

浮床黑麦草对城市生活污水氮循环细菌繁衍和脱氮效果的影响

范洁群, 邹国燕*, 宋祥甫, 付子轼, 吴淑杭, 刘福兴, 潘琦

(上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201106)

摘要: 通过设施大棚内容积为 1.5m^3 的人工模拟池试验, 研究了浮床黑麦草对模拟城市生活污水氮循环细菌繁衍和脱氮效果的影响。通过研究, 阐明浮床植物去除污染水体氮素的可能途径。研究表明: 浮床黑麦草对模拟城市生活污水总氮和氨氮的去除效果分别达到了 31.6% 和 43.0%; 浮床黑麦草根际和根系正下方是各类氮循环细菌生长的最佳区域; 浮床黑麦草处理有效地提高了系统氮循环细菌的数量, 16d 的试验结束时细菌总数(A , 单位为 $\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$) 达到最大值, 其 $\lg(A/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}))$ 增加至 8.82, 各类氮循环细菌比对照高 3—5 个数量级; 同时, 浮床黑麦草处理显著提高了氮循环细菌的群落多样性, 系统内氨化菌、硝化菌、亚硝化菌和反硝化菌共存; 明确了浮床黑麦草的吸收同化和氮循环细菌的生物脱氮是浮床黑麦草净化水质的两个重要途径。

关键词: 浮床黑麦草; 模拟城市生活污水; 氮循环细菌

Effect of ryegrass floating-bed on the nitrogen cycling bacteria and nitrogen removal in the synthetic municipal wastewater

FAN Jiequn, ZOU Guoyan*, SONG Xiangfu, FU Zishi, WU Shuhang, LIU Fuxing, PAN Qi

Institute of Ecological Environmental Protection, Shanghai Academy of Agricultural Science, Shanghai 201106, China

Abstract: Effects of ryegrass floating-bed on the multiply of nitrogen cycling bacteria and removal of nitrogen in synthetic municipal wastewater were investigated in an artificial 1.5m^3 simulating pond in a facilitated greenhouse in order to figure out a suitable pathway to remove nitrogen from the wastewater. The results showed that the total nitrogen (TN) and $\text{NH}_3\text{-N}$ removal rates by the ryegrass floating-bed were 31.6% and 43.0% respectively. The Rhizosphere and the region beneath the root system were the most suitable places for the growth of nitrogen cycling bacteria. The total nitrogen cycling bacteria in the ryegrass floating-bed system reached the highest $\lg(A/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}))$ value of 8.82 at 16d, which was 3 to 5 order of magnitude higher than that in the control. At the same time, the presence of ryegrass significantly increased the community diversity of the nitrogen cycling bacteria, in which ammonifiers, nitrobacteria, nitrosobacteria and denitrifying bacteria were detected. Taken together, we proposed that the important pathways of ryegrass floating-bed to remove nitrogen from the wastewater were nitrogen absorption and assimilation by ryegrass and bionitrification by microorganisms.

Key Words: ryegrass floating-bed; synthetic municipal wastewater; nitrogen cycling bacteria

生态浮床技术是一种运用无土栽培技术原理, 以高分子材料为载体和基质, 采用现代农艺和生态工程措施综合集成的水面无土种植植物技术。由于其具有可操作性强、运行成本低、易维护、生态风险小等优势, 受到了各国科学家的关注, 正逐步应用于富营养化水体治理中^[1-3]。

浮床黑麦草是在载体上种植黑麦草(*Lolium multiflorum* L.) 的一类生态浮床。由于黑麦草生物量大、吸收

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA06Z338)

收稿日期: 2008-09-22; **修订日期:** 2009-01-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zouguoyan@263.net

氮磷能力强、生态适应性强以及耐寒等特性,在我国的杭州和上海等地作为冬、春季净化富营养化水体的技术开始了尝试性的应用。郭沛涌等^[4]研究表明,覆盖率 30% 的浮床黑麦草对畜禽养殖污水中氨氮去除率高达 95.9%;张志勇等^[5]研究发现,浮床黑麦草系统对生活污水中总氮和氨氮的去除率比对照分别提高了 26.2% 和 31.4%。

