DOI: 10.3724/EE.1672-9250.2026.54.013 CSTR: 32253.14.EE.1672-9250.2026.54.013

鹤壁市鹤山区土壤硒元素活化迁移规律研究

王启蒙[1,2]，李兴辉[1,2,*]，鲁利国[3]，曹持畅[1,2]，王 辉[1,2]，王中杰[1,2]

(1. 河南省第一地质矿产调查院有限公司,河南 洛阳 471000; 2. 河南省生态环境与勘查地球化学应用工程技术研究中心,河南 洛阳 470123; 3. 河南省资源环境调查二院有限公司,河南 洛阳 470123)

摘 要： 本文通过1∶5万土地质量地球化学调查,采集并分析了河南省鹤壁市鹤山区的土壤、岩石、农作物等样品,研究了碱性环境下硒的空间分布、成因、赋存形态、有效态及土壤–农作物的迁移转化规律。结果表明:研究区中东部土壤硒呈明显富集的特征,富硒土壤分布受石炭系煤系地层控制,在石炭系地层及下游附近含量普遍较高,有机质与Se均表现出表层富集、深部亏损的特征,一般在20~30 cm上层富集;研究区土壤硒各形态中以残渣态、强有机结合态为主,易利用态占全量4.92%,处于中低水平,残渣态与土壤全硒高度相关,碳酸盐结合态、强有机结合态与有机质高度相关;研究区土壤硒有效态含量平均值为0.074 mg/kg,有效度11.35%,与全硒和pH值正相关,与有机质相关性弱;研究区小麦、玉米、红薯、谷子、油菜普遍富硒,富硒水平为富集–强富集;研究区硒资源丰富,土壤及农作物均无重金属污染,可根据研究成果进行合理化种植,开展富硒产业开发。

关键词： 硒;空间分布;有效态硒;形态;土壤–农作物;重金属元素;鹤壁鹤山区

中图分类号： P595;X142 **文献标识码：** A

硒(Se)是人体必需的微量营养元素,在免疫调节、抗氧化及拮抗重金属毒性等方面发挥着关键作用[1-2]。中国是一个贫硒国家,我国有72%地区属于缺硒或低硒地区,2/3的人口存在不同程度的硒摄入不足,贫硒地区居民的补硒工作十分重要[3-4]。通过食用富硒农产品来补充硒元素,利用生物源补充硒既安全又方便经济,而这些富硒农产品主要从土壤中吸收硒,因此富硒土壤是一种宝贵的耕地资源。

前人对富硒土壤的研究表明:自然过程和人为因素都可以活化和迁移硒进入和离开土壤,土壤硒的赋存、富集和运移受地形、土壤类型、土壤的理化性质、风化作用、土地利用方式等多种因素影响;富硒土壤的实际意义在于指导天然富硒农产品生产,农作物硒含量不仅与土壤全硒有关,更大程度上取决于土壤硒的有效态含量[4-5];富硒土地是含有丰富硒元素且有害重金属元素含量小于农用地土壤污染风险筛选值要求的土地,有害重金属元素超标将严重制约富硒土地的开发利用[6-7]。

通过1∶5万土地质量地球化学调查,笔者团队首次发现了鹤壁市鹤山区富硒土壤资源丰富,多种农作物富硒,具有较高的开发价值。下一步如何科学评价和合理开发利用研究区的富硒土地资源,需要系统性解决土壤硒富集规律、来源、赋存形态及有效性、土壤–农作物硒转化迁移规律,以及硒与重金属相互作用等问题[4]。前人对此地的研究仍属空白,相关的研究文献往往只注重其中部分方面,缺乏系统性,且较少关注土壤重金属元素的含量特征与相关性。本文系统研究了鹤山区碳酸盐岩地质背景下的碱性土壤,其成果对全国类似环境下的富硒研究具有重要参考价值,同时为研究区的富硒土地管理、产业开发及种植结构调整提供了科学与实践双重指导意义。

1 研究区概况

研究区位于河南省鹤壁市鹤山区,包括鹤壁集镇和姬家山乡,面积139 km^2。地势西高东低,西部以低山为主,地形切割强烈、复杂多样,以林地居多,东部以丘陵为主,以耕地居多。研究区西部出露地层为寒武–奥陶系、石炭系,土壤类型以石质土为主,沟谷中分布少量褐土;东部出露第三系、第四系(图1),土壤类型以褐土为主,少量红黏土,土地利用类型主要为旱地和水浇地。农作物以小麦、玉米为主,另有小米、油菜、红薯等。

收稿日期： 2025–10–30;**改回日期：** 2026–01–12

基金项目： 鹤壁市西部山区富硒土地资源调查项目(鹤财[2023]24号)。

第一作者简介： 王启蒙(1987—),男,本科,高级工程师,研究方向为环境地球化学。email:717720215@qq.com。

***通信作者：** 李兴辉(1998—),男,硕士研究生,研究方向为环境地球化学。email:1747268321 @qq.com。

© Editorial office of Earth and Environment. This is an open access article under the CC BY–NC–ND license.

