

DOI: 10.20103/j.stxb.202304150773

李娜, 张玉钧. 生态美学视角下宁夏贺兰山国家级自然保护区视觉景观特征评估. 生态学报, 2023, 43(22): 9177-9192.

Li N, Zhang Y J. Assessing visual landscape characteristics of Helanshan National Nature Reserve in Ningxia from the perspective of ecological aesthetics. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9177-9192.

生态美学视角下宁夏贺兰山国家级自然保护区视觉景观特征评估

李 娜¹, 张玉钧^{1,2,*}

1 北京林业大学园林学院, 北京 100083

2 北京林业大学国家公园研究中心, 北京 100083

摘要:景观美学的理论维度已从风景美学延伸至生态美学,为促进生态美学理论在客观法和空间水平上向“数字化+可视化”发展,以宁夏贺兰山国家级自然保护区为例,创新性地提出了利用地理要素构建分类的数字景观模型并借用基于景观生态学的景观格局指数进行视觉景观特征评估的研究框架。在筛选地貌(自然和垂直要素)和土地利用(文化和水平要素)景观要素的基础上,构建了一套景观分类指标体系;通过 GIS 进行空间叠加分析,识别了研究区域中的 440 种景观斑块和类型,以此作为视觉景观特征评估的基本单元;基于生态美学理论,构建了视觉景观多样性、自然性和独特性 3 个视觉景观特征评估指标,借用景观格局指数进行度量并通过 FRAGSTATs 与 GIS 可视化;通过 SPCA 分析得到权重后绘制了视觉景观特征综合评估的空间分布。结果显示,诸多相互作用的景观要素“聚集”在一起产生了不同水平的视觉景观特征,与低水平视觉景观特征有关的景观类型在要素组成上较为复杂,而与高水平视觉景观特征有关的景观类型主要与坡度适中的东南向山谷地貌与荒草地、未成林封育地和乔木林等土地利用的共同作用有关。研究认为,可视化的视觉景观特征评估结果有助于识别需得到保护修复、规划利用及管理协调的景观斑块或类型,有利于增加保护地整体的生态美学价值。

关键词:生态美学;数字景观模型分类;景观格局指数;宁夏贺兰山国家级自然保护区;视觉景观特征

Assessing visual landscape characteristics of Helanshan National Nature Reserve in Ningxia from the perspective of ecological aesthetics

LI Na¹, ZHANG Yujun^{1,2,*}

1 School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 National Park Research Center, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The theoretical dimension of landscape aesthetics has extended from the fields of scenic aesthetics to the ecological aesthetics at present. In order to promote the further development of ecological aesthetics theory in the direction of “digitalization + visualization” from two aspects which are objective method and spatial level, Helanshan National Nature Reserve in Ningxia was taken as a study case, and a complete research framework was innovatively proposed, including the utilization of geographical elements to construct a classified digital landscape model and the borrowing of landscape metrics which is based on landscape ecology to evaluate visual landscape characteristics. In the first place, this study constructed a set of system of landscape classification indexes on the basis of screening the landscape elements of landform (natural and vertical elements) and land use (cultural and horizontal elements). Then, through the analysis of spatial overlay based on GIS platform, 440 classes of landscape patches and types in the study area were identified in the general, which were

基金项目:国家社科基金重大项目(21ZDA090);宁夏回族自治区科技研发计划项目(2018HXFWYL24)

收稿日期:2023-04-15; **采用日期:**2023-10-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yjzhang622@foxmail.com

mainly used as the basic units for the assessment of visual landscape characteristics. In addition, based on the multi-disciplinary theory of ecological aesthetics, three indexes of visual landscape characteristics assessment, which are, visual landscape diversity, visual landscape naturalness, and visual landscape uniqueness, were constructed, which were mainly measured by landscape metrics in the form of borrowing, and all the measurement indexes were visualized by using FRAGSTATs and GIS platforms. At last, the results of spatial distribution about the comprehensive assessment of visual landscape characteristics were calculated and drawn after the weights were obtained by the SPCA method. The results of this study indicated that many interactive landscape elements “aggregated” to produce different levels of visual landscape characteristics. At the same time, the landscape types related to low-level visual landscape characteristics are more complicated in the composition of elements, while the landscape types related to high-level visual landscape characteristics are mainly related to the interaction between landform which is composed of moderate slope, southeast aspect and valley and land use which is dominated by grassland, undeveloped land and arbor forest. It is concluded that, the visual assessment results of visual landscape characteristics will be helpful to identify those landscape patches or types that need to be restored in combination with protection, used scientifically and planned rationally, and managed and coordinated in a complementary way, which is also conducive to increasing the ecological aesthetic value of the whole protected area.

Key Words: ecological aesthetics; classified digital landscape model; landscape metrics; Helanshan National Nature Reserve in Ningxia; visual landscape characteristics

景观包括自然、文化和美学(感知)3类,景观美学或感知领域主要是视觉景观。视觉景观质量评估涉及视觉景观特征(Visual landscape characteristics, VLC)和视觉景观感知的认知过程(Cognitive process of visual landscape perception)2方面,视觉景观特征评估就是侧重视觉景观客观物理属性的评估。如今,文化遗产领域十分重视视觉景观质量^[1],由于对国家公园生态系统完整性和原真性功能认识的提升,保护地领域更多关注景观生态学,景观美学作为一种重要的生态系统服务对人类福祉产生积极影响^[2]也应得到重视。

景观美学涵盖2个理论维度,过去视觉景观评估多遵循源自环境心理学的风景美学(Scenic aesthetics)理论,而较少采用与景观生态学交叉的生态美学(Ecological aesthetics)理论。风景美学暗示的视觉偏好具有明显固定性与相对永久性,这与公众视觉偏好的“荒野”存在一定矛盾,而生态美学倡导欣赏生态景观不仅是静态的视觉线索,还是建立在与环境动态、多感官和积极的接触尤其是对环境功能的理解上^[3]。生态美学可细分为视觉景观生态学、听觉景观生态学等跨学科领域,已有研究针对景观美学和景观生态学的主要交叉领域——视觉景观生态学在景观结构上的重叠指标展开了理论探讨^[4-7]。景观生态学主要通过复合指数^[8]或景观格局指数^[9-13]来测度景观斑块和类型客观存在、本身固有或自组织的空间特征以揭示生态功能,而景观美学多依赖专家知识或公众偏好揭示主观判定、赋予景观或重新组织的视觉特征。视觉景观生态学的理论核心是景观在美学(视觉)与生态上的相关性,方法学核心是美学(视觉)特征与生态功能共性的景观结构指标^[4-7],因此景观生态与景观美学(视觉)指标可被用来互相表征质量。但目前生态美学研究集中在景观生态学与景观美学关系的理论探讨^[4-7]或指标验证^[14-21]层面,较少直接利用生态美学理论开展视觉景观评估。

无论风景美学或生态美学,视觉景观评估方法都有“公众感知/偏好法(依赖于人或侧重公众偏好的主观法)”“专家/设计法(独立于人或依赖专家知识的客观法)”2类,主、客观都可在实地(有限视野)和空间(无限视野)水平开展。研究^[22]表明:(1)主观法的实地水平通常是调查或测量公众的心理、生理和行为等感知信息,从而间接确定其视觉偏好的特征,空间水平是将公众感知信息与地理要素或区域联系起来^[22];(2)客观法的实地水平是通过专家制定标准集对自然或文化的视觉要素(如地形、植被、水体、建筑等)直接观察或描述,空间水平是专家统计视觉要素并呈现其空间分布规律,或利用自然与文化的地理要素(如地貌、土地利用等)空间建模来计算视觉景观特征的空间格局^[22]。

保护地领域,主、客观方法已分别趋于“智能化+可视化”“数字化+可视化”^[22]。但早期景观偏好引发的

风景美学理论对风景名胜体系产生深远影响,视觉景观评估多采用风景美学而非生态美学理论,主观而非客观法,以及实地而非空间水平^[22]。依据风景美学理论的客观法在空间水平上采用的依旧是风景(视觉)而非地理要素,如依据我国传统风景要素(如陆地、水文、生物和气象景观)构建专家评估标准并绘制风景要素的等级分布规律^[23]。但保护地作为中观或宏观尺度的空间范围,调查和统计视觉要素空间分布存在费时费力问题。直到近些年才开始出现直接采用生态美学理论在空间水平上利用地理要素和景观生态学方法评估视觉景观特征^[19, 24—26]的研究。

为推进生态美学理论在客观法和空间水平上向“数字化+可视化”发展,以宁夏贺兰山国家级自然保护区为例,通过 GIS(Geographical information system, 地理信息系统)数字化技术利用地理要素构建分类的数字景观模型,以此得到客观的视觉景观结构或格局;基于生态美学理论,借用景观生态学的景观格局指数构建视觉景观特征指标,通过 FRAGSTATs(Fragment statistic method, 碎片统计法)对识别的视觉景观特征评估单元进行视觉景观特征计算;通过 SPCA(Spatial principal component analysis, 空间主成分分析法)分析和加权计算得到可视化结果,为保护地保护、规划和管理 3 个决策环节提供建议。

