文章编号：1009-6094(2005)02-0087-05

湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展*

况琪军[1]，马沛明[1,2]，胡征宇[1]，周广杰[1,2]
(1 中国科学院水生生物研究所，武汉 430072；
2 中国科学院研究生院，北京 100039)

摘 要：介绍了藻类的种群结构、污染指示种、生长潜力、种类多样性指数和综合指数等生物学指标在湖泊营养型评价中的应用；详细列举了超富营养型(Hypertrophication)、富营养型(Eutrophication)、中营养型(Mesotrophication)和寡营养型(Olipotrophication)等四类水体的部分指示藻类及大致表观现象；针对湖泊富营养化中备受关注的营养过剩和藻类生长过度问题，简要报道了国内外有关湖泊富营养化治理中的藻类N、P处理和除藻研究进展，以及近期作者在相关研究领域所开展的工作和初步结果；同时对湖泊富营养化的危害进行了大致分析，并提出了减缓湖泊富营养化进程、防治其进一步加剧的相关措施。

关键词：环境工程；藻类；湖泊富营养化；污染指示种；营养去除
中图分类号：X524　　**文献标识码**：A

0 引 言

由于全球环境变化及各类人为活动的影响，我国的湖泊富营养化仍在加剧，不但多数湖泊、塘堰的富营养化早已司空见惯，就连大江大河也屡屡出现富营养化现象。我国5大淡水湖泊中的太湖、洪泽湖和巢湖均已极度富营养化[1]；湖北武汉的东湖，从20世纪80年代起到目前为止，湖泊的营养水平不断上升，迄今，除个别远离畜牧场的湖区尚处于中－富营养水平外，其余水域均已达到富营养或超富营养水平[2]；汉江，从1992年至今的10余年间，先后4次发生藻类细胞密度急剧上升，出现藻类水华的现象，且水华涉及的面积逐次加大，发生的频率也在不断加快，1992年首次出现水华的地点仅局限在下游汉川江段，1998年和2000年逐步上溯到中下游的仙桃、沙洋乃至钟祥江段，且有继续蔓延的征兆[3]。可见，对湖泊富营养化的监测、控制和治理尚需投入更大精力。本文简要叙述了湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理方面的研究进展，旨在为从事藻类学研究人员能直接、快捷、准确地应用藻类生物判断水质，为环保学者们探索和拓展新的湖泊富营养化控制技术提供参考资料。

1 湖泊营养型藻类生物学评价

藻类是一类具有叶绿素，营自养生活，没有根茎叶分化，通过细胞的营养性分裂，或籍助于单细胞的孢子、合子进行生殖的低等植物，是水生态系统生物资源的重要组分。作为物质代谢和能量循环的初级生产者，藻类在维持水生态系统的平衡中起着十分重要的作用。由于藻类的群落结构及其生长量受水体生态环境变化的直接影响，因此，在水质和湖泊营养型评价中，藻类的应用极为广泛。根据国内外相关文献资料[4~6]并结合作者多年来对湖泊、河流、水库等水体调查所积累的经验[7,8]，将不同水质和不同营养型水体的表观现象、藻类出现的大致特征和典型污染指示种，以及一些常用的藻类生物学评价指标及标准归纳如下。

1.1 种群结构与污染指示种

藻类的种群结构和污染指示种是湖泊营养型评价的重要参数，尤其是那些在某种特定的环境(营养)条件下能大量生存的藻类，即污染指示藻类的种类和数量，在一定程度上可直接反映出环境条件的改变和水体的营养状况。通常将水体划分为超富营养型(Hypertrophication)，富营养型(Eutrophication)，中营养型(Mesotrophication)和寡营养型(Olipotrophication) 4种类型。

