

水动力学条件下潘家口水库富营养化的控制

王立明¹, 林 超², 刘德文¹

(1. 水利部海河水利委员会水资源保护科学研究所, 天津 300170; 2. 海河流域水资源保护局, 天津 300170)

摘要 通过分析 2002 年潘家口水库运行调度和水体营养盐的变化情况, 确定总磷是水库富营养化限制性因子。采用沃伦维德模型和迪隆模型计算了潘家口水库总磷年平均质量浓度, 预测正常蓄水水位下, 水库富营养化临界状态单位面积允许磷负荷量为 $2.66 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 入库总磷控制量为 $173 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

关键词 水动力学; 富营养化; 总磷; 迪隆模型; 潘家口水库

中图分类号 X524 **文献标识码** A **文章编号** 1004-693X(2009)04-0008-04

Study on eutrophication control of Panjiakou Reservoir under hydrodynamic conditions

WANG Li-ming¹, LIN Chao², LIU De-wen¹

(1. Research Institute of Water Resources Protection, Haihe Water Conservancy Committee, Ministry of Water Resources, Tianjin 300170, China; 2. Water Resources Protection Bureau of Haihe River Basin; Tianjin 300170, China)

Abstract: Analysis of the changes of operation scheduling and nutrients in the water of Panjiakou Reservoir in 2002 shows that TP was the restrictive factor of eutrophication in the reservoir. The annual average mass concentration of TP was calculated with the Warren Vader model and the Dillon model. It was predicted that at the normal pool level the TP critical carrying capacity per unit area was $2.66 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ and the controlled load of TP to the reservoir was $173 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

Key words: hydrodynamics; eutrophication; TP; Dillon model; Panjiakou Reservoir

近年来, 随着全球气候变暖的加快, 由于富营养化造成的湖泊水库蓝藻水华发生的频率与严重程度呈现加快加重趋势^[1-2]。2007 年, 太湖再次出现大规模蓝藻暴发, 无锡市大部分生产与生活用水供应中断, 造成了重大经济损失和严重的社会影响^[3]。同年, 北方地区的海河流域某水库蓝藻也大面积暴发, 影响供水安全。加强水库富营养化的研究、监测、预警和防治工作, 对于保障饮水安全具有重要意义, 也是摆在水利工作者面前的一个新的课题。

影响富营养化发生的因素很多, 包括地理特性、气候条件、水生生态系统和污染特性等, 但多数学者认为, 影响水体富营养化发生的主要因素是温度、水体流态和营养盐^[4]。以往富营养化研究的重点在于对藻类生长过程受营养盐和气候条件的影响机理方

面, 而对于水动力条件与水体富营养化关系的研究相对较少。对于富营养化机理问题的认识现在还停留在初级阶段, 还缺乏学科之间的交叉^[5]。

水库的水动力学参数是指水库在运行调度过程中的水位、蓄水量、水深、流量、流速等, 这些参数也是评价水库富营养化、选择预测模型、确定模型参数的基础^[6]。水动力条件对藻类暴发有一定的影响, 静水条件下可能更适合藻类的生长。因此我国颁布的地表水环境质量标准中, 对于湖泊、水库氮、磷浓度限制要比江河严格得多。如 III 类水, 江河中总磷质量浓度为 $0.2 \text{ mg}/\text{L}$, 而湖泊、水库则为 $0.05 \text{ mg}/\text{L}$, 原因在于湖泊、水库的水动力交换能力较低, 更适合藻类生长^[7]。研究水库在不同水动力条件下的富营养化发生的临界状态判别条件, 将有利于通过水利

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2006CB403408)

作者简介: 王立明(1973—)男, 河北涿水人, 工程师, 主要从事流域水资源保护工作。

通讯作者: 林超, 男, 教授级高级工程师, E-mail: linchao@hwcc.gov.cn

工程调度实现水量的合理调配,调节水体的水动力条件,达到控制水库富营养化和抑制蓝藻暴发的作用和目的,具有重要的应用价值。

1 研究区概况

潘家口水库位于河北省承德、唐山两市的滦河干流上,总库容为 29.3 亿 m^3 ,多年平均径流量 24.5 亿 m^3 属多年调节水库,其功能以供水为主,兼顾防洪、发电和灌溉。20 多年来,潘家口水库作为引滦工程的源头,已向天津、唐山两市供水 150 多亿 m^3 [8]。

