

磷矿区新建水库的富营养化趋势与防治

施为光

(四川省环境保护科学研究院, 成都 610041)

摘要 90年代中期,开始对四川德阳市清平水库修建后的富营养化可能性及防治进行预研究.对水库修建河段设四个断面进行连续5个月水质监测,表明河水中TP浓度高.对水库蓄水初期的TP时空水质预测模型和参数率定工作进行了深入的探讨.用模型对大欠坪坝址和枇杷岩两个坝址建库的水质进行了模拟预测,发现两个坝址修建水库的水质都将超过湖库水质标准,并有可能发生富营养化.其中,大欠坪坝址可以通过防治措施防止水库富营养化,而枇杷岩坝址修建水库在技术经济上是不可行的.

关键词 水质 水库 模型 富营养化

分类号 X524 P343.3

四川省德阳市拟建的清平水库位于绵竹县清平乡境内,地处沱江主源绵远河上游.水库总库容 $9945 \times 10^4 \text{m}^3$,积水区面积 246.5km^2 ,多年平均径流量 $3.06 \times 10^8 \text{m}^3$.水库是一个以防洪和城市供水(供德阳市)为主,并结合灌溉、发电、养殖和旅游的综合利用水库.鉴于水库库区分布有清平磷矿、德阳市磷矿及许多乡镇、个体磷矿企业,漫山遍野堆放着磷矿废渣;再加上该地区土壤中磷元素的本底含量高,使河水中磷含量也较高.因此,建库后水库是否会富营养化就成为决策者关注的主要问题之一.

自Shindler确定富营养化的最主要限制物质为磷以来,不管富磷地区还是缺磷地区,80%以上的湖泊水库中,产生富营养化的物质都是磷元素^[1].通常是建立总磷(TP)和叶绿素a之间的相关关系来描述水体的富营养化程度.如Dillon和Rigler应用北美19个湖泊资料建立的模型^[2]就是较为成功的模型.但这些模型都是基于已建成水库和自然湖泊等稳定水体而建立的模型,并预测其未来富营养化的趋势.

90年代中期,作者开展了对清平水库富营养化趋势的研究.本文主要对建立水库蓄水初期磷元素时空分布模型和参数率定进行了探讨,并应用模型来预测水库水质变化和发生富营养化的可能性.主要目的在于探讨建立水库蓄水初期磷浓度变化水质模型和预测水库富营养化趋势.同时,针对清平水库探讨在磷矿区建立水库避免水体富营养化可行性.希望引起对水库蓄水初期水质模型问题的关注,并为磷矿区修建此类工程提供借鉴.

1 绵远河水质分析

1.1 水质监测断面、时段与频次设计

清平水库工程设计了大欠坪枇杷岩两个坝址.根据设计情况和河流水文地质及污染源分布情况,设置了4个水质监测断面,分别是蔑棚子、大欠坪、枇杷岩和白果庄.蔑棚子是源头水

* 收稿日期:1999-08-12;收到修改稿日期:2000-01-18.施为光,男,1943年生,高级工程师.

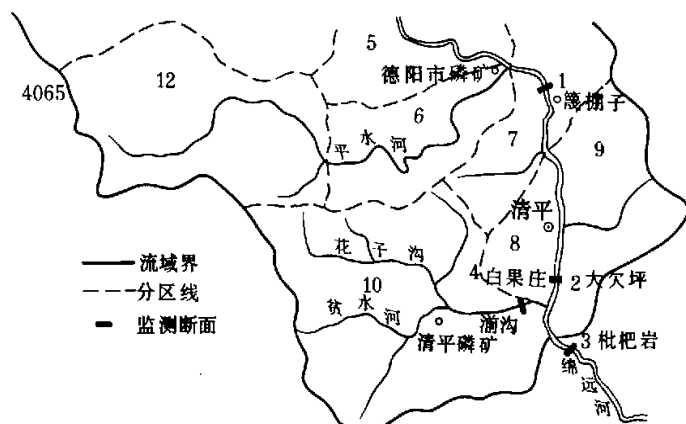


图1 水质监测断面

Fig. 1 Cross-section of monitoring river for water quality

质水文参数监测断面,也是今后水库建成后入库水质的常年监测断面。大欠坪和枇杷岩为设计坝址断面,白果庄断面是控制清平磷矿及整个湫沟河上游来水水质的监测断面和水文测控断面(图1)。

