

流域水质时空分布特征及其影响因素初析

黄金良^{1,2}, 黄亚玲², 李青生², 周增荣³, 冯媛², 张祯宇²

(1. 厦门大学福建省海陆界面生态环境重点实验室, 厦门 361005; 2. 厦门大学环境科学研究中心, 厦门 361005; 3. 华侨大学化工学院, 厦门 361021)

摘要: 选取闽东南九龙江流域 21 个典型小流域开展 2010 年丰(8月)、平(11月)、枯(2月) 3 个水期的基流水质监测, 并借助 GIS、多元统计分析方法识别流域水质的时空分布特征及其影响因素, 为九龙江流域水质监测、管理与控制提供依据。结果表明, 九龙江水质枯水期最差, 平水期次之, 丰水期水质较好。表征生活污水、工业废水的污染因子对水质变化的贡献率为 45.58%, 表征农业污染的主成分的贡献率为 21.28%。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、SRP、高锰酸盐指数、 K^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 浓度与建设用地比例、人口密度呈显著的正相关, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度与耕地比例有显著的正相关, 自然用地面积比例与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 K^+ 、 Cl^- 、 Na^+ 浓度有显著的负相关。建设用地比例较大、人口较密集的小流域 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、SRP、高锰酸盐指数、 K^+ 、 Cl^- 的浓度较高, 耕地比例较大的小流域 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度则较高。在流域水质管理上, 建议提高污水处理率, 并重视由于化肥施用导致的农业非点源污染对水质的影响。

关键词: 水质; 污染源; 特征; 影响因素; 流域

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)04-1098-10

Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed

HUANG Jin-liang^{1,2}, HUANG Ya-ling², LI Qing-sheng², ZHOU Zeng-rong³, FENG Yuan², ZHANG Zhen-yu²

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Coastal Ecology and Environmental Studies, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Twenty one sub-watersheds in the Jiulong River watershed were chosen for in-situ monitoring water quality of baseflow in flood season, dry season and average season in 2010. Geographical information system and multivariate analysis were coupled to characterize the spatiotemporal variation of water quality and identify its influencing factors. The results show that the water quality in dry season is the worst whereas the water quality in flood season is comparatively good. The first principal component representing sanitary and industrial wastewater pollution, explained 45.58% of the total variance of water quality. The second principal component concerning pollution due to agricultural activities, explained 21.28% of the total variance. $\text{NH}_4^+\text{-N}$, SRP, potassium permanganate index, K^+ , Cl^- , Mg^{2+} and Na^+ had a significantly positive correlation with percentage of built-up and density of population. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ was correlated positively with percentage of cropland. The sub-watersheds with high proportion of built-up area and density of population show high concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, SRP, potassium permanganate index, K^+ , Cl^- . Comparatively, the sub-watersheds with high percentage of cropland show high level of nitrate concentration. Improvement of the wastewater treatment efficiency and increased recognition of agricultural non-point source pollution were finally highlighted from watershed management perspectives.

Key words: water quality; pollution source; characteristics; influencing factors; watershed

河流水质反映了各种自然和人为活动的综合作用^[1], 从土地利用的角度来理解人类活动对河流水质的影响, 研究者开展了大量工作, 取得了一些共识。比如: 农业用地面积比例与水体中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈正相关^[2-4]; 城市用地比例与 COD、BOD、TN、TP、SS 呈正相关^[5]; 城市流域浊度、有机污染物、营养盐较高^[4-6]; 林地在改善水质方面有重要的作用^[7,8]; 营养盐浓度、悬浮底质、浊度与草地面积比例呈很强的负相关关系^[9]。尽管如此, 由于影响特定河流水质的因素较为复杂且受时间、空间和尺度等因素的综合作用^[10,11], 识别流域水质时空变化特

征仍很具挑战性。

我国正处于城市化快速发展阶段, 但工业废水与生活污水的处理率相比发达国家而言仍然较低, 加之非点源污染的影响, 近年来河流、湖泊水质持续下降^[12]。据 2008 年的中国水质调查, 45% 的主要河流水质呈中度至严重污染^[13]。“三河三湖”等流域污染的防治成为我国“十一五”期间政府工作的重点。

收稿日期: 2011-05-24; 修订日期: 2011-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901100; 40810069004); 福建省自然科学基金项目(2009J01222)

作者简介: 黄金良(1975~), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为土地利用/覆被变化的生态效应, E-mail: jluang@xmu.edu.cn

2011 年国家政府工作报告,进一步将“推进大江大河主要支流、湖泊和中小河流治理”列为“十二五”时期的主要目标和任务. 显然,识别流域水质特征及其影响因素,在我国具有紧迫性.

本研究选取亚热带中尺度的九龙江流域作为研究流域,作为漳州、龙岩、厦门三地市超过 500 万人的饮用水与工农业用水源,其区域的生态意义重大. 研究流域水质的时空分布特征及其影响因素,识别主要污染物与污染源对于九龙江流域水质的控制与管理具有重要的现实意义,但相关研究却鲜见报道. 基于此,本研究遴选 21 个小流域开展 2010 年不同水期(丰、平、枯)基流水质调查,旨在初步识别流域水质的时空分布特征及其影响因素,为九龙江流域水质监测、管理与控制提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

九龙江位于东经 116°46'55"~118°02'17",北纬 24°23'53"~25°53'38",是福建省第二大河. 流域面积 $1.47 \times 10^4 \text{ km}^2$,年平均径流量达 $8.23 \times 10^9 \text{ m}^3$

(浦南水文站). 流域由北溪、西溪和南溪三大支流构成. 九龙江流域 GDP 约占福建省的 25%. 流域受人类活动包括农业生产的影响很大^[14],流域下游的漳州平原是福建省农业集约化程度较高的区域. 九龙江流域林地、草地、耕地、建设用地、水体、裸地分别占 69.40%、3.45%、18.35%、4.67%、3.11%、1.03%^[11].

考虑到能全面反映九龙江流域的水质特征和采样的现实性,本研究选取 21 条小流域(多数为源头小流域)开展基流水质监测. 小流域的地理位置及基本概况见图 1 和表 1.

