

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第6期 Vol.31 No.6 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 6 期 2011 年 3 月 (半月刊)

目 次

臭氧胁迫对水稻生长以及 C、N、S 元素分配的影响	郑飞翔,王效科,侯培强,等 (1479)
高含氮稻田深层土壤的氨氧化古菌和厌氧氨氧化菌共存及对氮循环的影响	王 雨,祝贵兵,王朝旭,等 (1487)
气候年际变率对全球植被平均分布的影响	邵 璞,曾晓东 (1494)
模拟升温 and 放牧对高寒草甸土壤有机碳氮组分和微生物生物量的影响	王 蓓,孙 庚,罗 鹏,等 (1506)
广州城区生态安全岛典型植物群落结构及物种多样性	莫 丹,管东生,黄康有,等 (1515)
中亚热带湿地松人工林生长过程	马泽清,刘琪璟,王辉民,等 (1525)
潜流人工湿地中植物对氮磷净化的影响	刘树元,阎百兴,王莉霞 (1538)
模拟氮沉降对两种竹林不同凋落物组分分解过程养分释放的影响	涂利华,胡庭兴,张 健,等 (1547)
苔藓植物对贵州丹寨汞矿区汞污染的生态监测	刘荣相,王智慧,张朝晖 (1558)
三峡库区泥、沙沉降对低位狗牙根种群的影响	李 强,丁武泉,朱启红,等 (1567)
上海崇明东滩互花米草种子产量及其萌发对温度的响应	祝振昌,张利权,肖德荣 (1574)
栲-木荷林凋落叶混合分解对土壤有机碳的影响	张晓鹏,潘开文,王进闯,等 (1582)
荒漠化对毛乌素沙地土壤呼吸及生态系统碳固持的影响	丁金枝,来利明,赵学春,等 (1594)
黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素	孙文义,郭胜利 (1604)
种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响	李玉英,胡汉升,程 序,等 (1617)
测墒补灌对冬小麦氮素积累与转运及籽粒产量的影响	韩占江,于振文,王 东,等 (1631)
植被生化组分光谱模型抗土壤背景的能力	孙 林,程丽娟 (1641)
北方两省农牧交错带沙棘根围 AM 真菌与球囊霉素空间分布	贺学礼,陈 程,何 博 (1653)
基于水源涵养的流域适宜森林覆盖率研究——以平通河流域(平武段)为例	朱志芳,龚固堂,陈俊华,等 (1662)
黑龙江大兴安岭呼中林区火烧点格局分析及影响因素	刘志华,杨 健,贺红士,等 (1669)
大兴安岭小尺度草甸火燃烧效率	王明玉,舒立福,宋光辉,等 (1678)
长江口中华鲟自然保护区底层鱼类的群落结构特征	张 涛,庄 平,章龙珍,等 (1687)
骨顶鸡等游禽对不同的人为干扰的行为响应	张微微,马建章,李金波 (1695)
光周期对白头鹇体重、器官重量和能量代谢的影响	倪小英,林 琳,周菲菲,等 (1703)
应用稳定同位素技术分析华北部分地区第三代棉铃虫虫源性质	叶乐夫,付 雪,谢宝瑜,等 (1714)
西花蓟马对蔬菜寄主的选择性	袁成明,郅军锐,曹 宇,等 (1720)
基于 Cyt b 基因序列分析的松毛虫种群遗传结构研究	高宝嘉,张学卫,周国娜,等 (1727)
沼液的定价方法及其应用效果	张昌爱,刘 英,曹 曼,等 (1735)
垃圾堆肥基质对不同草坪植物生态及质量特征的影响	赵树兰,廉 菲,多立安 (1742)
五氯酚在稻田中的降解动态及生物有效性	王诗生,李德鹏 (1749)
专论与综述	
景观遗传学:概念与方法	薛亚东,李 丽,吴巩胜,等 (1756)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 284 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 31 * 2011-03



封面图说:美丽优雅的新疆夏尔西里森林草地原始景观。夏尔西里国家级自然保护区建立在新疆博乐北部山区无人干扰的中哈边境上,图中雪地云杉为当地的优势树种。

彩图提供:国家林业局陈建伟教授 E-mail: cites.chenjw@163.com

潜流人工湿地中植物对氮磷净化的影响

刘树元^{1,2}, 阎百兴^{1,*}, 王莉霞¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 采用潜流人工湿地系统, 配制以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为主要成分的模拟污水, 通过间歇运行方式, 考察了芦苇和小叶章的生长情况、生理生态学特性及其对污水中 N、P 净化效能的影响, 并研究了植物对湿地系统 pH 变化、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 净化效率的影响。结果表明, 当水力停留时间为 7d 时, 小叶章和芦苇湿地对 TN 的去除率分别为 65.1% 和 99.6%, 去除负荷分别为 $1.66\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $2.53\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。小叶章和芦苇对去除 TN 的贡献率分别为 14.7%、61.7%, 对去除 TP 的贡献率分别为 11.7% 和 12.9%; 芦苇植株内 N、P 浓度分别为 29.2mg/g 和 3.41mg/g。芦苇湿地的净化效能高于小叶章湿地。湿地系统中 pH 值先升高后降低的拐点可作为氨氧化反应结束的指示参数。

关键词: 湿地植物; 人工湿地; 去除负荷; 去除率; pH

The effect of two wetland plants on nitrogen and phosphorus removal from the simulated paddy field runoff in two small-scale Subsurface Flow Constructed Wetlands

