

滇中“三湖流域”土地利用景观格局与水质变化关系研究

祁兰兰^{1,2,3}, 王金亮^{1,2,3}, 叶辉^{1,2,3}, 朱泓^{1,2,3}

(1.云南师范大学 地理学部, 昆明 650500; 2.云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 昆明 650500; 3.云南省地理空间信息工程技术研究中心, 昆明 650500)

摘要:为探讨滇中湖泊流域土地利用及景观格局演变对水质产生的影响,选取地理位置相近而水质相差悬殊的抚仙湖、星云湖、杞麓湖流域(以下简称三湖流域)为研究区域,采用景观格局指数法、Pearson 相关分析、冗余分析法揭示了三湖流域土地利用/景观格局对水质的影响。结果表明:(1) 1990—2018 年,三湖流域耕地面积减少,建设用地增加,其余土地利用类型变化幅度小。斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、景观多样性(SHDI)均增加,三湖流域景观格局趋向复杂。(2) 耕地与建设用地是影响抚仙湖、杞麓湖水质的主要土地利用类型。星云湖流域林地面积比与水质指标负相关性程度较高,对水质影响稍强。(3) 抚仙湖流域 SHDI, LSI 与湖泊水体 CODMn 显著正相关,杞麓湖流域 PD, LSI 与湖泊水体 CODMn 极显著正相关,斑块结合度(COHESION)与湖泊水体 BOD₅ 极显著负相关,SHDI, LSI 与 COHESION, PD, LSI 分别可作为抚仙湖、杞麓湖流域景观尺度上预测水质变化的关键因子,星云湖流域仅蔓延度指数(CONTAG)与湖泊水体 CODMn, TP, TN 显著正相关,CONTAG 可作为星云湖水质变化的有效预测因子。

关键词:土地利用; 景观格局; 湖泊流域; 水质; 相关性分析

中图分类号:X52; X144

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0199-10

Study on the Land Use Landscape Pattern and Water Quality Change in the ‘Three Lakes’ Basin in Central Yunnan

QI Lanlan^{1,2,3}, WANG Jinliang^{1,2,3}, YE Hui^{1,2,3}, ZHU Hong^{1,2,3}

(1.Faculty of Tourism and Geographic Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2.Key Laboratory of Resources and Environmental Remote Sensing for Universities in Yunnan, Kunming 650500,

China; 3.Center for Geospatial Information Engineering and Technology of Yunnan Province, Kunming 650500, China)

Abstract: To investigate the effects of land use and landscape pattern evolution on water quality in the Lake Basin of Central Yunnan, Fuxian Lake, Xingyun Lake and Qilu Lake basins (hereinafter referred to as the Sanhu Basin) with similar geographical locations and great differences in water quality were selected as the study areas. Landscape pattern index method, Pearson correlation analysis and redundancy analysis were used to reveal the effect of land use/landscape pattern on water quality in the Three Lake Basin. The results show that: (1) in 1990—2018, the arable land in the Three Lakes Basin decreased, the construction land increased, the other land use types changed little; patch density (PD), landscape shape index (LSI), and landscape diversity (SHDI) all increased, and the landscape pattern of the Three Lakes Basin tended to be complex; (2) Arable land and construction land were the important land use types that affected the water quality of Fuxian Lake and Qilu Lake; the woodland area ratio in the Xingyun Lake Basin had a higher degree of negative correlation with water quality indicators, which had a slightly stronger impact on water quality; (3) SHDI and LSI of Fuxian Lake Basin were significantly positively correlated with the CODMn of the lake water body, PD, LSI and the lake water CODMn of Qilu Lake Basin were extremely significantly positively correlated, and the patch combination degree (COHESION) was extremely significantly negatively correlated with the lake water BOD₅; SHDI, LSI and COHESION, PD, LSI could be used as the key factors for

收稿日期:2020-12-15

修回日期:2021-01-05

资助项目:国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项项目(2018YFE0184300);云南基础研究重点项目(2019FA017);国家自然科学基金(41561048);云南省高校科技创新团队

第一作者:祁兰兰(1992—),女,江苏盐城人,硕士生,主要从事资源与环境遥感技术应用研究。E-mail:1691439830@qq.com

通信作者:王金亮(1963—),男,云南昆明人,教授,主要从事资源与环境遥感技术应用研究。E-mail:jlwang@ynnu.edu.cn

predicting water quality changes on the landscape scale of Fuxian Lake and Qilu Lake basin, respectively; the contagion index (CONTAG) of the Xingyun Lake Basin was significantly positively correlated with the CODMn, TP and TN of the lake water body; CONTAG could be used as an effective predictor of water quality changes in Xingyun Lake.

Keywords: land use; landscape pattern; lake basin; water quality; correlation analysis

水资源是支撑社会经济发展的战略性资源,对于维持生态社会经济系统的可持续发展至关重要^[1-2]。近几十年,随着人类活动的扩大,城镇化进程的加快,河流湖泊的水质恶化成为影响生态文明建设的主要制约因素^[3]。人为活动改变了土地利用方式和自然景观格局,土地利用在污染物产生、迁移和转化过程中起着重要作用^[4],而景观格局控制着一个流域的各种生物地球化学和物理过程,景观格局的变化会引起许多水文过程,如地表径流、地球化学循环等,会导致大量污染物进入水体,因此,土地利用和景观格局的变化是影响水质的重要驱动因素^[5-6]。探讨土地利用和景观格局与湖泊水质之间的关系,不仅可以为流域的景观格局规划提供参考,也对流域水资源可持续利用及识别水质的主要威胁具有重要意义。

针对土地利用景观格局与水环境质量的关系,相关学者进行了很多研究。自 20 世纪 70 年代以来,土地利用/覆被与水质的空间耦合关系就是早期研究的重点^[7]。不合理的人类活动通常会改变地表特征,产生污染,增加污染物负荷^[8]。强烈的农业活动与快速的城市化进程增加了污染物入湖、入河的数量,进一步恶化了水质。农业生产过程中,化肥农药的使用引起的非点源污染是水环境污染的重要来源^[9],农业用地面积占比与水质呈显著正相关^[10]。城市化进程中过多的人造地表改变了径流方式,导致污染物无法被截留、吸收,直接进入水体,进而对水质产生负面影响^[11]。林草地对污染物的截留起到了积极作用^[12]。2000 年以后,从景观生态学角度探索土地利用景观格局与水质的关系成为许多学者重点关注问题^[13-14]。主要集中在分析了景观构成属性^[15]、景观格局空间属性^[16]、不同景观类型的空间尺度下对水质的影响^[17-18]。目前研究景观格局与水质的关系多采用模型与数理统计方法^[10]。但是由于研究区的地域差异性、选取的景观指标及水质参数不同,使得土地利用/景观格局对水质的影响关系这一论题的结论不一致,甚至在同一区域内,若区域内自然特征、土地利用结构及景观格局特征有差异,也会导致研究结论产生不确定性。因此,有必要针对存在的问题开展进一步地研究,剖析二者之间的关系。

