

文章编号: 1672-3317(2023)03-0040-08

# 山西省3种典型作物主产区土壤微量元素特征分析

刘洋<sup>1</sup>, 李廷亮<sup>1,2,3\*</sup>, 栗丽<sup>1,2,3</sup>, 张晋丰<sup>1</sup>, 陈婷<sup>1</sup>

(1.山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801;

2.黄土高原特色作物优质高效生产省部共建协同创新中心, 山西太谷 030801;

3.山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心, 山西太谷 030801)

**摘要:** 【目的】探明研究区耕层土壤微量元素量现状及其影响因素。【方法】本试验分别在山西省小麦、玉米和谷子种植区, 各选择作物种植面积最大的3个代表性县域, 在每个县域选取100个采样点, 分析其耕层土壤微量元素(Fe、Mn、Zn、Se)量, 及其与pH、有机质、土壤类型和种植制度的关系。【结果】研究区耕层土壤Fe、Mn、Zn和Se分别为30.42 g/kg、626.55 mg/kg、78.06 mg/kg和0.283 mg/kg。各种植区土壤微量元素量总体表现为: 小麦种植区>玉米种植区>谷子种植区, 尽管3个种植区土壤微量元素整体处于中等(或适量)及以上水平, 但同时也存在不同程度的微量元素缺乏, 研究区整体Fe缺乏比例最大, 谷子种植区整体微量元素缺乏比例最大。不同土壤类型中, 石质土、潮土、粗骨土、褐土和红黏土的微量元素量, 显著高于棕壤、黄绵土、栗褐土和风沙土( $P<0.05$ ), 其中石质土微量元素量最高, 棕壤和风沙土量最低。相关性分析结果表明, pH与4种微量元素均极显著负相关, 有机质与4种微量元素均极显著正相关。种植制度、土壤类型、pH和有机质4种影响因素对土壤含Se量的综合解释率最高, 为47.9%; 含Mn量变化仅受土壤类型和有机质影响, 其综合解释率为8.1%。【结论】尽管现阶段山西省主要粮食作物种植区耕层土壤Fe、Mn、Zn和Se的4种微量元素总体处于中等(适量)及以上水平, 但仍然需要注重对Fe的补充, 以及提升谷子种植区整体养分量。土壤含Se量受环境变化影响最大, 而Mn在土壤中的较为稳定。

**关键词:** 山西省; 主要粮食作物; 耕层土壤; 微量元素; 含量特征; 影响因素

中图分类号: S158.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021594

OSID:



刘洋, 李廷亮, 栗丽, 等. 山西省3种典型作物主产区土壤微量元素特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 40-47.

LIU Yang, LI Tingliang, LI Li, et al. Trace Element Contents in Typical Soils in Shanxi Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3): 40-47.

## 0 引言

【研究意义】土壤是作物生长的载体, 土壤养分供应状况直接影响着作物的生长过程。农作物的产量和品质不仅受到土壤大量和中量营养元素的影响, 同时也受到微量营养元素供给的影响。因此农作物生长与土壤微量元素的供给状况密切相关, 而微量元素的供给状况由其含量、形态和分布规律等决定。所以明确区域范围内农田土壤微量元素量和分布状况, 对于农产品提质增效, 以及耕地土壤生态环境安全具有重要意义<sup>[1]</sup>。【研究进展】土壤微量元素量因土壤母质、地形和植被类型等自然因素差异而具有一定的区域性<sup>[2]</sup>, 同时也受土地利用类型、施肥和耕作制度等人为因素的影响<sup>[3-4]</sup>。张腾蛟等<sup>[5]</sup>研究发现西昌市不同母质形成的土壤微量元素量差

异显著, 侏罗纪-白垩纪泥岩类风化物形成的土壤中含有较多的Zn(267.7 mg/kg)和Mn(1 702.7 mg/kg); 第四季冲洪积风化物形成的土壤中Zn和Mn量较低(75.2 mg/kg和511.0 mg/kg)。余慧敏等<sup>[6]</sup>研究发现高程和坡度可通过改变土壤水热分布状况影响土壤中的养分分布, 其中高程对土壤Mn、Se量影响显著, 坡度对土壤Mn、Mo量影响显著。王兴灵等<sup>[7]</sup>研究不同植被类型对土壤微量元素的影响, 发现表层土壤(0~15 cm)中Fe、Mn量表现为林地>草地>耕地, Zn量则表现为耕地>草地>林地。山西省地处黄土高原东部, 土壤微量元素量相对较低, 根据20世纪90年代山西省第二次土壤普查数据, 山西省耕层土壤Fe量为30 g/kg, 高于全国土壤背景值2.0%, 但Mn、Zn和Se平均量分别为545、66.2、0.18 mg/kg, 分别较全国土壤元素量背景值低6.5%、10.8%、37.9%<sup>[8-9]</sup>。【切入点】近年来, 我国粮食产量水平稳步提高, 多数研究证明我国粮食增产很大程度上与氮、磷和钾肥的大量投入有关, 而对于粮食增产背后的土壤微量元素量变化特征缺乏

收稿日期: 2021-12-31

基金项目: 黄土高原特色作物优质高效生产省部共建协同创新中心基金项目(SBGJXTZX-25); 山西省重点研发计划项目(201703D211001)

作者简介: 刘洋(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤-作物养分循环与调控。E-mail: liuyang5618@163.com

通信作者: 李廷亮(1982-), 男, 教授, 博士, 主要从事土壤-作物养分循环与调控研究。E-mail: litingliang021@126.com

系统分析。另外，在山西省转型发展和“农谷”建设战略发展要求下，山西省人民政府提出“要立足山西省农业特色资源和产业发展需求，发展功能食品和功能农业新产业拓展农业产业链和价值链”<sup>[10]</sup>，明确土壤微量元素量特征对推进山西省功能农业发展尤为重要。【拟解决的关键问题】由于施肥种植及气候条件变化对土壤养分演变的影响，第二次土壤普查养分数据已不能有效指导农业施肥生产。因此，本研究在山西省小麦、玉米和谷子种植区，分别选取代表性县域，系统分析区域内耕层土壤微量元素（Fe、Mn、Zn 和 Se）量特征及其影响因素，以期为推进山西省功能农业发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

