

中国土壤模式-作物系统重金属生物富集模型建立

郑宏艳, 姚秀荣, 侯彦林*, 刘书田, 米长虹, 黄治平, 王 农, 蔡彦明

(农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要:针对土壤模式建立土壤和作物重金属含量关系模型,旨在消除土壤属性对作物重金属吸收量的影响。当作物类型或品种确定后,作物重金属吸收量只与土壤重金属含量有关。提出了农田作物重金属生物富集的“土壤重金属含量-作物特性-土壤属性”关系理论,定义了土壤模式、土壤模式-作物系统重金属生物富集模型、土壤模式-作物系统重金属生物富集模型图谱等概念,确定了土壤模式的划分方法和使用方法,在此基础上以最近30年来中文期刊发表的土壤镉含量与水稻和小麦镉含量关系作为案例验证了以上方法。结果表明:水稻和小麦同一部位镉吸收量随土壤镉含量增加而增加,水稻和小麦吸收镉能力顺序为根>茎>叶>籽粒,水稻和小麦籽粒镉吸收量在同一范围内。

关键词:重金属生物富集模型;土壤模式-作物系统;中国

中图分类号:X151.9 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)02-0257-09 doi:10.11654/jaes.2015.02.008

Establishment of Heavy Metal Bioaccumulation Model of Soil Pattern-Crop System in China

ZHENG Hong-yan, YAO Xiu-rong, HOU Yan-lin*, LIU Shu-tian, MI Chang-hong, HUANG Zhi-ping, WANG Nong, CAI Yan-ming

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: A relational model of the content of heavy metals between soil and crop in farm system was established based on the different soil patterns to eliminate the effect of soil properties on heavy metal absorption by crop from soils. Thus heavy metals absorption by crops was only related to the contents of heavy metals in soil patterns when crop type or variety was confined. A theory was put forward about bioaccumulation of heavy metals dependent on the relations among heavy metal contents in soil, crop characteristics and soil properties. The concepts of soil pattern, soil pattern - crop system heavy metal bioaccumulation model and its atlas were also defined. Methods for classifying and utilizing soil patterns were established and verified based on the Chinese articles published in the last 30 years dealing with the relationships between Cd contents in farm soils and in rice and wheat plants. The results showed that the Cd absorption quantity in the same plant organ was increasing with Cd content in soil, with Cd absorption ability of root>stem>leaf>grain. The Cd content of rice grains and wheat grains was within the same range.

Keywords: heavy metal; bioaccumulation model; soil pattern-crop system; China

以往土壤-作物系统重金属关系研究主要集中在作物吸收重金属机理、迁移能力及影响因素方面,缺乏整体系统的研究,对土壤-作物系统重金属生物富集剂量-效应关系模型研究的也较少,因此相关资料难以为重金属土壤安全基准的建立提供科学依据^[1-2]。描述土壤-作物重金属传输的模型主要有三类:一是

直接采用吸收系数或富集系数表示,其预测结果误差大,难以满足精度需求;二是采用机理及半机理模型法^[3-5],所需参数多,而且机理尚不十分明确,因此实际应用中也受到诸多限制而无法推广;三是采用经验模型法,它通常运用土壤重金属全量及土壤基本理化性质对土壤离子态或溶解态重金属含量进行估计,进而对植物体中重金属含量进行估算,基本表达形式为多元回归,考虑的因素有重金属含量、土壤 pH 值、土壤有机质含量^[6-8],也有考虑土壤粘粒含量、土壤 CEC^[9-10]、土壤锌^[11-12]。经验模型由于参数较少、建模简单、估算精度高等优点而被广泛应用。

收稿日期:2014-09-17

基金项目:中国农业科学院科技创新工程(2014-cxgc-hyl)

作者简介:郑宏艳(1986—),女,研究实习员,硕士,主要研究土壤重金属污染、数据挖掘和 GIS 应用。

E-mail:zhenghongyan5540@163.com

* 通信作者:侯彦林 E-mail:hjyours@sina.com

关于农田土壤-作物系统重金属生物富集的主要研究结论有:不同种类的植物对不同重金属元素的吸收富集能力不同^[13-15];不同种类作物对同一重金属元素吸收转化能力不同^[16-18];同一种类作物不同品种对重金属的吸收富集能力不同^[19-22]。这些研究的共同特点是从土壤重金属含量和作物重金属含量的关系发现规律,而本文是针对土壤模式即按主要理化性质相近的原则将土壤分成不同的模式,针对具体土壤模式应用统计分析方法研究生物富集规律,并直接建立土壤重金属总量和植物重金属浓度之间的定量模型。这是本研究与传统研究方法的显著不同之处,使研究结果的针对性更强,更易于结果的应用。

1 材料与方法

1.1 数据

由于目前还没有大量的数据支撑中国土壤模式-作物系统重金属生物富集模型的研究,本文仅以镉为例,从一个侧面验证所提出的研究方法的可行性和意义。

本文总结了 1979 年至 2011 年 7 月的中国国内主要中文期刊上发表的土壤镉含量与水稻和小麦镉含量的对应关系,这些数据包括不同时间、不同空间的各类盆栽试验、大田试验及野外取样数据。数据的筛选原则为:既有水稻或小麦镉含量(籽粒、根茎或叶),又有与之相对应的土壤镉含量,以便满足本文数据分析的要求。由于可用数据少,所以复合污染条件下的数据也参与统计,以显示整体趋势。数据均来自公开发表的论文,并通过后续方法去除掉 5%的“噪音数据”。水稻和小麦数据分别见表 1 和表 2。

