

宋玉芝,张艳娜,黄晓峰,等. 湿地植物对农业面源磷污染净化作用的研究进展[J]. 江苏农业科学,2014,42(7):5-8.

# 湿地植物对农业面源磷污染净化作用的研究进展

宋玉芝<sup>1</sup>, 张艳娜<sup>1</sup>, 黄晓峰<sup>2</sup>, 管益东<sup>1</sup>, 李海妮<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏南京 210044; 2. 无锡城市发展集团有限公司, 江苏无锡 214031)

**摘要:**随着全球水环境问题的加剧,对湿地生态功能的认识程度在不断加深。农田磷的流失在水体污染中占有重要的地位,是引起水体富营养化的重要原因,磷是植物生长所必需的元素,湿地植物对营养物质的截留功能倍受关注。笔者就湿地植物对农业面源污染物磷的去除及去除机理,以及影响去除效果的主要因子等方面的国内外研究进行回顾和总结,明确湿地植物种类及其组合对农业面源磷负荷截流的重要性以及有关湿地植物未来的研究方向,为农业面源污染控制和富营养化污染管理提供思路。

**关键词:**湿地植物;农业面源;磷污染;净化作用

**中图分类号:** X71      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2014)07-0005-04

农业面源污染物中的磷素是水体富营养化的主要限制性因子之一<sup>[1-2]</sup>,农田流失的养分随地表径流或农田退水进入受纳水体,导致下游水体富营养化,使水环境质量保护面临巨大的挑战<sup>[3]</sup>。湿地是陆地和水体之间的一个过渡带,它在汇集、转化各种营养物质和废弃物方面具有其他系统不可替代的重要作用。农田径流经由湿地,有利于径流水体水质的改善<sup>[4]</sup>。湿地对磷素的净化作用通过基质的吸附和沉淀、植物吸收、微生物固定等作用来实现<sup>[5]</sup>。植物是湿地系统重要的组成部分,在湿地对营养物质的截留功能中起着重要的作用<sup>[6]</sup>。植物存在与否对磷去除率的影响很大,种植植物的湿地系统对磷的去除率高于无植物湿地系统<sup>[6-8]</sup>。湿地植物不仅通过吸收作用直接去除湿地磷,湿地植物还能通过影响土壤理化性质及微生物种类及数量等从而间接影响湿地磷的去除,而湿地生境中氮和磷含量的改变导致物种间竞争能力和对环境胁迫适应能力的变化,进而引发植物群落的变化,导致湿地生态系统结构和功能的变化<sup>[9-11]</sup>。湿地中植物及湿地

磷循环关系越来越多地受到相关学者关注。湿地及湿地植物用在处理生活污水、养殖水、污染湖泊及河流水、景观水、污水处理厂尾水、复合废水、工业废水都有相关报道,在生活污水及工业污水处理方面研究较多,而将其作为净化农业面源磷污染及富营养化水体磷污染的研究还处在起步阶段<sup>[12-13]</sup>,针对已有的关于湿地植物对净化磷的研究进行回顾和总结。阐述湿地植物对磷污染的净化机理及影响因素,探讨湿地植物种类及组合对磷污染控制的重要性,以为农业面源污染控制和富营养化污染管理提供理论依据。

## 1 湿地植物对湿地磷的去除效应

湿地植物是湿地生态系统中重要的组成部分,在湿地生态系统对磷去除率中占据重要的位置<sup>[6-7,14-15]</sup>。已有研究表明,植物湿地系统春夏季磷的平均去除率在 60% 以上,即使在冬季也能达到 40% 以上,出水水质稳定,而无植物湿地系统磷的去除率仅为 28%<sup>[7]</sup>;Cui 等在垂直流人工湿地系统的研究表明,风车草的生物量每增加 1 000 g,其地上部分 TP 积累量增加 4.9 g<sup>[14]</sup>;宋英伟等通过人工湿地试验表明,人工湿地种植植物后对总氮(TN)、总磷(TP)的去除率比无植物状态时分别提高 13.6% 和 19.5%<sup>[15]</sup>。彭婉婷等研究表明,有植物湿地相对于无植物的湿地其最大净化率提高了 43.73%<sup>[6]</sup>。农业面源污水具有污染物浓度较低、成分复杂等

