

研究论文

河渠特定生态岸坡基质酶活性及 细菌种群的动态特征

吴义锋, 吕锡武, 仲兆平, 史 静
(东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 采用多孔混凝土预制球构建河渠特定岸坡生态系统, 对坡面基质中的微生物量、3 种酶活性和 5 种类群细菌数量进行了跟踪测量。结果表明, 特定生态坡面上水位变动区即挺水植物生长区的微生物学性能指标明显优于草本植被生长区和淹没区; 生态岸坡基质微生物量及各种酶活性不同月份存在显著性差异, 脱氢酶、脲酶、纤维素酶在 6 月、9 月时表现了较高的酶活性, 并且显著高于 3 月和 12 月; 微生物量在 6 月时达到最高值, 坡面上的空间特征与酶活性分布特征较为一致, 都具有明显的根际效应; 细菌总数及 5 种功能性细菌类群的数量在 6 月和 9 月达到高峰, 其时空分布规律与酶活性具有一致性。

关键词: 岸坡特定生态系统; 多孔混凝土; 酶活性; 细菌种群; 动态特征

中图分类号: X 171.4

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2009) 11-2897-06

Dynamic characteristics of substrate enzyme activities and bacteria species groups in special riverine ecosystem

WU Yifeng, LÜ Xiwu, ZHONG Zhaoping, SHI Jing

(School of Energy & Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: The dynamic characteristics of enzyme activities and bacteria species groups in the substrate of stream banks have been studied through the construction of a special riverine ecosystem, in which the ecological embankments are made up of prefab spherical bricks with porous concrete. The microbial biomass, three kinds of bio-enzymes and five types of bacteria species groups in the substrate of ecological embankments were scouted. Results showed that there are significantly distribution differences ($p < 0.05$) in the microbial biomass and bio-enzyme activities in the ecological embankments. The activities of dehydrogenase, urease and cellulase are significantly higher in June and September than those in March and December, and the activities of these bio-enzymes in aquatic plants district of the ecological embankments are also higher than those of other places. Microbial biomass appears a peak in June, and its spatial characteristic is similar with the enzyme activities, which all have an accumulated ecological effect on the hydrophyte rhizosphere. The performance indexes of microorganism in the water level fluctuation zone are all superior to those in other places. Aerobic bacteria (cellulose decomposing bacteria, ammonifying bacteria, nitrosation bacteria and nitrobacteria) and anaerobic bacteria (denitrifying bacteria) have the same distribution in the ecological embankments, the quantity of bacterium also appears a peak in June and September, and the dynamic characteristics of each type of bacteria in the special riverine ecosystem are

2009-06-22 收到初稿, 2009-07-19 收到修改稿。

联系人及第一作者: 吴义锋 (1975—), 男, 博士后。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50678035); 江苏省博士后科研资助计划项目 (0901002C)。

Received date: 2009-06-22,

Corresponding author: WU Yifeng, shinfun@163.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50678035) and Funding Scheme of Postdoctoral Science Foundation of Jiangsu Province (0901002C).

consistent with the biomass and bio-enzyme activities.

Key words: special riverine ecosystem; porous concrete; enzyme activity; bacteria species groups; dynamic characteristic

引 言

岸坡是水生生态系统的重要组成部分,其护砌方式必然对生态系统产生影响。长期以来,河渠岸坡因水土保持等功能需求普遍采用的硬化护砌切断了水体与陆地间的物质、能量及信息交流,绿色植物和微生物失去了生存空间,生物多样性降低,生态系统瓦解破碎^[1]。对于缺损的生态系统来说,生物种类及其生长介质的丧失或改变是影响生态恢复的关键因素,生态修复时通常选用合适的植物种类改造介质,或利用物理化学方法直接改良或改变介质^[2-3],使之具有一定强度、安全性和耐久性的同时,把硬化了的河渠岸坡改建为水体与基质、水体与生物体相互涵养、适合生物生长的仿自然型生态岸坡。在构建生态河渠的过程中,研发类似河渠天然岸坡生态功能并具有一定强度的生态环保型材料尤为关键。

