

三峡库区次级河流营养状态及营养盐输出影响

张晟^{1,2}, 李崇明², 郑丙辉¹, 翟崇志², 郑坚², 张芹²

(1. 中国环境科学研究院水环境研究所, 北京 100012; 2. 重庆市环境科学研究院, 重庆 400020)

摘要:通过对三峡库区 15 条次级河流 TP、TN、Chla、高锰酸盐指数、SD 和浮游植物的测定, 分析了次级河流的营养状态及营养盐输出状况。结果表明, 次级河流 TN、TP、高锰酸盐指数、Chla 含量和 SD 差异较大, SD 范围为 0.45 ~ 1.5 m, TN 含量范围为 0.65 ~ 4.27 mg·L⁻¹, TP 含量范围为 0.011 ~ 0.432 mg·L⁻¹, 高锰酸盐指数范围为 0.657 ~ 5.37 mg·L⁻¹, Chla 值范围为 0.57 ~ 12.2 mg·m⁻³。次级河流受到不同程度污染, 水体中 N 含量丰富, 部分次级河流富营养化的限制因子为 P。利用综合营养状态指数法评价了次级河流富营养化程度, 结果表明 3 条达到轻度富营养化, 2 条为贫营养, 10 条河流为中营养。次级河流藻类 7 门 67 属 129 种, 种类数以硅藻、绿藻和蓝藻最多。浮游植物的群落类型以硅-绿藻型、硅-蓝藻型和蓝-绿藻型为主, 种类和数量随水域不同而呈现差异, 水体营养特征为浮游植物响应型。15 条次级河流年排放 TN、TP 和高锰酸盐指数分别为 3.14 × 10⁵ t、1.76 × 10⁴ t 和 2.74 × 10⁵ t。三峡水库完工后, 由于次级河流河口区水体流速减缓, 富营养化趋势可能加重。

关键词: 三峡库区; 次级河流; 营养状态; 营养盐; 输出

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)03-0500-06

Trophic States and Nutrient Output of Tributaries in Three Gorges Reservoir Area

ZHANG Sheng^{1,2}, LI Chong-ming², ZHENG Bing-hui¹, ZHAI Chong-zhi², ZHENG Jian², ZHANG Qin²

(1. Institute of Water Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Chongqing Academy of Environmental Science, Chongqing 400020, China)

Abstract: TP, TN, chlorophyll a, potassium permanganate index and secchi depth (SD) and phytoplankton were determined in 15 tributaries of Three Gorges Reservoir. Trophic states were assessed and output fluxes of TN, TP and potassium permanganate index were calculated. The results showed that value of TN, TP, potassium permanganate index, SD and Chla were different in each tributary. SD, TN, TP, potassium permanganate index and Chla value are 0.45 ~ 1.5 m, 0.65 ~ 4.27 mg·L⁻¹, 0.011 ~ 0.432 mg·L⁻¹, 0.657 ~ 5.37 mg·L⁻¹ and 0.57 ~ 12.2 mg·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 integrated nutrition state index, it assessed the trophic states degree of tributaries. All of the studied tributaries, 3 tributaries are eutropher, 10 tributaries are mesotropher and 2 tributaries are oligotropher respectively. 129 species of phytoplankton are identified, which belongs to 7 division and 67 genera. The dominant species are *Bacillariophyceae*, *Chlorophyceae* and *Cyanophyta*. The type of phytoplankton community is *Bacillariophyceae-Chlorophyceae* type, *Bacillariophyceae-Cyanophyta* type and *Cyanophyta-Chlorophyceae* type. The species and numbers of phytoplankton are various in different tributaries. The nutritive peculiarity belongs to responding type of phytoplankton. The nutrient fluxes load was calculated by discharge and concentration of each tributary. The nutrient fluxes load of TN, TP and potassium permanganate index are 3.14 × 10⁵ t, 1.76 × 10⁴ t and 2.74 × 10⁵ t respectively in one year. After the Three Gorges Dam was completed in 2009, eutrophication trend of tributaries estuaries would be more serious with the decreasing of flow velocity.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; tributary; trophic status; nutrient; output

