

Research Progress on Early Warning of Heavy Metal Pollution Risk in Farmland Soil

Lang Teng¹, Tengbing He^{1,2,3*}, Xiangying Li^{2,3}, Li Mou⁴, Chao Guo¹, Qingqing Zeng¹

¹College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²The New Rural Development Institute, Guizhou University, Guiyang Guizhou

³Engineering Laboratory for Pollution Control and Resource Reuse Technology of Livestock and Poultry Breeding in Mountain, Guizhou Province, Guiyang Guizhou

⁴College of Life Science, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Email: 1398151435@qq.com, ^{*}hetengbing@163.com

Received: Jun. 25th, 2018; accepted: Jul. 16th, 2018; published: Jul. 23rd, 2018

Abstract

Heavy metals are absorbed by the human body and accumulated in the body, affecting human health. It is very important to establish agricultural soil, agricultural products and human health risk early warning. This paper summarizes the risk early warning of heavy metal pollution in farmland soil, agricultural product risk warning and human health evaluation, and compares the difference of heavy metal pollution and risk assessment between farmland soil in mining area and non-mining area. The ability of major agricultural products to accumulate heavy metals and the risk early warning assessment of agricultural products are also discussed. The health risk assessment of USEPA by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) is also described. The main research directions of heavy metal pollution risk early warning in farmland soil were defined.

Keywords

Farmland Soil, Heavy Metal, Risk Early-Warning

农田土壤重金属污染风险预警的研究进展

滕浪¹, 何腾兵^{1,2,3*}, 李相楹^{2,3}, 牟力⁴, 郭超¹, 曾庆庆¹

¹贵州大学农学院, 贵州 贵阳

²贵州大学新农村发展研究院, 贵州 贵阳

³贵州省山地畜禽养殖污染控制与资源化技术工程实验室, 贵州 贵阳

⁴贵州大学生命科学学院, 贵州 贵阳

Email: 1398151435@qq.com, ^{*}hetengbing@163.com

*通讯作者。

收稿日期：2018年6月25日；录用日期：2018年7月16日；发布日期：2018年7月23日

摘要

重金属通过植物被人体吸收，在体内不断积累，影响人类健康，建立农田土壤、农产品及人体健康风险预警尤为重要。本文综述了矿区与非矿区农田土壤重金属污染风险预警，农产品风险预警及人体健康评价；比较矿区与非矿区农田土壤主要污染重金属与风险评价的差别、主要农产品积累重金属的能力，以及农产品风险预警评估，并阐述了美国环保署(USEPA)的健康风险评价。明确了进一步开展农田土壤重金属污染风险预警的主要研究方向。

关键词

农田土壤，重金属，风险预警

Copyright © 2018 by authors 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

1. 前言

农田土壤是农业生产的物质资源，是人类赖以生存的物质基础[1]。然而随着城镇化和农村工业化的发展，农田土壤重金属污染问题日渐突出[2]。重金属具有致癌和致突变性，因此深入了解其对人体健康的影响具有重要意义[3]。近年来随着矿产资源的大量开发利用，工业“三废”的排放以及农业上污水灌溉、污泥和磷肥的施用等，造成了农田土壤重金属污染，经薛忠财[4]等研究表明我国农田耕层土壤(0~20 cm) Cd 的年平均增量达到 4 ug/kg，由于土壤中的 Cd 很容易被植物吸收，从而进入食物链，这导致“镉大米”、“镉小麦”等食品安全问题的频繁发生，对人民群众的生命安全造成了严重的威胁，因此如何利用农田土壤重金属污染预警，对重金属污染农田的可持续利用与风险评估是我们当前要解决的主要问题。随着工业的快速发展，工业生产的迅速发展和各种化学品、农药及化肥的使用，含重金属的污染物通过各种途径进入土壤，造成土壤污染，尤其是农田土壤污染日益严重[5]。农田土壤重金属污染严重威胁农产品的产地环境，成为影响食品质量安全与农业生态环境的突出问题[6]。研究农田土壤重金属污染风险预警，对农产品风险预警与人体健康评价具有重要的意义。

