

天津于桥水库流域水体氮磷空间分异与景观格局的关系

包姗姗, 李崇巍*, 王祖伟, 陈萍, 郭继发

(天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300074)

摘要:以于桥水库流域内 24 个采样点的水质营养盐监测数据为基础, 分析了流域水质氮磷的空间异质性。运用聚类分析将 24 个子流域分成 3 组, 即受工业污染源和居民生活污水污染严重的高度污染组(A 组), 坡度较大且受果园土壤侵蚀带来的氮磷污染物影响严重的中度污染组(B 组), 地势低平且无明显聚集性人为干扰的低污染组(C 组), 而且发现在城镇化格局影响下总氮污染空间差异相对其他指标较小。结合 2013 年 ETM 遥感影像解译的土地利用现状图, 探讨了流域景观格局与河流水体中营养盐浓度的相关关系。结果表明, 流域内“源汇”特性明显: 耕地面积比与总氮(TN)和磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)存在显著的正相关性, 与溶解性总磷(DTP)存在极显著的正相关性; 城市建设用地面积比与 DTP、TN 和氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)有显著的正相关性, 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 表现为极显著的相关性; 园地的面积比与 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 具有显著的正相关性; 林地是本流域主要的“汇”型景观, 其面积比和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有显著的负相关关系, 相关系数为-0.459。从景观水平上看, 在本流域内景观格局指数与磷含量具有一定的相关性, 各景观指数对与地形因素有关的水土侵蚀量较为敏感。斑块数(NP)、斑块密度(PD)和最大斑块指数(LSI)都与磷含量有明显的正相关, 流域内斑块数量越多、景观类型和形状越复杂, 水质越容易受到氮磷污染。

关键词:景观格局; 于桥水库; 氮; 磷; 相关分析

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)08-1609-08 doi:10.11654/jaes.2014.08.020

Relationship Between Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus in Water and Landscape Pattern in Yuqiao Reservoir Basin, Tianjin

BAO Shan-shan, LI Chong-wei*, WANG Zu-wei, CHEN Ping, GUO Ji-fa

(College of Urban and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Water quality is often influenced by landscape patterns in a basin. Here we collected water samples from 24 locations in Yuqiao Reservoir Basin, Tianjin, and analyzed the spatial heterogeneity of nitrogen and phosphorus in water using cluster analysis and explored its relationship with landscape spatial patterns. Spatially, these sampling points were divided into 3 groups: Group A, highly polluted sites where water quality was mostly influenced by partially industrial effluents and domestic wastewater; Group B, moderately polluted sites where water quality was mainly affected by soil erosion from orchards due to the slope; and Group C, relatively less polluted sites where the terrain is low and there was little human impact. The percentage of cropland area was positively correlated with TN, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and DTP, while that of construction area was positively correlated with DTP, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$. The proportion of garden area was positively correlated with TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$. However, the ratio of woodland area was negatively correlated with $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($r=-0.459$). At class-level, landscape indices—number of patches(NP), patch density(PD) and landscape shape index(LSI) were all positively correlated with water phosphorus. Landscape indices were good indicators of water and soil erosion. Our results show that greater fragmentation, larger diversity and more scattered distribution of landscape would cause more nutrient losses.

Keywords: landscape pattern; Yuqiao Reservoir Basin; nitrogen; phosphorus; correlation analysis

收稿日期: 2014-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(31270510; 41101352)

作者简介: 包姗姗(1991—), 女, 浙江台州人, 硕士研究生, 主要从事景观生态及污染研究。E-mail: baoshanshan9121@163.com

* 通信作者: 李崇巍 E-mail: yllcw13@126.com

流域的水质不仅与降雨、地形、工农业生产和城市化等多种自然和人为因素密切相关^[1],而且在更大程度上受到各种景观类型的空间分布格局的影响^[2]。景观格局的配置与各种生态过程的综合作用造成流域水质污染的高空间异质性。研究水质空间异质性不仅能为环境变量提供有用的信息而且有利于识别关键污染源,进而进行适宜的水资源管理^[3-4]。景观指数是能够高度浓缩景观格局信息、反映其结构组成和空间配置等方面特征的简单定量指标^[5],是适合于定量表达景观格局与生态过程之间关联的空间分析方法^[1,6]。20世纪80年代以来,随着数学统计分析和“3S”技术的发展^[7],国内外进行了大量有关景观指数的研究,对景观-水质的关联研究也越来越受到重视。

