

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.04.011

千岛湖现状污染负荷分析与限制排污总量研究

张红举^{1,2,3}, 彭树恒⁴, 周 娅³, 袁洪州⁵, 陈江海⁵

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 太湖流域管理局水利发展研究中心, 上海 200434; 3. 太湖流域水资源保护局, 上海 200434; 4. 中国国际工程咨询公司, 北京 100044; 5. 上海勘测设计研究院, 上海 200434)

摘要: 根据千岛湖水质现状和水功能区划, 确定2015年和2020年千岛湖水质保护目标的污染物浓度, 核算现状污染负荷量。将现状COD_{Mn}、NH₃-N和TP污染负荷量作为千岛湖COD_{Mn}、NH₃-N和TP的纳污能力, 即千岛湖湖区COD_{Mn}、NH₃-N和TP指标纳污能力分别为16420 t/a、2225 t/a和434 t/a。采用狄龙模型核算千岛湖TN指标的纳污能力, 2015年千岛湖TN质量浓度目标值为0.88 mg/L, 对应湖区限排总量为3468 t/a; 2020年将千岛湖TN质量浓度目标值进一步提高至0.8 mg/L, 此时对应湖区TN限排总量为3176 t/a。

关键词: 纳污能力; 限排总量; 水功能区; 狄龙模型; 千岛湖

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2014)04-0053-04

Analysis of current pollutant loads and investigation of total pollutant discharge limits in Qiandao Lake

ZHANG Hongju^{1, 2, 3}, PENG Shuheng⁴, ZHOU Ya³, YUAN Hongzhou⁵, CHEN Jianghai⁵

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Water Resources Development Research Center, Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China; 3. Water Resources Protection Bureau of Taihu Basin, Shanghai 200434, China; 4. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100044, China; 5. Shanghai Investigation, Design and Research Institute, Shanghai 200434, China)

Abstract: Based on the current water quality and water function zones of Qiandao Lake, the pollutant concentrations that will meet the water quality requirements in 2015 and 2020 were determined, and the current pollutant loads were calculated. The current pollutant loads of COD_{Mn}, NH₃-N, and TP were examined, in order to study the environmental capacity of the lake. The lake's capacities of COD_{Mn}, NH₃-N, and TP, were 16 420 t per year, 2 225 t per year, and 434 t per year, respectively. The Dillon model was used to calculate the pollutant capacity of TN in the lake. The results show that the target TN concentration will be 0.88 mg/L for the year 2015, and the corresponding total pollutant discharge limit will be 3 468 t per year. In the year 2020, the target TN concentration will decrease to 0.8 mg/L, and the corresponding total pollutant discharge limit will be 3 176 t per year.

Key words: water environmental capacity; total pollutant discharge limits; water function zones; Dillon model; Qiandao Lake

1 千岛湖概况及研究意义

千岛湖(新安江)是我国长三角地区最大的淡水人工湖和重要的水源地,集水面积10442 km²,正常水位108 m时,库容178.4亿m³,水域面积580 km²。新安江发源于安徽省黄山市休宁县,干流全

长约359 km,是入千岛湖的最大河流,其入湖水量约占总入湖水量的60%以上。新安江流域多年平均天然径流量(地表水资源量)126.7亿m³,其中年均入千岛湖水量115.2亿m³。新安江流域示意图见图1。

千岛湖的生态战略地位极为重要,是我国现阶段不可多得且亟须保护的水生态区域之一。近年来

作者简介:张红举(1977—),男,高级工程师,硕士,主要从事水资源规划研究。E-mail: zeusium@hotmail.com

随着工业化、城镇化进程的加速,污染物排放总量不断增加,千岛湖水质面临严峻挑战。仅靠常规的防治措施,难以改变污染总量增加和水质变差的趋势。如果任其发展,难免重蹈“先污染、后治理”的覆辙。要保证千岛湖的水质不再恶化,有必要提出明确的水质目标,并在此基础上核算污染物限排总量。

