

水体营养物及其响应指标基准制定过程中建立参照状态的方法 ——以典型浅水湖泊太湖为例*

郑丙辉¹, 许秋瑾¹, 周保华^{1,2}, 张龙江³

(1: 中国环境科学研究院, 北京 100012)

(2: 济南大学城市发展学院, 济南 250002)

(3: 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘 要: 建立参照状态是水体营养物及其响应指标基准制订的关键性工作, 建立参照状态的方法主要有时间参考状态法、空间参考状态法、频率法、沉积物历史反演法和预测或外推模型法等. 以我国东部湖区典型水体太湖为例, 主要应用频率分析法建立了太湖营养物总氮、总磷及响应指标叶绿素 *a*、塞氏深度基准的参照状态, 并用时间参考状态法和沉积物历史反演法进行了总氮和总磷参照状态值的验证. 综合研究分析显示太湖营养物总磷、总氮的参照状态值应为 0.03mg/L、0.6mg/L; 响应指标叶绿素 *a*、塞氏深度的参照状态值应为 0.004mg/L、0.70m. 研究结果旨在为我国水体营养物及其响应指标基准、标准的研究与制订以及我国水体富营养化的控制提供理论和方法借鉴.

关键词: 营养物基准; 太湖; 参照状态

Building nutrient and its response indications reference state for criteria enactment: on the case of Lake Taihu, a typical shallow lake in eastern China

ZHENG Binghui¹, XU Qiuji¹, ZHOU Baohua^{1,2} & ZHANG Longjiang³

(1: *Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, P.R.China*)

(2: *School of City Development, University of Jinan, Jinan 250002, P.R.China*)

(3: *Nanjing Institute of Environment Science, Ministry of Environmental Protection of China, Nanjing 210042, P.R.China*)

Abstract: During enacting nutrients criteria, there are five main methods such as direct observation of temporal reference state, direction observation of spatial reference state, population distribution approach, paleolimnological reconstruction, forecast and extrapolate model approach. In this paper, population distribution approach was applied to build the nutrients criteria on the case of Lake Taihu, one of the typical shallow water bodies in eastern China. Then, direct observation of temporal reference state and paleolimnological reconstruction were applied to validate the reference state value of TN and TP. Results showed that the reference state value of TP, TN in Lake Taihu was 0.03mg/L, 0.07mg/L, respectively, and the response indication of Chlorophyll-*a* and Sacci disk depth was 0.004mg/L and 0.70m, respectively. This study would offer the experience for enacting the criteria and standard in China, also would provide the theoretic support for eutrophication control in China.

Keywords: Nutrients criteria; Lake Taihu; reference state

水质基准是指“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的水中的各种污染物质的允许浓度”^[1], 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. 营养物基准制定过程, 建立

* 国家973课题“湖泊水环境基准理论与方法体系”(2008CB418206)和国际科技合作项目“三峡库区水环境特征与支流富营养化机制研究”项目(2007DFA90510)联合资助. 2008-03-19收稿; 2008-06-03收修稿. 郑丙辉, 男, 1963年生, 博士, 研究员; E-mail: zhengbh@craes.org.cn.

参照状态至关重要. 所谓参照状态, 即每一水体类型的本底值, 它可以作为比较的参照标准. 营养物基准指标如总磷、总氮、叶绿素 a 等有关的理想的参考状态应为没有人类干扰和污染的水体条件的代表浓度. 但是, 水体基本上都受到了人类开发活动的一定程度的影响, 事实上我们很难得到这样的自然本底值. 因此, 需要通过特定的方法帮助建立参照状态, 参照状态值实际上代表影响最小的条件值. 在营养物基准研究方面, 美国积累了大量研究和实践的成果, 建立了营养物参照状态的时间参考状态法、空间参考状态法、频率法、沉积物历史反演法和预测或外推模型法等方法^[2-3]. 本文借鉴国外研究的经验, 以太湖为例, 主要应用频率分析法建立太湖营养物的参照状态, 并用时间参考状态法和沉积物反演法进行了校验, 旨在为我国水体营养物及其响应指标基准、标准的研究与制订以及我国水体富营养化控制提供理论和方法借鉴.