收稿日期:2013-10-09

基金项目:国家科技重大专项(编号:2012ZX07101-013-02);国家自然科学基金(编号:41071341)。

作者简介:宋玉芝(1970—),女,河南信阳人,副教授,主要从事水体富营养化方面的研究。E-mail:syz70@nuist.edu.cn。

- [25] 牛丽影,郁 萌,刘夫国,等. 香橼精油的组成及香气活性成分的 GC-MS-O 分析[J]. 食品与发酵工业,2013,39(4):186-191.
- [26] 李建绪,王红程,高美华,等. 枸橼果实的香豆素和黄酮类成分研究[J]. 药学研究,2013,32(4):187-189,192.
- [27] 伍岳宗,温鸣章,肖顺昌,等. 我国特有植物——木里香橼叶精油化学成分的研究[J]. 天然产物研究与开发,1990(1):32-36.
- [28] 董丽荣,李忠荣,阎玉鑫,等. 香橼种子油脂成分的 GC-MS 分析[J]. 中国现代中药,2010,12(7):19-21.
- [29] 王 钊,蒋俊兰,梁瑞璋. 野香橼果皮油成分研究[J]. 西南林学院学报,1989,9(2):131-135.
- [30] 曹 玮,章小丽,袁 瑾,等. 香橼中 $\beta$ -胡萝卜素含量的反相高效液相色谱测定[J]. 山东化工,2004,33(4):32.
- [31] 张振杰,韦 薇. 香橼饮料的生产工艺研究[J]. 楚雄师专学

报,1999,14(3):81-83.

- [32] 蒋俊兰,梁瑞璋,王 钊. 野香橼综合加工利用的研究[J]. 西南林学院学报,1987(2):14-17.
- [33] 许洁玲,江乙逵,陈 宇,等. 保健型佛手香橼含片的研制[J]. 现代食品科技,2007,23(5):56-57.
- [34] 施学武,姜新福. 佛手怎样深加工[J]. 中国花卉园艺,2004(10):34-35.
- [35] 杨维平. 香橼佛手饮治疗功能性消化不良 96 例[J]. 中国中医药现代远程教育,2010,8(8):46-47.
- [36] 王天顺. 香橼膏治疗乳腺炎[J]. 中医研究,1988(1):16.
- [37] 李雪梅,刘维涓,周 瑾,等. 香橼叶挥发性化学成分及其在卷烟加香中的应用研究[J]. 烟草科技,2000(5):24-25.

特点<sup>[16]</sup>,而湿地植物在处理轻度富营养化水的人工湿地中,植物吸收对磷的去除起主要作用,植物平均磷积累量对去除水中磷的贡献率为 51.0%<sup>[17]</sup>。农业面源污染径流水经过湿地植物的同化吸收、富集等作用从而减轻下游受纳水体的磷污染负荷。不同植物类型的湿地对水体磷的去除效果存在差异,与湿地植物去除磷的机制密切相关。

## 2 湿地植物对水体磷素去除机理

### 2.1 直接吸收作用

磷是植物生长所必需的营养元素,湿地植物通过根系、茎以及叶直接吸收水中的无机磷,同化成为自身的组成成分,从而减少水体磷的含量。湿地往往具有较高的初级生产力,高生产力导致湿地植被有较高的矿物质吸收率。已有的研究<sup>[18-19]</sup>表明,大型湿地植物吸收磷量为  $1.8 \sim 18.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,其中芦苇地上部分吸收磷量大约为  $6.7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,大部分沼生植物的干物质生物量中磷的含量为 0.15% ~ 1.05%。植物磷积累量主要集中在植物的地上部,平均磷积累对去除水中磷的贡献率 40.5%<sup>[20]</sup>,鲁静等研究表明,洱海流域 44 种湿地植物地上部分分别占有整株 72% 的生物量、75% 的磷含量<sup>[10]</sup>,说明收割湿地植物的地上部分可以高效去除湿地生态系统中的氮和磷。但也有研究表明,植物通过吸收作用对湿地系统除磷的作用很小,收割只能去除磷素的 5%<sup>[21-22]</sup>。李林锋等研究表明,湿地植物对 TP 的吸收量占人工湿地 TP 去除量的 1.4% ~ 41.2%<sup>[23]</sup>,由于湿地植物吸收的 TP 中有相当一部分是储存在湿地植物的地下部,通过收获植物地上部 TP 吸收量仅占人工湿地 TP 去除量的 0.8% ~ 19.6%。由此可见,不同学者就湿地植物去除磷作用大小存在分歧,可能与试验植物种类、湿地植物收割频率以及具体的试验条件密切相关。湿地植物对 TP 吸收存在的差异,除与湿地植物自身组织磷含量和生物量有关外,还可能与湿地植物根表铁氧化物胶膜形成有关。王震宇等研究表明,芦竹根表铁氧化物胶膜吸附的磷占根系吸附吸收磷的 81.7%,香蒲是 85.7%<sup>[24]</sup>。相关研究还刚开始,还需要进一步研究阐明。

