

蚯蚓和基质种类对人工湿地植物根系特征及净化效果的影响

朱 铭, 万 震, 王 杰, 冯锡杰, 王 飞, 徐德福*

(南京信息工程大学, 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044)

摘 要:选择 4 种常见的人工湿地基质(沙、沙+土、有机质+沙、有机质+沙+土),研究加入蚯蚓后不同基质对黄菖蒲最长根长、根体积和基质总孔隙度及其净化 COD_{Mn} 能力的影响。结果表明,不同基质上黄菖蒲的最长根长、根体积存在差异,以有机质+沙基质上黄菖蒲的最长根长、根体积最大,而沙子基质上黄菖蒲的最长根长、根体积最小,两处理间存在显著差异($P<0.01$)。加入蚯蚓能增加黄菖蒲的最长根长、根系体积、总孔隙度和 COD_{Mn} 的去除率。相关分析显示,黄菖蒲的最长根长、根体积与总孔隙度呈显著正相关($P<0.01$),且根系体积、最长根长与 COD_{Mn} 去除率也呈显著正相关($P<0.01$)。

关键词:人工湿地;基质;蚯蚓;根系特征;净化能力

中图分类号:X703.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)04-0838-05

Effect of Earthworms and Substrates on Root Characteristics of Wetland Plant and Purifying Capacity of Constructed Wetland

ZHU Ming, WAN Zhen, WANG Jie, FENG Xi-jie, WANG Fei, XU De-fu*

(Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Earthworms have been introduced to constructed wetlands to help purify the wastewater and used in the restoration of a wetland clogged by pollutants, by both loosening the substrate and converting the organic matter into its dissolved constituents. Earthworms play an important role in constructed wetland, but there is little information about how earthworms affect wetland plant. This study investigated the effect of four common substrates (sand, sand-soil mixture, sand-organic matter mixture, and sand-soil-organic matter mixture) with or without addition of earthworms on the maximum root length and root volume of *Iris pseudacorus*, the porosity and removing efficiency of COD_{Mn} . Results showed that the maximum root length and root volume of *Iris pseudacorus* planted in the substrate of sand-organic matter mixture were the highest, while those of sand substrate were the lowest, giving significant differences ($P<0.01$) in the maximum root length and root volume between the two substrate treatments. The addition of earthworms into the substrates increased the maximum root length, root volume, the porosity and COD_{Mn} removing efficiency of substrate. Correlation analysis showed that the maximum root length and root volume were significantly ($P<0.01$) positively correlated with substrate porosity and COD_{Mn} removal efficiency.

Keywords: constructed wetland; substrate; earthworms; root characteristics; purifying capacity

人工湿地具有低成本、低运行费用、管理方便和美观等特点,具有广泛应用前景。人工湿地可用于处理生活污水、部分工业废水、农村面源污染、垃圾渗滤

液等,且效果显著^[1]。此外,人工湿地也可用于城市景观水体的生态修复^[2],但人工湿地在应用过程中存在堵塞问题。一旦人工湿地发生堵塞,将导致湿地基质的渗透系数急剧下降,过水能力也随之降低,引发恶臭,导致蚊蝇滋生,恶化运行环境^[3-4],还会降低污染物(尤其是有机物和氮氮)的去除效果,同时缩短人工湿地的运行寿命^[5]。

为解决人工湿地的堵塞问题,很多学者都开展了

收稿日期:2011-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(40901257)

作者简介:朱 铭(1987—),女,江苏常熟人,硕士研究生,研究方向为污染水体生态修复。E-mail:z13m911@126.com

* 通讯作者:徐德福 E-mail:dehexu1@163.com

这方面的研究,如对进水进行预处理、选择合适的基质粒径及级配、选择合理的进水方式、选择合理的湿地植物、选择合适的水力负荷^[6];曝气充氧,停床、轮休,更换湿地表层基质^[7];基质正反级配^[8]等。本文主要是通过基质的选择和蚯蚓的添加来研究人工湿地总孔隙度的变化,旨在为解决人工湿地堵塞问题提供新的途径。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验采用的材料有沙子、土壤、有机质。沙子来源于长江下游南京段支流,其主要成分为二氧化硅,粒径为0~0.25、0.25~0.50、0.50~1.0、1.0~2.0 mm和2.0~5.0 mm的质量百分比(不同粒径沙子质量与总质量之比)分别为19.2%、31.7%、25.3%、12.5%和11.3%。土壤取自南京信息工程大学农业试验站,有机质含量为12.1 g·kg⁻¹,全氮为0.99 g·kg⁻¹,碱解氮为57.9 g·kg⁻¹,速效磷为70.94 g·kg⁻¹,速效钾为50.39 g·kg⁻¹,pH值为7.26。有机质采用腐熟的稻草秸秆,然后将其剪碎(<1 cm)备用。

