ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 37 卷 第 8 期
2016 年 8 月 15 日

目 次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 …… 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 …… 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 $PM_{2.5}$ 浓度日变化及气象条件影响分析 …… 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004 ~2015 年北京市清洁点臭氧浓度变化特征……
程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 魏强, 孙彤卉, 王步英, 富佳明, 何乐为, 程兵芬, 皮帅, 马立光, 崔继宪, 孟凡 (2847)
抗战胜利 70 周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 ……
…… 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 …… 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析……
…… 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翡 (2871)
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 …… 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险: 以贵阳市为例 …… 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析 …… 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH_3 和N_2O)减排效果比较:以夏玉米季为例 …… 范会,姜姗姗,魏荧,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤 CO_2、CH_4 和N_2O通量的观测 …… 吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬 CO_2 和 CH_4 分压特征分析 …… 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 …… 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 ……
…… 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 …… 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐输运的影响:以草堂河为例 …… 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 …… 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究…… 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 ……
…… 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 …… 刘静,郑丙辉, 刘录三,马迎群,林岿璇,汪星, 夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛烷磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 …… 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 …… 卫亚宁,潘佳钏,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 …… 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 …… 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甾醇对南山老龙洞地下河粪便污染的指示 …… 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
滹沱河冲洪积扇地下水中酞酸酯的污染现状与分布特征 …… 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,乔肖翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 …… 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn 系 LDHs 覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 …… 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce^{3+} 与 Cu^{2+} 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 …… 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 …… 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO_2 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 …… 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料 AY17 的光催化降解动力学及机制 …… 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 …… 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能…… 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR 工艺 ANAMMOX 耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 …… 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧 Fe(Ⅲ)还原氨氧化现象初探 …… 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮 EGSB 反应器的快速启动…… 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的 EBPR 系统除磷性能 …… 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 …… 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估……
…… 王菲,吴泉源, 吕建树, 董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 …… 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国 18 种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究 …… 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 …… 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羟基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu^{2+}、Zn^{2+}的吸附特性 …… 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 …… 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 …… 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与 β-环糊精复合提取预测污染土壤中 PAHs 的生物有效性……
…… 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 …… 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 …… 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 …… 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氮水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 …… 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)

农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究

李强坤[1],胡亚伟[1],宋常吉[1],彭聪[1,2]
(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院,郑州 450003; 2. 河海大学水文水资源学院,南京 210098)

摘要: 沟渠系统"过程拦截"是现阶段农业非点源污染控制和管理的重要手段. 针对当前农田排水沟渠水体-底泥-植物系统内各介质间非点源溶质迁移转化机制不清的现状,本研究以天然沟渠为对象,以非点源溶质氮为例,通过 2014 年 3 月 ~2015 年 2 月现场监测试验,分析了农田排水沟渠水体及底泥中非点源溶质氮的分布特征. 结果表明,沿沟渠纵向,试验沟渠水体中总氮质量浓度、底泥中总氮含量均呈现一定程度递减趋势,表现出沟渠系统对非点源溶质的净化作用; 水体中总氮质量浓度、底泥中总氮含量在沟渠横断面分布存在较大不均匀性,其分布特征与断面形态、流量变化过程、流速分布等因素有关,其中水体中总氮质量浓度均衡度为 76.89%,底泥中总氮含量均衡度为 57.04%; 试验期内,水体中总氮质量浓度呈"凹"形变化、底泥中总氮含量呈"凸"形变化,二者表现出相逆的变化趋势.

关键词:非点源污染; 排水沟渠; 氮; 底泥; 试验
中图分类号: X143; X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)08-2973-06 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.08.019

Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch

LI Qiang-kun[1], HU Ya-wei[1], SONG Chang-ji[1], PENG Cong[1,2]
(1. Institute of Yellow River Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Along with the highlighted water environmental issues and the gradual effective renovation of the point source pollution (PSP) such as industrial waste, the agricultural non-point source pollution (AGNSP) caused by the non-scientific application of fertilizers and pesticides has attracted more and more attention. On the basis of strengthening the field "source control", making the best use of agricultural drainage ditch (pond) system "intercepting process" is a vital means of agriculture non-point source pollution control and management at the present stage. Ditch system is not only an important part of the farmland irrigation and drainage engineering, but also a vital corridor of AGNSP of solute transport. The unique farmland drainage ditch water-sediment-plant system in ecology and physics is similar to linear wetland function, and has effect of interception and purification on non-point source solute in farmland drainage. Non-point source solute transformation mechanism of each medium in the farmland drainage ditch water-sediment-plant system is unclear, in view of the current situation, the study took the natural channel as the object. Taking the non-point source solute nitrogen as an example, by field monitoring test during March 2014-February 2015, the distribution characteristics of non-point solute nitrogen in the water-sediment of the farmland drainage ditch were analyzed. The results indicated that the concentration of total nitrogen in water and the total nitrogen content in the sediment of the experimental ditches both showed a certain degree of decreasing trend along the longitudinal ditch, which represented a purification effect of the ditch system on the non-point source solute. The concentration of total nitrogen in water and the total nitrogen content in the sediment had big inhomogeneity in the ditch cross-sectional distribution, and its distribution characteristics were related to the shape of the cross-section, flow variation process, flow velocity distribution and other factors. The balance of the total nitrogen concentration was 76.89%, and the total nitrogen content in the sediment was 57.04%. During the trial period, the total nitrogen concentration in the water was "concave" shape, while in the sediment it was "convex" shape, showing opposite changing trends.