1.2 理论与方法

1.2.1 土壤-作物系统重金属生物富集影响因素分析

根据以往大量的研究结果,有关土壤-作物重金属迁移转化影响因素有 pH、有机质含量、氧化还原电位、土壤质地、含盐量、土壤重金属形态、植物类型等,因素间有促进或抑制效应^[23-35]。经过综合分析可以总结出以下规律:作物重金属含量首先取决于土壤重金属含量,其次取决于作物吸收特性,同样也与土壤属性如土壤有机质含量、pH、质地等有关;只要前两个因素满足一定条件如土壤重金属含量足够高和作物容易吸收该重金属,则作物一定会被重金属污染,而土壤属性只能起到加速或延缓被污染速度或程度的作用。将以上规律称为土壤-作物系统重金属生物富集的“土壤重金属含量-作物特性-土壤属性”关系理

表 1 水稻样本分布情况

Table 1 Distribution of rice samples among different areas

地区 Area	籼稻 Indica	粳稻 Japonica	土壤类型 Soil type
江苏	66	14	红壤、潮土、水稻土
天津	0	74	潮土
湖北	66	0	黄棕壤
广东	44	0	赤红壤
浙江	32	5	红壤、水稻土
辽宁	0	33	水稻土
湖南	28	2	黄壤
四川	23	0	水稻土
福建	17	0	红壤、潮土
重庆	8	8	紫色土
江西	14	0	红壤
北京	0	9	褐土
上海	5	0	—
贵阳	2	0	—
总计	305	145	

注:表示土壤类型未知。下同。

Note: “—” Indicates unknown soil type. The same below.

表 2 小麦样本分布情况

Table 2 Distribution of wheat samples among different areas

地区 Area	数量 Quantity	土壤类型 Soil type
四川	43	水稻土
北京	33	褐土
辽宁	10	棕壤
上海	5	—
湖北	5	—
宁夏	1	—
总计	97	

论,并可表示为如下概念模型:

$$Y(\text{作物重金属含量})=f(\text{土壤重金属含量;作物吸收特性或作物类型;土壤属性}) \quad (1)$$

1.2.2 基本概念

(1)土壤模式:指特定质地、特定有机质含量范围和 pH 范围的所有土壤集合的总称。如此定义是为了把所有土壤归纳为若干个土壤模式,以便建立作物重金属含量与土壤重金属含量关系模型时,消除掉质地、有机质和 pH 的影响,减少建模时自变量个数,提高预测精度。这里有机质含量和 pH 与宏观气候条件有关,pH 和质地与局域成土母质有关,因此土壤模式在一定意义上反映了土壤的空间格局状况。

(2)土壤模式-作物系统重金属生物富集模型:将某类土壤模式上的作物的某一重金属含量与土壤

重金属含量画成散点图,总结规律,形成特定土壤模式-作物系统重金属生物富集模型,它既是以往研究成果综合后的数值化过程,又是定量或半定量模型,可用于预测。

(3) 土壤模式-作物系统重金属生物富集模型图谱:将所有土壤都归类到特定的土壤模式中,在每类土壤模式上都可以把八种重金属的土壤-作物生物富集模型表达出来,每个模型都对应一个散点图,这些模型和图的集合称之为土壤模式-作物系统重金属生物富集模型图谱。

1.2.3 土壤模式划分方法

为了建立中国土壤模式-作物系统重金属生物富集模型图谱,首先需要简化土壤属性的影响,以实现将来建立数学模型时尽量使用较少的自变量的目的,即先划分土壤模式,然后在每一个模式下研究土壤模式-作物系统重金属含量关系,将来模型中不再出现土壤属性影响,而当固定作物后只有土壤和作物重金属含量两个变量。

土壤模式划分考虑以下三个土壤属性:现代农田土壤有机质是长期气候作用下的产物,也深受近代人类耕作制度的影响,属于土壤有机属性或生物化学属性,与土壤微生物活动密切相关;质地是由局域性的母质因素决定的,是影响土壤中重金属行为的主要土壤物理属性;pH是气候、母质、耕作制度等相互影响下的属性,属于土壤化学属性。重金属在土壤中的行为与以上三个土壤属性有密切的关系,并且这三个属性的数据容易获得,也与成土因素有关,便于实现空间预测。至于土壤的CEC则可以由有机质和质地得到一定程度的反映,全盐、碳酸钙也与pH有一定的相关性,类似这些属性不作为土壤相对独立的共性属性而使用。

一般地,特定的土壤有机质含量范围、质地类型和pH范围将构成陆地表层特定的土地和具体区域,按此设想,首先将中国土壤有机质含量、质地类型、pH范围分别划分为3个档次。土壤有机质3个档次划分标准为(具体标准在以后可以根据每种重金属特性和全国土壤状况确定):低于 $10.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (简称低,下同)、 $10.0\sim 30.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (中)、大于 $30.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (高);质地分为:砂、壤、粘;pH划分标准为:6.5以下(酸)、6.5~7.5(中)、7.5以上(碱)。按3个指标3个档次可以把中国土壤划分为理论上的27个土壤模式。

