

生态护砌模拟河道对氮系污染物的去除特性

陈杨辉, 吕锡武, 吴义锋

(东南大学环境工程系, 南京 210096)

摘要: 分别应用生态混凝土预制球型砌块、板状砌块及 4 球联体砌块构建 3 条中试规模的模拟河道, 定量研究生态护砌河道对氮系污染物的去除特性, 并与“三面光”护砌模拟河道进行对比. 结果表明, 在自然条件下, 水力停留时间 2 d 时, 生态混凝土预制球型砌块护砌河道对黄浦江原水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN 的去除率分别为 83.6%、75.2%、37.1%、47.5%, 生态混凝土预制板状砌块护砌河道为 83.4%、53.0%、30.6%、40.4%, 生态混凝土预制 4 球联体砌块护砌河道为 88.1%、72.4%、33.0%、40.9%. 在相同的条件下, “三面光”护砌河道对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的去除率分别为 61.1%、9.1%, 而 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 由于受到 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化的影响, 浓度产生了累积, 分别增加了 7.4%、3.4%. 护砌方式对水中氮系污染物的去除影响显著, 生态护砌方式可在短期内有效去除水中氮系污染物, 故可作为河流等地表水体水质净化与修复的重要措施. 护砌结构孔隙率和植被覆盖率的提高有利于生态护砌河道对氮系污染物的去除.

关键词: 生态护砌; “三面光”护砌; 生态混凝土; 模拟河道; 氮系污染物; 去除特性

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2172-05

Removal of Nitrogen in Simulated Rivers Embanked by Ecological Concrete

CHEN Yang-hui, LÜ Xi-wu, WU Yi-feng

(Department of Environmental Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The removal of nitrogen was studied in four types of pilot-scale rivers. The embankment for rivers No. 1, 2 and 3 consisted of respectively spheriform ecological-concrete prefab-bricks, rectangular ecological-concrete prefab-bricks and square ecological-concrete prefab-bricks with 4 hemispheroids. The embankment for river No. 4 was made of concrete C25. The results show that the removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and TN of river 1 are 83.6%, 75.2%, 37.1% and 47.5% under hydraulic retention time of 2 days, 83.4%, 53.0%, 30.6% and 40.4% for river 2, 88.1%, 72.4%, 33.0% and 40.9% for river 3. Under the same condition, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN of river 4 decreases by 61.1%, 9.1%, while $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ increase by 7.4%, 3.4% due to the transformation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$. It indicates that ecological embankment rivers can effectively remove nitrogen. Besides, the addition of pore rate in embankment structure and more rate of plant coverage are good for the removal of nitrogen in ecological embankment rivers.

Key words: ecological embankment; hard embankment; ecological concrete; simulated rivers; nitrogen; removal

河流岸坡是河流生态系统的重要组成部分^[1], 是河流水体与近岸陆地之间物质和能量的交换纽带^[2,3], 异质性高^[4,5], 生物多样性好^[6], 对保持河流生态平衡起到重要作用^[7,8]. 传统的河道护砌方式忽略了岸坡的生态作用, 采用普通混凝土或浆砌块石, 将水体封闭在河道中, 切断了水体与近岸陆地之间的联系, 破坏了河道生态功能, 水体自净能力下降, 河流生态修复能力脆弱甚至崩溃, 河流对外部污染负荷的抗冲击能力削弱甚至失去, 一旦污染物进入河道即造成严重污染.

随着人们生态意识的加强, 基于恢复河岸生态功能的生态护砌技术得到广泛关注, 已在其内涵^[9~11]、功能^[12]、环境效益^[13,14]等方面形成较为成熟的理念. 生态护砌技术应用的关键是开发出类似土壤透水性且满足一定强度的生态护砌材料, 相关学者已就其结构形式^[15~17]、力学性能^[18,19]等方面做了大量研究工作. 生态混凝土是使用特殊级配的集

料和胶凝材料, 在力学性能满足工程使用要求的同时, 形成蜂窝状结构, 实现其多孔且连续的特点, 具有良好的透水透气性, 用其作为护砌材料, 可以在保护河流岸坡安全与稳定的同时, 恢复河岸生态功能. 本研究构建了河流生态护砌中试实验模型, 在可控条件下定量研究生态护砌河道水体中氮系污染物的去除特性, 以为生态河道的构建提供科学依据和技术基础.

