

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑菌活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移

李邵龙, 陈道毅*

(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 为了研究在上覆水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移, 本实验建立了简单的沉积物再悬浮发生装置, 并分别利用不同粒径大小的沙粒作为均质沉积物, 同时利用 $500 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的溶解性罗丹明 B 作为示踪剂, 观察在紊流扰动条件下物质在不同的均匀沉积介质中的迁移情况。结果表明, 在粒径不同的各类沉积介质中, 由于不同颗粒的孔隙度、渗透率不同, 在各沉积介质中形成的孔隙水压力差产生了孔隙水对流现象, 从而导致了物质在多孔介质中发生垂向或水平迁移, 并且其平均迁移速度受到染色剂的埋深和沉积介质的粒径大小的影响。而在均匀的沉积层中, $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的扰动主要影响各沉积介质中物质的垂向迁移, 并且当适当增加介质的粒径时, 这种垂向对流迁移现象相对增强。

关键词: 均质; 对流; 孔隙压差; 扰动; 罗丹明 B

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3683-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.016

Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance

LI Shao-long, CHEN Dao-yi*

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To examine mass transport in porous sediments during a turbulent flow, we established a simple sediment re-suspension device, made use of different sizes of sands as homogeneous sediments, and we injected $500 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ soluble Rhodamine B into different parts of the sediment as the mass tracer, to observe mass transport during the turbulent condition. The research showed that in porous sediments, pore-water pressure difference would be generated because of the sediments' distinctive porosity and permeability, and further led to the convective flow and mass transport in porous media. Moreover, such mass transport was directly influenced by its burial depth and particle size of the sediment. While in homogeneous sediments, mass transport was strongly influenced in vertical direction under $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ disturbance, and when moderately increased the size of porous particles under the same turbulent condition, such convection of pore-water would relatively enhance.

Key words: homogeneous sediment; convection; pore pressure; disturbance; Rhodamine B

海洋、湖泊等沉积层是一个巨大的能源、资源储存和中转站。以各种方式进入海洋、湖泊等水体的污染物质最终将以凝聚或吸附的方式沉入沉积层^[1], 而这些物质包括溶解盐、有机质和污染物质等可能由水动力和生物扰动被再悬浮释放^[2~5], 这一过程将对上覆水环境产生严重的影响, 在维持海洋、湖泊的环境生态平衡重起着至关重要的作用。

大量研究表明, 风浪、底栖生物以及人为因素对沉积物的扰动影响十分显著^[6~9], 尤其在浅水环境中, 风浪作用等引起的紊流扰动对沉积物的再悬浮有着密切的关系, 由此导致的沉积物中污染物再释放速度加剧^[10~13]。近年来通过对沉积物内源释放的研究, 很多国内外研究者发现水动力扰动造成的沉积物中营养盐的释放远远超过静态条件下内源物质的释放^[14~16], 王同成^[17] 2007 年研究了极端风情下湖泊沉积物与上覆水体间的物质交换, 发现在台风风情下, 湖泊中 SS 和 PO_4^{3-} 等悬浮物和溶解性营养盐的含量大大增加, 为静态负荷量的 23 倍。同样, 在强扰动环境下, 悬浮物上 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 HCl-P 发

生了释放^[28]。2008 年 Feng 等^[19] 利用沉积物再悬浮发生装置研究了在浅流扰动条件下难降解有机污染物的释放, 研究表明, 在实验扰动条件下, $\sum \text{PAHs}$ 的释放量比静态条件下高出 30%。这些沉积物内源污染物质的释放将严重影响水体的环境和生态平衡, 甚至造成多次污染并暴发大面积的水体富营养化^[20]。

然而, 海洋、湖泊沉积物研究起步相对较晚, 目前国内外研究方式比较单一, 主要是对沉积物扰动前后进行采样分析, 而扰动过程中沉积物的响应过程的研究甚少, 也少有学者将不同物理化学性质沉积物结合进行对比研究, 该手段较为被

收稿日期: 2014-10-14; 修订日期: 2015-05-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA09A409); 深圳近海动力环境演变重点实验室项目(ZDSY20130402163735964); 深圳市科技创新委员会项目(KQC201109050083A); 环境保护公益性行业科研专项(201309006)

作者简介: 李邵龙(1988~), 男, 硕士, 主要研究方向为浅水动力对沉积物的影响, E-mail: lisl12@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: chen.daoyi@sz.tsinghua.edu.cn

动,结果也具有滞后性. 因此,为更好地理解紊流扰动条件下沉积物的响应过程,本研究将关注研究在不同程度扰动条件下,非均质沉积物对扰动过程的运动响应.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究实验包括预备实验和主体实验部分,预备实验包括用简易达西装置测得各粒径沉积物的渗透系数以及其粒径级配实验;主体实验部分采用到平均粒径分别为 646、503、311、154 以及 71 μm 的石英沙作为均质沉积物,此粒径范围为浅水相沉积物中主要的粒径范围,同时采用浓度为 500 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的罗丹明 B 作为示踪剂在沉积层中进行分线铺设,具体方法见 1.2 节.

1.2 实验方法

本实验将采用如图 1 所示扰动装置对沉积物进行紊流扰动.

