

三峡水库蓄水后氮、磷营养盐的特征分析

张 远¹,郑丙辉¹,刘鸿亮¹,富 国¹,罗专溪²

(1. 中国环境科学研究院河流与海岸带环境研究室 ,北京 100012 2. 中国矿业大学恢复生态研究所 ,北京 100083)

摘要 根据 2004 年 4 月调查结果 ,对三峡库区二期蓄水后的氮、磷营养盐浓度及分布进行研究。结果表明 ,二期蓄水后水体总磷、总氮的质量浓度平均为 0.083 mg/L、1.56 mg/L ,其中总溶解性磷比例介于 32% ~ 82% ,总溶解性氮为 72% ~ 95%。总磷浓度受蓄水的影响较大 ,坝前区总磷浓度在蓄水后显著降低 , $\rho(\text{N})/\rho(\text{P})$ 值提高。由于氮、磷营养盐浓度偏高 ,库区水体在二期蓄水后呈现富营养化趋势。营养盐浓度对不同类型水体富营养化的影响程度存在差异 ,蓄水后长江干流为贫营养和中营养状态 ,而部分支流回水段已达到了富营养化程度 ,存在潜在的水华爆发现象。

关键词 蓄水 ;氮 ;磷 ;富营养化 ;三峡水库

中图分类号 X824 **文献标识码** A **文章编号** 1004-693X(2005)06-0023-04

Characters of nitrogen and phosphorus of the Three Gorges Reservoir after impounding

ZHANG Yuan¹, ZHENG Bing-hui¹, LIU Hong-Liang¹, FU Guo¹, LUO Zhuan-xi²

(1. River and Costal Environmental Research Center , China Research Academy of Environment Science , Beijing 100012 , China ; 2. Institute of Restoration Ecology , China University of Mining and Technology , Beijing 100083 , China)

Abstract Based on the results investigated in April 2004 , the concentration and distribution of N and P in the Three Gorges Reservoir were analyzed. The results show that the contents of total phosphorus and total nitrogen are about 0.083 mg/L and 1.56 mg/L respectively in the Three Gorges Reservoir. Total dissolved phosphorus is about 32% ~ 82% of total phosphorus , while total dissolved nitrogen is about 72% ~ 95% of total nitrogen. Impounding has great impacts on the concentration of total phosphorus. The TP content decreases remarkably after impounding , and $\rho(\text{N})/\rho(\text{P})$ rate increases accordingly. High nutritious salt concentration results in eutrophication of waters in the reservoir after the second stage of impounding. However , impact of nutritious matters on the eutrophication of different water bodies is different. The mainstream of the Yangtze River is oligotrophic and mesotrophic , while backwaters of some tributaries is eutrophic and algal bloom exists potentially.

Key words impounding ; nitrogen ; phosphorus ; eutrophication ; Three Gorges Reservoir

三峡工程是我国在建的最大水利工程 ,水库形成后对库区水质的影响如何 ,是人们所关心的问题。最初主要是从水污染防治角度对 COD、DO 等指标的变化进行预测和研究^[1,2] ,后来 ,人们更为关注水库形成后的富营养化问题 ,于是对成库后的 N、P 等营养盐浓度、污染负荷以及富营养化趋势等开展了

相关研究^[3,4]。雒文生和谈戈^[5]对三峡库区次级支流香溪河的研究表明 ,成库后 P 的浓度在水库中是不均匀的 ,从支流回水末端至入库河口 P 的浓度将逐渐减小 ,而对于入库河口而言 ,随着蓄水时间的延长 ,河口的 N、P 质量浓度因为营养盐的截留作用而将有所增加 ,初步预测 2005 年可达 0.35 mg/L ,2010 年可

基金项目 :国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB412409) ;国家“十五”科技攻关计划资助项目(2003BA614-04)
作者简介 :张远(1970—)男 ,辽宁沈阳人 ,副研究员 ,博士后 ,主要从事水文水资源与水环境保护方面的研究 .E-mail :zhangyuan@craes.org.cn

