DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2025.05.027 CSTR: 32214.14.tr202409060357
袁遥遥, 马雅莉, 张锡唐, 等. 关中平原土壤剖面微量元素空间分布特征及其影响因素. 土壤, 2025, 57(5): 1185–1195.

关中平原土壤剖面微量元素空间分布特征及其影响因素①

袁遥遥[1,2]，马雅莉[3]，张锡唐[3]，张晨晨[3]，朱绪超[4]，刘喜东[3*]，乔江波[2*]

(1 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室，北京 100055；2 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院，陕西杨凌 712100；3 陕西省林业科学院，西安 710082；4 中国科学院大学，北京 100049)

摘 要：以关中平原为研究对象，通过野外采集 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 和 60 ~ 100 cm 5 个土层深度的土壤样本并进行室内分析，研究了该区域 6 种土壤微量元素(Fe、Mn、Zn、Cu、Ba 和 Co)的空间分布特征及其影响因素。研究发现：①研究区 0 ~ 100 cm 土层中不同元素的含量均值由大到小均为 Fe>Mn>Ba>Zn>Cu>Co；与陕西省土壤背景值相比，不同土层 Fe、Mn 和 Co 含量均值均高于背景值，Zn 和 Cu 含量均值在背景值附近波动，Ba 含量均值则均低于背景值；随着土层深度的增加，Fe、Ba 和 Co 含量呈现增加的趋势，Zn 和 Cu 含量呈现减少的趋势，而 Mn 含量则是先升高后降低。②整体上，不同土层中大部分微量元素的最优插值模型均为指数模型，且不同土层中 6 种微量元素表现出不同程度的空间相关性和变程差异，具有深度依赖性。③关中平原土壤微量元素含量分布呈现西高东低的趋势。④0 ~ 10、10 ~ 20 和 60 ~ 100 cm 土层土壤微量元素空间分布的主要影响因素为土壤含水量和砂粒含量，20 ~ 40 cm 土层为含水量、pH 和砂粒含量，40 ~ 60 cm 土层为砂粒含量。

关键词：关中平原；土壤微量元素；土壤剖面；地统计分析；结构方程模型

中图分类号：S153.6 **文献标志码：**A

Spatial Distribution Characteristics and Its Influencing Factors of Trace Elements in Soil Profiles of Guanzhong Plain

YUAN Yaoyao[1,2], MA Yali[3], ZHANG Xitang[3], ZHANG Chenchen[3], ZHU Xuchao[4], LIU Xidong[3*], QIAO Jiangbo[2*]

(1 *Key Laboratory of Coupling Process and Effect of Natural Resources Elements*, *Beijing* 100055, *China*; 2 *College of Soil and Water Conservation Science and Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*; 3 *Shaanxi Academy of Forestry*, *Xi'an* 710082, *China*; 4 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In this paper, the Guanzhong Plain was taken as the research object, soil samples were collected from five depths of 0–10, 10–20, 20–40, 40–60, and 60–100 cm in the fields, and the contents of six trace elements (Fe, Mn, Zn, Cu, Ba, and Co) were determined, and their spatial distribution characteristics and influencing factors were explored. The results showed that: 1) The mean values of trace elements in the 0–100 cm depth in the Guanzhong Plain, from highest to lowest, was as follows: Fe>Mn>Ba>Zn>Cu>Co. Compared with soil background values in Shaanxi Province, the mean values of Fe, Mn and Co were higher in different soil layers, the mean value of Ba was lower, while the mean values of Zn and Cu were varied and irregular. As the depth increased, the contents of Fe, Ba, and Co increased, the contents of Zn and Cu decreased, while the content of Mn first increased and then decreased. 2) The optimal interpolation model was an exponential model for most elements in different soil layers, and the six elements in different soil layers exhibited varying degrees of spatial correlation and range differences, with depth dependence. 3) The contents of soil trace elements were higher in the west and lower in the east in the study area. 4) The main influencing factors were moisture and sand particles in the 0–10, 10–20, and 60–100 cm soil layers, moisture, pH and sand particles in the 20–40 cm soil layer, and sand particles in the 40–60 cm soil layer.

Key words: Guanzhong Plain; Trace elements in soil; Soil profile; Geostatistical analysis; Structural equation model

---

①基金项目：自然资源要素耦合过程与效应重点实验室开放基金项目(2022KFKTC019)和陕西林业科技创新青年人才培育专项(SXLK 2023-06-7)资助。

* 通信作者(jiangboqiao815@163.com；252084552@qq.com)

作者简介：袁遥遥(2002—)，女，甘肃陇南人，硕士研究生，主要研究方向为土壤物理。E-mail：shirely_cxyy330@163.com

土壤中的微量元素含量较低，然而其对生物体的生长、发育和代谢过程却起着至关重要的作用，且对植物的养分供应、农作物的生长发育和品质形成具有重要影响[1]。微量元素在土壤中的循环是一个复杂的生物地球化学过程[2]。近年来，人类活动的不断加剧和环境的变化导致土壤微量元素的分布和循环发生了显著变化，这些变化可能对生态系统的结构与功能产生重大影响，进而威胁生物多样性和生态平衡[3]。因此，研究土壤微量元素的空间分布特征及影响因素，有助于理解土壤形成过程和土壤生态环境的演变，为土壤改良和农业可持续发展提供指导。

目前，众多学者对不同地区土壤微量元素的空间分布特征及其影响因素进行了研究[4-6]，并取得了重要发现。如，武婕等[7]研究指出，南四湖区农田土壤微量元素 Mn、Cu 和 Zn 含量呈现中部高、南北两端低的分布趋势，土壤类型、耕层质地、坡度、土地利用类型和地貌类型对土壤微量元素 Fe、Mn、Zn 和 Cu(除 B 外)的空间分布具有显著影响；曾妍妍等[8]对新疆若羌县土壤的研究发现，Fe、Mn、Zn 和 Cu 的分布呈现从四周向中心含量逐渐增大的格局，而 Mo 和 B 则显示从南向北含量逐渐增加的趋势，土壤有机质、pH、成土母质、土壤类型和土地利用方式对土壤微量元素含量具有不同程度的影响；罗源群等[9]以靖西市植烟区为研究对象，发现该区土壤中有效 B、Zn、Mn 含量存在空间聚集现象，而有效 Fe 含量则表现出空间随机性，这些元素含量受土壤 pH、有效硫、速效钾、有效磷和交换性钙等多种因子综合影响。综上所述，由于自然环境和人类活动等因素的影响，不同地区的土壤微量元素结果具有区域差异性，需针对特定区域进行特定分析。此外，目前关于土壤微量元素的研究主要集中在土壤表层(0 ~ 20 cm)[10-12]，而表层的微量元素会通过淋溶作用、土壤胶体吸附与解吸以及植物吸收等过程逐渐向下层移动[13]，但关于 20 cm 浓度以下土壤微量元素的分布特征及其影响因子的研究相对较少，仍待进一步探索和研究。

