

芦苇的种质资源及在人工湿地中的应用*

王萌 王玉彬 陈章和**

(华南师范大学生命科学学院, 广东省高等学校生态与环境重点实验室, 广东省植物发育生物工程重点实验室 广州 510631)

摘要 芦苇属 (*Phragmites*) 植物在世界分布广泛, 具有多个变种, 并被大量地应用于人工湿地, 具有较强的污水净化效果. 在我国芦苇属有3个种, 分别为卡开苇 [*P. karka* (Retz.) Trin. ex Steud.]、日本苇 (*P. japonica* Steud.) 和普通芦苇 [*P. australis* (Cav.) Trin. ex Steud.]. 普通芦苇是当今世界范围内应用最广泛的芦苇种. 芦苇为适应不同的环境条件会变异为不同的生态型, 具有各自稳定的生理、遗传学特征. 本文主要介绍我国3个芦苇种的生物学特征和分布, 对芦苇的多生态型特征以及世界范围内不同种芦苇在人工湿地中的应用现状进行阐述, 并分析芦苇人工湿地的特点和应用中存在的问题, 同时指出调查芦苇更多生态型, 研究不同生态型芦苇与人工湿地污水净化效果之间的关系以及开展芦苇与其他人工湿地植物污水净化效果的比较等方面是以后研究的重点. 表1 参69

关键词 芦苇; 种质资源; 人工湿地; 污水处理; 生态型

CLC X52 : Q949.714.208

Germplasm Resource of *Phragmites adans* and Its Application in Constructed Wetlands*

WANG Meng, WANG Yubin & CHEN Zhanghe**

(Key Laboratory of Ecology and Environmental Science in Guangdong Higher Education, Guangdong Provincial Key Laboratory of Biotechnology for Plant Development, College of Life Sciences, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract The genus *Phragmites* is widely distributed in the world and extensively used in constructed wetlands. There are several variations of *Phragmites* worldwide, but only three in China: *P. karka* (Retz.) Trin. ex Steud., *P. japonica* Steud. and *P. australis* (Cav.) Trin. ex Steud. *P. australis* is recognized as the most commonly used species. *Habitant adaptation of Phragmite* can develop various ecotypes, which are characterized by specific physiological and genetic properties. Different ecotypes of *Phragmites*, and its distribution and biological properties of three variations in China were described in this paper. Meanwhile, decontamination performances and problems on constructed wetlands planted with *Phragmites* were also discussed. Furthermore, it was proposed that future researches on *Phragmites* were mainly emphasized on ecotype investigation and wastewater purification by different ecotypes, as well as comparison on purification capacities by *Phragmites* and other wetland plants. Tab 1, Ref 69

Keywords *Phragmites adans*; germplasm resource; constructed wetland; wastewater treatment; ecotype

CLC X52 : Q949.714.208

芦苇属 (*Phragmites*) 是禾本科多年生草本植物, 分布广泛, 具有广泛的适应性, 是人工湿地中一种重要的应用植物. 芦苇能够调节局部小气候, 防止水土流失, 维持物种多样性, 具有很高的生态价值; 芦苇 also 具有很高的经济价值, 在工业、医药、纺织业等领域发挥着重要的作用. 芦苇在世界范围内有10个种, 分布于不同的生境中, 为了适应不同的生长环境, 变异成不同的生态型, 是一种多生态型植物, 并且不同生态型芦苇具有不同的生理、形态特征. 人工湿地兴起于上世纪70年代, 能为野生动植物提供栖息地, 具有蓄洪、消减流速等作用, 享有“地球之肾”的美誉. 与传统技术相比, 人工湿地具有节能降耗、抗冲击能力强、管理方便、造价及运行费用低等优点, 并具有良好的景观和生态效应. 近年来, 人工湿地作为一种新兴的污水处理工艺, 已在污水处理中得

到广泛应用. 芦苇是人工湿地中最常应用的植物之一, 能加强和维持人工湿地中的水力传输, 吸收利用、富集水体中的污染物和重金属离子以及为微生物提供栖息地. 目前, 世界上许多国家对芦苇的研究主要集中在把芦苇应用于人工湿地, 利用芦苇人工湿地净化能力强的特点, 达到净化污水的目的. 但是目前在世界范围内, 大多数学者只研究普通芦苇的特点, 而关于芦苇其他种属的研究则很少. 本文全面综述了芦苇种质资源调查以及芦苇的应用研究情况.

1 芦苇资源

1.1 分类

芦苇属禾本科芦苇属 (*Phragmites*), 是多年水生或湿生的高大草本植物. 据记载, 芦苇属在世界范围内有10个种, 在中国有3个种, 即卡开苇 [*P. karka* (Retz.) Trin. ex Steud.] (大芦)、日本苇 (*P. japonica* Steud.) 和普通芦苇 [*P. australis* (Cav.) Trin. ex Steud.]^[1-3]. 另外, 芦苇还存在许多变种^[4]. 在国外芦苇人工湿地中, *P. mauritanus*与*P. australis*是被广泛应用的两个种.

