

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20150028

生物扰动对海洋沉积物中有机污染物环境行为的影响

田胜艳, 张彤, 宋春铮, 高一楠

(天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 概述了不同功能类群底栖动物的生物扰动行为, 介绍了生物扰动作用下沉积物颗粒迁移、混合的特点, 以及由此促进沉积物中有机污染物的释放. 生物扰动作用改变了沉积环境理化性质, 因此提高了其中有机污染物的生物可利用性. 展望中提出在生物扰动作用对沉积物中有机污染物环境行为影响研究中应考虑其生物毒性的变化.

关键词: 生物扰动; 沉积环境; 有机污染物; 迁移; 释放

中图分类号: Q178.53; X171

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2016)01-0001-07

Influence of Bioturbation on the Environmental Behavior of Sediment-associated Organic Pollutants in Marine Ecosystem

TIAN Shengyan, ZHANG Tong, SONG Chunzheng, GAO Yinan

(Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: This paper aims to describe the bioturbation behavior of different functional groups, the particle migration and mixing characteristics caused by bioturbation, and the release of the sediment-associated organic pollutants in the bioturbated sediment. When particles are biomixed, their state can be modified chemically. Herein, sediment-associated organic pollutants could be more available for other organisms. Whereas, the biotoxic changes induced by bioturbation should be further studied in the future.

Key words: bioturbation; sedimentary environment; organic pollutants; migration; release

生物扰动(bioturbation)是指底栖动物由于摄食、建管、筑穴等生物活动对沉积物初级结构造成的改变^[1]. 这一过程导致沉积物物理、化学性质变化, 并对沉积物-海水界面的生物地球化学过程造成重大影响. 因此, 生物扰动是构成河口、近岸和浅海水域关键生态过程, 是水层与底栖系统耦合过程的重要环节和枢纽, 曾经受到全球联合海洋通量研究(JGOFS)和陆-海相互作用(LOISZ)研究的极大重视^[1]. 扰动生物被誉为“生态系统工程师”, 它一方面影响水-沉积物界面的营养循环, 另一方面改变沉积物吸附特征及氧化还原电位, 同时还影响沉积物中生源要素和污染物的地球化学循环, 其影响沉积环境的生物地球化学过程的主要机制如图1^[2]所示. 底栖动物掘穴和沉

积食性者的摄食活动对沉积颗粒物的输运, 不仅使颗粒物发生迁移、混合, 还改变了沉积物中如氧化还原条件和降解特性等特征, 从而使颗粒物中的物质更容易被食碎屑者和分解者利用; 底栖动物在穴道内的摄食和呼吸活动使得上覆水不断涌入和排出洞穴, 从而使得洞穴周围孔隙水的化学性质发生改变, 这种作用称为生物灌洗作用, 通过排出有毒代谢物和引入氧气可以改变洞穴周围孔隙水的化学特征, 在沉积物中形成了微生物活力更强的新界面^[2-3]. 生物扰动作用下, 沉积物发生的这些理化特性改变都将影响沉积物中污染物的环境行为.

沉积物是持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)的重要汇. 由于 POPs 性质稳定, 对

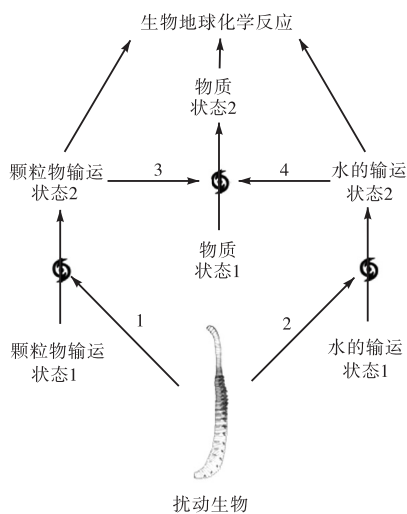
收稿日期: 2015-03-10; 修回日期: 2015-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41303070); 中国博士后科学基金资助项目(2013T60256)

作者简介: 田胜艳(1974—), 女, 山东潍坊人, 高级工程师, tiansy@tust.edu.cn.

数字出版日期: 2015-10-16; 数字出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20151016.1443.002.html>.

