

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

魏孝荣^{1,2}, 郝明德¹, 邵明安^{1,3*}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 在长期定位试验的基础上, 用连续浸提方法对土壤微量元素进行形态分级, 研究了长期种植作物条件下黄土高原旱地土壤中微量元素的形态组成及其在不同土壤组间的分配特征, 探讨了种植系统对土壤微量元素有效性的影响。土壤中有有效态微量元素含量的剖面分布除与土壤中微量元素的全量有关外, 还与不同的种植系统有关。各种种植系统有效锌和有效铜含量均低于休闲土壤, 有效锌以小麦连作和苜蓿连作降低最多, 有效铜以小麦连作和粮豆轮作降低最多。小麦连作系统 40 cm 以上土层土壤有效锰含量和休闲土壤接近, 40~100cm 土层低于休闲土壤, 苜蓿连作和粮豆轮作整个剖面土壤有效锰含量均有所增加。各种种植系统 40cm 以上土层土壤有效铁含量均高于休闲土壤, 40~100cm 土层土壤有效铁分布趋势相同, 其含量均随土层深度的增加而增加, 并且小麦连作低于休闲土壤, 粮豆轮作高于休闲土壤, 苜蓿连作与休闲相近, 这些结果表明长期种植作物可以显著改善土壤锰素营养和铁素营养状况。苜蓿连作和小麦连作使锌和铁从矿物态向有机结合态转化, 增加了土壤有效锌和有效铁的储备, 粮豆轮作系统各形态锌低于休闲土壤, 并且土壤中锌的总贮量有所减少; 各种种植系统土壤氧化物结合态铁在耕层增加, 在古耕层降低, 这也表明种植作物可以活化深层土壤难溶态铁。长期种植作物使耕层土壤各形态铜含量降低, 粮豆轮作和小麦连作系统古耕层土壤各形态铜含量较休闲土壤有所增加。3 种植系统碳酸盐结合态、氧化物结合态和有机结合态锰含量均有不同程度的下降, 且耕层土壤交换态、碳酸盐结合态和有机结合态锰高于古耕层, 氧化物结合态和矿物态锰含量低于古耕层。

关键词: 种植作物; 微量元素; 形态; 有效性

文章编号: 1000-0933(2005)12-3196-08 中图分类号: S153.6 文献标识码: A

Effects of long-term cropping on the forms and the availability of micronutrients in dryland soils on the Loess Plateau

WEI Xiao-Rong^{1,2}, HAO Ming-De¹, SHAO Ming-An^{1,3*} (1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3196~3203

Abstract: The low availability of soil micronutrients in dryland of the Loess Plateau cannot meet the need of crop growth and then it has become one of the limiting factors for the agriculture production in this area for many years. The current cropping systems applied in the area may have effects on the availability of soil micronutrients. The long-term field cropping experiment, which composed of fallow (FA), continuous clover cropping (CC), continuous wheat cropping (WC), and clover-legumes rotation (CLR), was initiated in 1984 in the Loess Plateau. After 18 years observations, soil samples were collected from plough layer (PL) and plow sole (PS) and then the samples were used for classifying the soil micronutrients into five forms, i

基金项目: 中国科学院野外台站基金资助项目; 中国科学院知识创新资助项目(KZCX2-413-3); 国家科技攻关资助项目(2001BA508B15)

收稿日期: 2004-11-30; **修订日期:** 2005-04-20

作者简介: 魏孝荣(1978~), 男, 陕西武功人, 硕士, 主要从事微量元素土壤环境化学研究

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: shaom@igsnr.ac.cn

Foundation item: CAS Field Station Fund, CAS Project of Knowledge Innovation Program (No. KZCX2-413-3), and Chinese National Program for Science and Technology Development (No. 2001BA508B15)

Received date: 2004-11-30; **Accepted date:** 2005-04-20

Biography: WEI Xiao-Rong, Master, mainly engaged in soil environmental chemistry of micronutrients



e⁻, exchangeable (Ex⁻), carbonate bond (Cr⁻), oxides bond (Ox⁻), organic matter bond (Om⁻), and mineral bond (Min⁻), by using an amended sequential extraction technique. In addition, soil samples from 0~100cm soil depth were also taken for the determination of available micronutrient contents so that the effects of long-term cropping on the forms and availability of soil micronutrients in the area can be assessed. The results showed that the distribution of micronutrients in soils related not only with total contents of the elements in soil, but also with cropping systems. The available Zn and Cu in the three cropping systems were all lower than those in FW. WC and CC have the lowest soil available Zn contents, and the available contents of Cu in CC and CLR are the lowest. The content of available Mn in WC is similar to that in 0~40cm soil depth but lower than that in 40~100cm of FA, respectively. Meanwhile, the contents of available Mn were increased in CC and CLR systems compared with those in FW. The contents of available Fe in the three cropping systems were also increased in 0~40cm soil depth and presented the same distribution trend in 40~100cm that the contents increased with the increase of soil depth. Moreover, the available Fe was lower in WC and higher in CLR than that in FA in 40~100cm. However, CC has the similar contents of available Fe with that in FW in 40~100cm depth. These indicate that long-term cropping, especially leguminous crops, could improve the soil nutrition of Mn and Fe. The long-term continuous cropping of clover and wheat helped the transformation of Zn and Fe from Min forms to Om forms, which extended the capacity of soil available Zn and Fe. The five forms of Zn in CLR were lower than that in FA and the total contents in the three systems were reduced due to the uptake by crops for a long time. The Ox-Fe contents in the three systems were increased in PL and decreased in PS soils, which suggests that long-term planting of crops can activate the difficultly dissolved Fe in deep soil. Eighteen years cropping led to the reduction of Cu in five forms in PL soils, nevertheless, CLR and WC caused the augments of such forms in PS soil. Manganese in Cr, Ox, and Om fractions were all decreased after 18 years cropping. In addition, exchangeable, carbonate bond, and organic matter bond Mn were higher in PL than in PS soils, while oxides bond and mineral bond Mn were lower in plough layer than in plow sole.

