引文格式：冯达,段亚锋. 浏阳河流域土地利用与水质的相关性研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 32-37. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.11.006

浏阳河流域土地利用与水质的相关性研究

冯　达[1]，段亚锋[2*]
（1. 湖南省测绘科技研究所，湖南 长沙 410007；2. 湖南省长沙生态环境监测中心，湖南 长沙 410001）

摘　要：为评估浏阳河近20年的水质变化情况，研究其与流域土地利用变化之间的关系，选取浏阳河8个典型断面，对其1996—2020年水质监测数据进行综合分析，并在此基础上结合遥感数据，探讨了浏阳河水质与土地利用变化之间的相关性。结果表明：①1996—2020年浏阳河水质总体向好；②2000—2020年浏阳河流域城乡用地面积明显增长，主要来源于林地和耕地，其中2010—2020年的土地利用变化更大；③随着污水管网的不断完善、污染物治理技术水平的提升和相关环境保护政策的出台，城乡用地集中区域水质改善趋势明显，而在人类活动不集中的近郊林地，水质问题凸显。

关键词：浏阳河；水质；土地利用构成；相关性
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0032-06

Research on Correlation Between Water Quality and Land-use Change in Liuyang River Basin

FENG Da[1], DUAN Yafeng[2]
(1. The Surveying and Mapping Research Bureau, Changsha 410007, China;
2. Changsha Environmental Monitoring Center of Hunan Province, Changsha 410001, China)

Abstract: To evaluate the water quality changes of Liuyang River in the past 20 years and study its correlation with land-use changes in the watershed, we selected 8 typical sections, and analyzed their water quality monitoring data from 1996 to 2020. On the basis of this, combined with remote sensing data, we explored the correlation between water quality and land-use change. The results showed that ①from 1996 to 2020, the water quality of Liuyang River improved. ②From 2000 to 2020, the urban and rural land-use area of Liuyang River basin significant increased, with the increase mainly coming from forest and cultivated land. Among them, the land-use change from 2010 to 2020 was greater. ③The trend of improving water quality is obvious in urban and rural land-use areas, while in suburban forests where human activities are not concentrated, water quality issues are prominent.

Key words: Liuyang River, water quality, land-use composition, correlation

浏阳河是湘江的一级支流，主要位于长沙市内，以其逶迤秀美闻名于世[1]。20世纪80年代以来，城镇化进程的加速推进与土地资源过度开发使得浏阳河流域生态结构受损、流域生态功能退化严重，极大地影响了该区域经济的可持续发展[2]。随着水工程事业的迅速发展以及人们对生态可持续性发展理念的逐渐理解与认同，人们对水质的要求和环境保护意识不断提高[3-5]。然而，在经济建设快速发展的背景下，作为贯穿长沙市整个湘江以东区域、城区污水处理厂主要受纳水体、最终注入湘江的浏阳河仍然面临污染物种类复杂、水环境容量有限、水环境治理压力大等问题。

针对流域水质评价及其对土地利用/覆被类型的响应问题，国内外学者开展了相关研究，如Cui H[6]等以博斯腾河流域为研究对象，根据ArcGIS和ENVI制作的2000—2013年土地利用/覆盖变化（LUCC）图分析了1993—2013年该流域土地利用动态变化特征，结果表明污染与耕地和工矿区呈正相关，与水域和草地呈负相关；Liu Q[7]等采用GIS空间处理方法和水文方法分析了土地利用变化对水量和水质的影响，结果表明辽河中下游地区土地利用和林地变化导致不同林地类型下蒸发量的变化，从而进一步改变了流域的径流产生；Yang L[8]等利用SWAT模型诊断了黑河流域气候因素和LUCC对水文过程的影响，结果表明气候因素对黑河上游水文过程的影响比LUCC更明显。国内对于

收稿日期：2023-06-19。
项目来源：国家自然科学基金联合基金资助项目（U19A2051）；湖南省自然科学基金资助项目（2023JJ60558）。
第一作者简介：冯达（1978—），硕士，高级工程师，主要研究方向为自然资源利用，E-mail：fengda2000@126.com。
通信作者：段亚锋（1979—），博士，高级工程师，主要研究方向为资源利用与环境保护，E-mail：206511@qq.com。

