

# 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出

张晟<sup>1, 2</sup>, 郑坚<sup>2</sup>, 刘婷婷<sup>1</sup>, 曾凡海<sup>3</sup>, 付永川<sup>2</sup>

(1. 西南大学资源与环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市环境科学研究院, 重庆 401147; 3. 重庆市涪陵区环境监测站, 重庆 408000)

**摘要:** 三峡水库成库后, 对三峡水库 13 条主要支流入库断面有机物、营养盐、生物量含量季节变化进行了初步研究. 结果表明, 支流高锰酸盐指数、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、氨氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl-a)含量季节间差异较大. 高锰酸盐指数范围为  $0.20 \sim 5.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , COD 含量范围  $4.06 \sim 30.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , TN 含量范围为  $0.542 \sim 7.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量范围  $0.034 \sim 2.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , TP 含量范围为  $0.010 \sim 0.449 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , Chl-a 值范围为  $1.02 \sim 128 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ . 支流受到不同程度污染, 水体中 N 含量丰富, 部分支流富营养化的限制因子为 P. 除兰溪河外, 其余支流 Chl-a 含量较低, 仅为贫-中营养水平. 双因子方差分析表明, 营养因子在时间、空间分布上均有不同程度差异. 利用相关分析方法, 分析了叶绿素 a 与营养盐之间的关系, 叶绿素 a 与有机物、营养盐都呈显著正相关关系. 支流营养盐、有机物输出负荷主要受流量控制, 表现为丰水期 > 平水期 > 枯水期. 13 条支流不同季节排放 COD、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 TP 范围分别为  $1\,772 \sim 6\,701$ 、 $380 \sim 1\,875$ 、 $40.1 \sim 172$ 、 $249 \sim 922$  和  $9.97 \sim 50.5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ . 三峡水库支流有机物、营养盐的排放应引起关注.

**关键词:** 三峡水库; 支流; 有机物; 营养盐

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)01-0058-06

## Seasonal Variation and Output of Nutrient in Tributaries of Three Gorges Reservoir

ZHANG Sheng<sup>1, 2</sup>, ZHENG Jian<sup>2</sup>, LIU Ting-ting<sup>1</sup>, ZENG Fan-hai<sup>3</sup>, FU Yong-chuan<sup>2</sup>

(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Academe of Environmental Science, Chongqing 401147, China; 3. Fuling District Environmental Monitoring Station of Chongqing, Chongqing 408000, China)

**Abstract:** After the Three Gorges Reservoir was storage water in June 2003, organic contamination, nutrient and biomass were determined in 13 tributaries of Three Gorges Area in three seasons. Potassium permanganate index, chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and chlorophyll a (Chl-a) value are  $0.20\text{--}5.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $4.06\text{--}30.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $0.542\text{--}7.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $0.034\text{--}2.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $0.010\text{--}0.449 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $1.02\text{--}128 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  respectively. The water body of tributaries is polluted at various levels. The concentration of TN is abundant. The rate of TN and TP showed that a part of tributaries eutrophication are limited by TP. Low concentration of Chl-a was in tributaries water body except Zhuxi river. Trophic states of tributaries were oligotropher to mesotropher. Utilizing the method of between-subjects effects tests, it indicated that spatial and seasonal distribution of nutrient factors is different in diverse seasons. The correlation of nutrient, organic contamination and Chl-a were researched. It indicated there was a significant positive correlation among Chl-a, nutrient and organic contamination. Fluxes load of nutrient and organic contamination was calculated by discharge and concentration of each tributary. It indicated that flux load of nutrient and organic contamination was mainly controlled by discharge. The flux load in flood season is higher than normal and dry season. The nutrient fluxes load of COD, potassium permanganate index,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , TN and TP are  $1\,772\text{--}6\,701 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $380\text{--}1\,875 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $40.1\text{--}172 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $249\text{--}922 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  and  $9.97\text{--}50.5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  respectively. Pollution of tributaries in Three Gorges Area should be noticed.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; tributary; organic contamination; nutrient

2003 年 6 月, 三峡水库 139 m 蓄水成库后, 干流水体流速减缓, 成库水域泥沙沉积使表观水质得到改善, 理化指标基本保持稳定或优于成库前<sup>[1, 2]</sup>. 但与成库前相比, 部分支流库湾水体富营养化现象却频繁发生, 甚至部分支流发生严重“水华”现象, 已经引起广泛关注<sup>[3~5]</sup>. 三峡库区重庆段受三峡水库 139 m 蓄水影响的流域面积在  $100 \text{ km}^2$  以上的一级支流约有 20 条, 这些支流流经区域接纳了大量工业、生活废水和受农业面源污染的影响, 一般水体中污染物含量较高. C、N、P 是水体富营养化的主要指标和