Key words: long-term cropping; micronutrients; forms; availability

土壤是植物微量元素的主要来源, 土壤中微量元素的含量、形态分布和有效性不仅与成土母质和成土过程等有关, 还受耕作制度、施用肥料和种植作物等人为因素的影响^[1]。在长期作物连作和轮作条件下, 土壤中微量元素的形态和分布已较原来土壤发生了很大变化, 其较为典型的特点便是在耕层土壤的淋溶和深层土壤的相对富集^[2]。此外, 长期种植作物条件下, 作物残体向土壤的归还使有机质在表层土壤得到富集^[3-6], 土壤有机质的变化不但能直接影响微量元素的形态和有效性, 还能通过影响其他性质对微量元素产生影响^[7-13]。不同种植系统所种植的作物在根系活动、分泌物组成及特性等方面都存在着很大的差异, 因此也影响着微量元素的形态和有效性^[14-17]。长期的作物连作和轮作所引起的土壤微量元素化学行为和生物可给性的变化, 将对植物的微量营养元素平衡产生深远的影响。因此, 研究种植不同作物及不同种植方式条件下微量营养元素土壤化学特性的变化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。

本研究在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站的长期定位试验基础上, 采用改进了的 Tessier^[18]和 Shuman^[19]形态分级方法, 把土壤锌、铜、锰、铁分为交换态(Ex⁻)、碳酸盐结合态(Cr⁻)、氧化物结合态(Ox⁻)、有机结合态(Om⁻)和矿物态(Min⁻) 5种形态, 以研究在长期种植作物条件下土壤中微量元素的形态组成及其在不同土壤组分间的分配特征, 探讨不同种植系统对土壤微量元素有效性的影响, 为定量评价土壤中微量元素肥力的变化, 提高土壤微量元素的有效性提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 1984 年设置在位于黄土高原中南部的陕西省长武县十里铺村旱地上。试验地土壤为粘黑垆土, 母质是深厚的中壤质马兰黄土, 全剖面土质均匀疏松, 通透性好, 肥力中等, 耕层土壤(1984 年秋季布置试验时土样分析值)有机质含量 10.5g/kg, 全氮 0.80g/kg, 速效氮 37.00mg/kg, 全磷 0.659g/kg, 速效磷 3.0mg/kg, 速效钾 129.3mg/kg, CaCO₃ 108.4mg/kg, 试验地海拔 1200m, 年平均气温 9.1℃, 无霜期 171d, 0~10℃活动积温 3866℃, 10~15℃活动积温 3029℃, 热量供作物一年一熟有余, 属暖温带半湿润大陆型季风气候。试验地的土壤养分含量、地貌特征在黄土高原同类地区有典型代表性。

1.2 试验设计

试验设计苜蓿连作(CC)、小麦连作(WC)和粮豆轮作(豌豆-小麦-小麦-糜子)(CLR) 3个种植系统, 另设休闲(FA)处理 1个, 均为 3 次重复, 试验小区随机排列, 小区面积为 10.26m × 6.5m。供试作物品种及生育期见表 1。试验管理同一般大田。

表 1 供试作物品种及生育期

作物 Crops	品种 Varieties	播种期 Seedling period	收获期 Harvesting period
苜蓿 Clover	本地紫花苜蓿 Native varieties		6 月上旬或 9 月中旬 Early June or Middle September
小麦 Wheat	秦麦 4 号 Qinmai 4 (1984~ 1985)		September
	长武 131 Changwu 131 (1986~ 1995)	9 月中旬 Middle September	6 月下旬 Late June
豌豆 Pea	长武 134 Changwu 134 (1996~ 2002)		
	白豌豆 White pea	3 月中旬 Middle March	7 月上旬 Early July
糜子 Millet	本地品种 Native varieties	7 月上旬 Early July	10 月上旬 Early October

1.3 样品采集及分析

于 2002 年 9 月分别采集耕层(0~ 15)和古耕层(20~ 33cm)土壤样品(耕层和古耕层厚度参考陕西土种志^[20]),同时采集 0~ 100cm 土层土壤样品,风干后磨碎过 1mm 和 0.25mm 筛。

土壤样品测定有效态微量元素(pH 7.3 DTPA 溶液浸提,原子吸收法测定)和全量微量元素(HNO₃-HClO₄-HF 消化,原子吸收法测定)含量^[21]。

微量元素形态分级采用改进了的 Tessier^[18]和 Shuman^[19]方法,把土壤微量元素分为交换态(Ex⁻)、碳酸盐结合态(Cr⁻)、氧化物结合态(Ox⁻)、有机结合态(Om⁻)和矿物态(Min⁻)5 种形态,具体操作见表 2,浸提液用原子吸收法测定含量。

