

# 太湖流域入湖河流土地利用类型对水质的影响 ——以乌溪港、武进港为例

於梦秋, 蔡颖, 刘华, 龚蕾婷, 冷欣, 安树青\*

(南京大学生命科学学院, 南京 210093)

**摘要:**以太湖流域典型入湖河流乌溪港以及武进港 2009 年和 2010 年 5 月末至 6 月初的水质监测数据为基础, 结合断面土地利用数据, 通过聚类和相关性分析识别河流污染物主要来源, 并利用逐步多元回归揭示污染物的最显著响应范围。结果表明: 研究区域水质指标与土地利用类型存在显著的响应关系, 响应方式与响应程度强弱普遍在 500~1000 m 范围处发生转变。TN 与水田、其他建设用地, NH<sub>3</sub>-N 与水田、农村居民点和其他建设用地, PO<sub>4</sub>-P 和 TP 与水田、城镇用地间分别存在显著的正相关。氮磷营养盐的最显著响应尺度基本在 500~1000 m 之间, 而 TOC 主要受到 500 m 内离河岸较近的土地利用结构的影响。

**关键词:**太湖流域; 土地利用; 水质; 缓冲区

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)05-1024-09 doi:10.11654/jaes.2014.05.028

## Impact of Land Use on Water Quality Along Inflow Rivers in Taihu Basin

YU Meng-qiu, CAI Ying, LIU Hua, GONG Lei-ting, LENG Xin, AN Shu-qing\*

(School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Relationship between land use and water quality along typical inflow rivers in the Taihu Basin were explored at semi-circle buffer zones (100 m, 200 m, 500 m, 1000 m, 1500 m and 2000 m). Water samples were collected and analyzed for physico-chemical variables from late May to early June in both 2009 and 2010. Land use and land cover (LULC) data was also obtained in 2009. Statistical analysis including cluster analysis, correlation analysis and stepwise regression analysis were used to identify the major sources of pollutants and to determine the critical range of anthropogenic disturbance in the inflow rivers. The water quality in the inflow rivers was affected primarily by paddy field, residential, and construction land. Total N in water was positively correlated with paddy field and construction land, and NH<sub>3</sub>-N with paddy field, rural residential and construction land. Total P and PO<sub>4</sub>-P were significantly influenced by paddy field and urban residential. The critical range where water quality was severely impacted was 500~1000 m. Nitrogen and phosphorus in water were influenced most by human activities in the 500~1000 m buffer zone, while water TOC was mainly affected in the buffer zone of 500 m. The impacts of land use on water quality were reduced beyond the critical range, and even became non-significant.

**Keywords:** Taihu basin; land use; water quality; buffer zone

当前, 由于人为活动的加剧, 全球范围内的水环境污染问题日益突出。土地利用/覆盖(LULC)可以有效描述人为活动与自然环境之间的联系<sup>[1]</sup>, 人为活动

改变了流域土地利用结构, 并直接通过土地利用/覆盖来反映其对水生态系统的影响, 如人为活动导致了河流水体中氮、磷营养盐等污染物增加, 水质富营养化严重<sup>[2]</sup>。Arheimer 等研究发现农田类型是河流氮磷营养盐的主要来源<sup>[3]</sup>, 而 Osborne 等发现城镇用地类型是可溶性磷盐的主要来源, 农田类型则是氮磷营养盐的次要来源<sup>[4]</sup>, 可见土地利用/覆盖可以显著影响河流水环境质量。

国外学者对土地利用/覆盖与水质之间关系的研

收稿日期: 2013-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100393); 江苏省自然科学基金(BK2011577); 973 项目(2008CB418201); 国际科技合作与交流专项(2011DFG33480); 江苏省农业三项工程资助

作者简介: 於梦秋(1987—), 男, 硕士, 从事湿地生态学研究。

E-mail: yeyuling-yx@126.com

\* 通信作者: 安树青 E-mail: anshq@nju.edu.cn

究工作开展得较早,主要采用对比分析、统计分析、空间分析和模型分析等分析方法<sup>[5]</sup>,涉及的尺度包括汇水区(Watershed/Catchment)<sup>[6-7]</sup>、子流域(Sub watershed)<sup>[8-10]</sup>、河岸缓冲带(Riparian buffer zone)<sup>[6,11-12]</sup>以及作用区(Contributing zone)<sup>[13-14]</sup>多个层次,如 Sliva 等研究安大略湖北部3个子流域在3个季度下汇水区与100 m河岸缓冲带土地利用变化对河流水质的影响<sup>[6]</sup>,Carey 等基于佛罗里达州比斯坎湾10年的数据进行河流水质与带状、圆形缓冲区的土地利用相关关系的对比<sup>[15]</sup>。国内相关研究起步较晚,但近年来不断地受到重视,尤其针对水系结构复杂、集水区相对模糊的平原河网地区的研究不断增多,如官宝红等<sup>[12]</sup>和夏睿等<sup>[16]</sup>分别基于河岸缓冲带和圆形缓冲区尺度研究杭州及无锡土地利用与河流水质的相关关系,张殷俊等<sup>[17]</sup>对于圆形和带状两种缓冲区划分下土地利用对巢湖流域河流水质影响进行了比较。但国内研究对于土地利用对水质影响尺度方面,对于最显著影响的土地利用类型、尺度范围关注比较高,如果能进一步识别水质污染物来源和空间尺度上的综合变化,就能够为河流水质污染控制规划和决策提供更详细的依据,也能对水文环境、土地利用格局不同的其他区域提供参考。

