

# 三峡水库不同应急调度方式对库区水华抑制作用初步研究

刘东,郭辉,聂艳华

(长江科学院水力学研究所,武汉 430010)

**摘要:**河道筑坝蓄水后易爆发水华现象,在短期内要减轻对生态环境的影响,可以通过改变水库调度方式,使其对河流突发性生态环境的恶化影响降到最小程度。文章以三峡库区水华暴发为背景,以枢纽实际运行状态为依据,通过9种可行性应急方案的数值模拟计算,分析三峡水库水位消落阶段坝前水流特性,阐述枢纽调度对水华的影响,研究三峡水库抑制水华暴发的最优调度方法。研究表明:方案5在运行初期水体交换率较大,效果明显。

**关键词:**三峡水利枢纽;水华暴发;调度方法

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2013)08-0117-05

## 1 研究背景

河道上筑坝等改变自然规律的现象是河流及平原生态系统恶化的一个重要因素,突出表现在对生态环境的影响和破坏。由于河道筑坝蓄水后库区水位抬升,水流减缓,紊动扩散能力降低,导致水体自净能力减弱和污染物在支流库湾滞留,这种变化极易暴发水华现象,将直接影响水库生态系统的完整性和健康状态,并对工程综合效益的发挥产生重大影响。水华是水体富营养化的典型特征之一,是藻类迅速大量生长、繁殖、聚集,最终达到一定浓度的现象。藻类水华暴发涉及到生理需求、营养竞争、食物链、外部入侵以及物理和化学因素的驱动作用等,机理十分复杂。目前普遍取得的共识是水华暴发必须具备3个条件:充足的营养盐(氮、磷、硅等);缓慢的水流流态;适宜的气候条件(水温、光照等)<sup>[1-3]</sup>。

三峡库区为典型的河道型水库,在水位消落阶段的枯水季节,坝前水流、气温、水温及光照为藻类的大面积生长创造了条件<sup>[4]</sup>。三峡水库建成后,在175 m水位下,库区干流平均宽度由建库前的385 m提高到986 m,库区平均水深由建库前的13.4 m提高到48.6 m,在90%保证率连续7 d最枯流量条件下,库区平均流速由建库前的0.85 m/s降为0.17 m/s。尤其是支流库湾受到干流回水顶托的影响,水流流速显著降低。例如香溪河水位平均升高了40 m,流速则从建坝前的0.43~0.92 m/s下降到

蓄水后的0.002~0.004 m/s。自2003年以来三峡库区支流库湾水华呈现加重、扩大的趋势,2009年3月,三峡水库坝前隔流堤内上引航道水域、银杏沱至大坝水域各库湾港区等水域暴发水华现象。

国内外学者认为,增加库区水流流速及提高水体的交换率改善水质,是减少水华暴发的关键因素,在短期内要减轻大坝对生态的影响,可努力集中于改变水库调度方式,使其对河流突发性生态环境的恶化影响降到最小程度。此次研究以三峡枢纽工程庙河至坝前近坝区河段为研究对象,通过水力学数值模型计算研究进行枢纽调度,结合三峡水库坝前水域水华暴发的水流条件观测分析,改变库区应急调度方式,提出抑制水华暴发的对策。

## 2 三峡水库抑制水华应急调度方案研究

### 2.1 水库水华应急调度研究方案

本文结合以往物理模型试验的成果,采取数值模拟计算对典型日实际运行方案进行优化调度,以流速小于0.01 m/s的水域作为滞水区,以近坝区20 km左右的河段(图1)初始时刻滞水区作为水体交换能力的对象,以溶解态保守性物质作为滞水区水体的示踪物来研究水体的交换能力,研究三峡水库抑制水华应急调度方案<sup>[5]</sup>。

