

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0586

宋进喜,任朝亮,李梦洁,等.2014.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,34(8):2062-2069

Song J X, Ren C L, Li M J, et al. 2014. Effects of *Tubificid* bioturbations on vertical hydraulic conductivity of the hyporheic streambed sediments[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(8):2062-2069

河流潜流带颤蚓生物扰动对沉积物渗透性的影响研究

宋进喜^{1,2,*}, 任朝亮², 李梦洁³, 薛健², 杨小刚²

1. 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,杨凌 712100

2. 西北大学城市与环境学院,西安 710127

3. 陕西师范大学旅游与环境学院,西安 710062

收稿日期:2013-10-27 修回日期:2014-01-11 录用日期:2014-01-14

摘要:为了探究河流沉积物中底栖动物扰动对沉积物渗透性的影响,以渭河陕西段为研究对象,通过原位采样,布置不同颤蚓密度的试验管,进行室内颤蚓生物扰动对渗透系数影响的模拟实验测试.同时,通过对不同颤蚓密度下垂向渗透系数和沉积物指标进行相关分析和回归分析,研究颤蚓密度大小对渗透系数变化、沉积物表层特征、成分及渗透性变化的影响.结果表明,在研究时段内,渗透系数在白天和晚上的变化程度小于在整个试验时段上的变化程度;光照条件对颤蚓扰动作用影响不明显;沉积物的渗透系数在颤蚓密度约为 $1.0 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时达到最大值,颤蚓密度越大,沉积物表面越粗糙,沉积物厚度变化程度越大,沉积物成分变化越大,沉积物颗粒有变小趋势,浮泥含量增加.颤蚓生物扰动作用能够影响沉积物的渗透性能,当颤蚓密度小于一定量值时,颤蚓生物扰动对沉积物渗透性有加强作用;而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,这一颤蚓密度量值大致在 $2.0\sim 2.5 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$ 之间.研究表明,颤蚓通过生物扰动改变沉积物的内部和表层结构、沉积物成分组成等,以此破坏或加强沉积物中细小颗粒物的阻塞,致使沉积物的渗透性能增强或减弱.

关键词:颤蚓生物扰动;垂向渗透系数;粒度分布;影响分析

文章编号:0253-2468(2014)08-2062-08 中图分类号:X174 文献标识码:A

Effects of *Tubificid* bioturbations on vertical hydraulic conductivity of the hyporheic streambed sediments

SONG Jinxi^{1,2,*}, REN Chaoliang², LI Mengjie³, XUE Jian², YANG Xiaogang²

1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100

2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127

3. Tourism and Environment College, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062

Received 27 October 2013; received in revised form 11 January 2014; accepted 14 January 2014

Abstract: In order to investigate the effects of *Tubificid* bioturbations on vertical hydraulic conductivity of the hyporheic streambed sediments, the experimental test for the vertical hydraulic conductivity of sampling sediments with different *Tubificid* densities from the Weihe River were simulated. The variation of surface structure, composition and permeability of sediment were estimated by regression and trend analysis method to explore the relationship between vertical hydraulic conductivity and sediment indicators with different *Tubificid* densities. The results indicated that the range of variance for the vertical hydraulic conductivity between daytime and nighttime was smaller than the variance in the entire period. There was no obvious variation occurred on *Tubificid* bioturbations when illumination conditions changed. The vertical hydraulic conductivity reached its maximum value when *Tubificid* density was $1.0 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$; The pore space increased with enhanced *Tubificid* density, which further changed sediment thickness and sediment composition. Therefore, the *Tubificid* bioturbations have an impact on the vertical hydraulic conductivity and strengthen the permeability of streambed sediments when *Tubificid* density is lower than a critical value, roughly between $2.0 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$ and $2.5 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$. It can be concluded that the *Tubificid* bioturbations can increase or decrease sediment permeability by changing internal and surface structure and particle composition of streambed sediments.

Keywords: *Tubificid* bioturbations; vertical hydraulic conductivity; grain-size distributions; impact analysis

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51079123,51379715);教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (No. NCET-11-1045);高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 20136101110001)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51079123,51379715), the Program for New Century Excellent Talents in University (No.NCET-11-1045) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20136101110001)

作者简介: 宋进喜 (1971—),男,教授, E-mail:jinxisong@nwu.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: SONG Jinxi (1971—), male, professor, E-mail:jinxisong@nwu.edu.cn; * Corresponding author

1 引言(Introduction)

