

三峡水库香溪河库湾主要营养盐的入库动态

李凤清^{1,2}, 叶 麟¹, 刘瑞秋¹, 曹 明^{1,2}, 蔡庆华^{1,*}

(1. 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; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:基于香溪河及其主要支流高岚河的 5a 监测数据, 估算三峡水库香溪河库湾氮磷营养盐的入库通量, 并分析了氮磷营养盐的浓度及其通量的逐月动态。研究发现, 每年大约有 1623.49 t 总氮和 331.85 t 总磷汇入香溪河库湾, 其中, 香溪河贡献了 68.50% 的总氮和 91.74% 的总磷。在这两条河流中, 溶解无机氮是氮的主要存在形式; 氮通量表现出夏季 7 月份偏高、春秋季节次之、冬季较低的规律; 面源污染是氮进入河道的主要途径。磷酸盐是香溪河磷的主要存在形式, 而高岚河磷酸盐的含量则较低; 香溪河磷通量的月均波动规律不明显, 高岚河磷通量的高峰期出现在春末和夏季; 高岚河的磷主要通过面源途径进入河道, 而香溪河的磷则存在点源污染。水土流失可能是香溪河流域面源污染的主要途径, 磷矿和磷化工厂的排污则是磷点源污染的主要途径。从保护三峡水库香溪河库湾的生态学角度考虑, 应重点控制香溪河磷的点源污染。

关键词:氮; 磷; 浓度; 通量; 动态; 三峡水库; 香溪河库湾

文章编号: 1000-0933(2008)05-2073-07 中图分类号: Q148, Q178, X131.2 文献标识码: A

Dynamics of the main nutrients input to Xiangxi Bay of Three Gorge Reservoir

LI Feng-Qing^{1,2}, YE Lin¹, LIU Rui-Qiu¹, CAO Ming^{1,2}, CAI Qing-Hua^{1,*}

1 State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

2 The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2073 ~ 2079.

Abstract: Based on routine monitoring data in Xiangxi River and its main tributary Gaolan River from September 2000 to June 2005, this paper estimates the contribution of riverine nutrients, and analyzes the monthly dynamics of concentrations and fluxes of nutrients. The results show that Xiangxi Bay annually receives 1623.49 tons of total nitrogen and 331.85 tons of total phosphorus; Xiangxi River alone accounts for 68.50% of the total nitrogen fluxes and 91.74% of the total phosphorus fluxes. In these two rivers, dissolved inorganic nitrogen (DIN) is the dominating form; fluxes of DIN and TN are high during the summer (July), medial in spring and autumn, and relatively low in winter; non-point source pollutants that flow into rivers are the most important pathway of nitrogen. Phosphate is the dominating form in Xiangxi River, relatively low in Gaolan River; fluxes of phosphorus are high during the late spring and summer, relatively low during the late autumn and winter periods in Gaolan River, but fluctuates irregularly in Xiangxi River; phosphorus in Gaolan River has

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-427, KSCX2-SW-111); 国家自然科学基金重点资助项目(30330140); 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2002CB412300)

收稿日期:2007-02-11; **修订日期:**2007-07-05

作者简介:李凤清(1982~), 男, 河南安阳人, 硕士生, 主要从事系统与流域生态学研究. E-mail: qflee@ihb.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

致谢:中国科学院水生生物研究所唐涛、黎道丰、渠晓东、周淑婵、吴乃成、傅小城等同志参加野外工作, 谨致谢忱

Foundation item: The project was financially supported by the Knowledge Innovation Project of CAS (No. KZCX2-YW-427, KSCX2-SW-111), Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 30330140) and the National Basic Research Priorities Program (973 Programme, 2002CB412300)

Received date: 2007-02-11; **Accepted date:** 2007-07-05

Biography: Li Feng-Qing, Master candidate, mainly engaged in systems ecology and watershed ecology. E-mail: qflee@ihb.ac.cn

been caused by non-point source pollutants, while point source pollutants of phosphorus play an important role in Xiangxi River. Soil erosion probably represents the major pollutants of non-point source, while the drainages of phosphorus diggings and factory discharges play the most important role in the point source of phosphorus. This research suggests that measures must be taken to control the point source pollutants of phosphorus in Xiangxi River in order to protect Xiangxi Bay of the Three-Gorge Reservoir.