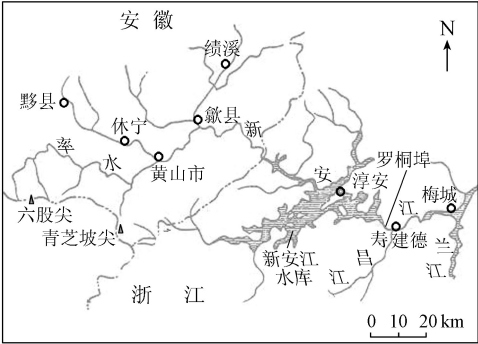


图1 新安江流域示意图

2 千岛湖现状水质

根据浙江省水文局监测数据,2008—2010 年千岛湖 COD_{Mn} 为 I 类,DO 为 I ~ II 类,TP 为 II 类,TN 为 III ~ IV 类(表 1),主要超标指标为 TN。TN 是千岛湖的首要污染物,其次是 TP,而 COD_{Mn}、NH₃-N、DO 造成的污染较小,它们的水质类别基本上都是 I 类。可见,保护千岛湖水质的首要工作是控制 TN 的排放,降低 TN 的质量浓度,提高 TN 的水质类别。

表1 2008—2010 年千岛湖主要水质指标年均质量浓度及水质类别

年份	DO		COD _{Mn}		NH ₃ -N		TP		TN	
	质量浓度	水质类别	质量浓度	水质类别	质量浓度	水质类别	质量浓度	水质类别	质量浓度	水质类别
2008	8.04	I	1.52	I	0.080	I	0.018	II	1.04	IV
2009	8.01	I	1.49	I	0.078	I	0.016	II	0.96	III
2010	6.84	II	1.34	I	0.062	I	0.020	II	0.93	III
平均值	7.63	I	1.45	I	0.073	I	0.018	II	0.98	III

注:质量浓度单位为 mg/L。

3 千岛湖水功能区划与水质保护目标

3.1 水功能区划

根据国务院批复的《全国重要江河湖泊水功能区划》(国函[2011]167 号),千岛湖水功能区划分为 3 个:新安江水库淳安饮用水水源区,水质保护目标为 II 类;新安江水库淳安渔业用水区,水质保护目标为 III 类;新安江水库景观娱乐用水区,水质保护目标为 III 类(表 2)。

3.2 水质保护目标

根据千岛湖现状水质以及 GB3838—2002《地表水环境质量标准》,确定 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 和 TN 为千岛湖污染物控制指标。千岛湖现状 COD_{Mn}、NH₃-N

表2 千岛湖(新安江水库)水功能区划

名称	范围	面积/km ²	水质保护目标
新安江水库淳安饮用水水源区	千岛湖(除零星景观用水区外水域)	524.5	II
新安江水库淳安渔业用水区	里杉柏—化肥厂湖湾	2.5	III
新安江水库景观娱乐用水区	千岛湖西园湖湾、龙山岛、界首岛、猴岛、姥山岛等岛屿周边水域	56.0	III

的水质类别为 I 类,TP 为 II 类,已符合水功能区水质目标要求,故直接采用近 3 年(2008—2010 年)水质指标的平均质量浓度作为近期(2015 年)水质保护目标。TN 指标现状水质为 III 类,未达到水功能区水质目标要求。II 类水质对 TN 质量浓度的最低要求为 0.5 mg/L,2015 年实现的难度较大。综合考虑水质目标可达性,2015 年 TN 质量浓度保护目标设为 0.88 mg/L;远期(2020 年)COD_{Mn}、NH₃-N、TP 等指标的质量浓度继续保持,TN 质量浓度在 2015 年基础上进一步提高至 0.80 mg/L。见表 3。

表3 千岛湖近远期水质保护目标

年份	COD _{Mn}		NH ₃ -N		TP		TN	
	质量浓度	水质类别	质量浓度	水质类别	质量浓度	水质类别	质量浓度	水质类别
现状	1.45	I	0.073	I	0.018	II	0.98	III
2015 年	1.45	I	0.073	I	0.018	II	0.88	III
2020 年	1.45	I	0.073	I	0.018	II	0.80	III

注:质量浓度单位为 mg/L。

4 千岛湖现状污染负荷量

4.1 工业污染源

根据浙江省环保厅汇报材料《千岛湖流域污染物排放情况及趋势》,2010 年淳安县 59 家重点企业和其他非重点污染源 COD 排放量为 561.4 t,NH₃-N 排放量为 44.6 t。其中千岛湖镇为主要工业发展区,企业较集中,规模相对较大,是工业污染物排放的主要地区。

4.2 生活污染源

生活污染源分为城镇生活污染源和农村生活污染源。参照《2009 年淳安统计年鉴》中千岛湖周边乡镇人口统计数据,采用当量法计算污染物排放量。千岛湖周边乡镇包括:汾口镇、浪川乡、姜家镇、梓桐镇、界首乡、鸠坑乡、威坪镇、宋村乡、金峰乡、左口乡、临歧镇、富文乡、文昌镇、千岛湖镇、石林镇、里商乡、安阳乡、大墅镇、枫树岭镇。

