

基于最小累积阻力模型的洱海流域上游 面源污染“源—汇”风险格局研究

董亚坤^{1,2,3}, 王钰^{1,2,3}, 曾维军^{1,2,3}

(1.云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650201; 2.自然资源部 云南山间盆地土地利用
野外科学观测研究站, 云南 昆明 650201; 3.云南省土地资源利用与保护工程实验室, 云南 昆明 650201)

摘要: [目的] 对洱海流域上游面源污染“源—汇”风险格局进行研究, 为保护洱海生态和快速识别面源污染“源—汇”风险的关键区域提供理论依据。[方法] 以 2005, 2010, 2015 和 2020 年数据为例, 构建阻力基面评价体系, 基于最小累积阻力模型建立阻力面, 划分面源污染风险等级并探讨洱海流域上游 16 a 来面源污染的风险等级变化。[结果] ①阻力因子的空间异质性使阻力基面的分布存在区域性差异, 而“源”的分布则影响阻力面的分布, 2020 年比 2005 年阻力面值提高了 7 485.40。②研究区极高风险区面积所占比例达 30%, 而中风险区以上所占比例超过 60%, 面源污染风险等级偏高; 16 a 间, 极高风险区面积减少最多, 为 35.74 km², 而中风险区面积增加最多, 为 38.69 km²。③面源污染风险等级距离“源”越近, 风险等级越高, 表现为中部高于边界, 南部高于北部, 而极高风险区是面源污染的关键区域。④16 a 间中风险区转出面积最多, 为 80.93 km²。茈碧湖镇、凤羽镇和右所镇三镇交界处以及牛街乡的北部是面源污染风险等级转移的主要区域。[结论] 关键区域的景观优化、种植业调整等措施对减少氮磷的流失及风险等级格局的改变具有更积极的作用, 可进一步改善洱海未来水环境。

关键词: 洱海流域上游; 最小累积阻力模型; “源—汇”风险格局; 面源污染; 风险等级转移矩阵

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)06-0166-09

中图分类号: X87, X522

文献参数: 董亚坤, 王钰, 曾维军. 基于最小累积阻力模型的洱海流域上游面源污染“源—汇”风险格局研究 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 166-175. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.021; Dong Yakun, Wang Yu, Zeng Weijun. Analyzing “source-sink” pattern of NPS pollution risks in upper reaches of Erhai Lake basin by minimum cumulative resistance model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 166-175.

Analyzing “Source-Sink” Pattern of NPS Pollution Risks in Upper Reaches of Erhai Lake Basin by Minimum Cumulative Resistance Model

Dong Yakun^{1,2,3}, Wang Yu^{1,2,3}, Zeng Weijun^{1,2,3}

(1.College of Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming,

Yunnan 650201, China; 2.Yunnan Intermountain Basin Land Use Field Research Station,

Ministry of Natural Resources, Kunming, Yunnan 650201, China; 3.Yunnan Provincial

Engineering Laboratory of Land Resources Utilization and Protection, Kunming, Yunnan 650201, China)

Abstract: [Objective] The “source-sink” risk pattern of non-point source (NPS) pollution in the upper reaches of the Erhai Lake basin was identified in order to provide a theoretical basis for protecting the ecology of Erhai Lake and for rapidly identifying key areas of “source-sink” NPS pollution risk. [Methods] An evaluation system of resistance base surfaces was built based on data from 2005, 2010, 2015, and 2020. Resistance surfaces were established and NPS pollution risk levels were classified based on the minimum cumulative resistance model to analyze changes in NPS pollution risk levels over these 16 years in the upper

收稿日期: 2022-02-26

修回日期: 2022-04-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于非点源污染‘源—汇’风险空间格局的流域上游种植生态区划”(41961040); 云南农业大学科技创新创业行动基金项目(2021ZKX184)

第一作者: 董亚坤(1993—), 男(汉族), 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向为 3S 技术、土地生态。Email: 2447849115@qq.com。

通讯作者: 曾维军(1979—), 男(汉族), 湖南省邵阳市人, 博士, 副教授, 主要从事资源环境规划、RS 与 GIS 综合集成、水土资源高效利用方面的研究。Email: zengweijunde@163.com。

reaches of the Erhai Lake basin. [Results] ① Spatial heterogeneity in the resistance factor caused regional differences in the distribution of the resistance base surfaces, while the distribution of the “source” affected the distribution of the resistance surfaces. The resistance surfaces value increased by 7 485.40 from 2005 to 2020. ② Thirty percent of the study area was classified as extremely high-risk zones, while the area of the medium-risk zones accounted for more than 60% of the study area, and the NPS pollution risk level was high. During the 16 years of the study, the area of extremely high-risk zones decreased the most (35.74 km²), while the area of medium-risk zones increased the most (38.69 km²). ③ The closer the NPS pollution risk level was to the “source”, the higher the risk level. The risk level was higher in the central region than at the border, and higher in the south than in the north, while the extremely high-risk zones were the key area of NPS pollution. ④ Among zones of different risk levels, the medium-risk zones witnessed the largest transfer-out (80.93 km²) in the past 16 years. The main transfer-out areas were the intersections of three towns (Cibi Lake, Fengyu, and Yousuo) and the northern part of Niujie Town. [Conclusion] Measures such as landscape optimization and planting adjustments in key zones have a more positive effect on reducing the loss of nitrogen and phosphorus and changing the risk level pattern, which could further improve the future water environment of the Erhai Lake.

Keywords: upper reaches of Erhai Lake basin; minimum cumulative resistance (MCR) model; “source-sink” pattern; non-point source (NPS) pollution; risk level transfer matrix

洱海是云南9大高原湖泊之一^[1]。洱海流域上游为高原山间盆地,使得该地区集中了整个流域约57%的耕地^[2],同时洱海流域上游也是洱海最为主要的水源补给区^[3]。面源污染具有分布广,污染源多,治理难,成本高等特点,成为区域生态环境污染的主要贡献者^[4]。因而控制洱海流域上游面源污染是改善洱海水质的决定因素。

在水质受到污染前对面源污染进行识别和防控具有更好的治理效果^[5]。目前涉及洱海流域面源污染的相关研究多围绕水质的理化性质及变化特点进行探讨^[6-8],而近年来利用“源—汇”景观理论,以构建阻力面来识别和防控面源污染成为热门方向^[9-10]。“源—汇”风险是“源—汇”景观理论的延伸,最初是用来研究大气污染中CO₂的来源与吸收,后来被引入到景观生态学当中,发展为“源—汇”景观理论^[11]。“源—汇”方法将流域景观赋予“源”“汇”属性,并依据源汇景观指数评价流域内景观对面源污染的贡献,识别流域内面源污染的风险等级^[12]。面源污染风险等级识别有多种方法。Jiang, Zhou 和 Xin^[10,13-14]分别采用景观空间负荷比指数、网格景观空间负荷比指数来划分面源污染风险等级,而 Zhu、王金亮和刘帆^[5,15-16]借助最小累积阻力模型构建阻力面方式分别划分了三峡库区、王家沟、重庆北碚区的面源污染“源—汇”风险等级。相较于 SWAT, AnnAGNPS 等模型在大中尺度流域的应用,最小累积阻力模型偏定性研究,对数据要求较低,精度较高^[17],更适合洱海流域上游这种面积较小(1 230.00 km²),数据易获取

