

Research Progress on Risk Profile of Farmland Soil Heavy Metal Pollution

Xiaoliao Wei^{1*}, Tengbing He^{1,2,3#}

¹College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Guizhou Provincial Livestock and Poultry Breeding Pollution Control and Resource Technology Engineering Laboratory, Guiyang Guizhou

³Institute of New Rural Development, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Email: 1285733928@qq.com, #hetengbing@163.com

Received: Jul. 24th, 2018; accepted: Aug. 7th, 2018; published: Aug. 14th, 2018

Abstract

The risk model of heavy metal pollution in farmland is analyzed by using Nemerow index method, geological accumulation index method, enrichment factor method, pollution load index method and potential ecological risk index method. At present, the harms of cultivated land to heavy metals are serious. The research summarizes the advantages and disadvantages of several commonly used soil heavy metal evaluation methods and summarizes the landscape pattern of soil heavy metal pollution and the spatial distribution pattern of soil heavy metal pollution, indicating that different soil heavy metals have similarities in the global space and the spatial pattern of heavy metals. Besides, it points out the problems existing in the risk pattern of heavy metal pollution in farmland soil.

Keywords

Farmland Soil, Heavy Metals, Spatial Distribution, Risk Pattern

农田土壤重金属污染风险格局研究进展

韦小了^{1*}, 何腾兵^{1,2,3#}

¹贵州大学农学院, 贵州 贵阳

²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

³贵州大学新农村发展研究院, 贵州 贵阳

Email: 1285733928@qq.com, #hetengbing@163.com

收稿日期: 2018年7月24日; 录用日期: 2018年8月7日; 发布日期: 2018年8月14日

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 韦小了, 何腾兵. 农田土壤重金属污染风险格局研究进展[J]. 土壤科学, 2018, 6(4): 77-84.

DOI: 10.12677/hjss.2018.64010

摘要

通过分析内梅罗指数法、地质累积指数法、富集因子法、污染负荷指数法、潜在生态风险指数法等评价方法来阐述农田重金属存在的污染风险格局, 众多研究中常用的评价法均表明当前农田受到重金属的危害处于比较严重的局面。研究总结了几种常用的土壤重金属评价方法的优点与缺点, 并对土壤重金属污染景观格局、土壤重金属污染空间分布格局进行综述, 结果表明不同土壤重金属在全局空间上具有一定的相似; 并指出农田土壤重金属污染风险格局存在的问题进行展望。

关键词

农田土壤, 重金属, 空间分布, 风险格局

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. 引言

在自然的农业土壤中, 许多重金属含量都是微小的。然而, 由于外来污染物的排放超过一定水平, 土壤污染发生, 导致农产品受到污染。如今, 农业用地的土壤污染已经成为一个社会问题而受到各国政府和科学家的广泛关注[1] [2]。Teng 等[3]和 Li 等[4]对全国多地农业区土壤重金属含量的监测显示重金属污染类型多样, 污染面积不断增大, 污染危害等级在提高。随着工农业发展的加剧, 多种有害物质会通过大气沉降、工业排放、农药、化肥滥用等途径进入土体中, 导致土壤环境质量下降, 尤其是重金属污染造成的中国农田土壤污染问题尤为显著[5]。中国农田土壤污染格局复杂多样, 污染程度严重。根据《2014年度全国土壤污染调查报告》[6]的调查, 全国土壤环境总体污染严重, 土壤点超标率已达 19.4%以上, 其中农田土壤镉富集率较高, 是最为严重的。许多经典案例表明重金属通过食物链传入人体内导致重金属含量超过人体承受的水平从而导致人体重金属中毒, 例如, 20 世纪 30 年代的日本疼痛病和 20 世纪 50 年代的“水俣病”说明重金属对人类是极其有害的。因此查明农田土壤重金属的污染的机理成为多个学科的关注点[7] [8]。土壤重金属污染作为一个整体, 具有其景观格局和空间分布格局的特征。基于土壤重金属污染评价, 利用景观格局指数法从斑块类型和景观层次上直接反映土壤重金属污染级别的面积占用率, 解决了边界复杂和聚集的问题以及土壤整体多样性和破碎化程度等问题, 剖析土壤中重金属的污染程度和空间格局特征。为土壤重金属污染的评价和分布特征提供了一种新的研究方法。然而, 目前关于土壤重金属污染景观格局和空间分布格局研究相对较多, 而对于土壤重金属污染风险格局的研究鲜见报道, 所以有必要对土壤重金属污染风险格局进行研究, 为农田土壤保护研究提供基础依据。