4.2.1 城镇生活污染

淳安县总人口 452 718 人,城镇人口 76 256 人,其中千岛湖周边乡镇城镇人口 74 891 人。城镇生活污染物入湖量通过人均产污当量确定,COD_{Mn} 的产污当量为 18.7 ~ 28.0 kg/(a·人),NH₃-N 的产污

当量为 3.1 ~ 5.2 kg/(a · 人),TP 的产污当量为 0.4 ~ 0.6 kg/(a · 人),TN 的产污当量为 7.5 ~ 10.0 kg/(a · 人)^[1]。根据计算,城镇生活污染物中 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 和 TN 的入湖量分别为 2 097 t/a、389 t/a、37.45 t/a 和 656 t/a。

4.2.2 农村生活污染

淳安县农业人口 376 462 人,其中千岛湖周边乡镇农业人口 317 262 人。农村生活污染量的计算以人均产污当量为基础,同时根据农业生活污染排放实际情况确定污染物综合入湖系数。农村生活污染源中,COD_{Mn}的产污当量为 17.3 ~ 26.2 kg/(a · 人),综合入湖系数为 0.68;NH₃-N 的产污当量为 3.1 ~ 5.2 kg/(a · 人),综合入湖系数为 0.70;TP 的产污当量为 0.4 ~ 0.6 kg/(a · 人),综合入湖系数为 0.52;TN 的产污当量为 7.4 ~ 9.8 kg/(a · 人),综合入湖系数为 0.64^[1]。根据计算,农村生活污染物中 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 和 TN 的入湖量分别为 5 652 t/a、1 155 t/a、82.49 t/a 和 1 746 t/a。

4.3 农村面源

4.3.1 化肥施用

千岛湖周边乡镇农作物播种面积为 39 268.3 hm²,区域内磷流失量以 1.2 kg/(hm² · a)计,氮流失量以 23.4 kg/(hm² · a)计。根据计算,湖区周边乡镇因农药化肥施用产生的 TP、TN 流失量为 47.12 t/a 和 919 t/a,入湖量为 24.50 t/a 和 588 t/a。

4.3.2 畜禽养殖

根据年鉴资料,以乡镇为基本单元统计千岛湖禽畜养殖量。千岛湖周边乡镇年养殖牛 1 981 头、生猪 282 449 只、羊 2 276 头、家禽 337 773 羽、兔 2 584 只。各类畜禽排泄量当量见表 4。其中兔排泄物中的主要污染物含量参考家禽排泄量当量。

表 4 污染负荷模型各类禽畜排泄量当量取值范围^[1]

	kg/a			
畜禽	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP	TN
牛(头)	223.4 ~ 337.40	19.60 ~ 32.70	7.20 ~ 11.00	51.80 ~ 69.30
猪(头)	23.9 ~ 36.20	1.70 ~ 2.87	1.70 ~ 2.70	3.70 ~ 4.90
羊(只)	4.0 ~ 5.98	0.40 ~ 0.70	1.00 ~ 1.60	3.50 ~ 4.70
家禽(羽)	1.0 ~ 1.50	0.09 ~ 0.17	0.14 ~ 0.22	0.21 ~ 0.28

根据计算,千岛湖周边乡镇畜禽养殖产生的 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 和 TN 入湖量分别为 7 693 t/a、578 t/a、283.06 t/a 和 786 t/a。

4.4 旅游人口

千岛湖旅游经济迅速发展,2010 年接待游客突破 350 万人次,旅游人数以 350 万人/a 计,游客平均滞留时间以 2d 计,千岛湖旅游人口所致的 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 和 TN 入湖量分别为 305 t/a、56 t/a、4.99 t/a 和 107 t/a。

4.5 围网养殖

湖区围网养殖会污染水体。根据调查,千岛湖湖区 2011 年底将保留 33.3 hm² 网箱用于鱼种养殖和科研养殖,其余 133.3 hm² 养殖网箱全部退出千岛湖。因此,现状湖区围网养殖面积约 167 hm²。水产养殖中,COD_{Mn}的产污当量为 670.5 ~ 1 012.8 kg/(a · hm²),NH₃-N 的产污当量为 14.0 ~ 23.4 kg/(a · hm²),TP 的产污当量为 7.9 ~ 12.1 kg/(a · hm²),TN 的产污当量为 85.6 ~ 114.5 kg/(a · hm²)。根据计算,千岛湖围网养殖带来的 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 和 TN 排放量(入湖量)分别为 112 t/a、2.32 t/a、1.32 t/a 和 14 t/a。