本文以太湖流域典型入湖河流乌溪港、武进港干流为例,通过设置水质监测断面,结合GIS和RS技术分析入湖河流水质与土地利用之间的关系,并结合逐步多元回归分析探讨水质对土地利用的响应及其空间尺度动态变化特征,识别水体污染物的主要来源及其响应范围,进而为太湖流域河流污染控制以及水环境管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域的乌溪港位于太湖流域宜兴市南部的湖父镇和丁蜀镇,属北亚热带南部季风气候区,四季分明、温和湿润、雨量充沛。乌溪港源于林地丰富的丘陵地区,流经湖父镇与丁蜀镇城镇居民区,下游途经分散的农村居民区,联通农田区密集的水网汇入太湖。宜兴市作为江苏省重要的工业和旅游城市,由于平原河网区开发利用强度高,工农业及生活污染源的过量排放,导致环境污染和生态退化现象突出<sup>[18]</sup>。在宜兴丁蜀镇入湖河流林庄港的季度监测结果显示:河道全年总氮含量监测值均劣于V类水指标,磷与其他水质指标相当于II~IV类水水质,水体的富营养化

主要体现为总氮含量超标<sup>[19]</sup>。

武进港位于常州市武进区内,气候条件与乌溪港类似,上游起源于京杭大运河南岸,东临直湖港流域,下游汇入太湖梅梁湾。武进港周边区域土地利用结构无明显变化,以耕地、居民用地和其他建设用地为主,区域内河流受工农业生产及生活污染的影响较为严重,监测结果显示主要表现为含氮营养盐的污染,总体水质为IV~劣V类。

### 1.2 水质监测方法

结合卫星图像,分别于2009年和2010年的5月底至6月初进行实地水样采集。乌溪港设置9个水质监测断面,武进港设置8个水质监测断面,断面间距控制在1500 m以上(图1),每个断面上均有3组重复,每组均取3个平行样品。

利用HORIBA多参数水质分析仪U-52型对酸碱度(pH)、溶解氧(DO)、可溶性固体总量(TDS)等理化指标进行现场测定。在每个断面(有明显水流处)设置左、中、右三条垂线作为重复,当水深>2 m时,需取混合样,即分别在水面下0.5 m、中间部、底部上0.5 m处取样后混合;当1 m<水深<2 m时,在水面下0.5 m、底部上0.5 m处取混合样;当水深<1 m,在水体中部取样;各取3个平行样。采集的样本中硝氮(NO<sub>3</sub>-N)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总氮(TN)均采用Skalar流动分析仪进行测定,磷酸根磷(PO<sub>4</sub>-P)、总磷(TP)的测定参照《水和废水监测分析方法(第四版)》<sup>[20]</sup>所述的方法进行,总有机质(TOC)使用Liqui TOCII分析仪测定。

### 1.3 影像数据来源

采用成像时间为2009年的太湖流域Landsat TM遥感影像和SRTM DEM(分辨率为90 m)影像,对遥感影像进行几何纠正(误差<0.5像元)、地形纠正和数字镶嵌后,综合应用监督分类法和专家分类法提取研究区土地利用/覆盖信息,并利用目视解译结合地面调查对分类结果进行修正,得到研究区域土地利用/覆盖类型图。参考土地利用分类图和统计年鉴的相关数据划分研究区域土地利用类型<sup>[21]</sup>,共分为7类,分别是:水田、旱田、林地草地、水域(河渠、湖泊和水库坑塘等)、城镇用地、农村居民点和其他建设用地。结合实地调查的河流两岸土地利用类型和空间分布,沿河流上游方向设置以监测点为圆心的半圆形缓冲区,半圆直径与河流流向垂直。相关的研究表明,小尺度范围土地利用情况对水质影响变化较大,综合考虑后将半圆形缓冲区的半径梯度分别设为100、200、500、1000、1500、2000 m。

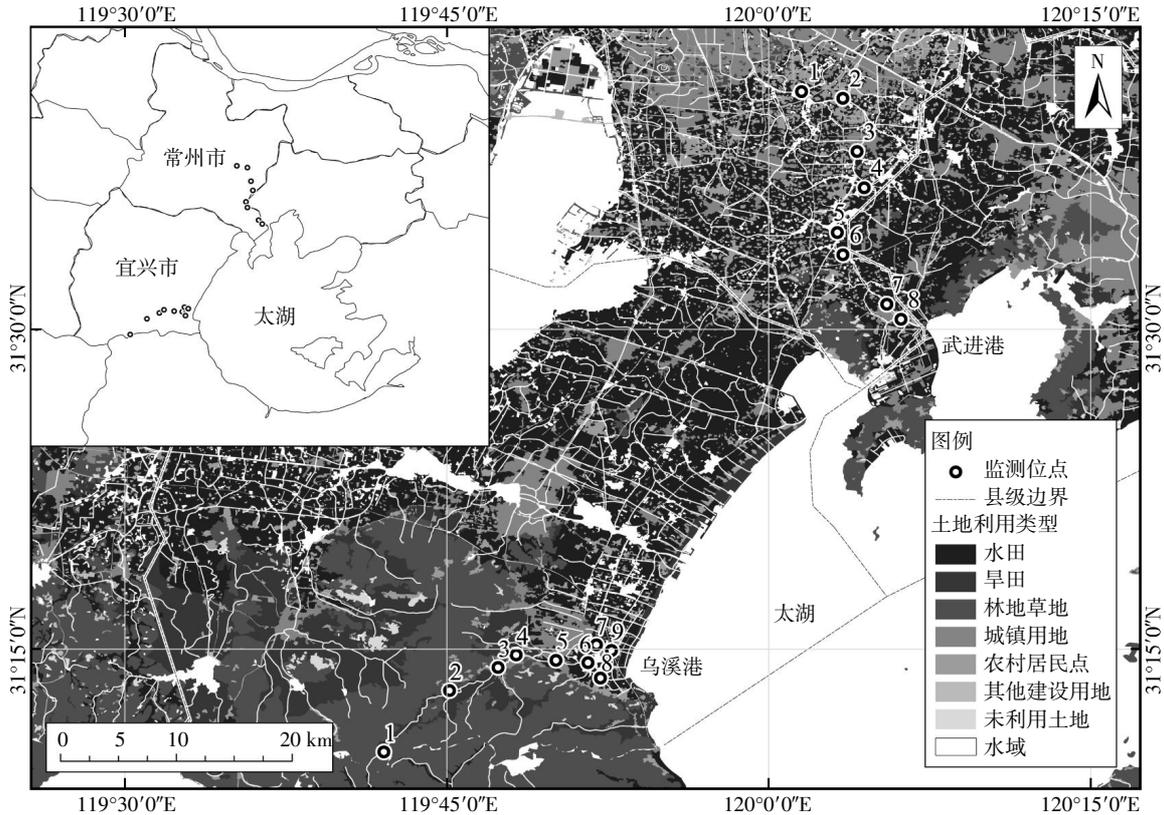


图1 研究区域内水质监测点分布、土地利用/覆盖、水系

Figure 1 Water sampling sites, land use/ land cover, river system in studied area