藻类生长、繁殖最基本的必要元素. 各支流水体 C、N、P 含量特征变化不仅对支流营养化状态有影响, 同时支流 C、N、P 的输出对三峡水库干流水体水质和营养状态也将产生不同程度的影响. 三峡水库成库前后对少数典型支流营养状态进行过初步研究<sup>[6, 7]</sup>, 但在较大尺度上的连续性研究报道不多. 本

收稿日期: 2008-01-08; 修订日期: 2008-04-17

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(2008BB7373, 2007BB7242)

作者简介: 张晟(1971~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为环境化学与污染生态学, E-mail: shengzts@126.com

实验对三峡水库重庆段 13 条主要支流入库断面 C、N、P 枯水期、平水期和丰水期含量变化和输出负荷进行了初步分析, 以期对三峡库区支流富营养化研究提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集方法

对三峡水库 13 条支流分别进行 3 次采样分析, 根据三峡库区多年支流流量统计, 以 2005 年 2 月代表枯水期, 2005 年 5 月代表平水期, 2005 年 9 月代表丰水期. 在各支流设置 1 个采样断面(支流入库断面), 按水样采集规范<sup>[8]</sup>, 根据不同支流的宽度, 各断面分别设置 1~3 个采样点, 采集 0.5 m 以上表层水. 同一断面超过 1 个采样点时, 取平均值代表断面平均水质状况. 支流位置及采样点位见图 1.

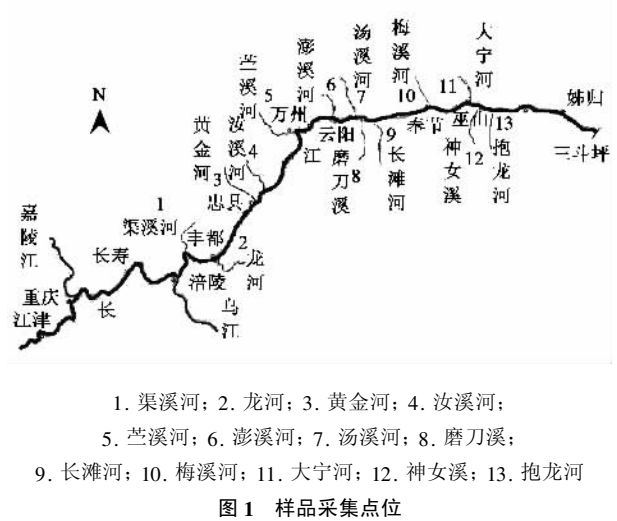


Fig.1 Investigation stations of tributaries in Three Gorges Reservoir

1.2 样品分析测试方法

水质理化监测项目为化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、高锰酸盐指数、叶绿素 a(Chl-a)、pH、溶解氧(DO)、电导率、水温等 10 项. pH 采用玻璃电极法; DO 采用碘量法; 水温为水温度计法; 电导率为电导仪法; Chl-a 为丙酮萃取分光光度法; 高锰酸盐指数采用 GB 11892-89 规定的方法; TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法; TP 采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法; COD 采用重铬酸钾法; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂比色法. 为了控制测定的准确性, 在 COD、高锰酸盐指数、TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 分析时, 每 10 个测定样品用标准样品校验, 另 10% 的平行样分析用于控制实验的精密度, 平行样的相对误差 < 10%.

1.3 支流 C、N、P 输出计算

利用三峡库区支流不同季节流量与污染物浓度, 估算营养盐对三峡水库的输入负荷, 计算公式为: 营养盐负荷(g·s<sup>-1</sup>) = 营养盐浓度(mg·L<sup>-1</sup>) × 流量(m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) × 换算系数.