目前,多数研究侧重于浮床黑麦草对不同水体的净化效果,而对净化机理特别是有关浮床植物系统中微生物研究较少,尤其是氮循环细菌所引起的生物脱氮的研究更少。氮循环过程中生物固氮、氨化、硝化和反硝化是氮循环细菌的特有过程^[6],在富营养水体生态系统中,氮循环细菌对氮素的迁移和转化起着至关重要的作用^[7]。本文研究了浮床黑麦草对模拟城市生活污水中氮循环细菌的繁衍以及系统中氮去除效果的影响,探讨了浮床黑麦草系统中去除氮素的可能途径,试图为利用“生物共生机制”原理进行水体生态修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验材料取自笔者等在治理上海市城市污染河道中所用的浮床黑麦草。在河道选择大小基本一致的植株,裁取浮床片段,在试验基地洗净植物根系待用。

1.2 供试水体

为了模拟上海市城市污染河道的水质,供试水体参照国际经合组织污水标准配方^[8]配制而成的模拟污水。配制后实测水质的 COD_{Cr} 值为 $241.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总氮为 $20.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮为 $3.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总磷为 $2.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3 试验方法

试验在上海市农业科学院试验场设施大棚内的人工模拟池中进行。模拟池尺寸为 $1.5 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ($L \times W \times H$),总容积为 1.5 m^3 ,实际用污水体积为 1.35 m^3 。试验共设 2 种处理,不放置浮床的空白对照处理和种植有 8 株黑麦草、水面覆盖率为 20% 的浮床黑麦草处理,每个处理重复 3 次。试验期间,每天记录气温和水温,定期补充蒸腾和蒸发所消耗的水分,试验周期为 16d。由于试验正值冬春交替时节,气温变幅较大,水体温度在 17°C 到 23°C 之间。

1.4 取样方法

1.4.1 水样

分别在第 1 天、第 6 天和第 16 天取水样,测定水体总氮和氨氮含量。空白对照处理采用“五点法”取样,每点取水面 20cm 和 50cm 的混合水样,最终将水样均匀混合成一个待测样。浮床黑麦草处理组取样点如图 1 所示,分别取浮床正下方(A 点)、距浮床 30cm(B 点)和 100cm(C 点),取样深度与空白对照一致,浮床黑麦草处理总氮和氨氮含量为 A、B、C 3 个样点测试结果的平均值。

1.4.2 氮循环细菌

由于模拟城市污水由自来水和营养元素配制而成,第 1 天水体中氮循环细菌数量较少,因此忽略不计。第 6 天和第 16 天用于测定水体中各种氮循环细菌数量的取样方法同水样方法。为了考察根系附着物中氮循环细菌的分布情况,从每个浮床黑麦草处理中随机采集 4—5g 黑麦草根系,吸干水分剪碎后用四分法称取 1.0g,置入装有 99mL 无菌水的密封试剂瓶中,在 25°C 、150 r/min 的水浴摇床上振荡 2h,所得悬液即为根系附着物菌液。

