

## 茭草(*Zizania latifolia*)在不同人工湿地中的生长适应性\*

刘长娥, 刘福兴, 宋祥甫\*\*, 邹国燕, 付子轼, 潘琦, 刘娅琴, 王金庆  
(上海市农业科学院, 上海 201403)

**摘 要:** 茭草是太湖流域河、湖水陆交错带及低洼沼泽中普遍生长的挺水植物, 其生长条件在当地挺水植物中具有代表性. 根据该流域河道水陆交错带的现状与挺水植物生长特性, 针对性地设计了置入式生态滤床、生物氧化池、潜流-表面流复合人工湿地和水平潜流人工湿地 4 种不同生境条件, 研究茭草的生长适应性, 为建立与恢复退化的河道水陆交错带植被群落提供科学依据和技术支持. 结果表明, 茭草能够适应不同生长环境, 在沸石基质和水培环境中均能正常生长; 不同环境条件下其生长速度和繁茂程度存在差异.

**关键词:** 茭草; 人工湿地; 生长环境; 生长适应性

## Growth adaptabilities of *Zizania latifolia* in different artificial wetlands

LIU Change, LIU Fuxing, SONG Xiangfu, ZOU Guoyan, FU Zishi, PAN Qi, LIU Yaqin & WANG Jinqing  
(Shanghai Academy of Agricultural Science, Shanghai 201403, P. R. China)

**Abstract:** *Zizania latifolia* mainly grows in the land/inland water ecotones of river channels and lowland swamps of Lake Taihu Basin. Its growth condition is representative in this area. Four different environment conditions such as implanted ecological filter bed, biological oxidation pond, subsurface flow and surface flow integrated artificial wetland and horizontal subsurface flow artificial wetland have been designed based on the status of land/inland water ecotones of river channels. The growth adaptabilities of *Z. latifolia* in different environments were studied so as to provide a scientific evidence and technical support for establishment and restoration of the degraded vegetation communities of land/inland water ecotones of river channels. The results showed that *Z. latifolia* was able to adapt to different growth environments such as zeolite matrix and hydroponics; the growth rate and luxuriance degree differed among substrates.

**Keywords:** *Zizania latifolia*; artificial wetlands; growth environment; growth adaptabilities

太湖是我国第三大淡水湖, 多年的监测分析表明<sup>[1]</sup>, 其污染物主要来自入湖河道. 因此, 太湖水环境污染治理的重点之一是入湖河道的水环境治理, 具体包括河道集水区的污染负荷削减、河道水质改善与河道水陆交错带(也称河岸带)的生态环境修复等, 使入湖污染得到有效控制. 其中, 修复退化的河岸带湿地, 利用湿地系统截留消纳径流污染物是减轻入湖污染负荷的有效途径之一. 根据河岸带不同的地形, 创建多生境的湿地系统, 是改善河道水环境和提高其自净能力的重要方面<sup>[2-3]</sup>.

太湖入湖河道类型不同, 其河岸带特征与河床结构存在较大差异. 其中, 相当比例的河岸为硬质岸坡, 植物难以生长, 基本失去了作为水陆交错带应有的生态功能. 而改造或恢复生态功能型的自然岸坡, 不仅投资大, 而且在一些通航河道容易造成岸坡坍塌, 影响河道的正常通航. 利用沸石或半软性填料为植物营造一个生长环境, 一定程度上构建河岸带应有的湿地结构, 为恢复生物多样性创造生境条件, 不仅有利于岸带对径流污染物的削减, 而且能有效优化河道生态结构, 提高河道的自净能力.

植物是湿地系统的构成主体之一, 在湿地净化污水中起到非常重要的作用. 一方面, 植物可以通过根系直接吸收同化水中的氮、磷, 并将其变成自身的有机成分; 另一方面, 它的根区为微生物的生存和降解污染

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2008ZX07101-005)和国家自然科学基金项目(30821140542)联合资助. 2011-04-02 收稿; 2011-09-11 收修改稿. 刘长娥, 女, 1967 年生, 博士, 副研究员; E-mail: lc566@163.com.

\*\* 通信作者; E-mail: songxfu@263.net.

物提供了必要的场所和良好的环境条件<sup>[4-5]</sup>. 目前, 全球发现的湿地高等植物多达 6700 余种, 而已被用于湿地系统且产生效果的不过几十种. 茭草 (*Zizania latifolia*) 是我国南方, 尤其是太湖流域河道及沼泽中普遍生长的挺水植物. 很多研究表明<sup>[6-8]</sup>, 茭草对污水中氮、磷具有较强的吸收和吸附作用, 在对其定期收获的前提下, 茭草对氮、磷具有较好的直接去除作用, 同时对恢复河岸带植被群落, 提高河道的生物多样性具有积极的促进作用.