2. 农田土壤重金属污染风险研究现状

2.1. 重金属定义、特点及形态

土壤重金属污染是指由于人类活动或土壤形成原因, 土壤中重金属含量超过其自然背景值所引起的生物和环境破坏现象[9] [10]。农业土壤重金属污染主要包括 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg 等元素。重金属污染物具有隐蔽性、滞后性和累积性等特点。因此土壤一旦被污染, 则需要长时间对土壤进行修

复[11]。改进的 BCR (BCR 为欧洲共同体参考物机构, 英文全称为 European Community Bureau of Reference) 四步连续萃取法将土壤中的重金属分为酸可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态。其中残渣态的重金属对环境和人体不造成威胁。

2.2. 农田土壤重金属污染风险研究现状

土壤是万物生长的基础, 它与其他圈层的物体时刻进行物质和能量的交换。因此外界可通过大气沉降、污水灌溉、农药、化肥以及固体废弃物堆放等途径把重金属传入土体中导致土壤污染, 其中尤以 Cd、Pb、Cu、Hg、Zn 及其复合物污染特别严重[12] [13]。陈卫平[14]等阐述我国农田土壤重金属污染防治面临区域差异显著、污染危害加剧、风险管控困难等主要问题与挑战, 赵其国等[15] [16]对我国农田土壤重金属污染面积进行估算, 其污染面积约为 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 年粮食污染可达 $1.2 \times 10^7 \text{ t}$, 造成经济损失 2×10^{10} 元。宋伟等[5]对近 20 年来涉及全国 83.9% 的省份和 22.5% 的地级市土壤重金属污染状况进行整理, 发现我国城市、城郊和农村均有不同级别的农田重金属污染问题。同时赵其国和骆永明[16]指明我国区域农田土壤重金属污染严重, 以西南, 华中, 长江三角洲及珠江三角洲等地区尤为严重。曾希柏等[17] [18]对矿区周边农田湖南和广东等地的调查结果显示, 样品超过现行土壤环境质量 II 级标准的比例达到 21.1%~62.3%。王金贵[19]对我国 22 种典型农田土壤 Cd 的解吸特性进行了研究, 结果显示红壤、赤红壤和黄壤等酸性土壤类别在不同温度下 Cd 解析率均超过 15%, 明显高于碱性土壤类别(如灰漠土和栗钙土等)的 Cd 解析率(<10%)。Rafiq 等[20]对我国 7 种典型农田土壤 Cd 活性进行研究, 结果显示酸性土壤类别中, 富铝土中交换态 Cd 含量大约为黄壤的 4 倍。

2.3. 农田土壤重金属污染风险评价方法

目前, 在土壤重金属污染评价方面, 国内外通常采用以下几种方法:

1) 内梅罗单因子指数法

内梅罗单因子指数法是当前国内外用来评价综合污染指数计算最常用的一种方法, 是一种突出最大值的计权型多因子环境质量指数, 能从多方面综合地评价重金属的污染程[21]。计算公式如(1):

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

单因子污染指数法 P_i , 基于土壤元素背景值, 采用单因子污染指数法对重金属累积污染程度进行评价。若 $P_i < 1$, 这表明土壤没有被人类污染; 若 $P_i > 1$, 它已经被人类污染了。 P_i 是污染物 I 在土壤中的环境指标, ; S_i 是污染物 I ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的评价标准。

内梅罗综合指数法(Nemerow index)综合考虑了多种污染元素的综合效应, 也是当前国内外许多科研者用来评价综合污染指数计算最常用的一种方法[22]。其计算公式见公式(2):

