

城市土地利用异质性对湖泊水质的影响

郭青海¹, 马克明^{2,*}, 张 易³

(1. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361003; 2. 城市与区域生态国家重点实验室, 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085;
3. 黑龙江省农产品质量检验检测中心, 哈尔滨 150090)

摘要: 土地利用类型与水体水质之间存在显著相关关系, 这种相关关系受到土地利用类型及其空间分布的影响。人类活动造成流域中不同汇水单元间土地利用异质性, 进而影响和改变了汇水单元水质状况。在自然或半自然区域内, 采用多个汇水单元的综合分析能够体现出流域土地利用类型与水质的相关关系。然而, 在城市区域中, 可能存在由于土地利用特征差异而导致这种相关关系的抵消和降低, 致使分析结果与实际存在偏差。为证实这一现象的存在, 选取武汉市汉阳地区龙阳湖等 4 个湖泊流域为研究对象, 分别从汇水单元综合分析、以影响水质的主要用地类型作为变量进行聚类分析和以湖泊流域为对象的分析等 3 个角度, 分析汇水单元间的土地利用特征差异对水质的影响, 结果显示土地利用异质性影响甚至改变了土地利用类型与水质的相关关系。因此, 在研究城市土地利用与水体水质相关性时, 需要同时考虑土地利用类型的特征和格局。

关键词: 土地利用类型; 土地利用格局; 汇水单元; 流域; 湖泊水质

文章编号: 1000-0933(2009)02-0776-12 中图分类号: Q142, Q178, Q988, X52 文献标识码: A

Impact of land use pattern on lake water quality in urban region

GUO Qing-Hai¹, MA Ke-Ming^{2,*}, ZHANG Yi³

¹ Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361003, China

² State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

³ Heilongjiang Inspection and Detection Centre for Agricultural Products Quality, Harbin 150090, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 0776 ~ 0787.

Abstract: Former study showed that land use types influence water quality, but the influence of the heterogeneous pattern of land use types on this relationship is not clear. In natural or rural area, the relationship between land use and water quality is conceivable through integrated analysis of small catchments at watershed scale. However, the relationship may be questionable in urban area because of its more complex land use pattern and urban constructions. In order to clarify the impact of land use pattern on water quality, four lake watersheds were selected in Hanyang district, Wuhan, China and analyzed in three ways, including catchments integrated analysis, clustering analysis based on main land uses relevant to water quality, and analysis through whole lake watersheds, respectively. The results show that the relationship between land use types and water quality is altered when taking into account the heterogeneity of land use pattern in urban region, which implies that in order to reach a reliable conclusion in practice, land use types and land use pattern should be considered simultaneously in detecting the impact of land use on water quality.

Key Words: land use types; land use pattern; catchments; watershed; lake water quality

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(973)(2007CB407307); 国家自然科学基金委创新群体资助项目(40321101); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿资助项目(0714131d10)

收稿日期: 2007-08-20; 修订日期: 2008-05-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mkm@rcees.ac.cn

土地利用类型与水体污染物浓度之间存在显著相关关系^[1-7]。其中,城市和农业用地与水体污染物浓度存在显著正相关关系,林地、草地等土地利用类型与污染物浓度存在负相关关系^[8-11]。流域尺度上,土地利用类型及其空间分布影响着水体水质污染状况^[12-14]。在自然或半自然区域内,由于土地利用特征(土地利用类型及其空间分布)存在相似性,多个汇水单元的综合分析体现出流域尺度上土地利用类型与水质的相关关系^[9, 10]。然而,营养物质类型及其累积浓度的空间分布在不同土地利用类型上呈现出各不相同的特征^[15]。尤其在城市区域中,由于人类活动的影响造成流域中不同汇水单元间土地利用的异质性,不仅土地利用类型发生变化,而且其空间分布也变化强烈。这种异质性造成不同汇水单元内的土地利用类型对水质的影响效果产生差异^[16, 17],因此分析土地利用类型与水体污染物浓度关系时,就可能存在由于土地利用差异而导致对水质影响效应的抵消和降低,致使分析结果与实际存在偏差,然而这方面的研究开展的极少。基于此,本文提出研究城市土地利用与水体水质关系时,先分析汇水单元土地利用特征,将具有相似土地利用特征的汇水单元聚类,再比较土地利用特征存在差异的汇水单元间用地类型与水质的关系。

研究选取武汉市汉阳区龙阳湖等4个湖泊流域为研究对象,分别从汇水单元综合分析、以影响水质的主要用地类型作为变量进行聚类的分析和以湖泊流域为对象的分析等3个角度,分析汇水单元间的土地利用特征差异,比较三者之间的结果,分析土地利用特征存在差异时与水质的关系,阐明城市土地利用异质性对湖泊水质影响的效应。文中汇水单元综合分析是指对4个流域所有汇水单元中的土地利用类型与相应的水质指标进行相关分析^[18]。聚类分析是将具有相似土地利用特征的汇水单元聚类,之后分析同一类中汇水单元土地利用与相应水质指标的关系。以流域为对象的分析是将一个流域内所包含的多个汇水单元为一类,分析各湖泊流域中土地利用类型与水质相关关系。