2 结果与分析

2.1 物理化学参数特征

表 1 为三峡水库主要支流物理化学参数. pH 范围在 7.30~8.79, 均为中偏弱碱性水体. DO 含量范围在 2.53~12.31 mg·L<sup>-1</sup>, 除芑溪河夏季污染重、水温高, 底泥厌氧发酵导致丰水期 DO 较低, 其余饱和率范围在 60%~108%, 均在允许值范围内. 受水温的影响, 大部分河流 DO 含量枯水期大于平水期和

表 1 物理化学参数  
Table 1 Results of physical chemistry parameters

| 支流编号 | 支流名称 | 水温/℃ |      |      | pH   |      |      | DO/mg·L <sup>-1</sup> |      |      | 电导率/μS·cm <sup>-1</sup> |     |     |
|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------------|------|------|-------------------------|-----|-----|
|      |      | 2 月  | 5 月  | 9 月  | 2 月  | 5 月  | 9 月  | 2 月                   | 5 月  | 9 月  | 2 月                     | 5 月 | 9 月 |
| 1    | 渠溪河  | 9.0  | 19.5 | 22.5 | 7.69 | 7.71 | 7.85 | 8.00                  | 7.60 | 7.80 | 214                     | 214 | 211 |
| 2    | 龙河   | 9.0  | 17.5 | 19.8 | 7.64 | 7.70 | 7.71 | 7.70                  | 7.50 | 7.60 | 258                     | 189 | 196 |
| 3    | 黄金河  | 12.9 | 25.0 | 27.4 | 8.79 | 8.56 | 8.30 | 7.58                  | 8.05 | 7.72 | 239                     | 273 | 295 |
| 4    | 汝溪河  | 12.5 | 25.0 | 27.9 | 8.12 | 8.26 | 8.32 | 9.02                  | 8.62 | 7.53 | 227                     | 251 | 336 |
| 5    | 芑溪河  | 9.8  | 21.0 | 27.0 | 8.00 | 7.87 | 7.85 | 7.00                  | 6.67 | 2.53 | 540                     | 440 | 400 |
| 6    | 澎溪河  | 9.0  | 21.0 | 25.6 | 7.80 | 7.74 | 7.32 | 6.96                  | 6.50 | 7.30 | 632                     | 563 | 187 |
| 7    | 汤溪河  | 9.0  | 20.0 | 25.6 | 7.30 | 7.44 | 7.62 | 7.72                  | 6.80 | 7.60 | 468                     | 449 | 342 |
| 8    | 磨刀溪  | 8.0  | 20.0 | 25.0 | 7.60 | 7.64 | 7.32 | 7.06                  | 6.80 | 7.40 | 341                     | 353 | 196 |
| 9    | 长滩河  | 8.5  | 20.0 | 25.5 | 7.54 | 7.52 | 7.66 | 7.64                  | 7.50 | 7.50 | 485                     | 480 | 230 |
| 10   | 梅溪河  | 8.0  | 23.5 | 24.0 | 8.21 | 8.36 | 8.32 | 8.65                  | 6.82 | 6.54 | 252                     | 247 | 238 |
| 11   | 大宁河  | 11.5 | 21.5 | 19.0 | 8.62 | 8.23 | 8.22 | 11.0                  | 9.63 | 9.09 | 552                     | 400 | 325 |
| 12   | 神女溪  | 11.0 | 22.5 | 22.0 | 8.66 | 8.26 | 8.24 | 11.4                  | 8.93 | 7.89 | 522                     | 390 | 303 |
| 13   | 抱龙河  | 10.0 | 22.0 | 19.0 | 8.58 | 8.39 | 8.41 | 12.3                  | 8.93 | 8.88 | 403                     | 350 | 365 |

丰水期,受水体流速的影响,DO 饱和率枯水期小于平水期和丰水期;电导率范围在  $187.0 \sim 632.0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,枯水期大于平水期和丰水期,可能与枯水期水体流量小,工业污染源排放相对量增加有关。受山地和河流深度的影响,不同河流水温有一定程度变化,其中 2 月水温范围为  $8.0 \sim 12.9^\circ\text{C}$ ;5 月为  $17.5 \sim 23.5^\circ\text{C}$ ;9 月为  $19.0 \sim 27.9^\circ\text{C}$ ,水温相对变化较大。

## 2.2 营养状态因子特征

### 2.2.1 有机物

支流有机物含量变化见图 2。高锰酸盐指数和 COD 代表水体有机物污染程度。高锰酸盐指数范围在  $0.20 \sim 5.91 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,达到 I ~ IV 类水质标准(GB 3838-2002)。大多数支流丰水期高锰酸盐指数含量高于枯水期和平水期。高锰酸盐指数作为有机污染

