

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征 朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响 蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近 3 年太原市夏季降水的化学特征研究 郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征 刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布
..... 李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究 王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究 刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析 李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析
..... 张奎,李秋华,黄国佳,欧腾,李翎,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究 郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力
..... 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性 李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价
..... 臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV 协同 ClO₂ 去除三氯生及其降解产物的研究 李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中 As(V) 的去除机制研究 康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中 Cr(VI) 的研究 曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中 Cr(VI) 研究 刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO₂@ 酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL 的研究 王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO₂/CFP 复合电极的制备及电吸附 Pb²⁺ 特性的研究 刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂 TiO₂ 催化剂 王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁 TiO₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚 A 的研究 项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载 Fe/Co 催化 H₂O₂ 氧化降解阳离子红 3R 马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红 3R 废水特性研究 张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响 韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧 EBPR 系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究 马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O 池溶解氧水平对石化废水 A/O 工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响
..... 丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探 周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究 杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应
..... 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田 N₂O 排放的影响 吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究 刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响 张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究 刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险 张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律 杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例 朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究 徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1 株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究 刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS 量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对 Cu²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应 李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物 田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中 Na⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究 张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用 樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401) 《环境科学》征稿简则(437) 信息(489,522,726,735)

城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性

李如忠, 钱靖, 董玉红, 唐文坤, 杨继伟

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要: 选择 NaCl 为示踪剂, 于 2013 年 9 ~ 10 月在合肥城郊的关镇河支渠开展 5 次瞬时投加示踪实验. 从暂态存储、侧向补给和对流-扩散等作用机制层面, 设置 4 种模拟情景, 解析暂态存储作用对于排水沟渠溶质传输规律的影响, 并对 OTIS 模型参数进行灵敏性分析. 结果表明, 暂态存储对于主流区 Cl^- 模拟浓度穿透曲线 (BTCs) 峰值大小影响很大, 相对偏差高达 24.23% ~ 117.26%, 显著高于对峰值出现时间的影响, 且暂态存储影响显著超过了侧向补给作用; 由相关性分析, 主流区 Cl^- 模拟浓度 BTCs 峰值大小和出现时间的相对偏差与 A_s/A 具有极显著相关性; 4 个主要参数的灵敏度排序为 $A > A_s > \alpha > D$.

关键词: 暂态存储; 参数灵敏性分析; OTIS 模型; 示踪实验; 排水沟渠

中图分类号: X11; X14 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0481-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.02.015

Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch

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

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

Abstract: From September to October 2013, five in-stream tracer experiments involving slug additions of chloride were performed in Guanzhenhe Branch, a headwater stream in suburban Hefei. From the perspective of different transport mechanisms such as transient storage, lateral inflow and advection-dispersion, four scenarios were set to analyze the effects of transient storage on solute transport in the drainage ditch. And sensitivity analysis of parameters in OTIS model was conducted. The results showed that transient storage exerted a significant influence on the peak values of simulated chloride concentration breakthrough curves (BTCs) in the main channel, and the REs (relative errors) of peak values in the BTCs ranged from 24.23% to 117.26%, which were much higher than those of the peak times. Meanwhile, the effects on simulated BTCs of transient storage markedly exceeded those of lateral inflow. Correlation analysis results showed that A_s/A were significantly correlated with the peak value REs and the peak time RE's, respectively. Moreover, the ranking of parameter sensitivity in OTIS model was $A > A_s > \alpha > D$.

Key words: transient storage; parameter sensitivity analysis; OTIS model; tracer experiment; drainage ditch

作为河流水系重要组成部分的源头溪流, 由于其数量众多、总长度较大, 对汇水区汇入溶质的迁移转化具有十分重要的影响, 从而调控和制约着河流下游水体水环境质量^[1]. 近些年来, 源头溪流溶质 (特别是氮磷) 滞留特征和机制, 一直都是欧美发达国家环境科学、环境水文地质学、水生生态学等领域的研究热点^[2~4]. 1983 年, Bencala 等^[2]从地表水-地下水相互作用角度, 提出了定量描述山地溪流溶质迁移规律的 TSM 模型. 1991 年, Runkel 等^[5]在 TSM 模型基础上, 进一步提出了可用于非保守性溶质迁移转化模拟的 OTIS 模型和相应的模拟计算软件, 并于 1998 年开发了 OTIS-P 参数自动优化软件包. 目前, OTIS 模型及其应用软件, 已成为溪流溶质迁移转化规律和滞留特征分析的重要工具^[6]. OTIS 或 TSM 模型将溶质的迁移转化过程概括为主流区和暂态存储区两个部分, 而现有其他水环境模型 (如 S-P 模型、WASP 模型、QUAL2E 模型等) 主要关注河道流动水体部分, 对暂态存储区及其与主

流区的相互作用考虑不多. 这里, 暂态存储区不仅包括河床及滨岸带下方的可渗透区 (即潜流带), 还包括河道内的缓流滞水区域, 如死水区、漩涡、深潭等^[7]. 溪流、沟渠中营养盐的滞留主要分为 3 种类型, 即物理滞留、生物滞留和化学滞留等^[2,8]. 其中, 物理滞留主要指通过溪流自身的结构特征 (如比降、漩涡、深潭等) 及外部的条件变化 (如杂物、枯枝落叶、水獭筑坝等), 延长溶质的水力停留时间; 生物滞留主要包括生物吸收、同化作用及微生物的矿化过程等; 化学滞留则主要是指吸附、沉淀、絮凝等化学过程. 暂态存储作用是小尺度水体中影响溶质运移的重要的水动力学过程^[8,9], 但如何有效量化这一影响, 仍还缺乏专门、系统的研究^[10]. 由于 OTIS 模型是由代表不同作用机制的模

收稿日期: 2014-07-19; 修订日期: 2014-09-01

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

块集成得到,因此对于不同模块作用效果的分析,有助于揭示不同作用机制对于模拟结果的影响,从而有利于改进模型结构,减少模型的不确定,提高模拟结果的准确性^[11].

