

# 南方农村饮水水源地生态防控体系示范工程 ——以南京市东龙河小流域为例

陆海明, 邹 鹰, 孙金华, 丰华丽, 王立群

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 农村饮水水源地保护是保障农村饮水安全的重要组成部分. 利用在人工措施适当干预下的半自然或自然生态系统所具有的污染物削减消化能力, 因地制宜地建立农村水源地生态防控技术体系是农村饮水水源地保护的重要措施. 以南京市江宁区东龙河小流域为例, 通过构建包括生态沟渠、滞留塘和稳定塘、植被缓冲带、生态护坡和跌水设施在内的生态防控体系示范工程, 有效削减了水体污染物负荷. 在小流域出口, 水体氨氮质量浓度从劣V类提高到Ⅲ类水体质量标准, 总氮质量浓度从超过Ⅲ类水质标准的9.38倍下降到1.18倍. 小流域出口主要水质指标达到或基本达到Ⅲ类水体质量标准, 取得了预期的生态防控效果.

**关键词:** 饮水安全; 水源地; 小流域; 生态防控技术; 示范工程

**中图分类号:** X143

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2011)03-0059-06

目前,我国农村饮水以传统、落后的分散供水为主,饮水安全问题很多.对于水资源相对丰沛的南方地区而言,农村饮水安全问题主要表现为水质型缺水,农村面源污染是其中污染源之一.农村面源污染具有发生随机性、产生面广、隐蔽性、滞后性和监测成本高等特点,难以采用传统的污水管网收集后集中到污水处理厂处理的治理方法<sup>[1]</sup>.利用自然生态系统污染物降解吸收的能力,根据面源污染发生和传输规律,结合当地自然和社会经济条件,构建生态防控技术体系是解决农村面源污染的主要措施之一<sup>[2-4]</sup>.当前我国正在大力实施诸多农村地区经济社会发展计划,如社会主义新农村建设计划、防治水土流失计划、小流域生态治理计划等,可以通过对这些计划的有效整合,形成共同目标,在提高农民生活水平、改善农村生态环境的同时兼顾水资源保护,形成从多个方面保护饮用水水质安全的局面.目前国内对水源地保护研究主要是单项技术的研发,其相应技术主要应用在中小空间尺度上,各个单项技术之间鲜有以流域为单位进行系统的集成,形成统一的整体.

本文以位于南京市秦淮河水源地上游的南京市江宁区东龙河小流域为例,结合社会主义新农村建设,围绕构建农村饮水水源地生态防控技术体系开展了相关示范工程研究.

## 1 研究区域概况

示范工程研究区域选择南京市江宁区的东龙河小流域(图1).该流域地处秦淮河支流句容河右岸,是句容河上游源头小流域之一.流域总面积约1.6 km<sup>2</sup>,东龙河河道长约2 km,河道平均坡降约5%.东龙河两侧土地利用类型主要为稻田、棉田、菜地、果园和村落等.东龙河小流域的地貌类型以丘陵岗地为主,流域随地势呈南北走向,北高南低,流域平均海拔高程在25~38 m(吴淞高程).流域土质为黄土和青泥土,土壤质地

收稿日期: 2010-11-01

基金项目: “十一五”科技支撑课题(2006BAD01B08);国家自然科学基金(50809040);水利部公益性行业专项(200801028,201101031);南京水利科学研究院基本科研业务费专项资金(Y50803)

作者简介: 陆海明(1978-),男,江苏射阳人,工程师,博士,主要从事水环境保护与生态水利学研究.

E-mail: cnlhm@126.com

属轻壤土. 东龙河小流域属亚热带季风气候区, 具有气候温和、四季分明、日照充足、雨水充沛、无霜期长的特点. 年平均气温 15℃ 左右, 多年平均降水量为 1 028 mm, 雨热同季, 光热水配合较好; 降水量年内多集中在汛期(4—9月), 约占全年的 70%.

东龙河小流域内农村居民饮水主要来源于下游乡镇自来水厂供水. 尽管当地自来水基本普及, 但是小流域内部分农村居民仍然利用流域内东龙河和池塘作为淘米、洗菜、洗衣等生活用水, 因此这些水体的水质状况对当地农村居民的健康依然有着重要影响.

