

河流潜流带的生态系统健康研究进展

吴 健, 黄沈发, 唐 浩, 吴建强

(上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要 :回顾当前关于河流潜流带在影响地表水水质和生态过程的重要作用方面的研究进展,列举了河流潜流带功能受到的主要潜在威胁,并初步提出了通过度量一定尺度范围内河流与潜流带的水文交换强度、重要的间隙化学作用速率以及河底无脊椎动物多样性来评估河流潜流带生态系统健康的方法。

关键词 :河流;潜流带;生态系统健康

中图分类号 :X171.1 ;X522 文献标识码 :A 文章编号 :1004-693X(2006)05-0005-04

Review of research on ecosystem health in riverine phreatic zones

WU Jian, HUANG Shen-fa, TANG Hao, WU Jian-qiang

(Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract :The research progress related to the influence of phreatic zone on surface water quality and ecological process was reviewed, as well as some main potential threats affecting phreatic zone were listed. In addition, methods to evaluate the the health condition of phreatic zone through measurements of the extent of hydrological exchange between the river and the phreatic zone at a range of scales, the rates of some key interstitial chemical processes, and the biodiversity of phreatic invertebrates were proposed.

Key words :river; phreatic zone; ecosystem health

数十年前水文和生态学家就已意识到地下水对于河流功能的重要性,但地下水生态研究仍远远滞后于表面径流。事实上只在近十年,地下水的水文和生态才开始被整合到河流生态系统功能的概念模型中^[1]。这一进展使公众意识到河流不仅仅是向下游输送水及物质的“管道”,在其各界面上还通过各种渠道不断地进行水和物质的交换^[2]。

许多交换都发生于河流下方以及侧向河岸可渗透的沉积区内,这一区域被称作潜流带。潜流带是河流地表水和地下水相互作用的界面,占据着地表水、侧向河岸带和地下水之间的中心位置。当水流通过潜流带时,微生物和化学过程通过营养转化、耗氧和有机物分解等作用改变水体性质。因而,从潜流带进入其上河流的水体通常具有不同的水质,从而也会影响河流中的一些进程,例如藻类生长、无脊椎动物组成和凋落物分解等^[3-4]。在一些河流中,潜

流带的流量甚至有可能是表面水体的 3~4 倍,河流生态学家开始意识到潜流带对许多河流生态系统的重要性。

目前,生态学家与管理者和决策者之间缺乏必要的沟通,在如何确立特定河流潜流带的重要性、各种过程或生物的重要程度以及如何度量人类活动影响等方面仍相当欠缺。至今为止,河流生态系统健康方面的著作都仅着重于度量地表水的过程和流域环境,然而这种传统上只关注地表水水质的评估往往是不准确的,需要结合表面水体与河底区域健康的度量才能获得对河流生态系统环境更可靠的认知。

本文回顾了当前关于潜流带在影响地表水水质和生态过程的重要作用方面的研究进展,列举了河流潜流带功能受到的主要潜在威胁,提出了一些可以用于度量这一重要河流组分的健康状况的生态指标。

这些指标将有助于资源管理者和政策开发者对河流生态系统健康进行评估和保护,同时提高对地表水和地下水在河流生态系统中相互作用的科学认识。

1 潜流带的动态交换

在许多河流中,潜流带处于地表径流、可渗透的沉积含水层、滨岸植被区和地下水之间的中间位置。潜流带的边界随着与之交换的表面径流的深度与流量的变化而波动,这些波动也会引起邻近的河流生态系统组分的变化^[5]。在枯水期,潜流带中地表水的贡献很有限,大多数都来自于深层地下水或侧面含水层。相反,在丰水季节或洪水时,地表水将进入潜流带,这将改变下层水的化学性质与停留时间。

下渗水为潜流带输送了溶解氧、营养物、有机物和微型无脊椎动物,同时也可能带来有毒物质、淤泥和酸性水。当水流渗透沉积物时,沉积物的作用不仅只是类似鱼缸底部的卵石,而更像一个生物过滤器,密集的微生物相覆盖于沉积颗粒物的表面区域,并依赖营养物和可溶性碳源的供应,以及间隙孔隙率和氧化还原能力,进行一系列的生物化学转化^[6,7]。

