

# 香溪河水质空间分布特性研究<sup>\*</sup>

叶 麟 黎道丰 唐 涛 渠晓东 蔡庆华<sup>\*\*</sup>

(中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

**【摘要】** 运用聚类分析和主成分分析对香溪河 19 个样点水质的理化特性进行研究. 聚类分析表明, 根据各采样点之间水质组分的相似性可将香溪河大致分为 3 个河段, 分别属于不同的亚流域, 各亚流域间的特征差异显著. 对各河段水质的主成分分析表明, 上述 3 河段的主要水质信息差异很大, 第 1 河段(在河流上游)水质的信息主要体现为总碱度和硬度, 第 2 河段(河流中游)主要体现为可溶性磷酸盐、总磷和氯离子, 第 3 河段(河流下游)则为 pH、亚硝酸盐氮、总氮和 COD. 文中结合香溪河流域地理环境背景, 探讨了香溪河水质空间分布格局的成因, 为分析流域水质状况及成因提供了一条简单有效的途径.

**关键词** 聚类分析 主成分分析 河流水质 香溪河

**文章编号** 1001-9332(2003)11-1959-04 **中图分类号** Q178.51<sup>+</sup>1 **文献标识码** A

**Spatial distribution of water quality in Xiangxi River, China.** YE Lin, LI Daofeng, TANG Tao, QU Xiaodong and CAI Qinghua (State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(11):1959~1962.

Cluster analysis and principal component analysis were used to analyze the physical and chemical characteristics of water samples collected from 19 sampling sites along Xiangxi River. The result of cluster analysis showed that Xiangxi River could be divided into three reaches, which belonged to different sub-basins. The principle component analysis on each reach showed that the main information of water quality was different from each other. In the upper reach, the main information of river water quality was hardness and total alkalinity; in the middle reach, the main information was dissolved phosphorus, total phosphorus and  $\text{Cl}^-$ , in the lower reach, the main information was pH,  $\text{NO}_2^-$ -N, total nitrogen and COD. Furthermore, considering the geographical and environmental backgrounds of the Xiangxi River basin, the reason that caused the different distribution pattern of water quality in Xiangxi River was discussed. Hence, a simple approach to analyze the spatial distribution of water quality was provided.

**Key words** Cluster analysis, Principal component analysis, River water quality, Xiangxi River.

## 1 引言

水质是河流生态系统的重要指标, 河流水质的好坏对于流域内人民的生活用水、农业灌溉、工业用水等有着重要的意义. 由于受复杂的地质、气候等自然条件<sup>[5]</sup>以及人类生产、生活等活动<sup>[14]</sup>的影响, 河流水质是由多因素、多层次相互组合和影响的结果, 在很大程度上也反映了流域内的基本特征. 当前, 有关河流水质的研究主要集中在河道中污染物的扩散<sup>[12]</sup>、主要污染物的主成分识别<sup>[22]</sup>以及河流水质的评价<sup>[11]</sup>等等, 而对于水质的空间分布特性及其与流域特征之间关系的研究几乎未见报道. 本研究尝试综合运用聚类分析和主成分分析的方法探讨河流水质空间分布的变化规律, 并结合已有的流域环境背景资料, 分析香溪河水质空间分布规律及产生原因, 为水资源的科学管理提供合理依据.

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 研究地区概况

香溪河发源于神农架林区, 流经神农架林区的木鱼、红

花和兴山县的湘坪、南阳、高阳、峡口, 最终在秭归县香溪镇注入长江. 香溪河是三峡库区坝首第一大支流, 其干流长 94km, 流域总面积 3099 km<sup>2</sup>. 香溪河流域属亚热带大陆性季风气候, 雨量充足; 受山峦起伏叠嶂的影响, 气候的垂直变化明显, 小气候特征十分显著<sup>[7]</sup>. 香溪河流域内自然地质条件复杂多变, 土壤类型繁多<sup>[9]</sup>, 植被垂直分布差异显著<sup>[8]</sup>.

