

## 疏浚对洞庭湖水环境容量的影响分析\*

安贞煜<sup>1</sup>, 曾光明<sup>1</sup>, 张硕辅<sup>1,2</sup>, 徐敏<sup>1</sup>, 王玲玲<sup>1</sup>

(1: 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

(2: 湖南省水利厅, 长沙 410007)

**摘要:** 本文在分析洞庭湖水质现状及现有污染源的基础上, 选择 COD<sub>Mn</sub>、TN、TP 作为水质敏感参数, 对疏浚前后洞庭湖水环境容量的变化情况进行了模拟计算. 结果表明, 疏浚工程的实施增加了洞庭湖的水环境容量, 水位越低、流量越大, 增加值越多. 分析认为, 疏浚使得洞庭湖区河道贯通、水流归槽、流量流速加大, 增强了污染物稀释自净能力, 在外源不变的情况下, 对洞庭湖的水质改善起到了积极的作用, 一定程度上缓解了湖泊的富营养化状况.

**关键词:** 水环境容量; 洞庭湖; 疏浚; 富营养化

## Effect of dredging engineering on water environmental capacity of Lake Dongting

AN Zhenyu<sup>1</sup>, ZENG Guangming<sup>1</sup>, ZHANG Shuofu<sup>1,2</sup>, XU Min<sup>1</sup> & WANG Lingling

(1: College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

(2: Hunan Water Conservancy, Changsha 410007, P. R. China)

**Abstract:** Lake Dongting, which is the second biggest fresh water lake in our country, is located in the middle reaches of the Yangtze River. For a long time, the Yangtze River and the other four riverways which inpour in Lake Dongting always take a great deal of sands every year, as a result, the lake was filled up, many continents were developed, the water velocity was slowed and the water environmental quality was worsened. In order to resolve these problems, dredging engineering is actualizing in Lake Dongting now. Combined with the engineering, the changes in COD<sub>Mn</sub> capacity, TN capacity and TP capacity of Lake Dongting before and after dredging were simulated based on the analysis of the Lake Dongting actuality water environmental quality in the paper, and the reasons were also analyzed. It was found that dredging engineering enhanced the water environmental capacity of Lake Dongting. Especially in the lower water and higher flux, the water environmental capacity increased more. Under the same source of explicit pollution, the dredging was helpful for improving the water quality of Lake Dongting, and it could ameliorate the eutrophic state of Lake Dongting in a certain extent.

**Keywords:** Environmental capacity; Lake Dongting; dredging; eutrophication

疏浚一般可分为环境疏浚和工程疏浚. 环境疏浚旨在清除湖泊水体中的污染底泥, 减少内源污染, 并为水生生态系统的恢复创造条件; 工程疏浚则主要是为了某种工程需要, 如疏通航道、增容等而进行的.<sup>[1]</sup> 目前, 关于湖泊疏浚的研究多是对疏浚对生态系统、底栖生物及水体水质等的影响<sup>[2-8]</sup>. 对于疏浚能否改善水体水质, 消除湖泊富营养化还存在争议<sup>[4]</sup>, 如对滇池草海<sup>[5]</sup>、长春南湖<sup>[6]</sup>、瑞典 Trummen 湖<sup>[9]</sup>等的研究表明, 疏浚在一定程度上能够改善其水体水质; 但对南京的玄武湖、日本的 Suwa 湖<sup>[4]</sup>, 荷兰的 Zierikzee 湾<sup>[10]</sup>的研究却显示疏浚对改善其水体的富营养化状况效果不明显.

## 1 洞庭湖流域水环境现状及河湖疏浚工程

洞庭湖作为长江中游的洪道型湖泊, 长期以来, 由于长江三口及湘、资、沅、澧四水洪水携带大量的泥沙

\* 国家杰出青年科学基金项目(50425927, 50225926)、2000年度高等学校优秀青年教学科研奖励计划项目、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20020532017)联合资助. 2005-09-30 收稿; 2006-01-17 收修改稿. 安贞煜, 女, 1980年生, 硕士研究生; E-mail: irene\_anzhy@hotmail.com.