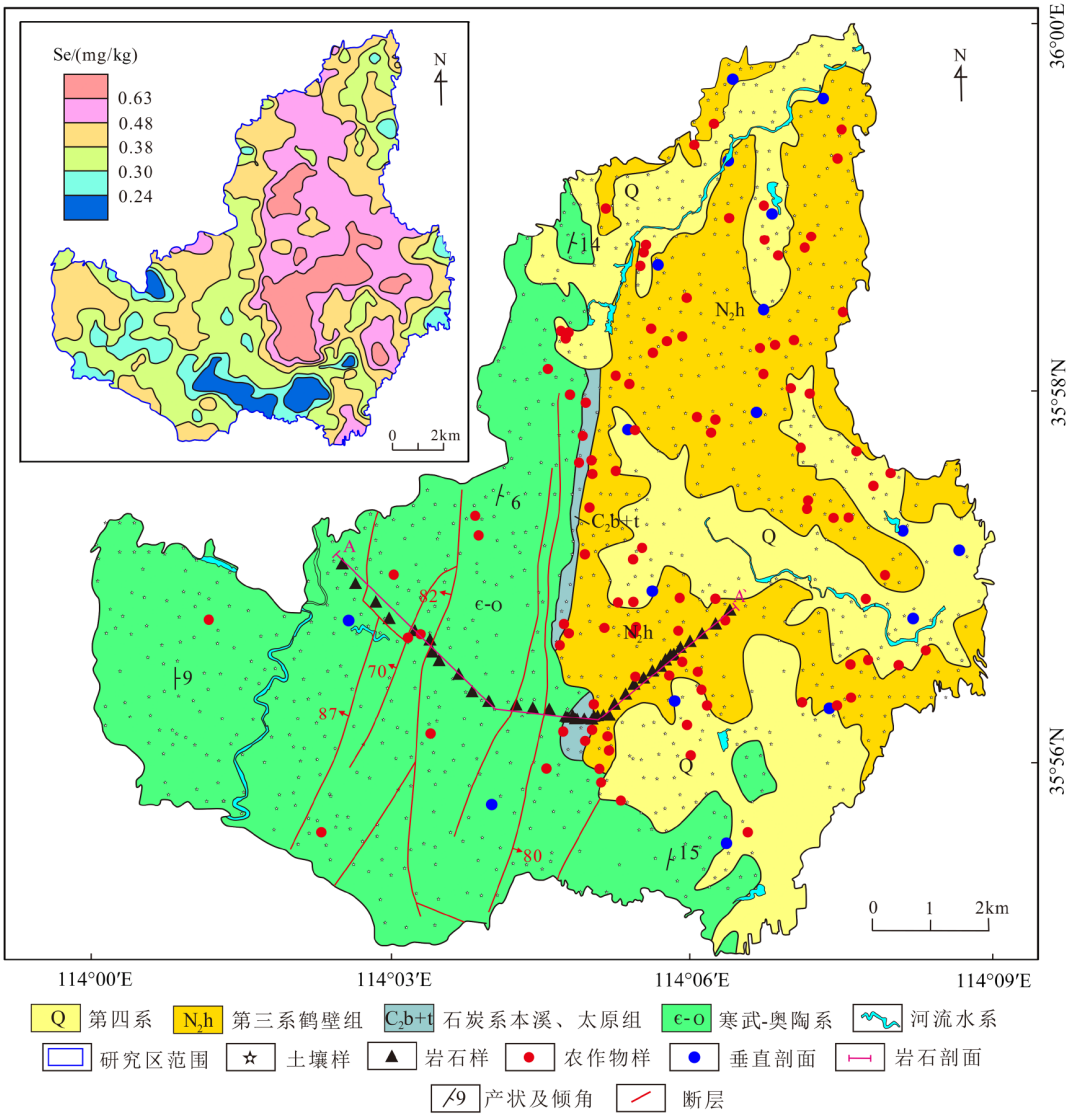


图1 研究区地质背景及硒元素地球化学图

Fig. 1 Geological background and selenium geochemical map of the study area

2 样品采集与分析

2.1 样品采集

各类样品采用网格加图斑的原则均匀布设(图1),满足对不同成土母质类型、土壤类型、土地利用类型的有效控制。表层土壤样(1 205件)以主样点为中心,20~30 m范围内五点法采样,采样深度20 cm;土壤剖面样(48件)分层明显时,按照分层厚度取样,分层不明显时,按照自上而下0~20、20~50、50~100、100~150、150~200 cm的土层深度采集土壤样品;岩石样(45件)在3个主要地层单元中采集,垂直地层走向按间距多点采集新鲜岩石组合成1个样品,样重大于1.0 kg。农作物样(105件)在成熟时集中采集,采用棋盘法进行,在长势整齐的田块中,以0.1~0.2 hm^2为采样单元,小麦、谷子、油菜选择3~5个不同位置按1 m×1 m面积采集籽实(穗),玉米、红薯选择5~8棵不同位置的植株采集,然后等量混匀组成1个混合样品,同时采集根系土(105件),将植物整体挖出后,收集植物根部上的泥土样品。土壤有效态(30件)、形态样品(10件)从采集的农作物根系土副样中提取。

2.2 样品分析

样品分析由华北有色(三河)燕郊中心实验室有限公司完成。全硒、有效态硒、形态硒均采用原子荧光光谱法(AFS)测定,全硒用硝酸、氢氟酸溶样浸提,有效态硒用磷酸二氢钾溶液浸提,硒的离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化态、强有机结合态、残渣态分别用MgCl溶液、NaAc溶液、$Na_4P_2O_7$溶液、$HONH_3Cl$溶液、H_2O_2–HNO_3溶液、HNO_3–$HClO_4$溶液浸

提；有机质用重铬酸钾、硫酸溶液处理，容量法测定；农作物样烘干、粉碎、密闭微波法消解后用AFS法测定；重金属元素主要用电感耦合等离子体质谱法(ICP–MS)和原子荧光光谱法(AFS)测定。样品分析准确度、精密度和报出率(表1、表2)满足《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD2005-03)、《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)要求。