微生物相为许多摄食的孔隙无脊椎动物提供了营养丰富的“草场”。潜流带的食物网和表层水体的食物网有明显的区别,在表层水体中,草食动物以取食初级生产者为生,而在地下潜流带,食碎屑者和肉食动物是主要的营养类群^[8]。在许多未污染河流的潜流带中,存在着特异的无脊椎动物,它们中的许多都只存在于潜流带,并且通过眼睛退化、延长附属感觉器官和减小身体尺寸来适应孔隙生活^[9]。在一些冲积河流,某些河底无脊椎动物甚至出现在距主河道数十公里的河流区内,这表明潜流带在某些河流中的分布范围相当广泛。

潜流带水体的化学性质随着水和底质与微生物相的长时间接触而发生极大改变。无论是自激流的末端或是砾石沙洲的下游端重新进入河流的上渗水,通常都含有较低的溶解氧和较高的营养物质。在这些上渗区,厌氧过程如反硝化作用、氨化作用和甲烷化作用盛行^[10]。在水流进入地表水的地方,有可能会出现局部的初级生产者的增长热点。例如,在澳大利亚亚利桑那州的一条沙漠河流中,氮含量限制了表面水的初级生产力,富含氮的上渗水造就了高密度局部丛生的绿色藻类和表面径流水中纵向梯度的氮浓度变化^[11]。

2 潜流带的重要功能

某一特定河流潜流带的功能重要性主要取决于潜流带中的水文交换和间隙作用的强度(例如化学

变化、微生物动态和无脊椎动物呼吸作用等)^[7]。水文交换强度取决于流域尺度上的河流大小与形态、排水模式、河道形式和水流年际变化的特征,以及沉积物尺度上的颗粒尺寸、填料、孔隙率和河流内植被的变化^[6]。间隙作用强度则受到包括可溶性营养物、油类、有机物质、微生物群落组成、捕食压力、微尺度上的水流模式等一系列因素的影响^[7,10]。

有学者提出一个简单的概念模型,用以说明水文交换与间隙作用两者间的关联,有助于研究人员对潜流带健康的理解与评估^[12]。如果水文交换与间隙作用的强度都很低,潜流带就不可能在河流功能中发挥重要作用。过快的水文交换也会使得水文停留时间太短,以至于微生物作用还未能对水体的化学性质产生足够影响,从而损害潜流带的价值。

潜流带的主要生态功能在于对水体化学性质的改变。在富营养化河流中,潜流带的作用类似于污水处理厂的砾石过滤器。潜流带也为地表径流提供营养物质,这些营养物质通常是河流生产力的限制因子。许多河流有机物分解的微生物过程都发生在沉积物中,潜流带既是存储区又是反应区^[13]。沉积物缝隙间的新陈代谢活动改变了溶解氧浓度,从而影响到重金属的毒性与迁移。

潜流带另一重要功能是在洪水或干旱时期为许多无脊椎动物提供避难所^[8]。潜流带的存在避免了一些生物受到地表水水体污染的威胁。潜流带的生物多样性比预期的高,每年都有许多新种被发现。尽管这些种在潜流带中可能具有较高密度,然而它们所扮演的角色却不为人所知。这些无脊椎动物通过它们的活动(迁移、摄食、排泄)来改变孔径,它们不仅是微生物的载体,而且还摄食微生物相,有时也成为表面捕食者的猎物,并且通过排泄产生营养物。潜流带还为砾石产卵鱼类的成功繁育提供了物理化学条件,某种意义上这也是一种避难所功能。

