

夏炎, 宋延斌, 侯进凯, 等. 河南洛阳市土壤和农作物中钼分布规律与影响因素研究[J]. 岩矿测试, 2021, 40(6): 820 - 832.
XIA Yan, SONG Yan - bin, HOU Jin - kai, et al. Distribution Law and Influencing Factors of Molybdenum in Soils and Crops in Luoyang, Henan Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(6): 820 - 832.
【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202104130052】

河南洛阳市土壤和农作物中钼分布规律与影响因素研究

夏炎, 宋延斌, 侯进凯, 赵瑞, 王喜宽*
(河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 钼是人体和农作物必需的有益元素, 具有防癌抗癌作用。由于不同地区土壤中钼含量和土壤酸碱性的不同, 农作物中钼含量有很大差异, 同时不同农作物对钼的吸收也不相同。研究不同农作物中钼富集规律可以为健康地质发展、富钼农产品开发、功能农业发展、种植结构调整提供依据。本文以洛阳市钼资源详查区及其他农业种植区为研究区, 通过采集 22 种大田种植的农作物及其根系土, 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定土壤和农作物钼含量, 研究了不同农作物钼含量特征及其影响因素。结果表明: 洛阳市土壤钼含量较高, 是中国土壤富钼特色地区。绿豆、豇豆、黑豆、黄豆、红小豆和花生是富集钼的主要农作物, 钼平均含量 > 9 mg/kg, 富集系数 > 500%, 属于钼的超富集农作物。芝麻、豆角、谷子、小麦、玉米和油菜籽钼含量较高, 钼含量均值介于 0.446 ~ 2.437 mg/kg, 富集系数介于 40% ~ 300%, 属于富钼农作物。辣椒、大蒜、红薯、秋葵的钼含量介于 0.1 ~ 0.3 mg/kg, 富集系数介于 10% ~ 30%, 属于高钼农作物。苹果、梨、葡萄、石榴、樱桃与中药材银条的钼含量 < 0.05 mg/kg, 富集系数 < 5%, 是低钼农作物。大多数农作物钼含量与根系土钼含量呈正相关, 而苹果、葡萄、石榴、樱桃等水果钼含量与根系土钼含量呈负相关。研究揭示了在碱性环境下土壤中的钼更容易被农作物吸收。区内农作物与中国其他地区相比均呈富钼特征, 是开发富钼农业产业的有利地区。依据不同农作物钼含量, 选择出绿豆、豇豆、黑豆、黄豆、红小豆和花生是研究区特色富钼农产品, 芝麻、豆角、谷子、小麦、玉米和油菜籽是富钼农产品, 辣椒、大蒜、红薯、秋葵属于高钼农作物。本成果为研究区富钼农产品开发、调整种植结构提供了科学依据。

关键词: 洛阳市; 农作物; 钼; 富集系数; 健康地质; 电感耦合等离子体质谱法

要点:

- (1) 绿豆、豇豆、黑豆、黄豆、红小豆和花生是钼的超富集农作物。芝麻、豆角、谷子、小麦、玉米和油菜籽是富钼农作物。苹果、梨、葡萄、石榴、樱桃等水果与银条是低钼农作物。
- (2) 研究区是开发富钼农业产业的有利地区。
- (3) 各种农作物中钼含量特征是科学利用富钼土地、调整农业种植结构、建设富钼农业产业的重要依据。

中图分类号: O657.63; X820.4 **文献标识码:** A

钼是瑞典化学家谢勒(Scheele)于 1778 年发现的, 普遍存在于自然界的水体、岩石、土壤、大气飘尘和动植物体中^[1]。钼是动植物必需的微量元素^[2-3], 有防癌抗癌作用, 胃癌、食管癌、宫颈癌死亡率与钼含量呈显著负相关^[4]。人体摄入钼不足时, 可造成癌症的发病率增高^[5-7]; 造成心肌坏死, 免疫

功能降低, 导致动脉硬化, 引起甲状腺功能亢奋^[7]。钼酶缺乏会导致儿童智力发育迟缓^[8]。钼中毒目前很少有公开的报道, 但经白鼠等动物实验, 钼过量会引起骨关节病变、损伤血细胞, 导致心血管疾病、损伤性机能^[7]。人体内钼过多, 黄嘌呤氧化酶活性增加, 生产尿酸过多, 可导致痛风症^[9]。

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-04-21; 接受日期: 2021-07-28
基金项目: 洛阳市钼资源详查项目(洛公交易采购[2018]053号)
第一作者: 夏炎, 工程师, 从事地质勘查、地球化学研究。E-mail: 1139936863@qq.com。
通信作者: 王喜宽, 博士, 正高级工程师, 长期从事地球化学研究。E-mail: nmgwsk@126.com。

自 1930 年以来,人类知道除了少数蓝藻以外,所有植物都需要钼,但钼对动物和人类的重要性直到后来才被认识^[2]。1949 年 Westerfeld 和 Richert 发现了黄嘌呤氧化酶,是钼在动物营养中作用的第一次证明^[2]。随后世界各国对钼与人体健康影响作了大量研究。在钼与农作物关系中,通过施加钼肥提高农作物产量与品质、钼对固氮作用研究成为重点^[10-14]。20 世纪 80 年代以来,中国针对微量元素与人体健康的关系、农作物中微量元素含量及其影响因素研究,主要集中于硒和镉等重金属元素,而对于钼,主要是通过施加钼肥的试验研究其对农作物的影响^[15-17]。从时间段分析,20 世纪 80 年代至 21 世纪初,重点是对钼与人体健康关系进行研究^[1,3-9];2000 年至 2015 年,重点是通过施加钼肥来研究钼对各种农作物品质、产量等的影响^[18-21];2015 年至今,对钼与农作物的研究集中在土壤钼及有效态与烟草品质的相关关系方面^[22-27]。

20 世纪 70 年代以来,人们打破了微量、超微量元素的分析禁区,为人类研究人体中的微量元素提供了可能,其中电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)作为一种高灵敏度的分析技术在痕量、超痕量无机元素分析方面被广泛应用^[28]。随着元素与人体健康关系研究的深入,健康地质概念开始出现。健康地质是在谋求人与自然和谐共生的大背景下,从地球系统观出发,研究探索地质环境与人体健康的密切关系^[29]。王学求等^[30]发现 40 余种元素(包括钼)在人体血液和土壤中具有高度相关性,揭示了土壤中化学元素对生命物质组成和健康的重要性。钼是人体重要的必需元素,对人体健康具有重要的意义。目前对一个地区大田种植的、非施加钼肥的各类农作物中的钼含量及其影响因素的研究较少。本文依据《洛阳市硒资源详查》项目,通过系统采集研究区大田种植的 22 种农作物及其根系土,采用 ICP-MS 分析钼含量,研究土壤、农作物中钼分布特征以及相互关系和影响因素,探讨钼在不同农作物内的富集分布规律,发现富钼与贫钼农作物,为研究区以及其他地区科学开发富钼农业产业及种植结构调整提供依据,也为健康地质的深入研究、功能农业开发、种植结构调整提供思路。

1 实验部分

1.1 研究区概况

研究区位于河南省洛阳市伊洛河流域,涉及伊川县大部,以及汝阳县、嵩县、孟津县和洛阳市区的

部分地区。研究区土壤类型以褐土、潮土、红黏土和粗骨土为主(图 1)。研究区地层有:新太古界太华群、登封群;中元古界熊耳群、五佛山群、汝阳群;新元古界洛峪群、震旦系;古生界寒武系、石炭系、二叠系;中生界三叠系、白垩系;新生界古近系、新近系及第四系。

研究区以洛阳市硒资源详查项目 770km² 面积的 1:5 万调查区为主,洛阳市范围内的农业种植区为辅,主要分布在第四系分布区,地形以第四系平原、丘陵为主,1:5 万调查区上游 50 千米左右的伏牛山系是中国钼矿的矿集区。