达 0.518 mg/L。张恩仁和张经^[6]研究了三峡水库对长江中 N、P 营养盐的截留效果,发现在现有营养盐通量的基础上三峡水库蓄水后发育出的水库生态系统可将上游输入的 2%~7% 的溶解无机 N 和 13%~42% 的溶解无机 P 转化为有机颗粒态营养盐,同时由于库区生态系统光合固 N 能力的增大,坝前水体的 $\rho(\text{N})/\rho(\text{P})$ 值将有所提高。三峡水库 2003 年 6 月开始二期蓄水,水位抬升 60 余 m,水位线达 135 m,已接近水库最低运行线 145 m,水库基本形成。那么,水库在二期蓄水后,是否证实了这些学者的预测结果?营养盐成分的含量究竟发生了什么变化?变化的程度以及空间分布如何?为了回答上述问题,笔者根据库区二期蓄水后的水质观测资料,对库区蓄水后的 N、P 营养盐的变化和分布特征进行分析,以期对三峡库区水环境管理提供科学依据。

1 调查范围

三峡库区水域长 660 km,为河道型水库,二期蓄水回水区到达重庆涪陵李渡,其中重庆巫山县至三峡大坝是二期蓄水的主要影响区域。为此,笔者于 2004 年 4 月 13 日至 23 日,对该地区进行水质调查研究。区域内长江干流长为 250 km,约为库区总长的 40%,支流较多,一级支流包括小江、大宁河、龙船河、香溪河等 20 余条(表 1)。

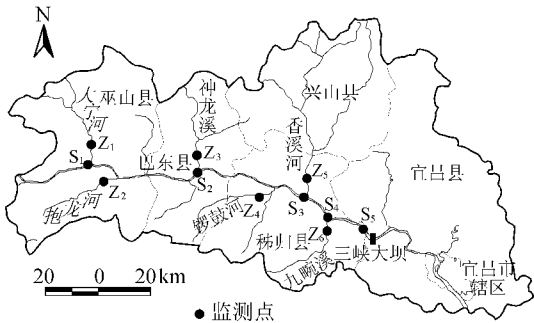
表 1 三峡水库调查区内主要支流的特征

河 流	流域 面积 /km ²	年均 流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	河口 距大坝 距离 /km	库区 境内 长度 /km	139 m 水 位线回 水距离 /km	水面 面积 /km ²	年均 滞留 时间 /d
巫山县大宁河	4200	98.0	123.0	142.7	38.76	12.97	38.32
巫山县抱龙河	325	6.6	106.5	22.3	5.58	1.05	50.17
巴东县神龙溪	350	20.0	74.0	60.0	21.83	4.72	37.36
秭归县青干河	523	19.6	48.0	54.0	16.24	3.29	74.35
秭归县香溪河	3095	47.4	32.0	110.1	25.06	9.22	53.61
秭归县九畹溪	514	17.5	20.0	42.1	6.14	0.66	20.33

2 调研方法

调查长江干流和主要支流回水段的水体,调查断面共 11 个(图 1),其中干流 5 个,支流回水段 6 个。每个断面同时进行水动力学的仪器测试和水质取样。水库动力学参数采用多普勒河流流量测量系统(ADCP)进行现场测量,具体项目包括断面流量、流速、宽度、水深等。TP、TN、总溶解态磷(TDP)、总溶解态磷(TDN)、chl a 等水化指标在现场采样并进行处理,在实验室按照文献[7]相关规定进行测量,其中 TDP、TDN 采用 0.45 μm 滤膜减压过滤,总悬浮态 P(TSP)为 TP 减去 TDP 的值,总悬浮态 N(TSN)为 TN 减去 TDN 的值。对于水面宽度超过 100 m 的断

面,取左、中、右 3 个点位,取 3 个点位的平均值作为断面监测结果值,对于宽度小于 100 m 的断面,取河中心点,在距水面 0.5 m 处取样。



S₁: 长江大宁河交汇段 S₂: 长江神龙溪交汇段 S₃: 长江香溪河交汇段 S₄: 长江九畹溪交汇段 S₅: 长江大坝前江段 Z₁: 大宁河回水段 Z₂: 抱龙河回水段 Z₃: 神龙溪回水段 Z₄: 锣鼓河回水段; Z₅: 香溪河回水段 Z₆: 九畹溪回水段

图 1 三峡库区水质调查断面位置

3 结果与分析

3.1 水体动力学特征

三峡库区蓄水前后水动力学条件变化明显,蓄水后干流样点流速为 0.13~0.24 m/s,远低于天然河道状态下 2 m/s 的平均流速,支流回水段流速普遍低于 0.05 m/s,远低于天然状况下的 1~3 m/s 的平均流速。国际上根据水库的流速特征,一般将河道型水库划分为河流型水体(>0.2 m/s)、过渡型水体(0.05~0.2 m/s)、湖泊型水体(0.05 m/s)^[8]3 部分。三峡水库二期蓄水后长江在与神龙溪交汇以上江段保持为河流型,长江在与神龙溪交汇以下江段转变为过渡型水体,而支流回水河段则转变为湖泊型水体。

