

# 模拟人工湿地植物对富营养化水体的修复研究

霍张丽<sup>1</sup>, 朱广龙<sup>1</sup>, 张江汀<sup>2</sup>, 魏学智<sup>1</sup>

(1. 山西师范大学 生命科学学院, 山西 临汾 041004; 2. 山西省水利厅, 太原 030000)

**摘 要:**以河砂为基质构建人工湿地,通过人工配制不同浓度的富营养化水体,用无植被、填充相同基质的空白人工湿地(CK)做对照,研究湿生植物芦苇(*Phragmites australis*)、蘆草(*Scirpus triqueter*)、薄荷(*Mentha haplocalyx*)和水芹(*Oenanthe javanica*)对水体中总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )及化学需氧量(COD)的去除效率。结果表明:四种植物对不同浓度富营养化水体的净化效果都显著优于CK( $P<0.01$ )。(1)对TP的去除:轻度处理下芦苇的吸收率最高为89.30%;中度处理下去除效果最好的是蘆草为74.96%;重度处理中四种植物差异不显著。(2)对TN的去除:在轻、中度处理下,去除效果最好的是芦苇,吸收率分别为86.76%和73.27%;重度处理下蘆草吸收效果最好为51.80%。(3)对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除:轻度处理下各植物间无明显差异;而在中度处理下去除效果最好的是薄荷吸收率为81.96%;重度处理下,水芹的去除率最高为58.30%。(4)对COD的去除:各处理中均以蘆草最好,低浓度处理下去除率为77.57%;中度处理下为74.42%;重度下为62.89%。试验表明在选择人工湿地净化污水时,可优先考虑芦苇和蘆草。

**关键词:**人工湿地; 富营养化; 湿生植物; 去除率

中图分类号:X52

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)05-0267-05

## Remediation Function of Simulated Artificial Wetland Plants to Water Eutrophication

HUO Zhang-li<sup>1</sup>, ZHU Guang-long<sup>1</sup>, ZHANG Jiang-ting<sup>2</sup>, WEI Xue-zhi<sup>1</sup>

(1. College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China;

2. Department of Water Conservancy of Shanxi Province, Taiyuan 030000, China)

**Abstract:** Four types of hygrophYTE including *Phragmites australis*, *Scirpus triqueter*, *Mentha haplocalyx* and *Oenanthe javanica* were planted in simulated artificial wetland that was constructed with river sand and eutrophic water to study the removal efficiency of total nitrogen(TN), total phosphorus(TP), ammonia nitrogen( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ) and chemical oxygen demand(COD) in the water. Result showed that four kinds of plants had significant purifying effect to different concentration of eutrophic water than CK( $P<0.01$ ). With respect to TP uptake, the highest uptake efficiency was 89.30% by *Phragmites australis* under mild treatment; but under moderate treatment, *Scirpus triqueter* had the highest uptake efficiency that was 74.96%; there was no significant difference uptake TP under severe treatment among all of the plants. With respect to TN uptake, under mild and moderate treatment, the *Phragmites australis* had the highest removal efficiency, which was 86.76% and 73.27% respectively. However, the highest uptake efficiency was 51.80% by *Scirpus triqueter* under severe treatment. With respect to  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  uptake, there was no significant difference to uptake  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  under mild treatment among all of the plants, whereas the highest uptake efficiency was *Mentha haplocalyx* under moderate treatment, and 58.30% by *Oenanthe javanica* under severe treatment. With respect to COD uptake, the *Scirpus triqueter* had the highest uptake efficiency in all treatments, the uptake efficiency was 77.57%, 74.42% and 62.89% under mild, moderate, and severe treatment, respectively. So this study suggests that *Phragmites australis* and *Scirpus triqueter* are superior to sewage treat-

收稿日期:2013-12-01

修回日期:2014-01-13

资助项目:国家自然科学基金“酸枣对极端干旱气候响应机理研究”(30972396)

作者简介:霍张丽(1986—),女,山西运城人,在读硕士研究生,主要从事植物学研究。E-mail:huozhangli@163.com

通信作者:魏学智(1956—),男,山西临汾人,教授,硕士生导师,主要从事植物学研究。E-mail:wxyz3288@163.com

ment in the constructed wetland.

