

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧, 朱彬, 高晋徽, 张恩红, 王红磊, 陈烨鑫, 王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳, 魏建苏, 严文莲, 吕军, 孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏, 张国庆, 王剑琼, 吴昊, 李宝鑫, 王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华, 王东方, 赵倩彪, 崔虎雄, 李娟, 段玉森, 伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊, 朱彬, 安俊琳, 段卿, 邹嘉南, 沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙龙, 陆钊, 张天舒, 伍德侠, 盛世杰, 陆亦怀, 刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真, 赵亚丽, 赵浩宁, 梁兴印, 孙静雯, 王保贵, 王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利, 杨力, 孙剑宇, 梁欣欣, 虎雪姣, 孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强, 陈秋方, 孙在, 蔡志良, 杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣, 丁永建, 曾国雄, 吴锦奎, 秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹, 陈能汪, 吴殷琪, 莫琼利, 周兴鹏, 鲁婷, 田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷, 秦延文, 马迎群, 赵艳民, 时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞, 王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕, 石安邦, 瞿杨晨, 岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀, 金军, 何畅, 王英, 马召辉, 李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠, 杨继伟, 钱靖, 董玉红, 唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波, 盛明, 朱强, 杨霜, 檀炳超, 范冉, 南旭军, 何茂阳, 王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新, 梁新强, 吴明, 叶小齐, 蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊, 李云梅, 吕恒, 朱利, 吴传庆, 杜成功, 王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁, 江韬, 闫金龙, 魏世强, 王定勇, 卢松, 李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐, 江韬, 卢松, 闫金龙, 高洁, 魏世强, 王定勇, 郭念, 赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉, 周雪峰, 胡学香, 胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋, 万金泉, 马邕文, 黄明智, 王艳, 陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺, 曾思思, 梁思, 韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖, 黄玉婷, 葛川, 张浩, 陈昕, 张志剑, 罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康, 常晋, 王先宝, 刘柯君, 王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥, 张大林, 黄勇, 陈宗炬, 袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝, 倪晓棠, 魏源送, 佟娟, 王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静, 王广启, 曹知平, 李中华, 胡玉瑛, 王凯军, 左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲, 任杰, 宋志文, 吴等等, 夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青, 刘锐, 罗金飞, 王根荣, 陈吕军, 刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华, 张芹, 白旭丽, 刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华, 白旭丽, 张芹, 刘毅, 贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东, 胡晓娜, 章小强, 刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华, 张玮, 顾琬雯, 张瑞雷, 王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨, 杨贵芹, 陆琴, 周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超, 王宁, 杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵, 熊黑钢, 陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮, 李忠武, 黄斌, 王艳, 张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰, 唐冰培, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟, 段碧辉, 夏全杰, 矫威, 郭再华, 胡承孝, 赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪, 王继华, 关键飞, 杨雪辰, 陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军, 何丙辉, 赵旋池, 李源, 毛文韬, 曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲, 王世杰, 罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺, 廖婷婷, 王睿, 郑循华, 胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹, 王彬, 王云琦, 张会兰, 杨松楠, 李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇, 卓钟旭, 孙水裕, 罗光前, 李晓明, 谢武明, 王玉洁, 杨佐毅, 赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春, 江梅, 邹兰, 李晓倩, 魏玉霞, 赵国华, 张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)	

合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征

李如忠, 杨继伟, 钱靖, 董玉红, 唐文坤

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要: 为揭示源头溪流中深潭和曲折沟渠两种典型渠道形态的氮磷养分滞留特征, 在合肥城郊二十埠河的某一级支流上, 以 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 为添加营养盐, 以 NaCl 为保守型示踪剂, 开展现场示踪实验. 在此基础上, 利用 OTIS 模型软件、暂态存储参数和养分螺旋原理, 解析深潭和曲折沟渠氮磷滞留特征. 结果表明: ① 深潭的 A_s 值较曲折沟渠大, 但其 α 值则较弯曲沟渠小 1 个数量级, 而且 A_s 和 α 值随水文条件变化均不显著; ② 深潭中主渠道流动水体的 $\text{NH}_4^+ - \lambda$ 较其暂态存储区的 $\text{NH}_4^+ - \lambda_s$ 高 2~3 个数量级, 曲折沟渠的 $\text{NH}_4^+ - \lambda$ 与 $\text{NH}_4^+ - \lambda_s$ 数值较为接近; ③ 深潭中 $\text{NH}_4^+ - V_f$ 较 $\text{SRP} - V_f$ 高 1~2 个数量级, 而在曲折沟渠中, 不仅 $\text{NH}_4^+ - V_f$ 与 $\text{SRP} - V_f$ 数值较为相近, $\text{NH}_4^+ - S_w$ 与 $\text{SRP} - S_w$ 也基本相当; ④ 深潭的 $\text{NH}_4^+ - U$ 较 $\text{SRP} - U$ 高出 2~3 个数量级, 曲折沟渠 $\text{NH}_4^+ - U$ 则较 $\text{SRP} - U$ 高出 1~2 个数量级; ⑤ 总的来说, 在对 NH_4^+ 和 SRP 滞留影响方面, 深潭和曲折沟渠存在较大的差异性, 且在深潭中 NH_4^+ 的滞留效应显著超过 SRP .

关键词: 源头溪流; 氮磷滞留; 养分螺旋; 暂态存储区; OTIS 模型; 渠道形态

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3365-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.017

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China

LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, DONG Yu-hong, TANG Wen-kun