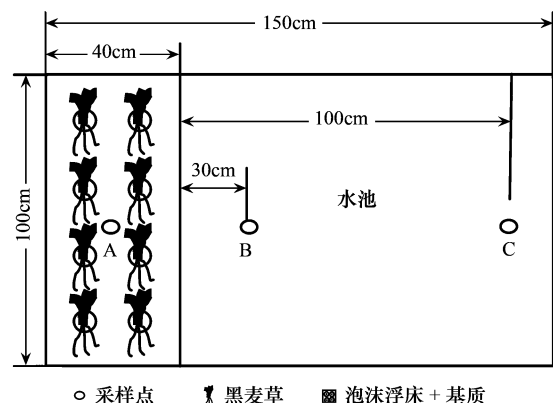


图 1 浮床黑麦草采样平面示意

Fig. 1 The sampling locations in the ryegrass floating-bed system

1.5 测定项目和方法

1.5.1 水样测定

氨氮采用纳氏试剂光度法 (GB/T 7479—1987)^[9];总氮采用碱性过硫酸甲消解-紫外分光光度法 (GB11894-89)^[9]。

1.5.2 微生物测定

分别用氨化菌、亚硝化菌、硝化菌和反硝化菌培养基对 4 种氮循环细菌分别进行培养,液体稀释法 (MPN)^[10]测定其每 mL 水样中最大可能菌数(A ,单位为 $\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$)。CFU 为 Colony-Forming Units 英文缩写,为菌落形成单位,指将稀释后的一定量菌液通过浇注或涂布的方法,让其内的微生物单细胞——分散在琼脂平板上,待培养后,每一活细胞就形成一个菌落。由于不同菌群数量呈数量级变化,为便于分析,将最大可能菌数 A 以 10 为底取对数,即为 $\lg(A/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}))$ 。

1.5.3 植物测定

试验开始和试验结束时,用直尺和目测法测定植物的株高、分蘖数和根长等生育性状。

1.6 数据分析

应用 Excel 和 SPSS 统计软件对数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 试验开始和结束时植物生长情况

试验期间,浮床黑麦草的平均株高增长了 41.8%,平均分蘖数新增 16.3%,平均根长增长 64.3%,鲜重增加 42.5%,并不断地出现新根。试验期间,植物生物性状的显著增加,为浮床黑麦草净化污染水体奠定了基础。

表 1 试验开始和结束时植物生物性状比较

Table 1 The plant biological characteristics at the beginning and end of trial

测试时间 Testing time	株高 Plant height/cm	分蘖 Tillering/(枝/株)	根长 Root length/cm	鲜重 Fresh weight/g
试验开始 Testing started	28.0 ± 2.3	98.0 ± 2.2	15.4 ± 0.6	200.6 ± 8.1
试验结束 Testing end	39.7 ± 2.5	114.0 ± 2.7	25.3 ± 2.6	285.8 ± 3.0

2.2 浮床黑麦草对模拟城市污水氮循环细菌生长的影响

如图 2 所示,2 个采样时间浮床黑麦草处理的氮循环细菌总数的 $\lg(A/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}))$ 均显著高于空白对照 ($P < 0.01$),第 6 天和第 16 天分别比空白对照高 3 个和 5 个数量级。同时,空白对照处理氮循环细菌总数随着处理时间的延续显著减少 ($P < 0.05$);而浮床黑麦草处理的氮循环细菌总数的 $\lg(A/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}))$ 从第 6 天的 8.0 增长到第 16 天的 8.82 ($P < 0.05$),增加了 10.3%。

氮循环细菌不同功能菌的数量变化如图 3 所示。结果显示,浮床黑麦草中各类功能菌群都显著高于空白对照,但优势种在不同的测试时间有所变化。第 6 天,空白对照和浮床黑麦草处理的优势种均为氨化菌,其数量超过其他菌群 2—4 个数量级。此时,浮床黑麦草处理的氨化菌的 $\lg(A/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}))$ 达到 7.01,高出对照近 3 个数量级;第 16 天时,浮床黑麦草处理的硝化菌和反硝化菌成为优势种, $\lg(A/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}))$ 分别达到 7.37 和 6.54,超过其他菌群 1—2 个数量级。

在整个试验过程中,空白对照中未检测出亚硝化菌,浮床黑麦草处理中, $\lg(A/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}))$ 在第 6 天和

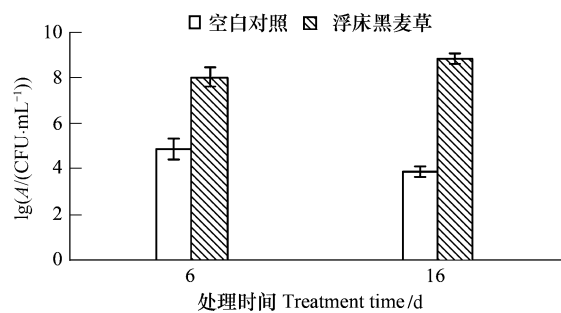


图 2 不同测试时间空白对照和浮床黑麦草处理氮循环细菌总数的变化

Fig.2 The number of total nitrogen cycling bacteria in CK and Ryegrass Floating-bed at different sampling times

