

几种植物去除污染水体中养分效果研究

常会庆¹, 寇太记¹, 乔鲜花¹, 何俊瑜²

(1. 河南科技大学 农学院, 河南 洛阳 471003; 2. 贵州大学 农学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 对城市尾水和人工模拟富营养化水体进行了静态培养试验。通过比较不同植物对城市尾水中氮、磷去除效果, 以及它们在不同磷浓度条件下对不同形态氮素去除效果研究, 目的在于筛选出适合治理富营养污染水体的植物品种。研究表明, 空心菜 (*Ipomoea aquatica*)、酸模 (*Rumex acetosa*)、莎草 (*Cyperus glomeratus*) 3 种植物都能很好地吸收尾水中的营养物质, 且生长状况良好。经 3 种植物处理的城市尾水, 其氮、磷浓度随水培时间的增加而降低。莎草、酸模对污水中 TN 的去除率达 90% 以上, 其中莎草最高, 达 93.4%; 空心菜对全磷的去除率最高达 76.9%。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在处理前期变化显著, 且莎草的净化效果最好达 94.4%; 污水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量随着水培时间的增加而逐渐下降, 但在试验后期 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 又有所增加。酸模去除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 效果最好, 达 65.4%。另外 3 种植物对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 都具有一定的吸收作用, 并且优先吸收 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。且从对于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净化效果看, 莎草 > 酸模 > 空心菜。

关键词: 富营养化; 植物修复; 氮磷; 净化作用

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)05-0118-05

中图分类号: Q143, X52

Removal Efficiency of Nutrients from Waste water by Several Plants

CHANG Hui-qing¹, KOU Tai-ji¹, QIAO Xian-hua¹, HE Jun-yu²

(1. College of Agriculture, He 'nan University of Science and Technology, Luoyang, He 'nan 471003, China; 2. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: The study method used is the one investigating the effluent from activated sludge treatment and artificial wastewater in two experiments. The first experiment examined the nitrogen and phosphorus removal efficiency of effluent from activated sludge treatment by several plants. The second experiment explored the removed efficiency of different forms of nitrogen with different concentrations of phosphorus in the artificial wastewater. The aim of the study was to filter out the proper plant varieties for eutrophication treatment. Results showed that the three plants of *Ipomoea aquatica* Forsk, *Rumex acetosa* L, and *Cyperus glomeratus* L had perfect purification capacity and growth in good condition. The concentration of nitrogen and phosphorus in the effluent decreased during experiment, especially TN removal reached more than 90% by *Cyperus glomeratus* L and *Rumex acetosa* L. *Cyperus glomeratus* L had the best removal efficiency of 93.4%, the removal rate of TP exceeded 70%, and *Ipomoea aquatica* Forsk had the best removal efficiency of 76.9%. In the pre-treatment, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ had significant changes and *Cyperus glomeratus* L treatment showed the best purification of 94.4%. The content of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ gradually decreased in pre-experiment period and then showed an increased tendency. The best removal efficiency by *Rumex acetosa* L reached 65.4%. Nitrogen and phosphorus removals in control treatment were lower than in treatments of plant system. The experiment for different forms of nitrogen removal with different concentrations of phosphorus in the artificial wastewater by three plants showed that both $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ were absorbed by the three plants, with the priority absorption of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$. The order of plant purification effect for $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ was *Cyperus glomeratus* D L > *Rumex acetosa* L > *Ipomoea aquatica* Forsk.

