

三峡库区富营养化主要诱发因子分析

[关键词] 三峡水库 富营养化 诱发因子 [中图分类号] X Q

李锦秀¹ 廖文根

(中国水利水电科学研究院水环境研究所, 教授级高工¹ 北京 100038)

湖库富营养化通常呈现发展快、危害大、治理难、修复历时长等特点, 对富营养化进行预防性研究是控制湖库富营养化发生的最经济有效的办法。尤其是对于举世瞩目的三峡工程, 因天然状况下库区江段总磷总氮浓度一直偏高, 水库蓄水以后, 水流运动速度迅速减缓, 故库区水域是否会发生富营养化, 是三峡水库水污染综合防治过程中急需开展预测研究的重要课题。本文通过简要分析富营养化发生的成因和机理, 类比分析三峡水库在成库过程中和成库以后库区生态系统相关要素的变化趋势, 探讨富营养化发生的可能性和主要诱发因子, 提出三峡库区富营养化的预测方法, 为进一步深入开展三峡库区富营养化预测研究、及早有效防治库区富营养化的发生提供参考与借鉴。

一、富营养化成因和调控要素分析

1. 富营养化成因分析 人类认识和判断富营养化的主要表现症状为: 某种优势藻类大量生长繁殖(俗称“水华”), 破坏了生态系统的平衡状态。富营养化对人类生存环境的最直接危害也是由于藻类的大量繁殖, 以至降低了水体透明度、影响了供水系统, 藻类死亡腐烂后又对水体产生了极大的污染。因此, 研究富营养化的发生发展过程, 实质上就是研究某种优势藻类的生长过程。理论上, 富营养化在任一水生生态系统内都有可能发生, 实际上主要出现在水动力交换条件比较差的湖泊、水库、河口、海湾等较封闭的水域。近年来, 随着水污染的加剧和水资源短缺, 一些河流水体在特定季节也出现富营养化问题。尽管对于不同的水域, 由于区域地理特点、自然气候条件、水生生态系统结构和水污染特性等存在诸多差异, 会出现不同的富营养化表现症状, 也即出现不同的优势藻类种群, 并连带出现各种不同类型的水生生物种类的失衡, 但是富营养化发生所需的最必要的外力条件基本上是一样的。可以归纳为以下3个方面: (1) 总磷、总氮等营养盐相对比较充足; (2) 缓慢的水流流态; (3) 适宜的气候条件(包括水温、光照条件)。只有在3方面条件都比较适宜的情况下, 才会出现某种优势藻类“疯”长的“水华”现象, 爆发富营养化。

2. 富营养化可调控要素分析 研究富营养化的主要目的, 是期望通过找出富营养化发生的成因和主要诱发因子, 制定科学的防治措施和对策, 防御、减缓或根除富营养化。由于水温和光照要素是大气候形成的自然结果, 目前尚难以通过人工措施调节局部水域的气候条件。因此, 在进行富营养化

成因和主要诱发因子分析研究时, 可以将气候条件作为富营养化发生的主要影响因素来处理, 重点分析研究人为可控因子对诱发水体富营养化的作用。也就是说, 人类可以通过对水体营养盐水平和水流流态的整治和调节来综合防御水体富营养化的发生发展。

目前, 国际上一般认为当水体中总磷和总氮的浓度分别达到 0.02mg/l 和 0.2mg/l 时, 从营养盐单因子考虑, 就有可能发生藻类疯长的“水华”现象^[1]。国内外针对不同水域, 制定了一系列地方性或全国性用于表征水体营养状态的TP、TN以及生物量等判别指标^[2]。但是, 至今为止, 有关水流动力条件对水体中藻类生长过程的影响作用研究甚少。尤其是在实际富营养化防治过程中, 往往重点考虑通过控制营养盐等污染源整治措施, 来控制或治理富营养化, 也即是从控制富营养化的单因子因素出发, 来防御和治理富营养化^[3]。诚然, 通过控制污染源, 使水体中营养盐浓度不超过优势藻类大量繁衍的临界浓度, 是治理富营养化的最重要措施; 而大量资料表明, 我国营养盐等污染源主要来自农业面源, 其次是城镇生活污水和工业污染源。从目前我国农业生产的耕作方式、污染源治理重点和治理水平、周围人群的环保意识等诸多方面考虑, 对营养盐等污染源的控制过程往往需要一定的时期和资金, 其治理过程将会是一个比较长时期的艰巨任务。正因如此, 尽管目前我国对一些富营养化十分严重的水体如滇池、太湖等加大了治理力度, 但是治理效果并不理想。

