

# 小清河流域氮磷时空特征及影响因素的空间与多元统计分析

王琼<sup>1,2</sup>, 姜德娟<sup>1</sup>, 于靖<sup>1,2</sup>, 张华<sup>1①</sup> (1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 选取山东小清河流域为研究区, 在 2012—2013 年汛期和非汛期的水质监测基础上, 应用主成分分析(PCA)和聚类分析(CA)等多元统计方法识别流域不同形态氮磷浓度的时空分布特征, 结合空间分析和相关分析方法辨析集水区不同土地利用方式对氮磷输出的影响。结果表明: 流域氮污染严重, 其中总氮超标率达 100%。氨氮、磷酸盐浓度汛期显著高于非汛期, 硝态氮浓度则非汛期显著高于汛期( $P < 0.05$ )。以总磷、总溶解态磷为主要指标的主成分 Z1 对水质变化的贡献率接近 50%, 以总氮、氨氮和硝态氮为主要指标的主成分 Z2 对水质变化的贡献率接近 20%。总氮、总磷、氨氮、磷酸盐和总溶解态磷浓度与集水区城市和工业建设用地的面积比例呈显著正相关( $P < 0.05$ ); 硝态氮浓度与耕地面积比例呈显著正相关, 与草地、林地面积比例呈显著负相关( $P < 0.05$ )。空间上按氮磷分布特征不同子流域被划分为 3 类: 第 1 类和第 2 类主要集中在干流及北部平原区, 沿途接纳点源排放, 氮磷浓度总体较高且空间差异较大; 第 3 类流域主要位于南部山区, 建设用地比例较小, 污染程度相对较低。

**关键词:** 小清河流域; 氮磷; 时空特征; 土地利用; 多元统计

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831(2015)02-0137-09

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2015.02.001

**Spatio-Temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus and Spatial and Multi-Variable Statistical Analysis of Its Impacting Factors in Xiaoqinghe Watershed.** WANG Qiong<sup>1,2</sup>, JIANG De-juan<sup>1</sup>, YU Jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Hua<sup>1</sup> (1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Water quality of the Xiaoqinghe watershed in Shandong Province during rainy and dry seasons in the year of 2012–2013 were investigated. Based on the water quality monitoring data of the period, principal component analysis and cluster analysis were conducted to determine spatio-temporal distribution of various forms of nitrogen (N) and phosphorus (P) in the watershed. Meanwhile, spatial analysis and correlation analysis were carried out to analyze effects of types of land use on N and P export. Results show that nitrogen pollution of the watershed was very serious, with the over standard rate of total nitrogen (TN) reaching 100%. Ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) and orthophosphate-phosphorus concentrations ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) were significantly higher in the rainy season than in the dry season, whereas nitrate nitrogen concentration was in a reverse trend. Principal components (Z1) represented mainly by total phosphate (TP) and total dissolved phosphorus (TDP), explained about 50% of the total variability of water quality, while principal components (Z2), consisting mainly of TN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , explained about 20% of the total variability. TN, TP,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  and TDP concentrations were significantly and positively related to proportion of the residential and industrial zones in the area of the watershed and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  concentration was positively related to proportion of the cropland, but negatively to that of the forestland and grassland. In terms of spatial distribution nitrogen and phosphorus, the watershed could be divided into three groups of sub-watersheds: Group One and Group Two were distributed mainly along the main stream and in the northern plain, and being receptors of point source pollution where the concentration of N and P were generally quite high and varied sharply, and Group Three was mainly in the southern mountain area, where construction area was quite low in proportion and pollution was low, too, in degree.

**Key words:** Xiaoqinghe watershed; nitrogen and phosphorus; spatio-temporal variation; land use; multi-variable statistical analysis

收稿日期: 2014-07-15

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14); 中国科学院“一三五”规划(烟台海岸带研究所)生态突破项目(Y254021031)

① 通信作者 E-mail: hzhang@yic.ac.cn

近年来我国河流、湖泊等受纳水体污染加重,水质持续下降,水生态功能严重受损<sup>[1]</sup>。河流水质受地质、地形、土壤类型、降雨、城市化及工农业活动等自然和人为因素的综合作用。其中,从水环境与土地利用相互关系的角度分析流域经济社会活动对河流水质的影响成为当前的研究热点<sup>[2-4]</sup>。土地利用方式可以反映城市化和工业化水平,定性描述农业和生活等不同类型非点源污染负荷强度<sup>[5]</sup>。研究表明,城市建设用地、农业用地的面积比往往与水体中营养盐(如氮、磷)、重金属和有机污染物具有显著的相关性<sup>[6]</sup>。黄金良等<sup>[7]</sup>研究发现,耕地与水体中的 $\text{NO}_3^-$ -N浓度呈显著正相关。而张大伟等<sup>[8]</sup>对武进港区域的研究则发现,耕地的面积比例与污染指标呈显著负相关。曹芳芳等<sup>[9]</sup>研究表明,在丰水期,耕地对氨氮的影响最大,而在平水期,耕地对总氮的影响最大。林地和草地在水质改善方面起重要作用<sup>[10]</sup>。郝敬峰等<sup>[11]</sup>研究发现,以林地斑块为主要景观类型的小流域水质好于以草地斑块为主的小流域。综上所述,在不同土地利用类型主导下的河流,水质的影响因素较为复杂且受时间、空间和尺度等因素的综合作用,因此,流域水质时空特征及影响因素的识别仍具挑战性<sup>[6]</sup>。

