

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

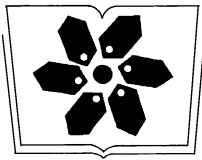
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 23 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等 (7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等 (7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等 (7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等 (7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等 (7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等 (7302)
基于模型数据融合的干烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等 (7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华 (7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星 (7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等 (7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉 (7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等 (7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利 (7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等 (7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等 (7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等 (7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成 (7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等 (7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等 (7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚 (7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等 (7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现 (7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等 (7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等 (7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等 (7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等 (7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等 (7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等 (7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等 (7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等 (7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等 (7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅 (7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等 (7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等 (7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等 (7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等 (7595)
专论与综述	
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智 (7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等 (7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 380 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 38 * 2012-12

DOI: 10.5846/stxb201112251968

王祖伟, 弋良朋, 高文燕, 曾祥峰, 王中良. 碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响. 生态学报, 2012, 32(23): 7512-7518.

Wang Z W, Yi L P, Gao W Y, Zeng X F, Wang Z L. Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7512-7518.

碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响

王祖伟*, 弋良朋, 高文燕, 曾祥峰, 王中良

(天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300387)

摘要: 镉是土壤环境中对土壤质量有着极其重要影响的污染物之一, 低含量下就能对人体和动物产生危害。镉在土壤中的有效态既决定了它的生物有效性及对环境的危害程度, 又是人们对受污染土壤进行治理和修复的基础。作为盐化土壤中的典型组分, 无机盐不可避免对镉的有效态及生物有效性等地球化学行为产生明显影响。研究了碱性土壤盐化过程中无机盐阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉影响。研究方法为: 以钠盐为例, 实验研究了碱性土壤盐化过程中无机盐阴离子对土壤中镉有效态的影响; 通过油菜种植试验, 分析了无机盐阴离子对土壤中镉生物有效性的影响。研究表明, 土壤盐化过程中, 土壤溶液中 Cl^- 浓度较低时, 土壤中镉的有效态含量随 Cl^- 浓度增加而增大, 但当土壤中 Cl^-/Cd 的比值大于 100:1 时, 土壤中镉的有效态含量达到最大值。土壤溶液中 SO_4^{2-} 含量对土壤中镉有效态含量的影响不明显; 随着土壤溶液中 HCO_3^- 含量的增加, 土壤中镉的有效态含量明显减少。由于 Cl^- 、 SO_4^{2-} 是土壤溶液中的主要成分, 随着盐度的增加, 镉的有效态含量增加。油菜种植试验显示, 当土壤中 Cl^- 的含量增加时, 土壤中镉的有效态含量增加, 有利于植物对镉的吸收, 因此油菜中镉的含量随土壤中 Cl^- 的含量增加而增加, 但当土壤有效态含量超过 2 mg/kg 后, 油菜吸收镉已经达到最大。随着土壤溶液中 SO_4^{2-} 浓度的增加, 油菜中镉含量基本不变; 土壤溶液中 HCO_3^- 的含量增加, 植物中镉的含量随土壤中 HCO_3^- 含量增加而减少。这些特征与土壤镉有效态变化相吻合。通过各种措施控制土壤盐度和调节阴离子类型和含量, 有利于降低土壤中镉的有效态含量, 减轻镉的活化; 农业生产中适当调整无机肥料的种类, 可以减少农作物对镉的吸收。

关键词: 碱性盐化土壤; 无机盐阴离子; 镉有效态; 植物有效性

Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils

WANG Zuwei*, YI Liangpeng, GAO Wenyan, ZENG Xiangfeng, WANG Zhongliang

College of Urban and Environment Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract: Cadmium (Cd) is one of the main heavy metal pollutants in the soil environment. It has an important influence on soil quality and can cause harm to humans and animals at low concentrations. The Cd effective fraction (dissolved + exchangeable) in soil is important in determining its bioavailability and harmful levels in the soil environment, but it is also the foundation of contaminated soil treatment and remediation. There are many soil factors which influence concentrations of the Cd effective fraction. As a typical component of salinization in soil, inorganic salts inevitably have an obvious impact on the geochemical behavior of Cd in soil such as Cd fractions and their bioavailability. In this paper, the impact of inorganic salt anions such as Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- on the concentrations of the Cd effective fraction in soil and its phytoavailability was