根据太湖流域河道水陆交错带的现状与挺水植物——茭草的基本生长特性, 针对性地设计了置入式生态滤床、生物氧化池、潜流-表面流复合人工湿地和水平潜流人工湿地 4 种不同生境条件, 研究茭草的生长适应性, 为建立与恢复退化的河道水陆交错带植被群落提供科学依据与技术支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置结构与给排水模式

人工湿地处理系统模拟实验装置均采用 PVC 板制作, 箱体总体积为  $0.384 \text{ m}^3$ , 长  $\times$  宽  $\times$  高 =  $1.2 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ . 其中的前  $0.2 \text{ m}$  为布水区域, 末端  $0.2 \text{ m}$  为集水区, 中间  $0.8 \text{ m}$  为床体实验区域, 各区域之间以同材质的 PVC 挡板隔开, 箱体上部  $0.2 \text{ m}$  为超高设计, 以避免污水外溢, 影响实验的正常进行.

以沸石作为基质, 按不同水流方式以及湿地床结构设计了 4 种类型湿地 (图 1), 包括置入式生态滤床 (A)、生物氧化池 (B)、潜流-表面流复合人工湿地 (C, 以下简称潜流-表面流复合湿地)、水平潜流人工湿地 (D, 以下简称潜流湿地). 其中, 置入式生态滤床进水端与出水端均采用溢流堰形式, 沸石床体 ( $0.8 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ) 通过网状的隔板全部置入湿地箱, 上下均浸入水中, 水面高于基质表层  $0.1 \text{ m}$ ; 生物氧化池采用组合半软性填料进行生物挂膜, 整体浸泡在水中, 进出水方式与置入式生态滤床相同; 潜流-表面流湿地前端沸石床体 ( $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ) 采用潜流进水, 水位高  $0.4 \text{ m}$ , 即水层低于基质层表  $0.1 \text{ m}$ , 后端沸石床体 ( $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.35 \text{ m}$ ) 为表面流人工湿地, 水面高出基质表层  $0.05 \text{ m}$ , 前后端床体落差  $0.15 \text{ m}$ ; 潜流湿地沸石床体 ( $0.8 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ) 通体采用潜流方式进水, 水位高  $0.45 \text{ m}$ , 水层低于基质表层  $0.05 \text{ m}$ .

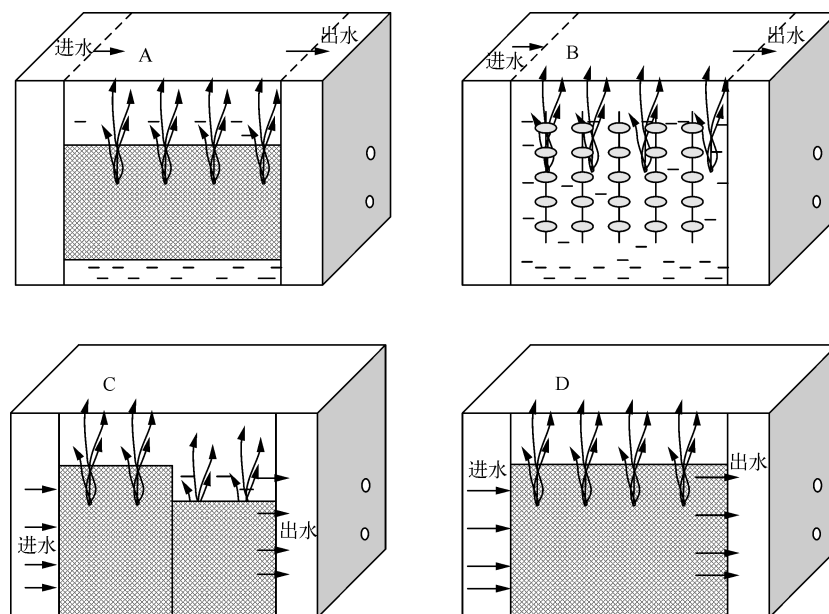


图 1 实验用人工湿地示意图

Fig. 1 Schematic map of the experimental artificial wetlands

## 1.2 实验场所与用水

实验在江苏无锡市胡埭镇龙延村的国家“十一五”水专项“闸控入湖河流(直湖港)及小流域污染控制技术及工程示范”课题实验基地进行. 实验设施置于简易雨棚内. 实验用水取自基地区域内的河道, 首先采用潜水泵将水抽至规格为 500 L 的塑料桶内, 然后通过恒流泵均匀分配至各实验设施. 采用连续进水方式, 水力停留时间约为 3.4 d. 不同时期河道水质存在差异, 实验期间主要水质指标总氮(TN)为 6.58 ~ 8.73 mg/L、总磷(TP)为 0.47 ~ 1.13 mg/L、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)为 2.78 ~ 4.53 mg/L、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)为 9.87 ~ 15.26 mg/L.