近年来, 香溪河流域地方经济发展迅速, 沿河两岸分布的乡镇企业较多. 全年工业废水排放量达  $196.8 \times 10^4$  t, 所含废物为: 挥发酚 58.5 t、石油类 115.5 t、氯化物 10.2 t、有机耗氧量 83.67 t, 污染物排放主要集中在兴山县境内以高阳镇为中心的香溪河沿岸<sup>[7]</sup>. 随着三峡大坝建成蓄水后, 河床水位抬高, 河水流速减缓, 极易在回水区形成污染带, 致使香溪河环境状况更趋严峻.

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412310)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-111)、国家自然科学基金项目(30070153, 39670150)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-12-IV-21)、中国科学院水生生物研究所领域前沿项目(K220208)和湖北省涝渍灾害与湿地农业重点实验室基金资助项目(HNKFJ2002A02).

<sup>\*\*</sup> 通讯联系人. E-mail: qhcai@ihb.ac.cn  
2003-01-07 收稿, 2003-05-27 接受.

## 2.2 水样采集分析

本次野外采样时间为 2001 年 7 月 9~11 日, 天气晴朗。为对香溪河水质的分布有一个比较清晰全面的了解, 并考虑到实际操作的可行性, 沿香溪河干流每隔 4km 左右设置一个采样点(图 1)。水样由 1L 洁净的聚乙烯瓶在水下 20cm 左右收集, 在水样收集过程中考虑到下水采样所带来的河水搅动的影响, 一般在下河后稍等片刻, 并于采样者的上游取样。所采集的样品于当天带回野外实验室分析。水质分析的指标有(括弧内为缩写): pH 值(pH)、电导率(Cond)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、硝酸盐氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、总氮(TN)、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、总磷(TP)、总碱度(TA)、总硬度(Hardness)、钙离子(Ca<sup>2+</sup>)、二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)、氯离子(Cl<sup>-</sup>)、有机物耗氧量(COD)。其中 pH 值由 HACH 公司 pH Meter-Sension 1、电导率由 HACH 公司 Conductivity-Sension 5 测定、二氧化硅测定采用采用硅钼黄光度法<sup>[6]</sup>, 其它指标的测定均参照文献<sup>[18]</sup>。

## 2.3 数据分析

由于所有监测项目的单位并不完全相同, 为了消除量纲的影响, 对原始数据进行标准化, 公式如下:

$$x_{ij} = (s_{ij} - \bar{s}_j) / \sqrt{\sum (s_{ij} - \bar{s}_j)^2 / (n-1)}$$

其中,  $x_{ij}$  为变量  $s$  标准化之后的第  $i$  个采样点第  $j$  个指标的数值,  $s_{ij}$  为原始数据的值,  $\bar{s}_j$  为第  $j$  个指标的均值。首先通过聚类分析, 将相似的样本归并成类<sup>[1,2]</sup>。聚类分析的方法选择了目前应用广泛的等级聚类法, 以欧氏距离度量样本之间的距离<sup>[4]</sup>, 运用 Ward 算法生成具有层次结构的聚类树<sup>[15]</sup>。应用主成分分析提取上述分类中各类水质的影响因素。主成分分析是在不损失原有信息(即方差)的前提下, 将原来多个彼此相关的指标转化为新的少数几个彼此独立的综合指标的一种多元统计的分析方法<sup>[1]</sup>, 其原理具体原理参见文献<sup>[17]</sup>。上述数据分析的方法均在 Matlab 6.5 上实现。

## 2.4 GIS 空间分析

应用 ArcView GIS 3.2a 加载 Spatial Analysis 2.0 和 SWAT 扩展模块, 根据香溪河流域 DEM 图, 对香溪河流域的亚流域边界进行计算(图 1)。