目前,针对景观格局对水质的影响研究主要集中在流域尺度上斑块数量、斑块密度、斑块面积、斑块优势度和景观蔓延等指标与水质污染指标的相关性分析^[7-10]。由于景观格局变量的综合化和复杂化,相应的数据分析方法也逐渐由定性分析向半定量或定量分析发展。2000年以来,主要的定量分析方法包括线性相关分析、方差分析、逐步回归分析、梯度分析方法和一些借助于环境数学模型的分析方法。杨莎莎等^[8]、张大伟等^[11]都从流域景观水平和类型水平两个方面,运用线性相关分析分别分析了苏子河流域和太湖流域景观格局对河流水质的影响;曹晓峰等^[12]将滇池流域土地利用类型百分比聚类后分析流域优势斑块对水质的影响。国外地中海地区^[13]、马来群岛的河口^[14]和韩国水域^[15]都有此方面的研究。然而,不同区域特征的研究结论仍存在异议,景观指数与水质之间关联性还存在不确定性^[1]。不同流域的气候、土壤、植被、地形及土地利用方式的空间异质性及生态系统的复杂性,导致流域景观格局与水质之间很难存在通用关联模式,对此还需要更深入研究。

于桥水库是引滦入津工程的重要调蓄水库,同时又是天津市工农业和生活用水的主要水源地^[16]。从近年流域水质监测来看,于桥水库上游水质污染较严重,且氮和磷为此流域的主要污染因子。于桥水库流域水质的相关研究从20世纪80年代一直延续至今,目前对于桥水库及库区周边的监测研究较多,对水库的上游流域监测研究多局限在坡面、沟壑等小尺度的研究,对区域尺度的研究还较少。李俊然等^[16]、李佩武等^[17]仅针对于桥水库流域某小区研究地形、坡度对河流N、P输出特征的影响。2000年陈利顶等^[18]开始在流域尺度对于桥水库流域地表水非点源污染的时空

变化特征进行研究,并提出“源-汇”景观格局理论。但近十年间未见流域尺度的水质研究报道。随城镇化的进程,水库上游流域“源”型景观类型的面积不断增加,园地、村落、农田和采矿区形成了围库之势,流域污染日趋严重,并随着每年汛期的到来汇入地表径流排入库区。因此,于桥水库流域的景观格局特征与流域水质定量关系还有待深入研究。

本研究基于流域24个子流域的定点监测数据及遥感、地形等空间数据,从流域景观组成和格局特征两个方面,通过聚类分析和Spearman秩相关分析研究于桥水库流域土地利用对河流水质的影响。本文将着重探讨“源”、“汇”景观组成和分布对于桥水库流域河流N、P输出的定量关系。以期对于桥水库流域景观格局优化和土地利用合理配置提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

于桥水库流域位于天津蓟县城东4 km处,北纬39°56'~40°23',东经117°26'~118°12',地跨津、冀两省市,总面积2060 km²。于桥水库流域属于温带大陆季风型半湿润气候,年平均降水量在700 mm以上,其中汛期7—9月的降雨量约占全年降雨总量的83%。该流域水系发达,河网密度大,流域内的河流汇集成三大主要水系——淋河、沙河和黎河^[19]。考虑到能全面反映于桥水库流域的水质营养盐特征,同时避开引滦河道的影响,本研究在全流域范围内划分出24个子流域开展基流水质监测(图1)。

1.2 样品采集和测定

根据本流域非汛期部分河流断流,本研究对于桥水库流域24个子流域进行汛期河道水体的采样,不同小流域之间地形地貌、土地利用/覆被和人类活动特征差异较大,在每个小流域的下游出口处设置水体取样控制点,采样时间为2013年6—10月,降雨后24 h内进行。在采样现场用塑料采样瓶装约500 mL水样供营养盐的测定,采样后水样立刻置于4℃采样箱保存,24 h内完成测定。由于于桥水库流域内河道周边多为园地和农耕地,农业非点源污染是决定地表水水质的主要因素,研究根据流域污染状况选取水质参数为:总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)和溶解性总磷(DTP)。将收集的地表径流水样静置后分为两部分:一部分用于测定TN、TP;另一部分经0.45 μm滤膜过滤后用于测定NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P、NO₃⁻-N和DTP。TN用

