

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



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,王翥 (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 ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,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 ₂ O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运输的影响: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,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸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,潘佳钊,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)
甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖晋翠 (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)
聚羧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)
不同氨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)	

农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析

李如忠¹, 黄青飞¹, 钱靖², 殷晓曦¹, 韦林¹

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽省环境科学研究院, 合肥 230071)

摘要: 2015 年 11 月 ~ 2016 年 2 月, 以 NaCl 为示踪剂, 在巢湖流域某一农田源头溪流开展了 5 次野外示踪试验, 并据此计算溪流的物理特征参数和暂态存储指标; 通过对深潭渠段与平直渠段相关指标的比较, 解析人工深潭地貌格局的暂态存储特征。结果表明: ①人工深潭地貌格局渠段 A_s/A 基本都较平直渠段更高, 但其交换系数 α 却较平直渠段低一个数量级; ②人工深潭地貌格局的暂态存储对于溶质滞留的影响较平直渠段大, 但其流动水体的溶质滞留能力则较平直渠段弱; ③尽管深潭地貌格局拥有相对较大的 A_s/A 比值, 但对溶质运移转化的综合影响却低于平直渠段; ④人工深潭的暂态存储指标 F_{med}^{200} 可以解释 18.86% ~ 26.05% 的溶质行进时间, 平直渠段可以解释 5.28% ~ 33.87%, 且大部分情况下平直渠段都较深潭渠段更高; ⑤深潭地貌格局与平直渠段在 φ_w 、 φ_A 和 T_s 方面差异明显, 而在其他指标方面则区别不显著。

关键词: 人工深潭; 暂态存储; 农田源头溪流; OTIS 模型; 浅滩-深潭序列

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2964-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.018

Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream

LI Ru-zhong¹, HUANG Qing-fei¹, QIAN Jing², YIN Xiao-xi¹, WEI Lin¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Institute of Environmental Science, Hefei 230071, China)

Abstract: From November 2015 to February 2016, five short-term tracer injections were performed with a conservative tracer (NaCl) in an agricultural headwater stream, Lake Chaohu basin. Thus the data sets of tracer experiments were finally employed for calculating the physical characteristics and transient storage metrics. Through the comparisons between the artificial pool reach and straight reach, characteristics of transient storage for the artificial pool geomorphic structure were interpreted and explored. Study results showed that: ① The ratio of A_s/A in artificial pool was larger than that in straight reach, whereas its value of exchange coefficient α was lower by an order of magnitude than that of straight reach. ② Artificial pool geomorphic structure had greater influence of transient storage on solute retention than that in straight reach, but its solute retention capacity of flowing water was weaker than that of straight reach. ③ It had a large ratio of A_s/A for the pool geomorphic structure, whereas its impact on the migration and transformation of solutes was less than that of straight reach. ④ Based on the F_{med}^{200} metric, the transient storage accounted for 18.86% to 26.05% of travel time in artificial pool. For the straight reach, the F_{med}^{200} metric had a range of 5.28% to 33.87%. In most cases, the values of F_{med}^{200} metric in straight reach were higher than those in artificial pool. ⑤ Significant differences existed between artificial pool geomorphic structure and straight reach in the values of φ_w , φ_A and T_s , however, the differences were not significant in other indicators.

Key words: artificial pool; transient storage; agricultural headwater stream; OTIS model; riffle-pool sequence

沟渠溪流系统作为生态服务功能重要提供者的角色, 在对汇水区流失氮磷营养盐滞留和对下游河流水质调控方面发挥着重要作用^[1,2]。据估计, 在汇入溪流的营养盐中, 约有 10% ~ 60% 在传输过程中发生滞留^[3]。暂态存储是小河流域系统中影响溶质迁移的重要的水动力学过程, 不仅包括暂态存储区 (如潜流带、滞水区、死水区、漩涡等) 与主流区流动水体的交换作用, 也包括暂态存储区内部溶质的滞留效应, 现已成为农田溪流、排水沟渠营养盐截留、净化和调控机制研究的热点^[4-6]。大量研究表明, 深潭、阶梯、浅滩等河床地貌控制着溪流暂态存储特征^[7-9], 从而影响营养盐的滞留能力^[10-12]。深潭地貌格局的水动力学条件相对较差, 对模拟营

养盐输移扩散规律的水质模型参数影响很大^[13]。由于水流速度较低, 颗粒态溶质容易在深潭中发生物理沉降。近年来, 在欧美国家河流水环境修复中, 修复和重构河道自然特征和深潭地貌格局引起人们的重视^[14,15], 通过改造河流地形地貌以提高暂态存储和营养盐滞留能力的案例也越来越多^[16], 丰富了非点源污染过程阻断与调控技术的科学内涵。

与国外相比, 国内针对深潭地貌的研究, 主要集中在山区溪流阶梯-深潭系统水力特性和地貌特

收稿日期: 2016-03-08; 修订日期: 2016-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51179042, 51579061)

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、非点源污染过程阻断与调控技术, E-mail: Lrz1970@163.com

