

溪流生态系统潜流带生态学研究概述

袁兴中¹, 罗固源²

(1. 重庆大学资源与环境科学学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400044)

摘要:最近一、二十年,对潜流带研究的逐渐开展已使人们充分认识到潜流带在溪流生态系统结构、功能和生态过程中的重要意义。潜流带是溪流地表水和地下水相互作用的界面,占据着在地表水、河道之下的可渗透的沉积缓冲带、侧向的河岸带和地下水之间的中心位置。有关潜流带重要性的近期研究进展增进了我们对溪流生态学的理解,大大扩展了水生生物生境的物理空间以及生物相互作用和生产力存在的区域。潜流带生境包含多样化的、丰度很高的动物区系,其常常控制着溪流生物生产力和生态过程。潜流带对溪流生态系统的潜在重要性来自于生物学和生物地化活动。潜流带在溪流有机物的分解和水质净化等生态过程中发挥着重要的作用。潜流带是溪流集水区区内各种环境特征的综合表征体,它能够反映周围景观的环境条件及其变化,集水区内的自然或人为干扰,都会影响到潜流带的水文循环、理化特征、生境分布、营养结构和基本生态过程。因此,对溪流生态系统的综合管理必须包括潜流带。最后对潜流带生态学研究现存的主要问题及未来研究展望提出了几点看法。

关键词:溪流生态系统;潜流带;潜流带生物;功能重要性;动态;生物地化过程;干扰;响应

A brief review for ecological studies on hyporheic zone of stream ecosystem

YUAN Xing-Zhong¹, LUO Gu-Yuan² (1. College of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (5): 956~964.

Abstract: Stream is complex three dimensional ecosystem, in which the interface of interaction between surface-water and groundwater influenced the exchange of water and solutes between stream surface-water and groundwater. In recent 10~20 years, a previously unrecognized habitat, the hyporheic zone, has been recognized as a critical component of many streams. The studies on hyporheic zone has revealed the significance of hyporheic zone in structure component, function and processes of stream ecosystem. Hyporheic zone is defined as the saturated interstitial areas beneath the stream bed and into the stream banks that contain some proportion of water from the stream surface channel or that have been altered by channel water infiltration. This definition emphasized that presence of surface-water is a key property of hyporheic zones. Thus, the hyporheic zone is known as an ecotone between groundwater and surface-water. It occupied a central location between the surface-water above, permeable alluvial aquifers below,

基金项目:“十五”科技攻关资助项目;中国博士后科学基金及重庆大学骨干教师资助基金联合资助项目

收稿日期:2002-01-12;修订日期:2003-03-20

作者简介:袁兴中(1963~),男,四川万源人,副教授,博士,主要从事生态系统生态学和水环境生态学研究。

Foundation item:“Tenth Five” National key Project of Science and Technology;Chines Postdoctoral Science Foundation and Key Teacher Foundation of Chongqing University

Received date:2002-01-12; **Accepted date:**2003-03-20

Biography: YUAN Xing-Zhong, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in the research of ecosystem ecology, water environmental and wetland ecology. E-mail: xzyuan63@yahoo.com.cn

the riparian zones laterally, and the groundwater below. The recent advances of study on the significance of hyporheic zone in stream ecosystem have got a deeper understanding of stream ecology and broadened physical space of hydrobiont habitat and area of organism's interaction and production presence. Hyporheic zones are hotspots of biodiversity and now known to harbor a rich assemblage of organisms which exert a significant effect on function of stream ecosystem, such as metabolism, nutrient cycle, and surface-subsurface interactions. The hyporheos, biota inhabiting the hyporheic zone, exhibit various adaptations to this habitat. Evidence suggests that many invertebrates and microbiota present in hyporheic zone. The main ecological role of the hyporheic zone appears to be that of the alteration of water chemistry. Most decomposition and microbial processing of stream organic matter occur in there. Along a single stream riffle, there is a typical flow pattern in which surface-water enters the hyporheic zone in a downwelling zone at the head of the riffle and hyporheic water returns to the stream surface in an upwelling zone at the tail of the riffle. Downwelling stream water brings dissolved oxygen, nutrients, organic matter, and tiny invertebrates into the hyporheic zone. As the water percolates through the hyporheic sediments, they act as a biological filter. Dense microbial biofilms coat the large surface areas provided by the sediment particles, and depending on the supply of nutrients and dissolved carbon, interstitial porosity and redox potential, these thin biological layers carry out a suite of biochemical transformations. Upwelling water, re-entering the stream at the end of a riffle or the downstream end of a gravel bar from hyporheic zone, contains less dissolved oxygen and higher concentrations of nutrients in more reduced form. In these upwelling zones, anaerobic processes such as denitrification, ammonification, and methanogenesis usually prevail. Upwelling nutrients from hyporheic zones influence primary production within surface communities and accelerate the recovery of surface production after floods and other disturbances. Another role of hyporheic zone lies in the refuge provides for many species of invertebrates from flooding and drying, and the important physical and chemical conditions for the successful recruitment of gravel-spawning fishes. Characteristics of hyporheic zone serve as integrators of broader environmental conditions because they reflect the conditions of the surrounding landscape. Activities within a watershed, whether natural or anthropogenic, influence the most basic aspects of hyporheic zone such as hydrological cycle, physical and chemical properties, habitat distributions, trophic structure and ecological processes. So, effective stream management and restoration requires defining system boundaries to include all major ecosystem structural and functional attributes. Lack of consideration of hyporheic zone when predicting ecosystem responses to natural and anthropogenic stresses is a significant source of uncertainty in current management planning. In the end of this paper, some ideas for further studies on hyporheic zone were proposed.

