

不同水生植物吸收地表水中氮磷能力差异及其机理

李旭霞, 荣湘民, 谢桂先, 张玉平, 严红星, 宋海星

(湖南农业大学资源环境学院, 南方粮油作物协同创新中心, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 农田污染控制与农业资源利用湖南省重点实验室, 植物营养湖南省普通高等学校重点实验室, 长沙 410128)

摘要: 为查明不同水生植物吸收地表水中氮磷能力的差异及其机理, 采用模拟沟渠试验和盆栽试验, 研究了8种水生植物地表水中氮磷吸收能力的差异, 并选择氮磷吸收能力差异较大的水生植物品种, 进一步探讨了根系生理特性及底泥微生物量变化。结果表明: 种植水生植物后沟渠水中氮磷浓度明显减少, 供试8种水生植物中以海寿花、狐尾藻、珍珠梅、茭白、再力花的生物量大, 养分吸收量多, 沟渠水中养分减少也相对明显; 种植水生植物后相对于不种植植物的沟渠水中养分残留减少比例分别为, 总氮22.4%~44.0%、铵态氮24.5%~36.8%、硝态氮13.6%~51.6%、总磷15.6%~34.6%、水溶性磷26.3%~41.3%; 氮磷吸收能力强的水生植物与其具有更强的根系活力、更多伤流量以及更高的伤流液养分浓度有关, 但并不是某一种植物的以上指标均有优势, 茭白的根系活力强、伤流量多, 狐尾藻、海寿花、珍珠梅的伤流液中氮磷浓度较高; 沟渠水中氮磷减少比例较大的水生植物底泥中微生物总数、硝化细菌和反硝化细菌数、微生物量碳氮磷较高, 反之则较低。

关键词: 水生植物; 生态拦截; 微生物量; 根系生理特性

中图分类号: Q948.8; X52 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)01-0259-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.040

Difference in Absorbability of Different Aquatic Plants on N and P in Surface Water and Its Mechanism

LI Xuxia, RONG Xiangmin, XIE Guixian, ZHANG Yuping, YAN Hongxing, SONG Haixing

(College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Agricultural University, Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, National Engineering Laboratory of Soil and Fertilizer Resources Efficient Utilization, Hunan Provincial Key Laboratory of Farmland Pollution Control and Agricultural Resources Use, Hunan Provincial Key Laboratory of Plant Nutrition in Common University, Changsha 410128)

Abstract: In order to find out the difference in absorbability of different aquatic plants on nitrogen (N) and phosphorus (P) existing in surface water, and even to explore its mechanism, the simulated ditch experiment and pot experiment were conducted using 8 different aquatic plants. And the plants with great difference on absorbing N and P were selected to make further exploration on root physiological characteristics and microbiological changes of sediment. The results showed that the concentrations of N and P in ditch water decreased significantly after planting aquatic plants, among 8 aquatic plants, the greater biomass was observed in *Pontederia cordata*, *watermifoil*, *Sorbaria sorbifolia*, *Zizania* and *thalia dealbata*, which could absorb more nutrients, resulting in consequently, the decreased nutrients in ditch water. Compared with the treatment of no aquatic plants, nutrient residual in ditch water decreased significantly, total N decreased by 22.4%~44.0%, ammonium nitrate decreased by 24.5%~36.8%, nitrate decreased by 13.6%~51.6%, total P decreased by 15.6%~34.6% and water-soluble P decreased by 26.3%~41.3%, respectively. Aquatic plants could absorb more nutrients was due to their stronger root activity, more xylem sap or higher SAP nutrient concentration. But these advantages could not exist in one specific aquatic plant, for example, *Zizania* had the stronger root activity, while the N and P concentrations in xylem sap were higher in *watermifoil*, *Pontederia cordata* and *Sorbaria sorbifolia*. In the ditch water planted aquatic plants, where the decreased proportions of N and P were larger, the total number of microorganisms, nitrobacteria and denitrifying bacteria, even the microbial biomass C, N and P were also higher, and vice versa.

