

陇中旱区农田土壤微量元素特征及其对绿肥休耕的响应

宋淑钧^{1,2}, 崔小茹³, 陈其鲜³, 陈雄⁴, 杨荣¹

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院临泽内陆河流域研究站,兰州 730000;2.中国科学院大学,北京 100049;
3.甘肃省农业技术推广总站,兰州 730000;4.定西市安定区农业技术推广中心,甘肃 定西 743000)

摘要: 研究土壤微量元素对绿肥休耕的响应,为大面积区域农田土壤养分管理和农业生产提供参考。基于陇中旱区 3 年多点位监测数据,选择土壤有效铁、有效锰、有效铜、有效锌、有效钼和有效硼等 6 项指标,对比分析休耕种植绿肥前后土壤微量元素差异。结果表明:(1)与基础土壤相比,休耕 3 年后土壤有效锰、有效铜和有效锌含量分别显著增加 18.8%,22.5%,14.3% ($p < 0.05$);有效铁和有效硼含量均显著降低 ($p < 0.05$),有效钼无显著变化。(2)回归分析表明,有效铁、有效锰和有效铜的变化幅度与休耕前微量元素基础含量均呈负线性关系,而有效锌和有效钼均呈负对数关系 ($p < 0.05$),且对有效锰、有效铜、有效锌和有效钼的基础含量分别小于 8.0,0.9,0.3,0.06 mg/kg 的农田土壤有显著提高效果;有效铁、有效锰和有效铜变化幅度与休耕前土壤有机质和全氮基础养分含量之间均呈显著负线性关系 ($p < 0.05$);有效铁、有效锰、有效铜和有效锌变化幅度与休耕前土壤 pH 之间均呈显著正线性关系 ($p < 0.05$)。(3)进一步对休耕后土壤微量元素和常量元素相关分析表明,休耕后有效铁、有效锰和有效锌均与土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾存在显著正相关关系;除有效钼,其他 5 种微量元素与土壤 pH 之间均呈显著负相关。综上所述,休耕种植绿肥可不同程度地提高陇中旱农区土壤有效锰、有效铜和有效锌含量,尤其可显著改善土壤缺锰状况,且该模式对土壤养分基础含量较低和偏碱性土壤提高微量元素含量效果更显著。

关键词: 休耕; 农田土壤; 微量元素; 陇中旱农区

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)06-0268-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.034

Characteristics of Soil Trace Elements in the Dryland Farming Area of Central Gansu and Their Responses to Green Manure Fallow

SONG Shujun^{1,2}, CUI Xiaoru³, CHEN Qixian³, CHEN Xiong⁴, YANG Rong¹

(1.Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of

Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 2.University of

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3.Gansu General Station of Agrotechnology Extension,

Lanzhou 730000; 4.Dingxi City Anding District Center of Agricultural Technology Extension, Dingxi, Gansu 743000)

Abstract: The responses of soil trace elements to green manure fallow were investigated to provide reference for soil nutrient management and agricultural production in the large region of farmland. Based on the three-year multi-point monitoring data in the dryland farming area of central Gansu, six indexes of soil trace elements, including available Fe, available Mn, available Cu, available Zn, available Mo, and available B, were selected to compare and analyze the differences of soil trace elements before and after fallow planting of green manure. The results showed that: (1) Compared with the basic soil, after three years of fallow, the contents of available Mn, available Cu, and available Zn in soil were significantly increased by 18.8%, 22.5%, 14.3%, respectively ($p < 0.05$). The contents of available Fe and available B showed significant decreasing trends ($p < 0.05$), while available Mo did not change significantly. (2) Regression analysis showed that the magnitude of variation of available Fe, available Mn and available Cu were all negatively linearly related to the basal content of trace elements before fallow, while effective Zn and effective Mo were

收稿日期:2023-05-07

资助项目:甘肃省旱作区耕地休耕养地技术试验研究与示范项目(GNCX-2016-1);农业农村部“耕地轮作休耕制度试点”项目;国家生态科学数据中心开放基金项目(NESDC20210103)

第一作者:宋淑钧(2001—),女,山西忻州人,硕士研究生,主要从事寒旱区水土资源研究。E-mail:songshujun@nieer.ac.cn

通信作者:杨荣(1979—),男,甘肃武威人,研究员,博士,博士生导师,主要从事农业生态学研究。E-mail:yangrong@lzb.ac.cn

all negatively logarithmic ($p < 0.05$), and had a significant enhancement effect on agricultural soils with basal content of available Mn, available Cu, available Zn, and available Mo of less than 8.0, 0.9, 0.3, 0.06 mg/kg, respectively. There were significant negative linear correlations ($p < 0.05$) between the magnitude of changes in available Fe, Mn, Cu and the pre-fallow basic nutrient contents of soil organic matter and total nitrogen. (3) Further correlation analysis of trace elements and macronutrients in the soil after fallowing showed that available Fe, Mn, and Zn were significantly positively correlated with soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus and available potassium. Except for available Mo, the other five trace elements were significantly negatively correlated with soil pH. In conclusion, the implementation of fallow mode of green manure planting can improve the contents of available Mn, Cu, and Zn in the dryland farming area of central Gansu to some extent, particularly good for soils of Mn-deficient, and it is more effective for soils with low basic soil nutrient content and alkaline soils.

