

人工介质对富营养化水体中氮磷营养物质去除特性研究*

纪荣平^{1,2}, 吕锡武¹, 李先宁¹

(1: 东南大学环境科学与工程系, 南京 210096)

(2: 扬州大学环境科学与工程学院, 扬州 225009)

摘 要: 采用人工介质富集微生物对太湖梅梁湾水源水中氮磷营养物质的去除特性进行了试验研究。中试结果表明: 随着介质密度和水力停留时间的增加, 对氮磷营养物质的去除率均有提高。介质密度为 26.8%、水力停留时间为 5d 时, 人工介质对 TN、TP、氨氮、亚硝态氮的去除率分别为 26.6%、72.1%、43.2%、79.4%, 可见人工介质对富营养化水体中氮磷营养物质有较好的去除效果。增加水流速度消除了池内的溶解氧和氧化还原电位的分层现象, 提高了 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的去除效果, 没有降低 TP、 PO_4^{3-} -P、DTP 的去除效果, 说明沉淀作用并不是去除水体中氮磷营养物质的主要途径。人工介质表面富集了大量的微生物, 通过硝化-反硝化作用是富营养化水体水质改善的主要途径。

关键词: 人工介质; 氮磷营养物质; 富营养化水体; 水质改善

Performance of artificial medium for removing nutrients in eutrophic water

Ji Rongping^{1,2}, Lu Xiwu¹ & Li Xianning¹

(1: Department of Environmental Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

(2: College of Environmental Science & Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, P. R. China)

Abstract: Pilot test was made for the removal of nutrients in eutrophic source water through the use of enriched microbes by artificial medium. The results indicated that the nutrient elements removal efficiency enhanced as the medium density and hydraulic retention time (HRT) increased. The removal rates of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammoniacal nitrogen, nitrite nitrogen were 26.6%, 72.1%, 43.2% and 79.4% respectively under the medium density of 26.8% and HRT of 5d. It is evident that enriched microbes on the artificial medium can effectively remove the nutrient elements in the eutrophic source water. Because of increasing the water velocity, the delamination phenomena of the dissolved oxygen (DO) is lowered and oxidation-reduction potential (ORP) is eliminated. The removal ratio of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen was enhanced slightly whereas the elimination effect of TP, phosphate, dissolved total nitrogen (DTN) did not. So the sedimentation isn't the main approach of nutrient elements removal in source water. The large quantity of microbes is enriched on the surface of artificial medium. The nitrification and denitrification is one of the main mechanisms for water quality improvement in eutrophic water.

Keywords: Artificial medium; nutrient elements; eutrophic water; water quality improvement

由于工农业生产的迅速发展, 人类对环境资源开发利用的日益增加, 大量的营养物质进入并积累在湖泊中, 导致湖泊富营养化在短时期内出现, 水体富营养化问题已经成为世界范围内普遍存在的环境问题^[1]。造成水体富营养化的主要原因在于排入水体中的氮和磷得不到有效去除, 点源污染中氮、磷等营养元素的处理技术已基本趋于成熟, 但对于富营养化湖泊的治理, 由于湖泊水体营养物浓度低、水体容积大, 不适合采用传统工艺处理。迫切需要开发具有处理水量大、效率高、成本低的富营养化水体净化技术。目前

* 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601011-03)及江苏省科学技术厅项目(BS2004050)和江苏省环境保护专项资金项目(苏财建 2005-80-7)联合资助。2006-01-19 收稿; 2006-06-12 收修改稿。纪荣平, 男, 1965 年生, 博士, 副教授; E-mail: rpji@yzu.edu.cn.

