

西北干旱区间歇性河流与含水层水量交换 研究进展与展望

王 平

(中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘 要:本文依托国家自然科学基金青年项目“河水温度对干旱区宽浅型河床渗透系数影响的定量研究”,并梳理了其他相关研究,总结了我国西北干旱区间歇性河流与含水层水量交换研究所面临的基础科学问题及当前所取得的研究进展。主要结论为:以宽浅型沙质河床为基本特征的西北干旱区内陆河流域下游河流,其河床每年经历数次干湿交替与冻融过程。受河水温度与河流水动力条件的影响,河床作为河流与含水层相互作用的重要界面,其渗透性能具有高度时空变异性,已成为河水与地下水水量交换研究的难点与热点。分析指出,在环境变化和当前交叉学科迅猛发展的背景下,以河流与含水层相互作用为核心的潜流带水文学发展面临新的机遇与挑战。

关键词:地表水—地下水转化;河床渗透系数;水文过程;干旱区

1 河流与含水层水量交换

1.1 河流与地下水交换研究热点

河流与地下水作为陆地水循环过程的重要组成部分,两者间的相互作用在塑造地表形态的同时,促进潜流带的物质迁移和能量交换,并对河岸带生态系统产生影响(胡立堂等, 2007; Brunner et al, 2017; 朱金峰等, 2017)。近年来持续干旱、修建水库和无序取水等自然环境变化与人类活动对全球河流系统及地表水循环过程造成了严重影响。比如,包括河流在内的近9万平方公里地表水体在过去的32年间(1984-2015)逐渐消失(Pekel et al, 2016)。同时,超过30%的天然河流频繁断流,由常年性河流转变成间歇性河流,而且这一比例仍在增加(Tooth, 2000; Datry et al, 2014)。对于常年性河流系统而言,除了傍河水源地超采地下水所导致的河水与地下水脱节之外,河流与含水层之间通常处于饱和连接状态,即两者之间以饱和流方式进行水量交换(靳孟贵等, 2017)。相比之下,间歇性河流与含

水层之间的水力联系则较为复杂,基本存在饱和连接(饱和流)、过渡连接(饱和流与非饱和流共存)和完全脱节(非饱和流)3种不同的水力联系状态,而且3种状态之间频繁转换且交替出现(Brunner et al, 2011)。近年来,间歇性河流脱节过程及其影响要素、以及由饱和连接至完全脱节过程中的河水入渗规律已成为河水与地下水交换研究的热点与难点。

对于饱和连接模式下的河流与含水层系统,河水与地下水之间的水量交换强度同河水位与地下水位差成线性关系(Hunt, 1999),并能依据饱和水流的达西定律来建立相应的解析模型(Hantush, 1965; Wang et al, 2015)。然而,正如Reid等(1990)所指出,一旦河水与地下水开始脱节,在河床与含水层之间会逐渐形成一个包气带。此时,应该结合非饱和土壤水分运动理论来描述下渗水分在包气带中的迁移过程,并需要考虑下渗水分到达地下水面的时间(Niswonger et al, 2005)。Fox等(2003)、Brunner等(2009)运用饱和-非饱和渗流理论先后研究了垂向一维状态下河流与含水层由饱和连接至完全脱

收稿日期:2017-09-29;修订日期:2017-01-24。

基金项目:国家自然科学基金项目(41301025);中俄(NSFC-RFBR)合作项目(41511130025) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41301025; NSFC-RFBR Programme 2015-2016, No.41511130025]。

作者简介:王平(1979-),男,安徽肥西人,副研究员,硕导,主要从事流域水循环与地下水水文过程研究,E-mail: wangping@igsnrr.ac.cn。

引用格式:王平. 2018. 西北干旱区间歇性河流与含水层水量交换研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 37(2): 183-197. [Wang P. 2018. Progress and prospect of research on water exchange between intermittent rivers and aquifers in arid regions of northwestern China[J]. Progress in Geography, 37(2): 183-197.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.02.002

节过程中的河水入渗速率变化。研究认为,在河水位及河床入渗性能不变的情况下,水力梯度随着地下水位下降而不断增加,进而导致河水入渗速率逐渐增大,在河流与含水层完全脱节时达到最大,并趋于稳定。然而,Rivière等(2014)研究发现,在包气带开始形成的过渡连接阶段,当河床渗透性能远低于河床下方含水层渗透性能时,入渗速率在过渡连接初期达到最大,之后缓慢减小并趋于稳定。分析河床下方包气带的形成及其变化过程是深入理解河流脱节机理的关键,也是间歇性河流与含水层相互作用研究的难点,这方面研究仍有待加强。

如何有效识别河水与地下水是否脱节是河流与含水层相互作用研究的另一难点(Brunner et al, 2011)。Wang等(2016)认为,当自由水面的水平水力梯度为零,垂向水力梯度为1时,河水与地下水完全脱节。在地下水渗流理论分析的基础上,Brunner等(2009)基于一维垂向稳定流假设建立了判别河水与地下水脱节与否的数学表达式。然而,对于窄浅型河流与含水层系统,正如靳孟贵等(2017)所指出,由于水平流与垂直流共存,该判据并不适用。水平流的形成与脱节型河流两岸非饱和带的发育密切相关。当河流两岸非饱和带发展到一定阶段,河岸带非饱和介质毛细吸力足以引起河水在垂直入渗过程中产生水平方向的运移,即水平流(Xie et al, 2014; 靳孟贵等, 2017)。对具有淤塞层的河流脱节过程研究发现,当河水与地下水发生脱节之后,在淤塞层下方能够形成悬挂饱水带,其最大厚度约等于河水深(Wang et al, 2016)。Xie等(2014)研究发现,在一定条件下,未淤塞河流脱节之后同样可在河床下方发育有悬挂饱水带。围绕“河流-悬挂饱水带-非饱和带-地下水”系统的饱和与非饱和水流形成与转化研究,将有助于精准刻画间歇性河流与含水层之间的水分迁移过程。

作为河流与含水层相互作用的重要物理界面(Constantz, 2016),河床直接影响河水与地下水交换强度以及潜流带生物地球化学过程(Brunner et al, 2017; 杜尧等, 2017)。河床渗透系数(K)是反映河床沉积物导水能力的重要参数,其大小不仅取决于河床沉积物的性质,如粒度、成分、颗粒排列、充填状况、沉积结构等,同时与河水的物理性质,如容重、粘滞性具有密切的关系(薛禹群, 1997; Cuthbert et al, 2010)。受多种因素的影响,河床沉积物 K 值有一个较大的变化范围,从小于 1×10^{-9} m/s到大于 1×10^{-2} m/s不等(Calver, 2001)。不仅如此,河床渗透性

能具有强烈的空间非均质性,并在时间上也呈现出一定的变异性(Chen, 2004; Tang et al, 2017)。河床沉积物所具有的这种时空变异特征,一方面,影响河流与含水层之间的转化关系;另一方面,造成难以准确定量河水与地下水交换量。当前,对河床渗透性能时空变异性及其影响因素的识别不仅是研究河水与地下水水量交换的关键与难点(束龙仓等, 2008; Rosenberry et al, 2009; Pozdniakov et al, 2016),也是河流与含水层相互作用研究的热点(Constantz, 2016; Brunner et al, 2017)。

1.2 河流与地下水交换研究方法

河水与地下水交换的研究方法主要包括室内物理模拟实验、野外测定、数值模拟等(Yager, 1993; Landon et al, 2001; Kalbus et al, 2006; Rosenberry et al, 2008; Fleckenstein et al, 2010)。野外测定的方法很多,比如,河道流量测定法、抽水试验法、微水试验法、渗水试验法、离子示踪法等(Scanlon et al, 2002; Cook, 2015)。近年来,基于达西定律的各种形式原位渗流实验方法得到不断改进与完善,并在此基础上发展出原位测定河床渗透性能的一些新方法。如Chen(2000)所提出的原位竖管法已在河床沉积物渗透系数的野外测定上得到了较为广泛的应用(束龙仓等, 2002; 何志斌等, 2007; 宋进喜等, 2009)。圆盘渗流仪(seepage meter)也被广泛用于研究干旱区河流与含水层水量交换速率(Landon et al, 2001; Rosenberry, 2008)。

当前,随着温度示踪逐渐成为国际上研究河水与地下水交换的一种有效手段,利用温度变化信息定量研究河水与地下水交换,以及河水温度变化对河床沉积物 K 值的影响正逐渐成为一种新趋势(Ronan et al, 1998; Anderson, 2005; Hatch et al, 2006; Selker et al, 2006; Constantz, 2008; 吴志伟等, 2011; Halloran et al, 2016; Caissie et al, 2017)。通过记录河床的温度剖面,可观测到河水温度瞬变信号在河床内的传播过程,从而根据这个信号的形状和滞后时间估算向下的河水入渗速率(Constantz et al, 2003; Constantz, 2008; Lundquist et al, 2008; Roshan et al, 2012; Vogt et al, 2012)。在此基础上,结合河水与地下水水位及温度观测资料,即可计算获得河床沉积物 K 值及其随温度的变化关系(Hatch et al, 2006; Hatch et al, 2010; Hyun et al, 2011)。