Keywords: fallow; farmland soil; trace element; dryland farming area of central Gansu

土壤微量元素是土壤重要组成部分,是表征土壤质量的重要因子^[1],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^[2]。尽管作物对微量元素的需要量很少,但在作物生长发育过程中微量元素起着不可或缺的作用。微量元素不仅影响作物的生长发育、产量及农作物品质^[3],也在一定程度上影响到人类的健康^[4-5]。因此,关于微量元素在土壤中的含量、形态分布和有效性的研究十分重要。大量研究^[6-7]表明,土壤中有有效态微量元素含量受到成土母质、气候、地形等自然环境因素和耕作制度、施肥模式、种植作物类型等人为了的土地管理与利用方式共同影响,通过人为的农学措施改变土壤微量元素的含量及有效性被认为是一种可持续的、安全的和经济的方案^[8]。因此,研究农田管理措施对土壤微量元素的影响对维持土壤微量元素肥力平衡和充分发挥微量元素在农业生产中的作用有重要意义。

近年来,关于农田管理措施对土壤微量元素影响的研究主要集中在不同施肥模式对土壤微量元素含量的影响^[9-10]、开垦复垦对土壤微量元素的影响^[11]、不同耕作种植方式对土壤微量元素含量的影响^[12-13]等方面。而耕作种植方式是人类干预土壤自然活动、影响土壤肥力变化的一种普遍、直接和深刻的土地利用方式,李龙等^[13]研究发现,黄土高原地区粮草轮作系统中土壤有效态微量元素的含量高于粮豆轮作系统。并且已有许多研究^[14-15]表明,休耕是改良土壤、培肥地力和实现土地用养结合之功效的种植模式,为此国内外已开展较多休耕试点项目的相关研究。关于休耕模式的研究^[16]表明,在不同地域条件下推行适宜的休耕模式,如冬耕晒垡、种植绿肥和增肥培肥等模式。其中通过种植绿肥等养地作物来实现休耕恢复地力,做到休而不荒、休而不废,是休耕模式中较优化的措施之一,高飞等^[17]研究发现,甘肃省东北部

严重干旱区以及河西土壤沙化、盐渍化严重等地区连续实施 3 年休耕种植绿肥后,有效铜、有效锌等微量元素呈增加趋势,土壤肥力得到初步恢复。但以上研究多集中在小区域点尺度内,对于大范围推广实施应用具有一定局限性。

陇中旱区是以种植马铃薯和玉米为主的典型旱作雨养农业区,近年来,由于马铃薯多年连作,加之地力培肥不当,造成农田土壤质量下降,从而影响农作物生长及品质。为促使该区域土壤地力得以提升,进一步保障区域农业生产可持续发展,在该区域实施“甘肃省旱作区耕地休耕养地技术试验研究与示范”和农业农村部“耕地轮作休耕制度试点”等一系列项目。通过项目的实施积累大量监测数据,可用于休耕对土壤质量改善影响的评价。其中对土壤微量元素多点位监测数据的分析能够补充区域种植绿肥休耕对土壤微量元素研究的不足,以探明陇中旱区农田土壤大面积推广该休耕模式的适用性。鉴于此,以陇中旱农区为研究对象,基于 2017—2019 连续 3 年项目监测数据,分析陇中旱区农田土壤微量元素对绿肥休耕的响应,以期为区域定量评价土壤微量元素含量变化和科学有效地管理农田土壤微量元素提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在甘肃省定西市安定区北部的石泉、青岚山、葛家岔、称钩驿、岷口、鲁家沟、白碌等 7 个乡镇($35^{\circ}17' - 36^{\circ}02'N, 104^{\circ}12' - 105^{\circ}01'E$),位于陇中旱农黄土梁峁沟壑区,海拔 1 700~2 580 m。该区属于典型的温带大陆性气候,年平均气温为 6.3 $^{\circ}C$,多年平均降水量 400 mm,无霜期 130 天左右。土壤类型主要分为黑垆土、灰钙土、黄绵土和潮土。2017 年土壤耕层(0—20 cm)有机质含量为 5.48~18.87 g/kg,有机质和全氮平均含量分别为 10.94, 0.74 g/kg;速效钾和速效磷平均含量分别为 167.63, 11.97 mg/kg;土壤 pH 为

8.23~9.13,平均值为 8.68,土壤呈碱性。

1.2 数据来源与监测方案

数据来自“甘肃省旱作区耕地休耕养地技术试验研究与示范”和农业农村部“耕地轮作休耕制度试点”项目 2017—2019 年连续 3 年土壤微量元素监测数据。该项目旨在全面掌握试点区域耕地质量现状及变化趋势,科学评价耕地休耕对农田土壤养分及微量元素的影响。为避免单一监测点不具代表性,该试点项目设计为多点位对比监测,研究区实施面积为 27.75 km²,平均 66.67 hm²耕地设立 1 个固定监测点,每个监测点面积 2 000 m²左右,共设置 41 个监测点。每个监测点设休耕处理,即以绿肥种植替代常规农作物种植,绿肥选择毛苕子和箭筈豌豆混播,其每 666.67 m²播种量分别为 1.5,5.0 kg,绿肥播种前及时翻耕,每年 4 月上旬至 5 月中旬适期播种,盛花期 7 月中旬深翻还田。

在建立的所有监测点内,按照“随机”“等量”和“多点混合”原则,在 2017 年 3 月下旬至 4 月上旬完成休耕前土壤样品的采集($n=41$),在 2019 年种植绿肥休耕结束后采集耕层(0—20 cm)的土壤样品($n=41$)。土壤样品测定依托甘肃省有色金属地质勘探局兰州矿产勘查院中心实验室,采用常规分析方法^[18-19]对有效铁、有效锰、有效铜、有效锌、有效钼和有效硼等 6 项微量元素指标进行分析。土壤有效铁、有效锰、有效铜、有效锌采用二乙三胺五乙酸(DTPA)浸提—电感耦合等离子体光谱法;土壤有效硼采用沸水回流浸提,电感耦合等离子体光谱法;土壤有效钼采用草酸—草酸铵缓冲溶液浸提,电感耦合等离子体质谱法。