LIU Shuyuan^{1,2}, YAN Baixing^{1,*}, WANG Lixia¹

1 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun 130012, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In order to explore the approaches of ecological engineering for a non-point source pollution caused by paddy field runoff in the Sanjiang Plain, and to seek suitable wetland plants which are appropriate to be used under the local natural conditions in constructed wetlands two subsurface flow constructed wetlands (SSFCWs), 2.0 m in length, 0.5 m in width and 0.65 m in depth, were set up by selecting the local soil and slag (3—5 mm in diameter) as the substrates and transplanting two typical natural marsh wetland plants, *Calamagrostis angustifolia* and *Phragmites australis*. The wetlands were dosed in batch operations using synthetic wastewater without the addition of any organic carbon but with the addition of ammonium-N (30.32 mg/L), nitrate-N (28.74 mg/L) and phosphate-P (10.15 mg/L) as major pollutants. The results suggested that both of the two plant species maintained normal growth in the wastewater, which demonstrates their good pollutant resistance. During the experimental period, the relative growth rate of *Phragmites australis* was 0.042 d^{-1} , which was 2.82 times higher than that of *Calamagrostis angustifolia*. During a 7-day wastewater retention, an average TN removal rate for *Calamagrostis angustifolia* and *Phragmites australis* of 65.1% and 99.6%, respectively, and a TN removal load of $1.66\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ and $2.53\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively, were obtained. The wetland with *Phragmites australis* demonstrated a higher nitrogen removal efficiency. In the course of direct nutrient uptake, the contribution ratios to TN removal achieved by *Calamagrostis angustifolia* and *Phragmites australis* were 14.7% and 61.7%, respectively; whereas for TP, the ratios were 11.7% and 12.9%, respectively. Apart from its uptake rate, the accumulation and concentration of nitrogen in the plants were higher than those of phosphorus, whereas a significant difference of nutrient assimilation between different plants was observed. The nitrogen uptake rate of *Phragmites australis* was $0.519\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, i. e. 3.94 times higher than that of

基金项目: 中国科学院知识创新项目 (KZCX2-YW-Q06-03); 国家自然科学基金项目 (40901128)

收稿日期: 2010-07-07; **修订日期:** 2011-01-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanbx@neigae.ac.cn

Calamagrostis angustifolia. The phosphorus uptake rate of *Phragmites australis* was nearly the same as that of *Calamagrostis angustifolia* ($0.012 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ and $0.011 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively). The concentrations of TN and TP in the biomass of *Phragmites australis* were measured as 29.2 mg/g and 3.41 mg/g , respectively, which were 1.83 and 1.49 times as those of *Calamagrostis angustifolia*. The N and P content in the leaves was found to be higher than that of the stems, for both *Calamagrostis angustifolia* and *Phragmites australis*. For *Calamagrostis angustifolia*, the N and P concentrations in the leaves were 3.66 and 1.03 times higher than those of the stems, and for *Phragmites australis*, the N and P concentrations in the leaves were 3.17 and 0.68 times higher than those of stems, respectively. The N and P assimilation capacity of *Calamagrostis angustifolia* was lower than that of *Phragmites australis*. The removal effectiveness of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ exceeded that of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in each of the SSFCWs. A visible segregation effect of purification for nitrogen and phosphate pollution was found in SSFCWs, and the purification capacity of the top layer was higher than that of the bottom layer in each wetland. The pH values of the top layer of the SSFCWs were lower than those of the bottom layer during the operation process of the SSFCWs. The variation curves of the pH values decreased firstly and then increased. The $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration affected the pH values markedly. The break-point of the pH curve was suggested to be an indicator of the end of the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ reaction. The results clearly demonstrated that constructed wetlands could be a potential technology for nutrient removal from paddy field runoff. The purification capacity of the wetland planted with *Phragmites australis* exceeded that of the wetland with *Calamagrostis angustifolia*.

Key Words: wetland plants; constructed wetland, removal load; removal efficiency; pH

三江平原是我国重要的水稻产区,全区可耕农田的 35% 为水田^[1],且有逐年增加的趋势,因而水田开发成为三江平原自然湿地保护及河流生态环境保护的严重威胁,开展以农田退水为主的面源污染治理研究迫在眉睫^[2]。近年来,基于可持续发展的理念,人们对环境污染防治的观念发生了改变,开始认识到了生态治理的重要性。人工湿地由于具有很低的投资运行费用、良好的处理效果和显著的生态效益等优点,成为了水体修复的重要技术^[3-7]。在人工湿地污水处理系统中,植物起着非常重要的作用,主要表现在吸收污染物质,植物根系向基质释放氧气,植物根系固定植物床,改变水力传导能力,创造生物共生条件,影响微生物和酶的分布以及植物的景观美学作用等方面^[8-10]。但是在三江平原,人工湿地作为一种新型污水处理技术,在湿地植物选择方面缺乏相关的经验,特别是该地区优势湿地植物——小叶章作为人工湿地植物的研究尚未见报道。开展三江平原地区的人工湿地植物筛选与配置技术研究对于拓展人工湿地技术在三江平原乃至我国东北地区的应用有着重要意义。本文通过构建 2 种三江平原地区湿地优势植物的潜流湿地系统,研究了不同湿地植物对 TN、TP 的净化效果的影响,为三江平原地区人工湿地的构建和运行提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验用原水

采用中国科学院三江平原试验站试验场内池塘储水作为试验用原水。该池塘以大气降水及地下水作为补给水源。原水水质指标如下:pH 值为 8.24, COD_{Cr} 为 32—45 mg/L, TN 为 0.885 mg/L, TP 为 0.066 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为 0.055 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为 0.588 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 0.125 mg/L。

1.2 湿地植物选取

植物对于改善湿地基质土壤微环境进而驯化有利于污染物去除的微生物有着重要影响,因此,人工湿地植物系统的选择对于充分发挥湿地功能至关重要。水生植物的选择主要考虑植物的净化能力、耐污能力和抗病虫害能力、易管理等方面。

2009 年 5 月,从中国科学院三江平原试验站试验场内采集湿地植物——芦苇(*Phragmites australis*),向湿地土壤中植入带有芽苞的芦苇根。同时取小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)原状土。每种植物栽种 1 池。植物生长初期做到经常除杂草,防止迅速生长的杂草抑制芦苇、小叶章的生长。湿地植物生长至 7 月中旬基本

布满整个池子成为优势种。启动期间以试验站内池塘水培养,日均换水 100L。

1.3 人工湿地的构建

采用潜流型人工湿地系统,布设场地选定在中国科学院三江平原试验站试验场,试验装置如图 1 所示。人工湿地床体材料为 PVC,单个床体长 2.0 m,宽 0.5 m,深 0.65 m,基质深 0.5 m,有效水深 0.4 m。每个系统分为进水段、处理段、出水段。进水经过粒径 30—50 mm 砾石布水区进入湿地填料床。出水经穿孔板进入粒径 30—50 mm 砾石收水区,流出湿地系统。共 4 池,其中 2 池基质选定为 4—8 mm 粒径的煤渣,上层覆盖 15 cm 土壤,植物分别为芦苇和小叶章;另外 2 池选取土壤为基质的人工湿地系统作为对照,土壤取自中国科学院三江平原试验站试验场天然湿地,植物同样分别为芦苇和小叶章。