收稿日期: 2009-11-11 接受日期: 2010-03-04

*国家自然科学基金项目 (No. 30470346) 和广东省自然科学基金项目 (No. 06025056) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30470346) and the Natural Science Foundation of Guangdong, China (No. 06025056)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: chenzhh@scnu.edu.cn)

1.2 生物学特性

芦苇属植物具有发达根状茎, 营养繁殖力强, 天然种群以根茎繁殖进行补充更新, 在适宜环境条件下可形成单优种群^[5]。

普通芦苇一般株高2.5 m以上。它具有3种茎: 1) 地下茎(即根状茎, 又称芦鞭), 其作用是更新种群, 茎乳白色, 节间中空, 每节生一个先端为尖锐形硬质的芽, 生长点即在其内, 节上生须根。2) 地上茎(即植株), 为待成熟茎, 有节15~30个, 由它进行光合作用和开花结果。3) 一种介于前两种之间的中间类型的直立地下茎, 它从匍匐茎的茎芽上萌发, 直立向上生长, 是地上茎的基础, 但能分株。地上茎每节生一个叶片, 二列式排列, 叶片呈针形至宽条形, 长30~60 cm, 宽2~5 cm, 全缘, 基部圆形, 中部以上渐窄, 先端渐尖, 两面粗糙, 叶鞘圆筒形包围着秆, 叶舌为一圈短毛。圆锥形花序, 顶生, 小穗较大, 棕紫色或黄绿色, 微垂头, 分枝纤细^[2]。

普通芦苇存活时间一般为6 a, 根茎从第5年开始大量死亡, 至最高6龄级所占比重较小。普通芦苇种群的1龄级根茎为处于生长发育阶段的幼龄级, 其根茎中的干物质储量和可溶性糖含量较少; 2~4龄级根茎为保持相对稳定阶段的成龄级, 在此期间根茎中的干物质储量和可溶性糖含量增加; 5~6龄级根茎为正在衰老死亡阶段的老龄级, 其中的干物质储量和可溶性糖含量最多^[6]。根茎芽的生活力并不随着龄级增加而减弱, 老龄级根茎芽在种群更新中仍具有重要地位和作用。

普通芦苇一般2月中旬前后开始萌发, 7~9月开花, 10月结实而逐渐枯黄。

卡开苇为多年生草本, 茎高3~6 m, 粗壮且不分枝。具有根状茎。节间较短, 节上生有不定根。叶鞘平滑, 具横脉, 叶舌较短, 叶片扁平宽广。大型圆锥花序, 具稠密分支与小穗。

日本苇为多年生草本, 茎高约1.5 m, 较细瘦。具地下横走根状茎和向上竖立的短根状茎, 以及发达的地面匍匐茎。节间较长, 节处生不定根。叶鞘边缘粗糙, 叶舌较短, 膜质, 叶片扁平较厚, 顶端渐尖, 边缘具锯齿状粗糙, 小型圆锥花序, 具分支与小穗^[7]。

1.3 分布

普通芦苇具有广泛的适应性, 在淡水、碱性、轻盐性的湿地都有分布, 甚至在强酸性(pH=2.9)的湿地和干旱沙丘也能生长。普通芦苇在世界各地广为分布。1960年, 在美国除了南太平洋沿岸的一些地区外, 几乎在所有的州都有分布^[8]。一些科学家根据化石研究发现普通芦苇在美国西南部存在时间至少达4万年, 古生态学调查也表明芦苇分布于太平洋和大西洋沿岸已有数千年^[9]。

普通芦苇在我国分布区域辽阔, 资源丰富, 根据水热条件和生态环境的差异可以把我国芦苇产区划分为5个地理区域: 南方湖滨苇区、东部滨海苇区、北方沼泽苇区、西北干旱苇区和西南高原苇区。普通芦苇生于江河湖泽, 一般分布在海拔较低及沿海一带, 在海拔较高的谷地有少量日本苇^[10]。

卡开苇不如普通芦苇分布广泛, 一般生于海拔1 000 m以下的江河湖岸与溪旁湿地。在我国仅南部、西南部有分布; 另外亚洲热带地区、非洲、大洋洲、中南半岛、马来西亚及澳大利亚北部也均有分布^[11]。

日本苇产于黑龙江(宁安、镜泊湖), 生于水中或沼泽地, 位于湖区迎水面或砾石地。在东北地区以及日本、朝鲜及俄罗斯远东地区均有分布^[7]。

1.4 生态型

早在1972年, Waisel报道普通芦苇有盐生和非盐生2种生态型。甘肃河西走廊地处沙漠地带, 气候多变, 为适应所处的生境条件, 芦苇分化成沼泽芦苇、沙丘芦苇、盐化草甸芦苇和盐化草甸-沙丘过渡带芦苇4种类型, 并且每种芦苇都有不同的生理结构特征^[11-12]。黄河三角洲地域广阔, 环境变化较大, 芦苇在黄河三角洲分化为淡水沼泽芦苇、咸水沼泽芦苇、低盐草甸芦苇和高盐草甸芦苇4个不同生态型^[13]。张淑萍等(2003)通过研究分析黄河下游芦苇的变异规律和分化特点, 建议将该地芦苇分为盐生芦苇、淡水芦苇、巨型芦苇3种生态型^[14]。新疆芦苇为适应其特殊的生态环境, 分化成水生芦苇、盐化草甸芦苇、沙丘芦苇和过渡芦等生态型^[15]。

