

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20180210001

潘国浩, 刘洋, 赵永强, 等. 淋洗脱盐对滨海滩涂不同植被演替带土壤重金属的影响[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(1): 210-218

Pan G H, Liu Y, Zhao Y Q, et al. Effects of leaching desalination on the heavy metals in soils of vegetation successions of the pristine tidal flat [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(1): 210-218 (in Chinese)

## 淋洗脱盐对滨海滩涂不同植被演替带土壤重金属的影响

潘国浩<sup>1,2</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 赵永强<sup>3</sup>, 付强<sup>1,\*</sup>, 高军<sup>4</sup>, 曹迅<sup>1</sup>, 张莹莹<sup>1</sup>, 张志强<sup>1</sup>,  
严金龙<sup>1,#</sup>

1. 盐城工学院环境科学与工程学院, 江苏省环境保护海涂生态与污染控制重点实验室, 盐城 224051

2. 常州大学环境与安全工程学院, 常州 213164

3. 盐城湿地珍禽国家级自然保护区, 盐城 224057

4. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042

收稿日期: 2018-02-10 录用日期: 2018-03-01

**摘要:** 为研究围垦对滨海滩涂土壤重金属的影响, 采用土柱实验模拟淋洗脱盐过程, 分析了滨海滩涂不同植被演替带(光滩、互花米草滩、碱蓬滩、芦苇滩)土壤在淋洗脱盐前后重金属(As、Hg、Cd、Cr、Pb、Cu、Zn)含量的变化, 评估了围垦可能导致的滩涂重金属流失量。研究表明, 淋洗脱盐后, 各植被演替带土壤重金属均显著降低, 相比而言, Hg、Cr 更易淋洗(淋洗率分别为 57.2%、49.9%), 而 Zn 不易淋洗(淋洗率 18.5%); 不同植被演替带土壤重金属淋洗率表现为: 光滩>互花米草滩>碱蓬滩>芦苇滩, 光滩土壤重金属更易淋洗, 而芦苇滩重金属不易淋洗; 根据土壤容重、含水率、淋洗率及重金属含量计算重金属流失量发现, 不同植被演替带重金属流失量同样表现为: 光滩>互花米草滩>碱蓬滩>芦苇滩; 除互花米草滩 As 流失量较高外( $19.26 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), 其他重金属流失量均表现为光滩最高, 光滩围垦可能会造成更多的重金属流失; 在仅考虑淋洗脱盐情况下, 以江苏省 2010~2020 年围垦规划 270 万亩计, 仅表层 20 cm 滩涂土壤, 通过围垦即可能导致 As、Hg、Cd、Cr、Pb、Cu、Zn 流失 2 102.5、7.4、421.3、8 587.9、4 376.3、2 404.3 t, 由围垦导致的滩涂重金属流失风险值得关注。

**关键词:** 重金属; 围垦; 滩涂; 淋洗脱盐; 植被演替

文章编号: 1673-5897(2018)1-210-09 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## Effects of Leaching Desalination on the Heavy Metals in Soils of Vegetation Successions of the Pristine Tidal Flat

Pan Guohao<sup>1,2</sup>, Liu Yang<sup>1</sup>, Zhao Yongqiang<sup>3</sup>, Fu Qiang<sup>1,\*</sup>, Gao Jun<sup>4</sup>, Cao Xun<sup>1</sup>, Zhang Yingying<sup>1</sup>,  
Zhang Zhiqiang<sup>1</sup>, Yan Jinlong<sup>1,#</sup>

1. Key Laboratory for Ecology and Pollution Control of Coastal Wetlands (Environmental Protection Department of Jiangsu Province), School of Environmental Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China

2. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41301551); 江苏省自然科学基金项目(BK20130426; BK20131219); 国家海洋局海洋生态环境科学与工程重点实验室开放项目(MESE-2013-04)

**作者简介:** 潘国浩(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为滨海滩涂污染物生物地球化学, E-mail: 1256133359@qq.com

\* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: fuqiangaaa1@126.com

# 共同通讯作者(Co-corresponding author), E-mail: yjlyt4788@126.com

3. Jiangsu Yancheng Wetland National Nature Reserve, Rare Birds, Yancheng 224057, China

4. Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEP, Nanjing 210042, China

Received 10 February 2018      accepted 01 March 2018

**Abstract:** To explore the effect of reclamation on the heavy metals in soils of coastal tidal flat, we analyzed the variation of concentrations of heavy metals (As, Hg, Cd, Cr, Pb, Cu, and Zn) in soils of vegetation successions of the pristine tidal flat before and after fresh water leaching desalination using a soil column simulation experiment. The losses of heavy metals induced by reclamation of tidal flat were also evaluated. Results showed that the concentrations of heavy metals in soils of vegetation successions all decreased significantly after leaching desalination. Comparatively, Hg and Cr could be eluted more easily (the leaching percentages were 57.2% and 49.9%, respectively), and Zn could be eluted harder (the leaching percentages was 18.5%). The leaching percentages of the vegetation successions showed: bare flat > *Spartina alterniflora* flat > *Suaeda glauca* flat > *Phragmites australi* flat. The heavy metals in bare flat could be eluted more easily, while in *Phragmites australi* flat could be eluted harder. The losses of heavy metals in tidal flat calculated by the soil bulk density and moisture content, leaching percentage and heavy metal concentration also showed: bare flat > *Spartina alterniflora* flat > *Suaeda glauca* flat > *Phragmites australi* flat. The losses of heavy metals were all higher in bare flat, except for As in *Spartina alterniflora* flat (19.26 kg · ha<sup>-1</sup>). Based on the reclamation programme of Jiangsu Province (2.7 million mu from 2010 to 2020), reclamation could make As, Hg, Cd, Cr, Pb, Cu, and Zn in topsoil (0~20 cm) lose 2 102.5, 7.4, 421.3, 8 587.9, 4 376.3, and 2 404.3 t, respectively, under the condition that we only think about the fresh water leaching desalination. More attention should be paid to the loss risk of heavy metals induced by the reclamation of tidal flat.