Key words: non-point source pollution; drainage ditch; nitrogen; sediment; experiment

随着水环境问题的突出以及工业废污等点源污染的逐步整治,由于化肥农药不科学施用而引起的农业非点源污染问题日益引起人们的关注和重视. 基于当前研究现状,在加强田间"源头控制"的基础上,充分发挥沟渠(塘)系统"过程拦截"是农业非点源污染控制和管理的重要手段[1~4]. 沟渠系统是农田灌排工程的重要组成部分,一般起始于田间毛沟或农沟,经支沟、干沟或总干沟排入外界大面积水体. 农田排水沟渠是区域农田灌溉(降雨径流)退水及排涝的主要输送通道,同时也是农业非点源污染物迁移的廊道[5~8]. 农田排水沟渠独特的水体-底泥-植物系统在生态学和物理学上具有与线性湿地

收稿日期: 2016-01-17; **修订日期**: 2016-03-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(51379085); 水利部公益性行业科研专项 (201401019)
作者简介: 李强坤(1968 ~),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为生态水文与环境水文、农业水土环境等,E-mail: liqiangk@126.com

相似的功能[9],有研究认为可将沟渠系统概括为具有河流和湿地特征的独特工程化生态系统[10],天然沟渠能够吸收水体中非点源污染溶质以改善受污染的水体[11,12]. 由此,“生态拦截型沟渠系统”概念的提出以及进一步由此延伸的农业非点源污染“4R”控制体系[13,14]、景观型灌排系统布设[15]等相关研究[16~21],使得沟渠拦截成为国内非点源污染控制的焦点和热点. 与此相反,关于农田排水沟渠水体-底泥-植物系统内各介质间非点源溶质的迁移转化机制尚不清楚,农田排水沟渠非点源污染溶质净化与可能形成的内源污染机制也有待进一步研究,农田排水沟渠拦截农业非点源污染尚未形成完善的理论体系[22]. 本项研究以天然沟渠为对象、现场监测试验为基础,基于沟渠纵向及断面横向水体中总氮质量浓度、底泥中总氮含量变化,分析农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征,以期为进一步的沟渠湿地相关作用机制研究提供借鉴和参考.

1 材料与方法

1.1 试验布置

项目试验区位于河南省人民胜利渠灌区清水渠,该渠起始于河南省新乡市原阳县,流经获嘉县最终进入人民胜利渠总干渠. 清水渠因早年渠水清澈而得名,近年由于两侧农田化肥、农药施用及农田排水进入而使水质变差. 农田灌溉期间,由于上游大量排水进入,两侧农田又从沟渠中提水进行灌溉,属于灌排合一沟渠. 试验沟渠段布置在清水渠与东一干渠交叉枢纽下游约 500 m,试验段总长度 600 m,相对封闭,没有其它进水口和排水口,沿水流方向分别布设 1、2、3 号断面,详见图 1(a). 同时为分析溶质氮在沟渠横断面的分布特征,选取试验段中间 2 号断面进行典型分析,断面形态见图 1(b). 2 号断面为宽浅型复式断面,通常情况下水面宽度为 9.40 m,左右岸临水侧分布有覆盖度相近的野生芦苇,左岸临水平台高于右岸 35 cm,断面形态不完全对称.

1.2 测试项目和方法

项目试验时段为 2014 年 3 月至 2015 年 2 月,每月测定 1 次,测试项目主要包括不同沟渠断面中水体流速、水体中氮磷质量浓度及底泥中氮磷含量等,本文以测试项目中的总氮为例进行分析.

本试验中流速采用 LS300-A 型便携式流速仪测定,每个断面布设 5 条垂线,同图 1(b)中所示水样提取垂线重合,测量时根据水深变化情况每条垂线分别采用 1 点法和 2 点法测量.