1 基础数据及研究方法

1.1 数据来源

数据来源于环境保护部太湖流域环境监测网中心站. 根据太湖流域环境监测网中心站的采样规范, 全太湖共布置 20 个采样点, 采样点分布见图 1. 采样点较均匀地覆盖了太湖的整个湖区, 因此可全面地反应太湖水质的空间分布状况. 所用数据主要为系统性、完整性较好的 1987–1988 及 1994–2005 年的监测数据. 每年奇数月采样监测 1 次, 一年监测 6 次. 监测的指标包括叶绿素 a(Chl.a)、总氮(TN)、总磷(TP)、塞氏深度(SD).

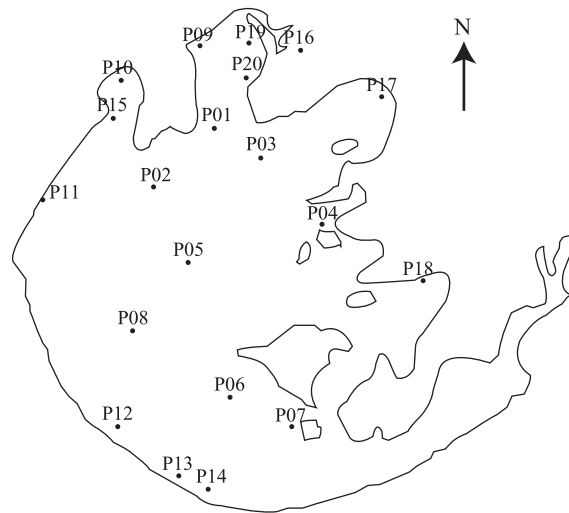


图 1 太湖检测取样点分布(P01:拖山; P02:椒山; P03:乌龟山; P04:漫山; P05:平台山; P06:四号灯标; P07:泽山; P08:大雷山; P09:閘江口; P10:百渚港; P11:大浦口; P12:新塘港; P13:小梅口; P14:新港口; P15:沙塘港; P16:五里湖心; P17:沙墩港; P18:胥口; P19:犍山口; P20:小湾里)

Fig.1 Sampling sites in Lake Taihu

1.2 研究方法

根据国外的研究经验, 当在生态区域中存在没有受人类干扰或干扰很小的水体或水体历史上水质很好, 且有调查和监测数据时, 可采用时间或空间参照状态法; 当能收集和采集到生态区域中几乎所有水体的水质数据或同一水体多位点长期监测数据时, 可采用频率法; 如果缺乏历史数据, 水体流动性差, 沉积物很少扰动的水体, 可考虑采用沉积物历史反演法, 对于浅水湖泊, 由于扰动相对大, 应只可作为其他方法的参考验证; 当一个给定的水体或区域很少或没有可利用的数据时, 可考虑采用预测或外推模型法. 根据目前太湖的实际情况和数据收集情况, 本文采用了频率分析法, 并用时间参照状态法和沉积物反演法进行校验.

1.2.1 频率法 频率法的重要假设是在水体类群中至少有一些是良好的水体或同一水体多个采样点多年监

测数据中至少有一些是良好水质. 在整个区域中进行同类水体或同一水体多个采样点的数据收集和采集工作, 作出相应的水质频率累积分布图. 每一选取的营养物基准变量的确定, 一般用每一变量分布的最好分位值或下 25 百分点作为参考数值. 如果从区域中所有同类水体的最好水质或影响最小的同类水体群中选取参照状态, 因为这些参考水体被公认为是一种较为理想的状态, 所以可选取上百分点, 美国国家环境保护局(USEPA)一般推荐上第 25 百分点, 代表参考水体分布的营养浓度较高, 作为参考条件是合理的. 如果从区域中所有同类水体随机取样或选取所有同类水体或同一水体所有监测数据作为参考条件, 这种情况下, 样品中肯定包含了一些退化的水体和不良的水质, 所以选取的百分点应该是下百分位点. 这种选择方法在符合自然参考水体的数量一般很少时, 或者水体受经济、社会发展影响颇大时非常有用. 由于本文使用的数据主要是近二三十年的数据, 太湖已遭受不同程度的污染, 因此采用了下百分位点.

1.2.2 时间参照状态法 时间参照状态法的原理是基于我国大多数水体历史上水质很好, 水质污染严重是主要由于近二三十年社会经济高速发展, 城市化进程导致的. 基于这样的原因, 那么水体良好水质的历史数据, 应可以作为参照状态.

