

姜 畅, 刘鸿雁, 陈 竹, 等. 基于 GIS 的红枫湖流域土地利用变化与水质响应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1232–1239.

JIANG Chang, LIU Hong-yan, CHEN Zhu, et al. Response relationship between land-use change and water quality in Hongfeng Lake basin based on GIS[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1232–1239.

基于 GIS 的红枫湖流域土地利用变化与水质响应

姜 畅¹, 刘鸿雁^{1,2*}, 陈 竹², 饶 程¹, 李政道², 杨通铨³, 吴 攀¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 3. 贵阳市两湖一库管理局, 贵州 清镇 551400)

摘 要:为探究红枫湖流域土地利用变化与水质的响应, 利用 ENVI 5.2、ArcGIS 10.2 软件对红枫湖流域 2001、2008 年和 2016 年的 Landsat TM 影像进行解译, 选取监督分类法结合人工修正将研究区分为水域、林地、耕地、草地、建设用地、未利用地 6 个土地类型, 并与水质进行 Spearman 秩相关分析。研究表明, 红枫湖流域以林地和耕地为主, 占总面积的 60% 以上。从 2001 年到 2016 年, 耕地、林地、未利用地均有所减少, 主要流入建设用地和草地, 林地面积减少了 10.68 km², 减幅达 7.30%, 建设用地增加了 11.41 km², 增幅达 36.11%。2001 年水质总体为Ⅲ类, 建设用地与 TP、NH₃-N、COD 呈现明显正相关关系, 表明污染主要来自于工业源和生活源; 2008 年建设用地、耕地与营养指标表现出正相关关系, 但未达到显著水平, 水质总体为Ⅳ类, 水质较差可能是工业源、农业源和生活污染源共同作用的结果; 2016 年耕地与 TP、NH₃-N、COD 和 DO 的相关系数分别达 0.757*、0.750、0.786* 和 -0.847*, 说明在工业污染源和生活污染源得到治理后, 农业面源成为红枫湖流域的主要污染源, 但其排放系数较小, 水质为Ⅱ类, 没有对水质产生较大影响。总体上建设用地和耕地表现为污染“源”的作用, 林地则呈现“汇”的效应。

关键词:红枫湖流域; 土地利用类型; ENVI; ArcGIS; 水质

中图分类号: X592 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)06-1232-08 **doi:** 10.11654/jaes.2017-1598

Response relationship between land-use change and water quality in Hongfeng Lake basin based on GIS

JIANG Chang¹, LIU Hong-yan^{1,2*}, CHEN Zhu², RAO Cheng¹, LI Zheng-dao², YANG Tong-quan³, WU Pan¹

(1. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Guiyang Management Bureau of the two lakes and a reservoir, Qingzhen 551400, China)

Abstract: In order to understand the relationship between land-use change and water quality in the Hongfeng Lake basin, Landsat TM images from 2001, 2008, and 2016 were interpreted using ENVI 5.2 and ArcGIS 10.2. This paper divides the research area into the following: Water, woodland, farmland, grassland, construction land, and unused land. This is done using supervised classification and artificial correction, and the Spearman correlation analysis to evaluate water quality. The results indicate that Hongfeng Lake basin is dominated by woodland and farmland, accounting for more than 60% of the total area. The farmland, woodland and unused land have, over the last 15 years, been converted to construction land and grassland. The decreasing area of the woodland is 10.68 km², or 7.30%, but the increasing area of the construction land is 11.41 km², or 36.11%. The data show that there is an evident positive correlation between the area of the construction land in 2001 and nutrition indexes such as TP, NH₃-N and COD, indicating that the pollutants mainly came from industrial and domestic activities before environmental treatment was carried out. In 2008, the nutrition indexes show a positive correlation with the farmland and the construction land, not reaching a significant level, so the point and non-point source might be resultant of poor water quality. In 2016, the correlation coefficients of the farmland with TP, NH₃-N, COD and DO are 0.757*, 0.750, 0.786* and 0.847* respectively, which indi-

收稿日期: 2017-11-22 录用日期: 2018-01-31

作者简介: 姜 畅(1992—), 男, 重庆荣昌人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染过程与控制。E-mail: 446388571@qq.com

* 通信作者: 刘鸿雁 E-mail: hongyan.L@163.com

基金项目: 贵州省应用基础研究计划重大项目(黔科合 J 重大字[2015]2001); 国家自然科学基金项目(41461097); 贵州省普通高等学校土壤质量安全与水肥调控重点实验室开放基金项目(黔教合 KY 字[2016]001)

Project supported: The Special Program of Applied Basic Research Plan in Guizhou Province (Qian Ke He [2015]2001); The National Natural Science Foundation of China (41461097); The Open Fund Program of the Key Laboratory of Soil Quality Safety and Water Fertilizer Regulation, Colleges and Universities in Guizhou Province (Qian Jiao He [2016]001)

cates that agricultural non-point source pollution is the dominant contributor to Hongfeng Lake basin after controlling industrial and domestic pollution, however there is a relatively small emission coefficient and water quality is only slightly impacted. Conclusively, the construction land and farmland are regarded as "sources", and the woodlands as "sinks".