富营养化发生的成因和国内外已有水域爆发富营养化的过程分析表明, 总磷总氮浓度偏高是导致库区富营养化发生的必备条件, 但不是唯一的诱发因子和人为可控要素。近年来, 随着水利事业的飞速发展, 利用水利工程能有效地进行水量和水资源的合理调配, 这在区域防洪和供水保障等过程中发挥着重要作用。在进行水利工程调度时, 针对一些特殊水域富营养化高发区域, 从综合防治富营养化出发, 充分利用水利工程的调度功能, 调节水域的水流流态和水质状况, 将会使富营养化的综合防治更加有效、快捷。

二、三峡库区富营养化主要诱发因子分析

1. 长江流域典型支流“水华”案例分析 近年来, 在长江流域一级支流汉江的武汉江段和乌江的局部江段相继多次发生“水华”的严重富营养化污染事故^{[4][5]}。历年水质监测结果分析表明, 两条江的

总磷、总氮浓度长期偏高,其中汉江武汉江段自1989年以来总磷浓度在 $0.1\text{mg/l} \sim 0.19\text{mg/l}$ 之间、总氮在 $1.0\text{mg/l} \sim 2.0\text{mg/l}$;乌江武隆断面总磷浓度在 0.15mg/l 左右、总氮在 1.5mg/l 左右。两个江段的总磷总氮浓度已常年超过了国际上确定的爆发水华的临界TP、TN浓度值的5倍左右。也就是说,从营养盐单因子角度考虑,两个江段常年都具备发生富营养化的条件;而近年来汉江和乌江发生“水华”的时间主要集中在3月份的枯水季节。汉江1992年、1998年和2000年发生3次严重的“水华”现象,而且均是在春季的枯水季节、水流速度相对比较小的情况下发生的。其中1992年春季武汉汉江段的水流速度比往年同期流速减小了30%以上,武汉宗关断面流速小于 0.7m/s 。乌江自1994年以来,几乎每年都发生“水华”现象,发生时间基本上也是在3月份的枯水季节。尽管造成水体藻类大量繁殖的成因十分复杂,上述两个典型案例爆发“水华”的相关监测资料不多,笔者难以作较为深入的分析,但是初步分析可以判定,水流速度减缓是诱发汉江和乌江爆发“水华”的重要因素之一。

2. 三峡库区富营养化主要诱发因子 对此应在可能性分析的基础上探讨控制对策。

(1) 三峡库区发生富营养化的可能性分析 目前,三峡库区江段总体水质良好,但总磷、总氮浓度却普遍比较高。库区干段断面平均TP浓度高达 $0.15\text{mg/l} \sim 0.25\text{mg/l}$ 左右,TN浓度在 $1.5\text{mg/l} \sim 2.8\text{mg/l}$ 之间^[6],库区江段一些将长期处于水库回水影响区的典型支流如香溪河、小江和乌江等的现状监测的总磷、总氮浓度与库区干流江段相类似,也普遍偏高。这些表明天然河道状况下库区水域的营养盐含量已常年接近或超过富营养化发生、发展的营养盐水平状况。之所以目前在库区干流和一般支流尚未普遍出现富营养化问题(支流乌江近年来已连续出现“水华”现象),主要原因是天然河道状况下水流流速比较快,没有形成富营养化发生所需的缓慢流态条件。