的小尺度流域。面源污染研究的方法很多,但有的对研究区域的基础资料要求高^[18-19],有的缺乏预测的精确性或适用性不强^[20-21]。同时水文水质气象等数据具有较高的保密性,对于非相关研究领域人员获取较难。遥感技术具有全天时、全天候、易获取等优点^[22],方便了土地利用数据的获取。通过构建氮磷等面源污染物的评价体系,以阻力成本的方式来识别面源污染的“源—汇”风险等级,是研究洱海流域上游面源污染的有益尝试。因此,本文以洱海流域上游为例,选取影响面源污染转移的阻力因子构建评价体系,使用最小累积阻力模型形成阻力面,识别 2005, 2010, 2015 和 2020 年洱海流域上游面源污染“源—汇”风险等级,分析面源污染风险等级及其转移变化。通过面源污染“源—汇”风险等级的划分,快速识别面源污染发生的高风险区域并开展重点治理,为保护洱海流域生态环境提供理论与决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洱海流域位于云南省大理州境内,处于三江交汇地带^[1]。洱海流域上游属中亚热带西南季风气候带,一年当中只有干季和湿季,无春夏秋冬四季之分,气候宜人,降雨量丰沛,但空间分布不均,95%的雨量集中在雨季的5—10月^[7]。研究区独特的地形地貌,优越的环境与气候,丰富的水资源,使得该区域人口密集,耕地面积大而集中,经济活跃,土地利用率高,受面源污染严重^[8]。

1.2 基础数据及处理

本文基础数据包括 2005、2010、2015 和 2020 年的土地利用类型数据、归一化植被指数、人口密度以及 DEM 数据、土壤数据、地形湿润指数。其中归一化植被指数和 2005、2010、2015 和 2020 年土地利用类型数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=184>), 分辨率均为 30 m (见图 1); DEM 数据来自地

理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>), 分辨率为 30 m; 土壤数据来自中科院南京土壤所 (<http://www.issas.ac.cn/>), 分辨率为 30 m; 人口密度来自 WorldPop (<https://www.worldpop.org/project/categories?id=18>), 分辨率为 1 km。

以上数据经处理全部采用 CGCS 2000 坐标系, 分辨率统一为 30 m 的栅格数据, 数据处理以及后续的空间分析使用软件 ArcGIS 10.5。

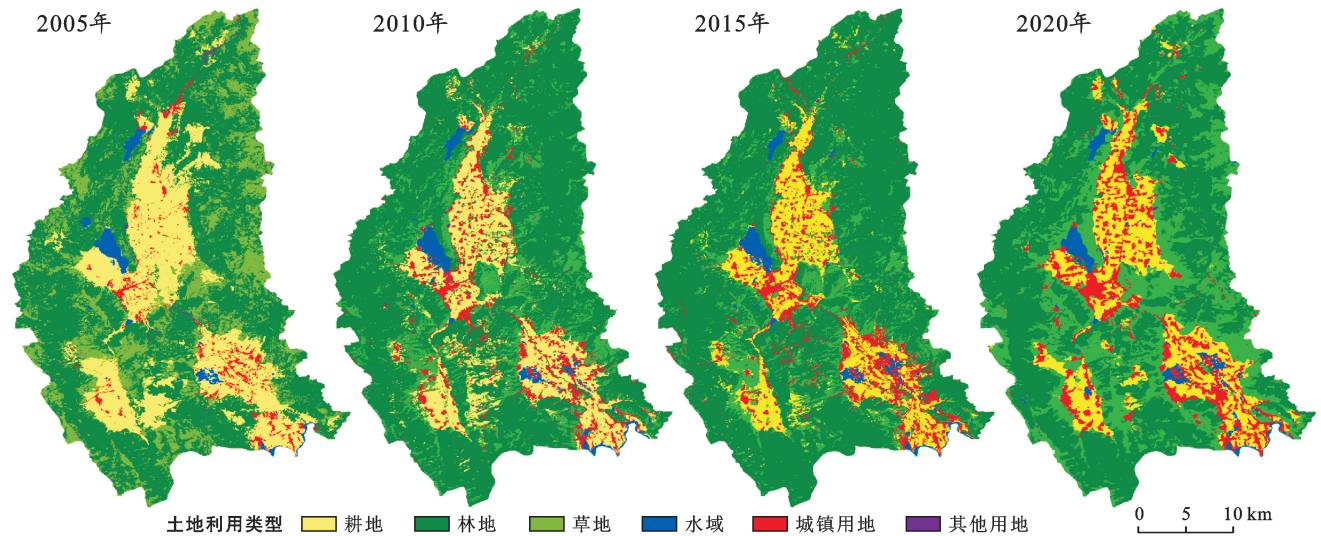


图 1 洱海流域上游 2005—2020 年土地利用类型分布

1.3 研究方法

1.3.1 最小累积阻力模型 最小累积阻力模型 (the minimal cumulative resistance model, MCRM) 是耗费距离模型的扩展应用, 其核心观点是景观要素通过克服阻力来实现景观类型的相互转化^[23]。最初用来反映物种从“源”到目的地所耗费的最小代价^[24], 后被广泛应用于生态安全^[17]、生态廊道或风险路径^[25]、景观格局^[26]等。该模型考虑源、空间距离和阻力基面 3 方面因素^[23], 计算公式为:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \cdot R_i$$

式中: MCR 为最小累积阻力值; D_{ij} 为某物种从“源”景观 j 至“汇”景观 i 的空间距离; R_i 为修正后的阻力系数; f 为正相关关系函数, 表征源景观至空间中某一点路径的相对易达性。

1.3.2 “源”地识别 面源污染中的“源”景观是指能够促进面源污染发生、发展的景观类型, 污染风险高, 而“汇”景观则与之相反^[27]。产生面源污染物的土地利用类型加快面源污染的发展, 被认为是“源”景观^[28]。依据中国土地分类体系将洱海流域上游的土地划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和其他用地, 其中耕地施用农药化肥产成氮磷等面源污染物,