从上述报道不难看出, 芦苇是一种多生态型植物, 在不同的环境条件下, 为适应其生存环境, 其变异广泛存在。水分条件会造成芦苇的株高、叶面积、茎粗度、节间长度和节数等形态差异, 进而造成了长期生长在不同水分条件下的芦苇生物量的差异^[16-17]; 生长在湖泊等水体中的芦苇, 由于不同的水体具有独特的物理化学性质, 导致芦苇的形态差异和独特的生理特性^[18]; 在某种物质的污染区范围内生长的芦苇, 也会由于长期适应此生长环境而形成自身独特的代谢特征, 进而形成不同的生理特征^[19]; 在沙地中生长的芦苇, 由于要适应干旱以及风蚀沙埋, 逐渐演化成株高、茎长变短、分蘖数、芽数减少的特点, 表现出与普通样地芦苇截然不同的适应对策^[20]。

一般情况下, 不同地理气候区间芦苇的形态变异异常被认为是地理生态型, 同一气候区内不同生境中芦苇的形态变异异常被认为是生境生态型。不同生态型的芦苇具有各自独特稳定的形态、生理学等特征。分子生物学技术研究表明不同生态型芦苇具有显著的遗传差异, 而同一生态型的个体或群体之间则差异很小, 同时也表现出不同生态型芦苇的演化趋势^[21-23]。但是至今关于芦苇生态型的研究, 大多还是集中在生境和形态学等方面, 因此值得加强不同生态型芦苇生理生态学和分子生态学等方面的研究。

2 芦苇在人工湿地中的应用

2.1 芦苇在人工湿地中的应用现状

人工湿地是一种新兴的污水处理工艺, 具有节能降耗、抗冲击能力强、管理方便、造价及运行费用低、景观和生态效应好等优点, 目前已在污水处理中得到广泛应用。其机理是当污水渗流过植物的根区时, 经过这一特殊生态条件下各种因素的综合作用, 达到净化的目的^[24]。芦苇去污能力强, 易于栽种, 已逐渐成为国际上公认的人工湿地处理污水的首选植物。芦苇人工湿地不但具有较高的污染物去除率, 还有研究表明芦苇人工湿地具有很强的储碳固碳能力, 可以有效固定温室气体, 减少温室效应对全球以及人类造成的危害^[25-26]。

1974年德国建成了世界上第一个芦苇人工湿地。与国外相比, 我国人工湿地处理污水的研究较晚。1987年天津环保

所建成我国第一个占地6 hm²、日污水处理规模为1 400 m³的芦苇人工湿地工程^[27]。至80年代中后期,德国、法国、丹麦、奥地利、比利时、卢森堡、荷兰等西欧国家都建立了大量的芦苇床系统,主要用于小城镇的污水处理,并建立了协作组织以推动进一步的研究。上个世纪八、九十年代芦苇人工湿地在世界上许多国家得到快速发展,已有数百座芦苇人工湿地系统投入使用。目前世界各国正投入大量人力和物力用以研究、应用芦苇湿地,并不断改进芦苇人工湿地技术。

芦苇人工湿地对污水中的有机物具有很高的去除率。诸惠昌等(1996)采用种植已达4 a之久的芦苇床对进水COD (Chemical oxygen demand)浓度为400~800 mg L⁻¹的乳制品厂废水进行处理,结果表明COD的去除率达97%~98%, BOD₅ (Biochemical oxygen demand)的去除率达98%~99%^[28];芦苇也具有较高的NH₄-N和NO₃-N去除率^[29];Huett等(2005)通过对芦苇人工湿地的进一步研究,发现芦苇对人工湿地中氮和磷具有较高的去除率^[30];除此之外,芦苇对重金属等有很强的富集作用,可有效减少水体中的重金属含量^[31~32]。

2.2 芦苇人工湿地的作用与特点

芦苇人工湿地是利用自然生态系统的物理、化学和生物作用协同来完成对污水的净化。芦苇人工湿地具有多种重要的作用和特点。

1) 高的放氧能力及高的根系生物量:人工湿地的脱氮机理主要是硝化和反硝化作用,氧化是脱氮的限制步骤。而芦苇的叶片、叶鞘、根、茎均具有较发达的通气组织,可以将光合作用产生的O₂和空气中的O₂直接输送到植株各处。据测定,芦苇根系释放的O₂高达28.8 g m⁻² d⁻¹^[33]。芦苇的根系比较发达,泌氧能力强,泌氧功能比风车草(*Cyperus flabelliformis* Rottb.)、美人蕉(*Canna indica* Linn.)等水生植物要强。同时芦苇根系的泌氧速率远远大于土壤由于空气扩散所得的氧量。彭江燕等(1998)对几种主要的水生植物参数进行比较分析,得出芦苇的根系性状最为理想,具有较高的输氧速率^[34]。赵建刚等(2003)对几种人工湿地应用植物进行调查,发现芦苇在15 cm土层以下的根系生物量最大,且根系生物量的增幅最快^[35],这为大量微生物的生长繁殖提供了适合的空间环境。

