第26卷 第5期
2015年9月

水 科 学 进 展
ADVANCES IN WATER SCIENCE

Vol. 26, No. 5
Sep., 2015

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.05.013

城市小型河流水动力弥散和潜流交换过程

于 靖[1,2], 张 华[1]

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为研究城市小型河流中污染物的物理迁移过程规律, 分析基流条件下流动水体与暂态存储区之间的滞留交互作用, 采用溴化锂(LiBr)作为保守性示踪剂进行野外现场示踪试验, 结合一维溶质运移存储模型(One-dimensional Transport with Inflow and Storage model, OTIS)定量解析潜流交换特性, 估算纵向弥散系数(D)、潜流交换面积(A_s)、主河道断面面积(A)和潜流交换系数(α)。模型度量指标D_{al}值和均方根误差值结果表征参数模拟结果可靠性高, 拟合效果理想。由泵入点O至下游1 300 m设置的A、B、C、D 4处监测点的模拟结果表明, 水文参数D、A_s、A和α均随水文条件而变, OB河段(0~600 m)潜流交换能力较弱, 主要以对流弥散过程为主; BD河段(600~1 300 m)具有较强的暂态存储能力, 对溶质的滞留时间长; BC(600~1 000 m)和CD(1 000~1 300 m)河段交换系数分别为$(3.42\times10^{-6}\pm0.65\times10^{-6})\ s^{-1}$和$(2.87\times10^{-6}\pm0.81\times10^{-6})\ s^{-1}$; 河段BC存在$2.2\times10^{-5}\ m^3/(s\cdot m)$的侧向补给流量。4个河段对比发现, 城市河流渠道化、河床沉积物贫瘠等特征导致潜流交换能力弱化。

关键词: 城市河流; 物理迁移; 暂态存储; 保守性示踪剂; 一维溶质运移存储模型

中图分类号: X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2015)05-0714-08

河流水系统中的潜流交换带为河水和地下水双向迁移和充分混合区, 是河床内水分饱和的沉积物层[1-2], 潜流带中存在上覆水体与地下水之间物质和能量的交换与过渡[3-4], 连接着河流水体、沉积物和地下水, 是河流生态系统的重要组成部分。溶质、水、颗粒和胶体等在上覆水体和沉积层之间相互作用称为潜流交换[5-9], 有研究表明潜流交换作用使溶质在河流中的运移发生滞留和暂态存储现象, 影响其在河流中的迁移行为, 延长溶质在河流中的滞留时间, 增加溶质在沉积物中降解的可能性[10], 因此潜流交换的研究对于揭示污染物在水体与沉积物间的交互作用特性及研究污染物迁移转化具有重要意义。

研究潜流交换的常用方法有液体压力法、结合压力测量技术的地下水示踪法和河流示踪试验结合模型模拟法[11-12], 前两种存在压力计布设的问题, 河流示踪试验法是目前被国外研究者较为接受的潜流交换研究方法。目前关于小型城市河流潜流交换特性的研究已有大量研究报道。Bencala和Walters[13] 1983年确立用河流示踪方法结合短期存储模型作为定量确定小型河流水动力的一种标准方法; Pizzuto等[14]指出城市河流平均宽度相比于天然河道宽26%, 而平均弯曲程度则小8%; Ryan等[15]关于植被覆盖影响城市河流中地表水与地下水之间交换作用变化的研究表明, 夏季基流条件下潜流交换作用较春季强, 主要原因是春季河道中水生植被相对较少; Becker等[16]用Cl作示踪元素结合OTIS(One-dimensional Transport with Inflow and Storage model)模型研究比较了增加河道弯曲度等水力特征的河流与常规城市河流的潜流交换规律, 研究发现按照自然河道设计的河流与一般城市河流相比具有较快的表面暂态存储能力和潜流交换能力。国内关于水质模拟的研究主要集中于大中型河流和湖泊[16], 而小型水体潜流交换的研究相对滞后, 已有研究通过室内水槽试验设计集中研究不同河床形态[17-19]及垂向和纵向交换机理[20], 但在实际河道潜流交换的量化研究方面研究相

收稿日期: 2015-01-19; **网络出版时间:** 2015-08-21
网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20150821.1731.028.html
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41271506); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14)
作者简介: 于靖(1989—), 女, 山东烟台人, 博士研究生, 主要从事环境水文过程与模拟方面研究。
E-mail: jyu@yic.ac.cn
通信作者: 张华, E-mail: hzhang@yic.ac.cn