3 结果与分析

3.1 土壤硒地球化学特征

3.1.1 表层土壤硒含量特征

研究区土壤呈碱性–强碱性，平均pH值为8.23，硒含量平均值为0.48 mg/kg(表3)，是河南省、全国土壤硒平均值的2.53、2.18倍，呈明显富集的特征。采用土壤硒健康指标等级(DZ/T 0295—2016)划分原则(表4)，研究区土壤硒以适量–高为主，面积占比97.21%，无硒过剩区，硒缺乏和边缘面积较小，占比分别为1.61%和1.18%，高硒土壤区面积51.68 km^2，占比50.86%。采用中国地质调查局标准《天然富硒土地划定与标识》(DZ/T 0380—2021)标准(碱性，≥0.30 mg/kg)，富硒土壤面积达12.5万亩，硒含量平均值为0.55 mg/kg。

3.1.2 土壤硒空间分布特征及成因

研究区硒元素含量整体空间分布不均匀(图1)，中东部明显高于西部，高值区主要分布在工作区中东部，呈带状分布，低值区在西部及西南部。研究区寒武—奥陶系、石炭系、第三系地层岩石硒平均含量分别为0.08、0.49、0.18 mg/kg，在空间上，石炭系岩石及土壤硒含量普遍较高(图2)，但土壤硒高值点较多出现在下游第三系地层附近，这与石炭系地层位于中部半坡、风化剥蚀后向下游低缓处迁移聚集有关，Se易迁移，在水中悬浮物中含量较高，悬浮物以黏土级吸附，在洪冲积及河流冲积中缓慢沉积富集。而西部寒武—奥陶系地层硒含

表1 分析方法检出限、准确度、精密度和报出率

Table 1 Detection limits, accuracy, precision and yield of analytical methods

检测项目	分析方法	检出限	准确度(△lgC)	RSD	报出率
土壤全量Se	AFS	0.01 mg/kg	0.005	4.49%	100%
土壤全量Cd	ICP–MS	0.03 mg/kg	0.06	4.50%	100%
土壤全量Ni	ICP–AES	2 mg/kg	0.09	4.22%	100%
土壤全量Cu	ICP–MS	1 mg/kg	0.05	4.80%	100%
土壤全量As	AFS	0.8 mg/kg	0.05	4.50%	100%
土壤全量Hg	AFS	0.000 5 mg/kg	0.007	5.29%	100%
土壤全量Pb	ICP–MS	1.5 mg/kg	0.003	3.81%	100%
土壤全量Cr	ICP–AES	3 mg/kg	0.003	4.23%	100%
农作物Se	AFS	0.007 mg/kg	0.006	1.05%	100%
有效态Se	AFS	0.001 mg/kg	0.01	3.45%	100%
有机质	VOL	0.17%	0.004	4.10%	100%
pH	ISE	0.1	0.002	3.28%	100%

表2 硒元素各形态分析精密度和报出率

Table 2 Analysis precision and reporting rates of selenium speciation

元素	参数	水溶态 离子态		碳酸盐态	腐植酸态	铁锰结合态	强有机结合态	残渣态
Se	RSD/%	3.38	5.79	6.79	3.08	4.64	5.02	5.73
	报出率/%	90.0	70.0	100	100	90.0	100	100

表3 土壤硒元素地球化学特征值表

Table 3 Geochemical characteristic values of selenium in soil

元素	平均值/(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	标准差(σ)	变异系数(CV)	河南省背景值/(mg/kg)	全国背景值/(mg/kg)
Se	0.48	0.05	2.98	0.27	0.55	0.22	0.19

表4 土壤硒等级划分统计表

Table 4 Classification of soil selenium levels

等级	缺乏	边缘	适量	高	过剩
	Se≤0.125	0.125<Se≤0.175	0.175<Se≤0.4	0.4<Se≤3.0	Se>3.0
面积/km^2	1.63	1.20	47.10	51.68	0
占比/%	1.61	1.18	46.35	50.86	0

注：Se含量单位为mg/kg。

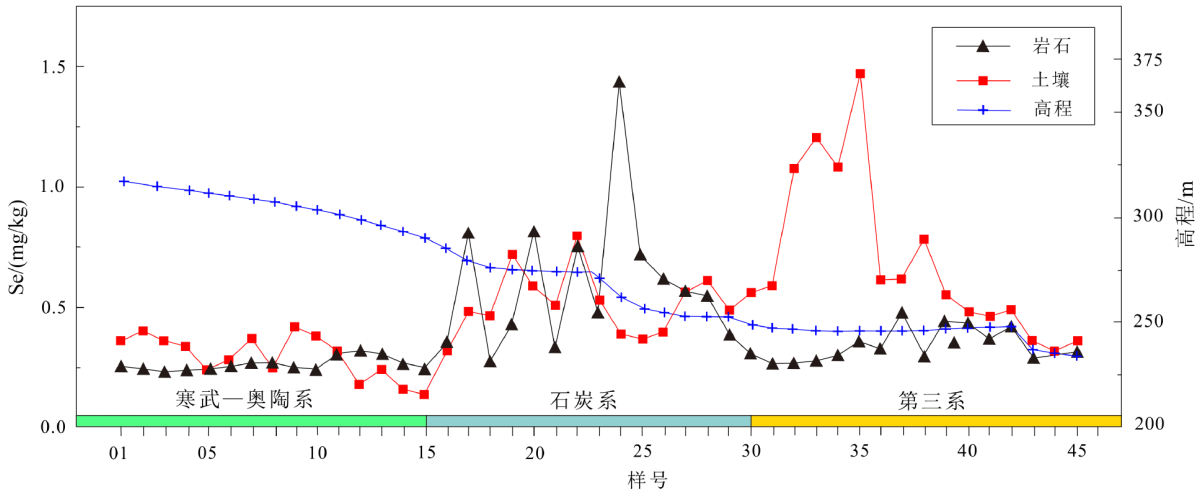


图2 岩石–土壤水平剖面硒元素含量特征

Fig. 2 Selenium content in rock-soil horizontal profile

量普遍相对较低,相应土壤的整体硒含量也偏低,明显受地质背景控制。但不同的地质背景、土壤类型均会出现高值和低值,说明土壤硒的赋存、富集和运移受多种因素影响。

富硒土壤分布多受地质背景控制,发育富硒土壤的地区大多分布着富含有机质黑色页岩、煤及煤系地层等[4],典型区域包括河南新密市南部[8]、陕西省安康紫阳县[9]、广西马山县[10]、安徽省宣城市[11]等,富硒土壤与母岩古生代煤系地层分布具有良好的对应性。此外,研究区东部大型煤矿的采煤、燃煤活动,通过大气沉降对富硒土壤的形成也有重要贡献。