根据环保部门地表水例行监测的水期,结合清平地方的具体情况,监测时段分为:3月(枯水期),5月(平水期),7月(丰水期),主要采样监测旱段。此外,4月和6月作为加密监测时段。河流水质采样是每隔15min采样一次,采集4次的混合样作为一个监测断面的分析样品,对溶解氧等不容混合的样品,仍然用一次瞬时采样。

1.2 监测结果与分析

水质监测结果见表1和表2。

表1 绵远河水质现状监测资料(枯水期)

Tab. 1 Water quality of Mianyuan River (dry period)

项 目	蔑棚子	大欠坪	枇杷岩	白果庄
pH	7.12	7.31	7.45	6.80
SS/mg · L ⁻¹	2.4	2.3	2.2	2.2
DO/mg · L ⁻¹	9.57	9.55	8.32	9.15
BOD ₅ /mg · L ⁻¹	0.90	1.13	1.16	0.56
COD _{Mn} /mg · L ⁻¹	1.35	2.00	2.31	1.14
NO ₃ ⁻ -N/mg · L ⁻¹	0.891	0.808	0.901	1.004
KN/mg · L ⁻¹	0.238	0.308	0.409	0.321
TP/mg · L ⁻¹	0.193	0.256	0.305	0.554
PO ₄ ³⁻ /mg · L ⁻¹	0.024	0.038	0.039	0.081
F ⁻ /mg · L ⁻¹	0.354	0.340	0.354	0.354
Cr ⁶⁺ /mg · L ⁻¹	0.003	0.003	0.003	0.003
As/mg · L ⁻¹	0.003	0.004	0.004	0.004
Cd/mg · L ⁻¹	0.003	0.004	0.003	0.004
Pb/mg · L ⁻¹	0.071	0.056	0.048	0.048

表 2 河水中磷元素含量变化

Tab. 2 The change of phosphorus concentration in Mianyuan River

断 面	项 目	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月
蔑棚子	TP/mg · L ⁻¹	0.139	0.195	0.273	0.240	0.322
	PO ₄ ³⁻ /mg · L ⁻¹	0.025	0.025	0.036	0.028	0.049
大欠坪	TP/mg · L ⁻¹	0.256	0.222	0.290	0.250	0.331
	PO ₄ ³⁻ /mg · L ⁻¹	0.038	0.026	0.040	0.032	0.049
枇杷岩	TP/mg · L ⁻¹	0.305	0.236	0.295	0.282	0.343
	PO ₄ ³⁻ /mg · L ⁻¹	0.039	0.028	0.039	0.037	0.055
白果庄	TP/mg · L ⁻¹	0.554	0.332	0.320	0.348	0.419
	PO ₄ ³⁻ /mg · L ⁻¹	0.081	0.041	0.040	0.043	0.075

表 1 为主要水质项目枯水期监测值;表 2 为 3 月至 7 月总磷(TP)和可溶磷(PO₄³⁻)的统计值.从绵远河枯、平、丰三个水期的监测数据可以看出,一般水质指标尚可,都基本不超过Ⅰ类水域标准.但四个断面三个水期总磷都超过河流Ⅰ类水域标准(0.1mg · L⁻¹),且从上游到下游总磷呈递增趋势.从污染时段上看,丰水期比较严重;高锰酸盐指数(COD_{Mn}),KN 和非离子氨在枯水期和平水期都不超标;而丰水期超标很高.这说明,三个污染因子主要系地面径流所致.总磷和可溶磷也是丰水期比枯水期和平水期严重得多,说明与夏季降雨淋溶矿渣密切相关.应该指出,这里是按河水标准来评价的,如果按湖泊Ⅰ类水域标准(0.025mg · L⁻¹)来判断,总磷更是严重超标.