**Keywords:** heavy metals; reclamation; tidal flat; leaching desalination; vegetation successions

滨海淤泥质滩涂是陆-海界面重要的缓冲带和过渡带,也是我国重要的后备耕地资源<sup>[1]</sup>。随着人口、经济的快速增长,大量滩涂通过围垦转化为农田。数据显示,自1950s以来,仅江苏省就已设立垦区170余处,围垦面积达2 524 km<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。由围垦导致的环境问题目前已引起国内外学者的广泛关注<sup>[3]</sup>。

滩涂土壤含盐量较高,不适合作物生长。因此,滩涂围垦必须经过引淡排盐过程才能将土壤转变成可耕种的低盐分土壤。在淡水淋洗脱盐的同时,大量土壤养分、重金属等可被淋洗排出<sup>[4-5]</sup>。目前有关滩涂围垦对土壤性质的影响研究主要集中在围垦前后土壤理化性质的变化以及垦区土壤性质随时间的演化,针对围垦过程尤其是淋洗脱盐过程对土壤造成的影响尚鲜有报道<sup>[3, 6]</sup>。考虑到目前我国巨大的围垦规模及相应的淡水排盐量,这一过程引起的土壤重金属等关键污染物的变化量可能也相当可观,但目前相关研究还很少。

Li等<sup>[7]</sup>、崔志红<sup>[8]</sup>、杜烨锋等<sup>[9]</sup>、刘亚男等<sup>[5]</sup>、Li等<sup>[10]</sup>均对滩涂淋洗脱盐过程对土壤重金属的影响进行了研究,发现淋洗脱盐可降低土壤重金属含量及生物可利用性、改变重金属形态和迁移路径。但目

前国内的相关研究主要从滩涂土壤重金属污染治理与修复角度进行研究,且主要集中在珠江口河口潮滩<sup>[5, 7-11]</sup>,针对围垦面积更大的江苏淤泥质滩涂尚未见报道。滩涂围垦范围不仅包括潮上带盐沼草滩,也包括潮间带和部分潮下带,滩涂不同组成部分的围垦可能具有不同的环境效应。有关淋洗脱盐对滩涂不同植被演替带土壤重金属的影响目前也未见报道。

基于此,本研究模拟了围垦中的淋洗脱盐过程,分析了这一过程对滩涂不同植被演替带土壤重金属含量的影响,评估了滩涂淋洗脱盐可能造成的重金属流失量。研究结果一方面有助于进一步深入了解滩涂围垦的环境效应,另一方面能够对垦区土壤重金属的源解析提供一定支持。

## 1 材料与方法 (Materials and methods)

### 1.1 布点与采样

于2014年5月采集盐城湿地珍禽国家级自然保护区核心区原生滩涂不同植被演替带表层土壤样品(0~20 cm)。在每个演替带中部沿平行于海岸线方向布设样点,光滩4个,互花米草滩、碱蓬滩、芦苇滩均为6个,各样点间隔约2 km。利用荷兰Ei-

jkelkamp 采样器梅花形采集 5 个土样, 合并成一个样品, 共计 22 个样。

样品采集后去除枯枝落叶等杂物, 自然风干, 研磨, 过 10 目尼龙筛, 密封, 暗处保存。

### 1.2 土柱淋洗脱盐模拟实验

将 100 g 土样均匀装入内径 7 cm、高 20 cm 的有机玻璃管, 制成 22 根淋洗脱盐土柱。土柱底部设置塑料孔板、贴滤布、 $\text{SiO}_2$  过滤层和淋洗液收集装置, 土柱上端用塑料袋盖住, 防止水分蒸发。综合考虑表层土壤重量、当地降水情况、实际的淋洗时间等情况确定淋洗用水量及水土比<sup>①</sup>。首先将土柱从底部用去离子水浸透, 赶走土柱内的空气, 再从上部缓慢注入去离子水, 注水量 200 mL。淋洗结束后, 更换承接瓶, 并重新注入 200 mL 水, 继续淋洗, 共计 12 个淋洗循环, 合计用水量 2.4 L, 总水土比 24:1。不同植被演替带土壤孔隙度、 $\text{Na}^+$  含量、导水能力差异显著, 导致其淋洗时间差异较大, 从光滩的 1 d 至互花米草滩的 260 d 不等。在实验中每天记录淋洗状况, 并检测淋洗液 pH、盐度、电导率的变化。淋洗液酸化冷冻保存, 待测。

### 1.3 检测指标与检测方法

参考《土壤农业化学分析方法》、《水和废水监测分析方法(第四版)》对淋洗脱盐前、后土壤 7 种重金属( $\text{As}$ 、 $\text{Hg}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Zn}$ )含量进行测定。 $\text{As}$ 、 $\text{Hg}$  采用王水消解, 原子荧光法测定,  $\text{Cd}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Zn}$  采用王水-过氧化氢消解, 原子吸收法测定。淋洗液重金属采用硝酸-高氯酸消解, 原子荧光和原子吸收法测定。淋洗液 pH、盐度、电导率均采用便携式水质分析仪测定。

