

太湖上游流域下垫面因素对面源污染物输出强度的影响

李燕^{1,2}, 李恒鹏^{1*}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:应用流域断面监测、GIS 的流域空间分析等手段建立太湖上游地区流域基础数据, 通过多元逐步回归和冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 手段, 研究了太湖上游流域下垫面要素对流域出口污染物输出影响特征以及不同要素影响的相对强度, 提取了影响太湖上游流域面源污染产出的主要下垫面因素并分析各小流域水质控制性要素的空间特征. 研究结果表明, 流域面源污染与下垫面要素具有很大的相关性, 其中流域土地利用对面源污染产出的影响最为显著, 其次是流域土壤特征、流域坡度, 流域面积的影响最小; 影响流域面源污染输出变化的控制性因素为居民用地、耕地面积比例和流域平均坡度, 对水质数据进行解释的显著性和重要性水平均较高, 能解释 59.5% 的流域水质信息、98.6% 的下垫面特征-水质指标关系信息, 且在不同小流域中这 3 个因素对流域水质影响的贡献率不同.

关键词:面源污染输出; 下垫面特征; 多元回归分析; 冗余分析; 太湖上游流域

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)05-1319-06

Influence of Landscape Characteristics on Non-Point Source Pollutant Output in Taihu Upper-River Basin

LI Yan^{1, 2}, LI Heng-peng¹

(1. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the observed data in monitored drainage areas and GIS spatial analysis tools, watershed basic database of Taihu upper-river basin was built. Using the methods of multiple stepwise regression and redundancy analysis, the influence of landscape characteristics on non-point source pollutant output at the outlets of watersheds and their relative influence intensity were analyzed. The dominant landscape characteristics influencing non-point source pollutant output in Taihu upper-river basin and sub-watersheds were also illustrated. The results show that there are strong correlations between non-point source pollution and landscape characteristics, in which land use makes the most remarkable effect, followed by soil characteristics and average slope and watershed area in turn. Residential land proportion, farmland proportion and average terrain slope with higher importance and significance level, are the dominant landscape characteristics variables affecting non-point source pollutant output of watersheds. 59.5% of water quality information and 98.6% of relation information between landscape characteristics and water quality can be explained by these three variables. Furthermore, the contribution rates of these three landscape characteristics to non-point source pollutant output in each sub-watershed are different.

Key words: non-point source pollutant output; landscape characteristics; multivariable regression analysis; redundancy analysis (RDA); Taihu Upper-River Basin

太湖流域经济发达、人口稠密, 流域现代农业发展和城市化导致大量污染物和营养盐排放进入河湖水体, 入湖的污染物和营养盐超过了最大允许入湖量, 水体富营养化问题非常突出. 虽然太湖流域点源污染得到有效地控制和管理, 然而面源污染却成为水环境恶化的主要原因^[1-3]. 流域面源污染受流域人类活动强度、下垫面特征、产汇流等众多因素和过程的影响, 机理非常复杂. 在流域污染控制与水环境管理中, 如何合理地估算面源污染负荷一直是该领域研究的热点问题. 为揭示流域面源污染产出的机理和规律, 近年来国内外相关研究者从面源污染产出的源头出发, 剖析流域的基本过程, 开展较小尺度

的人工暴雨实验和野外监测, 注重研究流域面源污染产出与单一环境要素的定量关系. 如基于人工暴雨实验研究, 探讨坡面流面源污染负荷与坡度、土壤 N、P 含量等单一因素的定量关系^[4-6]; 选择单一用地小流域开展野外监测研究, 揭示流域出口面源污染输出强度与土地利用的定量关系^[7-12]. 由于流域面源污染最终输出是流域众多要素与过程综合作用的结果, 认识流域不同环境要素对面源污染输出影

收稿日期: 2007-05-31; 修订日期: 2007-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40401056); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2002CB412310)

作者简介: 李燕 (1981 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 GIS 及流域综合管理, E-mail: yanli@niglas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: hpli@niglas.ac.cn

响的强度尤为重要,一方面有助于整合小尺度单一过程的已有研究成果,解决复杂流域的面源污染估算问题;另一方面有助于揭示影响流域面源污染输出的关键要素和过程,为流域面源污染模型构建提供依据.本研究选择水环境问题较为突出的太湖流域,综合应用断面监测、GIS 的流域空间分析手段,建立以 66 个监测流域为分析样本的基本数据,通过多元逐步回归和冗余分析(RDA)方法,分析流域下垫面要素对流域出口污染物输出影响特征,提取流域面源污染输出的控制性因素,以期合理估算流域面源污染提供依据.