1.2 实验方法

本实验采用的实验装置是将一个塑料桶(上口直径30 cm,下底直径23 cm,高30 cm)放在一个塑料盆中(上口直径40 cm,下底直径30 cm,高13 cm),在塑料桶底部有6个污水通道,可实现塑料桶与塑料盆之间的污水交换。在塑料桶底部放一尼龙网,以防止基质从塑料桶中漏出。按下列方法准备4种基质:A(沙):沙子;B(沙+土):沙子+土壤完全混合(体积比1:1);C(沙+有):3%有机质与97%沙子混合(质量比);D(沙+土+有):沙子与土壤1:1(体积比)混合后再与3%的有机质混合(质量比)。分别将相同体积(7 L)的上述基质放入塑料桶中(质量31.0~36.37 g·盆⁻¹),并向塑料桶中加入2株长势均匀的黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)幼苗。实验设2组处理,一组是分别向4种基质中加入蚯蚓(*Eisenia foetida*),另一组是未加入蚯蚓作为对照(CK),每处理设3次重复,共24个处理。2010年3月中旬开始实验,在实验过程中,向每个处理加入相同量的污水使整个基质处于湿润状态以维持蚯蚓和植物的生长,整个实验在塑料大棚中进行。

1.3 指标分析与测定

2011年5月初将塑料盆取下、洗净并向每个塑料盆中准确加入4 L富营养化水,其高锰酸盐指数

(COD_{Mn})、总氮(TN)和总磷(TP)分别为8.14、4.47 mg·L⁻¹和0.24 mg·L⁻¹。有机负荷COD_{Mn}为0.65 g·m⁻²·d⁻¹,水力负荷为8 cm·d⁻¹,4 d后,测定塑料盆中污水的剩余体积,并分析水中COD_{Mn}的含量。污水剩余体积直接采用量筒测定,COD_{Mn}采用文献[9]中的标准方法测定,并采用下列公式计算COD_{Mn}的去除率:

$$f=[(C_0 \times V_0 - C_4 \times V_4) \div (C_0 \times V_0)] \times 100\% \quad (1)$$

式中: f 为COD_{Mn}去除率(%); C_0 为加入污水中COD_{Mn}的初始浓度(mg·L⁻¹); V_0 为加入污水的初始体积(mL); C_4 为第4 d污水中COD_{Mn}的浓度(mg·L⁻¹); V_4 为第4 d污水的体积(mL)。

实验于2011年7月结束,用环刀法测定土壤容重,用比重瓶法测定土壤比重^[10],并通过下列公式计算基质的总孔隙度:

$$P_t=[(d_s - r_s) \div d_s] \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_t 为总孔隙度(%); d_s 为比重(g·cm⁻³); r_s 为容重(g·cm⁻³)。

测定土壤容重和比重后,将处理中的黄菖蒲取出,选取每个处理中具有代表性的黄菖蒲1株,小心地去掉根上的泥,并用水冲洗干净。采用排水法直接测定根系的体积,用直尺直接测定植物的最长根长。

1.4 数据处理与分析

利用DPS统计软件进行统计分析,采用邓肯多重极差对不同处理间差异进行显著性检验,显著性水平为 $P=0.05$ 。

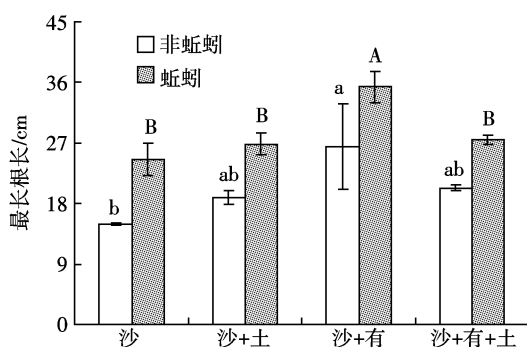
2 结果与分析

2.1 黄菖蒲的最长根长

黄菖蒲在不同处理上最长根长变化见图1。可以看出,黄菖蒲的最长根长存在差异,以沙+有处理上最长,沙处理上黄菖蒲的最长根长最短。未加入蚯蚓时,沙+有处理上黄菖蒲的最长根长显著高于沙处理($P<0.05$);加入蚯蚓后,沙+有处理上黄菖蒲的最长根长显著高于沙+有+土、沙+土和沙处理($P<0.05$)。加入蚯蚓后,植物的最长根长均增加,与未加入蚯蚓相比,沙、沙+土、沙+有和沙+有+土基质上的最长根长分别增加了64.4%、42.1%、33.4%和35.5%。

