



**青岛市崂山区茶园土壤7种中微量元素空间分布特点**

马佳妮, 袁杨洋, 张艳, 何华, 宋祥云

引用本文:

马佳妮, 袁杨洋, 张艳, 等. 青岛市崂山区茶园土壤7种中微量元素空间分布特点[J]. *农业资源与环境学报*, 2026, 43(1): 144–152.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0548>

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

[西藏一江两河流域中部地区土壤重金属生态风险评价](#)

王伟鹏, 卢宏伟, 冯三三

*农业资源与环境学报*. 2020, 37(6): 970–980 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0421>

[遵义市土壤锌空间分布特征研究](#)

赵建, 师华定, 吴啸, 韩小斌, 彭玉龙, 马瑾, 刘京

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(3): 298–303 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0158>

[沈抚灌区耕地重金属Cd、Pb的变化特征分析](#)

徐宁, 魏忠义

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(6): 783–791 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0129>

[秸秆还田深度对春玉米农田土壤有机碳、氮含量和土壤酶活性的影响](#)

王峥宇, 廉宏利, 孙悦, 马梓淇, 田平, 齐华, 姜英

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(4): 636–646 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0378>

[余江县水稻土剖面酸缓冲性能与酸化速率](#)

唐贤, 蔡泽江, 徐明岗, 文石林, 高强, 姚晨, 陈玲英

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(6): 774–782 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0220>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马佳妮, 袁杨洋, 张艳, 等. 青岛市崂山区茶园土壤7种中微量元素空间分布特点[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 144-152.

MA J N, YUAN Y Y, ZHANG Y, et al. Spatial distribution of medium and trace elements in tea garden soil of Laoshan District, Qingdao City

[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2026, 43(1): 144-152.



开放科学 OSID

# 青岛市崂山区茶园土壤7种中微量元素空间分布特点

马佳妮<sup>1</sup>, 袁杨洋<sup>2</sup>, 张艳<sup>1</sup>, 何华<sup>1</sup>, 宋祥云<sup>1\*</sup>

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109; 2. 青岛市崂山区农业农村局, 青岛 266061)

**摘要:**为探究崂山区茶园空间分布特点及海拔高度对中微量元素的影响,本研究运用Pearson相关性分析、单因素方差分析和地统计学方法,对青岛市崂山区茶园0~20、20~40 cm土层土壤7种中微量元素(Fe、Mn、Cu、Zn、B、S、Mo)含量的空间变异特征及其影响因素进行了研究,分析了崂山区耕地土壤中微量养分含量现状。结果表明,研究区0~20、20~40 cm土层有效硫呈强变异程度,其他中微量元素呈中等变异程度。半方差函数结果表明,土壤有效铁、有效锰、有效铜及有效硼受结构性因素(地形、母质等)和随机性因素(施肥、耕作等)共同影响,0~20 cm土层上述7种中微量元素在研究区的变异系数大小顺序为S>Zn>Cu>B>Mo>Fe>Mn,20~40 cm土层这7种中微量元素在研究区的变异系数大小顺序为S>Zn>Cu>Mo>B>Mn>Fe。土壤中有有效硫、有效铁和有效锌的分布均呈现出南部高、北部低的趋势。相关性分析结果表明,0~20 cm及20~40 cm土层土壤有效铜含量均与有效锌含量、海拔高度呈显著正相关。方差分析结果表明,海拔高度对0~20 cm土层土壤中Fe、Cu、Zn、B、S、Mo含量影响差异性显著( $P<0.05$ ),对20~40 cm土层土壤中Cu、B、S含量影响差异性显著( $P<0.05$ )。随着海拔高度的升高,0~20 cm及20~40 cm土层土壤有效铜含量随海拔升高而增加。研究表明,崂山区茶园土壤7种中微量元素含量受到海拔、地形、母质等空间特征的影响。

**关键词:**崂山;青岛;茶园土壤;中微量元素;空间变异

**doi:** 10.13254/j.jare.2024.0548

## Spatial distribution of medium and trace elements in tea garden soil of Laoshan District, Qingdao City

MA Jian<sup>1</sup>, YUAN Yangyang<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, HE Hua<sup>1</sup>, SONG Xiangyun<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. Agricultural and Rural Bureau of Laoshan District, Qingdao City, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** The yield and quality of tea are affected by the soil environment, especially the content of medium and trace elements. Therefore, the abundance and deficiency of medium and trace elements in the soil of the tea garden play a crucial role in the growth and quality of tea. The spatial variation characteristics and effect factors of 7 medium and trace elements (Fe, Mn, Cu, Zn, B, S, Mo) in 0-20 cm and 20-40 cm soil in Laoshan District of Qingdao City were studied by Pearson correlation analysis, single factor analysis of variance and geostatistics, and the current situation of micronutrient content in the soil in Laoshan District was analyzed. In the study, the available sulfur in 0-20 cm and 20-40 cm soil layers showed strong variation, and other medium and trace elements showed moderate variation. The results of semi variance function showed that the soil available iron, available manganese, available copper and available boron were affected by structural factors (topography, parent material, etc.) and random factors (fertilization, tillage, etc.). The order of variation coefficients of seven medium and trace elements in 0-20 cm soil layer were as follows: S>Zn>Cu>B>Mo>Fe>Mn. While, the order of variation coefficients of seven medium and trace elements in 20-40 cm soil layer were as follows: S>Zn>Cu>Mo>B>Mn>Fe. The distribution of available sulfur, available iron and available zinc in soil showed a trend of high level in the south and low in the north of tea garden. The results of

收稿日期: 2024-07-20 录用日期: 2024-12-24

作者简介: 马佳妮(1999—),女,吉林长春人,硕士研究生,研究方向为土壤肥力。E-mail: mjn0502@163.com

\*通信作者: 宋祥云 E-mail: xsong@qau.edu.cn

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2021MD066); 茶园土壤分析及农业技术指导项目(6602423008)

correlation analysis showed that the soil available copper in 0–20 cm and 20–40 cm soil layers were significantly positively correlated with available zinc and altitude. The results of variance analysis showed that altitude had significant differences in the contents of Fe, Cu, Zn, B, S and Mo in 0–20 cm soil layer ( $P < 0.05$ ), while it had significant differences in the contents of Cu, B and S in 20–40 cm soil layer ( $P < 0.05$ ). With the increase of altitude, the soil available copper in 0–20 cm and 20–40 cm soil layers increased with the altitude. The seven medium and trace elements in tea garden of Laoshan are affected by altitude, topography, parent materials, etc.

