

三峡水库支流回水区营养状态季节变化

张晟^{1,2}, 李崇明², 郑坚², 刘婷婷¹, 曾凡海³, 付永川²

(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 条主要支流回水区有机物、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、化学耗氧量(COD)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+ -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 0.20~9.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 含量范围 4.58~42.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 含量范围 0.601~10.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N 含量范围 0.044~6.82 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 含量范围 0.011~0.756 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Chl-a 值范围为 2.0~161 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 支流回水区受到不同程度污染, 水体中 N 含量丰富, 部分支流富营养化的限制因子为 P. 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. 回水区 Chl-a 含量高于上游区, 季节分布有丰水期>平水期>枯水期. Chl-a 与 COD、高锰酸盐指数、TN、TP 呈显著正相关关系. 利用综合营养状态指数法评价了回水区富营养化程度, 综合营养指数范围在 35~72, 所有支流达到中营养以上水平, 不同季节营养状态表现为丰水期>平水期>枯水期. 支流回水区富营养化程度较成库前严重, 该区域水体富营养化应引起重视.

关键词: 三峡水库; 支流; 营养状态; 季节变化

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)01-0064-06

Seasonal Variation of Trophic States in Backwater Areas of Tributaries in Three Gorges Reservoir

ZHANG Sheng^{1,2}, LI Chong-ming², ZHENG Jian², LIU Ting-ting¹, ZENG Fan-hai³, FU Yong-chuan²

(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 backwater areas of 13 tributaries in three seasons. Potassium permanganate index, chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH_4^+ -N), total phosphorus (TP) and chlorophyll a (Chl-a) value are 0.20-9.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 4.58-42.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 0.601-10.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 0.044-6.82 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 0.011-0.756 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 2.0-161 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 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. Utilizing the method of between-subjects effects tests, it is indicated that spatial and seasonal distribution of nutrient factors is different in diverse seasons. Chl-a value of backwater areas of tributaries is usually beyond upstream and concentration of Chl-a in flood season is higher than that in normal and dry season. There was a significant positive correlation between Chl-a nutrient and organic contamination. Utilizing the method of integrated nutrition state index, it assessed the trophic states degree of the studied area. The integrated nutrition state index ranged 35-72. All of the studied tributaries are beyond mesotropher. The degree of eutrophication in flood season is higher than that in normal and dry season. The degree of eutrophication is more serious than that before the Three Gorges Reservoir impoundment. The problem of eutrophication in tributaries of Three Gorges Area should be noticed.

Key words: Three Gorges Reservoir; tributary; trophic state; seasonal variation

2003 年 6 月, 三峡水库蓄水后, 库区水位提高、水流减缓、水体扩散能力减弱、污染物滞留时间延长, 水环境条件发生了巨大变化^[1,2]. 受干流回水顶托的影响, 部分支流回水区污染加重, 局部区域水体富营养化频繁发生, 甚至部分支流发生严重“水华”现象, 已经引起广泛关注^[3-5]. 支流回水区是受干流、支流不同生境连接形成的生态交错区, 相邻生境间进行着有关物理、化学、生物等过程的重要交换, 并彼此影响. 支流回水区的范围与支流地形条件(坡度)和干、支流流速、流量有关, 该区域干流水体倒灌及其顶托作用而引起支流水体的流速减缓、水质污

染、生物多样性等的显著变化^[6]. 三峡水库成库后对少数典型支流回水区营养状态进行过初步研究^[7,8], 但在较大尺度上的连续性研究鲜见报道. 本研究对三峡水库重庆段 13 条主要支流回水区断面营养盐和生物量在枯水期、平水期和丰水期含量和营养状态变化进行了初步分析, 以期为三峡库区富营养化的研究和防治提供科学依据.

收稿日期: 2008-01-21; 修订日期: 2008-04-13

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(2007BB7241, 2007BB7242); 重庆市建委项目(2007-54, 2007-56)

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: shengzsts@126.com

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. 在各支流回水区范围中段设置 1 个采样断面, 按水样采集规范^[9], 根据不同支流回水区的宽度, 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.



