

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0681

夏品华,孔祥量,喻理飞.2016.草海湿地小流域土地利用与景观格局对氮、磷输出的影响[J].环境科学学报,36(8):2983-2989

Xia P H, Kong X L, Yu L F. 2016. Effects of land-use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Caohai wetland watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(8): 2983-2989

草海湿地小流域土地利用与景观格局对氮、磷输出的影响

夏品华^{1,2}, 孔祥量³, 喻理飞^{1,*}

1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025

2. 贵州师范大学 贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001

3. 贵州省第一测绘院, 贵阳 550004

收稿日期: 2015-06-24

修回日期: 2015-09-25

录用日期: 2015-10-02

摘要: 识别主要污染物和污染源对草海湿地生态系统的保护与管理具有重要的现实意义。基于 2012 年 5—10 月 6 个小流域的水质观测数据、土地利用结构与景观格局指数, 研究了草海湿地入湖小流域氮、磷输出的时空变化规律及其与景观格局的关系, 以为草海湿地综合治理提供参考。结果表明, 草海湿地北面建设用地面积比例呈西北、东南方向逐渐降低和景观破碎度逐渐减小的趋势, 具有明显的城市-城郊-农村的景观格局梯度, 景观格局影响流域水质。多元统计分析表明, 小流域氮磷输出受景观组成属性和空间属性综合影响, 城镇建设用地百分比与 TN、TP 和 COD 呈显著正相关关系 (r 分别为 0.995、0.978 和 0.996, $p < 0.01$), 景观破碎度 (CONTAG、ED、MPS) 和多样性 (SHDI) 与水质 (TN、TP、COD) 具有显著的相关关系, CCA 的第一排序轴解释了建设用地面积比例、景观指数与水质指标相关性的 96.0%。可见, 威宁城镇化快速发展威胁了草海湿地生态安全, 需进行草海周边城镇化进程的调整和控制。

关键词: 流域; 土地利用; 景观格局; 氮、磷输出; 草海湿地

文章编号: 0253-2468(2016)08-2983-07

中图分类号: X522

文献标识码: A

Effects of land-use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Caohai wetland watershed

XIA Pinhua^{1,2}, KONG Xiangliang³, YU Lifei^{1,*}

1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025

2. Guizhou Key Laboratory for Mountainous Environmental Information and Ecological Protection, Guizhou Normal University, Guiyang 550001

3. Guizhou First Surveying and Mapping Institute, Guiyang 550004

Received 24 June 2015;

received in revised form 25 September 2015;

accepted 2 October 2015

Abstract: Identifying the main pollutants and sources of pollution has important practical significance for the protection and management of the Caohai wetland ecosystem in Guizhou Plateau. Based on the water quality data, land use structure and landscape pattern metrics of six sub-watersheds in Caohai from May, 2012 to October, 2012, the spatial-temporal variation characteristics of TN, TP released from sub-watersheds and flowed into lake in Caohai and its relationship with the landscape patterns were studied, to provide guidance for the comprehensive management of Caohai wetland. The results show that the northern land area of Caohai watershed landscape had a gradually decreasing trend from northwest to southeast, with the gradual reducing of landscape fragmentation, and exhibited an obvious City-Suburb-Rural landscape pattern gradient that greatly affects the water quality. The multivariate statistical analysis shows that the nitrogen and phosphorus release from a small watershed were comprehensively influenced by landscape composition and spatial attributes. It is also found a positive correlation between the portion of urban construction area with TN, TP and COD content (the r value is 0.995, 0.978 and 0.996 respectively, $p < 0.01$). The landscape fragmentation degree (CONTAG, ED, MPS) and landscape diversity were dramatically related to water quality (TN, TP, COD). The result of CCA indicated that the first ordination axis could explain 96.0% of the correlations between construction land

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (No.2011BAC02B02); 贵州省重大科技专项 (No.20160048)

Supported by the National Key Technology R&D Program (No.2011BAC02B02) and the Guizhou Science and Technology Major Project (No.20160048)

作者简介: 夏品华 (1981—), 男, 副研究员 (博士生), E-mail: pinhuayy@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: lfyu@gzu.edu.cn

Biography: XIA Pinhua (1981—), male, associate professor (Ph.D.candidate), E-mail: pinhuayy@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: lfyu@gzu.edu.cn

ratio, landscape index and water quality indicators. The rapid development of urbanization gravely threatens the ecological security of Caohai, and which needed to further adjustment and control.