1.2 样品采集

本次农作物及其根系土样品主要在 1:5 万调查区内采集,部分分布在洛阳市的其他种植区内,包括粮食类、豆类、油料、蔬菜、水果、中药材银条(*Stachys floridana* Schuttl. ex Benth)等 22 种农作物。区内大面积种植的农作物主要是玉米、小麦、红薯、花生、芝麻、谷子,其次是黄豆、梨、银条、大蒜、油菜、苹果等,其余农作物种植面积较小,有的只是在一块地里发现有种植,因此不同农作物样品采集数量各不相同。大面积种植的农作物样品采集大于 30 件;种植面积较小的采集 10~20 件;其余样品数量小于 5 件的,都是种植面积太小,无法采集到足够的样品数量。

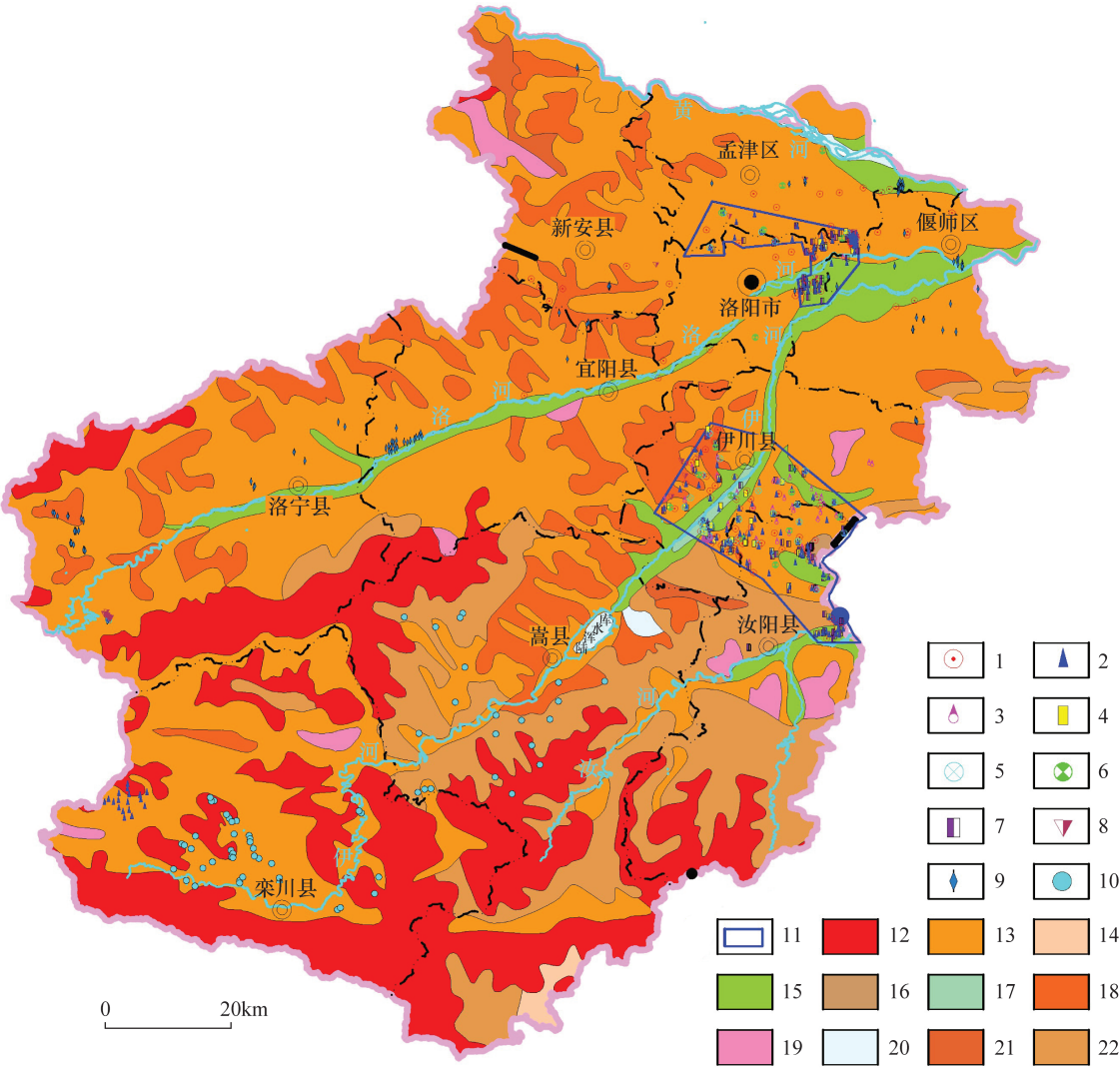
本次工作共采集 1:5 万土地质量地球化学评价土壤样品 5794 件,农作物样品及其根系土样品各 716 件。农作物样品在成熟时集中采集,同时采集根系土。采用棋盘法进行 3~5 点取样,然后等量混匀组成 1 件样品。大型果实由 5~10 棵以上植株组成,小型果实由 10~20 棵以上植株组成。谷物、油料、干果类采集质量为 1kg(干质量),水果、蔬菜类采集质量为 2kg(鲜质量)。土壤样品采集严格执行《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016),各项工作质量均满足规范和设计要求。

1.3 样品分析测试

本次样品分析测试工作由华北有色地质勘查局燕郊中心实验室、河南省岩石矿物测试中心、湖北省地质实验测试中心、河南省第一地质矿产调查院实验室承担。

1.3.1 样品制备

土壤:野外采集的土壤样品在样品加工间阴干过 20 目尼龙筛混匀后,采用四分法将样品装袋送交实验室。实验室用玛瑙研磨机将样品研磨至小于 200 目以后,称取 0.1000g 样品进行四酸(硝酸-盐



1—小麦样品采集点; 2—玉米样品采集点; 3—谷子样品采集点; 4—花生样品采集点; 5—芝麻样品采集点; 6—油菜籽样品采集点; 7—红薯样品采集点; 8—豆类样品采集点; 9—其他作物样品采集点; 10—钼矿(化)点; 11—1:5万钼资源详查范围; 12—棕壤; 13—褐土; 14—黄棕壤; 15—潮土; 16—砂姜黑土; 17—水稻土; 18—红黏土; 19—紫色土; 20—火山灰土; 21—石质土; 22—粗骨土。

图1 研究区位置及农作物样品采集位置分布图

Fig. 1 Location of the study area and distribution map of crop sample collection

酸-氢氟酸-高氯酸)溶样,定容至 25mL 后稀释待测。

小麦、玉米、花生、芝麻、豆类:将样品用尼龙筛筛去杂质,四分法缩分,分取于尼龙筛中,用自来水多次清洗至水澄清,再用蒸馏水冲洗,置于不锈钢托盘中,于 60℃ 烘箱中烘干。烘干样品经碎样机打碎至 40 目,密闭消解。

谷子:将样品用尼龙筛筛去泥土,四分法缩分,分取试样于尼龙筛中,用自来水多次清洗至水澄清,再用蒸馏水冲洗,置于不锈钢托盘中,于 45℃ 烘箱中烘干。经砻谷机脱壳后,用碎样机打碎,将碎好的样品进行密闭消解。

水果、蔬菜:将样品用自来水冲洗干净,再用蒸馏水冲洗,用粉碎机粉碎成浆状,将碎好的样品装入螺口塑料瓶内,密闭消解。

1.3.2 样品分析及质量控制

根系土和农作物中的钼采用 ICP-MS 进行分析。土壤样品报出率为 100%,同步测试的国家一级标准物质(GBW07405、GBW07407、GBW07425、GBW07447、GBW07449、GBW07451、GBW07452、GBW07453、GBW07454),监控样(GBW07385、GBW07388、GBW07452、GBW07457)分析的对数标准偏差合格率均为 100%,每组监控样的标准差(λ)、重复性检验和异常点抽查合格率满足《土地质

量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)等相关规范要求。

农作物样品: 插入国家一级标准物质(GBW10010、GBW10011)合格率均为 100%。重复性检验相对双差(RD)合格率为 100%。本次样品分析测试质量要求见表 1,均满足各项规定要求,分析质量可靠。共抽取 38 件外检样品,对比数据见