对富营养化湖泊的治理措施有:外源污染控制、内源污染控制、生态调控和生态工程^[2]. 外源污染控制包括工业污染源的达标排放、城市生活污水的集中治理、面源污染的控制等. 内源污染控制包括底泥疏浚和覆盖^[3, 4]、捕获水体中的藻类^[5]、利用化学方法钝化营养盐^[6]、引水冲污^[7]等. 生态调控包括利用浮游动物^[8]、鱼类^[9]、水生植物^[10]控制浮游植物的生长. 生态工程包括湖滨带水生植被和湿地的恢复^[11]、局部物理生态工程^[12, 13]等措施. 研究表明外源污染控制是改善富营养化湖泊水质的前提条件,内源污染控制可短期局部改善水质,但难以长期有效控制湖泊富营养化,通过生态调控和局部生态工程可有效改善富营养化湖泊水质^[14, 15].

人工介质水质净化技术采用具有较大比表面积和容积利用率的人工介质作为生物载体,对湖水中的土著微生物进行有效富集,利用微生物的硝化-反硝化作用,去除部分氮磷营养元素,将原有的以水-土界面为主的好氧-厌氧、硝化-反硝化条件扩大到整个水体,同时利用微生物对有机污染物的降解作用,可去除水体中的有机污染物,达到净化水质的目的. 前期的研究表明,组合介质表面富集的生物量最大、生物活性最强,对富营养化水体水质有较好的改善效果^[16],本文研究了组合介质对富营养化水体中氮磷营养物质的去除特性,包括不同的介质密度、水力停留时间、水流速度等对水质净化效果的影响.

1 试验装置及测定方法

1.1 试验装置简介

试验装置建在中科院南京地理与湖泊研究所“太湖梅梁湾水质改善技术试验研究基地”的湖边,共4格,每格长6 m,宽1.2 m,深1.8 m. 组合介质由中心盘(骨架)、四周醛化维纶丝穿结、中心绳、空隔套管等组成. 中心盘(塑料片体)经特殊加工,四周纤维均匀地分布在片体周围,使纤维的有效面积充分利用,具有比表面积大、挂膜快、不易结团、寿命长、老化生物膜易脱落等特点. 该介质适合各种微生物生长在其表面,并构成相应的生物膜.

由于进水水质波动较大,为确保数据的可比性,不同介质密度和水力停留时间试验在3格池内同时进行,即保持一定的水力停留时间,3格内的介质密度分别为15.6%、26.8%、38.0%(介质所占体积/水体体积);保持一定的介质密度,3格内的水力停留时间分别为3 d、5 d、7 d. 中试试验装置流程见图1. 水流速度试验是在组合介质池(1号)出水处增加一台循环泵,将出水回流到反应器的进水处,增加反应器内的水流速度,模拟太湖内的水力流态,考察水流速度对处理效果的影响. 设两个对照池,一个对照池(3号)内,有组合介质,但无循环泵;另一个空白对照池(4号)内装循环泵,但无组合介质. 1号和4号池内水流速度与梅梁湾取水口附近的流速基本一致.

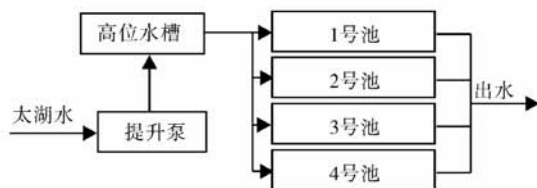


图1 中试试验装置流程

Fig. 1 Schematic diagram of pilot experiment setup

1.2 测定项目和方法

总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)、亚硝态氮(NO_2^--N)、溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)、悬浮物(SS)等的测定方法参考文献^[17, 18]. 溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)测定采用多参数水质检测仪,型号:650MDS(美国YSI公司),探头型号:600XL. 采用荧光原位杂交(FISH)法测定湖水中组合介质上硝化菌数量^[19],采用4'6-二脒基-2-苯基吡啶盐酸盐(DAPI)荧光染色法测定了湖水中人工介质上的细菌总数^[20].