1.2 采样和化学分析

本研究对九龙江 21 条小流域进行了丰、平、枯 3 次基流水质采样,时间分别为 2010 年的 2 月 28 日(枯)、8 月 28 日(丰)及 11 月 28 日(平). 采样的前一周未有降雨. 用塑料采样桶或塑料瓶采集每个小流域出水口的表层水样,分别用塑料采样瓶装约 500 mL 和 100 mL 水样供营养盐和金属测定. 采样后营养盐水样立刻置于 4℃ 采样箱保存,而金属测定的水样则在采样后立即加 5% 的硝酸后常温下保

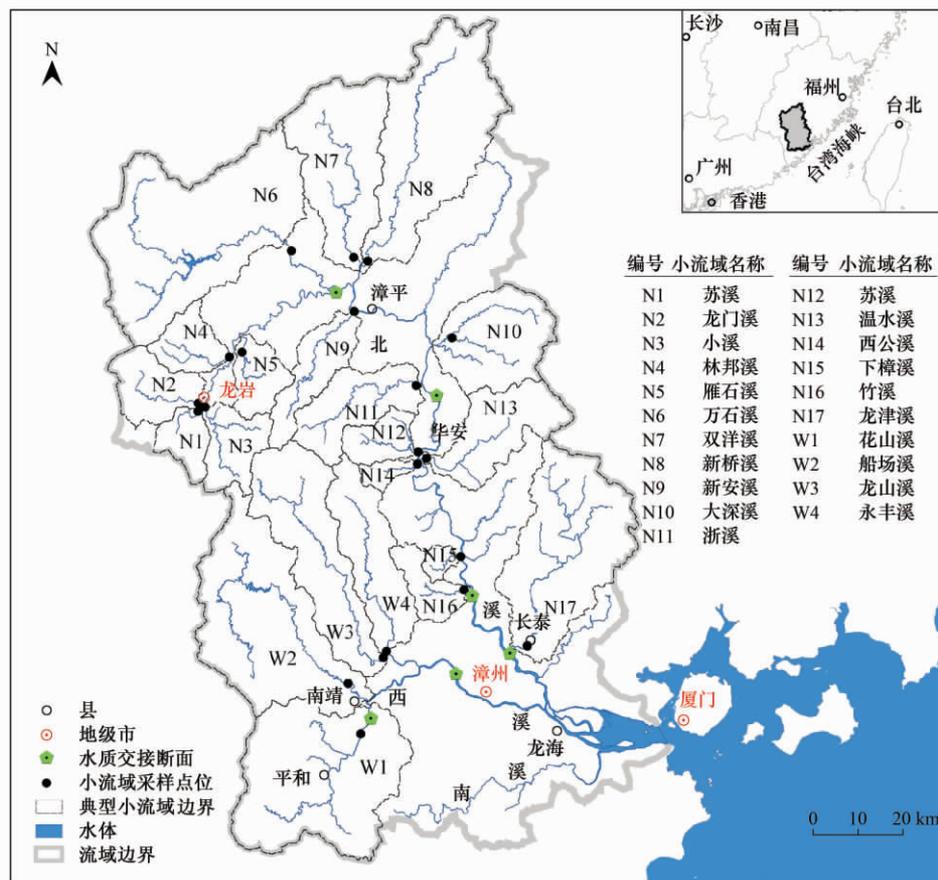


图 1 流域采样点

Fig. 1 Sampling sites in the study watershed

表 1 21 条小流域概况¹⁾

Table 1 Brief description of 21 sub-watersheds

名称	面积/km ²	人口/万	人口密度/人·km ⁻²	大中型企业分布	农业种植情况
龙门溪	236	7.06	299	3 个,分别为钢铁铸件、轴承、纤维板制造业	蔬菜、花卉、竹林等
苏溪	180	5.28	293	0	竹林、杨桃、蔬菜等
小溪	218	8.37	384	5 个,其中 4 个为水泥制造业,1 个为煤矿开采洗选业	果林和蔬菜等
浙溪	343	3.27	95	0	蔬菜、茶叶、竹林等
赤溪	145	0.65	45	0	蔬菜、茶叶、龙眼等
温水溪	385	3.61	94	0	蔬菜、茶叶等
西公溪	55	0.75	136	0	蔬菜、龙眼、茶叶等
大深溪	472	0.44	9	0	茶叶、竹林、水稻等
下樟溪	43	0.47	109	0	蔬菜、水稻、甘蔗等
竹溪	142	1.91	135	3 个,分别为啤酒、陶瓷、电子真空器件制造业	蔬菜、水稻、甘蔗、竹林等
龙津溪	900	13.7	152	17 个,主要为纸板、五金、食品日用品制造业和制糖业	蔬菜、香蕉、龙眼等
富溪	170	1.64	96	1 个兽药厂	竹林等
船场溪	1 031	14.2	138	1 个铁矿采选业	蔬菜、香蕉等
龙山溪	676	12	178	2 个,分别为纸板制造业和金属冶炼加工业	蔬菜、香蕉、龙眼、竹林等
永丰溪	437	6.36	146	0	蔬菜、巨尾桉、香蕉等
花山溪	1 050	21.1	201	0	蔬菜、香蕉、柚子等
双洋溪	657	2.99	46	0	水稻、果园、蔬菜、竹林等
新安溪	250	2.32	93	0	水稻、果园等
新桥溪	970	4.70	48	0	水稻、蔬菜、果园、竹林等
万安溪	1 274	3.22	25	0	森林为主
岩山溪	166	1.47	89	煤矿企业	森林为主

1) 人口数根据小流域与行政边界的关系进行概略计算;大中型企业和农业种植情况根据野外调查结合年鉴资料整理;各小流域均无污水处理厂

存. 24 h 内完成营养盐的测定. 监测的水质参数包括: 氨氮(NH_4^+-N)、活性磷酸盐(SRP)、高锰酸盐指数、硝态氮(NO_3^--N)、氯离子(Cl^-)、硫酸根(SO_4^{2-})、钾离子(K^+)、镁离子(Mg^{2+})及钠离子(Na^+). 用 ICP-MS 进行金属元素分析,其他指标均采用国标法进行分析.