表 2 土壤微量元素形态分级方法

形态 Fractions	浸提剂 Extractants	操作条件 Operation condition
交换态(Ex ⁻)	1mol/L Mg(NO ₃) (pH 7.0)	振荡 2h Shake 2h
碳酸盐结合态(Cr ⁻)	1mol/L NaAc-HAc (pH 5.0)	振荡 5h Shake 5 h
氧化物结合态(Ox ⁻)	0.1mol/L NH ₂ OH·HCl + 25% HAc	振荡 0.5h Shake 0.5h
有机态(Om ⁻)	A: 30% H ₂ O ₂ (pH 2.0) B: 1mol/L Mg(NO ₃) (pH 7.0)	用 A 85 °C 水浴近干,重复 1 次,用 B 浸提 Extracted twice with A at 85 °C, then extracted 2 hours with B at 25 °C
矿物态(Min ⁻)	HNO ₃ -HClO ₄ -HF	

2 结果与分析

2.1 长期种植作物对土壤有效态微量元素含量剖面分布的影响

2.1.1 对土壤有效锌的影响 由有效锌在土壤剖面上的分布(图 1)可以看出,休闲处理 0~ 40cm 土层土壤有效锌含量较高;40cm 以下土层含量较低,并且不随深度变化,这和早期的研究结果一致^[22]。小麦连作和粮豆轮作土壤有效锌剖面分布趋势与休闲处理相似。经过作物长期吸收携出,3 种植系统 0~ 50cm 土层土壤有效锌显著低于休闲土壤,并且均以小麦连作和苜蓿连作含量最低。苜蓿根系分布较深,长期种植苜蓿使 50~ 80cm 土层土壤有效锌也显著低于休闲土壤。各种种植系统土壤有效锌所呈现的分布趋势与所种植的作物有关。苜蓿连作和小麦连作不利于土壤肥力的持续发展,导致了肥力的下降,作物根系活动能力降低,根系分泌物对土壤难溶态锌的溶解少,不足以弥补作物长期对土壤锌的吸收,所以苜蓿连作和小麦连作系统土壤有效锌的下降较多。粮豆轮作系统种植的作物多样,土壤肥力状况有所改善,土壤微环境对难溶态锌的溶解量较多,其有效锌含量也高于苜蓿连作和小麦连作。

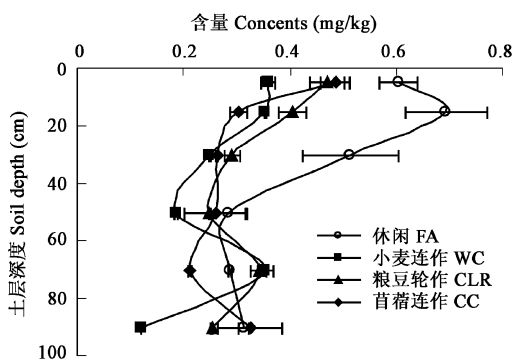


图 1 有效锌剖面分布

Fig. 1 Distribution of available zinc in soil profile

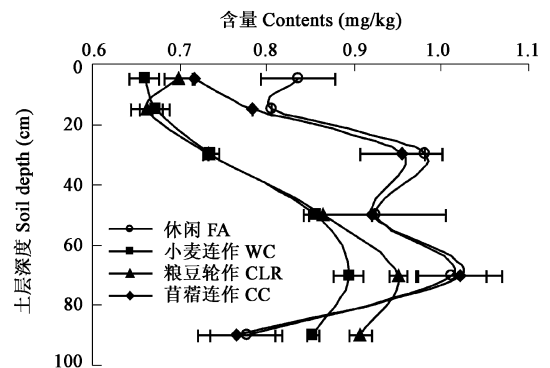


图 2 有效铜剖面分布

Fig. 2 Distribution of available copper in soil profile

2.1.2 对土壤有效铜的影响 土壤有效铜含量在剖面中呈上低下高的分布趋势,并显著地受不同种植系统的影响(图 2)。整个剖面上休闲和苜蓿连作系统有效铜的分布趋势相似,在 0~20cm 和 80cm 以下土层含量较低,20~80cm 之间含量较高;小麦连作和粮豆轮作系统的有效铜含量剖面分布相似,0~40cm 土层含量较高,而且两个种植系统含量相近,40cm 以下土层含量升高,且粮豆轮作土壤有效铜含量高于小麦连作土壤。图 2 还显示,各种种植系统有效铜含量有所下降,其中苜蓿连作下降较少,只在 0~40cm 土层稍有降低,40~100cm 土层有效铜含量几乎没有变化,这说明苜蓿连作对土壤有效铜的消耗不大,或者虽然苜蓿连作对土壤有效铜有一定的消耗,但苜蓿在生长过程中能活化土壤中难溶态铜,使其转化为易溶态而补充到土壤溶液中去。长期进行小麦连作和粮豆轮作加剧了 0~80cm 土层土壤有效铜的耗竭,这两个种植系统该土层土壤有效铜含量显著低于休闲土壤相应土层含量。