1) 超富营养型。这类水体污染特别严重，依其严重程度又可分为厌氧重污型(αps)和富营养重污型(βps)。αps型水体主要集中在污水入口，水体混浊，呈黑褐色，透明度小，除表层含不足1 mg/L的溶氧外，其余全部缺氧。藻类基本绝迹，仅极少数耐污的藻类(蓝藻门的个别席藻*Phormidium sp*)与污染颗粒结合形成黑褐色胶团漂浮水面。指示生物主要是闪囊菌*Lamprocystis*，螺菌*Spirillum*，泡硫菌*Thiophysa*等一些裂殖菌类；βps型水体离污水入口约200～500 m处，污水负荷越大，扩散面越宽，其混浊度、色度和透明度较αps型水体略有改善，耗氧强烈，仅表层几厘米处含溶氧，藻类种类单一，表层常聚集大量裸藻，底层多为腐生性纤毛类微型动物。典型的指示藻类有：螺旋鞘丝藻*Lyngbya contoria*，弱细颤藻*Oscillatoria tenuis*，坑形席藻*Phormidium foveolarum*，纤细席藻*Pho. Tenue*，强氏螺旋藻*Spirulina jenneri*，节旋藻*Arthrospira sp*，绿梭藻*Chlorogonium elongalum*，小毛枝藻*Stigeoclonium tenue*，鱼形裸藻*Euglena pisciformis*，近轴裸藻*Eug. proxyma*，梨形扁裸藻*Phacus pyrum*等。

2) 富营养型。富营养型水体亦可依其有机物浓度的差别分为富营养型(αms)和中－富营养型($\beta\alpha$ms)。αms型水体的特点是有机物浓度特别高，耗氧量大，白天因藻类光合放氧强烈使水中溶氧饱和，夜间因生物呼吸作用强烈而使水体溶氧量急剧下降，以蓝藻和绿藻占绝对优势。主要指示藻类有绿球藻目中的粗刺藻*Acanthosphaera zachariasi*，蛋白核小球藻*Chlorella pyrenoidosa*，普通小球藻*Chl. vulgaris*，极毛顶棘藻*Chodatella cilliata*，四刺顶棘藻*Cho. Quadriseta*，空心藻*Coelastrum sphaericum*，十字藻*Crucigenia apiculata*，蹄形藻*Kirchneriella lunaris*，四星藻*Tetrastrum hastiferum*，四棘藻*Treufaria triappendiculata*等。相关的蓝藻指示种类有：水华鱼腥藻*Anabaena flos-aquae*，螺旋鱼腥藻*Ana. spiroides*，阿氏项圈藻*Anabaenopsis arnoldii*，水华束丝藻*Aphanizomenon flos-aquae*，束缚色球藻*Chroococcus tenax*，居氏腔球藻*Coelosphaerium kuetzingia*，针状蓝纤维藻*Dactylococcopsis acicularis*，湖生束球藻*Gomphosphaeria lacustris*，细小平裂藻*Merismopedia minima*，微小平裂藻*Mer. tenuissima*，铜锈微囊藻*Microcystis aeruginosa*，水华微囊藻*Mic. flos-aquae*，阿

* 收稿日期：2004-11-04
作者简介：况琪军，高级工程师，从事污水生物净化与藻类生态毒理学研究。
基金项目：国家863项目(2002AA601021)；国家973项目(2002CB412309)。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

氏颤藻*Oscillatoria agardhii*，两栖颤藻*Osc. Amphibian* 等。此外，啮蚀隐藻 *Cryptomonas erosa*，卵形隐藻 *Cry. ovata*，血红裸藻 *Euglena sanguinea*，绿色裸藻 *Eug. viridis*，角甲藻 *Ceratium hirundinella* 等均为 αms 型水体的指示藻类。

βαms 型水体虽有机物浓度很高，但其表观状况和透明度均略优于 αms 型水体，主要指示种有：硅藻——星杆藻 *Asterionella formosa*，美壁藻 *Caloneis sp.*，梅尼小环藻 *Cyclotella meneghiniana*，草鞋波缘藻*Cymatopleura solea*，异极藻 *Gomphonema sp.*，细布纹藻 *Gyrosigma kuetzingii*，颗粒直链硅藻*Melosira granulata*，小舟形藻*Navicula minima*，菱形藻 *Nitzschia sigma*，尖辐节藻 *Stauronei acuta*，针尖针杆藻 *Synedra acus* 等；绿藻——狭形纤维藻 *Ankistrodesmus angustus*，镰形纤维藻 *Ank. falcatus*，卵形衣藻 *Chlamydomonas ovalis*，水溪绿球藻*Chlorococcum infusionum*，锐新月藻*Closterium acerosum*，椭圆卵囊藻 *Oocystis elliptica*，波吉卵囊藻 *Ooc. borgei*，浮球藻*Planktosphaeria gelotinosa*，尖细栅藻*Scenedesmus acuminatus*，龙骨栅藻*Sce. Cavinatus*，弓形藻*Schroederia setigera*，不正四角藻*Tetraedron enorme* 和细丝藻 *Ulothrix tenerrima*；蓝藻——细巧隐球藻*Aphanocapsa delicatissima*，湖泊鞘丝藻 *Lyngbya limnetia*，巨颤藻 *Oscillatoria Princeps* 等。