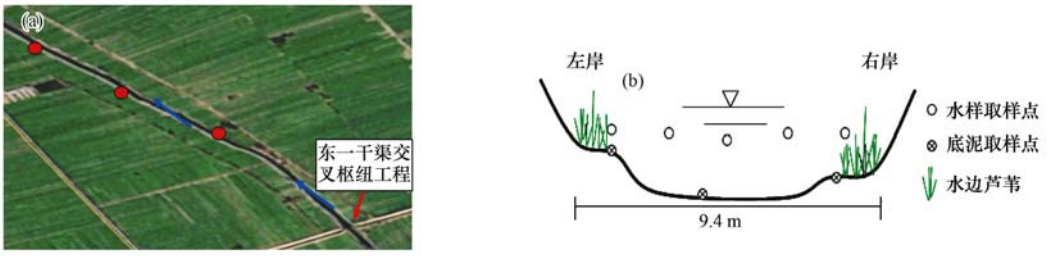

图 1 项目试验布置示意

Fig. 1 Schematic diagram of project experimental layout

水样提取利用取样瓶现场取样,每个断面布设 5 条水样垂线,每条垂线均在水面以下 1/3 处取样,每个水样 500 mL. 水样提取后按照文献[23]中相关规定进行必要前置处理后即送实验室分析.

底泥样品采用 PSC-600A 型活塞式柱状沉积物采样器提取,每个断面布设 3 个取样点,分别为两侧及沟渠中间,图 1(b)中 3 个取样点距离左岸起点距依次为 1、4 和 8 m,每个取样点提取 0~15 cm 底泥沉积物. 样品取出后放入风干袋自然风干,然后磨碎、过 100 目筛之后进行消煮分析.

实验室主要分析仪器为 Smartchem 140 全自动化学分析仪.

2 结果与讨论

2.1 沟渠中流量及典型断面流速变化

水体是农业非点源污染形成和输移的动力及载体. 利用测量所得 2 号断面形状和现场测定流速数据,采用面积-流速法,利用式(1)计算得到试验期 2014 年 3 月至 2015 年 2 月逐月沟渠过水流量,点绘流量过程线见图 2.

$$Q_w = A \times V \quad (1)$$

式中,Q_w 为断面过水流量($m^3 \cdot s^{-1}$);A 为断面过水面积(m^2);V 为断面水体流速($m \cdot s^{-1}$).

从图 2 中可以看出,试验期内沟渠流量在 2、3 月较小,之后随着作物耕种周期和雨季来临,5、6

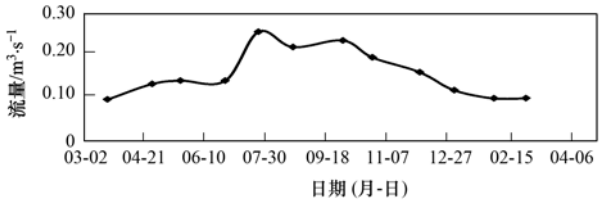

图 2　试验期内沟渠流量过程线

Fig. 2　Ditch flow process line in the trial period

月沟渠内流量开始上升,7 ~ 9 月沟渠内流量达到年内峰值,试验期内最大过水流量为 0.2 $m^3 \cdot s^{-1}$,是年内最小流量的 2.6 倍,10 月之后沟渠中流量开始逐月减小,第二年 1、2 月逐步恢复至试验开始时流量值.

沟渠典型横断面流速分布选取 2 号断面作为典型进行分析. 依据沟渠过水流量,将所测定的断面垂线流速,划分 0.1 $m^3 \cdot s^{-1}$ 以下、0.1 ~ 0.2 $m^3 \cdot s^{-1}$ 和 0.2 $m^3 \cdot s^{-1}$ 以上这 3 个流量级分别统计,结果见图 3.

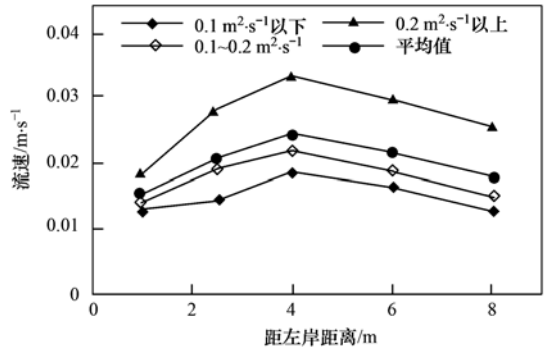

图 3　典型断面流速分布

Fig. 3　Velocity distribution of typical section

图 3 中可以看出,对应于典型断面不同的流量级其流速大小有所不同,但在横向断面的分布趋势基本一致. 将图 3 中的流速横断面分布同图 1(b)断面形态相比较,不论在那个流量级,主流区(3 ~ 6 m)流速均大于两侧水边区流速; 左右岸水边区进行比较,右岸边区流速略大于左岸边区流速. 不同流量级相比较,流量越小断面流速分布越趋于均匀,随着流量增大,主流区流速与两侧边流区流速差异增大.