另外,富硒土壤分布也与地形地貌呈显著相关性,在江苏海安里下河地区[12],地势越高,硒含量越低,地势相对低洼处硒含量较高,因其沉积物粒度相对较细,有机质及黏土矿物含量相对较高,对土壤 Se有一定的固定和富集作用。在梅州市五华县地区[13],四周海拔较高的低洼地带土壤表层硒含量较高,中北部平原地带含量较低,一方面,平原地带受人类活动影响,可能会导致土壤硒被作物吸收而减少,另一方面地表径流、土壤侵蚀频繁,影响物质的再分配及土壤理化性质,从而直接或间接地影响土壤硒的迁移与富集[14]。由于水文地质作用,硒在下垫面中被富集,在部分地区,富硒土壤主要分布在河流边、湖泊周围等水文地质条件较好的地方。

3.1.3 土壤硒垂直分布特征

在垂向剖面上(图3),褐土、红黏土、石质土中的Se元素均表现出表层富集、深部亏损的趋势,即Se元素的含量与深度呈负相关关系,尤其在浅部Se元素的含量随着深度的增加迅速降低,研究区褐土、红黏土富硒(≥0.30 mg/kg)土壤多在30 cm以浅,石质土富硒土壤在20 cm以浅,有机质与硒元素高度一致,均呈现表聚型特征。

在河北省石家庄市藁城区[15],表层土壤硒元素普遍存在明显的富集现象,主要集中在0~15 cm的耕植层。在河南省睢县西南部[16],Se元素含量自上而下基本呈现逐渐减小的趋势,50 cm以深土壤Se元素含量均小于0.25 mg/kg。在湖北省建始县[17],虽然随着剖面深度的增加,土壤中的硒及有机质含量逐渐降低,但是在150~200 cm深度,Se元素含量平均仍大于0.38 mg/kg。这说明土壤硒的垂向分布具有明显空间异质性,个别地区受成土母质、有机质迁移及水文条件等因素控制,深层(>150 cm)土壤也可富硒。研究表明,表层土壤中含有较高含量的腐殖质和氧化铁,对硒具有更强的吸附作用[8],表浅层土壤有机质、铁铝氧化物、黏粒组分高于深层土壤,有利于硒的富集,但在深土层由于土壤理化性质的变化,硒含量迅速降低[4]。

3.2 土壤硒形态及有效态地球化学特征

3.2.1 土壤硒的形态特征

土壤中的硒根据其溶解性、移动性、有效性的大小,按从大到小的顺序分为水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态、强有机结合态和残渣态7种形态。按照生物可利用性(表5),惰性态(残渣态、强有机态)含量最高,占全量的82.20%;其次为中等利用态(腐殖酸态、铁锰氧化物态),占全量的12.87%;易利用态(水溶态、离子交换态、碳酸盐态)含量较低,占全量的4.92%。硒不同形态含量为残渣态>

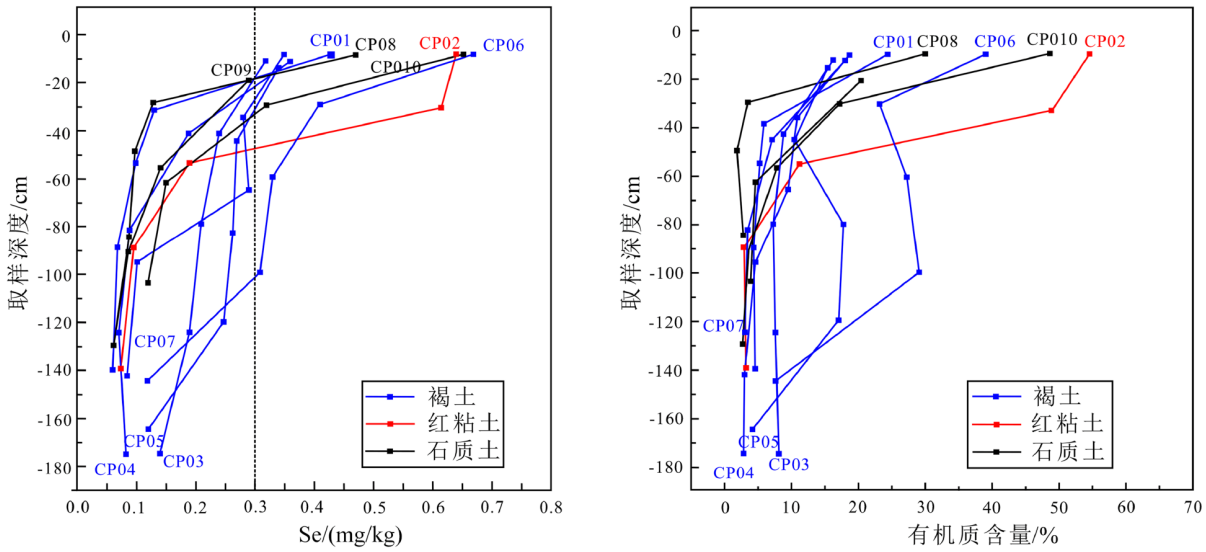


图3 土壤垂直剖面中硒元素及有机质含量特征

Fig. 3 Characteristics of selenium and organic matter content in soil vertical profile

