

河流中潜流交换研究进展

金光球, 李 凌

(河海大学水生态环境模拟中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 河水和地下水交换——潜流交换对溶质和污染物的归宿起着重要作用。潜流交换机理主要包括泵吸交换和冲淤交换。泵吸交换是由于河床形态引起的水头梯度, 这些水头梯度诱导了对流传输; 冲淤交换发生是由于移动河床截留和释放孔隙水。潜流交换的主要影响因素包括: 河道流量、河床水力传导性、河床形态、河道弯曲、河床不均匀和背景条件。还探讨了反应性溶质、胶体颗粒共存情况下潜流交换的规律。对潜流交换研究现存的主要问题及未来研究展望提出了看法。

关键词: 潜流交换; 潜流带; 泵吸交换; 冲淤交换; 河床形态; 溶质; 胶体

中图分类号: TV131.3; G353.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2008)02-0285-09

河水中的污染物可能会进入河床的孔隙水中, 同样孔隙水中的污染物释放可能会引起上覆水的再次污染, 这就是人们常说的河流二次污染。如 2005 年 11 月松花江污染事件后, 人们一直担心底泥污染物释放是否会造成长期的水质超标等问题^[1]。2007 年 5 月国家环保总局宣布为防治松花江流域水体污染, 松花江全流域进行为期 10 年的“休养期”。这些表明对河水和地下水之间相互作用——潜流交换的研究是非常必要的。潜流交换引起溶质在河床中的滞留, 影响着溶质在河流中的迁移^[2]。营养盐和污染物在通过河水-地下水界面时主要受潜流交换的控制^[3]。因此研究潜流交换可以帮助理解河流中的污染物是怎样进入底泥中, 底泥中的污染物是怎样释放的, 这些研究对河流健康和人类生命健康都具有重要的意义。

随着河流水生态、环境研究的深入, 河水和地下水交混区域——潜流带的生态学研究成了一个热门话题。潜流带是活跃的生态群落交错区, 对河流生命体的生命循环有重要的生态意义, 对河流生态区的健康起着关键的生态小生境的作用, 成为河流中颗粒和溶质交换、新陈代谢和储存的主要场所。潜流带还是许多动物的避难和居住的重要场所。河水和地下水相互作用对河流环境的生物地化产生了至关重要的影响, Malcolm 指出潜流带水质对鲑鱼的卵的存活有重要的影响, 潜流带的物理化学性质和物质能量交换对潜流带的生态群落和生态分布起着决定性的作用, 因此弄清楚潜流交换对研究潜流带的生态具有重要的参考价值。本文主要探讨了潜流带和潜流交换的定义, 两种典型的潜流交换机理, 影响潜流交换的因素以及各种物质的潜流交换的规律。

1 潜流带和潜流交换

1.1 潜流带

潜流带是指河流河床内水分饱和的沉积物层, 是河水和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量交换的区域。潜流带也被定义为表面水和地下水双向迁移和混合的区域^[4]。同时含有河水和地下水是潜流带一个重要特征。Triska 对潜流带进行了量化, 即河水含量大于 10% 但小于 98%^[5]。潜流带与河道的饱和地下区域相连, 与河道共有一定的生物、化学、物理特征^[5]。潜流带是位于溪流或河流河床之下并延伸至河岸边带和两侧的水分饱和的沉积物层, 潜流带是河流或溪流连续性的重要组成部分, 它有效地连接着河流的陆地、地表和地下^[6]。潜流带位置示意图见图 1。

潜流带对河流水化学环境起着很重要的作用。潜流带在溪流有机物的分解和水质净化等过程中发挥着重要

收稿日期: 2007-07-25

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (50425926)

作者简介: 金光球(1979-), 男, 安徽六安人, 博士研究生, 主要从事水生态环境研究。E-mail: jingq02@126.com

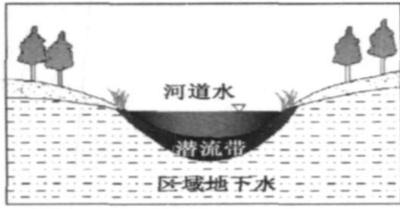


图1 顺直型河流潜流带位置示意图

Fig. 1 Schematic of the site of the hyporheic zone in straight river

有溶解性气体浓度梯度、有机生命体浓度梯度、pH 值梯度和温度梯度^[7]。这些物理、生物和化学梯度，为许多无脊椎动物提供了重要生境，是生物多样性研究的热点区域^[6]，这些梯度也导致生物地球化学反应，这些反应最终影响了河流水质^[7, 10~12]。