Key words: stream ecosystem; hyporheic zone; hyporheos; functional importance; dynamics; biogeochemical processes; disturbance; responses

文章编号:1000-0933(2003)05-0956-09 中图分类号:Q178 文献标识码:A

溪流是复杂的三维生态系统,在其中,地表水和地下水在地表层和地下之间的相互作用界面影响着溪流和地下水之间的水分和溶质的交换。溪流生态系统的整体性评价和流域综合管理必须考虑溪流的地上和地下部分。溪流生态系统的所有自然组分,包括位于不可见的地表之下的部分,对于溪流生态过程及功能都是重要的。人类对地表水的过度利用已经影响到邻近的地下水和河岸带^[1]。因此,对溪流生态系统的管理,必须同时考虑其地表部分、地下部分及两者之间的界面。有效的溪流管理和恢复需要准确定义系统边界,以便明确那些关键的生态组分,只有这样才能认识决定溪流生态系统结构和功能的关键过程。

尽管近年来水文学家和河流生态学家已经意识到地下水对于溪流功能的重要性,但有关地下水生态

学的研究仍远远落后于地表水的生态学研究。事实上,在20世纪末,才开始在河流生态系统功能的概念模型中考虑地下水水文学和生态学^[2]。由于这种努力,拓宽了对溪流生态系统的理解,认识到溪流并非仅仅单纯作为“管道”向下游输送水和溶质。除了主河道外,在地上和地下还有很多重要的水流通路,在那里经常发生着水和物质的交换^[3]。这些交换的大部分发生在河床及河岸底下的水分处于饱和状态的沉积物层。在过去的10年,一个以前较少认识的生境——潜流带被认为是溪流生态系统的关键成分,但是对其认识还相当肤浅。通过潜流带分布的范围来定义溪流生态系统边界,使关键的生态过程能够在管理决策中予以考虑^[4]。了解这种潜藏的生态交错带的作用可能是河流及溪流生态系统恢复与管理尚待开垦的处女地之一。

本文的主要目的是探讨溪流潜流带这一地表水和地下水之间的生态界面的定义,潜流带生物群落及其生态特征,潜流带在影响地表水质及其生态过程中的作用,潜流带动态和生物地化过程,潜流带对集水区自然和人为干扰的响应。以期拓展对于溪流生态系统中地表水和地下水相互作用的科学理解,为溪流生态系统的管理提供科学依据。

1 潜流带及其潜流带生物群落

1.1 潜流带的定义

潜流带(hyporheic zone; Hyporheic 来自希腊文,“hypo”=under,“rheos”=flow)这一术语的最初使用见于Orghidan的著作^[5],他将这一界面描述为包含具有鉴别性特征生物的地下水新生境。

对潜流带的定义植根于物理学或生物学基础,依赖于研究者的兴趣和特定地点的研究方法。最普遍的定义是: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,地下水和地表水在此交混。潜流带是溪流地表水和地下水相互作用的界面,占据着在地表水、河道之下的可渗透的沉积缓冲带、侧向的河岸带和地下水之间的中心位置。在活跃的河道之下及大多数溪流或河流的河岸带内都可以发现潜流带。在更广泛的意义上,可以把潜流带定义为与地表进行水交换的溪流地下区域^[2]。

潜流带包含一部分主河道的水或主河道水下渗后其溶质组成发生部分变化的水^[6],强调含有地表水是潜流带的一个关键特征。Triska等通过设定最低地表水含量(将含有10%地表水作为确定潜流层水组成的阈值)对潜流带定义进行了量化^[7],Triska等提出了对这一界面环境的经验性判断,认为含地表溪流量大于10%但小于98%为相互作用的潜流带。Vervier等则强调潜流带的生态交错带性质^[8],潜流带是地表水和地下水的生态交错区,这一边界在空间和时间上处于动态变化之中。按照这一观点,潜流带的重要特征是:(1)地下水(通过沉积物孔隙介质流动)和河道地表水(自由流动)的界面;(2)固相(沉积物)、液相(水体)和生物相(微生物群、无脊椎动物群)的多相空间;(3)存在着一些相关梯度,如氧化还原潜势(E_h)、有机物含量、微生物数量和活动、营养盐和光的可利用性。对生物地化过程感兴趣的研究者则偏向于根据水源来定义潜流带。然而,更偏重于生物学方面的定义是,潜流带是潜流层生物(hyporheos)存在的区域^[9]。