#### 1.4 研究方法

数据分析处理使用 SPSS 19.0。通过聚类分析将监测断面按其水质和土地利用类型特征的相似程度聚成若干类,聚类分析采用离差平方和法(Ward's法),度量标准采用平方欧氏距离。

此外,对6个缓冲区范围下的6种土地利用类型面积占比和8项水质参数进行两两相关分析。进行相关分析之前必须先利用非参数分析中K-S法对各个参数进行正态分布检验,对于满足正态分布的参数,采用Pearson相关分析;对于不满足正态分布的变量,则采用Spearman秩相关分析。

最后,对数据进行逐步多元回归分析。以水质参数作为因变量,以某一缓冲区范围下的6种土地利用类型面积占比作为自变量,建立某缓冲区范围下某水质参数与6种土地利用类型面积占比的多元回归方程,并采用逐步法筛选自变量以消除多重共线性。由于最后生成的多元回归方程可能会有多种模型,并且各模型的拟合度 $R^2$ 可能相近,可以参考上述聚类和相关分析的结果,并结合先验知识,选取相对合理的模型,建立6个缓冲区范围下8项水质指标各自的

“最优”回归方程集合。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用/覆盖状况

乌溪港河流周边区域土地利用类型较为丰富,从上游到下游变化显著。随着缓冲区半径的增大,土地利用类型种类逐渐增加,土地利用特征差异明显。上游河段的1、2号断面用地类型以林地为主,2号断面旱田占比例较多,平均32.40%。中游河段的3、4、5号断面位于城镇和城乡结合部地带,3、4号居民用地类型以城镇用地为主,林地面积逐步减少,耕地类型从旱田转变为水田。下游河段的6、7、8、9号断面主要位于农村,水田平均占比59.89%,7、8、9号断面的居民用地类型由城镇转变为农村。河流上游至下游的总体变化趋势为林地减少,水田、居民用地以及湿地面积增多,城镇用地转变为农村居民点,受人为活动影响由弱变强(图2)。

与乌溪港相比,武进港河流周边区域土地利用类型相对简单,旱田及林草地分布较少,土地利用类型特征沿河流变化不明显。上游河段的1、2号断面用地

类型以水田、水域和农村居民点为主,其他建筑占比11.36%~22.37%,3号断面的居民用地转变为以城镇类型为主;中游河段的4、5、6号断面用地类型比例相似,水田平均占比逐渐增加到62.09%,为全河段中占比最高的区域;下游河段的7、8号断面居民用地类型相对较多,水田占比逐渐减少。武进港上游到下游均以水田和居民用地为主,受人为活动影响较强(图3)。

所有监测断面的空间聚类分析结果(图4)显示,当 $6 < D_{link}/D_{max}$  (个案链锁距离与最大链锁距离之比) $< 11$ 时,17个监测断面被分为3组,根据组别之间受人为活动影响程度的差异将其定义。I组:受人为活动影响较少,主要土地利用类型为林地草地;II组:受人为活动影响相对可控,主要土地利用类型为城镇、农村居民用地;III组:受人为活动影响广泛,主要土地利用类型为水田和农村居民用地。

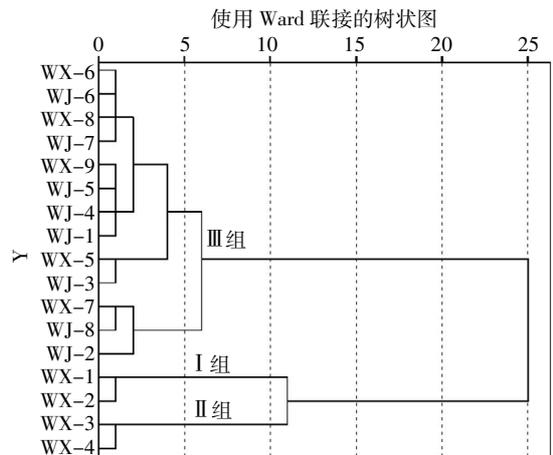


图4 监测断面土地利用类型的空间尺度聚类分析结果  
Figure 4 Spatial cluster analysis of land use/land cover classes of all sampling sites

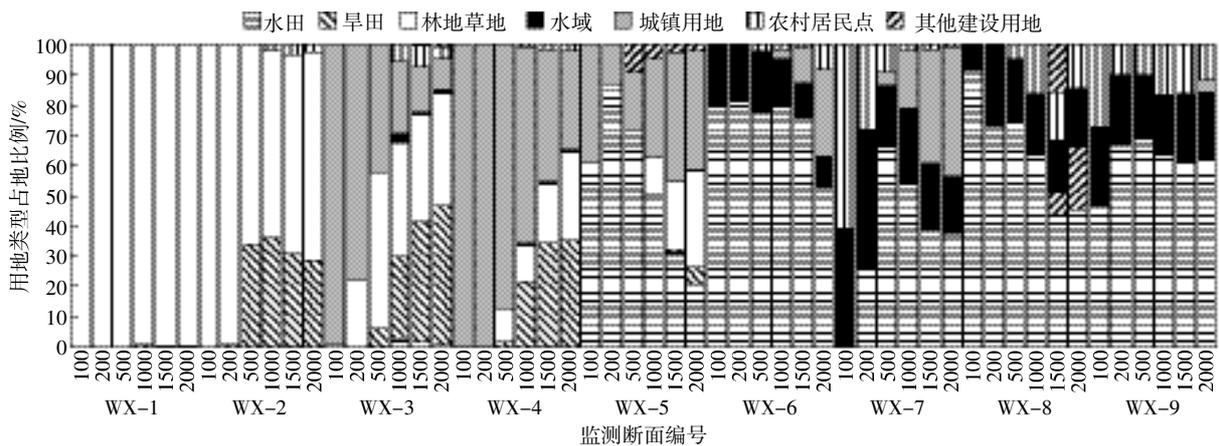


图2 乌溪港监测断面不同半径缓冲区内土地利用/覆盖构成  
Figure 2 Composition of land use/land cover in buffer zones with different radii along Wuxigang River

