

郑丙辉, 张 远, 富 国, 等. 2006 三峡水库营养状态评价标准研究 [J]. 环境科学学报, 26 (6): 1022 - 1030

Zheng B H, Zhang Y, Fu G, *et al* 2006. On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorge Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26 (6): 1022 - 1030

三峡水库营养状态评价标准研究

郑丙辉*, 张 远, 富 国, 刘鸿亮

中国环境科学研究院 河流与海岸带环境研究室, 北京 100012

收稿日期: 2005-08-17 修回日期: 2006-04-23 录用日期: 2006-04-24

摘要: 采用一维水力学模型和 30 年的系列水文数据, 计算了三峡库区干流及其主要支流在不同来水条件下的月滞留时间和月平均流速, 通过统计不同类型滞留时间和流速的发生概率, 综合计算了库区的富营养化敏感指数, 对三峡库区水体的敏感类型进行了划分, 将库区水体分为河流水型、过渡型和湖泊型 3 种. 根据三峡水库营养状态调查结果, 统计分析了过渡型和湖泊型水体的营养指标分布概率、富营养化阈值及其与叶绿素 a 的回归关系, 确定了库区过渡型和湖泊型 2 种水体的营养指标分级标准值, 提出了三峡水库营养指标指数值的确定方法和权重大小, 对三峡水库不同类型敏感区的营养状态进行了综合评价, 分析了评价结果与同期监测的浮游植物密度的相互关系, 从而对三峡水库的评价标准和评价方法的科学性进行了验证. 结果表明, 三峡水库富营养化敏感程度从库尾至库首逐渐增加, 三峡库区长江在银杏沱以上江段为河流水型水体, 在银杏沱至坝前江段为过渡型水体, 位于丰都县以下的支流的回水区以湖泊型水体为主. 分别制定了三峡水库过渡类型区和湖泊类型区的营养状态标准值, 依据该标准所开展的营养状态综合评价结果与浮游植物数量具有显著的相关性, 其中湖泊类型区的营养化程度高于过渡类型区, 与三峡水库的现实状态相符合.

关键词: 富营养化; 标准; 评价方法; 三峡水库; 敏感分区

文章编号: 0253-2468 (2006) 06-1022-09

中图分类号: X824

文献标识码: A

On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorge Reservoir

ZHENG Binghui*, ZHANG Yuan, FU Guo, LIU Hongliang

River and Coastal Environmental Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

Received 17 August 2005;

received in revised form 23 April 2006;

accepted 24 April 2006

Abstract: It is a challenge to determine the assessment standards for nutrition status for environmental management and protection of the Three Gorges Reservoir. Monthly resident time and mean flow speed were simulated with 30 years hydrological data using an one-dimension hydrodynamics model. Sensitivity indice to eutrophication were calculated from probability statistics of resident time and flow speed. The Three Gorges Reservoir was zoned to river type regions, transitional type regions and lake type regions according to the sensitivity indices. With to analysis of nutrition indicator statistics, regressive relationship between nutrition index and nutrient concentration, and threshold values of nutrition status indicators, grading standards for nutrition status indicators were determined synthetically for transitional type and lake type regions in the Three Gorges Reservoir. Nutrition index approach is applied to assess nutrition status in different type of regions with the standards proposed. The rationality of the standards and its weighting factors were examined. The relationship between nutrition index and density of phytoplankton were analyzed for verification of standards system and assessment method. Results indicate that the sensitivity increases from the upstream to the downstream of the Three Gorges Reservoir. The reach upper Yinxingtuo of Yangze River is river type region, and the reach from Yinxingtuo to the dam belongs to transition type. Tributaries lower Fengdu County belongs to lake type. Standard values for nutrition index assessment in transition type and lake type regions were set for the Three Gorge Reservoir. It is concluded that the nutrition status closely related to density of phytoplankton. Nutrition level in lake type region is higher than that in transition region, which is consistent with actual situation of the reservoir.

Keywords: eutrophication; standard; assessment methods; the Three Gorge Reservoir; sensitivity zoning

三峡工程是举世瞩目的水利工程, 建成后防洪、发电、航运等综合效益巨大, 但是工程的兴建和

水库的形成, 将对长江三峡段的水文情势产生显著的影响 (李锦秀等, 2003), 造成河流流速变缓, 滞留

基金项目: 国家“十五”科技攻关计划项目 (No. 2003BA614A-04); 中国高技术研究发展计划项目 (No. 2002AA648010-06)

Supported by the National “Tenth-Five” Key Technology Program (No. 2003BA614A-04) and the Hi-tech Research and Development Program of China (No. 2002AA648010-06)

作者简介: 郑丙辉 (1963—), 男, 研究员 (博士), E-mail: zhengbh@caes.org.cn, Tel: 010 - 84915316; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: ZHENG Binghui (1963—), male, professor (Ph.D.), E-mail: zhengbh@caes.org.cn, Tel: 010 - 84915316; * Corresponding author

时间增长,使得河流输送氮、磷营养物质的能力受阻,水库水体存在着潜在的富营养化趋势(叶闽等, 2002). 由于缺乏相关评价标准,难以对三峡库区蓄水后的营养状态变化进行科学评价和判断,阻碍了三峡水库的富营养化管理工作的开展. 因此,营养状态评价标准的制定已成为当前三峡水库管理所亟待解决的问题.

