

河渠岸坡特定生态系统的脱氮效率及影响因素

吴义锋, 吕锡武, 仲兆平, 史静, 徐微

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京, 210096)

摘要: 采用多孔混凝土为河渠生态护岸载体, 联合微生物、绿色植物等生态因子构建模拟河渠岸坡特定生态系统, 以研究该系统的脱氮效果及其去除机制。研究表明: 岸坡特定生态系统能强化河渠中氮类污染物的去除效果, 且脱氮过程符合一级反应动力学关系; 具有完善特定岸坡生态系统的实验渠, 停留时间为 7 d 时氨氮去除率达到 85%~90%; 总氮(TN)的去除效果受季节影响, 在植物生长季节(4~8 月份), 7 d 的停留时间内 TN 去除率达到 90%, 脱氮反应动力学常数为 $0.331\sim 0.353\text{ d}^{-1}$, 主要是微生物反硝化和植物吸收脱氮, 脱氮贡献率为 85%左右; 在冬季(12 月份), 当停留时间为 7 d 时, TN 去除率仅为 36.4%, 反应动力学常数为 0.064 d^{-1} , 微生物反硝脱氮的贡献率为 80.9%, 而植物吸收的脱氮贡献率仅为 4.3%; 硬质化岸坡的空白渠中, TN 去除率低于 72%, 脱氮反应动力学常数 K 最大值仅为 0.191 d^{-1} ; 在河渠岸坡特定生态岸坡中, 反硝化细菌群集数量的时空分布特性与坡面基质反硝化潜力的时空分布特性基本类似, 具有明显的根际效应, 水生植物带是系统脱氮的主要功能区。

关键词: 岸坡特定生态系统; 多孔混凝土; 脱氮; 影响因素

中图分类号: X171.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2011)02-0539-07

Influencing factors of nitrogen removal from stream water using special riverine ecosystem

WU Yi-feng, LU Xi-wu, ZHONG Zhao-ping, SHI Jing, XU Wei

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

Abstract: An experimental model of streams with special riverine ecosystem was constructed to evaluate nitrogen removal from stream and its influencing factors using ecological embankments of porous concrete, microorganism and hydrophytes. The results show that the stream with the benefit of mature special riverine ecosystem gives the highest capacity of nitrogen removal, and the process of nitrogen removal fits first-order reaction kinetics, the reaction speed constant increases with the increase of temperature, and it is $0.331\sim 0.353\text{ d}^{-1}$ during vegetative season but 0.064 d^{-1} in winter. The ammonia-nitrogen removal is 85%~90% within 7 d retention time, and the removal efficiency of total removal is affected by seasonal factors, which can reach 90% during vegetative season, denitrification and plant uptake are both dominate in the process of nitrogen removal, which can contribute 85% of total nitrogen removal. When it is in winter, the removal rate of total nitrogen from the stream reduces to 36.4%, and only denitrification plays the key role in the process of nitrogen removal which contributes 80.9% of total nitrogen removal. The spatial-temporal characteristics of denitrifying bacteria have the same distribution as denitrification potential of substrate on ecological embankments, which all have an accumulated ecological effect on the hydrophyte rhizosphere microbes' activities. In contrast, in the stream with hard embankments, the removal rate of total nitrogen is bellow 72% all the year around, and the maximum kinetic constant is only 0.191 d^{-1} . It is evident that special riverine ecosystem via ecological embankments of porous concrete and hydrophytes can restore and complete the ecology system significantly.

Key words: special riverine ecosystem; porous concrete; nitrogen removal; influencing factors

收稿日期: 2009-11-09; 修回日期: 2010-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009027); 浙江省水利厅科技计划项目(RB0914)

通信作者: 吴义锋(1975-), 男, 安徽萧县人, 博士后, 从事水环境的生态修复及生态工程技术研究; 电话: 025-83795618; E-mail: shinfun@seu.edu.cn

