

人工湿地除磷研究进展

李晓东¹ 孙铁珩^{1 2 3} 李海波^{2,*} 王 洪²

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110004 2. 沈阳大学环境工程重点实验室, 沈阳 110044 ;
3. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要 :从人工湿地除磷机理着手,综述了国内外有关湿地基质、湿地植物及微生物强化除磷的研究机理以及进展。深入研究多种基质组合对磷素的吸附与解析机理,可以从理论上推进诸多高效除磷基质的实际应用进程。植物间接净化作用及其与湿地水力停留时间的关系,是影响湿地植物选种和种植的重要依据。植物根际微环境以及植物与微生物的耦合作用可能是人工湿地除磷的主要途径之一。强调湿地的污水净化功能而忽视其生态服务功能,是湿地运行中普遍存在的认识错误。最后指出,湿地运行应采取高水力负荷、低污染负荷的方式,强调强化一级处理的重要性。

关键词 :人工湿地 除磷 基质 耦合作用 生态功能

文章编号 :1000-0933 (2007) 03-1226-07 中图分类号 :X703 文献标识码 :A

Current researches and prospects of phosphorus removal in constructed wetland

LI Xiao-Dong¹ , SUN Tie-Heng^{1 2 3} , LI Hai-Bo^{2,*} , WANG Hong²

1 School of Resources & Civil Engineering ,Northeast University ,Shenyang 110004 ,China
2 Key laboratory of Environment Engineering ,Shenyang University ,Shenyang 110044 ,China
3 Institute of Applied Ecology ,Chinese Academy of Science ,Shenyang 110016 ,China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (3) 1226 ~ 1232.

Abstract :The paper presented a review of current research progress and mechanism of the phosphorus removal in the constructed wetlands , in which the substrates , plants and microorganisms play the role of strengthening phosphorus removal. Overall literature analyses indicate that advanced research on the mechanism of sorption and desorption properties of the combined substrates can improve the effective removing phosphorus of the substrates and therefore , theoretically promote the progress of wetland application ; The relationship between the indirect removal potential of the plants and hydraulic retention time is an essential basis that affect the plant selection and its growth in wetlands ; The rhizosphere microsurrroundings of the plants and coupling effects between microorganisms and plants may be one of the main ways to enhance the removal rate of phosphorus in wetlands ; Much pursuit is focused on the purification function of sewage in wetlands while the ecological service function is sometimes neglected , which is incorrect understanding in the wetland performance. Finally the review points out that the applying manner should be high hydraulic load and low pollution load. Meanwhile the primary strengthening treatment is necessary to be emphasized.

基金项目 辽宁省教育厅青年基金资助项目 (2005264) ;国家 973 资助项目 (2004CB418506-1)
收稿日期 2006-02-12 ;修订日期 2006-07-20
作者简介 李晓东 (1978 ~) 男,山西太谷县人,博士生,主要从事污水处理的生态技术. E-mail :lxdlyl2005@126.com
* 通信作者 Corresponding author. E-mail :neu_lhb@yahoo.com.cn

Foundation item The project was financially supported by the youth foundation of Liaoning Province education hall (No. 2005264) , National 973 Program of China (No. 2004CB418506-1)
Received date 2006-02-12 ; **Accepted date** 2006-07-20
Biography LI Xiao-Dong , Ph. D. candidate , mainly engaged in ecological technology for wastewater treatment. E-mail :lxdlyl2005@126.com

Key Words : constructed wetland ; phosphorus removal ; substrate ; coupling effect ; ecological service function

氮素和磷素能刺激藻类和光合水生生物生长 ,并最终诱发水体富营养化。根据 Liebig 最小定律 (Liebig Law of the Minimum) ,磷常被视为水体富营养化的主要诱导因素之一^[1] ,因此 ,污水除磷对于控制水体富营养化具有重要意义。

