

## 基于改善水质的浅水湖泊引调水模式的评价指标\*

华祖林<sup>1</sup>, 顾莉<sup>1</sup>, 薛欢<sup>2</sup>, 刘晓东<sup>1</sup>

(1: 河海大学环境科学与工程学院浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

(2: 江苏省环境科学研究院, 南京 210036)

**摘要:** 以浅水湖泊引清调水的目的为基础, 结合生态水力学要求, 兼考虑经济性因子, 尝试性地建立了浅水湖泊调水方案评价指标体系, 评价指标包括湖泊水质改善效果指标、水力条件指标和经济效益指标. 以玄武湖调水模式为例, 采用二维水质水量模型对玄武湖不同的引水规模、引水方式、引水口和出水口流量分配的引调水方案进行模拟计算, 统计出各个评价指标的结果, 综合分析评价出相对最优的引调水方案. 该评价方法可推广到其它类似的浅水湖泊引清调水模式的评价中.

**关键词:** 浅水湖泊; 调水; 评价指标; 水量水质模拟; 综合评价; 玄武湖

## Assessing indicators for water diversion based on improving water quality of shallow lakes

HUA Zulin<sup>1</sup>, GU Li<sup>1</sup>, XUE Huan<sup>2</sup> & LIU Xiaodong<sup>1</sup>

(1: *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes of Ministry of Education of College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China*)

(2: *Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, P.R.China*)

**Abstract:** Based on the goal of water diversion for shallow lakes, taking the requirement of ecological hydraulics and economic factor into consideration, an attempt to establish an assessing indicator system for water diversion scheme of shallow lakes is put forward in this paper. The indicators are consisted of lake quality-improving indicators, hydraulic indicators and economic indicator. By the case of Lake Xuanwu, a 2-D water-quality model is adopted to simulate different schemes of water diversion for Lake Xuanwu with different flow flux, diversion mode, flow distribution of inlets, and flow distribution of outlets. Detailed assessing indicators of statistic results are obtained, and then the optimum water diversion scheme is assessed. The method can be applied to the assessment of water diversion on similar shallow lakes.

**Keywords:** Shallow lake; water diversion; assessing indicator; water-quality simulation; comprehensive assessment; Lake Xuanwu

当前我国湖泊水污染形势十分严峻<sup>[1-2]</sup>, 特别是在经济发达地区的浅水湖泊, 其水体富营养化问题更显突出<sup>[3]</sup>. 湖泊水环境问题已经严重威胁周边人民的生活质量和经济可持续发展, 治理、改善和修复受污湖泊的水环境质量已刻不容缓. 目前对受污湖泊水体的治理主要有物理、化学和生物修复三类方法<sup>[2,4-5]</sup>, 往往某种单一的方法很难恢复受损湖泊的水质和水生态系统, 只有将多种方法有机的结合, 实现优势互补, 才能更好的改善受污湖泊的水环境质量<sup>[6-7]</sup>.

南京玄武湖治理工程就囊括了截污、清淤、引水、湖内环境整治和生物修复等在内的多种方法, 其中引清调水工程是非常重要的组成部分. 适度调水可在较短时间内改善受污湖泊水质, 增加水体的交换能力, 因而适度引清调水仍是湖泊治理的有效方式之一.

如何评价引清调水模式的科学性, 如何确定相对较佳的调水方案, 这些问题的解决对指导湖泊调水

---

\* 国家重点基础研究发展计划(2008CB418202)、国家自然科学基金项目(50679019 和 50009001)和江苏省社会发展科技计划项目(BS2006095)联合资助. 2008-02-19 收稿; 2008-06-10 收修改稿. 华祖林, 男, 1965 年生, 教授; E-mail: zulinhua@hhu.edu.cn.

方案的选择具有重要的理论和现实意义,但到目前为止对湖泊引清调水模式的评判研究还很少,评判的标准较为缺乏.引清调水除了要实现“以动治静,以清释污,以丰补枯,改善水质”的目标外,还应该兼顾湖泊治理中的生物修复措施的水力要求,为生物成长提供适宜的外部水流条件,即从生态水力学角度对调水模式提出更高的要求.基于以上考虑,从水质改善、提供水生态适宜的水力要求以及调水经济性角度出发,对调水模式评价指标体系作出尝试性地探索,并将之应用到玄武湖调水方案的评价中.

