

湖、库富营养化机理研究综述

胡晓镭

(温州市水文站,浙江温州 325000)

摘要 综述了湖、库富营养化机理研究现状,内容包括水体富营养化过程各主要因素间的相互关系及其表现:藻类增长限制因子,叶绿素 a 与总氮、总磷浓度的关系;“水华”发生的水文气象条件;富营养化过程的藻类表现;典型污染指示种、群落多样性及藻类生长潜力;湖泊生态系统健康概念与湖泊生态系统的物质循环理论。指出富营养化实质是生态失衡。

关键词 富营养化;水库;湖泊;环境因子;藻类特征;生态系统

中图分类号 :X524 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2009)04-0044-04

Summing up the research on eutrophication mechanisms of lakes and reservoirs

HU Xiao-lei

(Wenzhou Hydrological Station, Wenzhou 325000, China)

Abstract : This article summarizes the current status of research on eutrophication mechanisms of lakes and reservoirs, including the relations between each primary factor and its performance during the water eutrophication process. It examines the factors limiting algae growth; the relations between chlorophyll a, total nitrogen and total phosphorus concentration; and hydrometeorology conditions that exist while the water bloom is curring. Algae characteristics during the water eutrophication process, such as the typical pollution specie indicators, the community diversity and the algae growth potential, are described briefly. The concept of lake ecosystem health and the theory of material circulation of the lake ecosystem are introduced. It is indicated that eutrophication is in essence an ecological imbalance.

Key words : eutrophication; reservoir; lake; environment factor; algae characteristics; ecosystem

在 20 世纪初期,水体富营养化问题引起了国外部分生态学家、湖泊学家的关注,并开始对其成因进行初步探索,从 70 年代开始进行湖泊生态系统健康研究,我国从 20 世纪 60 年代末开始关注富营养化问题。据统计,全球约有 75% 以上的封闭型水体存在富营养化问题。2007 年太湖蓝藻暴发引发的用水危机,再次警示湖、库富营养化问题的严重性与紧迫性。本文从环境因子、藻类特征、生态系统等方面入手分析湖、库富营养化的表现及机理,旨在为从事湖、库水质监测、评价及研究人员提供参考。

1 水体富营养化环境因子分析

早期的富营养化机理研究主要是探讨水体中营

养盐负荷与浮游藻类生产力的相互作用和关系,这也是揭示湖泊富营养化形成机理的主要途径。目前我国主要从富营养化主要因素间的关系入手研究湖、库富营养化问题。关于理化因子和叶绿素 a 的关系存在着各种各样的观点,大多数学者认为湖、库浮游藻类的生长是由营养盐、水文气象条件等因素控制。通常磷是藻类增长的最小限制因子;叶绿素 a 含量与一定浓度范围内的总氮、总磷呈正相关关系。湖、库富营养化引起藻类暴发,不但与营养物质有关,也与水文、气象、气候条件有关。

1.1 藻类增长限制因子

丹麦著名生态学家 Jorgensen^[1]指出浮游藻类的生长是富营养化的关键过程,着重研究氮、磷负荷与

浮游藻类生产力的相互作用和关系,揭示湖泊富营养化形成机理。

在适宜的光照、温度、pH 值及营养物质充分的条件下,天然水体中的藻类进行光合作用,合成本身的藻类原生质^[2]: $C_{106}H_{263}N_{16}P_1$,临界的氮磷比按元素计为 16:1;按质量计为 7:1。利贝格最小值定律(Leibig law of the minimum)指出:植物生长取决于外界提供给它的所需养料中数量最少的一种。因此,当氮磷比小于 7:1,氮将限制藻类的增长,否则,磷则可认为是藻类增长的限制因素。在一般情况下,水体中藻类可利用的氮远比可利用的磷多,通常磷是最小限制因子,而氮与浮游植物的生物量没有显著的相关性^[3]。这在国际经合组织(OECD)对理化因子和叶绿素 a 动态变化的相互关系的研究中得到证实。水体磷为唯一主导因子的占 80%,氮为主导因子的占 11%,其余 9%的水体为氮和磷共同起作用^[4]。英国国家环境署规定,在静止的水体中,总磷质量浓度达到 0.086 mg/L 即为发生富营养化的临界值。美国 EPA 则建议总磷质量浓度 0.05 mg/L 和正磷酸盐质量浓度 0.025 mg/L 为湖泊和水库磷质量浓度的上限^[5],说明磷在湖、库富营养化中的重要地位。