**Key words:** constructed wetlands; eutrophication; hygrophYTE; uptake efficiency

随着社会经济的迅速发展、人口激增,随之而来的环境恶化、水土流失等问题日益严峻,尤其是水土资源供需矛盾,对此我国水利部水土保持司于 2006 年开始重点开展生态清洁小流域治理工作<sup>[1]</sup>。生态清洁小流域建设以水源保护为中心,涉及流域内的水土流失治理和流域内污染源治理,其中水污染治理是主要的内容之一<sup>[2]</sup>。人类在生产、生活过程中向河流排入大量农药、化肥及其他污染物质,当超过河流生态系统的自净能力时,将导致水质变差(如水体富营养化等),直接对河流生态系统造成破坏,降低其生态服务功能<sup>[3]</sup>。《2012 年中国环境状况公报》<sup>[4]</sup>显示,在监测的 60 个湖泊(水库)中,富营养化状态的湖泊(水库)占 25.0%,其中,轻度富营养状态和中度富营养状态的湖泊(水库)比例分别为 18.3%和 6.7%,形势依然严峻。人工湿地用于富营养化水体的修复,具有投资少、易管理、效果好的特点,是一种新型生态污水处理技术<sup>[5]</sup>。通过实践研究,构建适合我国不同地域特点的高效人工湿地,对修复我国富营养化水体具有迫切的现实意义<sup>[6]</sup>。

本实验通过构建芦苇(*Phragmites australis*)、蘆草(*Scirpus triqueter*)、薄荷(*Mentha haplocalyx*)、水芹(*Oenanthe javanica*)4 种湿生植被小型人工湿地,定期进行水质监测和分析,研究不同湿地植被对富营养化水体的修复能力。筛选出净化效果好、适宜于山西临汾地区人工湿地生境的植物,充分发挥人工湿地在“清洁生态型小流域”建设中的重要作用,使生态环境得到显著改善,为水环境保护提供重要的实验依据<sup>[2]</sup>。

# 1 材料与方法

## 1.1 人工湿地的构建

小型模拟人工湿地系统构建于红色塑料桶内<sup>[7]</sup>(桶的规格:上口直径 33 cm,内径 28.5 cm,下口直径 24.5 cm,内径 21 cm,高 28 cm),在桶底设一个水龙头用来排水。在距桶底 15 cm 的桶体上设一个出水龙头,并连接集水管用于采集水样。集水管均匀打孔,用 100 目的滤布包裹,防止细砂进入管中造成堵塞。

在桶内分层铺设不同粒径的河砂作为基质,从下至上:10 cm 厚的粗砂(粒径 1~3 cm),15 cm 厚的细砂(粒径 0.3~1 mm),之间用 100 目的滤布隔开。

## 1.2 富营养化水体的配制

试验前加入 KNO<sub>3</sub>、NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>、NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 和葡萄

糖来人工模拟富营养化水体<sup>[8]</sup>,参照 GB3838—2002 《地表水环境质量标准》<sup>[9]</sup>地表 I、Ⅲ、V 类水标准扩大 10 倍进行配置,所配置的初始浓度配比见表 1。

表 1 试验水体营养成分初始浓度配比

营养成分	营养等级		
	轻度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	中度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	重度/ (mg·L <sup>-1</sup> )
总氮(TN)	2.0	10	20
总磷(TP)	0.1	0.5	2
氨氮(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N)	0.4	2	4
化学需氧量(COD)	23.7	63.23	181.79