1 材料与方法

1.1 试验装置

河流生态护砌中试场地(图 1)位于上海市黄浦江原水厂临江泵站内. 4 条模拟河道结构相同, 均为

收稿日期: 2007-08-16; 修订日期: 2007-11-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601130); 江苏省科技厅社会发展项目(BS2004050)

作者简介: 陈杨辉(1983~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为河流生态修复技术, E-mail: yanghuichen123@163.com

环状构型,断面为梯形,上部宽 4.0 m,下部宽 1.0 m,外侧岸周长 54.70 m,内侧岸周长 29.56 m,河道深 1.0 m,岸坡坡度 1:1.5,设计工作水位 0.8 m,每条河道内均安装 1 个潜水式水流推进器,以模拟河流水体流动.

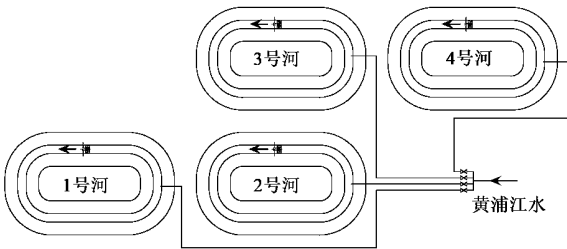


图 1 中试场地平面布置
Fig.1 Plan of pilot-scale system

1 号、2 号、3 号模拟河道分别采用不同构型的生态混凝土预制构件进行河床和岸坡的三面护砌,4 号模拟河道采用普通混凝土进行“三面光”护砌.

1 号模拟河道:生态混凝土预制单球砌块护砌.

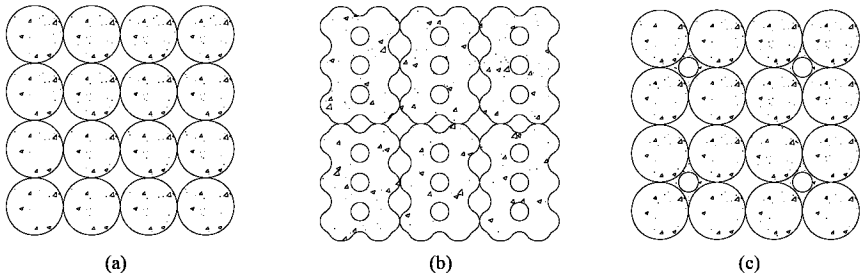


图 2 生态混凝土预制构件
Fig.2 Ecological-concrete prefabric-brick

1 号、2 号、3 号河道在砌块铺装后,就近挖取地表 20 cm 的土壤填充坡面的空隙,以诱导植物生根发芽,然后通水试运行 30 d 左右,使生态混凝土的释碱效应降低,河道岸坡的覆土密实,然后栽种植被.护坡上部喷播狗牙根、黑麦草等草本植被,下部栽种美人蕉和黄菖蒲等挺水植物,底部栽种苦草等沉水植物,以模拟自然岸坡的植物带结构.2006 年 6 月竣工后,绿化养护 2 个月,1 号、3 号河道岸坡基本被植物覆盖,2 号河道由于板状砌块的护砌面孔隙率低,植被覆盖率 70% 左右,3 条河道混凝土间隙中出现螃蟹、蟾蜍等动物,并有鸟类在此觅食,河道内呈现出良好的生态效应.

1.2 试验方法

单球直径 250 mm,内部分别沿 x 、 y 、 z 三维方向预留连接通道,并保留一定的偏心距以避免连接时在球体内部形成碰撞,单球之间用 $\phi 18$ mm 钢筋(需防锈蚀处理)进行连接,形成长度约 100 mm 的方孔[图 2(a)].护砌面连结为整体,稳定性好,孔隙率约 47%.

2 号模拟河道:生态混凝土预制板状砌块护砌.板状砌块的外形尺寸为 510 mm $\times$ 350 mm $\times$ 250 mm,在砌块中间预留了 3 个直径 80 mm 的圆柱形孔洞,组合护砌时,砌块之间也产生直径约为 100 mm 的孔洞[图 2(b)],砌块之间的连接缝也可生长植物.护砌面稳定,孔隙率约 22%.

