

云南高原杞麓湖流域的景观格局与水质变化

普军伟, 赵筱青, 顾泽贤, 卢飞飞, 郑田甜, 高翔宇, 陈俊旭, 易琦

(云南大学资源环境与地球科学学院, 云南大学“一带一路”战略研究院, 昆明 650500)

摘要: 由于人类活动日益增强, 高原湖泊杞麓湖景观格局和湖泊水质发生较大改变, 探究其变化关系可为湖泊生态系统保护和流域管理提供科学参考。采用 2005 年、2010 年和 2015 年遥感影像的解译结果, 结合 RS/GIS 技术和 Pearson 相关统计方法, 分析了 10 年间景观格局变化、湖泊水质变化及其相关性。结果表明: (1) 2005-2014 年杞麓湖水质偏差, 其中总氮、高锰酸盐指数、生化需氧量和叶绿素 a 呈显著增长趋势, 氨氮、总磷和透明度波动较大, 2015 年整体水质有所改善, 但仍为劣 V 类水。 (2) 杞麓湖流域主要景观类型是林地和耕地, 占流域总面积的 74% 以上, 10 年间建设用地的面积增加较快 (+876.42 hm²), 水域 (-1 281.42 hm²) 和耕地 (-794.61 hm²) 缩减较多, 后 5 年湖滨湿地大量出现 (+1 432.08 hm²); 景观格局聚集程度增加, 异质性略有减弱, 破碎化程度降低, 多样性和均匀程度变化不大, 人类活动对景观格局影响强烈。 (3) 水田、旱地和建设用地聚集程度增强及破碎化程度降低与氨氮外的其它水质指标呈正相关, 水域面积与氨氮和高锰酸盐指数呈负相关, 水田与建设用地是杞麓湖水质退化的主要污染源。

关键词: 景观格局; 杞麓湖流域; 湖泊水质

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2018)05-0013-09

景观格局是指异质景观要素的类型、数目以及空间分布与配置, 也是景观空间异质性的重要表现 (王明浩等, 2015)。景观格局及其变化和发展是各种生态过程在不同尺度上相互作用的结果, 同时制约和影响区域的生态过程 (傅伯杰, 1995)。因此对区域景观格局的分析可以深入了解生态变化情况。湖泊水体是流域生态系统的重要组成部分, 其水质受流域内自然和人为因素的综合作用 (黄金良等, 2011); 人类活动中不合理的土地利用 (Tong et al, 2002; 于术桐等, 2011)、城镇化 (Ren et al, 2003; 张洪等, 2013)、农业生产 (Osborne et al, 1988; 傅金成等, 2009) 等均会导致流域景观格局变化, 从而影响人类活动所产生污染物的迁移和转化。因此, 流域内的景观格局变化会对湖泊水质产生重要的影响。

杞麓湖是云南省九大高原湖泊之一。近年来, 杞麓湖周围农田分布集中、建设用地扩张, 加之湖泊面积急剧缩减, 导致湖泊水体主要污染指标呈上升趋势, 水质恶化加剧。杞麓湖流域面源污染集中分

布在湖盆坝区, 进行杞麓湖流域景观格局与水质变化关系的分析, 有利于探究水质变异的影响因素。本研究从景观生态学角度, 分析了各景观格局指数与水质之间的相关性, 旨在为湖泊生态系统保护和流域管理提供科学参考。

1 区域概况及数据来源

1.1 研究区概况

杞麓湖流域位于云南省中部 (102°33'48"~102°52'36"E; 24°4'36"~24°14'2"N), 隶属于玉溪市通海县 (图 1)。流域面积为 354.99 km², 四周高、中部低, 湖盆内地形平坦, 其中山区和坝区是主要部分, 各占 61% 和 31%; 杞麓湖流域属于珠江流域西江水系, 主要有红旗河、者湾河、中河及大新河 4 条入湖河流; 流域属于中亚热带半湿润高原季风气候, 年温差小而昼夜温差大, 夏秋湿热多雨, 冬春温燥少雨, 年均气温和年均降水量分别为 15.7℃ 和 887 mm。2015 年末, 杞麓湖流域总人口达到 24.09 万, 其中农村人口占总人口的 57.22%; 国民生产总值为 191.18 亿元, 其中第一、二、三产业分别占国内生产总值的 14.37%、62.16%、23.47%。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 遥感数据 采用 2005 年和 2010 年 ETM+ (分辨率 15 m)、2015 年 OLI_TIRS (分辨率 15 m) 和高分一号 (分辨率 5 m) 共 3 个时期的多波段、多

收稿日期: 2017-03-23

基金项目: 玉溪地区三大湖泊 (抚仙湖、星云湖、杞麓湖) 水质遥感监测 (玮元-A2016191)。

作者简介: 普军伟, 1995 年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为生态环境与土地利用优化。E-mail: pujunwei666@foxmail.com

