

湖泊营养盐控制标准制订方法的初步研究

郑丙辉, 许秋瑾, 朱延忠

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:制订可行的湖泊营养盐控制标准是实施湖泊富营养化治理和管理的重要前提, 我国目前尚缺乏按照区域湖库生态差异制订相应营养盐控制标准的研究, 也缺乏制订湖泊营养盐控制标准的统一原则和方法. 以我国东部平原大型浅水湖泊太湖为例, 依据营养盐控制标准制订的通用性、可能性及实用性原则, 考虑太湖自然环境条件以及地区社会、经济、技术等因素, 应用1994~2005年的监测数据, 以国际公认的湖泊富营养化的叶绿素a含量分级为基础, 提出湖泊营养盐控制标准的制订方法, 分析确定了太湖营养状态的6个等级, 即贫营养、中营养、轻度富营养、中度富营养、重度富营养及超富营养状态, 对应计算得出了六级营养盐控制标准, 研究得到太湖富营养化的控制标准建议值: 叶绿素a分别是: $< 1.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $1.6 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $10 \sim 26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $26 \sim 64 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $64 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $> 160 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 塞氏深度分别是: 0.7、0.4、0.3、0.3、0.3、0.25 m; 总磷分别是: 0.03、0.04、0.06、0.09、0.12、0.18 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 总氮分别是: 0.6、1.7、2.2、3.2、4.2、6.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 旨在通过对我国东部平原湖区典型湖泊水体的营养盐控制标准制订方法的研究, 探讨制订我国湖泊营养盐控制标准的可行方法, 为分区制订我国营养盐控制标准提供方法借鉴.

关键词: 富营养化; 营养盐; 控制标准; 太湖

中图分类号: X321 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)09-2497-05

Primary Study on Enacting the Lake Nutrient Control Standard

ZHENG Bing-hui, XU Qiu-jin, ZHU Yan-zhong

(Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: It is important precondition to enact viable lake nutrients control standard for lake control and management. Now China is shortage of study on nutrients control standard considering of the regional and nutrient difference. In this paper, five-step method for nutrient control standard is built following the principle of commonality, possibility and practicability. The monitoring data from 1994 to 2005 were divided into six groups according to chlorophyll-a content. Every group is a representative of one grade, oligotrophication, mesotrophication, low eutrophication, middle eutrophication, high eutrophication and extro-eutrophication respectively. In every group, total nitrogen, total phosphate and transparency were analyzed by frequency method, and 50% frequent values were applied. Results came out that the nutrient control standard for Taihu lake is as follows: Chlorophyll-a content were $< 1.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $1.6 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $10 \sim 26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $26 \sim 64 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $64 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $> 160 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Transparency is 0.7 m, 0.4 m, 0.3 m, 0.3 m, 0.3 m and 0.25 m. Total phosphate is 0.03 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.04 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.06 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.09 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.12 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.18 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Total Nitrogen is 0.6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 1.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 2.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 3.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 4.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 6.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. This study would offer the experience for enacting nutrient control standard in the other lake region of China, also would offer the theoretic support for eutrophication control in China.

Key words: eutrophication; nutrient; control standard; Taihu Lake

湖泊及其流域是最适宜人类繁衍生息和社会经济发展的重要场所和水源地, 具有航运、灌溉、调节洪水和旅游等多种功能. 随着工业化、城市化的快速发展, 湖泊流域内工农业生产和人民的生活水平不断提高, 大量污水排放, 导致水体氮磷浓度增加, 藻类暴发, 湖泊水环境恶化, 生态功能严重退化^[1~3]. 根据最近对我国67个主要湖泊和富营养化现状的调查发现, 有80%以上的湖泊受到了污染(Ⅳ至劣Ⅴ类), 富营养化湖泊为49个, 占调查湖泊数量的73.1%, 表明当前我国湖泊富营养化问题十分突出, 已成为制约流域经济和社会可持续发展的严重障碍, 应加快加大对富营养化湖泊的治理力度^[4~6]. 制订可行的湖泊营养盐控制标准是实施湖泊富营养化