1.2.3 沉积物反演法 水体沉积物中遗留有许多有机种类. 遗留物的一部分能抵抗腐烂, 变成了水体中永久的生命生物记录. 通过许多水体过去的生物区系与现在的生物区系对比, 可以推测过去水体的环境条件. 通过沉积物特殊成分的历史反演来确定水体参照条件就是利用这个原理. 利用沉积物反演的建立参照条件一般采取两个步骤, 一是制定预测模型, 二是使用模型推算环境变量, 建立参照条件. 具体第一步是确立物种与环境条件是否足够相关, 以允许制定预测模型来推算环境条件. 目前, 这个工作使用 CCA 分析技术(Canonical Correspondence Analysis)^[2-4]. CCA 分析技术是一种按照环境梯度排序的等级分类技术. 与线性分析模型不同, 它不假设物种丰富度同环境梯度是线性响应关系, 而是假设物种同梯度有某种响应, 如物种的丰富度在环境变量的适宜值的两边波动^[4], 假设每一物种有一个营养物、温度、光、pH 等最适宜的环境. CCA 能识别环境变量同物种结构的相关程度, 因而是制定预测模型的合适方法. 环境变量(如营养物)预测值的模型用权重平均回归(weighted averaging regression)来建立^[5]. 程序 WACALIB^[6]是进行这些计算的有效方法. 第二步是利用模型推算环境变量的最适宜值. 某一区域每一水体类型的适宜条件是这个类型的环境变量的平均值, 权重由类型的丰富度确定^[5].

1.3 营养物指标及数据分析方法

从世界各个主要发达国家与地区的湖库营养物及响应指标基准、标准制订的统计看, 总氮、总磷和叶绿素 a 的出现率是 100%, 美国及欧洲一些国家选取了塞氏深度作为第四个指标. 因此, 参考国外经验^[7-8], 本文确定营养物指标为总磷、总氮, 营养物的响应指标为塞氏深度、叶绿素 a. 利用 SPSS 软件进行统计分析和制作水质频率分布图.

2 结果与分析

在利用频率分析法建立参照状态的过程中, 考虑目前是运用太湖所有能收集到的数据, 而且自 20 世纪 80 年代以来, 太湖流域经济发展速度快, 水污染日趋严重, 因此采用下第 25 百分点^[9]. 利用目前能收集到的太湖流域环境监测网中心站的数据进行水质频率分布综合分析, 按 USEPA 推荐的下第 25 百分点, 那么总磷的参照状态是 0.05mg/L、总氮是 1.21mg/L、叶绿素是 0.008mg/L. 塞氏深度应采用上第 25 百分点, 因为高的塞氏转盘读数同较高的水质有关, 塞氏深度需要将数据从高到低的排列, 按照这样的原则, 塞氏深度是 0.40m(表 1、图 2).

由于无论是哪种方法, 参考水体分布的上第 25 百分点和来自代表性取样分布的下第 25 百分点都是一般的建议. 观测的实际分布和内在区域水质知识也是选择阈值点的重要决定因素. 如果多数水质的监测数据都受到了较大的污染影响, 那么应选取上或下第 5 百分点, 以期恢复到以前大概的自然条件^[7,9]. 按此原则, 我们用频率分析法, 总磷、总氮和叶绿素 a 选取下第 5 百分点, 塞氏深度选取上第 5 百分点, 总磷的参照状态是 0.03mg/L、总氮是 0.60mg/L、叶绿素是 0.004mg/L、塞氏深度是 0.70m(表 1、图 3).

通过时间状态参考法的分析, 我们发现第 5 百分点比第 25 百分点的结果应更可信. 太湖水质观测数据有据可查的是 20 世纪 60 年代中国科学院南京地理研究所联合多家单位对太湖进行的一次全面系统调

查, 调查结果显示, 当时总氮与总磷的浓度分别在 0.07–0.15mg/L 和 0.01–0.05mg/L 之间, 太湖基本上不存在水质污染^[10]. 若取中间值, 那么太湖参照状态的总磷值为 0.03mg/L, 总氮为 0.11mg/L. 经过比较分析, 发现频率法第 5 百分点的研究所得的参照状态值和利用 60 年代的数据进行分析得到总磷的参照状态值是一样的, 均是 0.03mg/L, 但总氮相差比较大, 利用 60 年代数据直接观测分析得到的总氮参照状态值为 0.07–0.15mg/L(取中间值为 0.11mg/L), 用频率综合分析法得到的参照值为 0.6mg/L. 综合考虑国际上的富营养化标准、我国的水质标准以及太湖营养物的实际情况和希望严格制订基准、标准, 尽可能指导湖泊恢复良好, 本研究确定总氮的参考状态值以频率法为准, 为 0.6mg/L.

