

湖泊营养物基准的制定方法研究进展

霍守亮¹, 陈奇^{1,2}, 席北斗^{1*}, 郭旭晶¹, 陈艳卿¹, 刘鸿亮¹

1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 北京化工大学, 北京 100029

摘要: 系统论述了国外湖泊营养物基准制定程序和技术方法, 重点分析了国外营养物基准指标的选取和确定湖泊营养参照状态的方法, 并分析了其适用性和可行性。湖泊营养物基准指标的选取要综合考虑富营养化控制关键因子和不同分区湖泊区域差异性, 所选指标要具有相对稳定、因地制宜、早期预警等特点。湖泊参照状态的确定主要包括调查数据和历史数据的统计分析、模型预测和推断、古湖沼学重建等方法。统计学方法充分利用历史及现状的实测水质和生物数据, 保证制定的基准适用于大多数湖泊, 对于历史监测资料缺乏或污染严重的湖泊, 该方法确定参照状态较困难; 模型预测和推断方法用于受人类影响较严重的湖泊参照状态确定, 但也需要大量数据进行校准和验证; 古湖沼学重建法利用湖泊沉积重建湖泊自然营养本底和定量恢复历史时期湖泊营养状态演化序列, 进而推导湖泊参照状态, 需要复杂的数据分析和专家判断, 同时也难以适用于沉积物受扰动较大的浅水湖泊。我国的大部分湖泊普遍受人类影响较大, 历史数据稀缺, 不同分区湖泊的差异性显著, 针对国外营养物基准制定方法优缺点, 需要加以优化改进, 建立我国完善的湖泊营养物基准制定方法体系, 指导我国湖泊营养物基准的制定。

关键词: 营养物基准; 基准制定方法; 参照状态; 营养物指标

中图分类号: X132

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0743-06

营养物是湖泊水生生物和健康生态系统所必需的, 但是营养物过量会引起湖泊的富营养化, 导致有害藻类和植物过度生长、溶解氧含量下降、水体混浊、物种和生物多样性减少等一系列问题^[1]。湖泊营养物基准是湖泊富营养化控制标准的理论基础和科学依据, 一些发达国家已经制定或正在制定地表水的营养物基准。与发达国家相比, 我国水质基准特别是湖泊营养物基准研究极为薄弱, 主要参考国外的相关基准值, 但由于水生生物区系具有地域性, 代表性物种不同, 其它国家的水质基准不能够完全反映中国的水生生物保护的要求, 所以如果参考其它国家的水质基准来制定我国的水质标准, 将会降低我国水质标准的科学性, 导致保护不够或过分保护的可能性^[2]。

美国 1998 年制定了区域营养物基准的国家战略, 此后八年先后编制完成了湖泊/水库 (2000 年 4 月)、河口海岸 (2001 年 10 月)、河流 (2006 年 7 月) 和湿地 (2006 年 12 月草案) 的营养物基准技术指南, 并首先制定一级分区湖泊营养物基准, 各州根据营养物基准技术指南陆续制定本州的营养物基准。欧洲各国也在分别制定湖泊营养物基准。美国在制定湖泊营养物基准中, 首先建立区域技术协作组, 创建合适的数据库, 划分营养物生态分区, 同时对湖泊进行分类 (含地理性与非地理性

分类), 然后对各生态分区及湖泊/水库类型筛选候选变量、确定指标, 建立参照状态, 最后通过专家评价和考虑保护特定用途与对下游的影响等因素确定分区的湖泊营养物基准^{[3]18}。营养物基准制定的过程中最为核心的内容是确定生态分区的营养物指标和参照状态, 本文综述了国外在湖泊营养物基准制定过程中指标的选取和参照状态的确定方法, 分析了我国在营养物制定过程中存在的问题和解决方法。

