

流域非点源污染物输出的环境因子分析

唐艳凌,章光新

(中国科学院湿地生态与环境重点实验室,中国科学院东北地理与农业生态研究所,长春 130012)

摘要 通过流域断面水质监测和 GIS 的流域空间分析等手段建立石头口门水库流域基础数据库,运用多元统计分析和偏冗余度分析对枯水期和丰水期影响流域非点源污染物输出空间分异的自然环境、人为干扰、尺度因素及其交互作用等环境因子进行了定量分解,运用冗余分析方法探讨了两个时期不同环境因子对流域非点源污染物输出种类及其形态的影响。结果表明,所选环境因子在枯水期和丰水期分别解释了流域非点源污染水质空间变异的 64.5%和 68.2%,两个时期纯自然环境对非点源污染的影响均最为显著,分别解释了水质空间变异的 43.7%和 59.5%,其次是纯人为干扰,均超过了 20%。自然环境-人为干扰的组合在枯水期较为强烈地影响非点源污染的产出,占到水质空间变异的 20%以上,而在丰水期这一作用不明显。枯水期,以居民用地为主的人为干扰控制着流域内以氨氮和颗粒有机氮为主的氮的输出以及有机物质的输出,而以流域面积为主的尺度因素则主要影响可溶性磷和有机物质的输出。对于丰水期而言,非点源污染物输出的种类和形态受到不同类型环境因子组合的控制。

关键词 非点源污染;流域尺度;环境因子格局;冗余分析;石头口门水库

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)04-0725-08

Analysis of Environmental Factors Influencing Non-point Source Pollutants

TANG Yan-ling, ZHANG Guang-xin

(Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China)

Abstract Based on the observed data in monitored drainage areas and GIS spatial analysis tools, watershed basic database of Shitoukoumen Reservoir Basin was built. Multivariate analysis and partial redundancy analysis (pRDA) were employed to analyze the contribution of the different influencing factors, including natural environment factors, anthropogenic disturbance factors and watershed scale factors, and their interaction between them to water quality during dry season and rainy season. In addition, pRDA was also used to investigate the effect of the different influencing factors on the main types and forms of the non-point source (NPS) pollutant export. The results showed that different influencing factors led to great changes in water quality at spatial and seasonal scales. All selected influencing factors explained 64.5% and 68.2% of the spatial variation of water quality over dry season and rainy season, respectively, which shows clear seasonal difference. Natural environment factors played the key role on the spatial variation of water quality associated with the NPS pollution, which explained 43.7% and 59.5% of the spatial variation of water quality during dry and rainy season, respectively. And anthropogenic disturbance factors were the second important factors, which possess above 20% of the spatial variation during both dry and rainy season. The interaction between natural environment factors and anthropogenic disturbance factors resulted in more NPS pollutant export during dry season than that during rainy season, which the former possesses above 20% of the spatial variation of water quality and the latter does less 5%. During dry season, residential land used of anthropogenic disturbance factors dominates some NPS export, including the ammonia nitrogen, particle organic nitrogen and organic matter, and meanwhile discharge area of scale factors controlled dissolved phosphor and organic matter export. During rainy season, interaction of different influencing factors controlled the types and forms of NPS pollutant export.

Keywords non-point source pollution; watershed scale; environmental factor pattern; redundancy analysis; Shitoukoumen Reservoir

收稿日期 2009-10-14

基金项目:吉林省与中国科学院高技术产业化专项资金合作项目(2006SYHZ0025);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q06-2, KZCX2-YW-126)

作者简介:唐艳凌(1978—),女,吉林通化人,助研,博士,主要从事同位素水文学和水环境污染研究。E-mail: tangyl78@126.com

通讯作者:章光新 E-mail: zhgx@neigae.ac.cn

非点源污染是影响地表环境的主要污染方式之一,已成为水源地污染的重要物质来源^[1-2]。在每一个尺度上影响生态过程的因子有关键因子和次要因子之分,环境因子的空间组合关系(格局)将影响到生态过程的演变^[3]。与生态过程相类似,非点源污染过程与环境之间也存在密切的关系,然而哪些环境因子是关键因子,它们以何种方式影响非点源污染过程,在多大程度上决定非点源污染物的输出特征,以及非点源污染过程对环境做出何种反应,这些问题的解决对流域非点源污染的合理控制具有重要的指导意义。