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\overline{P}_i)^2 + P_{i\text{max}}}{2}} \quad (2)$$

P_i 为单项污染指数平均值; P_{max} 为最大单项污染指数。若 $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 未被污染, 则安全水平; 若 $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$, 则达到警戒水平; $1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$ 是轻度污染; $2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$; 中等污染; $P_{\text{综}} > 3$ 为重污染。

3) 地累积指数法

地累积指数法是由德国学者 Muller 提出的, 王宁[23]等采用该法利用地累积指数法, 对于城市污泥中的汞污染现状进行了评价, 发现汞重度污染以上的省份比例达到 60%以上。地累积指数法不仅能反映土壤重金属含量的自然布特征, 而且也能体现土壤受人类活动的影响, 其公式(3):

$$I_{geo} = \log 2 [C_n (K * Bn)] \quad (3)$$

其中: C_n 为土壤重金属元素 n 的实测含量, (Bn 为该研究区域土壤背景值), K 为由于岩石差异引起土壤背景值变动而取的系数(一般 $K = 1.5$)。地累积指数 I_{geo} 的分级标准如下, $I_{geo} \leq 0$, 无累积污染; $0 < I_{geo} \leq 1$, 累积污染为没有 - 中度; $1 < I_{geo} \leq 2$, 中度累积污染; $2 < I_{geo} \leq 3$ 中-强累积污染; $3 < I_{geo} \leq 4$, 较强累积污染; $4 < I_{geo} \leq 5$, 强 - 极强累积污染; $I_{geo} > 5$, 极强累积污染。

4) 富集因子法

富集因子法是评价人类活动对土壤重金属浓度影响的参数。为了减少采样和样品制备的人为影响, 并保证每个指标的可比性和等价性, 通常选择参考元素作为参考标准。常用参比元素主要有 Sc, Mn, Ti, Al, Fe, Ca 等, 国内外许多学者已开始把它应用到土壤重金属污染的评价中[24]。其具体计算公式如(4):

$$EF = \frac{Cn(\text{sample})/C_{ref}(\text{sample})}{Bn(\text{background})/B_{ref}(\text{background})} \quad (4)$$

在该公式中, EF 是土壤中重金属的富集因子; Bn (背景)是评价和参考区中某一元素的浓度; C_{ref} (sample), B_{ref} (background)是评价区和参考区浓度的参考元素。Sutherland [25]根据富集因子可将重金属污染分为 5 个层次见表 1。

5) 污染负荷指数法

污染负荷指数法是由 Tomlinson 等提出的, 周静[26]等采用地累积指数法、污染负荷指数法对张家港河金港段表层沉积物中重金属做了评价。结果表明: 大部分处于重度污染状态。其公式如(5)、(6):

$$CF_i = C_i / C_{oi} \quad (5)$$

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 * CF_2 * CF_3 * \dots * CF_n} \quad (6)$$

其中: CF_i 为重金属元素 i 的最高污染系数; C_i 为重金属元素 i 的实测含量, C_{oi} 为重金属元素 i 的评价标准, PLI 为某一点的污染负荷指数; n 为重金属元素个数; PLI_{zone} 为某一区域的综合污染负荷指数; m 为采样点个数。污染负荷指数 PLI 的分级标准如下: $PLI \leq 1$, 未污染; $1 < PLI \leq 2$, 中度污染; $2 < PLI \leq 3$, 重污染; $PLI > 3$, 严重污染。

6) 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是由瑞典学者 Hankason 等提出的, 黄华斌为安溪铁观音茶园土壤中重金属运用此法以及其他方法评价重金属污染特征及潜在生态风险, 结果表明, 不同乡镇茶园重金属平均含量均超过福建省土壤环境背景值, 采用定量方法测定不同重金属的潜在危害等级[27] (表 2)。

$$C_f^i = C^i / C_n^i \quad (7)$$

$$E_r^i = T_r^i * C_f^i \quad (8)$$

$$R_t = \sum_i^n = 1, E_r^i \sum_i^n = 1, [T_r^i * (C^i / C_n^i)] \quad (9)$$

其中: C_f^i 为土壤重金属 i 的污染参数; C^i 为土壤重金属 i 的实测浓度; C_n^i 为计算所需的参比值。 T_r^i 为单个污染物的性响应参数; E_r^i 为土壤重金属 i 的潜在生态危害系数; R_t 为多种重金属的综合潜在生态危害指数, 危险等级见表 2。