淤积于洞庭湖,造成了湖区内洪道萎缩、洲滩滋长、滞留阻水现象十分严重,并呈现恶化趋势.为此,洞庭湖实施了能够改善水流条件、稳定河床、减少泥沙淤积的河湖疏浚工程.洞庭湖的疏浚,不同于针对富营养化较严重的湖泊进行的以清除污染底泥、减少内源污染为主要目的的环境疏浚,而是以“中枯水归槽、束水攻沙、改善洪道行洪条件;减少泥沙淤积、延长河道湖泊寿命”为主要目的的工程疏浚.按照规划,湖区疏浚工程涉及湘、资、沅、澧四水尾间和松滋河、虎渡河、藕池河、南洞庭湖、东洞庭湖、长江城螺河段、汨罗江等河段,共需疏挖河道洲滩 119 处 400.72 km,刨除废堤 16.23 km.河道疏挖总工程量达  $42939.39 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,相应增加湖泊容积  $3.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,约占洞庭湖总容积(城陵矶水位 33.5 m 时容积  $167 \times 10^8 \text{ m}^3$ )的 2%.河槽疏挖底板高程设计是按照中水河床断面不挖深槽、不使上下游枯水位降低、不改变河床深泓纵坡坡降为原则确定的.河槽的疏挖宽度由设计流量、河床糙率和河相关系等因素根据水力学及河流动力学公式计算确定.目前已实施疏浚的包括南洞庭湖和藕池河系洪道.

如此大规模的工程疏浚,必将改变湖区的水文条件,水体自净能力也将受到影响.考虑到洞庭湖已属于中—富营养状态<sup>[11]</sup>,笔者认为,研究新的水文情势下洞庭湖水环境及其容量的变化对洞庭湖区水资源保护及其开发利用具有较强的现实意义.

## 2 数学模型

湖泊水环境容量,即具有某一设计水量的(即某一保证率)湖泊为维持其水环境质量标准,所容许污染物最大的入湖数量,与湖泊水质目标、水体稀释自净能力、入湖水量等因素紧密相关.

### 2.1 水质参数的选取

目前,洞庭湖面临的主要水环境问题是水体富营养化状况日趋严重,现有的研究资料显示<sup>[11-13]</sup>,有机物和营养盐是造成洞庭湖水体富营养化的主要污染物,而且多年的水质监测数据也表明:COD<sub>Mn</sub>、TN 和 TP 是洞庭湖水质的主要超标因子.结合富营养化的评价指标及洞庭湖水体污染现状,本文选定 COD<sub>Mn</sub>、TN、TP 作为水质敏感参数进行分析.

### 2.2 有机物水环境容量数学模型

洞庭湖是一个面积较大的吞吐型浅水湖泊,进出水量相近,本文采用进、出湖水量相等均匀混合易降解的水质数学模型进行丰水期有机物水环境容量计算,其质量平衡方程<sup>[14]</sup>为:

$$V \frac{dC}{dt} = C_p Q_p + W_0 - CQ - KCV$$

经变换得水环境容量计算公式:  $W_s = C_s(Q + KV)$ . 式中,  $V$  为湖泊容积 ( $\text{m}^3$ );  $C$  为污染物浓度 ( $\text{mg/L}$ );  $C_p$  为污染物排放浓度 ( $\text{mg/L}$ );  $Q_p$  为废水排放量, ( $\text{m}^3/\text{a}$ );  $Q$  为出湖流量 ( $\text{m}^3/\text{a}$ );  $K$  为自净系数 ( $1/\text{a}$ );  $W_0$  为湖中现有污染物排入量 ( $\text{t/a}$ );  $W_s$  为水环境容量 ( $\text{t/a}$ );  $C_s$  为水质标准(目标值) ( $\text{mg/L}$ ).

考虑到枯水期,洞庭湖水位较低,水流归槽,湖泊可概化为一条宽浅河流,本文采用二维水质模型进行枯水期有机物水环境容量计算,其基本方程<sup>[14]</sup>为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - KC$$

经变换得水环境容量公式:  $W_s = [C_s \exp\{\frac{KL}{u}\} - C_0] hu \sqrt{\frac{\pi}{u} E_y L}$ . 式中,  $x, y$  为水流纵向、横向;  $u, v$  为  $x, y$  坐标向流速 ( $\text{m/s}$ );  $E_x, E_y$  为  $x, y$  坐标向弥散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $h$  为平均水深 ( $\text{m}$ );  $C_0$  为污染物背景浓度 ( $\text{mg/L}$ );  $L$  为河道长度 ( $\text{m}$ ); 其它符号意义同前.