1.2 潜流交换

潜流交换一般定义为水和溶质在活动河道和河床及河岸中的地下沉积层之间的交换^[8]。潜流交换是独特的，因为进入潜流带中的河水最终在下游的一些点返回河流中。潜流交换定义开始用时，主要指的是水交换，随着对河道-地下之间的研究的越来越深入，人们开始把溶质、颗粒、胶体等在河道和地下之间的相互作用也称为潜流交换^[11, 13, 14]。因此这里给出潜流交换的广义定义：物质（水、溶质（保守性溶质、反应性溶质）、颗粒和胶体）在河道和河道附近的饱和沉积层之间的相互交换称之为潜流交换。图2给出了潜流交换的一般区域，是从空间三个角度来看潜流交换发生区域和方式。图2(a)是河流横截面；图2(b)是河流纵剖面图；图2(c)是河流平视图。

潜流交换对河流水环境有重要的影响。潜流交换通过引起溶质在河流系统中的滞留，影响着溶质在河流中的迁移。有研究表明这种滞留很明显地影响了铬的迁移；示踪实验发现在离注入点下游30 km处测得保守性溶质与注入时的相比损失达76%^[2]。

测量潜流交换的三种方法^[8]：液体比重测定方法、地下溶质示踪剂法和河流示踪剂方法。前两种方法有同样的局限，存在压力计布置网的问题；后一种方法对活动河道与池塘和漩涡之间的交换非常敏感，用它来测定潜流交换也有较大的不确定性。

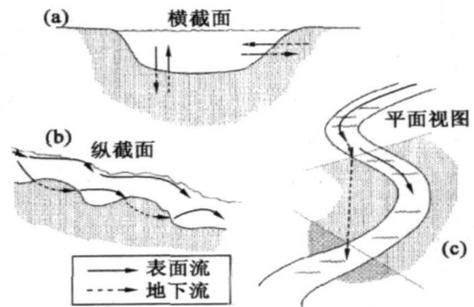
潜流交换的分类：按照产生的机理可以分为紊流引起的紊流交换、压力梯度引起的对流交换、冲淤引起的冲淤交换和扩散引起的扩散交换。在河流中主要的影响有两种：对流交换（也叫泵吸交换）和冲淤交换。按照产生的位置可以分为：与河道底沉积物发生的垂向潜流交换，与河岸饱和多孔介质发生的侧向潜流交换、沿河流方向发生的纵向潜流交换。按照不同交换交换来分：水的潜流交换、保守性溶质的潜流交换、反应性溶质的潜流交换、胶体的潜流交换。

很多学者根据自己研究的目的和区域不同，对潜流交换有很多称谓，例如地表和地下水文交换、地表-地下交换、河流-地下交换、河流和河床之间的交换^[15~18]。

2 潜流交换机理

潜流交换的产生是由不同水力学机理引起的^[2]。很多实验证实河床形态能够引起潜流带的对流传输^[13, 19]。

的作用。潜流带可以简单地定义为河水和浅层地下水混合的河床多孔渗透区和河岸^[11]。河道水和地下水的混合可以通过水化学梯度来反映，在潜流带以下，水化学不受河流水的影响^[12]。由于表面水和地下水的化学成分的不同，河流和潜流带的水和溶质的交换有很多的生物地球化学效应。表面水在典型的氧化环境下，拥有相当高的溶解氧浓度，相反，地下水系统中的溶解氧相对较低^[13]。在地下水中，有机质的微生物氧化作用导致相对大气过饱和的溶解态的二氧化碳浓度。因此潜流带是一个混合区，在这里



(阴影部分)之间的垂向和侧向潜流交换^[19]

图2 水在河道与周围的饱和沉积物-潜流带

Fig. 2 Diagram showing vertical and lateral hyporheic exchanges of water between the stream and surrounding saturated sediments hyporheic zone (shaded region)

Packman 等^[20]对粗砂砾颗粒引起的紊流进行了研究,并用扩算模型对紊流引起的水体和沙床表面的质量交换进行了估计。Zhou 和 Mendoza^[21]依据流动水和泥沙表面之间的紊流相互作用,理论化了平整砂砾河床的潜流交换。河床受冲刷和河床不受冲刷的潜流带中的水动力过程是不相同的。潜流交换主要包括泵吸交换、冲淤交换以及泵吸交换和冲淤交换的混合。在以上几种情况下,都有扩散和紊流作用的影响,但是相对他们来说,扩散和紊流作用很小,一般河流中主要是有河床形态作用引起的两种交换机理——泵吸交换和冲淤交换。这两种交换机理有其独特性,下面对这两种机理进行了阐述。

2.1 泵吸交换

河床形态或者其他不规则性(如原木、大石块和水表面地形)会引起水头梯度(或者压力变化),这些水头梯度诱导了对流传质^[13, 19, 22~24],产生了潜流交换。图3说明河床形态引起泵吸交换。由三角形沙床表面引起的剪切流的扰动产生了压力变化,压力变化导致孔隙水移动,河流和饱和沙床之间发生了交换,这种交换被称为泵吸交换。泵吸交换发生非常广泛,不仅在河流中,在海岸带和沿海浅滩沙丘也有潜流交换的产生^[25]。