河水和地下水相互作用是全球水循环的一个重要组成部分,对物质循环和能量传递都起到了重要的作用(滕彦国等,2007),研究表明,河流与地下水相互作用发生在河床表面以下或侧向多孔渗透区内,称之为潜流带(hyporheic zone)(Brunke *et al.*, 1997).在潜流带,河水与地下水水量相互交换,称之为潜流带水交换(Alexander *et al.*, 2003).影响潜流带水交换的一个重要因素是河流潜流带的生物扰动过程(Battin *et al.*, 2003).生物扰动作用是指生物体对沉积物颗粒的混合作用,其以各种方式出现,如生物构造(洞穴)、生物冲灌,以及由生物扩散混合、生物平流混合等各种动力学过程引起的沉积物再分布等(Gardenr *et al.*, 1987;杨群慧等,2008).生物和微生物多样性是影响河床潜流带水文过程的一个重要因素(Mermillod-Blondin, 2011).有学者在研究河床渗透系数时提到生物扰动是造成河床沉积物渗透性较大的主要因素(宋进喜等,2009; Song *et al.*, 2010).研究表明,在河流潜流带沉积物表面有一层细小沉积物形成的淤塞层(Blaschke *et al.*, 2003),粒径较小的沉积物形成的淤塞层能够降低河床沉积物渗透性(Wood *et al.*, 1997);无脊椎动物的生物扰动作用能够破坏沉积物表层的淤塞层,减少沉积物的淤塞(Mauclair *et al.*, 2006; Mermillod-Blondin, 2011),进而增加沉积物的渗透性.颤蚓是广泛存在于河流和湖泊等地表水环境的无脊椎动物,Nogaro 等(2006)在研究无脊椎动物对沉积物影响时发现,颤蚓能够翻动沉积层里的土壤,在沉积层中为水流形成通道,减少沉积物的阻塞,进而增强沉积物的渗透性.但在国内,已有的对生物扰动作用的影响研究主要集中于对沉积物迁移变化影响(Sun *et al.*, 2010;覃雪波等,2010)和污染物迁移转化影响(张弛等,2010;路永正等,2010;聂小保等,2011;白秀玲等,2012)等方面,对渗透系数的影响研究较少(陈友媛,2006;任朝亮等,2013).

因此,本研究基于垂向渗透系数室内模拟试验,在试验管中加入不同生物密度的颤蚓,利用回归分析及趋势分析来研究不同生物扰动作用强度下沉积物渗透性的变化特性,以正确认识生物扰动对河床沉积物渗透系数变化的影响机理.这不仅在理论上有助于人们深化对河床渗透性能的科学认

识,而且对研究人为控制地表水对地下水污染,恢复河流水文生态功能,维持河流健康等具有重要的指导意义.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 试验材料

沉积物、颤蚓生物、上覆水均采集于渭河干流(眉县、咸阳、草滩、临潼和华县)潜流带,地点相同.沉积物是在做完原位渗透试验后,采集的有机玻璃管内沉积物,取样深度约 45 cm,数量充足;颤蚓利用采泥器(20 cm×30 cm)、D 型网、采样筛工具采集,取样深度约 15 cm,数量充足;上覆水鉴于河水含沙量较大,试验使用自然澄清后的渭河河水,数量充足.此外,用到的实验仪器还有长 40 cm、内径 5.4 cm 的透明有机玻璃管材,14 孔的定制铁架台、定制水槽、秒表、分样筛、纱布、卡子等.

2.2 模拟试验

试验分为 1、2 两组,每组 7 根模拟试验管.模拟试验管装有采集到的沉积物样品,利用分样筛把自然风干后的沉积物分为粗沙、细沙和浮泥,再按 m (粗沙): m (细沙): m (浮泥)=4:3:3 的比例充分混合,混合沉积物厚度约为 35 cm;试验管中加入混合沉积物后,再在试验管中加入经过自然澄清后的原位采集到的渭河河水,静置不少于 24 h,使沉积物中含水能够充分饱和;沉积物含水充分饱和后在 7 根试验管中加入不同生物密度的颤蚓(0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 ind·cm⁻²),试验用颤蚓采集于渭河干流,将试验装置放置不少于 24 h 后再进行渗透系数测定(孙刚等,2009);渗透系数每 1 h 测定 1 次,共测定 3 d;根据试验时间,设定 6:00—20:00 为白天,20:00—6:00 为夜晚.另外,由于 7 根试管中加入的颤蚓密度不同,根据不同密度标试验编号为 MN0(对应密度为 0 ind·cm⁻²)、MN1(0.5 ind·cm⁻²)、MN2(1.0 ind·cm⁻²)等,其他类推.根据试验分组分为 MN0-1、MN0-2、MN1-1、MN1-2 等,其中, MN0-1、MN1-1 等为第 1 组, MN0-2、MN1-2 等为第 2 组.

2.3 渗透系数测定方法

渗透系数的测定方法采用水头下降竖管渗透试验法(Chen, 2000; Chen *et al.*, 2010).试验采用的竖管是长 80 cm、内径 5.4 cm 的透明有机玻璃管;距上端 35 cm 左右处固定试验管,下端浸入水中;管内沉积物厚度约 35 cm,上部注满经过自然澄清后的原位采集到的渭河河水;准备工作完成后,记录水

头下降过程中不同时段的水头高度,用来计算垂向渗透系数(图 1).