已有的非点源污染研究主要集中在对污染负荷的估算和对污染过程的模拟等方面^[4-7],也有研究者在较小尺度上开展了人工降雨实验和野外观测,研究流域非点源污染产出与单一环境因子的定量关系^[8-10]。然而,流域尺度非点源污染输出与多个环境因子的定量关系方面研究工作开展的较少。非点源污染过程受到自然环境(如气候、地形、土壤、植被等)、人为干扰(如土地利用方式)和流域尺度等众多环境因子的控制与影响,空间差异性大,各种环境因子的作用途径和程度不一,探讨流域尺度上非点源污染物输出特征与不同类型环境因子之间的复杂关系,解析影响非点源污染过程的主要环境因子类型及其格局,继而从该方面入手进行污染的防治将是一种更加切实有效的措施。本文试应用数量生态学中冗余分析技术(RDA),分析长春市重要饮用水水源地石头口门水库流域非点源污染物输出特征与环境因子之间的关系,以揭示非点源污染输出特征沿环境梯度的变化规律,解析影响流域非点源污染物输出种类和形态的关键环境因子及其格局,为有效防治非点源污染、保障水库流域供水安全提供科学依据。

1 研究地区概况

研究区域为长春市主要饮用水水源地之一的石头口门水库及其4944 km²的集水范围(东经125°46′~126°41′,北纬43°06′~44°03′),区域内的主要河流饮马河干流及其两个支流岔路河和双阳河均注入水库。研究区位于松嫩平原腹地,属中温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温为2~6℃,极端最低温度-38.4℃,极端最高温度36℃,多年平均降水量为600 mm,67%的雨量集中在7、8月份,时空分布不均匀。全区地貌以平原为主,其次为丘陵、台地和山地,从东南向西北呈现由低山丘陵向平原过渡的特征。土壤以暗棕壤和草甸土为主。流域农业开发历史悠久,部分地区土壤剥

蚀严重,森林、耕地和居民建设用地为流域内的主要土地利用类型,其格局的空间差异显著。

2 资料来源及研究方法

2.1 取样观测

为分析流域环境因子与非点源污染输出的联系,以石头口门水库出口作为流域总出水口,应用AVSWAT模型,通过水库流域1:100 000DEM地形分析,结合数字化的实际河网,提取流域边界和数字水系,并对流域进行离散化,找出流域最佳的子流域划分水平,取最小集水面积10 000 hm²,将流域离散成28个子流域。子流域的出水口一般位于支流与干流交汇处,根据矢量化的流域实际河网对模拟河网和子流域的出水口进行校正(见图1)。

水质数据通过野外实地水质监测获得。采样断面设置在各子流域出水口处,按照规范和标准方法^[11-12],



图1 石头口门水库及其上游流域子流域划分
Figure 1 Sub-catchments of Shitoukoumen Reservoir upper-river basin

每个断面设置左、中、右 3 个采样点,由于各断面水深均未超过 10 m,故仅设置表层(水面以下 0.5 m 处)采样,所用水样采集装置为有机玻璃采水器。水质样品采集分两个时期进行,分别为 2008 年 4 月和 7 月各 1 次,代表枯水期和丰水期的水质特征。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,每次采样过程选择降雨后期或降雨之后 1~2 d 内完成。选取水体总氮浓度(TN)、硝态氮浓度(NO₃-N)、氨氮浓度(NH₃-N)、可溶性氮浓度(DN)、颗粒态有机氮(PON)、总磷浓度(TP)、可溶性磷(DP)、悬浮颗粒结合态磷(PAP)、悬浮颗粒物含量(SS)以及化学需氧量(COD_{Cr})共 10 项水质指标来表征非点源污染物输出特征,分析方法见《水和废水监测分析方法》(第四版)^[13]。

2.2 环境变量的确定

通过对非点源污染产出、输移机理的分析,按照自然环境、人为干扰及尺度因素选取了 15 个环境变量作为解释水质空间变异的环境因子指标,指标数据的获取如表 1 所示。其中自然环境因子集包括与非点源污染及水文过程密切联系的降水、地形和土壤,土地利用方式和植被盖度作为人为干扰因子,流域面积和河网密度作为尺度因素。据此构建出枯水期和丰水期两个环境因子数据文件,各 15 个解释变量。为了满足国际通用植被数量分析软件 CANOCO 4.5 的输入数据要求及用于分析的目的,全部解释变量均采用实际计算值表示。

2.3 统计分析

本文采用方差分析方法对枯水期和丰水期 2 个时期的水质指标进行比较,以确定其差异是否显著。继而,将这 2 个时期的水质数据矩阵作为环境因子的

响应变量进行分析。鉴于去趋势对应分析(DCA)其排序轴反映了水质变化的程度(以平均标准差(SD)来反映),用 DCA 估计排序轴梯度长度(Lengths of gradient, LGA)比较适宜^[16]。理论上讲,梯度长度(LGA)<3 适合线性排序法, LGA>3 适合采用非线性排序方法。通过初步对 D-P 和 F-P 2 个数据文件(非转换)进行 DCA 分析,结果表明排序轴最大的梯度长度分别为 1.223 和 0.729,均小于 3,表明 2 个数据文件均具有较好的线性反应,也即不同时期流域水质对环境梯度的响应是线性的,对此 2 个数据矩阵利用线性响应模型分析(如 RDA 和 partial RDA)比较适宜。该分析方法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,通过采用 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,能将表征非点源污染物输出强度的水质指标、子流域及环境因子之间的关系反映在坐标轴上^[17-18]。

