植物营养与肥料学报 2013,19(2):404-412
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi:10.11674/zwyf.2013.0217

长期不同施肥和土地利用方式对塿土耕层碳储量的影响

王莲莲,张树兰,杨学云*
(西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要:利用塿土20年长期肥料定位试验研究了不同土地利用方式和施肥对土壤有机碳和无机碳储量变化的影响。试验包括休闲(Fallow, FL)、撂荒(Setaside, SL)、不施肥(CK)、单施氮(N)、氮钾(NK)、磷钾(PK)、氮磷(NP)、氮磷钾(NPK)、氮磷钾配合秸秆还田(SNPK)、氮磷钾配合低量有机肥(M1NPK)和氮磷钾配合高量有机肥(M2NPK)11个处理。结果表明,CK和FL处理等质量耕层土壤有机碳储量仍维持在试验前水平,NP和SL处理显著提高了耕层土壤有机碳储量,年均增加分别达到347 kg/hm^{2}和518 kg/hm^2,此4个处理等质量耕层土壤无机碳储量均较试验开始前(Initial soil, IniS)显著下降,尤其是NP处理显著低于其它3个处理。与IniS和CK相比,除NK处理外的所有施肥处理均显著地提高了等质量耕层土壤有机碳储量,其大小顺序为M2NPK > M1NPK > SNPK > NPK≈NP > PK≈N,最大年均增加量为M2NPK 944 kg/hm^2,最小为N 127 kg/hm^2。施肥处理除PK和M2NPK处理外,其它处理等质量耕层土壤无机碳储量均较试验前明显降低,可能是由于土壤酸化所致。PK和M2NPK处理无机碳储量能够维持不下降,表明土壤无机碳和有机碳在适合条件下可能有某种关系。试验结果还显示,长期试验20年除M1NPK和M2NPK处理外,其它处理耕层土壤容重均明显高于试验开始前,表明等质量土壤碳储量与等深度碳储量相比可以更好地反映土壤碳的变化。

关键词:塿土;长期肥料试验;土壤有机碳;土壤无机碳
中图分类号:S153.6+1 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2013)02-0404-09

Soil carbon storage affected by long-term land use regimes and fertilization in manural loess soil

WANG Lian-lian, ZHANG Shu-lan, YANG Xue-yun*
(*College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: The storages of soil organic and inorganic carbon under contrasting land use regimes and fertilization were analyzed on a basis of a 20-year long term experiment in a manural loess soil. There were eleven treatments, fallow (FL), setaside (SL), un-amended control (CK), nitrogen (N), nitrogen and potassium (NK), phosphorus and potassium (PK), nitrogen and phosphorus (NP), nitrogen phosphorus and potassium (NPK), wheat/maize straw (S) with NPK (SNPK) and dairy manure (M) with NPK (M1NPK and M2NPK). The results indicated that the storages of soil organic carbon in the soils of the FL and CK, with an equivalent mass to that of top 20 cm soil of CK, remained unchanged relative to the soil prior to the commence of the experiment (Initial soil, IniS), while the storages were significantly improved under the treatments of NP and SL with an annual increase of 347 kg/ha and 518 kg/ha, respectively. The storages of soil inorganic carbon for CK, NP, FL and SL were dropped dramatically compared to initial soil, particularly for NP, on which it is even significantly lower than those of other three treatments. For treatments where nutrient management treatments were applied in conjunction with the cropping regime of winter wheat and summer maize rotation (exclusive of FL and SL treatments), the storages of

收稿日期:2012-08-13 **接受日期**:2012-11-09
基金项目:公益性行业(农业)科研项目(201203030)资助。
作者简介:王莲莲(1988—),女,陕西安康人,硕士研究生,主要从事农田物质循环与环境方面的研究。E-mail:wanglian4427505@126.com.cn
*通信作者 E-mail:xueyunyang@nwsuaf.edu.cn

soil organic carbon in plough layer soils on an equivalent mass basis of all but NK treatments were markedly enhanced compare with those of CK and initial soil in a order of statistic significance as follow: M2NPK > M1NPK > SNPK > NPK ≈ NP > PK ≈ N, of which, the maximum increase was observed on M2NPK with an annual mean value of 944 kg/ha, and a minimum value of 127 kg/ha on N. Whereas considerable decreases of the soil inorganic carbon storage in plough layer soils on an equivalent mass basis were found in all treatments except for PK and M2NPK in comparison to initial soil value, this is probably due to the acidification of the soil as the consequence of either precipitation or fertilization. The fact that the storages of inorganic carbon in PK and M2NPK, in ca. top 20 cm soils on equivalent mass, remained stable relative to their initial soil values might suggest that soil organic carbon may convert to inorganic form under some circumstances. The results also exhibited substantial decline in soil bulk densities in the treatments those receiving no organic manure, this result implied that the soil carbon storage on an equivalent mass basis rather than the equivalent soil depth could be a better indicator of soil carbon changes.