治理和管理的重要基础^[7,8]. 制订湖泊营养盐标准的目的是为对湖泊的营养状态进行评价, 以便根据评价结论采取合理的控制措施, 防止湖泊富营养化^[9]. 但是, 我国目前缺乏按照区域湖库的生态差异制订相应营养盐控制标准的研究, 也缺乏制订湖泊营养盐控制标准的统一原则和方法. 本文以太湖为例, 通过我国东部平原湖区典型湖泊水体的营养盐控制标准制订方法的研究, 探讨制订我国湖泊营养盐控制标准的可行方法, 以期能为分区制订我国营养盐控制

收稿日期: 2008-10-20; 修订日期: 2009-02-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2008CB418206); 科技部国际科技合作项目(2007DFA90510)

作者简介: 郑丙辉(1963~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为流域水环境管理, E-mail: zhengbh@craes.org.cn

标准提供方法借鉴.

1 研究区域的自然概况

太湖流域地跨江苏、浙江、安徽和上海三省一市,流域面积36 500 km²,总人口约3 400万,是我国人口最密集地区之一,同时太湖流域工农业总产值占全国工农业总产值的 13% 以上,是我国经济发达、工业化与城市化程度较高的地区之一^[10].太湖是我国长江中下游地区著名的五大淡水湖泊之一,位于长江三角洲南缘,位于 N30°55′40″ ~ 31°32′58″, E119°53′32″ ~ 120°36′10″ 之 间. 湖 泊 面 积 为 2 338.1 km²,平均深度 2 m,最大水深 4 m,是典型的浅水湖泊.全部水系以太湖为中心,北部以无锡的直湖港为界,南部以原吴江市的吴淞港为界,向西河流以入湖河流为主,属上游,向东河流以出湖为主,属下游.水系特点是上游为树枝状排列,下游呈现为扇状排水系统^[11].

2 研究方法

2.1 数据来源

环境监测时段为 1994 ~ 2005 年,每年监测 6 次,每奇数月采样监测 1 次,全湖共布置 20 个采样点,分布状况见图 1,地名见表 1.

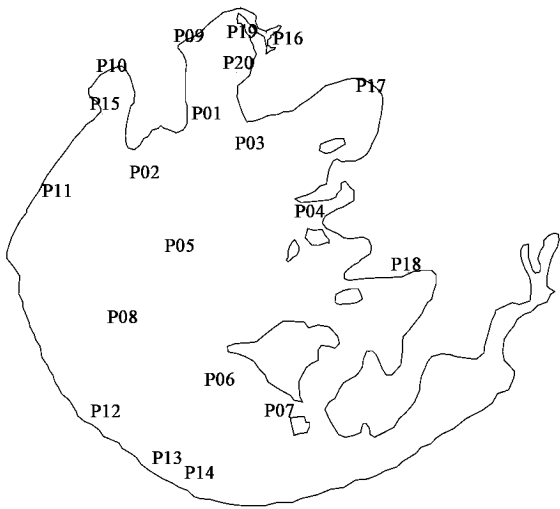


图 1 太湖检测取样点分布
Fig.1 Sampling spots in Taihu Lake

2.2 样本代表性

监测站位的设定主要考虑太湖的陆源排污口、近岸区域、近湖心等具有代表性的区域,涵盖了太湖的大部分区域,可以较为全面地反映太湖的富营养化及生态环境状况,因此监测点在空间上具有代表

性.在时间序列上,环境监测时间从 1994 ~ 2005 年,基本反映了太湖近 10 年水质恶化的过程;从样本量来统计,每种选取的营养盐控制指标有上千个监测数据,样本具备代表性.

