

荒漠绿洲过渡带林地开垦对土壤有效态微量元素的影响

马晓飞^{1,2}, 楚新正^{1,2}

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;

2. 新疆维吾尔自治区重点实验室新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 选择荒漠绿洲过渡带的林地开垦区为研究对象, 运用地统计学和 ArcGis 空间分析工具相结合的方法, 研究了林地开垦后土壤中有效态 Fe、Cu、Zn 和 Mn 含量的空间变异特征和丰缺状况。结果表明: 林地开垦后有效态 Mn 显著缺乏 ($P < 0.05$), 平均值为 $4.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于临界值的土壤占土壤总数的 32.25%, 有效态 Fe 和 Ze 次之, 分别有 21.82% 和 29.36% 的样品低于临界值, 4 种微量元素空间变异强度均 $> 25\%$, 呈较明显的空间变异性; 半方差函数分析中, 有效态 Fe 块金值最大, 有效态 Mn 变程最小, 4 种有效态微量元素块金值与基台值的比值均 $< 25\%$, 表明 4 种有效态微量元素空间依赖性均较强; 在空间结构中, 4 种有效态微量元素呈明显的片状和斑块状分布, 有效态 Cu 主要分布于研究区西南和西北部, 有效态 Zn 和 Fe 主要分布于中部, 有效态 Mn 呈东西方向对称分布且东部含量大于西部; 在有效性评价中, 单项指数 (E_i) 以有效态 Mn 最高, 达 2.83, 综合指数 (E_c) 以有效态 Fe 最高, 达 1.27, 有效态 Cu 的 E_i 值和 E_c 值均较低。

关键词: 土壤微量元素; 荒漠绿洲过渡带; 林地开垦; 空间变异性; 有效性评价

中图分类号: S153.6+1 文献标志码: A

Desert oasis ecotone of forest land tillage effects on soil trace elements

MA Xiao-fei^{1,2}, CHU Xin-zheng^{1,2}

(1. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China;

2. Key Laboratory of lake environment and Resources in arid area of Xinjiang, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

Abstract: Selection of desert oasis ecotone of forest land reclamation area as the research object, using the method of statistical tools and ArcGis spatial analysis of combining research, spatial variability of woodland effective state in soil after reclamation of Fe, Cu, Zn and Mn content and the condition of abundance or deficiency. The results showed that: After the land reclamation, the available Mn was obviously insufficient ($P < 0.05$). The average content was $4.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Soil with the Mn content which was lower than the critical value occupied 32.25% of all the soil. Insufficiency degrees of available Fe and available Ze ranked the second place. Fe contents in 21.82% of samples and Ze contents in 29.36% of samples were lower than critical values. The spatial variation intensities of 4 microelements exceeded 25%, while these microelements showed obvious spatial variability; Analysis of semi variance function, nugget value maximum available Fe, available Mn variable range minimum, 4 kinds of available trace elements nugget value base table value $< 25\%$, showed that 4 kinds of available trace elements spatial dependence are strong; In the space structure, sheet and patchy distribution obviously 4 available trace elements are, available Cu mainly distributed in the study area in southwest and northwest, available Zn and Fe were mainly distributed in the middle available Mn in east-west direction, symmetrically distributed and Eastern content greater than western; According to availability evaluation results, available Mn had the highest single index (E_i), which reached up to 2.83; available Fe had the highest comprehensive index (E_c) which reached up to 1.27; and E_i and E_c values of available Cu were relatively low.

收稿日期: 2015-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(41261046); 新疆师范大学地理学博士点支撑学科开放课题基金项目(XJNU-DL-201501)

作者简介: 马晓飞(1988—), 男, 新疆额敏人, 硕士研究生, 主要从事生态退化和景观地球化学方面的研究。E-mail: 364982725@qq.com。

通信作者: 楚新正(1956—), 男, 教授, 主要从事干旱区景观生态学研究。E-mail: xzchu@sina.cn。

Keywords: soil trace element; desert oasis ecotone; reclamation of forest land; spatial variability; effectiveness evaluation

荒漠绿洲过渡带指荒漠生态系统和绿洲生态系统之间的生态接触带^[1],对阻止沙丘迁移、减缓绿洲风沙危害等具有重要作用,因此也被看作绿洲的重要组成部分。在绿洲演替进程中,荒漠绿洲过渡带成为绿洲风沙响应^[2-4]、水文变化过程^[5]、沙堆演化^[6]最敏感的区域。林地作为荒漠绿洲过渡区主要的土地利用类型,在干旱、半干旱地区生态环境建设中发挥着重要作用,然而,在我国西北干旱区普遍存在着人工绿洲扩张的问题,荒漠绿洲过渡带的天然林地,不断被开垦为农田,导致过渡带林地面积锐减^[7],从而对荒漠、绿洲的生态安全产生很大威胁。