1.3 GIS 分析

首先,利用 GIS 技术基于 DEM 进行 21 个小流域的划分. 支流子流域可真实反映各点水流的流向、汇入水域等特征,被广泛应用于水文水质问题的研究^[15,16]. 本研究利用已有的研究结果^[11],即基于 GIS 对流域 46 幅 1:50 000 原始 DEM 进行拼图、投影转换、切边和重采样之后,生成流域的 DEM,并利用 GIS 的水文模拟功能,界定了流域的边界,并根据流域水质省控断面等地理位置划分了 21 条小流域.

其次,基于 2007 年 Landsat TM 遥感影像数解译得到的土地利用/覆被类型图,利用 GIS 进一步提取 21 个典型小流域的土地利用信息. 采用非监督分类的方式将遥感影像分为农业用地、林地、草地、水体、城镇建设用地和裸地 6 类. 考虑到研究流域草地数量较少及在解译过程可能存在的误差,本研究将草地和林地归并成自然用地. 图 2 是 21 个小流域土地利用类型结构图.

由图 2 可知,多数小流域土地利用类型以自然

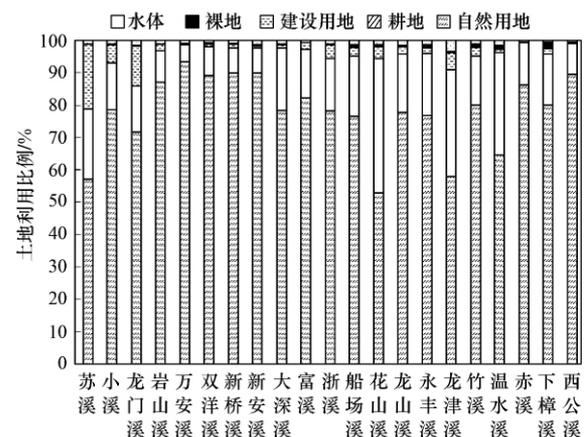


图 2 21 个小流域土地利用结构

Fig. 2 Land use structure and composition of 21 sub-watersheds

用地为主,约占 53% ~ 93%,其次为耕地,约占 5% ~ 42%,其中花山溪、龙津溪、温水溪和苏溪超过 25%,其余均小于 25%。除苏溪和小溪外,其余流域的建设用地的比例均小于 10%,水体和裸地所占的比重较小.

1.4 数据处理及多元统计分析

多元统计方法要求污染指标呈正态或接近正态分布^[17-20]. 进行主成分和聚类分析之前,需要检验污染物指标的分布特征,本研究采用 Kurtosis 和 Skewness 方法检验原始数据污染指标分布特征^[17,18].

主成分分析是将多个变量通过线性变换以选出

较少个数重要变量的一种多元统计分析方法,在水质研究中被广泛应用^[18]。当实验数据用几个主成分来对水质的物理、化学和生物特征进行解释,主成分分析显得更加有意义^[4]。在本研究中,采用 KMO 和球形 Bartlett 检验,分析数据进行主成分分析的适宜性,利用主成分分析识别各小流域主要的污染物。

聚类分析是一种探索的模式识别技术,其中层次聚类分析(HCA)方法的应用最为广泛,根据观测对象之间的相似程度,逐次聚合,达到“物以类聚”的目的^[21]。本研究中采用离差平方和法(ward's method)和平方欧氏距离法(squared euclidean distance)^[4, 14, 22]分析各小流域水质特征的空间相似性和差异性。

一元线性回归是处理一个随机变量 Y 与一个普通变量 X 之间的线性回归关系的方法^[23]。本研究

中采用回归分析方法,分析各小流域的各主成分的因子得分与土地利用类型百分比的相关性,识别影响子流域水质的潜在污染源。

本研究采用的数据分析工具为 Microsoft Excel 2007、SPSS 16.0 和 Statistics 7.0。

2 结果与分析

数据正态分布检验结果表明 Kurtosis 和 Skewness 值分别为 0.220 ~ 3.254 和 0.120 ~ 12.034,虽然还不全是正态分布,但是除个别参数外基本接近正态分布,可用于单变量统计分析、聚类分析与主成分分析等。