由于三峡水库是一个河道型水库,库区水体的水力学特征条件变化较大,不同水域对富营养化的敏感程度差异显著,更增加了对其营养化状况评价的复杂性和难度,因此需要对库区不同敏感型水体进行识别,在此基础上制定适用于不同敏感型水体的营养状态评价标准,对三峡水库实施有效的管理. 为此,本文拟在三峡水库营养状况现状调查的基础上,根据河道型水库的营养状态评价标准的制定方法(张远等, 2006),研究三峡水库的富营养化敏感区划方案,确定不同敏感区的营养状态评价标准值及综合评价方法,从而为三峡水库的水环境保护以及富营养化控制提供依据和支持.

1 水库概况与调查方法 (The Three Gorges Reservoir and surveys)

1.1 基本概况

水库位于东经 106 °~ 111 °50 ',北纬 28 °30 '~ 31 °50 ',东起湖北省宜昌,西迄重庆巴县,涉及了重

庆市和湖北省的 19 个县市,库区面积 5.4 万 km². 库区属于湿润亚热带季风气候,年平均气温 17 ~ 19 °C,1 月平均温度 3.6 ~ 7.3 °C,气候条件有利于藻类的生长. 水库跨越川、鄂中低山峡谷和川东平行峡谷低山丘陵区,是一个典型的河道型水库,总长达 660 km,水面宽为 700 ~ 1700 m,平均水深 90 m,水面面积约 1084 km² (长江水利委员会, 1997). 水库目前蓄水水位到 139 m,建成后正常蓄水位 175 m、汛期防洪限制水位 145 m、枯季消落最低水位 155 m. 水库总库容和防洪库容分别为 393 亿 m³、221.5 亿 m³. 入库多年平均径流量 2692 亿 m³,出库多年平均径流量 4292 亿 m³,79% 的径流量集中在汛期 6 ~ 10 月份. 库区支流丰富,仅在重庆市域流域面积大于 100 km² 的河流就有 207 条,其中主要支流包括嘉陵江、乌江、小江、大宁河、香溪河等.

水库修建对长江水文情势有较大影响. 建库前,在天然河道下重庆至宜昌的库区河道,河水流速一般为 2 ~ 3 m · s⁻¹,建成蓄水后库区水流流速从库尾至库首逐渐减缓. 根据 2004 年 4 月的调查,二期蓄水后坝前区断面流速约在 0.06 ~ 0.10 m · s⁻¹ 之间,支流回水段流速约在 0.01 ~ 0.03 m · s⁻¹ 之间,都为建库前的 1/10 左右. 库区营养盐含量较为丰富,同期监测表明,蓄水后的 TP 浓度为 0.1 ~ 0.5 mg · L⁻¹ 之间, TN 浓度为 0.8 ~ 1.5 mg · L⁻¹ 之间. 因此,库区的营养盐含量和水力学条件都易使水体爆