Key Words: nitrogen; phosphorus; concentration; flux; dynamic; Three-Gorge Reservoir; Xiangxi Bay

20 世纪 60、70 年代,内陆水体的富营养化问题曾一度成为研究热点,此后的 20 多年中,氮磷营养、沉积物、杀虫剂和重金属污染等环境问题在全球蔓延开来,并引起了科学家的广泛关注和众多研究^[1]。至 20 世纪 90 年代,内陆水体的富营养化问题才再次引起各国科学家的广泛关注,但前后两次的关注点却发生了改变,相较于早期的城市污水问题,如今的关注点更多地集中于营养源的扩散上^[2],对此问题大多数研究集中在土地利用上。然而事实上,营养物质的输入输出才是最重要最根本的问题。在发展控制污染物水平的理论过程中,营养物质的输入输出关系显得更为重要,并成为一种通行的研究方法^[3]。

三峡工程是举世瞩目的特大型水利枢纽工程,它的兴建在防洪、发电、航运等方面带来了巨大的综合效益,同时,也对库区的生态环境产生了显著的影响。三峡大坝截流后,库区水位抬高、流速减缓、水体扩散能力减弱、污染物质在库湾中的滞留时间延长,库湾水体面临严峻的富营养化问题,局部水域已经出现藻类水华现象^[4]。研究三峡水库入库支流主要营养盐的变化,对于揭示三峡库区水生态系统如何变化,探讨水体健康状况的变化趋势,以及预测和预防蓄水后三峡水库水质的恶化、合理利用库区流域的自然资源具有重要意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

香溪河是三峡库首的第一大支流,其干流长 94 km,流域总面积 3099 km²,地理位置为 30°57'~31°34'N, 110°25'~111°06'E,由北向南贯穿兴山县全县,至峡口镇有高岚河汇入,于秭归县香溪镇注入长江^[5~7](图 1)。香溪河流域的自然地质条件复杂多变,矿产资源十分丰富,其中磷矿储量 3.57 亿 t,是中国三大富磷矿区之一^[8]。香溪河流域的土壤类型繁多,土地利用类型多样^[5],植被的垂直分布差异显著,森林覆盖率达 60%^[9]。近年来,香溪河流域的地方经济发展迅速,沿河分布的乡镇企业增多,污染物的排放主要集中在兴山县境内以老县城高阳镇为中心的香溪河沿岸^[5,10]。

对香溪河生态系统的研究始于 1999 年,2000 年 6 月开始了季节性常规监测,2001 年 8 月开始逐月监测。根据香溪河流域的自然环境特点和采样的可行性,共设置了 25 个采样点(图 1),研究对象包括水文、水体理化、水生生物(如藻类、浮游动物、底栖动物、鱼类)等。受三峡蓄水影响,2003 年 6 月后香溪河与高岚河部分样点成为库湾状态。本文主要探讨近 5a 来(2000 年 9 月~2005 年 6 月)进入三峡水库香溪河库湾的主要营养物质氮磷的来源、组成及其时间上的动态,故各选取香溪河与高岚河离库湾较近的一个河流态样点,以计算此二河营养盐的入库通量,其中,XX11 位于香溪河水文站附近,GL02 位于高岚河下游(图 1)。

1.2 研究方法

水样由 pH < 2 的硫酸处理过的聚乙烯瓶在水下 30 cm 左右收集(深度允许的情况下),现场加硫酸调整 pH < 2,低温保存,并于当天带回野外实验室分析。分析的指标包括:总氮(TN)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、总磷(TP)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)。指标的测定方法均按标准执行^[11]。

XX11 的流量数据来源于香溪河水文站。应用 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型计算出 XX11 和 GL02 的汇水面积分别为 1909 km²和 820.6 km²^①,根据两条河流的汇水面积和香溪河的流量估算出高岚河

① 叶麟,三峡水库香溪河库湾富营养化及春季水华研究,中国科学院研究生院博士学位论文,2006 年

的流量。根据营养盐的瞬时浓度和月均流量计算营养盐的入库通量,公式如下:

$$F = \sum C_i \times D / 10^3$$

式中, F 为营养盐的通量(kg/d); C_i 为时间 i 时营养盐的瞬时浓度(mg/L); D 为月均流量(m^3/s)^[1]。

2 结果

2.1 流量和降水量

近 5a 的监测结果显示,河道流量的月度变化较为强烈,丰水期一般出现在水量较大的夏季,较小的流量使冬季成为枯水季节,春秋两季则归入平水期(图 2)。个别月份的异常流量造成 10 月份的月均流量高于 9 月份,5 月份的月均流量高于 6 月份。基于近 5a 的监测数据,可以估算出平均每年汇入三峡水库香溪河库湾的水量为 13.6 亿 m^3 。

