

黄土高原旱地连续施用锰肥的土壤效应研究*

魏孝荣^{1,2} 郝明德¹ 邵明安¹

(1 中国科学院水利部水土保持研究所(西北农林科技大学水土保持研究所)黄土高原土壤侵蚀与

旱地农业国家重点试验室, 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 采用连续浸提形态分级方法, 研究了连续施用锰肥 17 a 后锰的土壤化学特性变化。结果表明: 经过长期连续施用锰肥, 土壤全锰和 DTPA-Mn 含量增加不多。土壤 DTPA-Mn 含量随试验时间的延长呈增加趋势, 施锰土壤有效锰提高不多, 土壤 DTPA-Mn 含量只增加了 0.4~1.7 mg kg⁻¹。土壤中的锰主要以矿物态存在, 占土壤全锰含量的比例为 87.3%~91.8%。碳酸盐态、氧化锰态和紧结有机态锰占全锰的比例相当, 土壤中各形态锰按含量大致呈矿物态>碳酸盐态>氧化锰态>紧结有机态>松结有机态>交换态的顺序。施入土壤的锰肥有 91.1%~98.6% 进入碳酸盐结合态、氧化锰结合态、紧结有机态和矿物态, 只有很少一部分仍留在有效态锰库中。交换态和松结有机态锰对土壤锰的有效性起着主要作用, 可以反映土壤锰的供给状况, 碳酸盐态和紧结有机态锰不能反映土壤锰的有效性。

关键词 连续施肥; 锰; 土壤; 形态; 有效性

中图分类号 S143.7; S153.6

文献标识码 A

我国缺锰土壤基本上分布于北方^[1,2], 北方大面积的石灰性土壤, 尤其是质地轻、通透性良好、有机质少的土壤中锰的供给往往不足。近年来, 锰肥在北方地区得到了大面积的推广和应用, 收到了良好的效果^[3-5]。许多研究者也开展了锰肥作物效应方面的研究^[6-9]。李旭辉等^[6]研究发现, 在陕西省缺锰土壤上施用锰肥可以显著提高小麦产量, 改善小麦的营养状况。高柳青等^[7]发现, 对于高 pH、固锰能力较强、释放养分能力较弱的土壤, 施锰能显著地提高作物的根系活力, 促进作物吸收养分的能力, 增强作物根系对养分的活化作用。魏孝荣等^[8]的试验结果表明, 施用锰肥可以部分地补偿干旱胁迫对玉米光合作用的影响, 促进光合作用。

目前关于施用锰肥的土壤效用, 特别是连续施用条件下的土壤效应报道的不多。锰肥施入土壤后发生各种反应, 进入不同的形态, 这些形态的锰对作物的有效性直接影响着土壤对作物锰营养的供应能力和锰肥的效果。李旭辉等^[6]以陕西土进行的试验发现, 施入土壤中的锰有 53.8%~72.4% 转化成植物不易吸收的易还原态锰, DTPA-Mn 增加甚微。可见, 深入研究锰肥进入土壤后的土壤效应对于了

解锰肥在土壤中的行为和充分发挥锰肥的效果有重要意义。

本文根据在黄土高原南部旱地上连续进行了 17 a 的锰肥长期定位试验资料, 采用改进了的 Tessier 等^[10]和蒋廷惠等^[11]的形态分级方法, 把土壤中的锰依次分为交换态、松结有机态、碳酸盐结合态、氧化锰结合态、紧结有机态和矿物态六个形态, 研究长期施用条件下锰的土壤化学特征变化, 旨在为同类地区锰肥的合理施用提供依据。

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。试验地土壤为粘化黑垆土, 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 10.5 g kg⁻¹, 全氮 0.8 g kg⁻¹, 速效氮 37.0 mg kg⁻¹, 全磷 0.66 g kg⁻¹, 速效磷 3.0 mg kg⁻¹, 速效钾 129.3 mg kg⁻¹, CaCO₃ 108.4 mg kg⁻¹, pH 8.3。试验地海拔

* 中国科学院农业扶贫专项 CASN115-06-04 和中国科学院野外台站基金资助

作者简介: 魏孝荣(1978~), 男, 陕西武功人, 硕士, 从事微量元素土壤环境化学方面的研究。E-mail: xrwei78@163.com

收稿日期: 2005-07-06 收到修改稿日期: 2005-11-20

1 200 m, 试验区年平均气温 9.1℃, 无霜期 171 d, $\geq 0^\circ\text{C}$ 活动积温 3 866℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温 3 029℃, 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 CK (施 N 60 kg hm⁻², 施 P₂O₅ 60 kg hm⁻²)、施 Mn (施 N 60 kg hm⁻², 施 P₂O₅ 60 kg hm⁻², 施 MnSO₄ 22.5 kg hm⁻², 含 Mn 25.8%) 2 个处理, 3 次重复, 小区面积 5.5 m × 4 m, 随机排列。供试小麦品种在 1984 年和 1985 年为“秦麦 4 号”, 1986 年~ 1995 年为“长武 131”, 1996 年以后为“长武 134”, 小麦播种期为 9 月中旬, 收获期为 6 月下旬。氮肥为尿素, 磷肥为过磷酸钙, 于作物播种前撒施地表, 翻入土壤。小麦采用沟播, 锰肥溜入播种行, 试验管理同大田。