长期以来,人们对河渠岸坡的水利工程所采取的措施仅局限于水土保持等功能需求,通常采取硬质化的护岸方式切断水域与陆地之间的物质、能量和信息交流,这给河渠的生态环境带来了严重问题。尽管河流污染控制已取得一些突破性成果,外源污染负荷在一定程度上被拦截和控制,但水生生态环境并未得到有效改善,使人们认识到依靠单纯的截污、控污并不能有效改善水体水质和修复破损的生态系统,必须采取生物生态型等工程技术对其进行原位性治理和修复,在不影响水体使用功能的前提下,改变传统硬化岸坡为类似天然的生态型堤岸^[1-2]。岸坡是生态系统中能量、物质、信息交换和构造水体景观的通道,也是陆域与水域中生态系统的重要生境和载体。影响岸坡生态恢复的关键因素是生物物种及其生长介质的丧失^[3-4],研发具有类似天然岸坡生态功能并具有一定力学强度的环保型材料对于修复水生生态具有重要意义。多孔混凝土也称为生态混凝土(Ecological concrete)、环境友好型混凝土(Environment-friendly concrete),是采用特殊级配的骨料和胶凝材料,其力学性能满足工程使用要求;其结构呈蜂窝状,内部具有连续贯通的孔隙,绿色植物能以此为基质茁壮生长,并能有效降低环境污染负荷^[5-6]。采用多孔混凝土为河渠生态护岸载体,可为微生物的富集提供基质条件,绿色植物也能在其中生长,进而营造生物多样性的生境,修复和完善水生生态系统^[7-8]。然而,多孔混凝土生态护岸的研究应用还存在一定的问题,如:河流的流动特性使得岸坡与水体的交互时间短,水质改善效果不明显,而且在研究应用阶段,受经济等因素限制,尚未建设较大规模的生态护岸作为研究模型,这也是导致目前多孔混凝土生态护岸的研究多集中于功能上的定性描述,而缺乏定量性研究成果的主要原因。在此,本文作者针对河渠硬化导致的环境生态问题,采用多孔混凝土为生态护岸载体,联合微生物和绿色植物等生态要素构建岸坡特定生态系统,研究河渠岸坡特定生态系统的脱氮效果及其机理,以便为多孔混凝土生态护岸工程模式和水体污染控制提供实用技术和方法借鉴。

1 实验模型与方法

1.1 岸坡特定生态系统构建

于上海市黄浦江原水厂临江泵站内建设中试模型,该模型由人工开挖的环形实验河渠构成,环形河渠可模拟自然弯曲和水流多样性的特征,同时增加了

模型的可控制性。河渠外侧岸周长为 54.7 m,内侧岸周长为 29.5 m,断面为梯形,底宽为 1 m,上宽为 4 m,岸坡坡度为 1.0:1.5,工作水深为 0.8 m。渠内设水流推进器,以模拟河水流动。1 号为实验渠,其岸坡采用多孔混凝土为生态护岸基质,以微生物和绿色植物为生命主体构建岸坡特定生态系统;2 号为硬化岸坡的实验参照渠即空白渠,见图 1。

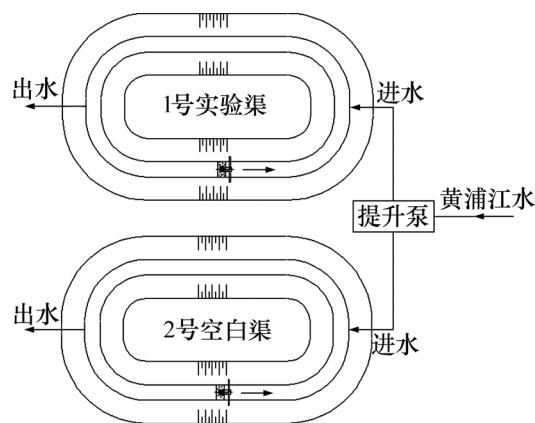
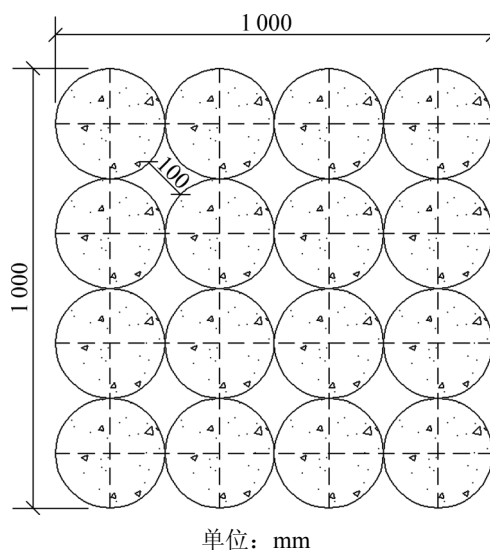