2.2　沟渠纵向水体中氮素质量浓度及通量变化

沿试验沟渠纵向,依次点绘 1、2、3 号断面逐月水体中总氮质量浓度变化见图 4.

可以看出,试验期内试验沟渠纵向水体中总氮质量浓度变化呈现出两个典型变化特征,一是由上而下,1 ~ 3 号断面水体中总氮质量浓度变化趋势具有很好的同步和一致性,并且多数测点都表现出 1 号断面高于 2 号断面、2 号断面又高于 3 号断面的特征,说明即使在灌排合一沟渠系统内,其复杂的水体-底泥-植物系统仍然表现出对非点源污染溶质具有一定的净化功能; 二是试验沟渠水体中总氮质量浓度年内总体呈“凹”形变化,试验初期 2014 年 3 月总氮质量浓度是全年最高值,2014 年 6 ~ 10 月是全年最低期,2014 年 11 月之后又进一步上升,2015 年年初又近似恢复到试验开始时 2014 年 3 月总氮质量浓度. 对照图 2 中沟渠流量变化过程,可看出沟渠水量和水体中总氮质量浓度变化的相关性. 试验初期,沟渠中流量较小总氮质量浓度较高,之后随着小麦春灌开始,灌溉排水进入渠内稀释,水体总氮质量浓度有所降低,2014 年 6 ~ 10 月沟渠中水量进一步增加,水体中总氮质量浓度进一步降低,之后开始逐步上升.

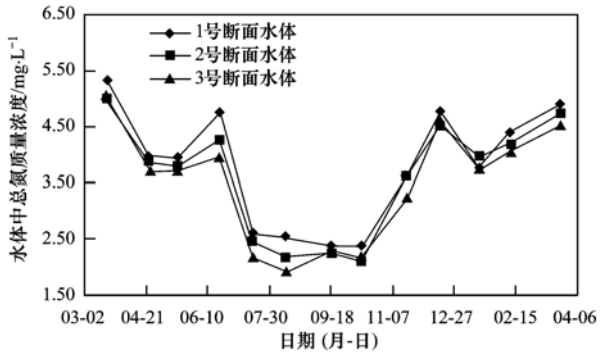

图 4　试验沟渠纵向水体中总氮质量浓度变化

Fig. 4　Variation of total nitrogen concentration in water along experimental longitudinal ditches

为了进一步分析沟渠中水体的污染特征,综合沟渠流量和水体中总氮质量浓度两项因子,应用式(2)计算试验沟渠的逐月总氮污染通量,点绘见图 5.

$$Q_{TN,2} = Q \times c_2 \times 1\,000 \qquad (2)$$

式中,$Q_{TN,2}$ 为试验沟渠 2 号断面总氮通量($mg \cdot s^{-1}$); Q 为试验沟渠流量($m^3 \cdot s^{-1}$); c_2 为试验沟渠 2 号断面水体总氮质量浓度($mg \cdot L^{-1}$); 1 000 为单位换算常数.

对照图 5、图 4 和图 1,典型断面总氮通量最大值出现的时间和水体总氮质量浓度、流量最大值出现的时间并不一致,而是水体总氮质量浓度的次高值、流量上升过程中的一个时间点. 污染通量是水体中污染物质量浓度和断面流量的综合反映,与断面的污染负荷过程相一致. 分析图 5 中污染通量的变化特征,其升高过程除与农田排水中本身含氮量增加有关外,还与沟渠中断面流量增加导

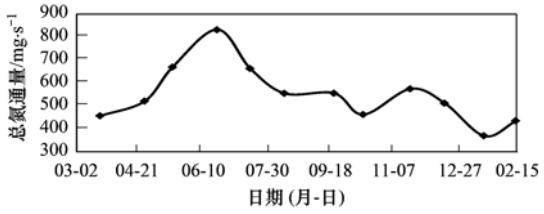

图 5 试验沟渠水体中总氮通量变化

Fig. 5 Variation of total nitrogen flux in experimental ditches

致水位抬升、过水面积增大,使沟渠两侧自上一个灌排周期结束后一直所附着、沉积的污染物进入水体有较大关系. 之后,随着沟渠中流量持续增加,水体中总氮浓度稀释,断面总氮通量呈现出下降趋势,并在 2014 年 11 ~ 12 月随着小麦冬灌开始出现一个小的波动. 总氮通量的年内变化过程反映了试验沟渠污染负荷随农田灌排及区域降水量变化、沟渠水体中总氮质量浓度变化的特点.