山西省属于暖温带、中温带大陆性气候，年平均气温为 10.6 °C，降水量在 400~650 mm，夏季降水量占全年的 60%以上，土壤类型主要包括栗钙土、栗褐土、褐土等。农作物播种面积 355.52 万  $\text{hm}^2$ ，主要农作物有小麦、玉米和谷子等，其常年种植面积分别为 174.77 万、56.03 万、19.78 万  $\text{hm}^2$ 。本研究根据《山西省统计年鉴》的统计数据以及区域特色，选取小麦主产区的洪洞县、襄汾县、闻喜县，玉米主产区的原平市、太谷县、寿阳县，以及谷子主产区的沁县、临县、五寨县作为研究区域。各研究区基本信息如表 1 所示。

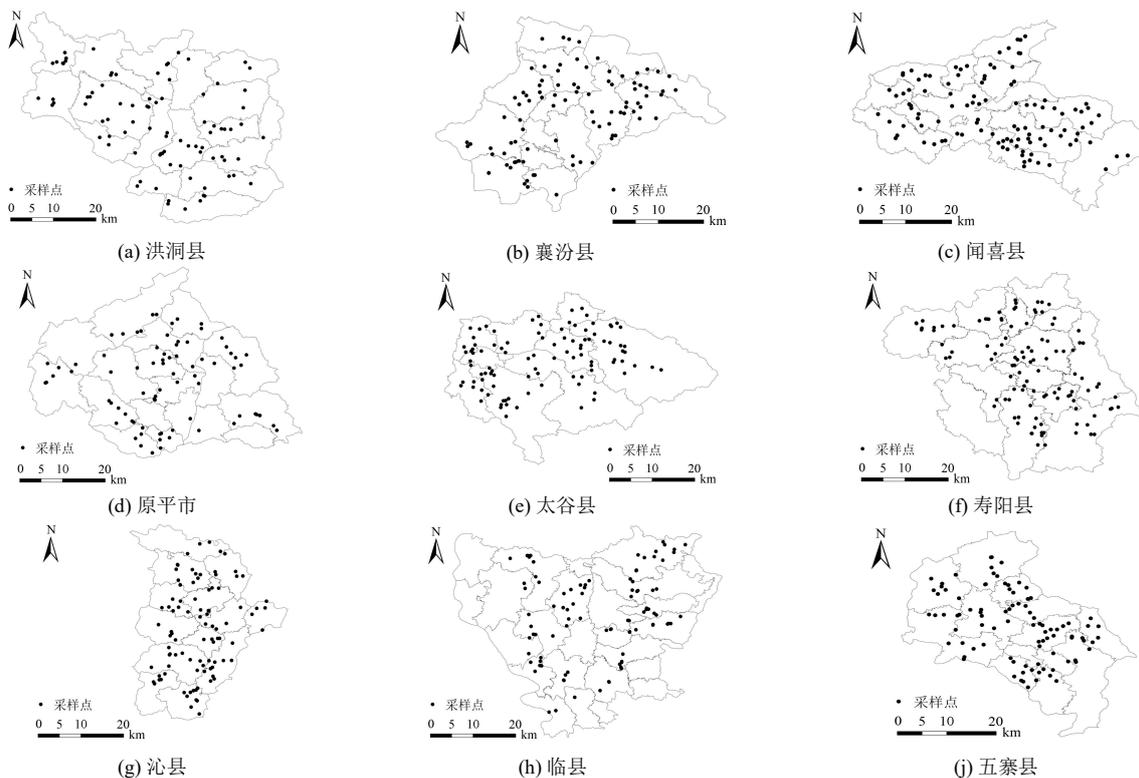


图 1 研究区采样点分布

Fig.1 Diagram of sampling sites in study area

表 1 研究区基本信息

Table 1 Basic information of study area				
种植区类型	县域	土壤类型	年降水量/mm	年平均气温/°C
小麦	洪洞县	T1、T2、T3、T4	493	12.3
	襄汾县	T2、T3、T4	550	11.5
	闻喜县	T2、T3、T4	430	12.6
玉米	原平市	T2、T3、T4、T5	457	8.3
	太谷县	T1、T2、T4	463	9.9
	寿阳县	T1、T2、T3、T4	518	7.4
谷子	沁县	T2、T3、T4、T6	606	8.9
	临县	T2、T3、T7、T8	519	8.8
	五寨县	T7、T8、T9	500	4.3

注 T1: 石质土; T2: 潮土; T3: 粗骨土; T4: 褐土; T5: 棕壤; T6: 红黏土; T7: 黄绵土; T8: 栗褐土; T9: 风沙土。

### 1.2 样品采集与处理

为避免季节性施肥对土壤养分量的影响，本研究土壤样品均在作物收获后采集，其中小麦区样品在 2019 年 7—9 月完成，玉米区和谷子区样品在 2019 年 10—11 月完成。分别在所选取的 9 个粮食作物主产县市，根据土壤类型和种植区均匀布点 100 个，详见图 1。每个采样点根据所在地块性质大小特征，采用五点法或“S”形法采集耕层（0~20 cm）混合样品土壤样品，所有样品均在种植相应作物的地块上采集，样品经四分法处理后留取 1 kg 左右带回实验室，待风干后除去石砾和枯枝落叶，粉碎并通过 1 mm 和 0.149 mm 尼龙网筛，装进自封袋做好标记备用。

土壤全 Fe、Mn、Zn 量采用 HNO<sub>3</sub>-HF 高温消解—ICP-MS 法测定<sup>[11-12]</sup>；土壤全 Se 量采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 高温消解—HG-AFS 法测定<sup>[13-14]</sup>；土壤 pH 采用电位法测定<sup>[15]</sup>；土壤有机质量采用重铬酸钾外加热法测定<sup>[15]</sup>。