2.2 冲淤交换

当河床形态移动时,在河床形态的上游迎风面受到水流冲刷,泥沙被冲走,释放孔隙水;在河床形态的下游避风坡处,冲走的泥沙在此处沉降,截留河道水充当河床新的位置的孔隙水,这个释放和截留孔隙水的过程引起河床与河流间的物质交换,称为冲淤交换^[11, 19, 22]。冲淤交换主要发生在河床形态移动或者河床冲刷地区。图4是理想状态下三角形河床形态的冲淤交换。

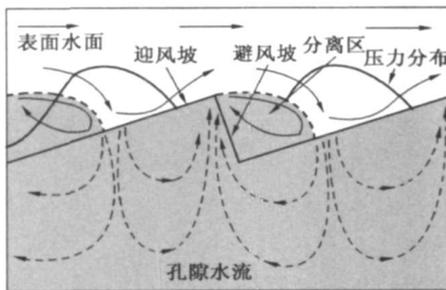


图3 在三角形河床形态下的压力分布和孔隙水流示意图

Fig. 3 Schematic of pressure distribution and pore water flows beneath triangular bedform

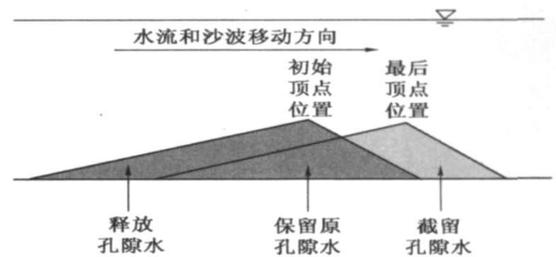


图4 河床形态理想的运动和冲淤交换过程示意图^[26]

Fig. 4 Schematic of the idealized movement of a bed form and the turnover exchange process

2.3 混合潜流交换

一般在河床移动时,既有冲淤交换,也有泵吸交换,这两者的混合被称为混合潜流交换。如图5所示,在沙丘的迎风面受到冲刷作用,沉积物被冲走,释放孔隙水到河道中;在沙丘的避风面泥沙沉降,截留河道中的水充当孔隙水;由于有沙床表面的地形起伏,水流发生变化,产生压力分布不均,在沙床上就有潜流交换流动,使河道和沙床之间发生潜流交换^[11, 19, 22]。大部分移动的河床形态都造成混合潜流交换。

Elliot 和 Brooks^[19, 22]研究得出:河床静止或慢的河床移动,河床形态引起的孔隙水流(泵吸交换)占主导地位;

快速移动河床,冲刷和沉降交换占主导地位;河床形态向前推进时,冲淤交换变得很重要。但是 Packman^[11]实验和模拟得出,移动河床刚开始冲淤交换占主导地位,然后是泵吸交换。

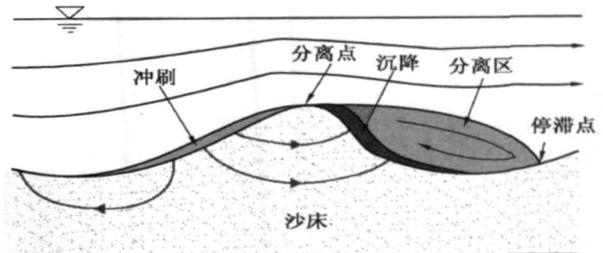


图5 典型沙丘引起的泵吸交换和潜流交换示意图

Fig. 5 Schematic of pumping exchange and turnover exchange in the typical dune

3 潜流交换的影响因素

发生在河流中的潜流交换是非常复杂的,受多种条件的影响。Packman^[23]对各种水槽实验分析得出潜流交换率与河床沉积物的渗透性成正比,与河流流速的平方成正比,与河床深度成反比,与沉积物的空隙率成反比。交换也受河床形态的几何形状的影响,特别是与河床形态相关有渗透。在空间尺度上潜流交换随着流量、梯度、河床形态、沉积物的渗透性和水表面坡度而变化^[26]。

3.1 流量的影响

很多实验证实流速是主要影响潜流交换的因素^[19,27]。随着流量的增加,相应的湿周也增加了,致使表面水和沉积物有更多的接触,增加了潜流交换的机会^[8]。Fauntleroy 溪调查数据表明,高流速比低流速的潜流交换势要大;Clarks 溪调查表明河流流速对交换势的影响要比河岸的浸润的季节变化对交换势的影响要大^[28]。Jonsson^[2]通过对在潜流带的无量纲滞留时间与河流弗劳德数的相关性分析,得出随着弗劳德数的增加,潜流交换率增加,而随着弗劳德数的增加溶质的滞留时间下降。在对河流评价中如果采用常数流量将导致潜流交换被低估,非稳定流的影响是非常大的,例如洪水对潜流交换影响就是非常大。