## 3 结果与分析

### 3.1 各样点水质的相似性

基于水质指标的香溪河采样点聚类结果见图 2。根据各采样点水质的相似性可将所有采样点分成 3 组, 其中 1 组包括样点 1~8, 2 组包括样点 9~14, 3 组包括样点 15~19。从采样点分布示意图上(图 1)可以看出, 各组采样点基本上落在各自不同的亚流域内。其中, 1 组的 8 个样点基本上都属于神农架林区, 位于香溪河上游, 流域内植被覆盖率高, 人口密度低, 河流水质受人为影响较小; 2 组的 6 个采样点在神农架林区至高阳镇(兴山老县城)之间, 位于河流中游, 河岸带地势较平坦, 沿河岸村落分布的密

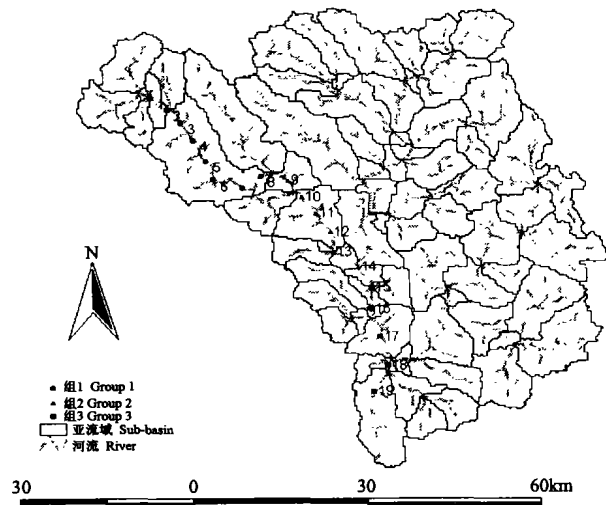


图 1 香溪河采样点分布及亚流域示意图

Fig.1 Sketch map of sampling sites and sub-basin in the watershed of Xiangxi River.

度增大, 土地开垦、利用程度较高, 人类活动频繁; 3 组的 5 个采样点在高阳镇以下, 位于河流下游, 人口密集, 同时, 高阳镇附近集中了香溪河流域中的大部分工矿企业, 生活污水和工业废水排放对河流水质的污染严重。

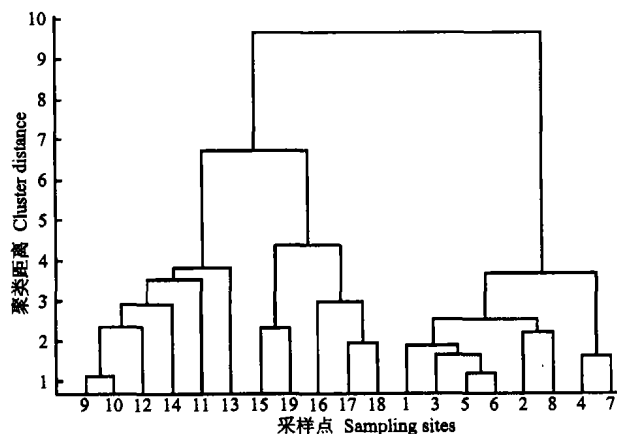


图 2 基于水质指标的香溪河采样点聚类结果

Fig.2 Cluster dendrogram of sampling sites based on water quality indexes of Xiangxi River.

### 3.2 各组采样点水质指标特征

为了进一步确定是哪些水质指标差异产生了上述聚类结果的差异, 分别对每组水质指标进行主成分分析(表 1), 结果表明, 1 组前 3 个主成分分量, 2、3 组前 2 个主成分分量的累计贡献率均超过 80.0% (1 组: 81.56%, 2 组: 81.30%, 组 3: 80.77%), 基本包含了 14 项水质指标的信息。各组主成分分析的结果表明, 不同河段之间影响河流水质的主要因素差异很大。

表 1 各组采样点水质组分的主成分分析结果

Table 1 Principal component analysis result of the water quality indexes of each sampling group