收稿日期: 2017-07-17

资助项目: 湖南省重点研发计划项目(2016JC2030); 国家科技支撑计划项目(2014BAC09B01-01)

第一作者: 李旭霞(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染防控研究。E-mail: 1479942865@qq.com

通信作者: 宋海星(1964-), 女, 博士, 教授, 主要从事植物营养生理与作物高效施肥研究。E-mail: shx723@163.com

Keywords: aquatic plants; ecological interception; microbial biomass; root physiological characteristics

以水生植物为主体的生态沟渠、人工湿地、植物缓冲带、生态浮床等控制和修复富营养化水体的生态工程,不仅可以达到净化水质的目的,还具有较高的观赏价值,已成为农业面源污染防控和生态环境领域的研究热点之一^[1-2]。已有研究证明,沟渠中有水生植物拦截净化效果要好于无水生植物拦截的自然净化效果^[3-4],太湖地区生态沟渠植物吸收氮、磷分别占夏季试验进水氮磷总量的 68.30% 和 78.45%^[5]。目前,已筛选出泽苔草、水芋、水生美人蕉、空心菜、再力花等多种氮、磷去除能力比较强的植物^[6-7]。关于水生植物对水体氮磷的去除作用的机理主要认为,除植物本身的吸收作用之外,还通过促进微生物活动^[6]和提高水体脲酶及碱性磷酸酶活性等胞外酶活性^[7]来实现。但由于水生植物对不同生态环境的适应性以及生长能力和氮磷吸收能力的差异性^[8-9],针对某一区域的水污染情况筛选并搭配适宜的水生植物种类非常重要。本文采用模拟沟渠及培养试验,研究了 8 种水生植物对地表水中氮磷的吸收能力差异,并探讨了以上差异的机理,旨在为指导当地农业面源污染防控生态工程构建提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 模拟沟渠试验

试验设茭白、海寿花、黑三棱、狐尾藻、珍珠梅、黄菖蒲、千屈菜、再力花 8 种水生植物和 1 个空白对照(不种植植物)共 10 个处理,3 次重复,共 30 个模拟沟渠,每个模拟沟渠面积为 6 m²(2 m×3 m),密度为 40 cm×50 cm。试验开始时向沟渠灌入水,每个沟渠水深控制在 20 cm,沟渠水氮磷浓度分别为 30 mg/L(60% 为硝态氮,40% 为铵态氮)和 0.6 mg/L,管理方式同一般农田沟渠,植物生长 3 个月后收割取样。

1.2 盆栽试验

在玻璃顶网室内钵进行盆栽试验,采用内径 30 cm、高 38 cm 的棕色塑料钵,每钵装入 8 kg 土并加水,水面比土面高出 5 cm,水中氮磷浓度同模拟沟渠试验。试验设茭白、海寿花、狐尾藻、珍珠梅、黄菖蒲 5 种水生植物品种处理,重复 5 次,共 25 钵。

1.3 取样与测定

1.3.1 模拟沟渠试验 每隔 20 d 采一次模拟沟渠中的水样,测定其氮磷浓度变化,共测 3 次,植物生长 3 个月后测定其干重和氮、磷吸收量,计算时换算为 20 d 内的干重变化和氮、磷吸收量。植株样品烘干粉碎过筛后浓 H₂SO₄—H₂O₂ 消解,用凯氏定氮法测定氮含量、用钒钼黄比色法测定磷含量;水样品的总氮(径流液滤纸过滤)采用高温下碱性过硫酸钾消

解(120 ℃,200 kPa 消化 45 min),双波长紫外分光光度法测定;铵、硝态氮采用连续流动分析仪分析;总磷(径流液滤纸过滤)和水溶性磷(抽滤通过 0.45 μm 微孔滤膜)均采用高温下过硫酸钾消解(120 ℃,200 kPa 消化 45 min),双波长紫外分光光度法测定。