1 营养物指标的选取

湖泊的营养物基准指标主要包括营养物变量 (磷、氮)、生物学变量 (有机碳、叶绿素 a、透明度、溶解氧、大型植物、生物群落结构) 和流域特征 (土地利用) 等^{[3]71}。氮、磷等营养物质对水生生物的危害主要在于促进藻类的生长而暴发水华, 从而导致水生生物的死亡和水生态系统的破坏。评价和控制富营养化生态危害的主要指标不是毒理指标, 或指标离毒性阈值很远, 防止水体富营养化的营养物基准主要是基于生态学原理和方法来制定的^{[4]75}。能够反映湖泊营养状态的变量很多, 但只有部分指标可用于评价营养状态, 不同国家和地区所选取的指标也各不相同^[6]。美国环保局 (2000) 推荐采用原因变量 (TP、TN) 和反应变量 (Chl-a、SD), 但允许州或部落也可根据适用性对信息进行

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX07106-001); 国家重点基础研究发展计划项目 (2008CB418206)

作者简介: 霍守亮(1981 年生), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事水质基准和污染物迁移转化研究。E-mail: huoshouliang@126.com

*通讯作者, E-mail: xibeiou@263.net

收稿日期: 2009-01-12

筛选, 将其他变量增加到基准指标变量中^{[3]71, [5]}。

当前普遍认为在气候潮湿的地区藻类的增长趋于磷限制, 因为在自然条件下该营养物最可能限制植物的生长。因此, 长期以来对磷的研究比较多, 湖泊中磷浓度的高低常常被用来衡量一个湖泊生产力的^[7]。由于系统中大部分磷是颗粒态的, 而且多半会在水体中以初级生产者能利用的形态进行再循环, 所以常规分析采用总磷(TP), 包含所有有机的和无机的、可滤过的和颗粒状的磷^{[8]47}。在许多磷限制的湖泊中, 总磷和叶绿素水平通常呈简单的线性关系。

氮是藻类生长的另一种重要的基本营养元素, 氮能被蓝藻等生物直接从空气中吸收, 且循环比磷循环更为复杂, 可从一种形态转化为另一种形态, 因此湖泊水体的氮含量主要以总氮(TN)表示^[9]。总氮包括了水中所有硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、总氨氮和总有机氮。美国明尼苏达州考虑州内大部分湖泊均为磷限制, 只制定了总磷浓度、叶绿素a和塞氏透明度的基准, 而无氮的基准^{[8]62-63}。

水体富营养化过程与氮磷比密切相关, 因为碳输入比与氮和磷的供给比相连^[10]。一般认为, 当氮磷重量比大于10:1时, 磷可以考虑为藻类增长的限制因素^[11]。日本湖泊学家板本曾研究指出, 当湖水的总氮和总磷浓度的比值在10:1—25:1的范围时, 藻类生长与氮、磷浓度存在着直线^[12]。

丹麦著名生态学家 Jørgensen 早在1983年便指出浮游藻类的生长是富营养化的关键过程。叶绿素a是植物光合作用中的主要色素, 能很好地反应环境对营养富集的敏感程度, 最常用作藻类生物量的评价指标^[13]。营养物富集的响应是复杂的, 至今很少有研究能提供输入和响应之间关联的确切证据。需要加强对营养物输入和浮游植物响应的季节影响、不同水体的自然敏感度和环境差异等的关注^[14-15]。在有些湖泊中, 总磷不是影响藻类或生物量的重要因素(如无机浊度高或流速高的湖泊), 叶绿素a会是最为重要的指标。例如, 弗吉尼亚州将叶绿素a作为确定营养物基准的基础, 亚利桑那州也选择其浓度作为浮游植物主导的水体和大型植物主导的水体的最主要指标^{[8]69, 76-77}。

在一般的湖泊中, 透明度的变化主要源于水体中悬浮的藻类数量的差异, 能够很好地表征湖泊的富营养化程度。Smeltzer等(1989)发现透明度即塞氏盘深度是从统计学角度确定营养状态明显趋势的最好变量, 因为它采样频率高且费用较少。EPA建议采用夏季透明度来评估富营养化, 并明确指出用塞氏透明度指示湖库的营养状态, 但是不适用于

