

李 航, 郑冬梅, 马欢驰. 辽河口湿地沉积物中汞含量变化特征的模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 774–779.

LI Hang, ZHENG Dong-mei, MA Huan-chi. Simulation of total mercury content variability in wetland sediments in the Liaohe Estuary[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 774–779.

辽河口湿地沉积物中汞含量变化特征的模拟研究

李 航^{1,2}, 郑冬梅^{1,2*}, 马欢驰^{1,2}

(1. 沈阳大学环境学院, 沈阳 110044; 2. 沈阳大学区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 沈阳 110044)

摘 要:以辽河口裸滩表层(0~10 cm)和底层(10~20 cm)沉积物作为研究对象,采用室内恒温培养法进行模拟培养,探讨在淹水盐度(CK、0.50%、1.50%和1.80%)、环境温度(10、20℃和30℃)以及淹水状态(全淹水和半淹水)改变的情况下,辽河口裸滩表层和底层沉积物中总汞含量的变化趋势。结果表明:全淹水状态下,在淹水盐度为1.80%、培养温度为30℃时,表层和底层沉积物中汞含量均最低,分别为0.095 mg·kg⁻¹和0.098 mg·kg⁻¹;半淹水状态下,淹水盐度为1.80%,培养温度为30℃时,表层和底层沉积物中汞含量也最低,分别为0.103 mg·kg⁻¹和0.101 mg·kg⁻¹;两种淹水状态下,表层和底层沉积物中汞含量随盐度和温度的变化趋势基本一致。研究表明,随着淹水盐度升高,沉积物中总汞含量逐渐降低。相同盐度条件下,沉积物中总汞含量随环境温度(10~30℃)升高而逐渐降低。沉积物在淹水状态全淹水时比半淹水时更有利于无机汞的释放。

关键词:辽河口;汞;淹水盐度;温度;湿地

中图分类号:X13 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)04-0774-06 **doi:**10.11654/jaes.2017-1517

Simulation of total mercury content variability in wetland sediments in the Liaohe Estuary

LI Hang^{1,2}, ZHENG Dong-mei^{1,2*}, MA Huan-chi^{1,2}

(1.Environmental College, Shenyang University, Shenyang 110044, China; 2.Key Laboratory of Eco-restoration of Regional Contaminated Environment, Ministry of Education, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: Using a laboratory incubator to simulate the culturing process, we studied the change of total mercury content in response to changing salinity of flood water (CK, 0.5%, 1.5%, and 1.8%), environmental temperature (10℃, 20℃, and 30℃), and flooding conditions (full inundation or semi-inundation) for both the exposed surface and bottom layer (0~10 cm and 10~20 cm) of the mudflats sediments in the Liaohe estuary. The results showed that under the full inundation condition, the mercury content of the sediments in both layers reached the lowest level at a water salinity of 1.80% and culturing temperature of 30℃, reflecting a 0.095 mg·kg⁻¹ and 0.098 mg·kg⁻¹ concentration for the surface layer and the bottom layer, respectively. Under semi-inundation conditions, the mercury content of the sediments in both layers also reached its lowest level at the same salinity and temperature as the full inundation condition, resulting in concentrations of 0.103 mg·kg⁻¹ and 0.101 mg·kg⁻¹ for the surface layer and bottom layer, respectively. Under both inundation conditions, the overall trends of mercury content with salinity and temperature were generally the same. The concentration of total mercury in both layers gradually decreased with the rising salinity of the flooding water, while at a given salinity, the total mercury concentration decreased with the rising temperature from 10~30℃. The full inundation condition was more favorable than the semi-inundation condition in driving the release of inorganic mercury from sediments.