人工湿地是自适应系统 ,在构成人工湿地污水处理系统的四大基本要素 (水体、基质、水生植物和微生物)中 ,基质、水生植物和微生物或三者相互之间通过一系列物理的、化学的以及生物的途径 ,可以完成对污染物的高效去除^[2]。其中 ,利用人工湿地系统中的基质、水生植物和微生物的共同作用去除磷元素 ,通常被认为是一种廉价有效的废水处理技术^[3]。人工湿地除磷工艺具有投资少、效果处理好、维护方便、环境友好以及生态服务功能突出等优点 ,可作为传统的污水除磷技术的一种有效替代方案^[2]。自 20 世纪 60 年代中期 ,Seide 和 Kickuth 开发了“根区法”以来 ,人工湿地除磷技术就不断发展并得到推广应用^[4] ,目前已广泛应用于处理生活污水、农业点源和面源污染以及治理水体富营养化等方面。人工湿地因其良好的生态服务功能和高效的富营养化元素去除能力 ,越来越受到世界各国的普遍重视和关注 ,对此的研究一直以来都是当前湿地科学领域的热点研究内容。

本文总结了近年来国内外对湿地除磷的研究进展情况 ,系统分析了有关湿地基质、湿地植物和微生物对于磷元素去除的强化作用机理 ,并对今后湿地除磷研究进行了展望。

1 湿地基质除磷作用机制

湿地基质一直被公认为是进入湿地系统的磷的最终归宿。磷去除率与湿地基质类型密切相关 ,即 :基质特殊的理化性质以及特定的吸附能力影响磷的去除^[5]。

1.1 湿地基质类型对磷去除的影响

人工湿地处理含磷废水 ,基质的筛选原则一般应考虑磷吸附效率、水力传导性、材料易得性、价格等多方面因素。Drizo 等^[6,7]综合比较了铝土矿、页岩、沸石、石灰石、轻质陶粒、飞灰、油性页岩等 7 种基质对磷的去除效果 ,认为页岩对磷的去除效果最好。Sakadevan^[8]等以土壤、沸石、鼓风炉渣、钢炉渣等材料作为人工湿地基质进行了吸附磷的比较。研究表明 ,鼓风炉渣、钢炉渣的吸附效果明显好于其它基质 ,试验取用的两种土壤的最大吸磷量分别为 1153、934mg/kg ,而鼓风炉渣最大吸磷量为 44200mg/kg ,超过土壤吸磷量 40 倍 ;回归分析表明 ,活性铝的吸磷作用大于活性铁 ,两者联合作用效果更好。Gray 等以钙化海藻 (maerl) 为基质 ,与以往试验数据比较 ,发现钙化海藻除磷能力等同于页岩和钢渣^[9]。袁东海^[10] ,谭洪新^[11]等人分别选取了几种基质作磷的吸附试验 ,结果表明钢渣的吸附效果最好 ,其最大吸磷量为 50490mg/kg ,而同比砂子的最大吸磷量仅为 302mg/kg。

已有研究表明 :在试验室和野外得到的基质除磷率存在较大差别 ,钢渣在野外和试验室的除磷率分别为 72%、27% ,而石灰石正好相反 ,分别为 18% 和 64%^[12]。由于以往国内外关于湿地基质除磷的研究多数是在试验室小型模拟操作^[8~14] ,因此 ,诸如钢渣等是否可以作为高性能脱磷基质 ,尚需在今后湿地工程建设中进行检验。

1.2 多种基质组合对磷去除的影响

许多研究表明 ,钢渣是一种非常高效的除磷基质^[8~14] ,但是由于钢渣碱性强 ,不适合植物生长 ,为此在湿地实际建设中一般不能直接采用。为了使得钢渣能在湿地建设中得到应用和推广 ,袁东海^[10,14]建议 :钢渣和常用的基质 (砂子)组合使用 ,可以达到很好的除磷效果。Drizo^[15]建议 :采用 3 个湿地单元串联 ,第 1 个单元填充稳定性好的基质如砾石 ,便于植物生长和微生物附着 ;第 2 个单元填充钢渣以除磷 ,一般不种植物 ;第 3 个单元为植物床稳定出水 ,控制运行管理上采用干湿交替运行模式 ,从而保证湿地除磷的高效性和稳定性。

徐丽花、周琪等研究了沸石、沸石-石灰石、石灰石 3 种填料的人工湿地除磷能力 ,研究表明 :沸石可促使难溶性磷的释放 ,使得石灰石吸附磷的能力加强 ,两者的协同作用使得总磷去除效果好于单独使用情况^[16]。