多元统计分析方法能有效分析多断面多指标的水质数据,尤其是聚类分析和主成分分析。流域水质评价中常按照监测时间和监测断面的地理位置进行聚类,分析流域水质的时空变化特征<sup>[12]</sup>。当水质评价指标过多,且彼此之间存在较大的相关性,用这些指标进行水质评价时,由于各个指标反映的信息有一定程度的重叠,不仅会增加工作量,还会掩盖水体的一些重要特征。而主成分分析通过研究众多变量之间的内部依赖关系,用少数几个独立的不可观测变量(成分)来表示其基本的数据结构。这种分析方法有助于提取污染因子并对污染源进行识别,因而被国内外学者广泛应用在河流水质研究中<sup>[7,9,12-16]</sup>。徐华山等<sup>[12]</sup>和曹芳芳等<sup>[9]</sup>采用聚类分析分别对漳卫南运河和新安江河的水质进行评估,分析了其时空变化特征;WAN等<sup>[14]</sup>和黄金良等<sup>[7]</sup>综合运用聚类分析、主成分分析和一元回归分析法分别在分析印度Lagoon河和九龙江典型小流域的水质空间差异性特征的基础上,探讨了水质时空变化和土地利用类型的关系。

小清河是山东省济南、淄博、潍坊、滨州和东营5地市超过1 164万人的饮用水与工农业用水源,其水质状况对该区域的生态和环境保护意义重大。因此,笔者选取中尺度的小清河流域作为研究对

象,结合土地利用和集水区的空间分析、主成分分析和聚类分析等多元统计方法,揭示小清河流域氮磷等水质要素的时空变化特征,辨识流域土地利用类型对氮磷浓度的影响,以期对小清河流域的水质监测、水资源管理和优化土地利用方式提供科学依据。

## 1 研究区概况

小清河流域位于鲁北平原南部,东邻弥河,西靠玉符河,南依泰沂山脉,北以黄河、支脉河为界,地理坐标为 $36^{\circ}15' \sim 37^{\circ}20' \text{ N}$ 、 $116^{\circ}50' \sim 118^{\circ}45' \text{ E}$ ,流经济南、滨州、淄博、东营和潍坊的5市10县(市、区),于寿光市羊口镇注入渤海的莱州湾。河流全长237 km,流域面积 $10\,336 \text{ km}^2$ ,主要支流包括杏花河、孝妇河和淄河。流域年均降水量为646.7 mm,其中,6—9月降水量占年降水总量的75.3%<sup>[17]</sup>。流域内的人口城市化率为49.5%,国内生产总值(GDP)约占山东省的16%,以化工、纺织和造纸等行业为主<sup>[18]</sup>。小清河流域土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、建设用地(主要指城市和工业用地)和裸地,其面积分别占流域总面积的58.3%、14.9%、10.7%、4.3%、11.4%和0.4%。

## 2 研究方法

### 2.1 样点布设与水质分析

选取21个采样点(其中11个位于干流)开展水质监测与采样分析(图1)。采样时间分别为2012年6月4日—7日、2013年7月16日—18日和2013年9月25日—28日。测试分析的水质参数包括总氮、硝态氮、亚硝态氮、氨氮、总磷、磷酸盐、总溶解磷,其中总氮是借助TOC-VCPH分析仪的燃烧法测定,其余指标均由SEAL AA3连续流动分析仪测定。因6月和9月2次采样时大部分水闸并未开放,且并未处于雨季,因此将7月作为汛期,6月和9月作为非汛期进行处理。根据山东省地表水环境功能区区划方案,并参照GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,小清河不同河段执行不同的水质目标值。目前,尚未划定需特殊保护和管理的地表水域,仍执行地表水环境质量I类标准<sup>[19]</sup>。

### 2.2 子流域划分与土地利用分析

小清河流域土地利用类型图来自Landsat TM遥感影像的解译<sup>[20]</sup>,时间为2005年,主要类型包括耕地、林地、草地、水体、建设用地和裸地6类。基于国际科学服务平台下载到的90 m×90 m分辨率的SRTM(shuttle radar topography mission) DEM(digital

elevation model) 数据,以地形图数字化后的河道数据作为引导,应用分布式水文模型 SWAT( soil and water assessment tool) 模型的水系数字化模块提取小清河水系,并结合 2010 年小清河规划方案<sup>[18]</sup>中的

水系作为比对验证。在此基础上,根据流域水质监测断面的位置、土地利用类型的空间分布等,将小清河流域划分为 21 个子流域(图 1)。图 2 是 21 个子流域的土地利用类型结构图。