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To investigate the characteristics of ammonium and phosphorus retention in two typical channel forms, deep pool and winding ditch in headwater stream, four field tracer experiments were conducted in a first-order stream of Ershibu River in Hefei suburban, in which a solution of biologically active (NH_4Cl and KH_2PO_4) and conservative (NaCl) tracers was released to the head of each reach at a constant rate. According to the data sets of tracer experiments, mechanisms of ammonium and phosphorus retention were interpreted by using OTIS model code, transient storage metrics and nutrient spiraling theory. Study results showed that: ① The value of A_s in deep pool was larger than that in winding ditch, whereas its value of hydrological parameter α was lower by an order of magnitude than that of winding ditch; ② The value of $\text{NH}_4^+ - \lambda$ in main channel was higher by two to three orders of magnitude than that of $\text{NH}_4^+ - \lambda_s$ in transient storage zone in deep pool, but in winding ditch the two parameters were closer in terms of numerical size; ③ In deep pool, the value of $\text{NH}_4^+ - V_f$ was higher by an order of magnitude than that of $\text{SRP} - V_f$, in winding ditch, however, not only the two values of $\text{NH}_4^+ - V_f$ and $\text{SRP} - V_f$ were close to each other, but $\text{NH}_4^+ - S_w$ was nearly equal to $\text{SRP} - S_w$ in numerical size as well; ④ The value of $\text{NH}_4^+ - U$ was larger by two to three orders of magnitude than that of $\text{SRP} - U$ in deep pool, whereas in winding ditch $\text{NH}_4^+ - U$ was just larger by one to two orders of magnitude than $\text{SRP} - U$ in size; ⑤ In general, significant difference existed between deep pool and winding ditch in the effect on ammonium and phosphorus retention, and marked retention efficiency was observed for ammonium rather than SRP in deep pool.

Key words: headwater stream; nitrogen and phosphorus retention; nutrient spiraling; transient storage zone; OTIS (one-dimensional transport with inflow and storage) model; channel forms

源头溪流是河流、湖、库水系统的重要组成部分, 其长度甚至可能达到整个河流水系总长度的 85% 以上^[1], 因此在整个水系统中扮演者非常重要的角色. 源头溪流是汇水区氮磷营养盐汇集和向下游水体传输的重要载体和通道, 尽管其尺度较小, 但由于数量庞大, 在微生物活性较强的季节, 源头溪流可以将来自汇水区 50% 以上的无机氮滞留和转化^[2]. Alexander 等^[3]在密西西比河流域河流尺度对于氮传输影响的研究中发现, 等级较低小河流可以将 60% 以上的氮滞留下来, 而等级较高的大河流

滞留率则仅为 10% 左右. 源头溪流氮磷营养盐的吸收和去除过程主要发生在水底沉积物和附着的生物膜表层, 由于具有较浅的水深和较大的面积-体积比, 因此具有比大河流更短的养分吸收长度, 特别是当输入的无机氮浓度较低时, 源头溪流甚至可以在几分钟至几小时、几十米至数百米的时空尺度下将输入的无机氮去除和转化^[2]. 在农业生产区, 源头

收稿日期: 2014-02-13; 修订日期: 2014-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179042)

作者简介: 李如忠(1970~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水环境保护与修复机制, E-mail: Lrz1970@163.com

溪流基本都源自田间地头,直接承纳地表径流以及农田排水裹挟的氮磷营养物,因此充分发挥溪流水体的养分滞留功能,对于调控和减轻非点源污染影响无疑具有重要意义,并已成为当前欧美发达国家环境科学、环境水文地质学等领域研究的热点^[4,5].

暂态存储区是溪流中迟滞和削减氮磷负荷的重要场所^[6]. 20 世纪 90 年代以来,不断有学者从潜流带、滞水区等的暂态存储作用出发,利用养分螺旋原理解析溪流氮磷养分滞留特征和滞留效应^[7~9]. 研究发现,溪流的地形和地貌支配着溶质在溪水中的滞留时间^[10],并通过影响溪水与水底反应性生物地球化学基质的暴露接触而间接影响溪水中的溶质吸收^[11]. 因此,地形与地貌条件在影响溪流形态特征的同时,也在一定程度上制约了氮磷的滞留^[12]. 近年来,我国开始有学者关注源头溪流等小尺度水体氮磷浓度变化和衰减规律^[13~15],但基本都还处在起步阶段. 巢湖是我国“九五”至“十二五”期间重点治理的湖泊之一,目前该湖泊流域也正面临非点源氮磷负荷削减和控制的棘手难题. 为充分发挥源头溪流、农业沟渠氮磷养分滞留功能,本研究拟以合肥城郊二十埠河的某一级支流为例,针对深潭和曲折沟渠两种典型渠道形态开展氮磷养分滞留特征分析,以期对溪流氮磷滞留能力评估和以提高养分滞留能力为目标的水环境生态修复方案制定提供依据.

1 研究区概况

二十埠河发源于长丰县三十头乡南部,为巢湖北部入湖河流南淝河的最大支流,流域面积 136 km²,全长 27.0 km,上游为农业生产区,中下游为城市用地,是合肥市城区东部的一条重要季节性河流. 该河上游有多条支流,每一支流上又有着数目不等的多条低等级源头溪流. 在合肥市区东北部城郊的新蚌埠路附近选择一条典型源头溪流(一级支流),该溪流长约 1.5 km,在陶冲水库泄水闸下方 1 km 处与陶冲水库支流交汇. 溪流外形蜿蜒曲折,水面宽约 0.7~3.0 m,水深 0.10~0.55 m,流速 0.1~0.5 m·s⁻¹,流量 0.030~0.055 m³·s⁻¹,渠道坡降约 0.002. 该溪流原本主要靠上游多个小水塘出流来补给,但随着中游多处居民住宅小区和沿街商业店面的陆续出现,部分无法进入主城区排水管网系统的生活污水在经化粪池出流后进入了溪流中,从而提高了溪流水体氮磷污染水平. 溪流中下游两侧主要为蔬菜种植用地,并有多座水泥搅拌站. 由于沟

渠缺乏有效的维护和管理,渠道边坡坍塌较为普遍.

所研究的深潭和曲折沟渠位于同一条溪流上,且曲折沟渠位于深潭下方 50 m 处. 深潭形如弯月,长约 20 m,宽 1.5~2.8 m,水深 0.40~0.55 m,潭内速度 0.08~0.15 m·s⁻¹. 深潭左侧下切深度大约为 3 m,紧贴右侧岸上建有一座两层平房. 夏秋季节,深潭两侧水面生长大量水花生和空心菜等浮水植物,水面覆盖度达 40%,底质主要为淤泥和植物残体. 选定的曲折沟渠长度大约 40 m 左右,以自然沟渠特征为主,下切深度约 1.0 m 左右,由于土质边坡坍塌和落入渠道中废弃建筑砖块的影响,沟渠内水流形态极不规则,河床上还有多个尺度稍小的水坑,使得溪流水面宽窄变化频频,大约为 0.5~2.0 m. 夏秋时节,渠道滨岸水花生等大型水生植物生长旺盛,渠道沉积物主要由淤泥、植物残体和砾石组成.

