环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.12
第40卷 第12期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第12期
2019年12月15日

目 次(卷终)

研究报告

粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第12期 2019年12月
Vol. 40, No. 12 Dec., 2019

高硒高镉区土地安全区划方法

王锐[1,2,3],侯宛苓[3],李雨潼[3],余涛[4],陈娟[5]
(1. 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队,重庆 400038; 2. 重庆市土地质量地质调查重点实验室,重庆 400038; 3. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院,北京 100083; 4. 中国地质大学(北京)数理学院,北京 100083; 5. 北京大学医学部公共卫生学院,北京 100191)

摘要: 湖北恩施地区土壤中硒资源非常丰富,但土壤中也存在一定程度的镉污染风险,为了科学地开发富硒资源,选择典型高硒高镉区恩施市沙地乡为研究对象,结合玉米镉硒吸收模型,提出土地安全区划方法. 对比硒的健康效应对土地安全区划结果的影响发现,硒对镉的拮抗作用可以减少农耕区严格管控区面积,提高土地利用效率. 结合研究区各类农作物中镉硒的含量特征,建议优先保护区及安全利用区大力发展富硒农产品,结构调整区种植玉米与茶叶.

关键词:镉;硒;吸收模型;拮抗作用;安全区划;建议
中图分类号: X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)12-5524-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201905006

Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas

WANG Rui[1,2,3], HOU Wan-ling[3], LI Yu-tong[3], YU Tao[4], CHEN Juan[5]
(1. Southeast Sichuan Geological Group, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400038, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Land Quality Geological Survey, Chongqing 400038, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. School of Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China)

Abstract: The selenium in the soil of Enshi, Hubei Province, is very rich, but there is also a certain degree of cadmium pollution risk. To scientifically utilize selenium-rich resources, a typical high-selenium and high-cadmium area in Shashi Township, Enshi City was selected as the research object. Combined with the corn cadmium selenium absorption model, a land safety zoning method was proposed. Comparing the health effects of selenium with the results of land safety zoning, it was found that the antagonism of selenium on cadmium can reduce the area of strict control of agricultural areas, and improve land use efficiency. Combined with the characteristics of cadmium and selenium in various crops in the study area, it is recommended for priority protection areas and safe-use areas to vigorously develop selenium-enriched agricultural products, and grow corn and tea in the structural adjustment area.

Key words: cadmium; selenium; absorption model; antagonistic effect; safety zoning; suggestion

硒元素是人体以及动植物体重要的健康元素之一,土壤及农作物中硒元素的含量与人类及动植物的健康息息相关[1~3],众所周知硒元素具有双重性,硒元素的缺乏和过量摄入都会对人体造成危害,硒元素的缺乏会导致大骨节病、克山病等疾病,同时也会对人体的心血管系统造成影响,而硒元素的过量摄入会引起硒中毒[4,5]. 硒元素含量过高会导致植物发育不良,蛋白质合成减少[6~8]. 重金属元素具有不可降解、可以通过土壤-作物-人体系统不断在人体中积累的特点,对人体健康造成严重危害[9~12]. 硒对镉等重金属元素具有一定的拮抗作用,一方面硒元素可以与镉等重金属元素发生反应,生成重金属硒蛋白复合物,该物质不易被人体及动物体吸收,另一方面硒元素可以减缓重金属对生物体内抗氧化酶的抑制作用,提高人体及动植物体自身的免疫能力和抗逆性[13].

湖北省恩施市土壤中硒元素的含量十分丰富,居世界前列,被称为"世界硒都",土壤及农作物中硒元素含量丰富[14,15],受到地层分布等因素的影响,土壤中也存在不同程度的镉污染[16],土壤及农作物中镉元素的富集严重影响了富硒农业的发展. 本文选择在典型高硒高镉区恩施市沙地乡开展土地安全区划方法研究,以期为地区发展特色富硒产业提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

沙地乡位于湖北省恩施市东北,清江北部(图1),地势由北到南逐渐降低,海拔为270~1 680 m. 沙地乡行政区总面积为189.2 km^2. 沙地乡位于建始县南部,与新塘乡隔江对望,气候适宜,降水丰沛,年平均气温为15℃. 研究区主要大宗农作物为玉米,其次为烟叶、番茄、辣椒和土豆等,水稻种植较少.