### 2.3 营养物质水环境容量数学模型

湖水中营养物质受湖外负荷的很大支配,并呈明显的正相关关系,本文采用联合国经济合作与开发组织(简称 OECD)提出的以湖水的滞留时间等为参数的营养物质负荷模型,分析洞庭湖 TN、TP 容量,其平衡方程<sup>[15]</sup>为:

$$\bar{P} = P_i (1 + 2.27 t_w^{0.586})^{-1}$$

经变换后,水环境容量的数学公式为:  $W_s = C_s Q (1 + 2.27 t_w^{0.586})$ . 式中,  $\bar{P}$  为湖水平均营养物浓度 ( $\text{mg/L}$ );  $P_i$

为平均入湖营养物浓度 ( $\text{mg/L}$ );  $t_w$  为湖水滞留时间 ( $\text{a}$ ); 其它符号意义同前。

### 3 计算结果分析

河湖疏浚工程实施后,强化了主流,引导水流归槽,改变了河道过水断面、主河床糙率等水力因素,洞庭湖的水量、湖泊容积及平均水深等都会发生相应的变化。

根据可持续发展战略及水资源保护规划对洞庭湖水环境质量的要求,洞庭湖水体水质保护目标为Ⅲ类,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{TP}$  的标准分别为  $6 \text{ mg/L}$ 、 $1.0 \text{ mg/L}$ 、 $0.05 \text{ mg/L}$  ( $\text{GB3838—2002}$ )。

#### 3.1 洞庭湖现状水环境容量

根据洞庭湖的水体污染特性、自净能力和水质目标,对 1995—2004 年的月平均水环境容量进行计算,其中,有机污染物自净系数  $K$  用 1996—2000 年有关的水质、水量及污染物资料代入模型率定而得,  $K = 0.015\text{d}^{-1}$ <sup>[11]</sup>, 计算结果见表 1。

表 1 洞庭湖多年月平均水环境容量统计 ( $\text{t/m}$ )

Tab. 1 The monthly average water environmental capacity of Lake Dongting

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
$\text{COD}_{\text{Mn}}$	58611.8	66810.2	95600.5	135047.7	200428.8	227791.1	343523.2	258939.0	190349.9	119705.1	77309.8	50992.4
$\text{TN}$	10746.7	12202.0	17447.4	24725.2	37029.7	42360.8	64369.3	48475.5	35618.7	22368.2	14380.1	9426.8
$\text{TP}$	537.3	610.1	872.4	1236.3	1851.5	2118.0	3218.5	2423.8	1780.9	1118.4	719.0	471.3

从表 1 可以看出,洞庭湖枯水期(11—5月)水环境容量要明显小于丰水期(6—10月)。主要是因为枯水期湖区的流量小、水位低、蓄水量少,从而容纳污染物的能力减小。 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{TP}$  的多年年均水环境容量分别为 1825109.7 t、339150.5 t、和 16957.5 t。

#### 3.2 河湖疏浚工程实施后洞庭湖水环境容量变化

3.2.1 枯水期水环境容量的变化 结合洞庭湖疏浚工程的实际进展,本文仅以南洞庭湖为例来模拟疏浚前后枯水期水环境容量的变化。南洞庭湖于 1997 年开始实施疏浚,2001 年基本完成。分别选取疏浚前后的中枯水年份枯水位、小流量水文资料进行对比(表 2)。根据洞庭湖区的近期治理规划,河槽疏挖底板高程设计是按照中水河床断面,以不挖深槽、不使上下游枯水位降低,不改变河床深泓纵坡降为原则确定的。所以理论上疏浚工程实施后,在来水情况一定时,枯水期洞庭湖的水位、水环境容量均应保持不变。

由于资料所限,本文仅选择  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  来验证疏浚工程实施前后对比时间内南洞庭湖的水环境容量是否发生改变。计算起始断面选择南嘴,终止断面选择沅江市,全长 22000 m。水质目标按照《湖南省水功能区》中南洞庭湖  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  水质管理目标确定为  $3.6 \text{ mg/L}$ 。污染物综合自净系数及横向扩散系数根据实测资料计算得出,通过模拟计算,结果如表 2,可以看出:实际上疏浚前后,在营田(南洞庭湖出口水位控制站)水位基本相同时,南嘴(南洞庭湖入口流量控制站)水位下降,流量增大,枯水期水环境容量也相应发生变化。疏浚工程实施后南洞庭湖水域计算河段的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  容量有少量增加,平均增加容量  $27 \text{ t/m}$ ,这表明,疏浚使得南洞庭湖枯水期水力条件发生了较大改变,水位下降、流速增大,污染物的扩散与自净能力得到增强。由此可见,在入湖污染物一定的情况下,疏浚工程的实施增加了枯水期洞庭湖的水环境容量,有利于改善枯水期洞庭湖相对敏感的水质,缓解湖泊富营养化现状。