Drizo 等人比较了电弧炉钢渣、蛇纹石分别与石灰石混合的除磷效果,研究表明,加入一定比例的石灰石后,其除磷效果不像预想的好,在蛇纹石中添加石灰石甚至使得除磷率下降^[17]。

深入研究吸磷效果好的基质,并在实际湿地建设中的应用,以及合理组合选定的高效基质,使其充分发挥功效,是今后湿地基质研究的热点方向之一。

1.3 湿地基质理化性质及磷吸附能力

目前公认的湿地基质磷吸附能力受以下几方面关键因素影响:①吸附电位的数量;②基质颗粒的比表面积;③pH 值。在碱性条件下,磷吸附于含大量钙离子的碱性基质中,形成几乎不溶的磷酸钙沉淀^[18];在酸性环境下,磷与铝离子、铁离子及其氧化物发生置换反应从而通过化学作用发生沉淀,反应速度与反应对象浓度呈正相关^[9]。同时,大量的研究还发现:废水中的磷仅被吸附在基质表面,这种吸附沉淀不是不可逆过程,其中部分磷可以在一定条件下重新溶解,进入水相,即,当污水中磷的浓度相对较低时,基质里部分磷就可以被重新释放到水中。基质在某种程度上可被视为“磷缓冲器”,其具体作用是调节水中磷浓度,吸附磷最少的基质最容易释放磷^[20~23]。

袁东海等^[10]考察了饱和吸附后的磷释放过程,研究发现:砂子的解吸率最大(9.43%),粉煤灰和钢渣的最小(分别为0.14%、0.35%);不同的基质有不同的解吸率,只要措施得当,可以调控基质中磷的解吸。高超等^[24~25]研究指出:磷的吸持饱和度(DPS, the degree of phosphorus saturation)是基质磷素水平和基质固磷能力的综合指标,反映基质中的磷进入液相的难易程度,可以作为评价水-土界面磷迁移能力的重要指标。

基质除磷受环境因素影响显著。湿地基质中的氧化还原电位对基质除磷效果有着很大的影响。例如,在还原环境中, Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} ,从而使与之结合的磷化合物溶解度升高,导致磷的释放。植物的输氧作用所形成的好氧环境也会促进湿地基质对磷吸附、沉淀、蓄积稳定,这也是种植植物的系统能够有比较好的除磷效果的一个重要原因^[26~28]。

磷的去除效果对水力负荷的变化十分敏感,在湿地基质吸附交换达到平衡后,去除效果明显下降^[26]。然而,已有研究表明湿地基质在经过一段时间“休息”再与空气接触,可以恢复74%左右的蓄磷能力^[15]。Andrea 等采用钙硅石作为湿地生态系统的基质用于去除二级废水中可溶解的磷,发现基质的作用与停留时间有关,当停留时间大于40h,出水中可溶解磷的浓度才能低且稳定^[29]。

Moshi 认为基质有机质含量会抑制磷的吸附,表现为:①有机质堵塞吸附点;②有机质阴离子和磷竞争吸附点^[30]。徐德福研究表明:在湿地基质中添加有机物,会使pH 值改变,磷去除率下降^[31]。但是也存在不同的观点,Sanyal 认为一些土壤中的有机质可以增加磷的吸附能力,有机质与土壤中的三氧化二铁、三氧化二铝结合,给磷的吸附提供了一个活跃的表面^[32]。

2 湿地植物除磷的作用机制

植物在人工湿地净化污水的过程中起着重要作用,可分为直接净化作用和间接净化作用。直接净化作用是指植物通过吸收、吸附和富集等作用直接去除污水中污染物^[33]。间接净化作用是指植物根茎输送氧气,增强和维持基质的水力传输,影响水力停留时间,而且根系巨大的表面积会附着大量微生物,根际会创造利于各种微生物生长的微环境^[34~35]。