## 1.3 基质

采用浙江缙云产天然斜发沸石, 粒径为 1 cm 左右, 未作改性处理, 用水冲洗去除杂质与泥土后直接作为实验用基质. 沸石主要成分包括 SiO<sub>2</sub>、CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O, 含量分别为 69.58%、2.59%、12.2%、0.13%、0.87%、2.59%、1.13%, 其他成分占 10.91%.

## 1.4 植物栽种

5月中旬在研究区的龙延河选择长势良好、生长基本一致、株高 50 cm 左右的茭草植株个体, 清水洗净根部污泥后, 挑选大小均匀的植株栽植于实验装置内. 同时, 随机选取 3 株测定株高、根长、根状茎数和生物量等主要生长指标, 取其平均值作为实验背景值.

茭草于实验进水前栽种, 每个湿地系统中均匀栽植 8 株, 栽植完毕后统一进水. 植物采用不同的无土栽培方法种植, 其中, 生物氧化池采用筐篮种植法, 即将茭草定植于筐篮之中, 并将筐篮均匀固定挂置于挂膜支架上. 筐篮为塑料材质, 直径 13 cm, 高 5 cm, 将布水区集满供试水, 从而保证水均匀、连续地流入实验区. 其他湿地系统将茭草直接栽植于沸石中(以下称直接栽植法).

## 1.5 测定项目与方法

系统自 5 月中旬开始运行至 10 月中旬, 运行周期为 180 d. 植物恢复并进入正常生长期后, 7 月 8 日开始每月定期对每个系统的植株生长进行考测, 项目包括株高、分蘖、茎高、茎粗、叶片数(绿、黄). 茭草枯黄时期(10 月上旬), 在每个湿地系统中随机选取 3 株, 对根长、根状茎数以及地上部分和地下部分生物量.

## 1.6 数据处理与分析

茭草生长指标的增量( $I$ ) =  $G_1 - G_0$ , 其中  $G_1$  为实验结束后茭草的生长指标值,  $G_0$  为移栽前茭草的生长指标值. 茭草构件生物量的分配率( $B$ ) = 构件生物量( $P$ )/植株总生物量( $T$ ) × 100%. 采用 Excel 2003 制图, 利用 SAS 软件中的 One-way ANOVA 进行统计分析.

# 2 结果与分析

## 2.1 人工湿地中茭草的总体生长状况

在 4 种不同的湿地系统中, 茭草均能正常生长, 5—10 月植物生长期间各项生长指标显著增加, 生物量平均增加量为 58.8 g/株, 较移栽时增加了 6 倍多, 其中, 地上部分生物量干重以采用筐篮种植法的生物氧化池的增加量最大, 达到 50.7 g/株, 最少的为潜流-表面流湿地, 为 14.5 g/株. 地下部分生物量增加量最大的为潜流湿地, 平均为 45.7 g/株, 生物氧化池茭草地下部分生物量增加最少, 仅 13.7 g/株.

茭草株高平均增长了 74.8 cm, 较移栽时增加 1.5 倍, 其中, 生物氧化池中茭草株高增加最多, 达到 104.1 cm, 增加最少的为潜流-表面流湿地, 株高增长了 56.7 cm. 不同湿地茭草株高的增加量与地上部分生物量增长排序相同.

地下部分的根长平均增加了 58.6 cm, 较移栽时增加 4.7 倍, 以潜流-表面流湿地最多, 增加了 72.5 cm. 潜流湿地茭草根长增加最少, 仅 31.0 cm. 根状茎数平均增加量为 6.3 个/株, 较移栽时增加 3.2 倍, 增加最多的为潜流湿地, 达到 11.0 个/株, 增加最少的为生物氧化池, 茭草根状茎退化, 出现负增长(表 1).

从茭草各生长指标的平均增加量来看, 生物量与根长增长幅度较大, 株高增长幅度较小, 这说明茭草在 4 种人工湿地中地下部分的生长速度较地上部分快, 为植物的繁衍奠定了良好的基础.

表 1 不同人工湿地系统茭草主要生长指标的增长量(平均值 $\pm$ 标准差)Tab. 1 Increments of main growth indexes of *Z. latifolia* in different artificial wetland systems

湿地	总生物量/(g/株)	地上部分/(g/株)	地下部分/(g/株)	株高/cm	根长/cm	根状茎数
A	49.7 $\pm$ 4.5	16.6 $\pm$ 4.6	33.1 $\pm$ 4.4	60.5 $\pm$ 5.5	69.5 $\pm$ 3.2	6.0 $\pm$ 2.3
B	64.4 $\pm$ 4.8	50.7 $\pm$ 6.5	13.7 $\pm$ 3.2	104.1 $\pm$ 10.5	61.5 $\pm$ 2.9	-0.7 $\pm$ 1.2
C	56.7 $\pm$ 5.4	14.5 $\pm$ 5.4	42.2 $\pm$ 5.5	56.7 $\pm$ 6.5	72.5 $\pm$ 4.1	9.0 $\pm$ 2.8
D	64.4 $\pm$ 4.3	18.7 $\pm$ 4.5	45.7 $\pm$ 4.1	78.0 $\pm$ 8.7	31.0 $\pm$ 2.3	11.0 $\pm$ 2.5