图 1 实验模型示意图

Fig.1 Diagram of pilot system

实验渠岸坡特定生态系统的构建方法为:采用多孔混凝土预制球铺装护砌,球直径为 250 mm,内部预留平面二维方向的通孔,球成型后用经防锈处理的直径为 18 mm 钢筋进行串接固定,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,护砌面空隙率约 47%,见图 2。预制球铺装后,就近挖取地表层 20 cm 的土壤填充护砌面的空隙,以诱导植物生根发芽。覆土后实验模型反复通水 30 d 左右,



单位: mm

图 2 多孔混凝土预制球及组合图

Fig.2 Prefab spherical bricks of porous concrete

以充分稀释多孔混凝土的碱, 然后在坡面种植植被。坡面上以选种须根系的植物类型为主, 并兼顾景观效应。沿坡面从下往上依次种植枯草、菖蒲、美人蕉、狗牙根、黑麦草等, 植物带结构依次为沉水植物、挺水植物、草本植被, 实现了坡面上水生生态向陆生生态的自然过渡。岸坡特定生态系统主要通过生态坡面上的绿色植物来改善水质和修复生态, 并以多孔混凝土载体和坡面基质富集微生物进一步强化系统的稳定性。

1.2 实验条件

岸坡特定生态系统过 1 a 多的运行后, 河渠岸坡植物旺盛, 多孔混凝土预制球的间隙中出现了河蟹、蟾蜍等动物, 岸坡特定生态系统已趋于完善。实验原水取自黄浦江, 当渠中水深达到 0.8 m 时, 关闭进出水阀, 同时启动水流推进器, 水在渠中循环流动, 实验周期为 7 d。黄浦江原水水质见表 1, 硝态氮平均占氮类污染物的 47%。分别于 2008 年 4 月份、8 月份和 12 月份开展 3 个周期的实验研究, 以考察不同季节河渠岸坡特定生态系统对水中氮类污染物的去除效果及其影响因素。

表 1 黄浦江原水水质

Table 1 Raw water quality of Huangpu River

$\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$					pH
COD _{Mn}	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	
5.86~	0.64~	0.045~	0.98~	3.73~	7.31~
7.08	2.22	0.223	3.47	6.72	7.68
(6.53)	(1.12)	(0.122)	(2.41)	(5.12)	(7.52)

注: 括号中的数值为平均值。

1.3 实验分析方法

总氮(TN)和氨氮分别采用过硫酸钾消解紫外分光光度法和纳氏试剂分光光度法测定^[9]。

1.3.1 岸坡特定生态系统的基质采集

采用 DN50 的 PVC 管一端切割成 45°斜面的自制基质采集器, 插入多孔混凝土预制球的间隙, 采集深度为 3~5 cm 的基质。

1.3.2 反硝化潜力测定^[10]

将采集的新鲜基质 250 g 置入容器, 加入去离子水, 先用纯氮曝气, 待溶解氧(DO)接近于 0 时, 加入 NaNO₃ 溶液, 轻轻搅拌, 使水中的 NO₃⁻-N 浓度与黄浦江原水中的浓度类似, 将液体石蜡倾倒与水面形成 5 mm 的液体石蜡膜以隔离外界空气, 定时取水样测定 NO₃⁻-N 浓度, 换算为单位质量坡面基质在单位时

间内对 NO₃⁻-N 的削减量; 反硝化细菌采用反硝化细菌培养基对一系列的基质悬液培养后, 应用最大可能数法(MPN)测定^[10]。

1.3.3 基质悬液制备

称取 10 g 新采集基质加入盛有 100 mL 无菌水的三角锥瓶中, 振荡混匀至土壤颗粒完全分解后, 吸取 1 mL 基质悬液进行系列稀释。

基质反硝化潜力和反硝化细菌群集数量的监测断面设置于环形河道长直线段的中部, 由上而下设 4 个取样点, 分别标记为 a, b, c 和 d, 见图 3。a 点长期位于水面以上, b 点位于坡面上上部的水位变动区, c 点位于坡面中下部, d 点位于岸坡与河床交界处。a 点至坡顶为植物带草本植物带, a~c 点为植物带挺水植物带, b 点位于挺水植物带的中部, c~d 点对应沉水植物带。