参数灵敏性分析是水环境数学模型研究的重要工作内容. 由于它定性或定量的衡量了模型输入误差对计算输出的影响,因此是识别各参数重要性的必要工具. 实际上,参数灵敏性分析也有助于理解和改善模型结构以及不同作用机制的定量化表征. 目前,国内开始有学者采用 OTIS 模型模拟源头溪流溶质迁移转化规律^[12,13],但还处在起步阶段,还缺乏对不同作用机制相应溶质传输影响的深层次分析,因而还不能适应未来水环境保护与管理发展的需要. 本研究拟以合肥市城郊典型排水沟渠——关镇河支渠为对象,在现场示踪实验的基础上,解析暂态存储作用机制及其对保守性溶质迁移规律的影响,并开展参数灵敏性分析,以期对排水沟渠等小尺度流动水体溶质传输机制研究,提供参考和依据.

1 研究区概况

关镇河支渠位于合肥市东南城郊的淝河镇境内,为关镇河的一条重要源头支流,水历经关镇河-南淝河的传输而进入巢湖西半湖. 关镇河支渠全长 1.1 km 左右,大部分位于望城岗南坡,是一条以防洪排涝为主要功能的典型排水沟渠. 近年来,沟渠源头建起多个规模较大的住宅小区. 由于该处远离城区,城市排水系统不完善,导致生活污水无法全部排入城市污水管网,部分生活污水经由居住区化粪池溢流后进入到关镇河支渠中,成为沟渠稳定的补给水来源. 关镇河支渠水体氮、磷污染严重,枯水期间的总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)和总磷(TP)浓度分别高达 29.67、24.05 和 2.82 mg·L⁻¹.

关镇河支渠水面宽度约 1.5~3.0 m,水深约 15~40 cm,流量约 30~150 L·s⁻¹. 中、上部渠段由于人工整饬和清淤,滨岸和水中几乎没有大型湿地植物存在,而且底部沉积物也极少,水流流速较快,达 30 cm·s⁻¹左右;下部渠段的渠底较上部渠段稍宽、水流速度稍小,约为 15~25 cm·s⁻¹,沟渠底部主要为沉积物及岸边坍塌黏土,在局部渠段甚至还分布有碎石、粗砂形成的浅滩和水潭. 而且,在植物生长季节,下游渠道水面两侧的滨水植物生长茂盛,沟渠护坡上也覆盖着浓密的草本植物和藤蔓植物. 本研究在关镇河支渠下部的望城岗南坡,选择一长约 270 m 的较为平直渠段,开展现场示踪实验.

2 模型与方法

2.1 示踪实验

2013 年 9~10 月,以 NaCl 为示踪剂,采用瞬时投加示踪剂的方式,在实验渠段总共开展了 5 次示踪实验. 除 2013-09-23 实验(第 2 次)仅设置 3 个采样点外,其它 4 次均在投加点(O)下方设置了 4 个采样点,依次记作 A、B、C 和 D. 其中,OA、AB、BC 和 CD 长度分别为 60、62、63 和 81 m. 这里,投加点和采样点均布设在主流区水流较为集中的地方. 采用人工方式同步采集水样,采样时间间隔设定为 30 s,由专人负责报时. 采样过程中,利用 KL-138(II)笔式电导率仪测定水样电导率,并当电导率稳定在背景值水平后停止采样. 示踪实验开始前,在各采样点分别采集 2 个水样,用以确定氯离子(Cl⁻)背景浓度. 在实验室利用 PXS-215 离子活度计和氯离子选择性电极(参比电极 232-01、氯离子电极 PCI-1-01),测定水样 Cl⁻ 浓度.

2.2 数学模型

排水沟渠中保守型溶质的输移扩散规律,可以采用下述一组耦合模型进行模拟,即^[7]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \underbrace{\frac{Q}{A} \frac{\partial c}{\partial x}}_{\text{对流}} + \underbrace{\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial c}{\partial x} \right)}_{\text{扩散}} + \underbrace{\frac{q_L}{A} (c_L - c)}_{\text{侧向补给}} + \underbrace{\alpha (c_s - c)}_{\text{暂态存储}} \quad (1)$$

$$\frac{dc_s}{dt} = \alpha \underbrace{\frac{A}{A_s} (c - c_s)}_{\text{暂态存储}} \quad (2)$$

式中, Q 为沟渠流量 (m³·s⁻¹); D 为扩散系数 (m²·s⁻¹); α 为暂态存储区与主流区间的交换系数 (s⁻¹); q_L 为侧向补给强度 [m³·(s·m)⁻¹]; A 为主流区断面面积 (m²); A_s 为暂态存储区断面面积 (m²); c 为主流区溶质浓度 (mg·L⁻¹); c_s 为暂态存储区溶质浓度 (mg·L⁻¹); c_L 为侧向补给溶质浓度 (mg·L⁻¹); t 为时间 (s); x 为纵向距离 (m).