3 号模拟河道:生态混凝土预制 4 球联体砌块护砌.砌块由上部 4 个半球体和下部 4 个圆台组成,中间预留了 1 个直径 80 mm 的圆柱形孔洞,半球直径 250 mm,砌块平面尺寸 500 mm $\times$ 500 mm,砌块之间通过预留的连接件连接为一体[图 2(c)].块体质量大,护砌面稳定,孔隙率约 31%.

4 号模拟河道:采用 C25 素混凝土进行“三面光”护砌,作为生态护砌河道的对比河道.

分别于 2006-12-01 ~ 2006-12-08 和 2007-04-06 ~ 2007-04-13 进行 2 个周期的水质试验.2 个周期的平均水温分别为 10.1℃ 和 15.6℃.河水在水流推进器的推动下循环流动,1 号、2 号、3 号河的流速约 0.26 m/s,4 号河流速约 0.40 m/s.取样采用时间阶梯法,第 1 d 内每 3 h 取样 1 次,第 2 d 内每 6 h 取样 1 次,第 3 d 内每 8 h 取样 1 次,以后的时间每 d 取样 2 次.试验原水取自黄浦江,初始水质及分析方法如下, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$:采用纳氏试剂分光光度法测定(1.12 ~ 1.30 mg/L); $\text{NO}_2^- \text{-N}$:采用 α -萘胺分光光度法测定(0.12 ~ 0.25 mg/L); $\text{NO}_3^- \text{-N}$:采用氨基磺酸紫外分光光度法测定(2.60 ~ 3.32 mg/L);TN:采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定(4.64 ~ 5.70 mg/L).

2 结果与分析

2.1 NH₄⁺-N 的去除

图3为各模拟河道对NH₄⁺-N的去除特性曲线.第1个试验周期,1号、2号、3号河中的NH₄⁺-N得到很好去除,水力停留时间2d时的去除率分别达到66.1%、55.6%、61.0%,水力停留时间4d时已去除充分;4号河中的NH₄⁺-N短期内无明显去除,水力

停留时间2d时的去除率仅为10.6%.第2个试验周期,1号、2号、3号河中的NH₄⁺-N去除较快,水力停留时间2d时的去除率分别达到83.6%、83.4%、88.1%;4号河中的NH₄⁺-N去除较慢,水力停留时间2d时的去除率为61.1%.以上表明,整个试验期内,特别是冬季试验期,1号、2号、3号河中的NH₄⁺-N去除效率要明显优于4号河道.

2.2 NO₂⁻-N 的去除

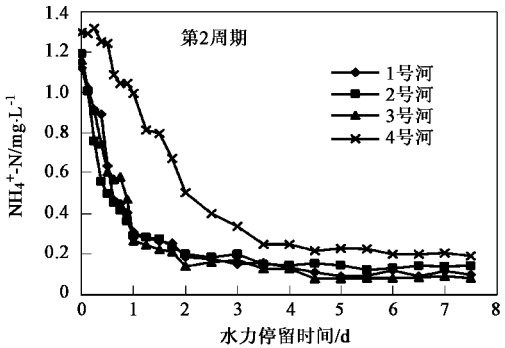
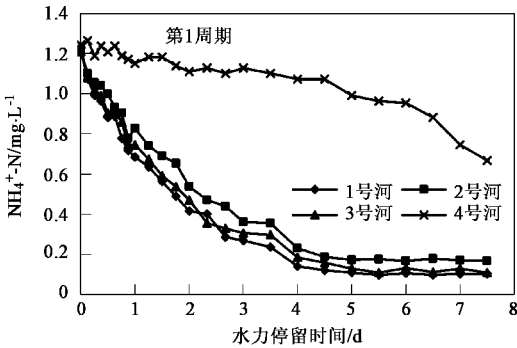


图3 各模拟河道对NH₄⁺-N的去除特性
Fig.3 Removal of NH₄⁺-N in simulated rivers

图4为各模拟河道对NO₂⁻-N的去除特性曲线.第1个试验周期,1号、2号、3号河中的NO₂⁻-N得到有效去除,水力停留时间2d时的去除率分别为82.5%、66.8%、77.1%,试验结束时均已完全去除;4号河中的NO₂⁻-N浓度一直处于波动状态,无明显去除,水力停留时间2d时的去除率仅为7.7%,试验结束时的去除率为9.2%;第2个试验周期,1号、2号、3号河中的NO₂⁻-N去除情况类似于前一周,水力停留时间2d时的去除率分别为75.2%、53.0%、72.4%;4号河中的NO₂⁻-N浓度受到NH₄⁺-N转化的影响,在水力停留时间0~2d内发生较大波

动,水力停留时间2d时浓度增加了7.4%,之后缓慢衰减,试验结束时的去除率为50.2%.以上表明,1号、2号、3号河中的NO₂⁻-N衰减速度快,去除率高,受季节变化的影响小,4号河中的NO₂⁻-N去除效率要远低于1号、2号、3号河道,并在去除过程中伴随较大波动.