Key words: manural loess soil; long-term fertilizer experiment; soil organic carbon; soil inorganic carbon

土壤碳库包括土壤有机碳库和土壤无机碳库,是地球上最大的碳库,约为大气碳库储量的3倍,其较小的变化可对大气碳库产生较大影响,由此引起的环境效应日益受到人们的关注[1-3]。农田土壤已被认为是大气 CO_2 的一个重要源,研究不同农业生产措施对农田土壤碳库的影响是全球土壤碳库研究的重要内容。

土壤有机碳库是地球陆地生态系统最重要、最活跃的部分,同时又是土壤肥力和基础地力的最重要的物质基础,影响着耕地生产力及其稳定性。有研究表明,自1980年以来中国农田土壤有机碳库基本上表现为碳汇功能,表层土壤有机碳库储量增加311.3～401.4 Tg(1 Tg = 10^{12} g),南方水稻土和潮土有机碳含量基本上呈现增长态势,而东北黑土则有下降趋势[4-8]。

土壤无机碳库也是土壤碳库的重要组成部分,受气候变化与人类活动的影响,参与全球碳循环,对全球土壤碳库计算及碳循环研究必不可少。土壤无机碳主要是指土壤风化成土过程中形成的发生性碳酸盐矿物态碳,是半湿润到干旱地区土壤的一个重要组成部分,以碳酸钙形态占优势,多以结核状、菌丝状存在于土壤剖面;土壤中的游离碳酸钙影响土壤团聚体性状、微生物活性、土壤pH值、有机质的分解速率,进而影响土壤有机碳库[9-10]。

植物是维持或提高土壤有机碳库的基础,氮磷配施、有机肥或化肥配施可显著提高耕层土壤有机碳储量。施肥影响着耕层土壤有机碳储量,但不同管理措施和不同施肥处理对耕层土壤无机碳的影响尚不明确[11-14]。

土壤碳库随着土壤有机碳和土壤无机碳含量的变化而变化,但在表达方式上也与土壤容重和土壤深度有关。目前国内许多学者采用土壤有机或无机碳含量、土壤容重和土壤深度的乘积得到碳储量,即等深度土壤碳储量计算方法[15]。而国外一些研究者认为土壤有机碳储量的估算需要以土壤质量为基础,等深度法并不能客观解释不同管理措施的改变引起的土壤质量变化及由此导致的土壤碳库变化,而等质量法可以完全解决这一问题[16-17]。

垆土是陕西省关中平原的主要土壤类型,小麦-玉米轮作是该区域主要的作物种植制度,研究在不同施肥条件和土地管理措施下耕层土壤中有机、无机碳储量的变化,对评价关中地区土壤碳库储量和对农业生产的影响有重要意义。为此,本研究以陕西杨凌国家黄土肥力与肥料效益长期监测基地的长期肥料定位试验为研究平台(20年),探讨长期施用化肥、化肥配合秸秆还田及有机肥对耕层土壤碳储量的影响,以期为全面评价关中土壤碳库储量变化对环境和农业生产的影响提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验点概况

本试验在"国家黄土肥力与肥料效益监测基地"进行,试验地位于黄土高原南部的陕西省杨凌示范区三级阶地(34°17′51″N, 108°00′48″E,海拔534 m)。试验点年平均气温13.0℃,年降水量550 mm,主要分布在6月至9月。年均蒸发量993 mm,无霜期184～216 d。供试土壤为土垫旱耕人为土,黄土母质。试验开始时耕层土壤(0—20 cm)有机碳含量7.32 g/kg,全氮0.92 g/kg,速效磷9.57 mg/kg,速效钾191 mg/kg,容重1.35 g/cm^3。

1.2 试验设计

试验开始于1990年秋,包括三种较为典型的土地利用方式: 1)休闲(Fallow,FL),长期不种植作物,不施肥,人工清除杂草,每年十月耕地一次; 2)撂荒(Setaside,SL),长期不做任何人为扰动; 3)冬小麦-夏玉米轮作(以小麦玉米轮作的对照和氮磷处理为代表)。不同的施肥处理为: 对照(CK),不施肥;单施氮(N); 氮磷配施(NP); 氮钾配施(NK); 磷钾配施(PK); 氮磷钾配施(NPK); 氮磷钾加秸秆还田(SNPK); 氮磷钾配施低量有机肥(M1NPK); 氮磷钾配施高量有机肥(M2NPK)。施肥处理均为冬小麦-夏玉米轮作。试验共11个处理。氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为过磷酸钙(普通过磷酸钙含P_2O_5 12%,高效过磷酸钙含P_2O_5 16%),钾肥为硫酸钾(含K_2O 50%)。小麦季施肥量为N 165.0、P 57.6、K 68.5 kg/hm^2,玉米季为N 187.5、P 24.6、K 77.8 kg/hm^2。SNPK处理的秸秆每年于冬小麦播种前一次施用,其中1990年至1998年,每年施入小麦秸秆4500 kg/hm^2,1999年开始施入该小区当年的全部玉米秸秆,平均施用量为4392 kg/hm^2(变幅为2630～5990 kg/hm^2),用铡刀切成约3 cm长的小段,秋播小麦时一次施入。秸秆氮、磷、钾平均含量分别为N 9.2、P 0.83、K 19.4 g/kg,未计入施用量。有机肥在每年冬小麦播种前一次施用,M1NPK处理中氮的总用量与NPK处理相同,但30%的氮由化肥提供,70% 由有机肥提供;M2NPK处理中施肥量在小麦季为NPK处理施用量的1.5倍,其中总氮量的30%由化肥提供,70%由有机肥提供。有机肥碳、氮、磷(P)、钾(K)平均含量分别为: 26.45% 、1.32%、0.87%和1.09%。M1NPK和M2NPK处理平均每年施入有机肥干重分别为13.7 t/ha ±7.2 和20.6 t/ha ±10.8 (SD),其中的P、K均由化肥提供,随有机肥施入的P、K量未计入施肥量。在玉米季,M1NPK和M2NPK处理的施肥量与NPK处理相同,均来自化肥。休闲和撂荒处理的面积为98 m^2(14 m×7 m),其它处理小区面积196 m^2(14 m×14 m),处理均一次重复。