由式(1)和式(2)耦合而成的模型称之为 OTIS 模型,由于未考虑溶质衰减带来的影响,因此该模型实质上就是 TSM 模型^[2]. Runkel 等^[5]以数值算法中的差分法为基础,开发了 OTIS 模型模拟计算和参数优化计算软件. 该计算软件是将第一个采样点的相关信息作为上游边界条件,采用试错法调试上游边界流量,待流量固定下来后,再通过微调参数 A 、

q_L , 控制溶质穿透曲线的形状和时间进程, 从而使 Cl^- 模拟值与观测值尽可能达到高度拟合^[14]. 在此基础上, 再利用 OTIS-P 参数自动优化程序包, 对前述得到的 D 、 A 、 A_s 、 α 参数值作进一步优化, 经由不断迭代和调整参数, 使 Cl^- 模拟值与观测值达到最佳的拟合效果^[13].

2.3 暂态存储影响分析方法

对于保守型溶质迁移扩散规律的模拟, OTIS 模型综合考虑了 3 个方面的作用机制, 即对流-扩散作用、暂态存储作用以及侧向补给作用. 其中, 对流-扩散机制作为模型的基础模块项出现; 暂态存储机制主要包括水底潜流带、水中滞水区(或死水区)对溶质运移过程的影响; 侧向补给则考虑来自地表和(或)地下水补给的影响. 为刻画暂态存储对 Cl^- 传输过程的影响程度, 初步提出下述分析方法和步骤.

首先, 针对上述 3 种作用机制的共同影响, 利用 OTIS 模拟计算和 OTIS-P 参数优化程序包, 计算各采样点位的 OTIS 模型参数优化值和主流区 Cl^- 模拟浓度穿透曲线(breakthrough curves, BTCs); 然后, 针对 3 种作用机制, 设定不同组合方案, 并在保持参数优化值不变的情况下, 计算主流区 Cl^- 模拟浓度 BTCs; 最后, 基于示踪实验中溶质浓度 BTCs 的波状变化特征^[4,15], 以 3 种作用机制共同影响情形为基准, 计算不计暂态存储影响时的 BTCs 峰值及峰值出现时间的相对偏差, 从而定量展示暂态存储作用机制对 Cl^- 输移过程的影响程度, 即:

$$RE = (c - c_0)/c_0 \times 100\% \quad (3)$$

$$RE' = (t - t_0)/t_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中, RE 为忽略暂态存储作用时 Cl^- 模拟浓度 BTCs 峰值大小的相对偏差(%); RE' 为忽略暂态存储模块时 BTCs 峰值出现时间的相对偏差(%); c_0 和 c 分别为考虑 3 种作用机制和忽略暂态存储作用时主流区 Cl^- 模拟浓度 BTC 峰值($mg \cdot L^{-1}$); t_0 和 t 分别为 c_0 和 c 峰值对应的时间(min).

2.4 相关性分析

利用 SPSS 统计软件, 将主流区 Cl^- 模拟浓度 BTCs 峰值大小和对应时间的相对偏差 RE、RE' 与 Q 、 A_s/A 进行相关性分析, 揭示主流区 Cl^- 输移规律与水文条件、暂态存储等的相关关系.

2.5 参数灵敏性分析

采用扰动分析方法对模型参数进行灵敏性分析, 即在模型某个参数的最佳估值附近给定一个人工干扰, 并计算由此干扰导致的模拟结果变化率.

鉴于 OTIS 模型至今还没有简单实用的解析解, 考虑直接通过模拟计算进行参数灵敏性分析, 大体步骤如下^[4,16].

(1) 保持模型参数优化值不变, 运行 OTIS 模型计算程序, 并计算 Cl^- 浓度模拟值与观测值的均方误差 $RMSE_0$, 即:

$$RMSE_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_{sim,i} - c_{obs,i})^2} \quad (5)$$

式中, $c_{obs,i}$ 为样本 i 观测值($mg \cdot L^{-1}$); $c_{sim,i}$ 为样本 i 模拟值($mg \cdot L^{-1}$); n 为样本数目; $RMSE_0$ 为 Cl^- 浓度模拟值与观测值的均方误差.

(2) 在参数 D 、 A 、 A_s 、 α 的最佳估计值附近给定一个人工干扰(如 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$), 计算干扰后的参数值; 每次仅对一个参数取一种干扰值, 并令其它参数保持优化值不变, 重新运行 OTIS 模型计算程序, 计算该干扰情形的 RMSE 值.

(3) 计算干扰后与优化状态下 RSME 的差值, 即:

$$\Delta RMSE = RMSE - RMSE_0 \quad (6)$$

依据 $\Delta RMSE$ 的数值大小, 对同一干扰程度下不同参数进行排序, 并根据排序情况, 分别赋予 1~4 的整数值, 以此体现不同参数灵敏性的差异.