东龙河上游和中游两侧农田不仅种植有水稻、小麦、棉花和油菜等大田作物, 而且有部分地块被开发种植茄子、青菜、葡萄等高效型经济作物. 东龙河下游正在建设千亩蔬菜大棚示范区和千亩茶园区. 随着高强度农业开发带来大量的农药化肥投入, 未被利用的残留农药化肥将随着降雨径流或农田排水进入东龙河.

小流域农村居民生活污水在经过化粪池简单处理后并没有经过进一步去除有机污染物和营养盐处理, 也没有利用管网进行收集, 而是就近施入农田或者通过沟渠直接排入东龙河.

位于小流域上游的工业集中区已初具规模, 但是相应的污水排放管网和处理设施尚未同步建设完善, 有时部分企业含高浓度氨氮和化学需氧量(COD)的生产污水直接排入东龙河, 每天污水排放总量从十几立方米到几百立方米不等.

东龙河小流域水环境目前存在的主要问题是水体氮素超标严重, 其次是有机污染物含量超标, 部分河段水葫芦、水花生等入侵植物覆盖度较高.

## 2 水源地生态防控示范工程介绍

东龙河小流域生态防控体系示范工程由下列 5 项内容组成: 生态沟渠恢复工程、稳定塘与滞留塘污染防控工程、植被缓冲带建设工程、生态护坡建设工程和跌水设施建设工程. 各项示范工程空间分布如图 1 所示.

(1) 东龙河生态沟渠恢复工程 东龙河生态沟渠恢复工程主要是指东龙河河道疏浚、河道内菜地清理和河道内植被恢复. 对东龙河部分垃圾堆积、底泥淤积严重的河道实施清淤工程. 清理河道内的农田和菜地, 将其恢复成自然河道形态, 清理面积约为 100 m<sup>2</sup>, 清理后恢复自然植被群落. 将公路南侧约 100 m 内的河道宽度拓宽至 15 m, 清理河道内过度生长的水葫芦与水花生等入侵植物.

(2) 稳定塘和滞留塘污染防控工程 利用排水沟渠将农村生活污水和农田地表径流引到水塘, 利用水塘对生活污水和地表径流进行处理后再排入东龙河. 在工业集中区下游已有的水塘下方再建 2 个稳定塘, 作为上游污水的“缓冲器”和强化处理工业集中区处理后排放的生产和生活废/污水. 新建稳定塘的底部长宽分别为 25 m(东西向)和 15 m(南北向). 沿水流方向从上到下, 分别为厌氧塘、兼性塘和好氧塘.

(3) 植被缓冲带建设工程 在东龙河两侧留 1~5 m 宽的缓冲带, 在缓冲带内种植当地具有发达根系的常绿林木、灌丛和草地, 增加植被覆盖度, 减少缓冲带内农作物种植. 植被缓冲带的宽度根据现有场地条件决定, 宜宽则宽、宜窄则窄. 开挖稳定塘时堆土的东龙河左侧沟渠, 在雨季来临前恢复至少 3 m 宽的缓冲带. 利用自然恢复过程中的先锋植物, 如蒿类杂草, 可以迅速形成较高植被覆盖度的优点, 及时固定土壤, 减少土壤流失进入河道. 待土壤堆积体稳定后, 将野生植物替换成具有

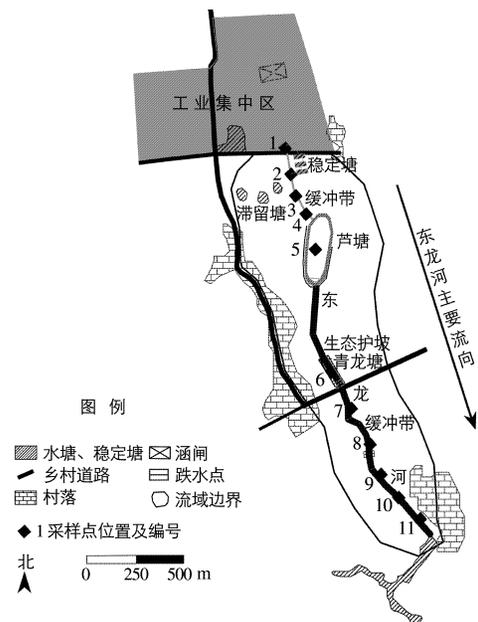


图1 东龙河小流域示范工程及地表水采样点分布  
Fig. 1 Distribution of demonstration projects and surface water sampling sites in Donglong stream catchment