1.3 采集与测定方法

土壤样品于2010年6月采集,将每个处理小区平均划分为三个区域,作为3次重复进行采样,每个重复用直径3.5 cm土钻分别取0—20 cm和20—40 cm样品各6钻混合,装入塑料袋后带回实验室,人工去除植物残体等杂物,过0.25 mm筛,备用。

土壤容重用环刀法,每个处理小区平均划分为三个区域,作为3次重复,每个重复区0—20 cm土层按每5 cm一层取至20 cm深,每层取一环刀;20—40 cm土壤容重的测定用容重钻,每个重复区按每10 cm一层取至40 cm深,每层取一钻,不锈钢容重环内径5.06 cm,高度6 cm。

土壤无机碳的测定用吸收法[18];土壤有机碳的测定用重铬酸钾容量法(外加热)[19]。

1.4 计算与数据处理

1.4.1 等深度土壤碳储量的计算方法 等深度土壤碳储量为各处理20 cm的结果,参考梁爱珍等方法[20],按以下公式计算:

$$SOC_{(storage\ in\ depth)} = 2 \times BD \times C \quad (1)$$

式(1)中: $SOC_{(storage\ in\ depth)}$为等深度(20 cm)单位面积土壤碳储量(t/hm^2);BD为土壤容重(g/cm^3); C为各处理0—20 cm土层土壤有机碳或无机碳含量(g/kg)。

1.4.2 等质量土壤碳储量的计算方法 等质量土壤碳储量计算参考Ellert等方法[16-17],以CK处理0—20 cm土层土壤质量为参照(等质量),当其它处理0—20 cm土壤容重大于CK相应土层土壤容重时,采用以下公式计算:

$$SOC_{(storage\ in\ mass)} = 2 \times BD_{ck} \times C \quad (2)$$

式(2)中: $SOC_{(storage\ in\ depth)}$为与CK处理0—20 cm土壤等质量单位面积的土壤碳储量(t/hm^2);BD_{ck}为CK处理0—20 cm土壤容重(g/cm^3);C为各处理土壤(0—20 cm)有机碳或无机碳含量(g/kg)。

当其它处理0—20 cm土壤容重小于CK相应土层土壤容重时,则采用以下公式计算:

$$SOC_{(storage\ in\ mass)} = 2 \times BD_1 \times C_1 + 2 \times (BD_{ck} - BD_1) \times C_2 \quad (3)$$

式(3)中: $SOC_{(storage\ in\ depth)}$为各处理与CK处理0—20 cm土壤等质量单位面积土壤碳储量(t/hm^2); C_1和C_2分别为其0—20 cm和20—40 cm土壤碳含量(g/kg); BD_{ck}为CK处理0—20 cm土壤容重(g/cm^3), BD_1为其它处理0—20 cm土壤容重(g/cm^3)。

1.4.3 土壤碳年变化量的估算[21] 土壤碳年变化量的估算公式为:

$$DSOC = (SOC_2 - SOC_1)/n \quad (4)$$

式(4)中: DSOC为土壤碳年变化量(kg/hm^2·a); SOC_2为经长期定位试验n年后土壤碳储量(kg/hm^2); SOC_1为同一试验小区长期定位试验前土壤碳储量(kg/hm^2); n为试验年限。

试验数据用 DPS v7.05 软件进行统计分析,LSD 法进行多重比较和显著性检验。

2　结果与分析

2.1　土壤容重、有机碳和无机碳含量

从表 1 可以看出,不同土地利用方式和不同施肥处理耕层(0—20 cm)土壤容重与试验开始时(初始值 Initial soil, IniS)相比除施有机肥处理(MNPK)外其它均显著增加(表 1);施有机物处理(SNPK, MNPK)耕层土壤容重显著低于对照(CK)、N 和 NPK 处理,施化肥处理之间或不同土地利用方式各处理的容重均无明显变化。不同土地利用方式耕层土壤有机碳含量表现为 SL > NP > FL≈CK ≈IniS。小麦玉米轮作体系中施有机肥处理(MNPK)耕层土壤有机碳含量显著高于 SNPK、NPK、NP 处理,而 SNPK、NPK、NP 又高于 N、NK、PK、CK 处理。耕层土壤无机碳总体上均较试验开始时有不同程度的降低,除 FL 和 PK、M2NPK 处理稍有下降外,其它处理均明显下降(表 1)。NP 处理 0—20 cm 土层无机碳含量低于 FL、SL 和 CK;小麦-玉米轮作体系中,也以 NP 处理为最低,其次为 M1NPK,M1NPK 处理除了与 NP、NPK、SNPK 无显著差异外,均明显低于其它施肥处理和 CK。

表 1　塿土不同土地利用方式和施肥 20 年后土壤容重、有机碳和无机碳含量

Table 1　Soil bulk density, soil organic and inorganic carbon contents after 20 years' fertilization under different tilling systems in loess soil