Keywords: Hongfeng Lake basin; land-use type; ENVI; ArcGIS; water quality

土地利用变化涉及区域人口、资源、环境与发展方面的核心问题。研究表明土地利用变化是影响水质的重要原因^[1],其对流域面源污染的影响是导致水环境恶化的重要因素之一^[2-4]。红枫湖是贵阳市重要的饮用水源保护地,流域土地利用变化与水环境安全密切相关。从1990年起,土地利用变化便成为全世界资源与环境领域的研究热点^[5-6],众多学者利用高光谱遥感、微波遥感、高分辨率影像和多源信息复合、遥感图像自动识别与分类、3S集成等技术^[7],针对不同时空土地利用的变化、特征、趋势开展了大范围的研究工作。

在土地利用对水质影响的研究中,蔡宏等^[8]、Nash等^[9]、曹芳芳等^[10]或通过子流域土地利用类型为分析样本,或以监测断面为中心建立缓冲区等手段从空间上研究不同距离土地利用类型对水质的相关性。郭青海等^[11]、杨峰等^[3]利用多元逐步回归模型分析了土地利用类型与流域湖泊水质间的相关关系,从景观生态学的角度阐述了不同土地利用类型对营养元素输出的源汇作用,对贡献率高的土地利用类型提出了面源污染的分类控制措施。孙金华等^[12]通过子流域归类分析了土地利用空间格局差异对水质的影响,表明土地利用比例结构和分布格局对水质亦具有重要影响。廖建荣^[13]采用冗余分析(RDA)方法揭示土地利用类型与河流水质的空间依赖性。因此,通过量化流域土地利用类型的面积,再与水质进行关联分析是研究土地利用类型与污染物质内在联系的重要手段^[14]。红枫湖是贵阳市的“三大水缸”之一,水质质量直接关乎区域用水安全。近年来已有较多关于红枫湖流域的研究,但流域土地利用变化对水质影响的研究仍鲜有报道。为明确影响水质营养指标的主要土地利用类型,本研究选取红枫湖准保护区流域为研究区,以7个水质监测断面为中心建立缓冲区,采用Spearman秩相关和景观生态学理论探究红枫湖流域15年间土地利用变化与水质的响应。结合研究区实际情况,文章从空间尺度变化的角度出发,以更大的缓冲半径进行了多个连续尺度的研究,分析不同距离的土地利用类型对中心点水质的影响,使分析结果更为可靠。该结果可为流域面源污染的控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

红枫湖流域地处贵州高原中部,长江二级支流猫跳河的上游区,是贵州省最大的高原人工湖泊之一,也是喀斯特高原深谷型湖泊。该流域地处亚热带湿润季风区,海拔1250 m,雨量丰沛,多年平均降水量达1200 mm^[15]。流域位于东经106°19′~106°28′,北纬26°26′~26°35′,流域面积1596 km²^[16],湖域面积57.2 km²,总库容6.01亿m³,湖内小岛零星散布,多已开发为旅游景点。经过60多年的发展,现已发展成为具有饮用水源、工农业用水、旅游、发电等多功能的水库,供水量占贵阳市主城区用水量的70%^[16]。流域内碳酸盐岩在垂直和水平分布上均占有较大的比例,岩溶发育强烈,岩溶地貌成为流域内地貌类型的主要特征。从2003年到2007年红枫湖水质急剧恶化^[16],从Ⅲ类降到劣Ⅴ类,2008年开始经过6年的集中治理后水质逐步好转。

1.2 数据获取

本研究采用条带号与行编号分别为127、42的Landsat TM遥感影像图,结合贵阳市两湖一库管理局提供的地形边界资料得到研究区流域遥感影像图,具体包含2001年Landsat4-5 TM卫星数据(时相4月13日,分辨率30 m)、2008年Landsat4-5 TM卫星数据(时相4月8日,分辨率30 m)、2016年Landsat 8 OLI_TRIS卫星数据(时相2月10日,分辨率30 m)共三期遥感影像作为基础数据,数据来源于中科院遥感所(<http://ids.ceode.ac.cn/>)与地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),研究区域选择为饮用水源保护区,含一级、二级保护区和准保护区。水质监测点选取大坝、腰洞、花鱼洞、后午、偏山寨、三岔河、焦家桥等7个监测断面,时间分别为2001、2008年和2016年,数据来源于贵阳市两湖一库管理局环境监测站。选取总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)4个指标进行分析,监测点分布见图1。