三峡库区的总磷总氮浓度主要来自库区上游来水、农田径流和城镇生活污水。水库建成正式运行后的一定时段内,预测库区断面平均TP和TN浓度仍将很高,与天然河道浓度含量相当^[7]。水库建成以后总体气候条件与建库前变化也不会太大;只是由于水深增大,局部江段可能出现水温分层现象。但是,水库建成以后,预测坝前深水区断面平均流速只有 $0.01 \sim 0.04\text{m/s}$ 左右,比天然河道断面平均流速减小将近5倍~10倍^[7]。尤其是在一些库湾以及长期处于三峡水库回水淹没区的支流,受干流顶托作用,局部水域的水流运动将变得十分缓慢。利用长江流域典型支流富营养化发生案例类比分析推断,三峡水库建成以后在一些水流运动缓慢的水域如支流和库湾极有可能发生富营养化。

(2) 三峡库区富营养化主要诱发因子 对三峡水库建成前后水环境的主要要素变化趋势初步分析后认为,总磷总氮浓度偏高是库区干支流可能发生富营养化的主要成因之一,但不大可能是最主要的诱发条件。三峡水库建成以后库区和支流的水流条件将发生很大变化,流速迅速减缓,这可能会成为发生水体富营养化的最主要诱发因子。因此,应

从理论和实践两个方面进一步探明三峡库区富营养化的主要诱发因子,尤其是将水动力条件作为富营养化的主要诱发因子加以深入研究,提出三峡库区富营养化发生的临界动力条件,为防治三峡库区富营养化的发生提供重要依据。

(3) 三峡库区富营养化防治对策 根据三峡水库富营养化发生成因和对主要诱发因子的探讨,三峡库区应该,也有条件从控制污染源和水流条件两个方面入手,制定富营养化控制对策。目前三峡水库污染源控制重点侧重于库区江段内的点源(包括城镇工业和生活污水)和面源(城市垃圾等),并正在实施和规划实施一系列强有力的工程和非工程措施。但是,三峡库区总磷总氮污染负荷来源调查分析表明,营养盐负荷主要来自库区上游来水和沿库区江段的支流来水。因此,为了有效控制三峡库区营养盐水平,应该将影响三峡库区水质的整个流域汇入区域作为控制对象进行统一规划,制定系统的三峡水库水污染控制措施和管理对策。同时,三峡水库建成后属于季调节型水库,具有较大的水流调节功能,进行水库调度运行时,应根据水库实际功能需要,综合考虑防洪、供水(包括水量保障和水质保障两个方面)、发电等因素。如能将库区富营养化发生的临界水动力条件作为水库调控要素之一,调整库区干支流流态,预计将使库区富营养化的防御更加有效、显著。

三、三峡库区富营养化预测方法

自从人们认识富营养化以来,一直在设法通过建立富营养化数学模型来管理和认识富营养化,对富营养化的主要表征要素的变化趋势进行预测,这将为富营养化的综合防治提供基础。

1. 国内外富营养化模型研究状况分析 富营养化模型大致可分为两类:经验模型与生态动力学模型。

经验模型是对富营养化复杂过程进行较为简化的数学处理结果,期望通过抓住表征富营养化问题的最主要指标及其影响因素,了解在特定条件下富营养化的发展状态。经验模型着重关注问题的最终结果,对过程的描述比较简单。由于经验模型在使用过程中所需基础资料比较少、计算简便,因而适合于富营养化的预警预报和管理服务。但是,经验模型的建立过程需要收集大量基础资料,尤其需要建模者具有十分丰富的研究经验和对特定研究区域富营养化问题的全方位认识,才能确保建立的经验模型具有一定的预测预报精度。如世界OECD组织于70年代提倡对全球范围内湖泊的富营养化问题进行调查研究,世界各地纷纷响应,开展了大规模的湖泊富营养化调查,专家们在大量基础资料统计分析的基础上,建立了一系列的经验富营养化模型^[8-10]。

生态动力学模型则是以质量守恒方程为基础,采用数学方法描述各项水生态指标在水体中的物理、化学、生物过程,仿真模拟生态变量的时、空变化规律。由于生态动力学模型考虑富营养化发生发展的复杂过程和变化规律,模拟的变量通常需要包括水流、水质、营养盐和生物量等多项指标,再考虑