2. 农田土壤重金属风险预警

生态环境部和自然资源部在 2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》[7]显示，全国土壤环境质量不容乐观，局部地区土壤污染较为严重，耕地土壤环境质量堪忧，工矿业周边土壤环境问题突出[8]，全国土壤总污染率达到 16.1%，其中轻微、轻度、中度和重度污染率分别为 11.2%、2.3%、1.5%、1.1%。

2.1. 矿区农田土壤重金属风险预警

矿产资源开采、冶炼和利用为工业化和城市化发展提供了物质基础，但矿产资源开发利用在推动国民经济增长的同时，也导致矿区土壤重金属富集，造成严重的土壤污染问题[9]。然而，金属矿产资源开采、冶炼与利用过程是引发重金属污染问题的关键，常常造成开采与冶炼区域农田土壤重金属污染，还

导致周边流域灌溉区土壤重金属污染[10][11],导致地表及地下水重金属含量严重超标,矿区流域的下游受到重金属危害在不断增大,导致灌溉区域农田土壤的环境质量堪忧[12],并通过食物链进入人体,危害当地居民健康。

矿山开采与冶炼是导致矿区周边土壤受到重金属污染的主要原因,其污染源主要是矿山开采、冶炼粉尘及冶炼污水随意排放,尾矿不合理堆积[13][14][15]。由图1可以看出矿区农田土壤重金属污染从上个世纪年代受到80年代开始受到科研工作者的注意[16],从21世纪开始研究呈现指数增长,在2003~2007比1998~2002增长13倍,2008~2012比2003~2007增长2.9倍,2013~2017比2008~2012增长1.3倍。

2.1.1. 铅锌矿农田土壤重金属风险预警

铅锌矿的开采、冶炼与利用导致周边农田及流域土壤重金属污染,降低了当地土壤的生产力和危及粮食的生产安全[17],增加了当地居民健康风险指数,降低了生活水平。重金属在土壤中以多种的形态存在,且每一种形态的生物有效性不同,导致被植物吸收利用的能力不同,因此,土壤中重金属的存在形态决定了重金属的潜在危害[18]。经徐芹磊[13]对福建某铅锌矿区农田土壤Cd、Pb、Zn和Cu的含量进行调查,得出Cd、Pb、Zn和Cu含量均超过福建省的土壤背景值,并运用潜在生态风险指数法,对调查区域农田土壤潜在生态风险进行评价,得出调查区潜在生态风险程度 $Cd > Pb > Zn > Cu$,表明土壤中Cd的潜在生态危害风险较高,Pb、Zn和Cu次之。经周艳[19]对西南某铅锌矿区农田土壤As、Cd、Cr、Hg、Pb和Zn进行研究,得出6种重金属含量均超过了土壤背景值,并运用潜在生态风险指数法,对农田土壤潜在生态风险进行评价,结果表明,研究区农田土壤重金属Cd、Pb和Zn含量相对处于极高水平,污染十分严重,相对潜在生态危害风险极高,Hg、Cr和As含量属于中度污染,潜在生态危害风险较高,这与邹小冷[20]、李忠义[18]和覃朝科[21]研究结果一致,虽然是铅锌矿区,但是污染最严重的是Cd,均到达了重度风险预警。