2.1 植物直接净化作用

学术界对植物直接净化磷的能力,目前存在两种不同的看法。一些学者认为:不同的植物除磷效果差别很大,选择合适的植物,在恰当的时间收割,既能有效除磷又有经济价值^[36~43];但是也有一些学者认为:植物的作用主要是间接作用,收割只能去除磷素的5%,并且会影响湿地内水流状况及输氧、脱氮能力^[27,44~46]。

2.2 植物间接净化作用

由于构筑湿地内部的水力学特征影响污染物质转移,从而直接影响污水净化效果^[47],为此许多学者研究了^[48~51]人工湿地内的水力学特征及其对污水净化效果的影响规律,结果表明:湿地植物根系所造成的物理学和生物学上的效应是影响水力学特征的主要原因,污水在湿地内部的停留时间长短将直接影响其净化效果。

但是关于植物对水力停留时间的影响,学术界存在分歧。一般认为,种植植物有利于出水,效果明显好于不种植植物^[52-53]。但是吴振斌等人^[47]研究表明,在负荷高的情况下,湿地植物的根系过度生长,使得湿地内部孔隙度下降,沙粒板结而水流不畅导致出水速率变慢,影响处理效果。而解决湿地供氧问题,最好的办法就是选择输氧能力强的植物,即根系发达的植物,这就使得在湿地运行时,要合理选用植物,得出最佳的水力负荷与植物耕作密度,及水力停留时间的关系。

植物和微生物的作用是相互的,植物的根系及其根际分泌物,能为微生物的生长提供营养及场所,为此一些学者研究了不同的植物根际分泌物与微生物的关系,来选取湿地植物^[54]。但是有关植物根际微环境在湿地中的作用机理及其影响因素,目前为止尚不清楚。

3 湿地微生物除磷的作用机制

进入构筑湿地系统中的含磷化合物主要包括颗粒磷、溶解有机磷和无机磷酸盐。无机磷化合物的溶解性改变,有机磷化合物的分解矿化,无机磷的氧化、还原都需要磷细菌等微生物的生物化学反应及酶的催化来实施^[55]。Wang 等^[56]的研究表明,微生物死亡后其体内吸附的磷几乎全部迅速分解释放,回到水体当中,所以一般认为微生物的活动与总磷的去除效率之间并无显著相关,但是有机磷酶促水解无机化,却是人工湿地系统中磷被基质吸附沉淀和植物吸收利用的关键一步^[57]。在好氧和厌氧条件下,磷细菌能将有机磷化合物转化为简单的可供植物及微生物吸收的磷化物,并在厌氧条件下提供短链的挥发性脂肪酸,有研究表明,聚磷菌一般可直接利用的物质主要为短链挥发性脂肪酸,其它物质则需要转化为短链挥发性脂肪酸后才能被利用^[58-59]。

微生物的作用,尤其是好氧微生物,依赖于氧气的供给。而传统上的认识,湿地植物具有天然曝气机的功能,但已有实践和研究表明,从植物根部渗透的少量氧气相对于城市污水在实际负荷所需要的氧气来说是微不足道的^[60-61]。因此,对于植物-微生物耦合作用的研究还存在较多机理上的空白。

4 湿地运行过程中的除磷问题

大量研究表明,湿地实际运行中磷的去除也存在不少问题。首先,涉及到磷的去除量基本上以去除率的形式加以报道,然而许多研究中进水的磷浓度很低,故去除少量的磷却表现为较大的去除率;第2个问题,新建人工湿地的磷去除数据不能代表长期运行后的湿地,新建湿地植物的吸磷量大于长时间运行的湿地植物,而且,长时间运行湿地的植物在枯死后将吸收的磷重新释放至湿地,另外新建湿地的基质具有较大的磷吸附容量,而经过1~2a的运行,湿地基质已几乎饱和^[62-63];第3个问题,湿地除磷受温度、季节影响很大,在春季和夏季,植物生长迅速,生物量增加,对磷的吸收加快,出水中磷含量减少,而在秋季植物枯萎后,吸收速度放慢,冬季死亡的植株会释放磷到湿地中,致使出水磷含量上升,无机磷含量甚至高于进水^[20]。