1.3 数据处理

对土壤微量元素数据进行描述性统计和正态分布检验。采用 t 检验比较绿肥休耕前后土壤微量元素的差异显著性,其中对服从正态分布的指标进行配对样本 t 检验(paired-samples t -test),不服从正态分布的指标进行非参数检验中配对样本威尔科克森符号秩检验(wilcoxon signed rank test),显著性水平以 $p<0.05$ 表示。对各土壤微量元素指标按照休耕前后明显增加、基本不变和明显降低进行变幅频率统计,采用回归分析法分析土壤微量元素休耕前后的变化率[变化率=(休耕后微量元素含量—休耕前微量元素含量)/休耕前微量元素含量 $\times 100\%$]和基础养分之间的变化规律,并利用 Pearson 相关系数及双尾检验对土壤常量养分与土壤微量元素进行相关性分析。采用 Microsoft Excel 2019、SPSS 26.0 和 Origin 2021 软件进行数据处理、统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 土壤微量元素含量描述性统计分析

对 2017 年休耕前监测点及 2019 年休耕后所有

监测点土壤微量元素含量进行描述性统计(表 1)。结果表明,休耕前后所有土壤微量元素的变异系数为 11.07%~81.04%,均处于中等变异程度。变异系数的大小在一定水平上反映数据的离散程度,其中有效锌、硫、钼和硼的变异系数均较大,即研究区内这些指标含量的空间分布极其不均。休耕前后有效铜的偏度系数和峰度系数分别为 -0.19,0.42 和 0.30,0.32,近似服从于正态分布,满足配对样本均值差异性检验的要求。

根据“全国农业系统的土壤速效微量元素丰缺指标”“中国科学院微量元素组的土壤有效态微量元素评价指标”和甘肃省耕地质量监测指标分级标准^[20],对监测点休耕前后土壤微量元素含量进行总体评价。由表 1、表 2 可知,休耕前土壤有效铁含量处于高水平,有效态铜、硼含量处于中等水平,但有效锰处于低水平,有效锌和有效钼处于极低水平;休耕后有效铁由高水平下降为中等水平,有效钼和有效硼均有降低,但依然处于极低水平和中等水平,有效锰由低水平上升为中等水平,有效铜和有效锌含量均有增加,但含量依然是中等水平和极低水平。

2.2 绿肥休耕对土壤微量元素含量的影响

总体来看,经 3 年绿肥休耕,土壤微量元素中有有效锰、有效铜和有效锌含量均增加,而有效铁、有效钼和有效硼含量均降低。结果表明(表 1),除有效钼以外,休耕前后其他土壤微量元素含量均存在显著差异($p<0.05$),其中有效铁、有效铜和有效硼变化极显著($p<0.001$)。有效锰、有效铜和有效锌含量绿肥休耕前后分别从 8.50 增加到 10.10,0.80 增加到 0.98,0.42 增加到 0.48 mg/kg,增幅分别为 18.8%,22.5%和 14.3%。进一步比较各监测点绿肥休耕前后微量元素变化频率(图 1),休耕后 73.2%的监测点有效锰明显增加,85.4%的监测点有效铜明显增加,68.3%的监测点有效锌明显增加。土壤有效铁和有效硼含量休耕后降幅分别为 27.5%和 8.8%,以上 2 种微量元素分别有 87.8%和 78.0%的监测点休耕后明显降低。

2.3 土壤基础养分对绿肥休耕前后微量元素变化幅度的影响

将各微量元素绿肥休耕前后的变化幅度与休耕前其基础含量之间分别进行回归拟合,结果表明(图 2),除有效硼外,其他 5 种土壤微量元素含量休耕前后变化幅度与其基础含量均呈显著负相关关系($p<0.05$)。其中有效铁、有效锰和有效铜均呈线性关系,决定系数(R^2)分别为 0.22,0.29,0.43,0.13;而有效锌和有效钼均呈对数关系,决定系数(R^2)分别为 0.46,0.30。土壤微量元素变化率随基础含量的增加而降

低,其中,土壤有效铁休耕前后变化率为负值,即休耕
后含量显著下降;土壤有效锰、有效铜、有效锌和有效
钼的基础含量分别小于 8.0,0.9,0.3,0.06 mg/kg 时,
休耕后其含量均有提升,当基础微量元素含量大于此
范围时,变化率出现负值,表明休耕后微量元素含量
较休耕前减少。

表 1 土壤微量元素含量的描述性统计及休耕种植绿肥前后土壤微量元素 t 检验结果 (n=41)

指标		最小值/ (mg·kg ⁻¹)	最大值/ (mg·kg ⁻¹)	平均值/ (mg·kg ⁻¹)	标准差/ (mg·kg ⁻¹)	变异 系数/%	偏度	峰度	t 值
有效铁	2017	6.38	15.89	11.02	1.69	15.34	0.40	1.68	-5.41***
	2019	5.67	12.18	7.99	1.58	19.77	0.83	0.57	
有效锰	2017	4.53	17.09	8.50	2.32	27.29	1.38	3.61	-3.16**
	2019	2.94	20.43	10.10	2.94	29.11	0.89	2.95	
有效铜	2017	0.43	1.17	0.80	0.15	18.75	-0.19	0.42	-6.24***
	2019	0.62	1.44	0.98	0.17	17.35	0.30	0.32	
有效锌	2017	0.11	1.59	0.42	0.26	61.90	2.46	9.39	-2.38*
	2019	0.13	1.35	0.48	0.21	43.75	2.07	7.23	
有效钼	2017	0.04	0.42	0.10	0.07	70.00	3.50	14.79	-1.78
	2019	0.04	0.23	0.08	0.04	50.00	2.45	7.40	
有效硼	2017	0.44	1.69	0.80	0.23	28.75	1.59	4.54	-3.47***
	2019	0.38	3.92	0.73	0.55	75.34	5.18	30.19	