Keywords: Liaohe estuary; total mercury; salinity of the flooding water; temperature; wetland

收稿日期: 2017-10-01 录用日期: 2017-12-25

作者简介: 李 航(1993—),男,贵州遵义人,硕士研究生,从事污染土壤生态修复研究。E-mail: 1508124278@qq.com

*通信作者: 郑冬梅 E-mail: zhengdm126@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571085, 31300444); 辽宁省高等学校创新人才支持计划(LR2016078)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41571085, 31300444); Project supported by the Program for Innovative Talents of Liaoning Higher Education Institution (LR2016078)

湿地被称为汞的活性库^[1],是连接陆地生态系统和水生生态系统的枢纽,不仅是物质、能量、信息等互相流通的介质,同时也使得汞能在各生态系统间传递。汞(Hg)及汞的化合物都具有很强的毒性,可以富集并长期存在于环境和生物体内^[2]。自日本发生水俣病(Minamata disease)事件以来,汞污染问题一直受到人们的广泛关注,国内外学者也对各生态系统中汞的迁移转化、累积放大等进行了相关研究。影响汞在土壤环境中存在形态与迁移转化的因素主要有 pH 值、有机质、氧化还原电位、温度等^[3]。NaCl 对外源汞在土壤中形态分布有显著影响,土壤的盐渍化趋势会使汞污染和作物吸收风险更趋严重^[4]。土壤中的盐度变化会显著影响重金属的环境化学行为,进而影响其生物有效性及毒性^[5]。因此,研究湿地沉积物中汞的变化机理对湿地生态系统及人类健康具有积极意义。

裸滩是辽河口主要湿地类型之一,裸滩沉积物中汞含量受多种因素影响,沉积物有机质含量、温度以及淹水盐度和淹水状态等条件的改变均影响裸滩水-土界面汞的迁移方向和沉积物中无机汞的释放量。红树林湿地中沉积物中总汞含量的高低与其自身形态和沉积物中有机质含量有关^[6]。有机质和土壤总硫含量是影响三江平原湿地汞含量的重要因素^[7]。依艳丽等^[8]的试验研究表明,土壤淹水后,土壤汞开始了向水体释放的过程,释放到水体中的重金属离子又与溶出物质发生反应,最终形成稳定的化合物。王金玉^[9]研究表明,汞的释放通量与沉积物温度和大气温度呈正相关关系,升高温度增加了沉积物和孔隙水中 Hg^{2+} 的还原反应速度,有利于 Hg^0 的释放。李雅芬等^[10]研究发现河流沉积物中汞含量特征表现为沿河流流向而逐渐升高的趋势。辽河口裸滩由于潮汐作用、气候以及地表径流等因素的影响,导致其所处环境的温度和盐度不断发生变化,而海水盐度作为滨海湿地特有的综合型环境因子,对湿地汞的影响至关重要。目前,国内对辽河口在该方面的研究鲜有报道。本文采用室内模拟的方式,探讨了全淹水和半淹水两种淹水状态下,淹水盐度和环境温度的变化对辽河口裸滩沉积物中总汞的影响机理,为以后对河口湿地沉积物中汞的迁移转化和释放特征的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

辽河口湿地是我国四大河口湿地之一,有着重要的湿地生态功能^[11],该区位于辽河下游入海口,面积

约为 3150 km²,其中岸线至 0 m 区域滩涂面积约为 889.13 km²^[12-13],约占湿地总面积的 28%。该区气候为暖温带季风气候,年平均气温为 7.1~8.9℃,年降水量为 557~682 mm,年蒸发量为 1392~1705 mm,湿地中水分主要来源于河水的滞留和潮水的补给,该区地势平坦,以冲积平原和潮滩为主^[14]。区域内分布的主要湿地类型为芦苇(*Phragmites australis*)湿地、翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*)湿地和裸滩,湿地土壤类型属于以氯盐为主的滨海盐渍土,且由内陆向海洋方向土壤盐渍化程度呈上升趋势^[15]。辽河口的潮汐时间因季节而不同,但通常每日会有两次涨潮和落潮的过程,每次涨潮和落潮时间相差 6 h 左右;上浮水中汞含量为 0.020~0.051 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在辽河口笔架岭(40.83°~41.15°N, 121.56°~121.76°E)地区选择采样地。