2.1.3 对土壤有效锰的影响 有效锰在土壤剖面的分布也呈现上高下低的趋势,表层(0~20cm)土壤有效锰含量高,底层(20~100cm)土壤含量低,而且不同种植系统土壤有效锰含量也存在很大的差异(图 3)。小麦连作系统土壤有效锰含量在 40cm 以上土层和休闲土壤接近,在 40~100cm 土层显著低于休闲土壤,长期种植小麦消耗了土壤有效锰,但上层土壤小麦根系活动较为旺盛,促进了部分难溶态锰的溶解,对小麦吸收的锰有所补偿,从而使其含量和休闲土壤差异不大。和休闲土壤相比,苜蓿连作和粮豆轮作土壤有效锰含量均有显著增加,苜蓿连作在 0~60cm 土层增加的较多,增幅为 5.0%~53.9%,60cm 以下有所降低;粮豆轮作在 0~40cm 和 60~100cm 增幅较大(9.1%~19.9%)。土壤有效锰的剖面分布除与不同作物对锰的吸收特性有关外,还与不同作物对土壤理化性质的改善有关。长期种植豆科作物可以显著地改善土壤锰素状况,这是因为苜蓿和豌豆等豆科作物在生长过程中酸化了土壤,降低了土壤 pH 值,促进了难溶态锰的溶解释放^[23~27]。

2.1.4 对土壤有效铁的影响 土壤有效铁的剖面分布与有效铜相似,为上低下高的趋势,并受种植系统的影响(图 4)。在 40cm 以上土层,各系统土壤有效铁含量均高于休闲土壤,40~100cm 土层各种种植系统有效铁分布趋势相同,其含量均随土层深度的增加而增加,并且小麦连作低于休闲土壤,粮豆轮作高于休闲土壤,苜蓿连作与休闲相近。土壤有效铁含量的剖面分布与土壤中铁的含量与分布有关,但由于铁的土壤化学性质与锰相似,种植系统对有效铁在剖面分布的影响机理与有效锰相似。可见,长期种植作物也可以显著改善土壤铁素营养状况。

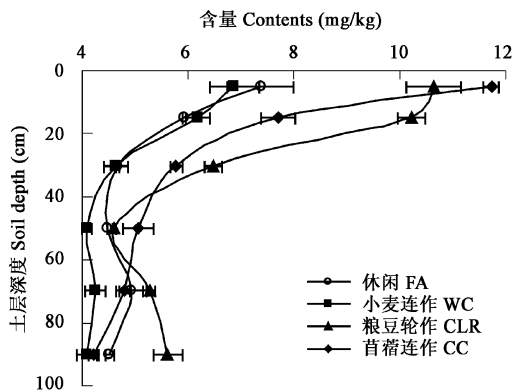


图 3 有效锰剖面分布

Fig 3 Distribution of available manganese in soil profile

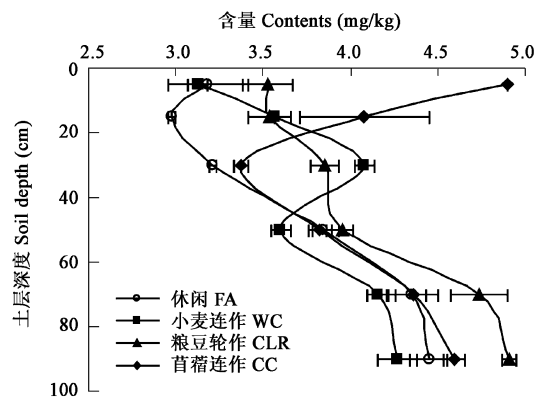


图 4 有效铁剖面分布

Fig 4 Distribution of available iron in soil profile

2.2 土壤微量元素的形态分布

2.2.1 土壤锌形态含量变化 土壤中的锌主要以矿物态存在,其含量变化范围为 59.11~76.68mg/kg;氧化物结合态锌含量也较高,含量为 3.10~3.95mg/kg;有机结合态和碳酸盐结合态锌含量较低,分别为 1.16~1.55mg/kg 和 0.43~1.00mg/kg;可交换态锌没有达到测出水平。此外,耕层土壤各形态锌的含量均高于古耕层土壤(图 5)。

图 5 还表明,长期种植作物影响了土壤锌在不同形态间的分配。土壤中各形态锌处于一个动态平衡中,某个形态含量的变化势必造成整个平衡的破坏,而这些形态的锌在重新平衡过程中含量也随之发生变化。苜蓿连作土壤碳酸盐结合态锌含量高于休闲土壤,小麦连作和粮豆轮作则低于休闲土壤。苜蓿和小麦连作耕层土壤氧化物结合态锌高于休闲土壤,苜蓿连作和粮豆轮作古耕层土壤氧化物结合态锌低于休闲土壤。虽然不同种植系统土壤有机结合态锌的含量也有较大差异,但总体上都高于休闲土壤。作物根系活动以及植物残体向土壤的归还促进了土壤有机质的累积,加速了土壤有机质与锌的结合过程,使有机结合态锌含量有所增加,其中以苜蓿连作和小麦连作系统增加最多。和休闲土壤相比,3 种植系统土壤的矿物态锌含量均有降低,且两个土层都以苜蓿连作和粮豆轮作降低较多,在耕层降低了 21.15% 和 23.08%,在古耕层降低了 14.19% 和 10.67%;小麦连

