

doi:10.3799/dqkx.2017.054

# 潜流带水文—生物地球化学:原理、方法及其生态意义

杜尧<sup>1,2</sup>, 马腾<sup>1,2\*</sup>, 邓娅敏<sup>2,3</sup>, 廖曼<sup>1,2</sup>, 郑倩琳<sup>1,2</sup>

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074

**摘要:**精确量化潜流带水文交换和生物地球化学反应一直是一个挑战,潜流带水文—生物地球化学研究的核心任务是将小尺度上的水文通量及生物地球化学反应动力学与更大尺度上它们对河流水质和生态的累积效应关联起来。基于潜流带水文—生物地球化学耦合原理,系统综述了渗流仪测量、测压管测量、示踪剂注射试验、温度示踪等潜流带水文学研究方法以及野外示踪试验、室内培养试验等生物地球化学研究方法,针对性地评述了潜流带水文—生物地球化学过程在更大尺度上的累积效应及其对河流生态系统的重要意义,并指出未来的研究将从潜流带研究技术方法的先进化、水文地貌理论与模型的深入化和潜流带生物地球化学过程的尺度化等方面持续地发展。

**关键词:**潜流带;生物地球化学;多尺度;生态;水文地质。

中图分类号: P641.3

文章编号: 1000-2383(2017)05-0661-13

收稿日期: 2017-01-03

## Hydro-Biogeochemistry of Hyporheic Zone: Principles, Methods and Ecological Significance

Du Yao<sup>1,2</sup>, Ma Teng<sup>1,2\*</sup>, Deng Yamin<sup>2,3</sup>, Liao Man<sup>1,2</sup>, Zheng Qianlin<sup>1,2</sup>

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** It is always challenging to quantify precisely the hydrologic exchange and biogeochemical reaction in hyporheic zone. The core task for the research of hydro-biogeochemistry in hyporheic zone is to associate the hydrologic flux and biogeochemical reaction dynamics on small scale, with their cumulative effect on water quality and ecology of rivers on larger scale. This paper presents the basic principles of hydrology-biogeochemistry coupling in hyporheic zone, and systematically summarizes hydrologic approaches including measurement by seepage meter, piezometer measuring, tracer injection experiment, streambed temperature profile, environmental tracer and mass balance, and biogeochemical approaches including field tracer experiment and indoor incubation experiment. In addition, this paper specifically illustrates the cumulative effect of hydrologic and biogeochemical processes in hyporheic zone for larger scale, and its ecological significance. It is suggested that the future research on hyporheic zone science shall focus on the advance of research methods, development of hydrogeomorphic theory and model, and up scaling of biogeochemical processes in hyporheic zone.

**Key words:** hyporheic zone; biogeochemistry; multi-scale; ecology; hydrogeology.

**基金项目:**中国地质调查局项目(Nos.121201001000150121,12120114069301);国家水体污染控制与治理科技重大专项(No.2012ZX07204-003-04)。  
**作者简介:**杜尧(1989—),男,博士研究生,主要从事地表水—地下水相互作用、同位素水文学方面的研究。ORCID:0000-0002-5934-9288。

E-mail:cugduyao@aliyun.com

\***通讯作者:**马腾,ORCID:0000-0003-2827-9579.E-mail:mateng@cug.edu.cn

**引用格式:**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.地球科学,42(5):661—673.

## 0 引言

在水文循环中,地表水和地下水不是相互独立的,而是一个统一的系统,两者之间有着相互作用(Winter *et al.*, 1998; 邓娅敏等, 2015).地表水—地下水相互作用是当前水文学与水资源、生物地球化学等领域的研究热点,对于水资源管理、水体污染防治、生态恢复等具有十分重要的现实意义(Sophocleous, 2002).作为地表水与地下水相互作用的关键纽带,潜流带在流域水文循环和生物地球化学循环中扮演着重要角色.

潜流是指地表水迁移穿过沉积物,然后返回到地表水中(Harvey *et al.*, 1996; Storey *et al.*, 2003; Tonina, 2012).在穿过沉积物的过程中,潜流可与下伏地下水进行混合,对此, Triska *et al.*(1989)提出将有 10% 地表水渗入的范围作为潜流带的下界,这一提法至今仍被广泛使用.在过去数十年,潜流已成为河流生态学与生物地球化学的核心内容;越来越多的学者认识到河流与河漫滩进行侧向交换以及与下伏地下水进行垂向交换的重要性.

Tóth(1963)在地下水水流模式的开创性研究中当时就提出了地表水—地下水相互作用研究的若干前沿问题,特别是不同级次地下水水流系统对地表水基流的贡献.Vaux(1968)首次建立了基于物理过程的潜流模型,但未考虑其与地下水的相互作用.部分学者针对紊流流体与渗透壁面之间的水动力相互作用建立了理论模型(Ruff and Gelhar, 1972; Ho and Gelhar, 1973),但未考虑流体力学与潜流流动之间的关联性.Bencala and Walters(1983)和 Thibodeaux and Boyle(1987)分别在野外和室内利用截然不同的方法,定量表征了河水与沉积物之间的双向交换流.Harvey and Bencala(1993)以及 Elliott and Brooks(1997)通过对野外与室内数据进行模拟,为深入理解潜流及其与河水、地下水的相互作用奠定了基础.此后,学者们对潜流展开了多方面的探索,包括多尺度的侧向与垂向潜流流动路径(Wroblicky *et al.*, 1998; Storey *et al.*, 2003)、潜流流动变化的效应(Wondzell and Swanson, 1996a, 1996b)、潜流与生态的关系(Stream Solute Workshop, 1990)、潜流在细粒沉积物迁移中的作用(Packman and Brooks, 1995)、不同类型水文地貌特征对潜流的影响(Hester and Doyle, 2008; Sawyer *et al.*, 2011).

地表水通过潜流带与河漫滩以及下伏地下水进行持续交换(Standford and Ward, 1993; Buffington

and Tonina, 2009),减缓了其中溶解物质和悬浮物质的运移,有利于许多生物地球化学过程的进行,包括氮循环(Duff and Triska, 2000; Mulholland *et al.*, 2008; Böhlke *et al.*, 2009)、金属形态变化(Bourg and Bertin, 1993; Fuller and Harvey, 2000; Palumbo-Roe *et al.*, 2012)、有机碳代谢(Kim *et al.*, 1995; Battin *et al.*, 2008)、有机污染物生物降解(Kim *et al.*, 1995; Conant *et al.*, 2004).潜流带对物质的转化与阻滞机制包括:被河底沉积物吸附、化学还原与氧化、固相物质沉淀与溶解以及各种由微生物介导的生物化学反应(Bencala *et al.*, 1984; Mulholland *et al.*, 1997; Baker *et al.*, 2000; Battin *et al.*, 2003, 2008; McKnight *et al.*, 2004; Ren and Packman, 2004, 2005).潜流交换也可以通过沉淀和过滤的方式促进悬浮物质的沉积,从而导致各种颗粒态组分(金属、磷、有机碳等)的滞留(Hendricks and White, 2000; Newbold *et al.*, 2005; Harvey *et al.*, 2012).

较长的滞留时间、较强的化学梯度、多样的微生物代谢和加速的反应速率使得潜流带生物地球化学过程强烈地改变着整个河流网络的地表水水质(Harvey and Fuller, 1998; McClain *et al.*, 2003; Gandy *et al.*, 2007; Harvey *et al.*, 2013).然而,将小尺度上的水文通量及生物地球化学反应动力学与更大尺度(河段、河网、盆地)上它们对河流水质和河流生态的累积效应关联起来,一直是一个重要挑战(Battin *et al.*, 2008; Boano *et al.*, 2014),同时也将是潜流带水文—生物地球化学研究中一项长期的核心任务.

潜流带科学的持续发展离不开潜流带水文学及生物地球化学研究技术方法的同步发展,精确量化潜流带水文交换和生物地球化学反应是此领域所有研究的基础.尽管大量的技术方法不断涌现,但由于潜流流动固有的多尺度特征以及空间变异性,精确量化潜流交换将是一个重要挑战.本文在阐述潜流带水文—生物地球化学耦合原理的基础上,系统综述了潜流带水文学与生物地球化学研究的前沿技术与方法,评述了开展潜流带水文—生物地球化学研究对于河流生态系统的重要意义.