本文选取的研究对象(三湖流域)呈现出了地域

差异性这一特点,三湖流域均分布于云贵高原区,海拔较高,生态系统较为脆弱。三湖同属断层陷落淡水湖,湖泊换水周期长,自净能力不足,湖泊生态平衡状态极易被打破。三湖虽然自然条件类似、地理位置相近,但是由于各个湖泊流域内人为土地开发强度、经济发展模式及湖泊内部特征不同,使得 3 个湖泊水质差异明显,不同程度地制约了三湖流域的生态环境建设和社会经济可持续发展。其中,抚仙湖是深水贫营养湖泊,水质较好;星云湖是典型地高原浅水湖泊,由中营养过渡为富营养;杞麓湖与抚仙湖、星云湖距离较近,而水污染较为严重,呈中度至重度富营养状态。基于此,本研究采用 Pearson 相关分析及冗余分析法分析抚仙湖流域、星云湖流域、杞麓湖流域这 3 个高原湖滨区不同土地利用变化对水质的影响,探讨景观指数与水质之间是否具有相关性,综合分析土地利用/景观格局对水质的影响,为高原湖泊生态系统保护和水环境保护措施的制定提供理论依据。

1 研究区概况

抚仙湖(24°21′—24°38′N, 102°49′—102°57′E)、星云湖(24°17′—24°23′N, 102°45′—102°48′E)、杞麓湖(24°4′—24°14′N, 102°33′—102°52′E)均位于滇中腹地(云南省玉溪市境内),同属珠江流域南盘江水系,为滇中经济区的社会发展、生态环境等方面提供重要的水资源基础。三湖流域地处亚热带季风气候区,属于中亚热带湿润高原季风气候,具有四季温和,干湿季明显等特征,5—10 月为雨季,且流域内地形错综复杂,以山区和坝区为主,呈西北高、东南低地势。

抚仙湖为珠江源头湖泊,平均水深 95.3 m,流域面积 675.48 km²。自 1990 年至今,玉溪市政府进行抚仙湖流域水污染综合防治“十五”“十一五”“十二五”规划,使其水质整体保持在Ⅰ类,但是湖滨区及流域北岸受到工农业及旅游业发展的影响,局部水质为Ⅱ类,由于湖泊换水周期长达 167 a,生态系统极易受到破坏。

星云湖是抚仙湖的上游湖泊,通过隔河与抚仙湖相连,其流域面积 409.36 km²。星云湖平均水深仅 4.73 m,蓄水量 2.3 亿 m³,流域内磷矿资源丰富,磷矿产业较为聚集,是星云湖总磷含量居高不下的主要

原因。1994 年以前,星云湖整体水质为Ⅲ类,2002—2018 年,水质始终处于Ⅴ类甚至劣Ⅴ类的位置,由中营养向富营养状态转变。

杞麓湖距离抚仙湖不到 100 km,有 4 条主要入湖河流,无明出口,为典型的封闭性高原陷落性湖泊。根据文献^[19],杞麓湖流域是云南省九大高原湖泊人口高度密集,城市化率较高,受环境资源约束较大的地区,流域内以农业面源污染及工业污染为主,导致湖水水质整体污染严重,1990—2018 年水质呈Ⅳ类—劣Ⅴ类—Ⅴ类的趋势。

综上所述,抚仙湖属于深水贫营养湖泊,湖泊容量大,但是受到流域周边人类活动的影响,水质较易受污染;星云湖属于典型的浅水性富营养湖泊,生态系统较为脆弱,当前水质污染严重;杞麓湖流域周边土地开发程度高,加重水质受污染风险。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据源

三湖流域土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdu.cn/lzs.aspx>)1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2018 年的

30 m×30 m 精度的全国土地利用遥感监测数据。参照中科院一、二级分类体系,结合研究区实际情况,将研究区分为耕地、林地、草地、湖泊、水库坑塘、建设用地 6 种土地利用类型。评价水环境污染程度时,选用多种环境质量参数。本研究结合研究区的实际污染状况,选取与土地利用数据对应的 7 个年份的高锰酸盐、生化需氧量、总磷、总氮 4 个水质指标的年均值作为水质数据。水质数据主要来源于相关的文献资料^[20-22]、《云南省环境状况公报》、星云湖“十一五”规划、杞麓湖流域水污染综合防治“十一五”规划。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用及景观指数计算 基于 7 期土地利用数据,利用 ArcGIS 10.6 软件分析 1990—2018 年的三湖流域土地利用面积变化及转移情况,阐明土地利用类型空间变化特征。景观指数是反映景观格局的定量指标,可从斑块、类型、景观 3 个类别上反映土地利用空间格局信息^[23]。为了分析整体景观结构,研究从表征景观破碎度、聚集度、连通性指数、多样性指数中选取了 5 个景观指数反映景观格局特征(表 1)。采用 Fragstata 4.2 景观指数分析软件计算 7 期土地利用数据的 PD,LSI,CONTAG,COHESION,SHDI。

表 1 研究所选景观格局指数

景观指数	计算模型	表征的景观意义
斑块密度(PD)	$PD=(n/A)10^6$	景观破碎度,PD 值越大,景观越破碎
景观形状指数(LSI)	$LSI=\frac{\sum_{k=1}^m E}{\sqrt{A}}$	景观破碎度,LSI 值越大,景观形状越复杂
蔓延度指数(CONTAG)	$CONTAG=[1+\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [p_i(g_{ik} \sum_{k=1}^m g_{ik})][\ln p_i(g_{ik} \sum_{k=1}^m g_{ik})]}{2 \ln m}]\times 100$	景观聚集度,CONTAG 值越大,景观团聚度越佳
斑块结合度(COHESION)	$COHESION=(1-\frac{\sum_{i=1}^m p_{ij}}{\sum_{j=1}^m p_{ij} \sqrt{a_{ij}}})(1-\frac{1}{\sqrt{A}})^{-1}\times 100$	景观物理连接度,COHESION 值越大,景观的空间连通性越好
香农多样性指数(SHDI)	$SHDI=-\sum_{i=1}^m (p_i \ln p_i)$	景观多样性,SHDI 值越大,景观异质性增强

注: n 为斑块数目; A 为景观总面积; E 为景观中所有斑块的周长; P_i 为 i 类型在整个景观中所占的比例; g_{ik} 为 i 和 k 类型中相邻的斑块数; m 为斑块类型的总数; p_{ij} 为 ij 斑块周长; a_{ij} 为 ij 斑块面积。

2.2.2 Pearson 相关性分析 基于 SPSS 软件,采用 Pearson 相关系数分析土地利用/景观指数与湖泊水质之间相关性,Pearson 相关性分析实质上是研究两组变量之间的线性相关程度,公式如下:

$$P_{xy}=\frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X)}\sqrt{var(Y)}}$$

