

经济植物浮床技术 改善富营养化 水体水质的机理及应用

胡绵好·著



中国环境科学出版社

经济植物浮床技术

改善富营养化

水体水质的机理及应用

葛晓峰 著



中国环境出版社

经济植物浮床技术改善富营养化 水体水质的机理及应用

胡绵好 著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

经济植物浮床技术改善富营养化水体水质的机理及应用/胡绵好著. —北京: 中国环境科学出版社, 2010 3
ISBN 978-7-5111-0216-4

I. 经… II. 胡… III. 水体—富营养化—污染防治 IV. X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 041516 号

责任编辑 刘璐 肖卫

封面设计 天字行 

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京东海印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2010 年 3 月第 1 版
印 次 2010 年 3 月第 1 次印刷
开 本 880×1230 1/32
印 张 6.125
字 数 160 千字
定 价 16.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 世界水资源及水体富营养化	1
1.2 水体富营养化、发生机理及其评价方法	8
1.3 水体富营养化危害及其控制措施	16
1.4 植物对富营养化水体修复的研究进展	28
1.5 本研究的主要内容及其目的、意义	35
第 2 章 不同经济植物对富营养化水体净化能力的比较研究	48
2.1 材料与方法	48
2.2 结果与分析	50
2.3 讨论	54
2.4 小结	56
第 3 章 不同品种黑麦草对富营养化水体净化能力的比较研究	58
3.1 材料与方法	59
3.2 结果与分析	62
3.3 讨论	70
3.4 小结	74
第 4 章 水生经济植物—浮床附生藻类对富营养化水体 水质改善的协同效果	77
4.1 材料与方法	78
4.2 结果与分析	81
4.3 讨论	86

4.4 小结	89
第 5 章 浮床系统中水生经济植物根际氮循环细菌 及其作用的研究	92
5.1 材料与方法	93
5.2 结果与分析	96
5.3 讨论	99
5.4 小结	103
第 6 章 pH 和曝气处理对水生经济植物改善富营养化 水体水质的影响	108
6.1 材料与方法	109
6.2 结果与分析	110
6.3 讨论	116
6.4 小结	119
第 7 章 不同温度处理对水生经济植物净化富营养化 水体能力的影响	122
7.1 材料与方法	123
7.2 结果与分析	124
7.3 讨论	131
7.4 小结	136
第 8 章 富营养化水体中水生经济植物氮代谢酶特性与 不同形态氮去除的关系	143
8.1 材料与方法	144
8.2 结果与分析	146
8.3 讨论	149
8.4 小结	151

第 9 章 水生蔬菜对富营养化水体净化及资源化利用研究	155
9.1 材料与方法	156
9.2 结果与讨论	158
9.3 小结	162
第 10 章 生态浮床-简易湿地组合系统对富营养化水体 净化效果的研究	165
10.1 材料与方法	166
10.2 结果与分析	168
10.3 讨论	171
第 11 章 凤眼莲-固定化氮循环细菌联合作用对富营养化 水体原位修复的研究	176
11.1 材料与方法	176
11.2 结果与分析	179
11.3 讨论	184

第 1 章 绪 论

1.1 世界水资源及水体富营养化

1.1.1 世界水资源概况及其污染现状

1.1.1.1 世界水资源概况

水是生命之源，没有水就没有生命。世界上水的总储量约有 14 亿 km^3 ，覆盖了 70% 以上的地球表面，但是其中 97.2% 的水都分布在大洋和浅海中，这些咸水是人类无法直接利用的。地球的淡水比例仅占 2.8% 左右，陆地上两极冰盖和高山冰川中的储水占总水量的 2.15%，目前也无法直接利用，其余不到 1% 的淡水又有将近一半被土壤和空气吸收，余下的部分蕴藏在地球表面分布极不均等的江河湖泊之中，约 0.65% 才是人类可直接利用的。据统计，过去的 50 多年，全世界淡水使用量增加将近 4 倍，每年高达 4 130 km^3 ，农业用水就占全部用水的 60%。全球人均水资源拥有量日益下降，有 100 多个国家缺水，严重的有 40 多个。据预测，亚洲的用水量 21 世纪将从目前占世界用水量的 1/2 上升到近 2/3。我国水资源总量约 28 124 亿 m^3 （其中地下水 8 000 亿 m^3 ），居世界第六，而人均水资源不足 2 400 m^3 ，约为世界人均水资源量的 1/4^[1]，相当于美国的 1/5、加拿大的 1/48，世界排名第 110 位，我国被列为全球 13 个人均水资源贫乏国家之一。