图 1 样品采集点位

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(NH₄⁺-N)、高锰酸盐指数、叶绿素 a(Chl-a)、pH、溶解氧(DO)、电导率、透明度(SD)、水温等 11 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; NH₄⁺-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、NH₄⁺-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 营养状态评价方法

水体的营养状态主要取决于一系列相关因子的综合作用, 如 N、P 等营养盐和 SD 等. 本研究采用了包括 Chl-a、高锰酸盐指数、TN、TP 和 SD 在内的相关加权综合营养状态指数来评价各河流的营养状态^[10]. 综合营养状态指数计算公式为:

$$TLI(\sum) = \sum_{i=1}^m W_j \cdot TLI(j)$$

式中, TLI($\sum$) 为综合营养状态指数; TLI(j) 代表第 j 种参数的营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重, 各因子 W_j 取值见表 1. 以 Chl-a 作为基准参数, 营养状态指数计算公式为:

$$TLI(Chl-a) = 10(2.5 + 1.086 \ln Chl-a)$$
$$TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624 \ln TP)$$
$$TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694 \ln TN)$$
$$TLI(SD) = 10(5.118 - 1.94 \ln SD)$$
$$TLI(高锰酸盐指数) = 10(0.109 + 2.661 \ln 高锰酸盐指数).$$

采用 0 ~ 100 的一系列连续数字对水体营养状态进行分级: TLI($\sum$) < 30 为贫营养; 30 ≤ TLI($\sum$) ≤ 50 为中营养; TLI($\sum$) > 50 为富营养 (50 < TLI($\sum$) ≤ 60 为轻度富营养; 60 < TLI($\sum$) ≤ 70; 为中度富营养; TLI($\sum$) > 70 为重度富营养). 在同一营养状态下, 指数值越高, 其营养程度越重.

表 1 Chl-a 与其它因子的 W_j 值

Table 1 W_j value of chl-a and other parameter					
参数	Chl-a	TP	TN	SD	高锰酸盐指数
W_j	0.266 3	0.187 9	0.179 0	0.183 4	0.183 4

2 结果与讨论

2.1 物理化学参数特征

表 2 为三峡水库主要支流物理化学参数. pH 范围在 7.22~8.82, 均为中偏弱碱性水体. DO 含量范围在 0.20~11.7 mg·L⁻¹, 除芈溪河夏季污染重、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丰水期; 电导率范围在 187~646 μS·cm⁻¹, 枯水期大于平水期和丰水期, 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, 不同河流水温相对变化较大, 其中 2 月水温范围为 8.0~13.0℃; 5 月为 17.5~25.0℃; 9 月为 19.8~28.2℃. 透明度(SD)主要受水体中悬浮物和浮游生物量的影响, 由于各支流流域生态环境状况不同, 导致 SD 范围变化大, 各支流 SD 范围在 20~450 cm, 受水土流失的影响绝大多数支流 SD 丰水期最小.

2.2 营养状态因子特征

表 2 物理化学参数

Table 2 Results of physical chemistry parameters																
支流 编号	支流名称	水温/℃			pH			DO/mg•L ⁻¹			电导率/μS•cm ⁻¹			SD/cm		
		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	渠溪河	9.0	19.5	22.5	7.68	7.69	7.87	8.10	7.80	7.80	202	214	209	40	40	40
2	龙河	9.0	17.5	19.8	7.63	7.73	7.72	7.90	7.60	7.70	243	187	193	40	20	30
3	黄金河	13.0	23.7	27.8	8.38	8.43	8.43	7.26	9.82	7.42	206	261	316	90	60	60
4	汝溪河	12.7	24.6	28.2	8.82	8.16	8.46	8.75	8.74	7.46	221	246	346	150	80	70
5	芑溪河	10.2	23.0	28.0	7.22	8.50	8.56	0.20	10.1	8.78	600	443	399	40	60	50
6	澎溪河	9.0	21.0	25.6	7.76	7.82	7.56	6.90	6.00	6.80	646	588	168	100	70	70
7	汤溪河	9.0	20.5	25.6	7.66	7.60	7.36	7.18	6.20	7.20	545	534	347	100	80	90
8	磨刀溪	8.0	20.5	25.0	7.28	7.46	7.28	7.00	6.20	7.00	573	497	219	100	70	80
9	长滩河	8.5	20.5	25.5	7.39	7.38	7.26	7.02	6.40	7.00	369	392	248	110	80	70
10	梅溪河	8.0	23.5	24.0	8.17	8.30	8.21	8.58	6.88	6.69	264	250	246	140	100	200
11	大宁河	9.0	25.0	21.0	8.67	8.26	8.37	11.7	9.75	9.35	403	360	290	280	450	300
12	神女溪	11.0	22.5	22.0	8.56	8.05	8.28	11.4	7.18	8.15	385	368	293	430	170	100
13	抱龙河	11.0	22.0	22.0	8.55	8.77	8.60	11.2	10.9	19.0	385	350	251	380	300	100