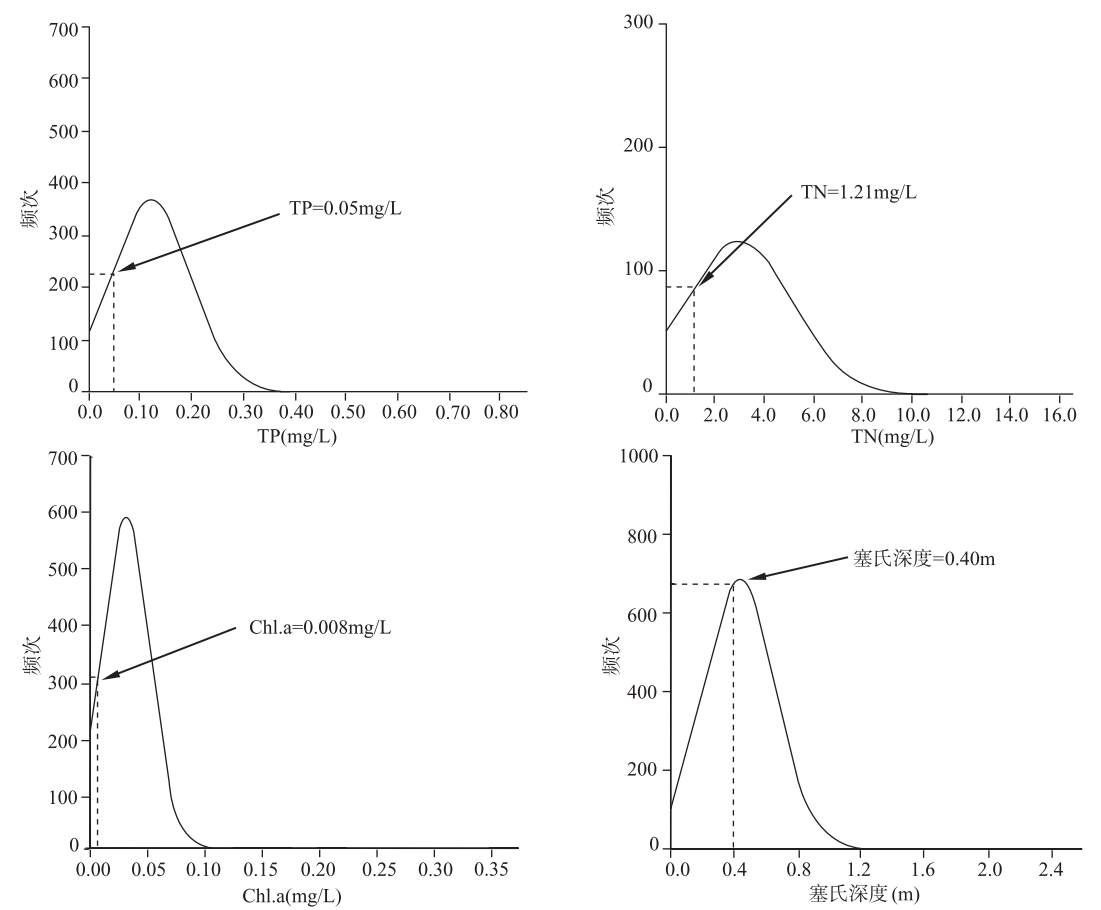


图 2 太湖营养物参照状态值(上、下第 25 个百分点)
Fig.2 Establishing reference condition values of the trophic state for Lake Taihu
(The upper or lower 25th percentile)

表 1 确定太湖营养盐参照状态值

Tab.1 Establishing reference condition values of the trophic state for Lake Taihu

指标	下第 25 百分点	下第 5 百分点	上第 25 百分点	上第 5 百分点
TN(mg/L)	1.21	0.60	—	—
TP(mg/L)	0.05	0.03	—	—
叶绿素 a (mg/L)	0.008	0.004	—	—
塞氏深度(m)	—	—	0.40	0.70