关中平原作为我国的核心农业生产基地，其地形平坦、光照条件优越，以灌溉农业为主导，土壤结构优良，复种指数较高[14]。深入探究关中平原土壤微量元素的分布特征及其影响因素，对于提升该区域的农业生产效率和保护生态环境具有重大意义。基于此，本研究以关中平原为研究对象，针对 0 ~ 100 cm 深度土壤 Fe、Mn、Zn、Cu、Ba 和 Co 6 种微量元素开展分析，探讨其空间变异性特征及影响因素，以期为关中平原的农业可持续发展和生态环境保护提供科学支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区关中平原位于我国陕西省中部，亦被称为渭河平原(107°30′E ~ 110°30′E，34°00′N ~ 35°40′N，图 1)。该区西部狭窄、东部较宽，东西长约 300 km，海拔 400 m 左右，地势西部高、东部低。年均气温为 12 ~ 13.6 ℃，年均降水量为 530 ~ 700 mm，其中 7—9 月的降水量约占全年总降水量的 45%，年蒸发量介于 1 000 ~ 1 200 mm，是典型的温带半干旱半湿润季风气候。区内地势平坦，土壤肥沃，主要土壤类型包括黄绵土、黑垆土、塿土等，适宜农业生产。研究区因灌溉农业而闻名，素有“八百里秦川”的美称，是我国工业、农业和文化相对发达的地区之一，也是全国重要的麦棉产区。

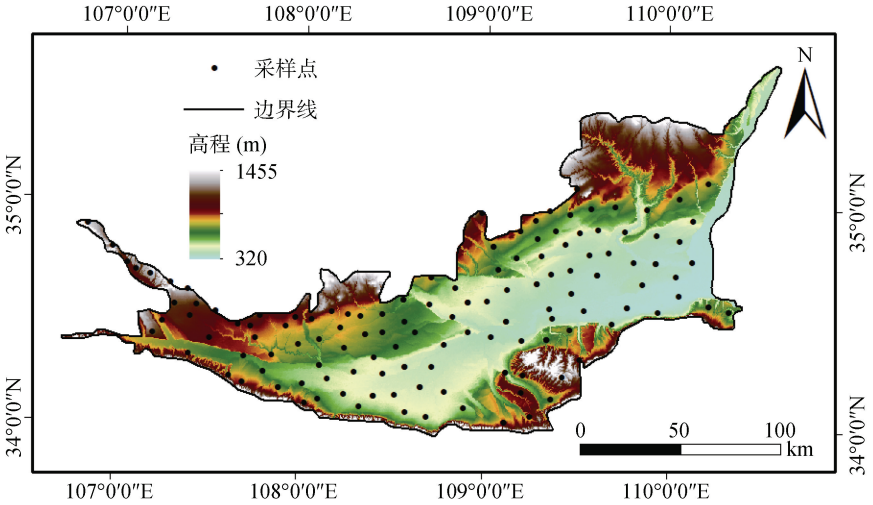


图 1 研究区采样点分布

Fig. 1 Soil sampling points in research area

1.2　样品采集与室内分析

采用野外调查与网格布点(20 km × 20 km)相结合的方法，在宝鸡、咸阳、渭南和西安等地设置 124 个采样点，其中农田 95 个，果园 29 个(图 1)，于 2018 年 12 月至 2019 年 2 月开展采样工作。各样点采集深度为 1 m，采样时在各采样点运用土钻分层钻取 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 和 60 ~ 100 cm 土层土样，且每个样点沿“S”形钻取 5 个子样(间距保持 2 m)，将 5 个子样的土壤混合均匀后，部分装入铝盒用于测定土壤含水量，其余装入塑封袋用于测定其他理化性质。采样同时，利用 GPS 记录样点的空间位置信息，询问当地居民获取灌溉条件等信息。

室内处理时，铝盒样品置于 105℃的烘箱中烘干 8 h 至恒重，通过烘干前后样品的质量差计算土壤含水量；塑封袋样品于室温条件下自然风干，去除其中杂质后进行研磨操作，再经过筛(0.149 mm 和 2 mm)处理，而后装袋备测。其中，采用 HNO_3-HF-$HClO_4$ 电热板消解法对土壤样品进行消解，采用电感耦合等离子体质谱法(Thermo Scientific，Waltham，MA，USA)测定微量元素的含量，并在每 20 个样品中加入 4 个标准物质进行质量控制，样品回收率保持在 96% ~ 100%，以保障测量的准确性。土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾容量法。土壤颗粒组成分析利用马尔文激光粒度仪(Marlven Instruments，Malvern，England)。土壤 pH 的测定采用玻璃电极法。

1.3　气象数据获取

本研究从中国气象数据共享服务平台(http://cdc.cma.gov.cn/)获取 2010—2019 年关中平原 89 个气象站的年均降水量(MAP)和年均气温(MAT)，利用克里金法进行插值，得到区域内各个采样点的 MAP 和 MAT 值。

1.4　数据处理与分析

利用经典统计和地统计方法分析土壤微量元素的空间变异特征，SPSS 22.0 软件对数据开展描述性统计分析，GS+9.0 软件对数据进行半方差函数分析及模型拟合，ArcGIS 10.8 软件进行普通克里金插值并绘制土壤微量元素的空间分布图，SPSS 28.0 软件进行变量间结构方程模型的构建。

2　结果与分析

2.1　土壤微量元素描述性统计特征

研究区 0 ~ 10 cm 土层中 Fe、Mn、Zn、Cu、Ba 和 Co 含量均值分别为 34 180.93、647.92、73.77、21.91、473.63 和 17.20 mg/kg，由高到低顺序为 Fe>Mn>Ba>Zn>Cu>Co，其他土层微量元素含量大小顺序与 0 ~ 10 cm 土层保持一致(表 1)。随着土层深度的增加，不同元素含量变化趋势不同，其中 Fe、Ba 和 Co 逐渐升高，而 Zn 和 Cu 逐渐降低，Mn 则先升高后降低，这可能与土壤的物理化学性质和生物活动存在关联。与陕西省土壤背景值[15]相比，不同土层 Fe、Mn 和 Co 含量均值均高于背景值，Zn 和 Cu 含量均值在背景值附近波动，Ba 含量均值则均低于背景值。

变异系数(Coefficient of variation，CV)是表示各观测值变异程度的一个统计量。当 0<CV≤10%时，为弱变异；10%<CV<100%时，为中等变异；CV ≥ 100%时，为强变异[16]。根据变异程度分级可知：除 0 ~ 10 cm 土层的 Fe 和 Ba 以及 10 ~ 20 cm 土层的 Ba 属于弱变异外，其余不同土层的微量元素均属于中等程度变异。K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验是描述统计数据分布形状的检验方法之一。表 1 中不同土层的 6 种微量元素均有着不同程度的高低偏斜情况，除 60 ~ 100 cm 土层的 Mn 外，其余元素均不符合正态分布，因此对其余元素进行相应转换(对数、平方根等)，以便进行下一步分析。