2 新建水库的水质演变分析

2.1 磷的时空变化模型

描述富营养化过程的第一个模型是由 Vollenweider 提出的^[3].这个模型假定湖库是完全混合的稳定水体.目前,湖泊水库变化的预测模型都基本是对 Vollenweider 模型的修定模型,只在湖泊和已建成水库相对稳定的水体中使用^[4].一个水库建成后,其蓄水初期磷元素随水流输入水体,其浓度也由不稳定逐渐到达稳定.对此过程,研究者历来采用“黑箱”模型来处理.为探讨建库初期水质演变过程和预测水库发生富营养化的可能性,这里建立建库初期磷元素的时空变化模型.

假设水库从库尾到坝址为狭长型水库,把水库(长度为 L)的分为 m 段,从库尾到大坝依次为 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_m$.初蓄水时,随着时间的增长,水库的蓄水段逐渐增长,最后逐渐由大坝直到库尾.建立如下总磷(TP)的数学模型:

$$V_m \frac{dC_m}{dt} = Q_{m-1}C_{m-1} - Q_m C_m - A_m S_m C_m \quad (1)$$

式中, V_m 为各蓄水单元的库容; C_m 为各段的 TP 浓度及流出浓度; Q_m 为各段流出水量; S_m 为各段 TP 的沉降速度; A_m 为各段水面面积.

应该指出,对于(1)式,由于包含了沉降速度 S_m 项,使计算复杂化.但现有求 S 的方法都是根据实测资料拟合而得,经验性很强.由于本水库为新建水库,没有实验资料可供利用.所以,本文使用磷的滞留系数 R (或称保持系数)来代替 S 对模型求解.

$$R = 1 - \frac{\text{进入水体的 TP}}{\text{流出水体的 TP}} = 1 - \frac{Q_{\text{out}} C_p}{Q_{\text{in}} P_{p, \text{in}}}$$

可以看出,如果单元没有水流量流出,则磷元素将全部保留在这个单元内。

引入 R 解(1)式并化简可得下式:

$$C_i = C_{i-1} \exp\left[\frac{-Q_i t}{V_i(1-R_i)}\right] + \frac{Q_{i-1} C_{i-1}}{Q_i} (1-R_i) \{1 - \exp\left[\frac{-Q_i t}{V_i(1-R_i)}\right]\}$$

式中 R_i 为各段的滞留系数;其余参数同上。

模型建立和求解过程篇幅较多,本文不可能详述,有兴趣者可参阅有关研究报告^①。

2.2 模型参数的率定

2.2.1 水文特征量的率定 在蓄水过程中,水库的水面面积 A 、库容 V 、水位 H 及各分段的水面面积 A_i 、容积 V_i 都随时间波动。在计算中取计算时段内的平均值作为计算量。

2.2.2 滞留系数 R 的确定 由于湖库形状、水深、水温、水流、pH、TP 中颗粒磷和可溶磷的含量等各种因素都影响着 R 的大小,应该说每个湖库都有确定自己 R 规律的公式。世界各国学者通过大量研究,得出了许多确定 R 的经验公式公认应用最多的 R 公式为 Kirchner 和 Dillon 用多元回归分析方法确定 R 和 $\frac{Q_{\text{out}}}{A}$ 高度相关的回归公式^[2],其表达如下:

$$R = 0.426 \exp(-0.271 \frac{Q_{\text{out}}}{A}) + 0.574 \exp(-0.0094 - \frac{Q_{\text{out}}}{A})$$

经过详细探讨,确定此公式可应用在研究蓄水期的水质模型中。

2.2.3 入流 TP 浓度的率定 一般情况下,求某设计流量条件下,某污染物浓度 C_n 时使用下式计算:

$$C_n = \frac{C_i Q_i}{Q_n}$$

式中, C_i 为实测污染物浓度, Q_i 为相应实测流量, Q_n 为设计流量, C_n 为设计流量条件下相应的污染物浓度。

在清平水库计算中,由于野外实测浓度和流量数量较少,其精度不能满足模型模拟计算的需要,作者探寻了用实测资料计算流域非点源污染负荷的新方法,来解决入流 TP 浓度的率定问题。该方法是以河流典型时段的水量和污染物在水中的浓度实测值为基础,通过水文学方法推算水库在设计水平年下的磷负荷量,从而得到水库在设计水平年下的磷负荷量。在清平水库的计算中,把一年分为 36 旬,计算出典型水文年 $P=50\%$ 的各旬平均流量。然后通过河流实测水量和污染浓度配套数据,计算出典型年的磷污染负荷量。其具体计算过程请参阅文献^[3],大坎坪坝址按旬分配磷负荷情况见表 3。