项目 Item	处理 Treatment	容重 Bulk density (g/cm³)		土壤有机碳 SOC (g/kg)		土壤无机碳 SIC (g/kg)	
		0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
土地利用方式 Land use regime	休闲 FL	1.47 ab	1.55 ab	7.70 g	5.11 f	11.14 ab	11.36 cd
	撂荒 SL	1.49 a	1.57 ab	11.01 c	6.02 c	10.87 b	11.98 bc
	CK	1.49 a	1.62 a	7.53 g	5.22 ef	11.00 b	10.27 e
	NP	1.46 ab	1.58 ab	9.95 d	5.47 de	10.26 d	11.15 d
小麦-玉米轮作体系 Winter wheat-summer maize rotation system	N	1.51 a	1.57 ab	8.38 f	5.35 def	10.83 b	11.06 d
	NK	1.48 ab	1.57 ab	7.96 fg	5.44 de	11.00 b	10.89 de
	PK	1.45 ab	1.59 ab	8.35 f	5.46 de	11.44 a	12.65 ab
	NPK	1.50 a	1.58 ab	9.34 e	5.30 ef	10.78 bc	12.36 ab
	SNPK	1.42 bc	1.53 bc	10.30 d	5.35 def	10.79 bc	12.03 bc
	M1NPK	1.40 bcd	1.55 ab	12.14 b	5.65 d	10.40 cd	11.34 cd
	M2NPK	1.35 cd	1.46 c	14.59 a	6.88 a	11.44 a	13.08 a
	初始值 IniS	1.35 d	1.56 ab	7.64 g	6.47 b	11.57 a	11.99 bc

注(Note): FL—Fallow; SL—Setaside; IniS—Initial soil; SOC—Soil organic carbon; SIC—Soil inorganic carbon. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

表 1 还显示,在 20—40 cm 土层,土壤容重的变化为施高量有机肥处理(M2NPK)显著低于其它处理和试验开始时的初始值,施秸秆加氮磷钾肥处理(SNPK)显著低于不施肥处理(CK),其它处理间无差异。20—40 cm 土层的有机碳含量为 M2NPK 处理显著高于 IniS,其它处理都显著低于 IniS。M1NPK 处理高于 CK。不同土地利用方式中,SL 处理 20—40 cm 土层土壤有机碳含量也明显高于其它处理,FL 最低(表 1)。20—40 cm 土壤无机碳以 SL 最高,其次为 FL 和 NP 处理,均显著高于 CK,CK 和 NP 处理明显低于试验开始前土壤。施肥处理中 M2NPK 处理的土壤无机碳含量在 20—40 cm 土层显著高于试验开始前的土壤(IniS)和除 NPK 以及 PK 处理外的其它处理;PK、NPK 及 SNPK 显著高于 CK、NP、N 和 NK 处理,后 4 个处理较试验开始前土壤无机碳含量也有明显降低(表 1)。

2.2 不同土地利用方式下耕层土壤碳储量

长期不同土地利用方式下,等深度(20 cm)与等质量(和对照处理 20 cm 土层质量相等)土层土壤有机碳储量和趋势一致(图 1 A)。其中撂荒(SL)的土壤有机碳储量最高,显著高于 NP、FL、CK 处理和 IniS; NP 处理有机碳储量显著高于 FL 和 CK,也较试验开始时(IniS)有显著提高(图 1 A)。

长期不同土地利用方式等深度与等质量耕层土壤无机碳储量变化不一致。在 20 cm 土壤中,CK、FL 和 SL 3 个处理的土壤无机碳储量显著高于 IniS,但 NP 则显著低于 IniS(图 1 B)。而在与 CK 处理 20 cm 土层等质量情况下,所有处理 0—20 cm 土层土壤无机碳储量均较试验开始前显著下降,尤其是 NP 处理,比其他处理显著降低(图 1 B)。

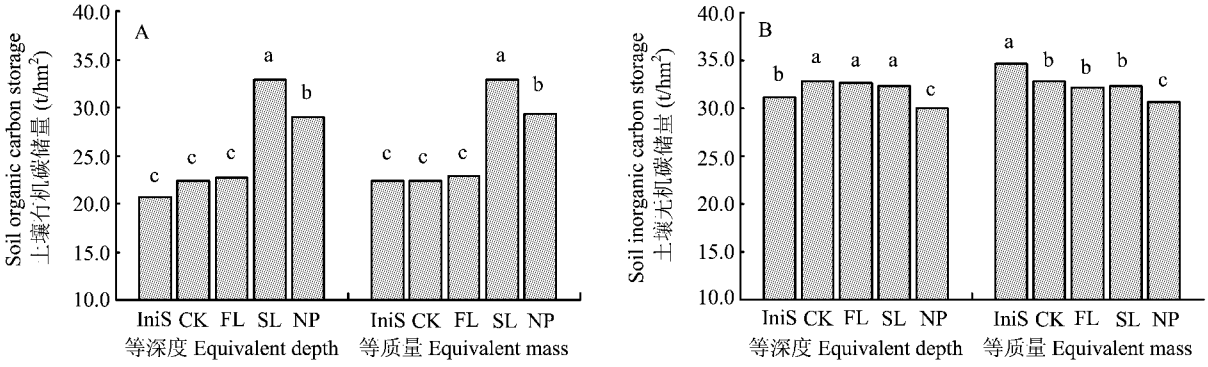

图 1 垆土不同土地利用方式 20 年耕层土壤有机碳(A)和无机碳(B)储量

Fig. 1 Storages of organic carbon (A) and inorganic carbon (B) in plough layer soils after 20 years' fertilization under different tilling systems in loess soil

[注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at the 5% level.]