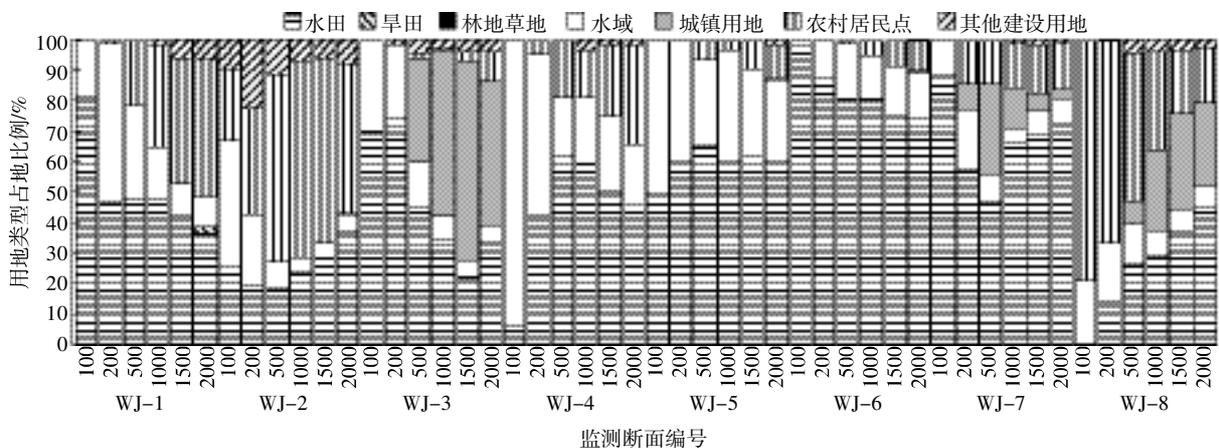


图3 武进港监测断面不同半径缓冲区内土地利用/覆盖构成  
Figure 3 Composition of land use/land cover in buffer zones with different radii along Wujingang River

## 2.2 水质状况

如图5所示,乌溪港和武进港水体pH值均无显著变化,在6.5~7.5之间,符合国家地表水环境标准的正常范围。DO的组间差异比较明显,乌溪港水体DO值要明显高于武进港,最高值分别出现在乌溪港上游林地区和武进港中游水田区,其共同特点是在该区域居民用地占比在各组内均为最少(分别为10%以下、

20%以下)。TOC变化趋势大致与DO相反,乌溪港上游林地区和武进港中游水田区出现各组内的最低值。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和TP的变化趋势较为接近,乌溪港的最大值集中在中下游5~8号断面,而武进港的最高值则分散在1、3、5号断面,但各组内的整体水平相差并不大。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在各组内最高值集中在中段,两组间最高值为乌溪港上游地区。