1 研究区域概况

汉阳区是湖北省武汉市的三镇之一(114°30' ~ 114°17'E, 30°25' ~ 30°36'N),东濒长江,北傍汉水,呈三角形。汉阳区属北亚热带季风性湿润气候,多年平均气温 15.8 ~ 17.8℃,年平均降水量为 1150 ~ 1450mm,降水集中于每年 6 ~ 8 月。汉阳地区湖泊众多、沟渠交织,但湖泊水质恶化现象十分严重。本研究选取的汉阳区4个主要湖泊流域中(表1,图1),除三角湖水质为V类外,龙阳湖、墨水湖、南太子湖等湖泊均为劣V类水质。4湖流域经济发展方向和水平不同,墨水湖北岸和龙阳湖北岸属于旧城区,人口居住密度高,对环境压力大;南太子湖和三角湖处于新开发区域,南太子湖南岸为武汉市经济技术开发区,三角湖流域主要为文教区。

2 研究方法

2.1 土地利用类型分类与汇水单元划分

土地利用类型数据通过高分辨率 Quickbird 遥感影像(2003年1月23日)目视解译获得。首先,利用汉阳区 1:50000 地形图,在遥感软件 ERDAS Imagine 8.5 中进行 Quickbird 影像的几何校正,并定义其投影参数;然后在 ArcGIS 支持下,进行影像的目视解译和数字化。由于高分辨率(0.61m)对计算机自动判读有强烈的干扰作用,并且研究区的面积较小(22100hm²),因此本研究采用目视解译方法进行土地利用分类,从而获得高精度的土地利用分类图。参照中国土地资源分类系统及国家标准的《城市用地与规划建设用地标准》(GBJ137-90),将汉阳区的土地利用类型划分为16种,即沟渠、塘、农田、林地、天然草地、人工草坪、农村居民地、城市居民地、商业用地、工矿用地、教育用地、非透水性道路、透水性道路、公共设施、平整地和滩地等。然后,通过野外实地调查进行解译结果的校正(精度85%),最终获得汉阳区土地利用类型图(图1)。

将汉阳区 1:10000 DEM 数据输入 SWAT 模型,根据高程确定龙阳湖,墨水湖,南太子湖和三角湖的各汇水单元边界,4湖可划分出17个汇水单元,其中墨水湖流域6个、龙阳湖流域4个、三角湖流域3个,和南太子湖流域4个(图2)。使用 FRAGSTATS3.0 计算汇水单元内各土地利用类型所占面积比例。

2.2 水质指标

当汇水单元内以城市居民地、农村居民地、工业用地和商业用地为主时,径流污染物包括总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄)和硝酸盐(NO₃⁻)等^[19-21]。因此,本研究在每个汇水单元相邻近的湖面(距离湖岸10 ~

表 1 4 湖基本情况

Table 1 Basic information of lakes

湖泊 Lake	湖泊面积 Lake area (hm^2)	流域面积 Watershed area(hm^2)	流域土地利用特征 Characteristics of land uses in watershed	水质 Water quality
墨水湖 Lake Moshui	411.55	1924.83	城市化水平较高,居民住宅及工矿企业集中于北岸,南岸为农田;不透水面达 57.79% Higher level of urbanization, habitation and industry locating on the north watershed, agriculture locating on the south watershed; impervious land accounting for 57.79%.	劣 V
龙阳湖 Lake Longyang	231.85	1073.60	流域开发多处在湖泊外围,沿湖周边地带并未开发;不透水面达 45.95% Anthropogenic development happening in the lake periphery, virgin in the region near lake. Impervious land accounting for 45.95%.	劣 V
南太子湖 Lake Nantaizi	481.69	2503.68	武汉经济开发区坐落于南岸;不透水面达 24.89% Wuhan economic development zone locating in the south watershed, and impervious land accounting for 24.89%.	劣 V
三角湖 lake Sanjiao	237.92	1123.56	近 5a 来不透水面积增加迅速,主要在于新江汉大学坐落在三角湖湖边,以及度假村、高级住宅小区的建设 Jiangnan University, holiday village and high classic house zone making the proportion of impervious land increases dramatically during the past five years.	V

湖泊和流域面积为 2003 年 Quickbird 影像解译测算所得 Land use data were extracted through the high-resolution Quickbird multispectral imagery (resolution of 0.61m) acquired on January 23, 2003 (SPOT Company)