水资源质量评价的研究开展得较晚，如刘超[9]等利用Landsat遥感影像数据解译分类了景观类型，分析了2008—2018年洪泽湖16个监测点位水质数据变化特征，从流域尺度研究了景观类型和景观格局演变对湖区水质的影响机制；朱珍香[10]等基于河流水质观测数据和Landsat8影像数据分析了厦门后溪2013—2017年干季和湿季的水质时空变化特征，流域景观特征可解释70%以上水质变化，湿季对TN和TP的影响更大；王娟[11]等利用2014年5月和2014年10月实测水样采样点分析了艾比湖区域的pH、电导率、矿化度和全盐的空间变化趋势，结果表明优选拟合模型与数据的拟合程度较好；孙芹芹[12]等利用不同时期的Landsat遥感卫星影像对九龙江下游河段的叶绿素a和悬浮颗粒物浓度进行了年际变化分析和季节变化分析；徐嘉兴[13]等分析了太湖流域近18年的土地利用变化特征，揭示了太湖流域各类土地利用数量和空间变化情况。为评估近20年浏阳河水质的综合状况，结合LUCC遥感数据，本文对1996—2020年浏阳河流域的水环境质量进行综合评价，并分析了水质与土地利用变化的相关性，对于加强和改善浏阳河流域的宏观调控，推进浏阳河流域的水质优化具有重要意义。

1　研究区概况

浏阳河是湘江的一级支流，全长222 km，流域面积为4 665 km^2，主要位于长沙市域内；属亚热带季风气候，流域内多年平均气温为17.3℃；地貌以山地丘陵为主，地势东北高、西南低[14]。20世纪80年代以来，快速的经济和城市化发展导致浏阳河水质恶化，生态功能减退。2008年国家启动“水体污染控制与治理”重大专项，浏阳河作为湘江一级支流开展了一系列水环境治理工作。2019年水利部在全国范围内启动示范河湖建设，浏阳河入围全国17个示范河湖建设名单。

2　数据来源与研究方法

2.1　影像数据采集与处理

本文采用的遥感影像数据来源于自然资源部发布的2020年版GlobeLand30全球30 m分辨率地表覆盖数据。以2000年、2010年和2020年的浏阳河流域土地利用图为数据源，将土地利用类型分为林地、草地、耕地、城乡用地、未利用地和水域6类，进而分析浏阳河流域内土地利用的空间变化情况。

2.2　采样点的数据测定与处理

水质数据为环境监测部门的常规监测数据，综合考虑历史数据的延续性以及点位分布和监测指标的代表性，本文选取黄花洞、株树桥水库、小溪、浏阳三水厂、韩家港、榔梨、黑石渡、三角洲等8个水质监测断面，以1996—2020年19项指标的年均值数据作为分析对象。

2.3　水环境质量评价标准与方法

地表水（河流）水质评价执行GB 3838-2002《地表水环境质量标准》。用于分析测定的评价指标包括化学需氧量、氨氮、高锰酸盐指数、生化需氧量、溶解氧、氟化物、硫化物、氰化物、六价铬、锌、阴离子表面活、镉、汞、挥发酚、铜、铅、砷、石油类和总磷等19项。综合污染状况按照国家生态环境部《环境质量报告书编写技术规定》中推荐的综合评价方法，采用综合污染指数进行评价[15]，黄花洞断面采用Ⅰ类水质评价标准，小溪、株树桥水库、浏阳三水厂断面采用Ⅱ类水质评价标准，韩家港和榔梨断面采用Ⅲ类水质评价标准，黑石渡和三角洲采用Ⅳ类水质评价标准。其计算公式为：

$$P_j=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}P_{ij} \tag{1}$$

$$P_{ij}=\frac{C_{ij}}{C_{i_0}} \tag{2}$$

式中，P_{ij}为断面j污染物i的污染指数；P_j为断面j水污染综合指数；C_{ij}为断面j污染物i的年平均值；C_{i_0}为污染物i的评价标准值。

2.4　Mann-Kendall检验

Mann-Kendall检验是一种应用于环境数据时间序列趋势分析的非参数方法，可判断要素的时间序列中是否存在突变，若存在，可确定突变发生的时间。对于具有n个样本的时间序列X，构造一秩序列：

$$S_k=\sum_{i=0}^{k}r_iC\quad r_i=\begin{cases}1, & x_i<x_j\\ 0, & \text{else}\end{cases} \tag{3}$$