水体富营养化是营养物质在水体中富集, 从而使水体发生一系列物理、化学和生物的复杂变化的连续过程。其后果不仅导致水环境质量下降, 加重水资源的紧张, 而且给渔业、农业及人群健康带来危害, 严重制约社会经济持续快速发展。水体富营养化是普遍存在的水环境问题, 大多在湖泊、水库和海湾等封闭或半封闭性水体发生, 由于河流一般流速较大, 不利于浮游藻类的生长, 其富营养化程度不如湖泊、水库等静止水体严重。但近年来, 随着工农业和城市建设的不断发展, 我国部分河流水域如汉江、珠江、葛洲坝水库的黄柏河已经出现了“水华”等富营

养化现象^[1,2]。

三峡库区重庆段流域面积在 100 km² 以上, 直接排入长江的次级河流有 42 条, 其中包括嘉陵江和乌江 2 条长度超过 1 000 km 的次级河流, 这些河流有的已出现过富营养化现象^[3]。由于次级河流流经区域接纳了大量工业、生活废水和受农业面源污染

收稿日期: 2006-04-07; 修订日期: 2006-06-21

基金项目: 中意国际合作项目; 重庆市自然科学基金项目 (2005BB7239)

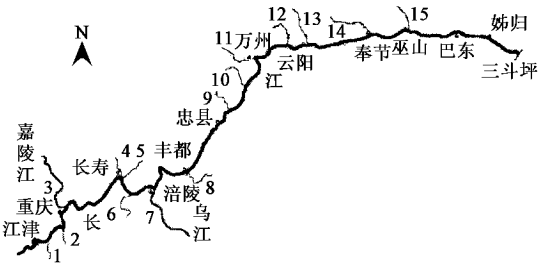
作者简介: 张晟(1971 ~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: shengzsts@126.com

的影响,一般水体营养盐含量较高,三峡库区次级河流的水质状况将直接影响三峡水库的水质安全.因此,作好库区次级河流水污染治理和富营养化防治工作是当前的一项紧迫任务.本文旨在通过对三峡库区重庆段部分次级河流的研究结果,探讨主要次级河流水体富营养化状况及其对三峡水库营养盐输入的影响.

1 研究方法

1.1 样品采集

2002-10 和 2003-03, 分别对 15 条次级河流进行采样分析.各条次级河流设置 2~3 个断面,即接近长江入河口处、河口上游 1~5 km 处,采集 0.5 m 以上表层水,在 1 个断面上,水面宽小于 50 m 时,只设中泓 1 个采样点,水面宽 50~100 m 时,在左、右近岸有明显水流处设 2 个采样点.水面宽大于 100m 时,设置左、中、右 3 个采样点,共采集样品 87 个,每条河流数据结果取各监测断面的平均值.次级河流采样示意图及编号见图 1.



- 1. 綦江河 2. 花溪河 3. 嘉陵江 4. 桃花溪 5. 龙溪河
- 6. 梨香溪 7. 乌江 8. 龙河 9. 汝溪河 10. 壤渡河
- 11. 苎溪河 12. 小江 13. 汤溪河 14. 梅溪河 15. 大宁河

图 1 采样点位示意

Fig.1 Location of sampling sites

1.2 样品分析

水质监测项目 TP、TN、叶绿素 a(Chla)、高锰酸盐指数、透明度(SD)等 5 项.SD 采用塞氏盘法,高锰酸盐指数采用 GB11892-89 规定的方法,Chla 采用分光光度法,TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB11894-89),TP 采用钼酸铵分光光度法(GB11893-89).为了控制测定的准确性,在高锰酸盐指数、TN、TP 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,平行样的相对误差小于 10%.浮游植物定量样品采集时加入鲁哥氏液固定,在室内静置 48 h,静置后用虹吸管缓慢在水面以下吸去多余水样,浓缩至 30 mL,充分摇匀后,用定量吸管取 0.1 mL 注入计数

框内在显微镜下计数.每个样品数 3 片,取其平均值,按 1L 水浓缩的标本量(mL)/计算的标本水量(mL)×计数得的生物数量进行计算^[4].

1.3 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^[5].本研究采用了包括 Chla、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^[6].