1 研究区域概况

研究区域位于宁夏回族自治区银川市西北,银川平原与阿拉善高原之间,总面积 1935.36km²(图 1)。1956 年经第一届全国人大通过划定,1982—1983 年从省级晋升为国家级,于 1995 年加入中国人与生物圈网络,是宁夏最早建立的森林生态系统类型自然保护区,集自然与文化景观为一体。贺兰山素有“朔方之保障,沙漠之咽喉”地位,山地系统受地质构造、干燥剥蚀和流水侵蚀影响,具有高低悬殊、岭谷相间和山壁陡峭的特点^[27]。保护区位于贺兰山东麓北段和中段,两段地貌差异明显,北段海拔不超过 2000m,由花岗岩组成,具

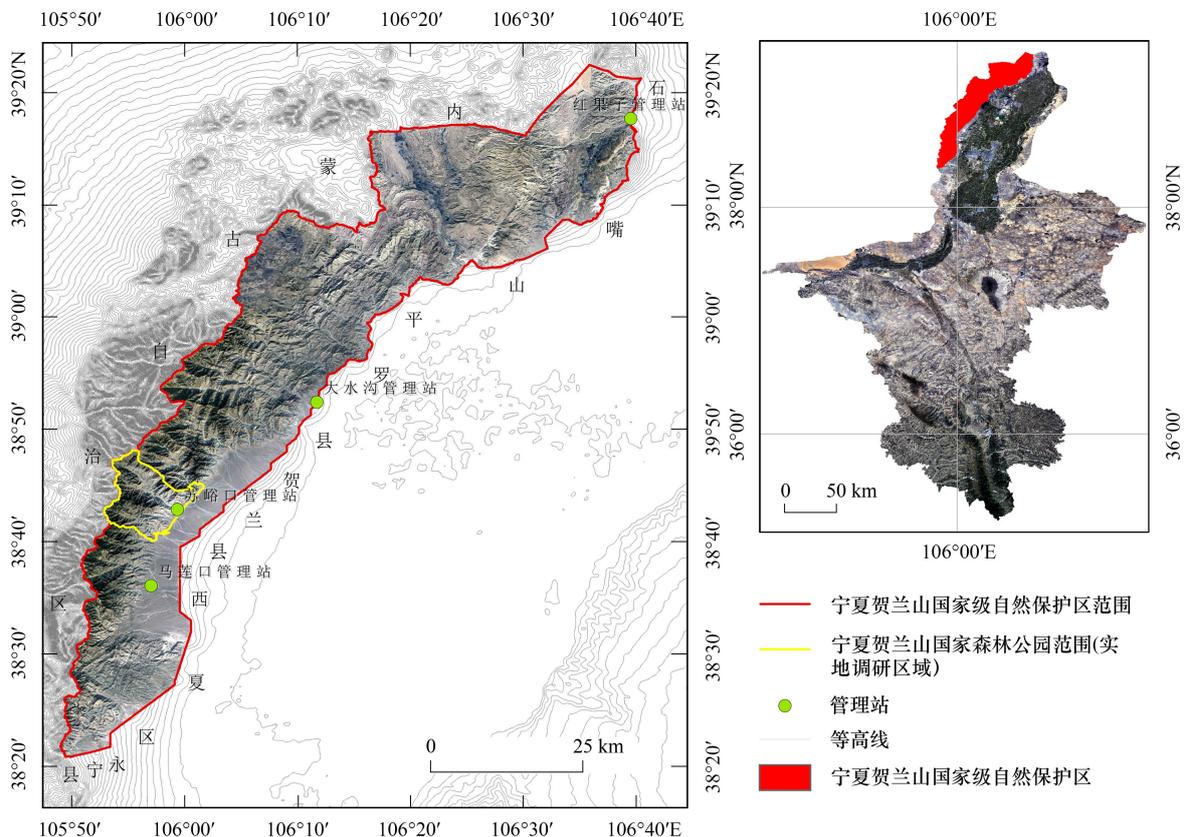


图 1 研究区域区位

Fig.1 Location of study area

有球状风化地貌,中段海拔 3000m 左右,最大相对高差 2000m,存有煤炭资源。由于处于半荒漠草原和荒漠间分界线、中温带干旱气候区,保护区全年干旱少雨、日照强、无霜期短、雨雪稀少和大雾天气多,又因海拔高,山地气候典型,垂直分布明显^[27]。保护区内沟道极为发育,自西向东延伸,呈梳篦状分布,概属黄河水系外流区,但受气候影响整体水资源较为贫乏,多数沟道为季节性河流,同时中段上游山地高寒,降水多、蒸发少,又有基岩裂隙水补给,沟道水流具有瀑布涨落的特性^[27]。水热条件随海拔变化具有更替规律性,特别是中段土壤和植被具有明显垂直分异^[27],森林多为天然次生林,以云杉、油松、山杨、灰榆等植被为主。

2 数据来源

10m×10m 空间分辨率的数字高程模型(Digital terrain model, DEM)从 Bigemap GIS Office(<http://www.bigemap.com/index.html>)上获取(已授权)(图 2)。数字土地利用模型(Digital land use model, DLUM)为 2018 年通过遥感手段获得的林地与建筑物等地表覆盖数据(图 3)。在 ArcMap 10.5.0 中建立数据库并预处理,根据地理位置投影坐标系设置为 WGS_1984_UTM_ZONE_48N,通过要素转栅格工具将土地利用矢量数据统一为空间分辨率为 10m×10m 栅格大小。

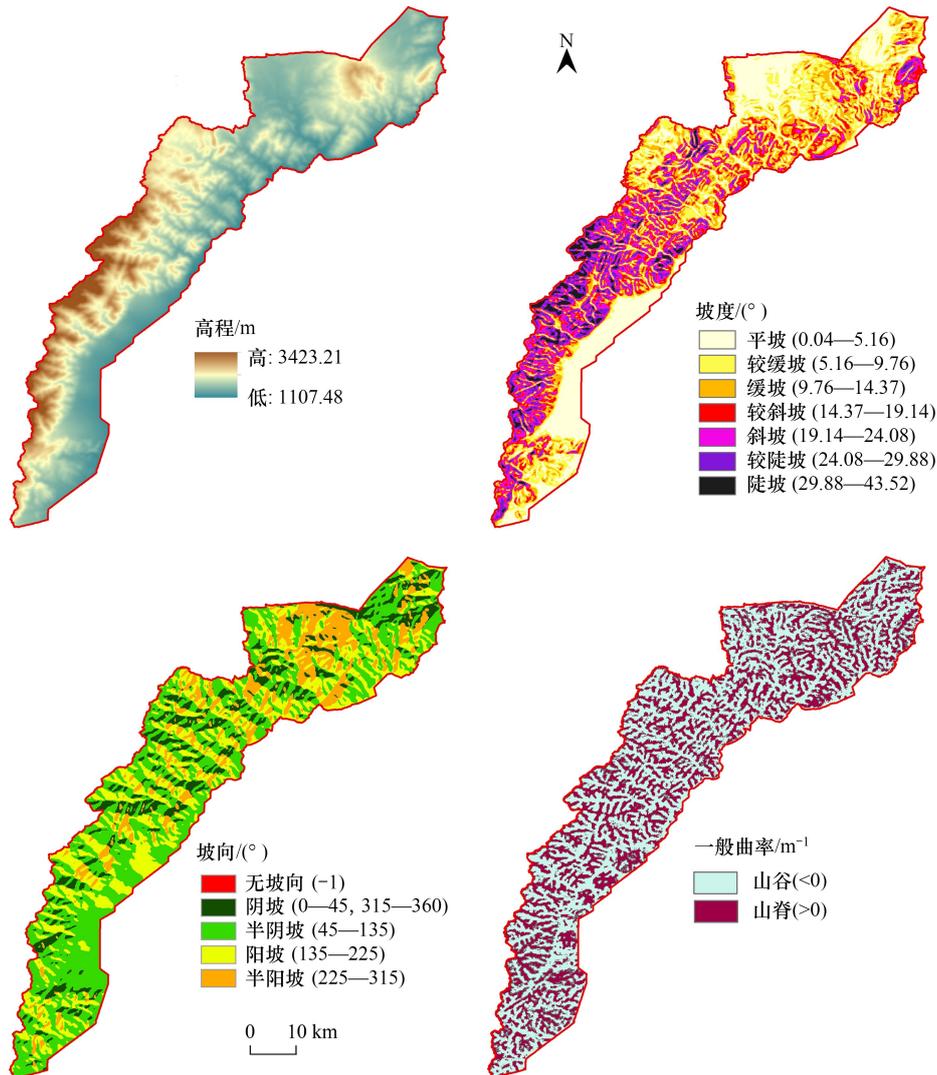


图2 研究区域高程基础数据与 3 个地貌分类指标

Fig.2 Basic terrain data and three landform classification indicators of study area