1.3 样品采集与分析

于 1984、1987、1990、1991、1992、1993、1995 和

2001 年小麦收获期分别采集耕层土壤样品; 2001 年冬小麦返青期(3 月)和 2001 年冬小麦播前(9 月)分别采集 0~ 100 cm 土壤样品。土壤样品自然风干后过 1 mm 和 0.25 mm 筛。

所有土壤样品测定有效锰(DTPA-Mn)含量, 2001 年 9 月采集的 0~ 60 cm 土样测定全锰含量和不同形态锰含量。

土壤有效锰含量用 DTPA (pH7.3) 溶液浸提—原子吸收法测定; 全锰含量用 HNO₃-HClO₄-HF 消化—原子吸收法测定^[11]。

1.4 锰的形态分级

本研究所用的形态分级方法在 Tessier 等^[10]和蒋廷惠等^[11]的方法基础之上进一步改进, 把土壤中的锰依次分为: 交换态、松结有机态、碳酸盐结合态、氧化锰结合态、紧结有机态和矿物态 6 种形态。

具体操作步骤见表 1。实验操作温度为 25℃, 液土质量比为 10:1。

数据分析采用 SAS 软件包中相应程序进行。

表 1 土壤锰形态分级方法

Table 1 Sequential fractionation of manganese in soils

形态 Fractions	浸提液 Extractants	操作条件 Operation condition
交换态 Ex-Mn	1 mol L ⁻¹ Mg(NO ₃) ₂ (pH7.0)	振荡 2h Shake 2 hours
松结有机态 Wb-Mn	0.1 mol L ⁻¹ Na ₄ P ₂ O ₇ (pH9.5)	振荡 2h Shake 2 hours
碳酸盐结合态 Carb-Mn	1 mol L ⁻¹ NaOAc-HOAc (pH5.0)	振荡 5h Shake 5 hours
氧化锰结合态 OxMn-Mn	0.1 mol L ⁻¹ NH ₂ OH·HCl (pH7.0)	振荡 0.5h Shake 0.5 hours
紧结有机态 Sb-Mn	A: 30% H ₂ O ₂ (pH2.0) B: 1 mol L ⁻¹ Mg(NO ₃) ₂ (pH7.0)	用 A 85℃ 水浴近干, 重复一次, 用 B 浸提 Extracted with A at 85℃ twice, then extracted 2 hours with B at 25℃
矿物态 Min-Mn	HNO ₃ -HClO ₄ -HF	

2 结果与分析

2.1 全锰含量的变化

长期施用锰肥没有使锰在土壤中产生明显

的积累(表 2)。产生这种现象的原因是土壤中本来就含有较多的锰, 而本试验的施锰剂量较小, 通过施用锰肥对土壤全锰含量的增加作用便不明显。

表 2 土壤中全锰含量

Table 2 Total manganese content in the soil profile (mg kg⁻¹)

处理 Treatments	土层深度 Soil depth				
	0~ 15 cm	15~ 30 cm	30~ 45 cm	45~ 60 cm	0~ 60 cm
Mn	655.4	635.0	621.1	627.3	634.7
CK	639.6	622.3	606.3	626.1	623.6
增幅 Increment (%)	2.5	2.0	2.4	0.2	1.8

LSD_{0.05 处理} = 10.67, LSD_{0.05 剖面} = 15.09, LSD_{0.05 treatment} = 10.67, LSD_{0.05 profile} = 15.09

施用锰肥土壤剖面中全锰含量略高于对照,且在土壤剖面中分布比较均匀。施锰使0~15 cm 土层土壤全锰含量增加了 15.8 mg kg^{-1} , 15~30 cm 和 30~45 cm 土层分别增加了 12.6 mg kg^{-1} 和 14.8 mg kg^{-1} ,但是在0~60 cm 土层的平均增幅只有 1.8%。

