

不同底栖生物扰动对沉积物渗透性的影响

程丹东¹, 王元元¹, 宋进喜^{1,2}, 孙雅琪¹, 张国涛¹

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127;

2. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探讨不同生物扰动对沉积物成分、粒径分布和渗透性的影响, 为河流污染治理与潜流带修复提供科学依据。[方法] 通过室内模拟沉积物中摇蚊幼虫(*Chironomid larvae*), 颤蚓(*Tubificid*)和尖膀胱螺(*Physa acuta*)的生物扰动过程, 研究不同底栖生物扰动对河流潜流带沉积物渗透系数的影响。[结果] 混合生物组中, 摇蚊幼虫和尖膀胱螺组合为渗透性能加强最大的一组。生物扰动作用通过改变沉积物的物理特性促使其结构疏松, 孔隙增大, 从而对沉积物颗粒粒径大小和分布区域产生明显干预作用, 从而影响沉积物的渗透性。摇蚊幼虫对沉积物成分变化及粒径分布影响最大, 使沉积物渗透性增强; 颤蚓的淤塞作用主要发生在水—沉积物界面以下 3~9 cm, 导致渗透性减弱; 尖膀胱螺对沉积物粒径分布的影响不明显。[结论] 在同一沉积物环境条件下, 单一物种组中摇蚊幼虫和尖膀胱螺对沉积物的渗透性呈促进作用, 摇蚊幼虫的促进效果比尖膀胱螺更显著, 颤蚓对沉积物渗透性呈削弱作用。

关键词: 生物扰动; 垂向渗透系数; 摇蚊幼虫; 颤蚓; 尖膀胱螺

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0077-05

中图分类号: X174

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20151009.001

Influences of Bioturbations on Vertical Hydraulic Conductivity Diversity of Sediments

CHENG Dandong¹, WANG Yuanyuan¹, SONG Jinxi^{1,2}, SUN Yaqi¹, ZHANG Guotao¹

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710027, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] We analyzed the impact of bioturbations on sediment composition, particle size distribution and permeability in order to provide a scientific basis for river pollution control and undercurrent belt repair. [Methods] We investigated the effects of different invertebrates on vertical hydraulic conductivity (VHC) through simulating sediments disturbed by *Chironomid larvae*, *Tubificid* and *Physa acuta* in laboratory conditions. [Results] *C. larvae* and *P. acuta* had the greatest impact on permeability. The clogging effect by *Tubificid* mainly occurred in 3—9 cm under water-sediment interface, resulted in reducing hydraulic conductivity. The granularity effect and distribution characteristics by *P. acuta* were barely discernible. [Conclusion] Bioturbation of both *Chironomid larvae* and *Physa acuta* improves the VHC of sediments, while bioturbation of *C. larvae* is more remarkable, comparatively. In contrast, *Tubificid* weakens the permeability of sediment. Bioturbation can modify the structure of sediment deposits, and thereby promote the permeability of streambed sediments.

Keywords: bioturbations; vertical hydraulic conductivity; *Chironomid larvae*; *Tubificid*; *Physa acuta*

潜流带是一个在水文、生态、生物地球化学过程等方面相互作用的动态生态交错带^[1], 是河流生态系统的重要组成部分, 潜流带水力交换有助于提高其生态质量, 为水生生物提供独特的栖息地^[2], 并且, 潜流带水交换能够影响整个河流生态系统的新陈代谢

和养分循环^[3]。因此, 河水和地下水相互作用对河流的生态环境健康有着至关重要的影响^[4]。

在关于潜流带的研究中, Packman 等研究认为, 河水和浅层地下水相互作用于河岸表面及河床多孔渗透区, 即潜流带^[5]。潜流交换是指物质在河道和河

收稿日期:

修回日期: 2015-07-14

资助项目: 国家自然科学基金“北方河流潜流带水交换变化机理与数值模拟”(51379175), “典型物理化学作用下河床渗透系数变化机理研究”(51079123); 陕西省重点科技创新团队计划(2014KCT-27); 高等学校博士学科点专项科研基金(20136101110001)