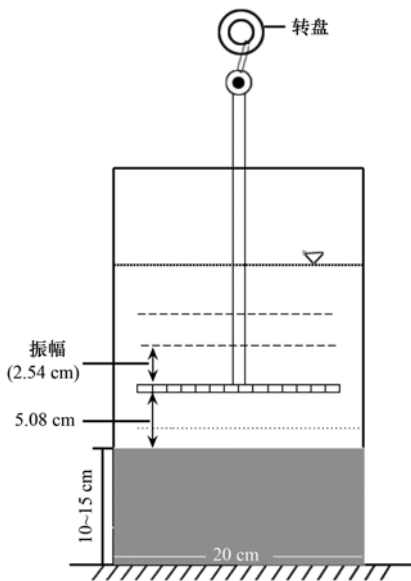


图 1 沉积物扰动发生装置示意
Fig. 1 Sediment re-suspension device

如图 1 所示,均匀介质或颗粒粒径不同的两种沉积物将分别铺设在 20 cm $\times$ 20 cm $\times$ 40 cm (长、宽、高)的有机玻璃水箱内,铺设厚度约 12 cm. 扰动作用由一电机带动 16 cm $\times$ 16 cm,孔边长为 1 cm (共 14 $\times$ 14 孔)的不锈钢网格来完成,钢丝的直径约为 2 mm,如图 2 所示. 并在整个扰动过程中对染色示踪剂在多孔介质中的迁移进行观察分析.

1.2.1 预备实验

首先,本研究对将使用到的平均粒径为 646、

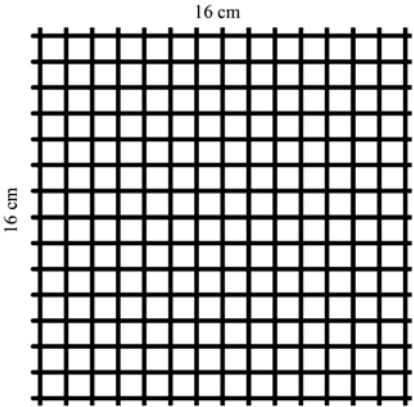


图 2 扰动网格装置示意
Fig. 2 Sketch map of disturbing grid

503、311、154 和 71 μm 的石英沙做达西渗流实验以测得其渗透率.

由达西定律公式可求得各沉积介质的渗透系数:

$$v = KJ$$

式中, $v = \frac{Q}{A}$ 为过水断面的平均流速, Q 为一定时间内通过过水断面的流量, A 为过水断面面积; $J = \frac{h_2 - h_1}{L}$ 为水力梯度, h_2 和 h_1 分别为两个测压管测得的水头, L 为两个测压管间的距离; K 为所求的渗透系数. 该实验部分对各个参数重复测量 3 次,分别计算出 3 次不同流速下的渗透系数 K ,并取其平均值,最终测得各沉积颗粒的渗透系数如表 1 所示.

表 1 各沉积颗粒渗透系数

Table 1 Osmotic coefficients of each sediment material					
平均粒径/ μm	646	503	311	154	71
渗透系数 $K/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	0.56	0.46	0.3	0.15	0.08

实验中所用到的各种介质粒径级配实验由 Mastersizer 3000 激光粒度分析仪完成,各沉积介质粒径级配如图 3 ~ 7 所示.

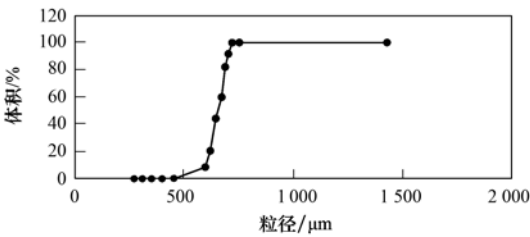


图 3 646 μm 沉积介质粒径级配曲线
Fig. 3 Size grading curve of 646 μm sediment

各沉积介质的 DV(50)和 DV(90)如表 2 所示.