## 1 潜流带水文—生物地球化学耦合的基本原理

在大部分河流底部都存在一个从氧化性、阳光

照射、开阔水面的环境到一个还原性、黑暗、迁移受限的环境的过渡,这些性质的急剧转变对于生物地球化学过程至关重要。因为这一关键过渡带(潜流带)的存在,使河流不仅仅被看成一个管道,更被视为发生着迁移、储积、化学反应和生物生产等多过程的有机系统(Harvey and Gooseff, 2015)。

潜流带中化学反应的强度直接影响着水生生态系统中物质的归趋(衰减或释放),其对整个河流网络物质质量平衡的贡献取决于水文学与生物地球化学两方面的因素。水文学因素是指携带化学物质的潜流流动的空间和时间尺度,在化学反应速率相同的情况下,更大空间尺度和更长时间尺度的潜流流动在更大程度上影响着物质的归趋。潜流流动的空间尺度即潜流带空间范围,常用潜流带的储积厚度或横截面积来表征,但其落脚点在于获取潜流水动力交换量;而时间尺度则用潜流带中的水文滞留时间来表征。生物地球化学因素是指特定化学过程的反应强度,常用化学反应速率来表征,在水文条件相似的情况下,更快的化学反应速率更有利于物质的衰减或释放。

潜流带水文—生物地球化学耦合,即同时考虑潜流带水文过程和生物地球化学过程的权重,特别是对比水动力迁移与化学反应的时间尺度,评价其对整个水生生态系统物质循环的贡献。当潜流水动力迁移的时间尺度短于化学反应的时间尺度时,需要经过多次潜流循环才能使反应完成,此时潜流带

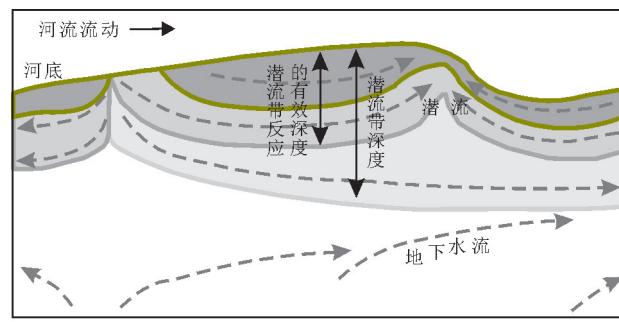


图1 水文迁移与生物地球化学反应对潜流带反应程度控制的原理

Fig.1 The sketch for the control of hydrologic transport and biogeochemical process on hyporheic zone reaction progress

潜流带反应程度在浅层潜流路径上可能受限于反应而在深层潜流路径上可能受限于迁移,反应时间尺度和迁移时间尺度的差异会导致潜流带反应的有效深度与实际潜流带深度不一致。改自 Harvey *et al.*(2013)

反应程度受限于化学反应,限制因素为沉积物的内在性质;而当潜流水动力迁移的时间尺度长于化学反应的时间尺度时,反应物会在潜流流动过程中被消耗完全,此时潜流带反应程度受限于迁移,限制因素为潜流水动力交换量(图1)。仅仅当潜流水动力迁移的时间尺度与化学反应的时间尺度接近时,潜流带生物地球化学过程对于物质归趋的影响最为显著。作为一种简单而有效的方式,达姆科勒数(damkohler number,  $Da_{hz}$ )被广泛用于比较迁移与反应的时间尺度(Gu *et al.*, 2007; Zarnetske *et al.*, 2012),  $Da_{hz} = T_r / T_t = \lambda_{hz} \tau_{hz}$  ( $T_r$ ,  $T_t$ ,  $\lambda_{hz}$ ,  $\tau_{hz}$  分别表示迁移时间尺度、反应时间尺度、一级反应速率常数和水文滞留时间);  $Da_{hz} < 1$  指示受限于反应,  $Da_{hz} > 1$  指示受限于迁移,其越接近于1,潜流反应的程度越显著。

## 2 潜流带水文学与生物地球化学的研究技术与方法

### 2.1 潜流带水动力交换量与滞留时间的量化

由上述潜流带水文—生物地球化学耦合的原理可以看出,潜流水动力交换量和滞留时间的获取至关重要。大量的技术方法被用于量化这两个重要的潜流带水文学参数,其中部分方法可以同时获取交换量和滞留时间,而部分方法只能针对其一,本部分将一起进行论述。

**2.1.1 渗流仪测量** 仅针对交换量的测定,利用渗流仪直接测定通过河床的渗漏量。Lee(1977)最早设计了袋式渗流仪,当地下水流向地表水时,单位时间内进入收集袋的流体体积即为交换量;而当地表水流向地下水时,收集袋内预先充入一定体积的水,单位时间内收集袋中流体体积的减少量即为交换量。但随着研究的深入,此方法的精确性开始受到挑战,例如当水流通过收集袋上方时可能影响袋内的水头,也可能会扭曲或者折叠收集袋,从而影响测量结果,特别是应用于水动力条件较强的河流环境中时(Murdoch and Kelly, 2003)。由于袋式渗流仪潜在的问题,各种类型的自动渗流仪相继出现,包括热脉冲仪(Taniguchi and Fukuo, 1993)、超声波脉冲仪(Paulsen *et al.*, 2001)和电磁仪(Rosenberry and Morin, 2004),研究者通过它们监测出的水管水流速度来计算得到交换量等。渗流仪测量所得到的结果只针对特定的空间和时间点,因此要想获取一片

区域或一段时间内的平均交换量,需要通过多点或多频率的测量来实现(Kalbus *et al.*, 2006; Rosenberry *et al.*, 2013)。

**2.1.2 测压管测量结合达西定律** 仅针对潜流交换量的测定,通过获取水力梯度与河床渗透系数,并基于达西定律计算得到交换量,即  $q = -K \cdot dh/dl$  ( $K$ ,  $dh$  和  $dl$  分别代表渗透系数、水头和距离)(Baxter *et al.*, 2003; Rivett *et al.*, 2008)。水力梯度包括横向和垂向两方面,但垂向水力梯度对于理解地下水与地表水的相互作用更为关键,其通过同一位置不同深度测压管的水头值计算得到。基于批量的水力梯度结果,地下水与地表水之间的补排关系以及地表水附近的地下水水流特征均可以比较容易地获取。由于测压管中的水位是动态变化的,因此某片区域或场地的水位必须在几乎相同的时间点进行测定,或者在测压管中安装水位自动监测探头。

河床渗透系数可通过多种方法获取:(1)颗粒粒度分析(Shepherd, 1989),即通过典型粒度参数与渗透系数的经验关系获取,但此方法精确性难以保证,一般仅用于实际野外工作之前的方案设计中作为参考;(2)室内渗流试验(Todd and Mays, 2005),即从野外用储水管采集原状柱状沉积物,在室内通过降水头试验或者定水头试验,基于水头变化、时间和储水管结构等参数,计算得到渗透系数;(3)微水试验(Bouwer and Rice, 1976; Conant, 2004; 刘颖等, 2015),即向测压管中瞬时注入或移除已知体积的水,由水位恢复过程中水头与时间的关系,以求得渗透系数。

**2.1.3 示踪剂注射试验** 可同时得到交换量和滞留时间,通过在河段上游注射保守性示踪剂,选取河段下游典型断面,在不同时间点,同时采集地表水和河底不同深度孔隙水,分析示踪剂浓度。基于地表水和不同深度孔隙水的穿透曲线,可以直接得到潜流带深度和水文滞留时间(Triska *et al.*, 1993; Harvey *et al.*, 1996);通过地表水和不同深度孔隙水的峰值浓度,以及地下水的背景浓度,计算不同深度的混合比,以 10% 地表水渗入的深度作为潜流带深度;对于不同深度孔隙水的穿透曲线,以示踪剂浓度达到峰值浓度一半所对应的时间作为滞留时间。

示踪试验结果可以进一步通过经典的暂时性储积模型(transient storage model, 简称 TSM)分析(Bencala and Walters, 1983; Harvey and Wagner, 2000),其将物质在河流系统中的迁移转化过程分为 4 项:对流、弥散、储积和反应(图 2)。通过将模拟结

