

基于生态安全格局的喀斯特地区自然资源空间精准分区与管制方法研究

——以广西壮族自治区柳州市为例

李思旗¹, 陆汝成^{1,2}, 吴彬¹, 覃璐园³

(1.南宁师范大学 自然资源与测绘学院, 广西 南宁 530001; 2.北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西 南宁 530001; 3.南宁师范大学 地理科学与规划学院, 广西 南宁 530001)

摘要: [目的] 以典型岩溶地貌及全国南部生态廊道相对发育与密度较高的柳州市为例, 对自然空间进行精准分区并提出管制办法, 为其他喀斯特地区研究提供科学参考。[方法] 基于空间叠置法、INVEST模型与最小累积阻力模型, 提取全域尺度生态廊道, 构建区域生态安全格局, 实现自然资源空间精准分区。[结果] ①生态源区以大型林地为主, 面积达 3 531.24 km², 总体呈中部向南北部递增的趋势; ②生态廊道呈以主要廊道为依托, 次要廊道为承接的环状分布结构; ③依据生态安全格局构建结果及自然地理特征将柳州市自然资源空间划分为禁止开发建设、限制开发建设、允许开发建设、优先开发建设 4 个管控区, 并按照区域生态环境问题与空间主导功能提出差异化管制方法。[结论] 以生态安全格局为依据划分自然资源空间管制区, 各管控区发展定位与目标差异较大, 要实行差别化管制, 促进区域的可持续发展。

关键词: 生态安全格局; 自然资源空间精准分区; INVEST模型; 最小累积阻力模型; 生态源区; 生态廊道
文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2021)03-0200-10 **中图分类号:** F205, X37

文献参数: 李思旗, 陆汝成, 吴彬, 等. 基于生态安全格局的喀斯特地区自然资源空间精准分区与管制方法研究[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 200-209. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.028; Li Siqi, Lu Rucheng, Wu Bin, et al. Spatially accurate zoning and control methods for natural resources in karst region based on ecological security pattern [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 200-209.

Spatially Accurate Zoning and Control Methods for Natural Resources in Karst Region Based on Ecological Security Pattern —A Case Study of Liuzhou City, Guangxi Zhuang Autonomous Region

Li Siqi¹, Lu Rucheng^{1,2}, Wu Bin¹, Qin Luyuan³

(1. School of Natural Resources and Surveying and Mapping, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001, China; 2. The Key Laboratory of Environmental Evolution and Resource Utilization of the Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning, Guangxi 530001, China; 3. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001, China)

Abstract: [Objective] The natural resource space of Liuzhou City, which is located in Southern China with typical karst landform and relatively high development level and density of ecological corridors was accurately divided and a control method was proposed in order to provide a scientific reference for research in other karst areas. [Methods] Based on the spatial superposition method, the INVEST model, and the minimum cumulative resistance model, global scale ecological corridors were extracted, the regional ecological security pattern was constructed, and the precise spatial division of natural resources was determined. [Results] ① The ecological source region was dominated by large woodland with an area of 3 531.24 km², and exhibited an overall increasing trend of fields from the central area to the south and to the north; ② The structure of ecological

收稿日期: 2021-01-23

修回日期: 2021-02-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于‘四维度’的边境耕地多功能利用与国家战略农田划定研究: 以广西边境地区为例”(42061043)

第一作者: 李思旗(1995—), 女(汉族), 广西壮族自治区陆川县人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与区域发展。Email: 1294525797@qq.com。

通信作者: 陆汝成(1972—), 男(汉族), 广西壮族自治区临桂区人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事土地利用与区域发展、国土空间规划、土地政策与管理研究。Email: 710912213@qq.com。

corridors was distributed in a ring shape that was supported by the main corridors and connected by the minor corridors; ③ According to the finished construction of the ecological security pattern and the natural geographical characteristics of Liuzhou City, the natural resources of this city were divided into four controlling areas: areas where development and construction are forbidden, areas where development and construction are restricted, areas where development and construction were permitted, and areas where development and construction were a priority. Differentiated control methods were proposed in accordance with regional ecological environment problems and spatially dominant functions. [Conclusion] The natural resource space control zone was divided on the basis of the ecological security pattern. The development positioning and goals of each control zone were quite different. Differentiated control must be implemented to promote sustainable development of the region.

Keywords: ecological security pattern; accurate spatial zoning of natural resources; INVEST model; minimum cumulative resistance model; ecological source region; ecological corridors

随着城镇化的快速发展,资源紧缺现象严重,人地矛盾问题突出,加之不合理的土地利用方式导致土地资源浪费和生态环境质量下降,严重影响了经济社会的可持续发展。基于此,党的十八大提出“大力推进生态文明建设的战略决策”。党的十九大报告中进一步强调“要加大生态环境保护力度,加快生态文明体制改革,建设美丽中国”。因此,以生态安全建设为目标的区域格局优化成为生态安全领域的研究热点。生态文明建设是以自然资源空间为载体,对自然资源空间进行分区管制可以实现生态保护和经济建设互促共进。相较于其他地区而言,典型岩溶地貌区因其复杂的地形地貌会更加凸显生态建设与经济发展的矛盾,在经济发展过程中也更容易忽视其生态系统最基本的功能。因此,典型岩溶地貌区自然资源空间分区必须要以生态安全格局的底线思维^[1-2]。在自然资源空间格局划分过程中,要充分考虑经济发展、生态环境与粮食安全等问题,还要解决生态源区的连通性,以期实现区域自然资源空间的完整性^[3]。重建生态系统结构完整的自然资源空间管制新格局要以理清“三生”空间关系与重塑区域生态安全格局为基础。以生态安全格局为基础实现自然资源空间精准管控,也可区域可持续发展提供重要空间保障。

生态安全格局最早在欧美国家中被提出,是维护区域生态安全与系统结构完整的关键性格局。人类的某些活动直接或间接的造成生态环境质量下降进而破坏整体生态安全格局,威胁经济社会的可持续发展。20世纪初,国外进入工业化快速发展阶段,在经济发展的过程中生态环境也遭受到了严重的破坏,为解决生态环境问题,缓解生态系统压力,国外学者通过交互分析方法建立研究区域的生态安全格局方案,并对生态环境保护与管制提供相应措施^[4-9]。与发达国家相比,中国生态安全格局研究起步较晚,1999年