作土壤矿物态锌降低较少。在作物根系分泌物的溶解和土壤有机质的络合(或螯合)作用下,土壤中的锌从矿物态向其它形态转变,并使矿物态锌含量有所降低。

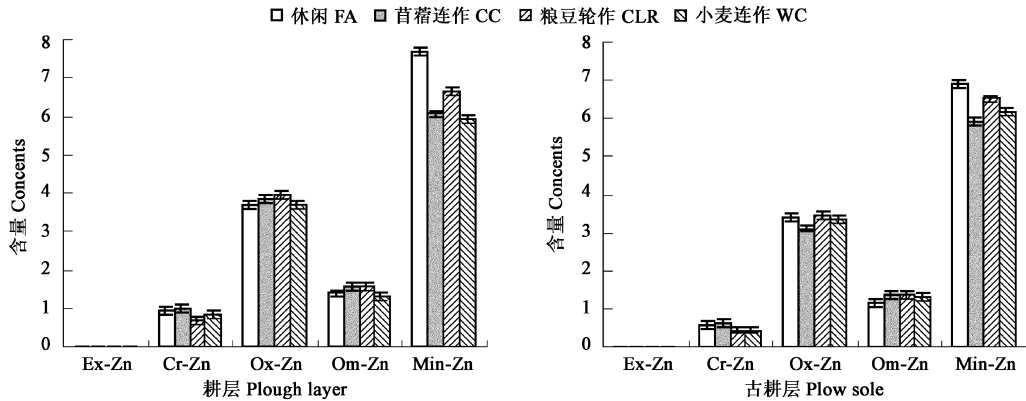


图5 不同种植系统锌形态分布

Fig 5 Zinc fractions in different planting systems

矿物态锌单位为 10mg/kg,其余都为 mg/kg Unit of Min-Zn is 10mg/kg,Others are mg/kg

上述结果表明,苜蓿连作和小麦连作使矿物态锌向有机结合态锌转化,增加了土壤有效锌的储备,粮豆轮作由于具有较大的种植强度,作物对土壤锌的吸收较多,各形态锌均低于休闲土壤。另外,由于作物长期的吸收利用,再加上没有锌的补给,作物吸收的锌仅靠少部分根茬补充,抵不上随作物吸收带走的锌量,土壤中锌的总贮量有所减少。

2.2.2 土壤铜形态含量变化 土壤中的铜主要存在于矿物态;铜与有机质有强烈的络合能力,所形成的内圈络合物十分稳定;土壤中铁锰氧化物在形成过程中可以包被土壤溶液中的铜,土壤中碳酸盐通过吸附和共沉淀也吸持土壤溶液中的铜,所以有机结合态铜、氧化物结合态铜和碳酸盐结合态铜含量也较高,而交换态铜含量较低。各形态铜含量呈矿物态>有机结合态、氧化物结合态>碳酸盐结合态>交换态的顺序。耕层土壤碳酸盐结合态、有机结合态和矿物态铜含量高于古耕层土壤,氧化物结合态铜含量则低于古耕层土壤(图6)。

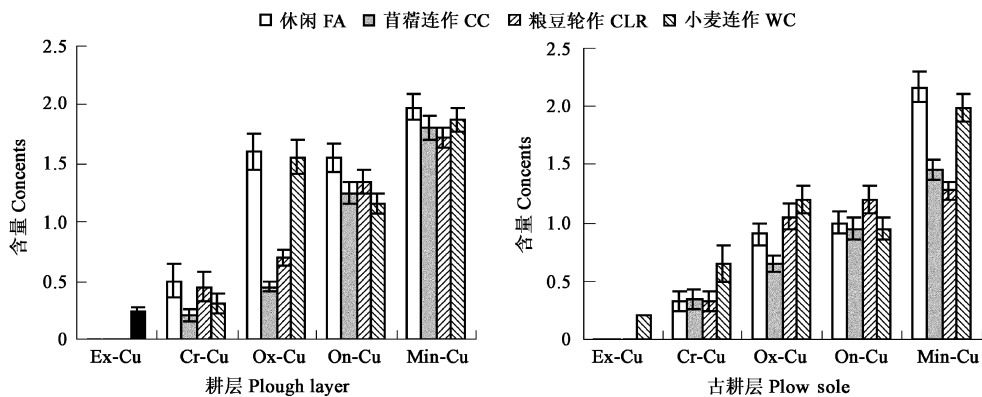


图6 不同种植系统铜形态分布

Fig 6 Copper fractions in different planting systems

矿物态铜单位为 10mg/kg,其余都为 mg/kg Unit of Min-Cu is 10mg/kg,Others are mg/kg

苜蓿和小麦连作系统及休闲土壤交换态铜均未达到测出水平,粮豆轮作系统耕层和古耕层土壤交换态铜达到 0.24mg/kg 和 0.2mg/kg。长期种植作物使耕层土壤中的碳酸盐结合态铜含量有所减少,减少顺序为:苜蓿连作(60.0%)>粮豆轮作(40.0%)>小麦连作(10.0%);古耕层土壤碳酸盐结合态铜却呈现出了粮豆轮作>苜蓿连作>小麦连作的增加顺序。各种种植系统土壤中氧化物结合态和有机结合态铜含量有所降低。矿物态铜含量较休闲土壤也有较大幅度降低,下降趋势在耕层和古耕层一致,均为小麦连作>苜蓿连作>粮豆轮作,且降幅均为古耕层大于耕层。