Keywords: watershed; land use; landscape pattern; TN and TP exports; Caohai wetland

1 引言(Introduction)

流域氮、磷等营养物质的输出是引起江河湖泊富营养化的重要原因(赵军等,2011;韩黎阳,2014)。氮磷的产生、迁移和转化与流域土地利用方式及景观格局紧密相关,随着人类活动的增加,流域土地覆盖变化,从自然植被逐渐向以人类活动为主的农业用地、城镇建设用地转变,而揭示景观格局与地表水质之间的关系,对优化调整流域景观结构,有效管理流域中的养分,实现对流域水污染的控制具有重要理论和现实意义。近年来,景观格局与水质的关系备受关注(Maillarda *et al.*, 2008; Nash *et al.*, 2009; 郝敬锋等, 2010; Lee *et al.*, 2010; 张大伟等, 2010; 黄金良等, 2011; 李明涛等, 2013), 尤其是“3S”技术的成熟促进了相关领域的发展,有关土地利用方式、景观格局及不同景观尺度对水质的影响也有不少的报道(Basnyat *et al.*, 1999; Jung *et al.*, 2008; 官宝红等, 2008; Amiri *et al.*, 2009; 欧洋等, 2012);然而,同时研究流域土地利用方式与景观格局对氮、磷输出的影响则少见报道,且缺乏对云贵高原湿地的关注。

草海是典型的喀斯特高原湖泊,为国家一级重要湿地,地处贵州省西北边缘威宁县县城西南隅。由于人类活动的干扰(如:开沟排水、污水直排),该湿地面积近50年来缩小了近一半,沼泽化趋势明显,上游水体污染较为严重。这不仅威胁到草海湿地的生态健康,而且会对威宁的经济社会发展产生极大的影响,因此,草海湿地的综合治理得到了中央和地方各级政府的高度重视(夏品华等,2012)。治湖先治河,只有草海入湖河流水质改善,草海湿地水质才有可能好转。而揭示流域土地利用、景观格局与氮、磷输出的关系对草海湿地治理与管理具有重要意义。因此,本研究以贵州高原草海流域为研究对象,基于小流域监测的水质数据,结合GIS技术,运用CCA等多元统计方法,在宏观景观类型和微观斑块水平探讨流域景观格局与氮、磷输出的关系,以期对草海流域相关规划与水环境保护提供科学依据。

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 研究区域概况

草海国家级自然保护区(北纬 $26^{\circ}47'32''$ ~ $26^{\circ}52'52''$,东经 $104^{\circ}10'16''$ ~ $104^{\circ}20'40''$)位于云贵高原中部顶端的乌蒙山麓腹地,是典型的喀斯特高原湖泊湿地,海拔2170 m,平均水深约2 m,最深不到5 m。保护区总面积 96 km^2 ,水域面积 25 km^2 。属亚热带季风气候,年平均气温 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 950.9 mm 。汇入草海的河流大多数是发源于泉水的短小河溪,主要有卯家海子河、东山河、白马河和中河等小河流。草海自然保护区位于威宁县草海镇境内,草海镇是威宁县政治、经济和文化的中心,总人口56369人,密度大;人为生产生活活动对草海湿地构成了严重的威胁,加剧了草海湿地退化进程(夏品华等,2012)。

2.2 土地利用信息及流域划分

本研究结合SPOT5遥感影像图、1:10000地形图和土地利用现状图对遥感影像进行人机交互式屏幕目视解译方式判读,获得草海自然保护区详细水系及沟渠系统分布情况。利用ArcGIS9.3平台水文分析模块划分小流域,并以实地调查为基础,把草海划分为6个人湖小流域,每个小流域出口设置采样断面1个,即富民村小流域S1、中河小流域S2、白马河小流域S3、东山河小流域S4、卯家海子河小流域S5和草海出口小流域S6(图1)。应用MapGIS67平台获得草海流域土地利用现状图土地利用分类信息,将研究区域土地利用主导类型分为农用地、林地、建设用地、沼泽地和其它5大类。



图1 水质采样点

Fig.1 Location of the sampling sites

2.3 采样与分析方法

2012 年 5—10 月期间,进行每月 1 次的采样(图 1).水样的保存与分析参考《水和废水监测分析方法》(第 4 版),总氮(TN)的测定采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法,总磷(TP)的测定采用钼酸铵分光光度法,化学需氧量(COD)的测定采用滴定法.