本文利用直接梯度分析方法 RDA 和 partial RDA 通过分析不同时期流域水质空间分布格局,提取流域非点源污染输出的控制性因素,进一步揭示流域环境因子类型及其格局对非点源污染输出的影响。鉴于具有高的变异膨胀因子(Variance inflation factors, VIF)与其他的变量具有高的多重共线性,对模型的贡献很少,对不同时期 15 个非点源污染影响因子变量分别进行初步 RDA 分析筛选,结果表明,除降水量(PCP)、土壤全磷(TPs)和森林比率(PF)之外的 12 个环境变量的组合能够保证所有变量的膨胀因子均小于 20。为了满足解释变量的正态要求及减小异常值对分析的影响,本文在用 RDA 进行分析之前,对数据进行了标准化处理,所用公式如下:

$$y_{ij} = (x_{ij} - \mu_j) / \sigma_j \quad (\text{其中 } i=1\sim 28, j=1\sim 14)$$

表 1 环境因子的资料来源和数据处理

Table 1 Source and process of environmental data

数据类型	尺度	来源	数据描述	数据处理方法*	数据处理结果
地形	1:10 万	中科院东北地理与农业生态研究所	高程	利用 SWAT 模型描述流域,提取河网和流域边界,划分子流域,计算坡长和坡度 ^[14]	最大相对高差(Elev)、坡度(Slope)、坡长(SL)、子流域面积(Area)、河网密度(RD)
气象	68 站	中国气象科学数据共享服务网和长春市防汛抗旱信息网	日降水量、降水日数	空间 Kriging 插值	平均日降雨量(PCP)和平均日降雨强度(RI)
土壤	1:100 万	中国西部环境与生态科学数据中心	土壤空间及理化性质数据	土壤粒径转化、土壤可蚀性因子计算 ^[15]	土壤可蚀性(K)、有机质(OM)、全氮(TNs)、全磷(TPs)
土地利用	1:10 万	中科院东北地理与农业生态研究所	土地利用类型分类及面积	GIS 统计分析	森林比例(PF)、居民用地比例(PR)、耕地比例(PA)
植被覆盖	19.5 m×19.5 m	中国资源卫星应用中心	CBERS 遥感影像	降噪处理和几何校正后,利用 ERDAS IMAGINE 8.7 进行波段合成,计算 NDVI	归一化植被指数(NDVI)

注:数据处理完成后均与子流域边界图层进行叠加得到每个子流域内的环境变量数据。

对不同时期水质的 2 个数据文件的数据进行了对数转换,所用公式为:

$$Y = \lg(10Y + 1)$$

子流域数据没有中心化,水质数据经过了中心化和标准化处理,其他以 CANOCO 软件的默认形式执行。各环境因子对不同时期水质的重要性,由 CANOCO 软件的自动向前选择程序 (Automatic forward selection procedure) 完成,利用 Monte Carlo 检验 (Using 499 permutations) 判断其重要性是否显著。

2.4 因子分解的实现

考虑到自然环境、人为干扰和流域尺度因素的综合作用,不同时期由非点源污染引起的流域水质空间格局的变化可以分离成以下几个部分:

(1) 总解释变异 (The total amount of variation explained by all variables, V_t): 全部变量与分析。

(2) 部分变异,包括以下 7 部分:

① 自然环境解释部分 (The proportion of the variation explained exclusively by natural environmental variables, V_{pn}): 是在各时期水质矩阵中以环境变量作为解释变量而人为干扰和流域尺度因素作为协变量,从而得出环境因素独立解释的水质空间变化。

② 人为干扰解释部分 (The proportion of the variation explained exclusively by anthropogenetic disturbance variables, V_{pd}): 是在各时期水质矩阵中以人为干扰变量作为解释变量而环境变量和流域尺度因素作为协变量,从而得出人为干扰独立解释的水质空间变化。

③ 流域尺度因素部分 (The proportion of the variation explained exclusively by catchment scale variable, V_{ps}): 是在各时期水质矩阵中以流域尺度因素作为解释变量而环境变量和人为干扰作为协变量,从而得出流域尺度因素独立解释的水质空间变化。