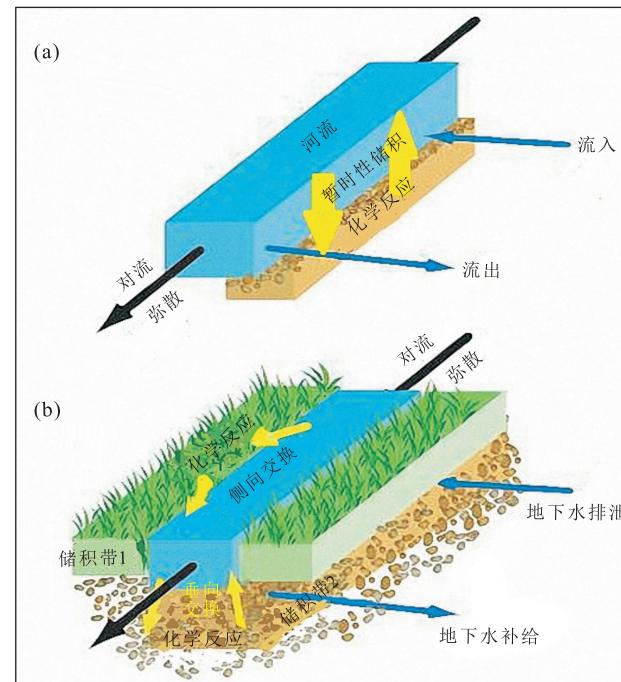


图 2 暂时性储积模型的概念图解

Fig.2 Conceptual scheme of transient storage model (TSM)  
a. 表示仅考虑垂向交换;b. 表示同时考虑垂向和侧向交换. 改自 Harvey and Gooseff(2015)

果与观测结果进行对照验证,可以大大提高结果的可信度。模型方程如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{q_L}{A} (C_L - C) + \alpha (C_s - C), \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \alpha \frac{A}{A_s} (C - C_s), \quad (2)$$

式中: $C$ 、 $C_s$ 、 $C_L$  为地表水、潜流带和地下水中示踪剂浓度; $t$  和  $x$  为注射开始后的时间和注射点下游方向的距离; $Q$  和  $q_L$  为地表水流量和地下水流入量; $D$  和  $\alpha$  为河流纵向弥散系数和潜流带交换系数; $A$  和  $A_s$  为河流和潜流带的横截面积。

$Q$  和  $q_L$  可以通过稀释计量法(Kilpatrick and Cobb, 1985)得到;剩下的参数( $D$ 、 $\alpha$ 、 $A$ 、 $A_s$ )可以通过模型对地表水中示踪剂穿透曲线进行拟合来得到。基于得到的参数,潜流带深度( $d_{hz}$ )和水文滞留时间( $\tau$ )可以通过计算得到,即  $d_{hz} = A_s / \omega n$ ,  $\tau = A_s / \alpha A$ ( $\omega$  和  $n$  分别代表河流平均宽度和河床孔隙度)。基于以上参数,潜流水动力交换量可最终得到: $q_{hz} = d_{hz} \theta / \tau$ ( $\theta$  为河床孔隙度)。

**2.1.4 河底温度示踪** 主要用于测定交换量,而较少被用于测定滞留时间,其是利用地表水与不同深度地下水温度信号的时间序列,结合其他参数计算

得到潜流交换量(Constantz, 1998; Anderson, 2005; Keery *et al.*, 2007; 马瑞等, 2013). 热量在地下介质中的迁移由对流性热迁移和传导性热迁移组成, 其可以由一维热运移方程来表征:

$$\frac{\lambda_e}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - q \frac{\rho_w c_w}{\rho c} \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

式中:  $T$  为温度,  $t$  为时间,  $z$  为垂向距离,  $q$  是渗流交换量,  $\rho$  和  $\rho_w$  为饱水沉积物和上覆水的密度,  $c$  和  $c_w$  为饱水沉积物和上覆水的比热容,  $\lambda_e$  为饱水沉积物的有效热传导系数. 由于不同岩性河底沉积物的热力学参数差异较小, 其可从已有文献中获取(Gordon *et al.*, 2012). 自从 Stallman(1965)首次建立精确的解析解以来, 针对热运移方程的各种解析方法和数值方法(Hatch *et al.*, 2006; Keery *et al.*, 2007)不断涌现, 并仍在持续地发展. 基于这些方法, 相关的程序代码已被开发, 如 VFLUX(Gordon *et al.*, 2012)和 Ex-stream(Swanson and Cardenas, 2011). 最近, 分布式温度传感技术的应用更是可以同时高精度地获取整个河段纵向的温度记录和潜流带垂向的温度记录(Briggs *et al.*, 2012). 然而, 温度示踪只能测定一定范围内的交换量, 交换量过大或过小均会使其敏感性大大降低.

### 2.1.5 环境示踪剂

此方法总体上可以分为两个方面, 一是基于非反应性环境示踪剂在河底沉积物孔隙水中的垂向浓度梯度, 并结合其他条件, 半定量地得到交换量, 其要求示踪剂浓度在地表水和地下水端元具有显著的差异性, 故可靠性难以保证; 二是基于放射性示踪剂在沉积物孔隙水中的浓度梯度, 定量得到水文滞留时间和潜流交换量, 现以被广泛使用的<sup>222</sup>Rn为例来论述.

<sup>222</sup>Rn是半衰期为3.8 d的惰性气体, 其在孔隙水中的来源包括沉积物表面<sup>226</sup>Ra的衰减、矿物晶体的<sup>222</sup>Rn的扩散和排出(Cecil and Green, 2000), 而其在地表水中的含量却低得多(Cook *et al.*, 2006). 由于相对较短的半衰期, 河底沉积物孔隙水中的<sup>222</sup>Rn原理上将会与其母体<sup>226</sup>Ra快速达到稳定状态, 但由于潜流交换的存在, 稳定状态下<sup>222</sup>Rn的浓度将由于地表水的稀释而比理论上低, 这种理论上和实际测量之间的差异被用于估算潜流滞留时间(Lamontagne and Cook, 2007):

$$t_h = \frac{c - c_h}{\lambda c_h - \gamma}, \quad (4)$$

式中:  $c$  和  $c_h$  代表地表水和潜流带孔隙水中的<sup>222</sup>Rn浓度;  $\gamma$  代表潜流带中<sup>222</sup>Rn的产生速率;  $\lambda$  代表

<sup>222</sup>Rn的衰减系数. 基于获取的滞留时间, 潜流水动力交换量可最终计算得到:  $q_{hz} = z\theta/t_h$  ( $z$  和  $\theta$  分别表示沉积物深度和河床孔隙度).

以上“<sup>222</sup>Rn非平衡法”并未考虑扩散和弥散过程, 潜流水动力交换量可以通过求解包含衰减和生成过程的一维对流—弥散方程来获取(Cranswick *et al.*, 2014):

$$\frac{\partial A}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{q_{hz}}{\theta} \frac{\partial A}{\partial z} - \lambda A + \gamma, \quad (5)$$

式中:  $A$  代表<sup>222</sup>Rn浓度;  $D_e$  为有效弥散系数; 其余参数的意义同上.

### 2.1.6 河流流量监测结合质量平衡

仅针对交换量的测定, 通过监测河流流量变化并结合其他条件推算其与地下水的交换量(Christensen *et al.*, 1998). 此方法可以通过2种渠道来实现:(1)通过测定连续的河流断面流量, 基于不同断面之间流量的差异, 计算其与地下水的净交换量, 若结合河流不同断面和地下水中保守性示踪剂的浓度, 还可计算得到地下水的流入量和流出量;(2)对河流流量过程进行基流分割, 以基流作为地下水向地表水的排泄量, 大量的环境示踪剂被用于进行流量过程分割, 包括氢氧同位素、电导率等. 值得说明的是, 质量平衡方法得到的是更为广义上的地表水与地下水交换量, 而非实际意义上的潜流交换量.

在不同的空间和时间尺度上, 不同方法有着各自不同的优势、劣势和适用性(表1), 因此, 多种方法联合使用, 并相互验证各自结果的可靠性是当前潜流交换定量研究的主流趋势(González-Pinzón *et al.*, 2015).

## 2.2 潜流带化学反应速率的量化

通过潜流交换, 河源物质与河底沉积物进行相互作用, 在孔隙水中参与化学反应, 被沉积物中的微生物群落所代谢. 潜流带生物地球化学工作的核心在于量化特定过程的化学反应速率, 其总体上可以通过2种方式实现, 一是野外示踪试验, 二是室内培养实验.