通信作者: 赵筱青。E-mail: xqzhao@ynu.edu.cn

时相、多平台遥感影像数据,数据均来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)。

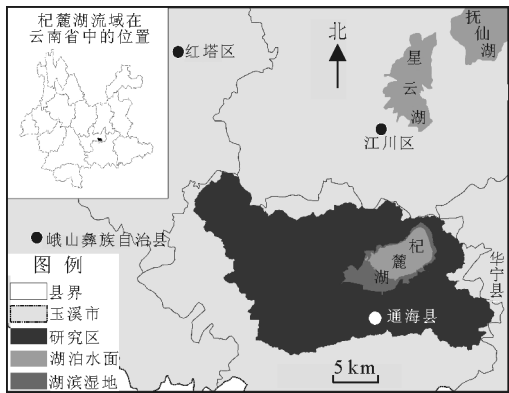


图1 研究区区位图

Fig.1 Location of the study area

1.2.2 水质数据 一般来说,高锰酸盐指数可直接反映水质污染状况,生化需氧量能间接反映水体被有机物污染的程度(孙庆先等,2009),氮和磷则是导致水体富营养化的主要因素(荆春燕等,2004),叶绿素 a 能反映水体中富营养化的程度,透明度直观表现湖泊的浑浊情况。依据中华人民共和国《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)对水质评价指标的规定,结合杞麓湖流域主要污染源,选取高锰酸盐指数、生化需氧量、总氮、总磷、氨氮、叶绿素 a 和透明

度 7 个指标的年均值作为水质污染评价指数,数据由云南省环境监测中心站提供,根据多个典型监测点取样得出,能代表湖泊整体水质情况。

2 研究方法

2.1 景观类型分类体系

参考第二次全国土地调查分类体系(GB/T21010-2007),并根据杞麓湖流域的实际情况将流域景观分为水田、旱地、园地、草地、灌木林地、有林地、建设用地、水域、未利用地和湖滨湿地十类。其中 2010 年后杞麓湖水面大面积转变为湖滨湿地,因此湖滨湿地类型只出现在 2015 年景观分类中。

2.2 栅格单元大小确定

最优栅格单元大小对于研究区景观格局指数的分析具有重要的意义。参照前人的方法确定景观格局栅格单元大小(刘宝军和王荣女,2011),对矢量数据计算所得的“真值”与不同尺度的栅格数据所得景观指数进行比较,统计出各景观类型及整个流域景观的最佳栅格单元(表 1)。去除 2 个较为极端的 10 m×10 m 栅格单元,计算其它栅格大小的平均值为 91.36 m×91.36 m,最终选取 90 m×90 m 栅格单元进行计算和分析。

表 1 杞麓湖流域各景观类型及整个景观的最优栅格单元

Tab.1 Landscape types and best-fit raster unit sizes for each type in Qilu Lake basin

景观类型名称	水田	旱地	园地	水域	湖滨湿地	草地	灌木林地	有林地	建设用地	未利用地	整个流域
最优栅格单元/m	10*	80	110	120	10*	110	90	60	70	90	90

注:“*”代表极端值。
Note: “*” represents extreme values.

2.3 景观格局指数分析

目前,基于遥感和 GIS 技术定量分析景观格局的方法主要有景观格局指数分析法、空间统计分析法和景观格局变化动态模拟法(汪荣,2007);其中,景观格局指数分析法浓缩了景观结构组成和空间配置信息,能够定量描述景观格局在不同时间和空间上的景观特征(刘颂等,2009)。本次研究采用该方法分析杞麓湖流域景观格局的特点。

景观格局依据指数能反映研究区明显变化,能同时描述景观形态与结构(杨娅楠等,2016),有效地识别景观等级结构和特征尺度效应(张娜,2014);选取斑块密度、最大斑块指数、形状指数、平均斑块面积、蔓延度、香浓多样性指数、香浓均匀度指数和聚集度共 8 个景观格局指数,分析杞麓湖流域景观格局的变化情况,指数通过 Fragstats 4.0 计算得到。

2.4 水质相关性分析

采用 Pearson 相关系数分析景观格局指数与湖泊水质之间的相关性,公式如下:

$$P_{XY} = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{Var(X)} \sqrt{Var(Y)}} \tag{1}$$

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:

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

式中: x_i, y_i 为变量, $i=1,2,3,\cdots,m$; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为 x_i 和 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。最终相关系数为正值,表明该因素对湖泊水体污染物的变化产生正向

作用,加重污染;系数为负时,表明该景观格局指数变化对污染物的变化产生负向作用,减轻污染。

3 结果与分析

3.1 杞麓湖湖泊水质特点

根据中华人民共和国《地表水环境质量标准》(GB3838-2002),杞麓湖流域水质变化如图 2。

2005 - 2013 年,杞麓湖总氮、高锰酸盐指数、生化需氧量和叶绿素 a 呈显著增长趋势;而氨氮、总磷和透明度波动较大,趋势不明显。其中,总氮一直处于 V 类水标准,氨氮在 2008 - 2013 年的状况较好,属 I 类水质,高锰酸盐指数在 2013 年和 2014 年达到 V 类,生化需氧量 2010 年后达到 IV 类,总磷在 2011 - 2012 年超过 IV 类标准,叶绿素 a 在 2010 年后

急剧上升,2013 年达到峰值后降低,透明度指数越低,说明水质浑浊度越高,呈先增后减趋势。7 个指标在 2015 年均有所改善,主要由于“十二五”规划期间严格管控,提出“一个目标、两条河流、三个片区、四项保障、五大工程”治理思路(<http://www.yncj.gov.cn/yuxi/336524/336611/493703/index.html>),通过“控源、截污、生态修复”等手段,最终在规划期末收到成效,污染得到初步控制。

总之,2005 年前杞麓湖水质已为 V 类,随着污染的加重,其距离水功能区 III 类水的要求更加遥远,大多指标均在 2013 - 2014 年最差,其中高锰酸盐和总氮不能达到“十三五”水质控制目标,10 年中,前 9 年水质整体情况下降,污染程度不断增强,2015 年有所改善。