为“源”景观; 建设用地通常被认定为点源污染, 但研究区以农村为主体, 生活污水的排放设施在近几年由政府投资修建才得以缓解, 因此建设用地被认为是“源”景观 (图 1)。

1.3.3 阻力基面评价指标体系构建 选取影响面源污染的土地利用类型、相对高程、坡度、地形湿润指数、人口密度、土壤可蚀性和植被指数 7 个因子, 构建阻力基面评价指标体系。

不同因子在面源污染的转移过程中所起的阻力作用不同, 权重也不同, 参考相关文献和 Delphi 专家打分法为各因子权重赋值^[10,15,29]。而同一因子的不同等级也有不同的阻碍作用, 依据文献或自然断点法利用重分类工具划分 5 个等级, 分别赋予对应因子阻力系数值为 1, 3, 5, 7, 9^[30] (表 1)。其中, 相对高程和归一化植被指数, 值越高, 面源污染发生的风险越小, 面源污染风险等级越低; 坡度、地形湿润指数^[31]、土壤可蚀性^[32] (K 值) 和人口密度, 值越大, 以及土地利用类型中的耕地和建设用地越多, 面源风险等级越高。相对高程、坡度和归一化植被指数与面源污染风险等级呈负相关性, 主要原因是相对高程越高、坡度越大的区域受到人类活动影响越小, 氮磷等污染物排

放越低;而归一化植被指数值越大,植被覆盖度越高,生态环境越好,其能有效保持水土,减少氮磷等污染物的流失。地形湿润指数、土壤可蚀性、人口密度和土地利用类型与面源污染风险等级呈正相关性,地形湿润指数可对潜在土壤水分含量和径流产生潜在能力进行量化,值越高,污染物越容易随土壤侵蚀而流

失,土壤可蚀性反映不同土壤受到侵蚀的速度,值越高,土壤受到的侵蚀越高,污染物流失也越多;人口密度和土地利用类型是人们生产、生活与经济的反映,也是污染物排放最为集中之地,人口越多,密度越大,耕地和建设用地就越多,面源污染风险等级也随之越高。

表 1 洱海流域上游面源污染阻力基面评价指标体系

阻力系数	影响因子						
	土地利用类型 (以 2020 年为例)	相对高程/m	坡度(°)	土壤可蚀性	地形湿润指数	归一化植被指数 (以 2020 年为例)	人口密度 (以 2020 年为例)
1	城镇用地和水域	0~390	>25	>0.007 6	>13.14	<0.15	>1 324.15
3	耕地	390~706	15~25	0.006 9~0.007 6	9.68~13.14	0.15~0.46	838.29~1 324.15
5	其他用地	706~1033	6~15	0.005 6~0.006 9	7.17~9.68	0.46~0.66	441.67~838.29
7	草地	1 033~1383	3~6	0.004 9~0.005 6	5.38~7.17	0.66~0.79	154.12~441.67
9	林地	>1383	<3	<0.004 9	<5.38	>0.79	5.39~154.12
分类方法	文献 ^[5,9] 和地类属性	自然断点法 ^[15]	自然断点法 ^[30]	自然断点法 ^[5]	自然断点法 ^[9]	自然断点法 ^[16]	自然断点法 ^[5]
权重	0.21	0.12	0.16	0.06	0.15	0.20	0.10

1.3.4 阻力面构建 阻力面反映了各种“流”(物质和能量等)从“源”克服各种阻力到达目的地的难易程度,也客观表现了事物空间运动的趋势和潜在可能性^[24]。基于阻力基面评价体系,运用 ArcGIS 10.5 中的栅格计算器进行叠加计算,形成 2005, 2010, 2015 和 2020 年的综合阻力基面,再将“源”景观和综合阻力基面运用 cost-distance 工具进行叠加,生成对应阻力面,即最小累积阻力面。

1.3.5 面源污染风险等级划分 本文将影响流域面源污染的阻力面作为反映面源污染“源—汇”风险等级的指标,该指标反映面源污染物从“源”景观到最终汇集处之间的可达性^[23]。阻力面值越大,面源污染“源—汇”风险等级越小,景观单元所起到的汇作用越强,面源污染越不容易发生,否则反之。众多文献利用数据的突变点采用自然断点法进行分类。研究区属于盆地,采用自然断点法会把山地错分到极高风险区当中,综合各种数据分析后采用几何间断方法划分面源污染风险等级,将研究区分为极低风险区、低风险区、中风险区、高风险区和极高风险区。

2 结果与分析

2.1 各因子的阻力系数分布特征

阻力因子的阻力系数分布从 1—9 等级,表示阻碍污染物的阻力在逐渐增大。由图 2 分析可知,相对高程、土壤可蚀性和人口密度空间分布规律相近,均是从中间向边界逐渐增大,各等级层次分明,高度集中,呈现圈层分布特征,而坡度、地形湿润指数和归一化植被指数三者空间分布杂乱无序,各阻力等级相互