考虑到Eh对作物吸收重金属的影响,再把土壤模式分成水田和旱田两大类。在每个土壤模式上分别

建立每类作物重金属含量即 $Y=f$ (土壤重金属含量)的关系模型;在27个土壤模式基础上,如果只考虑8种重金属元素总量、四大类作物类型(玉米、小麦、水稻、粳稻,其中玉米和小麦属于旱田类,水稻和粳稻属于水田类),则为构成中国完整图谱理论上至少需要建立旱田类432个、水田类432个,共计864个土壤模式-作物系统重金属生物富集模型。不考虑作物类型按以上方法划分的54个土壤模式如下(有些模式纯属理论划分,结果未必有实践意义):高砂酸(分水田和旱田,下同)、高砂中、高砂碱、高壤酸、高壤中、高壤碱、高粘酸、高粘中、高粘碱;中砂酸、中砂中、中砂碱、中壤酸、中壤中、中壤碱、中粘酸、中粘中、中粘碱;低砂酸、低砂中、低砂碱、低壤酸、低壤中、低壤碱、低粘酸、低粘中、低粘碱。同样,研究者也可以根据研究目的不同建立其他意义的土壤模式,以达到建立模型时降低自变量数量的目的,提高预测精度。

1.2.4 模型建立和分析方法

先假设具有54个土壤模式中某一模式(这样就消除了3个自变量)的至少30个以上的统计大样本,包括特定作物的盆栽试验和(或)田间情况下的结果;以样本的土壤重金属含量(X)与作物重金属含量(Y)制作散点图,横坐标可以是土壤重金属总量或某一形态含量,纵坐标可以是籽粒或地上部或地下部重金属含量。分析方法分述如下:

(1)通道的划分方法及其意义:先对数据集的所有点进行线性回归,然后平行向左上方移动直线,直到移动的直线左上方剩下2.0%~2.5%的样本数为止;同样平行向右下方移动直线,直到移动的直线右下方剩下2.0%~2.5%的样本为止,两者合计剩余的样本大约为5.0%为止。这样两条移动的直线所构成的区域为通道,通道内的样本约占95.0%,之外约占5.0%,本文规定5%为“噪音数据”而不参与统计。

(2)平均吸收量模型的建立方法:以国家土壤环境质量标准为基准,划分若干个统计区域,即0~0.5倍、0.5~1.0倍(国家标准)、1.0~2.0倍、2.0~3.0倍、3.0~4.0倍、4.0~5.0倍、5.0~7.0倍、7.0~10.0倍等;统计每个区间内的土壤重金属平均含量和作物平均吸收量,再将其用折线连接,最后对其进行回归,一般可以获得平均吸收量随土壤重金属含量增加而吸收量增加的趋势模型。

(3)作物重金属含量频率求算方法:如果将某个土壤重金属含量区间的样本统计做成直方图,这时

横坐标为生物或经济产量的重金属含量,纵坐标为该区间样本占总样本的百分数。这样可以计算出生物或经济产量的重金属在某含量范围出现的频率,作为未来预测的概率使用,最大概率100%出现在生物或经济产量的重金属最低含量处,最小概率0%出现在生物或经济产量的重金属最高含量处,见图1中左下角部分所示。

(4)模型的应用:有了模型即可实现预测;根据土壤三个属性确定使用哪个土壤模式的模型。假如土壤模式的模型确定了,则可通过土壤重金属含量查询对应的平均吸收量,它对应样本概率为50%;如果某具体作物或品种比平均吸收量容易吸收某重金属,则为强吸收作物,否则为弱吸收作物。这样可以预测任何土壤模式作物吸收重金属的理论平均吸收量,再结合具体试验条件还可提高预测精度。预测结果也可以指导科学研究和生产实践,虽然只是大致的范围,却建立了空间定位下的对应的数值关系,便于利用IT技术实现预测和表达预测结果。

2 结果与分析

2.1 水稻不同部位镉含量对比

由于按常用单位的土壤和作物镉含量作图,存在数据过于集中,不利于具体分析的问题,将土壤与作物镉含量分别乘以1和1000后取以10为底的对数作图,作物镉含量乘以1000后单位变为 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。将收集到的水稻盆栽和田间试验数据放一起,样本数分别为:根160个、茎62个、叶37个、籽粒450个。

图2是不同时间、不同空间、不同土壤类型的盆

栽试验、大田试验及野外取样数据的集合。由图2可以总结出如下规律:距离土壤越远的部位吸收镉能力越弱,吸收强弱顺序为根>茎>叶>籽粒;同一部位镉吸收量随土壤镉含量增加而增加。如果把水稻四个部位作为四种虚拟作物看待,则图2与图1理论模式模型图相似。

进一步分析获得:土壤镉含量与水稻根系镉含量、水稻茎镉含量、水稻叶镉含量、水稻籽粒镉含量回归方程如下:

$$Y=0.773X-1.819(n=160, r=0.6189^{**}, r_{0.01}=0.2025)$$

$$Y=0.845X-2.638(n=62, r=0.7987^{**}, r_{0.01}=0.3223)$$

$$Y=0.825X-2.800(n=36, r=0.8319^{**}, r_{0.01}=0.4182)$$

$$Y=0.441X-2.293(n=450, r=0.5119^{**}, r_{0.01}=0.1273)$$

以水稻籽粒样本作图获得图3,总体规律和图1一致。历史污染的数据为155个,占水稻籽粒样本总数的34.4%,其他为人工添加镉的数据。图3中蓝色的折线是平均吸收量线,两条黑色的相互垂直的线分别为土壤和作物镉含量标准,即 $0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[36]和 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[37]。它将样本分成4个区域:第三象限里是土壤镉含量不超标,水稻镉含量也不超标的样本;第四象限里是土壤镉含量超标,水稻镉含量不超标的样本;第二象限里是土壤镉含量不超标,水稻镉含量超标的样本(本案例中几乎没有样本);第一象限里是土壤镉含量超标,水稻镉含量也超标的样本。根据以上样本分布可以初步得出以下结论:土壤镉含量不超标情况下,水稻镉含量也不超标;土壤镉含量超标情况下,水稻镉含量不一定超标。这说明土壤镉含量是水稻镉含量超标的必要条件(此结论是基于本研究所收

