

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.02.022

太湖流域河网地区湖泊氮磷污染负荷研究

——以江苏常熟南湖荡为例

张丹蓉¹, 邵广文¹, 管仪庆¹, 张其成¹, 冒甘泉², 叶彬³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 卡尔斯鲁厄理工学院气象与气候研究所, 德国 卡尔斯鲁厄 82467;
3. 大唐观音岩水电开发有限公司, 湖北 攀枝花 617012)

摘要:以江苏常熟市南湖荡为例,对当地主要的农业面源、水产养殖面源、畜禽养殖面源、居民生活面源的污染物排放量及南湖荡水体的TN、TP允许纳污量进行估算,并对南湖荡水体的富营养化现状进行评价。结果表明:南湖荡的TN、TP排放量分别为113.8 t/a和18.3 t/a,水体的TN、TP允许纳污量分别为134.4 t/a和6.4 t/a。TN排放量已经十分接近水体TN允许纳污量的上限值,TP排放量已经远远超出水体TP允许纳污量。因此,南湖荡水质已经处在从Ⅲ类水向Ⅳ类水过渡阶段。依据计算得到的富营养化参数,可认为南湖荡处于中度富营养化状态。研究结果可为南湖荡的污染控制和管理提供依据,研究思路和方法可为同类湖泊治理与保护工作提供参考。

关键词:污染负荷;允许纳污量;富营养化;总氮;总磷;南湖荡

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)02-0106-05

Study of pollution load of nitrogen and phosphorus in lake of Taihu Basin river-net area: a case study of Nanhudang Lake in Changshu City, Jiangsu Province

ZHANG Danrong¹, SHAO Guangwen¹, GUAN Yiqing¹, ZHANG Qicheng¹, MAO Ganquan², YE Bin³
(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Institute of Meteorology and Climate Research, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe 82467, Germany;
3. Datang Guanyinyan Hydropower Development Co. Ltd., Panzhuhua 617012, China)

Abstract: Taking Nanhudang Lake in Changshu City, Jiangsu Province as an example, the pollution discharge of non-point pollution sources, including agriculture, aquaculture, livestock, poultry breeding, and resident living sewage, was estimated. The allowable discharge of TN and TP in Nanhudang Lake was estimated and the eutrophication status in Nanhudang Lake was assessed. The results show that the current discharge of TN and TP are 113.8 tons per year and 18.3 tons per year, respectively, and the allowable discharge of TN and TP are 134.4 tons per year and 6.4 tons per year, respectively. The discharge of TN is close to the allowable discharge of TN and the discharge of TP goes far beyond the allowable discharge of TP. The water quality of Nanhudang Lake is in the transition phase from the water standard III to water standard IV. According to the calculated eutrophication parameters, Nanhudang Lake is in the moderate eutrophication phase. The results can provide supports for the pollution control and management of Nanhudang Lake, and the research strategies and methods can provide reference for similar lakes.

Key words: pollution load; allowable discharge of pollution; eutrophication; TN; TP; Nanhudang Lake

湖泊在陆地表层系统中发挥着十分重要的调节作用,是人类重要的淡水来源、洪水调蓄库和物种基因库,与人类生产与生活息息相关。湖泊湿地对人

地关系和生态环境变化有很强的响应关系。同时,湖泊湿地也是最具有生态调节和改善功能的一种湿地类型。近年来,化肥、农药、禽畜养殖业及城市污

水排放等严重加剧了湖泊的污染^[1]。根据中国的第2次湖泊现状调查显示,在全国138个面积大于10 km²的湖泊中,有85.4%的湖泊超过了富营养化标准,其中达到重富营养化标准的更是达到了40.1%左右^[2]。2007年,太湖蓝藻水华暴发,水体发生富营养化现象,居民的饮用水水源地受到污染,造成了重大经济损失和严重社会影响。滇池草海中TP质量浓度也由1980年的0.20 mg/L上升到21世纪的2.4 mg/L,平均年增长率大于11%,内湖有机污染严重,外湖部分水体已受有机物污染^[3]。