2.3 清平水库磷变化的模拟

2.3.1 模拟分区 清平水库拟定大欠坪和枇杷岩两个比较坝址。现以大欠坪坝址来说明水库模拟的分区情况。清平水库为峡谷河道型深水水库,正常蓄水时,90%的库面水深在 10m 以上。这种水库对底质的再悬浮十分不利,水质模拟时,不考虑磷的再悬浮问题。根据模拟精度要求和水库具体情况,把大欠坪坝址的水库分为四个模拟小区,从库尾到坝址分别是 I、II、III 和

① 施为光等,四川德阳清平水库水质趋势研究报告。

IV 区,其长度分别为 1.1km、1.7km、9.5km 和 1km,全长 4.57km。

2.3.2 大欠坪坝址磷时空变化的预测 使用以上模型和表 1 中各旬 TP 的输入数据,模拟水库一年 36 个旬中磷随时间变化和四个模拟区的空间变化情况(表 4)。

表 3 总磷平均输入统计(大欠坪坝址)

Tab. 3 Input concentration of TP of Dapianping Dam

旬	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.208	0.213	0.220	0.223	0.225	0.230	0.233	0.235	0.234	0.266	0.273	0.270
旬总量/t	0.521	0.480	0.505	0.435	0.418	0.416	0.424	0.443	0.894	1.446	1.687	1.575
旬	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.285	0.279	0.272	0.270	0.297	0.309	0.311	0.303	0.295	0.296	0.280	0.304
旬总量/t	2.329	1.979	1.812	2.575	4.856	6.915	8.007	4.581	3.589	3.427	3.018	2.345
旬	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	34	36
浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.296	0.287	0.292	0.294	0.286	0.269	0.258	0.248	0.232	0.225	0.215	0.205
旬总量/t	2.452	2.504	2.952	3.099	2.419	1.708	1.235	1.024	0.790	0.694	0.632	0.607

大欠坪坝址每年输入 TP 为 72.8t,按这个输入进行模拟。通过五年按旬输入数据的模拟,发现清平水库蓄水初期的三年内水库内磷浓度变化较大,但从第四年起,水库内磷浓度与第三年重复。也就是说,第三年水库内磷浓度才达到稳态。此时,全水库中 TP 浓度为 $0.048\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从表 4 可以看出,在 I 区,每年的第一旬 TP 浓度为 $0.104\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,到七月份的第十九旬最高为 $0.265\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,再回复到年终(第 35 旬)的 $0.114\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从空间变化上看,从库尾的 I 区到大坝的 IV 区浓度逐渐变小,如第 19 旬,TP 浓度从 $0.265\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,变化到 IV 区的 $0.131\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,空间变化十分明显。

表 4 稳态时一年内 TP 浓度变化(大欠坪坝址)

单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Tab. 4 The change of concentration for TP in one year under stable state for Daqianping Dam

旬	I	II	III	IV	旬	I	II	III	IV
1	0.104	0.071	0.047	0.033	19	0.265	0.224	0.184	0.131
3	0.108	0.082	0.046	0.028	21	0.253	0.227	0.171	0.108
5	0.110	0.089	0.048	0.022	23	0.221	0.185	0.137	0.095
7	0.123	0.110	0.075	0.032	25	0.215	0.179	0.131	0.091
9	0.150	0.125	0.094	0.044	27	0.200	0.166	0.121	0.080
11	0.187	0.150	0.107	0.053	29	0.188	0.160	0.118	0.068
13	0.210	0.164	0.122	0.070	31	0.150	0.139	0.103	0.052
15	0.224	0.184	0.133	0.091	33	0.126	0.112	0.093	0.047
17	0.255	0.207	0.164	0.109	35	0.114	0.095	0.079	0.034

从时间上,IV 区的最低点出现在第五旬为 $0.022\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (2 月底),其原因是水库运行时,将随流量大小调节水库出水量。当地 12 月至 2 月底流量仅占全年流量的 2.7%,流量很小,水库基本不放水出库。进水水库中的 TP 将滞留于各分区,到达大坝处的量很小。而 19 旬由于出库水流量较大,使 I 区到 IV 区变化梯度远小于 1—7 旬的变化。