Key words: eutrophication; phytoremediation; nitrogen and phosphorus; purification

近年来地表水体富营养化的进程,已经成为全世界范围内最为关注的水质量问题^[1]。2007年全国地表水污染依然严重,七大水系总体为中度污染,湖泊富营养化问题突出^[2]。我国污水处理厂一级A的氮、磷排放标准分别为15 mg/L和1 mg/L,已经超出地表三类水质要求的约30倍。如果没有进行深度处理就直接排出,势必导致受纳水体富营养化现象的发生。甚至会引起许多位于较偏僻的山区,并作为饮用水源地的水库发生富营养化现象^[3]。植物修复技术是近20 a来发展起来的环境污染治理技术,对富营养化水体的治理起着重要作用。生长快速并有较高去除养分能力的水生植物已经引起了研究者用于废水处理并实现资源化的兴趣。例如,水生植物系统可以高效的去除畜禽废水^[4]、生活废水^[5]、工业废水^[6]、水产养殖废水中的养分含量,并可用于处理土壤渗透液^[7]。植物修复还用于处理太湖富营养化水体用作饮用水源的工程中^[8]。空心菜对污染水体的养分去除研究虽然比较多,但是空心菜和两种湿地植物莎草、酸模作为研究材料的文献却很少报道。因此选取洛阳当地3种植物,比较它们对氮、磷污染的去除能力。旨在筛选出具有高养分吸收能力的当地植物品种,为以后大规模的富营养化水体的植物深度修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试植物

(1) 莎草,属莎草科多年生草本植物。(2) 酸模又名山大黄,蓼科多年生草本。(3) 空心菜又名蕹菜,一年生或多年生草本植物。莎草和酸模于2007年4月采至洛阳涧西区的一条污水河中,选取了生长健壮,大小基本一致无枯、黄叶的健康植株,洗净后在自来水中培养4 d后用于试验研究。空心菜取至菜市场,经培养10 d后开始试验。

1.2 供试水样

供试水样取至洛阳市涧西区污水处理厂的城市污水,本污水处理厂采用A₂/O工艺,日处理量 5×10^4 t。主要处理洛阳市涧西区和高新技术开发区的工业废水和生活污水。污水采集后,直接用于植物培养。出水主要理化性状为:pH值7.1, TN 13.2 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 10.9 mg/L, TP 0.66 mg/L, 化学需氧量(COD) 40 mg/L, SS 16 mg/L。

1.3 试验设计

试验在室温条件下进行,时间从2007年3月28日到2007年6月20日。第一阶段为尾水中的氮、磷的去除效果研究。采集生长一致的酸模、莎草两种湿地

植物和培育好的空心菜备用,先用自来水洗净,然后再用去离子水冲洗干净,待水蒸发完全,在托盘天平上称取124 g为一份,栽植在装有12 L尾水的培养桶中,用泡膜板使其浮在水面上。每隔1 d用蒸馏水增加到原有的体积。植物生长的温度在20 ~ 30,空气相对湿度80%。分别在0, 5, 10, 15 d测水体中TN, TP, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度。第二阶段为植物对模拟富营养化水体中不同形态氮素 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的吸收研究。同样上述3种植物,研究它们对不同形态氮的吸收利用效果。营养液的配制参照Hutner营养液配方。使 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度分别为14 mg/L,磷设A, B, C这3个处理,浓度分别为1, 2, 4 mg/L,不种植植物的处理为对照。把培养好的植物放入2 L的培养液中同时加入微生物抑制剂(ATU 20 mg/L, 20 g稀释1 L(浓缩1 000倍),阻止铵态氮转化为亚硝态氮,且不影响植物的生长。pH值控制在6~7之间,分别在4, 8, 12, 16 d测水体中铵态氮和硝态氮浓度的浓度。

1.4 测定项目和方法

铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)采用奈氏试剂分光光度法测定;硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)采用紫外分光光度法测定;总氮(TN)采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定;总磷(TP)采用钼锑抗分光光度法测定。

2 结果与分析

2.1 三种植物对城市尾水营养物质的去除效果

2.1.1 植物对尾水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果 试验中空心菜、酸模、莎草3种植物对污水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 都有较好的去除效果,试验结束时去除率分别达82.2%, 85.9%, 94.4%。3种植物对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的净化顺序:莎草 > 酸模 > 空心菜。空心菜和酸模对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的净化效果基本上相同,但都低于莎草的净化作用。对照处理(空白污水)对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率仅为76.4%。对照中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除主要是由污水中硝化和反硝化作用,以及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的挥发作用等。而在有植物的水培系统中,除了微生物的作用外,还有植物对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 直接吸收利用。