### 1.4 计算方法

土柱重金属淋洗率采用如下公式计算:

$$E = (\omega_a - \omega_b) / \omega_a \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $E$  为淋洗率(%),  $\omega_a$ 、 $\omega_b$  为脱盐前、后土壤重金属含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

不同植被演替带土壤重金属流失量采用如下公式计算:

$$W = \omega_a \times E \times (1-\theta) \times \rho_b \times h / 10 \quad (2)$$

式中,  $W$  为重金属流失量( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ),  $E$  为淋洗率(%),  $\omega_a$  为脱盐前土壤重金属含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $\theta$  为原土含水率(%),  $h$  为土层厚度(20 cm),  $\rho_b$  为原土容重( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。

### 1.5 数据处理

数据整理、绘图采用 Origin 9.0 软件, 统计检验采

用 SPSS 19.0 软件。多重比较采用 LSD 法, 两两比较采用 Mann-Whitney U 检验, 显著性水平  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果(Results)

### 2.1 淋洗脱盐过程中淋洗液 pH、盐度、重金属含量的变化

淋洗脱盐过程中淋洗液 pH、盐度、重金属含量的变化如图 1 所示。随着淋洗的进行, 滩涂不同植被演替带土壤淋洗液盐度(以盐度和电导率表示)均极速降低, 淋洗 5 次后, 淋洗液盐度基本达到平衡。 $\text{pH}$  则随淋洗脱盐显著升高, 淋洗第二次达到最高, 之后基本达到平衡。淋洗液中重金属浓度(以  $\text{Zn}$  为例)变化与盐度变化类似, 随着淋洗脱盐的进行, 淋洗液中重金属浓度显著降低, 淋洗 5 次后, 重金属浓度基本达到平衡。以上结果显示, 模拟围垦的淡水淋洗脱盐过程能够显著降低滩涂土壤盐度, 提高  $\text{pH}$ , 与此同时, 也会淋洗出一定数量的土壤重金属。淋洗 5 次(水土比 10:1)基本能够达到平衡, 计算结果显示, 前 5 次的重金属淋洗量超过总淋洗量的 80%, 后续的 7 次淋洗对土壤重金属含量的影响较小。

### 2.2 淋洗脱盐前后土壤重金属含量的变化

淋洗脱盐前后滩涂不同植被演替带土壤盐度、重金属含量的变化如图 2 所示。淋洗脱盐后各植被演替带土壤盐度均显著降低, 平均盐度由脱盐前的 1.08% 降至 0.04% 左右, 7 种重金属含量也显著降低, 表明模拟围垦的淡水淋洗脱盐过程可显著降低滩涂土壤重金属含量。

不同植被演替带、不同重金属呈现不同的淋洗效率, 如表 1 所示,  $\text{As}$ 、 $\text{Hg}$ 、 $\text{Cr}$  在互花米草滩中的淋洗率相对较高, 而在芦苇滩中相对较低;  $\text{Cd}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Zn}$  则在光滩中淋洗率较高, 在盐沼草滩尤其是芦苇滩中相对较低。总体而言, 滩涂不同植被演替带土壤重金属平均淋洗率表现为: 光滩>互花米草滩>碱蓬滩>芦苇滩(图 3), 光滩土壤重金属更易淋洗流失, 而芦苇滩重金属不易流失, 滩涂植被的正向演化有助于土壤重金属的固定。不同重金属也表现出不同

<sup>①</sup> 滩涂表层 20 cm 土壤平均干土重约 220 000  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 盐城地区多年平均降水约 1 050 mm, 在仅考虑降水淋洗的条件下, 一般需要 4~5 年才能达到种植要求, 以淋洗 5 年计, 则淋洗水土比约为  $1 050 \times 1 000 \times 5 / 220 000 \approx 24$ 。

的淋洗效率(图4),总体而言,Hg、Cr在滩涂土壤中更易淋洗流失(淋洗率分别为57.2%、49.9%),而Zn不易流失(淋洗率18.5%),As、Cd、Pb、Cu淋洗率在25.0%~35.0%之间,差异不大。

### 2.3 滩涂不同植被演替带围垦可能导致的重金属流失量

根据原土土壤容重、含水率、重金属含量以及淋洗率计算不同植被演替带土壤重金属流失量如表2所示。7种重金属中,Cr的流失量最高,达到47.72 kg·ha<sup>-1</sup>,Hg的流失量最低,仅为0.041 kg·ha<sup>-1</sup>;除互花米草滩As流失量较高外(19.26 kg·ha<sup>-1</sup>),其他重金属流失量均表现为光滩最高,不同植被演替带间重金属流失量总体表现为:光滩>互花米草滩>碱蓬滩>芦苇滩,芦苇滩重金属流失量仅为光滩的1/4。相比于滩涂草滩,光滩围垦时可能会造成更多的重金属流失。

