

# Research Progress in the Effect of Physical and Chemical Properties on Heavy Metal Bioavailability in Soil-Crop System

Yuan Yuan

Coal Geological Bureau of Fujian Province, Fuzhou  
Email: [181475989@qq.com](mailto:181475989@qq.com)

Received: Jun. 8<sup>th</sup>, 2014; revised: Jul. 4<sup>th</sup>, 2014; accepted: Jul. 12<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

This paper comprehensive reviewed the existing laws of heavy metals in soil-plant system, analyzed the source, migration, transformation and enrichment regularity of heavy metal pollutants in soil plant system, summarized the effect of physicochemical properties of soil and crop physiological-biochemical factors on heavy metal bioavailability in soil-crop system, dissected the relating factors, and discussed recent related research methods. This study finally submitted the weak link in the system, and proposed the further research in spatial relationship with different heavy-metals, influence mechanism and quantitative model.

## Keywords

Soil-Crop System, Heavy Metal Form, Migration and Transformation Laws, Correlation Study

---

# 理化性质对土壤 - 农作物系统重金属生物有效性影响研究进展

袁 园

福建省煤田地质局, 福州  
Email: [181475989@qq.com](mailto:181475989@qq.com)

收稿日期：2014年6月8日；修回日期：2014年7月4日；录用日期：2014年7月12日

## 摘要

本文全面综述了重金属在土壤-植物系统中的存在规律，分析了农作物中重金属污染物的来源、迁移、转化及富集规律，归纳了土壤理化性质、农作物生理生化因素对土壤重金属生物有效性的吸收转化的规律，剖析了重金属生物有效性的影响因子，进而对近年相关关系研究方法进行论述。最终提出今年土壤-植物系统研究中存在的薄弱环节，提出进一步研究区域环境中土壤-农作物系统重金属空间对应关系、影响机制和定量模型。

## 关键词

土壤-农作物系统，重金属形态，迁移转化规律，相关性研究

## 1. 引言

土壤与作物作为一个密不可分的系统通过食物链与人类健康问题总是息息相关，土壤作物系统中重金属污染是全球面临的一个急待解决的环境问题[1]。重金属是土壤原有的构成元素，有些是植物、动物和人必需的营养元素。但由于含量的不同，可导致不同的效应，如果含量和有效性太低生物会表现出缺乏症状，但过量就会造成污染。通常土壤重金属污染是指因人类活动，土壤中的微量有害元素在土壤中的含量超过背景值，过量沉积而引起的含量过高，统称为土壤重金属污染。污染土壤的重金属主要指汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)和类金属砷(As)等生物毒性显著的元素，及有一定毒性的锌(Zn)、铜(Cu)、镍(Ni)等元素。过量重金属可引起植物生理功能紊乱、营养失调，镉、汞等元素在作物中富集系数较高，即使超过食品卫生标准，也不影响作物生长、发育和产量[2]，此外汞、砷能减弱和抑制土壤中硝化、氨化细菌活动，影响氮素供应[3]。重金属污染物在土壤中移动性很小，不易随水淋滤，不为微生物降解，通过食物链进入人体后，潜在危害极大，应特别注意防止重金属对土壤污染。

本文综述了重金属在土壤-植物系统中的存在规律，并对农产品中重金属污染物的来源、迁移、转化及富集规律，土壤理化性质、农作物生理生化因素对重金属的吸收转化进行了全面总结，进而对近年研究方法进行了分析总结。较系统地了解重金属污染对农作物污染的规律、污染的现状和危害症状，为农产品生长过程中如何避免重金属污染危害提供理论依据。

## 2. 重金属赋存系统的特征

目前，农作物中重金属的来源，主要为土壤，灌溉水，大气，生产加工过程和流通环节等[4]，其中较为直接作用的是土壤和灌溉水[5]。在一定弹性范围内，农作物中重金属的含量与土壤中重金属的含量呈正相关。但土壤中重金属浓度超过农作物根系的正常生理生化功能时，对根系产生毒害作用，导致重金属上移受阻。

### 2.1. 土壤重金属生物有效性

#### 2.1.1. 土壤中重金属的形态

土壤重金属元素的迁移、转化及其对植物的毒害和环境的影响程度，除与土壤中重金属含量有关外，

还与重金属元素存在形态有关。土壤中重金属存在的形态不同,其活性、生物毒性及迁移特征也不同[6]。土壤重金属形态有两层含义,一种是指土壤中化合物或矿物的类型,另一种是操作定义上的重金属形态,是直接影响农作物对重金属吸收的重要因素。目前还没有统一的定义及分类方法,根据其操作可分为单一形态的单独提取法和多种形态的连续提取法。单一形态的单独提取法利用某一提取剂直接溶解某一特定形态,如水溶态或可迁移态、生物可利用态等。单独提取法虽可说明重金属有效态含量即生物有效性,但是并不能反映重金属在土壤中的形态分布情况,也无法说明植物吸收的是土壤重金属的哪一部分,对进一步研究其在土壤中的行为机理有一定困难。因此,连续提取法则更能揭示土壤重金属的存在形态,迁移能力以及生物有效性[7]。