2.3 沟渠横向断面水体中氮素质量浓度变化

以试验沟渠 2 号断面为例[见图 1(b)],在 2 号断面沿横向设置 5 个取样点,分别按 2014 年 3 ~ 5 月、6 ~ 8 月、9 ~ 11 月、2014 年 12 月 ~ 2015 年 2 月这 4 个时间段及试验期平均值统计,点绘不同取样点水体中总氮质量浓度变化见图 6.

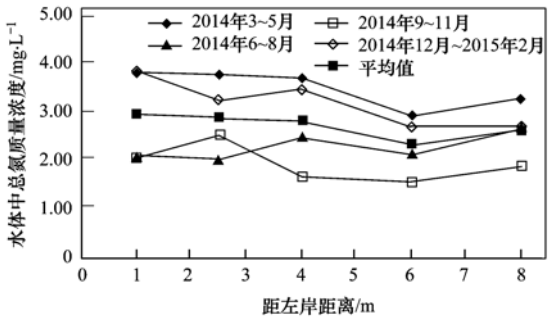

图 6 典型断面横断面水体中总氮质量浓度变化

Fig. 6 Variation of total nitrogen concentration in water body of typical cross section

从图 6 中可以看出,同一典型断面不同取样点水体中总氮质量浓度并不一致,总体看断面左侧水体中总氮质量浓度大于断面中间及右侧水体中的总氮质量浓度,与图 3 中断面横向流速分布相比较,流速较小的左侧边流区总氮质量浓度高于流速相对较大的右侧边流区总氮质量浓度.

进一步分析水体中总氮质量浓度在横断面分布的不均匀性,计算同一时期不同测点总氮质量浓度极差,并应用式(3)计算典型断面不同时期水体总氮质量浓度均衡度列于表 1.

$$m = 1 - \left(\frac{c_{max} - c_{min}}{c_{ave}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中,m 为断面水体总氮质量浓度均衡度(%);c_{max}、c_{min}、c_{ave}依次为典型断面不同时期各测点水体总氮质量浓度的最大值、最小值和平均值($mg \cdot L^{-1}$).

表 1 典型断面不同时期水体总氮浓度极差和均衡度比较

Table 1 Comparison of total nitrogen concentration range and the equilibrium degree of the typical section in different periods

时间段	总氮质量浓度极差 /mg·L⁻¹	均衡度 /%
2014 年 3 ~ 5 月	0.89	74.84
2014 年 6 ~ 8 月	0.65	71.77
2014 年 9 ~ 11 月	0.97	50.20
2014 年 12 月 ~ 2015 年 2 月	1.17	63.55
各时间段平均	0.64	76.89

表 1 中计算结果可以看出,典型断面总氮质量浓度极差最大值为 2014 年 12 月 ~ 2015 年 2 月时间段的 1.17 $mg \cdot L^{-1}$,各时段平均值极差最小,为 0.64 $mg \cdot L^{-1}$. 均衡度方面除去不同时间段的平均值均衡度为 76.89% 外,2014 年 3 ~ 5 月时间段水体中总氮质量浓度均衡度较好,为 74.84%,均衡度较低的时间段为 2014 年 9 ~ 11 月,为 50.20%. 横断面水体中总氮质量浓度均衡度的大小与过水断面本身的形态、流量波动及流速等水力特性都有较大关系.

将图 6 与图 1(b)中的断面形态进行比较,并结合图 3 断面流速分布进行分析,典型断面中间主流区水深和流速最大,是断面的主要过水部分,由于水体交换和曝气速率较大,相应水体中总氮质量浓度较低; 断面右侧水深和流速均大于断面左侧,相应总氮质量浓度也较左侧偏小. 典型断面各测点水体总氮质量浓度表现出与水深和流速负相关的特征. 文献[24]曾系统分析沟渠水深变化对氮磷等非点源污染溶质截留效果影响,结果表明当沟渠水深小于 38 cm 时截留效果影响不明显,当水深大于 47cm 时截留效果随水深的增加而降低. 流速影响方面,文献[25]研究结果认为沟渠对总氮的最佳截留流速为 0.49 $m \cdot s^{-1}$,截留率可以达到 46%. 本试验以上特征同相关研究结果基本相似.

2.4 沟渠纵向底泥中氮素含量变化

依次将 1、2、3 号断面 0 ~ 15 cm 底泥中总氮含量试验期变化过程点绘,见图 7.