在时间序列随机独立的假设下，定义统计量：

$$UF_k=\frac{S_k-E(S_k)}{\sqrt{\mathrm{Var}(S_k)}}\quad k=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

式中，$UF_1=0$；$E(S_k)$、$\mathrm{Var}(S_k)$为累计数S_k的均值和方差。

在$x_1,x_2,\cdots,x_n$相互独立，且有相同连续分布时，可表示为：

$$E(S_k)=\frac{k(k-1)}{4} \tag{5}$$

$$\mathrm{Var}(S_k)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \tag{6}$$

按时间序列x逆序$x_n,x_{n-1},\cdots,x_1$，重复上述过

程，同时使 $UB_k=-UF_k$，$k=n,n-1,\cdots,1$，$UB_1=0$。给定显著性水平，如果 $\alpha=0.05$，则临界值为±1.96，绘制 UF_k 和 UB_k 曲线图和±1.96两条直线，若 UF_k 值大于0，则表明序列呈上升趋势；小于0则呈下降趋势。若它们超过临界直线，则表明上升或下降趋势显著，将超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点，且交点在临界线内，则交点对应的时刻即为突变开始的时间。

2.5 斯皮尔曼相关分析

斯皮尔曼相关系数是一个衡量两个变量依赖性的非参数指标，并不假设两个数据集具有相同分布。与其他相关系数一样，该系数的范围为[–1，1]，0表示两个参数没有相关性。若数据中没有重复值，且两个变量完全单调相关，则斯皮尔曼相关系数为+1或–1。当 X 增加、Y 趋向于增加时，斯皮尔曼相关系数为正；反之，当 X 增加、Y 趋向于减少时，斯皮尔曼相关系数为负。斯皮尔曼相关系数被定义为等级变量之间的皮尔逊相关系数，对于样本容量为 n 的样本，n 个原始数据被转换为登记数据，则相关系数为：

$$\rho=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{7}$$

3 研究结果与分析

3.1 水质综合污染指数变化

水质综合污染指数通过统计各污染指标的相对污染指数，得出代表水体污染程度的数值，用以确定主要污染物和污染程度，反映多个水质参数与相应标准之间的综合对应关系。1996—2020年研究区各断面水质综合污染指数见图1。从时间维度来看，各断面综合污染指数呈下降趋势，水质向好；2009年之前水质污染指数总体偏高，波动幅度较大，2009年之后水质污染指数明显下降，波动幅度缩小。根据Mann–Kendall检验分析（图2），各断面综合污染指数发生突变的时间在2009—2014年之间，与国家水体污染控制与治理专项和长沙市两次环境保护3年行动计划时间吻合。研究时段内水质综合污染指数最大值与最小值之差为其变化幅度。从断面的空间位置来看，水体功能类别较高的上游和中游断面综合污染指数变化幅度更大，变化幅度排序为小溪（0.57）>韩家港（0.45）>浏阳三水厂（0.31）>黄花洞（0.25）>黑石渡（0.21）>三角洲（0.13）>榔梨（0.12）>株树桥水库（0.06，缺2010年之前的监测数据）。最高值出现在2000年的小溪断面，次高值出现在2004年和2006年的韩家港断面，结合污染指标数据可知，其主要原因在于铅（2000年小溪断面超标4.2倍）和挥发酚（2004年、2006年韩家港断面分别超标4.8、5.4倍）超标。