表 1 太湖取样点编号

Table 1 Serial number of sampling spots in Taihu Lake

测点名称	编号	测点名称	编号
拖山	P01	大浦口	P11
椒山	P02	新塘港	P12
乌龟山	P03	小梅口	P13
漫山	P04	新港口	P14
平台山	P05	沙塘港	P15
四号灯标	P06	五里湖心	P16
泽山	P07	沙墩港	P17
大雷山	P08	胥口	P18
閘江口	P09	犊山口	P19
百淩港	P10	小湾里	P20

2.3 数据监测、分析与处理方法

按照水环境监测采样布点的原则,监测点在空间上具有代表性,在 1、3、5、7、9、11 各月采集统计样本,样本时间分布也具有随机性.

参考国际湖泊富营养化基准及控制标准制订的经验^[12-14],本研究选取的指标参数主要是叶绿素 a (Chl-a)、总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD)等指标.其中叶绿素 a 的测定方法采用丙酮萃取分光光度法;透明度采用塞氏盘法;总氮采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;总磷采用钼酸铵分光光度法.

数据分析:采用 SPSS 软件做统计频率分布图.

2.4 标准制订方法

依据国际湖泊富营养化基准及控制标准制订的经验^[12-14],将控制标准制订的方法归纳整理为五步法.

第 1 步:确定营养盐控制指标.参考国外经验^[12-14],确定富营养化控制指标为叶绿素 a(Chl-a)、总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD).从理论上,将总氮(TN)、总磷(TP)设定为原因变量,叶绿素 a(Chl-a)、透明度(SD)设定为结果变量.

第 2 步:确定营养盐分级标准.根据国际通用的营养状态评价标准^[15],将叶绿素 a(Chl-a)含量分成六级,分别是Ⅰ级贫营养(< 1.6 mg•m⁻³)、Ⅱ级中营养(1.6 ~ 10 mg•m⁻³)、Ⅲ级(轻)富营养(10 ~ 26 mg•m⁻³)、Ⅳ级(中)富营养(26 ~ 64 mg•m⁻³)、Ⅴ级(重)富营养(64 ~ 160 mg•m⁻³)、超富营养(> 160 mg•m⁻³).

第 3 步:控制指标的分级频率统计分析.按照湖泊富营养化发生程度(叶绿素 a)分级,分别对总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD)样本做频率统计分析.

第 4 步:控制指标的统计特征值确定.按照统计频率分析结果,确定 25%、50%和 75% 3 个级别的总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD)作为特征值.

第 5 步,进行验证和专家评估.根据经验,由研究团队结合水域使用功能和生态系统接纳的要求和氮、磷营养盐控制技术水平,综合分析确定营养盐控制指标值.

3 结果与分析

3.1 频率分析的统计特征值

将所有采样点的数据根据国际公认的叶绿素 a 含量分级建议值归类,分别得到对应的 6 组总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD)的样本群,针对每个样本群利用 SPSS 软件做出相应的频率分布图,分别得到了 25%、50%、75% 频率的统计特征值,总氮分级统计特征值见表 2,总磷分级统计特征值见表 3,透明度分级统计特征值见表 4.

表 2 应用频率取值法计算所得总氮分级统计特征值

Table 2 Total nitrogen graded statistical eigenvalue by frequency method

营养分级	标准分级	叶绿素 a /mg·m ⁻³	总氮特征值/mg·L ⁻¹		
			25 %	50 %	75 %
贫营养	I	< 1.6	0.72	2.27	3.70
中营养	II	1.6 ~ 10	0.99	1.73	2.70
轻富营养	III	10 ~ 26	1.17	2.24	3.90
中富营养	IV	26 ~ 64	1.76	3.23	5.11
重富营养	V	64 ~ 160	2.75	4.18	5.73
超富营养	劣 V	> 160	4.67	6.22	7.67

表 3 应用频率取值法计算所得总磷分级统计特征值

Table 3 Total phosphate graded statistical eigenvalue by frequency method

营养分级	标准分级	叶绿素 a /mg·m ⁻³	总磷特征值/mg·L ⁻¹		
			25 %	50 %	75 %
贫营养	I	< 1.6	0.07	0.08	0.08
中营养	II	1.6 ~ 10	0.04	0.06	0.11
轻富营养	III	10 ~ 26	0.06	0.09	0.13
中富营养	IV	26 ~ 64	0.06	0.12	0.17
重富营养	V	64 ~ 160	0.12	0.18	0.23
超富营养	劣 V	> 160	0.14	0.28	0.46