3.2 河床沉积物水力传导性

河流沉积物的结构和水文地质特征强烈地影响了潜流交换。在高渗透性的砂砾中交换是非常快的,致使河床孔隙水和河水经过几个小时后基本上达到完全的混合。潜流交换的深度和侧向程度是由包括泥沙大小和渗透性(水力传导性)在内的河道特征和表面河道地形决定的^[8]。Storey 等^[29]指出均匀冲积沉积物的河床中,水力传导性控制着潜流交换率和交换程度;当河床的水力传导性低于一定的阈值将没有潜流交换的发生。Wondzell 等^[30]发现山区河流中潜流偏爱通过有生物残余体的溪流河道。Worman 等^[31]发现在小的农业河流中河床的水力传导性的变化引起了估计潜流交换的不确定性。Salehin 等^[27]做了一系列河流-地下水交换的实验,通过人工方法做了二维不均匀河床的结构,发现了水流偏爱通过高渗透性区域,在此区域界面流量增大;但河床不均匀结构还产生了有效的各向异性,这些各向异性限制了垂直方向上的溶质的渗透。

3.3 河床的几何形状

溪流和河流中的观测和详实的实验室观测揭示河床形态上的压力不同和流动障碍引起了溶解性物质在潜流交换作用下进入潜流带^[2]。在实际河流中,潜流交换率和潜流带范围在空间分布上是不均匀的^[28]。自然状态的河床形态交换量大于平整河床形态的交换量,三角形河床的初始交换量要大于正弦波形河床的交换量,但是三角形河床的交换率下降更快^[32]。

3.4 河流形态

河流弯曲处也能产生潜流交换和滞留性,但是比上面提到的由河床形态引起的潜流交换在空间尺度上要大的多,水流从侧面经过了一定的距离,再重新回到河道^[33]。Baxter 等^[34]通过量化在多重空间尺度(排水段、山谷段、宽阔地段和河道段)的潜流交换过程,确定在每种空间尺度上与潜流交换相联系的几何特征,测量垂直水力梯度和河床水力传导性来量化潜流交换,得出在全部的尺度上这些鲑鱼的产卵位置与潜流交换有较强的相关性。空间尺度上的水文学和地形学的耦合对潜流交换起着关键的作用^[34,35]。在小的支流中地形对结构潜流交换起着非常大的作用。

3.5 河床不均匀性

与均匀河床相比,不均匀河床水力传导性引起通过界面的平均流量在空间上变化更大^[27]。通过模拟河床流动,不均匀导致的潜流交换增加了 17% 到 32%^[36]。河床分层结构关系产生了有效的各向异性,这种分层结构使水流更偏爱在空隙中纵向流动;河床分层结构关系引起了平均孔隙水流随深度方向发生了相对快速的下降。与均匀河床相比,进入河床的溶质被限定在更浅的区域。更快的表面迁移和更浅污染物渗入的结合产生了更短的平均滞留时间。河床泥沙的不均匀性对潜流交换产生了更大的空间局限性。在不均匀河流中潜流交换发生更大的空间变化^[27]。

在河床表面的粗沙层的掩护和覆盖增加了界面的流量, 但是层的不均匀性也降低了垂直迁移深度^[3]。Cardenas 等^[36]得出在沙和砾石河流中沉积物的不均匀性对调整潜流交换起着决定性的作用。通过流量计算表明与同等均匀介质相比, 不均匀河床引起了重要的额外潜流带交换。然而, 引起潜流带流量主要原因是沿着边界的空间周期水头分布。当边界水头周期波动更加强烈时, 不均匀性对总的潜流交换和潜流带大小的额外影响增加。当考虑河道弯曲对边界水头的影响时, 不均匀影响更大^[36]。

3.6 背景条件

不同的背景条件对悬沙或者胶体在河床中的沉积有着重要的影响。随着离子浓度的增加, 更大的一部分胶体在河床迁移的过程中将会被过滤, 使水槽中的悬浮泥沙减少, 这是由于抑制硅胶体和河床中的硅沙之间的相互排斥作用, 引起过滤系数的增加。河道中泥沙下降的比率等于潜流交换率与过滤去除部分的乘积。Ren^[37]通过实验得出对河床泥沙不进行预处理, 将产生不能重复的结果, 这说明在做细颗粒泥沙迁移实验中对床沙进行充分准备是非常重要的。由于锌或铜吸附, 使赤铁矿的表面有更强的正电荷; 磷酸根是带负电荷离子, 与赤铁矿有强的特定的反应, 使赤铁矿的表面负电荷更强。在磷酸根离子存在的情况下, 赤铁矿的沉积要比铜和锌存在的情况下要低。铜和锌的吸附使赤铁矿表面电荷更正, 在石英沙中产生更强的过滤, 这样, 在铜或锌的存在情况下赤铁矿沉积就更快。在磷酸根存在的情况下, 过滤作用下降, 磷酸根吸附提高了赤铁矿的运动, 更高的磷酸根浓度产生更高的赤铁矿运动。赤铁矿在磷酸根存在的情况下进入河床的深度要比铜或锌存在的情况下要深, 磷酸根离子浓度越大, 深入河床的深度就越深^[38]。