1.3 土地利用类型及水质划分

参照土地利用类型的分类方法^[17-19],可将土地划分为6个一类地和25个二类地。在分辨率30 m精度

的图形中,二类地无法得到有效区分,为了控制样本的分类精度,结合分类方法和参考相关文献,最终确定土地利用类型为耕地、林地、草地、建设用地、未利用地、水域。对遥感影像图进行辐射定标、大气校正和裁剪等预处理后进行分类。通过对多光谱不同波段的对比研究后,最终对 2001 年和 2008 年的遥感影像采用 543 波段进行 RGB 合成,对 2016 年的遥感影像采用 654 波段进行 RGB 合成。在 ENVI 5.2 的支持下,采用支持向量机的监督分类方法,结合 Google Earth 和实地调查对分类结果进行人工修正,对结果进行分类处理后,利用 ArcGIS 10.2 生成满足高精度要求的土地利用类型图。通过 ENVI 5.2 中 Region of Interest Tool 计算样本的可分离系数(Separability),同时通过 Confusion Matrix 工具对 2001、2008 年和 2016 年的影像处理成果执行精度评估。可分离系数的标准是大于 1.8 属于合格样本,超过 1.9 说明样本之间可分离性好,小于 1.8 则需要编辑样本或者重新选择样本,若小于 1,考虑将两类样本合成一类样本。总体分类精度(OA)达到 90%则为优。Kappa 指数可分为 5 个等级:0~0.20 为几乎不一致、0.21~0.40 为较低一致、0.41~0.60 为中度一致、0.61~0.80 为高度一致、0.81~1 为几乎完全一致。根据各年份水质状况的不同对水域进行划分,其中 I、II 类水划为一类,水质为优,III 类水划为一类,水质为较好,IV 类水划为一类,水质为较差,V、劣 V 类划为一类,水质为差。

1.4 土地利用变化分析

土地利用变化幅度是从面积上考察土地利用类型的变化程度,重点描述不同土地利用类型在不同时间内总量上的差异^[20]。文章对土地利用类型的面积进行动态监测,利用转移矩阵^[15-6]生成 2001—2008 年、2008—2016 年的土地利用转移矩阵,对红枫湖流域 15 年间土地利用类型进行转换幅度和转换方向分析。

1.5 研究尺度确定

建立缓冲区有利于从空间上分析不同距离的土地利用类型对中心点水质的影响,该方法易于量化不同土地利用类型对水质的影响范围和影响程度^[8]。文章以 7 个监测断面为圆心,准保护区为边界,以不同尺度量化分析土地利用类型与水质的关系。缓冲半径上,由于不同于城市边界范围缓冲区域的划分,因此选用 1、1.5、2 km 和 2.5 km 尺度略大的缓冲半径,在 ArcGIS 10.2 下生成缓冲区域(图 1),计算各土地利用类型的面积。

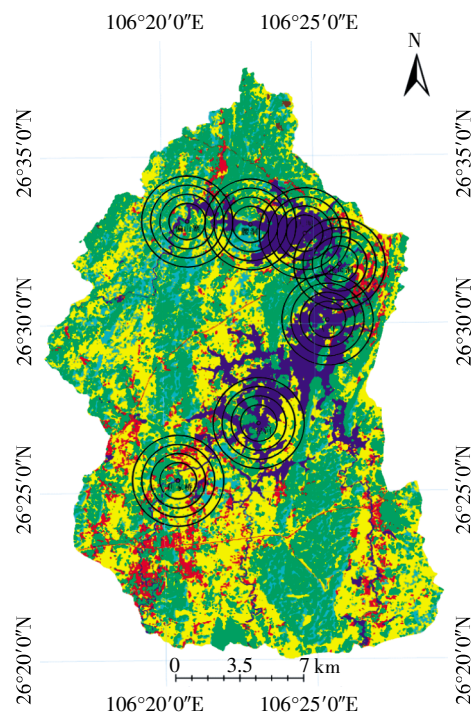


图 1 监测断面点及缓冲区域分布图

Figure 1 Picture of monitoring points and buffer zone

1.6 土地利用与水质的关联分析

本文以 7 个监测断面为样本,通过 ArcGIS 10.2 生成大坝、腰洞、花鱼洞、后午、偏山寨、三岔河、焦家桥监测断面的圆形缓冲区(图 1),以 1、1.5、2 km 和 2.5 km 为缓冲尺度,分别将 2001、2008 年和 2016 年不同缓冲范围内土地利用类型的面积(林地、耕地、草地、建设用地、未利用地)和对应水质数据(TP、NH₃-N、COD、DO)进行关联,利用 SPSS 17.0 进行 Spearman 相关性分析,探究 15 年间土地利用变化与水质的响应。根据景观生态学“源汇”理论,对不同土地利用类型与水质的相关性进行“源汇”分析。不同地类对面源污染起到了正向推动作用即为“源”景观,相反,对面源污染起到了负向滞缓作用即为“汇”景观^[2,21]。

2 结果与讨论

2.1 土地利用变化分析

2.1.1 土地利用分类精度评估

利用 ENVI 5.2 生成可分离系数(Separability)、总体分类精度(OA)、Kappa 指数三个指标。通过对红枫湖流域 2001、2008 年和 2016 年的遥感影像分类进行精度评估(表 1)可知,分类精度整体较好,符合解译要求。

2.1.2 土地利用类型分布

利用 ENVI 5.2 与 ArcGIS 10.2 生成 2001、2008

表 1 土地利用类型分类精度

Table 1 Classification accuracy of land-use type

精度指标	2001 年	2008 年	2016 年
总体分类精度(OA)/%	98.914 6	99.673 2	99.659 9
Kappa 指数	0.986 4	0.996 0	0.995 9
一致性级别	几乎完全一致	几乎完全一致	几乎完全一致
可分离系数	1.89~2.00	1.81~2.00	1.95~2.00
可分离性	好	较好	好