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对较少，对城市河流潜流交换的研究更为缺乏。

研究表明影响河道与地下水间潜流交换的因素包括几何含水层的水力特性、河道护坡、河道宽度、弯曲度和含水层渗透性等[15,21-22]，城市化河流经人为因素设计施工已改变其原有河床结构及水力学特征[1,8]。城市河流流速缓慢，河道宽而浅，弯曲度降低[14]，河床无明显支流补给，多以管道排水补给为主；河床多被渠道化，结构板结且沉积物贫瘠，垂直透水性差，直接影响城市河流纵向弥散及潜流交换过程[15,23]。因此，探究城市化河流特定水文条件下对潜流交换过程的作用规律具有重要的生态环境意义。

本研究基于保守型示踪剂 LiBr 的野外河流现场示踪试验数据，选取逛荡河作为城市小型河流代表，结合一维溶质运移模型(OTIS)模拟城市河流基本水文参数纵向弥散系数、潜流交换面积和潜流交换系数等，量化模型模拟效果并推算溶质在人工修复河道的滞留时间，建立城市小型河流溶质迁移转化数学模型并进行模型参数识别，为城市河流水质模拟提供参考。

1　试验与方法

1.1　研究区概况

逛荡河发源于山东省烟台市凤凰山，流经庙后水库、凤凰山水库，注入黄海，全长 10.1 km。该河位于烟台市内，沿河多为居民区，上游为土质护坡，透水性好，下游多为人工建造堤岸，河道中每隔 300 m 左右人工设置拦河坝，河道中堆叠自然山石，大小石块错落，为典型的经过人工改造后的城市小型河流。河流中段长期受氮、磷等营养盐污染，水生植物较密集。

如图 1 所示，选择凤凰山水库出水口下游作为起点(O 点)，O 点至下游 1 300 m 作为研究河段开展示踪试验，该河段流速较缓，无支流汇入，流量稳定。在研究河段共设 A、B、C、D 4 个采样观测点，距 O 点的距离分别为 200 m、600 m、1 000 m 和 1 300 m。

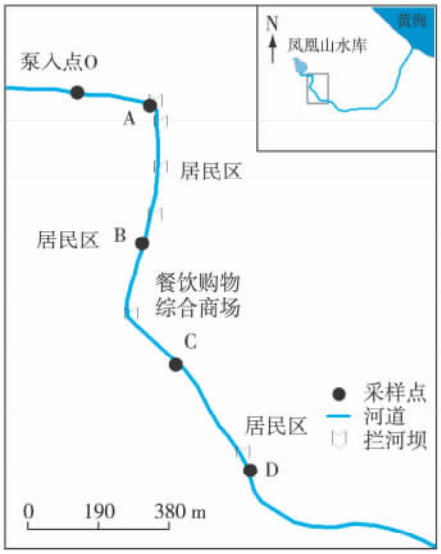

图 1　采样点示意

Fig. 1　Schematic of sampling sites along Guangdang River

1.2　保守型溶质的野外示踪试验

示踪试验在枯水期(2014 年 4 月 10 日)基流条件下进行，采用溴化锂溶液作为示踪剂，设计浓度为500 g/L，其中 Li 离子浓度为 40 g/L；采用蠕动泵(WT 600-2J-A Peristaltic Pump)于 10 日上午 9:39 连续匀速将溴化锂(LiBr)示踪溶液输入河中，持续时间 33 h，共泵入 100 L 示踪溶液，平均泵入流量 50 mL/min。研究河流 Li 离子浓度背景值为 0 mg/L。于 10 日 9:39 至 21 日 15:34 时间段内在源头下 O 点及 A、B、C、D 点处采集水样，设计前 2 天的采样间隔 4 h，后 8 天的采样间隔增大到 8 h。用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定水样中锂离子浓度。各采样断面的流量采用如下公式计算：

$$Q_i = \frac{Q_{INJ} C_{INJ}}{C_i - C_0} \tag{1}$$

式中　Q_i为河流某点流量，L/s；Q_{INJ}为注入流量，L/s；C_{INJ}为示踪剂浓度，mg/L；C_i为测得对应位点示踪剂的最高浓度值，mg/L；C_0为该河流中示踪剂的天然本底浓度值，mg/L。

采用流速仪(Global Water FP111)、卷尺等工具在河流断面 A、B、C、D 处测定流速 u，河宽 d 和水深 h，利用面积积分法得到断面面积，计算实测断面流量并与上述理论断面流量进行校对。