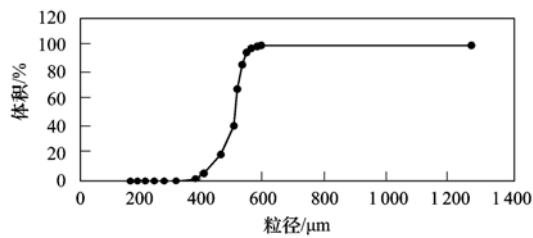


图 4 503 μm 沉积介质粒径级配曲线
Fig. 4 Size grading curve of 503 μm sediment

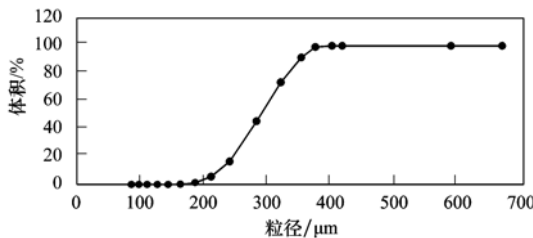


图 5 311 μm 沉积介质粒径级配曲线
Fig. 5 Size grading curve of 311 μm sediment

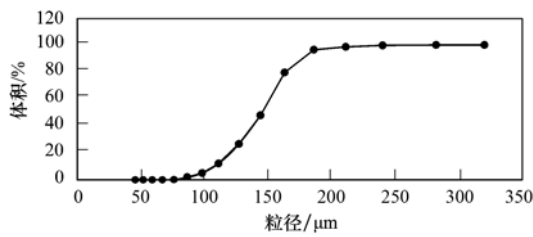


图 6 154 μm 沉积介质粒径级配曲线
Fig. 6 Size grading curve of 154 μm sediment

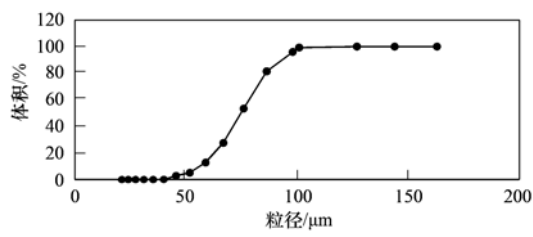


图 7 71 μm 沉积介质粒径级配曲线
Fig. 7 Size grading curve of 71 μm sediment

1.2.2 200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 扰动条件下染色剂在均质沉积物中迁移实验

为研究观测在上覆水体紊流扰动下,物质在不同的均匀沉积介质中的迁移情况,本实验设置了在 200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 扰动条件下,以平均粒径分别为 646、503、311、154 和 71 μm 的沙质颗粒物作为均匀介质,观测研究物质在均匀介质中的迁移情况. 为了方便数据分析,在沉积层不同埋深处分区布置监测点,用注射针注射 0.1~0.2 mL 罗丹明 B 染色剂作为示踪物质,并从左往右,从上至下对监测点进行命

表 2 各沉积介质 DV(50) 和 DV(90) 数据

Table 2 DV(50) and DV(90) of each sediment material		
项目	平均粒径/ μm	
	646	503
DV(50)/ μm	646	503
DV(90)/ μm	673	541
均方差	0.083	0.094

31
31
34

名,如图 8 所示.

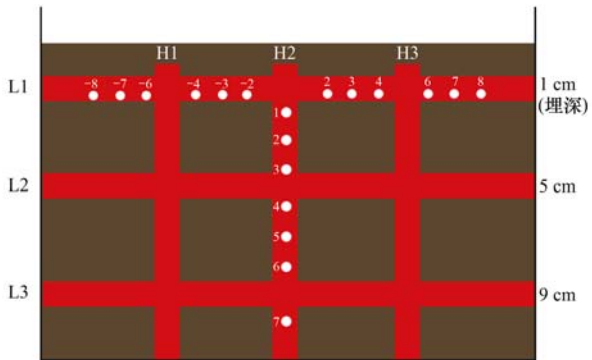


图 8 均匀介质中采样记录点设置示意
Fig. 8 Sketch map of sampling points arrangement in homogeneous sediment

如图 8 所示,L1、L2 和 L3 分别埋深 1、5 和 9 cm,并以 H2 为中心,在 L1、L2 和 L3 两侧分别布置 -2~-8 和 2~8 共 12 个监测点,其数字即点离中心位置的距离,而在 H2 的左、右约 5 cm 处分别布置 H1 和 H3 垂直染色剂线条,并如图 8 布置 1~7 监测点,其埋深分别为 2~4、6~8 和 10 cm.

为方便研究物质在沉积介质中垂向及水平迁移情况,L1、L2 和 L3 各监测点主要观测染色剂的垂向位移,H1、H2 和 H3 各监测点监测其水平位移. 并每隔 1 h 对每个采样点进行数据监测纪录,观测其迁移情况,以采样点的上下、左右边界为基准,记录其垂直或水平位移,整个扰动观测过程延续 11 h.

1.3 分析方法

水动力的紊流扰动将会在沉积物孔隙中产生孔隙水压力,这类孔隙水压力的方向各异性是产生剪切力的基础,从而使得物质在水动力环境下做定向迁移运动. 不同粒径的孔隙度不同,水扰动在其中产生的孔隙水压力也必然不同,在不同的沉积部分可能存在方向和大小不同的孔隙水压力,从而导致水流向压降处定向流动,进而产生染色剂定向迁移. 本研究将对每一次实验采样点的位移和平均迁移速度进行分析,从而可分析得出不同区域的染色点运动的差异性,进而得出沉积介质中物质迁移对扰动的响应以及在其中产生的差异性的水动力环境,同

时可得在相同扰动条件下,不同均质沉积物对其响应的特点。

2 结果与分析

2.1 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动条件下物质在 $646 \mu\text{m}$ 平均粒径均匀沉积物中迁移结果分析

在本实验中,均匀沉积介质由平均粒径为 $646 \mu\text{m}$ 沙质颗粒物组成,扰动强度为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. 11 h 后对 L2 和 L3 中各监测点进行位移统计,并计算出各点的平均垂向迁移速度,而由于 6 h 后, L1 中各监测点染色剂向下迁移与其他染色剂融合无法辨别,因此仅对 6 h 后 L1 中各监测点垂向迁移速度进行分析,如图 9 所示。

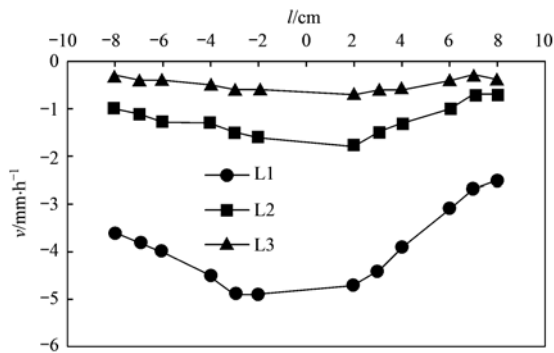


图9 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动下 $646 \mu\text{m}$ 介质中 L1、L2 和 L3 各监测点平均垂向迁移速度