3 人类活动对潜流带的影响

尽管有报道说有有毒物质和重金属会破坏间隙作用,但人类对潜流带的影响通常表现为对水文交换通道的破坏。水文效应受到工程活动和土地利用行为的影响,可能是两者综合作用的结果(表1)。由于缺乏管理的土地利用(例如过度放牧和毁林)、火灾或干旱以及沿河的道路建设等行为,使得从集水区冲刷下来的碎屑沉积物在潜流带表面沉降,从而进入间隙中造成阻塞,这些碎屑沉积物只有在受到激流冲刷时才有可能被移除。

过量的有机营养物可能导致藻类生长爆发,从而在河床表面形成由淤泥和死亡有机体构成的非渗

透性层,使得潜流带缺乏下渗水,从而造成溶解氧和营养物的供应不足,导致好氧微生物与无脊椎动物的死亡。被封闭的缝隙使得鱼类无法产卵,河流无脊椎动物也在洪水和干旱时失去了避难所^[6]。

河道拓宽与水坝建设使得淤泥量增加,这些活动会改变地表水和地下水的混合模式。河床侵蚀会破坏部分潜流带、改变孔积率和地下水水位。这些水文变化也可能威胁到邻近的洪水平原和滨岸林带的完整性与生物多样性^[14]。河道内的沙砾开采是威胁到潜流带的另一因素,在大多数沙砾开采中都不曾考虑到对潜流带的影响^[15]。

有机物和有毒物污染有可能经由潜流带从河流中迁移至地下水体和侧面含水层。尽管潜流带的沉积物通常是某些化学物质的有效过滤器,但却难以经受持续的有机负荷冲击。研究表明,过于丰富的有机物质将使得微生物呼吸耗氧,从而导致河底生物群落消亡。锌和铜等重金属也会毒害孔隙无脊椎动物^[7],见表1。

表1 影响潜流带功能的主要人类活动

人类活动	破坏水文交换	损害间隙作用
土地管理不当带来的沉积物(过度放牧、毁林、农耕)	✓	
采矿带来的沉积物,包括污染沉积物	✓	✓
沿河道路建设带来的石块和淤泥	✓	
河道工程:开凿渠道、截弯取直、堤岸建设	✓	
水库、水坝和其他集水工程:改变水流和沉积物变化特征	✓	
河流含水层地下水过度开采	✓	
地表水过度利用,尤其在枯水期	✓	
滨岸林带的改变、毁害或过度采伐	✓	✓
河内沙砾开采:沉积作用和栖息地的物理移除	✓	✓
河道侵蚀和疏浚:移除栖息地	✓	✓
由于疏于管理的密集农业和污水排放带来的过度营养物质输入		✓
疏于管理的流域土地利用造成的盐碱化		✓
城市和农村排放的有毒物质、杀虫剂、除草剂和有机污染物		✓
发电站造成的热污染或水库带来的冷水		✓
垃圾堆放、油站和有毒物管理不当带来的地下水污染		✓

4 潜流带健康的评估

在流域和景观尺度上对水域和陆域生态系统健康的评估已有较多论述。然而,尽管大多数文献都论及潜流带对河流生态系统的功能作用和生态重要性,但几乎没有对于度量潜流带健康方法的描述。上面的讨论提出了一些可能的指标,它们也曾作为地表水生态系统的生态系统健康和生态完整性的指标^[16]被提出过。这些指标都是功能性的,因为生态

系统健康不可能参照任何“自然”系统来判定,而只可能取决于生态系统的自我维持能力。对健康的判定必须包括人类价值观、系统为人类带来的服务功能,以及以上提出的生态标准^[17-18]。这种将人类问题加入河流健康评估的观点越来越被接受,这也使得这一问题超越了单一的环境问题而朝着更加完善的生态系统健康管理发展。

一些研究选择了水文交换强度、间隙作用速率和无脊椎动物多样性等指标来评估潜流带的生态系统健康状况,这些筛选的指标要求既要易于度量,又能反映潜流带对外在胁迫的响应,还应考虑到人类社会价值观和对潜流带的利用。和地表水的健康评估一样,仅凭单一的指标不可能满足所有的要求。