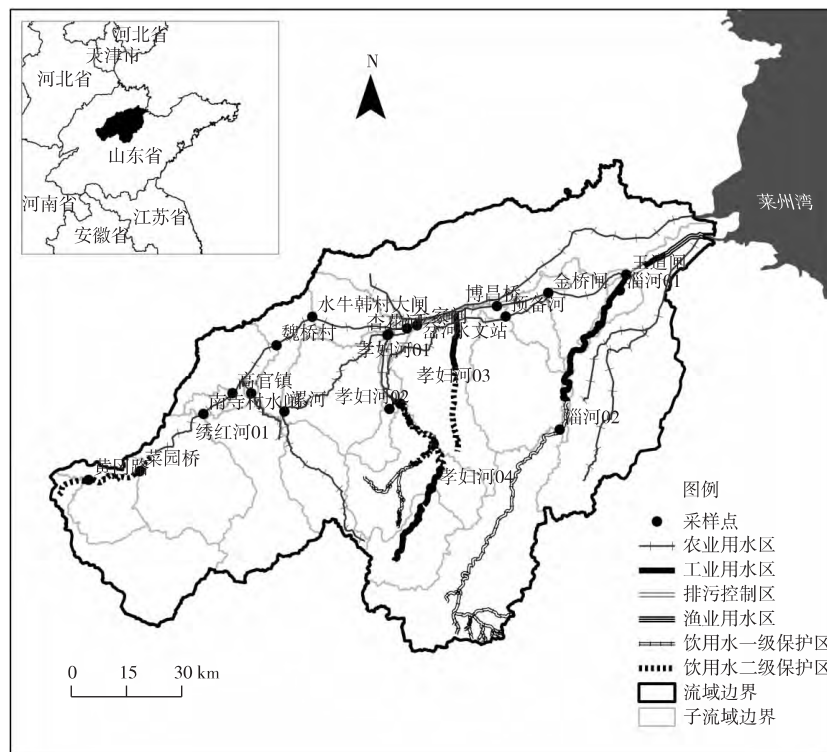


图 1 流域采样点位与水环境功能区划

Fig. 1 Sampling sites in and water functional zoning of the Xiaoqinghe watershed

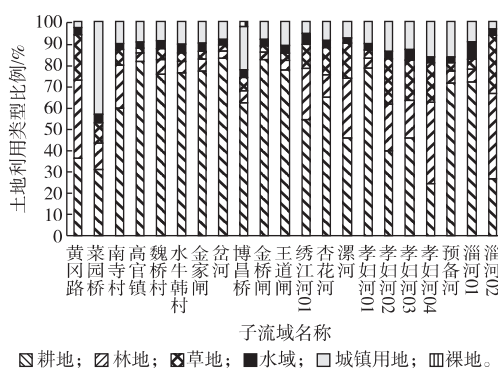


图 2 子流域不同土地利用类型的面积比例

Fig. 2 Area proportions of different types of land use in various sub-watersheds

### 2.3 多元统计分析

多元统计分析技术的应用能对长时间、多指标、多断面的大量监测数据进行有效分析,从中挖掘有效信息<sup>[21-24]</sup>。采用 K-S 检验法( Kolmogorov-Smirnov test) 检验污染指标是否呈正态或接近正态

分布<sup>[12]</sup>。采用两样本  $t$  检验( 2-sample  $t$ -test) 统计方法来检验汛期和非汛期之间的差别是否显著。采用 KMO ( Kaiser-Meyer-Olkin) 和球形 Bartlett ( Bartlett sphere) 检验方法<sup>[6,12]</sup>分析数据进行主成分分析的适宜性,进而识别子流域的主要污染物。在主成分分析数据的基础上,采用离差平方和( Ward's method) 和平方欧氏距离法( squared Euclidean distance) <sup>[12,25-26]</sup>进行聚类分析,识别各子流域水质特征的空间差异性和相似性。采用相关分析方法分析各子流域的水质指标浓度与土地利用类型面积百分比的相关性,进而识别影响子流域水质的潜在污染源。分别采用 ARCGIS 9.3 和 SPSS 17.0 软件进行空间分析和数据分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 流域水质季节差异性分析

小清河 21 个子流域汛期和非汛期的平均水质状况和  $t$  检验结果见表 1。其中总氮含量普遍较高,

在汛期和非汛期都大大超出了环境功能区划对应的水质标准。总氮以氨氮和硝态氮为主,两者含量均较高,且存在显著的季节差异性。其中,氨氮在

汛期的平均浓度显著大于非汛期( $P < 0.01$ ),而硝态氮在非汛期的平均浓度高于汛期。氨氮浓度范围较大,空间分布不规律。

表1 小清河各断面汛期和非汛期水质监测数据统计描述和  $t$  检验结果

Table 1 Descriptive statistics and  $t$  test of water quality at different sections of the Xiaoqinghe River during the rainy and dry seasons

水质指标	季节	平均值/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	中位数/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	标准差/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	范围/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	超标比例/ %	$P$ 值 <sup>1)</sup>
总氮	汛期	11.16	11.87	2.87	5.96~16.95	100	0.09
	非汛期	13.75	12.23	6.34	2.88~28.05	100	
氨氮	汛期	3.81	4.07	2.03	0~6.94	81	<0.01
	非汛期	1.21	1.19	1.14	0.02~4.48	19	
硝态氮	汛期	4.07	3.49	2.56	0.99~9.90	—	<0.01
	非汛期	8.99	8.02	4.56	3.02~17.55	—	
总磷	汛期	0.31	0.31	0.09	0.14~0.51	38	0.71
	非汛期	0.30	0.29	0.16	0.04~0.61	19	
总溶解态磷	汛期	0.24	0.25	0.08	0.10~0.40	—	0.19
	非汛期	0.30	0.31	0.19	0.04~0.75	—	
磷酸盐	汛期	0.15	0.14	0.06	0.06~0.30	—	<0.01
	非汛期	0.08	0.07	0.08	0.01~0.39	—	

1) 表示  $t$  检验差异的显著性水平。

流域内部分站位总磷浓度超标,在汛期和非汛期的超标率分别为 38% 和 19%,但是其平均浓度的季节差异不显著。总磷组成以  $< 0.45 \mu\text{m}$  的总溶解态磷为主,颗粒态磷含量相对较低。另外,磷酸盐约占总磷组成的 1/3 到 1/2,其在汛期的平均浓度明显大于非汛期。

### 3.2 流域氮磷分布的主成分分析

汛期和非汛期氮磷监测数据的 Bartlett 球度检验值均小于 0.05,表明可以用主成分分析方法进行分析。对汛期和非汛期分别进行主成分分析,得到 2 个主成分 Z1 和 Z2(图 3)。