在众多连续提取法中,经典法为 Tessier[8]等(1979)提出的五步提取法来划分土壤重金属形态,分为可交换离子态,碳酸盐结合态,铁锰氧化物结合态,硫化物及有机结合态和残渣态。交换态金属是指交换吸附在土壤粘土矿物及其它组分的离子,较易为植物吸收利用,是对植物产生污染的主要形态;碳酸盐结合态是指金属离子与碳酸盐结合沉淀,当 pH 值降低时,离子态重金属可重新释放而被作物所吸收;铁锰氧化物结合态是重金属与 Fe、Mn 氧化物结合,产生氢氧化物沉淀,其离子键结合态,较稳定。但土壤环境条件变化后,也可使部分离子重新释放,具有潜在危害性;有机物及硫化物结合态是指以重金属离子为中心离子,以有机质活性基团为配位体发生螯合作用而形成螯合态,或硫离子与重金属生成难溶于水的化合物,因而有机结合态重金属较为稳定,不易被作物吸收利用。但当土壤氧化还原电位发生变化时,有机质因氧化作用而分解,可导致部分有机结合态重金属释放,重新被作物吸收;残渣态是重金属最主要的结合形式,以结晶矿物形式存在于原生和次生矿物晶格中,主要为硅酸盐矿物,因而残渣态重金属一般被认为是惰性的,缺乏活性。总而言之,不同形态重金属被释放的难易程度不同,生物可利用性和有效性也不同。

### 2.1.2. 土壤重金属形态的有效性

重金属有效态是指在土壤中能影响微生物活性的重金属形态。重金属全量可提供土壤中重金属富集的信息,但董克虞等[9]研究发现,全量不能较好地表征重金属元素在土壤中的存在状态,迁移转化以及植物吸收的有效性。土壤重金属在不同形态间的分布比例,直接影响重金属的迁移能力和生物有效性。农业土壤中重金属通常以残渣态为主,但受染土壤非残渣态重金属比例易改变[10],因此,利用有效性差异可一定程度上判断或表征土壤中重金属污染的差异性。作物重金属含量与土壤重金属的有效态含量具有十分密切的关系。重金属有效态主要是指土壤中能为植物所迅速吸收与同化的那部分重金属含量,与土壤中重金属形态是两个不同的概念。另有研究表明,土壤重金属交换态、碳酸盐结合态、氧化锰结合态稳定性差,易被植物吸收利用,是其有效或较为有效的形态,与植物所吸收量呈显著正相关性,而有机结合态和残渣态稳定性强,与植物重金属含量相关性不明显[11]。李冰等[12]对农田土壤 Pb 和作物 Pb 含量进行分析,认为农作物 Pb 与土壤有机结合态 Pb 含量显著正相关。综上所述,农作物中重金属含量与土壤重金属交换态,碳酸盐结合态及铁锰氧化物结合态和有机结合态等具有不同程度的相关性,而与残渣态和全量的相关性较弱或不明显,说明土壤重金属交换态,碳酸盐结合态及铁锰氧化物结合态和有机结合态等非残渣态对农作物均具有一定的潜在有效性[13]。

## 3. 理化性质对迁移转化的影响研究进展

重金属在土壤 - 农作物系统中迁移是一个极其复杂的过程,受土壤理化性状、农作物生理特征及污染物浓度等多种因素影响[14]。

### 3.1. 土壤理化性质

#### 3.1.1. 土壤酸碱性

土壤 pH 是土壤重要的理化性质之一, 是植物对土壤重金属吸收的最主要影响因子[15]。在低 pH 条件下, 一些固相盐类的溶解度增加, 而土壤溶液中  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  和  $\text{H}^+$  的增加又加剧重金属元素在土壤中交换位的竞争, 从而使得土壤对重金属元素的吸附减少, 增加了重金属元素的有效性[16]; 而在中性和碱性条件下, 重金属氢氧化物、硫化物、磷酸盐和碳酸盐的沉淀反应所起的作用逐渐增大[17], 有机质和土壤表面胶体对重金属吸附增加[18]。