如图2所示,沿库区主流设置A—E 5个分析点。A点位于大坝附近,B点位于九岭山附近水域,

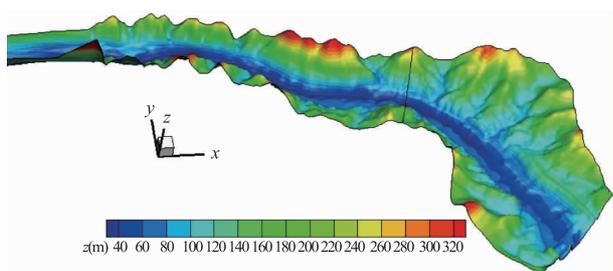


图 1 近坝区地形图

Fig. 1 Topographic map near the dam

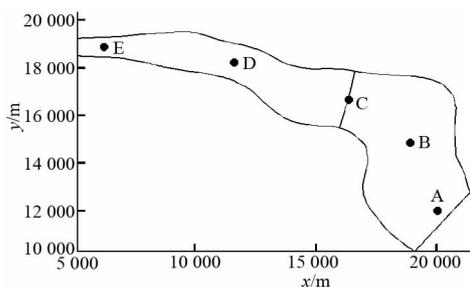


图 2 主流区分析点示意图

Fig. 2 Sketch map of analyzed points (mainstream area)

C 点位于蛋子石附近水域, D 点位于美人沱与偏岩子之间水域, E 点位于杉木溪以上水域。

库湾滞水区的流速都很小, 水力条件较差, 是分析的重点。假定滞水区以外的水体为新鲜水体, 以 5 d 为调度周期, 分析各种方案下库湾滞水域与域外水体的交换能力。如图 3 所示, 选取的分析点 F—K 位于不同的库湾滞水区, 其中 F—I 位于左岸库湾, J—K 位于右岸库湾。

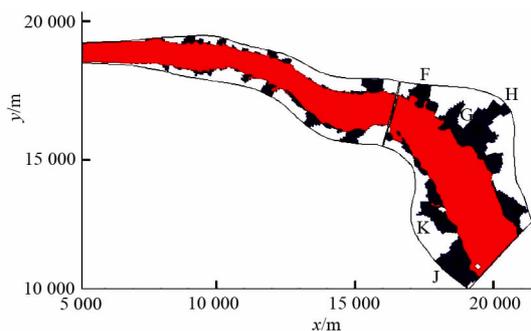


图 3 库湾滞水区分析点示意图

Fig. 3 Sketch map of analyzed points (backwater area)

图 4 所示为 2009 年 1—4 月三峡水库实际调度运行图, 水库日调节的运行规律可以概化为 0:00—08:00 为低泄流量时段, 12:00—20:00 为高泄流量时段。试验以期通过对现有调度模式条件下该段河道水流流态、水流特性以及流速分布进行分析, 选取具有代表性的工况进行枢纽调度, 在保证电站最低出力、枢纽控制下泄最低流量(本阶段暂按 5 200 m<sup>3</sup>/s)及水库水位消落值允许范围前提下, 研究表孔开启、电厂机组运行台数调度、加大枢纽下泄泄量等情况对

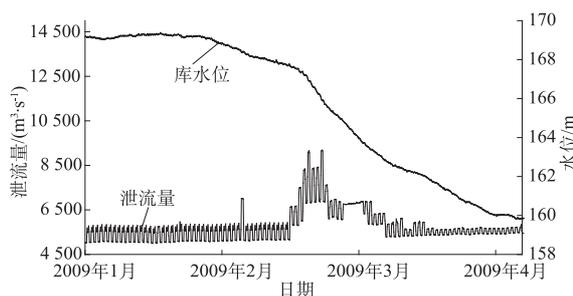


图 4 三峡水库实际调度运行图

Fig. 4 Discharge and reservoir water level during the operation of Three Gorges Reservoir

上游近坝区河段的流速流态影响。本文以库水位 160 m、入库流量 5 000 m<sup>3</sup>/s 为背景, 设定如下 9 种情景, 进行 5 d 的水库应急调度过程分析。

如图 5 和表 1 所示, 方案 1 至方案 7 为 24 h 调度方式, 试验调度时长为 5 d。方案 1 为实际运行方案, 0:00—08:00 流量为 5 400 m<sup>3</sup>/s, 12:00—20:00 流量为 5 600 m<sup>3</sup>/s; 方案 2 主要通过加大流量变幅, 即“降低低泄流量时刻的流量, 增大高泄流量时刻的流量”, 具体时段为 02:00—09:00 时运行低泄流量, 12:00—16:00 时运行高泄流量; 方案 3 是提高调峰频率, 在实际运行过程的基础上, 反复增大减小泄流量, 希望造成水体的波动, 即“人工潮汐”, 以期能增大水的掺混度; 方案 4 高泄流量时段为 10:00—18:00, 开启左右电厂约 16 台机组, 达到机组的中等泄流能力, 流量为 14 900 m<sup>3</sup>/s; 方案 5 高泄流量时段为 2:00—6:00 和 11:00—19:00 两个时段, 同方案 4, 流量为 14 900 m<sup>3</sup>/s; 方案 6 高泄流量时段为 1:00—17:00, 流量为 14 900 m<sup>3</sup>/s; 方案 7 高泄流量时段为 10:00—18:00, 考虑左右电厂全部 26 台机组的最大泄流能力, 高泄流量值选取为 25 800 m<sup>3</sup>/s。