2.2　土壤微量元素空间结构特征

表 2 为研究区土壤微量元素半方差模型及拟合参数。整体上，不同土层中大部分元素的最优模型均为指数模型。此外，同一土层不同元素拟合系数不同，如 10 ~ 20 cm 土层不同元素 Fe、Mn、Zn、Cu、Ba 和 Co 的拟合系数分别为 0.121、0.509、0.372、0.658、0.092 和 0.546，且同一种元素在不同土层中的拟合效果也不同，如 Fe 在不同土层中的拟合系数分别为 0、0.121、0.937、0.803 和 0。

基台值(C_0+C)代表系统内的总变异程度，此值越大，表明总的空间异质性程度越高[17]。由表 2 知，随土层深度的增加，不同土层中基台值最大的均为 Fe，最小的基台值除 60 ~ 100 cm 土层外其他土层均为 Ba。块金值与基台值之比(C_0/(C+C_0))表示空间异质比，定量描述了随机变异在总变异中所占的比例，当比值≤25%时，系统空间相关性显著；25%<比值≤75%时，相关性中等；比值>75%时，相关性较弱[17]。由表 2 知，0 ~ 10 cm 土层的 Fe、10 ~ 20 cm 土层的 Ba 与 60 ~ 100 cm 土层的 Zn，在各自土层中空间相关性较弱，表明其主要受人为因素(种植制度、施肥、灌溉、农药等)的影响。10 ~ 20 cm 土层的 Cu、20 ~ 40 cm 土层的 Fe、Zn、Cu 和 Co，以及 40 ~ 60 cm 土层的 Fe、Mn、Zn、Ba 和 Co，空间相关性程度中等，

表 1 研究区土壤微量元素描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of soil trace elements in research area

土层深度(cm)	特征值	Fe	Mn	Zn	Cu	Ba	Co
0 ~ 10	最小值(mg/kg)	14 665.00	229.95	23.83	4.84	415.75	6.03
	最大值(mg/kg)	43 975.00	857.25	120.75	43.71	647.00	23.08
	平均值(mg/kg)	34 180.93	647.92	73.77	21.91	473.63	17.20
	标准偏差(mg/kg)	3 504.43	79.22	12.59	4.58	41.64	1.98
	偏度	–2.04	–1.83	–0.06	0.55	1.58	–2.12
	峰度	10.64	8.83	4.11	6.47	3.15	12.05
	变异系数	0.10	0.12	0.17	0.21	0.09	0.11
	K-S 检验统计量	0.099	0.126	0.095	0.138	0.123	0.108
	双尾检验系数	0.004	0	0.007	0	0	0.001
10 ~ 20	最小值(mg/kg)	15 870.00	260.50	23.88	4.80	404.25	6.43
	最大值(mg/kg)	48 450.00	815.00	130.75	41.84	641.50	24.15
	平均值(mg/kg)	34 301.48	643.37	71.12	21.61	476.18	17.27
	标准偏差(mg/kg)	4 065.39	81.65	12.11	4.50	43.88	2.08
	偏度	–0.82	–1.60	0.13	0.30	1.37	–1.41
	峰度	6.23	5.62	6.72	5.81	2.29	8.64
	变异系数	0.12	0.13	0.17	0.21	0.09	0.12
	K-S 检验统计量	0.096	0.126	0.111	0.112	0.155	0.117
	双尾检验系数	0.006	0	0.001	0	0	0
20 ~ 40	最小值(mg/kg)	17 402.50	287.00	32.40	6.30	390.00	8.40
	最大值(mg/kg)	51 175.00	857.50	95.10	37.11	643.25	24.88
	平均值(mg/kg)	34 341.06	636.69	68.24	21.09	475.83	17.28
	标准偏差(mg/kg)	3 871.49	76.05	9.02	4.13	45.26	2.06
	偏度	–0.19	–1.11	–0.45	0.66	1.51	–0.49
	峰度	5.78	4.07	2.23	4.59	2.71	4.60
	变异系数	0.11	0.12	0.13	0.20	0.10	0.12
	K-S 检验统计量	0.105	0.088	0.110	0.125	0.140	0.106
	双尾检验系数	0.002	0.017	0.001	0	0	0.001
40 ~ 60	最小值(mg/kg)	18 135.00	304.50	30.63	6.01	403.25	8.13
	最大值(mg/kg)	55 125.00	1 044.50	101.63	45.58	819.00	28.53
	平均值(mg/kg)	34 816.11	652.93	66.22	20.93	484.84	17.55
	标准偏差(mg/kg)	4 501.32	99.63	9.46	4.79	60.79	2.37
	偏度	0.55	0.74	–0.08	1.28	2.30	0.42
	峰度	5.03	3.70	2.91	6.85	7.87	5.51
	变异系数	0.13	0.15	0.14	0.23	0.13	0.13
	K-S 检验统计量	0.106	0.099	0.095	0.141	0.153	0.107
	双尾检验系数	0.001	0.004	0.007	0	0	0.001
60 ~ 100	最小值(mg/kg)	18 380.00	294.00	25.03	4.13	389.50	8.30
	最大值(mg/kg)	54 475.00	926.00	97.38	47.95	820.50	28.73
	平均值(mg/kg)	35 078.79	647.39	65.96	20.97	487.30	17.70
	标准偏差(mg/kg)	4 891.24	100.40	10.22	5.44	58.96	2.62
	偏度	–0.20	–0.33	–0.76	1.22	1.98	–0.12
	峰度	3.59	1.62	3.51	6.92	7.66	4.47
	变异系数	0.14	0.16	0.15	0.26	0.12	0.15
	K-S 检验统计量	0.085	0.053	0.111	0.139	0.146	0.085
	双尾检验系数	0.031	0.200	0.001	0	0	0.028
陕西省土壤背景值[15](mg/kg)		31 500.00	557.00	69.40	21.40	516.00	10.60

受人为因素和非人为因素(土壤、气候、地形因素等)共同影响。其余元素在相应土层空间相关性较强，受自然因素影响较大[18]。

变程(A)是研究区域内土壤性质的空间相关性范围，此值越小，土壤性质在空间上的相互作用距离就越短，变异性就越强，一旦样点间距超过变程，则不具有相关性[19]。研究区不同土层中 6 种微量元素变程各异，受土壤性质、元素自身特性和人类活动等因素综合影响。变程在 0 ~ 10 和 40 ~ 60 cm 土层中最大的均为 Fe，10 ~ 20 cm 土层中最大的为 Cu，20 ~ 40 和 60 ~ 100 cm 土层中最大的均为 Zn，而变程在 0 ~ 10 cm 土层中最小的为 Zn，10 ~ 20 cm 土层中最小的为 Fe，20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层中最小的为 Ba，60 ~ 100 cm 土层中最小的为 Fe 和 Mn。对于不同元素，变程最大分别出现在 40 ~ 60(Fe)、20 ~ 40(Mn)、20 ~ 40(Zn)、10 ~ 20(Cu)、10 ~ 20(Ba)以及 40 ~ 60 cm(Co)，最小的分别出现在 60 ~ 100(Fe)、60 ~ 100(Mn)、0 ~ 10 (Zn)、0 ~ 10 和 60 ~ 100(Cu)、60 ~ 100(Ba)和 0 ~ 10 cm(Co)。