2 模型与方法

2.1 野外现场示踪实验

2013 年 11 月~2014 年 1 月,分 4 次在选定的深潭和曲折沟渠开展野外示踪实验,且每次实验都首先针对下游的曲折沟渠,待实验结束后再开展上游的深潭实验. 在溪流入潭前、后和曲折沟渠进、出口处,都分别设置 1 个采样点,称之为采样点 A 和 B(图 1). 为确保示踪剂与溪水的充分混合,将投加点分别设在深潭、曲折沟渠采样点 A 的上方 15 m 和 22 m 处. 选择 NH₄Cl 和 KH₂PO₄ 为添加营养盐,以 NaCl 为保守型示踪剂. 除第 1 次实验中仅用 KH₂PO₄ 和 NaCl 混合投加外,其余 3 次均以 NH₄Cl、KH₂PO₄ 和 NaCl 混合投加. 将示踪剂用溪水混合均匀,采用恒定连续投入的方式进行示踪剂投加(混合液的投加速度控制在 20 mL·s⁻¹),并在投加前采

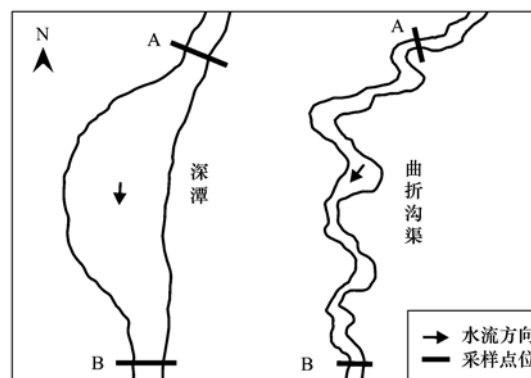


图 1 两种渠道形态及其相应的采样点示意

Fig. 1 Sketch map of two typical channel forms and the respective sampling points

集背景水样,得到整个沟渠的 Cl^- 、 NH_4^+ 和 SRP 背景浓度平均值,分别为 100、15 和 $1.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

实验过程中对采样点 A、B 同步采集水样,采样时间间隔为 1 min 或 0.5 min。对采样点 B 现场测定水样的电导率,待电导率值达到稳定状态后停止投加示踪剂,并在电导率回到背景值后停止采样,从而可以获得完整的浓度-时间穿透曲线(breakthrough curve, BTC)。样品以 100 mL 聚乙烯瓶保存,在 16 h 内完成 Cl^- 、 NH_4^+ 和 SRP(溶解反应性磷酸盐)浓度的测定。将每份水样平分为大致相等的两份,其中一份采用氯离子选择性电极法(雷磁 232-01 参比电极、PCI-1-01 氯离子电极)测定 Cl^- 浓度;另一份在经过滤处理后,采用纳氏试剂分光光度法测定 NH_4^+ 浓度,以钼锑抗分光光度法测定 SRP 浓度。

2.2 OTIS 模型

OTIS(one-dimensional transport with inflow and storage)模型是一个专门用于描述小尺度河流水体溶质迁移转化规律的数学模型,它是由主渠道流动水体与暂态存储区两方面的控制方程耦合而成^[16]。对于非保守型溶质,OTIS 模型的微分方程形式可表示如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{q_L}{A} (c_L - c) + \alpha (c_s - c) - \lambda c \quad (1)$$

$$\frac{dc_s}{dt} = -\alpha \frac{A}{A_s} (c_s - c) - \lambda_s c_s \quad (2)$$

式中, c 为主渠道流动水体的溶质浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Q 为溪流流量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; A 为溪流断面面积, m^2 ; D 为纵向扩散系数, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$; q_L 为侧向补给强度, $\text{m}^3\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$; c_L 为侧向补给水的溶质浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; α 为溪流流动水体与暂态存储区之间的交换系数, s^{-1} ; c_s 为暂态存储区的溶质浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; A_s 为暂态存储区断面面积, m^2 ; λ 为主渠道流动水体溶质一阶吸收系数, s^{-1} ; λ_s 为暂态存储区溶质一阶吸收系数, s^{-1} ; t 为时间, s ; x 为长度, m 。

这里,模型参数 A 、 A_s 、 D 、 Q 、 q_L 和 α 主要反映水文过程的影响,通常称为水文参数;生物吸收、非生物吸附等非水文参数过程的影响,则是通过一阶吸收系数 λ 和 λ_s 来体现。OTIS 模型求解及其参数的确定,可以借助美国地质调查局(USGS)学者 Runkel 开发的 OTIS 应用程序包和 OTIS-P 参数自动优化包,采用两步法来实现^[16],即首先根据保守型

示踪剂的 BTC 信息,计算水文参数(即令 $\lambda = \lambda_s = 0$);然后,再根据添加营养盐的 BTC,优化计算 λ 和 λ_s 。

2.3 暂态存储参数

暂态存储区的溶质滞留潜力,通常都是借助下述 3 个指标来反映,即:

$$L_s = Q/(\alpha A) \quad (3)$$

$$T_s = A_s/(\alpha A) \quad (4)$$

$$R_h = T_s/L_s = A_s/Q \quad (5)$$

式中, L_s 为行进长度, m ; T_s 为滞留时间, s ; R_h 为水力滞留因子, $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

从定义上看, L_s 表示溶质在进入暂态存储区之前,在溪流中的行进长度^[17]; T_s 表示溶质在随水流进入暂态存储区后,在暂态存储区内的滞留时间; R_h 则表示 T_s 与 L_s 的比值^[18]。由于 R_h 没有考虑参数 α 的影响,难以全面反映暂态存储区的重要作用。为此, Runkel^[19] 又提出了一个新指标:

$$F_{\text{med}} \cong (1 - e^{-L\alpha/v}) \times \frac{A_s}{A + A_s} \quad (6)$$

