-231.
- [32] 央视网报道《我国正式设立首批国家公园》. 2021. https://www.gov.cn/xinwen/2021-10/12/content_5642183.htm.
- [33] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 于德永, 扈海波. 中国典型植被最大光利用率模拟. *科学通报*, 2006, 51(6): 700-706.
- [34] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [35] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖燚, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [36] 张昌顺, 范娜, 刘春兰, 谢高地. 1990—2018年中国生态系统水源涵养功能时空格局与演变. *生态学报*, 2023, 43(13): 5536-5545.
- [37] 唐春云, 臧俊梅. 新时代广州市耕地多功能评价及时空演变分析. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(2): 332-343.
- [38] 肖练练, 钟林生, 虞虎, 周睿. 功能约束条件下的钱江源国家公园体制试点区游憩利用适宜性评价研究. *生态学报*, 2019, 39(4): 1375-1384.
- [39] 张云路, 徐拾佳, 韩若楠, 马嘉, 李雄. 基于山地特征的城市山地公园游憩服务能力评价与优化——以承德市为例. *中国园林*, 2020, 36(12): 19-23.
- [40] 赖国华, 胡宝清, 李敏, 林树高. 桂西南—北部湾地区“三生”空间适宜性评价. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 221-227.
- [41] 张新鼎, 崔文刚, 韩会庆, 梅艳, 汪田归, 潘杉. 基于“三生”适宜性的典型喀斯特乡村土地利用冲突识别及分析. *水土保持研究*, 2023, 30(4): 412-422.
- [42] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨. *土壤学报*, 2019, 56(1): 227-241.
- [43] 何敏, 王鹤松, 孙建新. 基于植被生产力的西南地区生态系统脆弱性特征. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 429-438.
- [44] 张庭康, 王军邦, 叶辉, 赖文钦, 张秀娟. 高寒生态系统脆弱性及其对气候变化和人类活动的响应. *生态学报*, 2024, 44(1): 154-170.
- [45] 李倩茹, 贾彦龙, 王慧军, 王哲. 基于生态功能区的河北省生态系统服务权衡与协同分析. *地理学报*, 2023, 78(11): 2833-2849.
- [46] 李春华, 李宁, 史培军. 自组织特征映射神经网络原理和应用研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(5): 543-547.
- [47] 国家林业和草原局关于印发《国家公园管理暂行办法》的通知. 2022, 第 64 号. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/04/content_5693924.htm.
- [48] 福建省人民代表大会常务委员会第十次会议通过《福建省武夷山国家公园条例》. 2024, 第 26 号. https://www.fujian.gov.cn/zwgk/flfg/dfxfg/202406/t20240608_6462421.htm.
- [49] 国家林业和草原局公布《中华人民共和国国家公园法(草案)(征求意见稿)》. 2024. https://www.forestry.gov.cn/html/main/main_4461/20220819150642437874099/file/20220819170110625932085.pdf.
- [50] 刘洋, 彭蓉, 王孟欣. 美国纽约州州立公园游憩设施建设. *国家公园(中英文)*, 2024, 2(1): 56-65.
- [51] 钟林生, 彭枝桑, 张晓瑶. 自然保护区旅游特许经营研究进展. *国家公园(中英文)*, 2023, 1(2): 75-86.
- [52] 付梦娣, 田俊量, 朱彦鹏, 田瑜, 赵志平, 李俊生. 三江源国家公园功能分区与目标管理. *生物多样性*, 2017, 25(1): 71-79.
- [53] 唐芳林, 王梦君, 黎国强. 国家公园功能分区探讨. *林业建设*, 2017, 35(6): 1-7.
- [54] 黎国强, 孙鸿雁, 王梦君. 国家公园功能分区再探讨. *林业建设*, 2018, 36(6): 1-5.
- [55] 赵智聪, 彭琳. 国家公园分区规划演变及其发展趋势. *风景园林*, 2020, 27(6): 73-80.
- [56] 高媛, 唐军, 张梦澜, 翟志雯. 国外国家公园动态分区及其管控策略的模式研究. *中国园林*, 2023, 39(11): 118-124.