2) 高的根际微生物活性:微生物是系统中有机污染物和氮分解去除的主要执行者。李科德等(1995)采用人工模拟芦苇床处理生活污水,对其净化机理进行了研究,结果表明,芦苇根际具有较高的氧化还原电势,为好氧微生物的活动创造了有利条件^[36]。凌云等(2008)对芦苇根际微生物的研究表明芦苇根际微生物活性高于非根际的微生物活性,且根际更适合硝化亚硝化细菌的生长^[37],这也符合项学敏等的研究结果^[38]。芦苇床根际的优势菌属较多,这些菌均为快速生长的微生物,能有效去除污水中的有机物,是对污水中有机物分解的主体微生物种群^[39]。

3) 低的组织污染物释放速率:卢少勇等(2005)对芦苇、水葫芦(*Eichhornia crassipes* (Mart.) solms)和茭草(*Zizania caduciflora* (Turcz. et Trin.) Hand)三种植物组织污染物释放速率进行研究,发现芦苇的茎叶对于总氮的释放较慢^[40],在处理氮含量较高的污水时,选用芦苇可以减少由于植物组织自

身污染物释放对水质造成的二次污染。

2.3 芦苇人工湿地在应用中存在的问题

芦苇作为一种优良的湿地植物,在人工湿地中被广泛应用,但目前应用在芦苇人工湿地床中的种类只有少数两三个种,大部分人工湿地使用的是普通芦苇,国外只有少数人工湿地应用*P. mauritanicus*和*P. karka*,其他种在人工湿地中的应用还鲜见报道(表1)。因而有的文献甚至直接把reed湿地床当作是*P. australis*床(普通芦苇床),而不加以区分^[41]。目前少有不同变种、不同生态型芦苇应用效果比较的报道。芦苇属植物广布全世界,不同的种或不同的变种,对不同的气候、土壤及其他生境特点具有不同的适应性。即使同一个种的不同生态型,由于长期适应不同的生长环境,也可能有不同的适应性。不同种或变种或不同的生态型对生态环境适应的差异,会反映在对人工湿地污水处理系统的生长和污水净化能力的差异上,但这方面的研究和比较非常缺乏。

本研究组在近10 a的人工湿地研究中发现芦苇是一种很好的人工湿地应用植物,具有易于生长、管理简单等特点,在污水净化和吸附重金属离子方面尤为突出,并成为本团队在研究人工湿地方面最常用的湿地植物,为我们在人工湿地净化效果以及人工湿地植物生理生态特性等方面的研究提供了最好的原料基础^[35, 42]。我们一直使用普通芦苇进行人工湿地方向的试验,研究中发现普通芦苇能够适应气候、降水、土壤等环境条件,长势良好,但未发现变种。

3 展望

芦苇是禾本科多年生草本植物,适应性广,抗逆性强,多生长在江、河、湖、海岸淤滩等地,是湿地环境中生长的主要植物之一。芦苇具有种植简单、耐污、抗水性强、繁殖能力强、生长周期长、管理要求粗放等特点,在人工湿地中是一种非常重要的应用植物,对污水具有很好的净化效果。芦苇分布范围广泛,由于不同地区在气候、土壤及其他生境条件上存在很大差异,芦苇会变异成多种生态型,并且生理特性等也会发生改变,因此芦苇种质资源在应用上应有所差别,然而目前这方面的研究很有限。开展芦苇多生态型的调查以及不同变种与污水净化效果关系的比较研究,可以筛选出更适合人工湿地的芦苇种属,对提高人工湿地净化污水的效率具有重要意义。

根据芦苇的应用价值和现实需求,今后值得开展以下几方面的研究:1) 进一步开展对芦苇属种质资源的清查。芦苇属分布广泛,可能还有不同的变种、不同的生态型仍然没有被发现。随着应用的增加,也可能出现新的生态型,并且该生态型芦苇可能会具有某种特殊特征,对研究工作十分有意义。2) 加强对不同种、不同变种、不同生态型的芦苇地区适应性研究和污水净化能力的比较研究。芦苇的不同种或变种或生态型,可能对不同的气候条件等环境因素有不同的适应性,例如有的可能更适应于温带的气候条件,而有的则可能较适合于热带亚热带气候条件。不同种、不同变种、不同生态型芦苇对污水净化效果也可能存在差异,应加强对不同种质资源的地区适应性研究和污水净化效果研究,因地制宜地选用最合适的种类,对提高人工湿地的净化效果具有重

表1 不同种芦苇近10 a在世界若干国家和地区人工湿地的应用

Table 1 Application of different species of *Phragmites* in constructed wetlands in some areas around the world during the last decade