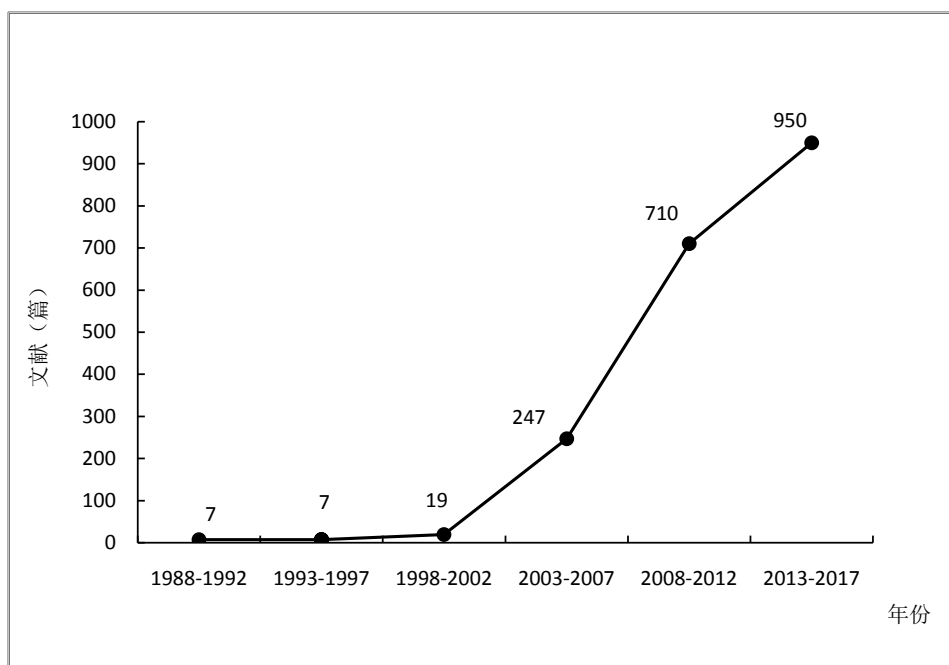


Figure 1. Research on heavy metals in farmland soil in mining area

图1. 矿区农田土壤重金属研究情况

2.1.2. 铜矿农田土壤重金属风险预警

铜是记载中最早被广泛运用的金属, 具有悠久的开采历史, 自石器时代进入青铜器时代开始, 青铜矿就被广泛地用于铸造钟鼎、兵器、乐器以及农耕工具[22]。如今对铜的依赖越来越大, 铜制品用于各行各业, 因此对铜的需求量也在不断增加, 然而铜矿的开采给矿区周边农田土壤造成了严重污染[23] [24] [25]。迪娜·吐尔生江[23]在研究中表明农田土壤 Cu, Cd, Pd, Zn 和 Cr 只有 Cu 超过了土壤背景值, 土壤生态风险值较低。窦智勇[24]对铜陵矿区农田土壤 Cd、Cu、Pb 和 Zn 共 4 种重金属元素的单项潜在生态危害指数进行研究, 得出 4 种重金属单项潜在生态危害指数依次为 $Cd > Cu > Pb > Zn$, 研究区农田土壤重金属存在潜在中度生态风险, Cd 为最主要的潜在生态危害因子。涂常青[25]对硫化铜矿区周边农田土壤重金属潜在生态风险指数评价结果表明, 污染区中重金属污染物对硫化铜矿区周边农田土壤构成的潜在生态危害程度由强至弱依次为: $Pb > Cu > Zn$ 。由此可见, 硫铜矿矿区周边农田土壤中受 Pb 的污染占主导地位。

2.1.3. 金矿区农田土壤重金属风险预警

自然界金矿常与许多矿物共生或伴生, 可形成多种多样的矿物共生体。其中最主要的共生伴生矿物是石英和黄铁矿[26] [27], 石英与黄铁矿常伴随着有毒金属 Cd、Pd、Ag、Cr、Cu 等等。陈璐[28]在平度市金矿研究中得出农田土壤中 4 种重金属潜在风险程度依次为 $Cd > Zn > Pb > Cr$ 均表现出中等及以上污染风险, 其中 Cd 呈极严重污染风险。陈友宁[29]在研究金矿区土壤 Cd 含量时得出: 农田土壤重金属 Cd 的主要来源是伴随在金矿中的 Cd, 在金矿开采中没有做好矿渣、污水与粉尘的处理导致周边农田土壤重金属严重超标, Cd 呈现极严重污染风险。

2.1.4. 煤矿区农田土壤重金属风险预警

煤矿区周围农田土壤的重金属污染主要来源于煤矿在开采、冶炼与利用过程中产生的粉尘, 粉尘在风力的作用下, 飘散在空气中, 通过降雨淋溶渗透作用进入土壤中, 造成土壤的重金属污染[30]。目前, 国内外学者对煤矿区周边的土壤与水作了大量的研究, Teixeira [31]对巴西煤矿区河流底部沉积物重金属污染状况进行分析; Clark [32]对澳大利亚某矿区地表水重金属污染状况进行分析。另外, 美国[33]意大利[34]印度[35]等国针对煤矿区重金属污染也开展了大量的研究工作; 我国的学者王丽[30]、朱玉高[36]和袁新田[37]等对部分煤矿区农田土壤重金属污染进行了研究, 结果表明煤矿区农田土壤均受到不同程度的重金属污染, 主要污染元素是 Cd、Pd、Cu 和 Hg, 且 Cd 的污染最为严重, 存在极严重的污染风险。