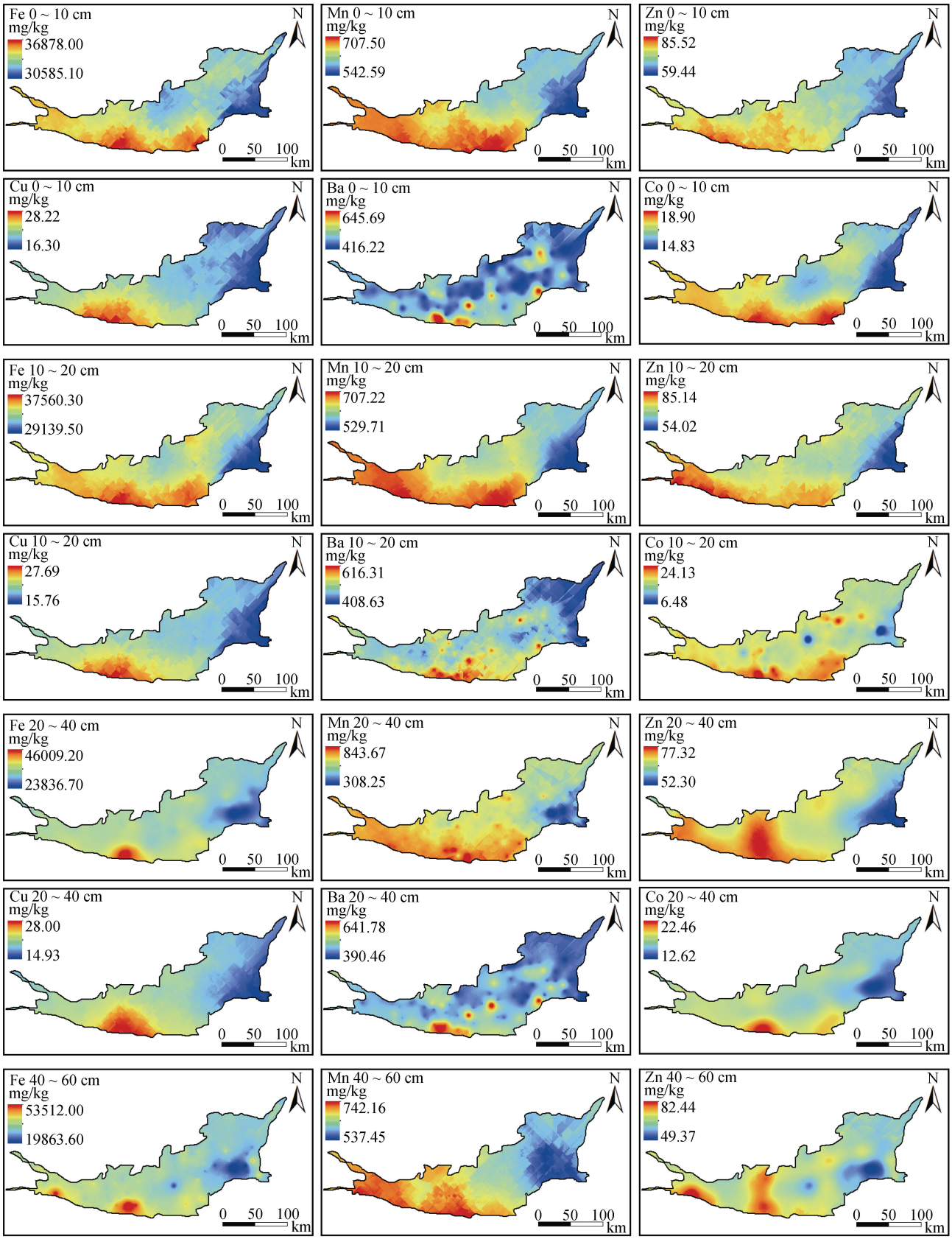
表 2　土壤微量元素半方差模型及拟合参数

Table 2　Half variance models and fitting parameters for soil trace elements

土层深度 (cm)	元素	理论模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块基比 $C_0/(C_0+C)$ (%)	变程 A (km)	决定系数 R^2	残差 RSS
0 ~ 10	Fe	线性模型	12 056 985	12 056 985	100.00	1.737 3	0	8.12×10^{12}
	Mn	球状模型	10	6017	0.17	0.1	0	6 108 640
	Zn	高斯模型	20.4	154	13.25	0.027 7	0	2 978
	Cu	球状模型	1.53	21.61	7.08	0.1	0	149
	Ba	指数模型	0.144	0.914	15.75	0.165	0.149	0.063 6
	Co	指数模型	0.38	3.834	9.91	0.132	0.051	1.32
10 ~ 20	Fe	指数模型	1 500 000	16 200 000	9.26	0.126	0.121	9.67×10^{12}
	Mn	指数模型	470	6314	7.44	0.267	0.509	2 498 326
	Zn	指数模型	4.4	134.1	3.28	0.186	0.372	1013
	Cu	指数模型	16.33	38.63	42.27	11.937	0.658	42.3
	Ba	线性模型	0.97	1.026 91	94.46	1.7373	0.092	0.043 4
	Co	指数模型	0.43	4.261	10.09	0.258	0.546	0.936
20 ~ 40	Fe	球状模型	8 630 000	21 290 000	40.54	2.835	0.937	9.19×10^{12}
	Mn	指数模型	2 210	10 133	21.81	5.754	0.973	771 610
	Zn	指数模型	51.1	173.7	29.42	12.027	0.858	401
	Cu	高斯模型	11.01	24.94	44.15	1.967 6	0.897	32.8
	Ba	指数模型	0.16	1.06	15.09	0.186	0.127	0.136
	Co	指数模型	2.11	6.754	31.24	4.854	0.965	0.412
40 ~ 60	Fe	指数模型	14 090 000	40 280 000	34.98	12.027	0.803	2.7×10^{13}
	Mn	高斯模型	6890	13790	49.96	2.409 3	0.933	3 466 975
	Zn	指数模型	33.1	86.86	38.11	0.366	0.374	781
	Cu	指数模型	16.48	46.71	35.28	9.786	0.742	70.1
	Ba	指数模型	0.216	1.729	12.49	0.198	0.267	0.266
	Co	指数模型	3.83	10.669	35.90	10.359	0.816	2.12
60 ~ 100	Fe	指数模型	24.1	175.6	13.72	0.006	0	6716
	Mn	指数模型	0.72	3.911	18.41	0.006	0	5.1
	Zn	线性模型	0.439 64	0.439 64	100.00	1.737 3	0.007	0.019 2
	Cu	球状模型	0.029	0.37	7.84	0.1	0	0.033 6
	Ba	球状模型	0.138	1.686	8.19	0.159	0.219	0.255
	Co	指数模型	0.0155	0.101	15.35	0.147	0.018	2.602×10^{-3}