土壤微量元素是相对大量元素而划分的,是植物生态环境因子中重要的组成部分^[8]。其中,存在于土壤中能被植物吸收利用的部分称为有效态微量元素^[9]。土壤有效态微量元素的供应受土壤性质、土壤环境条件等因素的制约,成为植物生长的限制性因素。目前,全球范围内有数万公顷耕地土壤缺乏微量元素^[10],而我国更是比较普遍^[11],尤以干旱区表现最为典型。近年来,土壤微量元素的研究主要集中在森林生态系统、农田生态系统以及植被演替进程^[12-18]等方面,对于土地利用类型遭破坏或干扰下的土壤微量元素动态变化的相关研究还较少,尤其是对荒漠绿洲过渡区域林地开垦处的土壤微量元素变化特征的相关研究则更少。本文以荒漠绿洲过渡带的林地开垦区为研究对象,分析了土地利用类型转变后土壤有效态微量元素(Fe、Mn、Cu、Zn)的变化特征,以期揭示绿洲扩增进程中人为扰动因素与土壤微量元素间的关系,从而为研究区土地修复与可持续发展提供理论依据。

1 研究区概况

新疆甘家湖梭梭林荒漠绿洲过渡带地处甘家湖梭梭林国家级自然保护区,研究区荒漠绿洲过渡带范围为:44°30′~44°36′N,82°44′~82°56′E,面积达122.78 km²,年平均气温6.7℃,无霜期18 d左右,年平均降水量达144 mm,年蒸发量为2 000 mm,属于典型的温带大陆性荒漠气候。

新疆甘家湖梭梭林国家级自然保护区西邻中国第二大沙漠(古尔班通古特沙漠)且与新疆第一大咸水湖——艾比湖相接。该区域拥有着我国生长状况最好、分布最集中的梭梭林,其不仅是我国“三北”防护林体系的组成部分,同时也控制着克可喀斯哈2.0

×10⁵ hm²流沙的移动,抵御着阿拉山口常年肆虐的大风。由于近40年来人类大面积毁林变耕,甘家湖的林地面积不断锐减,已逐渐成为影响天山北麓生态环境及经济发展的重要因素。

2 研究方法

2.1 样品采集和分析

2013年5月在甘家湖梭梭林国家级自然保护区内进行土样采集。其中,在林带内部以及靠近林带且为同时段开垦的两种土地利用类型下分别设立采样点,利用GPS进行定位取土,样点间距大于500 m且小于2 km,每个样地取0~10 cm(表层),10~20 cm(第二层),20~40 cm(第三层),40~60 cm(第四层)的土壤,最终取得584个土样,每个土样质量≥2 kg,所有样品装入样品袋带回实验室。在实验室将样品自然风干,挑出植物根系、石砾等,过2 mm筛进行理化性质分析。土壤样品采用常规方法进行分析^[19]。土壤有效铜、锰、铁、锌用二乙三胺乙酸(DT-PA)浸提,ZL-5100型原子吸收分光光度计进行测定。

2.2 数据分析与处理

采用SPSS 17.0统计软件对土壤微量元素含量进行描述性统计分析,为避免产生比例效应,采用K-S方法对数据进行正态分布检验,最终得出最大值、最小值、平均值等统计信息。

采用GS+9.0软件进行变异函数计算和分析,其中,变异函数参数块金值(C_0)是空间距离为零时变异函数的值;基台值($C+C_0$)是系统最大变异,块金值与基台值的比值 $C_0/(C+C_0)$ 反映了土壤属性的空间相关性程度,比值越大,空间自相关性越强;决定系数(R^2)或残差平方和(RSS)用于判断模型拟合的好坏^[20]。

利用ArcGIS10.0软件对土壤微量元素进行Kriging法和IDW法的最优插值,得到微量元素的空间分布图。其中,Kriging插值法对独立误差进行估值时,具有良好的关联性和精确性。但易受变异函数、待估样点几何性质等影响^[21],当变异函数误差较大时,精确性则明显下降。而IDW在空间插值主要受距离影响,所插值可以通过邻近点的分析从而获得最优值^[22]。