变量 Variables	1 组 Group 1			2 组 Group 2		3 组 Group 3	
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC1	PC2
pH	-0.118	0.245	-0.063	0.030	0.245	-0.574	0.234
电导率 Cond.	-0.119	0.357	-0.209	-0.124	-0.014	0.052	0.074
氨氮 $\text{NH}_3\text{-N}$	-0.181	-0.049	0.135	0.035	0.180	0.129	0.143
亚硝酸盐氮 $\text{NO}_2\text{-N}$	-0.074	0.016	-0.044	-0.113	-0.188	0.572	-0.086
硝酸盐氮 $\text{NO}_3\text{-N}$	0.099	-0.467	-0.768	0.048	0.419	0.124	0.130
总氮 TN	0.025	-0.030	-0.152	-0.243	0.252	-0.055	-0.628
磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	-0.003	0.005	-0.080	0.583	-0.435	0.160	-0.157
总磷 TP	0.028	-0.079	0.074	0.497	0.055	0.047	-0.262
二氧化硅 $\text{SiO}_2$	-0.167	0.477	-0.321	-0.340	-0.162	0.369	-0.105
总碱度 TA	-0.850	-0.240	0.033	-0.087	-0.019	0.039	-0.042
总硬度 Hardness	-0.160	0.510	-0.147	-0.063	0.079	0.028	0.037
钙离子 $\text{Ca}^{2+}$	-0.364	-0.169	-0.015	0.311	-0.022	0.323	0.241
氯离子 $\text{Cl}^-$	-0.097	-0.014	-0.317	-0.236	-0.602	-0.095	-0.287
有机物耗氧量 COD	0.065	0.107	-0.284	-0.206	-0.213	0.163	0.503
方差 Variance	2.19	1.11	0.780	4.48	2.36	5.32	3.91
贡献率 Percentage of variances (%)	43.79	22.19	15.58	53.26	28.04	46.26	34.51
累计贡献率 Cumulative (%)	43.79	65.98	81.56	53.26	81.30	46.26	80.77

在 1 组中, 第 1 主成分分量(占 43.79%)主要体现了总碱度的信息, 第 2 主成分分量(占 22.19%)主要体现了总硬度的信息, 第 3 主成分分量(占 15.58%)主要体现了硝酸盐氮的信息. 说明在第一个河段中, 影响河流水质的主要因素是总碱度和硬度, 即在香溪河上游, 因植被覆盖率高、人口密度相对较小, 河流水质基本未受污染, 河流水质主要由矿物离子组成, 这种特性的水质分布与 Day 等<sup>[3]</sup>报道的山地河流水质特性相吻合. 第 3 主成分分量中反映的硝酸盐氮的信息可以解释为流域中地表径流带入河流中的营养物质.

在 2 组中, 第 1 主成分分量(占 53.26%)主要体现了磷酸盐和总磷的信息, 第 2 主成分分量(占 28.04%)主要体现了氯离子的信息, 说明在第二个河段中磷酸盐、总磷和氯离子是影响水质的主要因子. 分析第 1 主成分分量中磷酸盐和总磷的信息, 可能与该河段内的村落分布密度增大紧密相关. 由于河岸民居增多, 大量生活污水未经处理直接排入河流, 以及河岸土地开垦加剧, 导致水土流失<sup>[20]</sup>, 可能是该河段磷酸盐和总磷信息特别显著的主要原因. 有关河流中氯离子研究的报道不多, 第 2 主成分分量中反映的氯离子信息, 推测可能是该河段所在的亚流域地质条件特殊所致<sup>[19]</sup>. 一般认为, 随着河岸土地开垦程度的加大, 作为化肥的主要成分的硝酸盐的信息会显著增加<sup>[20]</sup>. 然而, 从已有数据的分析结果来看, 与第 1 个河段相比, 河水中的硝酸盐氮的信息并未显著增大, 可能是在夏季(7 月份)农作物的化肥使用量较低或者在河岸有一个较强的反硝化

河岸带缓冲区, 分解了大部分从耕作土地流入河流的水体中所溶解的硝酸盐<sup>[13]</sup>.