#### 3.1.2. 土壤有机质

土壤有机质被认为是影响土壤重金属有效性的主要因素之一[19]。土壤有机质在微生物作用下, 形成土壤腐殖质, 能够与土壤中的粘土矿物、氧化物等无机颗粒相结合形成有机胶体和有机-无机复合胶体, 增加土壤的表面积和表面活性, 也能改变土壤阳离子交换量, 从而增加土壤对重金属的交换性吸附能力[20]。土壤腐殖质中含有多种含氧功能团, 易与重金属元素发生络合或螯合反应, 形成金属-有机质复合物, 改变重金属在土壤中的赋存形态, 形成有机结合态重金属[21], 从而降低植物对土壤重金属元素的吸收[22]。另外土壤中有有机质对植物吸收土壤重金属有一定的促进作用[23]。因此, 土壤有机质对作物吸收重金属的影响并不一致, 这可能是水溶性有机物和重金属形成的络合物会增加土壤重金属的移动性和生物有效性[24], 而大分子固相有机物则会同土壤中的粘土矿物结合一起吸附重金属, 形成较为稳定的有机结合态重金属, 降低土壤重金属有效性[25]。

#### 3.1.3. 土壤氧化还原电位

土壤氧化还原电位对重金属氧化还原状态的溶解性和生物有效性影响最大的土壤理化性质之一[26]。随着农作物田土壤氧化还原电位增大[27], 土壤中水溶性 Cd 含量也增大, 农作物吸收 Cd 的总量以及籽粒中 Cd 含量随之增加[28]。而土壤氧化还原电位降低时, 农作物中 Cd 含量也随着显著降低[29]。在氧化条件下比在还原条件下作物更易吸收农作物土壤中的 Cu、Zn、Pb、Cd 等重金属元素[30]。当土壤氧化还原电位降低, 土壤硫被还原为  $\text{S}^{2-}$  的量增加, 易生成硫化物沉淀, 从而使土壤溶液中重金属元素的浓度降低[31]; 当土壤处于氧化状态时, 土壤硫化物发生氧化, 从而使 Cd 等重金属元素被释放到土壤溶液中[32]。同时, 土壤氧化还原电位变化可能引起土壤重金属有机结合态和铁锰氧化物结合态含量变化[33]。在土壤淹水还原条件下, 能够增强有机质对土壤重金属的吸附能力, 形成较为稳定的有机结合态重金属, 进而降低重金属对农作物的有效性[34]; 在氧化还原电位较高时, 因有机质被氧化而重新释放有机结合态重金属离子, 提高了重金属对农作物的有效性[35]。

#### 3.1.4. 土壤质地

土壤中重金属有效性含量与土壤质地密切相关[36]。重金属进入土壤后, 土壤质地越密实, 对重金属持留量越大。由于粘土矿物的晶格中含有 K、Na、Ca、Mg 等常规无机离子, 而重金属能够通过取代反应替换常规离子进入晶格内部, 但这种取代反应也与重金属离子的价态有关[37]。同时土壤矿物, 特别是粘粒含量是影响土壤 CEC 的主要因素, 而 CEC 代表了土壤胶体的负电荷量, 其数值越高, 土壤负电荷量越高, 因此通过静电吸附重金属离子量也越多[38]。土壤粘土含量也是影响植物对土壤重金属吸收的重要理化性质[39]。此外, 土壤盐分, 含磷量等其他土壤理化性质也对重金属的有效性具有一定影响[40]。

### 3.2. 农作物生理生化作用

通常植物植株外部形态及内部结构的不同, 吸收重金属的生理生化机制各异[41]。即使在相同条件下,



不同的农作物品种对重金属元素的累积量差异较大[42]，韩爱民[43]、肖美秀[44]、牟仁祥[45]、李欢[46]等人的研究也有类似结果。蒋彬等人[47]将来自于全国不同地区的 239 份农作物样品种植在同一地区，发现各农作物品种 Cd、Pb 和 As 含量存在极显著的基因型差异，不同农作物类型对重金属的累积能力不同[2]。王凯荣[48]，吴启堂[49]等人研究结果表明不同类型农作物对不同重金属元素吸收有差异。农作物对重金属的累积差异不仅体现在农作物品种上，还存在于农作物不同组织器官中。重金属在农作物植株内新陈代谢旺盛的器官累积量较大，而在营养贮藏器官中累积量小，因而总体上重金属在农作物不同形态器官中含量分布规律不同[50]。重金属在农作物体内的迁移，分布和累积是一个动态变化过程[2]。农作物中重金属以不同形态存在，不同组织器官中重金属的主要存在形态也不同[51]。

不同的农作物品种由于具有不同的外部形态及内部结构[52]，以及不同的吸收重金属的生理生化机制，对重金属元素的累积量差异较大，农作物对重金属的吸收累积也受基因型的影响[53]。农作物对重金属的吸收与根系存在一定关系，其形态性状和生理活性等都会影响对重金属元素的吸收[54]。研究表明，单位产量的耗水量、根冠比较大的农作物品种，其农作物中 Cd 含量相对较高[55]。根系具有向根际释放氧气和氧化物质的能力，提高根际氧化还原电位[56]，从而使淹水土壤中大量的  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  等还原性物质在农作物根系被氧化而形成明显可见的铁锰氧化物胶膜[57]，它对重金属离子进入农作物体内起着重要作用[58]。根系还能分泌有机酸、糖类、氨基酸及其他次生代谢物质，统称为根系分泌物[59]，能够与土壤重金属络合、螯合、沉淀及改变根际环境而影响土壤中重金属的有效性[60]，形成铁锰氧化物结合态和有机结合态重金属等[61]。