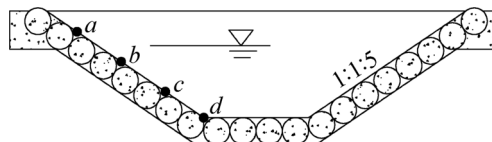


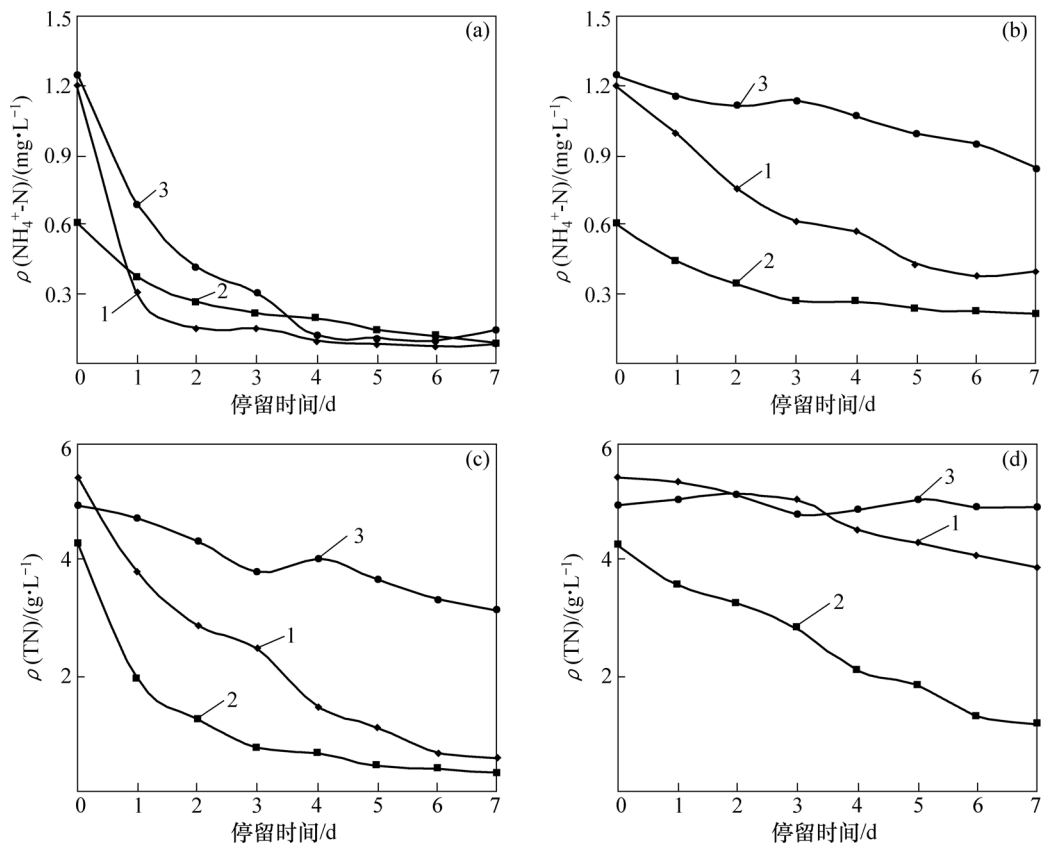
图 3 生态护砌面监测位置

Fig.3 Sampling point on ecological embankments

2 结果与分析

2.1 氨氮和 TN 的去除效果

实验河渠中氮类污染物的浓度变化与停留时间 T_R 的关系见图 4, 脱氮反应动力学常数模拟结果见表 2。从图 4 可见: 实验渠(1 号)具有完善的岸坡特定生态系统, 水中氮类污染物去除效果显著; 在植物生长旺盛季节(4 月份、8 月份)的 2 个周期内, 当 T_R 为 3 d 时, 氨氮和 TN 的去除率超过 54%, T_R 为 7 d 时去除率均达到 85%以上, 此时, 水中氨氮质量浓度低于 0.1 mg/L, TN 质量浓度低于 0.6 mg/L; 冬季时(12 月份), 河渠岸坡护砌面上的挺水植物菖蒲、美人蕉枯萎被收割, 仅生长越冬植物黑麦草, 植物量减少, TN 的去除率大幅度降低, T_R 为 3 d 时去除率仅为 22.8%, 7 d 时的去除率仅增加至 36.4%, 可见岸坡特定生态系统中植物因素在一定程度上决定着河渠的脱氮效果。另外, 实验渠中, 溶解氧质量浓度为 8.0 mg/L 左右, 氨氮在好氧条件下被氨化细菌转化为硝态氮, 因此, 氨氮的去除率高且不受季节影响, 而 TN 去除率受季节交替的影响显著。硬质护砌的空白渠(2 号)中氮类污染物的去除过程与实验渠的去除效果差别较大, 在 4 月