2.2.1 有机物含量变化

支流回水区有机物含量季节变化见图 2。高锰酸盐指数作为有机污染的指标,当其超过 4 mg•L⁻¹ 时,表示水体已受到有机污染^[11],三峡库区 3 条支流水体高锰酸盐指数含量超过 4 mg•L⁻¹,回水区高锰酸盐指数范围在 0.20~9.61 mg•L⁻¹。高锰酸盐指数芑溪河含量最高,各季节均达到 9 mg•L⁻¹ 以上,其余支流处于地表水Ⅰ~Ⅲ类水质之间。COD 含量范围在 4.58~42.0 mg•L⁻¹,芑溪河含量最高,各季节均达到 30 mg•L⁻¹ 以上,其余支流达到地表水Ⅰ~Ⅲ

类。高锰酸盐指数和 COD 含量分布表明,三峡库区绝大多数支流回水区还未受有机污染严重影响,与同期三峡水库干流比较^[12],大多数支流高锰酸盐指数含量低于干流,但高于支流上游入库断面,与回水区同时受干、支流影响有关。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)分布上均有显著差异;高锰酸盐指数在支流空间分布无显著差异,但在时间分布上有显著差异(95%置信水平)。

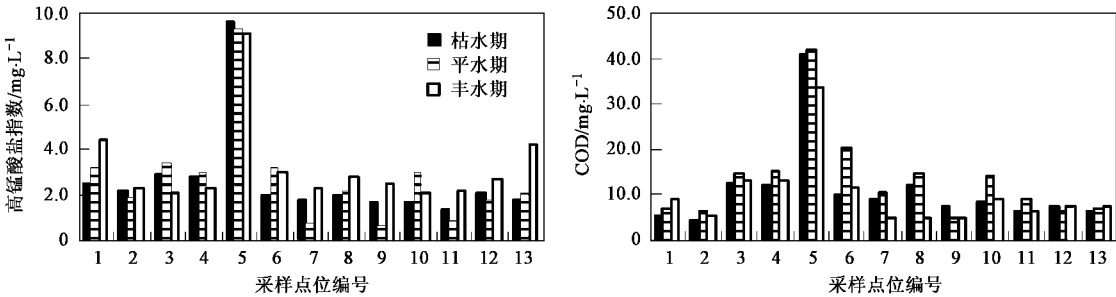


图 2 有机物含量季节变化

Fig.2 Distribution of organic contamination in diverse season

2.2.2 N、P 含量变化

支流 N、P 含量变化见图 3。 NH_4^+ -N 含量范围在 0.044~6.82 mg•L⁻¹,除芑溪河枯水期、平水期含量超过 2 mg•L⁻¹,为劣Ⅴ类水质,其余支流均达到Ⅰ~Ⅲ类标准。TN 含量范围在 0.601~10.1 mg•L⁻¹,为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 0.011~0.756 mg•L⁻¹,除

芑溪河水质较差,其余支流优于Ⅲ类水质标准。一般认为,当水体中 TN、TP 含量分别达到 0.20、0.02 mg•L⁻¹ 以上时,水体存在发生富营养化的风险,调查支流水体的 TN 和绝大多数支流 TP 含量均远高于限值,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 N/P < 7,氮将限制藻类的生长,N/P 在 8~30 为适应藻类生长范围,N/P > 30,P 将成为藻类生长的限制因子^[13]。三峡水库调查支流 N/P 范围在 9~106,绝大