第一作者: 程丹东(1990—)女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为水文与水资源。E-mail: chengdandong@163.com。

通信作者: 宋进喜(1971—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 教授, 博士, 主要从事水文学、水资源与水生态研究。E-mail: jinxisong@nwu.edu.cn。

道附近的饱和沉积层之间的相互交换^[3],潜流交换受众多因素的影响,其中一个重要因素是生物扰动过程^[6]。生物扰动是指底栖动物由于自身的摄食、迁移等行为对沉积物颗粒的混合、扩散,最后导致沉积物再分布^[7],可以改变沉积物的物理化学性质,影响沉积物与水界面的物质交换^[8]。在潜流交换过程中,河床沉积物的垂向渗透系数(K_v)是河流与地下水之间相互作用以及河流生态系统分析中一个重要的参数^[9]。研究表明,生物扰动是影响河床沉积物渗透性的重要因素之一^[10],且无脊椎动物扰动对沉积物的物理影响程度也依赖于物种扰动特点和环境条件^[11]。目前虽然关于生物扰动对沉积物迁移变化研究比较深入^[12],但鲜有不同种属无脊椎动物互相作用下,对渗透系数的影响研究。因此,本文选取渭河临潼段主要无脊椎底栖生物摇蚊幼虫、颤蚓及尖膀胱螺 3 种生物,通过室内模拟垂向渗透系数试验和沉积物的粒度分析,初步探讨不同生物扰动作用强度下沉积物渗透性的变化特性,以期拓展沉积物渗透系数变化的影响机理研究,为河流污染治理与潜流带修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集及处理

沉积物样品、扰动生物均采集于渭河临潼断面潜流带。沉积物原样为原位渗透实验后有机玻璃管内沉积物;利用采泥器(20 cm×30 cm)、D 型网及 60 目筛采集生物,在实验室内进行培养和鉴定,试验所需水样为实验超纯水。将采集到的原位沉积物经过自然风干后进行粒径分析,得到 $0.2 \text{ mm} < r < 2.0 \text{ mm}$ (粗沙)、 $0.075 \text{ mm} < r < 0.2 \text{ mm}$ (细沙)和 $r < 0.075 \text{ mm}$ (细泥)的重量比为 3 : 2 : 4,将筛分后的粗沙、细沙和细泥分类保存待用。无脊椎生物主要为摇蚊幼虫、颤蚓及尖膀胱螺,三者与研究点的生物密度比为 7 : 98 : 10。

1.2 试验设计

试验所用的有机玻璃管(高为 40 cm,内径为 5.4 cm)底端用细纱布封住,并垂直固定在水槽架上,将处理后的粗沙、细沙和细泥按 3 : 2 : 4 重量比例混合均匀装入试验管内,高为 15 cm,将上覆水深缓慢加入管内待沉积物中与水充分饱和后加入生物。由于试验组中的孔隙度与原位沉积物中孔隙度有偏差,因此取出水头下降高度一致的试验管加入生物,仍可分析不同生物的扰动特点对沉积物渗透性的影响。

试验采用 3 组平行样,分为 8 组:(1) CK 组,空白对照,不添加底栖生物;(2) Cl 组,7 条摇蚊幼虫;

(3) Tub 组,98 条颤蚓;(4) Pa 组,10 条尖膀胱螺;(5) Cl+Tub 组,7 条摇蚊幼虫和 98 条水颤蚓;(6) Cl+Pa,7 条摇蚊幼虫和 10 条尖膀胱螺;(7) Tub+Pa 组,98 条颤蚓和 10 条尖膀胱螺;(8) Cl+Tub+Pa 组,7 条摇蚊幼虫、98 条颤蚓和 10 条尖膀胱螺。

渗透系数的测定方法采用水头下降竖管渗透实验法^[13]。室内底栖生物生物扰动模拟试验数据记录结束后,对试验管中沉积物进行分层取样,每 3 cm 一层,进行粒径分析。