注: *、**、*** 分别表示 $p<0.05$, $p<0.01$, $p<0.001$ 。下同。

表 2 土壤有效态微量元素评价标准

单位:mg/kg

测定项目	极低	低	中等	高	极高	临界值
有效铁	≤5.0	5.0~7.0	7.0~10.0	10.0~15.0	>15.0	7.0
有效锰	≤5.0	5.0~10.0	10.0~20.0	20.0~30.0	>30.0	10.0
有效铜	≤0.1	0.1~0.2	0.2~1.0	1.0~1.8	>1.8	0.2
有效锌	≤0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0	>5.0	1.0
有效钼	≤0.1	0.1~0.15	0.15~0.2	0.2~0.3	>0.3	0.15
有效硼	≤0.25	0.25~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	>2.0	0.5

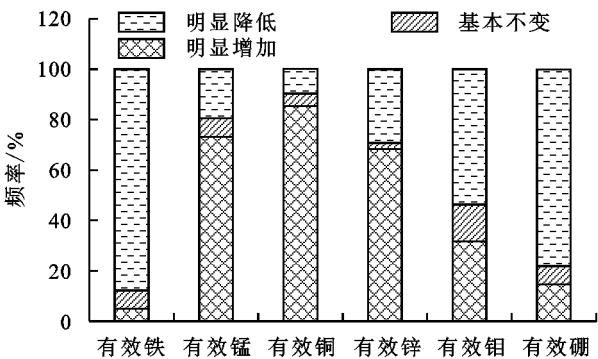


图 1 休耕种植绿肥前后土壤微量元素变化频率统计

将各微量元素绿肥休耕前后的变化幅度与土壤
基础有机质(SOM)、全氮(TN)和 pH 等常量养分含
量之间分别进行线性回归拟合。结果显示,有效铁、
有效锰和有效铜微量元素变化幅度与休耕前 SOM
和 TN 基础含量拟合结果均显著,具体拟合的回归方
程结果见图 3、图 4,其变化率随 SOM 和 TN 基础含
量的增加而降低,而其他微量元素的拟合结果均不显
著($p>0.05$)。有效铁、有效锰、有效铜和有效锌微
量元素变化幅度与休耕前土壤 pH 之间均呈显著正相
关线性关系($p<0.05$),决定系数(R^2)分别为 0.12,

0.18,0.19,0.14,具体拟合的回归方程结果见图 5,其
变化率随土壤 pH 基础值的增加而增加,且当土壤
pH 高于 8.5 时,有效锰、有效铜和有效锌等微量元
素含量的变化率为正值,即绿肥休耕后对应的含量均
增加,而其他微量元素的变化幅度与土壤 pH 基础值拟
合结果均不显著($p>0.05$)。

2.4 土壤微量元素与土壤常量养分之间的相关性分析

对休耕后土壤有效态微量元素与土壤常量养分
之间进行相关性分析表明(表 3),除有效钼与土壤
pH 之间负相关关系不显著($r=-0.10$, $p>0.05$),其他
5 种微量元素与土壤 pH 之间均呈显著的负相关关系
($p<0.01$)。有效铁、有效锰和有效锌均与土壤有机质
(SOM)、全氮(TN)、速效磷(AP)和速效钾(AK)呈显著
正相关关系($r>0.32$, $p<0.05$);有效铜除与 AP 无显著
相关关系,与 SOM、TN 和 AK 呈显著正相关关系($p<$
0.05),Pearson 相关系数分别为 0.53,0.56,0.34;有效硼除
与 AK 有显著正相关关系($r=0.42$, $p<0.01$),与
SOM、TN 和 AP 均无显著相关关系;有效钼与 4 种
土壤常量养分之间均无显著相关关系。