观赏和经济价值的林木和草地。

(4) 生态护坡建设工程 东龙河内青龙塘靠近新农村集中居住点,堤岸不仅需要较好的稳定性,而且需要良好的景观效果,满足居民的亲水要求。因此,对于青龙塘常年淹没线水位以下采用硬质护坡,淹没线以上采用生态护坡。生态护坡采用透水网格,网格中覆土播撒草种,增加植被覆盖度。网格尺寸为 60 cm×60 cm×15 cm。草种选择根系比较发达,地表生物量较大,同时能够耐旱的品种,例如狗牙根、黑麦草等。

(5) 跌水设施建设工程 利用东龙河从上游到下游具有约 10 m 的高程差,分别在芦塘出口、青龙塘出口和下游出口处修建跌水设施,增加河流水体复氧能力,跌水高程落差为 1 m 左右。跌水设施建成滚水坝形式,与涵闸、路桥结合修建。

### 3 实施效果评估与作用机制分析

通过分析不同时期东龙河水体水质,评估东龙河小流域生态防控体系示范工程改善水源地水环境质量的实施效果,分析生态防控体系的作用机制。

#### 3.1 采样和分析方法

在东龙河内从上游到下游依次设置了 11 个采样点(见图 1),其中 1 号采样点位于东龙河上游,2~4 号位于东龙河较窄的沟渠段,沟渠宽度约为 2~3 m。东龙河的左岸在稳定塘开挖前为农田,稳定塘开挖后为高约 2 m 的堆土场,右侧为农田。5 号采样点在芦塘内。6 号采样点位于青龙塘,塘的右侧为青龙社区的幼儿园。7~10 号位于较宽的沟渠,沟渠宽度约为 3~5 m,沟渠的两侧为设施农业和农田,11 号位于东龙河出口,从该处东龙河水流入下游河流。

采样时间分别为 2008 年 4 月、2009 年 3 月、2009 年 5 月和 2009 年 7 月,其中第 1 次为示范工程刚启动,中间 2 次为示范工程建设过程中,最后 1 次为示范工程主体完成后。

监测项目为《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和化学需氧量(COD)4 项指标。总氮分析方法采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法(GB 11894-89),总磷分析方法采用碱性过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法(GB 11893-89),氨氮分析方法采用纳氏试剂比色法(GB 7479-87),化学需氧量分析方法采用重铬酸盐法(GB 11914-89)。

#### 3.2 实施效果分析

东龙河水体 TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度(质量浓度,下同)监测结果见图 2。从时间上来说,东龙河水体水质总体呈改善趋势。河流上游水体受工业集中区废污水排放影响较大,其排放规律不明显,因此这几次监测结果中 TN 和氨氮浓度表现出波动趋势。

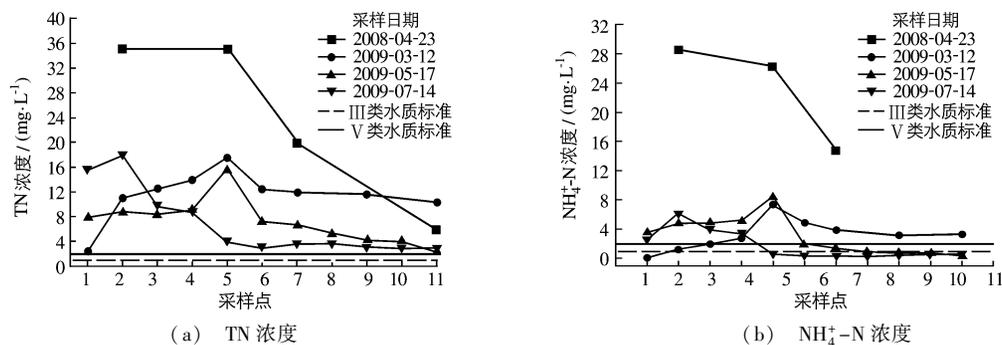


图 2 东龙河 TN 浓度和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度变化趋势

Fig. 2 Trends of TN and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration in Donglong stream