### 1.3 数据处理与分析

使用 ARCGIS 10.2 制作研究区采样点分布图；使用 Excel 2010 对数据进行初步整理，制作 pH、有机质与微量元素量的相关性图，并进行 Pearson 相关分析；使用 SPSS 19 对土壤 pH、有机质量、Fe、Mn、Zn 量和 Se 量进行描述性统计分析，不同土壤类型微量元素的方差分析和齐性检验，及各影响因素对微量元素的多元逐步回归分析；使用 Canoco 5 进行 RDA 分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植制度土壤微量元素现状分析

如表 2 所示，研究区耕层土壤 Fe、Mn、Zn 量和 Se 量分别为 30.42 g/kg、626.55 mg/kg、78.06 mg/kg 和 0.283 mg/kg。其中小麦种植区 Fe、Mn、Zn 量和 Se 量分别为 32.57 g/kg、651.58 mg/kg、85.27 mg/kg 和 0.413 mg/kg；玉米种植区次之，分别为 30.69g/kg、613.36 mg/kg、81.40 mg/kg 和 0.310 mg/kg；谷子种植区最低，分别为 27.87 g/kg、613.76 mg/kg、67.09 mg/kg 和 0.180 mg/kg，小麦种植区的 Fe、Zn 量和 Se 量显著高于谷子种植区 ( $P<0.05$ )。依据《土地质量地球化学评价规范 DZ/T0295—2016》中，全国第二次土壤普查养分含量分级标准<sup>[16]</sup>，对采样点微量元素量进行等级划分（表 3）。结果表明，研究区 4 种微量元素缺乏（或较缺乏）比例：Fe (35.65%)>Zn (15.39%)>Se (11.09%)>Mn (3.866%)，3 个种植区微量元素缺乏比例：谷子>玉米>小麦。其中小麦种植区仅 Fe 缺乏（或较缺乏）比例较高（14.49%），其他元素缺乏比例均小于 5%；与小麦种植区类似，玉米种植区 Fe 缺乏（或较缺乏）比例最高（28.83%），其他元素缺乏比例均小于 10%；谷子种植区微量元素较缺乏和较缺乏比例总体较高（Mn 除外），Fe、Zn 和 Se 分别为：64.36%、36.82%和 26.88%。

变异系数反映土壤特性空间变异程度，变异系数  $\leq 10\%$  为弱变异，介于 10%~100% 为中等变异， $>100\%$  为强变异<sup>[17]</sup>。由表 2 可知，各种种植区 4 种元素变异强度表现为 Se>Zn>Fe>Mn，仅小麦种植区 Mn 属于弱变异，其他各种种植区微量元素均属于中等变异。

表 2 土壤微量元素的描述性统计

种植区	样本量	元素	极小值	极大值	均值	标准差 SD	变异系数 CV/%
小麦	300	Fe	23.00	47.23	32.57a	4.01	12.30
		Mn	468.20	787.40	651.58a	58.32	8.95
		Zn	57.88	132.70	85.27a	14.05	16.47
		Se	0.077	1.354	0.413a	0.207	50.12
玉米	300	Fe	20.80	43.30	30.69ab	3.32	10.82
		Mn	402.40	903.90	613.36b	65.57	10.69
		Zn	45.03	130.00	81.40a	16.06	19.73
		Se	0.095	0.778	0.310b	0.136	43.87
谷子	300	Fe	12.50	41.00	27.87b	3.72	13.35
		Mn	466.70	914.00	613.76a	66.02	10.76
		Zn	35.20	123.50	67.09b	12.26	18.27
		Se	0.038	0.712	0.180c	0.091	50.56
总体	900	Fe	12.47	47.21	30.42	4.21	13.84
		Mn	402.40	914.00	626.55	65.79	10.50
		Zn	35.20	132.70	78.06	16.20	20.75
		Se	0.038	1.354	0.283	0.146	51.78

注 Fe 量单位为“g/kg”，Mn、Zn 和 Se 单位为“mg/kg”，均值后小写字母表示同一种元素在不同种植区的显著性差异 ( $P<0.05$ )。

表 3 土壤微量元素量分级<sup>[11]</sup>

微量元素	分级	分布频率/%				
		小麦	玉米	谷子	总体	
Fe	>37	丰富	14.29	2.88	2.31	6.64
	32~37	较丰富	34.78	30.13	10.89	25.48
	29~32	中等	35.71	37.82	22.44	32.23
	24~29	较缺乏	13.25	25.64	53.47	30.62
	$\leq 24$	缺乏	1.24	3.19	10.89	5.03
Mn	>700	丰富	24.67	8.63	10.63	14.15
	600~700	较丰富	59.63	46.58	45.18	51.23
	500~600	中等	15.53	38.22	38.87	30.76
	375~500	较缺乏	1.55	5.10	4.98	3.86
	$\leq 375$	缺乏	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	>84	丰富	47.20	38.76	7.57	31.65
	71~84	较丰富	40.68	34.53	23.36	33.15
	62~71	中等	10.56	17.26	31.71	19.81
	50~62	较缺乏	1.24	7.49	33.22	13.78
	$\leq 50$	缺乏	0.00	1.30	3.62	1.61
Se	>3.000	过剩	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.400~3.000	高	36.77	20.13	2.95	20.11
	0.175~0.400	适量	57.74	70.78	45.90	57.61
	0.125~0.175	边缘	2.90	6.17	23.61	11.20
	$\leq 0.125$	缺乏	1.93	2.92	26.88	11.09