种 Species	地点 Locality	应用 Application	文献 Source
卡开苇 <i>P. karka</i>	万隆 Bandung, Indonesia	污水处理湿地 Wastewater treatment	Kurniadie D, <i>et al.</i> (2000) ^[43]
	印度 India	污水处理湿地 Wastewater treatment	Billore SK, <i>et al.</i> (2001) ^[44]
	巴基斯坦 Pakistan	污水处理湿地 Wastewater treatment	Aslam MM, <i>et al.</i> (2007) ^[45]
	马来西亚 Malaysia	污水处理湿地 Wastewater treatment	Sim CH, <i>et al.</i> (2008) ^[46]
普通芦苇 <i>P. australis</i>	捷克 Czech	污水处理湿地 Wastewater treatment	Vymazal J, <i>et al.</i> (2005) ^[47]
	西班牙 Spain	污水处理湿地 Wastewater treatment	Solano ML, <i>et al.</i> (2004) ^[48]
	德国 Germany	污水处理湿地 Wastewater treatment	Vacca G, <i>et al.</i> (2005) ^[49]
	英国 UK	污水处理湿地 Wastewater treatment	Batty LC, <i>et al.</i> (2004) ^[50]
	爱沙尼亚 Estonia	污水处理湿地 Wastewater treatment	Maddison M, <i>et al.</i> (2009) ^[51]
	澳大利亚 Australia	污水处理湿地 Wastewater treatment	Huett DO, <i>et al.</i> (2005) ^[30]
	波兰 Poland	污水处理湿地 Wastewater treatment	Hardej M, <i>et al.</i> (2002) ^[52]
	丹麦 Denmark	污水处理湿地 Wastewater treatment	Mendelssohn LA, <i>et al.</i> (1999) ^[53]
	加拿大 Canada	污水处理湿地 Wastewater treatment	Maltais-Landry G, <i>et al.</i> (2009) ^[54]
	意大利 Italy	污水处理湿地 Wastewater treatment	Bragato C, <i>et al.</i> (2009) ^[55]
	爱尔兰 Ireland	污水处理湿地 Wastewater treatment	Healy MG, <i>et al.</i> (2007) ^[56]
	比利时 Belgium	污水处理湿地 Wastewater treatment	Lesage E, <i>et al.</i> (2007) ^[57]
	葡萄牙 Portugal	污水处理湿地 Wastewater treatment	Galvão AF, <i>et al.</i> (2010) ^[58]
	韩国 Korea	污水处理湿地 Wastewater treatment	Yoo JH, <i>et al.</i> (2006) ^[59]
	巴西 Brazil	污水处理湿地 Wastewater treatment	Mant C, <i>et al.</i> (2005) ^[60]
	印度 India	污水处理湿地 Wastewater treatment	Billore SK, <i>et al.</i> (1999) ^[61]
	扎龙 Zhalong, China	生境湿地 Habitat	王昊等 Wang H, <i>et al.</i> (2006) ^[62]
	漳江口 Zhangjiang Estuary, China	生境湿地 Habitat	黄传忠等 Huang CZ, <i>et al.</i> (2002) ^[63]
	盘锦 Panjin, China	生境湿地 Habitat	于文颖等 Yu WY, <i>et al.</i> (2006) ^[64]
	太湖 Taihu Lake, China	污水处理湿地 Wastewater treatment	Tian ZQ, <i>et al.</i> (2009) ^[65]
	衡水湖 Hengshui Lake, China	污水处理湿地 Wastewater treatment	Zhang MY, <i>et al.</i> (2009) ^[66]
	中国台湾 Taiwan, China	污水处理湿地 Wastewater treatment	Jing SR, <i>et al.</i> (2001) ^{[1] [67]}
<i>P. mauritanus</i>	乌干达 Uganda	污水处理湿地 Wastewater treatment	Okurut TO, <i>et al.</i> (1999) ^[68]
	坦桑尼亚 Tanzania	污水处理湿地 Wastewater treatment	Kaseva ME (2004) ^[69]

¹⁾ 该文使用普通芦苇的旧名 *P. communes* The paper uses the former name of common reed as *P. communes*

要的意义。3) 加强对芦苇与其他污水处理人工湿地植物之间污水净化能力的比较研究。通过研究比较, 找出对不同污染物具有特殊去除能力的植物, 然后可以根据污水的各项污染物指标来选择适合净化该污水的人工湿地植物, 这样能大大增强人工湿地净化污水的效率。4) 加强不同生态型芦苇的遗传学以及分子生物学等方面的研究, 从微观角度分析不同生态型芦苇发生变异的原因, 从根本上解释物种发生变异的遗传因素与环境条件的关系。