2.2 氮磷浓度的月动态

硝酸盐氮、氨氮、亚硝酸盐氮共同组成了溶解无机

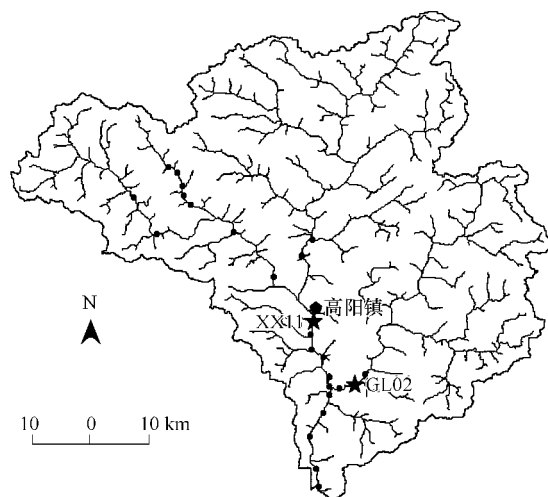


图 1 香溪河采样点分布示意图(★为本文所用样点)

Fig. 1 Sampling sites in Xiangxi River (★ The sites analyzed in this paper)

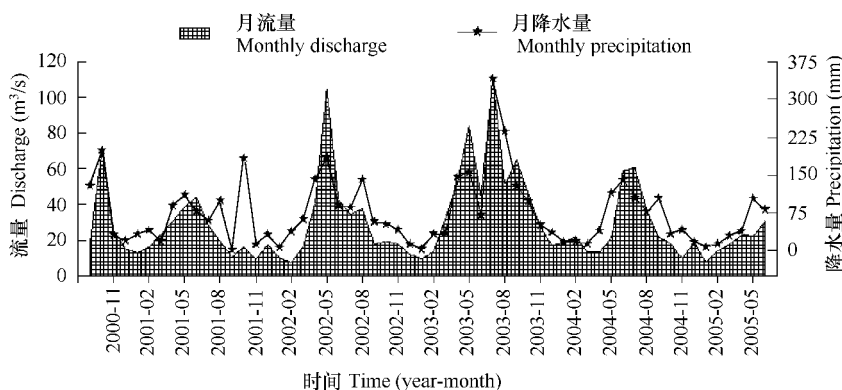


图 2 2000 年 9 月到 2005 年 6 月香溪河流域月均流量和降水量

Fig. 2 Monthly discharge and precipitation measured in Xiangxi River watershed from September 2000 to June 2005

氮(DIN),其中,以硝酸盐氮为最主要成分。对近 5 年的营养盐浓度数据取平均,计算两条河流各种无机氮的比例,结果显示香溪河 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 占 DIN 的百分比分别为 84.96%、13.33% 和 1.71%,而高岚河三者的百分比分别为 90.43%、9.10% 和 0.47%。

氮磷浓度分析采用近 5a 的月均值,分析 TN 的组成及其比例,结果显示香溪河 DIN/TN 为 0.66,高岚河稍高,达到 0.74,高岚河溶解无机氮的浓度显著高于香溪河($p = 0.034$, $df = 11$)。两条河流溶解无机氮和总氮的浓度在流量较大的月份表现出较高的水平,而流量较小的月份则较低(图 3)。

为了表征总磷和磷酸盐的差值,引入磷差(residual phosphorus)的概念,即磷差为总磷和磷酸盐之差^[12]。分析磷指标及其比例,结果显示,香溪河 PO_4^{3-} -P/TP 为 0.80,而高岚河仅为 0.33。香溪河的总磷和磷酸盐浓度均显著高于高岚河($p = 0$, $df = 11$),高岚河 PO_4^{3-} -P 浓度的逐月波动不明显,其总磷浓度表现出和两项氮指标大致相同的趋势,其浓度高峰出现在流量较大的 5、6 月份。而香溪河磷浓度的月动态呈现出与两项氮指标相反的趋势,即丰水期总磷和磷酸盐浓度较低,枯水期则偏高(图 3)。