2.3　土壤微量元素空间分布特征

为更直观展示研究区土壤微量元素含量的空间分布特点，采用 ArcGIS 10.8 软件进行普通克里金插值，绘制研究区各微量元素含量的空间分布图(图 2)。


Fe 0 ~ 10 cm
mg/kg
36878.00
30585.10
Mn 0 ~ 10 cm
mg/kg
707.50
542.59
Zn 0 ~ 10 cm
mg/kg
85.52
59.44
Cu 0 ~ 10 cm
mg/kg
28.22
16.30
Ba 0 ~ 10 cm
mg/kg
645.69
416.22
Co 0 ~ 10 cm
mg/kg
18.90
14.83
Fe 10 ~ 20 cm
mg/kg
37560.30
29139.50
Mn 10 ~ 20 cm
mg/kg
707.22
529.71
Zn 10 ~ 20 cm
mg/kg
85.14
54.02
Cu 10 ~ 20 cm
mg/kg
27.69
15.76
Ba 10 ~ 20 cm
mg/kg
616.31
408.63
Co 10 ~ 20 cm
mg/kg
24.13
6.48
Fe 20 ~ 40 cm
mg/kg
46009.20
23836.70
Mn 20 ~ 40 cm
mg/kg
843.67
308.25
Zn 20 ~ 40 cm
mg/kg
77.32
52.30
Cu 20 ~ 40 cm
mg/kg
28.00
14.93
Ba 20 ~ 40 cm
mg/kg
641.78
390.46
Co 20 ~ 40 cm
mg/kg
22.46
12.62
Fe 40 ~ 60 cm
mg/kg
53512.00
19863.60
Mn 40 ~ 60 cm
mg/kg
742.16
537.45
Zn 40 ~ 60 cm
mg/kg
82.44
49.37
N
0 50 100
km

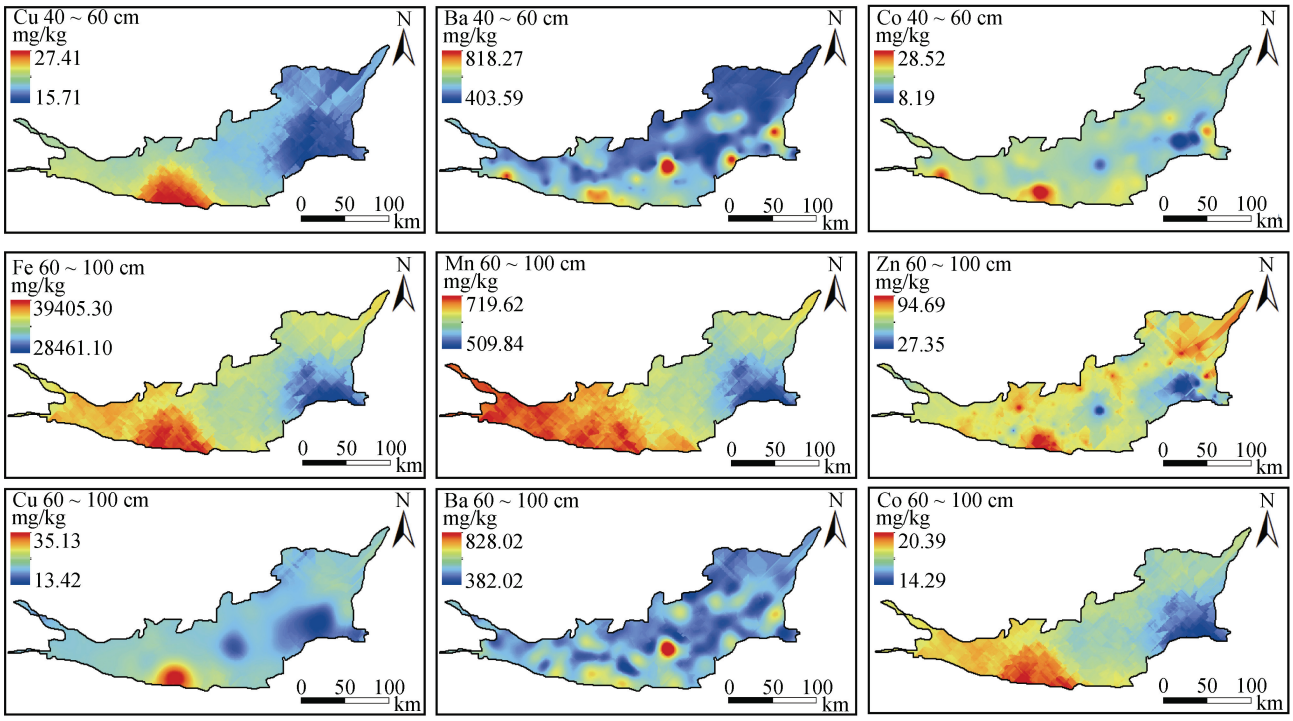


图 2　研究区 0 ~ 100 cm 土壤微量元素空间分布图

Fig. 2　Spatial distributions of soil trace elements in 0 - 100 cm depth in research area