2.2 黄菖蒲根系体积

图2显示了在不同处理上黄菖蒲根系体积的变化,可以看出,不同处理上黄菖蒲根系体积存在差异。在未加入蚯蚓时,沙+有处理上黄菖蒲根系体积显著高于沙处理($P<0.05$),加入蚯蚓后,沙+有处理上黄菖蒲根系体积则显著高于沙+土+有、沙+有和沙处理



图中不同的小写字母表示未加入蚯蚓不同处理在 $P=0.05$ 的水平上存在显著差异,不同的大写字母表示加入蚯蚓后不同处理在 $P=0.05$ 的水平上存在显著差异。下同

图 1 不同基质上黄菖蒲的最长根长

Figure 1 The maximum root length of *I. pseudacorus* planted in different substrates

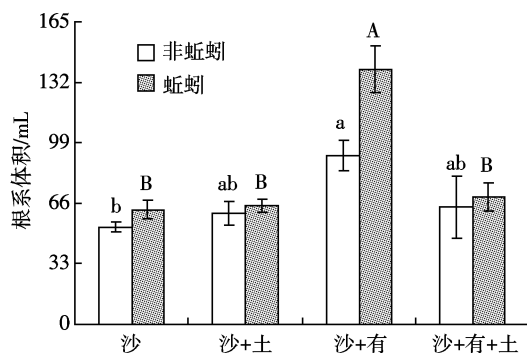


图 2 不同基质上黄菖蒲的根系体积

Figure 2 The root volume of *I. pseudacorus* planted in different substrates

($P<0.05$)。加入蚯蚓后,黄菖蒲根系体积均增加,与未加入蚯蚓相比,沙、沙+土、沙+有和沙+有+土基质上的黄菖蒲的根系体积分别增加了 17.9%、6.6%、51.1% 和 8.6%。

2.3 基质的总孔隙度

图 3 显示了不同处理上基质总孔隙度的变化,可以看出,在未加入蚯蚓时,沙+有、沙+土+有和沙+土或沙处理基质的总孔隙度存在显著差异 ($P<0.05$);加入蚯蚓后,沙+有处理的总孔隙度显著高于沙+土+有、沙+土和沙处理的总孔隙度 ($P<0.05$)。加入蚯蚓后,基质的总孔隙度均增加,与未加入蚯蚓相比,沙、沙+土、沙+有和沙+有+土基质的总孔隙度分别增加了 11.8%、11.3%、5.1% 和 4.4%。

2.4 基质对 COD_{Mn} 的去除率

不同基质对 COD_{Mn} 去除率见图 4。可以看出,未加入蚯蚓、沙+有、沙+土+有和沙+土处理对 COD_{Mn} 的

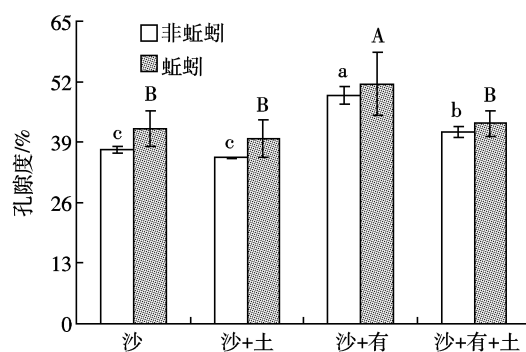


图 3 不同基质的总孔隙度

Figure 3 Porosity of different substrates

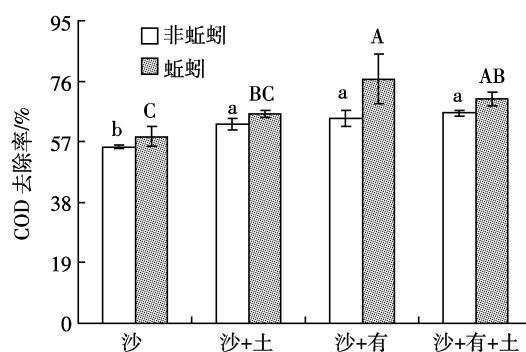


图 4 不同基质对 COD_{Mn} 的去除率

Figure 4 The removal efficiency of COD_{Mn} by different substrates

去除率显著高于沙处理 ($P<0.05$);加入蚯蚓后,沙+有处理对 COD_{Mn} 去除率显著高于沙+土和沙处理 ($P<0.05$)。加入蚯蚓后,不同处理对 COD_{Mn} 的去除率均增加,与未加入蚯蚓相比,沙、沙+土、沙+有和沙+有+土处理对 COD_{Mn} 的去除率分别增加了 6.0%、5.2%、19.1% 和 6.7%。