式中: P_{xy} 为总体相关系数; $cov(X,Y)$ 为随机变量 X/Y 的协方差; $var(X)/var(Y)$ 分别代表 X 和 Y 的方差。样本相关系数的计算公式为:

$$R_{ij}=\frac{\sum_{i=1}^m (x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i-\bar{y})^2}}$$

式中: x_i,y_i 为变量, $i=1,2,\cdots,m;\bar{x},\bar{y}$ 为 x_i,y_i 的均值; R_{ij} 为样本相关系数,采用 T 检验对样本显著性差异进行计算。最终相关系数为正时,表明该因素对湖泊水体污染物起到了正向作用,加重污染;系数为负时,表明影响因素对污染物产生了负效应,减轻污染。

2.2.3 冗余分析 借助 Canoco 5 软件进行土地利

用/景观指数与湖泊水质的冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)。RDA 是一种从统计学角度阐释一组变量与另一组多变量之间的排序分析方法,该方法起源于生态学,用来揭示物种与环境变量之间的关系,后来被应用于地理学中土地利用覆被与水质等方面。该方法既能揭示各个环境变量(土地利用/景观指数)对湖泊水质变化的贡献率,又能以二维排序图直观地呈现出环境变量与水质间的关系^[24]。因此,以 RDA 方法分析土地利用/景观指数与水质间的关系,首先对水质参数进行降趋式对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA),若 Lengths of gradient 第一轴大于 4,则选择 CCA 分析,介于 3~4,则两种模型均可,若小于 3, RDA 的效果更佳。结果显示 Lengths of gradient 第一轴的结果为 0.3,所以选择冗余分析(RDA)。排序图中一种箭头表示水质数据,另一种箭头表示土地利用/景观指数,箭头夹角之间的余弦值代表了二者的相关性,两者之间夹角的余弦值小于 0 时,两者呈正相关,夹角越小,相关性越高;两者之间夹角余弦值为 0 时,两者无相关性;二者之间夹角余弦值大于 0 时为负相关,夹角越大,相关程度越高。箭头长度代表了该影响因子所占比重,箭头越长影响程度越高。

3 结果与分析

3.1 三湖流域土地利用变化

由图 1 可知,抚仙湖流域以林地和湖泊为主要土地利用类型,面积占比分别平均达到 25.75%, 32.53%, 变化幅度微弱。建设用地面积持续增加,但占比较小(2.07%~2.78%),增加了 34.81%。星云湖流域耕地、林地面积占比较大,分别为(32.16%~36.25%, 30.15%~32.11%),并且波动式下降,其余土地利用类型占比较小,其中建设用地呈波动式上升趋势,面积占比增加了 1.01%。杞麓湖流域耕地、林地、湖泊为优势景观类型,面积占比最显著,分别平均达到 44.63%, 26.52%, 而湖泊水面在 2000—2018 年面积占比变化幅度大,主要由于 2010—2015 年,受围湖修坝影响,湖泊水面缩小,湖滨带出现大面积滩地,2015—2018 年为维护水环境,滩地又转为湖泊水面。总之,1990—2018 年,三湖流域的耕地面积波动式减少,建筑用地逐年递增,剩余土地利用类型变化趋势幅度小(图 1)。不同土地利用类型由于受人类活动的干扰,相互之间会发生转移。1990—2018 年,三湖流域的土地利用类型转移以耕地、林地、草地、建设用地为主,根据转出面积的大小排序依次为耕地>林地>草地>建设用地,其余土地利用类型的转移幅度较小。

三湖流域内耕地基本上转为林地、草地,这与三湖流域土地利用规划中退耕还林、还草政策相关;林地大部分转为耕地、草地;草地多数转为林地。建设用地的增加量主要来源于耕地的转入,抚仙湖、星云湖、杞麓湖流域耕地分别向建设用地转入了 5.56, 5.39, 8.51 km²,表明三湖流域内人类活动增强,城镇化发展占据了大量的耕地,同时利用林地、草地填补耕地,保护区域生态环境。

3.2 土地景观格局演变

景观指数可反映景观格局的空间结构,研究区内,1990—2018 年总体景观指数变化如下(图 2)。三湖流域的 PD, LSI, SHDI 指数均增加,表明研究区受人为干扰影响强烈,景观破碎化程度加深,异质性增强,不同景观类型的斑块朝着不规则多边形方向发展。抚仙湖与杞麓湖流域 CONTAG 减小,星云湖流域 CONTAG 增大;同时 3 个湖泊流域的 COHESION 值介于 98.8~99.1,表明 3 个湖泊流域相邻斑块间的空间连接性增强,空间连通性好,抚仙湖与杞麓湖流域内不同斑块类型团聚程度下降,星云湖流域内不同斑块类型聚集度提升。

3.3 三湖流域水质特征

抚仙湖、星云湖、杞麓湖水质变化见图 3。根据中华人民共和国《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)将地表水域环境功能分为 I 类、II 类、III 类、IV 类、V 类。当 CODMn≤2, 4, 6, 10, 15; BOD₅≤3, 3, 4, 6, 10; TP≤0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2; TN≤0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 时,分别对应 I 类、II 类、III 类、IV 类、V 类。1990—2018 年,抚仙湖 CODMn, BOD₅ 有显著增长趋势, TP 与 TN 的变化不明显,且 4 个水质指标均处于 I 类水标准,水质始终保持在 I 类。星云湖 CODMn, BOD₅, TP, TN 总体呈上升趋势,其中在 1990—2010 年,浓度持续上升,2015—2018 年浓度指数下降,且 TP, TN 是星云湖的主要污染物, TP 在 2010—2018 年一直稳定在 V 类,水质污染严重。杞麓湖 BOD₅, TP, TN 增长趋势明显, CODMn 波动较大趋势不明显。BOD₅, TP 在 2010—2015 年分别处于 V 类, IV 类水标准, TN 一直处在 V 类水标准。可见,2015 年之前三湖水质受污染程度较高,2018 年水质均有所改善。

3.4 土地利用/景观格局与水质的关联分析

3.4.1 土地利用/景观格局与水质的 Pearson 相关分析

(1) 土地利用变化与水质相关性。由表 2 可知,抚仙湖流域耕地面积比与水质指标呈负相关,且与 CODMn 呈极显著负相关;林地面积比与 CODMn, BOD₅ 呈负相关,草地及水库坑塘与水质呈正相关,林地、草地、水库坑塘与水质的相关性均不显著;建设用

地面积比与 CODMn 的相关系数为 0.875,显著性概率 p 小于 0.01,呈极显著正相关状态。星云湖流域耕地面积比、水库坑塘面积比、建设用地面积比与水质均呈正相关;林地、草地面积比均与水质呈负相关,但是相关性均不显著,只有林地面积比与水质的相关系数较高,相关系数介于 $-0.684 \sim -0.504$ 。杞麓湖