着色或有无机悬浮性固体的水体^{[3]77}。

营养状态指标(TSIs)是描述水体营养状态的一项直观的指标, 最常用的是建立在塞氏透明度、总磷和叶绿素a之间相互关系上的Carlson TSI。全球大多数湖泊的TSI值都落在0~100范围内, 接近于0表示水体处于贫营养极端, 而接近100则表示超营养状态^{[8]49-51, [16]}。

Ludovisi与Poletti(2003)提出, 热力学指标可作为湖泊生态系统发展状况的生态指示。对意大利Trasimeno湖的研究表明, 小型浅水湖的营养状态与Carlson TSI指标、基于磷负荷的Vollenweider富营养化模型及Hillbrich-Ilkowska方法得到的结果均一致, 并发现湖泊平均水深在决定营养结构和状态的变化上充当重要的角色^[17-18]。另外一些研究发现COD与富营养化存在较好的相关性, 但关系尚不明确, DO在富营养化发生过程中一直发生动态变化, 也很难作为预警性指标^[19]。

综上所述, 湖泊营养物基准指标的确定应遵循几个原则:(1)指标不易受其它外界因素影响, 相对稳定, 如不同形态氮容易相互转化, 宜采用相对稳定的指标TN表示;(2)分区湖泊富营养化控制的关键指标, 要因地制宜, 不同分区的营养区基准指标可以不同;(3)所选指标与藻类生长有明确的相关关系;(4)具有湖泊发生富营养化的早期预警功能, 为湖泊富营养化控制提供依据。

2 确定分区湖泊参照状态的方法

参照状态是指“受影响最小的状态或认为可达到的最佳状态”, 提供着决定随时间推移由人类引起的湖泊变化的基线, 若没有分区湖泊的参照状态, 则很难得出湖泊现状及未来潜在变化受人类影响的程度^{[14]5}。美国和欧洲在确定湖泊参照状态的方法基本类似, 主要包括调查数据和历史数据的统计分析、模型预测和推断、古湖沼学重建和专家判断, 方法都各有优缺点^{[3]85, [20-21]}。

2.1 统计学方法

U.S.EPA指南中首推统计学方法, 即利用生态分区内收集到的湖泊历史和现状的大量数据进行统计分析确定营养物参照状态。该方法分为参照湖泊法(reference lake approach)和湖泊群体分布法(lake population distribution approach)两类^{[3]86-88, [20]12}。首先通过分析生态分区湖泊受外界影响水平, 确定参照湖泊的条件, 选出分区中的参照湖泊, 即未受人类影响或受人类影响非常小且维持最佳用途的湖泊, 可代表该地区自然生物学的、物理的和化学的完整性^[22]。欧洲WFD-CIS中建议湖泊参照状态可以有较小的波动范围, 这意味着人类影响是允许的, 只要没有或只有很小的生态影响^{[20]6[23]16-17}。

统计学方法的优点是充分利用历史及现状的实测水质和生物数据, 保证制定的基准使大多数湖泊在无大的污染条件下不发生富营养化^{[4]78}。

参照湖泊法是利用生态分区中的参照湖泊基准指标的中值(也有采用平均值)的频率分布的上25%点为该分区湖泊的参照状态, 因为这个水平最大地保护区域自然营养湖泊类型的多样性^{[3]23-24}。一般要求生态分区内参照湖泊占全体湖泊的十分之一以上, 需要考虑土地利用数据和流域的可视化调查, 要求流域内有种植面积或城市化面积不超过20%, 不和主要排污管或海岸线直接联系, 没有明显的内源(如: 浅水湖泊沉积物的悬浮, 或存在大量的高密度的挺水植物群), 更适用于深水湖泊区^{[3]87, [23]52-53}。

此外, 在工业化世界的大多数国家与地区, 由于土地利用和到处存在的人类活动及氮的大气沉降, 未受污染的参照点实际上是不存在的, 该法的适用范围受限^[24-26]。在发达国家, 也因缺少涵盖一系列气候条件和流域大小未受污染的取样站点而使流域营养物的自然本底浓度的确定受阻。Smith等认为, 任何使用开发较重地区的参照点数据来确定水体营养物自然本底状况的方法, 必须包含对人为来源的校正^[25]。