2.3 NO₃⁻-N 的去除

图5为各模拟河道对NO₃⁻-N的去除特性曲线.第1个试验周期,温度较低,反硝化作用受到抑制,4条河中的NO₃⁻-N去除缓慢,并伴有小幅波动,试验结束时均无明显去除.第2个试验周期,1号、2号、3

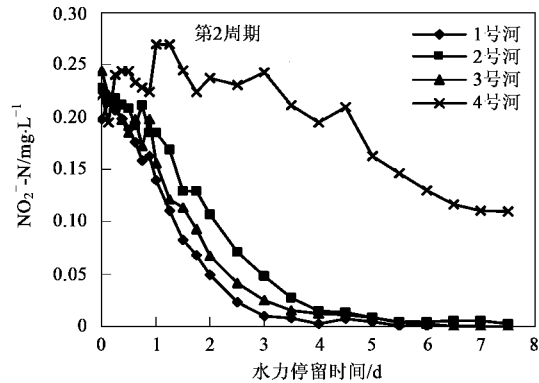
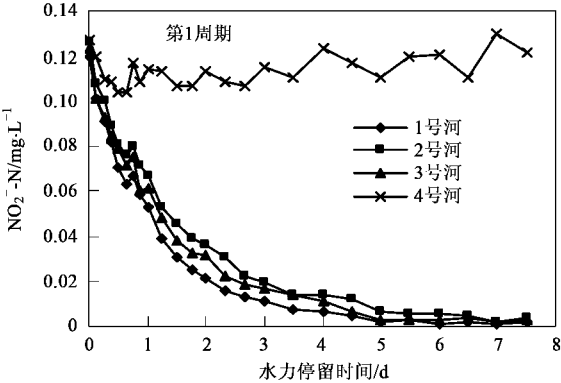


图4 各模拟河道对NO₂⁻-N的去除特性
Fig.4 Removal of NO₂⁻-N in simulated rivers

号河中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度在水力停留时间 0~2 d 内小幅波动,之后快速衰减,水力停留时间 2 d 时的去除率分别为 37.1%、30.6%、33.0%,试验结束时的去除率均达到了 97% 以上;4 号河中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除缓慢,试验前期由于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的转化, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 出

现了累积,水力停留时间 2 d 时浓度增加了 3.4%,试验结束时的去除率仅为 29.9%。以上表明,河道水体中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除情况受季节的影响较大,冬季试验期无明显去除,春季试验期去除较快,其中 1 号、2 号、3 号河道要远优于 4 号河道。

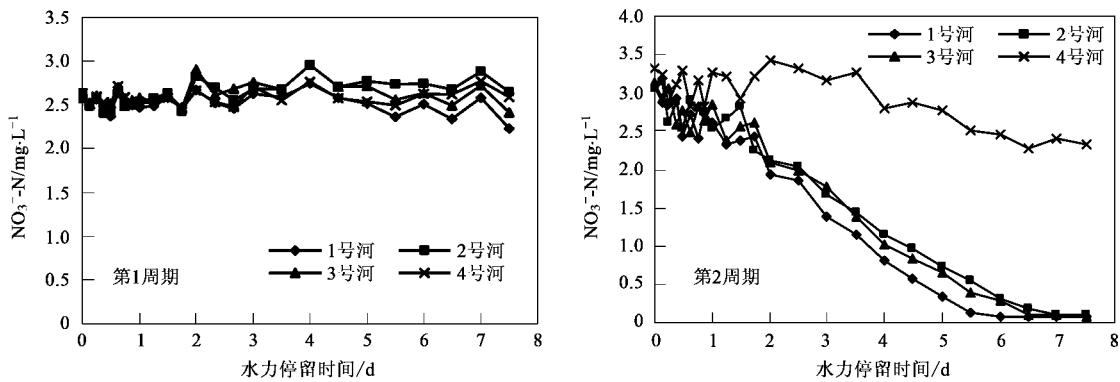


图 5 各模拟河道对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除特性

Fig.5 Removal of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in simulated rivers