评价重金属的方法有很多种, 各方法各有优缺点。根据前人的研究总结了几种常用的重金属评价方法的优点与不足(表 3)。

Table 1. Relationship between enrichment factors and heavy metal pollution levels**表 1.** 富集因子与重金属污染程度的关系

重金属富集因子	重金属污染程度
$EF < 2$	未-轻
$2 \leq EF < 5$	中等
$5 \leq EF < 20$	重
$20 \leq EF < 40$	严重
$40 \leq EF$	极重

Table 2. Potential hazard levels of different heavy metals**表 2.** 不同重金属潜在危害等级

危害程度	轻	中	强	较强	极强
E'_r	<40	40~80	80~160	160~320	>320
R_f	<150	150~300	300~600	600~1200	>1200

Table 3. Advantages and disadvantages of several commonly used methods for evaluating heavy metals**表 3.** 几种常用的重金属评价方法的优点与不足

常用评价方法	优点	缺点
单因子指数法	具有明确的目标、可比性显著以及计算简便。	只局限于土壤中某种特定元素的分析,不能反映出污染元素的综合效应。
内梅罗综合指数法	数学公式计算快捷、物理概念清晰等能够更为全面、地反映出研究区域内的土壤重金属的污染状况。	不能考虑重金属元素的毒性差异,得出的评价结果往往比较机械。
地累积指数法	所需要的数据单一、方法简便,同时综合考虑了人为污染因素和地球化学背景值等多要素所造成的影响。	未考虑到重金属的形态差异与地理空间差异性的影响。
富集因子法	选取参考元素作为参考标准,减少了采样过程中人为的影响,保证了指标之间的可比性和等价性。参比元素需要稳定的性质,不易受到环境和分析测试的影响。	参考元素的选择不规范,不同区域背景值的不确定性。
污染负荷指数法	可以反映各重金属对区域污染的贡献程度,还可以进一步反映各重金属污染的时空变化特征。	该方法不考虑由不同污染源引起的背景差异。
潜在生态风险指数法	将环境生态效应与毒理学联系起来。	不考虑重金属相互作用的影响。

3. 土壤重金属污染风险格局研究

3.1. 土壤重金属污染空间分布格局

土壤受五大成土因素的影响,具有复杂性和时空变异性,土壤性质随空间位置的变化称为空间变异,包括土壤性质在水平空间上的变异和随土壤垂直剖面而变化的变异,对于农业土壤而言,其空间变异性通常是指水平空间变异[28]。土壤重金属含量是一个典型的区域化变量,具有高度的空间相关性和依赖性。对于具有空间结构变量的空间变异分析,采用经典统计学来分析是远远不够的[29]。地统计学就是一种能够弥补经典统计学缺陷的方法。它最早应用于采矿业,在本世纪 60 年代,国外土壤学家开始将地统计学原理应用于土壤空间变异的研究[30]。而在这方面的研究我国相对落后一些,90 年代才有部分科学家将地统计学运用到土壤重金属的研究上[31]。目前对土壤重金属分布特征以及变异规律的研究最多的是采用地统计学方法[32] [33] [34]。有研究表明采用经典统计学法和地统计学方法,研究土壤重金属含量的空间