## 1.3 湿地植物采集及处理

2013 年 6 月从临汾市汾河流域采集芦苇、蘆草、水芹、薄荷 4 种湿生植物,植物采集后,经自来水、蒸馏水冲洗根部泥土,然后放入 10%的 Hoagland 营养液中进行培养,一周换水一次。两周后挑选大小一致、长势良好的植株。将其植入试验桶中,每桶种植 8 株。向桶中浇灌蒸馏水 2 次,每次将水排空后进行第二次注水。最后,一次性向每个实验桶中注入 5 L 预先配好的富营养化水体。

## 1.4 试验设计

将 4 种预处理后的植物分别植入试验装置中,不同处理浓度下每种植物和空白对照组(即装置中装入等量相同的基质,不栽种任何植物)均设 3 个重复,共计 45 桶。实验从 2013 年 7 月 18 日开始至 8 月 29 日结束,共计 42 d。实验期间每隔 7 d 取水样一次,每次取 200 ml 测主要污染物的去除效果。其中 TP 采用钼锑抗分光光度法测定;TN 采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂光度法测定;COD 采用重铬酸钾法测定<sup>[10]</sup>。考虑到试验期间水分的蒸发和植物的蒸腾作用,适向桶内添加蒸馏水以保持水体积不变。同时为保证植物正常光合作用,试验设在室外搭建的白色塑料棚内。

## 1.5 计算方法

$$\text{去除率} = (C_0 - C_i) / C_0 \times 100\%$$

式中: C<sub>0</sub>——初始时的浓度; C<sub>i</sub>——第 i 天的浓度。

## 1.6 数据处理

采用 SPSS 19.0 和 Microsoft Excel 2007 对数据进行处理和绘图,并做单因素方差分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 4 种湿生植物的生长状况

植物的生长情况可以间接反映植物的耐污能力,

所以实验期间对植物的生长状况进行观察。总体来说,芦苇长势最好,株高变化最大,轻度处理下平均株高由原来的 24.13 cm 增长到 56.92 cm,中度处理下平均株高由 22.21 cm 增加为 58.64 cm,重度处理下平均株高增加 29.86 cm。蘆草株高变化不大,但实验期间不断有新芽冒出,长成完整的植株,使得实验种植密度增大;水芹菜生长旺盛,根系生长发达,植株明显增高加粗,不同浓度处理下,平均株高均增长 12~15 cm,但底部叶片在生长过程中有不断干枯脱落现象;薄荷在实验期间株高无明显变化,90%以上的植株出现了开花现象,说明长势良好。

2.2 不同浓度条件下水体主要污染物去除率的比较

2.2.1 各种植被人工湿地对不同浓度水体中 TP 的去除 由图 1A 可以看出,与对照相比,轻度处理中 4

种植物对 TP 都有较好的去除作用。总体的趋势表现为:芦苇(89.3%)>蘆草(82.4%)>薄荷(81.8%)>水芹(80.5%)>CK(61.2%)。差异显著性分析表明:实验组的去除率都显著高于对照组( $P<0.01$ ),芦苇与薄荷和水芹相比对 TP 的去除差异极显著( $P<0.01$ )。中度处理下,蘆草(去除率:74.96%)>薄荷(72.5%)>芦苇(69.96%)>水芹(64.4%)>CK(36.42%)(图 1B)。差异显著性分析表明:蘆草、薄荷对中浓度 TP 的去除无明显差异,但都显著高于水芹( $P<0.01$ )。重度处理下,在 15 天后 4 种植被人工湿地对 TP 的去除均达到饱和,去除率没有明显差异,芦苇为 63.68%、薄荷为 61.69%、蘆草为 60.59%、水芹为 59.68%,都显著高于对照组(22.87%)(图 1C)。