1.2 潜流带的划分和确定

Boulton等根据不同的物理、化学、生物或生物地化特征带中的明显不同的群落,进一步将潜流带划分为亚带或群落生境^[10]。按照这一系统,位于潮湿的河道表层之下具有密切的生物学和水文学交换的层带称为潜流带(hyporheic zone),在活跃的河道边界内较干燥区域之下的层带是副流带(parafluvial zone),而位于河岸边界之外在邻近边岸带之下的潜流带称为河漫滩潜流带(floodplain hyporheic zone)。目前,有关潜流带的术语还比较含混,这是因为研究者的定位不同以及这一新兴领域正处在快速发展时期的缘故。

从概念上看,潜流带的定义尽管较简单,但在实践中要对其加以准确描述却是非常困难的。在野外,确定潜流带位置和范围的最直接的方法是利用稳定性示踪剂技术^[11]。这种方法是将稳定性示踪剂(在低浓度下即可检测)加入地表河道,在那里同溪水混合,并随之向下游流动。带有示踪剂标记的地表水渗透进入潜流带,然后在采样井(sampling well)(采样井安置在邻近河道及河道之下的水分饱和的层带)的水样中可以检测到示踪剂。通过监测水流中溶质的浓度或其它特征(如pH、电导率、温度、不同的离子等),可以判断地表水向潜流带的输入数据。此外,还可通过检测采样井采集的水样中是否有潜流层生物而证明潜流带的存在^[13]。

1.3 潜流带生物群落

潜流带是黑暗的生境,因此生物区系以无脊椎动物和微生物为主。通常把生活在潜流带中的无脊椎动物群落称为潜流动物(hyporheos)。潜流动物常以其生活在沉积物间隙的生活史特征或适应性而加以鉴别和区分。一般,居住在潜流带的孔隙动物反映了水源的梯度,可将其分为3类:偶然潜流动物(occasional hyporheos)、永久性潜流动物(permanent hyporheos)、地下水动物(groundwater fauna)^[14]。偶然潜流动物与表层环境有密切的联系,主要由水生昆虫组成,包括石蝇和摇蚊幼虫。这些无脊椎动物在其生活史的早期阶段利用潜流带,变成成体后又返回地表层。永久性潜流动物也能在地表附近发现,但其全部生活史阶段主要在潜流带度过,在形态上适应于这种孔隙空间的生活。永久性潜流动物包括挠足类、水螅、介形虫等。地下水动物,如其名称所指,常常与真正的地下水联系在一起,包括端足类、等足类、环节动物原环虫等无脊椎动物。作为地下水与地表水的生态过渡带,在潜流带中,偶然潜流动物多度较低,永久性潜流动物和地下水动物占据主导地位。

大多数无脊椎动物生活在潜流带沉积物的孔隙中,并且适应这种特殊的黑暗环境的生活,形态和生理上发生相应的变化,如眼睛退化、感觉附器延长、身体细小^[15]。潜流带无脊椎动物群落结构在时空上是高度变化的。影响群落的参数有沿水流路径上潜流带的空间位置距离、溶解氧浓度、有机物浓度、温度、营养物、底质性质。在一些冲积河流,甚至在离主河道较远(有时远至数公里)的侧向平行带中还能发现潜流动物^[16],说明了在一些河流系统,潜流带的地理延伸范围较宽。

除了无脊椎动物群落外,在潜流带沉积物颗粒表层还包裹着一层生物膜(biofilms),这是由细菌、真菌、原生动物、小型底栖动物等微型生物所组成的生物层^[17]。微生物与无脊椎动物构成了潜流带食物网,在这个食物网中,优势营养群是食腐屑者和捕食者^[18]。潜流带食物网明显不同于地表溪流,地表溪流主要由初级生产力维持植食者的取食,而在潜流带则是生物膜为各种不同的孔隙生活的无脊椎动物提供营养源,如碳源、氮源的供应^[19,20]。由于潜流带的动态复杂性及其作为生态交错带的性质,因此在未被污染的溪流的潜流带,无脊椎动物多样性较高。

2 潜流带功能重要性及动态

2.1 潜流带的功能重要性

潜流带是河流或溪流连续统的重要组成部分,它有效地连接着河流的陆地、地表和地下成分。潜流带包含着较大的物理、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。有关潜流带重要性的近期研究进展增加了人们对溪流生态学的理解,大大扩展了水生生物生境的物理空间以及生物相互作用和生产力存在的区域。潜流带生境包含多样化的、丰度很高的动物区系,其常常控制着溪流的生物生产力^[21,22]。在许多溪流或河流,潜流带地下无脊椎动物的生产力达到甚至超过了溪流底表上的生物群落^[23],潜流带确实维持着令人惊异的生物多样性及复杂的食物网。

