

弯曲河岸侧向潜流交换试验

林俊强, 严忠民, 夏继红

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为揭示河岸形态引起的侧向潜流交换规律, 利用地表水与地下水双循环水槽系统, 通过10组正弦型微弯河岸与4组直线型河岸的潜流交换对比试验, 研究不同河岸振幅 a 、地表水流速 u 、河流水深 h 条件下的潜流交换特性。试验结果表明, 与垂向潜流交换机理类似, 侧向潜流交换也存在对流(泵吸交换)、扩散和微循环3种交换形式。河流雷诺数 Re 的增大, 将加强紊动扩散与微循环作用。河岸弯曲形态的出现, 将引起泵吸效应, 大大加剧了河岸的潜流交换, 且随着河岸振幅与河流流速的增大, 河岸形态引起的泵吸交换将逐渐成为潜流交换前期的主要形式。

关键词: 河岸; 水槽试验; 潜流交换; 侧向; 泵吸效应

中图分类号: TV131 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2013)01-0118-07

潜流带是河流地表水与浅层地下水相互作用、相互联系的过渡区域。它位于河床、边滩及河岸之下的饱和沉积层内, 甚至可向两侧延伸至泛洪平原的地下区域^[1-2]。不同于河流与深层地下水之间的单向补给与排泄, 潜流带的水流运动具有独特的双向性^[3-4]。水流流经不同河床形态(沙波、沙丘、礁潭)、河岸地形(河曲、边滩、点沙坝)、河中障碍物(水中植物、鱼类产卵坑、巨石)等不规则边界时, 都会产生一系列的水力高压区与低压区^[3,5-8], 河流地表水从河床或河岸表面的水力高压区进入地下, 穿越一定距离的浅层孔隙区, 与其中的地下水进行混掺与交换, 再从水力低压区返回地表。这种循环反复的潜流交换行为, 大大促进了地表水与地下沉积物及微生物群落间的生物地球化学反应, 加强了河流的新陈代谢, 改善了河流的水环境^[4]。因此, 潜流交换对整个河流生态系统的健康起着至关重要的作用。1990年以来, 已有很多学者对潜流交换机理开展了大量研究。如: 一些学者通过水槽试验研究不同河床形态引起的潜流交换规律, 并提出了一些机理性的理论与数值模型, 可有效模拟与预测河流与河床之间的潜流交换^[9-12]。然而, 这些研究多集中于河床部分的垂向交换研究, 关于侧向潜流交换的机理性研究却鲜有报道。尽管一些野外试验观测的河岸地下水位分布情况可一定程度地揭示侧向潜流交换的路径与主要影响因素^[5-6,13], 但侧向交换机理、潜流净交换量和滞留时间等问题仍不明晰。认识和理解侧向潜流交换的特征规律, 不论是对水循环演变规律等方面的理论研究, 还是对地表水与地下水污染防治等方面的实际应用, 都具有积极的参考作用。

天然河流中, 潜流交换的影响因素众多, 不同的河床形态、河岸形态、沉积物的组成结构、泥沙运动、河流水流条件等都会引起不同程度的潜流交换。本文将利用自行研制的地表水与地下水双循环水槽系统, 建立适当的概化模型, 通过示踪剂试验, 从潜流净交换量角度, 着重研究了微弯河岸形态与河流水流条件共同作用所引起的侧向潜流交换特性。

收稿日期: 2012-02-20; 网络出版时间: 2012-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20121217.2024.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40871050); 江苏省研究生科研创新项目(CX10B-212Z)