**Keywords:** Laoshan; Qingdao; tea garden soil; medium and trace element; spatial variation

土壤是人类生存和发展的重要物质基础<sup>[1-3]</sup>,是提供多种生态系统服务的重要自然资源<sup>[4]</sup>。地统计学是一种研究如何利用统计学方法来分析地理空间数据的学科,可以通过考虑样本和估计点之间的空间相关性来插值未采样点的值<sup>[5]</sup>,其中之一的研究方向是关于土壤属性在空间上的不均匀变化,也可用于绘制某一区域的土壤肥力图,有助于了解空间上临时的土壤肥力状况<sup>[6-7]</sup>。自20世纪70年代末以来,国内外学者对地统计学在土壤养分中的应用取得了丰硕的成果<sup>[8-11]</sup>。吴才武等<sup>[12]</sup>使用地统计学和地理信息系统(GIS)技术相结合的方法研究了土壤养分的空间分布特征和变异规律;其中,地形因子是造成土壤养分异质性和影响植物分布的一个重要因素<sup>[13-14]</sup>。丁园等<sup>[15]</sup>的研究表明随海拔高度的增加茶叶的生理指标及土壤养分均显著增加,地形作为土壤五大成土因素之一<sup>[16]</sup>,了解海拔梯度上中微量元素含量的分布有助于理解地形因子对微量元素的影响以及微量元素的垂直分布特征,但有关崂山区茶园的相关研究报道较少。

茶树(*Camellia sinensis* L.)起源于我国,数百年来,茶叶一直风靡全球<sup>[17-18]</sup>。茶具有较高保健功效和经济价值,是世界三大无酒精饮料之一<sup>[19]</sup>。从1959年开始,山东省实施了“南茶北引”项目<sup>[20-21]</sup>。20世纪90年代初开始,山东省茶树面积逐年扩大、质量不断提高、效益显著增长<sup>[22]</sup>。尤其是青岛崂山区,截至2021年底,茶园面积已达到17 992亩(1亩=1/15 hm<sup>2</sup>),总产量达到1 339.885 t,创造了约6亿元的产值。青岛崂山茶,被誉为江北地区第一名茶。崂山区独特的棕壤类型茶园土壤含有丰富的矿物质和营养元素,为茶树的健康生长提供了良好的条件。茶叶的产量和品质受到土壤环境的基础影响,特别是微量元素含量对茶树的生长发育有着重要的影响。因此,崂山茶所生长土壤中的中微量元素的丰缺,对于茶叶的生长和品质起着至关重要的作用。

本研究以青岛市崂山区茶园土壤为研究对象,通过茶园土壤样品采集和ArcGIS地统计分析模块,探

讨了崂山区茶园土壤内中微量元素的分布情况,以及该区茶园土壤中微量元素有效态含量与海拔高度的相关性以及中微量元素有效态含量的空间变异规律,以期对崂山区茶园土壤养分管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

山东省青岛市崂山区(36°05′~36°19′N,120°24′~120°42′E),辖区陆域面积395.8 km<sup>2</sup>,海域面积2 880 km<sup>2</sup>,海岸线长95.71 km,地形呈阶梯状分布。1991—2020年,崂山区气候湿润,平均日照时数2 266.4 h,年平均气温13.7℃,年平均降雨量656.1 mm。崂山区茶园土壤为棕壤,呈酸性,成土母质以残坡积物和洪冲积物为主。

### 1.2 样品采集与分析

本研究于2022年4—7月在崂山区茶园基于田块随机布点选择茶园土壤进行采样,深度为0~20 cm和20~40 cm,使用手持式全球定位系统(GPS)记录每个采样点的经纬度及海拔。共设置点位206个(图1),采集土样412个(0~20、20~40 cm)。样品经过风干、混匀、磨细及过筛处理后进行检测与分析。

### 1.3 测定项目及方法

土壤中微量元素包括有效铁、有效锰、有效铜、有效锌、有效硼、有效钼、有效硫。土壤样品自然风干后,过2 mm筛。

土壤有效铁、有效锰、有效铜、有效锌含量采用DTPA溶液浸提-原子吸收光谱法测定;土壤有效硼含量采用沸水浸提-甲亚胺比色法测定;土壤有效钼含量采用草酸-草酸铵浸提-催化极谱法测定;土壤有效硫含量采用磷酸盐浸提-硫酸钡比浊法测定<sup>[23]</sup>。

变异系数作为土壤特性空间变异性的一个统计量,是标准差与平均值之比,弱等变异程度为 $CV \leq 10\%$ ;中等变异程度为 $10\% < CV < 100\%$ ;强等变异程度为 $CV \geq 100\%$ <sup>[24]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