生物降解、光降解、化学分解作用具有较强的抵抗能力,因而可以在沉积环境中存留数年甚至数十年之久.随着外界污染源的消失,作为 POPs 主要蓄积库的沉积物又成为污染源,即使在静态条件下,吸附在沉积物中的污染物也会向水体释放.在水动力学条件(潮汐、风浪)、人为因素(航运、拖网、疏浚等)以及生物扰动作用下,沉积物发生再悬浮,将促进吸附在悬浮颗粒物上的污染物向水体释放.即使在没有外源输入的情况下,蓄积在沉积物中的 POPs 可以通过颗粒物再悬浮、解吸附等途径进入水层,也可以通过生物富集、食物链传递进入水层,因此沉积物又成为 POPs 的重要污染源,对水生环境健康的影响可能持续几年甚至几十年之久^[4].研究发现,在某些条件下,生物扰动对沉积物中污染物再悬浮释放的促进作用要强于物理扰动^[5].因此,有必要重视生物扰动作用对沉积物中有机污染物环境行为的影响.本文主要阐述了生物扰动作用下沉积颗粒物迁移混合特点、沉积环境变化特征,以及随之发生的沉积物中有机污染物迁移、释放、降解和生物可利用性等环境行为变化.



1. 颗粒物运输(即沉积物再造); 2. 水的运输(即生物灌洗);
3. 颗粒物被生物扰动迁移、混合后其化学特性发生改变; 4. 生物灌洗作用通过排出有毒代谢物和引入氧气改变洞穴周围孔隙水的化学特征

图1 底栖动物作为生态系统工程师影响沉积环境的生物地球化学过程的机制

Fig. 1 Mechanism of bioturbating infauna acting as ecosystem engineers and affecting biogeochemical activity in sediment environments

1 生物扰动作用下沉积颗粒物的迁移混合

底栖动物通过不同方式对沉积颗粒物进行迁移、

混合.根据它们的扰动方式,大致可以分为4个功能类群(图2^[2]).