3.2 营养盐的组成与数量

三峡库区 TP 质量浓度为 0.063~0.098 mg/L,各类型水体之间差异较小,其中神龙溪回水段最低,九畹溪回水段最高(图 2)。香溪河的 TP 质量浓度为 0.093 mg/L,低于文献[5]模型预测结果(0.30 mg/L)。TP 的悬浮态与溶解态的组成有较大差异,长江干流

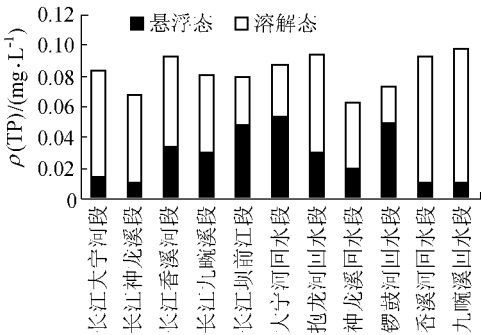


图 2 三峡库区 TDP 与 TSP 质量浓度

TSP 含量从大宁河段至坝前逐渐升高,而 TDP 含量逐渐减少,其中长江大宁河段的 TDP/TP 达到 82%,而坝前水体仅为 32%。大宁河、锣鼓河支流回水段的 TSP 含量较高,其它支流回水段较低。通过对 TSP 含量与 chl_a 含量的关系分析(图 3),发现两者相关性较好,三峡库区坝前水域、大宁河、锣鼓河的 chl_a 含量较高,其对应的 TSP 含量也较高。由于 chl_a 实质反映了水体的藻类生物量高低,说明 TSP 与藻类生物量关系密切,藻类生物量越高,则水体中的 TSP 含量相应越高,进一步说明发育的水生态系统使得更多的溶解态 P 转化为悬浮态 P^[6]。

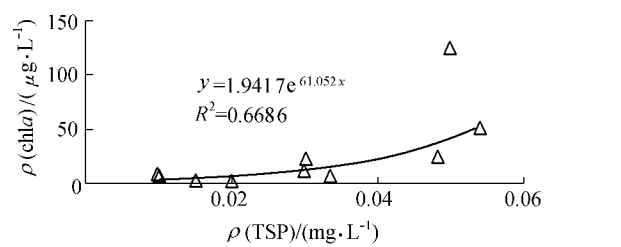


图 3 三峡库区 TSP 与 chl_a 质量浓度的关系

TN 质量浓度为 1.10 ~ 1.85 mg/L,其中锣鼓河回水段最低,九畹溪回水段最高(图 4)。从组成上看,各调查断面的 TDN 均占绝大部分,TDN/TN 介于 72% ~ 95% 之间,高比例的溶解态 N 量可以保证浮游生物对 N 的充分利用。N:P 值是反映浮游植物生长与营养盐关系的一个重要指标。三峡库区蓄水后的 TN/TP 平均为 19:1,其中溶解态 TDN/TDP 的比例更高,平均为 26:1,超过理论上浮游植物代谢的 ρ(N)/ρ(P)量比(7.2:1),说明蓄水后 P 将是三峡水库生态系统生产力的限制性因素。

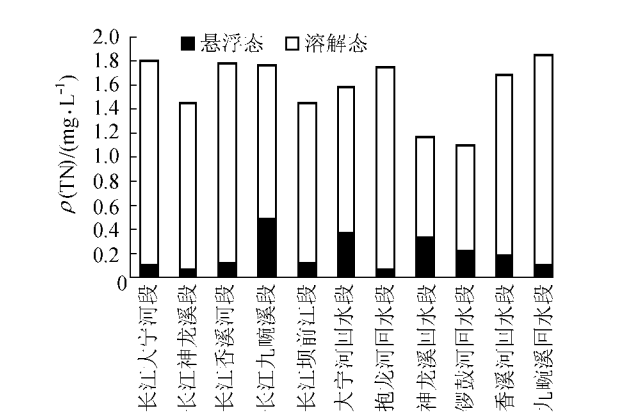


图 4 三峡库区 TDN 与 TSN 质量浓度

3.3 营养盐通量

瞬时通量是指单位时间内流过河流指定断面的物质质量,对于反映库区干支流的 N、P 污染物总量具有重要意义。根据同时监测的流量和营养盐质量浓度,计算出三峡库区主要干支流的 N、P 营养物的瞬