运用Excel 2021和SPSS 26.0对数据进行统计分

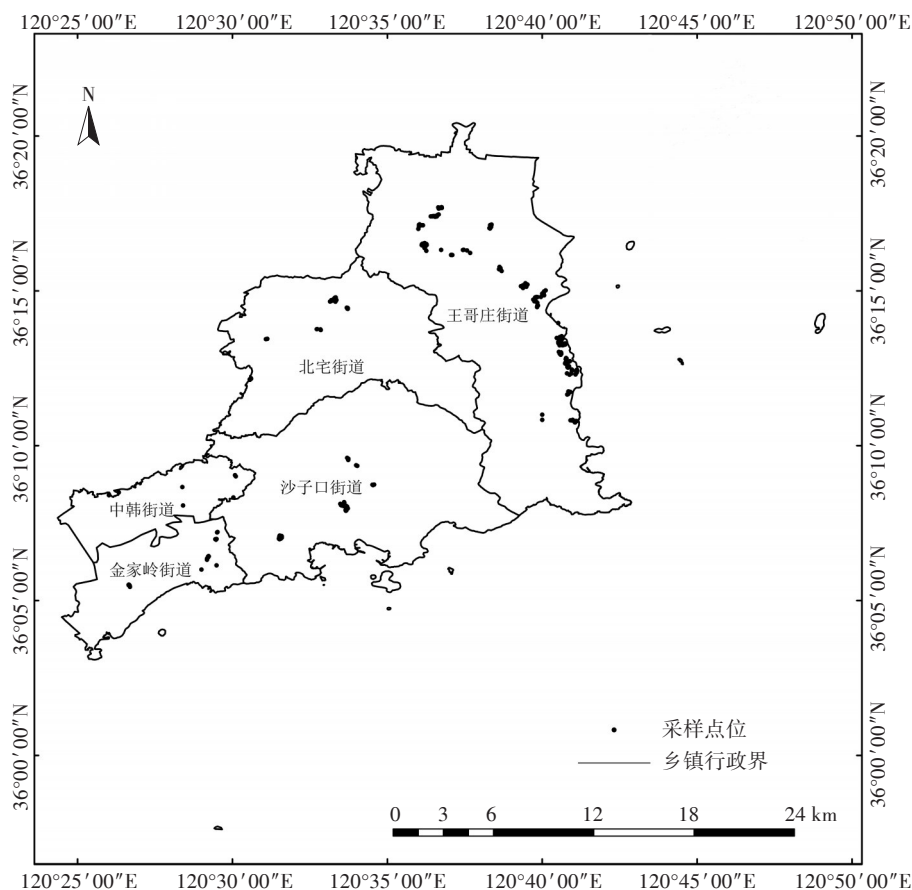


图1 研究区茶园土壤采样点分布

Figure 1 Distribution of soil sample sites in tea garden of Laoshan district

析。在单因素方差分析中将海拔分为6组： $\leq 30$ 、31~60、61~90、91~120、121~150 m和 $>150$  m。运用ArcGIS 10.7和GS+9.0对数据进行半方差函数计算。运用Origin 2022和ArcGIS 10.7制图分析养分空间分布状况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 茶园土壤中有效态中微量元素含量的描述性统计特征

表1为崂山区茶园耕层土壤中微量元素有效态含量状况以及空间变异程度。茶园0~20 cm耕层土壤中有效铁CV为34.12%，有效锰CV为33.36%，有效铜CV为50.82%，有效锌CV为79.72%，有效硼CV为48.41%，有效钼CV为45.71%，均呈中等变异程度；有效硫CV为183.92%，呈强变异程度。茶园20~40 cm耕层土壤中有效铁CV为33.13%，有效锰CV为33.76%，有效铜CV为50.38%，有效锌CV为59.54%，有效硼CV为38.15%，有效钼CV为47.44%，均呈中等变异程度；有效硫CV为201.16%，呈强变异程度。0~20 cm土层7种中微量元

素在研究区的变异系数大小顺序为 $S>Zn>Cu>B>Mo>Fe>Mn$ ，20~40 cm土层7种中微量元素在研究区的变异系数大小顺序为 $S>Zn>Cu>Mo>B>Mn>Fe$ 。

土壤中的中微量元素参与植株体内生理生化过程，并与叶绿体、多种氧化酶和多种呼吸酶的合成息息相关，为植物生长发育提供营养成分。中微量元素的有效态含量反映了土壤对植物矿物质营养的供给水平，当土壤养分有效性发生变化通常会引发植物养分的变化。根据山东省耕地质量监测土壤中微量元素分级标准<sup>[25]</sup>，可将0~20 cm及20~40 cm土壤有效铁、有效锰、有效锌、有效钼含量分为一级，土壤有效铜含量分为二级，土壤有效硼含量分为四级，土壤有效硫含量分为五级。土壤有效硼含量较低，其参与植物体内营养物质的运输和代谢<sup>[26]</sup>，需注重硼肥的补充，可以通过增加有机肥的施用量等方法提高茶园土壤的有效硼含量。

### 2.2 茶园土壤中有效态中微量元素含量的半方差函数分析

空间变异不仅受自然因素影响，而且很大程度上

表1 土壤中有效态中微量元素含量状况

Table 1 Statistical analysis of available medium and trace elements of soil samples