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量在植物系统中,都是随着处理时间的增加而下降,但后期 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度又开始增加。原因可能是植物的吸收作用使 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度下降,培养系统中养分缺乏导致植物体向外分泌一些营养盐如 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的缘故。对照处理中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量变化为先下降后升高。空心菜、酸模、莎草对污水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率分别为51.4%, 65.4%,

50.5%, 其去除效果顺序为酸模 > 空心菜 > 莎草, 但莎草、空心菜对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的净化效果基本上一致。无植物系统去除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的作用主要是污水中的微生物对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 反硝化作用。

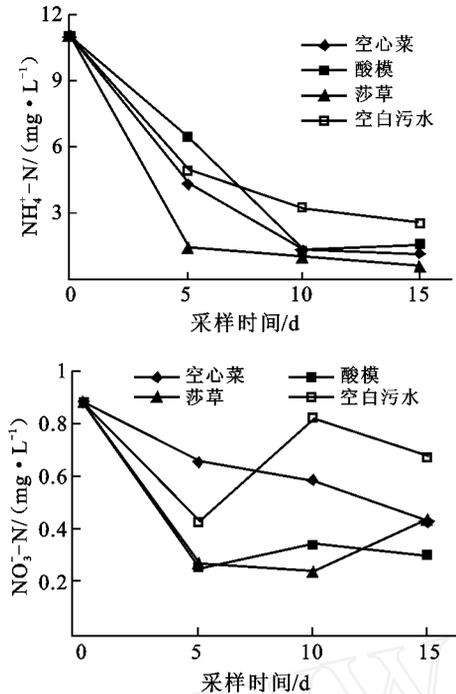


图 1 植物对尾水中氨氮和硝态氮的去除效果

2.1.2 三种植物对城市尾水中 TN 和 TP 去除效果

TN 含量随着培养时间的增加而降低, 且植物系统对 TN 的去除优于无植物系统(图 2)。试验结束时, 空心菜、酸模、莎草对总氮的去除率分别为 82.7%, 87.1%, 93.4%。研究结果还表明, 莎草对污水净化作用与其生长状况密切相关, 生长越旺盛、根系越发达的植株, 其净化能力越强^[9]。对照处理中 TN 浓度的降低则表明, 自然状态下污水具有一定的自净功能, 可通过自身微生物的硝化、反硝化等途径去除部分氮素。

污水中 TP 随着水培时间的增加而降低(图 2)。实验结束时, 空心菜、酸模、莎草对 TP 的去除率为 76.9%, 71.4%, 71.1%。数据显示, 空心菜、酸模、莎草对 TP 的去除效果基本上相同。对照处理对磷的去除率为 46.3%。

2.2 空心菜、酸模、莎草对人工模拟富营养化水体养分的去除效果

2.2.1 三种植物对人工模拟富营养化水体中 TN 去除效果

TN 随着实验时间的增加, 浓度逐渐地降低。实验前 4 d, TN 急剧下降, 随后 4~16 d 中则呈现缓慢降低趋势。在试验结束时, A, B, C 这 3 个不同磷浓度

的处理中, 空心菜对 TN 的去除率分别为 86.7%, 69.7%, 60.9%, 酸模的去除率为 89.8%, 72.2%, 64.3%, 莎草的去除率为 94.5%, 85.0%, 72.2%。结果表明, 3 种植物对总氮的净化效果大小顺序为莎草 > 酸模 > 空心菜。空心菜、酸模、莎草 3 种植物处理随着磷浓度的增加, 植物对 TN 的净化作用在逐渐减弱(图 3)。这与吴小刚研究的不同磷浓度下菖蒲的生长状况及净化作用的结果相一致。植物对某种养分的吸收和利用效率不仅与介质中该养分的浓度供应有关, 还与其它养分含量的变化有关^[10]。