反硝化潜力测定方法:将取出的人工介质放入小桶内,加入4 L去离子水,用纯 N_2 曝气,实测DO到0

后,加入 5 ml NaNO_3 溶液,轻轻搅拌使水中的 NO_3^- -N 浓度约 4 mg/L,将液体石蜡倾倒入水面形成约 5 mm 的液体石蜡膜,隔离外界空气,同时监测水中 DO 浓度,保证在试验期间 DO 为 0. 试验在 20℃ 恒温箱中进行,定时取水样测定 NO_3^- -N 浓度.

2 试验结果与分析

2.1 介质密度对氮磷营养物质去除效果的影响

2005 年 5-6 月进水 TN 浓度平均值 5.30 mg/L,按照《太湖营养类型评价标准》^[21],为极度富营养,可见梅梁湾水体富营养化十分严重,人工介质对 TN 的去除率为 27.4% - 35.4% (表 1),出水 3.43 - 3.85 mg/L,处于极度富营养-重度富营养之间. 进水 TP 平均值 0.22 mg/L,处于重度富营养-富营养之间,人工介质对 TP 的去除率为 52.4% - 59.8%,出水处于富营养-中富营养之间,可见通过人工介质对水质的净化,可将水体的富营养状况降低一个等级.

按照《地表水环境质量标准 (GB3838-2002)》,进水 TP 浓度 0.22 mg/L,为劣 V 类水体,经过人工介质净化后的水体可达Ⅳ类水体,水质提高了两个等级. 我国《地表水环境质量标准》和《生活饮用水卫生规范》中虽然没有对水体中的 NO_2^- -N 浓度做明确规定,但《城市供水 2000 年技术进步发展规划》中对一类自来水公司提出了 NO_2^- -N 浓度不得高于 0.10 mg/L^[22]的要求. 而太湖梅梁湾水体中平均值为 0.31 mg/L,人工介质对 NO_2^- -N 的去除率达 80% 以上,取得了较好的处理效果. 由表 1 可见,随着介质密度的增加,对 TN、TP、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 的去除率均有所增加.

表 1 介质密度对氮磷营养物质去除效果的影响*
Tab. 1 Removal effect of N and P nutriment substance in different medium densities

项 目	进水浓度 (mg/L)	出水浓度 (mg/L)			去除率 (%)		
		密度 1	密度 2	密度 3	密度 1	密度 2	密度 3
TN	5.30	3.85	3.60	3.43	27.4	32.0	35.4
TP	0.219	0.105	0.102	0.088	52.4	53.6	59.8
NH_4^+ -N	0.511	0.379	0.346	0.32	25.7	32.3	37.4
NO_2^- -N	0.308	0.062	0.040	0.037	79.8	86.9	88.1

* 密度 1 为 15.6%,密度 2 为 26.8%,密度 3 为 38.0%.

2.2 水力停留时间对氮磷营养物质去除效果的影响

为寻求人工介质的应用技术参数,研究了不同的水力停留时间 (HRT) 对氮磷营养物质去除效果的影响 (表 2),可见当 HRT 从 3d 增加到 5d 时,人工介质对 TN、TP、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 的去除率均有明显增加; HRT 从 5 d 增加到 7 d 时,TN、 NH_4^+ -N 的去除率仍有明显增加,但 TP、 NO_2^- -N 的去除率增加的幅度较小. 当介质密度为 26.8%、HRT 为 5d 时,人工介质对 TN、TP、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 的去除率分别为 26.6%、72.1%、43.2%、79.4%,可见通过人工介质富集微生物的方法对富营养化水源地水体中氮磷营养物质有较好的去除效果. 人工介质对 TN 和 NH_4^+ -N 的去除效果比由漂浮、浮叶、沉水植物及其根际微生物等组成的人工复合生态系统低,而对 TP 的去除效果与人工复合生态系统基本相近^[23].