4.1 水文交换强度

水文学家和地形学家可以通过流速、河床形态、孔积率和颗粒尺寸来计算某一特定河段的水文交换强度。与此相关的是水文导水性(水流通过间隙的容易程度),有相对简单的操作方法来度量^[4]。如对于水文交换强度,就可以通过利用染色剂进行现场交换实验、测量水体温度差异或可溶性示踪物等有效的方法来度量^[19]。表面阻塞、间隙堵塞或是与之相反的快速过流,都表明有物理或生物过程改变了水文交换强度。覆盖于下渗区之上的淤泥或藻类层较明显,然而更深的阻塞则不易被发觉。

受到破坏的水文交换的特征及其对潜流带水质的影响前面已有论述。这一指标较易理解,而且当水流通道组成单一时(由同类沉积物构成),采用染色剂或通过温度来度量的方法也更直接有效。但这一度量方法的敏感性较难判断,在自然变化的背景下,轻微的堵塞也难以被检测。

4.2 间隙作用速率

如果水文交换足够充分,而间隙作用却比预期的低得多,这表明生态系统功能的缺失。尤其是,如果某一过程需要相当严格的环境条件(与底物、温度、pH值有关),那么这一过程就可能指示出损害间隙作用的因子。目前在实地测量水生生态系统中微生物活动和功能的技术方法上,也取得了一定的进展^[20]。这一指标最大的问题在于,如何选择合适的生态系统过程和新陈代谢途径。当前,在大范围的潜流带中,研究人员缺乏这些过程的速率,以及沉积物尺寸、水文通透性、营养供应和其他条件变化的经验数据。

一种表示某些过程相对速率的比较性方法为快速测定提供了美好的发展前景。有研究表明,硝酸盐浓度高的地区比浓度低的地方,其硝化速率更快。与之类似的是,溶解氧的浓度水平就可以表明好氧

细菌的活动速率。虽然直接进行实地的微生物度量(如水解活动)可能更为灵敏^[18],但这却比度量营养物或溶解氧浓度更加困难。

4.3 无脊椎动物多样性

大型无脊椎动物群体的多样性及组成被用于表面水体的评估中,同样,无脊椎动物生物多样性也可度量潜流带的健康水平。无脊椎动物可作为地下水水质的指示种,但是目前对于许多种的生态位仍缺乏必要的基础研究资料。国外一些研究表明,人类对潜流带的破坏改变了孔隙无脊椎动物的功能组成^[21]。无脊椎动物多样性指标仍需得到严格的检验。它的灵敏度取决于河底群体的特定组成成分,而不是整个生物多样性。取样方法应首先得到改进,虽然目前有几种方法可以采集潜流带无脊椎动物,但这些方法都存在缺陷,当前需要更多的比较性研究来确定这些采样问题的严重程度。当研究人员知道了无脊椎动物在潜流带的作用,就能更好地了解这一指标。

5 结 语

潜流带在河流生态系统中发挥着重要作用,但近十几年来,各国河流生态学家才开始重视并研究潜流带。由于研究方法和技术远不能满足需要,再加上潜流带本身异常动态复杂的特点,许多基本问题尚未弄清,潜流带的边界不易确定,潜流带生物种类难以鉴定,而且潜流带生态过程非常复杂,潜流带的采样也一直是此类研究所面临的挑战。我国对河流生态学的研究还很不深入,有关潜流带的研究迄今鲜有报道。河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。而潜流带作为河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。若想全面研究生态系统并遵循流域管理,就需要建立更为宽泛的河流环境安全体系,考虑地下水问题。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及改良,该领域的研究最终会有所突破,从而为河流生态系统的管理提供有力支持。

参考文献:

[1] VALETT H M, HAKENKAMP C, BOULTON A J. Perspectives on the hyporheic zone: integrating hydrology and biology introduction [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, 12: 40-43.

[2] BENCALA K E. A perspective on stream-catchment connections

[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, 12: 44-47.