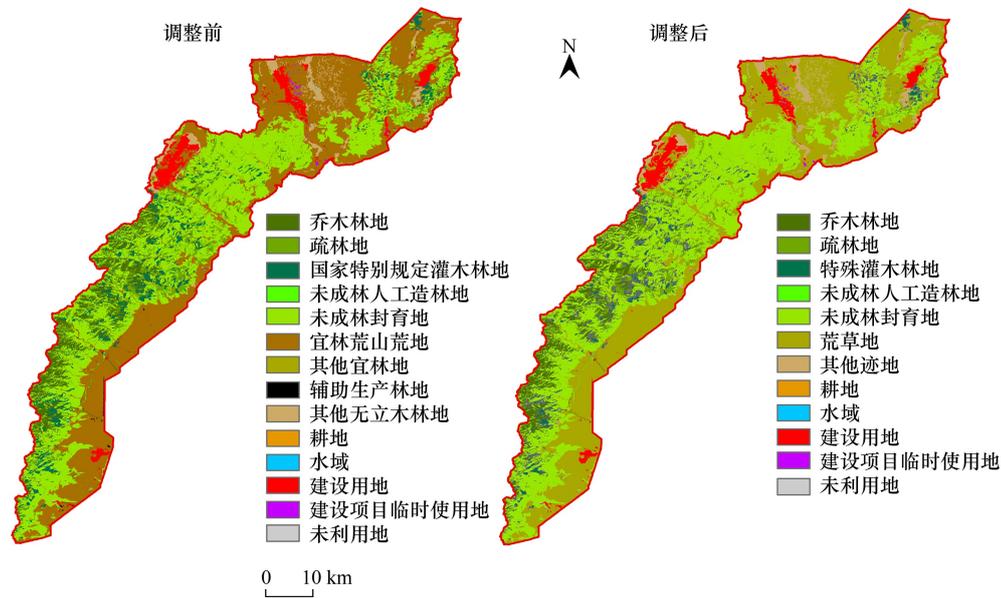


图3 研究区域调整前后的土地利用分类

Fig.3 Land use classification of study area before and after adjustment

3 研究方法

3.1 数字景观模型分类

3.1.1 筛选景观要素

景观作为人所感知的区域,其视觉特征是自然和文化要素相互作用的结果^[28]。虽然视觉景观特征评估的对象是实地层面上看到的视觉景观,但也可在空间层面通过景观斑块或类型来表征^[29]。保护地作为一类复杂适应系统(Complex adaptive systems, CAS)^[30],是由“自然与文化”或“垂直与水平”相互作用的要素组合而成,识别景观斑块或类型需要对景观要素进行筛选。英国景观特征评估(Landscape character assessment, LCA)总结了土地覆盖、动植物、土壤、气候、水文、地质、地貌等自然要素,土地利用、居民点、圈地、土地权属、时间深度等文化要素^[28];朱里莹等^[31]基于灰色统计分析总结了中国国家公园9类景观要素;袁阳等^[32]总结山岳型国家公园的地貌、地形起伏度、坡度、地质4类主体景观要素和土壤、植被、水域、土地权属和土地利用5类次要景观要素。贺兰山具有典型山地生态系统特点,选取地貌作为主要自然和垂直要素,土地利用为次要文化和水平要素。

3.1.2 景观分类指标

依据景观要素构建景观分类指标体系(表1),计算分析时将三级指标转换为属性值。

(1) 地貌分类

通过GIS的表面分析工具,利用高程栅格数据可视化坡度、坡向和一般曲率3个地貌指标(图2),由于地貌指标为连续变量,采用重分类工具划分等级。其中,坡度决定了径流侵蚀强度^[19, 33],采用模式分级法中的自然间断点分级法^[34],获得坡度分布频数并根据分布统计直方图找出明显自然裂点作为地貌类型界线,结合地理学分类标准^[35]划分为7个等级;坡向决定了径流侵蚀方向和植物生长水热条件^[19, 33],该地区山地系统不同坡向的林地生态需水量不同^[36],按日照方位划分坡向为5个等级;一般曲率决定径流侵蚀和沉积方向^[19, 33],依据地形曲面的凹凸结构划分山体曲率为2个等级。

(2) 土地利用分类

获取的土地利用数据除了林地(乔木林地、疏林地、国家特别规定灌木林地、未成林人工造林地、未成林

封育地、宜林荒山荒地、其他宜林地、辅助生产林地、其他无立木林地),还有耕地、水域、建设用地、建设项目临时用地和未利用地(图3)。拟议的《城乡用地分类与规划建设用地标准》^[37]对《土地利用现状分类(GB/T 21010—2017)》^[38]有所调整,《森林法(2019年修订)》^[39]与《林地分类(LY/T 1812—2021)》^[40]中部分林地类型不再按林地管理。参考相关标准^[37, 40]并按视觉相似性和区别性,利用GIS重分类工具调整为12种土地利用类型(图3)。其中,国家特别规定灌木林地调整为特殊灌木林地^[37];宜林地虽宜林却没有林地覆盖且与草地等存在冲突^[41],已被取消^[40],但研究区域的宜林荒山荒地、其他宜林地在视觉上并非无植被覆盖,调整为不用于畜牧业的荒草地^[37];道路、示范基地、基础设施等辅助生产林地已被取消^[40],视觉上与建设用地一致^[37];无立木林地已被取消^[40],调整为其他迹地^[37]。

表1 研究区域景观分类指标

Table 1 Landscape classification index of study area

一级指标 First level indicators	二级指标 Second level indicators	分级依据 Placement basis	三级指标 Third level indicators	
			属性值 Attribute value	等级划分 Degree dividing
地貌(自然和垂直要素) Landform (natural and vertical elements)	坡度	自然间断点分级法	1	平坡(0.04°—5.16°)
			2	较缓坡(5.16°—9.76°)
			3	缓坡(9.76°—14.37°)
			4	较斜坡(14.37°—19.14°)
			5	斜坡(19.14°—24.08°)
			6	较陡坡(24.08°—29.88°)
			7	陡坡(29.88°—43.52°)
	坡向	日照方位	1	无坡向(-1°)
			2	阴坡(0°—45°, 315°—360°)
			3	半阴坡(45°—135°)
			4	阳坡(135°—225°)
			5	半阳坡(225°—315°)
一般曲率	地形曲面	1	山谷(<0 m ⁻¹)	
		2	山脊(>0 m ⁻¹)	
土地利用(文化和水平要素) Land use (cultural and horizontal elements)	地类	相关标准及视觉相似性和区别性	1	乔木林地
			2	疏林地
			3	特殊灌木林地
			4	未成林人工造林地
			5	未成林封育地
			6	荒草地
			7	其他迹地
			8	耕地
			9	水域
			10	建设用地
			11	建设项目临时用地
			12	未利用地

3.1.3 空间叠加分析

识别景观斑块或类型属于区划范畴,区划是表达地理现象与特征的区域分布规律方法^[42],有2种划分顺序:(1)依据地域分异规律,将地表依次划分为不同等级的各种区域,形成“自上而下”的区域分割方法(顺序划分),可将同一空间区域中多个要素层叠加,通过计算和分析组成一个综合要素层^[43],综合分类结果具有各要素层属性^[44]。在边界确定上较直接和清晰,但叠加时需将重合度高的线条作为新界限,叠加要素不宜过多,否则很难将叠加的界限提取出来^[43];(2)依据地域组合规律,将同性质的地理空间单元合并为更高一级的

区域,形成“自下而上”的空间聚类方法(逐级合并)^[42]。该方法以 LCA 识别为代表,识别景观特征类型或区域^[45]并生成景观特征地图,常用双向指示物种分析^[46]、证据权重法^[47]、碎片统计法^[48]以及基于现有 GIS 数据处理或基于规则的处理法(综合利益相关者意见制定分类规则)^[45]等方法。

从视觉上考虑,第 1 种“顺序划分”逐步将景观斑块和类型缩小至可视范围并接近人眼分辨景观中物体的能力(区分光学深度的临界距离为 1200—1400m^[49]),适用于揭示视觉景观结构或格局^[19];第 2 种“聚类分析”逐步扩大可视范围,前人划分的景观特征区域^[32, 50]显示单个景观特征区域尺度往往大于 2000m 且超过了可视距离。结合景观分类进行“自上而下”的空间叠加分析,通过 GIS 联合工具叠加分析,将数字高程模型与数字土地利用模型的综合分类组合起来构建分类的数字景观模型^[19, 51],识别的景观斑块和类型将为视觉景观特征评估提供计算的基本单元,详见图 4。

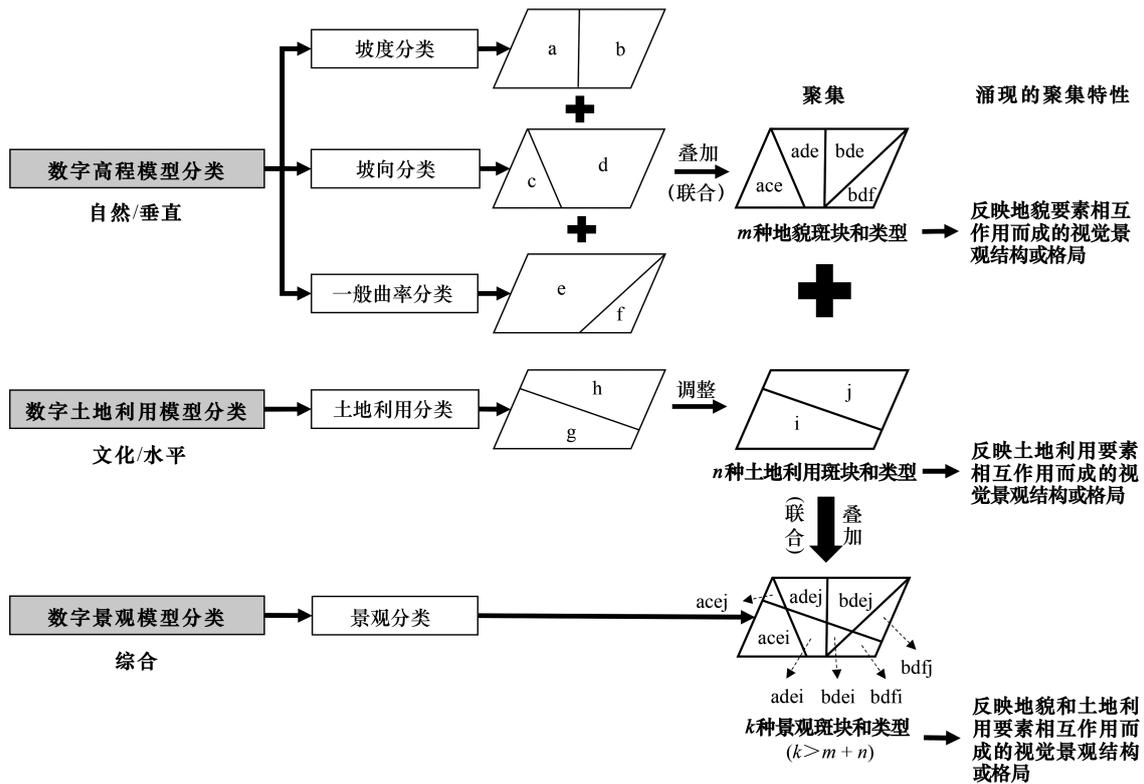


图 4 “自上而下”的空间叠加分析流程(顺序划分)