中国学者俞孔坚将生态安全格局研究引入国内,将全国生态廊道划分为“三横两纵”的结构,极大丰富了生态安全格局理论研究,为其他学者开展生态安全格局研究工作,构建生态安全体系提供了借鉴^[10-15]。随着新一轮国土空间规划工作的开展及“山水林田湖草是命运共同体”的系统思想的提出,以生态安全格局为导向的自然资源空间精准分区与管制成为实现自然资源和生态环境统筹治理的新举措。当前,基于生态安全格局的自然资源精准分区研究较少,但对景观生态安全格局、生态安全评价等都开展了大量的研究^[16-20],为自然资源的空间管控奠定研究基础。与其他地区相比,喀斯特地区地形地貌复杂,气候独特,复杂的地形地貌会影响物种的迁徙与物质能量的传递,也会形成典型的生态环境结构,也兼备重要的生态服务系统功能但其生态环境敏感,抗干扰能力低,自我修复能力弱,是自然资源空间管制研究的典型区域,构建生态安全格局最终实现自然资源空间管制对喀斯特地区生态安全维护与“三生”空间的优化布局具有重要的理论与现实意义。

广西壮族自治区柳州市处于全国南部生态廊道相对发育与密度较高的区域,生态地位突出,也是西部地区典型喀斯特山区城市。随着经济的高速发展,资源的不合理利用和城镇建设用地的快速扩张导致水土流失、石漠化等一系列生态环境问题。在生态建设与经济发展的双重压力下,土壤保持能力及水源涵养能力下降,地表常见裸岩,土地瘠薄,土地生产能力逐步下降等一系列生态环境问题突出。受岩溶地貌的限制,经济发展与生态建设成为制约柳州市社会发展的主要矛盾,作为广西壮族自治区新一轮国土空间规划的试点地区之一,柳州市秉承着实现“保护优先、绿色经济”的目标,是进行自然资源空间精准分区与管制研究的典型案例,对实现区域“3类空间”的优化布局与资源的合理配置具有实际意义,也可以为其他喀斯特

地区进行自然资源空间管控提供经验借鉴。本文应用数据密集型知识挖掘^[21],利用自然资源本底要素,在理清“3类空间”的管控要求、分布格局及相互作用关系的基础上,以100 m×100 m栅格数据为评价单元,开展精准评价,构建生态安全格局,旨在实现空间精准分区与管制,进一步丰富空间管制理论研究。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

柳州地处广西壮族自治区中北部,位于108°32′—110°28′E, 23°54′—26°03′N。国土面积18 596.64 km²,属亚热带季风气候,主要受季风环流的影响,年平均降水量为1 818.5 mm,折合降水总量为3.38×10¹⁰ m³,太阳辐射量年平均为397.66~460.44 J/cm²,日照时数平均1 250~1 570 h。柳州位于第二阶梯向第三阶梯转变的过渡带且位于西南喀斯特地区,主要地貌类型为岩溶地貌和河谷地貌。但岩溶地貌相对发达,分布范围较广,其中市区岩溶地貌面积为2 305.27 hm²,占市区总面积的35%,是典型的岩溶山区,也是中国为数不多的市区被众多山头分割的城市之一。全市地势总体呈北高南低,两极差异较为明显,海拔为25~2 073 m,北部地区以岩溶山地和丘陵山地为主,地形坡度总体较大,地表常见裸岩,土地瘠薄,垦殖率低,质量总体较差,属全市地质灾害易发区,极易造成水土流失、滑坡泥石流等地质灾害,据调查统计数据显示,柳州市水土流失面积为3 549.51 km²(水土流失面积数据来源于广西壮族自治区水利厅公布的2018年度广西壮族自治区水土流失面积遥感调查成果),约占国土面积的19.03%;中部和东南部地区属于低丘地带,柳江两岸台地为冲积平原,地势总体较为平坦,土地质量较好。土地资源利用条件南北差异较大以及城镇开发建设空间不断往外扩张,导致生态空间不断减少,使柳州市面临较大的生态保护压力。

1.2 数据来源与预处理

主要涉及的数据包括土地利用数据、地形数据、植被覆盖度、降水数据、蒸散发量及土壤数据等。土地利用数据通过解译2018年Landsat 8 OLI遥感影像获得,分辨率为30 m×30 m,经kappa系数检验精度达87.5%;地形数据从地理空间数据云下载的30 m分辨率DEM数据进行栅格镶嵌获得,并用柳州市行政界线裁剪出研究区范围;植被覆盖度从地理空间数据云平台下载的2018年MODIS NDVI数据,利用ENVI 5.1通过归一化植被指数计算出植被覆盖度;降水数据来自研究区15个气象观测站2008—

2018年观测数据和气象部门提供的近5 a平均降雨量数据;蒸散发量由气象部门提供的实测数据进行生成;土壤数据在广西土壤类型分布图中提取;人口、GDP等统计数据来自2020年《广西统计年鉴》。以100 m×100 m分辨率栅格为评价单元,保证数据的连续性与精准性。

2 研究方法

基于ArcGIS平台,运用多元化的方法对各类基础数据进行精细空间化处理;在此基础上,结合喀斯特地区地形地貌特点,综合选择土壤侵蚀敏感性、石漠化敏感性等综合分析生态环境敏感性,选取土壤保持、生物多样性、生境质量等分析生态服务功能重要性;根据生态要素综合评价结果以评价等级为极重要、高度重要的斑块作为生态源区划定的基础,通过加权叠加,选取生态重要性的高值区作为生态源区根据研究区自然保护地分布情况对生态源区进行修正;基于复合因子加权求和生成综合阻力面,并通过最小累积阻力模型,提取生态廊道,进而构建柳州市生态安全格局,最后基于生态安全格局进行空间精准分区并提出管制规则。

2.1 生态环境敏感性评价方法

柳州市南北地形差异较大,北部部分地区土壤贫瘠,垦殖率低,境内又有许多河流流经,加上雨季集中,流域范围内人为活动比较强烈极易造成水土流失、滑坡泥石流等地质灾害。水土流失和土壤侵蚀成为该地区的主要生态问题,故从土壤侵蚀、石漠化敏感性、水质污染敏感性3个方面评价研究区的生态环境敏感性。

