

贺前锋, 桂娟, 刘代欢, 等. 淹水稻田中土壤性质的变化及其对土壤镉活性影响的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2260-2268.
HE Qian-feng, GUI Juan, LIU Dai-huan, et al. Research progress of soil property's changes and its impacts on soil cadmium activity in flooded paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12): 2260-2268.

淹水稻田中土壤性质的变化及其 对土壤镉活性影响的研究进展

贺前锋, 桂娟, 刘代欢*, 李学钊, 李鹏祥, 权胜祥

(湖南永清环保研究院有限责任公司, 长沙 410330)

摘要:近年来,面对稻田土壤镉(Cd)污染日益严重和“镉米”事件频发的现状,许多专家对稻田土壤镉的活性变化及其污染治理进行了大量研究,大多数研究表明淹水能降低稻田土壤Cd的活性和稻米Cd的含量。但是,由于稻田土壤自身的复杂性以及影响因素的多样性、综合性和不确定性,尤其是在淹水条件下,稻田土壤性质[土壤胶体和团聚体、pH和 $E_h(pH)$ 、阴离子和阳离子、铁锰氧化物和含硫化合物、有机质和可溶性有机物、碳酸盐和磷酸盐、根系分泌物和微生物等]发生了复杂变化,使得Cd活性变化更加复杂,Cd污染的防控和修复更加困难。通过综述淹水条件下稻田土壤性质的变化,阐述了这些变化对土壤中Cd活性的影响,同时对该领域的研究方向进行了展望,旨在为实现Cd污染稻田的农业安全生产提供理论依据,并为Cd污染土壤的修复治理提供参考。

关键词:淹水;稻田;土壤性质;镉活性;镉污染

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)12-2260-09 doi:10.11654/jaes.2016-0892

Research progress of soil property's changes and its impacts on soil cadmium activity in flooded paddy field

HE Qian-feng, GUI Juan, LIU Dai-huan*, LI Xue-zhao, LI Peng-xiang, QUAN Sheng-xiang

(Hunan Yonker Environmental Protection Research Institute Co., Ltd., Changsha 410330, China)

Abstract: Soil is the first line of defense to protect the crop safety, and the material basis for the human food quality and ecological environmental security. Since soil cadmium(Cd) pollution in paddy field and “Cd-polluted rice” issue become more severe in recent years, more and more researches focus on the changes of soil Cd activity and its pollution restoration. Previous results showed that submerged condition could help decrease soil Cd activity in soil and also lower the Cd content in rice. However, due to the complexity of the soil, and the diversity, comprehensiveness and uncertainty of external factors, especially under submerged condition, soil properties may have complex change. On one hand, the adsorption of soil colloid, aggregate, iron/manganese oxides, organic matters and phosphate, the rise of soil pH and reduction of E_h , the obstruction of oxide plaque on root surface, the coprecipitation of sulfide, the reduction of reducing bacteria, and the chelation of root exudates could lead to reduce Cd activity. On the other hand, the coordination of anions, the dissolution of iron/manganese oxides and carbonates, the adsorption of oxide plaque, the chelation of DOM, and activation of root exudates could increase Cd activity. These changes make the movement and transformation of Cd more complex, which may increase difficulty of Cd remediation in soil. In this paper, we summarized the changes of soil property and their effects on soil Cd activity in flooded paddy field, as well as pointed out future research directions. This paper could help provide theoretical basis for the agricultural production safety and references for Cd pollution remediation in paddy field.

Keywords: flooding; paddy soil; soil property; Cd activity; Cd pollution

收稿日期:2016-07-06

基金项目:湖南省科技计划项目(2016TP2018)

作者简介:贺前锋(1979—),男,硕士,工程师,主要研究方向为环境污染控制。E-mail:qianfeng.he@yonker.com.cn

*通信作者:刘代欢 E-mail:36882233@qq.com

近年来,由于污水灌溉、农药化肥施用、矿山开采和汽车尾气排放等,我国耕地土壤重金属污染形势日趋严峻^[1]。2014 年,全国土壤污染公报显示,全国中重度污染耕地约 333 万 hm^2 ,耕地土壤点位超标率高达 19.4%,其中以镉(Cd)污染最为突出,样点超标率达 7.0%,每年生产的农产品中 Cd 含量超标的已超过 $14.6 \times 10^8 \text{ kg}$ ^[2],因 Cd 污染引起的粮食安全问题屡见不鲜^[3]。水稻是我国第一大粮食作物,约有 60%以上的人口以稻米为主食^[4-5]。稻米质量安全关系到国计民生,加快 Cd 污染稻田修复、保障粮食安全已迫在眉睫。

Cd 主要通过土壤-作物系统进入人体,而稻田土壤 Cd 的生物有效性即活性是影响重金属 Cd 进入人体的主要因素^[6]。大量研究表明,稻米 Cd 含量与土壤中有效态 Cd 含量密切相关^[1,7]。土壤有效态 Cd 是作物吸收的主要形式,主要包括水溶性 Cd 和交换态 Cd。因此,降低土壤 Cd 活性是避免 Cd 通过食物链进入人体,进而危害人类健康的关键。

水分管理为 Cd 污染控制的主要农艺调控措施之一。有研究表明,在 Cd 污染的稻田采用传统的全生育期深水淹灌比湿润灌溉或间歇灌溉等节水措施更有利于降低土壤 Cd 生物有效性和稻米 Cd 含量^[8-9]。土壤胶体和团聚体、土壤 pH 和 Eh、阴阳离子、铁锰氧化物和硫化物、有机质和可溶性有机物、碳酸盐和磷酸盐、根系分泌物和微生物等性质是影响 Cd 生物有效性的重要因素^[1,10]。在淹水条件下,这些因素会发生复杂的化学变化,进而影响土壤 Cd 的形态分配^[11]。目前,很多学者对淹水还原条件下土壤 Cd 生物有效性及其制约机理进行了研究^[11-12]。大量研究表明,随土壤还原作用的增强,土壤 Cd 活性形态的含量降低^[13-14]。但是,葛滢等^[15]采用黄棕壤进行淹水培养实验,结果表明还原作用越强,土壤有效 Cd 含量越高。可见,由于稻田土壤性质的不同以及各因素的多样性和复杂性,淹水对土壤 Cd 活性转化具有上升和下降的双向影响。因此,探明淹水条件土壤 Cd 活性变化需要综合考虑以上各因素的影响。

