

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.03123

河流潜流带渗透系数变化研究进展

冯斯美, 宋进喜, 来文立, 王 珍, 梁 雯

(西北大学 城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: 介绍了河流潜流带的含义, 即是河水与地下水发生物质能量交换的区域, 其水力联系和交换水量大小受河床沉积物渗透系数的影响。对近年来国内外学者对河床潜流带渗透系数变化进行了大量研究。由于特殊的环境与水文地质条件, 潜流带渗透系数的大小不仅取决于沉积物孔隙大小和孔隙的连通性, 而且与生物扰动、河流流水等作用紧密相关: 洪水带来的细小颗粒引起河床表面沉积物孔隙淤塞, 致使渗透系数减小, 但在洪水退后, 潜流带的水文交换和生物扰动能破坏淤塞层, 从而引起反淤塞作用, 造成河床渗透系数增大。因此, 淤塞反淤塞作用改变着河床的渗透性能。最后, 指出存在的问题今后的研究方向。

关键词: 河流; 地表水-地下水; 潜流带; 水文交换; 生物扰动; 淤塞 反淤塞; 渗透系数

中图分类号: P641.2; X131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0123-04

An Overview of the Effects of Hyporheic Processes on the Streambed Hydraulic Conductivity in the Hyporheic Zone of a River

FENG Si mei, SONG Jin xi, LAI Wen li, WANG Zhen, LIANG Wen

(College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710027, China)

Abstract: The hyporheic zone plays a key role in the surface water and groundwater interaction. Streambed hydraulic conductivity can affect the magnitude of interactions between groundwater and surface water and hyporheic water exchange. The clogging and declogging processes often occur alternately, which can change the streambed sediment characteristics and affect its permeability. On the basis of the overview of literatures of hyporheic exchange and streambed hydraulic conductivity, the possible effects of clogging and declogging processes on the streambed hydraulic conductivity have been illustrated. Streambed hydraulic conductivity is not only affected by the pore size of sediments, but also related to the hydrological connectivity and bioturbation in the hyporheic zone. Generally, the small particles brought by the floods can cause riverbed clogging, resulting in reduced hydraulic conductivity. However, when the flood goes down, hydrological exchange and bioturbation in the hyporheic zone can destroy the clogging layer, causing the declogging process and increasing in hydraulic conductivity. The current studies are limited to the analysis of the variations of measured streambed hydraulic conductivity data, and the mechanism of the clogging and declogging processes in the hyporheic zone of a river requires more investigations. At last, it is pointed out that the existing problems in the future.

Key words: stream; surface water and groundwater; hyporheic zone; hydrological exchange; bioturbation; clogging declogging; hydraulic conductivity

近年来, 地表水污染对地下水的的影响日益加重, 特别是在黄河、辽河、海河及太湖等地表水污染较严重地区, 因地表水与地下水相互连通, 地下水饮用水水源安全受到严重威胁。在此情况下, 对处于地表水和地下水相互作用核心部位的潜流带的水文学过程进行研究, 显得尤为重要^[1]。

1 潜流带

1.1 潜流带的定义

潜流带是指河流河床内水分饱和的沉积物层, 是河水与地下水相互作用的区域, 也是河床中能与河流存在物质和能

收稿日期: 2012-11-22 修回日期: 2013-03-17 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1744.036.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51079123); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-1045); 教育部留学科研启动基金(教外司留[2010]1174)

作者简介: 冯斯美(1988-), 女, 陕西延安人, 硕士研究生, 主要从事水文、水资源研究。E-mail: simeifeng@gmail.com

通讯作者: 宋进喜(1971-), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事河流生态系统健康及其修复研究。E-mail: jinxisong@gmail.com

量交换的区域^[2]。很多学者对潜流带进行过定义^[3-4]:如将潜流带定义为“地下水与地表水的混合区域”、“地表水与地下水之间多孔介质的转换带”、“地表水和地下水发生交换的动力学潜流带”,等等。无论如何,潜流带定义必须从生态学和人文(地质)学的角度出发,概括地表水与地下水相互作用的区域及所发生的水文(地质)过程、化学过程和生物生态过程,因此,地下水-地表水的潜流带可以看作是“生物地球化学活动强烈的地表水与地下水的混合区域”^[5-6]。潜流带因处于地表水和地下水频繁混合的界面而具有特定的物理、化学、生物性质^[7]。潜流带的重要特征有:(1)地下水(通过沉积物孔隙介质流动)和地表水(自由流动)的界面;(2)固相(沉积物)、液相(水体)和生物相(微生物群、无脊椎动物群)的多相空间;(3)存在着一些相关梯度,如氧化还原潜势(Eh)、有机物含量、微生物数量和活动、营养盐和光的可利用性^[4]。

