

# 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

曾妍妍<sup>1,2</sup>,周金龙<sup>1,2</sup>,陈云飞<sup>1,2</sup>,王松涛<sup>3</sup>,杜江岩<sup>3</sup>,范薇<sup>1,2</sup>

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心,新疆 乌鲁木齐 830052;  
3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第二水文工程地质大队,新疆 昌吉 831100)

**摘 要:**基于若羌县 2015 年 143 组 0~20 cm 土层土壤 6 种微量营养元素(Fe、Mn、Zn、Cu、Mo 和 B)的实测含量,运用多元统计分析、地统计学和 ArcGIS 技术相结合的方法,对研究区土壤微量营养元素的含量和空间分布特征进行分析。结果表明:Fe、Mn、Zn、Cu、Mo 和 B 变异系数介于 18.2%~47.4%,均属于中等变异。Fe、Mn、Zn、Mo 和 B 的块金效应均小于 25%,空间相关性较强,空间变异主要受到土壤母质等结构性变异主导;Cu 的块金效应介于 25%~75%之间,属于中等空间相关,空间变异受到人为活动等随机因素和结构性因素的共同影响。Fe、Mn、Zn 和 Cu 的空间分布格局相似,总体呈现出从研究区四周向中心含量逐渐增大的趋势;Mo 和 B 的空间分布格局相似,总体呈现出从南向北含量逐渐增大的趋势。土壤有机质、pH 值和不同的成土母质、土壤类型、土地利用类型对土壤微量营养元素均有不同程度的影响。

**关键词:**微量营养元素;空间分布;影响因素;表层土壤;若羌县

**中图分类号:**S153.6<sup>+</sup>1      **文献标志码:**A

## Spatial distribution and its influencing factors of micronutrients in soils of Ruoqiang County, Xinjiang

ZENG Yan-yan<sup>1,2</sup>, ZHOU Jin-long<sup>1,2</sup>, CHEN Yun-fei<sup>1,2</sup>, WANG Song-tao<sup>3</sup>, DU Jiang-yan<sup>3</sup>, FAN Wei<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;  
2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi, Xinjiang 830052, China;  
3. No.2 Hydrogeology and Engineering Geology Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Changji, Xinjiang 831100, China.)

**Abstract:** Based on the analysis of seven micronutrients (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo and B) of 143 surface soil samples in Ruoqiang County of Xinjiang, this study used multivariate statistical analysis, geostatistics and ArcGIS to explore the and spatial distribution of these micronutrients. The results showed that: (1) the variation coefficient of Fe, Mn, Zn, Cu, Mo and B varied from 18.2% to 47.4%. (2) The nugget-to-sill ratio of Fe, Mn, Zn, Mo and B were less than 25% with high spatial correlation, indicating Fe, Mn, Zn, Mo and B were influenced by structural factors such as the parent materials. The nugget-to-sill ratio of Cu ranged from 25% to 75% with medium spatial correlation, indicating the influence by the combined effects of artificial random and structural factors. (3) Spatial distribution maps showed the similar spatial distribution characteristics for Fe, Mn, Zn and Cu, with an increasing trend from the surrounding to the center. The spatial distribution pattern of Mo and B was similar, showing an ascending trend from the south to the north. (4) Soil organic matter, pH and parent materials, soil types, land use types also influenced soil micronutrients.

收稿日期:2017-04-05      修回日期:2017-06-06  
基金项目:中央返还两权款资金项目“新疆和田-若羌绿洲带 1:25 万土地质量地球化学调查”(S15-1-LQ);新疆自治区高峰学科—水利工程学科基金(xjslgcgfk20161103)  
作者简介:曾妍妍(1989-),女,江西吉水人,博士研究生,主要从事地下水利用与保护、绿洲生态、地球化学方面的研究。E-mail: 644257818@qq.com  
通信作者:周金龙(1964-),教授,博士生导师,主要从事干旱区地下水利用与保护、绿洲生态、地球化学等研究。E-mail: zjzhoujl@163.com

**Keywords:** micronutrient; spatial distribution; influencing factors; surface soil; Ruoqiang County

土壤中的锰、锌、铜、钼、硼等元素,是植物正常生长所必需的微量营养元素。铁是土壤中的大量元素,为植物正常生长所必需,但在植物体内的含量很低,所以也被列为微量营养元素。人类、动物和农作物所需微量营养元素数量微小,但其缺乏会对农作物生产和人类、动物健康造成严重影响<sup>[1]</sup>。微量元素参与许多酶系统的活动,在氮、磷、碳的代谢过程中以及在生物氧化过程中均有微量元素参与。微量营养元素主要从土壤矿物质中获得,前人研究表明,其有效性常受土壤理化性质(有机质和 pH 值等)、成土母质、土地利用类型、地下水位埋深、灌溉水质、降水、地形等因素影响<sup>[2-6]</sup>。