作者简介: 林俊强(1984-), 男, 福建泉州人, 博士研究生, 主要从事生态水力学研究。

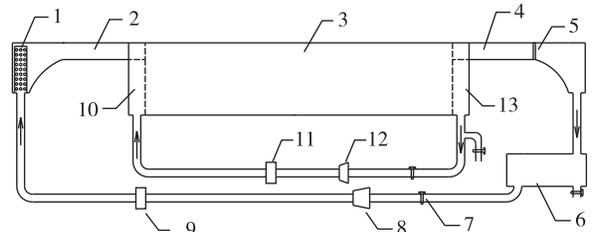
E-mail: junqiang-lin@hotmail.com

通信作者: 夏继红, E-mail: syjxia@hhu.edu.cn

1 试验装置系统

为了更好地模拟河流地表水与河岸地下水的水流环境, 并有效调控其各自的水流条件, 本文设计了一种具有地表水与地下水双循环系统的试验水槽。该水槽的河流地表水循环系统由地表水进口缓冲器、地表水进口直线段水槽、模拟河道的试验段水槽、地表水出口直线段、尾门、下游水箱、地表水管道阀门、地表水管道离心泵、地表水流量计等部分组成。河岸地下水循环系统由地下水进口、试验段水槽的模拟河岸、地下水出口、地下水蠕动泵、地下水微型流量计等部分组成, 如图 1 所示。其中, 试验段水槽长 10 m、宽 2 m、高 0.8 m, 试验时将沙料铺设于该水槽内, 利用河岸形态塑造器塑造不同的河岸形态。试验段水槽的上下游分别设置了一段长 1.5 m 的直线段水槽, 其断面形式与模型河道相同, 底部高程分别与模型河道进出口处的河床高程一致, 用以平稳模型河道进出口处的水流。地下水的进出口采用孔板断面, 其上覆盖有一层 200 目的尼龙土工布, 以防止河岸沉积物流失。由于水分蒸发与示踪剂挥发量很小, 试验中可忽略不计, 因此该循环水槽可视为封闭系统, 可较好地应用于侧向潜流交换与溶质迁移规律的定量研究。

由于大曲率河道的水流条件复杂, 泥沙运动剧烈, 难以维持既定的河岸形态, 因此选择微弯河道作为研究对象。而微弯河道中, 河岸边界对地表水与地下水流场的影响通常仅局限于近岸区域, 如图 2 所示, 在偏离河岸边界一定距离(大于 5 倍水深)后, 河岸边界的影响较小, 河道流线趋近于直线。另一方面, 本文研究的重点是分析不同岸线形态对侧向潜流交换的相对影响, 以探讨侧向潜流交换的机理。故此本文试验仅考虑单侧河岸, 而将河流中另一侧近似直线的流线概化成直线水槽边壁, 建立半河道形式的概化模型, 如图 3 所示。在河床与河岸填料选择方面, 天然河流的沉积物以粘性土与砂性土为主, 而粘性土渗透系数小, 交换速率缓慢, 所以选择均质沙性土作为填料铺设河床与河岸断面。该填料为人工石英砂, 颗粒大小均匀且各向同性, 中值粒径为 0.78 mm, 渗透系数为 0.584 cm/s, 孔隙率为 0.45。弯曲河岸的岸线概化为正弦曲线, 河岸高度为 13 cm, 边坡系数为 3, 河岸铺设的平均宽度为 128 cm。河床可根据需要铺设成不同的坡度, 其表面平整、无沙波形态, 平均宽度为 33 cm, 最大深度为 50 cm。另外, 为减小概化的左岸直线边壁对右岸附近流场的影响, 试验时还需控制水深, 使水面宽度大于水深的 5 倍。本文不考虑沉积物结构特性的影响, 仅对同一均质沙在相同密实度条件下开展相关试验研究。



1. 地表水进口缓冲器; 2. 地表水进口直线段水槽; 3. 试验段水槽; 4. 地表水出口直线段水槽; 5. 尾门; 6. 下游水箱; 7. 地表水管道阀门; 8. 地表水管道离心泵; 9. 地表水流量计; 10. 地下水进口; 11. 地下水微型流量计; 12. 地下水蠕动泵; 13. 地下水出口

图 1 试验水槽循环系统

Fig. 1 Circulation system of experimental flume

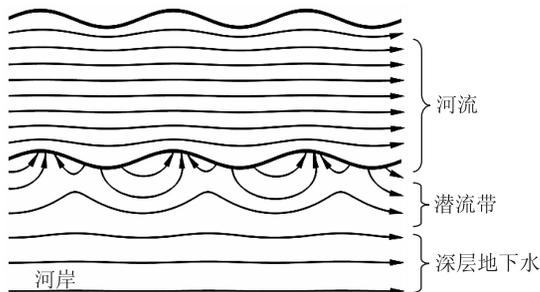


图 2 微弯河岸边界对地表水与地下水流场的扰动示意

Fig. 2 Disturbed flow field of stream and subsurface induced by slight curved bank boundary