分布,发现不同土壤重金属在空间结构具有一定的相似[35][36]。刘晖等[37]利用多元统计方法研究了湖北梁子湖水体及底泥中12种微量元素和重金属的含量及空间格局,空间格局表明,在人类活动的影响下,湖水中重金属的分布强烈,最大值出现在梁子岛附近,在人类活动中相对集中,沉积物中的差异不大。湖泊沉积物由于地质背景的一致性。尤龙辉等[38]研究了福建沿海公路沿线土壤重金属的分布规律。结果表明,有林带和无林带路旁土壤重金属含量峰值均不在路肩处。李小平等[39]通过收集全国35个城市儿童血铅含量数据,利用SPSS、ArcGIS和污染评价模型对数据进行了处理与分析,研究结果表明我国城市土壤铅与儿童血铅污染空间分异较大,局部地区污染严重,东部高、中部低;南方城市、特大城市与老工业基地城市较大,北方城市、中小城市较小的空间分布格局。唐志娟[40]对长沙市城市森林土壤重金属含量测定结果表明,长沙市森林土壤中5种重金属的平均含量为 $Mn > Zn > Pb > Cu > Cd$,分布特点为:城市中心 > 城市边缘 > 城市周边。

3.2. 土壤重金属污染景观格局

景观生态学最早于1939年由德国科学家Troll提出,至20世纪80年代由中国老一辈引入中国[41]。景观空间格局是指不同形状和大小的景观斑块的空间排列,它是各种生态过程作用的结果。不少研究证实,土壤重金属的迁移扩散过程往往为景观格局所决定[42][43]。目前,结合景观格局指数与土壤重金属污染的研究多集中在快速城镇化发展对区域生态安全及生态服务功能的影响等方面[44][45]。李诚等[46]以2005年珠江三角洲As, Cd, Ni和Pb4种土壤重金属为研究对象,分析景观格局对农业区土壤重金属污染的影响,结果表明耕地土壤重金属污染水平高于果园和林地;土壤重金属浓度与水体面积比例、破碎化程度、景观形状复杂度呈显著正相关;土壤重金属污染程度与距离工业区的距离相关,且距离越近污染程度越高。田壮等[47]以江苏省盐城市海岸带为研究对象,分析耦合景观格局与重金属浓度的空间分布,结果表明人类活动主导的景观格局演变与重金属的浓度具有空间分布的相关性。胡潇潇等[48]用2010年TM遥感影像及一系列景观格局指数,对张家港土壤-水稻系统中重金属迁移与区域农业景观格局变化的相互关系进行了研究,结果表明研究区土壤-水稻系统安全评价结果较好。朱文转等[49]对惠州市Cu, Zn, Ni等8种土壤重金属污染景观空间格局特征研究,结果表明,8种土壤重金属的单因子指数和综合污染指数的算术平均值均小于0.5各指数均服从正态分布,惠州市东部及东北部重金属污染指数较低,南部重金属污染指数相对较高。陈昕等[50]利用对苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征进行了研究。重金属在土壤中的分布主要集中在研究区,人类活动对土壤中低含量区的影响最大,土壤中重金属的污染有进一步的发展趋势。

4. 研究展望

目前对农田重金属污染风险的评价较多,但还存在一些问题:一是对农田土壤重金属污染风险评价方法还不完善,每个地方的土壤背景值不一样,因此在评价重金属污染风险上要结合当地的土壤背景并且结合多种评价方法来综合评价土壤重金属污染风险。二是对重金属污染的研究虽然多,但关注点集中在重金属总量上,而在重金属的形态研究上相对不足,今后应该在土壤重金属的形态上做进一步研究。三是土壤重金属空间结构具有明显的尺度依赖性,但土壤重金属空间分布的研究多集中在单一空间尺度。四是对土壤重金属污染格局划分比较少,划分侧重于重金属污染景观格局和空间分布的格局,而对土壤重金属污染风险格局的划分少,在今后的研究中需要进一步深入研究。掌握农田土壤重金属污染风险格局以及影响因素,为农田土壤保护和农产品质量安全提供科学依据。

5. 结论

一是农田受到重金属的危害处于比较严重的局面,从区域上来说西南部地区的重金属最为严重,其

中重金属镉、铅和汞是污染最严重的重金属。矿区土壤重金属污染严重, 尤其是儿童。三是土壤重金属污染的潜在生态风险, 对人体健康危害的研究较少。四指出农田土壤重金属污染风险格局存在的问题进行展望。

