

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

高会议¹, 郭胜利^{1,2*}, 刘文兆^{1,2}, 车升国¹

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;

2 西北农林科技大学水土保持研究所, 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 利用中国科学院长武农田生态试验站的长期田间试验(1984年—2007年), 研究了小麦产量, 耕层有机碳变化, 评价了土壤管理和气候因素对土壤有机碳(Soil organic C, SOC)变化的影响。研究涉及6个处理: 休闲地(F); 不施肥(CK); 有机肥(M); 氮肥(N); 氮、磷肥(NP)和氮、磷、有机肥(NPM)处理。结果表明, 施肥可以显著提高作物产量和SOC积累, CK、M、N、NP、NPM处理平均产量依次为1.5、2.6、2.0、3.3、4.0 t/hm², 2007年F、CK、M、N、NP、NPM处理0—20 cm土层SOC积累量依次为-1.09、0.76、8.59、1.02、3.42和9.5 t/hm²。作物产量与SOC含量呈显著的正相关关系($r=0.80$), 有机碳输入量与SOC含量相关性更好($r=0.97$), 外源有机碳的输入也是提高SOC的重要措施。施肥措施对作物固碳和SOC影响存在显著($P<0.05$)差异。土壤固碳速率(Y)与SOC输入量(X)符合线性方程 $Y=0.231X-0.0813$ ($r=0.98$)。施肥可以提高黄土高原半干旱地区土壤生产力和SOC的积累, 且无机肥和有机肥配施效果最佳。

关键词: 施肥措施; 黄土旱塬; 小麦产量; SOC

中图分类号: S147.3; S153.6⁺²

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)06-1333-06

Effects of fertilization on wheat yield and soil organic carbon accumulation in rainfed loessial tablelands

GAO Hui-yi¹, GUO Sheng-li^{1,2*}, LIU Wen-zhao^{1,2}, CHE Sheng-guo¹

(1 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Wheat yield and soil organic carbon (SOC) change at the surface layer were investigated by a long-term field experiment with six treatments at the Changwu Ecological Station of the Chinese Academy of Sciences started from 1984 to 2007. The six treatments are fallow (F), control (CK), organic manure (M), nitrogen (N), nitrogen and phosphorus (NP), and nitrogen and phosphorus with organic manure (NPM). The results show that the crop productivity and SOC accumulation are significantly increased under the fertilizer applications. The averaged winter wheat yields of the 23 years are 1.5, 2.6, 2.0, 3.3, and 4.0 t/ha for the CK, M, N, NP, and NPM treatments, respectively. Cumulative amounts of SOC at 0-20 cm soil layer in 2007 are -1.09, 0.76, 8.59, 1.02, 3.42 and 9.5 t/ha for the six treatments. There is a significant correlation between crop yield and SOC content ($r=0.80$), and moreover, there is a significant correlation between carbon application amount and SOC content ($r=0.97$), which indicates carbon from farm yard manure plays an important role in improving SOC content. There is a significant difference between the effects of fertilization on carbon sequestration ($P<0.05$) by crop and SOC, and the relationship between soil carbon sequestration rate (Y) and soil organic carbon input (X) can be expressed by a linear equation of $Y=0.231X-0.0813$ ($r=0.98$). Fertilization can increase soil productivity and SOC accumulation in the semiarid regions of the Loess Plateau, especially with the

收稿日期: 2009-02-10 接受日期: 2009-04-03

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目资助(KZCX2-YW-424-2)。

作者简介: 高会议(1982—), 安徽砀山人, 博士, 主要从事土壤碳循环与生态环境研究。E-mail: gaohuiyi0701@163.com

* 通讯作者 E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

combined application of organic and inorganic fertilizer.