1.2 潜流带渗透系数的研究现状

在地表水-地下水相互作用中,潜流带的渗透系数直接影响着河流向含水层的入渗量和含水层向河流的排量^[8],同时也影响水力联系的强弱和潜流带水量和溶质的交换,是渗流力学中的重要参数。渗透系数一般用来衡量地表水与地下水相互补给的能力。大量理论和实验研究已经表明,渗透系数的空间分布是影响地下水系统中溶质迁移转化的重要因素^[9],同时,河流潜流带渗透系数的时间变化直接影响着河水与地下水的水量交换和溶质传递及空间分布模式的时间变异性^[10]。潜流带的渗透系数还受一些物理化学作用的影响^[11]。渗透系数的大小首先与沉积物空隙的直径大小和连通性有关,其次才和空隙的多少有关。李金荣等^[12]用区域化变量理论和半方差函数研究测试区含水介质的渗透系数,研究结果表明含水介质的渗透系数具有空间变异性,属于中等程度变异。通过对其半方差函数进行拟合,其E-W方向的变异程度主要由含水介质本身的空间结构引起,S-N向含水介质的渗透系数其空间变异程度主要由随机性引起。Ryan和Boufadel^[13]发现示踪剂的浓度在浅层沉积物(河床表面以下7.5~10cm)中比在深层沉积物(河床表面以下10~12.5cm)中高,同时渗透系数在浅层沉积物中要比深层沉积物中高。还有研究发现潜流带渗透系数的在时间尺度上的变化很明显,Genereux等^[10]在北卡罗来纳河流上布了487个测试点,研究了河床渗透系数在一年内的时空变化。结果显示,渗透系数呈正态分布,沿水流方向的上游渗透系数较下游的低。河流中心处的渗透系数通常较大,这可能会对河床水通量和化学通量起主导作用。河床沉积物粒度分布显示,河流中心处河床表层沉积物细颗粒(泥沙和黏土)较少(总体来看,有94%的沙)。潜流带和地下水的温度变化并不是引起渗透系数在时间尺度变化的重要原因。水流冲刷和河床淤塞程度才是引起潜流带渗透系数发生时间变化的重要影响因素。Cuthbert等^[14]研究发现,河床的气体累积量也会对渗透系数产生很大影响。在河流枯水期,河床气体含量能显著改变地下水-河岸和地下水-河床的水量交换比例。

2 淤塞和反淤塞作用

2.1 淤塞和反淤塞方式

河床沉积物层的淤塞方式主要分为物理淤塞、化学淤塞

和生物淤塞。河水中携带的悬浮物、碎屑物质和细小的泥沙颗粒沉积在河床表层,堵塞沉积物的孔隙,造成多孔介质的淤堵称之为物理淤塞^[15]。生物淤塞表现为生物生长、繁衍和死亡过程对多孔介质的淤堵,生物遗体分解过程引起介质的物理化学环境改变,使某些溶解物质沉积下来的淤堵,或是由于有机质的吸附作用是某些元素沉积造成的表层沉积物淤塞。生物体在其生命活动中通过捕获黏结等作用也会使沉积物淤塞。由于地表水总是处于较快的运动与循环状态,其中的溶解物质在搬运过程中一般不具备沉积条件,故化学淤塞作用微弱。洪水中携带的悬浮物、有机质和细小的泥沙颗粒在河床表层淤积、堵塞沉积物孔隙而引起淤塞^[16-18]。同时,在其他时期,河流泥沙冲刷、无脊椎动物生物扰动以及微生物对有机质的分解等作用能够破坏河床淤塞层^[10-11],破碎的淤塞层可以被后来较大的水流冲走^[19],沉积物再次出现孔隙,形成反淤塞。淤塞-反淤塞作用能改变潜流带的渗透性能。