(a) $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$, 实验渠; (b) $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$, 空白渠; (c) $\rho(\text{TN})$, 实验渠; (d) $\rho(\text{TN})$, 空白渠;
1—4 月份; 2—8 月份; 3—12 月份

图 4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度与停留时间的关系

Fig.4 Relationship between total nitrogen and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration and retention time

表 2 脱氮反应动力学常数模拟结果

Table 2 Simulated reaction kinetic constant of denitrification

河渠类型	4 月份		8 月份		12 月份	
	动力学常数 K/d^{-1}	相关系数 R^2	动力学常数 K/d^{-1}	相关系数 R^2	动力学常数 K/d^{-1}	相关系数 R^2
实验渠	0.331	0.986	0.353	0.941	0.064	0.952
空白渠	0.052	0.962	0.191	0.979	0.002	0.045

份和 8 月份的 2 个实验周期内,当 T_R 为 3 d 时,氨氮、TN 去除率均低于 33%;随着 T_R 延长,渠中滋生了刚毛藻等浮游藻类促进了氮类污染物的去除效果,8 月份时 TN 去除率达到 72.0%,然而冬季时(12 月份),气温低而水中藻类生物量少, T_R 为 7 d 时氨氮去除率仅为 31.7%,TN 几乎无去除效果。上述表明岸坡特定生态系统能够强化河渠中氮类污染物的去除能力。

岸坡特定生态系统是以多孔混凝土为生态护岸载体,联合坡面基质富集的微生物及绿色植物协同作用。氮类污染物去除机理是多样的,包括氨挥发、硝化—反硝化、植物摄取以及基质吸附等,其中主要途径是微生物的硝化—反硝化以及植物摄取,因此, T_R 越长,

脱氮效果越明显。实验渠脱氮效果明显优于空白渠的脱氮效果的原因可归纳为:

(1) 多孔混凝土本身具备连续贯通的孔隙为绿色植物提供了类似土壤的生长载体,孔隙的覆土基质富集了各类群微生物。

(2) 坡面植被以须根系植物为主,根系巨大的比表面积具有明显的根际效应,附着大量的微生物,同时,植物对各种形态氮尤其是氨态氮具有较强的吸收能力。

(3) 岸坡特定生态系统中不同坡位的功能优势互补,植物根系附近形成有利于硝化作用的好氧区,而坡面下部远离植物根系的厌氧区的基质内含有大量的

碳源, 提供了反硝化条件。

2.2 脱氮动力学模拟

根据实验河渠的水力学特征以及生化需氧量(BOD)和 TN 的去除服从一级反应动力学原理^[11], 即 TN 去除动力学符合以下动力学模型:

$$\rho = \rho_0 \exp(-Kt) \quad (1)$$

式中: ρ 为 TN 质量浓度, mg/L; ρ_0 为 TN 初始质量浓度, mg/L; K 为反应动力学常数, d^{-1} ; t 为停留时间, d。

忽略水量损失, 总氮去除率可表示为:

$$\eta = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} = 1 - \exp(-Kt) \quad (2)$$

式中: η 为去除率。将式(2)两边取对数, 得:

$$-\ln(1 - \eta) = Kt \quad (3)$$

式(3)在坐标系中为1条过原点的直线, 以 $-\ln(1 - \eta)$ 为纵坐标, 停留时间 t 为横坐标, 斜率即为动力学常数 K , 计算结果见表2。实验渠(1号)的脱氮反应动力学常数 K 与岸坡特定生态系统所处的季节因素有关, 植物生长季节(4~8月份), 护砌面植物量大, 实验渠脱氮反应动力学常数为 $0.331 \sim 0.353 d^{-1}$, 而冬季时(12月份)水生植物枯萎、被收割, 反应动力学常数仅为 $0.064 d^{-1}$ 。空白渠(2号)的脱氮反应动力学常数 K 值远比实验渠的 K 小, 并受季节影响; 8月份时随 T_R 的延长, 渠内滋生了大量的浮游生物, 提高了氮类污染物的去除效果, 动力学常数为 $0.191 d^{-1}$; 4月份和12月份时空白渠脱氮效果较差, 反应动力学常数仅分别为 $0.052 d^{-1}$ 和 $0.002 d^{-1}$ 。