各指标间的互动效应及其影响因素,生态动力学模型所需率定的模型参数很多^[1,11-13],如Di toro等(1977)的湖泊富营养化模型,考虑了15个生态变量,模型需率定的参数多达110个,尽管利用一些特殊年份的实测资料,进行了部分模型参数的率定与验证工作,但由于富营养化模型中类似藻类的生长速率等等参数对于不同的藻类、不同季节,甚至是不同时段内都是不一样的,给模型参数的率定带来了极大的难度。受资料限制,以及人类本身对湖泊水体中所发生的生态过程的认识不够深入,至今为止,尚没有一个生态模型能较好地完成模型的参数率定与验证工作,生态模型仍有待进一步完善。同时,由于生态动力学模型描述的是一种复杂的生态过程,模型计算过程相对比较复杂,使用中需要输入比较详细的反映计算区域边界生态因子变化过程的水流水质和生物量资料,以及计算区域内的污染源和气候条件等基础资料,因而模型实用性受到一定限制,与实际管理应用尚有一定距离。

综观国内外富营养化研究现状,无论是黑箱型的经验数学模型,还是机理性的生态动力学模型,以往人们研究重点在于对藻类生长过程受营养盐和气候条件的影响机理方面,对水动力条件与藻类生长之间的相互影响关系的研究很少;而对于三峡库区,初步分析表明,水动力特性将会是三峡库区富营养化的最主要诱发因子。因而,水动力条件对藻类生长过程的影响应成为三峡库区富营养化研究中拟解决的关键技术难题。

2. 三峡库区富营养化预测方法研究 三峡库区正常蓄水后,从库首至库尾全长约700km,沿江受回水顶托影响的支流多达上百条。对如此大范围水域的富营养化变化趋势进行预测研究时,数学模型应是重要的技术手段。三峡库区生态系统组成复杂、影响因素多,生态要素如水动力条件、水质因子等呈现显著的时空变化特点,开展三峡库区富营养化预测研究时,有必要建立复杂的生态动力学模型,通过数值敏感试验和典型工况预测,模拟分析

三峡库区复杂的生态动力要素相互作用机理和时空动态变化规律,揭示库区未来富营养化的演变趋势;同时,三峡库区富营养化研究成果又必须直接为库区水环境有效管理和水污染控制服务,因此,应在三峡库区复杂生态动力模型研究基础上,建立以富营养化关键性表征要素为核心的经验型预测模型,用于三峡库区富营养化的预警预报和管理。

(1) 生态动力学模型 三峡库区目前有关富营养化基础监测资料十分欠缺,在现有条件下很难将三峡整个库区及其汇入支流作为整体,进行较为复杂的生态动力学过程模拟预测研究。因此,可以通过选择富营养化发生概率高、影响因素相对比较单一的典型支流如乌江、小江和香溪河等作为重点研究对象,建立较为精细的生态动力学模型,进行详细的水流、水质和生物量同步观测,动态监测三峡水库蓄水前后水流、水质和营养状态的演变趋势。富营养化模型应以藻类生长过程模拟为核心、以对藻类生长过程影响显著的氮和磷循环过程和溶解氧平衡过程为基础,考虑水流条件、气候条件对生态动力过程的影响。鉴于三峡库区含沙量比较大,大量实测资料表明泥沙对水体中的污染物和营养盐具有显著的吸附作用,三峡水库建成以后随着水流运动规律将发生巨大变化,库区和支流泥沙运动规律也将发生很大变化,进而影响库区污染物的赋存形态和时空分布规律,因此,三峡库区富营养化模拟研究中应考虑泥沙的影响和气候条件,后者包括光照和水温。光照条件可以根据历年统计资料确定,需要数值模拟研究的主要是水温条件。

综上所述,三峡库区生态动力学模型拟包括氮循环、磷循环、溶解氧平衡、浮游生物、水动力、泥沙和水温共7个相互作用的模拟系统(模型框架见图1)。根据三峡建库前后变化特点,在三峡库区生态动力学模型系统研究过程中,除了对藻类生长与总磷总氮等相互关系进行深化研究外,重点应研究水流动力条件对藻类生长过程的影响、泥沙对营养盐等污染物质的影响。