若羌县作为新疆维吾尔自治区(以下简称“新疆”)发展红枣产业的大县,了解当地土壤中微量营养元素分布状况及丰缺程度,利用微量营养元素含量较高的区域发展若羌县红枣产业。而前人对新疆若羌县土壤微量营养元素方面的研究总体相对较少。因此,新疆地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队和新疆农业大学于 2015 年在新疆和田—若羌绿洲带展开了 1:25 万土地质量地球化学调查工作。本文以若羌县农田表层土壤(0~20 cm)为研究对象,采集了 143 组土壤样品,以了解农田微量营养元素的含量、空间分布特征及丰缺状况,为当地合理施加微肥提供科学依据,并且对更合理地持续开发利用农田土壤资源,提高当地农作物的产量和品质,同时对保护人类身体健康具有非常重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

若羌县位于新疆东南部,塔克拉玛干大沙漠东

南缘,阿尔金山北麓,县域地处东经 86°45′~93°45′,北纬 36°05′~41°23′。地势南高北低,由西南向东北倾斜,地形平缓。根据研究区的地貌形态、成因类型及物质组成,可将研究区地貌类型划分为:构造侵蚀中低山区、侵蚀剥蚀堆积平原和剥蚀堆积平原。研究区内除农业用地、戈壁砾石带和零星相间沙丘及少数盐土外,其余为灌木、野生植被覆盖的荒漠区,主要植被有天然胡杨林、红柳、芦苇、白刺、甘草等<sup>[7-8]</sup>。

若羌县属暖温带大陆性荒漠干旱气候,年平均温度 11.8℃,极端最高温度 43.6℃,极端最低温度-27.2℃;年平均相对湿度 39%,无霜期 189~193 d;年平均降水量 28.5 mm,年平均蒸发量 2 920.2 mm<sup>[9]</sup>。研究区属典型的农牧区,农业以种植业为主,粮食作物主要有小麦、玉米,经济作物主要有红枣、棉花、黄豆、瓜类、水果、蔬菜等,且以红枣为主。

1.2 土壤样品的采集与测试

土壤样品于 2015 年 10 月采集,采用网格布点法共采集表层土壤样品 143 个,采样深度为 0~20 cm。土壤采样点按照取样密度 1 个·km<sup>-2</sup>布设(图 1)。

土样中微量营养元素含量由国土资源部乌鲁木齐矿产资源监督检测中心(新疆维吾尔自治区矿产实验研究所)进行测试,其中,Fe 和 Mn 采用波长色散 X 射线荧光光谱法测定,检出限分别为 0.03 g·kg<sup>-1</sup>和 3.254 mg·kg<sup>-1</sup>;Mo 采用电感耦合等离子体原子发射光谱法测定,检出限为 0.012 mg·kg<sup>-1</sup>;Cu 和 Zn 采用全谱直读光谱法测定,检出限分别为 0.952 mg·kg<sup>-1</sup>和 0.644 mg·kg<sup>-1</sup>;B 采用发射光谱法测定,检出限为 0.902 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[10-11]</sup>。

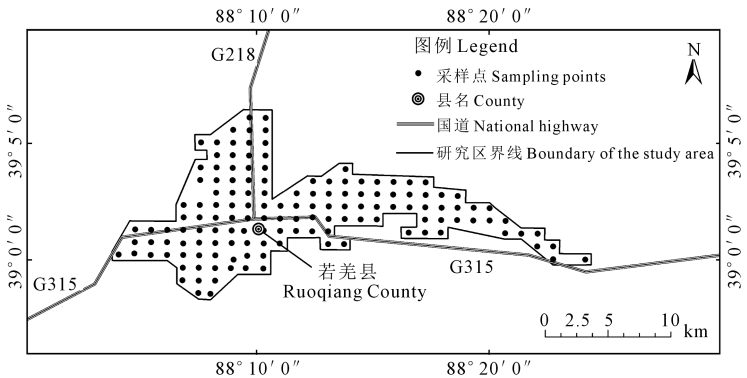


图 1 研究区表层土壤采样点分布

Fig.1 Distribution of the soil sampling points in Ruoqiang County

1.3 数据处理

数据采用 SPSS 19.0 统计软件进行描述性统计和正态分布检验,其中采用 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验方法 $[P(k-s)>0.05]$ 来检验数据是否服从正态分布,如果数据不服从正态分布,则需要对其进行对数或幂变换使其接近于正态分布,以达到较好的地统计学插值效果。采用 GS+7.0 软件进行半方差函数的计算和理论模型的拟合。采用 ArcGIS 10.2 软件中的 Geostatistical Analyst 模块绘制各元素的空间分布图,采用克里金插值法进行地统计分析,当数据服从正态分布时,可选用普通克里金插值;若服从对数正态分布,则选用对数克里金插值;若服从幂指数正态分布,则选用幂指数克里金插值。