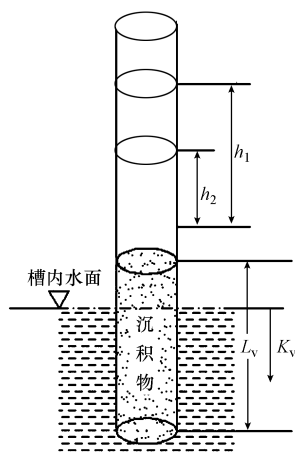


图 1 室内垂向渗透系数测试示意

Fig.1 Measurement of vertical hydraulic conductivity in lab testing process

模拟试验结束后,对不同模拟管沉积物垂向渗透系数(K_v)进行计算,其计算公式为(Chen,2000):

$$K_v = \frac{L_v}{(t_2 - t_1)} \ln(h_1/h_2)$$

式中, L_v 为有机玻璃管中沉积物的厚度(cm); h_1 和 h_2 分别为 t_1 和 t_2 时刻测试管中的水位值(cm).

2.4 数据处理

运用 Excel 和 SPSS 等软件对试验结果进行统计和分析,分析包括回归分析和趋势分析.

3 结果(Results)

3.1 生物扰动影响垂向渗透系数的实验模拟

3.1.1 不同时间垂向渗透系数变化 从 2013 年 7 月 9 日 20 时至 2013 年 7 月 12 日 20 时,72 h 共内记录了 67 次数据,第 1 个 24 h 记录了 24 次,第 2 个 24 h 记录了 22 次,第 3 个 24 h 记录了 21 次.通过对所测的数据进行渗透系数计算,并求算数平均数,计算出每个完整 24 h 内的垂向渗透系数和每个完整 24 h 内白天和晚上的垂向渗透系数(表 1).不同颤蚓密度下垂向渗透系数的值为第 1、2 组的均值,其中, MN0 以 MN0-1 测定的垂向渗透系数表征(测定前 MN0-2 沉积物表层被人为破坏).对 3 个昼夜过程中计算的昼、夜 6 个垂向渗透系数进行相关分析,除 MN5 线性相关系数为 0.63 外,其余测定管线性相关系数均大于 0.86(表 2),存在明显的线性相关.随着试验时间的增加,垂向渗透系数逐渐变大(表 1),说明在环境基本不变情况下的一段时间范围内,沉积物的渗透性是呈线性逐渐增加,颤蚓的扰动作用越来越明显.

表 1 不同时间垂向渗透系数

Table 1 Test value of vertical hydraulic conductivity within different times

编号	不同时间垂向渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)											
	7月9日20时— 7月10日20时			7月10日20时— 7月11日20时			7月11日20时— 7月12日20时			7月9日20时— 7月12日20时		
	夜晚	白天	全天	夜晚	白天	全天	夜晚	白天	全天	夜晚	白天	全天
MN0	8.06	7.88	7.95	8.11	8.41	8.28	8.69	8.91	8.83	8.25	8.40	8.34
MN1	8.93	8.93	8.93	9.24	9.72	9.56	9.79	10.53	10.29	9.27	9.73	9.55
MN2	9.38	9.08	9.21	9.31	9.68	9.53	9.95	10.35	10.21	9.51	9.70	9.63
MN3	8.79	8.69	8.73	8.84	9.06	8.97	9.28	9.39	9.35	8.94	9.05	9.01
MN4	8.95	8.80	8.86	9.04	9.30	9.19	9.58	9.96	9.84	9.15	9.35	9.28
MN5	7.06	6.78	6.90	6.97	6.98	6.97	7.03	7.34	7.24	7.02	7.03	7.03
MN6	7.33	7.37	7.35	7.50	7.65	7.59	7.63	7.99	7.87	7.47	7.67	7.59

表 2 白天和晚上垂向渗透系数线性相关系数

Table 2 Linearly dependent coefficient of vertical hydraulic conductivity within daytime and nighttime

MN0	MN1	MN2	MN3	MN4	MN5	MN6
0.94	0.86	0.90	0.94	0.94	0.63	0.94

底栖动物的生物扰动方式包括生物构造、生物冲灌、生物活动等(杨群慧等,2008).汪振华等(2011)在研究鱼类聚集时发现,鱼类在白天和晚上

存在不同的集聚情况.由于昼夜变化,不同生物在白天和夜晚表现出不同的活动规律.颤蚓活动在昼夜变化下也应存在一定变化.鉴于在环境基本不变情

况下,沉积物的渗透性呈线性增加,为更好地分析颤蚓生物扰动下沉积物白天和夜晚垂向渗透系数的大小,以1天24小时作为1个测试循环周期,分别计算白天-夜晚(先测白天渗透系数)2个循环均值和夜晚-白天(先测夜晚渗透系数)3个循环均值(表3)。结果表明:对于白天-夜晚循环,白天垂向渗透系数小于夜晚,而对于夜晚-白天循环,其结果恰好相反;白天渗透系数先测,白天测定值小,晚上渗透系数先测,夜晚测定值小;光照等因素对颤蚓扰动作用影响较弱。沉积物渗透性大小在一定时间范围内上呈线性增加(表1、表2),光照等因素对颤蚓扰动作用影响较弱,白天测定值大于前一个晚上测