2.2 淤塞-反淤塞对渗透系数的影响研究现状

根据河床淤积的理论研究,实验室模拟,实地观察,河床淤塞时,由于细颗粒沉积物填充堵塞砂砾之间的空隙,一些研究人员推论,河床表层的沉积物的渗透系数应当普遍较小,往深处K值有增大的趋势。Song等^[20]对美国内布拉斯加的三条河流的河床沉积物渗透系数进行了现场分层实测,发现河床上层的K值反而比河床下层的渗透系数值要大。Levy等人^[21]的研究假设是河床沉积物表层淤塞层的渗透系数比下层的小。但是在洪水期,河水冲刷河床,瓦解淤塞层并带走沉积物,淤塞层的厚度会减小,反而增大了渗透系数。由此可见,该推论和现场测定的结果之间有矛盾。要解决这个矛盾,需要对河床的淤塞作用,以及淤塞作用对河床渗透系数的影响进行深入的研究。

河床淤塞主要发生在洪水消退期。细小的沉积颗粒,沉积在河床的表面,进入到河水-沉积物界面的下方,阻塞了粗颗粒之间的空隙^[22-23],使渗透性下降,成为淤塞层^[24-25]。同时,下层沉积物受到上层物质向下挤压后结构更致密,性质更稳定,这也会使上层沉积物的渗透系数大于下层沉积物。河流潜流带水文过程促进了河水与地下水之间的水量交换,又会增大河床沉积物孔隙度和渗透性,从而使上层沉积物渗透系数值增大^[19]。流速快的河段沉积物渗透系数比流速慢的高,这是因为细小的颗粒沉积物会被水流冲走,而在流速低的河段又形成淤塞^[26]。Mutini等^[27]在对大迈阿密河的调查研究中发现,河流高水位冲刷会导致细颗粒泥沙流失,这可能是引起渗透系数增加的原因。回归分析表明,反淤塞的形成原因主要受河流汛期控制(即流速和流量),只有很小程度上取决于河流的绝对水位。当严重的矿井水污染导致河流异常、有大量的矿物质和/或金属存在时,淤塞对河床渗透性产生的影响最大,同时也是区域性产生显著影响最普遍的过程^[21]。这表明淤塞-反淤塞对河床渗透性能的影响研究是非常必要的。

还有研究者认为,河床淤塞将会影响河水与河床潜流带的水动力学,并且影响河床沉积物内的底栖生物的生存和分布^[28]。生物体对河床渗透性的可能影响主要体现在3个方

面,一是生物体自身活动会增加河床孔隙度,二是生物体对有机质的分解与转化过程中所产生的孔隙和气体也改变着沉积物结构,从而影响到渗透性^[20,21],三是生物作用产生的薄层,会淤塞河床潜流带^[28,29]。无脊椎动物的生物扰动会在裸露的河床与含有泥沙、黏土和有机质的细颗粒沉积物中产生的孔洞、通道和土堆。这些无脊椎动物的活动增大了沉积层的孔隙大小,从而减轻了河床的淤塞程度,最终使河床垂向渗透系数增大。潜流带河水与地下水之间的垂向水力梯度测量结果表明垂直通量可以改变方向。在点位渗透试验中,上层沉积物的渗透系数比下层的大,河床形成淤塞层后渗透系数变小。地下水渗流区产生的气泡会增大水与表层沉积物颗粒的接触面积。大量的气泡能破坏河床沉积物的淤塞层,从而增大河床的垂向渗透系数^[29]。

因此,深入解析淤塞-反淤塞作用下河床渗透系数变化机理,不仅在理论上有利于人们深化对河床渗透性能的科学认识,而且将为研究人为控制地表水对地下水污染、恢复河流水文生态功能,维持河流健康生命具有重要的指导意义。