本文综述了淹水条件下稻田土壤性质[土壤团聚体和胶体、pH 和 Eh(pe+pH)、阴离子和阳离子、铁锰氧化物和含硫化物、有机质和可溶性有机物、碳酸盐和磷酸盐、根系分泌物和微生物等]的变化,并阐述了土壤性质的变化对土壤中 Cd 活性的影响,旨在为淹水稻田土壤中 Cd 活性的变化规律及其制约机理的研究和 Cd 污染稻田的治理与粮食的安全生产提供理论依据和技术支撑。

1 土壤性质的变化及其对 Cd 活性的影响

1.1 胶体和团聚体的变化及其对镉活性的影响

1.1.1 胶体变化及其对 Cd 活性的影响

土壤胶体是指粒径范围在 $1 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ 之间的一类细微粒物质,可分为无机胶体、有机胶体和无机-有机复合胶体。胶体具有大量的比表面积和丰富的表面电荷,对 Cd 有强的吸附能力,对 Cd 的生物有效性有重要影响^[16]。当土壤淹水后,土壤胶体会从土壤基质释放到土壤溶液中或溶液中的土壤胶体沉积到土壤基质上。有研究表明,土壤淹水后,土壤阳离子浓度降低,与 Cd 对胶体吸附的竞争减小,促进土壤胶体对 Cd 的吸附^[11,17]。

1.1.2 团聚体变化及其对 Cd 活性的影响

土壤团聚体是土壤结构最基本的物质和功能单元。不同粒径的团聚体颗粒组成、有机质、氧化铁及矿物质结合方式各异,对重金属的束缚能力及生物有效性不同^[18]。龚仓等^[19]研究表明,随团聚体粒径的增加 Cd 在团聚体中的富集呈减弱的趋势,且主要分布在粉-黏团聚体。郁红艳等^[20]研究了农田土壤水稳定性团聚体中 Cd 的分布规律,表明总 Cd 和各化学形态 Cd 主要存在库是大团聚体和微小团聚体。

有机质是土壤团聚体的胶结物质,与团聚体的形成和功能紧密相关^[21]。有研究表明,土壤中的有机碳含量随团聚体粒径减小而升高,Cd 分布与颗粒有机碳含量正相关^[22]。淹水后,土壤有机质累积,水稳定性团聚体更加稳定,对 Cd 的吸附增强^[23]。

1.2 pH、Eh 和 pe+pH 的变化及其对 Cd 活性的影响

1.2.1 pH 和 Eh 变化及其对 Cd 活性的影响

淹水使稻田土壤与空气隔绝,随土壤中微生物的代谢,土壤中氧气迅速减少;微生物分解土壤有机质释放大量的电子和质子,使硝态氮、铁锰氧化物等氧化性物质接受电子发生还原,同时也消耗大量的质子,导致 pH 值向中性靠拢,即酸性土壤 pH 值升高及碱性土壤 pH 值降低,而氧化还原电位(Eh)在两种土壤中均下降,尤其在淹水初期,变化显著^[24-25]。根据黄丹丹等^[26]研究结果作出淹水过程中酸性红壤土和碱性潮黄土 pH 和 Eh 的变化图形,如图 1 所示。

pH 变化跟土壤本底性质相关。淹水条件下,酸性土壤 pH 之所以升高,主要是因为土壤铁氧化物的还原溶解作用,而碱性土壤 pH 降低则主要由土壤中大量碳酸盐溶解作用以及土壤中 CO_2 的累积所导致^[27]。土壤 pH 值能够影响土壤对 Cd 的吸附,吸附曲线可

分为3个区间:低pH值低吸附区,中pH值稳定增长区及高pH值强吸附区^[28]。pH值小于3.2时,Cd的吸附率很低;pH在4.5~7.2时,Cd的吸附率与pH呈显著正相关;pH大于7.5时,Cd的吸附率接近100%,主要以氧化物结合态及残渣态形式存在^[28]。大量研究也表明,土壤pH与稻谷Cd含量成反比^[26,29]。

Eh值反映土壤氧化还原程度。一般认为在pH为7的土壤中,Eh值高于125 mV时,土壤以氧化状态为主;Eh值低于125 mV时,土壤以还原状态为主^[30]。稻田淹水时,土壤耕作层水分饱和,土壤处于还原状态。在低Eh值下,土壤Cd更易于由有效态转化为稳定态,从而降低Cd的活性^[31]。

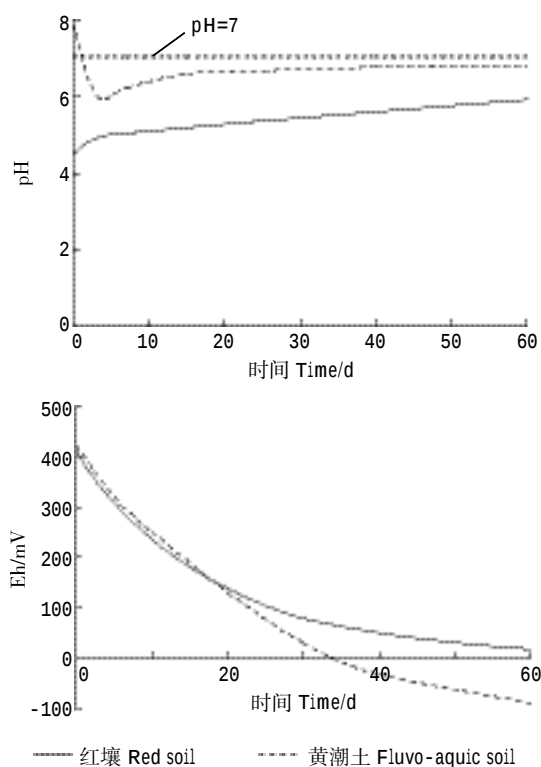


图1 土壤淹水后pH和Eh变化

Figure 1 The change of pH and Eh of the soil after flooding

1.2.2 pe+pH的变化及其对Cd活性的影响

pe表示参加反应的电子活度的负对数,pH表示参加反应的质子活度的负对数。氧化还原反应有电子的转移和质子的参与,因而pe+pH能更好地表示参加化学和电化学反应的反应物与生成物的浓度变化^[26]。pe+pH值越小,表示还原势越强,pe+pH值越大则氧化势越强。土壤淹水后,土壤还原程度加强,pe+pH值下降,且土壤类型不同,下降的程度也不同^[32]。李义纯等^[32]研究表明(图2),在淹水过程中黄潮土比

