

原木跌水结构对河流潜流带温度场的影响

刘佳鑫, 王可健, 刘 瑛, 刘德富, 冯晶红, 李 毅

(湖北工业大学河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

摘要:为探究原木跌水结构对河流潜流带温度场的影响,应用有限元软件 COMSOL Multiphysics 构建了地表水-地下水二维耦合模型,分析原木跌水结构的高度、间距及数量等参数变化对河流潜流带温度场的影响规律。结果表明:河道中原木跌水结构的添加会改变潜流带局部的压力分布,增加原木高度、间距和数量都会使河床压力最大值增大;随着原木跌水结构高度增加,原木下方区域温度受地表水水温的影响范围扩大;随着原木跌水结构间距和数量的增加,潜流带热缓冲作用增强。原木跌水结构设置参数的变化将不同程度影响潜流带温度场的变化和热缓冲作用,引起潜流带内部的热异质性,从而增加底栖生物和水生生境的多样性。

关键词:潜流带;原木结构;地表水-地下水耦合模型;温度场;热异质性

中图分类号:TV138

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2022)04-0021-06

Influence of log waterfall structure on temperature field of river hyporheic zone//LIU Jixin, WANG Kejian, LIU Ying, LIU Defu, FENG Jinghong, LI Yi (Key Laboratory of Ecological Remediation of Lakes and Rivers and Algal Utilization of Hubei Province, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to explore the influence of log waterfall structure on temperature field of river hyporheic zone, a two-dimensional coupling model of surface water and groundwater was established by using the finite element software COMSOL Multiphysics, and the influence effects of log structure height, spacing and quantity on the temperature field was explored. The results show that the addition of log waterfall structure in the river can change the pressure distribution in the hyporheic zone, and increasing the height, spacing and the number of log structures can magnify the maximum pressure of the river bed. As the height of log waterfall structure increases, the temperature of the area below the logs is affected more widely by the surface water temperature. Thermal buffering of the hyporheic zone can be enhanced when the spacing and number of log waterfall structure increase. Variation of log structure parameters can affect the temperature field and thermal buffering in the hyporheic zone, resulting in thermal heterogeneity, which may increase the diversity of benthos and aquatic habitats.

Key words: river hyporheic zone; log structure; surface water-groundwater coupling model; temperature field; thermal heterogeneity

河流中的生物体对热变化比较敏感,只能适应一定范围内的温度,因此温度是影响有机体和生态系统功能的最重要因素之一^[1]。河流潜流带中,温度可以影响微生物活性、无脊椎动物的发育、部分鱼卵的存活,具有重要的生态意义^[2]。而潜流交换控制着多种栖息地因子(如温度、砂砾等),这些因子直接控制着生物对产卵栖息地的选择。如,一些蛙和鱼将卵产在下降潜流和上升潜流的交界位置,向上的水流会带来恒定的温度和丰富的营养,向下的水流则会带来充足的溶解氧^[3]。上覆水和地下水之间的压力梯度和沉积物的渗透性能是影响潜流交

换的两个主要因素,水压是局部潜流交换的驱动力^[4]。Menichino 等^[5]研究发现跌水结构可以使潜流带形成局部水力梯度,在上游产生下行流,在下游产生上行流,进而产生潜流交换,对河流温度具有一定的调节作用。Sawyer 等^[6-7]采用实验室水槽试验和数值模拟方法对潜流和热交换进行量化,认为河道中大型枯木结构周围的河水流动会沿河床产生压力梯度,从而推动河水与地下水的混合以及潜流带内的热传输。Malard 等^[8]研究发现,在较大型河流系统中,由于局部地表-地下水的相互作用,河段内部存在明显的热非均质性现象。陈孝兵等^[9-10]通过

基金项目:国家自然科学基金(52179131, 41902248);水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室开放研究基金([2017]KJ08)

作者简介:刘佳鑫(1995—),男,硕士研究生,主要从事河流生态恢复研究。E-mail:1009435360@qq.com

通信作者:刘瑛(1983—),女,副教授,博士,主要从事河流生态恢复研究。E-mail:lycg06@163.com

构建循环式水槽装置和数值模型,研究了不同河床地形、河床渗透特性的潜流交换与地表水动力、河床沉积物非均质性之间的关系。Moore 等^[11]研究表明,河道中原木引起的河床复杂地形会对地表水温度的昼夜变化产生显著影响。