在 3 组中, 第 1 主成分分量(占 46.26%)主要体现了 pH 和亚硝酸盐( $\text{NO}_2\text{-N}$ )的信息, 第 2 主成分分量(占 34.51%)主要体现了总氮(TN)和 COD 的信息, 说明反映香溪河下游(第三个河段)水质特征的主要因子是 pH、氮盐和 COD. 河流中生物群落新成代谢对 pH 影响较大<sup>[10]</sup>, 因为河流中部分生物通过光合作用吸收水中的  $\text{CO}_2$ , 从而增加河水的 pH 值<sup>[16]</sup>. 从采样点的地理分布来看, 该组分布在高阳镇以下的河段, 受县城生活污水和工矿企业排放的废水污染较为严重. 从主成分分析结果来看, 与其它河段相比, 河流水质主要污染物是各类氮盐尤其是亚硝酸盐氮的污染和 COD 的污染. 长期以来, 地表水中可检测出的亚硝酸盐都认为是水体污染的一种警告<sup>[21]</sup>, 在有机物浓度很高的地方, 含氮有机物的腐烂分解, 如蛋白质分解、污水中的尿素分解能在分解的中间步骤产生亚硝酸盐, 说明在该河段中微生物的分解作用活跃, 其反映的信息与 pH 反映的信息是高度一致的.

#### 4 结 论

本文综合运用聚类分析和主成分分析, 揭示了香溪河水质的空间分布特性. 通过聚类分析, 按照各样点水质组成的相似性将香溪河划分为 3 个河段; 通过主成分分析研究了各个河段水质的主要影响因素; 并在此基础上分析了流域尺度因素对于河流水质空间变化的影响. 通过本研究, 揭示了香溪河水质的现状及其成因, 为确定香溪河主要污染源及其开展科学管理提供了合理的依据.

#### 参考文献

- 1 Cai Q-H (蔡庆华). 1999. Application of mathematics to hydrobiological research. In: Liu J-K (刘建康) ed. Advance in Hydrobiology. Beijing: Science Press. 376~400 (in Chinese)
- 2 Danielsson A, Cato I, Carman R, et al. 1999. Spatial clustering of metals in the sediments of the Skagerrak/Kattegat. *Appl Geochem*, 14(6): 689~706
- 3 Day JA, Dallas HF, Wackernagel A. 1998. Delineation of management regions for South African rivers based on water chemistry. *Aquatic Ecosyst Health Man*, 1: 183~197
- 4 Fovell R, Fovell MY. 1993. Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis. *J Climate*, 6(11): 2103~2135.
- 5 Gibbs RJ. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170: 1088~1090
- 6 Huang X-F (黄祥飞), Chen W-M (陈伟民), Cai Q-M (蔡启铭). 2000. Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology. Beijing: China Standards Press. (in Chinese)
- 7 Hui Y (惠 阳), Zhang X-Y (张晓华), Chen Z-J (陈珠金). 2000. Present situation and strategy about the natural environment of the Xiangxi River Basin. *Resour Environ Yangtze Basin* (长江流域资