表 2,计算外检结果与原始值的相对双差均小于 30%,外检合格率 100%。

2 结果与讨论

研究区 1: 5 万土壤样品 5794 件、农作物根系土样品 716 件钼元素地球化学特征值(钼含量、有机质含量、pH 值)的测定结果见表 3。

表 1 土壤和农作物钼元素分析质量要求

Table 1 Analytical quality of molybdenum in soils and crops

样品种类	要求检出限 (mg/kg)	分析检出限 (mg/kg)	准确度 (Δ lgC)	准确度(Δ lgC) 合格率(%)	RSD (%)	精密度 合格率(%)
土壤	0.3	0.3	0.005	100	5.45	100
农产品	—	0.002	0.04	100	6.02	100

表 2 农作物中钼元素外检分析结果对比

Table 2 Comparison of external analytical results of molybdenum in crops

序号	原始样钼含量 (mg/kg)	外检样钼含量 (mg/kg)	相对双差 (%)	序号	原始样钼含量 (mg/kg)	外检样钼含量 (mg/kg)	相对双差 (%)
1	1.58	1.77	11.34	20	1.08	1.17	8.00
2	0.14	0.13	7.41	21	0.08	0.08	0.00
3	1	1.07	6.76	22	6.62	6.23	6.07
4	0.91	1.09	18.00	23	1.4	1.63	15.18
5	0.89	0.92	3.31	24	1.02	0.87	15.87
6	0.71	0.84	16.77	25	0.89	0.73	19.75
7	1.43	1.45	1.39	26	0.85	0.74	13.84
8	0.42	0.34	21.05	27	0.89	0.88	1.13
9	0.12	0.13	8.00	28	1.65	1.66	0.60
10	1.17	1.34	13.55	29	1.36	1.33	2.23
11	1.55	1.28	19.08	30	11.4	11	3.57
12	1.56	1.45	7.31	31	20.2	20.4	0.99
13	1.04	0.87	17.80	32	1.3	1.05	21.28
14	7.29	9.07	21.76	33	0.4	0.34	16.22
15	8.87	11.2	23.22	34	0.08	0.08	0.00
16	1.39	1.28	8.24	35	0.08	0.08	0.00
17	1.02	1.19	15.38	36	1.37	1.2	13.23
18	1.81	2.17	18.09	37	1.72	1.53	11.69
19	18.84	22.5	17.71	38	0.85	0.72	16.56

表 3 研究区土壤钼元素地球化学特征值

Table 3 Geochemical characteristic values of molybdenum in soils of the study area

测定参数	样品数 (件)	研究区土壤 平均值	研究区土壤 特征值范围	河南省土壤 背景值	中国土壤 背景值 ^[31]	研究区土壤平均值/ 河南省土壤背景值	研究区土壤平均值/ 中国土壤背景值
土壤钼含量(mg/kg)	5794	1.29	0.43~23.2	0.55	0.67	2.35	1.93
根系土钼含量(mg/kg)	716	1.55	0.55~67.7	0.55	0.67	2.82	2.31
有机质含量(%)	5794	1.89	0.17~17.43	1.55	1.84	1.22	1.03
土壤 pH	5794	7.53	4.59~8.56	8.07	7.67	0.93	0.98
根系土 pH	716	7.65	4.59~8.56	8.07	7.67	0.95	0.997

2.1 研究区土壤钼地球化学特征

研究区土壤中钼含量平均值是河南省土壤背景值的 2.35 倍,是中国土壤背景值的 1.93 倍,明显呈富集特征。研究区内根系土中钼含量平均值是河南省土壤背景值的 2.82 倍,是中国土壤背景值的2.31 倍,均明显呈富集特征。研究区西部伊河上游是中国重要的钼矿集聚区,因此在矿区周边及下游分布着较大范围的土壤高背景钼。

2.2 研究区土壤有机质和酸碱性特征

研究区 1:5 万土壤有机质明显高于河南省平均值,略高于全国平均值,研究区有机质含量呈正常水平。研究区 1:5 万土壤以碱性(pH 7.5~8.5)为主,占比 68.16%,其次为酸性(pH 5.0~6.5)和中性(pH 6.5~7.5),占比分别为 17.12%、14.33%,强酸性(pH<5.0)占比 0.39%,没有强碱性(pH>8.5)土壤。农作物根系土 pH 值以中性(pH 6.5~7.5)为主,占比 73.04%,其次为碱性(pH 7.5~8.5),占比 18.3%,强碱性(pH>8.5)土壤占比 2.37%,酸性(pH 5.0~6.5)土壤占比 6.28%,没有强酸性土壤。总体上,土壤 pH 值呈中性偏碱的特征。

2.3 研究区农作物中钼元素分布特征

2.3.1 不同农作物中钼含量特征

根据对不同农作物和根系土中钼含量统计(表 4),豆类作物和花生是富集钼的主要农作物,钼含量>9mg/kg。芝麻、豆角、谷子、小麦中钼含量均值范围为 1.03~2.437mg/kg,其中豆角比豆类低,主要包括新鲜豆角全部,富含水分较多。玉米和油菜籽钼含量均值分别为0.603mg/kg 和0.446mg/kg,高于其他蔬菜(钼含量介于 0.1~0.3mg/kg),低于小麦。辣椒、大蒜、红薯、秋葵等蔬菜的钼含量均值为0.118~0.266mg/kg,各种水果与银条的钼含量均小于0.05mg/kg,其中最低的是樱桃,其钼含量小于 0.01mg/kg。总体上农作物钼含量特征是:豆类和花生>芝麻、豆角>谷子、小麦>玉米、油菜籽>辣椒、大蒜、红薯、秋葵>银条、石榴、葡萄、苹果、梨、樱桃。豆类和花生的钼含量是粮食类农作物钼含量的7~25倍,是蔬菜类农作物钼含量的 34~122 倍,是水果钼含量的 263~1728 倍。绿豆、黑豆、葡萄、石榴、豆角、樱桃、辣椒、毛豆、秋葵、红小豆、豇豆样品数小于 5 件,从统计学上可靠度不够,但样品的钼含量反映了客观规律,可以作为参考依据。

表 4 洛阳市不同农作物及根土钼含量和富集特征

Table 4 Molybdenum contents and enrichment characteristics of different crops and root soils in Luoyang City							
农作物 种类	样品数 (件)	根系土钼均值 (mg/kg)	根系土钼含量范围 (mg/kg)	农作物钼均值 (mg/kg)	农作物钼含量范围 (mg/kg)	生物富集系数 均值(%)	生物富集系数 范围(%)
绿豆	4	1.38	0.89~2.5	14.68	9.66~18.84	1326.75	386.48~2038.69
豇豆	1	0.81	—	14.14	—	1754.4	—
黑豆	4	0.75	0.57~1.00	9.22	7.21~11.01	1261.11	987.92~1644.48
黄豆	20	1.09	0.72~3.12	10.97	0.32~22.00	1097.89	80.58~2291.67
红小豆	1	1.90	—	9.6	—	505.25	—
花生	49	1.71	0.61~5.04	9.71	0.44~29.34	675.91	54.75~1630.11
豆角	2	0.73	0.70~0.75	2.06	1.80~2.31	284.69	240.59~328.78
芝麻	35	1.78	0.68~4.40	2.437	0.31~6.93	158.39	29.19~379.21
谷子	34	1.45	0.79~3.53	1.3	0.32~2.63	98.45	25.11~235.00
小麦	174	1.37	0.57~11.2	1.03	0.12~3.08	92.56	7.97~254.91
玉米	175	2.08	0.68~67.7	0.603	0.05~3.86	44.04	5.47~127.68
油菜籽	15	1.19	0.64~3.10	0.446	0.38~0.649	45.24	14.66~79.14
辣椒	2	1.00	0.92~1.08	0.266	0.238~0.293	26.48	25.82~27.14
大蒜	16	1.23	0.85~1.82	0.202	0.056~0.52	15.67	5.14~28.57
红薯	125	1.52	0.67~13.4	0.178	0.033~0.735	13.91	1.43~34.70
秋葵	1	0.84	—	0.118	—	14.02	—
银条	17	1.00	0.64~1.74	0.042	0.016~0.109	4.30	1.71~7.44
石榴	3	0.94	0.84~1.02	0.036	0.032~0.039	3.83	3.16~4.72
葡萄	3	0.88	0.84~0.90	0.024	0.013~0.043	2.77	1.45~5.13
苹果	13	0.70	0.57~0.79	0.012	0.005~0.022	1.74	0.68~3.14
梨	20	0.75	0.55~1.16	0.011	0.004~0.021	1.43	0.49~3.02
樱桃	2	0.76	0.75~0.77	0.0085	0.006~0.011	1.12	0.8~1.44