定值,小于后一个晚上测定值(表1)。说明在一定时间范围内,在颤蚓生物扰动作用影响下,渗透系数在白天和夜晚的变化程度小于渗透系数在整个研究时段内的变化程度,光照条件对颤蚓扰动作用的影响不明显。这可能是因为颤蚓的前端藏在潜流带中,尾部露在水中摆动,光照对藏于潜流带的前端影响很小;颤蚓的耐污性非常强,主要栖息于水质较差的河流底部,光照在水质较差河水中的透过率较低,光照对颤蚓的影响也很小;颤蚓主要通过进食含有有机质的沉积物生活,对光照需求较少。这进一步在一定程度上导致光照条件对颤蚓生物扰动作用的影响不明显。

表3 白天和夜晚垂向渗透系数

Table 3 Measured value of vertical hydraulic conductivity within daytime and nighttime

循环模式		白天夜晚垂向渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$)						
		MN0	MN1	MN2	MN3	MN4	MN5	MN6
白天-夜晚循环	夜晚	8.40	9.52	9.63	9.06	9.31	7.00	7.57
	白天	8.15	9.33	9.38	8.88	9.05	6.88	7.51
夜晚-白天循环	夜晚	8.25	9.27	9.51	8.94	9.15	7.02	7.47
	白天	8.40	9.73	9.70	9.05	9.35	7.03	7.67

3.1.2 不同颤蚓密度条件下沉积物垂向渗透系数变化 通过对不同颤蚓密度下沉积物垂向渗透系数的计算分析,发现随着颤蚓密度的增加,沉积物渗透系数先变大再变小,并在MN2($1.0 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$)附近出现极大值(图2)。试管MN2垂向渗透系数测定值为 $9.63 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$,在7个不同颤蚓密度试验中为最大值(表1)。MN1、MN2、MN3和MN4的测定值均大于MN0, MN5和MN6的测定值均小于MN0(表1、图2)。表明颤蚓密度在 $2.0 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以下时,对沉积物渗透性能具有明显增强作用,反映出在一定颤蚓密度下,颤蚓生物扰动作用对沉积物渗透性呈增强作用。而当颤蚓密度进一步加大后,其沉积物渗透性呈减弱作用,甚至密度达到一定程度时,沉积物渗透性比没有颤蚓时还弱。研究表明,生物扰动作用

在一定密度范围内随着生物密度的增加而增强(聂小保等,2010)。MN6中颤蚓密度为 $3.0 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$,为所有模拟试管中生物密度最大的,进而为生物扰动作用最强的,但其垂向渗透系数并不是所有模拟试验中最大的。由此可以看出,颤蚓生物扰动作用在达到一定程度后对加强沉积物渗透性起到负作用。这可能是由颤蚓生物扰动作用改变了沉积物物理性质引起的。

3.2 生物扰动影响沉积物变化的实验模拟

3.2.1 沉积物表层特征变化 3个完整昼夜测定垂向渗透系数结束后,利用尼康D5000分别对试管管进行俯视和正视拍照(图3),以分析沉积物的表层变化。通过观察与对比分析可以看出:MN0-1沉积物表面比较光滑,有起伏;MN1-1沉积物表面俯视图中能够看到明显的坑洞;MN2-1、MN3-1、MN4-1、MN5-1和MN6-1等试管沉积物均存在坑洞,数量多但细小,且高颤蚓密度试管中表层沉积物稳定性较差;沉积物表层随着颤蚓密度的增大而逐渐变得粗糙,对沉积物的影响作用越来越大,但MN6-1沉积物表面坑洞被细小沉积物覆盖,从而使其沉积物俯视图显得相对光滑。颤蚓的前段藏于沉积物中形成孔洞,后端在水中摇摆,摇摆作用使孔洞顶部的沉积物减少,在一定程度上加大了表层的坑洞,