在流域的下游,即从在芦塘的 5 号采样点开始,河流水体 TN 浓度呈逐次监测降低的趋势。流域出口 TN 浓度从 10.38 mg/L 降低到 2.18 mg/L,超过 III 类水体标准的标倍数从 9.38 降低至 1.18,生态防控体系示

范工程建设后对于水体 TN 去除率达到 79%。 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度时间变化趋势与 TN 浓度变化趋势相类似,流域出口  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度从 3.25 mg/L 降低到 0.48 mg/L,水质从劣于 V 类水体变为优于 III 类水体,水质提升了 2 个等级以上,生态防控体系示范工程建设后对于水体氨氮的去除率达到 85%。

从空间上来说,东龙河水体 TN 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度从上游到下游总体呈下降趋势。以生态防控体系示范工程建成后的监测结果为例:工业集中区排放的废污水 TN 浓度最高达 17.9 mg/L,进入芦塘、青龙塘后有较明显的降低,TN 浓度为 2.80 mg/L,进入下游 7 号和 8 号采样点时,TN 浓度略微升高,之后下降,出口处水体 TN 浓度为 2.79 mg/L。生态防控体系示范工程对于上游废污水 TN 的去除率达到 84%。示范工程建设前, $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度很高(达 28.40 mg/L),可能是监测取样时刚刚排放废污水。

从图 3(a)可见,东龙河水体 TP 含量总体不高,均低于河流 III 类水体质量标准。从时间上来说,不同采样时间河流水体 TP 含量相差不明显。但必须指出的是,尽管水体磷素含量未高于河流 III 类水体质量标准,由于东龙河位于水源地源头区上游,在枯水季节,东龙河基本处于断流状态,各河段水体流速很小,换水周期比较长,若以地表水湖库水体质量标准来衡量,上游水体 TP 含量已经超过 IV 类水体质量,下游水体也超过 III 类水体质量标准,这也是部分河段内水葫芦、水花生等入侵植物过度生长的重要原因。从空间上来说,若以湖库地表水 TP 含量为衡量标准,上游水体 TP 含量为 V 类水体,下游水体为 IV 类水体,生态防控体系示范工程提高东龙河水体质量 1 个等级。

东龙河水体各采样点 COD 浓度分布如图 3(b)所示,东龙河水体 COD 污染总体来说并不严重。从时间上来说,最后 1 次的监测结果总体趋势最低,这说明随着示范工程建设的完成,生态防控体系开始起到削减 COD 负荷的作用。从空间上看,东龙河下游水体水质好于上游水体水质。上游水体 COD 含量超过 III 类水体质量标准,下游水体质量低于 II 类水体质量标准,示范工程实施后,就水体 COD 含量而言,水质至少提高 1 个等级。在示范工程稳定后,生态防控体系 COD 的去除率为 64%。