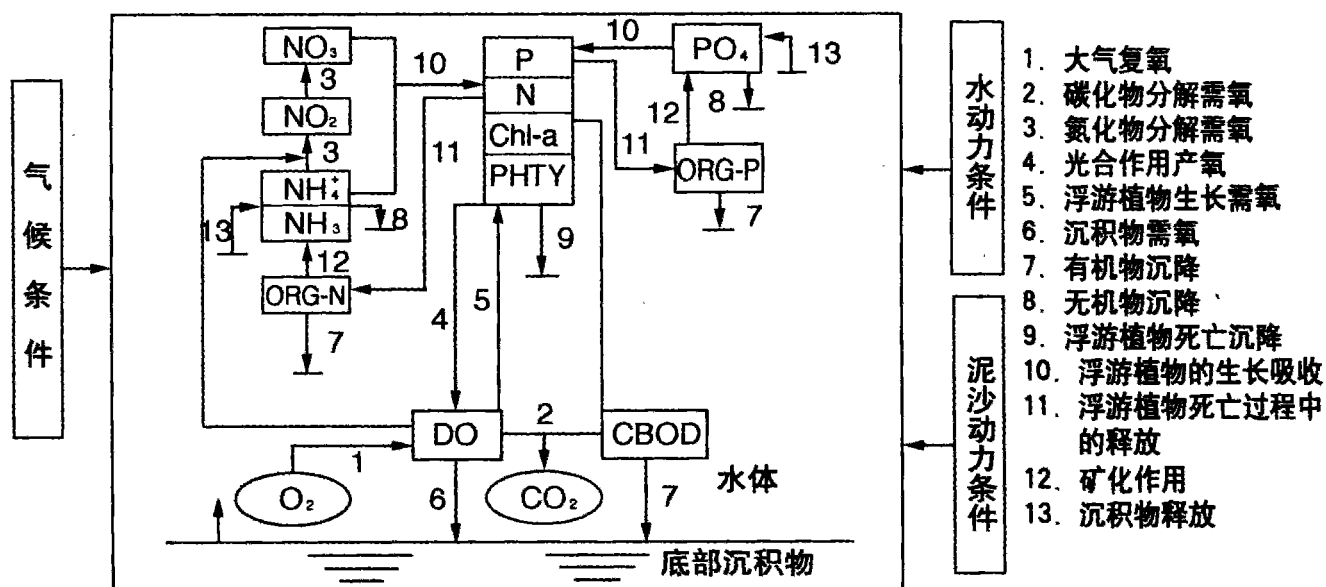


图1 三峡库区生态动力学模型框架

(2) **经验富营养化模型** 可通过对三峡库区典型水域藻类生长过程的精细数值模拟和敏感性数值试验研究,结合国内外研究成果,进行归纳、总结、提炼,针对三峡库区总体特点,建立一套简单实用的富营养化预测经验型数学模型,进行三峡库区总体富营养化变化趋势的预测预报。初步设想三峡库区的经验数学模型应以浮游植物含量(可以以叶绿素 a 浓度来表示)为时变量,以水动力、总磷和总氮浓度、水温等为应变量的模拟预测函数。利用建立富营养化经验性数学模型,能较为方便地预测三峡整个库区包括支流的富营养化发生区域、发生时间和发生程度。同时,利用建立的经验型富营养化模型,通过多方案治理效果的预测,又能为三峡库区富营养化防治对策的有效制定提供技术支持。

(3) **野外同步观测** 当前,在人类对富营养化的认识还比较模糊的情况下,数学模型的预测精度一定程度上又依赖于实测资料的率定和验证结果。在现有的富营养化研究状况下,野外观测和数学模型是预测大水体富营养化的两种不可替代的技术手段。因此,在三峡库区和典型支流区域开展富营养化指标的动态跟踪观测,对及时准确地了解三峡库区富营养化的演变趋势具有重要作用。

四、结论

通过简要分析富营养化的发生成因、长江流域两条典型支流富营养化的发生情景,类比分析三峡水库建成前后干支流的水流、营养盐变化趋势,初步判断三峡水库建成以后,在一些支流和库湾局部水流运动缓慢的水域,极有可能发生富营养化,其中营养盐偏高是库区发生富营养化的主要成因之一,而水流运动速度减缓可能会成为库区诱发富营养化的最主要外力。因此,三峡库区富营养化综合防治应该从营养盐控制和水流流态两个方面考虑,制定有效的防治对策。