年和 2016 年的土地利用类型及水质变化图(图 2)。利用 Arc GIS 10.2 的空间数据分析功能,对各个土地利用类型的面积进行量化统计(表 2)。15 年间红枫湖流域的总体特征:耕地和未利用地面积呈现逐年下降趋势,林地面积先上升后下降,草地、建设用地面积持续上升,水域面积在小范围内波动,变化比例较小。流域土地利用类型以林地、耕地为主,2016 年分别占总面积的 33.70%和 29.67%。从 2001 年到 2016 年,林

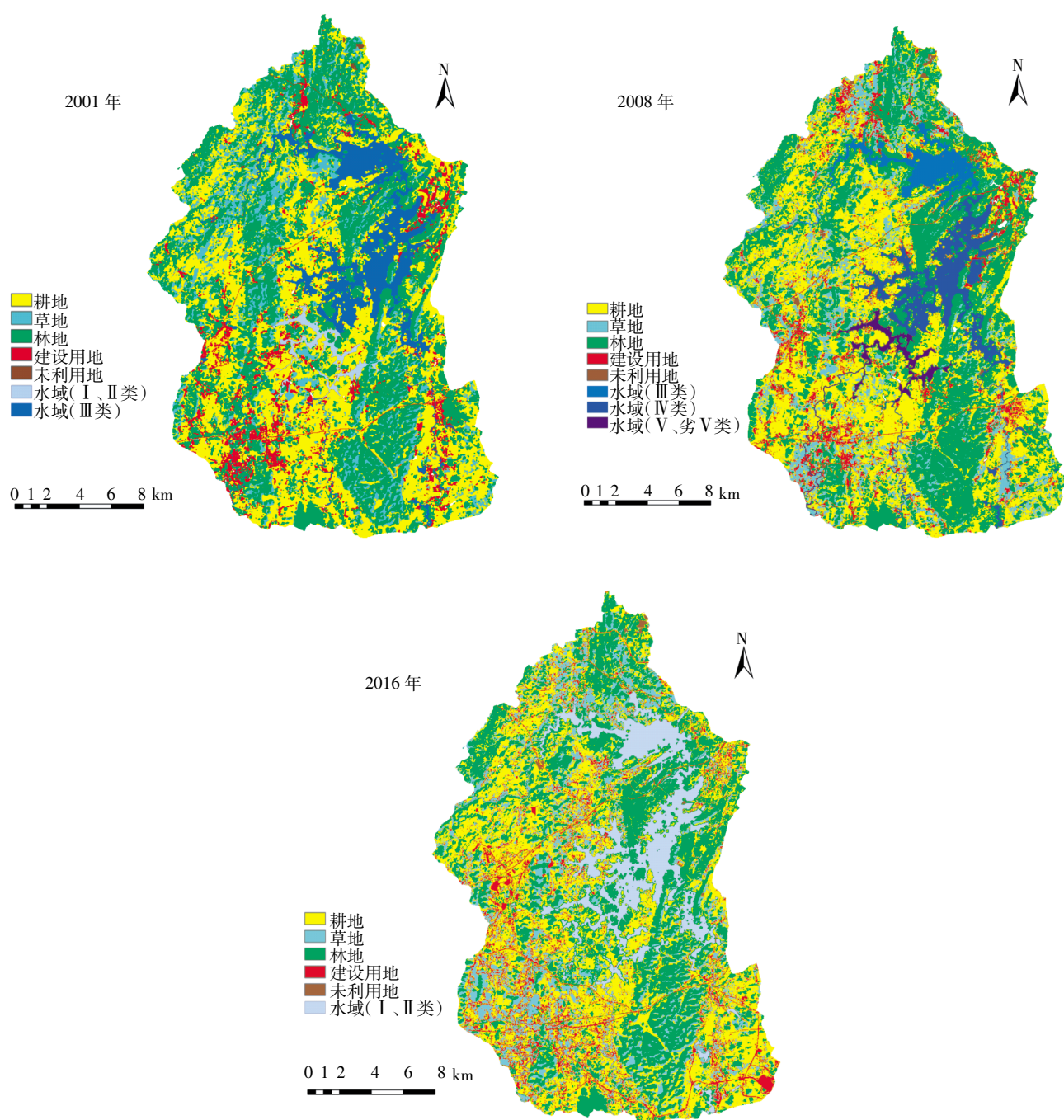


图 2 2001、2008 年和 2016 年红枫湖流域土地利用类型及水质变化图

Figure 2 Picture of land-use type and water quality change in Hongfeng basin in 2001, 2008 and 2016