2.2 DTPA-Mn 含量变化

土壤中锰的总量仅代表土壤向作物供给锰的潜在能力,只有有效锰才能被当季作物直接吸收利用,可作为评价对植物有效的锰的指标。土壤中的有效锰可分为水溶态、代换态和易还原态,三者之和称为活性锰。有效锰则可表示为:有效锰=水溶态锰+代换态锰+1/20 易还原态锰^[13],常用 DTPA (pH 7.3) 来浸提^[14]。一般土壤中水溶性锰很少,常包括在交换态锰中;石灰性土壤中交换态锰也往往不能测出,所测得的有效锰实际上只有易还原态锰。

张维理等^[15]的研究结果表明,施入土壤中的锰有 61%~86% 转化为易还原态锰,增加了土壤有效锰的含量。黄土区土壤为弱中碱性,富含碳酸钙 ($70\sim 160 \text{ g kg}^{-1}$)^[16],对锰肥有较强的固定作用;另外,由于低价锰在土壤中易氧化成高价锰^[17],施用锰肥对该区土壤有效锰含量的提高不明显。无论施用锰肥与否,土壤中 DTPA-Mn 的含量均随试验时间的延长呈现出上升的趋势,且施锰处理和对照处理的上升趋势一致,即 1984 年~1990 年、1991 年~1993 年和 1995 年~2001 年三个时期土壤 DTPA-Mn 增加较为平稳,1991 年和 1995 年土壤 DTPA-Mn 增加较快(图 1),这可能和该区降雨量的年季分配有关。和其他年份相比,1991 年和 1995 年该地区降雨较多,有利于土壤锰的活化,土壤 DTPA-Mn 增加较多。

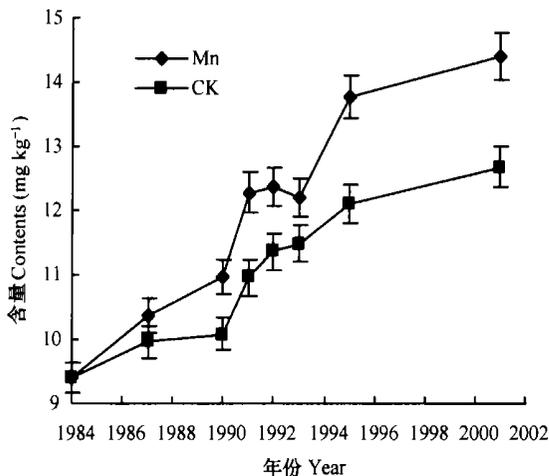


图 1 试验期内土壤 DTPA-Mn 含量变化

Fig 1 Variation of Soil DTPA-Mn contents from 1984 to 2001

图 2 表明,土壤 DTPA-Mn 增加量随锰肥施用时间的延长呈线性增加关系。这是因为锰肥施用时间愈长,土壤中累积的锰素愈多,土壤 DTPA-Mn 的增加就越多。

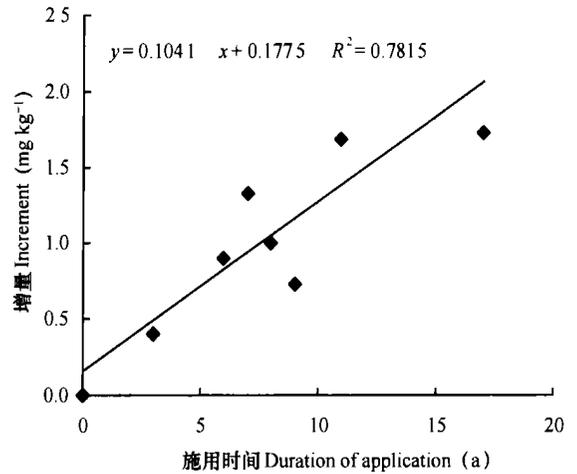


图 2 土壤 DTPA-Mn 增加量与施用时间的关系

Fig 2 Soil DTPA-Mn in relation to duration of Mn fertilizer application

土壤中 DTPA-Mn 含量分布(图 3,图 4)表明,DTPA-Mn 基本上在 0~40 cm 土层范围内含量较高,经过长期施用锰肥,表层土壤 DTPA-Mn 含量的增加并不是很多,这与 Wilson 等^[18]的研究结果相似。比较两个不同时期土壤 DTPA-Mn 分布发现,返青期小麦对土壤有效锰吸收强烈,土壤 DTPA-Mn 含量较低;下季小麦播前经过长达 3 个月的休闲季节,此期正好为该区的雨季,土壤接受了丰富的降雨,氧化还原环境和其他理化性状都有所改善,有利于土壤中的锰向有效形态转化,此时土壤 DTPA-Mn 含量显著高于上季小麦返青期含量。和不施锰相比,在 2001 年小麦返青期,施锰土壤 20~100 cm 四个土层 DTPA-Mn 含量分别比对照高 33.0%、48.2%、33.9% 和 20.3%;0~100 cm 土层土壤 DTPA-Mn 平均含量增加了 26.7%。在 2001 年小麦播前,施锰处理 0~30 cm 土层土壤 DTPA-Mn 含量较对照增加较少,30~100 cm 土层增加较多,增幅为 13.3%~28.6%,最大增幅出现在 45~60 cm 土层,0~100 cm 土层内 DTPA-Mn 平均含量比对照高 15.5%。这些结果表明,由于较强的固定作用以及易于氧化的特性,施用锰肥使表层土壤 DTPA-Mn 提高不明显;深层土壤氧化性较弱,施用锰肥后淋溶到深层的低价锰离子不易因氧化而失去有效性,所以长期施用锰肥后深层土壤 DTPA-Mn 含量增加较多。

