

DOI: 10.20103/j.stxb.202207061928

武燕, 吴映梅, 李琛, 高彬嫔, 郑可君, 王梦娇. 基于风险-质量的高原湖泊流域生态分区构建——以滇池流域为例. 生态学报, 2024, 44(3): 1052-1066.

Wu Y, Wu Y M, Li C, Gao B P, Zheng K J, Wang M J. Construction of ecological zoning of plateau lake basin based on spatial conflict and eco-environmental quality: A case of Dianchi Lake Basin. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 1052-1066.

基于风险-质量的高原湖泊流域生态分区构建 ——以滇池流域为例

武 燕¹, 吴映梅^{1,*}, 李 琛¹, 高彬嫔¹, 郑可君^{1,2}, 王梦娇¹

¹ 云南师范大学地理学部, 昆明 650500

² 云南省社会科学院, 昆明 650000

摘要: 随着人类足迹不断延伸, 高原湖泊流域人地系统三生空间冲突显著。以滇池流域为例, 顾及流域三生空间冲突风险, 基于三生空间景观格局和生态环境质量的变化, 尝试引入四象限模型, 结合热点分析, 划分风险-质量综合生态环境分区。结果表明: (1) 滇池流域三生空间冲突风险类型以较强为主, 冲突曲线指数呈现倒“U”型, 较强冲突比重不断下降。三生空间类型转换明显, 生活空间共增长了 312.23 km², 主要是由于高原湖泊流域的快速城镇化使得生活空间大量挤占了生产和生态空间。(2) 滇池流域生态环境质量总体呈现下降趋势, 空间上以滇池为中心呈现高-低-高的分布特征。较高质量和高质量区面积减少了 136.66 km²; 低质量区和较低质量区由 699.65 km² 上升到 930.51 km², 约占流域总面积的 1/3。(3) 基于三生空间冲突风险和生态环境质量两个维度将生态分区分为综合生态环境优质、良好、一般、劣质四类, 四类区的空间分布连续性相对较好, 尤以劣质区面积连续扩展的态势最为典型。针对不同生态分区提出差异化管理措施, 为流域人地协调发展提供实践指导。

关键词: 三生空间; 生态分区; 空间冲突; 四象限模型; 滇池流域

Construction of ecological zoning of plateau lake basin based on spatial conflict and eco-environmental quality: A case of Dianchi Lake Basin

WU Yan¹, WU Yingmei^{1,*}, LI Chen¹, GAO Binpin¹, ZHENG Kejun^{1,2}, WANG Mengjiao¹

¹ Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

² Yunnan Academy of Social Sciences, Kunming 650000, China

Abstract: The continuous increase in the human footprint has caused a significantly spatial conflict among human-land systems in plateau lake basins. Taking the Dianchi Lake Basin as an example, considering the risk of spatial conflict among the production-life-ecological space in the basin, and based on changes in land-use landscape patterns and eco-environmental quality, this study introduced a four-quadrant model and performed a hotspot analysis for risk-quality-integrated eco-environmental zoning. The results showed that: (1) The three-life spatial conflict risk types in the Dianchi Lake Basin were generally strong, the conflict curve index showed an inverted “U” shape, and the proportion of strong conflict types has decreased. The three-life space type has changed significantly, and the area of living spaces has increased by 312.23 km², mainly due to rapid urbanization within the plateau lake basin, which has transformed numerous production and ecological spaces into living spaces. (2) The overall eco-environmental quality in the Dianchi Lake Basin showed a downward trend. Spatially, with Dianchi Lake as the center, it showed a high-low-high distribution. The higher-quality and

基金项目: “兴滇英才”项目(XDYC-WHMJ-2022-0016); 国家社科基金青年项目(23CMZ045); 云南省科技厅项目(202305AP350016); 云南省哲学社会科学创新团队(2014cxp02)

收稿日期: 2022-07-06; **采用日期:** 2023-11-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuyingmei@hotmail.com

high-quality areas decreased by 136.66 km²; the lower-quality and low-quality areas increased from 699.65 km² to 930.51 km², accounting for approximately one third of the total area of the basin. (3) The four area categories used for the comprehensive risk-quality eco-environmental zoning were high-quality, good, general and bad areas. The spatial distribution continuity of the four category areas was relatively good, and continuous expansion of bad areas was the most typical. Identifying comprehensive risk-quality eco-environmental zones in combination with the three-life spatial conflict risk can further enrich the theoretical framework and methods used in eco-environmental research, serve as a reference for future studies, and provide practical guidance for the coordinated development of human-land systems in the river basin.

Key Words: ecological-production-living spaces; ecological zoning; space conflict; four-quadrant evaluation; Dianchi Lake Basin

生产-生活-生态空间(以下简称“三生”空间)是一种综合性的国土空间分区方式,其涵盖了生物物理过程、直接和间接生产以及精神、文化、休闲、美学的需求满足等,是表征自然系统和社会经济系统协同耦合的产物^[1-2]。打造“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”作为习近平新时代中国特色社会主义思想的核心内容,为协调好三生空间动态平衡、实现人与自然和谐一体化发展提供了重要理论支撑^[3-4]。当前,受到快速城镇化的影响,人类社会经济活动加剧,加速了土地利用方式、结构以及空间分布的转变,使得自然环境和生态系统发生显著变化^[5-7],在此过程中区域三生空间资源竞争会引起空间压力增大、景观生态稳定性减弱以及空间扰动性增强等一系列空间冲突风险^[8-9]。三生空间冲突是在土地利用冲突基础上延伸出来的^[10],一般而言,空间冲突变化越强烈,人地关系越发趋于紧张状态^[11-13]。此外,三生空间主导功能的转变主要体现在生产、生态以及生活三大主导功能之间的转化,在这个过程中,原有的空间动态平衡被打破,对区域气候^[14]、水环境^[15]、生物多样性^[16]等生态系统产生扰动,继而促使生态环境发生变化,带来一系列生态环境问题^[17-21],严重制约着区域空间平衡和可持续发展。三生空间作为新时代美丽中国的重要空间载体,为实现三生空间的协调集约利用及空间优化,既要把握三生空间存在冲突的客观现象,避免空间格局失控所引发的一系列负面效应,又要关注三生空间转型下的生态环境质量变化,维护以及协调好三生空间稳定性和可持续发展。

在三生空间转型过程中,空间冲突风险与生态环境质量往往作为生态环境变化的特殊表征,对区域生态环境保护而言意义突出。然而当前研究大多是将空间冲突风险以及生态环境质量作为两个独立的科学问题进行讨论研究,对于二者之间的联系关注度不够,相关研究处于不断探索阶段。在面向国土空间优化三生空间研究的现实需求下,为协调好区域经济发展与生态环境保护,通过整合生态环境多要素,因地制宜地开展生态分区构建^[22],不仅能够辅助决策者明确地区生态保护以及建设重点,同时对于未来生态环境改善提供了参考依据,逐渐成为了地区制定科学发展规划的重要手段之一^[23-24]。多要素生态分区构建强调了生态系统的整体性和独特性,为实现三生空间生态风险与生态环境质量要素整合,综合表达生态环境特征、变化及三生空间格局优化提供新思路。

滇池流域是典型的高原湖泊流域,属长江上游生态安全的重要组成部分,作为生态、生产以及生活三生功能空间的重叠叠加区、以及生态修复保护行为、资源开发利用行为以及社会日常生活行为互动的重要场所,兼具高生态系统服务价值以及高生态系统脆弱性等特点,经济发展和生态保护战略地位突出^[25-26]。随着流域城镇化建设加快,人类活动干扰加剧,三生空间转型过程中各种主导功能之间进行数量和空间再配置,各类空间数量和格局发展巨大变化,空间相互竞争博弈,形成严峻的空间冲突和矛盾,流域整体景观格局变化剧烈,直接或间接影响着流域三生空间稳定性,空间冲突风险显著,并呈现出特殊的格局形态。同时由于生产、生活以及生态空间的功能差异性,空间结构趋向失衡,对整体生态环境质量造成扰动,直接或间接地影响流域人与自然和谐一体化整体发展。本研究从人地关系地域系统理论出发,基于三生空间视角,划定流域三生空间类型,开展流域三生空间冲突风险以及生态环境质量评价,尝试引入四象限模型,结合热点分析,划分风险-质量

综合生态环境区,实现多要素生态分区构建,以期综合表征生态环境变化特征,同时为高原湖泊流域实现三生空间格局优化以及可持续发展和生态文明建设提供科学支撑。

1 研究区域、思路与方法

1.1 研究区概况

滇池流域位于云贵高原中部,界于 24°28′N—25°28′N,102°30′—103°00′E,属亚热带季风气候,全年温差较小,地形相对平坦,面积约为 2900.50km²,包括昆明市的五华区、盘龙区、西山区、官渡区、呈贡区、晋宁区、嵩明县等六区一县^[25](图 1)。作为全国重点保护流域和滇中城市群核心区,肩负经济发展和生态保护的双重重任。伴随着快速城镇化,人口、经济水平的迅猛发展,流域生态空间侵蚀过快,生活空间激增,三生空间冲突显著,空间资源与环境问题矛盾日益突显。