为恢复河道的生态功能,近年来人们仿造河流自然形态提出并实施了生态跌水恢复工程,旨在营造河流的深潭-浅滩结构,增加河道空间异质性和形态的多样性,以此达到提高生物多样性的目的。原木跌水结构是生态跌水结构的一种,国外应用和研究的较多^[12-13],国内的研究主要集中在生境恢复效果方面^[14]。

目前,模拟或者试验研究更多地集中于床面形态等因素对潜流交换的影响以及潜流交换过程对地表水温的调节作用^[15-17],很少有学者研究如何设置工程结构来增强潜流交换、增强潜流带的热缓冲能力。基于以上考虑,本研究应用有限元软件 COMSOL Multiphysics 构建地表水-地下水二维耦合模型,研究河道内原木跌水结构对河床潜流带温度场的影响,以原木高度、间距和数量为基础变量,探究其变化对地表水与潜流带温度传递过程的影响,以期能为河流生态修复提供参考。

1 地表-地下水耦合数值模型

1.1 模型建立

COMSOL Multiphysics 可实现任意多物理场直接耦合分析,与其他有限元数值分析软件相比,具有十分强大的多物理场求解功能。该软件在化学反应、弥散、流体动力学、地球科学等领域得到了广泛应用。前人应用该软件对潜流交换和热交换等开展了较多的研究^[18-19],具有较强的实用性。因此,本文利用该软件建立地表水-地下水耦合模型(图1)。模型河床长×高为 3 m×0.5 m,河床表面有效水位为 0.4 m,原木高度为 0.2 m,放置于河床 1.5 m 处。模型分为地表水部分和地下水部分,地表水部分共划分 7 221 个网格单元,地下水部分共划分 12 426 个网格单元。地表水部分利用基于雷诺平均方程

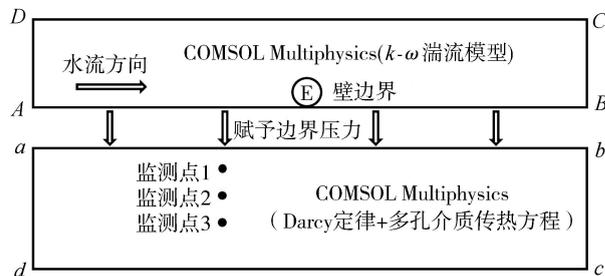


图1 地表-地下水耦合模型示意图

(N-S 方程)和 $k-\omega$ 湍流模型计算河床表面的壁边界压力分布,并将此压力作为地下水模型的上压力边界;地下水部分是通过 Darcy 方程及热传导方程建立温度和流动耦合。为探究原木跌水结构对潜流带温度场的影响,通过改变原木的高度、间距和数量来建立多种工况进行对比分析。

1.2 初始和边界条件

1.2.1 初始条件

根据河流现场实测数据得到模型初始条件:河流初始流速为 0.18 m/s,水深 0.4 m,地表水温度为 23 °C,河床的初始温度为 21 °C (实测平均值),河床底质的渗透率为 $3.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 。

1.2.2 边界条件

如图1所示地表水部分的水力边界为:AD为进口速度边界,BC为出口边界,CD为对称边界,AB为不透水边界,E为原木结构。地下水模型水力边界为:ab为压力边界,bc、cd、ad都为不透水边界。地下水热力学边界为:ab为温度边界,温度为河床表面温度,其他边均为绝热边界。

1.3 模型验证

本文采用河流现场监测点实测数据进行模型率定。河道位于武汉市黄陂区夏家寺河(E114°28', N31°02'),平均河宽约 2 m,水深 0.2 ~ 0.5 m。选取长约 50 m 的顺直河段,每隔 15 m 放置一根横跨河道的原木并固定,共设置三级原木跌水结构(图2)。参考前人试验^[20],试验中记录温度的传感器型号为 DS1922L,采样频率为 10 min/次。监测河床 0 m、0.1 m、0.2 m、0.3 m 深度的温度数据,监测周期为 6 d。温度传感器的放置位置与上文模型的 1、2、3 点设置位置相同(图1)。



图2 在现场设置的单级原木结构

实测河床温度与模型模拟温度的对比结果如图3所示。通过均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)对模型模拟结果进行验证,以此判断模型的精度, $R^2 > 0.6$ 可认为模型模拟结果较好。监测点1的RMSE值为0.139, R^2 值为0.930;监测点2的RMSE值为0.142, R^2 值为0.810;监测点3的RMSE值为