2.3.2 不同农作物中钼元素富集特征

生物富集系数(BCF)是表征土壤中元素含量分布对食物链影响程度的参数,客观反映了农产品从土壤环境中吸收或摄取微量元素的能力,是现代环境地球化学研究土壤元素行为的常用指标之一^[32]。BCF 计算公式为:

$$BCF = \frac{\text{农作物中元素含量}}{\text{土壤中元素含量}} \times 100\%$$

一般地,BCF >5% 为富集特征。本文实验统计结果显示,豇豆、绿豆、黑豆、黄豆的 BCF >1000% ,红小豆、花生的 BCF >500% ,豆类和花生是钼的超富集农作物。豆角、芝麻中钼的 BCF 值分别为 284.69% 和 158.39% ,谷子、小麦中钼的 BCF 值分别为 98.45% 和 92.56% ,都是富钼农作物。油菜籽、玉米、辣椒、大蒜、秋葵、红薯中钼的 BCF 值介于 10% ~50% ,属于高钼农作物。银条、石榴、葡萄、苹果、梨、樱桃中钼的 BCF 值小于 5% ,属于贫钼农作物,除银条是中药材外均是水果。

农作物对应的根系土钼含量大于研究区平均值的是玉米、红小豆、芝麻、花生、红薯、谷子、绿豆、小麦种植区,这些农作物种植区处于富钼区域;稍低于研究区土壤平均值的是大蒜、油菜籽种植区;低于研究区土壤平均值的是黄豆、辣椒、银条、石榴、葡萄、秋葵、豇豆、樱桃、黑豆、梨、豆角、苹果种植区,其中

石榴、葡萄、秋葵、豇豆、樱桃、黑豆、梨、豆角、苹果种植区域内土壤钼含量远低于研究区平均值,但高于中国土壤平均值和河南省土壤平均值,这些农作物中豇豆、黑豆、豆角的 BCF 值高,其他农作物的 BCF 值低,钼含量也低。总体上根系土钼含量高,对应农作物钼含量也高,但黄豆、豇豆、黑豆、豆角的钼含量较高而对应根系土钼含量较低,说明豆类作物对钼有吸附专属性。目前中国没有钼的土壤环境容量限值,贾婷^[33]于 2014 年对福建省不同农作物钼富集规律开展了研究,推断出钼土壤环境限量为 9.13mg/kg。研究区不同农作物根系土中,玉米有 4 件、小麦有 1 件、红薯有 2 件土壤的钼含量大于9.13 mg/kg。除小麦钼含量不是最大值外,玉米和红薯钼含量是最大值,说明高钼土壤生长着高钼农作物。

2.4 研究区根系土钼含量及 pH 值与农作物钼含量的关系

对农作物通过散点图进行根系土钼含量与农作物中钼含量、根系土 pH 值与农作物中钼含量的相关性分析,建立相应的最优拟合方程,目的是探究农作物中钼含量的影响因素。其中绿豆、黑豆、石榴、葡萄、豆角、辣椒、樱桃数量小于 5 件,结果供参考。

2.4.1 根系土钼含量与农作物钼含量的关系

从表 5 中的数据可看出(由于豇豆、红小豆、秋葵各只有 1 件样品,所以未列入表格),绝大部分农

表 5 洛阳市根系土钼含量及 pH 值与农作物钼含量的关系

Table 5 Relationship between molybdenum contents and pH of root soil and molybdenum contents of crops in Luoyang City					
农作物种类	样品数(件)	根系土钼含量与农作物钼含量关系	R^2	农作物钼含量与土壤 pH 值关系	R^2
玉米	175	$y = 0.0556x + 0.4865$	0.497	$y = 0.0047x^{2.3307}$	0.148
小麦	174	$y = 0.3639\ln x + 0.9813$	0.144	$y = 0.0022x^{2.9471}$	0.244
红薯	125	$y = 0.0432x + 0.1122$	0.352	$y = 2 \times 10^{-5}x^{4.4983}$	0.263
花生	49	$y = 1.7779x + 6.6766$	0.105	$y = 8 \times 10^{-5}x^{5.7563}$	0.359
芝麻	35	$y = 1.6711x^{0.4482}$	0.143	$y = 0.0074e^{0.7425x}$	0.524
谷子	34	$y = 0.985x^{0.5568}$	0.197	$y = 0.0971x^{1.2203}$	0.035
黄豆	20	$y = 9.1861x^{0.2975}$	0.015	$y = 7.7935x - 48.724$	0.307
梨	20	$y = 0.01x^{0.3272}$	0.0097	$y = 2 \times 10^{-7}x^{5.3294}$	0.175
银条	17	$y = 0.0277x + 0.0139$	0.192	$y = 3 \times 10^{-7}x^{5.7776}$	0.162
大蒜	16	$y = 0.5755x^2 - 1.2488x + 0.8086$	0.6	$y = 1.4467x^2 - 23.533x + 95.841$	0.129
油菜籽	15	$y = 0.0413x + 0.397$	0.183	$y = -0.2539x^2 + 3.6565x - 12.669$	0.26
苹果	13	$y = 0.2011e^{-4.166x}$	0.216	$y = 7 \times 10^{-9}x^{6.9153}$	0.194
绿豆	4	$y = 21.991e^{-0.316x}$	0.632	$y = 0.0737e^{0.6796x}$	0.63
黑豆	4	$y = 42.718x^2 - 63.417x + 31.7315$	0.713	$y = 3.4449x - 15.452$	0.947
石榴	3	$y = -0.038x + 0.0713$	0.992	$y = 0.0004e^{0.5712x}$	0.936
葡萄	3	$y = -0.5374x + 0.4954$	0.992	$y = -0.0061x + 0.0712$	0.0054
豆角	2	$y = 1.0545x - 0.3045$	1	$y = -5.9755x + 13.756$	1
辣椒	2	$y = -0.6847x + 1.6077$	1	$y = -7.0917x + 14.422$	1
樱桃	2	$y = -0.7638x + 1.5338$	1	$y = -7.4088x + 4.824$	1

作物中钼与土壤中钼是呈正相关关系,即土壤中钼含量增加,农作物中钼含量也增加。其中 $R^2 > 0.3$ 呈较强正相关的农作物是黑豆、绿豆、大蒜、玉米、红薯; R^2 值介于 $0.1 \sim 0.3$ 呈弱正相关的农作物是谷子、银条、油菜籽、小麦、芝麻、花生。黄豆中钼与土壤中钼无相关性。在中国首次发现苹果、石榴、葡萄、樱桃中钼与根系土中钼呈强的负相关关系,虽然样品数较少,但多年生木本水果除梨无相关性外均呈现相同特征。这些水果生长的土壤中钼含量均较低,推断是由于果树属于多年生长,一直吸收营养来维持生长,果实中钼含量越高,摄取土壤中的钼越多,造成土壤中钼含量越低。