基金项目: 国家自然科学基金(40973078, 40830746); 973 计划前期研究专项(2010CB434806); 天津市科技计划项目(10SYSYJC27400)

收稿日期: 2011-12-25; 修订日期: 2012-08-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangzuwei@tjnu.edu.cn

studied in order to understand the influence of inorganic salts on Cd geochemistry during the process of salinization in alkaline soils. Using sodium salts as the example, the impact of inorganic anions such as Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- on concentrations of the Cd effective fraction was studied experimentally and the impact of inorganic anions on Cd phytoavailability was studied in a rape cultivation experiment. The Cd effective fraction in soil was extracted using the Tessier method, and concentrations of the Cd effective fraction in soil and Cd concentrations in rape were measured by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. The experiments investigating the impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction showed that concentrations of the Cd effective fraction in soil increased with increasing Cl^- concentration in soil solutions and reached a maximum when the concentration ratio of Cl^-/Cd exceeded 100:1. For SO_4^{2-} , no obvious effect was observed on the concentrations of Cd effective fraction, while increasing HCO_3^- concentration in soil solutions significantly reduced concentrations of the Cd effective fraction. The rape cultivation experiments showed that Cd concentrations in rape increased with increasing concentrations of the Cd effective fraction. The impact of the inorganic Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- anions on concentrations of the Cd effective fraction were reflected by Cd uptake by rape, with Cd concentrations in rape increasing with increasing Cl^- concentrations in the soil solution, reaching a maximum when the concentration of the Cd effective fraction exceeded 2 mg/kg. When SO_4^{2-} concentrations in the soil solution increased, no change was observed in Cd concentrations in rape, which is in agreement with the lack of changes in concentrations of the Cd effective fraction in soil observed with increasing SO_4^{2-} concentrations. Cd concentrations in rape reduced with increasing HCO_3^- concentrations in the soil solution which was consistent with the phenomenon that a significant reduction occurred in concentrations of the Cd effective fraction with increasing HCO_3^- concentrations in soil solutions. It suggests that Cd phytoavailability, as well as concentrations of the Cd effective fraction during salinization, are influenced by inorganic anions such as Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- in the soil solution. Concentrations of the Cd effective soil fraction can be controlled by adjusting contaminated soil salinity and inorganic anion types with various measures. Cd uptake by crops can be reduced by using appropriate inorganic fertilizer types in agricultural production.

Key Words: alkaline salinization soils; inorganic anions; concentrations of cadmium effective fraction; phytoavailability

土壤是人类赖以生存的最重要的自然资源之一,随着工农业生产的快速发展,土壤污染特别是重金属污染越来越严重。重金属污染具有隐蔽性或潜伏性、不可逆性和长期性、后果严重性等特点。近年来研究证明,无论是从毒性还是蓄积作用来看,镉成为威胁人类健康的重要的重金属元素。土壤环境中镉污染已引起人们的普遍关注,成为国内外地球化学、环境科学、土壤化学等各学科的研究热点之一。

在天津地区,分布有海洋和河流相互作用形成的冲积海积平原,土壤类型多样,碱性盐化土壤分布广泛。由于水资源匮乏,污水灌溉成为解决农业用水短缺的重要手段之一。多年来已在北京排污河和南、北排污河流域形成了三大污灌区,面积已达 15 万 hm^2 ,为全国之首。由于污水灌溉,污灌区碱性盐化土壤受到严重污染,土壤环境质量恶化,镉是最主要的污染元素,污灌区水稻及蔬菜等作物已经被污染,开始影响到人类健康^[1-3]。初步研究发现,天津土壤中镉的地球化学行为与无机盐有关^[4]。因此,分析研究土壤中无机盐对镉的地球化学行为的影响,特别是阴离子的影响,探讨镉具备较高生物有效性的机理及其影响因素,具有重要的实际意义。