第 16 天却分别高达 3.03 和 5.04。

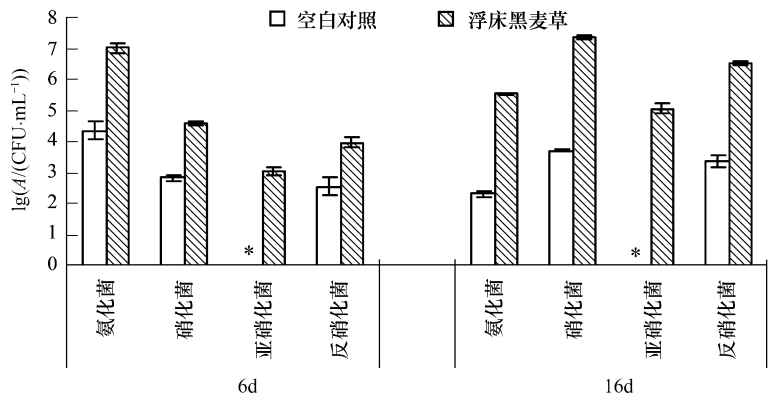


图 3 不同测试时间空白对照和浮床黑麦草各种氮循环细菌数量的比较

Fig. 3 Contrast of four different type of nitrogen cycling bacteria between CK and Ryegrass Floating-bed on 6d and 16d

* 表示未检测出氮循环细菌

2.3 浮床黑麦草处理不同区域氮循环细菌的分布

表 1 显示了浮床黑麦草处理不同区域氮循环细菌的分布情况。结果表明,2 个测试时间根表附着物和根系下方水体各类氮循环细菌数量均比距根系 30cm 和 100cm 处多 2—3 个数量级。

表 2 浮床黑麦草不同区域的氮循环细菌分布情况 ($\lg A(\text{CFU} \cdot \text{ml}^{-1})$)

Table 2 The number of four different types of nitrogen cycling bacteria at four sample sites in the Ryegrass Floating-bed system ($\lg A$)

不同区域 Different area	第 6 天 6 th				第 16 天 16 th			
	氨化菌 Ammonifiers	硝化菌 Nitro- bacteria	亚硝化菌 Nitroso- bacteria	反硝化菌 Denitrifying bacteria	氨化菌 Ammonifiers	硝化菌 Nitro- bacteria	亚硝化菌 Nitroso- bacteria	反硝化菌 Denitrifying bacteria
根表附着物 Root surface attachment	8.54aA	5.51aB	3.46bD	4.38bC	6.60bC	7.47bB	5.40bD	8.46aA
根系下方 Right beneath the roots	8.68aA	5.73aB	4.19aC	5.20aB	6.69aC	8.53aA	6.09aD	7.45bB
距根系 30cm 30cm to roots	5.44bA	3.34bB	2.37bC	3.16bB	4.47cBC	6.80bA	4.31bC	5.09bB
距根系 100cm 100cm to roots	5.37bA	3.76bB	2.09bC	3.09bB	4.39cC	6.69bA	4.37bC	5.16bB

* 小写字母表示同一列、大写字母表示同一行存在差异显著 ($P = 0.05$)

第 6 天时,4 个样点的优势种均为氨化菌 ($P < 0.05$),其根系附着物和根系下方的 $\lg(A/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}))$ 超过了 8.5,根系 30cm 和 100cm 处的数量则接近 5.5,均比其它菌群高出 2—3 个数量级;第 16 天时,4 个采样点的硝化菌和反硝化菌数量显著高于氨化菌和亚硝化菌,成为优势菌群 ($P < 0.05$);结果还表明,随处理时间的延续,浮床黑麦草处理的氮循环细菌总数显著增加。