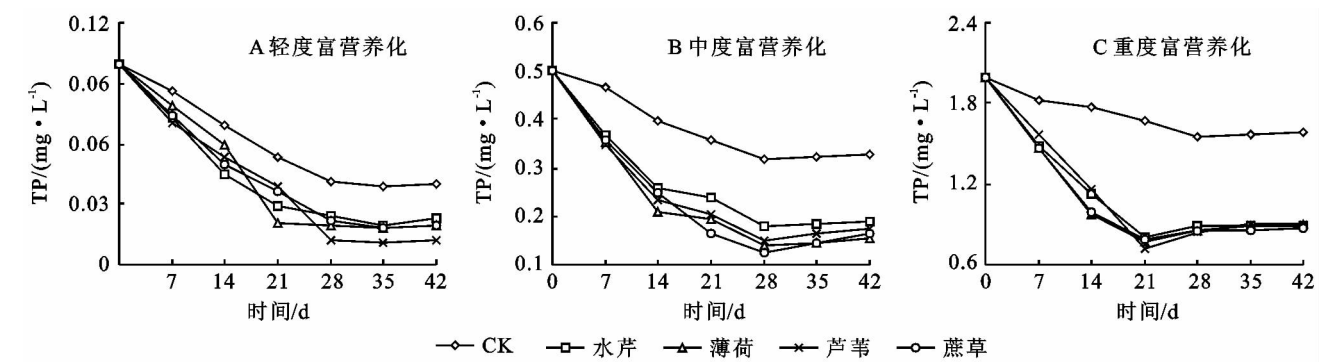


图 1 人工湿地系统对不同浓度富营养化水体中 TP 的去除效果

2.2.2 各种植被人工湿地对不同浓度水体中 TN 的去除效果比较 与对照组的去除率(48.62%)相比,4 种湿生植物对轻度处理下的 TN 都有明显的去除作用。其中去除效果最显著的是芦苇,20 d 内试验水体中的 TN 浓度从 2 mg/L 降到了 0.265 mg/L,去除率高达 86.76%。其它三种植物的去除率从高到低依次为蘆草(78.06%)、水芹(74.87%)、薄荷(74%)(图 2A)。差异显著性分析表明:轻度处理下,芦苇对 TN 的去除水平显著优于其它植物( $P<0.05$ )。中度处理下(图 2B),差异显著性分析可知:芦苇和蘆草对

TN 的吸收无显著差异,但显著高于水芹和薄荷( $P<0.05$ )。4 种植物对 TN 的吸收率依次为:芦苇(73.27%)、蘆草(70.52%)、水芹(67.51%)、薄荷(62.94%),都明显高于对照组(36.68%)。对于重度富营养化水体中 TN 的去除,对照组的去除率为 23.98%,实验组的去除率为:蘆草(51.8%)>芦苇(48.71%)>水芹(43.26%)>薄荷(40.75%)。差异显著性分析表明:蘆草对重浓度 TN 的去除明显高于水芹、薄荷和空白对照组( $P<0.01$ ),与芦苇无明显差异。