流域耕地面积比与 BOD₅呈极显著负相关状态;林地与草地面积比与水质无显著相关性;水库坑塘面积比与建设用地面积比与水体污染物均呈正相关,其中水库坑塘与 CODMn,建设用地与 BOD₅之间相关性显著,相关系数分别达到 0.820,0.882,显著性概率分别小于 0.01,0.05。

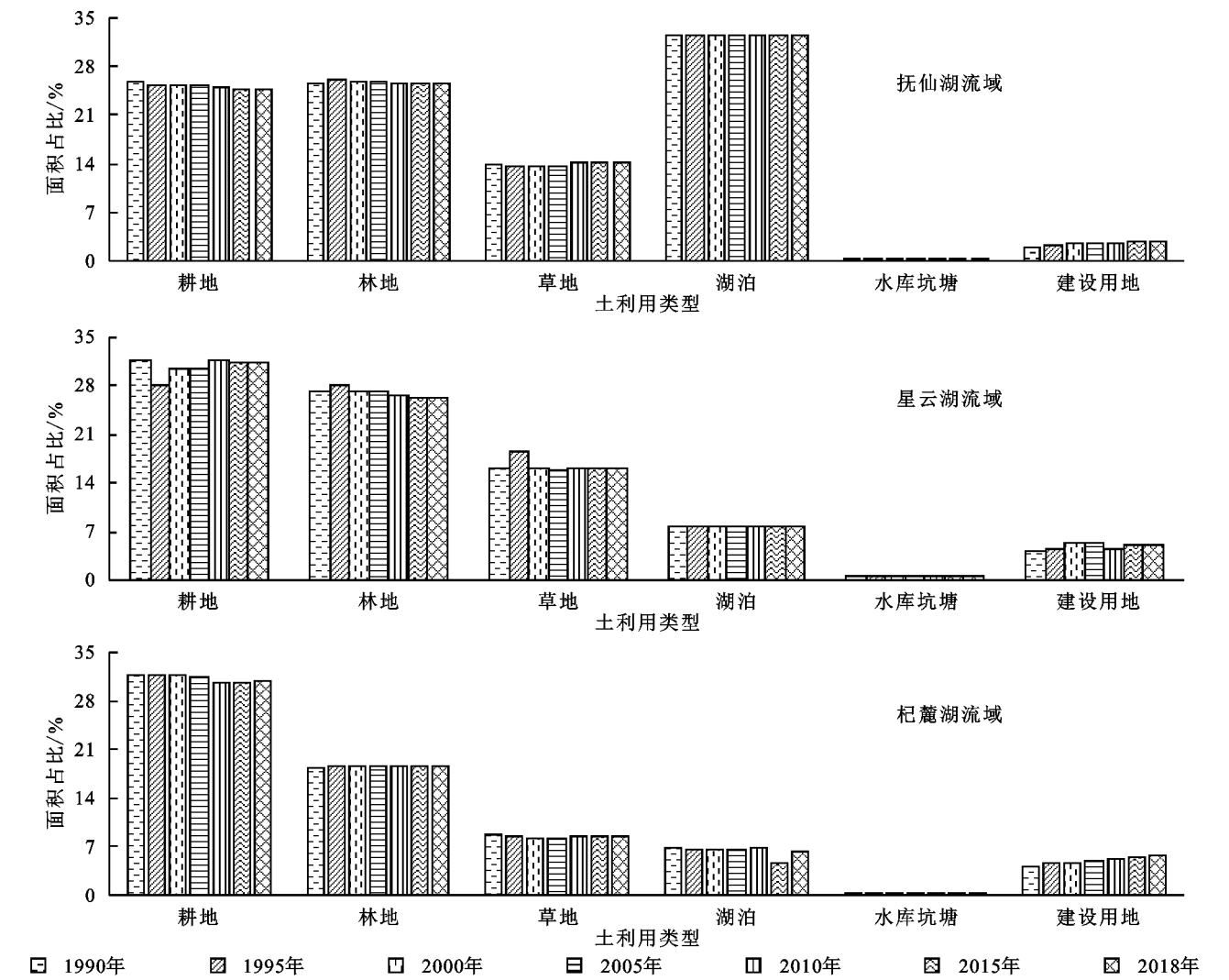


图 1 三湖流域土地利用变化

综上,抚仙湖流域内耕地对 CODMn 表现出显著的正效应,建设用地对 CODMn 具有较明显的负效应,耕地与建设用地是预测抚仙湖水水质变化的重要因子。星云湖流域内林地对净化水质有重要作用。杞麓湖流域耕地、建设用地分别对 BOD₅有相当明显的正效应和负效应,水库坑塘对 CODMn 具有相对明显的负效应,对于 CODMn 浓度的增长,贡献较大,耕地、水库坑塘、建设用地可作为杞麓湖水水质变化的重要预测因子。

(2) 景观格局与水质相关性。抚仙湖流域仅有 PD, LSI, SHDI 与表征湖泊水质下降指标 CODMn 呈显著正相关,相关系数分别为 0.791,0.773,0.820,其显著性概率 p 小于 0.05。星云湖流域 CONTAG

分别与 CODMn, TP, TN 呈显著正相关性,相关性系数分别达到 0.807,0.788,0.833,而 PD, LSI, COHESION, SHDI 与水质指标均无显著相关性。杞麓湖流域 PD, LSI 与 CODMn 具有极显著正相关性,相关性系数分别为 0.886,0.890,其与 BOD₅呈显著正相关关系,相关性系数分别为 0.848,0.797,COHESION 与 BOD₅的相关系数为 -0.944 ,显示明显的负相关关系,其显著性概率小于 0.01,CONTAG 与 SHDI 分别与 BOD₅的相关性系数为 -0.808 ,0.843,两者间的相关关系均较显著。综上,选取的景观格局指数可有效地预测研究区内水质变化。