Fig.4 “Top-down” spatial overlay analysis process (divided in order)

3.2 视觉景观特征指标

3.2.1 指标和计算方法

生态美学视角下,客观法遵循的是从基础研究^[4-7]和实证评估^[14-20, 52]中推导出的共同偏好,即被大多数人认同的共识指标^[2]。而视觉特征和生态功能的共性指标诸多^[4, 7],已有研究通过客观法(景观格局指标)和主观法(视觉偏好)的相关性证明多样性和自然性是视觉评价中的关键评估标准^[52],许多研究亦表明独特性也是关键评估标准^[23, 53],尤其是我国国家公园设立指标^[54]将景观独特性纳入主要考虑因素之一。基于前人研究^[2, 24, 52]选取视觉景观的多样性、自然性和独特性 3 个指标^[2, 24],借用景观格局指数作为度量指数分析和制图(表 2)。利用 FRAGSTATs 在类型尺度上计算斑块密度(Patch density, PD)、边缘密度(Edge density, ED)和占景观面积比例(Percent of landscape, PLAND)3 个景观格局指标,将结果整理为 excel 表格连接到 GIS 的栅格文件,进一步计算和绘制面积加权自然度(Area weighted naturalness, AWN)和面积加权稀有度(Area weighted rarity, AWR)。

表 2 视觉景观特征指标

Table 2 Visual landscape characteristic indicators

一级指标 First level indicators	二级指标 Second level indicators	度量指数 Metric indexes	计算公式 Calculation formulas
视觉景观多样性 Visual landscape diversity	组成多样性	$PD/(块/100hm^2)$	$PD = \frac{NP_i}{A}, (PD > 0)$
	结构多样性	$ED/(m/hm^2)$	$ED = \frac{\sum_{k=1}^m e_{ik}}{A}, (ED \geq 0)$ $AWN = P_i \times N_i, (0 \leq AWN \leq 6)$
视觉景观自然性 Visual landscape naturality	感知自然性	$AWN/\%$	$PLAND = P_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A}, (0 \leq P_i \leq 1)$
视觉景观独特性 Visual landscape uniqueness	类型稀有性	$AWR/\%$	$AWR = (1 - P_i) \times R_i, (0 \leq AWR \leq 1)$

PD : 斑块密度 Patch density; NP_i : 类型 i 的 斑块数量 Number of patches of type i ; A : 景观面积 Area of landscape; ED : 边缘密度 Edge density; e_{ik} : 类型 i 与 k 之间的边缘长度 Edge length between types i and k ; AWN : 面积加权自然度 Area weighted naturalness; P_i : 类型 i 占景观的百分比 Percent of type i in landscape; $PLAND$: 占景观的比例 Percent of landscape; N_i : 类型 i 的自然度赋值 Naturalness assignment of type i ; a_{ij} : 斑块 ij 的面积 Area of patch ij ; AWR : 面积加权稀有度 Area weighted rarity; R_i : 类型 i 的稀有度赋值 rarity assignment of type i

(1) 视觉景观多样性

组成与结构多样性分别通过斑块密度 (PD) 和边缘密度 (ED) 绘制。这两个指标通常与视觉偏好呈正相关^[2], PD 反映了单位面积上的类型数量, 同时揭示了景观类型的空间分布、组成的破碎化程度以及景观整体的异质性。 ED 反映了单位面积上的边缘长度, 其景观边界线和背景的边缘不作为边缘看待^[55], 揭示了景观斑块类型形状的复杂性。

(2) 视觉景观自然性

感知自然性通过面积加权自然度 (AWN) 绘制。虽然 AWN 是以生态意义的生态干扰度 ($hemeroby$)^[56] 为依据, 但它更好地反映了人对自然的感知。对景观类型的感知自然性赋值上, 借鉴 Walz 和 Stein 依据人类影响对生态干扰度的分级^[56], Carver 等针对土地覆盖的自然性分类^[57] 以及 Hermes 划分的感知自然度等级^[2], 依据土地利用对感知自然性的影响程度制定感知自然度赋值 (N_i), 详见表 3。

表 3 研究区域景观类型的感知自然性赋值

Table 3 The assignment of perceived naturalness of landscape types in study area

人类影响 Human impact	影响来源 (土地利用) Impact source (land use)	感知自然度 Perceived naturalness	N_i
几乎没有 Few	乔木林地、荒草地、未利用地	非常高	6
较弱 Weak	水域、疏林地	高	5
适度 Modest	特殊灌木林地、未成林封育地	相当高	4
中等强 Moderately strong	未成林人工造林地	中等	3
强 Strong	其他迹地	较低	2
非常强 Very strong	耕地	低	1
过强 (生境破坏) Excessively strong (habitat destruction)	建设用地、建设项目临时用地	非常低	0

(3) 视觉景观独特性

类型稀有性通过面积加权稀有度 (AWR) 绘制。景观类型的稀有性由土地利用性质和面积占比共同决定, 在设置景观类型的稀有性赋值时较为严格, 只有几乎没有或较弱的人类影响且 P_i 低于 3% 时, 景观类型才能设为“稀有”^[2], 其他均为“不稀有”, 故类型稀有度赋值 (R_i) 只有 1 和 0, 详见表 4。

表 4 研究区域景观类型的稀有性赋值

Table 4 The assignment of rarity of landscape types in study area

人类影响 Human impact	影响来源(土地利用) Impact source (land use)	P_i 要求 Requirements of P_i	类型稀有度 Type rarity	R_i
几乎没有 Few	乔木林地、荒草地、未利用地	<3%	稀有	1
较弱 Weak	水域、疏林地	<3%	稀有	1
适度 Modest	特殊灌木林地、未成林封育地	—	不稀有	0
中等强 Moderately strong	未成林人工造林地	—	不稀有	0
强 Strong	其他迹地	—	不稀有	0
非常强 Very strong	耕地	—	不稀有	0
过强(生境破坏) Excessively strong (habitat destruction)	建设用地、建设项目临时用地	—	不稀有	0

(2)空间主成分分析

SPCA 分析是为了揭示指标中无法直接测量到的隐形主成分。将各指标值归一化处理,利用 GIS 主成分分析工具进行空间降维,提取 4 个主成分的特征根、贡献率(方差解释率)、累积贡献率和线性组合系数矩阵,并依据特征根和线性组合系数矩阵计算权重,量化和绘制视觉景观特征(VLC)空间分布结果的加权求和公式如下:

$$VLC = w_1 PD_{\text{归一化}} + w_2 ED_{\text{归一化}} + w_3 AWN_{\text{归一化}} + w_4 AWR_{\text{归一化}}$$

4 结果

4.1 景观斑块和类型识别

通过 GIS 对数字景观模型分类,在对坡度、坡向和一般曲率空间叠加分析后,划分得到 57 种地貌斑块和类型(图 5,表 5),与调整后的 12 种土地利用类型(图 3)叠加,识别了 440 种景观斑块和类型(图 6,表 6)。