2.4 景观指数分析与计算

景观指数能够高度浓缩景观格局信息,并反映其结构组成和空间配置某些特征.本文从能表征景观的破碎度、多样性和物理连接度等 6 个指标表征景观特征(表 1).通过 MapGIS67 与 ArcGIS9.3 平台数据间的一系列处理与格式转换后,所获得的栅格数据经过 Fragstats3.3 软件计算获得各景观指数值.

表 1 草海小流域景观指数

Table 1 Landscape pattern indices in Caohai sub-watershed

景观指数	指数描述	范围
斑块密度(PD)	单位面积上的斑块数,反映景观破碎化程度	> 0
边缘密度(ED)	单位面积上各斑块类型边界长度或总边界长度	≥ 0
平均斑块面积(MPS)	景观或各类型中斑块的平均面积	> 0
平均斑块形状(SHMN)	经过某种数学转化的斑块边长与面积之比,反映斑块形状的复杂性	≥ 1
蔓延度指数(CONT)	景观里不同拼块类型的团聚程度或延展趋势	0~100
香农多样性指数(SHDI)	反映景观异质性	≥ 0

3 结果(Results)

3.1 流域土地利用类型与景观格局

本研究利用遥感影像数据进行土地利用分类,通过监督和非监督分类相结合的方式将遥感影像分为旱地、林地、草地、水域、建设用地和湖泊水面等土地利用类型.草海子流域土地利用面积比例见图 2.耕地是草海自然保护区的主要土地利用类型,所占比例为 59.57%~81.33%;林地面积比例较小(12.51%),约为 13%,中河小流域所占比例最大不到 30%;各小流域建设用地所占比例差异较大,在 3.2%~20.1%之间,富民村小流域所占比例高达 20.1%,而卯家桥等小流域所占比例不到 6%.可见,各小流域间的土地利用结构不同,草海湿地北面建设用地面积比例呈西北、东南方向逐渐降低、景观破碎度逐渐减小的趋势,具有明显的城市-城郊-农

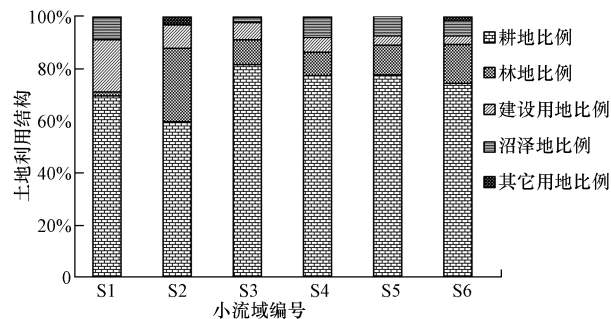


图 2 草海保护区不同小流域土地利用结构

Fig.2 The structure of Land use of sub-watershed in the Caohai Nature Reserve

村的景观格局梯度.

从能表征景观的破碎度、多样性和物理连接度的 6 个指标中,选择了斑块密度、香农多样性指数等景观指数进行分析,结果列于表 2.流域景观格局边缘密度、平均斑块面积和多样性指数均以富民村小流域最大,草海出口小流域最低.而平均斑块形状(SHMN)、蔓延度指数(CONT)在各子流域间变化不大,平均斑块面积(MPS)除 S1 流域外,其它的也很相似.

表 2 草海小流域景观格局指数

Table 2 Landscape pattern metrics in Caohai sub-watershed

采样点	PD	ED	SHMN	CONT	SHDI	MPS
S1	24.53	171.04	1.33	52.83	5.69	4.08×10^6
S2	46.37	135.82	1.37	55.16	4.76	2.16×10^6
S3	45.35	134.44	1.28	57.28	4.27	2.20×10^6
S4	35.01	130.25	1.31	57.92	3.97	2.86×10^6
S5	39.62	128.84	1.32	59.32	3.71	2.52×10^6
S6	47.03	91.94	1.28	60.53	3.57	2.13×10^6

3.2 草海小流域 TN、TP 和 COD 输出的时空特征

如图 3 所示,草海小流域 TN、TP 和 COD 输出具有明显的时空差异.在空间上,富民村小流域 TN、TP 和 COD 最高,分别为 $(11.63 \pm 1.85) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.92 \pm 0.34) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(114.44 \pm 17.16) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水质严重污染;草海出口小流域最低,分别为 $(0.67 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.01 \pm 0.00) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(7.53 \pm 0.55) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水质较好.在时间上,不同小流域 TN、TP 和

COD 季节变化不一致,富民村小流域 10 月 TN、TP 和 COD 最高,而 9 月最低;但草海出口小流域 TN 最高值出现 5 月,最低值出现 9 月,中河小流域 6 月最

高,而 8 月最低.TN、TP 和 COD 输出随着城镇化和景观破碎呈现出梯度分布.