### 3.3. 土壤中污染物浓度和类型

虽然土壤重金属全量与作物重金属含量未发现呈显著相关关系[62]，但是土壤重金属全量对作物中重金属也具有不可替代的作用。通常，土壤重金属全量与重金属各种赋存形态之间存在较好的相关性[63]，尤其是随着土壤污染加重，土壤交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态等非残渣态重金属的比例提高[64]，从而增加了土壤重金属的有效性。重金属在土壤农作物中的迁移能力，也受土壤重金属污染来源和种类的影响[65]。农作物对人工污染土壤、尾矿砂、污泥等三种类型土壤中重金属的富集规律，发现其富集顺序依次为人工污染土壤 > 尾矿砂 > 污泥 > 尾矿砂 + 污泥[66]，由此说明不同来源的重金属进入土壤后对植物生长的影响不同，其中以人工污染土壤对农作物的影响最大[67]。

## 4. 系统相关性研究方法

### 4.1. 传统统计分析方法

目前，土壤农作物系统重金属污染已经做了大量的研究工作[68]，从以往研究来看，农作物重金属与土壤重金属关联特征的研究通常采用相关系数分析[69]、回归分析[70]、主成分分析[71]以及其他多元分析方法[72]。通过相关系数分析研究了农作物各组织器官与土壤重金属全量以及化学形态含量的相关性[73]，均得到了各自的研究结果，揭示了土壤-农作物系统与重金属关联性。通过多元回归分析方法建立了农作物 Cd 与土壤 Cd 和 pH 之间的相关模型[74]，拟合模型达到了极显著的相关性水平，能够较好地表征研究区农作物对土壤重金属 Cd 的吸收累积特征[75]。相关系数分析、回归分析、主成分分析等统计分析方法，从不同角度揭示重金属在土壤-农作物系统的迁移转化及其生物有效性，然而，土壤环境是一个不均一的复杂体系，重金属污染水平和土壤理化性质均存在着明显的空间异质性[76]，而土壤-农作物系统中重金属的迁移转化又受土壤性质、重金属浓度等多种因素的影响[77]，因此土壤-农作物中重金属的关联特征也具有一定的空间异质性。传统的统计分析方法只能概括地反映土壤-农作物系统中重金属相关关系的全貌，无法给出空间位置和空间结构等方面的信息，不能满足实际田间生产的需要。

## 4.2. 空间分析方法

目前,土壤-作物系统中空间相关关系的研究日益引起国内外学者的关注[78]。利用空间统计学方法研究土壤环境污染物的空间分布规律[79]已被认为是环境地球化学研究中效果显著的空间分析方法,对查找污染源,研究污染空间迁移规律具有良好的指示意义[80]。应用地统计学进行土壤重金属空间变异性的研究,已有诸多实例[81]。钱翌等人(2013)[67]、邹朝晖等人(2013)[82]、刘文等人(2013)[83]、曹宏杰等人(2014)[84]、王波等人(2013)[85]、柳云龙等人(2012)[86]、胡克宽等人(2012)[87]、胡艳霞等人(2013)[88]、邱海源等人(2012)[89]在乌鲁木齐、松嫩高平原、乌兹别克斯坦、三江平原、河北肥县、上海、黄土高原、北京、福建尤溪的土壤研究。目前国内外也有对作物信息空间结构的研究,主要是针对作物产量的空间变异性,而关于重金属元素的空间结构的研究报道较少[90]。作物中营养元素的空间变异性,与土壤物理、化学、生物学的空间异质性有关[91]。高祥照等(2002)等人[92]、陈蓉蓉等(2004)[93]研究了农作物长势、产量和土壤养分的空间变异规律及其相互关系。在土壤-作物系统空间相关关系中,空间分布格局图可直观比较土壤和作物性质的空间结构相似性。为定量分析空间相关性,通常采用空间插值结果的相关系数、回归分析、协同克里格方法和交叉相关函数法[94]。

## 5. 存在的问题及展望

从研究方法上来说,主要通过室内盆栽试验进行的研究[95],采用相关系数分析、回归分析、主成分分析等传统统计分析方法,揭示重金属在土壤-农作物系统的迁移转化及其生物有效性,但室内的盆栽试验由于受人为控制因素较多,农作物生长环境条件较为单一,其结果往往与野外不符,难以真实反映实际结果及土壤农作物系统中重金属的迁移转化规律。从区域上来说,小区田间试验,主要是针对污染源很明显,危害比较严重的特殊区域[96],通常为矿山企业周围[97],污灌区[98],公路沿线[99],具有局部研究意义[100]。从研究内容上来说,利用空间分析方法进行土壤重金属空间变异性的研究已有很多报道,也有部分学者进行植物性质空间变异性的研究,但关于土壤-作物系统中重金属空间相关关系的研究鲜见报道。开展区域产地环境中土壤-农作物系统重金属空间对应关系、影响机制和定量模型研究,对提高产地土壤环境质量,指导农作物安全生产布局,保障农产品安全,具有重要的理论价值和现实意义。