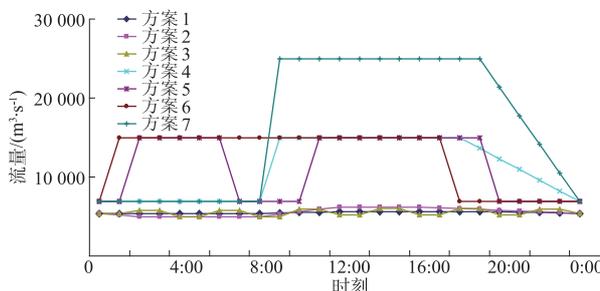


图 5 方案 1 至方案 7 水库调度过程

Fig. 5 Flow discharge processes in reservoir operation case 1—case 7

方案 8、方案 9 为 5 d 调度工况, 具体调度过程如图 6 和表 2 所示, 方案 8 第 1 天高泄流量时段全部开启地下电厂和右电站, 第 2 天和第 3 天高泄流量时段全部开启右电厂, 第 4 天和第 5 天减少右电厂的高泄流量至 10 000 m<sup>3</sup>/s; 方案 9 第 1 天高泄流量时段全部

表 1 方案 1 至方案 7 水库调度过程

Table 1 Flow discharges in reservoir operation

时刻	case 1—case 7						
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7
0:00	5 400	5 400	5 400	6 900	6 900	6 900	6 900
1:00	5 400	5 200	5 400	6 900	6 900	15 000	6 900
2:00	5 400	5 000	5 800	6 900	15 000	15 000	6 900
3:00	5 400	5 000	5 800	6 900	15 000	15 000	6 900
4:00	5 400	5 000	5 000	6 900	15 000	15 000	6 900
5:00	5 400	5 000	5 000	6 900	15 000	15 000	6 900
6:00	5 400	5 000	5 800	6 900	15 000	15 000	6 900
7:00	5 400	5 000	5 800	6 900	6 900	15 000	6 900
8:00	5 400	5 000	5 000	6 900	6 900	15 000	6 900
9:00	5 450	5 300	5 000	15 000	6 900	15 000	25 000
10:00	5 500	5 600	5 900	15 000	6 900	15 000	25 000
11:00	5 550	5 900	5 900	15 000	15 000	15 000	25 000
12:00	5 600	6 200	5 200	15 000	15 000	15 000	25 000
13:00	5 600	6 200	5 200	15 000	15 000	15 000	25 000
14:00	5 600	6 200	6 000	15 000	15 000	15 000	25 000
15:00	5 600	6 200	6 000	15 000	15 000	15 000	25 000
16:00	5 600	6 200	5 200	15 000	15 000	15 000	25 000
17:00	5 600	6 100	5 200	15 000	15 000	15 000	25 000
18:00	5 600	6 000	6 000	15 000	15 000	6 900	25 000
19:00	5 600	5 900	6 000	13 650	15 000	6 900	25 000
20:00	5 600	5 800	5 200	12 300	6 900	6 900	21 380
21:00	5 550	5 700	5 200	10 950	6 900	6 900	17 760
22:00	5 500	5 600	5 900	9 600	6 900	6 900	14 140
23:00	5 450	5 500	5 900	8 250	6 900	6 900	10 520
0:00	5 400	5 400	5 400	6 900	6 900	6 900	6 900

表 2 方案 8 至方案 9 水库调度过程

Table 2 Flow discharges in reservoir operation

方案	时间	case 8—case 9			
		时刻	流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	时刻	流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
方案 8	第 1 天	0:00	0	12:00—18:00	18 340
	第 2 天	0:00—6:00	5 600	12:00—18:00	14 260
	第 3 天	0:00—6:00	5 600	12:00—18:00	14 260
	第 4 天	0:00—6:00	5 600	12:00—18:00	10 000
	第 5 天	0:00—6:00	5 600	12:00—18:00	10 000
方案 9	第 1 天	0:00	0	12:00—18:00	28 520
	第 2 天	0:00—6:00	5 600	12:00—18:00	14 260
	第 3 天	0:00—6:00	5 600	12:00—18:00	14 260
	第 4 天	0:00—6:00	5 600	12:00—18:00	10 000
	第 5 天	0:00—6:00	5 600	12:00—18:00	10 000