1 研究区域概况

选择太湖上游相对独立的浙西水利分区和湖西区的湖滢流域作为研究区(图 1).该区位于太湖流域的西南部,地貌类型包括山地、丘陵和平原,地面高程在 2~1 578 m 之间,属于亚热带气候,平均降水量为 1 022~1 897 mm,降雨集中于 4~9 月份,自北向南逐渐增加.该区水系发达,是太湖上游最大的山区水系,入湖水量占太湖入湖量的 50% 左右,水质以Ⅲ类水为主.流域地带性土壤为红壤,其次为黄壤;农业土壤主要是水稻土.用地类型主要包括林地、耕地、居民用地、草地和水体等,其中林地约占 53.78%,耕地占 37.78%.

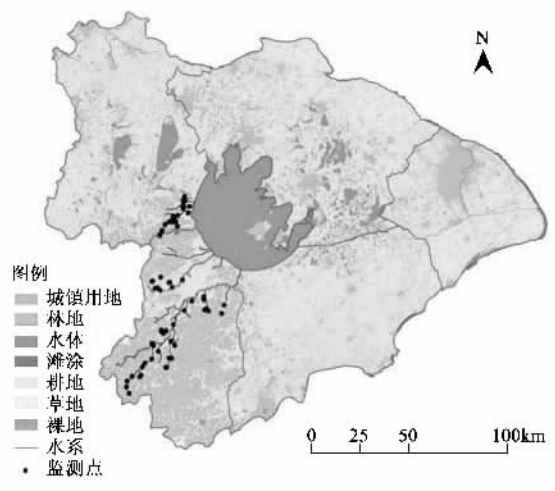


图 1 研究区在太湖流域的位置

Fig.1 Location of study area in Taihu Basin

2 资料来源及研究方法

2.1 数据获取方法

为分析流域要素与面源污染输出的联系,在太湖上游流域选择水力关系明晰、土地利用类型多样、

无重要点源排放的区域,共设定 66 个监测断面进行水质监测,包括浙西区的 44 个断面和湖西区湖滢流域的 22 个断面(见图 1).流域水质监测采用代表性暴雨径流采样监测方法,全年共 3 次采样,分别在梅雨期(2004-05~2004-07)、台风雨期(2004-09)和枯水期(2004-11~2004-12)这 3 个时段进行.由于研究区的泄洪过程一般在降雨后 2~3 d 内结束,为了使采集水样能够代表暴雨径流的面源污染特征,因此每次采样过程选择降雨后期或降雨之后 1~2 d 内完成.分析水质指标主要包括悬浮颗粒(SS)、水体总氮浓度(TN)和化学需氧量(COD).

流域要素选取基于面源污染产出、输移过程的机理过程分析,主要包括与面源污染及水文过程密切联系的土地利用、土壤化学性质、地形、流域面积等指标.监测流域的边界提取采用 1:5 万地形图,通过数字化建立流域数字地形(DEM)和水系分布图,利用 Arcgis 的水文分析模块 Archedydro 以 66 个监测断面为流域出口点进行子流域的划分;并统计各监测点对应的上游流域面积及平均地形坡度.土地利用采用 2000 年的 TM/ETM 卫星影像的目视解译数据,分为林地、耕地、居民用地、草地、水体、滩涂和裸地 7 类,并在 Arcgis 环境下运用空间分析模块统计子流域林地、耕地和居民用地所占比例获得流域土地利用信息.流域土壤分布信息采用土壤普查的 1:20 万土壤图数字化获得,根据土壤志中现有的土壤发生学分类数据体系建立各土壤类型的有机质、TN 属性数据,把土壤分布与子流域边界进行叠加分析,确定各个子流域的土壤类型及其比例,获得子流域土壤有机质、TN 平均含量信息.