5 结论与展望

综上所述,人工湿地除磷主要依赖湿地基质、水生植物和微生物以及三者之间的联合作用,通过一系列复杂的物理、化学以及生物的途径,实现磷素去除的目的。

湿地基质的除磷作用最大,富含 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 的基质通过吸附和沉淀反应有很好的除磷效果。大量的富含 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 的基质(钢渣)具有显著地的除磷效果,但限于材料自身的特性,不能实际应用。探索不同基质的组合除磷作用是今后湿地基质研究的热点,此外,深入研究基质中磷素解析释放,也是今后需要重点开展的工作。

植物和微生物的耦合作用也是湿地除磷的一个重要机制。虽然植物和微生物单独作用对磷直接去除贡献率很小,但其协同作用可以通过影响湿地水运输方式、供氧能力的方式改变湿地中磷素的赋存形态,从而促进磷素去除。深入研究植物和微生物的耦合作用,查明植物根茎密度与水力负荷及停留时间的关系,揭示植物根际微环境的作用机理及其影响因素,可以为优化湿地植物选择和种植方式提供理论依据。

人工湿地污水处理技术是一种生态技术,应首先强调其生态功能,其次是净化功能,过度追求湿地除磷能力,可能会造成新建湿地快速失去生态服务功能,最终导致湿地系统瘫痪。湿地运行应采取高水力负荷、低污

染负荷的方式,强调强化一级处理的重要性。

References :

- [1] Bi X J, Zhao G Q, Bi H F. Principle and progress of bio-chemical mechanism for biological removal of phosphorous from wastewater. *Journal of Qingdao Technological University*, 2006, 27 (2): 9—13.
- [2] Zhang H C. Study progress in constructed wetland ecosystems for sewage purification. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2004, 5 (2): 11—14.
- [3] He F. Phys-chemical character and nitrogen changes in integrated constructed wetland at the initial stage of operation. *Resources and Environmental in the Yangtze Basin*, 2002, 11 (3): 279—283.
- [4] Bai X H. Development of constructed wetland wastewater treatment technology and its application in China. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1999, 32 (6): 88—92.
- [5] Richardson C J. Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in wetlands. *Science*, 1985, 228: 1424—1427.
- [6] Drizo A, Frost C A, Grace J. Physicochemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems. *Water Research*, 1999, 33 (17): 3595—3602.
- [7] Drizo A, Frost C A, Smith K A, *et al.* Phosphate and ammonium removal by constructed wetlands with horizontal subsurface flow, using shale as a substrate. *Water Science and Technology*, 1997, 35 (5): 95—102.
- [8] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. *Water Research*, 1998, 32 (2): 393—399.
- [9] Gray S, Kinross J, Read P. The nutrient assimilative capacity of maerl as a substrate in constructed wetland systems in constructed wetland systems for waste treatment. *Water Research*, 2000, 34 (8): 2183—2190.
- [10] Yuan D H, Jing L J, Gao S X, *et al.* Analysis on the removal efficiency of phosphorous in some substrates used in constructed wetland systems. *Environmental Science*, 2005, 26 (1): 51—55.
- [11] Tan H X, Zhou Q. Characterization of adsorption on phosphorus in stuffings and its removal in substratum in wetland. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24 (2): 353—356.
- [12] Shilton A, Pratt S, Drizo A, *et al.* 'Active' filters for upgrading phosphorus removal from pond systems. *Water Science and Technology*, 2005, 51 (12): 111—116.
- [13] Drizo A, Comeau Y, Forget C, *et al.* Phosphorus saturation potential: a parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36: 4642—4648.
- [14] Yuan D H, Jing L J, Zhang M Q. Mechanism of phosphorus purification in some kinds of substrates constructed wetland systems. *China Environmental Science*, 2004, 24 (5): 614—617.
- [15] Drizo A, Frost C A. Physicochemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems. *Water Research*, 1997, 33 (7): 3595—3602.
- [16] Xu L H, Zhou Q. Study on purification ability of artificial wetlands with different fillers. *Shanghai Environmental Sciences*, 2002, 21 (10): 603—605.
- [17] Drizo A, Forget C. Phosphorus removal by electric arc furnace steel slag and serpentinite. *Water Research*, 2006, 40: 1547—1554.
- [18] Stumm W, Morgan J J. *Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. New York: John Wiley & Sons, 1970. 583.
- [19] Arias C A, Bubba M D, Brix H. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. *Water Research*, 2001, 35 (5): 1159—1168.
- [20] Wu Z B, Chen H R, He F, *et al.* Primary studies on the purification efficiency of phosphorus by means of constructed wetland system. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, 25 (1): 28—35.
- [21] Gersberg R M, Elkins B V, Lynon S R, *et al.* Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. *Water Research*, 1986, 20 (3): 363—368.
- [22] Brix H. Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 1994, 29 (4): 71—78.
- [23] Tanner C C, Clayton J S, Upsdell M P. Effect of loading rate and planting in constructed wetlands II. removal of nitrogen and phosphorus. *Water Research*, 1993, 29 (1): 27—34.
- [24] Gao C, Zhang T L. Phosphorus sorption and desorption of upland soils in the hilly areas of Taihu Lake watershed. *Journal of Lake Sciences*, 2001, 13 (3): 255—260.