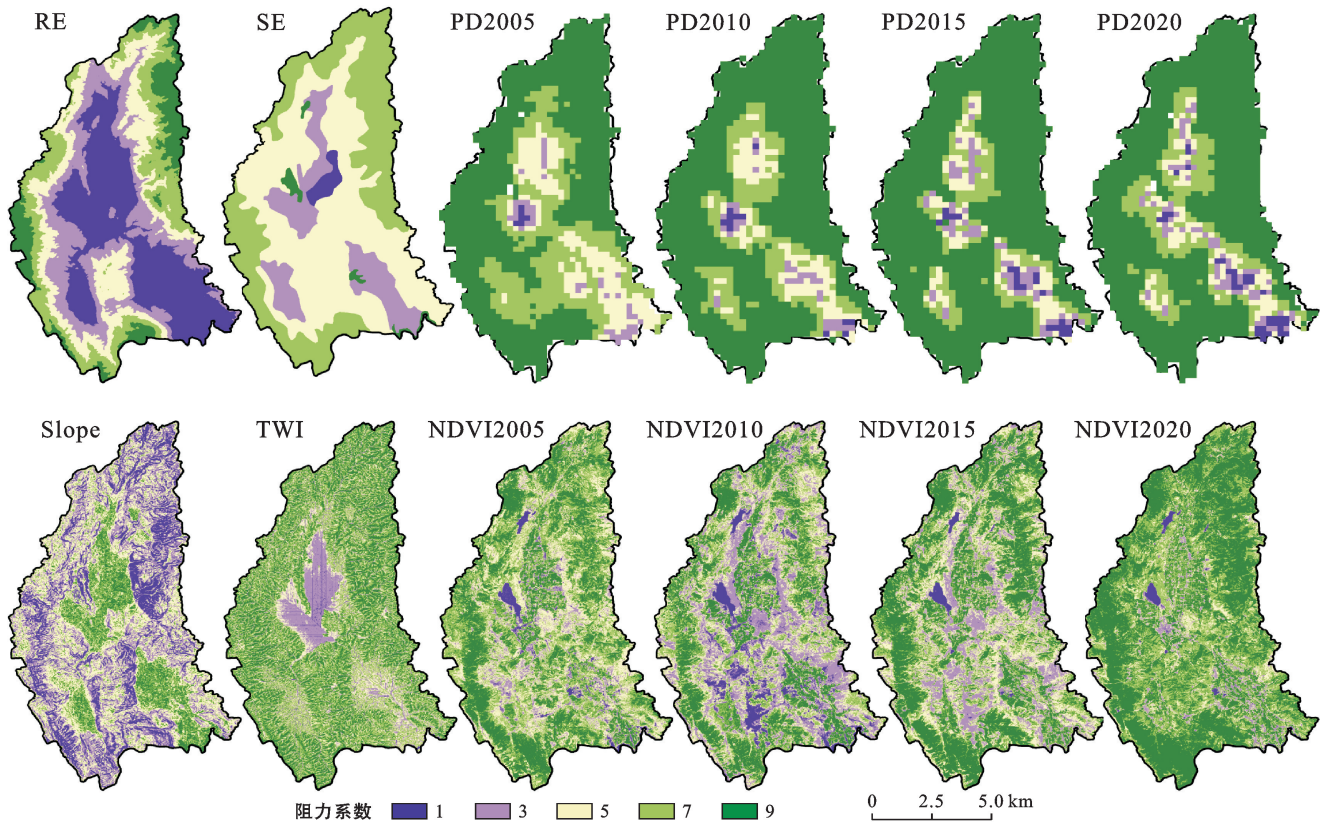
交错,呈小区域聚集,整体分散的特征。各阻力因子的阻力系数面积也存在着巨大差异。相对高程和坡度的阻力等级分布以 1, 3 等级为主,面积是其余阻力因子同等级的数倍。土壤可蚀性的阻力等级分布 5 等级面积(604.13 km²)最多,远远超过剩余阻力因子最大值(382.92 km²)。人口密度、地形湿润指数和归一化植被指数的阻力等级分布以 7, 9 等级最多,二者面积超过 800.00 km²,远超其余阻力因子的两者面积(最高约 400.00 km²)之和,与其他阻力因子形成鲜明对比。除了坡度外,各因子阻力等级分布均为中间低边界高,表明平缓区是面源污染物最集中的区域,易受到面源污染。

2.2 综合阻力基面和阻力面的空间分布

阻力值的高低表明景观单元受到阻力因子的影响程度,阻力值越大,受到面源污染的概率越小,否则反之。由图 3 可以看出,2005, 2010, 2015 和 2020 年的综合阻力基面的最高值均是 8.48, 而最低值在 1.60。结合图 1 可知,阻力值的分布和土地利用类型的分布较为一致,但局部空间分布也有变化的趋势。主要在于 2005—2020 年,土地利用类型分布总体保持稳定,但景观内部耕地、草地面积呈现减少,林地、水域面积呈现增加的趋势。同时,茈碧湖镇、三营镇交界处以及凤羽镇的低阻力值空间分布明显减少,尤其在 2005—2010 年显著减少。从图 4 可知,4 期的阻力面整体分布是基本一致的,都是低阻力值占据绝对主体地位。低阻力值占据平缓区域及附近范围,高阻力值分布流域边缘的极高山地,阻力值在波动中总体呈上升态势,由 2005 年的 55 183.90 增加到

2020 年的 62 669.30.16 a 来,阻力基面与阻力面的空间分布存在着明显的区域差异,但均呈现中间低边界高的趋势。而阻力面的阻力值增加,表明从 2005—

2020 年,各种保护洱海的政策和工程起到良好作用,产生面源污染物的区域进一步缩小,阻碍范围进一步扩大。



注:RE 为相对高程;SE 为土壤可蚀性;PD 为人口密度;TWI 为地形湿润指数;NDVI 为归一化植被指数。

图 2 研究区面源污染各阻力因子等级空间分布

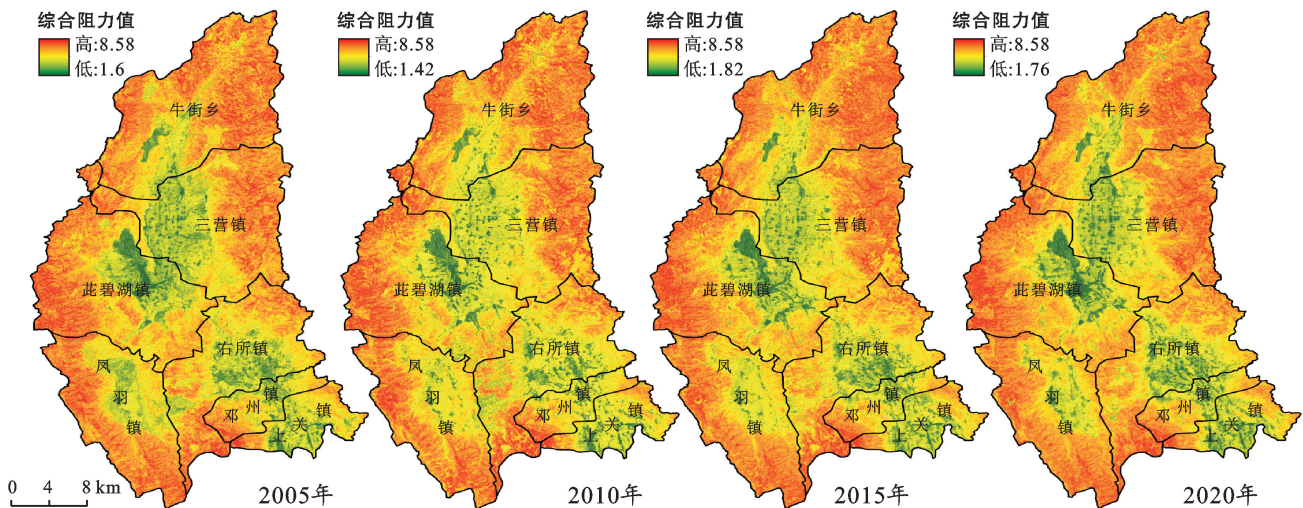


图 3 洱海流域上游 2005—2020 年面源污染综合阻力基面空间分布

2.3 面源污染风险等级分析

由图 5,表 2 可知,2005,2010,2015 和 2020 年洱海流域上游的面源污染风险等级分布由里向外依次是极高风险区、高风险区、中风险区、低风险区和极低风险区,中风险区、高风险区和极高风险区占总面积