土壤侵蚀敏感性是指土壤侵蚀的可能性与难易程度^[22]。本研究选取植被覆盖度、地形起伏度、降雨侵蚀力、土壤质地作为土壤侵蚀敏感性评价因子^[23]。具体评价公式为:

$$SE_j = \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 C_i} \quad (1)$$

式中: C_i 为敏感性等级值; SE_j 为敏感性指数。

岩溶石漠化是指地表出现类似荒漠景观的土地退化过程^[24]。依据《生态功能区划暂行规程》结合研究区特点,判断该研究区是否为岩溶地貌,再利用坡度、土壤侵蚀强度、植被覆盖度计算石漠化敏感性指数来评价石漠化敏感性程度^[25]。计算公式如下:

$$M_j = \sqrt[3]{\prod_{i=1}^3 S_{ij}} \quad (2)$$

式中: M_j 为空间单元 j 的石漠化敏感性指数; S_{ij} 为因子 i 在空间单元 j 的敏感性等级值。

水质污染敏感性可以反映水域受到污染的难易程度。水域两侧土地利用类型与水质污染有显著的正相关效应。相关研究^[26-27]表明,水域两侧建设用地较多,当水域的缓冲区距离为 100 m 时,水质污染程度会随着缓冲区和绿化类型斑块的面积增加而降低甚至消失。故以 100 m 为划分距离,运用 GIS 工具,对研究区域内的河流、湖泊、水库进行缓冲区分析。其中河流、湖泊、水库本身划分为极敏感地区,100 m 缓冲区为高度敏感地区,200 m 为中度敏感区,300 m 为较敏感区,缓冲区以外划分为低敏感区。

上述评价结果均通过自然断点法划分为 5 个等级,并按敏感性从高到低进行分别赋值,最后等权叠加评价生态环境敏感性。

2.2 生态服务功能重要性评价方法

生态服务功能重要性评价是对区域环境的主要生态服务功能重要进行评价。立足柳州市的本底资源特征从土壤保持、水源涵养、生物多样性保护、生境质量 4 个方面来评价生态服务功能重要性。

(1) 土壤保持重要性是指进行土壤保持的必要性程度,土壤侵蚀量化是研究土壤保持功能的方法。参照相关学者研究^[28],根据土壤保持的计算方法,结合 RUSLE 模型,对研究区域的土壤保持情况进行评价。评价公式如下:

$$A = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (3)$$

式中: A 为土壤保持量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤侵蚀因子; LS 为坡度坡长因子; C 为植被覆盖和管理因子; P 为水土保持措施因子。

(2) 水源涵养重要性评价,可揭示区域生态系统对水流、水循环的调控能力。以河流源区、降水量、蒸散发量、地表覆盖等因子进行评价^[29]。评价公式为:

$$TQ = \sum_{i=1}^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^3 \quad (4)$$

式中: P_i 为降雨量; R_i 为地表径流量; ET_i 为蒸散发量; A_i 为 i 类生态系统面积; i 为生态系统类型; j 为类型数。根据气象部门提供的近 10 a 平均降雨量数据,采用空间插值生成降雨量分布图;蒸散发量由气象部门提供的实测数据进行生成;地表径流量为降雨量乘以平均地表径流系数。

(3) 物种保护的热点区被视为生物多样性保护的重要区域。生态系统类型和物种丰富度的空间分布与土地利用类型对应关系较强。本研究从土地利用类型的角度确定生物多样性保护评价因子和分级标准,对各类矢量数据进行空间叠加,对重要分级进行赋值,对柳州市生物多样性进行表征,得出生态保护多样性评价结果。

(4) 生境质量模块主要的原理是将生境与威胁源建立联系,根据不同生境类型对威胁源的响应程度,计算生境分布与退化情况,高质量的生境可以划定为生态源区。选取交通运输用地,建筑用地,GDP,人口等作为生境质量胁迫因子并转换为栅格数据,参考张梦迪等^[30],孙兴齐^[31]的研究和 InVEST 模型使用手册对威胁源设置有关参数等,通过 InVEST 模型的生境质量模块测算出柳州市生境质量结果,以此表征研究区维持生物多样性的能力。计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^2} \right) \right] \quad (5)$$

式中: Q_{xj} 为生境质量; H_j 为生境适宜性; D_{xj} 为生境胁迫水平, z 为模型参数($z = 2.5$), k 为半饱和常数(取默认值, $k = 0.5$)。

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_x} \left(\frac{w_x}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x s_{jx} \quad (6)$$

式中: r 为栅格数; y 为胁迫因子; Y_x 表示胁迫因子的栅格数; w_x 为权重,值为 $[0, 1]$; r_y 为胁迫因子值,其值为 0 或 1; i_{rxy} 为 r_y 胁迫水平; β_x 为栅格单元 x 的可达性; s_{jx} 为胁迫因子敏感性。

上述评价结果均利用自然断点法划分为 5 个等级,并按各因子等权叠加评价生态系统服务功能重要性。

2.3 阻力面构建方法

物种迁移和功能传递的受阻程度会受到土地覆被状态、土地利用类型与高程等因素的影响。参考相关学者的研究^[32-33],鉴于柳州市南北地势差异较大,单一地形因子无法较好地表征地形的空间分布特征,选用复合地形因子,可充分反映区域地形复杂状况。在此基础上,利用特尔非法确定生态阻力因子权重,评价指标体系如表 1 所示。

表 1 柳州市综合阻力面评价指标体系

生态阻力因子	相对阻力值					权重
	1	2	3	4	5	
土地利用类型	林地、水域	草地、园地	耕地	其他土地	建设用地	0.32
地形位指数	<0.2	0.2~1	1.0~1.8	1.8~3	>3	0.24
植被覆盖度/%	>80	60~80	40~60	20~40	<20	0.26
土壤侵蚀敏感性	低敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感	0.18

基于 GIS 平台,应用多因子加权叠加模型,将生态阻力因子进行叠加,得到生态源区在向外扩张过程中受到的阻力情况,公式为:

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i \times A_i \quad (7)$$

式中: Z 是综合阻力值; W_i 为权重; A_i 为相对阻力值; n 是阻力因子个数。

2.4 生态廊道提取方法

目前,生态网络的构建方法有 GIS 空间叠置法,最小成本路径与重力模型,图谱理论相结合的方法,MSPA 法,电路理论等^[34]。采用最小累积阻力模型提取生态廊道,综合考虑各项影响因子,计算物种从源运动到目标斑块所受的阻力值,并选取阻力值最低的通道作为生态廊道^[35],公式如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (8)$$