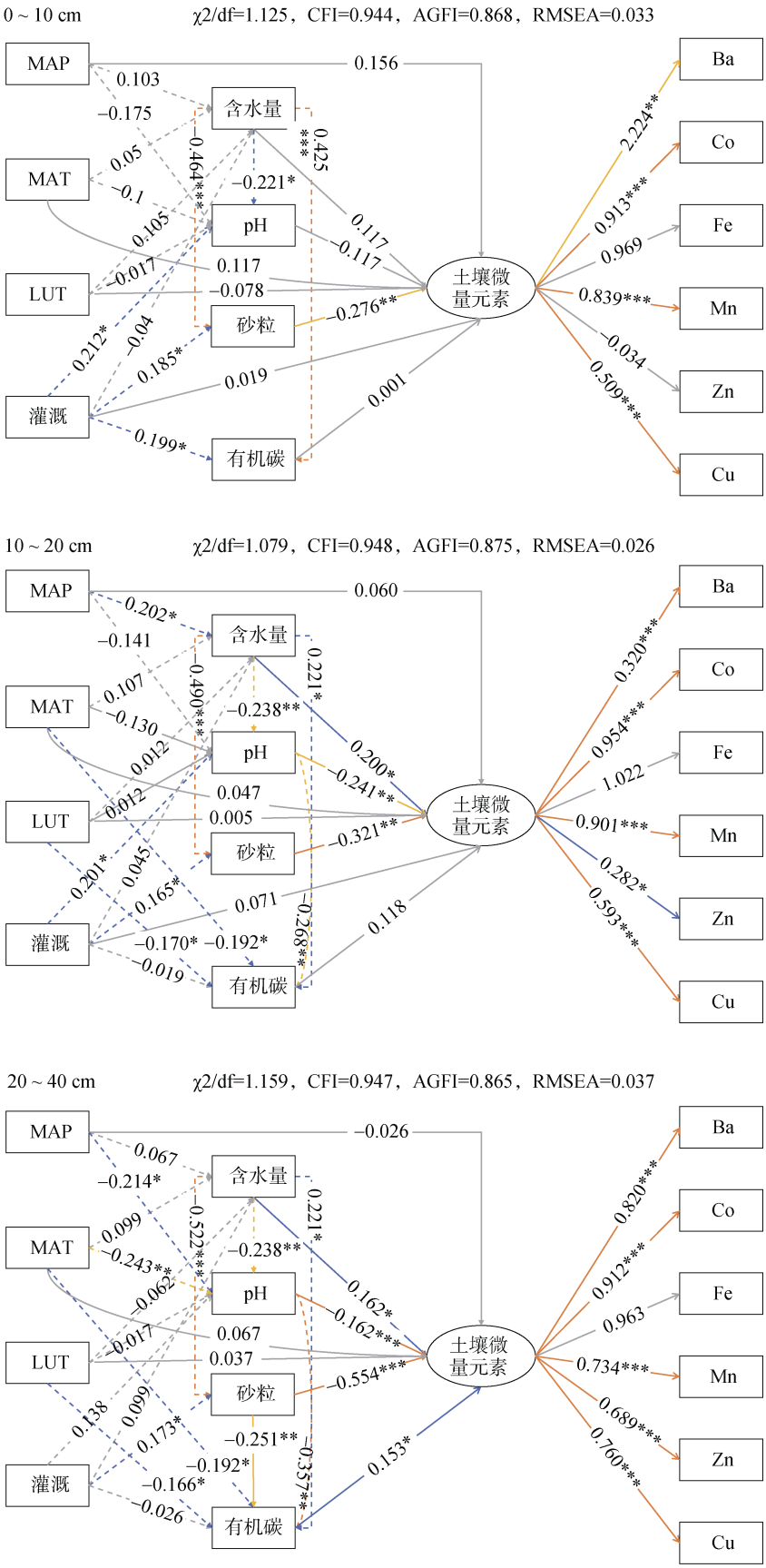
由图 2 可知，0 ~ 10 cm 土层中 Fe、Mn、Zn、Cu 和 Co 总体呈现块状分布，高值区集中于西部和中南部，Ba 为点状分布；10 ~ 20 cm 土层中 Ba 和 Co 为点状分布，其他元素则为块状分布；20 ~ 40 cm 土层中 Fe、Mn、Zn、Cu 和 Co 总体呈现块状分布，高值区集中在中部和南部，Ba 为点状分布；40 ~ 60 cm 土层中 Fe、Mn、Zn 和 Cu 均为块状分布，高值区主要分布于西部和中部，Ba 和 Co 则呈点状分布；60 ~ 100 cm 土层中 Fe、Mn、Cu 和 Co 均为块状分布，高值区集中在西部和中南部，Zn 和 Ba 则为点状分布。总体上，关中平原土壤微量元素含量空间分布由西向东呈现下降趋势。

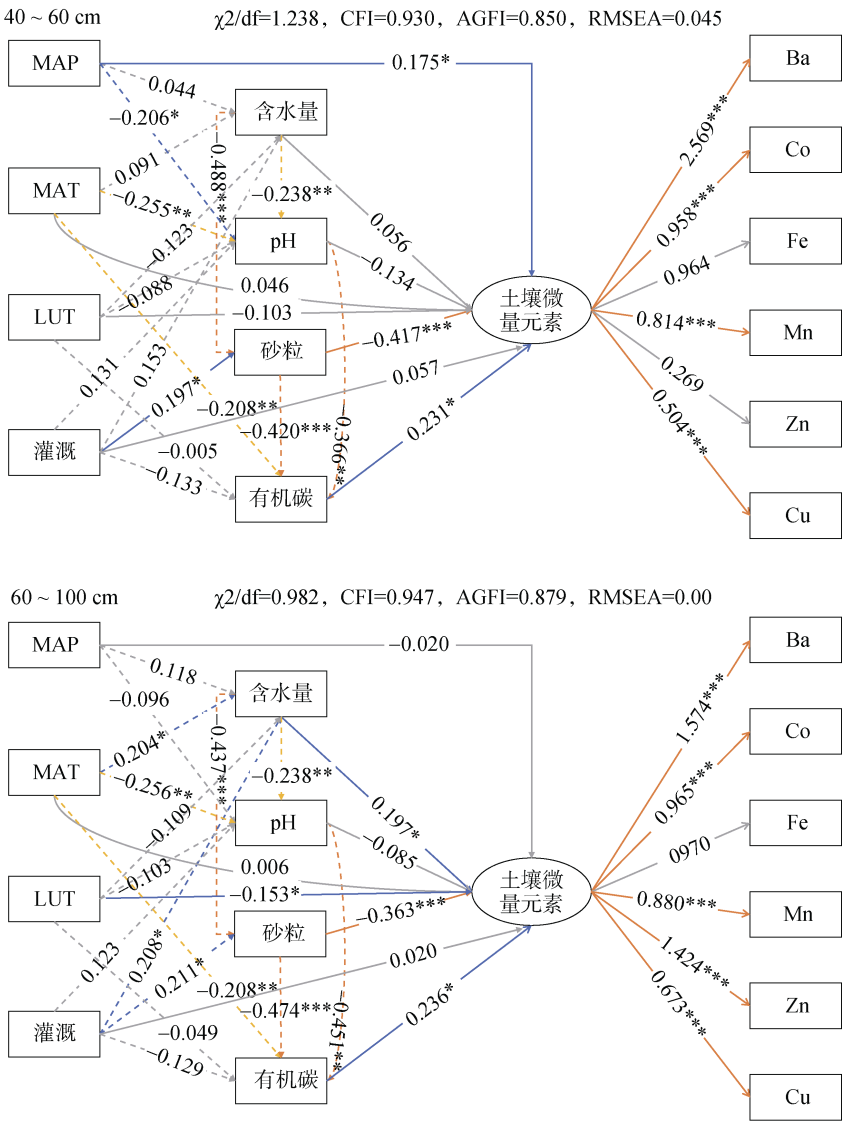
2.4　土壤微量元素影响因素

为明确土壤微量元素的影响因素，本文选取了气候因子(年平均降水量 MAP、年平均气温 MAT)、土地利用类型 LUT(农田、果园)、管理措施(灌溉、未灌溉)和土壤理化性质(含水量、pH、颗粒组成、有机碳)4 类因素，采用结构方程模型对其进行分析，通过卡方自由比(χ^2/df)、比较拟合指数(CFI)、拟合优度指数(AGFI)和近似误差均方根(RMSEA)等指标来评判模型的拟合状况[20]。如图 3 所示，不同土层 χ^2/df<2，CFI>0.9、AGFI>0.8 以及 RMSEA<0.1，表明模型拟合良好。