④ 自然环境-人为干扰组合解释部分 (The amounts of variation attributable exclusively to the interaction of natural environmental and anthropogenetic disturbance variables, V_{nd}) 其计算公式为:

$$V_{nd} = V_t - V_s - V_{pn} - V_{pd} \quad (1)$$

式中: V_s 是用流域尺度因素因子矩阵为约束得出的尺度因素能够解释的水质空间变化部分。

⑤ 自然环境-尺度因素组合解释部分 (The amounts of variation attributable exclusively to the interaction of natural environmental and catchment scale variables, V_{ns}) 其计算公式为:

$$V_{ns} = V_t - V_d - V_{pn} - V_{ps} \quad (2)$$

式中: V_d 是用人为干扰矩阵为约束得出的全部干扰因子能够解释的水质空间变化部分。

⑥ 人为干扰-流域尺度因素组合解释部分 (The amounts of variation attributable exclusively to the interaction of anthropogenetic disturbance and catchment scale variables, V_{ds}) 其计算公式为:

$$V_{ds} = V_t - V_n - V_{pd} - V_{ps} \quad (3)$$

式中: V_n 是用环境矩阵为约束得出的全部环境因子能够解释的水质空间变化部分。

⑦ 自然环境-人为干扰-流域尺度因素组合解释部分 (Variation exclusively shared by the interaction of anthropogenetic disturbance and catchment scale variables, V_{nds}) 其计算公式为:

$$V_{nds} = V_t - (V_{pn} + V_{pd} + V_{ps} + V_{nd} + V_{ns} + V_{ds}) \quad (4)$$

3 结果与讨论

3.1 排序轴与环境因子的相关性

不同时期各子流域水质空间特征如表 2 所示。通过方差分析,枯水期和丰水期的水质差异极为显著 ($P < 0.01$),其中丰水期的水质空间变异程度普遍低于枯水期,两个时期之间, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、PAP 和 SS 输出的浓度差异表现得极为明显 ($P < 0.01$),而 TN、DN 和 TP 的差异也达到了显著水平 ($P < 0.05$),说明枯水期和丰水期之间的季节性因素控制着流域非点源污染的物质输出。此外,同一时期内,各水质指标的空间变异程度不同。为了进一步探讨由非点源污染导致的流域水质的季节和空间上的差异,本文对初步分析筛选出的 12 个环境因子组成的变量组进行 RDA 分析,得到不同时期该环境因子组合对流域水质空间分异的解释。由表 3 可知,不同时期 RDA 的排序轴均与环境因子之间显著相关 ($P < 0.05$),其中,枯水期水质空间分异的 64.5% 是由全部环境因子共同决定的,而对于丰水期,这一解释则更高,升到了总变异的 68.2%。从前 4 个排序轴所占的总信息量来看,两个时期环境因子的变量组合对流域水质空间分异的解释累积均超过了 90%,且前两个排序轴的累积解释量也均占到了总信息量的 75% 左右,可见这些环境因子能够在很大程度上决定流域非点源污染的输出特征,而且不同时期流域水质的空间分异完全可以由前两个排序轴进行解释。由于枯水期和丰水期用于解释水质空间分异的环境因子的类型没有发生改变,可以推断环境因子格局的改变可能是导致不同时期流域非点源污染产出差

表 2 不同时期子流域水质空间特征(mg·L⁻¹)

Table 2 Spatial water quality characteristics during different seasons in sub-catchments(mg·L⁻¹)

水质指标	枯水期			丰水期			P-value
	Average[CV(%)]	Min	Max	Average[CV(%)]	Min	Max	
TN	2.163 [85]	0.530	7.810	3.058 [47]	1.108	7.188	0.039
NH ₄ -N	0.330 [190]	0.030	2.980	0.185 [130]	0.010	1.170	0.264
NO ₃ -N	0.818 [85]	0.010	2.220	1.918 [72]	0.017	8.200	0.001
DN	1.511 [72]	0.222	3.920	2.195 [56]	0.820	5.225	0.029
PON	0.710 [133]	0.010	4.070	0.864 [65]	0.110	2.072	0.366
TP	0.127 [96]	0.027	0.459	0.209 [78]	0.041	0.659	0.029
DP	0.069 [112]	0.017	0.257	0.048 [91]	0.007	0.195	0.201
PAP	0.057 [113]	0.001	0.206	0.161 [90]	0.019	0.626	0.001
SS	70 [103]	12	301	181 [72]	56	534	<0.000 1
COD _{Cr}	22.99 [106]	1.02	102.03	34.10 [52]	12.55	69.03	0.059