2.3 长期不同施肥条件下耕层土壤碳储量

长期不同施肥处理,等深度耕层土壤有机碳储量与等质量土壤有机碳储量变化大体一致(图 2 A)。所有处理等深度耕层土壤有机碳储量均较试验开始前有显著升高,且除 NK 处理外的所有施肥处理均较不施肥的 CK 处理显著上升;处理之间以施有机肥的处理(MNPK)显著高于 SNPK、NPK、NP,后三者之间没有显著差异,且高量有机肥(M2NPK)处理的有机碳储量显著高于低量有机肥处理(M1NPK);所有施入 N 和 P 的处理(NP,NPK,SNPK,MNPK)均显著高于不平衡施肥(供试土壤中氮、磷为主要养分限制因素)处理(N、NK、PK);单施氮肥处理(N)土壤有机碳储量显著高于 CK 和 NK(图 2A)。在等质量条件下,土壤有机碳储量 CK 与试验开始前没有显著差异,N、NK 和 PK 处理间差异也不显著,SNPK 显著高于 NPK 处理(图 2A)。

长期不同施肥处理条件下,等深度和等质量耕层土壤无机碳储量有较大差异。在等深度时,CK、N、NK 和 PK 处理的无机碳储量显著高于试验开始前(IniS)及除了 NPK 处理外的其它各处理(图 2 B);NPK、SNPK 和 M2NPK 与 IniS 无显著差异,但后两个处理显著低于 NPK;M1NPK 处理较所有处理(除 NP 外)均低。在等质量情况下,除了 PK 和 M2NPK 处理外,其他各处理表层土壤(约 20 cm)无机碳均较试验前有明显降低,其中 NP 处理低于除 M1NPK 外的所有处理(图 2 B)。

2.4 20—40 cm 土层土壤无机碳储量

和试验前 20—40 cm 土壤比较,CK 处理土壤无机碳储量有显著降低;撂荒(SL)处理 20—40 cm 土壤无机碳储量显著高于 CK、FL 和 NP,FL 和 NP 较 CK 略高,但三者间及其和试验前相比均无显著差异。小麦玉米轮作体系中,和试验前比较,CK、N 和 NK 处理土壤无机碳储量有显著降低,PK 处理显著升高,NP、NPK、SNPK 和 MNPK 几个处理无显著变化。PK、NPK、SNPK 和 M2NPK 处理明显高于 CK 和 NK 处理(图 3)。

2.5 耕层土壤碳库年变化量

不同土地利用方式下等深度土壤有机碳和无机碳储量年变化量相差均较大(表 2),撂荒处理(SL)有机碳年变化量比 CK 高 518 kg/(hm² · a), NP 较 CK 处理约高 330 kg/(hm² · a),而 FL 则比 CK 高 10 kg/(hm² · a);CK 处理等质量耕层土壤有机碳年

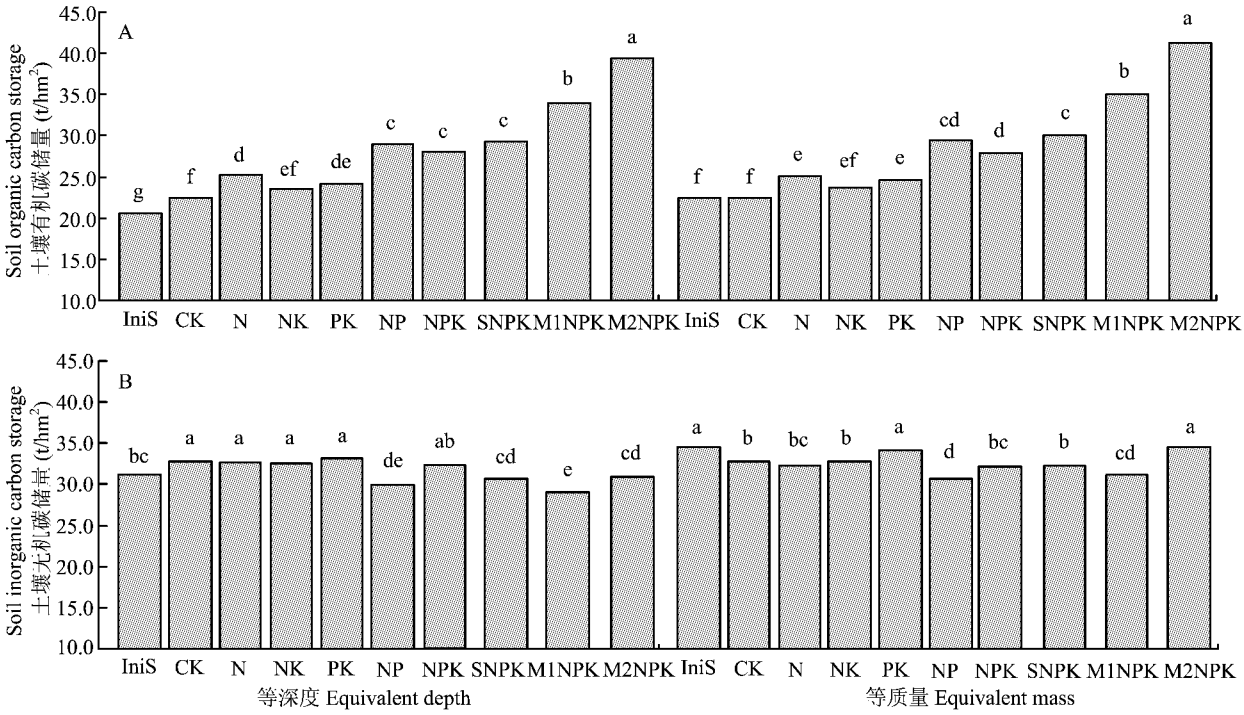

图 2　塿土不同施肥条件下 20 年耕层土壤有机碳(A)和无机碳(B)储量

Fig. 2　Storages of soil organic carbon (A) and inorganic carbon (B) of plough layer soils after 20 years' fertilization in loess soil

[注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at the 5% level.]