地面积减少了 10.68 km²,减幅达 7.30%,建设用地增加了 11.41 km²,增幅最高,达 36.11%,这也与经济发展和城镇化建设的推进相符合。

2.1.3 土地利用变化趋势

分别对 2001、2008 年和 2016 年的土地利用类型图进行动态监测操作,利用 ENVI 5.2 的转移矩阵分析得到 2001—2008 年、2008—2016 年土地利用转移矩阵(表 3)。从 2001 年到 2016 年耕地持续减少,累计减少面积达 8.61 km²。从 2001 年到 2008 年,耕地主要流出方向是建设用地和林地,两者面积在 7 年间均有所增加。除耕地的贡献外,未利用地也主要流入建设用地和林地,在 2008 年,未利用地流入建设用地

和林地的面积共计 1.34 km²,占未利用地整体变化量的 68%。从 2008 年到 2016 年耕地的主要流出方向为建设用地和草地。从 2001 年到 2008 年,林地面积有所增加,但从 2001 年到 2016 年,总体呈现下降趋势,2016 年林地面积下降了 12.26 km²(表 3),下降总量与其他地类相比最多,转出的林地主要流入了建设用地和草地。综上,耕地、林地和未利用地是建设用地和草地面积增加的主要来源,说明 15 年间流域土地利用变化主要朝建设用地和草地增加。

2.2 土地利用类型与水质的相关性分析

2.2.1 水质变化趋势

2001 年红枫湖水质总体为Ⅲ类,水质情况较好。

表 2 2001、2008 年和 2016 年研究区土地利用类型

Table 2 Land-use type of the research area in 2001, 2008 and 2016

土地利用类型	2001 年		2008 年		2016 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
水域	48.40	10.59	46.97	10.27	47.91	10.48
耕地	162.66	35.58	158.21	34.61	154.05	33.70
草地	66.01	14.44	66.23	14.49	75.66	16.55
林地	146.33	32.01	147.91	32.35	135.65	29.67
建设用地	31.60	6.91	36.42	7.97	43.01	9.41
未利用地	2.16	0.47	1.42	0.31	0.88	0.19
总计	457.16	100.00	457.16	100.00	457.16	100.00

表 3 2001—2008 年和 2008—2016 年研究区土地利用转移矩阵(km²)

Table 3 The transfer matrix of land-use in research area from 2001 to 2008 and 2008 to 2016(km²)

2008 年土地利用类型	2001 年土地利用类型						变化量
	水域	林地	耕地	草地	建设用地	未利用地	
水域	43.20	2.96	0.67	0.46	1.11	0	5.20
林地	0.73	89.47	26.1	21.25	8.47	0.31	56.86
耕地	1.88	29.89	98.82	19.02	12.43	0.62	63.84
草地	0.02	21.49	22.34	20.66	1.29	0.21	45.35
建设用地	0.91	3.08	10.04	4.68	12.80	0.09	18.80
未利用地	0.23	1.02	0.24	0.16	0.32	0.19	1.97
变化量	3.77	58.44	59.39	45.57	23.62	1.23	192.02
净变化量	-1.43	1.58	-4.45	0.22	4.82	-0.74	

2016 年土地利用类型	2008 年土地利用类型						变化量
	水域	林地	耕地	草地	建设用地	未利用地	
水域	42.62	3.40	0.61	0.16	0.18	0	4.35
林地	0.96	14.88	92.81	27.50	21.75	0.31	65.40
耕地	3.11	100.95	26.46	14.00	3.27	0.12	46.96
草地	0.16	9.89	19.18	27.98	8.87	0.15	38.25
建设用地	1.04	6.33	14.40	5.91	8.73	0.01	27.69
未利用地	0.02	0.20	0.59	0.11	0.21	0.29	1.13
变化量	5.29	34.70	61.24	47.68	34.28	0.59	183.78
净变化量	0.94	-12.26	-4.16	9.43	6.59	-0.54	

2008 年水质污染严重,总体达Ⅳ类,局部呈现Ⅴ类、劣Ⅴ类水平,工业废水、生活污水的排放以及农业面源污染可能是导致水质恶化的主要原因。2008 年启动了污染治理工程,经过治理,2016 年水质总体达Ⅱ类,局部呈现Ⅰ类水平(图 2),15 年间流域水质经历了由较好变差,由差转为优的过程。将土地利用类型(林地、耕地、草地、建设用地、未利用地)与水质(TP、NH₃-N、COD、DO)进行 Spearman 秩相关分析(表 4)。由相关性分析可以看出,建设用地、耕地与水质营养指标普遍呈正相关关系,有些达到显著水平,林地呈明显负相关关系,草地对水质的影响较小,未利用地对水质的影响较为波动,正负相关性都有存在,影响方向不明确。

2.2.2 建设用地、耕地与水质的相关性

建设用地与水质指标的相关性表现显著,与 TP、NH₃-N、COD 均在一般正相关和极显著正相关之间,相关系数分别可达 0.818、0.883、0.571,与 DO 均在一般负相关和显著负相关之间,相关系数最高达-0.865。以不同尺度比较建设用地与 TP、NH₃-N 的相关系数。