表 2 HRT 对氮磷营养物质去除效果的影响
Tab. 2 Removal effect of N and P nutriment substance in different hydraulic retention time

项 目	进水浓度 (mg/L)	出水浓度 (mg/L)			去除率 (%)		
		3 d	5 d	7 d	3 d	5 d	7 d
TN	5.03	4.09	3.70	2.91	18.7	26.6	42.1
TP	0.222	0.088	0.062	0.056	60.4	72.1	74.8
NH_4^+ -N	0.52	0.35	0.29	0.25	33.4	43.2	52.0
NO_2^- -N	0.17	0.058	0.035	0.033	65.7	79.4	80.4

2.3 水流速度对氮磷营养物质去除效果的影响

为探寻人工介质在实际富营养化湖泊中的应用效果,通过循环泵增加试验装置内的水流速度,模拟太湖内的水力流态,考察了水流速度对氮磷营养物质处理效果的影响(图2). 当介质密度为 26.8%, HRT 为 7 d 时,进水 TN 质量浓度为 4.59 mg/L, 1 号、3 号出水质量浓度分别为 2.40 mg/L、1.95 mg/L,去除率分别为 47.7%、57.4%,可见增加水流速度对 TN 的去除效果有所降低. 由图 2 可以看出,增加水流速度对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除效果有所提高,对 TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、DTP 的去除效果差别不大,而对 TN、DTN 的去除效果有所降低. 因为增加水流速度后,池内的溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)分布发生了变化,3 号池由于水流比较平稳,出现了溶解氧分层现象,上层由于藻类的光合作用,释放出氧气,溶解氧较高,平均值达 16.97 mg/L,中层溶解氧平均值为 4.1 mg/L,下层由于底泥消耗了水体中的溶解氧,因此其值很低,接近为 0(图 3). 而 1 号池加循环泵后消除了溶解氧分层现象,除进水端上层溶解氧稍低外(7.28 mg/L),其余均在 8.0 mg/L 左右,消除了部分缺氧微环境的存在. 通过对 1 号池和 3 号池的氧化还原电位分布比较,发现 3 号池出现了氧化还原电位分层现象,上层和中层的氧化还原电位变化不大,在 -52 ~ -140 mV 之间,但下层的氧化还原电位在 -162 mV 至 -240 mV 之间,说明下层存在缺氧环境,可通过反硝化作用将硝态氮还原为氮气,而去除部分总氮. 1 号池的氧化还原电位较高,在 100 ~ 120 mV 之间,并从进水端到出水端逐渐升高. 因此通过循环泵增加水流速度后,强化了生物膜表面的更新,提高了生物膜的活性和传质作用,促进微生物的新陈代谢,提高了对氨氮和亚硝态氮的去除,而降低了对 TN、DTN、SS 的去除效果.