的指标,当其超过  $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,表示水体受到有机污染<sup>[9]</sup>,除受严重污染的苎溪河外,库区其于支流高锰酸盐指数均值低于  $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;COD 含量范围在  $4.06 \sim 30.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,除苎溪河和澎溪河平水期含量超过 III 类标准外,其它河流达到 II 类标准以上。大多数支流 COD 平水期含量高于枯水期和丰水期。高锰酸盐指数和 COD 含量分布表明,三峡库区绝大多数支流还未受有机污染严重影响。与三峡水库干流比较<sup>[10]</sup>,大多数支流高锰酸盐指数含量低于干流,对干流而言表现为稀释作用。对 3 个季节 13 条支流 COD 和高锰酸盐指数分别作无重复双因子方差分析,结果表明 COD 在支流空间(不同支流)分布和时间(不同季节)分布上均无显著差异;高锰酸盐指数在支流空间分布无显著差异,但在时间分布上达到极显著差异(99%置信水平)。

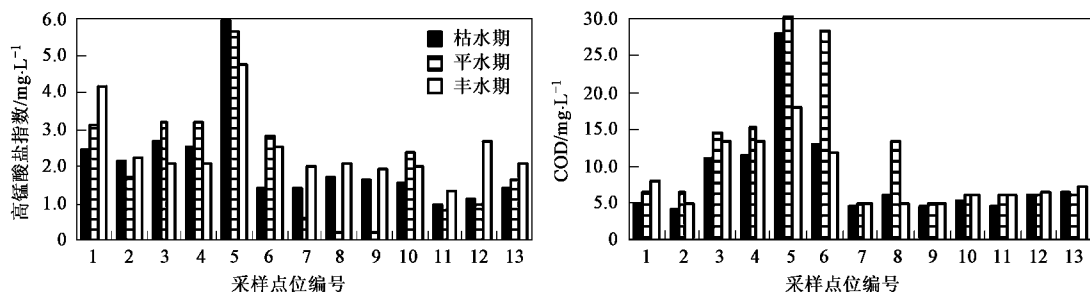


图 2 有机物含量季节变化

Fig. 2 Distribution of organic contamination in diverse season

### 2.2.2 N、P

支流 N、P 含量变化见图 3。三峡水库支流  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量范围在  $0.034 \sim 2.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,除苎溪河为 V 类水外,其余河流均优于 III 类标准。三峡水库支流 TN 较重,TN 含量范围在  $0.542 \sim 7.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,达到 III ~ 劣 V 类水质标准。三峡库区是重庆市主要农业区,同时各支流流域也是居民稠密分布区,水体中 TN 含量较高可能与城镇生活污水排入和农村化肥过度施用有关。TP 含量范围在  $0.010 \sim 0.449 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,除苎溪河水质较差,其余支流优于 III 类水质标准。大多数支流 TN、TP 含量低于干流<sup>[11]</sup>。苎溪河 N、P 含量高已经丧失了地表水功能。

一般认为,当水体中 TN、TP 含量分别达到  $0.20$ 、 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以上时,水体存在发生富营养化的风险<sup>[12]</sup>,调查支流水体的 TN 和绝大多数支流 TP 含量均远高于限制值,表明 N、P 浓度条件适宜藻类生长。N/P 对藻类的爆发性生长具有重要作用,当水体中  $\text{N/P} < 7$ ,氮将限制藻类的生长, $\text{N/P}$  在  $8 \sim 30$  为

适合藻类生长范围, $\text{N/P} > 30$ ,P 将成为藻类生长的限制因子<sup>[13]</sup>。三峡水库调查支流 N/P 范围在  $9 \sim 128$ ,绝大多数在  $8 \sim 30$  之间,表明水体 N/P 较适合藻类的生长,容易发生水体富营养化,P 为部分支流水体富营养化的限制因子。对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的无重复双因子方差分析,表明各支流  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 含量空间分布均无显著差异,时间分布均有显著差异。时间分布的差异可能与三峡水库支流流域农业耕作方式和地表径流季节变化有关。

### 2.2.3 Chl-a

Chl-a 含量季节变化见图 4,Chl-a 含量范围在  $1.02 \sim 128 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,根据 OECD 富营养化单因子(Chl-a)评价标准( $\text{Chl-a} < 3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  为贫营养; $\text{Chl-a} 3 \sim 11 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  为中营养; $\text{Chl-a} 11 \sim 78 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  为富营养; $\text{Chl-a} > 78 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  为严重富营养)<sup>[14]</sup>,其中 7 条支流各季节 Chl-a 含量均为贫营养水平,除苎溪河 Chl-a 含量平水期、丰水期达到富营养化水平,其余河流各季节均为贫-中营养水平。各支流 Chl-a 含量基