表5 土壤硒形态分析结果表

Table 5 Selenium speciation in soil

指标	全硒	水溶态硒	离子交换态硒	碳酸盐态硒	腐殖酸态硒	铁锰氧化物态硒	强有机态硒	残渣态硒
平均值/(μg/kg)	656.50	15.36	8.00	13.00	72.40	12.10	168.70	366.94
变异系数	0.55	0.47	0.43	0.47	0.40	0.56	0.43	0.88
占比/%	100.00	2.34	1.22	1.98	11.03	1.84	25.70	55.89
与全硒相关性		–0.15	–0.06	0.39	–0.13	0.33	0.51	0.95
与有机质相关性		0.27	0.40	0.89	–0.35	0.62	0.95	0.39

强有机结合态>腐殖酸结合态>碳酸盐结合态≈铁锰氧化物结合态≈水溶态>离子交换态。

土壤水溶态Se是土壤Se形态中最易被植物吸收的一种形态，研究区土壤水溶态硒含量3~20 μg/kg，平均值15.36 μg/kg，略高于中国土壤水溶态Se的均值含量10 μg/kg[18]。水溶态Se占全硒比值的2.34%，易利用态占比为5.69%，总体处于中低水平(表6)，这可能会导致农作物对硒的生物利用率偏低。

在部分地区，如天津市蓟州区[22]、河南洛阳[27]，土壤中有效硒的含量近似等于水溶态、离子交换态和碳酸盐结合态硒含量之和，相比之下，研究区易利用态占有效硒含量的50%左右，说明中等利用态硒在有效硒转化过程中发挥了重要作用。

土壤硒全量与不同形态硒表现出显著的相关性差异，与残渣态呈高度正相关(r = 0.95)，表明土壤全硒含量的增加会直接导致残渣态硒的显著累积，反映其作为主要赋存形态的稳定性；与强有机结合态呈中等正相关(r = 0.51)，与碳酸盐态、铁锰氧化物态次之，与其他形态相关性弱。这一结果揭示了硒在土壤中的固定机制以残渣态为主，有机络合作用为辅。

土壤有机质与不同形态硒以正相关为主，与碳酸盐结合态、强有机结合态高度相关，相关系数为0.89、0.95，与水溶态、离子交换态相关性不高，而水溶态、离子交换态与有效硒最为相关，说明硒有效态含量不随有机质的增多而增高。总之，土壤中硒元素的生物有效性受总硒含量、土壤pH值、硒形态等综合因素的影响[28]。

3.2.2 土壤硒的有效态特征及影响因素

硒有效态是指土壤硒元素全量中能被植物吸收利用的部分，研究区有效态样品全硒平均值为0.65 mg/kg，有效硒平均为0.074 mg/kg，有效度11.35%，变异系数(CV)为0.30，属不均匀分布型(0.25<CV≤0.5)(表7)，与山东省博山区富硒农业区[29]、湖北恩施[26]及陕西紫阳[9]富硒区土壤硒的有效度相近。

研究区有效硒与全硒、有机质、pH的相关系数为0.62、0.27、0.43，说明全硒越高，有效硒也会相应增高，全硒含量较高的土壤能够向植物提供更多的有效硒；而

表6 中国部分地区土壤水溶态硒含量表

Table 6 Water-soluble selenium content in selected regions of China

地区	全量硒/10^{-6}	水溶态硒/10^{-9}	易利用态硒/10^{-9}	水溶态硒占比/%	易利用态硒占比/%	参考文献
宁夏石嘴山	0.23	11.21	28.16	4.88	12.24	[19]
黑龙江海伦市	0.17	8.00	17.00	4.68	9.95	[20]
江西鄱阳湖	0.31	11.00	27.00	3.60	8.84	[21]
天津市蓟州区	0.33	15.00	23.00	4.60	7.05	[22]
南疆焉耆盆地	0.34	7.00	46.90	2.05	13.74	[23]
青海东部	0.35	11.51	32.86	3.32	9.48	[24]
安徽庐江	0.36	5.00	15.00	1.40	4.20	[25]
湖北恩施沙地乡	1.87	13.30	40.00	0.71	2.14	[26]
鹤壁鹤山	0.66	15.36	37.36	2.34	5.69	本研究

表7 研究区土壤硒含量表

Table 7 Selenium content in soil of the study area

样本	有效态硒/(mg/kg)				全硒/(mg/kg)				有效度/%
	最小值	最大值	平均值	变异系数	最小值	最大值	平均值	变异系数	
全区(30件)	0.023	0.114	0.074	0.30	0.25	1.47	0.66	0.48	11.35
旱地(22件)	0.02	0.11	0.08	0.29	0.25	1.08	0.57	0.58	13.80
水浇地(8件)	0.05	0.11	0.07	0.34	0.30	1.47	0.69	0.68	10.29

有机质的积累,并不会使硒有效态含量明显增加,提高其生物利用性;pH值在7.5~9.0之间,pH值与有效硒相关性较高,相关系数为0.56,说明偏碱性的富硒土壤有利于有效硒含量的增加。