多孔混凝土 (porous concrete),也称生态混凝土 (ecological concrete)、环境友好型混凝土 (environment friendly concrete),是采用特殊级配的集料和胶凝材料,使其力学性能满足工程使用要求的同时,形成蜂窝状结构,内部具有连续贯通的孔隙,绿色植物能以此为基质正常生长,并能有效降低污染负荷,其自研发以来即被视为河渠岸坡建设的生态型替代材料,并已逐步开展研究及应用^[4-7]。以多孔混凝土为护岸载体构建的河渠特定生态岸坡,是生态系统中营养盐的汇聚场所,富集在基质上的微生物种群是影响生态系统净化容量和生态修复的关键因素。目前,关于多孔混凝土生态

岸坡功能的研究主要集中于水质净化、植物生长效应等方面,对生态坡面微生物富集效应、基质酶活性以及细菌种群的时空演变特征却鲜有报道。

微生物是特定岸坡生态系统中有机的分解者和无机盐的转化者,生态护砌面与水体的交互过程中,多样性的微生物类群对生态系统中物质迁移和转化发挥着重要作用。研究微生物量、生物活性以及细菌种群在生态坡面上的时空分布特征,有助于阐明河渠生态堤岸的水质净化及生态修复机制,丰富河渠生态堤岸的工程模式及其功能研究等方面的内容。

1 实验材料与方法

1.1 实验装置及运行条件

于上海市黄浦江原水厂内构建河渠特定岸坡生态系统中试模型,实验河渠设计为环形以模拟自然弯曲和水流多样性等特征。河渠外侧岸周长 54.7 m,内侧岸周长 29.5 m,断面为梯形,底宽 1 m,上宽 4 m,岸坡坡度 1:1.5,工作水位 0.5~0.8 m,见图 1。渠中安装潜水型水流推进器,以模拟河水流动。

河渠岸坡以多孔混凝土为护岸载体并进行坡面绿化以构建特定岸坡生态系统。岸坡由水质净化效果和生态效应均较好的多孔混凝土预制球^[4-7]铺装护砌,球直径 250 mm,内部预留 x 、 y 方向的通孔,球成型后用经防锈处理的 $\phi 18$ 钢筋串接固定,并充当生态护砌面的配筋,球体之间自然形成了边长约 100 mm 的方孔,见图 2,护砌面空隙率约 47%。预制球铺装后,就近挖取地表 20 cm 的土壤

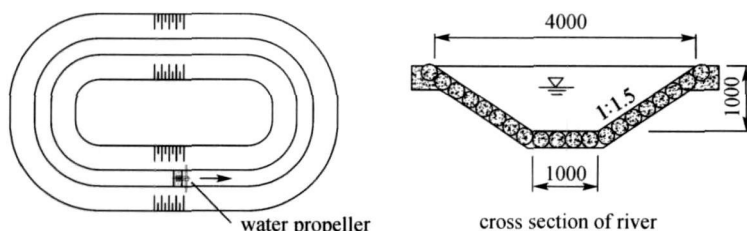


图 1 实验河渠示意

Fig 1 Plan of pilot system

填充护砌面的空隙, 以诱导植物生根发芽, 覆土后河渠反复通水约 30 d, 充分稀释多孔混凝土的释碱, 然后进行坡面植被植生。植物以须根系类型为主, 沿坡面从下往上依次种植枯草 (*Subtilis*)、香蒲 (*Typha*)、美人蕉 (*Canna generalis*)、狗牙根 (*Bermuda grass*)、黑麦草 (*Lolium perenne*) 等, 植物带结构依次为沉水植物、挺水植物、草本植被, 坡面上实现了水生生态向陆生生态的自然过渡。实验装置及坡面绿化于 2006 年 8 月完成, 岸坡特定生态系统经过 1 年多的培养后, 坡面基质酶活性与细菌种群实验观测于 2008 年进行, 此时岸坡特定生态系统已趋于完善, 挺水植物、草本植被的覆盖率接近 100%, 间隙中发现了河蟹、蟾蜍等动物, 而下部的沉水植物则受黄浦江原水浊度较高的影响而生长缓慢。