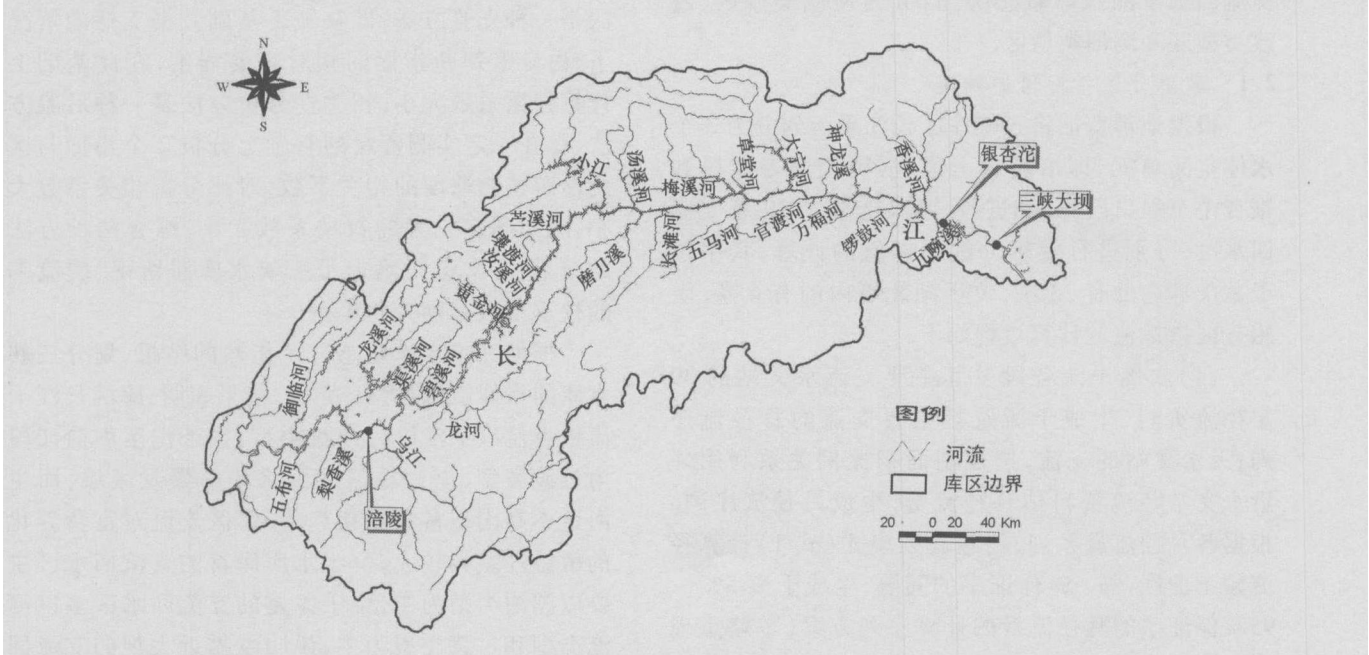


图 1 三峡水库的水系概况图
Fig 1 River courses of the Three Gorges Reservoir

发水华,支流回水区更是富营养化的敏感区域(刘永明等,2003)。

1.2 调查时间与方法

调查时间分别选择在2003年10月和2004年4月(藻类易爆发时段)。调查范围包括重庆市涪陵县至三峡大坝之间的库区干流及其支流回水区,共设采样断面24个,其中长江干流断面8个,支流断面16个(由于篇幅限制,未列出)。断面分左、中、右3点采样,共取得样品数144个。

表层水体(0.5 m)采样。采用YSI-6600型水质自动分析仪现场测定酸碱度(pH)、水温、透明度、浊度、电导率(E_h)、溶解氧(DO)等指标。TP、TN、 COD_{Mn} 及Chl-a现场取样,室内试验测定,其采样及测定方法依据《水和废水监测分析方法》(第四版)相关规定进行。水库动力学参数采用多普勒河流流量测量系统(ADCP)测定,项目包括断面流量、流速、宽度、水深等。浮游植物的采样及其定性、定量方法参考《湖泊富营养化调查规范》(金相灿等,1990)的相关规定进行。

2 水库富营养化敏感分区 (Zone of sensitivity to eutrophication of the reservoir)

分别计算干流各段及其主要支流回水段的缓流率、滞留率,根据张远等(2006)提出的敏感区划指数计算模型和分区标准,划定干流各段及其主要支流回水段的水体敏感类型,分为河流类型区、过渡类型区和湖泊类型区。

2.1 敏感分区指标值的确定

根据地形特征将三峡库区长江干流划分为3个水体空间单元,即涪陵以上段、涪陵至银杏沱段和银杏沱至坝口段,分别进行计算。选取了29条支流回水段,分别进行敏感分区指标值的计算,其中位于重庆境内的有23条,位于湖北境内的有6条。敏感分区指标值的计算过程如下。

(1)收集干流各段及其主要流水文站的30年径流资料,生成干流及其主要支流的月径流序列;无水文站的支流,按控制面积比例关系利用邻近水文站径流资料估算径流量,生成月径流序列。根据各月径流量系列,按经验频率式(式1)计算径流频率曲线。按5%保证率的间隔,生成干流5%~95%保证率的月径流量的计算序列方案(忽略重现期20年以上的极端事件)。

$$P = m / (n + 1) \quad (1)$$

式中, m 为样本序号(径流量从大到小排列), P

为第 m 项的频率保证率, n 为样本容量(即该月径流数据个数)。

(2)以三峡水库正常的145~175m的运行水位为边界条件,干流各月径流量的计算序列方案为初始条件,利用一维水动力模型计算干流各月不同流量条件下的流速和库区水位线,确定干流各段的平均流速及各支流的河口水位。以计算出的各支流河口水位为边界条件,采用同样方法计算各支流在不同月径流量条件下的流速分布,确定各支流单元的平均流速。

(3)根据1:10000地形资料建立干流各段及其主要支流单元的水位-库容关系,实际计算中只考虑了净库容。

(4)根据生成的库容和月径流数据,采用水力滞留时间计算公式(式2),计算各月不同保证率流量条件下的月滞留时间。

$$T_r = V / Q \quad (2)$$

式中, T_r 为滞留时间(d); Q 为月径流量($m^3 \cdot d^{-1}$); V 为水库库容(m^3)。

(5)根据滞留率、缓流率的计算方法(张远等,2006),分别计算各个单元的滞留率和缓流率的指标值。

2.2 敏感分区指数的计算与分区方案

分别采用专家经验判断和相关性分析确定三峡水库敏感分区指标的权重大小。专家经验判断方法是一种先验方法,即在缺乏基础数据支持的情况下,由专家判断指标的相对重要程度,在此基础上计算权重系数大小;相关性分析方法是一种后验方法,是在一定实测资料的基础上分析2个指标与区内浮游植物浓度的相关系数,对比分析相关系数大小,从而确定二者的权重系数大小。综合两种方法的结果,本文最终确定了三峡水库滞留率、缓流率的权重系数分别为0.6和0.4。