为了治理湖泊水体污染,人们进行了大量湖泊污染和富营养化的研究。钱宝等^[4]为全面了解江苏里下河地区重要湖泊水体富营养化状况,选取了乌巾荡、九龙口、大纵湖3个典型湖泊作为研究对象,并进行以TOC、COD、BOD等为主要有机质污染综合指标的测定;胡开明等^[5]结合2007年至2010年环太湖水文监测及水文调查,对太湖的TN收支进行分析,预测太湖流域不同的功能区内的TN指标,为太湖的污染防治提供了科学的依据;钟振宇等^[6]分析了洞庭湖的主要污染源,入湖污染物特征,并在此基础上提出污染防治对策,为洞庭湖区的进行综合开发和污染治理提供依据和参考。

平原河网地区是城市发达、人口众多的地区,同时又是湖泊密布、易于发生水体污染的地区。太湖流域苏南河网地区经济发达,湖泊众多,湖泊的水质状况和生态调节和改善功能与当地人们的生产、生活密切相关。近年来该地区湖泊的水产养殖业发达,对湖泊水质、生态环境产生影响。本文选取具有代表性的江苏常熟南湖荡进行污染负荷和富营养化研究,可以为当地水环境管理和污染控制提供依据,对河网地区同类湖泊水生态功能保护具有一定的参考价值。

1 研究区概况

1.1 自然地理

南湖荡位于江苏省常熟市区西南部阳澄片区内,是常熟市第3大湖泊,湖身狭长,目前湖面面积大约为2.29 km²,东连元和塘,西通望虞河,中间有苏虞张高速公路及沙桐公路穿过(图1)。南湖荡地势低洼,地面高程约2.5~4.0 m,湖体总体呈现残月形,蜿蜒曲折,成锯齿状。南湖荡所处南湖荡圩区地形由西北向东南倾斜,河网水流因地形和水系的限制,都为由西向东单向排水,本文研究区以南湖荡圩区为界。南湖荡地处亚热带季风气候区,气候温和,四季分明,多年平均降雨量大约为1052.7 mm,雨量丰富。

1.2 土地利用现状

研究区陆域土地利用类型主要为农田、鱼塘及

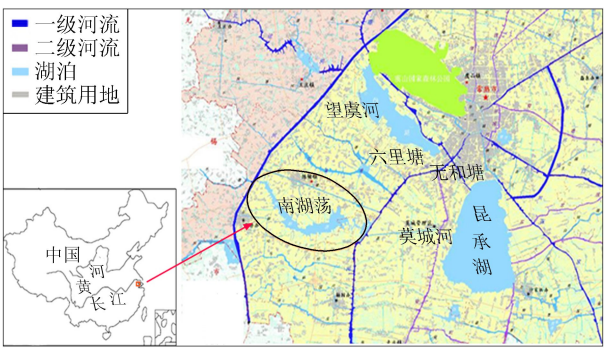


图1 南湖荡地理位置

部分农村居民点,其中,农田主要以水稻田、苗圃(红花继木球、罗汉松、红枫、金边黄杨、桂花、杜英、紫薇、棕榈树、香樟等)、草坪等为主;鱼塘水面约3.98 km²,养殖户100多户,渔业养殖主要以四大家鱼、蟹及珍珠等为主,据统计,研究区内水产养殖有:鱼1134 t,虾183 t,蟹128 t。

南湖荡沿岸有一些规模较小的畜禽养殖场,养殖奶牛、羊、猪、鸡、鸭等。具体养殖情况如下:蛋禽现存栏量为2.7万羽,出栏量为16.8万羽;生猪现存栏量近2700余头,出栏量为6500余头,其中种猪为400余头;乳牛现存栏量为80头,出栏量为18头;羊现存栏量为2300余只,出栏量为2400余只。研究区内畜禽与水产养殖、农业生产、砖瓦厂、生活垃圾填埋场以及垃圾焚烧发电厂均对圩区内的湖泊生态环境造成了一定的影响^[7]。