2.1 小流域水质季节性特征分析

九龙江 21 个小流域 2010 年平水期、丰水期、枯水期的平均水质状况如图 3 所示。

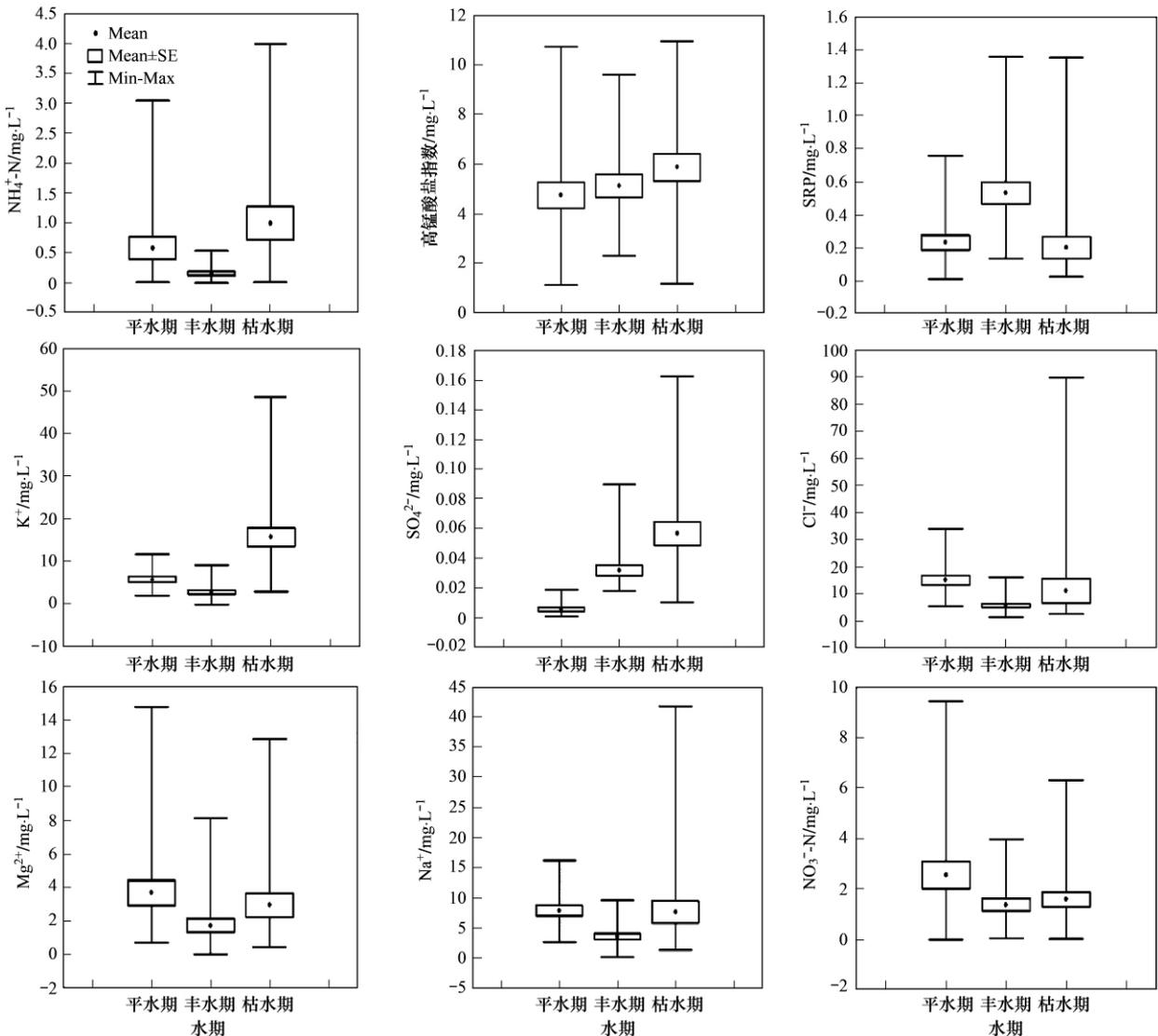


图 3 小流域水质指标时空分布

Fig. 3 Temporal distribution of water quality paramters in 21 sub-watershes

从图 3 可知, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 K^+ 的平均浓度 枯水期 > 平水期 > 丰水期, 最大值出现在枯水期, 最小值出现在丰水期. SRP 的平均浓度, 丰水期 > 平水期 > 枯水期, 最大值和最小值都出现在平水期. 高锰酸盐指数、 SO_4^{2-} 的平均浓度, 枯水期 > 丰水期 > 平水期. $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 Cl^- 、 Na^+ 及 Mg^{2+} 平均浓度均为平水期 > 枯水期 > 丰水期. 监测的 9 个指标中 4 个指标(即: $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、高锰酸盐指数、 SO_4^{2-} 、 K^+) 的平均浓度最大值出现在枯水期. 6 个指标的浓度最大值出现在枯水期, 分别是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、高锰酸盐指数、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 4 个指标平均值最大值出现在平水期, 分别是 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} , 但只有 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 Mg^{2+} 、SRP 的最大浓度值出现在平水期, SRP 的平均浓度最大值出现在丰水期. 总体而言 枯水期水质污染最严重, 平水期次之, 丰水期流域水质最好.

2.2 小流域主要污染物识别

Bartlett 球度检验获得 p 为 0.00 ($p < 0.05$), 表明可以用主成分方法选择少量的因子对所有参数进行解释^[23, 24]. 选用的 2 个公因子来进行分析, 得到累积方差百分比(累积贡献率)为 64.86%, 这 2 个因子可以解释流域大部分的水质变化. 表 2 和表 3 分别为因子负荷矩阵和因子得分.

由表 2 可知, 第一主成分对原始变量解释贡献了总方差的 43.58%, 负荷值最高的几个指标分别为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 K^+ 、SRP、高锰酸盐指数、 Cl^- , 分别为 0.87、0.82、0.81、0.79 及 0.73(本研究中以绝对值 > 0.7 判定负荷值较高^[25]), 说明这 5 个水质参数可以解释流域将近 50% 的水质变化的信息. 第二主成分的贡献率为 21.28%, 其负荷值最高的参数是 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 其值为 0.91.

表 3 给出了 21 个小流域 2 个主成分的综合得分, 表征 21 个小流域分别受 2 个潜在污染因子的影响程度. 由表 3 可知, 苏溪、小溪、龙门溪、岩山溪、龙

表 2 主成分负荷矩阵

Table 2 Principal component loading matrix

水质参数	主成分	
	1	2
SRP	0.87	0.06
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.82	0.20
K^+	0.81	0.52
高锰酸盐指数	0.79	-0.01
Cl^-	0.73	0.58
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	-0.04	0.91
Na^+	0.60	0.67
SO_4^{2-}	0.06	0.01
Mg^{2+}	0.57	-0.01
特征根	3.92	1.92
方差百分比/%	43.58	21.28
累积方差百分比/%	43.58	64.86

表 3 21 条小流域的因子得分表

Table 3 Factor scores for 21 sub-watersheds

小流域	因子 1	因子 2	小流域	因子 1	因子 2
苏溪	1.09	0.71	船场溪	-0.82	0.61
小溪	3.04	0.64	花山溪	-0.61	3.25
龙门溪	1.66	-0.10	龙山溪	-0.41	0.98
岩山溪	0.56	-1.32	永丰溪	-0.32	0.05
万安溪	-0.05	-1.12	龙津溪	0.98	-0.11
双洋溪	-0.57	-0.73	竹溪	0.02	0.05
新桥溪	-0.69	-0.74	温水溪	-0.27	-0.40
新安溪	-0.81	1.07	赤溪	-1.01	-0.19
大深溪	-0.95	-0.42	下樟溪	0.11	-0.15
富溪	0.22	-0.98	西公溪	-0.67	-0.57
浙溪	-0.49	-0.52			

津溪受因子 1 的影响最大, 其中小溪的受影响程度最大, 花山溪受因子 2 影响最大, 因子得分也远大于其它小流域.