3 结果与分析

3.1 模型参数的确定

根据 OTIS 模拟计算软件和 OTIS-P 参数自动优化程序包的相关要求, 将采样点 A 作为上游边界条件^[7], 并参照国内外溪流、沟渠水体的参数值^[12,13,17], 对参数 D 、 A 、 A_s 、 α 等进行初始赋值. 具体操作方法参见文献[12,13]. 最后, 通过模拟优化计算, 得到关镇河支渠实验段的 OTIS 模型水文参数值, 见表 1. 再由 OTIS 模拟计算软件, 得到主流区和暂态存储区 Cl^- 浓度模拟计算结果. 限于篇幅, 这里仅提供 2013-09-29 示踪实验中, 采样点 B、C 和 D 的主流区 Cl^- 浓度实测值、模拟值以及暂态存储区 Cl^- 浓度模拟情况, 见图 1. 5 次示踪实验中, 主流区 Cl^- 浓度模拟值与对应时刻实测值的相对误差, 分别为 $5.16\% \pm 3.84\%$ 、 $2.56\% \pm 1.74\%$ 、 $-1.24\% \pm 0.47\%$ 、 $4.39\% \pm 0.83\%$ 和 $-0.83\% \pm 3.12\%$, 表明两者具有很好的拟合效果.

由图 1 不难看出, 3 个采样点主流区 Cl^- 实测浓度 BTCs 与模拟浓度具有较好的拟合效果, Cl^- 实测浓度拖尾明显, 暂态存储区 Cl^- 浓度明显低于主流区, 而且峰值出现的时间也相对较为滞后. 其它 4

次示踪实验也得到了类似结果(略). 一些研究指出, 暂态存储是影响主流区溶质 BTC 尾部的重要机制, 曲线的尾部越长, 暂态存储区的扩散作用也越明

显^[2,18]. 不难推断, 图 1 中曲线的拖尾现象以及暂态存储区峰值的滞后现象, 意味着实验渠段 Cl^- 输移过程受暂态存储作用的影响很大.

表 1 OTIS 模型水文参数

Table 1 Hydrological parameters in OTIS model

时间	采样点	Q / $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	q_L / $\text{m}^3\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$	D / $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	A / m^2	A_s / m^2	α/s^{-1}
2013-09-13	B	111.9	2.5×10^{-5}	0.252	0.459	0.116	1.55×10^{-3}
	C	112.0	2.0×10^{-7}	0.244	0.439	0.123	4.03×10^{-3}
	D	112.0	2.0×10^{-7}	0.016	0.449	0.081	2.61×10^{-3}
2013-09-23	B	40.3	5.0×10^{-6}	0.159	0.306	0.119	1.65×10^{-3}
	C	40.5	2.0×10^{-6}	0.237	0.275	0.080	1.01×10^{-3}
2013-09-29	B	116.1	8.5×10^{-5}	0.230	0.411	0.117	2.24×10^{-3}
	C	119.2	5.0×10^{-5}	0.182	0.512	0.152	1.15×10^{-3}
	D	149.1	3.7×10^{-4}	0.188	0.753	0.104	1.32×10^{-3}
2013-10-02	B	80.0	5.0×10^{-7}	0.116	0.480	0.110	1.92×10^{-3}
	C	80.2	2.0×10^{-6}	0.392	0.456	0.069	8.85×10^{-4}
	D	80.3	2.0×10^{-6}	0.194	0.448	0.160	2.76×10^{-3}
2013-10-17	B	40.1	2.0×10^{-6}	0.072	0.395	0.142	1.68×10^{-3}
	C	44.7	7.4×10^{-5}	0.038	0.240	0.134	5.14×10^{-3}
	D	45.7	1.2×10^{-6}	0.044	0.347	0.215	3.97×10^{-3}

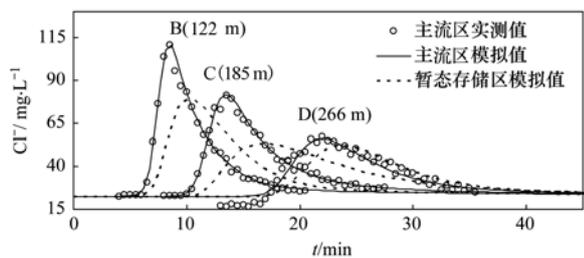


图 1 2013-09-29 示踪实验的 Cl^- 浓度实测值与模拟值

Fig. 1 Observed and simulated Cl^- concentrations in the tracer experiment on 29 September, 2013

3.2 暂态存储对溶质运移过程的影响

为解析不同作用机制对溶质迁移的影响, 拟对下述 4 种情景分别进行模拟计算.

① 情景 I: 综合考虑暂态存储、侧向补给和对流-扩散作用机制的 OTIS 模型模拟; ② 情景 II: 忽略暂态存储机制, 仅考虑侧向补给和对流-扩散作用的 OTIS 模型模拟; ③ 情景 III: 忽略侧向补给作用, 而考虑暂态存储和对流-扩散作用的 OTIS 模型模拟; ④ 情景 IV: 仅考虑对流-扩散作用机制的 OTIS 模型模拟.

图 2 展示了 2013-10-02 示踪实验中, 采样点 B、C 和 D 的主流区 Cl^- 实测浓度, 以及情景 I、II 中主流区 Cl^- 浓度模拟结果. 直观上, 情景 I 的 Cl^- 浓度模拟值与实测值拟合效果都很好; 而情景 II, 不仅 BTC 峰值明显高于情景 I, 而且峰值出现的时间也较情景 I 略有提前, 特别是在采样点 D. 实际上,

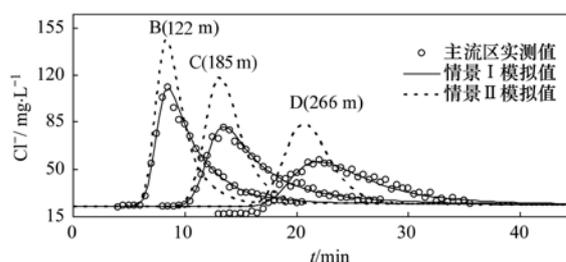


图 2 2013-10-02 示踪实验 Cl^- 浓度实测值与不同情形下模拟值

Fig. 2 Observed and simulated Cl^- concentrations in different scenarios on 2 October, 2013

在其它 4 次示踪实验中, 也都出现了类似的变化特征. 情景 I、II 在 Cl^- 浓度 BTCs 峰值上表现出的显著差异性, 说明暂态存储机制对于小尺度水体溶质运移影响的重要性.