2 污染量估算

2.1 点源污染估算

点源污染有固定的排污口,像城市污水和工矿企业与船舶等废水排放口均可认定为点污染源。为了控制点源污染,南湖农场工业集中区建有一个初级污水处理厂,南湖荡周边的大型高污染化工企业污水均经过该厂处理后输送到市污水处理厂进行进一步的精细处理,然后进行污水排放。因此,在本研究中点源污染可以不予考虑。

2.2 面源污染估算

面源污染又称非点源污染,其污染的严重性及防治的重要性已经为国内外所认识。当前,许多水域的非点源污染程度超过了点源污染,面源污染正逐步成为水体污染的一个主要来源,严重威胁人民的生活用水安全。不同于点源污染,面源污染主要是氮、磷以及农药等污染物,在某一块区域通过地表径流、土壤渗滤等方式进入水体,对水体造成污染^[8]。南湖荡地区水产养殖业丰富,因此,除常规的农业面源、畜禽养殖面源和生活污染面源之外,本文同时对水产养殖面源污染进行了估算。

2.2.1 农业面源污染估算

农业面源污染主要指农业生产活动中,农田中的土粒、氮、磷及其他形式的有机或无机污染物质,在降水或灌溉过程中,通过农田地表径流、农田排水和地下渗流进入水体。虽然在输移过程中自身降解了一部分,但仍有很大一部分的污染物质进入水体,造成污染^[9]。

朱建国等^[10]于2000年6月到2000年11月在江苏省武进区雪堰镇进行了农田氮素负荷试验,经计算,在其实验水田中,TN 排放净负荷量约为19.77 kg/(hm²·a)。由于南湖荡圩区的水文、气候特征与该负荷试验非常类似。因此,本文参照该实验的结果数据,对南湖荡地区的水体面源污染负荷进行估算。旱地 TN 排放净负荷量则参考马立珊^[11]1987—1988 年的研究结果,约为水田的 1/3,即6.6 kg/(hm²·a)。折纯后磷肥的用量大概为氮肥使用量的 1/10,故 TP 排放净负荷按各耕地类型 TN 排放净负荷的 1/10 计。因此,可计算出南湖荡的农田 TN、TP 排放量分别为 14.3 t/a 和 1.43 t/a。

2.2.2 水产养殖面源污染估算

南湖荡水产养殖业十分发达,养殖规模庞大,除鱼塘精养外,南湖湖面几乎被围网养殖占用。养殖密度高,投放饲料过多,而水体不足以将污染物质完全分解处理,必将导致水体富营养化。由于资料有限,水产养殖产生的 TN、TP 负荷用竹内俊郎法^[12]估算。该方法认为,从给饵料的营养成分中扣除蓄积在养殖生物体内的量,剩余的即是环境的负荷量,详见式(1)。

$$\begin{cases} W_{TN} = 10(CN_f - N_b) \\ W_{TP} = 10(CP_f - P_b) \end{cases} \quad (1)$$

式中:W_{TN}、W_{TP}分别为 TN 负荷和 TP 负荷,kg/t;C 为饵料系数(增肉系数);N_f、P_f分别为饵料中氮和磷的质量分数,%;N_b、P_b分别为养殖生物体内氮和磷的质量分数,%。

针对南湖荡地区,竹内君郎法相应的各参数取值情况及其污染负荷计算结果详见表 1~2。经计算,水产养殖面源中 TN、TP 的排放量分别为 84.1 t/a 和 13.1 t/a。