式中, L 为河段长度, m ; F_{med} 称为行进时间中值, %。

这里, F_{med} 表示溶质在暂态存储区的行进时间占溶质总平均运移时间的比率,因此它可以用于反映暂态存储区对于保守型溶质运移过程的影响程度^[20]。考虑到 F_{med} 数值大小与河段长度有关,为便于对不同长度的溪流段进行比较, Runkel 建议取 $L = 200 \text{ m}$ 作为标准长度进行计算,即 F_{med}^{200} 。

2.4 营养盐吸收参数

溪流营养盐滞留能力可以利用养分螺旋指标来评估,相应的指标表达式分别为:

$$S_w = u/k \quad (7)$$

$$V_f = k \times h = \frac{u \times h}{S_w} \quad (8)$$

$$U = V_f \times c \times 1\,000 \quad (9)$$

式中, S_w 表示吸收长度, m ; V_f 表示吸收速度(也称物质传输系数), $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; U 表示单位面积吸收速率, $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$; u 表示河水平均流速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; h 表示溪流平均深度, m ; k 表示营养盐综合衰减系数, s^{-1} ; c 表示溪流中营养盐背景浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 1 000 表示量纲换算值。

从定义上看, S_w 表示溪流中营养盐在被去除之前在溪水中的平均行进距离, V_f 反映溪水中营养盐的吸收速度, U 则是表征溪流表层单位面积沉积物的营养盐吸收速率。

2011 年, Argerich 等^[7] 提出了一个基于 OTIS 模

型参数的养分综合衰减系数计算式,即:

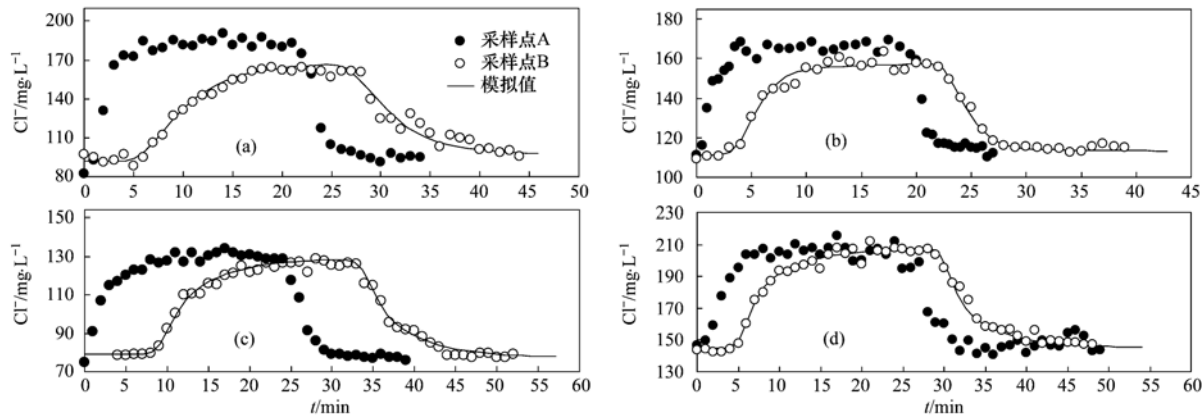
$$k = \lambda + \frac{\alpha \lambda_s A_s}{\alpha A + \lambda_s A_s} \tag{10}$$

3 结果与分析

3.1 水文参数估算

根据示踪实验数据信息,可以绘制深潭、曲折沟渠的示踪剂 Cl⁻ 浓度-时间穿透曲线,即 BTC 曲线. 限于篇幅,这里仅提供两次现场示踪实验 BTC 曲线. 其中,图 2(a)和 2(c)、图 2(b)和 2(d)分别对应于 2013-11-06 和 2013-12-04 实验中深潭

和曲折沟渠的 Cl⁻ 浓度 BTC. 将采样点 A 的水文水质数据信息作为上游边界条件,由采样点 B 的 Cl⁻ 浓度 BTC 曲线,以及由实测及计算得到的溪流断面面积、流量等数据信息,利用 Runkel 开发的 OTIS 应用程序包和 OTIS-P 参数自动优化包,计算深潭、曲折沟渠相应的 OTIS 模型水文参数值,结果见表 1. 可以看出,深潭的 A_s 值较曲折沟渠更大一些,但两者的 A_s 值随水文条件的变化都不十分明显. 不仅如此,深潭和曲折沟渠的 α 值随水文条件变化平稳,但深潭的 α 值基本上都较曲折沟渠小 1 个数量级.



(a)和(b)对应于深潭,(c)和(d)对应于曲折沟渠

图 2 实测及模拟的 Cl⁻ 浓度穿透曲线

Fig. 2 Breakthrough curves of observed and simulated Cl⁻ concentrations

表 1 OTIS 模型的各项水文参数值

Table 1 Hydrological parameters in OTIS model

项目	时间	$Q/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$D/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	A/m^2	A_s/m^2	α/s^{-1}	$q_t/\text{m}^3 \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$	DaI
深潭	2013-11-06	0.030	0.11	0.59	0.83	6.60E-04	5.50E-05	0.56
	2013-11-22	0.050	0.14	0.61	0.79	7.00E-04	3.00E-05	0.57
	2013-12-04	0.052	0.24	0.56	0.65	9.34E-04	1.50E-04	0.77
	2014-01-04	0.036	0.10	0.53	0.83	3.27E-04	2.50E-06	0.34
曲折沟渠	2013-11-06	0.033	0.04	0.42	0.11	1.23E-03	0	7.95
	2013-11-22	0.050	0.20	0.44	0.30	1.79E-03	0	4.44
	2013-12-04	0.052	0.17	0.32	0.15	1.35E-03	0	2.44
	2014-01-04	0.036	0.16	0.30	0.14	4.09E-04	0	1.06

OTIS 模型对于暂态存储过程的灵敏性和由 OTIS-P 优化得到的水文参数的可靠性,常用达姆科勒数(DaI)来评估,相应的计算式为 $\text{DaI} = [\alpha(1 + A/A_s)L]/v$. 一般认为,当 DaI 值处于 0.1 ~ 10 时,参数值都是可以接受的,特别是当 DaI 值接近 1.0 时,参数的不确定性达最低. 由表 1 可见,深潭和曲折沟渠水文参数对应的 DaI 值均在 0.34 ~ 7.95 之间,表明模型水文参数的计算结果具有较高的可靠性. 与国外尺度大小相同或相近的沟渠、溪流水体相比^[20~23],

深潭和曲折沟渠的 α 值基本处于同一数量级.