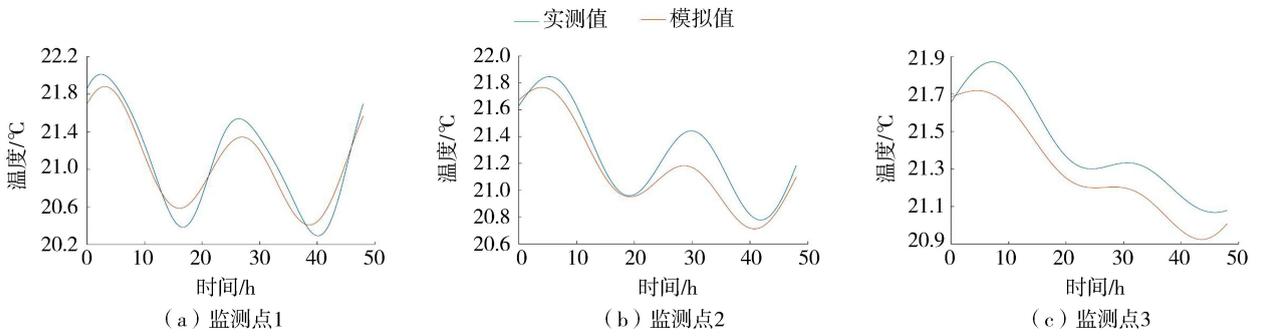


图3 河床温度实测值与模拟值对比

0.146, R^2 值为 0.693。各监测点均方根误差均不大于 0.146, 其决定系数 R^2 均大于 0.6, 说明模型可靠、模拟效果较好, 用来研究潜流带温度变化规律是可行的。

1.4 工况设置

本文以原木数量、高度和间距为变量来探讨不同结构影响下潜流带温度场的变化, 模拟时间为 24 h, 具体工况参数见表 1。

表 1 不同工况参数

工况	原木高度/cm	原木数量/个	原木在模型中的位置/m	河段模拟长度/m
1	15	1	$x=1.5$	3
2	20	1	$x=1.5$	3
3	25	1	$x=1.5$	3
4	20	2	$x_1=5, x_2=6$	7
5	20	2	$x_1=3, x_2=6$	7
6	20	2	$x_1=1, x_2=6$	7
7	20	1	$x=4$	5
8	20	2	$x_1=3, x_2=4$	5
9	20	3	$x_1=2, x_2=3, x_3=4$	5

注: x 为原木在模型中的位置。

2 结果与分析

2.1 原木跌水结构高度对潜流带温度场的影响

2.1.1 压力和流场分析

在无原木结构及工况 1、2、3 情况下, 得到的不同原木高度影响下潜流带压力和达西流线分布 (图 4)。原木跌水结构设置对潜流带压力场和流场有明显影响, 在原木下方潜流带局部区域, 压力沿 x 轴方向呈现分层分布, 原木上游压力表现为正值, 下游压力表现为负值。由于原木附近上下游的压力差, 原木上游部分水流表现为下降流, 下游部分为上升流。随着原木高度的增加, 河床表面压力分布也发生变化, 原木上游和下游间的压力差逐渐增大, 压力差极大值从 31.8 Pa 增加至 76.3 Pa。