时通量见表 2。长江 TP 通量平均为 617.7g/s, TN 通量平均为 12502.1g/s,从大宁河段至坝前,长江水体的 TP 通量略有增加,但 TDP 通量呈明显减少趋势。6 条支流的 TP、TDP、TN、TDN 通量总和分别为 108.97 g/s、70.61 g/s、1964.32 g/s、1655.31 g/s。通过对营养盐支出的分析,TP、TN 上游来量分别为该区域营养盐总量的 85.1%和 87.2%,区域产生量约为总量的 14.9%和 12.8%,其中 7.9%的 TP 和 20.3%的 TN 滞留在调查区域,其余通过水流汇入长江中下游。从营养盐来源看,由于测前时段为枯水期,营养盐主要来源于城镇生活和工业污染源,非点源污染物质所占比例相对较小,在丰水期非点源污染所占比例将增大,营养盐通量也将显著增加。据预测,随着库区浮游植物的生长和繁殖,更多的 N、P 营养盐将被截留在库区,P 的截留率可达到 10%^[6]。

表 2 三峡库区主要河流的 N、P 营养物通量 g/s

监测断面	TP	TDP	TN	TDN
长江大宁河段	620.00	509.30	13 307.10	12 546.90
长江神龙溪段	501.90	428.10	10 650.10	10 111.30
长江香溪河段	679.70	436.10	13 063.20	12 205.60
长江九畹溪段	616.00	388.80	13 324.00	9 716.60
长江坝前江段	671.10	263.90	12 169.40	11 226.00
大宁河回水段	32.85	12.46	596.50	460.59
神女溪回水段	4.09	2.79	76.16	73.20
龙船河回水段	11.37	7.76	211.68	152.13
锣鼓河回水段	11.39	3.59	172.07	137.75
香溪河回水段	25.62	22.87	463.39	411.87
九畹溪回水段	23.55	21.14	444.52	419.77

3.4 二期蓄水后的 N、P 营养盐变化

以坝前区水体二期蓄水前后的数次测试结果来看(表 3),二期蓄水前 TP 质量浓度较高,ρ(N)/ρ(P)值较低,二期蓄水后随着 P 的沉积、吸收等过程的变化,水体中的 TP 含量降低,ρ(N)/ρ(P)值显著增加,说明库区水质受蓄水的影响较大。水体中 P 营养盐的变化主要在于水力学特性和水体中泥沙悬移质含量的变化。三峡库区长江水体中约有 80%的 P 是以颗粒态形式存在的,泥沙悬移质与 P 含量的相关系数达到 0.99,因此,水中悬移质含量的变化对 TP 的影响较大。而且水中悬移质含量与水体的流速密切相关,随着流速的减缓,泥沙的沉积过程加强,造成泥沙悬移质含量减少,导致水体中

表 3 坝前区二期蓄水前后的 TP 和 TN 状况

时间	水期	ρ(TP) (mg·L ⁻¹)	ρ(TN) (mg·L ⁻¹)	ρ(N) /ρ(P)
2003-03-10	枯水(二期蓄水前)	0.24	1.20	4.91
2003-06-10	丰水(二期蓄水期)	0.16	2.05	12.53
2003-10-16	平水(二期蓄水后)	0.10	1.87	17.95
2004-04-24	枯水(二期蓄水后)	0.08	1.44	18.13

TP 含量降低,同时由于水生态系统的发育造成水中的悬浮态 P 含量增加,而溶解态 P 含量减少。目前,TN 含量并未发生显著变化,预测认为随着水库生态系统的进一步发育和变化,水库光合固 N 作用的提高,库区水体的 TN 含量将有所提高, $\rho(N)/\rho(P)$ 值也将进一步提高。