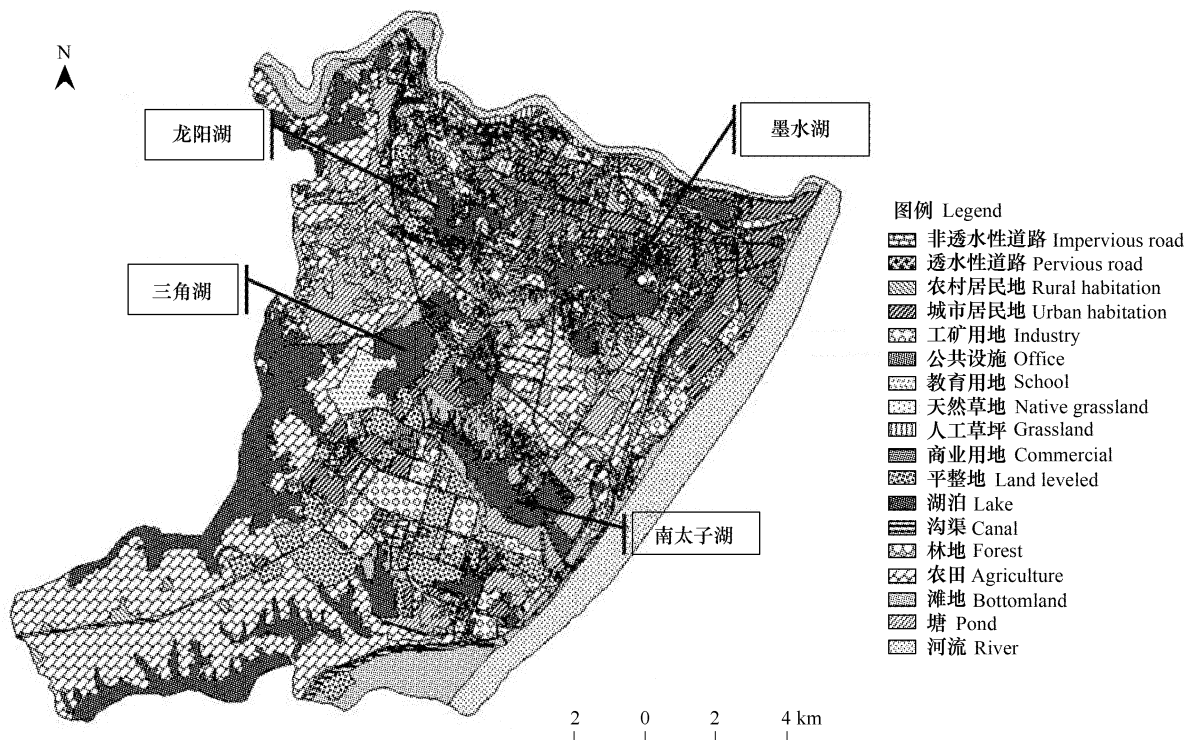


图 1 汉阳地区土地利用图

Fig. 1 Land use classification in Hanyang district

图例中的河流和湖泊不包括在 16 种土地利用类型中,河流指的是长江和汉水 Rivers and lakes are excluded from sixteen types of land use, and rivers are pointed to Yangtze River and Han River in the map

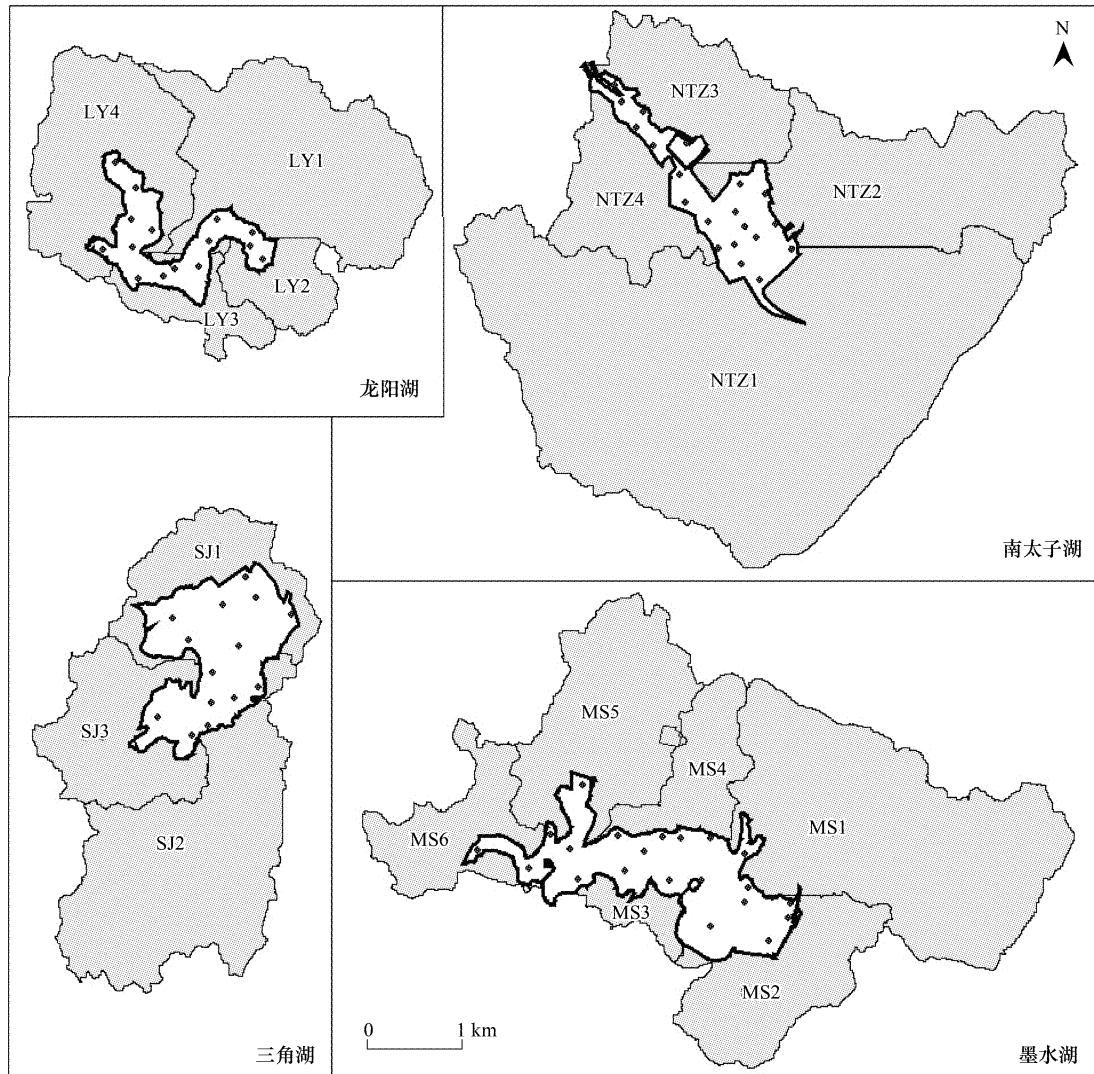


图2 4湖汇水单元及采样点分布

Fig. 2 Catchments in the four lake watersheds and the distribution of sampling sites