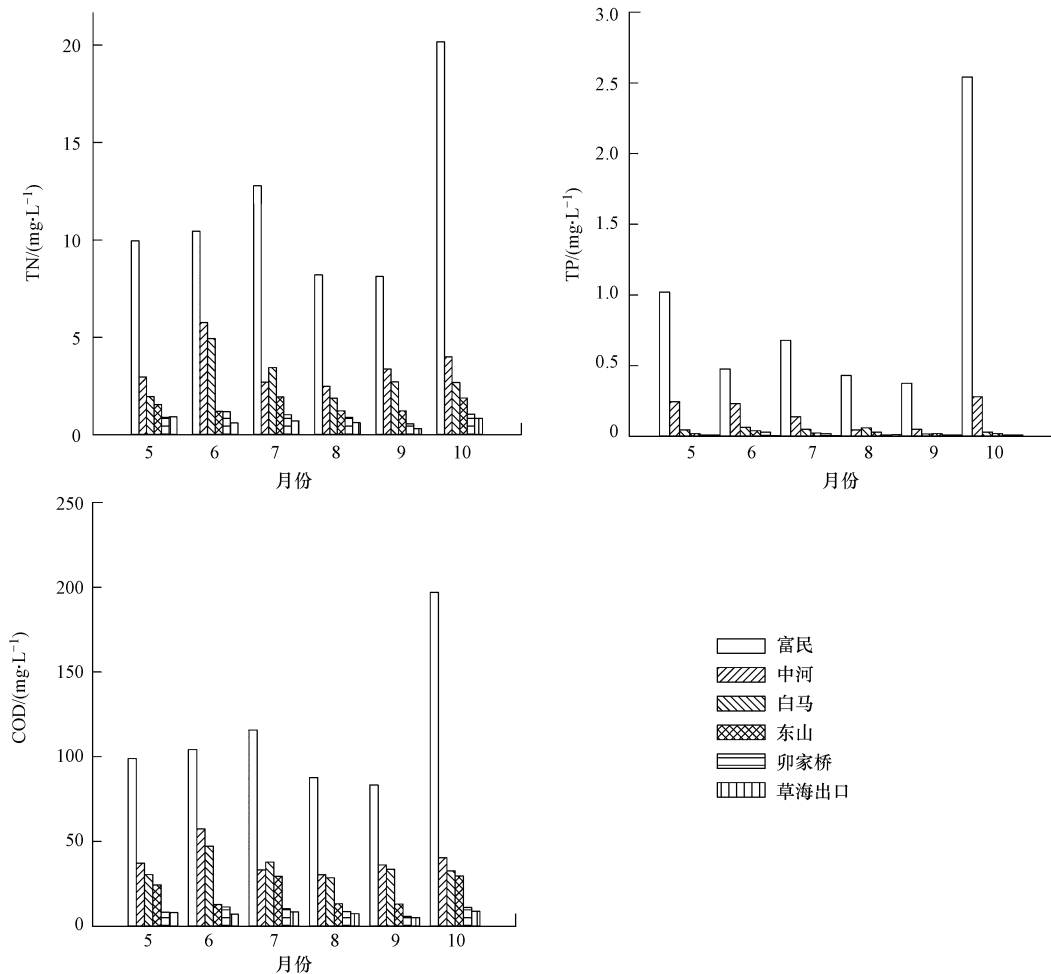


图 3 小流域出水水质监测结果

Fig.3 The water quality in sub-watershed in different time

3.3 景观格局与氮、磷输出的关系

3.3.1 景观格局与氮、磷输出的 Pearson 相关性
 建设用地与 TN、TP、COD 呈显著正相关(表 3),表明建设用地是草海流域入湖水体的主要污染输出者,与草海水质恶化存在密切关联.建设用地的污染类型一般包括:工业点源污染、农村及城镇面源污染等,因

此,建设用地是对水质影响贡献较大的土地类型,这与相关的研究结果类似(Basnyat *et al.*, 1999; Jung *et al.*, 2008; Slive *et al.*, 2001; Tong *et al.*, 2002). 耕地与 TN、TP、COD 相关性不显著,耕地对水质的影响具有不确定性.林地、沼泽地与 TN、TP、COD 相关性不显著,这与水体污染源和景观格局特征有关.