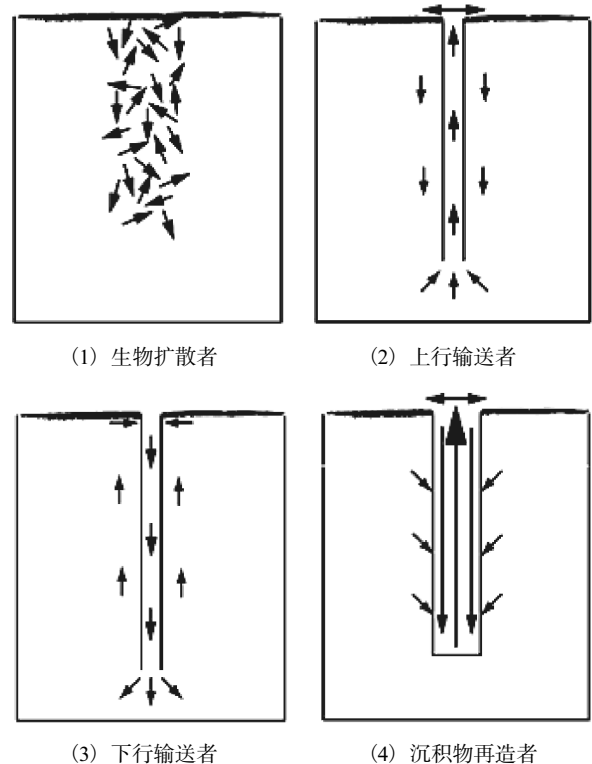


图2 生物扰动功能类群

Fig. 2 Functional groups of bioturbators

(1)生物扩散者(biodiffusers):其活动导致沉积物扩散性的运输,使沉积物颗粒在短距离移动,其中有一类生物扩散者是通过在沉积层筑造“甬道”,随着生物体的运动,粪便和颗粒物从表面落到管道底部,这类动物也被称为甬道扩散者(gallery diffusers);(2)上行输送者(upward conveyors):通常是头向下,垂直方向掘穴的种类,从底部吞食沉积物,在沉积物-水界面处排泄;(3)下行输送者(downward conveyors):是头向上的种类,将沉积物从沉积物-水界面通过肠道排泄到底部;(4)沉积物再造者(regenerators):是穴居的种类,在掘穴和维护洞穴时不断将穴内深层沉积物推出洞外,在沉积物-水界面形成较大的开口,在水流作用下洞穴内又被填入表层沉积物,或者由于洞穴坍塌导致上层沉积物迁移到下层^[2].由此可见,底栖动物的生物扰动方式是由其生活习性、摄食方式决定的.比如中国天津沿海常见的优势底栖动物种群:双齿围沙蚕、泥螺和天津厚蟹,由于它们的栖息环境和食性不同,从而使得它们具有不同的生物扰动方式.双齿围沙蚕属潮间带高潮区的优势种,栖息在细颗粒泥砂质黏土沉积物中,掘成U字形甬道(深约15 cm)置身其中,随潮水涨落而活动,昼伏夜出,摄

食时露出沉积层表面,成体沙蚕靠大量吞食沉积物摄取食物,为沉积食性,偏向于吞食较小粒径的颗粒物^[6-7];泥螺广泛分布于我国南北沿海潮间带—潮下带浅水区,通常在退潮 2 h 后出现在滩面上四处爬行,而涨潮前 2 h 迅速从滩面消失,隐藏到 10 cm 深的滩面下,在冬季会钻到 1 m 多深的滩面下潜藏起来不活动,夏季高温时也隐藏在滩面下,依靠齿舌舔食滩涂表面的食物,为舔食性腹足类,其食物主要以底栖硅藻为主,还有大量有机碎屑、泥砂及小型甲壳类、无脊椎动物卵等,泥螺对食物没有严格选择性^[8];天津厚蟹则是典型河口穴居种,栖息于高、中潮滩,更喜草滩^[9],洞穴深约 6 cm,摄食有机碎屑、底栖藻类和软泥等,属沉积食性.覃雪波等^[10]利用微宇宙示踪技术定量研究了这 3 种底栖动物对河口沉积物的扰动作用,研究发现双齿围沙蚕属甬道扩散者,泥螺属下行输送者,厚蟹属沉积物再造者;实验表明这些底栖动物的生物扰动作用显著影响沉积颗粒物的迁移分布,但对不同深度颗粒物的影响强度不同,其中对表层沉积物扰动强度顺序依次为:沙蚕>厚蟹>泥螺,而对深层(距表面 5 cm)沉积物的扰动强度顺序依次为:厚蟹>沙蚕>泥螺,生物扰动作用与它们的生活习性基本吻合.

伴随沉积颗粒物的迁移,吸附在颗粒物中的污染物自然也发生迁移,尤其是具有疏水性的有机污染物,它们极易与颗粒物结合,更容易随颗粒物的转移进入不同环境介质.生物扰动能将表层的沉积颗粒物迁移至深处(有些物种能迁移至 20 cm 深)^[2],也能将深层的颗粒物迁移至表层,这些迁移、混合的过程必然影响有机污染物在沉积物中的迁移与分布.Timmermann 等^[11]在丹麦 Roskilde 峡湾浅海区进行溢油模拟实验,发现底栖动物沙蚕(*Arenicola marina*)、沙蚕(*Nereis diversicolor*)、水螅虫(*Hydrobia* spp.)、螺赢蜚(*Corophium volutator*)等生物扰动作用下,表层颗粒物向深层输运,表层沉积物中的石油污染在实验进行 20 d 时表现出明显迁移行为,实验进行到 120 d 时,石油污染从表层迁移至约 10 cm 深的沉积层.表层污染物向深层输运,有利于石油污染存留在沉积层,不易进入水层造成二次污染.但是,生物扰动作用同样能将深层沉积物中的污染物输运至表层,比如上行输送者和沉积物再造者,这样就增加了污染物的生态风险.杜永芬等^[12]利用化学性质稳定的荧光砂作为示踪颗粒,通过 15 d 的养殖实验发现,底栖双壳类软体动物菲律宾蛤仔(*Ruditapes*

philippinarum)的生物扰动作用使 28.2% 的表层示踪砂悬浮进入水体,36.1% 的表层示踪砂垂直向下迁移;对于沉积物 8 cm 处的示踪砂,则有 27% 向上迁移,12.6% 向下迁移.于子山等^[13]通过类似示踪砂实验也发现经过紫彩血蛤(*Nuttallia olivacea*)10 d 生物扰动,沉积物表层的示踪砂有 47% 向下迁移,最深至 12 cm,对于沉积物 10 cm 处的示踪砂则有 45% 向上迁移,15% 向下迁移.由此可见,生物扰动作用对深层沉积物向上迁移的搬运功能是不可忽视的,这也预示着埋藏在沉积物深层的污染物可能在生物扰动作用下向表层迁移.