表 1 不同养殖品种竹内君郎法参数取值情况

养殖品种	N _b /%	P _b /%	N _f /%	P _f /%	C
蟹类	2.34	0.26	5.6	1.0	2.0
鱼类	1.76	0.63	5.3	0.9	1.6
虾类	2.97	0.26	6.6	1.0	1.2

2.2.3 畜禽养殖面源污染估算

经调查,南湖荡地区的畜禽养殖主要为牛、猪、羊、鸡、鸭等。因此,本文通过分析上述畜禽的产

表 2 水产养殖面源污染负荷及排放量

养殖品种	总数量/ (t·a ⁻¹)	W _{TN} / (kg·t ⁻¹)	W _{TP} / (kg·t ⁻¹)	TN 排放量/ (t·a ⁻¹)	TP 排放量/ (t·a ⁻¹)
蟹类	128	88.6	17.4	11.3	2.2
鱼类	1 134	56.2	8.1	63.7	9.2
虾类	183	49.5	9.4	9.1	1.7
总量	1 445	149.3	34.9	84.1	13.1

粪尿量,计算进入水环境中的粪尿量及其污染物量。畜禽污染负荷的估算,主要综合参考国内外有关研究结果^[13-14],尤其是太湖地区研究结果。最终,选取如下系数(表 3),对畜禽养殖面源污染进行估算。通过估算,研究区内畜禽养殖 TN、TP 排放量分别为 4.84 t/a 和 0.87 t/a。

表 3 畜禽的粪尿排污情况

畜禽	存栏量/头	粪尿年排放量 ^① / (kg·头 ⁻¹)		进入水体粪尿 ^② 比例/%		污染排放量/ (t·a ⁻¹)	
		TN	TP	TN	TP	TN	TP
牛	18	31.9(29.2)	8.61(29.2)	5.600(50)	5.50(50)	0.295	0.022
猪	6515	2.34(2.17)	1.36(0.34)	1.085(25)	0.17(25)	3.700	0.569
羊	2431	2.280	0.450	5.300	5.2	0.294	0.057
家禽	167964	0.257	0.115	1.190	1.16	0.550	0.224

注:①括号中为尿的排放量;②括号中为尿进入水体的百分比。

2.2.4 居民生活面源污染估算

居民生活污染主要由生活污水与人粪尿两大部分组成。据统计,圩区内人口数 10 553 人,由于该区内居民生活水平较高,均按城镇居民排污系数计算,排放系数采用张大弟等^[15]的研究结果(表 4),人粪尿的产生量以每人每天平均排粪 0.25 kg,排尿 1.0 kg 计算,以人粪尿排放量的 10% 进入水体进行计算。

表 4 居民生活污染排放情况

指标	镇生活污水/ (kg·a ⁻¹ ·人 ⁻¹)	人粪尿/ (kg·a ⁻¹ ·人 ⁻¹)	污染排放量/ (t·a ⁻¹)
TN	0.730	0.274	10.6
TP	0.183	0.093	2.9

通过以上计算可得到各类型的污染排放量,计算各类型的污染物排放量总和,可得到南湖荡的 TN、TP 排放量为 113.8 t/a、18.3 t/a。其中,水产养殖面源污染占了总量的 70% 左右,其次,农业面源污染和居民生活源污染占了 20% 左右,最后,家禽养殖源污染占了 4% 左右(详见图 2)。