征方面^[17,18],尽管有学者探讨了山区河流阶梯-深潭、浅滩-深潭水生栖息地改善及其生态学意义^[19,20],但并未涉及深潭地貌格局的暂态存储特征和存储潜力,这与国内针对暂态存储问题研究严重不足的客观现状是一致的。随着国家《水污染防治行动计划》的逐步落实,农田溪流、排水沟渠在农业非点源污染过程阻断和调控中的重要性日益凸显,开展小河流域系统暂态存储机制研究可谓恰逢其时。平直渠段是河流形态结构中相对简单的构造形式,不难料想,若将深潭地貌格局与平直渠段进行比较,则可以更好地展示深潭结构的暂态存储水平。鉴于深潭地貌格局存在的广泛性和对溶质滞留影响的特殊性,本研究拟以巢湖西半湖北侧南淝河流域的某一农业源头溪流为对象,就河床上人为开挖取土形成的深坑/深潭地貌类型,筛选深潭地貌格局特征明显的渠段,并以毗邻的平直渠段为对照,通过物理特征、暂态存储指标的比较以及多元统计分析,解析人工深潭地貌格局的暂态存储特性,以期为包括农田溪流在内的小河流域系统溶质(特别是氮磷营养盐)滞留及调控提供依据。

1 研究区概况

二十埠河位于巢湖西半湖北岸的合肥市城区东北部,是南淝河的主要支流之一。在二十埠河的多条源头溪流中,位于职教城附近的一条长约 2.5 km 的农田溪流,一直都是笔者所在研究团队的主要研究对象^[21~23]。该溪流中下部渠段能够常年保持水体流动状态,水面宽约 0.5 ~ 2.0 m,水深约 0.1 ~ 0.4 m;流速约 0.05 ~ 0.30 m·s⁻¹,流量约 0.01 ~ 0.06 m³·s⁻¹。水体氨氮(NH₄⁺)浓度约为 0.5 ~ 1.0 mg·L⁻¹,溶解性磷酸盐(SRP)浓度约为 0.04 ~ 0.10 mg·L⁻¹。

由于地处两座丘陵岗地之间,溪流主要是由雨水汇流冲刷而成,虽有人工开挖的影响,但仍在很大程度上保留了天然溪流的特征。由于面临城市建设征地,汇水区用于农业耕作的土地面积已不足半数,人工林地、鱼塘和荒地所占比重较大。在溪流的很多地段,滨岸杂草丛生,下切深度达 1.0 ~ 1.5 m。在溪流中上部的大部分渠段,水面两侧不同程度地生长着大型水生植物(如芦苇、水花生或其它湿地杂草),而在下部溪流段,由于溪流过水断面收窄、变深,水流速度加大,局部渠底冲刷明显,致使溪流底质板实,水生植物较少,溪流表现出较为明显的渠道化特征,仅在深潭处存在泥沙淤积现象。由于缺乏

人工管护,溪流土质岸坡存在不同程度的坍塌现象。特别是,由于两侧鱼塘护坡和田埂加固大多直接从溪流河床上取土,导致局部渠段的水面宽度、水体深度差异显著。

本研究所在试验段位于溪流下游且非常类似于渠道形态,长约 150 m,下切深度约 1.5 m,左侧为养鱼塘,右侧为荒草生长茂盛的稀疏林地,沟渠壁面较为陡峭,春、夏季节坡面和渠底几乎都没有大型水生或湿生植物生长。在该渠段中部河床上,明显存在由数个人工开挖深坑串联形成的狭长型深潭地貌格局(图 1)。深潭中水流较缓,潭底有泥沙沉积。深潭渠段上、下部渠道较为平直,水体流动性好,河床较为板结,稀疏地分布着苔藓类植物。

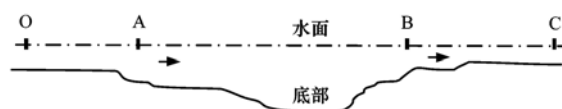


图 1 试验渠段纵向垂直剖面及采样点位置示意

Fig. 1 Vertical profile and sampling sites sketch of the study reach

2 示踪试验设计

2015 年 11 月 ~ 2016 年 2 月,选用 NaCl 为示踪剂,采用恒速连续投加的方式,开展 5 次现场示踪试验。试验渠段示踪剂的投加点和水样采样点的布置情况,见图 1。其中, O 表示投加点, A、B 和 C 分别代表采样点,深潭介于采样点 A、B 之间。其中, OA、AB 和 BC 渠段长度分别为 30、80 和 40 m。为确保混合溶液中氯离子(Cl⁻)在抵达采样点 A 前能够与溪流充分均匀混合,根据已有经验,将 OA 长度确定为 30 m。为满足采样点水流集中、流动性相对较好的条件要求,在深潭的上、下方各留出 5 m 分别作为采样点 A、B。渠段 AB 中,深潭长约 70 m。

现场利用溪水将 NaCl 充分溶解、均匀混合,5 次试验的 NaCl 混合溶液浓度约 75 g·L⁻¹,混合溶液总量约 60 L,释放速度约 30.30 mL·s⁻¹,所有试验均将混合溶液全部投送完毕,试剂投送持续时间约 35 min。3 个采样点的水深都在 15 ~ 20 cm 左右,采样深度大致控制在水面下 5 cm,且在水流相对集中的位置处采样。采样点 A、B 和 C 起始采样时间不完全相同,其中 A 在开始投加时即着手采样, B、C 则有一定程度的滞后。采样点 A 水样采集间隔时间为 1 min,而 B、C 则依据水流速度和扩散条件的不同,选取 1 ~ 4 min 的时间间隔。利用 PVC 塑料瓶(100 mL)采集水样,并以便携式电导率计现场测定电导率,待电导率稳定回到背景值水平后,停止该点位采样。示踪

试验结束后,在多个断面分别测定水深、水面宽度及流速等。水样送回实验室后,利用氯离子选择性电极(参比电极 232-01、氯离子电极 PCl-1-01)和 PXS-215 离子活度计,在 24 h 内完成 Cl^- 浓度的测定,获得 3 个采样点的 Cl^- 浓度-时间过程曲线,即穿透曲线(breakthrough curves, BTCs)。