LY1、LY2、LY3 和 LY4 表示龙阳湖的 4 个汇水单元;MS1、MS2、MS3、MS4、MS5 和 MS6 表示墨水湖的 6 个汇水单元;NTZ1、NTZ2、NTZ3 和 NTZ4 表示南太子湖的 4 个汇水单元;SJ1、SJ2 和 SJ3 表示三角湖的 3 个汇水单元 Lake Longyang watershed includes 4 catchments such as LY1, LY2, LY3 and LY4; Lake Moshui watershed includes 6 catchments such as MS1, MS2, MS3, MS4, MS5 and MS6; Lake Nantaizi watershed includes 4 catchments includes NTZ1, NTZ2, NTZ3 and NTZ4; Lake Sanjiao watershed includes 3 catchments such as SJ1, SJ2 and SJ3

20m) 设定 2~6 个采样点不等(图 2), 每个样点重复测定 3 次。水质指标选定 TN、TP、 NH_4 、 NO_3^- 、氯化物(Cl^-)、COD, 以及非金属硒(Se)。 NH_4 、 NO_3^- 和 Cl^- 采用 6600EDS 水质分析仪(YSI Int.) 现场测定; 其余指标采集水样带回实验室分析。TN、TP、COD 按照地表水环境质量标准(GB3838-2002) 方法测定, 非重金属指标采用等离子发射光谱仪 ICP-OES (VISTA-MPSX) 分析。

2.3 土地利用类型与水质相关性分析

降雨过程中, 污染物质从各土地利用类型上析出, 随径流在各土地利用类型中流动, 不断被吸收、沉淀和再析出, 最终汇入湖泊^[22]。本文采用指数模型表征这一过程^[9, 19]:

$$NPS_i = \alpha e^{\beta_1 \text{农田}_i + \beta_2 \text{林地}_i + \beta_3 \text{商业用地}_i + \dots + \beta_{15} \text{农村居民地}_i + \beta_{16} \text{城市居民地}_i} \quad (1)$$

式中, NPS_i 指水体中测定的水质指标; α 为常数; $\beta_1 \sim \beta_{16}$ 分别表示各种土地利用类型面积比例与水质指标之间的相关系数, β_i 值为正, 表明此土地利用类型上输出污染物; β_i 值为负, 表明此土地利用类型上滞留、吸附

污染物或者吸收的污染物大于自身所释放的污染物。运用 SPSS 统计软件进行逐步回归 (stepwise regression process) 分析, 只有具有统计显著性的变量才在模型中出现。聚类分析运用 SPSS10.0 统计软件, 水质数据经 $\ln(x)$ 转化。

3 结果与分析

3.1 汇水单元综合分析

将 17 组土地利用类型和对应水质指标带入指数模型, 经逐步回归分析, 结果显示 16 种土地利用类型中与水质指标相关的有 7 种, 其中农村居民地、城市居民地、商业用地和滩地对水体水质变化影响较大 (表 2)。农村居民地是 TN、TP、 NH_4 、 NO_3^- 和 Cl^- 的一个主要来源。商业用地是另一个突出污染源, 不仅作为 COD、Se 的主要污染源, 而且对 TN 和 NH_4 的贡献高于农村居民地。城市居民地, 虽然主要输出 NO_3^- 和 Cl^- , 但其影响程度低于农村居民地。滩地与大多数污染物浓度变化呈现负相关, 在吸收、截留径流携带的污染物质方面具有积极作用, 是污染物进入湖泊之前的预前“汇”。此外, 人工草坪、教育用地和非透水性道路分别对 Cl^- 、COD 和 Se 有负相关关系, 不过考虑到其在 17 个汇水单元里出现的频率较低, 且面积比例较小, 故未列入影响水质的主要用地类型。教育用地在 SJ3 中占到 74.45%, 主要是因为江汉大学坐落于此, 作为一个完整的用地类型而使其面积比例异于其他汇水单元。

表 2 水质指标与用地类型回归分析结果

Table 2 Regression analysis between land use types and water quality indices

水质指标 Water quality index	用地类型 Land use types							
	沟渠 Canal	塘 Pond	农田 Agriculture	林地 Forest	人工草坪 Grassland	农村居民地 Rural habitation	城市居民地 Urban habitation	商业用地 Commercial
TN						+		+
TP						+		
NH_4						+		+
NO_3^-						+	+	
Cl^-					-	+	+	
COD								+
Se								+

水质指标 Water quality index	用地类型 Land use types						R	P
	工矿用地 Industry	教育用地 School	非透水路 Impervious road	公共设施 Office	平整地 Land leveled	滩地 Bottomland		
TN							0.641	0.025
TP						-	0.748	0.003
NH_4							0.667	0.016
NO_3^-							0.781	0.001
Cl^-							0.960	<0.001
COD		-				-	0.945	<0.001
Se			-				0.679	0.013