表 3 各方案水流特性对比表

Table 3 Comparison of flow characteristics in different operation cases

方案	最大流速/(m·s <sup>-1</sup> )		最大水位日变幅/m
	低泄流量时段	高泄流量时段	
方案 1	0.10	0.11	0.07
方案 2	0.10	0.12	0.11
方案 3	0.11	0.12	0.10
方案 4	0.10	0.30	0.66
方案 5	0.18	0.31	1.18
方案 6	0.19	0.31	1.26
方案 7	0.11	0.53	1.47
方案 8	0.11	0.36	1.09
方案 9	0.23	0.57	1.95

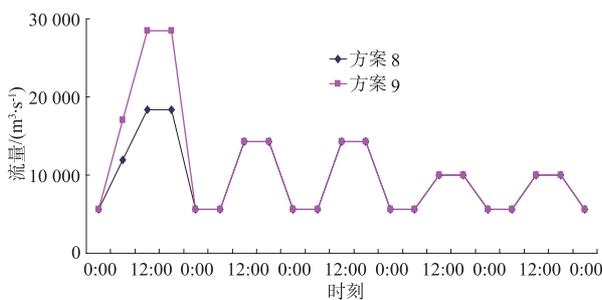


图 6 方案 8、方案 9 水库调度过程

Fig. 6 Flow discharge processes in reservoir operation case 8 and case 9

开启右电厂和左电厂,第 2 天和第 3 天减少左右电厂的高泄流量至 14 260 m<sup>3</sup>/s,第 4 天和第 5 天减少左右电厂的高泄流量至 10 000 m<sup>3</sup>/s。

## 2.2 水库水华应急调度效果

### 2.2.1 水流特性

各工况出现的高泄流量与低泄流量的交替变化,会形成不同的库区水流特性,库湾在一定时间段会产生回流。出现回流区的时段使得主流区水体与库湾滞水区水体掺混度增大,更多的滞水区水体会交换至主流区;不产生回流区的时段,主流区流速较

大且平顺,有利于回流区交换至主流区的滞水区水体下泄,改善水质。表 3 统计了各方案在低泄流量时段和高泄流量时段的最大流速值,以及各方案最大水位日变幅。从表中看出,各种方案低泄流量的最大流速值与实际运行方案较一致,而高泄流量的流速值大幅提高,其中方案 7、方案 9 高泄流量的最大流速值变化最明显,尤其是方案 4 至方案 9 增大泄流量后,最大流速值增加 0.19 ~ 0.46 m/s,同时各应急方案高泄流量时段的最大水位日变幅也有显著提高,方案 9 最大水位日变幅达到 1.95 m。

### 2.2.2 主流区

主流区高泄流量时段各方案各分析点流速对比见表 4。A—E 测点各方案下最大流速值均出现在 D、E 点,方案 1 至方案 3 流速相对实际方案变化不大,而方案 4 至方案 9 由于在高泄流量时段大幅提高了泄流量,流速增幅较明显,均增加 0.15 m/s 以上,方案 9 最大流速达到 0.56 m/s;水库近坝区 A、B 测点流速均在 0.30 m/s 以内,流速变化相对较小。河道主流区域各分析点在方案 4 至方案 9 条件下流速增加,流速值也较高,基本不会形成产生水华的条件。

表 4 高泄流量时段各方案各分析点流速对比表

Table 4 Comparison of flow velocity at the analyzed points of different operation cases with big discharge m/s

方案编号	A 点	B 点	C 点	D 点	E 点
方案 1	0.07	0.06	0.09	0.10	0.10
方案 2	0.06	0.07	0.09	0.11	0.11
方案 3	0.05	0.06	0.09	0.09	0.10
方案 4	0.14	0.15	0.22	0.25	0.26
方案 5	0.15	0.15	0.23	0.25	0.25
方案 6	0.16	0.16	0.23	0.27	0.26
方案 7	0.28	0.28	0.41	0.46	0.45
方案 8	0.21	0.21	0.33	0.35	0.35
方案 9	0.30	0.30	0.49	0.55	0.56