2.2 多元统计分析方法

为揭示流域要素与流域面源污染输出的联系,本研究以 66 个监测流域为分析样本,通过逐步回归方法定性地判断下垫面变量是否对流域单一水质变量产生显著的影响.在此基础上,应用冗余分析(RDA)揭示出流域下垫面要素对面源污染输出的贡献率,进一步提取出流域面源污染输出的控制性因素.其中,冗余分析是一种多变量直接梯度分析方法,它是多元线性回归的扩展,采用 2 个变量集的线性关系模型,得到数值矩阵并对特征值进行分解,能将水质指标、样点及下垫面变量之间的关系反映在坐标轴上^[13~15].逐步回归分析和冗余度分析(RDA)分别在 SPSS 软件和 CANOCO 4.5^[16]中进行.多元变量分析中,响应变量采用流域水质指标 SS、TN 和 COD,解释变量采用与土地利用密切联系的耕地、林

地和居民地所占流域百分数;与 TN 产出密切联系的土壤含氮量、有机质含量,与地表冲刷能力和输移过程密切联系的流域平均坡度和流域面积.

3 结果与讨论

3.1 下垫面要素基本统计特征

监测流域土地利用结构统计分析结果显示,流域用地方式以耕地、林地、居民用地为主,3 种土地利用类型比例之和均在 89.05% 以上.耕地比例占 0 ~ 15%、15% ~ 30%、30% ~ 45% 的子流域数分别为 27 个、16 个和 14 个,约占全部流域样本的 41%、24.3% 和 21.2%.在监测流域中,林地也占有较大的比例,其中有 22 个子流域的林地比例在 75% ~ 90% 之间,约占全部样本点的 1/3.流域居民用地比例最高为 15%,低于 1% 的为 43 个,占有样本数的 65.2%.不同用地在监测流域所占的比例如图 2(a)

和 2(b)所示.

监测流域样本平均坡度分布范围较广,各个坡度范围的流域均有分布.平均坡度在 2° ~ 8°、8° ~ 15°、25° ~ 35°、>35° 的子流域分别占 10.6%、16.7%、15.2% 和 24.2%,平均坡度在 15° ~ 25° 之间的子流域达 22 个,占 1/3 左右.流域面积从 0.5 ~ 400 km² 不等,其中 < 50 km² 的子流域为 40 个,占流域样本数的 60.6%;50 ~ 100 km²、> 100 km² 的子流域数量较少,分别占 12.1% 和 27.3%.监测流域地形坡度、面积分布如图 2(c)和 2(d)所示.

各个监测流域土壤有机质、TN 平均含量差异不明显[图 2(e)和 2(f)].所有监测流域土壤有机质平均含量在 14 ~ 28 g•kg⁻¹ 之间,其中有 64% 集中于 18 ~ 21 g•kg⁻¹ 范围之内.土壤 TN 平均含量分布范围相对较小(0.8 ~ 1.7 g•kg⁻¹),且分布在 0.9 ~ 1.2 g•kg⁻¹ 范围内的子流域数就达 89.4%.