3) 中营养型(βms)。水体营养含量适中，溶氧浓度变化较大，透明度较高，藻类种类丰富。中污性藻类，尤其是带鞭毛的绿藻和裸藻是这类水体的主要种群。相关的指示藻类有：集星藻 *Actinastrum hantzschii*，刚毛藻 *Cladophora sp.*，拟新月藻 *Closteriopsis longissima*，胶网藻 *Dictyosphaerium ehrenbergianum*，空球藻 *Eudorina elegans*，水网藻 *Hydrodictyon reticulatum*，微芒藻 *Micractinium pusillum*，微星鼓藻*Micrasterias sp.*，实球藻*Pandorina morum*，短棘盘星藻*Pediastrum boryanum*，壳衣藻*Phacotus lenticularis*，素衣藻 *Polytoma uvella*，桑椹藻 *Pyrobotrys quaternarium*，四尾栅藻 *Scenedesmus guadricauda*，纤细月牙藻 *Selenastrum gracile*，球囊藻 *Sphaerocystis schroeter*，螺带鼓藻 *Spirotaenia condensata*，纤细角星鼓藻 *Staurastrum gracile*，六臂角星鼓藻 *Sta. senarium*，美丽团藻 *Volvox aurens*，球团藻 *Vol. globator*，沼地微鞘藻 *Microcoleus paludosus*，点形念珠藻 *Nostoc punctiforme*，扁圆卵形藻*Cocconeis placentula*，膨大桥弯藻 *Cymbella turgida*，等片硅藻*Diatoma vulgare*，钝脆杆藻 *Fragilaria capucina*，环状扇形藻*Meridion circulare*，粗壮双菱藻 *Surirella rubusta*，卵形双菱藻 *Sur. Ovata*，梭形裸藻 *Euglena acus*，宽扁裸藻 *Phacus caudatus* 等。

4) 寡营养型(os)。水色清澈，有机物含量低，溶氧饱和，藻类多样性指数高，透明度基本见底。组成这类水体的主要种群为喜清水的金藻、黄藻和硅藻。常见的os 指示藻类有：金藻 *Chromulina sp.*，金颗藻 *Chrysococcus sp.*，锥囊藻 *Dinobryon sp.*，黄群藻 *Synura urella*，丝状黄丝藻 *Tribonema bombycium*，红胞藻 *Rhodomonas sp.*，胭脂藻 *Hildenbrandia sp.*，中华鱼子菜 *Lemanea sinica*，波缘曲壳藻 *Achnanthes crenulata*，月形短缝藻*Eunotia lunaris*，北方羽纹藻*Pinnularia borealis*，纤细羽纹藻 *Pin. gibba*，微星鼓藻*Micrasterias sp.*，胶四孢藻 *Tetraspora gelatinosa*，相似丝藻 *Ulothrix aequalis*，静水隐杆藻 *Aphanothece stagnina* 等。

值得说明的是，以上各类型水体的指示种类中，均有营养过度性藻类。就 βαms 型指示种而言，因其耐污性和厌污性介入在 αms 和 βms 型水体之间，故其中多数种类可分别在 αms 型或 βms 型水体中观察到；金藻、锥囊藻、双菱藻等os 型指示种亦可在βms 型水体中出现。此外，小球藻、衣藻、栅藻、色球藻、腔球藻等微型单细胞藻类，对生长环境的适应性很强，可在多种类型的水体中采到，故而在利用藻类污染指示种评价水体污染状况和湖泊营养型时，必须结合其它评价参数。