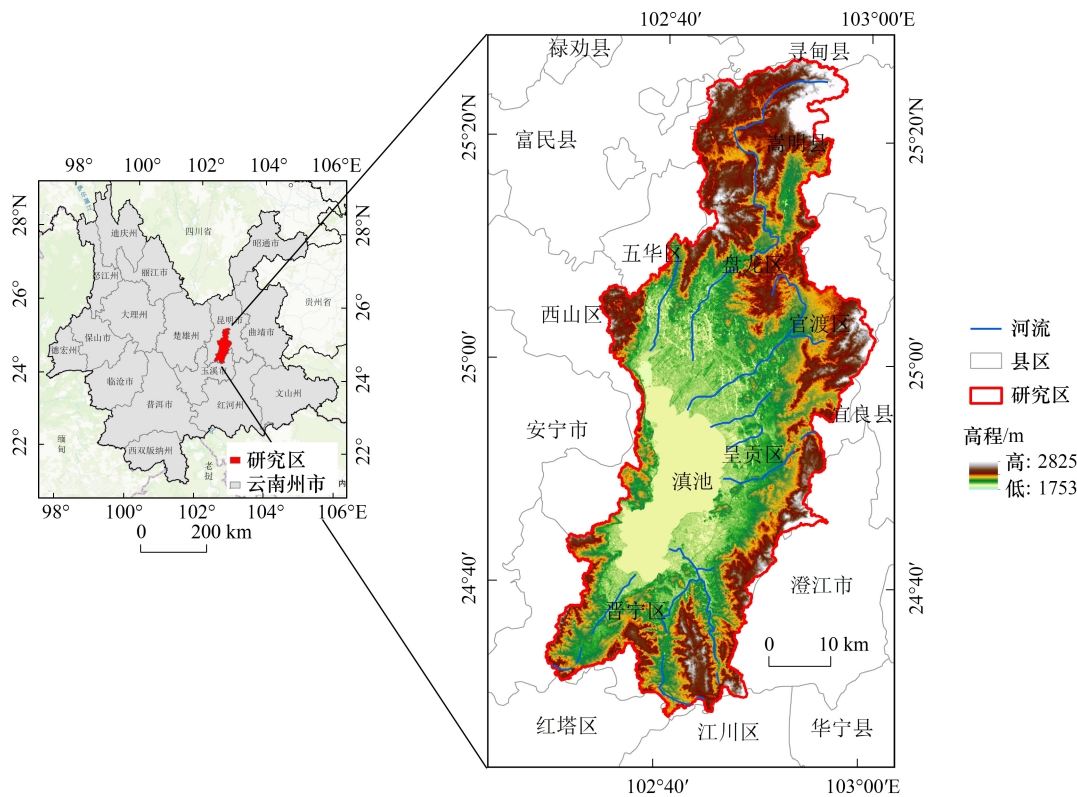


图 1 研究区位图

Fig.1 Geographical location of study area

1.2 数据来源与研究思路

滇池流域 1990、2000、2010、2018 年 4 期土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据云平台(www.resdc.cn);DEM 数据来自地理空间数据云(http://www.gscloud.cn),空间分辨率均为 30m×30m。参考孔冬艳等^[27]研究,结合滇池流域的土地利用现状划定了流域三生空间类型(表 1),从研究区实际情况和斑块大小出发,采用了 2km×2km 的网格评价标准将研究区划分为 868 个评价单元。此外,为强调流域三生空间转型及景观格局变化,本研究在综合评估三生空间冲突风险以及生态环境质量基础上,结合热点分析及四象限模型,构建风险-质量综合生态环境区。具体研究内容包括以下三个部分:(1)基于生态风险评价的三生空间冲突风险评价;(2)基于生态环境格局因子以及生态环境属性因子的生态环境质量评价;(3)基于四象限划分风险-质量综合生态环境区划分(图 2)。

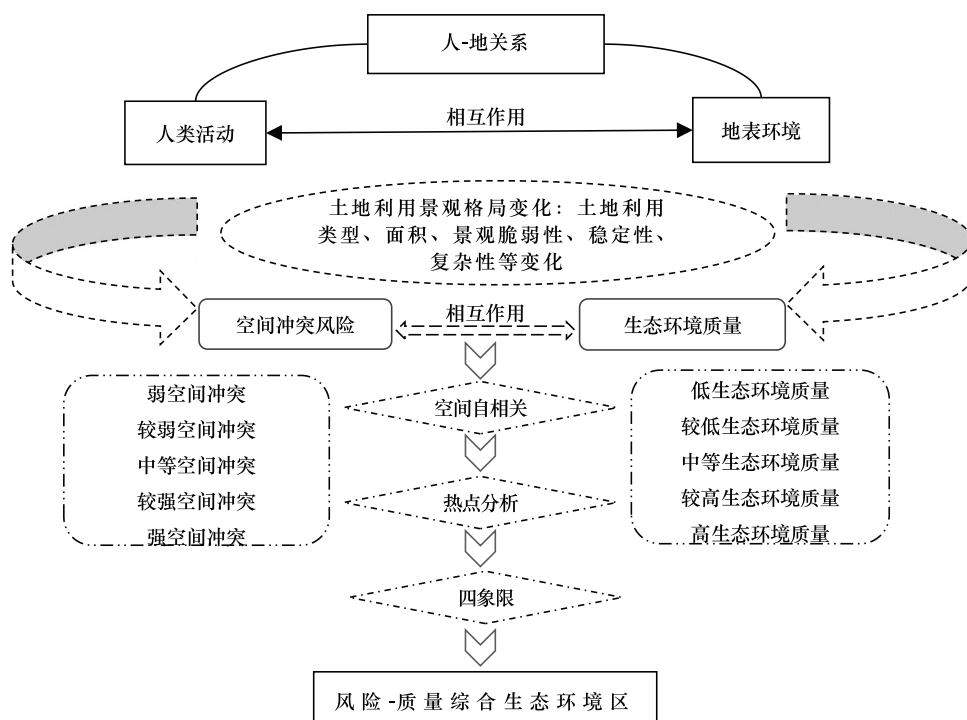


图2 研究思路

Fig.2 Research ideas

1.3 研究方法

1.3.1 基于生态风险评价的空间冲突模型构建

三生空间冲突加剧往往会带使景观格局发生变化,借鉴已有研究^[12,28],基于流域经济的快速发展,土地的利用强化,斑块形状的逐渐复杂等现状特征,选取斑块数量 (Number of patches, NP)、斑块密度 (Patch density, PD)、面积加权平均拼块分形指数 (Area-weighted mean patch fractal dimension, AWMPFD) 等构建出“复杂性+脆弱性-稳定性”的流域三生空间冲突模型。该方法采用的景观指数相对客观,能够准确识别冲突的地点,并能有效表征人为干扰和自然恶化的压力,在很多区域研究均有应用^[29-30]。

①空间复杂性表达

空间复杂性使用空间外部压力指数 (Spatial complexity index, SCI) 表示,常用面积加权平均拼块分形指数 (AWMPFD) 来测算空间外部压力^[12],用来表达邻域斑块对测度斑块的干扰程度,反映人类活动对空间格局的影响程度。其值越高,则反映人类干扰程度越大,反之亦然。表达式为:

$$AWMPFD = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{2\ln(0.25P_{ij})}{\ln a_{ij}} \times \frac{a_{ij}}{A} \quad (1)$$

式中, P_{ij} 表示第 i 类空间类型第 j 个斑块的周长; a_{ij} 表示第 i 类空间类型第 j 个斑块的面积; A 表示空间单元面积。

②空间脆弱性表达

空间脆弱性使用空间脆弱性指数 (Spatial fragility index, SFI) 测算。反映斑块在受到外界干扰时,生态功能丧失的程度以及内部生态环境遭受破坏的可能性。可表示为空间斑块抵御外界压力的能力,抵抗能力越强,冲突水平越低,反之亦然^[12]。其表达式为:

$$SFI = \sum_{i=1}^m \sum_{s=1}^r f_{is} \times \frac{a_{is}}{A} \quad (2)$$

式中, f_{is} 表示第 i 类空间类型第 s 种景观地类的景观脆弱度, a_{is} 表示第 i 类空间类型第 s 种景观地类的景观斑块面积; m 表示空间类型数量; r 表示景观地类种类; A 表示空间单元面积。高原湖泊流域生态系统特殊性与复杂性并存^[31], 生态系统一旦遭到外界破坏很难短时间得到恢复, 结合流域城镇化特点和发展战略方向, 在参考已有研究基础上^[28,32], 对流域景观脆弱度进行赋值。景观脆弱度由高到低依次为草地生态空间 7、林地生态空间 6、农村生活空间 5、农业生产空间 4、工业生产空间 3、城镇生活空间 2、水域生态空间 1。