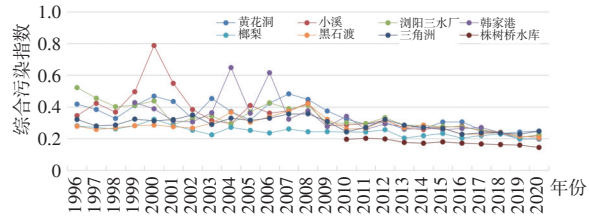


图1 1996—2020年各断面水质综合污染指数

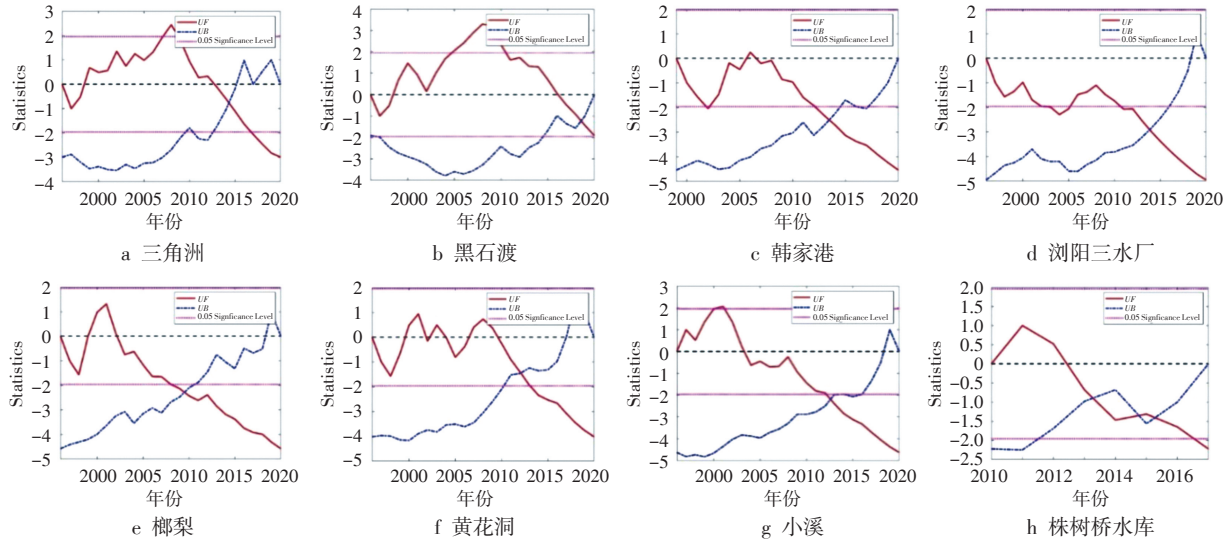


图2 M–K突变检验图

3.2　土地利用结构特征

LUCC动态演变是人与自然共同作用的结果，表现为土地利用类型在时间或空间上的不断变化[15]。流域范围内的土地利用变化在一定程度上影响了水质的变化。由图3可知，研究区面积最大的地类为林地，约占流域总面积的70%，2000—2020年城乡用地面积明显增加，增加区域主要集中在浏阳河下游，中游韩家港断面及以上沿河岸周边也有较明显的增加。利用ArcGIS10.3软件计算得到2000—2010年和2010—2020年的土地转移矩阵，结果见表1、2。

表1　2000—2010年土地利用转移矩阵/km²

2000年土地利用类型	2010年土地利用类型					
	耕地	林地	草地	未利用地	水域	城乡用地
耕地	888.864 6	1.591 9	0.163 2	0	11.802 7	57.953 9
林地	0.761 0	3 375.814 8	0.348 6	0.000 1	0.709 7	0.213 8
草地	0.119 5	0.380 9	304.979 4	0	0.021 3	0.026 4
未利用地	0	0.017 0	0	0.176 4	0.116 9	0
水域	5.103 7	7.389 4	1.662 6	0.001 2	35.894 2	2.384 7
城乡用地	8.727 6	12.456 8	1.566 1	0	1.396 4	141.417 5

表2　2010—2020年土地利用转移矩阵/km²

2010年土地利用类型	2020年土地利用类型					
	耕地	林地	草地	未利用地	水域	城乡用地
耕地	622.790 1	133.576 3	23.017 3	0.252 5	8.512 0	115.259 2
林地	175.158 7	3 005.251 2	89.708 5	0.007 8	15.200 4	111.351 7
草地	44.600 2	75.416 1	146.244 5	0.002 6	2.424 0	39.950 0
未利用地	0	0	0	0.001 9	0.175 3	0
水域	1.164 6	3.071 3	0.196 7	0.000 3	41.541 5	3.938 6
城乡用地	1.878 3	1.461 9	1.195 9	0	2.250 5	195.193 5