不妨选择情景 I 为基准, 在对不同情景水质模拟计算的基础上, 依据式(3)和式(4)定量刻画各采样点主流区 Cl^- 模拟浓度 BTCs 峰值大小和时间先后的差异, 见表 2 和表 3.

从表 2 可见, 就侧向补给影响而言, 除 2013-09-29 示踪实验中采样点 D 的峰值大小相对偏差高达 12.32%、2013-10-17 实验中采样点 C 和 D 的峰值偏差分别达 7.82% 和 6.68% 以外, 情景 III 与情景 I 浓度峰值大小的相对偏差 (RE_2) 都较小, 意味着实验期间侧向补给对于主流区 Cl^- 输移影响并不大. 相比较而言, 不考虑暂态存储影响的情景 II、IV, 其 Cl^- 模拟浓度 BTCs 峰值大小与情景 I 的相对

偏差 RE 均很大, 最高值甚至高达 117.26%, 最小值浓度 BTCs 峰值影响很大, 显著高于侧向补给作用也达 24.23%, 表明此时暂态存储作用对于 Cl^- 模拟带来的影响。

表 2 不同情景下各采样点氯离子 BTCs 峰值大小变化情况¹⁾

Table 2 Calculation results among peak values of chloride BTCs in different scenarios

采样点	情景	指标	2013-09-13	2013-09-23	2013-09-29	2013-10-02	2013-10-17
B	I	$c_0/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	70.57	96.14	110.19	97.95	118.77
	II	$c_1/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	87.67	131.34	146.12	132.07	175.35
		$\text{RE}_1/\%$	24.23	36.61	32.61	34.83	47.63
	III	$c_2/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	71.01	96.48	113.45	97.98	118.99
		$\text{RE}_2/\%$	0.62	0.35	2.96	0.03	0.19
	IV	$c_3/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	88.66	131.99	151.02	132.11	175.77
		$\text{RE}_3/\%$	25.6	37.29	37.05	34.87	47.99
	C	I	$c_0/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	56.41	75.26	81.69	76.29
II		$c_1/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	80.19	116.33	118.38	103.35	158.39
		$\text{RE}_1/\%$	42.16	54.57	44.91	35.47	65.44
III		$c_2/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	56.60	75.59	83.34	76.37	103.23
		$\text{RE}_2/\%$	0.34	0.44	2.02	0.10	7.82
IV		$c_3/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	80.08	117.03	121.91	103.43	173.82
		$\text{RE}_3/\%$	41.96	55.50	49.23	35.57	81.55
D		I	$c_0/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	52.98	—	56.00	60.44
	II	$c_1/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	80.05	—	83.77	94.10	150.54
		$\text{RE}_1/\%$	51.09	—	49.59	55.69	93.42
	III	$c_2/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	53.22	—	62.90	60.54	83.03
		$\text{RE}_2/\%$	0.45	—	12.32	0.17	6.68
	IV	$c_3/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	80.02	—	94.31	94.25	165.67
		$\text{RE}_3/\%$	51.04	—	68.41	55.94	112.86

1) c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 分别表示情景 I、II、III、IV 中各采样点主流区 Cl^- 模拟浓度 BTCs 峰值; RE_1 、 RE_2 、 RE_3 分别表示情景 II、III、IV 相对于情景 I 的 Cl^- 模拟浓度 BTCs 峰值大小的相对偏差

表 3 不同情景下各采样点氯离子 BTCs 峰值时间变化情况¹⁾

Table 3 Calculation results among peak times of chloride BTCs in different scenarios

采样点	情景	指标	2013-09-13	2013-09-23	2013-09-29	2013-10-02	2013-10-17
B	I	t_0/min	9.12	18.24	8.64	13.92	22.08
	II	t_1/min	9.12	17.76	8.16	13.44	20.16
		$\text{RE}'_1/\%$	0.00	-2.63	-5.56	-3.45	-8.70
	III	t_2/min	9.12	18.24	8.64	13.92	22.08
		$\text{RE}'_2/\%$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	IV	t_3/min	9.12	17.76	8.64	13.44	20.16
		$\text{RE}'_3/\%$	0.00	-2.63	0.00	-3.45	-8.70
	C	I	t_0/min	13.92	26.4	13.44	20.64
II		t_1/min	12.96	24.48	12.96	19.20	25.92
		$\text{RE}'_1/\%$	-6.90	-7.27	-3.57	-6.98	-18.18
III		t_2/min	14.4	26.4	13.92	20.64	32.64
		$\text{RE}'_2/\%$	3.45	0.00	3.57	0.00	3.03
IV		t_3/min	13.44	24.96	13.44	19.2	26.4
		$\text{RE}'_3/\%$	-3.45	-5.45	0.00	-6.98	-16.67
D		I	t_0/min	18.24	—	22.08	30.24
	II	t_1/min	16.80	—	20.64	26.88	36.48
		$\text{RE}'_1/\%$	-7.89	—	-6.52	-11.11	-24.75
	III	t_2/min	18.72	—	24.48	30.24	51.36
		$\text{RE}'_2/\%$	2.63	—	10.87	0.00	5.94
	IV	t_3/min	16.8	—	23.04	26.88	38.4
		$\text{RE}'_3/\%$	-7.89	—	4.35	-11.11	-20.79