在阴离子对镉的影响方面,多年来许多专家进行了研究。对于 Cl^- , Garcia-Miragaya 等早在 1978 年是就提出 Cd^{2+} 与 Cl^- 等阴离子结合形成无机化合物会抑制镉的吸附^[5]。Bingham 研究了土壤在 pH 值 4.0 到 7.0 时 Cl^- 的作用,发现 Cl^- 能促进植物对 Cd 的吸收^[6]。Connor 等研究表明在石灰性土壤中 Cl^- 的存在 (CaCl_2) 导致 Cd^{2+} 的吸附减少,这是 Cd^{2+} 与 Cl^- 络合作用的结果^[7]。Smolders 等的研究发现,土壤溶液中 Cl^- 的浓度增加,造成土壤溶液中 Cd 的浓度增加和植物 Cd 的吸收量的增加,KCl 肥料使用同样增加植物吸收 Cd,其原理主要是 Cd^{2+} 与 Cl^- 结合形成 CdCl^+ ,具有与 Cd^{2+} 相同的化学性质,可直接被植物吸收^[8-10]。Hiroyuki 等研究发现氯

化物在低 pH 值下能够明显增加的植物吸收镉能力^[11]。

对于 SO_4^{2-} 离子,McLaughlin 等进行的水培和盆栽实验表明, Na_2SO_4 的加入虽然显著降低了营养液或土壤溶液中自由 Cd^{2+} 的质量分数,但植物对 Cd 的吸收和积累并没有受到明显影响^[12]。Zhang 等研究了 SO_4^{2-} 对 Cd^{2+} 吸附的影响,结果表明 SO_4^{2-} 不管是先加入还是后加入都增加了 Cd^{2+} 的吸附,但是先加入效果更显著; SO_4^{2-} 加入后增加了负电荷密度,导致土壤表面的负电位增加;另外三元配合物 -S-SO_4^- 的形成也可能起着重要的作用^[13]。ZHAO 等对 K_2SO_4 、 KCl 和 KNO_3 三种钾肥进行的比较研究结果显示, KCl 和 K_2SO_4 的加入均明显提高了两个小麦品种对 Cd 的吸收,且随着 KCl 和 K_2SO_4 质量分数的升高,小麦幼苗茎中 Cd 质量分数也随着升高;相对的,根中 Cd 质量分数随 KCl 和 K_2SO_4 的变化不如茎中强烈, K_2SO_4 处理的小麦根中 Cd 质量分数变化不大甚至略有降低,表明 Cl^- 和 SO_4^{2-} 有可能影响 Cd 从植物根部向茎部的转运^[14]。Chen 等的研究发现,使用 K_2SO_4 能够显著减少小麦的根、茎和籽实各部分对 Cd 的吸收,其原因是由于 CaSO_4 的形成降低了 Ca^{2+} 对 Cd^{2+} 的竞争作用^[15]。

上述研究虽然已经取得大量的研究成果,但这些研究涉及的土壤为中-酸性土壤,不同学者对于 SO_4^{2-} 影响的研究结果不一致,有许多问题尚无定论,有待于新的证据的获得。本文针对上述问题,以钠盐为例,分析无机盐阴离子对碱性土壤中镉的地球化学行为的影响。由于镉的有效态(水溶态+可交换态)是镉的生物有效性的主要影响形态,本文研究碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉的有效态和生物吸收镉的影响。

1 实验方法

1.1 土壤盐化过程中无机盐阴离子对土壤中镉有效态影响的实验研究

以钠盐为例,实验研究无机盐阴离子对土壤中镉有效态的影响。实验所用土壤采自天津污灌区重壤质湿潮土,土壤有机质含量 2%,pH 值为 8.1。将采集的土壤样品除去植物根茎,风干,混匀,研碎,备用。

取制备好的供试土壤,加入硝酸镉溶液,使土壤中 Cd 的含量达到 10 mg/kg,自然风干。实验表明,外源 Cd 进入土壤后,由于各种因素作用,镉发生各种形态转化,老化时间为 35 d 左右,土壤中镉的各种形态基本保持相对稳定。因此将加入外源镉的土壤自然风干至 50 d,破碎、筛分。

各取制备好的加入外源镉的土壤样品,每个样品按 50 g 称重,进行盐处理,即分别加入浓度分别为 0、0.02、0.04、0.08 mol/L NaCl 、 Na_2SO_4 和 Na_2CO_3 溶液 50 mL,室温下稳定 30 d。设置 3 个平行样。实验表明,无机盐进入土壤后,15 d 左右后土壤中镉的形态达到平衡。土壤加入无机盐,自然风干,30 d 后将样品破碎筛分,备用。