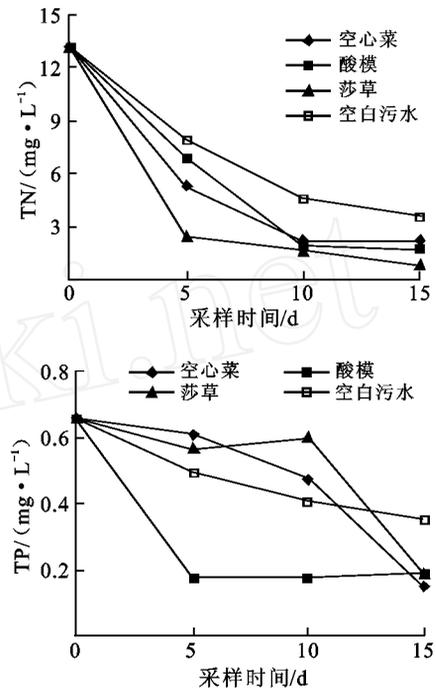


图 2 植物对尾水中总氮和总磷的去除效果

2.2.2 三种植物对人工模拟富营养化水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果

随着试验时间的增加, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度在逐渐降低(图 4)。试验结束时, A, B, C 不同磷浓度的处理中, 空心菜对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率为 92.3%, 74.6%, 71.4%; 酸模的去除率为 95.3%, 82.5%, 70.3%, 莎草的去除率为 98.1%, 89.6%, 82.4%。对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净化效果为莎草 > 酸模 > 空心菜。空心菜、酸模、莎草 3 种植物随着系统中磷浓度的增加, 植物对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的净化作用在逐渐减弱。由此可见污水中 C/P 不同可能会影响到供试植物对营养盐的去除效果。由图 3 和图 4 可以看出, 净化周期内各系统的 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均随着污水停留时间的推移呈直线下降趋势。同时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的下降幅度大于 TN, 说明供试的 3 种植物对系统中的阳离子态氮具有较强的去除能力。

2.2.3 三种植物对人工模拟富营养化水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除效果 各系统中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度随着培养时间的增加整体呈递减趋势。在试验结束时, A, B, C 不同磷浓度的处理中, 空心菜对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率为 83.3%, 68.9%, 63.4%, 酸模的去除率为 87.3%, 75.4%, 65.1%; 莎草的去除率为 92.9%, 84.1%, 70%。从净化效果看, 莎草 > 酸模 > 空心菜。图 4 和图 5 的结果相比较, 在试验不同时期 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 减少量大于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 减少量。由于试验中加入不影响植物生长的微生物抑制剂, 消除了硝化细菌的作用, 而植物吸收的氮素主要是无机态氮(铵离子和硝酸根离子), 因此可以推测植物优先吸收 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。