3 脱氮的影响因素与机理

由于实验模型为封闭的模拟河渠, 氮类污染物去除途径主要包括微生物反硝化、植物吸收、多孔混凝土及填充基质吸附和氨氮挥发。文献[12]表明: 在湿地系统中, 当 pH 小于 8.0 时, 氨挥发潜力较小; 当 pH 大于 9.3 以及氨和铵离子的物质的量比为 1:1 时, 氨氮挥发才变得显著^[12]。多孔混凝土在生产过程中通常掺加一定的碱性缓释剂, 即使在封闭的实验模型中, $T_R=7 d$ 时水体 pH 也不超过 8.5, 通过氨挥发途径的脱氮量较小。介质吸附主要对还原态氨氮而言, 且吸附过程是快速和可逆的, 但以基质阳离子发生铵离子交换一般不认为是氨氮去除的结果^[13]。另外, 用于构造岸坡特定生态系统的载体为多孔混凝土, 其构造材料如砾石、水泥等通常是惰性的, 并不能提供吸附过程

所需要的大量活性点位, 通过介质吸附来完成脱氮也可忽略不计。综上所述, 岸坡特定生态系统的脱氮过程主要通过微生物反硝化和植物吸收来完成。

3.1 生态岸坡反硝化细菌富集特征和反硝化潜力

反硝化细菌属于异养型微生物, 利用亚硝酸盐、氨氮作氮源, 有机质作碳源, 使硝酸盐逐步转化为 NO , N_2O 和 N_2 , 从而完成脱氮过程。岸坡特定生态系统不同坡位的基质由于底物浓度、含氧量、pH、氧化还原电位(ORP)等存在差异, 生态护砌面的反硝化细菌群集数量也相应存在空间差别, 结果见表3。水植物带的 b 点和 c 点反硝化细菌群集数量明显比 a 点和 d 点的高, 但差别不大, 属同一数量级, 反硝化细菌并没有因为 d 点水深增加或 DO 偏低而发生显著变化, 表明特定生态岸坡上反硝化作用的空间差别较小。这主要是因为基质采集区深度为 3~5 cm, 为植物根际区, 氧的含量并不是影响坡面基质富集的首要因素; 另外, a 点暴露于空气中, 是草本植被生长区域, 植物根系区存在还原性的微环境, 富集了一定数量的反硝化细菌。可见: 岸坡特定生态系统的坡面基质存在全方位的反硝化潜力。

岸坡特定生态系统基质的反硝化潜力时空分布见表3。不同点位的反硝化潜力在不同季节具有一定的共性, 挺水植物生长带的 b 点和 c 点基质的反硝化潜力较大, 坡面上部 a 点、坡底 d 点基质的反硝化潜力则较小。生态坡面的反硝化潜力的分布与反硝化细菌的分布特征基本一致, 说明生态坡面上的反硝化细菌群集特性以及基质的反硝化潜力都具有明显的根际效益。在好氧和厌氧同时起作用以及碳源不受限制的情况下, 岸坡特定生态系统的生态坡面具有较强的反硝化潜力, 有利于微生物反硝化脱氮过程, 同时, 也证明了岸坡特定生态系统对微污染水体进行水质净化和生态修复时, 反硝化作用并非是系统脱氮的限制步骤。

3.2 植物吸收的脱氮作用

植物在氮类污染物的迁移和转化过程中发挥着重要功能, 可以直接吸收水体中的 NH_3-N 和 NO_3^-N 合成自身物质。植物在生长过程中, 根系分泌有机物, 可为微生物除磷脱氮作用的发生补充碳源, 而根系泌氧作用又可以在根系形成好氧或兼氧的微环境, 有利于脱氮过程的完成^[14]。水生植物是岸坡特定生态系统的重要组成部分, 采用生态混凝土进行生态护坡后, 水生植物在特定生态系统的载体中生长良好, 提高了系统内绿色植物的生物量, 从而强化了系统中氮类污染物的去除。在实验渠的岸坡特定生态系统中, 草本植被的种植面积为 $63.2 m^2$, 夏秋季主要种植狗牙根, 冬春季为黑麦草, 挺水植物 1 a 后的成活率达到 90%