收获植物的同时取底泥样品,测定微生物数量及种类。土壤微生物数量采用稀释平板涂抹培养计数法测定;土壤微生物量碳采用熏蒸提取—容量分析法、土壤微生物量氮采用熏蒸提取—全氮测定法、土壤微生物量磷采用熏蒸提取—全磷测定法进行测定^[10];细菌采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基、放线菌采用改良的高氏一号培养基、真菌采用孟加拉红培养基培养基、硝化细菌采用铵盐培养液、异养厌氧细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基。反硝化细菌培养基成分为:柠檬酸钠 5 g, KNO₃ 2 g, K₂HPO₄ 1 g, KH₂PO₄ 1 g, MgSO₄·7H₂O 0.2 g, 琼脂 15 g, H₂O 1 L。

1.3.2 盆栽试验 移栽 30 d 后刈割地上部分,先用脱脂棉法收集伤流液,再取根系样品,用于测定伤流量与根系活力。伤流量用称重法、伤流液中氨基态氮用茚三酮比色法、伤流液中无机磷用钼锑抗比色法、根系活力用 TTC 还原法测定。

所有数据采用 DPS 7.05 统计软件和 Excel 2003 进行数据处理分析。

2 结果与分析

2.1 高效吸收地表水中氮磷的水生植物品种筛选

沟渠水中的养分主要去向为被水生植物吸收、转化为气态挥发损失、被土壤吸附或固定等。因此,无论种植植物与否,沟渠水中的养分都会逐渐减少,为避免植物吸收以外的沟渠水养分减少造成的误差,设置了不种植植物对照。8 种植物中狐尾藻和茭白的生长量较大,其次是海寿花和再力花,其余 4 种植物的生长量较小(表 1)。从沟渠水中的养分残留测定值(表 1)来看,植物生长 20 d 后模拟沟渠水中的氮磷浓度均降低,其中,以种植珍珠梅、海寿花、狐尾藻、茭白的总氮、铵态氮、硝态氮、总磷和水溶性磷浓度较低,其沟渠水净化效果更加明显,正好这些植物的生长量及氮磷吸收量也偏大,说明水中氮磷的减少与水生植物的氮磷吸收是密切相关的。

由表 2 可以看出,相对于不种植植物相比,种植水生植物后沟渠总氮残留减少 22.4%~44.0%、铵态氮残留减少 24.5%~36.8%、硝态氮残留减少 13.6%~51.6%、总磷残留减少 15.6%~34.6%、水溶性磷残留减少 26.3%~41.3%。从不同水生植物品种对铵、硝态氮吸收的差异来看,对硝态氮吸收的品种间差异明显大于

对铵态氮吸收的差异。可见,不同植物品种间硝态氮吸收的差异对氮素养分拦截的贡献大于铵态氮吸收差异。

总之,种植水生植物是拦截农田沟渠养分,净化

水质的有效措施,本试验所设置的处理范围内,以种植珍珠梅、海寿花、狐尾藻的效果最明显,建议种植于农田沟渠中。

表1 水生植物生长20 d后模拟沟渠水中养分残留量及植物吸收量

单位:g/m²

供试植物	总氮	铵态氮	硝态氮	总磷	水溶性磷	吸收总氮	吸收总磷	植物干重
再力花	1.87bc	0.433b	0.776bc	0.064ab	0.047b	6.57b	1.47ab	789b
海寿花	1.48d	0.420b	0.523cd	0.051b	0.041b	8.23a	1.50ab	779b
黑三棱	1.70cd	0.478b	0.677cd	0.059ab	0.049ab	6.60b	1.03c	524c
珍珠梅	1.51d	0.400b	0.584cde	0.051b	0.043b	7.60ab	1.35b	703b
狐尾藻	1.48d	0.416b	0.494e	0.050b	0.042b	8.02ab	1.65a	1053a
黄菖蒲	1.91bc	0.475b	0.734bc	0.062ab	0.049ab	4.13c	1.00c	391c
千屈菜	2.05b	0.430b	0.882b	0.064ab	0.050ab	3.95c	0.60d	473c
茭白	1.67cd	0.421b	0.618cd	0.056b	0.046b	7.08ab	1.47ab	1018a
CK	2.64a	0.634a	1.021a	0.076a	0.064a			