绝大部分。同时受地形影响,研究区南部面源污染风险要高于北部,耕地及其邻近范围内的区域风险等级最高,表明极高风险区即为面源污染的关键源区。耕地“源”作用强,林地、草地和水域“汇”作用弱,因此,“源”景观的面积和分布是影响风险等级的关键

因素。16 a 间(图 6),极高风险区从 2005—2015 年呈现逐步下降的趋势,到 2020 年又有所上升;高风险区在 2005—2020 年持续上升;中风险区在 2005—2010 年略微下降后,在 2010—2020 年快速上升;低风险区在 2005—2015 年快速上升后,到 2020 年又急剧下降;极低风险区在 2005—2010 年上升,之后持续下降。

总之,极低风险区面积减少 16.16 km²,低风险区面积减少 7.01 km²,极高风险区面积减少 35.74 km²,中风险区增加了 38.69 km²,高风险区面积增加了

20.23 km²。16 a 间,茈碧湖镇极高风险区虽有波动,但面积基本上未发生变化,保持在 65.00 km² 左右;邓川镇和上关镇全镇面积的 80% 以上被中等风险及以上所占据,而极低风险区几乎为零,受到的面源污染威胁很高;三营镇和右所镇均处在平缓区域,且极高风险区面积最多,都大于 70.00 km²,2020 年相比 2005 年极高风险区面积也均有所下降;凤羽镇和牛街乡的各面源污染风险等级较为相似,但牛街乡各面源污染风险等级分布较为分散,而凤羽镇较为连续。总之,各乡镇都受到较高的面源威胁。

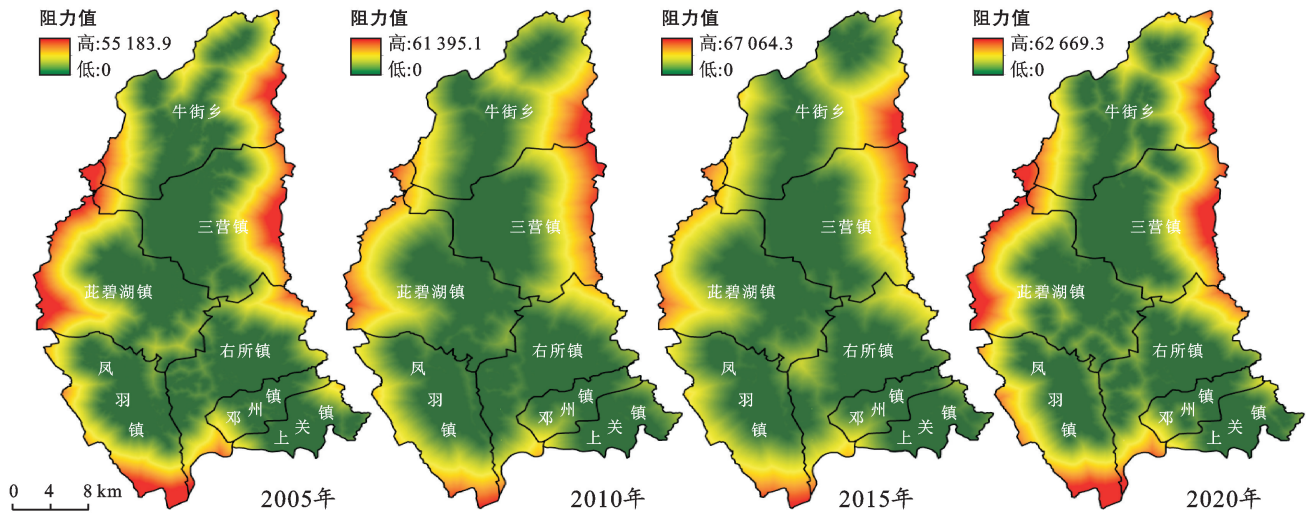


图 4 洱海流域上游 2005—2020 年面源污染阻力面空间分布

表 2 洱海流域上游各乡镇 2005—2020 年面源污染风险等级面积

km²

项目	年份	茈碧湖镇	邓川镇	凤羽镇	牛街乡	三营镇	上关镇	右所镇	总计
极高风险区面积	2005	65.48	26.62	56.95	55.07	91.47	36.16	75.28	407.02
	2010	68.18	22.32	50.37	39.74	72.62	36.20	84.90	374.33
	2015	62.27	24.48	47.50	41.82	77.08	39.66	68.49	361.30
	2020	64.19	23.11	45.17	49.06	80.95	38.54	70.27	371.30
高风险区面积	2005	23.42	8.04	18.68	28.74	20.84	8.70	26.68	135.12
	2010	32.62	6.98	23.80	27.38	16.05	9.02	25.56	141.41
	2015	30.85	7.95	22.94	28.88	20.54	9.77	22.06	142.99
	2020	36.56	8.63	18.62	35.91	20.09	9.40	26.13	155.33
中风险区面积	2005	49.11	7.96	30.67	54.07	27.79	9.20	28.74	207.53
	2010	44.01	12.84	27.84	52.66	26.38	11.32	29.04	204.09
	2015	48.63	11.09	30.64	54.10	29.33	8.99	40.56	223.35
	2020	55.64	11.83	35.13	61.23	35.38	9.51	37.52	246.25
低风险区面积	2005	56.46	9.51	43.88	85.57	44.08	8.84	39.20	287.53
	2010	54.67	9.75	51.23	96.75	55.35	6.48	33.20	307.43
	2015	63.89	8.59	51.19	92.68	52.87	4.78	45.48	319.48
	2020	45.60	8.55	49.04	84.47	51.15	5.72	35.96	280.48
极低风险区面积	2005	55.44	0.00	28.09	42.36	50.48	0.21	15.53	192.10
	2010	50.48	0.21	25.11	49.39	64.16	0.13	12.69	202.16
	2015	44.05	0.02	25.69	48.16	54.91	0.02	8.93	181.78
	2020	47.86	0.00	30.36	35.06	47.05	0.00	15.56	175.89