红壤土pe+pH下降程度更大。

pe+pH值可用来表征土壤铁矿物的形态转化,其变化影响土壤Cd的形态^[33]。淹水使酸性土壤pe+pH下降,Cd活性降低,主要受土壤铁氧化物控制;淹水使碱性土壤pe+pH下降,Cd活性降低,主要受土壤碳酸铁控制^[33]。随着pe+pH下降,土壤Cd由可交换态转化成其他形态,且Cd固相组分逐级发生变化^[33]。在pe+pH为14.16~11.34、pH<5.0时,土壤Cd组分以可交换态Cd为主;在pe+pH为14.16~6.04、pH>5.0时,土壤Cd组分以碳酸盐态和氧化物结合态为主;在pe+pH为6.48~5.38、pH>5.78时,土壤Cd组分以有机结合态为主;pe+pH<5时,土壤Cd组分以硫化物为主^[34]。

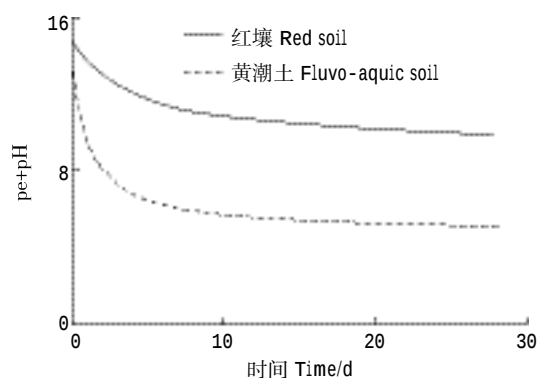


图2 土壤淹水后pe+pH变化

Figure 2 The change of pe+pH of the soil after flooding

1.3 阴离子和阳离子的变化及其对Cd活性的影响

1.3.1 阴离子的变化及其对Cd活性的影响

淹水稻田的阴离子主要有 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- ^[10],均能与 Cd^{2+} 形成可溶性离子化合物。 Cl^- 属于非专性吸附的阴离子,不易被土壤胶体表面吸附,且和Cd之间有极强的络合能力。农田灌溉会带入 Cl^- 于土壤中^[35], Cl^- 与 Cd^{2+} 的配位可以促进土壤Cd的释放,土壤Cd溶解度增大,进而影响土壤Cd的活性。因此, Cl^- 存在时Cd不易被土壤吸附,且吸附后也容易被解吸下来。陈苏等^[36]研究表明,随溶液中 Cl^- 浓度的增大,土壤Cd的解吸率提高,其原因可归结为 Cl^- 与 Cd^{2+} 的配合促进了 Cd^{2+} 从土壤表面的解吸。

SO_4^{2-} 属于专性吸附的阴离子,也是酸雨的主要成分,不仅可以通过内、外层络合作用增加表面负电荷,还可以与Cd形成水溶性络合物,从而促进 SO_4^{2-} 对Cd的结合^[37]。甲卡拉铁等^[38]研究表明,施加硫酸钾肥料可抑制水稻对Cd的吸收。李国臣^[39]研究酸雨中 SO_4^{2-} 对

土壤 Cd 吸附的影响结果表明,随 SO_4^{2-} 浓度的增大,土壤对 Cd 的吸附量减少,推测原因是 SO_4^{2-} 以硫酸形式存在, SO_4^{2-} 浓度的增大,造成硫酸浓度的增大,导致土壤 pH 值下降,从而影响土壤对 Cd 的吸附量。

NO_3^- 属于非专性吸附阴离子,稻田淹水灌溉,土壤硝态氮淋失增大;淹水厌氧环境下,土壤处于还原状态,有利于反硝化作用的进行,土壤 NO_3^- 含量减少^[40],进而与 Cd^{2+} 的配位减少,Cd 活性降低。

1.3.2 阳离子的变化及其对 Cd 活性的影响

土壤阳离子主要有 K^+ 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} ^[10]。土壤阳离子与 Cd^{2+} 之间存在土壤表面吸附点位的竞争。在淹水条件下,非变价元素 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 含量基本不变但饱和度降低,因此与 Cd^{2+} 对土壤表面吸附点的竞争减少,Cd 活性降低。变价元素 Fe 由于氧化铁(Ⅲ)的还原溶解造成 $\text{Fe}(\text{Ⅱ})$ 浓度的增加,而土壤铁形态的变化影响 Cd 的铁锰结合态的变化,从而控制 Cd 活性的变化。陈莉娜等^[41]研究淹水还原作用对红壤 Cd 生物有效性的影响,水溶性 $\text{Fe}(\text{Ⅱ})$ 浓度在淹水前期增大而后期降低,Cd 的生物有效性在淹水初期高于后期。

1.4 铁锰氧化物和含硫化合物的变化及其对 Cd 活性的影响

1.4.1 铁锰氧化物的变化及其对 Cd 活性的影响

水稻土壤中最丰富的金属氧化物是铁氧化物,包括晶型的赤铁矿、磁铁矿、针铁矿、纤铁矿和无定形的水铁矿,且还原溶解作用依次降低。土壤淹水后,铁氧化物发生还原溶解,水溶性 Fe^{2+} 浓度增加,同时, Fe^{2+} 形成 FeCO_3 、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$ 等沉淀^[42]。尤其在有机质和 SO_4^{2-} 丰富的土壤, Fe^{2+} 与 S^{2-} 反应形成黑色 FeS ^[43]。这些沉淀又被氧化为溶解度较低的无定形氧化铁,导致无定形氧化铁浓度增加^[42]。

土壤铁氧化物的变化是影响 Cd 活性的重要因素。一方面,铁氧化物具有较大的比表面积和可变表面电荷,对土壤中的 Cd 有很大的吸附容量^[44],因此在淹水条件下,铁氧化物还原溶解也是其自身对 Cd 的释放;另一方面,不同的铁氧化物具有不同的表面活性吸附点位,对 Cd 的吸附也不同^[45],因此 Fe 形态的再分配决定了 Cd 形态的再分配。有研究表明,土壤淹水后可交换态 Cd 占总 Cd 的比例明显下降,且下降的部分向活性较低的晶形铁氧化物结合态转化^[46]。

锰的各种氧化态随化学价的升高,碱性减弱而酸性增强。低价的 MnO 、 Mn_2O_3 属碱性,4 价的 MnO_2 属中性,高价的 MnO_3 、 Mn_2O_7 为酸性。在酸性土壤中,因