2.4.2 根系土 pH 值与农作物钼含量的关系

在根系土 pH 值与农作物的相关关系中,绝大多数农作物中钼与土壤 pH 值呈正相关(表 5),与贾婷^[33] 研究结果相似。其中 $R^2 > 0.3$ 呈较强正相关的农作物是黑豆、石榴、绿豆、芝麻、花生、黄豆; R^2 介于 $0.1 \sim 0.3$ 呈弱正相关的农作物是红薯、小麦、苹果、梨、银条、玉米。研究区主要处于中、碱性环境中,有利于农作物对钼元素的吸附。油菜籽、大蒜在线性、指数、对数、幂函数条件下均无相关性,但用多项式函数呈曲线相关。油菜籽是在 pH 值呈中性条件下钼含量最高,在弱酸性与弱碱性环境下钼含量较低。大蒜在土壤呈弱碱性 ($7.8 < \text{pH} < 8.12$) 条件下,钼与 pH 呈负相关;在土壤呈碱性 ($\text{pH} > 8.12$) 条件下,钼与 pH 呈正相关。谷子、葡萄中钼与 pH 没有相关性。豆角、辣椒、樱桃中钼与 pH 呈强负相关,由于样品只有 2 件,仅供参考。

2.5 研究区农作物中钼含量与其他地区对比

豆类是富集钼的主要农作物,各地豆类的钼含量也不同。如黄豆中的钼含量,在黄土丘陵区为 $10.6\text{mg/kg}^{[15]}$, 福建为 $1.49\text{mg/kg}^{[33]}$, 江西进贤为 4.66mg/kg , 江西新建为 0.85mg/kg , 东北地区为 $11.2\text{mg/kg}^{[34]}$, 广西为 $3.16\text{mg/kg}^{[35]}$ 。洛阳市与东北大豆中的钼含量相近,远高于其他地区黄豆。

本次工作与他人研究成果一致,豆类是吸收钼最高的作物,但与福建不同豆类相比^[33] (表 6),研究区根系土钼含量较低,豇豆、黄豆、花生根系土钼含量只是福建的 0.21 、 0.77 、 1.22 倍,但农作物钼含量是福建地区的 3.98 、 7.36 、 8.99 倍。豇豆、黄豆、花生在本研究区的 BCF 值是福建的 18.83 、 9.52 、 7.36 倍,豆类比福建地区富集钼的能力更强。与福建相比,研究区豇豆、黄豆、花生根系土 pH 值平均值分别为 7.72 、 7.66 、 7.40 ,呈中性。福建地区根系土 pH 值为 $3.71 \sim 7.35$,平均值为 $5.64^{[33]}$,呈酸性,说明了碱性环境下农作物更容易吸收钼。

小麦作为主要的粮食作物,在各地区的钼含量也不相同。与陕西延安地区 $0.754\text{mg/kg}^{[36]}$ 、山东地区 $0.64\text{mg/kg}^{[37]}$ 、河北大城 0.824mg/kg 、江苏宿迁 0.367mg/kg 、山东鄄城 $1.921\text{mg/kg}^{[38]}$ 、天津宝坻 $0.62\text{mg/kg}^{[39]}$ 、法国 $0.52\text{mg/kg}^{[40]}$ 相比,研究区小麦钼含量除低于山东鄄城外,均高于其他地区。

玉米的钼含量,在黄土丘陵区^[15] 为 0.462mg/kg ,广西^[35] 为 0.12mg/kg ,天津宝坻^[39] 为 0.37mg/kg ,远低于本研究区。花生的钼含量,在福建^[33] 为 1.08mg/kg ,广西^[35] 为 1.02mg/kg ,远低于本研究区。谷子的钼含量,在黄土丘陵区^[15] 为 0.361mg/kg ,远低于本研究区。

王夔^[41] 总结了胡萝卜、西红柿、青椒、黄瓜等蔬菜钼含量在 0.1mg/kg 以内,为典型低钼食物。研究区不同种类蔬菜中钼含量平均值(表 4)为:红薯 0.178mg/kg ,辣椒 0.266mg/kg ,秋葵 0.118mg/kg ,大蒜 0.202mg/kg ,豆角 2.06mg/kg ,均大于 0.1mg/kg ,富集系数在 $10\% \sim 30\%$ 之间,呈高钼特征,说明研究区蔬菜也富钼。只有石榴、苹果、梨、葡萄、樱桃等水果钼含量均小于 0.04mg/kg ,是低钼农作物。

之前国外研究表明,日本^[42] 各种农作物的钼含量为:芝麻 1.48mg/kg ,豆类 3.42mg/kg ,红豆 3.61mg/kg ,小麦和小麦产品 0.1mg/kg ,蔬菜(干重) 0.05mg/kg ,水果(干重) 0.05mg/kg 。韩国^[43] 各种

表 6 研究区与福建省农作物及根系土钼含量对比

Table 6 Comparison of molybdenum contents in crops and root soils in the study area and Fujian Province

农作物 种类	本研究农作物 钼含量 (mg/kg)	福建农作物 钼含量 ^[33] (mg/kg)	本研究/ 福建	本研究根系土 钼含量 (mg/kg)	福建根系土 钼含量 ^[33] (mg/kg)	本研究/ 福建	洛阳 BCF	福建 ^[33] BCF	本研究/ 福建
豇豆	14.14	3.55	3.98	0.81	3.83	0.21	1745.68	92.69	18.83
黄豆	10.97	1.49	7.36	1.09	1.41	0.77	1006.42	105.67	9.52
花生	9.71	1.08	8.99	1.71	1.4	1.22	567.84	77.14	7.36

农作物的钼含量为:玉米 0.0158mg/kg,绿豆0.267 mg/kg,红 豆 0.1637mg/kg,苹果 0.0003mg/kg,梨 0.0016mg/kg,小麦 0.0133mg/kg,花生 0.2065 mg/kg。可见韩国农作物中的钼含量明显低于本研究区。

通过上述各地主要农作物钼含量对比结果表明,本研究区是种植富钼粮食、油料、蔬菜等农作物的有利地区。

2.6 研究区农作物中钼含量的影响因素

已有研究表明,土壤全钼含量是有效钼的基础,有效钼含量与土壤钼全量呈线性正相关^[44-45],与土壤 pH 值的关系表现为有效钼含量随着 pH 增大而增高,在碱性土壤中有效钼含量较高^[46],在酸性土壤中则呈不相关^[44],或者在酸性土壤的有效钼很少^[47],甚至在水稻土中呈负相关^[48]。这些成果与研究区土壤呈中、碱性特征下的农作物钼含量明显高于其他地区的特征相符,说明研究区内有效态钼较高。同时,位于栾川县钼矿集中区附近采集 2 个点位的玉米根系土钼含量最高分别为 67.7mg/kg 和 15.5 mg/kg,玉米钼含量也是研究区最高,分别是3.86mg/kg和 2.46mg/kg,说明土壤全钼的高含量是农作物中钼含量的基础。本次研究表明大多数农作物中钼含量与 pH 值呈正相关关系,研究区属于碱性、中性为主的地区,适合农作物对钼的吸收,因此属于农作物吸收钼的有利土壤环境。

为了对研究区富钼地块和非富钼地块中农作物钼含量特征进行对比,根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中土地质量养分等级钼元素划分标准,将钼含量≥0.85mg/kg 作为富钼土壤,钼含量 <0.85mg/kg 作为非富钼土壤,统计各种农作物中的钼含量特征。大蒜、苹果、绿豆、葡萄、辣椒、毛豆根系土钼含量均≥0.85mg/kg,豆角、樱桃、秋葵、红小豆、豇豆根系土钼含量均 <0.85 mg/kg,其余农作物钼含量见表 7。绝大多数农作物钼含量在富钼土壤高于非富钼土壤,只有石榴、梨钼含量在非富钼土壤稍高于富钼土壤。上述特征说明绝大多数农作物中钼含量是受土壤中钼含量影响。石榴、葡萄、樱桃、苹果中钼含量与土壤中钼含量均呈负相关,梨无相关性,这些水果位于研究区土壤钼含量正常环境中,在土壤中钼含量超过富钼土壤标准后,如超出贾婷^[33]推断的钼土壤环境限量为 9.13mg/kg后是否还存在负相关关系,需要进行调查研究。