③空间稳定性表达

空间稳定状况使用空间稳定性指数 (Spatial Stability index, SSI) 测算。空间形态越完整, 空间风险越小, 稳定性越好, 空间冲突强度越低, 反之亦然^[12]。其表达式为:

$$SSI = \frac{PD - PD_{\min}}{PD_{\max} - PD_{\min}} \quad (3)$$

其中:

$$PD = \frac{n}{A} \quad (4)$$

式中, PD 表示景观破碎度, $PD_{\max}$ 和 $PD_{\min}$ 分别表示景观破碎度的最大值和最小值。 n 表示空间单元斑块数量; A 表示空间单元面积。

最终, 空间综合冲突指数 (Spatial comprehensive conflict index, SCCI) 可表达为:

$$SCCI = SCI + SFI - SSI \quad (5)$$

式中, $SCCI$ 为空间综合冲突指数; SCI , SFI , SSI 分别为空间复杂性指数、空间脆弱性指数以及空间稳定性指数。参考蒙古军等人^[12]的研究, 采用等权重方法来计算空间综合冲突指数用于表征空间冲突风险。

1.3.2 基于景观格局指数的生态环境质量计算

生态环境质量指数是当前学术界基于遥感解译的土地利用/覆被变化数据测度生态环境质量的主要方法之一^[33]。三生空间转型会引起流域景观格局变化^[34], 针对生态环境质量测算偏重生态环境指数因子单一指标的研究现状, 统筹考虑滇池流域土地利用方式的功能属性和空间格局, 参考王永洵等^[35]研究将生态环境格局因子纳入到生态环境质量指标中, 采用修正后的生态环境质量指数模型实现滇池流域生态环境质量计算。即: 选用景观格局指数中景观破碎度 (C_i)、景观分离度 (N_i)、景观优势度 (D_i)^[7] 构建生态环境格局因子 (S_i), 三者权重为 $a=0.6$, $b=0.3$, $c=0.1$, 权重分配具体参考谢花林等^[36]的研究, 景观格局指数计算参考高彬媛等^[7]的方法。生态环境属性因子 (F_i) 取值参考陈万旭、孔冬艳等^[21,27]的研究, 以表征地类的基本环境属性, 代表了不同功能地类所具备的生态环境水平差异。 EV 公式如下:

$$EV = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{A} (F_i + S_i) \quad (6)$$

式中, EV 为生态环境质量指数, A_i 和 A 分别为采样单元范围内第 i 种用地类型的面积和采样单元总面积, F_i 为第 i 类用地类型的生态环境属性因子 (表 1), S_i 为第 i 类用地类型的生态环境格局因子, 两者经过无量纲化处理, 共同构成了第 i 类用地类型的生态环境质量指数。

1.3.3 基于热点分析的四象限模型构建

随着学科的融合发展, 早期运用于房地产市场变化分析的四象限模型, 逐渐被引入到景观生态质量和生态系统服务质量等研究方面^[37-38]。当前, 滇中城市群的加速发展, 承担着发展和保护双重压力的滇池流域人地关系矛盾冲突日趋明显。本研究尝试运用双变量空间自相关^[39]揭示空间冲突风险和生态环境质量之间的关联性, 并进一步结合热点分析^[40], 运用自然间断点法确定二者冷热点 $Z(G_i^*)$ 取值区间, 尝试构建出以空间冲突风险为 X 轴, 生态环境质量为 Y 轴的四象限模型, 通过指标值所在象限的位置反映不同评价单元内空间冲突风险和生态环境质量耦合差异程度, 按照程度划分出优质、良好、一般、劣质四类风险-质量综合生态环境区 (图 3)。

表 1 三生空间土地利用分类及其生态环境属性因子

Table 1 Land use classification of production-living-ecological and eco-environmental quality index

“三生”空间土地利用功能分类 Land use function classification of production-living-ecological space		土地利用分类系统的二级地类 Secondary classification of land use classification system	生态环境属性因子 Eco-environmental quality index
一级分类 First class	二级分类 Second class		
生产空间 Productive space	农业生产空间	水田、旱地	0.263
	工业生产空间	其他建设用地(包括工矿、大型工业厂、采石场、交通用地等)	0.150
生活空间 Living space	城镇生活空间	城镇用地	0.200
	农村生活空间	农村居民点	0.200
生态空间 Ecological space	林地生态空间	有林地、灌木林地、疏林地、其他林地	0.796
	草地生态空间	高覆盖草地、中覆盖草地、低覆盖草地	0.465
	水域生态空间	河渠、湖泊、水库坑塘、滩地	0.697

2 结果与分析

2.1 滇池流域三生空间变化特征

从三生空间分布演变看,滇池流域三生空间以林地生态空间为主,主要分布于流域外围,片状集中分布于流域东部,草地生态空间则呈现条带状分布于林地以及农业生产空间,农业生产空间和城镇生活空间围绕滇池沿岸集中分布。随着流域城镇化进程加快,生活空间向外扩张速度和面积凸显,造成滇池沿岸生产、生态空间逐渐被生活空间挤占,城镇生活空间扩张速度和面积明显,流域内部空间收缩加剧,三生空间类型转换及空间格局演变剧烈(图 4)。

从数量结构变化看(表 3),研究期内流域三生空间

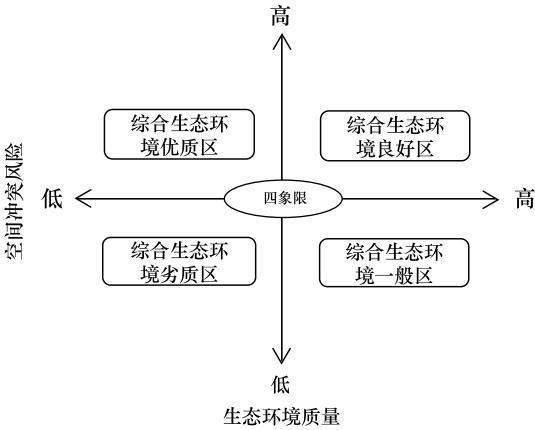


图 3 四象限模型

Fig.3 Four-quadrant evaluation

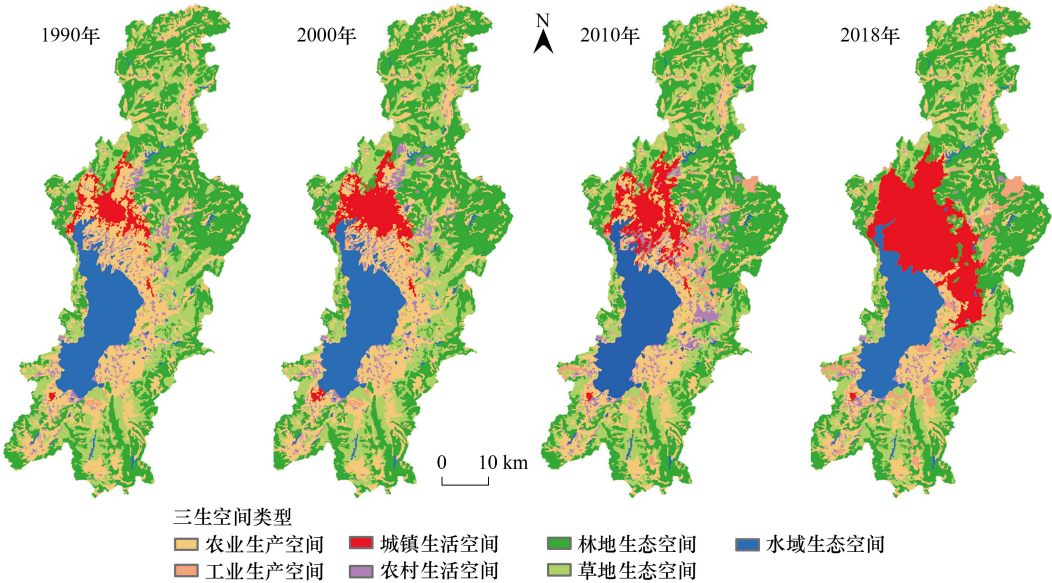


图 4 1990—2018 年滇池流域三生空间格局

Fig.4 Spatial pattern of production-living-ecological spaces in Dianchi Lake Basin from 1990 to 2018

结构变化剧烈,工业生产空间以及城镇生活空间面积大幅度增加,其余空间均呈现不同程度的减少。1990—2018 年农业生产空间减少了 256.72km²,变化率达 33.34%,与此同时城镇生活空间由原来的 96.23km² 增加了 349.96km²,变化率达 363.65%。结合三生空间转移矩阵可知(图 5),流域城镇生活空间主要由农业生产空间、草地生态空间以及农村生活空间转化而来,转入面积分别为 202.76km²、60.63km²,41.65km²,以 2010—2018 年时间段内转化最为突出。作为滇中城市群核心区域,滇池流域在近 30 年间,三生空间转换显著,城镇生活空间面积不断增加,农业生产空间以及林、草地生态空间面积减少,三生空间冲突剧烈,流域生态环境压力增大,人地关系矛盾突出。

表 3 1990—2018 年滇池流域三生空间面积及其变化

Table 3 Area and variation of production-living-ecological space in Dianchi Lake from 1990 to 2018