土层 Soil layer	中微量元素 Medium and trace element	样品数 Sample number	中微量元素含量 Medium and trace element concentration/(mg·kg <sup>-1</sup> )				变异系数 CV/%	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	
			最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	中值 Medium				标准差 Standard deviation
0~20 cm	Fe	206	40.11	210.12	113.09	114.04	38.59	34.12	-0.69	0.19
	Mn	206	12.58	53.44	27.92	24.44	9.32	33.36	-0.33	0.88
	Cu	206	0.64	6.82	2.97	2.49	1.51	50.82	-0.57	0.67
	Zn	206	1.15	15.42	6.18	3.66	4.93	79.72	-1.25	0.65
	B	206	0.07	0.95	0.45	0.44	0.22	48.41	-0.96	-0.13
	S	206	1.86	89.57	10.25	3.32	18.85	183.92	7.00	2.91
	Mo	206	0.07	0.73	0.42	0.42	0.19	45.71	-1.19	-0.11
20~40 cm	Fe	206	36.12	208.71	118.57	124.67	39.28	33.13	-0.71	0.32
	Mn	206	10.53	51.77	32.25	28.45	1.89	33.76	-1.55	0.16
	Cu	206	0.37	7.02	2.83	2.44	1.43	50.38	0.17	0.95
	Zn	206	1.33	15.38	7.14	5.37	4.25	59.54	-1.00	0.56
	B	206	0.06	1.05	0.47	0.49	0.18	38.15	0.45	-0.22
	S	206	1.88	74.90	6.07	2.87	12.21	201.16	24.51	4.95
	Mo	206	0.07	0.70	0.40	0.41	0.19	47.44	-1.26	-0.20

注:峰度和偏度越接近0,正态分布越大。

受外在因素影响,如人为活动干扰等<sup>[27]</sup>。根据表2中的崂山区茶园土壤内中微量元素含量的半方差函数计算结果,0~20 cm土壤中的中微量元素有效铁、有效锰、有效铜、有效锌、有效硼、有效硫和有效钼的块金值分别为336.000、7.800、0.528、7.680、0.048、0.619、0.306;20~40 cm土壤中的中微量元素有效铁、有效锰、有效铜、有效锌、有效硼、有效硫、和有效钼的块金值分别为0.020、34.700、0.023、0.440、0、1.200、0.003。可以看出0~20 cm土壤有效铜、有效硼、有效硫和有效钼以及20~40 cm土壤有效铁、有效铜、有效锌、有效硼、有效硫和有效钼块金值都比较小,表明在最小抽样尺度下,导致随机误差的概率小,能很好地体现土壤中微量元素有效含量的空间构造性。有效铁、有效锰块金值较大,可能受作物施肥、管理水平的影响。

崂山区茶园0~20 cm耕层土壤有效铁、有效锰、有效铜、有效锌、有效硼、有效硫和有效钼的块金值与基台值之比分别为0.201、0.190、0.261、0.227、0.691、0.251、0.836。由此可见,0~20 cm耕层土壤有效铁、有效锰和有效锌的块金值与基台值之比都小于25%,具有强烈的空间相关性,说明主要受结构性因素影响。崂山区茶园20~40 cm耕层土壤有效铁、有效锰、有效铜、有效锌、有效硼、有效硫和有效钼的块金值与基台值之比分别为0.006、0.350、0.351、0.021、0、0.036、0.077。由此可见,20~40 cm耕层土壤有效铁、

有效锌、有效硼、有效硫和有效钼的块金值与基台值之比均小于25%,空间自相关性强,说明主要受结构性因素影响。0~20 cm土壤有效硫、有效铜、有效硼及20~40 cm土壤有效铁、有效锰、有效铜及有效硼的块金值与基台值之比都在25%~75%范围内,空间相关性一般,说明受结构性因素和随机性因素共同影响<sup>[28]</sup>。

茶园0~20 cm耕层土壤中有效钼的决定系数 $R^2$ 较小,为0.783;土壤有效硼、有效铁、有效锰、有效锌的决定系数均大于0.9。20~40 cm土壤中有效硼的决定系数 $R^2$ 较小,为0.671;土壤有效铁、有效锰、有效铜、有效锌、有效硫的决定系数均大于0.9。综上所述,有效态中微量元素的决定系数均大于0.6,决定系数可客观反映观测值和变异函数之间的拟合程度,因此,土壤有效态中微量元素的半方差函数拟合较好,能较好地反映土壤有效态中微量元素的空间结构特征。茶园0~20 cm耕层土壤中有效铁、有效锰块金值较大,可能受作物施肥、管理水平的影响,不能很好地反映研究区有效铁含量在空间上的结构性,建议在未来从小尺度上对二者进行分析。

### 2.3 茶园土壤中有效态中微量元素含量的空间分布特征

崂山区茶园0~20 cm土层中土壤有效硫、有效钼含量高于20~40 cm土层的土壤含量。由图2可以看出分布斑块大、分布规律较明显。其中土壤有效硼

表2 土壤有效态中微量元素含量的半方差函数分析

Table 2 Semi-variance function analysis of available medium and trace elements of soil samples

土层 Soil layer	微量元素 Medium and trace element	半方差变异函数模型 Variogram model type	块金值 $C_0$	基台值 $C_0+C$	偏基台值 $C$	块金效应 $C_0/C_0+C$	$R^2$	Range	RSS
0~20 cm	Fe	高斯模型	336.000	1 671.000	1 335.000	0.201	1.000	2 331.34	0.790
	Mn	球状模型	7.800	41.060	33.260	0.190	1.000	234.80	0.079
	Cu	指数模型	0.528	2.020	1.492	0.261	0.854	4 050.00	0.166
	Zn	指数模型	7.680	33.790	26.110	0.227	0.997	13 890.00	0.334
	B	线性模型	0.048	0.069	0.021	0.691	0.931	7 613.98	$1.171 \times 10^{-5}$
	S	指数模型	0.619	2.468	1.849	0.251	0.862	12 330.00	0.033
	Mo	线性模型	0.306	0.366	0.060	0.836	0.783	23 717.49	$9.210 \times 10^{-4}$
20~40 cm	Fe	球状模型	0.020	3.228	3.208	0.006	0.971	2 210.00	0.045
	Mn	高斯模型	34.700	99.250	64.550	0.350	1.000	464.01	0.033
	Cu	高斯模型	0.023	0.066	0.043	0.351	0.933	18 463.66	$8.017 \times 10^{-5}$
	Zn	高斯模型	0.440	20.900	20.460	0.021	0.991	703.21	1.660
	B	高斯模型	0	0.021	0.021	0	0.671	138.56	$1.205 \times 10^{-4}$
	S	球状模型	1.200 0	33.000	31.800	0.036	0.986	1 129.00	3.410
	Mo	球状模型	0.003	0.036	0.034	0.077	0.737	1 250.00	$1.608 \times 10^{-5}$