1.2 样品采集

于 2016 年 6 月 2 日,用不锈钢土钻分别采集辽河口裸滩表层(0~10 cm)和底层(10~20 cm)沉积物,每层 6 个重复,分层均匀混合,去除样品中植物残枝、沙粒、贝壳、羽毛等杂物后装入自封袋密封带回实验室,放于实验室干净通风的实验台上自然风干。为了保证实验用土的均一性,将自然风干后的沉积物研磨混匀,过 2 mm 筛。测得供试沉积物理化性质见表 1。

表 1 供试沉积物基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested sediments

层次	pH	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	总汞/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
表层沉积物	8.71	11.06	17.37	0.15
底层沉积物	8.91	9.57	10.97	0.13

1.3 配制人工海水

采样时采集辽河口裸滩湿地涨潮时的水样,并测得涨潮时潮水的盐度为 1.84%,将水样带回实验室测定水样中各主要离子浓度,以此作为人工海水的配制标准。配制 1 L 盐度为 1.80%的人工海水,所需药品见表 2,并以此分别调制盐度为 1.50%和 0.50%两种梯度的盐溶液,以去离子水作为空白处理(纯水)。

1.4 实验方案

(1)纯化:将研磨后的表、底层沉积物分别装入两个塑料盆里,混匀;分别称取混匀后表层和底层沉积

表 2 人工海水溶液各组分含量($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 2 Composition of artificial seawater solution($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

NaCl	KCl	CaCl ₂	MgCl ₂	MgSO ₄	NaHCO ₃	NaBr
26.518	0.725	1.141	2.447	3.305	0.202	0.083

物 300 g 置于烧杯中,然后加入少量纯水,水量应正好浸湿土样,静置 24 h 以活化烧杯中土样。

(2)分别将盐度为 0.50%、1.50%和 1.80% 3 种梯度的人工海水和去离子水分别加入装有土样的烧杯中;每一种盐度条件下均设有两种淹水状态,第一种淹水水面高于沉积物表面 1 cm 处(全淹水),第二种淹水水面低于沉积物表面(半淹水);加入人工海水后,用记号笔在烧杯外壁做好淹水刻度线,以便控制后续加海水的量,每一种淹水状态做 3 组平行。

(3)将以上盐度梯度的样品同时放入 3 个恒温培养箱中,设置 3 个恒温培养箱温度分别为 10、20 ℃和 30 ℃,使样品在不同温度条件下同时进行培养,因辽河口裸滩沉积物中总汞含量较低,短时间沉积物中汞含量变化可能不明显,因此,设置培养时间为 168 h。

(4)在培养过程中,定期向烧杯中补充海水溶液,保证淹水状态处于刻度线上以及淹水盐度不变;采用电导率仪测定淹水盐度。

(5)每一温度条件培养结束都用自制采样装置取样,将样品装入自封袋内于冰箱中冷藏;待实验时取出自然风干,研磨过 80 目筛,备用。

1.5 汞的测定

沉积物中汞采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-V}_2\text{O}_5$ 进行消解^[16], AFS-2202 原子荧光光度计测定,仪器最低检出限为 $0.005 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在实验过程中,样品进行平行处理,相对标准偏差都小于 4%。每批样品做两个试剂空白;采用国家土壤标准样品 GBW-07401(GSS-1)进行质量控制,汞国家标准物质含量为 $(0.032\pm 0.004) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,验证结果分别为 $(0.034\pm 0.002) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验中所用的试剂均为优级纯,所用的玻璃器皿使用前均用

$3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝酸浸泡 24 h,用自来水冲洗干净后再用二次去离子水冲洗 3 遍。