另外, 进行回归分析的用地类型中未包括天然草地和透水性道路, 因为这两类型出现频率低, 且面积极小。

3.2 基于主要用地类型的聚类分析

一方面人类活动程度的强弱造成龙阳湖等 4 个流域 17 个汇水单元土地利用异质性, 另一方面汇水单元间土地利用特征也存在着一定相似性。聚类分析将汇水单元间的土地利用相似点提取出来, 同一类汇水单元土地利用特征相似, 之后比较经汇水单元聚类后的土地利用类型与水质关系。通过汇水单元综合分析, 发现

农村居民地、城市居民地、商业用地和滩地是影响水质变化的主要用地类型。以这 4 类土地利用类型作为变量将 17 个汇水单元进行聚类,用地类型相似的汇水单元聚为一类,进而分析存在差异的汇水单元聚类对水质的影响。单因素方差分析显示以农村居民地、城市居民地、商业用地和滩地为变量的聚类分析,将 17 个汇水单元分为 3 类时各类之间存在显著差异($P < 0.05$)。

第 I 类包括汇水单元 LY1、LY2、MS1、MS4、MS5、MS6、NTZ1、SJ2 和 SJ3,土地利用以城市用地类型为主,城市居民地和商业用地面积比例高于 II 和 III 类中的相同土地利用类型,且这两种土地利用类型面积比例之和高于同一聚类中的农村居民地和滩地面积比例之和(1.38% ~ 17.69%)(表 3,图 3)。汇水单元 LY3、LY4、MS2、MS3、NTZ2、SJ1 为第 II 类,该类中农村居民地面积比例较其它两类农村居民地面积比例高,且城市居民地和商业用地较低,此类以农业用地类型为主。NTZ3 和 NTZ4 组成第 III 类,滩地为主要用地类型,分别占 NTZ3 和 NTZ4 汇水单元面积的 53.25% 和 19.98%,比该类中的城市居民地、商业用地和农村居民地之和分别高出 46.68% 和 16.31%。

表 3 分类结果

Table 3 Clustering results

类别 Class	汇水单元 Catchments	土地利用特征 Land use characteristics
I	LY1、LY2、MS1、MS4、MS5、MS6、SJ2、SJ3、NTZ1	城市居民地、工矿用地、教育用地、非透水性道路和平整地所占比例较高,农田、农村居民地、商业用地、滩地较低,其他类型出现频率或面积比例低 Urban habitation, industry, school, impervious road and land leveled are the dominant land use types; agriculture, rural habitation, commercial and bottomland have low proportions; and other land uses have low frequency or proportions of area
II	LY3、LY4、MS2、MS3、NTZ2、SJ1	塘、农田、农村居民地所占面积较高,沟渠、非透水性道路、平整地和滩地比例较低,其他类型出现频率或面积比例低 The proportions of pond, agriculture and rural habitation are higher than those of canal, impervious road, land level and bottomland
III	NTZ3、NTZ4	滩地为主要类型,平整地、塘和农田其次 Bottomland is the main type of land use, and bottomland, pond and agriculture play minor role

3 种聚类类型中土地利用类型与水质关系见表 4。I 类中多种土地利用类型与水质指标存在相关关系,而 II 类中这种相关性却比较少,而 III 类汇水单元的用地类型与水质指标均不存在显著相关关系,故表 4 中未列出。I 类聚类中由于沟渠、天然草地和透水性道路等用地类型出现频率极低,排除在相关分析之外,剩余的 13 种用地类型与各水体污染物浓度进行逐步回归。回归结果显示, NO_3^- 浓度变化在 I 类中与各土地利用类型相关性均不显著,TN 浓度变化与林地、农村居民地和公共设施等面积比例存在正相关关系,TP 浓度变化与人工草坪、农村居民地和城市居民地等面积比例之间存在正相关关系,林地和农村居民地是 NH_4 的输出源, Cl^- 来源于农田、林地和公共设施,而对于 COD 和 Se 分别来源于农村居民地和滩地。滩地除作为 Se 的来源地外,还起到吸收 TP 和 Cl^- 的作用;除滩地外,对一些污染物起到“源”作用,又对另一些污染物起到“汇”作用的用地类型,还包括农田、城市居民地和公共设施。塘在 I 类汇水单元中对营养物质的负相关作用极为明显;此外,商业用地、教育用地和平整地起到汇的作用。

II 类汇水单元土地利用类型与水质相关分析中,用地类型排除了商业用地、天然草地、透水路面和公共设施,原因在于这 4 种用地类型面积较小或是在汇水单元中出现频率过低。II 类中土地利用类型对污染物的贡献弱于 I 类,TP、COD 和 Se 与土地利用类型关系不显著。农田和滩地的面积比例大小与 NO_3^- 和 Cl^- 浓度变化之间存在正相关关系,而农村居民地和工矿用地面积比例与 NO_3^- 浓度负相关;TN 和 NH_4 仅与教育用地面积比例负相关。II 类汇水单元中用地类型与水质相关分析结果与 I 类的差别较大。

3.3 以湖泊流域为对象的用地类型与水质相关性分析

汉阳区龙阳湖等 4 湖流域内的土地利用类型存在差异(图 3)。墨水湖流域,尤其是墨水湖北部区域是汉阳区老工业基地,属于旧城区,水环境污染问题较为突出;龙阳湖流域城市化水平低于墨水湖流域,主要用地