表 4 应用频率取值法计算所得 SD 分级统计特征值

Table 4 Transparence graded statistical eigenvalue by frequency method

营养分级	标准分级	叶绿素 a /mg·m ⁻³	透明度特征值/m		
			25 %	50 %	75 %
贫营养	I	< 1.6	0.25	0.30	0.55
中营养	II	1.6 ~ 10	0.20	0.40	0.40
轻富营养	III	10 ~ 26	0.20	0.30	0.40
中富营养	IV	26 ~ 64	0.20	0.30	0.40
重富营养	V	64 ~ 160	0.25	0.30	0.40
超富营养	劣 V	> 160	0.20	0.25	0.30

3.2 营养盐控制标准值的确定

确定营养盐分级:参考现有的地表水环境质量标准(GB 3838-2002),考虑管理的便利性,以及国内目前的水体富营养化治理水平,为保证湖泊水域生态系统基本健康,并保证使用功能实现,对应国际公认的叶绿素含量分级,将湖泊营养盐控制标准分为六级:Ⅰ级,近似湖泊基准值,贫营养状态,主要适用

于国家自然保护区、农村分散式生活饮用水;Ⅱ级,中营养化状态,主要适用于集中式生活饮用水地表水源地一级保护区、珍稀水生生物栖息地、鱼虾类产场、仔稚幼鱼的索饵场等;Ⅲ级,轻度富营养状态,主要适用于集中式生活饮用水地表水源地二级保护区、鱼虾类越冬场、洄游通道、水产养殖区等渔业水域及游泳区;Ⅳ级,中度富营养化,主要适用于一般工业用水区及

人体非直接接触的娱乐用水区;Ⅴ级,重度富营养化,主要适用于农业灌溉用水及一般景观要求水域,Ⅵ级,超富营养状态,不具备水体生态功能.

确定营养盐控制标准:把所有监测数据中的叶绿素含量以国际上公认的叶绿素含量分级为基础,进行分级,再应用频率取值法反推计算对应的太湖富营养化控制标准.在计算过程中,统计计算 3 个频

率取值,分别是 25%、50%、75%. 25%反映了该级营养水平下水质较好的状态,50%反映了平均水平,75%反映了同级营养水平下水质相对较差的状况.通过对比分析,根据反退化政策,建议除贫营养水平外,其余均采用 50%的频率值,详见表 5.营养盐控制标准的六级分法,基本涵盖了目前太湖不同湖区,不同时段水质的总体情况.

表 5 太湖富营养化控制分级标准
Table 5 Eutrophicated graded control standard on Taihu Lake

营养分级	标准分级	叶绿素 a/mg·m ⁻³	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	SD/m
贫营养	I	< 1.6	0.6	0.03	0.70
中营养	II	1.6 ~ 10	1.7	0.06	0.40
轻富营养	III	10 ~ 26	2.2	0.09	0.30
中富营养	IV	26 ~ 64	3.2	0.12	0.30
重富营养	V	64 ~ 160	4.2	0.18	0.30
超富营养	劣 V	> 160	6.2	0.28	0.25

4 讨论

湖泊营养盐控制标准的制定过程要求科学、严谨和客观,而如何应用“标准”实施水质控制,即如何最终选择确定控制标准的具体值则具有阶段性特征并带有主观能动性.依据国外的经验,如美国《清洁水法》对全美的地表水污染控制做出了比较全面的规定,该法的立法目的是“恢复和维持国家水体的物理、化学和生物完整性”.为了实现这一目标,清洁水法中 303(c)部分要求各州、地区和授权部落的水质标准包含 3 部分内容:水体的指定功能、保护这些指定功能的水质基准和水质反退化政策^[14-15].因此,本研究以太湖为例,探讨制订湖泊营养物控制标准及其应用时,也是遵循水质功能、水质基准和水质反退化政策 3 个原则进行的.