2 结果与讨论

2.1 不同盐度对沉积物中汞含量的影响

沉积物表层、底层汞含量随盐度升高逐渐降低。在全淹水条件下(图 1),当温度为 10 ℃时,表层沉积物在加入 1.50% 盐水时汞含量最低($0.117 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),加入纯水(CK)时沉积物汞含量最高($0.147 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);底层汞波动较大,在淹水为纯水(CK)时,沉积物汞含量最低($0.112 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),在淹水盐度为 0.50% 时,达到最大值($0.150 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。20 ℃时,表层、底层汞总体上也表现为随淹水盐度升高有降低的趋势。30 ℃时,表层和底层沉积物中汞含量均在纯水条件下达到最大值,分别为 $0.119 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.121 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在半淹水状态下(图 2),10 ℃时,添加纯水的表层沉积物中汞含量处于最低水平($0.123 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),在淹水盐度为 0.50% 时,汞含量升高,但随着盐度继续升高,汞含量无明显变化;底层在 0.50% 时汞含量最高。在 20 ℃和 30 ℃时,表层、底层沉积物中汞含量均随盐度增加逐渐降低。

总体上来看,两种淹水状态下,表层和底层沉积物中汞含量均随淹水盐度升高而逐渐降低,高盐度环境不利于沉积物对无机汞的吸附。已有研究表明,碱金属和碱土金属离子可将吸附在固体颗粒上的金属离子交换出来,盐度的增加会大幅增强重金属的解吸^[17],淹水中大量的 Na^+ 和部分 K^+ 能使部分吸附态汞从土壤中解吸进入水体,被解吸出来的 Hg^{2+} 与 Cl^- 生成高溶性稳定络合物,如 $[\text{HgCl}_4]^{2-}$ 、 $[\text{HgCl}_3]^-$ 和

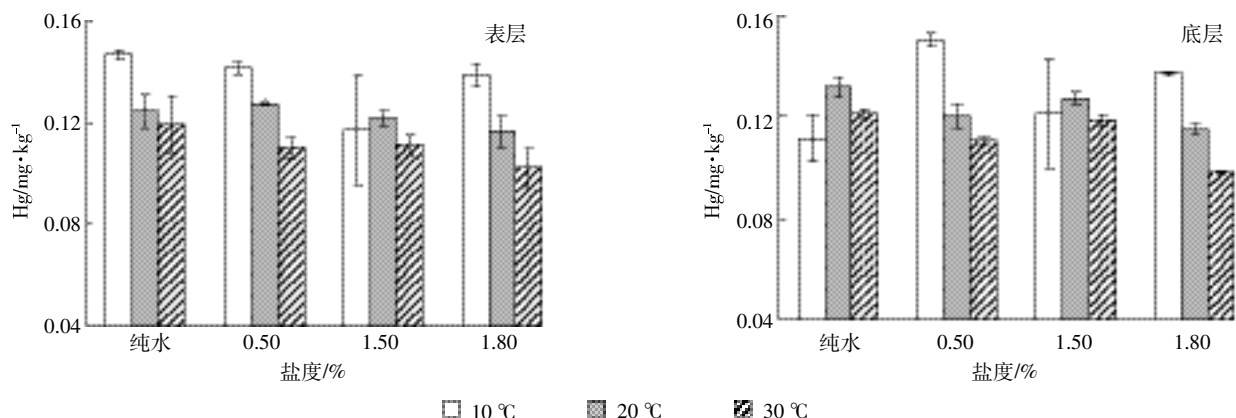


图 1 全淹水状态下表层和底层沉积物汞含量随淹水盐度、温度的变化

Figure 1 Variation of total mercury content in the topsoil and subsoil with the different submergence salinity and environment temperature under fully flooded condition