1.2 叶绿素 a 与总氮、总磷浓度的关系

由于叶绿素 a 浓度是表征藻类现存量的重要指标之一^[6],因此,研究叶绿素 a 与总氮、总磷浓度的关系,对认识湖泊富营养化的机理具有重要意义。大量的研究表明,总氮、总磷浓度在一定的范围内,叶绿素 a 浓度与总氮、总磷浓度呈正相关。

对中国湖泊、水库的调查发现^[7-8],叶绿素 a 与总磷和透明度三者的自然对数之间存在线性关系。文献^[9]则认为叶绿素 a 和总磷的季或年平均浓度之间具有正相关性,而且这二者的关系在世界范围内的湖泊和水库中具有普遍性,同时在总磷浓度很宽的范围内都存在。陈永根等^[10]在对太湖藻类生长进行研究后给出了具体的质量浓度范围,认为总氮质量浓度小于 5.4 mg/L、总磷质量浓度为 0.1 ~ 0.31 mg/L 时,叶绿素 a 浓度与总氮、总磷浓度呈正相关,当总氮质量浓度超过 4.5 ~ 5.4 mg/L、总磷质量浓度超过 0.27 ~ 0.31 mg/L 时,叶绿素 a 浓度与总氮、总磷浓度呈负相关。

杨福田^[11]认为:总氮质量浓度小于 4.0 mg/L、总磷质量浓度小于 0.30 mg/L 适宜微囊藻(藻类“水华”发生的代表藻之一)生长。在藻类“水华”发生后,由于藻类暴发吸收大量的营养盐,营养盐浓度迅速降低,这在五里湖得到证实^[12]:当总氮质量浓度从 6.0 mg/L 降至 2.5 mg/L 后,叶绿素 a 质量浓度则从 20 $\mu\text{g/L}$ 上升到 60 $\mu\text{g/L}$ 。

1.3 “水华”发生的水文气象条件

湖、库富营养化引起藻类暴发,不但与营养物质有关,也与水文、气象、气候条件有关。在营养源满足条件的前提下,水文、气象、气候条件是发生浮游植物暴发的诱导因素^[13]。水深不超过 10 m,平均流速小于 0.05 m/s,是适宜的水文条件^[14],Mitrovic 等^[15]研究发现水库中的项圈藻暴发的临界流速为 0.05 m/s,Escartin 等^[16]的室内实验证明,要破坏藻群结构,水流速度必须达到 0.10 m/s。由此可见,平均流速小于 0.05 m/s,适宜于藻类生长,超过 0.10 m/s 则不利于生长。若换水周期长、水位低也有利于水华的发生^[17]。

温度对藻类生长的影响比较突出。当环境温度较低时水体增温会促进藻的生长,环境温度较高时则起抑制作用^[17]。不同的温度条件适宜不同的藻类生长,例如小新月菱形藻、三角褐指藻、铲状菱形藻等藻类适宜生长温度在 20℃ 以下,中肋骨条藻、亚心形扁藻、波吉卵囊藻等藻类适宜生长温度在 20 ~ 25℃,湛江等鞭藻、牟氏角毛藻、盐藻等藻类适宜生长温度在 25 ~ 33℃,钝顶螺旋藻适宜生长温度在 30℃ 以上。

光照对藻类生长也有明显影响。光照的影响主要表现在藻类光合作用的速率随着光强变化而变化,以及不同种类的藻对不同波长、不同强度的光敏感性不同。盐藻、小球藻、微绿球藻等浮游硅藻适宜光照度为 58.5 ~ 195 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ^[18]。在光照强度为 9.75 ~ 195 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的范围内,小球藻、等鞭金藻、青岛大扁藻、绿色杜氏藻在 9.75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时生长率和叶绿素 a 浓度均最低^[19]。