群体分布法是当参照湖泊数量不足时, 选择区域内全体湖泊最好的四分之一(即频率分布的下25%)作为营养物基准参照状态。U.S.EPA指南(2000)指明两种方法确定的基准值结果相近。美国在确定全国14个一级分区的参照状态时将两种结合起来使用。然而, 欧洲REFCOND指南不支持该方法, 但认为在农业地区的低地可能不失为一种实用的方法^{[20]12}。实际上, 选择参照湖泊指标变量的75%或所有湖泊指标变量的25%是假定的, 即参照湖泊和所有湖泊指标变量的频率分布互相存在着特殊的关系。蒙大纳州环境质量部(MT DEQ)研究发现, 所有湖泊指标变量的频率分布的25%处营养物浓度可能表现出保护过度或保护不够的基准, 参考湖泊指标变量频率分布的75%的营养物水平可能与所有湖泊指标变量的频率分布的4%~97%相当, 即其它百分点也可能是合理的^[21]。

U.S.EPA声明具体的百分点只是一个建议, 对于各个区域应当根据数据的实际分布来选择具体阈值或百分点, 如三等分方法。三分法的样本为分区内所有的湖泊, 数据中的最好的三分之一作为受影响很小的水体, 这三分之一数据的50%点(中值)作为该分区湖泊的参照状态, 该方法适合受人类影响不大的区域。堪萨斯州将该法作为确定湖泊和水库的参照状态采用的三种方法之一^[27]。

利用湖泊监测站点的原始数据来建立参照状态最为合适, 但是许多湖泊的历史监测资料不齐全或无法获得, 为参照状态的确定带来极大困难, 因此需要运用多种方法来确定参照状态。在美国各州及欧洲各国建立参照状态制定基准时, 普遍将数学统计与模型回归相结合^{[8]58-79, [20], [28]5-7}。Dodds与Oakes(2004)提出通过协方差分析量化区域变化的方法来确定营养物参照浓度, 然后建立多重线性回归模型^[26]。

2.2 模型预测和推断

在许多地区, 人类对湖泊流域自然环境的影响已经经历了很长的时期, 利用调查数据、专家意见或历史数据难以建立湖泊的参照状态^[5]。模型预测无论在指标选择还是参照状态确定上都有广泛利用。虽然U.S.EPA推荐采用统计学的方法, 但是各州在具体建立参照状态时, 几乎都涉及和借助了回归模型方法^{[8]58-79, [28]5-7}。

欧洲用于确定参照状态的模型方法可以归纳为2种方法:(1)利用大量数据建立可靠的压力-响应关系, 建立拟合曲线, 通过推断低压力水平条件下的压力-响应关系来确定湖泊的参照状态。(2)利用响应和预测变量之间内在联系的信息建立模型确定参照状态, 其中预测变量为独立的且不受人类活动影响的变量(如地理变量)。前一种方法的主要不足是参照状态外推常常在已知数据/关系之外, 后一种方法的优点是允许有自然环境梯度。模型法需要大量数据、校准和验证, 需要的费用较高^{[20]13, [29]}。

U.S.EPA推荐两种模型方法: 一是土壤形态指数法(MEI), 即湖深-溶解性固体指数, 是指湖水中总可溶性固体与湖泊平均深度之比, 用于预测参照状态下的磷浓度, 但是需要用参照湖泊数据进行校准和验证; 二是总量平衡模型法, 虽然该模型本身不能建立参照状态, 但可利用进入湖泊的负荷和湖泊的水文条件来估测营养物的浓度, 从而用于估计水体在受人类干扰前可能的状态^{[3]90-91}。