1.1.1.2 水资源污染现状

据不完全统计，全世界每年排放的污水超过 4 300 亿 t，造成

55 000 亿 m^3 的水体受到污染, 占全球径流总量的 14% 以上。由于人类的活动已是 140 万 t 氮输入环境中, 每年相当于 1 000 万多辆卡车氮肥^[2]。据联合国调查统计, 全世界河流稳定流量的 40% 左右受到污染; 世界卫生组织还指出, 世界上近 80% 疾病是由于水体污染及其基本的卫生设备所致, 且全球每天死于水源疾病的人数达 2.5 万人, 数百万人身体受损^[3]。

据估计, 全世界有半数以上的国家和地区缺乏饮用水, 特别是经济欠发达的第三世界国家, 目前已有 70%, 即 17 亿人喝不上清洁水, 世界有将近 80% 人口受到水荒的威胁。我国人均淡水为世界人均水平的 1/4, 属于缺水国家。全国有 300 多个城市缺水, 有 29% 的人正在饮用不良水, 其中有 7 000 万人正在饮用高氟水。每年因缺水而造成的经济损失达 100 多亿元, 因水污染而造成的经济损失更达 400 多亿元。

总之, 由于城镇生活污水、工业废水的排放及农田氮肥的大量使用导致水体环境污染现象日益严重, 尤其是后者对水体中氮磷等营养盐的污染尤为突出。

(1) 地下水污染现状

农田氮肥通过径流和淋溶等途径从土壤向地表水和地下水流失, 导致水体污染已成为一种全球的现象^[4]。土壤中氮的负荷越大, 流失率也越大, 地下水氮的浓度增加。研究表明, 农田氮肥的大量施用与地下水 NO_3^- -N 浓度升高有明显的相关性^[5, 6]。在 Aurangabad 地区, 对 15 个不同村庄的地下水抽样检测发现有 93% 的饮用水样中硝酸盐含量已超出 WHO 和 BIS 规定的标准值, 氮素化肥的大量施用是导致该地区饮用水中硝酸盐含量增加的主要原因^[7]。黎巴嫩北方 Akkar 平原的 15 个井水, 有 14 个井水中硝酸盐含量已经超过了 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最高达到 $163 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[8]; 岐阜 Kakamigahara 城市的地下水硝酸盐含量有 30% 已经超过了日本规定的 $44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NO_3^- -N 的最高水平^[9, 10]。灌溉和施肥管理不善及不利的水力条件, 是近海岸地下水的硝酸盐含量增加 (高达 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NO_3^- -N) 的主要原因^[11]。Thorburn 等^[12]人对澳大利亚东北沿海岸的 1 454 个地下

井水的氮污染情况进行测定,发现地下水质量浓度为 $20\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 且还在增加;半多井水中硝酸盐含量是由于氮肥的大量施用所致。氮等营养盐污染也已成为我国城市地下水污染的重大问题。尤其是一些人口密集的老城区,居民的排泄物和废弃物就近排放,致使地下水中氮化合物的含量高达 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上。据北京市的分析资料,城区地下水中的总氮含量一般均大于 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高可达 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [13]。在对我国华北地区 14 个市、乡镇的地下水的硝酸盐含量测定发现,地下水和饮用水中氮的含量都超过 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (饮用水的规定值),认为氮肥的施用是这些城市、乡镇地下水和饮用水浓度增加的主要因素 [14]。若将我国农业中氮肥不同途径的损失率以 45% 计,我国农田氮素的损失已达 $1.0\times 10^7\text{ t}$,不仅造成巨大的浪费,也给业已脆弱的生态环境增加了压力 [15]。

(2) 地表水污染及水体富营养化

农业非点源氮磷的流失是引起所有水体富营养化的关键元素,氮不仅能促进淡水的富营养化和水生植物的生长 [16, 17],还危害一些鲑鱼和两栖动物的幼体生长 [18-20]。在英、法国,氮素流失已经成为水体污染的主要成因,从土地流失的氮和磷等营养物质进入湖泊、水库、河口、海湾、近海等缓流水体后,在适宜的环境条件下,会使水体中某些藻类或植物疯长,产生水华、赤潮和富营养化,从而导致严重的生态灾难和水生生物的大量死亡。对我国 25 个湖泊调查研究发现,水体总氮均超过了富营养化指标,某些特征性藻类 (尤其是蓝藻、绿藻等) 的异常增殖,致使水体透明度下降,溶解氧降低,严重地影响了水生生物的生存环境,水味变得腥臭难闻 [21]。