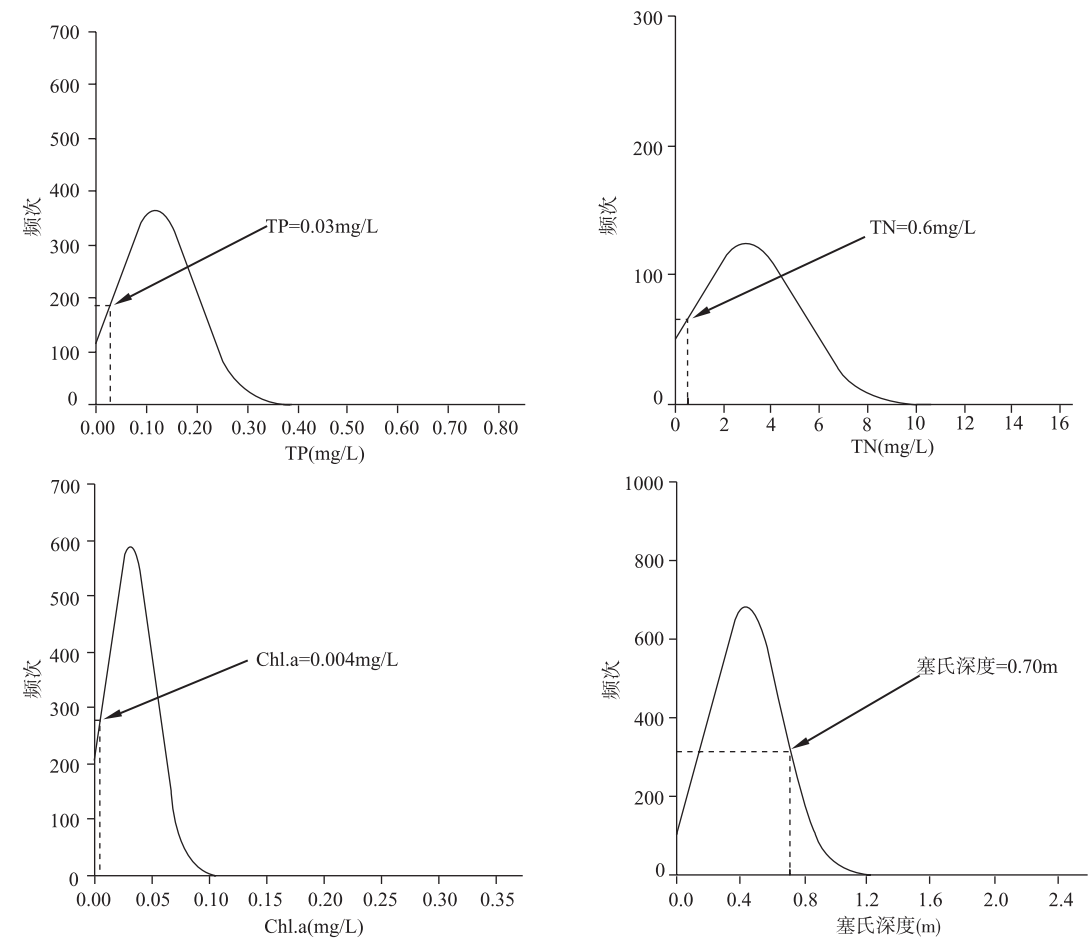


图 3 太湖营养物参照状态值(上、下第 5 个百分点)
Fig.3 Establishing reference condition values of the trophic state for Lake Taihu
(The upper or lower 5th percentile)