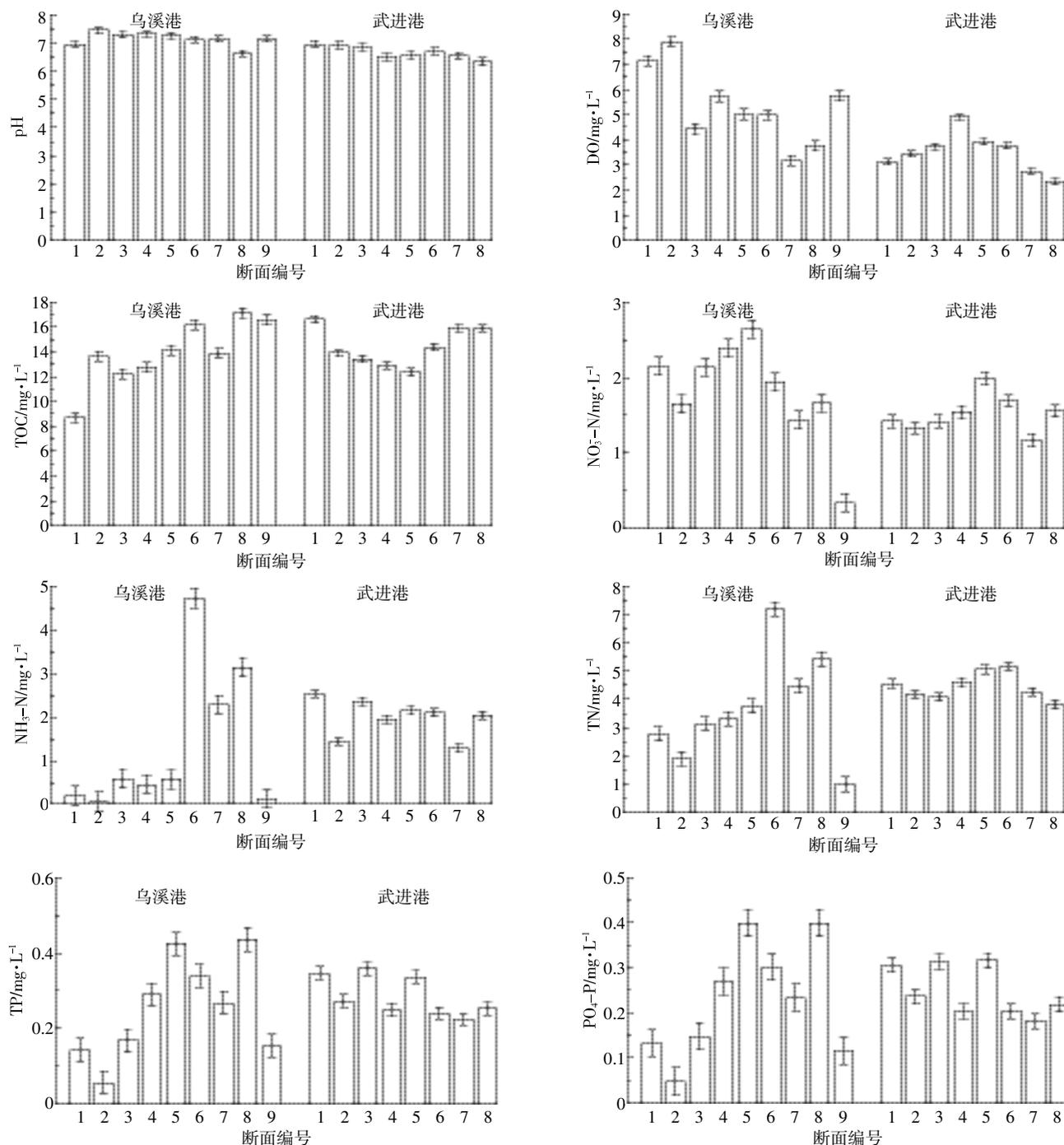


图5 主要水质指标沿各监测断面的变化

Figure 5 Changes of water quality variables of all sampling sites

水质空间尺度聚类分析结果(图6)表明,当  $10 < D_{link}/D_{max}$  (个案链锁距离与最大链锁距离之比)  $< 25$  时, 17个水质监测断面被分为2组, 根据组别之间污染的严重程度将其定义为:A组为轻污染组, DO值较高, 主要污染物表现为  $NO_3-N$ 、 $PO_4-P$  和 TOC; B组为重污染组, DO值较低, 主要污染物表现为 TN、 $PO_4-P$  和 TOC。

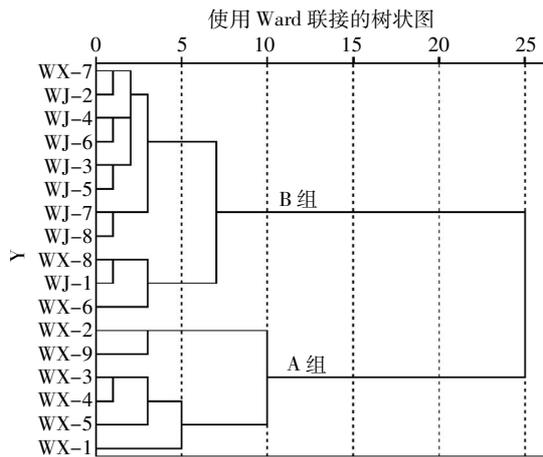


图6 监测断面水质指标的空间尺度聚类分析结果

Figure 6 Spatial cluster analysis of water quality of all sampling sites

综合监测断面的水质和土地利用聚类分析结果可以看出,二者具有较好的对应关系,除了乌溪港5、9号断面分组情况不同外,土地利用的I组、II组与水质的A组对应,III组与B组对应。该结果表明,受人为活动的影响,监测断面的土地利用类型与其河流水质污染程度具有较好的关联性。

### 2.3 水质与土地利用类型的相关关系

从相关性分析结果(表1)可以看出,水田在2000 m的范围内与 TOC、 $NH_3-N$ 、TN、 $PO_4-P$ 、TP 显著正相关;旱地、林地草地和城镇用地类型与  $NO_3-N$  表现出显著正相关,而与  $NH_3-N$  和 TN 显著负相关;农村居民点与 TOC、 $NH_3-N$  显著正相关,而与 TN 无显著相关性、与  $NO_3-N$  显著负相关;其他建筑用地在1500~2000 m 缓冲区范围内与 TOC、 $NH_3-N$  显著正相关,在500 m 以上缓冲区范围则与  $PO_4-P$ 、TP 显著正相关。总体上,造成水体污染的主要水质参数(TOC、 $NH_3-N$ 、TN、 $PO_4-P$ 、TP)与旱地、林地草地用地类型显著负相关,而与水田、城镇、农村居民点和其他建筑用地类型显著正相关;并且,与水田显著正相关的水体污染物类型最为广泛,而与城镇用地、农村居民点、其他建筑用地相关的水体污染物类型则相对单一。

从逐步多元回归分析结果(表2)可以看出,在

1000 m 范围以上 pH 表现出与旱田、水田的显著相关性,但调整  $R^2$  为各回归方程中的最低值(0.043、0.048),其相关程度微弱。DO 主要与100~2000 m 缓冲区范围内林地草地显著正相关,峰值在1500 m 处;与100~500 m 的农村居民点和1500~2000 m 的其他建设用地显著负相关,在1000 m 处发生转变。TOC 与500 m 内的水田和农村居民点均显著正相关,回归系数随缓冲区范围增大而略有下降,在1000 m 范围以外,则主要与林地草地负相关。 $NO_3-N$  与100~2000 m 范围内的城镇用地和林地草地类型、200~500 m 范围内的水田类型显著正相关,三者回归系数峰值均出现在500 m 处。 $NH_3-N$  一方面与100~2000 m 范围的水田类型显著正相关,另一方面与100~500 m 的农村居民点、1500~2000 m 的其他建设用地表现出显著正相关性;水田的回归系数峰值出现在1500 m 处,而居民用地类型相应地在1000 m 处发生转变。TN 的回归结果在一定程度上是  $NO_3-N$  和  $NH_3-N$  的综合体现,主要与100~1500 m 的水田显著正相关,与其他建设用地的正相关性在1500 m 处表现得较为明显,回归系数峰值均出现在1000~1500 m。TP 和  $PO_4-P$  的回归结果极为相似,都与100~1500 m 范围内的水田、500~2000 m 范围内的城镇用地、1500 m 和2000 m 范围内的其他建设用地和农村居民点表现出显著的正相关性;城镇用地的起始范围和水田回归系数峰值均出现在500 m,之后水田回归系数逐渐降低直到消失,而城镇用地的回归系数逐步增大,表明 TP 和  $PO_4-P$  的主要相关用地类型发生明显变化。