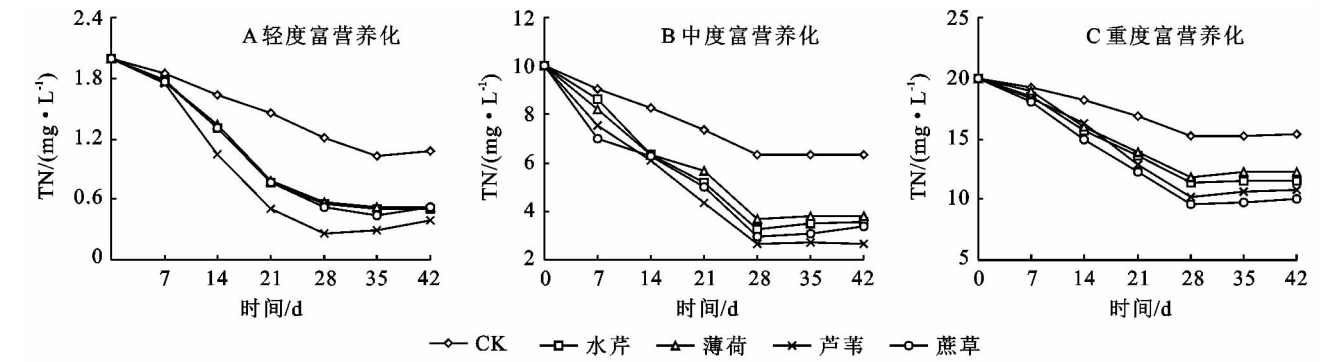


图 2 人工湿地系统对不同浓度富营养化水体中 TN 的去除效果

2.2.3 各种人工湿地植被对不同浓度水体中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果比较 轻度处理下,实验组对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的吸收率依次为:薄荷(89.7%)>芦苇(88.2%)>蘆草(86.5%)>水芹(85%)。差异显著性分析可知:植物组对轻度富营养化水体中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除无明显差异,但都明显高于对照组(46.3%)(图3A)。中度处理下,效果最好的仍是薄荷,35 d内试验水体中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的浓度由2 mg/L下降到0.361 mg/L,吸收

率为81.96%,显著高于其它三种植物以及空白组的吸收率,其中芦苇77.59%、蘆草67.29%、水芹64.86%、CK34%(图3B)。在高浓度处理下(图3C),各种植被人工湿地系统对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率由高到低依次为水芹(58.3%)、芦苇(56.2%)、薄荷(50.2%)、蘆草(49.1%),都高于对照组(18.68%)。差异显著性分析可知:水芹和芦苇对重度富营养水体中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率显著高于蘆草、薄荷和对照组。

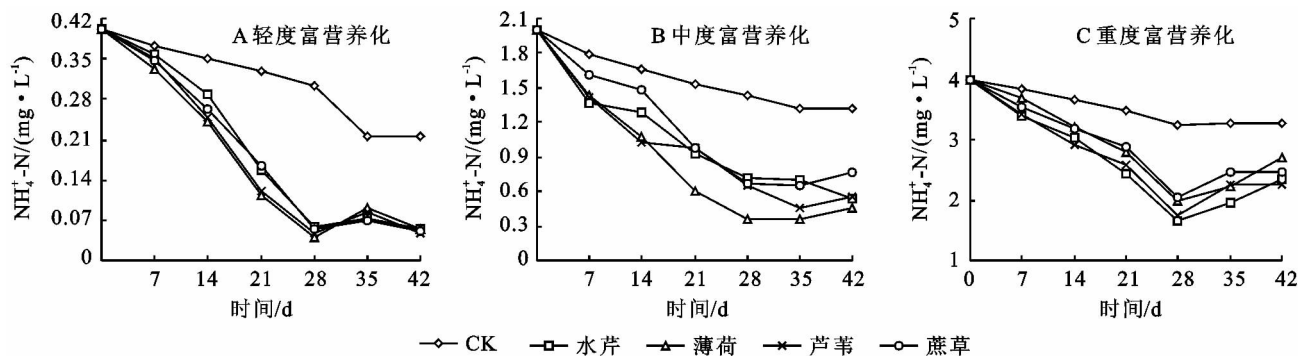


图3 人工湿地系统对不同浓度富营养化水体中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果

2.2.4 各种人工湿地植被对不同浓度水体中 COD 的去除效果比较 4种湿地植物对低浓度富营养化水中 COD 的净化效果见图4A。通过分析可以得出:蘆草对 COD 的去除率最高为77.57%,其次为:芦苇(74.63%)>薄荷(72.84%)>水芹(66.17%)>CK(43.97%)。差异显著性分析表明:轻度处理下蘆草对 COD 的去除率明显高于其它植物组和对照组,且差异显著( $P<0.05$ ),芦苇和薄荷之间无显著差异。由图4B可知,4种植物对中度富营养化水体中 COD 的去除能力依次为:蘆草(74.42%)>芦苇(71.52%)

