

DOI: 10.5846/stxb202006081487

郑群明, 申明智, 钟林生. 普达措国家公园生态安全格局构建. 生态学报, 2021, 41(3): 874-885.

Zheng Q M, Shen M Z, Zhong L S. Construction of ecological security pattern in Pudacuo National Park. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 874-885.

普达措国家公园生态安全格局构建

郑群明^{1,2}, 申明智^{1,2,*}, 钟林生³

1 湖南师范大学旅游学院, 长沙 410081

2 湖南师范大学研学旅行研究院, 长沙 410081

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要:生态安全格局作为景观生态学的热点和重点,其构建对维护区域生态安全水平以及实现区域可持续发展具有重要意义。选取云南省普达措国家公园为研究区域,基于 2000、2010、2017 年 3 期土地利用数据,利用 InVEST 模型评估其生境质量时空演变,并以此为基础确定生态源地。选取坡度、土地利用类型、生境质量指数、植被覆盖度(NDVI)和距水域距离等 5 个相关阻力因子建立阻力面,运用阻力阈值法提取保护关键区;最后利用最小累积阻力模型建立生态廊道和生态战略节点,构建出普达措国家公园的生态安全格局。结果表明:(1)普达措国家公园生境质量空间分布差异较大,与土地利用类型有一定的关联性,生境质量总体上处于较高水平,高质量生境占比 80% 以上。(2)2000—2017 年,研究区平均生境质量先下降后基本不变,由 0.8392 到 0.8295 再到 0.8294,总体保持较高水平,生境质量均值均为 0.8 以上;面积占比随着生境质量的变化相应变化。(3)研究区生态源地分布整体上较为集中,占普达措国家公园总面积的 2.30%,最小累积阻力值分布总体上较为分散。(4)生态廊道呈现环状形态格局,生态战略节点位于环状中心和环状上部区域,保护关键区表现出“双三角”形态。研究结果有利于刻画普达措国家公园生境质量时空演变过程,对其土地资源的合理可持续利用与发展具有积极的指导意义,并为我国国家公园的生态保护提供借鉴。

关键词:普达措国家公园; 生境质量; InVEST 模型; 生态安全格局构建; 最小累积阻力模型

Construction of ecological security pattern in Pudacuo National Park

ZHENG Qunming^{1,2}, SHEN Mingzhi^{1,2,*}, ZHONG Linsheng³

1 Tourism College of Hunan Normal University, Changsha 410081, China

2 Research Institute for Educational Tourism of Hunan Normal University, Changsha 410081, China

3 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

Abstract: As a focus of landscape ecology, ecological security pattern is of great significance for maintaining the level of regionally ecological security and realizing regional sustainable development. Selecting the Pudacuo National Park in Yunnan Province as the research area, this paper uses InVEST model to assess the temporal and spatial evolution of its habitat quality based on three phases of land use data in 2000, 2010 and 2017, which paves the way for the determination of the ecological source. Five relevant resistance factors, including slope, land use type, habitat quality index, vegetation coverage (indicated by NDVI), and distance from the water area, are selected to establish resistance surface, as well as the resistance threshold method is used to extract key protection areas. Finally, the minimum cumulative resistance model is used to establish ecological corridors and ecological strategic nodes for constructing the ecological security pattern of Pudacuo National Park. The results show that: (1) there are wide discrepancies among the spatial distribution of habitat quality in Pudacuo National Park, which is related to land use types. The overall habitat quality is at a high level with high

基金项目:科技部课题“第二次青藏高原综合科学考察研究”(2019QZKK0401);湖南师范大学研学旅行研究院课题(YX202003)

收稿日期:2020-06-08; 修订日期:2020-12-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 984763220@qq.com

habitats accounting for more than 80.0%. (2) From 2000 to 2017, the average habitat quality of the study area firstly declined and then remained basically unchanged for 0.8392, 0.8295 and 0.8294, maintaining a relatively high level overall, with the average habitat quality being above 0.8. The area percentage increases with the change in habitat quality accordingly. (3) The distribution of ecological sources in the researched study area is relatively concentrated on the whole, accounting for 2.3% of the total area of Pudacuo National Park. The distribution of the minimum cumulative resistance value is generally variant. (4) The ecological corridor presents a ring-shaped pattern. The ecological strategic nodes are located in the center of the ring and the upper area of the ring while the protection key area shows a "double triangle" shape. The results are conducive to presenting the temporal and spatial evolution process of the habitat quality of Pudacuo National Park, which has positive guiding significance for the reasonable and sustainable use and development of land resources, and provides reference for the ecological protection of the national parks in our country. In addition, this paper has the following four innovations: 1. Try to carry out habitat quality assessment and ecological security pattern construction of China's emerging entity National Park. 2. In terms of research methods, we try to use the results of habitat quality assessment in the early stage as the basis for the construction of ecological security pattern in the later stage. 3. Select the typical Pudacuo National Park to construct the habitat quality and ecological security pattern, and provide reference for the ecological environment protection of other national parks in China. 4. Based on invest model and MCR model, the habitat quality and ecological security pattern of Pudacuo National Park were studied.

Key Words: Pudacuo National Park; habitat quality; InVEST model; construction of ecological security pattern; minimum cumulative resistance model

国家公园是指经国家有关部门批准设立并主导其建设与管理的特定陆地或海洋的区域,它可以利用自然科学的保护和合理利用来维护国家生态安全,建设一个美好的中国^[1]。在中共中央十八届三中全会和十九大报告中,先后提出建立国家公园体制和以国家公园为主体的自然保护地体系。目前我国已开展了包括三江源、神农架、普达措等 10 个国家公园体制试点。而云南普达措早在 2006 年便启动了建立国家公园的探索^[2],在这些国家公园试点中具有独特性和代表性。通过评估普达措国家公园的生境质量,以此构建其生态安全格局,具有一定的意义。