表 3 景观格局与水质评价因子的相关性

Table 3 Correlation between landscape pattern and water quality variabes

	PD	ED	SHMN	CONT	SHDI	MPS	土地利用类型比例				
							耕地	林地	建设用地	沼泽地	其他
TN	-0.76	0.85 *	0.34	-0.90 *	0.95 **	0.86 *	-0.38	-0.49	0.99 **	0.21	-0.01
TP	-0.81	0.80	0.34	-0.84 *	0.91 *	0.89 *	-0.40	-0.51	0.97 **	0.33	-0.04
COD	-0.75	0.86 *	0.35	-0.92 *	0.97 **	0.84 *	-0.37	-0.48	0.99 **	0.17	0.01

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

反映景观破碎程度的指数(ED、CONT 和 MPS)和多样性指数(SHDI)与水体污染具有显著的相关关系,ED(除 TP 外)、MPS 和 SHDI 与水质污染指标呈显著正相关.草海从北部富民村流域至下游草海出口流域,主要入湖河流水质污染指标逐渐递减,污染程度逐渐降低,这与各流域间 ED 值的变化规律吻合. ED 反映了单位面积上各斑块类型边界长度或总边界长度,而斑块边缘长度影响着斑块之间的相互作用程度,ED 越高意味着人为干扰越大,从而使得景观越破碎,流域的水质被污染的风险越大. MPS 表征景观或各类型中斑块的平均面积,反映了景观的破碎程度, MPS 值越大,水质越差. SHDI 反映景观异质性,与水污染指标呈负相关,SHDI 越大,表明景观受人类干扰越大,景观越破碎,导致河流水体受污染风险越大. CONT 与水质呈显著负相关,说明流域间景观的破碎化程度越来越低,水质受人类活动影响越来越小,与草海小流域水质变化规律一致.

3.3.2 景观与氮磷输出的多元逐步回归分析 水质指标与景观指数的多元线性逐步回归模型都达到显著性水平($p < 0.01$). 从表 4 多元回归分析可知,在 5 个景观类型和 6 个景观格局指数中,建设用地面积比例和边缘密度对 TN、TP 和 COD 的输出具有重要的影响,TN、TP 和 COD 随建设用地面积比例增大而升高,随边缘密度增大而减小.

表 4 景观指数与水质指标的多元线性逐步回归模型

Table 4 The optimal multiple linear regression models with stepwise of landscape metrics and water quality indices

水质指标	逐步回归方程	R^2	p
TN	$TN = 72.91a - 0.02b$	0.99	0.00
TP	$TP = 6.62a - 0.00b$	0.96	0.01
COD	$COD = 691.69a - 0.14b$	0.99	0.01

注: a 为建设用地面积百分比, b 为边缘密度.

3.3.3 景观格局与氮、磷输出的典范对应分析 景观与水质排序达到了显著水平,累计能解释景观-含量水质关系的 96%. 建设用地面积比例和多样性指数、蔓延度指数和边缘密度是主要解释变量,相关系数 r 分别为 0.99、0.99、0.96 和 0.92(表 5),表明了城镇化和景观破碎对水质的影响.耕地面积比例、林地面积比例等与水质关系不显著.城镇化是草海水质恶化的主要原因.

表 5 景观格局指数与 CCA 前两轴的典型相关系数

Table 5 The canonical correlation coefficients of landscape metrics and first two CCA ordinations

景观指数	相关系数	
	第一轴	第二轴
PD	-0.79	-0.36
ED	0.92	-0.19
CONT	-0.96	0.23
SHDI	0.99	-0.13
MPS	0.86	0.33
耕地比例	-0.45	0.04
林地比例	-0.46	-0.30
建设用地比例	0.99	0.04
沼泽地比例	0.32	0.75
其他用地比例	-0.03	-0.25

从 CCA 排序图 4 可知,草海 6 个小流域分布在 3 个不同象限内,其中,富民村小流域位于排序图的第一象限,该小流域城市化水平较高,但景观破碎度不高,平均斑块面积较大;中河小流域和白马河小流域在第三象限,该区景观破碎度较高,林地面积比例较大,属于城郊结合区;其它 3 个小流域位于第四象限,耕地面积比例和蔓延度指数较大,为农村区域.