式中: MCR 是最小累积阻力值; f 表示空间任一点的最小累积阻力和到生态源区的正相关函数; D_{ij} 是指源 j 到景观单元 i 的距离; R_i 是物种迁移的阻力系数。

3 结果与分析

3.1 生态要素单项评价结果与分析

通过对单项生态要素的评价可知,研究区土壤侵蚀极敏感性总体较低,极敏感、高度敏感等级占全市国土总面积的比例仅为 0.76%,敏感区域零星分布于南部;石漠化敏感性等级较高的区域主要位于北部,主要因为地形坡度总体较大,地表常见裸岩,土地瘠薄,垦殖率低,质量总体较差,南部地区石漠化敏感性相对较低,且高敏感地区分布较为零星,主要是南部属于低丘地带,柳江两岸台地为冲积平原,地势总体较为平坦,土地质量较好。水质污染极敏感区域主要集中在河流沿岸 100 m 处,越靠近河流水质污染敏感性越强(图 1)。

全市土壤保持重要性等级较低,土壤保持等级高的区域主要分布在北部,低值区主要分布在东部和南部,主要因为东部地区矿山开采,植被覆盖度较低,矿山开采对生态环境影响较大,南部地区是农作物生产区,受人类活动干扰强烈,目前存在水土流失、生境斑块破碎等生态问题。水源涵养等级较高的区域主要位于北部,中部和南部水源涵养等级较低,中部和西南部主要地类为建设用和耕地,植被覆盖率低,水源涵养能力较差。生物多样性保护等级较高的区域主要分布在自然保护地,中心城区生物多样性保护等级较低,此处人为活动较为强烈,主要土地利用类型为建设用地,对生物的栖息及迁徙的影响较大。InVEST 模型综合测定柳州市生境质量,柳州市生境

质量高值区主要分布在柳州市北部,质量高与较高区域主要位于自然保护地内,生境质量低值区主要集中在城市建成区及城市郊区,该地区人类建设开发活动较大,生态空间受到明显的胁迫,生境质量维持能力较低,总体来说柳州市生物多样性维持能力处于较高的水平(图 2)。

3.2 生态保护重要性评价

利用自然断点法将生态服务功能重要性和生态环境敏感性划分为 5 个等级(图 3a,3b)。生态环境敏感性面积最大的为低敏感和轻度敏感区,总面积为 9 842.63 km²,占全市总面积的 53.07%,其次为中度敏感区,面积为 4 110.11 km²,占全市总面积的 22.10%。由此可知,柳州市生态环境敏感性总体处于低敏感和轻度敏感水平。根据生态环境敏感性分布图,极敏感和高度敏感区主要分布在柳州市北部,该区域坡度和地形起伏度较大,自然灾害易发,同时也是国家重点生态功能区分布的区域,是重要林地与水域及水源涵养区。生态服务功能重要性自南向北递增,北部的生态服务供给能力较强,生态服务功能重要性等级较高,主要是因为北部生态价值主要由林地提供,自然保护地面积占比大,而南部地区地势平坦,土地质量良好,土地利用类型多以生态价值较低的建设用地与农用地为主,生物保育作用弱。将生态服务功能重要性和生态环境敏感性评价结果等权叠加得到生态保护重要性评价结果,其极重要和高度重要区分布于东部、北部(图 3c),全市生态保护重要性评价结果为极重要的有 8 139.59 km²,占全市国土总面积的 43.77%,其中面积较大的是融水苗族自治县、融安县和三江侗族自治县。

3.3 生态源区识别

生态源区可为物种栖息提供高质量生态服务,依据单项及综合评价结合生态保护重要性评价结果,以极重要、高度重要为生态源区的划定基地,并结合自然保护地及山体脉络、河流等边界去除面积较小的细碎斑块,提取生态源区(图 4)。

根据柳州市自然生态本底特征、空间分布格局等特点,同时为了避免破碎图斑的影响,选择面积较大的极重要与高度重要集中连片生态区作为主要生态源区,主要生态源区是全市生态系统功能和生态学价值较高的区域,能为物种的栖息和繁衍提供重要保障,其他生态源区也能为物种迁移过程中提供暂时的栖息地,分布在主要生态源区的周边,最终划定柳州市生态源区面积为 3 531.24 km²,占全市总面积的 18%,其中面积较大的生态源区其主要分布在北部和东南部,中部部分地区因土地质量优良也成为生态源

区。生态源区划定结果与柳州市典型岩溶地貌分布大体相同,也与现行生态文明建设目标和生态规划建设要求基本保持一致。从生态源区构成来看,生态源区以林地为主,70%的生态源区由生态系统服务价值

较高的林地构成,其次是耕地和草地,占比分别为 10.6%和 3.1%,其他用地和建设用地生态服务价值低,大部分被划为非生态源区,但仍有少数建设用地因在自然保护地内也被划为生态源区。