近年来,在干旱与半干旱地区的常年或间歇性河流河床渗透系数研究方面,已有学者尝试利用温

度感测器(固定在直径为4~5 cm的钻孔中)来记录河床剖面温度信号,从而实现对整个河床断面河床沉积物 K 值的估算(Vogt et al, 2010; Anibas et al, 2011; Gerecht et al, 2011; Anibas et al, 2016)。在计算方法上,采用对流与热传导计算模型对河床剖面的温度与水位观测数据进行分析,已成为定量确定河床入渗性能的一种重要手段(Anderson, 2005)。在河水及地下水热量与水量交换过程模拟,以及河床渗透系数时空变异性分析计算方面,美国农业部盐渍土实验室所开发的HYDRUS-1D水热耦合运移模型(Šimůnek, van Genuchten, 2008; Šimůnek, van Genuchten, Šejna, 2008; Šimůnek et al, 2016)和美国地质调查局所开发的变饱和孔隙介质水热运移模型VS2DH(Healy et al, 1996, 2012)已得到了广泛的应用与验证(Schmidt et al, 2007; Essaid et al, 2008; Anibas et al, 2009; Duque et al, 2010; Vandersteen et al, 2015; Halloran et al, 2016; Huang et al, 2016)。

随着地下水模型(比如,MODFLOW)的河道水流模块SFR1(Prudic et al, 2004)和SFR2(Niswonger et al, 2005)不断发展与完善,对河流与含水层系统的数值模拟已成为区域尺度上河水与地下水交换研究的重要手段(Yao, Zheng, Tian, 2015)。类似模拟研究的可靠性不仅依赖于一个相对完整的河水与地下水水位联合监测网(Wang et al, 2015),而且取决于对河流与含水层系统模型的正确概化以及对模型参数的准确估算(Yao, Zheng, Liu, 2015; Brunner et al, 2017)。从参数化的角度来看,上述所提及的野外研究方法,包括点尺度上的原位渗透实验以及关键河段尺度上的河道水量平衡实验,能为河水与地下水水量交换关键参数(比如,河床渗透系数)的确定提供依据。当前,随着测温技术的不断发展,点式测温、分布式测温、航空和航天遥感测温与水位、流量等传统水文观测相结合(Yao, Huang, et al, 2015),为地表水与地下水耦合模型的校正提供多源校正信息,保证从不同的时空尺度上研究河水与地下水相互作用的规律与强度(黄丽等, 2012; 马瑞等, 2013; 刘传琨等, 2014)。

受研究尺度、研究方法本身的局限性与不确定性等因素制约,单一研究方法所获得的计算结果代表性有限,而不同研究方法所得到的结果之间可能存在较大差异。因此,综合运用多种相互独立的技术方法,是提高河水与地下水水量交换研究结果可靠性的重要保障(McCallum et al, 2014)。

1.3 干旱区间歇性河流与地下水交换研究存在的问题

干旱区由于降水稀少,地表水资源贫乏,浅层地下水是人类生产与生活活动的基本保障,也是维持自然生态系统平衡的关键要素。对于干旱区内陆河下游地区来说,河流地表水是浅层地下水补给的重要来源(王平等, 2014)。当前,干旱区河流渗漏补给地下水的基础研究已成为河流与含水层相互作用研究的一项重要前沿课题(de Vries et al, 2002; Villeneuve et al, 2015),也是科学评价河岸带地下水资源,合理维持河流及河岸带生态系统功能(Jolly et al, 2008),以及进行水量调度系统论证的重要依据(程国栋等, 2014; Tian, Zheng, Zheng, et al, 2015; Wu B et al, 2015)。

干旱内陆河流域上、中、下游系于一脉,尽管流域内河水与地下水多次转换,但仍同属一个水资源系统(中国科学院地学部, 1996)。近年来,随着河流中上游水资源的过度开发利用,河流下游发生间歇性断流(Tian, Zheng, Wu, et al, 2015),导致河流与含水层系统之间形成了复杂的“饱和连接-过渡脱节-完全脱节”演化关系(Brunner et al, 2011),增加了河流与含水层之间水量交换研究的难度。此外,干旱区发育有数量众多的短小河流,且多为季节性河流。这些河流通常处于干涸状态,仅在暴雨期间形成河道径流,并通过砂质或砾石质河床快速渗漏补给地下水(Hoffmann et al, 2002; Morin et al, 2009; Noorduijn et al, 2014; Rau et al, 2017)。针对一次来水过程中水流湿润锋在河床下方非饱和带内的垂向运移过程,Dahan等(2008)发展了非饱和层监测系统(Vadose zone monitoring system, VMS),用于观测非饱和层中水流的渗漏过程。通过连续追踪非饱和带内的土壤含水量变化,分析计算水流的入渗速率。该方法已在干旱区间歇性河流一次洪水过程的河床入渗补给机理研究中取得了新的认识(Morin et al, 2009; Rimon et al, 2011)。尽管如此,受自然条件的限制,干旱区水文气象站点稀少,基础观测资料缺乏。因此,在上述地区开展间歇性河流与地下水交换研究仍然面临着极大的困难和挑战(Wheater et al, 2010)。

中国西北干旱区以温带大陆性气候为主,年内与昼夜温差大。由于河流水深较浅,河水与河床的温度受气温影响显著,尤其在严寒的冬季,宽浅型河流通常部分冻实或连底冻(图1)。与此同时,以塔里木河、黑河、石羊河为典型的中国西北内陆河流,其地表径流过程近年来受到了人为的调控(庞忠

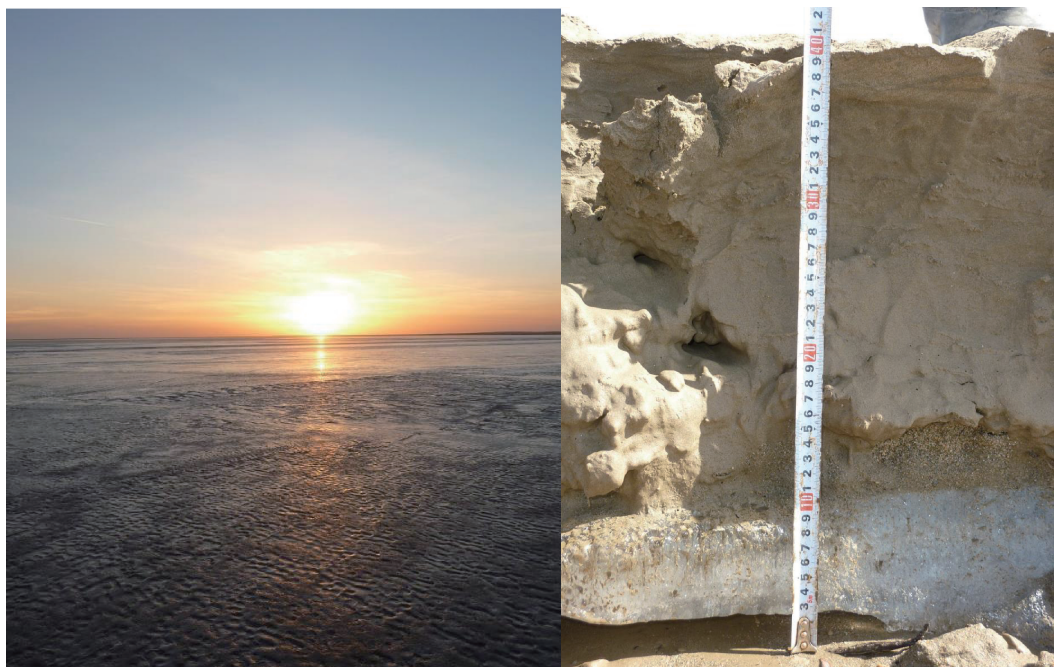


图1 黑河下游东居延海冻结冰面(左)与额济纳东河河岸地下冰层(右)

Fig.1 Icy lake of the East Juyan in the lower reach of the Heihe River (left) and underground ice at the riverbank of the East River in the Ejina (right)

和, 2014; 王平等, 2014)。通常, 每年在春秋两季向下游集中调水, 而夏季河床经常处于干涸状态。河水温度年内及昼夜波动、河床季节性冻融与河道间歇性过水, 作为西北干旱区下游河流水文的典型特征, 势必导致河水物理性质、水动力条件及河床沉积物本身的改变, 并进而影响河床渗透性能在时空尺度上的变化。然而, 目前在对于干旱区河流与地下水交换的定量研究方面, 通常假定河床渗透性能是恒定的。由于不考虑环境要素对河床渗透性能的影响, 野外试验所获取的河床渗透系数存在很大差异。比如, 近年来不同研究人员对中国西北黑河下游额济纳东河河床渗透性能进行原位测试, 其中 Min 等(2013)采用原位竖管法获得的河床渗透系数为 12~28 m/d, 而 Xi 等(2015)利用 Guelph 入渗仪测定的河床渗透系数却相对较小(< 3 m/d)。除不同实验方法之间可能存在的测算误差外, 两次测试期间环境要素(如水温、河水所携带的泥沙含量)的差异可能是导致所测算河床渗透系数差别的重要原因。

在内陆河流域下游生态输水实践中, 仍在探索一种更为优化的周期性输水模式, 旨在持续恢复河岸带地下水位与河岸林植被(刘登峰等, 2014)。当前, 在确定适宜输水期、输水持续时间及单次输水量的过程中, 仍存在诸多科学问题尚待研究解决, 其中包括: 干旱区河流在间歇性过水与季节性冻融

环境下, 其水动力条件与河水温度是如何变化的, 是否存在一定的规律? 这些变化又将如何进一步影响河床渗透性能及河水与地下水之间的水量交换, 它们之间是否存在某种具有物理机制的联系?