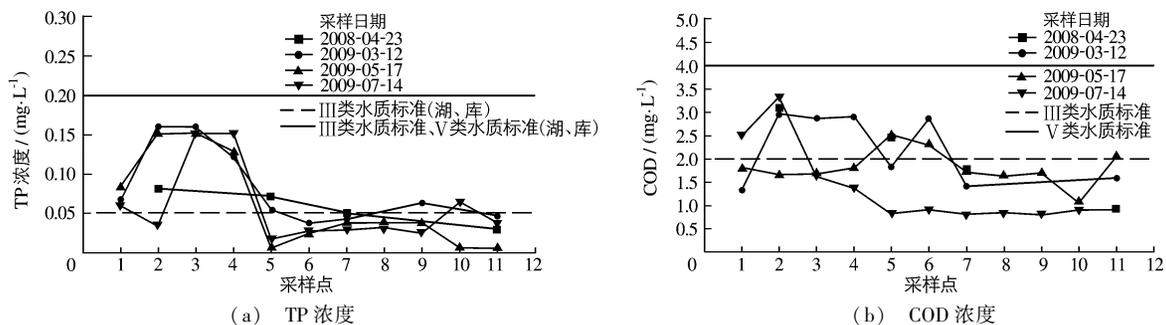


图3 东龙河 TP 浓度和 COD 浓度变化趋势

Fig. 3 Trends of TP and COD concentration in Donglong stream

### 3.3 作用机制分析

从河流生态系统中移除氮素的作用机制包括反硝化作用、氨气挥发作用、沉积作用和水生生物吸收后移除等。水体中的硝态氮在底质反硝化细菌的作用下,通过反硝化过程转变为  $\text{N}_2$  或  $\text{N}_2\text{O}$ ,释放进入大气从而脱离河流生态系统,研究证实反硝化作用是河流中氮素永久性去除的最主要途径<sup>[5-9]</sup>。氨气挥发作用是指河流水体中的铵离子在水体 pH 值较高具有较高浓度的氢氧根离子时形成氨气,在水流的作用下从河流水体挥发进入大气脱离河流生态系统<sup>[5,10]</sup>。河流水体中氮素和大颗粒结合或者吸附在泥沙上,在水体流速较低时发生沉淀或沉降,累积在河流底质表面,河流底质为氮素临时的“汇”,当水流速度较快或条件改变时,原来沉积在表面的氮素又会重新被悬浮,进入河流水体中,因此沉积作用只是氮素暂时而非永久性去除机制<sup>[11]</sup>。氮素被水体中的水生植物、水生动物、浮游生物和藻类吸收利用,吸收固定氮素的水生生物通过被收割、收获或捕猎,其生物体带走的氮素被移除出水生生态系统<sup>[5]</sup>。河流水体磷素去除机理包括颗粒态磷素沉降、化学反应沉淀、底质吸附解吸和生物吸收固定等<sup>[12-13]</sup>。颗粒态磷素沉降和生物吸收固定去除磷素作用机制和去除

氮素机制相类似. 化学反应沉淀主要是指水体中磷酸盐与  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  等阳离子化学反应生产磷酸钙/磷酸镁等溶解度很低的化合物,从而将磷素从水体中去除. 河流底质矿物颗粒和有机质可以为磷酸盐吸附提供巨大的比表面积,在水体和底质之间存在磷素动态吸附-解吸平衡关系,当磷素吸附-解吸达到平衡时,水体磷酸盐浓度为某个河段特定底质的吸附-解吸平衡点. 当水体中磷酸盐浓度超过吸附平衡点时,水体中磷素被底质吸附,水体磷素暂时储存在底质中,底质为水体磷素的“汇”;当水体中磷酸盐浓度低于吸附平衡点时,底质向水体释放磷素,底质是水体磷素的“源”.

东龙河生态恢复后,硝态氮在河流底质反硝化细菌的作用下转化成  $\text{N}_2$  或  $\text{N}_2\text{O}$  被去除;地表径流水体中磷素通过吸附作用被固定在底质中;菹草、黑藻等沉水植物和芦苇、菖蒲等挺水植物重新成为东龙河植物群落的优势种群,不仅增强了东龙河氮素和磷素沉积作用,而且增加了氮素被水生植物吸收固定的比例. 滞留塘主要通过存贮调节功能,降低地表径流流速,使地表径流携带的颗粒物沉降,从而实现削减农田地表径流氮素和磷素进入东龙河的目的. 东龙河两侧农田地表径流经过植被缓冲带时,流速降低,颗粒态氮素和磷素通过沉降作用得以部分去除;地表径流硝态氮随下渗过程进入土体发生反硝化过程,铵态氮和磷素则可以被土壤吸附而暂时固定;缓冲带内植株生长则可以吸收固定地表径流中的氮素和磷素. 青龙塘两侧堤岸建成生态护坡则提高了岸坡的稳定性,减少了堤岸土质侵蚀,减轻东龙河淤积风险.

东龙河水生植物生长茂盛,水生植物在生长时吸收二氧化碳释放氧气,增加水体氧气含量,增强水体自净能力,降低耗氧有机物含量<sup>[14-16]</sup>. 曝气跌水设施增加了水体氧气含量,加速有机耗氧物质的分解,削减下游水体耗氧有机污染物负荷.

## 4 结 语

由生态沟渠、滞留塘和稳定塘、植被缓冲带、生态护坡等生态工程措施组成的东龙河小流域生态防控体系示范工程取得了较好的农村水源地污染防控效果. 在小流域出口,氨氮浓度从劣于V类提高到Ⅲ类,总氮浓度从超过Ⅲ类水质标准的9.38倍下降到1.18倍. 以湖、库地表水TP含量为衡量标准,示范工程建成后东龙河上游端水体总磷浓度为V类,下游端水体总磷浓度下降到Ⅳ类,水质提高了1个等级.