3.2 暂态存储参数计算

根据表 1 的水文参数值计算结果,由式(3) ~ (6)计算得到深潭和曲折沟渠的暂态存储能力参数值,见表 2. 不难看出,深潭的溶质滞留时间显著超过曲折沟渠,从而可以延长深潭中溶质与生物或底质的接触时间,这对于氮磷营养盐的生物吸收或非生物吸附是有利的. 这里,深潭的 A_s/A 比值和 F_{med}^{200} 均明显高于曲折沟渠,表明该深潭具有较曲折沟渠

更高的暂态存储能力,而且深潭的水力滞留因子 R_h 明显高于曲折沟渠,也在很大程度上支持了这一论断. 表 2 给出了其它一些在空间尺度、水文条件等

方面与本研究溪流基本相近的沟渠、溪流水体暂态存储参数值. 不难看出,不同水体参数值存在一定

表 2 暂态存储参数值

Table 2 Values of transient storage metrics

项目	时间	T_s/s	L_s/m	$R_h/s \cdot m^{-1}$	$F_{med}^{200}/\%$	A_s/A
深潭	2013-11-06	3 108. 42	108. 33	28. 69	49. 18	1. 40
	2013-11-22	1 849. 60	117. 38	15. 76	46. 17	1. 30
	2013-12-04	1 228. 15	98. 52	12. 47	46. 42	1. 15
	2014-01-04	4 820. 11	209. 44	23. 01	37. 63	1. 58
曲折沟渠	2013-11-06	217. 30	63. 80	3. 41	20. 12	0. 27
	2013-11-22	378. 29	63. 03	6. 00	38. 74	0. 68
	2013-12-04	347. 69	120. 37	2. 89	25. 88	0. 47
	2014-01-04	1 163. 02	294. 64	3. 95	15. 87	0. 48
St. Kevin Gulch 溪流 ^[17]	—	173	670	—	—	0. 069
Maimai 流域一级支流 ^[18]	—	38 520 ~ 63 360	274 ~ 381	0. 10 ~ 0. 23	—	0. 36 ~ 0. 58
Ball Creek ^[21]	1996-10-24	180	53	3. 38	—	0. 367
Red Canyon Creek ^[23]	—	120	530	0. 22	3. 2	0. 06

3.3 氮磷营养盐吸收参数

根据水文参数值(表 1),利用式(7)~(10)计算深潭和曲折沟渠氮磷营养盐吸收参数值,结果见表 3 和表 4. 单就深潭而言,主渠道流动水体 $NH_4^+-\lambda$ 较其暂态存储区 $NH_4^+-\lambda_s$ 高 2~3 个数量级,而 $SRP-\lambda$ 与 $SRP-\lambda_s$ 则基本处于同一数量级,但数值相当小. 而且,无论是主渠道还是暂态存储区,深潭的 $NH_4^+-\lambda$ 一阶

吸收系数均较 SRP 相应吸收系数高出 1~2 个数量级. 由 $NH_4^+-S_w$ 较 $SRP-S_w$ 低 1~2 个数量级,表明 NH_4^+ 较 SRP 更容易在深潭中滞留. 深潭中, $NH_4^+-V_f$ 较 $SRP-V_f$ 高 1~2 个数量级, NH_4^+-U 较 $SRP-U$ 更是高出 2~3 个数量级,表明深潭对于 NH_4^+ 的滞留效应显著超过 SRP . 因此,从提高氮素的削减和控制来看,适当增加深潭所占比重可能更为有利.

表 3 NH_4^+ 的一阶吸收系数和养分螺旋指标值

Table 3 First-order uptake coefficients and nutrient spiraling metrics for NH_4^+

项目	时间	λ/s^{-1}	λ_s/s^{-1}	k/s^{-1}	$NH_4^+-S_w/m$	$NH_4^+-V_f/m \cdot s^{-1}$	$NH_4^+-U/mg \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$
深潭	2013-11-22	1. 17E-04	8. 21E-06	1. 27E-04	6. 47E + 02	5. 08E-05	7. 52E-01
	2013-12-04	2. 90E-06	1. 84E-09	2. 90E-06	3. 17E + 04	1. 16E-06	1. 51E-02
	2014-01-04	-5. 00E-06	-1. 00E-05	-2. 16E-05	-3. 18E + 03	-8. 62E-06	-1. 16E-01
曲折沟渠	2013-11-22	4. 29E-05	1. 53E-05	5. 32E-05	2. 13E + 03	1. 60E-05	2. 39E-01
	2013-12-04	6. 72E-05	3. 05E-05	8. 14E-05	1. 99E + 03	1. 63E-05	2. 05E-01
	2014-01-04	2. 87E-07	1. 16E-04	4. 88E-05	2. 47E + 03	9. 75E-06	1. 10E-01

在曲折沟渠方面, $NH_4^+-\lambda$ 、 $NH_4^+-\lambda_s$ 较 SRP 的相应系数高 1~2 个数量级. 但与深潭明显不同的是,曲折沟渠的 $NH_4^+-\lambda$ 与 $NH_4^+-\lambda_s$ 在数值上非常接近. 在吸收长度 S_w 方面,除了 2013-11-22 实验的 SRP 较高以外,曲折沟渠的 $NH_4^+-S_w$ 与 $SRP-S_w$ 基本相近,这与深潭有所不同. 此外,弯曲沟渠中 $NH_4^+-V_f$ 与 $SRP-V_f$ 也大小接近, NH_4^+-U 也仅较 $SRP-U$ 高出 1~2 个数量级,这也与深潭有所不同. 上述情况表明,在对 NH_4^+ 和 SRP 的滞留影响方面,深潭与曲折沟渠有着较为明显的差异性.