表 1 表层土壤微量元素含量统计分析( $n=143$ )  
Table 1 Descriptive statistics of micronutrients in surface soil

| 元素<br>Elements | 范围<br>Range<br>/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 平均值<br>Mean<br>/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 标准差<br>Standard<br>deviation<br>/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 背景值<br>Background value<br>/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 变异系数<br>Coefficient of<br>variation/% | K-S 检验<br>Kolmogorov-Smirnov test |      | 分布类型<br>Distribution type                     |
|----------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|------|-----------------------------------------------|
|                |                                                      |                                                      |                                                                       |                                                                  |                                       | $P$                               | $P'$ |                                               |
| Fe             | 10~41                                                | 26                                                   | 5.4                                                                   | 32.7                                                             | 21.0                                  | 0.67                              | /    | 正态分布<br>Normal distribution                   |
| Mn             | 226.0~789.0                                          | 531.5                                                | 96.73                                                                 | 765                                                              | 18.2                                  | 0.40                              | /    |                                               |
| Zn             | 32.4~88.7                                            | 57.9                                                 | 11.65                                                                 | 72                                                               | 20.1                                  | 0.32                              | /    |                                               |
| Cu             | 8.5~49.5                                             | 22.0                                                 | 7.60                                                                  | 30                                                               | 34.5                                  | 0.21                              | /    |                                               |
| Mo             | 0.6~4.1                                              | 1.3                                                  | 0.58                                                                  | 1.9                                                              | 44.6                                  | 0.00                              | 0.19 | 幂指数正态分布<br>Exponential normal<br>distribution |
| B              | 25.8~212.0                                           | 70.7                                                 | 33.49                                                                 | 52                                                               | 47.4                                  | 0.00                              | 0.29 | 对数正态分布<br>Lognormal distribution              |

注:“背景值”参考成杭新等 2014 年报道的新疆土壤中化学元素的背景值<sup>[13]</sup>;“ $P$ ”为双侧近似  $P$  值,“ $P'$ ”为对数/幂变换后双侧近似  $P$  值。  
Note: “Background value” refers to the report on the chemical elements in the soils of Xinjiang, China by Cheng Hangxin et al. in 2014<sup>[13]</sup>; “ $P$ ” indicates that the asymptotic significance (2-tailed), “ $P'$ ” indicates that the asymptotic significance after logarithmic/power transformation.

2.2 土壤微量元素含量的空间变异结构特征

在进行地统计分析之前,需要对数据进行正态分布检验,若不服从正态分布,则需要对数据进行对数或幂变换使其接近于正态分布。由表 1 可见,土壤中 Fe、Mn、Zn、Cu 含量服从正态分布,B 服从对数正态分布,Mo 服从幂指数正态分布。

块金值  $C_0$ 、偏基台值  $C$  和基台值的比值  $C_0/(C_0+C)$  (即块金效应) 分别表示随机变异(人为因素)和结构变异(自然因素)引起的空间变异占总体变异的比重。 $C_0/(C_0+C)$  比值小于 25%,说明微量元素具有强烈的空间相关性,变异主要由结构性变异组成;比值在 25%~75%之间,说明微量元素具有中等空间相关性;比值大于 75%,说明微量元素空间相关性很弱,变异主要由随机变异组成<sup>[14-16]</sup>。

表 2 为研究区土壤微量元素拟合的最优半变异函数模型参数,由表 2 拟合效果可知,Fe、Mn、

2 结果与分析

2.1 土壤微量元素含量统计分析

研究区土壤微量元素含量统计结果见表 1,B 的平均含量与新疆背景值相比增加 36.0%,其余元素平均含量均低于新疆土壤背景值,说明该地土壤中 B 有不同程度的累积。变异系数可以反映微量元素含量的变异程度,并在一定程度上反映其受人为影响的程度。由表 1 可以看出,Fe、Mn、Zn、Cu、Mo 和 B 属于中等变异性,其中,Fe、Mn 和 Zn 变异系数较小,均小于 25%,说明 Fe、Mn 和 Zn 受外界影响较一致,可能具有相同的来源<sup>[12]</sup>。

Cu 符合球形模型,Zn、Mo 和 B 符合指数模型。从块金效应来看,Fe、Mn、Zn、Mo 和 B 的块金效应均小于 25%,空间相关性较强,空间变异主要受到自然因素的影响,如成土母质等;Cu 的块金效应为 49.8%,介于 25%~75%之间,属于中等空间相关,空间变异同时受到人为因素和自然因素的影响。同时,从表 2 可以看出,变程介于 2.27~9.36 km 之间,说明土壤微量元素在这个范围内存在空间自相关性,超过此范围空间自相关性消失<sup>[4,17]</sup>。

2.3 土壤微量元素含量的空间分布特征

平均误差和标准化均方根误差是判断插值模型精度的重要参数。平均误差(Mean error, ME)越接近于 0,精度越高;标准化均方根误差(Root mean square standardized error, RMSSE)越接近 1,精度越高,大于或小于 1,表示高估或低估了预测值<sup>[17]</sup>。由表 2 可知,各元素预测平均误差都接近于 0,标准化均方根误差都接近于 1,表明各插值模型的预测

精度较高,预测结果可反应出无监测点区域的土壤微量营养元素分布状况。本文采用克里金插值法绘制各元素的空间分布图(图 2),Fe、Mn、Zn 和 Cu 含量服从正态分布,选用普通克里金插值模型;B 服从对数正态分布,选用对数克里金插值;Mo 服从幂