1.2 藻类生长潜力

藻类同其他所有的生物一样，需要C、N、P、K、Ca、Mg、S 等多种营养元素，以及Fe、B、Mn、Zn、Co、Cu、Mo、Si 等系列微量元素才能维持正常的生长，进行光合作用，为其它水生生物提供足够的氧气，达到能量代谢和物质循环的目的。所有营养元素中，N、P 是最重要的，如果N、P 不足，藻类的生长繁殖受到限制；如果N、P 过于丰富，又会引起藻类非正常过量繁殖，出现所谓的"富营养化"现象(Eutrophication)，发生藻类水华(Algal-bloom)，导致水质下降，污染加重，水生态平衡失调。因此，在评价湖泊水质和营养状况时，水体中的营养成份除靠化学方法予以测定外，还可通过藻类生长潜力的测试来甄别，以便有效、准确地获知水体中哪些营养元素含量不足，限制了藻类的生长；哪些营养元素过剩，导致藻类疯长，引发富营养化。藻类生长潜力测试的实验设置可参考表1 提供的方案。

用于藻类生长潜力试验的藻种和培养基名目繁多，不胜枚举，通常选用对其形态、生理生化特征、生长规律和培养方法均有深入研究，且有大量相关资料可供借鉴的藻种及其相应的培养基。对表1 试验设置可能出现的结果依其甄别目的分析如下。

1) 处理No.1 与对照相比，藻类的最大生长值有3 种可能：a) 大于对照：表明原水中的综合营养十分丰富，一旦阳光充足，水温适宜，水体极易发生富营养化；b) 与对照相当：原水中各种营养足够藻类生长繁殖，但不会引起富营养化；c) 小于对照：原水中可能存在藻类生长上的营养限制因子。

表1 藻类生长潜力试验设置

Table 1 A setting for algae growth potential test

No	试验设置	甄别目的
1	原水[1)]，不添加任何营养	在原水综合营养状况下藻类的最大生长值
2	原水，煮沸，不添加任何营养	原水中活性物质对藻类生长的影响
3	原水＋N(按对照培养基的量，下同)	N 元素对藻类生长的影响
4	原水＋P	P 元素对藻类生长的影响
5	原水＋N＋P	N 和P 对藻类生长的协同效应
6	原水＋对照全部营养元素	原水中是否存在对藻类致毒的物质
7	标准培养基[2)]	参比对照

注：1) 供试原水在配水前，先行过滤，如果为了比较有菌和无菌条件下藻类的生长情况，试验中可增加"原水，灭菌，不添加任何营养"的试验设置；2) 对照培养基因被试藻类种类的不同而有差异。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2) 处理No.2 与No.1 相比，藻类的最大生长值有可能：< No.1 或 = No.1，分别表明活性物质的破坏对藻类的生长有或没有影响；如果出现大于No.1 的现象，则说明杀死其它活性物质对藻类的生长有利。

3) 处理No.3、No.4 和No.5 分别与对照相比，进一步确定藻类生长上的限制性营养元素是N 还是P，或二者都是。

4) 处理No.6 的藻类生长量，理论上应大于对照。如果小于对照，则认为原水中可能存在对藻类生长产生致毒效应的物质，这一点，可通过毒性生物测试予以验证。有关毒性生物测试的方法可参阅文献[9]。

1.3　藻类生长量与光合放氧

藻类生长量的表达有多种形式，依试验条件和检测目的的不同而各有所侧重。在湖泊水质和营养型评价的研究中，藻类的细胞密度、生物量、叶绿素 a 含量等，都是最基本的检测指标，条件允许时，还可进行藻类光合放氧能力的测试。大量研究资料表明，藻类生物量的多寡与水体的营养状况呈正相关性[10,11]，其所反映的湖泊营养状况和污染程度比较客观，且不需要太复杂、精密的分析仪器和设备。为引用方便起见，表 2 列举了国内外相关文献[12~14]中应用较多的藻类生长量评价指标及评价标准。

1.4　种类多样性指数与综合指数

藻类的种类多样性指数是环保学者在评价水质时最常用的检测指标，主要以藻类细胞密度和种群结构的变化为基本依据评价水体的污染程度。文献中使用较多的多样性指数及其计算式有