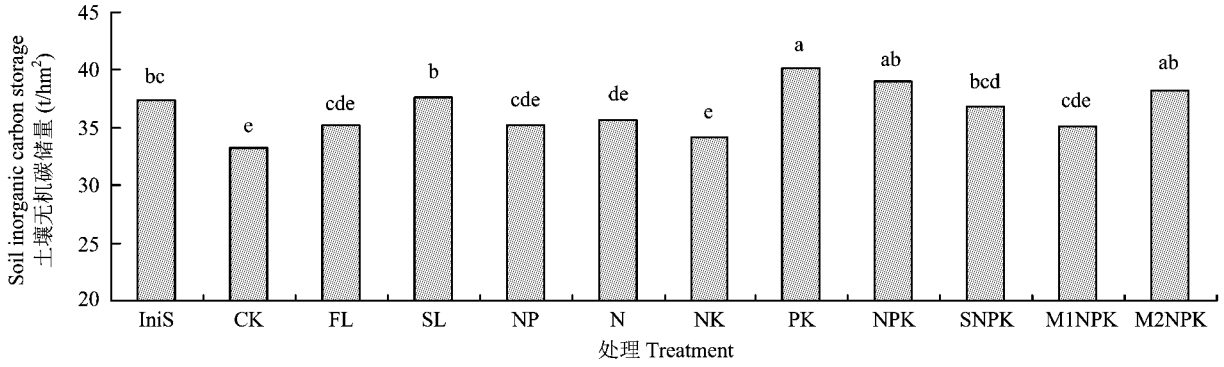

图 3　塿土不同土地利用方式和施肥 20 年 20—40 cm 土壤无机碳储量

Fig. 3　Storages of soil inorganic carbon in 20—40 cm soil layer after 20 years' fertilization under different tilling systems in loess soil

[注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at the 5% level.]

变化量每年减少 1 kg/hm^2,各处理等质量土壤有机碳储量年变化量较等深度土壤约小 80 kg/hm^2。等深度土壤无机碳变化结果显示,NP 处理耕作层无机碳每年减少63 kg/hm^2,SL 年增加约 60 kg/hm^2,CK 和 FL 年增加量约为 80 kg/hm^2。等质量耕层土壤无机碳年变化量均为负值,且 NP 处理每年减少最多,达到约 200 kg/hm^2,年下降最少的为休闲(FL),为 70 kg/km^2。

不同施肥处理等深度土壤有机碳年变化量为有机肥处理(MNPK) > SNPK、NPK、NP > N、NK、

表2 塿土不同土地利用方式和施肥20年等深度(20 cm)和等质量土壤有机碳和无机碳年变化量[kg/(hm² · a)]

Table 2 The annual changes of soil organic and inorganic carbon pool with soils of equivalent depth and equivalent mass after 20 years' fertilization under different tilling systems in loess soil

项目 Item	处理 Treatment	等深度 Equivalent depth		等质量 Equivalent mass	
		SOC	SIC	SOC	SIC
土地利用方式 Land use regime	休闲 FL	100	76	20	-70
	撂荒 SL	608	58	518	-111
	CK	90	78	-1	-91
	NP	421	-63	347	-198
小麦-玉米轮作体系 Winter wheat-summer maize rotation system	N	234	73	127	-117
	NK	146	67	61	-91
	PK	178	97	109	-21
	NPK	370	55	270	-125
	SNPK	431	-29	378	-114
	M1NPK	668	-106	628	-173
	M2NPK	938	-17	944	-3

注(Note): FL—Fallow; SL—Setaside; SOC—土壤有机碳 Soil organic carbon; SIC—土壤无机碳 Soil inorganic carbon. 等质量土壤以 CK 处理 0—20 cm 土壤质量为参照 The equivalent soil mass is calculated in a basis of the soil mass of plough layer (20 cm) of control treatment (CK).

PK、CK;等质量土壤有机碳年变化量变化趋势与等深度土壤基本一致,但不施肥处理(CK)等质量有机碳年变化几乎为零, M2NPK 等深度和等质量耕层土壤年变化量非常接近,而其它处理等深度较等质量变化量高约 40 ~ 100 kg/hm²(表 2)。CK、N、NK、PK、NPK 处理等深度土壤无机碳年变化量均大于 55 kg/hm²(55 ~ 97 kg/hm²),NP 和施有机物料的 3 个处理(M1NPK、M2NPK、SNPK)年变化量为负值,每年减少约 20 ~ 110 kg/hm²。以和 CK 处理 20 cm 土壤等质量计算,所有处理耕层土壤的无机碳均出现不同程度的下降,其中 M2NPK 和试验开始前基本持平,PK 下降也较小,每年仅减少 21 kg/hm²;其它处理以平均每年约 70 ~ 200 kg/hm² 的速度下降(表2)。

3 讨论

虽然试验各处理之间耕层土壤容重大多没有显著差异,但是和试验开始前比较,除施有机肥处理外均有明显增加(表 1),这和近十多年大型收割机具的应用有关。鉴于此,在涉及碳储量年变化及小麦-玉米轮作体系各处理碳储量时(不同土地利用方式各处理的容重差异不大,等深度和等质量土壤碳储量规律相近),采用和对照处理 0—20 cm 土层等质量土壤的方法应该更能反映真实情况。