2 结果与讨论

2.1 次级河流水环境质量

从图 2 可看出,次级河流 SD 和 TN、TP、高锰酸盐指数、Chla 含量差异较大,其中 SD 范围为 0.45~1.5 m,普遍较低,其中透明度小于 1 m 的河流达到 6 条,占调查河流的 40%.由于三峡库区是我国水土流失严重地区,次级河流 SD 低与库区水土流失严重有关,水体中悬浮物质含量高,影响了次级河流水体的透明度.TN 含量范围为 0.65~4.27 mg•L⁻¹,最大为苎溪河,其 TN 含量超过地表水 V 类水质标准的 2 倍以上,最小为大宁河,其 TN 含量也超过地表水 II 类水质标准.TP 含量范围为 0.011~0.432 mg•L⁻¹,最大也为苎溪河,最小为大宁河.对比同期长江三峡段干流 TN、TP 含量(1.62 mg•L⁻¹、0.13 mg•L⁻¹)^[7],有 8 条次级河流超过干流 TN 浓度值,5 条超过干流 TP 浓度值.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^[8],三峡库区仅 2 条次级河流水体高锰酸盐指数含量超过 4 mg•L⁻¹,次级河流高锰酸盐指数范围为 0.657~5.37 mg•L⁻¹,高锰酸盐指数大宁河含量最低,桃花溪最高,处于地表水 I~III 类水质之间.TN、TP、高锰酸盐指数含量表明次级河流 N、P 污染严重,有机污染相对较轻.国际上一般认为,TN 浓度为 0.2 mg•L⁻¹,TP 浓度为 0.02 mg•L⁻¹是湖泊水库富营养化的发生浓度.按此标准所有调查的河流均具备了产生富营养化的营养盐浓度条件.浮游植物色素的测定可作为生物量的重要指标,从 Chla 含量的测定确定藻类生物量的大小,Chla 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.Chla 值范围为 0.57~12.2 mg•m⁻³,大宁河最低,龙溪河最高.根据世界经济合作与发展组织(OECD)的 Chla 单因子评价标准^[9],除龙溪河达到富营养化外,有 8 条河流达到中营养,6 条为贫营养.表明调查的次级河流中 Chla 含量暂时未达到与营养元素相应

的含量水平,这一结论与金湘灿等的调查结论一致^[10].可能与次级河流有较大流速或其它因素有关.

将 15 条河流的 TN、TP、高锰酸盐指数含量采用系统聚类分析,聚类结果见图 3.根据污染物含量的不同,次级河流可分为 4 类,龙河、汤溪河、梅溪河和

大宁河为一类,具有较低 TN、TP、高锰酸盐指数含量;綦江河、嘉陵江、汝溪河、小江、乌江为一类,具有较高 TN、TP 和较低的高锰酸盐指数含量;花溪河、桃花溪、龙溪河、梨香溪、壤渡河为一类,具有较高 TN、TP、高锰酸盐指数含量;苕溪河为一类,具有极高 TN、TP、高锰酸盐指数含量.

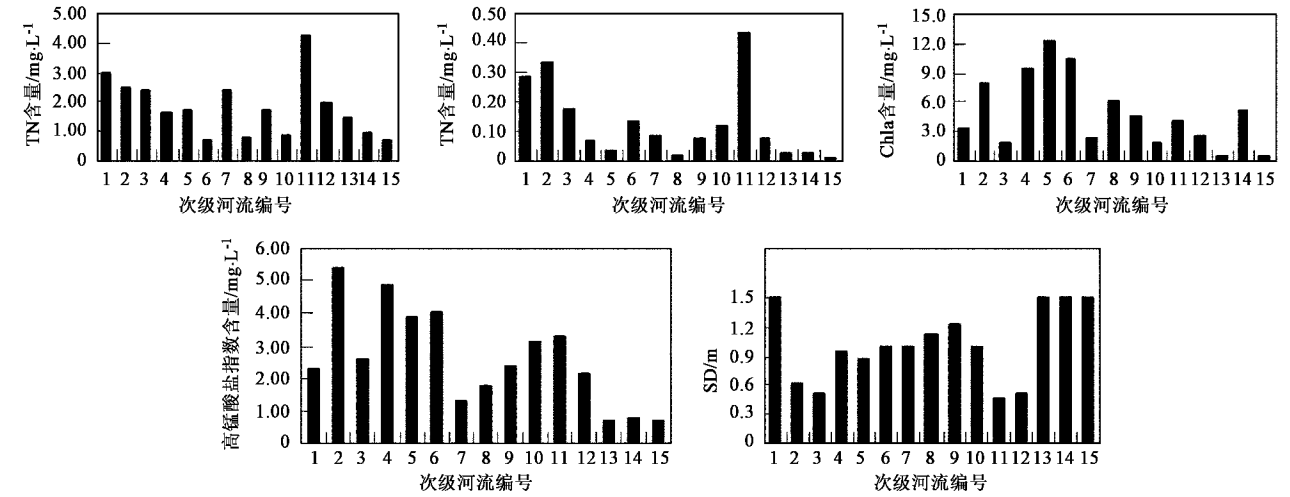


图 2 三峡库区次级河流富营养化指标结果
Fig.2 Results of eutrophication index in tributaries of Three Gorges Reservoir Area