Shannon-Weaver 指数：$H' = -\sum(n_i/N)\cdot\log_2(n_i/N)$

Margalef 指数：　$D = (S-1)/\ln N$

Gleason 指数：　$D = S/\ln N$

Cdum 指数：　$D = S/1000$ 个体

式中　S 为种类数，N 为同一样品中的个体总数，n_i 为第 i 种的个体数[14,15]。评价标准是：指数值越大，水质越好，即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，稳定性变差，水质下降。孙军等人应用模糊综合评判的方式对浮游植物常用的多样性指数进行综合分析后发现，不同的多样性指数各有其优缺点[15]。为此，建议在应用藻类多样性指数评价水质时，至少选用2 种或2 种以上的计算式进行计数，以确保评价结果的可信性。藻类综合指数(K)是将藻类的种群结构进一步细化，并依此判断水体的营养程度，其计算式为：K =(蓝藻门＋绿球藻目＋中心纲硅藻＋裸藻) 种类数/鼓藻目种数[16]，K 值越大污染越重，营养级别越高。尽管综合指数与多样性指数的侧重点有些不同，但所得出的评价结果，二者应基本吻合。

以上仅从宏观方面对水体富营养化的藻类生物学评价作了简要综述。随着人们对富营养化研究的不断拓展和创新，已有学者将藻类细胞生物学、藻类分子生物学和生物化学应用于水体富营养化的评价中[17]，从微观上使湖泊富营养化的藻类生物学监测迈上了一个新台阶，对控制湖泊富营养化的进程，对确保水环境质量与安全，具有重要意义。

2　湖泊富营养化的危害与治理

湖泊是人类重要的自然资源，广泛用于防洪、灌溉、航运、给水和养殖，一旦湖泊富营养化，其主要危害有：1) 导致水体质量下降，功能减退，水生态系统失衡；2) 影响水体景观，大量肉眼可见的蓝绿色絮状或胶团状物漂浮水面，经风浪冲击而聚集水域沿岸，堆积腐烂，产生恶臭，并扩散到大气中，使周围空气遭受污染；3) 导致制水供水成本提高，净化系统堵塞，出水中含有异味，人们的饮水质量下降；4) 破坏天然水产资源，使鱼类资源小型化(Size miniature of fishes resources)，生物多样性下降，优质水产品的养殖受到严重威胁，暴发性流行病害肆虐；5) 影响水生植物的恢复，除遮光和营养竞争外，附生藻类可在水生植被的表面形成一个高pH 值、高O_2 和低CO_2 的环境，使水生植被对CO_2 的可利用性降低、光合作用受阻，以致水体的自净能力减弱。如此种种，最终均将影响到人类的身体健康，其潜在危害不容忽视，为此，对湖泊富营养化的治理研究受到普遍重视。

2.1　富营养化治理中藻类对N、P 的生物降解研究

大量研究结果证明，湖泊富营养化的发生主要是因为N、P 等营养盐含量超过了湖体本身的自净能力，加上缓慢的水流流态和适宜的温度及光照条件等[18]，由于水流流态和局部水域的气候条件目前尚无力通过人工措施予以调节，故而只能通过降低水体中的营养盐浓度来控制富营养化的发生。半个世纪以来，国内外学者在‘杜绝外源营养盐的输入和对内源营养盐的生物降解’方面进行了许多有益的探索，仅藻类对N、P 的生物处理技术，就经历了从藻菌氧化塘，高效藻类塘，活性藻和固定化藻类等诸多改进，迄今已得到广泛应用并取

表 2　湖泊营养类型评价的藻类生物学指标与标准

Table 2　Algal biological index and standards for evaluation of lake trophic status

评价指标	评价标准						
	极贫营养	贫营养	贫中营养	中营养	中富营养	富营养	极富营养
初级生产量/($g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$)	< 0.5	0.5	0.6~0.5	1.1~3.0	3.1~5.0	5.1~7.5	7.6~10.0
生物量/($mg\cdot L^{-1}$)	< 0.1	< 1.0	< 3.0	< 5.0	< 7.0	< 10.0	≥10.0
叶绿素/($\mu g\cdot L^{-1}$)	< 0.5	< 1.0	< 5.0	< 25.0	< 50.0	< 500	≥500
细胞密度/($\times 10^6\cdot L^{-1}$)	≤0.5	≤1.0	1~9	10~40	41~80	81~99	≥100
种群结构	甲藻、金藻、硅藻		蓝藻、绿藻、硅藻、鼓藻			蓝藻、硅藻、绿藻、裸藻	
多样性指数 d	5(清洁)，> 4(寡污)，>3(β中污)，<3(α中污)						
多样性 H 值	>3(轻或无污染)，1~3(中污染)，0~1(重污染)						
藻类综合指数	≤1.0(贫营养)，1.0~2.9(中营养)，≥3.0(富营养)						