2.2.3 枇杷岩坝址磷时空变化的预测 枇杷岩坝址每年输入 TP 为 104.7t,通过 5 年输入数据模拟,也是蓄水初期的三年后达到稳定,即以后各年重复第三年 TP 浓度的时空变化过程.水库达到稳定后,枇杷岩坝址水库中 TP 浓度为 $0.082\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.枇杷岩坝址水库模拟统计值见表 5.其时空变化规律同大欠坪坝址,空间上也是从 I 区到大坝的 IV 区浓度逐渐变小,年内变化也是一年中 7 月份浓度最高,年初和年末浓度较小.

表 5 模拟 TP 时空变化情况(枇杷岩坝址)*

单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Tab.5 Simulated tempo-spatial change of TP concentration in Pibayan Dam

年份	分区	年均	6,7,8月	7月上旬
蓄水第一年	0区	0.309	0.346	0.361
	I区	0.246	0.285	0.367
	II区	0.185	0.228	0.332
	III区	0.124	0.174	0.345
	IV区	0.078	0.113	0.314
蓄水第二年	0区	0.304	0.331	0.354
	I区	0.239	0.274	0.351
	II区	0.171	0.216	0.264
	III区	0.116	0.165	0.211
	IV区	0.065	0.102	0.205
蓄水第三年	0区	0.301	0.331	0.354
	I区	0.224	0.266	0.289
	II区	0.161	0.204	0.251
	III区	0.091	0.153	0.197
	IV区	0.054	0.095	0.154
(达到稳态)	全库平均	0.082	0.125	0.221

* 0区代表输入项,以下同.

3 水体富营养化趋势分析

3.1 大欠坪方案水质趋势

3.1.1 现行输入的水质趋势 用现行水质输入水库进行模拟,水库达到稳定状态后,各分区的 TP 值情况见表 6.

从表中可以看出,每个模拟区 TP 浓度都基本超出湖库标准($0.025\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).光热条件较好的 6,7,8 三个月的平均浓度超标更多.所以,从长远来看,维持现状水质输入,大欠坪坝水库将来发生富营养化的可能性极大.

3.1.2 采取措施后的水质趋势 清平水库大欠坪坝址以上地区除德阳磷矿外,还有许多乡镇、个体磷矿,满山遍野分布磷矿废渣.清平地区降雨量大且集中,对堆放于野外磷矿废渣的淋溶,造成绵远河水中磷浓度很高^[6].

如果要在大欠坪筑坝修建水库,而又要保持水体不发生富营养化,必须采取措施削减 TP 输入量.首先,水库上游所有磷厂停止开采,重点投资德阳磷矿,采取措施停止大欠坪以上所有乡镇、个体磷矿开采,预计这两项措施将耗资 990 万元.同时,还必须采取一定的工程措施,使沿河两岸山上堆放的矿渣得到妥善处理,把降雨径流冲刷这些矿渣的能力减至最小.对现有量

大而又危险的矿渣堆放点采用筑堤封闭处理,其上植树进行覆盖,这项措施将投资 300 万元。水库建成后,水库上游集水区居民尽量迁出水库区域,搬迁费大约需 1610 万元,采取这些措施共投资 2900 万元。这些措施实施后,输入河水中的 TP 将降至每年 30.45t。用这个输入量再进行水质模拟预测,水库达到稳定状态后,水库 TP 的年平均浓度达到 $0.02\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达到了湖库水质标准,可保证大欠坪坝址水库不发生富营养化。

表 6 模拟 TP 时空变化情况(大欠坪坝址)

单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Tab. 6 Simulated tempo-spatial change of TP concentration in Daqianping Dam

年 份	分 区	年 均	6,7,8 月	7 月上旬
蓄水第一年	0 区	0.275	0.300	0.311
	I 区	0.215	0.251	0.265
	II 区	0.155	0.182	0.216
	III 区	0.104	0.131	0.172
	IV 区	0.078	0.097	0.120
蓄水第二年	0 区	0.262	0.289	0.311
	I 区	0.197	0.235	0.249
	II 区	0.138	0.103	0.204
	III 区	0.098	0.117	0.165
	IV 区	0.052	0.075	0.110
蓄水第三年	0 区	0.262	0.289	0.311
	I 区	0.177	0.213	0.239
	II 区	0.107	0.148	0.194
	III 区	0.072	0.088	0.150
	IV 区	0.035	0.053	0.091
(达到稳态)	全库平均	0.048	0.090	0.165