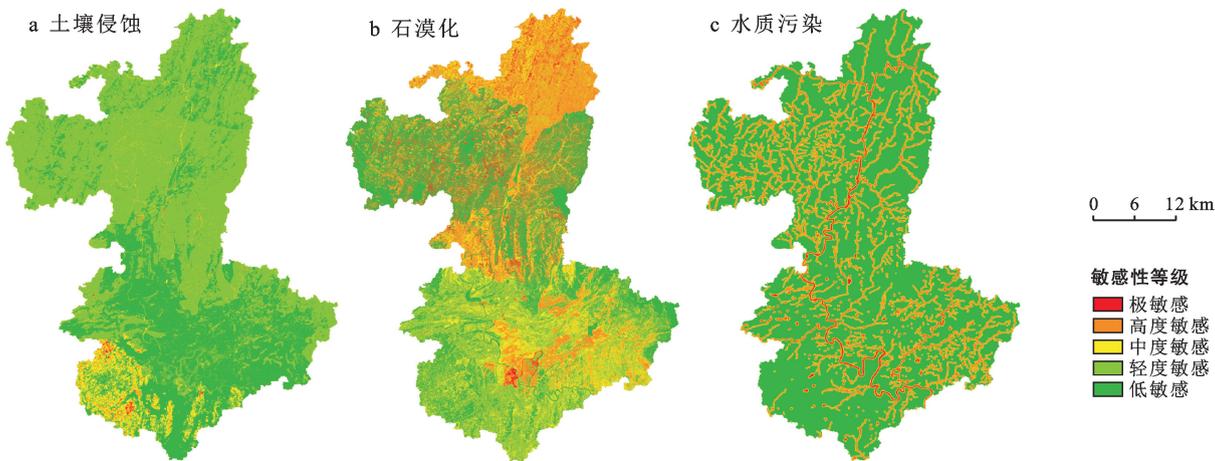


图 1 柳州市生态要素生态环境敏感性评价结果

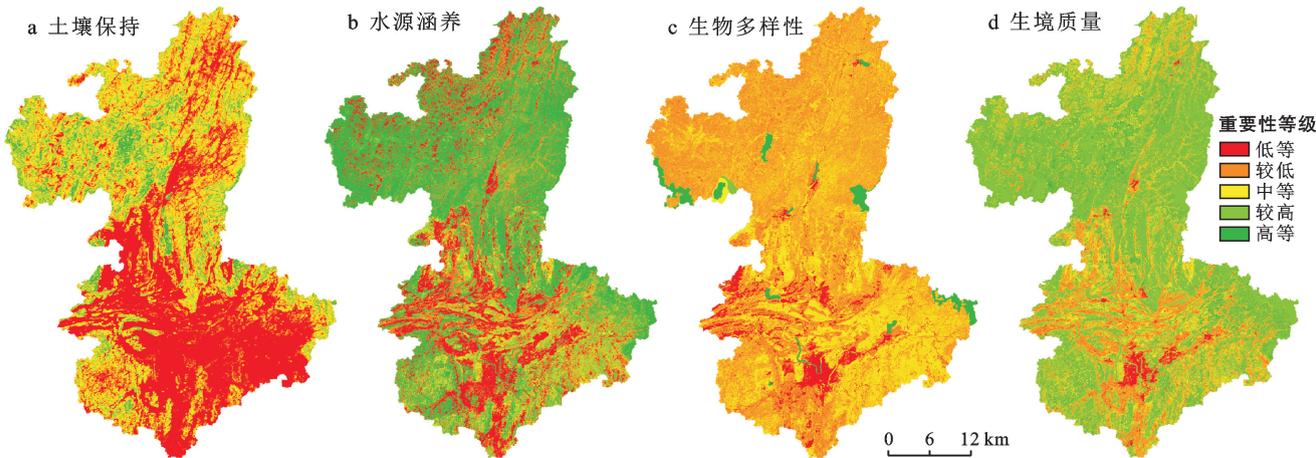


图 2 柳州市生态要素生态服务功能重要性评价结果

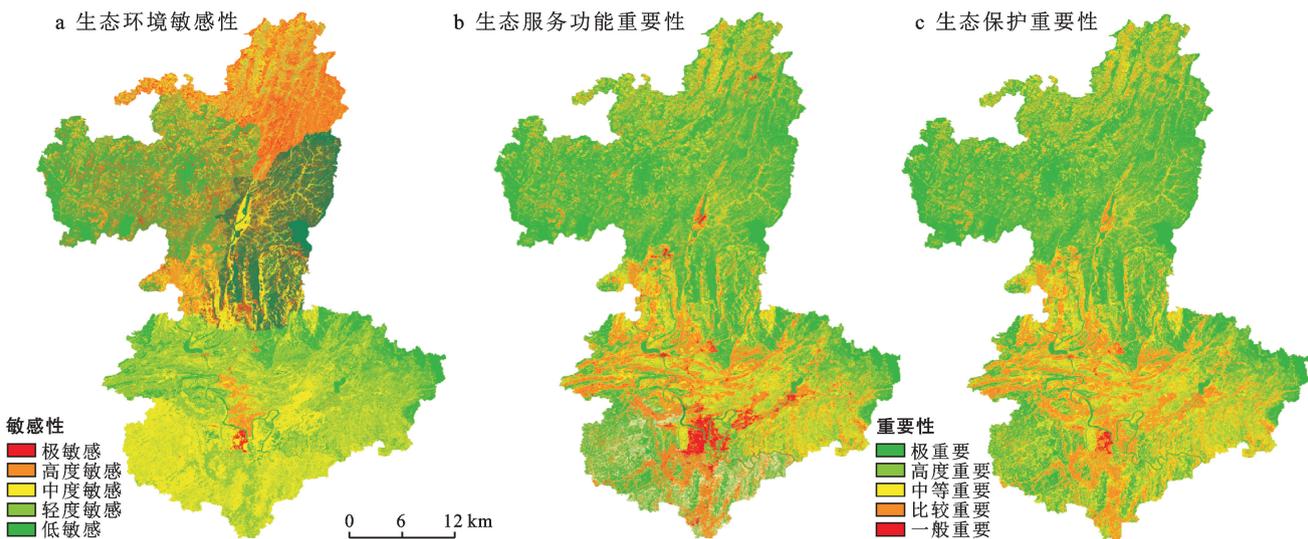


图 3 柳州市生态要素综合评价空间分布格局

3.4 阻力面构建与廊道提取

根据生态阻力面构建方法,构建研究区综合阻力面(图 5a)。其中阻力值最高为 4.8,最低为 1.2,阻力值高的区域主要集中在人类活动较为剧烈的柳州市市辖区,中等偏上区域广泛分布,但主要分布在柳州市中部。生态阻力主要受土地利用类型、地形位指数等因素的影响。根据阻力面构建结果,选取各源区的质心点作为生态源点(共 29 个),分别以每个节点为源,以剩余 28 个节点为目标,借助 ArcGIS 中的 CostDistance 模块,获得基于图层的最小耗费路径作为主要生态廊道(图 5b)。选取的主要廊道受到土地利用强度、建设用地等因素的阻碍,没有将全部生态源区衔接,致使物种迁移阻力加大,为保证物种有利

的迁徙条件,有必要构建完整的生态网络。故以主要廊道为基础,以综合阻力面为参照,基于 MCR 模型,提取次要生态廊道。柳州市的主要、次要生态廊道分别为 1 184.12, 516.89 km。整体上看,柳州市生态网络总体上呈环状分布,主要集中在北部、东南部地区,主要是因为以自然保护地、大型林地为主的生态源区多分布在北部的凤凰大山及九万大山,东南部的架桥岭和大瑶山,且面积较大,生态源区多为林地,对于生物迁移阻力较小,生物迁徙路径多;中南部城市建成区生态源区较少,且中部地区的城市建设用地对物种的迁徙起阻断作用,加之柳江河流宽度大,流经城区的河段亦对城区生态廊道进行切割,以致于南部生态廊道相对较为稀疏且迁移阻力大,不利于物种迁徙。