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] Arao, T., Ishikawa, S., Murakami, M., *et al.* (2010) Heavy Metal Contamination of Agricultural Soil and Countermeasures in Japan. *Paddy & Water Environment*, **8**, 247-257. <https://doi.org/10.1007/s10333-010-0205-7>
- [2] 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>
- [3] Teng, Y., Wu, J., Lu, S., *et al.* (2014) Soil and Soil Environmental Quality Monitoring in China: A Review. *Environment International*, **69**, 177-199. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.04.014>
- [4] Li, M., Xi, X., Xiao, G., *et al.* (2014) National Multi-Purpose Regional Geochemical Survey in China. *Journal of Geochemical Exploration*, **139**, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.06.002>
- [5] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298.
- [6] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014.
- [7] 卢桂兰, 韩梅, 李发生. 北京市通州污灌区土壤环境质量监测和蔬菜重金属污染状况研究[J]. 中国环境监测, 2005, 21(5): 54-57.
- [8] Zhao, L.Y., Schulin, R. and Nowack, B. (2009) Cu and Zn Mobilization in Soil Columns Percolated by Different Irrigation Solutions. *Environmental Pollution*, **157**, 823-833. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.11.011>
- [9] 王艳娜. 土壤重金属污染现状与防治方法[J]. 价值工程, 2014, 33(35): 311-312.
- [10] 杨国义, 张天彬, 万洪富, 等. 广东省典型区域农业土壤中重金属污染空间差异及原因分析[J]. 土壤, 2007, 39(3): 387-392.
- [11] Zheng, N., Wang, Q., Zhang, X., *et al.* (2007) Population Health Risk Due to Dietary Intake of Heavy Metals in the Industrial Area of Huludao City, China. *Science of the Total Environment*, **387**, 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.07.044>
- [12] Markus, J. and Mcbratney, A.B. (2002) A Review of the Contamination of Soil with Lead: II. Spatial Distribution and Risk Assessment of Soil Lead. *Environment International*, **27**, 399-411. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00049-6](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00049-6)
- [13] Liu, X., Tian, G., Jiang, D., *et al.* (2016) Cadmium (Cd) Distribution and Contamination in Chinese Paddy Soils on National Scale. *Environmental Science & Pollution Research*, **23**, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6968-7>
- [14] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261-272.
- [15] 赵其国, 黄国勤, 钱海燕. 生态农业与食品安全[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1127-1134.
- [16] 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.
- [17] 曾希柏, 苏世鸣, 马世铭, 等. 我国农田生态系统重金属的循环与调控[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2418-2426.
- [18] 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 186-194.
- [19] 王金贵. 我国典型农田土壤中重金属镉的吸附-解吸特征研究[J]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [20] Rafiq, M.T., Aziz, R., Yang, X., *et al.* (2014) Cadmium Phytoavailability to Rice (*Oryza sativa* L.) Grown in Representative Chinese Soils. A Model to Improve Oil Environmental Quality Guidelines for Food Safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **103**, 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.10.016>
- [21] 陈京都, 戴其根, 许学宏, 等. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3487-3496.
- [22] 张金婷, 孙华. 内梅罗指数法和模糊综合评价法在土壤重金属污染评价应用中的差异分析[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(4): 27-31.