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

得显著成效[19]。

十五期间，作者承担了国家高技术研究发展计划(863计划)子课题《受污染城市水体修复技术与示范工程》项目中的部分内容，主要研究着生藻反应器的研制及其对污水中N、P营养的吸收与转化效率，与20世纪50年代提出的藻菌氧化塘、60年代改进的高效藻类塘、70年代发展的活性藻工艺和80年代创新的固定化藻类技术等相比，着生藻反应器具有易于收获过量的藻类细胞，不需要特别的暴气装置，程序更为简便，管理费用明显降低等优势。作者在室内条件下小规模研究结果表明，在接种量40 g/L(鲜重)、流速25 L/d、光强3000 Lux、温度13～18 ℃的条件下处理15 d，水网藻(*Hydrodictyon reticulatum*)反应系统的TP、PO_4-P、TN和NH_4-N的日均减少量分别为3.72 mg/L，1.64 mg/L，6.17 mg/L和0.72 mg/L；平均去除率分别为45.82%，40.52%，49.08%和57.37%；刚毛藻(*Cladophora oligoclona*)反应系统的日均减少量分别为4.94 mg/L，3.53 mg/L，4.80 mg/L和0.32 mg/L，平均去除率55.64%，49.01%，39.16%和28.15%[20]。露天条件下140 L试验规模的研究表明，在5d的处理期内，TN、TP含量分别由(36.97±0.26) mg/L和(2.88±0.02) mg/L减少至(1.44±0.09) mg/L和(0.07±0.01) mg/L，单位面积藻类对N、P的吸收速率分别达到1.84 g/(m^2·d)和0.15 g/(m^2·d)，去除率分别高达96%和98%，显而易见，大型丝状着生藻对污水中的N、P养分具有较高的转化率和去除率，值得深入研究，并使其在湖泊富营养化治理中发挥作用。

2.2 富营养化治理中的除藻研究

湖泊富营养化的具体体现是藻类"疯长"和水华爆发，因此，去除水体中的过量藻类细胞是富营养化治理的另一重要方面。由于过量繁殖的藻类可在短期内形成大量有机物质，并导致水体带有不同程度的异味，即使通过过滤或净化处理，水中的异味仍会残留，故除藻技术除了解决地面水域，尤其是自来水厂取水口水域中存在的大量藻类细胞外，更重要的是要消除其所产生的异味。有关除藻剂的研制和除藻方法的探索，长期以来备受国内外学者的重视，相继提出了多项除藻工艺。目前国内应用较多、技术上较成熟的除藻工艺大致有：臭氧——气浮联用除藻工艺[21]；絮凝或混泥沉淀除藻工艺[22]；活性炭或微滤机直接过滤除藻工艺；强氧化剂(如高锰酸钾复合药剂，高铁酸盐复合药剂，硫酸铜盐复合药剂和过氧化氢等)除藻工艺[23～26]，这些技术为提高给水供水质量发挥了重要作用。此外，陈鸣钊等人通过改变生态条件和应用浮游生物滤清器除藻，亦获得极为满意的效果，除藻率可达84%～93%[27]。作者近期研究了一种新型除藻剂——稳定性二氧化氯对人工培养的斜生栅藻和采自东湖的天然混合藻类的致死效果，结果表明，在25 mg/L浓度中暴露12 h，或在20 mg/L浓度中暴露36 h，被试藻类均100%死亡；当浓度波动在5～15 mg/L时，藻类的死亡百分率随暴露时间的延长和处理浓度的增加而上升，小于1 ppm的浓度，对被试藻类基本上不造成伤害[28]。有关除藻剂的研制和除藻方法的探索仍在继续，相信随着研究的不断深入和新型除藻剂和除藻技术的相继问世，人们的饮水卫生与安全必将进一步提高。