1.3　OTIS 模型的水环境功能模块

OTIS 模型是美国地质勘探局(USGS)开发的可用于模拟河流中溶质物理过程(对流、扩散、侧向补给和暂态存储)及化学过程(吸附和一阶降解)的一维水质模型[11]。OTIS 模型研究自定义水质组分，提供了流量

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(Q)、主河道断面面积(A)、潜流交换参数(A_s，α)和纵向弥散系数(D)的参数估计，并为用户提供了参数优化器OTIS-P，目前已被广泛用于水质模拟[18,24]。

保守型示踪剂试验适用于该模型物理模块考虑的4个过程，其中主河道浓度随时间变化公式及暂态存储交换过程浓度变化公式如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q\partial C}{A\partial x} + \frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial x}\left(AD\frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{q_{LIN}}{A}(C_L - C) + \alpha(C_S - C) \tag{2}$$

$$\frac{\partial C_S}{\partial t} = \alpha\frac{A}{A_S}(C - C_S) \tag{3}$$

式中 A 为主河道断面面积，m^2; C 为主河道溶质浓度，mg/L; C_L为横向流入的溶质浓度，mg/L; C_S为暂态存储区溶质浓度，mg/L; D 为纵向弥散系数，m^2/s; Q 为河流流量，m^3/s; q_{LIN}为侧向流入流量，m^3/s; t 为时间，s; x 为沿河流方向的距离，m; α 为河道与暂态存储带之间的交换系数，s^{-1}; A_S为暂态存储面积，m^2，代表河流河水的滞留能力，包括表面暂态存储和潜流交换存储，数值大小受河流弯曲程度、河床底质理化性质及沉积物量影响。

1.4 模型校准

OTIS模型通过调整参数的取值控制潜流交换特征参数A_S和α，可实现Li^+在4个河流采样点处浓度随时间变化的模拟曲线与观测曲线的充分拟合。均方根误差E_{RMS}作为客观评价模拟效果的指标能将拟合程度定量化，可作为单个观测位点的拟合效果评价，表达式如下:

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}((C_{sim})_i - (C_{obs})_i)^2} \tag{4}$$

式中 $(C_{obs})_i$ 为第 i 个示踪溶质浓度观测值，mg/L; $(C_{sim})_i$ 为与第 i 个观测值相对应的浓度模拟值，mg/L; N 为观测浓度的个数。采用整合均方根误差E_{agg}作为多个观测位点综合拟合效果评估指标[26]，表达式为

$$E_{agg} = (E_1^2 + E_2^2 + \cdots + E_n^2)^{0.5} \tag{5}$$

式中 1，2，…，n 为数据组数; E_1，E_2，…，E_n 为式(4)计算的均方根误差值。

1.5 暂态存储过程的度量指标

暂态存储的指标分析是将模型估算参数转化为用于评价的敏感性指标，多为量纲一指标参数，这种参数有助于数据的分析比较及确定参数估计的可靠性[10]。国外学者对于暂态存储度量指标的研究颇多，其中最为常用的有两种，一种是Damkohler number(D_{al})，D_{al}指标定义为存储率与主河道平流率的比值[10]，数值在0.1~10之间意味着模拟结果可信度较高，其中数值1.0为最优值，表明河段长度足够河水与暂态存储区之间的充分混合交换[21]; 另外一个重要的指标F_{med}为溶质在河道的平均迁移时间，可作为不同长度河段的常规比较，通常情况下选取200 m河道进行计算; 此外，还有几种度量表示，如溶质在暂态存储区的滞留时间表示、暂态存储交换区的运移长度、标准交换面积、交换通量、存储带的流量及水力滞留因子[10,21]，计算公式见表1。

表1 暂态存储度量指标公式

Table 1 Equations describing transient storage metrics

度量指标	计算公式
Damkohler number	$D_{al} = \frac{\alpha(1 + A/A_S)L}{v}$
溶质在河道的平均迁移时间	$F_{med} \cong (1 - e^{-L\frac{\alpha}{v}})\frac{A_S}{A + A_S}$
溶质在暂态存储区的滞留时间	$T_{STO} = A_S/(\alpha A)$
暂态存储交换区的运移长度	$L_S = v/s$
标准交换面积	A_S/A
交换通量	$q_S = \alpha A$
存储带的流量	$Q_S = \alpha AL$
水力滞留因子	$R_H = A_S/Q$