## 基金项目

国土资源部公益性行业科研专项(201111020-2)。

## 参考文献 (References)

- [1] 朱雅兰 (2010) 重金属污染土壤植物修复的研究进展与应用. *湖北农业科学*, **6**, 1495-1499.
- [2] 钱翌, 刘峥延, 杨立杰 (2011) 青岛市蔬菜重金属污染及铅, 镉健康风险评价. *中国农学通报*, **22**, 176-181.
- [3] 邢艳帅, 乔冬梅, 朱桂芬, 齐学斌 (2014) 土壤重金属污染及植物修复技术研究进展. *中国农学通报*, **17**, 208-214.
- [4] 胡淼, 吴家强, 彭佩钦, 甘国娟, 周航, 廖柏寒 (2014) 矿区耕地土壤重金属污染评价模型与实例研究. *环境科学学报*, **2**, 423-430.
- [5] 梁烜赫, 曹铁华, 张磊, 于雷, 刘春光 (2012) 吉林省农田重金属含量及其在作物中的累积. *吉林农业科学*, **6**, 59-62.
- [6] 陈怀满 (1996) 土壤-植物系统中的重金属污染. 科学出版社, 北京, 7-15.
- [7] 张朝阳, 彭平安, 宋建中, 刘承帅, 彭珏, 卢普相 (2012) 改进 BCR 法分析国家土壤标准物质中重金属化学形态. *生态环境学报*, **11**, 1881-1884.

- [8] Tessier, A., Campbell, P.G. and Bisson, M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, **51**, 844-851.
- [9] 董克虞, 陈家梅, 邓小莹 (1981) 农作物对镉的吸收累积规律. *环境科学*, **3**, 86-91.
- [10] 卢璞, 龚子同 (2003) 南京城市土壤中重金属的化学形态分布. *环境化学*, **2**, 131-136.
- [11] 马运宏, 范瑜 (1995) 重金属在土壤-作物系统中迁移分配规律的分析. *江苏环境科技*, **1**, 8-10.
- [12] 李冰, 王昌全, 代天飞, 李焕秀, 杨娟 (2007) 水稻子实对不同形态重金属的累积差异及其影响因素分析. *植物营养与肥料学报*, **4**, 602-610.
- [13] 何峰 (2004) 重庆市农田土壤-粮食作物重金属关联特征与污染评价. 西南农业大学, 重庆, 1.
- [14] 叶华香, 张思冲, 辛蕊, 李国芬 (2011) 哈尔滨市郊菜地土壤重金属及土壤理化性质. *中国农学通报*, **2**, 162-166.
- [15] 汤丽玲 (2007) 作物吸收 Cd 的影响因素分析及籽实 Cd 含量的预测. *农业环境科学学报*, **2**, 699-703.
- [16] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 杨永亮 (2011) 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展. *环境工程学报*, **7**, 1441-1453.
- [17] 宗良纲, 丁园 (2001) 土壤重金属(CuZnCd)复合污染的研究现状. *农业环境保护*, **2**, 126-128.
- [18] 王凯丽, 徐绍辉, 杨永亮, 林青 (2011) 胶体存在时不同质地土壤对锌镉的吸附试验研究. *土壤*, **2**, 239-246.
- [19] 黄震, 黄占斌, 孙朋成, 沈忱, 景生鹏 (2012) 环境材料对作物吸收重金属 Pb, Cd 及土壤特性研究. *环境科学学报*, **10**, 2490-2499.
- [20] Reddy, K.R. and Patrick Jr., W.H. (1975) Effect of alternate aerobic and anaerobic conditions on redox potential, organic matter decomposition and nitrogen loss in a flooded soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **7**, 87-94.