Reference

- Institute of Botany in the Chinese Academy of Sciences (中国科学院植物研究所). The Picture Index of Senior China Plant. Beijing, China: Science Press (北京: 科学出版社), 2002
- Li FZ (李法曾), Zhao ZT (赵遵田). Essence of Botany in Shandong. Beijing, China: Science Press (北京: 科学出版社), 2004
- Jia SX (贾慎修). Forage Floras of China. Beijing, China: Agriculture Press (北京: 农业出版社), 1991
- Li JG (李建国), Li GB (李贵宝), Liu F (刘芳), Wang DW (王殿武), Chen GK (陈桂坤). Reed resource and its ecological function and utilization in Baiyangdian Lake. *South-to-North Water Transfers & Water Sci & Technol* (南水北调与水利科技), 2004, 2 (5): 37~40
- Chinese Academy of Sciences (中国科学院). Flora of China. Beijing, China: Science Press (北京: 科学出版社), 2002
- Yang YF (杨允菲), Zhang BT (张宝田), Tian SY (田尚衣). Dry matter storage and water soluble sugar content in different age classes rhizomes of *Phragmites communis* population in dry land habitat of Songnen Plain of China. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2008, 19 (9): 1905~1910
- Institute of Botany in Guangdong (广东省植物研究所). Flora of HaiNan. Beijing, China: Science Press (北京: 科学出版社), 1977
- Stalter R. *Phragmites communis* in South Carolina. *Rhodora*, 1975, 77: 159
- Saltonstall K. Cryptic invasion by a non-native genotype of the common reed, *phragmites australis*, into North America. *National Acad Sci*, 2002, 99 (4): 2445~2449
- Li BH (李必华), Sun PC (孙丕燊), Xing SJ (邢尚军). Preliminary exploration on biological and ecological characteristics of coastal reed in Shandong. *J Shandong For Sci & Technol* (山东林业科技), 1994 (2): 1~6
- Wang HL (王洪亮), Zhang CL (张承烈). Comparative investigation on plasmolemma properties of different reed ecotypes in Hexi corridor. *Acta Bot Sin* (植物学报), 1993, 35 (7): 537~540
- Yang HL (杨海莲), Chen GC (陈国仓), Zhang CL (张承烈). Analysis of nutrient compositions of *Phragmites communis* in different habitats. *Acta Pratacult Sin* (草业学报), 1994, 3 (1): 1~6
- Zhao KF (赵可夫), Feng LT (冯立田), Zhang SQ (张圣强). Adaptive physiology of different ecotypes of *Phragmites communis* to salinity in the yellow river delta. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 1998, 18 (5): 463~469
- Zhang SP (张淑萍), Wang RQ (王仁卿), Zhang ZG (张治国), Guo WH (郭卫华), Liu J (刘建), Song BM (宋百敏). Study on morphological