2.3 氮磷通量的月动态

为方便计算,分别取 XX11 和 GL02 近 5a 的浓度数据,与各自流量相乘,可计算出每年汇入香溪河库湾的

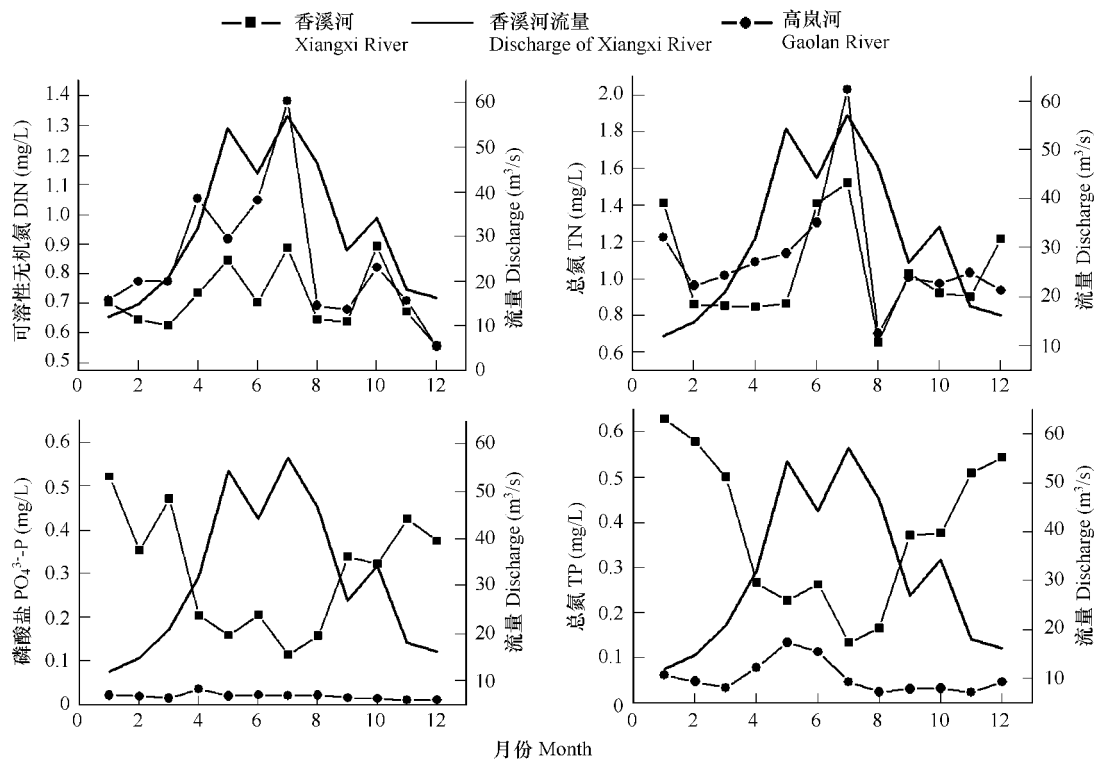


图3 香溪河和高岚河流量与营养盐浓度的逐月动态

Fig. 3 Monthly dynamics of the discharge and nutrient concentrations in Xiangxi River and Gaolan River

总氮为 1623.49 t, 香溪河及高岚河分别为 1112.05 t 和 511.44 t, 分别占总量的 68.50% 和 31.50%; 汇入库湾的总磷为 331.85 t, 两条河流分别为 304.43 t 和 27.42 t, 分别占总量的 91.74% 和 8.26%。

两条河流氮通量的最大值均出现在夏季的 7 月份 (香溪河: DIN 通量 = 4392.94 kg/d, TN 通量 = 7531.01 kg/d; 高岚河: DIN 通量 = 2942.04 kg/d, TN 通量 = 4319.02 kg/d)。这些值是冬季 1、2 月份氮通量最低值的 6.0~9.2 倍 (图 4)。

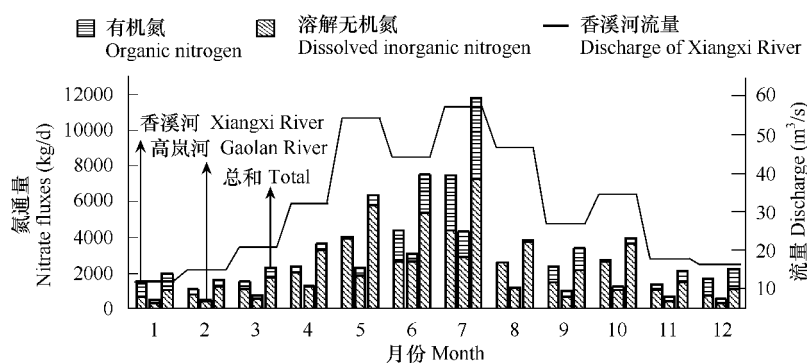


图4 有机氮和溶解无机氮月通量的柱状图

Fig. 4 Bar chart of the monthly fluxes of organic nitrogen and dissolved inorganic nitrogen