2.1.5. 其他矿区农田土壤重金属风险预警

目前国内外对铅锌矿、铜矿、金矿及煤矿的农田土壤重金属污染风险预警研究较多, 其他矿石研究较少, 王帅[38]在铀矿的研究中表明: 农田土壤中 Cd, Pd, Cu, U 的均超出全国土壤背景值, 且 Cd 是背景值的 11 倍, 存在极严重污染风险预警。湛天丽[39]对万山汞矿区农田土壤重金属进行污染评价时发现, 土壤重金属综合污染指数为 469.0, 生态风险强, Hg 的贡献率达到 78.3%。杨涛[40]对赣南钨矿区土壤重金属风险评价, 发现 Cd 的风险程度最大, 其次是 $Hg > As > Cu > Ar > Pd > Zn$ 。顾秉谦[41]发现贵州遵义多金属矿区受到不同程度的 T1 污染。矿区旱地土 T1 的评价等级为中等生态危害、强生态危害、很强生态危害的样品分别占 18%、64%、18%; 矿区水稻土样品 T1 的评价等级为中等生态危害和强生态危害的样品分别占 33%和 67%, 由此可以看出铊在淹水条件下活性更强。

2.2. 非矿区农田土壤重金属风险预警

农田生态系统中重金属污染的来源主要有自然因素和人类活动两大途径。自然因素主要是成土母质和成土过程中所形成的土壤重金属元素背景值, 人类活动引起重金属污染来源主要是农药、肥料、污水

污泥和大气沉降等[42] [43]。目前国家有关部门对我国农田土壤重金属普查时发现,目前我国土壤污染的总体形势不容乐观,其中以西南、中南、长江三角洲及珠江三角洲等地区污染最为突出[44],西南地区土壤重金属污染主要是由于地质高背景导致的,而于中南、长江三角洲及珠江三角洲重金属主要来源是由于工业生产。吴洋[45]对广西都安县耕地土壤重金属风险评价,发现该区重金属超标严重,其中以Cd的超标率最高,生态风险最大,总体呈中度生态风险。麦提吐尔逊·艾则孜[46]对新疆焉耆盆地辣椒地土壤重金属污染及生态风险预警,发现土壤潜在生态风险指数平均值为18.40,属于轻微生态风险态势,生态风险指数平均值为-4.78,属于无警态势。石磊[47]、阿吉古丽·马木提[48]、胡尊芳[49]等对农田土壤重金属Cd、Pd、Cu、Hg和Zn进行风险评估,发现研究区均存在不同程度的风险预警,且Cd的风险程度最大。

3. 农产品风险预警

《农产品质量安全法》明确规定,不适宜特定农产品生产的区域应禁止生产[50]。土壤中重金属含量超出标准规定的限量值,则被视为污染土壤,不适宜进行蔬菜生产,而面临退出农业生产的风险,这样容易导致土地资源的浪费。没有对农产品可食用部分重金属含量检测,忽视了蔬菜对重金属的吸收和富集存在差异的特性,虽然土壤受到重金属污染,通过风险预警评价结果为不适宜进行蔬菜生产,但可能生产出的蔬菜重金属含量符合国家食品卫生标准。农产品重金属超标风险的发生是一个系统过程,由风险源、暴露途径及风险受体等多个环节共同组成[51]。如果排除大气和灌溉水污染,风险源可简化为土壤污染;风险受体为产品。目前,国内外对蔬菜中重金属风险预警的研究较多,蔡立梅[52]、周泉潇[53]、陈京都[50]等对蔬菜中重金属Cd和Pd进行了测定,均表明蔬菜中重金属含量较低,单一暴露风险较低。蔬菜对重金属的吸收还与蔬菜的品种与种类有一定关系,欧阳喜辉[54]研究表明叶菜类吸收能力强于果菜类。杨辉[55]研究发现,蔬菜对重金属的富集能力表现为叶菜类 > 花菜类 > 根茎类 > 茄果类 > 禾谷类。自湖南发生镉大米事件后,潘根兴[56],在全国六个地区(华东、东北、华中、西南、华南和华北)县级以上市场随机采购大米样品91个,结果同样表明:10%左右的市售大米镉超标。郑富海[57]研究发现:运用高危指数法(HI),稻米存在健康风险,且As的贡献率最大,但稻米中主要污染物为Cd和Pd。