### 2.2.1 野外示踪试验

方法同3.1.3小节“示踪剂注射试验”部分, 基于模型拟合获取的水文学参数( $D$ 、 $\alpha$ 、 $A$ 、 $A_s$ ), 反应速率可通过以下两个稳定状态方程求得:

$$0 = -\frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{q_L}{A} (C_L - C) + \alpha (C_s - C), \quad (6)$$

$$0 = \alpha \frac{A}{A_s} (C - C_s) - \lambda_s C_s, \quad (7)$$

表 1 量化潜流交换的主要方法  
Table 1 Primary methods for quantifying hyporheic exchange

方法	空间尺度	时间尺度	优势	劣势
渗流仪测量	$\text{cm}^2 \sim \text{m}^2$	数小时~数月	可直接量化渗流速率、可多次使用、价格低廉	只能针对时间和空间点、交换量较小时结果可能存在不确定性
测压管测量	$\text{cm}^2 \sim \text{m}^2$	数秒~数分	可简单而精确地获取水力梯度	只能针对时间和空间点、需人工密集安装
示踪剂注射试验	$10 \text{ m}^2 \sim \text{km}^2$	数小时~数天	可评价整个河段的流量、损失及侧向流入量	无法识别长时间尺度的潜流路径；结果可能因示踪剂被吸附而受影响
河底温度示踪	$\text{cm}^2 \sim \text{m}^2$	数秒~数月	低廉的价格、精确的温度测量、长时间的热记录、可识别渗流速率和方向	只能针对空间点、不能识别地下流动的补给
环境示踪剂	$\text{cm}^2 \sim \text{m}^2$	数分~数天	可直接测定示踪剂浓度、简单的质量平衡计算	只能针对时间和空间点、要求不同水体端元的浓度差异显著
质量平衡	$10 \text{ m}^2 \sim \text{km}^2$	数小时~数年	直接测量河水流量、简单的水量均衡计算	当流量较低或是紊流时难以测定、要求所有监测点的流量特征曲线

注：改自 Hatch *et al.*(2006)、Gonzalez-Pinzon *et al.*(2015) 和 Harvey and Gooseff(2015)。

式中： $\lambda_s$  为一级反应速率常数，其表征潜流带中某一组分的衰减或释放速率，为化学反应时间尺度的倒数；其他符号的意义与公式(1)和(2)相同。

当然，一级反应速率常数同样可以基于地表水与不同深度孔隙水中保守性组分和反应性组分的浓度梯度，通过质量平衡的方法来直接计算得到：

$$\lambda_h^{i+1/2} = \frac{C_h^i + \beta^{i+1/2} (C_L - C_h^i) - C_h^{i+1}}{\tau^{i+1/2} (C_h^{i+1} + C_h^i) / 2}, \quad (8)$$

式中： $C_h$  和  $C_L$  代表潜流带和地下水水中某种组分的浓度； $\beta$  代表孔隙水中地下水所占比例，由保守性组分浓度梯度计算得到； $\tau$  代表滞留时间； $i$  代表某一深度， $i+1$  代表下一深度， $i+1/2$  代表两点之间的平均深度。

通过以上模拟和计算，实际上只能得到某种组分的净衰减或者净释放量，而无法识别主控过程。要想定量表征特定生物地球化学过程的反应速率，需要在 3.1.3 小节的示踪剂注射试验中同时注射反应性示踪剂。以被广泛研究的反硝化过程为例，在上游注射  $^{15}\text{NO}_3^-$ ，通过在不同时间收集孔隙水中  $\text{N}_2$  并测定  $^{15}\text{N}_2$ ，可计算得到  $^{15}\text{N}_2$  产生速率，从而得到反硝化速率(Böhlke *et al.*, 2004)。

**2.2.2 室内培养试验** 通过室内培养实验测定某种反应过程速率的原理和方法是多种多样的，如直接测定反应物的减少量或者生成物的生成量、加入抑制剂排除相关过程的干扰等，但这些方法均存在诸多限制和不确定性。与野外示踪试验的原理类似，室内同位素示踪(标记)方法被广泛利用。笔者从野外采集原位沉积物，将其置于培养箱或培养瓶中，并保持与原位尽量接近的环境条件，注射反应性示踪剂，通过测定同位素标记的生成物产量，即可计算得

到特定过程的反应速率。以当前被学者们广泛关注的两大氮衰减过程——反硝化和厌氧氨氧化为例，通过注射  $^{15}\text{N}$  标记的  $\text{NO}_3^-$  进行培养实验，实验结束后分析培养液中的  $^{15}\text{NO}_3^-$  以及  $^{29}\text{N}_2$  和  $^{30}\text{N}_2$ ，最后利用特定的算法同时得到反硝化和厌氧氨氧化反应速率(Risgaard-Petersen *et al.*, 2003)。

值得注意的是，潜流带沉积物在空间上可能是高度非均质的，化学反应动力学受控于粒径、矿物、孔隙度、比表面积等诸多因素，非均质性影响着局部和整体的反应速率。相对于均质系统，非均质性的存在可能会使整体的反应速率产生数量级倍的差异(Liu *et al.*, 2013)，这使得将生物地球化学反应参数从实验室到野外的尺度化成为了当前研究的一项重要挑战(Liu *et al.*, 2014)。此外，潜流带也具有时间变异性，季节性的水位波动使得潜流带水文学与生物地球化学特征呈现季节性的变化，尤其体现在河水与河漫滩相互作用的河岸潜流带，这使得潜流带的动态监测工作逐渐被学者们重视。

### 3 潜流带水文—生物地球化学耦合的生态意义

#### 3.1 水文—生物地球化学过程的累积效应

将潜流带小尺度上的水文通量与生物地球化学反应动力学与更大尺度上它们对河流水质的累积效应关联起来，具有重要的生态意义，但也面临着巨大挑战(Battin *et al.*, 2008)。由于潜流带范围、水文交换量、残留时间等参数在大的空间尺度上无法直接测定，建立基于物理过程、同时又耦合了潜流交换及其对整个河流网络水质影响的模型是十分必要的。

河流网络模型对于理解大尺度上溶质的迁移和转化是一个十分重要的工具。然而,当前已有的模型往往是通过将质量衰减速率与河流运移时间耦合起来的经验常数来表征河流系统的生物地球化学过程,其对于分析量化过去和当前的趋势是十分有效的,但忽视了对将来的趋势有重要影响的过程——潜流交换。潜流交换被广泛认为对盆地尺度河流水质有重要控制,但潜流带中的水文过程和生物地球化学过程在已有河流网络模型中一直被忽视。

Harvey and Fuller(1998)和Harvey(2013)将潜流带水文因子和生物地球化学因子之间的关系公式化,提出了一个无量纲指数——“反应意义因子”(reaction significance factor, RSF),其可量化潜流带中水动力交换量、滞留时间和生物地球化学反应速率在累积效应中的权重,以及它们对下游水质的影响,将水文过程及生物地球化学过程从局部尺度拓展到了河盆尺度。其中,局部尺度的因子通过滞留时间和反应速率来表征,它们反映了潜流带化学反应的程度;而河盆尺度的因子则由河水在已知河段长度上通过潜流带循环的程度来表征(图3)。图3中的等值线表示,当河水与潜流带交换程度以及生物地球化学反应程度更高时,RSF具有更大的值,指

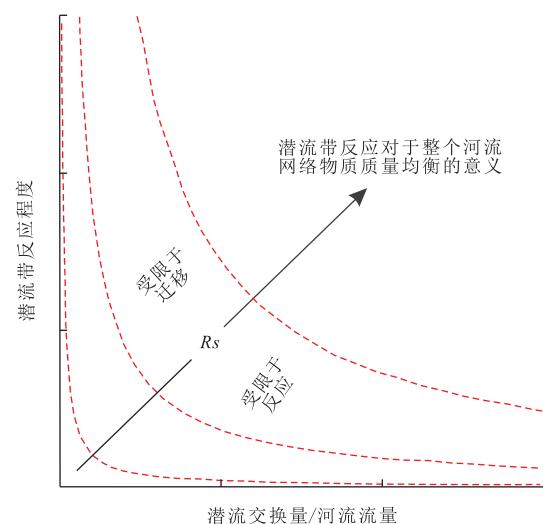


图 3 反应意义因子(RSF)的概念图解

Fig.3 Conceptual scheme of reaction significance factor (RSF)

改自 Harvey et al.(2013)

示着潜流带水文—生物地球化学过程对整个河流网络的物质质量均衡具有更重要的意义。

一个完整的河流网络往往由多种河流地貌组成,不同类型的河流地貌驱动着不同类型的潜流交换,包括受河底地形控制的垂向交换、受河流沙洲与河曲控制的侧向交换(图4)。Findlay(1995)指出,水