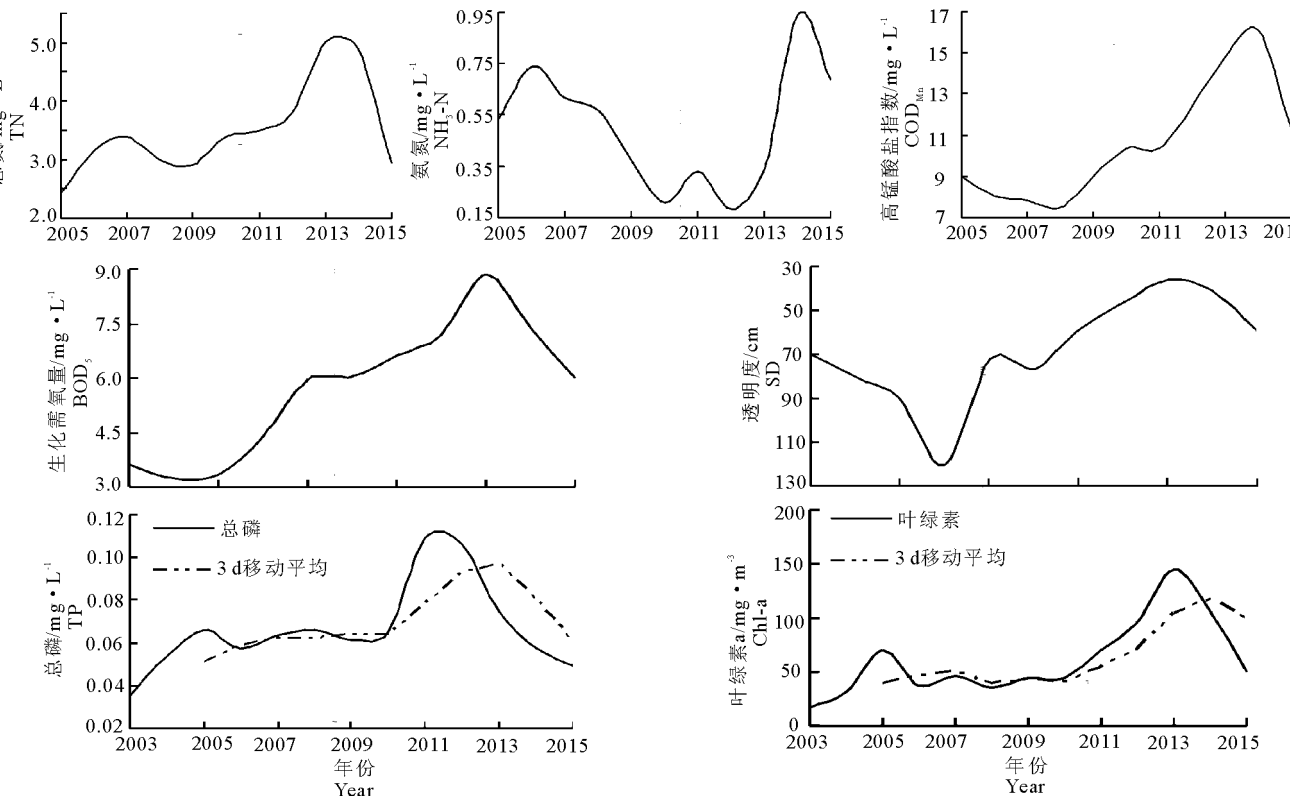


图 2 2005 - 2015 年杞麓湖理化指标变化

Fig.2 Annual variation of the water quality parameters in Qilu Lake, 2005 - 2015

3.2 杞麓湖流域景观格局变化

3.2.1 不同景观类型面积变化特点 2005 年、2010 年和 2015 年杞麓湖流域景观分类见图 3。

杞麓湖流域主要景观类型是林地(灌木林地和有林地)和耕地(水田和旱地),2005 年、2010 年和 2015 年 3 个时段林地和耕地面积占流域总面积的比例分别为 76.95%、76.54%和 74.53%。10 年间杞麓湖流域的景观面积发生了较大变化,湖滨湿地、

建设用地和有林地面积增加,其中建设用地面积增加较快;水田、草地和园地面积减少;未利用地先减后增,旱地、水域和灌木林地面积先增后减,其中后 5 年水域面积减少较快。从绝对变化量来看,湖滨湿地面积增加最大,其次为建设用地;水域面积则减少最多,其次为水田(表 2)。建设用地增加主要是占用耕地,10 年间杞麓湖流域城镇化速度加快,占用了周边良田;湖滨湿地出现则主要由于近年来受