4. 人体健康风险预警

人体健康风险评价是20世纪70年代以后发展起来,用于描述人类暴露于环境中的危害因素下,所出现的不良特征,旨在识别环境中可能出现的风险源,意在评价污染物与人体发生接触的暴露途径以及定量评价暴露结果对人体健康的危害程度。风险评价最开始兴起于上世纪七十年代工业化比较发达的几个国家,其中以美国在该方面的研究最为突出。人体健康风险评价技术的发展历史大致可分为两个阶段:七十年代到八十年代初,风险评价处于探索期,1976年美国环保署(USEPA)首次颁布“致癌物风险评价”准则[58],此时的风险评价理论尚不成熟,仅仅采取毒性鉴定的方法;八十年代中期以后,风险评价得到快速发展,为风险评价体系建立的技术准备阶段。1983年美国国家科学院(NAS)发布了题为《联邦政府的风险评价管理》的报告[59]提出风险评价的规范要求,统称为风险评价的“四步法”,即危害鉴别,剂量-反应关系评价,暴露评价和风险表征,并对各部分都作了明确的定义。此后,USEPA在包括致畸风险评价、致癌风险评价、发育毒物健康风险评价、化学混合物健康风险评价、暴露评价等[60]方面编制并实施了相关的文件。

我国于上世纪九十年代开始开展相关方面的研究,到目前为止,国内学者研究重点主要在大气环境、水环境和土壤环境领域的健康风险评价。王永杰[61]等介绍了健康风险评价模型和结果的不确定性问题,讨论了非致癌毒性评价和致癌毒性评价中的不确定性因素。杨刚[62]等开展了对西南山地铅锌矿区耕地土

壤和谷类产品的健康风险评价研究。秦普丰[63]等研究和评价株洲市不同功能区土壤和蔬菜中重金属污染和健康风险状况。重金属作为一种持久性潜在的有毒污染物,进入土壤后因不能被生物降解而长期存在于土壤中,且不断积累,进而导致农作物中重金属含量增高,经口吸入及皮肤接触含有重金属的土壤、饮用地下水及地表水、食用粮食蔬菜等暴露途径摄入的重金属会危害人体健康[64]。

5. 总结

综上所述,众多学者意识到重金属对人体产生的危害,开始重视重金属对农田土壤生态环境与长产能力的影响,因此农田土壤重金属成为全世界的热点问题[65][66][67]。从单一的评价某重金属元素生态风险到多元化的评价重金属生态风险,建立评价体系,评价农田土壤、农产品及人体健康风险。从风险评价转化到风险预警,预测现有重金属污染会在哪个时期对生态环境、农产品质量安全及人体健康造成危害。国内外主要对农田土壤 Cd、Cr、Pb、Zn、Cu、Hg 及 As 重金属风险预警,对农产品及人体风险预警主要集中在三种常见毒性最强的 Cd、As 及 Hg 元素。

6. 研究展望

农田土壤重金属污染风险预警与周边生产活动密切相关,但对矿区农田土壤重金属种类研究较少,风险预警评价方法单一,非矿区农田土壤风险评价重金属种类较少。农产品与人体健康风险评价方法单一,也只对常涉及的几种重金属进行风险评价。目前需要加强如下研究:

1) 对矿区农田土壤重金属污染风险预警应多元化,不要仅局限在 Cd, Pd, Zn, As, Hg, Cu, 应根据主要矿产种类以及常伴生的矿物进行重金属污染风险评价。