富营养化已经成为美国各个河流、溪流、湖泊、水库和河口遭受损失的最主要的原因,据 1996 年美国水质调查报告,有 40% 的河流、51% 的湖泊和 53% 的河口正受到富营养化的负面影响。美国的 2 084 个湖泊、河流等由于氮磷的过量而不能达标的水体占 61% [22, 23]。美国最大河流的入海口、世界最大的咸水湖——切萨皮克湾的富营养化问题已对水生植物和动物群落产生了严重危害。而且,有毒藻类菲斯达杀鱼藻在河流大量增长,导致了鱼类大量死亡,

严重损害人类的健康。由于流域内人口增加所造成的生活和工业污水排放已导致了瑞典南部的楚门湖蓝绿藻水华暴发及缺氧以致鱼类死亡现象也十分严重。从 1960 年到 1970 年, 未充分处理污水中的磷流入位于瑞士、奥地利和德国的国际湖泊——博登湖, 造成了富营养化。由于非点源污染和游客造成的污染引起中欧最大的湖泊——巴拉顿湖富营养问题, 已经导致了鱼腥藻水华和饮用水变味的问题也十分严重^[24]。城市污水的大量排放已使日本的儿岛湖的富营养化程度加剧, 如该水体中的总氮 (TN)、总磷 (TP) 年平均质量浓度分别为 1.5 mg/L 和 0.2 mg/L (日本环境标准则分别为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[25]。目前, 水体富营养化也成为我国最为突出的环境问题之一。据统计, 我国主要湖泊因氮磷等营养盐的输入而导致富营养化的占统计湖泊的 56%^[26]。在对我国 131 个大型湖泊的质量评价中, 67 个城市近郊水体富营养化程度普遍偏高, 太湖、鄱阳湖、滇池、杭州西湖、南京玄武湖、安徽巢湖及武汉东湖等均达到重富营养化程度。另外, 对 119 座水库营养化程度评价表明, 63 座水库为中营养化, 13 座水库为富营养化^[27]。

总之, 由于经济发展, 人口膨胀以及人类对自然资源不合理的开发利用, 世界范围内的地表水和地下水中的污染物 (包括无机无毒物, 无机有毒物, 有机无毒物, 有机有毒物) 都在不同程度上呈现出上升的趋势, 其中以氮、磷等植物营养物质的逐渐积累和不断富集所造成的全球水体富营养化现象日益严重。水体富营养化现象是当今世界水污染治理的难题, 已成为全球最重要的环境问题之一。

1.1.2 水体污染物的主要类型

(1) 需氧污染物: 水体中所含的碳氢化合物、脂肪、蛋白质等有机化合物在水中微生物等作用下, 最终分解为二氧化碳、水等简单的无机物, 同时消耗大量的氧; 而水体中的亚硫酸盐、硫化物、亚铁盐和氨类等还原性物质, 在发生化学氧化时, 也要消耗水中的溶解氧。这些物质就统称为需氧污染物。水中溶解氧的下降, 势必影响鱼类及其它水生生物的正常生活, 使水质恶化。一般来说, 大

多数鱼类要求生活在溶解氧为 4 mg/L 以上的水体中（如河鲢为 3~12 mg/L，鲤鱼为 6~8 mg/L，青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼为 5 mg/L 以上）。当溶解氧 < 1 mg/L 时，大部分鱼类窒息死亡。溶解氧消失时，水中嫌气细菌发展起来，有机物分解放出甲烷和硫化氢，便造成水体的发臭。需氧污染物主要来自城乡生活污水和造纸、食品、印染、制革、焦化、石油化工等工业废水。