Fig. 9 Average vertical velocity of sampling points in L1, L2 and L3 in $646 \mu\text{m}$ sediment under $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ disturbance

由图 9 数据分析可知,在 $646 \mu\text{m}$ 粒径的均匀沉积物中,6 h 后埋深 1 cm 处的 L1 中各监测点染色剂发生了明显向下的垂向位移,且在监测点 -3 处垂向位移达到最大值 -29.3 mm,平均迁移速度为 $-4.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;而在监测点 8 处垂向位移达到最小 -14.8 mm,平均迁移速率为 $-2.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,仅为 -3 监测点处最大迁移速率的 0.5 倍;11 h 后,埋深 5 cm 的 L2 中各监测点向下迁移速率明显小于 L1 中各点迁移速率,其最大值也只有 $-1.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,仅为 L1 中最大迁移速率的 0.4 倍,而最小迁移速度发生在 8 监测点,其值为 $-0.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,为 L1 中最小迁移速度的 -0.3 倍;而在埋深 9 cm 的 L3 中,各监测点受到扰动的影响最小,发生在监测点 2 处的最大迁移速度也只有 $-0.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,分别是 L1 和 L2 中最大迁移速度的 0.1 倍和 0.4 倍,而最小迁移速度只有 $-0.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. 且在各埋深层的监测点中,染色剂由中心向两边迁移速度逐渐减小。

而在 11 h 后, H1、H2 和 H3 中各监测点染色剂

均主要向下迁移,并在小于 5 ~ 7 cm 埋深处很快与其他向下迁移的染色剂融合,各点均无明显的水平迁移趋势,仅在 H1 中的 8 cm 埋深处发现最大向左迁移 3.1 mm,而在 H3 处 7 cm 处也只发现最大向右迁移 4.7 mm,整个扰动过程中,各监测点并无一致的水平迁移趋势。

2.2 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动条件下物质在 $503 \mu\text{m}$ 平均粒径均匀沉积物中迁移结果分析

在本实验中,均匀沉积介质由粒径为 $503 \mu\text{m}$ 沙质颗粒物组成,扰动强度为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. 由于 8 h 后 L1 中各监测点染色剂与其它染色剂混合,因此,对 L1 各点 8 h 后平均迁移速度进行分析,而对 L2 和 L3 中各监测点 11 h 后的平均迁移速度进行分析,如图 10 所示。

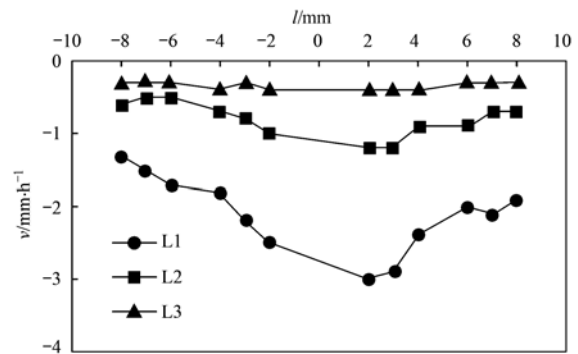


图10 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动下 $503 \mu\text{m}$ 介质中 L1、L2 和 L3 各监测点平均垂向迁移速度

Fig. 10 Average vertical velocity of sampling points in L1, L2 and L3 in $503 \mu\text{m}$ sediment under $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ disturbance

由图 10 可知,扰动过程中,染色剂均发生了不同程度的向下迁移,在埋深 1 cm 处的 L1 各点平均向下迁移最快,监测点 2 在 8 h 后已向下迁移了 -24.6 mm,平均迁移速度为 $-3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,但只有相同扰动强度下 $646 \mu\text{m}$ 实验 L1 中最大迁移速度的 0.6 倍,而 -8 监测点位移最小,其平均迁移速度为 $-1.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,也只有 $646 \mu\text{m}$ 实验 L1 中最小迁移速度的 0.5 倍;埋深 5 cm 的 L2 中最大垂向位移发生在监测点 2,最大值为 -13.6 mm,平均迁移速度为 $-1.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,是 L1 中最大迁移速度的 0.4 倍,而监测点 -6 处最小位移值为 -5.7 mm,平均迁移速度为 $-0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,是 L1 中最小迁移速度的 0.4 倍;同样在埋深 9 cm 的 L3 各监测点位移最小,其最大和最小平均迁移速度分别为 $-0.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $-0.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,分别为 L1 中最大和最小迁移速度的 0.1 倍和 0.2 倍. 且各埋深层监测点染色剂由中心向两边发生的垂向位移逐渐减小。

实验中 H1、H2 和 H3 各监测点染色剂主要向下迁移,且 11 h 后 H1 在 5 cm 处发现向左最大迁移 3.7 mm; H2 和 H3 在埋深小于 5 cm 处很快与向下迁移的染色剂融合无法辨别,各监测点染色剂均无明显向两边迁移的趋势。

2.3 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动条件下物质在 $311 \mu\text{m}$ 粒径均匀沉积物中迁移结果分析