2 生物扰动作用促进沉积物中有机污染物的释放

生物扰动作用在导致沉积颗粒物迁移、混合的过程中,会造成颗粒物再悬浮,吸附在悬浮颗粒物上的污染物进入水层,颗粒物—水之间的浓度差以及溶氧环境的变化都可能促进污染物由沉积相向水相的解吸附或者溶解过程^[14].悬浮颗粒物本身还可以直接被水生动物摄食而进入水层食物链.此外,生物扰动作用对沉积物迁移、混合的过程还伴随有生物灌洗作用发生,即动物在穴道内的运动、呼吸活动等使得水不断涌入和排出洞穴(图 1).生物灌洗作用通过排出有毒代谢物和引入氧气而改变洞穴周围孔隙水的化学特征,颗粒物迁移和水的流动共同改变了沉积层的孔隙度,从而促进了沉积物—水间的物质交换^[2].因此,生物扰动作用可以通过颗粒物再悬浮和从沉积物到孔隙水的解吸附两种途径促进沉积物中污染物的释放.污染物的释放过程受生物扰动方式、污染物化学性质、污染物的埋藏深度等因素影响^[15].Hedman 等^[14]通过微宇宙模拟实验研究了多毛类环节动物 *Marenzelleria* spp.(甬道扩散者)和端足目甲壳动物 *Monoporeia affinis*(生物扩散者)生物扰动作用下表层沉积物中三氯联苯(¹⁴C]PCB-32)的释放行为,并与物理作用(近表层机械搅拌)造成再悬浮促进的释放行为进行比较,研究发现两种扰动方式的生物扰动作用都促进了三氯联苯向水层释放,其中溶解态释放量(即通过溶解进入水层)大于颗粒态释放量(即以悬浮颗粒物形式进入水层);生物扩散者 *Monoporeia affinis* 生物扰动作用下的释放量大于甬道扩散者扰动下的释放量,并大于物理扰动下的释放量.Josefsson 等^[15]通过微宇宙模拟实验研究了上述两种底栖动物

生物扰动下,不同深度沉积物(距表层 2、5、10 cm)中几种 3 氯代-8 氯代多氯联苯(polychlorinated biphenyls, PCBs)和 3 溴代、5 溴代和 8 溴代等几种多溴联苯醚(PBDEs)同系物的释放行为,发现甬道扩散者 *Marenzelleria* spp. 生物扰动下两类污染物的释放量大于生物扩散者 *Monoporeia affinis* 扰动下的释放量;释放量与污染物埋藏深度呈反比,即表层沉积物中污染物的释放量大于深层沉积物中的污染物;疏水性相对较差的同系物(即辛醇-水分配系数 K_{ow} 值相对较低)释放量相对较大;各同系物以颗粒态或者以溶解态形式释放的比例也与埋藏深度有关:越接近表层的低氯/溴代同系物(K_{ow} 值相对较低)以溶解态形式释放的比例较高,相反,深处的高氯/溴代同系物(K_{ow} 值相对较高)主要以颗粒物状态进入水层. 上述两个研究关于不同生物扰动方式影响沉积物中有机污染物释放行为的结果不同,主要因为前者研究的是表层沉积物中污染物的释放,而后者研究的深度是 2 cm 以下,这个深度超过了生物扩散者 *Monoporeia affinis* 的扰动深度,对深层的污染物,掘穴、筑管类种群的生物扰动作用对释放的促进作用更显重要. 李俐俐等^[16]通过室内实验证明了沙蚕(*Nereis diversicolor*)的生物扰动作用极大地促进了天津大沽排污河口沉积物中菲向水体的释放,生物扰动作用下水体中颗粒态菲是对照组(无生物扰动作用)的 2.96 ~ 10.35 倍,溶解态菲是对照组的 9.55 ~ 17.4 倍,其中溶解态菲占释放总量的 80% 以上. 作者认为除了沙蚕生物扰动过程中对沉积物颗粒直接输运、迁移作用外,沙蚕的筑穴活动使沉积物变疏松而更易发生再悬浮,而且沙蚕以沉积物为食优选小颗粒沉积物,其排泄出的颗粒也易再悬浮,综合以上因素提高了生物扰动组水体中的悬浮颗粒物的含量,而且这些悬浮颗粒以小粒径为主,其中含有较多的有机污染物;此外,底栖动物的排泄物中含有大量的小分子溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM),生物扰动处理中沉积物-水界面水体中 DOM 浓度显著升高,这也促进了污染物从沉积相向水相解吸. 综上所述,生物扰动作用促进了沉积物中的有机污染物向水层释放,但是其释放行为因底栖动物扰动类型而异,也受沉积物类型和污染物的化学性质的影响.