含量的分布呈现出西部高、北部低的趋势；土壤中有有效硫、有效铁和有效锌含量的分布呈现出南部高、北部低的趋势；土壤中有有效铜含量的分布呈现出中东西部高、南北部低的趋势，土壤中有有效锰含量的分布呈现出中部和南北部高、东西部低的趋势。土壤中有有效硫、有效铁和有效锌的空间分布类似，结合相关性分析可以初步断定，该研究区土壤中微量元素有效硫、有效铁和有效锌可能存在同源性。

#### 2.4 海拔高度对茶园土壤中微量元素含量的影响

海拔高度与崂山区茶园土壤中有有效态中微量元素含量的相关性如表3所示。0~20 cm土层茶园土壤中，有效硼与有效硫呈极显著正相关；有效硫与有效钼、有效铁呈显著正相关，与有效锰呈极显著负相关，与有效锌呈显著极正相关；有效铁与有效铜呈显著正相关，与有效锰、有效锌呈极显著正相关；有效锰与有效铜、有效锌呈极显著负相关；有效铜与有效锌、海拔呈极显著正相关；有效锌与海拔呈极显著正相关，这与焦敬华<sup>[29]</sup>的研究结果相似。

20~40 cm土层茶园土壤中，有效硼与有效硫、有效锌和海拔呈显著正相关，这与Ali等<sup>[30]</sup>的研究结果相似；有效硫与有效铁、有效铜、有效锌以及海拔呈显著正相关；有效钼与有效铁、有效锌呈显著正相关；有效铁与有效铜、有效锌以及海拔呈显著正相关；有效锰与有效铜、有效锌呈显著负相关；有效铜与有效锌和海拔呈显著正相关。

0~20 cm土壤中的有效铜和有效锌及海拔高度

互呈显著正相关；20~40 cm崂山区茶园土壤有效铜与有效锌和海拔呈显著正相关。

将海拔高度分为6组，分别为≤30、31~60、61~90、91~120、121~150、>150 m。海拔高度对茶园土壤中微量元素含量的影响如表4所示。

海拔对土壤中微量元素含量有显著影响，其中0~20 cm土壤中有有效铁和有效铜在海拔>150 m时达到最大值，有效锌在海拔121~150 cm时达到最大值，而不同海拔高度下有效锰含量差异不显著。20~40 cm土壤中有有效铁、有效铜和有效硼在海拔>150 m时达到最大值，而不同海拔高度下有效锰、有效锌和有效钼含量差异不显著。

### 3 结论

(1)崂山区茶园0~20 cm土层中土壤有效硫、有效铜、有效硼及20~40 cm土层中土壤有效铁、有效锰、有效铜及有效硼的块金值与基台值之比都在25%~75%范围内，受结构性因素(地形、母质等)和随机性因素(施肥、耕作等)共同影响。