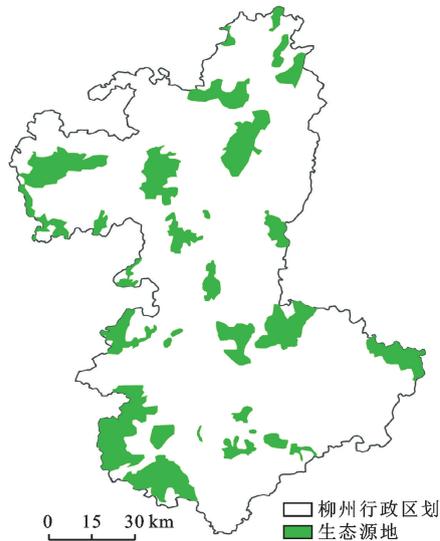


图 4 柳州市生态源区分布特征

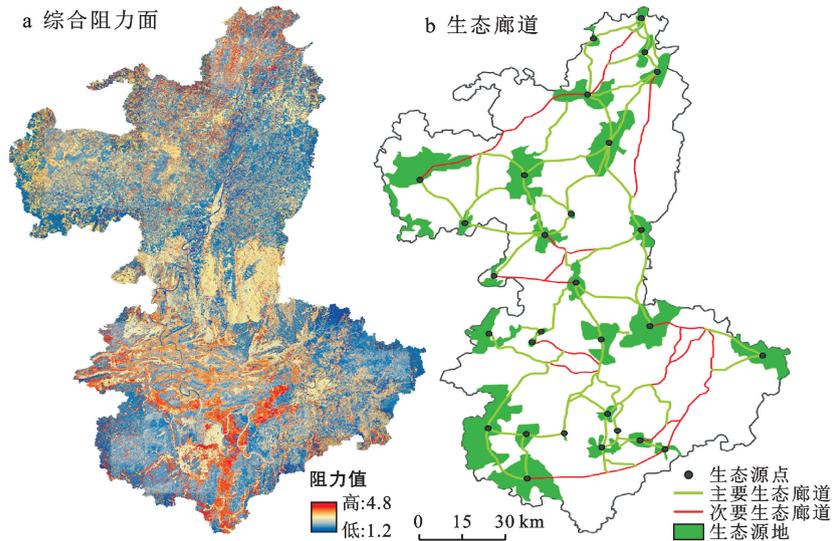


图 5 柳州市综合阻力面与生态廊道分布特征

3.5 生态安全格局构建

柳州市处于纵横两条全国生态廊道“大兴安岭—太行山脉—巫山—雪峰山”与“横断山脉—南陵—武夷山”的交汇处,也是两广地区人字形生态廊道的交汇处,生态地位突出,生态环境质量较好。但因属西南喀斯特岩溶地区,岩溶地貌发育明显,北部部分地区石漠化现象严重,区域内部土壤侵蚀严重及生态环境退化形势严峻,威胁整体生态安全,根据生态要素单项与综合评价结果,以生态源区和生态廊道为支撑构建柳州市生态安全格局(图 6)。

由 28 个生态源区,77 条网状分布的生态廊道构成了全域生态安全网络。柳州市生态安全格局主要由生态源区、生态用地、非生态用地以及生态廊道构成。生态用地和非生态用地主要根据生态综合评价结果来划分,生态综合评价结果等级高的划分为生态

用地,等级较低的划分为非生态用地。生态用地主要为耕地、林地,非生态用地以建设用地为主,其中主要生态源地以自然保护地为主也是现行生态保护红线重点保护的核心区域,是实现全市可持续发展的重要生态空间保障。柳州市位于全国南部生态廊道相对发育与密度较高的区域,其生态源区和廊道主要分布在生态环境好,生态弹性较大的区域,70%的生态廊道和生态源区由林地构成,但仍有少数源区为建设用地,对生物迁移具有较大的阻碍,为提升生态廊道的稳定性,可以对土地利用性质进行变更或优化,逐步实现“退建还生”,生态安全格局的构建为柳州市实现自然资源空间分区管控奠定基础。

3.6 自然资源空间分区与管制策略

自然资源空间管制要基于生态安全格局,在扩大生态空间范围的同时也要保证经济建设与农业种植

的发展,以化解生态、农业、城镇在空间上的冲突。主要生态用地和生态源区应该限制不正当人为活动的干扰。以格网为单元,依据柳州市生态安全格局与自然保护地划定分布情况,将生态源区与主要生态廊道、主要生态用地与次要生态廊道、次要生态用地、非生态用地分别划定为禁止开发建设区、限制开发建设区、条件开发建设区与优先开发建设区,结合遥感影像扣除面积细碎斑块,便于自然资源空间的分级管理(图7)。