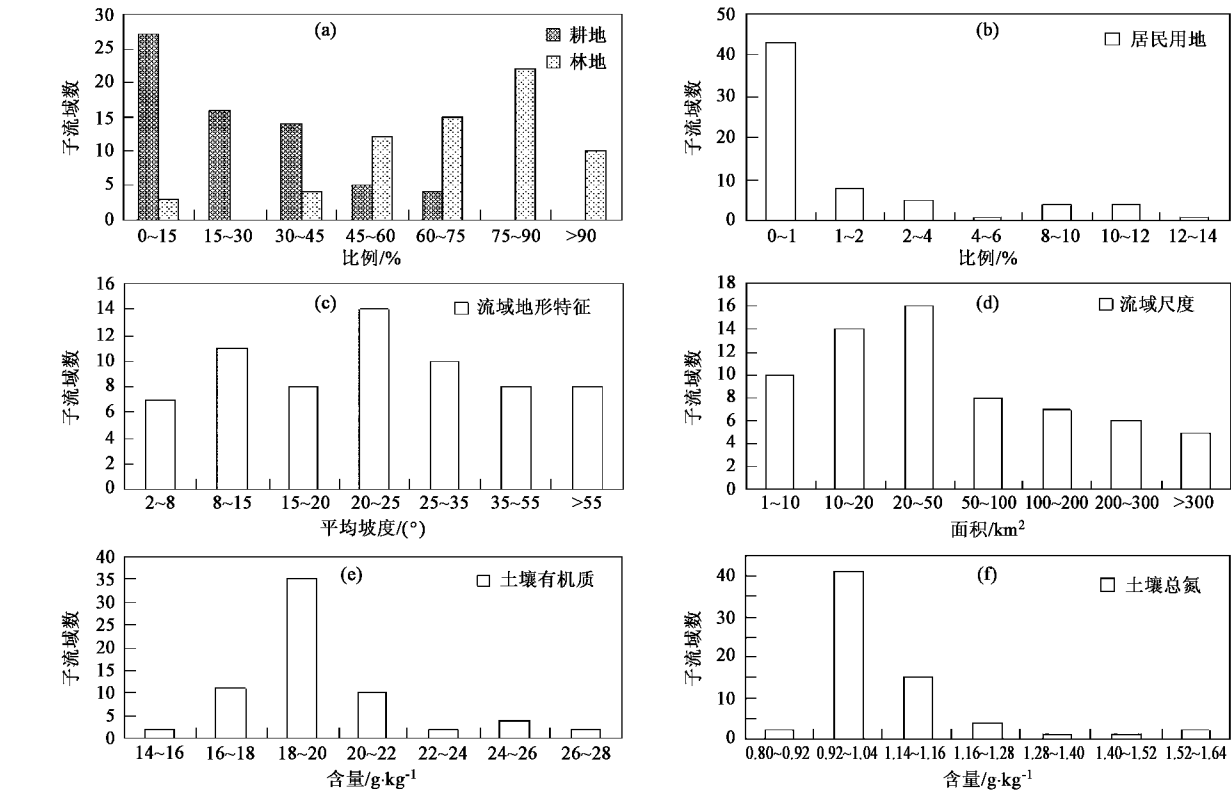


图 2 太湖上游流域下垫面要素特征

Fig. 2 Characteristics of landscape in Taihu upper-river Basin

3.2 监测流域下垫面要素对水质的影响及原因分析

对下垫面要素与流域面源污染产出关系进行统计分析前,首先对下垫面要素-水质指标数据(包括 66 个流域样本和 10 个指标变量)进行标准化处理.对下垫面要素数据,除了土壤总氮(TN)、平均坡度

数据用对数函数转换外,其余的均进行平方根转换;水质指标除 TN、COD 值保持不变外,SS 数据用对数函数进行转换;把所有参与分析的指标值转化到同一数量级内,避免由于数量级的不同造成统计结果的错误.

单一水质指标与下垫面要素变量的多元逐步回归分析见表 1, 相关关系的显著性用置信水平 p 表征. 分析结果显示, 水土悬浮颗粒(SS)、总氮浓度(TN)和化学需氧量(COD)与下垫面要素的相关系数较大, 分别达到 0.239、0.539、0.612. 悬浮颗粒与居民用地和土壤有机质含量最为密切, 其中居民用地的影响最为显著, 呈很强的正相关关系($p = 0.000$),

而与土壤有机质含量呈较强的负相关关系($p = 0.002$). 总氮浓度主要受居民用地、流域平均坡度和土壤有机质含量的影响; 其中, 与居民用地、平均坡度呈很强的正相关关系($p = 0.000$), 与土壤有机质含量呈负相关性($p = 0.001$). 化学需氧量与耕地、居民用地关系密切, 均呈很强的正相关关系($p = 0.000$).

表 1 下垫面特征对水质影响的多元逐步回归分析结果¹⁾

Table 1 Results of multiple stepwise regression of the effect of landscape characteristics on water quality

水质指标	土地利用比例			土壤特征		地形、尺度特征		R^2
	耕地	林地	居民用地	土壤有机质	土壤 TN	平均坡度	流域面积	
悬浮颗粒			+	*	-	*		0.239
总氮浓度			+	*	-	*	*	0.539
化学需氧量	+	*	+	*	-			0.612

1) + ** 代表置信水平 $p < 0.001$ 的正相关关系; - *, - 分别代表置信水平 $0.001 \leq p \leq 0.002$ 、 $p > 0.002$ 的负相关关系; 空白代表相关性不显著
土壤成分的相互关系.