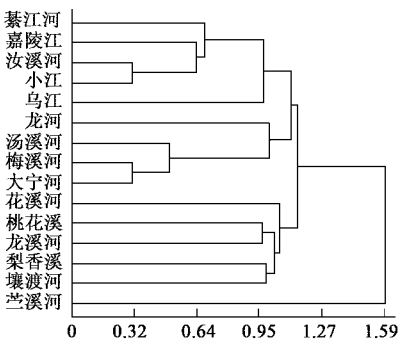


图 3 基于水质指标的次级河流聚类结果
Fig.3 Cluster dendrogram of tributaries based on water index

日本湖沼学家合田建提出:湖水 TN/TP 为 12:1 ~ 13:1 时,最适宜藻类生长,当该比值小于 4 时,N 是水体富营养化的限制性因素^[11],对调查的 15 条次级河流的 TN/TP 进行计算,其比值均 > 4,表明三峡库区次级河流中 N 元素不是发生富营养化的限制因子,其中 6 条河流 TN/TP 在 4.8 ~ 13.6,较适宜藻类生长,9 条河流比值在 23 以上,P 可能成为这些河流藻类生长的限制因子.

在湖泊、水库缓流状态下,一般 Chla 与 N、P 间存在不同程度的线性关系^[12~15],这一点已为许多研究所证实.河流富营养化是一个非常复杂的环境生

态体系,所涉及的因子很多,由于不同河流流速差别较大,河流中是否存在这种线性关系鲜见报道.本次调查的河流分布范围广,污染来源复杂,加之流域泥沙流失和人为活动的干扰,使得次级河流生产力指标 Chla 与富营养化指标之间的关系更为复杂. 15 条次级河流富营养化指标相关性分析结果见表 1.和大多数湖泊、水库不同,调查的次级河流 Chla 与 SD、TN 呈负相关,且相关性不显著;与 TP、高锰酸盐指数呈正相关,与高锰酸盐指数呈极显著正相关 ($r = 0.7115, p < 0.01$),与 TP 相关性不显著. SD 与 TN ($r = -0.50124, p < 0.05$)、TP ($r = -0.49378, p < 0.05$)、高锰酸盐指数 ($r = -0.58967, p < 0.05$) 呈显著负相关,可能与三峡库区地表水主要受面源污染影响有关^[16],次级河流透明度主要受颗粒态物质的影响较大,而地表径流产生的颗粒物中 N、P 含量较高. TN、TP 呈极显著的正相关性 ($r = 0.81274, p < 0.01$),也间接表明,可能均受面源污染影响较大.重庆市一般大中型水库均位于某一次级河流的中、上游,处于同一次级河流域,而同期对重庆市辖区内所有 35 座大中型水库富营养化调查发现, Chla 与 TP 相关性不显著,与高锰酸盐指数呈极显著正相关,和次级河流调查结论一致.而在水库水体中 Chla 与 SD 呈显著负相关^[17],可能与水库为静止水

体,颗粒态物质沉降,SD 主要受藻类生物量的增长影响有关.

表 1 富营养化指标相关性

Table 1 Correlation of eutrophication index					
相关系数	Chla	SD	TN	TP	高锰酸盐指数
Chla	1				
SD	-0.210 26	1			
TN	-0.110 29	-0.501 24 ¹⁾	1		
TP	0.032 53	-0.493 78 ¹⁾	0.812 74 ²⁾	1	
高锰酸盐指数	0.711157 ²⁾	-0.589 67 ¹⁾	0.235 63	0.484 53 ¹⁾	1