### 3 讨论(Discussion)

盐度变化是滩涂围垦过程中土壤性质最明显的变化和最典型的特征。研究表明,围垦过程中经过人为洗盐、压盐后土壤盐分会在短时间内发生剧烈变化,土壤含盐量很快由>1%下降至0.01%~0.04%<sup>[12]</sup>。本研究显示,淡水淋洗能够有效去除滩涂土壤盐分,经过5次淋洗后土壤盐度即可达到最低,土壤盐度降至0.04%左右。盐度的降低主要缘于Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等主要离子的溶解、冲刷和淋洗<sup>[5]</sup>。图1显示,淋洗脱盐可促进土壤pH的提高,这可能与土壤中的Ca<sup>2+</sup>淋溶有关<sup>[13-14]</sup>。研究显示,经过淋洗脱盐,滩涂土壤Ca含量降低了约37%(未发表数据),受溶度积的支配作用:CaCO<sub>3</sub>+CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O $\rightleftharpoons$ Ca<sup>2+</sup>+2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,土壤中CaCO<sub>3</sub>产生部分溶解,随着Ca<sup>2+</sup>的淋洗,相应提高了HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度,从而导致pH的升高<sup>[5,13-14]</sup>。

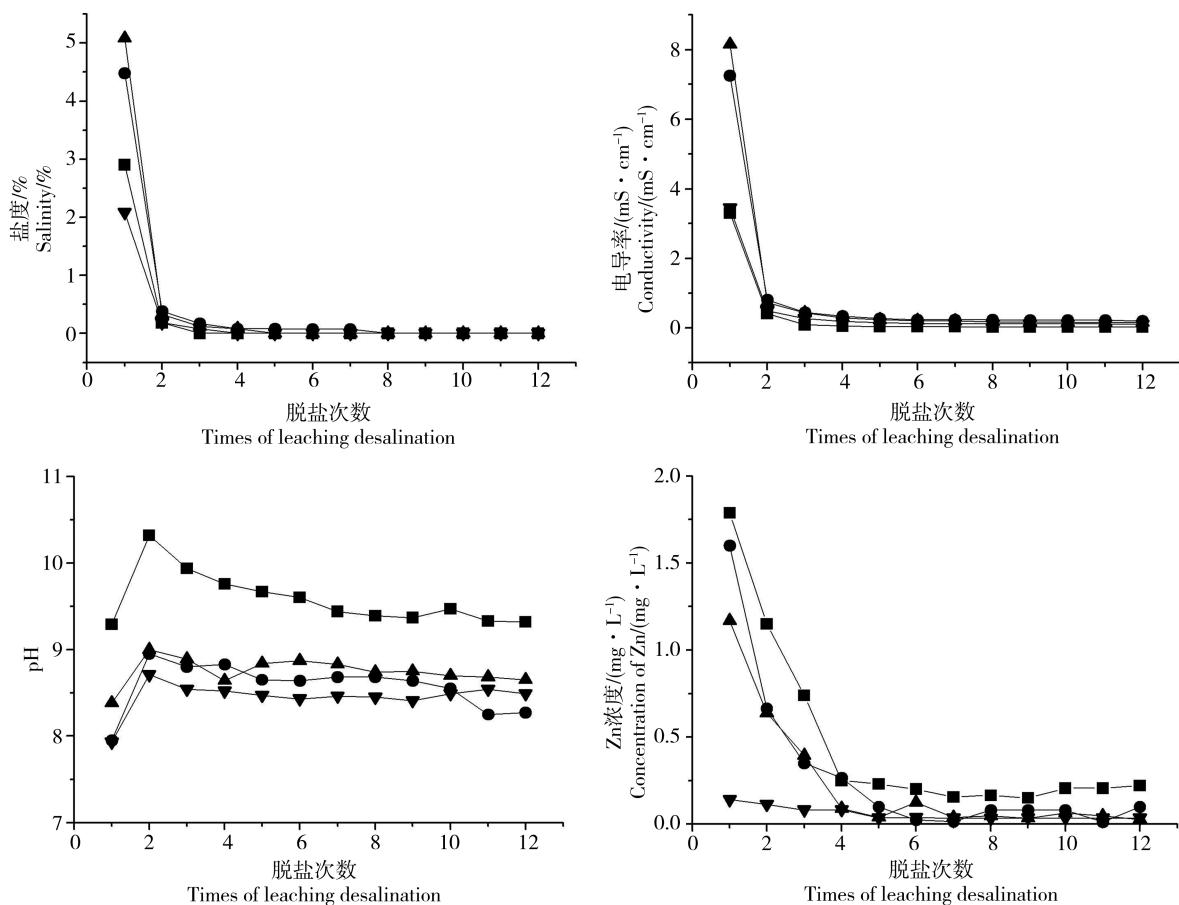


图1 淋洗液pH、盐度、重金属含量的变化

(■光滩,●互花米草滩,▲碱蓬滩,▼芦苇滩)

Fig. 1 Changes of pH, salinity and concentrations of heavy metals in leachate  
(■Bare flat, ●Spartina alterniflora flat, ▲Suaeda glauca flat, ▼Phragmites australis flat)