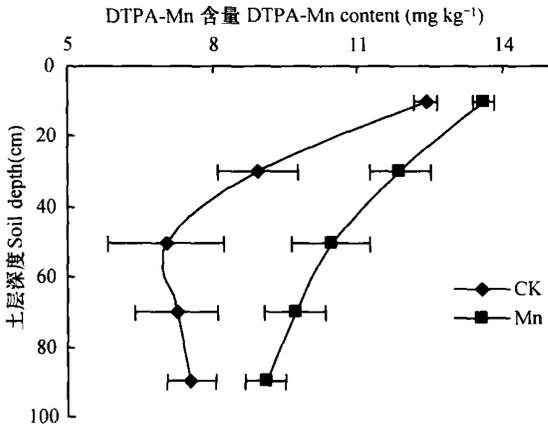


图 3 2001 年小麦返青期土壤 DTPA-Mn 含量

Fig. 3 Soil DTPA-Mn content at the wheat regreening stage in 2001

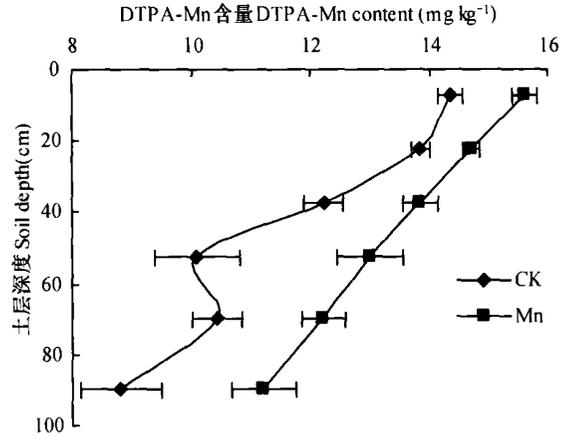


图 4 2001 年小麦播前土壤 DTPA-Mn 含量

Fig. 4 Soil DTPA-Mn content before sowing of wheat in 2001

表 3 土壤中各形态锰占全锰的比例

Table 3 Percentages of manganese fractions in soils (%)

处理 Treatments	土层 Layers (m)	交换态 Ex-Mn	松结有机态 Wh- Mn	碳酸盐态 Carb- Mn	氧化锰态 OxMn-Mn	紧结有机态 Slb- Mn	矿物态 Min- Mn
Mn	0~ 15	0.15	0.57	5.56	2.10	1.86	89.77
	15~ 30	0.10	0.57	4.64	2.46	2.06	90.17
	30~ 45	0.05	0.47	5.11	3.39	2.45	88.53
	45~ 60	0.05	0.49	5.91	3.73	2.35	87.46
CK	0~ 15	0.06	0.45	4.56	1.74	1.41	91.78
	15~ 30	0.07	0.54	4.28	1.95	1.78	91.38
	30~ 45	0.04	0.46	5.19	2.50	1.59	90.22
	45~ 60	0.01	0.44	5.49	4.95	1.79	87.32

2.3 土壤中锰的形态

表 3 为土壤中各形态锰占全锰的比例, 试验地土壤中的锰主要以矿物态存在, 占土壤全锰含量的比例为 87.32%~ 91.78%; 碳酸盐态、氧化锰态和紧结有机态锰占全锰的比例相似, 顺序为碳酸盐态(4.28%~ 5.91%) > 氧化锰态(1.74%~ 4.95%) > 紧结有机态(1.41%~ 2.45%); 松结有机态和交换态锰占的比例很小, 分别为 0.44%~ 0.57% 和 0.01%~ 0.15%。无论施用锰肥与否, 0~ 60 cm 土层土壤中锰的形态按含量均大致呈矿物态> 碳酸盐态> 氧化锰态> 紧结有机态> 松结有机态> 交换态的顺序(图 5)。

土壤各形态锰之间处于动态平衡之中, 锰肥施入土壤后, 部分以二价锰的形式进入土壤溶液, 部分氧化成锰氧化物或进入次生矿物晶格中, 还有一部分被粘土矿物或有机物质吸持或固定, 在各形态之间重新分配, 使各形态锰之间达到新的平衡。施用