目前各种强度和规模的人类活动对某个特定区域的自然生态系统结构、功能和格局都产生了巨大冲击。其中,土地利用方式和强度的改变会使生态系统格局和结构以及生境质量与生态系统过程发生相应的改变,进而削弱生态系统服务功能,保护生态系统和生态环境已是当务之急。生境质量是指生态系统为物种的生存状况以及繁衍生息提供必要充足条件的潜在力量。生境质量与生物的丰富性有着紧密关系,同时也决定了野生动植物生存地的适宜性程度^[3]。生境质量是区域生态安全的重要体现,能够体现出区域生物多样性的维持状态和生态服务水平的高低,正日益成为生态安全领域研究的热点问题。目前国内外学者针对区域生境质量开展了大量研究,在研究尺度方面,早期的研究主要是集中在单点和样地等小尺度,如莱州湾生态环境质量评价^[4]、漫湾库区生境质量研究^[5]、老铁山自然保护区生境质量时空变化^[6]。后期生境质量的研究逐渐扩大到城市层面和大区域,如京津冀生境质量时空演变^[7]、新疆两大区生境质量对比^[8]。在研究方法方面,一是对动植物进行调查、统计和分析,获取特定区域的生境质量参数,并据此建立生境质量评价体系^[9];二是借助各种模型开展生境质量评估,这些模型主要包括 MAXENT 模型^[10]、ARIES 模型^[11]、HIS 模型^[12]、SoIVES 模型^[13]、InVEST 模型^[14]等。由于 InVEST 模型具有多个模块、运行参数较少、基础数据获取较易、以及评价结果定量化和空间可视化等诸多优点,被国内外研究者广泛应用在生境质量、水源涵养、碳储量和土壤侵蚀等生态系统服务评估领域。在研究内容上,则包括针对单个物种^[15]和某个特定区域开展生境质量研究与评价^[16]。在研究视角上,则多基于实地测量的物种多样性或参量替代的生境质量演化状况分析^[17],以及对于社会经济活动与生境质量之间的互动关系进行研究^[18]。

中共十九大强调要加强对生态安全保障体系的优化。生态安全已成为继国防、经济和粮食安全的第四大安全体系,维护生态安全的有效途径就是构建生态安全格局。生态安全格局是指在自然景观中,位于不同方位和空间之间联系的某些关键局部区域共同构成的某类潜在的生态系统空间格局^[19]。生态安全格局的建设非常注重对生态环境问题开展综合性解决,通过研究自然—社会耦合系统,确定有关的阈值与层序,是最终得出区域生态安全建设、生态恢复与维护以及维持社会可持续发展的重要途径和方法^[20]。生态安全格局的构建方法主要有供需分析构建方法^[21]、源地—阻力面构建方法^[22]、多因素叠加规划方法^[23]和风险分析规划方法^[24]等。目前,构建生态安全模式的方法与范式更加成熟,基本分为三大步:识别源地、构建阻力面和提取生态廊道。其中,生态廊道的识别方法主要包括斑块重力模型^[25]、综合评价指标体系^[26]和最小累积阻力模型^[27]等,最小累积阻力模型同传统的概念和数学模型相比,具有可以较好地模拟物种在空间运动过程中受景观阻力作用大小的优点而被大量应用于生态网络格局和生态安全格局的构建之中。在生态安全格局研究内容方面,国外主要集中在保护地体系的建立方面,并依照保护程度,将其划分为最为严格至可持续性利用等各种类型。研究主题涉及生态系统功能和过程,生物多样性和生态系统服务评估与协同关系的研究^[28-29];生态保护和恢复,自然系统与社会经济系统的耦合分析^[30-31]等。国内主要集中在生态安全格局的识别与构建方面。研究主题涉及格局的形成、演变和影响机制^[32];基于多种方法的生态安全格局构建和优化^[33-34]以及生态安全的预测、预警和调控管理^[35]等。

普达措作为我国国家公园体制试点区,其管理机制和体系已取得一定进展,区域内的动植物等物种也得到了有效的保护,但人类活动也给普达措国家公园的生态环境带来了巨大压力,如何实现保护与发展之间的平衡,如何推动其可持续且快速发展,成为一个必须面对和解决的问题。因此,本文以普达措国家公园为研究区域,尝试以其生境质量为基础来构建其生态安全格局。基于 2000、2010、2017 年三期从遥感图像中解译出来的土地利用数据,利用 InVEST 模型,选择威胁因子并赋予权重,确定各个生境类型对威胁因子(即威胁源)的敏感程度和生境适宜度,探究土地利用变化对普达措国家公园的生境质量所产生的时空变化影响。同时,根据前面得到的生境质量、植被覆盖度等提取出的普达措国家公园的生态源地,选取与研究区生态过程相关的阻力因子加权叠加生成阻力面,通过 MCR 模型得到生态廊道,并生成生态战略节点,最终生成普达措国家公园生态安全格局,有望为其保护生物多样性,制定维护生态系统可持续发展的有关决策提供理论依据,同时对国家公园的生态安全格局构建和生态环境保护具有一定的参考价值。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

普达措国家公园位于云南省迪庆藏族自治州香格里拉市,地处青藏高原东南部的边缘地带,是我国国家公园体制试点区之一。该区域拥有众多景观类型和丰富的动植物等,保存着较完整的生态系统。强烈的外力作用形成了该地区以高海拔以及山脉—盆地特征的地貌地形,其海拔在 3500—4159 m 之间,植被分布垂直地带性显著,区域总面积达到 1313 km²(图 1)。

1.2 数据来源

本文选用 2000、2010、2017 年三期遥感影像,均来源于地理空间数据云平台,分辨率均为 30 m;参照 GB/T 21010—2017《土地利用现状分类》以及普达措国家公园的实际情况将其分为林地、裸地、水域、草地、耕地和建设用地等六大类。利用 ENVI 5.3 对 3 个时期的遥感影像进行预处理,并采用最大似然法,将影像土地分布进行监督分类操作,进而借助谷歌地球高清晰分辨率影像并通过人工目视判读方式对分错的土地利用类型进行修正,最终得到该研究区域 3 期的土地利用类型结果(图 2)。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 InVEST 模型的生境质量计算