3.4.2 土地利用/景观指数与水质的冗余分析 本研究将三湖流域 7 期的水质数据分别与土地利用面

积比、景观指数进行冗余分析(RDA),探索土地利用/景观格局对水质的影响强度,结果见图 4。

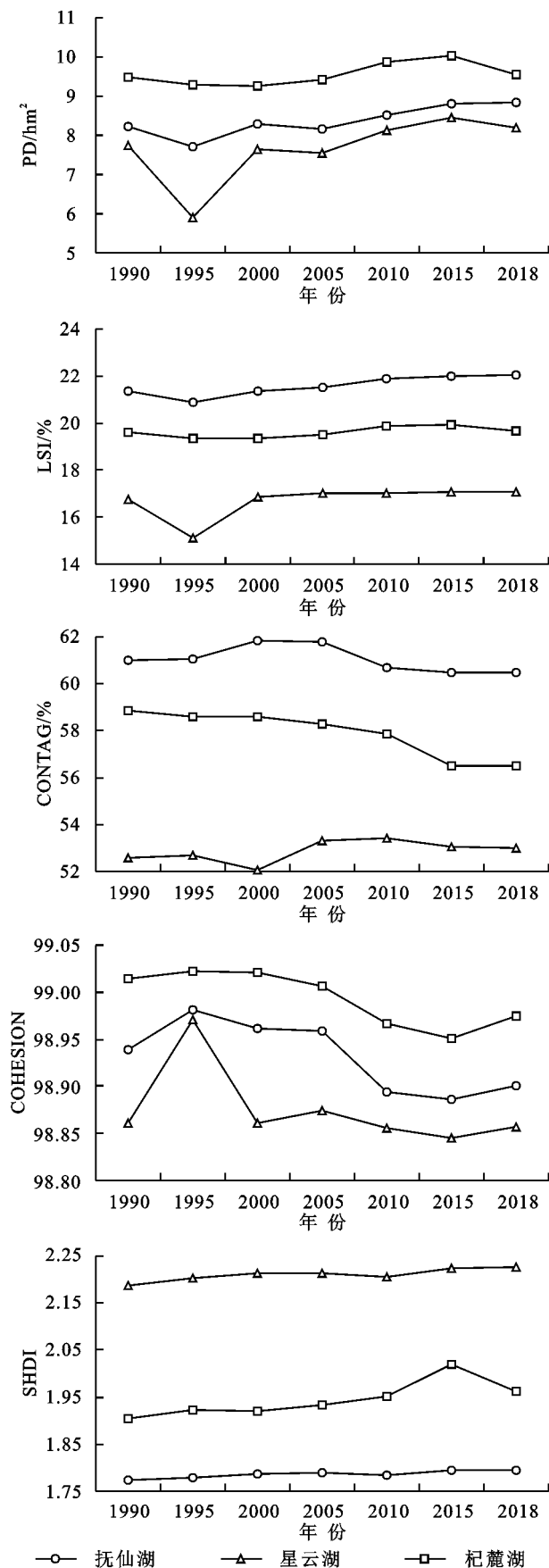


图 2 三湖流域景观指数变化特征

(1) 土地利用变化与水质冗余分析。由图 4 可知,三湖流域土地利用面积比与水质变化分析的结果与表 2 中 Pearson 相关性分析结果一致。抚仙湖、星云湖、杞麓湖流域土地利用面积比第一轴和第二轴分别累积解释了 89.15%, 96.37%, 88.06% 的水质变化。抚仙湖流域耕地、林地均与 CODMn, BOD₅ 呈负相关, 其中耕地对 CODMn 的影响程度较大; 草地、水库坑塘与所有水质指标呈正相关; 建设用地与 CODMn, BOD₅ 呈正相关, 且与 CODMn 相关性程度较高。星云湖流域耕地、水库坑塘、建设用地面积比与水化学指标呈正相关, 其中耕地的箭头最长, 对水质影响较大; 林地、草地面积比与湖泊水质指标均呈负相关, 林地强烈影响着水质变化。杞麓湖流域耕地与所有水质参数呈负相关关系; 水库坑塘、建设用地与所有水质指标呈正相关, 耕地对水质的影响程度较其他土地利用类型高。

(2) 景观格局与水质冗余分析。三湖流域景观指数 1 轴和 2 轴分别累积解释了 89.72%, 97.05%, 88.23% 的水质变化。抚仙湖流域 PD, LSI, SHDI 与 CODMn 呈极显著正相关, SHDI 对水质影响最大。星云湖流域 PD, LSI, CONTAG, SHDI 与所有水质指标呈正相关, COHESION 与湖泊水质指标均呈负相关, CONTAG 对水质影响较大。杞麓湖流域 COHESION, CONTAG 与所有水质参数呈负相关关系, PD, LSI, SHDI 与所有水质指标呈正相关, COHESION 对水质的影响程度较其他指数高。

根据表 3, 得出土地利用类型面积占比与景观指数对水质的解释程度。抚仙湖流域建设用地、SHDI 对水质有较高的解释量, 分别为 61.9%, 58.7%。星云湖流域土地利用类型对水质的解释量较低, CONTAG 对水质变化具有最高 51.5% 的解释量。杞麓湖流域耕地、建设用地、PD、COHESION 的解释量最高, 依次为 69.9%, 52.3%, 59.9%, 64%。

4 讨论

4.1 土地利用变化对水质的影响

同一地域条件下, 不同土地利用类型由于自身空间布局及不同强度的人类活动干扰也会使得土地利用类型对水质影响效果产生差异。相关研究表明^[25-26], 耕地和建设用地的输出贡献较大, 两者作为水体潜在污染物的“源”景观, 对水质具有正效应, 由于农业用地施肥等原因, 土壤中的污染物随着地表径流进入水体, 而生活污染物导致建设用地本来就是污染源, 加上地表不透水面的增加, 为污染物向水体的输出提供了新的途径。而林草地是水体污染物的“汇”景观, 能够较好地截留和消减污染物, 净化水质。