2.1.2 温度场分析

模拟 24 h 后, 不同原木高度影响下的潜流带温度等值线变化如图 5 所示。受原木的影响, 等值线在其下方形成了一个半椭圆的较高温区域, 该区域

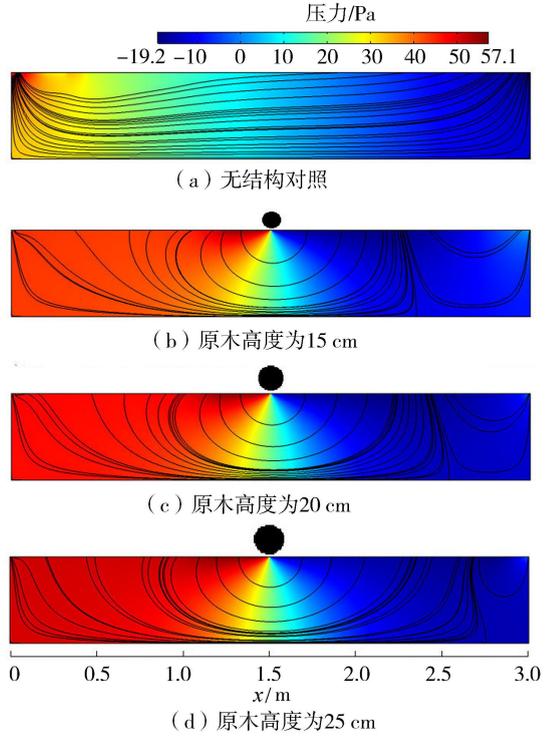


图 4 不同原木高度影响下的潜流带压力和流场分布

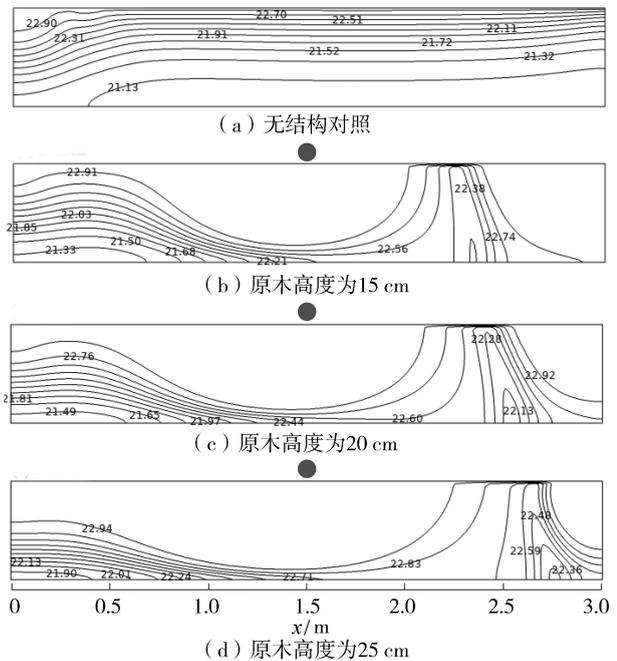


图 5 不同原木高度下影响下的潜流带温度等值线 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

温度更接近地表水温度。并随着原木高度的增加,该区域的面积在逐渐增大,潜流带内部的温度范围也发生变化。结合潜流带压力和流场变化分析,设置原木跌水结构会增大局部地下压力差,使得该区域达西流速增加,因此原木下方更易受地表水温的影响。此外在原木下游的上升流部分存在一梯形区域,该区域温差范围小,温度相对比较稳定,在纵向上无明显温度分层,因此在极端温度下可以为一些无脊椎生物提供暂时的热避难所^[21]。

2.2 原木跌水结构间距对潜流带温度的影响

2.2.1 压力和流场分析

在无原木跌水结构及工况 4、5、6 情况下,不同原木间距影响下的压力分布和地下达西流线情况如图 6 所示。两组原木下方的地下部分的压力沿 x 轴方向均有分层现象,随着原木间距的增大,第二组原木下方的压力分层现象越明显。第一组原木上游压力表现为正值,第二组原木下游压力表现为负值。随着原木间距的增大,两组原木之间地下部分的压力值在增大,且上下游的压力差最大值也在增大,其最大压力差由 53.47 Pa 增大至 68.2 Pa。且随着原木间距的增大,两组原木之间的潜流带压力分层现象越明显,出现了多次上升流和下降流。

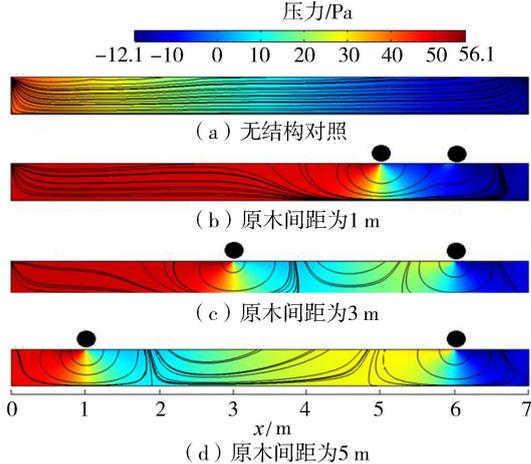


图 6 不同间距的原木影响下的潜流带压力和流场分布

2.2.2 温度场分析

在经过 24 h 模拟后,不同原木间距影响下的潜流带温度等值线变化如图 7 所示。受原木影响,原木下方会形成一个半椭圆形的高温区域,在每组原木的下游部分存在一定大小且温度相对稳定的梯形区域。随着间距的增大,两组原木之间出现了多次上升流和下降流,且对应的潜流带区域温度分层现象越明显,并引起了局部的热异质性^[7]。随着原木间距的增大,第一级原木下游的缓冲区域在慢慢变大,温度缓冲效果更好。研究结果表明增加两级原木间距,可以降低地表水水温对潜流带局部的影响程