## 3 讨论

### 3.1 氮营养盐对土地利用类型的响应

由于研究区域内人为活动程度频繁,导致水体 TN 普遍偏高,其中  $NH_3-N$  主要与水田类型相关。乌溪港上游林地草地为主的区域,其 TN 主要以  $NO_3-N$  形式存在,而乌溪港中下游以及武进港全程(林地草地相对较少), $NH_3-N$  的量相对增多并和  $NO_3-N$  浓度相近。有研究表明河流中的 TN 主要来源于水田用地类型<sup>[22-23]</sup>,但一般情况下其主要形态是  $NO_3-N$ <sup>[22]</sup>,而曹亚澄等对太湖流域中心地带水体氮来源的研究中发现,虽然水田区的氮污染一般以  $NO_3-N$  形态为主;但在有效氮丰富和硝化作用弱的条件下, $NH_3-N$  浓度很高并超过了土壤的吸附能力时,可淋洗入地下水或通过地表径流流失,成为河流氮污染的主要形态;并且通过  $\delta^{15}N$  同位素追踪,发现人畜粪便是  $NH_3-N$  主要

表1 监测断面不同缓冲区范围的土地利用类型占比与水质指标之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between land types and water quality variables in buffer zones with different radii in upper reaches of all sampling sites

土地类型	半径/m	水质监测指标							
		pH	DO	TOC	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>3</sub> -N	TN	PO <sub>4</sub> -P	TP
水田	100	-0.161	-0.355**	0.430**	-0.250*	0.549**	0.498**	0.431**	0.412**
	200	-0.112	-0.166	0.372**	-0.159	0.488**	0.431**	0.447**	0.432**
	500	-0.102	-0.162	0.425**	-0.179	0.535**	0.469**	0.389**	0.380**
	1000	-0.169	-0.276**	0.434**	-0.318**	0.514**	0.451**	0.296**	0.272**
	1500	-0.197*	-0.341**	0.440**	-0.321**	0.566**	0.491**	0.296**	0.273**
	2000	-0.239*	-0.424**	0.390**	-0.414**	0.455**	0.361**	0.191	0.160
旱田	200	0.149	0.401**	-0.059	-0.044	-0.400**	-0.348**	-0.356**	-0.342**
	500	0.258**	0.440**	-0.268**	0.215*	-0.515**	-0.487**	-0.416**	-0.400**
	1000	0.253*	0.577**	-0.432**	0.370**	-0.638**	-0.485**	-0.485**	-0.456**
	1500	0.261**	0.514**	-0.428**	0.427**	-0.553**	-0.456**	-0.259**	-0.238*
	2000	0.269**	0.531**	-0.422**	0.449**	-0.575**	-0.461**	-0.261**	-0.236*
林地草地	100	0.175	0.520**	-0.429**	0.296**	-0.587**	-0.389**	-0.443**	-0.407**
	200	0.170	0.518**	-0.440**	0.311**	-0.584**	-0.378**	-0.436**	-0.400**
	500	0.230*	0.601**	-0.479**	0.416**	-0.650**	-0.446**	-0.482**	-0.448**
	1000	0.265**	0.659**	-0.460**	0.522**	-0.712**	-0.459**	-0.401**	-0.358**
	1500	0.227*	0.553**	-0.282**	0.477**	-0.550**	-0.346**	-0.250*	-0.204*
	2000	0.275**	0.526**	-0.238*	0.474**	-0.415**	-0.229*	-0.190	-0.142
城镇用地	100	0.233*	0.302**	-0.237*	0.446**	-0.380**	-0.307**	-0.097	-0.075
	200	0.168	0.136	-0.145	0.332**	-0.385**	-0.275**	-0.116	-0.105
	500	0.094	-0.173	-0.128	0.200*	-0.167	-0.238*	-0.018	-0.028
	1000	0.104	-0.134	-0.046	0.246*	-0.012	-0.118	0.092	0.084
	1500	0.130	-0.089	0.028	0.140	-0.013	-0.156	0.089	0.077
	2000	0.117	-0.156	0.041	0.086	0.102	-0.039	0.147	0.135
农村居民点	100	-0.030	-0.371**	0.242*	-0.352**	-0.005	-0.191	-0.087	-0.096
	300	-0.143	-0.565**	0.283**	-0.478**	0.091	-0.067	-0.044	-0.072
	500	-0.254**	-0.648**	0.374**	-0.534**	0.423**	0.216*	0.192	0.157
	1000	-0.184	-0.521**	0.400**	-0.524**	0.224*	0.015	0.036	0.013
	1500	-0.234*	-0.479**	0.303**	-0.499**	0.231*	0.045	0.069	0.040
	2000	-0.273**	-0.537**	0.360**	-0.512**	0.383**	0.192	0.171	0.135
其他建设用地	100	-0.018	-0.192	-0.037	-0.171	-0.024	0.011	0.018	0.021
	300	-0.126	-0.414**	0.024	-0.193	0.161	-0.001	0.140	0.121
	500	-0.047	-0.251*	0.028	-0.002	0.017	-0.033	0.224*	0.224*
	1000	-0.150	-0.376**	0.097	-0.134	0.116	0.053	0.233*	0.215*
	1500	-0.183	-0.487**	0.268**	-0.187	0.320**	0.164	0.365**	0.349**
	2000	-0.194	-0.552**	-0.006	-0.146	0.274**	0.169	0.305**	0.288**