注:同列后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

表2 种植水生植物沟渠相对于不种植物沟渠

养分残留减少比例

单位:%

供试植物	总氮	铵态氮	硝态氮	总磷	水溶性磷
再力花	29.2bc	31.7a	24.0e	16.1d	31.4cd
海寿花	43.8a	33.8a	48.8ab	32.7a	41.3a
黑三棱	35.7b	24.5b	33.7d	22.6bc	27.3d
珍珠梅	42.7ab	36.8a	42.8bc	33.1a	38.4abc
狐尾藻	44.0a	34.3a	51.6a	34.6a	39.9ab
黄菖蒲	27.5c	25.0b	28.2de	18.8cd	27.6d
千屈菜	22.4c	32.1a	13.6f	15.6d	26.3d
茭白	36.8b	33.5a	39.5cd	26.5b	32.4bcd

2.2 不同水生植物品种氮磷吸收能力差异

由图1和图2可以看出,供试5种植植物中根系活力以茭白和珍珠梅较大,黄菖蒲较低;单位地上部

鲜重的伤流液量以茭白和海寿花较大,也是以黄菖蒲较低;但伤流液中氮磷养分含量却以狐尾藻最高,其次是珍珠梅和海寿花,茭白和黄菖蒲较低。因此,茭白虽然有较高的根系活力和较大的伤流量,但伤流液养分浓度不高,其伤流液中的养分总量相对低;狐尾藻的根系活力和伤流量居中,但由于其伤流液中养分浓度高,其伤流液中的养分总量较高;珍珠梅和海寿花的根系活力、伤流量及伤流液养分浓度均居中,其伤流液中的养分总量比较高;黄菖蒲的根系活力、伤流量及伤流液养分浓度均偏低,其伤流液中的养分总量最低。总之,水生植物具有更高的根系活力、更多的伤流量及伤流液养分浓度,均有利于其吸收更多养分。

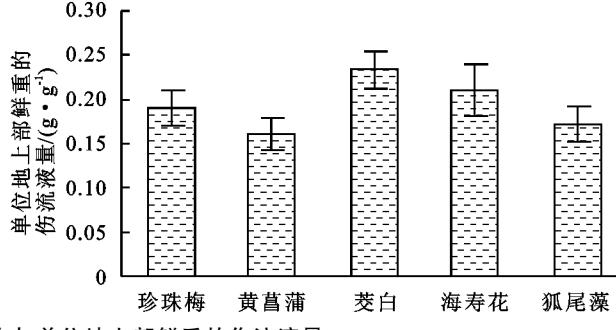


图1 不同水生植物品种根系活力与单位地上部鲜重的伤流液量

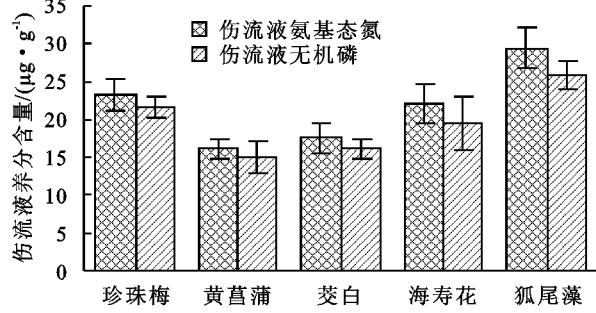
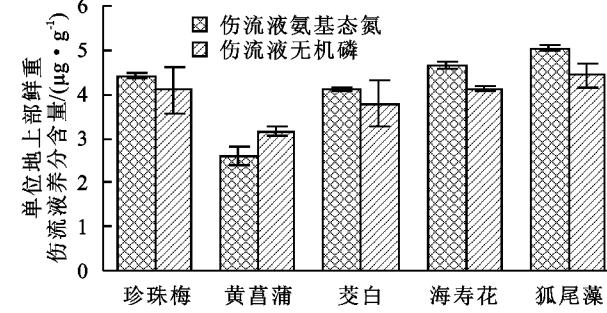