收稿日期: 2019-05-02; **修订日期**: 2019-06-06
基金项目: 中南重点重金属高背景区土地质量地球化学调查项目(DD20160323)
作者简介: 王锐(1994~),男,硕士,主要研究方向为环境地球化学,E-mail:1372661182@qq.com

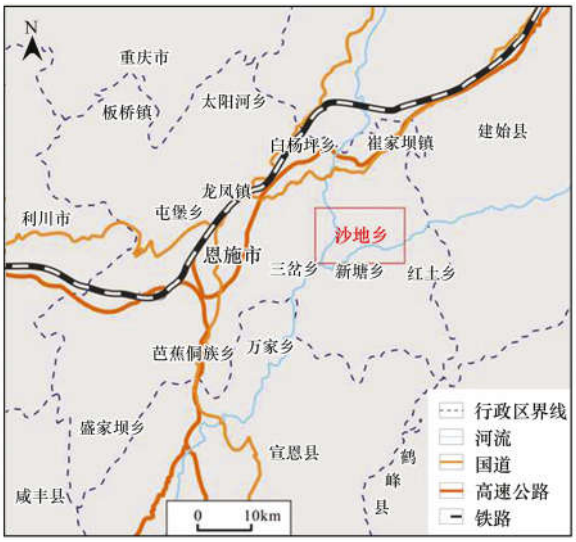

图 1　研究区交通位置示意

Fig. 1　Traffic location map of the study area

1.2　采样方法与分析测试

在研究区内，采用 1∶50 000 比例尺，采集 0～20 cm 的表层土壤 839 件，根据研究区农作物种植情况，采集了 237 件农作物样品，其中包括 110 件玉米、40 件土豆、40 件辣椒、23 件红薯、16 件茶叶和 8 件水稻样品，并配套采集根系土．选择常住人口采集人体尿样 160 件．

土壤样品在自然条件下阴干．在样品干燥过程中要经常揉搓样品，以免胶结，并去除土壤中的砾石以及植物根系．干燥后的样品在过筛前用木槌轻轻敲打，以便使土壤样品恢复至自然粒级状态．样品晾干后用尼龙筛，截取 2 mm（10 目）粒级的样品 500 g，装瓶．农作物样品及尿样采集后冷藏，并及时送至实验室进行测试分析．尿样分析测试由北京大学医学部完成，其余样品分析测试由安徽省地质实验研究所完成．

土壤样品测试质量控制：测试单位在样品分析测试过程中通过一级标准物质和样品重复样分析的方法来控制测试数据的质量．此外，工作人员在处理并分装好的样品中按照总样量的 5% 以密码样插入同类国家一级标准物质和重复样来进行分析对比，确保所测数据真实可靠．在土壤样品测定过程中采用国家标准物质 GSS-4、GSS-7、GSS-8、GSS-9、GSS-12、GSS-17、GSS-21、GSS-22、GSS-24、GSS-25、GSS-26 和 GSS-27 分析，监控测试分析的质量．以重复样分析结果评定本次分析精密度（RD），以密码插入的同类国家一级标准物质的测试结果检验本次分析的准确度（RE）．其中：

$$\mathrm{RE} = \overline{\Delta \lg C}(\mathrm{GBW}) = \left|\lg \overline{C}_i - \lg C_r\right| \quad (1)$$

$$\mathrm{RD} = \frac{1/n \sum \left|C_1 - C_2\right|}{(C_1 + C_2)/2} \times 100\% \quad (2)$$

式中，C_1 和 C_2 为常规测试及重复样的测试分析结果；C_i 为某标准样的某次测试结果，C_r 为该标准样的标准值．

土壤样品的精密度和准确度计算见表 1．均需符合《土地质量地球化学评价规范》（DZ/T 0295-2016）[17] 要求．

农作物样品准确度控制：每一批样品插入同类型标准物质 1～2 个与样品同时分析，并计算单个样品单次测试值的相对误差，要求相对误差≤30%．精密度控制：采用重复分析的方法控制样品分析的精密度，每件样品进行 100% 的重复分析，双份分析的相对双差≤30%．

土壤及农作物检出限分别见表 2 和表 3．样品回收率均为 100%．

采用石墨炉-原子吸收分光光度计（耶拿 Zeenit 700）测定在研究区常住人群中采集的尿Cd浓度，

表 1　土壤中各元素分析测试的精密度（RD）和准确度（RE）质量监控

Table 1　Precision (RD) and accuracy (RE) quality monitoring for analysis of each element in soil