## 2.2 地上部分的生长状况

2.2.1 株高 生境影响茭草的生长, 筐篮种植法与直接栽植法茭草的生境不同, 前者为水培, 后者为沸石基质; 同时, 采用直接栽植法, 不同湿地间茭草生长水位不同, 生长环境也存在差异. 生长环境的差异导致 4 种湿地系统中茭草的生长速度不同. 其中, 以采用筐篮种植法的生物氧化池(B)中茭草最高, 平均株高达 176 cm, 接近自然河道同期茭草株高(181 cm), 株丛个体间生长均匀, 高度差异较小. 直接栽植法种植的茭草生长较慢, 其中, 潜流湿地(D)茭草 8 月株高最高, 之后植株生长减缓, 开始枯黄, 株高趋于降低, 至 10 月株高平均仅 106 cm; 置入式生态滤床(A)中的茭草持续生长至 9 月后, 高度增长趋于缓慢, 平均株高为 118 cm; 潜流-表面流复合湿地系统(C)中的茭草较置入式生态滤床生长略快, 平均株高为 122 cm, 株丛个体间高度差异较大. 总体而言, 筐篮种植法种植的茭草株高较直接栽植法高, 除潜流湿地茭草株高较早停止生长外, 其他 3 种湿地系统茭草 10 月前株高均处于增长状态(图 2).

2.2.2 分蘖 各湿地系统相比, 生物氧化池茭草的分蘖数最高, 平均达 9 株/丛, 其次是置入式生态滤床, 而潜流-表面流复合湿地系统与潜流湿地系统茭草的分蘖数接近, 相对较低, 平均为 5 株/丛. 筐篮种植法与直接栽植法茭草分蘖高峰期有差异, 筐篮种植法种植的茭草生长初期分蘖较好, 枝条数急剧增加, 而直接栽植法种植的茭草的分蘖数中期较高. 各湿地系统不同株丛之间分蘖数差异较大, 尤其是随着生长时间的延长, 这种现象愈加明显, 说明不同植株分蘖能力存在较大差异(图 2). 各湿地茭草的分蘖数与根系和水的接触面大小呈正相关, 即根系吸水面积愈大, 株丛的分蘖数愈高.

2.2.3 茎秆 植株茎秆的生长包括茎高与茎粗的生长, 由于植株分蘖时各分蘖枝条的生长速度不同, 各株丛分蘖枝条间的茎高差异比较明显. 生物氧化池中茭草的茎高最高, 尤其在生长后期, 平均茎高达 48.7 cm, 相当于总株高的 28%. 潜流湿地和置入式生态滤床中茭草的茎高前期增长较快, 但在 9 月之后迅速缩减, 主要是部分枝条出现枯萎, 茎高的平均值降低. 而潜流-表面流复合湿地系统中茭草茎高变化较小, 生长缓慢, 平均茎高仅为 29.9 cm. 所有湿地系统茭草的平均茎高均在 9 月后开始降低, 但降低幅度存在差异, 其中, 生物氧化池植株茎高降低幅度最小, 而潜流湿地最大(图 2), 从某种方面说明不同湿地系统茭草枯黄的程度和根系与水的接触面大小有关.

茭草的茎粗也受环境的影响. 其中, 生物氧化池茭草生长初期茎粗增加较快, 8 月开始茎粗停止增长, 茎中段平均直径为 2.4 cm; 潜流湿地茭草整个生长期间茎粗无明显增加, 平均仅为 1.5 cm; 置入式生态滤床与潜流-表面流复合湿地系统茭草的茎粗则在生长中期增加较快, 9 月开始基本停止生长, 平均为 1.7 cm. 各湿地系统相比, 生物氧化池中的茭草茎粗最高, 规律与茎高一致(图 2).

2.2.4 叶片 8 月份是茭草生长的旺盛时期, 枝繁叶茂, 此期各处理相比, 生物氧化池中茭草叶片最多, 平均每株叶片为 7 个(折合每丛约 50 个), 而潜流-表面流复合湿地系统茭草叶片最少, 每株平均仅 4 个(折合每丛约 16 个). 8 月之后茭草新叶片的萌发基本停止, 潜流湿地则持续至 9 月份.

10 月份各湿地系统茭草基本枯黄, 其中, 潜流-表面流复合湿地茭草叶片枯黄量约为 55%, 其次是生物氧化池和潜流湿地, 叶片枯黄量占 42% 左右, 枯黄程度较轻的为置入式生态滤床, 叶片枯黄量为 35%.