表 3 对不同时期影响水质空间变异的解释变量线性冗余度分析结果

Table 3 Linear redundancy analysis(RDA)of the environmental variables affecting spatial variation of water quality between dry and wet seasons

数据集 * Data set	p	典范特征值总和 Sum of all canonical eigenvalues	前四轴累计贡献百分比/%Cumulative percentage of canonical variance accounted for by axes 1-4			
枯水期	0.022*	0.645	49.6	77.2	88.3	93.3
丰水期	0.012*	0.682	46.7	73.4	85.7	91.9

注：*参与分析的包括了全部 7 个环境变量、3 个人为干扰变量和 2 个流域尺度因素变量。The full set of 7 environmental 3 anthropogenetic disturbance and 2 catchment scale explanatory variables was used p：通过 499 次运算，全部典范排序轴均达到了显著水平 Based on 499 permutations tests of significance of all canonical axes gave identical results.

异的重要原因。

3.2 因子分解及排序

3.2.1 因子分解结果及其解释

利用偏冗余度分析(partial RDA)经因子分解得到能够被自然环境、人为干扰和尺度 3 类变量及其交互作用解释的流域水质空间分异的 7 个部分(见表 4)。分析可知,无论是枯水期还是丰水期,纯自然环境

(V_{pe})和纯人为干扰(V_{pd})都是影响流域水质的主要环境变量类型,均占到了总解释变异的 20%以上,其中纯自然环境(V_{pe})对流域水质空间分异的影响更大一些,其贡献占到了总解释变异的 40%以上,且丰水期高于枯水期。此外,自然环境和人为干扰的组合格局在枯水期对流域水质的空间变异也发挥了重要作用,对总解释变异的贡献超过了 20%,而在丰水期这一贡

表 4 基于冗余度分析(RDA)的环境因子格局对不同时期水质空间变异的解释结果

Table 4 Spatial variation of non-point source pollutant output explained by environmental factor patterns during different period by linear redundancy analysis(RDA)

环境因子格局 Environmental factor pattern	枯水期 Dry season		丰水期 Wet season	
	TV	TVE/%	TV	TVE/%
纯自然环境因子 Natural environmental(V_{pe})	0.282	43.72	0.406	59.53
纯人为干扰因子 Anthropogenetic disturbance(V_{pd})	0.144	22.33	0.145	21.26
纯尺度因子 Scale(V_{ps})	0.055	8.53	0.066	9.68
自然环境-人为干扰因子组合 Natural environmental-disturbance(V_{ed})	0.135	20.93	0.030	4.40
自然环境-尺度因子组合 Natural environmental- scale(V_{es})	0.014	2.17	0.020	2.93
尺度-人为干扰因子组合 Scale-disturbance(V_{sd})	0.004	0.62	0.010	1.47
自然环境-人为-尺度因子组合 Natural environmental- disturbance-scale(V_{edb})	0.011	1.71	0.005	0.73

注 TV 总变异 Total variance ;TVE 总变异解释部分 Total variance explained。

献则降到了4.4%。纯尺度因子和其他组合的环境因子格局对解释流域水质空间分异的贡献较小,均不超过总解释变异的10%。两个时期流域水质空间分异未被解释的部分,均占到总变异的35%左右,可见除所选的自然环境、人为干扰和尺度因子外,仍存在其他因素在控制流域水质上起着较为重要的作用。

分析结果表明,纯自然、纯人为干扰以及二者的组合是影响枯水期水质的环境因子格局,其对流域水质空间变异的解释接近总信息量的87%,对非点源污染产出起着重要的作用。而丰水期是纯自然和纯人为干扰的环境因子格局在控制着非点源污染的产出,二者的累计解释占到了总信息量的81%左右。与枯水期相比,丰水期的纯人为干扰对流域水质空间分异的贡献基本没有变化,而纯自然环境因子的贡献有明显提高。对环境变量矩阵中随时间发生变化的植被因子和降水量分别进行一维方差分析可知,枯水期和丰水期降水量的差异极显著($P < 0.01$),而植被因子变化不明显,说明人为因素中植被覆盖状况的显著变化对流域水质影响不大,而降水量的明显变化能够改变环境因子的格局,从而影响流域非点源污染的产出。对于不同环境因子类型对流域水质贡献的差异,部分原因可能是不同环境因子类型包含的环境因子数量差异引起的。