2.4 TN 的去除

图 6 为各模拟河道对 TN 的去除特性曲线.第 1 个试验周期,水力停留时间 0.5 d 时,1 号、2 号、3 号、4 号河中的 TN 去除率分别为 17.7%、12.0%、22.4%、1.9%,水力停留时间 1 d 时,由于好氧有机营养微生物的内源呼吸作用导致其体内的氮向水中释放^[20],各河道水体中的 TN 浓度均有回升,1 号、2 号、3 号河的去除率分别减为 4.7%、10.7%、13.3%,4 号河则增加了 8.3%,之后,4 条河中的 TN 浓度均呈缓慢下降趋势,试验结束时的去除率分别为

28.2%、23.8%、37.7%、8.7%.第 2 个试验周期,1 号、2 号、3 号河中的 TN 快速衰减,水力停留时间 2 d 时的去除率分别达到 47.5%、40.4%、40.9%,试验结束时的去除率分别为 89.8%、88.3%、89.9%;4 号河中的 TN 衰减缓慢,水力停留时间 2 d 时的去除率为 9.1%,试验结束时的去除率仅为 39.1%.由图 5 和图 6 可看出,各河道水体的 TN 去除特性和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除特性类似,冬季试验期衰减缓慢,去除率低,春季试验期衰减快,去除率高,其中 1 号、2 号、3 号河道要远优于 4 号河道。

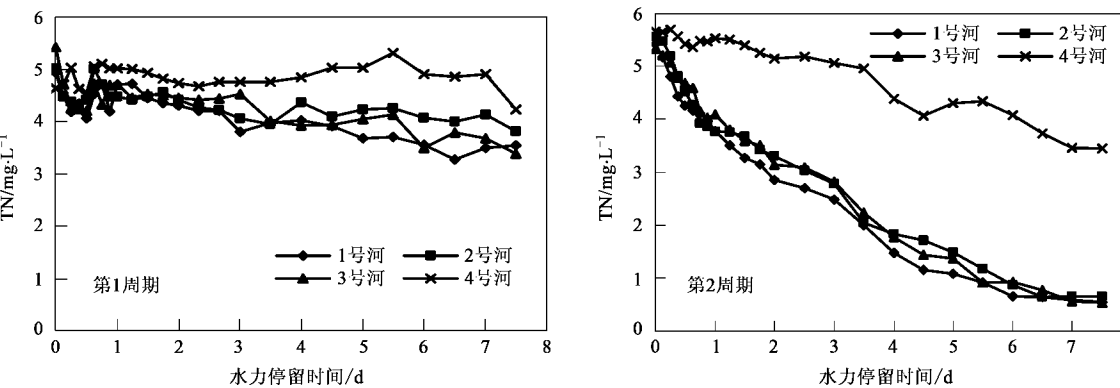


图 6 各模拟河道对 TN 的去除特性

Fig.6 Removal of TN in simulated rivers

3 讨论

生态混凝土护砌河道的最大特点是其连续多孔

的护砌结构,孔隙率可达 20%~30%,透水系数则可达 1.5~3.0 cm/s,因而具有良好的透水透气性能,保证了河流生态系统和陆地生态系统之间的物

质流、能量流、信息流的畅通,为河岸带植物的生长、动物和微生物的栖息繁衍提供了生境,同时,多孔结构增大了混凝土的比表面积,具有很强的吸附性能,为微生物的富集提供了良好条件。

1号、2号、3号模拟河道成功构建了稳定的水生态系统,恢复了天然河道的水生物链,提高了水体自净能力,故能有效去除水中的氮系污染物,特别是对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 能在短期内实现快速去除,对水力停留时间较短的天然河水的水质改善具有实用意义。2号模拟河道护砌面孔隙率和岸坡植被覆盖率要低于1号、3号河道,生态效应略差,氮系污染物的去除率要略低于1号、3号河道。4号模拟河道采用“三面光”护砌,将水体封闭在河道中,破坏了河流生态系统,水体自净能力较弱,水中的氮系污染物在短期内无明显去除。