2002 年初潘家口水库蓄水位达到 200.25 m,蓄水量 9.44 亿 m^3 。全年入库水量 3.68 亿 m^3 ,出库水量 9.27 亿 m^3 。年末水库水位降至 182.39 m,蓄水量减少到 3.85 亿 m^3 。2002 年潘家口水库各月水力学参数变化特征如表 1 所示。

表 1 2002 年潘家口水库水力学变化特征

月份	水位/m	入库水量/万 m^3	出库水量/万 m^3
1	200.25	1689	4146
2	199.76	2171	2817
3	198.94	3848	11476
4	197.67	364	4576
5	195.37	1312	21515
6	190.93	4759	6015
7	191.04	4426	5377
8	189.56	4163	17200
9	184.47	2987	11732
10	182.61	4953	6657
11	182.29	3882	6058
12	182.39	2307	5048

2 计算模型及参数的确定

2.1 潘家口水库富营养化限制因子

Redfield 对水体藻类化学成分的分析研究表明,藻类的“经验分子式”为 $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ 。根据利贝格(Liebig)最小值定律,植物最大生长量取决于外界提供给它的所需营养盐中数量最少的一种,这种盐称为限制性营养盐。在藻类分子量中所占的重量百分比最小的两种元素氮和磷,特别是磷是控制藻类生长的主要元素。藻类氮、磷原子个数比率为 16:1,相对应的氮、磷质量浓度比为 7.2:1。因此,当水体中可以被藻体吸收的氮、磷质量浓度比小于 7:1 时,则氮是限制性营养盐;若比率大于 7:1,则磷是限制性营养盐;若比率接近于 7:1,则两者均可能是限制性营养盐 [9]。

根据 2002 年 4~10 月份潘家口水库水质监测结果(表 2),水库中总氮与总磷质量浓度比在 69:1~824:1 之间,年平均比值为 372:1,远高于藻类生长所需要的氮磷比 7:1,为典型的磷控制型水库 [10],

春季总磷质量浓度高达 0.029 mg/L ,超过地面水环境质量 III 类标准。因此,控制潘家口水库水体富营养化,防止藻类暴发,应以控制水体中总磷的含量为主。2002 年潘家口水库总磷质量浓度变化过程如图 1 所示。

表 2 潘家口水库氮磷营养盐含量及结构比例

监测时间	$\rho(TN)(mg \cdot L^{-1})$	$\rho(TP)(mg \cdot L^{-1})$	$\rho(TN)/\rho(TP)$
4月2日	2.01	0.029	69.31
4月23日	3.03	0.024	126.25
5月15日	3.09	0.029	106.55
5月23日	2.55	0.005	510.00
6月8日	2.71	0.012	225.75
6月27日	3.66	0.005	732.00
7月8日	3.79	0.005	758.00
7月22日	2.38	0.010	238.00
8月1日	2.35	0.010	235.00
8月13日	3.74	0.005	748.00
9月12日	4.49	0.024	187.08
9月23日	3.83	0.018	212.78
10月11日	4.12	0.005	824.00
10月24日	4.36	0.018	242.22