在本实验中,均匀沉积介质由平均粒径为 $311 \mu\text{m}$ 沙质颗粒物组成,扰动强度为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。其中,11 h 后 L1、L2 和 L3 中各监测点染色剂的垂向迁移速度分析如图 11 所示。

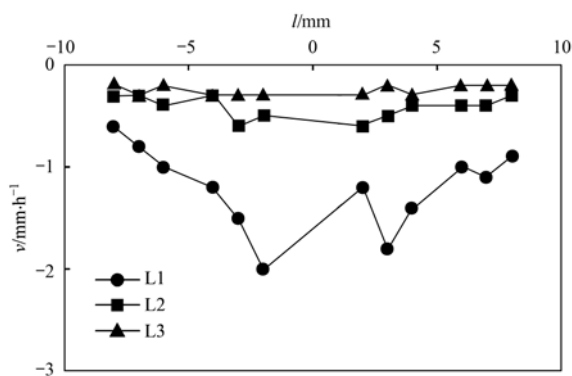


图 11 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动下 $311 \mu\text{m}$ 介质中 L1、L2 和 L3 各监测点平均垂向迁移速度

Fig. 11 Average vertical velocity of sampling points in L1, L2 and L3 in $311 \mu\text{m}$ sediment under $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ disturbance

由图 11 可知,埋深 1 cm 处的 L1 各监测点向下的垂向位移最大,且在 -2 监测点处达到最大向下位移值 -21.7 mm,平均迁移速度为 $-2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,但只有相同扰动条件下 $646 \mu\text{m}$ 实验中 L1 中最大迁移速度的 0.4 倍;在 -8 监测点处达到最小位移 -6.7 mm,平均迁移速度为 $-0.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,是 $646 \mu\text{m}$ 实验中 L1 中最小迁移速度的 0.2 倍;而埋深 5 cm 处的 L2 中各点的垂向位移相对较小,在监测点 2 处达到最大值 -6.3 mm,平均迁移速度为 $-0.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,为 L1 中最大迁移速度的 0.3 倍,而在监测点 -8 处达到最小位移 -2.9 mm,平均迁移速度为 $-0.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,是 L1 中最小迁移速度的 0.5 倍;本实验中,埋深 9 cm 处的 L3 中各监测点染色剂位移最小,其平均位移基本在 5 mm 以下,在监测点 2 处也只发生了 -3.7 mm 的最大位移,其最大迁移速度为 $0.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,分别为 L1 和 L2 中最大迁移速度的 0.2 倍和 0.5 倍,而在监测点 6 处发生最小位移值 -2 mm,平均迁移速度仅为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。且图 11 中各监测点均表明,在各埋深处,随着监测点往两边

靠近,其染色剂的垂向位移均有减小趋势。

而本实验中 H1、H2 和 H3 中各监测点染色剂主要表现为向下迁移,H1 有向两边扩散,且在埋深 4 cm 处与向下运动的染色剂融合,并有最大向左位移 4.3 mm,H2 在埋深小于 5 cm 处的各监测点与向下迁移的染色剂融合,而在 6 cm 埋深处发现有向右迁移 3.3 mm,H3 无明显水平迁移表现,且 H1、H2 和 H3 没表现出一致的水平迁移趋势。

2.4 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动条件下物质在 $154 \mu\text{m}$ 粒径均匀沉积物中迁移结果分析

在本实验中,均匀沉积介质由平均粒径为 $154 \mu\text{m}$ 沙质颗粒物组成,扰动强度为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。由于 11 h 扰动后 L3 中各监测点的垂向位移太小,最大监测值也小于 3 mm,因此,不对 L3 的监测点进行数据作图分析,而 11 h 后 L1 和 L2 中各监测点垂向迁移速度如图 12 所示。

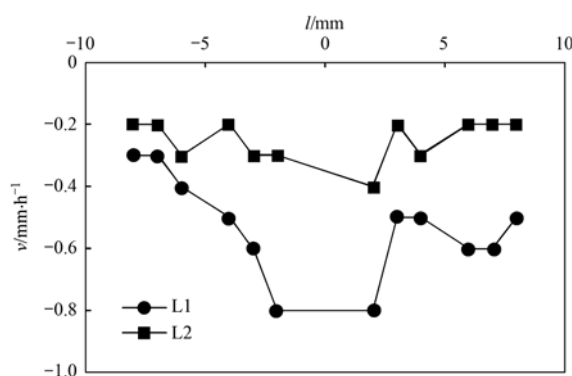


图 12 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动下 $154 \mu\text{m}$ 介质中 L1 和 L2 各监测点平均垂向迁移速度

Fig. 12 Average vertical velocity of sampling points in L1 and L2 in $154 \mu\text{m}$ sediment under $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ disturbance

由图 12 所示,在粒径为 $154 \mu\text{m}$ 的沉积介质中,上覆水体扰动所引起的物质在沉积介质中迁移比较微弱,在 1 cm 埋深处的 L1 各监测点中,最大垂向位移也只有 -8.7 mm,平均迁移速度为 $-0.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,分别只有 646 、 503 和 $311 \mu\text{m}$ 沉积介质 L1 中最大监测点迁移速度的 0.2 倍、0.3 倍和 0.4 倍,而在其监测点 -7 处最小向下位移仅有 -3.1 mm,最小平均迁移速度为 $-0.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。而埋深 5 cm 处的 L2 中各监测点垂向位移更小,最大向下位移也只有 -3.9 mm,其平均迁移速度为 $-0.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,是 L1 中最大平均迁移速度的 0.5 倍,而在监测点 -8 处发现最小向下位移 -1.9 mm,平均迁移速度为 $-0.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。同样,在该组均质实验中,各埋深范围监测点由中心向两边发生的位移逐渐减小。

而在 H1、H2 和 H3 各监测点中,均无发现明显迁移趋势,其中 H1 在 11 h 后在埋深 5 cm 处发现最大向左迁移 3.2 mm, H2 在 3 cm 埋深处发现最大向左迁移 4.1 mm. H3 无明显水平迁移趋势.