2.4 浮床黑麦草对模拟城市污水中总氮和氨氮的去除效果

图 4 和图 5 分别是不同测试时间空白对照和浮床黑麦草处理总氮和氨氮浓度的变化。如图 4 所示,试验始期各处理总氮浓度为 $20.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,第 6 天 2 种处理的测试结果与处理始期无显著差异。试验延续 10D 后即第 16 天测试结果显示,空白对照总氮浓度虽有下降的趋势,但统计结果表明与处理始期无显著差异;而此时浮床黑麦草处理总氮浓度下降至 $13.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与处理始期比较,总氮的去除率达到了 31.6%。图 5 显示了试验始期,空白对照和浮床黑麦草处理的氨氮浓度在 $3.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;第 6 天取样时,2 种处理的氨氮浓度同时达到了 $14.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。第 16 天,空白对照处理氨氮浓度为 $11.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,浮床黑麦草处理为 $8.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这一结果显示,与总氮的去除时期相同,在后 10d,浮床黑麦草对氨氮的去除率达到了 43.0%。

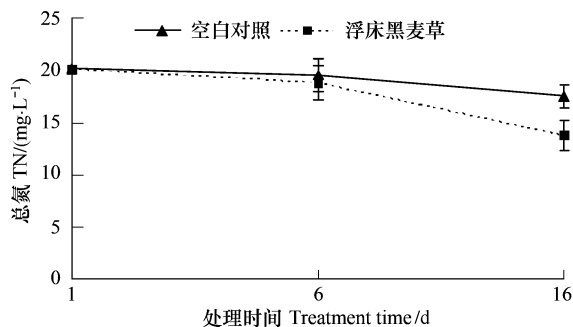


图4 不同测试时间空白对照和浮床黑麦草处理水体总氮浓度的变化

Fig. 4 Changes of TN concentration in CK and Ryegrass Floating-bed at different sampling times

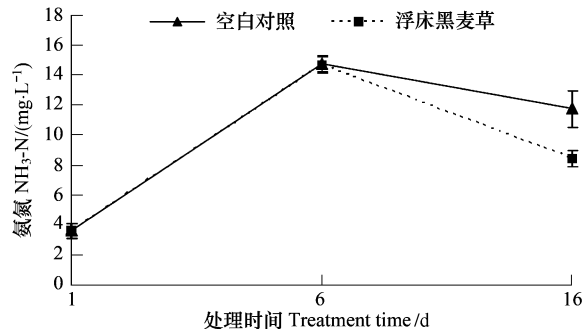


图5 不同测试时间空白对照和浮床黑麦草处理水体氨氮浓度的变化

Fig. 5 Changes of NH₃-N concentration in CK and Ryegrass Floating-bed at different sampling times

3 讨论

试验结果表明,浮床黑麦草处理各类氮循环细菌数量及其总数均显著高于对照,且根系下方和根系附着物为氮循环细菌分布最为集中的区域。这是由于黑麦草根系拥有巨大的表面积和良好的生物相容性,给微生物提供了良好的附着和繁衍场所,成为各种氮循环细菌的重要载体;同时,黑麦草根区形成的有氧区域和厌氧或嫌氧区域,为不同功能的氮循环细菌提供了不同的生境条件^[11],植物根系所截留的有机污染物和分泌物中的有机碳源,如糖类、有机酸、氨基酸、酚类化合物等,又给微生物提供了丰富的营养物质^[12-13],并且粗大的根系有利于均匀布水,防止水体对微生物冲刷,能够大大扩展生态浮床净化污水的空间,有利于微生物特别是硝化菌和亚硝化菌等好氧细菌向水体深部分布^[14]。由此可见,黑麦草的存在以及生长情况对氮循环细菌的数量和分布有着重要影响。

浮床黑麦草系统中氨氮含量从试验始时的 $3.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到第6天的 $14.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这是由于试验开始的前6d系统中氨化菌为优势种,氨化作用强烈,处理水体中有机氮被大量转化成氨氮;而此时黑麦草长势较弱,吸收氮素的效率较低,同时系统的硝化作用和反硝化作用不够强烈,导致大量氨氮在处理水体中积累。该结果还显示了,浮床黑麦草处理在试验的前6d,系统中氮循环细菌实现了从可以忽略不计到 $\lg(A/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}))$ 为 8.82 的迅速繁衍阶段,氨化菌的优势又导致了系统氮形态实现了由有机氮向无机氮的良性转化,为后期浮床黑麦草去除水体氮素提供了良好的物质基础。试验的后10d,黑麦草根系总表面积显著增加,附着在其上的生物膜也趋于成熟,系统中硝化菌和反硝化菌大量共存,硝化作用和反硝化作用强烈,生物脱氮效率明显提高;同时,浮床黑麦草生物量的增加需要大量吸收水体中的无机氮素,使得水体氨氮和总氮含量在后10d同时大幅度下降。试验结束时,氨氮的去除率达到了43.0%,总氮去除率达到了31.6%。这些研究结果与王园园等人研究黑麦草净化氨废水和牛晓音等人研究人工湿地中黑麦草净化富营养化水体结论一致^[15-16]。黑麦草吸收同化和氮循环细菌的生物脱氮是浮床黑麦草系统净化水质的两个重要途径^[17-18]。