根据三峡水库敏感分区指数的结果,划分三峡水库的水体敏感类型(表1)。结果表明,库区长江干流银杏沱以上江段为河流类型;银杏沱至坝前江段为过渡类型,岸边缓流区为水华易爆发区域,而主河道不易出现富营养化趋势。库区支流对富营养化的敏感性差异较大,位于水库库首的支流回水区主要以湖泊类型为主,位于库尾的支流回水区多以河流类型和过渡类型为主,说明越靠近大坝的支流回水段的富营养化敏感性越高,受蓄水的影响也就越显著。

表 1 三峡水库的水体富营养化敏感分区结果

Table 1 Zone of sensitivity to eutrophication in the Three Gorges Reservoir

水系	分区名称	位置	滞留率 (T_p)	缓流率 (U_p)	敏感分区指数 (I_{RL})	分区类型
长江干流	涪陵以上段		0.09	0.11	0.10	河流型
	涪陵 银杏沱		0.24	0.38	0.30	河流型
	银杏沱 坝口		0.29	0.58	0.41	过渡型
支流回水区	五布河	巴南	0.30	0.68	0.45	过渡型
	御临河	渝北	0.56	0.81	0.66	湖泊型
	桃花溪	长寿	0.25	0.79	0.47	过渡型
	龙溪河	长寿	0.20	0.59	0.35	河流型
	梨香溪	涪陵	0.43	0.56	0.48	过渡型
	渠溪河	丰都	0.32	0.50	0.39	河流型
	碧溪河	丰都	0.09	0.74	0.35	河流型
	龙河	丰都	0.14	0.38	0.23	河流型
	池溪河	丰都	0.42	1.00	0.65	湖泊型
	东溪河	忠县	0.73	0.97	0.83	湖泊型
	黄金河	忠县	0.34	0.98	0.60	湖泊型
	汝溪河	忠县	0.59	0.88	0.71	湖泊型
	壤渡河	万州	0.71	1.00	0.82	湖泊型
	芒溪河	万州	0.51	0.96	0.69	湖泊型
	小江	云阳	0.66	0.68	0.66	湖泊型
	汤溪河	云阳	0.44	0.59	0.50	湖泊型
	磨刀溪	云阳	0.56	0.71	0.62	湖泊型
	长滩河	云阳	0.39	0.85	0.57	过渡型
	梅溪河	奉节	0.73	0.89	0.79	湖泊型
	草堂河	奉节	0.82	1.00	0.89	湖泊型
	大宁河	巫山	0.69	0.78	0.72	湖泊型
	官渡河	巫山	0.48	1.00	0.68	湖泊型
	抱龙河	巫山	0.73	1.00	0.83	湖泊型
	神龙溪	巴东	0.65	0.91	0.75	湖泊型
	青干河	秭归	0.80	0.99	0.87	湖泊型
	童庄河	秭归	0.95	1.00	0.97	湖泊型
	咤溪河	秭归	0.64	0.94	0.76	湖泊型
	香溪河	秭归	0.71	0.93	0.80	湖泊型
	九畹溪	秭归	0.50	0.96	0.69	湖泊型

3 水库营养状态评价指标的分级标准值的确定
(Standard values of nutrition indices)

考虑到管理的需求,本文对三峡水库的过渡类型区和湖泊类型区的营养状态评价标准进行了研究,没有涉及河流类型区的营养状态评价标准问题.

3.1 营养状态评价指标的统计分析

根据标准值的统计学分析方法,对湖泊类型区和过渡类型区水体的 TP、TN、叶绿素 a 和透明度等指标值的分布进行了研究,其中过渡类型区样品数为 42 个,湖泊类型区样品数为 78 个,确定了三峡水库的不同类型区的标准参考值(表 2).

表 2 三峡水库的营养指标的频率分布统计结果

Table 2 Probability of nutrient indices in the Three Gorges Reservoir

频率	湖泊型				过渡型			
	总磷	总氮	叶绿素 a	透明度 *	总磷	总氮	叶绿素 a	透明度 *
	/(mg·L ⁻¹)	/(mg·L ⁻¹)	/(μg·L ⁻¹)	/m	/(mg·L ⁻¹)	/(mg·L ⁻¹)	/(μg·L ⁻¹)	/m
25%	0.037	0.89	6.96	0.95	0.09	1.46	7.56	1.0
50%	0.066	1.3	46.24	1.3	0.119	1.81	52.33	1.4
75%	0.093	1.71	63.13	2.0	0.155	2.083	88.46	2.2