空间类型 Space Type	面积 Area/km ²				变化 Change/km ²			
	1990 年	2000 年	2010 年	2018 年	1990—2000 年	1990—2010 年	2010—2018 年	1990—2018 年
农业生产空间 Agricultural production space	767.68	707.21	650.84	510.96	-60.47	-116.84	-139.88	-256.72
工业生产空间 Industrial production space	27.45	29.84	91.17	122.10	2.39	63.71	30.93	94.65
城镇生活空间 Urban living space	96.23	152.68	173.31	446.19	56.44	77.08	272.88	349.96
农村生活空间 Rural living space	96.03	105.97	125.29	58.30	9.94	29.27	-66.99	-37.73
林地生态空间 Forest ecological space	1007.63	1001.90	1030.19	996.23	-5.73	22.56	-33.96	-11.41
草地生态空间 Grassland ecological space	569.35	563.75	492.91	441.64	-5.60	-76.44	-51.27	-127.71
水域生态空间 Water ecological space	340.13	343.16	340.80	329.09	3.03	0.67	-11.71	-11.04

2.2 滇池流域三生空间冲突时空格局特征

SCCI(空间综合冲突指数)由 SPI、SFI 和 SRI 组成。本研究借鉴冲突的倒“U”型曲线模型,根据研究区域空间冲突指数的累计频率曲线分布特征划分,即弱空间冲突(0,0.2]、较弱空间冲突(0.2,0.4]、中等空间冲突(0.4,0.6]、较强空间冲突(0.6,0.8]以及强空间冲突(0.8,1]。从结构变化来看(图 6):SCCI 占比曲线呈现倒“U”型(图 6),SCCI 在(0.6,0.8]占比最大,流域总体以较强空间冲突为表征,研究期间 SCCI 较强空间冲突占比总体呈下降趋势,表明滇池流域三生冲突随着时间的推移而逐渐趋向缓解,但仍然维持在较强空间冲突。此外,流域弱空间冲突占比在 1990—2010 年保持在 10%以下,至 2018 年增加至 18%,这与流域城镇化推进过程中城镇生活空间逐渐围绕滇池集中连片息息相关。

从三生空间冲突空间变化来看,由中心向外围呈现“弱空间冲突-中等空间冲突-较强/强空间冲突”的空间格局特征(图 7)。流域四周的嵩明县、晋宁区以及官渡区以北区域,林草地生态空间面积大分布集中,易受到城市扩张影响,较强空间冲突特征明显。此外,城镇空间集中区域或水域生态空间主要为弱空间冲突区,随着城镇化的快速推进,流域弱空间冲突面积不断增加,其中以城镇生活空间增加为主要原因。流域城镇不断扩张,使得滇池沿岸大量农业生产空间、农村生活空间被城镇生活空间侵占,逐渐在滇池沿岸形成城镇生活空间的集中连片区,城镇生活空间面积不断增加使得流域整体弱空间冲突面积所占比重不断增大,流域空间冲突指数下降明显。其中近 10 年间,城镇生活空间大面积组团式集中增长,城镇生活空间集中稳定的同时提升了流域的整体稳定性,三生空间冲突风险得到缓解。针对流域相对稳定的三生空间冲突区域进行空间结构、配置和竞争等优化调控,缓解空间冲突对流域生态系统造成负面影响,解决因弱空间冲突区不断扩大而威胁生态环境的问题,对协调流域三生空间平衡至关重要。

2.3 滇池流域生态环境质量时空格局特征

近 30 年滇池流域三生空间生态环境质量呈现减低的态势,1990—2018 年四个时间段内平均生态环境质

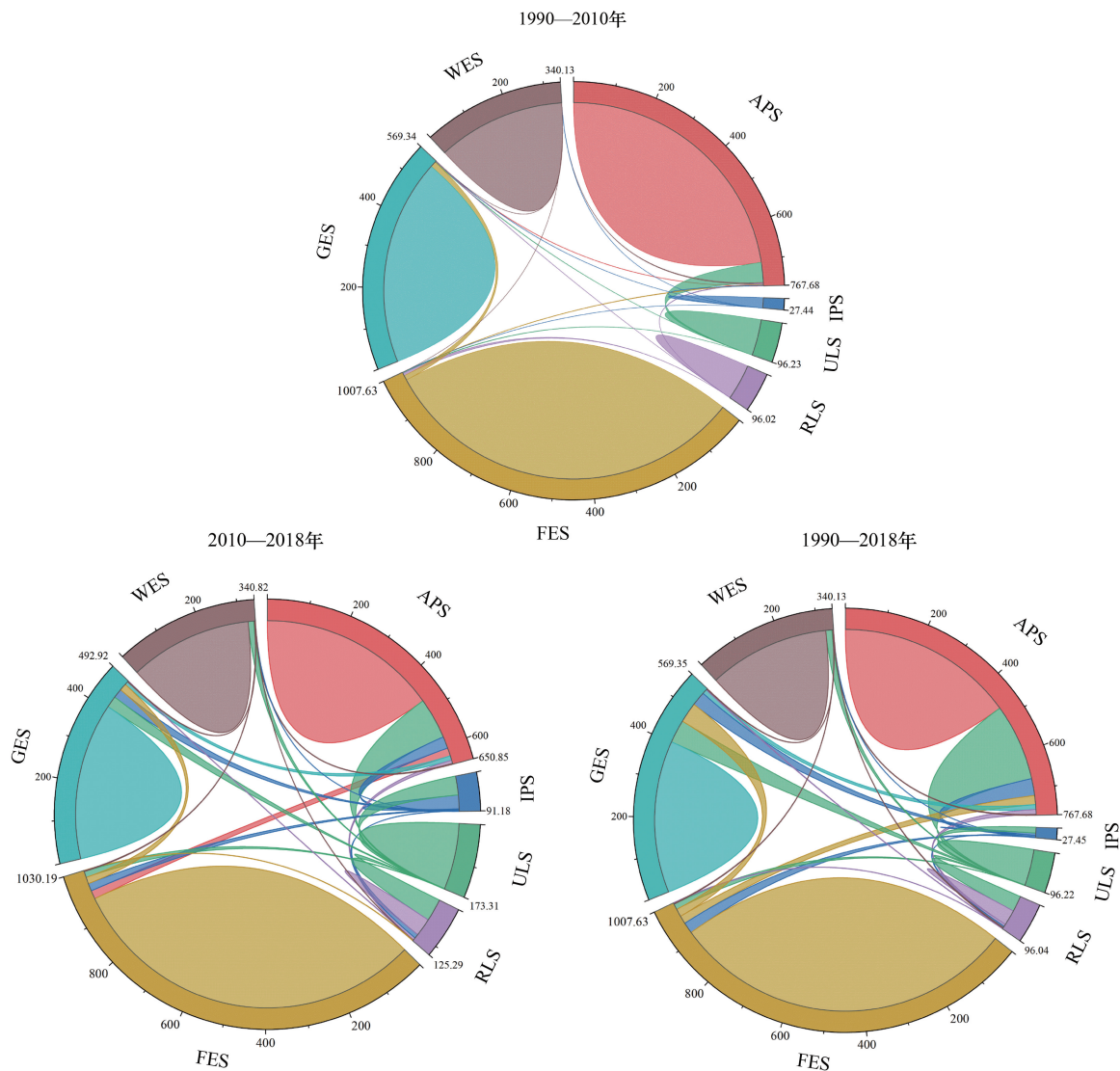


图5 滇池流域不同时间段内三生空间转换和弦图

Fig.5 The chord diagram of land use transfer in the production-living-ecological space in the Dianchi Lake Basin from different time periods

APS: 农业生产空间; IPS: 工业生产空间; ULS: 城镇生活空间; RLS: 农村生活空间; FES: 林地生态空间; GES: 草地生态空间; WES: 水域生态空间

量指数分别为 0.760、0.752、0.746、0.701。采用指数克里金插值法进行空间插值,运用自然间断点法将 2018 年生态环境质量划分为 5 个等级,即:低质量($EV \leq 0.36$)、较低质量($0.36 < EV \leq 0.58$)、一般质量($0.58 < EV \leq 0.77$)、较高质量($0.77 < EV \leq 0.93$)、高质量($EV > 0.93$),其他 3 期数据均采用 2018 年的分级区间,便于 4 期数据比较分析(图 8)。生态环境质量由里向外总体呈现出“高-低-高”的空间分布特征,分别大致对应着滇池水域生态空间、主城区城镇生活空间以及流域外围大部分林、草地生态空间。

从流域生态环境质量等级变化看,1990—2018 年滇池流域三生空间低质量区增加突出,面积占比由 8.68% 上升至 18.05%,增长近十个百分点,而其余等级质量区面积占比均在下降明显减少(表 4)。滇池沿岸生态环境质量以低、较低质量区为主,1990 年以来,城镇生活空间不断向滇池以东的官渡区、呈贡新区蔓延式外扩,低、较低质量区范围随之扩展,至 2018 围绕滇池沿岸形成了低质量连片集中区的空间分布格局,并在官渡区以北形成了一个低质量区中心。结合流域三生空间转换的分布格局和生态质量空间变化格局来看,流域