2 西北干旱区间歇性河流与含水层水量交换研究

2.1 典型区选取

研究区黑河下游额济纳地处中国西北内陆腹地(图2), 该区日照充足、干旱少雨、蒸发能力强、温差大、风沙多, 为典型的大陆性干旱气候。据额济纳旗国家基本气象站 1961-2015 年的观测数据显示, 这一地区多年平均降水量为 35 mm, 年均蒸发能力达到 1500 mm 左右(Wang et al, 2014; Du et al, 2016; Liu et al, 2016)。该地区多年平均气温为 9.09°C , 其中月平均最高气温(7月)为 27.05°C , 月平均最低气温(1月)为 -11.23°C , 年内昼夜温差平均达 15°C 。

黑河是流入额济纳地区的唯一河流, 在狼心山分为东、西 2 个支流, 通常称之为额济纳东河与西河, 并最终分别流向尾间湖东、西居延海(图2)。20 世纪 50 年代之后, 随着黑河中游地区大规模的农业开发, 下游地区的地表来水量不断减少, 地下水位

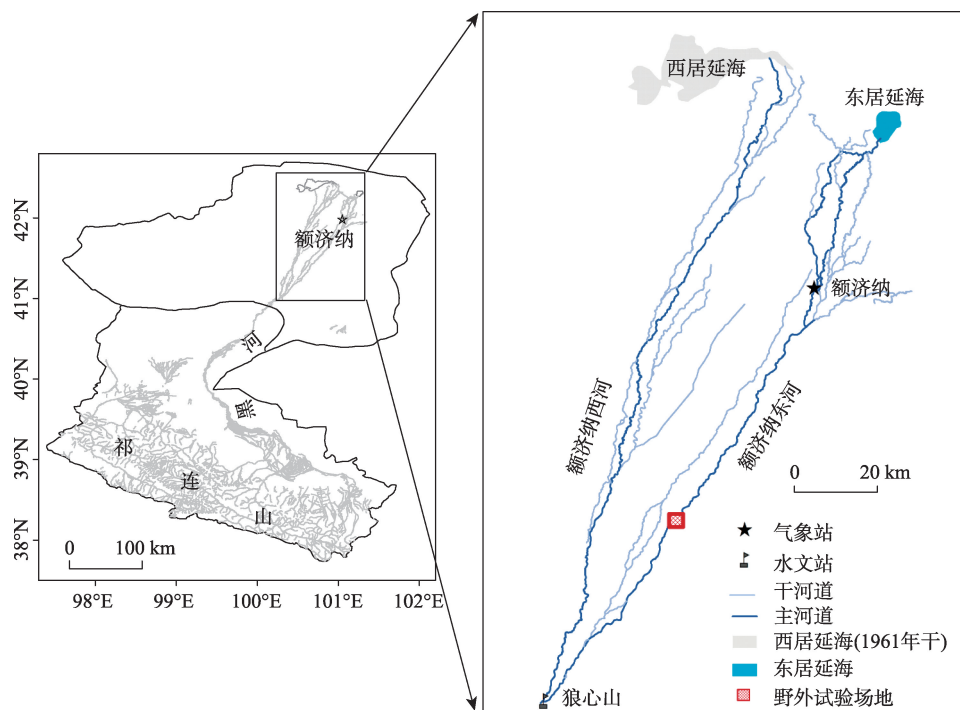


图2 黑河下游研究区及野外试验场地位置图

Fig.2 Location of the lower reach of the Heihe River and the field experiment site

持续下降,导致绿洲区植被大面积死亡(Wang, Yu, et al, 2011);西居延海与东居延海也分别于1961和1992年干涸,引起沙尘天气增多、强度变大、影响范围变广。为恢复黑河下游日益退化的生态环境,管理部门自2000年开始实施生态输水工程,保证每年向黑河下游集中调水(Wang, Zhang, et al, 2011; Zhang et al, 2011)。

据狼心山水文站(图2)观测,2000-2015年期间向额济纳年均调水约5.5亿 m^3 ,其中额济纳东河输水量约占总调水量的70%。此外,额济纳东、西河过水时间主要集中在7-10月以及每年的12月至次年4月。在每年的4-6月,额济纳河流基本处于干涸状态,或仅有短暂的少量过水,总过水量一般不超过当年调水量的5%。7-8月虽然过水,但每次过水时间也非常短暂,因此,额济纳河在夏季以少水或无水为基本特征。与此同时,作为宽浅型河流,额济纳地表河流水深较浅(平均不超过1.5 m),受气温剧烈波动的影响,河水温度也呈现出显著的季节性变化特征。据2011-2012年对额济纳东河河床下方50 cm埋深的水温观测,河水/地下水日均温度在年内变化达到 20°C (王平等, 2014)。由此可见,受河流间歇性输水和气温变化的双重影响,额济纳河的河床每年都至少经历1~2次干湿交替以及河水冻结与融化过程,具有中国西北干旱区内陆河下游水

文过程的典型特征。

针对1.3所提出的科学问题,在国家自然科学基金青年项目《河水温度对干旱区宽浅型河床渗透系数影响的定量研究(项目批准号:41301025)》的资助下,选取位于额济纳东河中上段(距狼心山水文站约55 km处)的河床断面(图2)为研究对象,开展干旱区河床渗透性能时空变异性及河水与地下水水量交换的试验观测与模拟研究。本文是在青年项目研究成果的基础上,梳理了西北干旱区间歇性河流与含水层水量交换的研究进展,并展望了河流与含水层相互作用的发展趋势及其所面临的基础科学问题。

2.2 试验布设与数据分析

河床渗透系数定量研究方法总体上可分为实验室分析法、野外测定法、数值模拟法等(Scanlon et al, 2002; Cook, 2015)。实验室分析法主要是基于河床沉积物的颗粒级配曲线推求其渗透系数(Alyamani et al, 1993; Song et al, 2009),而数值模拟法则是通过参数识别的方法确定河床的渗透系数(Yager, 1993; Wang et al, 2015)。实验室分析法与数值模拟法都是通过间接的手段来获取河床渗透系数,而野外测定法则是通过原位实验直接获得河床沉积物 K 值,也是当前河床渗透系数测定最常用的方法之一。本次研究总体思路是以野外试验与观

测为基础,通过分析计算确定河床沉积物 K 值,并分析不同环境下的 K 值差异性,揭示河床渗透性能时空变异性及其主要影响因素。研究方法包括典型断面河床剖面野外调查与采样、河床沉积物物理及水理性质室内分析、河床渗透性能原位测试、河流-含水层系统温度与水位同步连续自动观测、数值模拟与计算、数理统计分析等。

2.2.1 河流与含水层系统的水位与温度同步观测

假定河流与两侧地下水交换强度基本相同,由于其对称性,拟以河流中线为界在一侧布设河流与含水层系统的水位与温度同步观测,方案如图3所示。根据Wang等(2015)论证提出的河水与地下水监测方案,在垂直于河道方向上布设3眼地下水观测井(G1-G3)与1眼河水位监测井R1,用于分析河水与河岸带地下水之间的关系。在此基础上,考虑河流宽度及河床断面形态特征,自河流中线至河岸布设一定数量的河床温度与水位监测剖面(如图3所示的RB1-RB4)。然后,根据河床剖面垂向结构,在每个监测剖面自河床表层向下的不同深度内埋设温度自动记录仪,用于观测河床沉积物的温度变化。

2.2.2 河床渗透性能原位测试

根据非过水期河床剖面垂向结构特征调查结果,采用原位竖管法对河床沉积物渗透系数进行分层测定。Hvorslev(1951)较早提出了原位竖管法的理论计算依据,其试验方法如图4所示(Chen, 2000):将一定规格的测管竖直插入河床沉积物中,

然后向竖管内连续注水。在管内注满水后,开始记录水头下降过程中不同时刻测管内水头位置,进而计算河床的垂向渗透系数。由于简单易行,该方法已成为当前河水与地下水交换定量研究中用来原位测试河床渗透性能的重要手段。

原位测试以河流与含水层水位与温度同步监测断面为基准,从河岸一侧按等间距对河床渗透性能分层进行测定。在河流与含水层同步监测断面的上下游,根据河床形态分别增设一处类似的测试断面。考虑到温度、流量等水文气象要素对河床渗透性能的影响,原位测试在不同的季节和流量下进行,并且每次测试期间对河水温度、河水位、流速等要素进行测量与记录。单点测试完毕,原地采集河床沉积物样品,在室内采用筛分(>2-mm 粒级)与激光粒度仪(<2-mm 粒级)相结合的方法进行样品粒度分析。

2.2.3 河床沉积物水分运动参数分析

在河床干涸期,沿着河床渗透性能原位测试点采用容积为100 cm³环刀分层采集河床沉积物原状样品,室内测定样品的物理性质和水分运动参数,包括粒度分布、干容重、饱和含水率、渗透系数、水分特征曲线等。选取合适的含水量和吸力关系模型,如 van- Genuchten (vG) 模型(van Genuchten, 1980)、Brooks-Corey (BC)模型(Brooks et al, 1964)、Clapp-Hornberger (CH)模型(Clapp et al, 1978),对样品水分特征曲线进行拟合,获取模型计算所需要的水分运动参数。