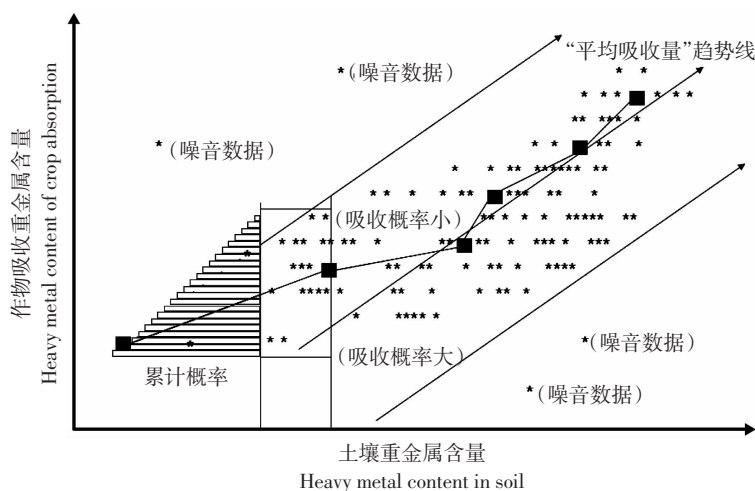


图1 土壤模式-作物系统重金属生物富集模型示意图

Figure 1 Schematic diagram of heavy metal bioaccumulation model in soil pattern - crop system

集的数据得出的,特殊地区除外)。

田间水稻不同部位(其样本数分别为:根 53 个、茎 17 个、叶 13 个、籽粒 74 个)与土壤镉含量关系的统计结果显示的总体规律同图 2,总体趋势如图 1。盆栽水稻不同部位镉含量(其样本数分别为:根 107 个、茎 45 个、叶 24 个、籽粒 376 个)与土壤镉含量的统计结果显示的总体规律同图 2,总体趋势如图 1。

2.2 小麦不同部位镉含量对比

将所有小麦不同部位样本放在一起作图(图 4),其样本数分别为:根 70 个、茎 10 个、叶 16 个、籽粒 97 个。总体规律同图 2,说明不同作物具有同样的规律,但是籽粒与其他部位吸收的差异变小,总体趋势如图 1。

进一步分析获得土壤镉含量与小麦根系镉含量、小麦茎镉含量、小麦叶镉含量和小麦籽粒镉含量回归方程如下:

$$Y=1.421X-4.551(n=70, r=0.6245^{**}, r_{0.01}=0.3038)$$

$$Y=1.526X-4.553(n=10, r=0.9757^{**}, r_{0.01}=0.7348)$$

$$Y=0.875X-3.943(n=16, r=0.7450^{**}, r_{0.01}=0.6055)$$

$$Y=0.559X-2.042(n=100, r=0.7797^{**}, r_{0.01}=0.2552)$$

以小麦籽粒样本作图(图 5),总体规律和图 1 一致。图中蓝色的折线是平均吸收量线,两条相互垂直直线分别为土壤和作物镉含量标准,即 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[36] 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[37]。历史污染的数据为 63 个,占小麦籽粒样本总数的 64.9%,其他为人工添加镉的数据。如此将样本分成 4 个区域:第三象限里是土壤镉含量不超标、小麦镉含量也不超标的样本;第四象限里是土壤镉含量超标,小麦镉含量不超标的样本;第二象限里是土壤镉含量不超标,小麦镉含量超标的样本(本案例中几乎没有样本);第一象限里是土壤镉含量超标,小麦镉含量也超标的样本。根据样本分布可以初步得出以下结论:土壤镉含量不超标情况下,小麦镉含量也不超标;土壤镉含量超标情况下,小麦镉含量不一定超标。这说明土壤镉含量是小麦镉含量超标的必要条件(此结论是基于本研究所收集的数据得出的,特殊地区除外)。