### 2.2 土壤类型对土壤微量元素量的影响分析

将研究区域土壤类型按土类划分，可知各土类之间微量元素 Fe、Mn、Zn 量和 Se 量具有一定差异性（表 4）。其中石质土、潮土、粗骨土、褐土和红黏土的微量元素量，显著高于棕壤、黄绵土、栗褐土和风沙土 ( $P<0.05$ )。结果表明，不同土壤类型含 Fe、Mn 量和含 Zn 量以石质土最高，分别为 33.03、661.12 mg/kg 和 90.24 mg/kg，潮土含 Se 量最高，为 0.365 mg/kg。风沙土 Fe、Zn 和 Se 量最低，分别为 24.45、54.34 mg/kg 和 0.119 mg/kg，棕壤含 Mn 量最低，为 518.00 mg/kg。

表 4 不同土类微量元素量及变异系数

Table 4 Content and coefficient of variation of trace elements in deficient soil group

土壤类型	样本量	项目	Fe	Mn	Zn	Se
T1	30	质量百分数/(g kg <sup>-1</sup> )	33.03±3.59a	661.12±73.22a	90.24±12.93a	0.294±0.12abc
		变异系数 CV/%	10.87	11.08	14.33	40.11
T2	134	质量百分数/(g kg <sup>-1</sup> )	31.99±4.62a	649.97±90.09a	84.46±19.16ab	0.365±0.19a
		变异系数 CV/%	14.44	13.86	22.68	51.12
T3	51	质量百分数/(g kg <sup>-1</sup> )	31.48±4.19a	629.08±77.90ab	78.44±15.73b	0.256±0.13bc
		变异系数 CV/%	13.32	12.38	20.05	51.05
T4	514	质量百分数/(g kg <sup>-1</sup> )	31.35±3.34a	634.45±69.47ab	83.05±16.05ab	0.338±0.16abc
		变异系数 CV/%	11.08	10.95	19.32	46.43
T5	6	质量百分数/(g kg <sup>-1</sup> )	26.37±3.46b	518.00±54.80e	60.72±11.94c	0.220±0.09d
		变异系数 CV/%	13.16	10.58	19.67	40.45
T6	17	质量百分数/(g kg <sup>-1</sup> )	31.62±3.24a	646.19±67.80ab	81.72±19.16ab	0.281±0.16abc
		变异系数 CV/%	10.25	10.49	23.45	41.11
T7	60	质量百分数/(g kg <sup>-1</sup> )	26.17±2.94b	598.77±58.91bc	63.22±11.26c	0.148±0.05de
		变异系数 CV/%	11.22	9.84	17.81	36.38
T8	117	质量百分数/(g kg <sup>-1</sup> )	25.70±2.24b	579.96±55.33cd	60.77±7.08c	0.142±0.05de
		变异系数 CV/%	8.76	9.54	11.66	34.39
T9	8	质量百分数/(g kg <sup>-1</sup> )	24.45±3.03b	538.86±73.43de	54.34±9.49c	0.119±0.05e
		变异系数 CV/%	12.44	13.63	17.47	44.87

含量表示平均值±标准差，同列不同字母表示不同土类微量元素量差异显著( $P<0.05$ )。T1: 石质土; T2: 潮土; T3: 粗骨土; T4: 褐土; T5: 棕壤; T6: 红黏土; T7: 黄绵土; T8: 栗褐土; T9: 风沙土。

### 2.3 土壤 pH、有机质及其与微量元素间的相关性分析

研究区土壤 pH 在 7.45~9.00 之间，有机质在 4.10~64.28 g/kg 之间。由图 2 可知，土壤微量元素量与 pH 均极显著负相关 ( $P<0.001$ )，与有机质均极显著正相关。其中土壤 Mn 量与 pH 和有机质的

相关性最弱，相关系数分别为-0.219 和 0.214；土壤 Se 量与 pH 和有机质的相关性最强，相关系数分别为：-0.507 和 0.570。土壤 Fe 量与 pH 和有机质的相关系数分别为：-0.452 和 0.353，土壤 Zn 量与 pH 和有机质的相关系数分别为：-0.448 和 0.429。