2) 对非矿区农田土壤重金属的来源研究较少,应加强相关研究,从根本上解决农田土壤重金属污染问题。

3) 对不同成土母质上发育的土壤重金属风险预警研究缺乏,难以确定不同成土母质发育的土壤中重金属是来源于母质还是后天污染。

4) 农田土壤风险预警评价方法单一,主要以内罗梅综合污染指数法、污染负荷指数法、潜在生态风险指数法及生态风险预警指数法评价为主。对人体健康风险预警评价仅有美国环保署(USEPA)的评价方法。

5) 风险预警评价的研究区域主要集中在平原地区的农田土壤,对于山区、地质高背景区等农田土壤的研究较少,常用的评价方法是否适用有待于进一步研究确认。

基金项目

国家自然科学基金委员会——贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目:喀斯特地区重金属污染过程与防控机制研究(U1612442)。

参考文献

- [1] 麦麦提吐尔逊·艾则孜,阿吉古丽·马木提,艾尼瓦尔·买买提. 新疆和硕绿洲农田土壤重金属污染及生态风险[J]. 地球与环境, 2018, 46(1): 66-75.
- [2] 王高辉. 矿区煤矸石山周围土壤重金属分布规律研究[J]. 能源环境保护, 2008, 22(2): 11-18.
- [3] 安玉琴,张瑞琦,袁树华,金红,王刚,裴秀坤,刘毅刚. 河北省农田土壤重金属健康风险评价[J]. 职业与健康, 2016, 32(9): 1252-1255.
- [4] 薛忠财,李纪红,李十中,杜瑞恒,吕芑,籍贵苏,刘永兵. 能源作物甜高粱对 Cd 污染农田的修复潜力研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1621-1627.

- [5] 樊霆, 叶文玲, 陈海燕, 鲁洪娟, 张颖慧, 李定心, 唐子阳, 马友华. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(10): 1727-1736.
- [6] 雷凌明. 农田土壤重金属污染现状与评价[D]. [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [7] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014, 36(5): 10-11.
- [8] 王玉军, 刘存, 周东美, 等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状——关于《全国土壤污染状况调查公报》中有关问题的讨论和建议[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1465-1473.
- [9] 陈岩, 朱先芳, 季宏兵, 等. 北京市得田沟和崎峰茶金矿周边土壤中重金属的粒径分布特征[J]. 环境科学学报, 2014, 34(1): 219-228.
- [10] Zhou, J.-M., *et al.* (2007) Soil Heavy Metal Pollution around the Dabaoshan Mine, Guangdong Province, China. *Pe-dosphere*, **17**, 588-594. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(07\)60069-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60069-1)
- [11] Guo, Z.H., *et al.* (2010) Spatial Distribution and Environmental Characterization of Sediment-Associated Metals from Middle-Downstream of Xiangjiang River, Southern China. *Journal of Central South University of Technology*, **17**, 68-78. <https://doi.org/10.1007/s11771-010-0013-7>
- [12] 郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 3-11.
- [13] 徐芹磊, 陈炎辉, 谢团辉, 等. 铅锌矿区农田土壤重金属污染现状与评价[J]. 环境科学与技术, 2018(2): 176-182.
- [14] 高军侠, 党宏斌, 姜灵彦, 等. 矿区周围农田土壤重金属铜锌铅污染及生物效应分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(26): 137-141.
- [15] 杨敏, 滕应, 任文杰, 等. 石门雄黄矿周边农田土壤重金属污染及健康风险评估[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1172-1178.
- [16] 丁瑞兴, 孙玉华, 黄晓澜, 等. 南京市东郊菜地的土壤重金属积累及蔬菜品质评价[J]. 农村生态环境, 1987(3): 5-11.
- [17] Guo, Z., *et al.* (2010) Spatial Distribution and Environmental Characterization of Sediment-Associated Metals from Middle-Downstream of Xiangjiang River, Southern China. *Journal of Central South University of Technology*, **17**, 68-78. <https://doi.org/10.1007/s11771-010-0013-7>
- [18] 李忠义, 张超兰, 邓超冰, 等. 铅锌矿区农田土壤重金属有效态空间分布及其影响因子分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1772-1776.
- [19] 周艳, 陈樯, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评估[J]. 环境科学, 2018(6): 1-20.
- [20] 邹小冷, 祖艳群, 李元, 等. 云南某铅锌矿区周边农田土壤 Cd、Pb 分布特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2143-2148.
- [21] 覃朝科, 农泽喜, 黄伟, 等. 广西某铅锌矿区农田土壤重金属形态分布特征[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(15): 146-149.
- [22] 蒋晓春. 中国青铜时代起始时间考[J]. 考古, 2010(6): 76-82+115.
- [23] 迪娜·吐尔生江, 李典鹏, 胡毅, 等. 新疆奴拉赛铜矿周边土壤理化特征和重金属污染生态风险评估[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1): 17-23.
- [24] 窦智勇, 程建华, 周平, 等. 基于总量及有效态的铜陵矿区农田土壤重金属生态风险评估[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(11): 6-10.
- [25] 涂常青, 温欣荣, 张镜, 等. 硫化铜矿区周边农田土壤重金属污染及其生态危害评价[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 987-992.
- [26] 王成辉, 徐珏, 黄凡, 等. 中国金矿资源特征及成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2315-2325.
- [27] 张文钊, 卿敏, 牛翠祎, 等. 中国金矿床类型、时空分布规律及找矿方向概述[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(5): 721-732.
- [28] 陈璐, 王凯荣, 王芳丽, 等. 平度市金矿区农田土壤 - 玉米系统重金属污染风险评估[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 161-166.
- [29] 徐友宁, 张江华, 柯海玲, 等. 某金矿区农田土壤重金属污染的人体健康风险[J]. 地质通报, 2014, 33(8): 1239-1252.
- [30] 王丽, 王力, 和文祥, 等. 神木煤矿区土壤重金属污染特征研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(Z2): 1343-1347.
- [31] Teixeira, E.C., Ortizls, S., Alves, M.F.L., *et al.* (2001) Distribution of Selected Heavy Metals in Fluvial Sediments of Coal Mining Region of Baixo Jacuí, R S, Brazil. *Environmental Geology*, **41**, 145-154.