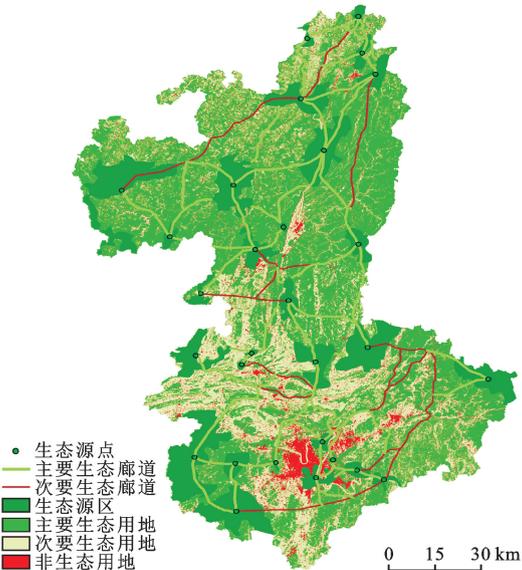


图6 广西柳州市生态安全格局分布特征

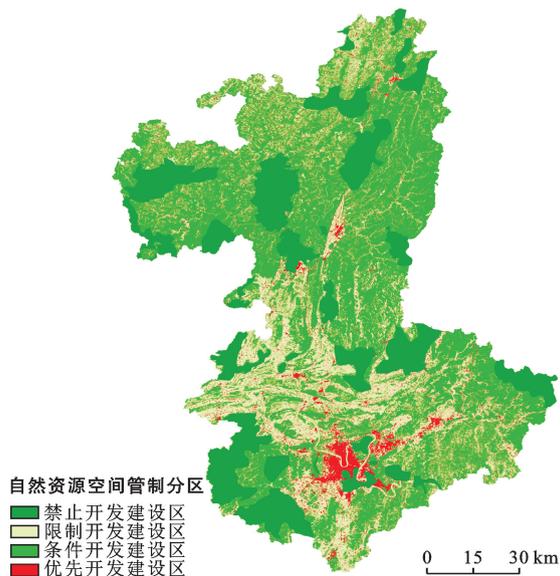


图7 广西柳州市自然资源空间管制分区特征

禁止开发建设区主要是以生态源区为主的极重要与极敏感区域,总面积为 $3\,768.95\text{ km}^2$,主要为重点生态公益林区、国家级或省级自然保护区、水源保护区等;北部禁止开发区由于坡度、地形起伏度较大,

地质灾害易发,该区域应严守生态底线,禁止任何形式的开发建设,保护区域珍稀动植物,维护生态系统稳定,保护水源,维护水资源安全,防止地质灾害发生。此外,对于存在自然灾害隐患区域和生态系统不稳定区域应及时采取工程或生态措施进行针对性修复,可以通过实行退耕还林,增加植被覆盖率、水源涵养工程、提高廊道连通性等措施实现该片区的功能提升。禁止开发建设区南部的部分耕地是柳州市重要的农林产品供给区,目前区域内存在水土流失、生境斑块破碎、人为活动干扰等问题,南部禁止开发建设区的耕地区域应该限制化肥的使用、加强水质污染监测,保障土壤安全。限制开发建设区面积最大,主要分布在柳州市北部,为 $8\,459.66\text{ km}^2$,占全市总面积的45.49%,限制开发建设区紧邻着禁止开发区,对禁止开发区起缓冲的作用,该区域可以适当拓展建设,可在保护为主的前提下适度开发、低密度低强度开发,但部分区域应以禁止建设为主,例如生物保护重要性较为重要的区域。条件开发建设区面积主要分布于南部和东部地区,面积为 $4\,629.42\text{ km}^2$,南部和东部地区以平原、丘陵地形为主,土地质量较好,也是重要的农产品生产区,应坚持利用性保护,兼顾生态保护与开发建设,积极发展生态农业与生态旅游,实现经济发展与生态保护的平衡。优先开发建设区主要为建设用地,面积为 $1\,738.61\text{ km}^2$,可作为城市近期拓展用地区,可进行较高强度与密度的开发,发展高质量城镇建设,但要注重提高土地利用效率,开发低效用地与城区土地的内涵挖潜。

4 讨论与结论

4.1 结论

以土地调查数据为基础,应用GIS空间叠置方法,以生态安全格局的整体性、连通性为底线,通过对土地资源、生态条件、环境质量等方面进行评价,优化自然资源空间布局,并针对各自然资源分区提出精准管控方法。

(1) 通过生态服务功能评价和生态环境敏感性评价,识别出生态源区并通过构建综合阻力面提取生态廊道。总体而言,柳州市生态环境敏感区主要分布在柳州市北部,生态服务功能重要性自南向北递增。依据生态综合评价结果,划定生态源区面积为 $3\,531.24\text{ km}^2$,占全市总面积的18%,其中70%的生态源区由生态系统服务价值较高的林地构成。应用最小累积阻力模型提取柳州市的主要、次要生态廊道,其中主要生态廊道为 $1\,184.12\text{ km}$,次要生态廊道为 516.89 km 。此外,柳州市北部、东南部山地地区

自然保护区较多,生态源区以林地为主,物种迁徙受建设用地影响较小,生物迁移可选择路径多,而南部生态廊道邻近城市建成区,且廊道密度相对稀疏,物种迁移阻力大,不利于物种迁徙。

(2) 综合全市生态源区、廊道及生态规划建设,将柳州市国土空间生态安全格局归结为“28 源 87 廊”,生态安全格局的构建为整合市内各类景观生态资源,完善、优化全市生态系统具有重要意义,也为柳州市实现自然资源空间分区管控奠定基础。

(3) 基于生态安全格局评价结果,按照生态保护重要性等级将研究区域划分为禁止开发建设区、限制开发建设区、允许开发建设区、优先开发建设区,其中限制开发建设区面积最大,占全市国土总面的 45.49%,禁止开发建设区面积最小。

(4) 以生态安全空间分布格局为支撑,依据不同管制区生态环境特点,在充分确保区域经济可持续发展、生态功能不下降的前提下提出相应的管制规则,实现自然资源空间精准管控,为实现柳州市可持续发展提供重要空间保障。