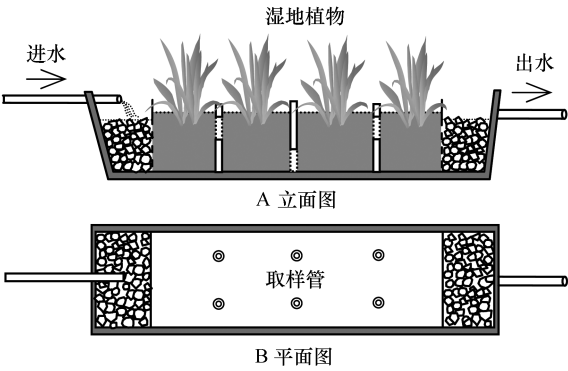


图 1 人工湿地模拟装置示意
Fig. 1 Configuration of constructed wetland

1.4 试验设计

根据实际调查以及文献资料^[11-12],同时参照农田泡田和排干水中 N、P 浓度的基础上,确定了模拟进水浓度。8 月下旬配置模拟进水,进水氮素以 NH_4NO_3 (分析纯) 配制,磷素以 $\text{NaH}_2\text{PO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ (分析纯) 配制。进水后,实测床体进水水质如表 1 所示。运行方式:瞬时进水→净化试验(5—10d)→瞬时出水→落干(2d)。试验期间以原水保持湿地模拟装置水位。

表 1 人工湿地进水污染物浓度

Table 1 Inflow concentration of pollutant in constructed wetlands					
参数 Parameters	TN	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	TP	$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$
进水水质 Inflow/(mg/L)	61.65	31.24	29.46	10.28	10.15

1.5 样品的采集及分析

1.5.1 植物样品采集

实验开始前,收割每槽前、中以及后部在株高、茎秆直径等植物生理指标有代表性的植株各 20 株,并计量每槽内植株株数;试验结束后收割每槽中的全部植物。将植株按照茎、叶分离,称量鲜重后洗净,在 80 ℃ 烘箱中烘至恒重后称重^[13],测定植株生物量(干重)和分析植物的相对生长速率及植株体 TN、TP 的含量。植物相对生长速率 $RGR(\text{/d}) = (\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)$ ^[14], W_1 为试验开始时 t_1 的植物干生物量, W_2 为试验结束时 t_2 的干生物量。

1.5.2 水样采集

人工湿地系统中的水样从湿地表面采用虹吸法利用取样管抽取。取样管为各自在上下部位穿孔的 PVC 管,穿孔部位裹以尼龙网过滤杂质,然后埋入床体基质中。如图 1 所示,每个湿地模拟装置上、下层取样管各 3 个,布置在床体的前中后段,负压虹吸法取样,汲取床体上层水样的穿孔管开孔部分中心部位距基质表层 15 cm,汲取床体下层水样的穿孔管开孔部分中心部位距 PVC 槽底部 15 cm,开孔部分总长度 20 cm。在取样前首先将取样管中原有的水抽干两次,防止污染水样。

1.5.3 分析方法

各指标均采用《水和废水监测分析方法(第 4 版)》中方法进行测定,其中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定; $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定;TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;TP 采用过硫酸钾氧化-钼锑抗比色法测定; $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 采用钼锑抗比色法测定;pH 值采

用精密 pH 计测定。植物样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮制备成溶液^[15],然后依据上述方法测定 TN、TP 含量。

1.5.4 数据统计

各指标内差异显著性采用单因素方差分析 (ANOVA, LSD)。分析软件为 SPASS13.0。

2 结果与讨论

2.1 植物生长状况及对营养物质的吸收

2.1.1 试验期间植物的生长状况

植物生长状况间接反映了它的耐污力,这也是植物能够达到湿地备选标准的重要条件之一。作为应用于污染物净化的湿地植物,耐污力是植物生存和为微生物提供依附场所的前提。在试验装置启动期间,小叶章和芦苇两种植物一直生长较好,每株植物都有新叶发出,有分蘖,尤其以芦苇最为突出。8 月初小叶章进入结穗期,9 月初进入枯萎期,植株底部叶片变黄;而芦苇在此期间一直长势良好,9 月初全面进入结穗期。图 2 显示试验期间小叶章与芦苇株高都有变化,其中以芦苇的变化最为明显,平均株高从 8 月 19 日的 109.4 cm 一直生长到 9 月 6 日的 135.7 cm,增加了 26.3 cm,相反,小叶章在此期间仅长高了 1.5 cm,从表 1 可看出,除生长密度小叶章要优于芦苇外,其他指标均落后于芦苇。而除了植物的表现特征,植物的相对生长率 RGR 也可以用于评价植株的健康状况。表 2 显示芦苇表现出较高的相对生长率,为 0.042/d;小叶章的相对生长率则较低,为 0.011/d,这与小叶章自身具有生长较缓慢的特性有关。

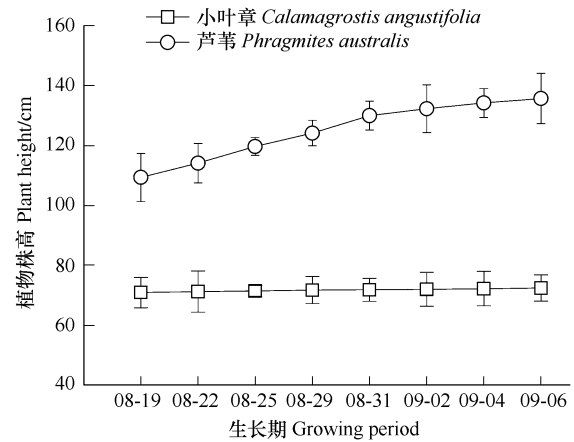


图 2 试验期间湿地植物株高随时间的变化

Fig. 2 Height of the plant in the constructed wetland in one experimental cycle

表 2 湿地植物收割时的生长状况

Table 2 Characteristics of growth of the plant in the constructed wetland before the plant-cutting