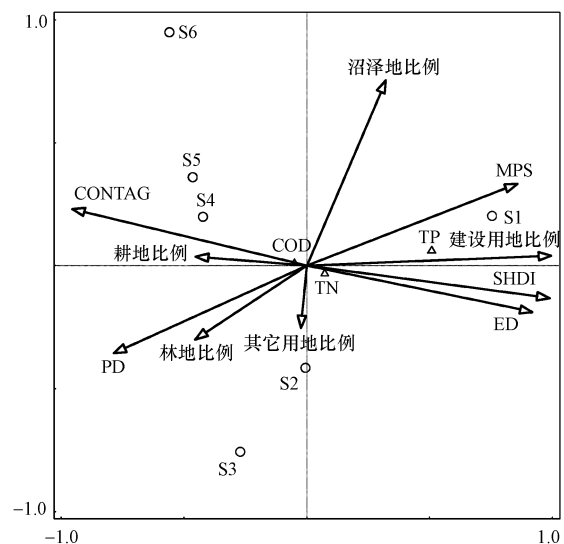


图 4 土地利用景观格局变量与氮、磷输出的典范对应分析

Fig.4 Canonical correlations between N/P exports and land use pattern variables

4 讨论 (Discussion)

4.1 流域土地利用与氮、磷输出关系

由于人类活动干扰及土地类型间对污染负荷

影响程度的差异,使得景观类型和水质之间必然存在着显著关系 (Slive *et al.*, 2001; Tong *et al.*, 2002; 黄金良等, 2011). 本研究中 Pearson 相关分析、多元线性逐步回归分析及典范对应分析结果都表明, 建设用地比例的变化是解释小流域氮、磷输出变化的一个重要指标. 建设用地包含了城镇用地、农村居民点用地、工矿用地、交通用地等污染物输出贡献较大的污染源, 因此, 建设用地所占比重增大会导致流域水质退化. 城镇化不仅可以通过点源污染排放导致水体污染, 而且不透水地面比例的增大, 使得暴雨时期城镇地区在失去自然植被对污染物的截留、吸收作用及土壤的自然下渗过程的情况下, 大量的污染物会通过不透水地面在短时间内进入河流 (Paul *et al.*, 2001; 黄金良等, 2006). 富民村小流域位于草海北部, 该区包括了威宁县县城部分区域, 城市化水平较高, 该小流域出口为人工开挖的排污沟, 氮、磷输出含量最高, 对草海水质影响巨大. 研究表明, 草海上游水质污染严重, 为劣 V 类, 这与威宁县城生活污水大部分未经处理直接排放有关. 中河小流域为威宁城郊结合区, 流域出口氮、磷输出也很高, 对草海的影响应给予高度重视. 其它 3 个小流域出口氮、磷达到地表 III 类水质要求, 满足草海保护的需要. 可见, 草海小流域氮、磷的输出沿着城市-城郊-农村景观格局梯度逐渐降低, 表明城镇化快速发展严重威胁草海湿地生态健康, 及时处理城市及城郊生活污水是草海保护的当务之急.

耕地与水质的关系具有不确定性 (Hey *et al.*, 1994). 本研究中耕地与水质指标间的相关性不显著, 这与人的一些研究结果一致, 耕地并不是一个预测水质下降的主导因子 (胡和兵等, 2012); 但与周文等 (2012) 的结果不同: 太湖流域下游河流水质与耕地面积呈正相关; 其它的很多研究表明, 耕地对流域水质具有重要的影响 (Basnyat *et al.*, 1999; Tong *et al.*, 2002). 耕地与水质关系的不确定性与研究区域的地形地貌、耕作方式、化肥施用等有关 (付斌等, 2015; 于松延等, 2014). 草海自然保护区坐落于一个天然盆地之中, 四面环山, 大量人口沿湖而居, 生活污水的排放对水质影响较大, 可能掩盖了耕地氮、磷流失对水质的影响. 另外, 草海湖滨农田中渠网密布, 使得耕地对进入该区域水体的水质反而起到了净化作用, 因此, 耕地与草海流域水质呈弱负相关关系. 农田渠网具有明显的湿地特征, 截留净化了大量的氮、磷等物质. 研究表明, 草海湿地农