* 仅用 2004 年 4 月的调查结果进行统计分析

3.2 水库叶绿素 a 与营养指标的回归关系分析
基于 2003 年和 2004 年的 2 次调查,建立了水

库过渡类型区和湖泊类型区的叶绿素 a 与总磷、总氮和透明度的 Loess 关系式 (表 3)。

表 3 叶绿素 a 与总磷、总氮、透明度之间的回归关系式

Table 3 Regression of chlorophyll a with total phosphorus, total nitrogen and Secchi depth

类 别	湖 泊 型	过 渡 型
叶绿素 a 与总磷	$\ln A = 0.4162 \times \ln B + 4.4319$ $R^2 = 0.1027 \quad n = 78$	$\ln A = 0.5668 \times \ln B + 0.2439$ $R^2 = 0.0324 \quad n = 42$
叶绿素 a 与总氮	$\ln A = 0.1135 \times \ln C + 3.2404$ $R^2 = 0.1122 \quad n = 78$	$\ln A = 1.2334 \times \ln B + 1.0772$ $R^2 = 0.1375 \quad n = 42$
叶绿素 a 与透明度 *	$\ln A = -1.84 \times \ln D + 3.6653$ $R^2 = 0.3323 \quad n = 39$	$\ln A = -0.1281 \times \ln D + 1.4574$ $R^2 = 0.2251 \quad n = 21$

* 仅采用 2004 年 4 月调查数据分析与透明度的回归关系;A 为 chl a 浓度,B 为总磷浓度,C 为总氮浓度,D 为透明度。

对叶绿素 a 与总磷、总氮之间的相关关系进行分析,发现相关性并不显著,究其原因在于蓄水刚刚开始而监测数据量不足,而蓄水后的总磷和总氮均在变化过程之中,水库水质尚未稳定,难以建立起不同类型区的叶绿素 a 与营养物的回归关系模型,所以不能采用上述回归关系进行营养标准值的制定.为此,本文借鉴《湖泊富营养化调查规范》中叶绿素 a 与 TP、TN 和透明度的回归关系式,确定湖

泊类型区的营养物的分级标准值 (表 4).对于过渡类型区,由于缺乏成熟的关于叶绿素 a 与营养物的关系模型,所以未对其进行基于回归分析方法的分级标准参考值的研究.虽然回归分析方法目前在三峡水库的应用条件还不够成熟,但随着对三峡水库的调查和研究的深入,该法将会在以后标准修订过程中会发挥重要作用。

表 4 基于叶绿素 a 与营养指标的关系的湖泊类型区的营养指标分级标准参考值

Table 4 Nutrient standard values of lake type region based on regression of chlorophyll a and nutrients

营养化级别	叶绿素 a /(μg·L ⁻¹)	总磷 /(mg·L ⁻¹)	总氮 /(mg·L ⁻¹)	透明度 /m
贫营养上限值	1.6	0.0046	0.079	8.00
中营养上限值	10.0	0.023	0.310	2.40
轻度富营养上限值	26.0	0.050	0.650	1.30
中度富营养上限值	64.0	0.110	1.200	0.73

3.3 营养指标的阈值分析

3.3.1 湖泊型水体

根据 2003 年和 2004 年的监测结果,统计处在藻类临爆发和爆发阶段的营养指标的最小浓度值和最大浓度值 (表 5).对营养状态评价指标进行阈

值分析,总磷的富营养化爆发阈值介于 0.043 ~ 0.93 mg·L⁻¹之间,总氮的富营养化爆发阈值介于 0.607 ~ 0.893 mg·L⁻¹之间,叶绿素 a 的爆发阈值介于 32.59 ~ 62.81 μg·L⁻¹之间。

表 5 三峡水库湖泊型水体在不同藻类爆发阶段的营养指标的阈值

Table 5 Thresholds of nutrient indices in lake type region of the Three Gorges Reservoir in various periods of algae booming

营养化指标	限值	总磷 / (mg·L ⁻¹)	总氮 / (mg·L ⁻¹)	叶绿素 a / (μg·L ⁻¹)
临爆发阶段 (藻类数量介于 (500 ~ 10000) ×10 ⁴ 个·L ⁻¹)	最小值	0.093	0.607	32.59
	最大值	0.238	1.756	78.6
爆发阶段 (藻类数量大于 10000 ×10 ⁴ 个·L ⁻¹)	最小值	0.043	0.893	62.81
	最大值	0.228	1.242	123.35

3.3.2 过渡型水体

由于过渡类型区在调查期间未出现水华爆发,因此本文根据 N/P比间接分析营养物的潜在阈值.通过对三峡水库银杏沱至坝前江段进行分析,得到如下结论:(1)2003年10月坝前水域 N/P摩尔比低于16,说明氮为限制性要素.藻类密度最多仅为33.7×10⁴个·L⁻¹,TN介于0.743~0.873mg·L⁻¹之间,叶绿素a介于2.3~20.6μg·L⁻¹,水体仍然属于贫营养状态,尚未达到水华临界爆发状态,因此可以判断出TN和叶绿素a的富营养级别潜在阈值可在0.8mg·L⁻¹和20μg·L⁻¹以上;(2)2004年4月坝前区 N/P摩尔比高于20,说明磷为限制性要素.除个别点位藻类密度达到临爆发状态,绝大部

分水域藻类密度都未达到临爆发状态,此时TP浓度介于0.078~0.11mg·L⁻¹之间,TN浓度介于1.22~1.64mg·L⁻¹之间,因此可以判断出总磷的富营养化潜在阈值可在0.10mg·L⁻¹以上.