高岚河 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 通量的最大值出现在夏季的 7 月份 (43.33 kg/d), 是最低值冬季 12 月份的 6.7 倍, TP 通量的最大值出现在春末的 5 月份 (271.85 kg/d), 低峰出现在 11 月份到翌年 3 月份, 其中以秋末的 11 月份最低 (15.87 kg/d)。香溪河磷通量的月均波动较为平缓, 其中, 以 10 月份最高 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 通量 = 955.22 kg/d, TP 通量 = 1117.14 kg/d), 但最高通量也仅是冬季 1、2 月份最低通量的 2.1 和 1.7 倍 (图 5)。

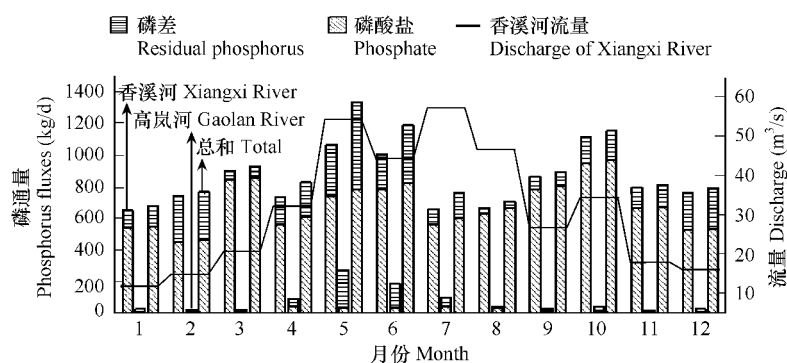


图5 磷差和磷酸盐月通量的柱状图

Fig. 5 Bar chart of the monthly fluxes of residual phosphorus and phosphate

3 讨论

香溪河作为三峡坝首的最大支流,其健康状况将直接影响到三峡水库,因而研究香溪河营养盐入库通量动态的意义重大^[13]。分析两条河流氮磷组成发现,香溪河溶解无机氮、磷酸盐分别占总氮、总磷的50%强,由此可以推断香溪河的主要污染是无机污染,高岚河溶解无机氮的比例也较高,其磷酸盐的比例则相对较低。整体上,高岚河的受污程度比香溪河为轻。

香溪河地处北亚热带,其季节性融雪较高纬度的欧洲等地区为少,融雪对河道流量的补充作用不强,同时峡谷型地貌限制了农业灌溉用水,因此河道流量同降水量的关系较为密切($r = 0.804$, $p < 0.05$, $N = 58$)。分析时间尺度上营养盐通量的入库动态,结果显示,降水量在季节分布上的不均匀性造成河道流量出现季节性差异,而这种差异最终强烈地影响了营养物质的入库通量。分析两条河流营养盐与河道流量的逐月变动规律,发现高流量时,两条河流的氮和高岚河的磷均表现出较高的浓度,而流量较小时,其浓度偏低,这种流量与营养盐浓度同步变动的趋势说明两条河流的氮和高岚河的磷主要从面源途径进入河道^[12]。Omernik 研究发现,在农业用地或城镇用地占主导的流域,氮的输出量显著地高于森林占主导的流域^①,Laznik 也认为在 Lielupe 河流域,农业土壤的流失是氮的最主要来源^[12],在香溪河地区,农业管理过程中农药化肥的大量使用,使其残留物质和表层土壤伴随降水过程汇入河道之中,成为丰富的氮源,这种状况也出现在全球的大多数河流中,比如,拉脱维亚的 Lielupe 河^[12]、英国的 Adour 河与 Frome 河^[14,15]、美国的 Neuse 河^[16]等。香溪河磷浓度与河道流量的逐月变动趋势呈现反向波动,即高流量时,较大的水量对磷有稀释作用,造成磷浓度偏低,低流量则对应了磷的较高浓度,这样的变动规律说明香溪河的磷主要通过点源途径进入河道。磷的点源污染也存在于上述几条河流之中,但是在全球的多数河流中,磷的点源污染较轻,表现为规律性变化。