潜流带的水文交换对地表溪流生物产生着较大的影响。潜流带沉积物和水体在代谢上是活跃的,其具有复杂的随时空变化的营养循环格局^[24]。来自潜流带的上行流(upwelling)能够传递营养物到溪流河道,影响藻类初级生产力的速率、底栖藻类群落的组成、受干扰后溪流河段的恢复^[25],能加速遭受洪水和其它干扰后溪流生产力的恢复。地下水和地表水之间的水体的相互变化在溪流底栖界面的结构和功能中具有重要的作用。

潜流带对溪流生态系统的潜在重要性源于生物学和化学活动,以及该带内较大的理化和生物学梯度。潜流层生物地化过程强烈地影响地表水质^[26]。潜流带较宽阔的溪流,保持和进行营养循环的效率更高^[27]。潜流带生物群落的分解作用可能使溪流消除有机废物的能力大大加强^[28]。

潜流带对河流生态系统的重要性部分是因为其相对较大的孔隙面积和表面积。这些特征对于决定潜流带中的生物类型非常重要^[29]。因此,潜流带沉积物孔隙为潜流带生物提供了较大的栖息生境。例如,20cm深的溪流,流经100cm河段的沉积物,其潜流带的生境大小是其上面河道的2.5倍。Stanford等推测,在美国内布拉斯加州的Plattehead河,沿着河漫滩,潜流带生境大小是河道生境大小的2400倍^[16]。潜流带中可为细菌、真菌、原生动物等生物利用的表面积至少比20cm深的溪流中的2mm直径的砂子河床沉积物表

面积大 2000 倍。沉积物颗粒表面的有机质和微生物群落在生化上是活跃的,并且能吸收或转移溶解化合物和有机物^[30]。

宽阔的潜流带可能作为溪流生物的避难地,以缓冲流量变化和食物供应的干扰。其生产力的季节性格局和干扰后格局不同于潜流带流量较少的溪流。研究表明,溪流表层的一些底栖动物在受到干扰后会进入潜流带,将其作为庇护地^[31]。实验证明,来自潜流带生境的生物是溪流生物补充的一个重要来源。

2.2 潜流带动态

潜流带的边界随其与地表溪流水交换的体积和深度而处于波动状态。反过来,这种波动影响溪流生态系统的相关组分。在溪流流量较小的季节,进入潜流带的地表水是有限的,潜流带的大部分水分来自深层地下水或侧向缓冲带。反之,流量较大的季节,或者洪水期间,地表水向潜流带输送,这种波动导致了地表水化学的改变及停留时间的变化。

潜流带是一个典型的动态生态交错带,水文交换的许多过程发生在此^[26,32]。下行流(downwelling)的水携带着溶解氧、营养盐、有机物、以及微小无脊椎动物进入潜流带,此外,也可能向潜流带输送有毒物质、沉积物粘粒、酸性径流。当水渗透过沉积物时,潜流带起着生物过滤器的作用。致密的微生物生物膜包裹着较大面积的沉积物颗粒,依赖于潜流带的营养盐和溶解碳的供应、孔隙度、氧化还原潜势,这一薄薄的生物层完成着一系列的生物化学交换^[33,34]。

3 潜流带生物地化过程

流域范围内潜流带对地表水影响的格局取决于控制潜流带分布的物理因子、通过潜流带的流量、和发生在其内的生物地化过程之间的相互作用。潜流带生物地化过程对溪流水质的影响是由于巨大的、高度活跃的溪流底表区域与沉积物和水体的长期接触^[35]。通过沉积物颗粒表面的非生物吸收以及生物膜为介质的生物吸收而去除沉积物表面的溶质。

明显影响溪流化学的潜流过程需要两个条件:(1)进入潜流带的水量较多、停留时间足够长;(2)当水通过潜流带时,影响化学变化的潜流过程的速率较高^[14]。

在地下沉积物层中,溶质的吸收可能是可逆的或不可逆的。以生物膜为介质的生物学吸收能够从水中不可逆地除去有关物质,或者在以后的时间里将其以不同的形态重新释放。当细胞代谢把有机或无机分子转化为气相时,通过扩散进入大气层,使得 C 和 N 被永久性去除。通过气体流失而发生的物质的永久性去除,其关键过程是呼吸(将有机碳转化为二氧化碳和甲烷)、脱氮(将硝酸盐转化成氮气, $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$)^[36]。潜流带生物量中所含有的所有元素亦可能通过潜流生物的迁移而从溪流中去除。

潜流带是溪流生态系统中碳、氮处理强度较大的地方^[37,38],潜流带氮循环甚至会影响整个溪流生态系统氮流^[11,39]。溪流生态系统初级生产力受到氮的可利用性的限制,因此来自潜流带的氮的输入明显地影响溪流的初级生产和次级生产。

河滨岸边带植被的镶嵌性分布(由不同年龄段、不同植被类型所组成的斑块),使得在有植被占优势的河岸陆地形态的演替发育过程中,氮的积累产生了潜在氮输入的斑块分布。土壤营养的斑块分布与河岸带植被之下变化的潜流带流之间的相互作用,使得通过上升流进入河道的潜流带营养流呈现空间异质性格局^[14]。示踪剂技术研究表明,潜流带流与河岸带土壤间存在着复杂的相互作用。