- [21] 王丹丽, 关子川, 王恩德 (2003) 腐殖质对重金属离子的吸附作用. *黄金*, **1**, 47-49.
- [22] 董克虞, 陈家梅 (1982) 镉对农作物生长发育的影响与吸收累积的关系. *环境科学*, **4**, 31-34.
- [23] Sloan, J.J., Dowdy, R.H. and Dolan, M.S. (1998) Recovery of biosolids-applied heavy metals sixteen years after application. *Journal of Environmental Quality*, **27**, 1312-1317.
- [24] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江, 黄标, 孙维侠 (2011) 耕地土壤有机质空间变异性的随机模拟. *农业工程学报*, **12**, 324-329.
- [25] 吐尔逊, 吐尔洪, 叶凯 (2013) 重金属 Cd 和 Pb 在甜高粱幼苗体内的积累特性研究. *中国农学通报*, **3**, 80-85.
- [26] 张茹吉, 姚世雅, 奥岩松 (2013) 土壤表层中的 Cu, Cd, Pb 的垂直运移规律. *上海交通大学学报: 农业科学版*, **5**, 67-71.
- [27] 于童, 徐绍辉, 林青 (2012) 不同初始氧化还原条件下土壤中重金属的运移研究 I. 单一 Cd, Cu, Zn 的土柱实验. *土壤学报*, **4**, 688-697.
- [28] 肖青青, 王宏斌, 赵宾, 叶志鸿 (2011) 云南个旧市郊农作物重金属污染现状及健康风险. *农业环境科学学报*, **2**, 271-281.
- [29] Reddy, C.N. and Patrick, W.H. (1977) Effect of redox potential and pH on the uptake of cadmium and lead by rice plants. *Journal of Environmental Quality*, **6**, 259-262.
- [30] 郑顺安, 郑向群, 刘书田, 姚秀荣 (2012) 再生水灌溉下紫色水稻土颗粒态有机质中重金属的富集特征. *水土保持学报*, **2**, 246-250.
- [31] 陈涛, 吴燕玉, 张学询, 孔庆新, 宋胜焕, 王连平, 朴东华, 高玉环 (1980) 张士灌区镉土改良和水稻镉污染防治研究. *环境保护科学*, **3**.
- [32] 刘亚男, 李取生, 杜焯锋, 崔志红, 李莎 (2011) 滩涂土壤淋洗过程中盐分变化及其对重金属的影响. *环境科学*, **7**, 2087-2091.
- [33] 林亲铁, 朱伟浩, 陈志良, 彭晓春, 赵述华 (2013) 土壤重金属的形态分析及生物有效性研究进展. *广东工业大学学报*, **2**, 113-118.
- [34] Tessier, A., Rapin, F. and Carignan, R. (1985) Trace metals in oxic lake sediments: Possible adsorption onto iron oxyhydroxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **49**, 183-194.
- [35] Tessier, A., Campbell, P.G. and Bisson, M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, **51**, 844-851.
- [36] 王坤, 王小敏, 赵勇, 林志, 谢建治 (2014) 土壤质地和碳氮比对龙葵富集重金属 Cd 的影响. *水土保持学报*, **2**, 199-203.