## 1 评价指标体系的建立

湖泊调水的基本目的有:1)以清释污,实现湖区总体水质改善;2)重点关注区(点)浓度达标,如重点湖区饮用水水质达标,重点景观区满足人们的感官、娱乐等要求;3)湖泊出水水质达标时间短,尽量减小出湖污水对外围水系的影响.此外还应考虑到湖泊治理中其它生态修复措施的水力要求,给生物成长提供适宜的外部水力条件,引清调水还应满足下列要求:1)激活水流,适当增加湖泊流速,促进水体复氧,增加耗氧污染物降解<sup>[8]</sup>;2)流速分布较均匀,避免局部流速过快破坏水生植物生长环境,尽可能营造出对水中生命体生存有利的均匀流场条件;3)滞水区面积小,引入的水流能对全湖水体进行高效置换,减小换水“盲区”恶劣的水质对水生生物的损害;4)同时调水时适当降低湖泊调水水位,可以减小水生植被恢复区的水深,改善水下光照条件,促进水生植物繁殖体的萌芽和幼苗的生长.最后从经济角度考虑,在满足调水的各种功能要求的前提下总调水量应该尽量小.

基于以上要求,湖泊调水方案可以从水质改善、水力特性和经济性等三个方面考虑,建立对湖泊调水模式的评价指标,具体见表1.

表1 浅水湖泊引调水方案评价指标体系  
Tab.1 The assessing indicator system for water diversion in shallow lakes

评价视角	评价指标	说明
水质改善	湖泊平均浓度达标所需的时间	反映调水方案对湖泊水质总体改善效果的快慢
	重点关注区(点)浓度达标所需的时间	反映调水方案对重点关注区(点)水质改善效果的快慢
	湖泊出水浓度达到某一规定要求所需的时间	反映出水水质满足要求的快慢,尽量减小出湖污水对外围水系的影响
水力条件	全湖平均流速	反映湖水的活性和置换的速度,为水生生物提供充足的氧气
	流速标准偏差	反映流速分布的均匀性,避免局部过快流速破坏水中生物的生长环境
	滞水区面积比例	反映全湖水体的置换率,减小死水区的恶劣水质对水生生物产生的不良影响
	水深	反映水下光照条件
经济效益	调水总流量	反映调水的经济成本

## 2 案例分析

从上述评价指标体系出发,以南京玄武湖引清调水改善水环境质量为例,对玄武湖调水方案进行评价.

### 2.1 玄武湖引清调水概况

玄武湖位于南京市老城区东北部,属于小型浅水湖泊(图1).玄武湖占地4.72km<sup>2</sup>,其中水面面积3.68km<sup>2</sup>,陆地面积1.04km<sup>2</sup>,汇水面积为32.78km<sup>2</sup>,汇水主要来自紫金山北麓雨水.该湖湖岸呈菱形,周长约10km,平均水深1.43m,全湖最大水深2.8m,常年水位在9.8-10.2m之间.玄武湖湖区被环洲、梁洲、樱洲、翠洲、菱洲五块绿洲划分为东南湖、东北湖、西北湖、西南湖四大湖区.湖中五洲桥堤相通,融为一体,有一定的水力联系.玄武湖和市内的秦淮河水系、护城河、内金川河水系等几大水系相连,湖水

水位、入湖流量人工控制, 流量较小. 其中, 玄武湖与内金川河水系通过大树根闸相连, 与内秦淮河水系的珍珠河通过武庙闸相连. 玄武湖目前具有的引调水分别由上元门水厂和大桥水厂通过 A<sup>#</sup>、B<sup>#</sup>、C<sup>#</sup>、D<sup>#</sup> 四根暗管完成, 管道直径分别为 DN800、DN300、DN300 和 DN600.