多数在 8~30 之间,表明水体 N/P 条件较适合藻类的生长,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 含量空间分布有显著差异,时间分布无显著差异.TP 空间、时间分布均无显著差异.和有机物分布较一致,大多数支流回水区 TN、TP 含量低于干流^[14],高于支流上游,与回水区同时受干、支流影响有关.该区域水体中污染物并未充分混合,各支流污染物分布可能因回水区形成规模不同而存在不同程度的梯度变化.本研究从较大尺度上分析三峡水库支流回水区的总体变化,以回水区中段水质代表该区域平均水质.对具体支流污染物在回水区的梯度分布变化特征将作进一步的研究.

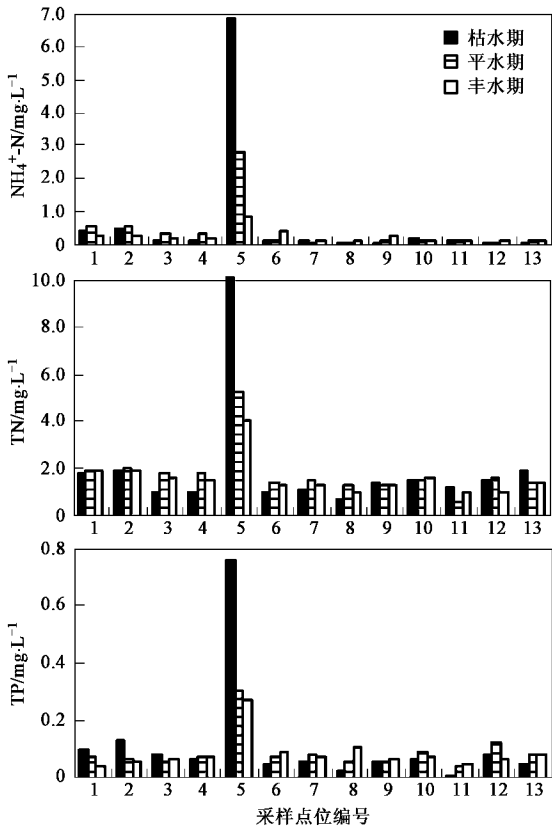


图 3 N、P 含量季节变化

Fig.3 Distribution of N and P in diverse season

2.2.3 Chl-a 含量变化

浮游植物色素的测定可作为生物量的重要指标,从 Chl-a 含量的测定确定藻类生物量的大小,Chl-a 含量是水体中浮游植物生物量的综合指标,代表富营养化结果.Chl-a 含量季节变化见图 4,Chl-a 值范围为 $2.0 \sim 161 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 苎溪河在各季节均最高.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)^[15],枯水期所有支流均为贫-中营养水平;平水期 4 条支流达到富营养以上水平(30.8%),其中苎溪河达到严重富营养,其余支流为贫-中营养水平;丰水期 6 条支流达到富营养以上水平(46.2%),其中苎溪河达到严重富营养,其余支流为中营养.从本次调查结果分析,三峡水库支流回水区 Chl-a 含量有丰水期 > 平水期 > 枯水期的变化规律.适宜于浮游藻类生长的水温条件一般为 $15 \sim 25^\circ\text{C}$,枯水期 Chl-a 值较低可能与水温较低和光照较弱有关,枯水期 13 条支流回水区水温范围在 $8.0 \sim 13.0^\circ\text{C}$,水温范围处于适宜水温的底线以下.与支流上游 Chl-a 值比较,各季节回水区不同程度的大于上游,但枯水期 Chl-a 含量的增加不如平水期和丰水期增加明显,与枯水期水温对支流上游河流段和下游回水段均为限制因子有关.Chl-a 作无重复双因子方差分析,Chl-a 在不同空间、时间分布均有显著差异.