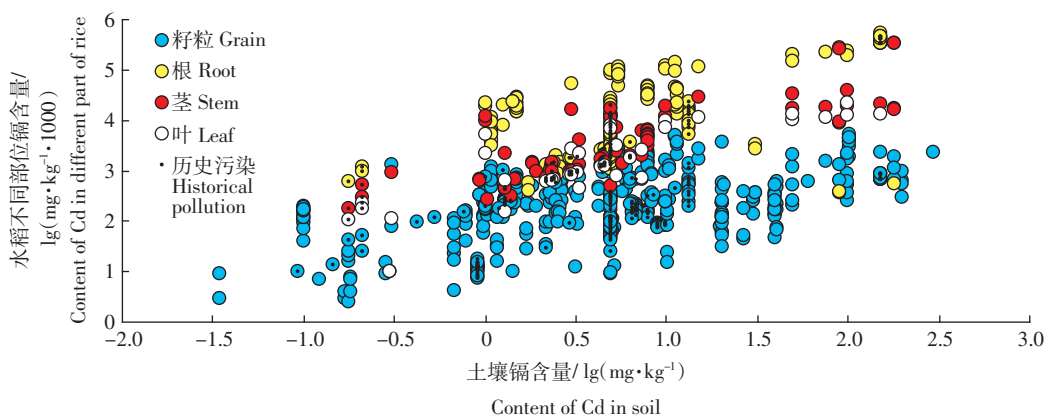


图 2 水稻不同部位镉含量与土壤镉含量关系

Figure 2 Relationship between rice Cd and soil Cd content

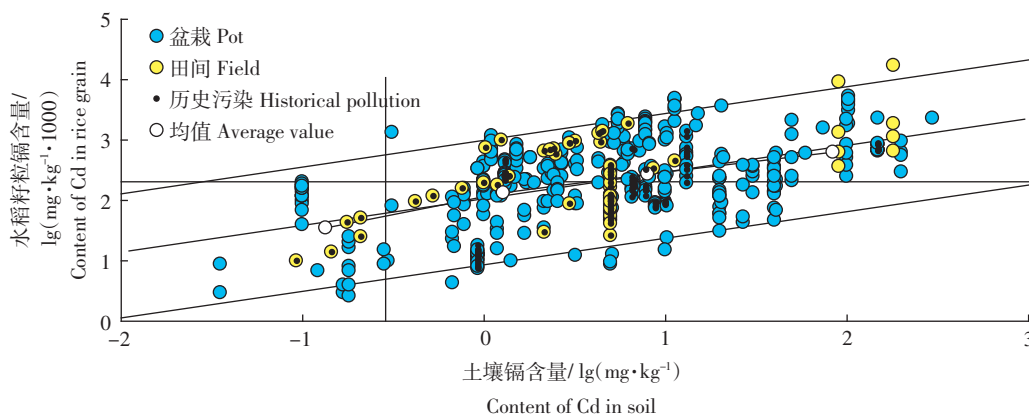


图 3 水稻籽粒镉含量与土壤镉含量关系

Figure 3 Relationship between rice grain Cd and soil Cd content

田间小麦不同部位(其样本数分别为:根 17 个、茎 4 个、叶 4 个、籽粒 15 个)与土壤镉含量关系的统计结果显示的总体规律同图 2,说明不同作物具有同样的规律,总体趋势如图 1。盆栽小麦不同部位镉含量(其样本数分别为:根 53 个、茎 6 个、叶 12 个、籽粒 82 个)与土壤镉含量的统计结果显示的总体规律同图 2,说明不同作物具有同样的规律,总体趋势如图 1。

2.3 盆栽和田间条件下水稻籽粒镉含量对比

将水稻盆栽和田间样本放在一起作图(图 3),其中盆栽样本数 376 个、田间样本数 74 个。总体规律是:随土壤镉含量增加籽粒镉含量增加,水稻盆栽和田间吸收量在同一范围内,总体趋势同图 1。

2.4 盆栽和田间条件下小麦籽粒镉含量对比

将小麦盆栽和田间样本放在一起作图(图 5),其中盆栽样本数 82 个、田间样本数 15 个。总体规律是:随土壤镉含量增加籽粒吸收镉量增加,小麦盆栽和田

间吸收量在同一范围内,总体趋势同图 1。

2.5 水稻和小麦籽粒镉含量对比

将水稻和小麦籽粒样本放在一起作图 6,其中水稻样本数 450 个、小麦样本数 97 个。历史污染的数据为 218 个,占水稻和小麦籽粒样本总数的 39.9%,其他为人工添加镉的数据。总体规律是:随土壤镉含量增加籽粒吸收镉量增加,水稻和小麦吸收量在同一范围内,总体趋势同图 1。

3 讨论

3.1 土壤模式划分问题

土壤模式划分是本研究的创新点,它主要根据研究目的和作物重金属含量与土壤属性关系来进行,本文所划分的标准只就一般情况而言,任何研究者都可以根据实际需要,具体问题具体分析,划分出能够寻找科学规律才是研究之目的。这样做是为了消除土壤属性对作物吸收重金属规律的影响,以期定量表