- [37] 线郁, 王关娥, 陈卫平 (2013) 土壤砷植物暴露途径的土壤因子模拟. *生态学报*, **8**, 2400-2409.
- [38] 谢正苗, 李静, 徐建明, 叶兰军, 王碧玲 (2006) 杭州市郊蔬菜基地土壤和蔬菜中 Pb, Zn 和 Cu 含量的环境质量评价. *环境科学*, **4**, 742-747.
- [39] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 赵谨, 郑德圣 (2002) 土壤中重金属污染现状与防治方法. *土壤与环境*, **1**, 79-84.
- [40] Haldar, M. and Mandal, L.N. (1981) Effect of phosphorus and zinc on the growth and phosphorus, zinc, copper, iron and manganese nutrition of rice. *Plant and Soil*, **59**, 415-425.
- [41] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 李久海, 黄筱敏, 王吉方 (2003) 不同水稻品种籽粒 Cd, Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄取风险. *环境科学*, **3**, 112-115.
- [42] 王凯荣, 龚惠群 (1996) 两种基因型水稻对环境镉吸收与再分配差异性比较研究. *农业环境保护*, **4**, 145-149.
- [43] 韩爱民, 蔡继红, 屠锦河, 朱伊君 (2002) 水稻重金属含量与土壤质量的关系. *环境监测管理与技术*, **3**, 27-28.
- [44] 肖美秀, 梁义元, 梁康迳, 林文雄 (2005) 水稻重金属污染及其控制技术的研究进展. *亚热带农业研究*, **3**, 40-43.
- [45] 牟仁祥, 陈铭学, 朱智伟, 应兴华 (2004) 水稻重金属污染研究进展. *生态环境*, **3**, 417-419.
- [46] 李欢, 陈亮, 潘琼, 谢武 (2013) 水稻重金属生态毒性诊断研究进展. *环境与可持续发展*, **6**, 80-84.
- [47] 蒋彬, 张慧萍 (2002) 水稻精米中铅镉砷含量基因型差异的研究. *云南师范大学学报: 自然科学版*, **3**, 37-40.
- [48] 王凯荣, 郭焱 (1993) 重金属污染对稻米品质影响的研究. *农业环境保护*, **6**, 254-257.
- [49] 吴启堂, 何林昌 (1994) 不同水稻, 菜心品种和化肥形态对作物吸收累积镉的影响. *华南农业大学学报*, **4**, 1-6.
- [50] 王宏镛, 束文圣, 蓝崇钰 (2005) 重金属污染生态学研究现状与展望. *生态学报*, **3**, 596-605.
- [51] 杨居荣, 蒋婉茹 (1995) Cd 污染对植物生理生化的影响. *农业环境保护*, **5**, 193-197.
- [52] 李福燕, 李许明, 赵雄, 杨帆, 张宇, 漆智平 (2010) 热带地区不同水稻品种对土壤镉胁迫的生理生化响应. *生态学杂志*, **4**, 821-825.
- [53] 王姗姗, 张红, 王颜红, 王世成, 崔杰华, 李波, 杨晶晶 (2012) 土壤类型与作物基因型对花生籽实镉积累的影响. *应用生态学报*, **8**, 2199-2204.
- [54] 陈京都, 何理, 许轲, 戴其根, 郭保卫, 张洪程, 霍中洋, 魏海燕 (2013) 镉胁迫对不同基因型水稻生长及矿质营养元素吸收的影响. *生态学杂志*, **12**, 3219-3225.
- [55] 郭晓方, 卫泽斌, 丘锦荣, 吴启堂, 周建利 (2010) 玉米对重金属累积与转运的品种间差异. *生态与农村环境学报*, **4**, 367-371.
- [56] 杜斌 (2012) 紫色水稻土中镉的生物有效性研究. 硕士论文, 西南大学, 重庆.
- [57] 王震宇, 刘利华, 温胜芳, 彭昌盛, 邢宝山, 李锋民 (2010) 2 种湿地植物根表铁氧化物胶膜的形成及其对磷素吸收的影响. *环境科学*, **3**, 781-786.
- [58] 刘敏超, 李花粉, 夏立江, 杨林书 (2001) 根表铁锰氧化物胶膜对不同品种水稻吸镉的影响. *生态学报*, **4**, 598-602.
- [59] 王大力, 林伟宏 (2012) CO<sub>2</sub> 浓度升高对水稻根系分泌物的影响——总有机碳, 甲酸和乙酸含量变化. *生态学报*, **4**, 570-572.
- [60] 沈青群, 胡沪胜, 何荫飞, 陈丹, 简峰 (2010) 镉污染土壤根际环境调节. *河北农业科学*, **3**, 76-78.
- [61] 常学秀, 施晓东 (2010) 土壤重金属污染与食品安全. *环境科学导刊*, **z1**, 21-24.
- [62] 齐雁冰, 常庆瑞, 刘梦云, 刘京, 陈涛 (2013) 陕北某化工厂对土壤-作物系统重金属含量及分布的影响. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201301-234>
- [63] 王晓瑞, 周生路, 吴绍华 (2011) 长江三角洲地区小麦植株的重金属分布及其相关性. *地理科学*, **2**, 226-231.
- [64] 李军辉, 卢瑛, 张朝, 邓香连, 连槿 (2011) 广州石化工业区周边农业土壤重金属污染现状与潜在生态风险评价. *土壤通报*, **5**, 1242-1246.
- [65] 周东美, 王玉军, 陈怀满 (2014) 论土壤环境质量重金属标准的独立性与依存性. *农业环境科学学报*, **2**, 205-216.
- [66] 陈怀满, 郑春荣, 王慎强, 涂从 (2001) 不同来源重金属污染的土壤对水稻的影响. *农村生态环境*, **2**, 35-40.
- [67] 王玉军, 陈怀满 (2013) 我国土壤环境质量重金属影响研究中一些值得关注的问题. *农业环境科学学报*, **7**.
- [68] 陈怀满 (1990) 我国土壤污染现状, 发展趋势及其对策建议. *土壤学进展*, **1**, 53-56.