植物 Plants	最大株高 Maximum height/cm	平均株高 Average height/cm	生长密度 Growth density/m ⁻²	地上部分生物量 Aboveground biomass		含水率 Moisture content/%	相对生长速率 Relative growth rate/d ⁻¹
				/(kg/m ²)			
				鲜重	干重		
				Fresh weight	Dry weight		
小叶章 <i>Calamagrostis angustifolia</i>	82	70.90	1481	1.520	0.883	41.9	0.011
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	155	135.67	448	2.588	1.260	51.3	0.042

2.1.2 植物对营养物质的吸收

小叶章和芦苇对于氮磷的吸收列于表 3。由表 3 可知,植物吸收氮的量普遍高于吸磷量,同时不同植物品种在营养物质吸收方面的能力差异显著。这与祝宇慧等人的研究结论是一致的^[16]。芦苇对氮素的吸收速率远高于小叶章 ($P<0.05$),而对于磷素的吸收速率差异不明显 ($P>0.05$),这可能与基质及水体中 N、P 的含量有所相关。因为磷素的主要去除机理是依靠基质的物理吸附作用^[17],作用时间短,在很短的时间内磷素的浓度大幅下降,从而造成植物对磷的吸收减少,导致植物对磷素的吸收能力被削弱。而氮素的情况则相反,氮素主要通过硝化与反硝化等微生物作用被削减,所以水体中氮浓度降低梯度较小,为植物对氮的吸收创造了条件,因此两种植物均表现出对 N、P 吸收能力的差异。但植物品种之间,芦苇和小叶章对氮素的吸收能力表现出明显的差异,小叶章的 N、P 吸收能力显著弱于芦苇。

表 3 湿地植物对 N、P 的吸收

Table 3 Nutrient assimilation of wetland plants

植物 Plants	吸收速率 Uptake rate /(g·m ⁻² ·d ⁻¹)		积累量 Accumulation /(g/m ²)		浓度 Concentration /(mg/g)		植物贡献率 Contribution rate of plants/%	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP
小叶章 <i>Calamagrostis angustifolia</i>	0.105	0.011	15.34	1.95	15.98	2.29	14.65	11.70
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	0.519	0.012	28.55	2.17	29.20	3.41	61.71	12.91

以往研究表明,湿地植物对 N 的吸收速率在 0.03—0.30 g·m⁻²·d⁻¹ 之间,对 P 的吸收速率在 0.012—0.017 g·m⁻²·d⁻¹ 之间^[18]。植物种类的不同对 N、P 的积累量有一定的影响,有人研究了 7 种湿地植物中 N、P 积累量分别为 5.67—27.02 g/m² 及 0.44—1.46 g/m² 之间^[19],与本次研究结果大致相似。植物具有较高的营养物质积累能力在污水处理中是有利的,因为可以通过收割将其固定的 N、P 带出水体^[20-22],延长人工湿地的使用寿命。

植物体内的氮磷浓度直接反映了其对营养物质的吸收能力^[21]。虽然有人提出植物体内营养物浓度与植株所处水环境有一定的相关性,但不同的研究结果差异较大,尚无能够被普遍接受的结论。如 Debusk^[23]认为,在中度富营养化(TN、TP 分别为 11.4 mg/L 和 3.0 mg/L)水中,10 种挺水植物的 N、P 浓度分别在 10.2—25.5 mg/g 及 1.3—3.7 mg/g 之间。而蒋跃平等^[24]研究显示轻度富营养化水中(TN、TP 分别为 1.71 mg/L 和 0.08 mg/L),17 种植物的 N、P 浓度分别在 10.68—32.66 mg/g 及 0.73—3.36 mg/g 之间。实验结果的不一致与湿地植物所处的水体中营养元素的组成、环境温度、植物种类等因素有关。从比较可以看出,本实验所配置的进水 N、P 浓度远高于中度富营养化水体浓度,但植物的 N、P 浓度却在上述研究所得的范围之内,间接证明小叶章和芦苇的营养物质吸收能力基本达到自身容量的阈值。

植物的不同部位对营养元素的吸收能力不同。图 3 显示在试验阶段小叶章茎、叶 TN 最高含量分别为 2.71 mg/g(植物干重,下同)和 12.63 mg/g,TP 含量分别为 0.65 mg/g 和 1.32 mg/g,小叶章叶中氮、磷含量分别是茎中含量的 4.66 倍和 2.03 倍;湿地植物芦苇也表现出同样的规律,叶片中的氮、磷含量分别为 23.03 mg/g 和 1.36 mg/g,分别是茎中氮、磷含量的 4.17 倍和 1.68 倍。就不同植物而言,芦苇叶和茎中的氮、磷含量均高于小叶章($P<0.05$),尤其以对氮的吸收二者差异明显,分别是小叶章叶和茎的 1.82 倍和 2.04 倍。氮、磷在植物不同器官中的含量遵循叶>茎的规律。由此可推测在湿地植物选择时应充分重视提高多叶片植物的比重,以便提高湿地植物在 N、P 去除中的作用。

2.2 人工湿地系统内水质指标变化

2.2.1 湿地系统内氮磷的净化效果

由图 4 可见,各种污染物的去除效率均随着停留时间的延长而增加。芦苇湿地 TN 的处理效率在 7d 后为 99.6%,此时小叶章湿地各污染物的去除效率分别为:TN 为 65.1%;NH₄⁺-N 为 84.5%;NO₃⁻-N 为 60.8%;TP 为 96.5%。至 7d 时,小叶章湿地的 TN 去除负荷为 1.655 g·m⁻²·d⁻¹,降解速率为 5.731mg·L⁻¹·d⁻¹,而芦苇湿地的 TN 去除负荷为 2.534 g·m⁻²·d⁻¹,降解速率为 8.789 mg·L⁻¹·d⁻¹,小叶章湿地的氮素去除效能显著低于芦苇湿地($P<0.05$)。