4.6 现状污染负荷汇总

综合千岛湖周边乡镇工业污染、生活污染、农村面源污染、旅游人口以及湖区围网养殖的排污,入千岛湖的 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 和 TN 现状污染负荷总量分别为 16 420 t/a、2 225 t/a、434 t/a 和 3 897 t/a。见表 5。

表 5 千岛湖现状污染负荷汇总

	t/a			
污染源	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP	TN
工业污染	561	45	—	—
城镇生活污水	2 097	389	37.45	656
农村生活污水	5 652	1 155	82.49	1746
种植业(化肥施用)	—	—	24.50	588
畜禽养殖	7 693	578	283.06	786
旅游人口	305	56	4.99	107
围网养殖	112	2	1.32	14
总计	16 420	2 225	433.81	3 897

5 纳污能力核算

5.1 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 指标纳污能力

现状千岛湖水质指标中,COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP 均已达到 I ~ II 类,符合水功能区水质目标要求。根据 GB/T 25173—2010《水域纳污能力计算规程》,将现状 COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP 污染负荷量作为千岛湖 COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP 的纳污能力,千岛湖湖区 COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP 指标纳污能力分别为 16 420 t/a、2 225 t/a 和 433.81 t/a。

5.2 TN 指标纳污能力

千岛湖 TN 质量浓度为 0.98 mg/L,没有达到 II 类水的要求。根据 GB/T 25173—2010《水域纳污能力计算规程》,采用模型法计算 TN 的纳污能力。

国内不少学者和专家^[2-6]开展了对湖泊和水库的纳污能力和污染物限排总量的相关研究,取得了一定的成果。最常用的纳污能力和污染物限排总量核算是狄龙模型法,例如:陈来华等^[3]采用狄龙模型并结合水库质量平衡模型模拟预测杨溪水库的水质,计算出恢复目标水质所需削减的污染负荷

值;陈永金等^[4]应用狄龙模型对东平湖水环境容量进行了计算;彭贤则等^[5]用狄龙模型计算出洪湖主要污染物 COD_{Mn}、TN、TP 的最大水环境容量以及洪湖水环境可承载能力范围内的生产、生活排污量。除了狄龙模型之外,一维模型、二维模型也被应用于计算河湖的纳污能力和限排总量。史晓新等^[6]采用二维数学模型进行太湖纳污能力动态变化的模拟,得到了太湖纳污总量和逐月的量值。这些学者的研究方法和研究成果对笔者研究千岛湖污染物限排总量的核算有着很好的参考作用。

5.2.1 计算方法

按照 GB/T 25173—2010《水域纳污能力计算规程》,选用湖库富营养化模型——狄龙模型,计算千岛湖现状超标的 TN 指标的允许入湖污染负荷量。

建立设定水文条件下湖库水域 TN 质量浓度与污染负荷的关系:

$$M_N = L_s A \tag{1}$$

$$L_s = P_s H \beta / (1 - R_p) \tag{2}$$

其中 $\beta = Q_a / V \tag{3}$

$$R_p = 1 - Z_{out} / Z_{in} \tag{4}$$

式中: M_N 为氮的水域负荷量,t/a; L_s 为单位湖(库)水面积氮的水域负荷量,g/(m²·a); A 为湖(库)水面积,m²; H 为对应计算水位的库区水深,m; P_s 为湖(库)氮的年平均控制质量浓度,g/m³; R_p 为氮在湖(库)中的滞留系数; Z_{out} 为污染物出湖(库)负荷量,t/a; Z_{in} 为污染物入湖(库)负荷量,t/a; β 为水力冲刷系数,1/a; Q_a 为湖(库)年出湖水量,亿 m³/a; V 为湖(库)库容,亿 m³。

5.2.2 计算条件

5.2.2.1 水文条件

计算湖区水域纳污能力,采用 90% 保证率下的最枯月平均水位或近 10 年最枯月水位作为计算水位。根据新安江电站提供的千岛湖湖区水位逐月过程资料,2001—2010 年 10 年湖区最低水位为 93.59 m,对应计算水位时库区平均水深为 19.59 m。