2.3 小流域潜在污染源识别

根据流域的主要污染物及其特征, 利用一元回归分析方法, 探讨污染物与土地利用类型、人口密度的关系, 以识别各污染物的可能来源及流域的主要污染源. 表 4 为污染物与土地利用类型百分比、人口密度关系分析结果.

表 4 污染指标与土地利用类型比例、人口密度的相关系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficients between individual land use pattern and the major water quality parameters

水质参数	耕地	建设用地	自然用地	裸地	水体	人口密度	主成分 1	主成分 2
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.05	0.78	-0.35	-0.28	0.13	0.80	0.82	0.20
SRP	0.12	0.53	-0.34	0.03	0.41	0.76	0.87	0.06
高锰酸钾指数	0.19	0.50	-0.36	-0.10	0.24	0.56	0.79	-0.01
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.68	0.33	-0.69	0.13	0.24	0.41	-0.04	0.91
SO_4^{2-}	-0.12	0.16	0.04	-0.16	0.02	0.08	0.06	0.01
Cl^-	0.26	0.43	-0.39	-0.04	0.24	0.84	0.73	0.58
Na^+	0.36	0.37	-0.46	0.15	0.32	0.78	0.60	0.67
Mg^{2+}	-0.11	0.40	-0.06	-0.31	0.02	0.41	0.57	-0.01
K^+	0.29	0.67	-0.51	-0.09	0.24	0.92	0.81	0.52
主成分 1	0.05	0.59	-0.29	-0.11	0.26	0.79	—	—
主成分 2	0.60	0.240	-0.59	0.16	0.21	0.48	—	—

1) 表中黑体字表示 $\alpha < 0.05$, 有显著相关性

由表 4 可知,耕地比例与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度有显著的正相关性,与 Na^+ 有一般正相关性.建设用地比例与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、SRP、高锰酸盐指数、 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 浓度有显著的正相关性.自然用地比例与大部分的指标都呈负相关关系,与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 呈显著的负相关.裸地比例与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 Mg^{2+} 呈弱负相关性.水体比例与 SRP 浓度有显著的正相关性.人口密度与大部分指标(除了 SO_4^{2-})都呈显著的正相关.

此外,主成分 1 与建设用地比例有显著的正相关关系,主成分 2 与耕地比例有显著正相关性,并与自然用地比例有显著的负相关关系.由此表明,主成分 1 主要表征生活污水、工业排放废水及畜禽养殖业等污染因子对水体的影响,主成分 2 则表征农业肥料施用和植物生物过程产生的污染物对水体的影响.

2.4 小流域污染类型空间差异性和相似性识别

通过对流域的主要污染物及污染源识别,可知小流域的主要污染源可以用主成分 1、主成分 2 进行解释.本研究进一步利用 2 个主成分中高负荷的水质参数的平均浓度来分析 21 条小流域污染类型的空间差异性和相似性,即:分别采用主成分 1 的高负荷指标($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、高锰酸盐指数、SRP、 Cl^- 、 K^+)、主成分 2 高负荷指标($\text{NO}_3^- - \text{N}$)进行分析.

根据 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、高锰酸盐指数、SRP、 Cl^- 、 K^+ 的平均浓度,分析小流域受主成分 1 影响的空间相似性和差异性.结果见图 4.

如图 4 所示,将 21 条小流域分成三类,第一类包括苏溪、小溪、龙门溪;第二类包括花山溪、龙山溪、岩山溪和龙津溪;第三类包括双洋溪、大深溪、浙溪、船场溪、赤溪、西公溪、新安溪、富溪、温水溪、下樟溪、竹溪、新桥溪、永丰溪、万安溪.

表 5 给出了基于主成分 1 分类的三类小流域的主要污染物平均浓度与平均因子得分.

由表 5 可知,第一类流域受主成分 1 的影响最

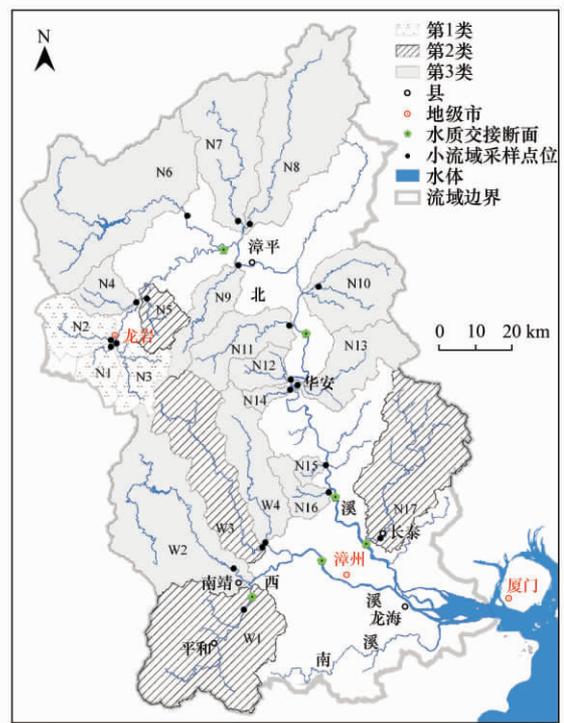
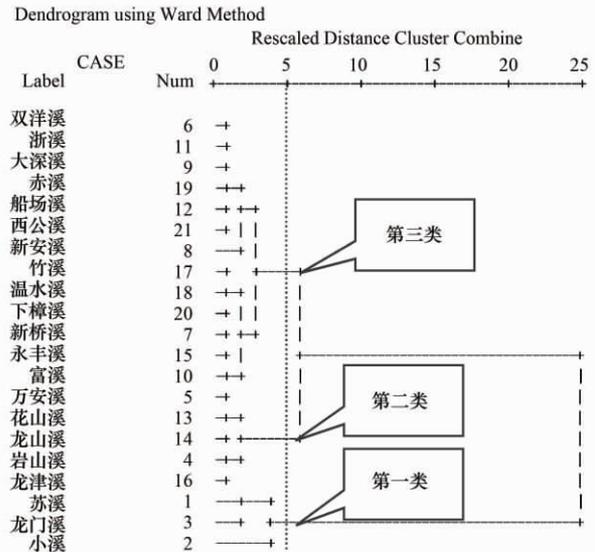