不同土地利用方式对土壤有机碳储量有不同程度的影响。20 年休闲(Fallow)或种植作物但不施肥(CK)耕层土壤有机碳储量较试验开始前无显著变化,施氮、磷和长期撂荒处理土壤有机碳储量均有显著增加,尤其是撂荒对土壤有机质的提升效果显著高于 NP 处理(表 1,图 1A)。其原因对休闲处理而言是由于没有任何植物生长从而缺少有机物质的投入;对 CK 而言是由于不施肥处理作物产量长期维持在相对很低的水平,归还土壤的作物残茬或根系只能维持有机碳的平衡。氮磷配施可以很大程度地满足作物生长需求,归还土壤的作物根茬对耕层有机碳储量的提高有明显贡献。而撂荒处理表层土壤有机碳储量显著上升,一方面是由于有植被自然生长,其残体和根系提供了大量有机物质,另一方面则是由于长期处于免耕状态,有利于减少土壤有机物的矿化,这与 West[22] 对比研究免耕和常规耕作后认为免耕有利于减少土壤有机物的矿化结果一致。

不同土地利用方式下,氮磷(NP)处理等质量耕层土壤无机碳储量均显著低于对照(CK)、休闲(FL)和撂荒(SL),可能是因为氮磷处理有机碳含

量较高,分解过程中产生的有机酸会分解碳酸盐,加上施肥导致土壤(局部)酸化也会使碳酸盐分解。黄斌等[23]曾报道施肥降低土壤无机碳储量。等质量时4个处理耕层土壤无机碳储量均较试验前显著下降,其原因应该和碳酸盐淋溶下移有关。有研究表明,有机碳对碳酸盐的溶蚀具有驱动作用,土壤表层碳酸盐的淋溶作用使部分土壤无机碳迁移到土壤的较深层,或在土壤水分状况和 CO_2 分压变化的情况下发生溶解的逆过程而重新沉淀,或随水的运动转移出土体[24-25]。

小麦-玉米轮作体系不同施肥处理的有机肥和化肥配合施用能显著增加等深度和等质量土壤有机碳储量,这与其它大多数研究结果相同[26]。秸秆和化肥配合施用(SNPK)有机碳储量在等深度耕层土壤中与平衡施肥(NP、NPK)无显著差异,在等质量土壤显著高于氮磷钾处理(NPK),表明秸秆的投入量对耕层土壤有机碳提升有一定的贡献,结论与劳秀荣[27]等研究结果一致。在单施化肥处理中,等深度和等质量土壤中平衡施肥处理(NP、NPK)显著高于不平衡施肥处理(N、NK、PK);这可能与平衡施肥处理作物生长状况良好,根茬等残留物高于不平衡施肥有关。

施肥处理土壤耕层(0—20 cm)无机碳储量与二十年前相比(试验前),单施化肥处理在等深度和等质量土壤中施钾肥的处理(NK、PK、NPK)高于不施钾肥的常规处理(NP),可能与钾在土壤中的化学行为有关。有研究表明 K^+ 在土壤颗粒表面的吸附解吸是扩散控制过程[28],土壤颗粒表面的电场和剩余力场导致一层特殊的非自由态膜状水层形成,吸附时 K^+ 进入而 Ca^{2+} 逸出水膜,解吸时则相反,均通过扩散完成;当 Ca^{2+} 析出时,在土壤水分适宜,CO_2 分压较高时重新沉淀从而使其碳酸钙含量增大。但是 K^+ 在颗粒表面的吸附解吸说法存在争议,因此是否与施钾肥有绝对关系还有待进一步验证。各施肥处理等质量表层土壤无机碳储量除 PK 和 M2NPK 处理外均比试验前有不同程度的下降(图2B)。其原因可能是20年不同程度的土壤酸化(大气沉降及施肥)和碳酸盐淋移。PK 处理在等质量土壤中无机碳储量有所增加,其可能的原因有4个: 1)未施用氮肥,减小了土壤酸化的程度; 2)钾的作用(如上所述); 3)施用磷肥,增大了土壤中钙的含量,可能促进了碳酸盐形成; 4)随作物生长带入的有机物质相对较少,有机物分解过程中产生的有机酸相对较少。M2NPK 处理土壤无机碳比试验前土壤不下降的原因可能和 PK 处理有所不同,尽管有机肥和化肥的施用可能引起土壤酸化(或局部酸化)造成碳酸盐分解,但随磷肥(普通过磷酸钙)和有机肥施入的钙(所谓土壤复钙[29])也较其它处理高得多,大量有机物质的施入,分解过程中释放相对较多的 CO_2 在大量钙存在的时候可能会沉淀固定下来,当然也可能与施用钾素量较高有关,且这些可能成为主导因素。PK 和 M2NPK 处理表层土壤无机碳储量经过20年仍然维持未变可能预示着在某种情况下,有机和无机碳之间存在转化关系,这还有待进一步研究。

参 考 文 献:

[1] Lal R, Bruce J P. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect [J]. Environ. Sci. & Policy. 1999, 2(2): 177-185.

[2] Six J, Elliott T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems[J]. Soil Sci. Soc. Am., 1999, 63(5): 1350-1358.

[3] Bayer C, Mielniczuk J, Amado T J C *et al*. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil[J]. Soil Till. Res., 2000, 54: 101-109.

[4] 赵生才. 我国农田土壤碳库演变机制及发展趋势[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 587-590.
Zhang S C. The evolution of soil carbon storage and the trend of development in China[J]. Prog. Geogr., 2005, 20(5): 587-590.

[5] 黄耀, 孙文娟. 近20年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. 科学通报, 2006, 51(7): 750-763.
Huang Y, Sun W J. The change trend of the soil organic carbon content in the surface soil of farmland over the past 20 years in China[J]. Chin Sci. Bull., 2006, 51(7): 750-763.

[6] 于严严, 郭正堂, 吴海斌. 1980-2000年中国耕作土壤有机碳的动态变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(6): 123-130.
Yu Y Y, Guo Z T, Wu H B. Changes in organic carbon of cultivated soils in China from 1980 to 2000[J]. Mar. Geol. & Quat. Geol., 2006, 26(6): 123-130.