总的来看,该源头溪流的 $NH_4^+-V_f$ 与尺度相近的 Open Grounds Farm 农场沟渠十分接近,但其

$SRP-V_f$ 则远小于农场沟渠^[24]. 与受点源污染影响较重的 Spavinaw Creek 支渠相比,两者相应的 $NH_4^+-V_f$ 、 NH_4^+-U 大小相近,而且弯曲沟渠的 $SRP-V_f$ 、 $SRP-U$ 及深潭的 $SRP-V_f$ 与该支渠也大体相当. 特别是,Spavinaw Creek 支渠的 $SRP-V_f$ 和 $SRP-U$ 在冬季也出现了负值^[25]. 与背景浓度较低的 Ball Creek, Sycamore Creek 和 Mack Creek 等小溪相比,尽管研究区源头溪流 $NH_4^+-V_f$ 较之低 1 个数量级,但由于 NH_4^+ 背景浓度相当高,使得研究区溪流 NH_4^+-U 远高于这些水体.

3.4 拟合效果

根据现场示踪实验数据信息,同样可以绘制深

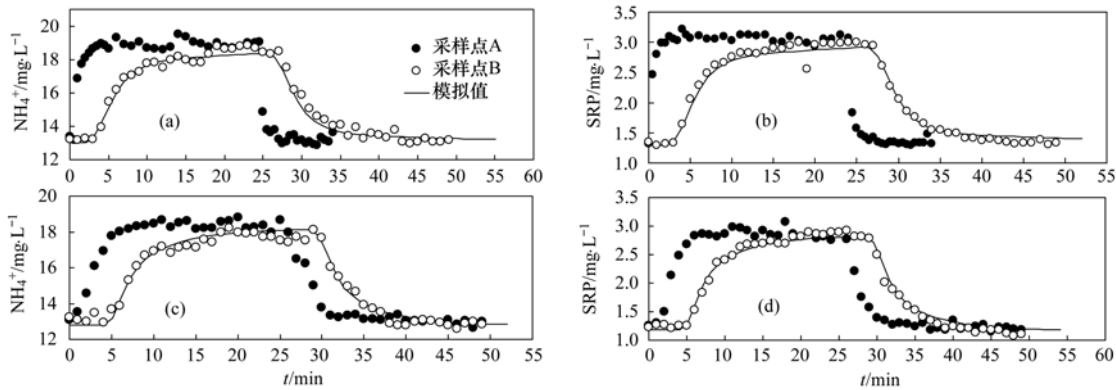
潭、曲折沟渠的 NH_4^+ 和 SRP 浓度-时间穿透曲线. 不妨以 2013-12-04 示踪实验为例,直观展示 NH_4^+ 和 SRP 的 BTC 曲线及其模拟结果,见图 3. 不难看出,两种营养盐浓度曲线上升段的持续时间都很短,

下降速度都很快,且在接近背景浓度时均存在一定的拖尾现象. 但与深潭相比,无论是在浓度上升阶段,还是在停止投加示踪剂后的下降阶段,曲折沟渠持续的时间都较深潭长.

表 4 SRP 的一阶吸收系数和养分螺旋指标值

Table 4 First-order uptake coefficients and nutrient spiraling metrics for SRP

项目	时间	λ/s^{-1}	λ_s/s^{-1}	k/s^{-1}	SRP- S_w /m	SRP- V_f /m·s ⁻¹	SRP- U /mg·(m ² ·s) ⁻¹
深潭	2013-11-06	7.14E-07	7.75E-07	1.80E-06	2.83E+04	7.18E-07	5.74E-04
	2013-11-22	6.92E-07	1.53E-09	6.94E-07	1.19E+05	2.77E-07	4.58E-04
	2013-12-04	1.15E-09	2.28E-07	2.63E-07	3.51E+05	1.05E-07	1.36E-04
	2014-01-04	-1.50E-05	-1.00E-05	-3.16E-05	-2.17E+03	-1.26E-05	-2.40E-02
曲折沟渠	2013-11-06	8.46E-05	1.16E-06	8.49E-05	9.22E+02	3.39E-05	2.38E-02
	2013-11-22	7.68E-06	1.09E-09	7.68E-06	1.47E+04	3.07E-06	4.76E-03
	2013-12-04	2.14E-07	2.80E-04	1.20E-04	1.35E+03	4.80E-05	6.24E-02
	2014-01-04	2.10E-10	8.24E-05	3.57E-05	3.37E+03	1.43E-05	2.14E-02



(a)和(b)分别对应于深潭中 NH_4^+ 和 SRP, (c)和(d)分别对应于曲折沟渠中 NH_4^+ 和 SRP

图 3 实测及模拟的 NH_4^+ 和 SRP 浓度穿透曲线

Fig. 3 Breakthrough curves of observed and simulated NH_4^+ and SRP concentrations

利用线性回归分析中的可决系数,反映实测浓度与模拟浓度的拟合效果^[26]. 在 2013-12-04 示踪实验中,深潭的可决系数值分别为 $R^2(\text{NH}_4^+) = 0.9826 (y = 0.9581x + 0.5185, P < 0.001)$ 和 $R^2(\text{SRP}) = 0.9887 (y = 0.9225x + 0.1471, P < 0.001)$,曲折沟渠的可决系数分别为 $R^2(\text{NH}_4^+) = 0.9799 (y = 1.0299x - 0.3930, P < 0.001)$ 和 $R^2(\text{SRP}) = 0.9921 (y = 0.9609x + 0.1486, P < 0.000)$. 由可决系数的物理意义不难判定,该模拟值与实测值拟合效果较好. 同样,其他几次示踪实验中 NH_4^+ 和 SRP 的可决系数 R^2 也都在 0.9713 ~ 0.9921 之间,表明模拟结果与实测值具有较高的拟合程度.