3 模型与方法

3.1 物理特征指标

溪流过水断面单位宽度流量,即单宽流量(unit discharge)常用于描述和表征溪流不同状态的过流强度,数学表达式为:

$$q = Q/w \quad (1)$$

式中, q 表示单宽流量, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; Q 表示溪流试验断面过水流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; w 表示过流断面宽度, m 。

单位水流功率(unit stream power)表示溪流单位长度的能耗率,可用于反映溪流水体挟沙能力的相对强弱,数学表达式为^[24]:

$$\Omega = rQJ/w \quad (2)$$

式中, Ω 表示单位水流功率, $\text{N} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$; r 表示水的容重, $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$; J 表示溪流河床比降, $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$; 其他变量同上。

溪流地貌形态结构的异质性可以由渠道宽度变化参数和横截面积变化参数来表征,即^[8,24]:

$$\varphi_w = \left(\sum_{i=1}^n |w_{\text{avg}} - w_i| \right) / n \quad (3)$$

$$\varphi_A = \left(\sum_{i=1}^n |A_{\text{avg}} - A_i| \right) / n \quad (4)$$

式中, φ_w 表示渠道宽度变化残差, m ; w_i 和 w_{avg} 分别表示水面实测宽度和平均宽度, m ; φ_A 表示渠道横截面积变化残差, m^2 ; A_i 和 A_{avg} 分别表示渠段水面横截面积和平均横截面积, m^2 ; n 表示断面个数。

显然, φ_w 、 φ_A 残差值越大,意味着溪流渠段的地貌格局差异性越大;反之,则越小。

3.2 暂态存储指标

溪流暂态存储潜力可以利用下述 5 项指标描述^[8],即:

$$L_s = Q/(\alpha A) = u/\alpha \quad (5)$$

$$T_s = A_s/(\alpha A) \quad (6)$$

$$R_h = T_s/L_s = A_s/Q \quad (7)$$

$$F_{\text{med}} = (1 - e^{-L\alpha/u}) \frac{A_s}{A + A_s} \quad (8)$$

$$q_s = \alpha A \quad (9)$$

式中, L_s 表示溶质未进入暂态存储区前,在溪水中

行进长度, m ; T_s 表示溶质在暂态存储区滞留时间, s ; R_h 表示水力滞留因子, $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$; F_{med} 表示溶质平均传输时间中来自暂态存储的贡献,通常以 $L = 200 \text{ m}$ 为标准长度进行比较(即 F_{med}^{200}), %; q_s 表示存储区交换通量, $\text{m}^3 \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$; Q 为溪流流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; u 为溪流流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; α 为暂态存储交换系数, s^{-1} ; A 为溪流主流区断面面积, m^2 ; A_s 为暂态存储区断面面积, m^2 ; L 为渠段长度, m 。

此外, DaI (damkohler number, 无量纲) 也是暂态存储分析中较为常用的评价指标,主要用于检验溪流试验渠段长度选择的合理性。一般认为,当 DaI 值介于 0.1 ~ 10 范围时,参数计算结果可以接受;当 DaI 值接近 1.0 时,参数的不确定性最低,效果更好^[25],数学表达式为:

$$\text{DaI} = \frac{\alpha(1 + A/A_s)L}{u} \quad (10)$$

在式(5) ~ (10)中,参数 α 、 A 和 A_s 为 OTIS 模型的水文参数,可以利用美国地质调查局(USGS)提供的 OTIS 模拟优化计算软件进行参数优化估值^[26]。

3.3 统计分析

利用 SPSS 统计软件中 Spearman 相关系数,分析人工深潭与平直渠段中物理特征、暂态存储指标的相关性;从物理特征和暂态存储指标角度,采用 Mann-Whitney U -tests 秩和检验法,刻画深潭地貌格局与平直渠段暂态存储的差异性,借以展示人工深潭地貌暂态存储的特殊性。

4 结果与分析

4.1 OTIS 模型水文参数确定

5 次示踪试验得到的示踪剂 Cl^- 浓度穿透曲线 BTCs, 见图 2。不难看出,尽管渠段 AB 长度是 BC 的 2 倍,但 A、B 采样点 Cl^- 浓度发生明显变化所对应的时间差,远大于 B、C 采样点位差值;而且,AB、BC 渠段相应采样点的 Cl^- 浓度峰值变化基本都有较大差异,表明人工深潭地貌格局对溪流水流动态性和溶质运移扩散影响颇为显著。

将采样点 A 作为边界条件,基于各采样点 Cl^- 穿透曲线,以及水深、水面宽度和流速等实测数据信息,利用 OTIS 软件包和 OTIS-P 模拟优化软件,计算试验渠段 OTIS 模型水文参数 α 、 A 和 A_s ,以及流量 Q 、扩散系数 D 和侧向补给强度 q_l ,结果见表 1。其中,深潭段、平直段分别与渠段 AB、BC 相对应。具体计算方法,参见文献[11,12]。