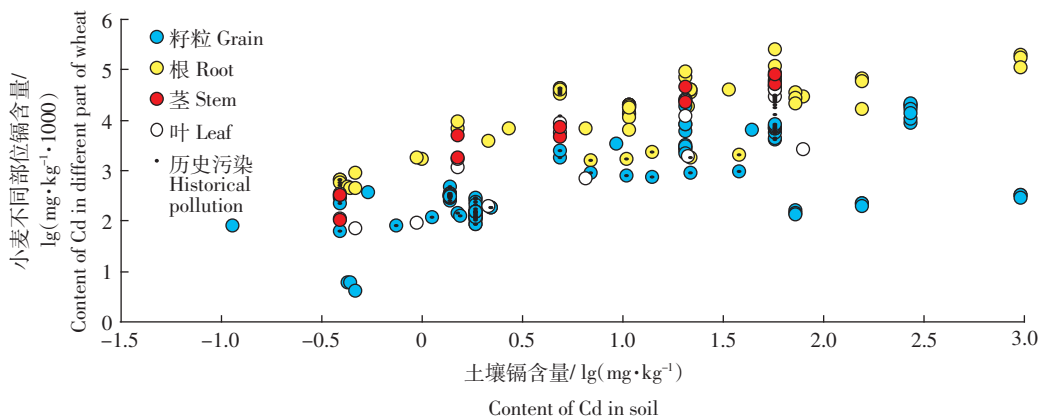


图 4 小麦不同部位镉含量与土壤镉含量关系

Figure 4 Relationship between wheat Cd and soil Cd content

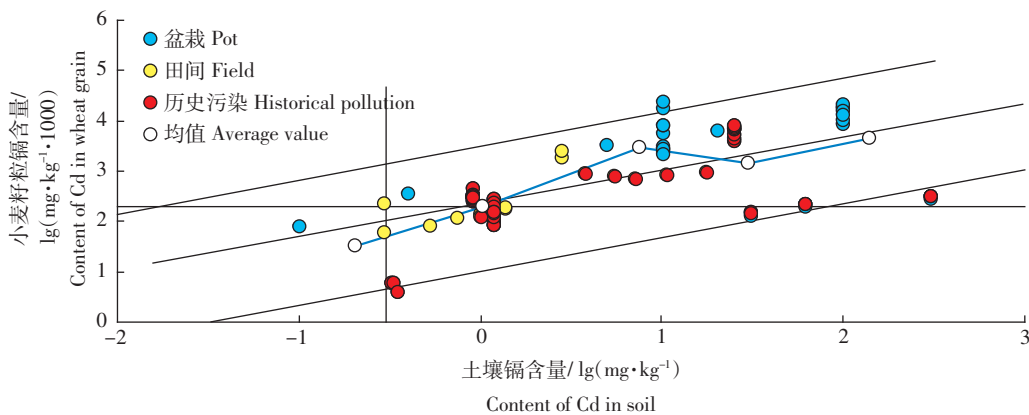


图 5 小麦籽粒镉含量与土壤镉含量关系

Figure 5 Relationship between wheat grain Cd and soil Cd content

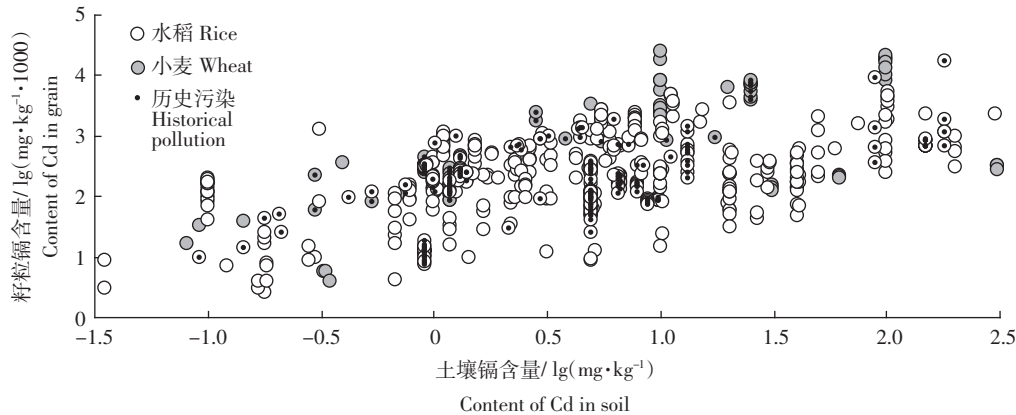


图6 水稻和小麦籽粒镉含量与土壤镉含量关系

Figure 6 Relationship between Cd contents in rice and wheat grain and in soil Cd

达,弥补富集系数法、机理模型法^[3-5]和经验模型法^[6-12]在预测精度方面的不足。根据表1和表2中所统计的结果,将另文对特定土壤模式-作物系统镉生物富集模型进行介绍。

3.2 平均吸收量的含义

平均吸收量是统计意义上某一土壤模式下的某一土壤重金属含量范围内作物吸收重金属的平均含量,它能从宏观上或按50%概率给出一个概念或标准,即当土壤重金属含量为多少时,平均意义上作物应该大致吸收多少,这样就建立了一个相对的标准,便于比较不同土壤模式的吸收规律,最终建立全国图谱,将使所有试验结果都能在一套标准下进行相互比较,定量表示不同种类植物^[13-15]和同一种类作物的不同品种对重金属的吸收富集能力之差异^[19-22]。

土壤重金属统计范围确定问题:按土壤重金属含量范围统计“平均吸收量”的做法,是在数据挖掘初期尽量避免使用根据作物生理特性等划分的困难和缺少数据的现实。随着研究的深入,发现新问题后还可以重新设计统计区间。本文的目的是提出一整套研究思路和方法,抛砖引玉,使宝贵的历史数据资源发挥出潜在的研究价值。

同一作物同一土壤重金属含量下的不同吸收量的差异:大量的研究表明同一作物同一土壤重金属含量下作物重金属含量一般是不同的,这可能由很多原因导致,本文使用概率的方法确定吸收量就是要对其进行统计,从中找出规律。

3.3 大田测试结果的真实性

过去重金属在土壤-作物系统中的迁移转化规律的研究多采用室内盆栽的方法,盆栽试验条件与大田实际情况有很大差异。一般大田研究建立的模型的相

关系数较室内试验小得多,模型预测值与实测值之间必然会出现较大的差异。另外,盆栽试验一般只采用一到两种土壤类型,与大田条件下的土壤类型相比过于单一,也不具备代表性。为此,有必要在大田条件下对土壤重金属含量与作物重金属含量关系进行长期定位研究,以总结自然条件下重金属在土壤-作物系统中的迁移转化规律。

4 结论

本文提出了农田作物重金属生物富集的“土壤重金属含量-作物特性-土壤属性”关系理论并定义了一系列概念,在方法上确定了具体土壤模式的划分方法和对结果进行分析的方法,并进一步用案例进行了佐证。应用结果表明:有了模型和散点图,则可根据土壤重金属含量预测作物重金属含量,既为预测、预报、预警提供定量化方法,也为全国农田重金属污染防治提供科学依据和决策依据。