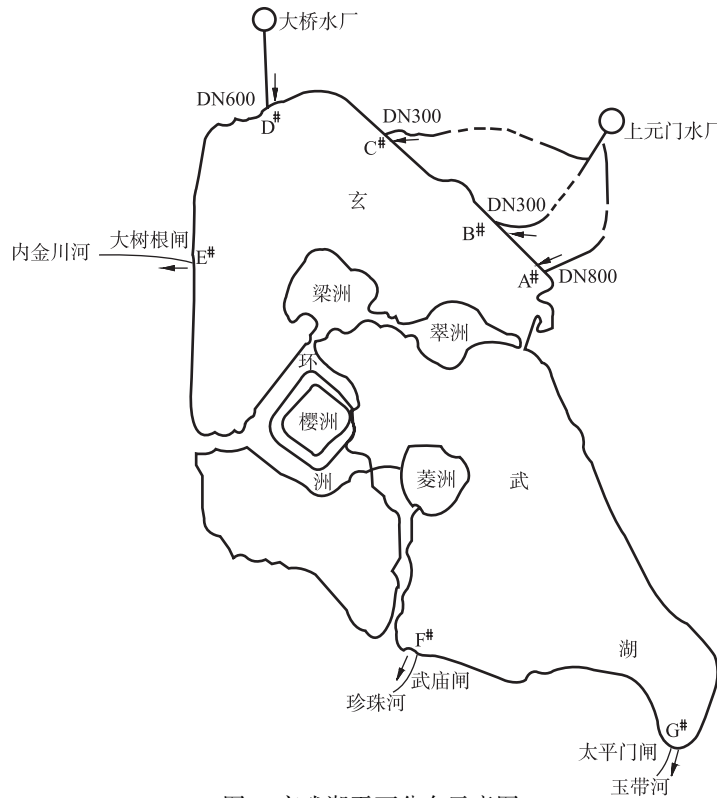


图 1 玄武湖平面分布示意图  
Fig.1 Plane sketch map of Lake Xuanwu

### 2.2 引水调度方案设计

(1) 引水规模: 现有引水规模为  $18 \times 10^4$  t/d, 分别由上元门水厂调水  $10 \times 10^4$  t/d, 大桥水厂调水  $8 \times 10^4$  t/d. 可考虑扩大现有的引水规模, 设计引水规模为  $28 \times 10^4$  t/d、 $31.5 \times 10^4$  t/d 和  $40 \times 10^4$  t/d.

(2) 引水口流量分配: 现阶段上元门水厂通过 1 根管径 DN800, 2 根管径 DN300 的暗管道和玄武湖相通, 大桥水厂也通过 1 根管径 DN600 的管道与玄武湖相连, 加大引水规模后, 通过参考管径大小来分配引水口流量.

(3) 排水方式: 考虑连续排水和间断排水两种方式.

连续排水出流流量分配: 目前玄武湖的主要出水口为大树根闸和武庙闸, 大树根闸出水入内金川河, 武庙闸出水入珍珠河. 在现有的引水规模为  $18 \times 10^4$  t/d 情况下, 武庙闸出流为  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , 大树根闸出流  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . 扩大引水规模以后, 考虑利用太平门闸出水. 引水规模为  $28 \times 10^4$  t/d 时, 即  $3.24 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 考虑蒸发等其他损失, 总的出流流量约为  $3.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 引水规模为  $31.5 \times 10^4$  t/d 时, 即  $3.65 \text{ m}^3/\text{s}$ , 总的出流流量约为  $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 引水规模为  $40 \times 10^4$  t/d 时, 即  $4.64 \text{ m}^3/\text{s}$ , 总的出流流量约为  $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$  左右.

间断排水出流流量分配: 在引水规模为  $28 \times 10^4$  t/d 时, 设计间断出流方案, 引水前期先仅从大树根闸出流, 出流流量为  $3.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , 武庙闸和太平门闸均关闭. 当大树根闸满足出水要求后, 关闭大树根闸, 同时开启武庙闸和太平门闸, 设计此时武庙闸出流  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , 太平门出流  $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

考虑以上因素, 设计六种引调水方案, 如表 2 所示.