InVEST 模型通常是指用于评估与衡量诸如生境质量等一系列生态系统服务功能的一种生态模型,从生

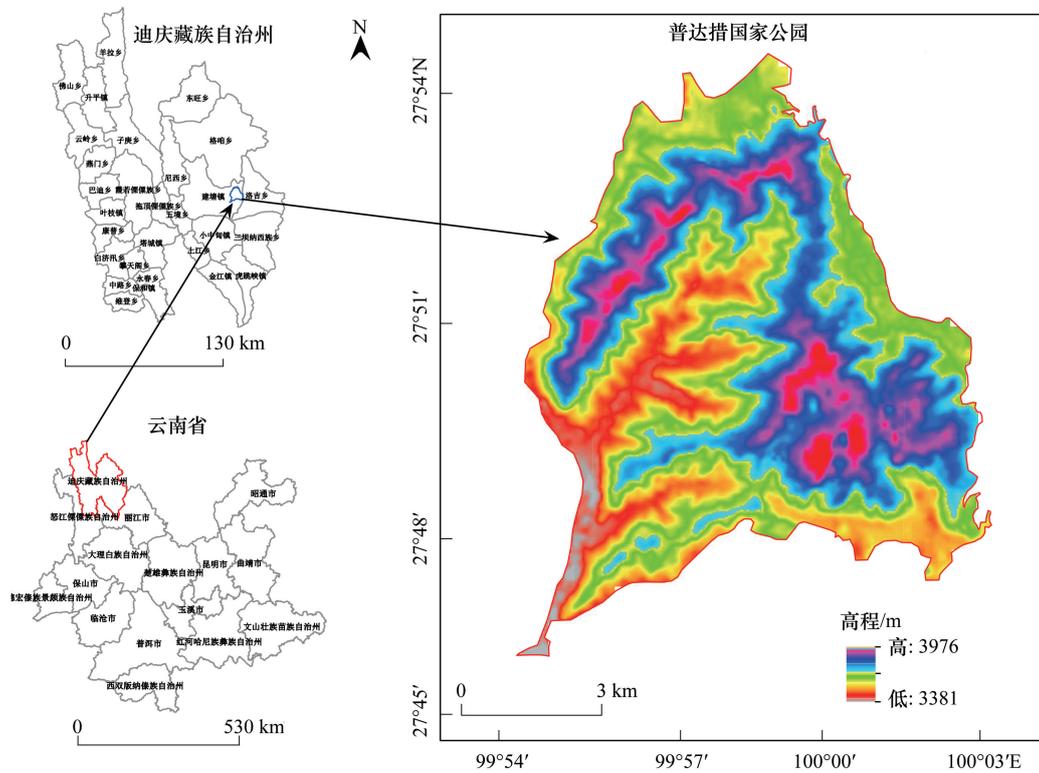


图 1 普达措国家公园所处位置和高程图

Fig.1 Geographical location and elevation map of Pudacuo National Park

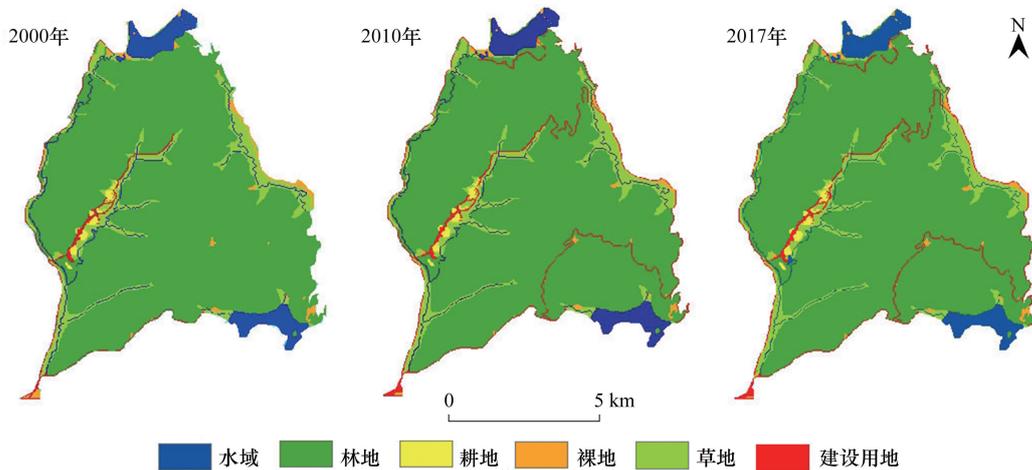


图 2 普达措国家公园 2000、2010、2017 三期土地利用类型

Fig.2 Land use types of phase III of Pudacuo National Park 2000、2010 and 2017

生物多样性角度量化评估生境质量^[36]。生境质量的分析主要是利用该模型中的生境质量板块来操作运行。该方法的核心是不同的土地利用类型可能成为威胁源,将生境质量与威胁源相关联,并计算威胁源对生境的不利影响,根据生境恶化条件和适当的生境条件计算出生境质量。生态源地所受到的威胁在空间上的衰减性可用线性或指数距离衰减函数来表示,即 i_{rxy} 的计算公式为:

线性衰减:
$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{max}} \right) \quad (1)$$

指数衰减:

$$i_{rxy} = \exp\left[-\left(\frac{2.99}{d_{r\max}}\right)d_{xy}\right] \quad (2)$$

式中, d_{xy} 表示两个栅格之间的距离大小; $d_{r\max}$ 为威胁因子可能影响的最大限度。生境质量的计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \right] \quad (3)$$

式中, Q_{xj} 为土地的不同利用类型中 x 栅格的生境指数大小; H_j 为 j 的生境适宜程度的大小; K 为半饱和性质常数, 一般为 D_{xj} 最大值的一半; z 为默认参数大小值, 通常情况下取值为 2.5。

该模型需要输入 4 个必须的数据, 分别为当前土地利用类型栅格数据、威胁源栅格数据集、威胁源 CSV 量表和土地利用类型对各个生态威胁源的敏感程度 CSV 量表。本文参考 InVEST 模型用户指南^[36] 和相关的研究成果^[37-39], 并根据普达措国家公园的实际情况及相关专家建议, 对两个 CSV 量表中的参数进行赋值 (表 1, 表 2)。

表 1 威胁因子影响范围及权重

Table 1 Influence scope and weight of threat factors

威胁因子 Threat factors	最大影响距离/km Maximum influence distance / km	权重 Weight	空间衰减类型 Spatial attenuation type
耕地 Cultivated land	3	0.7	线性
裸地 Bare land	2	0.6	线性
建设用地 Construction land	5	0.9	指数

表 2 不同生境对威胁因子的敏感度

Table 2 Sensitivity of different habitats to threat factors

土地利用类型 Land use types	生境适宜度 Habitat suitability	耕地 Cultivated land	裸地 Bare land	建设用地 Construction land
水域 Waters	0.80	0.65	0.40	0.55
林地 Woodland	0.90	0.50	0.45	0.70
耕地 Cultivated land	0.30	0.00	0.50	0.25
裸地 Bare land	0.00	0.00	0.00	0.00
草地 Grassland	0.60	0.50	0.55	0.35
建设用地 Construction land	0.00	0.00	0.00	0.00

1.3.2 基于最小累积阻力(MCR)模型的生态安全格局构建

最小累积阻力模型(MCR)又被称为最小费用距离模型, 1992年由 Knaapen 第一次提出, 主要研究物种的扩散过程, 随后应用于不同类型的自然生态学或人文科学有关研究。最小累积阻力模型在水平空间扩展分析方面具有优良的适应度和扩张度。1995年 FORMAN 在该模型基础上第一次系统全面的提出了景观格局的改进版方案, 在此基础上俞孔坚提出了景观生态安全格局这一全新的理论^[40], 即景观中具有某种潜在性质的空间格局, 构成内容包括景观中的某些重要的点、局部以及空间关系。生态安全格局构建的具体内容如下:

(1) 确定源地

生态源地是物种扩展以及维持的源头, 其内涵包括了提供关键性和重要性的生态性服务、景观格局表现出连续和完整等特性、对生态系统退化原因造成的各种问题进行预防 3 个最为重要的特点。确定生态源地是整个生态安全格局构建过程中的基础工作。在大部分情况下, 把需要保护的生物物种, 种族群落居住地的生态系统, 具有普遍的象征性, 并且足以表征研究区域的不同栖息地。

(2) 构建阻力面

物种对环境的利用可以看作是空间覆盖和竞争管理的过程, 必须通过克服其相应阻力来实现其覆盖与管理, 阻力面也表现出物种和生态流扩散的趋势。由于物种在不同类型景观中运动会遇到某些阻力, 阻力面的

构造已成为物种扩散路径中克服阻力的基本内容。在阻力面的构建过程中需要选取一定量和相关的阻力因子并确定阻力因子的阻力值和权重,本文从普达措国家公园的实际情况出发,按照整体系统性、数据易获得性和思路可实现性的原则,选取与研究区生态过程相关的坡度、土地利用类型、生境质量指数、植被覆盖度(归一化植被指数表示)和距水域距离等五个因素作为阻力因子,各个阻力因子按照五级制分类标准,用1、2、3、4、5分别表示各个等级,等级越低则阻力越低,相反则越高,同时运用层次分析法求出各个阻力因子的权重。(表3)

在阻力面的构建过程中,需要先构建综合阻力面,其计算公式为:

$$F_i = \sum_{j=1}^n W_j \times A_{ij} \quad (4)$$

式中, F_i 指*i*栅格阻力数值大小; W_j 指*j*阻力因子所占份额大小; A_{ij} 表示在整个图层中第*i*个栅格数据、第*j*个阻力因子所表现出的阻力值大小; n 表示阻力因子的总个数。

最小累积阻力面的构建可以运用地理学理论中的表面模型即最小累积阻力模型,其公式如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (5)$$

式中,MCR表示最小累积阻力面值, f 表示空间中任一点的最小距离与其到全部源地的距离和景观特点的正相关关系,是一个未知的正函数; \min 表示不同的评估斑块在不同的生态源地中累计阻力值中的最小值; D_{ij} 表示目标物种从生态源地*j*扩展到某一景观单元*i*之间的空间间隔大小; R_i 表示某一景观单元对物种在运动过程所产生的阻力值大小; $(D_{ij} \times R_i)$ 的累积阻力值表示物种从生态源地运动到空间上某一点的某一道路的易达性。最小累积阻力值的大小可以作为判断源地向外扩展的可能性,展现了空间单元与源地的连通性和相似性,一般情况下源地在整个生态过程中是最适宜的。

表3 普达措国家公园生态阻力因子及其权重

Table 3 Ecological resistance factors and weight of Pudacuo National Park

阻力因子 Resistance factor	阻力分值 Resistance score					权重 Weight
	1	2	3	4	5	
坡度 Slope	0—5	5—15	15—25	25—35	>35	0.25
土地利用类型 Land use types	林地、水域	草地	耕地	未利用地	建设用地	0.28
生境质量指数 Habitat quality index	>0.8	0.6—0.8	0.4—0.6	0.2—0.4	<0.2	0.16
植被覆盖度 Vegetation coverage	0.81—1	0.63—0.81	0.42—0.63	0.24—0.42	0—0.24	0.19
距水域距离 Distance from water area /m	<500	500—1000	1000—1500	1500—2000	>2000	0.12

(3) 生态廊道识别

生态廊道可作为生物物种、生态信息以及生态环境能量流动的主要通道,也可作为源地之间生态斑块的连接通道,能够提升景观之间的沟通联络以及强有力防护的能力。对生态廊道的识别需要建立相应的阻力面,其中确定阻力值是最重要的步骤。另外对主要生态走廊的提取对于实现区域生态系统功能的完整性发挥着重要作用。

(4) 生态战略节点识别

生态战略节点是阻力面上两个相邻生态源区域之间的等阻线接触点,并且是不同源区域之间(例如走廊和生态源区域之间)的连接点^[41]。它是一个相互联系的节点,具有重要的战略意义,对于促进地区的生态可持续发展具有重要意义。生态战略节点还是两个相近的源地之间生物物种扩展的“跳板”,对地区生态安全格局具有重大影响。

(5) 保护关键区划定

保护关键区是指在生态网络格局中的重要地区,对人为干扰很敏感并且对生态景观的稳定影响较大的生态景观单元,以及对生态景观的健康持续发展具有战略作用的区域。保护关键区一旦遭到外部破坏或长时间得不到有效修复和治理,区域内的生态系统将失去平衡,个别的还会丧失生态功能并且无法得到恢复,甚至使得珍稀物种遭受灭顶之灾,轻则人类生产活动受到影响,重则损害人类健康。

2 结果与分析

2.1 普达措国家公园生境质量时空演变

在 InVEST 模型中,栖息地质量水平由 0 到 1 之间连续变化的值表示。值越接近 1,栖息地的质量越高,土地开发与利用的强度越低,土地所展现出来的生态效益就越高。通过运行 InVEST 模型的生境质量模块可以得到普达措国家公园的生境质量分布图(图 3),同时为了能够更直观形象地展现生境质量在空间上的分布情况,在 ArcGIS 中将分布结果图分为 5 个等级,分别为低等级(0—0.2)、较低等级(0.2—0.4)、中等级(0.4—0.6)、较高等级(0.6—0.8)和高等级(0.8—1)等 5 个等级(图 3)。通过统计各个等级的面积占比,得到各个等级的生境情况表(表 4)以及各个年份之间面积的变化情况表(表 5)。