土壤中镉的形态可分为有效态(水溶态+可交换态)、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态、残渣态五种形态。有效态采用 Tessier 法提取,其过程为^[16]:准确称取 1.0000 g 土壤样品,加入 1.00 mol/L 的 MgCl_2 溶液 8 mL,于 25 °C 恒温水浴中,连续振荡 2 h,离心取上清液,剩余残余物加去离子水洗涤,再离心,所有上清液过滤,定溶。上清液中镉的含量即为镉的有效态含量,采用 ICP-MS 法测试。样品的测试精度通过标准曲线校验,符合实验的精度要求。试验重复 3 次。

1.2 盐胁迫下无机盐阴离子对土壤中镉有效态影响在生物有效性响应的试验研究

各取制备好的加入外源镉的土壤样品,分别加入一定量的碳酸钠、硫酸钠、氯化钠溶液,浓度分别为 0、2、4、8 g/kg,分别代表土壤低、中、高盐度,室温下稳定 30 d。设置 3 个平行样。30 d 后将样品破碎、筛分、备用。

对每个土壤样品中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 含量采用常规法测试,土壤中镉的有效态采用 Tessier 法提取,采用 ICP-MS 测定。试验重复 3 次。

取制备好的已进行盐处理的供试土壤,将样品破碎筛分,按 1 kg 装入花盆,进行农作物栽培试验。试验用油菜品种为半冬性甘蓝型中熟杂交油菜品种中油杂 10 号(*B. napus* var. *Zhongyouza* No. 10),由中国农科院油料所提供。将油菜种子经消毒、浸种,播入土壤中,待出苗后,每盆保留 10 株。于温室内 22 °C 恒温培养,自然光照,60 d 后取样。

将采集的油菜样品按根系、茎叶分开处理。将分离开的油菜根系、茎叶分别用自来水和无离子水冲洗后,

在干燥通风处风干,破碎、筛分,经过微波消解后,采用 ICP-MS 法测定其中镉的含量,样品的测试精度通过标准曲线绘制和插入内标进行控制,结果符合实验的精度要求。试验重复 3 次。

2 结果与讨论

2.1 土壤盐化过程无机盐阴离子对土壤中镉有效态的影响及形成机理

2.1.1 土壤盐化过程无机盐阴离子对土壤中镉有效态的影响

图 1 显示了单一离子对镉有效态的影响。

从图 1 可知,随着 Cl^- 浓度的增加,土壤中 Cd 的有效态含量明显增加。土壤中镉有效态含量土壤溶液中 SO_4^{2-} 含量对的影响不明显,随着土壤溶液中 HCO_3^- 含量的增加,土壤中镉的有效态含量明显减少。

图 2 所示了用于栽培实验的土壤中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 含量以及其对镉有效态的影响。

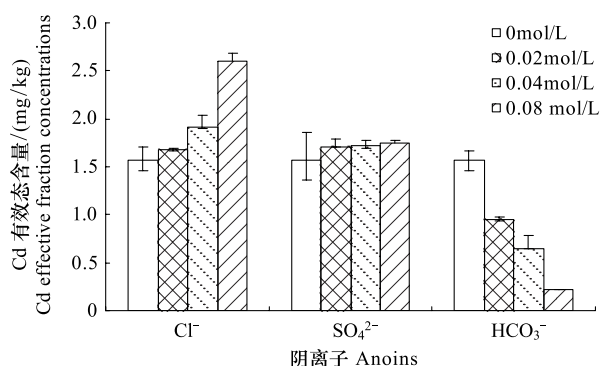


图 1 土壤溶液中单一阴离子对土壤镉有效态的影响

Fig. 1 Influence of a single anion concentration on Cadmium effective fraction content in soils