由此可见, 土地利用结构对流域面源污染产生的影响最为显著, 不同土地利用类型的影响强度又有所不同, 居民用地对水质的影响最大, 耕地次之, 林地最小. 由于土地利用类型与人类活动的强度密切相关, 居民用地因生产、生活产生大量的地表散落物, 通过地表径流冲刷进入河流; 此外, 分散的居民地还因生活污水缺乏有效的收集和处理出现大量的分散点源污染, 对流域水质产生较大影响. 耕地的影响较大一方面是因为化肥的施用和流失, 另外耕地土壤有机质含量较高, 径流冲刷携带大量的有机物进入水体, 造成水体的化学需氧量增高. Lenat 等^[17-18]针对流域耕地对河流水质的影响研究也得出类似的结果. 在太湖上游山区林地分布面积大且集中, 植被覆盖度较好, 土壤侵蚀量少, 污染物产出的贡献率较低, 对水环境的影响不如耕地和居民用地显著. 同时, 林地生态系统具有一定的下渗滤过机制, 对面源污染有较强的削减和调节作用^[19], 从而大面积的林地分布在一定程度上起到了改善流域水质的作用.

相对于土地利用而言, 土壤化学性质对太湖上游水质的影响在分析中未得到明显体现. 然而从流域面源污染的产出机理来看, 尤其是 TN 应该与流域土壤含氮量密切联系^[20], 导致分析结果两者关系不显著的原因可能与所采用的土壤信息精度有关, 由于我国土壤数据体系以土壤分类信息为主, 而针对土壤理化性质的高精度空间分布信息还比较缺乏, 通过土壤分类与相关类别典型剖面的信息很难获取精度较高的信息, 很难揭示出流域面源污染和

流域面积与污染物输移的距离及所经历的时间有关, 距离越大, 历时越长, 污染物滞留降解量越大. 从图 2(c)和 2(d)的分析结果来看, 流域面积与各项水质指标的关系不显著, 主要是由于本项研究针对的太湖上游地区以山地流域为主, 流速快, 历时短, 浓度相对较低, 滞留和降解量较少. 流域坡度与地表冲刷能力密切相关, 一般情况下, 坡度越大, 降水侵蚀地表程度就愈大, 则进入河流水体中的营养盐就越多.

3.3 流域面源污染产出的主要变量提取

以上分析揭示出流域下垫面要素与流域面源污染产出的关系, 在此基础上, 如果能够确定不同下垫面要素对流域面源污染物输出强度影响的贡献率, 从而提取面源污染产出的控制性因素, 这对认识流域面源污染输出规律并建立模型具有重要的参考价值. 表 2 是采用 RDA 方法分析全部下垫面特征变量共同进行水质数据解释时各自的重要性和显著性结果(499 次变换的 Monte Carlo 检验), 其中显著性检验表明下垫面要素是否对水环境质量产生密切相关, 而重要性体现了该要素对水环境影响的大小^[17]. 可以看出: 耕地比例、居民用地比例、平均坡度、土壤总氮含量能显著地对水质数据进行解释, 具有 95% 的置信度, 其他变量未能通过显著性检验; 就重要性而言, 以上指标中仅土壤总氮的重要性较低. 将以上显著性指标作为主要环境变量再次进行 RDA 分析, 结果显示, 水质指标与下垫面要素的相关性反映在轴 1、轴 2 上均非常明显(相关系数分别

达到 0.808、0.625), 且这 2 个轴共解释了 59.5% 的水质数据信息和 98.6% 的下垫面特征-水质关系信息. 对 4 个环境变量和 7 个环境变量的 RDA 结果比较(见表 3), 2 组分析中轴 1 和轴 2 水质数据累积方差值和水质-下垫面特征关系的累积百分比差别均不大, 说明以上 4 个下垫面特征变量完全可以较好地用于研究区水质数据的解释.

进一步对 4 个环境变量的 RDA 结果进行分析(见图 3). 针对水质指标而言, 化学需氧量、悬浮颗

粒指标大致沿第 1 轴方向排列, 说明第 1 轴反映的是水体污染的梯度; 而总氮浓度与第 2 轴更为接近, 说明该轴反映的是营养盐的变化. 针对下垫面特征变量而言, 第 1 轴主要代表耕地和居民用地比例要素, 第 2 轴代表流域平均坡度; 而土壤总氮虽与 2 个轴的关系密切, 但相对其他 3 个要素而言其贡献率均较小. 因此, 耕地比例、居民用地比例和流域平均坡度要素具有很好的代表性, 基本上能够反映水质数据的主要变化, 是流域面源污染产出的控制性因素.