1) t_0 、 t_1 、 t_2 、 t_3 分别表示情景 I、II、III、IV 中各采样点主流区 Cl^- 模拟浓度 BTCs 峰值出现的时间; RE'_1 、 RE'_2 、 RE'_3 分别表示情景 II、III、IV 相对于情景 I 的 Cl^- 模拟浓度 BTCs 峰值出现时间的相对偏差

从表 3 可见,不考虑暂态存储影响的情景 II、IV,其 Cl⁻ 模拟浓度峰值出现时间与情景 I 均不同程度出现差异,而且基本都表现出峰值出现时间提前的特点,尤其是 2013-10-17 实验表现的最为明显,相对偏差 RE' 最大值达 -24.75%。虽然 2013-09-29 和 2013-10-17 实验中来自侧向补给作用导致的采样点 D 相对偏差 RE' 分别达 10.87% 和 5.94% (即时间出现滞后),但大多数情况下 RE' 基本都很小,甚至可以忽略不计。仅就本研究而言,暂态存储对主流区 Cl⁻ 模拟浓度 BTCs 峰值出现时间的影响,大都超过了侧向补给作用。

3.3 暂态存储效应的相关性分析

为揭示主流区 Cl⁻ 模拟浓度峰值大小及峰值出

现时间的相对偏差与水文条件和暂态存储区大小的相关程度,拟对 RE₁、RE₂、RE₃、RE'₁、RE'₂、RE'₃ 以及 Q 和 A_s/A 作相关性分析,结果见表 4。这里,流量 Q 代表水文条件,比值 A_s/A 表征暂态存储的相对大小。由表 4 可见,Q 和 RE'₃ 呈极显著正相关关系,而与其它指标相关性不大; A_s/A 与 RE₁ 和 RE₃ 呈极显著正相关,而与 RE'₁ 和 RE'₃ 呈极显著负相关,与不计侧向补给的相对偏差无明显相关性。A_s/A 与 RE₁、RE'₁、RE₃、RE'₃ 之间存在的相关性表明,暂态存储大小是影响暂态存储模块对溶质运移效应的重要因素。暂态存储作用越大,溶质到达下游的时间就越长,在沟渠中停留的时间也就越久,被去除或转化滞留的几率也相应越大。

表 4 水文条件、暂态存储大小与相对偏差指标的相关性¹⁾

Table 4 Correlation coefficients among hydrology, transient storage zone size and relative errors

	RE ₁	RE ₂	RE ₃	RE' ₁	RE' ₂	RE' ₃
RE ₁	1					
RE ₂	0.476	1				
RE ₃	0.970 **	0.668 **	1			
RE' ₁	-0.936 **	-0.461	-0.920 **	1		
RE' ₂	0.459	0.855 **	0.604 *	-0.341	1	
RE' ₃	-0.796 **	-0.071	-0.702 **	0.891 **	0.053	1
Q	-0.412	0.226	-0.300	0.449	0.436	0.673 **
A _s /A	0.742 **	0.255	0.720 **	-0.783 **	0.041	-0.779 **

1) * * 显著水平 P < 0.01

3.4 参数灵敏性分析

取扰动幅度 ±10% 和 ±20%, 分别对参数 D、A、A_s、α 进行灵敏性分析。首先,取其中一个参数进行扰动,而保持其他参数不变,利用 OTIS

计算程序,计算相应模拟结果的 RMSE; 然后,计算其与优化状况下 RMSE 的差值,并以不同扰动幅度下 RMSE 差值对参数进行灵敏度排序,结果见表 5。

表 5 OTIS 模型参数灵敏度排序表¹⁾

Table 5 Rankings of the parameter sensitivity in OTIS model

日期	参数	渠段 AB				渠段 BC				渠段 CD			
		-10%	+10%	-20%	+20%	-10%	+10%	-20%	+20%	-10%	+10%	-20%	+20%
2013-09-13	D	3	4	4	3	4	4	4	4	4	3	4	4
	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	A _s	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	α	4	2	3	4	3	3	3	3	3	4	3	3
2013-09-23	D	3	3	4	4	3	4	4	4	—	—	—	—
	A	1	1	1	1	1	1	1	1	—	—	—	—
	A _s	2	4	2	3	2	2	2	3	—	—	—	—
	α	4	2	3	2	4	3	3	2	—	—	—	—
2013-09-29	D	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	3	4
	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	A _s	2	3	2	3	3	2	3	3	3	4	2	3
	α	3	2	3	2	2	3	2	2	4	3	4	2
2013-10-02	D	4	4	4	3	3	4	3	4	3	4	3	4
	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	A _s	2	2	2	4	2	2	2	2	2	2	2	3
	α	3	3	3	2	4	3	4	3	4	3	4	2
2013-10-17	D	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	A _s	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2
	α	4	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3