3 存在问题与研究展望

现有的研究仅限于对淤塞或反淤塞某一作用条件下的渗透系数试验测试^[17,18],缺乏对淤塞-反淤塞作用周期内的渗透系数变化的全面测试研究。同时,对于淤塞-反淤塞的物理化学作用对河床渗透性能的影响效应与变化机理还有待于深入研究。今后的研究还可关注以下3点:(1)潜流带水文过程和生物扰动作用对渗透系数的影响机制。(2)底泥中微生物的代谢包括降解有机物的氧化放热过程和微生物增殖还原吸热过程,在这两种反应过程中渗透系数的变化规律。(3)团聚体结构主要由有机质的数量和种类决定,而它又影响着土壤孔隙度,进而会导致渗透系数的不同。因此,研究这些因素对河流潜流带渗透系数的影响机理显得尤为重要。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 全国地下水污染防治规划(2011-2020)[Z]. 2011. (The Environmental Protection Department of the People's Republic of China. The Groundwater Pollution Prevention and Control Planning (2011-2020) [Z]. 2011. (in Chinese))
- [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 Guang qiu, LI Ling. Advancement in the Hyporheic Exchange in Rivers[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 285-293. (in Chinese))
- [3] White D S. Perspectives on Defining and Delineating Hyporheic Zones[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1993, 12(1): 61-69.
- [4] Palmer M A. Experimentation in the Hyporheic Zone: Challenges and Prospectus[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1993, 12(1): 84-93.
- [5] 滕彦国, 张琢, 冯丹. 河水-地下水交互带内污染物生物地球化学行为及其探测技术[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(5/6): 515-519. (TENG Yan guo, ZHANG Zhuo, FENG Dan. Biogeochemical Behavior and Detection of Contaminants in the Hyporheic Zone of Stream and Ground Water[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2009, 45(5/6): 515-519. (in Chinese))
- [6] 滕彦国, 左锐, 王金生. 地表水-地下水的交错带及其生态功能[J]. 地球与环境, 2007, 35(1): 1-8. (TENG Yan guo, ZU O Rui, WANG Jin sheng. Hyporheic Zone of Groundwater and Surface Water and its Ecological Function[J]. Earth and Environment, 2007, 35(1): 1-8. (in Chinese))
- [7] Krause S, Hannah D M, Fleckenstein J H. Hyporheic Hydrology: Interactions at the Groundwater-surface Water Interface[J]. Hydrological Processes, 2009, 23: 2103-2107.
- [8] 束龙仓, CHEN Xur hong, CHENG Cheng, 等. 美国内布拉斯加州普拉特河河床沉积物渗透系数的现场测定[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 629-633. (SHU Long cang, CHEN Xur hong, CHENG Cheng, et al. Measurement in Situ of Streambed Hydraulic Conductivities in the Platte River, Nebraska[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(5): 629-633. (in Chinese))
- [9] 王晓丽, 郑春苗, 刘改胜, 等. 利用直接推进技术测定渗透系数的最新进展[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 8-18. (WANG Xiao li, ZHENG Chun miao, LIU Gai sheng, et al. A Review of Recent Developments in Using Direct push Technologies for Rapid, High resolution Hydraulic Conductivity Measurements[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, 39(1): 8-18. (in Chinese))
- [10] Genereux D P, Leahy S, Mitasova H, et al. Spatial and Temporal Variability of Streambed Hydraulic Conductivity in West Bear Creek, North Carolina, USA[J]. Journal of Hydrology, 2008, 358: 332-353.
- [11] Davis R A. Depositional Systems[M]. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1983: 7-10.
- [12] 李金荣, 韩新正, 万红友, 等. 渗透系数的空间变异研究[J]. 中国农村水利水电, 2011, (2): 11-13. (LI Jin rong, HAN Xin zheng, WAN Hong you, et al. Research on the Spatial Variability of Hydraulic Conductivity[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011, (2): 11-13. (in Chinese))
- [13] Ryan R J, Boufadel M C. Influence of Streambed Hydraulic Conductivity on Solute Exchange with the Hyporheic Zone[J]. Environmental Geology, 2006, 51: 203-210.
- [14] Cuthbert M, Mackay R, Durand V, et al. Impacts of River bed Gas on the Hydraulic and Thermal Dynamics of the Hyporheic Zone[J]. Advances in Water Resources, 2010, 33.
- [15] 仵彦卿. 多孔介质渗流与污染物迁移数学模型[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (WU Yan qing. Porous Medium Seepage Mathematical Model and Pollutant Migration[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [16] Smith J W. Groundwater-surface Water Interactions in the Hyporheic Zone[R]. U K: Environment Agency, 2005.
- [17] CHEN Xur hong. Statistical and Geostatistical Features of Streambed Hydraulic Conductivities in the Platte River, Nebraska[J]. Environmental Geology, 2005, 48(6): 693-701.
- [18] CHEN Xur hong, Burach M, CHENG Cheng. Electrical and Hydraulic Vertical Variability in Channel Sediments and Its Effects on Streamflow Depletion Due to Groundwater Extraction[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(3-4): 250-266.
- [19] SONG Jir xi, CHEN Xur hong, CHENG Cheng, et al. Effects