3 生物扰动作用改变沉积环境的理化性质

生物扰动作用下沉积颗粒物不仅发生迁移、混合,其中的生物地球化学过程也发生改变^[17-19]. 底栖

动物的掘穴、摄食行为改变了沉积物的结构,同时也改变了沉积物中如氧化还原条件和降解特性等特征;底栖动物在穴道内的呼吸活动引起的生物灌洗作用改变了孔隙水的化学特征,这些理化特征的改变使得沉积物中形成了微生物活力更强的新界面^[20-21]. 生物灌洗作用促进沉积物-水界面之间包括溶解氧、营养盐及有机物等物质的交换,能够向深层沉积物间歇性供氧,从而改变了底栖动物洞穴周围沉积层的氧化/还原层边界,进而改变微生物群落组成^[22]. 底栖动物所掘的洞穴和建筑的管道,增加了溶质在缺氧的间隙水与含氧的上覆水之间进行交换的有效表面积,为微生物提供了一个有氧-无氧不断交替的界面. 这些洞穴和管道的内壁不是沉积物表面的简单延伸,而是有着特异的理化性质,并附着一些特定微生物群落. 洞穴和管道中经常变化的环境,如频繁波动的氧化还原条件、溶质在固相和间隙水中的交换以及一些化学反应、有机物质活性增加(更容易被生物利用)等,为附着在洞穴和管道壁上的微生物群落变化提供了环境基础. 大量野外和室内实验都发现底栖动物对沉积物的再造活动和生物灌洗作用促进了有机质的矿化作用^[23].

Hunting 等^[24]研究发现底栖动物的生物扰动作用能够促进细菌活力和矿化作用,但是不同扰动行为底栖动物生境中的菌群结构和氧化电位存在差异. Volkenborn 等^[25]的研究发现,在鬼虾(*Neotrypaea californiensis*)生物扰动作用下,由生物灌洗作用引起的水动力变化导致沉积层中出现有氧-无氧周期性变化的区域. 生物灌洗作用中含氧的上覆水不断涌入巢穴,缺氧的间隙水又不断通过沉积层-水界面交换而排出. 上覆水涌入时,水压力促使含氧的水不仅涌入巢穴,也会渗入巢穴周围区域. 鬼虾间歇性的掘穴灌洗作用可以使巢穴区在 90% 以上时间内处于有氧状态,而巢穴周围的沉积物和表层沉积物中有氧-无氧状态每小时交替约 1 ~ 1.5 次. 在渗透性差的泥质沉积物中,氧周期性波动区在距巢穴几毫米的范围;而在渗透性强的砂质沉积物中,氧波动区可达距巢穴几厘米的范围. 由生物扰动引起的氧化还原环境变化可能是改变海洋沉积物中微生物菌群结构和生物地球化学过程的主要因素.