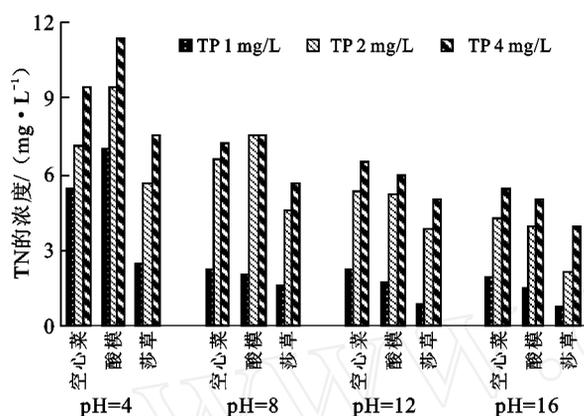


图 3 不同 pH 值不同磷浓度下 TN 的净化效果

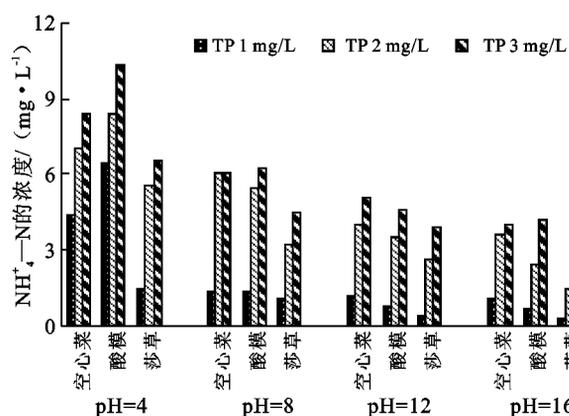


图 4 不同 pH 值不同磷浓度下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的净化效果

3 讨论

许多研究发现, 城市污水中的 N, P, 有机物可被植物吸附、吸收和同化而除去。污水水培系统中植物大量吸收无机氮、磷等营养物质, 进行光合作用。水中氮素作为植物生长过程中不可缺少的物质被植物直接摄取, 合成植物蛋白质与有机氮, 再通过植物的收获而从废水中除去。Thammarat Koottatep 和 Chongrak Pol-

presert 在人工湿地的试验中发现, 窄叶香蒲吸收的氮素占进入系统中总氮量为 43%, 当采用定期收获植物方式时, 由于总生物量的增加使氮的植物吸收还要增加, 高达 46%。在一些垂直流人工湿地中, 香蒲对氮的去除分别高达 55% 和 85%。除植物吸收外, 其余大部分氮素通过系统中微生物的降解而除去, 氮在系统中的残留并不明显。废水中无机磷在植物吸收及同化作用下可转化成植物的 ATP, DNA, RNA 等有机成分, 然后通过植物的收获而移去^[11]。

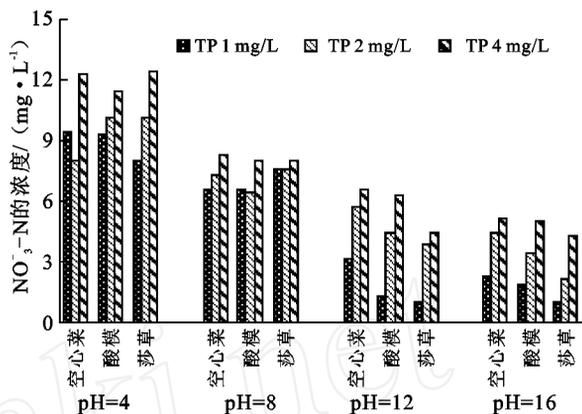


图 5 不同 pH 值不同磷浓度下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的净化效果

植物的存在使系统中的微生物数量如硝化细菌、反硝化细菌、磷细菌, 纤维素分解菌的数量显著增加^[12], 而微生物是系统中有机物分解的主要执行者, 植物的存在间接增加了有机物的分解速率。

空心菜在污染水体的净化研究中已经有不少研究。包括空心菜和陆生花卉比较对污染水体的净化作用研究^[13]; 空心菜和水生植物的比较研究等^[14]。这些研究结果都表明空心菜的去除效果要高于其它供试植物。但是本研究中莎草、酸模等湿地植物在去除氮素方面显示了优于空心菜的净化作用, 而对磷的去除效果空心菜的作用要优于其它两种湿地植物。因此在今后的植物修复污水系统中可以根据污水中营养盐的特性进行植物镶嵌组合, 以便发挥不同植物的去除优势。

本试验重点研究植物对污染水体中不同形态氮素去除的效果。虽然在设计试验时用了微生物抑制剂, 排除了微生物的作用; 调节 pH 值接近中性, 避免水体呈碱性, 而影响 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 挥发。但是由于第二阶段试验已进入夏季, 由于温度的升高对试验条件所产生的影响无法忽略, 会给实验结果造成一定的误差。

4 结论

供试 3 种植物都能很好地吸收水中的营养物质,

表现出很强的净化能力,且生长状况良好。经 3 种植物处理过的城市尾水,其氮、磷的浓度随水培时间的增加而降低,特别是莎草、酸模,对污水中 TN 的去除率达 90% 以上,其中莎草的净化效果最好,达 93.4%。3 种植物对 TP 的去除率达 70% 以上,其中空心菜的净化效果最好,为 76.9%。莎草显示出对 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 最好的净化效果,达到 94.4%。酸模对 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 净化效果表现最好,为 65.4%;对照处理中氮、磷的浓度的降低要低于有植物处理的系统。