土壤微量元素密度是指单位面积土壤所含微量元素的质量,采用如下计算公式^[8]:

$$STED = 1/10 \sum D_i \times BD_i \times STEC_i \times (1 - V_i)$$

式中,STED为土壤微量元素密度($g \cdot m^{-2}$); D_i 为第*i*层土壤厚度(cm); BD_i 为第*i*层土壤容重($g \cdot cm^{-3}$); $STEC_i$ 为第*i*层土壤微量元素的含量($g \cdot kg^{-1}$); V_i 为 $> 2 mm$ 土壤颗粒质量分数(%)。

土壤微量元素有效性评价采用单项指数(E_i)和综合指数(E_c)相结合的方法^[23],先计算各种微量元素有效性指数,再采用“均根法”计算综合有效性指数,计算公式如下:

$$E_i = \frac{c_i}{s_i}, E_c = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2}$$

式中, c_i 为实际测定的第*i*种土壤有效态微量元素密度($g \cdot m^{-2}$); s_i 为第*i*种土壤有效态微量元素密度的临界值($g \cdot m^{-2}$), E_i 、 E_c 分别为单项指数和综合指数。

3 结果与分析

3.1 土壤微量元素有效态含量的总体特征

研究区荒漠绿洲过渡带4种土壤微量元素有效态描述性统计结果见表1。从表1可以看出,4种微量元素有效态含量最大值和最小值变幅的大小依次

为: $Mn > Fe > Zn > Cu$ 。根据新疆农科院土壤肥料研究所设定的临界值指标^[23],从中可以看出,有效态Mn的平均值为 $4.24 mg \cdot kg^{-1}$,低于临界值的土壤数占总土壤数的32.25%。除此之外,有效态Fe和有效态Zn的平均值均大于临界值,但仍有21.82%和29.36%的样品处于临界值以下。有效态Cu均值明显大于临界值,且所有样品均处于临界值以上。可见,林地开垦后对土壤中微量养分的影响以有效态Mn表现最为显著,部分采样点有效态Fe和有效态Zn的缺失也需要引起重视。

变异系数在0~15%之间的为小变异,在16%~35%之间为中等变异,大于36%的为高度变异^[17]。从表1可以看出,除有效态Mn表现为中等变异外,其余3种有效态元素均表现为高度变异。说明这4种微量元素有效态含量的分布存在较为明显的空间变异性。

偏度是表示数据分布偏斜方向和程度的度量,峰度是统计数据分布陡峭程度的度量,偏度和峰度值等于或者接近0,数据服从正态分布^[24]。从表1可见,只有有效态Cu的偏度和峰度较接近于0,其余3种有效态微量元素均不接近于0。说明只有有效态Cu呈正态分布。

表1 研究区土壤微量元素有效态含量的统计特征

Table 1 Statistical characteristic of soil available trace elements contents in the study area

微量元素 Soil trace elements	最小值 Min. /($mg \cdot kg^{-1}$)	最大值 Max. /($mg \cdot kg^{-1}$)	平均值 Mean /($mg \cdot kg^{-1}$)	标准差 SD /($mg \cdot kg^{-1}$)	偏度 Skew	峰度 Kurt	临界值 ^[23] Threshold /($mg \cdot kg^{-1}$)	临界值以下比例 Below threshold of proportion/%	变异系数 CV /%
有效 Fe Available Fe	4.30	25.10	8.85	3.98	1.07	1.53	4.50	21.82	45.68
有效 Mn Available Mn	1.80	17.20	4.24	1.79	4.50	26.58	5.00	32.25	42.32
有效 Cu Available Cu	0.88	2.90	1.58	0.39	-0.17	-0.91	0.20	0	25.69
有效 Zn Available Zn	0.36	1.50	0.50	0.21	3.01	9.15	0.50	29.36	42.85

3.2 土壤微量元素有效态含量的空间结构

运用半方差函数模型分析了4种土壤微量元素有效态含量的空间变异特征。结果显示(表2),4种有效态微量元素的理论模型能够较好地符合高斯模型、指数模型和球状模型,4种有效态微量元素的块金值(C_0)均较小,以有效Zn最为典型,为0.0092。由于块金值表示随机部分的异质性,指由实验误差和小于实验取样尺度引起的变异,变异的大小由块金值的大小决定,较大的块金值表明较小尺度上的某种过程不容忽视^[25]。因此,在4种有效态微量元素的块金值比较中有效Fe的块金值最大,为0.32,表明在小尺度范围内,土壤中有效态Fe的变异过程仍然相对较强,不容忽视。由于变程的大小反映区域化变量自相关范围的尺度,在变程范围内,变量具