（2）重金属：特别是汞、镉、铅、铬等具有显著的生物毒性。它们在水体中不能被微生物降解，而只能发生各种形态相互转化和分散、富集过程（即迁移）。重金属污染的特点是：① 除被悬浮物带走外，会因吸附沉淀作用而富集于排污口附近的底泥中，成为长期的次生污染源。② 水中各种无机配位体（氯离子、硫酸离子、氢氧离子等）和有机配位体（腐蚀质等）会与其生成络合物或螯合物，导致重金属有更大的水溶解度而使已进入底泥的重金属又可能重新释放出来。③ 重金属的价态不同，其活性与毒性不同。其形态又随 pH 和氧化还原条件而转化。④ 在其危害环境方面的特点是：微量浓度即可产生毒性（一般为 1~10 mg/L，汞、镉为 0.001~0.01 mg/L）；在微生物作用会转化为毒性更强的有机金属化合物（如甲基汞等）；可被生物富集，通过食物链进入人体，进而危害人类健康。亲硫重金属元素（汞、镉、铅、锌、硒、铜、砷等）与人体组织某些酶的巯基（—SH）有特别大的亲和力，能抑制酶的活性，亲铁元素（铁、镍）可在人体的肾、脾、肝内累积，抑制精氨酸酶的活性。六价铬可能是蛋白质和核酸的沉淀剂，可抑制细胞内谷胱甘肽还原酶，导致高铁血红蛋白，可能致癌，过量的钒和锰则能损害神经系统的机能。

（3）一般有机物：① 油类。油类已成为水体，特别是海洋污染的主要物质。石油进入水体，除了挥发一部分外，在水面形成油膜（低分子烃类可溶于水），由于风浪作用，又可生成乳化油（其油滴平均直径 0.5~25 μm ）。油能黏住鱼卵和鱼，降低孵化率并使鱼畸形、死亡。如海水中含油 100 mg/L，可使 95% 的美洲大海虾幼体于 24 h 内死亡（LD₅₀ 为 1 mg/L）；含油 0.01 mg/L 可使鱼虾贝类

有石油臭味。油类还会吸附在海兽和鱼类的呼吸器官，使其窒息而死。总之，油类会降低水生生物的品质和数量，影响水资源的质量。

② 酚类。酚类属于可被天然分解的有机物。其分解速度取决于其结构（单元酚分解较二元酚、三元酚易）、初始浓度、微生物条件、温度、曝气条件等因素，酚类生物分解最适宜的水温是 15~25℃。

③ 氰化物。天然水体对氰化物有较强的自净作用。我国各地有氰电镀废水含氰量为 30~35 mg/L；某些焦化厂粗苯和纯苯分离水含氰 1~96 mg/L；化肥厂煤气洗气水含氰 180 mg/L。

(4) 酸、碱及一般无机盐类：酸主要来自矿坑废水、工厂酸洗水、硫酸厂、粘胶纤维、酸法造纸等，酸雨也是某些地区水体酸化的主要来源。碱主要来自造纸、化纤、炼油等工业。酸碱污染不仅可腐蚀船舶和水上构筑物，改变水生生物的生活条件，还可大大增加水的硬度（生成无机盐类），影响水的用途，增加工业用水处理费用等。

(5) 致病性微生物污染：致病性微生物包括细菌和病毒。致病性微生物污染大多数来自未经消毒处理的养殖场、肉类加工厂、生物制品厂和医院排放的污水。此外，水体中还包括放射性污染物生物污染、环境内分泌干扰素污染、热污染等。

(6) 植物营养物：植物营养物主要指氮、磷化合物。来源于化肥、农业废弃物、生活污水和造纸制革、印染、食品、洗毛等工业废水。如城市居民每人每天排放污水中的氮约 50 g，美国生活污水中 50%~75% 的磷是洗涤剂产生的。过量的养分负荷，尤其是氮、磷的负荷是导致水体富营养化的主要原因^[28, 29]。一般来说，总磷和无机氮分别超过 0.02 mg/L、0.2 mg/L 就可以认为水体富营养化。

1.1.3 我国废水和主要污染物排放量

我国在 2004 年废水的排放量为 482.4 亿 t，其中工业废水排放量为 221.1 亿 t，生活污水排放量为 261.3 亿 t。化学需氧量排放量为 1 339.2 万 t，其中工业排放量为 509.7 万 t，生活排放量为 829.5 万 t；氨氮排放量为 133.0 万 t，其中工业排放量为 42.2 万 t，生活

排放量为 90.8 万 t (表 1-1)。

表 1-1 废水及主要污染物排放统计

年度	废水排放量/亿 t			COD 排放量/万 t			氨氮排放量/万 t		
	合计	工业	生活	合计	工业	生活	合计	工业	生活
2000	415.2	194.2	220.9	1 445	704.5	740.5			
2001	432.9	202.6	230.3	1 404.8	607.5	797.3	125.2	41.3	83.9
2002	439.5	207.2	232.3	1 366.9	584	782.9	128.8	42.1	86.7
2003	460	212.4	247.6	1 333.6	511.9	821.7	129.7	40.4	89.3
2004	482.4	221.1	261.3	1 339.2	509.7	829.5	133	42.2	90.8
年度增 减率/%	4.8	4	5.5	0.4	-0.4	0.9	2.5	4.5	1.7