在湖北省建始县研究区[17],土壤有效硒含量与有机质含量同样存在弱正相关关系,相关系数为0.23,与土壤pH值相关性系数为0.44;在天津市蓟州区[22],土壤有效硒含量与有机质相关系数仅为0.13,有效硒主要受土壤全硒和pH的影响,相关性分别为0.61、0.63;在宁夏回族自治区石嘴山市[19],土壤整体为碱性环境,有效硒含量与全硒、有机质、pH值呈正相关关系,全硒随着有机质含量升高而升高,有效硒也呈现上升的趋势,但有机质与有效硒的关系取决于有机质的分解程度,如有机质未完全分解,土壤硒的有效性就会降低。

总之,在有效硒与全硒、有机质、pH的相关性研究上,一方面土壤有机质可与硒形成有机金属化合物而降低土壤硒的生物有效性,另一方面有机结合态硒又是有效态硒的潜在来源[30-31];在土壤碱性的基础上,pH的增高在一定程度上会增加有效硒的含量;从不同土地利用类型来看,水浇地与旱地有效态相当(表7),生物可利用性相差不大,说明研究区水文地质条件不是有效态硒高低的主要影响因素;土壤硒有效性还与铁铝氧化物、土壤结构及矿物组成等土壤理化条件密切相关[32-33]。

3.3 土壤硒及重金属元素向农作物迁移规律

3.3.1 土壤–农作物中硒的迁移

按与研究区条件相近的陕西省富硒含硒食品与相关产品硒含量标准(DB 61/T556—2018),粮食谷物大于0.05 mg/kg,油科植物及薯类大于0.02 mg/kg,即达到富硒标准。从表8中可以看出,农作物中硒含量油菜>小麦>玉米>谷子>红薯,农作物硒含量平均值均高于富硒标准,油菜普遍高于粮食作物,远高于富硒标准。由于人体硒摄入量适宜范围很小,有学者认为硒含量大于1 mg/kg 即为过剩[34],按此标准研究区农作物硒含量无过剩现象。

不同农作物对土壤中硒的吸收能力不同,利用生物富集系数BCF(农作物含量/根系土含量比值)来研究硒元素向农作物的转化迁移,生物富集系数越大,表明植物对硒的吸收能力越强。将农作物硒的BCF值分级为:20%~50%是较强富集,10%~20%是富集,5%~10%是弱富集农作物。根据BCF值大小可以看出,小麦及油菜为强富集,油菜(40.78%)对硒元素吸收能力最强,玉米(19.27%)、谷子(18.31%)为富集,红薯对硒吸收能力相

表8 不同农作物硒元素生物富集系数统计表

Table 8 Bioconcentration factors of selenium in different crops

农作物种类	样本/件	农作物硒含量/(mg/kg)	根系土硒含量/(mg/kg)	相关系数	富集系数/%	富硒样本/件	富硒比例/%
小麦	30	0.166	0.620	0.27	26.77	25	83.3
玉米	30	0.106	0.550	-0.03	19.27	19	63.3
谷子	15	0.108	0.590	0.12	18.31	14	93.3
红薯	15	0.024	0.470	0.32	5.11	7	46.7
油菜	15	0.208	0.510	-0.07	40.78	15	100.0

对较弱，为弱富集，总体富集能力表现为：油料类>谷物类>薯类。

在乌鲁木齐市城郊[33]，农作物对硒元素的富集能力强弱表现为：谷物类>豆类>薯类。在洛阳市[35]，除玉米(7.55%)外，油菜(35.44%)、小麦(18.38%)、谷子(19.46%)富集程度与研究区类似，红薯(2.8%)最弱。在仙桃市西南部[36]，油菜(50.26%)、小麦(44.61%)、玉米(35.10%)均表现为较强富集性。

研究区小麦、红薯中硒含量与其根系土硒含量相关性为0.27、0.32，呈弱正相关，玉米、油菜、谷子中硒含量与其根系土中硒含量相关性弱，可能与种植区土壤硒含量的变化幅度较小有关，说明土壤全硒含量高不是必然会产出富硒农作物，也说明了土壤–作物系统中的硒吸收、运移与土壤硒含量水平、存在形态、生物有效性及土壤理化性质等众多因素有关[4]。

3.3.2 土壤–农作物中硒与重金属元素迁移的相关性

中国耕地土壤主要污染物为镉(Cd)、镍(Ni)、铜(Cu)、砷(As)、汞(Hg)、铅(Pb)等。土壤重金属元素含量较高是富硒土壤开发利用的重要制约因素，土壤中硒与重金属元素之间往往存在伴生关系。研究区土壤重金属元素含量不超标，但空间分布上较不均匀，农作物重金属元素含量亦不超标。

Cu、Cd、Pb、Hg的高值区与工矿企业、村庄的重叠较好，说明受人类活动影响较大；Zn、Ni、Cr、As高值区较分散，受地质、地球化学环境影响为主。土壤Se元素与各种重金属元素含量的相关性研究显示，Se元素除了与Cd元素一般呈显著正相关外，与Hg、Cu、Pb、Zn多以中等正相关为主，如海南岛地区[37]、河南省睢县西南部[16]、广西壮族自治区都安县[38]、宁夏回族自治区石嘴山市[19]、陕西省紫阳县[39]。研究区土壤Se元素与Cd、Hg、Cu、Pb、Zn呈中等正相关，与Ni、Cr呈弱正相关，与As呈弱负相关(表9)，与其他地区的研究基本一致，也指示了元素的来源具有一定的一致性。

研究区农作物中Se与各种重金属元素含量的相关性显示，Se与Cd、Zn呈中等正相关，与其他元素相关性变弱，说明在土壤及农作物中Se与Cd、Zn均具有正相关性，也证明了从土壤到植物过程中，硒能增强其抵抗某些重金属污染、提高其环境胁迫抗逆性的能力[40]。研究表明硒能与重金属结合成难溶性沉淀物质，或改变重金属形态，减少植物体对重金属的摄入或阻断其转运过程[41]。