3.2.2 丰水期水环境容量的变化 湖南省水利水电勘测设计研究总院的研究表明,在大量水流快速聚集洞庭湖的情况下,由于疏浚增加了河道的过水断面面积,湖区局部水域水力条件得以改善,水流能快速流出洞庭湖。本文利用疏浚前后丰水期城陵矶水位变化的研究成果<sup>①</sup>,对疏浚工程实施后洞庭湖丰水期(6—10月)  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{TP}$  的月平均容量进行了模拟计算(表 3)。

① 湖南省水利水电勘测设计研究总院、河海大学水资源环境学院,洞庭湖疏浚工程数值模拟分析研究与应用, 2004.4.

表2 南洞庭湖疏浚前后枯水期水位(黄海高程)、流量及水环境容量对比

Tab. 2 Water level, flux and water environmental capacity in low water period of South Lake Dongting, cross-reference of dredging

序号	时间 (年.月.日)	营田水位 (m)	南 嘴		位差 (m)	COD <sub>Mn</sub> (t/m)
			水位(m)	流量(m <sup>3</sup> /s)		
1	1994.3.30	23.17	26.94	252	3.77	859
	2004.4.9	23.16	26.93	375	3.77	902
2	1994.3.31	23.17	26.93	258	3.76	855
	2004.4.11	23.18	26.82	315	3.64	860
3	1994.4.1	23.17	26.91	250	3.74	848
	2004.4.19	23.18	26.86	399	3.68	875
4	1994.4.2	23.05	26.87	240	3.82	834
	2004.4.14	23.05	26.84	365	3.79	868
5	1994.4.3	23.54	26.86	239	3.32	830
	2004.4.16	23.54	26.81	340	3.27	856

可以看出,疏浚工程实施后,丰水期洞庭湖 COD<sub>Mn</sub>水环境容量均有所增加,增加值在 850 – 900 t/m 之间.其中 10 月份增加值最大,7、8 月份增加值较少,不同年份间的月平均增加值变化不大,其变化规律与疏浚后洞庭湖的容积变化相关.根据洞庭湖水位 – 容积曲线:城陵矶水位在 19.7 – 32 m 之间时,湖容随水位的上升呈幂函数递增;城陵矶水位高于 32 m 时,湖容随水位的上升呈线性增加<sup>[16]</sup>.疏浚工程实施后,丰水期城陵矶水位均有少量下降,且下降值同水位呈负相关关系.另外疏浚工程的实施,相当于给丰水期洞庭湖增加了 3.47 亿 m<sup>3</sup>容积.因此,疏浚工程实施后,当丰水期城陵矶水位低于 32 m 时,水位越低相对于疏浚前同水位下湖容的增加值越大,相应的 COD<sub>Mn</sub>容量也增加的越多;当水位高于 32m 时,水位越高相对于疏浚前同水位下湖容的增加值越大.这就说明了为什么疏浚工程实施后,虽然 10 月份城陵矶的水位较低,但是增加的水环境容量却最多;7、8 月份水位较高增加的容量却较少.如 2002 年 10 月是同期水位最低的,增加的 COD<sub>Mn</sub>容量却最多.

疏浚后洞庭湖丰水期的 TN、TP 容量的增加值 6 月、10 月较多,7 – 9 月较少.由营养物质水环境容量模型可知,TN、TP 容量同入湖水量和湖水滞留时间相关.疏浚工程实施后,在出湖流量不变的情况下,丰水期洞庭湖容积增大,蓄水量增加,湖水滞留时间延长,TN、TP 容量随之增大.由于疏浚工程实施后不同水位下增加的蓄水容积不同,增加的湖水滞留时间也不同,所以水环境容量的变化自然也不同.另外对于洞庭湖这个出、入湖水量很大的洪道型湖泊,入湖水量是影响 TN、TP 容量的关键因素,尽管 6 月份城陵矶水位比 10 月份高,增加的蓄水容积较少,但由于入湖水量大,增加的水环境容量反而多些.