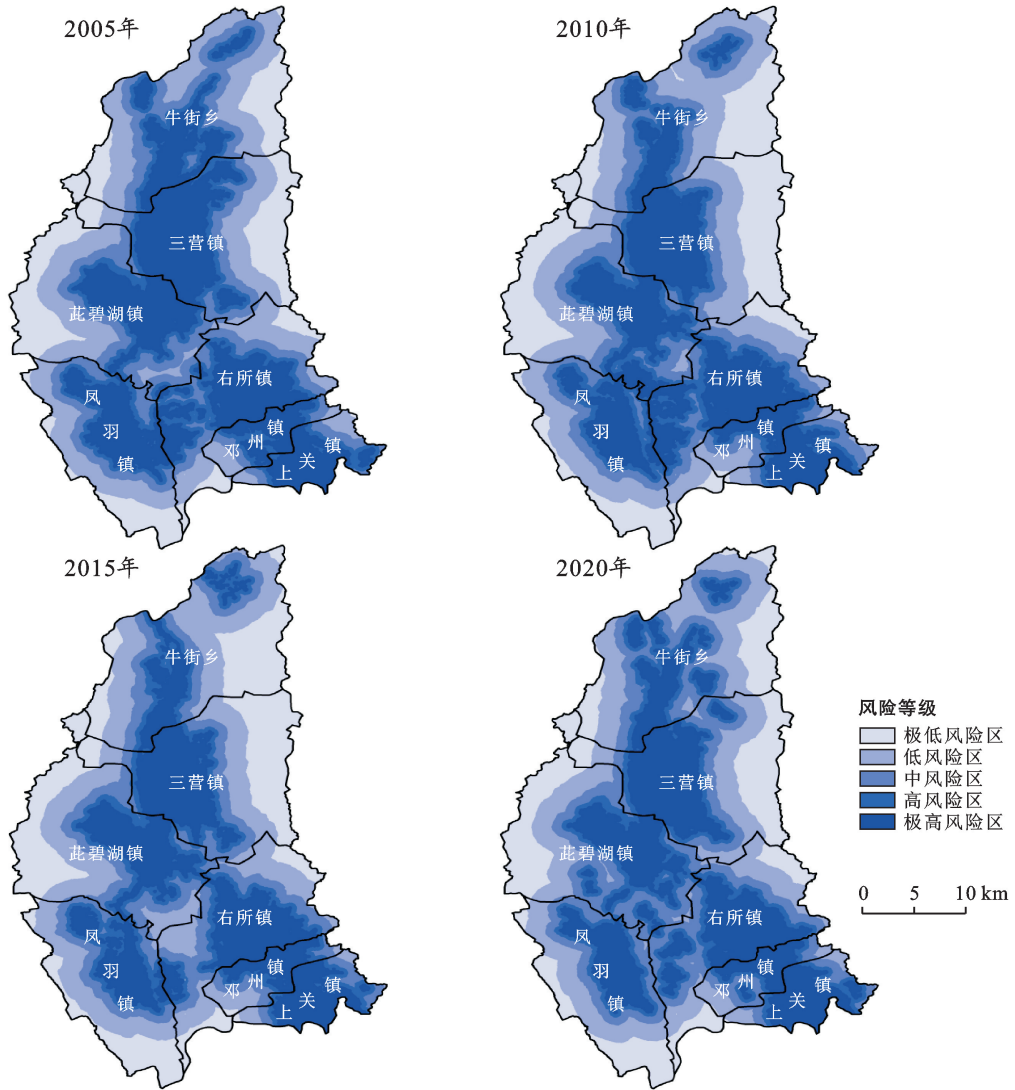


图 5 洱海流域上游 2005—2020 年面源污染风险等级分布

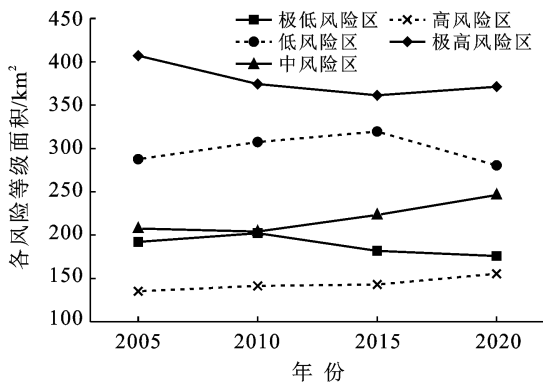


图 6 研究区 2005—2020 年面源污染各风险等级面积趋势变化

2.4 面源污染风险等级转移分析

2005—2020 年,洱海流域上游共发生了 15 种面源污染风险等级转移变化(图 7,表 3),主要是在极高风险区、高风险区、中风险区之间转移,以转出为主,转出面积分别为 80.93,72.51,75.63 km²。其中极低风险区和低风险区的转入转出主要在盆地边缘,而其他面源

污染风险等级的转入转出主要在盆地中间。低海拔向高海拔过渡的区域面源污染风险等级变化最为剧烈。

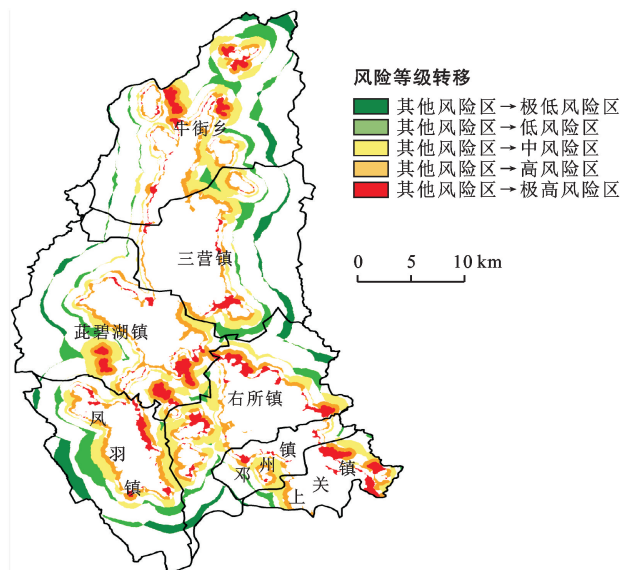


图 7 研究区 2005—2020 年面源污染风险等级转移分布

低风险区、中风险区、高风险区具有相似的转移特征,与其相邻的等级转移最多,最高分别为 41.12, 33.88 和 43.29 km²,相距越远彼此转移越少。极高风险区和极低风险区均只相邻一个面源污染风险等级,故只沿一侧单向递减转移。极低风险区几乎只和低风险区相互转移,而极高风险区因距离递减作用,向高风险区和中风险区转移最多,分别为 51.10 和

29.47 km²,向其余面源污染风险等级几乎不转移。在空间分布上,茈碧湖镇、凤羽镇和右所镇的交界处以及牛街乡的北部是主要转移的区域,这些区域是“源—汇”景观交界处及“汇”景观所在地,也是面源污染治理重点关注的区域。风险等级转移的方向和程度受到多种因素的影响,而人类活动和洱海流域生态保护政策的实施是最主要的原因。

表 3 研究区 2005—2020 年面源污染风险等级转移矩阵

风险等级	2020 年					总计
	极低风险区	低风险区	中风险区	高风险区	极高风险区	
2005 年						
极低风险区	163.17	28.21	0.44	0	0	191.82
低风险区	12.49	221.83	41.12	7.75	4.23	287.42
中风险区	0	27.61	131.88	33.88	14.13	207.51
高风险区	0	2.40	43.29	62.58	26.82	135.09
极高风险区	0	0.36	29.47	51.10	326.05	406.98
总计	175.66	280.41	246.20	155.32	371.24	1 228.82