图 3 具有正弦型弯曲河岸形态的试验河道

Fig. 3 Experimental channel with sinusoidal bank morphology

2 试验方法与特征参数

在恒定流条件下,通过潜流交换进入地下的流量等于返回地表的流量(入渗流量等于溢出流量)。在一个封闭的循环系统中,随着地表水与地下水的水量交换,河流中的溶质将迁移进入地下。假设河流地表水的初始溶质浓度为 C_0 ,地下水的初始溶质浓度为 0,则 t 时刻后潜流交换的溶质平衡可用下式表示^[10]:

$$\frac{C(t)}{C_0} = \frac{V_w}{V_w + V_e \theta} \quad (1)$$

式中 V_w 为河流地表水的体积; $C(t)$ 为当前时刻地表水的溶质浓度,并假设此时已发生交换的地下区域浓度与地表水浓度相同, $C(t)/C_0$ 为地表水溶质浓度的变化率; V_e 为已发生潜流交换的地下区域体积,表征潜流交换强度,其值越大,潜流交换量也越大; θ 为地下多孔区域的孔隙率。

式(1)表明, $C(t)/C_0$ 与 V_e 存在定量关系,潜流交换量越大,地表水溶质浓度变得越低。试验中潜流交换区域体积不易精确测定,而地表水溶质浓度容易测定,因此本试验采用 $C(t)/C_0$ 作为潜流交换量的表征量,从河流迁移到河岸的示踪剂净交换量角度进行研究。

为减小工况组合数量,采用同一种均质砂进行试验,并保持循环系统中的地表水体积不变,即 K 、 θ 、 V_w 为常数,同时也保持河岸波长 λ 为 1 m 不变,通过改变河岸振幅 a 、地表流速 u 和水深 h 的大小,研究不同河岸形态与不同地表水流相互作用所引起的侧向潜流交换。试验的工况组合与主要参数见表 1。

表 1 试验主要参数

Table 1 Main parameters of each experiment

工况	a/cm	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	h/cm	$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	工况	a/cm	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	h/cm	$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	8	60.0	11.0	0.31	8	4	60.0	11.0	0.31
2	8	50.0	11.0	0.26	9	4	50.0	11.0	0.26
3	8	40.0	11.0	0.20	10	4	40.0	11.0	0.20
4	8	63.4	12.5	0.27	11	0	60.0	11.0	0.31
5	6	60.0	11.0	0.31	12	0	50.0	11.0	0.26
6	6	50.0	11.0	0.26	13	0	40.0	11.0	0.20
7	6	40.0	11.0	0.20	14	0	63.4	12.5	0.27

注: Q 为河流地表水流量。

试验启动时,需缓慢调节尾门与地表水管道阀门开度,控制河流流量与水深,以形成近似均匀流,同时防止泥沙启动,保证河床平整、河岸形态完好。而后,调节地下水管道阀门开度,使河岸地下水水位与河流水位齐平。待河流地表水与河岸地下水平衡稳定后,在下游水箱一次性注入氯化钠溶液(NaCl)作为示踪剂。经地表水一至两次循环后(1~2 min),河流中的 NaCl 浓度即可达到均一状态。示踪剂试验开始后,需记录时间并定时测定地表水示踪剂浓度。NaCl 浓度采用便携式电导率仪在地表水进口直线段处直接测定。每组试验结束后,需进行水槽整体换水与洗沙工作,直至沉积物孔隙水浓度下降至背景值。所有工况的试验过程中,均无沙粒启动现象。

3 试验结果与讨论

经观察发现,地表水与地下水的快速交换发生在试验的前期,而后是缓慢的扩散阶段直至地表水与地下水的示踪剂浓度达到平衡。由于示踪剂的后期扩散过程极其缓慢,本文仅记录了前 14 h 的地表水浓度数据,这些数据已可充分反映岸线形态对潜流交换的相对作用。此外,在数据记录的 14 h 内,经测定所有工况水槽右侧边壁处的示踪剂相对浓度均为 0,概化的右岸水槽边壁未对试验结果产生过大影响。