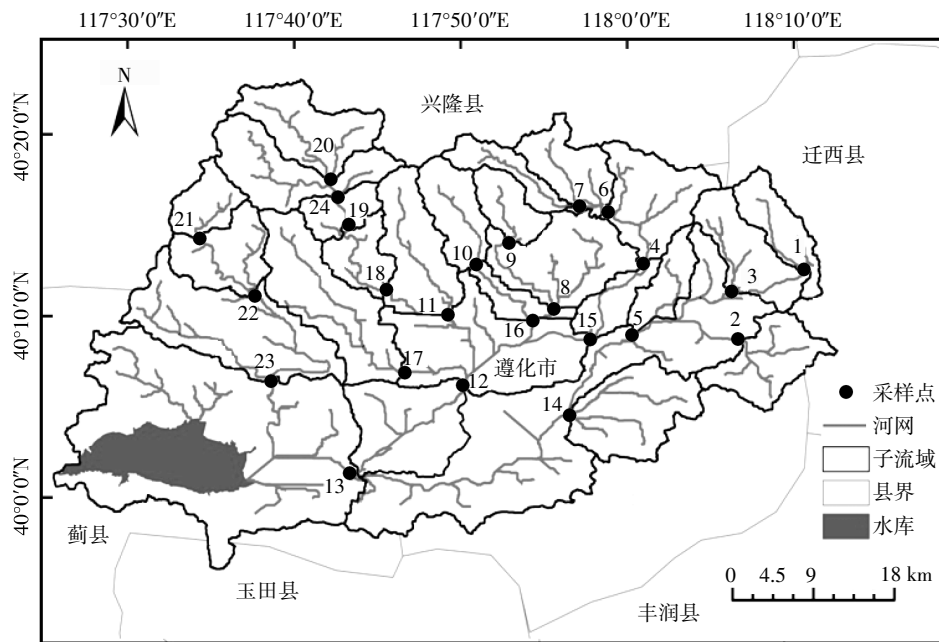


图 1 于桥水库流域各小流域形态及监测点分布

Figure 1 Sub-watersheds and monitoring sites in Yuqiao Reservoir Basin

GB 11894—1989 碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法, $\text{NH}_4\text{-N}$ 采用纳氏试剂比色法, $\text{NO}_3\text{-N}$ 用酚二磺酸光度法, TP、DTP 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 采用 GB 11893—1989 钼酸铵分光光度计测定。

1.3 空间数据获取与处理

以于桥水库流域 2013 年 8 月的 Landsat8ETM 遥感影像为数据源, 用 ENVI5.0 对其进行大气辐射校正、几何校正等预处理后, 采用有监督分类法进行分类, 结合实地调查进行影响后处理, 分类精度可达 87%, 将研究区域的土地利用类型分 6 类。以 1:5 万地形图为基础, 利用 ArcGIS 的水文分析模块, 获得流域范围、河网分布和 24 个子流域的划分(图 1)。子流域可真实反映各点水流的流向、汇入水域等特征, 被广泛应用于水文水质问题的研究^[20-22]。

1.4 数据统计处理与分析

用每个监测点各营养盐指标的标准变异系数表示各营养盐水质指标的变化情况, 计算公式为:

$$CV = \left(\frac{SD}{X} \right) \times 100\%$$

式中: SD 为水质指标的标准偏差; X 为样本均值。

根据相关研究, 选用能表征景观的破碎度和优势度的几种常用景观指数: 斑块数量(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、最大形状指数(LSI), 以此表征景观格局特征。采用数据统计分析方法对景观格局与地表水水质之间关系进行推绎, 是相关研究的关

键环节之一。虽然在本流域已经进行了不少研究, 但探讨本流域景观格局变量特征与水质之间关系的研究较少。本文使用统计分析软件 SPSS 13.0 对 2013 年于桥水库汛期的采样数据进行了聚类分析, 旨在说明各小流域水体营养盐指标的空间相似性和差异性特征。聚类分析是一种探索的模式识别技术, 分析方法选择目前应用广泛的等级聚类法, 以欧氏距离度量样本之间的距离^[23], 运用 Ward 算法生成具有层次结构的聚类树^[24]。使用 SPSS 13.0 分析各土地利用类型面积比以及景观指数与 2013 年汛期水体营养盐监测数据的统计相关关系, 以便了解景观特征对水体营养盐指标的影响。

2 结果与分析

2.1 于桥水库流域景观格局分析

流域的土地利用图按照“汇”型面积比例排序(汇型景观是林地和灌草地), 在整个流域中, 以园地和林地的景观类型为主导, 两者面积比例之和达 62.53%, 从上游到下游农田和城镇比例增大。24 个子流域景观类型面积比例差异较大, 其中面积比例跨度最大的是林地, 占各子流域面积的 0.73%~68.92%; 其次为耕地, 占各子流域面积的 2.65%~54.79%; 而后依次为园地、城市建设用地、灌草地、工况用地, 其面积比例分别为 3.76%~53.28%、4.14%~45.98%、8.68%~38.19%、

0.03%~3.89%。各子流域土地利用大部分是以林地为主,其次是园地,有少数区域居民用地占较大比例,这3种土地利用类型的面积之和接近总面积的90%或更高(图2)。