>薄荷(63.19%)>水芹(61.52%)。与轻度处理下趋势一致,但去除率总体略低于轻度处理。差异显著性分析表明:蘆草的净化能力显著高于薄荷和水芹( $P<0.01$ )。对于重度富营养化水体中 COD 的去除,对照组的去除率为29.21%。实验组中去除率最高的仍为蘆草62.89%,试验期间水体中的 COD 从181.79 mg/L下降到67.46 mg/L(见图4C)。其次是薄荷和水芹,去除效果最差的是芦苇,只有51.53%。差异显著性分析表明:蘆草对 COD 的去除极显著优于其它三种植物( $P<0.01$ )。

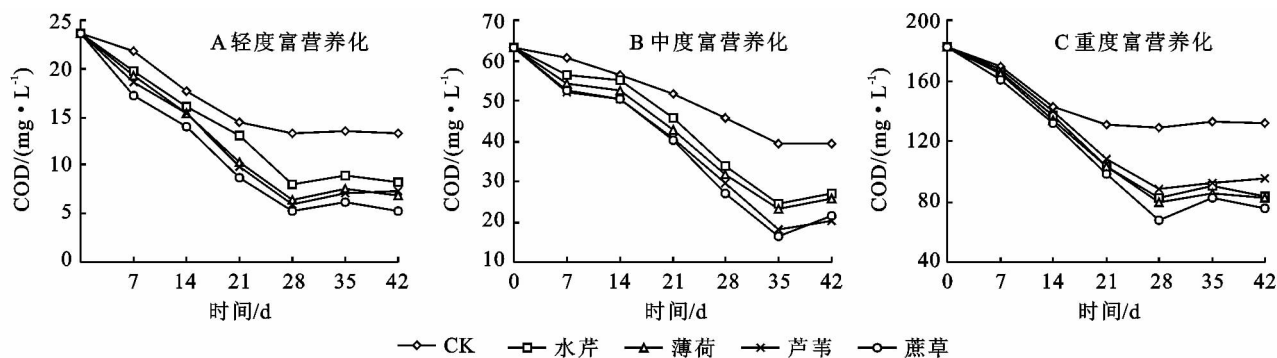


图4 人工湿地系统对不同浓度富营养化水体中 COD 的去除效果

### 3 讨论与结论

本研究的结果表明:芦苇对富营养化水体中 TP 和 TN 的去除效果较好,水体总磷浓度为0.1 mg/L时,去除率达89.3%;磷浓度为2 mg/L时,去除率达63.68%。水体总氮浓度为2 mg/L时,去除率为86.76%;总氮浓度为10 mg/L时,去除率为

73.27%。薄荷和水芹对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果较好,氨氮浓度为0.4 mg/L和2 mg/L时,薄荷对氨氮的去除率分别达89.7%和81.96%;氨氮浓度为4 mg/L时,水芹的去除率达到58.3%。蘆草对 COD 有明显的去除优势,低浓度处理下去除率为77.57%;中度处理下为74.42%;重度下为62.89%。芦苇对 TP 的去除优势可能与其特有的通气组织有关,有研究表

明植物可通过根系输氧和根系微生物来影响污水中磷素的净化<sup>[11]</sup>。同时氧气的传输,使根系周围依次形成好氧、缺氧和厌氧环境,好氧和厌氧微生物的大量存在可以使硝化和反硝化作用同时进行<sup>[12]</sup>,加强对 TN 的吸收。薄荷和水芹可能在吸收氮时优先选择吸收氨态氮,而且水芹发达的根系也大大扩展了其净化污水的空间。蘆草在实验期间不断有新芽冒出,长成完整的植株,使得试验种植密度增大,其突出的 COD 去除能力不排除这个原因。具体的原因和机理有待于进一步的试验研究,而对于富营养化水体的净化,或许可以考虑在此基础上多种优势植物的搭配使用。

试验水体富营养化浓度的设置由低到高逐渐增加,植物对主要污染物的去除率也逐渐降低,表现出一定的负相关现象。这也与很多学者的研究结果一致<sup>[13-14]</sup>。当然去除率降低的程度和植物本身有关,不同的植物之间存在一定的差异。由于不同植物对水体中营养盐的净化优势不同,所以在具体实践操作中,要针对富营养化水质的特点,有选择地构建人工湿地进行修复,同时还要考虑到水体富营养盐的浓度。