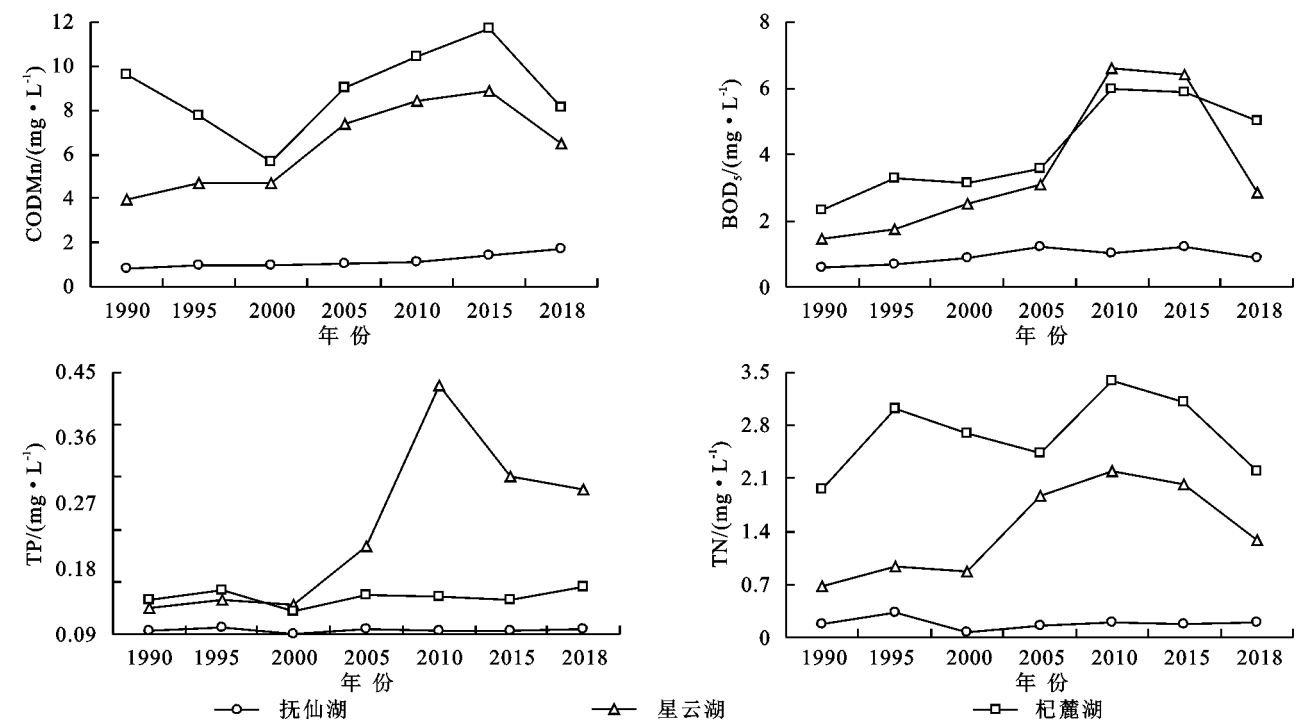


图 3 1990—2018 年三湖水质指标变化

表 2 土地利用/景观指数与水质指标相关关系					
湖泊流域	项目	CODMn	BOD ₅	TP	TN
抚仙湖流域	耕地	-0.902 **	-0.643	-0.045	-0.073
	林地	-0.449	-0.243	0.329	0.414
	草地	0.627	0.220	0.116	0.144
	水库坑塘	0.562	0.648	0.007	0.107
	建设用地	0.875 **	0.723	-0.223	-0.260
	PD	0.791 *	0.431	-0.335	-0.389
	LSI	0.773 *	0.545	-0.226	-0.327
	CONTAG	-0.641	0.030	-0.351	-0.449
	COHESION	-0.683	-0.397	0.136	0.121
	SHDI	0.820 *	0.739	-0.284	-0.353
星云湖流域	耕地	0.415	0.473	0.527	0.372
	林地	-0.615	-0.614	-0.684	-0.504
	草地	-0.390	-0.376	-0.364	-0.358
	水库坑塘	0.358	0.349	0.372	0.315
	建设用地	0.395	0.196	0.100	0.311
	PD	0.566	0.593	0.588	0.487
	LSI	0.494	0.457	0.471	0.450
	CONTAG	0.807 *	0.616	0.788 *	0.833 *
	COHESION	-0.432	-0.472	-0.444	-0.376
	SHDI	0.600	0.404	0.417	0.493
杞麓湖流域	耕地	-0.646	-0.992 **	-0.252	-0.558
	林地	-0.539	-0.199	-0.138	0.411
	草地	0.383	-0.157	-0.016	-0.168
	水库坑塘	0.865 *	0.652	0.182	0.039
	建设用地	0.356	0.886 **	0.358	0.350
	PD	0.886 **	0.848 *	0.070	0.453
	LSI	0.890 **	0.797 *	0.068	0.317
	CONTAG	-0.441	-0.808 *	-0.344	-0.164
	COHESION	-0.730	-0.944 **	-0.200	-0.400
	SHDI	0.617	0.843 *	0.104	0.444

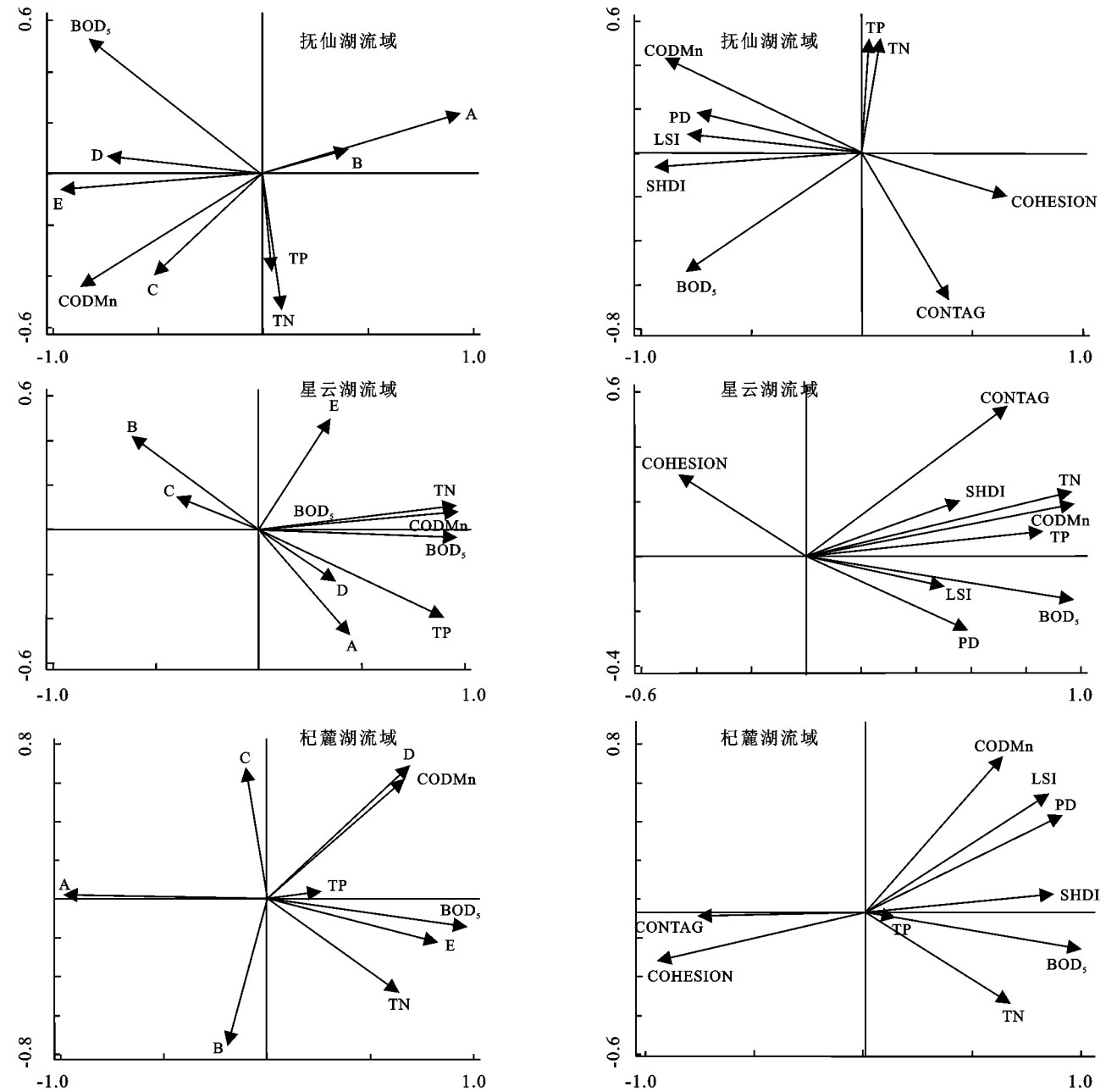
注: ** 表示显著性($p<0.01$),极显著相关; * 表示 0.05 显著性($p<0.05$),显著相关。相关系数 0.8~1.0 为极强相关,0.6~0.8 为强相关,0.4~0.6 为中度相关,0.2~0.4 为弱相关,0.0~0.2 为极弱相关或无相关。