3.4 营养状态评价标准的综合确定

在借鉴国内外现有成果的基础上,综合上述3种方法的分析结果,按照水体最安全原则确定了三峡水库湖泊类型区和过渡类型区的营养状态分级标准值(表6).对于TP、TN原因变量,库区湖泊类型区的标准值要严于过渡类型区,这与高敏感高保护的要求相一致;而对于叶绿素a和透明度等响应变量,库区湖泊型与过渡型水体具有相同的标准值,符合富营养化爆发的基本理论.

表 6 三峡水库库区营养状态评价标准

Table 6 Assessment standards for nutrition status of the Three Gorges Reservoir

类别	项目	贫营养	中营养	富营养		
				轻	中	重
湖泊型	总磷 / (mg·L ⁻¹)	0.004~0.02	0.02~0.04	0.04~0.08	0.08~0.16	0.16~1.2
	总氮 / (mg·L ⁻¹)	0.01~0.3	0.3~0.6	0.6~0.8	0.8~1.2	1.2~90
	叶绿素 a / (μg·L ⁻¹)	0.1~3	3~10	10~20	20~40	40~1000
	透明度 * /m	4.8~4	4~1.5	1.5~1.2	1.2~0.5	0.5~0.12
过渡型	总磷 / (mg·L ⁻¹)	0.004~0.04	0.04~0.08	0.08~0.12	0.12~0.2	0.2~1.2
	总氮 / (mg·L ⁻¹)	0.01~0.6	0.6~1.2	1.2~1.6	1.6~2.4	2.4~90
	叶绿素 a / (μg·L ⁻¹)	0.1~3	3~10	10~20	20~40	40~1000
	透明度 * /m	4.8~4	4~1.5	1.5~1.2	1.2~0.5	0.5~0.12

*透明度只在春季敏感期(3~6月)参加评价

4 营养状态综合评价与结果验证 (Integral assessment of nutrition status and validation)

4.1 营养状态指数和权重的确定

由于难以建立起三峡水库的叶绿素a与TP、TN、透明度的相关关系,造成无法根据真实回归关系计算每个单项指标的营养化指数.为此,作者提出了分段线性方法计算各参数营养化指数的方法(式3),然后再采用加权求和方法计算营养状态综

合评价指数(张远等,2006).

$$I_{E,i} = I_{E,i,1} + \frac{C_i - C_{i,1}}{C_{i,h} - C_{i,1}} \cdot (I_{E,i,h} - I_{E,i,1}) \quad C_{i,1} < C_i \leq C_{i,h}$$

(3)

式中, $I_{E,i}$ 为第*i*种指标的营养状态指数值; C_i 为第*i*种营养状态指标的观测值; $C_{i,1}$ 为第*i*种营养状态指标的*C*值所处境别的下限值; $I_{E,i,1}$ 为第*i*种营养状态指标分级下限值所对应的指数值(根据表7确定); $C_{i,h}$ 为营养状态指标分级的上限值; $I_{E,i,h}$ 为

营养状态指标分级上限值所对应的指数值 (根据表 7 确定).

表 7 三峡水库营养状态指数与营养级别的对应关系
Table 7 Correlation of between nutrition index and nutrient grades

营养状态级别	贫营养	中营养	富营养		
			轻	中	重
营养状态指数值分布 ($I_{E,i}$)	0 ~ 30	30 ~ 50	50 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 100

采用层次分析法确定营养状态指标的权重. 在专家经验判断的基础上, 构建过渡型和湖泊型水体的营养指标相对重要性的判断矩阵, 然后采用层次分析法 (Hicrachical analysis) 确定特征向量, 对特征向量经进行标准化, 所得到的结果即为各指标的权重向量 (朱茵等, 1999), 对分析结果进行一致性 (CR) 检验, 湖库类型区 CR = 0. 039, 过渡类型区 CR = 0. 023, 具有满意的一致性. 三峡过渡型和湖泊型水体的权重结果见表 8

4. 2 标准的验证

采用张远等 (2006) 提出河道型水库的综合评价方法, 对 2004 年 4 月三峡库区过渡类型区和湖泊类型区水体的营养状态进行了评价, 同时采用目前

表 8 三峡水库的营养状态评价指标的权重值

Table 8 Weight factors for nutrient status indices of the Three Gorges Reservoir

项目	权重	
	过渡型	湖泊型
总磷	0. 526	0. 156
总氮	0. 206	0. 095
叶绿素 a	0. 206	0. 478
透明度	0. 062	0. 271

国家环保总局推荐的湖泊营养状态评价标准及方法进行对比评价, 以对比分析本文所提出的标准以及方法的科学性 (表 9).