2 水体富营养化藻类特征

在研究环境因子间关系的同时,有学者从浮游生物入手研究湖、库富营养化程度。由于不同的温度条件适宜不同的藻类生长,以及不同种类的藻对不同波长、不同强度的光敏感性不同,使得藻类存在季节性分布现象。湖、库在不同的富营养化程度,有其典型污染指示种,因此,水体生物群落的组成可以较好地反映水环境的富营养化程度。群落多样性是反映群落的种类数与丰度的关系,是度量水生生态系统稳定性的一个重要指标,其多样性的大小直接反映水生生态系统的稳定性和水质状况。

2.1 藻类季节分布现象

藻类水华主要是蓝藻类,其代表为微囊藻、鱼腥藻和颤藻属,其次是绿藻和硅藻。通常优势物种会随着季节变化而改变,如山仔水库^[15]年内藻类种群的演替规律为冬、春季以硅藻为主,其余季节,尤其

是藻类暴发的季节以蓝藻为主,一年内微囊藻为优势种群的时间最长。这种变化是由于不同藻类有不同的繁殖要求:营养盐浓度、光照、温度等。不同的温度条件适宜不同的藻类生长,以及不同种类的藻对不同波长、不同强度的光敏感性不同,这些条件决定了在变化的环境条件下哪些藻类能占主导地位,使得藻类存在季节性分布现象。

2.2 污染指示种

湖、库在不同的营养盐状态下,有其不同的优势物种。因此,水体生物群落的组成可以较好地反映水环境的富营养化程度。

在日本调查了 211 个湖泊的氮、磷浓度,结果表明,当总氮质量浓度超过 0.39 mg/L、总磷质量浓度超过 0.035 mg/L 时,大部分的湖泊优势物种为蓝藻类^[20]。日本在研究了湖泊富营养化和浮游生物优势种的关系之后,总结了从贫营养水体向富营养水体过渡时出现的浮游生物优势种的演替规律:在贫营养湖泊中,硅藻门的小环藻等占据优势,当过渡到富营养化初期,星杆藻等富营养化藻类成为优势种,水体的富营养化程度进一步加剧时,绿藻和蓝藻开始大量生长繁殖。文献^[21]总结了不同水质和不同营养型水体的藻类出现的典型污染指示种:

a. 富营养重污型的指示藻类主要是螺旋鞘丝藻、弱细颤藻、坑形席藻、纤细席藻、强氏螺旋藻等。

b. 富营养型主要的指示藻类有粗刺藻、蛋白核小球、普通小球藻、水华鱼腥藻、螺旋鱼腥藻、水华束丝藻、铜锈微囊藻、水华微囊藻等。

c. 中-富营养型主要的指示藻类有星杆藻、美壁藻、梅尼小环藻、狭形纤维藻、镰形纤维藻、卵形衣藻、细巧隐球藻、湖泊鞘丝藻、巨颤藻等。

d. 中营养型主要的指示藻类有集星藻、刚毛藻、拟新月藻、胶网藻、膨大桥弯藻等片硅藻。

e. 寡营养型主要的指示藻类有金藻、金颗藻、锥囊藻、黄群藻、丝状黄丝藻、微星鼓藻等。

2.3 群落多样性

群落多样性是反映群落的种类数与丰度的关系,是度量水生生态系统稳定性的一个重要指标。藻类是水生生态系统的第一生产力,其多样性的大小直接反映水生生态系统的稳定性和水质状况。藻类的种类多样性指数越高,其群落结构越复杂,稳定性越大,水质越好;而当水体受到污染时,敏感型种类消失,多样性指数减小,群落结构趋于简单,而优势种的个体数量大幅度增加,稳定性变差,水质下降。通常求取藻类综合指数 a ($a = (\text{蓝藻门} + \text{绿球藻目} + \text{中心纲硅藻} + \text{裸藻}) \text{种数} / \text{鼓藻目种数}$),当 $a > 3$ 时,表明水体已经处于富营养型^[22]。