4 生物扰动作用提高沉积物中有机污染物的生物可利用性

生物扰动作用改变了沉积物的理化性质,在沉积

物中形成了微生物活力更强的新界面,使得沉积物中的物质更容易被食碎屑者和分解者利用,这说明沉积物中大分子有机物的生物可利用性得以提高。有机污染物的生物可利用性通常指沉积物中能够被生物降解或者为生物体吸收利用的那部分污染物,是评估其生态风险的基础。生物扰动作用下,一方面,底栖动物洞穴和管道内频繁波动的氧化还原条件、溶质在固相和间隙水中的交换等,为附着在洞穴和管道壁上的微生物群落变化提供了环境基础;另一方面,生物扰动作用影响营养盐在沉积物-水界面的交换^[26],加速营养盐再生的过程又可能为微生物分解有机污染物提供需要的营养源。底栖动物自身的排泄过程和生物扰动作用共同影响沉积物-水界面营养盐交换通量和再生过程。邓可等^[27]研究发现,生物扰动作用下菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)排泄的溶解态氮和磷酸盐约有 37% 释放入水体,还有一部分存在沉积颗粒物中。自然条件下海洋环境中的生物降解过程往往受到营养盐限制,比如利用生物修复方法清除溢油污染的案例,多数是通过添加营养因子促进微生物生长的措施提高石油污染降解速率^[28-30]。在 1989 年美国阿拉斯加 Exxon Valdez 油轮泄漏污染事件后,Brugg 等^[28]通过添加营养盐的方法显著提高了石油生物降解速率。生物扰动作用促进沉积物释放的氮磷以及底栖动物代谢产生的氮磷无机盐可能会促进石油烃生物降解。Timmermann 等^[11]在丹麦 Roskilde 峡湾浅海区进行的溢油模拟实验中还发现,底栖动物沙蠋(*Arenicola marina*)的生物扰动作用显著促进了 10~20 cm 深度沉积物中石油烃的生物降解,而 0~10 cm 表层沉积物中的石油烃浓度在海浪等物理作用和其他底栖动物类群如沙蚕(*Nereis diversicolor*)、螺赢蜚(*Corophium volutator*)、水螅虫(*Hydrobia* spp.)等生物扰动作用下也迅速降低。此外,沉积食性的底栖动物要吞食大量沉积物获取所需要的食物,它们的消化液中含有大量促进大分子有机化合物溶解和降解的物质,对生物降解也有很好的促进作用。

有机污染物进入沉积物后,一部分通过分配作用吸附在颗粒物的表面,而另一部分则扩散到颗粒物的内部,如一些大分子的有机质微孔中,被圈闭、包裹而滞留或锁定在沉积物中,这会降低有机污染物的生物可利用性^[31]。然而,在生物扰动作用下,进入颗粒物内部的有机污染物有可能在沉积结构和理化性质改变过程中发生性质变化,也可能被沉积食性的底栖

动物吞食,在动物肠道消化液作用下生物可利用性发生改变。张迪宇等^[32]通过动物体内消化实验发现部分经消化过程而释放出来的多环芳烃会吸附在消化残渣中排出,经过消化过程释放出来的多环芳烃是很容易被生物利用的。李莉等^[33]利用体外实验同样发现,经过动物消化液的作用,土壤中锁定残留芘的提取量增加,表明能够被生物利用的部分增加了。目前虽未见关于海洋底栖动物消化过程提高沉积物中有机污染物生物可利用性的研究,但是沉积食性的沙蠋、沙蚕等消化液内含有大量生物表面活性剂^[34],能有效地将沉积物中锁定的有机物溶解或者解吸出来进入消化液便于被生物吸收。如果部分经消化释放出来的有机污染物吸附在消化残渣中排出,同样会增加其生物可利用性。

5 结语与展望

海洋环境是各类污染物的最终归宿,海洋沉积物也是有机污染物的重要蓄积地。同时,海洋生态系统中生活着数量众多、种类丰富的底栖动物,这些底栖动物的生物扰动作用必然影响沉积颗粒物的迁移、混合,并影响沉积环境特征,从而影响沉积物中有机污染物的迁移、分布、释放、降解和生物可利用性等环境行为,这些都关系到海洋生态系统的健康和安全。目前,关于生物扰动作用影响沉积物中有机污染物迁移和释放行为的研究还局限在区域范围内,且针对单一类型污染物开展,而多种污染物共存时生物扰动对其环境行为的影响对生态风险评价更具有现实意义。此外,大多数研究主要关注了生物扰动作用下沉积物中有机污染物的迁移和释放量的变化,而揭示生物扰动作用下沉积物中的污染物对生境中其他生物可能产生的风险,是对生态系统安全更直观的指示。因此,在研究生物扰动作用影响沉积物中有机污染物迁移、释放行为的研究中有必要考虑其毒性效应的变化。