数学模型是对三峡库区大范围富营养化状况进行预测研究的重要技术手段,在现有基础资料等多因素限制条件下,三峡库区富营养化模型预测拟

首先以典型支流为例,通过建立复杂的生态动力学模型,模拟预测三峡库区典型支流水域富营养化发生条件和主要诱发因素,在此基础上,研究建立以表征富营养化发生的关键性因子为核心的经验富营养化模型,为三峡库区整体富营养化的预测预报和管理服务。

参考文献

- [1] Thomann, R. V., and Mueller, J. A., Principle of surface water quality modeling and contro[M], Haper & ROV, New York, (1987)
- [2] 金相灿等. 中国湖泊环境. 北京:海洋出版社,1995
- [3] 金相灿主编. 湖泊富营养化控制和管理技术. 北京:化学工业出版社,2001
- [4] 卢大远,刘倍刚,范天俞等. 汉江下游突发“水华”的调查研究. 环境科学研究,2000(2)
- [5] 李崇明等. 乌江“黑潮”现象原因及影响分析. 中国环境力学 2002. 中国水利水电出版社,2002
- [6] 中国水利水电科学研究院水环境研究所. 三峡水库水污染控制研究专题报告——三峡水库一维水流水质数学模拟研究报告,2001年9月
- [7] 李锦秀,廖文根. 三峡工程对库区水流水质影响预测. 水利水电技术,2002(10)
- [8] Vollenweider, R. A., Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication, Men. Ist. Ital. Idrobiol. 33:53-83. ,1976
- [9] Dillon, P. J., and F. H. Rigler, The phosphorus - chlorophyll relationship in lakes, Limnol. Oceanogr, 19(4): 767-773. 10,1974
- [10] OECD, eutrophication of water monitoring, assessment and control, OECD Publication, paris, 1982
- [11] JΦrgensen, S. E., Fundamentals of ecological modelling, Elsevier, Amsterdam, 1986
- [12] Di toro, D. M., Thomann, R. V. et al., Estuarine phytoplankton biomass models - verification analysis and preliminary applications, in E. D. Gølderg(Ed.) The sea: Ideas and observations on progress in the study of the sea (New York: Wiley), 1977
- [13] Di toro, D. M., J. J. Fitzpatrick, and R. V. Thomann, , Documentation for water quality analysis simulation program (WASP) and model verification program(MVP), Env. Res. Lab. ORD, USEPA, Duluth, MN, 145pp, EPA - 600/ 3-81-044, 1983

(责任编辑 王宏章)

科技动态

极化液体流过导电碳纳米管可以产生电流

据英《新科学家》2003年1月25日报道:以色列的魏茨曼科学研究院的 Peter Kral 和 Mbshe Shapiro 指出,如果使水一类的极化液体流过一个导电的碳纳米管,电子就会通过管壁在相同的方向形成电流。这种微型的电源可能有一天会导致新型的器官植入物品的出现,例如只受液体启动的心脏起搏器就可能采用这种碳纳米管制造。

在极化液体的分子中,某些原子稍微带正电,而其他原子带与之相当的负电。当液体分子的正电部分接近单壁碳纳米管的表面时,它们就吸引纳米管内的电子随液体一起流动。由于电子只能沿纳米管的长度方向流动,就会产生一个微小但可能很有用的电流。

这种大胆的科学设想吸引了许多科学家的注意。班

加罗尔印度科学院的物理学家 Ajay Sood 和他的同事通过实验,试图检验这种设想是否正确。他们把两个电极连接到任意取向的一束碳纳米管的顶部和底部,将其悬吊在一根1米长的玻璃管中,然后泵入水通过碳纳米管,再测量纳米管两端的电压。

果然,水流通过纳米管束时,在两端产生了一个电压,且电压随水流的速度增加而增加。在每秒2毫米的流速下,在纳米管两端产生了2.7毫伏电压。当水流方向相反时,电极的极性也改变方向。Sood 发现,如果在水中添加盐酸,极化液体中就会增加许多带正电的氢离子,电压也随之增加。

Kral 的理论没有能完全解释清楚一些科研小组的研

(下转第15页)