Paul和Gerritsen等利用佛罗里达州所有可用的湖泊数据, 对TP、TN与湖泊营养条件指标TLCI^[30](logSD与logChl-a的组合)进行了局部回归, 得到的参照湖泊化学指标值比统计学分布直接得出的值偏高(除了碱性色深湖TP浓度偏低), 可能是因为不同湖泊营养物的生物响应各异。同时发现叶绿素和透明度的多重线性回归模型可以用于预测叶绿素的参照状态, 和统计学方法直接得到的参照湖泊叶绿素和透明度的参照状态相似, 营养盐和叶绿素的等高线图预测的参照湖泊叶绿素浓度范围与观测的中值或均值相等

[28]13-24。Dodds 等基于外推法回归预测了堪萨斯州湖泊没有人类影响的水质状态, 根据流域特征, 建立流域内人类影响和营养物浓度的回归模型, 估算出流域没有人类影响时的营养物浓度, 从而确定营养物的参照状态^[27]。模型推断法对生态分区湖泊的环境条件要求不高, 因此可用于流域受人类影响较严重的湖泊的参照状态确定。

2.3 古湖沼学重建

古湖沼学重建法主要根据从沉积物泥芯的考查中得到的如硅藻或摇蚊等化石残骸和水质(主要为总磷、pH 和温度)之间的较强的相关关系推断过去状态^{[20]12-13, [31]}。首先运用硅藻预测模型(转换函数)对环境变量和营养状态进行推断, 然后利用其他信息(如: 纹泥、已知的污染事件、放射性同位素、花粉)对沉积物泥芯进行校准, 从而定量恢复历史时期湖泊营养状态演化序列^{[3]88-90}。相关指标应用于湖泊营养状态演化方面的研究始于 20 世纪 60 年代, 如 Stockner 和 Benson (1967) 应用硅藻类别的 A/C 比, 成功恢复了美国西雅图华盛顿湖近代营养状况演化历史, Leavitt 等^[32] (1994) 在加拿大 227 号湖泊进行了大量的试验论证沉积物中古营养指标的准确性问题, Wetzel 等 (2001) 利用色素指标恢复了美国印第安纳州 Pretty 湖营养状况演化^[33-34]。该法的优点是采样站点明确, 即不需要有参照湖泊, 但需要大量数据库的统计模型和某时期的沉积物泥芯样本。沉积物中有机物的保存通常是贫乏的, 而且残骸只限制存在于少数有机群中, 同时古湖沼学方法也需要复杂的数据分析和专家解释^{[20]13}。

目前, 古湖沼学方法定义湖泊参照状态的研究还不够系统, 只在部分地区有使用。科学的确定参照点位置、硅藻化石有限的生物组合、营养物参照值的确定等问题还有待解决, 需要进一步的研究^[35]。

2.4 历史数据和专家判断

利用湖泊的历史监测数据建立参照状态作用有限, 湖泊在 20 世纪受人类影响严重且发生明显的环境变化之前, 调查和监测数据很少, 很少有记录追溯到可严格认为是“参照”状态的状态。即使历史数据存在, 但它们经常采用不同的方法采集样品和分析, 导致与近年的数据相比存在可疑, 而且数据的质量可能低劣或未知^{[20]12}。

专家判断结合了历史数据和现今的结构与功能, 但由于专家判断常常是对参照状态叙述性的表达, 可能会引入主观性或偏见, 确定的值也常常是静态的, 不包含动力学和与自然生态系统相关的内在可变性。因此该法不能单独使用, 但与其他方法

结合时能得出有力的结果^{[20]13, [21]}。

确定湖泊营养物水平的参照状态没有最佳方法, 只有各生态区最适合的方法。用哪种方法确定参照状态的确定取决于该类型可用点位的质量: (1) 在未受干扰或几乎未受干扰的状态较多的地方, 首选有效的参照湖泊法; (2) 如果被降级的状态较多, 则首选方法是建立营养盐-生态响应关系的模型; (3) 专家意见作为最后的手段, 且应伴随可接受的确认程序。研究发现, 不同方法确定的结果之间存在细微的差异, 每种方法各有优缺点。