表 9 三峡水库不同方法的营养状态评价的结果对比
Table 9 Comparison of assessment of nutrient status of the Three Gorges Reservoir by various methods

敏感类型区	调查断面	浮游植物数量 (10^4 个 $\cdot$ L $^{-1}$)	本规范方法		总局推荐湖库方法	
			营养状态综合指数 (I_E)	营养级别	营养状态综合指数 (TSI)	营养级别
过渡型	坝前 1 (坝上约 4 km)	121. 5	45. 61	中营养	40. 56	中营养
	坝前 2 (坝上约 2 km)	1612. 4	52. 25	(轻) 富	44. 97	中营养
	坝前 3 (坝上约 1 km)	422. 1	41. 93	中营养	40. 56	中营养
湖泊型	小江河口	101. 1	50. 36	(轻) 富	46. 08	中营养
	大宁河出口	1995. 2	64. 95	(中) 富	53. 96	(轻) 富
	神女溪河口	7813. 9	63. 05	(中) 富	54. 50	(轻) 富
	锣鼓河口	15840. 3	68. 25	(中) 富	58. 45	(轻) 富
	龙船河口	103. 7	38. 11	中营养	38. 70	中营养
	九畹溪河口	59. 9	47. 41	中营养	44. 10	中营养
	香溪 1	1867. 6	62. 44	(中) 富	52. 30	(轻) 富
	香溪 2	7913. 5	65. 63	(中) 富	54. 80	(轻) 富
	香溪 3	11939. 3	63. 80	(中) 富	49. 96	中营养
	香溪 4	7143. 6	67. 02	(中) 富	54. 20	(轻) 富

属于过渡类型区的三峡坝前水域为中营养及轻度富营养水平, 藻类密度为 (121 ~ 1612) $\times 10^4$ 个 $\cdot$ L $^{-1}$ 之间, 尚未爆发水华, 但随着水库的进一步

蓄水, 可以预测水体营养状态将会进一步严重. 湖泊类型区的水体营养状态为中营养至中度富营养级别, 其中锣鼓河和香溪河回水段已出现了水华爆

发现现象,水体达到了中度富营养化级别,因此三峡库区蓄水后的湖泊类型区水体的富营养化趋势表现显著.采用本文标准和方法,其评价营养级别要明显高于国家环保总局推荐方法的评价结果,以香溪河 3 站点为例,采用国家环保总局推荐的标准及方法进行评价,结果是中营养化水平,但其实际浮游植物数量已达到了 $11939 \times 10^4 \text{个} \cdot \text{L}^{-1}$,出现了水华爆发现象,而采用本文的标准与方法进行评价,结果为中度富营养化级别,与现实情况更加符合.本文评价结果与水库浮游植物密度的相关性显著(图 2),营养状态综合评价指数 (I_E) 达到 50 以上时,浮游植物密度开始增加,达到 60 以上时就出现了浮游植物数量的爆发,说明本文的分级标准与评价方法是科学的,更适合于三峡水体的营养状况评价和预警分析.

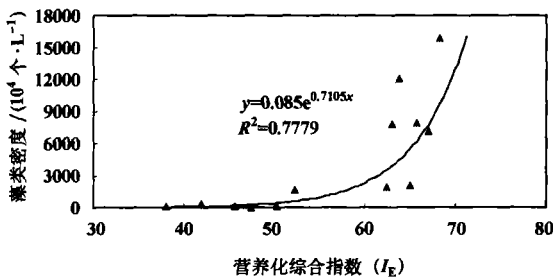


图 2 三峡水库的营养状态评价综合指数与藻类密度的关系

Fig 2 Relation of algae density and integral nutrition index in the Three Gorges Reservoir

5 结论 (Conclusions)

1)采用 30 年的月径流数据和一维水力学模型,计算了三峡水库干流及其主要支流的滞留率、缓流率等水力学概率特征指标值,综合计算了敏感分区指数,将三峡库区长江银杏沱以上江段划分为河流类型区,银杏沱至坝前江段划分为过渡类型区.对于支流而言,位于丰都县以上的支流的回水区以河流类型和过渡类型为主,而位于丰都县以下的主要支流回水区均为湖泊类型水体.

2)根据三峡水库的现场调查结果,对营养指标监测值进行了统计学、营养状态阈值及其与叶绿素 a 的回归关系的分析,确定了不同方法的标准参考值.按照安全性原则综合确定了三峡库区过渡类型区和湖泊类型区的营养指标分级标准值,建立了三峡水库的营养状态标准体系.其中,过渡类型区和湖泊类型区的叶绿素 a 和透明度的分级标准值相

同,但过渡类型区的 TP、TN 的标准值要高于湖泊类型区.

3)采用分段线性方法计算三峡水库各个营养指标的营养化指数,采用层次分析法分析了营养指标的权重大小,对三峡水库过渡类型区和湖泊类型区的营养状态进行了综合评价.结果表明,湖泊型水体的营养化程度高于过渡型水体,部分湖泊型水体达到了中度富营养水平,并且发生了水华爆发.