### 2.2 与微生物协同作用

湿地植物直接吸收磷量仅占去除磷量的一小部分,湿地植物去除磷的主要途径是通过与微生物的协同作用。湿地磷主要包括颗粒磷、溶解性有机磷和无机磷,无机磷可被植物直接吸收利用,但颗粒磷及溶解性有机磷却不能被湿地植物直接吸收利用。而农业面源污染带来的磷往往以颗粒磷为主<sup>[25-26]</sup>,这些磷必须经过磷细菌的代谢活动转换成溶解性无机磷才能被植物或基质吸附利用或通过吸附转化作用而直接固定下来,从而从水体中去除<sup>[27]</sup>。湿地植物对湿地微生物影响很大,有植物的湿地系统,细菌数量显著高于无植物系统,植物根部的细菌比周围介质细菌高 1 ~ 2 个数量级<sup>[28]</sup>,磷素去除率与湿地植物根际的磷细菌数目呈正相关<sup>[29]</sup>。因湿地植物将氧气从上部输送到根部,在根区或根际形成一种好氧环境,促进微生物生命活动和降解有机物<sup>[30]</sup>。植物根系分泌物也可促进某些嗜磷细菌的生长,促进磷释放与转化,从而间接提高净化率<sup>[31]</sup>。但也有人认为,微生物存在与总磷的去除效率之间并无显著相关,微生物死亡后体内吸附的磷几乎全部迅速分解释放,回到水体当中,但却认同微生物分泌的酶促

进有机磷水解,水解后的磷被植物吸收后,最终达到去除磷的目的<sup>[27]</sup>,通过植物和微生物的协同作用来去除磷。

### 2.3 其他途径

湿地植物除了直接吸收以及通过影响微生物而影响湿地除磷效果外,湿地植被还通过物理作用有效吸附截留水中的悬浮物和颗粒态磷,促进磷的沉降<sup>[32-33]</sup>。李文朝等研究表明,28 d 内,单位鲜重伊乐藻上吸附的固体干物质量达 28.71 g/kg,干物质中 TP 的平均含量为 0.311%<sup>[32]</sup>。而漂浮植物发达的根系与水体接触面积很大,能形成一道密集的过滤层,当水流经过时,不溶性胶体会被根系黏附或吸附从而沉降下来。当植物死了以后,在原来根系的地方会留下空隙,形成根孔,根孔的形成增强了湿地的过滤作用和扩大了湿地的吸附容量。李静等研究表明,苇地土柱的净化能力大于麦地土柱,其中对磷的净化能力最强<sup>[34]</sup>。湿地植物向根区输入的氧气,不仅影响微生物活动,进而影响水体磷的浓度,而且对土壤和底泥理化性质产生影响而影响磷的存在形态。Reddy 等研究表明,土壤和底泥对磷的吸附主要发生在表层<sup>[35]</sup>,这是由于表层土壤和底泥处于好氧状态,铁、铝呈无定性的氧化态形式,吸附能力强,能与磷形成难溶的复合物。在好氧条件下,铁和铝能吸附 87% 的磷。湿地植物生长对湿地磷的去除具有重要的角色,湿地植物通过多种途径影响湿地磷的去除作用。