有空间自相关性,反之则不存在^[26]。通过变程的分析结果可以看出,有效Mn的变程最小,表明它的空间变异性较强,空间分布特征差异性 or 复杂性较明显。

块金值与基台值的比值 $C_0/(C + C_0)$ 可以反映系统变量的空间自相关程度^[19]。当块金值与基台值的比值 $< 25\%$ 时,表明变量具有显著的空间自相关性;当块金值与基台值的比值介于 25% 和 75% 之间,表明变量具有中等程度的空间自相关性;当块金值与基台值的比值 $> 75\%$ 时,表明变量具有较弱的空间自相关性^[27]。4种有效态土壤微量元素块金值与基台值的比值均 $< 25\%$,表明研究区4种土壤有效态微量元素空间依赖性都较强,其空间分布主要受结构性因子(地貌、土壤类型、气候等)影响所致。

表 2 土壤微量元素有效态含量空间变异的半方差参数

Table 2 Parameters of the semi-variogram model on soil available trace elements

微量元素 Soil trace elements	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	块金值/基台值 ($C_0/C_0 + C$)	变程 Range/m	理论模型 Model	决定系数 R^2	残差 RSS
有效 Fe Available Fe	0.3200	15.6400	2.04	1820	Spherical	0.121	2.320
有效 Mn Available Mn	0.0100	0.0980	10.20	928	Gaussian	0.215	0.227
有效 Cu Available Cu	0.0169	0.1508	11.21	1920	Exponential	0.057	2.17×10^{-2}
有效 Zn Available Zn	0.0092	0.0431	21.35	1160	Gaussian	0.010	5.87×10^{-3}