4)对三峡水库营养化评价进行对比分析,本文标准与方法要比国家环保总局推荐的标准和方法更为科学和准确,而且与浮游植物密度具有显著的相关性,不仅能够表现出营养状态对浮游植物数量的影响规律,而且能够反映出库区水体营养状态的时空变化特征,更适合于三峡水库富营养化的科学管理和预警.

致谢:衷心感谢英国 Water Division of Scott Wilson Ltd 的杨宗严博士对本文所进行的悉心修改.

References:

- He Z H. 1987. A trophic classification of the lakes and reservoirs in China [J]. Journal of Dalian Fisheries University, (1): 1—10 (in Chinese)
- Jin X C, Tu Q Y. 1990. Lake eutrophication investigation standard (2nd edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 290—298 (in Chinese)
- Li J X, Liao W G. 2003. Main inducing factors of eutrophication in the Three Gorges Reservoir [J]. Science & Technology Review, (2): 49—52 (in Chinese)
- Liu Y M, Jia S F, Jiang L W, et al. 2003. A study on the impact of the Three Gorges Reservoir on potential eutrophication in backwaters of tributaries of Chongqing section of Yangtze River [J]. Geographical Research, 22(1): 67—72 (in Chinese)
- State Environmental Protection Administration of China. 2002. Monitor and analytical method of water and wastewater (Revised) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 12—14 (in Chinese)
- Yangtze River Basin Committee. 1997. Study on environmental impact of the Three Gorges engineering [M]. Wuhan: Hubei Sciences and Technology Press (in Chinese)
- Ye M, Hong Y P, Peng S H, et al. 2002. Analysis of eutrophication trend in the Three Gorges Reservoir [A]. In: Huang Zhenli et al. 2002' Environmental Hydraulic of China [C]. Beijing: China Hydraulic Engineering and Water Power Press (in Chinese)
- Zhang J, Zhang Z F, Liu S M, et al. 1999. Human impacts on the large world rivers: Would the Changjiang (Yangtze River) be an illustration? [J] Global Biogeochem Cycles, 13: 1099—1106
- Zhang Y, Zheng B H, Fu G, et al. Approach of nutrition criteria

development for river - type reservoir based on eutrophication sensitivity regionalization [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26 (6): (in Chinese)

Zhu Y, Meng Z Y, Gan S Y. 1999. Determination of Weight Value by AHP [J]. Journal of Northem Jiaotong University, 23 (5): 119—122 (in Chinese)

中文参考文献:

何志辉. 1987. 中国湖泊和水库的营养分类 [J]. 大连水产学院学报, (1): 1—10

金相灿, 屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范 (第 2 版). 北京: 中国环境科学出版社, 290—298

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

刘永明, 贾绍凤, 蒋良维, 等. 2003. 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, 22 (1): 67—72

国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 2002. 水和废水监测分析方法 (第 4 版). 北京: 中国环境科学出版社, 12—14

长江水利委员会. 1997. 三峡工程生态环境影响研究 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社

叶 闽, 洪一平, 彭盛华, 等. 2002. 三峡水库水体富营养化潜势分析 [A]. 见: 黄真理等编. 中国环境水力学 [C], 北京: 中国水利水电出版社

张 远, 郑丙辉, 富 国, 等. 2006. 基于敏感分区的河道型水库营养化指标及标准 [J]. 环境科学学报, 26 (6):

朱 茵, 孟志勇, 阚叔愚. 1999. 用层次分析法计算权重 [J]. 北方交通大学学报, 23 (5): 119—122

2004年环境科学技术类期刊总被引频次排序表

代码	期刊名称	总被引频次	排序	代码	期刊名称	总被引频次	排序
Z004	环境科学	1754	1	Z029	长江流域资源与环境	405	16
Z003	环境科学学报	1508	2	H784	生态环境	389	17
Z001	中国环境科学	1343	3	Z010	海洋环境科学	378	18
Z012	自然资源学报	1216	4	Z009	化工环保	326	19
Z008	农业环境科学学报	913	5	Z546	中国人口资源与环境	309	20
Z021	环境污染治理技术与设备	889	6	Z025	环境科学与技术	306	21
Z013	工业水处理	719	7	Z030	中国环境监测	237	22
Z002	环境科学研究	624	8	Z015	电镀与环保	207	23
Z011	上海环境科学	623	9	G129	中国安全科学学报	191	24
Z022	资源科学	593	10	Z549	安全与环境学报	180	25
Z016	水处理技术	515	11	Z017	环境保护科学	160	26
Z024	城市环境与城市生态	476	12	Z007	四川环境	157	27
Z023	农村生态环境	430	13	Z032	工业用水与废水	120	28
Z019	环境污染与防治	428	14	Z027	Journal of Environmental Sciences	96	29
Z005	环境工程	425	15				

资料来源:中国科学技术信息研究所. 2005年版中国科技期刊引证报告 [M]. 北京:科学技术文献出版社, 2005: 177