3 湖泊富营养化防治对策探讨

迄今，人们对湖泊富营养化的发生机理、环境条件和控制对策进行了许多卓有成效的研究，对湖泊富营养化问题的严重性以及解决问题的迫切性已有充分认识[29,30]，普遍认为湖泊富营养化发生的基本因素大致有3方面：1) 总氮、总磷等营养元素较为充足；2) 适宜的温度和光照条件；3) 缓慢的水体流速。鉴于水温和光照受气候条件所控制，水体流速受水位升降所左右，目前均无力通过人工措施加以调节。故此认为，减少湖泊水域中的营养浓度，严格控制点、面源污染，严禁含高浓度N和P的废水直接排入是遏制和治理湖泊富营养化的关键。此外，通过加强流域和水源地的生态修复和生态环境保护，局部恢复挺水植物以提高水体本身的自净能力；必要时引清冲污或清淤截污，以降低内源营养盐的浓度和防止爆发性病害的蔓延。同时还可采取合理适度放养的手段，以优化和调控水生态系统的结构和功能。相信只要各级部门加大资金投入和工作力度，严格执行政府部门制定的具体水资源管理措施，科学监控、综合防治、合理利用，湖泊富营养化的进程定会得到遏制，湖泊水域的生态环境必将得以逐渐改善。

References(参考文献)：

[1] Xu Xinyi(许新宜), Jin Chuanliang(金传良) and Shi Yubo(石玉波). Status and problem of water environment in China[J]. *China Irrigation* (中国水利), 1997, 12:19～20

[2] Liu Jiankang(刘建康). *Ecological Study on East Lake*(东湖生态学研究)[M]. Beijing: Science Press, 1995

[3] Kuang Qijun(况琪军), Tan Yuyun(谭渝云) and Wan Dengbang(万登榜). Study on the phytoplankton in the middle and lower reaches of the Hanjiang river and the prevention of water-blooms [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2000,9(1):63～70

[4] APHA, AWWA and WPCF. *Standard methods for the examination of water and wastewater, 15th edition* [M]. Washington: American Public Health Association, 1981

[5] B Fordy. *Phycology* (藻类学)[M]. Luo Dian (罗迪安), tran. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1980.428

[6] Lu Quanzhang (卢全章) (translated). *Environment and Index Organizer* (环境和指示生物)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1987

[7] Kuang Qijun (况琪军) and Bomchul Kim (金凡澈). Phytoplankton and trophic status in the South Han River, Korea [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 1999,8(2):221～226

[8] Kuang Qijun, Bi Yonghong, Xia Yicheng, et al. Phytoplankton community and algal growth potential in Taipinghu Reservoir, Anhui Province, China [J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2004, 9:119～124

[9] Kuang Qijun (况琪军), Hu Zhengyu (胡征宇), Zhao Xianfu (赵先富), et al. Approach to application prospects of algal biotechnology in protection of water environment [J]. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2004, 4 (Suppl):46～49

[10] Feng Jianshe (冯建设). Phytoplankton and water quality in Baiyangdian [J]. *Jiangshu Environment Science and Technology* (江苏环境科技), 1999, 2:27～29

[11] Guo Peitong (郭沛通), Lin Yuzhen (林育真) and Li Yuxian (李育仙). Phytoplankton and water quality in Dongping Lake [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology* (海洋湖沼通

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

报)，1997，4：37～42

[12] Marglef D R. Information theory in Ecology [J]. *General Systems*. 1958，(3)：36～71

[13] Cai Qinhua (蔡庆华). Comprehensive evaluation on eutrophication of East Lake [J]. *Oceanology and Limnology* (海洋与湖沼)，1993，24(4)：335～339

[14] Robert E. A trophic state index for lakes [J]. *Limology and Oceanogrophy*，1977，22(2)：361～369

[15] Sun Jun (孙军) and Liu Dongyan (刘东艳). The application of diversity indices in marine phytoplankton studies [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报)，2004，26(1)：62～75

[16] Cao Xiaodong (曹小东). An expert system of ecological index analysis on phytoplankton community [J]. *Chongqing Fisheries* (重庆水产)，1998，4：33～34

[17] Douterelo I，Perona E and Mateo P. Use of cyanobacteria to assess water quality in running waters [J]. *Environmental Pollution*，2004，(127)：377～384

[18] Lei Anping (雷安平)，Shi Zhixin(施之新) and Wei Yinxin(魏印心). Diversity of the phytoplankton in Donghu Lake，Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica* (水生生物学报)，2003，27 (2)：179～184

[19] Katsuya A，Atsue I and Morio H. Removal of nitrate，nitrite ammonium and phosphate ions from water by the aerial microalga Trentepohlia aurea. *Journal of Applied Phycology*，2002，14：129～134