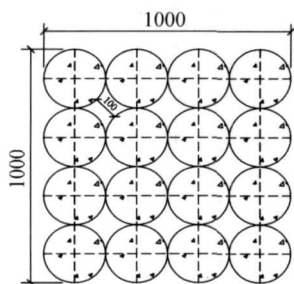


图 2 生态混凝土预制球砌块

Fig 2 Porous concrete prefab bricks

在环形河道长直段的中部设基质采集断面, 由上而下设 4 个采集点, 分别标记为 *a*、*b*、*c*、*d*。*a* 点位于水面以上, *b* 点位于坡面上水位变动区中部, *c* 点位于坡面中下部, *d* 点位于岸坡与河床交界处, 见图 3。*a* 点至坡顶为草本植物带, *a*~*c* 点为挺水植物带, *b* 点位于挺水植物带中部, *c*~*d* 点为沉水植物带。采用 DN50 的 PVC 管一端切割成 45° 斜面的基质采集器插入多孔混凝土预制球的间隙, 取深度为 3~5 cm 的基质带至实验室分析。分别于 2008 年 3 月、6 月、9 月和 12 月测定基质微生物量、酶活性及各种群细菌数量。

1.2 微生物量及酶活性的测定

基质微生物量测定采用脂磷法, 表示为每克基

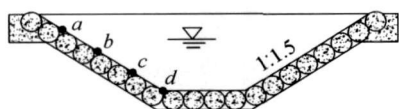


图 3 生态护砌面基质取样位置示意

Fig 3 Sampling point on ecological embankments

质微生物细胞中 P 的量 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。同时选取广泛存在于土壤中的脲酶、纤维素酶和脱氢酶进行测定, 这些酶对基质中 C、N、P 等主要物质的转化有着重要作用^[8]。脲酶采用纳氏比色法, 表示每克基质每天产生的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 量 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); 脱氢酶采用氯化三苯基四氮唑 (TTC) 法, 表示每克基质每天产生的三苯基甲簪 (TF) 的量 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); 纤维素酶采用蒽酮比色法, 表示每克基质每天产生的葡萄糖的量 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。每项目重复测定 3 次, 取其平均值, 具体测定步骤见文献[9]。

1.3 细菌类群数量的测定

基质细菌总数的测定采用琼脂培养基涂抹平板计数法; 氨化细菌的测定采用不含无机氮的蛋白胨琼脂培养基培养计数法; 纤维素分解菌、亚硝化细菌、硝化细菌、反硝化细菌的测定均采用最大可能数法 (MPN), 纤维素分解菌采用纤维素好氧分解培养基, 亚硝化、硝化细菌的培养基为改良的 Stephenson 培养基, 反硝化细菌采用反硝化细菌培养基。基质前处理步骤为: 称取 10 g 基质加入盛有 100 ml 无菌水的三角瓶中, 振荡至土壤颗粒完全分解, 摇匀并吸取 1 ml 土壤悬液进行系列稀释。具体测定步骤见文献[9]。