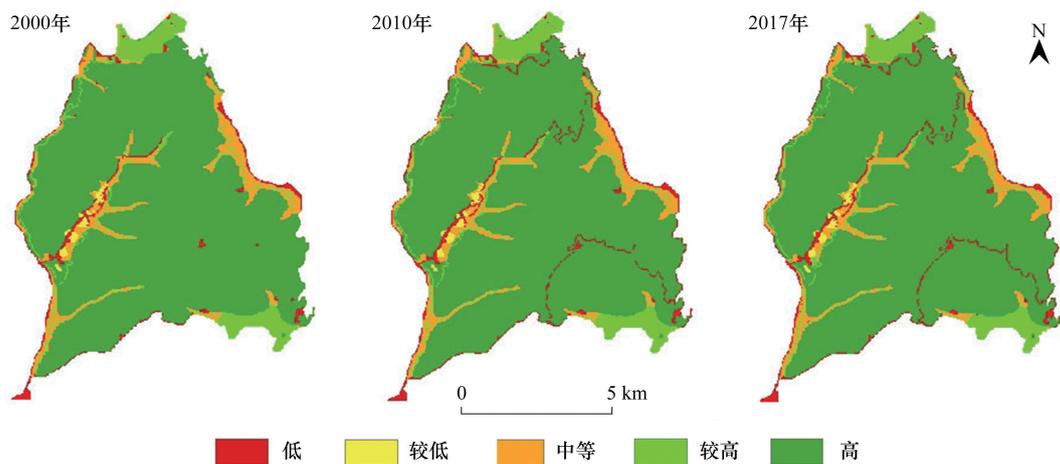


图 3 普达措国家公园 2000、2010 和 2017 三期生境质量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of habitat quality in phase III of Pudacuo National Park 2000, 2010 and 2017

表 4 2000、2010 年和 2017 年普达措国家公园各等级生境情况

Table 4 Habitat conditions at all levels of Pudacuo National Park from 2000, 2010 and 2017

等级 Grade	生境值 Habitat value	2000 年			2010 年			2017 年		
		面积 Area /m ²	面积占比 Area proportion/%	质量均值 Mean mass	面积 Area /m ²	面积占比 Area proportion/%	质量均值 Mean mass	面积 Area /m ²	面积占比 Area proportion/%	质量均值 Mean mass
低 Low	0—0.2	1975500	2.72		2783700	3.84		2801700	3.86	
较低 Lower	0.2—0.4	418500	0.58		418500	0.58		418500	0.58	
中等 Secondary	0.4—0.6	5557500	7.66	0.8392	5570100	7.68	0.8295	5544000	7.65	0.8294
较高 Higher	0.6—0.8	4547700	6.27		4489200	6.19		4518900	6.23	
高 Highest	0.8—1	60006600	82.76		59243400	81.71		59221800	81.68	

在空间格局上,从图 3 中可以看出普达措国家公园三期的生境质量总体上呈现出中间高、四周低的特征,总体生境质量处于较高水平,生境质量空间分布差异显著。在栖息地质量高、生物多样性非常丰富、人类活动少和生态系统保护水平高的地区,林地是占据相当大面积的土地利用类型,在普达措国家公园大部分地区都有分布,面积占比 80% 以上;生境质量较高的区域主要位于碧塔海、属都湖以及公园东西两侧的河流,这些区

域以水域为主,适合水生动植物的生存,生物多样性较为丰富,生态环境良好;生境质量中等的区域主要位于中部耕地附近的裸地以及东侧河流附近的裸地和西侧的裸地部分,该区域受到自然与人为双重因素影响,使得生境质量比林地和水域相对较差;生境质量较低的区域主要位于中部地区的耕地部分,该地区人类耕种活动频繁,生态系统相对来说较单一,地表植被数量较小,生态环境容易受到外部因素的干扰,该片区在整个区域面积所占的份额也相对较小,低于 5%;生境质量差的区域主要位于西南处的公园入口接待设施、耕地附近的农村居民点以及环绕公园的公路和穿插在公园内的公路,该区域生物多样性单一,人类活动相对来说比较多,对生态环境的干扰和破坏比其他土地利用类型的影响更为严重,生态环境易于恶化。

表 5 2000、2010 年和 2017 年各年份之间面积变化情况

Table 5 Changes in area of 2000, 2010 and 2017 years

等级 Grade	生境值 Habitat value	2000—2010 年		2010—2017 年		2000—2017 年	
		面积变化	变化率	面积变化	变化率	面积变化	变化率
		Area change /m ²	Change rate/%	Area change /m ²	Change rate/%	Area change /m ²	Change rate/%
低 Low	0—0.2	808200	40.91	18000	0.65	826200	41.82
较低 Lower	0.2—0.4	0	0	0	0	0	0
中等 Secondary	0.4—0.6	12600	0.23	-26100	-0.47	-13500	-0.24
较高 Higher	0.6—0.8	-58500	-1.29	29700	0.66	-28800	-0.63
高 Highest	0.8—1	-763200	-1.27	-21600	-0.04	-784800	-1.31

在时间尺度上,从表 4、表 5 中可以看出,2000、2010 和 2017 年普达措国家公园平均生境质量分别为 0.8392、0.8295 和 0.8294,生境质量总体上较高,整体上呈下降态势,但下降幅度较低。从 3 期的各等级生境面积占比可以看出,生境质量低和较低占比极小,都在 5% 以下,生境质量中等和较高也较低,都在 10% 以下,生境质量基本上没有发生太大变化,其中高生境占比最高,都在 80% 以上,表明普达措国家公园生境质量总体上处于较高的水平。2000—2010 年,公园北部、中部、南部部分地区以及东部边缘地区生境质量明显降低,生境质量中等和高面积变化分别减少了 1.29 和 1.27,低等级面积增加 40.91%,增幅较大,主要是因为这一时期该区域因建设国家公园,需要相应的风景名胜设施用地和必要的交通用地所致。2010—2017 年,较高生境增加了 0.66%,增加了部分建设用地和水域地块,其他无明显变化,该时期生境质量有小幅降低,但是总体上还是处于较高水平。2000—2017 年间,低生境增加了 41.82%,其他等级生境变化较小,主要在于该时间段的风景名胜设施以及必要的交通设施和其他相关的建设用地有所增加,大大降低了普达措国家公园的生境质量,因此需要合理规划并且控制好建设用地的面积。

2.2 普达措国家公园生态安全格局构建

2.2.1 生态源地识别结果

从数据可获得性的角度出发,根据 InVEST 模型生境质量模块计算出来的结果和生态源地的代表性,拟选取高生境质量区域(即生境质量指数为 0.8 以上)、植被覆盖度大于 0.9 以及斑块面积大于 40000 m² 的区域作为普达措国家公园的生态源地(图 4)。

从图 4 中可以看出生态源地基本上都位于普达措国家公园北部、中部等生境质量和植被覆盖度高的林地地区,生态源地共 11 处,总面积为 1665900 m²,占普达措国家公园总面积的 2.30%。

2.2.2 阻力面建立结果

在此过程中需要首先建立各个阻力因子所组成的综合阻力面,将各阻力因子转换为分辨率为 30m 的栅格属性数据,根据表 3 和公式 4,利用 ArcGIS 中的栅格计算器工具计算出综合阻力面(图 5)。