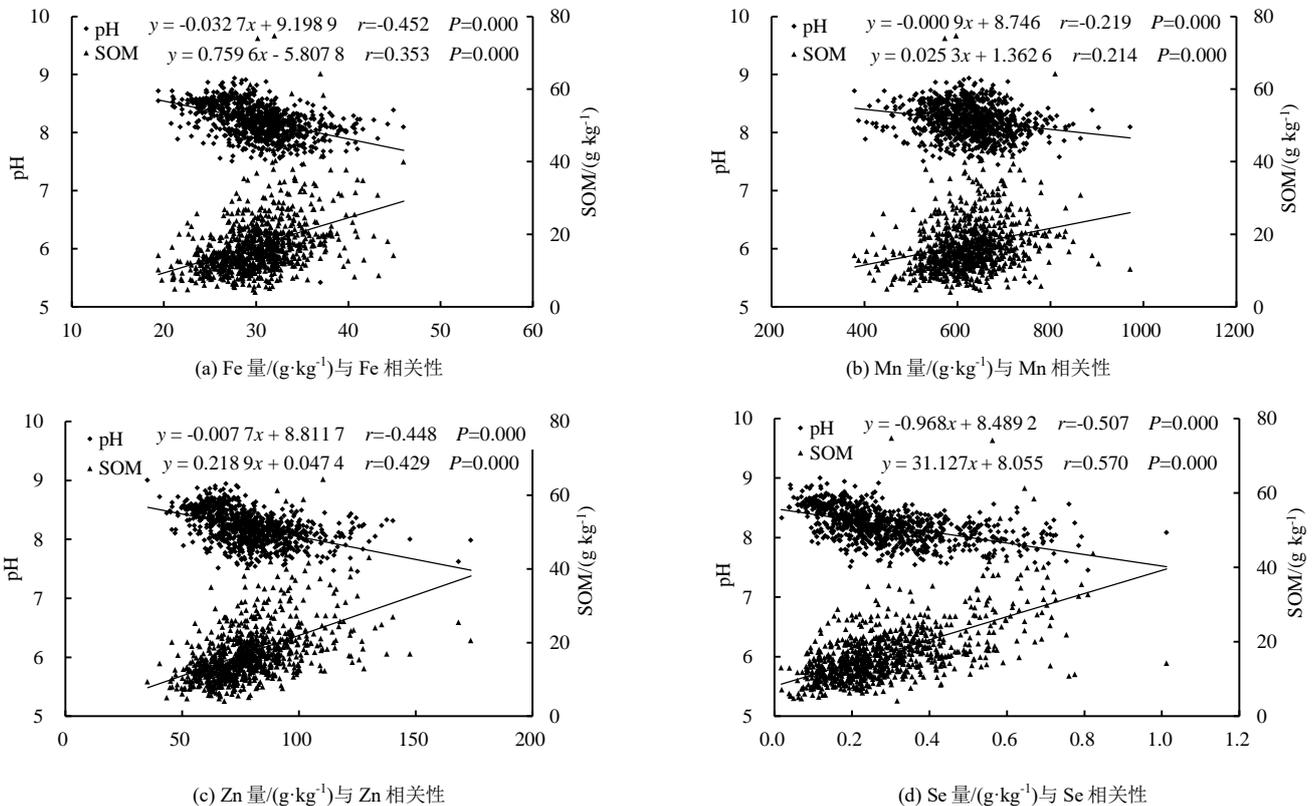


图 2 pH、有机质与土壤微量元素的相关性

Fig.2 Correlation between pH and SOM on trace elements

## 2.4 环境因素对微量元素的影响分析

以土壤类型、种植制度、pH 和有机质为自变量, Fe、Mn、Zn 和 Se 为响应变量进行 RDA 分析。结果如表 5 所示, 第一轴和第二轴的特征值分别为 0.182 1 和 0.008 0, 表明环境因素对微量元素量变化在第一轴和第二轴上的解释量分别为 18.21%和 0.80%, 其中第一轴的贡献率为 95.79%, 说明微量元素量的变化主要受第一轴影响。

表 5 各影响因素与微量元素量的 RDA 分析

Table 5 Redundancy analyse (RDA) of influencing factors and trace element content

统计量	第一轴	第二轴	第三轴
特征值	0.182 1	0.008 0	0
解释量 P/%	18.21	0.80	0
贡献率 P/%	95.79	99.98	100

在 RDA 排序图中 (图 3), 箭头之间夹角小于  $90^\circ$  表示两变量之间正相关, 大于  $90^\circ$  则表示负相关; 三角形在箭头所在线上的投影点到箭头的距离, 表示两变量之间关系的紧密程度, 距离越小关系越紧密。从图 3 中可以看出, 土壤微量元素之间正相关, 有机质与微量元素正相关, pH 与微量元素负相关。在不同土壤类型中, 石质土微量元素量最高, 棕壤和风沙土量最低; 在 3 个种植区中, 小麦种植区微量元素量最高, 谷子种植区微量元素量最低。

为比较各影响因素对不同土壤微量元素量的影响程度, 以种植制度、土壤类型、pH 和有机质为自变量, 分别以土壤 Fe、Mn、Zn 量和 Se 量为因变量

表 6 土壤微量元素含量与影响因素的多元逐步回归分析

Table 6 Multivariate stepwise regression analysis between soil microelement content and impacting factor

元素	进入方程的因子								
	变量	$\Delta R^2$	变量	$\Delta R^2$	变量	$\Delta R^2$	变量	$\Delta R^2$	$R_{adj}^2$
Fe	土壤类型	0.078	有机质	0.031	pH	0.213	种植制度	0.01	0.329
Mn	土壤类型	0.026	有机质	0.058	-	-	-	-	0.081
Zn	土壤类型	0.037	有机质	0.076	pH	0.219	种植制度	0.012	0.341
Se	土壤类型	0.012	有机质	0.307	pH	0.021	种植制度	0.142	0.479

注  $\Delta R^2$  表示环境因子对微量元素量变化的解释度;  $R_{adj}^2$  为综合决定系数, 表示环境因子对微量元素量变化的综合解释度。

## 3 讨论

山西省属黄土高原生态脆弱区, 土壤养分总体偏低<sup>[18]</sup>。全国第二次土壤普查结果显示, 山西省耕地土壤 Fe 和 Mn 的平均量分别为 20.00 g/kg 和 503.3 mg/kg, 处于缺乏和中等水平<sup>[19]</sup>。本研究土壤 Fe 和 Mn 的平均量分别为 30.42 g/kg 和 626.55 mg/kg, 较全国第二次土壤普查数据分别高 52.00% 和 24.49%; Se 平均量为 0.283 mg/kg, 较华北地区

进行多元逐步回归分析, 定量研究各影响因素对这 4 种微量元素量变化的解释度, 结果如表 6 所示。各影响因素对土壤 Fe 量变化的解释率表现为 pH>土壤类型>有机质>种植制度, 4 种影响因素对 Fe 量变化的综合解释率为 32.9%。各影响因素对土壤 Mn 量变化的解释率表现为有机质>土壤类型, 综合解释率为 8.1%, pH 和种植区对土壤 Mn 量的影响不显著。各影响因素对土壤 Zn 量变化的解释率表现为 pH>有机质>土壤类型>种植制度, 综合解释率为 34.1%。各影响因素对土壤 Se 量变化的解释率表现为有机质>种植制度>pH>土壤类型, 综合解释率为 47.9%。总体来看, 4 种微量元素量变化受不同环境因素的响应程度表现为: Se>Zn>Fe>Mn。