(2)崂山区茶园土壤0~20 cm土层中土壤有效硫、有效钼、有效铜含量高于20~40 cm土层土壤的含量；土壤有效硫、有效铁和有效锌的空间分布具有一定的相似性。

(3)崂山区茶园0~20 cm土壤中的有效铜和有效锌及海拔高度互呈显著正相关；20~40 cm茶园土壤中有有效铜与有效锌和海拔呈显著正相关。海拔高

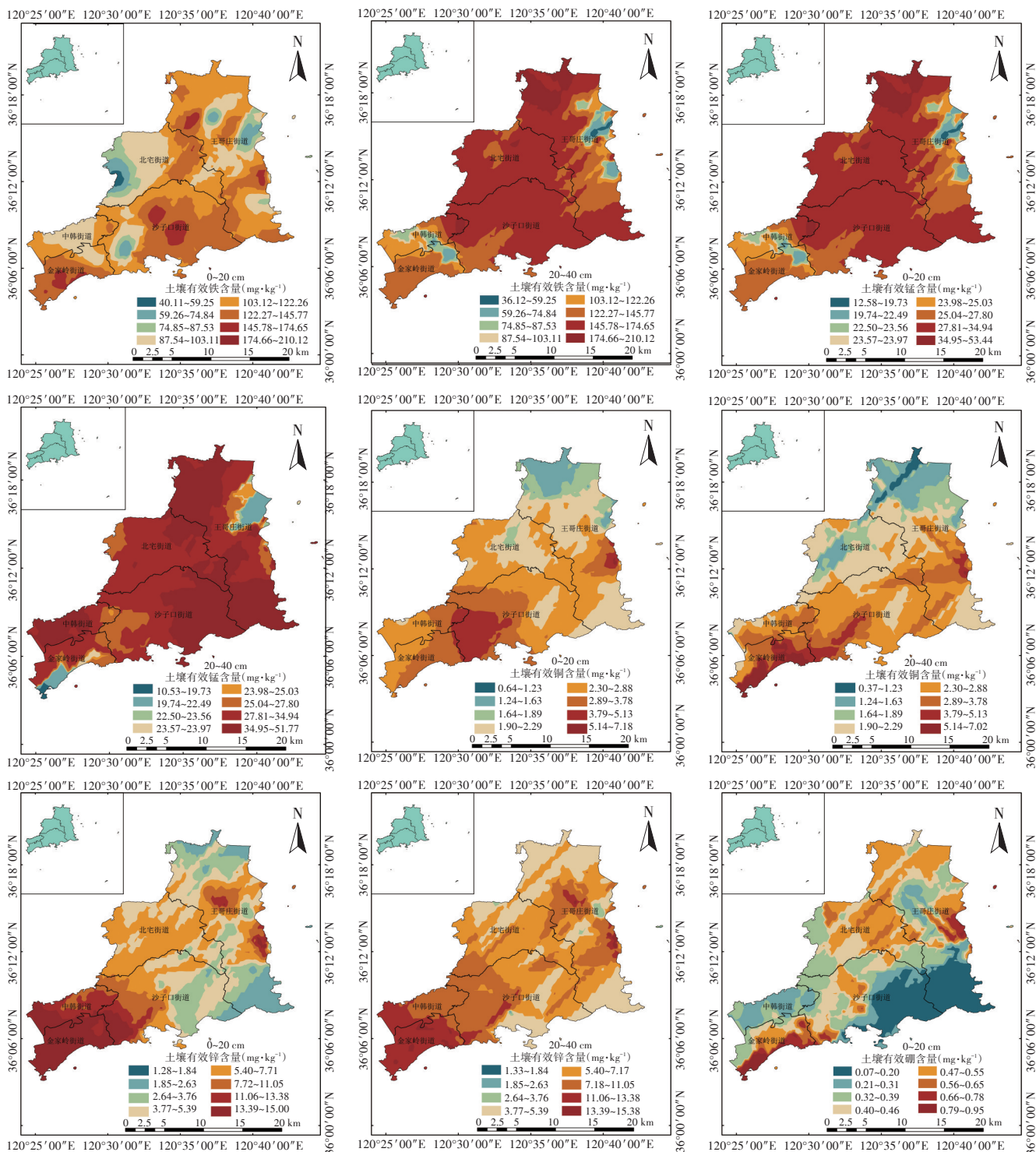
度是影响崂山区茶园土壤内中微量元素含量的重要因素。

参考文献:

[1] CAI Y, MA T, WANG Y Y, et al. Assessing the accumulation efficiency of various microbial carbon components in soils of different minerals[J]. *Geoderma*, 2022, 407: 115562.

[2] 谢龙涛,潘剑君,白浩然,等. 基于GIS的农田土壤重金属空间分布及污染评价:以南京市江宁区某乡镇为例[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 316-325. XIE L T, PAN J J, BAI H R, et al. GIS-based spatial distribution and risk assessment of heavy metals in farmland soils: a case study of a town of Jiangning, Nanjing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 316-325.

[3] PENG X D, DAI Q H, DING G J, et al. Distribution and accumulation of trace elements in rhizosphere and non-rhizosphere soils on a Karst