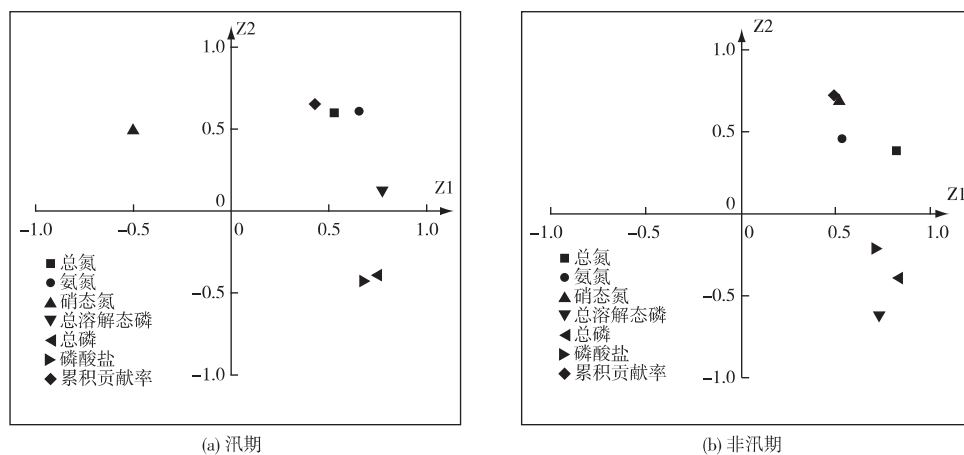


图3 汛期和非汛期水质指标与主成分负荷矩阵 Z1 和 Z2 的相位图

Fig. 3 Plot of water quality and principal components Z1 and Z2 in loading matrix during the rainy and dry season

汛期 Z1 的主要指标为总磷、总溶解态磷,负荷值均大于 0.7; Z2 的主要指标为氨氮和总氮,负荷值均大于 0.6。而非汛期 Z1 的主要指标分别为总氮、

总磷、总溶解态磷和磷酸盐,负荷值为 0.7~0.8, Z2 中负荷最高的是硝态氮。2 个主成分累计方差百分比(累计贡献率)在汛期和非汛期分别为 65.65% 和

72.92% ,可以解释流域水质的大部分变化。其中 ,汛期和非汛期的 Z1 对原始变量的解释贡献值均接近 50% 而 Z2 对水质变化的贡献率接近 20%。

采用主成分得分综合表征各子流域的氮磷负荷状况 ,由图 4 可知 ,汛期菜园桥、南寺村、魏桥村、

孝妇河和预备河断面污染最严重 ,其中魏桥村受主成分 Z1 控制 ,预备河受主成分 Z2 控制。非汛期菜园桥、博昌桥、孝妇河 03、孝妇河 04、预备河和淄河 02 断面水质最差 ,其中菜园桥受主成分 Z1 影响最大 ,孝妇河 04 监测断面受主成分 Z2 影响最大。

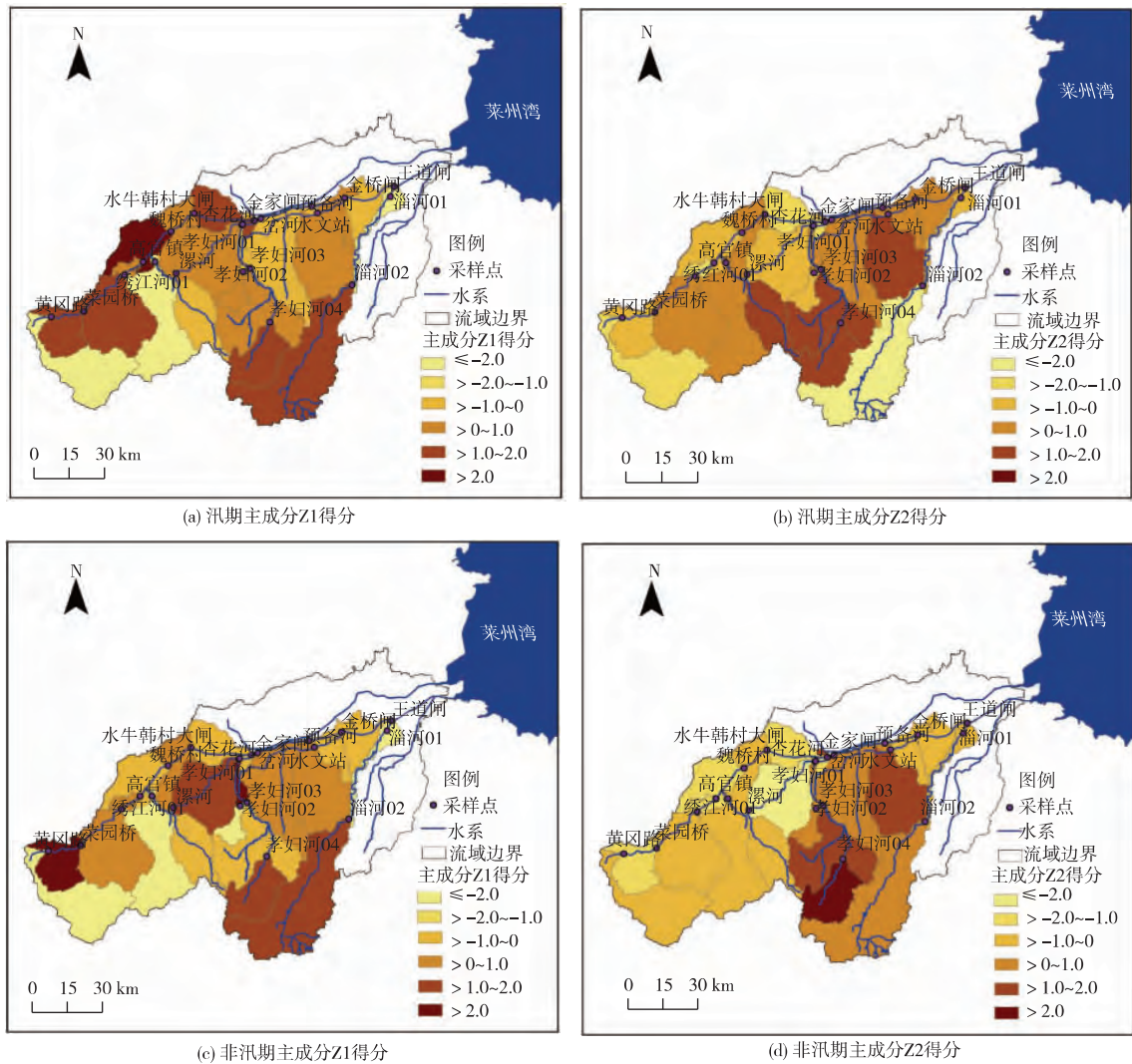


图 4 汛期和非汛期各子流域主成分得分分布

Fig. 4 Distribution of scores of principal components Z1 and Z2 during the rainy and dry seasons relative to sub-watershed