3.2.2 排序结果及其解释

由图2、图3和表5可知,不同时期流域非点源污染物输出强度受不同自然环境、人为干扰和尺度因素的影响。从流域整体上看,对于枯水期,第1轴主要

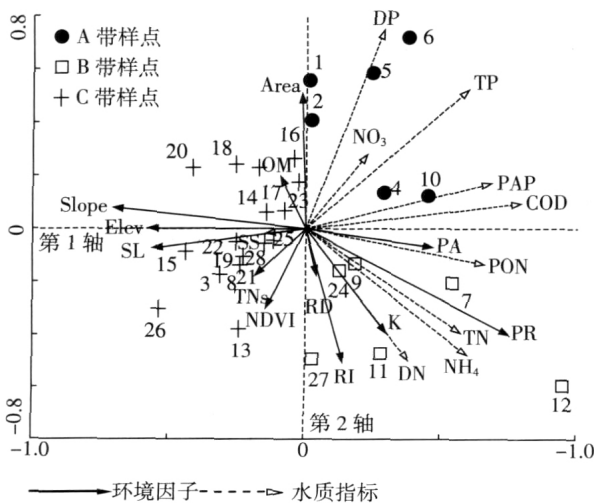


图2 枯水期环境因子和流域水质的冗余度分析(RDA)结果
Figure 2 Redundancy analysis results for environmental factors and water quality in catchment during dry season

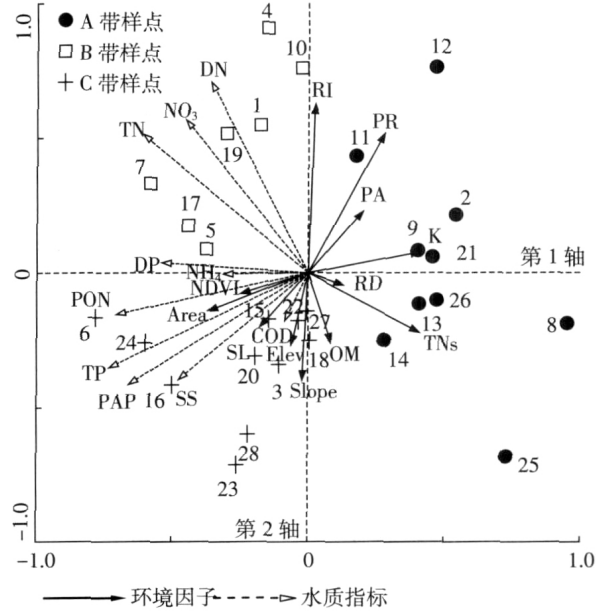


图3 丰水期环境因子和流域水质的冗余度分析(RDA)结果
Figure 3 Redundancy analysis results for environmental factors and water quality in catchment during rainy season

表5 环境因子与排序轴的相关系数

Table 5 Correlation of environmental factors with the first two ordination axes of redundancy analysis

变量名 Variables	枯水期		丰水期	
	第1轴 Axis 1	第2轴 Axis 2	第1轴 Axis 1	第2轴 Axis 2
PCP	-0.581 5	-0.521 4	0.036 6	0.706 0
Elev	-0.688 4	-0.006 9	-0.052 2	-0.209 5
Slope	-0.800 9	0.053 8	-0.025 2	-0.414 6
SL	-0.676 5	-0.071 2	-0.142 9	-0.146 4
K	0.255 3	-0.315 2	0.445 9	-0.061 8
OM	-0.080 9	0.159 7	0.070 4	-0.212 0
TNs	-0.229 0	-0.220 0	0.403 5	-0.256 3
NDVI	-0.121 6	-0.250 2	-0.204 5	-0.063 2
PA	0.601 3	-0.046 8	0.166 2	0.186 2
PR	0.846 1	-0.316 3	0.241 3	0.603 7
Area	-0.014 6	0.622 2	-0.408 6	-0.097 9
RD	0.036 6	-0.146 4	0.095 5	-0.050 9

注 PCP,平均降水量,mm; Elev,最大相对高差,m; Slope,平均坡度, $^{\circ}$; SL,平均坡长,m; K,土壤侵蚀性因子; OM,土壤有机质, $g \cdot kg^{-1}$; TNs,土壤全氮, $g \cdot kg^{-1}$; PA,农业用地比率,%; PS,居民用地比率,%; NDVI,植被归一化指数; Area,子流域面积, m^2 ; RD,河网密度, $m \cdot m^{-2}$ 。

反映了以流域居民用地比例、耕地比例为主的人为干扰和以流域平均坡度、坡长以及最大高差为主的地形因素的影响;第2轴则更多地反映了以流域面积为主的尺度因素和以降水量为主导的气候因素的影响(如

图2所示)。而丰水期,第1轴主要反映了以流域面积为主的尺度因素和以土壤可蚀性及土壤全氮含量为主的环境因素的共同影响,第2轴则更多地反映了以降水量为主的气候因素、流域平均坡度为主的地形因素和居民用地比例为主导的人为干扰因素的综合影响(如图3所示)。