注:总磷监测方法检出限为 0.010 mg/L ,实测质量浓度低于检出限时,按检出限的 1/2 处理。

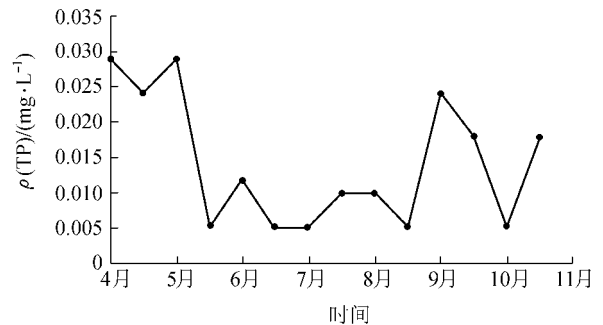


图 1 2002 年潘家口水库总磷质量浓度变化过程

2.2 潘家口水库总磷预测模型

潘家口水库是一个狭长的河道型水库,首尾之间长度超过 40 km,平均水面宽度 1~2 km,平均水深在 10~25 m 之间。在运行调度期间库区水体存在主导流速,横向流动速度与纵向流动速度相比微乎其微,可以看作完全均匀混合。假定水质在横断面上完全混合,不考虑水体的分层和对流扩散情况,本文选取沃伦维德模型(Vollenweider)和迪隆(Dillon)模型作为总磷预测模型。这两个模型在世界范围的富营养化研究中广泛应用,具有较强的可靠性和实用性 [11]。

沃伦维德模型根据物质平衡原理,假定水库随时间而变化的总磷质量浓度值,等于单位容积内输入的磷,减去水库内沉积的磷和输出的磷 [12]:

$$V \frac{d\rho(TP)}{dt} = \sum Q_i \rho(TP)_i - \sum Q_o \rho(TP)_o - S \quad (1)$$

式中: $\rho(\text{TP})$ 为水库总磷质量浓度, mg/L ; V 为湖泊、水库水体体积, m^3 ; Q_i 为入库流量, m^3/s ; Q_o 为出库流量, m^3/s ; $\rho(\text{TP})_i$ 为流入总磷质量浓度, mg/L ; $\rho(\text{TP})_o$ 为流出总磷质量浓度, mg/L ; S 为湖泊、水库总磷的沉积量, g/s 。

迪隆(Dillon)通过研究沃伦维德模型参数与水文条件的相互关系,对该模型进行了改进,得出水库总磷质量浓度预测的迪隆模型^[13]:

$$\rho(\text{TP}) = \frac{I(1-R)}{Z\gamma} \quad (2)$$

其中

$$R = 1 - \frac{\sum Q_o \rho(\text{TP})_o}{\sum Q_i \rho(\text{TP})_i} \quad (3)$$

式中: I 为水体单位面积总磷负荷, $\text{g}(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; γ 为水力冲刷系数, $1/\text{a}$; Z 为平均水深, m ; R 为总磷的滞留系数, $1/\text{a}$ 。

3 结果与分析

根据潘家口水库 2002 年水动力学参数和水库入、出库站水质监测结果,确定该年潘家口水库年均蓄水量 64857.7 万 m^3 ,平均水深 19.99 m,平均水面面积为 3157.75 万 m^2 ,年出库水量 92711 万 m^3 ,水力冲刷系数 1.582,总磷滞留系数 0.62,总磷出库量 15306.052 kg,单位面积总磷负荷 1.2647 $\text{g}(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

利用公式(2)预测潘家口水库总磷年平均质量浓度为 0.0152 mg/L ,与实测年平均质量浓度 0.0142 mg/L 相比,相对误差仅 7%,说明该模型对于潘家口水库总磷质量浓度预测有很好的适用性。因此,可以采用该模型预测潘家口水库单位面积所允许的总磷负荷。根据公式(2),如果已知水库发生富营养化总磷质量浓度临界值 $\rho(\text{TP})_b$,便可以计算出水库发生富营养化的单位面积允许总磷负荷 L_0 为

$$L_0 = \frac{Z\gamma\rho(\text{TP})_b}{1-R} \quad (4)$$

由于我国尚未制定水体富营养化的总磷浓度标准,本文采用国际上通行的水体富营养化标准总磷质量浓度值 0.02 mg/L ^[14]作为评价标准,来判定潘家口水库的允许的磷负荷量。利用公式(4),计算得到潘家口水库在不同平均水深时单位面积允许的总磷负荷。通过潘家口水库的蓄水位、蓄水量和平均水深关系,确定潘家口水库在不同水位下防止发生富营养化的单位面积允许的总磷负荷和所需要控制的入库总磷量。潘家口水库蓄水位与水面面积关系如图 2 所示,潘家口水库在不同水位下允许的总磷负荷和总磷入库控制量如表 3 所示。