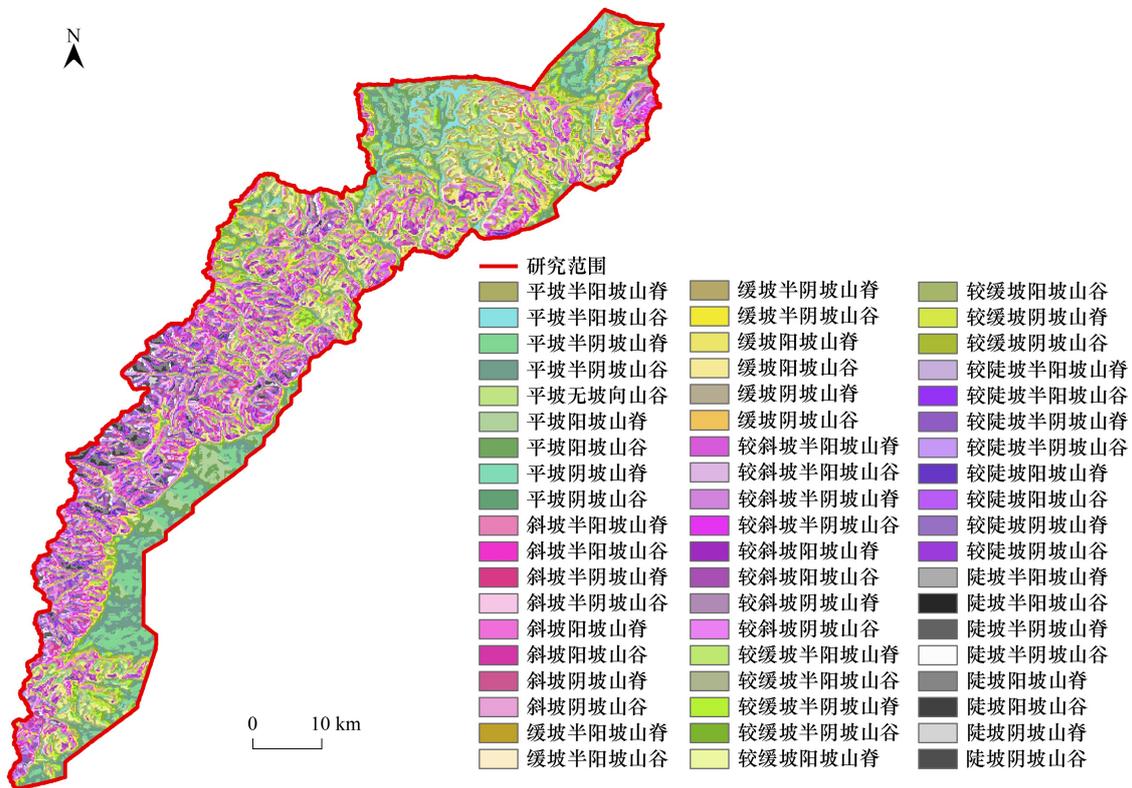


图 5 研究区域的地貌斑块和类型

Fig.5 Landform patches and types in study area

图 6 显示,所有景观斑块或类型都是由坡度、坡向、一般曲率等地貌的自然和垂直信息以及土地利用的文化和水平信息叠加后的复合景观要素信息组成,例如,当人们在平坡半阴坡山脊乔木林地景观类型区域时,可以同时欣赏(主要是视觉感知)到由平坡、半阴坡和山脊及乔木林地等景观要素组合起来的视觉景观特征。这些景观斑块和类型不仅划分了区域,还表明在接近人能分辨物体的 1000m 左右尺度可以探测到 10m×10m 分辨率的地貌和土地利用等景观要素的多层次(自然和文化要素)、多维度(垂直和水平)细节,反映客观的视觉景观结构或格局,可作为视觉景观特征评估的基础。

表 5 研究区域面积大或数量多的前 10 种地貌斑块和类型

Table 5 Top 10 landform patches and types with large area or quantity in study area

序号 Number	地貌斑块和类型 Landform patches and types	面积 Area/hm ²	面积占比 Ratio of area/%	序号 Number	地貌斑块和类型 Landform patches and types	数量 Quantity	数量占比 Ratio of quantity/%
1	平坡半阴坡山谷	14822.21	7.66	1	缓坡半阴坡山谷	1388	4.20
2	平坡半阴坡山脊	10292.52	5.32	2	缓坡半阴坡山脊	1372	4.15
3	较缓坡半阴坡山谷	9994.32	5.16	3	较缓坡半阴坡山脊	1287	3.89
4	缓坡半阴坡山谷	8410.94	4.35	4	较斜坡半阴坡山脊	1228	3.72
5	平坡阳坡山谷	7701.08	3.98	5	较斜坡半阴坡山谷	1201	3.63
6	缓坡半阴坡山脊	7266.20	3.75	6	较缓坡半阴坡山谷	1196	3.62
7	较斜坡半阴坡山谷	6963.80	3.60	7	缓坡阳坡山谷	1108	3.35
8	较斜坡半阴坡山脊	6798.85	3.51	8	较缓坡阳坡山谷	1053	3.19
9	较缓坡阳坡山谷	6735.01	3.48	9	缓坡阳坡山脊	1043	3.16
10	较缓坡半阴坡山脊	6664.23	3.44	10	较缓坡阳坡山脊	1025	3.10

表 6 研究区域面积大或数量多的前 10 种景观斑块和类型

Table 6 Top 10 landscape patches and types with large area or quantity in study area

序号 Number	景观斑块和类型 Landscape patches and types	面积 Area/hm ²	面积占比 Ratio of area/%	序号 Number	景观斑块和类型 Landscape patches and types	数量 Quantity	数量占比 Ratio of quantity/%
1	平坡半阴坡山谷荒草地	10823.32	5.59	1	平坡半阴坡山谷建设用地	1283	1.60
2	平坡半阴坡山脊荒草地	7956.82	4.11	2	缓坡半阴坡山谷未成林封育地	1212	1.51
3	平坡阳坡山谷荒草地	5320.10	2.75	3	较斜坡半阴坡山谷未成林封育地	1127	1.40
4	较缓坡半阴坡山谷荒草地	4726.01	2.44	4	缓坡半阴坡山脊未成林封育地	1107	1.38
5	缓坡半阴坡山谷未成林封育地	3951.82	2.04	5	较斜坡半阴坡山脊未成林封育地	1071	1.33
6	平坡阳坡山脊荒草地	3703.69	1.91	6	较缓坡半阴坡山谷未成林封育地	1018	1.27
7	缓坡半阴坡山脊未成林封育地	3668.14	1.90	7	缓坡阳坡山谷未成林封育地	933	1.16
8	较斜坡半阴坡山脊未成林封育地	3654.72	1.89	8	较缓坡半阴坡山谷荒草地	916	1.14
9	较斜坡半阴坡山谷未成林封育地	3541.07	1.83	9	较缓坡半阴坡山脊未成林封育地	916	1.14
10	较缓坡半阴坡山谷未成林封育地	3250.26	1.68	10	较斜坡阳坡山谷未成林封育地	868	1.08

4.2 视觉景观特征分析

4.2.1 度量指标分析

PD 和 *ED* 分别指示了视觉景观的组成和结构多样性。图 7 显示,不论山谷或山脊,坡度适中且东南向的未成林封育地和荒草地通常表现出较高的视觉景观多样性,而过强的人类影响促生了较低的视觉景观多样性。其中,(1)*PD* 最低的景观类型有 26 类(6%),涉及各类地貌且由建设项目临时用地、建设用地等组成,但不涉及乔木林地、疏林地、特殊灌木林地和未成林封育地;(2)*PD* 较低的多达 392 类(89%),涉及各类复杂的景观要素;(3)只有 20 类(5%)提供了较高 *PD*,是由山谷或山脊中非陡坡、东南向(半阴坡或阳坡)的未成林封育地和荒草地组成;(4)*PD* 最高的为缓坡半阴坡山谷未成林封育地;(5)较陡坡半阴坡山谷其他迹地的 *ED* 最低;(6)*ED* 较低的有 421 类(96%)之多并涵盖各种景观要素;(7)只有 17 类(4%)*ED* 较高,是由山谷或山脊中非较陡或陡坡、东南向的未成林封育地和荒草地组成;(8)平坡半阴坡山谷荒草地 *ED* 最高。