## 3 影响湿地植物除磷的因素

### 3.1 湿地植物种类及组合

不同生态类型植物对磷的净化效果不同。陈庆峰等研究表明,鸢尾对湿地中磷的吸收能力较强<sup>[36]</sup>。Koerselman 等根据已有的关于各种类型湿地中植物磷含量的文献得出,湿地植物磷的范围为  $0.2 \sim 3.3 \text{ mg/g}$ <sup>[37]</sup>;McJannet 等在标准营养条件(N:P:K=7:11:27)下栽培的 41 种湿地植物总磷含量变化范围为  $1.3 \sim 5.1 \text{ mg/g}$ <sup>[38]</sup>;鲁静等采集的洱海流域 44 种湿地植物中总磷含量为  $1.4 \sim 6.5 \text{ mg/g}$ ,其中含量最低的马来眼子菜为  $1.4 \text{ mg/g}$ ,最高的野慈姑为  $6.5 \text{ mg/g}$ <sup>[10]</sup>。总的来说,湿地植物对磷的吸收能力为挺水植物 > 漂浮植物 > 沉水植物。同生态类型不同种类植物的湿地对水体磷净化效果存在很大差异。杨长明等研究了风车草和香蒲水平潜流人工湿地对养殖水体中不同形态磷的去除效果差异。结果表明,风车草湿地处理系统总磷的去除率显著高于香蒲湿地<sup>[39]</sup>。廖新伟等研究发现香根草对总磷的去除效果要好于风车草<sup>[40]</sup>。刘长娥等对九段沙中沙湿地海三棱草、互花米草和芦苇 3 种典型湿地植物群落的植物各构件中磷的分布、积累与动态进行研究。结果表明,3 种湿地植物中磷含量存在很大差异,大小排序为海三棱草 > 芦苇 > 互花米草<sup>[41]</sup>;植物生长期对植物净化效果影响也很大。曹向东等在研究强化塘-人工湿地复合生态塘系统时发现,总磷的去除率在植物生长期为 15.89% ~ 27.64%,而非植物生长期为 9.21% ~ 14.65%<sup>[42]</sup>。徐后涛等指出,磷在湿地植物生长初期含量较高,随着植物的生长发育其含量呈下降趋势,不同种类植物组合,净化效果不同<sup>[43]</sup>。夏汉平等指出,与单一芦苇系统相比,混合种不仅使湿地净化效率提高,而且净化效果变得更稳定<sup>[44]</sup>。彭婉婷等通过研究睡莲、鸢尾等不同生态型的湿地植物组合对污水中磷的去除效果,结果表明,不同生态型的湿地

植物组合对污水中磷的去除率为 85.67% ~ 99.87%, 睡莲 + 再力花 + 鸢尾组合去除总磷效果最好, 较无植物对照组的最大净化率提高了 43.73%<sup>[6]</sup>。汪秀芳等研究了冬季低温环境下不同水生植物组合对富营养化水体的净化效果, 结果表明, 常绿水生鸢尾 + 羊蹄 + 金叶“金钱蒲” + 反曲灯心草“蓝箭”组合对磷的去除效果最好, 磷的去除率达 70.1%, 而吊兰和三穗藎草等植物长势差, 其植物组合对磷的去除效果不显著<sup>[45]</sup>。由此可见, 湿地植物对磷净化效果与湿地植物生态型、种类、生长状况以及不同植物组合等密切相关。

### 3.2 水文条件

湿地水文条件主要包括水力负荷、水位等。王世和等研究表明, 水力负荷过大或过小都不利于湿地植物对磷的净化处理<sup>[46]</sup>。Chris 比较了流入污水的水质对湿地去除氮、磷的影响, 停留时间从 2 d 增加至 7 d, 结果发现在没有种植植物的湿地中 TP 的去除率从 12% 增加 36%, 而种植了棒灯芯草时从 37% 增加到 74%, 湿地植物可随水力停留时间延长而提高对磷的去除效率<sup>[47]</sup>。柏祥等研究表明, 黄菖蒲和美人蕉分蘖数随水位的升高而显著减少, 植物地上部分形态指标变化不大, 生理指标表明其生长已受到胁迫<sup>[48]</sup>。已有的研究表明, 水位高低对湿地植物的生长、繁殖和生物量分配具有显著影响<sup>[46]</sup>, 武夷慈姑和锐棱荸荠适宜生长在 0 ~ 5 cm 水深处, 小慈姑在 20 cm 水深处生长较佳, 而野荸荠适宜于 0 ~ 20 cm 范围<sup>[49]</sup>, 千屈菜扦插苗适于生长于 0 ~ 10 cm 的浅水环境中, 最适水位为 10 cm<sup>[50]</sup>, 美人蕉最适应的水深 10 cm, 黄菖蒲适应的水深为 30 ~ 70 cm<sup>[48]</sup>。水力负荷、水位直接影响植物生长及局部好氧微环境的存在, 影响磷的过量吸收与释放<sup>[46]</sup>。降雨径流也是影响湿地净化效果的重要水文要素, 降雨不仅会增加湿地水力负荷, 也是农田产流产磷的主要驱动力, 是磷元素在湿地系统中发生迁移转化的重要条件<sup>[51]</sup>。降雨使得湿地内水流加快, 对悬浮颗粒的沉降产生不利影响。同时流速加大使得磷素在湿地内停留时间减少, 加速非点源磷汇入下游受纳水体。降雨会影响湿地水位变化, 从而影响植物的生长及湿地系统的磷转化。水文条件的胁迫对湿地植物除磷效果的影响很大。