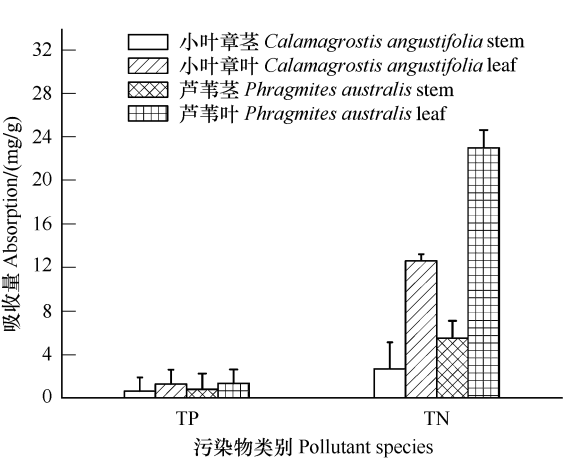


图 3 植物茎和叶对氮磷的吸收

Fig. 3 Absorption of the stem and leaf of plants for N and P

在图 4 中还可看出,各湿地床体对于 N、P 的处理效率上层要高于下层 ($P < 0.05$),这主要与上层湿地植物根系的作用有关。根据 Kichuth 的根区理论:植物根系的释氧,使其周围的微环境依次出现好氧、缺氧和厌氧状态,这是潜流型人工湿地脱氮的重要机理之一。由于湿地系统的床体上层为植物根系富集区,植物不但通过自身的生物代谢活动吸收污染物质,而且通过根系的生命活动为微生物的生长繁殖以及氮素的硝化反硝化、磷素的吸附提供微环境。因此,富集了植物根系的床体上层的污染物去除能力高于床体下层。不同植物种类在营养吸收能力、根系分布深度、氧气释放量、生物量和抗逆性方面存在差异,因而对污染物的净化作用各异^[25-26]。由于湿地植物芦苇根系发达,并具有中空的特殊结构,这是导致小叶章湿地的污染物去除效率低于芦苇湿地的主要原因。

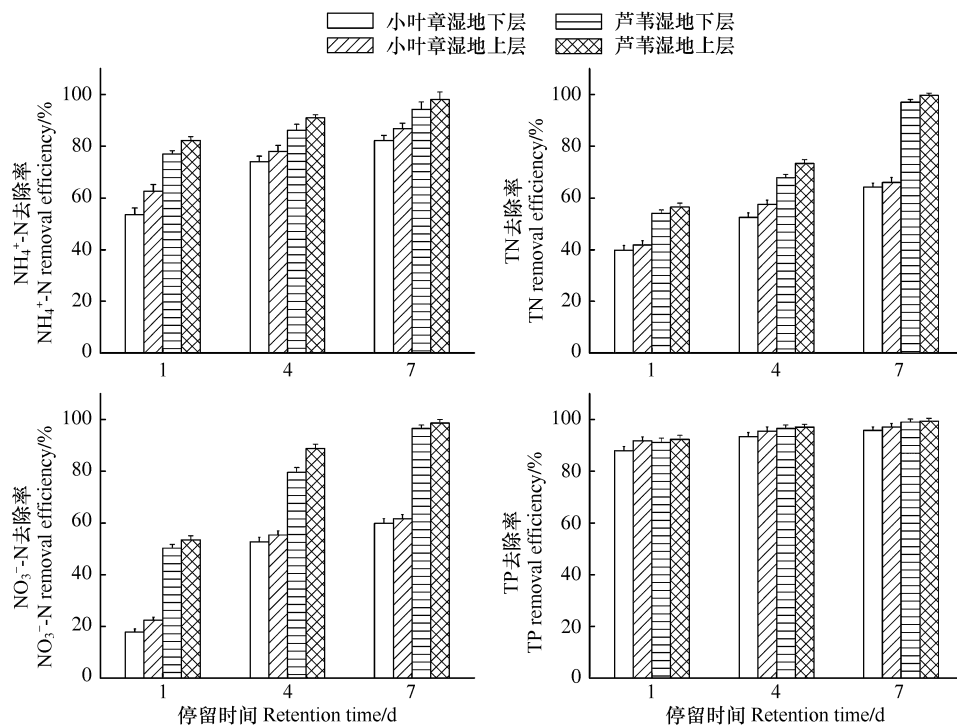


图 4 运行周期内 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 与 TP 的去除效率随停留时间的变化

Fig. 4 Removal efficiencies of TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N and TP in one experimental cycle

2.2.2 植物对人工湿地系统 pH 值的影响

在人工湿地运行过程中测量湿地 pH 变化见图 5, 具有以下几种规律:(1)虽然进水 pH 值较高,一般在 7.5—8.5 之间,但是床体内 pH 却能维持在相对稳定的范围内,一般在 6—8 之间;(2)床体中上层 pH 值总是小于下层 ($P < 0.05$);(3)人工湿地的 pH 值在运行过程中表现出了规律性的变化。随着运行时间的延长,湿地的上下层 pH 都随着运行时间的延长而逐渐降低,当降低到最低点后又开始升高,即出现 pH 值拐点。

在人工湿地运行过程中,具体可能有 5 种因素导致 pH 值的变化。(1)植物作用:水生植物对 NH₄⁺-N 的吸收导致水中 pH 降低,因为植物根部在吸收阳离子的同时释放出 H⁺,即伴随着有机酸的产生^[27]。(2)植物夜

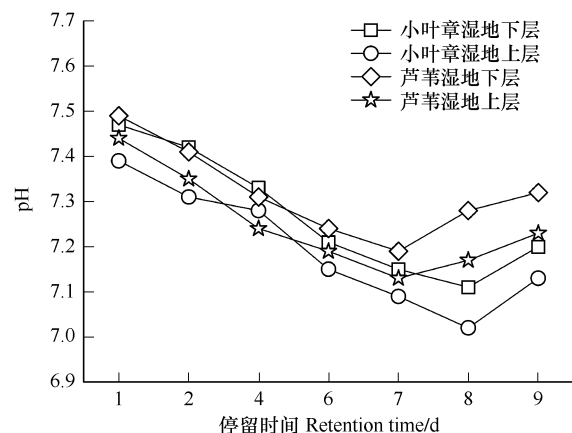


图 5 湿地床体 pH 随停留时间的变化

Fig. 5 Variation of pH in one experimental cycle

间呼吸作用:植物的呼吸作用表现为从大气中吸收 O_2 ,向水体中释放部分 CO_2 ,其白天的光合作用所吸收的 CO_2 又来自大气环境,导致废水中溶解的 CO_2 增加^[25],pH 值降低。(3)硝化作用:在有氧条件下, NH_4^+-N 硝化需要消耗碱度,使得 pH 值下降,而 $NO_2^- - N$ 氧化成 $NO_3^- - N$ 阶段并不消耗碱度,因此不会导致 pH 值的变化;厌氧氨氧化作用:在缺氧条件下,厌氧氨氧化消耗 H^+ ,使系统 pH 值上升;(4)微生物代谢作用:微生物代谢产生 CO_2 ,使得系统内的 pH 值降低;(5)逸散作用:微生物代谢产生的 CO_2 气体逸出进入大气,使得系统 pH 值升高。