潜流带是否作为氮源或氮汇取决于在同一点上起作用的物理、化学和生物学特性的平衡,而这些又最终决定于氧浓度。从地表河道进入潜流带的水携带着氧气和有机物。当水流通过潜流带时,有机物的分解消耗氧,这样,沿着水流路径产生了氧梯度^[40]。氧梯度的范围取决于水流路径的长度、流速、地表水与地下水比例、有机物种类和浓度之间的相对比例。氧浓度控制着生物地化循环类型和最终产物的生化性质,因此决定着潜流带中特定地点是氮源或是氮汇。

除了氮循环之外,氧梯度对于碳循环路径也具有重要的意义。潜流带的厌氧代谢所导致的甲烷产生和丧失可能是从溪流中去除碳的重要途径^[41]。研究表明,在溪流沉积物内,厌氧区域普遍存在,表层上升流中所含有的厌氧产物对于厌氧生物膜是较为重要的。

潜流带有机物的分解和氧气的消耗,大部分通过底栖微型生物进行。下行流所携带的有机物或洪水期

间所沉积的有机物提供了生活在沉积物表层的微生物群落的食物来源。这种群落里的表层附着细菌能快速地吸收和代谢溶解有机物^[42]。潜流带中呼吸作用的空间格局是微生物的呼吸所造成的,微生物呼吸利用有机物,结果造成释放氮的硝化作用。沿着潜流路径呼吸作用强度的降低,进一步证明了潜流路径的上游段有机物的快速消耗。表层附着生物的呼吸是重要的,它既能在潜流带流路上产生氧梯度,又能影响生态系统的总代谢。潜流带的呼吸是溪流生态系统总体代谢的重要组成部分^[43]。尽管难以将微生物呼吸同其它大的生物区分开,但有证据表明微生物承担了大部分的氧气消耗。沿着潜流带存在着表层附着生物对输入有机物的快速利用,进入潜流带的溶解有机物的 50% 都被沉积物细菌所利用。

水和底质与生物膜接触的时间长短,决定着潜流带生物地化过程。在溪流浅滩末端或石砾坝的下游末端重新进入溪流河道的上行流,包含有较少的溶解氧和以还原形式存在的高浓度营养物。在上行流带,厌氧过程如脱氮、甲烷产生常常占据优势^[44]。在水流进入表层溪流的地方,可能存在集中的初级生产力“热点区”。例如,在美国亚里桑纳荒漠溪流,在表层河道初级生产力受氮限制的地方,富含硝酸盐的上行流产生了致密的、集中的绿藻团,以及表层水流氮浓度的纵向梯度^[45]。

4 潜流带对集水区自然和人为干扰的响应

潜流带是溪流生态系统中地表水和地下水交混的生态交错带,连接着陆地、河岸带和溪流河道,是溪流集水区内的物质和能量的动态转换中心,是集水区各种环境特征的综合表征体,它能够反映周围景观的环境条件及其变化,集水区内的自然或人为干扰,都会影响到潜流带的水文循环、理化特征、生境分布、营养结构和基本生态过程,潜流带生物群落及系统整体对集水区自然和人为干扰的时空变化也产生着积极的响应。因此,潜流带是评价溪流生态系统健康的关键组分,是保持物种多样性和流域生态平衡的重要环节,也是易受人类干扰的脆弱系统。

影响沉积物输入和转运速率的自然和人为过程能够影响潜流带分布的大尺度时空格局。高地(或山地)管理实践和土地利用能够明显地改变沉积物和水的输入与分布,从而影响潜流带过程。改变潜流带的管理实践也会影响溪流水质、生产力和多样性。对溪流流量控制的人为影响(如筑坝、抽水灌溉)也会改变潜流交换的程度、量和时间。

人类活动对潜流带健康的影响常常通过扰乱水文交换路径而发生,尽管也有报道通过毒物和重金属损害孔隙活性。水文学效应是工程活动、土地利用实践的结果,或两者的综合作用。由于土地利用管理较差(如过度放牧、砍伐森林)、以及火或干旱的影响,溪流附近修筑道路,导致细粒沉积物被冲刷、沉积,产生上层沉积物的壅滞,细粒沉积物侵入孔隙空间,使潜流带的物理空间部分丧失,并且改变孔隙度和地下水位。细颗粒粘性沉积物可能来自河道疏浚和修筑大坝。这些活动也改变水流排放格局,及地表水和潜流带水的混合格局。上述水文变化亦会威胁到邻近河岸带的完整性和生物多样性^[46]。

过量的有机物富集(人工富营养化)导致致密的藻类生长,在溪流河床上形成不渗透的粘性和衰败的有机物层,致使厌氧微生物和无脊椎动物死亡。从而堵塞潜流带中的孔隙,使鱼类无法产卵在孔隙中,破坏了溪流无脊椎动物在洪水和干旱期间的避护地^[47]。