2.2 水体营养盐空间分异及特征分析

2.2.1 各监测点营养盐指标分异特征

从于桥水库流域2013年6—10月6次降雨24个监测点营养盐指标统计信息可以得出: NO_3^- -N、TN和DTP相对其他营养盐指标时空变化较小,CV分别为38.31%、56.77%和83.03%,时空变化较大的水质指标有TP、 PO_4^{3-} -P和 NH_4^+ -N,其值均大于100%(表1)。说明由于各个子流域土地利用类型存在较大差异,流域水体营养盐浓度存在很高的空间异质性。

表1 各监测点各项水质指标的描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of water quality indices

指标 Indicator/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值(变化范围) Mean value(range)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	标准偏差 Standard deviation/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	标准变异系数 Standardized coefficients of variation/%
TP	1.00(0.07~7.29)	1.12	111.87
PO_4^{3-} -P	0.10(0.00~0.53)	0.12	113.43
DTP	0.16(0.03~0.67)	0.14	83.03
TN	8.11(1.58~38.00)	4.61	56.77
NH_4^+ -N	0.92(0.01~6.60)	1.20	129.85
NO_3^- -N	7.74(0.22~17.23)	2.97	38.31

2.2.2 各监测点营养盐指标的空间分布特征

针对于桥水库汛期24个采样点的6种营养盐水质数据进行聚类分析,根据各样点的相似性进行归并和分类^[25],可将所有样点分成3组(图3)。各组包括的样点分别为:A{5、8、12、14、15、16}、B{19、21、22、23}、

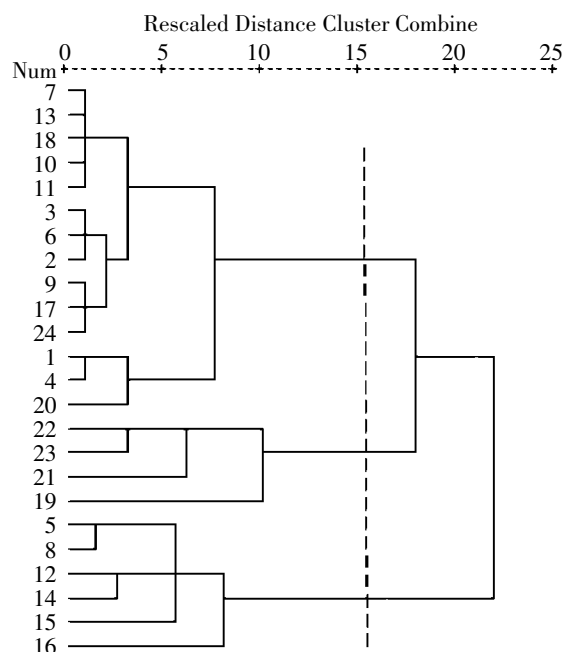


图3 于桥水库流域样点空间聚类树图

Figure 3 Dendrogram of sampling sites based on cluster analysis

C{1~4、6、7、9~11、13、17、18、20、24}。不同聚类组间6个水质指标值存在明显差异,对于TP、 PO_4^{3-} -P和TN3个参数指标数值大小排序为A>B>C,其中A组TP平均值最高为1.03,最低为0.23 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。A、B组的TP平均值超出流域地表水水质标准的5倍,较少污染组的TP平均值为0.23 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与流域地表水水质标准相近。 PO_4^{3-} -P最高均值为0.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最低均值为0.01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。对于TN同样是A>B>C,但3组均值相差不大,分别为17.32、16.01、15.33 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中 NO_3^- -N为B>C>A,3组均值分别为8.69、7.67、5.26 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N值差异较大,3组排序A>C>B,分别为3.20、