3 讨论

3.1 总孔隙度对基质和植物根系的响应

4 种基质的总孔隙度存在差异,其中沙+有和沙+有+土处理的总孔隙度比较高,而沙+土处理的总孔隙度比较低。从图 3 可以看出,向沙或沙+有处理中加入土壤都导致了总孔隙度的降低,如分别向沙和沙+有中再加入土壤后,总孔隙度分别降低了 4.7% 和 15.9%。向沙子中加入土壤,沙子的总孔隙度降低,可能与土壤粘粒进入沙子孔隙,导致沙子部分孔隙堵塞有关。因此,人工湿地运行一段时间后堵塞,可能与污水中大量的粘粒进入人工湿地,在人工湿地沉降而导致基质总孔隙度堵塞有关。有机质的加入对总孔隙度也产生影响,如向沙子中加入有机质或向沙+土处理中加

入有机质都导致了总孔隙度的增加(图 3)。杨金玲等^[11]发现土壤总孔隙度受到土壤质地和有机质含量的影响。对于未压实土壤,黏土的总孔隙度大,以毛管孔隙为主;沙土的总孔隙度小,但通气孔隙的比例相对较大,且由于有机质本身疏松多孔,富含有机质的土壤总孔隙度较高。卢瑛等^[12]也报道土壤压实的直接后果是紧实度增加,容重增大,总孔隙度降低。因此,加入有机质导致总孔隙度的增加可能与有机质加入后容重降低有关。

总孔隙度与最长根长和根体积的相关分析见图 5,可以看出,总孔隙度分别与黄菖蒲的最长根长(图 5a)和根系体积(图 5b)呈显著正相关($P<0.01$)。俞新妥^[13]报道混交林的土壤容重普遍比纯林小,主要是因为混交林的根系分布在不同的深度上,数量较多,根的形状多样,根系的穿插使土壤变得疏松多孔。因此,植物的根越长,在基质不同层次都有根系的分布,而根系的穿插作用使基质的总孔隙度增加。根系的体积与基质总孔隙度的相关性也说明,根系体积越多,根系越茂盛,穿插作用越强,总孔隙度越高。姚庆端^[14]认为枝落叶量大,分解快,且根系发达,细根量

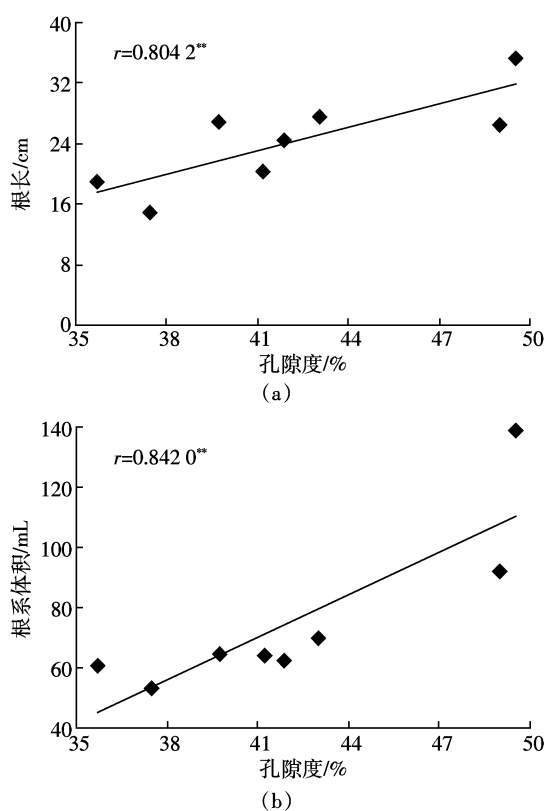


图 5 总孔隙度与最长根长、根系体积的相关分析

Figure 5 Correlation analysis between porosity and the maximum root length, root volume