2 结果与分析

2.1 生态坡面微生物量和生物活性时空动态特征

河渠特定生态岸坡基质中的微生物量以及脱氢酶、脲酶、纤维素酶活性的动态特征见图 4~ 图 7, 旨在探索河渠特定岸坡生态系统中生态要素与微生物学指标间的内在联系。

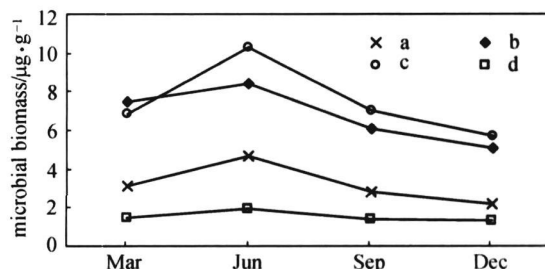


图 4 微生物量时空动态特征

Fig. 4 Dynamic characteristics of biomass

2.1.1 基质微生物量的动态特征 土壤或水处理中微生物的生物膜脂类大多以磷脂 (phospholipids) 的形式存在, 细胞死亡后磷脂迅速分解, 脂磷法测

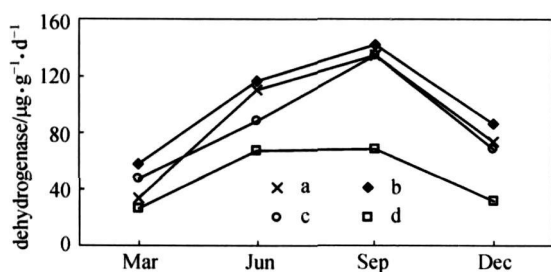


图 5 脱氢酶活性时空动态特征

Fig. 5 Dynamic characteristics of dehydrogenase activities

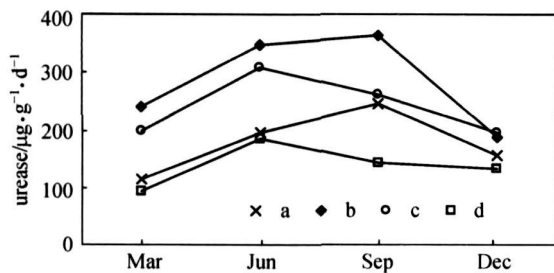


图 6 脲酶活性时空动态特征

Fig. 6 Dynamic characteristics of urease activities

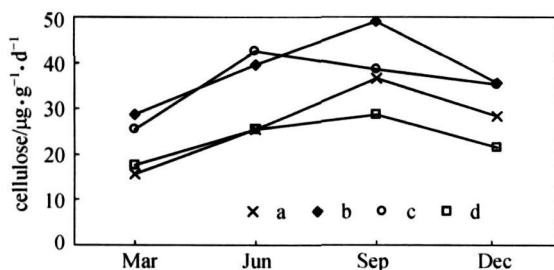


图 7 纤维素酶时空动态特征

Fig. 7 Dynamic characteristics of cellulose activities

定的微生物量通常表征基质中活性的微生物量^[10]。特定生态岸坡上各测点基质微生物量见图 4。由图 4 可以看出, 特定生态岸坡基质的微生物量高达 $10.29 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 达到了水处理中某些填料上生物膜中的微生物量水平, 如人工介质处理太湖富营养化原水时组合填料上的微生物量为 $8.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[11], 表明多孔混凝土为护岸载体而构建的岸坡特定生态系统能有效富集土著微生物, 从而修复和强化生态系统中的生物链。微生物量在特定生态岸坡的动态特征与季节、水位等因素相关, 挺水植物生长的水位变动区中部 b 点和下部 c 点的微生物量较高, 且 6 月和 9 月时的微生物量显著高于 3 月和 12 月; 草本植物带的 a 点微生物量略低于 b 点和 c 点, 时间分布特征与 b 点、c 点基本一致; 河床处的 d 点微生物量较低, 随时间变化不明显, 主要因为 d 点位于淹没区, 环境特性受外界影响较小, 微生物以还原

性菌群为主, 季节交替对其影响不明显。坡面中上部的水位变动区为微生物高度富集区, 同时也是挺水植物的生长区, 微生物量的空间分布特征标识了实施河渠岸坡生态治理及修复的重点区域。