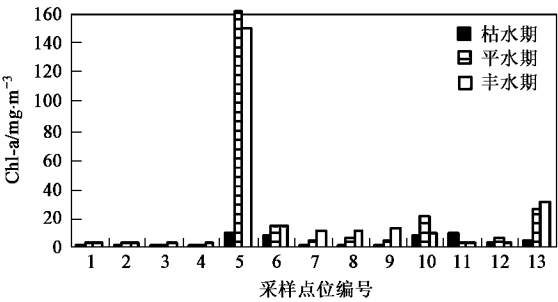


图 4 Chl-a 含量季节变化

Fig.4 Distribution of Chl-a in different season

2.3 营养因子关系

一般在湖泊、水库条件下,Chl-a 与 SD 呈显著负相关,与部分营养盐呈显著正相关^[16~18].回水区营养因子间相关关系见表 3.Chl-a 与 COD、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 呈正相关关系,其中与 COD、高锰酸盐指数、TN、TP 均呈显著正相关;本研究中 Chl-a 与 SS、SD 呈负相关,但相关关系不显著,表明回水区透明度受浮游藻类和悬浮物双重影响,与该区域复杂的水环境条件有关;有机物与营养盐均呈显著正相关,表明水体中污染物来源可能相同.

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^[19].根据污染物与污染源间因

表 3 营养因子间相关关系

Table 3 Correlation coefficients among trophic factors

	Chl-a	COD	高锰酸盐指数	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	SS	SD
Chl-a	1							
COD	0.696	1						
高锰酸盐指数	0.745	0.880	1					
NH ₄ ⁺ -N	0.296	0.749	0.755	1				
TN	0.426	0.800	0.828	0.968	1			
TP	0.386	0.778	0.803	0.962	0.969	1		
SS	-0.064	-0.006	0.103	-0.014	0.003	-0.022	1	
SD	-0.134	-0.248	-0.322	-0.218	-0.242	-0.221	-0.504	1

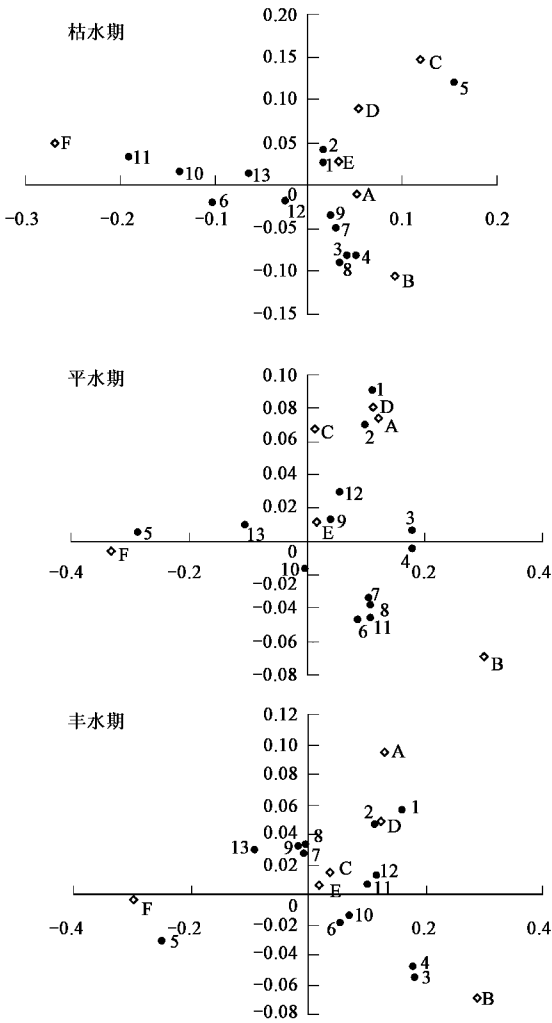
果关系,通过调查数据,运用对应分析法推算污染源的类型及成因.对 13 条支流 5 个营养因子进行对应分析,枯水期、平水期、丰水期提取的前 2 个因子分别解释了总方差的 92.12%、96.89%、91%.对应分析结果见图 5,大致可将不同支流污染类型大致分为 4 类,不同季节间计算值有不同程度的差异,平水期和丰水期结果较接近,这种差异与不同季节间污染物来源变化和藻类生长变化较大有关.以丰水期为例,第 1 类高锰酸盐-TP 污染型,包括渠溪河、龙河(编号 1、2);第 2 类 COD 污染型,包括黄金河、汝溪河(编号 3、4);第 3 类 NH₄⁺-N-TP 污染型,包括澎溪河、汤溪河、磨刀溪、长滩河、梅溪河、大宁河、神女溪、抱龙河(编号 6~13);第 4 类 Chl-a 型,主要为芘溪河(编号 5).