元素	RE		RD		元素	RE		RD	
	n	数值/%	n	数值/%		n	数值/%	n	数值/%
As	12	0.03	40	4.19	Sr	12	0.19	40	−0.25
Cd	12	1.24	40	−3.43	Se	12	0.85	40	0.73
Cr	12	1.43	40	0.12	N	12	0.12	40	−3.86
Cu	12	0.62	40	0.29	P	12	1.44	40	−0.15
Ni	12	0.18	40	−0.76	B	12	1.25	40	3.07
Hg	12	0.33	40	0.36	F	12	0.45	40	3.29
Pb	12	0.26	40	0.72	Cl	12	1.49	40	−1.54
Zn	12	0.60	40	−0.03	I	12	0.40	40	1.74
K_2O	12	0.11	40	1.50	Mn	12	0.27	40	−0.54
CaO	12	0.26	40	5.67	Co	12	0.16	40	0.81
Al_2O_3	12	1.28	40	−0.21	pH	4	0.56	40	0.00
Mo	12	0.16	40	−0.02	TOC	12	1.15	40	−1.39
V	12	0.47	40	0.17					

表 2 土壤样品指标分析方法检出限[1)]

Table 2 Detection limit of indicator analysis method

指标	分析方法	检出限	指标	分析方法	检出限
As	AFS	0.2	Sr	XRF	1
Cd	ICP-MS	0.02	Se	AFS	0.01
Cr	ICP-AES	3	N	VOL	15
Cu	ICP-AES	1	P	XRF	8
Ni	ICP-MS	1	B	ES	1
Hg	AFS	0.000 5	F	ISE	50
Pb	XRF	2	Cl	XRF	10
Zn	XRF	1	I	COL	0.3
K_2O	ICP-AES	0.01 *	Mn	ICP-AES	5
CaO	ICP-AES	0.02 *	Co	ICP-MS	0.04
Al_2O_3	COL	0.01 *	V	ICP-AES	2
Mo	ICP-MS	0.25	TOC	VOL	0.05 *
pH	ISE	0.10 **			

1) * 表示测试指标,单位为%, * * 无量纲,其余指标单位为$mg \cdot kg^{-1}$

表 3 农作物样品分析检出限/$mg \cdot kg^{-1}$

Table 3 Analysis and detection limits of crop samples/$mg \cdot kg^{-1}$

项目	As	Se	Cd	Hg	Pb
检出限	0.01	0.005	0.000 1	0.000 5	0.005

单位为$ng \cdot mL^{-1}$,检出限为 0.001 $ng \cdot mL^{-1}$,并利用尿标-8847 重复检验,控制样品测试的准确度,尿镉测定结果用尿肌酐测定值进行校正.

数据处理方法:数据整理利用 Excel 完成,图件绘制利用 CorelDRAW12、ArcGIS10.2 和 IBM SPSS Statistics 20 完成.

2 结果与分析

2.1 玉米对镉硒的吸收模型

农作物对土壤元素的吸收程度,不仅取决于土壤中元素的含量,也会受到土壤中其他组分及理化性质的影响[18],分析研究区主要大宗农作物玉米中镉、硒元素含量与对应根系土中各指标的相关关系,结果见表 4.

玉米镉硒含量与根系土中镉硒含量显著相关,主要原因为玉米中的元素主要来源于土壤. 玉米中镉的含量与土壤硒含量也存在一定的相关性,主要原因可能是因为土壤中硒与镉具有同源性. 玉米硒含量与土壤 K_2O 含量及土壤 pH 均具有较好的相关性,主要原因为 K_2O 及土壤 pH 均为土壤性质的主要影响因素,对硒的生物有效性具有明显的控制[19~21].

采用 SPSS 软件进行多元回归分析,得到玉米镉硒吸收模型,其方程如下:

$$\lg(Cd_{corn}) = 0.924 \lg(Cd_{soil}) - 0.983 \quad (3)$$

$$\lg(Se_{corn}) = 1.485 \lg(Se_{soil}) - 0.064\,2 \lg K_2O + 0.071pH - 1.793 \quad (4)$$

表 4 玉米镉、硒含量与根系土各指标相关性[1)]

Table 4 Correlation between cadmium and selenium content in corns and various indicators of root soil

农作物指标	根系土测试指标	相关系数
Cd	Cl	0.258
	Al_2O_3	-0.199
	CaO	0.148
	K_2O	-0.215
	Cd	0.552 **
	Se	0.592 *
	I	-0.158
	F	0.287
	TOC	-0.038
	pH	0.218
Se	Cl	0.027
	Al_2O_3	0.130
	CaO	0.101
	K_2O	0.225 *
	Cd	0.420 **
	Se	0.632 **
	I	-0.113
	F	-0.004
	TOC	-0.001
	pH	0.169 *

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关, * * 表示在 0.01 水平上显著相关, $n = 110$

式中,Cd_{corn}为玉米籽实中镉含量($mg \cdot kg^{-1}$);Cd_{soil}为土壤中镉含量($mg \cdot kg^{-1}$);Se_{corn}为玉米籽实中硒含量($mg \cdot kg^{-1}$);K_2O 为土壤中 K_2O 含量(%);Se_{soil}为土壤中硒含量($mg \cdot kg^{-1}$);pH 为土壤酸碱度(无量纲). 回归方程使用 F 检验,式(3)中:$F = 51.859 >$

$F_{0.05,1,108}=3.93$，$R=0.69$，式(4)中：$F=59.386>F_{0.05,3,106}=2.68$，$R=0.792$.