1)为显著相关; 2)为极显著相关

2.2 富营养化评价

综合营养状态指数法评价的结果(图 4)表明,在调查的各条次级河流,综合营养状态指数范围为 23.56~58.25,最高值为芑溪河,最小值为大宁河.达到富营养化的只有花溪河、桃花溪、芑溪河 3 条河流,且为轻度富营养化,占调查河流的 20%;贫营养为汤溪河、大宁河 2 条,占调查河流的 13%,其余 10 条河流为中营养,其中流量最大的嘉陵江和乌江均为中营养.三峡库区河流富营养化程度有较明显的地域分异现象,即处于人口稠密地区的次级河流(编号 1~12)富营养化程度明显高于三峡(编号 13~15).同期对重庆市辖区内所有 35 座大中型水库富营养化调查中,达到富营养化水平的水库有 17 座,约占总数的 50%.处于同一次级河流的河流段与水库段比较,水库富营养化程度远大于河流段,可见由于次级河流筑坝渠化后,水体流态发生改变,有利于藻类生长.在三峡水库 2009 年完工后,15 条调查河流均受成库影响,河口区域流速减缓,由于有较高的营养盐浓度背景值,有可能导致次级河流,特别是回水区水体富营养化的发生.

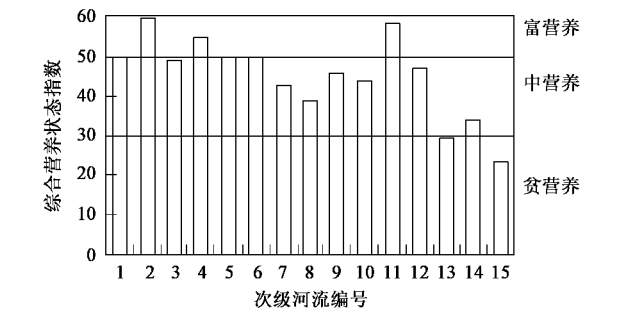


图 4 次级河流综合营养状态指数及评价结果
Fig.4 Integrated nutrition state index and eutrophication assessment results

2.3 次级河流藻类组成

三峡库区次级河流的浮游植物种类较丰富,共 129 种,分属于 7 门 67 属,其中硅藻门 29 属 62 种,占 48%;绿藻门 17 属 31 种,占 24%;蓝藻门 11 属 24 种,占 18.6%;裸藻门 2 属 5 种;甲藻门 2 属 3 种;金藻门 2 属 2 种;隐藻门 1 属 2 种.其中乌江的种数最多达到 112 种,可能与乌江流域面积大,其它众多支流藻类汇入以及水体环境质量较好有关.芑溪河种数最少为 67 种,与水环境质量较差有关.

浮游植物作为初级生产者,能对水体营养状态的变化做出迅速反应,被广泛用作水体营养状态的指示种^[18].一般藻类的营养生态位比较广,在各种营养条件下均能生长,在不同的营养条件下,浮游植物可以有类似的组成,或相同营养条件下,呈现不同的藻类组成.一般来说,大多数蓝藻种类适宜在营养水平比较高,环境比较稳定的水体中生长,但蓝藻在各营养水平的次级河流中均有分布,并以微囊藻(*Microcystis* sp.)、粘球藻(*Gloeocapsa* sp.)、色球藻(*Chroococcus* sp.)和平裂藻(*Merismopedia* sp.)为主.直链藻(*Melosira*)和小环藻(*Cyclotella*)作为富营养指示种,在各营养类型水体中均有分布,营养生态位比较广.但藻类的生物量随着水体营养状态的上升而增加^[19].次级河流主要藻类组成见图 5,在不同营养水平间,存在一些河流的优势种类组成比较相似,但在浮游植物的密度和生物量上均存在比较大的差异.根据次级河流藻类组成,可分为 3 类:硅-绿藻型、硅-蓝藻型、蓝-绿藻型.硅-绿藻型一般为水体富营养化程度较低的水体,如大宁河、汤溪河、壤渡河、龙河和乌江,除受到附近农田排污影响外,所受污染都较轻微,因此水质较好;硅-蓝藻型一般为水体富营养化程度略高的水体,如嘉陵江、汝溪河、小江、梅溪河,除受到附近农田排污影响外,还受到部分工业及城镇生活污水的影响;蓝-绿藻型一般为水体富营养化程度高的水体,并且裸藻占藻类数量的比例明显增高,如綦江河、花溪河、桃花溪、龙溪河、梨香溪

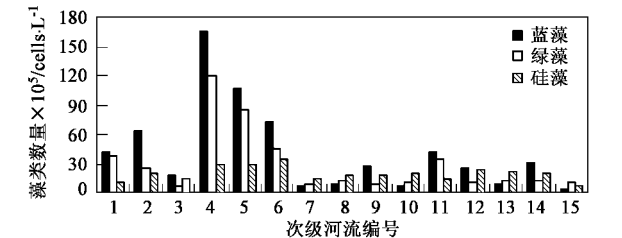


图 5 优势藻类构成
Fig.5 Composing of dominant species

和芑溪河,除受到各种污染源的影响外,还与流速较慢有利于蓝藻的生长有关.