图 4 基于主成分 1 的 21 个小流域聚类结果

Fig. 4 Spatial cluster analysis of 21 sub-watersheds based on PCA 1

表 5 三类流域的污染物平均浓度及平均因子得分

Table 5 Mean concentrations of pollutants and mean factors score of three types of watershed

类别	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SRP / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	高锰酸盐指数 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Cl^- / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	K^+ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	因子得分
第一类	2.14 ± 0.26	0.66 ± 0.24	7.57 ± 1.71	22.46 ± 13.53	16.85 ± 5.89	1.93
第二类	0.73 ± 0.51	0.37 ± 0.16	6.26 ± 0.79	13.66 ± 4.70	9.98 ± 2.35	0.13
第三类	0.21 ± 0.52	0.24 ± 0.13	4.60 ± 1.45	6.80 ± 4.71	5.89 ± 3.15	-0.43

严重,其各污染物的浓度都大于第二类和第三类的浓度,如第一类流域 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均浓度为 $2.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超过五类水质的标准[参考的标准为《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)],而第二类流域

的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度为 $0.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,符合三类水质的要求,第三类流域的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度值为 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 符合二类水质的要求.

第一类小流域的小溪、苏溪、龙门溪位于新罗市

区是 21 个小流域中人口密度最大的 3 条流域(图 4 和表 1), 建设用地所占比例均大于 5% (见图 2), 且这 3 条流域的周围及上游分布着多家养猪场^[26]. 根据污染源分析可知, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、高锰酸盐指数、SRP、 Cl^- 及 K^+ 的浓度与生活污水、畜禽养殖业、工业活动等密切相关, 第一类小流域是流域内人类干扰最剧烈的区域, 因此该类小流域受主成分 1 的污染最为严重, 这与实际情况相符.

第二类小流域的岩山溪、龙山溪、龙津溪虽然人口密度不及苏溪、小溪、龙门溪流域, 但除了岩山溪外, 龙山溪、龙津溪和花山溪的人口密度都大于 150 人/ km^2 . 岩山溪虽然人口密度不大, 但据现场调查了解到岩山溪周围有大量煤矿、养猪场及松树提取松香作坊, 因此第二类流域也属于人类活动相对较强的区域, 所以 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、活性磷、高锰酸盐指数等指标浓度值也相对较高, 而第三类流域的受人类活动的影响较小, 其人口密度均小于 150 人/ km^2 , 建设用地比例相对较低, 其受主成分 1 影响较小.

基于主成分 2 的高负荷水质指标 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的浓度, 进一步分析 21 条流域受主成分 2 影响的空间分布的相似性和差异性, 结果如图 5 所示.

由图 5 可见, 21 条流域可分成三类: 第一类为花山溪; 第二类包括苏溪、龙门溪、新安溪、船场溪、龙山溪、龙津溪、下樟溪; 第三类包括万安溪、岩山溪、双洋溪、新桥溪、大深溪、富溪、浙溪、温水溪、赤溪、西公溪、竹溪、小溪、永丰溪.

表 6 给出了基于主成分 2 分类的三类小流域的污染物平均浓度与平均因子得分.

表 6 三类流域的污染物平均浓度和平均因子得分
Table 6 Mean concentrations of pollutants and mean factors score of three types of watershed

类别	$\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	因子得分
第一类	7.88 ± 0.000	3.25
第二类	2.53 ± 1.95	0.43
第三类	0.92 ± 0.41	-0.48

由表 6 可知, 第一类流域的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度最大, 为 $7.88 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其第二主成分的因子得分最高 (3.25). 花山溪的耕地面积占其流域总面积的 41.59%, 是研究流域中耕地面积比例最大的 (见图 2). 由表 4 可知, 耕地面积比例与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度呈显著的正相关, 农业活动如化肥施用是 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的主要来源. 因此, 花山溪水质受主成分 2 的影响最严重, 第二类流域受主成分 2 的影响次之, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的平均浓度为 $2.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 因子得分为 0.43, 第三类流域的

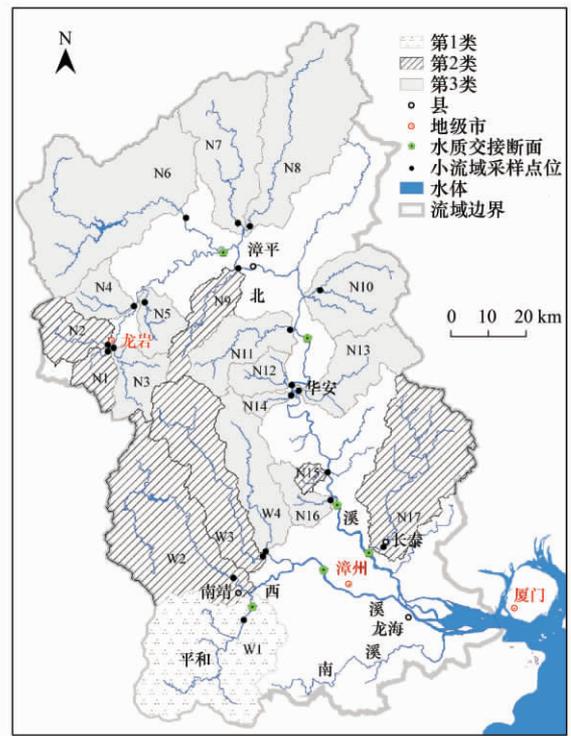
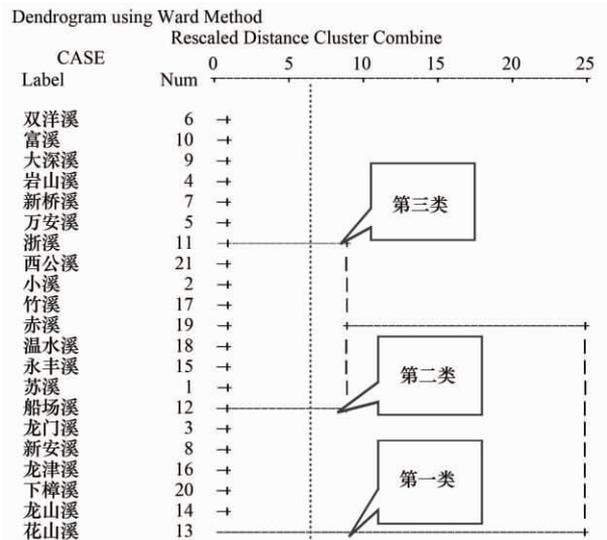


图 5 基于主成分 2 的 21 个小流域聚类结果图

Fig. 5 Spatial cluster analysis of 21 sub-watersheds based on PCA 2

$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度最低且第二主成分的因子得分最低, 其受主成分 2 的影响最小.