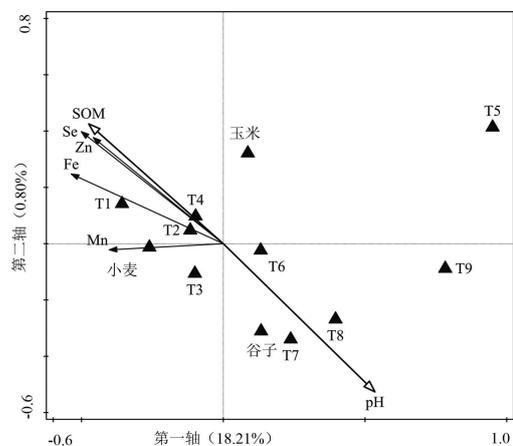


图 3 各影响因素与微量元素量的 RDA 排序

Fig.3 RDA ordination diagram of influencing factors and trace element

(0.180 mg/kg) 高 57.22%<sup>[20]</sup>。研究区土壤微量元素量的提高, 可能与肥料投入和测土配方施肥技术推广有关。本研究对每个采样点农户的施肥情况进行调查发现, 研究区域内施用的化肥以复合肥为主, 有机肥以腐熟的鸡粪、猪粪和牛粪为主, 这几种肥料的投入能一定程度上提高土壤微量元素量<sup>[21-25]</sup>。另外, 本研究发现小麦种植区土壤 Zn 量水平较高 (85.27 mg/kg), 谷子种植区土壤 Fe 量较缺乏 (27.87 mg/kg)。因此在施肥过程中需结合测土配方施肥技

入的同时，注重 Fe 等其他微量元素投入，从而保证土壤微量元素养分协调供应，确保作物正常生长<sup>[26]</sup>。土壤微量元素量受自然因素和人为因素的共同影响<sup>[27-30]</sup>，且土壤对母质的微量元素具有继承性，土壤母质的差异会直接影响土壤微量元素背景值，同时造成土壤微量元素量的空间异质性。本研究区土壤微量元素量表现为：小麦种植区>玉米种植区>谷子种植区，其由南向北的地理分布，与山西省土壤微量元素背景值由南向北逐渐降低的分布规律相同<sup>[8]</sup>，因此研究结果与前人一致。

研究区土壤微量元素变异程度总体表现为：Se>Zn>Fe>Mn。其原因一方面是由于土壤微量元素量主要表现为 Mn>Fe>Zn>Se，土壤中的 Se 量较低，相对较小的变化值在统计学上会产生较大的变异性；而土壤中的 Fe、Mn 量原本就较高，即使其量发生变化，所占的比重也较小。另一方面土壤中不同微量元素的活性不同，土壤 Se 的活性较高，容易受环境因素影响而使其量发生变化，例如有机 Se 是土壤 Se 的主要存在形式，Se 参与部分有机化合物的形成，有机质的增加会直接导致有机 Se 量的增加<sup>[31]</sup>，而本研究也发现土壤有机质对 Se 量变化的影响较大，能够解释其量变化的 30.7%。影响土壤 Se 量变化的因素较多，土壤 Se 的空间变异程度较大，因此 Se 也被视为反映人类活动对土壤环境影响敏感程度的地球化学因子<sup>[32]</sup>；而 Fe 和 Mn 变异程度较低，主要是因为碱性土壤上，Fe、Mn 只要以稳定的氧化物存在于矿物中，难以受到环境因素的影响。

土壤微量元素量很大程度上与土壤类型有关。石质土理化性质受区域环境的影响较大，且元素迁移现象不明显。研究区石质土微量元素量高于其他土壤类型，可能是因为当地微量元素背景值量较高，且当地降水量较低，减少了微量元素的流失；棕壤 Fe、Mn 量相对较低（分别为 2.64%和 518.00 mg/kg），因为棕壤在形成过程中，表层土壤会发生强烈的淋溶作用，使 Fe-Mn 氧化物向下迁移，导致表层土壤 Fe、Mn 量较低；风沙土微量元素量均显著低于其他土壤类型，主要因为风积物母质本身微量元素量较低，形成的风沙土砂粒量高，又极易发生养分流失，因此风沙土微量元素量较低<sup>[33]</sup>。

山西省从北向南降水量和温度不断升高，土壤母质的风化作用不断增强，并更大程度释放出微量元素，所以降水量与土壤微量元素量正相关；另一方面，随降水量的增加使得土壤中的盐基离子不断向下淋洗，造成土壤 pH 值降低，Fe-Al 氧化物聚集<sup>[34]</sup>。因此，本研究中 pH 值与微量元素量呈极显著负相关关系，土壤 pH 值对 Fe 量变化的解释度最

大（21.3%）。此外，本研究表明微量元素之间呈正相关关系，其中土壤 Fe、Mn 和 Zn 之间的相关性较好（图 3）。可能由于 Fe 和 Mn 在表生作用下，会形成带负电荷的氧化物胶体，氧化物胶体在迁移富集过程中，对 Zn 产生了吸附作用<sup>[35]</sup>，这与臧振峰等<sup>[36]</sup>研究结果一致。

本研究中，土壤有机质和 pH 对土壤微量元素量变化的解释率总体上高于作物类型，表明山西省微量元素量差异主要来自成土过程，而种植制度对土壤微量元素量影响相对较小。土壤全量微量元素量丰缺主要取决于矿物元素背景值，以及外源投入和养分库的流失。种植制度则主要通过不同作物根系代谢影响微量元素形态特征及其生物有效性，而对土壤全量微量元素没有驱动作用。

## 4 结论

在研究区域内，微量元素均存在不同程度的缺乏，其中 Fe 缺乏比例最高，且以谷子种植区微量元素量最低，谷子种植区微量元素缺乏比例总体最高，而小麦种植区微量元素量较为丰富。不同土壤类型中，以石质土微量元素量最高，栗褐土和风沙土微量最低。土壤 pH 与 4 种微量元素量极显著负相关，对土壤 Fe 量变化影响最大，有机质与 4 种微量元素量呈极显著正相关，对土壤 Se 量变化影响最大。同时，环境变化对土壤 Mn 量影响最小，对土壤含 Se 量影响最大。