2.4 次级河流营养盐输出通量

各次级河流营养盐输出通量计算公式为:

各次级河流营养盐通量 = 营养盐浓度 × 各次级河流平均流量

营养盐浓度为各次级河流均值,流量为多年平均流量.由表 2 可知,在所调查的 15 条次级河流中,TN 通量总量为 $9\,956\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,其中最大的为嘉陵江($5\,066\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$)和乌江($3\,927\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$),占 TN 通量总量的 90%,最小的为壤渡河($3.92\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$),仅占总量的 0.04%左右;TP 通量总量为 $560\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,其中最大的为嘉陵江($371\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$)和乌江($133\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$),占 TP 通量总量的 90%,最小的为桃花溪($0.32\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$),仅占 TP 通量总量的 0.05%;高锰酸盐指数通量总量为 $8\,702\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,最大为嘉陵江($5\,448\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$)和乌江($2\,145\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$),占高锰酸盐指数通量总量的 87%,最小为芑溪河($14.3\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$),仅占总量的 0.16%.通过对比,无论是 TN、TP 还是高锰酸盐指数,嘉陵江、乌江的排放量在所调查的次级河流中都为最大,其余河流相对排放量很小,这主要是由于次级河流的平均流量相差较大造成.次级河流 TN 和 TP 输出比例约为 17.8:1,营养盐的输出比例在适合藻类生长的范围内.

表 2 各次级河流营养盐通量

Table 2 Fluxes load of N、P and potassium permanganate index in tributaries

次级河流	平均流量 / $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	TN / $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$	TP / $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$	高锰酸盐 指数/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$
綦江河	122	365	34.9	280
花溪河	3.63	8.9	1.22	19.5
嘉陵江	2 120	5 066	371	5 448
桃花溪	4.76	7.6	0.32	23
龙溪河	48.9	81	1.71	189
梨香溪	13.6	8.9	1.86	55
乌江	1 650	3 927	133	2 145
龙河	64.9	49.9	1.29	111
汝溪河	11.9	20.1	0.87	27.8
壤渡河	4.78	3.92	0.56	14.7
芑溪河	4.43	18.9	1.91	14.3
小江	110	212	7.81	237
汤溪河	56.2	80.3	1.35	40.3
梅溪河	45.9	43.1	1.15	33.8
大宁河	98.0	63.7	1.08	64.4

据统计,2002 年三峡库区调查的 67 个直接排入长江的城市污水排放口中,TN 排放量为 $11\,469\text{ t}$,TP 排放量为 $1\,911.6\text{ t}$ ^[20].而在所调查的 15 条次级河流中 TN 年排放量为 $3.14\times 10^5\text{ t}$,TP 年排放量为 1.76

$\times 10^4\text{ t}$,高锰酸盐指数排放量为 $2.74\times 10^5\text{ t}$.TN、TP 分别为 67 个城市污水排放口排放量的 27 倍和 9 倍,超过城市污水对三峡水库营养盐输入的影响.因此,次级河流对三峡水库营养盐的输入应该引起足够重视.

2.5 次级河流富营养化发展趋势

富营养化的发生发展是由于水体整个环境系统出现失衡,导致某种优势藻类大量繁殖生长的过程.尽管对于不同的水域,由于区域地理特性、自然气候条件、水生生态系统和污染特性等诸多差异,会出现不同的富营养化表现症状,也即出现不同的优势藻类种群,并连带出现各种不同类型的水生生物种类的失衡.但是,富营养氧化发生所需的必要条件基本上是一样的,最主要影响因素有 3 个方面^[21,22]:总磷、总氮等营养盐相对比较充足;缓慢的水流流态(流速、水深等);适宜的气象条件(水温、光照等).只有在 3 方面条件都比较适宜的情况下,才会出现某种优势藻类“疯”长现象,暴发富营养化.