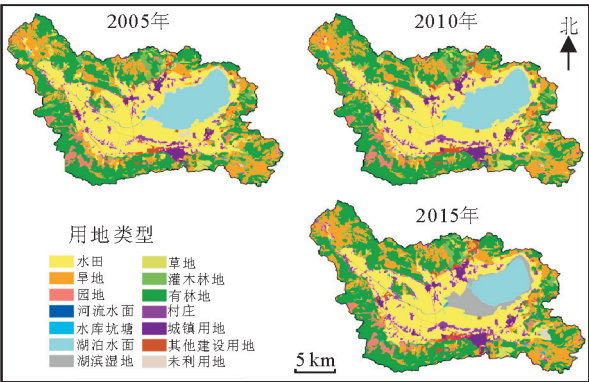


图3 杞麓湖流域景观分类

Fig.3 Landscape classification of Qilu Lake basin in 2005, 2010, 2015

表2 杞麓湖流域景观面积及其变化

Tab.2 Dynamic change of each landscape type in Qilu Lake basin

景观类型	2005 年面积/ hm ²	2010 年面积/ hm ²	2015 年面积/ hm ²	2005 - 2010 年 面积变化/hm ²	2010 - 2015 年 面积变化/hm ²	2005 - 2015 年	
						面积变化/hm ²	动态度/%
水田	9331.20	8927.01	8782.02	- 404.19	- 144.99	- 549.18	- 0.59
旱地	6100.11	6288.84	5854.68	188.73	- 434.16	- 245.43	- 0.40
园地	733.86	727.38	702.27	- 6.48	- 25.11	- 31.59	- 0.43
水域	3792.42	3824.01	2511.00	31.59	- 1313.01	- 1281.42	- 3.38
湖滨湿地	0.00	0.00	1432.08	/	1432.08	1432.08	/
草地	644.76	614.79	606.69	- 29.97	- 8.10	- 38.07	- 0.59
灌木林地	1054.62	1110.51	683.64	55.89	- 426.87	- 370.98	- 3.52
有林地	10831.32	10845.09	11137.50	13.77	292.41	306.18	0.28
建设用地	2771.01	3056.94	3647.43	285.93	590.49	876.42	3.16
未利用地	240.57	105.30	142.56	- 135.27	37.26	- 98.01	- 4.07
总计	35499.87	35499.87	35499.87	0.00	0.00	0.00	0.00

表3 2005 - 2015 年杞麓湖流域景观格局指数总体变化

Tab.3 Variation of the landscape pattern indices in Qilu Lake basin, 2005 - 2015

景观指数	2005 年	2010 年	2015 年
最大斑块指数	25.2036	24.6789	21.6898
斑块密度	2.5071	2.2113	2.1296
平均斑块面积	39.8875	45.2228	46.9575
形状指数	20.4451	19.8807	20.3353
蔓延度	44.6891	45.5065	46.3205
聚集度	82.3614	82.9004	82.5257
香浓均匀度指数	0.7943	0.7932	0.7828
香浓多样性指数	1.7453	1.7427	1.8025

2005 - 2015 年的 10 年间,杞麓湖流域景观格局聚集程度增加,异质性略有减弱,破碎化程度降低,均匀程度和丰富程度变化不大。自然情况下,景观格局应该向破碎化、均匀化和多样化的方向发展,与杞麓湖流域的景观格局变化反差较大,因此可以反映流域内的人类活动增强,且逐步使景观格局发生改变。

3.2.3 不同景观类型景观格局特征 由于 2005 - 2015 年间杞麓湖流域耕地转建设用地、湖泊水面转湖滨湿地最为突出,且这 4 种景观也是变化最显著

围湖修坝、造田等人类活动的影响,使湖泊水面不断缩小,同时水葫芦未能及时打捞,芦苇的大面积生长,导致湖滨带不断扩大,最终在生态修复过程中形成大面积湖滨湿地。

3.2.2 景观格局整体变化特征 2005 - 2015 年,斑块密度下降,平均斑块面积上升,说明流域景观破碎化程度降低;最大斑块指数下降,有林地作为流域内的优势景观,10 年中连通程度和影响程度降低;形状指数下降,聚集度和蔓延度上升,说明景观聚集程度提升,空间分布逐渐趋向集中,景观的异质性略有减弱;香浓均匀度指数和香浓多样性指数变化较小,说明景观均匀、丰富程度趋于稳定(表 3)。

的类型;其中水田、建设用地大都分布于湖盆坝区,对湖泊水质构成了巨大的威胁,因此有必要分析杞麓湖流域水田、旱地、建设用地和水域四类景观格局特征。分别选取 4 种类型具有代表性的景观指数,结果见表 4。

2005 - 2015 年,水田面积减少,斑块密度下降,平均斑块面积上升,表明破碎程度显著下降,异质性降低;形状指数降低,聚集度增加,表明水田斑块类型简化,聚集程度提升。为方便耕作、管理以及扩大收益,10 年中人类活动使得水田景观更加规整、聚集。旱地类型的景观格局变化不明显,面积先增后减,斑块密度降低,平均斑块面积增加,斑块异质性减弱,破碎化程度略有降低;形状指数降低,斑块趋于简化,聚集度变化较小。旱地类型景观指数变动较小,10 年间人类活动对于旱地变化的影响较小。建设用地类型的面积不断提升,最大斑块指数增加,斑块密度降低,平均斑块面积增加,破碎化程度明显降低;形状指数和聚集度增加,斑块复杂程度和聚集程度稍有提升。10 年中通海县人口不断增加,社会经济快速发展,导致建设用地景观类型不断扩张、归

表 4 不同类型景观指数变化情况

Tab.4 Variation of the landscape pattern indices for each landscape type

景观类型	指数	2005 年	2010 年	2015 年
水	类型面积	9331.20	8927.01	8782.02
	斑块密度	0.2648	0.0845	0.0845
	平均斑块面积	99.2681	297.5670	292.7340
田	形状指数	13.6465	11.7762	12.3780
	聚集度	88.0876	89.6345	88.9267
旱	类型面积	6100.11	6288.84	5854.68
	斑块密度	0.5380	0.5239	0.4958
	平均斑块面积	31.9377	33.8110	33.2652
地	形状指数	22.4598	22.3785	21.9942
	聚集度	74.9194	75.3501	74.8687
建设用地	类型面积	2771.01	3056.94	3647.43
	最大斑块指数	1.4375	1.9942	2.6856
	斑块密度	0.6451	0.6000	0.5634
	平均斑块面积	12.1005	14.3518	18.2372
	形状指数	21.0085	20.6992	21.3704
水域	聚集度	65.1896	67.3670	69.0001
	类型面积	3792.42	3824.01	2511.00
	最大斑块指数	10.6829	10.7719	7.0733
	形状指数	4.3358	3.6087	6.0804