由于本实验中湿地系统的进水氮污染物是以 NH_4NO_3 配制的,所以进水中含有大致等量的 NH_4^+-N 和 $NO_3^- - N$ 。在湿地系统的 NH_4^+-N 耗尽前, NH_4^+-N 和 $NO_2^- - N$ 氧化反应综合作用的结果使 pH 值持续下降。而当 NH_4^+-N 消耗完毕后,逸散作用开始占主导地位,pH 值开始缓慢上升,因此可以用 pH 值变化过程中出现的拐点作为人工湿地系统 NH_4^+-N 反应结束的指示指标。

研究表明,土壤具有优良的缓冲能力^[28-29]。由于各个湿地系统上层覆盖土壤,对于上层 pH 值的影响也是导致上层与底层 pH 值出现差异的原因之一。同时,上层水体靠近植物根区,根区的复氧作用使水体中氮素的硝化作用活跃,对湿地 pH 值的变化产生一定的影响。二者的综合作用使湿地系统表层的 pH 值低于底层。

2.2.3 NH_4^+-N 与 $NO_3^- - N$ 的变化规律

人工湿地模拟装置中 $NO_3^- - N$ 、 NH_4^+-N 的净化效率在试验阶段表现出了一定规律性变化(图 6)。由图 6 可以看出,在各个湿地系统中均表现出 $NO_3^- - N$ 的净化效率低于 NH_4^+-N ($P < 0.05$)。人工湿地系统水体中 $NO_3^- - N$ 、 NH_4^+-N 相互转化的途径是: NH_4^+-N 在有氧条件下会经过 $NO_2^- - N$ 最后转变为 $NO_3^- - N$,而直接转变为 N_2 排放到大气的过程中,同时也会产生一定比例的 $NO_3^- - N$ ^[30]。一般认为, NH_4^+-N 首先在在有氧条件下经过硝化作用转化为 $NO_3^- - N$,在厌氧或者缺氧环境下经反硝化作用转化为 N_2 排放到大气中。由于在进水过程中, $NO_3^- - N$ 与 NH_4^+-N 的浓度基本相同,同时 $NO_3^- - N$ 为 NH_4^+-N 向 N_2 转化过程中的中间产物,所以 $NO_3^- - N$ 的去除效率必然要落后于 NH_4^+-N 。

除以上作用外,植物根系的吸收和利用^[31]、基质的吸附作用同样对 NH_4^+-N 在水体中的浓度有重要的影响。目前,虽然对于植物根系是否优先吸收 $NO_3^- - N$ 或 NH_4^+-N 尚无定论,但普遍认为 NH_4^+-N 带正电荷,易被炉渣等基质吸附^[32-33],所以湿地系统水体中存在较少;相反,硝态氮带负电荷,不被基质吸附,主要存在于湿地水体中。

3 结论

本实验研究了 2009 年 8 月份三江平原气候条件下,以芦苇和小叶章作为湿地植物、间歇运行模式下潜流人工湿地中植物对氮磷净化的影响。

(1)芦苇、小叶章两种植物对污水环境均表现出了良好的适应能力。相对于小叶章,芦苇植株内 N、P 浓度较高,对营养元素的吸收能力较强;相对于小叶章湿地,芦苇湿地对 N、P 的净化效能较高。

(2)在芦苇和小叶章人工湿地中,芦苇和小叶章两种湿地植物均表现出了对 N、P 营养元素的吸收叶大于茎的特性,由于芦苇、小叶章根系的影响,各人工湿地上层 N、P 去除效能均高于下层。

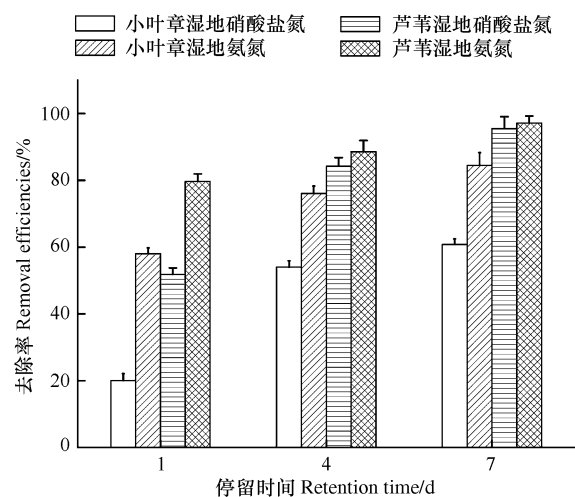


图 6 人工湿地系统 NH_4^+-N 、 $NO_3^- - N$ 在试验阶段的去除效率比较

Fig. 6 Removal efficiencies of NH_4^+-N 、 $NO_3^- - N$ in constructed wetland during experiment

(3)人工湿地床体上层的 pH 值小于下层。在实验周期内,pH 值表现了先下降后升高的规律性变化,可以以 pH 值变化的拐点作为氨氧化反应的终结。

References:

- [1] Liu X T, He Y, Deng W. Study on Northeast Regional Agricultural Comprehensive Development. Beijing: Science Press, 2002.
- [2] Jiang Q G, Cui H W, Li Y H. Study on dynamic change of wetland in Sanjiang Plain, Northeast Area. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2009, 39(6): 1127-1133.
- [3] Dai Y Y, Yang X P, Zhou L X. Effect of reed rhizosphere on nitrogen and COD removal efficiency in subsurface flow constructed wetlands. Environmental Science, 2008, 29(12): 3387-3392.
- [4] Vymazal J. Horizontal sub-subsurface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. Ecological Engineering, 2005, 25(5): 478-490.
- [5] Kedlec R H, Knight R L. Treatment Wetlands. Boca Raton FL: CRC Press, 1996.
- [6] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing country: a review. Ecological Engineering, 2001, 16(4): 545-560.
- [7] Stottmeister U, Wießner A, Kusch P, Kappelmeyer U, Kästner M, Bederski O, Müller R A, Moormann H. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. Biotechnology Advances, 2003, 22(1/2): 93-117.
- [8] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 11-17.
- [9] Huang J, Wang S H, Zhong Q S, Yan L, Liu Y, Wang F. Influence of plant eco-physiology characteristics on nitrogen removal effect in constructed wetlands. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(2): 471-475.
- [10] Knight R L. Wildlife habitat and public use benefits of treatment wetlands. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 35-43.
- [11] Heilongjiang Provincial Bureau of Statistics. Heilongjiang Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2007.
- [12] Liu X T, Ma X H. Influence of large-scale reclamation on natural environment and regional environmental protection in Sanjiang Plain. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(1): 14-19.
- [13] Bao S D. Analysis of Agricultural Soil. Third edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [14] Klomjek P, Nitisoravut S. Constructed treatment wetland: a study of eight plant species under saline conditions. Chemosphere, 2005, 58(5): 585-593.
- [15] Lu R K. Chemical Analysis of Soil Agricultural. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] Zhu Y H, Zhao G Z, Li L X Y, Tian G M. Purification ability of wetland plants for simulated wastewater. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(1): 166-172.
- [17] Nash D M, Halliwell D J. Tracing phosphorous transferred from grazing land to water. Water Research, 2000, 34(7): 1975-1985.
- [18] Yin W, Li P J, Qiu Q J, Song Z W, Xi J X. Contribution of macrophyte assimilation in constructed wetland to nitrogen and phosphorous removal. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(2): 218-221.
- [19] Jiang Y P, Ge Y, Yue C L, Dai J Q, Wang H S, Tang Y L, Chang J. Characteristics of plants in constructed wetland treating light eutrophic water. Journal of Zhejiang University: Sciences Edition, 2005, 32(3): 309-313.
- [20] Hosoi Y, Kido Y, Miki M, Sumida M. Field examination on reed growth, harvest and regeneration for nutrient removal. Water Science and Technology, 1998, 38(1): 351-359.
- [21] Zhu N W, An P, Krishnakumar B, Zhao L, Sun L W, Mizuochi M, Inamori Y. Effect of plant harvest on methane emission from two constructed wetlands designed for the treatment of wastewater. Journal of Environmental Management, 2007, 85(4): 936-943.
- [22] Zhou S, Hosomi M. Nitrogen transformations and balance in a constructed wetland for nutrient-polluted river water treatment using forage rice in Japan. Ecological Engineering, 2008, 32(2): 147-155.
- [23] DeBusk T A, Peterson J E, Reddy K R. Use of aquatic and terrestrial plants for removing phosphorus from dairy wastewaters. Ecology Engineering, 1995, 5(2/3): 371-390.
- [24] Jiang Y P, Ge Y, Yue C L, Chang J. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8): 1718-1723.
- [25] Kadlec R H. The effects of wetland vegetation and morphology on nitrogen processing. Ecological Engineering, 2008, 33(2): 126-141.
- [26] Akrotas C S, Tsihrantzis V A. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. Ecological Engineering, 2007, 29(2): 173-191.
- [27] Iamchaturapatt J, Su W Y, Rhee J S. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow(VFS) constructed wetland. Ecological

Engineering, 2007, 29(3): 287-293.

- [28] Liu W, Shang Q C. Buffer action and its influencing factors of different types of soil in Changchun region. Journal of Jilin Agricultural University, 2001, 23(3): 78-82.
- [29] Zhu X F, Jiang W J, Zhou L, Xiao Y L, Jin Y. The relationship between the buffer capacity of soil and the growth of the fir at Emei Mountain by simulated acid rain. China Environmental Science, 1998, 18(1): 21-24.
- [30] Ye J F. Biological Nitrogen Removal Wastewater Treatment Technology. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [31] Huo C F, Sun H L, Fan Z Q, Wang Z Q. Physiological processes and major regulating factors of nitrogen uptake by plant roots. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1356-1364.
- [32] Song Y W, Nian Y G, Huang M S, Nie Z D. Effects of substrates and plants on pollution removal of constructed wetlands. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(7): 1213-1217.
- [33] Aksu Z, Yener J. The usage of dried activated sludge and fly ash wastes in phenol biosorption/adsorption: comparison with granular activated carbon. Journal of Environmental Science and Health, 1999, 34(9): 1777-1796.

参考文献:

- [1] 刘兴土, 何岩, 邓伟. 东北区域农业综合发展研究. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 姜琦刚, 崔瀚文, 李远华. 东北三江平原湿地动态变化研究. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(6): 1127-1133.
- [3] 戴媛媛, 杨新萍, 周立祥. 芦苇根际微环境对潜流人工湿地氮与 COD 去除性能的影响. 环境科学, 2008, 29(12): 3387-3392.
- [9] 黄娟, 王世和, 钟秋爽, 鄢璐, 刘洋, 王峰. 植物生理生态特性对人工湿地脱氮效果的影响. 生态环境学报, 2009, 18(2): 471-475.
- [11] 黑龙江统计局. 黑龙江统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [12] 刘兴土, 马学慧. 三江平原大面积开荒对自然环境的影响及区域生态环境保护. 地理科学, 2000, 20(1): 14-19.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] 祝宇慧, 赵国智, 李灵香玉, 田光明. 湿地植物对模拟污水的净化能力研究. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 166-172.
- [18] 尹炜, 李培军, 裴巧俊, 宋志文, 席俊秀. 植物吸收在人工湿地去除氮、磷中的贡献. 生态学杂志, 2006, 25(2): 218-221.
- [19] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 戴洁琼, 王华胜, 唐宇力, 常杰. 轻度富营养化水人工湿地处理系统中植物的特性. 浙江大学学报(理学版), 2005, 32(3): 309-313.
- [24] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 常杰. 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): 1718-1723.
- [28] 刘伟, 尚庆昌. 长春地区不同类型土壤的缓冲性及其影响因素. 吉林农业大学学报, 2001, 23(3): 78-82.
- [29] 朱晓帆, 蒋文举, 周励, 肖永玲, 金燕. 模拟酸雨对峨眉山土壤缓冲能力与冷杉生长的关系. 中国环境科学, 1998, 18(1): 21-24.
- [30] 叶建峰. 废水生物脱氮处理新技术. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [31] 霍常富, 孙海龙, 范志强, 王政权. 根系氮吸收过程及其主要调节因子. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1356-1364.
- [32] 宋英伟, 年跃刚, 黄民生, 聂志丹. 人工湿地中基质与植物对污染物去除效率的影响. 环境工程学报, 2009, 3(7): 1213-1217.