胶体或者颗粒对反应性污染物或者其它物质在河床中迁移产生了重大的影响^[38~40]。Ren^[40]实验得出在高岭土存在的情况下锌滞留在河床中要比硅胶体存在的情况下要高。这主要是由于: 高岭土对锌的吸附能力比硅胶体吸附能力更强; 高岭土沉积在河床中比硅胶体沉积在河床中更容易。赤铁矿的浓度影响了锌或铜的迁移, 浓度更高的赤铁矿由于在河床沉降的更多, 赤铁矿吸附锌或铜, 使更多的锌或铜停留在河床中, 使上覆水的锌的浓度下降的更快^[38]。在悬沙存在的情况下, 卵囊的沉降速度和迁移到河床中的速度增强, 上覆水的卵囊的浓度下降速度也增快^[45]。

4 各种物质的潜流交换

4.1 保守性溶质的潜流交换

Elliott 和 Brooks^[19]对溶质进入河床进行了机理行的实验研究, 得出当河床静止或者移动较慢时, 用泵吸交换模型进行了模拟, 取得了较好的成果^[22]。但对平的河床交换的机理没有做出合理的解释。河床移动较快时用冲淤模型进行了模拟, 在实验初始阶段模拟较好, 但是实验后期模拟结果与实测值相比偏小。在河床静止或者移动速度很慢时, 明显可以看出进入泥沙的前头的溶质呈一定的弧线分布, 快速移动的河床溶质进入河床的前头部分大概水平^[22]。Packman 等^[11]对移动河床进行实验和模拟得出, 在开始阶段主要是冲淤交换, 发生在表层, 在运行一段时间后, 主要是泵吸交换, 发生在深层。初始阶段用几何模型来计算交换量, 后来用对流分析其交换量。当河床移动非常缓慢时, 冲淤交换可以忽略不计^[11]。

4.2 胶体

粘土沉积到沙床中主要有三个作用: 第一, 泵吸交换或者冲淤交换引起的; 第二是沉降引起的; 第三是过滤引起的, 过滤主要是由化学和静电作用引起的。由于沉降和过滤的作用, 使胶体颗粒的潜流交换速率比保守性溶质要快^[42]。图 6 说明过滤和沉积对胶体在河床中沉积的影响。

针对胶体的潜流交换实验得出, 上覆水中胶体的浓度下降速度要比保守性溶质的浓度下降更快^[37, 38, 42, 43]。Packman^[17]做了一个循环水槽实验, 通过测量上覆水的浓度下降来确定进入河床的胶体的量。由于水流作用和粘土颗粒太小, 有小部分不能沉降。在当表面水流泥沙浓度不高的情况下, 截留的粘土能够释放到水体中。

大量粘土在河床上聚集改变孔隙水流环境, 这改变了通过河流-沙床界面的流量和泥沙在河床中的沉积。细颗粒泥沙在河流-沙床界面被去除掉。即使当河床表面是均匀的, 当粘土沉积后也变得不均匀^[44]。

细颗粒泥沙沉积在河床上减少了孔隙水流和潜流交换率,对水下和潜流带生态群落可能产生有害的影响。在沙床没有迁移的情况下,细颗粒泥沙沉积在河床上,对河床淤堵比较厉害,减少了潜流交换,河床渗透性和空隙率下降。当河床移动时,淤堵几乎不发生^[45]。实验中发现只要河床不受扰动,截留在河床中的胶体是不再被释放的^[43]。

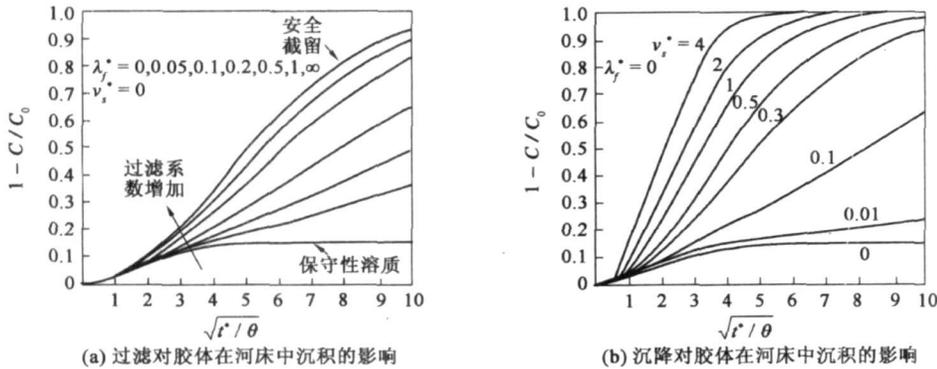


图6 过滤和沉降对胶体在河床中沉积的影响

Fig 6 Effect of filtration and settling on colloid deposition in the streambed

4.3 反应性污染物和胶体的结合

在表面水中吸附性污染物的运动依赖于悬浮泥沙和床沙。不同性质的离子可能改变胶体表面的性质,也可能改变床沙的性质,进而影响交换量。Ren的实验证实了这个结论,具有吸附性表面带不同电荷的离子,影响了赤铁矿在潜流带的交换^[38]。不同性质的泥沙对污染物停留在河床中也会产生重要的影响^[40]。