为淹水引起缺氧造成氧化还原点位较低时,氧化锰氧化成易溶于水的 $\text{Mn}(\text{Ⅱ})$ 。Fulda 等^[47]研究认为,在淹水还原环境,溶解还原的 Mn^{2+} 阻止水稻对 Cd 的吸收。Kashem 等^[48]研究发现,淹水后交换态 Cd 的含量明显下降而铁锰氧化物结合态 Cd 的含量显著增加,推测其主要原因是新形成的铁锰矿物对 Cd 的吸附,导致 Cd 由交换态向铁锰氧化物结合态转化。

另外,值得强调的是,在淹水厌氧环境下,铁锰氧化物在水稻根表形成一种红色或红棕色氧化物胶膜^[49]。此胶膜对土壤 Cd 具有吸附和吸收作用,从而促进^[50]、阻止^[51]或者不影响^[52]水稻对土壤 Cd 的吸收,其作用方向和程度主要取决于膜的形成量、老化程度以及水稻品种对 Cd 的富集和转运能力^[53]。可见,淹水厌氧环境可促进根系铁锰氧化物的形成,而此膜对土壤 Cd 活性的影响受多个因素的限制。

1.4.2 含硫化合物的变化及其对镉活性的影响

稻田淹水条件下,土壤形成还原环境促进土壤中挥发性硫化物(AVS,如 H_2S)或者硫酸盐(SO_4^{2-})还原,生成的 S^{2-} 或 HS^- 与土壤中 Cd 形成稳定、难溶的 CdS 沉淀。因此,CdS 的生成可显著降低土壤中 Cd 的活性^[8,54]。有研究表明,当水稻土壤淹水 5 周时, S^{2-} 和 Cd^{2+} 的离子活度积接近 CdS 的溶度积,表明淹水土壤中有 CdS 沉淀生成^[55]。刘邵兵等^[8]研究表明,Cd 污染稻田土壤中有效硫及其还原性 S^{2-} 的形成是显著影响水稻吸收累积 Cd 的一个间接因子。也有研究表明,在还原性强的土壤中,当 $\text{pe}+\text{pH}$ 小于 5 时,才有可能生成 CdS^[26]。但目前关于 Cd 与硫化物之间的作用机制并不清楚。一方面,硫化物提供的 S^{2-} 与 Cd^{2+} 结合生成 CdS,从而降低土壤 Cd 的活性;另一方面, S^{2-} 与土壤铁形成铁的硫化物, Cd^{2+} 再与铁的硫化物发生共沉淀从而导致 Cd 活性的降低^[56-57]。

1.5 有机质和可溶性有机物的变化及其对 Cd 活性的影响

1.5.1 有机质的变化及其对 Cd 活性的影响

与通气良好的土壤相比,淹水土壤中 O_2 的减少,可降低有机质的分解速率,从而导致有机质的累积^[58]。一方面,有机质通过改变土壤负电荷量、pH 等理化性质以提高土壤对 Cd 的吸附;另一方面,有机质具有大量的功能团,对 Cd^{2+} 具有螯合作用,可导致 Cd 活性降低^[59]。但有机质对土壤 Cd 的影响不稳定,随着有机质的分解,吸附的 Cd 会释放出来,并向交换态 Cd 转化,提高 Cd 的活性^[60]。

1.5.2 可溶性有机物的变化及其对 Cd 活性的影响

对于稻田生态系统,淹水后土壤有机质的分解使可溶性有机物(DOM)大量溶出^[61]。DOM具有比土壤更多的吸附点位,可以作为土壤重金属的“配位体”和“迁移载体”^[62]。它可以提供一系列整合能力不同的结合点位与Cd螯合,形成有机-重金属离子配合物,从而提高土壤中Cd的溶解性^[63]。有研究发现,DOM与Cd²⁺螯合形成的水溶性络合物,可提高Cd的活性和迁移能力,降低土壤对Cd的吸附^[64]。也有报道认为,Cd溶解度增大的原因在于DOM通过与Cd²⁺竞争土壤表面的吸附点位,从而减少土壤对Cd²⁺的吸附^[65]。但也有相反的研究发现,在较强酸性土壤中,土壤带有很强正电荷,土壤对DOM的吸附致使自身的负电荷增加,进而促进土壤对Cd²⁺的吸附。同时,DOM在Cd²⁺与土壤之间的螯合桥梁作用也会增大Cd²⁺在土壤表面的吸附量^[66],导致Cd的溶解度减小。DOM对土壤Cd的活性有增大和减小的双重影响,可能与土壤类型和DOM种类等有关。

1.6 碳酸盐和磷酸盐的变化及其对Cd活性的影响

1.6.1 碳酸盐的变化及其对Cd活性的影响

在稻田土壤中,主要的碳酸盐有Na₂CO₃、CaCO₃、MnCO₃和FeCO₃,且一般存在于中性或碱性土壤中。许多研究表明,碳酸盐对Cd有较强的吸附能力,且CdCO₃的形成本身就能降低土壤中Cd的溶解度^[10,67]。

当稻田淹水时,碳酸盐溶解可导致水体pH下降和大量盐基离子溶出^[68]。由于此过程相对缓慢,碳酸盐一直被视为淹水土壤的“定时炸弹”。水体pH下降使土壤表面负电荷数减少,进而导致土壤对Cd²⁺的吸附量减少;同时,溶出的大量盐基离子与Cd²⁺竞争土壤表面吸附点位,也导致土壤对Cd²⁺的吸附量减少,Cd活性提高^[10]。因此,在碱性或中性稻田土壤中,碳酸盐通过影响土-水体系的pH和溶液中盐基离子的含量,间接影响土壤中Cd的活性。

1.6.2 磷酸盐的变化及其对Cd活性的影响

土壤中的磷酸盐可分为与Fe、Al、Ca等结合的化合态磷酸盐和吸附在有机物或黏土矿物表面的吸附态磷酸盐。磷酸盐稳定Cd的作用机理主要是表面直接吸附、诱导吸附或者与Cd生成沉淀或矿物等复杂反应^[69]。

土壤淹水后化合态磷酸盐溶解。由于相比其他磷酸盐,磷酸镉盐的溶解度较低,在不同的pH条件下,磷酸盐与Cd²⁺结合可生成Cd(H₂PO₄)₂、CdHPO₄或Cd₃(PO₄)₂更稳定的化合物,土壤Cd活性降低^[70]。此外,有研究表明,磷酸盐被新形成的具有巨大表面