指数正态分布,选用幂指数克里金插值。基于 ArcGIS 的空间统计分析,得到研究区面积为 155.25 km<sup>2</sup>,Fe、Mn、Zn、Cu、Mo 和 B 含量依据土地质量地球化学评价规范(DZ/T0295-2016)<sup>[18]</sup>中的分级标准进行等级划分,各分级面积及比例见表 3。

表 2 表层土壤微量营养元素半方差函数模型与精度参数

| Table 2 Semivariogram models and precision parameters of micronutrients in surface soil |                      |                       |                       |                         |                    |                       |                       |                |                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| 元素<br>Elements                                                                          | 拟合模型<br>Theory model | 块金值<br>Nugget<br>(Co) | 基台值<br>Sill<br>(Co+C) | 块金效应<br>Co/(Co+C)<br>/% | 变程<br>Range<br>/km | 拟合度<br>R <sup>2</sup> | 残差<br>RSS             | 平均<br>误差<br>ME | 标准化<br>均方根误差<br>RMSSE |
| Fe                                                                                      | 球型模型 Spherical       | 0.0232                | 0.311                 | 7.5                     | 2.47               | 0.976                 | 7.05×10 <sup>-4</sup> | 0.023          | 0.960                 |
| Mn                                                                                      | 球型模型 Spherical       | 0.0001                | 0.007                 | 1.4                     | 2.27               | 0.930                 | 7.16×10 <sup>-7</sup> | 0.007          | 0.999                 |
| Zn                                                                                      | 指数模型 Exponential     | 0.0011                | 0.009                 | 11.9                    | 3.36               | 0.979                 | 2.29×10 <sup>-7</sup> | 0.030          | 0.919                 |
| Cu                                                                                      | 球型模型 Spherical       | 0.0138                | 0.028                 | 49.8                    | 3.22               | 0.900                 | 6.29×10 <sup>-6</sup> | 0.005          | 0.988                 |
| Mo                                                                                      | 指数模型 Exponential     | 0.0229                | 0.108                 | 21.2                    | 9.36               | 0.960                 | 2.38×10 <sup>-4</sup> | -0.019         | 1.000                 |
| B                                                                                       | 指数模型 Exponential     | 0.0001                | 0.041                 | 0.2                     | 6.27               | 0.963                 | 2.80×10 <sup>-5</sup> | 0.009          | 0.991                 |

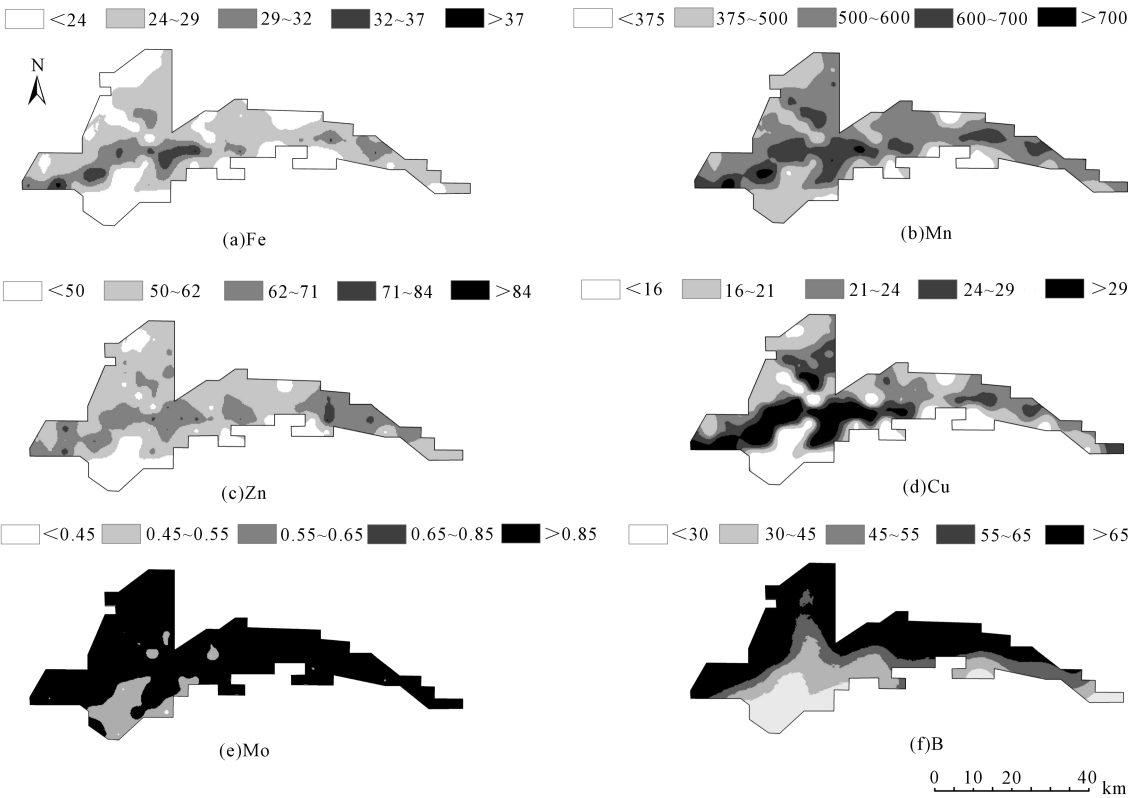


图 2 表层土壤微量营养元素含量空间分布/(mg·kg<sup>-1</sup>)  
Fig.2 Spatial distribution of micronutrients in surface soil