- variation of *Phragmites australis* in the yellow river downstream wetland. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 2003, **27** (1): 78~85
- 15 Liu MZ (刘明智), Nurbay (努尔巴衣), Abdusalih (阿布都沙力克), Jiang L (江凌), Pan XL (潘晓玲). Study on utilizations of the wildtype weed in Xinjiang. *J Agric Sci* (农业科学研究), 2005, **26** (1): 76~79
- 16 Ma JY (马金妍), Shi B (石冰), Wang KY (王开运), Gong JN (巩晋楠), Hou Y (侯颖). Factors affecting biomass of *Phragmites australis* in polders on Dongtan wetland of Chongming. *J Ecol & Rural Environ* (生态与农村环境学报), 2009, **25** (4): 100~102
- 17 Peng YL (彭玉兰), Tu WG (涂卫国), Bao WK (包维楷), Gao XF (高信芬), Wu N (吴宁), Luo P (罗鹏), Xiao WY (肖维阳). Aboveground biomass allocation and growth of *Phragmites australis* ramets at four water depths in the Jiuzhaigou Nature Reserve, China. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2008, **14** (2): 153~157
- 18 Duan XN (段晓男), Wang XK (王效科), Ouyang ZY (欧阳志云), Miao H (苗鸿), Guo R (郭然). The biomass of *Phragmites australis* and its influencing factors in Wuliangsui Hai. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 2004, **28** (2): 246~251
- 19 Huang H (黄辉), Tong L (童雷), Miao P (苗芑), Wang M (汪敏), Lai YD (赖文鼎), Shan GY (单国雁). Physiological characteristics of *Phragmites australis* L. growing in chromium polluted area. *J Agro-Environ Sci* (农业环境科学学报), 2007, **26** (4): 1273~1276
- 20 He YH (何玉惠), Zhao HL (赵哈林), Liu XP (刘新平), Zhao XY (赵学勇). Growth characteristics of *Phragmites australis* in typical habitats of Horqin sandy land. *J Desert Res* (中国沙漠), 2009, **29** (2): 288~292
- 21 Liu BB (刘斌斌), Xing JQ (邢家强), Gong XJ (龚晓洁), Pu TL (浦铜良). Genetic differences of different reed ecotypes adapted to individual habitats. *Acta Prayacult Sin* (草业学报), 2009, **18** (5): 250~255
- 22 Lin WF (林文芳), Chen LJ (陈林姣), Zhu XY (朱学艺). An analysis of genetic diversity of different ecotypes of reed (*Phragmites communis* Trin.) by molecular marker techniques. *J Plant Physiol & Mol Biol* (植物生理与分子生物学报), 2007, **33** (1): 77~84
- 23 Lambertini C, Gustafsson MHG, Frydenberg J, Speranza M, Brix H. Genetic diversity patterns in *Phragmites australis* at the population, regional and continental scales. *Aquat Bot*, 2008, **88** (2): 160~170
- 24 Zhang CB, Wang J, Liu WL, Zhu SX, Ge HL, Chang SX, Chang J, Ge Y. Effects of plant diversity on microbial biomass and community metabolic profiles in a full-scale constructed wetland. *Ecol Engin*, 2010, **36** (1): 62~68
- 25 Li B (李博), Liu CQ (刘存歧), Wang JX (王军霞), Zhang YJ (张亚娟). Carbon storage and fixation function by *Phragmites australis*, a typical vegetation in Baiyangdian Lake. *J Agro-Environ Sci* (农业环境科学学报), 2009, **28** (12): 2603~2607
- 26 Mei XY (梅雪英), Zhang XF (张修峰). Carbon storage and fixation by a typical wetland vegetation in Changjiang River Estuary-A case study of *Phragmites australis* in east beach of Chongming Island. *Chin J Eco-Agric* (中国生态农业学报), 2008, **16** (2): 269~272
- 27 Hua T (海涛), Zhou QX (周启星), Jia HY (贾宏宇). Designing cruxes and ecological issues of constructed wetland systems for wastewater treatment. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2004, **15** (7): 1289~1293
- 28 Zhu HC (诸惠昌), Stevens DK. Study on constructed wetland for wastewater of dairy products factory. *Environ Sci* (环境科学), 1996, **17** (5): 30~31
- 29 Tylova E, Steinbachova L, Votrubova O, Lorenzen B, Brix H. Different sensitivity of *Phragmites australis* and *Glyceria maxim* to high availability of ammonium-N. *Aquat Bot*, 2008, **88** (2): 93~98
- 30 Huett DO, Morris SG, Smith G, Hunt N. Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands. *Water Res*, 2005, **39** (14): 3259~3272
- 31 Bragato C, Brix H, Malagoli M. Accumulation of nutrients and heavy metals in *Phragmites australis* (Cav.) Trin.ex Steudel and *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla in a constructed wetland of the Venice lagoon watershed. *Environ Poll*, 2006, **144** (3): 967~975
- 32 Bonanno G, Giudice LR. Heavy metal bioaccumulation by the organs of *Phragmites australis* (common reed) and their potential use as contamination indicators. *Ecol Indicators*, 2010, **10** (3): 639~645
- 33 Li SP (李顺鹏), Shen B (沈标), Gao QJ (高庆军). Study on methanogens in reed pond treating waste water from city. *China Biogas* (中国沼气), 1994, **12** (1): 6~9
- 34 Peng JY (彭江燕), Liu ZH (刘忠翰). Comparison of major parameters of the influence of various aqua-plants on wastewater treatment. *Yunnan Environ Sci* (云南环境科学), 1998, **17** (2): 47~51
- 35 Zhao JG (赵建刚), Yang Q (杨琼), Chen ZH (陈章和), Huang ZG (黄正光). Studies on root system biomass of the plants in several kinds of wetland. *China Environ Sci* (中国环境科学), 2003, **23** (3): 290~294
- 36 Li KD (李科德), Hu ZJ (胡正嘉). Mechanisms of sewage purification by reed bed system. *China Environ Sci* (中国环境科学), 1995, **15** (2): 140~144
- 37 Ling Y (凌云), Ding H (丁浩), Xu YT (徐亚同). Effects of reed roots on rhizosphere microbes in constructed wetland. *Syst Sci & Comprehensive Studies Agric* (农业系统科学与综合研究), 2008, **24** (2): 214~222
- 38 Xiang XM (项学敏), Song CX (宋春霞), Li YS (李彦生), Sun XY (孙祥宇). Microorganism features of *Typha latifolia* and *Phragmites australis* at rhizosphere. *Environ Prot Sci* (环境保护科学), 2004, **30** (4): 35~38
- 39 Chaturvedi S, Chandra R, Rai V. Isolation and characterization of *Phragmites australis* (L.) rhizosphere bacteria from contaminated site for bioremediation of colored distillery effluent. *Ecol Engin*, 2006, **27** (3): 202~207
- 40 Lu SY (卢少勇), Zhang PY (张彭义), Yu G (余刚), Zhu WP (祝万鹏), Xiang CS (向长生). The contaminants release rule of *Zizania caduciflora*, *Phragmites austrails* and *Eichhornia crassipes*. *China Environ Sci* (中国环境科学), 2005, **25** (5): 554~557
- 41 Zheng WJ, Chen GC, Zhang CL, Hu YX, Li LH. Physiological adaptation of habitat by ion distribution in the leaves of four ecotypes of reed (*Phragmites australis*). *Acta Bot Sin*, 2002, **44** (1): 82~87
- 42 Chen WY (陈文音), Chen ZH (陈章和), He QF (何其凡), Wang XY (汪晓燕), Wang CR (王才荣), Chen DF (陈达丰), Lai ZL (赖增隆). Study on root growth of wetland plants with different root types. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2007, **27** (2): 450~458