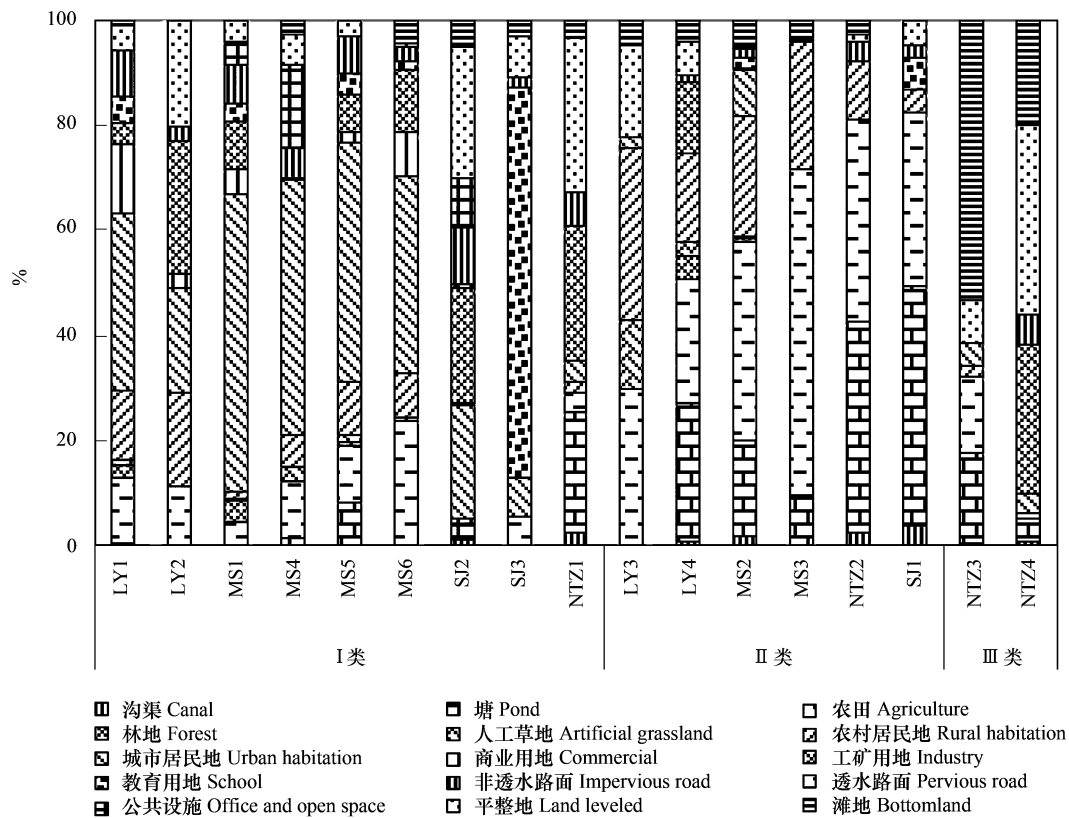


图3 各类汇水单元用地特征

Fig. 3 Characteristics of land use in catchments

类型为农业用地与居民用地;三角湖流域主要用地类型表现为城市居民用地和江汉大学新校区的建立;而南太子湖北部以农业用地为主,南部为武汉市经济技术开发区,不透水面积比例高。用地类型特征差异导致对水质的影响存在差别。分别对4个湖泊流域各包含的汇水单元进行用地类型与水质关系分析,其相关关系分析结果见表5。

龙阳湖流域中,滩地和塘的面积比例与TN浓度变化负相关,草地、城市居民地和工矿用地等的面积比例与TP、 NH_4 和 Cl^- 的浓度均存在正相关关系。墨水湖流域土地利用类型与水质相关关系较弱,除TP浓度与商业用地面积比例负相关,Se浓度与农村居民地和工矿用地的面积比例存在正相关外,其余5种污染物浓度与用地类型面积比例相关性不显著。南太子湖流域中,沟渠和塘的面积比例与营养类污染物浓度正相关,工矿用地面积比例与 Cl^- 浓度正相关,COD和Se与土地利用类型相关性不显著。三角湖流域情况与墨水湖相似,土地利用类型与水质关系较弱,滩地和塘的面积比例分别与 NO_3^- 、TP浓度变化存在正相关关系,教育用地和城市居民地面积比例分别与 Cl^- 、Se浓度变化存在负相关关系。

4 讨论与结论

4.1 汇水单元综合分析

城市土地利用影响着水体水质,Sonzogni等人的研究表明来源于农田和城市用地的总悬浮颗粒物(TSS)、TP和TN含量是林地和撂荒地上的10~100倍^[23]。不仅如此,商业用地、工矿用地、城市居民地和交通道路等土地利用类型是城市土地利用类型中最重要的几种污染源^[11, 24]。汇水单元综合分析结果显示农村居民地和商业用地与水体水质有着密切的相关关系。虽然城市居民地的影响程度低于农村居民地,但对 NO_3^- 和 Cl^- 浓度变化的影响也是不容忽视的。

此外,滩地、人工草坪和教育用地也与部分水质指标(TP、COD和 Cl^-)存在负相关关系。这一结果与其

它研究结果相类似^[8-11]。本研究与其他研究结果不同之处在于不透水路面面积比例大小与非金属 Se 浓度变化存在负相关(表 2)。产生这结果的原因一方面是由于汉阳地区排水系统与不透水路面的耦合机制,另一方面是排水系统的雨污合流。不透水路面对 Se 的负作用反映了排水系统对 Se 的影响,地面和排水管网中沉积的 Se 在降雨过程中被雨水冲刷经排水管网进入污水处理厂而被处理。