3 讨论

本文采用四期数据研究面源污染风险等级变化,相较于一期数据而言,能够体现时间和空间变化特征,表明面源污染“源—汇”风险识别方法具有可行性^[5,9]。虽然划分出 5 个级别,但数据段是不同的。这种划分方法是否可以不同年份之间的比较有待探讨。但可以确定的是基于最小累积阻力模型,可以初步识别面源污染的风险等级,找到面源污染的关键区域^[12,23]。同时阻力因子的数量以及权重会受人为因素影响,不同的学者、不同的研究区域会选择不同的阻力因子,具有一定主观性。此外,耕地分类只考虑到一级地类,未进一步细分旱地和水田,而旱地的氮磷流失要高于水田^[27],也未分析氮磷污染物从“源”到“汇”过程中的机理。上述局限性需要进行更深入研究。

洱海流域上游的高风险区和极高风险区主要分布在耕地及其附近,这些区域与经济、人口、城镇建设等具有正相关性。限制城镇规模,管控耕地,进行景观优化^[33]、农业产业结构调整^[4]是减少氮磷等污染物的有效方式,可从“源”头上有效降低面源污染的产生和转移。对耕地质量较低、易造成水土流失的坡耕地要逐步退出^[34],对茈碧湖、西湖和海西湖所在的区域重点管控,实施缓湖滨带生态修复。此外,极低风险区、低风险区具有波动性,和中高风险区呈现此消彼长,在风险等级转变的重点区域加大植树造林力度,增加林地和草地的面积,提高“汇”景观的优势度及主导作用。

农药、化肥的禁用,大蒜等高水高肥的经济作物

禁止种植,大面积的退耕还林还湿等众多保护洱海的政策实施,改变了洱海流域上游的面源污染风险等级,使得面源污染物大幅度减少,洱海水质得到较大提升。上述研究结果与《中国环境状况公报》《洱海保护治理与流域生态建设“十三五”规划纲要》《云南省环境状况公报》等文件总体保持一致,如《中国环境状况公报》《云南省环境状况公报》指出:洱海氮磷含量显著降低,水质由Ⅲ类接近Ⅱ类。而王琦^[35]、徐建锋^[36]、孔佩儒^[37]等人基于最小累积阻力模型分别识别了查干湖、丹江口水库和海河流域的面源污染风险格局,指出耕地是高风险区域,与本文研究结果相吻合。同时农户对于环境保护的积极性较高,甚至可以损失自己的部分利益,而一系列保护洱海的政策的实施使得当地农民经济损失严重,导致大量人员外出务工,众多农田被荒。因此,以绿色高效低成本方式,识别和控制洱海流域上游面源污染,降低因洱海保护造成的对农户及农业的损失,实现洱海保护和农民利益的双赢,会对洱海的保护起到更加非凡的意义。

4 结论

(1) 阻力因子和源的分布使阻力基面和阻力面的空间分布、阻力值的大小存在区域性差异。随着海拔的升高,阻力值的分布呈现中间低边界高,“源”景观的作用被“汇”景观逐渐取代。2020 年比 2005 年阻力面值提高了 7 485.40,表明洱海流域上游的生态环境有所改善。

(2) 研究区 4 期极高风险区面积全都大于 360.00 km²,所占比例达 30%,而中风险区以上占比超 60%,整体面源污染风险等级偏高;16 a 间,极低

风险区、低风险区和极高风险区面积分别减少了16.16, 7.01和35.74 km², 中风险区和高风险区面积分别增加了38.69和20.23 km²。

(3) 面源污染风险等级由“源”向外依次分布: 极高风险区、高风险区、中风险区、低风险区和极低风险区, 即距离“源”越近, 风险等级越高; 受空间距离和“源”的影响, 风险等级表现为中部高于边界, 南部高于北部。

(4) 16 a 间的中、高、极高风险区面积转出最多, 分别为80.93, 72.51和75.63 km², 分别占其总面积的36.44%, 53.68, 19.89%。茈碧湖镇、凤羽镇和右所镇三镇交界处以及牛街乡的北部是面源污染风险等级转移的主要区域, 主要是中高风险等级所在地; 极高风险区是洱海流域上游面源污染的关键区域, 而减少氮磷的流失需要围绕关键区域展开。

[参 考 文 献]

- [1] 陈虹, 郭兆成, 贺鹏. 1988—2018年洱海流域植被覆盖度时空变换特征探究[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(2): 116-123.
- [2] 项颂, 万玲, 庞燕. 土地利用驱动下洱海流域入湖河流水质时空分布规律[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 160-170.
- [3] Zheng Liang, An Zeyu, Chen Xiaoling, et al. Changes in water environment in Erhai lake and its influencing factors [J]. *Water*, 2021, 13(10):1362-1378.
- [4] Liu Yiwen, Li Jiake, Xia Jun, et al. Risk assessment of non-point source pollution based on landscape pattern in the Hanjiang River basin, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(45):64322-64336.
- [5] Zhu Kangwen, Chen Yucheng, Zhang Sheng, et al. Identification and prevention of agricultural non-point source pollution risk based on the minimum cumulative resistance model [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01149.
- [6] 严春丽, 赵明, 李泽坤, 等. 洱海北部入湖河流水质特征及其对北部湖区的影响[J]. 环境工程, 2020, 38(12): 59-63.
- [7] 姜海斌, 沈仕洲, 谷艳茹, 等. 洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1305-1313.
- [8] 沈仕洲, 杨艳, 王瑞琦, 等. 施肥对云南洱海流域蒜田土壤氮挥发和大蒜产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 470-479.
- [9] Wang Jinliang, Shao Jiuan, Wang Dan, et al. Identification of the “source” and “sink” patterns influencing non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(10): 1431-1448.
- [10] Wuyi Jiang, Yongli Cai, Jingjing Tian. The application of minimum cumulative resistance model in the evaluation of urban ecological land use efficiency [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(23):714-720.
- [11] 谭华清, 张金亭, 周希胜. 基于最小累计阻力模型的南京市生态安全格局构建[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 282-288.
- [12] 许芬, 周小成, 孟庆岩, 等. 基于“源—汇”景观的饮用水源地非点源污染风险遥感识别与评价[J]. 生态学报, 2020, 40(8): 2609-2620.
- [13] Zhou Zixiang, Li Jing. The correlation analysis on the landscape pattern index and hydrological processes in the Yanhe watershed, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 524(5): 417-426.
- [14] Zhang Xin, Zhou Lin, Liu Yuqi. Modeling land use changes and their impacts on non-point source pollution in a Southeast China coastal watershed [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(8):1593-1607.
- [15] 王金亮, 谢德体, 邵景安, 等. 基于最小累积阻力模型的三峡库区耕地面源污染源—汇风险识别[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 206-215.
- [16] 刘帆, 谢德体, 王三. 基于最小累积阻力模型的耕地面源污染源—汇风险格局评价: 以重庆市北碚区为例[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(14): 253-259.
- [17] 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.
- [18] Chuan Limin, Zheng Huaiguo, Wang Ailing, et al. The situation and research progress of agricultural non-point source pollution in China [J]. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 526(1): 012015.
- [19] Jeyrani F, Morid S, Srinivasan R. Assessing basin blue-green available water components under different management and climate scenarios using SWAT [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: 107074.
- [20] 郝守宁, 白庆芹, 张志伟, 等. 林芝市农业面源污染排放特征解析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 115-120.
- [21] 武升, 张俊森, 张东红, 等. 小流域农业面源污染评价与综合治理研究进展[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(6): 710-716.
- [22] Zheng Guihua, Cui Xiong, Li Shiyao, et al. Research on non-point source pollution and prevention countermeasures of river basin based on remote sensing and GIS [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(6): 1-14.
- [23] 贾玉雪, 帅红, 韩龙飞. 基于“源—汇”理论的资江下游地区非点源污染风险区划[J]. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3518-3528.
- [24] 尹发能, 王学雷. 基于最小累计阻力模型的四湖流域景观生态规划研究[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(2): 231-235.
- [25] 陈裕婵, 张正栋, 万露文, 等. 五华河流域非点源污染