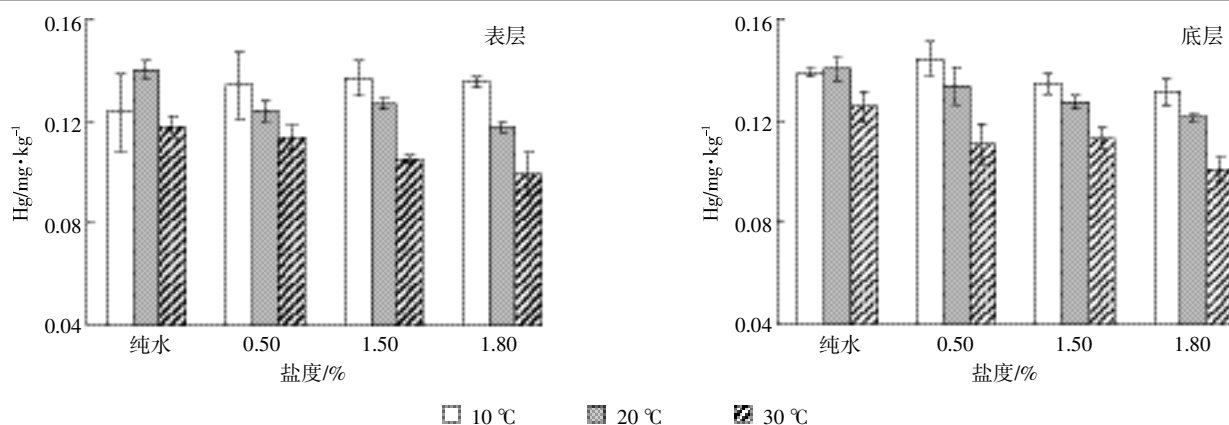


图2 半淹水状态下表层和底层沉积物汞含量随淹水盐度、温度的变化

Figure 2 Variation of total mercury content in the topsoil and subsoil with the different submergence salinity and environment temperature under half submerged condition

HgCl_2 ^[18-19],从而使进入水体的汞很难再被沉积物吸附。郑顺安等^[20]也得出高浓度的NaCl环境极其不利于 Hg^{2+} 在土壤中的吸附。而丁振华等^[2]对红树林湿地研究表明盐度对汞影响不明显,这可能与红树林湿地土壤有机质含量较高有关。本实验中,虽然随着淹水盐度的升高,两种淹水状态下表层和底层沉积物中总汞含量均呈现出降低的趋势,但是降低幅度并不大,这可能与裸滩沉积物的pH值(表1)较高有关。氯离子对汞的络合作用取决于土壤有机质含量和pH值:酸性条件下,若土壤有机质含量较低,则氯离子的作用明显,反之,氯离子浓度变化对土壤汞的络合没有明显影响;中性和碱性土壤中,氯离子浓度对土壤汞含量的影响很小,主要取决于土壤表面其他形态的汞和有机态的汞化合物之间的平衡^[21]。在 $\text{pH}>7$ 时, Hg^{2+} 与 Cl^- 生成的高溶性络合物会转化为氢氧化汞,促进汞的沉淀^[22]。

2.2 温度变化对沉积物中汞含量的影响

当淹水为纯水时,全淹底层、半淹表层和底层沉积物中汞含量表现为10 °C到20 °C汞含量增加,20 °C到30 °C汞含量降低;盐度为1.50%时,全淹表层和底层也表现为20 °C时汞含量较高。总体来看,在淹水盐度相同时,随着培养温度的升高,表层和底层沉积物中总汞含量均逐渐降低。土壤具有吸附性能是因为土壤中有巨大的表面能,并含有带电荷的矿物胶体和有机胶体^[23],所以进入沉积物中的汞会被沉积物吸附固定,但是当环境温度升高时,被沉积物中胶体吸附的汞因获得能量而解吸,温度越高,汞获得的能量越高,越不利于沉积物胶体对汞的吸附;对于解吸进入溶液中的汞,温度升高会加速 Hg^{2+} 与 Cl^- 形成络合物

的速率。根据扩散理论^[24],在土壤-上覆水系统内,随着温度的升高, Hg^{2+} 运动速率加快,与水分子接触的机会增加;同时, Hg^{2+} 与 OH^- 及有机质等的反应速率、与阳离子的交换速率等随温度升高而加快,增强了土壤汞的释放。研究表明,汞的释放是一个吸热过程^[25],温度升高为汞的释放提供了能量,有利于汞的释放。