### 2.2.3 库湾滞水区

图 7 反映了各方案不同时间及不同滞水区域的水体交换程度。

F 点所在水域位于左岸库湾,距大坝较远,此处滞水区面积相对较小。如图 7(a)所示,实际运行方案(方案 1)下,该水域的水体交换能力不强,5 d 后该点附近水域约有 41% 的水体被交换。方案 4 至方案 9 水体交换能力均有较大提高,5 d 后,方案 4 至方案 6 达到 60%,方案 7 则达到 80% 以上。

G 点所在水域位于左岸最大的库湾内靠近主流区的一侧,此处滞水区面积较大,河宽较大。该水域实际运行方案下的水体交换能力很弱,5 d 后仅有 15% 的水体被交换。方案 4 至方案 9 在 G 点附近水域前 2 d 的水体交换能力比实际运行方案稍有增长,其中方案 6 初期水体交换能力改善较快。5 d 末水体交换能力比实际运行方案提高 20%,其中方案 5 效果较为明显,交换率为 58%。

H 点与 G 点位于同一库湾,但 H 点所在水域远离主流区,靠近河岸。各方案 H 分析点附近水域水体几乎没有交换能力,仅通过水库调度的方式很难改善此分析点附近水域的水体交换能力(图略)。

I 点所在水域位于靠近大坝的左岸滞水区。方案 1 中 I 点附近水域的交换能力不弱,5 d 后的水体交换率为 51%。其他方案下,I 点附近水域的水体交换能力比实际运行方案有一定幅度的增长,5 d 后的水体交换率可达 90% 左右。

J 点所在水域位于靠近大坝的右岸滞水区。5 d 后有 27% 的水体被交换。方案 2 和方案 3 对 J 点附近水域的水体交换能力稍有增强,其他方案下,J 分析点附近水域的水体交换能力受泄流量影响较大,比实际运行方案有明显的提升,5 d 后的水体交换率可达 90% 以上。

K 点所在水域位于右岸滞水区,实际运行方案的水体交换能力很弱,5 d 后仅有 19% 的水体被交

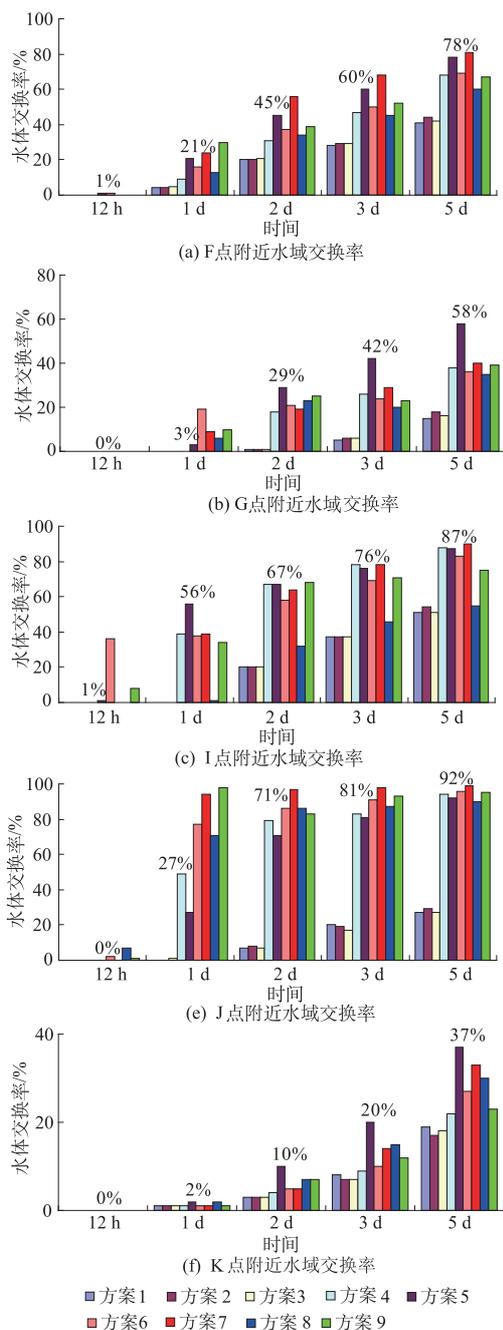


图 7 滞水区域分析点水域交换率  
(数据显示为方案 5)