注:为 Spearman 秩相关分析;\*表示在  $P=0.05$  水平显著相关;\*\*表示在  $P=0.01$  水平极显著相关。

来源<sup>[24]</sup>,这也是受到人为活动影响的一个重要标志。乌溪港中下游水田面积显著增加,水田区氨氮肥料过度施用导致的流失,以及区域内人畜粪便收集处理不力导致的污染都可能是造成水体中 NH<sub>3</sub>-N 浓度较高的主要原因。

NO<sub>3</sub>-N 与 NH<sub>3</sub>-N 的比例受到用地类型的一定影

响。首先,水体 NO<sub>3</sub>-N 和 NH<sub>3</sub>-N 部分来源于城镇和农村居民用地的贡献,另一方面,部分 NO<sub>3</sub>-N 也可能来自于林地草地区域的土壤氮素淋洗,并且,根据具体环境因素的不同,水域、水田等集中区域存在的硝化与反硝化过程也会对土壤 NO<sub>3</sub>-N 和 NH<sub>3</sub>-N 的比例产生影响。

表2 不同半径缓冲区的土地利用类型与水质指标之间的  
逐步多元线性回归结果

Table 2 Stepwise multiple lineal regression for land use types and  
water quality variables in buffer zones with different radii

水质指标	土地类型	缓冲区半径/m					
		100	200	500	1000	1500	2000
pH	旱田				1.824	1.475	
	水田						-0.854
	调整 $R^2$					0.043	0.048
DO	水田	-1.337					
	旱田				3.475		
	林地草地	2.482	3.192	3.094	3.317	3.909	3.655
	农村居民点	-2.839	-2.766	-2.656			
	城镇用地		0.684				
	其他建设用地						-6.064 -13.202
	调整 $R^2$	0.662	0.655	0.531	0.541	0.564	0.577
TOC	水田	4.372	4.125	4.090			
	林地草地				-5.333	-5.065	-4.679
	农村居民点	4.845	4.976	3.898			
	调整 $R^2$	0.367	0.262	0.243	0.309	0.305	0.253
NO <sub>3</sub> -N	水田		0.625	0.994			
	旱田						
	林地草地	0.900	1.216	1.873	1.442	1.520	1.582
	农村居民点						
	城镇用地	0.922	1.135	1.238	0.941	0.806	0.996
	调整 $R^2$	0.233	0.211	0.253	0.271	0.286	0.318
NH <sub>3</sub> -N	水田	1.682	2.202	2.567	2.798	3.260	2.824
	林地草地	-0.800					
	农村居民点	1.160	1.543	1.281			
	其他建设用地					1.414	2.023
	调整 $R^2$	0.318	0.260	0.335	0.364	0.368	0.332
	TN	水田	1.691	1.830	2.218	2.608	2.569
旱田							-4.045
其他建设用地						6.268	
调整 $R^2$		0.161	0.133	0.168	0.202	0.215	0.126
PO <sub>4</sub> -P	水田	0.127	0.167	0.221	0.200	0.148	
	农村居民点						0.221
	城镇用地			0.161	0.228	0.257	0.290
	其他建设用地					1.167	
	调整 $R^2$	0.064	0.082	0.092	0.083	0.149	0.050
TP	水田	0.143	0.188	0.247	0.232	0.181	
	农村居民点						0.277
	城镇用地			0.168	0.243	0.279	0.319
	其他建设用地					1.241	
	调整 $R^2$	0.078	0.099	0.110	0.103	0.173	0.064

注:仅列出方程中各自变量的回归系数;步进方法标准,设置显著性  $F$  检验的概率,当变量  $F$  检验概率  $\leq 0.05$  时选入回归方程,  $> 0.10$  时则剔除。

### 3.2 磷营养盐对土地利用类型的响应

简单相关分析结果显示,城镇用地、农村居民用地虽然与  $PO_4-P$ 、 $TP$  不存在两两之间的显著相关性,但进一步的逐步多元回归分析发现,二者相互或与水田、其他建设用地之间相互协同对  $PO_4-P$ 、 $TP$  表现出正相关。这与官宝红等的研究结果相似:典型城市用地(包含建设用地、城镇及农村居民用地)与  $TP$  具有显著正相关性<sup>[12]</sup>。

关于耕地类型的影响,官宝红<sup>[13]</sup>、夏睿<sup>[14]</sup>、张殷俊<sup>[17]</sup>等研究表明  $TP$  与耕地类型无显著相关性,本文研究结果与官宝红等研究结果存在差异,而与郭青海等<sup>[25]</sup>的研究结果类似。差异的存在除了受到方法、地区等影响,与采样时间也有一定的关联,郭青海的采样时间为2004年6月的强降雨后1~2 d,本文采样时间相对略滞后,在强降雨后的1~2周,从夏睿等对两个不同水期的另一研究<sup>[26]</sup>可以发现,降雨量确实会显著影响到氮磷营养盐对土地利用的响应情况。

从不同尺度的影响程度看,水田从100~2000 m均表现出与  $PO_4-P$ 、 $TP$  的相关性,可能和丰水期水田中磷营养盐相对容易扩散有关<sup>[27]</sup>,其对水体提供  $PO_4-P$ 、 $TP$  难以控制,而城镇、农村居民点和其他建设用地的污染相对可控,其对水质磷营养盐的影响必须达到一定的尺度范围才能有所体现。

## 4 结论

研究区域的河流水质与其周边土地利用类型存在明显的响应关系,通过分析识别,水体中氮磷营养盐和  $TOC$  主要与周边水田、城镇与农村居民用地、建设用地的面积占比呈现显著正相关性。其中,  $TN$  与水田、其他建设用地,  $NH_3-N$  与水田、农村居民点、其他建设用地,  $PO_4-P$  和  $TP$  与水田、城镇用地显著正相关。氮磷营养盐对土地利用类型的最显著响应尺度在500~1000 m之间,而  $TOC$  主要受到500 m内离河岸较近的土地利用结构的影响。