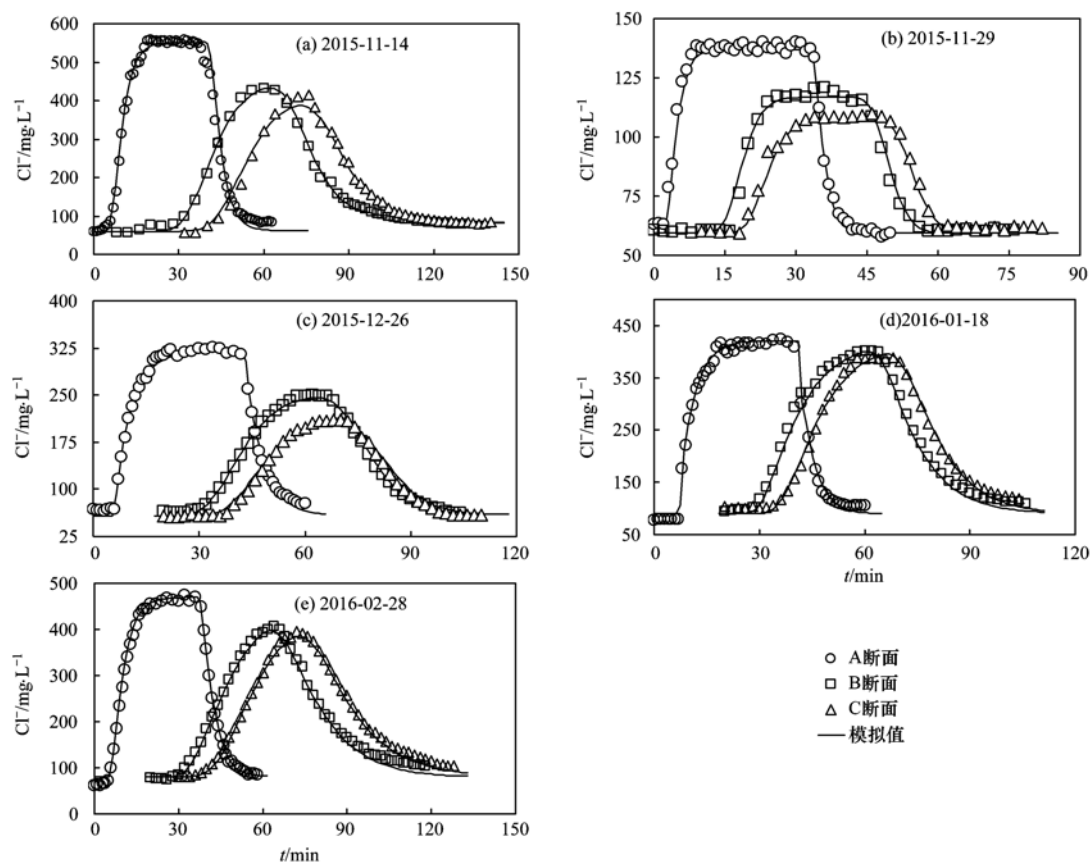


图2 Cl^- 模拟值与实测值的穿透曲线

Fig. 2 Breakthrough curves of simulated and observed concentrations of tracer Cl^-

表1 OTIS 模型水文参数

Table 1 Hydrological parameters in OTIS model								
时间	地貌类型	$Q/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	A/m^2	A_s/m^2	A_s/A	$D/\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$q_L/\text{m}^3\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$	α/s^{-1}
2015-11-14	深潭段	0.015	0.352	0.200	0.568	0.097	2.00E-06	1.71E-04
	平直段	0.017	0.188	0.097	0.516	0.068	4.70E-05	1.81E-03
2015-11-29	深潭段	0.058	0.544	0.777	1.428	0.121	5.00E-05	3.11E-04
	平直段	0.069	0.360	0.152	0.422	0.016	3.00E-04	7.31E-03
2015-12-26	深潭段	0.022	0.425	0.488	1.148	0.086	2.00E-07	1.63E-04
	平直段	0.025	0.139	0.063	0.453	0.016	8.70E-05	2.08E-03
2016-01-18	深潭段	0.015	0.263	0.066	0.251	0.036	1.00E-07	6.87E-04
	平直段	0.015	0.132	0.008	0.061	0.379	4.00E-07	1.46E-03
2016-02-28	深潭段	0.012	0.235	0.075	0.319	0.047	6.00E-07	6.90E-04
	平直段	0.012	0.102	0.081	0.794	0.079	1.00E-06	7.59E-03

有必要指出的是,表1中各参数值仅代表该渠段的平均水平,并不对应某个具体的断面。 A_s/A 和 α 常被作为反映小河流暂态存储潜力的两个重要指标^[21,22],由于深潭所在溪流段 A_s/A 基本都较平直渠段高一些,意味着在空间尺度层面深潭地貌格局可能具有比平直渠段更好的暂态存储潜力。但溪流暂态存储能力是流量、温度、河流形态、河床地貌、底质构成等多种因素综合作用的结果,因此比值

A_s/A 并不能完全代表其他因素的影响。5次试验中,深潭地貌格局的流动水体与暂态存储区之间的交换系数 α 均较平直渠段低一个数量级,这与李如忠等^[27]对深潭与曲折沟渠情形的研究结果相似,即曲折沟渠交换系数 α 较深潭水体高一个数量级。

4.2 溪流物理特征分析

根据试验渠段地形地貌特征,将河床比降粗略取为 $J=0.0020\text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$ 。由AB、BC试验段内多个

断面的水深、水面宽度测量数据,估算各自的单宽流量 q 、单位水流功率 Ω 及渠段断面变化情况指标 φ_w 和 φ_A ,结果见表 2. 可以看出,不论是过流强度还是单位水流功率,深潭地貌格局都低于平直渠段,意味着平直渠段水流挟沙能力相对更强,或说深潭

更有利于颗粒态溶质的沉降. 事实上,现场调查也证实了这一论断. 此外,渠道宽度和横截面积变化参数,也都表现出人工深潭段明显高于平直段的变化特征,表明深潭地貌形态结构的异质性明显超过了平直渠段.