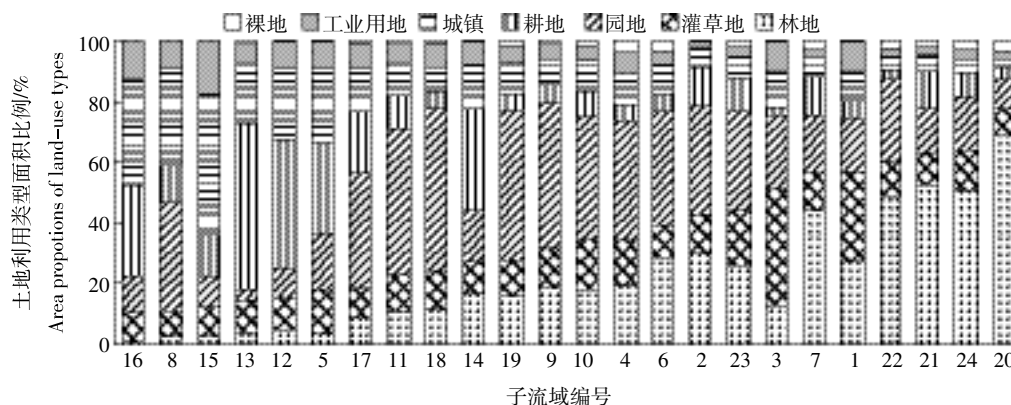


图2 各子流域内景观类型的构成

Figure 2 Percentages of landscape types in different sub-watersheds

1.01、0.87 mg·L⁻¹。

从聚类结果看,A组在除NO₃-N以外的其他水质指标中数值最高,可定义为高度污染组。A组污染均值较高,其中TP最大值1.63 mg·L⁻¹超出B组近22%;PO₄³⁻-P平均值分别超出B组和C组2倍和10倍;DTP平均值是B、C组的3倍左右。NH₄⁺-N平均值亦是远远超过了B、C组。A组的6个采样点位于中部平原地区,地势低平且人口密度较大,耕地、园地和城市建筑用地面积比之和达到80%以上。实地调查发现,这6个监测点控制的流域包括遵化市区及其周边地区,有部分工业污染源直接排放,居民生活污水的排放强度也较高^[16],成为导致这一组监测结果较高的主要原因。

B组定义为中度污染组,除DTP和NH₄⁺-N均值略低于C组外,其余各值都高于C组值,其中B组TP的3个数值是C组的近4倍,PO₄³⁻-P是C组的近3倍。这些点位于流域的西北部山区,虽然有较高的植被覆盖度及较低的人口密度,但海拔高程较其他点高,西北部山区地面平均坡度达25.6°,较中部及南部地区坡度较陡。这与Evans等^[26]研究的高海拔区域河流中溶解态氮和磷浓度要低于低海拔区的结论相似。夏季暴雨较多,加之果园面积的扩大,由土壤侵蚀带来的氮磷污染物对河道的水质影响较大。此外,北部山区近年来随着采矿行业的发展,生态破坏已较严重,河道水质浑浊,高强度的人为干扰致使水环境出现较严重的污染。

C组14个采样点的水质值均较低,其中TP均值为0.23 mg·L⁻¹,接近地表水水质Ⅲ类标准,但TN平均值11.36 mg·L⁻¹则远远超过地表水水质总氮Ⅲ类标准值1.00 mg·L⁻¹,说明C组氮污染情况要比磷污染

严重。近年来,城镇居民多使用无磷洗涤剂,农业用地也多偏向使用氮肥,因而造成氮污染情况高于磷污染。C组点位于流域的中北部、南部及东部地区,分布范围较广。实地调研发现,该区域虽有园地、城镇和农田分布,但无明显聚集性人为干扰,而且地势较低,水土流失量较低。此外,在这些采样点范围内,无明显点源污染,可从流域景观组成和格局特征两个方面来分析水体营养盐空间差异性。

2.3 景观格局与营养盐水质指标相关分析

将监测点各子流域的景观面积比例以及各景观结构指数与6个营养盐水质指标作为样本进行相关性分析(表2),由于景观面积比例、各景观结构指数和营养盐水质指标均不满足正态分布,利用SPSS 13.0对二者进行Spearman相关性分析,以便说明子流域内景观格局对河流营养盐的影响。

从表2中可以看出,耕地、城市建设用地和园地的面积比与各营养盐水质指标存在一定的正相关关系,是本流域内的主要“源”型景观。耕地面积比与TN和PO₄³⁻-P指标存在显著的正相关性,置信水平 $P<0.05$ 的相关系数值分别为0.507和0.536;与DTP存在极显著相关性,相关系数达到0.599,置信水平 $P<0.01$;城市建设用地面积比与DTP、TN和NH₄⁺-N通过 P 为0.05水平上的检验,有明显的正相关性,与PO₄³⁻-P表现为极显著相关性,置信水平 $P<0.01$ 的相关系数达到0.540。园地的面积比对TN和NH₄⁺-N具有显著正相关性,置信水平 $P<0.05$ 的相关系数分别为0.461和0.477。这与实际调查获知的园地施肥主要是氮肥,磷肥使用比例较低的情况相符。在各子流域内,林地的面积比仅和NH₄⁺-N有显著的负相关关系,置信水平 $P<0.05$ 的相关系数值达到-0.459,这表明随

表2 景观格局特征与营养盐水质指标的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between water quality indices and landscape pattern traits

项目	TP	PO ₄ ³⁻ -P	DTP	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ -N
林地	-0.088	-0.346	-0.345	-0.310	-0.459*	0.019
灌草地	-0.243	-0.237	-0.355	-0.228	-0.233	-0.077
园地	0.164	0.407	0.306	0.461*	0.477*	0.144
耕地	0.089	0.536*	0.599**	0.507*	0.305	0.187
工矿用地	-0.060	0.044	0.080	-0.103	0.385	0.024
城市建筑用地	0.274	0.540**	0.510*	0.529*	0.531*	0.071
NP	0.112	-0.097	0.445*	0.382	0.159	0.067
PD	0.216	0.510*	0.599**	0.180	0.363	-0.141
LPI	0.046	-0.556*	-0.680**	0.286	-0.129	0.246
LSI	0.037	0.410	0.427*	0.282	0.136	0.002