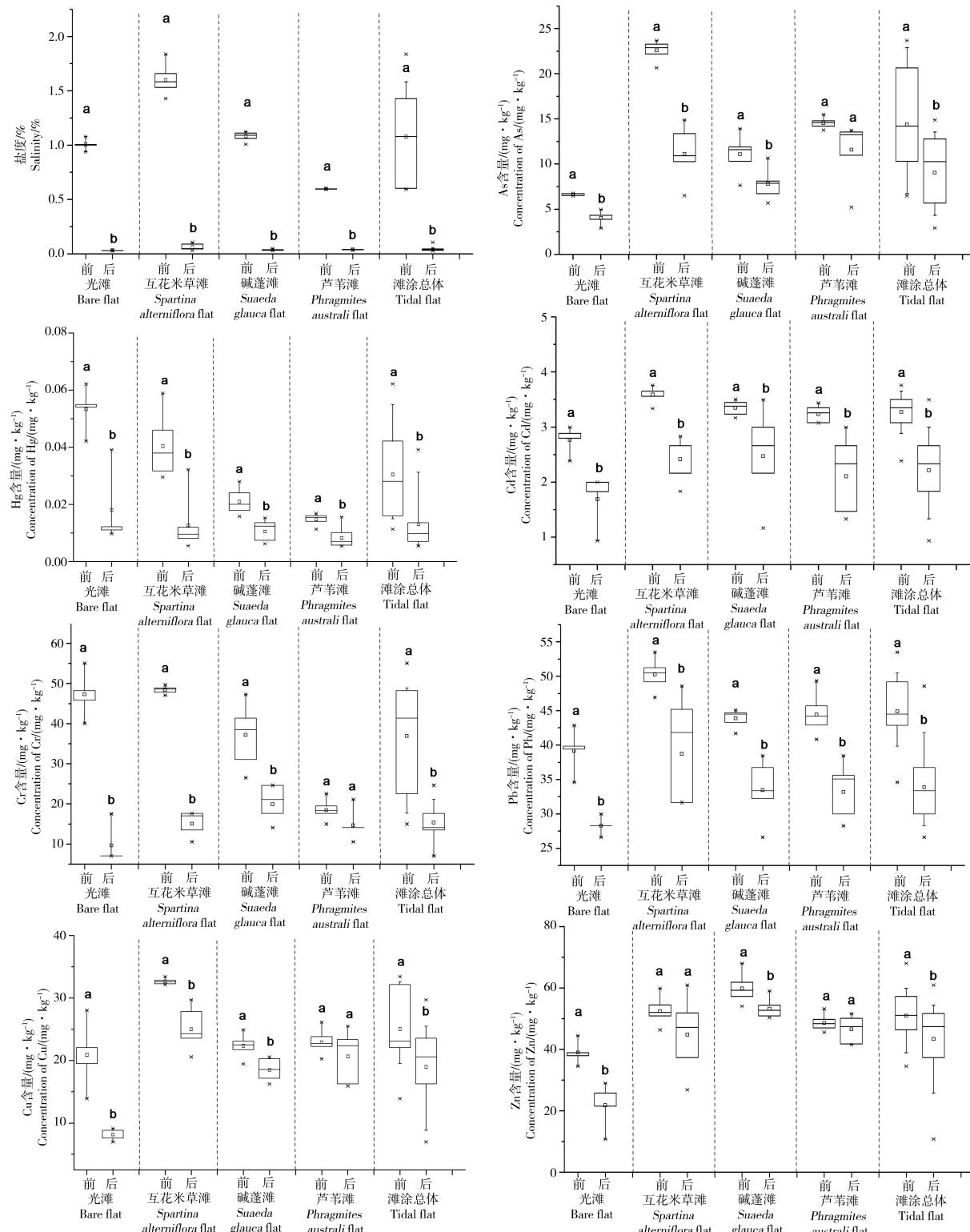


图2 淋洗脱盐前后滩涂不同植被演替带土壤重金属含量的变化

注: 脱盐前后相同字母表示差异不显著( $P>0.05$ ), 不同字母表示差异显著( $P<0.05$ ), Mann-Whitney U 检验。

Fig. 2 Changes of heavy metals in soils of vegetation successions of the pristine tidal flat before and after leaching desalination

Note: Data with the different letters were significantly different

( $P<0.05$ ), and data with the same letters were not significantly different ( $P>0.05$ ), Mann-Whitney U test.

表 1 淋洗脱盐前后不同植被土壤重金属平均淋洗率  
Table 1 Average leaching percentages of heavy metals before and after leaching desalination

重金属含量变化/(mg·kg <sup>-1</sup> )及平均淋洗率/%											
Changes of concentrations of heavy metals/(mg·kg <sup>-1</sup> ) and average leaching percentages/%											
光滩			H <sub>3</sub> 花米草滩			碱蓬滩			芦苇滩		
Bare flat			Spartina alterniflora flat			Suaeda glauca flat			Phragmites australis flat		
脱盐前	脱盐后	淋洗率	脱盐前	脱盐后	淋洗率	脱盐前	脱盐后	淋洗率	脱盐前	脱盐后	淋洗率
Before	After	Leaching	Before	After	Leaching	Before	After	Leaching	Before	After	Leaching
desalination	desalination	percentages	desalination	desalination	percentages	desalination	desalination	percentages	desalination	desalination	percentages
As	6.63±0.14 <sup>a</sup>	4.03±0.86 <sup>b</sup>	39.2	22.6±1.07 <sup>a</sup>	11.1±2.88 <sup>b</sup>	50.8	11.1±2.07 <sup>a</sup>	7.82±2.00 <sup>b</sup>	29.5	14.6±0.58 <sup>a</sup>	11.6±3.28 <sup>a</sup>
Hg	0.053±0.008 <sup>a</sup>	0.018±0.014 <sup>b</sup>	66.2	0.040±0.011 <sup>a</sup>	0.013±0.010 <sup>b</sup>	68.7	0.021±0.004 <sup>a</sup>	0.010±0.004 <sup>b</sup>	50.0	0.015±0.002 <sup>a</sup>	0.008±0.004 <sup>b</sup>
Cd	2.77±0.27 <sup>a</sup>	1.69±0.51 <sup>b</sup>	38.9	3.59±0.14 <sup>a</sup>	2.41±0.38 <sup>b</sup>	32.7	3.35±0.13 <sup>a</sup>	2.47±0.80 <sup>b</sup>	26.3	3.23±0.15 <sup>a</sup>	2.10±0.67 <sup>b</sup>
Cr	47.3±6.22 <sup>a</sup>	9.68±5.28 <sup>b</sup>	63.7	48.4±0.87 <sup>a</sup>	15.1±2.84 <sup>b</sup>	68.9	37.2±7.40 <sup>a</sup>	20.0±4.26 <sup>b</sup>	46.4	18.5±2.49 <sup>a</sup>	14.7±3.46 <sup>a</sup>
Pb	39.2±3.41 <sup>a</sup>	28.3±1.38 <sup>b</sup>	27.8	50.3±2.17 <sup>a</sup>	38.7±7.44 <sup>b</sup>	23.0	43.9±1.24 <sup>a</sup>	33.5±4.10 <sup>b</sup>	23.8	44.4±2.88 <sup>a</sup>	33.2±3.83 <sup>b</sup>
Cu	20.9±5.88 <sup>a</sup>	8.14±1.02 <sup>b</sup>	61.0	32.6±0.45 <sup>a</sup>	25.0±3.28 <sup>b</sup>	23.4	22.3±1.80 <sup>a</sup>	18.5±1.70 <sup>b</sup>	17.2	22.9±1.94 <sup>a</sup>	20.7±3.88 <sup>a</sup>
Zn	39.0±4.13 <sup>a</sup>	21.8±1.95 <sup>b</sup>	44.1	52.5±4.49 <sup>a</sup>	44.8±11.8 <sup>b</sup>	14.6	59.9±4.75 <sup>a</sup>	53.2±3.20 <sup>b</sup>	11.1	48.7±2.64 <sup>a</sup>	46.6±4.20 <sup>a</sup>