表9 富硒区土壤和农作物中硒与重金属元素相关性统计表

Table 9 Correlations between selenium and heavy metals in soil and crops from selenium-enriched areas

指标	Se–As	Se–Cd	Se–Hg	Se–Cr	Se–Pb	Se–Ni	Se–Cu	Se–Zn
根系土	–0.14	0.44	0.48	0.06	0.47	0.10	0.43	0.30
农作物	0.15	0.30	0.19	0.06	0.13	0.04	0.13	0.33

3.4 进一步研究建议

在139 km^2调查面积内圈定出富硒土地83.5 km^2(12.5万亩)，显示研究区具有开发富硒农产品的潜力，在今后的工作中，还需从以下方面进行深入研究：受季节及时间限制，部分农作物采集数量少，还有其他种类的粮食作物、蔬菜、水果等未进行采样研究，在今后开发过程中，可通过增加农作物样品种类及数量，进一步研究不同农作物的富硒规律，为富硒农业产业开发提供科学支撑；土壤硒来源的稳定性关系到富硒农产品持续开发的可行性，富硒土壤除了受地质背景控制，是否与其他因素有关，如大气沉降、灌溉水及农业耕作施肥等因素；不同农作物对硒及重金属元素的吸收能力不同，其差异性、潜在环境风险及生物富集效应，值得进一步研究，以调整至最佳的种植结构。

4 结论

1)研究区中东部土壤硒元素较富集，硒含量普遍大于0.48 mg/kg，硒元素的空间分布与地质背景关系最大，在石炭系煤系地层中最为富集，硒的富集受地形地貌、土壤类型、土壤理化性质等多方面因素综合影响；在垂向上有机质与硒元素含量随着深度增加迅速降低，均

呈现表聚型特征,富集深度小于30 cm,在耕种过程中应注意保护。

2)研究区土壤硒以残渣态、强有机态为主,易利用态占全量4.92%,处于中低水平,有机质与水溶态、离子交换态相关性不高,对硒有效态的影响不明显;土壤硒有效度为11.35%,全硒的含量越高,有效硒也会相应增高,碱性环境下,pH(<9.0)含量越高,有效硒越高。

3)研究区农产品普遍富硒,油菜、小麦、玉米、谷子富硒能力达到富集–强富集,无硒过剩现象。研究区土壤清洁,农作物无重金属污染,但土壤及农作物中Se与Cd、Zn均具有中–强相关性,在开发富硒农产品过程中预防重金属超标,并注意种植结构的调整。

参 考 文 献

[1] Geneva W H O. Trace elements in human nutrition and health[J]. Bulletin of the World Health Organization, 1996, 74(3): 306.

[2] Smits J E, Krohn R M, Akhtar E, et al. Food as medicine: selenium enriched lentils offer relief against chronic arsenic poisoning in Bangladesh[J]. Environmental Research, 2019, 176: 108561.

[3] 周国华. 富硒土地资源研究进展与评价方法[J]. 岩矿测试, 2020, 39(3): 319–336.

[4] 马芳宇. 江汉平原富硒土壤与农产品质量初探[J]. 资源环境与工程, 2012, 26(2): 194–200.

[5] 雷万杉, 林鑫, 段星星, 等. 土壤中硒元素来源和迁移作用研究现状[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2024, 54(1): 264–278.

[6] 宋波, 张云霞, 庞瑞, 等. 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4317–4326.

[7] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 449–459.

[8] 毛香菊, 刘璐, 程新涛, 等. 河南新密典型富硒区土壤Se元素地球化学特征及空间分布规律[J]. 地质通报, 2021, 40(10): 1664–1670.

[9] 张建东,王丽,王浩东,等.紫阳县土壤硒的分布特征研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1404–1408.

[10] 张春来, 杨慧, 黄芬, 等. 广西马山县岩溶区土壤硒含量分布及影响因素研究[J]. 物探与化探, 2021, 45(6): 1497–1503.

[11] 邢润华.安徽省宣城市土壤硒地球化学特征及成因分析[J]. 物探与化探, 2022, 46(3): 750–760.

[12] 杨晋炜, 刘强, 任衍斌, 等. 江苏海安里下河地区富硒土壤分布特征及成因[J]. 地质通报, 2025, 44(1): 173–184.

[13] 张金兰, 郑雪云, 胡晋, 等. 地形对县域农产品产地土壤硒空间分布的影响分析[J]. 地球与环境, 2025, 53(4): 565–576.

[14] 牛尧. 广东佛冈富硒土壤地质成因及其空间控制因素研究[D]. 荆州: 长江大学, 2022.

[15] 赵燕, 栾文楼, 郭海全, 等. 河北省石家庄市藁城区富硒土壤特征、成因与生态环境健康评价[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 764–776.

[16] 颜少权,高耀广,袁关涛.河南省睢县西南部土壤硒的地球化学特征及影响因素[J].矿产勘查, 2023,14(9):1766–1774.

[17] 高婕妤,周小娟,万翔,等.湖北省建始县土壤硒分布特征及影响因素分析[J].华中农业大学学报, 2023,42(1):212–218.

[18] 武少兴, 龚子同, 黄标. 我国土壤中的溶态硒含量及其与土壤理化性质的关系[J]. 中国环境科学, 1997, 17(6): 522–525.

[19] 王志强, 杨建锋, 魏丽馨, 等. 石嘴山地区碱性土壤硒地球化学特征及生物有效性[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 229–237.

[20] 张立, 刘国栋, 吕石佳, 等. 黑龙江省海伦市农耕区土壤硒分布特征及影响因素[J]. 现代地质, 2019, 33(5): 1046–1054.