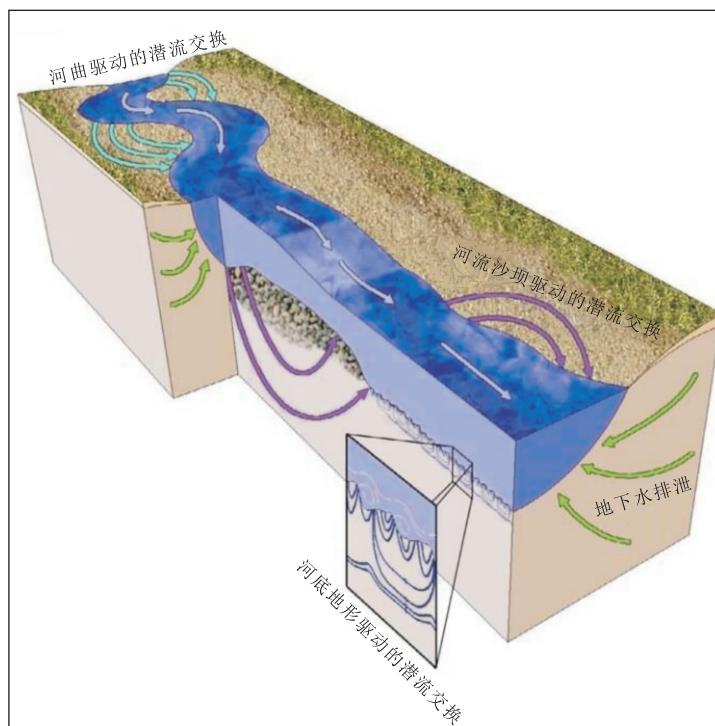


图 4 多尺度与多维潜流路径的模型

Fig.4 Conceptual scheme of multiscale and multidimensional hyporheic flow

改自 Stonedahl et al.(2010)

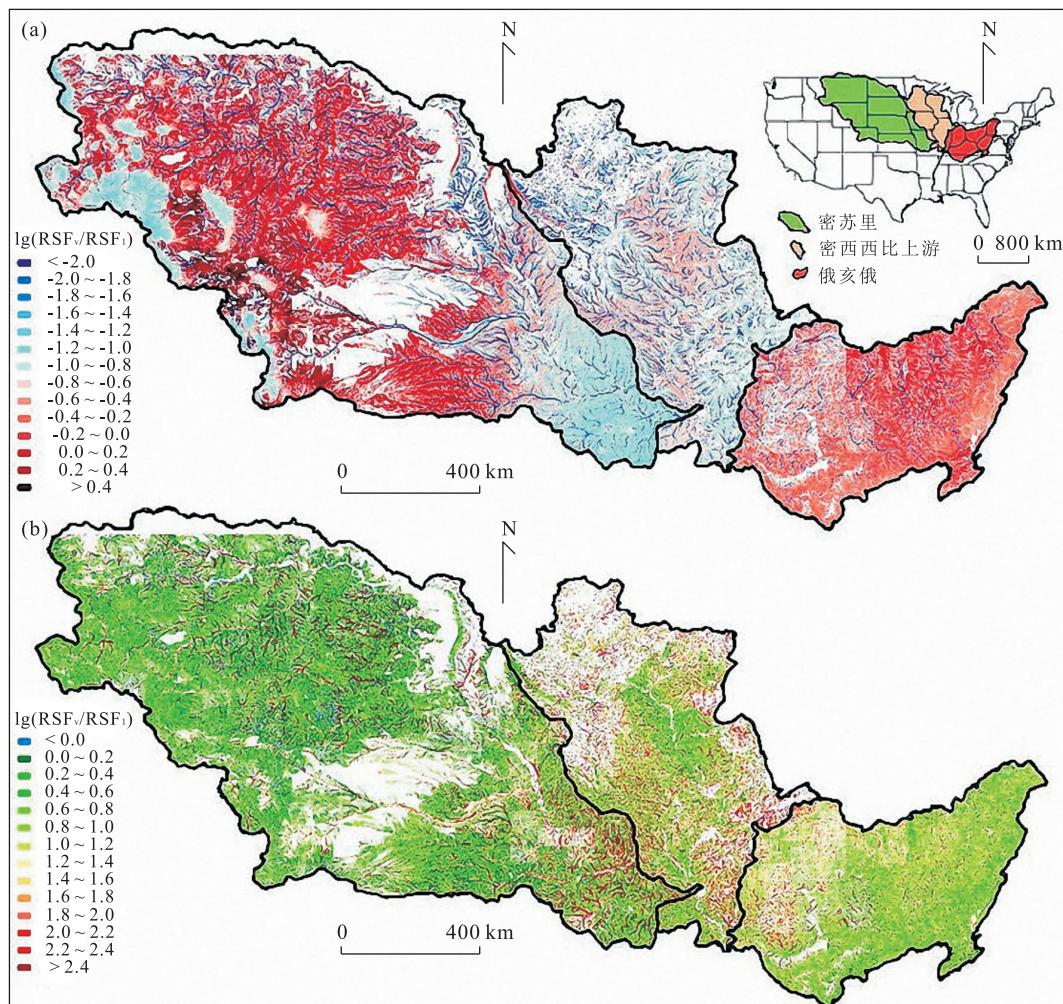


图 5 基于反应意义因子估算的密西西比河流网络反硝化潜力

Fig.5 Denitrification potential of Mississippi River network based on RSF

图 a 表示总体的反硝化 RSF, 值越高表示反硝化反应意义越大; 图 b 表示垂向与横向 RSF 的比值, 值越高表示垂向交换影响下的反硝化效率相对于侧向交换越大。改自 Gomez-Velez *et al.* (2015)

文地貌因素驱动着潜流水动力交换,且控制着河水与反应性沉积物的接触频率,就整个河网尺度而言,其相对于潜流带内部生物地球化学反应的速率具有更大的变异性。Gomez-Velez and Harvey (2014)通过融合已有的水文地貌和潜流模型,提出了用于河盆尺度潜流交换研究的 NEXSS(networks with exchange and subsurface storage)模型,将河流网络分解为各个单独的河段,基于各个河段几个基本的水文学和地貌学参数,模拟得到各个河段的潜流水动力交换量和水文滞留时间等重要参数。基于模拟得到的潜流带水文学参数,通过与“反应意义因子”连用,可以回答 3 个重要的科学问题:(1)何种水文地貌特征分别控制着大河流和小支流的潜流过程;(2)在整个河流网络中,哪些区域的潜流水动力交换最强烈;(3)在整个河流网络中,潜流带生物地球化学

过程在哪些区域最显著。Gomez-Velez *et al.* (2015)将此方法应用于美国密西西比河流网络中的反硝化过程,估算了垂向和侧向潜流交换影响下的反硝化潜力(图 5),结果表明:受河底地形控制的垂向潜流交换的反硝化潜力远远大于受河流沙坝与河曲控制的侧向潜流交换;在同一河流网络中,由于不同次一级盆地以及不同河流级别在水文地貌特征上存在差异,反硝化效率也大不相同。

### 3.2 生态意义

在我国内陆,河流的富营养化问题越来越突出,高营养荷载的河流流向海洋,使得赤潮等海洋生态问题也日益凸显(张龙军等, 2007)。潜流带对污染物质,特别是营养物质的自然衰减效应对于河流生态乃至海洋生态的改善具有重要的实际意义。潜流带水文—生物地球化学研究的核心任务在于回答

“整个河流网络中哪些区域的污染物衰减效应最强烈以及为何强烈”,以及“潜流带污染物自然衰减对于整个河流网络具体有多大贡献”两大重要科学问题,这两大科学问题的解决可以为人工改造河道增强潜流带物质衰减效应提供科学指导,从而达到改善河流生态状况和增强河流生态功能的目的。例如,通过人工措施增加河道弯曲程度和河底坡度可分别增强横向和垂向潜流交换(Simon *et al.*, 2013),通过防止粗粒沉积物被细粒沉积物阻塞可增强潜流垂向交换(Gomez-Velez *et al.*, 2015),最终达到改善河流水质和生态的目的。

## 4 研究展望

作为一门学科,潜流带经历了三大发展时期(Cardenas, 2015):(1)1980—1990年的萌芽期,潜流带被视为“黑箱”,当时仍被称作暂时性储积带;(2)1990—2000年的发展期,从地表水或地下水的角度探索潜流带过程的效应;(3)2000—2010年的成熟期,多学科、多过程以及多尺度地理解潜流带过程。目前,潜流带研究已成为水文学与水资源领域蓬勃发展的门科学,根据当前的研究趋势,其将在如下几个方面得到持续的发展:

(1)潜流带研究技术方法的先进化、更方便且可靠地获取潜流带水文学和生物地球化学参数需要先进技术与方法的支撑,高精度的传感与自动监测技术、更为有效的示踪技术与数值模拟技术等,都需要进一步的完善。

(2)水文地貌理论与模型的深入化。河底形貌特征及演化(如细粒沉积物迁移力学)是控制潜流交换的根本要素,地貌模型与潜流模型耦合的深入,将是一个长期的研究课题。

(3)潜流带生物地球化学过程的尺度化。人们对于孔隙尺度微生物过程的认识还十分有限,反应速率在时间和空间尺度上的非均质性对于更大空间和更长时间尺度上反应速率的影响,值得不断深入研究,相关的模型亟需不断完善。

致谢:本文在撰写过程中得到了美国地质调查局Judson Harvey教授的指导和帮助,在此表示衷心的感谢!感谢匿名审稿专家的意见和建议!