由图 3 可知，各土层情况各异。0 ~ 10 cm 土层，砂粒对微量元素产生直接显著效应，含水量和灌溉则对其产生间接显著效应，总效应绝对值大小顺序为：0.341(含水量)>–0.276(砂粒)>–0.071(灌溉)。10 ~ 20 cm 土层，含水量、pH 与砂粒对元素具有直接显著效应，含水量、MAP 和灌溉对其形成间接显著效应，总效应绝对值大小顺序为：0.448(含水量)>–0.321(砂粒)>–0.273(pH)>0.147(MAP)>0.019(灌溉)。20 ~ 40 cm 土层，含水量、pH、砂粒和有机碳对元素有直接显著效应，含水量、pH、砂粒、MAP、MAT、LUT 和灌溉有间接显著效应，总效应绝对值大小顺序为：–0.592(砂粒)>0.471(含水量)>–0.342(pH)>0.158(MAT)>0.153(有机碳)>–0.106(灌溉)>0.068(MAP)>–0.001(LUT)。40 ~ 60 cm 土层，砂粒、有机碳和 MAP 对其具有直接显著效应，含水量、pH、砂粒、MAT 和灌溉具有间接显著效应，总效应绝对值大小顺序为：–0.417(砂粒)>0.231(有机碳)>0.175(MAP)>–0.134(pH)>–0.057(灌溉)>0.056(含水量)> 0.046(MAT)。60 ~ 100 cm 土层，含水量、砂粒、有机碳和 LUT 对元素有直接显著效应，含水量、pH、砂粒、MAT 和灌溉呈间接显著效应，总效应绝对值大小顺序为：–0.493(砂粒)>0.413(含水量)>0.274(有机碳)>–0.183 (LUT)>–0.085(pH)>0.064(MAT)>–0.044(灌溉)。

综上，不同土层中微量元素的影响因素各有差异，同时不同因素对其影响程度也不同。其中，0 ~ 10 cm


0 ~ 10 cm
χ2/df=1.125，CFI=0.944，AGFI=0.868，RMSEA=0.033
MAP
MAT
LUT
灌溉
含水量
pH
砂粒
有机碳
土壤微量元素
Ba
Co
Fe
Mn
Zn
Cu
0.156
0.103
−0.175
0.05
−0.1
0.105
−0.017
0.212*
−0.04
0.185*
0.199*
−0.464***
−0.221*
0.425***
0.117
−0.117
0.117
−0.078
0.019
−0.276**
0.001
2.224***
0.913***
0.969
0.839***
−0.034
0.509***
10 ~ 20 cm
χ2/df=1.079，CFI=0.948，AGFI=0.875，RMSEA=0.026
MAP
MAT
LUT
灌溉
含水量
pH
砂粒
有机碳
土壤微量元素
Ba
Co
Fe
Mn
Zn
Cu
0.060
0.202*
−0.141
0.107
−0.130
0.012
0.012
0.201*
0.045
0.165*
−0.170*
−0.192*
−0.019
−0.490***
−0.238**
0.221*
0.200*
−0.241**
0.047
0.005
−0.321**
0.071
−0.268**
0.118
0.320***
0.954***
1.022
0.901***
0.282*
0.593***
20 ~ 40 cm
χ2/df=1.159，CFI=0.947，AGFI=0.865，RMSEA=0.037
MAP
MAT
LUT
灌溉
含水量
pH
砂粒
有机碳
土壤微量元素
Ba
Co
Fe
Mn
Zn
Cu
−0.026
0.067
−0.214*
0.099
−0.243**
−0.062
−0.017
0.138
0.099
0.173*
−0.192*
−0.166*
−0.026
−0.522***
−0.238**
0.221*
0.162*
−0.162***
0.067
0.037
−0.554***
−0.251**
−0.357**
0.153*
0.820***
0.912***
0.963
0.734***
0.689***
0.760***



(蓝线和*表示在 $P<0.05$ 水平上显著；黄线和**表示在 $P<0.01$ 水平上显著；红线和***表示在 $P<0.001$ 水平上显著；灰线表示无显著效应。实线表示直接效应，虚线表示间接效应。线上数字为标准化路径系数，正负号分别代表正向和负向影响)

图 3　0 ~ 100 cm 土壤微量元素空间结构方程模型图

Fig. 3　Model diagram of spatial structure equation of soil trace elements in 0 – 100 cm depth

土层主要影响因素为含水量和砂粒，10 ~ 20 cm 土层为含水量和砂粒，20 ~ 40 cm 土层为含水量、砂粒和 pH，40 ~ 60 cm 土层为砂粒，60 ~ 100 cm 土层为含水量和砂粒。

3　讨论

本研究表明，关中平原土壤微量元素含量整体上从西向东呈现下降的趋势，高值区主要集中在宝鸡、咸阳和西安城市群，低值区主要位于渭南市，这与其他研究结果类似。如，雷凌明等[21]以陕西省泾惠渠灌区(咸阳市的三原县和泾阳县，西安市的高陵区、阎良区和临潼区)的土壤重金属为研究对象，发现土壤中 Hg、As、Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni 8 种重金属平均质量分数均超出土壤背景值[22]；Liu 等[23]研究关中平原农田土壤中重金属的空间格局和危害区域表明，Pb、Cr、Ni、Zn 和 Cu 5 种元素的中度污染阈值均高于研究区的背景值，污染热点和危险区位于关中平原南部；王凌青等[24]在西安市郊农田土壤环境地球化学研究中也发现，重金属元素 Pb、Ni、Zn、Cr、Co、Mn、As 等严重超标。这可能是由于该区域存在大量的工厂和企业，诸如陕西航空电气有限公司、陕西柴油机重工有限公司、陕西中粮公司、康师傅集团、中航工业集团[25]等，导致土壤富集大量重金属，致使关中平原土壤微量元素含量从西向东表现出下降

的趋势。

随土层深度的递增，研究区内 Fe、Ba 和 Co 含量的平均值呈现上升的趋势，而 Zn 和 Cu 呈现下降的趋势，Mn 则是先升高后降低，这与其他研究结果不一致。如，庞妍[26]在对关中平原主要矿区农田土壤样品中 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量的测定中，发现这 5 种重金属均在表层土壤中含量最高，且随土层深度增加而减少；朱舒等[27]以关中平原农田土壤剖面(0 ~ 1 m)重金属为研究对象，分析 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 7 种元素的空间分布和影响因素，结果表明，随深度的增加，除 Ni 和 Cr 外，其他元素含量均呈现降低的趋势。这可能有以下几种原因：其一，由于地理位置不同，土壤微量元素的空间分布特征具有区域差异性；其二，土壤微量元素的迁移受到自然(土壤质地、植被类型、气候条件等)和人类活动(耕作、施肥、灌溉等)的影响，导致最终结果的不同；其三，由于元素自身的特性，不同元素在土壤中的迁移速率各异[13]。