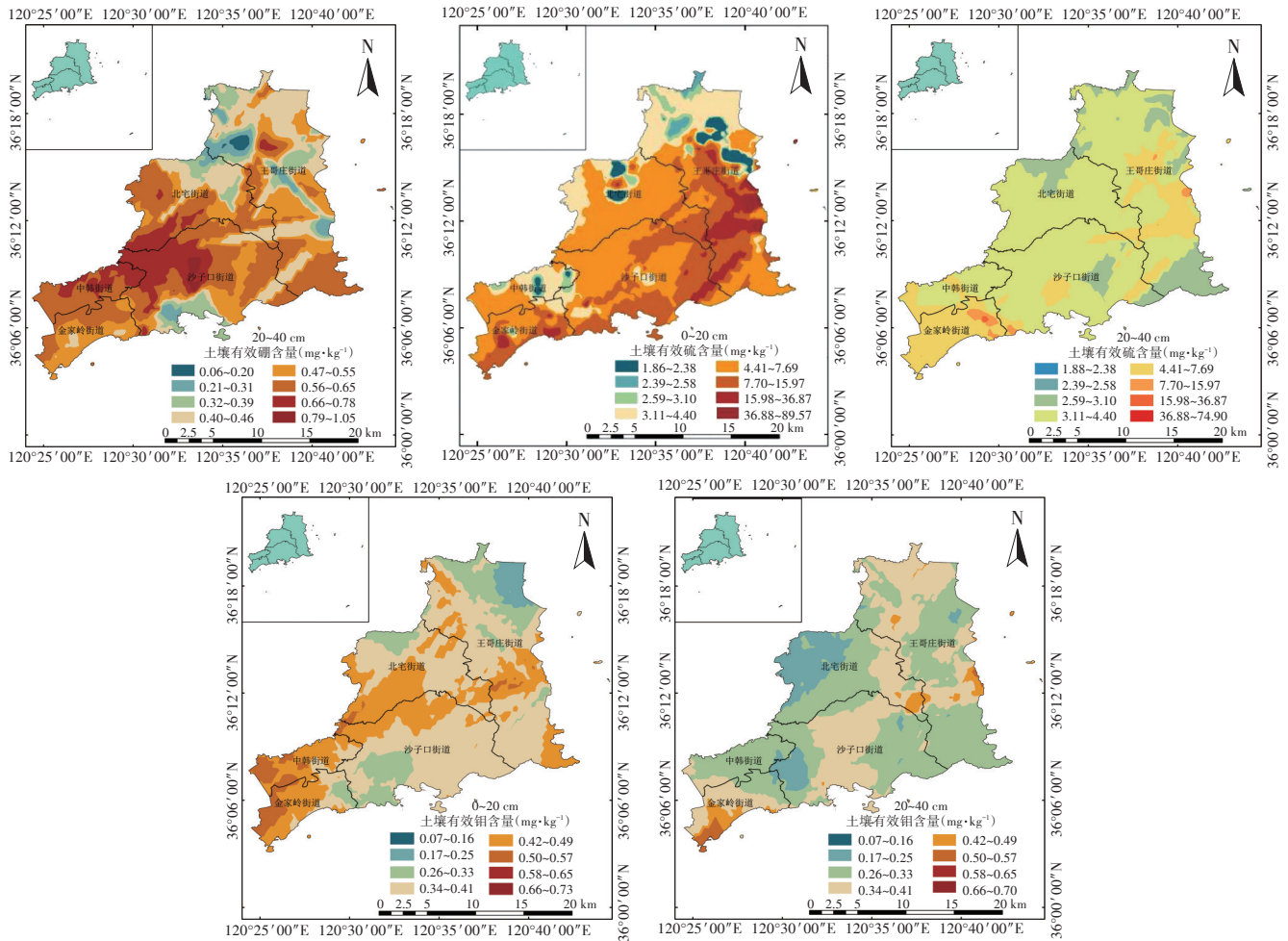


图2 崂山区茶园土壤的中微量元素含量空间分布

Figure 2 Spatial distribution of medium and trace elements in soil

plateau after vegetation restoration[J]. *Plant and Soil*, 2017, 420(1): 49-60.

[4] TAN Q Q, CHEN Y Z, WANG G A. Changes in soil micronutrients along a temperature gradient in northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158145.

[5] AHMAD M, MUHAMMAD D, MUSSARAT M, et al. Appraisal for site specific plant nutrient management through spatial variability and mapping in hilly areas of northern Pakistan[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(4): 936-948.

[6] SHU Q S, LIU Z X, SI B C. Characterizing scale- and location-dependent correlation of water retention parameters with soil physical properties using wavelet techniques[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(6): 2284-2292.

[7] KAVITHA C, SUJATHA M P, TATA R. Spatial variations in soil micronutrients as influenced by agro ecological conditions in a tropical humid region[J]. *Tropical Ecology*, 2019, 60(3): 362-378.

[8] KHAN J, GUPTA G, SINGH N K, et al. Geophysical and geostatistical assessment of groundwater and soil quality using GIS, VES, and PCA techniques in the Jaipur region of western India[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(31): 77713-77728.

[9] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究: 以河北省遵化市为例[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 557-563. GUO X D, FU B J, MA K M, et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS: a case study in Zunghua City of Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 557-563.

[10] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征: 以江苏省太仓市为例[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 33-40. ZHONG X L, ZHOU S L, LI J T, et al. Spatial variability of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta: a case study of Taicang City in Jiangsu Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 33-40.

[11] 李艳, 史舟, 徐建明, 等. 地统计学在土壤科学中的应用及展望[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(1): 178-182. LI Y, SHI Z, XU J M, et al. Utilization and perspective of geostatistics in soil sciences[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(1): 178-182.

[12] 吴才武, 张月丛, 夏建新. 基于地统计与遥感反演相结合的有机质预测制图研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1568-1575. WU C W, ZHANG Y C, XIA J X. Prediction and mapping of soil organic matter based on geostatistics and remote sensing inversion[J]. *Acta*

表3 土壤有效态中微量元素含量与海拔高度相关性分析  
Table 3 Correlation analysis of available medium and trace elements and altitude

土层 Soil layer	指标 Index	B	S	Mo	Fe	Mn	Cu	Zn	海拔 Altitude
0~20 cm	B	1							
	S	0.442**	1						
	Mo	0.077	0.166*	1					
	Fe	-0.018	0.156*	0.061	1				
	Mn	-0.009	-0.208**	-0.036	0.192**	1			
	Cu	0.034	0.121	-0.037	0.208*	-0.401**	1		
	Zn	0.133	0.274**	-0.056	0.186**	-0.286**	0.623**	1	
	海拔	0.033	-0.022	-0.024	0.006	-0.067	0.549**	0.423**	1
20~40 cm	B	1							
	S	0.190**	1						
	Mo	-0.089	-0.037	1					
	Fe	-0.101	0.225**	0.175*	1				
	Mn	0.09	0.066	-0.095	-0.046	1			
	Cu	0.103	0.218**	0.007	0.358**	-0.274**	1		
	Zn	0.278**	0.181**	0.138*	0.346**	-0.482**	0.374**	1	
	海拔	0.147*	0.228**	-0.046	0.197**	-0.002	0.627**	0.082	1

注:\*表示  $P < 0.05$ , \*\*表示  $P < 0.01$ 。

表4 海拔高度对土壤有效态中微量元素含量影响( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )  
Table 4 Effects of altitude on the content of available medium and trace elements in soil ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

土层 Soil layer	海拔 Altitude/m	Fe	Mn	Cu	Zn	B	S	Mo
0~20 cm	≤30	107.85±34.77ab	27.85±9.75a	2.35±1.07b	4.55±4.15c	0.49±0.20b	8.79±14.94ab	0.40±0.19ab
	31~60	124.78±41.57a	29.51±9.85a	2.80±1.34b	5.16±4.65c	0.38±0.21b	11.39±21.12ab	0.43±0.19ab
	61~90	118.28±35.12a	27.30±8.68a	3.19±1.57b	8.60±4.82b	0.47±0.26b	19.08±27.93a	0.53±0.14a
	91~120	83.49±20.18b	24.37±4.46a	4.50±1.28a	11.25±4.21ab	0.35±0.12b	2.83±0.42b	0.29±0.18b
	121~150	84.63±20.37b	26.60±6.82a	5.33±0.74a	12.21±3.01a	0.44±0.15b	2.90±0.61b	0.36±0.19b
	>150	125.55±53.55a	24.30±10.04a	5.36±1.71a	8.80±3.77ab	0.70±0.16a	4.31±3.15ab	0.42±0.26ab
20~40 cm	≤30	103.16±36.40a	30.84±11.35a	2.22±1.04b	6.15±4.39a	0.48±0.16ab	4.65±4.56c	0.40±0.17a
	31~60	132.59±39.03a	35.01±10.61a	2.59±1.12b	7.55±4.18a	0.41±0.21b	3.98±3.77c	0.39±0.20a
	61~90	126.84±39.25a	29.49±9.76a	2.92±1.30b	9.64±4.02a	0.51±0.13ab	3.76±1.50c	0.45±0.19a
	91~120	116.69±34.35a	33.20±9.30a	4.73±1.14a	6.86±3.90a	0.53±0.14ab	24.68±33.84a	0.32±0.19a
	121~150	116.67±35.87a	32.14±12.13a	5.30±0.55a	6.47±3.49a	0.48±0.15b	14.46±28.86b	0.35±0.16a
	>150	124.28±38.52a	28.78±12.72a	5.41±1.11a	6.16±2.08a	0.62±0.21a	2.37±0.39c	0.36±0.21a