多,每年向土壤提供大量的有机质,从而达到良好的胶结土壤作用;且大量的根系在生长过程中对土壤起到良好的穿插挤压以及根系吸收水分所引起的土壤涨缩作用,这都对土壤形成良好的团聚体结构有利。

3.2 孔隙度对 COD_{Mn} 去除的影响

COD_{Mn} 去除率与总孔隙度、根长和根体积的相关分析见图 6。

从图 6 可见, COD_{Mn} 去除率随着基质总孔隙度的增加而增加,且 COD_{Mn} 去除率与根系体积达到显著正相关($P<0.05$), COD_{Mn} 去除率与根长也达到极显著正相关($P<0.01$)。邱仁辉等^[15]报道土壤总孔隙度降低可带来土壤透气性、水分渗透性及饱和导水率减小,而

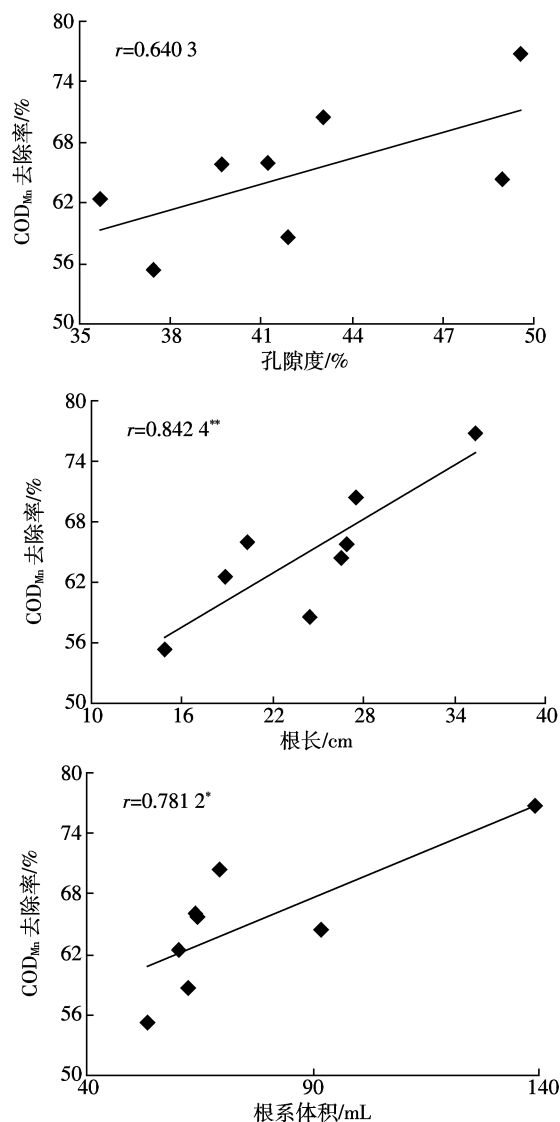


图 6 COD_{Mn} 去除率与总孔隙度、最长根长、根系体积的相关分析

Figure 6 Correlation analysis between the removal efficiency of COD_{Mn} and porosity, the maximum root length, root volume

土壤强度相应增加,植物根系的穿透性阻力增大;压实也导致了土壤中矿物质与水的接触面积减小, O_2 和 CO_2 的扩散变慢。吴海明^[16]报道植物根系泌氧量与 COD_{Cr} 、 NH_4^+-N 耗氧量呈显著正相关关系。因此,加入蚯蚓后黄菖蒲的根长增加,根系体积增加,从而导致基质孔隙度提高,以致更多的氧气到达根际,从而提高有机物的分解,提高 COD_{Mn} 的去除率。这与Wießner等^[17]的报道一致,即湿地植物的释氧量与其活性根的数量和长度有密切的关系,活性根较长且数量多的植物,其释氧量较大。Achintya等^[18]报道在根系植物量相似的条件下,地上部分生物量越大,植物释放的氧气量越大。例如,根系生物量相同的香蒲,地上部分生物量为0.082 g时,其释氧量为 $0.25\text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$;而当地上生物量为0.602 g时,其释氧量达到了 $0.75\text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$ 。因此,加入蚯蚓后, COD_{Mn} 去除率提高可能与加入蚯蚓后黄菖蒲的根长增加和根系体积增加,更多氧气在根际产生,从而提高 COD_{Mn} 的去除率有关。另外,加入蚯蚓后, COD_{Mn} 去除率的增加还可能与蚯蚓活动增加基质的总孔隙度使更多的氧气进入,利于提高 COD_{Mn} 的去除率有关。