2.4 藻类生长潜力研究

由于营养物浓度与藻类生物量成正比关系,水体中氮磷含量决定着藻类生长的潜在能力。藻类生长潜力的测定是在水样中接种特定藻类(一般接种蓝细菌、绿藻、硅藻),然后置于一定照度和温度条件下培养,使藻类生长达到稳定期,最后用测定藻类细胞数或干重的方法,来决定藻类在某种水体中的增殖量(algal growth potential, AGP),根据 AGP 的大小判断湖、库富营养化程度。一般贫营养湖的 AGP 在 1 mg/L 以下,中营养湖为 1 ~ 10 mg/L,富营养湖为 5 ~ 50 mg/L。

3 生态系统研究

系统论的基本思想是把系统内各要素综合起来进行全面考虑,以求整体的最优化,整体性原则是其出发点,层次结构和动态原则是其研究核心,综合化、有序化是其精髓。我国湖、库生态系统健康研究是近年才发展起来的生态学上一个新的研究领域,目前还没有标准的监测与评价方法,是急需研究的课题。

3.1 富营养化实质是生态失衡

湖泊富营养化即外来干扰所引起的逆行演替,是生态系统平衡遭到破坏的典型表现。在正常的湖泊中,湖泊初级生产力包括浮游植物、底栖或固着藻类、沉水植物与挺水植物。它们是相互作用和相互制约的,形成一个良性的湖泊初级生产力平衡系统。若湖泊接纳的营养盐主要供给了浮游植物,则蓝藻的生态位在生态系统具有较高的适合度,因而能够占据优势进而形成水华,从而会破坏这一系统平衡。总的来说,湖泊富营养化的实质是由于营养物质输入输出的失衡^[17],造成湖泊生态系统中各物种的种间平衡被打破,导致某单一物种的过度生长(如蓝藻的恶性繁殖),从而进一步破坏了系统的物质循环和能量流动,最终致使整个生态系统逐步走向消亡。

3.2 生态系统健康研究

湖泊生态系统健康评价主要有生态系统健康与湖泊生态系统的物质循环等 2 个理论。目前国内外开展的水生生态系统健康研究主要是选用生态指标来进行评价^[23]。生态系统健康的概念涵盖了 Constanza 定义的 6 个方面^[24]:自我平衡、没有病征、多样性、有恢复力、有活力和能够保持系统组分间的平衡,以及描述系统状态的 3 个指标^[25]:活力、组织和恢复力。

湖泊生态系统物质循环是湖泊生态系统中不同营养级的生物及其与外界环境之间物质交换的总称,不同湖泊中的物流不同,由此造成湖泊生态系统

的功能和结构各异。影响水生生物生长的营养物质(氮、磷和有机物)在水生生物之间的循环过程十分复杂,主要有湖泊和外界环境之间的物质和能量交换,浮游植物吸收,浮游动物、草食性和肉食性鱼类捕食以及在捕食和繁衍过程中的物质损失;上层水体中的营养物和有机物沉降、矿化以及沉积物中的营养物和有机物重新溶解,细菌的分解,渔业和人为的水生生物捕获^[26-28]。

4 结 语

水体富营养化过程各主要因素间的相互关系表明,通常磷是藻类增长的最小限制因子;总氮、总磷浓度在一定的范围内,叶绿素 a 含量与总氮、总磷浓度呈正相关,超过则呈负相关;湖、库富营养化引起藻类暴发,不但与营养物质有关,也与水文、气象、气候条件有关。藻类有季节性分布现象,在不同营养型水体中有不同的污染指示种,藻类是水生生态系统的第一生产力,其多样性的直接反映水生生态系统的稳定性和水质状况。湖泊富营养化即外来干扰所引起的逆行演替,是生态系统平衡遭到破坏的典型表现,富营养化实质是生态失衡。

面对日益恶化的湖、库生态环境,对湖、库富营养化研究还需加强,在进一步研究环境因子间关系的同时,应加强从浮游生物入手研究,也要从生态系统的角度来研究。

参考文献:

[1] JORGENSEN S E. Application of ecology in environmental management[M]. Boca Raton: CRC Press, 1983.