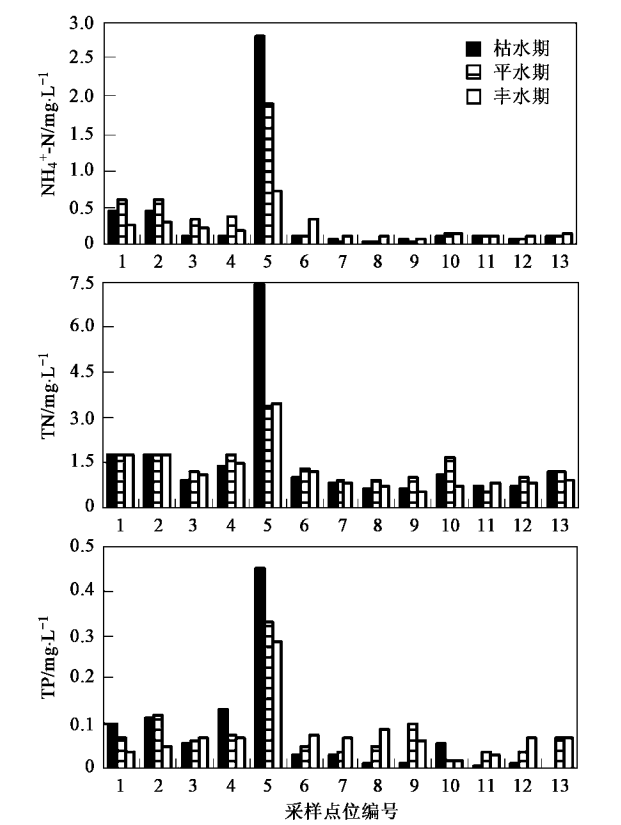


图3 N、P含量季节变化  
Fig.3 Distribution of N and P in diverse season

本为平水期和丰水期大于枯水期.浮游植物生长与营养盐含量水平、水流流态(流速、水深等)和适宜的气象条件(水温、光照等)等因素均有关<sup>[15-16]</sup>.对3个季节13条支流Chl-a作无重复双因子方差分析,

表2 Chla与营养化因子相关性

|                          | Chl-a    | COD      | 高锰酸盐指数   | $\text{NH}_4^+-\text{N}$ | TN       | TP |
|--------------------------|----------|----------|----------|--------------------------|----------|----|
| Chl-a                    | 1        |          |          |                          |          |    |
| COD                      | 0.557 93 | 1        |          |                          |          |    |
| 高锰酸盐指数                   | 0.499 52 | 0.690 94 | 1        |                          |          |    |
| $\text{NH}_4^+-\text{N}$ | 0.530 91 | 0.673 70 | 0.777 24 | 1                        |          |    |
| TN                       | 0.327 74 | 0.650 98 | 0.773 75 | 0.940 12                 | 1        |    |
| TP                       | 0.513 55 | 0.680 53 | 0.763 79 | 0.909 64                 | 0.904 54 | 1  |

对应分析是在主成分分析的基础上发展起来的多元统计分析方法,研究变量与变量间、样本与样本间、变量与样本间的关系,并将3种信息表示在同一图上,从而进行分类<sup>[22]</sup>.根据污染物与污染源间因果关系,通过调查数据,运用对应分析法推算污染源的类型及成因.对13条支流5个营养因子进行对应分析,提取的2个因子解释了总方差的98.4%.对应分析结果见图5,可将不同支流污染类型大致分为4

类.第1类Chl-a型包括芄溪河(编号5);第2类高锰酸盐指数-TN污染型,包括渠溪河、龙河(编号1、2);第3类 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ -TP污染型,包括汤溪河、磨刀溪、长滩河、梅溪河、大宁河、神女溪、抱龙河(编号7、8、9、10、11、12、13);第4类COD污染型,包括黄金河、汝溪河、澎溪河(编号3、4、6).根据对应分析结果分析,污染类型的划分与支流的区域分布相吻合,表明同一或相邻区域可能受到相似污染.除芄溪河