本研究还发现，土壤含水量、pH 和土壤颗粒组成是影响微量元素空间分布的主要因素，这一结论与众多研究结果一致[28-29]。土壤含水量会影响微量元素的有效性和迁移性，其波动可改变土壤溶液浓度与离子强度，干扰微量元素溶解–沉淀动态平衡，改变微量元素的空间分布格局。适宜的含水量能够促进微生物代谢，促使微量元素形态转化，或利于植物吸收，或引发沉淀反应[30]。PH 通过酸碱特性影响微量元素的溶解和吸附状态。酸性土壤中，H^+ 富集，削弱土壤颗粒对微量元素的吸附力，促使某些微量元素(如 Cu、Zn)的化合物溶解性增强，游离态增多，提升其可利用性。相反，碱性土壤中，OH^- 浓度增加，促使微量元素形成难溶性沉淀或化合物固定于土壤颗粒表面，降低其有效性[31]。不同颗粒组成的土壤，其固有的化学成分和结构特性不同，这直接影响了微量元素的吸附、固定和释放。例如，黏土矿物颗粒细、比表面积大、吸附位点多，可通过多种方式吸附并固定微量元素；砂质土颗粒大、比表面积小、吸附位点少，吸附固定力弱，使得微量元素易迁移流失[32]。综上，土壤含水量、pH 和土壤颗粒组成均通过影响微量元素的有效性、溶解度和吸附状态等，进而决定其在土壤中的分布和含量。

4 结论

1) 关中平原 0 ~ 100 cm 土层的 Fe、Mn 和 Co 含量均值均高于陕西省土壤背景值，Zn 和 Cu 含量均值在背景值附近波动，Ba 含量均值则均低于背景值。随土层深度的增加，Fe、Ba 和 Co 含量的平均值呈现增加的趋势，而 Zn 和 Cu 呈现减少的趋势，Mn 则是先升高后降低。

2) 半方差模型分析表明，整体上不同土层中大部分元素的最优插值模型均为指数模型，且不同土层中 6 种微量元素表现不同程度的空间相关性和变程差异，具有深度依赖性。此外，空间插值结果显示，关中平原的土壤微量元素含量总体上呈现西高东低的分布特点。

3) 结构方程模型结果显示，研究区 0 ~ 10、10 ~ 20 以及 60 ~ 100 cm 土层土壤微量元素空间分布的主要影响因素为含水量和砂粒含量；20 ~ 40 cm 土层为含水量、pH 和砂粒含量；40 ~ 60 cm 土层为砂粒含量。

参考文献：

[1] 刘家友, 杨国宝, 王齐龙, 等. 减氮配施中微量元素肥对冬瓜产量和品质的影响[J]. 土壤, 2023, 55(1): 30–36.

[2] 宋柳霆, 王中良, 滕彦国, 等. 贵州阿哈湖物质循环过程的微量元素地球化学初步研究[J]. 地球与环境, 2012, 40(1): 9–17.

[3] 肖海龙, 马源, 周会程, 等. 三江源退化高寒草原土壤微量元素与植被特征及其关系[J]. 草地学报, 2022, 30(8): 1925–1933.

[4] 徐兴阳, 邱学礼, 杨树明, 等. 昆明烟区植烟土壤 pH 与中微量元素时空变异性研究[J]. 土壤, 2023, 55(4): 887–893.

[5] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 554–564.

[6] 于保港, 张田萌, 李可力, 等. 曲周县农田土壤有效微量元素含量空间变异特征及影响因素初探[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 395–400.

[7] 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): 1596–1605.

[8] 曾妍妍, 周金龙, 陈云飞, 等. 新疆若羌县土壤微量营养元素的空间分布特征及影响因素[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 22–28.

[9] 罗源群, 贾海江, 范晓苏, 等. 靖西市植烟区土壤微量营养元素空间分布特征及影响因子分析[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2023, 44(6): 47–55.

[10] 宋淑钧, 崔小茹, 陈其鲜, 等. 陇中旱区农田土壤微量元素特征及其对绿肥休耕的响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 268–275.

[11] 褚宏欣, 党海燕, 王涛, 等. 我国主要麦区土壤有效铁锰铜锌丰缺状况评价及影响因素[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 129–139.

[12] 娜珠盼·斯德克江, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 杨秀云, 等. 新疆典型城-郊-乡梯度带土壤微量元素空间分布与来源[J]. 中国环境监测, 2023, 39(4): 158–166.

[13] 张晓霞, 李占斌, 李鹏, 等. 黄土高原林地土壤微量元素分布和迁移特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(S1): 161–169.
[14] 赵业婷. 基于 GIS 的陕西省关中地区耕地土壤养分空间特征及其变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
[15] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 87–91.
[16] 迪里木拉提·玉苏甫, 木合塔尔·艾买提, 玉苏甫·买买提, 等. 温宿县植棉土壤表层有效性微量元素空间分布特征[J]. 土壤通报, 2018, 49(5): 1115–1122.
[17] Li H, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity[J]. Oikos, 1995, 73(2): 280.
[18] 臧振峰, 南忠仁, 王胜利, 等. 黑河中游绿洲农田土壤微量元素含量的空间分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5): 190–195.
[19] 史文娇, 汪景宽, 魏丹, 等. 黑龙江省南部黑土区土壤微量元素空间变异及影响因子——以双城市为例[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 342–347.
[20] 牛犇, 王艳玲. 不同年限稻田红壤发生层土壤磷的固持容量及其释放潜能研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1724–1736.
[21] 雷凌明, 喻大松, 陈玉鹏, 等. 陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 88–96.
[22] 薛澄泽, 肖玲, 吴乾丰, 等. 陕西省主要农业土壤中十种元素背景值研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 1986, 14(3): 30–40.
[23] Liu W J, Chai G L, Deng W B. A combination of finite mixture distribution model with geo-statistical models to study spatial patterns and hazardous areas of heavy metals in cropland soils of the Guanzhong Plain, Northwest China[J]. Chemosphere, 2021, 283: 131222.
[24] 王凌青, 卢新卫, 贾晓丹. 西安市郊农田土壤环境地球化学研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(3): 113–117.
[25] 田大刚. 从传统治所到工业重镇——明清以降兴平城市空间与城市形态演变研究[J]. 咸阳师范学院学报, 2019, 34(3): 75–79.
[26] 庞妍. 关中平原农田土壤重金属污染风险研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
[27] 朱舒, 李舒怡, 鱼洋, 等. 关中平原农田土壤剖面重金属空间分布、影响因素、风险评价及源解析[J]. 环境科学, 2025, 46(4): 2501–2511.
[28] 姚珂涵, 肖列, 李鹏, 等. 冻融循环次数和土壤含水率对油松林土壤团聚体及有效态微量元素的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 259–266.
[29] 宋丰骥, 常庆瑞, 钟德燕, 等. 黄土丘陵沟壑区土壤微量元素空间变异特征及其影响因素[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 36–42.
[30] Johnson B G, Johnson D W. The influence of slash pile burning on meadow and upland forest soil micronutrients in the sierra *Nevada mountains*, United States[J]. Soil Science, 2019, 184(3): 78–86.
[31] 于君宝, 刘景双, 王金达, 等. 典型黑土 pH 值变化对营养元素有效态含量的影响研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(5): 404–408.
[32] 李红伟, 李立平, 邢维芹. 不同小尺度下潮土重金属有效性空间变异研究[J]. 土壤, 2006, 38(6): 782–789.