- [3] COLEMAN R L, DAHM C N. Stream geomorphology: Effects on periphyton standing crop and primary production [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1990, 9: 293-302.
- [4] BOULTON A J. Stream ecology and surface-hyporheic exchange: Implications, techniques and limitations [J]. *Australian Journal of Marine and Fresh Water Research*, 1993, 44: 553-564.
- [5] WHITE D S. Perspectives on defining and delineating hyporheic zones [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, 12: 61-69.
- [6] BRUNKE M, GONSER T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater [J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37: 1-33.
- [7] BOULTON A J, FINDLAY S, MARMONIER 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.
- [8] BOULTON A J. The subsurface macrofauna [C] // In: Jones J and Mulholland P, eds. *Streams and Ground Waters*. New York: Academic Press, 2000. 337-361.
- [9] DANIELOPOL D L. Groundwater fauna associated with riverine aquifers [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, 8: 18-35.
- [10] HENDRICKS S P. Microbial ecology of the hyporheic zone: a perspective integrating hydrology and biology [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, 12: 70-78.
- [11] GRIMM N B. Nitrogen dynamics during succession in a desert stream [J]. *Ecology*, 1987, 68: 1157-1170.
- [12] FINDLAY S. Importance of surface-subsurface exchange in stream ecosystems: the hyporheic zone [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40(1): 159-64.
- [13] MARMONIER P, FONTVIEILLE D, GILBERT J, et al. Distribution of dissolved organic carbon and bacteria at the interface between the Rhone river and its alluvial aquifer [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1995, 14(3): 382-392.
- [14] ALLAN J D, FLECKER A S. Biodiversity conservation in running waters [J]. *Bioscience*, 1993, 43: 32-43.
- [15] BOULTON A J. The role of subsurface biological filters in gravel-bed river rehabilitations strategies [C] // 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, 1999. 81-86.
- [16] RAPPORT D J, REGIER H A, HUTCHINSON T C. Ecosystem behavior under stress [J]. *The American Naturalist*, 1985, 125: 617-640.

(下转第 27 页)

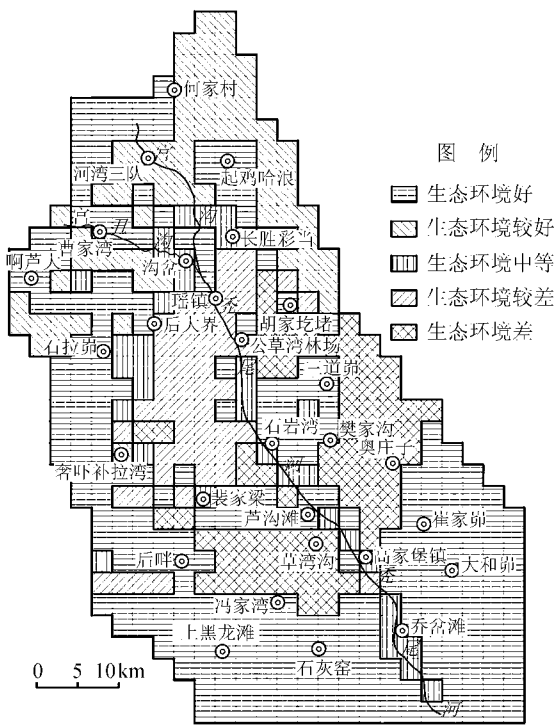


图 8 流域表生生态环境评价结果

态环境现状进行评价。评价结果表明,流域的表生生态环境现状总体较好。盖沙丘陵区 and 沙漠区是流域开发时进行水资源与生态环境保护的重点。

参考文献:

[1] 地质矿产部神府东胜环境地质综合组. 神府—东胜地区环境地质与水资源综合评价报告[R]. 1998.

[2] EMILIO C. Aquifer overexploitation :what does it mean ?[J]. Hydrogeology Journal 2002 ,10 :254-277.

[3] De VRIES J J. Prediction in hydrogeology :two case histories [J]. Geol Rundsch ,1997 ,86 :354-371.