- [32] Clark, M.W. and Wacsh, S.R. (2001) The Distribution of Heavy Metals in an Abandoned Mining Area, a Case Study of Strauss Pit. The Drake Mining Area, Australia: Implications for the Environmental Management of Mine Sites. *Environmental Geology*, **40**, 655-663. <https://doi.org/10.1007/s002549900073>
- [33] Ftnkflman, R.B. and Gross, P.M.K. (1999) The Types of Data Needed for Assessing the Environmental and Human Impacts of Coal. *International Journal of Coal Geology*, **40**, 91-101.
- [34] Dinellie, T.F. (2001) Factors Controlling Heavy Metal Dispersion in Mining Areas the Case of Vigonzano (Northern Italy), a Fe-Cu Sulfide Deposit Associated with Ophiolitic Rocks. *Environmental Geology*, **40**, 1138-1150. <https://doi.org/10.1007/s002540100316>
- [35] Mishra, V.K., Upadhyaya, A.R., et al. (2008) Heavy Metal Pollution Induced Due to Coal Mining Effluent on Surrounding Aquatic Ecosystem and Its Management through Naturally Occurring Aquatic Macrophytes. *Bioresource Technology*, **99**, 930-936.
- [36] 朱玉高. 陕北煤矿区农田土壤重金属污染现状及修复研究[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(5): 105-108.
- [37] 袁新田, 张春丽, 孙倩, 等. 宿州市煤矿区农田土壤重金属含量特征[J]. 环境化学, 2011, 30(8): 1451-1455.
- [38] 王帅. 某铀矿区农田土壤重金属形态分析及其风险评价[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 东华理工大学, 2017.
- [39] 湛天丽, 黄阳, 滕应, 等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 474-480.
- [40] 杨涛. 赣南钨矿区农田土壤重金属污染特征及风险评价[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
- [41] 顾秉谦. 贵州遵义松林 Ni-Mo 多金属矿区土壤砷、铊生态风险评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2017.
- [42] 赵纪新, 尹鹏程, 岳荣, 等. 我国农田土壤重金属污染现状, 来源及修复技术研究综述[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(4): 19-21+26.
- [43] 杜瑞英, 文典, 赵沛华, 等. 农田土壤重金属污染主要来源识别研究[J]. 农产品质量与安全, 2017(6): 61-64.
- [44] 赵其国, 骆永明. 论我国土壤保护宏观战略[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 452-458.
- [45] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2964-2971.
- [46] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆焉耆盆地辣椒地土壤重金属污染及生态风险预警[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1075-1086.
- [47] 石磊. 巴中市农田土壤重金属分布及生态风险评价[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(4): 176-180.
- [48] 阿吉古丽·马木提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆焉耆县耕地土壤重金属垂直分布特征与污染风险[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 367-373.
- [49] 胡尊芳, 孙彦伟, 程龙, 等. 东平湖湖区农田土壤重金属污染评价[J]. 土壤与作物, 2017, 6(4): 283-290.
- [50] 陈京都, 成强, 戴其根. 蔬菜重金属污染调查与评价方法探讨[J]. 现代农业科技, 2018(1): 243-244.
- [51] Nan, Z.R., Li, J.J., Zhang, J.M., et al. (2002) Their Transfer in Soil-Crop System under Actual Field Condition. *Science of the Total Environment*, **285**, 187-195. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00919-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00919-6)
- [52] 蔡立梅, 王秋爽, 罗杰, 等. 湖北大冶铜绿山矿区蔬菜重金属污染特征及健康风险研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018(4): 873-881.
- [53] 周泉潇, 毕春娟, 汪萌, 等. 大气沉降对叶菜重金属的污染效应及其健康风险[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2018(2): 141-150.
- [54] 欧阳喜辉, 赵玉杰, 刘凤枝, 等. 不同种类蔬菜对土壤镉吸收能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008(1): 67-70.
- [55] 杨晖, 梁巧玲, 赵鹏, 等. 7 种蔬菜型作物重金属积累效应及间作鸡眼草对其重金属吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 209-214.
- [56] 甄燕红, 成颜君, 潘根兴, 等. 中国部分市售大米中 Cd、Zn、Se 的含量及其食品安全评价[J]. 安全与环境报, 2008(1): 119-122.
- [57] 郑富海, 黎宁, 张卫, 等. 桂西北稻田重金属污染及健康风险评价[J]. 西南农业学报, 2017, 30(8): 1886-1893.
- [58] Robert, K. (1987) Contribution of Toxicology towards Risk Assessment of Carcinogens. *Archives of Toxicology*, **60**, 224-228.
- [59] National Research Council (1983) Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process. National Academies Press, Washington DC.
- [60] 杜锁军. 国内外环境风险评价研究进展[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(5): 193-194.
- [61] 王永杰, 贾东红. 健康风险评价中的不确定分析[J]. 环境工程, 2003, 21(6): 66-69.