通过分析2000年、2010年和2020年的土地利用情况，绘制不同土地利用类型的变化分析图（图3），结果表明，2010—2020年土地利用类型变化面积比2000—2010年大，变化主要发生在耕地、林地和城乡用地之间。20年间面积增加的地类为城乡用地和水域，其他地类面积有不同程度的减少。面积减少的地类按绝对面积从大到小依次为林地、耕地、草地和未利用地，按变化比例从大到小依次为未利用地、草地、耕地和林地。2000—2010年各地类相互转换，但仍以原有类型构成该类主体，其中水域和城乡用地的原有类型占该类总面积的70%以上，其他地类占98%以上；2010—2020年各地类相互转换幅度明显增大，除林地（约93%）和耕地（约74%）的原有类型仍为该类的绝对主体外，其他地类原有类型面积占比均在60%以下，其中95%以上的未利用地来自耕地，50%以上的城乡用地来自耕地和林地。

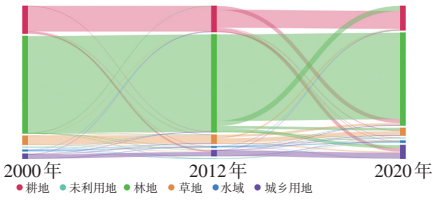


图3　土地转移桑基图

3.3　水环境质量对LUCC的响应

土地利用结构与景观格局对水质的影响具有尺度效应[16-17]。不同尺度的景观格局指数与水质的相关性存在差异，参考胡琳[18]等的研究成果，本文选取以监测点为圆心2 000 m范围的河岸区域作为缓冲区，利用ArcGIS10.3软件进行缓冲区分析，再利用GIS强大的空间分析功能和地图表达能力快速、直观地获取分析结果。在河岸缓冲区域，林地、耕地为主要土地利用类型。为探究LUCC对水质综合污染指数的影响，本文利用斯皮尔曼相关系数分析了河岸区域土地利用类型面积变化与水质污染指数之间的相关关系，初步研究了1996—2020年浏阳河流域综合水质变化与LUCC之间的交互效应，结果见表3。不同地类之间的相关性主要表现为林地与水域呈负相关关系、林地与城乡用地呈负相关关系、未利用地与水域呈正相关关系。从相关性分析数据来看，水质综合污染指数主要与水域、林地和城乡用地相关。水质综合污染指数与水域面积呈负相关关系，一方面水域面积是反映水环境容量的重要指标，通常水域面积越大、水环境容量越大，有利于稳定和改善水体质量；另一方面在缓冲区内水域面积大意味着居民生产生活用地面积较小，人类对河流水质的直接干扰较小，对于研究时段内受

人类影响较明显的浏阳河而言，人类干扰的减少有利于水质改善。水质综合污染指数与城乡用地呈负相关关系，在以往的研究中城乡面积的增加往往对应着水体质量的恶化[19-20]，而浏阳河流域的情况则有所不同，一方面随着耕地面积的减少，农业面源污染对水体质量影响减少；另一方面随着浏阳城市污水管网的不断完善、污水处理设施的升级、农村环境综合整治的不断深化，LUCC与水质综合污染指数的响应关系发生变化，城乡用地面积的增加不再必然导致水质变差，城乡面积较大的区域综合污染指数反而较低。水质综合污染指数与林地呈正相关关系，除工业、农业生产和居民生活外，浏阳河流域围绕林业资源还存在一定规模的旅游开发。由于区域内原住民数量较多且分布分散、旅游业开发不够成熟等原因，导致与城乡发展扩展区域空间距离较远的林地区域环境保护监管难度较大，出现了基于水体功能的水质下降[21-22]。

表3 LUCC与水质综合污染指数之间的相关性分析

	耕地	林地	草地	未利用地	水域	城乡用地	污染指数
耕地	1	−0.031	0.146	−0.415*	−0.081	−0.039	0.157
林地	−0.031	1	0.407*	−0.34	−0.880**	−0.951**	0.424*
草地	0.146	0.407*	1	0.039	−0.199	−0.422*	0.079
未利用地	−0.415*	−0.34	0.039	1	0.610**	0.397*	−0.077
水域	−0.081	−0.880**	−0.199	0.610**	1	0.852**	−0.446*
城乡用地	−0.039	−0.951**	−0.422*	0.397*	0.852**	1	−0.443*