### 3.3 流域水质空间聚类分析

利用汛期和非汛期各项氮磷指标进行空间聚类分析。总体来说 ,汛期和非汛期流域水质在空间上可分为 3 类:第 1 类为菜园桥、孝妇河 01、孝妇河 04;第 2 类为金家闸、王道闸、魏桥村、漯河、南寺村、博昌桥、孝妇河 03、高官镇、水牛韩村、岔河、杏花河、金桥闸、预备河、淄河 02;第 3 类为黄冈路、孝妇河 02、淄河 01、绣江河。由表 2 可知 ,在汛期和非汛

期 ,第 1 类流域各氮磷指标大于第 2 类和第 3 类。第 3 类流域水质相对较优 ,各氮磷指标浓度都低于其他 2 类。空间聚类分析较准确地反映了各个子流域的氮磷负荷类型。另外 ,从空间聚类结果(图 5~6)看 ,部分断面的水质浓度在汛期和非汛期差异较大。如孝妇河 02 断面 ,在汛期时属于第 1 类流域 ,而在非汛期时属于第 3 类流域。

表2 汛期和非汛期3类流域的污染物平均浓度及平均因子得分

Table 2 Mean concentrations of pollutants and mean factor score in the three types of sub-watersheds during the rainy and dry seasons

类别	季节	$\rho(\text{总氮}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{总磷}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{硝态氮}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{磷酸盐}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{总溶解态磷}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	因子得分
第1类	汛期	14.10±1.69	0.33±0.06	5.13±1.68	0.16±0.05	0.29±0.06	0.62
	非汛期	23.70±4.57	0.41±0.19	12.50±6.06	0.20±0.18	0.39±0.35	1.46
第2类	汛期	11.10±2.29	0.33±0.08	3.92±1.26	0.16±0.06	0.25±0.05	0.03
	非汛期	14.00±3.69	0.34±0.12	9.74±3.80	0.07±0.02	0.34±0.11	0.09
第3类	汛期	7.75±1.64	0.18±0.05	0.31±0.53	0.09±0.03	0.12±0.02	-1.57
	非汛期	5.44±2.00	0.09±0.05	3.75±0.59	0.01±0.01	0.07±0.02	-1.40