5 潜流交换对生态的影响

潜流交换控制着多种栖息地因子(也就是温度、砂砾等条件),这些因子直接控制着产卵栖息地选择的整个过程。鲑鱼巢主要发现在有界冲淤山谷段,这个地方拥有复杂的潜流交换方式和广泛的上涌区。潜流交换对鲑鱼的产卵栖息地的选择过程是非常重要的^[34]。

粗颗粒有机质的输入影响了潜流带的新陈代谢和生物地化过程^[46]。细颗粒沉降在鲑鱼产卵区的河床上,会减小通过卵巢的水流速度,通过鲑鱼卵巢的水流速度是控制着正在孵化鲑鱼卵存活的一个关键因素,这是由于水流给卵带来溶解氧并移除新陈代谢产物^[47]。

水动力控制着生物膜表面的拖曳力和控制着物质进生物膜,因此影响着生物膜的结构和功能。河流生态系统中水体通过这些过程影响着生物膜的微观结构,更重要的是表面水和孔隙水之间的水动力交换影响着河床中生物膜的微生物活动^[48]。沙床聚集着大量的微生物,它们以生物膜的形式存在,生物膜是细菌、藻类和真菌的聚集物。生物膜对沙床的各种过程有很大的影响,这些过程包括水动力交换和生物反应性混合物、颗粒与病原体的归宿^[49]。

Battin和Sengschmitt证实微生物对河床的淤堵产生了一定的影响^[47]。河床的生物膜生长增加了边界的粗糙度,对水流产生了影响^[31]。潜流带在某种意义上可以被看作为生物反应器,它控制着河流和地下水系统之间的物质传输。

6 问题与展望

从上述可以看出,最近研究集中在对这些交换过程的机理的了解,以及对水槽和自然系统中交换率的估计的改进。但是由于潜流交换受众多因素的影响,以及时空上分布有巨大差异,还有很多问题不太清楚,有待进一步进行系统深入的研究。笔者认为一下几个方面将是今后研究的重点:

(1) 潜流交换对生物地化过程作用 揭示水力学在时空上是怎样控制生物地化作用。这关系到污染物或者营养盐在河流和潜流带中的运输、停留、分解和转化等过程;

(2) 大尺度上的潜流交换的研究 现在很多研究是在小尺度上进行研究和估计潜流交换, 如何对自然河流中大尺度的进行潜流交换的量化或者估计, 这将是一个很重要的方向;

(3) 河床结构不均匀对潜流交换的影响 沉积物河床的结构明显地影响孔隙水流动比率和方式, 但是很少知道典型沉积的结构、潜流交换和别的迁移过程的相互作用。现在研究都是简单分层的不均匀情况, 在自然河床中大多是不均匀的各向异性沉积物, 对其机理以及模拟方式有待进一步的研究;

(4) 潜流交换对河流水质的影响 包括: 污染底泥在潜流交换作用是怎样释放的, 对上覆水有何影响, 是否会造成二次污染; 污染水体在潜流交换的作用下如何污染底泥; 在生物地化作用下如何影响水质;

(5) 潜流交换的数学模拟 现在多集中简单的数学估计, 以及一维和二维数学模拟上, 很少对各种生物化学过程和三维的问题进行数学模拟研究。现在模拟多集中在半耦合状态, 如何有效对界面上下的水动力学以及生物地化作用进行全耦合模拟将是一个重要的研究方向;

(6) 对污染物进出整个河床过程进行模拟 包括污染进入河床中的分布情况; 污染物在潜流交换作用下的释放规律;

(7) 沙波移动情况下潜流交换的水动力过程和污染物进出沙床的数学模拟 这个过程模拟的难点在于泥沙的冲淤使模拟界面发生变化, 冲淤交换和泵吸交换的相互耦合;

(8) 在胶体存在的情况下对反应性污染物进出河床的模拟 这个问题的难点在于床沙和胶体都对污染物有吸附行为, 两者的吸附性能和机理可能不一样; 胶体迁移和污染物的在河床中的迁移不一样, 同时胶体受到过滤和沉降的影响;

(9) 潜流交换对生态的影响 包括: 潜流交换对微生物的影响; 潜流交换对生物栖息地的影响; 潜流交换对潜流带生态结构和生态群落的影响; 潜流交换为生物补给营养盐的过程; 潜流交换对生物生长环境的影响。