3.2.3 河湖疏浚工程实施前后月平均水环境容量变化分析 将模拟计算的疏浚后 1995 – 2004 年丰水期(6 – 10 月)的水环境容量月平均增加值绘制成图 1.从多年月平均的水环境容量变化来看,COD<sub>Mn</sub>容量变化幅度最大的是 10 月,容量增加值为 872.6 t/m;变化幅度最小的是 8 月,增加值为 859.0 t/m. TN、TP 容量变化幅度最大的是 6 月,分别增加了 207.88 t/m 和 10.39 t/m,变化幅度最小的是 9 月,增加值分别为 175.88 t、8.79 t/m.

从图 1 还可以看出,疏浚工程实施后,COD<sub>Mn</sub>容量和 TN、TP 容量的最大增加值出现的月份不同.分析认为,这是由于湖泊入湖水量和湖泊容积的变化对有机物、营养物质水环境容量变化的影响程度不同导致的,COD<sub>Mn</sub>容量的变化受湖泊蓄水容积变化的影响大,而 TN、TP 容量的变化主要受湖泊入湖水量变化的影响.10 月份增加的洞庭湖蓄水容积较多,相应 COD<sub>Mn</sub>容量增加值也较大;6 月份洞庭湖的入湖水量较大时,疏浚工程实施后 TN、TP 容量增加值也较大.

表3 疏浚后洞庭湖 COD<sub>Mn</sub>, TN, TP 容量增加值  
 Tab.3 Increment of COD<sub>Mn</sub>, TN and TP environmental capacity of Lake Dongting after dredging

时间	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年
A: COD <sub>Mn</sub> (t/m)										
6月	859.9	863.3	867.8	862.5	864.2	862.3	865.2	859.3	866.7	862.7
7月	867.7	867.7	859.2	867.7	867.7	860.6	861.7	859.9	864.9	859.0
8月	859.4	873.4	862.0	874.6	862.6	861.6	869.5	867.7	862.6	860.5
9月	867.0	862.3	880.8	860.7	861.8	860.0	861.7	863.7	859.3	859.5
10月	871.0	878.2	876.5	869.9	869.5	861.8	870.3	884.7	874.5	872.8
平均	867.1	871.1	870.2	868.0	864.6	866.9	867.1	865.7	865.5	864.6
B: TN (t/m)										
6月	218.55	203.20	214.11	226.65	195.15	210.08	212.68	190.07	215.91	192.35
7月	176.66	183.43	180.89	171.19	183.25	163.65	197.74	194.23	173.85	196.63
8月	171.84	181.44	196.81	165.81	177.42	168.03	177.41	179.10	166.29	187.08
9月	178.37	185.72	202.54	166.08	175.24	173.67	159.19	207.08	146.47	164.40
10月	182.37	193.40	203.52	189.70	189.63	180.92	180.10	207.15	186.58	178.05
平均	194.80	195.35	205.93	192.63	183.64	193.16	194.49	200.06	188.07	192.59
C: TP (t/m)										
6月	10.93	10.16	10.71	11.33	9.76	10.50	10.63	9.50	10.80	9.62
7月	8.83	9.17	9.04	8.56	9.16	8.18	9.89	9.71	8.69	9.83
8月	8.59	9.07	9.84	8.29	8.87	8.40	8.87	8.96	8.31	9.35
9月	8.92	9.29	10.13	8.30	8.76	8.68	7.96	10.35	7.32	8.22
10月	9.12	9.67	10.18	9.49	9.48	9.05	9.00	10.36	9.33	8.90
平均	9.74	9.77	10.30	9.63	9.18	9.66	9.72	10.00	9.40	9.63

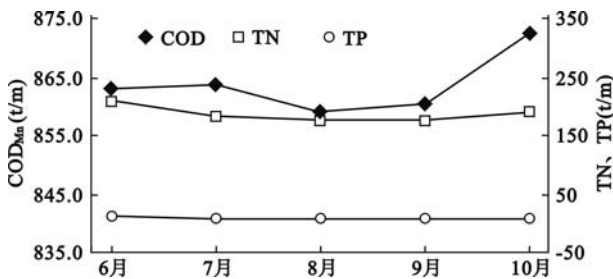


图1 疏浚后水环境容量月平均增加值

Fig. 1 The monthly average increment of water environmental capacity of Lake Dongting after dredging

#### 4 结语

模拟计算结果表明:疏浚工程实施后,无论是枯水期还是丰水期,洞庭湖水环境容量都有一定程度增加,且流量越大,水环境容量增加值越大.分析认为,疏浚工程的实施,使得水流归槽,流速加快,水体污染物的稀释扩散和自净能力增强,洞庭湖水环境容量增大,在外源不变的前提下,疏浚有利于改善湖区的水质,一定程度上能够缓解湖泊的富营养化情况.这也同那些在控制外源的基础上,通过疏浚使湖泊水质得到了改善的实例<sup>[4-6,9]</sup>相符合.