并,影响力大幅提升,聚集程度增强,破碎化程度下降。杞麓湖流域中水域总面积先少量增加后大量减少,主要由于后 5 年杞麓湖湖泊面积大量减少,转变为湖滨湿地,其中最大斑块指数反映湖泊水面占流域总面积的比例,比例下降较多;而水域类型的形状指数先减后增,说明流域中水域类型的斑块愈加复杂,且更加分离。

3.3 景观格局与水质的关系

3.3.1 整体景观格局与水质的关系 不同的景观指数对于水质指标的影响是不一样的。整体景观格局变化与水质指标相关性分析结果见表 5。以下分析均选取强相关以上关系进行说明。最大斑块指数

与高锰酸盐指数、叶绿素呈负相关,说明最大斑块指数的增加会抑制水质恶化,但流域内优势景观有林地面积逐渐减少,涵养水源、保持水土和滞留部分污染物的能力降低,湖泊水质下降;斑块密度与高锰酸盐指数、生化需氧量呈负相关,平均斑块面积与其相反,形状指数与总氮呈负相关而聚集度与其相反,说明破碎化程度下降,聚集程度上升,总氮、总磷、高锰酸盐指数和生化需氧量四类的累积程度加大,部分污染物无法得到有效吸收便进入水体;均匀度指数与高锰酸盐指数和叶绿素呈负相关,多样性指数与叶绿素呈正相关,说明均匀程度提升,景观类型间差异降低,斑块间变换使污染物流动困难,在不同斑块中得以有效吸收和转化。

3.3.2 不同类型景观格局与水质的关系 水田、旱地、建设用地和水域 4 种类型景观格局变化与水质污染指数之间的相关性分析结果见表 6。

2005 - 2015 年,水田类型的面积与高锰酸盐指数和生化需氧量呈负相关,面积减少有利于湖泊水质好转;斑块密度和形状指数与总氮、总磷、高锰酸盐指数和生化需氧量呈负相关,平均斑块面积和聚集度与这 4 个指标呈正相关,说明在杞麓湖流域水田景观破碎程度降低、异质性减弱、斑块类型简化的过程中,高度聚集的水田主要分布于湖盆坝区,该区域基本无林地分布,水源涵养功能与污染物吸收能力低,且农药化肥施用量高,未被吸收的养分和化学物质会随径流流失,导致残余污染物大量流入水体;聚集度与叶绿素 a 呈负相关,虽然氮肥、磷肥等残留物进入水体会使浮游植物生长状况变好,但随着通海县杞麓湖湿地公园的规划实施,大部分绿藻、水葫芦等浮游植物集中生长于岸边湖滨带。

表 5 景观格局变化与水质指标的相关系数

Tab.5 Correlation coefficients between landscape pattern indices and water quality parameters

指标	总氮	总磷	氨氮	高锰酸盐指数	生化需氧量	叶绿素 a	透明度
最大斑块指数	-0.153	-0.371	-0.651	-0.892	-0.607	-0.994	0.848
斑块密度	-0.755	-0.882	-0.008	-0.973	-0.976	-0.690	0.306
平均斑块面积	0.734	0.868	0.039	0.980	0.969	0.712	-0.335
形状指数	-0.938	-0.836	0.873	-0.266	-0.659	0.304	-0.688
蔓延度	0.514	0.693	0.318	0.996	0.861	0.880	-0.586
聚集度	0.972	0.895	-0.810	0.377	0.742	-0.190	0.598
均匀度指数	-0.101	-0.322	-0.690	-0.867	-0.564	-0.998 *	0.874
多样性指数	-0.024	0.201	0.775	0.798	0.457	0.998 *	-0.928

注:“*”代表在 0.05 水平(双侧)上显著相关;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 为中等程度相关,0.2~0.4 为弱相关,0.0~0.2 表示极弱相关或无相关。

Note: “*” significant correlation at the 0.05 level (bilateral); Correlation coefficient: 0.8 - 1.0 extremely strong correlation, 0.6 - 0.8 strong correlation, 0.4 - 0.6 moderate correlation, 0.2 - 0.4 weak correlation, 0.0 - 0.2 extremely weak correlation or no correlation.

表6 不同景观类型变化与水质指标的相关系数

Tab.6 Correlation coefficients between landscape pattern indices and water quality parameters for each landscape type								
景观类型	指数	总氮	总磷	氨氮	高锰酸盐指数	生化需氧量	叶绿素	透明度
水田	类型面积	-0.720	0.741	-0.058	-0.984	-0.964	0.888	/
	斑块密度	-0.873	-0.960	0.198	-0.905	-1.000 *	0.976	/
	形状指数	-0.982	-0.999 *	0.497	-0.725	-0.952	0.995	/
	平均斑块面积	0.884	0.966	-0.219	0.896	1.000 **	-0.980	/
	聚集度	0.999 *	0.982	-0.624	0.611	0.894	-0.968	/
旱地	类型面积	0.420	0.877	-0.963	-0.491	-0.064	-0.144	/
	斑块密度	-0.342	-0.544	-0.491	-0.963	-0.749	0.596	/
	形状指数	-0.178	-0.394	-0.632	-0.903	-0.626	0.451	/
	平均斑块面积	0.976	1.000 **	-0.467	0.748	0.962	-0.998 *	/
	聚集度	0.805	0.652	-0.974	-0.011	0.424	-0.603	/
建设用地	类型面积	0.334	0.537	0.499	0.96	0.744	/	0.735
	斑块密度	-0.563	-0.734	-0.261	-1.000 *	-0.89	/	-0.537
	最大斑块指数	0.458	0.646	0.377	0.989	0.827	/	0.636
	平均斑块面积	0.376	0.574	0.459	0.972	0.773	/	0.703
	形状指数	-0.447	-0.235	0.97	0.465	0.034	/	0.998 *
	聚集度	0.582	0.749	0.24	1.000 **	0.9	/	0.519
水域	类型面积	0.006	-0.218	-0.764	-0.808	-0.472	/	/
	最大斑块指数	0.006	-0.218	-0.764	-0.808	-0.472	/	/
	形状指数	-0.272	-0.049	0.908	0.622	0.221	/	/