[25] Litaor M I , Reichmann O , Belzer M. Spatial analysis of phosphorus sorption capacity in a semiarid altered wetland. *Journal of Environmental Quality* ,2003 ,32 :335 — 343.

[26] Tanner C C. Substratum phosphorous accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands. *Water Science and Technology* ,1999 ,40 (3) :147 — 154.

[27] Zhang J , Zhou Q , He R. Mechanism of nitrogen and phosphorus removal in free-water surface constructed wetland. *Ecology and Environment* , 2004 ,13 (1) :98 — 101.

[28] Patrick W H , Khalid R A. Phosphate release and sorption by soils and sediments :effect of aerobic and anaerobic conditions. *Science* ,1974 ,186 : 53 — 55.

[29] Brooks A S. Phosphorus removal by wollastonite :a constructed wetland. *Ecological Engineering* ,2000 ,15 (1-2) :121 — 132.

[30] Moshi A O , Greenland G D. Effect of organic matter on the charge and phosphate adsorption characteristics of Kikuyu red clay from Kenya. *Geoderma* ,1974 ,11 :275 — 285.

[31] Xu D F , Xu J M , Wu J J , *et al.* Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems. *Chemosphere* , 2006 ,63 :344 — 352.

[32] Sanyal S K , De Datta S K , Chan P Y. Phosphorus transformations and desorption behavior of some acidic soils of South and Southeast Asia. *Soil Science Society of America Journal* ,1993 ,57 :937 — 945.

[33] Cheng S P , Wu Z B , Kuang Q J. Macrophytes in artificial wetland. *Journal of Lake Sciences* ,2002 ,14 (2) :179 — 184.

[34] Vymazal J. The use of subsurface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic :10 years experience. *Ecological Engineering* ,2002 ,18 (5) :633 — 646.

[35] Wood A. Constructed wetlands in water pollution control :fundamentals to their understanding. *Water Science and Technology* ,1995 ,32 (3) :21 — 29.

[36] Shi L , Zhang X Y , *et al.* Dephosphorization efficiency of plant in underground- ditch-pattern soil treatment and artificial wetland. *Ecology and Environment* ,2003 ,12 (3) :289 — 291.

[37] Niu X J. Research progress on floral communities in constructed wetland in China. *Szechwan Environment* ,2005 ,24 (5) :45 — 47.

[38] Liu J T , Qiu C Q , Chen Z J , *et al.* Screening study of the vegetational plant species for N and P removal from domestic wastewater in the integrated eco-engineering system. *Acta Hydrobiologica Sinica* ,1998 ,22 (1) :1 — 8.

[39] Xu W W , Zhang B P. The functions of plant in constructed wetland for wastewater treatment. *Safety and Environmental Engineering* ,2005 ,12 (2) :41 — 44.

[40] Cheng S P , Kuang Q J , Xia Y C. Studies on artificial wetland with cattail (*Typha angustifolia*) and rush (*Juncos effuses*) I . the performance of purifying wastewater. *Journal of Lake Sciences* ,1997 ,9 (4) :351 — 358.