4.1 水质反退化政策

依据反退化政策制订湖泊营养盐控制标准:借鉴美国的经验,本研究在以太湖为例制订湖泊营养物标准时,采取保证不允许恶化到低于现有状况的政策,即营养物控制标准不能劣于目前的水体营养物标准.尽管太湖已全面进入富营养化状态,但太湖是历经了几十年,特别是近二、三十年才演变成富营养化水体的,而且不同湖区的营养水平也不同.假设在太湖富营养化的演变过程中,不同年份、不同水域、不同采样点的水质对应着不同的水质分级标准.同时,设定湖泊富营养化分级以叶绿素 a 含量来代表,每一级别的叶绿素 a 含量对应的总氮、总磷、透明度等理化指标的监测数据样本量足以反映湖泊营

养状态的信息.在频率分布图上,本研究采用的是频率分布 50%的值,意味着选取的是富营养化控制指标值的平均水平,反映了该级营养水平对应的水质指标的平均值,这比较好地诠释和遵循了控制标准不得低于现有水质的制订原则.

4.2 遵循水质功能

美国根据水体的用途将其分为娱乐、渔业,水生生物栖息地、饮用水、农业和工业用水等功能.我国地表水环境质量标准(GB 3838-2002)依据地表水水域环境功能和保护目标,按功能高低依次划分为五类,太湖兼具饮用水源、航运、灌溉、旅游、娱乐、发电、渔业等多种功能.借鉴美国水体生态功能与我国地表水环境质量标准规定的地表水生态功能,本研究将太湖的营养水平分成六级,即贫营养(Ⅰ级)、中营养(Ⅱ级)、轻度富营养(Ⅲ级)、中度富营养化(Ⅳ级)、重度富营养(Ⅴ级)及超富营养(Ⅵ级).不同功能类别分别执行相应级别的标准值,同一水域兼有多类使用功能的,执行最高功能级别对应的标准值.实现水域功能与达到功能类别标准为同一含义.这和美国 EPA 的规定是比较吻合的,美国环保局根据水质管理的需要将水质功能分为现有功能和指定功能两类.现有功能是指水体现在所取得的功能,而且水质标准规定现有功能一旦取得,就不能被取消.指定功能则是水质标准规定的水体应该可以实现的功能,而不管现在的水质是否满足该指定功能.实际上,也可以将水体的指定功能理解为水质标准,即为水体水质设定的阶段目标.本研究选择的频率值为 50%,显示的是本级水平下水质的平均功能,因此较

好地结合了美国环保局在制订营养盐控制标准时采用的现有功能和指定功能的两大概念。

4.3 依据营养物基准

由于近二、三十年太湖水质恶化趋势明显加快, 因此依据太湖水体 1994 ~ 2005 年的监测数据, 计算水质指标的贫营养指标建议值是不准确的, 因为收集到的太湖 10 a 的数据中只有 3 组数据是贫营养状态的, 样本量太少(见表 6)。因此, 本研究在确定贫营养水平的 I 级控制指标时, 引用了太湖的基准值。

表 6 贫营养状态下 3 个监测点的监测数据
Table 6 Monitoring data of three spots in oligotrophic state

样点	监测年	监测月	水温/℃	高锰酸盐指数 /mg•L ⁻¹	总磷 /mg•L ⁻¹	总氮 /mg•L ⁻¹	叶绿素 a /mg•L ⁻¹	透明度/m
漫山	1994	1	6.6	3.2	0.070	0.72	0.000	0.55
平台山	1996	3	8.6	4.5	0.080	2.27	0.001	0.25
大浦口	1996	11	15.3	4.1	0.080	3.70	0.001	0.30