我国对潜流交换的研究迄今未见报道。中国东部河流污染非常严重, 水生态水环境遭受破坏, 需要对河流的生态环境进行修复; 同时随着西部大开发的进展, 在对中国水资源非常丰富西南地区进行开发的同时, 必须确保河流生态环境系统健康发展及可持续利用, 因此, 为了彻底解决这些问题, 需要对潜流交换和潜流带有更深、更全面的认识和了解。

参考文献:

- [1] 胡勘平. 松花江水污染生态环境影响评估取得阶段性成果[J]. 环境保护, 2006(3): 1.
- [2] Jonsson. Effect of hyporheic exchange on conservative and reactive solute transport in streams. www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn:nbr:se-ur:diva-3522-1-fulltext.pdf, 2003.
- [3] Packman A I, Marion A, Zaramella M, *et al.* Development of layered sediment structure and its effects on pore water transport and hyporheic exchange[J]. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2006, 12(6): 69–78.
- [4] Boulton A J, Findlay S, Mamonier P, *et al.* The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, 29: 59–81.
- [5] Triska F J, Kennedy V C, Avanzino R J, *et al.* Retention and transport of nutrients in a third order stream in northwestern California: hyporheic processes[J]. *Ecology*, 1989, 70: 1894–1905.
- [6] 袁兴中, 罗固源. 溪流生态系统潜流带生态学研究概述[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 133–139.
- [7] Runkel R L, McKnight D M, Rajaram H. Modeling hyporheic zone processes [J]. *Advances in Water Resources*, 2003, 26(9): 901–905.
- [8] Patschke S N. Hyporheic exchange in a forested headwater stream[D]. Canada: Simon Fraser University, 1999.
- [9] Precht E, Franke U, Polerecky L, *et al.* Oxygen dynamics in permeable sediments with wave driven pore water exchange[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(3): 693–705.
- [10] Huettel M, Roy H, Precht E, *et al.* Hydrodynamical impact of biogeochemical processes in aquatic sediments[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 494: 231–236.
- [11] Packman A I, Brooks N H. Hyporheic exchange of solutes and colloids with moving bedforms[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(10): 2591–2605.

- [12] Cardenas M B, Wilson J L. Hydrodynamics of coupled flow above and below a sediment-water interface with triangular bedforms [J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30: 301– 313
- [13] Jonssona K, Johanssonb H, Womana A. Hyporheic exchange of reactive and conservative solutes in streams-tracer methodology and model interpretation[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 278: 153171.
- [14] Zaramella M, Marion A, Packman A I. Applicability of the Transient Storage Model to the hyporheic exchange of metals[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, 84(1– 2): 21– 35.
- [15] Findlay S. Importance of surface-subsurface exchange in stream ecosystems: The hyporheic zone[J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40(1): 159– 164.
- [16] Marion A, Zaramella M. A residence time model for stream subsurface exchange of contaminants[J]. *Acta Geophysica Polonica*, 2005, 53(4): 527– 539.
- [17] Packman A I, Brooks N H. Colloidal particle exchange between stream and stream bed in a laboratory flume[J]. *Marine and freshwater research*, 1995, 46(1): 233– 236.
- [18] Pretty J L, Hildrew A G, Trimmer M. Nutrient dynamics in relation to surface-subsurface hydrological exchange in a groundwater fed chalk stream[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 330(1– 2): 84– 100
- [19] Elliott A H, Brooks N H. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Laboratory experiments [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(1): 137– 151.
- [20] Packman A I, Salehin M, Zaramella M. Hyporheic exchange with gravel beds: basic hydrodynamic interactions and bedform induced advective flows[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(7): 647– 651.
- [21] Zhou D, Mendoza C. Flow through porous bed of turbulent stream [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993, 119: 365– 383.
- [22] Elliott A H, Brooks N H. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Theory[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(1): 123– 136.
- [23] Packman A I, Salehin M. Relative roles of stream flow and sedimentary conditions in controlling hyporheic exchange [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 494: 291– 297.
- [24] Laura K L, Donald I S. Modeling surface and ground water mixing in the hyporheic zone using MODFLOW and MT3D [J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29: 1618– 1633
- [25] Reimers C E, Stecher H A, Taghon G L, *et al.* In situ measurements of advective solute transport in permeable shelf sands[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 183– 201.
- [26] Havey J W, Bencala K E. The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(1): 89– 98.
- [27] Salehin M, Packman A I, Paradis M. Hyporheic exchange with heterogeneous streambeds: laboratory experiments and modeling[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40: W11504.
- [28] Reidy C A. Variability of Hyporheic Zones in Puget Sound Lowland Streams[D]. USA: University of Washington, 2004.
- [29] Storey R G, Howard K W F, Williams D D. Factors controlling riffle scale hyporheic exchange and their seasonal changes in a gaining stream: A three dimensional groundwater flow model[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(2): 1034.
- [30] Wondzell S M, Swanson F J. Seasonal and storm dynamics of the hyporheic zone of a 4th order mountain stream. II: Nitrogen cycling[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(1): 20– 34.
- [31] Womana A, Packman A I, Johansson H, *et al.* Effect of flow induced exchange in hyporheic zones on longitudinal transport of solutes in streams and rivers[J]. *Water Resources Research*, 2004, 38(1): 1001.
- [32] Marion A, Bellinello M, Guymer I, *et al.* Effect of bedform geometry on the penetration of nonreactive solutes into a streambed[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(10): 1209.
- [33] Wroblicky G J, Campana M E, Valett H M, *et al.* Seasonal variation in surface-subsurface water exchange and lateral hyporheic area of two stream-aquifer systems[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(3): 317– 328.
- [34] Baxter C V, Hauer F R. Geomorphology, hyporheic exchange, and selection of spawning habitat by bull trout (*Salvelinus confluentus*) [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57(7): 1470– 1481.
- [35] Kasahara T, Wondzell S M. Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39