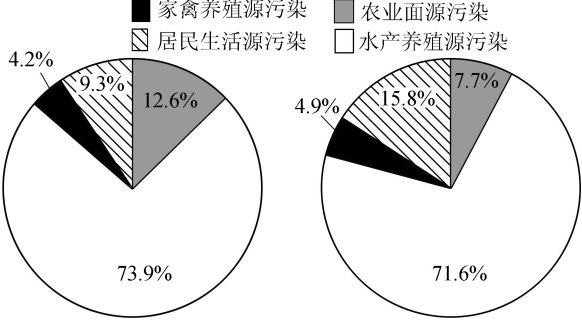


图 2 各类型污染负荷比例统计结果

3 水体允许纳污量与富营养化分析

3.1 氮、磷允许纳污量分析

水体氮、磷允许纳污量是指水体环境在满足一定的功能、设计水文条件和水环境目标下,即在水域使用功能不受破坏的条件下,水体可以承受氮、磷污染物的最大数量。它反映了水体在满足特定环境功能条件下对污染物的承受能力^[13]。针对湖泊水体,氮、磷污染物排入湖水后,在湖泊水流和风浪的作用下,湖泊中污染物分布基本均匀。采用沃伦威德尔模型计算湖体营养物质容量。模型简化后得水体TN、TP纳污能力计算公式:

$$W = V/\Delta T(\rho_s - \rho_0) + KV\rho_s + Q\rho_s \quad (2)$$

式中: W 为水体中TN、TP的允许纳污量,t/a; ΔT 为枯水时段,a; K 为TN、TP降解系数^[14],d⁻¹; ρ_0 、 ρ_s 分

表5 南湖荡相关参数与标准

参数	$\Delta T/a$	$V/\text{万 m}^3$	$Q/(\text{万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	K/d^{-1}		Ⅲ类水标准/(mg · L ⁻¹)		Ⅳ类水标准/(mg · L ⁻¹)	
				TN	TP	TN	TP	TN	TP
数值	0.068 5	863.2	430	0.001	0.001 5	≤1	≤0.05	≤1.5	≤0.1

将有关参数代入(2)式,通过计算可求得湖泊中TN、TP允许纳污量及其剩余纳污量,具体数据见表6。由此估算可以认为,当南湖荡水质目标设为Ⅲ类水标准时,TN的质量浓度已经十分接近该目标下的上限值,TP的质量浓度已经远远超出该目标下的水体允许纳污能力。

表6 南湖荡主要污染物水体允许纳污能力估算 t/a

指标	TN	TP
已占容量	113.8	18.3
剩余容量	20.6	-11.9
总计	134.4	6.4

3.2 水体富营养化分析

富营养化是指营养物质在湖泊、水库水体中的累积过多,导致该水体中生物的生产能力异常增多的过程。针对湖泊而言,富营养化现象会导致浮游生物的过量繁殖,不仅恶化了水体的感官形态,而且会由于缺氧造成鱼类的大面积死亡。鱼类的排泄物及浮游植物的残骸连同泥沙一起不断堆积于湖底,会加速湖泊向沼泽转化的进程。水体的富营养化现象形成的主要限制物质便是氮与磷,而湖泊水体中的营养物氮主要来自于农业排水,营养物磷主要来自于生活污水与水产养殖,因此磷的污染源控制比氮容易。因为一般湖体中的磷质量分数会比氮的质量分数小,故本研究以磷作为水体富营养化的主要限制物质。国内外的研究结果显示,采用狄龙模型可以很好地对湖体的富营养状态进行分析模拟^[17]。

$$\rho = \frac{L(1 - R)}{He} \quad (3)$$

别为水体中TN、TP的背景质量浓度和目标控制质量浓度,mg/L; V 为湖泊的体积,万m³; Q 为湖泊的稳定出流量,m³/s。

南湖荡水面面积为3.23 km²,平均水深4 m,估计湖泊形状系数为0.6~0.7之间,取0.65,估算得到湖水体积为863.2万m³。水平年中,南湖荡总体水量收支平衡,入湖、出湖水量基本相等,约430万m³/a。参考王良军^[16]研究,TN降解系数估算为0.001 d⁻¹,TP降解系数为0.001 5 d⁻¹。苏州市在2004年对南湖荡的水质进行了检测,结果表明,南湖荡的水质达到了Ⅱ类标准。随着社会和经济的发展,南湖荡现状水质明显下降,除少数区域能达到Ⅱ类水质标准,多数水域为Ⅲ类、Ⅳ类,现假定湖水水质的背景浓度为Ⅳ类水标准,要使目标水质达Ⅲ类的环境容量,一些相关参数与标准详见表5。