表 2 玄武湖引调水设计方案\*  
Tab.2 Schemes of water diversion in Lake Xuanwu

方案	引水规模 ( $\times 10^4$ t/d)	引水流量( $m^3/s$ )				出流流量( $m^3/s$ )		
		上元门水厂			大桥水厂	大树根闸 E <sup>#</sup>	武庙闸 F <sup>#</sup>	太平门闸 G <sup>#</sup>
		DN800A <sup>#</sup>	DN300B <sup>#</sup>	DN300C <sup>#</sup>	DN600D <sup>#</sup>			
一	18	0.90	0.13	0.13	0.93	0.5	1.5	—
二	28	1.81	0.25	0.25	0.93	1.6	1.5	—
三	28	1.81	0.25	0.25	0.93	1.1	2.0	—
四	31.5	2.11	0.30	0.30	0.93	1.5	1.0	1.0
五	40	2.87	0.42	0.42	0.93	2.5	1.0	1.0
六	28	1.81	0.25	0.25	0.93	3.1	—	—
						—	1.5	1.6

\* “—” 表示闸门关闭, 不出流.

2.3 引清调水的水质水量模拟

采用二维水质-水量模型对玄武湖引调水方案进行模拟计算<sup>[9-10]</sup>. 玄武湖水面由诸岛分割, 内部比较复杂, 且湖泊形状不规则, 为较好的拟合计算区域复杂不规则的边界, 采用无结构任意四边形网格对玄武湖水域实现网格的自动剖分, 网格尺度变幅不大, 变幅范围为 10m  $\times$  18m 至 40m  $\times$  40m. 网格生成结果如图 2 所示, 共生成 3301 个节点, 3032 个单元体.

采用有限体积法(FVM)进行数值求解. 对二维水量-水质方程各跨单元边界的数值通量进行FVM的积分离散, 利用局部黎曼问题求解, 采用 Osher 黎曼近似解格式计算模型中跨单元边界的数值通量, 进而求得方程的数值解.

玄武湖各湖区之间通过桥涵相连, 单元边界与之相重合时, 单元边的法向数值通量属于内边界问题. 本模型中遇到计算区域内部存在水工构筑物(如闸、堤、桥涵洞、堰等)的水流、水质计算仍然处于 FVM 框架之下, 但是法向通量的计算不能应用黎曼近似解, 而采用与水工构筑物相应的水力学出流公式.

模型经实测资料验证后, 对表 2 中的各种调水方案分别进行数值模拟. 水流边界: 如表 2 所述; 水质边界: 上元门水厂和大桥水厂的引水水质  $COD_{Mn}$  和氨氮均符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) II 类标准, TP 符合河流 II 类标准和湖泊 III 类标准, TN 符合 III 类标准. 故设计引水水质  $COD_{Mn}$  取 4.0mg/L,  $NH_3-N$  取 0.5mg/L, TP 取 0.05mg/L, TN 取 1.0mg/L.

图 3 为方案四引水后的稳定流场图, 方案四引水 10d 后  $COD_{Mn}$ 、 $NH_3-N$ 、TP、TN 的浓度分布图见图 4.

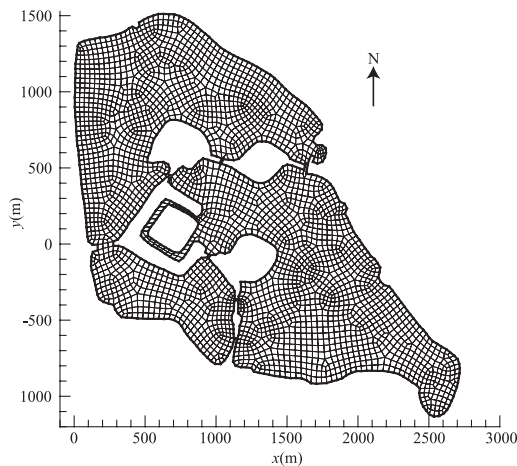


图 2 玄武湖无结构网格布置图  
Fig.2 Unstructured meshes of Lake Xuanwu

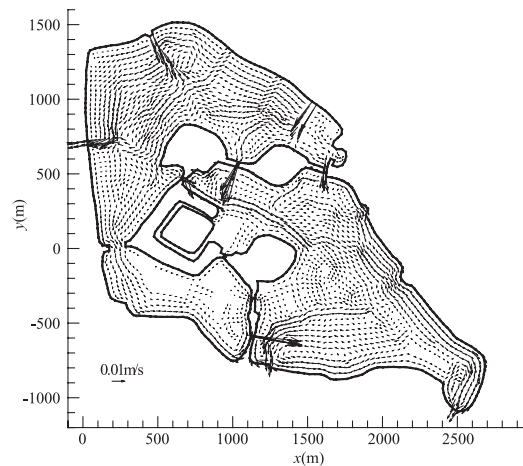


图 3 计算流场分布图(方案四)  
Fig.3 Simulated velocity vector field (scheme 4)