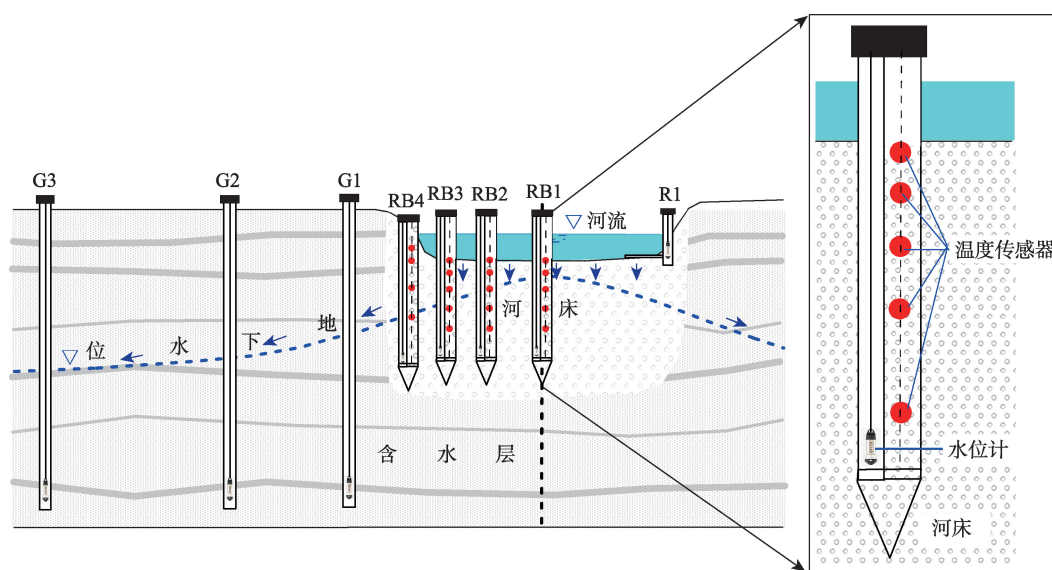


图3 河流与含水层系统的水位与温度同步连续观测示意图

Fig.3 Schema of continuous in situ monitoring of water level and temperature for river-aquifer systems

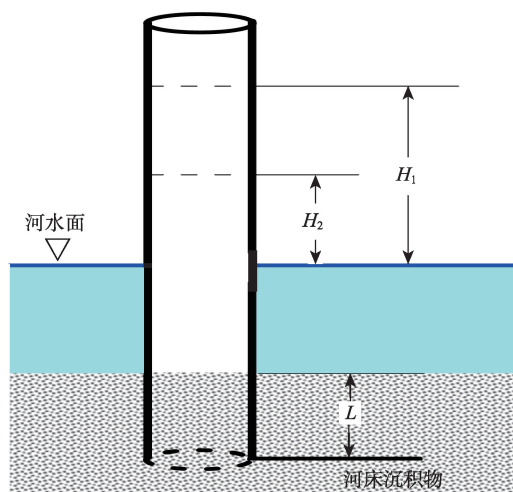


图4 原位竖管法测定河床沉积物渗透系数示意图。 L 为测管内河床沉积物的长度, H_1 和 H_2 分别为 t_1 和 t_2 时刻所对应的测管内水头高度。

Fig.4 Schematic diagram showing the measurement of riverbed hydraulic conductivity using in-situ standpipe method. L is the thickness of the measured riverbed inside the standpipe, H_1 and H_2 are the water level inside the standpipe at the testing time t_1 and t_2 , respectively.

2.2.4 河床渗透系数计算与分析

首先,分析不考虑温度影响的河床沉积物 K 值。对河床沉积物颗粒级配曲线进行分析,并根据经验公式计算其渗透系数 K (Alyamani et al, 1993; Song et al, 2009)。然后,分析恒定温度下的河床沉积物 K 值。根据河床渗透性能原位测试结果,利用改进后的 Hvorslev 公式(Pozdniakov et al, 2016; Wang et al, 2017)计算一定河水温度下的河床沉积物 K 值。最后,分析计算变化温度下的河床沉积物 K 值。对河流与含水层系统的温度与水位同步观测

原始数据进行预处理,插补因各种无法预测原因导致的观测数据短时段缺失,并生成可用的温度与水位原始步长序列。以水热耦合运移模型,如 HYDRUS-1D(Šimůnek, van Genuchten, 2008) 和 VS2DH(Healy et al, 1996),为模拟分析平台,利用校正之后的河流与含水层温度与水位观测数据,结合所获取的河床断面形态资料与水热运移参数,计算获得不同河水温度下的河床沉积物 K 值数据序列。

通过对上述3种不同测算方法所获取的 K 值进行对比,采用数理统计分析方法量化河水温度对河床渗透性能及河水与地下水水量交换的影响。采用时间序列分析,进一步探讨河床渗透性能时空变异性及其对河床干湿交替与冻融过程的响应。

2.3 干旱区河床温度剖面观测局限性

干旱区多发育冲积河床,河道形态及河床本身受水流冲刷作用强烈。当前,在西北干旱区内陆河下游人工输水过程中,单次流量可达到 $250\sim 300\text{ m}^3/\text{s}$ 。在此流量下的一次洪水过程,能造成河岸与河床的侵蚀与堆积。如图5所示,经过几次洪水过程,干旱区河流河道内所布设的水位观测井被冲弯,而埋在河床下的温度观测线缆也被冲刷露出河床。可见,河床温度观测剖面的埋深是随河床冲刷与堆积过程而发生改变,增加了对温度观测数据分析的难度与不确定性。如何保证河床温度观测埋深的相对稳定是干旱区间歇性河流水热监测所面临的一个技术难题。

2.4 河床渗透系数时空变异性的新视角

2.4.1 河床渗透性能时间变异性的温度效应

在气温日较差与年较差显著的地区,温度是影响河床渗透性能的重要因素。一方面,河水冷热变



图5 被冲弯的河水观测井(左)和被冲刷而露出河床的温度观测线缆(右)

Fig.5 The bent observation well (left) and exposed temperature cable (right) by river flooding

化会引起水的密度和粘滞性变化,进而影响河床渗透性能(Doppler et al, 2007)。Constantz等(1994)对位于美国St. Kevin Gulch的160 m天然河段的研究发现,当河水温度从4°C升高到18°C,河床渗透系数约增加38%。在河床季节性温差达到20~25°C的黑河下游地区,因不考虑河水温度变化而导致的河水渗漏量被高估10%~15%(Wang et al, 2017)。特别是在冬季,当河床临近冻结状态(~1°C)时,河床的渗透能力显著降低,而这一因素在当前的河水与地下水交换定量研究中常被忽略。Lapham(1989)在研究不同类型河流的河水温度与河流渗漏量之间关系时,同样发现,河水温度是影响河床渗透系数变化的重要因素之一,尤其在昼夜及年内气温变化剧烈的干旱地区(Constantz, 2008; Mutiti et al, 2010)。另一方面,在季节冻融区,冬季河水冻结能够引起河水位抬升,从而改变河水与地下水之间的水力梯度,并进而影响河水与地下水之间的水量交换强度(Weber et al, 2013)。此外,在温度梯度驱动下,冻融作用引起土壤中水分向冻结锋面迁移,并在河岸形成冰层(Cheng, 1983; 周幼吾等, 2000; 徐敦祖等, 2001)。2012年3月底,我们在野外发现额济纳东河河岸沉积物30 cm深度处存在约10 cm厚的地下冰层(图1)。室内试验也证实,在底部充分供水的情况下,对土柱施加垂向温度梯度,能在土壤饱和带附近快速形成一定厚度的冰层。据此推测,在季节冻土区,当河岸附近地下水位浅、供水充分时,冬季可在冻结锋面处形成一定厚度的地下冰。这种地下冰的存在,在一定程度上降低了河水与地下水在侧向上的水量交换强度。因此,在冬季随着气温下降到0°C以下,在水深较浅的河床底部可能发生局部冻结,从而减少河床渗漏面积,降低河水与地下水的交换强度。

随着全球气候变暖的加剧,在多年冻土区,活动层的季节变动带来水文过程的显著变化,这种现象已受到国内外学者们的广泛关注(Walvoord et al, 2007; 王根绪等, 2007; Frey et al, 2009; Wang et al, 2009; Cheng et al, 2013; Turner et al, 2014; Gao et al, 2016; Hinkel et al, 2017; Liao et al, 2017)。但是,在季节冻土区,土壤的冻融对水文过程的影响机制和影响程度,仍有待探索。尤其在中国西北内陆河流域下游地区,河道输水主要集中在冬季,而河床及两岸沉积物以中细砂为主,导热性较好,冬季易发生冻结,影响河水与地下水之间的水量交换。在全球变暖背景下,研究河流季节性冻融条件下的水