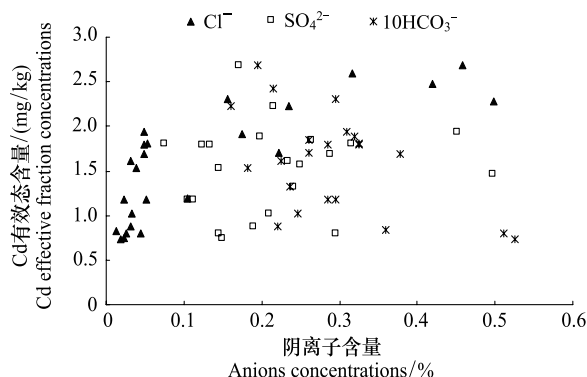


图 2 土壤溶液中阴离子含量对土壤镉有效态的影响

Fig. 2 Influence of anions concentration on Cadmium effective fraction content in soils

从图中可知,对于随着土壤中 Cl^- 含量增加,土壤中镉的有效态含量增加。当土壤中 Cl^- 含量超过 0.1%, 土壤中镉的有效态含量增加不明显。土壤中镉的有效态含量增加变化规律,除受阴离子影响外,还可能受土壤中镉的总量控制。因此在 Cl^- 浓度较低时,土壤中镉的有效态含量随溶液中 Cl^- 浓度增加而增大,结果与单一离子对镉有效态的影响符合。当 Cl^- 浓度到达一定量后,溶液中 Cl^- 浓度虽然增加,土壤中镉的有效态含量变化不明显。

对于 SO_4^{2-} , 土壤溶液中 SO_4^{2-} 对土壤中镉有效态含量的影响不明显,表明土壤中镉有效态基本不随土壤溶液中 SO_4^{2-} 浓度变化而变化。对于 HCO_3^- , 随着土壤溶液中 HCO_3^- 含量的增加,土壤中镉的有效态含量明显减少,与单一离子对镉有效态的影响符合。

由于 Cl^- 、 SO_4^{2-} 是土壤溶液中主要的阴离子,因此虽然 HCO_3^- 的含量增加,减少了土壤中镉的有效态含量,但是总体上随着土壤盐度的增加,土壤中镉的有效态含量是增加的。

2.1.2 形成机理分析

无机盐阴离子对土壤镉有效态的影响,主要与阴离子对土壤中物质成分吸附和解吸镉的影响密切相关。对土壤主要成分粘土矿物(蒙托石和伊利石)、铁锰氧化物在无机盐阴离子作用下对镉的吸附和解吸影响的研究表明^[17-18]:在相同浓度条件下,无机盐对蒙脱石和伊利石以及铁锰氧化物解吸镉的影响大小为氯化钠>硫酸钠>碳酸钠,硫酸钠、碳酸钠的存在增加了粘土矿物吸附镉的能力,溶液中镉离子浓度减小。其原因为 Cl^- 与 Cd^{2+} 反应生成 CdY^{1+} , CdY^{1+} 的有效水和离子半径增大,不易被粘土矿物、铁锰氧化物吸附^[19]。随着阴离子浓度增加,阴离子与 Cd^{2+} 反应生成 CdY^{1+} 几率增加,对粘土矿物和铁锰氧化物解吸镉的影响增大。

土壤溶液中存在的 CO_3^{2-} , 与镉和土壤粘土矿物结合形成配位体过程中产生的 H^+ 结合形成 HCO_3^- , 有利于更多的镉与粘土矿物结合形成配位体,降低溶液中镉离子浓度,因此土壤溶液中 HCO_3^- 含量的增加,土壤中镉

的有效态含量明显减少。

2.2 土壤胁迫下土壤中镉有效态分布在生物有效性的响应

土壤中镉有效态含量与油菜中镉含量的关系见图3。

从图3中可知,油菜中的镉主要富集在根中。油菜中镉的含量随土壤中镉有效态的增加而增高。当土壤中镉有效态超过 2 mg/kg 后,油菜吸收镉已经达到最大,不随镉有效态增加而增高。

土壤溶液中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度与油菜各组织器官中镉含量之间的关系见图4—图6。