潘家口水库设计兴利库容 19.5 亿 m^3 ,正常蓄水位 222 m,正常蓄水位下单位面积允许总磷负荷为

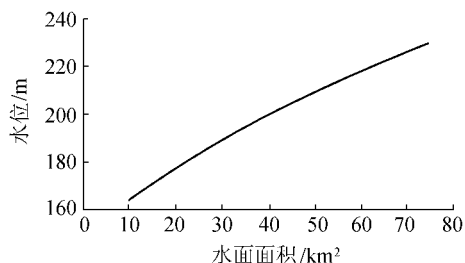


图 2 潘家口水库水位与面积关系曲线

表 3 潘家口水库不同水位下允许总磷负荷和控制量

水库水位/ m	单位面积允许 总磷负荷 L_0 / $(\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1})$	入库总磷 控制量/t	水库水位/ m	单位面积允许 总磷负荷 L_0 / $(\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1})$	入库总磷 控制量/t
165	0.67	6.66	200	2.01	78.27
170	0.86	12.49	205	2.15	95.75
175	0.98	18.32	210	2.30	114.90
180	1.21	26.64	215	2.48	137.38
185	1.44	37.47	220	2.62	162.36
190	1.49	45.79	225	2.78	187.34
195	1.83	63.28	230	2.73	203.99

2.66 $\text{g}(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,入库总磷控制量为 173 t。水库处于低水位 195 m 时,蓄水量 7.6 亿 m^3 ,单位面积允许总磷负荷为 1.83 $\text{g}(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,入库总磷控制量为 63.28 t。当蓄水量降至设计死库容 3.2 亿 m^3 时,蓄水位为 180 m,单位面积允许总磷负荷仅为 1.21 $\text{g}(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,入库总磷控制量为 26.24 t。

每年 7~9 月是潘家口水库的主汛期,入库水量占全年的 70%~80%,同时也会带来大量的氮磷等营养元素。这一时期光照强度和气温条件是藻类生长最适宜的时期^[15],是水体发生富营养化、藻类暴发的危险期。城市供水也达到高峰时期,利用上述模型和计算结果,可以为水库管理单位通过运行调度抑制藻类暴发提供参考。

4 结论

2002 年潘家口水库总氮与总磷质量浓度平均比值为 372:1,总磷是限制水库中藻类生长的主要营养盐。根据当年水动力学条件计算,在水库设计正常蓄水位 222 m 的条件下,为防止水库发生富营养化单位面积允许总磷负荷为 2.66 $\text{g}(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,入库总磷控制量为 173 t。研究水库运行调度过程中,不同水动力条件下营养盐变化情况以期达到控制水库发生富营养化和抑制藻类暴发的目的,是一个艰巨而复杂的难题,需要完整的环境背景资料和大量系统全面的水文水质资料支持。由于数据所限,本文仅探讨了对水库发生富营养化影响较为突出的影响因子总磷,没有涉及其他影响因子,在今后的研究工作中还需要进一步丰富和完善。

参考文献：

[1] 杨东方,高振会,孙培艳,等.浮游植物增殖能力的研究探讨[J].科学视野,2003,27(5):19-21.

[2] REYNOLDS C S, REYNOLDS S N, MUNAWAR F, et al. The regulation of phytoplankton population dynamics in the world's largest lakes[J]. Aquatic Ecosystem Health Management, 2000, 7(3):1-21.

[3] 孔繁翔.太湖水华与中国的水危机[J].文明,2007(10):10-11.

[4] 李锦秀,廖文根.富营养化综合防治调控指标探讨[J].水资源保护,2002,18(2):4-6.

[5] 尹真真.国内外水体富营养化机理研究历史与进展[J].微量元素与健康研究,2006,23(3):46-47.

[6] 高忠信.水库水环境数值模拟[M].北京:地震出版社,2005:94-105.