[41] 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. *Bioresource Technology* ,2004 ,94 :185 — 192.

[42] Huett D O , Morris S G , Smith G , *et al.* Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands. *Water Research* ,2005 ,39 :3259 — 3272.

[43] Jiang Y P , Ge Y , Yue C L. Nutrien tremoval role of plants in constructed wetland on sightseeing water. *Acta Ecologica Sinica* ,2004 ,24 (8) : 1718 — 1723

[44] Ciceka N , Lamberta S , Venema H D , *et al.* Nutrient removal and bio-energy production from Netley-Libau Marsh at Lake Winnipeg through annual biomass harvesting. *Biomass & Bioenergy* ,2006 ,30 :529 — 536.

[45] Zhang R S , Li G H , Zhou Q. Effects of plants on nitrogen/phosphorus removal in subsurface constructed wetlands. *Environmental Science* ,2005 , 26 (4) :83 — 86.

[46] Kim S Y , Geary P M. The impact of biomass harvesting on phosphorus uptake by wetland plants. *Water Science and Technology* ,2001 ,44 (11- 12) :61 — 67.

[47] Wu Z B , Ren M X , Fu G P. The influence of hydraulic characteristics on wastewater purifying efficiency in vertical flow constructed wetlands. *Environmental Science* ,2001 ,22 (5) :45 — 49.

[48] Machate T , Noll H , Behrens H , *et al.* Degradation of phenanthrene and hydraulic characteristics in a constructed wetland. *Water Research* ,1999 , 31 (31) :554 — 560.

[49] Torres J J , Soler A , *et al.* Study of the internal hydrodynamics in three facultative ponds of two municipal WSPs in Spain. *Water Research* ,1999 , 33 (11) :1133 — 1140.

[50] Nameche T , Vasel J L. Hydrodynamic studies and modelization for aerated lagoon and waste stabilization ponds. *Water Research* ,1998 ,32 (10) : 3039 — 3045.

[51] Mitsch W J , Wise K M. Water quality , fate of metals , and predictive model validation of a constructed wetlands treating acid mine drainage. *Water Research* , 1998 , 32 (6) : 1888 — 1900.

[52] Brix H. Function of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology* , 1994 , 29 : 71 — 78.

[53] Luederitz V , Eckert E , Lange-Weber M , *et al.* Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* , 2001 , 18 : 157 — 71.

[54] Liang W , Wu Z B , Zhan F C , *et al.* Seasonal variation of macrophytes root-zone microorganisms and purification effect in the constructed wetland system. *Journal of Lake Sciences* , 2004 , 16 (4) : 312 — 317.

[55] Xu G H , Zheng H Y. The handbook of analyse means to edaphon. Beijing : Agriculture Publishing House , 1986.

[56] Wang N , Mitsch W J. A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands. *Ecological Modelling* , 2000 , 126 (2-3) : 101 — 130.

[57] Wu Z B , Liang W , Cheng S P. Studies on correlation between the enzymatic activities in the rhizosphere and purification of wastewater in the constructed wetland. *Acta Science Circumstantiae* , 2001 , 21 (5) : 622 — 624.

[58] Abu-ghararah Z H , Randall C W. The effect of organic compounds on biological phosphorous removal. *Water Science and Technology* , 1991 , 23 (4) .

[59] Tadwalkar A D , Hsu C L. Enhanced uptake of phosphorus by activated sludge effect of substrate addition. *Water Research* , 1987 , 21 (3) .

[60] Delaune R D , Pezeshki R. Effects of soil oxidation-reduction conditions on internal oxygen transport , root aeration , and growth of wetland plants. *Proceedings of a conference on sustainability of wetlands and water resources*. USA : University of Mississippi , 2000.

[61] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands ? *Water Science and Technology* , 1997 , 35 (5) : 11 — 17.

[62] U S EPA. Constructed wetland treatment of municipal wastewaters manual cincinnati : office of research and development , 2000.

[63] Yin W , Li P J , *et al.* Application limitation and operation of subsurface flow constructed wetland. *China Water & Wastewater* , 2004 , 20 (11) : 36 — 38.