2 结果与讨论

2.1 底栖生物扰动对沉积物渗透系数的影响

由图 1 可知,同空白组对比,底栖生物扰动作用显著改变沉积物渗透系数。在单一生物组中,Cl 组渗透系数大于空白组,Tub 组渗透系数比空白组小,Pa 组变化不大。表明在该试验条件下,摇蚊幼虫对渗透性的促进作用最强,颤蚓对沉积物渗透性起抑制作用;尖膀胱螺扰动并没有明显的增强沉积物渗透系数,表明不同生物扰动对沉积物的渗透性影响不同。在不同生物混合组中,与空白组对比,Cl+Pa 组对沉积物渗透性起促进作用,Tub+Pa 组对沉积物渗透系数起较弱的抑制作用,Cl+Tub 组有明显的抑制作用,Cl+Pa+Tub 组的渗透系数小于空白组,表明不同生物的混合组中,生物之间的相互作用对沉积物渗透性有着一定影响。

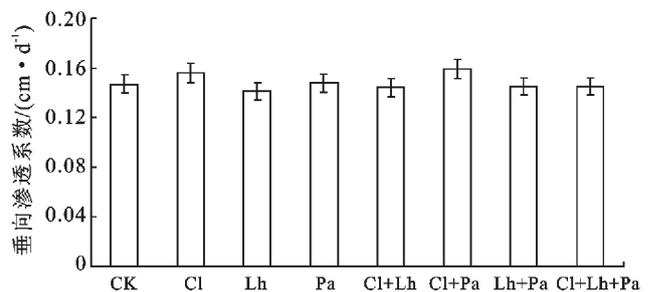


图 1 不同生物组垂向渗透系数

研究中发现,颤蚓类的活动明显加快沉积物颗粒的垂直迁移速率^[14],但试验中 Tub 组对沉积物渗透性表现出净抑制作用,这与颤蚓的密度有关。宋进喜等^[15]在研究河流潜流带颤蚓生物扰动对沉积物渗透性的影响研究时发现,颤蚓密度大于一定量值后,颤蚓生物扰动对沉积物渗透性有减弱作用。密度达到 2.0 ind./cm^2 后,沉积物渗透性甚至比空白组还弱。在 Tub 组中颤蚓的密度达到 4.1 ind./cm^2 ,远远超过其量值。颤蚓的生物扰动作用主要通过生物淋洗

来实现,在沉积物表层以下的深度活动产生大量的迁移痕迹和过水通道,迁移过程中伴随有生物搬运作用,在表层留下各种孔洞,所以颤蚓对沉积物表层构造的改变以垂直迁移为主^[16],颤蚓生物密度过大,生物体本身的阻塞作用超过了其扰动行为使表层和深层的沉积物颗粒在垂直方向发生移动和重新分布产生的孔穴。

在Cl组中,摇蚊幼虫对沉积物渗透性起促进作用。通过试验观察,摇蚊幼虫对沉积物构造的影响主要在表层0—2 cm,对沉积物表层结构的改变以再造为主,属于廊道构筑者。宋进喜^[10]等研究发现,河流潜流带表层有一层淤塞层,生物扰动作用能降低淤塞层阻塞,增强沉积物渗透性,研究发现摇蚊幼虫扰动作用能增加溶解氧渗透深度,表明摇蚊幼虫扰动能促进上覆水向沉积物的渗透,Cl组中摇蚊密度相对于Tub组颤蚓密度非常小,并没有发生生物本身对沉积空隙物的阻塞作用。另外,尖膀胱螺或者在沉积物表面爬行并分泌粘液,或者爬行在管壁并浮出水面,不会在沉积物中钻行,没有对沉积物结构产生太大影响,因而对其渗透性促进作用不大。