1) 得分 1 表示灵敏度最高,得分 4 表示灵敏度最低

由表 5 可见, 参数 D 、 A 、 A_s 、 α 的灵敏性趋势变化明显, 除少数状态下各参数灵敏度得分略有变化外, 基本都呈现出如下排序结果, 即 $A > A_s > \alpha > D$. 也就是说, 对模型输出结果敏感性最大的参数是主流区断面面积 A , 这主要归因于流量一定时, A 控制着溶质向下游运移的时间进程, 也是影响下游断面 BTCs 峰值大小的重要因素^[4,14]. D 灵敏度弱于 A_s 和 α , 表明溶质 Cl^- 的运移更易受到 A_s 和 α 的影响, 这与暂态存储是影响溶质 BTCs 形状的重要机制观点一致. Lautz 等^[14] 针对美国西部半干旱地区的二级溪流 Red Canyon Creek, 采用扰动法对其 OTIS 模型参数进行局部灵敏性分析, 得到了与本研究相同的灵敏性排序结果: $A > A_s > \alpha > D$. Wlostowski 等^[4] 采用动态识别分析方法对阿拉斯加北部源头溪流模型参数开展局部灵敏性分析, 得到瞬时投加示踪剂时, 参数灵敏度排序为 $A > D > A_s > \alpha$; 连续投加示踪剂时, 排序结果则为 $A > A_s > \alpha > D$, 与本研究的瞬时投加示踪实验结果相一致. 不难看出, OTIS 模型参数的相对灵敏性大体稳定.

4 讨论

暂态存储作用降低了投加点下游 Cl^- 峰值浓度, 迟滞了 Cl^- 向下游的传输时间, 也即延长了 Cl^- 在渠道内停留时间, 而水力停留时间的增加, 有利于排水沟渠对溶质的物理滞留和生物滞留^[19]. 实验表明, 暂态存储是影响关镇河支渠 Cl^- 模拟 BTCs 形状的重要因素, 是决定溶质迁移和滞留能力的重要机制. 考虑到本研究的示踪实验都集中在夏末初秋时节, 该结论是否具有—般性, 可能还有待进一步检验. 由于实验所在渠段地处岗坡上, 地下水侧向补给 q_L 较小, 对 Cl^- 运移的影响效果明显逊色于暂态存储作用. 事实上, 对于侧向补给较弱的情形, 在模拟计算过程中, 为减少模型参数数量, 降低参数不确定性, 也可以不计侧向补给模块^[20]. 但对于地处河流下游地区的源头溪流, 由于地下水埋深—般较浅, 侧向补给对于渠道内溶质输移的影响贡献可能相对较大.

水质模型方程和算法—般都较为复杂, 对模型结构的不确定性以及各模块对模拟结果影响的度量, 一直都是研究的难点所在^[11]. 本研究通过对不同作用机制的组合, 将 OTIS 模型模拟设定为 4 种情景. 从理论上来说, 针对每一情景, 应在假设相应方程(组)能够满足溶质迁移规律模拟的基础上, 从最初的参数初始赋值开始, 采用试错法分别进行模拟

计算; 然后, 再利用 OTIS-P 程序包对参数进行优化, 进而分析溶质模拟 BTCs 的变化情况^[21]. 有必要指出的是, 基于试错法开展的模型模拟计算, 其重要的工作基础和前提条件是实测值与模拟值具有较高的拟合度. 由图 2 可见, 在不计暂态存储情形下, Cl^- 模拟值与观测值难以匹配, 因此也就无法利用试错法重新计算参数. 本研究在分析暂态存储作用的溶质滞留效应时, 将情景 I 的参数优化值作为基础, 对其他 3 种情景都不再重新进行参数优化计算, 其原因就在于此. 也有国外学者在对模型各模块分析中, 将模拟值与部分观测值(观测值 BTCs 上升段或下降段)进行匹配^[2], 或者运用手动试错法以达到视觉效果上的相对拟合, 并基于此进行分析比较^[21]. 但这些方法存在模拟结果受主观性影响较大的弊端, 难以确定是否存在其他参数组合时拟合效果更好, 只能定性衡量模块对溶质运移的影响, 对进一步定量分析模块影响效应及与其它因素的关系相对较为困难. 而且, 对于暂态存储面积或交换系数较大的小河流/溪流水体, 这类方法往往难以使用.

尽管 OTIS 的解析解模型已得到—定程度的使用^[18, 22~25], 但其复杂的数学表达式, 制约了一些优化技术(如遗传算法、蚁群算法等)在参数灵敏性分析方面的应用. 本研究采用扰动分析方法对参数进行局部灵敏度分析, 没有考虑参数之间的相互影响或相关性. 一般地, 优化算法很难判断所产生的最优值是否是唯一的真值, 从而导致参数灵敏性分析难以完整描述参数的空间分布特征. 虽然有学者采用 UCODE 软件进行 OTIS 模型参数的全局灵敏性分析^[4, 16, 26], 但由于分析过程涉及大量水文地质参数, 且需要地下水溶质运移模拟计算软件的支持, 不仅求解过程过于复杂, 而且存在很大的不确定性. 考虑到目前国内对溪流等小尺度流动水体尚缺乏环境水文地质方面的基础资料, 全局灵敏性分析受到限制. 需要特别指出的是, 虽然可以从概念模型上将排水沟渠系统的溶质迁移转化区域划分为主流区和暂态存储区, 但若把两者完全剥离开来几乎是不现实的, 因为主流区与暂态存储区之间并没有绝对、清晰的界线. 尽管本研究针对的是瞬时投加示踪实验, 但相关的技术方法同样也可以用于稳态连续投加示踪实验, 只是溶质浓度的模拟值和实测值 BTCs 峰值将由尖峰状变为平峰形式^[27]. 此外, 当排水沟渠 Cl^- 浓度较高时, 也可以考虑选用其它保守型示踪剂, 如 NaBr 等.