式中: ρ 为污染物的质量浓度,mg/L; L 为湖泊面积污染物负荷,g/(m² · a); R 为滞留系数; $\bar{H}$ 为平均水深,m; e 为水力冲刷系数, $e=Q/V$,a⁻¹。其中 R 可采用基钦儿-狄龙建立的经验公式计算:

$$R = 0.426\exp(-0.271q_s) + 0.574\exp(-0.00949q_s) \quad (4)$$

其中 $q_s = Q/A$
式中: q_s 为单位面积水量负荷,m/a; A 为湖泊面积。

当TP的质量浓度介于0.1~0.2 mg/L之间处于轻度富营养,当TP的质量浓度介于0.2~0.6 mg/L之间处于中度富营养化,当TP的质量浓度大于0.6 mg/L时则处于重度富营养化。通过公式(3)可以求出 $\rho=0.39$ mg/L,因此,可以判定南湖荡在当前排污状态下,已处于中度富营养化状态。

4 结 论

根据计算结果可知,当南湖荡水质目标设为Ⅲ类水标准时,TN的质量浓度已经十分接近该目标下的上限值,TP的质量浓度已经远远超出该目标下的水体纳污能力。所以在当前的TN、TP排放量下,南湖荡水体已经处在从Ⅲ类水向Ⅳ类水过渡阶段。南湖荡的富营养化程度已经达到了中度富营养化状态。为了治理南湖荡的水体污染,我们提出以下两个方面建议:

a. 必须采取有效措施提高水体纳污能力或者控制污染物质进入量。从本研究的分析可以看出,进入湖泊的水量对水体纳污能力影响很大,而物质

降解对水体纳污能力影响较小,因此建议引水改善南湖荡水质,或者通过生态修复方法改善水质,并且严格控制污染物的进入。

b. 各种污染负荷中,水产养殖所产生的磷污染所占比重最大,所以为了有效缓解水质的富营养化现象,应当加强水产养殖污染防治,实现水质持续好转,减缓南湖荡湖泊的衰亡过程,促进自然生态系统的良性循环,推动当地经济和环境和谐发展。

参考文献:

[1] 潘世兵,曹利平,张建立. 中国水质管理的现状、问题及挑战[J]. 水资源保护,2005,21(2): 59-62. (PAN Shibing, CAO Liping, ZHANG Jianli. Water quality management in China: situation, problems, and challenges [J]. Water Resources Protection,2005,21(2): 59-62.)

[2] 吴锋,战金艳,邓祥征,等. 中国湖泊富营养化影响因素研究:基于中国 22 个湖泊的实证分析[J]. 生态环境学报,2012,21(1): 94-100. (WU Feng, ZHAN Jinyan, DENG Xiangzheng, et al. Influencing factors of lake eutrophication in China:a case study in 22 lakes in China [J]. Ecology and Envirdmental Sciences,2012,21(1): 94-100. (in Chinese))

[3] 吕利军,王嘉学,袁花,等. 滇池水体环境污染的综合研究[J]. 云南化工,2009,36(3): 57-61. (LV Lijun, WANG Jiaxue, YUAN Hua, et al. Comprehensive research on environment pollution on water from Dianchi [J]. Yunnan Chemical Technology,2009,36(3): 57-61. (in Chinese))

[4] 钱宝,刘凌,张颖,等. 江苏里下河地区典型湖泊有机质污染研究[J]. 环境污染与防治,2010,32(11): 18-24. (QIAN Bao, LIU Ling, ZHANG Ying, et al. The typical lakes contamination of organic matter in Lixia-River area of Jiangsu Province [J]. Environmental Pollution and Control,2010,32(11): 18-24. (in Chinese))