利用上述回归方程，结合研究区表层土壤数据，对表层土壤采样点对应的玉米籽实镉硒含量进行预测. 参照《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)[22]及《湖北省食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求》(DBS 42/002-2014)[23]给出的玉米中镉的限量及富硒标准，以玉米样品镉限量及二倍限量，将镉预测值分为≤0.1、0.1～0.2 和 >0.2 mg·kg^{-1}这 3 个区间，以玉米样品富硒及不富硒，将硒预测值分为 <0.02 mg·kg^{-1}和 ≥0.02 mg·kg^{-1} 两个区间进行反距离权重法插值分析，得到相应的地球化学图，将本次研究采集的 110 件玉米籽实镉硒实测含量投图，结果见图 2.

2.2　土地安全区划

依据“土地污染防治行动计划”给出的土地安全利用分类方法，将农用地划分为 3 个类别，安全区和轻微风险区划分为优先保护类，轻度和中度风险区的划分为安全利用类，重度风险区的划分为严格管控类. 结合《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)[22]给出的作物中镉元素含量限值及《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)[24]给出的土壤镉元素风险筛选值，提出土地安全区划方法见表 5. 利用该方法进行土地安全区划，结果见图 3.

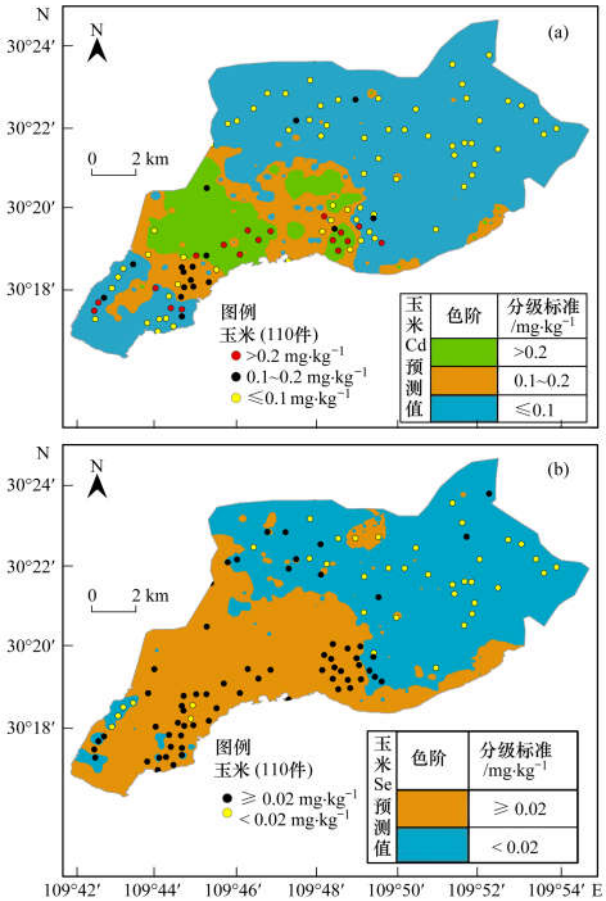

图 2　玉米镉和硒含量预测

Fig. 2　Prediction map of corn cadmium and selenium contents

表 5　土地安全区划方法[1)]

Table 5　Land safety division method

项目		土壤 Cd 环境质量等级				
		$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$3 < P_i \leq 5$	$P_i > 5$
含义		安全	轻微风险	轻度风险	中度风险	重度风险
玉米 Cd 含量 /mg·kg^{-1}	≤0.1	优先保护	优先保护	优先保护	优先保护	安全利用
	0.1～0.2	安全利用	安全利用	安全利用	安全利用	严格管控
	>0.2	结构调整	结构调整	严格管控	严格管控	严格管控

1) P_i = 实测值/风险筛选值

研究区为典型高硒区，土壤及农作物中硒含量丰富，硒对镉具有一定的拮抗作用，使得国标给出的限值很难适应沙地乡的实际状况. 建立尿 Cd(U-Cd，μg·d^{-1}，以 Cr 计)和通过玉米摄入镉的量(C-Cd，μg·d^{-1})的回归方程，可以计算出恩施市沙地乡主要大宗农作物玉米中镉的安全限值，计算过程如下.