3.1 顺直河岸形态的潜流交换特性

顺直河岸不同流速 u 与不同水深 h 条件下, 潜流交换随时间的变化如图 4、图 5 所示。试验发现, 在顺直河道中, 河流地表水的示踪剂相对浓度也有一定程度的下降, 这表明顺直河岸也可发生潜流交换。由于河床与河岸表面平整, 宏观上不会产生对流交换, 因此顺直河岸的潜流交换主要是由紊动扩散及微观尺度(孔隙尺度)下的微循环(微对流)所引起。从图 4 可以看出, 在水深不变的条件下, 潜流交换随河流地表流速的增大而增大。从图 5 可以看出, 在地表流速不变的条件下, 河流水深越大, 潜流交换越大。流速与水深的影 响可从两方面进行解释, 一方面地表水流速与水深的增大, 将导致水流雷诺数 Re 的增大, 水流紊动强度也相应增大, 从而加强了紊动扩散与泥沙孔隙中的微循环, 促进了顺直河岸的潜流交换; 另一方面河流水深的增大, 将引起河流断面湿周的增大, 地表水与地下水的界面面积也相应增大, 进而扩大了入渗面积, 增加了潜流交换。

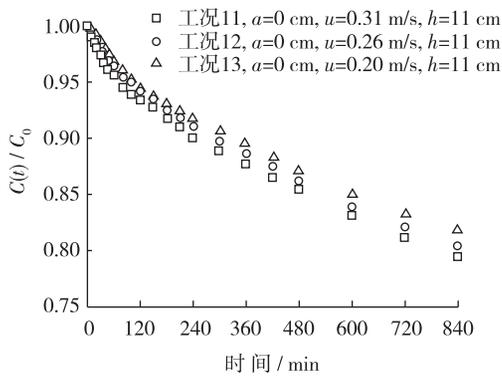


图 4 顺直河岸不同流速 u 条件下的潜流交换
Fig. 4 Hyporheic exchange with varying velocity u in straight bank

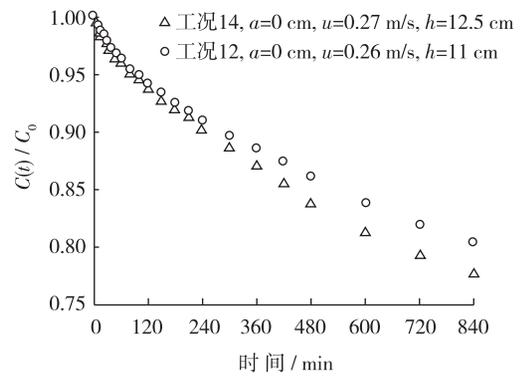


图 5 顺直河岸不同水深 h 条件下的潜流交换
Fig. 5 Hyporheic exchange with varying flow depth h in straight bank

3.2 弯曲河岸形态的潜流交换特性

河岸形态与地表水流速对潜流交换的影响如图 6、图 7 所示。从图 6 可以看出, 河岸弯曲形态的出现大大加剧了侧向的潜流交换, 且河岸的弯曲振幅越大, 河流中的示踪剂相对浓度下降得越快, 潜流交换的强度也越大。从图 7 可以看出, 弯曲河岸的潜流交换也随地表流速的增大而增大, 但其增大的幅度要大于顺直河岸。河岸形态上的弯曲将引起流线的弯曲, 由此产生河岸表面局部的压力梯度, 诱导河岸侧向的孔隙对流, 这种由于压力梯度引起的对流交换也称为泵吸交换。当河岸振幅增大时, 流线的弯曲程度随之增大, 河岸表面局部的压力梯度也相应增大, 进而增大了对流的入渗流量 ($Q = KAJ = KA \nabla P / \rho g$), 促进了潜流交换。

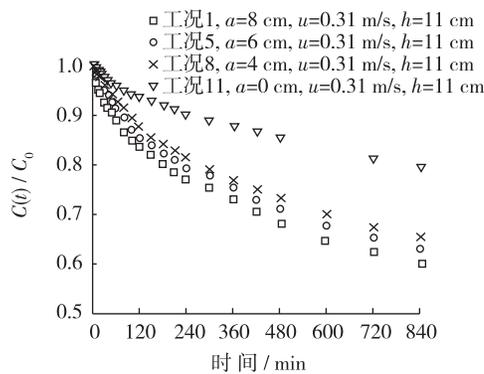


图 6 弯曲河岸不同振幅 a 条件下的潜流交换
Fig. 6 Hyporheic exchange with varying amplitude a in curved bank