## 参 考 文 献:

- [1] WANG X Y. Management of agricultural nonpoint source pollution in China: current status and challenges[J]. *Water Science and Technology*, 2006, 53(2): 1-9.
- [2] REINHARDT M, GACHTER R, WEHRLI B, et al. Phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural drainage water[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(4): 1251-1259.
- [3] MANDER U, KUUSEMETS V, HAYAKAWA Y. Purification processes, ecological functions, planning and design of riparian buffer zones in agricultural watersheds[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 24(5): 421-432.
- [4] WANG X H, YIN C Q, SHAN B Q. The role of diversified landscape buffer structures for water quality improvement in an agricultural watershed, North China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 107(4): 381-396.
- [5] SAUNDERS D L, KALFF J. Nitrogen retention in wetlands, lakes and rivers[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 443(1-3): 205-212.
- [6] HEFTING M M, DE KLEIN J J M. Nitrogen removal in buffer strips along a lowland stream in the Netherlands: a pilot study [J]. *Environmental Pollution*, 1998, 102: 521-526.
- [7] SCHLESINGER W H, RECKHOW K H, BERNHARDT E S. Global change: The nitrogen cycle and rivers[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(3): W03S06.
- [8] SJODIN A L, LEWIS W M, SAUNDERS J F. Denitrification as a component of the nitrogen budget for a large plains river[J]. *Biogeochemistry*, 1997, 39(3): 327-342.
- [9] BEAULIEU J J, TANK J L, HAMILTON S K, et al. Nitrous oxide emission from denitrification in stream and river networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 108(1): 214-219.
- [10] SUN L, LIU Y, JIN H. Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna [J]. *Ecological*

- Engineering, 2009, 35(1): 135-140.
- [11] 王沛芳, 王超, 胡颖. 氮在不同生态特征沟渠系统中的衰减规律研究[J]. 水利学报, 2007, 38(9): 1135-1139. (WANG Pei-fang, WANG Chao, HU Ying. Nitrogen degradation efficiency in channels with different ecological characteristics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(9): 1135-1139. (in Chinese))
- [12] WEN L, RECKNAGEL F. Balancing phosphorus adsorption and consumption processes in experimental treatment ponds for agricultural drainage water[J]. Ecological Engineering, 2006, 28(1): 14-24.
- [13] WITHERS P J A, JARVIE H P. Delivery and cycling of phosphorus in rivers: A review[J]. Science of the Total Environment, 2008, 400(1-3): 379-395.
- [14] PARANYCHIANAKIS N V, ANGELAKIS A N, LEVERENZ H, et al. Treatment of wastewater with slow rate systems: A review of treatment processes and plant functions[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2006, 36(3): 187-259.
- [15] NAHLIK A M, MITSCH W J. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica[J]. Ecological Engineering, 2006, 28(3): 246-257.
- [16] DEMARS B O L, EDWARDS A C. Distribution of aquatic macrophytes in contrasting river systems: A critique of compositional-based assessment of water quality[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(2): 975-990.

## Demonstration projects of ecological engineering for rural drinking water source area protection in South China: a case study in Donglong stream catchment of Nanjing

LU Hai-ming, ZOU Ying, SUN Jin-hua, FENG Hua-li, WANG Li-qun

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Rural drinking water source area protection plays an essential role for villagers' drinking water security. The establishment of ecological engineering system for rural drinking water source area protection is an important step, through utilizing the pollutant mitigation capability owned by natural and semi-natural ecosystems properly interfered by anthropologic activities. This paper takes Donglong stream catchment in Nanjing city as an example. The ecological engineering system including ecological ditches, detention pond, stabilization pond, vegetated buffer strip, eco-revetment, and aeration through dropping water has mitigated pollutant load from Donglong stream catchment. In the catchment outlet, the ammonium-N concentration reduces from higher than category V to lower than category III of national surface water standard (GB 3838-2002). Total nitrogen (TN) concentration in surface water over the TN value of category III drops from 9.38 times to 1.18 times. The main water quality criterion approaches category III of national surface water standard (GB 3838-2002), suggesting that the main goal of the demonstration projects has been reached.

**Key words:** drinking water security; drinking water source area; small catchment; ecological engineering; demonstration projects