注: L 为示踪试验河段长度，m; v 为河流平均流速，m/s。

本研究的4个河段分别应用以上8种度量指标分析方法进行评估，并对OTIS模型所有参数的模拟效果和度量指标进行分析。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　结果与讨论

2.1　河流水文参数实测值与模拟结果

经现场实测得到逛荡河示踪试验各河段水文参数值(表 2)，OA 段与 BC 段河面较宽，分别为 24.64 m 和 28.55 m，流速较缓；AB 段河道沿岸有大量水生植物，河道较窄仅为 14.26 m；CD 段缓水区面积占较大比例。

逛荡河具备显著的城市河流水文特征，试验河段沿岸改变了自然弯曲的河道形态，改为人工绿化的缓坡。为提高城市抗洪能力，河道内人工修建拦河堤坝造成逛荡河河水的分级落差，其中，AB 段拦河坝数量相对较多(4 处)，坝间河段较短，水位落差小，冲淤作用并不明显，而 BC 和 CD 两段各只设一处拦河坝，水位落差大，水流相对较急，在堤坝下游处产生河水的较强冲淤作用，导致河道底泥较厚，一定程度上增加了沉积物与上覆水体之间的潜流交换过程，其中 CD 段形成较明显的浅滩。泵入点处河流计算流量为 0.022 m^3/s，除在 BC 段有 0.009 m^3/s 的增加外基本保持稳定，与实测流量值一致，表明除 BC 河段，其他河段无明显的侧向补给。

表 2　逛荡河研究河段物理特征

Table 2　Physical characteristics of Guangdang River reaches

河段	宽度/m	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	平均水深/m	河床坡降	长度/m
OA	24.64	0.022	0.41	0.022	200
AB	14.26	0.022	0.68	0.0007	400
BC	28.55	0.031	0.29	0.001	400
CD	14.60	0.031	0.59	0.001	300

Li^+ 浓度实测值与 OTIS-P 模型拟合结果如图 2 所示，模拟值与观测值相近，模拟结果可靠性较高。均方根误差值可表征 OTIS-P 对各个参数模拟值的好坏，4 处观测点 E_{RMS} 值分别为 100、51、18 和 9；总均方根误差和 E_{agg} 为 114，说明拟合效果理想。示踪剂 Li^+ 浓度在 OA、AB 两河段曲线上升坡和下降坡较陡，表明在这两点处潜流交换作用较弱，而 BC、CD 两段则出现曲线相对延迟的现象，达到峰值之后浓度缓慢下降至接近背景值并保持稳定，反映了河道与暂态存储区之间滞留现象的存在。4 个河段示踪剂浓度最高值逐次降低，主要是由于河流稀释、对流和扩散作用的存在[18]。图 2 表明，保守型示踪剂在河流中的迁移过程缓慢，4 处实测点从检测到浓度上升至恢复背景值需时分别为 66 h、104 h、125 h 和 130 h，溶质在河道与暂态存储区间存在潜流交换过程。

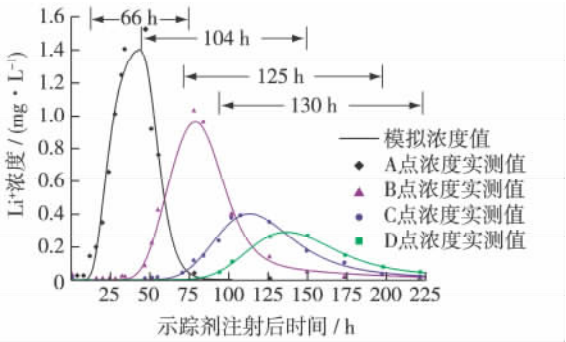

图 2　实测值与 OTIS 模型拟合效果

Fig. 2　Observed and simulated breakthrough curves of studied reaches

以泵入点下 0 点河流断面作为上边界条件，根据示踪试验现场测定的流速、流量作为基础水文数据，利用修改后的 OTIS 模型程序及 OTIS-P 的参数优化程序对暂态存储过程进行模拟，得到水文参数的估计值，河流 Li^+ 背景值为 0 mg/L。运行过程中不断进行参数调整进一步优化得到水文参数 D、A、A_S 和 α，结果见表 3。