参考文献：

[1] 毕学军 , 赵桂芹 , 毕海峰. 污水生物除磷原理及其生化反应机制研究进展. *青岛理工大学学报* , 2006 , 27 (2) : 9 ~ 13.

[2] 张虎成. 人工湿地生态系统污水净化研究进展. *环境污染治理技术与设备* , 2004 , 5 (2) : 11 ~ 14.

[3] 贺锋. 复合构建湿地运行初期理化性质及氮的变化. *长江流域资源与环境* , 2002 , 11 (3) : 279 ~ 283.

[4] 白晓慧. 人工湿地污水处理技术及其发展应用. *哈尔滨建筑大学学报* , 1999 , 32 (6) : 88 ~ 92.

[10] 袁东海 , 景丽洁 , 高士 等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析. *环境科学* , 2005 , 26 (1) : 51 ~ 55.

[11] 谭洪新 , 周琪. 湿地填料的磷吸附特性及潜流人工湿地除磷效果研究. *农业环境科学学报* , 2005 , 24 (2) : 353 ~ 356.

[14] 袁东海 , 景丽洁 , 张孟群 等. 几种人工湿地基质净化磷素的机理. *中国环境科学* , 2004 , 24 (5) : 614 ~ 617.

[16] 徐丽花 , 周琪. 不同填料人工湿地处理系统的净化能力研究. *上海环境科学* , 2002 , 21 (10) : 603 ~ 605.

[20] 吴振斌 , 陈辉蓉 , 贺锋 等. 人工湿地系统对污水磷的净化效果. *水生生物学报* , 2001 , 25 (1) : 28 ~ 35.

[24] 高超 , 张桃林. 太湖地区丘陵旱地土壤磷的吸持解吸特征. *湖泊科学* , 2001 , 13 (3) : 255 ~ 260.

[27] 张军 , 周琪 , 何蓉. 表面流人工湿地中氮磷的去除机理. *生态环境* , 2004 , 13 (1) : 98 ~ 101.

[33] 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.

[36] 史莉 , 张笑一 等. 地沟式污水土地处理 + 人工湿地中植物对磷的去除效果. *生态环境* , 2003 , 12 (3) : 289 ~ 291.

[37] 牛晓君. 我国人工湿地植物系统的研究进展. *四川环境* , 2005 , 24 (5) : 45 ~ 47.

[38] 刘剑彤 , 丘昌强 , 陈珠金 等. 复合生态系统中高效去除磷、氮植被植物的筛选研究. *水生生物学报* , 1998 , 22 (1) : 1 ~ 8.

[39] 徐伟伟 , 章北平. 植物在人工湿地净化污水过程中的作用. *安全与环境工程* , 2005 , 12 (2) : 41 ~ 44.

[40] 成水平 , 况琪军 , 夏宜峥. 香蒲、灯心草人工湿地的研究 I . 净化污水的效果. *湖泊科学* , 1997 , 9 (4) : 351 ~ 358.

[43] 蒋跃平 , 葛滢 , 岳春雷. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献. *生态学报* , 2004 , 24 (8) : 1720 ~ 1725.

[45] 张荣社 , 李广贺 , 周琪. 潜流湿地中植物对脱氮除磷效果的影响中试研究. *环境科学* , 2005 , 26 (4) : 83 ~ 86.

[47] 吴振斌 , 任明迅 , 付贵萍. 垂直流人工湿地水力学特点对污水净化效果的影响. *环境科学* , 2001 , 22 (5) : 45 ~ 49.

[54] 梁威 , 吴振斌 , 詹发萃 等. 人工湿地植物根区微生物与净化效果的季节变化. *湖泊科学* , 2004 , 16 (4) : 312 ~ 317.

[55] 许光辉 , 郝洪元. 土壤微生物分析方法手册. 北京 : 农业出版社 , 1986.

[57] 吴振斌 , 梁威 , 成水平. 人工湿地植物根区土壤酶活性与污水净化效果及其相关分析. *环境科学学报* , 2001 , 21 (5) : 622 ~ 624.

[63] 尹炜 , 李培军 等. 潜流人工湿地的局限性与运行问题. *中国给水排水* , 2004 , 20 (11) : 36 ~ 38.