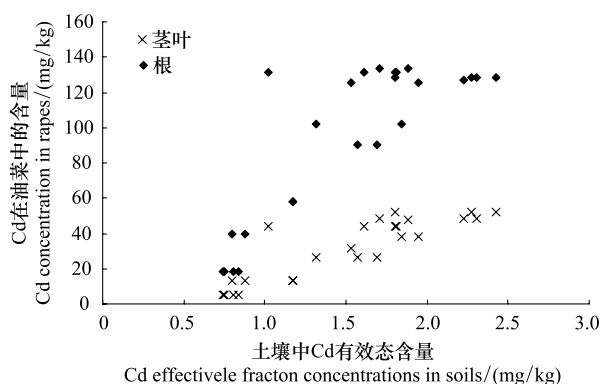


图3 土壤中镉有效态含量与油菜中镉含量的关系

Fig. 3 Relationship between Cd effective form content in soils and Cd content in rapeseed

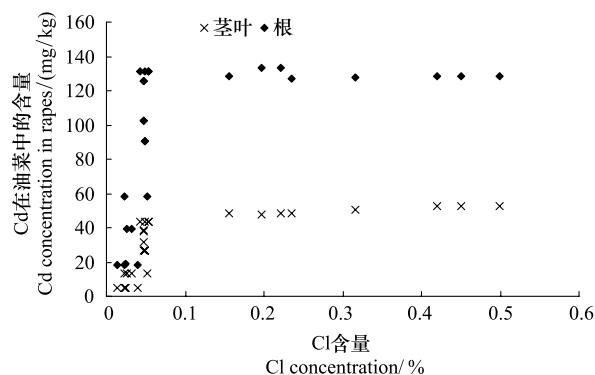


图4 土壤溶液中 Cl^- 含量与油菜中镉含量的关系

Fig. 4 Relationship between Cl^- concentration in soil solutions and Cd content in rapeseed

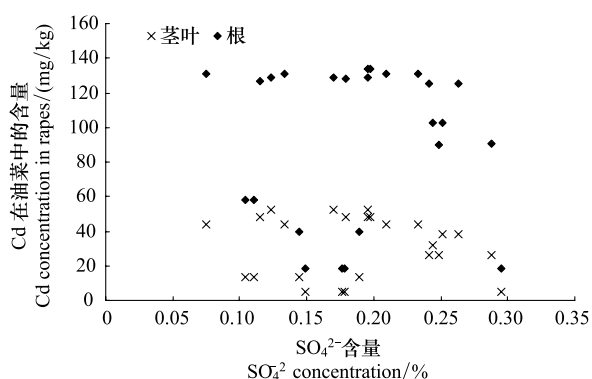


图5 土壤溶液中 SO_4^{2-} 含量与油菜中镉含量的关系

Fig. 5 Relationship between SO_4^{2-} concentration in soil solutions and Cd content in rapeseed

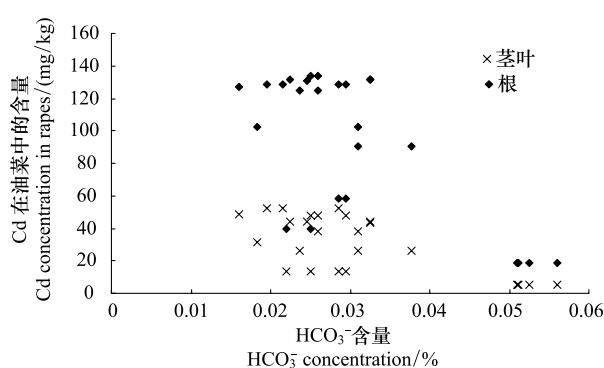


图6 土壤溶液中 HCO_3^- 含量与油菜中镉含量的关系

Fig. 6 Relationship between HCO_3^- concentration in soil solutions and Cd content in rapeseed

从图4中可知,在土壤溶液中 Cl^- 浓度较低时,随着 Cl^- 浓度的增加,油菜中镉含量快速增加,这与土壤溶液中较低 Cl^- 浓度时引起土壤中镉有效态增加相吻合。这一研究结果与前人的研究结果相符合^[5-11]。当土壤有效态超过 2 mg/kg 后,油菜吸收镉已经达到最大。这一结果与土壤中镉的有效态含量随 Cl^- 含量的变化规律一致。因此,在研究 Cl^- 对植物吸收镉的影响过程中,应同时考虑 Cl^- 浓度和土壤中镉的含量的共同作用。