积和更多吸附位点的无定形铁氧化物所吸附,从而增加土壤磷酸盐的吸附量,引起土壤表面负电荷增加,诱导Cd的吸附增加^[71]。但有研究表明淹水影响水稻土对磷酸盐的吸附不是连续的,淹水后期在一个特定的吸附磷酸盐水平,还原状态土壤溶液中磷酸盐溶解大于吸附,导致Cd的溶解增加^[72]。

1.7 根系化合物和微生物的变化及其对Cd活性的影响

1.7.1 根系化合物的变化及其对Cd活性的影响

根系分泌物包括低分子量化合物(氨基酸、有机酸等)和高分子量化合物(类金属蛋白、粘胶等)。这些化合物可通过酸化、螯合、络合以及活化等过程改变土壤Cd的形态,从而影响Cd的活性^[73]。

淹水土壤通透性、pH等性质的变化都会影响根系分泌物活化Cd。在淹水条件下,根系分泌物可以通过分泌质子或还原性有机酸,使根际pH降低,酸化土壤中不溶态Cd^[74]。水稻根系的分泌物也能溶解铁锰氧化物膜,从而影响水稻对Cd的吸收^[75]。此外,根系分泌物中某些金属结合蛋白和某些特殊的有机酸(如苹果酸、柠檬酸)也能螯合Cd,形成稳定的螯合物。例如根分泌的粘胶物质与根际的Cd²⁺结合,形成稳定的螯合体,将污染物Cd固定在土壤中^[76]。

1.7.2 微生物的变化及其对Cd活性的影响

微生物对Cd的修复机理主要是生物吸附和生物转化^[77]。此外,微生物还可通过分泌质子、有机酸、铁载体等物质或者将大分子分泌物转化成小分子化合物,活化土壤Cd^[78]。

土壤淹水后,微生物群落结构发生变化^[61]。淹水还原条件有利于厌氧型微生物的生长,如硫酸盐还原菌和异化铁还原菌等。硫酸盐还原菌可将土壤中的SO₄²⁻还原成S²⁻,S²⁻与Cd²⁺结合生成CdS沉淀,使土壤Cd活性降低^[79]。异化铁还原菌在厌氧生长环境下能结合并氧化有机物以其作为电子供体,同时将Fe(Ⅲ)还原成Fe(Ⅱ)。黄森等^[80]研究了淹水时间对水稻土中4种异化铁还原功能菌丰度的影响,结果表明Fe(Ⅱ)浓度在整个淹水培养期增加。在淹水前期,同属发酵型的梭菌和芽孢杆菌丰度上升,对铁还原的贡献较大;在培养后期,地杆菌和厌氧粘粉菌成为Fe(Ⅱ)浓度持续增长的重要因素。因此,异化铁还原菌通过影响Fe的还原而影响对Cd的吸附。

2 总结与展望

综上所述,由于淹水稻田土壤自身的复杂性、影

响因素的多样性、不确定性以及各因素之间的综合性,有关淹水稻田土壤性质的变化及其对土壤 Cd 活性影响的研究常出现不同的研究结果。一方面,淹水条件下,土壤胶体、团聚体、铁锰矿物、固相有机质、磷酸盐对 Cd 的吸附、酸性土壤 pH 的升高和氧化还原电位(Eh)的降低、根际铁锰氧化膜的阻碍、硫化物与 Cd²⁺的共沉淀、还原菌的还原作用以及根系分泌物的螯合作用都可能导致 Cd 活性降低;另一方面,阴离子(如 Cl⁻和 SO₄²⁻)与 Cd²⁺之间的配位、铁锰矿物和碳酸盐的溶解、根际氧化膜的吸附、DOM 与 Cd²⁺的螯合以及根系分泌物的活化作用都可能导致 Cd 活性升高。以上制约因素对土壤 Cd 活性变化影响的不同可能跟稻田生态系统的复杂环境有关,也给土壤 Cd 污染治理的研究带来困难。

目前,大量的研究集中在淹水对土壤理化性质的影响方面,缺乏结合生物指标以及不同生长期 Cd 在土壤-作物系统中迁移转化的系统性研究。为进一步探索淹水稻田土壤中 Cd 活性变化的机理,为稻田 Cd 污染控制和治理提供科学依据,今后的研究可从以下三个方面来开展:首先,结合作物生长季节对土壤多种指标,尤其是生物指标(如藻类等小型微生物)进行监测,研究不同水稻生长期淹水稻田土壤性质的变化及其对 Cd 活性的影响,揭示影响稻田土壤 Cd 形态和活性变化的主导因素和内在调控机制。其次,研究淹水条件下 Cd 在稻田土壤-作物中的迁移,揭示污染稻田土壤-作物系统 Cd 的迁移转化机理。第三,将国内外先进仪器和分析手段(原子力显微技术、X 射线荧光光谱原位监测技术、污染源解析技术等)应用于研究,在不破坏土壤结构的前提下对土壤重金属污染进行快速、精准检测,这对加快农田生态系统 Cd 污染的防控与修复具有重要意义。

参考文献:

- [1] 宋文恩, 陈世宝, 唐杰伟. 稻田生态系统中镉污染及环境风险管理[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9):1669-1678.
SONG Wen-en, CHEN Shi-bao, TANG Jie-wei. Cadmium pollution and its environmental risk management in rice ecosystem[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(9):1669-1678.
- [2] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 2014[EB/OL]. [2014-04-17]. http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/20140417_1312998.htm.
Ministry of Environmental Protection and the Ministry of Land. National survey of soil pollution bulletin 2014[EB/OL]. [2014-04-17]. http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/20140417_1312998.htm.
- [3] Bian R, Joseph S, Cui L, et al. A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 272: 121-128.
- [4] 国家统计局. 中国统计年鉴 2012 [M/OL]. [2013-07-13]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsi/20130713-1337236.html>
Nation Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistics year 2012[M/OL]. [2013-07-13]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsi/20130713-1337236.html>
- [5] 于红艳, 刘世义. 我国水稻产业发展现状、趋势及对策[J]. 农村经济与科技, 2016, 27(9): 7-9.
YU Hong-yan, LIU Shi-yi. The situation of rice production in China[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2016, 27(9): 7-9.
- [6] 崔岩山, 陈晓晨. 土壤镉的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 403-408.
CUI Yan-shan, CHEN Xiao-chen. Bioaccessibility of soil cadmium and its health risk assessment[J]. Environmental Science, 2010, 31(2): 403-408.
- [7] 张建辉, 王芳斌, 汪霞丽, 等. 湖南稻米镉和土壤镉锌的关系分析[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 156-160.
ZHANG Jian-hui, WANG Fang-bin, WANG Xia-li, et al. Relationship between Cd and Zn in rice grain[J]. Food Science, 2015, 36(22): 156-160.
- [8] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭 华, 等. 水分管理模式对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 908-914.
LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects and action mechanisms of different water management modes on rice Cd absorption and accumulation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 908-914.
- [9] 彭世彰, 乔振芳, 徐俊增. 控制灌溉模式对稻田土壤-植物系统镉和铬累积的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 94-99.
PENG Shi-zhang, QIAO Zhen-fang, XU Jun-zeng. Effect of controlled irrigation on accumulation of heavy metal Cd, Cr in soil-plant system in rice paddy[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 94-99.
- [10] 李义纯, 葛 滢. 淹水土壤中镉活性变化及其制约机理[J]. 土壤学报, 2010, 48(4): 840-846.
LI Yi-chun, GE Ying. Variation of cadmium activity in flooded soils and its controlling mechanisms[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 48(4): 840-846.
- [11] 陈莉娜. 淹水还原作用对土壤镉生物有效性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
CHEN Li-na. Effect of submergence on the bioavailability of Cd in soils[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [12] Römken P F, Brus D J, Guo H Y, et al. Impact of model uncertainty on soil quality standards for cadmium in rice paddy fields[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(17): 3098-3105.
- [13] Hu P J, Huang J X, Ouyang Y, et al. Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2013, 35(6): 767-778.
- [14] 邝美娟, 王翠红, 曾 理, 等. 淹水对湖南 3 种典型水稻土镉的形态分级影响[J]. 湖南农业科学, 2016(5): 28-34.
KUANG Mei-juan, WANG Cui-hong, ZENG Li, et al. Morphological

- classification effect of cadmium of waterlogging on 3 typical paddy soils in Hunan[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016(5):28-34.
- [15] 葛 滢, 李义纯, 周权锁, 等. 淹水还原作用下土壤镉的吸附与解吸特征的初步探讨[J]. *生态环境*, 2006, 15(4):730-734.
- GE Ying, LI Yi-chun, ZHOU Quan-suo, et al. Preliminary investigation on adsorption and desorption of Cd in soil with different reduction states[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(4):730-734.
- [16] 刘冠男, 刘新会. 土壤胶体对重金属迁移行为的影响[J]. *环境化学*, 2013, 32(7):1308-1317.
- LIU Guan-nan, LIU Xin-hui. A review on the impact of soil colloids on heavy metal transport[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(7):1308-1317.
- [17] Zhao L L, Zhou L X. Cadmium transport mediated by soil colloid and dissolved organic matter: A field study[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(1):106-115.
- [18] Wang J G, Yang W, Yu B, et al. Estimating the influence of related soil properties on macro- and micro-aggregate stability in ultisols of south-central China[J]. *Catena*, 2016, 137:545-553.
- [19] 龚 仓, 许殿斗, 成杭新, 等. 典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义[J]. *环境科学*, 2013, 34(4):1094-1100.
- GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, et al. Distribution characteristics and environmental significance of heavy metal in soil particle size fractions from tropical forests in China[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(4):1094-1100.
- [20] 郁红艳, 阮文权, 杨广龙. 冶炼厂周边农田土壤水稳定性团聚体中镉的分布规律[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(1):80-85.
- YU Hong-yan, RUAN Wen-quan, YANG Guang-long. Distribution of cadmium in soil water-stable aggregates in farmland surrounding a smelter[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1):80-85.
- [21] Wang H, Guan D S, Zhang R D, et al. Soil aggregates and organic carbon affected by the land use change from rice paddy to vegetable field[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 70:206-211.
- [22] 李璐娟, 夏建国, 刘 郎. 紫色土有机质对团聚体吸附-解吸 Pb^{2+} 的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5):1274-1383.
- LI Lu-juan, XIA Jian-guo, LIU Lang. Effect of purple soil organic matter on adsorption and desorption of Pb^{2+} by aggregates[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(5):1274-1283.
- [23] 龚 仓, 马玲玲, 成杭新, 等. 典型农耕地黑土和沼泽土团聚体颗粒中重金属的分布特征解析[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(9):1635-1639.
- GONG Cang, MA Ling-ling, CHENG Hang-xin, et al. Characterization of the particle size fractionation associated heavy metals in typical black and bog arable soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9):1635-1639.
- [24] Kogel-Knabner I, Amelung W, Cao Z, et al. Biogeochemistry of paddy soils[J]. *Geoderma*, 2010, 157:1-14.
- [25] 单世平, 黄 军, 刘前刚. 淹水条件对稻田土壤肥力及理化性质的影响研究进展[J]. *农学报*, 2014, 4(10):46-49.
- SHAN Shi-ping, HUANG Jun, LIU Qian-gang. Progress of effect on the physiochemical properties and fertility of paddy soil under submerged conditions[J]. *Journal of Agriculture*, 2014, 4(10):46-49.
- [26] 黄丹丹. 淹水和有机质对土壤镉活性消长行为的影响及其机理的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2008.
- HUANG Dan-dan. Influence of submergence and organic matter addition on the variation of cadmium in soils[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.
- [27] 金元军. 土壤与水稻[M]. 杭州:浙江科学技术出版社, 1981:89-127.
- JIN Yuan-jun. Soil and rice[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1981:89-127.
- [28] 李程峰, 刘云国, 曾光明, 等. pH 值影响 Cd 在红壤中吸附行为的实验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(1):84-88.
- LI Cheng-feng, LIU Yun-guo, ZENG Guang-ming, et al. Effect of pH on cadmium adsorption behavior in red soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1):84-88.
- [29] Thomas B, Ruben K, Andreas K, et al. Biogeochemical redox processes and their impact on contaminant dynamics[J]. *Environment Science Technology*, 2010, 44(1):15-23.
- [30] Rafiq M T, Aziz R, Yang X E, et al. Cadmium phytoavailability to rice (*Oryza sativa* L.) grown in representative Chinese soils: A model to improve soil environmental quality guidelines for food safety[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 103:101-107.
- [31] 丁昌璞. 中国自然、旱作土壤、水稻土的氧化还原状况和特点[J]. *土壤学报*, 2008, 45(1):66-75.
- DING Chang-pu. Oxidation-reduction regimes and characteristics of natural soil upland soil and paddy soil in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1):66-75.
- [32] 李义纯, 周权锁, 葛 滢. 淹水还原条件下不同类型土壤中 Cd 存在形态活性的变化[C]//中国土壤学会第十一届全国会员代表大会暨第七届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集(下), 2008:129-135.
- LI Yi-chun, ZHOU Quan-suo, GE Ying. Variations of Cd species in several types of soils under submerged conditions[C]//The Conference on Soil Science and Ecological Civilization and the 7th Cross-strait Symposium on Soil and Fertilizer, 2008:129-135.
- [33] 黄丹丹, 葛 滢, 周权锁. 淹水条件下土壤还原作用对镉活性消长行为的影响[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(2):373-380.
- HUANG Dan-dan, GE Ying, ZHOU Quan-suo. Effect of redox processes on soil Cd activity under submerged conditions[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2):373-380.
- [34] 葛 滢, 李义纯, 周权锁, 等. 淹水还原作用下土壤镉的吸附与解吸特征的初步探讨[J]. *生态环境*, 2006, 15(4):730-734.
- GE Ying, LI Yi-chun, ZHOU Quan-suo, et al. Preliminary investigation on adsorption and desorption of Cd in soil with different reduction states[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(4):730-734.
- [35] 李法虎, 黄冠华, 邓 健. 污水灌溉对土壤浸提液元素浓度变化影响的田间试验研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(11):124-129.
- LI Fa-hu, HUANG Guan-hua, DENG Jian. Effects of effluent irrigation on the variation of chemical element concentrations of soil extractions under field conditions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(11):124-129.