3 种植物对模拟富营养化水体中不同形态氮素的研究结果表明,3 种植物对铵态氮和硝态氮都有一定的吸收作用,而且植物优先吸收 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$,对 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 从净化效果顺序都是莎草 > 酸模 > 空心菜。

[参 考 文 献]

- [1] Carpentar S R, Caraco N F, Correll D F, et al. Non-point pollution of surface waters with nitrogen and phosphorus[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 559-568.
- [2] Smith V H, Schwartz G E, Alexander R B. Regional interpretation of water quality monitoring data[J]. *Water Resource Reseaerch*, 1997, 33(12): 2781-2798.
- [3] 陈文, 玉林. 水源地水库富营养化污染现状与对策[J]. *广西水利水电*, 2008(2): 16-18, 22.
- [4] Sooknah R D, Wilkie A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2004, 22: 27-42.
- [5] Vaillant N, Monnet F, Sallanon H. Treatment of domestic wastewater by an hydroponic NFT system[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(1): 121-129.
- [6] Xia H L, Ma X J. Phytoremediation of ethion by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) from Water[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(8): 1050-1054.
- [7] Fraser L H, Carty S M, Steer D. A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface wetland microcosms[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 94(2): 185-192.
- [8] 苏玉萍, 林颖昕, 林佳. 福建省典型饮用水源地水库富营养化状况调查与分析[J]. *亚热带资源与环境*, 2008, 3(1): 59-56.
- [9] 周炜, 谢爱军, 年跃刚, 等. 人工湿地净化富营养化河水试验研究: 植物对氮、磷污染物的净化作用[J]. *净水技术*, 2006, 25(3): 35-39.
- [10] 李文朝. 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J]. *中国环境科学*, 1997, 17(1): 53-57.
- [11] Fredeen A L, Rao I M, Terry N. Influence of phosphorus nutrition on growth and carbon partitioning in *Glycine max*[J]. *Plant Physiol*, 1989, 89: 220-280.
- [12] 张鸿, 陈光荣, 吴振斌, 等. 两种人工湿地中氮、磷净化率与细菌分布关系的初步研究[J]. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 1999, 33(4): 575-578.
- [13] 周建昌, 周丽燕, 邢海. 陆生植物对富营养化水体净化及美化效果研究[J]. *河北农业科学*, 2008, 12(1): 42-43.
- [14] 刘佳, 刘永立, 叶庆富. 水生植物对水体中氮、磷的吸收与抑藻效应的研究[J]. *核农学报*, 2007, 21(4): 393-396.

(上接第 97 页)

[参 考 文 献]

- [1] 张宗祜. 黄土高原区域环境地质问题及治理[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 25-31.
- [2] 周自翔, 任志远. GIS 支持下的土地利用与土壤侵蚀强度相关性研究[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(6): 629-634.
- [3] 杨振, 牛叔文, 吴文恒. 陇中黄土高原水土流失的人文因素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(6): 124-128.
- [4] 索安宁, 王天明, 袁飞, 等. 近 50 年来黄土高原中部水土流失的时空演化特征[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 90-97.
- [5] 刘康, 康艳, 曹明明, 等. 基于 GIS 的陕西省水土流失敏感性评价[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 168-170.
- [6] 邱彭华, 徐颂军, 谢跟踪, 等. 基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析[J]. *生态学报*, 2007, 27(4): 1257-1264.
- [7] 杨国靖, 肖笃宁, 赵成章, 等. 基于 GIS 的祁连山森林景观格局分析[J]. *干旱区研究*, 2004, 21(1): 27-31.
- [8] 肖笃宁. 景观生态学研究进展[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999: 238-244.
- [9] 查轩, 张萍. 基于 GIS 的重要水源地东圳库区土壤侵蚀与景观格局分析[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 44-47.