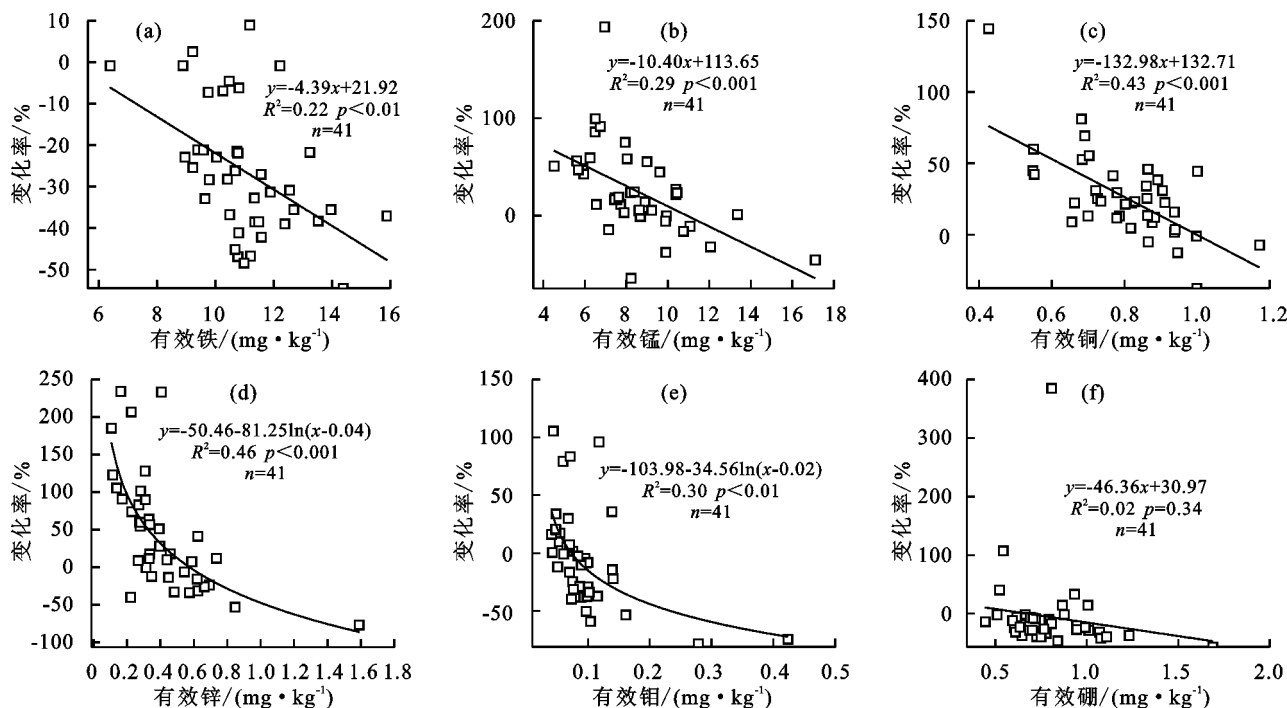


图2 土壤微量元素基础含量与其变化率之间的回归关系

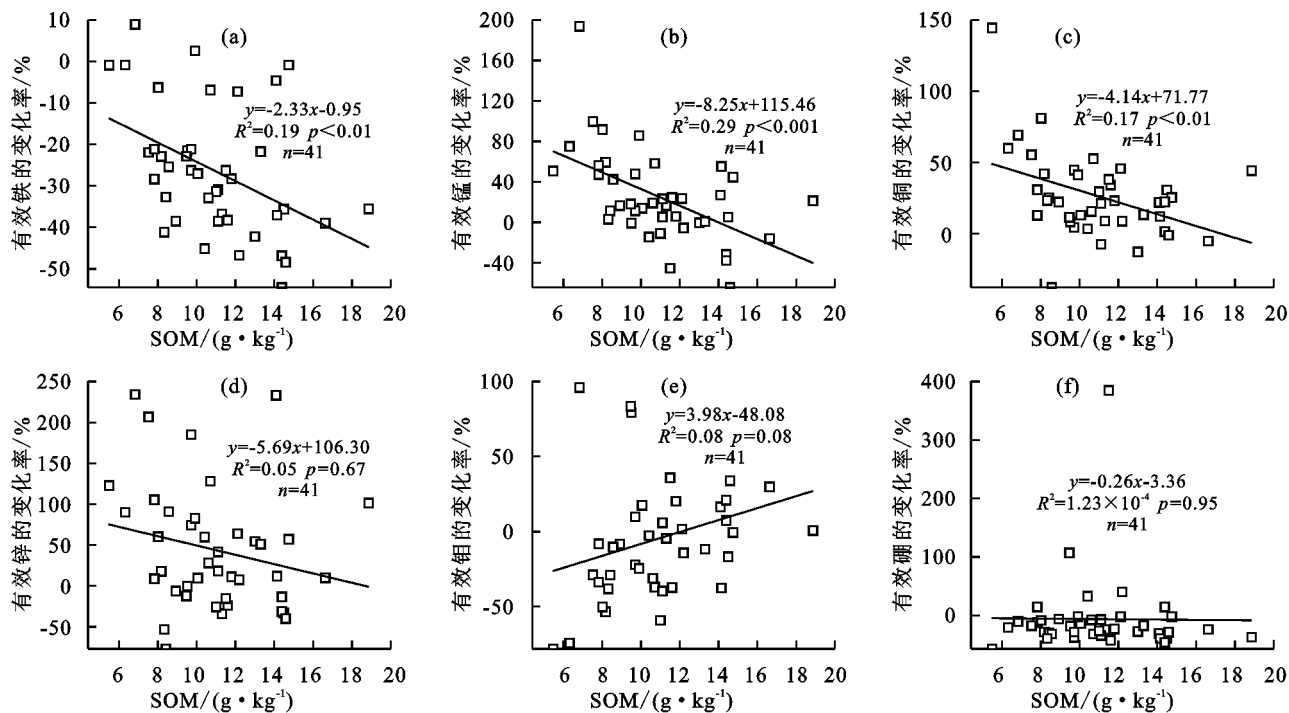


图3 土壤有机质与微量元素变化率之间的回归关系

3 讨论

土壤微量元素的有效态含量分布是母质、地形、气候以及耕作措施等多种因素综合作用的结果,其在一定条件下反映土壤微量养分的供应水平^[21]。耕地休耕作为土地利用方式之一,通过种植绿肥等养地作物能够有效提升土壤养分含量,促使耕地地力恢复,是一种有利于改善土壤质量,提升耕地生态价值,实现用养地结合的耕作措施^[22-23]。本研究发现,经3年种植绿肥休耕的监测区土壤有效锰、有效铜和有效锌含量分别显著提高18.8%,22.5%,14.3%,可见休耕