太湖总磷的参照状态值为0.03mg/L，可利用太湖沉积物历史反演法进行验证。水体沉积物中遗留有许多有机种类。遗留物的一部分能抵抗腐烂，变成了水体中永久的生命生物记录。通过许多水体过去的生物区系与现在的生物区系对比，可以推测过去水体的环境条件。通过沉积物特殊成分的历史反演来确定水体参照状态就是利用这个原理。沉积物中有几种生物物种，如硅藻属(diatoms)、苔藓虫(bryozoans)、水蚤类(cladocerans)等已在沉积物反演中得到应用。这些种类中，硅藻属的细胞膜在推算过去的化学条件中经常使用，也是最为成功的^[5]。这些保留的硅藻属提供了水体中硅藻属聚居体(diatom assemblage)的综合记录。水体沉积物表层1-2cm样品含有最近1-3年的硅藻属代表性样品。如果水体沉积物没有或很少受到干扰，那么在水体沉积物保存的硅藻属是水体历史的综合反应者^[2,5]。羊向东等利用硅藻进行了长江中下游湖群(包括太湖在内的49个湖泊)总磷的沉积物反演，研究结果显示1950-1970年间很多长江中下游湖泊由草型向藻型发生了转换，这时期总磷的值在0.08-0.11mg/L之间，这预示总磷的参照状态值应小于0.08mg/L。羊向东等利用这49个湖泊的数据资料设计了WA模型，并重建了太湖的历史总磷浓度，研究结果认为1920年前太湖的总磷浓度在0.043-0.062之间，持续的富营养状态出现在1950年以后。太湖的沉积物历史反演资料为太湖参照状态值定为0.03mg/L提供了佐证^[11]。在太湖富营养化沉积物硅藻记录的研究中表明，太湖在1980年前，总磷浓度变化很小，大约是0.05mg/L，1980年后，总磷急剧升高，超过

了0.10mg/L. 这些研究结果为太湖总磷参照状态值定为0.03mg/L提供了依据和验证^[12].

综合上述研究与分析, 初步确定太湖营养物参照状态值如表 2, 研究结果建议太湖营养物总磷、总氮的参照状态值应为 0.03mg/L、0.6mg/L、响应指标叶绿素 a、塞氏深度的参照状态值为 0.004mg/L、0.70m.

表 2 太湖营养物和响应指标的参照状态值
Tab.2 Reference condition values for Lake Taihu nutrient

指标		时间参照 状态法	频率法		沉积物 历史反演法	建议值
			百分位点(25)	百分位点(5)		
营养物指标	TN(mg/L)	0.07	1.21	0.60	0.05	0.60
	TP(mg/L)	0.03	0.05	0.03		0.03
响应指标	叶绿素 a(mg/L)	—	0.008	0.004		0.004
	塞氏深度(m)	—	0.40	0.70		0.70

3 参考文献

[1] 中国大百科全书总编辑委员会《环境科学》编辑委员会. 中国大百科全书·环境科学卷. 北京: 中国大百科全书出版社, 1983: 224.

[2] Dixit SS, Smol JP, Kingston JC *et al.* Diatoms: Powerful indicators of environmental change. *Environmental Science and Technology*, 1992, **26**: 22-33.

[3] Jongman RHG, ter Braak CJF, van Tongeren OFR. Data analysis in community and landscape ecology. Wageningen: Pudoc, 1987: 299.

[4] ter Braak CJF. Unimodal models to relate species to environment[Doctoral thesis]. University of Wageningen, 1987: 152.

[5] Charles DF, Smol JP, Engstrom DR. Paleolimnological approaches to biological monitoring. In: Loeb S, Spacie A eds. Biological monitoring of aquatic systems. Boca Raton: CRC Press, 1994: 233-293.

[6] Line JM, ter Braak CJF, Birks HJB. WACALIB version 3.3—a computer program to reconstruct environmental variables from fossil assemblages by weighted averaging and to derive sample-specific errors of prediction. *Journal of Paleolimnology*, 1994: **10**: 147-152.

[7] 夏 青, 陈艳卿, 刘宪兵. 水质基准与水质标准. 北京: 中国标准出版社, 2004: 362-365.

[8] England, Wales EA. Aquatic eutrophication in England and Wales. A proposed management strategy. Consultative Report. Environmental Issues Series. Britol: Environment Agency, 1998: 19-24.

[9] Office of Water, Office of Science and Technology. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual—Lakes and Reservoirs. Washington: USEPA-822-B00-001 2000.

[10] 中国科学院南京地理研究所. 太湖综合调查报告. 北京: 科学出版社, 1965: 37.

[11] Yang XD, Anderson NJ, Dong XH *et al.* Diatom-based total phosphorous transfer function in shallow lakes of Yangtze floodplain, Southeastern China. *Freshwater Biology*, 2008, **53**: 1273-1290.

[12] Dong XH, Bennion H, Battarbee R *et al.* Tracking eutrophication in Lake Taihu using the diatom record: potential and problems. *J Paleolimnol*, 2008, **40**: 413-429.