3 讨论

3.1 流域水质时间变异性

污染物的季节分布特征分析结果显示 (图 3), $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、高锰酸盐指数的最高浓度分别出现在枯水期 (11 月) 和平水期 (2 月), 二者丰水期 (8 月) 的浓度最小. Shen^[4]、Xu^[24] 等有类似的观测结果: Shen 等^[4] 发现城市流域的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度最高值出现在枯

水期,高锰酸盐指数污染最严重的出现在平水期; Xu 等^[24] 研究发现 NH_4^+-N 的最高浓度出现在春季和冬季,最低浓度出现在夏季和秋季,他们认为基流流量越大,水质中 NH_4^+-N 、高锰酸盐指数的浓度越小,水质越好。本研究发现 NO_3^--N 的最高浓度出现在平水期(2月) 枯水期(11月) 次之,平水期的农业活动相对强烈, Xu 等^[24] 的研究亦表明平水期(春季) 和枯水期(冬季) 的 NO_3^--N 浓度高,认为 NO_3^--N 浓度主要是受农业活动的影响。SRP 最大浓度出现在丰水期,从 SRP 与土地利用面积比例的相关性分析可知, SRP 主要来自建设用地生活污水以及水体释放的磷酸盐。May 等^[27] 的研究同样发现,水体中磷酸盐污染最大也是出现在丰水期,其研究认为丰水期流域流量增加,而磷酸盐会随径流流入水体,并且水体中的磷酸盐会随流量的增加而被释放。总而言之,不同水期污染物的浓度大小与某些研究一致,但也不尽相同,可能与不同流域气候、地形地貌、土地利用方式等因素有关。

3.2 流域水质空间差异性

流域污染类型空间差异性和相似性识别分析结果显示,建设用地比例与人口密度较大的小流域如小溪、苏溪、龙门溪, NH_4^+-N 、SRP、高锰酸盐指数等水质指标的浓度则较高。Miserendino 等^[28] 研究亦表明,城市流域的 NH_4^+-N 、SRP 浓度比其他类型流域高。在耕地面积比例最大的小流域 NO_3^--N 浓度最高,这与其他的研究结论类似^[29~32]。 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 来源广泛,如生活污水、工业废水、自然界的矿物质,二者还是天然水体化学特征的 2 个重要指标,被广泛采用来分析水质矿化度^[33~35]。本研究中 Mg^{2+} 浓度与建设用地有显著的相关性, Bahar 等^[3] 的研究也得到类似的结论。 SO_4^{2-} 与土地利用类型均无显著相关性,而 Bahar 等^[3] 的研究发现硫酸根与低密度建设用地和耕地有显著相关性。陈婉卿^[35] 指出,九龙江流域水质中硫酸根浓度可能主要受地质地貌条件、岩石成分等自然因素的影响。

3.3 流域水质影响因素

综合水质指标与土地利用类型面积比例、人口密度的相关分析结果(表 4),水质参数 NH_4^+-N 、SRP、高锰酸盐指数的高浓度值可能来源于流域生活污水、畜禽养殖业污水及工业废水、污水处理厂的水体排放。另外,多种水质指标的浓度与建设用地比例、人口密度均存在显著的正相关性,可知人口密度、建设用地比例是影响流域水质的主要因素。本研

究发现,建设用地与 NH_4^+-N 、高锰酸盐指数有显著的相关性,这与九龙江全流域和缓冲区尺度的研究结果相一致^[11,36]。其他的研究者亦发现建设用地是影响水质的主要土地利用类型^[7,9,37]。本研究发现, Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 K^+ 与建设用地有显著的相关性,而 Bahar 等^[3] 研究则发现 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 分别与工业用地、高密度居住地比例有一般的相关性, K^+ 与低密度居住地比例有显著相关性,因此,可以认为水质指标 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 K^+ 主要受人类活动的影响。耕地比例与 NO_3^--N 有显著的正相关性,这与文献^[3,29~32]的研究一致,表明 NO_3^--N 的主要来源是农业的肥料施用等。以林地为主的自然用地(包括林地和草地)比例与大多数指标浓度有显著的负相关性,与其他的研究结论一致,即认为林地是水体潜在的污染物的“汇”^[1,7,8,38],说明林地和草地有利于保持和减少水质的污染。显然,建设用地比例、耕地比例的扩大会加剧水质恶化,而增加自然用地比例有助于保持水质和减少污染。

3.4 流域水环境管理启示

本研究通过对九龙江 21 个小流域开展不同水期基流水质的监测与分析,初步识别出流域水质时空特征及其影响因素,并进一步基于主要污染源类型的差异,对研究的小流域进行了空间上的分类。研究结果有利于针对特定污染类型的小流域开展水质的控制和管理。流域建设用地比例与表征水质退化的指标呈较显著的正相关,一定程度上可反映该区域污水处理存在的问题^[39]。本研究中城市化水平较高的小流域如苏溪、小溪和龙门溪在工业废水、生活污水等点源的控制上仍需加大力量,如加强污水处理厂的建设,提高污水处理率。耕地面积比例较高的小流域如花山溪具有明显高于其它小流域的 NO_3^--N 浓度,非点源污染的控制包括化肥的施用,在类似的小流域也应得到足够的重视。

4 结论

(1) 小流域水质枯水期的污染最严重,平水期次之,丰水期水质状况较好。

(2) 生活污水和工业废水对水质的影响最大,农业非点源污染次之,主要污染物有 NH_4^+-N 、SRP、高锰酸盐指数、 Cl^- 、 K^+ 和 NO_3^--N 。