## 参考文献：

- [1] 钟秀倩, 钟俊辉. 微量元素与人体健康[J]. 现代预防医学, 2007, 34(1): 61-63.  
ZHONG Xiuqian, ZHONG Junhui. Trace elements and human health[J]. Modern Preventive Medicine, 2007, 34(1): 61-63.
- [2] 孟霖, 宋文静, 王程栋, 等. 贵州中部山区植烟土壤微量元素分布特征[J]. 中国烟草科学, 2015, 36(3): 57-62.  
MENG Lin, SONG Wenjing, WANG Chengdong, et al. The distribution of microelement contents of tobacco-growing fields in the central region of Guizhou Province[J]. Chinese Tobacco Science, 2015, 36(3): 57-62.
- [3] 顾思博, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆民丰县农田土壤微量营养元素含量及分布[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 142-149.  
GU Sibao, ZHOU Jinlong, ZENG Yanyan, et al. Content and distribution of trace elements in farmland soil in Minfeng County, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 142-149.
- [4] 郭军玲, 吴士文, 金辉, 等. 农田土壤微量元素含量的空间变异特征和影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 145-149, 158.  
GUO Junling, WU Shiwen, JIN Hui, et al. Spatial variability and controlling factors of microelements contents in farmland soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 145-149, 158.
- [5] 张腾蛟, 刘洪, 欧阳渊, 等. 中高山区土壤成土母质理化特征及主控因素初探：以西昌市为例[J]. 沉积与特提斯地质, 2020, 40(1): 106-114.  
ZHANG Tengjiao, LIU Hong, OUYANG Yuan, et al. A preliminary discussion on the physical and chemical characteristics and main

- controlling factors of soil and parent material in the middle and high mountain area: Take Xichang as an example[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2020, 40(1): 106-114.
- [6] 余慧敏, 朱青, 傅聪颖, 等. 江西鄱阳湖平原区农田土壤微量元素空间分异特征及其影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(1): 172-184.
- YU Huimin, ZHU Qing, FU Congying, et al. Spatial variability characteristics and impacting factors of soil trace elements in Poyang Lake plain, Jiangxi of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(1): 172-184.
- [7] 王兴灵, 张怡颖, 谷丰, 等. 华北土石山区土地利用类型对土壤有效态微量元素的影响[J]. *草业科学*, 2020, 37(7): 1 272-1 280.
- WANG Xingling, ZHANG Yiying, GU Feng, et al. Effects of land use type on soil available trace elements in the rocky mountain area of North China[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(7): 1 272-1 280.
- [8] 康瑞昌, 郑家焯, 胡省平, 等. 山西省土壤微量元素含量及应用区划[J]. *土壤肥料*, 1992(3): 8-11.
- KANG Ruichang, ZHENG Jiawan, HU Shengping, et al. Content of soil trace elements and its application division in Shanxi Province[J]. *Soils and Fertilizers*, 1992(3): 8-11.
- [9] 史崇文, 赵玲芝, 郭新波, 等. 山西省土壤元素背景值的分布规律及其影响因素[J]. *农业环境保护*, 1996, 15(1): 24-28.
- SHI Chongwen, ZHAO Lingzhi, GUO Xinbo, et al. Distribution regularities and influencing factors of soil element background values in Shanxi Province[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(1): 24-28.
- [10] 山西省人民政府办公厅. 山西省人民政府办公厅关于加快推进山西农谷建设的指导意见[J]. *山西省人民政府公报*, 2017(12): 6-9.
- [11] 刘亮, 周丽萍, 李中玺. ICP-OES 测定土壤、岩石及水系沉积物中的 19 种微量元素[J]. *光谱实验室*, 2013, 30(5): 2 184-2 187.
- LIU Liang, ZHOU Liping, LI Zhongxi. Determination of 19 trace elements in soil, rock and sediment by ICP-OES[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2013, 30(5): 2 184-2 187.
- [12] 张霖琳, 许人骥, 吴国平, 等. 微波消解 ICP-MS 法测定宣威和富源土壤中的微量元素[J]. *中国环境监测*, 2010, 26(2): 6-10.
- ZHANG Linlin, XU Renji, WU Guoping, et al. Determination of trace elements in soils in Xuanwei and Fuyuan by microwave digestion-ICP-MS[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2010, 26(2): 6-10.
- [13] 余文丽, 王振生, 王小强. 氢化物发生-原子荧光法测田螺中硒、汞[J]. *当代化工*, 2020, 49(1): 204-207.
- YU Wenli, WANG Zhensheng, WANG Xiaoqiang. Determination of selenium and mercury in river snail by hydride generation-atomic fluorescence spectrometry[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(1): 204-207.
- [14] 刘坤, 王伟德. 原子荧光同时测定土壤中的汞、硒方法的探究[J]. *环境与发展*, 2017, 29(3): 198, 200.
- LIU Kun, WANG Weide. Study on simultaneous determination of mercury and selenium in soil by atomic fluorescence spectrometry[J]. *Environment and Development*, 2017, 29(3): 198, 200.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shidan. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [16] 中华人民共和国国土资源部. 中国矿产资源报告-2016[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- [17] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. *地理研究*, 2001, 20(2): 161-169.
- WANG Shaoqiang, ZHU Songli, ZHOU Chenghu. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China[J]. *Geographical Research*, 2001, 20(2): 161-169.
- [18] 高晨迪, 姚顽强, 李朋飞, 等. 黄土高原重力侵蚀研究进展[J]. *人民黄河*, 2020, 42(6): 99-105.
- GAO Chendi, YAO Wanqiang, LI Pengfei, et al. Research progress of gravity erosion of the loess plateau[J]. *Yellow River*, 2020, 42(6): 99-105.
- [19] 刘耀宗, 张经元. 山西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [20] TAN J A, ZHU W Y, WANG W Y, et al. Selenium in soil and endemic diseases in China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 284(1/2/3): 227-235.
- [21] 汤建伟, 化全县, 王保明, 等. 发挥中微量元素养分在化肥减施增效中的重要作用[J]. *磷肥与复肥*, 2017, 32(3): 1-4.
- TANG Jianwei, HUA Quanshan, WANG Baoming, et al. Secondary nutrients and micro-nutrients play an important role in reducing application and increasing efficiency of chemical fertilizer[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2017, 32(3): 1-4.
- [22] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据[DB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexch.htm>
- [23] 王书转. 长期施肥条件下土壤微量元素化学特性及有效性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- WANG Shuzhuan. Availability and chemical characteristics of trace elements in soils under long-term fertilization[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [24] 李本银, 黄绍敏, 张玉亭, 等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 129-135.
- LI Benyin, HUANG Shaomin, ZHANG Yuting, et al. Effect of long-term application of organic fertilizer on Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in soil and brown rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1): 129-135.
- [25] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 175-181.
- NING Chuanchuan, WANG Jianwu, CAI Kunzheng. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1): 175-181.
- [26] TUME P, BECH J, TUME L, et al. Concentrations and distributions of Ba, Cr, Sr, V, Al, and Fe in Torrelles soil profiles (Catalonia, Spain)[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2008, 96(2/3): 94-105.
- [27] 焦婷. 青海省环湖地区土壤-牧草-畜体生态体系中微量元素季节变化及其盈缺分析[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2003.
- JIAO Ting. Seasonal changes of trace elements and analysis of their sufficiency or lack in the soil-forage-animal ecosystem in stud farm around Qinghai Lake[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2003.
- [28] 刘永红, 倪中应, 谢国雄, 等. 浙西北丘陵区农田土壤微量元素空间变异特征及影响因子[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1 710-1 718.
- LIU Yonghong, NI Zhongying, XIE Guoxiong, et al. Spatial variability and impacting factors of trace elements in hilly region of cropland in northwestern Zhejiang Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1 710-1 718.
- [29] 魏孝荣, 邵明安. 黄土沟壑区小流域不同地形下土壤微量元素分布特征[J]. *环境科学*, 2009, 30(9): 2 741-2 746.
- WEI Xiaorong, SHAO Mingan. Distribution of micronutrients in soils as affected by landforms in a loessial gully watershed[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(9): 2 741-2 746.
- [30] 武婕, 李玉环, 李增兵, 等. 南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1 596-1 605.
- WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al. Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the Nansihu region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1 596-1 605.
- [31] LI J, PENG Q, LIANG D L, et al. Effects of aging on the fraction distribution and bioavailability of selenium in three different soils[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 2 351-2 359.
- [32] 戴慧敏, 宫传东, 董北, 等. 东北平原土壤硒分布特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1 356-1 364.