种植绿肥促使上述原本含量处于中低水平的土壤有效态微量元素得到提高,与高飞等^[17]研究结果一致,其中,有效锰含量由低水平上升为中等水平,因此,该模式尤其对有效锰含量较低的土壤有更佳的提升效果,主要归因于采用种植绿肥和深翻耕的休耕措施。具体原因有:一是绿肥作物中含有机物质以及微量元素等养分,对更新土壤腐殖质、改善土壤理化性状和提高土壤微量元素有效性等起到有利作用^[24];二是经相关分析表明,有效锰、有效铜和有效锌均与土壤有机质呈显著正相关关系,与多数研究^[21,25]结果一

致,而随着绿肥的翻压腐解,土壤有机质含量增加,土壤肥力水平得到提高,故促进有效锰、有效铜等含量的积累;三是增施的有机肥本身含有微量元素^[26],而且有机肥腐解过程中降低耕层土壤 pH 及 Eh 值,促进土壤中锰、铜等氧化物的还原反应和难溶态的分解^[13,27],因此,溶解态离子含量增多,有效态含量增加。本研究结果表明,休耕后土壤有效铁和有效硼含量分别显著降低 27.5%和 8.8%,且有效铁由高水平下降为中等水平,其主要原因可能有 2 个方面,土壤

微量元素之间既有共生关系,也存在互相拮抗的关系,如有效态锰与铁、有效态锌与硼之间存在拮抗作用^[21,28],即互为拮抗作用的元素中的一种升高时,抑制对应元素含量的升高,从而导致相应的有效态微量元素含量降低;另一方面,绿肥作物在生长过程中对土壤中的铁素等消耗较多没有得到及时补充和归还,因而导致部分微量元素含量降低。因此,在实际生产耕作中,要注意高效合理地补充养分元素,保持农田生态系统中各土壤微量元素的平衡。