注：“*”代表在0.05水平(双侧)上显著相关;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为中等程度相关,0.2~0.4为弱相关,0.0~0.2表示极弱相关或无相关。

Note: “*”significant correlation at the 0.05 level (bilateral); Correlation coefficient: 0.8 - 1.0 extremely strong correlation, 0.6 - 0.8 strong correlation, 0.4 - 0.6 moderate correlation, 0.2 - 0.4 weak correlation, 0.0 - 0.2 extremely weak correlation or no correlation.

旱地类型的面积与氨氮呈负相关,斑块密度和形状指数与高锰酸盐指数呈负相关,平均斑块面积和聚集度与总氮、总磷和生化需氧量呈正相关,与叶绿素呈负相关,旱地景观类型由于其景观指数值变化并不明显,虽然聚集程度增加、斑块异质性降低且趋于简化,由于面积减少,农药化肥施用较水田少;尽管其污染物更容易流失,但距离湖泊较远,周围一般分布有林地,对污染物吸收较好,同时杞麓湖流域旱地主要种植玉米、烤烟和豆类等作物,其植物根系部分对NH₄⁺-N等物质也有吸收作用,因此旱地对湖泊水质影响较水田弱。

建设用地类型面积、最大斑块指数、平均斑块面积和聚集度与高锰酸盐指数、生化需氧量和透明度呈正相关,斑块密度与各指标相关性则相反,说明人口增长带动建设用地面积增加、破碎化程度降低、聚集程度提升、斑块复杂程度与影响力增强,且杞麓湖流域第二产业发达,导致生活和生产污水量增多,而现有的污水处理厂只能覆盖秀山街道及附近区域,其余区域污染物易对湖泊水质造成影响;除斑块密度外其余指标均与透明度呈正相关,说明建设用地对于湖泊水质浑浊程度有较大影响,建筑垃圾、砂石等在城市建设过程中不可避免地进入水体,同时混凝土会破坏原有土地生态,污染物滞留时间短,更易

进入水体,使湖泊可见度降低。

水域类型面积和最大斑块指数与氨氮、高锰酸盐指数呈负相关,湖泊水面缩减导致水量减少,稀释能力降低,污染物浓度增高;形状指数的相关性则相反,说明湖泊水域斑块复杂化,污染物更易残留,污染程度增强。

4 讨论

4.1 从时空角度探讨景观格局与水质变化可行性

景观格局与水质变化相关关系的研究主要分为动态和静态两种模式,即时间和空间两个角度。张洪(2013)和朱兰保等(2014)采用多年的年平均水质数据与景观格局进行分析,探讨了景观格局对水质的时间序列影响情况,但不足以显示水质变化对景观格局变化的具体响应;郭青海(2009)和伍恒赞等(2014)通过汇水单元或子流域划分,研究不同区域的景观格局变化与水质的联系,从空间上分析了两者的相关性,但时间期限较短。本文采用前者的方式,从动态角度探讨杞麓湖流域景观格局与湖泊水质变化的关系,能从流域整体层面了解2005-2015年杞麓湖流域景观格局变化、湖泊水质变化以及两者间的关联程度;同时,由于景观格局对水质变化的影响存在滞后性,是一个长期的过程,且“十二五”规

划期间对湖泊水质污染严格管治,为较好地了解两者间的相关性,根据规划周期选取了 2005 年、2010 年和 2015 年 3 个时间点进行分析。在分析整体景观与水质关系后,根据流域土地利用动态特点以及空间分布情况,着重探讨水田、旱地、建设用地和水域 4 种类型对水质的影响,寻求人类活动过程中土地利用方式改变与湖泊水质的关系,虽未通过定量方式划分汇水单元或子流域,但从定性角度探讨了杞麓湖坝区土地的利用特征,一定程度上弥补了空间上的缺陷。

从水质状况来看,近 10 年来,杞麓湖总磷和叶绿素 a 波动较大,2005 年、2010 年和 2015 年 3 期数据呈少量降低趋势,与水质长期变化情况不符,相关系数计算时存在误差。因此。本研究采用三点移动平均法(徐建华,2014)处理这 2 个指标并得到平滑趋势线,以降低误差,使研究结果更加合理。

4.2 杞麓湖流域景观格局与水质变化的相关性

4.2.1 景观格局变化特征 刘阳等(2008)分析 1989-2005 年杞麓湖流域土地利用变化情况,得出优势土地利用类型为森林与农田,森林和建筑用地面积增加而农田面积显著减少,湖滨存在大量建筑用地和农田交错混合。本文中,2005-2015 年杞麓湖流域同样以林地和耕地为主,与其相同,2005 年前湖滨带复杂的用地情况也导致近年来大量湖滨湿地的出现;董琼(2009)分析 1989-2005 年杞麓湖流域景观变化情况,其多样性提高,优势度减小,均匀度增强,破碎度降低;本研究中,2005-2015 年流域整体景观格局向着聚集化、规整化的方向发展,破碎化程度降低,林地优势度减小,与其相同,而与自然作用相反,说明人类活动对景观变化影响较大。