通过对比不同生物混合组,Cl+Pa组对于渗透系数的影响超过摇蚊幼虫和尖膀胱螺单个生物组的渗透系数。Mermillod—Blondin等^[17]研究发现,在同一环境中,物种的扰动特点,是无脊椎底栖生物对生态系统影响的主要因素之一。也就是说,摇蚊幼虫和尖膀胱螺在沉积物内作用的深度范围不同,分别为表层以下0—2 cm和沉积物表面,摇蚊的筑巢和尖膀胱螺的爬行等不同扰动特点,对沉积物渗透性的促进,起到叠加的效果。此外,摇蚊幼虫和尖膀胱螺的混合也使改组的密度增大,在一定程度上也起到了促进效果。Cl+Tub组、Tub+Pa组及CL+Tub+Pa组均含有4.1 ind./cm²的颤蚓,3组对沉积物渗透性起抑制作用。研究发现,在不同生物对沉积物的共同作用中,一类优势种属的扰动作用对沉积物化学性质起主要影响。孙刚^[18]研究表明,颤蚓垂直迁移深度可达9.4 cm,并且3种生物密度之比中,颤蚓数量远远超过其余两种。因此,在陕西省渭河临潼段,对沉积物渗透性抑制作用最强的物种是颤蚓。另一方面,Cl+Tub组、Tub+Pa组、Cl+Tub+Pa组的沉积物渗透系数略高于单个颤蚓组,表明,摇蚊幼虫和尖膀胱螺的扰动特点,在一定程度上减缓了颤蚓对沉积物渗透性的抑制,且颤蚓的垂向爬行对其他两种生物的扰动效果没有太大影响。

2.2 底栖生物扰动对沉积物粒径分布的影响

经试验观测,摇蚊幼虫扰动深度一般集中在沉积

物表层以下0—3 cm的范围内,颤蚓最强烈的活动与摄食发生在沉积物与水界面下3~4 cm^[19],故研究时以3 cm为单位进行分层。按照0—3,3—6,6—9,9—12和12—15 cm范围分为5层,对这5个深度的沉积物进行粒度分析、计算后,得出不同底栖生物密度下每一层的沉积物成分表(图2)。从图2中可以看出,相对于空白组,单个生物组各层沉积物中细泥和粗沙百分比变化趋势相似,细沙含量变化规律并不明显。摇蚊组沉积物不同深度中细泥含量均减少,粗沙含量均增加,随着沉积物深度增加,细沙含量逐渐增加;颤蚓组和螺组在0—9 cm深沉积物中,细泥含量均在不同程度上增加,粗沙含量不同程度上减少。在两组生物混合组中,发现Cl+Tub组沉积物不同深度中,各粒径的变化量在Cl和Tub组之间;CL+Pa组沉积物不同深度各粒径的变化趋势与大小与Cl近似;Tub+Pa组沉积物不同深度中,各粒径的变化量呈现一种叠加现象,就是说Tub和Pa组在0—9 cm沉积物中细泥含量均增加,使Tub+Pa组在该段的细泥含量增加量更大,庞俊晓等^[20]在总结生物扰动对沉积物颗粒的动态迁移过程的影响时指出,沉积物表层的示踪颗粒的垂直迁移率及生物沉降作用与颤蚓的丰度呈显著的正相关关系;对于3组生物混合的Cl+Tub+Pa组,其各段沉积物粒径变化与颤蚓组变化相似。在9—12和12—15 cm沉积物中,各试验组细泥和粗沙含量变化均产生了相同的趋势,9—12 cm沉积物中细泥含量突然减少,粗沙含量突然增加,12—15 cm沉积物中细泥含量相对增多,粗沙含量相对减少,这一方面与水流方向有关,水流冲刷导致细沙细泥向下沉降,在最底层由于纱布阻挡,细沙细泥会在12—15 cm段堆积,粗沙颗粒较大,不易渗入最底层,导致在细沙在9—12 cm段堆积。