注:不同小写字母表示同一元素在不同海拔高度之间含量的差异( $P < 0.05$ )。

*Pedologica Sinica*, 2016, 53(6):1568-1575.

[13] 张忠华, 胡刚, 祝介东, 等. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1038-1049. ZHANG Z H, HU G, ZHU J D, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and its impact on tree species distribution in a Karst forest of southwest China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(10): 1038-1049.

[14] 江叶枫, 钟珊, 饶磊, 等. 江西省耕地土壤有效态微量元素含量空间变异特征及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5):

1159 - 1169. JIANG Y F, ZHONG S, RAO L, et al. Spatial variability of soil available microelement contents of cultivated land in Jiangxi Province and their influencing factors[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(5): 1159-1169.

[15] 丁园, 张宝林. 不同海拔高度下庐山茶园土壤性质及茶叶生化指标的变化[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(6): 959-962. DING Y, ZHANG B L. Changes in tea biochemical indexes and soil physicochemical properties at different altitude ranges of Lushan Mountain[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, 44(6):

- 959-962.
- [16] 汪甜甜, 丁琪洵, 梅帅, 等. 基于遥感技术的土壤质地空间预测方法研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1415-1425. WANG T T, DING Q X, MEI S, et al. Research progress in soil texture spatial prediction methods based on remote sensing technology [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6): 1415-1425.
- [17] HE L, PENG X H. Content and bioavailability of Hg in a soil-tea plant system in Anxi area, southeast China[J]. *Water*, 2023, 15(1): 179.
- [18] YANG W H, LI C J, WANG S S, et al. Influence of biochar and biochar-based fertilizer on yield, quality of tea and microbial community in an acid tea orchard soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 166: 104005.
- [19] 杨新, 陈莉, 卢红梅, 等. 茶多酚提取与纯化方法及其功能活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 322-328. YANG X, CHEN L, LU H M, et al. Research progress on extraction and purification methods of tea polyphenols and its functional activities[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(5): 322-328.
- [20] 王清源. 崂山茶文化建设GEP模式的路径探讨[J]. 中国茶叶, 2018, 40(12): 48-51. WANG Q Y. Discussion on the path of GEP model of Laoshan tea culture construction[J]. *China Tea*, 2018, 40(12): 48-51.
- [21] 李玉胜, 王漪, 张续周. 山东省茶产业发展现状与对策[J]. 中国茶叶, 2013, 35(12): 14-15. LI Y S, WANG Y, ZHANG X Z. The development status and countermeasures of the tea industry in Shandong Province[J]. *China Tea*, 2013, 35(12): 14-15.
- [22] 张永乐. 山东省茶树主要叶部病害病原鉴定及生物学特性研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018. ZHANG Y L. Identification and biological characteristics of tea leaf diseases in Shandong Province [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2018.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [24] 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. YU B G, ZHANG T M, LI K L, et al. Spatial variability characteristics of soil available micronutrients and their influencing factors in Quzhou[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(2): 395-400.
- [25] 姚海军, 杨连俊, 刘洪蓬, 等. 德州市耕地中微量元素状况调查分析[J]. 农业科技通讯, 2019(9): 144-147. YAO H J, YANG L J, LIU H P, et al. Investigation and analysis of trace elements in cultivated land in Dezhou City[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2019(9): 144-147.
- [26] 毛伟, 李文西, 苏胜, 等. 扬州市耕地土壤有效硼含量的时空变异特征及驱动因子分析, 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 829-839. MAO W, LI W X, SU S, et al. Spatiotemporal variability and driving factors of soil available boron content in Yangzhou City, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(4): 829-839.
- [27] 赵昕, 张晓光, 宋祥云, 等. 胶莱平原县域表土有机碳空间变异特征研究及自相关分析[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(4): 127-136. ZHAO X, ZHANG X G, SONG X Y, et al. Spatial variation and autocorrelation analysis of topsoil organic carbon in Jiaolai Plain[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(4): 127-136.
- [28] 李强, 文铜, 何国兴, 等. 不同海拔高寒草甸土壤微量元素含量及其与植被的关系[J]. 草地学报, 2022, 30(7): 1731-1737. LI Q, WEN T, HE G X, et al. Content of soil trace elements in alpine meadows at different altitudes and relationships with vegetation[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(7): 1731-1737.
- [29] 焦敬华. 鄂西南烟区不同海拔土壤养分状况和土壤-烤烟硒含量的分布特点[D]. 郑州: 河南农业大学, 2008. JIAO J H. Status of soil nutrients at different altitudes and distribution of selenium contents in soil and tobacco leaves in southwest HuBei tobacco-growing areas[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2008.
- [30] ALI M H, MUSTAFA A R A, EL-SHEIKH A A. Geochemistry and spatial distribution of selected heavy metals in surface soil of sSohag, Egypt: a multivariate statistical and GIS approach[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(18): 1257.