注:**代表置信水平 $P<0.01$ 的相关系数,*代表置信水平 $P<0.05$ 的相关系数。

着林地比重增大会明显减少水中的氨氮浓度。灌草地与工矿用地的面积比和各流域的营养盐水质指标之间相关性并不显著,这和它们在流域中所占的面积比较低有关。一些研究发现,工矿用地对水质影响较复杂,且越靠近河道相关性越显著。本流域内,工矿用地多为人工采挖矿石堆积弃用而成,近似于裸地,对氮磷污染影响相对较小。总之,流域内的耕地、城市建筑用地和园地的面积增加会导致河流水质的恶化,是水体营养盐高负荷的重要来源。

营养元素流失到河道中需要一个过程,可以通过调整不同景观类型在空间上的格局组合来控制营养元素到达水体前的浓度,从而降低非点源污染形成的危险性^[21-22,27-28]。各子流域景观水平上的景观格局指数与磷污染表现一定的相关性,而与氮污染相关性并不显著(表3),其中,NP、PD和LSI都与磷含量有明显的正相关,NP与DTP的正相关系数0.445($P<0.05$);PD与DTP的正相关系数0.599($P<0.01$),与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的正相关系数0.510($P<0.05$);LSI与DTP的相关系数0.427($P<0.05$)。NP表征景观格局的破碎化程度,说明斑块数量越多水体中DTP的含量逐渐增高,水质恶化程度加深;同样PD也反映了景观的破碎化程度,即景观类型越复杂,越不利于水体中DTP和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的固定和截留;LSI表征景观形状的复杂程度,本流域景观构成复杂程度越低,对水体中营养盐浓度影响越小。LPI表征景观优势度,与磷含量有明显的负相关,表明在该研究区域内最占优势的景观类型为“汇”型景观。

3 讨论

流域内的耕地、城市建筑用地和园地的面积增加是河流水体营养盐高负荷的重要来源。由于水质受到多因素的影响,“源”型景观格局与各水质指标的存在变异相关关系。水体中的磷主要以颗粒态为主,颗粒态的磷受降雨强度和地形影响较大。本流域内耕地与各水质指标,特别是DTP存在极显著的正相关关系,而一些文献^[29-32]的研究结果表明耕地与水质指标间呈负相关。孙芹芹等^[21]研究九龙江流域发现,基于支流子流域的耕地面积百分比与各水质指标之间未发现相关性,但是引入坡度因子对耕地进行类型划分后发现坡度小于 15° 和大于 25° 的耕地占总耕地的面积比例与营养盐指标呈较强的正相关。出现这种差异的原因可能与耕作、灌溉方式、农药化肥施用量等农田管理措施以及耕地面积大小,与接纳水体的距离、地形

等有关^[21]。本流域内园地种植以板栗为主,氮施肥量大,受中、大雨的影响,易造成土壤中大量的含N营养物随着地表径流进入水体。这与园地对TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有明显的正效应情况符合。城镇建设用地面积比与营养盐指标呈较强的正相关,这与Huang等^[33]、Evans等^[26]和胡和兵等^[9]的研究结论是一致的,其原因是城镇建设用地造成的不透水面导致径流量增加和污染物浓度升高。

本流域内林地作为最主要的“汇”多分布在流域上游山地,并未对分布在中下游的耕地以及园地的水土流失起到拦截作用,其主要功能是调蓄水量,减少上游土壤侵蚀,表现为对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量具有明显的负效应。杨沙沙等^[8]研究苏子河流域发现林地对 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量具有明显的负效应,这可能跟当地的温度,水体中溶解氧的含量、水质及水体的pH值等有关。

从子流域景观尺度上计算四项基本景观指数并与氮磷水质做相关分析,发现在子流域尺度内,斑块数量越多、景观类型和形状越复杂,水质越容易受到污染,此结论与李明涛等^[34]研究潮河流域得出的结论一致。各景观格局指数与磷污染表现一定的相关性,而与氮污染相关性并不明显,而我们知道磷污染和水土侵蚀量紧密相关,这说明在于桥水库上游流域,各景观指数对与地形因素有关的水土侵蚀量较为敏感。研究发现,在不同的流域即使相同的景观指数,对水体中营养盐的效应也可能会产生截然相反的结论^[1,8-10]。杨沙沙等^[8]研究苏子河流域发现,随着缓冲区距离的增加,景观形状的复杂程度在不断变化,对水体中营养盐污染的影响表现不同。因而可以看出,景观指数与水体营养盐含量表现出不同的效应可能与所研究流域的特殊性以及所选择的研究尺度有关。