- 43 Kurniadie D, Kunze C. Constructed wetlands to treat house wastewater in Bandung, Indonesia. *Water Resour & Manage*, 2000, **74** (1/2): 87~91
- 44 Billore SK, Singh N, Ram HK, Sharma JK, Singh VP, Nelson RM, Dass P. Treatment of a molasses based distillery effluent in a constructed wetland in central India. *Water Sci & Technol*, 2001, **44** (11/12): 441~448
- 45 Aslam MM, Malik M, Baig MA, Qazi LA, Iqbal J. Treatment performances of compost-based and gravel-based vertical flow wetlands operated identically for refinery wastewater treatment in Pakistan. *Ecol Engin*, 2007, **30** (1): 34~42
- 46 Sim CH, Yusoff MK, Shutes B, Ho SC, Mansor M. Nutrient removal in a pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya city, Malaysia. *J Environl Manage*, 2008, **88** (2): 307~317
- 47 Vymazal J, Kropfelov L. Growth of *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic. *Ecol Engin*, 2005, **25** (1): 606~621
- 48 Solano ML, Soriano P, Ciria MP. Constructed wetlands as a sustainable solution for wastewater treatment in small village. *Biosyst Engin*, 2004, **87** (1): 109~118
- 49 Vacca G, Wand H, Nikolausz M, Kusch P, Kästner M. Effect of plants and filter materials on bacteria removal in pilot-scale constructed wetlands. *Water Res*, 2005, **39** (7): 1361~1373
- 50 Batty LC, Younger PL. Growth of *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex. Steudel in mine water treatment wetlands: Effects of metal and nutrient uptake. *Environ Poll*, 2004, **132** (1): 85~93
- 51 Maddison M, Soosaar K, Mairing T, Mander U. The biomass and nutrient and heavy metal content of cattails and reeds in wastewater treatment wetlands for the production of construction material in Estonia. *Desalination*, 2009, **246** (1~3): 120~128
- 52 Hardej M, Ozimek T. The effect of sewage sludge flooding on growth and morphometric parameters of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel. *Ecol Engin*, 2002, **18** (3): 343~350
- 53 Mendelssohn LA, Sorrell BK, Brix H, Schierup HH, Lorenzen B, Maltby E. Controls on soil cellulose decomposition along a salinity gradient in a *Phragmites australis* wetland in Denmark. *Aquat Bot*, 1999, **64** (3/4): 381~398
- 54 Maltais-Landry G, Maranger R, Brisson J. Effect of artificial aeration and macrophyte species on nitrogen cycling and gas flux in constructed wetlands. *Ecol Engin*, 2009, **35** (2): 221~229
- 55 Bragato C, Schiavon M, Polese R, Ertani A, Pittarello M, Malagoli M. Seasonal variations of Cu, Zn, Ni and Cr concentration in *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steudel in a constructed wetland of North Italy. *Desalination*, 2009, **246** (1~3): 35~44
- 56 Healy MG, Rodgers M, Mulqueen J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters. *Bioresour Technol*, 2007, **98** (12): 2268~2281
- 57 Lesage E, Rousseau DPL, Meers E, Tack FMG, DePauw N. Accumulation of metals in a horizontal subsurface flow constructed wetland treating domestic wastewater in Flanders, Belgium. *Sci Total Environ*, 2007, **380** (1~3): 102~115
- 58 Galvão AF, Matos JS, Ferreira FS, Correia FN. Simulating flows in horizontal subsurface flow constructed wetlands operating in Portugal. *Ecol Engin*, 2010, **36** (4): 596~600
- 59 Yoo JH, Ro HM, Choi WJ, Yoo SH, Han KH. Phosphorus adsorption and removal by sediments of a constructed marsh in Korea. *Ecol Engin*, 2006, **27** (2): 109~117
- 60 Mant C, Costa S, Williams J, Tambourgi E. Studies of removal of chromium by model constructed wetland. *J Chem Engin*, 2005, **22** (3): 381~387
- 61 Billore SK, Singh N, Sharma JK, Dass P, Nelson RM. Horizontal subsurface flow gravel bed constructed wetland with *Phragmites karka* in Central India. *Water Sci & Technol*, 1999, **40** (3): 163~171
- 62 Wang H (王昊), Xu SG (许士国), Sun LS (孙砾石). The prediction on reed swamp evapotranspiration in Zhalong wetland, China. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2006, **26** (5): 1352~1358
- 63 Huang CZ (黄传忠), Chi XQ (池新钦), Lü JY (吕家云). Study on mangrove wetland resources in Zhangjiang Estuary nature reserve. *Central South For Inventory & Planning* (中南林业调查规划), 2002, **21** (2): 55~57
- 64 Yu WY (于文颖), Chi DC (迟道才), He QJ (何奇瑾), Zhou GS (周广胜). Evapotranspiration features of *Phragmites communis* in Panjin Wetland. *J Shenyang Agric Univ* (沈阳农业大学学报), 2006, **37** (5): 758~762
- 65 Tian ZQ, Zheng BH, Liu MZ, Zhang ZY. *Phragmites australis* and *Typha orientalis* in removal of pollutant in Taihu Lake, China. *J Environ Sci*, 2009, **21** (4): 440~446
- 66 Zhang MY, Cui LJ, Sheng LX, Wang YF. Distribution and enrichment of heavy metals among sediments, water body and plants in Hengshuihu Wetland of Northern China. *Ecol Engin*, 2009, **35** (4): 563~569
- 67 Jing SR, Lin YF, Lee DY, Wang TW. Using constructed wetland systems to remove solids from highly polluted river water. *Water Sci & Technol: Water Supply*, 2001, **1** (1): 89~96
- 68 Okurut TO, Rijs GBJ, Vanbruggen JJA. Design and performance of experimental constructed wetlands in Uganda, planted with *Cyperus Papyrus* and *Phragmites Mauritianus*. *Water Sci & Technol*, 1999, **40** (3): 265~271
- 69 Kaseva ME. Performance of a sub-surface flow constructed wetland in polishing pre-treated wastewater-a tropical case study. *Water Res*, 2004, **38** (3): 681~687