摇蚊幼虫在进入底栖态后,利用细泥、细沙进行廊道的构筑,同时分泌的粘液使沉积物的颗粒越来越大,但其扰动深度能力较弱,对0—3 cm段沉积物粒径有较强影响,宋进喜^[15]等研究发现,沉积物表层有一层淤塞层,对沉积物渗透性有较大的淤塞作用,摇蚊幼虫的扰动破坏了淤塞层,促进沉积物渗透性,增加水流向下的速率,同时导致细小颗粒向下传输,使沉积物中细泥含量减少。而颤蚓头部扎入沉积物,尾端则留在水面,在沉积物深层摄食,会不断摆动尾部将大量的底层沉积物的有机物向上输送到沉积物的表层,其扰动会形成垂直通道,任朝亮等^[9]研究发现颤蚓在一定密度范围内,会促进沉积物渗透,当密度大于4 ind./cm²后,颤蚓密度太大,反而抑制渗透,在本研究中,颤蚓密度远大于4 ind./cm²,且渗透系

数明显小于空白组,这与沉积物粒径有密切联系。在 6—9 及 9—12 cm 段,沉积物中细泥含量明显增大,粗沙含量明显减小,颤蚓扰动将下层大颗粒物摄食后,分解为细小颗粒物排泄到上层,细泥含量增加,随着水流,细泥向下传送,并在 6—9 及 9—12 cm 段聚集,产生淤塞,导致沉积物渗透系数低于空白组。对

于尖膀胱螺有学者^[21]提出,尖膀胱螺通过摄食和排泄,能减小颗粒物粒径,并将有机物和胶黏体的粪便结成团块,且沉积物表面也为甲壳类尖膀胱螺主要活动带,其粪球被黏液粘结在一起,增加了颗粒的大小,增加表层孔隙度,但膀胱螺对沉积物影响范围较小,因此对沉积物渗透性促进较弱。