### 3.3 其他因子

湿地植物对磷的净化作用还与温度、CO<sub>2</sub>、水体中磷的浓度等诸多因素密切相关<sup>[52]</sup>。植物对磷的净化率随温度的变化而变化, 温度升高会导致植物、微生物生理活性升高, 有利于磷的去除<sup>[53]</sup>。李睿华等研究表明, 温度能够加速水生植物的光合作用, 促进植物对磷的吸收利用<sup>[54]</sup>。杨昌凤等在模拟人工湿地处理污水的试验中发现, 气温在 22 ~ 32 °C 范围内时, 系统对总磷的去除率随着温度的升高而增大<sup>[55]</sup>。Liikanen 等研究表明, 不论在好氧还是厌氧条件下, 磷的释放都随温度升高而增加, 温度升高 1 ~ 13 °C, 可使底泥中 TP 的释放增加 9% ~ 57%<sup>[56]</sup>。由于夏秋季节植物吸收、微生物吸收和降解的共同作用远远大于底泥磷的释放量, 使得夏秋季节净化磷的效果较冬、春季节好。众多研究表明, CO<sub>2</sub> 浓度升高对根际、根外土壤中的微生物生物量以及微生物总数量有促进作用, 与植物去除磷素密切相关的微生物生理类群, 如解磷细菌的数量也有所增加, 影响湿地植物对磷的净化效果<sup>[57]</sup>。通常湿地植物吸收的磷小于城市污水负荷的 5%<sup>[19]</sup>,

随着磷负荷的增加, 湿地去除效率会降低<sup>[58]</sup>。陈博谦等通过模拟试验发现, 当总磷的负荷量由 454 mg/(m<sup>2</sup> · d) 增加至 1 345 mg/(m<sup>2</sup> · d) 时, 去除率从 67.8% 下降到 56.2%<sup>[59]</sup>。

## 4 结论与展望

湿地系统作为陆生系统和水生系统的过渡带, 在减少农业面源污染随地表径流进入下游水体磷含量比较有效。湿地植物作为人工湿地系统的重要组成部分, 通过直接作用和间接作用能有效去除水体磷。目前, 全球已发现的许多湿地高等植物, 而被利用于人工湿地工程的植物不过几十种, 而已利用的人工湿地植物由于种种原因整体净化效果并不十分理想, 有关湿地植物的研究有待深入。今后我国人工湿地植物的研究要着重考虑以下几个方面。(1) 不同湿地植物的吸收作用及其根系对湿地环境中的生物因子及非生物因子的影响能力不同, 净化效果不同, 应加强不同湿地类型不同种类植物去磷机理的研究。(2) 适宜湿地植物组合往往较单一植物的净化能力强而稳定。加强湿地植物之间的相互作用及作用机理也是急需研究的问题。(3) 人工湿地植物生长状况直接影响湿地系统对磷的去除效果, 植物生长状况受水力负荷、水位、温度、水体污染物浓度等外界因素的影响, 加强湿地植物逆境生理生态研究有利于选择抗逆性强的湿地植物, 保证湿地系统运行的稳定性。