建立尿 Cd 和通过玉米摄入镉量的回归方程：

$$\lg(\text{U-Cd}) = 0.209\lg(\text{C-Cd}) + 0.235 \quad (5)$$

回归方程使用 F 检验，$F=59.386>F_{0.05,3,106}=2.68$，因此，该方程通过在 0.05 水平下的显著性检验. R 为 0.792，方程拟合程度较好.

根据欧洲食品安全局(European Food Safety Authority，EFSA)所使用的基准剂量(benchmark dose，BMD)评估方法[25]，利用 BMDS 软件计算得到以 β2-MG 为效应指标的 U-Cd 参考剂量为 4.05 μg·d^{-1}，将此限值代入上述回归方程，计算得到 C-Cd 限值为 60.545 μg·d^{-1}. 根据膳食调查结果，恩施地区研究对象日均摄入玉米的量为 212.5 g·d^{-1}，则恩施地区玉米中镉的含量限值则为 0.28 mg·kg^{-1}，即恩施市沙地乡，玉米样品中镉的安全限值为 0.28 mg·kg^{-1}(GB 2762-2017 给出的安全限值为 0.1 mg·kg^{-1})，将该值代入式(3)中，可以得到研究区土壤中镉的风险筛选值为 2.92 mg·kg^{-1}. 利用该方法得到的玉米中镉的限制以及土壤镉污染风险筛选值，按照表 5 给出的方法重新进行土地安全区划，结果见图 4.

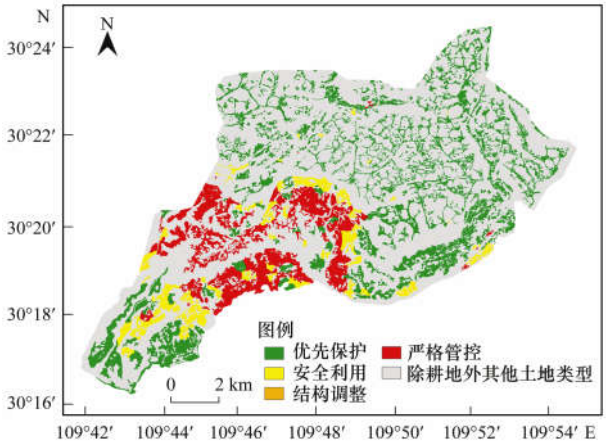

图 3 基于国标土地安全区划

Fig. 3 Land safety zone map based on the national standard

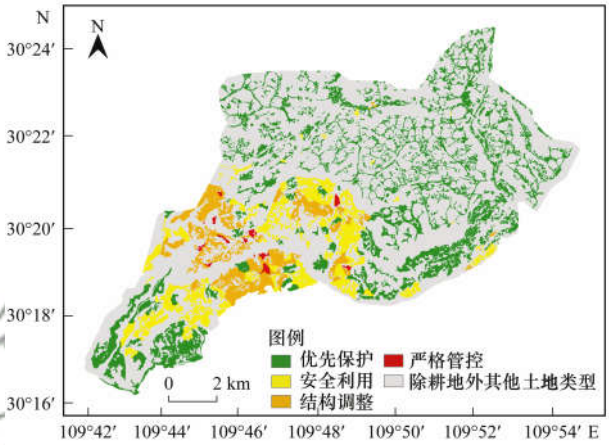

图 4 基于硒健康效应土地安全区划

Fig. 4 Land safety zone map based on selenium health effects

3 讨论

调查发现,研究区广泛分布二叠系茅口组地层,该地层的主要岩石类型包括暗色硅质岩及炭质页岩,属于典型的黑色岩系区[26],且研究区土壤中镉元素含量较高,出现了一定程度的镉超标现象[27].分析研究区表层土壤中硒元素与镉元素含量关系发现(图 5),二者呈明显正相关关系,主要原因为硒元素与镉元素在岩石中容易形成镉的硒化物,在成土过程中,金属硒化物发生分解,且研究区残坡积物分布广泛,成土母质搬运距离较近,土壤更多地继承了母岩的元素地球化学特征,参考《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)[17],以及《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)[24]给出的我国农用地土壤污染风险筛选值及农用地土壤污染风险管制值,进行土壤硒镉地球化学等级划分,结果见图 6,统计结果显示硒元素一等和二等面积所占比例高达 86.96%. 镉元素风险区面积所占比例为 81.97%,管制区面积所占比例为 13.20%,因此研究区属于典型高硒高镉区.故在研究区开展土地安全区划研究,可以更安全、科学地利用富硒资源.