注：脱盐前后相同字母表示差异不显著( $P>0.05$ )，不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )，Mann-Whitney U检验。

Notes: Data with the different letters were significantly different ( $P<0.05$ ), and data with the same letters were not significantly different ( $P>0.05$ ). Mann-Whitney U test.

表 2 滩涂不同植被恢复可能导致的重金属流失量 ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ )

Table 2 Losses of heavy metals induced by reclamation of different vegetation successions ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ )

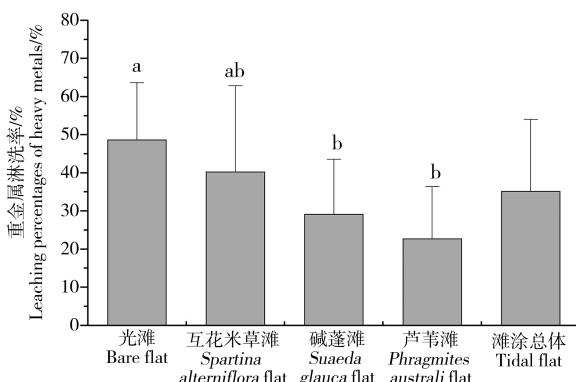


图3 重金属淋洗率随滩涂植被演替带的变化

注: 相同字母表示差异不显著( $P>0.05$ ), 不同字母表示差异显著( $P<0.05$ ), LSD 多重比较。

Fig. 3 Variations of leaching percentages of heavy metals with the vegetation successions

Note: Data with the different letters were significantly different ( $P<0.05$ ), and data with the same letters were not significantly different ( $P>0.05$ ), LSD multiple comparisons.

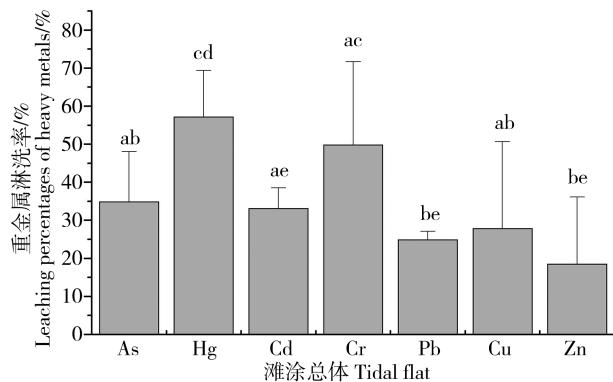


图4 不同重金属淋洗率的差异

注: 相同字母表示差异不显著( $P>0.05$ ), 不同字母表示差异显著( $P<0.05$ ), LSD 多重比较。

Fig. 4 Differences of leaching percentages of heavy metals

Note: Data with the different letters were significantly different ( $P<0.05$ ), and data with the same letters were not significantly different ( $P>0.05$ ), LSD multiple comparisons.

随着淋洗脱盐的进行,滩涂不同植被演替带土壤重金属均可被有效淋溶,这一方面缘于直接溶解、冲刷、洗脱的物理作用,更重要的是由于淋洗过程改变了土壤的氧化还原电位、盐分离子浓度及其组成比例,这些变化共同改变了重金属在土壤中的化学形态,进而影响到重金属在土壤中的迁移状况<sup>[5]</sup>。研究表明,盐分中阴离子的络合作用、阳离子的交换作用可使土壤中重金属的化学形态发生改变进而更容易被淡水淋洗掉<sup>[15]</sup>。如土壤盐分中的Cl<sup>-</sup>能与重