浮床黑麦草生物量的积累和氮循环细菌的繁衍两者作为生态浮床净化水质最为主要的途径之间是相对独立而又相互促进生长^[19-20]。研究结果再次证实,浮床黑麦草可作为利用“生物共生机制”原理的生态工程来有效治理污染水体。然而,试验所用的植物黑麦草属冬季作物,通常在11月进行浮床移栽,在水面越冬后,3月中旬或4月初进入生长旺盛期。本试验开始于5月初,黑麦草已过了生长盛期,因此,设计的试验周期比较短。同时,由于选择了生长后期的植物,与以往研究结果相比在相同的试验周期,水质净化效果不如生长旺盛期。本研究为今后进一步深入开展不同生育期浮床陆生植物水体氮素的去除,以及植物吸收和生物脱氮两个重要途径在不同时期各自的作用等方面的机理研究提供了理论依据。

4 结论

本试验在设施大棚容积为 1.5 m^3 的人工模拟池内,进行的16d浮床黑麦草对模拟城市生活污水中氮循环

细菌繁衍以及氮去除效果影响的研究,取得了以下初步结果:

- (1) 浮床黑麦草处理对总氮和氨氮的去除率分别达到 31.6% 和 43.0% ;
- (2) 浮床黑麦草处理氮循环细菌总数高于空白对照 3—5 个数量级;
- (3) 浮床黑麦草处理提高了氮循环细菌的群落多样性,使得系统中氨化菌、亚硝化菌、硝化菌和反硝化菌共存,促进了水体生物脱氮能力;
- (4) 浮床黑麦草根际和根系正下方是各类氮循环细菌生长的最佳区域;
- (5) 黑麦草吸收同化和微生物的生物脱氮是浮床黑麦草系统净化水质的两个重要途径。

References:

- [1] Miao L, Yue J W, Zeng L Y, Guo P S, Han Q Y. Nitrogen removal from eutrophic water by floating-bed-grown water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) with ion implantation. *Water Research*, 2007, 41: 3152-3158.
- [2] Kathleen S, Nicole W, Emily P G. Mercury uptake and accumulation by four species of aquatic plants. *Environmental Pollution*, 2007, 145(1): 234-237.
- [3] Song X F, Zou G Y, Wu W M, Jin Q Y, Ying H D. Study on the removal effect and regulation of rice plants on floating-beds to main nutrients N and P in eutrophicated water bodies. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(5): 489-493.
- [4] Guo P Y, Zhu M M, Song X F, Ding B H, Zou G Y, Fu Z S, Lü Q. Remediation of eutrophic water by terrestrial plant in enclosure: the purification effect and dynamics processes of *Lolium multiflorum* for removing $\text{NH}_3\text{-N}$. *Journal of Zhejiang University (science Edition)*, 2007, 34(1): 76-79.
- [5] Zhang Z Y, Feng M L, Yang L Z. Nitrogen and phosphorus removal and N_2O emission from domestic sewage in floating-bed plant systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4333-4341.
- [6] Northup R R, Yu Z S, Dahlgren R A, Vogt K A. Polyphenol control of nitrogen release from pine litter. *Nature*, 1995, 377(2): 227-229.
- [7] Komer S. Nutrient and oxygen balance of a highly polluted treated sewage channel with special regard to the submerged macrophytes. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.*, 1997, 25: 34-40.
- [8] OECD Guidelines for Testing of Chemicals, Simulation Test-Aerobic Sewage Treatment 303A, 1999.
- [9] China Bureau of Environmental Protection. Methods for Monitor and Analysis of Water and Wastewater editorial Committee. Methods for Monitor and Analysis of Water and Wastewater (Fourth edition). Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 254-284.
- [10] Ma F, Ren N, Yang J X. Pollution Control Microbiology Experimental Guide. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002: 32-43.
- [11] Chen S P, Wu Z B, Kuang Q J. Macro phytes in Artificial Wetland. *Wetland Science*, 2002, 14 (2): 179-184.
- [12] Stottmeister U, Wießner A, Kusch P, Kapplmeyer U, Küstner M, Bederski O, Müller R A, Moormann H. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, 2003, 22 (122): 93-117.
- [13] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 1997, 35 (5): 11-17.
- [14] Chen S P, Wu Z B, Xia Y C. Review on gas exchange and transportation in macrophytes. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, 27 (4): 413-417.
- [15] Wang Y Y, He Y, Pan J M. Study on efficiency of purification of ammonia wastewater with perennial ryegrass. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Science)*, 2006, 32(1): 110-113.
- [16] Niu X Y, Chang J, Ge Y, Guan B H, Xu Q S. The Role of *Lolium perenne* in constructed wetland ecological engineering for eutrophicate water purification. *Wetland Science*, 2004, 2(3): 202-207.
- [17] Schmidt I, Sliekers O, Schmid M, Cirpus I, Strous M, Bock E, Kuenen J G, Jetten M S M. Aerobic and anaerobic ammonia oxidizing bacteria-competitors or natural partners. *FEMS Microbiology Ecology*, 2002, 39(3): 175-181.
- [18] Liu C X, Hu H Y, Zhang J, Huang X, Shi H C, Qian Y. Rural Sewage Treatment Performance of Constructed Wetlands with Different Depths. *Environmental Science*, 2003, 24(5): 92-96.
- [19] Cheng S P. Advances in Biological Fundamental Studies On Artificial Wetland Wastewater Treatment System. *Journal of Lake Sciences*, 1996, 8 (3): 268-273.
- [20] Komer S, Vermaat J E. The relative importance of *Lemna gibba* L. , bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed-covered domestic wastewater. *Water Research*, 1998, 32(12): 3651-3661.

参考文献:

- [3] 宋祥甫, 邹国燕, 吴伟明, 金千瑜, 应火冬. 浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究. 环境科学学报, 1998, 18(5): 489-493.
- [4] 郭沛涌, 朱萌湄, 宋祥甫, 丁炳红, 邹国燕, 付子轼, 吕琦. 陆生植物黑麦草对富营养化水体修复的围隔试验研究. 浙江大学学报(理学版), 2007, 34(1): 76-79.
- [5] 张志勇, 冯明雷, 杨林章. 浮床植物净化生活污水中 N、P 的效果及 N₂O 的排放. 生态学报, 2007, 27(10): 4333-4341.
- [9] 国家环保总局编. 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: 254-284.
- [10] 马放, 任南, 杨基先. 污染控制微生物学试验. 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 32-43.
- [11] 成水平, 吴振斌, 况琪军. 人工湿地植物研究. 湖泊科学, 2002, 14(2): 179-184.
- [14] 成水平, 吴振斌, 夏宜. 水生植物的气体交换与输导代谢. 水生生物学报, 2003, 27(4): 413-417.
- [15] 王园园, 何勇, 泮进明. 多年生黑麦草对氨废水净化效果的试验研究. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(1): 110-113.
- [16] 牛晓音, 葛谨, 常杰, 关保华, 徐青山. 黑麦草在净化富营养化水的人工湿地生态工程中的作用. 湿地科学, 2004, 2(3): 202-207.
- [18] 刘超翔, 胡洪营, 张建, 黄霞, 施汉昌, 钱易. 不同深度人工复合生态床处理农村生活污水的比较. 环境科学, 2003, 24(5): 92-96.
- [19] 成水平. 人工湿地废水处理系统的生物学基础研究进展. 湖泊科学, 1996, 8(3): 268-273.