从单个子流域角度进行分析,同一时期,处于相似环境因子格局控制下的子流域,其水质输出特征也相似。分析结果表明,子流域样本点在图上有规律地分布反映了各子流域环境因子的格局特征及其控制下的水质污染状况。

根据子流域在RDA前两轴组成的坐标平面上的分布特征,对所有子流域进行分类。对于枯水期,子流域共划分为3类如图2。A带样点主要位于RDA排序第2轴正半轴和整个第1轴组成的坐标平面上。该样带代表了流域面积较大、居民用地相对较少的子流域。其流域出口水体总磷、化学需氧量、硝态氮和悬浮颗粒物4个指标相对较高,水质偏差。其中,可溶性磷是流域磷输出的主要形态。这些子流域受人为干扰相对较小,流域尺度是控制非点源污染输出的关键因子,其主要影响流域出口水体可溶性磷和有机物质的输出,该结果与国内部分研究结果一致^[19]。B带样点位于RDA第1、2轴负半轴组成的平面上。该样带代表流域面积小、居民用地少的子流域。这些流域居民用地少,人为干扰小,因此非点源污染输出少,流域出口水质相对较好。C带样点位于RDA排序第1轴正半轴和第2轴负半轴组成的坐标平面上,代表了流域面积小且居民用地比例较高、人为干扰相对剧烈的子流域。其流域出口水体的总氮和化学需氧量两个指标相对较高,水质偏差。其中,总氮的输出以氨氮和颗粒有机氮为主。这些子流域受人为干扰相对剧烈,居民用地控制着流域出口的水质。居民用地对流域出口水质具有显著的影响这一结果与国内外一些研究结论相一致^[20-23]。

对丰水期而言,子流域共划分为3类,如图3。A带样点主要位于RDA排序第1轴正半轴和整个第2轴组成的坐标平面上。该样带代表了流域面积较小、土壤可蚀性和土壤全磷含量较高的子流域。这些子流域非点源污染输出少,流域出口水质相对较好,说明土壤因子对流域水质影响不大,而流域尺度控制了非点源污染的输出。B带样点位于RDA第1轴负半轴和第2轴正半轴组成的平面上,代表了流域面积较大、土壤可蚀性低、土壤全磷和土壤有机质含量低、降

水强度高、居民用地比例较高、人为干扰相对剧烈,且地形坡度小的子流域。其流域出口水体的总氮和可溶性磷浓度较高,水质偏差。其中,氮的输出以可溶性氮为主,其主要输出形态为硝态氮。表明以降水为主的自然环境因子和以居民用地为主的人为干扰以及以流域面积为主的尺度因素共同控制了流域硝态氮和可溶性磷的输出。C带样点位于RDA排序第1、2轴负半轴组成的坐标平面上,代表了流域面积较大、土壤可蚀性和全磷含量低、土壤有机质含量较高、降水强度低、居民用地比例低、人为干扰较少、地形坡度大的子流域。其流域出口水体的总磷、颗粒有机氮、悬浮颗粒物和化学需氧量相对较高,水质较差。其中,磷的输出主要以颗粒结合态的形式为主。表明以土壤理化性质和地形为主的自然环境因子以及以流域面积为主的尺度因素共同控制了流域总磷、颗粒有机氮、悬浮颗粒物和有机物质的输出。

4 结论

(1)枯水期和丰水期环境因子与流域非点源污染都具有很好的相关性。筛选出的12个环境因子对枯、丰水期非点源污染空间变异的累计解释分别达到了64.5%和68.2%。与枯水期相比,丰水期环境因子对流域非点源污染输出的影响更大。

(2)从环境因子分类上看,丰、枯水期自然环境对非点源污染产出的影响最为显著,其次是人为干扰。不同的是,枯水期自然环境和人为干扰的交互作用对非点源污染产出的影响更为强烈,而丰水期任何因子类型之间的交互作用均不明显。不同时期自然环境、人为干扰和尺度因素对非点源污染贡献的差异归功于环境因子格局的变化,降水的差异是导致环境因子格局变化的主要原因。

(3)从单个环境因子看,枯水期居民用地和流域面积是影响非点源污染输出的关键环境因子,其中以居民用地为主的人为干扰控制着流域内以氨氮和颗粒有机氮为主的氮的输出以及有机物质的输出,而以流域面积为主的尺度因素则主要影响了可溶性磷和有机物质的输出。丰水期单个因子对非点源污染输出的影响不明显,以降水为主的自然环境因子和以居民用地为主的人为干扰以及以流域面积为主的尺度因素共同控制了流域硝态氮和可溶性磷的输出,而以土壤理化性质和地形为主的自然环境因子以及以流域面积为主的尺度因素共同控制了流域总磷、颗粒有机氮、悬浮颗粒物和有机物质的输出。