锰肥以后, 土壤中各形态锰的含量较对照均有增加(图 5): 交换态锰以 0~ 15 cm 和 45~ 60 cm 土层增加最多, 增幅分别为 146% 和 570%, 其次为 15~ 30 cm 和 30~ 45 cm 土层, 增幅为 37% 和 27%; 松结有机态锰以 0~ 15 cm 土层增加最多, 增幅为 29%, 其次为 45~ 60 cm, 增幅为 12%, 15~ 30 cm 和 30~ 45 cm 土层增幅最小; 碳酸盐态锰也以 0~ 15 cm 土层增加最多, 其次为 15~ 30 cm 和 45~ 60 cm, 30~ 45 cm 增加较小; 氧化锰结合态锰的最大增幅出现在 30~ 45 cm 土层, 为 38.87%, 0~ 15 cm 和 15~ 30 cm 土层增幅接近, 45~ 60 cm 为负值; 紧结有机态锰在 30~ 45 cm 土层增幅最大, 为 57.51%, 其次为 0~ 15 cm 和 45~ 60 cm 土层, 15~ 30 cm 增幅较小; 矿物态锰因含量很高而使其增幅有限, 在 0.22%~ 0.68% 范围内, 15~ 30 cm 和 30~ 45 cm 土层较多, 0~ 15 cm 和 45~ 60 cm 较小。从 6 种形态锰的含量变化可以发现, 施入土壤中的锰主要进入碳酸盐结合态、氧