表 3　水文参数优化值

Table 3　Optimized OTIS parameter values

河段	R^2	E_{RMS}	$D/(m^2 \cdot s^{-1})$	A/m^2	A_S/m^2	α/s^{-1}	$q_L/(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$
OA	0.985 3	100	0.027 4 ± 0.005	10.5 ± 0.400	0.01	1.0×10^{-9}	0
AB	0.995 8	51	0.079 5 ± 0.011	9.59 ± 0.361	0.01	1.0×10^{-9}	0
BC	0.999 6	18	0.087 2 ± 0.031	9.80 ± 1.24	32.2 ± 15.9	$3.42 \times 10^{-6} \pm 0.65 \times 10^{-6}$	2.2×10^{-5}
CD	0.999 6	9	0.127 0 ± 0.054	10.7 ± 1.97	40.0 ± 34.1	$2.87 \times 10^{-6} \pm 0.81 \times 10^{-6}$	0

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3显示了不同水文条件的河段其水文参数具有差异。其中，弥散系数 D 在4个河段处基本处于0.027 4～0.127 0 m^2/s 之间，Becker 等[10] 2013 年对人工设计河道的模拟结果为0.051～0.520 m^2/s，Jin 等[25] 2009 年研究河段的 D 值为0.20～1.77 m^2/s，本研究与国外学者的研究相比，数量级一致但数值相对偏小；4个河段的暂态存储面积 A_S 分别为0.01 m^2、0.01 m^2、32.2 m^2 和40 m^2，BC 段和 CD 段潜流交换面积相较于其他研究者明显较大[10,26]，表明逛荡河 BC 和 CD 两河段河道暂态存储和溶质滞留能力较强；BD 段潜流交换系数 α 与国外一些学者的研究成果一致[27-28]，基本处于 10^{-6} 数量级范围，而 Stofleth 等[29] 的研究中 α 值分别在 10^{-4}～10^{-3} 和 10^{-4} 数量级，需要说明的是，潜流交换系数与具体的河流水文状况有直接关系，因此在数值上体现出不一致性较为合理。BC 河段存在一定的河流侧向补给，补给流量 q_L 为 2.2×10^{-5} $m^3/(s\cdot m)$，与河段长度计算后得 Q_S 为0.009 m^3/s，与流量在下游增大的实际情况吻合，量级与其他研究成果一致[10]。

2.2 暂态存储度量

利用暂态存储过程中的度量公式计算如表4所示。4个河段的 D_{al} 值在0.25～1.00之间，说明 OTIS 模型模拟的4个参数的可靠性较高，河段选取的长度适合暂态存储研究及 OTIS 模型的参数模拟过程，认为拟合结果可以接受。

A_S/A 值、F_{med}、L_S 和 R_H 都是表征河流潜流交换能力和水力滞留能力的指标。A_S/A 值代表潜流交换区的相对大小，BC 和 CD 两河段潜流交换面积明显高于上游两个河段，相对面积值分别为3.286和3.738；F_{med} 在上游两个河段很低，而在 BC 和 CD 两处分别为35%和20%，表明 OA、AB 两个河段潜流交换能力较弱，后两个研究河段河水与沉积物间交换能力相对较强；从表4中不难看出，水力滞留因子 R_H 与潜流区迁移距离 L_S 在量度表征上具有一致性，逛荡河 BC 段和 CD 段对溶质滞留能力明显高于 OA 段和 AB 段，意味着 BC、CD 河段对于溶质在河道中的滞留能力较强，滞留时间 T_{STO} 较长，有利于促进污染物在河床底部沉积物中的交换和降解，本研究结果与文献[29-31]的研究结果极为相似，而与一般自然河道的研究相比明显偏高[10]，可能由于研究河段有人工分级堤坝影响导致下游河段冲淤现象严重，增大了沉积物的积累，促成了较为充分的潜流交换过程；潜流交换量 Q_S 在4个河段分别为 2.0×10^{-5} m^3/s、4.0×10^{-5} m^3/s、1.3×10^{-2} m^3/s 和 9.2×10^{-3} m^3/s，说明潜流交换过程的交换量在 BC 河段最大，CD 段次之，OA、AB 两河段几乎不存在潜流交换作用，主要以对流扩散起主导作用，这与实际调查中上游河段河床沉积物较贫瘠相一致。本研究结果可以充分说明与 OB 河段相比，逛荡河 BC、CD 两处研究河段潜流交换功能较强，这与河床沉积物层丰富有很大的关系。