综上所述, 筐篮种植法种植的茭草地上部分生长指标普遍高于直接栽植法. 由于筐篮种植法茭草根系直接生长于水中, 能够充分吸收水中的营养物质, 促进了植物的生长. 叶片是植物进行光合作用最主要的器官, 叶量的多少影响植物的生长速度和繁茂程度.

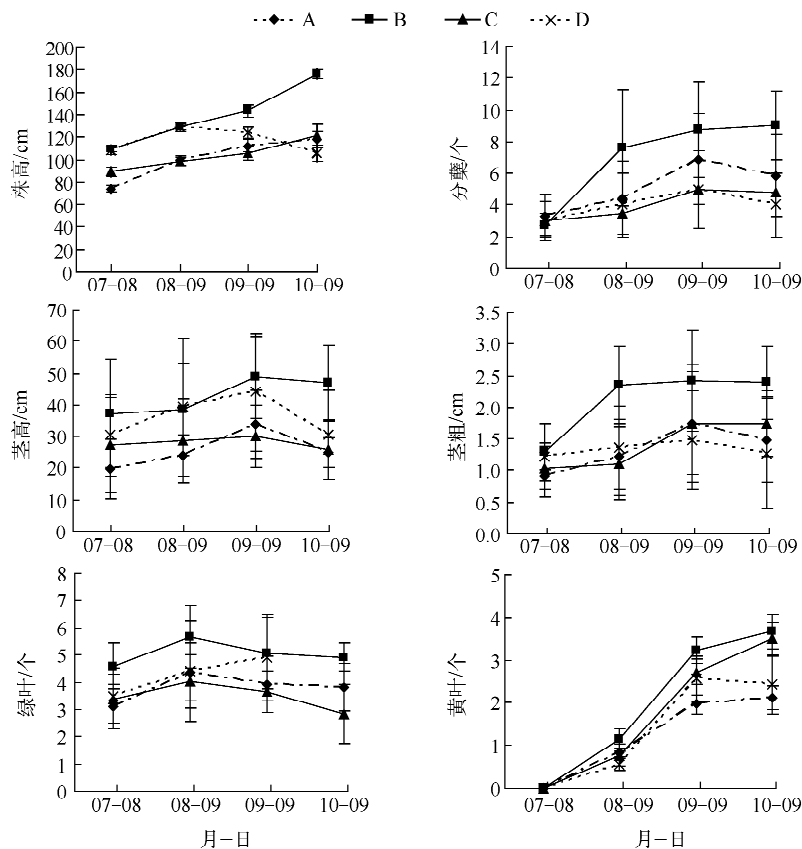


图 2 不同人工湿地系统茭草地上部分的生长动态

Fig. 2 Growth dynamics of aboveground of *Z. latifolia* in different artificial wetland systems

2.3 地下部分的生长状况

本实验中筐篮种植法种植的茭草地上部分生物量高于地下部分,而直接栽植法则相反,究其原因,主要受地下根状茎的影响. 筐篮种植法种植的茭草根系少见根状茎,主要由须根构成,干物质较少. 直接栽植法种植的茭草地下根状茎发育较好,平均每丛含 8~13 个,其中以植株生长水位较浅的潜流湿地(C1、D)明显,根状茎萌发较多,根条数多,有利于种群的扩展(图 3,图 4).

栽植方法的不同亦影响茭草根的生长,直接栽植法不仅有利于茭草根的横向扩展,而且对根的纵向生长也具有促进作用. 置入式生态滤床和潜流-表面流复合湿地中茭草的根较长,平均达 82~85 cm,能够深入系统基质深层. 与地上部分一样,茭草地下部分

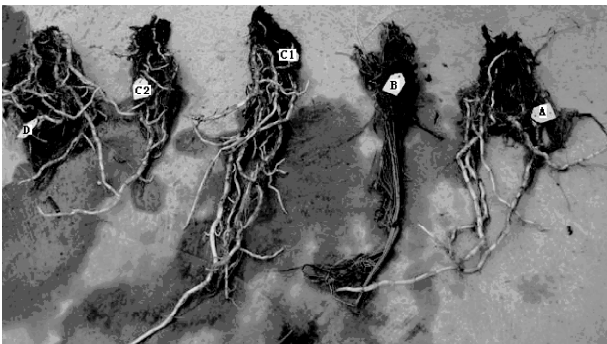


图 3 不同人工湿地系统茭草根系的生长状况 (C1 为潜流-表面流复合人工湿地中的潜流部分茭草根系, C2 为其表面流部分中的茭草根系)

Fig. 3 Growth situation of roots of *Z. latifolia* in different artificial wetland systems