表 7 研究区不同土壤钼含量对应的农作物钼含量

Table 7 Molybdenum contents in the study area corresponding to the different soils and crops

农作物 种类	富钼土壤			非富钼土壤		
	样品数 (件)	根系土	农作物	样品数 (件)	根系土	农作物
		钼含量	钼含量		钼含量	钼含量
		平均值 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)		平均值 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)
玉米	145	2.34	0.64	30	0.79	0.42
小麦	126	1.6	1.12	48	0.76	0.79
红薯	105	1.66	0.19	20	0.79	0.13
花生	42	1.87	10.59	7	0.75	4.47
芝麻	29	1.98	2.68	6	0.79	1.24
谷子	32	1.49	1.36	2	0.803	0.327
黄豆	16	1.17	12.07	4	0.76	6.54
银条	9	1.27	0.049	8	0.7	0.034
油菜籽	9	1.49	0.45	6	0.75	0.44
黑豆	1	0.998	11.01	3	0.67	8.63
梨	4	0.96	0.0089	16	0.7	0.011
石榴	2	0.993	0.034	1	0.84	0.039

3 进一步研究建议

《洛阳市硒资源详查》项目在调查评价研究区硒资源的同时,根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中土地质量养分等级钼元素划分标准,以钼含量≥0.85mg/kg 作为富钼土壤标准,在 770km²调查面积内圈定出富钼土壤 419.22km² (628830 亩),显示研究区具有开发富钼农产品的潜力。在今后的工作中,还需从以下方面进行深入研究。

(1)苹果、葡萄、樱桃、梨是研究区贫钼农产品,可以通过在钼矿区周边的土壤钼高值区进行种植,研究是否能够形成自然富钼水果,从而通过充分利用自然资源优势,调整种植结构,形成富钼水果的产业经济优势。

(2)本次在研究区未发现,但在洛阳市行政区内还有如土豆以及其他种类蔬菜未进行采集,需要后期进一步研究分析这些农作物中钼含量分布特征,为富钼农业产业开发提供科学支撑。

(3)对本次采集数量较少的农作物获得的结论,可作为参考,今后工作通过增加样品量,完善本次工作成果。

(4)借鉴富硒土地资源利用规划^[49]方法,来加强研究区以及洛阳市钼矿集区周边富钼土壤区土地资源评价研究,以富钼土地资源评价成果为基础,进一步研究富钼土壤分布以及集中连片程度、土壤环境质量、土壤肥力、农田耕作等条件,综合土壤钼生

物有效性、农产品富钼率、农产品食用安全性、作物种植适宜性等情况,对富钼土地资源可利用性进行评判和分类分区,提出富钼农产品种植规划建议。

4 结论

利用 1:5 万土地质量地球化学评价方法,在研究区采集大田种植的 22 种农作物及其根系土分析钼含量,研究了根系土与不同农作物中钼的相关关系以及土壤 pH 值对各类农作物中钼含量的影响,分析了富钼土壤与非富钼土壤特征下农作物中钼含量的差异,以及农作物中钼含量影响因素。研究表明,研究区内土壤中钼含量总体呈高背景特征,豆类和花生是钼的超富集农作物;芝麻、谷子、小麦、玉米、油菜籽是钼的富集农作物;蔬菜中大蒜、红薯属于高钼农作物;银条、苹果、梨属于贫钼农作物。绝大部分农作物中钼含量与土壤中钼含量、土壤 pH 值呈正相关关系。本研究区土壤富钼,土壤以中性、碱性特征为主,农作物中钼含量高于中国其他地区,是开发富钼农业的有利地区。

5 参考文献

- [1] 胡相红. 微量元素钼与人类健康[J]. 现代预防医学, 2001, 28(3): 353-355.
Hu X H. Essential trace element molybdenum of human body and human health [J]. Modern Preventive Medicine, 2001, 28(3): 353-355.
- [2] Vishwanath M S. Molybdenum: An essential trace element [J]. Nutrition in Clinical Practice, 1993, 8(6): 277-281.
- [3] 杨自军, 龙塔, 冉林武, 等. 钼的生物学功能及其在动物生产中的作用[J]. 河南科技大学学报(农学版), 2004, 24(2): 40-42.
Yang Z J, Long T, Ran L W, et al. Molybdenum's biological function and roles in animal production [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Agricultural Science), 2004, 24(2): 40-42.
- [4] 曾昭华, 曾雪萍. 中国癌症与土壤中钼元素的关系[J]. 农村生态环境, 2000, 16(2): 60-61.
Zeng Z H, Zeng X P. Cancer and soil Mo in China [J]. Rural Eco-Environment, 2000, 16(2): 60-61.
- [5] 吴磊, 曹光辉, 颜世铭, 等. 微量元素钼与胃癌关系研究[J]. 微量元素与健康研究, 1996, 13(3): 1-2.
Wu L, Cao G H, Yan S M, et al. Investigation on the relationship between trace element Mo and gastric cancer [J]. Studies of Trace Elements and Health, 1996, 13(3): 1-2.
- [6] 韩冰, 张菁华. 钼的生物学作用及钼缺乏对生物体的影响[J]. 菏泽医学专科学校学报, 2009, 21(1): 73-74.
Han B, Zhang J H. The biological function of molybdenum and the effect of molybdenum deficiency on the organism [J]. Journal of Heze Medical College, 2009, 21(1): 73-74.
- [7] 韦友欢, 黄秋婵. 钼对人体健康的生理效应及其机制研究[J]. 广西民族师范学院学报, 2010, 27(5): 10-12.
Wei Y H, Huang Q C. Physiological effects and mechanism of molybdenum on human health [J]. Journal of Guangxi Normal University for Nationalities, 2010, 27(5): 10-12.
- [8] 王丽, 郭锋. 生物微量元素钼与人体健康[J]. 化学世界, 2000(8): 446-448.
Wang L, Guo F. Biological trace element molybdenum and human health [J]. Chemistry World, 2000(8): 446-448.
- [9] 刘牧. 钼对人体健康的影响[J]. 中国钼业, 2001, 25(5): 43-45.
Liu M. The effect of Mo on human health [J]. China Molybdenum Industry, 2001, 25(5): 43-45.
- [10] Janssen K A, Vitosh M L. Effect of lime, sulfur, and molybdenum on N₂ fixation and yield of dark red kidney beans [J]. Agronomy Journal, 1974, 66(6): 736-740.
- [11] Hashimoto K, Yamasaki S. Effects of molybdenum application on the yield, nitrogen nutrition and nodule development of soybeans [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1976, 22(4): 435-443.
- [12] Yang M, Shi L, Xu F, et al. Effects of B, Mo, Zn, and their interactions on seed yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Pedosphere, 2009, 19(1): 53-59.
- [13] Kandil H, Gad N, Abdelhamid M T. Effects of different rates of phosphorus and molybdenum application on two varieties common bean of (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 3(3): 8-16.
- [14] Ahmad J, Anwar S, Shad A A, et al. Yield and nutritional status of mungbean as influenced by molybdenum and phosphorus [J]. Pakistan Journal of Agricultural Research, 2021, 34(1): 144-153.
- [15] 李芳亭, 鲁强, 王世国, 等. 黄土丘陵区土壤钼锌含量及农作物对钼锌的反应[J]. 农业环境保护, 2002, 21(6): 559-561.
Li F T, Lu Q, Wang S G, et al. Concentration of molybdenum and zinc in soil of upland of loess and response of crops [J]. Agro-Environmental Protection,