由图 2 和表 3 可以看出,Fe、Mn、Zn 和 Cu 的空间分布格局相似,总体呈现出从研究区四周向中心含量逐渐增大的趋势(图 2a~d);Mo 和 B 的空间分布格局相似,总体呈现出从南向北含量逐渐增大的趋势(图 2e~f)。其中,Fe、Zn 和 Cu 均是以较缺乏水平所占的比例最高,分别为 50.0%、53.7% 和 29.4%;Fe 等级为丰富的比例为 0.1%,该区域零星分布在研究区的中西部;Zn 等级为较丰富及以上的

比例仅为 1.3%,该区域零星分布在研究区的西部和东部;Cu 等级为丰富的比例为 14.3%,该区域主要分布在研究区的中西部。Mn 以中等水平所占的比例最高,为 48.0%,等级为丰富的比例为 1.1%,该区域零星分布在研究区的中西部。Mo 和 B 等级达到丰富的比例均为最高,分别为 88.2%和 51.2%,该区域主要分布在研究区的北部。

表 3 表层土壤微量营养元素含量分级与面积统计

Table 3 Grading and area statistics of micronutrients in surface soil

| 元素<br>Elements | 项目<br>Items                     | 分级 Classification              |                                              |                                   |                                         |                           |
|----------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|
|                |                                 | I 级(缺乏)<br>Grade I (Deficient) | II 级(较缺乏)<br>Grade II (Relatively deficient) | III 级(中等)<br>Grade III (Moderate) | IV 级(较丰富)<br>Grade IV (Relatively rich) | V 级(丰富)<br>Grade V (Rich) |
| Fe             | 分级 Level/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | <24                            | 24~29                                        | 29~32                             | 32~37                                   | >37                       |
|                | 面积 Area/km <sup>2</sup>         | 48.35                          | 77.58                                        | 23.36                             | 5.83                                    | 0.13                      |
|                | 比例 Ratio/%                      | 31.1                           | 50.0                                         | 15.0                              | 3.8                                     | 0.1                       |
| Mn             | 分级 Level/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | <375                           | 375~500                                      | 500~600                           | 600~700                                 | >700                      |
|                | 面积 Area/km <sup>2</sup>         | 7.25                           | 43.27                                        | 74.45                             | 28.52                                   | 1.76                      |
|                | 比例 Ratio/%                      | 4.7                            | 27.9                                         | 48.0                              | 18.3                                    | 1.1                       |
| Zn             | 分级 Level/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | <50                            | 50~62                                        | 62~71                             | 71~84                                   | >84                       |
|                | 面积 Area/km <sup>2</sup>         | 24.1                           | 83.26                                        | 45.85                             | 2.03                                    | 0.01                      |
|                | 比例 Ratio/%                      | 15.5                           | 53.7                                         | 29.5                              | 1.3                                     | 0.0                       |
| Cu             | 分级 Level/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | <16                            | 16~21                                        | 21~24                             | 24~29                                   | >29                       |
|                | 面积 Area/km <sup>2</sup>         | 27.08                          | 45.57                                        | 35.53                             | 24.79                                   | 22.28                     |
|                | 比例 Ratio/%                      | 17.4                           | 29.4                                         | 22.9                              | 16.0                                    | 14.3                      |
| Mo             | 分级 Level/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | <0.45                          | 0.45~0.55                                    | 0.55~0.65                         | 0.65~0.85                               | >0.85                     |
|                | 面积 Area/km <sup>2</sup>         | 0.00                           | 0.00                                         | 0.12                              | 18.20                                   | 136.93                    |
|                | 比例 Ratio/%                      | 0.0                            | 0.0                                          | 0.1                               | 11.7                                    | 88.2                      |
| B              | 分级 Level/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | <30                            | 30~45                                        | 45~55                             | 55~65                                   | >65                       |
|                | 面积 Area/km <sup>2</sup>         | 0.00                           | 22.49                                        | 26.84                             | 26.38                                   | 79.54                     |
|                | 比例 Ratio/%                      | 0.0                            | 14.5                                         | 17.3                              | 17.0                                    | 51.2                      |

土壤中微量营养元素的丰缺状况会直接影响当地农作物的生长以及农产品的产量和品质。从总体上看,研究区土壤中 Fe、Zn 和 Cu 元素丰缺程度为Ⅱ级(较缺乏水平),Mn 元素丰缺程度为Ⅲ级(中等水平),Mo 和 B 元素丰缺程度为Ⅴ级(丰富水平)。

2.4 土壤微量营养元素含量空间分布的影响因素

前人研究表明,土壤有机质、pH 值、成土母质、土地利用类型、地下水位埋深、灌溉水质、降水、地形等均是影响土壤微量营养元素含量的主要因素。在地下水位浅埋条件下,潜水蒸发是土壤水补给的主要来源,此时,地下水盐可转化为土壤水盐;当潜水埋深较大时,潜水蒸发对土壤水的补给已不起作用<sup>[19-21]</sup>。由研究区水井调查资料可知地下水埋深均大于 6 m,因此可以不考虑潜水蒸发对土壤元素含量的影响。依据 2014 年灌溉地表水和地下水水质测试数据可知研究区灌溉水质均满足农田灌溉