生物生产力与控制光、营养物和有机物输入的河岸带特征有关。由于城市化、农业或河岸造林产生的河岸带植被格局的变化,通过改变土壤营养物质分布而影响河岸带生物生产力^[48]。通过潜流交换增强表层下营养输入是支持这些生境群落生产力的关键因子。Boulton 比较了新西南 Hamilton 附近山地流域的几条小溪流在放牧、外来松林和土著林的影响下潜流带理化过程及无脊椎动物群落的变化^[49]。在有河岸土著林的溪流,潜流带维持着相对多样化的无脊椎动物,包括有在地表水体常见的大多数类群。在有河岸放牧活动的溪流,仅仅只有少数无脊椎动物个体和类群占据着潜流带。河岸被外来松林占据的溪流,潜流带生物在丰度和多度上与受放牧影响的溪流相似。

潜流带过程深刻地影响溪流生态系统的整体性和生产力。在大多数溪流,水质是较好的,但是随着土地利用的变化,要维持良好水质需要了解潜流带生境。改变沉积物输入或水文输入的管理活动影响其水文循环格局,因此,管理数据利用的潜流带生境及其与地表水连接的强度。地表水水质的降低可能对潜流带过程具有不可预期的影响,并进一步加快地表水质的退化。例如生化需氧量(BOD)的增加能够降低地表水的

氧气浓度。当进入潜流带水中的氧气含量降低时,好氧和厌氧生物地化过程的格局发生变化,表层和地下生境的生态系统生产力和多样性也随之被改变^[14]。

从特定点的木质物残体输入的改变到流域范围内沉积物输移的变化,人类活动存在于不同的尺度上。不同尺度上的人类活动对潜流带产生不同的影响,这依赖于它们对河道地貌和水力源头的影响效应。例如,木质物残体输入的变化能够改变潜流带中埋藏的木质物残体的数量,因此影响潜流带中短流径的数量和分布。这样的变化也能通过改变河段内沉积物的储存而影响到较大尺度的潜流^[50]。流域范围内沉积物来源的变化在不同尺度上影响潜流带的途径,是通过影响河段地貌和饱和沉积物层的总量。上述分析表明,在溪流管理计划中应该充分考虑潜流过程。

5 问题与展望

对潜流带重要性的认识和研究还是近十几年的事。尽管目前已受到各国溪流生态学家的重视,但由于研究方法和技术远不能满足需要和潜流带本身动态异常复杂的特点,许多基本问题尚未弄清。存在的主要问题是潜流带的边界难以确定,潜流带生物种类难以鉴定,潜流带生态过程非常复杂,潜流带的采样一直是研究所面临的挑战。

根据现有的文献资料,作者认为以下几个问题将是今后研究的重点:(1)潜流带的界面生态学研究。潜流带界面生态过程(如有机物生产、营养物质循环、能量流动等)的动力学机制及建模;对界面生态的动力学机制研究,应建立在界面水平、强调环境与界面耦合的基础上;探讨界面扰动与溪流稳定性及功能发挥的关系;(2)潜流带的水文学过程。选择具有不同沉积物类型(从细颗粒到粗石砾)的集水区,描述地表运输及与地下层交换特征、地下水生态带内的三维水流动态。对溪流的地表水和地下水之间的生态交错带的水源和水流动态进行定量研究,以决定源自这些相互作用的生态学响应;(3)潜流带的三维生物地球化学结构及过程。对潜流带下行流和上行流的生物地化过程的垂直分布进行研究,确定洪水、干旱等自然干扰对潜流带生物过程的调控作用;尤其是关注氮、磷等营养物的迁移转化动态及规律,鉴别和推测潜流带生物过程(细菌的硝化和脱氮;表层附着藻类膜的营养吸收和生产;颗粒和溶解有机物的分解)和非生物过程(吸收)与陆域集水区、溪流、溪流边岸带、潜流带的联系及其对固相(土壤、沉积物)、液相(水体)、生物相(微生物群、无脊椎动物群)多相网络生物地化的贡献;(4)潜流带无脊椎动物群落生态学。包括群落结构,及群落结构的时空格局与水文、生物和物理因子的关系,生物群落对水文交换变化的响应;潜流带群落的关键种和功能群及其在溪流食物网和生态系统中的贡献;(5)潜流带生态服务功能的生态学机制。主要是潜流带生物多样性,尤其是功能群多样性在生态系统服务中的贡献及其机理;潜流带生态过程和生态系统服务的相互关系及耦合机制;自然、人为干扰下,潜流带生态系统服务受损特征及原因;潜流带在溪流生态系统恢复中的作用;受损溪流潜流带生态服务功能恢复与重建的生态学机理及关键技术;(6)潜流带对溪流水质净化的机理。潜流带脱氮除磷机理的研究;潜流带沉积物颗粒表面微生物膜的生态作用,以及生物膜在水体净化和治理中的应用,根据相关机理,研制生物膜颗粒,并应用于溪流或河流的污染治理。