4 讨论

河流水体 NH_4^+ 滞留主要受硝化作用、植物吸

收、微生物固氮等生物过程以及挥发、吸附等非生物过程的共同影响^[27]. 同样, PO_4^{3-} 也可以通过藻类等水生植物的吸收和同化利用而被滞留,因此 PO_4^{3-} 的衰减同样受到水生植物的影响. 此外, NH_4^+ 还容易被带负电荷的粘土颗粒和有机物颗粒吸附而固定下来^[28], PO_4^{3-} 则易于与铝离子、铁离子、钙离子等形成化学沉淀而从水体中去除. 由于示踪实验均在冬季,沟渠中水生植物均已枯死,不存在水生植物的吸收利用. 事实上,即便是在水生植物生长较为旺盛的夏季,由于营养盐投加实验持续时间短暂,加之溪流本身 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 背景浓度已很高,短期内来自生物过程的贡献可能也微乎其微. 尽管此时水体中 NH_4^+ 和 SRP 去除机制尚难以确定,但可推断来自水中悬浮颗粒物、水底沉积物和植物残体的吸附及截留,可能起到了主导作用. 而且,本研究中的曲折沟渠段过水断面宽窄变化不均、渠道底部大

都坑坑洼洼极不平整,局部渠段甚至形成了水塘的形状,有利于吸附了氮磷养分的颗粒态物质沉积和滞留^[29];不仅如此,相对较大的交换系数 α ,也增大了营养盐与底部基质接触的可能,这或许正是主渠道流动水体与暂态存储区中 NH_4^+ 吸收系数颇为接近的原因所在。

目前,针对源头溪流暂态存储区的氮磷滞留效应还存在一些争议,如 McKnight 等^[30]在对北极地区冰川融雪溪流潜流交换和底部生物群落氮磷滞留影响的研究中发现,暂态存储行为对于 PO_4^{3-} 吸收作用十分有限;Hall 等^[31]指出, NH_4^+ 吸收与暂态存储之间具有很低的相关性,而且没有发现磷吸收与暂态存储存在关联性;另有一些研究也没有发现暂态存储与营养盐吸收之间存在何种联系^[8,21,32]。尽管如此,潜流带和回水滞留区的氮磷滞留效果依旧得到了研究者的普遍认同^[20,33]。本研究得到深潭和曲折沟渠中 NH_4^+ 滞留效应显著超过 SRP,同时发现深潭中主渠道流动水体的 NH_4^+ 吸收系数较暂态存储区高 2~3 个数量级(表 3),而曲折沟渠主渠道流动水体中 NH_4^+ 吸收系数则与暂态存储区接近。这里,深潭与弯曲沟渠在 NH_4^+ 滞留特征方面表现出的显著差异性,显示了源头溪流中氮磷滞留机制的复杂性和不确定性。但上述现象是否具有普遍性,在其他季节是否也具有这一特征,还需要进一步的研究。当然,从增强研究结果的代表性来看,对于水生植物生长较为旺盛和微生物活性较强的春、夏季节,继续开展相关问题的研究可能也是十分必要的。

自然弯曲的溪流形态可以创造有利于潜流交换发生的复杂的水流环境^[34,35],而深潭由于水深较大,潜流带与深潭下部水体之间的交换作用难以对上层水体产生影响^[36]。本研究中,4 次实验得到的深潭交换系数 α 均较曲折沟渠低 1 个数量级,似乎可以印证这一观点。而且,在来水流量不是很大的情况下,输入水量往往难以驱动整个潭内水体的运动,甚至可能形成“短流”。因此,就潜流带与上覆水交换作用对养分滞留的影响来看,深潭水深过大可能未必更有利于养分的滞留。大量研究表明,溪水中氮磷营养盐浓度较高时,氮磷滞留能力将会受到限制^[27,36,37]。Haggard 等^[25]在对点源污染较重的 Spavinaw Creek 支渠研究中,发现 SRP- V_f 和 SRP- U 在冬季为负值。本研究中溪流水体 NH_4^+ 和 SRP 背景浓度平均值分别为 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,已达到饱和浓度水平,加之冬季气温较低,也出现了

NH_4^+ 一阶吸收系数和吸收参数为负值的现象,即营养盐处于释放状态。源头溪流水生态系统的修复和保护是实现非点源氮磷污染控制的一项重要管理决策,也是改善下游水体水质状况的重要措施^[2]。从提高源头溪流氮磷滞留潜力的角度来看,除应加强生态溪流或沟渠的硬件设施建设外,降低入流营养盐浓度可能也十分重要。

5 结论

(1)对巢湖流域二十埠河一级支流开展的野外示踪实验表明,深潭的 A_s 值较纵向尺度稍大的曲折沟渠更大,但其交换系数 α 值却较曲折沟渠小 1 个数量级,而且深潭和曲折沟渠的 A_s 和 α 值随水文条件变化均不显著。

(2)深潭的主渠道中 NH_4^+ 吸收系数较暂态存储区高 2~3 个数量级,且主渠道和暂态存储区 NH_4^+ 一阶吸收系数均较 SRP 对应指标高出 1~2 个数量级。由 NH_4^+ 吸收长度较 SRP 低 1~2 个数量级,以及 NH_4^+ 吸收速度较 SRP 高 1~2 个数量级、面积吸收速率高 2~3 个数量级,表明深潭对于 NH_4^+ 的滞留效应显著超过 SRP。

(3)曲折沟渠的 NH_4^+ 一阶吸收系数也较 SRP 高出 1~2 个数量级,但主渠道与暂态存储区的 NH_4^+ 吸收系数却极为接近,且曲折沟渠中 NH_4^+ 与 SRP 的吸收长度基本相近,与深潭明显不同。此外,曲折沟渠中 NH_4^+ 与 SRP 吸收速度相近, NH_4^+ 单位面积吸收速率也仅较 SRP 高出 1~2 个数量级,表明在对 NH_4^+ 和 SRP 的滞留影响方面,曲折沟渠与深潭存在差异性。

参考文献:

- [1] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1945, **56**(3): 275-370.
- [2] Peterson B J, Wollheim W M, Mulholland P J, et al. Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams[J]. Science, 2001, **292**(5514): 86-90.
- [3] Alexander R B, Smith R A, Schwarz G E. Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico[J]. Nature, 2000, **403**(6771): 758-761.
- [4] Bernot M J, Tank J L, Royer T V, et al. Nutrient uptake in streams draining agricultural catchments of the midwestern United States[J]. Freshwater Biology, 2006, **51**(3): 499-509.
- [5] Gabriele W, Welti N, Hein T. Limitations of stream restoration for nitrogen retention in agricultural headwater streams[J]. Ecological Engineering, 2013, **60**: 224-234.