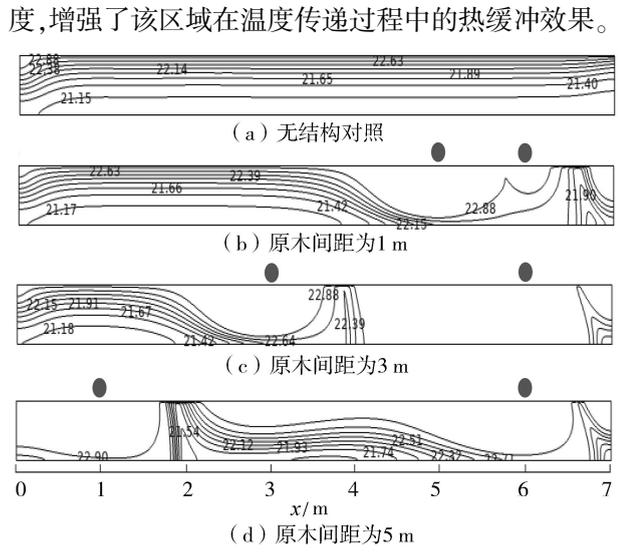


图 7 不同间距的原木影响下的潜流带温度等值线 (单位:℃)

2.3 原木跌水结构数量对潜流带温度的影响

2.3.1 压力和流场分析

在无原木结构及工况 7、8、9 情况下,得到的不同数量的原木影响下的压力分布和地下达西流线情况如图 8 所示。只有最上游一组原木下方的地下部分的压力沿 x 方向均有明显分层现象,第一组原木上游地下部分呈现正值,最后一组原木下游压力呈现负值。当原木数量增多时,地下部分压力差极大值也在增大,其最大压力差由 53.47 Pa 增大至 68.2 Pa。其地下流场也随着潜流带压力的分层而变化,主要的压力差分布都集中于第一组原木下方处,在其上游地下部分表现为下降流,在其下游地下部分基本表现为上升流。

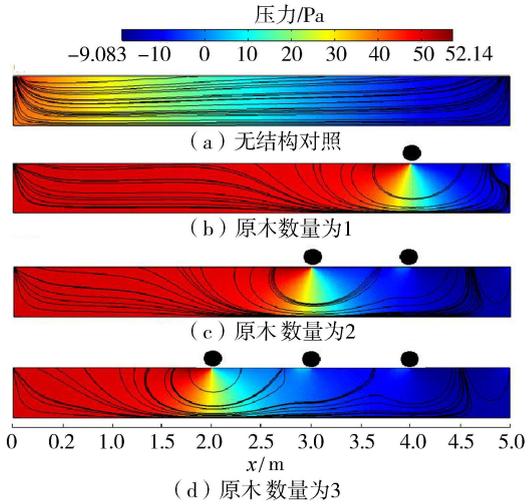


图 8 不同数量原木影响下的潜流带压力和流场分布

2.3.2 温度场分析

在经过 24 h 模拟后,不同数量原木影响下的潜流带温度等值线变化如图 9 所示。每组原木下方均形成一个接近地表水温的半椭圆形的较高温区域。

在每组原木的下游部分仍然存在一定大小的温度稳定区域。由于第一组原木下方局部压力差最大,其下方较高温区域面积最大。随着河道内原木数量的增加,该区域温度极小值减小,最后一组原木下游潜流带局部区域受地表水水温的影响程度在降低,热缓冲作用在增强。

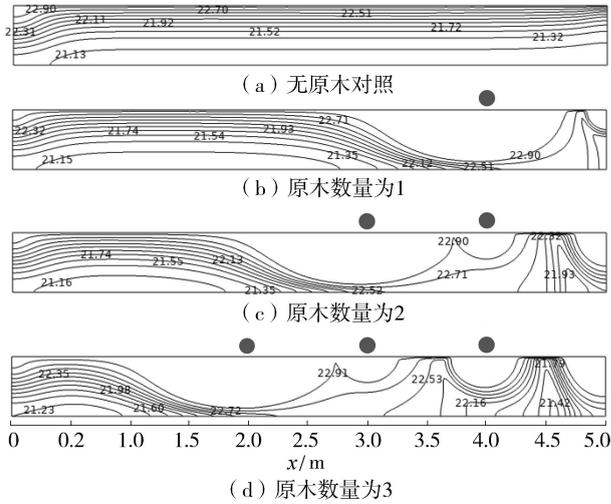


图9 不同数量原木影响下的潜流带温度等值线(单位:℃)