参考文献:

- [1] 周脚根, 宋变兰, 尤冬梅. 土壤重金属污染风险预测研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(22): 10617-10619.
ZHOU Jiao-gen, SONG Bian-lan, YOU Dong-mei. Research progress on prediction of soil heavy metal contamination risk[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(22): 10617-10619.
- [2] 周雯婧, 贺惠. 我国农田土壤重金属污染来源及特点[J]. 科研应用, 2013(12): 102-103.
ZHOU Wen-jing, HE Hui. The sources and characteristics of heavy metals contamination of farmland soils in China[J]. *The Science Education Article Collects*, 2013(12): 102-103.
- [3] Brennan M A, Shelley M L. A model of the uptake, translocation, and accumulation of lead (Pb) by maize for the purpose of phytoremediation[J]. *Ecological Engineering*, 1999, 12(3-4): 271-297.

- [4] 吴启堂. 一个定量植物吸收土壤重金属的原理模型[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 68-76.
- WU Qi-tang. A mechanistic mathematical model for predicting the up-take of heavy metals by plants[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(1): 68-76.
- [5] 张玉秀, 于飞, 张媛雅, 等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制[J]. 中国生态农业学报, 2008(5): 1317-1321.
- ZHANG Yu-xiu, YU Fei, ZHANG Yuan-ya, et al. Uptake, translocation and accumulation of cadmium in plant[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008(5): 1317-1321.
- [6] McBride, Murray B. Cadmium uptake by crops estimated from soil total Cd and pH[J]. *Soil Science*, 2002, 167(1): 62-76.
- [7] Li F Y, Okazaki M, Zhou Q X. Evaluation of Cd uptake by plants estimated from total soil Cd, pH, and organic matter[J]. *Environmental Contamination Toxicology*, 2003, 71(4): 714-721.
- [8] 何凤, 李瑞敏, 王轶, 等. 河南省基于土壤-小麦系统的土壤Cr生态安全评价[J]. 地质通报, 2008, 27(7): 1060-1064.
- HE Feng, LI Rui-min, WANG Yi, et al. Ecological safely evaluation of Cr in soils based on the soil-seed system in Henan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(7): 1060-1064.
- [9] Brus D J, Jansen M J W. Uncertainty and sensitivity analysis of spatial predictions of heavy metals in wheat[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(3): 882-890.
- [10] Wang X P, Shan X Q, Zhang S Z, et al. A model for evaluation of the phytoavailability of trace elements to vegetables under the field conditions[J]. *Chemosphere*, 2004, 55(6): 811-822.
- [11] Tudoreanu L, Phillips C J C. Empirical models of cadmium accumulation in maize, rye grass and soya bean plant[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2004, 84(8): 845-852.
- [12] Podar D, Ramsey M H. Effect of alkaline pH and associated Zn on the concentration and total uptake of Cd by lettuce: Comparison with predictions from the CLEA model[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 347(1-3): 53-63.
- [13] 方凤满, 汪琳琳, 谢宏芳, 等. 芜湖市三山区蔬菜中重金属富集特征及健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1471-1476.
- FANG Feng-man, WANG Lin-lin, XIE Hong-fang, et al. Enrichment characteristic and health risk assessment of heavy metals in vegetables in Sanshan district, Wuhu City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1471-1476.
- [14] 吕保玉, 白海强, 喻泽斌. 蔬菜重金属污染的研究现状与防治措施[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(4): 1566-1568.
- LÜ Bao-yu, BAI Hai-qiang, YU Ze-bin. Research status of heavy metal pollution in vegetables and its control measures[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(4): 1566-1568.
- [15] 刘景红, 陈玉成. 中国主要城市蔬菜重金属污染格局的初步分析[J]. 微量元素与健康研究, 2004, 21(5): 42-44.
- LIU Jing-hong, CHEN Yu-cheng. Primary investigation on contamination pattern of vegetables by heavy metals in Chinese cities[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2004, 21(5): 42-44.
- [16] Su Y H, McGrath S, Zhao F J. Rice is more efficient in arsenite uptake and translocation than wheat and barley[J]. *BioMetals*, 2010, 328(1): 27-34.
- [17] 赵勇, 李红娟, 孙治强. 土壤-蔬菜Cd污染相关性分析与土壤污染阈限值研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 149-153.
- ZHAO Yong, LI Hong-juan, SUN Zhi-qiang. Correlation analysis of Cd pollution in vegetables and soils and the soil pollution threshold[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(7): 149-153.
- [18] 陶玲, 任珺, 乔国栋, 等. 兰州市蔬菜基地蔬菜体内Cr污染及累积效应的研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1207-1211.
- TAO Ling, REN Jun, QIAO Guo-dong, et al. Research on Cr pollution and its cumulative mechanics in vegetables in vegetable base of Lanzhou City[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(5): 1207-1211.
- [19] Ro Mkens P F A M, Guo H Y, Chu C L, et al. Prediction of cadmium uptake by brown rice and derivation of soil-plant transfer models to improve soil protection guidelines[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8-9): 2435-2444.
- [20] Norton G J, Islam M R, Duan G L, et al. Arsenic shoot-grain relationships in field grown rice cultivars[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4): 1471-1477.
- [21] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 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[J]. 环境科学, 2003, 25(3): 112-115.
- LI Zheng-wen, ZHANG Yan-ling, PAN Gen-xing, et al. Grain content of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Environmental Science*, 2003, 25(3): 112-115.
- [22] 茹淑华, 张国印, 苏德纯, 等. 河北省白菜主要栽培品种吸收累积重金属镉的特征和质量安全性研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(14): 282-287.
- RU Shu-hua, ZHANG Guo-yin, SU De-chun, et al. Studies on the uptake and accumulation of cadmium and quality safety about Hebei major Chinese cabbages cultivars[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(14): 282-287.
- [23] 王祖伟, 李宗梅, 王景刚, 等. 天津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[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1406-1410.
- WANG Zu-wei, LI Zong-mei, WANG Jing-gang, et al. Absorption to heavy metals by wheat and influencing features in sewage-irrigated soil in Tianjin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1406-1410.
- [24] Zhao K L, Zhang W W, Zhou L, et al. Modeling transfer of heavy metals in soil-rice system and their risk assessment in paddy fields[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2009, 59(3): 519-527.
- [25] Bhattacharya P, Samal A C, Majumdar J, et al. Accumulation of arsenic and its distribution in rice plant (*Oryza sativa* L.) in Gangetic West Bengal[J]. *India Plant and Soil*, 2010, 8(1): 63-70.
- [26] 郑春荣, 孙兆海, 周东美, 等. 土壤Pb Cd污染的植物效应(I): Pb污染对水稻生长和Pb含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 417-421.
- ZHENG Chun-rong, SUN Zhao-hai, ZHOU Dong-mei, et al. Plant response to soil lead and cadmium pollution(I): Effects of soil lead pollution on wetland rice growth and its uptake of lead[J]. *Journal of Agro-*