2.3 淹水条件改变对沉积物中汞含量的影响

淹水条件的变化会改变湿地表层氧化还原条件,从而影响湿地中汞的迁移与转化^[26]。本实验中,培养温度和盐度相同时,同一层次的沉积物中汞含量总体表现为半淹高于全淹。培养温度为30 °C,淹水盐度为1.80%时,两种淹水状态下沉积物中汞含量均达到最低值,此时,全淹水状态和半淹水状态下表层沉积物中汞含量分别为 $0.095 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.103 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对于原始土壤分别降低了37.9%和32.7%,底层含量分别为 $0.098 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.101 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别降低了29.0%和26.8%。表明淹水状态更有利于裸滩沉积物中汞的释放。Liang等^[27]对三峡土壤的模拟实验发现,淹水后土壤中的汞会向上覆水释放,导致土壤中汞含量降低。全淹状态下,土壤相对处于厌氧环境,厌氧环境有利于无机汞从淹没的土壤和植被中溶解出来^[28]。通常情况下,淹水后进入上覆水的无机汞在一段时间内会被从沉积物中溶解出的有机胶体重新吸附而沉淀,但因受 Cl^- 和 Na^+ 等碱金属离子的影响,使这一过程受阻。土壤淹水后,土壤中吸附的汞解吸后会先进入孔隙水中,使孔隙水中汞浓度升高,而与上覆水形成较大的浓度梯度^[29],会形成较大的驱动力,从而促进沉积物中汞的释放和迁移。半淹状态下,虽然沉积物中汞也会向孔隙水中释放,并向上覆水中迁移,但

溶液较少,不会形成较大的驱动力以促进沉积物中汞的释放;同时有氧环境也不利于无机汞的释放。

辽河口裸滩湿地受潮汐作用的影响,淹水的盐度总是处在不断的变化中,这种改变直接影响裸滩沉积物中汞含量的变化;当海水退潮后,裸滩沉积物处于裸露状态,但是裸滩沉积物保水能力较强,沉积物仍持有大量水分,这说明在未淹水的情况下,裸滩沉积物中汞含量会受到孔隙水中盐分的影响。裸滩底层沉积物中的汞因盐分影响迁移进入孔隙水中,在毛管力作用下,孔隙水会向上迁移,从而导致沉积物底层的汞含量迁移进入水体。本实验培养过程中淹水没有受到扰动,这与实际环境中潮汐作用对沉积物的扰动存在差异,潮汐作用会进一步导致裸滩沉积物中汞的释放,进入水体的汞随水体迁移,对环境造成二次污染,从而对水生生态环境和人类造成危害。

3 结论

(1)沉积物淹水为纯水时,沉积物中汞含量较高,淹水盐度升高会促进土壤沉积物中无机汞的释放,使裸滩土壤沉积物中总汞含量降低。辽河口裸滩淹水主要以海水倒灌为主,海水氯盐含量较高,这不利于土壤沉积物对汞的富集。

(2)培养液盐度相同时,低温(10℃)条件下沉积物中汞含量较高,随培养温度升高,土壤中总汞含量逐渐降低。当淹水为纯水时,全淹底层、半淹表层和底层沉积物中汞含量表现为10℃到20℃汞含量增加,20℃到30℃汞含量降低;盐度为1.50%时,全淹表层和底层也表现为20℃时汞含量较高。

(3)沉积物所处的淹水水位不同,沉积物中汞的释放能力也不同,与半淹水状态相比,全淹水状态下更有利于裸滩沉积物中无机汞的释放。

参考文献:

- [1] 王起超,刘汝海,吕宪国,等.湿地汞环境过程研究进展[J].地球科学进展,2002,17(6):881-885.
WANG Qi-chao, LIU Ru-hai, LÜ Xian-guo, et al. Progress of study on the mercury process in the wetland environment[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(6):881-885.
- [2] 丁振华,刘金铃,李柳强,等.中国主要红树林湿地沉积物中汞的分布特征[J].环境科学,2009,30(8):2210-2215.
DING Zhen-hua, LIU Jin-ling, LI Liu-qiang, et al. Distribution of mercury in surficial sediments from main mangrove wetlands of China[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(8):2210-2215.
- [3] 杨燕娜,温小乐.土壤汞污染及其治理措施的研究综述[J].能源与环境,2006,15(2):9-11.
YANG Yan-na, WEN Xiao-le. Research review of soil mercury pollution and its control measures[J]. *Energy and Environment*, 2006, 15(2):9-11.
- [4] 郑顺安,韩允奎,李晓华,等.天津污灌区盐分累积对土壤汞赋存形态的影响[J].中国环境科学,2017,37(5):1858-1865.
ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, LI Xiao-hua, et al. A simulation study on the effect of salinity on the fractions distribution of exogenous mercury in the wastewater-irrigated area of Tianjin City[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(5):1858-1865.
- [5] Smith S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge[J]. *Environment International*, 2009, 35(1):142-156.
- [6] 丁振华,刘金铃,李柳强,等.中国红树林湿地沉积物中汞的形态特征、生物可利用性和迁移性[J].海洋环境科学,2010,29(5):653-656.
DING Zhen-hua, LIU Jin-ling, LI Liu-qiang, et al. Speciation, bio-accumulation and transportation of mercury in sediments of mangrove wetlands of China[J]. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(5):653-656.
- [7] 刘汝海,王起超,郝庆菊,等.三江平原湿地土壤汞的分布特征及影响因素分析[J].水土保持学报,2003,17(1):122-124.
LIU Ru-hai, WANG Qi-chao, HAO Qing-ju, et al. Distribution character of Hg in wetland soil in Sanjiang Plain and analysis of influential factors[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(1):122-124.
- [8] 依艳丽,李迎,张大庚,等.不同水分条件下汞在土壤中形态转化的研究[J].沈阳农业大学学报,2010,41(1):42-45.
YI Yan-li, LI Ying, ZHANG Da-geng, et al. Dynamic process of the form of mercury in the soil under different water conditions[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41(1):42-45.
- [9] 王金玉.胶州湾潮间带沉积物汞的形态及释放研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.
WANG Jin-yu. The research of mercury flux and speciation in Jiaozhou Bay intertidal zone[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [10] 李雅芬,王景,王宁.松花江上游金矿开采区河流水体和沉积物中汞的污染特征及风险评估[J].农业环境科学学报,2013,32(3):622-628.
LI Ya-fen, WANG Jing, WANG Ning. Distribution characteristics and risk assessment of mercury pollution in the river water and sediment of the Songhua River upstream gold mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):622-628.
- [11] 王丽荣,赵焕庭.中国河口湿地的一般特点[J].海洋通报,2000,19(5):47-54.
WANG Li-rong, ZHAO Huan-ting. Common features of the estuarine wetland in China[J]. *Marine Science Bulletin*, 2000, 19(5):47-54.
- [12] 王西琴,李力.辽河三角洲湿地退化及其保护对策[J].生态环境,2006,15(3):650-653.
WANG Xi-qin, LI Li. The degradation and protective countermeasures of the wetland in the Liaohe River Delta[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(3):650-653.
- [13] 林冰.辽河口海岸滩涂开发利用存在的问题及对策[J].农业与技术,2012,32(8):50-51.
LIN Bing. Problems and countermeasures of exploitation and utilization