以往研究采用的方法与本研究的汇水单元综合分析方法相似,是将流域中的汇水单元作为对象进行土地利用与水质相关分析;并且本研究的汇水单元综合分析结果与以往研究结果相似。但是,需要指出的是自然流域内汇水单元间的土地利用特征存在相似性,分析土地利用与水质关系时各汇水单元中土地利用类型对水质的影响具有相似性,因而在综合分析上这种相关关系未发生显著变化。与自然流域所不同的是,城市区域内人类活动显著改变了汇水单元的土地利用特征,不仅土地利用类型发生显著改变,而且土地利用类型的空间分布也发生了改变。因此,在研究城市区域土地利用类型对水质的影响时就不能忽视这样一个问题,即流域内土地利用类型差异对水质分析的影响。当将存在土地利用类型特征差异的汇水单元综合进行分析时,这种土地利用类型与水质相关关系会受到影响、削弱甚至于改变。

4.2 聚类比较

土地利用类型与水质的相关关系在 3 类汇水单元聚类中的结果显著不同,Ⅲ类中土地利用类型与水质指标不存在显著相关关系,Ⅱ类中与水质相关的土地利用类型明显少于Ⅰ类,而且Ⅰ、Ⅱ类中与水质指标存在相关关系的土地利用类型发生了改变(表 4)。以塘的面积比例变化为例,Ⅰ类中塘的面积比例与 TN、TP、Cl⁻、COD 和 Se 的浓度变化之间存在负相关关系,而在Ⅱ类中无显著相关。此外,同一种土地利用类型在Ⅰ、Ⅱ类中对同一种水质指标的影响也不尽相同。以 Cl⁻ 浓度变化为例,Ⅰ类中塘、教育用地和滩地等用地类型面积比例与之存在负相关关系,而与林地、农田和公共设施等用地类型面积比例正相关;然而在Ⅱ类中,Cl⁻ 浓度变化与农田和滩地面积比例正相关,滩地在这两类中的作用相反。聚类分析将存在差异的汇水单元分类分析,一定程度上去除了由于土地利用格局异质性带来的分析干扰,能更清楚地反映出汇水单元间的土地利用异质性对水体水质的影响。

与汇水单元综合分析结果(表 2)比较,聚类比较与综合分析两者间与水质相关的土地利用类型发生明显变化,在汇水单元综合分析中与 Cl⁻ 浓度变化相关的用地类型是人工草坪、农村居民地和城市居民地,分析结果显示由于土地利用异质性影响甚至改变了土地利用类型与水质的相关关系。存在显著差异的 3 类土地利用类型与水质相关关系支持了上节所提出的问题,将相关关系不同甚至存在相反作用的汇水单元综合分析,会影响土地利用类型与水质相关关系分析结果,削弱甚至于改变这种相关关系。

4.3 以湖泊流域为对象的分析

以湖泊为对象的分析结果显示 4 个流域内土地利用类型与水质相关性差异更加明显。流域土地利用受到经济发展水平和人类活动干扰,使得各流域土地利用特征差异显著,而且同一流域不同汇水单元间也存在着土地利用特征的差别(表 1)。以南太子湖 4 个汇水单元为例,汇水单元 NTZ1 处于聚类Ⅰ类,城市用地比例较高;NTZ2 处于聚类Ⅱ类,农村用地比例较高;而 NTZ3 和 NTZ4 滩地较多,属于聚类Ⅲ类。南太子湖 4 个汇水单元土地利用特征差异显著,土地利用类型与水质指标之间的相关关系明显弱于聚类分析的相关结果,也弱于汇水单元的综合分析结果,从另一方面证实土地利用特征存在差异时致使土地利用类型与水质指标相关关系的分析结果存在极大差别。

4.4 土地利用异质性对水体水质的影响

一般而言,与水质显著正相关的某一土地利用类型所占面积比例越大,则水体中的 TN、TP 和其他水质污染物的浓度越高^[25]。相反地,与水质显著负相关的某一土地利用类型所占面积比例越大,则进入水体的污染物质越小^[7]。汇水单元中包含多种土地利用类型,并且土地利用类型的分布具有空间异质性。不同的土地利用类型上污染物负荷也有所不同^[26]。降雨时,地表污染物质随地表径流入水体的过程中,流经不同性质的土地利用类型时污染物可能被沉积、吸收和再析出。景观生态学的格局与过程理论解释了水体水质之间的

空间差异性,一个原因就在于水体水质是与水质有正相关性、负相关的多种土地利用类型及其空间分布的综合作用反映^[27, 28]。当汇水单元间存在土地利用异质性时,其对相应水体水质的影响效应也不尽相同。因此,在城市区域研究土地利用与水体水质相关性时,先对汇水单元的土地利用特征进行分析,当存在显著差异时应进行基于土地利用特征的汇水单元聚类分析,将具有相同或相似土地利用特征的汇水单元聚为一类,之后再行土地利用与水质关系分析。

References:

- [1] Tong S T Y. The hydrologic effects of urban land-use: A case study of the Little River Basin. *Landscape and Urban Planning*, 1990, 19: 99 – 105.
- [2] Gburek W J, Folmar G J. Flow and chemical contributions to streamflow in an upland watershed: a baseflow survey. *Journal of Hydrology*, 1999, 217: 1 – 18.
- [3] Brezonik P L, Stadelmann T H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Miniesota, USA. *Water Research*, 2002, 36: 1743 – 1757.
- [4] Ha H J, Stenstrom M K. Identification of land-use with water quality data in stormwater using a neural network. *Water Research*, 2003, 37: 4222 – 4230.
- [5] Donohue I, McGarrigle M L, Mills P. Linking catchment characteristics and water chemistry with the ecological status of Irish rivers. *Water Research*, 2006, 40: 91 – 98.
- [6] Chen L D, Fu B J, Zhang S R, *et al.* Comparative study on the dynamics of non-point source pollution in a heterogeneous landscape. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 808 – 816.
- [7] Liang T, Wang H, Zhang X M, *et al.* Transportation processes and rates of heavy metals in an artificial rainstorm runoff under different land use types. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1756 – 1760.
- [8] Moreno J L, Navarro C, Delas Heras J. Abiotic ecotypes in south-central Spanish rivers: Reference conditions and pollution. *Environmental Pollution*, 2006, 143: 388 – 396.
- [9] Basnyat P, Teeter L D, Lockaby B G. Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution inputs to Coastal Estuaries. *Environmental Management*, 1999, 23(4): 539 – 549.
- [10] Wang X. Integrating water-quality management and land-use planning in a watershed context. *Journal of Environmental Management*, 2001, 61: 25 – 36.
- [11] Tong S T Y, Chen W L. Modeling the relationship between land-use and surface water quality. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66: 377 – 393.
- [12] Rhodes A L, Newton R M, Pufall A. Influences of land use on water quality of a diverse New England watershed. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35: 3640 – 3645.
- [13] Schoonover J E, Lockaby B G. Land cover impacts on stream nutrients and fecal coliform in the lower Piedmont of West Georgia. *Journal of Hydrology*, 2006, 331: 371 – 382.
- [14] Hwang S J, Lee S W, Sona J Y, *et al.* Moderating effects of the geometry of reservoirs on the relation between urban land use and water quality. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 82(4): 175 – 183.
- [15] Wang P, Gao C, Yao Q, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of nitrogen losses in hilly area of Taihu lake. *Environmental Science*, 2006, 27(8): 1671 – 1675.
- [16] Paul M J, Meyer J L. Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001, 32: 333 – 365.
- [17] Chadwick M A, Dobberfuhr D R, Benke A C, *et al.* Urbanization affects stream ecosystem function by altering hydrology, chemistry, and biotic richness. *Ecological Applications*, 2006, 16(5): 1796 – 1807.
- [18] Guo Q H, Ma K M, Yang L. Main sources of urban non-point source pollution and control measures for classified catchments. *Environmental Science*, 2006, 27(11): 2170 – 2175.
- [19] Basnyat P, Teeter L D, Lockaby B G, *et al.* The use of remote sensing and GIS in watershed level analyses of non-point source pollution problems. *Forest Ecology and Management*, 2000, 128: 65 – 73.
- [20] Bhaduri B, Harbor J, Engel B, *et al.* Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using a GIS-NPS mode. *Environmental Management*, 2000, 26(6): 643 – 658.
- [21] Ren W W, Zhong Y, Meligrana J, *et al.* Urbanization, land use, and water quality in Shanghai 1947 ~ 1996. *Environment International*, 2003,

29: 649 – 659.

- [22] Phillips J D. Evaluation of North Carolina's estuarine shoreline area of environmental concern from a water quality perspective. *Coastal Management*, 1989, 17: 103 – 117.
- [23] Sonzogni W C, Chesters G, Coote D R, *et al.* Pollution from land runoff. *Environmental Science and Technology*, 1980, 14(2): 148 – 153.
- [24] Bannerman R T, Owens D W, Dodds R B, *et al.* Sources of pollutants in Wisconsin stormwater. *Water Science and Technology*, 1993, 28(3-5): 241 – 259.
- [25] Mehaffey M H, Nash M S, Wade T G, *et al.* Linking land cover and water quality in New York city's water supply watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 107: 29 – 44.
- [26] Yang L, Ma K M, Guo Q H, *et al.* Zoning planning in non-point source pollution control in Hanyang district. *Environmental Science*, 2006, 27(1): 31 – 36.
- [27] Gustafson E J. Quantifying landscape spatial pattern: what is the state of the art? *Ecosystems*, 1998, 1: 143 – 156.
- [28] Gillies R R, Box J B, Symanzik J, *et al.* Effects of urbanization on the aquatic fauna of the Line Creek watershed, Atlanta-a satellite perspective. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 411 – 422.

参考文献:

- [6] 陈利顶,傅伯杰,张淑荣,等. 异质景观中非点源污染动态变化比较研究. *生态学报*,2002,22(6): 808 ~ 816.
- [7] 梁涛,王浩,张秀梅,等. 不同土地类型下重金属随暴雨径流迁移过程及速率对比. *应用生态学报*,2003,14(10): 1756 ~ 1760.
- [15] 王鹏,高超,姚琪,等. 太湖丘陵地区农田氮素迁移的时空分布特征. *环境科学*,2006,27(8): 1671 ~ 1675.
- [18] 郭青海,马克明,杨柳. 城市非点源污染的主要来源及分类控制对策. *环境科学*,2006, 27(11): 2170 ~ 2175.
- [26] 杨柳,马克明,郭青海,等. 汉阳地非点源污染控制区划. *环境科学*,2006,27(1):31 ~ 36.