城镇生活空间的扩张使得生态环境质量不断下降态势明显。以滇池流域周边林、草地生态空间密集的嵩明县、官渡区为例,城镇化的快速推进,该区大部分林、草地生态空间受到生活空间挤压,生态环境较高、高质量区占比下降明显。随着《云南省滇池保护条例》严格实施,更加注重流域三生空间冲突矛盾缓和解决,严格维护好“三区三线”,保障流域生态空间不被生产和生活空间过度侵占。

2.4 滇池流域风险-质量综合生态环境分区构建

2.4.1 空间冲突风险和生态环境质量关联性

对流域三生空间冲突风险指数与生态环境质量指数的进行双变量空间自相关分析,关联性分析表明二者之间存在显著正相关关系,四年 Moran's I 指数为 0.28、0.31、0.16、0.13。

2.4.2 空间冲突风险和生态环境质量冷热点区识别

分别对流域三生空间冲突风险和生态环境质量进行热点分析,根据 Z 值检验,采用自然间断点法将滇池流域四个时间段各单元格网空间冲突风险指数和生态环境质量指数的局域 G^* 统计量从高到低依次分成 4 类,流域三生空间冲突风险和生态环境质量的冷热点区空间分布格局大致相反(图 9),即流域由里向外,空间冲突风险呈现冷点区-热点区分布格局;生态环境质量呈现热点区-冷点区的空间分布格局。实现流域三生空间冲突风险与生态环境质量有机结合,能更全面的表征生态环境变化特征。

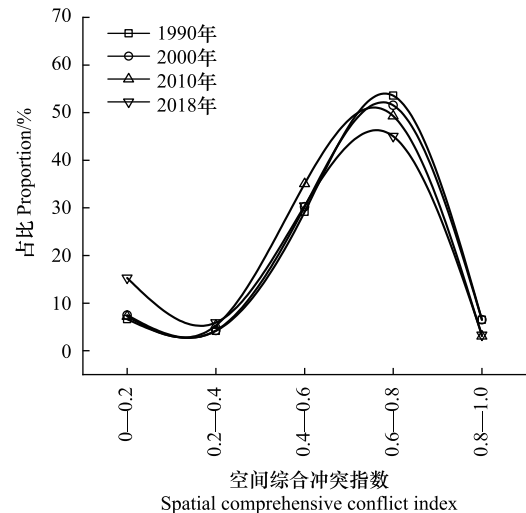


图 6 滇池流域 1990—2018 年三生空间综合冲突指数占比变化

Fig.6 Changes in the proportion of the spatial comprehensive conflict index in the Dianchi Lake Basin from 1990 to 2018

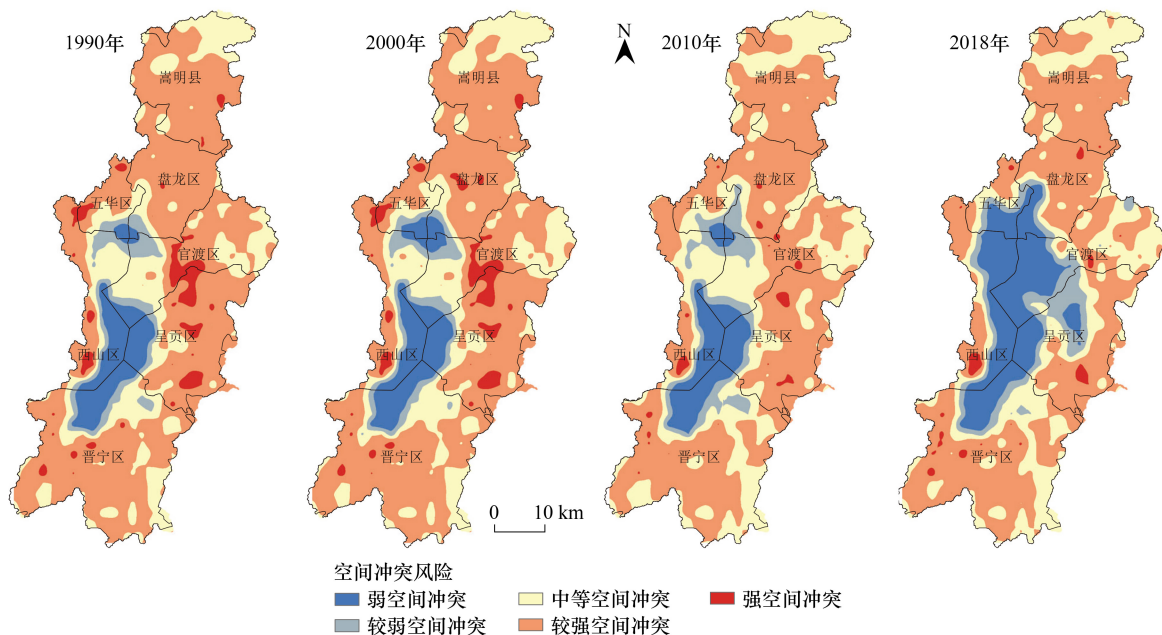


图 7 1990—2018 年滇池流域三生空间冲突分布

Fig.7 Distribution of spatial conflict in Dianchi Lake Basin from 1990 to 2018

2.4.3 风险-质量综合生态环境区划分

尝试引用四象限模型,结合流域不同年份空间冲突风险和生态环境质量冷热点区 $Z(G_i^*)$ 取值进行四象

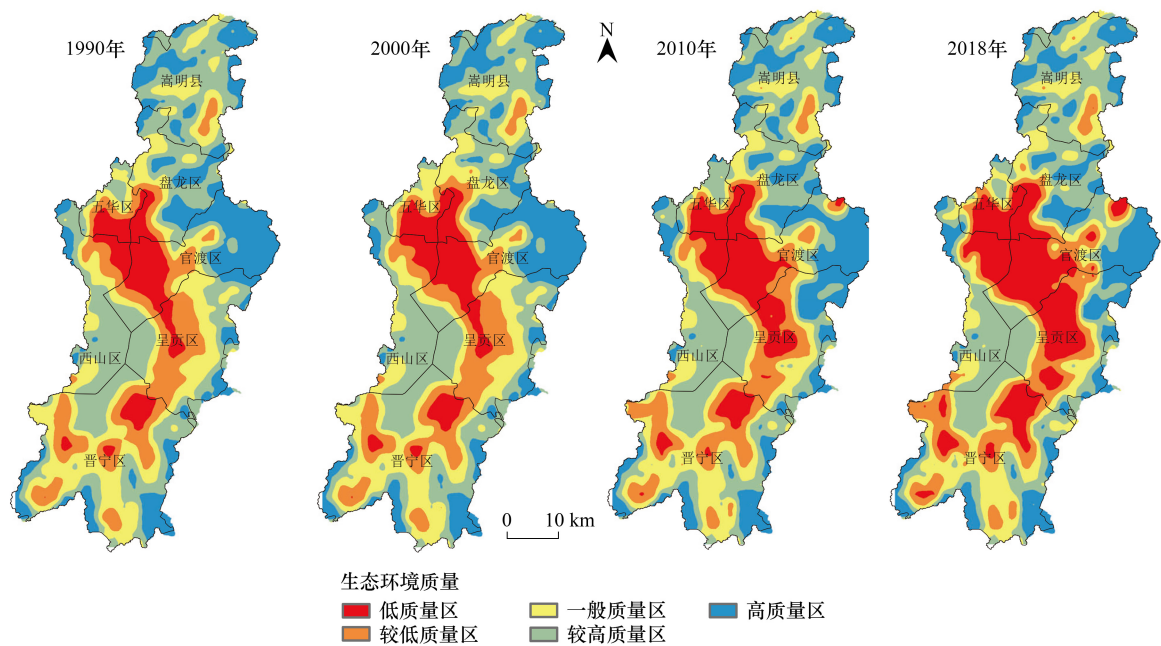


图 8 1990—2018 年滇池流域生态环境质量空间格局

Fig.8 Spatial pattern of eco-environmental quality in Dianchi Lake Basin from 1990 to 2018

限类型划分,识别出流域风险-质量综合生态环境区,以期综合反映流域生态环境变化特征(表 5、表 6)。根据研究结果与流域现实发展情况,风险-质量综合生态环境区划分为综合生态环境优质、良好、一般、劣质四类,在空间分布特征上大致呈圈层结构,空间连续性好,综合生态环境劣质区扩张显著(图 10)。

表 4 1990—2018 年滇池流域生态环境质量等级面积及占比

Table 4 Area proportion of eco-environmental quality grade in Dianchi Lake Basin from 1990 to 2018

生态环境质量 Eco-environmental quality	1990 年		2000 年		2010 年		2018 年	
	面积	占比	面积	占比	面积	占比	面积	占比
	Area/km ²	Proportion/%	Area/km ²	Proportion/%	Area/km ²	Proportion/%	Area/km ²	Proportion/%
低质量区 Low quality	251.90	8.68	278.08	9.59	350.76	12.09	523.50	18.05
较低质量区 Lower quality	447.75	15.44	448.62	15.47	434.11	14.97	407.01	14.03
一般质量区 Medium quality	683.31	23.56	699.98	24.13	610.90	21.06	589.11	20.31
较高质量区 Higher quality	951.29	32.79	904.41	31.18	913.27	31.48	863.96	29.78
高质量区 High quality	566.49	19.53	569.66	19.64	591.71	20.40	517.16	17.83