但同时,疏浚所增加的洞庭湖水环境容量必须以入湖污染物一定为前提,且增加量有限. 相关的研究也表明,大规模的湖区疏浚,将破坏湖泊原有的水生态系统,还可能导致底泥重新悬浮、水体透明度下降等问题,在一定程度上会影响水体水质<sup>[4,10]</sup>,我们必须客观的看待湖泊疏浚,高度重视疏浚可能给生态环境带来的负面影响. 笔者认为,要维护好洞庭湖水生态环境,实现洞庭湖区的可持续发展,要切实加强以下几个方面的工作:

(1)调整治水思路,树立可持续用水的观念,加大节水力度.

(2)搞好流域水土保持和植被建设,从根本上解决湖泊上游水土流失问题,保证清淤疏浚的效果.

(3)抓好全流域的水污染防治工作,特别是四水流域的污染源治理,控制污染物排放量,推进污水资源化.

(4)加大退田还湖力度,加强湖区湿地建设与保护.

致谢:论文完成过程中得到了湖南省水文局水情处的大力支持和协助,特别是顾庆福处长的大力帮助.

## 5 参考文献

- [1] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术. 北京:化学工业出版社,2001:89.
- [2] Kwon Y T, Lee C W. Application of multiple ecological risk indices for the evaluation of heavy metal contamination in a coastal dredging area. *The Science of the Total Environment*, 1998, **214**:203 - 210.
- [3] Lewis M A, Weber D E, Stanley R S, Moore J C. Dredging impact on an urbanized Florida bayou: effects on benthos and algal-periphyton. *Environmental Pollution*, 2001, **115**:161 - 171.
- [4] 濮培民,王国祥,胡春华等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗. 湖泊科学,2000,**12**(3):269 - 279.
- [5] 安琪,李发荣. 滇池草海底泥疏挖对水体水质及底泥影响分析研究. 云南地理环境研究,2002,**14**(2):65 - 69.
- [6] 王宁,张刚,王瑗. 湖泊内源污染的环保疏浚及其效果——以长春南湖清淤工程为例. 环境科学研究,2004,**17**(2):34 - 37.
- [7] Andrew M, Lohrer, Jennifer Jarrell Wetz. Dredging-induced nutrient release from sediments to the water column in a southeastern saltmarsh tidal creek. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, **46**:1156 - 1163.
- [8] Shahadat Hossain, Bradley D Eyre, Lester J McKee. Impacts of dredging on dry season suspended sediment concentration in the Brisbane River estuary, Queensland, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004,**61**:539 - 545.
- [9] 孙傅,曾思育,陈吉宁. 富营养化湖泊底泥污染控制技术评估. 环境污染治理技术与设备,2003,**4**(8):61 - 64.
- [10] Murphy TP, Lawson A, Kumagai M, Babin J. Review of emerging issues in sediment treatment. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 1999, (2):419 - 434.
- [11] 湖南省政协经济科技委员会. 三峡工程与洞庭湖关系研究. 长沙:湖南科学技术出版社,2002:155.
- [12] 窦鸿身,姜加虎. 洞庭湖. 合肥:中国科学技术大学出版社,2000:218 - 228.
- [13] 李荣喜,秦林. 洞庭湖水体污染现状及治理对策. 湖南水利水电,2000,(2):34 - 35.
- [14] 郑彤,陈春云. 环境系统数学模型. 北京:化学工业出版社,2003:80 - 81,46 - 48.
- [15] 全为民,严力蛟,虞左明等. 湖泊富营养化模型研究进展. 生物多样性,2001,**9**(2):168 - 175.
- [16] 易波琳,李晓斌,梅金华. 洞庭湖面积容积与水位关系及调蓄能力评估. 湖南地质,2000,**19**(4):267 - 270.