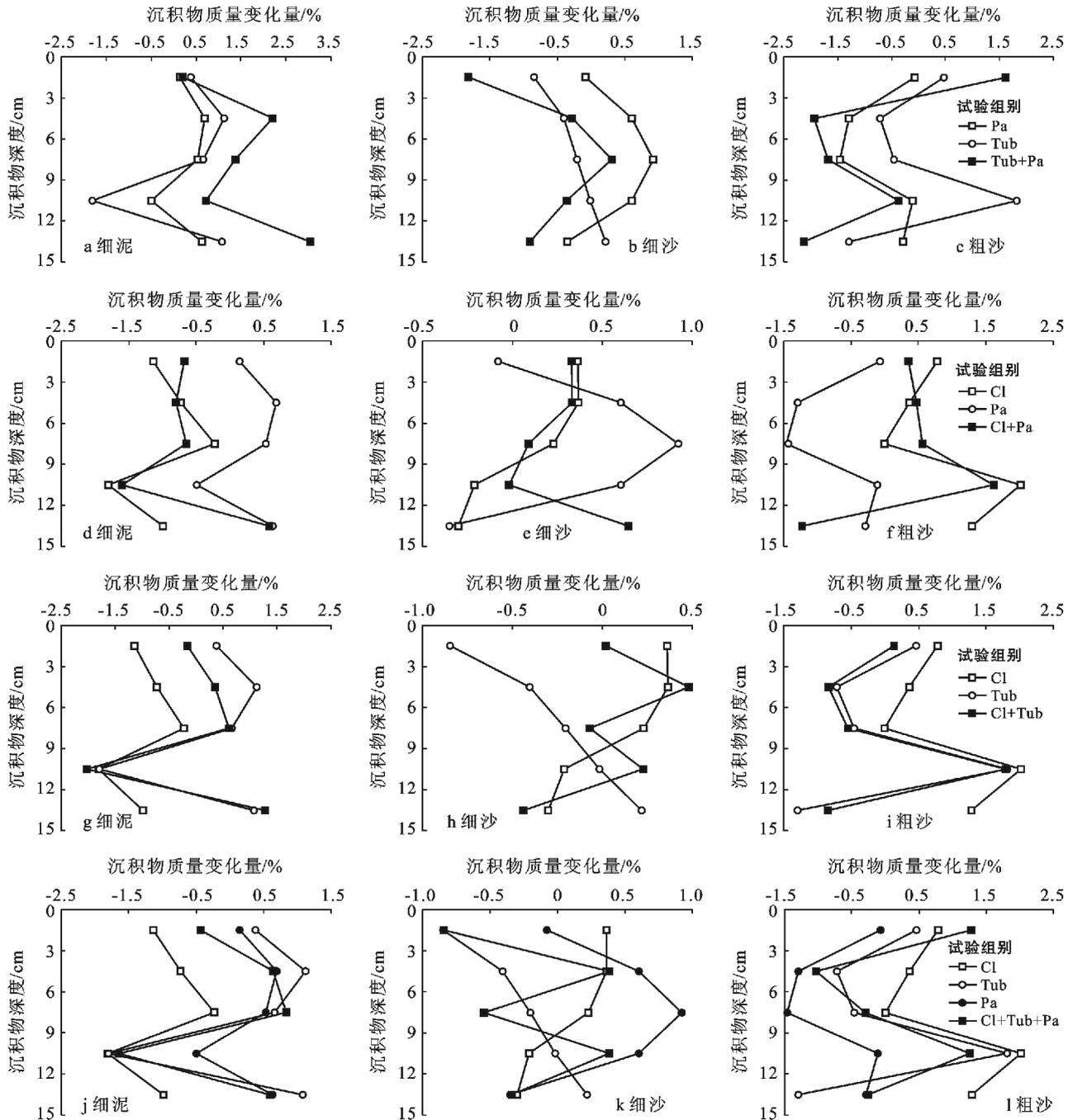


图 2 各试验组沉积物质量百分比变化

通过比较摇蚊、颤蚓及两者混合组发现,在 0—3 cm 段,由于摇蚊能明显减少细泥含量,提高水的渗透能力,使 Cl+Tub 组在该段细泥含量减少。而在 3—6 与

6—9 cm 段,沉积物粒径变化大小与颤蚓组近似,表明,不同生物栖息空间不同,对沉积物粒径影响的范围则不同,通过对比渗透系数发现,摇蚊组渗透系数

高于空白组,而 Cl+Tub 组的渗透系数低于空白组,表明该两种生物混合中,颤蚓对沉积物的渗透性起主导作用。在 Cl+Pa 中,由于摇蚊对沉积物表层结构有较大的改造,膀胱螺对沉积物结构影响不大,因此 Cl+Pa 组沉积物各层的粒径变化与摇蚊组近似,且 Cl+Pa 组的渗透系数也起明显的促进作用。表明 Tub+Pa 组中摇蚊扰动对沉积物起主要影响作用。由于颤蚓与膀胱螺两组沉积物各层粒径增加与减少趋势一致,且两种生物作用空间不同,当两种生物混合后,在 Tub+Pa 组出现叠加现象,使其各层沉积物粒径增加量或减少量加剧。Eckman 等^[22]研究发现管状生物密集程度的变化会造成沉积物床面的稳定性均有所降低,特别是当密集程度高时,这种作用更为明显。生物扰动作用通过改变沉积物的物理特性促使其结构疏松,孔隙增大^[23],从而导致沉积物更易于混合。一般认为生物扰动过程可以引起沉积物含水量的增加,促进粪球的形成和再悬浮^[24]。当生物扰动或水流干扰等产生的临界切应力能够抵消沉积物颗粒间的黏合力时,沉积物颗粒就会发生再悬浮^[25]。悬浮到上覆水体的微粒物质与沉降下来的微粒一起不断为水体中微量物质的吸附作用提供新的微粒表面,因而有利于生物扰动和水流动力作用引起沉积物发生内部混合作用,引发微粒聚集和凝聚作用增加。