- [6] Arango C P, Tank J L, Johnson L T. Assimilatory uptake rather than nitrification and denitrification determines nitrogen removal patterns in streams of varying land use [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, **53**(6): 2558-2572.
- [7] Argerich A, Martí E, Sabater F, *et al.* Influence of transient storage on stream nutrient uptake based on substrata manipulation [J]. *Aquatic Sciences*, 2011, **73**(3): 365-376.
- [8] Butturini A, Sabater F. Importance of transient storage zones for ammonium and phosphate retention in a sandy-bottom Mediterranean stream [J]. *Freshwater Biology*, 1999, **41**(3): 593-603.
- [9] Weigelhofer G, Fuchsberger J, Teufl B, *et al.* Effects of riparian forest buffers on in-stream nutrient retention in agricultural catchments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(2): 373-379.
- [10] Valett H M, Morrice J A, Dahm C N, *et al.* Parent lithology, surface-groundwater exchange, and nitrate retention in headwater streams [J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**(2): 333-345.
- [11] Ensign S H, Doyle M W. Nutrient spiraling in streams and river networks [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2006, **111**, G04009, doi: 10.1029/2005JG000114.
- [12] Bottacin-Busolin A, Singer G, Zaramella M, *et al.* Effects of streambed morphology and biofilm growth on the transient storage of solutes [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(19): 7337-7342.
- [13] 毛战坡, 单宝庆, 尹澄清, 等. 磷在农田溪流中的动态变化 [J]. *环境科学*, 2003, **24**(6): 1-8.
- [14] 袁淑方, 王为东. 太湖流域源头溪流氧化亚氮(N_2O)释放特征 [J]. *生态学报*, 2012, **32**(20): 6279-6288.
- [15] 王吉苹, 曹文志, 朱木兰, 等. 五川源头溪流系统氮的迁移和转化 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(1): 351-358.
- [16] Runkel R L. One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for streams and rivers [R]. Virginia: U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 1998. 73-78.
- [17] Harvey J W, Wagner B J, Bencala K E. Evaluating the reliability of the stream tracer approach to characterize stream-subsurface water exchange [J]. *Water Resources Research*, 1996, **32**(8): 2441-2451.
- [18] Gooseff M N, McGlynn B L. A stream tracer technique employing ionic tracers and specific conductance data applied to the Maimai catchment, New Zealand [J]. *Hydrological Processes*, 2005, **19**(13): 2491-2506.
- [19] Runkel R L. A new metric for determining the importance of transient storage [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2002, **21**(4): 529-543.
- [20] Powers S M, Stanley E H, Lottig N R. Quantifying phosphorus uptake using pulse and steady-state approaches in streams [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2009, **7**: 498-508.
- [21] Webster J R, Mulholland P J, Tank J L, *et al.* Factors affecting ammonium uptake in streams-an inter-biome perspective [J]. *Freshwater Biology*, 2003, **48**(8): 1329-1352.
- [22] Wagenschein D, Rode M. Modelling the impact of river morphology on nitrogen retention-A case study of the Weisse Elster River (Germany) [J]. *Ecological Modeling*, 2008, **211**(1-2): 224-232.
- [23] Lautz L K, Siegel D I. The effect of transient storage on nitrate uptake lengths in streams: an inter-site comparison [J]. *Hydrological Processes*, 2007, **21**(26): 3533-3548.
- [24] Ensign S H, McMillan S K, Thompson S P, *et al.* Nitrogen and phosphorus attenuation within the stream network of a Coastal, agricultural watershed [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**(4): 1237-1247.
- [25] Haggard B E, Stanley E H, Storm D E. Nutrient retention in a point-source-enriched stream [J]. *Journal of North American Benthological Society*, 2005, **24**(1): 29-47.
- [26] Gooseff M N, Bencala K E, Scott D T, *et al.* Sensitivity analysis of conservative and reactive stream transient storage models applied to field data from multiple-reach experiments [J]. *Advances in Water Resources*, 2005, **28**(5): 479-492.
- [27] Gucker B, Boëchat I G. Stream morphology controls ammonium retention in tropical headwaters [J]. *Ecology*, 2004, **85**(10): 2818-2827.
- [28] Craig L S, Palmer M A, Richardson D C, *et al.* Stream restoration strategies for reducing river nitrogen loads [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, **6**(10): 529-538.
- [29] 毛战坡, 王世岩, 周晓玲, 等. 六岔河流域多水塘-沟渠系统中土壤养分空间变异特征研究 [J]. *水利学报*, 2011, **42**(4): 425-430.
- [30] McKnight D M, Runkel R L, Tate C M, *et al.* Inorganic N and P dynamics of Antarctic glacial meltwater streams as controlled by hyporheic exchange and benthic autotrophic communities [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2004, **23**(2): 171-188.
- [31] Hall Jr R O, Bernhardt E S, Likens G E. Relating nutrient uptake with transient storage in forested mountain streams [J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**(1): 255-265.
- [32] Niyogi D K, Simon K S, Townsend C R. Land use and stream ecosystem functioning: nutrient uptake in streams that contrast in agricultural development [J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 2004, **160**(4): 471-486.
- [33] O'Connor B L, Hondzo M, Harvey J W. Predictive modeling of transient storage and nutrient uptake: implications for stream restoration [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, **136**(12): 1018-1032.
- [34] Rhoads B L, Schwartz J S, Porter S. Stream geomorphology, bank vegetation, and three-dimensional habitat hydraulics for fish in midwestern agricultural streams [J]. *Water Resources Research*, 2003, **39**(8), doi: 10.1029/2003WR 002294.
- [35] Bukaveckas P A. Effects of channel restoration on water velocity, transient storage, and nutrient uptake in a channelized stream [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(5): 1570-1576.
- [36] Macrae M L, English M C, Schiff S L, *et al.* Phosphate retention in an agricultural stream using experimental additions of phosphate [J]. *Hydrological Processes*, 2003, **17**(18): 3649-3663.
- [37] Mulholland P J, Helton A M, Poole G C, *et al.* Stream denitrification across biomes and its response to anthropogenic nitrate loading [J]. *Nature*, 2008, **452**(7184): 202-206.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(Ⅲ) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人