### 参考文献:

- [1] 李学平, 邹美玲. 农田土壤磷素流失研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 173 - 177.
- [2] Olli G, Darracq A, Destouni G. Field study of phosphorous transport and retention in drainage reaches[J]. Journal of Hydrology, 2009, 365(1/2): 46 - 55.
- [3] Sharpley A N, Chapra S C, Wedepohl R, et al. Man - aging agricultural phosphorus for protection of surface waters issues and options[J]. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(3): 437 - 451.
- [4] Delgado J A, Berry J K. Advances in precision conservation[M]. Advances in Agronomy, 2008: 1 - 44.
- [5] 张太平, 陈韦丽. 人工湿地生态系统提高氮磷去除率的研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 580 - 584.
- [6] 彭婉婷, 邹琳, 段维波, 等. 多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果[J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 612 - 617.
- [7] 吴振斌, 陈辉蓉, 贺锋, 等. 人工湿地系统对污水磷的净化效果[J]. 水生生物学报, 2001, 25(1): 28 - 35.
- [8] 廖新第, 骆世明. 香根草和风车草人工湿地对猪场废水氮磷处理效果的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 719 - 722.
- [9] 罗先香, 敦萌, 闫琴. 黄河口湿地土壤磷素动态分布特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 154 - 160.
- [10] 鲁静, 周虹霞, 田广宇, 等. 洱海流域 44 种湿地植物的氮磷含量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 709 - 715.
- [11] Wu Z H, Yu D. The effects of competition on growth and biomass allocation in *Nymphoides peltata* (Gmel.) O. Kuntze growing in microcosm[J]. Hydrobiologia, 2004, 527(1): 241 - 250.
- [12] 黄锦楼, 陈琴, 许连煌. 人工湿地在应用中存在的问题及解决措施[J]. 环境科学, 2004, 34(1): 401 - 408.
- [13] Zhang T, Xu D, He F, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990—2010[J]. Ecological Engineering, 2012, 47: 189 - 197.