当尺度为 1、1.5 km 和 2 km 时,2001、2008 年和 2016 年相关系数大小的顺序总体为 2016 年<2008 年<2001 年,尺度为 2.5 km 时,2008 年<2016 年<2001 年,且 2001 年不同尺度上建设用地的相关系数较其他土地利用类型相比最高,说明建设用地与水质营养指标在 2001 年的相关性最为显著,表明建设用地所代表的工业和生活污染源对水中氮、磷元素的引入有重要贡献作用。耕地与 TP、NH₃-N、COD 均在一般正相关和极显著正相关之间,相关系数分别可达 0.757、0.857、0.893,与 DO 主要呈显著负相关,相关系数最高达-0.847。以不同尺度比较耕地与 TP、NH₃-N 的相关系数。当尺度为 1.5、2 km 和 2.5 km 时,2001、2008 年和 2016 年相关系数大小的顺序总体为 2001 年<2008 年<2016 年,尺度为 1 km 时,2008 年<2001 年<2016 年,且 2016 年不同尺度上耕地的相关系数较其他土地利用类型相比最高。结合缓冲区面积统计发现,耕地面积比例越高,对水质的影响越显著。说明在 2016 年耕地所代表的农业面源污染成为红枫湖保护区内的主要污染源,这一结果也与红枫湖开展五大治

表 4 2001、2008 年和 2016 年土地利用类型与水质的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between land-use type and water quality parameters in 2001, 2008 and 2016

研究尺度	土地利用类型	2001 年				2008 年				2016 年			
		TP	NH ₃ -N	COD	DO	TP	NH ₃ -N	COD	DO	TP	NH ₃ -N	COD	DO
1 km	耕地	0.491	0.144	0.214	0.216	0.214	0.036	0.143	0.036	0.414	0.429	0.500	-0.559
	草地	0.327	0.144	0.071	0.378	0.286	0.179	0.214	0.036	0.072	0.143	0.286	-0.198
	林地	0.273	0.108	-0.286	0.288	0.179	-0.145	0.143	0.071	0.126	0.107	0.250	-0.414
	建设用地	0.743	0.336	0.468	-0.609	0.464	0.464	0.536	-0.250	0.034	0.143	0.025	-0.126
	未利用地	-0.491	-0.577	-0.286	-0.018	-0.401	-0.223	-0.356	0.045	-0.399	-0.474	-0.632	0.638
1.5 km	耕地	0.273	0.018	0.714	0.252	0.429	0.214	0.286	-0.214	0.757*	0.750	0.786*	-0.847*
	草地	0.273	0.198	-0.071	0.468	-0.016	-0.036	0.071	0.179	0.054	0.143	0.214	-0.126
	林地	0.600	0.414	-0.286	0.126	-0.286	-0.464	-0.286	0.429	-0.306	-0.286	-0.143	0.018
	建设用地	0.818*	0.793*	0.429	-0.865*	0.464	0.357	0.321	-0.357	0.036	0.162	0.036	-0.144
	未利用地	-0.109	-0.018	0.214	-0.595	0.217	0.355	0.256	-0.493	-0.449	-0.535	-0.668	0.674
2 km	耕地	0.109	0.106	0.643	0.414	0.429	0.214	0.286	-0.214	0.739	0.857*	0.893**	-0.739
	草地	0.546	0.126	0.143	0.126	-0.036	-0.071	-0.018	0.214	0.090	0.214	0.250	-0.090
	林地	0.655	0.126	-0.286	-0.126	-0.643	-0.750	-0.571	0.643	-0.432	-0.571	-0.500	0.252
	建设用地	0.709	0.883**	0.571	-0.829*	0.321	0.214	0.286	-0.214	0.036	0.167	0.036	-0.144
	未利用地	-0.055	-0.144	0.214	-0.487	-0.020	0.158	0.059	-0.335	-0.149	-0.217	-0.394	0.447
2.5 km	耕地	0.109	0.018	0.643	0.414	0.429	0.214	0.286	-0.214	0.757*	0.750	0.786*	-0.847*
	草地	0.491	0.018	0.214	0.036	-0.068	-0.143	-0.071	0.179	0.090	0.214	0.250	-0.090
	林地	0.604	0.306	0.286	-0.541	-0.357	-0.464	-0.429	0.357	-0.360	-0.536	-0.500	0.234
	建设用地	0.818*	0.793*	0.429	-0.865*	0.214	0.036	0.143	-0.179	0.234	0.214	0.250	-0.360
	未利用地	-0.273	-0.036	0.357	-0.216	-0.291	-0.018	0.073	-0.036	-0.082	-0.288	-0.414	0.018

注:* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note:* is significantly related at the level of 0.05(bilateral),** is significantly related at the level of 0.01(bilateral).