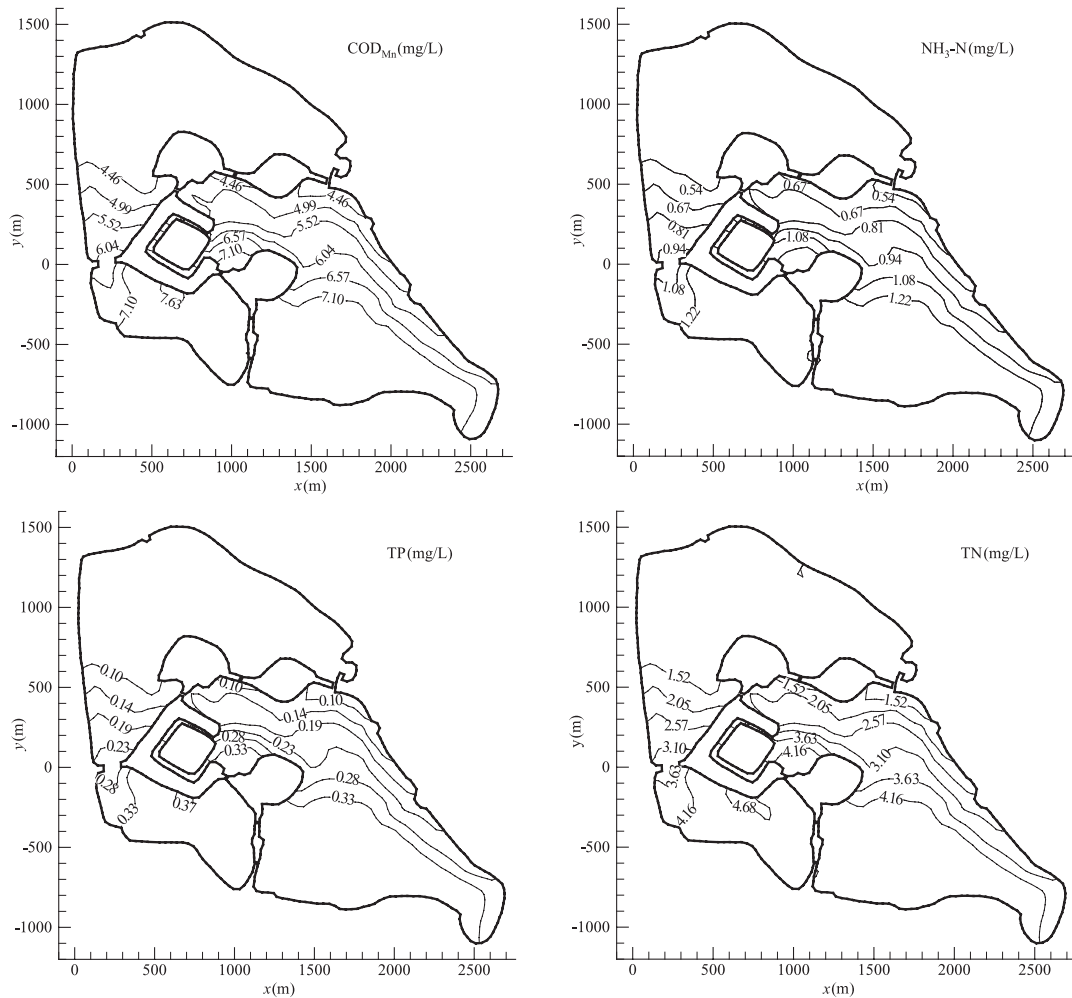


图4 调水 10d 后  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TP, TN 浓度场分布(方案四)  
 Fig.4 Simulated  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TP, TN concentration distribution in the 10th day after water diversion(scheme 4)