化锰结合态、紧结有机态和矿物态, 4 个形态的增量共占全锰增量的 91.1%~98.6%; 而肥料锰进入

交换态和松结有机态的量不多, 仅为 1.4%~8.9%。

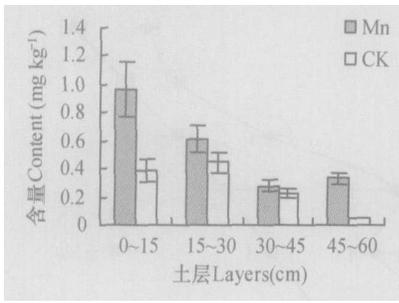


图 5a 土壤交换态锰含量分布图

Fig. 5a Distribution of Ex-Mn in soils

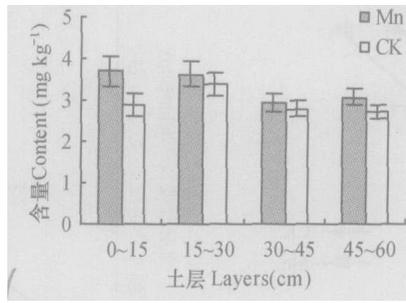


图 5b 土壤松结有机态锰含量分布图

Fig. 5b Distribution of Wb-Mn in soils

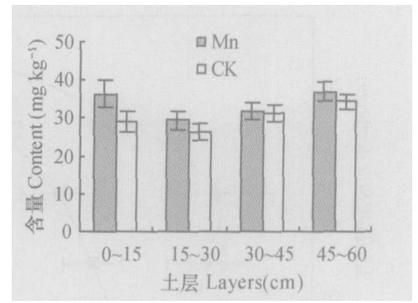


图 5c 土壤碳酸盐结合态锰含量分布图

Fig. 5c Distribution of Carb-Mn in soils

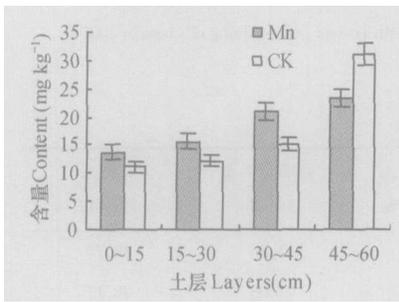


图 5d 土壤氧化锰结合态锰含量分布图

Fig. 5d Distribution of Ox-Mn in soils

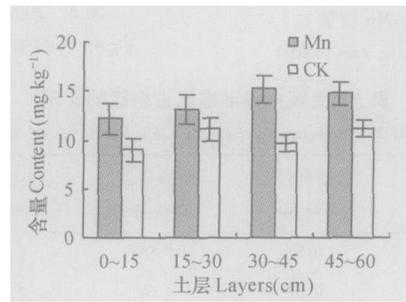


图 5e 土壤紧结有机态锰含量分布图

Fig. 5e Distribution of Sb-Mn in soils

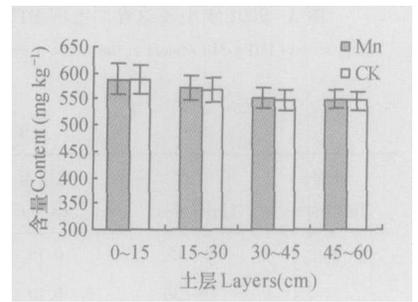


图 5f 土壤矿物态锰含量分布图

Fig. 5f Distribution of Min-Mn in soils

表 4 土壤 DTPA-Mn 与各形态锰的相关分析

Table 4 Correlation analysis of soil DTPA-Mn and manganese fractions

	DTPA-Mn	交换态 Ex-Mn	松结有机态 Wb-Mn	碳酸盐态 Carb-Mn	氧化锰态 Ox-Mn-Mn	紧结有机态 Sb-Mn	矿物态 Min-Mn	全锰 Tot-Mn
DTPA-Mn	1.000	0.869**	0.748*	-0.183	-0.768*	0.155	0.779*	0.616
交换态 Ex-Mn		1.000	0.902**	0.098	-0.598	0.102	0.789*	0.777*
松结有机态 Wb-Mn			1.000	-0.033	-0.458	0.256	0.620	0.625
碳酸盐态 Carb-Mn				1.000	0.557	0.413	-0.240	0.282
氧化锰态 Ox-Mn-Mn					1.000	0.415	-0.723*	-0.243
紧结有机态 Sb-Mn						1.000	-0.337	0.046
矿物态 Min-Mn							1.000	0.814*
全锰 Tot-Mn								1.000

注: 标有* 和** 者分别为差异达 0.05 和 0.01 显著水平 Note: * and ** mean differences at 0.05 and 0.01 significant levels

2.4 土壤锰的有效性分析

对土壤各形态锰含量与 DTPA-Mn 之间进行相关分析(表 4)发现, 土壤 DTPA-Mn 与交换态锰之间的相关性达极显著水平, 与松结有机态和矿物态锰之间的相关性达显著水平, 与氧化锰态含量之间呈显著负相关, 而与其他形态锰之间无相关性。在碱性条件下, 水锰矿(manganite)极易氧化成

结晶的钠水锰矿(birnessite), 由此开始, 按不同的氧化途径, 形成各种锰氧化物而失去有效性^[19], 这也是 DTPA-Mn 与氧化锰结合态锰之间呈显著负相关的原因。由相关分析结果可以认为, 交换态和松结有机态锰是土壤有效锰的来源。另外, 交换态锰与松结有机态锰含量之间的相关性达极显著水平, 与矿物态和全锰之间的相关性达显著水平,

氧化锰态锰与矿物态锰含量之间、矿物态锰与全锰之间呈显著相关, 而紧结有机态锰和碳酸盐态锰与其他形态锰之间无相关性。虽然矿物态锰和全锰与 DTPA-Mn 和交换态锰之间有显著的正相关关系, 但这是土壤中各形态锰长期平衡的结果, 这两种形态的锰并不能提供当季作物可以利用的有效锰, 因此我们只分析前 5 种形态锰之间的关系,

以揭示土壤有效锰的组成。

表 5 是土壤各形态锰的主成分分析结果, 可以看出, 第一主成分的方差贡献率最大, 为 52%, 第二主成分方差贡献率为 28%, 第三主成分的方差贡献率为 12%, 这三个主成分的累积方差贡献率为 92% (大于 85%), 因此这三个主成分能反映土壤各形态锰之间的关系。

表 5 土壤各形态锰主成分特征根

Table 5 Principal component eigenvalues of the soil manganese fractions

项目 Item	第一主成分 First principal component	第二主成分 Second principal component	第三主成分 Third principal component
特征根 Eigenvalues	3.68	1.96	0.84
方差贡献率 Proportion (%)	0.52	0.28	0.12
累积方差贡献率 Cumulative (%)	0.52	0.80	0.92

对各主成分进行的分权计算结果(表 6)表明, 第一主成分主要综合了交换态和松结有机态锰的变异信息, 且第一主成分的累积方差贡献率较大, 对土壤锰的有效性起着主要作用, 即包含了交换态和松结有机态锰信息的第一主成分可作为土壤锰的有效给源;

第二主成分综合了碳酸盐态和紧结有机态锰的变异信息, 由相关分析结果可知这两种形态与土壤有效锰无相关性, 所以土壤锰形态中的碳酸盐态和紧结有机态锰对锰的有效性没有直接贡献, 是土壤有效锰的储存库; 第三主成分则综合了碳酸盐态锰的变异信息。