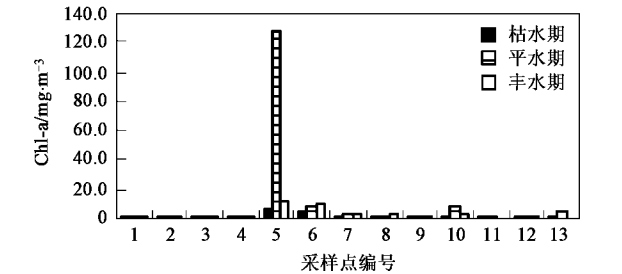


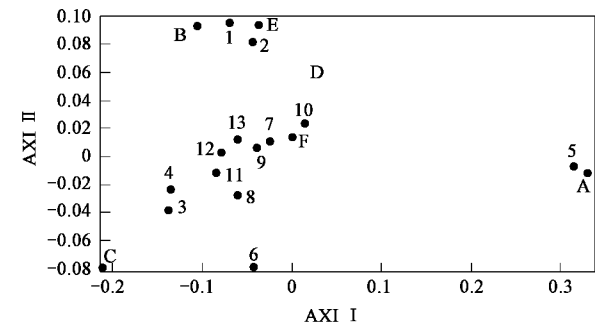
图4 Chl-a含量季节变化  
Fig.4 Distribution of Chl-a in diverse season

2.2.4 Chl-a与营养因子关系

在湖泊、水库缓流状态下,一般Chl-a与N、P间存在不同程度的线性关系<sup>[18-20]</sup>.但河流是一个非常复杂的环境生态体系,所涉及的因子很多.有关河流生产力指标Chl-a与富营养化指标之间的关系研究报道不多<sup>[21]</sup>.三峡水库支流Chl-a与营养因子相关关系见表2.Chl-a除与TN呈显著正相关关系外,与其它指标均呈极显著正相关关系.营养因子间均呈极显著正相关关系,可能与各营养因子具有相同来源有关.

类.第1类Chl-a型包括芄溪河(编号5);第2类高锰酸盐指数-TN污染型,包括渠溪河、龙河(编号1、2);第3类 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ -TP污染型,包括汤溪河、磨刀溪、长滩河、梅溪河、大宁河、神女溪、抱龙河(编号7、8、9、10、11、12、13);第4类COD污染型,包括黄金河、汝溪河、澎溪河(编号3、4、6).根据对应分析结果分析,污染类型的划分与支流的区域分布相吻合,表明同一或相邻区域可能受到相似污染.除芄溪河

为万州区(原中等城市-万州市)城区河流,已演变为接纳各种废水排放河道外,黄金河、汝溪河、澎溪河处于库区中上游,工业较发达表现为 COD 污染型;汤溪河、磨刀溪、长滩河、梅溪河、大宁河、神女溪、抱龙河处于库区下游近坝端,主要为山地农业耕作区,表现为 $\text{NH}_4^+$ -N-TP面源污染型.



1 ~ 13 为采样点编号; A 为 Chl-a, B 为高锰酸盐指数, C 为 COD, D 为 $\text{NH}_4^+$ -N, E 为 TN, F 为 TP

图 5 对应分析结果

Fig.5 Result of analysis

2.3 营养盐输出

大多数支流营养盐、有机物含量均低于干流,但其含量也远超过水体发生富营养化的限制值,支流营养盐、有机物的输入会影响干流总体负荷.将支流视作接纳了生活污水、工业废水和地表径流等污染源排口,计算了调查支流营养盐和有机物输出负荷.对 13 条支流不同季节 C、N、P 输出结果见表 3. 13 条支流 COD 2、5、9 月输出分别为 1 772、5 952、

6 701  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 高锰酸盐指数输出分别为 380、748、1 875  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\text{NH}_4^+$ -N 输出分别为 40.2、93.0、172  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ; TN 输出分别为 249、573、922  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ; TP 输出分别为 9.97、30.0、50.5  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ . 主要受支流流量影响,各支流 C、N、P 输出均为丰水期 > 平水期 > 枯水期. C、N、P 输出与流量( $Q$ )均呈显著正相关,高锰酸盐指数 =  $2.019\,3\,Q - 3.740\,2$ ,  $r^2 = 0.824\,3$ ; COD =  $10.682\,Q - 57.619$ ,  $r^2 = 0.611\,5$ ;  $\text{NH}_4^+$ -N =  $0.198\,Q - 0.104\,6$ ,  $r^2 = 0.532\,1$ ; TN =  $1.013\,4\,Q + 4.192\,4$ ,  $r^2 = 0.828\,3$ ; TP =  $0.056\,9\,Q + 0.041\,2$ ,  $r^2 = 0.731\,1$ . 澎溪河(编号 6)由于流量最大,其输出也最大,不同季节 COD、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN、TP 分别占输出总量的 33.9% ~ 49.7%、19.8% ~ 39.0%、13.9% ~ 37.2%、21.8% ~ 24.4%、17.4% ~ 28.9%. 枯水期输出 N/P 为 25.0,平水期为 19.1,丰水期为 18.2,支流 N、P 的输出比值在浮游植物生长适合范围内. 将各支流输出负荷换算成年输出,调查支流 COD、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN、TP 年输出负荷分别为 145 858、1 788、3 134、17 882、932 t. 其中大宁河(编号 11)与 2004 年 11 个月逐月 TN、TP 输出计算比较<sup>[23]</sup>,相对标准偏差分别为 2.32% 和 33.6%,表明本研究采用的估算方法与逐月计算结果具有可比性,对支流输出通量估算结果可能较接近实际状况. 与 67 个直接排入长江的城市污水排放口输出负荷比较<sup>[24]</sup>,支流 COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN、TP 输出分别为其 117%、41%、156%, 48.7%, 支流对三峡水库营养盐的输入应该引起足够重视.