## References

Anderson, M. P., 2005. Heat as a Ground Water Tracer. *Ground Water*, 43(6): 951—968.doi:10.1111/j.1745-

6584.2005.00052.x

Baker, M. A., Valett, H. M., Dahm, C. N., 2000. Organic Carbon Supply and Metabolism in a Shallow Groundwater Ecosystem. *Ecology*, 81(11): 3133—3148.doi:10.1890/0012-9658(2000)081[3133:ocsami]2.0.co;2

Battin, T. J., Kaplan, L. A., Findlay, S., et al., 2008. Biophysical Controls on Organic Carbon Fluxes in Fluvial Networks. *Nature Geoscience*, 1(2): 95—100.doi:10.1038/ngeo101

Battin, T. J., Kaplan, L. A., Newbold, J. D., et al., 2003. Contributions of Microbial Biofilms to Ecosystem Processes in Stream Mesocosms. *Nature*, 426(6965): 439—442.doi:10.1038/nature02152

Baxter, C., Hauer, F. R., Woessner, W. W., 2003. Measuring Groundwater-Stream Water Exchange: New Techniques for Installing Minipiezometers and Estimating Hydraulic Conductivity. *Transactions of the American Fisheries Society*, 132(3): 493—502.doi:10.1577/1548-8659(2003)132<0493:mgwent>2.0.co;2

Bencala, K. E., Kennedy, V. C., Zellweger, G. W., et al., 1984. Interactions of Solutes and Streambed Sediment: 1. An Experimental Analysis of Cation and Anion Transport in a Mountain Stream. *Water Resources Research*, 20(12): 1797—1803.doi:10.1029/wr020i012p01797

Bencala, K. E., Walters, R. A., 1983. Simulation of Solute Transport in a Mountain Pool-and-Riffle Stream: A Transient Storage Model. *Water Resources Research*, 19(3): 718—724.doi:10.1029/wr019i003p00718

Boano, F., Harvey, J. W., Marion, A., et al., 2014. Hyporheic Flow and Transport Processes: Mechanisms, Models, and Biogeochemical Implications. *Reviews of Geophysics*, 52(4): 603—679.doi:10.1002/2012rg000417

Böhlke, J. K., Antweiler, R. C., Harvey, J. W., et al., 2009. Multi-Scale Measurements and Modeling of Denitrification in Streams with Varying Flow and Nitrate Concentration in the Upper Mississippi River Basin, USA. *Biogeochemistry*, 93(1—2): 117—141.doi:10.1007/s10533-008-9282-8

Böhlke, J. K., Harvey, J. W., Voytek, M. A., 2004. Reach-Scale Isotope Tracer Experiment to Quantify Denitrification and Related Processes in a Nitrate-Rich Stream, Mid-continent United States. *Limnology and Oceanography*, 49(3): 821—838.doi:10.4319/lo.2004.49.3.0821

Bourg, A. C. M., Bertin, C., 1993. Biogeochemical Processes during the Infiltration of River Water into an Alluvial Aquifer. *Environmental Science & Technology*, 27(4): 661—666.doi:10.1021/es00041a009

Bouwer, H., Rice, R. C., 1976. A Slug Test for Determining

- Hydraulic Conductivity of Unconfined Aquifers with Completely or Partially Penetrating Wells. *Water Resources Research*, 12 (3): 423 – 428. doi: 10.1029/wr012i003p00423
- Briggs, M. A., Lautz, L. K., McKenzie, J. M., et al., 2012. Using High-Resolution Distributed Temperature Sensing to Quantify Spatial and Temporal Variability in Vertical Hyporheic Flux. *Water Resources Research*, 48 (2): W02527. doi: 10.1029/2011wr011227
- Buffington, J. M., Tonina, D., 2009. Hyporheic Exchange in Mountain Rivers II: Effects of Channel Morphology on Mechanics, Scales, and Rates of Exchange. *Geography Compass*, 3(3): 1038–1062. doi: 10.1111/j.1749-8198.2009.00225.x
- Cardenas, M.B., 2015. Hyporheic Zone Hydrologic Science: A Historical Account of Its Emergence and a Prospectus. *Water Resources Research*, 51(5): 3601 – 3616. doi: 10.1002/2015wr017028
- Cecil, L.D., Green, J.R., 2000.  $^{222}\text{Rn}$ , in Environmental Tracers in Subsurface Hydrology. Springer US, New York, 175 – 194.
- Christensen, S., Rasmussen, K. R., Moller, K., 1998. Prediction of Regional Ground Water Flow to Streams. *Ground Water*, 36(2): 351 – 360. doi: 10.1111/j.1745-6584.1998.tb01100.x
- Conant, B., 2004. Delineating and Quantifying Ground Water Discharge Zones Using Streambed Temperatures. *Ground Water*, 42(2): 243 – 257. doi: 10.1111/j.1745-6584.2004.tb02671.x
- Constantz, J.E., 1998. Interaction between Stream Temperature, Streamflow, and Groundwater Exchanges in Alpine Streams. *Water Resources Research*, 34(7): 1609 – 1615. doi: 10.1029/98wr00998
- Cook, P.G., Lamontagne, S., Berhane, D., et al., 2006. Quantifying Groundwater Discharge to Cockburn River, Southeastern Australia, Using Dissolved Gas Tracers  $^{222}\text{Rn}$  and SF6. *Water Resources Research*, 42 (10): W10411. doi: 10.1029/2006WR004921
- Cranswick, R. H., Cook, P. G., Lamontagne, S., 2014. Hyporheic Zone Exchange Fluxes and Residence Times Inferred from Riverbed Temperature and Radon Data. *Journal of Hydrology*, 519: 1870 – 1881. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.059
- Deng, Y.M., Wang, Y.X., Li, H.J., et al., 2015. Seasonal Variation of Arsenic Speciation in Shallow Groundwater from Endemic Arsenicosis Area in Jianghan Plain. *Earth Science*, 40 (11): 1876 – 1886 (in Chinese with English abstract).
- Duff, J. H., Triska, F. J., 2000. Nitrogen Biogeochemistry and Surface-Subsurface Exchange in Streams and Groundwaters. Academic Press, San Diego, 197 – 220.
- Elliott, A. H., Brooks, N. H., 1997. Transfer of Nonsorbing Solutes to a Streambed with Bed Forms: Theory. *Water Resources Research*, 33 (1): 123 – 136. doi: 10.1029/96wr02784
- Findlay, S., 1995. Importance of Surface-Subsurface Exchange in Stream Ecosystems: The Hyporheic Zone. *Limnology and Oceanography*, 40(1): 159 – 164. doi: 10.4319/lo.1995.40.1.0159
- Fuller, C.C., Harvey, J. W., 2000. Reactive Uptake of Trace Metals in the Hyporheic Zone of a Mining-Contaminated Stream, Pinal Creek, Arizona. *Environmental Science & Technology*, 34(7): 1150 – 1155. doi: 10.1021/es990714d
- Gandy, C.J., Smith, J.W.N., Jarvis, A.P., 2007. Attenuation of Mining-Derived Pollutants in the Hyporheic Zone: A Review. *Science of the Total Environment*, 373(2 – 3): 435 – 446. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.11.004
- Gomez-Velez, J.D., Harvey, J. W., 2014. A Hydrogeomorphic River Network Model Predicts Where and Why Hyporheic Exchange is Important in Large Basins. *Geophysical Research Letters*, 41(18): 6403 – 6412. doi: 10.1002/2014gl061099
- Gomez-Velez, J. D., Harvey, J. W., Cardenas, M. B., et al., 2015. Denitrification in the Mississippi River Network Controlled by Flow through River Bedforms. *Nature Geoscience*, 8(12): 941 – 945. doi: 10.1038/ngeo2567
- González-Pinzón, R., Ward, A.S., Hatch, C. E., et al., 2015. A Field Comparison of Multiple Techniques to Quantify Groundwater-Surface-Water Interactions. *Freshwater Science*, 34(1): 139 – 160. doi: 10.1086/679738
- Gordon, R.P., Lautz, L.K., Briggs, M.A., et al., 2012. Automated Calculation of Vertical Pore-Water Flux from Field Temperature Time Series Using the VFLUX Method and Computer Program. *Journal of Hydrology*, 420 – 421: 142 – 158. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.11.053
- Gu, C.H., Hornberger, G.M., Mills, A.L., et al., 2007. Nitrate Reduction in Streambed Sediments: Effects of Flow and Biogeochemical Kinetics. *Water Resources Research*, 43 (12): W12413. doi: 10.1029/2007wr006027
- Harvey, J. W., Bencala, K. E., 1993. The Effect of Streambed Topography on Surface-Subsurface Water Exchange in Mountain Catchments. *Water Resources Research*, 29 (1): 89 – 98. doi: 10.1029/92wr01960
- Harvey, J. W., Böhlke, J. K., Voytek, M. A., et al., 2013. Hyporheic Zone Denitrification: Controls on Effective Reaction Depth and Contribution to Whole-Stream Mass