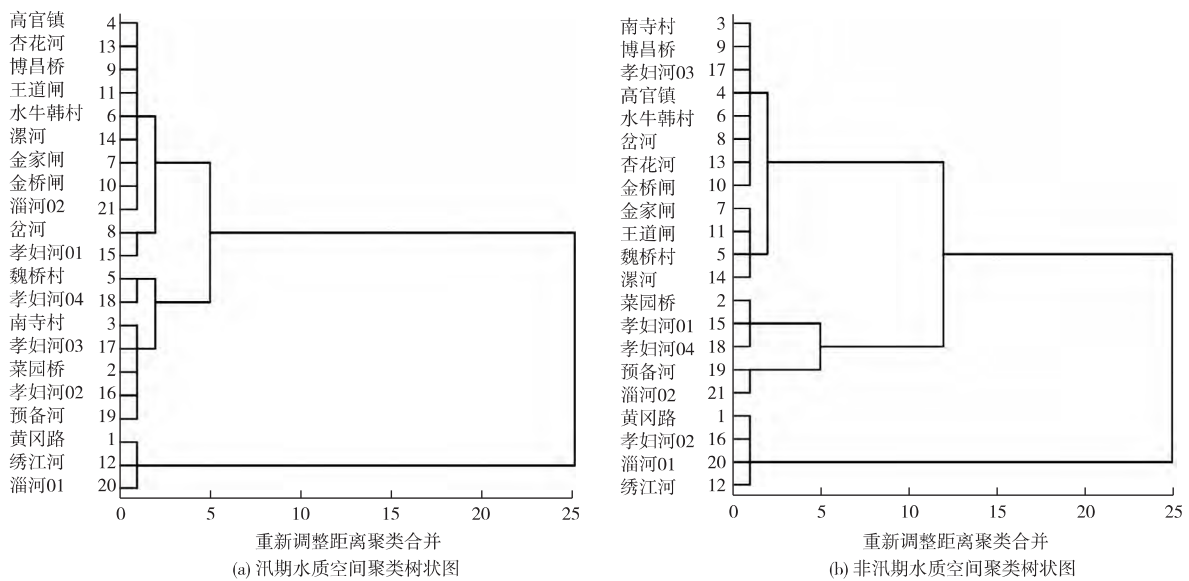


图5 流域汛期和非汛期空间聚类树状图

Fig. 5 Dendrogram of the watershed during the rainy and dry seasons

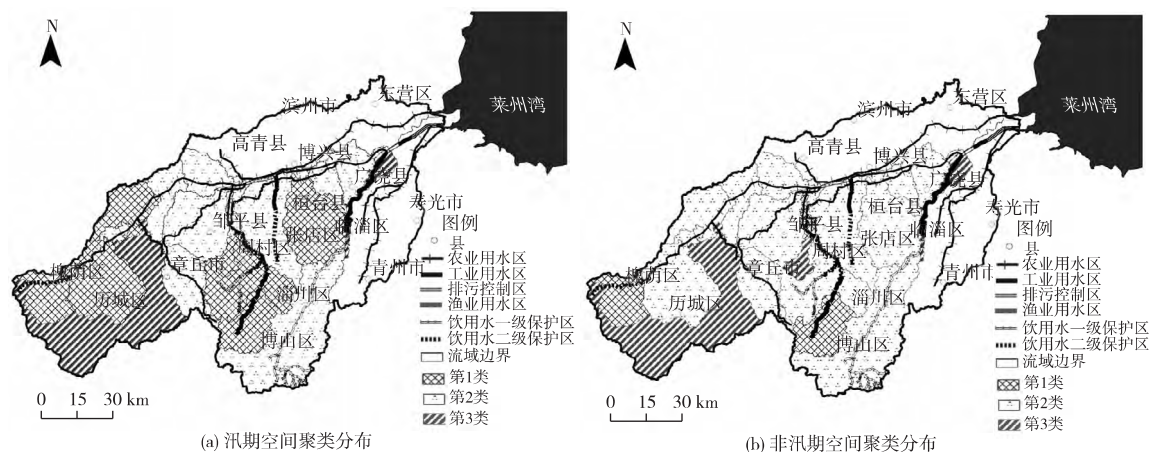


图6 流域汛期和非汛期空间聚类分布图

Fig. 6 Spatial cluster distribution map of the watershed during the rainy and dry seasons

3.4 土地利用类型对水质的影响分析  
对污染物浓度与土地利用类型面积比进行相

关分析(表3),发现总氮、氨氮和总溶解态磷浓度与建设用地的面积比例呈显著正相关( $P < 0.05$ ),而其

他土地利用类型面积比例与污染指标的相关性较弱。由于受采样条件的限制,采样点主要分布在干流上,因此针对干流子流域也进行了相关分析,结果表明,非汛期除硝态氮外各污染指标和建设用地的面积比例均呈显著正相关( $P < 0.05$ )。另外,干流

硝态氮与耕地面积比例呈显著正相关( $P < 0.05$ )。相反,林地、草地面积比例与所有污染指标均呈负相关性,但仅与硝态氮浓度之间关系显著( $P < 0.05$ )。

表3 整个流域各断面污染指标与土地利用类型面积比例之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between area proportion of each type of land use and pollution indices at various sections of the Xiaoqinghe watershed

土地利用类型 面积比例	季节	总氮	总磷	氨氮	硝态氮	磷酸盐	总溶解态磷
耕地	汛期	-0.109	-0.099	-0.030	0.245	-0.063	-0.014
	非汛期	-0.313	0.042	-0.147	-0.171	0.231	0.152
林地	汛期	-0.120	0.042	0.011	-0.169	0.036	-0.071
	非汛期	0.124	-0.170	-0.002	0.182	-0.306	-0.350
草地	汛期	-0.157	0.178	0.039	-0.148	0.027	-0.068
	非汛期	0.076	-0.155	-0.156	0.215	-0.294	-0.294
水域	汛期	-0.229	-0.402	-0.496*	0.288	-0.270	-0.387
	非汛期	-0.418	-0.324	-0.389	-0.357	-0.268	-0.291
建设用地	汛期	0.622*	0.075	0.089	-0.237	0.118	0.130
	非汛期	0.555*	0.342	0.542*	-0.004	-0.218	0.469*
裸地	汛期	-0.082	-0.020	0.121	-0.067	-0.090	0.132
	非汛期	0.038	0.100	0.301	-0.039	0.005	0.168

\* 土地利用类型面积比例与某污染指标显著相关( $P < 0.05$ )。

## 4 讨论

### 4.1 流域氮磷浓度的季节差异性

小清河流域总氮超标严重,氨氮和硝态氮的季节差异性显著,硝态氮浓度最大值出现在非汛期,而氨氮浓度最大值出现在汛期(表1)。小清河流域化工、石油加工、纺织和造纸等企业较多,且多紧邻小清河,尽管经过多次整治,仍有部分工业废水直接进入河道。另外,农业施肥、畜禽养殖和农村生活污水,多数尚未得到有效控制,排放后可随径流或地下水进入河道<sup>[27-29]</sup>。流域氨氮主要来源是化工废水和畜禽养殖废水的排放<sup>[24]</sup>。汛期随着降雨量的增加,畜禽粪便废水随径流的入河量相应增加,加上部分企业违规排放,导致汛期氨氮浓度急剧上升。硝态氮浓度最大值出现在非汛期,可能是由于农作物的种植及生长过程中施用的化肥农药随灌溉用水或者地下水进入河道<sup>[27]</sup>。此外,与大气和沉积物中氮的交换也影响着流域内不同形态氮的分布。不同季节不同区域的生物化学过程会导致水体中不同形态氮的相互转化。小清河流域内总磷浓度存在较严重的超标现象,部分汛期总磷超标率大于非汛期。在点源和非点源的共同作用下,流域内普遍存在氮磷污染,且汛期普遍较非汛期

严重。

### 4.2 流域氮磷浓度的空间差异性

流域主要污染物的空间分析(图4~6)显示,菜园桥、南寺村、魏桥村、孝妇河和预备河等断面的氮磷污染最严重,其中魏桥村子流域受磷的影响最大,预备河则主要受氮的影响大。从空间分布来看,小清河干流在源头黄冈路断面水质良好,在接纳济南槐荫区、历城区、章丘市污水后水质急剧恶化,之后流经滨州、淄博、东营和潍坊,水质始终较差。其中,济南市菜园桥断面水质状况最差。支流上,孝妇河多个断面在汛期的水质状况较差。总的来说,小清河水质空间差异的原因主要在于:(1)黄冈路断面位于小清河源头,水利工程少,水资源开发利用相对较少,另外绣江河与淄河子流域内的排污量相对较少,水质相对较好;(2)小清河流域主要接纳山东省5市10个县市区工业废水和生活污水,工业废水排放量占废水排放总量的39%,其中淄博市排放量最大,占43%;生活污水排放量占废水排放总量的61%,其中济南市的排放量占生活污水排放总量的43%<sup>[17]</sup>。另外,排放量超过1000万 $t \cdot a^{-1}$ 的山东博汇纸业、魏桥纺织、齐鲁石化等大型企业,大部分靠近小清河干流,因此干流水质较差;(3)流域内畜禽粪便氮污染负荷量大的