个体间也存在差异,其中,潜流-表面流复合湿地系统茭草个体间根的差异最大,主要因为系统的前后部位水位差不同,导致一系列的影响因素存在差异,进而对根的生长产生了不同的影响(图4)。

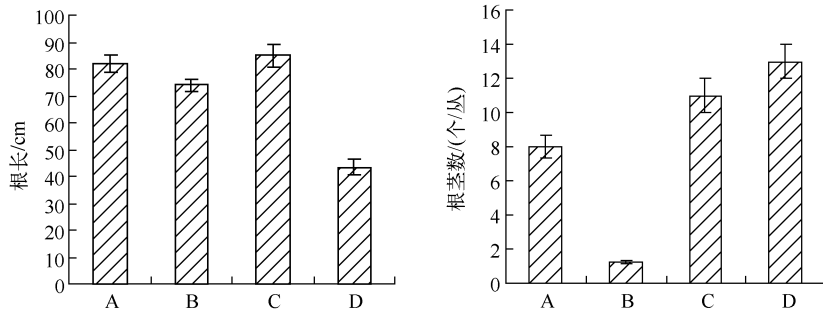


图4 不同人工湿地系统茭草地下部分生长指标

Fig. 4 Growth indexes of underground of *Z. latifolia* in different artificial wetland systems

植物生长发育过程中通过同化作用而形成的根、茎、叶等各器官生物量的比例对于研究植物对环境适应能力及生长发育规律意义重大.生物量分配主要决定于植物的遗传特性,同时也受栽培和环境条件的影响<sup>[9-10]</sup>.不同湿地系统茭草根、茎、叶各组分的分配率反应出茭草对环境因子的空间利用情况,是植物对环境适应的结果.筐篮种植法种植的茭草的茎占有最大的比例,为50%,其次是叶片,占30%,而根占有比例较小,为20%.直接栽植法种植的茭草则为根占有比例最大,3种人工湿地中茭草根的生物量分配率为58%~66%,叶为22%~29%,茎仅为9%~14%.其中,后两者根系所占份额较大,叶的份额较少(图5).根系部位水位和流态不同导致了植物吸收养分和水分的差异,影响了干物质在根、茎、叶间的分配比例。

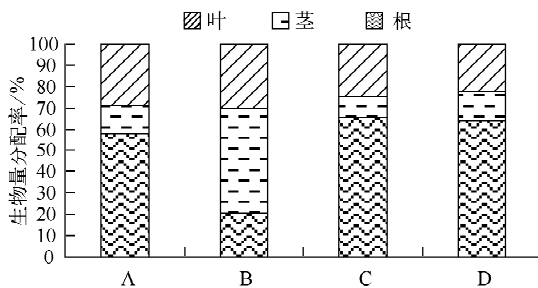


图5 不同人工湿地系统茭草干物质的分配状况

Fig. 5 Distribution situation of dry biomass of *Z. latifolia* in different artificial wetland systems

### 3 讨论

#### 3.1 人工湿地应用的可行性分析

尽管无土栽培技术已有较悠久的历史,并已成为农业设施的主要栽培方式之一,但在湿地建设和退化湿地恢复中的应用相对较少.目前在污染河道、湖泊的治理中常用的无土栽培主要以生态浮床的形式进行<sup>[11-15]</sup>,还鲜见无土栽培应用于河岸带的水生植物修复<sup>[16-18]</sup>,这在很大程度上限制了河道湿地系统的修复.而由于水利的需要,我国的部分河道、湖泊将自然岸坡改建为硬质岸坡,且在城市和一些经济相对发达地区的农村河道有进一步发展的趋势,此类岸坡几乎失去了挺水植物的生境条件,导致河、湖水陆交错带的水生植被群落退化,生物多样性降低.因此,研究建立一些永久性的无土栽培湿地系统,为植物营造良好的生长环境,以恢复河、湖水陆交错带的水生植被群落,有利于形成健康稳定的水陆交错带水生植被群落乃至河湖水生生态系统.自1990s起,太湖流域的绝大部分支流水质常年劣于地表水环境质量V类标准,而一级支流及其干流则成为大量污水进入太湖的主要通道,直接威胁太湖的水质安全.要控制进入太湖的污染物总量,改善太湖水的污染状况,必需减少由一级支流进入太湖的污染物.本课题研究人员在不影响通航的前提下,根据不同河段的污染状况和环境特征,由上游至下游按污染强化治理、污染阻隔、退化湿地修复等要求,在上述研究的基础上,将生物氧化池、置入式生态滤床、潜流-表面流复合湿地与潜流湿地依次设置于河道两边,以验证4种不同人工湿地类型直接应用于河道进行污染物削减及岸带湿地系统恢复的可行性.工程应用中湿地床由滤网将沸石包装成模块,可方便拆卸,组成一个稳定的整体,生物氧化池的半软性填料利用耐腐蚀的PVC框架固定.所有