表 2 深潭地貌与平直渠段的物理特征指标

Table 2 Physical characteristic metrics for the artificial pool reach and straight reach					
时间	地貌类型	$q/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\Omega/\text{N} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	φ_w/m	φ_A/m^2
2015-11-14	深潭段	0.018	0.362	0.088	0.038
	平直段	0.033	0.644	0.056	0.002
2015-11-29	深潭段	0.043	0.841	0.282	0.089
	平直段	0.058	1.143	0.069	0.018
2015-12-26	深潭段	0.016	0.305	0.319	0.134
	平直段	0.030	0.590	0.144	0.037
2016-01-18	深潭段	0.013	0.256	0.195	0.091
	平直段	0.016	0.306	0.083	0.023
2016-02-28	深潭段	0.010	0.193	0.210	0.086
	平直段	0.014	0.273	0.127	0.021

4.3 溪流暂态存储潜力分析

在对暂态存储指标 L_s 、 F_{med}^{200} 及 DaI 的计算过程中,流速 u 的确定至关重要. 深潭渠段水流较为缓慢,有些断面甚至接近停滞状态,而在深潭两端靠近采样点 A、B 处,水体流动性则相当的好. 深潭地貌格局中不同空间点位水流速度的显著差异性,使得直接通过测速估算渠段平均水流速度的方法操作起来难度较大,可能存在很大的不确定性. 为此,考虑利用 OTIS 模型模拟得到的流量 Q 和断面面积 A (表 1),近似估算渠段的平均流速 u . 于是,由式(5)~(10)计算得到暂态存储指标值,结果见表 3. 实际上,从渠段内多个断面所测定的水深、水面宽度、单位长度水流时间等一系列数据信息换算得到的流量和流速情况来看,模拟值与实测计算值颇为接近,表明以模拟流速计算暂态存储各项指标是可以接

受的.

由表 3 可见,5 次现场试验得到的 DaI 值均在 0~10 范围内变化,表明两个渠段长度的选择合理,由此得到的暂态存储指标信息是可靠的. 根据定义, T_s 是一个体现暂态存储溶质滞留影响的指标. 一般认为,溪流水系统中较大的 T_s 有利于调控溶质向下游传输的速度,从而缓解下游水体溶质负荷压力,对于可生化降解溶质(如氮、磷营养盐),甚至还可以为溶质与微生物的接触提供更多的机会,从而有利于溶质的降解. 这里,深潭地貌格局的 T_s 明显高于平直渠段,因此从溶质滞留和调控的角度看,人工深潭似乎具有更为有利的条件. 但从指标 L_s 来看,深潭渠段溶质在未进入暂态存储区前在溪流流动水体中的行进长度超过平直渠段,意味着深潭流动水体的溶质滞留水平低于平直渠段,特别是呈溶

表 3 深潭地貌与平直渠段的暂态存储指标

Table 3 Transient storage metrics for the artificial pool reach and straight reach							
时间	地貌类型	T_s/s	L_s/m	$R_h/\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	$F_{\text{med}}^{200}/\%$	$q_s/\text{m}^3 \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$	DaI
2015-11-14	深潭段	992.79	251.46	3.54	19.95	6.02E-05	0.87
	平直段	257.44	49.72	5.62	33.87	3.41E-04	2.33
2015-11-29	深潭段	1240.52	344.05	4.06	26.05	1.69E-04	0.39
	平直段	101.29	26.27	4.43	29.40	2.63E-03	5.18
2015-12-26	深潭段	1355.41	319.01	3.94	22.43	6.92E-05	0.52
	平直段	164.63	86.54	3.09	27.02	2.89E-04	1.54
2016-01-18	深潭段	364.59	83.11	4.39	18.86	1.80E-04	4.81
	平直段	40.35	77.60	0.52	5.28	1.14E-05	7.68
2016-02-28	深潭段	511.51	74.01	6.91	22.57	1.62E-04	4.47
	平直段	279.07	15.50	18.00	44.26	7.74E-04	5.83

解态或离子态溶质. F_{med}^{200} 反映了渠段内暂态存储对于溶质行进时间的贡献水平,其中深潭地貌格局的暂态存储作用可以解释 18.86% ~ 26.05% 的溶质行进时间,平直渠段的暂态存储作用可以解释 5.28% ~ 33.87%,而且绝大部分情况下平直渠段都高于深潭段.

由表 3 可见,深潭段水力滞留因子 R_h 也大都较平直渠段低,这似乎与经验认知存在出入. 大部分试验中,平直渠段暂态存储的交换通量 q_s 都比相应的深潭渠段高一个数量级,意味着平直渠段暂态存储交换作用更为显著一些. 因此,可以认为,该农田溪流平直渠段对于溶解态溶质的滞留潜力似乎较人工深潭更高一些. 总的来看,尽管深潭地貌格局拥有相对较大的 A_s/A 比值(表 1),但其对溶质运移转化过程的影响却低于平直渠段,这与人们的直观感觉存在一定的出入.

4.4 多元统计分析

深潭地貌格局与平直渠段中物理特征、暂态存储各项指标的 Spearman 相关系数情况,分别见表 4 和表 5. 不难看出,无论是深潭地貌格局还是平直渠

段中,存在显著相关关系的指标都不是很多,而且两者具有显著相关的指标也明显不同. 在深潭渠段, q 与 Ω 、 q 与 L_s 、 Ω 与 L_s 呈极显著的正相关关系, q 、 Ω 与 R_h 均呈极显著负相关性, L_s 与 R_h 呈显著负相关关系,其它指标的相关性则不强. 在平直渠段, q 与 Ω 、 φ_w 与 φ_A 、 T_s 与 R_h 、 F_{med}^{200} 与 q_s 均呈极显著的正相关关系, q 、 Ω 均与 φ_w 、 φ_A 均表现出显著的负相关关系. 显然,除了 q 与 Ω 内在关系外,深潭地貌格局与平直渠段的指标相关性差异很大.