- [62] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 2014-2021.
- [63] 秦普丰, 刘丽, 侯红, 等. 工业城市不同功能区土壤和蔬菜中重金属污染及其健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1668-1674.
- [64] 何峰. 重庆市农田土壤——粮食作物重金属关联特征与污染评价[D]: [博士学位论文]. 重庆: 西南农业大学, 2004.
- [65] Arai, T., Ishikawa, S., Murakami, M., *et al.* (2010) Heavy Metal Contamination of Agricultural Soil and Counter Measures in Japan. *Paddy and Water Environment*, **8**, 247-257. <https://doi.org/10.1007/s10333-010-0205-7>
- [66] Wolnik, K.A., Fricke, F.L., Capar, S.G., *et al.* (1985) Elements in Major Raw Agricultural Crops in the United States. 3. Cadmium, Lead, and 11 Other Elements in Carrots, Field Corn, Onions, Rice, Spinach, and Tomatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **33**, 807-811. <https://doi.org/10.1021/jf00065a010>
- [67] Li, X.N., Jiao, W.T., Xiao, R.B., *et al.* (2015) Soil Pollution and Site Remediation Policies in China: A Review. *Environmental Reviews*, **23**, 263-274. <https://doi.org/10.1139/er-2014-0073>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7255, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjss@hanspub.org