3.5 N、P 的变化对水体富营养化的影响

N、P 等营养成分是否充足是水华爆发的重要因素,也是评价水库富营养化程度的重要指标。一般认为当水体中 TP 和 TN 的质量浓度分别达到 0.02 mg/L 和 0.2 mg/L 时,从营养盐单因子考虑,就有可能发生藻类疯长的现象^[9]。二期蓄水之后,库区水体 TP 质量浓度为 0.063 ~ 0.098 mg/L,TN 质量浓度为 1.10 ~ 1.85 mg/L,营养盐浓度总体偏高,意味着在适宜的水体和自然条件下,藻类可能会快速繁殖与生长,甚至造成水华的爆发。在营养盐浓度偏高的情况下,三峡库区不同类型水体的藻类生长状况不一致。根据 chl_a 的监测结果表明,三峡水库的 chl_a 含量从库尾至库首逐渐升高,长江巫山段以上为河流型水体,藻类生物量较低,富营养化程度为贫营养,巫山段以下至坝前为过渡型水体,藻类生物量相对较高,达到中营养状况程度(图 5)。从支流回水段来看,大宁河、锣鼓河的 chl_a 质量浓度已超过了 40 $\mu\text{g/L}$,水体已达到富营养化程度,大宁河同期曾出现水华爆发现象,神龙溪和香溪河回水段虽然营养盐浓度同样较高,但仍然为贫、中营养状态。库区藻类生长受到了水力学条件以及其它自然条件的影响^[10]。在流速较快的河流型水体中,即使较高的营养盐浓度也不易引发藻类生长,而在流速较慢的过渡型和湖泊型水体中,同样的营养盐浓度就可能造成水华爆发。因此,在不同类型水域,N、P 等营养盐对水体富营养化的影响程度不同,应该采取相应不同的富营养化评价标准进行评价才更为科学。

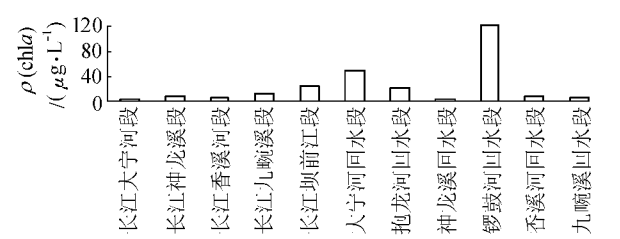


图 5 三峡库区水体的 chl_a 质量浓度

4 结 论

a. 三峡库区 TP 质量浓度为 0.063 ~ 0.098 mg/L, 其中 TDP 含量相差较大,随着水库水生态系统的发

育,TDP 在长江干流大宁河段至坝前段逐渐减少。水体 TN 质量浓度为 1.10 ~ 1.85 mg/L,其中 TDN 占到了 70% 以上。

b. 三峡库区长江 TP、TN 瞬时平均通量分别为 617.7 g/s 和 12 502.1 g/s,其中 6 条支流的 TP、TN 瞬时通量共计 108.97 g/s、1 964.32 g/s。TP、TN 上游来量分别为该区域营养盐总量的 85.1% 和 87.2%,区域产生量约为总量的 14.9% 和 12.8%,其中 7.9% 的 TP 和 20.3% 的 TN 滞留在调查区域,其余通过水流汇入长江中下游。

c. 坝前水体受到库区蓄水影响较大,随着蓄水后 P 的沉积、吸收等过程的变化,水体中的 TP 含量降低, $\rho(N)/\rho(P)$ 值显著增加。

d. 三峡库区二期蓄水后营养盐浓度偏高,水体出现富营养化趋势,但营养盐对水体富营养化的影响程度不同,河流型水域为贫营养状态,过渡型水体为中营养状态,部分湖泊型水体达到了富营养化状态,有潜在的爆发水华的可能。

参考文献:

[1] 长江水利委员会. 三峡工程生态环境影响研究[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1997.30~38.

[2] 张九红,李汉娥. 三峡水库调度对长江水质影响的研究[J]. 水资源保护,1997,13(2):1~5.

[3] 刘永明,贾绍凤,蒋良维,等. 三峡水库重庆段一级支流回水河段富营养化潜势研究[J]. 地理研究,2003,22(1):67~72.

[4] 叶闽,洪一平,彭盛华,等. 三峡水库水体富营养化潜势分析[A]. 中国环境水力学[C]. 北京:中国水利水电出版社,2002.297~302.

[5] 雒文生,谈戈. 三峡水库香溪河库湾水质预测[J]. 水电能源科学,2000,18(4):46~48.

[6] 张恩仁,张经. 三峡水库对长江 N、P 营养盐的截留效应的模型分析[J]. 湖泊科学,2003,15(1):41~48.

[7] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.12~14.

[8] Strskraba M, Tundisi J G. Guidelines of lake management (Volume 9):Reservoir Water Quality Management[M]. Shiga: International Lake Environment Committee of UNEP,1999.229.

[9] 李锦秀,廖文根. 三峡库区富营养化主要诱发因子分析[J]. 科技导报,2003(2):49~52.

[10] 郭红娟,郭生练. 水库水文情势与浮游植物群落结构[J]. 水科学进展,2001,12(1):51~55.

(收稿日期 2005-03-28 编辑:舒建)