[21] 魏然, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 江西省鄱阳湖流域根系土硒形态分析及其迁移富集规律[J]. 物探与化探, 2012, 36(1): 109–113.

[22] 谢薇, 杨耀栋, 侯佳渝, 等. 天津市蓟州区土壤硒的有效性及影响因素[J]. 环境化学, 2019, 38(10): 2306–2316.

[23] 赵禹, 白金, 刘拓, 等. 南疆焉耆盆地土壤-小麦系统硒耦合关系及生物有效性[J]. 地质通报, 2020, 39(12): 1960–1970.

[24] 张亚峰, 苗国文, 马强, 等. 青海东部碱性土壤中硒的形态特征[J]. 物探与化探, 2019, 43(5): 1138–1144.

[25] 杨奎, 李湘凌, 张敬雅, 等. 安徽庐江潜在富硒土壤硒生物有效性及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2018, 31(4): 715–724.

[26] 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.

[27] 周刊, 周建川, 王喜宽, 等. 河南洛阳农田土壤中硒锌的有效态与形态关系及影响因素[J]. 岩矿测试, 2024, 43(2): 315–329.

[28] 徐文. 硒的生物有效性及植物对硒的吸收[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(23): 46–47, 67.

[29] 梁若玉,和娇,史雅娟,等.典型富硒农业基地土壤硒的生物有效性与剖面分布分析[J].环境化学,2017,36(7):1588–1595.

[30] 蒲帅, 钱晓莉, 毛旭, 等. 贵州典型富硒区农作物对硒的富集转运特征研究[J]. 地球与环境, 2023, 51(6): 612–619.

[31] 陈萍. 不同来源硒在菌糠堆肥中的形态转化及其在土壤中的有效性[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.

[32] Joy E J M, Broadley M R, Young S D, et al. Soil type influences crop mineral composition in Malawi[J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 587–595.

[33] 郝应龙,李崇博,安永刚,等.乌鲁木齐市某蔬菜基地富硒土壤地球化学特征及生物效应研究[J]. 新疆地质, 2019, 37(2): 167–171.

[34] 谭见安.中华人民共和国地方病与环境图集[M].北京: 科学出版社, 1989: 373–416.

[35] 宋延斌, 王喜宽, 夏炎, 等. 河南洛阳市土壤和农作物中硒分布及富集特征[J]. 岩矿测试, 2022, 41(4): 652–662.

[36] 付豪,徐宏林,胡绍祥,等.仙桃市西南部土壤与农作物中硒的分布特征[J].资源环境与工程, 2017, 31(S1): 52–56.

[37] 杨忠芳, 余涛, 侯青叶, 等. 海南岛农田土壤Se的地球化学特征[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 837–849.

[38] 刘飞,杨柯,徐仁廷,等.广西都安县典型水田硒地球化学特征及影响因素[J].环境科学, 2021, 42(10): 4897–4907.

[39] 侯晨晖, 冯彩霞, 刘燊, 等. 土壤硒和重金属元素分布规律及污染评价: 以陕西紫阳为例[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2022, 52(5): 878–890.

[40] 朱青, 郭熙, 韩逸, 等. 南方丘陵区土壤硒空间分异特征及其影响因素: 以丰城市为例[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 834–843.

[41] 贾玮, 吴隽, 屈婵娟, 等. 硒增强植物抗逆能力及其机理研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(14): 171–176.

Study on the Activation and Migration Law of Selenium in Soil in Heshan District, Hebi City

WANG Qimeng[1,2], LI Xinghui[1,2,*], LU Liguo[3], CAO Chichang[1,2], WANG Hui[1,2], WANG Zhongjie[1,2]

(1. Henan First Geology and Mineral Survey Institute Co., Ltd, Luoyang Henan 471000, China;
2. Henan Engineering Research Center of Ecological Environment and Exploration Geochemistry Application, Luoyang Henan 470123, China;
3. The Second Institute of Resources and Environment Investigation of Henan Province Co., Ltd., Luoyang Henan 470123, China)

Abstract: Based on a 1:50 000 geochemical land quality survey of Heshan District, Hebi City, and subsequent analyses of soil, rock, and crop samples, this study investigates the spatial distribution, origin, speciation, bioavailability, and soil-to-crop transfer of selenium (Se) in an alkaline environment. The results demonstrate significant Se enrichment in the central-eastern soils. The spatial pattern of Se-rich soils is primarily controlled by Carboniferous coal-bearing strata, with elevated concentrations consistently observed within these geological units and in adjacent downstream areas. Both selenium and organic matter exhibited surface enrichment, showing a depletion trend with depth, particularly confined to the upper 20-30 cm. Sequential chemical extraction revealed that soil Se predominantly exists in the residual and strongly organic-bound fractions. The readily available fraction comprised only 4.92% of the total Se, indicating low to moderate bioavailability. A strong positive correlation was identified between the residual fraction and total soil Se, while the carbonate-bound and strongly organic-bound fractions showed high correlation with organic matter content. The average bioavailable Se concentration was found to be 0.074 mg/kg, corresponding to an availability rate of 11.35%. Bioavailable Se content positively correlated with total Se and soil pH but exhibited a weak relationship with organic matter. Major crops, including wheat, maize, sweet potato, millet, and rapeseed, were found to be enriched with Se, with enrichment levels ranging from moderate to strong. The study area is endowed with substantial Se resources, and no heavy metal contamination was detected in the soils or crops. These findings provide a scientific basis for optimizing agricultural practices and developing a sustainable Se-enriched industry in the region.

Keywords: selenium; spatial distribution; available selenium; speciation; soil-crop; heavy metal elements; Heshan District in Hebi