5.2.2.2 计算库容和水库面积

由相关计算得出,千岛湖湖区在计算水位 93.59 m 时对应的水库库容和水面面积分别为 105.5 亿 m³ 和 429.6 km²。根据调研,在此水位条件下,湖区入湖水量约 43.99 亿 m³,出湖水量约 61.88 亿 m³。

5.2.2.3 滞留系数

千岛湖多年平均入湖水量 115.16 亿 m³,其中安徽省入湖水量 67.77 亿 m³,浙江省入湖水量 47.39 亿 m³。根据水质监测数据,新安江街口断面带入湖区(即从安徽地区入湖)的 TN 约 8 919 t/a。浙江地区河道带入的污染物主要由陆域排入,为避免重复计算,仅统计周边乡镇 TN 排入量,按 3 897 t

计。两者合计 12 816 t。根据千岛湖“大坝前”站点水质监测浓度以及出湖水量,出湖带出的 TN 约 8 752 t/a。则滞留系数 R_p 为 0.317 1。

5.3 计算参数

各计算参数的数值分别为:水位 $L=93.59$ m,水深 $H=19.59$ m,库容 $V=105.5 \times 10^8$ m³,水面面积 $A=429.6$ km²,入湖水量 $Q_b=43.99 \times 10^8$ m³,出湖水量 $Q_a=61.68 \times 10^8$ m³,滞留系数 $R_p=0.317 1$,水力冲刷系数 $\beta=0.584 6$ a⁻¹。

5.4 计算成果

基于狄龙模型的千岛湖 TN 负荷与质量浓度关系见表 6。TN 为 0.88 mg/L 条件下的千岛湖周边乡镇限排量为 3 468 t/a。

表 6 基于狄龙模型的千岛湖 TN 负荷与质量浓度关系

$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	千岛湖 TN 负荷量/(t·a ⁻¹)	街口允许 TN 入湖量/(t·a ⁻¹)	周边乡镇 TN 排放量/(t·a ⁻¹)
0.98	7 060	3 208	3 852
0.88	6 340	2 872	3 468
0.80	5 763	2 587	3 176
0.70	5 043	2 244	2 799
0.60	4 323	1 898	2 425
0.50	3 602	1 552	2 050

5.5 合理性分析

根据狄龙模型测算结果,现状千岛湖湖区 TN 质量浓度为 0.98 mg/L 时,周边乡镇 TN 排放入湖量为 3 852 t/a,这与 TN 现状调查统计数据 3 897 t/a 接近,相差仅 1%,说明模型符合实际,成果合理。

将采用等比例削减法的计算结果与采用狄龙模型的计算成果进行比较,两者基本接近(表 7),说明成果较为合理。

表 7 等比例削减法与狄龙模型的计算成果比较

$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	周边乡镇 TN 排放入湖量	
	等比例削减法/(t·a ⁻¹)	狄龙模型法/(t·a ⁻¹)
0.98	3 897	3 852
0.88	3 424	3 468
0.80	3 113	3 176
0.70	2 734	2 799
0.60	2 332	2 425
0.50	1 946	2 050

5.6 限制排污总量

在千岛湖纳污能力核算结果的基础上,限制排污总量暂时定为其纳污能力的数值。2015 年千岛湖 COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP 的限排总量,即其现状污染负荷量,分别为 16 420 t/a、2 225 t/a 和 434 t/a。TN 的限制排污总量由狄龙模型计算得出,其中 2015 年千岛湖 TN 质量浓度目标为 0.88 mg/L,对应湖区限排总量为 3 468 t/a;2020 年千岛湖 TN 质量浓度目标进一步提高至 0.8 mg/L,对应湖区限排总量为 3 176 t/a。

(下转第 96 页)

每个人不可推卸的责任。推进严格水资源管理更需要立法保障。建议将推广利用海水作为大生活用水纳入沿海地区各级政府的工作规划,明确各级政府在普及推广利用海水作为大生活用水中的目标、责任,认真研究制定切实可行的大生活用海水推广的价格、金融、税收政策。

香港地区半个多世纪的海水冲厕技术的推广和立法实践推动了其相应法律和管理制度规范完整,以至于香港地区现已成为世界上海水冲厕使用率最高,技术最为成熟的地区。其立法和技术为我国内地利用海水作为大生活用水的发展提供了良好的范本。经历了我国内地几十年的海水利用技术研发和近年来的蓬勃发展,我国的海水利用已经初具规模,在淡水资源日益紧缺的沿海地区,海水利用需求明显,行业发展迅速,利用海水作为冲厕用水是其中重要的发展方向,其健康快速发展,需要立法层面上的推动和规范。