表 3 实验渠岸坡特定生态系的脱氮因素

Table 3 Influencing factors of nitrogen removal on ecological embankments

参数	4 月份				8 月份				12 月份			
	a 点	b 点	c 点	d 点	a 点	b 点	c 点	d 点	a 点	b 点	c 点	d 点
反硝化细菌/(10 ³ 个·g ⁻¹)	1.05	4.5	1.8	1.1	3.0	9.5	6.5	1.2	1.1	3.0	0.25	0.65
反硝化潜力/(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.16	2.12	1.73	0.72	0.27	2.63	1.76	0.31	0.42	0.85	0.16	0.37

表 4 实验渠中氮类污染物削减量估算

Table 4 Estimated amount of nitrogen removal from stream

实验时间	削减总量/g	反硝化作用削减		植物吸收削减		其他途径削减	
		削减量/g	贡献率/%	削减量/g	贡献率/%	削减量/g	贡献率/%
4 月份	358.56	141.04	39.3	169.55	47.2	47.97	13.5
8 月份	292.75	148.22	50.6	133.28	45.5	11.25	3.9
12 月份	133.01	107.57	80.9	5.72	4.3	19.69	14.8

以上,美人蕉、菖蒲呈簇生长,每簇 1~5 株,其中美人蕉 600 余簇,菖蒲 200 余簇;苦草等沉水植物受黄浦江浊度高的影响而生长不明显,岸坡特定生态系统中立体性的植物结构有利于水中污染物的去除。

3.3 实验渠中氮类污染物的去除机制

实验渠容纳水量为 74.10 m³,忽略实验周期内的水量损失,由初始 TN 质量浓度和实验周期末的 TN 质量浓度,可计算实验河渠中氮的总削减量。微生物反硝化作用的氮削减量由岸坡特定生态系统基质的反硝化潜力与生态护岸面积计算;植物吸收的氮削减量通过在试验周期内采集典型植物,由植株体内氮素含量^[15]与植物净生长量计算;削减总量扣除岸坡特定生态系统中的反硝化脱氮量和植物吸收的脱氮量,即为其他途径如底泥拦截、沉积等去除量,计算结果见表 4。从表 4 可见:在植物生长季节,实验渠脱氮过程主要由反硝化脱氮和植物吸收完成;而在冬季时,护砌面植物量较小,实验渠主要通过反硝化脱氮,其脱氮贡献率达到 80.9%,而植物吸收的贡献率仅为 4.3%。由于实验过程受多种因素影响,植物吸收的氮类来源于水、空气、基质等,植物脱氮的贡献率估算值有所偏大。因此,多孔混凝土作为河渠的生态护岸载体,其内部连续贯通的孔隙和巨大的比表面积为微生物的富集提供了载体,同时,也可作为绿色植物生长的基质,构建的岸坡特定生态系统提高了河流自净能力,能修复其生态环境。

4 结论

(1) 实验渠岸坡特定生态系统能够强化水中氮类

污染物的去除效果。停留时间 T_R 为 7 d 时氨氮去除率达到 85%~90%;TN 去除率受季节影响显著,植物生长季节去除速率较快, T_R 为 7 d 时,TN 去除率也达到 90%左右;而在低温季节, T_R 为 7 d 时,去除率仅为 36.4%。对于硬质化的空白渠,TN 去除率远小于实验渠的去除率,脱氮速率与水中滋生的藻类生物量有关,气温较高时水中易滋生藻类, T_R 为 7 d 时,TN 去除率为 72%,其他季节时,去除率低于 28%。

(2) 以多孔混凝土为生态护岸载体构建的岸坡特定生态系统对河渠中氮类污染物去除率与停留时间呈正相关,脱氮过程符合一级反应动力学关系,反应动力学常数 K 受季节影响,植物生长季节时反应动力学常数为 0.331~0.353 d⁻¹,冬季时仅为 0.064 d⁻¹。硬化空白渠的最大脱氮反应动力学常数仅为 0.191 d⁻¹。