- Environmental Science*, 2004, 23(3):417-421.
- [27] 郑春荣, 孙兆海, 周东美, 等. 土壤 Pb Cd 污染的植物效应 II: Cd 污染对水稻生长和 Cd 含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5):872-876.
- ZHENG Chun-rong, SUN Zhao-hai, ZHOU Dong-mei, et al. Plant responses to soil lead and cadmium Pollution: II. Effects of soil cadmium pollution on wetland rice growth and its uptake of cadmium[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(5):872-876.
- [28] 龚伟群, 李恋卿, 潘根兴. 杂交水稻对 Cd 的吸收与籽粒积累: 土壤和品种交互影响[J]. 环境科学, 2006(8):1647-1653.
- GONG Wei-qun, LI Lian-qing, PAN Gen-xing. Cd uptake and accumulation in grains by hybrid rice in two paddy soils: Interactive effect of soil type and cultivars[J]. *Environmental Science*, 2006(8):1647-1653.
- [29] 王广林, 刘登义. 冶炼厂污灌区土壤-水稻系统重金属积累特征的研究[J]. 土壤, 2005, 37(3):299-303.
- WANG Guang-lin, LIU Deng-yi. Characteristics of heavy metals accumulation in soil-rice system in sewage irrigated area near a smelter[J]. *Soils*, 2005, 37(3):299-303.
- [30] 李宗梅. 天津市污灌区土壤-小麦系统重金属污染评价及相关分析[D]. 天津: 天津师范大学, 2006.
- LI Zong-mei. Heavy metal pollution assessment and analysis on sewage irrigation soil-wheat system in Tianjin City[D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2006.
- [31] 陈 凤, 濮励杰. 昆山市农业土壤基本性质与重金属含量及二者的关系[J]. 土壤, 2007, 39(2):291-296.
- CHEN Feng, PU Li-jie. Relationship between heavy metals and basic properties of agricultural soils in Kunshan County[J]. *Soils*, 2007, 39(2):291-296.
- [32] 周国华, 汪庆华, 董岩翔, 等. 土壤-农产品系统中重金属含量关系的影响因素分析[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(增刊):226-231.
- ZHOU Guo-hua, WANG Qing-hua, DONG Yan-xiang, et al. Factors affecting heavy metal concentrations in soil-agricultural product system[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 29(Suppl):226-231.
- [33] 刘元东, 刘明利, 魏宏伟, 等. 安全小麦示范区土壤质地对土壤重金属含量的影响[J]. 河南农业科学, 2007(8):70-73.
- LIU Yuan-dong, LIU Ming-li, WEI Hong-wei, et al. Soil texture on soil heavy metal in safety demonstration area [J]. *Journal of Henan Agriculture Science*, 2007(8):70-73.
- [34] 汤丽玲. 作物吸收 Cd 的影响因素分析及籽实 Cd 含量的预测[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):699-703.
- TANG Li-ling. Effects of soil properties on crop Cd uptake and prediction of Cd concentration in grains[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):699-703.
- [35] 胡宁静, 骆永明, 宋 静. 长江三角洲地区典型土壤对镉的吸附及其与有机质、pH 和温度的关系[J]. 土壤学报, 2007(3):437-443.
- HU Ning-jing, LUO Yong-ming, SONG Jing. Influence of soil organic matter, pH and temperature on Cd sorption by four soils from Yangtze River Delta[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007(3):437-443.
- [36] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 1995.
- China State Environmental Protection Administration, China State Bureau of Technical Supervision. GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils[S]. 1995.
- [37] 中华人民共和国卫生部. GB 2715—2005 粮食卫生标准[S]. 2005.
- Hygienic Standard Grain, National Standard of the People's Republic of China GB 2715—2005. Ministry of Health of the People's Republic of China[S]. 2005.