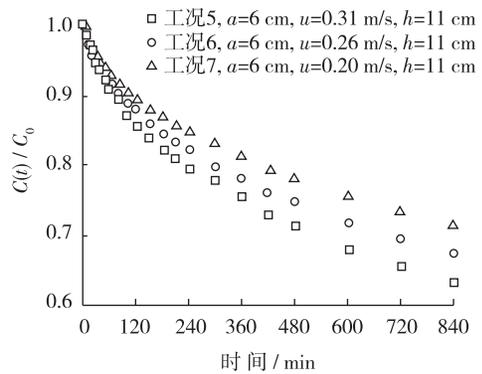


图 7 弯曲河岸不同流速 u 条件下的潜流交换
Fig. 7 Hyporheic exchange with varying velocity u in curved bank

而地表水流速的增大,将引起河岸形态对水流阻力的增大,同样也导致了河岸表面压力梯度的增大,因而也加强了弯曲河岸的潜流交换。进一步分析还可发现,在弯曲河岸的试验工况中,正是由于岸线形态引起的泵吸效应导致了潜流交换前期河流示踪剂浓度的快速下降(图6中工况1、工况5、工况8曲线的前半段),而潜流交换的中后期,河流示踪剂浓度的下降速率开始放缓,其浓度曲线的斜率逐渐接近直线河岸的浓度曲线斜率。可见,河岸形态引起的泵吸效应主要作用在潜流交换的前期,而潜流交换的后期则表现出扩散行为。

3.3 弯曲河岸引起的侧向泵吸效应

弯曲河岸的潜流交换是对流、紊动扩散和孔隙微循环共同作用的结果。为进一步揭示河岸侧向泵吸效应的影响,将弯曲河岸的潜流交换量与顺直河岸的潜流交换量相减,可得弯曲河岸引起的净泵吸(净对流)交换量如下:

$$m^* = \left(1 - \left(\frac{C(t)}{C_0}\right)_{a>0}\right) - \left(1 - \left(\frac{C(t)}{C_0}\right)_{a=0}\right) \quad (2)$$

式中 a 为河岸振幅, $1 - (C(t)/C_0)_{a>0}$ 为 t 时刻弯曲河岸的总溶质交换量, $1 - (C(t)/C_0)_{a=0}$ 为相同水深与流速下的顺直河岸总溶质交换量,即紊动扩散与微循环所引起的溶质交换量。

将某一时刻弯曲河岸引起的净泵吸交换量除以弯曲河岸的总潜流交换量,可得该时刻泵吸效应所占的比重:

$$P(t) = \frac{m^*}{\left(1 - \left(\frac{C(t)}{C_0}\right)_{a>0}\right)} \quad (3)$$

式中 $P(t)$ 为 t 时刻泵吸效应引起的溶质交换量占总溶质交换量的比值。

以工况1为例,弯曲河岸引起的泵吸交换过程如图8所示。从图8可以看出,在潜流交换前期,河岸侧向泵吸效应引起的溶质交换速率较快,随着时间的推移,溶质的交换速率逐渐减慢,但其累积交换量在逐渐增加。溶质的泵吸交换量比重与河岸形态、地表水流速间的关系如图9所示。从图9可以看出,不同工况在同一时刻下(以240 min时刻为例),泵吸效应引起的溶质交换量所占的比重随着河岸振幅与波长比 a/λ 的增大而增大,同时也随河流地表流速 u 的增大而增大,当 a/λ 增大至0.06, u 增大至0.26 m/s时,泵吸交换的比重已超过50%。随着河岸振幅与河流流速的增大,由河岸弯曲形态引起的泵吸交换(对流交换)将逐渐成为潜流交换前期的主要形式。