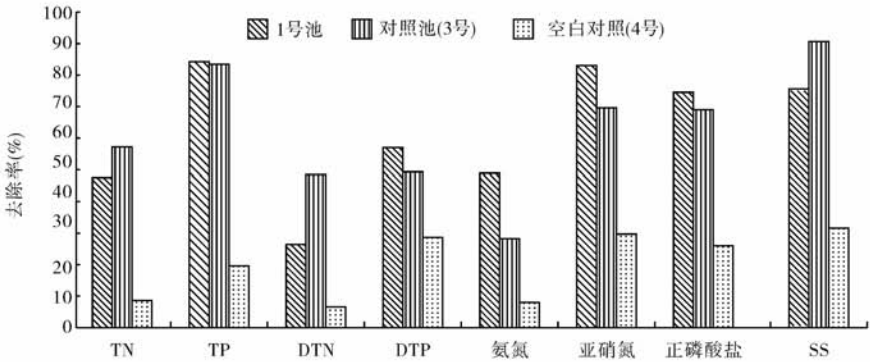


图2 水流速度对氮磷营养物质去除率的影响

Fig. 2 Removal rates of N and P nutrient substance in different flow velocities

2.4 人工介质对氮磷营养物质去除机理的探讨

2.4.1 人工介质对硝化菌等微生物的富集效果

采用荧光原位杂交(FISH)法测定了湖水中的人工介质上的硝酸菌和亚硝酸菌的密度,用DAPI法测定了细菌总数,表3为人工介质对细菌的富集效果,可见人工介质(中端)的细菌总数比湖水中的细菌总数高6个数量级,人工介质上的硝酸菌和亚硝酸细菌密度比湖水中高8个数量级. 由于人工介质的比表面积较大($1100 \text{ m}^2/\text{m}^3$),单位重量介质上的亚硝酸细菌密度比水耕植物过滤法底泥中亚硝酸菌的密度($2.2 \times 10^5 \sim 5.4 \times 10^5 \text{ cells/g}$)高出5个数量级^[24]. 湖水中硝酸菌仅占细菌总数的0.03%,而介质上硝酸菌占细菌总数的8.2%,比例提高了200多倍. 湖水中亚硝酸细菌仅占细菌总数的0.01%,而介质上亚硝酸细菌占细菌总数的1.2%,提高了120倍,可见通过人工介质可对湖水中的硝酸菌和亚硝酸菌等微生物进行有效富集.

2.4.2 人工介质的反硝化潜力 由于介质内部缺氧微环境的存在,人工介质具有一定的反硝化能力. 图4为人工介质反硝化潜力测定中加入 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 后其浓度随时间的变化曲线,可见随着反硝化过程的进行,

表3 人工介质对细菌的富集效果

Tab. 3 Enrichment effects of microbes on artificial medium

项 目	湖水 (cells/ml)	人工介质 (cells/g)
细菌总数	$(5.4 \pm 0.45) \times 10^6$	$(152.11 \pm 35.28) \times 10^{10}$
硝酸菌	$(1.68 \pm 0.14) \times 10^3$	$(12.53 \pm 0.95) \times 10^{10}$
亚硝酸细菌	$(0.54 \pm 0.09) \times 10^3$	$(1.89 \pm 0.07) \times 10^{10}$

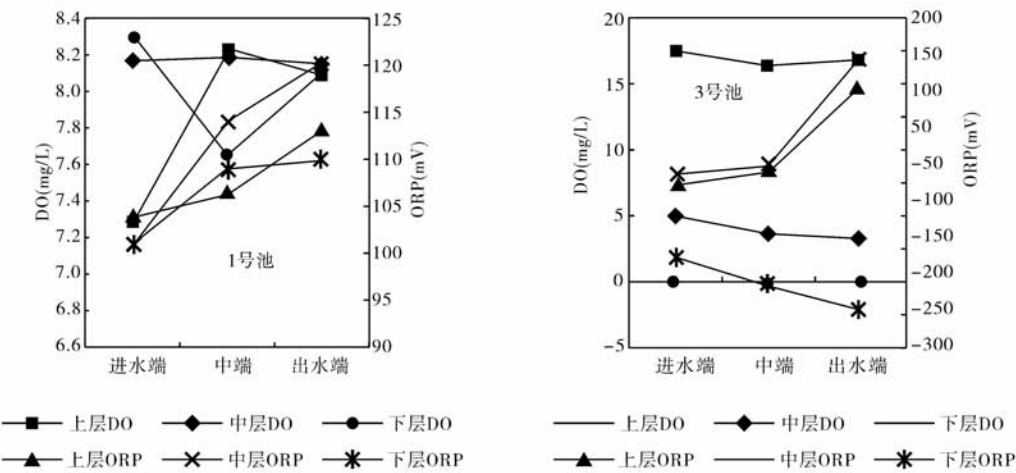


图 3 1 号池和 3 号池的溶解氧和氧化还原电位分布
Fig. 3 Distributing of dissolved oxygen and oxidation-reduction potential in No. 1 and No. 3

NO_3^- -N 浓度呈直线型下降,可近似为零级反应,经计算单位重量介质的反硝化潜力为 $(8.6 \pm 5.5) \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{h})$,而水耕植物过滤法底泥的反硝化潜力为 $4.8 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{h}) - 8.1 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{h})$,可见人工介质的反硝化潜力比水耕植物过滤法底泥的反硝化潜力高出一个数量级^[24]. 同时由图 3 可见,下层溶解氧接近 0,氧化还原电位在 -162 至 -240 mV 之间,满足反硝化所需的缺氧条件,接近底泥部分也能通过反硝化作用而去除部分总氮.