- 2002,21(6):559-561.
- [16] 董玉明,张建明.施用硼、钼对蚕豆生长发育及产量的影响[J].安徽农业科学,2003,31(1):152-153.
Dong Y M, Zhang J M. Effects of application of boron and molybdenum on growth and yield of broad bean [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2003, 31(1): 152-153.
- [17] 周苏玫,樊骅,郭俊红,等.有机肥及锌硼钼微肥对花生产量和品质的影响[J].河南农业大学学报,2003,37(4):335-338.
Zhou S M, Fan H, Guo J H, et al. Effects of organic manure and microelement fertilizer on the output and quality of peanut [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2003, 37(4): 335-338.
- [18] 杜应琼,廖新荣,何江华,等.施用硼钼对花生生长发育和产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2002,8(2):229-233.
Du Y Q, Liao X R, He J H, et al. Effects of boron and molybdenum on growth and yield of peanut [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 229-233.
- [19] 蔡妙珍,刘鹏,徐根娣,等.钼、锰营养对大豆碳氮代谢的影响[J].土壤学报,2008,45(1):180-183.
Cai M Z, Liu P, Xu G D, et al. Effect of molybdenum and manganese application on metabolism of carbon and nitrogen in soybean [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(1): 180-183.
- [20] 张剑,唐筱春,陈军响.镁硼锌钼营养对大棚番茄品质与产量的影响[J].浙江农业科学,2009(5):879-881.
Zhang J, Tang Y C, Chen J X. Effects of magnesium, boron, zinc and molybdenum nutrition on quality and yield of tomato in greenhouse [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2009(5): 879-881.
- [21] 吴拓,杨刘,降志兵.钼锌硼微量元素对大豆产量和品质的影响[J].南方农业,2015,31(9):6-8.
Wu T, Yang L, Jiang Z B. Effect of trace elements of molybdenum, zinc and boron on yield and quality of soybean [J]. South China Agriculture, 2015, 31(9): 6-8.
- [22] 李珊,张浩,李启权,等.广元植烟土壤有效态微量元素的空间变异特征及影响因素[J].核农学报,2017,31(8):1618-1625.
Li S, Zhang H, Li Q Q, et al. Spatial variability of soil available microelement contents and their influencing factors in tobacco growing area in Guangyuan City [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(8): 1618-1625.
- [23] 穆童,卢秀萍,许自成,等.罗平烟区土壤有效硼、钼含量与烟叶硼、钼含量的关系分析[J].中国土壤与肥料,2017(6):44-50.
Mu T, Lu X P, Xu Z C, et al. The relationship between the contents of available boron and available molybdenum in soil with the contents of boron and molybdenum of tobacco leaf in Luoping [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(6): 44-50.
- [24] 彭月月,余雪莲,李启权,等.川西南高海拔烟区土壤微量元素空间分布特征及影响因素[J].中国烟草科学,2018,39(3):39-47.
Peng Y Y, Yu X L, Li Q Q, et al. Spatial distribution and influencing factors of soil available microelements in high altitude tobacco planting areas in southwest Sichuan [J]. Chinese Tobacco Science, 2018, 39(3): 39-47.
- [25] 刘勇军,段淑辉,彭曙光,等.常德植烟土壤微量元素丰缺状况及管理建议[J].湖南农业科学,2019(4):41-44,47.
Liu Y J, Duan S H, Peng S G, et al. Trace elements deficiency assessment and management suggestion of tobacco planting soil in Changde [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2019(4): 41-44, 47.
- [26] 李良木,温心怡,卢秀萍,等.曲靖中海拔烟区土壤-烤烟钼含量状况及对烟叶感官质量的影响[J].中国土壤与肥料,2019(2):145-151.
Li L M, Wen X Y, Lu X P, et al. The status of molybdenum in flue-cured tobacco and soil and its effects on tobacco quality in Qujing tobacco growing area [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(2): 145-151.
- [27] 胡瑞文,刘勇军,唐春闰,等.稻作烟区土壤硼钼养分垂直分布及与有机质的关系[J].中国烟草科学,2020,41(3):9-15.
Hu R W, Liu Y J, Tang C G, et al. Vertical distribution of boron and molybdenum in soil and their relationship with organic matter in paddy-tobacco growing areas [J]. Chinese Tobacco Science, 2020, 41(3): 9-15.
- [28] 刘崴,胡俊栋,杨红霞,等.电感耦合等离子体质谱联用技术在元素形态分析中的应用进展[J].岩矿测试,2021,40(3):327-339.
Liu W, Hu J D, Yang H X, et al. Research progress on elemental speciation analysis by inductively coupled plasma-mass spectrometry hyphenated techniques [J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(3): 327-339.
- [29] 齐亚彬.坚决贯彻五中全会精神,全力推进健康地质工作[N].中国矿业报,2020-12-7(1).
Qi Y B. Resolutely implement the spirit of the fifth plenary session, to promote healthy geological work [N]. China Mining News, 2020-12-7(1).

- [30] 王学求,柳青青,刘汉粮,等. 关键元素与生命健康: 中国耕地缺硒吗? [J]. 地学前缘, 2021, 28(3): 412-423.
Wang X Q, Liu Q Q, Liu H L, et al. Key elements and human health: Is China's arable land selenium-deficient? [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 412-423.
- [31] 侯青叶,杨忠芳,余涛,等. 中国土壤地球化学参数 [M]. 北京:地质出版社, 2020:17.
Hou Q Y, Yang Z F, Yu T, et al. Soil geochemical dataset of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020:17.
- [32] 廖启林,刘聪,蔡玉曼,等. 江苏典型地区水稻与小麦籽实中元素生物富集系数(BCF)初步研究[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 331-340.
Liao Q L, Liu C, Cai Y M, et al. A preliminary study of element bioconcentration factors within milled rice and wheatmeal in some typical areas of Jiangsu Province[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 331-340.
- [33] 贾婷. 不同作物对土壤钼富集规律的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014:32-33.
Jia T. Study on molybdenum enrichment regularity in soil by different crops [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014:32-33.
- [34] 彭珊珊,张霖霖,黄婷. 豆制品中钼的分析研究[J]. 食品科学, 2002, 23(8): 210-211.
Peng S S, Zhang L L, Huang T. Analysis of molybdenum in soybean products [J]. Food Science, 2002, 23(8): 210-211.
- [35] 王振权,张育华,陈二钦,等. 广西常用饲料、牧草中铜、锌、铁、锰、钴、钼含量的初步调查[J]. 广西农业大学学报, 1992, 11(4): 53-58.
Wang Z Q, Zhang Y H, Chen E Q, et al. Investigations on the contents of Cu, Zn, Fe, Mn, Co, Mo of feedstuffs and forages in Guangxi [J]. Journal of Guangxi Agricultural University, 1992, 11(4): 53-58.
- [36] 李芳亭. 延安地区农作物施钼与人体健康的关系 [J]. 农业环境保护, 1994, 13(5): 68-69.
Li F T. Relationship between molybdenum application to crops and human health in Yanan area [J]. Agro-Environmental Protection, 1994, 13(5): 68-69.
- [37] 王振林. 冬小麦微量元素吸收特点的研究[J]. 山东农业大学学报, 1989(3): 27-32.
Wang Z L. A study on the absorption of micronutrients by winter wheat [J]. Journal of Shandong Agricultural University, 1989(3): 27-32.
- [38] 陈祥友. 不同产地小麦 33 种元素分析[J]. 世界元素医学, 2011, 18(3-4): 36-37.
Chen X Y. Analysis of 33 elements in wheat from different areas [J]. World Elemental Medicine, 2011, 18(3-4): 36-37.
- [39] 曹淑萍,卢煜文. 微量元素 Mo 对宝坻大蒜生长的影响研究[J]. 天津农业科学, 2011, 18(1): 106-108.
Cao S P, Lu Y W. Effect of Mo on the growth of Baodi garlic [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2011, 18(1): 106-108.
- [40] 王恕. 23 种中国和法国小麦及小麦面粉样品中九种元素的分析 [J]. 广东微量元素科学, 1999, 6(4): 54-58.
Wang S. Analysis on 9 trace elements in 23 kinds of wheat and wheat flour from China and France [J]. Guangdong Trace Elements Science, 1999, 6(4): 54-58.
- [41] 王夔. 生命科学中的微量元素分析与数据手册 [M]. 北京:中国计量出版社, 1998:156, 360-378.
Wang K. Trace element analysis and data handbook in the life science [M]. Beijing: Chinese Metrology Press, 1998:156, 360-378.
- [42] Hiroyuki H, Akane A, Chic I, et al. Determination of molybdenum in foods and human milk, and an estimate of average molybdenum intake in the Japanese population [J]. Journal of Nutritional Science and Vitaminology, 2004, 50(6): 404-409.
- [43] Choi M, Kang M, Kim M. The analysis of copper, selenium, and molybdenum contents in frequently consumed foods and an estimation of their daily intake in Korean adults [J]. Biological Trace Element Research, 2009, 128(2): 104-117.
- [44] 叶欣,郭雅玲,王果,等. 福建省铁观音茶园土壤钼含量状况调查与分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1372-1378.
Ye X, Guo Y L, Wang G, et al. Investigation and analysis of soil molybdenum in the Tieguanyin tea plantations of Fujian Province [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(6): 1372-1378.
- [45] 施宪,王冬艳,李月芬,等. 吉林西部锰、钼元素土壤地球化学特征 [J]. 世界地质, 2010, 29(2): 256-261.
Shi X, Wang D Y, Li Y F, et al. Soil geochemical characteristics of elements Mn, Mo in western Jilin Province [J]. Global Geology, 2010, 29(2): 256-261.
- [46] 曾昭华. 农业生态与土壤环境中钼元素的关系 [J]. 湖南地质, 2000, 19(3): 149-150.
Zeng Z H. Relationship between agroecology and molybdenum in soil environment [J]. Hunan Geology, 2000, 19(3): 149-150.