- 源与环境), 9(1): 27~31(in Chinese)
- 8 Jiang M-X (江明喜), Deng H-B (邓红兵), Tang T (唐涛), *et al.* 2002. On spatial pattern of species richness in plant communities along riparian zone in Xiangxi River watershed. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 22(5): 629~635(in Chinese)
  - 9 Jin T (金涛), Liu Y (刘艳). 1996. Geographical conditions for soil erosion and water loss in Xiangxi Valley in the Three Gorges region and its renovation. *Res Soil Water Conser* (水土保持研究), 3(4): 98~102 (in Chinese)
  - 10 Kubawara JS. 1992. Associations between benthic flora and diel changes in dissolved arsenic, phosphorus, and related physicochemical parameters. *J Nat Am Benthol Soc*, 11: 218~228
  - 11 Luo H-J (罗海江), Zhu J-P (朱建平), Jiang H-H (蒋火华). 2002. The suggestion of selecting pollution items on water quality evaluation. *Environ Monit China* (中国环境监测), 18(4): 1~55 (in Chinese)
  - 12 Luo W-Z (雒文生), Tan G (谈戈). 2000. Three Gorges Reservoir Xiangxihe bay water quality prognosis. *Hydroelectric Energy* (水电能源科学), 18(4): 46~48 (in Chinese)
  - 13 Muscutt AD, Harris GL, Bailey SW, *et al.* 1993. Buffer zones to improve water quality: a review of their potential use in UK agriculture. *Agric Ecosyst Environ*, 45: 59~77
  - 14 Petts G, Calow P. 1996. River Restoration. Oxford: Blackwell Science Ltd. 240.
  - 15 Sharma S. 1996. Applied Multivariate Techniques. New York: Wiley.
  - 16 Smith DG, Maasdam R. 1994. New Zealand's National River Water Quality Network 1. Design and physico-chemical characterisation. *N Z J Mar Freshwater Res*, 28: 19~35.
  - 17 Sun W-S (孙文爽), Chen L-X (陈兰祥). 1994. Multivariate Analysis. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
  - 18 Wei F-S (魏复盛), Kou H-R (寇洪茹), Hong S-J (洪水皆). 1989. Methods for the Examination of Water and Wastewater. 3rd ed. Beijing: China Environmental Science Press. (in Chinese)
  - 19 Wen Y-H (温以华). 2002. Influence of texture and bulk density on the transport's law of  $\text{Cl}^-$  in soils. *Res Soil Water Conser* (水土保持研究), 9(1): 73~75 (in Chinese)
  - 20 Withers PJA, Lord EI. 2002. Agricultural nutrient inputs to rivers and groundwaters in the UK: policy, environmental management and research needs. *Sci Total Environ*, 282/283: 9~24
  - 21 Xu X-Q (徐小清). 1999. Water environment. In Liu J-K (刘建康) ed. Advance in Hydrobiology. Beijing: Science Press. 1~51 (in Chinese)
  - 22 Zhang X-W (张祥伟), Wang D-C (王敦春). 1994. The principal component analysis on identification of pollutant composition in river. *Water Resour Hydropower Eng* (水利水电技术), (6): 2~6 (in Chinese)

作者简介 叶麟,男,1980年7月生,硕士研究生.主要从事水体及其流域生态学研究. E-mail: yelin@ihb.ac.cn

## 欢迎订阅 2004 年《应用生态学报》

《应用生态学报》(1990 年创刊)是经国家科委批准、科学出版社出版的国内外公开发行的综合性学术刊物.本刊宗旨是坚持理论联系实际的办刊方向,结合科研、教学、生产实际,报导生态科学诸领域在应用基础研究方面具有创新的研究成果,交流基础研究和应用研究的最新信息,促进生态学研究为国民经济建设服务.

本刊专门登载有关应用生态学(主要包括森林生态学、农业生态学、草地牧业生态学、渔业生态学、自然资源生态学、全球生态学、污染生态学、生态工程学等)的综合性论文、创造性研究报告和研究简报等.

本刊读者对象主要是从事生态学、地学、林学、农学和环境科学研究、教学、生产的科技工作者,有关专业的大学生及经济管理和决策部门的工作者.

本刊与数十家相关学报级期刊建立了长期交换关系,《中国科学引文索引》、《中国生物学文摘》、美国《生物学文摘》(BA)、美国《化学文摘》(CA)、英国《生态学文摘》(EA)、日本《科学技术文献速报》(CBST)和俄罗斯《文摘杂志》(PKJ)等十几种权威检索刊物均收录本刊的论文摘要(中英文),并被认定为《中国核心期刊(遴选)数据库》和《中国科学引文数据库》来源期刊.本刊的整体质量与水平已达到新的高度,1992 年荣获全国优秀科技期刊三等奖和中国科学院优秀期刊二等奖,1996 年荣获中国科学院优秀期刊三等奖,2000 年荣获中国科学院优秀期刊二等奖.

本刊为月刊, A4 开本, 176 页, 每月 18 日出版, 期定价 28.00 元, 全国各地邮政局(所)均可订阅, 邮发代号 8-98. 错过订期也可直接向本刊编辑部邮购, 个人订阅优惠 30%. 地址: 110016 辽宁省沈阳市文化路 72 号《应用生态学报》编辑部. 电话: (024)83970393, E-mail: cjae@iae.ac.cn