4 结论

不同基质上黄菖蒲的最长根长、根体积存在差异;基质中加入有机质和蚯蚓能提高基质的总孔隙度,并提高湿地对 COD_{Mn} 去除率。

参考文献:

- [1] Vymazal J. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater[J]. *Ecol Eng*, 2009, 35: 1-17.
- [2] 周 琪. 人工湿地技术在污水处理与生态环境保护中的应用及展望[J]. 给水排水, 2009, 35(7): 1-3.
ZHOU Q. Application and prospect on wastewater treatment and water protection by constructed wetland[J]. *Water & Wastewater*, 2009, 35(7): 1-3.
- [3] 李雪娟, 和树庄, 杨海华. 人工湿地堵塞机制及其模型化的研究进展[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(1): 1-4.
LI X J, HE S Z, YANG H H. Advance in clogging mechanisms and modeling in constructed wetland [J]. *Environmental Science Survey*, 2008, 27(1): 1-4.
- [4] Oullet-Plamondon C, Chazarenc F, Comeau Y, et al. Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 27(3): 258-264.
- [5] Cottingham P D, Davies T H, Hart B T. Aeration to promote nitrification in constructed wetland[J]. *Environmental Technology*, 1999, 20(1): 69-75.
- [6] 尧平凡, 陈静静. 人工湿地基质堵塞预防措施及恢复对策研究进展[J]. 净水技术, 2007, 26(5): 45-48.
- YAO P F, CHEN J J. Research progress on preventive measures and recovery countermeasures of substrate clogging in constructed wetlands[J]. *Water Purification Technology*, 2007, 26(5): 45-48.
- [7] 朱 洁, 陈洪斌. 人工湿地堵塞问题的探讨[J]. 中国给水排水, 2009, 25(6): 24-33.
ZHU J, CHEN H B. Discussion on constructed wetlands clogging[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(6): 24-33.
- [8] 王 荣, 贺 锋, 肖 蕾, 等. 不同级配基质方式下垂直流人工湿地净化效果及渗透性能研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 969-975.
WANG R, HE F, XIAO L, et al. Treatment efficiency and permeability of vertical flow constructed wetland in different gradation substrates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 969-975.
- [9] 水与废水监测分析[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Analyzed method of monitor water and wastewater[M]. Beijing: Environmental Science Press of China, 2002.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 308-315.
LU R K. Agrochemical analyzed method of soil[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Publishers, 1999: 308-315.
- [11] 杨金玲, 张甘霖, 赵玉国, 等. 土壤压实指标在城市土壤评价中的应用与比较[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 51-55.
YANG J L, ZHANG G L, ZHAO Y G, et al. Application and comparison of soil compaction indexes in the evaluation of urban soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(5): 51-55.
- [12] 卢 瑛, 龚子同, 张甘霖. 城市土壤的特性及其管理 [J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 306-309.
LU Y, GONG Z T, ZHANG G L. Characteristics and management of urban soils[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(2): 306-309.
- [13] 俞新妥. 混交林营造原理与技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989.
YU X T. The principle and technology of mixed forest[M]. Beijing: Forest Science and Technology Publishers, 1989.
- [14] 姚庆端. 不同杉木混交模式土壤肥力及土壤蓄水量研究[J]. 福建林学院学报, 1996, 16(3): 282-286.
YAO Q D. A Study on soil water storage capacity of different mixed stands of chinese fir[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1996, 16(3): 282-286.
- [15] 邱仁辉, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林经营措施对土壤的扰动和压实影响[J]. 山地学报, 2000, 18(3): 231-236.
QIU R H, YANG Y S, CHEN G S, et al. The Effect of forest management practices on soil disturbance and compaction [J]. *Journal of Mountain Research*, 2000, 18(3): 231-236.
- [16] 吴海明, 张 建, 李伟江, 等. 人工湿地植物泌氧与污染物降解耗氧关系研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(9): 1973-1977.
WU H M, ZHANG J, LI W J, et al. Relationship between oxygen release from plants in constructed wetland and oxygen demand for pollutant degradation[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(9): 1973-1977.
- [17] Wießner A, Kusch P, Stottmeister U. Oxygen release by roots of typha latifolia and juncus effusus in laboratory hydroponic systems[J]. *Acta Biotechnologica*, 2002, 22(1-2): 209-216.
- [18] Achintya N Bezbaruah, Tian C Z. Quantification of oxygen release by bulrush (*Scirpus validus*) roots in a constructed treatment wetland[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, 89(3): 308-318.