- Balance. *Water Resources Research*, 49 (10): 6298 — 6316.doi:10.1002/wrcr.20492
- Harvey, J. W., Drummond, J. D., Martin, R. L., et al., 2012. Hydrogeomorphology of the Hyporheic Zone: Stream Solute and Fine Particle Interactions with a Dynamic Streambed. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(G4):G00N11.doi:10.1029/2012jg002043
- Harvey, J. W., Fuller, C. C., 1998. Effect of Enhanced Manganese Oxidation in the Hyporheic Zone on Basin-Scale Geochemical Mass Balance. *Water Resources Research*, 34(4):623—636.doi:10.1029/97wr03606
- Harvey, J. W., Wagner, B. J., Bencala, K. E., 1996. Evaluating the Reliability of the Stream Tracer Approach to Characterize Stream-Subsurface Water Exchange. *Water Resources Research*, 32 (8): 2441 — 2451. doi: 10.1029/96wr01268
- Harvey, J., Gooseff, M., 2015. River Corridor Science: Hydrologic Exchange and Ecological Consequences from Bedforms to Basins. *Water Resources Research*, 51 (9): 6893—6922.doi:10.1002/2015wr017617
- Harvey, J. W., Wagner, B. J., 2000. Quantifying Hydrologic Interactions between Streams and Their Subsurface Hyporheic Zones, in Streams and Ground Waters. Academic Press, San Diego, 3—44.
- 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. *Water Resources Research*, 42(10):W10410.doi:10.1029/2005wr004787
- Hendricks, S.P., White, D.S., 2000. Stream and Groundwater Influences on Phosphorus Biogeochemistry, in Streams and Groundwaters. Academic Press, San Diego, 221—235.
- Hester, E. T., Doyle, M. W., 2008. In-Stream Geomorphic Structures as Drivers of Hyporheic Exchange. *Water Resources Research*, 44 (3): W03417. doi: 10.1029/2006wr005810
- Ho, R. T., Gelhar, L. W., 1973. Turbulent Flow with Wavy Permeable Boundaries. *Journal of Fluid Mechanics*, 58 (2):403.doi:10.1017/s0022112073002661
- Kalbus, E., Reinstorf, F., Schirmer, M., 2006. Measuring Methods for Groundwater-Surface Water Interactions: A Review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10 (6):873—887.doi:10.5194/hess-10-873-2006
- Keery, J., Binley, A., Crook, N., et al., 2007. Temporal and Spatial Variability of Groundwater-Surface Water Fluxes: Development and Application of an Analytical Method Using Temperature Time Series. *Journal of Hydrology*, 336(1—2):1—16.doi:10.1016/j.jhydrol.2006.12.003
- Kilpatrick, F.A., Cobb, E.D., 1985. Measurement of Discharge Using Tracers. U. S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Chapter A-16. United States Government Printing Office, Washington.
- Kim, H., Hemond, H.F., Krumholz, L.R., et al., 1995. In-Situ Biodegradation of Toluene in a Contaminated Stream. Part 1. Field Studies. *Environmental Science & Technology*, 29(1):108—116.doi:10.1021/es00001a014
- Lamontagne, S., Cook, P. G., 2007. Estimation of Hyporheic Water Residence Time In-Situ Using <sup>222</sup>Rn Disequilibrium. *Limnology and Oceanography: Methods*, 5 (11): 407—416.doi:10.4319/lom.2007.5.407
- Lee, D. R., 1977. A Device for Measuring Seepage Flux in Lakes and Estuaries 1. *Limnology and Oceanography*, 22(1):140—147.doi:10.4319/lo.1977.22.1.0140
- Liu, C. X., Shang, J. Y., Kerisit, S., et al., 2013. Scale-Dependent Rates of Uranyl Surface Complexation Reaction in Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 105:326—341.doi:10.1016/j.gca.2012.12.003
- Liu, C. X., Shang, J. Y., Shan, H. M., et al., 2014. Effect of Subgrid Heterogeneity on Scaling Geochemical and Biogeochemical Reactions: A Case of U(VI) Desorption. *Environmental Science & Technology*, 48(3):1745—1752.doi:10.1021/es404224j
- Liu, Y., Shao, J.L., Chen, C.S., 2015. Hydrogeological Parameter Estimations for Slug Test in Sloping Confined Aquifer. *Earth Science*, 40(5):925—932 (in Chinese with English abstract).
- Ma, R., Dong, Q.M., Sun, Z.Y., et al., 2013. Using Heat to Trace and Model the Surface Water-Groundwater Interactions: A Review. *Geological Science and Technology Information*, 32(2):131—137 (in Chinese with English abstract).
- McClain, M.E., Boyer, E. W., Dent, C. L., et al., 2003. Biogeochemical Hot Spots and Hot Moments at the Interface of Terrestrial and Aquatic Ecosystems. *Ecosystems*, 6 (4):301—312.doi:10.1007/s10021-003-0161-9
- McKnight, D.M., Runkel, R.L., Tate, C.M., et al., 2004. Inorganic N and P Dynamics of Antarctic Glacial Meltwater Streams as Controlled by Hyporheic Exchange and Benthic Autotrophic Communities. *Journal of the North American Bentholological Society*, 23(2):171—188.doi:10.1899/0887—3593(2004)023<0171:inapdo>2.0.co;2
- Mulholland, P. J., Helton, A. M., Poole, G. C., et al., 2008. Stream Denitrification across Biomes and Its Response to Anthropogenic Nitrate Loading. *Nature*, 452(7184): 202—205.doi:10.1038/nature06686
- Mulholland, P.J., Marzolf, E. R., Webster, J. R., et al., 1997.