根据本研究结果,抚仙湖、杞麓湖流域耕地与所有水化学指标呈负相关,且与耗氧污染物(CODMn, BOD₅)显著负相关,这与其他研究结果不一致^[10]。究其原因,抚仙湖流域内耕地是次要土地用地,且面积在 1990—2018 年不断减少,而 CODMn, BOD₅ 的变化趋势与其相反,表明流域内耕地对 CODMn, BOD₅ 具有一定的削弱作用。杞麓湖流域内耕地为首要土地利用类型,其中农业旱地经济作物(烤烟、玉米等)根系部分对氨氮类等化学物质具有吸收作用,使得耕地与所有水质指标负相关。另外,抚仙湖、杞麓湖两个湖泊流域的林地均与 CODMn, BOD₅ 负相关,且与 TN 中度正相关,主要因为两湖流域内林地与其他地类相间分布,发挥了污染源“汇”的作用,减少了 CODMn, BOD₅ 两类污染物的入湖量;同时两湖流域内均呈四周高、中间低的地势,而落地的枯枝,腐叶含有丰富的有机质,通过地表径流的方式将营养物质带入湖泊。抚仙湖流域内建设用地主要分布于湖滨区,集中在北部澄江县,同时澄江县内磷矿企业较多,造成了流域内建设用地与 CODMn 显著正相关。杞麓湖流域内建设用地主要分布于坝区水田周边,二者共同带来的面源及生活污染,对湖泊水质造成威胁。杞麓湖流域内水库坑塘与 CODMn 显著正相关,这一结果源于杞麓湖是一浅水性湖泊,水库坑塘与湖泊水体相连,通过径流方式携带营养盐入湖,导致湖泊底泥营养物质越积越多,成为湖泊水质潜在的污染源。星云湖流域耕地、水库坑塘、建设用地与所有水污染指

数正相关、林地、草地与所有水质指标负相关,但均无显著性,只有林地与水质之间的相关系数稍高,其结论与已有研究成果类似^[27]。其次星云湖流域内耕地与林地为主要景观类型,且面积占比相差不大,二者对水质的影响作用互相减弱,其次建设用地扩张缓慢是导致不同土地利用类型与水质指标相关性不显著

的主要原因。

三湖流域在各个湖泊流域内自然环境特征、土地利用类型变化及分布影响下,结合表 3 土地利用/景观格局对水质的解释量,耕地、建设用地是影响抚仙湖、杞麓湖水质的主要土地利用类型。星云湖流域林地对其解释量稍高。



注: A、B、C、D、E 分别代表耕地、林地、草地、水库坑塘、建设用地。

图 4 土地利用类型/景观指数与水质的冗余关系

表 3 土地利用/景观指数对水质的解释量

湖泊	耕地	林地	草地	水库坑塘	建设用地	PD	LSI	CONTAG	COHESION	SHDI
抚仙湖水体	0.594	0.133	0.215	0.364	0.619	0.395	0.428	0.217	0.298	0.587
星云湖水体	0.190	0.370	0.157	0.135	0.121	0.333	0.239	0.515	0.208	0.296
杞麓湖水体	0.699	0.129	0.087	0.424	0.523	0.599	0.541	0.432	0.640	0.521

4.2 景观指数变化对水质的影响

不同湖泊流域内,水质不仅受到土地利用类型的影响,更受到不同流域内景观类型的空间配置及格局的制约。通过建立景观指数与湖泊水体污染物浓度之间的关系,能够更好地预测湖泊水质的变化^[27]。

本研究显示,抚仙湖流域中,PD,LSI 与 CODMn 显著正相关。PD,LSI 反映景观的破碎度和景观形状复杂度,斑块边界越不规则、景观破碎化程度越严重,湖泊水质越容易被污染,SHDI 反映斑块类型的异质性与多样性,其与水质的相关关系受到流域内景观类型的影响。抚仙湖流域内“汇”景观林地受到人为干扰,斑块结构整体性下降,使得吸收“源”景观污染物的能力减弱,随着 SHDI 指数的增大,促进了污染物的扩散,导致 SHDI 与 CODMn 显著正相关,且相关系数较高。结合 RDA 分析,SHDI,LSI 对抚仙湖水体的解释程度较高,因此,SHDI,LSI 可作为预测抚仙湖水水质变化的关键因子。

本文结果表明,星云湖流域 CONTAG 与 CODMn,TP,TN 显著正相关,其余景观指数与剩余水质参数间的相关性不显著。这可能与流域内的景观类型有关系,CONTAG 代表不同斑块类型间的团聚蔓延程度,反映景观的分离和散布程度。值越大,斑块间的聚集程度越高。流域内以耕地为主要景观类型,且多分布于湖泊近岸相对集中,斑块间连通性好,造成农业污染物通过地表径流的方式直接入湖,水体污染物浓度增加,湖泊水质下降,与浑太河流域研究相似^[17],但也有研究结果与其相反^[28],若研究区内以林草地等为优势景观,则在一定程度上有助于减少湖泊污染。此外结合表3中的不同环境因子对星云湖水体的解释程度,CONTAG 可有效预测星云湖水质的变化。

在本研究中,通过杞麓湖流域景观—水质相关性分析、RDA 分析可知,对杞麓湖水水质影响较大的景观指标为 PD,LSI,COHESION。PD,LSI 均与 CODMn 极显著正相关的同时,仍与 BOD₅ 显著正相关。杞麓湖流域内湖盆坝区是耕地与建设用地的集中区域,耕地面积的减少,建设用地的增长造成斑块类型重复出现的频率上升,景观类型被分割成小的斑块,意味着流域内破碎度的加大会导致斑块间物质流动强度大,有利于污染物的迁移输出。COHESION 是衡量斑块连接度的重要指标,杞麓湖流域 COHESION 与 BOD₅ 呈极显著负相关,与徐启渝等^[29]在鄱阳湖流域研究的结论相同。表明杞麓湖流域内随着