3.3 土壤微量元素有效态含量的空间格局

选择上述最优半方差函数理论模型及相关参

数,运用空间插值的方法绘制空间分布图(见图 1),并采用交叉验证法对所用插值方法进行精度检验。

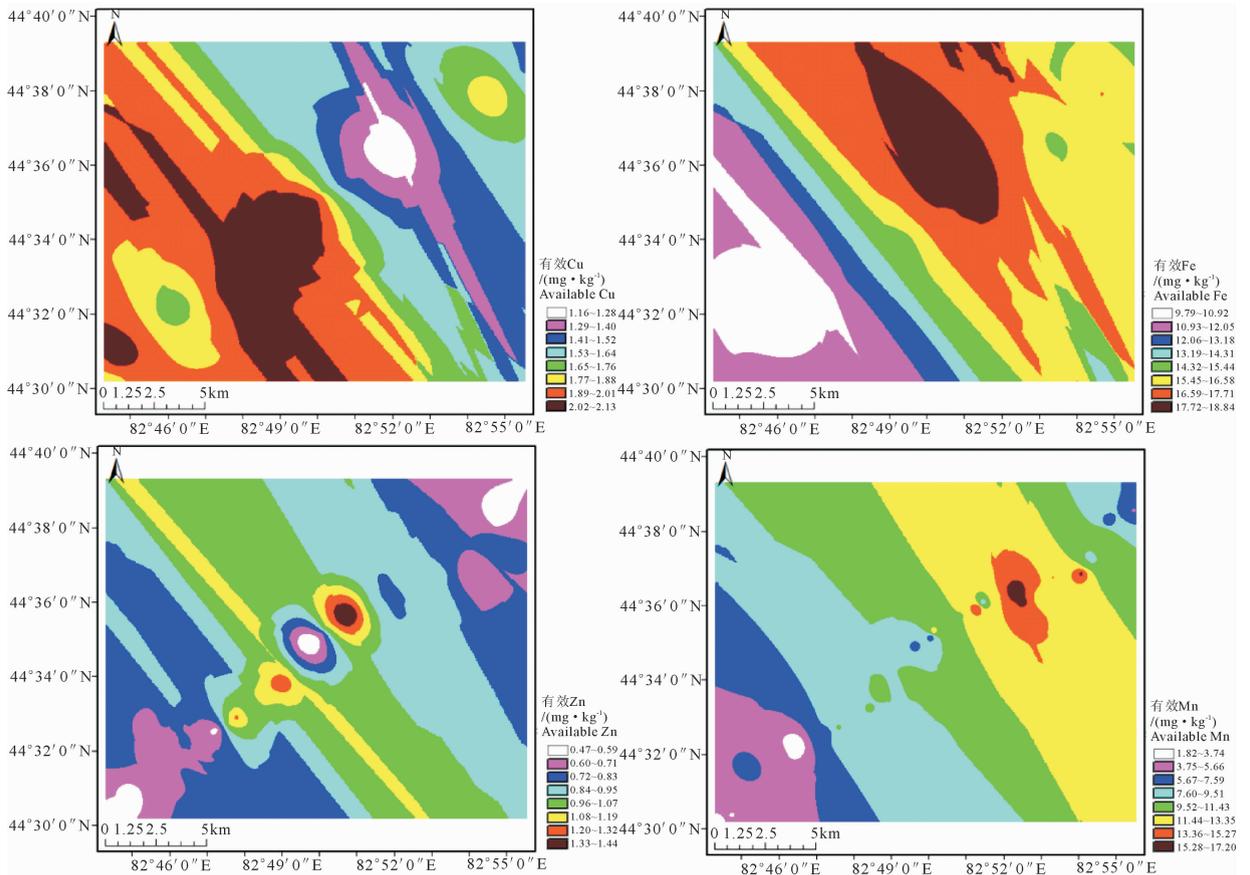


图 1 土壤有效态微量元素的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of soil available trace elements

通过对 4 种土壤微量元素 Kriging 和反距离权重(IDW)的插值精度检验(见表 3),表明有效 Cu 在两种插值方法中的精度均较高, RMSE 分别为 23.5%和 25.8%,有效 Fe、有效 Zn 的精度其次,有效 Mn 的精度最弱, RMSE 分别为 58.1%和 55.2%。因此,对有效 Cu、有效 Fe 和有效 Zn 采用 Kiging 插值法;为避免插值过程中随机性因素对插值的影响^[22],对有效 Mn 采用反距离权重(IDW)法进行插值,得出研究区有效态微量元素空间分布图(见图 1)。

从空间分布图来看,土壤有效态微量元素的含量空间分布呈典型的条带状和斑块状格局。其中,有效态 Fe 较高值主要分布在研究区中部偏东南方向,与此相对应的是中部偏西北方向有效态 Fe 含量相对较低,且出现一小范围的土壤有效态 Fe“贫瘠点”。有效态 Cu 的空间分布图主要以中低值分布,斑点状的高含量值主要分布在研究区西南、西北方向,且梯度性差异显著,这主要是因为土壤中的铜主要源自土壤母质,有近 70%的有效态 Cu 存在于黏粒物质中^[28],研究区大面积林地开垦改变了土壤原

有的机械组成,造成有效态 Cu 含量普遍较低。有效态 Zn 的空间分布大体与有效态 Fe 相近,只是较低值区域较有效态 Fe 加大加长。有效态 Mn 的含

量空间分布上东部大于西部,较大值和较小值呈东南、西北对称分布,最小值分布于中部偏南区域,处于缺乏状态。

表3 土壤微量元素有效含量插值精度检验

Table 3 Trace elements contents by interpolation accuracy test

微量元素 Soil trace elements	实测均值 Measured mean/(mg·kg ⁻¹)	Kriging 预测均值 Kriging forecast mean/(mg·kg ⁻¹)	Kriging 均误差 Kriging average error	Kriging RMSE /%	IDW 预测均值 IDW forecast mean/(mg·kg ⁻¹)	IDW 均误差 IDW average error	IDW RMSE /%
有效 Fe Available Fe	8.85	8.52	0.35	32.1	8.55	0.44	34.5
有效 Mn Available Mn	4.24	3.63	0.57	58.1	3.95	0.49	55.2
有效 Cu Available Cu	1.58	1.28	0.39	23.5	1.15	0.44	25.8
有效 Zn Available Zn	0.50	0.62	0.15	32.3	0.71	0.21	35.2

3.4 土壤微量元素有效态含量变化分析与评价

新疆农业科学研究院土壤肥料研究所根据以往在新疆各地州所做的肥料实验结果提出了适宜于新疆农田土壤养分含量评价的指标^[23],本文以 DTPA 提取的土壤微量元素含量(表1)作为评价值,对荒漠绿洲过渡带土壤有效态微量元素进行丰缺评价(见表4)。由于在实际应用过程中普遍存在以土壤表层微量元素含量代替整体的现象;而在不同土层中微量元素存在着表层土壤与下层土壤丰缺不一致的现象^[29-30]。因此,提出 STED 的概念可以更加系

统地计算有效态微量元素的丰缺性。由结果可知,研究区土壤中有有效态 Fe 含量较丰富,有效态含量为 8.85 mg·kg⁻¹,处于中等偏上水平,有效性指数 < 1,相对较低;有效态 Mn 的含量较低,为 4.24 mg·kg⁻¹,处于较低水平,其有效性指数较高,为 2.83;有效态 Cu 含量较为丰富,为 1.58 mg·kg⁻¹,处于中等水平,有效性指数较低;有效态 Zn 含量较低,为 0.5 mg·kg⁻¹,处于较低水平,有效性指数较低,为 0.12。研究区土壤有效性综合指数以有效态 Fe 最高,其次为有效态 Zn,有效态 Cu 最低,仅为 0.98。