图2 伤流液养分含量与单位地上部鲜重的伤流液养分总量

2.3 不同水生植物品种底泥微生物量差异

为查明不同水生植物底泥微生物对沟渠养分变化的影响,选择沟渠水中氮磷减少比例差异较大、且在当



地生长较多的茭白、海寿花、黄菖蒲3种水生植物,测定了其底泥微生物量差异。由图3、图4可知,微生物数量和微生物量碳氮磷均有差异,沟渠水中氮磷减少比例较

多的茭白和海寿花底泥中微生物总数、硝化细菌和反硝化细菌数、微生物量碳氮磷较高,反之则较低。其中微生物数量以沟渠水中氮素减少比例最多的海寿花最高,微生物量碳氮磷以沟渠水中氮素减少比例中等的茭白最高。根际环境与微生物之间的关系比较复杂,根系分泌物、植物根系泌氧作用引起的不同氧浓度环境(厌氧、缺氧、好氧)、沟渠中的养分状况等,都会影

响到不同类型微生物的生长和繁殖^[24]。本试验 3 种水生植物中,茭白的微生物总数、硝化细菌和反硝化细菌数、微生物量碳磷高于对照;海寿花除微生物量氮之外,其他各项指标也高于对照,而黄菖蒲的只有微生物总数高于对照,其他指标均低于对照,以上现象可能与对照沟渠中的氮磷养分含量较高有关,关于这一问题有待今后进一步研究。

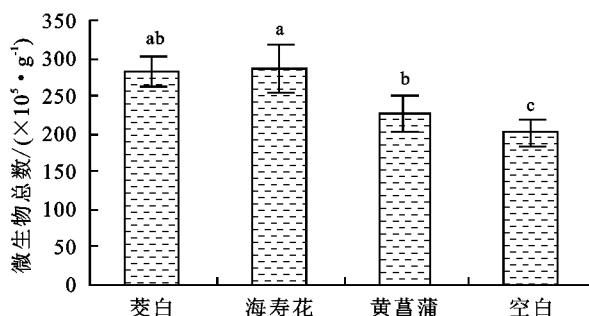


图 3 不同水生植物沟渠底泥微生物总数、硝化细菌与反硝化细菌数

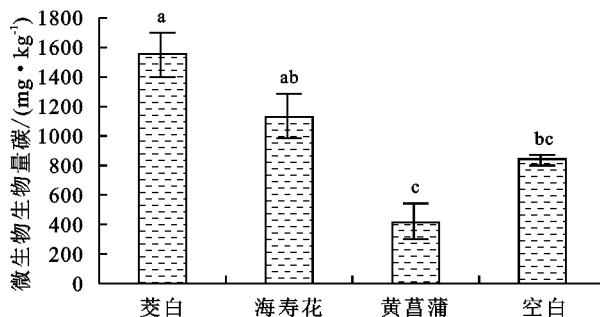
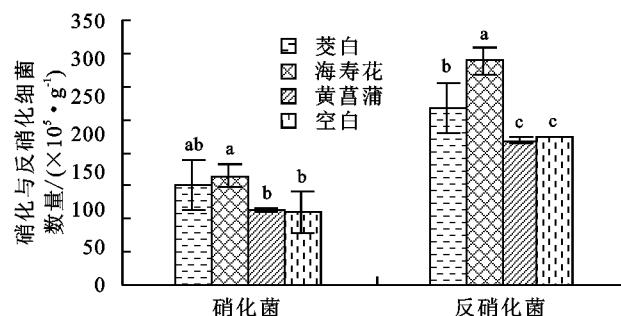
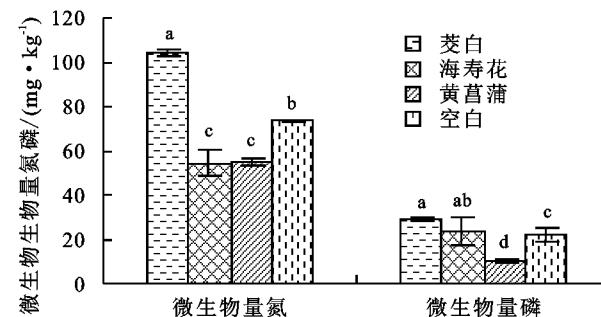