2.4 营养状态评价

不同季节支流回水区营养状态评价结果见图 6.综合营养指数范围在 35~72,支流回水区水体营养程度较高,无贫营养水平,13 条支流均达到中营养水平以上,其中枯水期有 1 条支流达到富营养化水平,平水期达到富营养化的支流达 4 条(30.8%),丰水期达到富营养化的支流为 6 条(46.2%),仅芘溪河各季节均达到重度富营养化水平.本次调查,三峡水库支流回水区水体营养化程度水平为丰水期>平水期>枯水期.与三峡库区成库前的 2003 年支流营养程度比较,综合营养状态指数范围为 23.56~58.25,最高值为芘溪河,最小值为大宁河.达到富营养化的只有芘溪河,且为轻度富营养化;汤溪河、大宁河达到贫营养,其余河流为中营养水平^[20].各支流综合营养状态指数成库后比三峡水库成库前均有不同程度的增高,表明三峡水库成库后,支流回水区水体营养程度的加重明显受三峡水库蓄水水体流速减缓的影响.

3 结论

(1) 三峡水库支流回水区有机物和 TP 含量普



1~13 为采样点编号; A 为高锰酸盐指数, B 为 COD, C 为 NH₄⁺-N, D 为 TN, E 为 TP, F 为 Chl-a

图 5 不同季节对应分析结果

Fig.5 Result of analysis in different season

遍较低, TN 含量普遍较高. TP、TN 含量超过水体发生富营养化的限制值, 存在发生富营养化的风险, P 为部分支流水体富营养化的限制因子. 从本次调查结果分析, 三峡水库支流回水区 Chl-a 含量有丰水

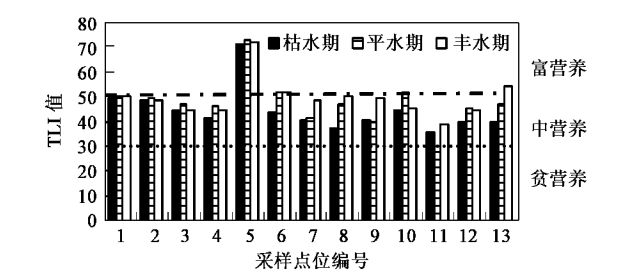


图 6 支流回水区水体营养状态评价结果

Fig.6 Assessment results of trophic states in backwater of tributaries

期>平水期>枯水期的变化规律。

(2) Chl-a 与 COD、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 呈正相关关系,其中与 COD、高锰酸盐指数、TN、TP 呈显著正相关。Chl-a 与 SS、SD 呈负相关,但相关关系不显著。

(3) 支流回水区水体营养程度较高,所有支流均达到中营养水平以上,其中枯水期有 1 条支流达到富营养化水平,平水期达到富营养化的支流达 4 条(30.8%),丰水期达到富营养化的支流为 6 条(46.2%),苈溪河各季节均达到重度富营养化水平。支流综合营养状态指数成库后比三峡水库成库前均有不同程度的增高。

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.三峡水库蓄水前后苈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] Melanie C, Franz S, Christoph D M. Effects of increased flow in the main stem of the River Rhine on the invertebrate communities of its tributaries [J]. Freshwater Biology, 2005, 50(1): 10-26.

[7] 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.

[8] 叶麟,徐耀阳,蔡庆华.苈溪河库湾春季水华期间硝酸盐、磷酸盐的时空分布[J].水生生物学报,2006,30(1):75-79.

[9] 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.

[10] 金相灿,屠清英.湖泊富营养化调查规范[M].北京:中国环境科学出版社,1990.286-302.

[11] 刘健康编.东湖生态学研究(二)[M].北京:科学出版社,1995.63-226.

[12] 张晟,李崇明,吕平毓,等.三峡水库成库后水体中 COD_{Mn} 、 BOD_5 空间变化[J].湖泊科学,2007,19(1):70-76.

[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] 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.

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

[16] 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.

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

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

[19] 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.

[20] 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.