COHESION 值的增大,景观趋于高联通方向发展,流域内耕地为优势斑块类型,而旱地小麦等作物的根系部分对水质的净化作用已被其他土地利用类型的零散不规则的斑块分布引起的污染物的聚集所掩盖,导致无法有效净化水质。结合表3中 COHESION,LSI,PD 对整个湖泊水质具有较高的解释率可推断 COHESION,LSI,PD 可作为杞麓湖流域湖泊水质的有效预测因子^[29]。

5 结论

(1) 1990—2018 年,三湖流域的土地利用景观格局变化明显,耕地减少、建设用地占比上升,是主要变化土地类型;PD,LSI,SHDI 均增加,流域景观格局异质性增强,破碎化程度加深。

(2) 三湖流域土地利用类型对水质影响显著,但不同流域内影响结果存在差异。抚仙湖流域耕地与建设用地是影响水质变化的重要因子,耕地与水质指标负相关,建设用地面积比与 CODMn 和 BOD₅ 呈正相关,表明耕地面积的减少有助于水环境质量提升,而建设用地扩张对于水体污染物浓度的减小起到阻碍作用。星云湖流域内林草地对水质呈现出正面效应,可相对减弱水质受污染风险。杞麓湖流域仅耕地、建设用地与 BOD₅ 的相关性极显著,对水质影响较大。

(3) 三湖流域景观格局变化对各个湖泊水质的影响效果也存在差异。抚仙湖流域中 SHDI,LSI 与 CODMn 表现出显著正相关,且对湖泊水体的解释量较高,可有效预测湖泊水质的变化。星云湖流域仅 CONTAG 与水质呈现较好的相关性,是引起湖泊水质变化的重要因素。杞麓湖流域景观破碎度越高,斑块间连通性较好,湖泊水质受污染程度越高;PD 和 LSI 与 CODMn 极显著正相关,对水质污染物浓度的减小起到负效应;另 COHESION,PD,LSI 这3个因子均对湖泊水质具有较高的解释量,可以在景观尺度上预测杞麓湖未来水质的变化。

参考文献:

- [1] Wang W, Tang D S, Pilgrim M, et al. Water resources compound systems: A macro approach to analysing water resource issues under changing situations[J]. Water, 2015, 8 (1).DOI:10.3390/w8010002.
- [2] Li T, Qiu S, Mao S, et al. Evaluating water resource accessibility in Southwest China[J]. Water, 2019, 11(8).DOI: 10.3390/w11081708.
- [3] Huang J, Li Q, Pontius R G, et al. Detecting the dynamic

- linkage between landscape characteristics and water quality in a subtropical coastal watershed, Southeast China[J]. *Environmental Management*, 2013, 51(1): 32-44.
- [4] Ullah K A, Jiang J, Wang P. Land use impacts on surface water quality by statistical approaches[J]. *Global Journal of Environmental Ence & Management*, 2018, 4(2): 231-250.
- [5] Xiao R, Wang G, Zhang Q, et al. Multi-scale analysis of relationship between landscape pattern and urban river water quality in different seasons [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-10.
- [6] Shi P, Zhang Y, Li Z, et al. Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales[J]. *Catena*, 2017, 151: 182-190.
- [7] Basnyat P, Teeter L D, Flynn L K M, et al. Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution inputs to coastal estuaries[J]. *Environmental Management*, 1999, 23(4): 539-549.
- [8] Ding J, Jiang Y, Fu L, et al. Impacts of land use on surface water quality in a subtropical River Basin: a case study of the Dongjiang River Basin, Southeastern China [J]. *Water*, 2015, 7(8): 4427-4445.
- [9] 孙芹芹, 黄金良, 洪华生, 等. 基于流域尺度的农业用地景观—水质关联分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 54-59.
- [10] 彭勃, 付永胜, 赵君凤, 等. 小流域土地利用景观格局对水质的影响[J]. *生态科学*, 2019, 38(3): 90-99.
- [11] 陈希冀, 郭青海, 黄硕, 等. 厦门城市水环境景观格局调整与建设探讨[J]. *生态科学*, 2018, 37(6): 97-105.
- [12] 任嘉衍. 伊河流域景观格局对水质的影响[D]. 河南开封: 河南大学, 2018.
- [13] 任磊. 西泉眼水库汇水区土地利用景观格局与水质特征关系研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [14] 黄金良, 李青生, 洪华生, 等. 九龙江流域土地利用/景观格局—水质的初步关联分析[J]. *环境科学*, 2011, 32(1): 64-72.
- [15] Hu X, Wang H, Zhu Y, et al. Landscape characteristics affecting spatial patterns of water quality variation in a highly disturbed region[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(12). DOI: 10.3390/ijerph16122149.
- [16] 赵鹏, 夏北成, 秦建桥, 等. 流域景观格局与河流水质的多变量相关分析[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2331-2341.
- [17] 李艳利, 徐宗学, 李艳粉. 浑太河流域多尺度土地利用/景观格局与水质响应关系初步分析[J]. *地球与环境*, 2012, 40(4): 573-583.
- [18] 曹灿, 张飞, 阿依尼格爾·亚力坤, 等. 艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨[J]. *环境科学*, 2018, 39(4): 1568-1577.
- [19] 王万宾, 管堂珍, 梁启斌, 等. 杞麓湖流域污染负荷及水环境容量估算研究[J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(11): 1436-1442.
- [20] 荆春燕, 张秀敏, 赵祥华. 抚仙湖水质变化趋势分析[J]. *云南环境科学*, 2004, 23(S): 110-114.
- [21] 吴献花, 胡小贞, 李平, 等. 玉溪“三湖”污染状况和控制策略[J]. *玉溪师范学院学报*, 2009, 25(12): 1-5.
- [22] 张文, 吕伟, 李海涛. 星云湖水水质富营养化的模糊决策分析[J]. *玉溪师范学院学报*, 2002, 18(5): 95-99.
- [23] 何鹏, 张会儒. 常用景观指数的因子分析和筛选方法研究[J]. *林业科学研究*, 2009, 22(4): 470-474.
- [24] 李石华. 基于高分影像的抚仙湖流域多尺度 LULC 时空演变及其与水质关系研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2018.
- [25] 杨莎莎, 汤萃文, 刘丽娟, 等. 流域尺度上河流水质与土地利用的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 1953-1961.
- [26] 焦欢. 渠溪河流域土地利用及格局对河流水质影响研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2016.
- [27] 焦胜, 杨娜, 彭楷, 等. 汾河流域土地景观格局对河流水质的影响[J]. *地理研究*, 2014, 33(12): 2263-2274.
- [28] 伍恒赞, 张起明, 齐述华, 等. 土地利用景观格局对信江水质的影响[J]. *中国环境监测*, 2014, 30(3): 166-172.
- [29] 徐启渝, 王鹏, 王涛, 等. 土地利用结构与景观格局对鄱阳湖流域赣江水质的影响[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(4): 1008-1019.