表 6 土壤各形态锰主成分的特征向量

Table 6 Principal component eigenvectors of the soil manganese fractions

测定项目 Analysis items	第一主成分 First principal component	第二主成分 Second principal component	第三主成分 Third principal component
交换态 Ex-Mn	0.491	0.184	-0.091
松结有机态 Wb _o -Mn	0.436	0.208	-0.398
碳酸盐态 Carb-Mn	-0.076	0.597	0.458
氧化锰态 OxMn-Mn	-0.380	0.400	0.201
紧结有机态 Sb _o -Mn	-0.065	0.561	-0.598

结合土壤锰的形态和有效性分析发现, 施入土壤中的大部分锰被土壤碳酸盐、氧化物和矿物所固定, 对土壤有效锰没有直接贡献; 只有很少一部分进入土壤有效锰给源的交换态和松结有机态。这些结果进一步证明黄土高原旱地施用锰肥对土壤有效锰提高不明显。

3 结 论

1) 长期施用锰肥对锰在土壤中的积累没有产生明显的影响; 施锰土壤 0~ 60 cm 剖面中全锰含量略有提高, 且上下分布比较均匀;

2) 土壤 DTPA-Mn 含量随试验时间的延长呈增

加趋势, 施锰土壤有效锰提高不多, 土壤 DTPA-Mn 含量只增加了 0.4~ 1.7 mg kg⁻¹;

3) 施用锰肥以后, 土壤中各形态锰的含量较对照均有所增加; 土壤中锰的形态按含量大致呈矿物态> 碳酸盐态> 氧化锰态> 紧结有机态> 松结有机态> 交换态的顺序; 施入的锰肥有 91.13% ~ 98.58% 进入碳酸盐结合态、氧化锰结合态、紧结有机态和矿物态, 只有很少一部分进入土壤有效态锰库中;

4) 交换态和松结有机态锰与土壤有效锰之间有着显著的相关关系, 可以反映土壤锰的供给状况; 碳酸盐态和紧结有机态锰与土壤有效锰之间的相关性较差, 不能反映土壤锰的有效性。

参 考 文 献

- [1] 刘铮, 唐丽华, 朱其清, 等. 我国主要土壤中微量元素的含量与分布初步总结. 土壤学报, 1978, 15: 138~ 150. Liu Z, Tang L H, Zhu Q Q, *et al.* Content and distribution of trace elements in soils of China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1978, 15: 138~ 150
- [2] Liu Z, Zhu Q Q, Tang L H. Microelements in the main soils of China. *Soil Science*, 1983, 135: 40~ 46
- [3] 刘铮, 朱其清, 韩玉勤, 等. 土壤中的锰与锰肥的应用. 见: 中国科学院微量元素学术交流会汇刊. 北京: 科学出版社, 1980. 136~ 145. Liu Z, Zhu Q Q, Han Y Q, *et al.* Soil Mn and application of Mn fertilizer. *In: Proceedings of the Symposium on Microelements, Chinese Academy of Sciences (In Chinese)*. Beijing: Science Press, 1980. 136~ 145
- [4] 刘铮, 朱其清, 韩玉勤, 等. 江苏省徐淮地区土壤中微量元素供给情况及其与作物生长的关系. 土壤学报, 1979, 16: 245~ 256. Liu Z, Zhu Q Q, Han Y H, *et al.* Status of microelements of soils and the crop growth in Xuzhou and Huaiyin districts of Jiangsu (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1979, 16: 245~ 256
- [5] 王学贵, 朱克庄. 锰肥在几种农作物上的增产效果. 见: 中国科学院微量元素学术交流会汇刊. 北京: 科学出版社, 1980. 146~ 153. Wang X G, Zhu K Z. Yield-increasing effect of Mn fertilizer on crops. *In: Proceedings of the Symposium on Microelements, Chinese Academy of Sciences (In Chinese)*. Beijing: Science Press, 1980. 146~ 153
- [6] 李旭辉, 张金水, 冯振国. 锰锌肥对锰锌俱缺石灰性土壤上小麦的效应. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(增刊): 19~ 22. Li X H, Zhang J S, Feng Z G. Effects of Mn, Zn fertilizer applications on winter wheat in Mn Zn lack soil (In Chinese). *Jour. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For. (Nat. Sci. Ed.)*, 2001, 29(Suppl.): 19~ 22
- [7] 高柳青, 田长彦, 胡明芳. 锌锰对棉花吸收氮磷养分的影响及机理研究. 作物学报, 2000, 26: 861~ 868. Gao L Q, Tian C Y, Hu M F. Research on effect of zinc (Zn), manganese (Mn) on nitrogen (N) and phosphorus (P) absorption of cotton and its mechanism (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26: 861~ 868
- [8] 魏孝荣, 郝明德, 邱莉萍. 土壤干旱条件下锰肥对夏玉米光合特性的影响. 植物营养与肥料学报, 2004, 10: 255~ 258. Wei X R, Hao M D, Qiu L P. Effect of manganese fertilizer on maize photosynthetic performance under soil drought condition (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10: 255~ 258
- [9] Fang Z, Zhang Y Y, Zhang F S, *et al.* Mechanisms of difference in Mn efficiency between wheat and oilseed rape. *Pedosphere*, 2000, 10: 213~ 220
- [10] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.*, 1979, 51: 844~ 851
- [11] 蒋廷惠, 胡霏堂, 秦怀英. 土壤锌铜铁锰形态区分方法的选择. 环境科学学报, 1990, 10(3): 280~ 286. Jiang T H, Hu A T, Qin H Y. Fractionation of soil zinc, copper, iron and manganese (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1990, 10(3): 280~ 286
- [12] 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. Agrochemistry Commission, Soil Science Society of China. Routine Methods for Soil and Agrochemical Analysis (In Chinese). Beijing: Science Press, 1983
- [13] Finck A. Principle and problems of the chemical estimations of the supply of available soil manganese. *Plant Soil*, 1960, 13: 39~ 46
- [14] Lindsay W L, Norvell W A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1978, 42: 421~ 428
- [15] 张维理, 张乃凤. 石灰性土壤中锰素营养的研究 III. 土壤中 $MnSO_4$ 的转化及不同形态锰的含量变化. 土壤学报, 1984, 21: 382~ 385. Zhang W L, Zhang N F. Study on nutrition of Mn in calcareous soils. III. Transformation of applied Mn and different forms of Mn in soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1984, 21: 382~ 385
- [16] 彭琳. 黄土土壤锰锌的含量及锰肥肥效. 土壤通报, 1981, 6: 16~ 19. Peng L. Content of manganese and zinc and their effects in Loess soils (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1981, 6: 16~ 19
- [17] 陈铭, 陈超子, 尹崇仁, 等. 锰、锌对土壤和小麦根系中营养元素浓度的效应. 土壤通报, 1995, 26: 174~ 177. Chen M, Chen C Z, Yi C R, *et al.* Effects of manganese and zinc on the nutrient concentration in soils and wheat root (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1995, 26: 174~ 177
- [18] Wilson D O, Boswell F C, Ohki K, *et al.* Soil distribution and soybean plant accumulation of manganese in manganese deficient and manganese fertilized field plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, 45: 549~ 552
- [19] McKenzie R M. Manganese oxide and hydroxides. *In: Dixon J B, Weed S B. eds. Minerals in Soil Environments*. 2nd Ed. Soil Sci. Soc. Am., Wisconsin, USA, 1989. 439~ 465