2.5 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动条件下物质在 $71 \mu\text{m}$ 粒径均匀沉积物中迁移结果分析

在本实验中,均匀沉积介质由粒径为 $71 \mu\text{m}$ 沙质颗粒物组成,扰动强度为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. 由于 L1 中各监测点染色剂位移十分微弱,而 L2 和 L3 中染色剂几乎没有发生垂向位移而是以自由扩散为主,因此仅对 L1 中各监测点染色剂的平均迁移速度进行分析,如图 13 所示.

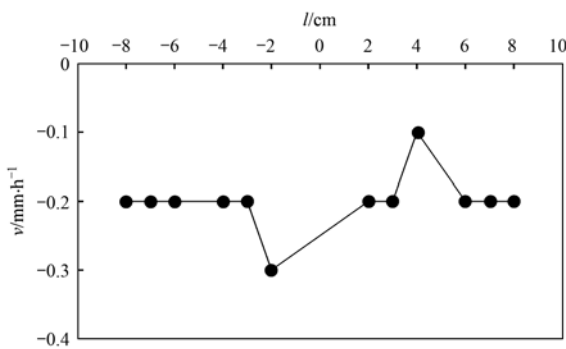


图 13 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动下 $71 \mu\text{m}$ 介质中 L1 各监测点平均垂向迁移速度

Fig. 13 Average vertical velocity of sampling points in L1 in $71 \mu\text{m}$ sediment under $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ disturbance

由图 13 可知,整个扰动过程中,埋深 1 cm 处的 L1 各监测点的迁移速度十分缓慢,11 h 后最大位移也只有 -3.3 mm ,其平均迁移速度为 $-0.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,而最小位移只有 -1.7 mm ,平均迁移速度为 $-0.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. L2 和 L3 中染色剂几乎没有发生垂向迁移.

同样,11 h 扰动后在 H1、H2 和 H3 各监测点中,均无发现明显迁移趋势,各染色线条沿着两边以自由扩散为主. 由此可知, $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的扰动强度对粒径为 $71 \mu\text{m}$ 的沉积介质几乎没有影响,因为其孔隙度太小,孔隙中水流运动十分微弱.

为了对比分析在相同扰动条件下,物质在不同粒径介质中迁移的差异,对每组实验的 L1、L2 和 L3 中各点的迁移速度取其平均值代表各埋深层的整体平均迁移速度,分别以 v_1 、 v_2 和 v_3 表示,同时以各沉积介质的 $DV(50)$ 为横坐标,来探讨不同介质中各埋深层物质的平均迁移速度,如图 14 所示.

由图 14 可知,同样在 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动条件下,由于沉积介质粒径不同,物质在其中迁移的速率差

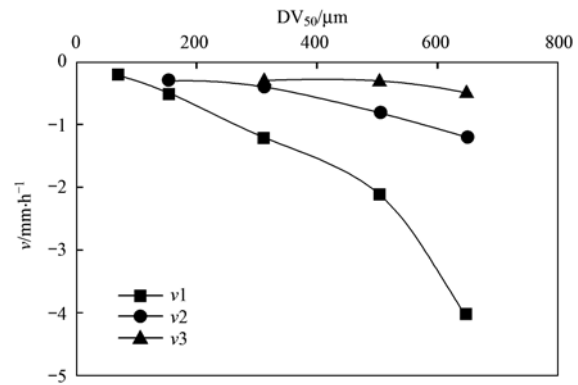


图 14 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动下 L1、L2 和 L3 分别在不同介质中的平均垂向迁移速度

Fig. 14 Average vertical velocity of L1, L2 and L3 in different sediments under $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ disturbance

别较大,随着沉积颗粒粒径的增加,各点物质迁移速度加快,且在埋深最浅的 L1 中,物质迁移速度随着粒径增加的梯度最大,而在 9 cm 埋深的 L3 中,各点迁移已十分缓慢.

在 $646 \mu\text{m}$ 均匀介质中埋深 1 cm 的 L1 平均向下迁移速度达到 $-4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,分别是 503 、 311 和 $154 \mu\text{m}$ 沉积介质中 L1 平均迁移速度的 1.9 倍、3.3 倍和 8 倍;而埋深 5 cm 的 L2 平均向下迁移速度也达到了 $-1.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,分别为后 3 组粒径中 L2 平均迁移速度的 1.5 倍、3 倍和 4 倍;而埋深 9 cm 处的 L3 平均向下迁移速度均较小,在 $646 \mu\text{m}$ 介质中也仅有 $-0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,都为 $503 \mu\text{m}$ 和 $311 \mu\text{m}$ 介质中 L3 平均迁移速度的 1.7 倍,而在 $154 \mu\text{m}$ 介质中,埋深 9 cm 处的物质迁移受到扰动影响已很小,平均位移不足 -3 mm .