资料来源:《2004 年中国环境状况公报》^[30]。

1.1.4 我国水体富营养化状况

由于人类活动导致大量营养物质的输入引发的富营养化问题越来越引起人们的关注,其中工农业污水和生活污水的流入使湖泊、江河中的氮、磷等营养盐不断积累,水体生产力提高,促使部分藻类生物量以及其它水生生物异常大量繁殖,水体一旦进入富营养阶段就会使水体生态环境产生很大的负面影响:水质下降,有毒藻类的产生,食物链的改变,栖息地的减少等^[31, 32],最终影响经济建设和社会发展。

我国是一个湖泊众多的国家之一,大于 1 km² 的天然湖泊有 2 300 余个,湖泊面积为 70 988 km²,约占全国陆地总面积的 0.8%。湖泊总贮水量为 7 077 多亿 m³^[33]。调查结果表明:2004 年七大水系的 412 个水质监测断面中,Ⅰ类~Ⅲ类、Ⅳ类~Ⅴ类和劣Ⅴ类水质的断面比例分别为 41.8%、30.3%和 27.9%,七大水系主要污染指标为氨氮、五日生化需氧量、高锰酸盐指数和石油类^[34]。

2004 年监测的 27 个重点湖库中,Ⅱ类水质的湖库 2 个,Ⅲ类水质的湖库 5 个,Ⅳ类水质的湖库 4 个,Ⅴ类水质湖库 6 个,劣Ⅴ类水质湖库 10 个。其中“三湖”(太湖、巢湖、滇池)水质因总氮

和总磷浓度高而均为劣V类。太湖水质与上年比有所改善,但仍处于中度富营养状况。滇池草海属重度富营养化,外海属中度富营养化。巢湖水质属中度富营养化。对于海洋环境,2004年全海域共发现赤潮96次,较上年减少23次。赤潮累计发生面积26 630 km²,较上年增加83.0%,其中大面积赤潮集中在东海。

目前,水体的富营养化已经成为我国最为突出的环境问题之一。许多大型湖泊都已经处于富营养或重富营养状态,如巢湖、太湖、鄱阳湖、滇池、杭州西湖等,而且一些河流在部分河段也出现了富营养化现象,如黄浦江流域、珠江广州河段等。据统计,我国主要湖泊处于因氮磷污染而导致富营养化的占统计湖泊的56%^[35, 36]。因此如何治理富营养化的水体,减少其中的营养物质的含量,恢复水体的综合功能,已成为当前全球性的环境问题的研究热点^[37]。

1.2 水体富营养化、发生机理及其评价方法

1.2.1 水体富营养化定义

水体富营养化指湖泊、水库和海湾等封闭、半封闭性水体及某些滞留河流(水流速度小于1 m/min)水体由于氮、磷等营养盐的富集,导致某些特征藻类(如蓝绿藻)和其它水生植物异常繁殖、异养微生物代谢频繁、水体透明度下降、溶解氧含量降低、水生生物大量死亡、水质恶化、水体发腥变臭,最终使整个水生生态系统平衡破坏的一种水污染现象。

1.2.2 水体富营养化的发生机理

富营养化过程包含着一系列生物、化学和物理变化的过程,与水体化学物理性状、湖泊河流等形态及其底质等众多因素有关,其实质是由于营养物质输入输出的失衡,而造成湖泊河流等生态系统中物种分布的平衡被打破,导致单一物种(如藻类)的疯长,从而进一步破坏了系统的能量流动和物质流动,致使整个生态系统逐

步走向消亡。其机理主要是:

(1) 氮、磷等营养物质与富营养化 丹麦著名生态学家 Jorgensen^[38]指出浮游藻类的生长是富营养化的关键过程。因此着重研究氮、磷负荷与浮游藻类生产力的相互作用和关系是揭示湖泊河流等富营养化形成机理的主要途径。根据对藻类化学成分进行的分析研究, Stumm 提出了藻类的“经验分子式”为 $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$, 可见碳、氮、磷是藻类繁殖所需的重要营养元素。藻类可以利用水中溶解的二氧化碳和有机物分解产生的二氧化碳作为自身生长所需要的碳源, 而氮和磷则是藻类生长的限制性因素。从养分最小定律供给的角度看, 按元素计氮磷比的理论临界值应为 16:1, 按重量计应为 7.2:1, 如果氮磷比小于该比值, 氮将限制藻类的增长; 如果大于该比值, 则磷是藻类增长的限制因素。富营养化水体中的氮磷只有在一定比值下, 才能使其成为限制因素, 并认为当 $N:P > 12$ 时, 受磷营养限制; 当 $N:P < 7$ 时, 受氮营养限制; 当 $7 < N:P < 12$ 时, 两种元素均不是限制因子^[39]。但氮磷重量比大于 10 时, 磷则为藻类增长的限制因素^[40]。而且, 由于水体中有一些藻类(如蓝藻、绿藻)具有固氮能力, 能够把大气中的氮转化为能被水生植物吸收和利用的硝酸盐形式, 因而使得藻类能够获得充足的氮营养物质, 因此, 氮不可能成为藻类增长的限制因素^[41]。

(2) 湖泊等水体热分层与富营养化 在温带气候地区的湖泊等水域, 水温由于受季节变化的影响而引起湖水分层和对流, 对水体富营养化有着不可忽视的影响, 由于热分层效应, 使得湖泊水体的表层水在夏季光照充足, 温度较高。若这时供给水体的营养物质充分, 藻类光合作用便随之加强, 生长旺盛。同时, 水体的底层往往处于缺氧状态, 很容易加速底泥磷的释放, 从而导致湖水磷浓度的增高。到了秋季湖水对流, 底层的内源性磷对流到了湖表层, 提高了湖表层水中的磷浓度。为第二年藻类的大量繁殖提供了充足的营养物质, 使得湖泊继续保持富营养状态。

(3) 水化学平衡与水体富营养化 湖泊水体中 pH 值、溶解氧和碳的平衡是维持湖泊生态系统良性循环的保障^[42]。大量污染物进

入湖泊后造成湖水 pH 值上升, 如长江中下游湖水 pH 值已从过去的 6.8~8.3 上升为 6.9~8.9。pH 值上升有利于水华藻类的生长, 而藻类大量繁殖又进一步提高湖水的 pH 值, 进而为水华藻类如微囊藻等的疯长提供了适宜的生长环境。根据湖水中光合作用产氧过程和污染物氧化降解的耗氧过程可知, 水体溶解氧下降有利于蓝藻的生长, 而对其他藻类生长不利。 CO_2 在水中溶解度随水温升高而降低, 当湖水氮、磷对藻类的生长达到饱和时, 碳有可能成为限制性因子, 此时增加水体中的碳源有利于水华藻类的生长。

总之, 从 20 世纪 60 年代末, 随着全球出现的海洋和淡水水体富营养化问题的不断加剧, 联合国环境规划署 (UNEP)、世界卫生组织 (WHO)、国际经济合作与开发组织 (OECD) 等众多国际组织以及世界各国都相继对富营养化形成机理及其防治对策进行了大量的试验、实践与探索, 特别是在加拿大的沃伦维德 (1968 年)、日本的合田建 (1970 年) 及奥地利的列夫勒 (1968 年) 等人研究下, 目前一致认为的富营养化形成原因主要是适宜的温度, 缓慢的水流流态, 总磷、总氮等营养盐相对充足, 能给水生生物 (主要是藻类) 大量繁殖提供丰富的物质基础, 导致浮游藻类 (或大型水生植物) 爆发性增殖。然而对于不同的水域, 由于区域地理特性、自然气候条件、水生生态系统和污染特性等诸多差异, 会出现不同的富营养化表现症状, 而且该机理的研究所涉及的学科多种多样, 所以目前对富营养化形成机理的研究还处在初级阶段, 有待更进一步的深入。

1.2.3 水体富营养化的评价方法

富营养化引起的环境问题日趋严重, 因此有必要建立一种科学的评价方法, 以便加强对水体的管理, 保护水体生态环境。水体富营养化评价, 就是通过分析与营养状态有关的一系列指标及指标间的相互关系, 对水体的营养状态做出准确的判断^[43]。由于水体生态系统较为复杂, 加之系统内部会涉及相当多的状态变量, 而且各状态变量之间的关系也相当复杂且难以描述, 因此, 在评价其指标选