(1): 1005

- [36] Cardenas M B, Wilson J L, Zlotnik V A. Impact of heterogeneity, bedform configuration, and channel curvature on hyporheic exchange[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40: W08307.
- [37] Ren J, Packman A I. Effects of Background Water Composition on Stream Subsurface Exchange of Submicron Colloids[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2002, 128(7): 624– 634.
- [38] Ren J, Packman A I. Coupled Stream Subsurface Exchange of Colloidal Hematite and Dissolved Zinc, Copper, and Phosphate[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(17): 6387– 6394.
- [39] Harvey J W, Fuller C W. Effect of enhanced manganese oxidation in the hyporheic zone on basin scale geochemical mass balance [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(4): 623– 636.
- [40] Ren J, Packman A I. Stream subsurface exchange of zinc in the presence of silica and kaolinite[J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38(24): 6571– 6581.
- [41] Searcy K E, Packman A I, Atwill E R, *et al.* Deposition of *Cryptosporidium* Oocysts in Streambeds[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(3): 1810– 1816.
- [42] Packman A I, Brooks N H, Morgan J J. A physicochemical model for colloid exchange between a stream and a sand streambed with bed forms [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(8): 2351– 2362.
- [43] Packman A I, Brooks N H, Morgan J J. Kaolinite exchange between a stream and streambed: Laboratory experiments and validation of a colloid transport model[J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(8): 2363– 2372.
- [44] Packman A I, MacKay J S. Interplay of stream subsurface exchange, clay particle deposition, and streambed evolution[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(4): 1094.
- [45] Rehg K J, Packman A I, Ren J. Effects of suspended sediment characteristics and bed sediment transport on streambed clogging[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(2): 413– 427.
- [46] Crenshaw C L, Valett H M, Webster J R. Effects of augmentation of coarse particulate organic matter on metabolism and nutrient retention in hyporheic sediments[J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47(10): 1820– 1831.
- [47] Zimmermann A E, Lapointe M. Intergranular flow velocity through salmonid redds: sensitivity to fines infiltration from low intensity sediment transport events[J]. *River Research and Applications*, 2005, 21: 865– 881.
- [48] Battin T J. Hydrodynamics is a major determinant of stream bed biofilm activity: From the sediment to the reach scale[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45: 1308– 1319.
- [49] Packman A I, Battin T J, Newbold J D. Challenges in Ecohydraulics Biophysicochemical Processes at the Stream Subsurface Interface <http://kfki.baw.de/conferences/ICHE/2002-Warsaw/ARTICLES/PDF/207C1.pdf>, 2002
- [50] Godillot R, Caussade B, Ameziane T, *et al.* Interplay between turbulence and periphyton in rough open channel flow[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2001, 39: 227– 239.

Advancement in the hyporheic exchange in rivers^{*}

JIN Guang qiu, LI Ling

(*Centre for Eco-Environment Modeling, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Surface subsurface exchange (hyporheic exchange) across the river bed plays an important role in the fate of solutes and contaminants in rivers. The main mechanisms of hyporheic exchange include pumping exchange and turnover exchange. The pumping exchange is driven by pore water flows induced by head gradients. Such head gradients are typically due to interactions between currents and the streambed topography. Turnover occurs with the moving bedforms trap and the released the interstitial fluid. The main factors of influence on hyporheic exchange are as follows: the riverine flow rate, the hydraulic conductivity, the bedform, the channel curvature, the streambed heterogeneity and the background conditions. The interplay of the reactive solutes and colloids is reviewed, and the ideas for further studies on hyporheic exchange are proposed.

Key words: hyporheic exchange; hyporheic zone; pumping exchange; turnover exchange; bedform; solute; colloid

* The study is financially supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China(No. 50425926)