我国对溪流生态学的研究还很不深入,有关潜流带的研究迄今未见报道。溪流作为一类特殊的生态系统,作为人类最重要的环境资源之一,其生态学及健康动态已经成为区域可持续发展的焦点。尤其是在西部地区,溪流是其区域景观的重要组成部分。西部开发,水资源的管理和合理利用是关键,如何确保溪流生态系统健康发展及可持续利用,是西部开发亟待迫切解决的科学问题。而潜流带作为溪流地表水与地下水的界面,是溪流与景观环境耦合的核心部位,在溪流生态系统健康的维持中起着十分重要的作用。相信随着一些重大国际生态研究计划的开展,研究方法和手段的引进和改良,该领域的研究最终会有所突破。

References:

- [1] Boulton A J. River ecosystem health down under: assessing ecological condition in riverine groundwater zones in Australia. *Water Health*, 2000, 6(2): 108~118.
- [2] Valett H M, Hakenkamp C, Boulton A J. Perspectives on the hyporheic zone: integrating hydrology and biology.

- Introduction. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, **12**: 40~43.
- [3] Bencala K E. A perspective on stream-catchment connections. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, **12**: 44~47.
- [4] Boulton A J, Findlay S, Marmonier P, *et al.* The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, **29**: 59~81.
- [5] Hauer F R and Lamberti G A. *Methods in Stream Ecology*. New York: Academic Press, 1996. 107~119.
- [6] White D S. Perspectives on defining and delineating hyporheic zones. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, **12**: 61~69.
- [7] 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. *Ecology*, 1989b, **70**: 1894~1905.
- [8] Vervier P and Naiman R J. Spatial and temporal fluctuations of dissolved organic carbon in subsurface flow of the Stillaguamish River. *Archiv für Hydrobiologie*, 1992, **123**, 401~402.
- [9] Stanford J A and Ward J V. An ecosystem perspective of alluvial rivers: connectivity and the hyporheic corridor. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, **12**: 48~60.
- [10] Boulton A J, Valett H M and Fisher S G. Spatial distribution and taxonomic composition of the hyporheos of several Sonoran desert (Arizona, USA) streams. *Archiv für Hydrobiologie*, 1992, **125**: 37~61.
- [11] Triska F J, Kennedy V C, Avanzino R J, *et al.* Retention and transport of nutrients in a third-order stream; channel processes. *Ecology*, 1989a, **70**: 1877~1892.
- [12] Evens E C, Greenwood M T and Petts G E. Thermal profiles within river beds. *Hydrologic Process*, 1995, **9**: 19~25.
- [13] Williams D. Towards a biological and chemical definition of the hyporheic zone in two Canadian rivers. *Freshwater Biology*, 1989, **22**: 189~208.
- [14] Edwards R T. The hyporheic zone. In: Robert J N and Robert E B eds. *River Ecology and Management-Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*. New York: Springer-Verlag, 1998. 399~429.
- [15] Danielopol D L. Groundwater fauna associated with riverine aquifers. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, **8**: 18~35.
- [16] Stanford J A and Ward J V. The hyporheic habitat of river ecosystem. *Nature*, 1988, **335**: 64~66.
- [17] Freeman C and Lock M A. The biofilm polysaccharide matrix: A buffer against changing organic substrate supply? *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**: 273~278.
- [18] Boulton A J. The subsurface macrofauna. In: Jones J and Mulholland P, eds. *Streams and Ground Waters*. New York: Academic Press, 2000a. 337~361.
- [19] Schindler J E and Krabbenhoft D P. The hyporheic zone as a source of dissolved organic carbon and carbon gases to a temperate forested stream. *Biogeochemistry*, 1998, **43**: 157~174.
- [20] Hill A R, Labadia C F and Sanmugadas K. Hyporheic zone hydrology and nitrogen dynamics in relation to the streambed topography of a N-rich stream. *Biogeochemistry*, 1998, **42**: 285~310.
- [21] Brunke M and Gonser T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*, 1997, **37**: 1~33.
- [22] Smock L A, Gladden J E, Riekenberg J L, *et al.* Lotic macroinvertebrate production in three dimensions: Channel surface, hyporheic, and floodplain environments. *Ecology*, 1992, **73**: 876~886.
- [23] Stanford J A, Ward J V and Ellis B K. Ecology of the alluvial aquifers of the Flathead River, Montana. In: Gibert J, Danielopol D L and Stanford J A, eds. *Groundwater ecology*. New York: Academic Press, 1994. 367~390.
- [24] McClain M E, Richey J E and Pimentel T P. Groundwater nitrogen dynamics at the terrestrial-lotic interface of a small catchment in the Central Amazon basin. *Biogeochemistry*, 1994, **27**: 113~127.
- [25] Coleman R L and Dahm C N. Stream geomorphology: Effects on periphyton standing crop and primary production. *Journal of the North American Benthological Society*, 1990, **9**: 293~302.
- [26] Gibert J, Dole-Olivier M-J, Marmonier P, *et al.* Surface water-groundwater ecotones. In: Naiman R J and Decamps H, eds. *The Ecology and Management of Aquatic-Terrestrial Ecotones*. Carnforth: UNESCO, Paris and Parthenon Publishers, 1990. 199~226.
- [27] Valett H M, Morrice J A, Dahm C N, *et al.* Parent lithology, surface-groundwater exchange, and nitrate retention in headwater streams. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**: 333~345.
- [28] Pusch M. The metabolism of organic matter in the hyporheic zone of a mountain stream, and its spatial