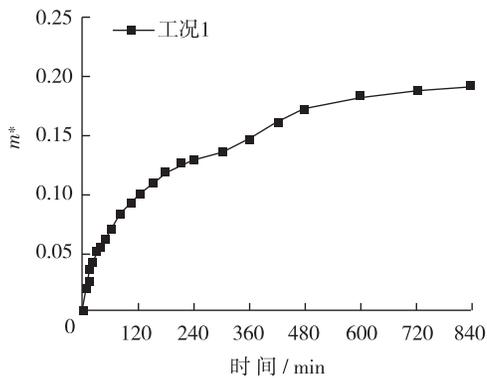


图8 工况1弯曲河岸引起的泵吸交换
Fig. 8 Pumping exchange induced by curved bank

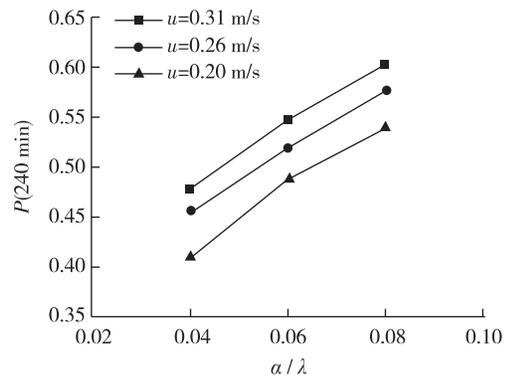


图9 240 min 弯曲河岸各工况泵吸交换量所占比重
Fig. 9 Proportion of pumping exchange at time 240 min in experiments with curved bank

4 结 论

在天然河流中,除了河岸形态以外,地下水的补给与排泄、温度对流、河岸蓄水效应、沉积物异质性导致的优势水流路径等都将影响潜流交换进程,但出于潜流交换的复杂性与现有技术手段的限制,难以全盘考虑。本文通过14组的水槽试验着重研究了不同河岸形态与地表水流条件相互作用所引起的潜流交换特性,尽管试验是在一定的概化条件(如:半河道、正弦型微弯岸线、均质沉积物等)下完成的,但仍能得到如下结论:

(1) 顺直河岸的潜流交换主要是由紊动扩散及微观尺度下的微循环所引起,地表流速与水深的增加将导致河流雷诺数 Re 与湿周的增大,进而加强了紊动扩散与微循环作用。

(2) 河岸弯曲形态的出现,形成了侧向孔隙对流,大大加剧了河岸的潜流交换,且河岸的弯曲振幅越大,河流流速越大,侧向对流交换就越大。

(3) 随着河岸振幅与河流流速的增大,由河岸弯曲形态引起的泵吸交换(对流交换)将逐渐成为潜流交换前期的主要形式。在240 min时刻,当河岸振幅波长比 a/λ 为0.06,河流流速为0.26 m/s时,泵吸交换的比重已超过50%,而自然河流中,河流弯曲程度与流速都可能远超试验条件,泵吸交换的主导作用将更加显著。

(4) 虽然这些规律性的结果是在半河道概化模型与某一特定均质沙条件下得出的,但是对于两岸均有弯曲形态的全河道以及不同中值粒径的均质沙而言,仍可得出上述相似的规律,区别仅在于交换过程的长短。然而,对于非均质沉积物而言,由于水流优先沿大孔隙介质流动,因此由均质沙条件得出的结论能否适用于非均质条件,还有待进一步研究证实。

参考文献:

- [1] TONIAN D, BUFFINGTON J M. Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and three-dimensional modeling [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43: W01421.
- [2] 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))
- [3] TONINA D, BUFFINGTON J M. Hyporheic exchange in mountain rivers: I: Mechanics and environmental effects [J]. *Geography Compass*, 2009, 13(3): 1063-1086.
- [4] HARVEY J W, WAGNER B J, BENCALA K E. Evaluating the reliability of the stream tracer approach to characterize stream-sub-surface water exchange [J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(8): 2441-2451.
- [5] HARVEY J W, BENCALA K E. The effect of streambed topography on surface-subsurface water interactions in mountain catchments [J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(1): 89-98.
- [6] KASAHARA T, WONDZELL S M. Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams [J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(1): 1005.
- [7] BUFFINGTON J M, LISLE T E, WOODSMITH R D, et al. Controls on the size and occurrence of pools in coarse-grained forest rivers [J]. *River Research and Applications*, 2002, 18: 507-531.
- [8] SAWYER A H, CARDENAS M B, BUTTLES J. Hyporheic temperature dynamics and heat exchange near channel-spanning logs [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48, W01529.
- [9] ELLIOTT A, BROOKS N H. Transfer of non-sorbing solutes to a streambed with bed forms: Theory [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(1): 123-136.
- [10] 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.
- [11] PACKMAN A I, SALEHIN M, ZARAMELLA M. Hyporheic exchange with gravel beds: Basic hydrodynamic interactions and bed-form-induced advective flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(7): 647-656.