水质标准(GB5084-2005)<sup>[22]</sup>,水质中与本研究相关的微量元素含量均远低于该标准限值,因此可不考虑灌溉用水水质对土壤中微量营养元素含量的影响。研究区为暖温带大陆性荒漠干旱气候,降水稀少,蒸发强烈,且该区地形平缓,可不考虑降水及地形对土壤中微量营养组分含量的影响。因此,本节主要讨论土壤有机质、pH 值、成土母质、土壤类型和土地利用类型对土壤微量营养元素含量的影响。

2.4.1 土壤有机质和 pH 值对土壤微量营养元素含量的影响 土壤是母质、气候、地形等诸多因素综合作用下形成的自然综合体,其理化性质直接影响着元素在土壤中的含量<sup>[23]</sup>。为研究若羌县土壤微量营养元素含量与土壤有机质、pH 值的关系,对土壤有机质、pH 值与土壤微量营养元素含量进行相关性分析(表 4)。

表 4 有机质、pH 值与土壤微量营养元素含量的相关性

Table 4 Correlation between soil organic matter, pH and micronutrients in surface soil

| 元素 Elements        | 有机质 Organic matter | pH       | Fe       | Mn       | Zn       | Cu    | Mo       | B     |
|--------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|-------|----------|-------|
| 有机质 Organic matter | 1.000              |          |          |          |          |       |          |       |
| pH                 | 0.188 *            | 1.000    |          |          |          |       |          |       |
| Fe                 | 0.589 **           | 0.166 *  | 1.000    |          |          |       |          |       |
| Mn                 | 0.603 **           | 0.178 *  | 0.993 ** | 1.000    |          |       |          |       |
| Zn                 | 0.565 **           | -0.020   | 0.868 ** | 0.864 ** | 1.000    |       |          |       |
| Cu                 | 0.588 **           | 0.245 ** | 0.928 ** | 0.907 ** | 0.806 ** | 1.000 |          |       |
| Mo                 | 0.134              | 0.025    | -0.015   | 0.016    | 0.170 *  | 0.022 | 1.000    |       |
| B                  | 0.283 **           | 0.096    | 0.073    | 0.120    | 0.258 ** | 0.065 | 0.840 ** | 1.000 |

注:“\*”表示在 P<0.05 水平显著,“\*\*”表示在 P<0.01 水平显著。  
Note:“\*” significant correlation at P<0.05, and “\*\*” significant correlation at P<0.01.

研究区土壤有机质、pH 值与土壤微量营养元素含量相关性分析结果表明,Fe、Mn、Zn、Cu 和 B 含量与土壤有机质呈现极显著正相关关系,Mo 含量与土壤有机质无相关关系;Fe、Mn 和 Cu 含量与 pH 值呈现显著或极显著正相关关系,Zn、Mo 和 B 含量与 pH 值无相关关系。

2.4.2 成土母质对土壤微量营养元素含量的影响

成土母质是影响土壤肥力的重要因素,母质是土壤形成的基础,前人研究表明由于母质的差异致使土壤特性存在着很大变异<sup>[24]</sup>。由表 5 可以看出,不同成土母质下土壤中微量营养元素中 B 的总体差异较大,含量范围为 49.8~91.0 mg·kg<sup>-1</sup>,表现为洪积物>风积物>冲洪积物>冲积物;其余 5 种微量营

养元素的含量差异较小,其中,Fe、Mn 和 Cu 含量均以冲积物最高,Zn 含量以洪积物最高,Mo 含量以风积物最高。综上所述,不同母质发育的土壤,养分分布具有差异性。

2.4.3 土壤类型对土壤微量营养元素含量的影响

结合遥感解译和实地调查验证,研究区土壤类型有棕漠土、灌淤土和林灌草甸土。由表 5 可以看出,Fe、Mn、Zn 和 Cu 平均含量均表现为灌淤土>林灌草甸土>棕漠土,Mo 和 B 平均含量均表现为林灌草甸土>灌淤土>棕漠土。综上所述,不同土壤类型下各微量营养元素的含量具有一定程度的差异性,同一土壤类型下各微量营养元素之间也有一定的差别。