EFFECTS OF CONTINUOUS APPLICATION OF MANGANESE FERTILIZER ON MANGANESE BEHAVIOR IN DRYLAND SOILS OF THE LOESS PLATEAU

Wei Xiaorong^{1,2} Hao Mingde¹ Shao Mingan¹

(1 *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources (Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-Tech. University of Agriculture & Forestry), Yangling, Shaanxi 712100, China*)
(2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract Manganese deficiency has been a problem in agricultural practice in many soils in North China and manganese fertilizer also has been extensively used to correct the problem. In order to further understand behavior of manganese fertilizer in soils, a long-term field experiment was initiated in 1984 on continuous application of manganese fertilizer in dryland soils of the Loess Plateau. After 17 years, availability and fractions of manganese in the soil were investigated using a modified sequential extraction technique. The results showed that total manganese and DTPA extractable manganese were not increased much in the soil. But the latter did show an increasing trend with the time, no matter manganese fertilizer was added or not. In addition, the application of manganese fertilizer contributed little to increase of soil DTPA-Mn, which ranged from 0.4 to 1.7 mg kg⁻¹. Manganese fractions in all studied soils were greater in manganese fertilizer treatments compared with those in control. It was also found that mineral bonded manganese occupied about 87.3% ~ 91.8% of the total soil manganese, while carbonate form and oxides form of manganese, and organic matter strongly bonded manganese shared similar percentages. In terms of content, the various fractions of manganese ranked in the order of mineral bonded > carbonate bonded > oxides bonded > organic matter strongly bonded > organic matter weakly bonded > exchangeable. About 91.1% ~ 98.6% of fertilizer manganese was in the form of carbonate bonded, oxide bonded, or organic matter strongly bonded manganese, or in the mineral form, which were not readily available for the crop to use. Only 1.4% ~ 8.8% of fertilizer manganese entered into exchangeable and organic matter weakly bonded forms, which were considered as available manganese in soils. The results of statistical analysis showed that exchangeable and organic matter weakly bonded manganese were the major sources of soil available manganese, carbonate bonded and organic matter strongly bonded manganese made little contribution to soil available manganese.

Key words Continuous fertilization; Manganese; Soil; Fraction; Availability