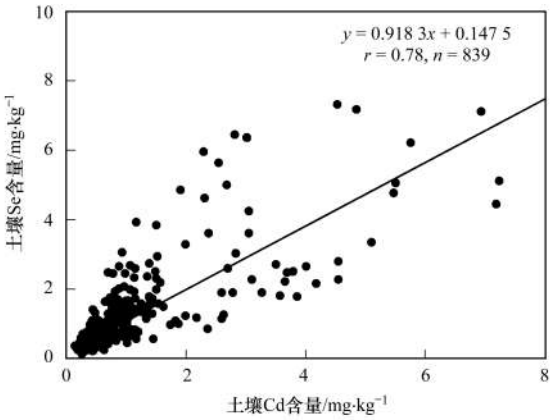

图 5 研究区表层土壤硒和镉含量散点图

Fig. 5 Scatter plot of Se and Cd content in surface soil of the study area

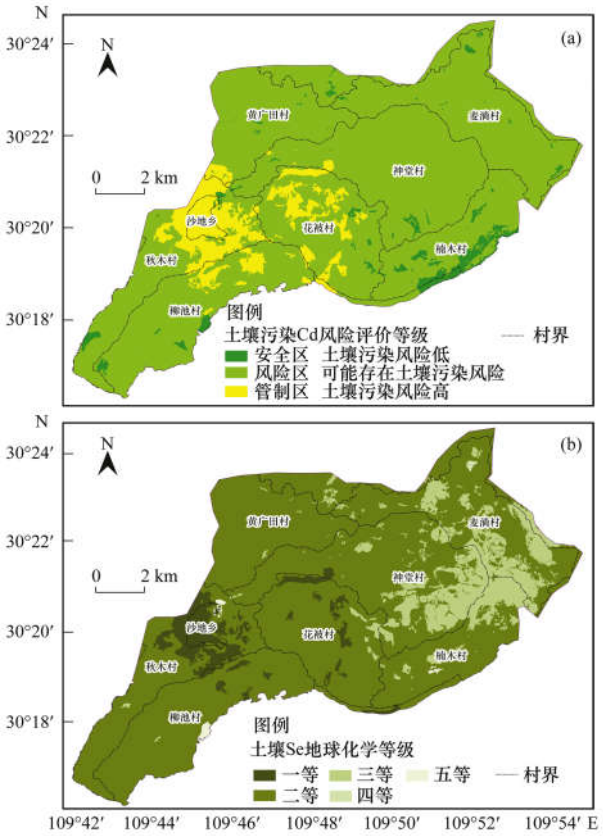

图 6 研究区土壤镉和硒地球化学等级

Fig. 6 Geochemical grade map of soil cadmium and selenium in the study area

将吸收模型预测值与 110 件实测值进行对比发现,玉米镉和硒吸收模型预测的准确率分别为 80.92% 和 83.64%,高估率分别为 5.45% 和 0.91%,低估率分别为 13.64% 和 15.45%(图 7),模型预测准确率较高.

基于国标进行土地安全区划,得到耕地土壤中优先保护占比 58.8%,安全利用占比 13.8%,结构

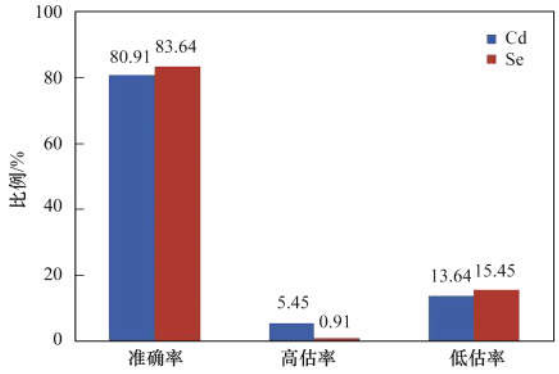

图 7　玉米镉和硒含量预测结果柱状图

Fig. 7　Histogram of prediction results of cadmium and selenium content in corn

调整占比 0，严格管控占比 27.4%．考虑到硒的健康效应土地安全区划结果显示，耕地土壤中优先保护占比 58.8%，安全利用占比 22.9%，结构调整占比 17.1，严格管控占比 1.2%（图 8）．对比以上两种结果可以看出，考虑到硒的健康效应时，严格管控区面积大幅度减少，可提高土地利用率．