金属离子形成较稳定的复合物,促使重金属由固态向土壤溶液转移<sup>[16-17]</sup>,并且促使重金属离子由吸附态转化为可交换态,从而有助于重金属被淡水淋洗<sup>[5]</sup>。土壤溶液中的阳离子如Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等也可与重金属离子产生竞争吸附,促使重金属由固态向溶液转化,进一步促进了其被淡水淋洗<sup>[18]</sup>。此外,淋洗脱盐过程中,由于CaCO<sub>3</sub>的溶解、有机质的降低(分别降低20%、19%,未发表数据)和氧化还原电位的降低<sup>[5]</sup>,部分碳酸盐结合态、有机结合态和铁锰氧化物结合态重金属也可被释放进入土壤溶液,进而被淋洗出土体。残渣态重金属不易受土壤性质及盐分变化的影响<sup>[5]</sup>,因此滩涂土壤淋洗脱盐前后重金属含量的降低主要缘于其活性成分的变化。表1、图4均显示,不同重金属具有不同的淋洗率,相对而言,Hg、Cr淋洗率较高而Zn淋洗率较低。不同重金属的不同淋洗效果可能缘于其赋存形态的差异以及和盐分离子相互作用的差异,例如残渣态越高越不易被淋洗,而可交换态越高越容易被淋洗。此方面的内部机理还需要更多的实验数据进行分析。

表1、图3显示,滩涂不同植被演替带土壤重金属淋洗率也存在显著差异,光滩、互花米草滩相对较高,而芦苇滩相对较低。此方面的差异也可能缘于土壤中盐分离子和重金属相互作用的差异。光滩、互花米草滩通常盐度、氯离子等含量较高,而芦苇滩通常较低,盐分越高,阴离子的络合作用越强,在淋洗脱盐过程中重金属由固态向土壤溶液转移越强,越容易被淋洗<sup>[16, 19]</sup>,淋洗率与原土盐度有一定的正相关性( $P<0.05$ )也支持了这一结果。此外,光滩更高的粒径和孔隙度、互花米草滩脱盐前后更高的有机质去除率(>20%)可能也有助于其重金属的洗脱。

图3表明,重金属平均淋洗率表现为光滩>互花米草滩>碱蓬滩>芦苇滩,显示滩涂植被的正向演化有助于土壤重金属的固定,从重金属流失角度讲,对潮上带的围垦比潮间带更加安全。表2的计算结果也验证了这一点。研究结果显示,围垦淋洗脱盐过程中,光滩土壤重金属的流失量远高于盐沼草滩,芦苇滩重金属流失量仅为光滩的1/4。因此围垦过程中要更加重视光滩重金属的流失情况。

通过淋洗脱盐向农田转化是目前我国滨海滩涂土地利用变化的主要形式,超过总体变化规模的75%<sup>[20]</sup>。随着社会经济的迅速发展,沿海用地矛盾日趋突出,滩涂围垦造地规模不断扩大。根据《江苏沿海滩涂围垦及开发利用规划纲要(2010~2020

年)》,2010~2020年,江苏省滨海滩涂围垦总规模可达270万亩,巨大的围垦量可能对滨海土壤环境产生重要影响。根据本研究结果,计算了围垦淋洗脱盐过程可能造成的重金属流失量,结果显示,以围垦规模270万亩计,仅表层20 cm土壤,As、Hg、Cd、Cr、Pb、Cu、Zn将分别淋洗流失2 102.5、7.4、4 21.3、8 587.9、4 376.3、2 404.3 t。Cr流失量远高于其他重金属,其次为Pb、Zn、Cu、As和Cd,Hg相对较低。考虑到围垦时影响的土壤深度可能超过1 m,实际流失的重金属量可能更高。流失的重金属一方面可能通过地表径流入海,也有可能垂直迁移进入地下水层<sup>[21]</sup>,无论何种归趋,由淋洗脱盐导致的重金属流失风险均相当可观,需要进一步引起重视。

需要说明的是,本研究中所用的土柱很小,淋洗结果与大土柱可能有一定差异,此外,本研究中未使用原位条件下的非均质土壤,考虑到不同植被演替带土壤孔隙状况以及优先流等情况,研究结果可能与实际滩涂土壤淋洗脱盐过程也存在一定差异,在今后的研究中将进一步使用接近实际情况的大土柱乃至现场土柱进行实验,以期获得更加接近实际的研究结果。