其次,基于上文中的综合阻力面,利用 ArcGIS 生成本文所需的最小累积阻力面。从图 4 中可以看出,普达措国家公园最小累积阻力面中最低阻力值为 0,最高阻力值为 4400.31。高阻力值主要分布在公园的西南部、中部、北部、南部和东北部等区域,在这些区域,人类活动频繁,对这些地区的生态环境造成的影响和破坏程度较大。低阻力值区域在公园内广泛分布,这些地方是生态环境较好的区域。

2.2.3 生态廊道生成结果

运用 ArcGIS 10.2 软件,以选取的生态源地和生成的综合阻力面为基础。首先计算出生态源地的几何中心作为生态源点,其次利用成本距离(Cost distance)工具计算出各个生态源地之间所表现出的累积阻力面,再次运用最小累计阻力模型和成本路径(Cost path)工具生成各个生态源地间的生态廊道,最后去除重复路径并进行叠加,最终得到普达措国家公园总的生态廊道 66 条,总长度 72.957 km。从图 4 中可以看出,公园的生态廊道整体上呈现出由中心向四周辐射且四周闭合的环状形态格局。

2.2.4 生态战略节点生成结果

各个生态廊道相交的点即为生态战略节点,利用 ArcGIS 10.2 软件中的要素工具生成生态战略节点,最终确定的节点共 64 个。普达措国家公园生态战略节点的具体分布见图 4。从图中可以看出,公园的生态战略节点在生态源地范围内广泛分布,主要位于各个距离紧凑的生态源地之间生态廊道环状中心和环状上部区域。

2.2.5 保护关键区识别结果

本文根据阻力阈值法对保护关键区的范围进行确定。阻力阈值法是指在某一过程的扩展中穿过某一个突变点时,相应的阻力值会发生骤变。利用 ArcGIS 10.2 软件可生成最小累积阻力值与栅格面积关系图(图 6)。从图中可以看出,阻力值在 2969.03—3931.94 范围内发生了突变,此处取该范围平均值,即阻力值 3450.485 作为确定保护关键区范围的阈值。从图 4 中可以看出,保护关键区主要分布在公园的北部和中部的生态环境较好的林地区域,它以生态源地为中心,向四周扩展,保护关键区可以作为生态源地的缓冲地带,更好地保护生态源地。从其整体的形状来看,形似一大一小的两个三角形,作者在此将其称为“双三角”。

2.2.6 生态安全格局构建结果

通过对生态源点、生态源地、保护关键区、普达措国家公园边界线、生态廊道等图层进行叠加组合,得到普达措国家公园生态安全格局图(图 4)。如图 4 所示,最终得到普达措生态源地 11 处,生态源点 11 个,生态廊道 66 条,生态战略节点 64 个,一条国家公园边界线,一个最小累积阻力面,两大片保护关键区即缓冲地带,共同组成普达措国家公园生态安全格局。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究尝试建立国家公园尺度的生态安全格局构建方法和体系,首先利用 InVEST 模型得出国家公园的生境质量,以得出的生境质量作为生态安全格局构建的基础,运用最小累计阻力模型构建生态安全格局。运用国内外较多学者采用的 InVEST 模型评估生境质量,较为科学,并以此结果确定生态源地,较为客观,避免了主观因素的干扰;国内外学者利用 MCR 模型建立研究区生态廊道的方法也较为广泛,具有良好的科学性。通过揭示研究区生境质量的时空演变,通过建立生态安全格局这一关键举措,有利于缓解国家公园发展与保护两者之间存在的矛盾,促进国家公园可持续发展与生态系统相协调。诚然,一方面由于数据限制,本文未能考虑外部威胁源对生境质量的影响,同时部分参数是根据专家经验等主观打分而来,这些都会使评估结果产

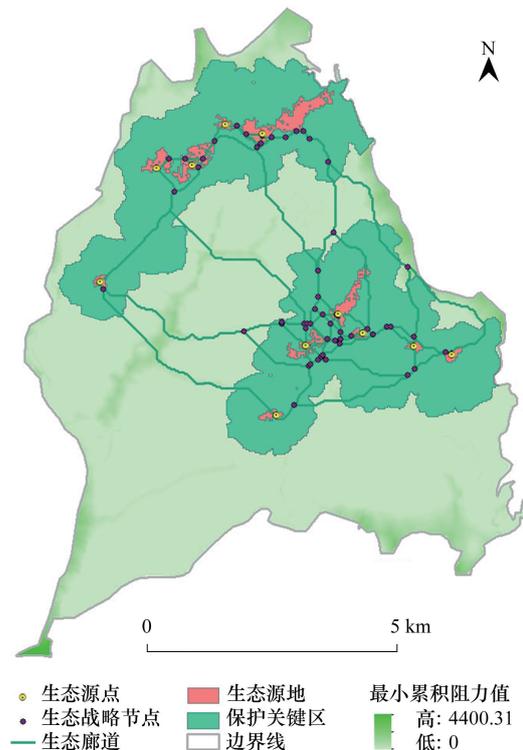


图 4 普达措国家公园生态安全格局
Fig.4 Ecological security pattern of Pudacuo National Park

生一定的误差,但这不会显著影响生境质量的总体变化。将来需要收集研究区域以外的威胁因素数据,以加强对栖息地质量机制的研究,并开展实地调查获取实际数据,以此更加准确地评估研究区生境质量的时空演变特征;另一方面,本文在生态源地的提取和阻力面的建立等方面,仅仅以栅格数据为基础,未考虑空间数据可能存在的区划效应和尺度效应;同时利用 MCR 模型生成的生态廊道,未考虑廊道的宽度问题,今后应把栅格数据和空间数据有机结合起来提取生态源地、建立阻力面等,将生态廊道的宽度问题纳入生态安全格局构建过程。当前,我国国家公园建设正处于起步阶段,如何处理好国家公园建设出现的生境问题,以维持发展与保护之间的平衡,评估国家公园范围内的生境质量,构建国家公园尺度的生态安全格局是路径之一。

3.2 结论

以普达措国家公园为研究区域,以其生境质量为基础来构建其生态安全格局。一方面利用 InVEST 模型和 ArcGIS 软件分析普达措国家公园生境质量的时空演变,另一方面基于该生境质量结果,运用 MCR 模型构建出普达措国家公园的生态安全格局,研究区选择我国的国家公园试点区,对我国国家公园的生态环境保护、可持续发展和生态安全格局构建具有一定的借鉴意义。研究结果表明:

(1) 普达措国家公园生境质量空间分布差异较大,与土地利用类型有一定的关联性,生境质量在总体上处于较高水平。高水平生境地区主要分布在植被覆盖率较高的针叶林林地区域以及水量丰沛的碧塔海、属都湖和分布于公园各处的河流,低水平生境地区主要分布在公园游客接待设施、公园内部的交通建设以及洛茸村的居民点和耕地等,在这些区域,人类活动频繁。

(2) 2000—2017 年,研究区域平均生境质量呈现出先下降后稳定,总体保持较高水平的特征,面积占比随着生境质量的变化而发生相应的变化。各等级生境质量面积变化在各个年份之间的变化情况差别较大,低等级生境质量在 2000—2010 年、2000—2017 年发生了较大变化,变化率达到 40% 以上;较低等级生境质量无变化;中等等级生境质量在 2000—2010 年增加了 0.23%、2010—2017 和 2000—2017 分别减少了 0.47% 和 0.24%;较高等级生境质量在 2010—2017 年增加了 0.66%,在 2000—2010 年、2000—2017 分别减少了 1.29% 和 0.63%;高等级生境质量变化也较小,整体上变化率也在 2% 以下。同时,各个年份中高等级生境质量所占面积最大,均达到了 80% 以上。

(3) 研究区生态源地分布整体上较为集中,最小累积阻力值分布总体上较为分散。本文根据前文得出的生境质量结果等指标选取普达措国家公园的生态源地,可以看出生态源地主要分布在公园北部及中部的生境质量和植被覆盖度高的林地区域,生态源地共 11 处,总面积为 1665900 m²,占公园总面积的 2.30%。最小累积阻力面中,高阻力值主要分布在公园的各个区域,低阻力值区域在公园内分布广泛,在公园各处基本上都有分布。

(4) 生态廊道呈现环状形态格局,生态战略节点位于环状中心和环状上部区域,保护关键区表现出“双三角”形态。普达措国家公园的生态廊道共有 66 条,总长度为 72.957 km,生态廊道整体上呈现出由中心向四周辐射且四周闭合的环状形态。生态战略节点在生态源地范围内广泛分布,主要位于各个距离紧凑的生态源地

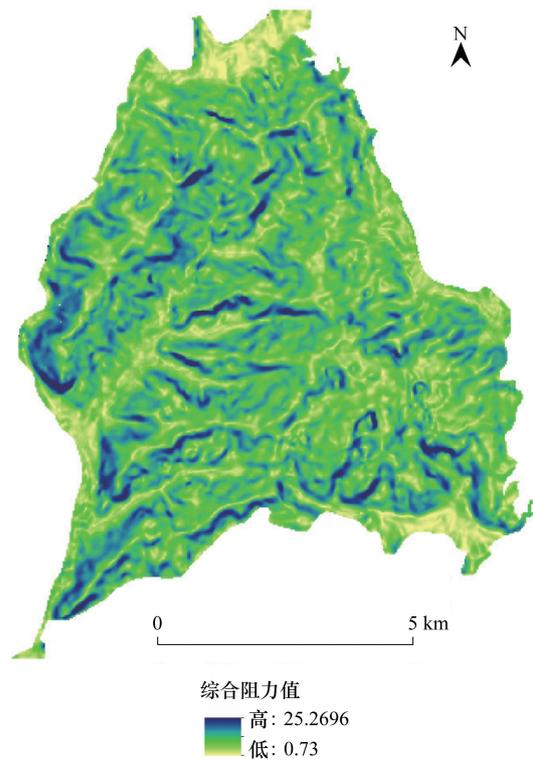


图 5 综合阻力面

Fig.5 Comprehensive resistance surface

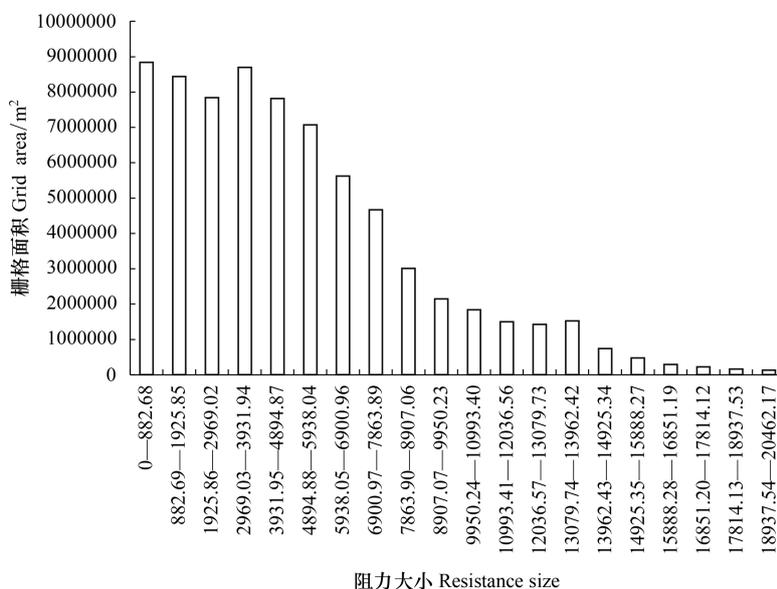


图 6 最小累积阻力值与栅格面积直方图

Fig.6 Histogram of minimum cumulative resistance value and grid area

之间生态廊道环状中心和环状上部区域。保护关键区主要分布在公园北部和中部的生态环境较好的林地区域,其以生态源地为中心,向四周扩展,形似一大一小的两个三角形,形成“双三角”形态。

参考文献 (References):