表4 新疆农田微量元素的分级指标及研究区土壤微量元素密度、有效性指数比较

Table 4 Classification index for trace element in Xinjiang farmland soil

微量元素 Soil trace elements	低 Low /(mg·kg ⁻¹)	中等 Medium /(mg·kg ⁻¹)	高 High /(mg·kg ⁻¹)	临界值 ^[23] Threshold/(mg·kg ⁻¹)	STED /(g·m ⁻²)	E _i	E _c
有效 Fe Available Fe	<5	5~10	>10	4.50	8.81 ± 0.09a	0.94	1.27
有效 Mn Available Mn	<7	7~10	>10	5.00	4.17 ± 0.14a	2.83	1.02
有效 Cu Available Cu	<1	1~3	>3	0.20	1.39 ± 0.25b	0.42	0.98
有效 Zn Available Zn	<1	1~2	>2	0.50	0.42 ± 0.07a	0.12	1.14

注:同列不同字母代表 0.05 水平下差异显著。

Note: Different letters represents significant difference at 0.05 level.

4 讨论

4.1 林地与开垦林地间有效态微量元素含量变化

土壤微量元素的含量是自然和人类活动综合作用的结果^[9]。本研究中土壤有效态 Mn 的含量变化显著(图2),分别较临界值和林地降低了 17.9%和 70.5%。这与李海峰等^[23]对绿洲农田土壤微量元素有效态含量的特征变化研究结果不同,其认为绿洲边缘土壤除 Mn 外,均缺乏 Fe、Cu 和 Zn,并指出其研究区暂时不会出现缺 Mn 的威胁。造成这种差异,一方面可能由于本文的研究区为刚开垦不久的农田,耕作周期较短,未见施肥状况或施肥力度较小;另一方面对刚开垦农田,其翻耕力度和频率往往较大,而翻耕会增大土壤的通透性,使得氧化还原电位升

高,降低了 Mn 的有效性^[31]。因此,在刚开垦不久的荒漠绿洲过渡带林地中施加 Mn 肥是有必要的。

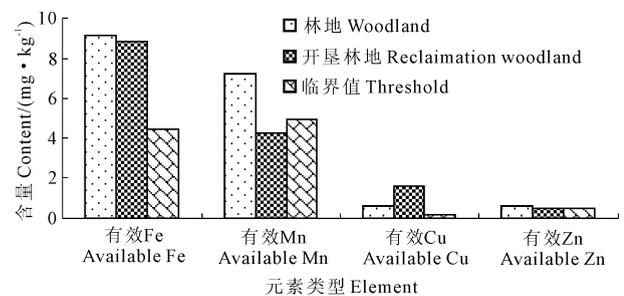


图2 林地与开垦林地间有效态微量元素含量变化

Fig.2 Changes of available trace elements contents between woodlands and reclaimed forest lands

草地或林地致使荒漠绿洲过渡带生态系统发生变化,农作物取代森林植被,致使初级生产固定的 Fe、Zn 等在土壤中的分配比例下降,从而降低了土壤中有有效态微量元素的含量^[8]。本研究中,有效态 Fe、Zn 均减少,这与董国涛等^[9]对新疆三工河流域绿洲土壤微量元素的有效态含量的研究结果相一致。然而,在本研究有效态 Zn 减少幅度相对较小,这可能由于所属研究区产业结构类型以棉花种植为主导,而 Zn 肥又对棉花的增产具有显著的作用^[32]。因此,研究区人为耕作中可能施加的少量 Zn 肥,会降低有效态 Zn 的减小幅度。

土壤微量元素在促进植物生长代谢、提高产量及品质方面具有重要意义^[33],微量元素 Cu 在植物生长中具有不可替代的作用。本研究中,开垦林地的有效态 Cu 含量高于临界值,甚至高于林地。Kopittke 等^[34]认为,铜素在土壤中的有效性与植物自身紧密相关,当含量较高时,则抑制植被生长发育,而在长期的生境下植物又会通过自身调节作用,减少对铜素的吸收。因此,在植被演替过程中,土壤有效态 Cu 含量降低是植物一种积极适应环境的方式。在本研究中,由于林地开垦打破了植物自身的适应机理和进程,对土壤中铜素的整合作用减弱,从而使得林地开垦区土壤有效态 Cu 含量提高。