参考文献:

- [1] 张志南. 水层-底栖耦合生态动力学研究的某些进展[J]. 青岛海洋大学学报:自然科学版, 2000, 30(1): 115-122.
- [2] Kristensen E, Penha-Lopes G, Delefosse M, et al. What is bioturbation? The need for a precise definition for fauna in aquatic sciences[J]. Marine Ecology Progress

- Series, 2012, 446: 285–302.
- [3] Shirakawa H, Yanai S, Goto A. Lamprey larvae as ecosystem engineers: Physical and geochemical impact on the streambed by their burrowing behavior[J]. *Hydrobiologia*, 2013, 701 (1) : 313–322.
- [4] Ross P S, Couillard C M, Ikonomou M G, et al. Large and growing environmental reservoirs of Deca-BDE present an emerging health risk for fish and marine mammals[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58 (1) : 7–10.
- [5] Granberg M E, Gunnarsson J S, Hedman J E, et al. Bioturbation-driven release of organic contaminants from Baltic Sea sediments mediated by the invading polychaete *Marenzelleria neglecta*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 (4) : 1058–1065.
- [6] 蒋霞敏, 柳敏海. 沙蚕科的研究进展[J]. *海洋科学*, 2008, 32 (4) : 82–86.
- [7] 张青田, 胡桂坤. 双齿围沙蚕摄食自然沉积物的研究[J]. *天津科技大学学报*, 2008, 23 (3) : 26–29.
- [8] 郑怀平. 泥螺行为与繁殖生物学特征的初步研究[J]. *海洋科学*, 2003, 27 (1) : 69–71.
- [9] 袁兴中, 陆健健. 长江口岛屿湿地的底栖动物资源研究[J]. *自然资源学报*, 2001, 16 (1) : 37–41.
- [10] 覃雪波, 孙红文, 吴济舟, 等. 大型底栖动物对河口沉积物的扰动作用[J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (2) : 458–463.
- [11] Timmermann K, Banta G T, Klinge L, et al. Effects of bioturbation on the fate of oil in coastal sandy sediments: An in situ experiment [J]. *Chemosphere*, 2011, 82 (10) : 1358–1368.
- [12] 杜永芬, 张志南. 菲律宾蛤仔的生物扰动对沉积物颗粒垂直分布的影响[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2004, 34 (6) : 988–992.
- [13] 于子山, 王诗红, 张志南, 等. 紫彩血蛤的生物扰动对沉积物颗粒垂直分布的影响[J]. *青岛海洋大学学报: 自然科学版*, 1999, 29 (2) : 279–282.
- [14] Hedman J E, Tocca J S, Gunnarsson J S. Remobilization of polychlorinated biphenyl from Baltic Sea sediment: Comparing the roles of bioturbation and physical resuspension[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2009, 28 (11) : 2241–2249.
- [15] Josefsson S, Leonardsson K, Gunnarsson J S, et al. Bioturbation-driven release of buried PCBs and PBDEs from different depths in contaminated sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44 (19) : 7456–7464.
- [16] 李俐俐, 武安泉, 覃雪波. 沙蚕生物扰动对河口沉积物中菲释放的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34 (9) : 2355–2361.
- [17] Kristensen E, Hansen T, Delefosse M, et al. Contrasting effects of the polychaetes *Marenzelleria viridis* and *Nereis diversicolor* on benthic metabolism and solute transport in sandy coastal sediment[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2010, 425: 125–139.
- [18] Karlson K, Hulth S, Ringdahl K, et al. Experimental recolonisation of Baltic Sea reduced sediments: Survival of benthic macrofauna and effects on nutrient cycling [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 294: 35–49.
- [19] Lohrer A M, Thrush S F, Gibbs M M. Bioturbators enhance ecosystem function through complex biogeochemical interactions[J]. *Nature*, 2004, 431 (7012) : 1092–1095.
- [20] Nogaro G, Hammerschmidt C R. Influence of benthic macrofauna on microbial production of methylmercury in sediments on the New England continental shelf [J]. *Hydrobiologia*, 2013, 701 (1) : 289–299.
- [21] Pischedda L, Milton C, Gilbert F, et al. Characterization of specificity of bacterial community structure within the burrow environment of the marine polychaete *Hediste (Nereis) diversicolor*[J]. *Research in Microbiology*, 2011, 162 (10) : 1033–1042.
- [22] Papaspyrou S, Gregersen T, Kristensen E, et al. Microbial reaction rates and bacterial communities in sediment surrounding burrows of two nereidid polychaetes (*Nereis diversicolor* and *N. virens*) [J]. *Marine Biology*, 2006, 148 (3) : 541–550.
- [23] Aller R C. Bioturbation and remineralization of sedimentary organic matter: Effects of redox oscillation[J]. *Chemical Geology*, 1994, 114 (3) : 331–345.
- [24] Hunting E R, Whatley M H, van der Geest H G, et al. Invertebrate footprints on detritus processing, bacterial community structure, and spatiotemporal redox profiles [J]. *Freshwater Science*, 2012, 31 (3) : 724–732.
- [25] Volkenborn N, Polerecky L, Wetthey D S, et al. Hydraulic activities by ghost shrimp *Neotrypaea californiensis* induce oxic-anoxic oscillations in sediments[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 455: 141–156.
- [26] De Vittor C, Faganeli J, Emili A, et al. Benthic fluxes of oxygen, carbon and nutrients in the Marano and Grado Lagoon (northern Adriatic Sea, Italy) [J]. *Estuarine*,