3 营养物基准值的确定

湖泊营养物基准的最终确定是根据营养物基准各变量的参照状态以及富营养化暴发的营养物阈值水平, 通过统计学分析方法和模型推断法确定不同湖泊营养物基准值范围或最大上限, 综合水体和参照状态的反降级政策、湖泊的特定用途、保护濒危物种以及对下游的影响确定^{[3]99-101, [36]}。具体的基准可以是数字型的(一个具体的值或范围), 也可以是叙述型的, 以及二者相结合的^{[1]5,14, [37]}。亚利桑那州制定描述统计表, 采用显著权重法解释叙述性营养物基准^{[8]72-79, [38]}。美国大部分州和欧盟国家采用数字型和叙述型相结合的基准。湖泊往往具有多种功能, 应当根据最严格要求的功能确定湖泊的营养基准^{[3]92}。

4 研究展望

分析国外湖泊营养物基准的制定的技术方法和经验教训, 对我国湖泊营养物基准的制定具有重要借鉴意义, 但不能完全照搬国外的方法。我国的大部分湖泊普遍受人类影响较大, 富营养化严重, 尤其是不同分区湖泊的污染状况差异性显著, 国外现有的营养物基准制定方法难以适用我国, 需要加以优化改进。受人为影响大富营养化严重的浅水湖泊湖区(如东部平原湖区), 可以研究采用湖泊流域历史数据分析和模型反演的方法确定该分区湖泊参照状态和营养物的基准值; 湖泊沉积物受扰动较小, 部分湖泊受人为影响小的湖区(如云贵高原湖区), 可以研究采用古湖沼学重建和统计学方法确定该分区湖泊参照状态和营养物的基准值; 大部分湖泊受人为影响小的湖区, 可以研究主要采用统计学方法确定该分区湖泊参照状态和营养物的基准值, 辅以古湖沼学重建方法进行验证(如青藏高原湖区)。根据不同分区湖泊的总体污染现状, 采用不同的方法, 也可研究采用几种方法的组合。总之, 我国的湖泊营养物基准的制定是一项系统工程, 需要国家持续投入经费和人力, 建立起完善的湖泊营养物基准体系, 为我国的湖泊保护提供坚实的理论依据和管理支撑。

参考文献:

- [1] United States Environment Protection Agency (U.S.EPA). National strategy for the development of regional nutrient criteria (EPA-822-R-98-002)[R]. Washington DC: United States Environment Protection Agency, 1998.
- [2] 孟伟, 刘征涛, 张楠, 等. 流域水质目标管理技术研究(II)-水环境基准、标准与总量控制[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 1-7.
MENG Wei, LIU Zhengtao, ZHANG Nan, et al. The study on technique of basin water quality target management II: Water environmental criteria, standard and total amount control[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(1): 1-7.
- [3] GIBSON G, CARLSON R, SIMPSON J. Nutrient criteria technical guidance manual: lakes and reservoirs (EPA-822-B-00-001)[R]. Washington DC: United States Environment Protection Agency, 2000.
- [4] 富国. 湖库富营养化敏感分级概念及指标体系研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(6): 75-79.
FU Guo. Study of concept and indicators system on eutrophication sensitivity classification of lake and reservoirs[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(6): 75-79.
- [5] FOX J C. Nutrient criteria development; notice of ecoregional nutrient criteria[R]. Washington DC: United States Environment Protection Agency, 2001: 1673.
- [6] NIEMEIJER D, GROOT R S. A conceptual framework for selecting environmental indicator sets[J]. Ecological Indicators, 2008, 2: 14-25.
- [7] JANSE J H, DE SENERPONT DOMIS L N, SCHEFFER M, et al. critical phosphorus loading of different types of shallow lakes and the consequences for management estimated with the ecosystem model PCLake[J]. Limnologia, 2008, 38: 203-219.
- [8] WALKER J L, YOUNOS T, ZIPPER C E. Nutrients in lakes and reservoirs-a literature review for use in nutrient criteria development[R]. Blacksburg: Virginia Water Resources Research Center, 2007.
- [9] DODDS W K. Misuse of inorganic n and soluble reactive p concentrations to indicate nutrient status of surface waters[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2003, 22(2): 171-181.
- [10] DODDS W K. Trophic state, eutrophication and nutrient criteria in streams[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2007, 22(12): 669-676.
- [11] 李小平. 美国湖泊富营养化的研究和治理[J]. 自然杂志, 2002, 24(2): 63-68.
LI Xiaoping. Lake eutrophication research and control in USA[J]. Chinese Journal of Nature, 2002, 24(2): 63-68.
- [12] 饶群, 芮孝芳. 富营养化机理及数学模拟研究进展[J]. 水文, 2001, 21(2): 15-19.
RAO Qun, RUI Xiaofang. The advances of study on the mechanism and mathematical modeling of eutrophication[J]. Hydrology, 2001, 21(2): 15-19.
- [13] SNELDER T H, BIGGS B J F, WEATHERHEAD M A. Nutrient concentration criteria and characterization of patterns in Trophic State for rivers in Heterogeneous landscapes[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(1): 1-13.
- [14] PAINTING S J, DEVLIN M J, ROGERS S I, et al. Assessing the suitability of OSPAR EcoQOs for eutrophication vs ICES criteria for England and Wales[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 50: 1569-1584.
- [15] ALVAREZ-VÁZQUEZ L J, FERNÁNDEZ F J, MUÑOZ-SOLA R. Mathematical analysis of a three-dimensional eutrophication model[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2009, 349:135-155.
- [16] DODDA W K, COLE J J. Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: It's not just the autotrophs[J]. Aquatic Sciences, 2007, 69: 427-439.
- [17] LUDOVISI A, POLETTI A. Use of thermodynamic indices as ecological indicators of the development state of lake ecosystems. 1. entropy production indices[J]. Ecological Modelling, 2003, 159:203-222.
- [18] LUDOVISI A, POLETTI A. Use of Thermodynamic indices as ecological indicators of the development state of lake ecosystems. 2. exergy and specific exergy indices[J]. Ecological Modelling, 2003, 159:223-238.
- [19] 张远, 郑丙辉, 富国, 等. 河道型水库基于敏感性分区的营养状态标准与评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 1016-1021.
ZHANG Yuan, ZHENG Binghui, FU Guo, et al. On the assessment methodology and standards for nutrition status in channel type reservoirs based on zoning of eutrophication sensitivity[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(6): 1016-1021.
- [20] SOLHEIM A L. Reference conditions of european lakes: indicators and methods for the water framework directive assessment of reference conditions[EB/OL]. 2005.
<http://www.rbm-toolbox.net/docstore/docs/3.1713.D7-uusi.pdf>
- [21] ANDERSEN J H, CONLEY D J, HEDAL S. Palaeoecology, reference conditions and classification of ecological status: the eu water framework directive in practice[J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 49:283-290.
- [22] SUPLEE M W, VARGHESE A, LELAND J. Developing nutrient criteria for streams and evaluation of the frequency distribution method[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(2): 453-472.
- [23] WALLIN M, WIEDERHOLM T, JOHNSON R K. Guidance on establishing reference conditions and ecological status class boundaries for inland surface waters[R]. Final Version 7.0, 2003.
http://www.minenv.gr/pinios/00/odhgia/7th_draft_refcond_final.pdf
- [24] LEWIS W M Jr., MELACK J M, MCDOWELL W H, et al. Nitrogen yields from undisturbed watersheds in the americas[J]. Biogeochemistry, 1999, 46: 149-162.
- [25] SMITH R A, ALEXANDER R B, SCHWARZ G E. Natural background concentrations of nutrients in streams and rivers of the conterminous United States[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(14): 3039-3047.
- [26] DODDS W K, OAKES R M. A technique for establishing reference nutrient concentrations across watersheds affected by humans[J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2004, 2: 333-341.
- [27] DODDS W K, CARNEY E, ANGELO R T. Determining ecoregional reference conditions for nutrients, Secchi Depth and Chlorophyll a in Kansas Lakes and Reservoirs[J]. Lake and Reservoir Management, 2006, 22(2): 151-159.
- [28] PAUL M J, GERRITSEN J. Nutrient criteria for Florida Lakes: A comparison of approaches[R]. 2002.
- [29] THEBAULT J M. Simulation of a mesotrophic reservoir (Lake Pareloup) over a longperiod (1983-1998) using ASTER2000 biological model[J]. Water Research, 2004, 38: 393-403.