4.2.2 景观格局与水质变化 景观聚集、破碎度能直接影响景观中的能量流动、物质循环等生态过程(岳隽等,2008)。杨娅楠等(2016)探究高原湖泊抚仙湖土地利用格局与水质变化关系,得出流域景观格局破碎化加重与水质变化呈显著正相关;本研究结论与其不同,杞麓湖流域景观聚集度提升、破碎度降低与水质指标呈正相关,可能与杞麓湖流域特殊的地貌有关,其湖盆坝区占流域总面积的 61%,该比例较其它高原湖泊流域大(如抚仙湖、星云湖等),且主要分布水田和建设用地,逐渐聚集的斑块更易累积污染物质,吸收和处理能力不足从而污染湖泊水质。

4.2.3 景观类型对水质指标的影响 很多学者分析了不同景观类型,探讨了其与水质的关系(张洪

等,2013;王明浩等,2015;杨娅楠等,2016)。本研究在参考文献的基础上,结合流域中景观变化特点以及空间分布情况,选择水田、旱地、建设用地和水域 4 种景观类型进一步分析,讨论各指数与水质指标之间的关系。其中前 9 年杞麓湖水质逐渐变差,耕地与建设用地是水质退化的主要贡献源,与其他研究结果相吻合(刘阳等,2008;赵锐锋等,2013;韩黎阳等,2014;杨娅楠等,2016)。水田种植以蔬菜为主,农药、化肥的施用量均高于旱地,且水田聚集度不断增加,过量农药化肥的残留污染物更容易累积并流入湖泊。杨逢贵(2013)和张军莉等(2013)也指出水田单位面积入湖污染负荷强度处于较高水平;而旱地以种植玉米、豆类和烤烟为主,一方面农药化肥施用量较低,另一方面分布在流域外围,影响较水田小;建设用地逐渐扩张,与坝区水田连通性较高,且近年来生活污水、生产废水排放量不断增加,通海县污水处理厂仅能处理秀山街道及附近区域的污水,无法全面地对整个流域的污水进行净化稀释,给湖泊水质带来压力;湖泊水体面积缩减则仅对氨氮、高锰酸盐指标影响较大,其缩减区域并没有完全干涸,主要转变为湖滨湿地,对水体有一定净化作用,因此影响力较水田和建设用地小。

4.2.4 管控措施对水质的影响 2015 年杞麓湖整体水质有所改善,主要由于“十二五”规划期间提出了“12345”治理思路,进行严管严控,实施“控源、截污、生态修复”手段。建设用地、水田等景观类型虽然聚集程度提升,但截污治污工程截断入湖污染来源,污染物更容易集中处理,统一设置河道拦截及末端湿地处理工程能够有效削减入湖污染负荷;实施生态修复工程,退耕还林、封山育林和退田还湖使流域内生态环境效益明显提高。管控措施虽从“十二五”规划期初开始实施,但由于景观格局变化对湖泊水质影响存在滞后性,因此直到 2015 年才收到成效。

5 结论与展望

(1)2005-2014 年杞麓湖水质情况偏差,其中总氮、高锰酸盐指数、生化需氧量和叶绿素 a 呈显著增长趋势,氨氮、总磷和透明度波动较大,2015 年整体水质有所改善,但仍为劣 V 类水。

(2)杞麓湖流域主要景观类型是林地和耕地,占流域总面积的 74% 以上;10 年间湖滨湿地、湖泊水面、建设用地和耕地变化量最大;景观格局聚集程度增加,异质性略有减弱,破碎化程度降低,分布格局

逐渐简化,均匀程度变化不大,人类活动增强对景观格局规整化影响较大。

(3)水田、旱地与建设用地聚集程度增强、破碎化降低与水质指标呈现正相关,但旱地影响较弱,水域面积与氨氮和高锰酸盐指数呈负相关、斑块复杂化与其呈正相关;水田与建设用地是杞麓湖水质退化的主要贡献源,旱地和湖泊水面影响较小。

(4)水田面源污染是杞麓湖的主要污染来源之一,蔬菜种植规模大,但现在农业面源污染的研究主要停留在排污系数法对农药化肥流失量的计算,并非入湖量,今后可分水田、旱地和园地,从流失量、入湖量方面结合水文条件展开分析,进一步把握农业面源污染的空间分布特征及其污染水平,为科学合理施用农药化肥提供依据。

(5)杞麓湖2013年和2014年的水质最差,景观格局变化对湖泊水质的影响存在滞后性;要进一步探究景观格局变化与水质的因果关系,还应增加对突变点及突变前年份数据,以深入研究景观变化情况。

参考文献

董琼,2009. 高原湖泊杞麓湖流域土地利用变化及生态安全评价[D]. 北京:北京林业大学.

傅伯杰,1995. 黄土区农业景观空间格局分析[J]. 生态学报, 15(2):113-120.

傅金成,郑世泽,李国志,2009. 现代农业生产对地下水质的影响评价[J]. 陕西水利, (6):102-103.

郭青海,马克明,张易,2009. 城市土地利用异质性对湖泊水质的影响[J]. 生态学报, 29(2):776-787.

韩黎阳,黄志霖,肖文发,等,2014. 三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响[J]. 环境科学, 35(3):1091-1097.

黄金良,李青生,洪华生,等,2011. 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, 32(1):64-72.

荆春燕,张秀敏,赵祥华,2004. 抚仙湖水质变化趋势分析[J]. 环境科学导刊, 23(s1):110-111.