2.1.2 脱氢酶活性的动态特征 脱氢酶能酶促脱氢反应, 参与碳氢化合物、有机酸的合成与分解以及光合作用、氧化磷酸化、脂肪的氧化与合成等生化反应, 为生命体提供必不可少的能量和还原当量^[12]。脱氢酶活性在很大程度上反映了生物体的活性状态, 直接表示生物细胞对其基质降解能力^[13]。生态坡面基质的脱氢酶活性随时间、空间呈现一定的变化规律。3 月、6 月和 9 月脱氢酶活性的差异显著 ($p < 0.05$), 9 月坡面上部 a、b、c 3 点的脱氢酶活性达到最高值, 12 月最低, Rogers 等^[8] 也同样发现人工湿地基质的脱氢酶活性季节差异性显著。坡面底部的 d 点脱氢酶活性最低。在特定生态岸坡生命活动旺盛的区域和时间内, 需要脱氢酶不断地转化有机质为生态系统中生命体代谢活动提供物质和能量, 在生命活动较弱的冬季和生物量较少的坡面底部, 生命活动受到环境因素制约, 脱氢酶活性较低。正是基于脱氢酶活性的空间动态特征, 可通过调控和改善河渠岸坡上生命要素的时空分布, 从而达到生态修复的最佳效果。

2.1.3 脲酶活性的动态特征 脲酶是一种酰胺酶, 以尿素为底物酶促水解有机物分子中的肽键, 使之转化为 NH_3 、 CO_2 和 H_2O , 其活性与基质中的微生物量、有机质含量、氮含量呈正相关^[14]。河渠特定生态岸坡中, 尿素是以植物残体的形式进入基质, 由于季节更替和生命规律循环, 3 月和 6 月时生态坡面基质脲酶活性显著高于 9 月和 12 月, 因为 6 月~12 月为植物主要生长期, 在上海当地的气候条件下, 美人蕉等水生植物在 12 月份仍能持续生长, 但生长潜力逐渐变弱, 进入冬季后, 植物的辅根系等残体逐渐被基质中的微生物分解和转化。气温升高时, 植物的生命代谢过程旺盛, 脲酶活性呈增长趋势。另外, 冬季时 (12 月~翌年 3 月) 坡面上植物量较小, 微生物量降低, 因而脲酶活性也较低。从脲酶活性的演化趋势分析, 脲酶活性是特定岸坡生态系统中生命要素自组织、自循环能力的体现, 表明河渠岸坡特定生态系统具有较强的自我组织、优化、调节、再生、繁殖等自生潜力。

2.1.4 纤维素酶的动态特征 纤维素酶主要参与

土壤基质中含 C 物质的转化与降解，能水解纤维素为更小分子量或植物能够直接吸收的有机物^[15]。由图 7 可看出，a、b、c 3 点的基质纤维素酶显著高于坡底的 d 点，随季节更替差异性显著，在 3 月、6 月和 9 月，生态岸坡上生命体新陈代谢活动增强，尤其是美人蕉和菖蒲等水生植物在 6 月~ 9 月生命活动较为旺盛，基质中微生物酶活性显著增加以加速系统含碳物质的转化，9 月时纤维素酶活性达到 $40 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上，从而保证营养物的供应。而在冬季时（12 月~ 翌年 3 月），植物生命活动基本停止，酶活性较低，其中 b 点、c 点纤维素酶活性约为 $28 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，a、d 两点更低，仅为 $15.6 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。从空间分布特性来看，酶活性具有明显的根际效应，在根系发达的挺水植物生长区，酶活性普遍较高，a 点位于水面上部，主要为草本植被生长区，酶活性略低于 b、c 两点，而 d 点植物生物量较少，酶活性最低。

2 2 微生物量及细菌种群的时空规律

以多孔混凝土为护岸载体而构建的特定生态岸坡受外界环境特征及河渠水文要素的共同影响，不同位置处的坡面基质中细菌类群时空分布也存在显著差异，结果见表 1。

从表 1 中可以看出，各测点的细菌数量在 6 月和 9 月时显著高于 3 月和 12 月，位于挺水植物带的 b、c 两点各类群细菌数量明显高于常水位以上的 a 点和下部的 d 点，数量差别最高为 2 个数量

级。造成细菌类群分布差异的原因主要与坡面基质温度、含水量、有机质、植物生长量、水解氮等多种生态因子有关。细菌类群的数量所反映的时空演变规律与基质微生物酶活性有高度的一致性，也说明了细菌是基质微生物的重要来源和主要组成部分。特定生态岸坡基质微生物富集效果较为显著，酶活性、各种群细菌数量与在人工湿地基质中的分布特征具有类似性^[16]。