表 3 支流营养盐输出负荷/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$

Table 3 Fluxes load of N, P and organic contamination of tributaries/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$

| 支流编号 | COD  |       |       | 高锰酸盐指数 |      |      | $\text{NH}_4^+$ -N |      |      | TN   |      |      | TP   |      |      |
|------|------|-------|-------|--------|------|------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|      | 2 月  | 5 月   | 9 月   | 2 月    | 5 月  | 9 月  | 2 月                | 5 月  | 9 月  | 2 月  | 5 月  | 9 月  | 2 月  | 5 月  | 9 月  |
| 1    | 33.9 | 86.6  | 200   | 16.9   | 41.4 | 100  | 3.07               | 8.04 | 6.16 | 12.4 | 23.6 | 43.0 | 0.71 | 0.92 | 0.97 |
| 2    | 108  | 364   | 452   | 56.7   | 96.5 | 200  | 12.3               | 33.6 | 28.8 | 46.6 | 102  | 159  | 3.03 | 6.68 | 4.84 |
| 3    | 84.4 | 205   | 304   | 19.3   | 47.6 | 47.7 | 0.76               | 5.03 | 4.86 | 6.65 | 24.6 | 36.5 | 0.56 | 0.79 | 1.42 |
| 4    | 67.3 | 165   | 254   | 15.4   | 32.0 | 45.0 | 0.62               | 3.85 | 4.48 | 5.85 | 19.6 | 29.9 | 0.38 | 0.78 | 1.47 |
| 5    | 74.2 | 121   | 141   | 11.8   | 22.4 | 45.3 | 5.33               | 7.60 | 13.0 | 11.6 | 13.6 | 28.8 | 1.03 | 1.33 | 1.39 |
| 6    | 694  | 2 960 | 2 272 | 75.3   | 292  | 473  | 5.60               | 13.7 | 64.0 | 54.3 | 140  | 225  | 1.78 | 5.23 | 14.6 |
| 7    | 120  | 253   | 459   | 36.5   | 30.4 | 183  | 2.27               | 1.72 | 8.72 | 21.9 | 46.6 | 79.8 | 0.78 | 1.98 | 6.24 |
| 8    | 166  | 794   | 474   | 47.0   | 11.7 | 199  | 1.36               | 3.15 | 10.6 | 18.5 | 57.2 | 74.0 | 0.28 | 3.03 | 8.16 |
| 9    | 57.6 | 124   | 225   | 20.5   | 5.0  | 85.6 | 0.93               | 1.09 | 3.69 | 8.96 | 26.4 | 26.1 | 0.15 | 3.63 | 2.84 |
| 10   | 78.9 | 179   | 416   | 22.8   | 68.4 | 141  | 1.58               | 4.12 | 6.50 | 16.4 | 50.2 | 50.8 | 0.87 | 0.58 | 0.74 |
| 11   | 210  | 553   | 1 219 | 43.6   | 72.5 | 248  | 5.27               | 9.37 | 16.2 | 35.0 | 44.4 | 131  | 0.27 | 3.98 | 4.80 |
| 12   | 58.5 | 110   | 208   | 10.2   | 18.0 | 85.9 | 0.79               | 1.14 | 3.30 | 6.87 | 17.8 | 27.7 | 0.10 | 0.63 | 2.29 |
| 13   | 19.5 | 37.2  | 76.9  | 4.27   | 9.86 | 22.0 | 0.29               | 0.57 | 1.52 | 3.59 | 7.05 | 10.3 | 0.03 | 0.41 | 0.75 |

3 结论

(1) 三峡水库支流水体有机污染较轻,N、P 污染严重,调查支流水体的 TN 和绝大多数支流 TP 含量均远高于限制值,N、P 浓度条件适宜藻类生长.水体中 N 含量丰富,部分支流 P 为营养限制因子.受流速影响支流Chl-a含量除个别水体外,绝大多数处于贫-中营养水平.营养因子在时间、空间分布上存在不同程度差异.