(3) 岸坡特定生态系统中反硝化细菌群集特征与基质反硝化潜力的分布特性基本一致,具有明显的根际效应,表明岸坡特定生态系统中挺水植物生长区反硝化细菌菌群数量较大,反硝化潜力强,是河渠脱氮的主要功能区。

(4) 在植物生长季节,微生物反硝化和绿色植物吸收是河渠岸坡特定生态系统脱氮的主要途径;冬季时,反硝化脱氮则是最重要的脱氮途径。对河渠进行生态修复时,应优先修复与水体进行直接交互作用的水生植物生长区,在保障岸坡安全与稳定以及不影响其水利功能的前提下,以实现污染物的最大去除。

参考文献:

[1] 董哲仁. 探索生态水利工程学[J]. 中国工程科学, 2007, 9(1): 1-7.

- DONG Zhe-ren. Exploring eco-hydraulic engineering[J]. Engineering Science, 2007, 9(1): 1-7.
- [2] Nakamura F, Jitsu M, Kameyama S, et al. Changes in riparian in Kushiro Mire, Japan, associate with stream channelization[J]. River Research and Applications, 2002, 18(1): 65-79.
- [3] DAI Yu, WANG De-guan. Numerical study on the purification performance of riverbank[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19: 643-652.
- [4] Suthipong S, Satoshi T, Jiraporn H, et al. Soil erosion and its impacts on water treatment in the northeastern provinces of Thailand[J]. Environment International, 2007, 33(5): 706-711.
- [5] Park S B, Tia M. An experimental on the water purification properties of porous concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(2): 177-184.
- [6] 李化建, 孙恒虎, 肖雪军. 生态混凝土研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(3): 17-21.
- LI Hua-jian, SUN Heng-hu, XIAO Xue-jun. Advance in research on eco-concrete[J]. Materials Review, 2005, 19(3): 17-21.
- [7] 吴义锋, 吕锡武, 王新刚, 等. 4种生态混凝土护坡护砌方式的生态特性研究[J]. 安全与环境工程, 2007, 13(1): 9-12.
- WU Yi-feng, LÜ Xi-wu, WANG Xin-gang, et al. Research on ecological properties of four eco-concrete embankment types for ecological slope protection[J]. Safety and Environmental Engineering, 2007, 13(1): 9-12.
- [8] LI Xiao-ping, ZHANG Li-quan, ZHANG Zheng. Soil bioengineering and the ecological restoration of river banks at the airport town, Shanghai, China[J]. Ecological Engineering, 2006, 26: 304-314.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 30-150.
- State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and analysis methods of water and wastewater[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 30-150.
- [10] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 52-66.
- YAO Huai-ying, HUANG Chang-yong. Science of soil microbial ecology and experimental technique[M]. Beijing: Science Press, 2006: 52-66.
- [11] Gersberg R M, Eldkins V. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetland[J]. Water Research, 1988, 20(3): 363-368.
- [12] Camvalero M A, Mara D D. Nitrogen removal via ammonia volatilization in maturation ponds[J]. Water Science and Technology, 2007, 55(11): 87-92.
- [13] 张荣社, 周琪, 张建, 等. 潜流构造湿地去除农田排水中的氮的研究[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 113-116.
- ZHANG Rong-she, ZHOU Qi, ZHANG Jian, et al. Study on nitrogen removal treating agriculture wastewater in subsurface constructed wetland[J]. Environmental Science, 2003, 24(3): 113-116.
- [14] 项学敏, 宋春霞, 李彦生, 等. 湿地植物芦苇和香蒲根际微生物特性研究[J]. 环境保护科学, 2004, 30(4): 35-38.
- XIANG Xue-min, SONG Chun-xia, LI Yan-sheng, et al. Microorganism features of typha latifolia and phragmites australis at rhizosphere[J]. Environmental Protection Science, 2004, 30(4): 35-38.
- [15] 郭长城, 胡洪营, 李锋民, 等. 湿地植物香蒲体内氮、磷含量的季节变化及适宜收割期[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1020-1025.
- GUO Chang-cheng, HU Hong-ying, LI Feng-min, et al. Seasonal dynamics of nitrogen and phosphorus of wetland plants Typha at Nansihu Lake[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 1020-1025.

(编辑 陈灿华)