- [23] 王宁, 刘清伟, 职音, 等. 中国城市污泥中汞含量的时空分布特征[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2296-2305.
- [24] 张晓薇, 王恩德, 安婧. 辽阳弓长岭铁矿区重金属污染评价[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1789-1796.
- [25] Sutherland, R.A. (2000) Bed Sediment-Associated Trace Metals in an Urban Stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, **39**, 611-637. <https://doi.org/10.1007/s002540050473>
- [26] 周静, 刘松华, 许伟, 沈利清. 张家港河金港段表层沉积物中氮磷及重金属污染评价[J]. 环境与发展, 2018, 30(2): 8-10.
- [27] 黄华斌, 林承奇, 于瑞莲, 等. 安溪铁观音茶园土壤重金属分布及污染评价[J]. 环境化学, 2018, 37(5): 994-1001.
- [28] 李亮亮, 依艳丽, 凌国鑫, 等. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 265-268.
- [29] 秦耀东. 土壤空间变异研究中的半方差问题[J]. 农业工程学报, 1998(4): 48-53.
- [30] 秦耀东. 土壤空间变异研究中的定量分析[J]. 地球科学进展, 1992, 7(1): 44-49.
- [31] 陶澎, 邓宝山, 陈伟元. 深圳地区土壤汞含量分布与污染[J]. 土壤学报, 1993, 13(1): 35-38.
- [32] Liu, H.B., Guo, P.T., Wu, W., *et al.* (2011) Assessment of Soil Arsenic, Chromium, Mercury, and Lead at an Agricultural Landscape Scale. *Journal of Soil Contamination*, **20**, 995-1007. <https://doi.org/10.1080/15320383.2011.620050>
- [33] 方元, 吴志峰, 陈利燕, 等. 空间分析方法在土壤变异研究中的应用[J]. 农机化研究, 2006(4): 170-173.
- [34] 黄勇, 郭庆荣, 任海, 等. 地统计学在土壤重金属研究中的应用及展望[J]. 生态环境, 2004, 13(4): 681-684.
- [35] 王学军, 邓宝山, 张泽浦. 北京东郊污灌区表层土壤微量元素的小尺度空间结构特征[J]. 环境科学学报, 1997, 17(4): 27-31.
- [36] 张世文, 周妍, 罗明, 等. 废弃地复垦土壤重金属空间格局及其与复垦措施的关系[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 237-247.
- [37] 刘晖, 张昭, 李伟. 梁子湖水体和底泥中微量元素及重金属的空间分布格局及污染评价[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(51): 105-111.
- [38] 尤龙辉, 叶功富, 陈增鸿, 等. 福建沿海公路旁土壤重金属分布格局及防护林的作用[J]. 福建林学院学报, 2012, 32(3): 199-207.
- [39] 李小平, 刘洁, 夏舒楠, 等. 我国城市土壤铅与儿童血铅空间分布格局[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 226-232.
- [40] 唐志娟. 长沙市城市森林土壤重金属含量空间分布格局及其来源分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.
- [41] 陈利顶, 李秀珍, 傅伯杰, 等. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [42] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 等. 土地利用/覆被变化(LUCC)与土壤重金属积累的关系研究进展[J]. 生态学报, 2008(2): 798-804.
- [43] 宋成军, 张玉华, 刘东生, 等. 土地利用/覆被变化(LUCC)与土壤重金属积累的关系研究进展[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(5): 617-624.
- [44] Kong, F.H., Yin, H.W. and Nakagoshi, N. (2007) Using GIS and Landscape Metrics in the Hedonic Price Modeling of the Amenity Value of Urban Green Space: A Case Study in Jinan City, China. *Landscape & Urban Planning*, **79**, 240-252. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.02.013>
- [45] Wang, G., Guo, X., Shen, Y., *et al.* (2003) Evolving Landscapes in the Headwaters Area of the Yellow River (China) and Their Ecological Implications. *Landscape Ecology*, **18**, 363-375. <https://doi.org/10.1023/A:1026187826596>
- [46] 李铖, 李芳柏, 吴志峰, 等. 景观格局对农业表层土壤重金属污染的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1137-1144.
- [47] 田壮, 方淑波, 印春生, 等. 盐城海岸带景观格局变化和重金属空间分布相关分析[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(6): 912-921.
- [48] 胡潇潇, 李建龙, 刚成诚, 等. 张家港市农业景观格局变化及其对土壤-水稻系统重金属迁移的影响[J]. 天津农业科学, 2013, 19(4): 68-73.
- [49] 朱文转, 夏北成, 江学顶. 惠州市土壤重金属污染景观空间格局特征研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(8): 885-891.
- [50] 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 等. 苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2313-2321.

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