4 结论

(1)于桥水库上游24个子流域的景观格局差异较大,流域内河流中的氮磷含量存在很高的空间异质性,其中总磷、磷酸盐和氨氮CV值均大于100%。

(2)流域的水质营养盐指标的聚类分析,可以将24个子流域分成低污染组、中度污染组和高度污染组三类。高度污染组和中度污染组由于受地形和较高的人为干扰影响,总磷指标的均值远高于低污染组。三组的总氮均值相差不大,变动值在2%之间,说明在城镇化格局影响下总氮污染空间差异相对较小。

(3)耕地、城镇和园地为本流域的主要“源”型景观。流域的景观格局指数(NP、PD和LSI)与磷含量有

明显的正相关,LPI与磷含量有明显的负相关,表明在子流域尺度内,斑块数量越多、景观类型和形状越复杂,水质越容易受到污染,且流域内最占优势的景观类型为“汇”型景观。

于桥水库流域水环境治理中,需要进一步优化区域景观格局,在流域可持续发展中应适度增加林地、草地等“汇”景观面积,降低农田、建筑用地等“源”景观比重。景观格局优化时,应避免景观破碎化,保持斑块形状结构,从源头上减轻氮、磷元素对流域河流的污染,改善水质状况。

流域水质研究中,由于小流域存在嵌套和包含的关系,会对监测数据的统计和分析造成一定的偏差,研究中营养盐和景观格局特征并非具有极显著相关性,与他人研究也存在一定差异,可能与镶嵌问题有关。而小流域的独立性与景观格局的复杂性难以统一,对此还需进一步探讨。此外,本文仅从景观格局上来分析非点源污染的空间差异性,考虑的因素过于单一,并未考虑降雨、土壤类型、流域尺度和坡度等因素对河流水质造成的综合影响,有待下一步研究。

参考文献:

- [1] 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.
HUANG Jin-liang, LI Qing-sheng, HONG Hua-sheng, et al. Preliminary study on linking land use and landscape pattern and water quality in the Jiulong River Watershed[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1): 64-72.
- [2] 赵 沙, 沔河流域土地利用与水质变化及其关系的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2012.
ZHAO Sha. Relationships between river water quality and land use type in Feng River Basin[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2012.
- [3] Huang F, Wang X, Lou L, et al. Spatial variation and source apportionment of water pollution in Qiantang River (China) using statistical techniques[J]. *Water Research*, 2010, 44(5): 1562-1572.
- [4] Bu H, Wan J, Zhang Y, et al. Spatial characteristics of surface water quality in the Haicheng River (Liao River Basin) in Northeast China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(6): 2865-2872.
- [5] 邬建国. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
WU Jian-guo. Landscape ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [6] Yu X J, Ng C N. Spatial and temporal dynamics of urban sprawl along two urban-rural transects: A case study of Guangzhou, China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 79(1): 96-109.
- [7] Zhao J, Fu G, Lei K, et al. Multivariate analysis of surface water quality in the Three Gorges Area of China and implications for water management[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(9): 1460-1471.
- [8] 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.
YANG Sha-sha, TANG Cui-wen, LIU Li-juan, et al. Relationships between river water quality and land use type at watershed scale[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(7): 1953-1961.
- [9] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 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, 2012, 33(3): 794-801.
HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, et al. Influence of spatial difference on water quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(3): 794-801.
- [10] 张大伟, 李杨帆, 孙 翔, 等. 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, 2010, 31(8): 1775-1783.
ZHANG Da-wei, LI Yang-fan, SUN Xiang, et al. Relationship between landscape pattern and river water quality in Wujingang Region, Taihu Lake Watershed[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(8): 1775-1783.
- [11] 王 瑛, 张建锋, 陈光才, 等. 太湖流域典型入湖港口景观格局对河流水质的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6422-6430.
WANG Ying, ZHANG Jian-feng, CHEN Guang-cai, et al. Responses of water quality to landscape pattern in Taihu Watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(20): 6422-6430.
- [12] 曹晓峰, 孙金华, 黄 艺. 滇池流域土地利用景观空间格局对水质的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 364-369.
CAO Xiao-feng, SUN Jin-hua, HUANG Yi. Responses of water quality to landscape pattern in Dianchi Lake Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(2): 364-369.
- [13] Moreno-Mateos D, Mander Ü, Comín F A, et al. Relationships between landscape pattern, wetland characteristics, and water quality in agricultural catchments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(6): 2170-2180.
- [14] Alkarkhi A F, Ahmad A, Easa A M. Assessment of surface water quality of selected estuaries of Malaysia: Multivariate statistical techniques[J]. *The Environmentalist*, 2009, 29(3): 255-262.
- [15] Lee S W, Hwang S J, Lee S B, et al. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 92(2): 80-89.
- [16] 李俊然, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 于桥水库流域地表水非点源 N 时空变化特征[J]. 地理科学, 2002, 22(2): 238-242.
LI Jun-ran, CHEN Li-ding, FU Bo-jie, et al. Spatiotemporal variation of nitrogen in surface water of Yuqiao Reservoir Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(2): 238-242.
- [17] 李佩武, 姚玉君. 于桥水库以上流域地形、坡度与 N、P 输出的关系初探[J]. 天津师大学报(自然科学版), 1994, 14(4): 50-54.
LI Pei-wu, YAO Yu-jun. Preliminary analysis of relationships between terrain, gradient and outport of nitrogen and phosphorus of Yuqiao Reservoir Basin[J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 1994, 14(4): 50-54.
- [18] 陈利顶, 丘 君, 张淑荣, 等. 复杂景观中营养型非点源污染物时空变异特征分析[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 85-90.
CHEN Li-ding, QIU Jun, ZHANG Shu-rong, et al. Temporal-spatial variation of non-point source pollutants in a complex landscape[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(3): 85-90.
- [19] 陈利顶, 傅伯杰, 张淑荣, 等. 于桥水库流域地表水中水溶性氮季节