表4 暂态存储度量指标

Table 4 Transient storage metrics

河段	D_{al}	A_S/A	F_{med}/%	T_{STO}/s	$q_S/(m^3\cdot s^{-1}\cdot m^{-1})$	L_S/m	$R_H/(s\cdot m^{-1})$	$Q_S/(m^3\cdot s^{-1})$
OA	1.00	0.001	1.0×10^{-4}	9.54×10^4	1.1×10^{-7}	0.21	0.45	2.0×10^{-5}
AB	0.84	0.001	2.0×10^{-4}	1.04×10^5	1.0×10^{-7}	0.23	0.45	4.0×10^{-5}
BC	0.40	3.286	35	9.61×10^5	3.35×10^{-5}	660	1 463.64	1.3×10^{-2}
CD	0.25	3.738	20	1.30×10^6	3.07×10^{-5}	1 010	1 290.32	9.2×10^{-3}

2.3 潜流交换特征

逛荡河作为典型的小型城市河流，河道具有明显的渠道化特征，河道清淤工程致使上游河床沉积物贫瘠，从而出现了 OA 段和 AB 段潜流交换系数偏低，潜流交换能力不足的问题。对于营养盐污染负荷较重的城市河流而言，降低了潜流带对污染物的滞留能力，不能起到有效促进污染物降解的可能性。在沉积条件相对较好的 BC 和 CD 段，河段流速缓慢，利于水体中颗粒物的沉积，实地调查发现，该河道下游沉积物层较厚且颜色暗黑，富含有机质，相对于沉积物较贫瘠的河道而言，一定程度上增大了暂态存储面积 A_S 和潜流交换系数 α，因此 F_{med} 和滞留因子 R_H 也相应增大。显然，中游两个研究河段中潜流带对暂态存储的贡献较

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大，有利于增强氮、磷等污染物在潜流带中的交换能力，增加污染物的降解可能性。另一方面，河道中设有人工设计的逐级拦河坝，拦河坝的存在具有一定的生态环境意义。从对潜流交换的贡献来说，堤坝上游引起回水现象[32]，坝下由于冲刷作用导致沉积物层被冲蚀，颗粒物在河水的裹挟下重新在下游流速较缓处堆积形成后沉积物层，造成河床结构改变，增大了上覆水体与沉积物层的接触面积，引起下游 BC 和 CD 段潜流交换能力增强，对于提高逛荡河暂态存储能力具有积极意义。

与自然河道相比，城市小型河流河床板结、垂直透水性差等特点对河流潜流带具有一定程度的影响。比较 4 个研究河段可见，BC 和 CD 河段具有明显的滞留能力，对河流下游水质具有一定的改善。另外，河床结构和河道形态影响污染物在河流中的迁移过程和降解过程，因此，城市河流的改造在考虑防洪等安全性外，还要重视河流在城市中发挥的生态环境作用。

3 结　论

(1) 逛荡河上游 4 处研究河段的纵向弥散参数 D 范围为 0.027 4 ~ 0.127 0 m^2/s，河段 BC 有侧向补给，补给流量 q_L 为 2.2×10^{-5} $m^3/(s\cdot m)$，其他河段流量相对稳定；BC、CD 段潜流交换系数 α 总体在 10^{-6} 数量级，结果表明 OA 和 AB 两河段以对流扩散为主，潜流交换能力较弱，BC 段和 CD 段潜流交换面积较大，具有一定的暂态存储能力。

(2) D_{al} 值显示本研究模拟结果可靠性高，河流上游河段 F_{med} 值、L_S 和 R_H 值较低，潜流交换能力相对较弱，BC、CD 河段 F_{med} 值及潜流区迁移距离与滞留因子明显较高，研究表明河流中潜流交换作用较强，河道对溶质的滞留能力显著，大大提高了溶质在潜流带的滞留时间，有利于增大河流中污染物在沉积物中的降解可能性。

(3) OTIS-P 模型的物理迁移模块能够很好地反映溶质在潜流交换过程中的交换特性，相对于室内模拟试验具有较高的模拟精度，但是模型参数调整和优化的不确定性造成了模型拟合过程的难度；因此，针对不同河流水文特征开展恰当的野外示踪试验，以获取较精准的实际数据还有待于进一步提高。

(4) 基于开展现场示踪试验结合 OTIS 模型分析模拟，能够有效地模拟小型河流水文参数 D、A_S 和 α，研究河流溶质迁移与潜流交换过程。研究表明，逛荡河不同水文条件下的河段具有不同的水文参数值和水文特征，出于防洪安全的考虑，城市河流河道渠道化，河岸弯曲度下降，河床板结等现象会导致河道潜流交换能力减弱，影响正常河流生态系统功能。

参考文献:

[1] HESTER E T, GOOSEFF M N. Moving beyond the banks: Hyporheic restoration is fundamental to restoring ecological services and functions of streams [J]. Environ Sci Technol, 2010, 45(5): 1521-1525.