[5] 胡开明,逢勇,王华. 太湖湖体总氮平衡及水质可控目标[J]. 水科学进展,2012,23(3): 437-444. (HU Kaiming, PANG Yong, WANG Hua. On the total nitrogen balance and water quality controllable target in Taihu Lake [J]. Advances in Water Science,2012,23(3):437-444. (in Chinese))

[6] 钟振宇,陈灿. 洞庭湖污染状况及防治对策[J]. 湖南有色金属,2011(8): 64-67. (ZHONG Zhenyu, CHEN Can. The pollution status and control measures for Dongting Lake [J]. Hunan Nonferrous Metals,2011(8): 64-67. (in Chinese))

[7] 李婷,叶亚平. 常熟市南湖荡生态服务价值评估[J]. 中国人口·资源与环境,2011,20(12): 92-95. (LI Ting, YE Yaping. Evaluation on the Eco-service value of Nanhu Marsh in Changshu City[J]. China Population Resources and Environment,2011,20(12): 92-95. (in Chinese))

[8] 张维理,徐爱国. 中国农业面源污染形势估计及控制对策[J]. 中国农业科学,2004,37(7): 1008-1017. (ZHANG Weili, XU Aiguo. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies[J]. Scientia Agricultura Sinica,2004,37(7): 1008-1017. (in Chinese))

[9] ITAHASHI S, SEO M C, TAKEUCHI M. Estimation and comparison of nitrogen loads and attenuation in agricultural catchments of Japan and Korea [J]. Water Science and Technology,2007(56): 105-113.

[10] 朱建国,郭红岩,王晓蓉. 非点源污染研究及控制对策 [C]//中国土壤学会第十次全国会员代表大会暨第五届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集. 北京:科学出版社,2004: 336-353.

[11] 马立珊. 苏南太湖水系农业非点源氮污染及其控制对策研究[J]. 应用生态学报,1992,3(4): 346-354. (MA Lishan. Nitrogen pollution from agricultural non-point sources and its control in water system of Taihu Lake[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,1992,3(4): 346-354. (in Chinese))

[12] 张玉珍,洪华生,陈能汪,等. 水产养殖氮磷污染负荷估算初探[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2003,42(2): 223-227. (ZHANG Yuzhen, HONG Huasheng, CHEN Nengwang, et al. Discussion on estimating nitrogen and phosphorus pollution loads in quaculture [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science),2003,42(2): 223-227. (in Chinese))

[13] 刘凌,崔广柏. 湖泊水库水体氮、磷允许纳污量定量研究[J]. 环境科学学报,2004,24(6): 1053-1058. (LIU Ling, CUI Guangbo. Waste load allocations of the nitrogen and phosphorus in lake and reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2004,24(6): 1053-1058. (in Chinese))

[14] 李一平,逢勇,丁玲. 太湖富营养化控制机理模拟[J]. 环境科学与技术,2004,27(3): 1-13. (LI Yiping, PANG Yong, DING Ling. Ecological Simulation of entrophication for Taihu Lake [J]. Environmental Science and Technology,2004,27(03):1-13. (in Chinese))

[15] 张大弟,章家骥. 上海市郊区非点源污染综合调查评价[J]. 上海农业学报,1997(1):31-36. (ZHANG Dadi, ZHANG Jiaqi. Integrated research and evaluation on nonpoint source pollution in Shanghai suburbs [J]. Acta Agriculturae Shanhai,1997(1):31-36. (in Chinese))

[16] 王军良,方志发. 城中湖水环境容量计算和对策研究[J]. 环境科学与技术,2008,31(1): 129-132. (WANG Junling, FANG Zhifa. Calculation of water environment capacity for a lake [J]. Environmental Science and Technology,2008,31(1): 129-132. (in Chinese))

[17] 锥文生,宋星原. 水环境分析及预测[M]. 武汉:武汉大学出版社,2004.

(收稿日期:2015 - 12 - 28 编辑:王 芳)