刘宝军,王荣女,2011. 基于GIS的林地景观格局分析及栅格单元确定[J]. 西部林业科学, 40(1):76-79.

刘颂,李倩,郭菲菲,2009. 景观格局定量分析方法及其应用进展[J]. 东北农业大学学报, 40(12):114-119.

刘阳,吴钢,高正文,2008. 云南省抚仙湖和杞麓湖流域土地利用变化对水质的影响[J]. 生态学杂志, 27(3):447-453.

孙庆先,李茂堂,路京选,2009. 基于TM影像数据的五日生化需氧量浓度估计[J]. 国土资源遥感, 80(2):82-86.

汪荣,2007. 福建茫荡山自然保护区森林景观格局研究[J]. 中南林业科技大学学报, 27(4):150-153.

王明浩,王文杰,冯宇,等,2015. 湖南水府庙水库流域景观格局与水质特征关系分析[J]. 环境工程技术学报, 5(4):333-340.

伍恒赞,张起明,齐述华,等,2014. 土地利用景观格局对信江水质的影响[J]. 中国环境监测, 30(3):166-172.

徐建华,2014. 计量地理学[M]. 北京:高等教育出版社:74-79.

杨逢贵,赵磊,聂菊芬,等,2013. 杞麓湖南岸蔬菜种植区农业面源污染物流失特征[J]. 环境科学导刊, 32(4):30-34.

杨娅楠,王金亮,陈光杰,等,2016. 抚仙湖流域土地利用格局与水质变化关系[J]. 国土资源遥感, 28(1):159-165.

于术桐,黄贤金,程绪水,等,2011. 流域土地利用变化的水质响应研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 21(3):422-426.

岳隼,王仰麟,李贵才,等,2008. 深圳市西部库区景观格局与水质的关联特征[J]. 应用生态学报, 19(1):203-207.

张洪,雷冬梅,黎海林,等,2013. 滇池流域建设用地景观格局与滇池水质关系分析[J]. 水土保持通报, 33(4):103-107.

张军莉,赵磊,赵琳娜,等,2013. 杞麓湖湖滨带农田排涝区农田排水入湖污染负荷研究[J]. 环境科学导刊, 32(1):33-34.

张娜,2014. 景观生态学[M]. 北京:科学出版社:224-248.

赵锐锋,姜朋辉,赵海莉,等,2013. 黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析[J]. 生态学报, 33(14):4436-4449.

朱兰保,盛蒂,戚晓明,等,2014. 基于RS和GIS的景观格局变化对城市湖泊水质影响的研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 16(1):102-105.

Osborne L L, Wiley M J, 1988. Empirical Relationships Between Land Use/Cover and Stream Water Quality in Agricultural Watersheds[J]. Journal of Environmental Management, 26(1):9-27.

Ren Wenwei, Zhong Y, John Meligrana, et al, 2003. Urbanization, land use, and water quality in Shanghai: 1947-1996[J]. Environment International, 29(5):649-659.

Tong S T, Chen W, 2002. Modeling the relationship between land use and surface water quality[J]. Journal of Environmental Management, 66(4):377-393.

(责任编辑 万月华)

Relationship between Landscape Pattern Changes and Water Quality
in the Qilu Lake Basin of Yunnan Plateau

PU Jun-wei, ZHAO Xiao-qing, GU Ze-xian, LU Fei-fei, ZHENG Tian-tian,
GAO Xiang-yu, CHEN Jun-xu, YI Qi

(College of Resources Environment & Earth Science, Institute of the “Belt and Road” Strategy,
Yunnan University, Kunming 650500, P.R.China)

Abstract: Qilu Lake is one of nine plateau lakes in Yunnan Province. In recent years, increased human activity has changed the original landscape pattern and water quality in the Qilu Lake Basin has declined. In this study, we explored the relationship between changes in landscape pattern and water quality using Pearson correlation analysis of landscape pattern indices and water quality parameters. The results provide a scientific reference for ecosystem protection and watershed management. The evolution of landscape patterns in the Qilu Lake basin from 2005 to 2015 were analyzed using GIS and remotely sensed data collected in 2005, 2010 and 2015. Water quality parameters (COD_{Mn} , BOD_5 , TN, TP, NH_3-N , Chl-a and SD) were provided by the Yunnan Province Environmental Monitoring Center. Results indicate: (1) Water quality in Qilu Lake was poor during the period 2005 – 2014. Among the seven water quality parameters, TN, COD_{Mn} , BOD_5 and Chl-a increased significantly and NH_3-N , TP and SD fluctuated widely. While water quality improved in 2015, it did not meet Grade V standards. (2) The primary land uses in Qilu Lake basin are forestland and farmland, together accounting for 76.95%, 76.54% and 74.53% of the total area in 2005, 2010 and 2015. Over the ten-year period, the area of construction lands increased by 876.42 hm^2 and lakeside wetlands by 1432.08 hm^2 , while water-covered areas decreased by 1281.42 hm^2 and farmland by 794.61 hm^2 . The degree of landscape aggregation increased, slightly reducing heterogeneity. There was no obvious change in diversity or uniformity. Human activities had a large impact on land use. (3) The aggregation of paddy field, dry cropland and construction land increased, exhibiting a positive correlation with water quality parameters, except for NH_3-N . Water-covered areas were negatively correlated with NH_3-N and COD_{Mn} . Paddy fields and construction lands were the main drivers of water quality deterioration in Qilu Lake and non-point source pollution from paddy fields was the primary pollution source for Qilu Lake.

Key words: landscape pattern; Qilu Lake basin; lake water quality