高流量主要通过两种方式影响营养盐的通量:第一,营养盐浓度较低,但河道流量很大,从而导致营养盐通量较高,但这种情况并没有出现在两条河流的氮和高岚河的磷波动趋势之中;第二,强降水冲刷土壤积累的营养盐进入河道,从而导致营养盐浓度的升高,两条河流的氮和高岚河的磷波动正是这种原因造成的,可以认为夏季高流量和高浓度的共同作用造成了营养盐通量的显著增加^[17]。在第二种方式中,我们更加关注营养盐的来源问题,下文将就点源途径和面源途径分别进行讨论:

香溪河流域蕴藏着丰富的磷矿资源,磷矿开采中磷的流失,矿坑以及磷化工厂废水的排放,构成了水体磷的点源污染负荷。受工艺和成本的制约,含磷废水往往得不到有效处理,直接排放进入河道,这种工业模式势必给三峡水库香溪河库湾带来巨大威胁,进而造成水体的富营养化,因此,香溪河流域点源污染的控制面临着严峻的挑战。

两条河流的氮和高岚河磷的高峰期出现在春末以及夏季,并以夏季为最,其原因可能是:(1)夏季的降水

① 叶麟,三峡水库香溪河库湾富营养化及春季水华研究,中国科学院研究生院博士学位论文,2006 年

量较大,携带土壤中的营养盐进入水体;(2)春季是农药使用的高峰期,农药的残留物会随春末和夏季的强降水过程汇入河道;(3)夏季土壤和水体的硝化作用强烈;(4)较大的水量也会冲刷河床底质,使得河床中所积累的营养盐大量地释放出来。进入秋冬季,其通量进入低谷期,系因:(1)秋冬季降水量较小,营养盐进入河道的过程缓慢,总量也较低;(2)土壤和水体的反硝化作用强烈,溶解氮通过沉积作用进入河床底质之中;(3)冬季农业活动较少,伴随春末丰水期的到来,早春农业活动所积累的营养盐大量进入水体的效应推迟到春末才得以发生;(4)冬季较低的温度在土壤表层留下了大量的矿化营养盐,伴随春末降水量的增加,这些矿化营养物质进入河道的数量才会随之增加。相关研究亦表明枯水期土壤的矿化作用以及植物对营养盐较少的吸收量给营养盐在土壤中的积累提供了有利条件^[12,18]。两条河流的氮和高岚河磷的这种季节分布与 Laznik 在 Lielupe 河^[12]以及 Bowes 在 Frome 河^[15]的研究结果不一致,最大的差别在于欧洲河流的水文状况和香溪河不一致,冬季和早春的融雪造成了欧洲河流的丰水期,而春末、夏秋季则成为枯水期。总而言之,无论在那个季节,几乎所有被研究河流的氮流失量都和流量成正比^[12],香溪河也是如此(表 1)。

表 1 流量与营养盐通量月动态的相关性

Table 1 Relationships between monthly dynamics of discharge and fluxes of nutrients

指标 Index	香溪河 Xiangxi river				高岚河 Gaolan river			
	DIN	TN	PO ₄ ³⁻ -P	TP	DIN	TN	PO ₄ ³⁻ -P	TP
<i>r</i>	0.961 **	0.816 **	0.607 *	0.682 *	0.898 **	0.866 **	0.947 **	0.676 *
<i>p</i>	0.000	0.001	0.036	0.014	0.000	0.000	0.000	0.016

* 表示在 0.05 水平上有显著性意义的相关系数 Correlation is significant at the 0.05 level; ** 表示在 0.01 水平上有显著性意义的相关系数 Correlation is significant at the 0.01 level

磷浓度过高将引起三峡水库局部水域出现更加严重的富营养化问题,所以应尽快采取措施改革工业模式,引入先进处理工艺,从而减少香溪河磷的排放量,减轻库湾的磷负荷;两条河流的氮盐控制同样不容忽视,这些措施的终极目的都应是为了控制和解决三峡水库香溪河库湾的富营养化问题。