图 4 不同水生植物沟渠底泥微生物量碳、氮、磷



3 讨论

农田排水沟渠不仅具有排水功能,还具备湿地功效,它是农田氮磷等面源污染物的汇聚地,也是富营养化水体的营养物质输出源,因而成为农业面源污染防控研究的热点^[3,11]。水生植物具有吸收营养物质,吸附沉积物,还能为水体中的微生物以及部分水生生物提供栖息场所和食物,在净化水质、降低水体富营养化过程中起到举足轻重的作用^[12-14]。但不同生态条件、不同污染物来源及不同种类水生植物的生长习性不同,水质净化效果差异非常大。何海成等^[15]利用人工浮岛技术研究水生植物对生活污水的净化效果表明,千屈菜的效果比较好;但苗金等^[6]通过温室静态试验研究水生植物对生活污水的净化效果表明,千屈菜的效果并不理想。可见,为充分发挥水生植物对污染物质的消纳能力,不仅要掌握不同水生植物在当地生态环境的生长适应性与氮磷等养分吸收能力,还需要了解种植不同水生植物造成沟渠营养物质消纳能力差异的原因。关于前者已有较多的研究^[16-19]报道,很多地区已筛选出适宜于当地生长的水生植物品种,而关于后者目前仅有少量研究报道。因此,本文在查明 8 种水生植物氮磷吸收能力差异的基础上,选择氮磷吸收能力差异较大的水生植物品种,进一步研究了根系生理特性

及底泥微生物量变化。结果表明,海寿花、狐尾藻、珍珠梅、茭白、再力花的生物量较大,养分吸收量多,沟渠水中养分减少也相对明显,而黄菖蒲、千屈菜、黑三棱则反之。有趣的是,即使氮磷硝化能力较强的植物,其根系养分吸收特性却不尽相同,茭白的根系活力强、伤流量多,狐尾藻、海寿花、珍珠梅则伤流液中氮磷养分浓度较高,说明不同水生植物保持养分吸收优势的根系生理原因并不相同。

不同种类的水生植物因其生理生态学特性不同,单位面积上的生物量也会存在较大差异^[20]。张树楠等^[21]的研究表明,长势高大,根系发达的水生植物,泥沙拦截效果较好;另外,尽管绿狐尾藻属于矮小的须根植物,但其植物密度较大,水体中的颗粒物在流动过程中遇到的阻力较多,因此泥沙拦截效果也较好。在本研究中,狐尾藻以及茭白、海寿花等生物量和根系活力大的水生植物也表现出较好的氮、磷去除效果。这些生物量较大的植物通过刈割其地上部分,可从生态沟渠中带走大量的氮、磷。而千屈菜、黑三棱和黄菖蒲等一类的水生植物生物量较小,伤流液养分含量低,相比其他水生植物,根系也不是很发达,从研究发现其根系微生物量也较低,对氮、磷氮磷吸收能力也相应较低。

唐静杰等^[22]研究表明,去除氮、磷效果较好的水生植物,也能较好地促进根际细菌的生长,但沟渠养分消纳过程中底泥微生物的作用方面研究却远少于水生植物根际微生物群落特征研究^[23-24]。本研究结果表明,沟渠水中养分减少比例较大的水生植物,底泥中微生物数与微生物量碳氮磷也较高,但沟渠养分减少比例与微生物数量排序并非完全一致。如海寿花的沟渠水养分减少比例大于茭白,而除底泥微生物总数略高于茭白之外,硝化细菌数、反硝化细菌数及微生物量碳氮磷均不同程度的低于茭白。以上现象也解释了,本试验中茭白的植株氮素吸收量略多于海寿花,而其沟渠水中养分减少比例却少于海寿花的原因。总之,种植水生植物后的养分消纳过程不仅与植物的吸收累积有关,还与微生物活动驱使的养分转化或损失有关,关于这一问题还有待进一步研究。

4 结论

(1)相对于不种植植物相比,种植水生植物后沟渠水中总氮残留减少22.4%~44.0%、铵态氮残留减少24.5%~36.8%、硝态氮残留减少13.6%~51.6%、总磷残留减少15.6%~34.6%、水溶性磷残留减少26.3%~41.3%。供试8种水生植物中以海寿花、狐尾藻、珍珠梅的氮、磷吸收效果较好。