[7] 卢大远,刘信刚,范天俞,等.汉江下游突发“水华”的调查研究[J].环境科学研究,2000,13(2):28-31.

[8] 李福生.引滦枢纽工程运行20年的效益与前景[J].海河水利,2003(6):47-49.

[9] 李小平.美国湖泊富营养化的研究和治理[J].自然杂志,2002,24(2):63-68.

[10] JOSEPH D, CHAO Lin, YANG Luo, et al. Eutrophication study at the Panjiakou-Daheiting Reservoir system: Chlorophyll-a model and sources of phosphorus and nitrogen[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94:43-53.

[11] 饶群,芮孝芳.富营养化机理及数学模拟研究进展[J].水文,2001,21(2):16-20.

[12] 韩菲,陈永灿,刘昭伟.湖泊及水库富营养化模型研究综述[J].水科学进展,2003,14(6):785-791.

[13] 梁婕,曾光明,郭生练,等.湖泊富营养化模型的研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2006,7(6):24-29.

[14] 濮培民,李正魁,王国祥.提高水体净化能力控制湖泊富营养化[J].生态学报,2002,25(10):58-63.

[15] 郑建军,钟成华,邓春光.试论水华的定义[J].水资源保护,2006,22(5):45-47.

(收稿日期:2008-03-21 编辑:熊水斌)

(上接第7页)如表4所示。从表4可以看出,采用贝叶斯法的评价结果亦和本文的评价结果相同。多种评价方案的评价结果也是一致的。可见,只有实施方案1,山东省水资源安全状况才会有明显改善,若实施方案2和方案3,则水安全状况改善较小。

表4 几种方法的评价结果

方案	P_i					评价等级		
	I	II	III	IV	V	贝叶斯法	综合指数法	属性识别法
方案1	0.1950	0.1971	0.2671	0.2116	0.1292	3	III	3
方案2	0.1942	0.1658	0.2158	0.2420	0.1821	4	IV	4
方案3	0.2001	0.1565	0.1991	0.2253	0.2191	4	IV	4

4 结 语

水安全评价指标体系的选取及各指标的评价分级标准的制订是否适当是水安全评价结果能否符合客观实况的关键所在。指标体系的选取需要在满足科学性、完备性、实用性和可比性等指标选取原则下,通过相关分析、频度统计分析等方法从众多指标中进行筛选,而分级标准制订则要根据所考察区域的经济、社会、生态环境和规划管理具体情况,并参考国内外不同类型地区的标准予以确定。

用本文提出的单指标水安全指数公式和对各子系统用广义模糊对比加权法进行水安全综合指数计算,物理意义明确,计算方法简便、实用。

参考文献：

[1] SULLIVAN C. Calculating a water poverty index[J]. World

Development, 2002, 30(7):1195-1210.

[2] 郭梅,许振成,彭晓春.水资源安全问题研究综述[J].水资源保护,2007,23(3):40-43,51.

[3] 施春红,胡波.城市供水安全综合评价探讨[J].资源科学,2007,29(3):80-85.

[4] 王远坤,夏自强,曹升东.水安全综合评价方法研究[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(6):618-621.

[5] 张龙云,曹升东.农村水安全综合评价[J].水电能源科学,2007,25(4):12-14.

[6] 卢敏,张展羽,石月珍.集对分析法在水安全评价中的应用研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(5):505-508.

[7] 樊彦芳,刘凌,陈星,等.层次分析法在水安全综合评价中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(5):512-514.

[8] 张龙云,曹升东,杨尚阳.属性识别理论在水安全评价中的应用研究[J].山东大学学报:工学版,2006,36(5):70-72.

[9] 黄乾,彭世彰,田守岗,等.模糊物元模型在区域水安全评价中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(4):379-383.

[10] 李祚泳,刘国东,丁晶.适用于多指标的水质指数公式[J].环境工程,2001,19(3):53-55.

[11] 廖杰,王文圣,丁晶.贝叶斯公式在河流水质综合评价中的应用[J].四川师范大学学报:自然科学版,2007,30(4):519-522.

(收稿日期:2008-07-14 编辑:熊水斌)