的趋势,此类岸坡几乎失去了挺水植物的生境条件,导致河、湖水陆交错带的水生植被群落退化,生物多样性降低.因此,研究建立一些永久性的无土栽培湿地系统,为植物营造良好的生长环境,以恢复河、湖水陆交错带的水生植被群落,有利于形成健康稳定的水陆交错带水生植被群落乃至河湖水生生态系统.自1990s起,太湖流域的绝大部分支流水质常年劣于地表水环境质量V类标准,而一级支流及其干流则成为大量污水进入太湖的主要通道,直接威胁太湖的水质安全.要控制进入太湖的污染物总量,改善太湖水的污染状况,必需减少由一级支流进入太湖的污染物.本课题研究人员在不影响通航的前提下,根据不同河段的污染状况和环境特征,由上游至下游按污染强化治理、污染阻隔、退化湿地修复等要求,在上述研究的基础上,将生物氧化池、置入式生态滤床、潜流-表面流复合湿地与潜流湿地依次设置于河道两边,以验证4种不同人工湿地类型直接应用于河道进行污染物削减及岸带湿地系统恢复的可行性.工程应用中湿地床由滤网将沸石包装成模块,可方便拆卸,组成一个稳定的整体,生物氧化池的半软性填料利用耐腐蚀的PVC框架固定.所有

湿地床体的底部及 4 周均以木桩固定在河道边. 由于其宽度仅为 0.4 m, 对河道的水流以及通航均无影响, 床体高度则根据河道的常水位设置, 以保证水流按要求通过植物的根部. 结果表明, 该湿地建设技术具有因地制宜设置、易于日常管理、建设成本相对较低、可操作性高等特点. 该技术如能推广应用, 将有助于改变目前入湖河道水质较差、系统结构简单、生态功能低下的现状, 对太湖水环境改善与生态系统的修复起到积极的促进作用.

### 3.2 茭草生长的适应性分析

作为太湖流域湿地水生植物优势种之一的茭草, 分布范围广, 常见于河岸边, 生长环境具有普遍的代表性. 本研究发现, 茭草的生长适应性很强, 无论在水中还是在沸石中均可以正常生长, 但相比自然环境中的茭草生长相对较差, 主要表现为株高普遍低于研究区河道自然生长状态的茭草(图 6), 这与曾爱平等<sup>[19]</sup>研究的 4 种水生植物不同栽培基质下的生长状况相似, 生长于自然土壤中的植株各生长指标较高. 影响水生植物生长的因子很多, 包括光照、温度、湿度、底质、营养盐含量等, 水生植物的生长依赖各种生物、非生物的环境因素<sup>[2]</sup>.

不同基质的物理、生化性质有所差异, 对水生植物生根、生长与繁殖会产生不同程度的影响<sup>[20]</sup>. 筐篮种植法种植的茭草根系直接生长于水中, 其生长基质物理结构与直接栽植法的沸石不同, 二者根的特征也存在较大的差异, 生长于水中的茭草表现为根状茎退化, 须根发达. 黄钦忠<sup>[21]</sup>研究不同坡位树木根系的生长时发现, 水分较充足的下坡位细根的生物量比上坡增长 50%, 水分条件充足有利于小根及细根的积累. 当少量根系能维持作物水分与养分的供需平衡时, 作物将把能量更多地用于地上部的生长, 相反则更多的用于根系的生长; 当水分或养分不

足时, 作物会增加根系数量、活性及根冠比来加强对水分和养分的吸收<sup>[22-23]</sup>. 由于在无土栽培条件下, 植物的养分供给均源于水体, 筐篮种植法种植的茭草生长水分充足, 污水中具有丰富的氮、磷物质向地上部分传输, 促使其地上部分旺盛生长, 生物量干物质分配率排序为: 茎 > 叶 > 根. 相对于筐篮种植法的水培条件, 直接栽植法的根系接触水体面积相对较少, 养分的供给量也自然不如水培条件下充足, 在某种程度上抑制了地上部分的生长. 为了应对不利因素的胁迫, 植物通过发达的根系供应其生长发育, 其干物质分配率也相应改变, 均为根 > 叶 > 茎. 直接栽植法中随茭草根系与水的接触面积不同, 各构件生物量的分配比例也发生变化, 潜流-表面流复合湿地与潜流湿地中茭草根的比例相对高于置入式生态滤床, 而叶的比例则相反.

综上所述, 研究设计的 4 种人工湿地无土栽培的茭草均可以正常生长. 其中, 筐篮种植法茭草地上部分生长旺盛, 分蘖数、茎、叶、生物量各项生长指标值比较高, 但地下根状茎发育较差, 以须根为主, 干物质分配率为: 茎 > 叶 > 根, 而直接栽植法的干物质分配率则为根 > 叶 > 茎. 水分与营养物质的耦合作用影响了人工湿地茭草不同构件干物质的分配比例.