(2) Chl-a与营养因子以及营养因子间都呈显著正相关关系.对应分析结果表明同一或相邻区域可能受到相似污染.

(3) C、N、P 输出与流量均成显著正相关,支流营养盐、有机物的输出主要受支流流量影响,各支流 C、N、P 输出均为丰水期 > 平水期 > 枯水期.支流 COD、TN 年输出超过 67 个直接排入长江的城市污水排放口负荷,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 年输出负荷占其 40% 以上,支流对三峡水库营养盐的输入应该引起足够重视.

参考文献:

[ 1 ] 张晟,刘景红,黎莉莉,等.三峡水库成库初期营养盐与浮游植物分布特征[J].环境科学, 2006, 27(6):1056-1061.

[ 2 ] 吕怡兵,宫正宇,连军,等.长江三峡库区蓄水后水库水质状况分析[J].环境科学研究, 2007, 20(1):1-6.

[ 3 ] 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[J].水生生物学报, 2006, 30(1):26-30.

[ 4 ] 李永建,李斗果,王德蕊.三峡工程 II 期蓄水对支流富营养化的影响[J].西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(4): 474-478.

[ 5 ] 郭平,龚宇,李永建,等.三峡水库 135 m 水位蓄水典型次级河流回水段富营养化监测评价[J].中国环境监测, 2005, 21 (2):88-90.

[ 6 ] 张晟,李崇明,王毓丹,等.乌江水污染调查[J].中国环境监测, 2003, 19(1):23-26.

[ 7 ] 张晟,李崇明,郑丙辉,等.三峡库区次级河流营养状态及营养盐输出影响[J].环境科学, 2007, 28(3):500-505.

[ 8 ] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社, 2000.123-375.

[ 9 ] 刘健康.东湖生态学研究(二)[M].北京:科学出版社, 1995. 63-226.

[ 10 ] 张晟,李崇明,吕平毓,等.三峡水库成库后水体中 COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub> 空间变化[J].湖泊科学, 2007, 19(1):70-76.

[ 11 ] 张晟,刘景红,张全宁,等.三峡水库成库初期 N、P 分布特征[J].水土保持学报, 2005, 19(4):123-126.

[ 12 ] 金湘灿,刘鸿亮,屠清瑛,等.中国湖泊富营养化调查[M].北京:中国环境科学出版社, 1990.68-70.

[ 13 ] 彭近新,陈慧君.水质富营养化与防治[M].北京:中国环境出版社, 1988.15-47.

[ 14 ] Organization for Economic Cooperation and Development. Eutrophication of waters monitoring, assessment and control [M]. Paris: OECD, 1982.

[ 15 ] 叶闽,洪一平,彭盛华.三峡水库水体富营养化的潜势研究[A].见:黄真理.中国环境水力学 2002[C].北京:中国水利水电出版社, 2002.26-30.

[ 16 ] 李锦秀,廖文根.三峡库区富营养化预测方法探讨[A].见:黄真理.中国环境水力学 2002 [C].北京:中国水利水电出版社, 2002.37-42.

[ 17 ] 张晟,李崇明,付永川,等.三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出[J].环境科学, 2008, 29(1):7-12.

[ 18 ] Prairie Y T, Duarte C M, Kalff J. Unifying nutrient-chlorophyll relationships in lakes[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1989, 46: 1176-1182.

[ 19 ] Jones J R, Knowlton M F. Limnology of Missouri reservoirs: an analysis of regional patterns[J]. Lake and Reservoir Management, 1993, 8: 17-30.

[ 20 ] 刘景红,张晟,陈玉成,等.重庆市水库富营养化调查及评价[J].水土保持学报, 2005, 19(4):131-134.

[ 21 ] Erwin E, Van N, Jones J R. Phosphorus-chlorophyll relationship in temperate streams and its variation with stream catchment area[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1996, 53:29-36.

[ 22 ] 陈玉成,吕宗清,李章平.环境数学分析[M].重庆:西南师范大学出版社, 1998.114-118.

[ 23 ] 罗专溪,朱波,郑丙辉,等.三峡水库支流回水河段氮磷负荷与干流的逆向影响[J].中国环境科学, 2007, 27(2):208-212.

[ 24 ] 国家环境保护总局.长江三峡工程生态与环境监测公报[R].北京:国家环境保护总局, 2003.21-22.