根据物理特征和暂态存储指标,利用 Mann-Whitney U -tests 秩和检验法剖析深潭地貌与平直渠段暂态存储的差异性. 不妨假设 H_0 :深潭地貌格局与平直渠段无差异; H_1 :深潭地貌格局与平直渠段有差异. 由于样本容量是小样本($n=5$),不妨采用 U 统计量的单侧精确概率 P 进行假设检验,结果见表 6. 显然,10 项指标中 φ_w 、 φ_A 和 T_s 不仅双侧渐近概率 $P < 0.05$,而且单侧精确概率值也满足 $P < 0.05$,即拒绝零假设 H_0 . 换言之,在 φ_w 、 φ_A 和 T_s 方面,深潭地貌与平直渠段暂态存储存在显著的差异性;而在其他指标方面,两者差异性并不十分明显.

表 4 深潭地貌格局中相关指标的 Spearman 相关系数¹⁾
Table 4 Spearman correlation coefficients between metrics in the pool geomorphic structure

	q	Ω	φ_w	φ_A	T_s	L_s	R_h	F_{med}^{200}	q_s
q	1.000								
Ω	1.000 **	1.000							
φ_w	-0.179	-0.179	1.000						
φ_A	0.286	0.286	0.393	1.000					
T_s	0.000	0.000	0.750	-0.143	1.000				
L_s	0.929 **	0.929 **	0.071	0.464	0.107	1.000			
R_h	-0.893 **	-0.893 **	0.250	-0.214	0.000	-0.821 *	1.000		
F_{med}^{200}	0.357	0.357	0.464	0.179	0.429	0.286	-0.143	1.000	
q_s	0.071	0.071	0.036	0.393	-0.286	0.036	0.321	0.286	1.000

1) * 表示显著性水平 $P < 0.05$; ** 表示显著性水平 $P < 0.01$

表 5 平直渠段中相关指标的 Spearman 相关系数¹⁾
Table 5 Spearman correlation coefficients between metrics in the straight reach

	q	Ω	φ_w	φ_A	T_s	L_s	R_h	F_{med}^{200}	q_s
q	1.000								
Ω	1.000 **	1.000							
φ_w	-0.857 *	-0.857 *	1.000						
φ_A	-0.786 *	-0.786 *	0.929 **	1.000					
T_s	-0.750	-0.750	0.679	0.500	1.000				
L_s	0.036	0.036	0.143	0.393	-0.321	1.000			
R_h	-0.643	-0.643	0.500	0.250	0.929 **	-0.643	1.000		
F_{med}^{200}	0.393	0.393	-0.429	-0.679	0.107	-0.643	0.321	1.000	
q_s	0.571	0.571	-0.464	-0.479	-0.071	-0.679	0.179	0.893 **	1.000

1) * 表示显著性水平 $P < 0.05$; ** 表示显著性水平 $P < 0.01$

表 6 差异性检验结果

Table 6 Results of difference test

指标	双侧渐近概率 P	单侧精确概率 P
q	0.295	0.310
Ω	0.251	0.310
φ_w	0.028	0.032
φ_A	0.009	0.008
DaI	0.076	0.095
T_s	0.009	0.008
L_s	0.047	0.056
R_h	0.917	1.000
F_{med}^{200}	0.117	0.151
q_s	0.209	0.222

5 讨论

在农田溪流、排水沟渠等传输的营养盐中,约有 70% 以上的磷是通过颗粒态的形式向下游传输,而氮则不足 10%^[28,29],因此颗粒沉淀成为了磷滞留的主要途径. 一般来说,溪流暂态存储能力越大,对溶质的滞留能力也就越强. 因此,提高溪流暂态存储潜力成为溪流营养盐滞留能力提升的重要途径. 笼统地,溪流水体主要是由主流区流动水体和暂态存储区两部分构成的,其中暂态存储区又可以进一步划分为以岸带滞水区、回水区、漩涡等为主要构成的表水暂态存储区和以潜流带为主体的潜流暂态存储区^[4,30]. 对于可生化降解的有机污染物而言,较长的暂态存储区滞留时间 T_s 可以为微生物与可降解污染物的充分接触提供更多的机会,从而有利于污染物的降解. 单就这一点而言,深潭地貌格局的暂态存储区似乎表现出了较平直渠段更强的暂态存储潜力. 但从 F_{med}^{200} 来看,深潭暂态存储对于溶质滞留的贡献水平反而不及平直渠段,这种看似存在矛盾性的结果,可能与深潭中流动水体与暂态存储区之间较弱的交换能力(或较小的 α 值)有很大的关系. 同样,深潭与平直渠段中指标 L_s 和 q_s 的相对大小,也都说明深潭对于溶质的滞留潜力弱于平直渠段,这些也都与深潭中较小的 α 值有很大关系. 因此,增强主流区流动水体与暂态存储区之间的水流交换作用至关重要.