表 5 不同成土母质和土壤类型的表层土壤微量营养元素平均含量/(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 5 Average contents of micronutrients of different parent materials and soil types in surface soils

| 分类<br>Classification     |                             | 样本数<br>Samples number | Fe | Mn    | Zn   | Cu   | Mo  | B     |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|----|-------|------|------|-----|-------|
| 成土母质<br>Parent materials | 风积物 Aeolian sediment        | 91                    | 25 | 530.2 | 59.1 | 21.5 | 1.4 | 78.5  |
|                          | 冲积物 Alluvium                | 24                    | 27 | 553.5 | 56.8 | 24.4 | 0.9 | 49.8  |
|                          | 冲洪积物 Alluvium and proluvial | 22                    | 25 | 507.9 | 53.0 | 21.2 | 1.0 | 55.7  |
|                          | 洪积物 Proluvial               | 6                     | 26 | 549.8 | 61.0 | 21.8 | 1.1 | 91.0  |
| 土壤类型<br>Soil types       | 灌淤土 Irrigation-silted soil  | 98                    | 27 | 558.5 | 60.0 | 23.7 | 1.1 | 64.8  |
|                          | 林灌草甸土 Shrubby meadow soil   | 26                    | 24 | 503.8 | 57.1 | 20.0 | 1.9 | 111.2 |
|                          | 棕漠土 Brown desert soil       | 19                    | 20 | 430.4 | 47.7 | 15.6 | 1.0 | 46.3  |

2.4.4 土地利用类型对土壤微量营养元素的影响

土地利用是自然和人类活动相互作用的综合过程,是土壤肥力的主要影响因素,土地利用方式与土壤理化性状的变化有着密切关系<sup>[25-27]</sup>。不同的轮作制度、管理模式、肥料类型等都可能会导致土壤微量营养元素含量的差异<sup>[4]</sup>。为去除上面讨论的成土母质对土壤微量营养元素的影响水平,本小节讨论不同成土母质条件下各土地利用类型对土

壤微量营养元素的影响。由表 6 可以看出,成土母质为风积物条件下,Fe、Mn、Zn 和 Cu 含量均以果园林地最高,其次为耕地,Mo 和 B 含量则以耕地最高,其次为果园林地;成土母质为冲积物条件下,Fe、Mn 和 Cu 含量均以果园林地最高,其次为耕地,Zn、Mo 和 B 含量则以耕地最高;成土母质为冲积洪积物条件下,6 种微量营养元素含量均以耕地最高;成土母质为洪积物条件下,土地利用类型为果园林

表 6 不同成土母质条件下各土地利用类型的表层土壤微量营养元素平均含量/(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 6 Average contents of micronutrients of various land use types under different parent materials conditions in surface soils

| 成土母质<br>Parent materials       | 土地利用类型<br>Land use types | 样本数<br>Samples number | Fe | Mn    | Zn   | Cu   | Mo  | B     |
|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|----|-------|------|------|-----|-------|
| 风积物<br>Aeolian sediment        | 果园林地 Orchard woodland    | 72                    | 27 | 552.2 | 61.7 | 23.0 | 1.4 | 77.6  |
|                                | 未利用地 Unutilized land     | 7                     | 20 | 426.0 | 46.3 | 15.6 | 1.2 | 66.3  |
|                                | 耕地 Cultivated land       | 6                     | 23 | 498.8 | 59.9 | 20.2 | 2.3 | 139.7 |
|                                | 建设用地 Construction land   | 1                     | 19 | 435.0 | 40.0 | 11.3 | 0.7 | 25.8  |
|                                | 草地 Grassland             | 5                     | 19 | 416.6 | 42.1 | 11.8 | 0.9 | 46.3  |
| 冲积物<br>Alluvium                | 果园林地 Orchard woodland    | 17                    | 28 | 574.1 | 57.5 | 26.2 | 0.9 | 50.1  |
|                                | 耕地 Cultivated land       | 1                     | 26 | 538.0 | 66.6 | 24.4 | 1.2 | 53.4  |
|                                | 建设用地 Construction land   | 5                     | 24 | 504.6 | 54.8 | 20.9 | 0.9 | 50.6  |
|                                | 草地 Grassland             | 1                     | 21 | 465.0 | 46.4 | 12.5 | 0.8 | 41.2  |
| 冲洪积物<br>Alluvium and proluvial | 果园林地 Orchard woodland    | 17                    | 26 | 528.0 | 54.4 | 22.8 | 1.0 | 54.1  |
|                                | 未利用地 Unutilized land     | 2                     | 16 | 354.0 | 38.2 | 12.0 | 0.8 | 42.2  |
|                                | 耕地 Cultivated land       | 2                     | 29 | 596.5 | 64.7 | 23.3 | 1.3 | 80.3  |
|                                | 建设用地 Construction land   | 1                     | 14 | 297.0 | 34.7 | 9.9  | 1.0 | 61.7  |
| 洪积物 Proluvial                  | 果园林地 Orchard woodland    | 6                     | 26 | 549.8 | 61.0 | 21.8 | 1.1 | 91.0  |

地。综上所述,不仅在不同成土母质条件下各土地利用类型具有一定程度的变异,同一土地利用类型下各微量营养元素之间也有一定的差别,说明人类活动对不同土地利用类型的土壤具有较为明显的影响。

3 结 论

1)研究区表层土壤中 B 平均含量高于新疆背景值,其余元素平均含量均低于新疆背景值。Fe、Mn、Zn、Cu、Mo 和 B 变异系数介于 18.2%~47.4%,均属于中等变异。