从5中可知,随着土壤溶液中 SO_4^{2-} 浓度的增加,油菜中镉含量基本不变,这与土壤镉有效态含量基本不随 SO_4^{2-} 浓度变化而改变相吻合,与 McLaughlin 等的结果一致与 Zhang 等研究结果相矛盾^[12-13]。当土壤溶液中 SO_4^{2-} 浓度高于 0.25% 时,油菜中镉的含量有所降低,与 Zhang 等、Chen 等研究结果相矛盾^[13-15]。因此,在研究 SO_4^{2-} 对植物吸收镉的影响过程中,应考虑 SO_4^{2-} 浓度变化梯度差异产生的影响。

从图6中可知,随着 HCO_3^- 浓度的增加,油菜中镉含量减少,这与土壤中镉有效态含量随土壤溶液中

HCO_3^- 浓度时增加而降低相吻合。

3 结论

土壤盐化过程中,随着土壤盐度的增加,土壤中镉有效态含量与土壤镉总量的比增加,表明随着土壤盐度的增加,土壤中镉有效态含量总体增加,土壤盐化过程有利于镉的活化。

土壤中镉的有效态含量随土壤溶液中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 变化而改变。对于 Cl^- ,在土壤溶液中 Cl^- 浓度较低时,土壤中镉的有效态含量随 Cl^- 浓度增加而增大。当土壤中 Cl^-/Cd 的比值超过 100:1 时,土壤中镉的有效态含量达到最大值,随着土壤溶液中 Cl^- 浓度虽然增加,土壤中镉的有效态含量变化不明显。

对于 SO_4^{2-} ,土壤溶液中 SO_4^{2-} 含量对土壤中镉有效态含量的影响不明显,土壤中镉的有效态含量基本不随土壤溶液中 SO_4^{2-} 浓度变化而变化;对于 HCO_3^- ,随着土壤溶液中 HCO_3^- 含量的增加,土壤中镉的有效态含量明显减少。

土壤中无机盐阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 含量决定土壤中镉有效态含量的高低,在镉的植物有效性有明显响应。当土壤中 Cl^- 的含量增加时,土壤中镉的有效态含量明显增加,有利于植物对镉的吸收,因此植物中镉的含量随土壤中 Cl^- 的含量增加而增加,当土壤有效态超过 2 mg/kg 后,油菜吸收镉已经达到最大;随着土壤溶液中 SO_4^{2-} 浓度的增加,油菜中镉含量基本不变,这与土壤镉有效态含量基本不随 SO_4^{2-} 浓度变化而改变相吻合;当土壤溶液中 HCO_3^- 的含量增加,减少了土壤中镉的有效态含量,不利于植物对镉的吸收,因此植物中镉的含量随土壤中 HCO_3^- 的含量增加而减少。

通过各种措施控制土壤盐度和调节阴离子类型和含量,有利于降低土壤中镉的有效态含量,减轻镉的活化;农业生产中适当调整无机肥料的种类,可以减少农作物对镉的吸收。

References:

- [1] Zheng H L, Zheng B W, Lu W L. Effects of different sewage on soil heavy metals, crop yield and quality. *Tianjin Agricultural Science*, 2001, 7 (2): 17-20.
- [2] Mao J H, Lu W L. Tianjin farmland soil pollution and its countermeasures. *Yunnan Environmental Science*, 2001, 19(S1): 96-98.
- [3] Wang Z W, Li Z M, Wang J G, Liu Z, Liu J Z. Absorption to heavy metals by wheat and influencing features in sewage-irrigated soil in Tianjin. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1406-1410.
- [4] Wang Z W, Zhang H. Environmental quality and biological effects of heavy metals in soils in the regions of sewage irrigation in Tianjin. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 211-213.
- [5] García-Miragaya J, Page A L. Sorption of trace quantities of cadmium by soils with different chemical and mineralogical composition. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1978, 9(3): 289-299.
- [6] Bingham F T, Sposito G, Strong J E. The effect of chloride on the availability of cadmium. *Journal of Environmental Quality*, 1984, 13(1): 71-74.
- [7] O'Connor G A, O'Connor C, Cline G R. Sorption of cadmium by calcareous soils: influence of solution composition. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(6): 1244-1247.
- [8] Smolders E, Lambregts R M, McLaughlin M J, Tiller K G. Effect of soil solution chloride on cadmium availability to Swiss chard. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2): 426-431.
- [9] Chien S H, Carmona G, Prochnow L I, Austin E R. Cadmium availability from granulated and bulk-blended phosphate-potassium fertilizers. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(5): 1911-1914.
- [10] Weggler K, McLaughlin M J, Graham R D. Effect of chloride in soil solution on the plant availability of biosolid-borne cadmium. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2): 496-504.
- [11] Hattori H, Kuniyasu K, Chiba K, Chino M. Effect of chloride application and low soil pH on cadmium uptake from soil by plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52(1): 89-94.
- [12] McLaughlin M J, Lambregts R M, Smolders E, Smart M K. Effects of sulfate on cadmium uptake by swiss chard: II. Effects due to sulfate addition to soil. *Plant and Soil*, 1998, 202(2): 217-222.