值采用国际公认的 1.6 mg•m⁻³。

5 结论

太湖属于我国东部平原湖区的典型浅水湖泊。遵照营养物控制标准制订的通用性、可能性及实用性原则, 考虑太湖自然环境条件和国家以及地区的社会、经济、技术等因素的基础, 本研究以太湖为例, 分析了湖泊营养盐控制标准的制订方法, 总结归纳为五步法。依据营养盐控制标准制订的五步法, 根据太湖近 10 年的监测资料, 综合分析湖泊营养状态评价方法和美国营养物标准制订方法, 以叶绿素含量的营养分级为基础, 应用频率取值法反推计算, 确定了太湖营养状态 6 个等级, 即贫营养、中营养、轻度富营养、中度富营养化、重度富营养及超富营养状态, 对应计算得出了六级富营养化控制标准。研究得到太湖富营养化的控制标准建议值, 叶绿素 a 分别是 < 1.6 mg•m⁻³、1.6 ~ 10 mg•m⁻³、10 ~ 26 mg•m⁻³、26 ~ 64 mg•m⁻³、64 ~ 160 mg•m⁻³、> 160 mg•m⁻³; 塞氏深度分别是: 0.7、0.4、0.3、0.3、0.3、0.25 m; 总磷分别是: 0.03、0.04、0.06、0.09、0.12、0.18 mg•L⁻¹; 总氮分别是: 0.6、1.7、2.2、3.2、4.2、6.2 mg•L⁻¹。由于不同湖泊环境条件差异很大, 该标准建议值是否适用于我国东部平原湖区的其他湖泊, 还需进一步通过该湖区其他湖泊资料进行验证。

营养物基准是指以保护人类健康和生态平衡为目的, 用可信的科学数据表示水中营养物质的允许浓度或能间接表示水中营养物浓度的相关理化和生物指标的数值。当水体处于基准值状态时, 应可直接饮用或稍作简单处理, 如煮沸即可饮用, 应不需要集中式饮用水处理。理论上营养物控制标准的 I 级应等于或略高于太湖营养物基准值, 研究表明太湖营养物基准值分别是总磷 0.03 mg/L、总氮 0.60 mg•L⁻¹、塞氏深度 0.70 m, 本研究叶绿素 a 的 I 级控制标准

参考文献:

[1] 《湖泊及流域学科发展战略研究》秘书组. 湖泊及流域科学研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2002, 14(4): 289-300.

[2] 国家环境保护总局科技标准司. 中国湖泊富营养化及其防治研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001. 23-28.

[3] 赵生才. 我国湖泊富营养化的发生机制与控制对策[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 138-140.

[4] 李世杰. 应重视湖泊科学的建设与发展[J]. 中国科学院院刊, 2006, 21(5): 399-405.

[5] 虞孝感, Josef Nipper, 燕乃玲. 从国际治湖经验探讨太湖富营养化的治理[J]. 地理学报, 2007, 62(9): 899-906.

[6] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.

[7] 李贵宝, 周怀东. 我国水环境标准化的发展[J]. 水利技术监督, 2003, 4: 1-3.

[8] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 水环境质量基准、标准与流域水污染物总量控制策略[J]. 环境科学研究, 2006, 19(3): 1-6.

[9] 李贵宝, 郝红, 张燕. 我国水环境质量标准的发展[J]. 水利技术监督, 2003, 3: 15-17.

[10] 操家顺, 张素英, 王超. 排污交易控制太湖磷污染应用研究[J]. 河海大学学报, 2005, 33(2): 157-161.

[11] 龚绍琦, 黄家柱, 李云梅, 等. 基于 GIS 下的太湖水质富营养化模糊综合评价[J]. 环境科学, 2005, 26(5): 34-37.

[12] 夏青, 陈艳卿, 刘宪兵. 水质基准与水质标准[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004.

[13] Gibson G, Carlson R, Simpson J, et al. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs[M]. Washington: Office of Water, Office of Science and Technology, 2000. 71-85.

[14] Office of Water. National strategy for the development of regional nutrient criteria[M]. Washington DC: USEPA, 1998. 35-41.

[15] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 289-302.