为了得出 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的扰动强度对各沉积介质的影响深度,以 L1、L2 和 L3 的埋深(1、5 和 9 cm)为纵坐标,以其在各沉积介质中的整体平均迁移速率为横坐标,对埋深-迁移速度进行分析,并以平均迁移速度最小的两个埋深层做线性拟合如图 15 所示.

由于在 $71 \mu\text{m}$ 介质中,各埋深层染色剂几乎均不受扰动影响,而在 1 cm 埋深处的 L1 中,其最大迁移速度也只有 $-0.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,因此可认为在大于 1 cm 埋深处, $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的扰动强度对沉积介质的影响十分微弱;对于 $154 \mu\text{m}$ 沉积介质,其拟合公式为 $y = -13.333x + 7.0667$,令 $x = 0$ 即求得该扰动强度下的影响深度约为 7 cm; $311 \mu\text{m}$ 沉积介质的拟合公式为 $y = -8x + 9.8$,其在 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动下影响深度约为 10 cm; $503 \mu\text{m}$ 沉积介质的拟合公式为

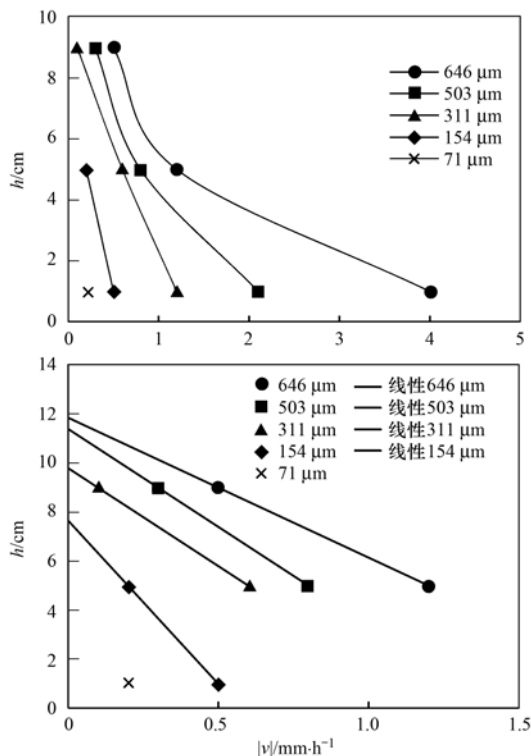


图 15 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动下各沉积介质中 L1、L2 和 L3 的平均迁移速率 ($|v|$) 与相应埋深 (h) 的关系和拟合曲线

Fig. 15 Relationship and fitted curves of average velocity (v) of L1, L2, L3 and corresponding burial depth (h) in different sediments under $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ disturbance

$y = -8x + 11.4$, 对应的影响深度约为 12 cm; $646 \mu\text{m}$ 沉积介质的拟合公式为 $y = 5.7143x + 12.857$, 在该扰动下的影响深度约为 13 cm.

为更直观地体现在 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动强度强度下粒径对扰动深度的影响, 分别以各沉积介质的 DV(50) 和各沉积介质的渗透系数为横坐标, 以该扰动下的影响深度 (h) 为纵坐标进行分析, 如图 16 和图 17 所示.

由图 16 和图 17 可知, 在 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动强度下, 沉积介质的粒径和渗透系数对扰动深度的影响趋势相近. 当沉积介质的平均粒径大于 $154 \mu\text{m}$ 时, 该扰动强度下粒径对沉积层扰动深度的影响几乎呈线性增长, 但增速相对缓慢; 当渗透系数 $K < 0.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 该扰动强度对沉积介质中物质迁移微弱, 影响深度小, 而当 $K > 0.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 影响深度随着渗透系数的增大而有明显的增长.

由上述均质实验可知, 上覆水体的扰动对不同的均匀沉积物中物质迁移有不同程度的影响, 而这种扰动在均匀介质中主要产生垂向的孔隙水压力, 从而导致物质随水流发生向下迁移, 在粒径为 646

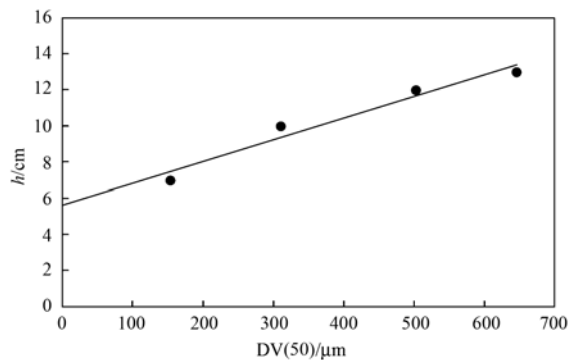


图 16 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动下沉积介质的粒径 DV(50) 与影响深度 (h) 关系

Fig. 16 Relationship of particle size DV(50) and affecting depth (h) under $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ disturbance

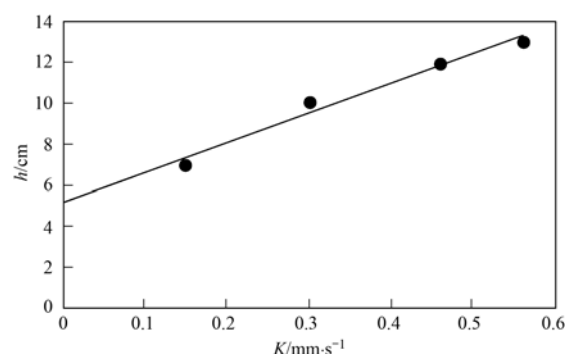


图 17 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 扰动下各沉积介质的渗透系数 (K) 与影响深度 (h) 关系

Fig. 17 Relationship of osmotic coefficient (K) and affecting depth (h) under $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ disturbance

μm 介质中, 由于其渗透系数相对较大, 因此染色剂产生的垂向位移最大. 随着沉积颗粒粒径的减小, 物质的迁移趋势减弱, 扰动对沉积层的影响深度也减弱.