- [13] Zhang G Y, Brümmer G W, Zhang X N. Effect of sulfate on adsorption of zinc and cadmium by variable charge soils. *Pedosphere*, 1998, 8(3): 245-250.
- [14] Zhao Z Q, Zhu Y G, Li H Y, Smith S E, Smith F A. Effects of forms and rates of potassium fertilizers on cadmium uptake by two cultivars of spring wheat (*Triticum aestivum*, L.). *Environment International*, 2003, 29(7): 973-978.
- [15] Chen S, Sun L N, Sun T H, Chao L, Guo G L. Interaction between cadmium, lead and potassium fertilizer (K_2SO_4) in a soil-plant system. *Environmental Geochemistry and Health*, 2007, 29(5): 435-446.
- [16] Tessier A, Campbell P G, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844-851.
- [17] Zeng X F, Zhang K, Yu X M, Wang Z W. Adsorption behaviors of Cd on Montmorillonite/Illite in alkaline saline conditions. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2251-2257.
- [18] Wang Z W, Zeng X F, Yu X M, Zhnag H, Li Z J, Di J. Adsorption behaviors of Cd^{2+} on Fe_2O_3/MnO_2 and the effects of coexisting ions under alkaline conditions. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2010, 29(2): 197-203.
- [19] O'connor G A, O'connor C, Cline G R. Sorption of cadmium by calcareous soils: influence of solution composition. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(6): 1244-1247.

参考文献:

- [1] 郑鹤龄, 郑标伟, 陆文龙. 不同污水对土壤重金属、作物产量及品质的影响. *天津农业科学*, 2001, 7(2): 17-20.
- [2] 毛建华, 陆文龙. 天津市农田土壤污染现状与防治对策. *云南环境科学*, 2001, 19(S1): 96-98.
- [3] 王祖伟, 李宗梅, 王景刚, 刘佐, 刘景珍. 天津污灌区土壤重金属含量与理化性质对小麦吸收重金属的影响. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1406-1410.
- [4] 王祖伟, 张辉. 天津污灌区土壤重金属污染环境质量与环境效应. *生态环境*, 2005, 14(2): 211-213.
- [17] 曾祥峰, 张凯, 于晓曼, 王祖伟. 碱性盐化条件下蒙脱石和伊利石对镉的吸附特征研究. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6): 2251-2257.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (<i>Eumeces chinensis</i>): testing the maternal manipulation hypothesis	LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)
Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (<i>Tamias sibiricus</i>)	SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)
Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study	LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)
Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese <i>Anser indicus</i> wintering at Caohai Lake of Guizhou, China	YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)
Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau	CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)
Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China	GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)
Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach	REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)
Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province	ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)
Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method	LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)
Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study	ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)
Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing	FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)
The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island	WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)
Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province	QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)
The dynamic variation of maize (<i>Setaria mays</i> L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau	WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)
Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities	LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)
Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land	XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)
Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (<i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.)	FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)
Photosynthetic response of different ecotype of <i>Illicium lanceolatum</i> seedlings to drought stress and rewating	CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)
Seasonal variations in the stems of <i>Larix principis-rupprechtii</i> at the treeline of the Luya Mountains	DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)
Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China	SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)
Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of <i>Catalpa bungei</i> clones	WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)
Effects of fire damages on <i>Larix gmelinii</i> radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China	WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)
A model for water consumption by mountain jujube pear-like	XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)
Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants	ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元