Fig. 7 Exchange rate at analyzed points in the backwater area (the figures are for case 5)

换,方案 5 的水体交换率略高,5 d 后达到 39%。在该库水位条件下,各应急方案的初期水体交换能力都较差,较难通过水库调度的方式快速改善该水域的水体交换能力。

结合上面各分析点附近水域的分析成果,综合库区流速及水位变幅等水流特性发现:坝前滞水区水体交换能力对泄流量较敏感,加大泄流量可以改变坝前部分区域的局部流态,使滞水区掺混度增大,较快提高该区域的水体交换能力;实际运行方案库湾滞水区

的水体交换能力总体较弱,方案2至方案3对滞水区水体交换能力影响不明显,方案4至方案9对除H点外的各分析点附近区域水体交换能力有不同程度的改善作用,但在左右库湾仍有一定面积水域的水体交换能力不易通过各应急方案来改善。

总体来说,方案5在运行初期时段保持高泄流量,水体交换率效果较好,水体交换率较大,且水位日变幅及最大流速均在可行性范围之内。提高各方案初期水体交换速率,对于库湾滞水区水华防治具有重要的借鉴意义。

### 3 结 论

本文针对三峡水库坝区水华暴发情况,分析水华暴发的环境因子,通过枢纽运行调度改变坝前水域水动力学条件,初步研究探索抑制水华暴发的可能性及其可能的水华抑制作用。

坝前滞水区的水体交换能力受调度过程的影响较敏感,通过增加下泄流量变幅,可以增加坝前水体的流速及掺混度,尽快提升水体交换能力、改善水质状况,达到提高水华防治的效果。文中方案5效果明显,根据坝区水文情势适时进行水库应急调度,充分利用水华易发生时期遇到的每一次洪峰流量,加强水体的交换,有利于水华的防治。

#### 参考文献:

[1] 徐 杨,常福宣,陈 进,等. 水库生态调度研究综述[J]. 长江科学院院报,2008,25(6):33-37. (XU

Yang, CHANG Fu-xuan, CHEN Jin, *et al.* Review of Research on Ecological Operation of Reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(6):33-37. (in Chinese))

[2] 章国渊. 三峡水库典型支流水华机理研究进展及防控措施浅议[J]. 长江科学院院报,2012,29(10):48-56. (ZHANG Guo-yuan. Mechanism of Water Bloom in the Tributaries of Three Gorges Reservoir: Progress and Control Suggestions [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(10):48-56. (in Chinese))

[3] 许 可,周建中,顾 然,等. 基于日调节过程的三峡水库生态调度研究[J]. 人民长江,2010,41(10):56-58. (XU Ke, ZHOU Jian-zhong, GU Ran, *et al.* Ecological Operation of Three Gorges Reservoir Based on Daily Regulating Hydropower Station Running [J]. Yangtze River, 2010, 41(10):56-58. (in Chinese))

[4] 王海云,程胜高,黄 磊. 三峡水库“藻类水华”成因条件研究[J]. 人民长江,2007,38(2):16-18. (WANG Hai-yun, CHENG Sheng-gao, HUANG Lei. Investigation on the Causes of Algal Bloom in Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River, 2007,38(2):16-18. (in Chinese))

[5] 艾学山,范文涛. 水库生态调度模型及算法研究[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(3):451-455. (AI Xue-shan, FAN Wen-tao. On Reservoir Ecological Operation Model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008,17(3):451-455. (in Chinese))

(编辑:曾小汉)

## Preliminary Research on the Prevention of Water Blooms by Emergency Scheduling in the Three Gorges Reservoir

LIU Dong, GUO Hui, NIE Yan-hua

(Hydraulics Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Water blooms are prone to break out in reservoir when dams are built up. Adjusting the reservoir operation is a practical approach to alleviate its impact on eco-environment in the short term. With the water blooms in the Three Gorges Reservoir as a background and in accordance with the actual operation of the reservoir, we designed 9 feasible emergency scheduling cases through mathematical numerical simulation. For each case, we analyzed the characteristics of flow downstream of the dam during water level drawdown, and expounded the effects of reservoir operation on the water blooms in the purpose of seeking the optimum reservoir operation plan to curb water blooms in the Three Gorges Reservoir. Results suggest that the operation in case 5 has obvious effect by retaining a large discharge in the initial period of the operation and a consequent big exchange rate.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; water bloom; operation mode