- [12] CARDENAS M B, WILSON J L. Hydro-dynamics of coupled flow above and below a sedi-ment-water interface with triangular bed-forms [J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30: 301-313.
- [13] WROBLICKY G J, CAMPANA M E, VALETT H M, et al. Seasonal variation in surface-subsurface water exchange and lateral hy-porheic area of two stream-aquifer systems [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(3): 317-328.

Laboratory experiments on lateral hyporheic exchange in riverbanks with curved bank morphology *

LIN Junqiang, YAN Zhongmin, XIA Jihong

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: As an important component of stream-subsurface exchange processes, lateral hyporheic exchange plays a crucial role in maintaining health of river and riparian ecosystems. In order to reveal the discipline of lateral hyporheic exchange induced by bank morphology, 10 runs of circulation flume experiments with idealized sinusoidal curved bank and 4 runs of comparison experiments with straight bank were conducted in varying flow conditions. The experimental results showed that the lateral hyporheic exchange also consisted of advection (pumping exchange), diffusion and micro-circulation, which was similar to the vertical hyporheic exchange. The increasing stream Reynolds Number Re intensified the effect of diffusion and micro-circulation. The presence of curved bank morphologies produced additional exchange under all flow conditions. With increasing bank amplitude and flow velocity, the pumping exchange (advective exchange) gradually became the main exchange pattern in the earth time of hyporheic exchange.

Key words: banks; flume experiments; hyporheic exchange; lateral; pumping exchange

2011 年审稿专家名单

以下专家参与了《水科学进展》2012 年论文评审工作,为期刊论文质量把关与提高做出了重要贡献。期刊编辑委员会及编辑部对各位专家表示感谢,并希望得到各位专家一如既往的指导与支持!

审稿专家名单(姓名拼音排序):

包为民 蔡焕杰 陈 进 陈 立 陈家军 陈建生 陈仁升 陈元芳 程根伟 程永光 褚君达 崔 鹏 崔保山
 崔信民 崔远来 邓 军 邓 伟 丁平兴 董哲仁 窦希萍 方红卫 冯 平 冯绍元 府仁寿 高 抒 葛朝霞
 葛全胜 顾 颖 郭劲松 郭生练 郭占荣 郭志学 韩龙喜 郝振纯 何大明 胡 斌 胡春宏 胡铁松 槐文信
 黄冠华 黄国如 黄金池 贾绍凤 贾仰文 假冬冬 江 灏 江春波 姜 彤 蒋颖魁 金菊良 康尔泗 赖锡军
 李 雷 李 新 李 云 李保国 李栋梁 李纪人 李九发 李绍武 李褪来 李砚阁 李云梅 李志军 梁忠民
 刘 波 刘 恒 刘建立 刘九夫 刘世荣 刘希林 刘昭伟 陆 彦 陆家驹 陆永军 吕海深 吕贤弼 吕宪国
 茅泽育 梅亚东 倪晋仁 潘存鸿 潘军宁 钱 进 钱 新 秦伯强 秦大庸 任国玉 任立良 芮孝芳 上官周平
 尚松浩 申冠卿 施 勇 拾 兵 史学正 史英标 舒安平 束龙仓 宋德敦 宋献方 宋志尧 唐 川 田立德
 王 栋 王 浩 王 军 王 康 王船海 王国庆 王红川 王全九 王少丽 王苏民 王文圣 王协康 王兴奎
 王银堂 王忠静 王宗志 吴炳方 吴吉春 吴加学 吴建华 吴建强 吴时强 吴志勇 谢悦波 谢正辉 邢 强
 熊立华 徐宗学 许炯心 许全喜 许士国 许有鹏 严登华 严忠民 颜志俊 杨传国 杨铁笙 姚惠明 姚仕明
 姚文艺 余 辉 余志豪 苑希民 曾 源 张光辉¹ 张光辉² 张长宽 张世法 张万昌 张文鹤 张幸农 张友静
 张原锋 张运林 张展羽 章新平 郑丙辉 钟德钰 钟华平 周建中 周明耀 周维博 周志芳 朱安宁 朱广伟
 左军成 左其华

注:1. 北京师范大学;2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40871050).