- [1] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 建立国家公园体制总体方案. 北京: 中共中央办公厅. (2017-09-26) [2020-03-10]. http://www.xinhuanet.com//politics/2017-09/26/c_1121727905.htm.
- [2] 郑群明, 申明智. 我国国家公园管理研究知识图谱分析. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2020, 19(2): 55-61.
- [3] 李营, 张峰, 杨海军, 殷守敬, 洪运富, 朱海涛, 滕佳华, 代宇庭. 生物多样性生态功能区生境质量变化遥感监测研究. 环境与可持续发展, 2016, 41(2): 46-48.
- [4] 杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 张娟, 张龙军, 罗先香. 基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价. 生态学报, 2014, 34(1): 105-114.
- [5] 刘世梁, 尹艺洁, 杨珏婕, 安南南, 王聪, 董世魁. 漫湾库区景观破碎化对区域生境质量的影响. 生态学报, 2017, 37(2): 619-627.
- [6] 王耕, 常畅, 韩冬雪, 白天骄. 老铁山自然保护区景观格局与生境质量时空变化. 生态学报, 2020, 40(6): 1910-1922.
- [7] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 黄秀兰, 卢志强. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3457-3466.
- [8] 刘方田, 许尔琪. 基于土地利用的新疆生产建设兵团与新疆维吾尔自治区生境质量时空演变的对比. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2341-2351.
- [9] Balasooriya B L W K, Samson R, Mbikwa F, Vitharana U W A, Boeckx P, Van Meirvenne M. Biomonitoring of urban habitat quality by anatomical and chemical leaf characteristics. Environmental and Experimental Botany, 2009, 65(2/3): 386-394.
- [10] 李美玲, 陈强强, 汪沐阳, 杨维康, 张弛, 罗格平, 丁建丽, 林昱辰. 基于 MaxEnt 模型的马可波罗盘羊生境适宜性评价. 生态学杂志, 2019, 38(2): 594-603.
- [11] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [12] 孟庆林, 李明玉, 任春颖, 王宗明, 田艳林. 基于 HSI 模型的吉林省东部地区生境质量动态评价. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 140-147.
- [13] 马桥, 刘康, 高艳, 李影, 范亚宁, 古超. 基于 SolVES 模型的西安浐灞国家湿地公园生态系统服务社会价值评估. 湿地科学, 2018, 16(1): 51-58.
- [14] 刘园, 周勇, 杜越天. 基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10): 2429-2440.
- [15] Tang X G, Li H P, Xu X B, Yang G S, Liu G H, Li X Y, Chen D Q. Changing land use and its impact on the habitat suitability for wintering Anseriformes in China's Poyang Lake region. Science of the Total Environment, 2016, 557-558: 296-306.
- [16] 钟莉娜, 王军. 基于 InVEST 模型评估土地整治对生境质量的影响. 农业工程学报, 2017, 33(1): 250-255.
- [17] Allan JD, McIntyre PB, Smith SDP, Halpern B S, Boyer G L, Buchsbaum A, Burton Jr G A, Campbell L M, Chadderton W L, Ciborowski J J

- H, Doran P J, Eder T, Infante D M, Johnson L B, Joseph C A, Marino A L, Prusevich A, Read J G, Rose J B, Rutherford E S, Sowa S P, Steinman A D. Joint analysis of stressors and ecosystem services to enhance restoration effectiveness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(1): 372-377.
- [18] 冯舒, 孙然好, 陈利顶. 基于土地利用格局变化的北京市生境质量时空演变研究. *生态学报*, 2018, 38(12): 4167-4179.
- [19] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 乔青, 奚雪松. 国土尺度生态安全格局. *生态学报*, 2009, 29(10): 5163-5175.
- [20] Zhao X Q, Xu X H. Research on landscape ecological security pattern in a *Eucalyptus* introduced region based on biodiversity conservation. *Russian Journal of Ecology*, 2015, 46(1): 59-70.
- [21] 彭保发, 郑俞, 刘宇. 耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架. *地理科学*, 2018, 38(3): 361-367.
- [22] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [23] 黎晓亚, 马克明, 傅伯杰, 牛树奎. 区域生态安全格局: 设计原则与方法. *生态学报*, 2004, 24(5): 1055-1062.
- [24] 郭明, 肖笃宁, 李新. 黑河流域酒泉绿洲景观生态安全格局分析. *生态学报*, 2006, 26(2): 457-466.
- [25] Kong FH, Yin HW, Nakagoshi N, Zong Y G. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [26] 张小飞, 李正国, 王如松, 王仰麟, 李锋, 熊侠仙. 基于功能网络评价的城市生态安全格局研究——以常州市为例. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(04): 728-736.
- [27] 李航鹤, 马腾辉, 王坤, 谭敏, 渠俊峰. 基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8): 1036-1045.
- [28] Brand U, Vadrot A B M. Epistemic selectivities and the valorisation of nature: The cases of the Nagoya protocol and the intergovernmental science-policy platform for biodiversity and ecosystem services (IPBES). *Law, Environment and Development Journal*, 2013, 9(2): 202-220.
- [29] Schröter M, Crouzat E, Hölting L, Massenberg J, Rode J, Hanisch M, Kabisch N, Palliwoda J, Priess J A, Seppelt R, Beckmann M. Assumptions in ecosystem service assessments: increasing transparency for conservation. *Ambio*, 2020, doi:10.1007/s13280-020-01379-9.
- [30] Liu J G, Mooney H, Hull V, Davis S J, Gaskell J, Hertel T, Lubchenco J, Seto K C, Gleick P, Kremen C, Li S X. Systems integration for global sustainability. *Science*, 2015, 347(6225): 1258832.
- [31] Baggio M, Chavas JP, Di Falco S, Hertig A, Pomati F. The effect of anthropogenic and environmental factors in coupled human-natural systems: evidence from Lake Zürich. *Natural Resource Modeling*, 2020, 33(1): e12245.
- [32] 蔡汉, 朱权, 罗云建, 马坤. 快速城镇化地区耕地景观生态安全格局演变特征及其驱动机制. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2020, 44(5): 181-188.
- [33] 吕红亮, 周霞, 党冰, 张文新. 基于生态过程的城市生态基础设施空间实现——以南京江北新区为例. *城市发展研究*, 2020, 27(6): 19-26.
- [34] 汤峰, 王力, 张蓬涛, 付梅臣. 基于生态保护红线和生态网络的县域生态安全格局构建. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 263-272.
- [35] 麦丽开·艾麦提, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 叶尔羌河平原绿洲土地生态安全预警演变与时空格局分析. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(7): 75-84.
- [36] Sharp R, Chaplin-Kramer R, Wood S, Guerry A, Tallis H, Ricketts T. InVEST User Guide. 2017. <http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/>.
- [37] 王燕, 高吉喜, 金宇, 曹秉帅, 王玥, 张小华, 周佳雯. 基于2005—2015年土地利用变化和InVEST模型的内蒙巴林右旗农牧交错带生境质量研究. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(5): 654-662.
- [38] 顾羊羊, 黄贤峰, 邹长新, 叶鑫, 林乃峰, 张卫民. 沅江源自然保护区生境质量变化遥感监测. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(6): 764-772.
- [39] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 李朝霞, 蔡崇法. 基于CA-Markov和InVEST模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4106-4118.
- [40] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, 19(1): 8-15.
- [41] 王晓玉, 陈甜倩, 冯喆, 吴克宁, 林倩. 基于地类边界分析的江苏省生态安全格局构建. *生态学报*, 2020, 40(10): 3375-3384.