理工程后,点源污染得到有效控制相吻合。2008年不同尺度上土地利用类型与水质的相关性规律不明显,红枫湖的水质较差可能是生活污染源、工业污染源和农业面源共同作用的结果。

2.2.3 林地、草地、未利用地与水质的相关性

缓冲区域为1 km时,林地与水质的相关性并不明显(表4)。随着缓冲区域的扩大,林地面积比例增加,与水中TP、NH₃-N、COD浓度呈明显负相关关系,具体表现在2008年和2016年。在2 km尺度的缓冲区域上,其相关系数可达-0.643、-0.750、-0.571。这是由于一方面林地属于透水性下垫面,对氮磷元素滞留、吸收可降低面源污染对受纳水体的影响^[22];另一方面,林地面积比例增加导致耕地、建设用地面积比例减少,使污染物输出也相应减少,这也与相关研究结果^[23-26]一致。草地与各水质营养指标的相关系数较小,且不同尺度上相关系数变化未见明显规律,说明草地对流域水质影响较小。未利用地对水质指标的相关性较为波动,例如与TP和NH₃-N,两者既有一般正相关,也存在一般负相关,没有明确的变化规律,相关性指向不明确。未利用地属于透水性下垫面,对径流的截留作用较强。廖建荣^[13]指出,DO与未利用地呈现正相关关系。结合表4发现,2001年和2008年的不同缓冲尺度上,未利用地与DO呈现负相关关系,2016年的不同缓冲尺度上,未利用地与DO呈现正相关关系。这可能是因为早年间红枫湖流域周边正处于开发建设时期,未利用地较多,长期堆放建筑垃圾,因此雨源型面源污染更为突出,导致了未利用地与DO相关性波动的结果。

2.2.4 源汇效应分析

为比较土地利用类型对水质营养指标的影响,根据表4相关系数的正负分别将土地利用划为“源”、“汇”两大类。结果显示建设用地、耕地与水体中TP、NH₃-N、COD普遍呈正相关关系,有些达到显著水平,且以耕地的相关系数为最高,与DO呈现明显负相关关系。2008年和2016年,林地与TP、NH₃-N、COD呈现明显负相关关系,但未达到显著水平。因此,耕地和建设用地对氮磷等污染负荷起“源”的作用,且以耕地为主,林地对氮磷等产出则起到“汇”的效应。

3 结论

(1)红枫湖流域保护区内土地利用类型主要以林地、耕地为主,占到了总面积的60%以上。从2001年到2016年,林地和耕地面积呈现下降趋势,其中林地

减少了10.68 km²,减幅达7.30%,耕地减少了8.61 km²,减幅达5.30%。建设用地和草地面积持续增加,其中建设用地增幅最大,达36.11%,面积增加了11.41 km²,草地增加了9.65 km²,增幅达14.62%,两者面积的增加主要来源于耕地、林地和未利用地的流入。

(2)2001年水质总体为Ⅲ类,建设用地与TP、NH₃-N、COD呈现正相关关系,有些达到显著水平,表明在没有进行环境治理之前,污染主要来自于工业和生活污染源;2008年不同尺度上土地利用类型与水质的相关性规律不明显,水质总体为Ⅳ类,红枫湖水质较差可能是生活污染源、工业污染源和农业面源共同作用的结果;2016年耕地与TP、NH₃-N、COD和DO的相关系数分别达0.757*、0.750、0.786*和-0.847*,说明在工业污染源和生活污染源得到治理后,农业面源污染成为红枫湖流域的主要污染源,但其排放系数较小,水质总体为Ⅱ类,没有对水质产生较大影响。

(3)红枫湖流域保护区内建设用地、耕地与TP、NH₃-N、COD普遍呈现正相关关系,与DO呈现明显负相关关系,表现为污染“源”的作用,林地与TP、NH₃-N、COD呈现明显负相关关系,表现出“汇”的效应。

参考文献:

- [1] 夏 飏,李云梅,王 桥,等.基于遥感的无锡市土地利用与过境水质响应关系的研究[J].地理科学,2010,30(1):129-133.
XIA Rui, LI Yun-mei, WANG Qiao, et al. Response relationship between land-use and transit water quality in Wuxi City based on remote sensing[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(1): 129-133.
- [2] 孟晓云,于兴修,泮雪芹.云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响[J].环境科学,2012,33(6):1789-1793.
MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin. Impact of the land-use change on the non-point source nitrogen load in Yunmeng Lake watershed[J]. *Environmental Sciences*, 2012, 33(6): 1789-1793.
- [3] 杨 峰,王鹏举,杨珊珊,等.城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响[J].环境科学,2012,33(8):2652-2658.
YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, et al. Influence of land use structure on nitrogen output in the watershed of suburban agriculture regions[J]. *Environmental Sciences*, 2012, 33(8): 2652-2658.
- [4] 李兆富,杨桂山,李恒鹏.西苕溪流域土地利用对氮素输出影响研究[J].环境科学,2006,27(3):498-502.
LI Zhao-fu, YANG Gui-shan, LI Heng-peng. Effects of land use on nitrogen export in Xitiaoqi watershed[J]. *Environmental Sciences*, 2006, 27(3): 498-502.
- [5] 于兴修,杨桂山.中国土地利用/覆被变化研究的现状与问题[J].地理科学进展,2002,21(1):51-57.
YU Xing-xiu, YANG Gui-shan. The advances and problems of land use and land cover change research in China[J]. *Progress in Geography*, 2002, 21(1): 51-57.