注：*表示在0.05级别（单尾），相关性显著；**表示在0.01级别（单尾），相关性显著。

4 结 语

本文选取浏阳河8个监测断面，利用近20年的水质监测结果计算得到综合污染指数；再结合2000年、2010年和2020年3期LUCC遥感数据源，分析了LUCC对水质变化的影响。结果表明：①2000—2020年浏阳河水质的污染程度总体呈缓解趋势，水质向好；②2000—2020年浏阳河流域城乡用地面积明显增长，增长部分主要来源于林地和耕地，其中2010—2020年的土地利用变化更大；③浏阳河水体质量与LUCC之间表现出新的响应关系，即水质综合污染指数与监测点河岸区域城乡用地面积呈负相关关系、与林地面积呈正相关关系。人与自然和谐相处意识的不断增强、污染物治理技术的提高以及相关环境保护政策的出台，使人类活动集聚的城乡区域水质改善趋势明显；而在人类活动不集中的近郊林地，由于监管难度大，非集中式排放影响凸显，反而呈现水质恶化趋势。本文的不足之处在于，LUCC对水质的影响是直观的表现形式，其根本原因还应考虑政策、人口、污染物排放、治理措施等因素，在后续研究中可综合考虑这些因素的影响，以期全面、精准地分析不同因素对浏阳河水质的影响。

参考文献

[1] 杨涛. 浏阳河流域水环境质量现状与思考:以浏阳段为例[J]. 湖南农业科学,2017(9):49-52

[2] 唐根. 浏阳河河长制实施情况遥感监测[J]. 新型工业化,2021,11(4):207-210

[3] 应晗婷,夏凯. 基于无人机多光谱遥感的水质年际变化[J]. 浙江农业科学,2021,62(8):1 633-1 637

[4] Su P W,Lo S L. Using Landsat8 Imagery for Remote Monitoring of Total Phosphorus as a Water Quality Parameter of Irrigation Ponds in Taiwan[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2021,28(47):66 687-66 694

[5] Bourouhou I, Salmoun F. Sea Water Quality Monitoring Using Remote Sensing Techniques: A Case Study in Tangier-Ksar Sghir Coastline[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2021,193(9):557-569

[6] Cui H,Zhou X D,Guo M J,et al. Land Use Change and Its Effects on Water Quality in Typical Inland Lake of Arid Area in China[J]. Journal of Environmental Biology, 2016, 37(4):603-609

[7] Liu Q, Wang Z J, Peng H, et al. LUCC and Its Impact on Water Enviromnent in Middle and Lower Reaches of Liaohe River[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2004:3 394-3 397

[8] Yang L, Feng Q, Yin Z, et al. Identifying Separate Impacts of Climate and Land Use/Cover Change on Hydrological Processes in Upper Stream of Heihe River, Northwest China[J]. Hydrological Processes,2017,31(5):1 100-1 112

[9] 刘超,王智源,张建华,等. 景观类型与景观格局演变对洪泽湖水质的影响[J]. 环境科学学报,2021,41(8):3 302-3 311

[10] 朱珍香,高肖飞,彭凤,等. 厦门后溪水质与流域景观特征沿城乡梯度的变化分析[J]. 生态学报,2019,39(6):2 021-2 033

[11] 王娟,张飞,张月,等. 艾比湖区域水质空间分布特征及其与土地利用/覆被类型的关系[J]. 生态学报,2016,36(24):

7 971-7 980

[12] 孙芹芹,洪华生. 九龙江下游水质遥感反演及时空变化分析[J]. 地理空间信息,2012,10(4):36-39

[13] 徐嘉兴,王继尧,梁涛,等. 近18年太湖流域土地利用变化及区域差异分析[J]. 地理空间信息,2009,7(4):48-51

[14] 韩英,郑文武,邓美容. 基于GIS的湘江流域生态系统服务价值时空变化及其驱动力分析[J]. 国土与自然资源研究,2021(4):51-57

[15] Ferrara A, Biró M, Malatesta L, et al. Land-use Modifications and Ecological Implications over the Past 160 Years in the Central Apennine Mountains[J]. Landscape Research, 2021,46(7):932-944

[16] Collins K E, Doscher C, Rennie H G, et al. The Effectiveness of Riparian 'Restoration' on Water Quality: A Case Study of Lowland Streams in Canterbury, New Zealand[J]. Restoration Ecology,2013,21(1):40-48