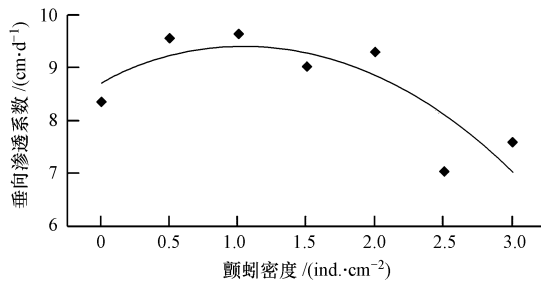


图2 不同颤蚓密度条件下沉积物垂向渗透系数

Fig.2 Vertical hydraulic conductivity of different *Tubificid* densities

正如 MN1-1 中看到的情况一样;而随着颤蚓密度的增加,颤蚓的摆动作用也越来越明显,摆动作用加大坑洞的同时又被其他坑洞覆盖,使其不能形成相对稳定且明显的坑洞,也正如 MN5-1 和 MN6-1 所看到的.加入不同密度颤蚓的试验管沉积物表层均比未加入颤蚓试验管的沉积物表层粗糙,且粗糙程度越来越大,但 MN5-1 和 MN6-1 由于颤蚓密度相

比较大,颤蚓生物扰动作用增强,大量颤蚓的扰动作用使沉积物稳定性较弱,使沉积物表层不能形成大量稳定的坑洞,使其沉积物表层相对光滑.颤蚓生物扰动减小沉积物细小颗粒物的阻塞作用呈现先增强后减弱的规律,进而使沉积物渗透性呈现先增强后变弱的趋势,渗透系数测定值也证明了这一结果(表 1、图 2).

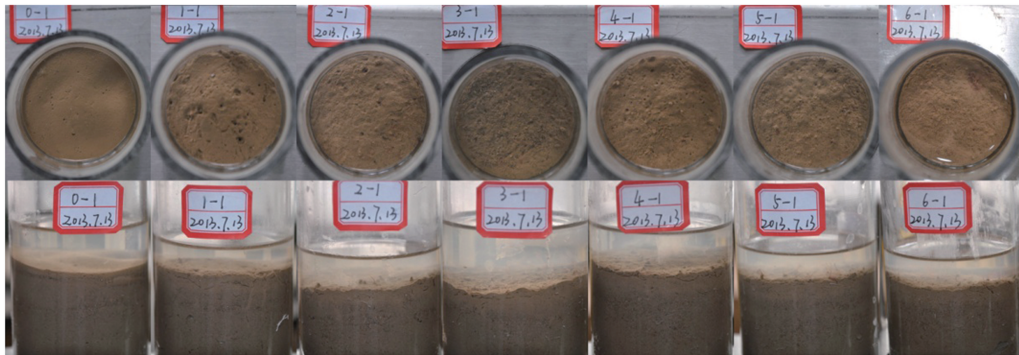


图 3 不同颤蚓密度条件下沉积物表层结构变化

Fig.3 Changes in surface sediments structure with different *Tubificid* densities

3.2.2 沉积物厚度变化 开始测定渗透系数前和 3 d 后渗透系数测试结束时分别对各个试验管沉积物厚度进行了测量,并对试验前后沉积物厚度减少量进行计算和分析(图 4).沉积物厚度在室内模拟试验结束后均比试验前有所下降,且随着颤蚓密度的增加变化越来越大,厚度差的变化越来越明显(图 4).颤蚓主要通过进食含有有机质的沉积物和摇摆尾部完成其生命活动,在进食和摇摆尾部过程中能够改变原有沉积物颗粒大小,沉积物颗粒大小变化在一定程度上引起沉积物厚度差变化.随着颤蚓密度增大,试验前后沉积物厚度变化越来越大,也在一定程度上证明,颤蚓生物扰动作用随着颤蚓密度的增加而增大.

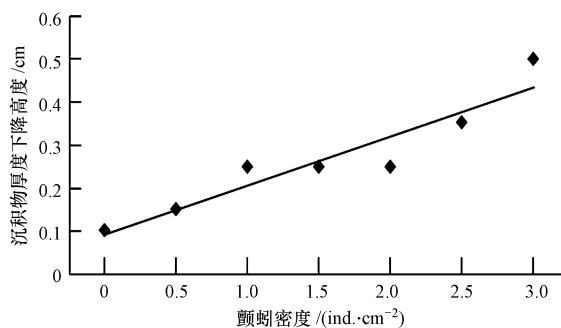


图 4 不同颤蚓密度沉积物厚度变化

Fig.4 Sediment thickness variation with different *Tubificid* densities

3.2.3 沉积物成分变化 鉴于本次模拟试验中,颤蚓生物扰动深度集中在 0~10 cm 之间,重点对这一深度的沉积物进行了粒度分析,并计算了不同颤蚓密度条件下的沉积物成分百分比(表 4).并通过线性回归分析,得出沉积物中 3 种不同成分的趋势线(图 5).由表 4 可知,7 个不同颤蚓密度下沉积物组成成分百分数均值分别是:浮泥 31.55%、细沙 24.54%、粗沙 43.91%,成分比与试验前沉积物测定基本一致.这在一定程度上反映颤蚓生物扰动能够改变沉积物粒度大小,进而影响沉积物成分比,成分比基本一致说明这一影响并非非常明显.浮泥百分比随着颤蚓密度的增大而不断增加,粗砂和细沙百分比不断减少(图 5).浮泥含量增加,粗砂和细沙含量减少,说明在颤蚓扰动作用下沉积物颗粒变