- of Hyporheic Processes on Streambed Vertical Hydraulic Conductivity in Three Rivers of Nebraska[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L07409. doi: 10.1029/2007GL029254.
- [20] SONG Jir xi, CHEN Xurr hong, CHENG Cheng. Observation of Bioturbation and Hyporheic Flux in Streambeds[J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineer in China*, 2010, 4(3): 340-348.
- [21] Levy J, Birck M D, Mutiti S, et al. The Impact of Storm Events on a Riverbed System and Its Hydraulic Conductivity at a Site of Induced Infiltration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92: 1960-1971.
- [22] Velickovic B. Colmation as one of the Processes in Interaction between the Groundwater and Surface Water[J]. *Architecture and Civil Engineering*, 2005, 3(2): 165-172.
- [23] Fleckenstein J H, Krause S, Hannah D M, et al. Groundwater surface Water Interactions: New Methods and Models to Improve Understanding of Processes and Dynamics[J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33: 129-1295.
- [24] Fenoglio S, Bo T, Malacarne G, et al. Effects of Clogging on Stream Macroinvertebrates: an Experimental Approach[J]. *Limnological Ecology and Management of Inland Waters*, 2007, 37(2): 186-192.
- [25] 宋进喜, CHEN Xurr hong, CHENG Cheng, 等. 美国内布拉斯加州埃儿克霍恩河河床沉积物渗透系数深度变化特征[J]. *科学通报*, 2009, 54(24): 3892-3899. (SONG Jir xi, CHEN Xurr hong, CHENG Cheng, et al. Nebraska Elkhart HuoEnHe Riverbed Sediment Depth of Coefficient of Permeability Variation Characteristics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(24): 3892-3899. (in Chinese))
- [26] Blaschke A P, Steiner K H, Schmalfluss R, et al. Clogging Processes in Hyporheic Interstices of an Impounded River, the Danube at Vienna, Austria[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2003, 88(3-4): 397-413.
- [27] Mutiti S, Jonathan L. Using Temperature Modeling to Investigate the Temporal Variability of Riverbed Hydraulic Conductivity During Storm Events[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 388(3-4): 32-334.
- [28] Sengschmitt D, Battin T J. Linking Sediment Biofilms, Hydrodynamics, and Riverbed Clogging: Evidence from a Large River[J]. *Microbiology Ecology*, 1999, 37: 185-196.
- [29] Nogaro G, Mermillod Blondin F, Francois Carcaillet F, et al. Invertebrate Bioturbation Can Reduce the Clogging of Sediment: An Experimental Study Using Infiltration Sediment Columns[J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51(8): 1458-1473.

(上接第 117 页)

- [45] 陈腊娇, 朱阿兴, 秦承志, 等. 流域生态水文模型研究进展[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(5): 535-544. (CHEN Lar jiao, ZHU A-xing, QIN Cheng zhi, et al. Review of Ecological Hydrological Models of Watershed Scale[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(5): 535-544. (in Chinese))
- [46] 熊立华, 郭生练, 田向荣. 基于 DEM 的分布式流域水文模型及应用[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4): 517-520. (XIONG Lihua, GUO Shenglian, TIAN Xiang-rong. DEM-based Distributed Hydrological Model and Its Application[J]. *Advances In Water Science*, 2004, 15(4): 517-520. (in Chinese))
- [47] Bronstert A, Bardossy A, Bismuth C, et al. Multi-scale modeling of land use change and river training effects on floods in the Rhine basin[J]. *River Research and Applications*, 2007, 23: 1102-1125.
- [48] 欧春平, 夏军, 王中根, 等. 土地利用/覆被变化对 SWAT 模型水循环模拟结果的影响研究—以海河流域为例[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(4): 124-129. (OU Chur ping, XIA Jun, WANG Zhong gen, et al. LUCC Influence on SWAT Hydrological Simulation: A Case Study of Haihe River Basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(4): 124-129. (in Chinese))
- [49] 万荣荣, 杨桂山, 李恒鹏. 流域土地利用/覆被变化的洪水响应—以太湖上游西苕溪流域为例[J]. *自然灾害学报*, 2008, 17(3): 10-15. (WAN Rong rong, YANG Gui-shan, LI Heng peng. Flood Response to Land Use and Land Cover Change: a Case Study of Xitiao Rivulet Basin in Upper Reach of Taihu Lake[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(3): 10-15. (in Chinese))
- [50] 周瑜佳, 袁飞, 任立良, 等. 赣江上游土地覆被变化的水文响应研究[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(4): 12-15. (ZHOU Yujia, YUAN Fei, REN Liliang, et al. Hydrologic Responses of Land Cover Change in Upper Reaches of Ganjiang River[J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(4): 12-15. (in Chinese))