1号、2号、3号模拟河道由于其效法自然河道的特点,河流生态系统的自我调节和适应能力较强,硝化作用较为稳定,故2个试验周期的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除特性差异不大,均能有效去除;4号模拟河道由于其河流生态系统遭到破坏,抵抗环境变化的能力较差,一旦环境因素发生改变,微生物作用就会受到很大影响,故2个试验周期的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除特性变化较大,冬季试验期的去除率要远低于春季试验期。

4 结论

(1)在上海市春季自然条件下,水力停留时间2d时,生态混凝土预制单球砌块护砌的1号河道对黄浦江原水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN的去除率分别为83.6%、75.2%、37.1%、47.5%,生态混凝土预制板状砌块护砌的2号河道为83.4%、53.0%、30.6%、40.4%,生态混凝土预制4球联体砌块护砌的3号河道为88.1%、72.4%、33.0%、40.9%。在相同的条件下,“三面光”护砌的4号河道对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的去除率分别为61.1%、9.1%,而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 由于受到 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化的影响,浓度产生了累积,分别增加了7.4%、3.4%。护砌方式对水中氮系污染物的去除影响显著,生态护砌方式可在短期内有效去除水中氮系污染物,故可作为河流等地表水体水质净化与修复的重要措施。

(2)1号、3号河道对氮系污染物的去除略优于

2号河道,说明护砌结构孔隙率和植被覆盖率的提高有利于生态护砌河道对氮系污染物的去除,实际应用时应根据岸坡状况及护砌要求选用合适的护砌构型。

参考文献:

- [1] 赵彦伟,杨志峰.城市河流生态系统健康评价初探[J].水科学进展,2005,16(3): 349-354.
- [2] Mander U, Kuusemets V, Krista L, et al. Efficiency and dimensioning of riparian buffer zones in agricultural catchments[J]. Ecological Engineering, 1997, 8: 299-324.
- [3] 张建春,彭补拙.河岸带及其生态重建研究[J].地理研究, 2002, 21(3): 373-383.
- [4] Jungwirth M, Muhar S, Schmutz S. Re-establishing and assessing ecological integrity in riverine landscapes[J]. Freshwater Biology, 2002, 47: 867-887.
- [5] 邓红兵,王青春,王庆礼,等.河岸植被缓冲带与河岸带管理[J].应用生态学报,2001,12(6): 951-953.
- [6] Burger J. Landscapes, tourism, and conservation [J]. Science of the Total Environment, 2000, 249: 39-49.
- [7] McKone P D. Streams and their corridors-functions and values [J]. Journal of Management in Engineering, 2000, 5: 28-29.
- [8] 张建春,彭补拙.河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建[J].生态学报,2003,23(1): 56-63.
- [9] Morgan R P C, Rickson R J. Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach [M]. London: E&FN SPON, 1995. 274.
- [10] 何衢,陈德春,魏文白.生态护坡及其在城市河道整治中的应用[J].水资源保护,2005,21(6): 56-58.
- [11] 汪洋,周明耀,赵瑞龙,等.城镇河道生态护坡技术的研究现状与展望[J].中国水土保持科学,2005,3(1): 88-92.
- [12] 陈小华,李小平.河道生态护坡关键技术及其生态功能[J].生态学报,2007,27(3): 1168-1176.
- [13] 封福纪,杨海军,于智勇.受损河岸生态系统近自然修复实验的初步研究[J].东北师大学报自然科学版,2004,36(1): 101-106.
- [14] 陈小华,李小平,张利权.河道生态护坡技术的水土保持效益研究[J].水土保持学报,2007,21(2): 32-35.
- [15] 夏继红,严忠民.国内外城市河道生态型护岸研究现状及发展趋势[J].中国水土保持,2004, (3): 20-21.
- [16] 季永兴,刘水芹,张勇.城市河道整治中生态型护坡结构探讨[J].水土保持研究,2001,8(4): 25-28.
- [17] 陈小华,李小平.农业流域的河流生态护坡技术研究[J].农业环境科学学报,2006,25(增刊): 140-145.
- [18] 张季如,夏银飞,龚友丽.生态护坡材料本构关系的研究[J].武汉理工大学学报,2003,25(8): 36-38.
- [19] 罗仁安,樊建超,冯辉荣,等.生态混凝土护坡与边坡稳定性[J].土工基础,2005,19(5): 48-51.
- [20] 王亚娥,李富生,汤浅晶,等.浮游微生物作用下河流水系氮的变化[J].中国给水排水,2006,22(1): 46-49.