- [6] 许俐俐, 胡宝清, 严志强, 等. 喀斯特土地利用变化及其区域生态环境效应: 以广西都安瑶族自治县为例[J]. 地域研究与开发, 2005, 24(6): 66-71.
XU Li-li, HU Bao-qing, YAN Zhi-qiang, et al. Karst land use change and their regional eco-environmental effect: A case study of Du'an Yao Autonomous County of Guangxi[J]. *Areal Research and Development*, 2005, 24(6): 66-71.
- [7] 彭 建, 王仰麟, 张 源, 等. 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[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 629-638.
PENG Jian, WANG Yang-lin, ZHANG Yuan, et al. Land use change and its ecological effect in the ecotone of northwest of Yunnan Province, China: A case study of Yongsheng County[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 629-638.
- [8] 蔡 宏, 何政伟, 安艳玲, 等. 基于遥感和GIS的赤水河水质对流域土地利用的响应研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2): 287-291.
CAI Hong, HE Zheng-wei, AN Yan-ling, et al. Response relationship between land use and water quality in Chishui River basin on RS and GIS[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(2): 287-291.
- [9] Nash M S, Heggem D T, Ebert D, et al. Multi-scale landscape factors influencing stream water quality in the state of Oregon[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 156(1/2/3/4): 343-360.
- [10] 曹芳芳, 李 雪, 王 东, 等. 新安江流域土地利用结构对水质的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2582-2587.
CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, et al. Effects of land use structure on water quality in Xin'anjiang River[J]. *Environmental Sciences*, 2013, 34(7): 2582-2587.
- [11] 郭青海, 马克明, 杨 柳. 城市非点源污染的主要来源及分类控制对策[J]. 环境科学, 2006, 27(11): 2170-2175.
GUO Qing-hai, MA Ke-ming, YANG Liu. Main sources of urban non-point source pollution and control measures for classified catchments [J]. *Environmental Sciences*, 2006, 27(11): 2170-2175.
- [12] 孙金华, 曹晓峰, 黄 艺. 滇池流域土地利用对入湖河流水质的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(12): 2052-2057.
SUN Jin-hua, CAO Xiao-feng, HUANG Yi. Effect of land use on in-flow rivers water quality in lake Dianchi watershed[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(12): 2052-2057.
- [13] 廖建荣. 山地城市土地利用与河流水质响应关系的研究: 以重庆市龙景湖流域为例[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
LIAO Jian-rong. Research on the response relationship between river water quality and land-using in mountainous city: Taking L-J Lake watershed for example[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [14] 鲍全盛, 王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望[J]. 地理科学, 1996, 16(1): 66-72.
BAO Quan-sheng, WANG Hua-dong. The research and prospect on non-point source pollution on water environment in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(1): 66-72.
- [15] 肖致强, 安艳玲. 2002—2009年红枫湖水污染趋势分析[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(3): 29-34.
XIAO Zhi-qiang, AN Yan-ling. An analysis of water environment changes of lake Hongfeng (2002—2009)[J]. *Environmental Science Survey*, 2012, 31(3): 29-34.
- [16] 杨通铨, 刘鸿雁, 喻阳华. 红枫湖水质变化趋势及原因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(Z1): 96-101.
YANG Tong-quan, LIU Hong-yan, YU Yang-hua. Variation trend of water quality and its causing effect of the Hongfeng Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(Z1): 96-101.
- [17] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
LIU Ji-yuan. Macro-scale survey and dynamic study of natural resources and environment of China by remote sensing[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996.
- [18] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
LIU Ji-yuan, KUANG Wen-hui, ZHANG Zeng-xiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14.
- [19] Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st Century[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 483-494.
- [20] 陈 江, 马松梅, 刘 琳, 等. 博乐垦区土地利用/覆被变化及预测研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 44-49.
CHEN Jiang, MA Song-mei, LIU Lin, et al. Study on land use/cover change and the prediction of Bole reclamation area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 44-49.
- [21] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.
CHEN Li-ding, FU Bo-jie, ZHAO Wen-wu. Source-sink landscape theory and its ecological significance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [22] 杨 柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. 环境科学, 2004, 25(6): 32-39.
YANG Liu, MA Ke-ming, GUO Qing-hai, et al. Impacts of the urbanization on waters non-point source pollution[J]. *Environmental Sciences*, 2004, 25(6): 32-39.
- [23] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality[J]. *Water Research*, 2001, 35(14): 3462-3472.
- [24] 帅 红, 夏北成. 广佛区域土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 热带地理, 2006, 26(3): 230-233.
SHUAI Hong, XIA Bei-cheng. Effects of land use structure on non-point source pollution in the areas of Guangzhou-Foshan[J]. *Tropical Geography*, 2006, 26(3): 230-233.
- [25] Moreno J L, Navarro C, Delas H J. Abiotic ecotypes in south-central Spanish rivers: Reference conditions and pollution[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143: 388-396.
- [26] 傅伯杰, 马克明, 周华峰, 等. 黄土丘陵区土地利用结构对土壤养分分布的影响[J]. 科学通报, 1998, 43(22): 2444-2447.
FU Bo-jie, MA Ke-ming, ZHOU Hua-feng, et al. Impacts of land use structure on soil nutrient distribution in loess hilly region[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(22): 2444-2447.