应用多元回归方法对土地利用类型和水质指标进行分析,能够在一定程度上解释水质污染物的来源和一定尺度范围内其影响方式和影响程度。应加强入湖河流周边城镇和农村居民点的污水接管、分散式处理措施,落实垃圾收集、转运工作,减少汇入河流  $TOC$  的总量;对于耕地密集的平原河网区,可在500~1000 m范围的缓冲区内进行重点防控,推广环境友好型的农业生产技术或建设氮磷拦截工程,从而减少汇入太湖的氮磷负荷。

## 参考文献:

- [1] Lambin E F, Geist H J. Land-use and land-cover change: Local processes and global impacts[M]. Springer, 2006.
- [2] Venkatachalam A, Radhakrishnan J, Eiji Y. Impact of riparian buffer zones on water quality and associated management considerations[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 24: 517-523.
- [3] Arheimer B, Lidén R. Nitrogen and phosphorus concentrations from agricultural catchments: Influence of spatial and temporal variables[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 227(1-4): 140-159.
- [4] Osborne L L, Wiley M J. Empirical relationships between land-use cover and stream water-quality in an agricultural watershed[J]. *Journal of Environmental Management*, 1988, 26(1): 9-27.
- [5] Tong S T Y, Chen W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66: 377-393.
- [6] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality[J]. *Water Research*, 2001, 35(14): 3462-3472.
- [7] Buck O, Niyogi D K, Townsend C R. Scale-dependence of land use effects on water quality of streams in agricultural catchments[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 130(2): 287-299.
- [8] 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(3-4): 234-247.
- [9] Mehafeey M H, Nash M S, Wade T G, et al. Linking land cover and water quality in New York City's water supply watersheds[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 107(1-3): 29-44.
- [10] Zampella R A, Procopio N A, Lathrop R G, et al. Relationship of land-use/land-cover patterns and surface-water quality in the Mullica river basin[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43(3): 594-604.
- [11] Alberti M, Booth D, Hill K, et al. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 345-361.
- [12] 官宝红, 李君, 曾爱斌, 等. 杭州市城市土地利用对河流水质的影响[J]. *资源科学*, 2008, 30(6): 857-863.  
GUAN Bao-hong, LI Jun, ZENG Ai-bin, et al. Impacts of urban land use on water quality in Hangzhou[J]. *Resources Science*, 2008, 30(6): 857-863.
- [13] 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[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 128(1-2): 65-73.
- [14] Maillard P, Santos N A P. 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*, 2008, 86(1): 158-170.
- [15] Carey R O, Migliaccio K W, Li Y C, et al. Land use disturbance indicators and water quality variability in the Biscayne Bay Watershed, Florida[J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11: 1093-1104.
- [16] 夏 骛, 李云梅, 王 桥, 等. 基于遥感的无锡市土地利用与过境水质响应关系的研究[J]. *地理科学*, 2010, 30(1): 129-133.  
XIA Rui, LI Yun-mei, WANG Qiao, et al. Response relationship between land-use and transit water quality in Wuxi City based on remote sensing[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(1): 129-133.
- [17] 张殷俊, 陈 爽, 相景昌. 河流近域土地利用格局与水质相关性分析: 以巢湖流域为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(9): 1054-1061.  
ZHANG Yin-jun, CHEN Shuang, XIANG Jing-chang. Correlation between the water quality and land use composition in the river side area a case of Chaohu Lake basin in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(9): 1054-1061.
- [18] Tian Z Q, Zheng B H, Zhang L, et al. The comparison of environmental roles between restored *Phragmites communis* communities and disturbed ones in lakeside wetlands of West Taihu Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2625-2632.
- [19] 徐洪斌, 吕锡武, 李先宁, 等. 太湖流域农村生活污水污染现状调查研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(增刊): 375-378.  
XU Hong-bin, LÜ Xi-wu, LI Xian-ning, et al. A survey on village sewage pollution in a zone of Tai Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl): 375-378.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 244-248.  
Chinese NEPA. Water and wastewater monitoring methods[M]. 4th edition. Beijing: Chinese Environmental Science Publishing House, 2002: 244-248.
- [21] Vaze J, Chiew F H S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface[J]. *Urban Water*, 2002, 4(4): 379-389.
- [22] 马 东, 杜志勇, 吴 娟, 等. 崂山水库流域不同土地利用类型地表径流的氮磷流失特征[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 31-39.  
MA Dong, DU Zhi-yong, WU Juan, et al. Losses characters of nitrogen and phosphorus in runoff with different land use pattern in watershed of Laoshan Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 31-39.
- [23] 李恒鹏, 杨桂山, 黄文钰, 等. 不同尺度流域地表径流氮、磷浓度比较[J]. *湖泊科学*, 2000, 18(4): 377-386.  
LI Heng-peng, YANG Gui-shan, HUANG Wen-yu, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus concentration of runoff from different spatial scale watersheds[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 18(4): 377-386.
- [24] 邢光熹, 曹亚澄, 施书莲, 等. 太湖地区水体氮的污染源和反硝化[J]. *中国科学(B辑)*, 2001, 31(2): 130-137.  
XING Guang-xi, CAO Ya-cheng, SHI Shu-liang, et al. Source and denitrification of nitrate-nitrogen in ground water of Taihu Region[J]. *Science in China(Series B)*, 2001, 31(2): 130-137.
- [25] Guo Q H, Ma K M, Liu Y, et al. Testing a dynamic complex hypothesis in the analysis of land use impact on lake water quality[J]. *Water Resources Management*, 2010, 24: 1313-1332.
- [26] 夏 骛, 李云梅, 王 桥, 等. 京杭大运河无锡段水质和土地利用的响应关系[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 364-372.  
XIA Rui, LI Yun-mei, WANG Qiao, et al. Response relationship between canal water quality and land-use using space statistical modeling[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(3): 364-372.
- [27] 王桂凤, 刘 凌, 田 娟. 淹水过程不同土层磷的释放研究[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(12): 21-23.  
WANG Gui-feng, LIU Ling, TIAN Juan. Phosphorus release in different layers of flooded soils[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(12): 21-23.