3 讨论

3.1 原木跌水结构对潜流带温度场的影响

原木高度、间距和数量增加时,河床的压力最大值增大,原木上下游总压力差增大,且越靠近原木,压力值越大。河道原木跌水结构添加将改变河床的潜流交换,从而在河床内形成空间上的热异质性。在自然河流中,地下水的平均温度通常与地表水不同,地下水温度相对较为恒定,而地表水温度受气温影响波动较为明显。在潜流交换过程中,当水流向下流动时,孔隙水温度会继承河水的波动特征;而当向上流动时,孔隙水温度会继承深层地下水的稳定特征^[7]。因此在潜流交换的上升流区域可以为一些对热变化敏感的生物提供庇护场所^[1]。研究结果表明,原木下方都可形成一个接近地表水温的半椭圆形的较高温区域,而在原木下游形成类似梯形的热缓冲区,且不同工况下热缓冲区有所不同。由于热缓冲区的温度相对稳定,这会增加底栖生物和水生生境的多样性以及热避难所的可用性^[21]。本文模拟了夏季较高温的地表水与河床的热交换过程,原木结构会影响河床表面压力并促进潜流带局部的下降流和上升流的形成,原木跌水结构参数的变化也会引起潜流带局部在温度传递过程中的热异质性。随着原木高度增加,原木下方区域潜流带受地表水水温的影响范围扩大;随着原木间距的增加

和原木数量的增加,潜流带热缓冲作用增强。

3.2 原木跌水结构在河流生态修复中的应用

大型原木是河流生态修复中的常用材料,其目的是增强河流的自然特征,如深潭和浅滩,来增加河流生态系统中生物生存环境的异质性,减少河岸侵蚀并提供鱼类栖息地^[22]。单一原木结构对河流潜流带水交换的影响可能十分有限,本研究试图用多级原木结构,并通过控制其尺寸、间距及数量来研究对它们共同作用下潜流带温度场的变化规律。发现原木跌水结构参数的变化确实能引起潜流带在热传递过程中的热异质性。因此,为了取得更有效的热缓冲能力,建议在河流生态恢复中采取增加原木的高度和数量等措施来达到热缓冲效果。通过研究,可以推断在河道内设置的原木结构对河流的影响达到一定规模,其在地表水流和潜流带中引起的热异质性足够大,甚至可以对生态环境产生直接的影响。

如何量化结构参数与热异质性的关系以及产生的热异质性对河流生态系统具体产生怎样的影响则需要进一步的研究。此外,原位河流中潜流带受影响的因素众多,原木结构在河流生态修复过程中起到的效果在很大程度上取决于周围的地下水排放或补给率,河床渗透率和原木的阻塞率等^[17]。河道中原木结构的添加是恢复河流水文连通性的很有前途的工具,因此在河流生态修复过程中也应更多地考虑在河道中如何设置原木结构来增强地表水与潜流带的相互作用来增加河流生态系统的多样性^[6]。

4 结语

河道中原木跌水结构的添加会改变潜流带局部的压力分布,增加原木高度、间距和数量时,都会使河床的压力最大值增大,使得河床上下游总压力差增大,促进了潜流带局部的下降流和上升流的形成。

在24 h内的温度传递过程中,原木跌水结构下游的上升流区域会存在一梯形的温度稳定区域,该区域的温差范围较小,不易受地表水温的影响,可能会为一些底栖生物提供热避难所。

原木跌水结构加快了地表水与河床的热交换,使原木下方区域形成接近地表水水温的半椭圆形高温区域。原木高度、间距及数量的不同均会影响潜流带在热传递过程中的温度场的变化,引起河床局部热异质性和热缓冲区的变化。随着原木高度增加,原木下方区域潜流带受地表水水温的影响范围扩大;随着原木间距的增加,原木间的热缓冲作用增强;随着原木数量的增加,最后一组原木下游区域热缓冲作用增强。

本文所构建模型为二维概化模型,对河床在空

间上的异质性的影响没有进行分析。构建三维模型,考虑河床空间异质性及原木参数的优化需要进一步研究。

参考文献:

[1] HESTER E T, DOYLE M W, POOLE G C. The influence of in-stream structures on summer water temperatures via induced hyporheic exchange [J]. *Limnology & Oceanography*, 2009, 54(1): 355-367.