李如忠等^[27]在对深潭与曲折沟渠的比较中,也得到了深潭结构较曲折沟渠的交换系数 α 低一个数量级的计算结果,但该深潭的 F_{med}^{200} 处于 37.63%~49.18% 范围内变化,而曲折沟渠则仅为 15.87%~38.74%,明显低于深潭中暂态存储的贡献水平,这与本研究中深潭不及平直渠段的结果存在显著的不同. 从环境因素和水动力学条件看,本研究的人

工深潭结构形式简单,水面和水底没有任何大型水生植物或植物残体存在,仅在深潭底部有少量的沉积物;而在文献[27]中,夏秋季节深潭大部分水面被水花生、空心菜等浮水植物所覆盖,即便是冬季,仍有大量植株残体漂浮在水面,深潭底部也有经年堆积的植株残体存在. 深潭中大量水生植物或植物残体的存在,不仅改变了水动力学条件,而且水生植物对水流的阻滞作用,使得在植物后方的尾流形成数量可观的漩涡结构^[31],从而增大表水暂态存储作用,同时也增进了深潭中流动水体与表水暂态存储的交换作用. 事实上,一些针对植被型和非植被型农业沟渠氮磷营养盐衰减情况的比较,也都很好的验证了大型水生/湿生植物对于提高氮磷营养盐滞留能力的有效性^[2]. 不难推断,本研究中人工开挖深潭暂态存储潜力的增强,可以从种植大型水生植物着手,在增大表水暂态存储的同时,提高流动水体与表水暂态存储的交互作用.

山地溪流中深潭-阶梯、深潭-浅滩结构对于暂态存储的重要性已为很多研究证实^[32,33]. 由于地处山区,这些溪流的深潭底部或边缘往往都有一些大小不等的块石或透水性较好的砂砾石存在,使得溪流的表水和潜流暂态存储都较强. Craig 等^[16]针对河流水环境修复中深潭地貌、浅滩-堰坝地貌格局以及溪流底部河床地貌变化对提高河流氮负荷削减能力的有效性进行了分析和验证,给出了十分肯定的结论. 一般认为,复杂的河流地貌结构有利于暂态存储作用的发生^[8]. 本研究中,虽然深潭地貌形态结构的异质性明显超过了平直渠段,但深潭的暂态存储潜力并没有表现出一致的变化特征. 笔者以为,这可能与深潭中有利于暂态存储作用的环境条件极度匮乏有一定关系. 从措施上看,可以在深潭中放置块石,通过产生不同尺度大小的漩涡体,增强表水暂态存储潜力;也可以在潭底铺设粗砂或砾石,增强垂向潜流交换^[5,12]. 此外,拓宽深潭水面宽度,降低水深,增大深潭壁面和底部粗糙度,将狭长型沟渠深潭改造成水面宽度相对较大的水塘型深潭,也可能不失为有效办法. 事实上,拓宽水面、降低水流的单宽流量 q 和水流功率 Ω ,可以促使颗粒物的沉降,这对无机颗粒态溶质的滞留是颇为有利的.

需要特别指出的是,本研究是基于保守型示踪剂而探究深潭地貌格局对于溶质的物理迟滞作用,并没有考虑生物因素、化学过程的影响. 对于具有可生化降解性的溶质(如氮、磷营养盐等),深潭地

貌格局对于溶质的暂态存储作用可能还将涉及生物化学、环境地球化学等作用过程。对于这一问题, 笔者将另作讨论。另外, 从溶质运移扩散角度解析深潭地貌格局的暂态存储特征, 需要水体具备一定的流动性。但对地势平坦或汇流区下游的近乎停滞的溪流水体, 如何解析暂态存储机制, 仍有待进一步探讨。对于氮、磷等污染情况较为严重的小河流水体, 虽然人工调控仍可以在一定程度上提高氮磷滞留能力, 但相应作用已十分有限^[34], 此时针对该水体开展暂态存储特征研究, 实际意义似乎并不大。总之, 小河流域系统暂态存储机制和相互作用关系十分复杂, 不同水文环境因子对于暂态存储的作用效应往往很难通过简单的线性关系进行刻画, 有些甚至带有明显的不确定性, 从农业面源污染过程阻断和调控的技术需求出发, 尚需要不断深入探究和创新小河流域系统溶质滞留能力提升的技术原理与方法。

6 结论

(1) 人工深潭地貌格局的 A_s/A 基本都较平直渠段更高, 但交换系数 α 却较平直渠段低了一个数量级; 而且, 人工深潭地貌形态结构的异质性明显超过平直渠段。

(2) 人工深潭地貌格局的暂态存储作用较平直渠段更有利于溶质的滞留, 但其流动水体的溶质滞留能力则较平直渠段弱; 尽管深潭地貌格局拥有相对较大的 A_s/A 比值, 但其对溶质运移转化过程的影响却较平直渠段低。

(3) 人工深潭地貌暂态存储作用可以解释 18.86% ~ 26.05% 的溶质行进时间, 平直渠段可以解释 5.28% ~ 33.87%, 且绝大部分情况下平直渠段都较深潭渠段更高一些。

(4) 人工深潭与平直渠段指标相关性分析结果差异显著; 根据 Mann-Whitney U -tests 秩和检验法, 深潭地貌格局与平直渠段在 φ_w 、 φ_A 和 T_s 方面差异显著, 而在其他指标方面则区别不大。

参考文献:

- [1] Smith D R, Pappas E A. Effect of ditch dredging on the fate of nutrients in deep drainage ditches of the Midwestern United States [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, **62** (4): 252-261.
- [2] Dollinger J, Dagès C, Bailly J S, *et al.* Managing ditches for agroecological engineering of landscape. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, **35** (3): 999-1020.
- [3] de Klein J J M, Koelmans A A. Quantifying seasonal export and retention of nutrients in West European lowland rivers at catchment scale [J]. *Hydrological Processes*, 2011, **25** (13): 2102-2111.
- [4] Johnson Z C, Warwick J J, Schumer R. Factors affecting hyporheic and surface transient storage in a western U. S. river [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **510**: 325-339.
- [5] 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.
- [6] Becker J F, Endreny T A, Robinson J D. Natural channel design impacts on reach-scale transient storage [J]. *Ecological Engineering*, 2013, **57**: 380-392.
- [7] Zarnetske J P, Gooseff M N, Brosten T R, *et al.* Transient storage as a function of geomorphology, discharge, and permafrost active layer conditions in Arctic tundra streams [J]. *Water Resources Research*, 2007, **43** (7): W07410, doi: 10.1029/2005WR004816.
- [8] Baker D W, Bledsoe B P, Price J M. Stream nitrate uptake and transient storage over a gradient of geomorphic complexity, north-central Colorado, USA [J]. *Hydrological Processes*, 2012, **26** (21): 3241-3252.
- [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] 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 & Technology*, 2009, **43** (19): 7337-7342.
- [11] 李如忠, 丁贵珍. 基于 OTIS 模型的巢湖十五里河源头段氮磷滞留特征 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34** (3): 742-751.
- [12] 李如忠, 丁贵珍, 徐晶晶, 等. 巢湖十五里河源头段暂态储存特征分析 [J]. *水利学报*, 2014, **45** (6): 631-640.
- [13] Hart D R, Mulholland P J, Marzolf E R, *et al.* Relationships between hydraulic parameters in a small stream under varying flow and seasonal conditions [J]. *Hydrological Processes*, 1999, **13** (10): 1497-1510.
- [14] Schwartz J S, Neff K J, Dworak F E, *et al.* Restoring riffle-pool structure in an incised, straightened urban stream channel using an ecohydraulic modeling approach [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **78**: 112-126.
- [15] Vietz G J, Rutherford I D, Fletcher T D, *et al.* Thinking outside the channel: challenges and opportunities for protection and restoration of stream morphology in urbanizing catchments [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, **145**: 34-44.
- [16] 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.
- [17] 李文哲, 王兆印, 李志威, 等. 阶梯-深潭系统的水力特性 [J]. *水科学进展*, 2014, **25** (3): 374-382.
- [18] 张晨笛, 王兆印, 李志威, 等. 单个阶梯-深潭破坏的力学模

- 型[J]. 水利学报, 2014, **45**(12): 1399-1409.
- [19] 余国安, 王兆印, 张康, 等. 人工阶梯深潭改善下切河流水生栖息地及生态的作用[J]. 水利学报, 2008, **39**(2): 162-167.
- [20] 王强, 袁兴中, 刘红. 山地河流浅滩深潭生境大型底栖动物群落比较研究——以重庆开县东河为例[J]. 生态学报, 2012, **32**(21): 6726-6736.
- [21] 李如忠, 杨继伟, 董玉红, 等. 丁坝型挡板调控农田溪流暂态氮磷滞留能力的模拟研究[J]. 水利学报, 2015, **46**(1): 25-33.
- [22] 李如忠, 张翩翩, 杨继伟, 等. 多级拦水堰坝调控农田溪流营养盐滞留能力的仿真模拟[J]. 水利学报, 2015, **46**(6): 668-677.
- [23] 李如忠, 董玉红, 钱靖. 基于TASCC的典型农田溪流氨氮滞留及吸收动力学模拟[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(5): 1502-1510.
- [24] Price J M, Bledsoe B P, Baker D W. Influences of sudden changes in discharge and physical stream characteristics on transient storage and nitrate uptake in an urban stream [J]. *Hydrological Processes*, 2015, **29**(6): 1466-1479.
- [25] Jin H S, Ward G M. Hydraulic characteristics of a small Coastal Plain stream of the southeastern United States: effects of hydrology and season [J]. *Hydrological Processes*, 2005, **19**(20): 4147-4160.
- [26] Runkel R L. One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for streams and rivers [R]. Water Resources Investigations Report, 98-4018. Washington D C: U. S. Geological Survey, 1998.
- [27] 李如忠, 杨继伟, 钱靖, 等. 合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3365-3372.
- [28] Svendsen L M, Kronvang B. Retention of nitrogen and phosphorus in a Danish lowland river system: implications for the export from the watershed [J]. *Hydrobiologia*, 1993, **251**(1): 123-135.
- [29] Russell M A, Walling D E, Webb B W, *et al.* The composition of nutrient fluxes from contrasting UK river basins [J]. *Hydrological Processes*, 1998, **12**(9): 1461-1482.
- [30] Johnson Z C, Warwick J J, Schumer R. Nitrogen retention in the main channel and two transient storage zones during nutrient addition experiments [J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, **60**(1): 57-77.
- [31] 闫静, 戴坤, 唐洪武, 等. 含植物河道紊流结构研究进展 [J]. 水科学进展, 2014, **25**(6): 915-922.
- [32] Zimmer M A, Lautz L K. Pre-and postrestoration assessment of stream water-groundwater interactions: effects on hydrological and chemical heterogeneity in the hyporheic zone [J]. *Freshwater Science*, 2015, **34**(1): 287-300.
- [33] Käser D H, Binley A, Heathwaite A L, *et al.* Spatio-temporal variations of hyporheic flow in a riffle-step-pool sequence [J]. *Hydrological Processes*, 2009, **23**(15): 2138-2149.
- [34] Gabriele W, Welti N, Hein T. Limitations of stream restoration for nitrogen retention in agricultural headwater streams [J]. *Ecological Engineering*, 2013, **60**: 224-234.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O 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, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-nu, LIU Yan, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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