3 结论

(1) 试验模拟表明,摇蚊幼虫、颤蚓和尖膀胱螺对沉积物渗透性具有不同的影响作用。单一物种组中摇蚊幼虫和尖膀胱螺对沉积物的渗透性呈促进作用,且摇蚊幼虫对沉积物渗透性促进效果比尖膀胱螺更显著;颤蚓对渗透性呈削弱作用,这与其生物密度过大有关系。在摇蚊幼虫、颤蚓和尖膀胱螺两两混合的3组中,由于尖膀胱螺的生活习性,尖膀胱螺和颤蚓组合的渗透系数反而大于摇蚊幼虫和颤蚓组合。另外,在混合试验组中,颤蚓生物密度过大,同时摇蚊幼虫与颤蚓之间相互竞争,使其扰动对沉积物渗透性的促进效果减弱,最终结果小于空白组。

(2) 生物扰动对沉积物颗粒粒径大小和分布区域产生明显干预作用,影响了沉积物的渗透性,使得沉积物中物质循环在垂直方向上得到显著加速。各种生物的扰动方式不同,使沉积物的渗透性增强或减弱。单一物种组中摇蚊对沉积物结构的再造作用最强;颤蚓的淤塞作用主要发生在水—沉积物界面以下3—9 cm,摄食排泄作用使沉积物中细泥含量增加,粗沙含量减少导致渗透性减弱;尖膀胱螺对沉积物粒径分布的影响不明显。

(3) 除生物种类外,生物密度也是影响沉积物渗透系数重要因素。本次研究只采用一种生物比例混合对河流潜流带垂向渗透系数的影响做了试验研究,在今后的研究工作中,尚需要对不同生物密度对渗透系数影响做实验测试分析研究。

[参 考 文 献]

- [1] Boulton A J, Datry T, Kasahara T, et al. Ecology and management of the hyporheic zone: Stream-groundwater interactions of running waters and their floodplains[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2010,29(1):26-40.
- [2] 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.
- [3] Mulholland P J, Marzolf E R, Webster J R, et al. Evidence that hyporheic zones increase heterotrophic metabolism and phosphorus uptake in forest streams[J]. Limnology and Oceanography, 1997,42(3):443-451.
- [4] 金光球,李凌. 河流中潜流交换研究进展[J]. 水科学进展,2008,19(2):285-293.
- [5] Packman A I, Brooks N H. Hyporheic exchange of solutes and colloids with moving bed forms[J]. Water Resources Research, 2001,37(10):2591-2605.
- [6] Battin T J, Kaplan L A, Newbold J D, et al. A mixing model analysis of stream solute dynamics and the contribution of a hyporheic zone to ecosystem function[J]. Freshwater Biology, 2003,48(6):995-1014.
- [7] 张雷,古小治,王兆德,等. 水丝蚓(Tubificid worms)扰动对磷在湖泊沉积物—水界面迁移的影响[J]. 湖泊科学, 2010,22(5):666-674.
- [8] 聂小保,吴淑娟,吴方同,等. 颤蚓生物扰动对沉积物氮释放的影响[J]. 环境科学学报,2011,31(1):107-113.
- [9] 任朝亮,宋进喜,杨小刚,等. 底栖动物扰动对河床渗透性的影响研究[J]. 环境科学,2013,34(11):4275-4281.
- [10] 宋进喜,王文科. 美国内布拉斯加州埃尔克霍恩河河床沉积物渗透系数深度变化特征[J]. 科学通报,2009,54(24):3892-3899.
- [11] Mermillod-Blondin F. The functional significance of bioturbation and biodeposition on biogeochemical processes at the water-sediment interface in freshwater and marine ecosystems [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2011,30(3):770-778.
- [12] Wondzell S M. The role of the hyporheic zone across stream networks[J]. Hydrological Processes, 2011,25(22):3525-3532.
- [13] Chen Xunhong, Song Jinxi, Wang Wenke. Spatial variability of specific yield and vertical hydraulic conductivity in a highly permeable alluvial aquifer[J]. Journal of hydrology, 2010,388(3):379-388.