- [30] GERRITSEN J, JESSUP B, LEPPÖ E W, et al. Development of lake condition indexes (LCI) for Florida. Tallahassee[R]. Tallahassee: Florida Department of Environmental Protection, 2000: 79-83.
- [31] BRAAK C J F, JUGGINS S. Weighted averaging partial least squares regression (WA-PLS): An improved method for reconstructing environmental variables from species assemblages[J]. *Hydrobiologia*, 1993: 485-502.
- [32] LEAVITT P R, HANN B J, SMOL J P, et al. Paleolimnological analysis of whole lake experiments: An overview of results from experimental lakes area lake 227[J]. *Canadian Journal of Fishery Aquatic Science*, 1994, 51: 2322-2332.
- [33] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. *科学通报*, 2006, 51(16): 1857-1866.
- QIN Boqiang, YANG Liuyan, CHEN Feizhou, et al. Eutrophication mechanism and control technology and its application of lake[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16): 1857-1866.
- [34] 杨世蓉, 吉磊. 古湖沼学中的化石硅藻-80年代以来研究进展[J]. *湖泊科学*, 1994, 6(2): 177-184.
- YANG Shirong, JI Lei. Fossil diatom studies in paleolimnology: Developments since the 1980s[J]. *Journal of Lake Science*, 1994, 6(2): 177-184.
- [35] BENNION H, BATTARBEE R. The European Union Water framework directive: Opportunities for palaeolimnology[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2007, 38: 285-295.
- [36] RECKHOW K H, ARHONDITSIS G B, KENNEY M A, et al. A predictive approach to nutrient criteria[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(9): 2913-2919.
- [37] U.S.EPA. Survey of States, Tribes and territories nutrient standards[R]. Washington DC: United States Environment Protection Agency, 2008: 2-3.
- [38] Arizona Department of Environmental Quality (ADEQ). Narrative nutrient standard implementation procedures for lakes and reservoirs[R]. Phoenix: Arizona Department of Environmental Quality Water Quality, 2008: 6-8.

A literature review for lake nutrient criteria development

Huo Shouliang¹, Chen Qi^{1,2}, Xi Beidou¹, Guo Xujing¹, Chen Yanqing¹, Liu Hongliang¹

1. Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China; 2. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

Abstract: This paper presents the process and technical method to develop lake nutrient criteria, analyses mainly the approaches of nutrient variables selection and lake reference condition establishment. Nutrient variables involve necessarily the indicators of over-enrichment and lake geographic differences, and possess the characteristics of relatively stability, ecoregion and eutrophication prediction. Several methods of reference condition establishment have been reviewed as statistical distributions of direct observation of reference lakes, model prediction and extrapolation, and paleolimnological reconstruction. Through analyzing historical and existing water quality data and biological information, statistical approach could ensure the established criteria is applicable for most lakes. However, the reference conditions are not specifically established by this approach when the lakes lack observation or significantly impacted by human activity. Model prediction and extrapolation can be used for lakes suffered anthropogenic disturbances, and needs to be recalibrated and tested with large data sets. Paleolimnological reconstruction approach tracks the natural background concentrations of lake nutrients and quantitatively restores past conditions by using sediment cores, and requires complex analyses and expert judgments. It is difficult to reconstruct the past nutrient condition of shallow lakes in which sediments are easily disturbed. Most of lakes have been impacted seriously by human activity in China, lack historical data record, and have significant geographic differences. Therefore, it is necessary to optimize and improve the methods of lake nutrient criteria development and establish an integrated methodology system of nutrient criteria development in China, direct us develop numeric criteria for nutrients to protect the designated uses from cultural eutrophication.

Key words: nutrient criteria; nutrient variables paleolimnological reconstruction; reference condition