田渠系水质净化功能显著 (夏品华等, 2012), 随着沟渠等级的增加, 水质逐渐变好, 最终使小流域出口水质较好. 草海农田的沟渠实质上为湿地的一种特殊类型-农田沟渠湿地, 草海小流域沟渠湿地占耕地面积的 6% 以上, 如此高的湿地率必然能够净化大量的氮、磷. 占流域面积 1%~5% 的湿地足以完成大部分氮、磷等营养物质的净化 (Hey *et al.*, 1994). 在我国南方的丘陵农业区, 占流域面积 4.9% 的多水塘系统即能够截留、去除 95% 以上来自村庄和农田的氮、磷等营养物质 (Yan *et al.*, 1998; Yin *et al.*, 1993).

林地、沼泽地均为流域“汇”型景观, 研究表明, 林地面积越大, 水质污染程度越低, 主要是由于林地具有截留、降解的作用, 对地表径流具有良好的净化效果 (Basnyat *et al.*, 1999; Tong *et al.*, 2002). 沼泽地具有较强的氮、磷净化能力, 对控制氮、磷污染具有重要意义. 但本研究发现, 林地、沼泽地与 TN、TP、COD 的相关性不显著, 这与水体污染源和景观格局特征有关.

4.2 景观格局与氮、磷输出的关系

景观格局指数是量化流域土地利用空间结构的一个有效方法, 因能较为全面地反映土地利用信息而备受关注 (Nash *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2010; 黄金良等, 2011; 李明涛等, 2013). 边缘密度 (ED)、平均斑块面积 (MPS)、香农多样性指数 (SHDI) 反映区域景观破碎程度、团聚程度及景观类型的丰富程度, 与氮、磷含量显著正相关, 蔓延度指数 (CONT) 与氮、磷显著负相关, 说明人为干扰越频繁, 景观越复杂, 则水体受污染的风险就越大. ED 反映了单位面积上各斑块类型边界长度或总边界长度, 而斑块边缘长度影响着斑块之间的相互作用程度, ED 越高意味着人为干扰越大, 从而使得景观越破碎, 流域的水质被污染的风险越大. MPS 表征景观或各类型中斑块的平均面积, 反映了景观的破碎程度, MPS 值越大, 水质越差. CONT 与水质呈显著负相关. 草海流域从上游至下游出口 CONT 值越来越大, 说明流域间景观的破碎化程度越来越低, 水质受人类活动影响越来越小, 这与水质自草海流域上游到下游逐渐好转相对应, 合理地解释了 CONT 与水质之间的显著负相关关系. SHID 反映景观异质性, 与水污染指标呈正相关. 草海各流域间 SHID 值自草海流域上游至下游出口逐渐降低, 相关性结果为与水质指标呈显著正相关, 说明 SHID 越大, 景观受人类干扰

越大,景观越破碎,导致河流水体受污染风险越大。

PD 是指单位面积上的斑块数,反映景观破碎化程度。PD 越大,说明其流域内单位面积上的斑块数越多,则景观越破碎,水质污染风险越大(韩黎阳等,2014)。但本研究中 PD 与氮、磷的输出相关性不显著,这与李明涛等(2013)等研究结果相似,PD 对水质的预测能力较弱,且具有一定的不确定性。大多研究表明,只有少数景观格局指数可较好地预测水体中的污染物输出,与土地利用面积比例相比,一些景观格局指数与水质的相关性较弱,甚至有些关系无法被合理解释(黄金良等,2011;李明涛等,2013)。因此,选择合适的景观格局指数对于流域水质预测和评价有着重要的现实意义。

5 结论(Conclusions)

1)草海各小流域出口氮、磷输出具有明显空间分布规律,城市、城郊小流域水体 TN、TP 和 COD 值较高,水体污染严重,农村区域小流域水质较好,因此,控制城市、城郊小流域氮、磷输出对草海湿地保护具有重要意义。

2)流域氮、磷输出与景观类型和景观格局间均存在密切的关系,建设用地面积百分比与 ED 等景观指数能很好地解释对氮、磷输出的影响,说明城镇化与景观破碎度是影响草海小流域氮、磷输出的主要原因,尤其是城镇化的影响最为显著。完善草海城镇和城郊生活污水收集与处理设施建设是草海湿地保护的当务之急。

3)以景观格局表征流域污染物的输出是一个可行的方法,尤其是在宏观上把握水环境与区域景观格局变化具有优势。在区域土地利用规划时,不仅要考虑土地利用结构,还需兼顾景观格局完整性,方能有效管理流域氮、磷的输出。

责任作者简介:喻理飞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事喀斯特退化生态系统恢复研究。E-mail:lfyu@gzu.edu.cn.