3 结论

(1) 在上覆水体的扰动条件下, 由于各沉积介质孔隙度不同, 会在多孔介质中产生孔隙水压力差, 这种压差导致了孔隙水在多孔介质中发生对流, 从而导致物质随着水的对流而发生定向迁移.

(2) 在一定扰动强度下, 在相对均匀的沉积介质中, 水体的紊流扰动主要影响物质的垂向迁移, 而其横向迁移趋势相对较小.

(3) 当沉积介质的粒径过小时, 其孔隙度小, 受到上覆水体扰动时孔隙水流较弱, 因此物质在多孔介质中迁移以弥散为主, 不会发生明显的垂向或水平迁移, 而对于孔隙度较大的沉积介质, 物质的这种对流迁移比较明显.

致谢:感谢吴国钟老师对本研究思路的指导以及各项目的支持;感谢李强老师、蔡加祥、杨盛牧和吴世克在本项目研究中给予本人的帮助和支持。

参考文献:

- [1] 栗志民, 申玉春, 余南涛, 等. 沉积再悬浮颗粒物对马氏珠母贝摄食生理影响的室内模拟[J]. 生态学报, 2012, **32**(2): 386-393.
- [2] Herrero A, Bateman A, Medina V. Sediment resuspension due to density currents caused by a temperature difference: application to the Flix reservoir (Spain)[J]. Journal of Hydraulic Research, 2013, **51**(1): 76-91.
- [3] Butman B, Aretxabaleta A L, Dickhudt P J, et al. Investigating the importance of sediment resuspension in *Alexandrium fundyense* cyst population dynamics in the Gulf of Maine[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2014, **103**: 79-95.
- [4] Jones E M, Kämpf J, Fernandes M. Characterisation of the wave field and associated risk of sediment resuspension in a coastal aquaculture zone[J]. Ocean & Coastal Management, 2012, **69**: 16-26.
- [5] de Stigter H C, Jesus C C, Boer W, et al. Recent sediment transport and deposition in the Lisbon-Setúbal and Cascais submarine canyons, Portuguese continental margin[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2011, **58**(23-24): 2321-2344.
- [6] Meile C, Van Cappellen P. Global estimates of enhanced solute transport in marine sediments[J]. Limnology and Oceanography, 2003, **48**(2): 777-786.
- [7] Jeng D S, Lee T L. Dynamic response of porous seabed to ocean waves[J]. Computers and Geotechnics, 2001, **28**(2): 99-128.
- [8] Meysman F J R, Galaktionov O S, Gribshoit B, et al. Bioirrigation in permeable sediments: Advective pore-water transport induced by burrow ventilation[J]. Limnology and Oceanography, 2006, **51**(1): 142-156.
- [9] Green M O. Very small waves and associated sediment resuspension on an estuarine intertidal flat[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, **93**(4): 449-459.
- [10] Upadhyay R, Pandey A K, Upadhyay S K, et al. Limnochemistry and nutrient dynamics in Upper Lake, Bhopal, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(11): 7065-7077.
- [11] 尤本胜, 王同成, 范成新, 等. 太湖沉积物再悬浮模拟方法[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(5): 611-617.
- [12] 张雷, 古小治, 邵世光, 等. 河蚬(*Corbicula fluminea*)扰动对湖泊沉积物性质及磷迁移的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 88-95.
- [13] Qin B Q, Zhu G W. The nutrient forms, cycling and exchange flux in the sediment and overlying water system in lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Science in China: Series D Earth Science, 2006, **49**(S1): 1-13.
- [14] Carrick H J, Aldridge F J, Schelske C L. Wind influences phytoplankton biomass and composition in a shallow, productive lake[J]. Limnology and Oceanography, 1993, **38**(6): 1179-1192.
- [15] Liu J G, Clift P D, Yan W, et al. Modern transport and deposition of settling particles in the northern South China Sea: Sediment trap evidence adjacent to Xisha Trough[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2014, **93**: 145-155.
- [16] Søndergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark[J]. Hydrobiologia, 1992, **228**(1): 91-99.
- [17] 王同成. 极端风情下湖泊沉积物-上覆水之间的物质交换[D]. 南京: 河海大学, 2007. 1-48.
- [18] 李大鹏, 黄勇. 扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2614-2620.
- [19] Feng J L, Shen Z Y, Niu J F, et al. The role of sediment resuspension duration in release of PAHs[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, **53**(18): 2777-2782.
- [20] Karydis M, Kitsiou D. Marine water quality monitoring: a review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **77**(1-2): 23-36.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行