(3) 建设用地比例、人口密度与大部分指标有显著正相关,表明建设用地比例、人口密度是影响水质的最重要指标,耕地比例与 NO_3^--N 浓度有显著正相关,说明耕地比例显著影响水质的 NO_3^--N 浓度,自

然用地比例与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 等呈显著负相关,表明自然用地对水质有保持和改善作用。

(4) 小流域污染类型空间差异性和相似性识别结果表明,苏溪、小溪、龙门溪受表征生活污水、工业废水主成分的影响最大,花山溪受表征农业活动污染的主成分的影响最大。针对特定污染类型的小流域在管理上建议提高污水处理率,并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] Novotny V. Water quality: diffuse pollution and watershed management [M]. (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [2] Fedorko E J, Pontius R G Jr, Aldrich S P, et al. Spatial distribution of land type in regression models of pollutant loading [J]. *Journal of Spatial Hydrology*, 2005, **5**(2): 60-80.
- [3] 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.
- [4] Shen Y H, Lü 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.
- [5] Chang H J. Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea [J]. *Water Research*, 2008, **42**(13): 3285-3304.
- [6] Wang X L, Lu Y L, Han J Y, et al. Identification of anthropogenic influences on water quality of rivers in Taihu watershed [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(4): 475-481.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Galbraith L M, Burns C W. Linking land-use, water body type and water quality in southern New Zealand [J]. *Landscape Ecology*, 2007, **22**(2): 231-241.
- [10] Uuemaa E, Roosaare J, Mander ü. Landscape metrics as indicators of river water quality at catchment scale [J]. *Nordic Hydrology*, 2007, **38**(2): 125-138.
- [11] 黄金良,李青生,洪华生,等. 九龙江流域土地利用/景观格局-水质的初步关联分析 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 64-72.
- [12] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world [J]. *Nature*, 2005, **435**(7046): 1179-1186.
- [13] Vorosmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity [J]. *Nature*, 2010, **467**(7315): 555-561.
- [14] Huang J, Pontius R G Jr, Li Q, et al. Use of intensity analysis to link patterns with processes of land change from 1986 to 2007 in a coastal watershed of southeast China [J]. *Applied Geography*, 2012, **34**: 371-384.
- [15] 孙芹芹,黄金良,洪华生,等. 基于流域尺度的农业用地景观-水质关联分析 [J]. *农业工程学报*, 2011, **27**(4): 54-59.
- [16] 万荣荣,杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨 [J]. *地理科学进展*, 2005, **24**(3): 25-23.
- [17] 周丰,郭怀成,黄凯,等. 基于多元统计方法的河流水质空间分析 [J]. *水科学进展*, 2007, **18**(4): 544-551.
- [18] Huang J L, Ho M H, Du P F. Assessment of temporal and spatial variation of coastal water quality and source identification along Macau peninsula [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, **25**(3): 353-361.
- [19] Johnson R A, Wichern D W. Applied multivariate statistical analysis [M]. (5th ed.). New Jersey: Prentice Hall, 1992.
- [20] Lattin J M, Carroll D, Green P E. Analyzing multivariate data [M]. New York: Duxbury Press, 2003.
- [21] 张旋,王启山,于淼,等. 多元统计分析技术在水质监测中的应用 [J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(11): 120-126.
- [22] Zhou F, Huang G H, Guo H C, et al. Spatio-temporal patterns and source apportionment of coastal water pollution in eastern Hong Kong [J]. *Water Research*, 2007, **41**(15): 3429-3439.
- [23] 邵崇斌. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2003.
- [24] Xu H, Yang L Z, Zhao G M, et al. Anthropogenic impact on surface water quality in Taihu Lake region, China [J]. *Pedosphere*, 2009, **19**(6): 765-778.
- [25] Simeonov V, Stratis J A, Samara C, et al. Assessment of the surface water quality in Northern Greece [J]. *Water Research*, 2003, **37**(17): 4119-4124.
- [26] 洪华生,黄金良,曹文志. 九龙江流域农业非点源污染机理与控制研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [27] May L, House W A, Bowes M, et al. Seasonal export of phosphorus from a lowland catchment: upper River Cherwell in Oxfordshire, England [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **269**(1-3): 117-130.
- [28] Miserendino M L, Casaux R, Archangelsky M, 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.
- [29] Smart M M, Jones J R, Sebaugh J L. Stream-watershed relations in the Missouri Ozark Plateau Province [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1985, **14**: 77-82.
- [30] Neill M. Nitrate concentrations in river waters in the south-east of Ireland and their relationship with agricultural practice [J]. *Water Research*, 1989, **23**(11): 1339-1355.
- [31] Sauer T J, Alexander R B, Brahana J V, et al. The importance and role of watersheds in the transport of nitrogen [A]. In: Follett R F, Hatfield J L, (eds.). *Nitrogen in the environment: sources, problems and management* [C]. Elsevier Amsterdam, 2001. 147-181.
- [32] Woli K P, Nagumo T, Kuramochi K, et al. Evaluating river water quality through land use analysis and N budget approaches

- in livestock farming areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **329**(1-3): 61-74.
- [33] 陈静生, 何大伟. 珠江水系河水主要离子化学特征及成因 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1999, **35**(6): 786-793.
- [34] 张立成, 董文江, 王李平. 长江水系河水的地球化学特征 [J]. *地理学报*, 1992, **47**(3): 220-232.
- [35] 陈婉卿. 福建省河流水化学特征分析 [J]. *水文*, 2003, **23**(5): 45-47.
- [36] Huang J L, Li Q S, Pointius R G, *et al.* Detecting the dynamic linkage of landscape characteristics and water quality in a subtropical coastal watershed, southeast China [J]. *Environmental Management*, 2011, DOI: 10.1007/s00267-011-9793-2.
- [37] 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.
- [38] Osborne L L, Kovacic D A. Riparian vegetated buffer strips in water-quality restoration and stream management [J]. *Freshwater Biology*, 1993, **29**(2): 243-258.
- [39] 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.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjcx.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论. 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达. 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框. 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), μm (米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法. 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.

图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.

学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjcx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjcx.ac.cn