文效应,不仅可深化理解干旱区间歇性河流与含水层系统的相互作用过程,而且能为中国西北干旱区内陆河流域优化生态配水方案提供科学依据。

2.4.2 河床渗透性能空间变异性的河流水动力效应

在不同水动力条件下,河床表层细颗粒物质的冲刷与沉降过程是引起河床渗透性能显著变化的重要因素(Partington et al, 2017)。Wang等(2017)在黑河下游河道不同水动力条件下的原位竖管渗透实验结果表明,在河水清澈的低水位期,河床渗透性能好(~36 m/d)且稳定,而在河水浑浊的高水位期,河床渗透性能随实验时间的增加而衰减。与低水位期试验相比,高水位期河床渗透性能显著下降,河床渗透系数平均为6 m/d。据Wang等分析,在高水位期的原位竖管渗透实验过程中,河水所携带泥沙在测管内逐渐沉降,造成河床表层淤塞层不断加厚,从而导致河床渗透性能衰减。

为进一步证实河水所携带泥沙的自然沉降过程将导致河床渗透性能的不断减弱,我们于2017年8月29日在额济纳东河开展了清水与浊水环境下的原位竖管对比实验研究。如图6所示,首先向测管内注入清水,并记录竖管内水位的下降速率,直至实验结束。然后,向同一个竖管内注入浑浊的河水,并重复上述实验。对比实验的结果表明,清水条件下的水位降深随时间变化曲线 $\ln(H_0/H(t)) \sim t$ 呈现线性相关;而浊水条件下, $\ln(H_0/H(t)) \sim t$ 曲线随着实验时间的推移,由开始的直线逐渐趋于平缓。对比实验证实了在静水条件下,浑浊河水所携带的泥沙不断沉降,引起河床表层淤塞,并导致河床渗透性能的减弱。

需要指出的是,原位竖管实验结果所反映的是静水条件下的泥沙自然沉降过程,而河流在不同水动力条件下,河道内的细颗粒物质(如黏土、粉土等)的沉降与冲刷过程十分复杂(靳孟贵等, 2017),是引起河床渗透性能时空变异性的主要因素(冯斯美等, 2013)。Doble等(2012)发现,河道内的细粒物质在一次洪水事件中将发生冲刷和沉降两个过程。在洪水前期,水流快速冲刷河床,将河床表层的淤塞层(clogged layer)冲洗并带走,从而减少淤塞层的厚度,增加河床渗透性能(Simpson et al, 2012)。然而,在洪水末期,河水所携带的大量细小泥沙颗粒、碎屑物质以及悬浮物等又快速沉降到河床表层,再次引起河床淤塞,极大地降低河床的渗透性能(Gibson et al, 2011; Chen et al, 2013)。Wu G D等(2015)对山东省境内大汶河河床在洪水期前后的河床渗



图6 原位竖管渗透实验对比研究,其中左图为清水实验,右图为浊水实验。

Fig.6 A comparative study of the in situ standpipe tests with clean (left) and muddy water (right)

透性能进行原位测试分析,发现河床渗透性能在洪水之后整体下降,而且呈现出更强的空间异质性。

水位降深随时间变化曲线的显著非线性特征,是高水位期河流泥沙自然沉降过程导致河床表层淤塞的直接证据。尽管数学模型可较好地刻画静水条件下的泥沙沉降过程(Wang et al, 2017),但实际情况远比原位竖管渗透实验条件复杂。在河道过水过程中,受河床微地貌及水流紊流强度的影响,泥沙的冲刷与自然沉降交替(或同时)发生(Partington et al, 2017)。特别是由于河流水动力条件的差异,天然河流的淤塞层并不连续,而是呈现出强烈的空间变异性(靳孟贵等, 2017)。河床渗透性能的高度时空变异性决定了河流与含水层系统水量交换研究的复杂性与不确定性。

3 研究展望

自130年前Boussinesq分析河流与连续冲积含水层作用规律以来(Winter, 1995),伴随实验技术和测量手段不断发展,河流与含水层相互作用研究已从当初单一的水文地质学问题发展到集水文地质学、水文地球化学、水文学、环境生态学、气象学等多学科为一体的交叉学科。迄今为止的研究从不同学科角度、不同时空尺度对河流与含水层之间的相互作用机制进行了探讨,提出了河水与地下水之间的转化模式,发展了河水与地下水交换的室内外试验方法与数值模拟技术。然而,由于河流与含水层系统相互作用是一个涉及到物理、化学、生物等多要素、多相流、多尺度的复杂生物地球化学过程,这一学科仍面临诸多亟待解决的基础科学问题。

首先,河床是河流与含水层相互作用的重要物理界面,控制着河流与含水层之间的水文及生物地球化学循环过程,而河床沉积物的物质组成与结构又受到潜流带水文和生物地球化学过程影响。目前,对河流冲积作用、生物化学作用以及冻融作用与河床沉积物时空变异性之间的互馈机制尚不清楚。因此,定量识别河床沉积物变化与潜流带水文和生物地球化学过程之间的互馈关系、探究该种互馈关系对河水与地下水交换的影响(靳孟贵等, 2017)、发展河流与含水层系统交互理论(刘传琨等, 2014)是未来研究的重要方向之一。

其次,当前河水与地下水交换研究主要包含以下3个空间尺度:一是点尺度上的河床渗透性能研究,二是剖面尺度上的河水与地下水交换速率研究,三是流域(河段)尺度上的水量平衡研究。尽管已有研究(Song et al, 2010; 宋进喜等, 2014)指出生物扰动能够改变河床沉积物结构,是影响潜流带水文过程的重要因素,但是对于孔隙尺度上的微生物过程和潜流带水文过程认识十分有限(杜尧等, 2017)。当前,自然环境变化和人类活动对河流生态系统产生了极大的影响,表现在干旱区河床干湿交替的频次在增加、河流与含水层系统温度场在发生改变。由于微生物对水分和温度的变化十分敏感,微生物如何响应变化环境、微生物过程如何影响潜流带水文过程,这将是孔隙尺度上潜流带水文学研究的重要内容。

最后,随着高精度传感与自动监测技术的发展,实现河流与含水层系统水文与生物地球化学过程的高精度、自动化监测将成为可能(杜尧等, 2017)。在获取包括气候、水文、地质、地貌、土壤、生物等自然要素在内的大量数据的同时,如何定量识别上述要素的时空变化过程(束龙仓等, 2003)、各要素间的互馈关系及其对变化环境与人类活动影响的响应,发展能精准刻画潜流带水文与生物地球化学过程的数值模型(Brunner et al, 2017),并解决模型时空尺度匹配、减少模型参数不确定性(Tian, Zheng, Zheng, et al, 2015),是我们面临的挑战。

致谢:感谢国家自然科学基金委员会地学部一处处长冷疏影研究员、中国科学院地理科学与资源研究所于静洁研究员、北京大学遥感与地理信息系统研究所范闻捷副教授在本文写作过程中给予的悉心指导、支持和帮助,感谢匿名审稿人专业且富有建设性的修改意见。本文在撰写过程中得到了中国