3 结果与讨论

- (1) 通过人工介质富集微生物的方法对太湖梅梁湾水源地水体中氮磷营养物质有较好的去除效果.
- (2) 随着介质密度的增加,对氮磷营养物质的去除率均有所增加.
- (3) 当水力停留时间从 3 d 增加到 5 d 时,对 TN 、 TP 、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 的去除率均明显增加;当水力停留时间从 5 d 增加到 7 d 时,对氮磷营养物质的去除率增加的幅度较小.
- (4) 增加水流速度并没有降低对太湖梅梁湾水体中 TP 、 PO_4^{3-} -P、DTP 的去除效果,对 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的去除效果反而有所提高,但对 TN 、DTN、SS 的去除效果有所降低,同时增加水流速度消除了池内的溶解氧和氧化还原电位的分层现象,强化了生物降解作用. 说明沉淀作用并不是去除水体中氮磷营养物质的主要原因,而通过人工介质富集微生物是改善水源地水质的主要途径.

在大多数环境中存在着许多土著微生物进行的自然净化过程,但由于微生物浓度低、种类少,生物降解过程时间长. 在富营养化水体中使用人工介质,为湖水中土著微生物提供附着生长的场所,使微生物得以富集并在人工介质表面形成一层生物膜,可对水体中的有机污染物和藻类进行强化生物分解,同时生物膜上附着生长的原生动、后生动物对藻类进行捕食,老化的生物膜脱落沉降进入底泥,达到净化水质的目的. 有研究表明利用大型水生植物竞争性地吸收内源营养,具有优先占领有利于高等水生植物优势的生态位,可取得较好的水质改善效果^[25],但水生植物受季节的影响较大,冬季植物死亡后,营养物质又释放入湖泊,形成内源污染. 而人工介质不存在水生植物的季节性生长问题,也不存在收割的问题,其布置不受垂直深度、透明度等因素的影响,可应用于风浪大、透明度低、无底泥淤积等难于恢复水生植物的区域,可弥补水生植物在深度分布上的不足(沉水植物和浮叶植物之间). 氮循环细菌在水体自净能力中具有不可忽视的作用,人工介质上富集的微生物不但能进行有机物的矿化分解,而且通过硝化反硝化作用,可去除部分氮

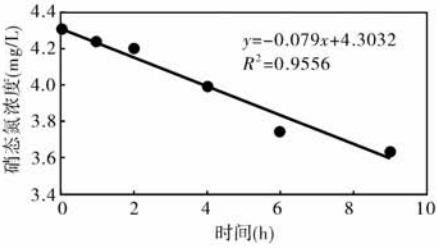


图 4 NO_3^- -N 浓度随时间的变化曲线
Fig. 4 Changes in NO_3^- -N concentration

素。另外人工介质还可起到缓流、消波、促淤、防止底泥再悬浮的作用^[26],减少风浪和摄食底栖生物鱼类所引起的沉积物再悬浮,降低水的浊度,改善透明度和水下光照条件,为沉水植物的恢复提供前提条件。人工介质还可增加水生态系统的生物多样性,可为植食性浮游动物提供逃避鱼类摄食的隐蔽所,为许多粘性卵鱼类提供产卵场所,恢复生态系统食物链网。在鱼类、蚌类控藻区域应用,可对鱼、蚌产生的排泄物进行生物降解,降低二次污染。人工介质可遮挡部分光线,阻止藻类利用光合作用进行大量繁殖,但对沉水植物的生长也有不利的影响。