[2] BRUNKE M, GONSER T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater[J]. *The Plant Journal*, 2004, 37(1): 1-33.

[3] BAXTER C V, HAUER F R. Geomorphology, hyporheic exchange, and selection of spawning habitat by bull trout (*Salvelinus confluentus*) [J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 2000, 57(57): 1470-1481.

[4] 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.

[5] MENICHINO G T, HESTER E T. Hydraulic and thermal effects of in-stream structure-induced hyporheic exchange across a range of hydraulic conductivities [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(6): 4643-4661.

[6] SAWYER A H, CARDENAS M B, BUTTLES J. Hyporheic exchange due to channel-spanning logs [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(8): 427-438.

[7] SAWYER A H, CARDENAS M B, BATTLES J. Hyporheic temperature dynamics and heat exchange near channel-spanning logs [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48: W01529.

[8] MALARD F, MANGIN A, UEHLINGER U, et al. Thermal heterogeneity in the hyporheic zone of a glacial floodplain[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(7): 1319-1335.

[9] 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): 34-41. (CHEN Xiaobing, ZHAO Jian, LI Yingyu, et al. Experimental study of bedform-driven hyporheic exchange [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 34-41. (in Chinese))

[10] 陈孝兵, 郑春阳, 袁越. 河床沉积物非均质性影响下的潜流交换数值模拟[J]. *水科学进展*, 2019, 30(2): 220-229. (CHEN Xiaobing, ZHENG Chunyang, YUAN Yue. Numerical simulation of hyporheic exchange under the influence of riverbed sediment heterogeneity [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2): 220-229. (in Chinese))

[11] MOORE R D, SUTHWELAND P, GOMI T, et al. Thermal regime of a headwater stream within a clear-cut, coastal British Columbia, Canada [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 19(13): 2591-2608.

[12] ARRIGONI A S, POOLE G C, MEETES L A K, et al. Buffered, lagged, or cooled? Disentangling hyporheic influences on temperature cycles in stream channels[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(9): 230-234.

[13] DOWNS P, KONDOLF G. Post-Project appraisals in adaptive management of river channel restoration [J]. *Environmental Management*, 2002, 29(4): 477-496.

[14] 曹丽娜. 北方乡村河流生态修复效果评价[D]. 长春: 东北师范大学, 2013.

[15] 鲁程鹏, 束龙仓, 陈洵洪. 河床地形影响潜流交换作用的数值分析[J]. *水科学进展*, 2012, 23(6): 789-795. (LU Chengpeng, SHU Longcang, CHEN Xunhong. Numerical analysis of riverbed topography influencing hyporheic exchange [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(6): 789-795. (in Chinese))

[16] BUFFINGTON J M, TONINA D. Hyporheic exchange in mountain rivers II: effects of channel morphology on mechanics, scales, and rates of exchange[J]. *Geography Compass*, 2010, 3(3): 1038-1062.

[17] NORMAN F A, CARDENAS M B. Heat transport in hyporheic zones due to bedforms: an experimental study [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(4): 3568-3582.

[18] CARDENAS M B. Stream-aquifer interactions and hyporheic exchange in gaining and losing sinuous streams [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(6): 429-441.

[19] 陈波. 水位波动条件下洲滩水-热动态变化特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.

[20] 李佳选, 王元元, 宋进喜, 等. 北洛河潜流带水交换研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 310-313. (LI Jiaxuan, WANG Yuanyuan, SONG Jinxi, et al. Hyporheic water exchange of the Beiluo River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 310-313. (in Chinese))

[21] SAWYER A H, CARDENAS M B. Effect of experimental wood addition on hyporheic exchange and thermal dynamics in a losing meadow stream [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(10): W10537.

[22] 龙笛, 潘巍. 河流保护与生态修复[J]. *水利水电科技进展*, 2006, 26(2): 21-25. (LONG Di, PAN Wei. Stream protection and ecological rehabilitation [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 26(2): 21-25. (in Chinese))

(收稿日期:2021-01-31 编辑:刘晓艳)