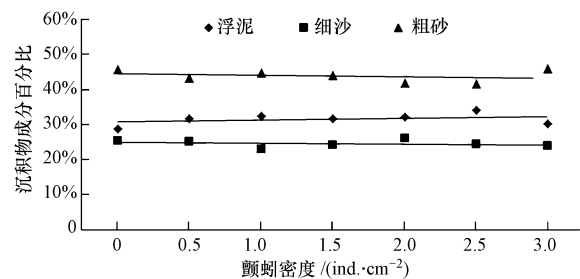


图 5 不同颤蚓密度下沉积物成分变化趋势

Fig.5 Variation of weight percentage for particle composition of measured sediment in different *Tubificid* densities

小,这也在一定程度验证了沉积物厚度变化的原因。此外,也说明随着颤蚓密度的增加,颤蚓生物扰动作用逐渐加强,并破坏了原来的沉积物,使沉积物颗粒逐渐变小(图 5)。不同颤蚓密度下,颤蚓生物扰动的影响效果不同,颤蚓密度越大,影响效果越大,沉积物成分变化越大。

表 4 不同颤蚓密度下沉积物成分质量百分比

Table 4 Weight percentage of particle composition of measured sediment with different *Tubificid* densities

编号	质量百分比		
	浮泥	细沙	粗砂
MN0	28.79%	25.40%	45.81%
MN1	31.57%	25.11%	43.32%
MN2	32.37%	22.84%	44.79%
MN3	31.77%	24.08%	44.15%
MN4	32.14%	26.06%	41.79%
MN5	34.05%	24.39%	41.56%
MN6	30.14%	23.88%	45.98%
均值	31.55%	24.54%	43.91%

4 讨论 (Discussion)

4.1 颤蚓生物扰动对渗透系数影响

颤蚓生物扰动能够改变沉积物的渗透系数,在渗透环境基本一致的情况下,沉积物中包含的颤蚓密度不同,其渗透系数表现出明显差异,且光照条件对颤蚓生物扰动作用的影响较小。随着颤蚓生物扰动时间的增加,渗透系数均呈现增大趋势,说明在一定时间范围内,随着试验时间增加,颤蚓生物扰动对渗透系数的影响效应也增加。但鉴于颤蚓的生活习性,光照难以到达河水底部甚至潜流带中,导致光照条件变化对颤蚓生物扰动作用的影响不是非常明显,而室内模拟实验的实测值也证明了这一点。此外,颤蚓密度小于一定量值时,沉积物渗透系数均大于控制管 MN0 测定值的情况;颤蚓密度大于一定量值时,沉积物渗透系数出现小于控制管 MN0 测定值;这一量值范围在 $2.0 \sim 2.5 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$ 之间;颤蚓密度在 $1.0 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$ 附近时渗透系数出现最大值。任朝亮等(2013)在研究底栖动物扰动对河床渗透性影响的现场试验中发现,在底栖动物密度小于 $1.0 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的范围内,渗透系数随着底栖动物密度的增加而增加;聂小保等(2010)研究发现,颤蚓密度和颤蚓生物扰动之间呈现“N”型关系,而在密度小于 $4.0 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的范围内两者的关系呈现“n”型;均和本次研究结果相似。从中可以看出,渗

透系数在一定颤蚓密度下,随着颤蚓数量、密度的增加而逐渐变大,当超过这一密度后,渗透系数会变小。这是因为一方面随着密度增加,颤蚓首先通过增加迁移应对食物短缺,然后通过减小迁移避免能量消化应对食物短缺,进而影响沉积物渗透系数(聂小保等,2010);另一方面,当颤蚓密度达到一定程度后,其颤蚓的扰动作用破坏了沉积物的粒度分布,使沉积物成分发生变化,进而使测定的沉积物渗透系数发生变化,同时影响沉积物的渗透性(图 3、图 5)。