[2] BOULTON A J, FINDLAY S, MARMONIER P, et al. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1998, 29(1): 59-81.

[3] LEMKE D, LIAO Zijie, WOHLING T, et al. Concurrent conservative and reactive tracer tests in a stream undergoing hyporheic exchange [J]. Water Resources Research, 2013, 49(5): 3024-3037.

[4] LIAO Zijie, LEMKE D, OSENBRUCK K, et al. Modeling and inverting reactive stream tracers undergoing two-site sorption and decay in the hyporheic zone [J]. Water Resources Research, 2013, 49(6): 3406-3422.

[5] PACKMAN A I, BROOKS N H. Hyporheic exchange of solutes and colloids with moving bed forms [J]. Water Resources Research, 2001, 37(10): 2591-2605.

[6] CARDENAS M B, WILSON J L. Hydrodynamics of coupled flow above and below a sediment-water interface with triangular bedforms [J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(3): 301-313.

[7] JONSSON K, JOHANSSON H, WORMAN A. Hyporheic exchange of reactive and conservative solutes in streams-tracer methodology and model interpretation [J]. Journal of Hydrology, 2003, 278(1/2/3/4): 153-171.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[8] 金光球，李凌. 河流中潜流交换研究进展[J]. 水科学进展，2008，19(2)：285-293.（JIN Guangqiu，LI Ling. Advancement in the hyporheic exchange in rivers[J]. Advances in Water Science，2008，19(2)：285-293.（in Chinese））

[9] 夏继红，陈永明，王为木，等. 河岸带潜流层动态过程与生态修复[J]. 水科学进展，2013，24(4)：589-597.（XIA Jihong，CHEN Yongming，WANG Weimu，et al. Dynamic processes and ecological restoration of hyporheic layer in riparian zone[J]. Advances in Water Science，2013，24(4)：589-597.（in Chinese））

[10] BECKER J F，ENDRENY T A，ROBINSON J D. Natural channel design impacts on reach-scale transient storage[J]. Ecological Engineering，2013，57(13)：380-392.

[11] HARVEY J W，BENCALA K E. The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments[J]. Water Resources Research，1993，29(1)：89-98.

[12] WHITE D S，ELZINGA C，HENDRICKS S P. Temperature patterns within the hyporheic zone of a Northern Michigan river[J]. Journal of North American Benthological Soc，1987，6(2)：85-91.

[13] 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.

[14] PIZZUTO J E，HESSION W C，MCBRIDE M. Comparing gravel-bed rivers in paired urban and rural catchments of sourtheastern pennsylvania[J]. Geology，2000，28(1)：79-82.

[15] RYAN R J，WELTY C，LARSON P C. Variation in surface water-groundwater exchange with land use in an urban stream[J]. Journal of Hydrology，2010，392(1-2)：1-11.

[16] 罗定贵，王学军，孙莉宁. 水质模型研究进展与流域管理模型 WARMF 评述[J]. 水科学进展，2005，16(2)：289-294.（LUO Dinggui，WANG Xuejun，SUN Lining. Progress in study of water quality model and review of river basin management model-WARMF[J]. Advances in Water Science，2005，16(2)：289-294.（in Chinese））

[17] ELLIOTT A，BROOKS N H. Transfer of non-sorbing solutes to a streambed with bed forms：Laboratory experiments[J]. Water Resources Research，1997，33(1)：137-151.

[18] HARVEY J W，WAGNER B J. Quantifying hydrologic interactions between streams and their subsurface hyporheic zones[M]. Streams and Ground Waters，Academic Press，San Diego，2000：3-44.

[19] PACKMAN A I，SALEHIN M，ZARAMELLA M. Hyporheic exchange with gravel beds：Basic hy-drodynamic interactions and bedform-induced advective flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2004，130(7)：647-656.