[4] LIN Nianfeng ,TANG Jie ,HAN Fengxiang. Eco-environmental problems and effective utilization of water resources in the Kashi Plain ,western Terim Basin ,China[J]. Hydrogeology Journal , 2001(9) :202-207.

[5] WANG G ,QIAN J ,CHENG G ,et al. Eco-environmental degradation and causal analysis in the source region of the Yellow River[J]. Environmental Geology 2001 ,40 :884-890.

[6] BOUTALEB S ,BOUCHAOU L ,MUDRY J ,et al. Hydrogeologic effects on the quality of water in the Oued Issen watershed , western Upper Atlas Mountains ,Morocco[J]. Hydrogeology Journal 2000(8) :230-238.

[7] BABU R P ,SUBRAHMANYAM K ,DHAR R L. Geo-environmental effects of groundwater regime in Andhra Pradesh ,India[J]. Environmental Geology 2001 ,40(4-5) :632-642.

[8] MARIA V E ,CARLOS D D. Environmental effects of aquifer overexploitation :a case study in the Highlands of Mexico[J]. Environmental Management 2002 ,29(2) :266-278.

[9] SANDRA J Z ,RAY H F. Influence of groundwater depth on the

seasonal sources of water accessed by Banksia tree species on a shallow sandy coastal aquifer[J]. Oecologia 2002 ,131 :8-19.

[10] BELOUSOVA A P. A concept of forming a structure of ecological indicators and indexes for regional sustainable development[J]. Environmental geology 2000 ,39(11) :1227-1236.

[11] GAO Q ,MEI Y ,CHANPIN L ,et al. Effects of groundwater and harvest intensity on alkaline grassland ecosystem dynamics—A simulation study[J]. Plant Ecology ,1998 ,135 :165-176.

[12] WANG Wenke. Research on ecology-oriented groundwater in northwest of China[C]//李佩成,王文科,裴先治. 中国西部环境问题与可持续发展国际研讨会论文集. 北京:中国环境科学出版社,2004 :483-491.

[13] 张长春,邵景力,李慈君,等. 地下水位生态环境效应及生态环境指标[J]. 水文地质工程地质,2003(3) :6-10.

[14] 姜桂华,王文科,杨泽元. 关中盆地潜水含水层脆弱性评价[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2004 ,32(10) :111-115.

[15] 王文科,栾约生,杨泽元,等. 人类重大工程对格尔木冲洪积扇水资源与生态环境系统的影响研究[J]. 西安工程学院学报,2001,23(2) :6-11.

[16] 张玉,崔旭. 疏勒河流域水文地质环境与盐渍土分布发育规律[J]. 甘肃农业,2000(9) :15-17.

[17] 地质矿产部地质工程勘察院. 陕西神木县红碱淖—沟岔地区地下水岭勘察研究报告[R]. 1992.

(收稿日期 2006-04-03 编辑 高渭文)

(上接第 8 页)

[17] RAPPORT D J. Symptoms of pathology in the Gulf of Bothnia (Baltic Sea) ecosystem response to stress from human activity [J]. Biological Journal of the Linnean Society ,1989 ,37 :33-49.

[18] RAPPORT D J. Ecosystem services and management options as blanket indicators of ecosystem health[J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health ,1995 ,4 :97-105.

[19] MORRICE J A ,VALETT H M ,DAHM C N ,et al. Alluvial characteristics , groundwater-surface water exchange , and hydrologic retention in headwater streams[J]. Hydrologic Process ,1997 ,11 :253-267.

[20] BOON P I. Bacterial biodiversity in wetlands[C]//In :Gopal B ,Junk W J ,eds. Biodiversity in Wetland :Assessment , Function and Conservation. Leiden :Backhuys Publishers , 2000 ,1 :1-30.

[21] CLARET C ,FONTVIELLE D. Characteristics of biofilm assemblages in two contrasted hydrodynamic and trophic contexts[J]. Microbial Ecology ,1997 ,34 :49-57.

(收稿日期 2005-04-26 编辑 高渭文)