- [69] 李建国, 濮励杰, 廖启林, 朱明, 刘丽丽, 张丽芳, 王琪琪, 戴小清 (2014) 无锡市土壤重金属富集的梯度效应与来源差异. *地理科学*, **4**, 496-504.
- [70] 李永涛, 戴军 (2012) 不同形态有机碳的有效性在两种重金属污染水平下水稻土壤中的差异. *生态学报*, **1**, 138-145.
- [71] 戴斯迪, 马克明, 宝乐 (2012) 北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征. *生态学报*, **16**, 5095-5102.
- [72] 张克云, 陈树元 (1995) 水稻-土壤生态系统对 Cu, As 污染的缓冲作用. *应用生态学报*, **3**, 313-316.
- [73] 钱翌, 张玮, 冉德超 (2011) 青岛城市土壤重金属的形态分布及影响因素分析. *环境化学*, **3**, 652-657.
- [74] 钟军 (2012) 四种农业种植模式下土壤 Cd, Pb, Zn 形态分配及作物富集效率研究. 硕士论文, 四川农业大学, 成都.
- [75] 叶新新, 孙波 (2012) 品种和土壤对水稻镉吸收的影响及镉生物有效性预测模型研究进展. *土壤*, **3**, 360-365.
- [76] 刘继龙, 马孝义, 张振华 (2010) 土壤水盐空间异质性及尺度效应的多重分形. *农业工程学报*, **1**, 81-86.
- [77] 李洪波, 薛慕瑶, 林雅茹, 申建波 (2013) 土壤养分空间异质性与根系觅食作用: 从个体到群落. *植物营养与肥料学报*, **4**, 995-1004.
- [78] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 王中良, 李军 (2011) 土壤重金属污染评价方法. *生态学杂志*, **5**, 889-896.
- [79] 钱翌, 于洪, 王灵 (2013) 乌鲁木齐市米东区农田土壤重金属含量的空间分布特征. *干旱区地理*, **2**, 303-310.
- [80] 史文娇, 岳天祥, 石晓丽, 宋伟 (2012) 高风险重金属污染土壤识别研究方法综述. *土壤*, **2**, 197-202.
- [81] 陈文辉, 谢高地, 卓庆卿 (2004) 农田基础环境信息空间变异性分析. *生态学报*, **2**, 347-351.
- [82] 邹朝晖, 宋戈, 张景奇, 雷国平, 孟飞 (2013) 松嫩高平原黑土区耕地土壤生态环境质量特征及空间分布规律. *中国农学通报*, **29**, 143-150.
- [83] 刘文, 吴敬禄, 马龙 (2013) 乌兹别克斯坦表层土壤元素含量与空间结构特征初步分析. *农业环境科学学报*, **2**, 282-289.
- [84] 曹宏杰, 王立民, 罗春雨, 张继舟, 倪红伟 (2014) 三江平原地区农田土壤中几种重金属空间分布状况. *生态与农村环境学报*, **2**, 155-161.
- [85] 王波, 毛任钊, 曹健, 王元仲, 高云凤, 李冬梅 (2013) 海河低平原区农田重金属含量的空间变异性——以河北省肥乡县为例. *生态学报*, **12**, 4082-4090.
- [86] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (2012) 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价. *环境科学*, **2**, 599-605.
- [87] 胡克宽, 王英俊, 张玉岱, 李会科, 梅立新, 梁俊 (2012) 渭北黄土高原苹果园土壤重金属空间分布及其累积性评价. *农业环境科学学报*, **5**, 934-941.
- [88] 胡艳霞, 周连第, 魏长山, 杜景龙 (2013) 北京水源保护地土壤重金属空间变异及污染特征. *土壤通报*, **6**, 1483-1490.
- [89] 陈奔, 邱海源, 郭彦妮, 汪立宜, 王宪 (2012) 尤溪铅锌矿集区重金属污染健康风险评估研究. *厦门大学学报: 自然科学版*, **2**, 245-251.
- [90] 潘成忠, 上官周平 (2003) 土壤空间变异性研究评述. *生态环境*, **3**, 371-375.
- [91] 杨玉玲, 盛建东, 田长彦, 文启凯 (2003) 盐化灌淤土壤速效氮, 磷, 钾空间变异性与棉花生长关系初步研究. *中国农业科学*, **5**, 542-547.
- [92] 高祥照, 胡克林, 郭焱, 李保国, 马韞韬, 杜森, 王运华 (2002) 土壤养分与作物产量的空间变异特征与精确施肥. *中国农业科学*, **6**, 660-666.
- [93] 陈蓉蓉, 周治国, 曹卫星, 朱艳, 戴廷波 (2004) 农田精确施肥决策支持系统的设计和实现. *中国农业科学*, **4**, 516-521.
- [94] 雷咏雯, 危常州, 李俊华, 候振安, 冶军, 鲍柏杨 (2004) 不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究. *土壤*, **4**, 376-381.
- [95] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 黄启飞, 鲁全国 (2002) 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. *科学通报*, **3**, 207-210.
- [96] 王荣萍, 张雪霞, 郑煜基, 陈能场, 李金娟, 张晓霞 (2013) 水分管理对重金属在水稻根区及在水稻中积累的影响. *生态环境学报*, **12**, 1956-1961.
- [97] 周建民, 党志, 蔡美芳, 司徒粤, 刘丛强 (2005) 大宝山矿区污染水体中重金属的形态分布及迁移转化. *环境科*

学研究, **3**, 5-10.

- [98] 李金娟, 张雪霞, 王平, 高云, 陈能场, 冷小艳 (2013) 多金属硫化物矿区不同品种水稻根际土壤酶活的变化. *生态环境学报*, **11**, 1830-1836.
- [99] 李波, 林玉锁, 张孝飞, 徐亦钢, 俞飞 (2005) 沪宁高速公路两侧土壤和小麦重金属污染状况. *农村生态环境*, **3**, 50-53.
- [100] 陈虎, 郭笃发, 郭峰, 李晓晴, 范仲学 (2013) 作物吸收富集镉研究进展. *中国农学通报*, **3**, 6-11.