氨化细菌、亚硝化-硝化细菌、反硝化细菌是特定岸坡生态系统中氮类物质去除和转化的功能性菌群，特定生态岸坡基质均能有效富集与此相关的细菌种群，从而强化了河渠中氮类污染物去除和转化，增强了河渠特定岸坡生态系统的自生能力。坡面基质的氨化、亚硝化-硝化等作用强度由于底物浓度、含氧量、氧化还原电位不同而存在一定差异，因而细菌总数、氨化细菌及硝化细菌等细菌数量同样存在一定的空间和时间差别。值得注意的是，反硝化细菌为厌氧菌，其空间分布特征表现出与氨化细菌、亚硝化-硝化细菌以及纤维素分解菌等好氧性细菌同样的空间分布特性，即 b 点、c 点的数量高于 a 点、d 点，但数值差别较小，属同一数量级，反硝化细菌的数量并没有因为 d 点水深增加和 DO 偏低而显著变化，表明特定生态岸坡上反硝化作用强度的空间差别较小，主要因为基质采集区深度 3~ 5 cm，为植物根际区，氧的含量并不是影响坡面基质富集各种群细菌的首要因素。因此，

表 1 特定生态岸坡的各种群细菌数量

Time-space		Aerobic bacterial count × 10 ⁻⁹ /cfu · g ⁻¹	Cellulose decomposing bacteria × 10 ⁻³ /MPN · g ⁻¹	Amonifying bacteria × 10 ⁻⁷ /cfu · g ⁻¹	Nitrosation bacteria × 10 ⁻³ /MPN · g ⁻¹	Ntrobacterium × 10 ⁻⁶ /MPN · g ⁻¹	Denitrifying bacteria × 10 ⁻³ /MPN · g ⁻¹
Mar	a	1.56	1.15	2.25	1.10	2.80	0.20
	b	1.73	1.40	4.51	3.50	3.50	4.50
	c	1.63	0.85	5.17	6.00	3.00	1.10
	d	0.77	0.35	0.25	0.65	0.25	1.10
Jun	a	2.42	4.50	7.55	2.50	7.00	2.50
	b	2.20	6.70	20.0	4.50	11.0	6.50
	c	2.95	7.00	2.20	6.00	6.50	4.50
	d	1.42	1.10	0.65	2.50	0.35	4.50
Sep	a	2.56	11.0	10.2	3.50	6.50	3.00
	b	5.57	16.0	18.5	6.70	25.0	7.00
	c	3.02	15.0	6.50	15.0	7.0	6.50
	d	1.45	1.25	0.35	0.70	0.45	1.10
Dec	a	1.42	1.25	2.83	1.10	2.80	1.10
	b	2.26	3.00	5.90	3.00	7.00	3.00
	c	2.16	5.25	6.70	2.00	2.00	0.25
	d	0.67	0.65	0.36	0.65	0.12	0.65

以多孔混凝土为护岸载体的特定生态岸坡能富集各种群细菌,并连同绿色植物以及水体中的物质、生命要素共同构成了稳定的水生生态系统。

3 结 论

(1) 采用多孔混凝土构建的特定岸坡生态系统,能有效富集各类群微生物,在外界环境特征(气候、基质下垫面等因素)的共同影响下,微生物生物量、基质酶活性以及各种群细菌表现出共同的时空分布特征,且在生命活动旺盛的季节(6月、9月)高于其他时段。

(2) 特定生态坡面基质的微生物富集具有显著的根际效应,细菌是坡面微生物的重要来源和主要组成部分,挺水植物带的微生物量、酶活性明显高于其他坡位,可通过调控河渠岸坡特定位置的生命要素,以达到生态修复的最佳效果。

(3) 特定生态坡面上厌氧性反硝化细菌数量的时空分布特性与细菌总数及好氧性的氨化细菌、亚硝化-硝化细菌的分布特性基本一致,表明生态岸坡上反硝化作用的空间差别较小,多样化的类群细菌连同多孔混凝土护砌面基质、坡面植物以及水体中的物质和生命要素可建立稳定的水生生态系统。