4 参考文献

- [1] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖流域水污染控制与生态修复的研究与战略思考. 湖泊科学, 2006, 18(3): 193 - 198.
- [2] 成小英,李世杰,濮培民. 城市富营养化湖泊生态恢复——南京莫愁湖物理生态工程. 湖泊科学, 2006, 18(3): 218 - 224.
- [3] 王 栋,孔繁翔,刘爱菊等. 生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响. 湖泊科学, 2005, 17(3): 263 - 268.
- [4] 濮培民,王国祥,胡春华等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? 湖泊科学, 2000, 12(3): 269 - 279.
- [5] 沈银武,刘永定,吴国樵等. 富营养湖泊滇池水华蓝藻的机械清除. 水生生物学报, 2004, 28(2): 131 - 136.
- [6] 陆开宏,晏维金,苏尚安. 富营养化水体治理与修复的环境生态工程——利用明矾浆和鱼类控制桥墩水库蓝藻水华. 环境科学学报, 2002, 22(6): 732 - 737.
- [7] 马 蕊,林 英,牛翠娟. 淡水水域富营养化及其治理. 生物学通报, 2003, 38(11): 5 - 9.
- [8] 谢 平著. 鲢、鳙与藻类水华控制. 北京:科学出版社,2003: 116 - 120.
- [9] 刘建康,谢 平. 用鲢鳙直接控制微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践. 生态科学, 2003, 22(3): 193 - 196.
- [10] 王国祥,濮培民,张圣照等. 用镶嵌组合植物群落控制湖泊饮用水源区藻类及氮污染. 植物资源与环境, 1998, 7(2): 35 - 41.
- [11] 朱季文,季子修,蒋自巽. 太湖湖滨带的生态建设. 湖泊科学, 2002, 14(1): 77 - 82.
- [12] 濮培民,胡维平,逢 勇等. 净化湖泊饮用水源的物理 - 生态工程实验研究. 湖泊科学, 1997, 9(2): 159 - 166.
- [13] Pu P, Hu W, Yan J, et al. A physico ecological engineering experiment for water treatment in a hypertrophic lake in China. *Ecol Engineering*, 1998, 10: 179 - 190.
- [14] 秦伯强,高 光,胡维平等. 浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践思考. 湖泊科学, 2005, 17(1): 9 - 16.
- [15] 王国祥,濮培民. 若干人工调控措施对富营养化湖泊藻类种群的影响. 环境科学, 1999, 20(2): 71 - 74.
- [16] 纪荣平,吕锡武,李先宁等. 三种人工介质对太湖水质的改善效果. 中国给水排水, 2005, 21(6): 4 - 7.
- [17] 国家环境保护总局编. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京:中国环境科学出版社, 2002: 243 - 280.
- [18] 金相灿,屠清瑛编. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京:中国环境科学出版社, 1990: 160 - 188.
- [19] 朱 琳,尹立红,浦跃朴等. 荧光原位杂交法检测环境硝化细菌实验条件优化及应用. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(2): 266 - 270.
- [20] 纪荣平. 人工介质对太湖水源地水质改善效果及机理研究[学位论文]. 南京:东南大学土木工程学院, 2005: 67 - 68.
- [21] 范成新,季 江,张文华等. 贡湖水质富营养化综合评价及初步预测. 海洋湖沼通报, 1997, (3): 18

-24.

- [22] 黄晓东,谭为民,曹天洪等. 自来水厂亚硝酸盐问题及处理方法的试验研究. 给水排水, 1998, **24** (12):23-25.
- [23] 王国祥,濮培民,张圣照等. 人工复合生态系统对太湖局部水域水质的净化作用. 中国环境科学, 1998, **18**(5):410-414.
- [24] 李先宁,吕锡武,宋海亮等. 水耕植物过滤法净水系统底泥硝化反硝化潜力. 环境科学, 2005, **26** (2):93-97.
- [25] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学, 2002, **14**(3):193-202.
- [26] 陈德春,周家苞. 人工水草缓流和消波研究. 河海大学学报, 1998, **26**(5):99-103.