- Coastal and Shelf Science, 2012, 113: 57–70.
- [27] 邓可, 刘素美, 张桂玲, 等. 菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 782–793.
- [28] Bragg J R, Prince R C, Harner E J, et al. Effectiveness of bioremediation for the *Exxon Valdez* oil spill[J]. Nature, 1994, 368: 413–418.
- [29] Xu R, Yong L C, Lim Y G, et al. Use of slow-release fertilizer and biopolymers for stimulating hydrocarbon biodegradation in oil-contaminated beach sediments[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 51(8): 1101–1110.
- [30] Östberg T L, Jonsson A P, Lundström U S. Accelerated biodegradation of n-alkanes in aqueous solution by the addition of fermented whey[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2006, 57(3): 190–194.
- [31] Kan A T, Fu G, Tomson M B. Adsorption/desorption hysteresis in organic pollutant and soil/sediment interaction[J]. Environmental Science & Technology, 1994, 28(5): 859–867.
- [32] 张迪宇, 吕艳, 赛道建, 等. 残渣吸着对消化道中土壤多环芳烃生物可给性体外测定的影响[J]. 环境化学, 2009, 28(4): 524–529.
- [33] 李莉, 苗明升, 丁俊男, 等. 土壤中锁定残留茈在体外消化系统中的生物可给性[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(5): 634–640.
- [34] Weston D P, Mayer L M. In vitro digestive fluid extraction as a measure of the bioavailability of sediment-associated polycyclic aromatic hydrocarbons: Sources of variation and implications for partitioning models[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1998, 17(5): 820–829.

责任编辑: 周建军

本校专利首获国家级专利奖

近日, 从国家知识产权局获悉, 由天津科技大学王硕、王俊平、张燕三位教授发明的“农药西维因人工抗原和抗体及其制备方法与应用”(专利号: ZL200410020332.2) 专利荣获第十七届中国专利优秀奖。这是本校首次获得国家级专利奖, 也是今年市属高校中唯一一个获得国家专利奖的高校。

“农药西维因人工抗原和抗体及其制备方法与应用”专利主要设计农药西维因半抗原的机构, 开发半抗原和人工抗原合成方法以及建立抗体的制备技术。专利建立的半抗原分子设计、合成技术, 成为高特异性小分子物质抗体制备的通用性技术。专利首创的西维因快速检测方法简便、快速、灵敏、时效性强, 在保障食品安全中发挥了重要作用。

专利奖的获得, 是学校多年来深入实施知识产权战略和创新驱动发展战略的有效成果, 是发明人致力于学术追求和科学研究的有力印证。作为天津市专利示范试点单位和天津市知识产权运营服务联盟单位, 学校将继续通过加强专利管理, 推进产学研合作等途径, 不断提高自主知识产权的拥有量和质量, 提升服务经济社会发展的能力和水平, 为实现学校科技繁荣提供强有力的智力支撑。

供稿: 科技处 宋巍

2015–12–09