[2] 王淑芳. 水体富营养化及其防治[J]. 环境科学与管理, 2005, 30(6): 63-65.

[3] LAU S S S, LANE S N. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication: a long-term study[J]. The Science of the Total Environment, 2002, 288: 167-181.

[4] 谢允田, 魏民, 吕军, 等. 南湖叶绿素 a 含量与湖水理化性质的多元分析[J]. 东北水利水电, 1999(1): 43-45.

[5] 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.

[6] LORENZEN C J. Determination of chlorophyll-a and phaeopigments: Spectrophotometric equations[J]. Limnology and Oceanography, 1967, 12: 343-346.

[7] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[8] 李崇明, 黄真理, 张晟, 等. 三峡水库藻类“水华”预测[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 1-6.

[9] OSGOOD R A. Lake mixis and internal phosphorus dynamics[J]. Arch Hydrobiol, 1988, 113: 629-638.

[10] 陈永根, 刘伟龙, 韩红娟, 等. 太湖水体叶绿素 a 含量与氮磷浓度的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2062-2068.

[11] 杨顶田, 陈伟民, 江晶, 等. 藻类暴发对太湖梅梁湾水体中 NPK 含量的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 969-972.

[12] 陈开宁, 包先明, 史龙新, 等. 太湖五里湖生态重建示范工程: 大型围隔试验[J]. 湖泊科学, 2006, 18(2): 139-149.

[13] 邬红娟, 郭生炼. 水库水文情势与浮游植物群落结构[J]. 水科学进展, 2001, 19(1): 51-55.

[14] 刘用凯. 山仔水库水质富营养化防治对策[J]. 福建环境, 2001, 18(1): 13-14.

[15] MITROVIC S M, OLIVER R L, REES C, et al. Critical flow velocities for the growth and dominance of *Anabaena circinalis* in some turbid freshwater rivers[J]. Freshwater Biology, 2003, 48: 164-174.

[16] ESCARTIN J, AUBREY D G. Flow structure and dispersion within algal mats estuarine[J]. Coastal and Shelf Science, 1995, 40: 451-472.

[17] 孔繁翔. 湖泊富营养化治理与蓝藻水华控制[J]. 江苏科技信息, 2007(9): 1-11.

[18] 陈明耀. 生物饵料培养[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 27-65.

[19] 刘青, 张晓芳, 李太武, 等. 光照对 4 种单胞藻生长速率、叶绿素含量及细胞周期的影响[J]. 大连水产学院学报, 2006, 21(1): 24-30.

[20] 涂建峰, 郑丰, 穆宏强. 湖泊富营养化的产生机制及主要影响[J]. 水利水电快报, 2007, 28(11): 1-4.

[21] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 87-91.

[22] 况琪军. 韩国南汉河的浮游植物及营养水平[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(2): 221-226.

[23] 刘永, 郭怀成, 戴永立, 等. 湖泊生态系统健康评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 723-729.

[24] JORGENSEN S E. A systems approach to the environmental analysis of pollution minimization[M]. New York: Lewis Publishers, 1999: 20-53.

[25] CONSTANZA R. Toward an operational definition of ecosystem health[C]//Costanza R, Bryan G N, Benjamin D H. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management. Washington D C: Island Press, 1992: 239-256.

[26] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 26-50.

[27] JORGENSEN S E. Fundamentals of ecological modelling[M]. New York: Elsevier Science, 1994: 32-41.

[28] XU Feng-lin, TAO Sen, DAWSON R W, et al. Lake ecosystem health assessment: indicators and method[J]. Wat Res, 2001, 35(13): 3157-3167.

(收稿日期: 2008-09-25 编辑: 熊水斌)