参考文献：

- [1] Julie Stauffer. The water crisis—constructing solutions to freshwater pollution[M]. London :Earthscan Publications Ltd, 1998 :31–50.
- [2] Bechmann M E, Stålnacke P, Kværnø S H. Testing the Norwegian phosphorus index at the field and subcatchment scale[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 120 :117–128.
- [3] 陈利顶, 吕一河, 等. 基于模式识别的景观格局分析与尺度转换研究框架[J]. *生态学报*, 2006, 26(3) :663–670.
Chen L D, Lv Y H, et al. A framework on landscape pattern analysis and scale change by using pattern recognition approach[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3) :663–670.
- [4] 邢可霞, 郭怀成, 孙延风, 等. 基于 HSPF 模型的滇池流域非点源污染模拟[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(2) :229–232.
Xing K X, Guo H C, Su Y F, et al. Simulation of non-point source pollution in Lake Dianchi basin based on HSPF model [J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(2) :229–232.
- [5] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(3) :375–383.
Hao F H, Yang S T, Cheng H G, et al. A method for estimation of non-point source pollution load in the large-scale basins of China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3) :375–383.
- [6] Polyakov V, Fares A, Kubo D, et al. Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(11) :1617–1627.
- [7] Oki K, Yasuoka Y. Mapping the potential annual total nitrogen load in the river basins of Japan with remotely sensed imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112 :3091–3098.
- [8] 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.
- [9] 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.
Lian G, Wang D J. Nitrogen leaching in wheat growing season in Taihu Lake area[J]. *Journal of Soil Science*, 2004, 35(2) :163–165.
- [10] 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.
- [11] 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭, 等. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京 :中国标准出版社, 1999.
Huang X F, Chen W M, Cai Q M, et al. Survey observation and analysis of lake ecology[M]. Beijing :Standards Press of China, 1999.
- [12] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊富营养化[M]. 北京 :中国环境科学出版社, 1990.
Jin X C, Liu H L, Tu Q Y, et al. Lake eutrophication in China[M]. Beijing :China Environmental Science Press, 1990.
- [13] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版 增补版. 北京 :中国环境科学出版社, 2002.
SEPA(State environmental Protection Administration of China). Water and wastewater monitoring analysis methods[M]. 4th edition. Beijing :China Environmental Science Press, 2002.
- [14] 李 俊. 基于 DEM 的黄土高原坡长的自动提取和分析[D]. 西安 :西北大学硕士学位论文, 2007.
Li J. Automatic extraction of slope length and analyst based on DEM in the Loess Plateau[D]. Xi'an :Northwest University, 2007.
- [15] 魏怀斌, 张占庞, 杨金鹏. SWAT 模型土壤数据库建立方法[J]. *水利水电技术*, 2007, 38(6) :15–18.
Wei H B, Zhang Z P, Yang J P. Establishing method for soil database of SWAT model[J]. *Water Resource and Hydropower Engineering*, 2007, 38(6) :15–18.
- [16] Jan Lepš, Petr Šmilauer. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. New York :Cambridge University Press, 2003 :50–54.
- [17] Ter Braak C J F, Šmilauer P. CANOCO Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows[M].(version 4. 5)New York :Centre for Biometry Wageningen. 2002.
- [18] 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.
Dong X H, Yang X D, Liu E F, et al. Application of redundancy analysis in predigesting sedimentary proxies for paleolimnological research : A case study of Taibai Lake[J]. *Geographical Research*, 2007, 26(3) :477–484.
- [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.
Li H P, Yang G S, Huang W Y, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus concentration of runoff from different spatial scale watersheds [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(4) :377–386.
- [20] Amiri B J, Nakane K. Entire catchment and buffer zone approaches to modeling linkage between river water quality and land cover—a case study of Yamaguchi Prefecture, Japan [J]. *Chinese Geographical Science*, 2008, 18(1) :85–92.
- [21] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality[J]. *Wat Res*, 2001, 35, 3462–3472.
- [22] 李 燕, 李恒鹏. 太湖上游流域下垫面因素对面源污染物输出强度的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29(5) :1319–1324.
Li Y, Li H P. Influence of landscape characteristics on non-point source pollutant output in Taihu upper-river basin[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(5) :1319–1324.
- [23] 刘仁燕, 冯明磊, 林 杉, 等. 三峡库区小流域水体硝态氮含量及与土地利用的关系[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5) :886–892.
Liu R Y, Feng M L, Lin S, et al. Nitrate concentration in water in small watersheds of Three Gorges reservoir area and its relationship with land-use [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5) :886–892.