科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心闵雷雷博士、中国科学院地理科学与资源研究所王田野和张学静两位研究生的帮助,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- 程国栋, 肖洪浪, 傅伯杰, 等. 2014. 黑河流域生态—水文过程集成研究进展[J]. 地球科学进展, 29(4): 431-437. [Cheng G D, Xiao H L, Fu B J, et al. 2014. Advances in synthetic research on the eco-hydrological process of the Heihe River Basin[J]. Advances in Earth Science, 29(4): 431-437.]
- 杜尧, 马腾, 邓娅敏, 等. 2017. 潜流带水文—生物地球化学: 原理、方法及其生态意义[J]. 地球科学, 42(5): 661-673. [Du Y, Ma T, Deng Y M, et al. 2017. Hydro-biogeochemistry of hyporheic zone: Principles, methods and ecological significance[J]. Earth Science, 42(5): 661-673.]
- 冯斯美, 宋进喜, 来文立, 等. 2013. 河流潜流带渗透系数变化研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 11(3): 123-126. [Feng S M, Song J X, Lai W L, et al. 2013. An overview of the effects of hyporheic processes on the streambed hydraulic conductivity in the hyporheic zone of a river[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 11(3): 123-126.]
- 何志斌, 赵文智. 2007. 河床水力传导度及其各向异性的测定[J]. 水科学进展, 18(3): 351-355. [He Z B, Zhao W Z. 2007. Measurement of streambed hydraulic conductivity and anisotropy analysis[J]. Advances in Water Science, 18(3): 351-355.]
- 胡立堂, 王忠静, 赵建世, 等. 2007. 地表水和地下水相互作用及集成模型研究[J]. 水利学报, 38(1): 54-59. [Hu L T, Wang Z J, Zhao J S, et al. 2007. Advances in the interactions and integrated model between surface water and groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 38(1): 54-59.]
- 黄丽, 郑春苗, 刘杰, 等. 2012. 分布式光纤测温技术在黑河中游地表水与地下水转换研究中的应用[J]. 水文地质工程地质, 39(2): 1-6. [Huang L, Zheng C M, Liu J, et al. 2012. Application of distributed temperature sensing to study groundwater-surface water interactions in the Heihe River Basin[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 39(2): 1-6.]
- 靳孟贵, 鲜阳, 刘延锋. 2017. 脱节型河流与地下水相互作用研究进展[J]. 水科学进展, 28(1): 149-160. [Jin M G, Xian Y, Liu Y F. 2017. Disconnected stream and groundwater interaction: A review[J]. Advances in Water Science, 28(1): 149-160.]
- 刘琨琨, 胡玥, 刘杰, 等. 2014. 基于温度信息的地表—地下水交互机制研究进展[J]. 水文地质工程地质, 41(5): 5-10, 18. [Liu C K, Hu Y, Liu J, et al. 2014. Advances in using temperature to study surface water-groundwater interactions[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 41(5): 5-10, 18.]
- 刘登峰, 田富强, 林木, 等. 2014. 基于生态水文耦合模型的塔里木河下游人工输水优化方案研究[J]. 水力发电学报, 33(4): 51-59. [Liu D F, Tian F Q, Lin M, et al. 2014. Study on optimal scheme of water transfer in the lower Tarim river based on ecohydrological evolution model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 33(4): 51-59.]
- 马瑞, 董启明, 孙自永, 等. 2013. 地表水与地下水相互作用的温度示踪与模拟研究进展[J]. 地质科技情报, 32(2): 131-137. [Ma R, Dong Q M, Sun Z Y, et al. 2013. Using heat to trace and model the surface water-groundwater interactions: A review[J]. Geological Science and Technology Information, 32(2): 131-137.]
- 庞忠和. 2014. 新疆水循环变化机理与水资源调蓄[J]. 第四纪研究, 34(5): 907-917. [Pang Z H. 2014. Mechanism of water cycle changes and implications on water resources regulation in Xinjiang Uygur autonomous region[J]. Quaternary Sciences, 34(5): 907-917.]
- 束龙仓, Chen X H. 2002. 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, 13(5): 629-633. [Shu L C, Chen X H. 2002. Measurement in situ of streambed hydraulic conductivities in the Platte River, Nebraska[J]. Advances in Water Science, 13(5): 629-633.]
- 束龙仓, Chen X H. 2003. 河流—含水层系统中水文要素的变化过程分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 31(3): 251-254. [Shu L C, Chen X H. 2003. Variation process of hydrologic elements of river-aquifer system[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 31(3): 251-254.]
- 束龙仓, 鲁程鹏, 李伟. 2008. 考虑参数不确定性的地表水与地下水交换量的计算方法[J]. 水文地质工程地质, 35(5): 68-71. [Shu L C, Lu C P, Li W. 2008. Calculation method of the exchange volume between surface water and groundwater based on uncertainty of parameters[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 35(5): 68-71.]
- 宋进喜, Chen X H, Cheng C, 等. 2009. 美国内布拉斯加州埃尔克霍恩河河床沉积物渗透系数深度变化特征[J]. 科学通报, 54(24): 3892-3899. [Song J X, Chen X H, Cheng C, et al. 2009. Variability of streambed vertical hydraulic conductivity with depth along the Elkhorn River, Nebraska, USA[J]. Chinese Science Bulletin, 54(24): 3892-3899.]
- 宋进喜, 任朝亮, 李梦洁, 等. 2014. 河流潜流带颤蚓生物扰动对沉积物渗透性的影响研究[J]. 环境科学学报, 34(8): 2062-2069. [Song J X, Ren C L, Li M J, et al. 2014. Effects of Tubificid bioturbations on vertical hydraulic conductivity of the hyporheic streambed sediments[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(8): 2062-2069.]

- 王根绪, 李元寿, 王一博, 等. 2007. 长江源区高寒生态与气候变化对河流径流过程的影响分析[J]. 冰川冻土, 29(2): 159-168. [Wang G X, Li Y S, Wang Y B, et al. 2007. Impacts of alpine ecosystem and climate changes on surface runoff in the headwaters of the Yangtze River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 29(2): 159-168.]
- 王平, 于静洁, 闵雷雷, 等. 2014. 额济纳绿洲浅层地下水动态监测研究及其进展[J]. 第四纪研究, 34(5): 982-993. [Wang P, Yu J J, Min L L, et al. 2014. Shallow groundwater regime and its driving forces in the Ejina Oasis[J]. Quaternary Sciences, 34(5): 982-993.]
- 吴志伟, 宋汉周. 2011. 地下水温度示踪理论与方法研究进展[J]. 水科学进展, 22(5): 733-740. [Wu Z W, Song H Z. 2011. Temperature as a groundwater tracer: Advances in theory and methodology[J]. Advances in Water Science, 22(5): 733-740.]
- 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 2001. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社. [Xu X Z, Wang J C, Zhang L X. 2001. Physics of frozen soil[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 薛禹群. 1997. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社. [Xue Y Q. 1997. Dixa shuidonglixue[M]. Beijing, China: Geological Publishing House.]
- 中国科学院地学部. 1996. 西北干旱区水资源考察报告: 关于黑河、石羊河流域合理用水和拯救生态问题的建议[J]. 地球科学进展, 11(1): 1-4. [Earth Science Division of Chinese Academy of Sciences. 1996. Xibei ganhanqu shuiziyuan kaocha baogao: Guanyu HeiHe, ShiYangHe liuyu heli yongshui he zhengjiu shengtai wenti de jianyi[J]. Advances in Earth Sciences, 11(1): 1-4.]
- 周幼吾, 郭东信, 程国栋, 等. 2000. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社. [Zhou Y W, Guo D X, Cheng G D, et al. 2000. Geocryology in China[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 朱金峰, 刘悦忆, 章树安, 等. 2017. 地表水与地下水相互作用研究进展[J]. 中国环境科学, 37(8): 3002-3010. [Zhu J J, Liu Y Y, Zhang S A, et al. 2017. Review on the research of surface water and groundwater interactions[J]. China Environmental Science, 37(8): 3002-3010.]
- Alyamani M S, Şen Z. 1993. Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves[J]. Ground Water, 31(4): 551-555.
- Anderson M P. 2005. Heat as a ground water tracer[J]. Ground Water, 43(6): 951-968.
- Anibas C, Buis K, Verhoeven R, et al. 2011. A simple thermal mapping method for seasonal spatial patterns of groundwater-surface water interaction[J]. Journal of Hydrology, 397(1-2): 93-104.
- Anibas C, Fleckenstein J H, Volze N, et al. 2009. Transient or steady-state? Using vertical temperature profiles to quantify groundwater-surface water exchange[J]. Hydrological Processes, 23(15): 2165-2177.
- Anibas C, Schneidewind U, Vandersteen G, et al. 2016. From streambed temperature measurements to spatial-temporal flux quantification: Using the LPML method to study groundwater-surface water interaction[J]. Hydrological Processes, 30(2): 203-216.
- Brooks R H, Corey A T. 1964. Hydraulic properties of porous media[R]. Hydrology papers. Fort Collins, Colorado: Colorado State University: 25.
- Brunner P, Cook P G, Simmons C T. 2009. Hydrogeologic controls on disconnection between surface water and groundwater[J]. Water Resources Research, 45(1): W01422.
- Brunner P, Cook P G, Simmons C T. 2011. Disconnected surface water and groundwater: From theory to practice[J]. Ground Water, 49(4): 460-467.
- Brunner P, Therrien R, Renard P, et al. 2017. Advances in understanding river-groundwater interactions[J]. Reviews of Geophysics, 55(3): 818-854.
- Caissie D, Luce C H. 2017. Quantifying streambed advection and conduction heat fluxes[J]. Water Resources Research, 53(2): 1595-1624.
- Calver A. 2001. Riverbed permeabilities: Information from pooled data[J]. Ground Water, 39(4): 546-553.
- Chen W F, Huang C, Chang M, et al. 2013. The impact of floods on infiltration rates in a disconnected stream[J]. Water Resources Research, 49(12): 7887-7899.
- Chen X H. 2000. Measurement of streambed hydraulic conductivity and its anisotropy[J]. Environmental Geology, 39(12): 1317-1324.
- Chen X H. 2004. Streambed hydraulic conductivity for rivers in south-central Nebraska[J]. Journal of the American Water Resources Association, 40(3): 561-573.
- Cheng G D. 1983. The mechanism of repeated-segregation for the formation of thick layered ground ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 8(1): 57-66.
- Cheng G D, Jin H J. 2013. Permafrost and groundwater on the Qinghai-Tibet Plateau and in northeast China[J]. Hydrogeology Journal, 21(1): 5-23.
- Clapp R B, Hornberger G M. 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties[J]. Water Resources Research, 14(4): 601-604.
- Constantz J. 2008. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges[J]. Water Resources Research, 44(4): W00D10.
- Constantz J. 2016. Streambeds merit recognition as a scientific discipline[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 3(1): 13-18.
- Constantz J, Cox M H, Su G W. 2003. Comparison of heat and bromide as ground water tracers near streams[J]. Ground Water, 41(5): 647-656.
- Constantz J, Thomas C L, Zellweger G. 1994. Influence of di-