由上述结果可以看出,粮豆轮作促进了土壤中铜从矿物态向交换态的移动,加速了铜的活化。苜蓿连作、小麦连作和粮豆轮

作系统由于作物根系活动向土壤分泌一些有机酸类物质,使表层土壤各形态铜溶解转移到土壤溶液中供作物吸收,导致了这些形态铜含量的降低。由于各种种植系统不断有作物残体的投入,有机质循环过程得到了促进,并刺激了土壤微生物的活动,这些过程加速了土壤中部分有机物-Cu 络合物的分解,使有机结合态铜含量降低。虽然作物根系对铜的吸收使耕层土壤各形态铜有所亏缺,但作物根系及根际效应却加速了土壤矿物态铜向其它形态的转化,使这些形态得到补充。在粮豆轮作和小麦连作系统,作物根系主要分布在耕层,对古耕层土壤铜的吸收作用比较弱,因此古耕层土壤各形态铜含量较休闲土壤有不同程度的增加;而苜蓿的根系分布较深,对古耕层土壤铜的吸收作用也较强,使苜蓿连作系统古耕层土壤的氧化物结合态铜和有机结合态铜含量呈现降低趋势。

2.2.3 土壤锰形态含量变化 锰主要以矿物态和氧化物结合态存在于土壤中,这两种形态锰的含量分别为 39.42%~45.42% 和 33.15%~42.64%。土壤矿物态锰包括存在于土壤原生矿物和次生矿物中的锰,是土壤中锰的主要形态和有效锰的潜在来源。土壤中的碳酸盐结合态锰和有机结合态锰也占有一定的比例(其含量分别为 6.44%~14.74% 和 6.28%~11.29%)。交换态锰的含量较低,这是因为 Mn^{2+} 在正常的土壤 pH 和 Eh 值范围内是土壤溶液中唯一稳定的价态,它位于 Ining-W illiaims 稳定次序的最低位置^[28];而 Mn^{3+} 和 Mn^{4+} 并不能长期存在于土壤溶液中,仅在一些氧化还原反应中作为中间产物而短暂存在^[29],所以在土壤中含量甚微。

长期种植不同作物使土壤中锰的形态分布发生了明显的变化(图 7)。作物根系对耕层土壤锰的活化作用较明显,各种种植系统该层土壤中交换态锰含量较休闲土壤均有较大程度的增加,其增幅以苜蓿连作最大(835.7%),其次为小麦连作(185.7%),粮豆轮作系统的增幅较小(57.1%)。苜蓿连作土壤碳酸盐结合态锰均有增加,小麦连作土壤均有减少,粮豆轮作系统的碳酸盐结合态锰在耕层比休闲减少了 5.2%,在古耕层比休闲增加了 1.3%。小麦连作和粮豆轮作土壤氧化物结合态锰变化不大,而苜蓿连作土壤该形态锰有较多的降低,并且在耕层土壤降低较多,在古耕层土壤降低较少。3 种轮作系统土壤有机结合态锰均低于休闲土壤,耕层降幅顺序为:苜蓿连作> 粮豆轮作> 小麦连作;古耕层为:苜蓿连作> 小麦连作> 粮豆轮作。

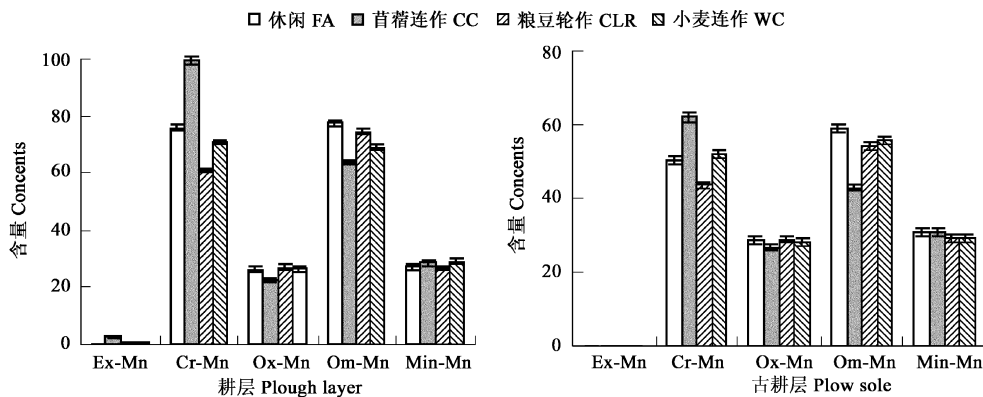


图 7 不同种植系统锰形态分布

Fig 7 Manganese fractions in different planting systems

氧化物结合态和矿物态锰单位为 10mg/kg,其余都为 mg/kg Units of Ox-Mn and Mn in Mn are 10mg/kg,Others are mg/kg

种植不同作物对锰在土壤组分形态分布产生了明显的影响。在长期种植作物条件下,作物根系分泌物的溶解作用和作物残体及土壤有机质在土壤中的转化过程促进了锰在各形态的重新分配,改善了土壤锰的有效性。同时由于作物的吸收,土壤中碳酸盐结合态、氧化物结合态和有机结合态锰含量均有不同程度的下降。种植系统对土壤锰有效性的改善因作物而异,但各种种植系统耕层土壤交换态、碳酸盐结合态和有机结合态锰高于古耕层,氧化物结合态和矿物态锰含量低于古耕层。

2.2.4 土壤铁形态含量变化 土壤中的铁主要以矿物态存在(图 8),占土壤全铁的 96.40%~97.32%,其次为氧化物结合态,占全铁的 2.26%~2.58%,有机结合态仅占全铁 0.24%~1.13%。耕层土壤交换态和有机结合态铁的含量高于古耕层土壤,而碳酸盐结合态、氧化物结合态和矿物态铁含量低于古耕层土壤。