- [36] 陈 苏, 孙丽娜, 晁 雷, 等. 无机阴离子对镉、铅解吸特性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(1):105-108.
CHEN Su, SUN Li-na, CHAO Lei, et al. Effects of inorganic anions on the desorption character of cadmium, lead[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(1):105-108.
- [37] Zhang G Y, Peak D. Studies of Cd(II)-sulfate interactions at the goethite-water interface by ATR-FTIR spectroscopy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(9):2158-2169.
- [38] 甲卡拉铁, 喻 华, 冯文强, 等. 不同磷、钾肥对水稻产量和吸收镉的影响研究[J]. 西南农业学报, 2009, 22(4):990-995.
JIKA La-tie, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effects of different phosphate and potassium fertilizers on yields and cadmium uptake by paddy rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(4):990-995.
- [39] 李国臣. 酸雨条件下成都市典型土壤镉吸附行为研究[D]. 成都:成都理工大学, 2012.
LI Guo-chen. The Study on cadmium adsorption in soils of Chengdu suburban area under acid rain condition[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [40] Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. *Paddy and Water Environment*, 2011, 9:333-342.
- [41] 陈莉娜, 葛 莹, 张春华, 等. 淹水还原对红壤镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11):2333-2337.
CHEN Li-na, GE Ying, ZHANG Chun-hua, et al. Effect of submergence on the bioavailability of Cd in a red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11):2333-2337.
- [42] Tack F M G, Van Ranst E, Lievens C, et al. Soil solution Cd, Cu and Zn concentrations as affected by short-time drying or wetting: The role of hydrous oxides of Fe and Mn[J]. *Geoderma*, 2006, 137(1/2):83-89.
- [43] Li X M, Liu T X, Zhang N M, et al. Effect of Cr(VI) on Fe(III) reduction in three paddy soils from the Hani terrace field at high altitude[J]. *Applied Clay Science*, 2012, 64:53-60.
- [44] 李义纯, 葛 莹. 淹水还原条件下土壤铁氧化物对镉活性制约机理的研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(2):160-165.
LI Yi-chun, GE Ying. Influence of iron oxides on activity of Cd in soils under reductive conditions: A review[J]. *Soil*, 2009, 41(2):160-165.
- [45] Liu R, Altschul E B, Hedin R S, et al. Sequestration enhancement of metals in soils by addition of iron oxides recovered from coal mine drainage sites[J]. *Soil Sediment Contamination*, 2014, 23(4):374-388.
- [46] Yu H Y, Liu C P, Zhu J S, et al. Cadmium availability in rice paddy fields from a mining area: The effects of soil properties highlighting iron fractions and pH value[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 209:38-45.
- [47] Fulda B, Voegelin A, Kretschmar R, et al. Redox-controlled changes in cadmium solubility and solid-phase speciation in a paddy soil as affected by reducible sulfate and copper[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(22):12775-12783.
- [48] Kashem M A, Singh B R. Transformations in solid phase species of metals as affected by flooding and organic matter[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, 35(9/10):1435-1456.
- [49] 傅友强, 于智卫, 蔡坤争, 等. 水稻根表铁膜形成机制及其与生态环境效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6):1527-1534.
FU You-qiang, YU Zhi-wei, CAI Kun-zheng, et al. Mechanism of iron plaque formation on root surface of rice plants and their ecological and environmental effects: A review[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6):1527-1534.
- [50] Liu J G, Cao C X, Wong M H, et al. Variations between rice cultivars in iron and manganese plaque on roots and the relation with plant cadmium uptake[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(7):1067-1072.
- [51] Du J, Yan C, Li Z, et al. Formation of iron plaque on mangrove *Kandalaria obovata* (S. L.) root surfaces and its role in cadmium uptake and translocation[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 74(1):105-109.
- [52] 刘厚俊, 胡向白, 张俊伶, 等. 水稻根表铁膜吸附镉及植株吸收镉的动态[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2):425-430.
LIU Hou-jun, HU Xiang-bai, ZHANG Jun-ling, et al. Dynamics of Cd adsorption on rice seedlings root surface with iron coating and Cd uptake by plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2):425-430.
- [53] 胡 莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 不同生育期水稻根表铁膜的形成及其对水稻吸收和转运 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):432-437.
HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, et al. Formation of iron plaque on root surface and its effect on Cd uptake and translocation by rice at different growth stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):432-437.
- [54] 李志涛, 王夏晖, 刘瑞平, 等. 耕地土壤镉污染管理对策研究[J]. 环境与可持续发展, 2016, 2:21-23.
LI Zhi-tao, WANG Xia-hui, LIU Rui-ping, et al. Control strategy research of cadmium pollution in cultivated soils[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, 2:21-23.
- [55] 陈怀满. 土壤圈物质循环系列专著: 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
CHEN Huai-man. Pedosphere material recycling monograph series: Heavy metal pollution in soil-plant system[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [56] de Livera J, McLaughlin M J, Hettiarachchi G M, et al. Cadmium solubility in paddy soils: Effects of soil oxidation, metal sulfides and competitive ions[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(8):1489-1497.
- [57] Teng W, Liu Q, Li Q, et al. Hazard and risk assessment of the heavy metal pollution to the agricultural products[M]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2010.
- [58] Hao R J, Li Z P, Che Y P. Differences in organic C mineralization between aerobic and submerged conditions in paddy soils of southern Jiangsu Province, China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10:1410-1418.
- [59] 宋 波, 曾炜铨. 土壤有机质对镉污染土壤修复的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(4):1018-1024.
SONG Bo, ZENG Wei-quan. Effects of organic matter on the remediation of cadmium-contaminated soil: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(4):1018-1024.