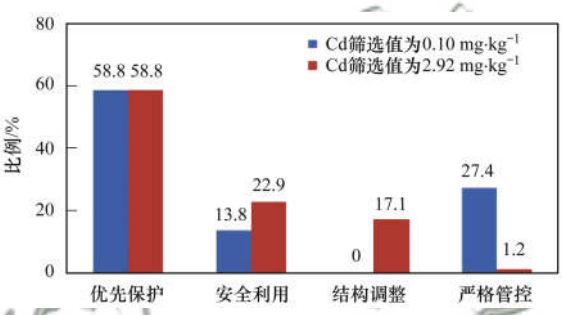

图 8　两种区划结果对比

Fig. 8　Comparison of the results of the two divisions

统计研究区农作物镉与硒的富集系数（图 9），从中可以看出，水稻镉的富集系数相对很高，而硒的富集系数较小，故研究区不建议种植水稻．玉米与茶叶样品中，镉的富集系数相对较低，而硒的富集系数相对较高．结合前文安全区划结果，优先保护区与安全利用区可大力开发富硒农产品，结构调整区建议种植玉米与茶叶．

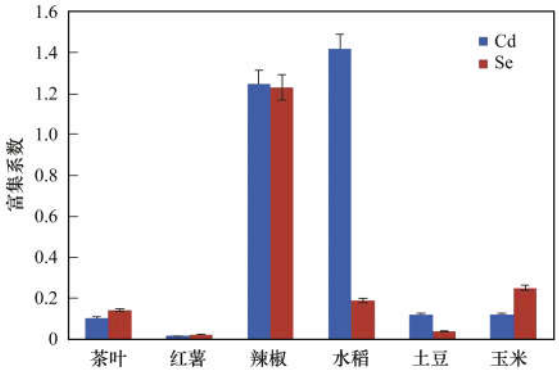

图 9　研究区农作物硒和镉富集系数统计直方图

Fig. 9　Statistical histogram of selenium and cadmium enrichment coefficients in crops in the study area

4　结论

（1）结合玉米 Cd 吸收模型，基于《食品安全国家标准食品中污染物限量》（GB 2762-2017）给出的作物中镉元素含量限值及《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618-2018）给出的土壤镉元素风险筛选值，提出土地安全区划方法，进行土地安全区划可以得到研究区农耕地土壤中优先保护占比 58.8%，安全利用占比 13.8%，结构调整占比 0，严格管控占比 27.4%．考虑到硒对镉的拮抗作用进行安全区划，结构调整区面积提高 17.1%，而严格管控区面积减少 26.3%，很大程度的提高了土地利用效率．

（2）结合研究区各农作物中硒和镉的含量特征，建议优先保护区及安全利用区大力发展富硒农产品，结构调整区种植玉米与茶叶．

（3）研究区土壤主要继承了成土母质的元素地球化学特征，地球化学等级评价结果显示，土壤中硒元素富集的同时，镉含量也较高．因此，在研究区开展土地安全区划研究，有利于安全、科学地开发富硒资源．

参考文献：

[1] Girling C A. Selenium in agriculture and the environment[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1984, **11**(1): 37-65.

[2] Long Z D, Yuan L X, Hou Y Z, *et al*. Spatial variations in soil selenium and residential dietary selenium intake in a selenium-rich county, Shitai, Anhui, China [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2018, **50**(8): 111-116.

[3] Rayman M P. The importance of selenium to human health[J]. Lancet, 2000, **356**(9225): 233-241.

[4] 李继云，任尚学，陈代中．陕西省环境中的硒与大骨节病关系的研究[J]．环境科学学报，1982，**2**(2)：91-101.
Li J Y, Ren S X, Chen D Z. A study of Kaschi-Beck disease associated with environmental selenium in Shanxi area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1982, **2**(2): 91-101.

[5] 杨元，杜宝珍．陕西省环境中硒与克山病的发病关系[J]．中国环境科学，1983，**4**(2)：57-60.

[6] Filek M, Zembala M, Hartikainen H, *et al*. Changes in wheat plastid membrane properties induced by cadmium and selenium in presence/absence of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2009, **96**(1): 19-28.

[7] Hartikainen P, Soininen H, Reinikainen K J, *et al*. Neurotransmitter markers in the cerebrospinal fluid of normal subjects effects of aging and other confounding factors [J]. Journal of Neural Transmission, 1991, **84**(1-2): 103-117.

[8] Sieprawska A, Kornas A, Filek M. Involvement of selenium in protective mechanisms of plants under environmental stress conditions-review [J]. Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica, 2015, **57**(1): 9-20.