- 风险区和风险路径识别[J].地理学报,2018,73(9):157-169.
- [26] 熊星,唐晓岚,叶海跃,等.基于“源汇”格局的传统乡村景观保护与管控策略[J].地域研究与开发,2019,38(6):120-125.
- [27] Huang Ning, Lin Tao, Guan Junjie, et al. Identification and regulation of critical source areas of non-point source pollution in medium and small watersheds based on source-sink theory [J]. *Land*, 2021,10(7):668-668.
- [28] Li Feng, Ye Yaping, Song Bowen, et al. Evaluation of urban suitable ecological land based on the minimum cumulative resistance model: A case study from Changzhou, China [J]. *Ecological Modelling*, 2015,318(1):194-203.
- [29] 汉瑞英,赵志平,肖能文,等.基于“源—汇”理论和生态阻力面(U-EER)模型的新疆和田地区沙源扩散路径[J].地球科学与环境学报,2020,42(5):701-710.
- [30] Wang Jinliang, Ni Jiupai, Chen Chenglong, et al. Source-sink landscape spatial characteristics and effect on non-point source pollution in a small catchment of the Three Gorge Reservoir Region [J]. *Journal of Mountain Science*, 2018,15(2):327-339.
- [31] Razavi Termeh Seyed Vahid, Sadeghi Niaraki Abolghasem, Choi Soo Mi. Gully erosion susceptibility mapping using artificial intelligence and statistical models [J]. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, 2020, 11(1): 821-844.
- [32] 杨子生.云南省金沙江流域土壤流失方程研究[J].山地学报,2002,20(S1):1-9.
- [33] Jiang Luguang, Liu Ye, Wu Si, et al. Analyzing ecological environment change and associated driving factors in China based on NDVI time series data [J]. *Ecological Indicators*, 2021,129:107933.
- [34] Song Ge, Zhang Hongmei. Cultivated land use layout adjustment based on crop planting suitability: A case study of typical counties in Northeast China [J]. *Land*, 2021,10(2):107-125.
- [35] 王琦,魏来,韩煜,等.查干湖汇水区面源污染风险识别及管控[J].环境科学研究,2020,33(9):2074-2083.
- [36] 徐建锋,贾海燕,辛小康.基于最小累积阻力模型的丹江口水源区面源污染风险识别[C]//中国水利学会2020学术年会论文集(第一分册),2020:335-340. DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.069744.
- [37] 孔佩儒,陈利顶,孙然好,等.海河流域面源污染风险格局识别与模拟优化[J].生态学报,2018,38(12):4445-4453.

(上接第165页)

- [11] 侯建坤,陈建军,张凯琪,等.基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应[J].环境科学,2022,43(11):5253-5263.
- [12] 王雪然,潘佩佩,王晓旭,等.基于 GeoSOS-FLUS 模型的河北省土地利用景观格局模拟[J].江苏农业学报,2021,37(3):667-675.
- [13] 王旭,马伯文,李丹,等.基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J].自然资源学报,2020,35(1):230-242.
- [14] 张凯琪,陈建军,侯建坤,等.耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J].中国环境科学,2022,42(06):2799-2809.
- [15] 林彤,冯兆华,吴大放,等.基于 FLUS 模型的喀斯特地区生态用地时空变化及多情景预测:以湖南省宁远县为例[J].水土保持通报,2022,42(2):219-227.
- [16] 林伊琳,赵俊三,陈国平,等.基于 MCR-FLUS-Markov 模型的区域国土空间格局优化[J].农业机械学报,2021,52(4):159-170.
- [17] 赵瑞,刘学敏.京津冀都市圈“三生”空间时空格局演变及其驱动力研究[J].生态经济,2021,37(4):201-208.
- [18] 黎夏,李丹,刘小平.地理模拟优化系统(GeoSOS)及其在地理国情分析中的应用[J].测绘学报,2017,46(10):1598-1608.
- [19] 方创琳.新发展格局下的中国城市群与都市圈建设[J].经济地理,2021,41(4):1-7.
- [20] 刘希宇,高浩歌,扈茗.培育型都市圈发展规划编制方法探索:以福州都市圈为例[J].规划师,2020,36(4):13-20.
- [21] 徐新良,刘纪远,张树文,等.中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[M].北京:中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统,2018.
- [22] Chen Zuoqi, Yu Bailang, Yang Chengshu, et al. An extended time series (2000—2018) of global NPP-VIIRS-Like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(3):889-906.
- [23] 王旭东,姚尧,任书良,等.耦合 FLUS 和 Markov 的快速发展城市土地利用空间格局模拟方法[J].地球信息科学学报,2022,24(1):100-113.
- [24] Liang Xun, Liu Xiaoping, Li Xia, et al. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018,177:47-63.
- [25] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].地理科学进展,1999,18(1):83-89.
- [26] 庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究[J].自然资源学报,1997,12(2):105-111.
- [27] Aneesa S B, Shashi M, Deva P. Future land use land cover scenario simulation using open source GIS for the city of Warangal, Telangana, India [J]. *Applied geomatics*, 2020,12(3):281-290.