(下转第 87 页)

据。为干旱半干旱缺水地区发展高效实用的节水型现代农业的建设提供支撑。

[参 考 文 献]

- [1] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 70(5):1569-1578.
- [2] Bormann H, Klaassen K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils[J]. Geoderma, 2008, 145(3/4):295-302.
- [3] 何丹, 马东豪, 张锡洲, 等. 土壤入渗特性的空间变异规律及其变异源[J]. 水科学进展, 2013, 24(3):340-348.
- [4] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2):3-22.
- [5] Roger-estrate J, Richard G, Dexter A R, et al. Integration of soil structure variations with time and space into models for crop management: A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2009, 29(1):135-142.
- [6] 马睿, 伍靖伟, 查元源, 等. 内蒙古河套灌区冻融土壤水分迁移简化模型[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6):1-5.
- [7] 李元寿, 王根绪, 丁永建, 等. 青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性[J]. 水科学进展, 2008, 19(1):61-67.
- [8] 李瑞平, 史海滨, 付小军, 等. 干旱寒冷地区冻融期土壤水分和盐分的时空变异分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1):86-89.
- [9] 李元寿, 王根绪, 赵林, 等. 青藏高原多年冻土活动场土壤水分对高寒草甸覆盖变化的响应[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1):157-165.
- [10] 吴谋松, 王康, 谭霄, 等. 土壤冻融过程中水流迁移特性及通量模拟[J]. 水科学进展, 2013, 24(4):543-550.
- [11] Rengasamy P. Transient salinity and subsoil constraints to dryland farming in Australian sodic soil: An overview[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2002, 42(3):351-361.
- [12] 李玮, 王立, 姜涛. 地下水浅埋区盐碱地滴灌条件下土壤盐分运移研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5):130-134.
- [14] Karickhoff S W, Morris K R. Impact of tubificid oligochaetes on pollutant transport in bottom sediments [J]. Environmental Science & Technology, 1985, 19(1):51-56.
- [15] 宋进喜, 任朝亮, 李梦洁, 等. 河流潜流带颤蚓生物扰动对沉积物渗透性的影响研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(8):2062-2069.
- [16] Lagauzère S, Boyer P, Stora G, et al. Effects of uranium-contaminated sediments on the bioturbation activity of *Chironomus riparius* larvae (Insecta, Diptera) and *Tubifex tubifex* worms (Annelida, Tubificidae) [J]. Chemosphere, 2009, 76(3):324-334.
- [17] Mermillod-Blondin F, Francois-Carcaillet F, Rosenberg R. Biodiversity of benthic invertebrates and organic matter processing in shallow marine sediments: An experimental study [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2005, 315(2):187-209.
- [18] 孙刚, 房岩, 汪爱武, 等. 颤蚓对水田沉积物颗粒垂直迁移的生物扰动效应[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(25):20275-20276.
- [19] Davis R B. Stratigraphic effects of tubificids in profundal lake sediments [J]. Limnology and oceanography, 1974, 19(3):466-488.
- [20] 庞俊晓, 游静. 生物扰动对沉积物中污染物环境行为与生物可利用性的影响[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(6):805-816.
- [21] 袁兴中, 何文珊. 海洋沉积物中的动物多样性及其生态系统功能[J]. 地球科学进展, 1999, 14(5):458-463.
- [22] Eckman J E, Nowell A R M, Jumars P A. Sediment destabilization by animal tubes [J]. Journal of Marine Research, 1981, 39(2):361-374.
- [23] Meysman F J R, Middelburg J J, Heip C H R. Bioturbation: A flesh look at Darwin's last idea [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2005, 21(12):688-695.
- [24] Je C, Hayes D F, Kim K. Simulation of resuspended sediments resulting from dredging operations by a numerical flocculent transport model [J]. Chemosphere, 2007, 70(2):187-195.
- [25] 蒋东辉, 高抒. 海洋环境沉积物输运研究进展 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(1):100-108.

(上接第 81 页)