县区主要集中在小清河流域的上游地区,尤其以历下区和天桥区的氮素污染负荷量最突出,因此菜园桥断面水质最严重<sup>[30]</sup>。另外,该流域现阶段的氮肥施用量仍然保持较快的增长势头,流域主要作物小麦-玉米轮作系统的平均施氮量为  $305 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,部分经济作物的施氮量甚至已经超过  $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,远超过国际上公认的施氮量上限( $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),因此流域内单位面积氮素潜在淋失量较大的区域主要分布在小清河干流两侧及沿岸<sup>[27,31]</sup>。

总体而言,按氮磷分布特征不同子流域可分为3类,第1类和第2类子流域受氮磷影响最大,区域内建设用地比例大,城市化发达,人类干扰最剧烈,污染物浓度与生活污水、畜禽养殖业、工业活动等来源密切相关,且农作物种植面积较大,氮磷肥料投入量大,在暴雨和灌溉量较大的情况下,氮磷元素淋失量较大。尤其是章丘市氮素潜在淋失总量较大<sup>[23]</sup>。第3类流域的建设用地面积比例较低,林地比例较高,受人类活动的影响较小,水质较好。此外,过去十几年虽然实施了流域污染治理专项规划,流域水质得到一定程度改善,但仍未达到水环境功能区的水质标准。

#### 4.3 流域氮磷负荷的影响因素

小清河流域土地利用类型整体以耕地、林地和城镇用地为主,占流域总面积的80%以上。空间上,耕地主要分布在北部平原区,林地和草地主要分布在南部山区。在各个子流域内,个别子流域土地利用数量结构存在差异。其中,菜园桥子流域城镇用地面积比例最大,为43.1%,岔河子流域耕地面积比例最大,为83.3%,淄河02子流域林地面积比例最大,为39.9%,水体和裸地所占比例很小。

水质指标与土地利用类型面积比例的相关分析发现,建设用地比例较高的子流域,如菜园桥、孝妇河04和魏桥村等断面的水质指标值较高,而建设用地比例较低子流域如黄冈路、绣江河,各断面的水质指标值较低,这同土地利用面积比例与水质的相关性分析结果一致。其主要原因在于,城市化过程中建设用地面积的增加,阻碍了地表水的截留与下渗,城市地表沉积的废弃物和灰尘颗粒等物质在径流冲刷过程中部分或全部汇入受纳水体,造成水质污染<sup>[32-34]</sup>。另外,建设用地面积与城镇生活污水(主要包括粪便和洗涤污水)的排放量呈显著正相关<sup>[35]</sup>,因此,建设用地面积比例与大部分水质指标值的正相关性显著。硝态氮与耕地面积比例呈显著正相关,表明硝态氮主要来源可能为农业施肥等。相反,草地、林地面积比例与硝态氮之间呈显

著负相关,这是因为林地、草地是水体潜在污染物的“汇”,林地、草地面积的增加通常减少地表径流,进而降低水土流失和截留吸收降解在径流中的部分污染物,因此,林地和草地面积的增加有利于水环境的保护与恢复<sup>[36-37]</sup>。

## 5 结论

(1) 汛期小清河流域氮磷污染物主要是总磷和总溶解态磷,其次是总氮和氨氮;而非汛期氮磷污染物主要为总氮、总磷、总溶解态磷和磷酸盐,其次为硝态氮。

(2) 小清河流域水质污染状况在汛期和非汛期存在一定差异,总体上,氨氮和磷酸盐浓度汛期显著高于非汛期,而硝态氮浓度则非汛期显著高于汛期。

(3) 建设用地是水质污染的重要源区,其面积比例与大部分水质指标呈显著正相关;农田施肥增加氮流失,而林地、草地对水质有改善作用,因此硝态氮浓度与耕地面积比例呈显著正相关,而与林地和草地面积比例呈显著负相关。

(4) 子流域氮磷污染类型的空间差异性和相似性识别结果表明,菜园桥、孝妇河、魏桥村和预备河等子流域受生活污水、工业废水等点源排放及农业非点源的污染严重,而黄冈路、绣江河和淄河01等子流域受点源和非点源的污染较小。针对以建设用地为主要土地利用类型的子流域,建议提高工业与生活污水处理率,而以耕地为主的子流域需重视由于化肥施用导致的农业非点源污染对水质的影响。

#### 参考文献:

- [1] LIU J G, DIAMOND J. China's Environment in a Globalizing World [J]. *Nature*, 2005, 435(7046): 1179-1186.
- [2] 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.
- [3] TRAN C P, BODE R W, SMITH A J, et al. Land-Use Proximity as a Basis for Assessing Stream Water Quality in New York State (USA) [J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(3): 727-733.
- [4] ROTHWELL J J, DISE N B, TAYLOR K G, et al. A Spatial and Seasonal Assessment of River Water Chemistry Across North West England [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(4): 841-855.
- [5] NGOYE E, MACHIWA J F. The Influence of Land Use Patterns in the Ruvu River Watershed on Water Quality in the River System [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, 29(15/16/17/