表 2 各个环境变解释的重要性和显著性检验结果

环境变量	耕地比例	居民用地比例	林地比例	平均坡度	土壤 TN	有机质	流域面积
重要性检验	0.44	0.29	0.25	0.17	0.02	0.01	0.03
显著性检验	0.002	0.002	0.122	0.024	0.004	0.664	0.598

表 3 包含不同下垫面特征变量的 RDA 结果

参数	RDA 轴			
	1 (7 个解释变量)	2	1 (4 个解释变量)	2
特征值	0.564	0.047	0.551	0.044
水质-下垫面变量相关系数	0.818	0.648	0.808	0.625
水质数据方差累积百分比/%	56.4	61.1	55.1	59.5
水质-下垫面变量关系累积百分比/%	90.6	98.1	91.2	98.6

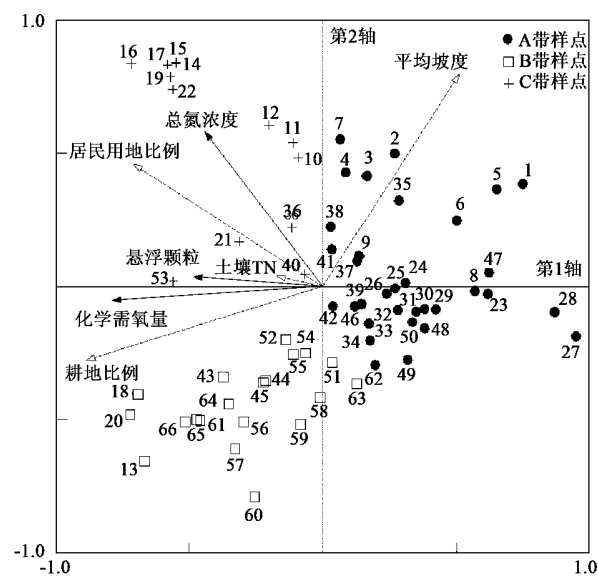


图 3 太湖上游流域水质指标变量与 4 个下垫面特征要素的 RDA 分析结果

Fig.3 RDA results of water quality and four landscape characteristic variables in Taihu upper-river Basin

3.4 流域面源污染控制因素的空间特征

从整体上, 耕地比例、居民用地比例和流域平均坡度是影响太湖上游地区面源污染产出的主要因素; 然而从单个子流域角度进行分析, 这 3 个主要变量在各监测流域的组分不同, 影响流域出口水质的贡献率不一, 因此面源污染控制因素在空间上存在差异. 分析结果如图 3, 监测流域样本点在图上有规律地分布反映了各监测流域的主要下垫面特征以及水质污染状况.

根据样本点分布特征, 把所有监测流域划分为 3 类. A 带样点主要位于平均坡度向量的正方向、水质指标向量的负方向上. 该带样点代表了平均坡度较大的子流域, 平均坡度均在 20°以上. 这些流域由于地形坡度大, 土地利用以林地为主, 森林植被覆盖率高, 面源污染产出少, 流域出口水质相对较好; 地形坡度是控制该带流域水质的主导因素. B 带样点位于耕地向量的正方向、平均坡度向量的负方向上, 代表了坡度小、耕地分布较广的子流域. 同时, 该带样点处于化学需氧量和悬浮颗粒指标的正方向上,

流域出口水体化学需氧量和悬浮颗粒指标相对较高,水质偏差.这些子流域地形平坦,农业开发强度大,耕地比例是该带流域的水质控制因素.C 带样点主要分布于居民用地和所有水质指标向量的正方向上,代表了人类活动最为强烈且流域出口水质最差的小流域.居民用地面积越大,流域出口水质越差,其水质控制性因素主要是居民用地比例.

4 结 论

(1) 流域面源污染与下垫面要素具有很好的相关性,其中流域土地利用对面源污染产出的影响最为显著,其次是流域土壤特征、流域坡度,流域的面积对面源污染产出的影响最小.不同土地利用类型对流域面源污染输出的影响又有所不同,居民用地最大,耕地次之,林地最小,反映流域面源污染产出与人类活动的强度密切相关.