4.2 颤蚓生物扰动对沉积物影响

随着颤蚓密度的增大,颤蚓生物扰动对沉积物的影响越来越大,沉积物表面变得越来越粗糙,且沉积物稳定性逐渐变弱(图 3)。沉积物的厚度变化随着颤蚓密度的增大而逐渐变大,投放颤蚓的 MN1 ~ MN6 的沉积物厚度差比 MN0 的沉积物厚度差多 50% ~ 400%(图 4)。并且沉积物成分随着颤蚓密度的增大变化逐渐明显,沉积物粒度有逐渐变小的趋势,其中, MN6 的浮泥含量比 MN0 多 4.7%,其他试验管均有不同变化(表 4、图 5)。以上均证明了随着颤蚓密度的增大,沉积物变化越来越明显,也即颤蚓生物扰动作用随着颤蚓密度的增加而逐渐变大。一般认为,沉积物的渗透性主要由沉积物的颗粒大小决定,沉积物颗粒越大,渗透性也越好(宋进喜等,2009),反之,渗透性越弱。沉积物成分随着颤蚓密度的增大,变化逐渐明显,且沉积物粒度有逐渐变小的趋势(图 5)。沉积物粒度变小,浮泥含量增加,粗沙、细沙含量变小,在一定程度上能够减小沉积物的渗透性。颤蚓前端深入沉积物中,后端在水中摇摆;深入沉积物的前端通过吞噬沉积物满足自身生命需要的同时也改变着沉积物结构和成分,使沉积物中形成交叉孔洞,浮泥含量增加;水中摇摆的后端则通过摇摆作用改变河水底部的水流环境,并影响沉积物表层的坑洞形式;沉积物在颤蚓前端和后端的的不同作用下改变着沉积物的表层特性、厚度和成分。

4.3 颤蚓生物扰动对沉积物渗透性影响

渗透系数随着颤蚓密度的增加呈现先增大后减小的趋势,且当颤蚓密度达到一定程度后,渗透系数反比没有颤蚓时还小(表 1、图 2)。说明颤蚓生物扰动对沉积物渗透性影响是随着颤蚓密度的增大先变强后减弱,当颤蚓密度达到 $1.0 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$ 附近时(略大于 $1.0 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$),渗透系数出现最大值,

说明此时颤蚓生物扰动对沉积物渗透性的加强作用达到最大.在底栖动物密度小于 $1.0 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的范围内,底栖动物扰动能够加强沉积物的渗透性,且底栖动物密度和渗透系数之间存在强相关性(任朝亮等, 2013).随着颤蚓密度进一步加大,颤蚓生物扰动作用逐步加强的同时,也逐渐破坏沉积物原有的稳定性,并使沉积物中浮泥含量增加,粗沙、细沙含量变小,在一定程度上减小沉积物渗透系数,进一步减弱了沉积物的渗透性.颤蚓的生物迁移和颤蚓密度之间呈现“N”型,而在小于 $4.0 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的范围内,两者呈现“n”型.颤蚓首先通过生物迁移满足自身需求,避免食物短缺,而后通过减少生物迁移减少能量消耗来避免食物短缺(聂小保等, 2010).此外,颤蚓密度达到一定程度后,其颤蚓的扰动作用破坏了沉积物的粒度分布,使沉积物成分发生变化,进而使测定的沉积物渗透系数发生变化,同时影响沉积物的渗透性.这说明颤蚓生物扰动作用在颤蚓密度小于一定程度时对沉积物渗透性有加强作用,而颤蚓密度大于一定程度后,对沉积物渗透性有减弱作用,这一程度大致范围在 $2.0 \sim 2.5 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$ 之间.

5 结论(Conclusions)

1) 河流潜流带渗透系数,在研究时间范围内,随着颤蚓生物扰动时间的增加,其值呈线性增加趋势,且渗透系数在白天和晚上的变化程度小于在整个试验时段上的变化程度.光照条件对颤蚓扰动影响不明显,沉积物的渗透系数在颤蚓密度约为 $1.0 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时达到最大值,且颤蚓密度在 $2.0 \sim 2.5 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$ 之间某密度时,其沉积物渗透系数和无颤蚓生物时相同.

2) 颤蚓密度越大,颤蚓生物扰动程度越大,沉积物表层、厚度、成分变化越大,沉积物颗粒有变小趋势,浮泥含量增加.

3) 颤蚓生物扰动作用能够影响沉积物的渗透性能,当颤蚓密度小于一定量值时,颤蚓生物扰动对沉积物渗透性有加强作用;而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;这一量值范围在 $2.0 \sim 2.5 \text{ ind}\cdot\text{cm}^{-2}$ 之间.

4) 颤蚓通过前端在沉积物中挖掘孔洞,后端在水中摇摆吸氧,并为满足自身生命需要吞食沉积物或向更深的沉积物迁移等生物扰动形式,来改变沉积物的内部和表层结构、沉积物成分组成等,以此

缓解或加强沉积物中细小颗粒物的阻塞,并使沉积物的渗透性增强或减弱.

责任作者简介: 宋进喜,博士,教授,博士生导师,“教育部新世纪优秀人才支持计划”入选者,陕西省中青年科技创新领军人才.主要从事水文学、水资源及水生态研究,近年来,先后主持包括国家自然科学基金,科技部科技惠民项目课题、国家社会科学基金重大项目课题、陕西省重点科技创新团队计划等在内的国家及省部级科研课题 10 余项.发表学术论文 70 余篇,其中 SCI 论文 16 篇,出版学术专著 1 部,获陕西省科学技术奖一等奖一项(第一完成人).