作物根系对铁的活化和吸收使不同种植系统对土壤中锰的形态分布产生了明显的影响(图 8)。除苜蓿连作耕层土壤交换态铁含量有较多增加外,各种种植系统土壤中该形态铁含量均有降低,在古耕层下降顺序为:小麦连作> 苜蓿连作> 粮豆轮作。苜蓿连作土壤碳酸盐结合态铁有较多的增加,小麦连作却有较多减少。各种种植系统土壤中氧化物结合态铁在耕层高于休闲土壤,在古耕层低于休闲土壤。苜蓿连作和小麦连作土壤有机结合态铁有较大幅度的增加,粮豆轮作土壤有机结合态铁低于休闲土壤。土壤矿物态铁含量均低于休闲土壤,降低顺序为:小麦连作> 苜蓿连作> 粮豆轮作。

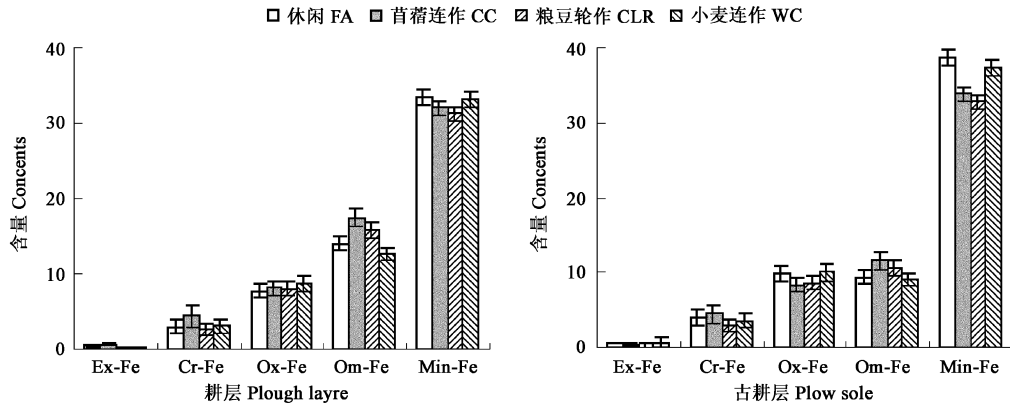


图8 不同种植系统铁形态分布

Fig. 8 Iron fractions in different planting systems

氧化物结合态、有机结合态和矿物态铁单位 Units of Ox-Fe, Om-Fe and Min-Fe: 100mg/kg, 10mg/kg, and 1000mg/kg, respectively, 其余为 mg/kg Others are mg/kg

不同种植系统对土壤中铁的存在形态有着不同的影响,这是由作物生长过程中所产生的特殊的土壤环境条件造成的。长期种植小麦和苜蓿促进了矿物态铁向有机结合态铁的转化,增加了土壤中有效铁的储量,这可能和小麦根系分泌的麦根酸类物质及长期种植苜蓿对土壤 pH 值的降低有关。作物根系分泌的有机物质及残留物在土壤中转化时降低了土壤的氧化还原电位,部分地溶解了氧化物结合态铁,而在土壤氧化还原电位恢复过程中又形成铁锰氧化物,包被了土壤中的游离态铁,使氧化物结合态铁增加。降低了的土壤氧化还原电位在表层土壤容易恢复,在深层土壤难于恢复,从而造成了各种种植系统土壤氧化物结合态铁在耕层的增加和在古耕层的降低,这也表明种植作物可以活化深层土壤难溶态铁。北方石灰性土壤在农业生产中经常发生缺铁症状,因此通过合理的作物种植制度来促进土壤铁向有效形态转化,调节土壤铁的有效性,改善土壤供铁状况和植物对土壤铁的吸收利用有重要的意义。

3 结论

(1) 土壤微量元素在土壤剖面的分布因种植系统和土壤层次的不同而异,有效锌和有效锰在剖面的分布呈现上高下低的趋势,有效铜和有效铁呈上低下高的分布趋势。

(2) 各种种植系统有效锌和有效铜含量均低于休闲土壤,有效锌以小麦连作和苜蓿连作降低最多,有效铜以小麦连作和粮豆轮作降低最多。小麦连作土壤有效锰含量低于休闲,苜蓿连作和粮豆轮作土壤均有所增加。各种种植系统在 40cm 以上土层土壤有效铁含量均高于休闲土壤,40~100cm 土层小麦连作低于休闲土壤,粮豆轮作高于休闲土壤,苜蓿连作与休闲相近。表明长期种植作物可以改善土壤锰素营养和铁素营养状况。

(3) 苜蓿连作和小麦连作使锌和铁从矿物态向有机结合态转化,增加了土壤有效锌和有效铁的储备,粮豆轮作土壤各形态锌低于休闲,并且锌的总贮量有所减少;各种种植系统土壤氧化物结合态铁在耕层增加和在古耕层降低也表明种植作物可以活化深层土壤难溶态铁。长期种植作物耕层土壤各形态铜含量降低,粮豆轮作和小麦连作古耕层土壤各形态铜有所增加。3 种植系统碳酸盐结合态、氧化物结合态和有机结合态锰含量均有不同程度的下降。

References

- [1] Xiong Y, Li Q K. *Chinese Soil*. Beijing: Science Press, 1987.
- [2] Liu X J, Liao X Y, Zhang Y Z, et al. Effects of rice-based cropping system on distribution of manganese in the profile of paddy soil derived from red earth. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1440~1445.
- [3] Janzen H H, Campbell C A, Isaurralde R C, et al. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil Tillage Research*, 1998, 47: 181~195.
- [4] Drinkwater L E, Wagoner P, Sarrantonio M. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature*, 1998, 396: 262~264.
- [5] Campbell C A, Zentner R P. Soil organic matter as influenced by crop rotation and fertilization. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 1034~1040.
- [6] Larson W E, Clapp C E, Pierre W H, et al. Effects of increasing amounts of organic residues on continuous corn. II. Organic carbon,