[7] 李忠佩, 吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 46-52.
Li Z P, Wu D F. Organic C content at steady state and potential of c swquestration of paddy soils in subtropical China[J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43(1): 46-52.

[8] 彭佩钦, 刘强, 黄道友, 等. 湖南典型农田土壤有机碳含量及其演变趋势[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1319-1322.
Peng P Q, Liu Q, Huang D Y *et al*. Change of farmland soil organic carbon content in typical region in Hunan province[J]. Chin. J. Environ. Sci., 2006, 27(7): 1319-1322.

[9] 李忠, 孙波, 赵其国. 我国东部土壤有机碳的密度和储量[J]. 农业环境保护, 2001, 20(6): 385-389.

Li Z, Sun B, Zhao Q G. Density and storage of soil organic carbon in east China[J]. Agro-Environ. Prot., 2001, 20(6): 385-389.

[10] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 张旭辉. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 327-333.
Pan G X, Zhou P, Li L Q, Zhang X H. Core issues and research progresses of soil science of sequestration[J]. Acta Pedol. Sin., 2007, 44(2): 327-333.

[11] Janzen H H. Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2004, 104: 399-417.

[12] 曾俊, 郭天文, 包兴国, 等. 长期施肥对土壤有机碳和无机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008, (2): 11-14.
Zeng J, Guo T W, Bao X G *et al*. Effections of soil organic carbon and soil inorganic carbon under long-term fertilization[J]. China Soils Fert., 2008, (2): 11-14.

[13] 尹云锋, 蔡祖聪. 不同施肥措施对潮土有机碳平衡及固碳潜力的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6): 745-749.
Yi Y F, Cai Z C. Effect of fertilization on equilibrium levels of organic carbon and capacities of soil stabilizing organic carbon for fluvo-aquic soil[J]. Soils, 2006, 38(6): 745-749.

[14] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 车升国. 施肥措施对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1333-1338.
Gao H Y, Guo S L, Liu W Z, Che S G. Effects of fertilization on wheat yield and soil organic carbon accumulation in rainfed loessial tablelands[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(6): 1333-1338.

[15] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 赵其国. 土壤有机碳密度及储量的统计研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 522-528.
Jin F, Yang H, Cai Z C, Zhao Q G. Calculation of density and reserveof organic carbon in soils[J]. Acta Pedol. Sin., 2001, 38(4): 522-528.

[16] Ellert B H, Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes[J]. Can. J. Soil Sci., 1995, 75(4): 529-538.

[17] Yang X M, Wander M M. Tillage effects on soil organic carbon distribution and storage in a silt loam soil in Illinois[J]. Soil Till. Res., 1999, 52: 1-9.

[18] Bundy L G, Bremner J M. A simple tirimetric method for determination of inorganic carbon in soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1972, 36: 273-275.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 4-35.
Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. 4-35.

[20] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, Drury C F. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1287-1293.
Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, Drury C F. Short-term effects of tillage on soil organic carbon storage in the plow layer of black soil in northeast China[J]. Sci. Agric. Sin., 2006, 39(6): 1287-1293.

[21] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. 应用生态学, 2008, 19(10): 2239-2250.
Lu F, Wang X K, Han B *et al*. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2008, 19(10): 2239-2250.

[22] West T O, Marland G. Net carbon flux from agricultural ecosystems: methodology for full carbon cycle analyses[J]. Environ. Poll., 2002, 116: 439-444.

[23] 黄斌, 王敬国, 金红岩, 徐善威. 长期施肥对我国北方潮土碳储量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 161-164.
Huang B, Wang J G, Jin H Y, Xu S W. Efects of long-term appfication fertilizer on carbon storage in calcareous meadow soil[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2006, 25(1): 161-164.

[24] 陶于祥, 潘根兴, 刘德辉, 孙玉华. 岩溶系统中土壤释放 CO_2 作用及其环境意义—以桂林丫吉村岩溶试场为例[J]. 火山地质与矿产, 1998, 19(3): 237-241.
Tao Y X, Pan G X, Liu D H, Sun Y H. CO_2 absorption and emission from soil and its environmental significance in karst system: an example of Guilin Yaji karst expermental site in Guilin China[J]. Volcanol. Miner. Resour., 1998, 19(3): 237-241.

[25] 潘根兴. 中国干旱性地区土壤发生性碳酸盐及其在陆地系统碳转移上的意义[J]. 南京农业大学学报, 1998, 22(1): 51-57.
Pan G X. Pedogenic carbonates in aridic soils of China and the significance in terrestrial carbon transfer[J]. J. Nanjing Agric. Univ., 1998, 22(1): 51-57.

[26] Purakayastha T J, Rudrappa L, Singh D *et al*. Long-term impact of fertilizers on soil organic carbon pools and sequestration rates in maize-wheat-cowpea cropping system[J]. Geoderma, 2008, 144: 370-378.

[27] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 618-622.
Lao X R, Sun W H, Wang Z *et al*. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(4): 618-622.

[28] John O A, Bernardovan R J. Rate processes of calcium magesium and potassium desorpyion from variable-charge soil by mixed ion-exchange resin[J]. Geoderma, 1999, 93: 141-157.

[29] 王金贵, 王益权, 徐海, 等. 关中农田土壤有机质和碳酸钙空间变异特征及其机理分析[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 23-26.
Wang J G, Wang Y Q, Xu H *et al*. Spatial variability of soil organic matter and calcium carbonate and its reason in Guanzhong farmland[J]. Agric. Res. Arid Areas, 2009, 27(6): 23-26.