- 18): 1161-1166.
- [6] PRATT B ,CHANG H. Effects of Land Cover ,Topography ,and Built Structure on Seasonal Water Quality at Multiple Spatial Scales [J]. *Journal of Hazardous Materials* ,2012 ,209/210: 48-58.
- [7] 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) : 1098-1110.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] MARIA L M ,RICARDO C ,MIGUEL A *et al.* Assessing Land-Use Effects on Water Quality ,In-Stream Habitat ,Riparian Ecosystems and Biodiversity in Patagonian Northwest Streams [J]. *Science of the Total Environment* ,2011 ,409( 3) : 612-624.
- [11] 郝敬峰 刘红玉 胡俊纳 等. 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* ,2010 ,30( 15) : 4154-4161.
- [12] 徐华山 徐宗学 唐芳芳 等. 漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别[J]. *环境科学* ,2012 ,33( 2) : 0359-0369.
- [13] MUSTAPHA A ,ABDU A. Application of Principal Component Analysis & Multiple Regression Models in Surface Water Quality Assessment [J]. *Journal of Environment and Earth Science* ,2012 ,2( 2) : 16-23.
- [14] WAN Y S ,QIAN Y ,MIGLIACCIO K W *et al.* Linking Spatial Variations in Water Quality With Water and Land Management Using Multivariate Techniques [J]. *Journal of Environmental Quality* ,2014 ,43( 2) : 599-610.
- [15] LI S ,LI J ,ZHANG Q. Water Quality Assessment in the Rivers Along the Water Conveyance System of the Middle Route of the South to North Water Transfer Project( China) Using Multivariate Statistical Techniques and Receptor Modeling [J]. *Journal of Hazardous Materials* ,2011 ,195: 306-317.
- [16] KOKLU R ,SENGORUR B ,TOPAL B. Water Quality Assessment Using Multivariate Statistical Methods: A Case Study: Melen River System ( Turkey) [J]. *Water Resources Management* ,2010 ,24( 5) : 959-978.
- [17] 赵章元 孔令辉. 渤海海域环境现状及保护对策[J]. *环境科学研究* ,2000 ,13( 2) : 23-27.
- [18] 小清河流域污染治理专项规划方案[R]. 济南: 山东省环境保护厅 ,2010.
- [19] 张晓东 慕金波 王艳 等. 山东省河流水环境容量研究[M]. 济南: 山东大学出版社 ,2007: 44-48.
- [20] 吴莉 侯西勇 徐新良 等. 山东沿海地区土地利用和景观格局变化[J]. *农业工程学报* ,2013 ,29( 5) : 207-216.
- [21] 蒋艳 彭期冬 骆辉煌 等. 淮河流域水质污染时空变异特征分析[J]. *水利学报* ,2011 ,42( 11) : 1283-1288.
- [22] 冉桂花 葛继稳 苗文杰 等. 三峡库区古夫河水质时空分异特征[J]. *生态学报* ,2013 ,33( 17) : 5385-5396.
- [23] 刘珍环 李正国 杨鹏 等. 城市景观组分影响水质退化的阈值研究[J]. *生态学报* ,2013 ,33( 2) : 0586-0694.
- [24] SUNDARAY S K. Application of Multivariate Statistical Techniques in Hydrogeochemical Studies: A Case Study: Arahmani-Koel River ( India) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment* ,2010 ,164( 1/2/3/4) : 297-310.
- [25] 张文彤 邱春伟. SPSS 统计分析基础教程[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社 ,2011: 235-246.
- [26] SHEN Y N ,LU J ,CHEN D J *et al.* Response of Stream Pollution Characteristics to Catchment Land Cover in Cao-E River Basin , China [J]. *Pedosphere* ,2011 ,21( 1) : 115-123.
- [27] 李虎 邱建军 高春雨 等. 基于 DNDC 模型的环渤海典型小流域农田氮素淋失潜力估算[J]. *农业工程学报* ,2012 ,28( 13) : 127-134.
- [28] SU S L ,ZHI J J ,LOU L P *et al.* Spatio-Temporal Patterns and Source Apportionment of Pollution in Qiantang River ( China) Using Neural-Based Modeling and Multivariate Statistical Techniques [J]. *Physics and Chemistry of the Earth* ,2011 ,36( 9/10/11) : 379-386.
- [29] BOYACIOGLU H ,BOYACIOGLU H. Water Pollution Sources Assessment by Multivariate Statistical Methods in the Tahtali Basin , Turkey [J]. *Environmental Geology* ,2008 ,54( 2) : 275-282.
- [30] 王立刚 李虎 王迎春 等. 小清河流域畜禽养殖结构变化及其粪便氮素污染负荷特征分析[J]. *农业环境科学学报* ,2011 ,30( 5) : 986-992.
- [31] 高懋芳. 小清河流域农业面源氮素污染模拟研究[D]. 北京: 中国农业科学院 ,2011.
- [32] CONWAY T M. Impervious Surface as an Indicator of pH and Specific Conductance in the Urbanizing Coastal Zone of New Jersey , USA [J]. *Journal of Environmental Management* ,2007 ,85( 2) : 308-316.
- [33] BOOTH D B ,JACKSON C R. Urbanization of Aquatic Systems: Degradation Thresholds ,Stormwater Detection ,and the Limits of Mitigation [J]. *Journal of the American Water Resources Association* ,1997 ,33( 5) : 1077-1090.
- [34] MORSE C C ,HURYN A D ,CRONAN C. Impervious Surface Area as a Predictor of the Effects of Urbanization on Stream Insect Communities in Maine ,USA [J]. *Environmental Monitoring and Assessment* ,2003 ,89( 1) : 95-127.
- [35] 曹连海 宋刚福 陈南祥. 城市生活污水排放量的影响因子及关联性研究[J]. *环境科学与技术* ,2009 ,32( 1) : 102-106.
- [36] 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.
- [37] LOPEZ R D ,NASH M S ,HEGGEM D T *et al.* Watershed Vulnerability Predictions for the Ozarks Using Landscape Models [J]. *Journal of Environmental Quality* ,2008 ,37( 5) : 1769-1780.

作者简介: 王琼(1989—),女,四川乐山人,硕士生,主要从事水文过程与数值模拟研究。E-mail: qiongwang@yic.ac.cn

(责任编辑: 陈 昕)