- urnal variations in stream temperature on streamflow loss and groundwater recharge[J]. *Water Resources Research*, 30(12): 3253-3264.
- Cook P G. 2015. Quantifying river gain and loss at regional scales[J]. *Journal of Hydrology*, 531: 749-758.
- Cuthbert M O, Mackay R, Durand V, et al. 2010. Impacts of river bed gas on the hydraulic and thermal dynamics of the hyporheic zone[J]. *Advances in Water Resources*, 33(11): 1347-1358.
- Dahan O, Tatarsky B, Enzel Y, et al. 2008. Dynamics of flood water infiltration and ground water recharge in hyperarid desert[J]. *Ground Water*, 46(3): 450-461.
- Datry T, Larned S T, Tockner K. 2014. Intermittent rivers: A challenge for freshwater ecology[J]. *BioScience*, 64(3): 229-235.
- de Vries J, Simmers I. 2002. Groundwater recharge: An overview of processes and challenges[J]. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 5-17.
- Doble R C, Crosbie R S, Smerdon B D, et al. 2012. Groundwater recharge from overbank floods[J]. *Water Resources Research*, 48(9): W09522.
- Doppler T, Franssen H-J H, Kaiser H-P, et al. 2007. Field evidence of a dynamic leakage coefficient for modelling river-aquifer interactions[J]. *Journal of Hydrology*, 347(1-2): 177-187.
- Du C Y, Yu J J, Wang P, et al. 2016. Reference evapotranspiration changes: Sensitivities to and contributions of meteorological factors in the Heihe River basin of northwestern China (1961-2014) [J]. *Advances in Meteorology*, 2016: 4143580.
- Duque C, Calvache M L, Engesgaard P. 2010. Investigating river-aquifer relations using water temperature in an anthropized environment (Motril-Salobreña aquifer)[J]. *Journal of Hydrology*, 381(1-2): 121-133.
- Essaid H I, Zamora C M, McCarthy K A, et al. 2008. Using heat to characterize streambed water flux variability in four stream reaches[J]. *Journal of Environmental Quality*, 37(3): 1010-1023.
- Fleckenstein J H, Krause S, Hannah D M, et al. 2010. Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics[J]. *Advances in Water Resources*, 33(11): 1291-1295.
- Fox G A, Durnford D S. 2003. Unsaturated hyporheic zone flow in stream/aquifer conjunctive systems[J]. *Advances in Water Resources*, 26(9): 989-1000.
- Frey K E, McClelland J W. 2009. Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry[J]. *Hydrological Processes*, 23(1): 169-182.
- Gao T G, Zhang T J, Cao L, et al. 2016. Reduced winter runoff in a mountainous permafrost region in the northern Tibetan Plateau[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 126: 36-43.
- Gerecht K E, Cardenas M B, Guswa A J, et al. 2011. Dynamics of hyporheic flow and heat transport across a bed-to-bank continuum in a large regulated river[J]. *Water Resources Research*, 47(3): W03524.
- Gibson S, Heath R, Abraham D, et al. 2011. Visualization and analysis of temporal trends of sand infiltration into a gravel bed[J]. *Water Resources Research*, 47(12): W12601.
- Halloran L J S, Rau G C, Andersen M S. 2016. Heat as a tracer to quantify processes and properties in the vadose zone: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 159: 358-373.
- Hantush M S. 1965. Wells near streams with semipervious beds[J]. *Journal of Geophysical Research*, 70(12): 2829-2838.
- Hatch C E, Fisher A T, Revenaugh J S, et al. 2006. Quantifying surface water-groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records: Method development[J]. *Water Resources Research*, 42(10): W10410.
- Hatch C E, Fisher A T, Ruehl C R, et al. 2010. Spatial and temporal variations in streambed hydraulic conductivity quantified with time-series thermal methods[J]. *Journal of Hydrology*, 389(3-4): 276-288.
- Healy R W, Essaid H I. 2012. VS2DI: Model use, calibration, and validation[J]. *Transactions of the ASABE*, 55(4): 1249-1260.
- Healy R W, Ronan A D. 1996. Documentation of computer program VS2DH for simulation of energy transport in variably saturated porous media—Modification of the U.S. Geological Survey's computer program VS2DT[R]. *Water resources investigation report 96-4230*. Denver, Colorado: U.S. Geological Survey.
- Hinkel K M, Arp C D, Townsend-Small A, et al. 2017. Can deep groundwater influx be detected from the geochemistry of thermokarst lakes in arctic Alaska[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(3): 552-557.
- Hoffmann J P, Ripich M A, Ellett K M. 2002. Characteristics of shallow deposits beneath Rillito Creek, Pima County, Arizona[R]. *Water-resources investigations report 01-4257*. Tucson, AZ: US Geological Survey: 42.
- Huang X, Andrews C B, Liu J, et al. 2016. Assimilation of temperature and hydraulic gradients for quantifying the spatial variability of streambed hydraulics[J]. *Water Resources Research*, 52(8): 6419-6439.
- Hunt B. 1999. Unsteady stream depletion from ground water pumping[J]. *Ground Water*, 37(1): 98-102.
- Hvorslev M J. 1951. Time lag and soil permeability in groundwater observations[R]. *Waterways experiment station bulletin 36*. Vicksburg, MS: US Army Corps of Engineers.
- Hyun Y, Kim H, Lee S-S, et al. 2011. Characterizing streambed water fluxes using temperature and head data on multi-

- ple spatial scales in Munsan stream, South Korea[J]. *Journal of Hydrology*, 402(3-4): 377-387.
- Jolly I D, McEwan K L, Holland K L. 2008. A review of groundwater-surface water interactions in arid/semi-arid wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology[J]. *Ecohydrology*, 1(1): 43-58.
- Kalbus E, Reinstorf F, Schirmer M. 2006. Measuring methods for groundwater-surface water interactions: A review[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(6): 873-887.
- Landon M K, Rus D L, Harvey F E. 2001. Comparison of in-stream methods for measuring hydraulic conductivity in sandy streambeds[J]. *Ground Water*, 39(6): 870-885.
- Lapham W W. 1989. Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity[R]. US Geological Survey water-supply paper 2337. Denver, Colorado: USGS Numbered Series: 35.
- Liao C, Zhuang Q H. 2017. Quantifying the role of permafrost distribution in groundwater and surface water interactions using a three-dimensional hydrological model[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 49(1): 81-100.
- Liu X, Yu J J, Wang P, et al. 2016. Lake evaporation in a hyper-arid environment, northwest of China—measurement and estimation[J]. *Water*, 8(11): 527.
- Lundquist J D, Lott F. 2008. Using inexpensive temperature sensors to monitor the duration and heterogeneity of snow-covered areas[J]. *Water Resources Research*, 44(4): W00D16.
- McCallum A M, Andersen M S, Rau G C, et al. 2014. River-aquifer interactions in a semiarid environment investigated using point and reach measurements[J]. *Water Resources Research*, 50(4): 2815-2829.
- Min L L, Yu J J, Liu C M, et al. 2013. The spatial variability of streambed vertical hydraulic conductivity in an intermittent river, northwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 69(3): 873-883.
- Morin E, Grodek T, Dahan O, et al. 2009. Flood routing and alluvial aquifer recharge along the ephemeral arid Kuiseb River, Namibia[J]. *Journal of Hydrology*, 368(1-4): 262-275.
- Mutiti S, Levy J. 2010. Using temperature modeling to investigate the temporal variability of riverbed hydraulic conductivity during storm events[J]. *Journal of Hydrology*, 388(3-4): 321-334.
- Niswonger R G, Prudic D E. 2005. Documentation of the Streamflow-Routing (SFR2) Package to include unsaturated flow beneath streams—A modification to SFR1[R]. U. S. Geological Survey techniques and methods 6-A13. Denver, Colorado: U.S. Geological Survey.
- Noorduijn S L, Shanafield M, Trigg M A, et al. 2014. Estimating seepage flux from ephemeral stream channels using surface water and groundwater level data[J]. *Water Resources Research*, 50(2): 1474-1489.
- Partington D, Therrien R, Simmons C T, et al. 2017. Blueprint for a coupled model of sedimentology, hydrology, and hydrogeology in streambeds[J]. *Reviews of Geophysics*, 55(2): 287-309.
- Pekel J-F, Cottam A, Gorelick N, et al. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. *Nature*, 540: 418-422.
- Pozdniakov S P, Wang P, Lekhov M V. 2016. A semi-analytical generalized Hvorslev formula for estimating riverbed hydraulic conductivity with an open-ended standpipe permeameter[J]. *Journal of Hydrology*, 540: 736-743.
- Prudic D E, Konikow L F, Banta E R. 2004. A new streamflow-routing (SFR1) package to simulate stream-aquifer interaction with MODFLOW-2000[R]. U.S. Geological Survey, open-file report 2004-1042. Carson, Nevada: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Rau G C, Halloran L J S, Cuthbert M O, et al. 2017. Characterising the dynamics of surface water-groundwater interactions in intermittent and ephemeral streams using streambed thermal signatures[J]. *Advances in Water Resources*, 107: 354-369.
- Reid M E, Dreiss S J. 1990. Modeling the effects of unsaturated, stratified sediments on groundwater recharge from intermittent streams[J]. *Journal of Hydrology*, 114(1-2): 149-174.
- Rimon Y, Nativ R, Dahan O. 2011. Vadose zone water pressure variation during infiltration events[J]. *Vadose Zone Journal*, 10(3): 1105-1112.
- Rivière A, Gonçalves J, Jost A, et al. 2014. Experimental and numerical assessment of transient stream-aquifer exchange during disconnection[J]. *Journal of Hydrology*, 517: 574-583.
- Ronan A D, Prudic D E, Thodal C E, et al. 1998. Field study and simulation of diurnal temperature effects on infiltration and variably saturated flow beneath an ephemeral stream[J]. *Water Resources Research*, 34(9): 2137-2153.
- Rosenberry D O. 2008. A seepage meter designed for use in flowing water[J]. *Journal of Hydrology*, 359(1-2): 118-130.
- Rosenberry D O, LaBaugh J W. 2008. Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water [R]. Techniques and methods chapter 4-D2. Reston, VA: U. S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Rosenberry D O, Pitlick J. 2009. Local-scale variability of seepage and hydraulic conductivity in a shallow gravel-bed river[J]. *Hydrological Processes*, 23(23): 3306-3318.
- Roshan H, Rau G C, Andersen M S, et al. 2012. Use of heat as