[47] 刘铮,朱其清,徐俊祥,等. 中国土壤中钼的含量与分布规律[J]. 环境科学学报,1990,10(2):132-137.
Liu Z,Zhu Q Q,Xu J X,et al. Contents and distribution of Mo in soils of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,1990,10(2):132-137.

[48] 张璐,蔡泽江,王慧颖,等. 中国稻田土壤有效态中量和微量元素含量分布特征[J]. 农业工程学报,2020,36(16):62-70.
Zhang L,Cai Z J,Wang H Y. Distribution characteristics of effective medium and micronutrient element contents in paddy soils of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 (16): 62-70.

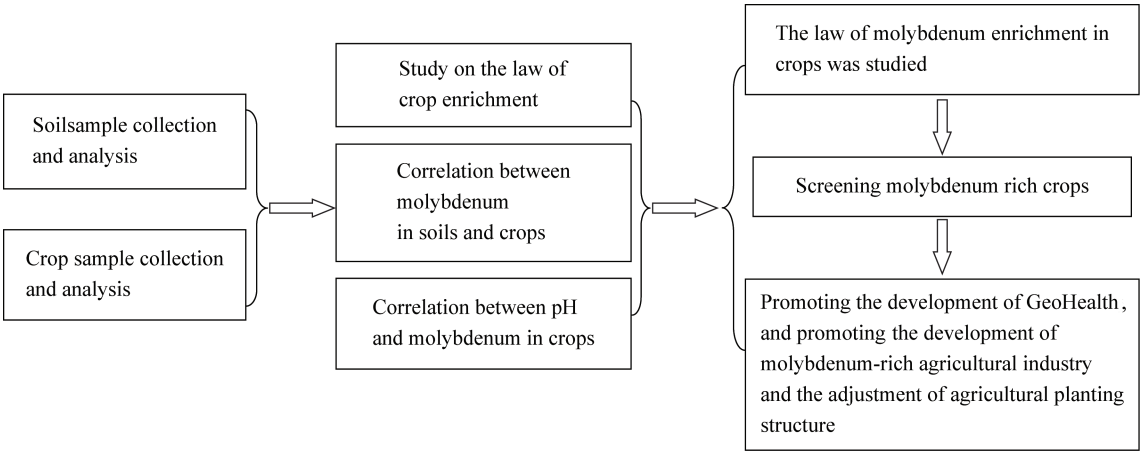
[49] 周国华. 富硒土地资源研究进展与评价方法[J]. 岩石测试,2020,39(3):319-336.
Zhou G H. Research progress of selenium-enriched land resources and evaluation methods[J]. Rock and Mineral Analysis,2020,39(3):319-336.

Distribution Law and Influencing Factors of Molybdenum in Soils and Crops in Luoyang, Henan Province

XIA Yan, SONG Yan-bin, HOU Jin-kai, ZHAO Rui, WANG Xi-kuan*
(No.1 Institute of Geological and Mineral Resources Survey, Henan Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Luoyang 471023, China)

HIGHLIGHTS

- (1) Mung bean, cowpea, black bean, yellow bean, red bean and peanuts are hyperaccumulators of molybdenum. Sesame, long bean, millet, wheat, corn and rapeseed are molybdenum-rich crops. Fruits such as apples, pears, grapes, pomegranates, cherries and *Stachys floridana* Schuttl. ex Benth are low-molybdenum crops.
- (2) The study area is a favorable area for developing a molybdenum-rich agricultural industry.
- (3) The characteristics of molybdenum content in different crops are an important basis for scientific utilization of Mo-rich land, adjustment of agricultural planting structure and construction of a Mo-rich agricultural industry.



ABSTRACT

BACKGROUND: Molybdenum is an essential and beneficial element for humans and crops and has an anti – cancer effect. The content of molybdenum and the pH of the soils are different in different regions, the content of molybdenum in crops varies greatly. At the same time, different crops have a different absorption ability of molybdenum. Studying the rules of molybdenum enrichment in different crops provides a basis for the development of healthy geology, the development of molybdenum – rich agricultural products, the development of functional agriculture, and the adjustment of planting structure.

OBJECTIVES: To investigate Mo content in different crops and their controlling factors.

METHODS: This study used the detailed survey area of selenium resources in Luoyang City and other agricultural planting areas as the research object. By collecting 22 kinds of crops and their root soils, inductively coupled plasma – mass spectrometry (ICP – MS) was used to determine the molybdenum content in soils and crops, and the characteristics and influencing factors of the content of molybdenum in different crops were studied.

RESULTS: The content of molybdenum in the soil of Luoyang City was relatively high, which was the characteristic area of molybdenum – rich soil in China. Mung bean, cowpea, black bean, yellow bean, red bean and peanuts were the main molybdenum enrichment crops, with average > 9mg/kg molybdenum content and enrichment factor > 500% , which belonged to the molybdenum hyperaccumulator. Sesame, long bean, millet, wheat, corns and rapeseed had high molybdenum content, which ranged from 0. 446mg/kg to 2. 437mg/kg, and the enrichment coefficient ranged from 40% to 300% , which were molybdenum rich crops. The content of molybdenum in chili, garlic, sweet potatoes and okra ranged from 0. 1mg/kg to 0. 3mg/kg, and the enrichment factor ranged from 10% to 30% , which were high – molybdenum crops. The content of molybdenum in apple, pear, grape, pomegranate, cherry and *Stachys floridana* Schuttl. ex Benth was less than 0. 05mg/kg, and the enrichment factor was less than 5% , which was a low – molybdenum crop. The content of molybdenum in most crops was positively correlated with that in root soils, while the content of molybdenum in apple, grape, pomegranate, and cherry was negatively correlated within the molybdenum content in the root soils.

CONCLUSIONS: Studies have shown that molybdenum in soils is more easily absorbed by crops under an alkaline environment. Compared with other areas in China, the crop in the area is richer in molybdenum, so it is a favorable area for the development of a molybdenum – rich agricultural industry. According to the molybdenum content of different crops, mung bean, cowpea, black bean, yellow bean, red bean and peanuts were selected as the characteristic Mo – rich agricultural products in the study area; sesame, long bean, millet, wheat, corns and rapeseed were Mo – rich agricultural products; pepper, garlic, sweet potato and okra were high Mo agricultural products. The results provide a scientific basis for the development and adjustment of the molybdenum – rich agricultural product planting structure in the study area.

KEY WORDS: Luoyang City; crops; molybdenum; enrichment factor; GeoHealth; inductively coupled plasma – mass spectrometry