[9] 阿吉古丽·马木提，麦麦提吐尔逊·艾则孜，艾尼瓦尔·买买提．新疆喀什市城乡交错带耕地土壤重金属污染风险评价[J]．环境工程，2018，**36**(4)：160-164.

Ajigul M, Mamattursun E, Anwar M. Pollution risk assessment of heavy metals from farmland soils in urban-rural ecotone of Kashgar City, Xinjiang[J]. Environmental Engineering, 2018, **36**(4): 160-164.

[10] 边博, 周燕, 张琴. 太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1442-1450.
Bian B, Zhou Y, Zhang Q. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals from river network sediment in western area of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1442-1450.

[11] 王俊能, 赵学敏, 胡国成, 等. 广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 488-495.
Wang J N, Zhao X M, Hu G C, *et al*. Distribution and bioaccumulation characteristics of cadmium in fish species from the Longjiang river in the Guangxi autonomous region[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 488-495.

[12] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2202-2210.
Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, *et al*. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu basin[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2202-2210.

[13] 蔡黎新, 蔡碧忍. 硒镉摄入对大鼠脏器中硒、镉、铜、锌、锰含量的影响[J]. 中国公共卫生, 2001, **17**(10): 893-894.
Cai L X, Cai B R. Effect of Selenium, cadmium supplement on contents of Se、Cd、Cu、Zn、Mn in rat organ[J]. China Public Health, 2001, **17**(10): 893-894.

[14] 彭小桂. 湖北省恩施市硒资源开发利用潜力浅析[J]. 资源环境与工程, 2015, **29**(4): 436-441, 458.
Peng X G. Analysis on utilization potential of selenium resource in Enshi, Hubei[J]. Resources Environment & Engineering, 2015, **29**(4): 436-441, 458.

[15] 王锐, 余涛, 杨忠芳, 等. 富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(7): 1647-1654.
Wang R, Yu T, Yang Z F, *et al*. Bioavailability of soil selenium and its influencing factors in selenium-enriched soil[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, **27**(7): 1647-1654.

[16] 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 等. 典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4684-4693.
Ma H H, Yu T, Yang Z F, *et al*. Spatial interpolation methods and pollution assessment of heavy metals of soil in typical areas[J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4684-4693.

[17] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].

[18] 曾庆良, 余涛, 王锐. 土壤硒含量影响因素及富硒土地资源区划研究——以湖北恩施沙地为例[J]. 现代地质, 2018, **32**(1): 105-112.
Zeng Q L, Yu T, Wang R. The influencing factors of selenium in soils and classifying the selenium-rich soil resources in the typical area of Enshi, Hubei[J]. Geoscience, 2018, **32**(1): 105-112.

[19] Rohn I, Marschall T A, Kroepfl N, *et al*. Selenium species-dependent toxicity, bioavailability and metabolic transformations in *Caenorhabditis elegans*[J]. Metallomics, 2018, **10**(6): 818-827.

[20] Pouri S, Motamedi H, Honary S, *et al*. Biological synthesis of selenium nanoparticles and evaluation of their bioavailability[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2018, **60**(1): 13-18.

[21] Yoshida S, Iwataka M, Fuchigami T, *et al*. *In vitro* assessment of bioavailability of selenium from a processed Japanese anchovy, Niboshi[J]. Food Chemistry, 2018, **269**: 436-441.

[22] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].

[23] DBS 42/002-2014, 湖北省食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求[S].

[24] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].

[25] European Food Safety Authority (EFSA). Opinion of the scientific committee on a request from EFSA related to a harmonised approach for risk assessment of substances which are both genotoxic and carcinogenic[J]. EFSA Journal, 2005, **3**(10): 282.

[26] 温汉捷, 裘愉卓, 凌宏文, 等. 中国早古生代若干高硒黑色岩系中层状硅质岩的地球化学特征及其成因意义[J]. 沉积学报, 2003, **21**(4): 619-626.
Wen H J, Qiu Y Z, Ling H W, *et al*. Geochemistry and genesis of bedded cherts in some typical eopaleozoic high selenium black shales, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, **21**(4): 619-626.

[27] 余涛, 杨忠芳, 王锐, 等. 恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析[J]. 土壤, 2018, **50**(6): 1119-1125.
Yu T, Yang Z F, Wang R, *et al*. Characteristics and sources of soil selenium and other elements in typical high selenium soil area of Enshi[J]. Soils, 2018, **50**(6): 1119-1125.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 12
Environmental Science (monthly) Dec. 15, 2019

CONTENTS