表 5 滇池流域风险-质量综合生态环境区划分标准

Table 5 The Delineation standard of comprehensive risk-quality eco-environmental zones divisions in the Dianchi Lake Basin

Z(G _i [*])取值 Range of values	1990 年		2000 年		2010 年		2018 年	
	空间冲 突风险	生态环 境质量	空间冲 突风险	生态环 境质量	空间冲 突风险	生态环 境质量	空间冲 突风险	生态环 境质量
	SCCI	EV	SCCI	EV	SCCI	EV	SCCI	EV
象限 I Quadrant I	(-1.18,-2.82]	(-0.23,3.32]	(-0.37,-2.81]	(-0.51,3.27]	(-1.18,2.77]	(-0.34,3.23]	(-0.83,2.83]	(-0.37,3.22]
象限 II Quadrant II	(-6.71,-1.18]	(-0.23,3.32]	(-6.47,-0.37]	(-0.51,3.27]	(-6.71,-1.18]	(-0.34,3.23]	(-5.22,-0.83]	(-0.37,3.22]
象限 III Quadrant III	(-6.71,-1.18]	(-5.35,-0.23]	(-0.37,-2.81]	(-5.34,-0.51]	(-1.18,2.77]	(-4.99,-0.34]	(-0.83,2.83]	(-4.24,-0.37]
象限 IV Quadrant IV	(-1.18,-2.82]	(-5.35,-0.23]	(-6.47,-0.37]	(-5.34,-0.51]	(-6.71,-1.18]	(-4.99,-0.34]	(-5.22,-0.83]	(-4.24,-0.37]

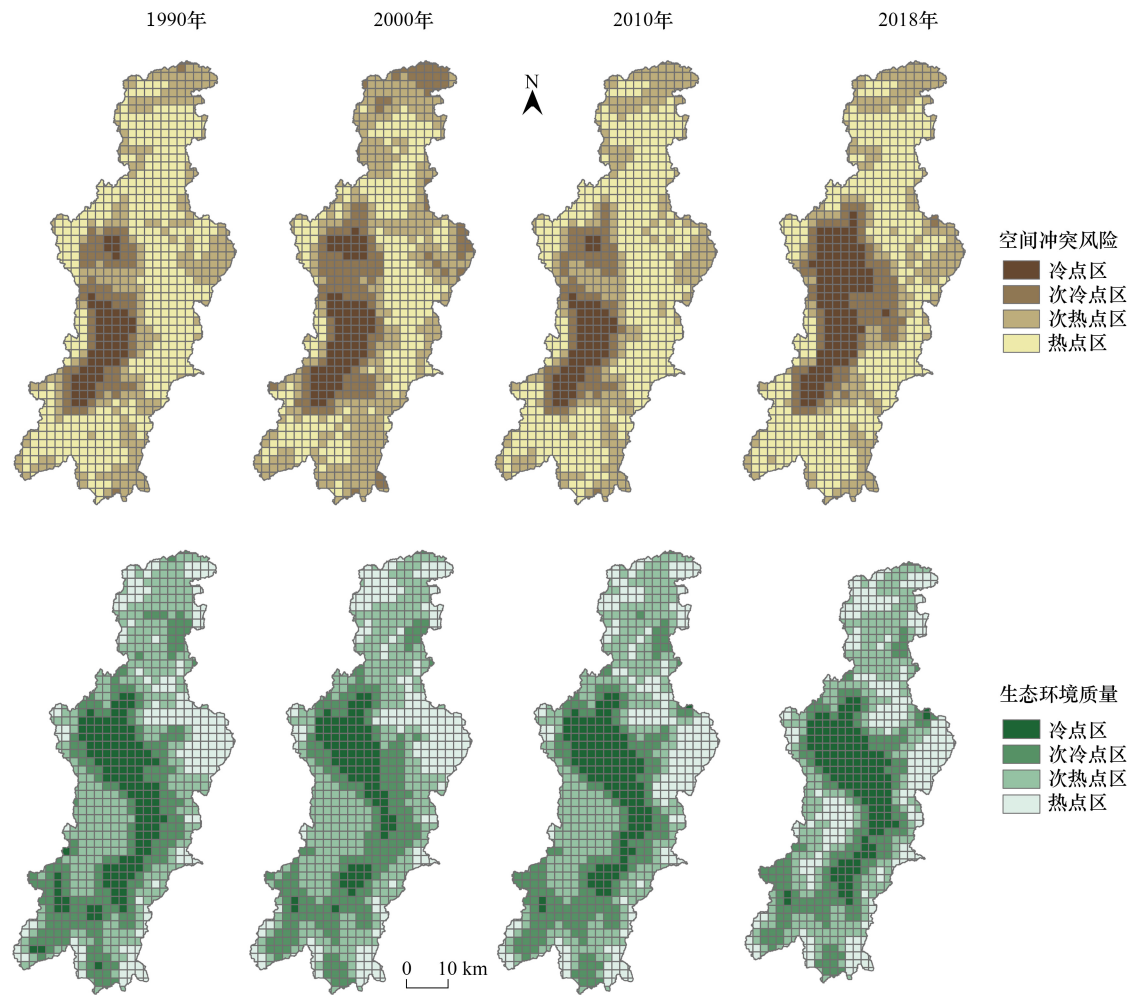


图9 1990—2018年滇池流域三生空间冲突风险和生态环境质量冷热点区

Fig.9 Cold-hot spot between spatial conflict and eco-environmental quality in Dianchi Lake Basin from 1990 to 2018

表6 滇池流域风险-质量生态分区

Table 6 Comprehensive risk-quality eco-environmental zones in the Dianchi Lake Basin

象限 Quadrant	分区 Zones	特征 Features
象限 I Quadrant I	综合生态环境良好区	集中分布于以林、草地生态空间为主的城市外围,城市扩张风险大,呈现出强冲突-高质量的特征
象限 II Quadrant II	综合生态环境优质区	集中分布于滇池水域生态空间,空间类型单一,表现为弱冲突-高质量的特征
象限 III Quadrant III	综合生态环境劣质区	集中分布于滇池沿岸的城镇生活空间,空间类型较为单一,表现为弱冲突-低质量特征,且分布与城市扩张方向一致,面积增加迅速
象限 IV Quadrant IV	综合生态环境一般区	主要分布于滇池沿岸的农业生产空间、农村生活空间,随着城镇化步伐加快,空间转化剧烈,呈现出强冲突-低质量的特征,且面积随着城镇生活空间增加而不断缩小

2.5 滇池流域风险-质量综合生态环境分区管理建议

湖城”关系一直是高原湖泊型城市发展不可避免的难题^[41]。随着高原湖泊流域城镇化进程的加快,流域生活空间不断扩张,侵占了生产和生态空间,三生空间冲突显著,重塑城镇发展与湖泊保护和谐关系,对流域可持续发展至关重要。因此,本研究通过分别计算流域三生空间冲突风险及生态环境质量,基于热点分析的四象限模型,划分出的风险-质量综合生态环境区,以此表征土地利用主功能快速变化下的高原湖泊流域生态

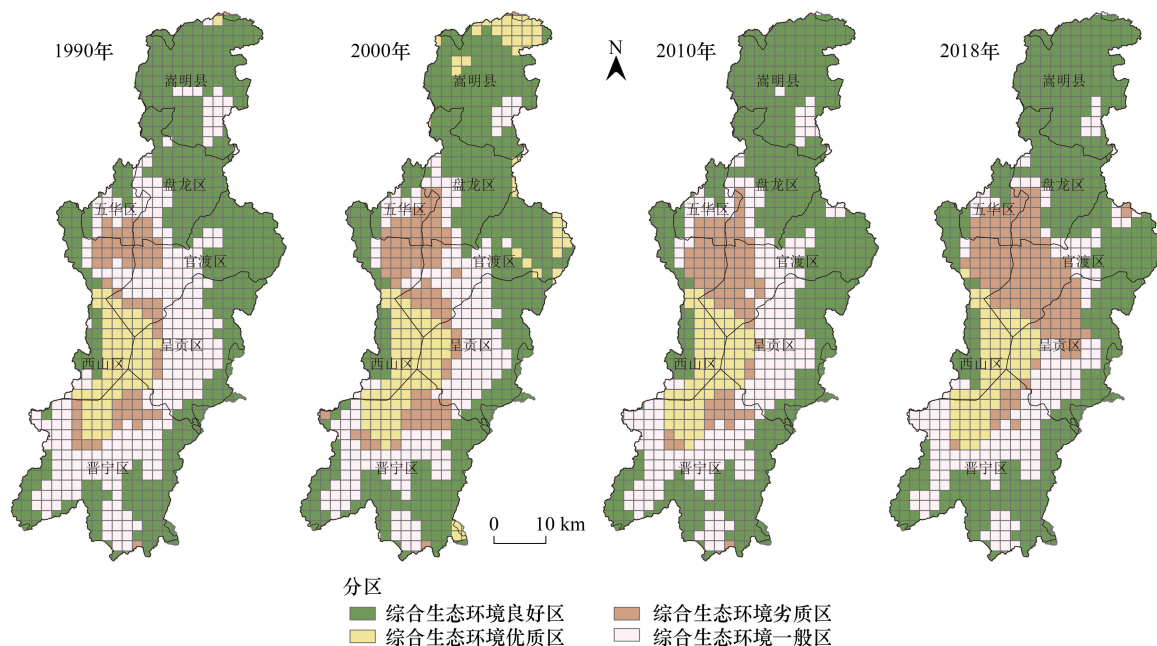


图 10 滇池流域风险-质量综合生态环境区

Fig.10 Distribution between spatial conflict and eco-environmental quality in Dianchi Lake Basin