(2)氮磷吸收能力强的水生植物与其具有更强的根系活力、更多伤流量以及更高的伤流液养分浓度有关,但并不是某一种植物的以上指标均有优势。

(3)沟渠水中氮磷减少比例较多的水生植物底泥中微生物总数、硝化细菌和反硝化细菌数、微生物量碳氮磷较高,反之则较低。

参考文献:

- [1] Kalkhoff S J, Hubbard L E, Tomer M D, et al. Effect of variable annual precipitation and nutrient input on nitrogen and phosphorus transport from two Midwestern agricultural watersheds [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 559: 53-62.
- [2] Liu R M, Wang J W, Shi J H, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469: 1069-1077.
- [3] 胡宏祥,朱小红,黄界颖,等.关于沟渠生态拦截氮磷的研究[J].水土保持学报,2010,24(2):141-145.
- [4] 张芳,易能,邸攀攀,等.高岩不同水生植物的除氮效率及对生物脱氮过程的调节作用[J].生态与农村环境学报,2017,33(2):174-180.
- [5] 王岩,王建国,李伟,等.生态沟渠对农田排水中氮磷的去除机理初探[J].生态与农村环境学报,2010,26(6): 586-590.
- [6] 苗金,原海燕,黄苏珍.10种水生观赏植物对不同富营养水体的净化效果研究[J].水土保持学报,2015,29(2):60-64,75.
- [7] 汪文强,王子芳,高明.5种水生植物的脱氮除磷效果及其对水体胞外酶活的影响[J].环境工程学报,2016,10(10):5440-5446.
- [8] 刘鹏,俞慧娜,张晓斌,等.几种水生观赏植物对城市污水的生理响应[J].水土保持学报,2008,22(4):163-167.
- [9] 范远红,崔理华,林运通,等.不同水生植物类型表面流人工湿地系统对污水厂尾水深度处理效果[J].环境工程学报,2016,10(6):2875-2880.
- [10] 吴金水,林启美,黄巧云,等.土壤微生物生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006.
- [11] 汪秀芳,许开平,叶碎高,等.4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.
- [12] Liu X, Huang S L, Tang T F Z, et al. Growth characteristics and nutrient removal capability of plants in subsurface vertical flow constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44:189-198.
- [13] 余红兵,杨知建,肖润林,等.水生植物的氮磷吸收能力及收割管理研究[J].草业学报,2013,22(1):294-299.
- [14] 关秀婷,周林飞,成霞.不同生长期水生植物对湿地沉积物中营养物质含量的影响[J].沈阳农业大学学报,2017,48(1):70-77.
- [15] 何海成,李青青,崔建平,等.不同水生植物人工浮岛对生活污水的净化效果[J].安徽农业科学,2017,45(3): 68-71.
- [16] 黄亮,黎道丰,蔡庆华,等.不同水生植物对滇池入湖河道污水净化效能的比较[J].生态环境,2008,17(4): 1385-1389.
- [17] 何娜,孙占祥,张玉龙,等.不同水生植物去除水体氮磷的效果[J].环境工程学报,2013,7(4):1295-1300.
- [18] 张力,张振华,高岩,等.不同水生植物对富营养化水体释放气体的影响[J].生态与农村环境学报,2014,30(6):736-743.
- [19] 陈英,邸学林,吴钰明.太湖流域农田生态沟渠塘不同水生植物组合净化氮磷效果研究[J].江苏农业科学,2015,43(12):367-369.
- [20] 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,2009,2(3):337-342.
- [21] 张树楠,肖润林,刘锋,等.生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J].环境科学,2015,36(12):4516-4522.
- [22] 唐静杰,成小英,张光生.不同水生植物—微生物系统去除水体氮磷能力研究[J].中国农学通报,2009,25(22):270-273.
- [23] 陆开宏,胡智勇,梁晶晶,等.富营养水体中2种水生植物的根际微生物群落特征[J].中国环境科学,2010,30(11):1508-1515.
- [24] 赵婉婉,郭丽芸,吴伟.水生植物根系生态化学特性及其生态响应研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(3): 231-236.