[17] 易帆,陈旻,何晓枫,等. 流域土地利用分析中空间尺度对水质的影响[J]. 中国环境科学,2023,43(8):4 280-4 291

[18] 胡琳,李思悦. 不同空间尺度土地利用结构与景观格局对龙川江流域水质的影响[J]. 生态环境学报,2021,30(7):1 470-1 481

[19] 刘金宝,刘轩,孙增慧,等. 丹江口水库土地利用与水质变化响应关系研究[J]. 遥感技术与应用,2023,38(2):285-296

[20] 裴宇,周旭,蒋啸,等. 基于土地利用和景观格局的高原山区湖库水质变化主要贡献因子分析[J]. 水土保持通报,2022,42(6):247-257

[21] 李国婉,夏兵,隋己元,等. 海绵城市建设对流域海绵体生态水文过程的改善[J]. 生态学报,2022,42(24):10 098-10 110

[22] 黄崇锐. 海绵城市建成区径流污染物输出特征研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2022

(上接第23页)

参考文献

[1] 李德仁,李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. 测绘学报,2015,44(6):591-601

[2] Liu Z, He C, Zhang Q, et al. Extracting the Dynamics of Urban Expansion in China Using DMSP-OLS Nighttime Light Data from 1992 to 2008[J]. Landscape and Urban Planning,2012,106(1):62-72

[3] Zhang Q, Seto K C. Mapping Urbanization Dynamics at Regional and Global Scales Using Multi-temporal DMSP/OLS Nighttime Light Data[J]. Remote Sensing of Environment,2011(115):2 320-2 329

[4] Ma T, Zhou Y, Zhou C, et al. Night-time Light Derived Estimation of Spatio-temporal Characteristics of Urbanization Dynamics Using DMSP/OLS Satellite Data[J]. Remote Sensing of Environment,2015(158):453-464

[5] Lo C P. Modeling the Population of China Using DMSP Operational Linescan System Nighttime Data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,2001,67(9):1 037-1 047

[6] Lo C P. Population Estimation Using Geographically Weighted Regression[J]. GIScience and Remote Sensing, 2008,45(2):131-148

[7] Xie Y, Weng Q, Fu P. Temporal Variations of Artificial Nighttime Lights and Their Implications for Urbanization in the Conterminous United States, 2013-2017[J]. Remote Sensing of Environment,2019(225):160-174

[8] Li X, Xu H M, Chen X L, et al. Potential of NPP-VIIRS Nighttime Light Imagery for Modeling the Regional Economy of China[J]. Remote Sensing,2013(5):3 057-3 081

[9] Wang J, Roudini S, Hyer E J, et al. Detecting Nighttime Fire Combustion Phase by Hybrid Application of Visible and Infrared Radiation from Suomi NPP VIIRS[J]. Remote Sensing of Environment,2020(237):111 466

[10] Bennett M M, Smith L C. Advances in Using Multitemporal Night-time Lights Satellite Imagery to Detect, Estimate, and Monitor Socioeconomic Dynamics[J]. Remote Sensing of Environment,2017(192):176-197

[11] 刘洋. 基于长时序夜光遥感数据的长三角区域GDP预测研究[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(4):128-131

[12] 张雨欣,李熙,宋杨,等. 基于"珞珈一号"夜光遥感影像的粤港澳大湾区城市空间形态分析[J]. 应用科学学报,2020,38(3):466-477

[13] 詹淇雯,刘传立,敖建锋. 夜光遥感视角下的粤港澳大湾区区域发展时空格局演变分析[J]. 遥感信息,2022,37(6):137-144

[14] 徐慧敏,王妍,李熙. 基于夜光遥感的贵州省城市格局变迁研究[J]. 自然杂志,2020,42(2):134-141

[15] 罗虹,赵政权. 基于NPP-VIIRS的云南省城市经济空间格局演变[J]. 地理空间信息,2022,20(1):32-37

[16] 顾倩芸. 长三角地区碳排放时空演变、驱动因素及脱钩分析:基于夜间灯光数据的实证研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2022

[17] 江枫,祝明明,余方正. 夜间灯光影像视角下长三角省际毗邻地带一体化发展[J]. 浙江经济,2020(9):51-53

[18] 李佳雯,王泓,杨元建,等. 基于NPP/VIIS夜间灯光数据的长三角人口空间化研究[C]. 第35届中国气象学会年会S21 卫星气象与生态遥感,合肥,2018