- DAI Huimin, GONG Chuandong, DONG Bei, et al. Distribution of soil selenium in the northeast China plain and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1 356-1 364.
- [33] 张凤荣. 土壤地理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- ZHANG Fengrong. *Soil Geography*[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2001.
- [34] 吕贻忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- LYU Yizhong, LI Baoguo. *Soil Science*[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2006.
- [35] 王敏杰, 郑乐平. 中国北方红黏土中铁锰胶膜对化学元素的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(6): 111-117.
- WANG Minjie, ZHENG Leping. The impact of Fe-Mn coatings on chemical elements of the red clay in North China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(6): 111-117.
- [36] 臧振峰. 黑河中下游区域绿洲农田土壤中主要微量元素的分布特征及其环境影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- ZANG Zhenfeng. Study on spatial distribution characteristics and environmental influence of main trace elements in the middle and lower reaches of Heihe River' oasis farmlands soil[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.

## Trace Element Contents in Typical Soils in Shanxi Province

LIU Yang<sup>1</sup>, LI Tingliang<sup>1,2,3\*</sup>, LI Li<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jinfeng<sup>1</sup>, CHEN Ting<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. Ministerial and Provincial Co-innovation Centre for Endemic Crops Production with High-quality and Efficiency in Loess Plateau, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 3. National Demonstration Center for Agricultural Resources and Environment Experimental Teaching, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract:** 【Objective】 Trace elements in soil are essential for crop growth and food health. Their bioavailability varies with various biotic and abiotic factors. This paper presents an analysis of trace elements in plough soil layer and its influencing factors in Shanxi province. 【Method】 Three representative counties with large cultivation areas of wheat, corn and millet were selected in the study. In each county, we took soil samples from 100 sites, and the contents of Fe, Mn, zinc and Se in each sample, as well as their relationship with pH, organic matter, soil type, and crop types, were analyzed and calculated. 【Result】 The average contents of Fe, Mn, Zn, and Se in all soil samples across the three counties were 30.42 g/kg, 626.55 mg/kg, 78.06 mg/kg, and 0.283 mg/kg, respectively. Contents of all elements varied spatially over the planting areas, with the highest content found in wheat-growing areas, followed by corn and millet fields. Trace elements in the three counties were mostly at medium or high levels, but some deficiencies were detected, particularly Fe in millet-growing areas. The contents of the four elements were significantly higher in *litho*, *fluvo-aquic*, *fragmental*, *cinnamon* and *red clay* soils than in *brown*, *cultivated loessal*, *castno-cinnamon*, and *aeolian sandy soils*. The trace elements were negatively correlated to pH and positively related to organic matter, both at significant levels. Correlation among the four trace elements themselves was positive, and multiple stepwise regression analysis showed that the combined effect of planting area, soil type, pH and organic matter, on Se were the highest, with the comprehensive interpretation rate being 47.9%. The variation in Mn content was affected by soil type and organic matter, with its comprehensive interpretation rate being 8.1%. 【Conclusion】 The contents of Fe, Mn, Zn and Se in the plough soil layer are at moderate level or above in most areas in Shanxi province. However, Fe supplementation and nutrient improvement in millet-growing areas are required. Se content is affected by environmental changes, while Mn content is comparatively stable. Overall, the contents of the four trace elements are highest in wheat-growing areas, followed by corn and millet fields.

**Key words:** Shanxi Province; main grain crop planting area; surface soil; trace elements; content characteristic; influence factors

责任编辑：赵宇龙