[20] 林俊强，严忠民，夏继红. 弯曲河岸侧向潜流交换试验研究[J]. 水科学进展，2013，24(1)：118-124.（LIN Junqiang，YAN Zhongmin，XIA Jihong. Laboratory experiments on lateral hyporheic exchange in riverbanks with curved bank morphology[J]. Advances in Water Science，2013，24(1)：118-124.（in Chinese））

[21] LARKIN R G. On the relationship between river-basin geomorphology，aquifer hydraulics，and ground-water flow direction in alluvial aquifers[J]. Geological Society of America Bulletin，1992，104(12)：1608-1620.

[22] WINTER T C. Recent advances in understanding the interaction of groundwater and surface water[J]. Reviews of Geophysics，1995，33(S2)：985-994.

[23] 陈孝兵，赵坚，李英玉，等. 床面形态驱动下潜流交换试验[J]. 水科学进展，2014，25(6)：835-841.（CHEN Xiaobing，ZHAO Jian，LI Yingyu，et al. Experimental study of bedform-driven hyporheic exchange[J]. Advances in Water Science，2014，25(6)：835-841.（in Chinese））

[24] BROSHEARS R E，BENCALA K E，KIMBALL B A. Tracer-dulution experiments and solute-transport simulations for a mountain stream，Saint Kevin Gulch，Colorado[R]. Denver：US Geological Survey Water-Resources Investigations Report，1993.

[25] JIN L，SIEGEL D I，LAUTZ L K，et al. Transient storage and downstream solute transport in nested stream reaches affected by beaver dams[J]. Hydrological Processes，2009，23(17)：2438-2449.

[26] 李如忠，丁桂珍，徐晶晶. 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.（LI Ruzhong，DING Guizhen，XU Jingjing. Characteristics analysis of transient storage zone in the headwater stream of Shiwuli River in Chaohu Lake basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2014，45(6)：631-640.（in Chinese））

[27] MARTINEZ C J，WISE W R. Analysis of constructed treatment wetland hydraulics with the transient storage model OTIS[J]. Ecological Engineering，2003，20(3)：211-222.

[28] SMEDT F D. Analytical solution and analysis of solute transport in rivers affected by diffusive transfer in the hyporheic zone[J].

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Journal of Hydrology, 2007, 339(1/2): 29-38.

[29] STOFLETH J M, SHIELDS F D, FOX G A. Hyporheic and total transient storage in small, sand-bed streams [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(12): 1885-1894.

[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] GOOSEFF M N, MCKNIGHT D M, RUNKEL R L, et al. Denitrification and hydrologic transient storage in a glacial meltwater stream, McMurdo Dry Valleys, Antarctica [J]. Limnology and Oceanography, 2004, 49(5): 1884-1895.

[32] PAGLIARA S, KURDISTANI S M. Scour downstream of cross-vane structures [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2013, 7(4): 236-242.

Hydrodynamic dispersion and hyporheic exchange in a small urban stream*

YU Jing[1,2], ZHANG Hua[1]

(1. *Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai* 264003, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: To reveal the physical transport processes in a small urban stream and analyze exchange processes between water column and transient storage zone under base flow, field experiment using LiBr as conservative tracer and numerical simulation using One-dimensional Transport with Inflow and Storage model (OTIS) were carried out to quantitatively characterize hyporheic exchange. The longitudinal dispersion coefficient (D) reach-scale transient storage area (A_S), main channel cross section area (A), and the hyporheic exchange coefficient (α) were estimated along a 1 300 m stream reach. Transient storage metrics D_{aI} and E_{RMS} values showed an excellent fit of the model. The results of four stations (A, B, C and D) downstream the location of tracer injection demonstrated that hydrological parameters D, A_S, A, α varied with hydrological conditions. The hyporheic exchange of upper reaches (0—600 m) was weak and convection and dispersion were dominant processes. The middle reaches of the river (600—1 300 m) had stronger transient storage and longer hydraulic retention time. The exchange coefficient of segment BC (600—1 000 m) and CD (1 000—1 300 m) were $(3.42\times10^{-6}\pm0.65\times10^{-6})$ s^{-1} and $(2.87\times10^{-6}\pm0.81\times10^{-6})$ s^{-1}, respectively. A lateral flow of 2.2×10^{-5} $m^3/(s\cdot m)$ contributed to BC. In general, stream channelization and lack of sediment on the streambed reduced the capacity of hyporheic exchange in urban streams.

Key words: urban stream; physical transport; transient storage; conservative tracer tests; One-dimensional transport with inflow and storage model

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41271506) and Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences of China (No. KZZD-EW-14).

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net