图 7 中可以看出,底泥中总氮含量沿沟渠纵向变化有如下特征:①整体上 3 个试验断面试验期内底泥中总氮含量呈现出由上而下沿程递减趋势,由

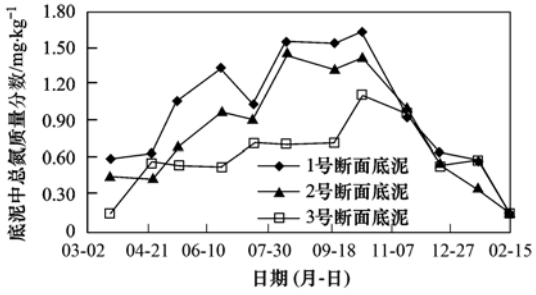

图 7　沟渠纵向底泥中总氮含量变化

Fig. 7　Variation of total nitrogen content in sediment along the longitudinal ditch

1 号到 2 号断面减小较少,2 号到 3 号断面相对减少较多; 同时,3 个试验断面试验期内底泥中总氮含量均呈“凸”形变化特征,灌溉排水期底泥中总氮含量较高,2、3 月则含量较低; ② 1、2 号断面底泥中总氮含量的年内变化过程非常相近,2014 年 3 ~ 8 月底泥中总氮含量呈上升趋势,2014 年 8 ~ 10 月底泥中总氮含量达到年内最高水平,之后开始下降,至 2015 年 1 ~ 2 月约下降至试验初期 2014 年 3 月水平; ③ 3 号断面与 1、2 号断面略有差异,2014 年 3 ~ 5 月是底泥中总氮含量的上涨阶段,2014 年 6 ~ 10 月底泥中总氮含量维持年内较高水平,其中 2014 年 10 月达到年内峰值,以上时间段 3 号断面底泥中总氮含量均小于 1、2 号断面,与 1 号断面相差较大的月份是 2014 年 6 月和 9 月; 2014 年 11 月 ~ 2015 年 2 月同样是 3 号断面底泥中总氮含量的下降阶段,且其总氮含量与 1、2 号断面相近.

将图 7 中典型断面底泥中总氮含量与图 4 中典型断面水体中总氮质量浓度变化过程进行对比,可以看出两个变化过程近似相逆. 也即在水体中总氮质量浓度较高的时期底泥中总氮含量相对较低,反之水体中总氮质量浓度较低的时期底泥中总氮含量则相对较高. 对农田排水沟渠而言,水体-底泥-水生植物组成一个复杂的微生态系统,除外源输入输出因素影响外,任一介质内氮素浓度(含量)的变化都可以看做是微系统内氮溶质迁移影响的结果. 文献[26]采用相对封闭的模拟沟渠水体-底泥-水生植物系统进行试验,结果表明沟渠水体-底泥-植物生态体内氮迁移联系紧密,任一介质内或介质间氮素迁移转化都会引起其他介质中氮素浓度相应调整.

2.5　典型断面横向底泥中氮素含量变化

与水体中总氮质量浓度横向变化分析相同,选取 2 号断面作为典型,进一步分析同一断面不同取样点底泥中总氮含量变化,同样分别按 2014 年 3 ~ 5 月、6 ~ 8 月、9 ~ 11 月、2014 年 12 月 ~ 2015 年 2 月这 4 个时间段统计并计算年度平均值,点绘底泥不同取样点总氮含量变化见图 8.

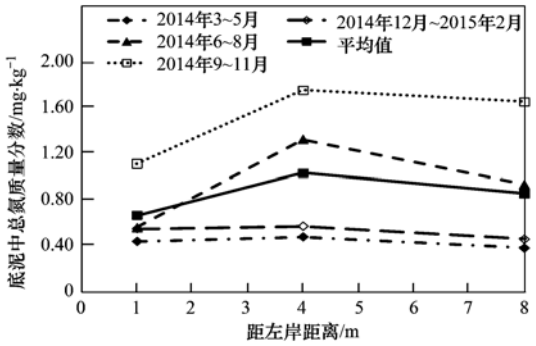

图 8　典型断面不同取样点底泥中总氮含量变化

Fig. 8　Variation of total nitrogen content in sediments from different sampling points in typical section

图 8 中可以看出,整体上排水沟渠左侧底泥中总氮含量相对低于右侧,年度平均值左侧为 0.67 $mg\cdot kg^{-1}$,右侧为 0.86 $mg\cdot kg^{-1}$; 不同时间段中,2014 年 3 ~ 5 月时间段底泥中总氮含量较低,对照图 4,该时段正是水体中总氮质量浓度较高时段; 2014 年 9 ~ 11 月底泥中总氮含量较高,同样由图 4 可以看出,9 ~ 11 月水体中总氮质量浓度相对较低、并且由低到高上升阶段. 将图 8 典型断面横向底泥中总氮含量与图 6 横断面水体总氮浓度变化相对比,也呈现出近似相逆的趋势,图 6 中水体中总氮质量浓度较高的左侧在图 8 中底泥总氮含量相对较小,图 6 中水体中总氮质量浓度较低的右侧在图 8 中底泥总氮含量则相对较高. 断面横向水体-底泥系统总氮含量的变化与沿沟渠纵向变化基本相似.