参考文献:

[1] 香港特别行政区政府水务署. 水资源:海水冲厕[EB/OL]. http://www.wsd.gov.hk/tc/water_resources/water_treatment_and_distribution_process/seawater_for_flushing/index.html.
[2] 香港特别行政区政府水务署. 客户服务及水费单:水务

设施条例[EB/OL]. [2013-07-16]. http://www.wsd.gov.hk/tc/customer_services_and_water_bills/waterworks_ordinance/index.html.
[3] 张雨山,王静,成玉,等. 大生活用海水水质标准研究[J]. 海洋技术. 2005,24(3):124-127. (ZHANG Yushan, WANG Jing, CHENG Yu, et al. Study on the standards of domestic seawater quality[J]. Ocean Technology, 2005, 24(3):124-127. (in Chinese))
[4] 香港特别行政区政府水务署. 新闻公报 立法会十九题:非法取水行为[EB/OL]. [2010-01-27]. http://www.wsd.gov.hk/tc/press_release_publicity/press_release/index_year_2010.html.
[5] 张雨山,王静,张国辉,等. 大生活用海水集成技术研究及应用[R]. 天津:国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所,2012.
[6] 张雨山,王静,张国辉,等. 大生活用海水技术研究与工程示范[R]. 天津:国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所,2009.
[7] 孔范龙. 海水冲厕地区污水脱氮研究[D]. 青岛:青岛大学,2005.
[8] 李文坛. 对我国政策行银行立法的思考[J]. 天水行政学院学报. 2010,4(64):110-113. (LI Wentan. Thinking and reference about the legislation of China's policy banks[J]. Journal of Tianshui College of Administration, 2010, 4(64): 110-113. (in Chinese))

(收稿日期:2013-09-02 编辑:高渭文)

(上接第 56 页)

6 结 语

经狄龙模型计算,要达到 2015 年水质目标,千岛湖 COD_{Mn}、NH₃-N、TP、TN 的限制排污总量分别为 16 420 t/a、2 225 t/a、434 t/a、3 468 t/a。建议对千岛湖严格限制污染物排放,使不能超过污染物限排总量。

本研究基于现状污染排放量和狄龙模型对千岛湖纳污能力进行了初步核算。然而,任何模型都不能够完全地模拟出真实情况,具体的纳污能力需要经过更加严密的论证和核算得出。因此,对于千岛湖纳污能力和限排总量的研究需进一步开展,尤其是对 TN 纳污能力的研究,其核算结果越接近真实情况,对千岛湖水质的保护就越有力。

参考文献:

[1] 王鹏. 基于数字流域系统的平原河网区非点源污染模型研究与应用[D]. 南京:河海大学,2006.
[2] 宋刚福,沈冰. 基于生态的城市河流水量水质联合调度模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(3): 258-263. (SONG Gangfu, SHEN Bing. An ecology based water quantity and quality combined operation model for

urban rivers[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012,40(3): 258-263. (in Chinese))
[3] 陈来华,苏飞,尹吉国,等. 水质模型在杨溪水库污染负荷控制研究中的应用[J]. 浙江水利科技,2011(6):4-7. (CHEN Laihua, SU Fei, YIN Jiguo, et al. Application of water quality model for pollution load control in the Yangxi River Reservoir[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2011(6):4-7. (in Chinese))
[4] 陈永金,林丽,刘加珍,等. 东平湖水体环境容量分析[J]. 人民黄河, 2012,34(6):61-62. (CHEN Yongjin, LIN Li, LIU Jiazhen, et al. Analysis on water environmental capacity of Dongping Lake[J]. Yellow River, 2012,34(6):61-62. ((in Chinese))
[5] 彭贤则,冯璐,黄东升. 洪湖水环境承载力及其对策研究[J]. 当代经济, 2011(7):92-93. (PENG Xianze, FENG Lu, HUANG Dongsheng. Water environmental capacity of Honghu Lake and its countmeasures[J]. Contemporary Economics, 2011(7):92-93. (in Chinese))
[6] 史晓新,禹雪中,马巍. 湖泊纳污能力动态特征分析及计算[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2008,6(2): 105-110. (SHI Xiaoxin, YU Xuezhong, MA Wei. Analysis and calculation of dynamic characteristics of lake environmental capacity[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2008,6(2): 105-110. (in Chinese))

(收稿日期:2013-07-29 编辑:彭桃英)