20 世纪 60、70 年代以来,国际上开展了大量有关水体富营养化的研究,但由于水域生态系统的复杂性,也由于形成原因和影响的复杂性,特别在人类活动和自然因素叠加的干扰下,水体富营养化问题仍然是一个因环境受损而引起的资源、环境、生态和社会发展的世界性问题^[4]。考虑到河流是连接陆地生态系统和水域生态系统的通道,大部分溶解态和颗粒态的物质都是通过河流进入水域生态系统的^[17],因此有必要在三峡水库的典型入库支流开展水域生态系统的长期监测,从气象、水文、物理、化学、生物、数学和地理等多学科综合的角度,研究三峡水库所面临的问题,从而科学地有效地管理三峡水库。

References:

- [1] Zhou Q X, Gibson C E, Foy R H. Long-term changes of nitrogen and phosphorus loadings to a large lake in north-west Ireland. *Water Research*, 2000, 34(3): 922—926.
- [2] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, *et al.* Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 559—568.
- [3] Hetling L J, Jaworski N A, Garretson D J. Comparison of nutrient input loading and riverine export fluxes in large watersheds. *Water Science and Technology*, 1999, 39(12): 189—196.
- [4] Cai Q H and Hu Z Y. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 7—11.
- [5] Ye L, Li D F, Tang T, *et al.* Spatial distribution of water quality in Xiangxi River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1959—1962.
- [6] Tang T, Qu X D, Li D F, *et al.* Benthic algae of Xiangxi River, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, 19(4): 597—604.
- [7] Tang T, Cai Q H, Liu J K. Using epilithic diatom communities to assess ecological condition of Xiangxi River system. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 112: 347—361.
- [8] Fang T, Fu C Y, Ao H Y, *et al.* The comparison of phosphorus and nitrogen pollution status of the Xiangxi Bay before and after the impoundment

- of the Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 26—30.
- [9] Jiang M X, Deng H B, Tang T, *et al.* On spatial pattern of species richness in plant communities along riparian zone in Xiangxi River watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 629—635.
- [10] Hui Y, Zhang X H, Chen Z J. Present situation and strategy about the natural environment of the Xiangxi River Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2000, 9(1): 27—33.
- [11] Huang X F, Chen W M, Cai Q M. *Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology*. Beijing: China Standards Press, 2000.
- [12] Laznik M, Stålnacke P, Grimvall A, *et al.* Riverine input of nutrients to the Gulf of Riga — temporal and spatial variation. *Journal of Marine Systems*, 1999, 23: 11—25.
- [13] Tang T, Qu X D, Cai Q H, *et al.* River ecosystem management — A case study of Xiangxi River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(6): 594—598.
- [14] Brunet R C, Astin K B. Spatio-temporal variation in some physical and chemical parameters over a 25-year period in the catchment of the river Adour. *Journal of Hydrology*, 1999, 220: 209—221.
- [15] Bowes M J, Leach D V, House W A. Seasonal nutrient dynamics in a chalk stream: the River Frome, Dorset, UK. *Science of the Total Environment*, 2005, 336: 225—241.
- [16] Stow C A, Borsuk M E, Stanley D W. Long-term changes in watershed nutrient inputs and riverine exports in the Neuse river, north Carolina. *Water Research*, 2001, 35(6): 1489—1499.
- [17] Goolsby D A, Battaglin W A, Aulenbach B T, *et al.* Nitrogen flux and sources in the Mississippi River Basin. *Science of the Total Environment*, 2000, 248: 75—86.
- [18] Randall G W, Huggins D R, Russelle M P, *et al.* Nitrate losses through subsurface tile drainage in conservation reserve program, alfalfa, and row crop systems. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 1240—1247.

参考文献:

- [4] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 7~11.
- [5] 叶麟, 黎道丰, 唐涛, 等. 香溪河水质空间分布特性研究. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1959~1962.
- [8] 方涛, 付长营, 敖鸿毅, 等. 三峡水库蓄水前后香溪河氮磷污染状况研究. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 26~30.
- [9] 江明喜, 邓红兵, 唐涛, 等. 香溪河流域河岸带植物群落物种丰富度格局. *生态学报*, 2002, 22(5): 629~635.
- [10] 惠阳, 张晓华, 陈珠金. 香溪河流域资源环境状况及开发策略探讨. *长江流域资源与环境*, 2000, 9(1): 27~33.
- [11] 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. *湖泊生态调查观测与分析*. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [13] 唐涛, 渠晓东, 蔡庆华, 等. 河流生态系统管理研究——以香溪河为例. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(6): 594~598.