- Evidence that Hyporheic Zones Increase Heterotrophic Metabolism and Phosphorus Uptake in Forest Streams. *Limnology and Oceanography*, 42(3): 443—451.doi: 10.4319/lo.1997.42.3.0443
- Murdoch, L.C., Kelly, S.E., 2003. Factors Affecting the Performance of Conventional Seepage Meters. *Water Resources Research*, 39 (6): 1163. doi: 10.1029/2002wr001347
- Newbold, J.D., Thomas, S.A., Minshall, G.W., et al., 2005. Deposition, Benthic Residence, and Resuspension of Fine Organic Particles in a Mountain Stream. *Limnology and Oceanography*, 50 (5): 1571—1580. doi: 10.4319/lo.2005.50.5.1571
- Packman, A.I., Brooks, N.H., 1995. Colloidal Particles Exchange between Stream and Stream Bed in a Laboratory Flume. *Marine and Freshwater Research*, 46(1):233—236.
- Palumbo-Roe, B., Wragg, J., Banks, V.J., 2012. Lead Mobilisation in the Hyporheic Zone and River Bank Sediments of a Contaminated Stream: Contribution to Diffuse Pollution. *Journal of Soils and Sediments*, 12 (10):1633—1640.doi:10.1007/s11368-012-0552-7
- Paulsen, R.J., Smith, C.F., O'Rourke, D., et al., 2001. Development and Evaluation of an Ultrasonic Ground Water Seepage Meter. *Ground Water*, 39(6):904—911.doi:10.1111/j.1745-6584.2001.tb02478.x
- Ren, J.H., Packman, A.I., 2004. Stream-Subsurface Exchange of Zinc in the Presence of Silica and Kaolinite Colloids. *Environmental Science & Technology*, 38(24):6571—6581.doi:10.1021/es035090x
- Ren, J. H., Packman, A. I., 2005. Coupled Stream-Subsurface Exchange of Colloidal Hematite and Dissolved Zinc, Copper, and Phosphate. *Environmental Science & Technology*, 39(17):6387—6394.doi:10.1021/es050168q
- Risgaard-Petersen, N., Nielsen, L. P., Rysgaard, S., et al., 2003. Application of the Isotope Pairing Technique in Sediments Where Anammox and Denitrification Coexist. *Limnology and Oceanography: Methods*, 1(1):63—73.doi:10.4319/lom.2003.1.63
- Rivett, M.O., Ellis, P. A., Greswell, R. B., et al., 2008. Cost-Effective Mini Drive-Point Piezometers and Multilevel Samplers for Monitoring the Hyporheic Zone. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 41(1):49—60.doi:10.1144/1470-9236/07-012
- Rosenberry, D.O., Morin, R.H., 2004. Use of an Electromagnetic Seepage Meter to Investigate Temporal Variability in Lake Seepage. *Ground Water*, 42(1):68—77.doi:10.1111/j.1745-6584.2004.tb02451.x
- Rosenberry, D. O., Sheibley, R. W., Cox, S. E., et al., 2013. Temporal Variability of Exchange between Groundwater and Surface Water Based on High-Frequency Direct Measurements of Seepage at the Sediment-Water Interface. *Water Resources Research*, 49(5):2975—2986.doi: 10.1002/wrcr.20198
- Ruff, J.F., Gelhar, L.W., 1972. Turbulent Shear Flow in Porous Boundary. *Journal of Engineering Mechanics*, 98 (EM4):975—991.
- Sawyer, A. H., Cardenas, M. B., Buttles, J., 2011. Hyporheic Exchange Due to Channel-Spanning Logs. *Water Resources Research*, 47 (8): W08502. doi: 10.1029/2011wr010484
- Shepherd, R.G., 1989. Correlations of Permeability and Grain Size. *Ground Water*, 27 (5): 633—638. doi: 10.1111/j.1745-6584.1989.tb00476.x
- Simon, A., Bennett, S.J., Castro, J.M., 2013. Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems: Scientific Approaches, Analyses, and Tools. *Geomorphology*, 93 (5): 206—207.doi:10.1029/gm194
- Sophocleous, M., 2002. Interactions between Groundwater and Surface Water: The State of the Science. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 52—67. doi: 10.1007/s10040—001—0170—8
- Stallman, R.W., 1965. Steady One-Dimensional Fluid Flow in a Semi-Infinite Porous Medium with Sinusoidal Surface Temperature. *Journal of Geophysical Research*, 70 (12):2821—2827.doi:10.1029/jz070i012p02821
- Stanford, J. A., Ward, J. V., 1993. An Ecosystem Perspective of Alluvial Rivers: Connectivity and the Hyporheic Corridor. *Journal of the North American Benthological Society*, 12(1):48—60.doi:10.2307/1467685
- Stonedahl, S. H., Harvey, J. W., Wörman, A., et al., 2010. A Multiscale Model for Integrating Hyporheic Exchange from Ripples to Meanders. *Water Resources Research*, 46(12):W12539.doi:10.1029/2009wr008865
- Storey, R.G., Howard, K.W.F., Williams, D.D., 2003. Factors Controlling Riffle-Scale Hyporheic Exchange Flows and Their Seasonal Changes in a Gaining Stream: A Three-Dimensional Groundwater Flow Model. *Water Resources Research*, 39(2):1034.doi:10.1029/2002wr001367
- Stream Solute Workshop, 1990. Concepts and Methods for Assessing Solute Dynamics in Stream Ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 9(2):95—119.doi:10.2307/1467445
- Swanson, T. E., Cardenas, M. B., 2011. Ex-Stream: A MATLAB Program for Calculating Fluid Flux through Sediment-Water Interfaces Based on Steady and Transient Temperature Profiles. *Computers & Geosciences*, 37

- (10):1664—1669.doi:10.1016/j.cageo.2010.12.001
- Taniguchi, M., Fukuo, Y., 1993. Continuous Measurements of Ground-Water Seepage Using an Automatic Seepage Meter. *Ground Water*, 31(4): 675—679. doi:10.1111/j.1745-6584.1993.tb00601.x
- Thibodeaux, L.J., Boyle, J.D., 1987. Bedform-Generated Convective Transport in Bottom Sediment. *Nature*, 325(6102):341—343.doi:10.1038/325341a0
- Todd, D.K., Mays, L.W., 2005. *Groundwater Hydrology*. Wiley, Hoboken.
- Tonina, D., 2012. Surface Water and Streamed Sediment Interaction: The Hyporheic Exchange, in Fluid Mechanics of Environmental Interfaces. CRC Press, Taylor and Francis Group, London, 255—294.
- Tóth, J., 1963. A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(16): 4795 — 4812. doi: 10.1029/jz068i016p04795
- Triska, F.J., Duff, J. H., Avanzino, R. J., 1993. The Role of Water Exchange between a Stream Channel and Its Hyporheic Zone in Nitrogen Cycling at the Terrestrial-Aquatic Interface. *Hydrobiologia*, 251(1—3): 167—184.doi:10.1007/bf00007177
- Triska, F.J., Kennedy, V.C., Avanzino, R.J., et al., 1989. Retention and Transport of Nutrients in a Third-Order Stream in Northwestern California: Hyporheic Processes. *Ecology*, 70(6):1893—1905.doi:10.2307/1938120
- Vaux, W.G., 1968. Intergravel Flow and Interchange of Water in a Streamed. *Fishery Bulletin*, 66(3):479—489.
- Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., et al., 1998. Groundwater and Surface Water: A Single Resource. USGS Circular, Reston, 1139.
- Wondzell, S. M., Swanson, F. J., 1996a. Seasonal and Storm Dynamics of the Hyporheic Zone of a 4th-Order Mountain Stream. I: Hydrologic Processes. *Journal of the North American Bentholological Society*, 15(1):3—19. doi:10.2307/1467429
- Wondzell, S. M., Swanson, F. J., 1996b. Seasonal and Storm Dynamics of the Hyporheic Zone of a 4th-Order Mountain Stream. II: Nitrogen Cycling. *Journal of the North American Bentholological Society*, 15(1):20—34.doi:10.2307/1467430
- Wroblicky, G.J., Campana, M.E., Valett, H. M., et al., 1998. Seasonal Variation in Surface-Subsurface Water Exchange and Lateral Hyporheic Area of Two Stream-Aquifer Systems. *Water Resources Research*, 34(3): 317—328.doi:10.1029/97wr03285
- Zarnetske, J. P., Haggerty, R., Wondzell, S. M., et al., 2012. Coupled Transport and Reaction Kinetics Control the Nitrate Source-Sink Function of Hyporheic Zones. *Water Resources Research*, 48(11): W11508. doi: 10.1029/2012wr011894
- Zhang, L. J., Xia, B., Gui, Z. S., et al., 2007. Contaminative Conditions Evaluation of Sixteen Main Rivers Flowing into Sea around Bohai Sea, in Summer of 2005. *Environmental Science*, 28(11):2409—2415 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 邓娅敏,王焰新,李慧娟,等,2015.江汉平原砷中毒病区地下水砷形态季节性变化特征.地球科学,40(11):1876—1886.
- 刘颖,邵景力,陈家润,2015.基于微水试验倾斜承压含水层水文地质参数的推估.地球科学,40(5):925—932.
- 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.地质科技情报,32(2): 131—137.
- 张龙军,夏斌,桂祖胜,等,2007.2005年夏季环渤海16条主要入海河流的污染状况.环境科学,28(11):2409—2415.