- distribution. *Hydrobiologia*, 1996, **323**: 107~118.
- [29] Williams D D and Hynes H B N. The occurrence of benthos deep in the substratum of a stream. *Freshwater Biology*, 1974, **4**: 233~256.
- [30] Fischer H, Pusch M and Schwoerbel J. Spatial distribution and respiration of bacteria in stream-bed sediments. *Archiv für Hydrobiologie*, 1996, **137**: 281~300.
- [31] Griffith M B and Rerry S A. The distribution of macroinvertebrates in the hyporheic zone of two small Appalachian headwater streams. *Archives für Hydrobiologia*, 1993, **126**: 373~384.
- [32] Vervier P, Gibert J, Marmonier P, *et al.* A perspective on the permeability of the surface freshwater-groundwater ecotone. *Journal of the North American Benthological Society*, 1992, **11**: 93~102.
- [33] Boulton A J. Stream ecology and surface-hyporheic exchange: Implications, techniques and limitations. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 1993, **44**: 553~564.
- [34] Boulton A J. The role of subsurface biological filters in gravel-bed river rehabilitation strategies. In: Rutherford I and Bartley R, eds. *Second Australian Stream Management Conference: The Challenge of Rehabilitating Australia's Streams*. Melbourne: Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 1999a, 81~86.
- [35] Valett H M, Fisher S G, Grimm N B, *et al.* Hyporheic-surface water exchange: implications for ecosystem structure and function. In: Stanford J A and Simons J J, eds. *Proceedings of the First International Conference on Groundwater Ecology*. Bethesda: American Water Resources Association, 1992. 395~405.
- [36] Jones J B Jr, Fisher S G and Grimm N B. Nitrification in the hyporheic zone of a desert stream ecosystem. *Journal of the North American Benthological Society*, 1995, **14**: 249~258.
- [37] Vervier P and Naiman R J. Spatial and temporal fluctuations of dissolved organic carbon in subsurface flow of the Stillaguamish River. *Archiv für Hydrobiologie*, 1992, **123**: 401~412.
- [38] Wondzell S M and Swanson F J. Seasonal and storm dynamics of the hyporheic zone of a 4th-order mountain stream. I: Nutrient cycling. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996b, **15**: 20~34.
- [39] Triska F J, Kennedy V C, Avanzino R J, *et al.* *In situ* retention-transport response to nitrate loading and storm discharge in a third-order stream. *Journal of the North American Benthological Society*, 1990b, **9**: 229~239.
- [40] Findlay S and Sobczak W. Variability in removal of dissolved organic carbon in hyporheic sediments. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, **15**: 35~41.
- [41] Jones J B Jr, Holmes R M, Fisher S G, *et al.* Methanogenesis in Sonoran desert stream ecosystem. *Biogeochemistry*, 1994, **31**: 155~173.
- [42] Bott T L, Kaplan L A and Kuserk F T. Benthic bacterial biomass supported by streamwater dissolved organic matter. *Microbial Ecology*, 1994, **10**: 335~344.
- [43] Pusch M and Schwoerbel J. Community respiration in hyporheic sediments of a mountain stream (Steina, Black Forest). *Archiv für Hydrobiologie*, 1994, **130**: 35~52.
- [44] Hendricks S P. Microbial ecology of the hyporheic zone: a perspective integrating hydrology and biology. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, **12**: 70~78.
- [45] Grimm N B. Nitrogen dynamics during succession in a desert stream. *Ecology*, 1987, **68**: 1157~1170.
- [46] Allan J D and Flecker A S. Biodiversity conservation in running waters. *Bioscience*, 1993, **43**: 32~43.
- [47] Brunke M and Gonser T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*, 1997, **37**: 1~33.
- [48] Swales S and Levings C D. Role of offchannel ponds in the life of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) and other juvenile salmonids in the Coldwater River, British Columbia. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 1987, **46**: 232~242.
- [49] Boulton A J, Scarsbrook M R, Quinn J M, *et al.* Land-use effects on the hyporheic ecology of five small streams near Hamilton, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1997, **31**: 609~622.
- [50] Dent C L, Grimm N B and Fisher S G. Multi-scale effects of surface-subsurface exchange on stream water nutrient concentrations. *Journal of the North American Benthological Society*, 2001, **20**: 162~181.