2)研究区表层土壤中 Fe、Zn 和 Cu 元素丰缺程度为较缺乏水平,Mn 元素丰缺程度为中等水平,Mo 和 B 元素丰缺程度为丰富水平。

3)通过半变异函数模型分析可知,Fe、Mn、Zn、Mo 和 B 的块金效应均小于 25%,空间相关性较强,空间变异主要受到自然因素的影响;Cu 的块金效应介于 25%~75%之间,属于中等空间相关,空间变异同时受到人为因素和自然因素的影响。

4)研究区表层土壤中 6 种微量营养元素均表现出明显的空间分布规律。Fe、Mn、Zn 和 Cu 的空间分布格局相似,总体呈现出从研究区四周向中心含量逐渐增大的趋势;Mo 和 B 的空间分布格局相似,总体呈现出从南向北含量逐渐增大的趋势。

5)研究区表层土壤中 Fe、Mn、Zn、Cu 和 B 含量与土壤有机质呈极显著正相关关系,Fe、Mn 和 Cu 含量与 pH 值呈现显著或极显著正相关关系。同时,不同的成土母质、土壤类型和土地利用类型对土壤微量营养元素的含量也有不同程度的影响。

参 考 文 献:

[1] Gupta U C, Kening W U, Liang S.土壤、农作物中及家畜体内的微量营养元素[J].地学前缘,2008,15(5):110-125.

[2] 贺行良,刘昌岭,任宏波,等.青岛崂山茶园土壤微量元素有效量及其影响因素研究[J].土壤通报,2008,39(5):1131-1134.

[3] 汪璇,王成秋,唐将,等.基于地统计学和 GIS 的三峡库区土壤微量营养元素空间变异性研究[J].土壤通报,2009,40(2):359-365.

[4] 张智,任意,鲁剑巍,等.长江中游农田土壤微量养分空间分布特征[J].土壤学报,2016,53(6):1489-1496.

[5] 马晓飞,楚新正.荒漠绿洲过渡带林地开垦对土壤有效态微量元素的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):125-131.

[6] 王雪梅,柴仲平,杨雪峰.荒漠绿洲区不同土地利用方式下土壤养分差异分析[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):91-96.

[7] 阿不力提甫·吾甫尔.若羌县耕地变化及其驱动力分析[D].

乌鲁木齐:新疆大学,2014.

[8] 阿依先木·司马义.退耕还林对农村经济的影响及可持续发展的研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2012.

[9] 比力克孜·司来曼,满苏尔·沙比提.若羌县近 50a 来气候变暖及其对农业生产影响分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(1):161-164.

[10] 叶家瑜,江宝林.区域地球化学勘查样品分析方法[M].北京:地质出版社,2004.

[11] 国家环境保护总局.土壤环境监测技术规范:HJ/T166-2004[S].北京:中国环境科学出版社,2004.

[12] 马啸,左锐,王金生,等.沈阳浑河冲洪积扇土壤的重金属空间分布特征及来源[J].环境科学研究,2014,27(11):1298-1305.

[13] 成杭新,李括,李敏,等.中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J].地学前缘,2014,21(3):265-306.

[14] 刘庆,杜志勇,史衍玺,等.基于 GIS 的山东寿光蔬菜产地土壤重金属空间分布特征[J].农业工程学报,2009,25(10):258-263.

[15] 吴文勇,尹世洋,刘洪禄,等.污灌区土壤重金属空间结构与分布特征[J].农业工程学报,2013,29(4):165-173.

[16] 张小桐,张瑞芳,王红,等.县域土壤有效态微量元素的空间变异特征及影响因素—以徐水县为例[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):74-80.

[17] 刘凯,高磊,彭新华,等.半干旱区科尔沁沙地土壤水分时空特征研究[J].土壤,2015,47(4):765-772.

[18] 中华人民共和国国土资源部.DZ/T0295-2016.土地质量地球化学评价规范[S].北京:中国标准出版社,2016.

[19] 张长春,邵景力,李慈君,等.华北平原地下水生态环境水位研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2003,33(3):323-326,330.

[20] Horton J L, Kolb T E, Hart S C. Physiological Response to Groundwater Depth Varies among Species and with River Flow Regulation [J]. Ecological Applications, 2001, 11(4):1046-1059.

[21] 夏江宝,赵西梅,赵自国,等.不同潜水埋深下土壤水盐运移特征及其交互效应[J].农业工程学报,2015,31(15):93-100.

[22] 国家质量监督检验检疫总局.GB5084-2005.农田灌溉水质标准[S].北京:中国标准出版社,2005.

[23] 王晓杰,孟凡乔,吴文良.内蒙古武川县土壤硒分布特性研究[J].土壤通报,2016,47(3):624-629.

[24] 徐茂.基于地统计学的江苏省环太湖地区土壤肥力质量演变特征研究[D].南京:南京农业大学,2006.

[25] Donnelly S. Land-usePortfolios and the Management of Private Landholdings in South-central Indiana [J]. Regional Environmental Change, 2011, 11(1):97-109.

[26] 张汪寿,李晓秀,黄文江,等.不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J].农业工程学报,2010,26(12):311-318.

[27] Lipsius K, Mooney S J. UsingImage Analysis of Tracer Staining to Examine the Infiltration Patterns in a Water Repellent Contaminated Sandy Soil [J]. Geoderma, 2006, 136(3-4):865-875.