3.2 枇杷岩方案水质趋势

3.2.1 维持现行输入的水质趋势 经计算枇杷岩址建库时,每年输入 TP 为 104.75t,主要是清平磷矿开采及矿渣淋溶通过绵远河支河湔沟输入水库中。按现行水质输入水库模拟,达到稳定状态以后,全库 TP 平均浓度达到 $0.82\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,严重超过湖库标准。水库的四个分区 TP 浓度,无论哪个区、哪个季度都严重超标。可见,如果在枇杷岩修水库,并维持现行水质输入,将来枇杷岩坝址水库极可能要发生富营养化,无法满足修建水库的水区功能要求。

3.2.2 采取措施的可能性 如果采用枇杷岩方案,而又要使将水库不发生富营养化,除大欠坪坝以上的集水区内的污染源(主要是磷矿)必须采取相应措施外,还必须解决湔沟来水的污染问题。

解决湔沟来水的污染问题,可以采取两种办法:一是湔沟上的清平磷矿停止开采,并对堆放的矿渣采取封闭措施;二是把经过清平磷矿的湔沟来水全部引出水库之外。清平磷矿属国有大型磷矿,其固定资产达一亿元以上,显然为保水库使其废弃在经济上并不可行。中国磷矿资源缺少,让这个高品位的磷矿停止开采显然是行不通的。欲把湔沟水引出水库,对于山高坡陡的清平地区要修 3km 左右的引水渠,其技术经济上都存在很大的难度。有人提出,对清平磷矿的采矿和选矿废水就地处理,使其达标排放。经研究,在目前经济技术条件下很难做到。

因此,若选用枇杷岩方案,水库将来发生富营养化的可能性极大,要使其不发生富营养化,将花费更大的投资,而且从技术经济可行性的角度出发,基本行不通。从保护水源和水体功能的角度出发,枇杷岩方案不可行。

参 考 文 献

- 1 余常昭, M 马尔柯夫斯基, 李玉梁. 水环境污染扩散输移原理与水质模型. 北京: 中国环境科学出版社, 1989, 131—141
- 2 顾丁锡, 舒金华. 湖泊水污染预测及其防治规划方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1988, 57—69
- 3 Vollenweider R. Input-output models. *Hydrologic*, 1975, 37: 53—84
- 4 W 金士博. 水环境数学模型. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987, 120—126
- 5 施为光, 凌文川. 用实测资料计算流域非点源污染负荷. 长江流域资源与环境, 1996, 5(3): 273—277
- 6 施为光, 杨菊仙. 四川清平地区磷矿为渣对水体的影响研究. 农村生态环境, 1997, 13(2): 21—24

Entrophication Trend and Countermeasures of Newly-built Reservoir on the Phosphoric Mineral Area

SHI Weiguang

(Sichuan Research Institute of Environmental Protection, Chengdu 610041, China)

Abstract

A preliminary study on the possible eutrophication and countermeasures of Qingpin Reservoir, Deyang city, Sichuan Province, was carried out since 1990s. In this paper, the data from four monitoring river cross-sections in five continuous months showed that the concentration of TP is very high, up to $0.193-0.554 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The temporal and spatial distribution model of TP during initial stage of reservoir operation, and method of defining parameters of model is discussed. The model is applied to simulate the change of TP concentration during the initial stage of Qingpin Reservoir operation for two possible dams of Daqianping and Pibayan. The simulated results showed that the concentration of TP exceeds standard of water quality for both dams, $0.042 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for the dam of Daqianping, and $0.082 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for the dam of Pibayan, respectively. Hence the eutrophication will probably occur in Qingpin Reservoir after operation. Still, the eutrophication for Daqianping Dam would possibly be controlled conditioning some countermeasures be taken, while that for Pibayan Dam would not under present sci-technical conditions.

Key Words Water quality, reservoir, model, eutrophication