4.2 荒漠绿洲过渡带土壤微量元素的空间分析

在土壤中微量元素自然含量高低首先取决于成土母质的来源,其次受到生物聚集和土壤自身聚集作用的影响,从而使得土壤矿质元素、机械组成、理化性质等发生变化^[35]。荒漠绿洲过渡带是一个生态环境脆弱区,由于高几率的被替代性、弱的抗干扰性和低概率的自我恢复性,致使绿洲荒漠过渡带成为最脆弱、最不稳定的生态系统类型之一^[36],同时也是干旱区荒漠化进程与绿洲化进程对立斗争的最敏感部位^[37]。甘家湖荒漠绿洲过渡带,是新疆天山北麓的典型区域。该区域受艾比湖湿地和古尔班通古特沙漠的交汇影响显著。近年来,一方面在自然因素下(如降水等),使得艾比湖水域伸缩性频繁,致使甘家湖荒漠绿洲过渡带西侧土壤理化性质变化显著;另一方面受人为活动的影响(如开垦、放牧、毁林等),使得古尔班通古特沙漠扩增力度加强,对研究区土壤表层扰动性增大。

Cu^{2+} 适宜在酸性环境中存在^[38],研究区南侧整体有效态 Cu 的含量普遍偏高。这可能由于艾比湖水域范围的延伸,引起研究区地下水位的上升,从而

降低了土壤的盐碱性,致使 pH 值降低,而 pH 值的降低就会导致 Cu^{2+} 沉淀。有效态 Fe 和 Mn,在研究区范围的西侧和西北侧含量降低,这可能由于林地开垦致使地表裸露,加大了相同时间内土壤温度的提升,从而致使部分土壤微量元素含量较高,这与刘洪来等^[8]研究认为,土壤温度的上升引起盐分向地表垂直运动加快,提高了表层土壤盐分含量和 pH 值,而土壤 pH 值的升高在一定程度上会促进有效态微量元素在土壤中的积累结果相一致。

5 结 论

1) 研究区林地开垦后土壤微量元素中有效态 Mn 变幅最大,含量低于临界值土壤数占总土壤数的 32.25%。变异系数变化中,4 种有效态微量元素变异系数均较高,说明其有效态含量的分布存在较好的空间异质性。半方差分析中,有效态 Fe 的块金值最大,表明在小尺度范围内,有效态 Fe 的变异过程仍然相对较强;有效态 Mn 的变程最小,表明有效态 Mn 的空间分布特征的差异性 or 复杂性较其他 3 种有效态微量元素显著;4 种有效态微量元素的块金值与基台值的比值均 $< 25\%$,从而说明研究区 4 种有效态微量元素的空间依赖性均较强。

2) 在空间结构分布中,有效态 Cu 主要集中分布于研究区西南和西北部,有效态 Zn 和有效态 Fe 主要分布于中部,有效态 Mn 在空间结构分布中呈对称分布且东部大于西部。通过对研究区 4 种主要土壤微量元素的有效性进行评价,从中看出,有效态 Fe 和有效态 Cu 相对较好,处于中等或中等偏上水平,而有效态 Mn 和有效态 Zn 则处于较低水平。

参 考 文 献:

- [1] 解婷婷,苏培玺,周紫娟,等.荒漠绿洲过渡带沙拐枣种群结构及动态特征[J].生态学报,2014,34(15):4272-4279.
- [2] 韩德林.中国绿洲研究之进展[J].地理科学,1999,19(4):313-319.
- [3] 李启森,赵文智,马长春.干旱区黑河流域山地-绿洲-荒漠草畜耦合及其应用研究——以黑河流域中游段的临泽示范区研究为例[J].草业学报,2004,13(4):13-20.
- [4] 王永兴,张小雷,阚耀平.绿洲地域系统及其演变规律的初步研究[J].干旱区地理,1999,22(1):62-68.
- [5] Fang C L, Bao C, Huang J C. Management implications to water resources constraint force on socio-economic system in rapid urbanization: A case study of the Hexi Corridor, NW China[J]. Water Resour Manag, 2007, 21: 1613-1633.
- [6] 彭 飞,王 涛,刘立超,等.民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙

- 堆演化阶段及其空间格局[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 593-599.
- [7] 赵文智, 常学礼. 河西走廊水文过程变化对荒漠绿洲过渡带 NDVI 的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(7): 1561-1571.
- [8] 刘洪来, 杨丰, 黄顶, 等. 农牧交错带草地开垦对土壤有效态微量元素的影响及评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 155-160.
- [9] 董国涛, 张爱娟, 罗格平, 等. 三工河流域绿洲土壤微量元素有效含量特征分析[J]. 土壤, 2009, 41(5): 726-732.
- [10] White J G, Zasoski R J. Mapping soil micronutrients[J]. Field Crops Research, 1999, 60: 11-26.
- [11] 刘雪云, 李晓忠, 周志宇, 等. 不同开垦年限西藏草地中量、微量元素含量变化特点[J]. 中国草地学报, 2010, 32(6): 70-75.
- [12] Ballard T M. Impacts of forest management on northern forest soils[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 133: 37-42.
- [13] 李跃林, 彭少麟, 李志辉. 桉树人工林地土壤酶活性与微量元素含量的关系[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 345-348.
- [14] 漆良华, 张旭东, 彭镇华, 等. 不同植被恢复模式下中亚热带黄壤坡地土壤微量元素效应[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 735-740.
- [15] 魏孝荣, 郝明德, 邵明安. 黄土高原旱地长期种植作物对土壤微量元素形态和有效性的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3196-3203.
- [16] Cattani I, Fragoulis G, Boccelli R, et al. Copper bioavailability in the rhizosphere of maize (*Zea mays* L.) grown in two Italian soils[J]. Chemosphere, 2006, 64(11): 19720-1979.
- [17] 李鹏, 李占斌, 张晓霞, 等. 复垦土地土壤有效微量元素分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 126-130.
- [18] Chopin E, Marin B, Mkoungafoko R, et al. Factors affecting distribution and mobility of trace elements (Cu, Pb, Zn) in a perennial grapevine (*Vitis vinifera* L.) in the champagne region of France[J]. Environment Pollution, 2008, 156(3): 1092-1098.
- [19] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] Li C J, Li Y, Ma J, et al. Spatial heterogeneity of soil chemical properties between *Haloxylon persicum* and *Haloxylon ammodendron* populations[J]. Journal of Arid Land, 2010, 2(4): 257-265.
- [21] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 35-149.
- [22] 李晓燕, 张树文, 王宗明, 等. 吉林省德惠市土壤特性空间变异特征与格局[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 989-997.
- [23] 李海峰, 曾凡江, 桂东伟, 等. 不同利用强度下绿洲农田土壤微量元素有效含量特征[J]. 生态学报, 2012, 32(6): 1803-1810.
- [24] 年佳乐, 李跃进, 景宇鹏, 等. 盐渍土有效态微量元素含量的空间变异特征研究[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(4): 163-167.
- [25] 王丽霞, 段文标, 陈立新, 等. 红松阔叶混交林林隙大小对土壤水分空间异质性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 17-24.
- [26] Yost R S, Uehara G, Fox R L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. II. Kriging[J]. Soil Sci Am J, 1982, 46: 1033-1037.
- [27] 武小刚, 郭晋平, 田旭平, 等. 芦芽山亚高山草甸、云杉林土壤有机碳、全氮含量的小尺度空间异质性[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7756-7764.
- [28] 杨娟, 王冬艳. 吉林省土壤中有效锰、铜、钼和锌含量的时空变化[J]. 世界地质, 2003, 22(4): 392-395.
- [29] 王军广, 李晨晨, 赵志忠, 等. 海南岛砖红壤中微量元素含量及其分布特征研究[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2010, 23(2): 188-192.
- [30] 池红杏. 洛川不同土地利用方式下土壤微量元素分布研究[J]. 地下水, 2011, 33(6): 136-138.
- [31] 魏孝荣, 邵明安, 张兴昌, 等. 黄土沟壑区小流域不同地形条件下土壤锰的形态分布及其有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 439-444.
- [32] 周自默. 锌肥·硼肥对棉花的增产效果[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(12): 2788-2788.
- [33] 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.
- [34] Kopittke P M, Menzies N W. Effect of Mn deficiency and legume inoculation on rhizosphere pH in highly alkaline soils[J]. Plant and Soil, 2004, 262(1): 13-21.
- [35] 钱亦兵, 吴兆宁, 张立远, 等. 古尔班通古特沙漠风沙土微量元素对植被格局的影响[J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1100-1108.
- [36] 贾宝全, 闫顺. 绿洲—荒漠生态系统交错带环境演变过程初步研究——以新疆吐鲁番盆地为例[J]. 干旱区资源与环境, 1995, 9(3): 58-64.
- [37] 卢玲, 程国栋, 李新. 黑河流域中游地区景观变化研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 68-74.
- [38] 汪洪, 刘荣乐, 金继运. 土层水分非均匀供应下施锌对玉米植株中 Ca、Fe、Mn、Cu 吸收积累的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 1-7.