4.2 讨论

以 100 m×100 m 为评价单元,对各项资源要素进行空间化与栅格化,保证资源空间边界完整性与空间划分的精准性。喀斯特地区地形地貌条件较为复杂,生态空间的连通性、物种迁移及生态系统中物质功能传输的影响因素不是单一的,因此选用复合因素构建生态阻力面可明显反映无序的人为活动干扰对生态环境的影响。复合因素的选取针对性的考虑了区域资源本底特征,相较于用单一因子构建阻力面,更可表征生物迁移阻力的空间分布情况以及整体山水格局掌握研究区自然资源分布情况和现状景观格局构成的基础上,构建生态安全格局用以指导柳州市自然资源空间管制,对于有效和适宜的配置资源管制分区具有一定的创新性、实现自然资源精准管制、促进协调社会、经济与环境可持续发展具有重要的理论与现实意义。选取柳州市为研究对象,对其分区后提出有针对性的自然资源空间管制办法仅进行了初步的研究与探讨,评价本底要素的选取以及分级赋值的设定、自然资源分区与生态安全格局之间的关系、管制分区后的调节手段以及管理等问题还有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 储金龙,王佩,顾康康,等.基于生态安全格局的安庆市规划区空间管制分区研究[J].安徽建筑大学学报,2016,24(3):100-107.
- [2] 赵毓芳,祁帆,邓红蒂.生态空间用途管制的八大特征变化[J].中国土地,2019(5):12-15.
- [3] 强真.新时期国土空间规划的职能构架与路径设计[J].中国土地,2019(2):22-25.
- [4] 许浩.国外城市绿地系统规划[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [5] Zube E. The advance of ecology [J]. Landscape Architecture, 1986,76(2):58-67.
- [6] Butlin F M. E. Howard. To-morrow: A peaceful path to real reform [J]. The Economic Journal, 1899,9(33):71-72.
- [7] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Landscape and urban planning, 1992,23(1):1-16.
- [8] Forman R T. Land mosaics: the ecology of landscape and regions [M]. London: Cambridge University Press, 1995.
- [9] Seppelt R, Voinov A. Optimization methodology for land use patterns using spatially explicit landscape models [J]. Ecological Modelling, 2002,151(2/3):125-142.
- [10] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局:概念与理论基础[J].生态学报,1999,19(1):8-15.
- [11] 俞孔坚.生态安全格局与国土空间开发格局优化[J].景观设计学,2016,4(5):6-9.
- [12] 俞孔坚,李海龙,李迪华,等.国土尺度生态安全格局[J].生态学报,2009,29(10):5163-5175.
- [13] 俞孔坚,乔青,李迪华,等.基于景观安全格局分析的生态用地研究:以北京市东三乡为例[J].应用生态学报,2009,20(8):1932-1939.
- [14] 蒙古军,王雅,王晓东,等.基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J].长江流域资源与环境,2016,25(7):1052-1061.
- [15] 冯琰玮,甄江红,马晨阳.干旱区城市生态安全格局优化研究:以内蒙古呼和浩特市为例[J].水土保持研究,2020,27(4):336-341.
- [16] 田雅楠,张梦晗,许荡飞,等.基于“源—汇”理论的生态型市域景观生态安全格局构建[J].生态学报,2019,39(7):2311-2321.
- [17] 吴学伟.小三江平原土地利用景观格局演变与生态安全评价[D].湖北 武汉:武汉大学,2018.
- [18] 许幼霞,周旭,赵翠薇,等.基于喀斯特脆弱性评价的印江流域生态安全格局构建[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2017,35(6):22-29.
- [19] 杜悦悦,胡熠娜,杨旸,等.基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建:以云南省大理白族自治州为例[J].生态学报,2017,37(24):8241-8253.
- [20] 王媛,周长威.黔中城市群景观生态安全格局构建[J].生态与农村环境学报,2019,35(9):1111-1117.
- [21] 虞虎,钟林生,曾瑜哲.中国国家公园建设潜在区域识别研究[J].自然资源学报,2018,33(10):1766-1780.

- [22] 刘军会,高吉喜,马苏,等.中国生态环境敏感区评价[J].自然资源学报,2015,30(10):1607-1616.
- [23] 张恩伟,彭双云,冯华梅.基于GIS和RUSLE的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变[J].水土保持学报,2020,34(2):115-122.
- [24] 熊平生,袁道先,谢世友.我国南方岩溶山区石漠化基本问题研究进展[J].中国岩溶,2010,29(4):355-362.
- [25] 肖荣波,欧阳志云,王效科,等.中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析[J].生态学杂志,2005,24(5):551-554.
- [26] 陈昕,彭建,刘焱序,等.基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J].地理研究,2017,36(3):471-484.
- [27] 官宝红,李君,曾爱斌,等.杭州市城市土地利用对河流水质的影响[J].资源科学,2008,30(6):857-863.
- [28] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].地理学报,2018,73(5):868-879.
- [29] 王升堂,孙贤斌,夏韦,等.生态系统水源涵养功能的重要性评价:以皖西大别山森林为例[J].资源开发与市场,2019,35(10):1252-1257.
- [30] 张梦迪,张芬,李雄.基于InVEST模型的生境质量评价:以北京市通州区为例[J].风景园林,2020,27(6):95-99.
- [31] 孙兴齐.基于InVEST模型的香格里拉市生态系统服务功能评估[D].云南昆明:云南师范大学,2017.
- [32] 杜腾飞,齐伟,朱西存,等.基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法[J].自然资源学报,2020,35(5):1190-1200.
- [33] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等.基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J].自然资源学报,2019,34(4):771-784.
- [34] 刘佳,尹海伟,孔繁花,等.基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化[J].生态学报,2018,38(12):4363-4372.
- [35] 陈影,哈凯,贺文龙,等.冀西北间山盆地景观格局变化及优化研究:以河北省怀来县为例[J].自然资源学报,2016,31(4):556-569.

(上接第109页)

- [18] 倪际梁,何进,李洪文,等.便携式人工模拟降雨装置的设计与率定[J].农业工程学报,2012,28(24):78-84.
- [19] 陈书军,陈存根,曹田健,等.降雨量级和强度对秦岭油松林林冠截留的影响[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(1):41-55.
- [20] 马文梅,武亚楠,张振明.降雨对植物叶表面颗粒物的淋洗作用[J].北京林业大学学报,2018,40(8):50-55.
- [21] 周青,黄晓华.钙对酸雨胁迫下甜瓜幼苗质膜透性的影响[J].环境科学,1997,18(3):60-61.
- [22] Zhang Jiaen, Ouyang Ying, Ling Dajiong. Impacts of simulated acid rain on cation leaching from the Latosol in South China [J]. Chemosphere, 2007,67(11):2131-2137.
- [23] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Urban woodlands: Their role in reducing the effects of particulate pollution [J]. Environmental Pollution, 1998,99(3):347-360.
- [24] 王丽梅.作物冠层氮素淋溶及影响因素研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [25] 徐虹.环境空气颗粒物对降水酸度的影响研究[D].天津:南开大学,2011.
- [26] 郭若妍,王会霞,石辉.模拟降雨对常绿植物叶表面滞留颗粒物的影响[J].生态学杂志,2019,38(7):1991-1999.
- [27] 徐晓梧,余新晓,宝乐,等.模拟降雨对常绿植物叶表面滞尘的影响[J].生态学报,2017,37(20):6785-6791.
- [28] 鲍文,包维楷,丁德蓉,等.森林植被对降水水化学的影响[J].生态环境,2004,13(1):112-115.
- [29] 李凌浩,林鹏,何建源,等.森林降水化学研究综述[J].水土保持学报,1994,8(1):84-96.