**通讯作者简介:**付强(1975—),男,副教授,主要从事滨海滩涂污染物生物地球化学方面的研究。

**共同通讯作者简介:**严金龙(1971—),男,教授,主要从事滩涂污染与防治等方面的研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 沈永明,冯年华,周勤,等.江苏沿海滩涂围垦现状及其对环境的影响[J].海洋科学,2006,30(10): 39-43  
Shen Y M, Feng N H, Zhou Q, et al. The status and its influence of reclamation on Jiangsu coast [J]. Marine Science, 2006, 30(10): 39-43 (in Chinese)
- [2] 严长清,孙伟,陆效平,等.江苏省沿海滩涂土地利用与生态保护研究[J].生态科学,2007,26(3): 263-268  
Yan C Q, Sun W, Lu X P, et al. Study on coastal wetlands use and its ecological protection of Jiangsu Province [J]. Ecological Science, 2007, 26(3): 263-268 (in Chinese)
- [3] Li J G, Pu L J, Zhu M, et al. Evolution of soil properties following reclamation in coastal areas: A review [J]. Geoderma, 2014, 226-227: 130-139
- [4] 陆君,李取生,杜烨锋,等.滩涂围垦淋洗脱盐过程对土壤中几种不同形态硫的影响[J].华南师范大学学报:自然科学版,2012,44(2): 95-98  
Lu J, Li Q S, Du Y F, et al. Effect of tidal flat reclamation and leaching desalination on several different forms of sulphur in the soil [J]. Journal of South China Normal University: Natural Science Edition, 2012, 44(2): 95-98 (in Chinese)
- [5] 刘亚男,李取生,杜烨锋,等.滩涂土壤淋洗过程中盐分变化及其对重金属的影响[J].环境科学,2011,32(7): 2087-2091  
Liu Y N, Li Q S, Du Y F, et al. Salinity change and its impact on heavy metals during beach soil leaching and desalination [J]. Environmental Science, 2011, 32 (7): 2087-2091 (in Chinese)
- [6] 徐彩瑶,濮励杰,朱明.沿海滩涂围垦对生态环境的影响研究进展[J].生态学报,2018,38(3): 1-15  
Xu C Y, Pu L J, Zhu M. Effect of reclamation activity on coastal ecological environment: Progress and perspectives [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 1-15 (in Chinese)
- [7] Li Q S, Liu Y N, Du Y F, et al. The behavior of heavy metals in tidal flat sediments during fresh water leaching [J]. Chemosphere, 2011, 82: 834-838
- [8] 崔志红.围垦对珠江口滩涂土壤重金属化学形态的影响[D].广州:暨南大学,2010: 14-40  
Cui Z H. Effect of reclamation on chemical species of heavy metals in tidal flat soil from the Pearl River Estuary [D]. Guangzhou: Jinan University, 2010: 14-40 (in Chinese)
- [9] 杜烨锋,李取生,陈连运,等.淋洗脱盐对滩涂土壤孔隙水重金属垂直迁移的影响[J].生态科学,2009,28(1): 62-65  
Du Y F, Li Q S, Chen L Y, et al. Effects of leaching desalination on the vertical movement of heavy metals in the pore water of tidal flat soils during reclamation [J]. Ecological Science, 2009, 28(1): 62-65 (in Chinese)
- [10] Li H, Lu J, Li Q S, et al. Effects of freshwater leaching on potential bioavailability of heavy metals in tidal flat soils [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2016, 38(1): 99-110
- [11] 李取生,楚蓓,石雷,等.珠江口滩涂湿地土壤重金属分布及其对围垦的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(4): 1422-1426  
Li Q S, Chu B, Shi L, et al. Heavy metal distribution in tidal wetland soils and its effect on reclamation in the Pearl River Estuary [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(4): 1422-1426 (in Chinese)
- [12] 毛志刚,谷孝鸿,刘金娥,等.盐城海滨盐沼湿地及围垦农田的土壤质量演变[J].应用生态学报,2010,21(8): 1986-1992  
Mao Z G, Gu X H, Liu J E, et al. Evolvement of soil

- quality in salt marshes and reclaimed farmlands in Yancheng coastal wetland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(8): 1986-1992 (in Chinese)
- [13] 殷仪华, 陈邦本. 江苏省滨海盐土脱盐过程 pH 值上升原因的探讨[J]. 土壤通报, 1991, 22(1): 5-7  
Yin Y H, Chen B B. Discussion on the reason of pH increase during the desalination of coastal saline soil in Jiangsu Province [J]. Journal of Soil Science, 1991, 22(1): 5-7 (in Chinese)
- [14] 陈邦本, 方明, 胡蓉卿, 等. 江苏滨海盐土碱化可能性的探讨 I. 自然脱盐过程中碱化可能性问题[J]. 南京农业大学学报, 1987, 10(2): 76-81  
Chen B B, Fang M, Hu R Q, et al. Possibility of alkalization of saline soils along the sea coast of Jiangsu Province I. Possibility of alkalization during the process of native desalinization [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1987, 10(2): 76-81 (in Chinese)
- [15] 刘平, 徐明岗, 宋正国. 伴随阴离子对土壤中铅和镉吸附-解吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 252-256  
Liu P, Xu M G, Song Z G. Effects of accompanying anions on adsorption-desorption of Pb and Cd by two typical soils of China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(1): 252-256 (in Chinese)
- [16] Williams T P, Bubb J M, Lester J N. Metal accumulation within salt marsh environment: A review [J]. Marine Pollution Bulletin, 1994, 28(5): 277-290
- [17] Usman A R A, Kuzyakov Y, Stahr K. Effect of immobilizing substances and salinity on heavy metals availability to wheat grown on sewage sludge-contaminated soil [J]. Soil & Sediment Contamination, 2005, 14: 329-344
- [18] Du L G, De V R, Vandecasteele B, et al. Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt Estuary [J]. Coastal and Shelf Science, 2008, 77(4): 589-602
- [19] Li Q S, Wu Z F, Chu B, et al. Heavy metals in coastal wetland sediments of the Pearl River Estuary, China [J]. Environmental Pollution, 2007, 149(2): 158-164
- [20] 翟可, 刘茂松, 徐驰, 等. 盐城滨海湿地的土地利用/覆盖变化[J]. 生态学杂志, 2009, 28(6): 1081-1086  
Zhai K, Liu M S, Xu C, et al. Land use/cover change in Yancheng coastal wetland [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(6): 1081-1086 (in Chinese)
- [21] 杜烨锋. 淋洗脱盐过程对滩涂土壤重金属垂直迁移的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2009: 10-35  
Du Y F. Effects of leaching desalination on the vertical movement of heavy metals in the tidal flat soils during reclamation [D]. Guangzhou: Jinan University, 2009: 10-35 (in Chinese) ◆