环境变化特征,并为针对性地提出分区管控建议奠定了良好的基础:

①象限 I 为综合生态环境良好区。大面积分布以林、草地生态空间为主的城市外围,城市扩张风险大,需要警惕城镇生活空间快速扩张带来的生态环境问题,严控高原湖泊流域需开发强度,因地制宜地挖掘生态空间的游憩、教育、康养等福祉,提高生态涵养功能,合理开发利用生态资源,完善生态补偿机制,维护好流域生产-生活-生态空间的动态平衡,协调好经济发展与环境保护之间的矛盾。

②象限 II 为综合生态环境优质区。主要是滇池水域生态空间,生态环境质量高,需要坚决做好生态保护工作,禁止开展与生态保护无关的建设活动,要结合当前滇池流域生态廊道线和环湖公路线“两线”方案的具体要求,以生态修复为重点,不断提升生态环境质量,保证生态资源持续好转,为流域发展留下生态缓冲空间;同时,要及时吸取在滇池流域长腰山生态越红线开发房产的经验教训,坚决摒弃“环湖造城”污染水域的错误思维,为流域发展留下生态缓冲空间,切忌因经济发展需要进行围湖造田,肆意扩张生活、生产空间。

③象限 III 为综合生态环境劣质区。主要分布于滇池沿岸城镇生活空间,城镇生活空间的大面积增加以及城镇规模粗放扩张使得生态环境质量降低明显,需要科学合理布局城市发展格局,避免城市无序扩张反噬城市发展质量,合理规划城镇生活空间发展方向、速度以及规模,同时通过建设城市绿地等方式缓解城镇生活空间的生态环境压力,创造宜居的高原湖泊流域城镇生活空间。

④象限 IV 为综合生态环境一般区。主要是滇池沿岸大面积的农业生产空间、农村生活空间,随着农村城镇化步伐加快,三生空间转化剧烈,面临着转变为劣质区的风险。农村空间转变为城镇空间的过程中,需要引入城市和农村规划保护的相关概念,按照耕地、永久基本农田、生态保护红线、城镇开发边界的顺序,统筹划定落实三条控制线,突出环境基础设施建设,高质量推动农村城镇化。

3 讨论

本研究从“三生空间”视角揭示了滇池流域三生空间变化、三生空间冲突以及生态环境质量特征,并借助多要素生态分区以实现流域三生空间格局优化思路,尝试基于热点分析的四象限模型,构建了流域风险-质量综合生态环境区,将三生空间冲突风险与生态环境质量有效关联,丰富了相关研究内容。作为人类活动系统

与自然生态系统交互作用最为强烈和复杂的地区之一,从流域系统角度探讨三生空间冲突风险与生态环境质量关联性,开展生态分区构建,既能实现三生空间冲突风险及生态环境质量的要素整合,又能为构建可持续国土空间开发保护格局提供理论依据。

目前大部分研究逐渐强调以多要素综合解析人地关系内在互动机制,聚焦于生态风险与生态系统服务^[23]、生态系统服务供需^[42]、生境质量与人类活动^[24]等不同方面,尝试在解析二者关联性的基础上以划定生态分区的方式,综合表达了区域生态环境变化特征,成为了落实区域生态环境保护、改善研究区生态环境、推动生态系统良性循环的重要出口^[23-24,42]。区域生态环境变化是诸要素综合作用结果^[43],受到快速城镇化建设的影响,滇池流域生产、生活以及生态空间随着发展需要不断转化,由于流域地形限制,平坦开阔的地区往往会被城市发展建设所占据,随着城市发展外扩明显,流域城镇生活空间实现了剧烈、快速以及填充式增长特征,形成“块”状集中分布于滇池沿岸。在研究期间,滇池沿岸逐渐由强空间冲突逐渐变为弱空间冲突,弱空间冲突面积占比增加,在空间上以单一城镇生活空间为表征,由于城镇生活空间不断增加且趋于稳定,人口密度以及交通、社会经济得到快速发展,人类活动干扰加剧,随之造成生态环境质量降低。这是由于单一城镇生活空间“蔓延式”、“内填式”集聚分布引起的,生产及生态空间逐渐被单一的城镇生活空间占据,而城镇生活空间一旦形成稳定的分布格局一般在城镇化推进过程中难以被其他空间所替代,因此“弱冲突、低质量”为特征的综合生态环境劣质区成为了滇池沿岸一种特殊的生态环境表征。随着城镇化推进,劣质区范围不断扩大,因此急需把握流域整体情况,对该类区域施行调节与补偿,避免流域三生空间走向失衡。再者,伴随着农村城镇化步伐加快,滇池沿岸的农村生产、生活空间与林、草地生态空间、城镇生活空间的转化加剧,激烈的空间冲突往往伴随着生态用地的流失、环境质量和生态系统健康的恶化,造成较高的生态风险,而这类区域同时也是受到人类活动破坏及干扰的地区,生态环境质量自然受到影响,但由于城镇发展尚未将流域农村生活、生产空间完全占据,因此需要警惕“一般区”转化为“劣质区”的风险。此外,滇池湖泊流域水域生态空间面积大,空间格局变化稳定,表现为弱空间冲突和高生态环境质量,未来需严格控制生态底线,避免围湖造田等恶意破坏生态空间稳定的行为。流域整体林、草地生态空间占比面积大,承担着重要的生态功能,提供了生态环境本底支撑,虽集中分布与流域外围,但生态脆弱性强,容易被城镇化发展过程中的生产以及生活空间侵占,空间冲突风险高,生态环境质量好,需着重关注空间冲突风险变化情况,警惕林、草地生态空间被侵占,转化为生活以及生产空间,发挥好生态空间的重要生态环境改善作用,贯彻“绿色发展,生态保护”,协调好流域生产、生活以及生态空间,实现三生空间格局优化,创造宜居、宜业、美丽空间格局,是下一步流域在推进城镇化进程中亟待关注的重要方面。

研究面向流域三生空间协调发展,构建优化协调的流域三生空间,将三生空间风险与生态环境质量通过构建生态分区方式实现有效整合,可直观反映出流域生态系统稳定性和生态环境变化特征,透过综合生态环境区划定,为流域后续生态修复生态保护提供必要参考。三生空间转型过程中往往会引发不同空间的竞争与博弈,空间冲突属于客观现象伴随着区域发展,但空间冲突往往会带来一系列负面效应,衍生出一系列涉及权益、资源、空间多个维度的“土地利用空间冲突”问题^[44],挤压生态空间带来的生态环境压力。当前研究多是从整体综合性视角评价地区土地利用冲突或是三生空间冲突,并划分不同冲突分区,较少涉及到与其他要素关联分析,由于三生空间转型过程中,空间之间存在密切的互动关系,因此有必要顾及三生空间冲突风险,并与生态环境质量实现多要素综合,划定生态分区,以此深入表征地区三生空间的环境变化,为实现三生空间动态平衡,打造健康生态空间,高效生产空间以及宜居生活空间提供思路。但目前还存在以下不足:尝试运用生态分区方式,将三生空间冲突风险及生态环境质量实现有效关联,可全面综合表征了地区由于三生空间转型过程下的生态环境变化情况,但二者之间的互动反馈机制尚不明确,未来需尝试进一步解析不同分区三生空间互动关系及引发的生态环境变化的驱动因素,为建设协调集约的流域三生空间,满足流域生产、生活需求下,建设对于生态空间的扰动,为三生空间的利用管控及合理布局提供理论支撑,并为地区可持续发展提供科学依据。此外,对于生态分区构建应逐渐从单一要素评价的固化观念中跳脱出来^[22],并在研究思路进一步强

调综合系统性,以及在研究方法上进一步突出学科融合性,结合多视角,以多视角、多要素、多方法、多尺度开展生态分区综合划分可实现综合全面表征地区生态环境变化,为地区可持续发展提供决策依据。

4 结论

本研究以城镇化进程加快、三生空间类型转换明显、人地关系冲突明显的典型高原湖泊流域——滇池流域为例,顾及流域三生空间冲突风险,尝试引入四象限模型,结合热点分析,划分风险-质量综合生态环境区,全面综合反映了流域生态环境变化特征,结论如下:

(1) 1990—2018 年滇池流域三生空间转换剧烈。城镇生活空间急速增加,挤占了农业生产空间、生态空间,三生空间冲突显著,以较强冲突为主,冲突曲线指数呈现倒“U”型。随着城镇生活空间连片增长,弱空间冲突面积不断扩大,给流域生态保护造成巨大压力。

(2) 1990—2018 年滇池流域三生空间生态环境质量呈下降趋势,城镇生活空间过快增长使得较低、低生态环境质量区面积增加迅速,生态环境质量由流域中心向四周呈现高-低-高的空间分布特征。低质量区和较低质量区面积增长显著,约占流域总面积的 1/3。

(3) 滇池流域风险-质量综合生态环境区分为综合生态环境优质区、良好区、一般区、劣质区四类,四类区域空间连续性较好,以综合生态环境良好区为主,但劣质区面积不断扩大,即以弱空间冲突风险和低生态环境质量为表征的综合生态环境劣质区由强空间冲突风险和低生态环境质量的综合生态环境质量一般区面积转化明显,今后需重点关注流域综合生态环境向差发展的区域,避免其进一步恶化。

参考文献 (References):

- [1] 段亚明, 黄安, 卢龙辉, 冀正欣, 许月卿. “生产-生活-生态”空间的概念与理论研究. 中国农业大学学报, 2023, 28(4): 170-182.
- [2] Fu J Y, Bu Z Q, Jiang D, Lin G, Li X. Sustainable land use diagnosis based on the perspective of production-living-ecological spaces in China. Land Use Policy, 2022, 122: 106386.
- [3] 江东, 林刚, 付晶莹. “三生空间”统筹的科学基础与优化途径探析. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1085-1101.
- [4] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展. 地理科学进展, 2017, 36(3): 378-391.
- [5] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 罗娅, 周旭, 赵海根. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. 地理学报, 2014, 69(1): 54-63.
- [6] 阮松涛, 吴克宁. 城镇化进程中土地利用冲突及其缓解机制研究——基于非合作博弈的视角. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(S2): 388-392.
- [7] 高彬媛, 李琛, 吴映梅, 郑可君, 武燕. 川滇生态屏障区景观生态风险评价及影响因素. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1603-1613.
- [8] 刘巧芹, 赵华甫, 吴克宁, 于潇, 张清军. 基于用地竞争力的潜在土地利用冲突识别研究——以北京大兴区为例. 资源科学, 2014, 36(8): 1579-1589.
- [9] Bao W K, Yang Y Y, Zou L L. How to reconcile land use conflicts in mega urban agglomeration? A scenario-based study in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Journal of Environmental Management, 2021, 296: 113168.
- [10] 邹利林, 刘彦随, 王永生. 中国土地利用冲突研究进展. 地理科学进展, 2020, 39(2): 298-309.
- [11] 杨永芳, 朱连奇. 土地利用冲突的理论及诊断方法. 资源科学, 2012, 34(6): 1134-1141.
- [12] 蒙古军, 江颂, 拉巴卓玛, 张维佳. 基于景观格局的黑河中游土地利用冲突时空分析. 地理科学, 2020, 40(9): 1553-1562.
- [13] Jiang S, Meng J J, Zhu L K, Cheng H R. Spatial-temporal pattern of land use conflict in China and its multilevel driving mechanisms. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149697.
- [14] 梁国付, 丁彦彦. 气候和土地利用变化对径流变化影响研究——以伊洛河流域伊河上游地区为例. 地理科学, 2012, 32(5): 635-640.
- [15] 陈清飞, 陈安强, 叶远行, 闵金恒, 张丹. 滇池流域土地利用变化对地下水水质的影响. 中国环境科学, 2023, 43(1): 301-310.
- [16] 滕雅丽, 谢苗苗, 王回苗, 陈燕, 李峰. 资源型城市土地利用转型及其对生境质量的影响——以乌海市为例. 生态学报, 2022, 42(19): 7941-7951.
- [17] 杨清可, 段学军, 王磊, 金志丰. 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应——以长江三角洲核心区为例. 地理科学, 2018, 38(1): 97-106.
- [18] 彭建, 王仰麟, 张源, 李卫锋, 吴健生, 陈大为. 滇西北生态脆弱区土地利用变化及其生态效应——以云南省永胜县为例. 地理学报, 2018, 43(1): 1-12.

- 2004, 59(4): 629-638.
- [19] Liu Y, Huang X J, Yang H, Zhong T Y. Environmental effects of land-use/cover change caused by urbanization and policies in Southwest China Karst area-A case study of Guiyang. *Habitat International*, 2014, 44: 339-348.
- [20] 甄江红, 王亚丰, 田圆圆, 何孙鹏, 王金礼. 城市空间扩展的生态环境效应研究——以内蒙古呼和浩特市为例. *地理研究*, 2019, 38(5): 1080-1091.
- [21] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 冉端, 杨斌. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理. *地理研究*, 2019, 38(9): 2173-2187.
- [22] Liu Y X, Zhao M Y. Linking ecosystem service supply and demand to landscape ecological risk for adaptive management: the Qinghai-Tibet Plateau case. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109796.
- [23] 谢丽霞, 白永平, 车磊, 乔富伟, 孙帅帅, 杨雪获. 基于价值—风险的黄河上游生态功能区生态分区建设. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 196-207.
- [24] 王子尧, 黄楚梨, 李惊, 林簪. 耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估——以博尔塔拉蒙古自治州为例. *生态学报*, 2022, 42(14): 5789-5798.
- [25] 陆文涛, 代超, 郭怀成. 基于 Dyna-CLUE 模型的滇池流域土地利用情景设计与模拟. *地理研究*, 2015, 34(9): 1619-1629.
- [26] 朱泓, 王金亮, 程峰, 邓欢, 张恩伟, 李应鑫. 滇中湖泊流域生态环境质量监测与评价. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1289-1297.
- [27] 孔冬艳, 陈会广, 吴孔森. 中国“三生空间”演变特征、生态环境效应及其影响因素. *自然资源学报*, 2021, 36(5): 1116-1135.
- [28] 周德, 徐建春, 王莉. 环杭州湾城市群土地利用的空间冲突与复杂性. *地理研究*, 2015, 34(9): 1630-1642.
- [29] Zuo Q, Zhou Y, Wang L, Li, Q, Liu, J. Impacts of future land use changes on land use conflicts based on multiple scenarios in the central mountain region, China. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108743.
- [30] 张潇, 谷人旭. 土地利用冲突的时空格局刻画与多情景模拟研究——以长江三角洲城市群为例. *地理研究*, 2022, 41(5): 1311-1326.
- [31] 樊凯, 张建生, 裴文娟, 杨苍玲, 陈运春, 余建新, 曾维军. 云南省三大高原湖泊流域土地利用景观格局及其稳定性分析. *西南农业学报*, 2018, 31(8): 1706-1711.
- [32] 赵旭, 汤峰, 张蓬涛, 胡波洋, 徐磊. 基于 CLUE-S 模型的县域生产-生活-生态空间冲突动态模拟及特征分析. *生态学报*, 2019, 39(16): 5897-5908.
- [33] 李晓文, 方创琳, 黄金川, 毛汉英. 西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应——以甘肃河西地区为例. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 280-290, 348.
- [34] 叶晶萍, 刘士余, 盛菲, 刘政, 杨敏, 李俊. 寻乌水流域景观格局演变及其生态环境效应. *生态学报*, 2020, 40(14): 4737-4748.
- [35] 王永洵, 王亚飞, 张静文, 王强. 海岸带土地利用转型及其生态环境效应——以福建海岸带为例. *环境科学学报*, 2021, 41(10): 3927-3937.
- [36] 谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析. *生态学报*, 2008, 28(10): 5020-5026.
- [37] 马守臣, 谢放放, 丁翠, 张合兵. 基于四象限模型煤粮复合区景观生态质量时空变化及影响因素. *农业工程学报*, 2020, 36(4): 259-268, 323.
- [38] 刘永婷, 杨钊, 徐光来, 杨强强, 刘世杰, 何开玲. 基于四象限模型的生态系统服务与人类活动强度关联性分析——以皖南国际旅游文化示范区为例. *生态学报*, 2022, 42(13): 5200-5210.
- [39] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 李苑菱, 杨琦, 陈小花. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析. *生态学报*, 2019, 39(7): 2366-2377.
- [40] 王钊, 杨山. 多中心城市区域城市蔓延冷点格局及演化——以苏锡常地区为例. *经济地理*, 2015, 35(7): 59-65.
- [41] 赵筱青, 李思楠, 谭琨, 苗培培, 普军伟, 卢飞飞, 王茜. 城镇-农业-生态协调的高原湖泊流域土地利用优化. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 296-307, 336.
- [42] 彭建, 杨畅, 谢盼, 刘焱序. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. *生态学报*, 2017, 37(13): 4562-4572.
- [43] Long H L. Land use policy in China: introduction. *Land Use Policy*, 2014, 40: 1-5.
- [44] 彭佳捷, 周国华, 唐承丽, 贺艳华. 基于生态安全的快速城市化地区空间冲突测度——以长株潭城市群为例. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1507-1519.