- nitrogen, phosphorus, and sulfur. *Agronomy Journal*, 1972, **64**: 204~ 208
- [7] Yuan K N. *Soil Chemistry of Plant Nutrients*. Beijing: Science Press, 1983
- [8] Moslehuddin A Z M, Sama L, Kazuhiko E. Trace elements in Bangladesh paddy soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, **30**: 1975~ 1996
- [9] Li Z Y, Xie Y Y, Tian X F, et al. Content and distribution of trace elements in the soils of Xinjiang. *Acta Pedologica Sinica*, 1986, **23**: 330~ 334
- [10] Xie Z C, Ma C H, Hu D J, et al. Studies on the content and distribution of micronutrients in soils of Hubei Province. *Acta Pedologica Sinica*, 1990, **27**: 411~ 419
- [11] Stevenson F J, Arda Kani M S. Organic matter reactions involving micronutrients in soils. In: Mortwedt J J, Giordano P M, Lindsay W L, eds. *Micronutrients in Agriculture*. Madison, USA: Soil Sci. Soc. Am. University of Illinois, Urbana, USA, 1972: 79~ 114
- [12] Hodgson J F, Lindsay W L, Trierweiler J F. Micronutrients cation complexing in soil solution. II. Complexing of zinc and copper in displaced solutions from calcareous soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1966, **30**: 723~ 726
- [13] Shuman L M. Effect of organic matter on the distribution of manganese, copper, iron, and zinc in soil fractions. *Soil Science*, 1988, **146**: 192~ 198
- [14] Marschner H, Cakmak I, Romheld V. Root-induced change of nutrient availability in the rhizosphere. *Journal of Plant Nutrition*, 1987, **9**: 695~ 713
- [15] Youssef R A, Abd E F A, Hilal M H. Studies on the movement of Ni in wheat rhizosphere using rhizobox technique. *Egyptian Journal of Soil Science*, 1997, **37**: 175~ 187
- [16] Mench M J, Fargues S. Metal uptake by iron-efficient and inefficient oats. *Plant and Soil*, 1994, **165**: 227~ 233
- [17] Shuman L M, Wang J. Effect of rice variety on zinc, cadmium, iron and manganese content in rhizosphere and non-rhizosphere soil fractions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1997, **28**: 23~ 36
- [18] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**: 844~ 851
- [19] Shuman L M. Fractionation method for soil micronutrients. *Soil Science*, 1985, **140**: 11~ 22
- [20] Yu J B. *Shaanxi Soil Species*. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1988
- [21] Agrochemistry Commission, Soil Science Society of China. *Routine methods for soil and agrochemical analysis*. Beijing: Science Press, 1983
- [22] Peng L, Peng X L, Yu C Z, et al. Zinc content in soils of Loessal region, effect of zinc fertilizer and effective conditions for its application. *Acta Pedologica Sinica*, 1983, **20**: 361~ 372
- [23] Williams C H, David D J. Effects of pasture improvement with subterranean clover and superphosphate on the availability of trace metals to plant. *Australian Journal of Soil Research*, 1976, **14**: 85~ 93
- [24] Cregan D, Sykes J A, Dymock A J. Pasture improvement and soil acidification. *Agricultural Gazette of New South Wales*, 1979, **90**: 33~ 35
- [25] Flemens K, Sinan A. Goulburn leclerne failures linked with induced manganese toxicity. *Agricultural Gazette of New South Wales*, 1970, **81**: 662~ 663
- [26] Osborne G J, Wright W A, Sykes J. Increasing soil acidity threatens farming system. *Agricultural Gazette of New South Wales*, 1978, **89**: 21
- [27] Lee B. Farming brings acid soils. *Rural Research*, 1980, **106**: 4~ 9
- [28] Cotton F A, Wilkinson G. *Advanced Inorganic Chemistry*. New York: Interscience Publishers, 1962
- [29] Bartlett R J. Soil redox behavior. In: Sparks D L, ed. *Soil Physical Chemistry*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1986: 179~ 207

参考文献:

- [1] 熊毅, 李庆远. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1987.
- [2] 刘学军, 廖晓勇, 张扬珠, 等. 不同稻作制对红壤性水稻土中锰的剖面分布的影响. *生态学报*, 2002, **22**(9): 1140~ 1145.
- [7] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学. 北京: 科学出版社, 1983.
- [9] 李泽岩, 谢玉英, 田秀芬, 等. 新疆土壤微量元素的含量与分布. *土壤学报*, 1986, **23**(4): 330~ 334.
- [10] 谢振翅, 马朝红, 胡定金, 等. 湖北省土壤微量元素含量分布研究. *土壤学报*, 1990, **27**(4): 411~ 419.
- [20] 喻建波. 陕西土种志. 西安: 陕西科技出版社, 1988.
- [21] 中国土壤学会土壤化学专业委员会. 土壤农化分析常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983.
- [22] 彭琳, 彭祥林, 余存祖, 等. 黄土地区土壤中锌的含量分布、锌肥肥效及其有效施用条件. *土壤学报*, 1983, **20**(4): 362~ 371.