(2) 在众多的流域下垫面因子中,居民地比例、耕地比例、流域平均坡度是流域面源污染输出变化的控制性因素,水质指标与下垫面要素的相关性反映在 RDA 分析的 2 个轴上分别达到 0.808、0.625,能解释 59.5%的流域水质信息、98.6%的下垫面特征-水质关系信息.

(3) 3 个控制性因素在不同监测流域水质变化中的贡献率有所不同,上游以林地为主的子流域,坡度对流域水质变化的贡献率较大;中、下游地形较为平坦的子流域,耕地和居民地比例对流域面源污染变化的贡献率较大.

(4) 由于我国土壤数据体系以土壤发生学的分类信息为主,缺乏针对土壤理化性质的高精度信息,RDA 分析中并没有体现出流域面源污染输出变化与流域土壤特性的密切联系,说明目前我国的土壤数据尚不能满足流域面源污染的研究,今后需要借鉴欧美国家的土壤数据分类体系,加强土壤理化性质的监测,完善我国的土壤数据库.

参考文献:

[1] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染管理及控制[J]. 环境科学,1998,19(5): 87-91.

[2] 于兴修,杨桂山,欧维新. 非点源污染对太湖上游西苕溪流域水环境的影响[J]. 湖泊科学,2003,15(1): 49-55.

[3] 杨柳,马克明,郭青海,等. 城市化对水体非点源污染的影响

[J]. 环境科学,2004,25(6): 32-39.

[4] 连纲,王德建. 太湖地区夏季氮素淋失特征[J]. 土壤通报,2004,35(2): 163-165.

[5] 高超,朱继业,朱建国,等. 极端降雨事件对农业非点源污染物迁移的影响[J]. 地理学报,2005,60(6): 991-997.

[6] Ning S K, Chang N B, Jeng K Y, *et al.* Soil erosion and non-point source pollution impacts assessment with the aid of multi-temporal remote sensing images [J]. Journal of Environmental Management, 2006, 79: 88-101.

[7] Budhendra B, Jon H, Bernie E, *et al.* Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using a GIS-NPS model[J]. Environmental Management, 2003, 26(6): 643-658.

[8] Chou T Y, Xie Z D, Chen M H. The application of quantitative assessment of land use changes impact on water conservation for reservoir watershed [J]. Hydrology Days, 2003. 45-55.

[9] 李恒鹏,刘晓玫,黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地利用类型的面源污染产出[J]. 地理学报,2004,59(3): 401-408.

[10] 于兴修,杨桂山. 典型流域土地利用/覆被变化及对水质的影响——以太湖上游浙江西苕溪流域为例[J]. 长江流域资源与环境,2003,12(3): 211-217.

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

[12] 刘瑞民,杨志峰,丁晓雯,等. 土地利用/覆被变化对长江上游非点源污染影响研究[J]. 环境科学,2006,27(12): 2407-2414.

[13] Makarenkov V, Legendre P. Nonlinear redundancy analysis and canonical correspondence analysis based on polynomial regression [J]. Ecology, 2002, 83(4): 1146-1161.

[14] 董旭辉,羊向东,刘恩峰,等. 冗余分析(RDA)在简化湖泊沉积指标体系中的应用——以太白湖为例[J]. 地理研究,2007,26(3): 477-484.

[15] 羊向东,王苏民,夏威夷,等. 典型对应分析在青藏高原现代湖泊硅藻与环境研究中的应用[J]. 中国科学(D 辑),2001,31(增刊): 273-279.

[16] ter Braak C J F, Smilauer P. CANOCO reference manual and user's guide to Canoco for Windows (version 4.5)[M]. New York: Centre for Biometry Wageningen, 2002. 113-180.

[17] Lenat D R, Crawford J K. Effects of land use on water quality and aquatic biota of three North Carolina Piedmont streams [J]. Hydrobiologia, 1994, 294(3): 185-199.

[18] Johnson L B, Richard C, Host G E, *et al.* Landscape influences on water chemistry in Mid-western stream ecosystems [J]. Freshwater Biology, 1997, 37: 193-208.

[19] 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,2006,18(4): 377-386.

[20] 梁涛,张秀梅,章申,等. 西苕溪流域不同土地类型下氮元素输移过程[J]. 地理学报,2002,57(4): 389-396.