- [14] Cui L H, Zhu X Z, Ouyang Y, et al. Total phosphorus removal from domestic wastewater with *Cyperus alternifolius* in vertical-flow constructed wetlands at the microcosm level[J]. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(7): 692-701.
- [15] 宋英伟, 年跃刚, 黄民生, 等. 人工湿地中基质与植物对污染物去除效率的影响[J]. 环境工程学报, 2009, 7(3): 1213-1217.
- [16] 宋丰明, 李长有. 农村水环境污染控制及修复[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(3): 330-332.
- [17] 刘盼, 宋超, 朱华, 等. 3种水生植物对富营养化水体的净化作用研究[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(2): 69-74.
- [18] EPA U S. Constructed wetland treatment of municipal wastewaters manual[M]. Ohio: EPA625-R-99-010, 2000.
- [19] Kim S Y, Geary P M. The impact of biomass harvesting on phosphorus uptake by wetland plants[J]. Water Science and Technology, 2001, 44(11/12): 61-67.
- [20] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1720-1725.
- [21] Cicek N, Lambert S, Venema H D, et al. Nutrient removal and bio-energy production from Netley-Libau Marsh at Lake Winnipeg through annual biomass harvesting[J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(6): 529-536.
- [22] 黄炳彬, 何春利, 易作明, 等. 北方地区受污染河湖水体潜流湿地净化技术与工程应用[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1): 19-29.
- [23] 李林锋, 年跃刚, 蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3): 337-342.
- [24] 王震宇, 刘利华, 温胜芳, 等. 2种湿地植物根表铁氧化物胶膜的形成及其对磷素吸收的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 781-786.
- [25] 王鹏, 高超, 姚琪, 等. 太湖丘陵地区农田氮素迁移的时空分布特征[J]. 环境科学, 2006, 27(8): 1671-1675.
- [26] 杨林章, 王德建, 夏立忠. 太湖地区农业面源污染特征及控制途径[J]. 中国水利, 2004(20): 29-30.
- [27] Wang N M, Mitsch W J. A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands[J]. Ecological Modelling, 2000, 126(2/3): 101-130.
- [28] 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.
- [29] 梁威, 吴振斌, 周巧红, 等. 复合垂直流构建湿地基质微生物类群及酶活性的空间分布[J]. 云南环境科学, 2002, 21(1): 5-8.
- [30] 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): 1226-1232.
- [31] 尧水红, 刘艳青, 王庆海, 等. 河滨缓冲带植物根系和根际微生物特征及其对农业面源污染物去除效果[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 365-370.
- [32] 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.
- [33] 殷敏, 陈桂珠. 利用水生高等植物净化污水研究的探讨[J]. 广州环境科学, 2002, 17(1): 6-9.
- [34] 李静, 尹澄清, 王为东, 等. 芦苇湿地根孔系统特征及其磷去除机理研究[J]. 湿地科学, 2009, 7(3): 273-279.
- [35] Reddy K R, Kadlec R H, Flaig E, et al. Phosphorus retention in streams and wetlands: a review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 1999, 29(1): 83-146.
- [36] 陈庆锋, 单保庆, 马君健, 等. 不同水生植物在暴雨湿地中的水质净化作用[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(4): 24-28.
- [37] Koerselman W, Meuleman A M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [38] Mcjannet C L, Keddy P A, Pick F R. Nitrogen and phosphorus tissue concentrations in 41 wetland plants: a comparison across habitats and functional groups[J]. Functional Ecology, 1995, 9(2): 231-238.
- [39] 杨长明, 顾国泉, 邓欢欢, 等. 风车草和香蒲人工湿地对养殖水体磷的去除作用[J]. 中国环境科学, 2008, 28(5): 471-475.
- [40] 廖新伟, 骆世明, 吴银宝, 等. 风车草和香根草在人工湿地中迁移养分能力的比较研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 156-160.
- [41] 刘长娥, 杨永兴, 杨杨. 九段沙中沙湿地植物磷元素的分布积累与动态[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(11): 1537-1541.
- [42] 曹向东, 王宝贞, 蓝云兰, 等. 强化塘-人工湿地复合生态塘系统中氮和磷的去除规律[J]. 环境科学研究, 2000, 13(2): 15-19.
- [43] 徐后涛, 王丽卿, 李高华, 等. 沙田湖人工湿地植物碳氮磷动态研究[J]. 上海环境科学, 2011, 30(3): 105-111.
- [44] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率[J]. 生态学杂志, 2002, 21(4): 51-59.
- [45] 汪秀芳, 许开平, 叶辟高, 等. 四种冬季水生植物组合对富营养化水体的净化效果[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 401-406.
- [46] 王世和, 王薇, 俞燕. 水力条件对人工湿地处理效果的影响[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(3): 359-362.
- [47] Chris C. Effect of loading rate planting on treatment of dairy farm waste waters in constructed wetlands: II. Removal of nitrogen phosphorous[J]. Water Research, 1995, 29(1): 17-26.
- [48] 柏祥, 陈开宁, 黄蔚, 等. 黄菖蒲和美人蕉对水深梯度的响应差异[J]. 生态学杂志, 2011, 30(3): 464-470.
- [49] 王海洋, 陈家宽, 周进. 水位梯度对湿地植物生长、繁殖和生物量分配的影响[J]. 植物生态学报, 1999, 23(3): 269-274.
- [50] 张群. 水位梯度对千屈菜生长繁殖及园艺性状的影响研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.
- [51] Sansalone J, Liu B, Ying G. Volumetric filtration of rainfall runoff: II. Event-based and interevent nutrient fate[J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, 136(12): 1331-1340.
- [52] 梁威, 吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展[J]. 环境科学动态, 2000(3): 32-37.
- [53] 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.
- [54] 李睿华, 管运涛, 何苗, 等. 河岸荆三棱带改善河水水质的中试研究[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1198-1203.
- [55] 杨昌凤, 谢其明. 模拟人工湿地处理污水的实验研究[J]. 应用生态学报, 1991, 2(4): 350-354.
- [56] Liikanen A, Murttoniemi T, Tanskanen H, et al. Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic mid-boreal lake[J]. Biogeochemistry, 2002, 59(3): 269-286.
- [57] Marilley L, Hartwig U A, Aragno M. Influence of an elevated atmospheric CO<sub>2</sub> content on soil and rhizosphere bacterial communities beneath *Lolium perenne* and *Trifolium repens* under field conditions[J]. Microbial Ecology, 1999, 38(1): 39-49.
- [58] 陈桂珠, 陈桂葵, 谭凤仪, 等. 白骨壤模拟湿地系统对污水的净化效应[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(4): 23-26.
- [59] 陈博谦, 王星, 尹澄清. 湿地土壤因素对污水处理作用的模拟研究[J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(1): 19-21.