参考文献(References):

- Alexander M D, Caissie D. 2003. Variability and comparison of hyporheic water temperatures and seepage fluxes in a small Atlantic salmon stream[J]. *Groundwater*, 41(1): 72-82
- 白秀玲,周云凯,张雷.2012.水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响[J].*生态学报*, 32(17): 5581-5588
- Battin T J, Kaplan L A, Newbold J D, *et al.* 2003. A mixing model analysis of stream solute dynamics and the contribution of a hyporheic zone to ecosystem function [J]. *Freshwater Biology*, 48(6): 995-1014
- Blaschke A P, Steiner K H, Schmalfuss R, *et al.* 2003. Clogging processes in hyporheic interstices of an impounded river, the Danube at Vienna, Austria [J]. *International Review of Hydrobiology*, 88(3/4): 397-413
- Brunke M, Gonser T. 1997. The ecological significance of exchange processes between river and groundwater[J].*Freshwater Biology*, 37(1): 1-33
- Chen X H.2000.Measurement of streambed hydraulic conductivity and its anisotropy [J]. *Environmental Geology*, 39(12): 1317-1324
- Chen X H, Song J X, Wang W K. 2010. Spatial variability of specific yield and vertical hydraulic conductivity in a highly permeable alluvial aquifer [J]. *Journal of Hydrology*, 388(3/4): 379-388
- 陈友媛. 2006. 生物活动对黄河口底土渗流特性的影响研究[D].青岛:中国海洋大学. 76-97
- Gardner L R, Sharma P, Moore W S. 1987. A regeneration model for the effect of bioturbation by fiddler crabs on ^{210}Pb profiles in salt marsh sediments [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 5(1): 25-36
- 路永正, 阎百兴. 2010. 颤蚓扰动作用对铅镉在沉积物-水相中迁移的影响[J].*中国环境科学*, 30(2): 251-255
- Mauclair L, Schurmann A, Mermillod-Blondin F. 2006. Influence of hydraulic conductivity on communities of microorganisms and invertebrates in porous media: a case study in drinking water slow sand filters [J]. *Aquatic Sciences*, 68(1): 100-108
- Mermillod-Blondin F. 2011. 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*, 30(3): 770-778

- 聂小保,黄廷林,张金松,等. 2010.底泥性质和分布密度对颤蚓迁移运动的影响[J].环境科学学报, 30(1): 103-110
- 聂小保,吴淑娟,吴方同,等. 2011.颤蚓生物扰动对沉积物氮释放的影响[J].环境科学学报, 31(1): 107-113
- Nogaro G, Mermillod-Blondin F, Francois-Carcaillet F, *et al.* 2006. Invertebrate bioturbation can reduce the clogging of sediment; an experimental study using infiltration sediment columns [J]. *Freshwater Biology*, 51(8): 1458-1473
- 任朝亮,宋进喜,杨小刚,等. 2013.底栖动物扰动对河床渗透性的影响研究[J].环境科学, 34(11): 4275-4281
- 宋进喜,Chen X H,Cheng C,等.2009.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,54(24): 3892-3899
- Song J X, Chen X H, Cheng C, *et al.* 2010. Observation of bioturbation and hyporheic flux in streambed [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 4(3): 340-348
- 孙刚,房岩,安永辉,等. 2009. 泥鳅对水田上覆水中氮素动态的生物扰动效应[J].生态与农村环境学报, 25(2): 39-43
- Sun G, Fang Y, Wang P, *et al.* 2010. Bioturbation effects of branchiura sowerbyi (Tubificidae) on the vertical transport of sedimentary particles in paddy field [J]. *Agricultural Science & Technology*, 11(8): 117-119
- 汪振华,王凯,章守宇.2011.马鞍列岛多种生境中鱼类群聚的昼夜变化[J].生态学报, 31(22): 6912-6925
- Wood P J, Armitage P D. 1997. Biological effects of fine sediment in the lotic environment [J]. *Environmental Management*, 21(2): 203-217
- 杨群慧,周怀阳,季福武,等. 2008. 海底生物扰动作用及其对沉积过程和记录的影响[J].地球科学进展, 23(9): 932-941
- 张弛,王树功,郑耀辉,等. 2010. 生物扰动对红树林沉积物中 AVS 和重金属迁移转化的影响[J].生态学报, 30(11): 3037-3045
- 覃雪波,孙红文,吴济舟,等. 2010. 大型底栖动物对河口沉积物的扰动作用[J].应用生态学报, 21(2): 458-463
- 滕彦国,左锐,王金生. 2007. 地表水-地下水的交错带及其生态功能[J].地球与环境, 35(1): 1-8