对三峡库区次级河流而言,水体营养盐含量均能满足发生富营养化的条件;一般在 2 月,三峡库区水温达到 10°C 左右,达到藻类适宜生长的温度范围内.以乌江为例,多次发生水体藻类爆发性生长的时期为 2 月,表明水温较低月份,也能导致富营养化的发生^[3].2 月为乌江流速、流量最小且水深最浅月份,因此可能水流流态是三峡库区水体发生富营养化的主要限制条件.2009 年三峡工程完工后,随着水位抬高,过水面积增大,三峡水库干流流速迅速减小,枯水期库区江段平均流速为 $0.17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,比天然河道减小约 4 倍.尤其在坝前深水区,水库建成后断面平均流速下降为 $0.04\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,比天然河道的断面平均流速减小约 5 倍^[23],水流运动特征的巨大变化,可能对干流水体生态系统产生巨大影响.对部分次级河流而言,由于水位的抬高,次级河流河口区面积和长度有不同程度的增加,其中嘉陵江河口区从北碚至入库汇流口,全长约 60 km ;乌江从武隆至入库汇流口,全长约 68 km ^[24].小江开县段枯水期平均流速由建库前的 $0.65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,降低为 $0.006\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而且岸边流速更小,可能基本为静止,接近湖泊型水库的流速^[25],库区次级河流回水区的水文条件将与水库相似,即具备诱发富营养化的形态要素条件.三峡水库 175 m 蓄水后,将可能增加部分区域干流水体特别是次级河流河口区发生富营养化的风险.

3 结论

(1) 三峡库区次级河流 N、P 污染严重,有机污

染相对较轻,均具备了产生富营养化的营养盐浓度条件。Chla 与高锰酸盐指数呈极显著正相关。SD 与 TN、TP、高锰酸盐指数呈显著负相关。

(2) 河流富营养化评价结果,有 3 条河流达到轻度富营养化,2 条为贫营养,10 条为中营养,与三峡库区的水库富营养化程度比较,次级河流富营养化程度较水库轻。随着三峡水库蓄水水位的抬升,库区水体特别是次级河流河口区发生富营养化的风险将增大。

(3) 三峡库区次级河流的浮游植物种类较丰富,共 129 种,分属于 7 门 67 属。次级河流藻类组成以蓝、绿、硅藻为主,藻类组成,可分为硅-绿藻型、硅-蓝藻型、蓝-绿藻型。

(4) 15 条次级河流 TN、TP、高锰酸盐指数年排放量大,其中 TN、TP 分别为 67 个城市污水排放口排放量的 27 倍和 9 倍。嘉陵江和乌江营养盐输出贡献最大。

参考文献:

[1] 马经安,李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境,2002,11(6):575 ~ 577.

[2] 窦明,谢平,夏军,等. 汉江水华问题研究[J]. 水科学进展,2002,13(5):557 ~ 561.

[3] 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.

[4] 国家环保总局编. 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.

[5] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? [J]. Hydrobiologia, 1998, 369/370: 11 ~ 26.

[6] 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.

[7] 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.

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

[9] Organization for Economic Cooperation and Development. Eutrophication of waters monitoring, assessment and control[M].

OECD. Paris: OECD, 1982.

[10] 金相灿,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.

[11] 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.

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

[13] Jones J R, Knowlton M F. Limnology of Missouri reservoirs: an analysis of regional patterns[J]. Lake and Reservoir Management, 1989, 8: 17 ~ 30.

[14] Erwin E, Van Nieuwenhuysse, 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.

[15] 林秋奇,胡韧,段舜山,等. 广东省大中型水库营养现状及浮游生物响应[J]. 生态学报,2003,23(6):1101 ~ 1108.

[16] 张智,兰凯,白占伟. 蓄水后三峡库区重庆段污染负荷与时空分布研究[J]. 生态环境,2005,14(2):185 ~ 189.

[17] 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):132 ~ 135.

[18] 沈韞芬,章宗涉,龚循矩,等. 微型生物监测新技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990. 120 ~ 125.

[19] Naselli-Flores L. Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: relationships between species composition and environmental factors[J]. Hydrobiologia, 2000, 424: 1 ~ 11.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 洪一平,叶闽,臧小平. 三峡水库水体中氮磷影响研究[J]. 中国水利,2004,20: 23 ~ 24.

[24] 黄真理,李玉梁,李锦秀,等. 三峡水库水环境容量计算[J]. 水利学报,2004,3: 7 ~ 14.

[25] 李锦秀,廖文根,黄真理. 三峡工程对水流水质影响预测[J]. 水利水电技术,2002,33(10):22 ~ 25.