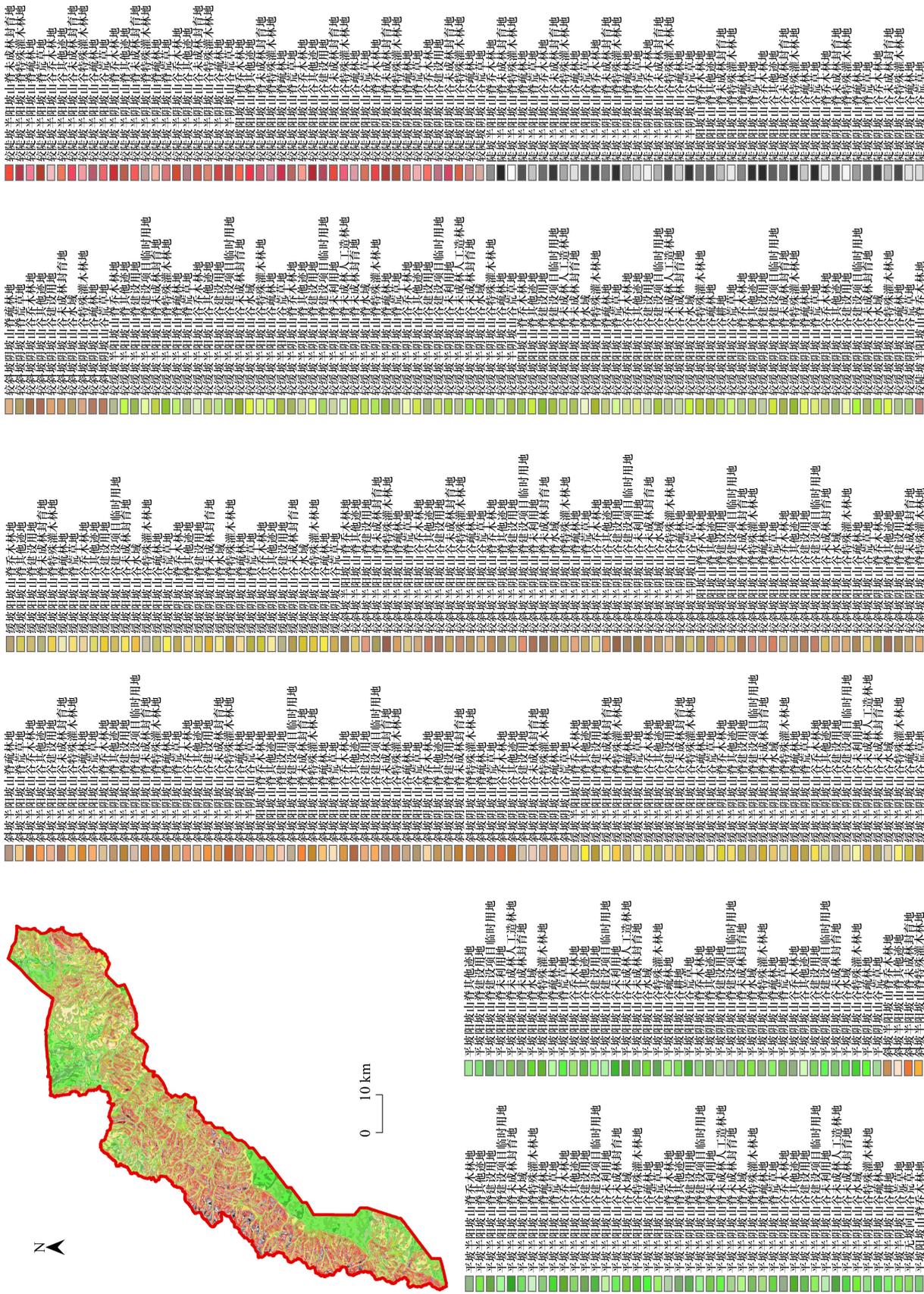


图 6 研究区域的景观斑块和类型 Fig.6 Landscape patches and types in study area

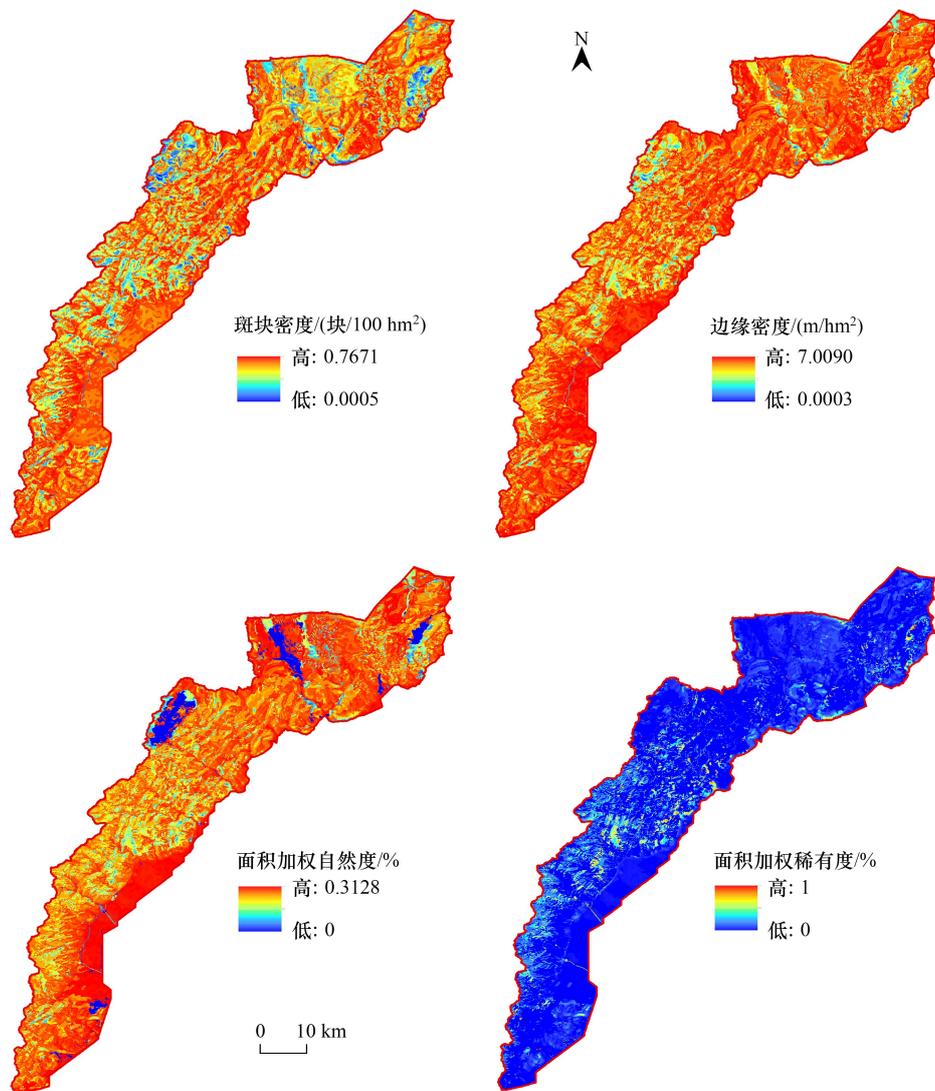


图7 研究区域视觉景观特征度量指标可视化

Fig.7 Visualization of metrics of visual landscape characteristics in study area

AWN 指示了视觉景观的感知自然性。图7表明,荒草地通常表现出较高的视觉景观自然性,而较低的感知自然性与中等以上强度的人类影响有关,但研究区域受半干旱气候的不利条件影响,缺乏含有水域的景观类型,而通常大面积的水域才会明显让人感知到自然性,这使得一些水域尤其是山谷或山脊的较斜坡半阴坡水域不具有感知自然性。其中,(1)AWN 最低的有72类(16%),主要为山谷或山脊中的较陡或陡坡东南向其他迹地、较缓坡阳坡山谷耕地、受建设用地和建设项目临时用地影响的所有区域,以及山谷或山脊中的较斜坡半阴坡水域;(2)AWN 较低的有287类(65%),景观类型组成复杂;(3)80类(18%)AWN 较高,由地貌复杂的未成林封育地、荒草地和乔木林地组成;(4)AWN 最高的为平坡半阴坡山谷荒草地。

AWR 指示了视觉景观的类型稀有性。图7表明,稀有与不稀有的景观类型比例较为接近,稀有性与极其低的人类影响和低面积占比有关,而轻微的人类影响都将使得景观类型不稀有,但含荒草地的景观类型受到面积限制,而含水域的景观类型则受益于不利的气候条件。其中,(1)不稀有的景观类型有242类(55%),多由地貌复杂的特殊灌木林地、未成林封育地、其他迹地、建设用地、建设项目临时使用地、未成林人工造林地和耕地及荒草地组成,尽管荒草地几乎没有人类影响,却有30类(7%)含荒草地的景观类型的 P_i 大于3%而成为不稀有类型;(2)稀有的景观类型有198类(45%),主要为地貌复杂的荒草地、乔木林地、疏林地、水域和未

利用地,其中,56类(12.7%)含荒草地的类型是稀有的,表明荒草地并未失去整体的稀有性优势,AWR值最高的为山谷或山脊的较斜坡半阴坡水域,表明不利气候条件在某种程度上促进了稀有性视觉景观的存在。

4.2.2 综合分析

SPCA分析4个归一化指标值得到4个隐形主成分的特征根、贡献率和线性组合系数矩阵。表7显示,前2个主成分的累积贡献率是91.53%,说明主成分1和2能够充分体现研究区域的视觉景观特征信息。表8表明,主成分1、3和4侧重视觉景观多样性,主成分1和3侧重视觉景观自然性,只有主成分2侧重视觉景观独特性,结合特征根计算指标权重分别为0.3084(w_1)、0.2892(w_2)、0.2265(w_3)和0.1758(w_4)。

表7 主成分特征根和贡献率

Table 7 Characteristic root and contribution rate of principal components

主成分 Principal components	主成分提取 Principal component extraction		
	特征根 Latent root	贡献率 Contribution rate/%	累积贡献率 Accumulative contribution rate/%
1	2.658	66.438	66.438
2	1.004	25.092	91.53
3	0.328	8.21	99.74
4	0.01	0.26	100

表8 线性组合系数矩阵和权重

Table 8 Linear combination coefficient matrix and weight

名称 Name	主成分 Principal components				综合得分系数 Composite score coefficient	权重 Weight
	1	2	3	4		
$PD_{\text{归一化}} PD_{\text{Normalization}}$	0.573	-0.004	0.6156	0.541	0.4316	0.3084
$ED_{\text{归一化}} ED_{\text{Normalization}}$	0.6097	-0.0325	0.1203	-0.7828	0.4047	0.2892
$AWN_{\text{归一化}} AWN_{\text{Normalization}}$	0.5476	0.0643	-0.7768	0.3045	0.3169	0.2265
$AWR_{\text{归一化}} AWR_{\text{Normalization}}$	-0.0131	0.9974	0.0564	-0.043	0.2461	0.1758

加权计算后的VLC综合了各指标特性(图8),地貌和土地利用景观要素等概率的出现在各类景观斑块和类型中,诸多相互作用的景观要素通过“聚集(Aggregation)^[30]”产生了不同水平的VLC,与低水平VLC有关的景观类型数量多且在景观要素组成上较为复杂,尚难指明具体要素,而有利于塑造高水平VLC的景观类型主要由坡度适中的东南向山谷地貌及荒草地、未成林封育地和乔木林地等土地利用共同组成。其中,(1)最低的VLC来自较陡坡半阳坡山谷其他迹地;(2)409类(93%)VLC都较低,由复杂的景观要素组合而成;(3)只有29类(7%)表现出较高VLC,主要为山谷和部分山脊中非较陡或陡坡且非阴坡(多为东南向)的荒草地、未成林封育地和乔木林地;(4)VLC最高的来自较缓坡半阴坡山谷荒草地。