## 2.4 调水方案的评价

2.4.1 水质改善指标评价 不同引调水方案下,玄武湖水质指标计算结果统计分析情况见表 3。

依据湖区平均浓度达标的天数,方案四、五相对较优,方案三次之,而方案一、二、六需要的时间较长(表3)。其次从出口断面水质达到标准的引水天数判断:方案三、四、五相对较优,但方案三没有启动太平门闸出流,在改善东南湖区的效果不及方案四和方案五;方案四和方案五均开启太平门闸以加大东南湖区水体流动,且两方案在武庙闸和太平门闸出口达到Ⅲ类水水质的天数相差较小;对于方案六,引水方式为间断排水,不同于方案一至方案五的连续排水,在引水前期只从大树根闸出流,6d后可达功能区要求,对西北湖区和东北湖区改善较快,但是后期武庙闸和太平门闸出口断面处需要花费较长的时间才能达到功能区要求。说明方案六采用间断排水的排水方式,对于局部湖区的水质改善较快,但是对于全湖区水质的改善较慢。

综合比较各个方案,从整个湖区水质改善和出水口水质达标角度看方案四、五较优,且方案五略优于方案四,其次为方案三、方案一、方案二和方案六。

表3 玄武湖水质模拟结果统计分析表\*

Tab.3 Simulated results of water qualities in Lake Xuanwu

计算方案		方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六							
标准		IV类	IV类	IV类	IV类	IV类	IV类							
湖区平均浓度 达标所需的 最短引水天数	COD <sub>Mn</sub>	—	—	—	—	—	—							
	NH <sub>3</sub> -N	5	5	2	2	1	4							
	TP	33	47	27	25	24	55							
	TN	34	48	27	25	24	55							
平均浓度达标最短天数小计		34	48	27	25	24	55							
标准		IV类	III类	IV类	III类	IV类	III类	IV类	III类	IV类	III类	IV类	III类	
出口断面水质	大树根闸	COD <sub>Mn</sub>	—	6.5	—	6.5	—	5.5	—	5	—	4	—	5
		NH <sub>3</sub> -N	4	6	5	10	3	5.5	3.5	5.5	3	4.5	3	6
达到标准的 最短引水 天数	武庙闸	COD <sub>Mn</sub>	—	22	—	32	—	18	—	20	—	19	—	46
		NH <sub>3</sub> -N	7	16	10	30	6	15	6	16	6	16	6	18
少引水 天数	太平门闸	COD <sub>Mn</sub>	未开	未开	未开	未开	未开	未开	—	15	—	15	—	45
		NH <sub>3</sub> -N							6	13	6.5	12	6	18
出水水质达标最短天数小计			22		32		18		20		19		46	

\* 由于全湖均需关注, 模拟时没有再单独设定重点关注区, 故该指标在本文中未作考虑。

#### 2.4.2 水力条件指标评价 方案一至方案五的玄武湖水力评价指标计算结果见表4。

方案四的流速相对标准偏差最小, 说明方案四条件下流速分布的均匀性最好, 方案五次之。然而方案五的湖区流速平均值最大, 滞水面积最小, 占湖区面积的13.92%, 说明方案五条件下湖水活性较高, 水体置换效果较好(表4)。

方案六采用间断排水的引水模式, 在调水前期只开启大树根闸, 所以整个西南和东南湖区水流几乎没有流动, 但是西北和东北湖区水体置换充分, 而后关闭大树根闸改由武庙闸和太平门闸出水, 实现西南湖和东南湖的水体置换, 后期整个湖区流速达到0.0021m/s。由于方案六的这种间断排水方式的特殊性, 暂不适合用此水力评价指标来直接进行评价。