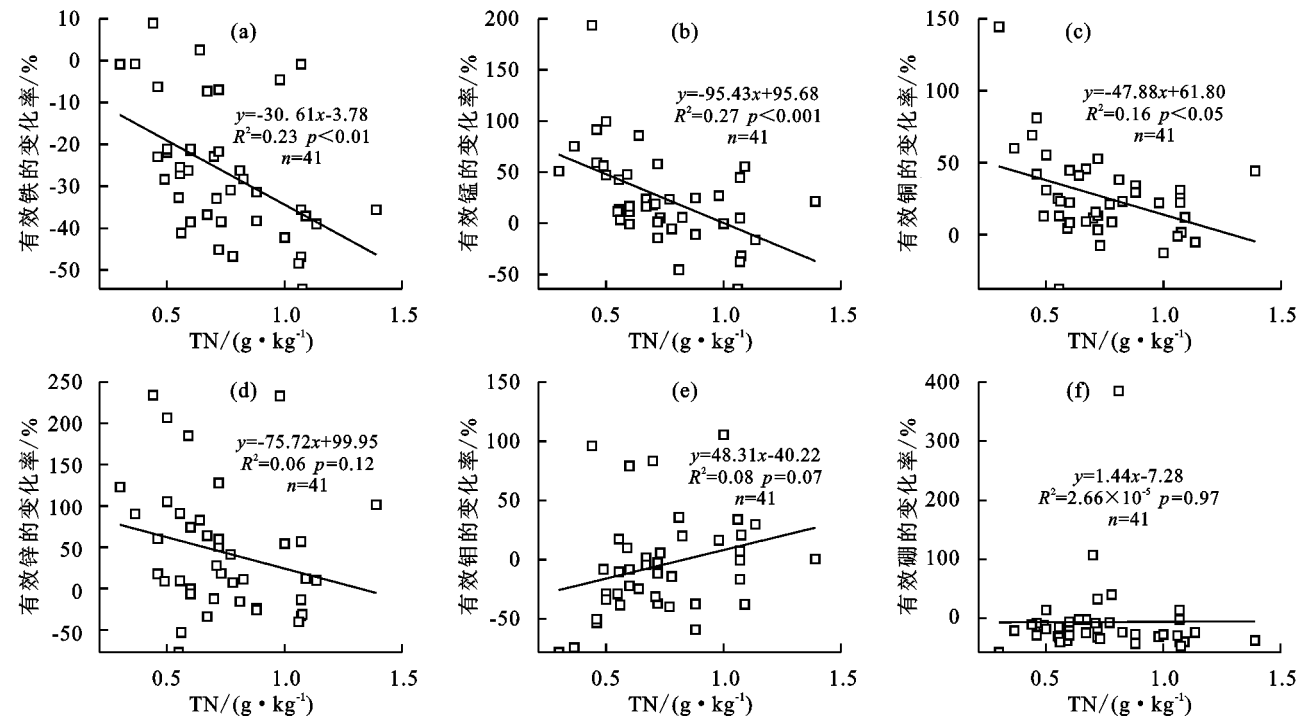


图 4 土壤全氮与微量元素变化率之间的回归关系

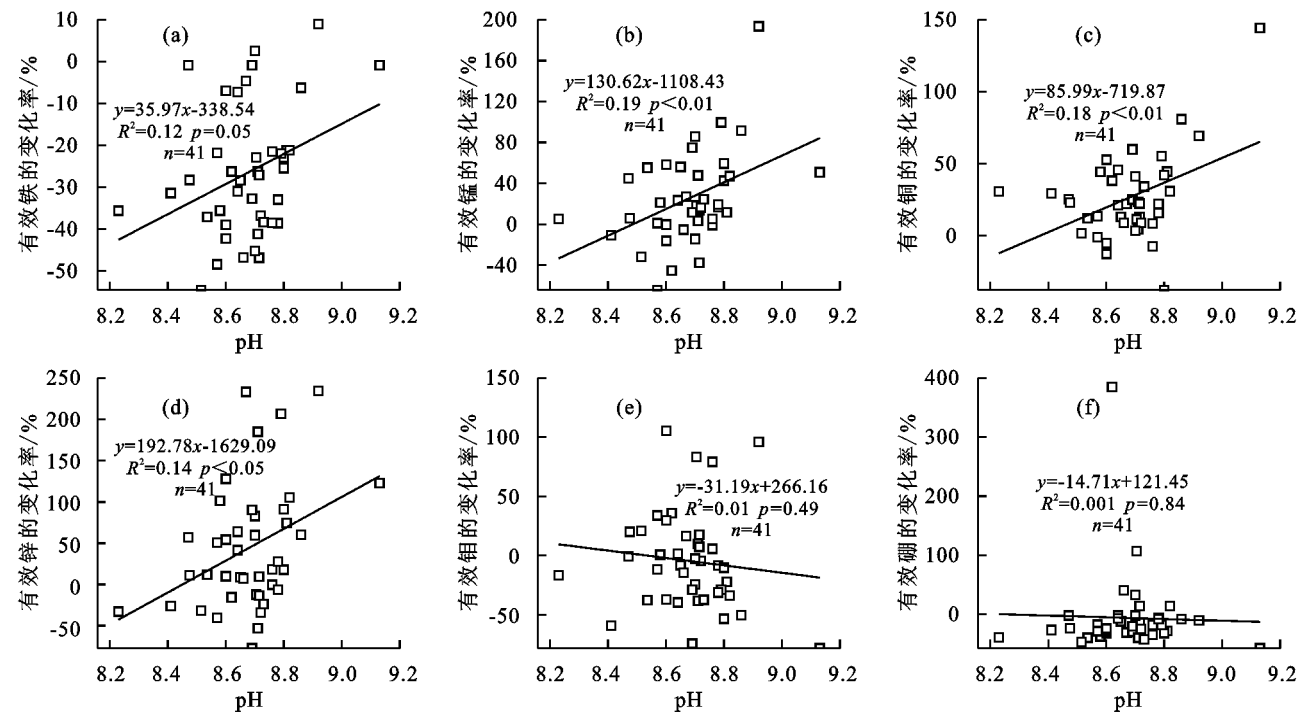


图 5 土壤 pH 与微量元素变化率之间的回归关系

表 3 土壤微量元素与常量养分之间的相关性

土壤养分	有效铁	有效锰	有效铜	有效锌	有效钼	有效硼
pH	-0.64**	-0.66**	-0.50**	-0.49**	-0.10	-0.43**
SOM	0.85**	0.88**	0.53**	0.48**	0.13	0.08
TN	0.85**	0.89**	0.56**	0.49**	0.16	0.07
AP	0.54**	0.56**	0.19	0.65**	-0.23	-0.05
AK	0.32*	0.43**	0.34*	0.35*	0.23	0.42**

分析土壤微量元素基础含量对绿肥休耕前后微量元素变化幅度的影响发现,除有效硼外,其他 5 种微量元素的变化幅度与休耕前各微量元素基础含量均呈显著的负相关关系($p < 0.05$),即各微量元素休耕前后变化幅度随基础含量的增加而降低,表明微量元素初始含量较高的土壤休耕前后其含量变化幅度较低,甚至种植绿肥后含量有下降趋势,该研究区实施的休耕模式对土壤有效锰、有效铜、有效锌和有效钼的基础含量分别小于 8.0, 0.9, 0.3, 0.06 mg/kg 的农田土壤有显著提高的效果。进一步分析土壤常量养分含量对农田土壤休耕前后微量元素变化幅度的影响发现,有效铁、有效锰和有效铜休耕后含量的变化幅度随着 SOM 和 TN 基础含量的增加而显著降低($p < 0.05$),是由于有效铁、有效锰和有效铜均与 SOM 和 TN 呈显著正相关关系,即微量元素含量随 SOM 和 TN 含量的增加而增加,已有许多研究^[10]也证明此结论,其原因可能是有机质和全氮作为一种有机无机复合体黏粒会对土壤中微量元素产生吸附作用^[29]。本研究结果表明,微量元素的基础含量越高其休耕后变化幅度越小,因此,微量元素含量休耕后变化幅度随 SOM 和 TN 基础含量的增加而降低。本研究结果表明,有效铁、有效锰、有效铜和有效锌休耕变化幅度随休耕前土壤 pH 增大而显著增大($p < 0.05$),尤其该绿肥休耕模式对 > 8.5 的碱性土壤有提高有效锰、有效铜和有效锌等微量元素含量的效果,并经相关分析表明,有效铁、有效锰、有效铜和有效锌均与土壤 pH 呈显著负相关关系($p < 0.01$),与许多研究^[26,30]结论一致,其原因可能是当土壤 pH 升高时,铁、锰、铜、锌等易形成不溶性的氢氧化物,降低微量元素化合物的溶解度,从而降低其有效含量^[31]。同样根据上述结果表明,微量元素的基础含量越低其休耕后变化幅度越大,故微量元素含量休耕后变化幅度随土壤 pH 基础值的增加而增加。因此,要实现区域土地生产潜力的充分发挥,需根据土壤初始酸碱度和地力水平的特性,采取适宜的农田种植管理措施。