参考文献(References):

Amiri B J, Nakane K. 2009. Modeling the linkage between river water quality and landscape metrics in the Chugoku District of Japan [J]. *Water Resources Management*, 23(5): 931-956

Basnyat P, Teeter L D, Flynn K M, et al. 1999. Relationships between landscape characteristics and non-point source pollution inputs to coastal estuaries[J]. *Environmental Management*, 23(4): 539-549

付斌,刘宏斌,鲁耀,等.2015.高原湖泊典型农业小流域氮、磷排放特

征研究—以凤羽河小流域为例[J]. *环境科学学报*, 35(9): 2892-2899

官宝红,李君,曾爱斌,等.2008.杭州市城市土地利用对河流水质的影响[J]. *资源科学*, 30(6): 857-863

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): 1092-1097

郝敬锋,刘红玉,胡俊纳,等.2010.城市湿地小流域尺度景观空间分异及其对水体质量的影响—以南京市紫金山东郊典型湿地为例[J]. *生态学报*, 30(15): 4154-4161

Hey D L, Barrett K R, Biegen C. 1994. The hydrology of four experimental constructed marshes[J]. *Ecology Engineering*, 3(4): 319-343

黄金良,杜鹏飞,欧志丹,等.2006.澳门城市小流域地表径流污染特征分析[J]. *环境科学*, 27(9): 1753-1759

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

胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等.2012.南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响[J]. *环境科学*, 33(3): 794-801

Jung J W, Lee S W, Hwang H S, et al. 2008. The effects of spatial variability of land-use on stream water quality in a coastal watershed [J]. *Paddy and Water Environment*, 6(3): 275-284

Lee S W, Hwang S J, Lee S B, et al. 2009. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics[J]. *Landscape and Urban Planning*, 92(2): 80-89

李明涛,王晓燕,刘文竹.2013.潮河流域景观格局与非点源污染负荷关系研究[J]. *环境科学学报*, 33(8): 2296-2306

Maillarda P, Santosb N A P. 2008. A spatial-statistical approach for modeling the effect of non-point source pollution on different water quality parameters in the Velhas river watershed-Brazil [J]. *Journal of Environmental Management*, 86(1): 158-170

Nash M S, Heggem D T, Ebert D, et al. 2009. Multi-scale landscape factors influencing stream water quality in the state of Oregon [J]. *Environmental Monitoring Assessment*, 156(1): 343-360

欧洋,王晓燕,耿润哲.2012.密云水库上游流域不同尺度景观特征对水质的影响[J]. *环境科学学报*, 32(5): 1219-1226

Paul M J, Meyer J L. 2001. Streams in the urban landscape [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32(1): 333-365

Slive L, Williams D D. 2001. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality [J]. *Water Research*, 35(14): 3462-3472.

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

夏品华,薛飞,孔祥亮,等.2012.贵州草海湿地农田渠系水质空间分异特征及影响分析[J]. *环境化学*, 31(8): 1201-1207

Yan W, Yin C, Tang H. 1998. Nutrient retention by multi-pond systems: mechanisms for the control of nonpoint source pollution [J]. *Environment Quality*, 27(5): 1009-1017

Yin C, Zhao M, Jin W, et al. 1993. A multi-pond system as a protective zone for the management of lakes in China [J]. *Hydrobiologia*, 251: 321-329

于松延,徐宗学,武玮,等.2014.北洛河流域水质空间异质性及其对土地利用结构的响应[J]. *环境科学学报*, 34(5): 1309-1315

张大伟,李杨帆,孙翔,等.2010.入太湖河流武进港的区域景观格局与河流水质相关性分析[J]. *环境科学*, 31(8): 1775-1783

赵军,杨凯,邵俊,等.2011.区域景观格局与地表水环境质量关系研究进展[J]. *生态学报*, 31(11): 3180-3189

周文,刘茂松,徐驰,等.2012.太湖流域河流水质状况对景观背景的影响[J]. *生态学报*, 32(16): 5043-5053