## 4 参考文献

- [1] 朱季文, 季子修, 蒋自巽. 太湖湖滨带的生态建设. 湖泊科学, 2002, 14(1): 77-82.
- [2] 陈书琴, 许秋瑾, 李法松等. 环境因素对湖泊高等水生植物生长及分布的影响. 生物学杂志, 2008, 25(2): 11-15.
- [3] 钟云霄, 胡洪营, 钱 易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(2): 38-39.
- [4] 成水平, 吴振斌, 况琪军. 人工湿地植物研究. 湖泊科学, 2002, 14(2): 180-184.
- [5] 王海珍, 陈德辉, 王全喜等. 水生植被对富营养化湖泊生态恢复的作用. 自然杂志, 2001, 18(1): 70-73.
- [6] 袁东海, 高士祥, 任全进等. 几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究. 水土保持学报, 2004, 18(4):

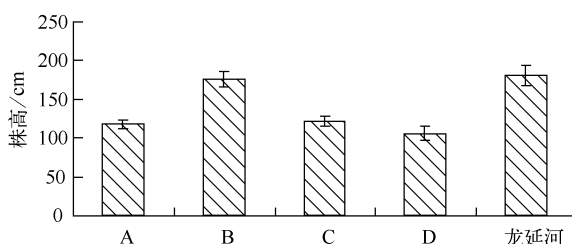


图 6 10 月上旬人工湿地与自然河道湿地茭草株高对比  
Fig. 6 Comparison of tallness of *Z. latifolia* between artificial wetlands and natural river wetland in early October

77-92.

- [ 7 ] 徐德福, 徐建民, 王华胜等. 湿地植物对富营养化水体中氮磷吸收能力研究. 植物营养与肥料学报, 2005, **11**(5): 597-601.
- [ 8 ] 李睿华, 管运涛, 何 苗等. 河岸芦苇、茭白和香蒲植物带处理受污染河水的中试研究. 环境科学, 2006, **27**(3): 493-497.
- [ 9 ] 段晓男, 王效科, 欧阳志云等. 乌梁素海野生芦苇群落生物量及影响因子分析. 植物生态学报, 2004, **28**(2): 246-251.
- [ 10 ] 贾庆宇, 周 莉, 谢艳兵等. 盘锦湿地芦苇群落生物量动态特征研究. 气象与环境学报, 2006, **22**(4): 25-29.
- [ 11 ] 宋祥甫, 邹国燕, 吴伟明. 浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究. 环境科学学报, 1998, **18**(5): 489-494.
- [ 12 ] 周小平, 王建国, 薛利红等. 浮床植物系统对富营养化水体中氮、磷净化特征的初步研究. 应用生态学报, 2005, **16**(11): 2199-2203.
- [ 13 ] Li M, Wu YJ, Yu ZL *et al.* Nitrogen removal from eutrophic water by floating-bed grown water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) with ion implantation. *Water Research*, 2007, **41**(14): 3152-3158.
- [ 14 ] 井艳文, 胡秀琳, 许志兰等. 利用生物浮床技术进行水体修复研究与示范. 北京水利, 2003, (6): 20-22.
- [ 15 ] 刘淑媛, 任久长, 由文辉. 利用人工基质无土栽培经济植物净化富营养化水体的研究. 北京大学学报: 自然科学版, 1999, **35**(4): 518-522.
- [ 16 ] 金卫红, 付融冰, 顾国维. 人工湿地中植物生长特性及其对 TN 和 TP 的吸收. 环境科学研究, 2007, **20**(3): 75-80.
- [ 17 ] 李旭东, 周 琪, 张荣社等. 三种人工湿地脱氮除磷效果比较研究. 地学前缘, 2005, **12**(1): 73-76.
- [ 18 ] 张荣社, 李广贺, 周 琪等. 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.
- [ 19 ] 曾爱平, 施于文, 刘洪见. 不同栽培基质对水生植物生长的影响. 浙江农业科学, 2009, **3**: 491-492.
- [ 20 ] Xie YH, An SQ, Yao X *et al.* Short time response in root morphology of *Vallisneria natans* to sediment type and water-column nutrient. *Aquat Botany*, 2005, **81**(1): 85-96.
- [ 21 ] 黄钦忠. 不同坡位 8 年生厚朴人工林生物量分配格局. 江西林业科技, 2010, (6): 16-21.
- [ 22 ] 王淑芬, 张喜英, 裴 冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响. 农业工程学报, 2006, **22**(2): 27-32.
- [ 23 ] 任书杰, 张雷明, 张岁岐等. 氮素营养对小麦根冠协调生长的调控. 西北植物学报, 2003, **23**(3): 395-400.