References

- [1] Meier K, Kuusemets V, Luig J, Mander U. Riparian buffer zones as elements of ecological networks: case study on *Parnassius mnemosyne* distribution in Estonia. *Ecological Engineering*, 2005, 24: 531-537
- [2] Dong Zheren (董哲仁). Exploring eco-hydraulic engineering. *Engineering Science* (中国工程科学), 2007, 9 (1): 1-7
- [3] Qin Pei (钦佩), An Shuqing (安树青), Yan Jingsong (颜京松). Science of Ecological Engineering (生态工程学). Nanjing: Nanjing University Press, 2002: 109
- [4] Chen Yanghui (陈杨辉), Wu Yifeng (吴义锋), Lü Xiwu (吕锡武). Application of eco-concrete in river slope protection. *Soil and Water Conservation in China* (中国水土保持), 2007 (6): 42-43
- [5] Wu Yifeng (吴义锋), Lü Xiwu (吕锡武). Pretreatment of eutrophic source water by ecological concrete media. *Water Purification Technology* (净水技术), 2007, 26 (4): 17-20
- [6] Wu Yifeng (吴义锋), Lü Xiwu (吕锡武), Wang Xingang (王新刚), Chen Yanghui (陈杨辉). Research on ecological properties of four eco-concrete embankment types for ecological slope protection. *Safety and Environmental Engineering* (安全与环境工程), 2007, 13 (1): 9-12
- [7] Wu Yifeng (吴义锋), Lü Xiwu (吕锡武), Chen Yanghui (陈杨辉), Wang Xingang (王新刚). Pilot-scale study on river water quality improvement using ecological concrete embankment. *China Water and Wastewater* (中国给水排水), 2007, 23 (11): 32-36
- [8] Rogers B F, Tate III R L. Temporal analysis of the soil microbial community along a toposequence in Pineland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33 (10): 1389-1401
- [9] Yao Huaiying (姚槐应), Huang Changyong (黄昌勇). Soil Microbial Ecology and Experimental Technique (土壤微生物生态学及其实验技术). Beijing: Science Press, 2006: 252-266
- [10] Bai Yu (白宇), Zhang Jie (张杰), Chen Shufang (陈淑芳), Yan Lilong (阎立龙). Biomass and microbial activity in backwashed biofilter. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2004, 55 (10): 1690-1695
- [11] Ji Rongping (纪荣平). Study on effect and mechanism of artificial media on the improvement of Taihu Lake water quality [D]. Nanjing: Southeast University, 2005
- [12] Chu H Y, Lin X G, Fujii T, Morimoto S, Yagi K, Hu J L, Zhang J B. Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 2971-2976
- [13] Carreira J A, Vinegla B, García-Ruiz R, Ochoa V, Hinojosa M B. Recovery of biochemical functionality in polluted flood plain soils: the role of microhabitat differentiation through revegetation and rehabilitation of the river dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40: 2088-2097
- [14] Huang Daizhong (黄代中), Xiao Wenjuan (肖文娟), Liu Yunbing (刘云兵), Liu Jingyuan (刘竟远), Zhou Yiyong (周易勇). Determination of dehydrogenase activity in sediment of shallow lakes and its ecological significance. *Journal of Lake Science* (湖泊科学), 2009, 21 (3): 345-350
- [15] Nie Zhiqiang (聂志强). Screen of high cellulase-producing fungi and the research on its enzymatic characteristics. *China Brewing* (中国酿造), 2009 (3): 81-83
- [16] Zhou Qiaohong (周巧红), Wu Zhenbin (吴振斌), Fu Guiping (付贵平), Cheng Shuiping (成水平), He Feng (贺锋). Temporal and spatial characteristics of substrate enzyme activities and bacteria physiological groups in constructed wetland. *Environment Science* (环境科学), 2005, 26 (2): 108-112