[20] Kuang Qijun(况琪军)，Ma Peiming(马沛明)，Hu Zhengyu (胡征宇)，et al. Study on the removal efficiency of nitrogen and phosphorus by filamentous green algae [J]. *ACTA Hydrobiologica Sinica*(水生生物学报)，2004，28(3)：323～326

[21] Chi Yuxia(迟玉霞) and Chen Yisun(陈翼孙). Treating the water containing algae by making use of the ozone link aero-floataion [J]. *Environment and Development*(环境与开发)，1999，14(1)：14～15

[22] Yin Weihong (尹卫红)，Song Xiangyang (宋向阳)，Zhang Shenjun (张甚军)，et al. Study of algae removal by coagulation and precipitation in Zhengzhou Baimiao Potable Water Plant [J]. *Industrial Water & Wastewater*(工业用水与废水)，2000，31(4)：7～9

[23] Ma Jun(马军)，Shi Ying(石颖)，Liu Wei(刘伟)，et al. Study on the removal efficiency of algae by high iron compounds [J]. *China Water & Wastewater*(中国给水排水)，1998，14 (5)：9～11

[24] Xu Guoren(许国仁) and Li Guibai(李圭白). Study on the removal efficiency of algae and odour by potassium permanganate compounds [J]. *China Water & Wastewater*(中国给水排水)，1998，14(12)：13～15

[25] Yuan Baoling(苑宝玲)，Qu Jiuhui(曲久辉)，Zhang Jinsong (张金松)，et al. The efficiency of algae removal from drinking water by ferrate [J]. *Environmental Science*(环境科学)，2001，22(2)：78～81

[26] Wang Guiyong(王桂荣) and Zhang Jie(张杰). Study on the removal efficiency of algae by H_2O_2 [J]. *J. of Wuhan Urban Construction Institute* (武汉城市建设学院学报)，2001，18(2)：21～24

[27] Chen Minzhao(陈鸣钊)，Xu Jinhuai(许京怀). Study on the algae removal by using of a plankton filtrater [J]. *Shanghai Environmental Science*(上海环境科学)，2000，19(8)：385～387

[28] Kuang Qijun(况琪军)，Bi Yonghong(毕永红)，Hu Zhengyu (胡征宇)，ei al. Study on the removal efficiency of algae by a novel algaecide-stationary CLO_2 [J]. *ACTA Hydrobiologica Sinica*(水生生物学报)，2003，27(5)：554～556

[29] Qin Boqiang(秦伯强). Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River [J]. *Journal of Lake Sciences*(湖泊科学)，2002，14(3)：193～202

[30] Sun Gang (孙刚) and Sheng Lianxi (盛连喜). Ecological engineering for eutrophication control in lake [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报)，2001，12(4)：590～592

Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology

KUANG Qi-jun[1]，MA Pei-ming[1,2]，HU Zheng-yu[1]，ZHOU Guang-jie[1,2]

([1] Institute of Hydrobiology，The Chinese Academy of Sciences，Wuhan 430072，China；[2] Graduate School，The Chinese Academy of Sciences，Beijing 100039，China)

Abstract：The present paper aims to introduce the authors' research on the method of evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology. As a matter of fact，with the fast industrialization tendency，lake eutrophication in China is still getting more and more exacerbated for a number of reasons，both human activities and natural factors. Luckily，algae is one of the important organisms in lake eco-system，whose growth is favorable for metabolism and species constitution. In the paper，the authors give a general outline on the application of algae in biologica1 assessment on lake trophic status with detailed information about the indicator of algae in the water bodies of hypertrophication，eutrophication，mesotrophication and olipotrophication. In addition，an example for giving an algal growth potential test，and the corresponding AGP test results. In addition，the authors have also discussed some algal species diversity and synthesis indexes as well as their evaluated standards. In order to figure out the key problems on nutrients excess and algal overgrown in lake eutrophication，a brief introduction about the recent progress on the study of nutrients and algae removal，whose research results about the research field conducted by the authors are also given. In order to protect our lakes against the eutrophication，it is important to draw up a more detailed and functional management rules and regulations on water resources，to strengthen the ecological environment protection of valleys and water areas，and to prohibit strictly the discharge of the wastewater with high concentration of phosphorus and nitrogenous compounds into water bodies.

Key words：environmental engineering；algae；lake eutrophication；saprobic indicator；nutrients removal

CLC number：X524　　**Document code**：A

Article ID：1009-6094(2005)02-0087-05

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net