- tracer to quantify vertical streambed flow in a two-dimensional flow field[J]. *Water Resources Research*, 48(10): W10508.
- Scanlon B R, Healy R W, Cook P G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge[J]. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 18-39.
- Schmidt C, Conant Jr B, Bayer-Raich M, et al. 2007. Evaluation and field-scale application of an analytical method to quantify groundwater discharge using mapped streambed temperatures[J]. *Journal of Hydrology*, 347(3-4): 292-307.
- Selker J S, Thévenaz L, Huwald H, et al. 2006. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems[J]. *Water Resources Research*, 42(12): W12202.
- Simpson S C, Meixner T. 2012. Modeling effects of floods on streambed hydraulic conductivity and groundwater-surface water interactions[J]. *Water Resources Research*, 48(2): W02515.
- Šimůnek J, van Genuchten M T. 2008. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS[J]. *Vadose Zone Journal*, 7(2): 782-797.
- Šimůnek J, van Genuchten M T, Šejna M. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes[J]. *Vadose Zone Journal*, 7(2): 587-600.
- Šimůnek J, van Genuchten M T, Šejna M. 2016. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages[J]. *Vadose Zone Journal*, 15(7): 25.
- Song J X, Chen X H, Cheng C, et al. 2009. Feasibility of grain-size analysis methods for determination of vertical hydraulic conductivity of streambeds[J]. *Journal of Hydrology*, 375(3-4): 428-437.
- Song J X, Chen X H, Cheng C. 2010. Observation of bioturbation and hyporheic flux in streambeds[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 4(3): 340-348.
- Tang Q, Kurtz W, Schilling O S, et al. 2017. The influence of riverbed heterogeneity patterns on river-aquifer exchange fluxes under different connection regimes[J]. *Journal of Hydrology*, 554: 383-396.
- Tian Y, Zheng Y, Wu B, et al. 2015. Modeling surface water-groundwater interaction in arid and semi-arid regions with intensive agriculture[J]. *Environmental Modelling & Software*, 63: 170-184.
- Tian Y, Zheng Y, Zheng C M, et al. 2015. Exploring scale-dependent ecohydrological responses in a large endorheic river basin through integrated surface water-groundwater modeling[J]. *Water Resources Research*, 51(6): 4065-4085.
- Tooth S. 2000. Process, form and change in dryland rivers: A review of recent research[J]. *Earth-Science Reviews*, 51(1-4): 67-107.
- Turner K W, Edwards T W D, Wolfe B B. 2014. Characterising runoff generation processes in a lake-rich thermokarst landscape (Old Crow Flats, Yukon, Canada) using $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and d-excess measurements[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 25(1): 53-59.
- van Genuchten M T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5): 892-898.
- Vandersteen G, Schneidewind U, Anibas C, et al. 2015. Determining groundwater-surface water exchange from temperature-time series: Combining a local polynomial method with a maximum likelihood estimator[J]. *Water Resources Research*, 51(2): 922-939.
- Villeneuve S, Cook P G, Shanafield M, et al. 2015. Groundwater recharge via infiltration through an ephemeral riverbed, central Australia[J]. *Journal of Arid Environments*, 117: 47-58.
- Vogt T, Schirmer M, Cirpka O A. 2012. Investigating riparian groundwater flow close to a losing river using diurnal temperature oscillations at high vertical resolution[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(2): 473-487.
- Vogt T, Schneider P, Hahn-Woernle L, et al. 2010. Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiber-optic high-resolution vertical temperature profiling[J]. *Journal of Hydrology*, 380(1-2): 154-164.
- Walvoord M A, Striegl R G. 2007. Increased groundwater to stream discharge from permafrost thawing in the Yukon River basin: Potential impacts on lateral export of carbon and nitrogen[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(12): L12402.
- Wang G X, Hu H C, Li T B. 2009. The influence of freeze-thaw cycles of active soil layer on surface runoff in a permafrost watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 375(3-4): 438-449.
- Wang P, Pozdniakov S P, Shestakov V M. 2015. Optimum experimental design of a monitoring network for parameter identification at riverbank well fields[J]. *Journal of Hydrology*, 523: 531-541.
- Wang P, Pozdniakov S P, Vasilevskiy P Y. 2017. Estimating groundwater-ephemeral stream exchange in hyper-arid environments: Field experiments and numerical simulations[J]. *Journal of Hydrology*, 555: 68-79.
- Wang P, Yu J J, Pozdniakov S P, et al. 2014. Shallow groundwater dynamics and its driving forces in extremely arid areas: A case study of the lower Heihe River in northwestern China[J]. *Hydrological Processes*, 28(3): 1539-1553.
- Wang P, Yu J J, Zhang Y C, et al. 2011. Impacts of environmental flow controls on the water table and groundwater chemistry in the Ejina Delta, northwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 64(1): 15-24.
- Wang P, Zhang Y C, Yu J J, et al. 2011. Vegetation dynamics

- induced by groundwater fluctuations in the lower Heihe River Basin, northwestern China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 4(1-2): 77-90.
- Wang W K, Dai Z X, Zhao Y Q, et al. 2016. A quantitative analysis of hydraulic interaction processes in stream-aquifer systems[J]. *Scientific Reports*, 6: 19876.
- Weber M D, Booth E G, Loheide S P. 2013. Dynamic ice formation in channels as a driver for stream-aquifer interactions[J]. *Geophysical Research Letters*, 40(13): 3408-3412.
- Wheater H S, Mathias S A, Li X. 2010. *Groundwater modeling in arid and semi-arid areas*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Winter T C. 1995. Recent advances in understanding the interaction of groundwater and surface water[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(S2): 985-994.
- Wu B, Zheng Y, Wu X, et al. 2015. Optimizing water resources management in large river basins with integrated surface water-groundwater modeling: A surrogate-based approach[J]. *Water Resources Research*, 51(4): 2153-2173.
- Wu G D, Shu L C, Lu C P, et al. 2015. Variations of streambed vertical hydraulic conductivity before and after a flood season[J]. *Hydrogeology Journal*, 23(7): 1603-1615.
- Xi H Y, Zhang L, Feng Q, et al. 2015. The spatial heterogeneity of riverbed saturated permeability coefficient in the lower reaches of the Heihe River Basin, Northwest China [J]. *Hydrological Processes*, 29(23): 4891-4907.
- Xie Y Q, Cook P G, Brunner P, et al. 2014. When can inverted water tables occur beneath streams[J]. *Groundwater*, 52(5): 769-774.
- Yager R M. 1993. Estimation of hydraulic conductivity of a riverbed and aquifer system on the Susquehanna River in Broome County, New York[R]. USGS water supply paper 2387. New York: U.S. Geological Survey.
- Yao Y Y, Huang X, Liu J, et al. 2015. Spatiotemporal variation of river temperature as a predictor of groundwater/surface-water interactions in an arid watershed in China[J]. *Hydrogeology Journal*, 23(5): 999-1007.
- Yao Y Y, Zheng C M, Liu J, et al. 2015. Conceptual and numerical models for groundwater flow in an arid inland river basin[J]. *Hydrological Processes*, 29(6): 1480-1492.
- Yao Y Y, Zheng C M, Tian Y, et al. 2015. Numerical modeling of regional groundwater flow in the Heihe River Basin, China: Advances and new insights[J]. *Science China Earth Sciences*, 58(1): 3-15.
- Zhang Y C, Yu J J, Wang P, et al. 2011. Vegetation responses to integrated water management in the Ejina basin, northwest China[J]. *Hydrological Processes*, 25(22): 3448-3461.

Progress and prospect of research on water exchange between intermittent rivers and aquifers in arid regions of northwestern China

WANG Ping

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Incorporating the research results of the the National Natural Science Foundation supported project "Quantifying the effect of river water temperature on riverbed hydraulic conductivity of broad-shallow rivers in the arid area" (No. 41301025), this article summarizes the basic scientific issues and the current research progress in the field of water exchange between intermittent rivers and aquifers in arid areas of northwestern China. Riverbed at the lower reaches of rivers in the arid regions of northwestern China is shallow, wide, and sandy. Such riverbed experiences several dry/wet alternations and freezing-thawing process each year. Due to the influence of river temperature and river flow conditions, the riverbed as an important interface of river-aquifer systems exerts significant temporal and spatial variability, which has become a key issue in understanding surface water and groundwater exchange. Hyporheic zone hydrology, which focuses on river-aquifer interaction, is facing new opportunities and challenges under the current changing environment and rapidly developing interdisciplinary research.

Key words: surface water-groundwater transfer; riverbed hydraulic conductivity; hydrological process; arid area