利用式(3)进一步计算典型断面底泥中总氮含量的均衡度,结果见表 2.

由表 2 中数据可以看出,典型断面底泥中总氮含量极差最大的是 2014 年 6 ~ 8 月时间段,对照图 2、图 4、图 7,该时间段对应于沟渠中流量上升、水体中总氮质量浓度下降、沟渠底泥中总氮含量上升的阶段,正是水体-底泥系统氮素原有平衡被打破而

表 2　典型断面不同时期底泥中总氮含量均衡度比较

Table 2　Comparison of total nitrogen content equilibrium degree in sediments of typical section in different periods

时间段	总氮含量极差 /mg·L⁻¹	均衡度 /%
2014 年 3 ~ 5 月	0.10	77.80
2014 年 6 ~ 8 月	0.77	18.69
2014 年 9 ~ 11 月	0.64	57.50
2014 年 12 月 ~ 2015 年 2 月	0.11	78.49
各时间段平均	0.37	57.04

新的平衡正在塑造的过程；各时间段中，2014 年 3 ~5 月、2014 年 12 月 ~2015 年 2 月底泥总氮含量均衡度最高，分别达到 77.80%、78.49%，而这两个时间段是沟渠中流量相对较小、水体中总氮质量浓度较高的时间段，是沟渠水体-底泥系统氮素经历灌溉排水期波动后回归原有平衡的阶段.

3 结论

(1)沿试验沟渠纵向，水体中总氮质量浓度、底泥中总氮含量均呈现一定程度递减趋势，表现出沟渠系统对非点源溶质的净化作用.

(2)断面形态决定了水深及流速分布的不均匀性，进而影响到不同部位水体中总氮质量浓度、底泥中的总氮含量，使得在沟渠横断面分布存在不均匀性，其中水体中总氮质量浓度均衡度为 76.89%，底泥中总氮含量均衡度为 57.04%.

(3)无论是沿沟渠纵向还是断面横向，水体中总氮质量浓度与底泥中总氮含量变化均呈现出相逆的变化趋势.

参考文献：

[1] 李丽华，李强坤. 农业非点源污染研究进展和趋势[J]. 农业资源与环境学报，2014，**31**(1)：13-22.

[2] 周静雯，苏保林，黄宁波，等. 不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究[J]. 环境科学，2016，**37**(3)：963-969.

[3] 孙宁宁. 水稻灌区新型农田水利系统防污减污试验研究[D]. 武汉：武汉大学，2012. 80-95.

[4] 李强坤，李怀恩. 农业非点源污染数学模型及控制措施研究——以青铜峡灌区为例[M]. 北京：中国环境科学出版社，2010. 155-196.

[5] 陆海明，孙金华，邹鹰，等. 农田排水沟渠的环境效应与生态功能综述[J]. 水科学进展，2010，**21**(5)：719-725.

[6] 张树楠，贾兆月，肖润林，等. 生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究[J]. 环境科学，2013，**34**(3)：1101-1106.

[7] 李强坤，胡亚伟，孙娟. 农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J]. 中国农业生态学报，2010，**18**(1)：210-214.

[8] 余红兵. 生态沟渠水生植物对农区氮磷面源污染的拦截效应研究[D]. 长沙：湖南农业大学，2012. 8-15.

[9] Meuleman A F M，Beltman B. The use of vegetated ditches for water quality improvement[J]. Hydrobiologia，1993，**253**(1-3)：375.

[10] Strock J S，Dell C J，Schmidt J P. Managing natural processes in drainage ditches for nonpoint source nitrogen control[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2007，**62**(4)：188-196.

[11] Needelman B A，Kleinman P J A，Strock J S，*et al*. Improved management of agricultural drainage ditches for water quality protection：an overview[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2007，**62**(4)：171-178.

[12] Kröger R，Holland M M，Moore M T，*et al*. Agricultural drainage ditches mitigate phosphorus loads as a function of hydrological variability[J]. Journal of Environmental Quality，2008，**37**(1)：107-113.

[13] 杨林章，周小平，王建国，等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J]. 生态学杂志，2005，**24**(11)：1371-1374.

[14] 杨林章，施卫明，薛利红，等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报，2013，**32**(1)：1-8.

[15] 张雅杰，邵庆军，李海彩，等. 生态景观型灌排系统面源污染防治试验及生态响应[J]. 农业工程学报，2015，**31**(1)：133-138.