#### 参考文献:

- [1] 黄聪,冯宝平,张展羽.基于生态足迹的生态清洁小流域评价研究[J].中国农村水利水电,2011(6):40-43.
- [2] 杨胜敏,杨林林.北京市生态清洁小流域治污技术探讨[J].中国水土保持,2011(4):60-61.
- [3] 杨俊鹏,王铁良,范昊明,等.河流生态修复研究进展

(上接第 266 页)

- [39] 孙立达,朱金兆.水土保持林体系综合效益研究与评价[M].北京:中国科学技术出版社,1995.
- [40] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(Z2):3445-3452.
- [41] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等.护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[J].岩石力学与工程学报,2006,25(10):2051-2057.
- [42] 张东升.长江上游暗针叶林林木根系抗拉力学特性研究[D].北京:北京林业大学,2002.
- [43] 朱清科,陈丽华,张东升,等.贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J].北京林业大学学报,2002,24(4):64-67.
- [44] Gray D H. Role of woody vegetation in reinforcing soils and stabilizing slopes[C]//Proc. Symp. Soil Reinforcing and Stabilising Techniques, Sydney, Australia, 1978:253-306.
- [45] Ekanayake J C, Marden M, Watson A J, et al. Tree roots and slope stability: a comparison between *Pinus radiata* and *kanuka*[J]. New Zealand Journal of Forest-

[J]. 水土保持研究,2012,19(6):299-304.

- [4] 张秋蕾.环境保护部发布《2012 中国环境状况公报》[N].中国环境报,2013-06-05(1).
- [5] 吴树彪,董仁杰,翟旭,等.组合家庭人工湿地系统处理北方农村生活污水[J].农业工程学报,2009,25(11):282-287.
- [6] 林文周,李莹莹.人工湿地在水体富营养化治理中的应用[J].市政技术,2012,30(4):98-99.
- [7] 邵莹.哈尔滨市人工湿地植物净污能力研究[D].哈尔滨:黑龙江大学,2012.
- [8] 常会庆,王世华,徐晓峰,等.两种水生植物对重富营养化水体修复效果研究[J].水土保持研究,2012,19(5):262-265.
- [9] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. GB3838—2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [10] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法-编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [11] 李晓东,孙铁珩,李海波,等.人工湿地除磷研究进展[J].生态学报,2007,27(3):1226-1231.
- [12] 翟旭,邱凌,吴树彪,等.人工湿地植物氧传输作用与研究进展[J].农机化研究,2010(8):204-207.
- [13] 袁东海,高士祥,任全进.几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究[J].水土保持学报,2004,18(4):77-80.
- [14] 凌祯,杨具瑞,于国荣.污水浓度对高原湖泊人工湿地处理率的影响研究[J].水力发电学报,2012,31(5):133-140.
- ry Science,1997,27(2):216-233.
- [46] Wu T H, Watson A J, El-Khouly M A, et al. Soil-root interaction and slope stability[C]//First Asia-Pacific Conference on Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization, Manila, Philippines, April 1999. Science Publishers, Inc., 2004:183-192.
- [47] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. Soil Science,1981,132(6):427-435.
- [48] Watson A, Phillips C, Marden M. Root strength, growth, and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability[J]. Plant and Soil,1999,217(1/2):39-47.
- [49] 王义琴,张慧娟,白克勇,等.分形几何在植物根系研究中的应用[J].自然杂志,1999,21(3):143-146.
- [50] 廖成章,余翔华.分形理论在植物根系结构研究中的应用[J].江西农业大学学报,2001,23(2):192-196.
- [51] Gray D H, Ohashi H. Mechanics of fiber reinforcement in sand[J]. J. Geotech. Eng.,1983,109(3):335-353.