- of coastal beach in Liaohe Estuary[J]. *Agriculture and Technology*, 2012, 32(8):50-51.
- [14] 张颖, 郑西来, 伍成成, 等. 辽河口湿地芦苇叶片蒸腾及其与影响因素关系研究[J]. *湿地科学*, 2011, 9(3):227-232.
- ZHANG Ying, ZHENG Xi-lai, WU Cheng-cheng, et al. Simulation experiment about transpiration characteristics of *Phragmites australis* leaf in Liaohe Estuary Wetlands[J]. *Wetland Science*, 2011, 9(3):227-232.
- [15] 肖颖, 杨继松. 辽河口滨海湿地土壤有机碳矿化及其与盐分的关系[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(10):2792-2798.
- XIAO Ying, YANG Ji-song. Soil organic carbon mineralization and its relation with salinity in coastal wetland of Liaohe Estuary[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(10):2792-2798.
- [16] 郑冬梅, 李昕馨, 罗庆. 锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染[J]. *环境科学*, 2012, 33(10):3680-3684.
- ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing. Mercury pollution in cricket in different biotopes suffering from pollution by zinc smelting[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(10):3680-3684.
- [17] 赵健. 长江口滨岸潮滩汞的环境地球化学研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- ZHAO Jian. Environmental geochemistry of mercury in intertidal flat of the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [18] 王平安. 干湿交替环境土壤汞赋存形态及其动态变化[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- WANG Ping-an. Dynamic variation of mercury species in soil in wet-dry rotation environment[D]. Chongqing: Southwest University, 2007.
- [19] Kinniburgh D G, Jackson M L. Adsorption of mercury(II) by iron hydroxide gel[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42(1):45-47.
- [20] 郑顺安, 李晓华, 徐志宇. 污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(5):1939-1945.
- ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu. Simulation study on the effect of salinity on the adsorption behavior of mercury in wastewater-irrigated area[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(5):1939-1945.
- [21] Schuster E. The behavior of mercury in the soil with special emphasis on complexation and adsorption processes: A review of the literature[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 1991, 56(1):667-680.
- [22] 陈业材. 环境汞的来源与迁移转化规律的研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1994(3):135-137.
- CHEN Ye-cai. Study on the sources, migration and transformation regularity of environmental mercury[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1994(3):135-137.
- [23] 张金洋. 三峡水库消落区土壤汞释放特征研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.
- ZHANG Jin-yang. Study on release characteristic of mercury from soil in water level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2005.
- [24] 王欣悦, 贺春风, 孙荣国, 等. 三峡库区消落带土壤淹水过程中汞的释放及甲基化特征[J]. *环境化学*, 2015, 34(1):172-177.
- WANG Xin-yue, HE Chun-feng, SUN Rong-guo, et al. Releases and methylation of soil mercury in water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir region[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(1):172-177.
- [25] 单长清, 刘汝海, 单红仙. 胶州湾近岸沉积物-海水汞的释放研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2006(4):44-51.
- SHAN Chang-qing, LIU Ru-hai, SHAN Hong-xian. The research on releasing of mercury from Jiaozhou Bay offshore sediment to seawater[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006(4):44-51.
- [26] 刘汝海, 王起超, 吕宪国, 等. 三江平原湿地汞的地球化学特征[J]. *环境科学学报*, 2002, 22(5):661-663.
- LIU Ru-hai, WANG Qi-chao, LÜ Xian-guo, et al. The geochemistry characteristic of mercury in Sanjiang Plain Marsh[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5):661-663.
- [27] Liang P, Zhang C, Yang Y K, et al. A simulation study of mercury release fluxes from soils in wet-dry rotation environment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(7):1445-1452.
- [28] 张翔. 三峡库区消落带典型植物淹水后汞的动态变化及其释放特征[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- ZHANG Xiang. Mercury Dynamic and release characteristics of several plants collected from the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area during flooding[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [29] 钱晓莉, 冯新斌, 闭向阳, 等. 贵州省草海表层水体和沉积物间隙水中汞的含量和形态分布初步研究[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(5):563-570.
- QIAN Xiao-li, FENG Xin-bin, BI Xiang-yang, et al. Concentrations and distributions of mercury species in surface water and porewater of Lake Caohai, Guizhou Province[J]. *Journal of Lake Science*, 2008, 20(5):563-570.