综合各方案的水力评价指标计算结果来看: 方案四和方案五效果相当, 优于方案三、方案二和方案一。

表4 玄武湖水力评价指标计算结果\*

Tab.4 Results of hydraulic assessing indicators in Lake Xuanwu

方案	平均流速(m/s)	流速相对标准偏差	流速≤0.0005m/s	
			滞水区面积(m <sup>2</sup> )	百分比(%)
一	0.0017	1.59	886016	24.08
二	0.0020	1.50	799842	21.73
三	0.0023	1.48	652982	17.74
四	0.0024	1.38	548602	14.91
五	0.0027	1.44	512190	13.92

\* 玄武湖水深较小(平均水深为1.43m), 计算时各个方案水深变化不大, 故本文不考虑水深指标。

2.4.3 经济效益指标评价 将各个方案的调水规模和达到调水目标所需的最短天数统计在表5中, 并计算出总调水量, 进行经济指标评价。由表5可知, 方案一调水量最少, 其次为方案三、方案四、方案五和方案二, 最后为方案六。

表5 玄武湖经济评价指标计算结果\*

Tab.5 Results of economic assessing indicator in Lake Xuanwu

方案	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
调水规模( $\times 10^4$ t/d)	18	28	28	31.5	40	28
调水天数(d)	34	48	27	25	24	55
总调水量( $\times 10^4$ t)	612	1344	756	787.5	960	1540

2.4.4 综合评价结果 从水质改善角度和水力指标来看, 可以认为方案四和方案五为较优调水方案, 这两个方案在改善湖区水质和提供适宜的生态水力条件方面效果基本相当, 但方案五所需引水规模较大, 为方案四的 1.22 倍, 经济性指标差些, 故选择方案四为相对最优方案.

### 3 结论

(1) 本文从湖泊水质改善效果、生态水力学和调水经济性角度出发, 尝试性建立了浅水湖泊调水方案评价指标体系. 水质改善效果指标主要指湖泊平均浓度、重点关注区(点)浓度和湖泊出水浓度达标所需的时间; 水力条件指标包括全湖平均流速、流速标准偏差、滞水区面积比例等; 经济效益指标则由调水总流量反映. 该评价指标体系的建立为浅水湖泊调水模式的科学评价进行了一次有益的探索.

(2) 以南京玄武湖为例, 通过水质水量模型对玄武湖的调水方案进行模拟计算, 统计出在不同引调水方案情形下的各个具体评价指标值, 采用建立的指标体系对玄武湖调水方案进行评价, 得出了相对最优的调水方案, 为有关部门制定调水方案提供了科学的依据.

(3) 针对调水方案评价指标的进一步完善和综合性评判方法仍有待下一步开展更为深入的研究.

### 4 参考文献

[1] 黄文钰, 吴延根, 舒金华. 中国主要湖泊水库的水环境问题与防治建议. 湖泊科学, 1998, 10(3): 83-89.

[2] 周怀东, 彭文启. 水污染与水环境修复. 北京: 化学工业出版社, 2005: 196-268.

[3] 舒金华. 我国城市湖泊和环境问题与对策探讨. 湖泊科学, 1991, 3(1): 61-66.

[4] 金相灿, 稻森悠平, 朴俊大等. 湖泊和湿地水环境生态修复技术与管理指南. 北京: 科学出版社, 2008: 132-141.

[5] 董哲仁, 刘 蓓, 曾向辉. 生态—生物方法水体修复技术. 中国水利, 2002, 3: 8-10.

[6] 汪易森. 日本琵琶湖保护治理的基本思路评析. 水利水电科技进展, 2004, 24(6): 1-5.

[7] 刘兆孝, 吴国平, 涂建峰. 日本主要湖泊富营养化状况及治理. 水利水电快报, 2007, 28(11): 5-11.

[8] 何 用, 李义天, 李 荣等. 改善湖泊水环境的调水与生物修复结合途径探索. 安全与环境学报, 2005, 5(1): 56-60.

[9] Zhao DH, Lai JS, Shen HW. Two-dimensional contaminant transport model with high-resolution upwind schemes. In: Proc, ASCE 1994 Conf.on Hydr Engrg Buffalo NewYork, 1994: 135-139.

[10] QI Chen, ZHAO Dihua, Tabios *et al.* 2-D coupled water quality model for industrial effluent transport. In: Proceedings of 1998 International Water Resources Engineering Conference, Tennessee, USA, 1998: 1106-1121.