由于微量元素的多样性和复杂性,本研究未对各个微量元素逐一分析绿肥休耕对其影响的原因,仅局限于对微量元素变化一致的整体分析。绿肥休耕后

土壤微量元素的变化幅度受多种因素的共同影响,如气候条件、土壤类型、水分状况等,但由于数据资料的欠缺,仅探究土壤养分基础含量对其影响,对于其他因素有待深入研究分析。尽管如此,本研究所得结论与实际生产基本相符,对陇中旱区农田土壤微量元素科学管理和评估微量元素在休耕种植绿肥中的响应效果具有一定的参考价值。

4 结论

(1)陇中旱农区实施种植 3 年毛苕子和箭筈豌豆绿肥休耕,土壤有效锰、有效铜和有效锌等微量元素含量分别显著增加 18.8%, 22.5% 和 14.3%, 土壤有效铁和有效硼含量分别显著降低 27.5% 和 8.8%, 且有效铁由高水平下降为中等水平,有效锰由低水平上升为中等水平,即该模式对锰含量较低的土壤有更好的应用价值。

(2)实施该模式对有效锰、有效铜、有效锌和有效钼的基础含量分别小于 8.0, 0.9, 0.3, 0.06 mg/kg 的农田土壤有显著提高的效果。

(3)绿肥休耕模式对陇中旱区肥力较差的农田土壤可显著提高有效锰和有效铜含量,对 > 8.5 的碱性土壤提高有效锰、有效铜和有效锌含量的效果更显著。

参考文献:

- [1] 王雪梅,柴仲平,毛东雷.不同质地耕层土壤有效态微量元素含量特征[J].水土保持通报,2015,35(2):189-192.
- [2] 陈超,杨丰,刘洪来,等.贵州喀斯特地区草地开垦对土壤微量元素的影响与评价[J].农业工程学报,2013,29(7):230-237.
- [3] Ye H C, Shen C Y, Huang Y F, et al. Spatial variability of available soil microelements in an ecological functional zone of Beijing[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(2): e13.
- [4] Li J N, Hou H, Wei Y, et al. Investigating the phytoavailability of trace elements in contaminated agricultural soils and health risks via consumption of water spinach grown under field conditions in Zhuzhou, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(5): e403.
- [5] 潘方杰,王宏志,王璐瑶,等.湖北省土壤微量元素县域分异特征及其与健康相关性[J].华中师范大学学报(自然科学版),2019,53(1):137-146.

- [6] Adeli A, Sistani K R, Tewolde H, et al. Broiler litter application effects on selected trace elements under conventional and no-till systems[J]. *Soil Science*, 2007, 172(5): 349-365.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Moreno-Jiménez E, Fernández J M, Puschenreiter M, et al. Availability and transfer to grain of As, Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in a barley agri-system: Impact of bio-char, organic and mineral fertilizers[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 219: 171-178.
- [10] 丁少男, 薛莲, 刘国彬, 等. 长期施肥对黄土丘陵区农田土壤微量元素有效含量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(1): 124-130.
- [11] 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.
- [12] 李志刚, 王灿, 杨建峰, 等. 连作对胡椒园土壤和植株中微量元素含量的影响及相关特征分析[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(12): 2215-2220.
- [13] 李龙, 魏孝荣, 郝明德. 黄土高原不同轮作次序对土壤有机质和有效态微量元素分布的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 96-101, 181.
- [14] 姜小凤, 郭凤霞, 陈垣, 等. 休耕和种植作物对黑麻土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 229-235.
- [15] 陈展图, 杨庆媛. 中国耕地休耕制度基本框架构建[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(12): 126-136.
- [16] 黄国勤, 赵其国. 中国典型地区轮作休耕模式与发展策略[J]. *土壤学报*, 2018, 55(2): 283-292.
- [17] 高飞, 崔增团, 贾蕊鸿, 等. 甘肃省休耕试点区域主要技术模式及实施效果[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(20): 93-97.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 王德宣, 富德义. 吉林省西部地区土壤微量元素有效性评价[J]. *土壤*, 2002, 34(2): 86-89, 93.
- [21] 邓邦良, 袁知洋, 李真真, 等. 武功山草甸土壤有效态微量元素与有机质和 pH 的关系[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(3): 647-650.
- [22] 苏康传, 杨庆媛, 张忠训, 等. 中国耕地差异化休耕模式及技术措施探讨[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 283-291.
- [23] 赵其国, 滕应, 黄国勤. 中国探索实行耕地轮作休耕制度试点问题的战略思考[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(1): 1-5.
- [24] 高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻—稻—绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 343-349.
- [25] Bech J, Tume P, Longan L, et al. Baseline concentrations of trace elements in surface soils of the torrelles and sant climent municipal districts (Catalonia, Spain) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 108(1): 309-322.
- [26] 李志军, 李平儒, 史银光, 等. 长期施肥对关中壤土微量元素有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1456-1463.
- [27] Wei X R, Hao M D, Shao M G, et al. Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 91(1/2): 120-130.
- [28] 穆桂珍, 罗杰, 蔡立梅, 等. 广东揭西县土壤微量元素与有机质和 pH 的关系分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(10): 208-215.
- [29] 朱海娣, 毛雪, 吴承龙, 等. 石台县土壤硒资源分布特征及其利用[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(9): 130-134, 180.
- [30] 顾思博, 周金龙, 曾妍妍, 等. 绿洲农田土壤微量营养元素的空间变异性研究: 以新疆于田县为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(3): 118-123.
- [31] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山青海云杉林土壤有效微量元素含量特征[J]. *土壤通报*, 2015, 46(2): 386-391.