4.3 应用价值

不同实践环节针对的视觉景观特征水平不同,从这一点上可为保护地领域3个实践环节的决策带来应用价值。(1)应对研究区域中的低水平VLC景观类型加强保护修复,结合生态美学的理论和思想,低水平VLC也是生态结构或功能脆弱的体现,这些区域多受人类影响,需结合生态修复手段合理提升;(2)可合理利用研究区域中具有高水平VLC的景观类型区域进行游憩线路规划,布局最佳的视觉景观体验线路;(3)需要协调景观斑块的保护或规划策略与现有管理分区间的冲突,由于研究区域最新管理分区尚未出台,图8仅展示原来的3级管理分区,按照保护优先原则,一些位于试验区(原)的保护修复景观斑块也应得到重视或将其划入严格保护区,而游憩线路规划应在试验区(原)可规划利用的景观斑块内进行。

5 讨论和结论

5.1 讨论

考虑数据获取性,仅选取贺兰山脉东麓的保护区作为研究范围。国家林业和草原局就“关于申请建立贺

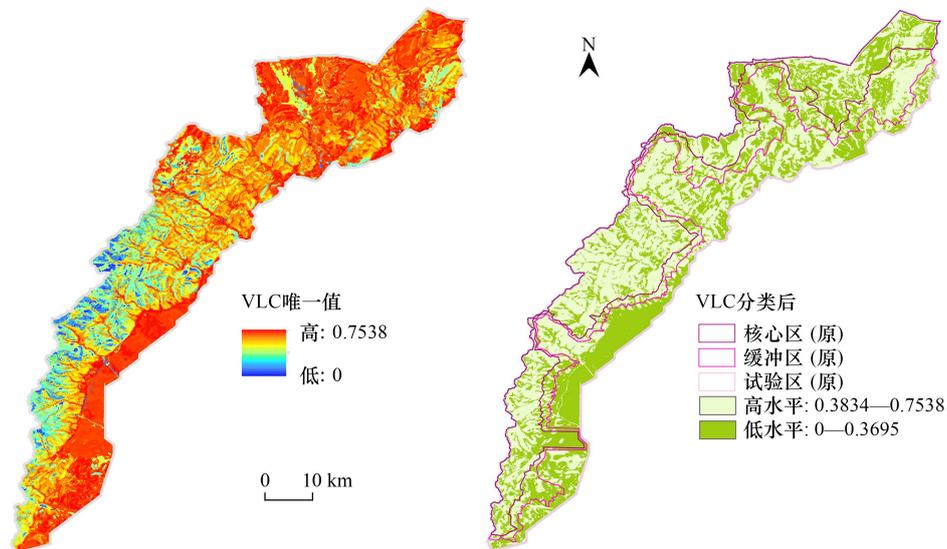


图8 研究区域视觉景观特征综合评估结果

Fig.8 Comprehensive assessment results of visual landscape characteristics in study area

VLC: 视觉景观特征 Visual landscape characteristics

兰山国家公园的建议”复文(2018年第2812号)指出“建立贺兰山国家公园有其必要性和可行性”,宁夏也已编制《贺兰山国家公园创建方案》^[58]。未来应考虑指标适用性,将研究范围扩展到贺兰山国家公园(拟议)、贺兰山脉、区域或国土范围上。

为避免重复计算和叠加要素过多,从“自然-文化”与“垂直-水平”考虑选择了地貌和土地利用2个主导景观要素。坡度分级方面,前人^[19]多直接采用山区坡度分类标准^[59-60],属于主观分级法且依赖经验判断^[34]。根据汤国安和宋佳^[34]对坡度分级方法的对比分析,本研究采用的自然间断点分级法不仅可以揭示地形的分类情况,还可让各级别中的变异总和达到最小,有效提取地貌类型的界线^[34]。

虽然空间叠加分析广泛应用于宏观地理区划中,但本研究筛选的叠加要素数量适宜,故将其运用在中观保护地尺度中。将景观分类与“自上而下”的空间叠加分析流程结合进行空间建模,识别的景观斑块接近可视尺度且反映视觉景观格局,因此直接借用景观格局指数进行视觉景观特征分析。目前,“自下而上”的空间聚类分析法也运用到保护地领域^[32, 50],并作为价值评估的基础,如通过专家对聚类识别的单个景观特征区域进行价值评估后并空间映射评估结果^[32]。但与叠加分析识别的详细分辨率景观斑块和类型相比,聚类分析法识别的粗分辨率景观特征区域尺度较大且超过人的可视能力,是否也能够被用来分析视觉景观结构需要探讨。同时,相较于基于空间建模的指数计算,价值映射依赖专家知识,是否可以代表单个景观特征区域中的所有可视属性也需要进一步研究。

有研究表明生态质量与视觉偏好(质量)呈U型分布^[17],但不同关系验证得出的视觉质量与景观格局关系结论存在差异,参考前人研究^[2, 24]仅选取了3个代表性指标,度量指标也借用了典型的景观格局指数。但先前研究未能充分表明人们在地貌方面对自然度和稀有度的明显视觉偏好,故重点考虑土地利用的影响。未来研究需针对生态美学的共性指标进行全面评估,同时比较各关系验证文章结论,探究如何筛选景观格局指数及影响因素。此外,研究利用可视尺度的景观斑块在类型尺度上计算景观格局指数是为了提出一套视觉景观特征评估框架,并未将人们在景观区域中观察的随机性和尺度性考虑进来,之后可参考该框架,采用接近可视尺度的网格(1000m宽)或移动窗口(500m半径)进一步分析。

某种程度上研究结果说明了保护地作为复杂适应系统,其视觉景观特征不是仅由个别地貌或土地利用要素单独决定的,相反它是各景观要素相互作用的结果。用信息论来解释,Shannon与Hartley提出的信息熵揭

示了“所有集合包括相等概率出现的元素^[61]”原理,这也诠释了景观斑块和类型是由等概率出现的景观要素组成的原因。整体层面上,只有优势的地貌与土地利用同时存在才有利于塑造高水平视觉景观特征,但导致低水平视觉景观特征的景观类型在要素组成上并不明显,还需继续探索不同景观要素对视觉景观特征的作用机制。

评估的目的是将其运用到实践环节,已有研究系统论证了客观法适用于国家公园规划环节的决策制定^[22],本研究采用的客观法已与空间上的地理要素和区域衔接起来,更有利于保护、规划和管理环节落实到具体的区域中去。由于我国保护地管理分区已由3区转变为2区,未来需结合最新管理分区探索管理协调的科学路径。

5.2 结论

研究提出了一套基于数字景观模型分类和景观格局指数的视觉景观特征评估框架,包括:(1)采用基于GIS的数字化技术空间建模,通过筛选景观要素、确定景观分类指标和空间叠加分析构建了分类的数字景观模型,识别了研究区域的景观斑块和类型,展现了客观的视觉景观结构和格局,各景观斑块和类型是视觉景观特征评估的基本单元;(2)结合生态美学理论,借鉴前人研究构建了3个视觉景观特征评估一级指标,并借用景观生态学领域的景观格局指数进行度量,于FRAGSTATs和GIS上计算和处理,得到各度量指标的可视化结果,经过SPCA分析和加权计算,可视化的综合空间分布结果揭示了不同水平视觉景观特征与景观类型的关系;(3)评估结果有助于识别那些需要进一步保护修复、规划利用以及管理协调的区域,从而增加保护地整体的生态美学(主要是视觉景观生态学)价值。

致谢:感谢宁夏贺兰山国家级自然保护区管理局与宁夏贺兰山国家森林公园有限公司提供的帮助。

参考文献(References):