- 变化特征[J]. 中国环境科学, 2003, 23(2):210-214.
- CHEN Li-ding, FU Bo-jie, ZHANG Shu-rong, et al. Seasonal change of solvable nitrogen in surface water of Yuqiao Reservoir Basin[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(2):210-214.
- [20] 黄金良, 黄亚玲, 李青生, 等. 流域水质时空分布特征及其影响因素初析[J]. 环境科学, 2012, 33(4):1098-1107.
- HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, et al. Preliminary analysis of spatiotemporal variation of water quality and its influencing factors in the Jiulong River Watershed[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(4):1098-1107.
- [21] 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.
- SUN Qin-qin, HUANG Jin-liang, HONG Hua-sheng, et al. Analysis on linkage between farm landscape and water quality in Jiulong River Watershed[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(4):54-59.
- [22] 万荣荣, 杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨[J]. 地理科学进展, 2005, 24(3):25-33.
- WAN Rong-rong, YANG Gui-shan. Discussion on some issues of hydrological effects of watershed land use and land cover change[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 24(3):25-33.
- [23] Fovell R G, Fovell M. Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis[J]. *Journal of Climate*, 1993, 6(11):2103-2135.
- [24] Sharma S. Applied multivariate techniques[M]. Now York: John Wiley and Sons, 1995.
- [25] Danielsson Å, Cato I, Carman R, et al. Spatial clustering of metals in the sediments of the Skagerrak/Kattegat[J]. *Applied Geochemistry*, 1999, 14(6):689-706.
- [26] Evans D M, Schoenholtz S H, Wigington Jr P J, et al. Spatial and temporal patterns of dissolved nitrogen and phosphorus in surface waters of a multi-land use basin[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(2):873-887.
- [27] Hood E W, Williams M W, Caine N. Landscape controls on organic and inorganic nitrogen leaching across an alpine/subalpine ecotone, Green Lakes Valley, Colorado Front Range[J]. *Ecosystems*, 2003, 6(1):31-45.
- [28] Ahearn D S, Sheibley R W, Dahlgren R A, et al. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 313(3):234-247.
- [29] Fedorko E J, Pontius R G, Aldrich S P, et al. Spatial distribution of land type in regression models of pollutant loading[J]. *The Biological Bulletin*, 2004, 207(2):173.
- [30] Bahar M M, Ohmori H, Yamamuro M. Relationship between river water quality and land use in a small river basin running through the urbanizing area of Central Japan[J]. *Limnology*, 2008, 9(1):19-26.
- [31] Arheimer B, Liden R. Nitrogen and phosphorus concentrations from agricultural catchments-influence of spatial and temporal variables[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 227(1):140-159.
- [32] Tong S T Y, Chen W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66(4):377-393.
- [33] Huang J, Li Q, Hong H. Primary study on response of water quality to land use pattern in a medium-sized watershed, southeast of China[C]. 2009 International Forum on Information Technology and Applications (IFITA 2009) Proceedings, IEEE Computer Society, 2009:225-229.
- [34] 李明涛, 王晓燕, 刘文竹. 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, 2013, 33(8):2296-2306.
- LI Ming-tao, WANG Xiao-yan, LIU Wen-zhu. Relationship between landscape pattern and non-point source pollution loads in the Chaohe River Watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(8):2296-2306.