CONTENTS

Influences of elevated ozone on growth and C, N, S allocations of rice	ZHENG Feixiang, WANG Xiaoke, HOU Peiqiang, et al (1479)
Coexistence, biodiversity and roles of ammonia-oxidizing archaea and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in deep soil layer of high nitrogen loaded paddy field	WANG Yu, ZHU Guibing, WANG Chaoyu, et al (1487)
The impact of interannual climate variability on the mean global vegetation distribution	SHAO Pu, ZENG Xiaodong (1494)
Labile and recalcitrant carbon and nitrogen pools of an alpine meadow soil from the eastern Qinghai-Tibetan Plateau subjected to experimental warming and grazing	WANG Bei, SUN Geng, LUO Peng, et al (1506)
The structure and species diversity of plant communities in ecological safety islands of urban Guangzhou	MO Dan, GUAN Dongsheng, HUANG Kangyou, et al (1515)
The growth pattern of <i>Pinus elliottii</i> Plantation in central subtropical China	MA Zeqing, LIU Qijing, WANG Huimin, et al (1525)
The effect of two wetland plants on nitrogen and phosphorus removal from the simulated paddy field runoff in two small-scale Subsurface Flow Constructed Wetlands	LIU Shuyuan, YAN Baixing, WANG Lixia (1538)
Effect of simulated nitrogen deposition on nutrient release in decomposition of several litter fractions of two bamboo species	TU Lihua, HU Tingxing, ZHANG Jian, et al (1547)
Ecological monitoring of bryophytes for mercury pollution in Danzhai Mercury Mine Area, Guizhou Province, China	LIU Rongxiang, WANG Zhihui, ZHANG Zhaohui (1558)
Influence of silt deposition and sand deposition on <i>Cynodon dactylon</i> population in low-water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, DING Wuquan, ZHU Qihong, et al (1567)
Seed production of <i>Spartina alterniflora</i> and its response of germination to temperature at Chongming Dongtan, Shanghai	ZHU Zhenchang, ZHANG Liquan, XIAO Derong (1574)
Effects of decomposition of mixed leaf litters of the <i>Castanopsis platyacantha</i> - <i>Schima sinensis</i> forest on soil organic carbon	ZHANG Xiaopeng, PAN Kaiwen, WANG Jinchuang, et al (1582)
Effects of desertification on soil respiration and ecosystem carbon fixation in Mu Us sandy land	DING Jinzhi, LAI Liming, ZHAO Xuechun, et al (1594)
The spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors in hilly region of the Loess Plateau	SUN Wenyi, GUO Shengli (1604)
Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above- and below- growth in faba bean/mazie intercropping system	LI Yuying, HU Hansheng, CHENG Xu, et al (1617)
Effects of supplemental irrigation based on measured soil moisture on nitrogen accumulation, distribution and grain yield in winter wheat	HAN Zhanjiang, YU Zhenwen, WANG Dong, et al (1631)
Anti-soil background capacity with vegetation biochemical component spectral model	SUN Lin, CHENG Lijuan (1641)
Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin of <i>Hippophae rhamnoides</i> L in farming-pastoral zone from the two northern provinces of China	HE Xueli, CHEN Cheng, HE Bo (1653)
Study on optimum forest coverage for water conservation: a case study in Pingtonghe watershed (Pingwu section)	ZHU Zhifang, GONG Gutang, CHEN Junhua, et al (1662)
Spatial point analysis of fire occurrence and its influence factor in Huzhong forest area of the Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province, China	LIU Zhihua, YANG Jian, HE Hongshi, et al (1669)
Combustion efficiency of small-scale meadow fire in Daxinganling Mountains	WANG Mingyu, SHU Lifu, SONG Guanghui, et al (1678)
Community structure of demersal fish in Nature Reserve of <i>Acipenser sinensis</i> in Yangtze River estuary	ZHANG Tao, ZHUANG Ping, ZHANG Longzhen, et al (1687)
Behavioral responses of the Common Coots (<i>Fulica atra</i>) and other swimming birds to human disturbances	ZHANG Weiwei, MA Jianzhang, LI Jinbo (1695)
Effects of photoperiod on body mass, organ masses and energy metabolism in Chinese bulbul (<i>Pycnonotus sinensis</i>)	NI Xiaoying, LIN Lin, ZHOU Feifei, et al (1703)
Larval host types for the 3 rd <i>Helicoverpa armigera</i> in Bt cotton field from North China determined by $\delta^{13}\text{C}$	YE Lefu, FU Xue, XIE Baoyu, et al (1714)
Selectivity of <i>Frankliniella occidentalis</i> to vegetable hosts	YUAN Chengming, ZHI Junrui, CAO Yu, et al (1720)
Genetic structure of <i>Pine caterpillars</i> (<i>Dendrolimus</i>) populations based on the analysis of Cyt b gene sequences	GAO Baojia, ZHANG Xuwei, ZHOU Guona, et al (1727)
Pricing method and application effects of biogas slurry	ZHANG Changai, LIU Ying, CAO Man, WANG Yanqin, et al (1735)
Effects of compost from municipal solid waste on ecological characteristics and the quality of different turfgrass cultivars	ZHAO Shulan, LIAN Fei, DUO Li'an (1742)
Degradation kinetics and bioavailability of pentachlorophenol in paddy soil-rice plant ecosystem	WANG Shisheng, LI Depeng (1749)
Review and Monograph	
Concepts and techniques of landscape genetics	XUE Yadong, LI Li, WU Gongsheng, ZHOU Yue (1756)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 6 期 (2011 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 6 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@ cspg. net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@ cspg. net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		