[16] 彭世彰，高焕芝，张正良. 灌区沟塘湿地对稻田排水中氮磷的原位削减效果及机理研究[J]. 水利学报，2010，**41**(4)：406-411.

[17] 潘乐，茆智，董斌，等. 塘堰湿地减少农田面源污染的试验研究[J]. 农业工程学报，2012，**28**(4)：130-135.

[18] 李如忠，钱靖，董玉红，等. 城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性[J]. 环境科学，2015，**36**(2)：481-489.

[19] 张树楠，肖润林，刘锋，等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学，2015，**36**(12)：4516-4522.

[20] 李强坤，胡亚伟，罗良国. 青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析[J]. 环境科学，2012，**33**(5)：1579-1586.

[21] 苏文辉，于晓菲，王国平，等. 沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响[J]. 环境科学，2015，**36**(4)：1431-1436.

[22] 李强坤，胡亚伟，宋常吉. 农田排水沟渠净化非点源污染的研究实践和关键问题[A]. 见：中国环境科学学会学术年会论文集(第二章)[C]. 成都：中国环境科学学会，2014. 580-583.

[23] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京：中国环境科学出版社，2002.

[24] 胡亚伟，李强坤，陈伟伟. 沟渠水深变化对氮、磷污染物截留效果分析[J]. 灌溉排水学报，2014，**33**(S1)：154-156.

[25] Hu Y W，Li Q K，Chen W W. The ditch water flow rate of nitrogen and phosphorus Non-point source pollutants intercept effect analysis and research[A]. In：2014 International Conference on Remote Sensing and Smart City[C]. Shenzhen：RSSC，2014. 258-266.

[26] 李强坤，宋常吉，胡亚伟，等. 模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究[J]. 环境科学，2016，**37**(2)：520-526.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 8

Aug. 15, 2016

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China ····· CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, *et al.* (2815)

Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China ····· LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, *et al.* (2823)

Diurnal Variation of $PM_{2.5}$ Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date ····· MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)

Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015 ····· CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, *et al.* (2847)

Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang ····· ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, *et al.* (2855)

Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain ····· JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, *et al.* (2863)

Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaxing City ····· SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, *et al.* (2871)

Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City ····· ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, *et al.* (2881)

Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case ····· LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)

Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin ····· GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, *et al.* (2897)

Assessment of Gaseous Nitrogen (NH_3 and N_2O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation ····· FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, *et al.* (2906)

Soil CO_2, CH_4 and N_2O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons ····· WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)

Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir ····· ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, *et al.* (2924)

Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir ····· ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, *et al.* (2932)

Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed ····· WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, *et al.* (2940)

Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai ····· XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, *et al.* (2947)

Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River ····· WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, *et al.* (2957)

Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream ····· LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, *et al.* (2964)

Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch ····· LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, *et al.* (2973)

Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir ····· CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, *et al.* (2979)

Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area ····· LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, *et al.* (2989)

Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region ····· CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, *et al.* (3001)

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China ····· WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, *et al.* (3007)

Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River ····· CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, *et al.* (3017)

Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland ····· WANG Qi-dong, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, *et al.* (3026)

Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers ····· LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, *et al.* (3034)

Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan ····· CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, *et al.* (3041)

Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season ····· ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, *et al.* (3049)

Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands ····· ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, *et al.* (3058)

Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce^{3+} and Cu^{2+} Ions ····· ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, *et al.* (3067)

Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor ····· DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, *et al.* (3073)

Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol ····· XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)

Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO_2 in Aqueous Solution ····· YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, *et al.* (3086)

Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine ····· MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, *et al.* (3094)

Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater ····· LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, *et al.* (3101)

Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor ····· WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, *et al.* (3108)

Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment ····· LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, *et al.* (3114)

Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia ····· GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, *et al.* (3120)

Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition ····· MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, *et al.* (3128)

Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid ····· HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, *et al.* (3135)

Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province ····· WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, *et al.* (3144)

Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics ····· ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, *et al.* (3151)

Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties ····· FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, *et al.* (3160)

Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method ····· LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, *et al.* (3169)

Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu^{2+}, Zn^{2+} Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions ····· ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, *et al.* (3177)

Preparation and NH_4^+-N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges ····· WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, *et al.* (3186)

Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions ····· ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, *et al.* (3192)

Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid ··· ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, *et al.* (3201)

Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization ····· JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, *et al.* (3208)

Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA ····· WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, *et al.* (3216)

Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance ····· LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, *et al.* (3224)

Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils ····· LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, *et al.* (3229)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：赵进才

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　刘　毅　汤鸿霄　孟　伟　周宗灿　林金明

赵进才　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2016 年 8 月 15 日　第 37 卷　第 8 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 8　Aug. 15, 2016

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	赵进才	**Editor-in -Chief**	ZHAO Jin-cai
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国 内 定 价：120.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行