5 结论

(1) 综合考虑对流-扩散、暂态存储以及侧向补给作用的 OTIS 模型模拟结果,很好地展示了主流区 Cl^- 实测浓度-时间过程变化特征。

(2) 暂态存储对于主流区 Cl^- 模拟浓度 BTCs 峰值的影响很大,峰值大小的相对偏差显著高于峰值出现时间的相对偏差;而且,暂态存储带来的影响也明显超过侧向补给作用。

(3) 相关性分析表明,暂态存储大小与主流区 Cl^- 模拟浓度 BTCs 的峰值大小和峰值出现时间关系密切;而流量与峰值大小和峰值出现时间的相关性较弱。

(4) 关镇河支渠 OTIS 模型参数的灵敏性排序结果为:主流区断面面积 $A >$ 暂态存储区断面面积 $A_s >$ 交换系数 $\alpha >$ 扩散系数 D ,与国外相关研究所得结果一致。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Bencala K E, Walters R A. Simulation of solute transport in a mountain pool-and-riffle stream; a transient storage model [J]. *Water Resources Research*, 1983, **19**(3): 718-724.
- [3] Gooseff M N, Briggs M A, Bencala K E, *et al.* Do transient storage parameters directly scale in longer, combined stream reaches? Reach length dependence of transient storage interpretations [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **483**: 16-25.
- [4] Wlostowski A N, Gooseff M N, Wagener T. Influence of constant rate versus slug injection experiment type on parameter identifiability in a 1-D transient storage model for stream solute transport [J]. *Water Resources Research*, 2013, **49**(2): 1184-1188.
- [5] Runkel R L, Broshears R E. One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for small streams [R]. CADSWES, Center for Advanced Decision Support for Water and Environmental Systems. Department of Civil Engineering, University of Colorado, 1991.
- [6] Koch J C, McKnight D M, Neupauer R M. Simulating unsteady flow, anabranching, and hyporheic dynamics in a glacial meltwater stream using a coupled surface water routing and groundwater flow model [J]. *Water Resources Research*, 2011, **47**(5), doi: 10.1029/2010WR009508.
- [7] Runkel R L. One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for streams and rivers; U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 98-4018 [R]. Washington, D. C. : U. S. Geological Survey, 1998.
- [8] Ward A S, Payn R A, Gooseff M N, *et al.* Variations in surface water-ground water interactions along a headwater mountain stream; Comparisons between transient storage and water balance analyses [J]. *Water Resources Research*, 2013, **49**(6): 3359-3374.
- [9] Cozzetto K D, Bencala K E, Gooseff M N, *et al.* The influence of stream thermal regimes and preferential flow paths on hyporheic exchange in a glacial meltwater stream [J]. *Water Resources Research*, 2013, **49**(9): 5552-5569.
- [10] Roberts B J, Mulholland P J, Houser J N. Effects of upland disturbance and instream restoration on hydrodynamics and ammonium uptake in headwater streams [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2007, **26**(1): 38-53.
- [11] Lindenschmidt K E, Fleischbein K, Baborowski M. Structural uncertainty in a river water quality modelling system [J]. *Ecological Modelling*, 2007, **204**(3-4): 289-300.
- [12] 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.
- [13] 李如忠, 丁贵珍, 徐晶晶, 等. 巢湖十五里河源头段暂态存储特征分析 [J]. *水利学报*, 2014, **45**(6): 631-640.
- [14] Lautz L K, Siegel D I, Bauer R L. Impact of debris dams on hyporheic interaction along a semi-arid stream [J]. *Hydrological Processes*, 2006, **20**(1): 183-196.
- [15] Powers S M, Stanley E H, Lotting N R. Quantifying phosphorus uptake using pulse and steady-state approaches in streams [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2009, **7**: 498-508.
- [16] Knust A E, Warwick J J. Using a fluctuating tracer to estimate hyporheic exchange in restored and unrestored reaches of the Truckee River, Nevada, USA [J]. *Hydrological Processes*, 2009, **23**(8): 1119-1130.
- [17] 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.
- [18] De Smedt F. Analytical solution and analysis of solute transport in rivers affected by diffusive transfer in the hyporheic zone [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **339**(1-2): 29-38.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Stream Solute Workshop. Concepts and methods for assessing solute dynamics in stream ecosystems [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1990, **9**(2): 95-119.
- [22] Wagner B J, Gorelick S M. A statistical methodology for estimating transport parameters; theory and applications to one-dimensional advective-dispersive systems [J]. *Water Resources Research*, 1986, **22**(8): 1303-1315.
- [23] Qiu Y F, Deng B Q, Kim C N. Analytical solution for spatially dependent solute transport in streams with storage zone [J].

- Journal of Hydrologic Engineering, 2010, **16**(8): 689-694.
- [24] Kumar A, Dalal D C. Analysis of solute transport in rivers with transient storage and lateral inflow: An analytical study[J]. Acta Geophysica, 2010, **58**(6): 1094-1114.
- [25] Kumar A, Dalal D C. Analytical solution and analysis for solute transport in streams with diffusive transfer in the hyporheic zone [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2014, **8**(1): 62-73.
- [26] 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.
- [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.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2014年9月26日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续13次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行