- [60] 陈建斌. 有机物料对土壤的外源铜和镉形态变化的不同影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 450-452.
CHEN Jian-bin. Effects of organic matter on forms of added Cu and Cd and their dynamic transformation in soil[J]. Agro-environmental Protection, 2002, 21(5): 450-452.
- [61] 桂娟, 陈小云, 刘满强, 等. 节水与减氮措施对稻田土壤微生物和微生物群落的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 107-116.
GUI Juan, CHEN Xiao-yun, LIU Man-qiang, et al. Influences of water-saved and nitrogen-reduced practice on soil microbial and microfauna assemblage in paddy field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 107-116.
- [62] 李廷强, 杨肖娥. 土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1083-1087.
LI Ting-qiang, YANG Xiao-e. Soil dissolved matter and its effect on chemical and biological behaviors of soil heavy metals[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6): 1083-1087.
- [63] Li T, Liang C, Han X, et al. Mobilization of cadmium by dissolved organic matter in the rhizosphere of hyperaccumulator *Sedum alfredii*[J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 970-976.
- [64] Cornu J Y, Schneider A, Jezequel K, et al. Modelling the complexation of Cd in soil solution at different temperatures using the UV-absorbance of dissolved organic matter[J]. Geoderma, 2011, 162(1): 65-70.
- [65] Li T, Di Z, Yang X, et al. Effects of dissolved organic matter from the rhizosphere of the hyperaccumulator *Sedum alfredii* on sorption of zinc and cadmium by different soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(3): 1616-1622.
- [66] 李妍, 刘静, 朱俊, 等. 水溶性有机质对Cd和Zn在土壤表面竞争吸附的影响[J]. 广东农业科学, 2012, 21: 79-81.
LI Yan, LIU Jing, ZHU Jun, et al. Effect of dissolved organic on competitive adsorption of Cd and Zn by an alkaline soil[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 21: 79-81.
- [67] Zhao X, Jiang T, Du B. Effect of organic matter and calcium carbonate on behaviors of cadmium adsorption-desorption on from purple paddy soils[J]. Chemosphere, 2014, 99: 41-48.
- [68] Hatjie V, Payne T E, Hill D M, et al. Kinetics of trace element uptake and release by particles in estuarine waters: Effects of pH, salinity and particle loading[J]. Environment International, 2003, 29(15): 619-629.
- [69] 周世伟, 徐明岗. 磷酸盐修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3043-3050.
ZHOU Shi-wei, XU Ming-gang. The progress in phosphate remediation of heavy metal-contaminated soils[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 3043-3050.
- [70] Seshadri B, Bolan N S, Wijesekara H, et al. Phosphorus-cadmium interactions in paddy soils[J]. Geoderma, 2016, 270: 43-59.
- [71] Tiberg C, Gustafsson J P. Phosphate effects on cadmium (II) sorption to ferrihydrite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2016, 471: 103-111.
- [72] 邵兴华, 张建忠, 王艾平. 淹水对酸性红壤磷吸附解吸特征的影响: 以江西省旱地红壤和水稻土为例[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2355-2359.
SHAO Xing-hua, ZHANG Jian-zhong, WANG Ai-ping. The effect of flooding on the phosphorus sorption and phosphorus desorption properties of upland red soil and paddy soil from Jiangxi Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(10): 2355-2359.
- [73] 徐卫红, 黄河, 王爱华, 等. 根系分泌物对土壤重金属活化及其机理研究进展[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 184-189.
XU Wei-hong, HUANG He, WANG Ai-hua, et al. Advance in studies on activation of heavy metal by root exudates and mechanism[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(1): 184-189.
- [74] 陈雪. 土壤根际铁形态转化和低分子量有机酸对水稻镉吸收的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
CHEN Xue. Effects of rhizospheric iron transformation and low molecular weight organic acids on the cadmium uptake by rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [75] 刘源, 徐仁扣. 低分子量有机化合物对MnO₂和土壤氧化锰的还原溶解作用[J]. 环境化学, 2015, 34(6): 1037-1042.
LIU Yuan, XU Ren-kou. Reductive dissolution of MnO₂ and manganese oxides in soils by low-molecular-weight organic compounds[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(6): 1037-1042.
- [76] Cunningham S D. Phytoremediation of contaminated soil[J]. Trend Biotechnology, 1995, 13(9): 393-397.
- [77] 薛高尚, 胡丽娟, 田云, 等. 微生物修复技术在重金属污染治理中的研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(11): 266-271.
XUE Gao-shang, HU Li-juan, TIAN Yun, et al. Research progress on microbial remediation of controlling heavy metal pollution[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(11): 266-271.
- [78] Sharma R K, Archana G. Cadmium minimization in food crops by cadmium resistant plant growth promoting rhizobacteria[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 107: 66-78.
- [79] 范文宏, 姜维, 王宁. 硫酸盐还原菌修复污染土壤过程中镉的地球化学形态分布变化[J]. 环境科学学报, 2008, 28(11): 2291-2298.
FAN Wen-hong, JIANG Wei, WANG Ning. Changes of cadmium geochemical speciation in the process of soil bioremediation by Sulfate-Reducing Bacteria[J]. Acta Scientiarum Circumstantiae, 2008, 28(11): 2291-2298.
- [80] 黄森. 淹水时间对水稻土中4种铁还原功能微生物丰度的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
HUANG Sen. Effects of flooding time on abundance of four iron-reducing microorganism in paddy soil[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forest University, 2013.