- [1] 徐文廷,方星星.有机演进类文化景观的文化生态完整度评价研究.北京林业大学学报:社会科学版,2017,16(3):18-23.
- [2] Hermes J, Albert C, von Haaren C. Assessing the aesthetic quality of landscapes in Germany. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 296-307.
- [3] Jorgensen A. Beyond the view: future directions in landscape aesthetics research. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(4): 353-355.
- [4] Fry G, Tveit M S, Ode Å, Velarde M D. The ecology of visual landscapes: exploring the conceptual common ground of visual and ecological landscape indicators. *Ecological Indicators*, 2009, 9(5): 933-947.
- [5] Dronova I. Environmental heterogeneity as a bridge between ecosystem service and visual quality objectives in management, planning and design. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 163: 90-106.
- [6] Gobster P H, Nassauer J I, Daniel T C, Fry G. The shared landscape: what does aesthetics have to do with ecology? *Landscape Ecology*, 2007, 22(7): 959-972.
- [7] Tveit M, Ode Å, Fry G. Key concepts in a framework for analysing visual landscape character. *Landscape Research*, 2006, 31(3): 229-255.
- [8] Niemi G J, McDonald M E. Application of ecological indicators. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, 35: 89-111.
- [9] 熊建新,吴南飞.东洞庭湖湿地景观空间结构的完整性分析.环境科学与管理,2008,33(4):30-33.
- [10] 李鑫,田卫.基于景观格局指数的生态完整性动态评价.中国科学院研究生院学报,2012,29(6):780-785.
- [11] 刘晓娜,刘春兰,张丛林,魏钰,黄宝荣.青藏高原国家公园群生态系统完整性与原真性评估框架.生态学报,2021,41(3):833-846.
- [12] 代云川,薛亚东,张云毅,李迪强.国家公园生态系统完整性评价研究进展.生物多样性,2019,27(1):104-113.
- [13] 彭杨靖,黄治昊,林乐乐,王锐锋,崔国发.国家公园陆地自然生态系统完整性与原真性评价方法探索:以钱江源国家公园体制试点为例.生物多样性,2021,29(10):1295-1307.
- [14] 王广兴.基于社交媒体数据的济南市城市公园景观格局对文化服务感知影响[D].济南:山东建筑大学,2022.
- [15] 汤茜,贾艳凤,丁圣彦.土地利用/覆盖与景观格局变化对景观多功能性的影响——以北宋皇陵文化景观为例.河南大学学报:自然科学版,2017,47(1):32-39.
- [16] 陈玲玲,刘佳雪,曹杨,潘鸿雷.城市旅游景观美学质量及其与景观格局的关系研究——以南京市为例.资源开发与市场,2016,32(3):317-321,256.
- [17] Zhao J W, Wang R H, Luo P J, Xing L, Sun T. Visual ecology: exploring the relationships between ecological quality and aesthetic preference. *Landscape and Ecological Engineering*, 2017, 13(1): 107-118.
- [18] 周玮,黄震方,吴丽敏,朱云峰.城市传统文化旅游地景观格局与景观审美耦合研究——以南京夫子庙秦淮风光带为例.热带地理,2015,35(6):917-925.
- [19] Karasov O, Vieira A A B, Kùlvik M, Chervanyov I. Landscape coherence revisited: GIS-based mapping in relation to scenic values and preferences estimated with geolocated social media data. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 105973.
- [20] 倪典,赵珂馨,董永逸,杨晓宇,刘文平.生态观光茶园景观美学功能与生态环境效应耦合关系研究——以湖北省恩施州伍家台生态茶

- 园为例. 湖北农业科学, 2018, 57(22): 86-89.
- [21] 刘宝印, 马运佳, 周侃, 孙勇, 侯鹰. 不同功能区域中公众环境感知与环境监测指标的差异性分析. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2957-2963.
- [22] 李娜, 高云, 孙乔响, 张玉钧. 国家公园视觉景观评估实证研究趋势、进展和应用. 中国城市林业, 2023, 21(1): 156-165.
- [23] Du A, Xu W H, Xiao Y, Cui T, Song T Y, Ouyang Z Y. Evaluation of prioritized natural landscape conservation areas for National Park planning in China. Sustainability, 2020, 12(5): 1840.
- [24] Kalinauskas M, Mikša K, Inúcio M, Gomes E, Pereira P. Mapping and assessment of landscape aesthetic quality in Lithuania. Journal of Environmental Management, 2021, 286: 112239.
- [25] Mander Ü, Uemaa E, Roosaare J, Aunap R, Antrop M. Coherence and fragmentation of landscape patterns as characterized by correlograms: a case study of Estonia. Landscape and Urban Planning, 2010, 94(1): 31-37.
- [26] Martín B, Ortega E, Otero I, Arce R M. Landscape character assessment with GIS using map-based indicators and photographs in the relationship between landscape and roads. Journal of Environmental Management, 2016, 180: 324-334.
- [27] 王小明. 宁夏贺兰山国家级自然保护区综合科学考察. 银川: 阳光出版社, 2011.
- [28] Tudor C. An approach to landscape character assessment. York: Natural England, 2014.
- [29] Antrop M, Eetvelde V. The holistic nature of landscape-landscape as an integrating concept. Landscape Series. Cham: Springer, 2017.
- [30] 约翰·H·霍兰. 隐秩序: 适应性造就复杂性. 上海: 上海科技教育出版社, 2019.
- [31] 朱里莹, 徐姗, 兰思仁. 基于灰色统计分析的中国国家公园景观特征要素选择. 中国园林, 2018, 34(10): 98-102.
- [32] 袁阳, 张家瑜, 许航, 周梦涵, 朱里莹. 山岳型国家公园景观特征识别研究——以武夷山国家公园为例. 江西科学, 2022, 40(1): 134-139.
- [33] Clymo R S, Whittaker R H. Communities and ecosystems. Journal of Ecology, 1970, 58(3): 897.
- [34] 汤国安, 宋佳. 基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究. 水土保持学报, 2006, 20(2): 157-160, 192.
- [35] 周启鸣, 刘学军. 数字地形分析. 北京: 科学出版社, 2006: 1-348.
- [36] 樊亚鹏, 张军, 扈花, 刘泽彬. 宁夏六盘山叠叠沟小流域典型华北落叶松林植被承载力研究. 宁夏农林科技, 2019, 60(6): 42-46, 63.
- [37] 中华人民共和国住房和城乡建设部办公厅. 住房城乡建设部办公厅关于国家标准《城乡用地分类与规划建设用地标准 GB50137(修订)(征求意见稿)》公开征求意见的通知. (2018-05-21) [2022-09-05]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/zqyj/201805/20180522_236162.html.
- [38] 全国国土资源标准化技术委员会. GB/T 21010—2017 土地利用现状分类. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [39] 新华网. 中华人民共和国森林法(2019 修订). (2019-12-28) [2022-09-04]. http://www.xinhuanet.com/politics/2019-12/28/c_1125399379.htm.
- [40] 全国森林资源标准化技术委员会. LY/T 1812—2021 林地分类. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [41] 徐斌, 宁鹏. 宜林地概念的取消对新能源项目开发的影响. 2022 [2022-09-04]. http://www.east-concord.com/zygd/Article/20221/ArticleContent_2684.html.
- [42] 郑度, 欧阳, 周成虎. 对自然地理区划方法的认识与思考. 地理学报, 2008, 63(6): 563-573.
- [43] 耿珊珊. 基于 GIS 的凤县综合自然区划方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- [44] 黄福卫. 水土保持区划及功能定位研究——以盘县为例[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.
- [45] Hong Kong Development Bureau Planning Department. Landscape Value Mapping of Hong Kong. 2005 [2022-09-06]. https://www.pland.gov.hk/pland_en/p_study/prog_s/landscape/landscape_tech3/e_index.htm.
- [46] ScienceDirect. TWINSpan. 2015 [2022-09-06]. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/twinspace>.
- [47] Unwin K I. The relationship of observer and landscape in landscape evaluation. Transactions of the Institute of British Geographers, 1975(66): 130.
- [48] McGarigal K, Marks B J. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure General Technical Report. Portland: United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995: 1-122.
- [49] Nijhuis S, van Lammeren R, van der Hoeven F. Exploring the visual landscapes - Introduction. van der Hoeven F, Nijhuis S. Research In Urbanism Series Volume 2. The Netherlands: Amsterdam: IOS Press, 2011: 1-336.
- [50] 孙乔响, 张玉钧. 自然区域景观特征识别及其价值评估——以青海湖流域为例. 中国园林, 2020, 36(9): 76-81.
- [51] van Lammeren R. Geomatics in physiognomic landscape research - A Dutch view//Steffen N, Ron van L, Frank van der H. Exploring the visual landscape Advances in physiognomic landscape research in the Netherlands. IOS press, 2011.
- [52] Frank S, Fürst C, Koschke L, Witt A, Makeschin F. Assessment of landscape aesthetics—validation of a landscape metrics-based assessment by visual estimation of the scenic beauty. Ecological Indicators, 2013, 32: 222-231.
- [53] Hoisl R, Nohl W, Engelhardt P. Naturbezogene Erholung und Landschaftsbild Handbuch. KTBL: Darmstadt, 2000: 1-306.
- [54] 国家林业和草原局. GB/T 39737—2021 国家公园设立规范. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [55] 郑新奇, 张春晓, 付梅臣. 景观格局空间分析技术及其应用. 2 版. 北京: 科学出版社, 2022: 1-239.
- [56] Walz U, Stein C. Indicators of hemeroby for the monitoring of landscapes in Germany. Journal for Nature Conservation, 2014, 22(3): 279-289.
- [57] Chang Chien Y M, Carver S, Comber A. Using geographically weighted models to explore how crowdsourced landscape perceptions relate to landscape physical characteristics. Landscape and Urban Planning, 2020, 203: 103904.
- [58] 中国环境报. 宁夏多措并举重构自然保护地体系将 58 个自然保护地整合为 49 个, 新建 5 个自然保护地. (2022-08-23) [2023-04-03]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/dfnews/202208/t20220823_992312.shtml.
- [59] Zhuchkova V K, Rakovskaja Je M. Metody kompleksnyh fiziko - geograficheskikh issledovaniy. Moscow: Akademiya Publ, 2004: 1-368.
- [60] OSGeo. Methods of geoeological studies: Geoinformational tutorial based on open GIS SAGA. (2018-06-01) [2023-04-24]. <https://www.osgeo.org/resources/methods-of-geoeological-research-a-geoinformational-tutorial-with-the-open-source-gis-saga/>.
- [61] Arndt C. Information measures: Information and its description in science and engineering. Signals and Communication Technology. Berlin: Springer, 2001: 1-554.