Key words: fertilization; rainfed loessial tableland; wheat yield; SOC

提高农田土壤有机碳 (Soil organic C, SOC) 库, 对保持农业的可持续发展、缓解气候变化趋势具有双重的积极意义^[1-5]。研究显示, 1980 年以来, 我国农田 SOC 库整体上呈不断上升趋势^[1-2, 6-9]。由于我国地域辽阔, 气候和土壤管理方式复杂多样, 区域尺度上农田的 SOC 盈余表现不一^[10]。目前已有的研究结果还难以定量评价全国农田 SOC 变化。从区域角度, 研究农田 SOC 动态变化对揭示全国农田 SOC 库变化具有重要意义。

黄土高原地区为我国典型的雨养农业区和生态脆弱区^[11-12]。该地区耕地面积达 1900 万 hm^2 , 占全国耕地面积 (13 Mhm^2) 的 15% 以上^[13]。由于干旱和水土流失的影响, 上世纪 80 年代初, 黄土区粮食作物产量只有全国同期产量的 66%, 农田 SOC 含量仅为全国平均水平的一半^[14]。1980 年以来, 由于经营体制变化, 采取了提高化肥投入、改良品种、治理水土流失等多种措施, 区域土壤生产力提高了 75%, 部分地区提高一倍以上^[15-16]。随着土壤生产力的提高, 这一区域的农田土壤成为我国农田土壤固碳潜力较大的区域之一。本文以设立于该地区的长期试验为对象, 探讨了土壤生产力与 SOC 变化的关系, 并讨论了土壤管理和气候因素对 SOC 变化的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地的自然条件

长期试验在长武站 (中国科学院生态研究网络 CERN 台站) 进行, 该区位于陕西省长武县 (东经 107°40', 北纬 35°12'), 海拔 1200 m, 属于典型的黄土旱塬区, 半湿润季风气候。1984 年~2007 年间年均降水量为 586 mm, 其中最高年份为 954 mm, 最低年份为 296 mm。7~9 月降水量占年总量的 49% 左右。年平均气温 9.4℃, 大于 10℃ 积温为 3029℃, 年日照时数 2230 h, 日照率为 51%, 年辐射总量为 484 kJ/cm^2 , 无霜期 171d。土壤为粘壤质黑垆土, 母质为中壤质马兰黄土, 土层深厚, 土质疏松。布设试验前 0~20 cm 耕层土壤有机碳含量 6.50 g/kg, 全氮 0.62 g/kg, 碱解氮 37.0 mg/kg, Olsen-P 3.0 mg/kg, 速效钾 129.3 mg/kg, CaCO_3 10.5%, pH 8.4。试验地氮、磷含量较低, 钾素丰富, 呈微碱性反应^[12]。

1.2 试验设计与管理

试验始于 1984 年 9 月, 设 11 种轮作方式与 7 种施肥制度 (不完全组合), 共 36 个处理, 三次重复, 随机区组排列^[12]。小区面积 10.3 m × 6.5 m, 小区间距 0.5 m, 区组间距和周边宽各 1.0 m。本研究选取其中的休闲地 (F) 和冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 连作 5 个施肥处理 (表 1)。依据党廷辉等^[17]测定有机肥含碳量 (1.07%), 估算每年有机肥中碳的输入量。

表 1 从长武长期定位试验选择的轮作施肥处理

Table 1 The selected treatments of the long-term experiment in Changwu Station

处理 Treatment	施肥量 Fertilizers rate [*] (kg/hm^2)		
	N	P	M
休闲 Fallows (F)	0	0	0
对照 CK	0	0	0
氮肥 N	120	0	0
氮 + 磷 NP	120	39	0
有机肥 M	0	0	75000
氮 + 磷 + 有机肥 NPM	120	39	75000

注 (Note): N—尿素 Urea; P—磷肥 Superphosphate; M—有机肥 Farmyard manure; * 单季作物施肥量 Fertilization rate per crop

供试作物为冬小麦 (小麦品种为长武 131 系列), 连作种植, 每年 1 料, 播种期为 9 月下旬 (播量 150~190 kg/hm^2 , 行距 20 cm), 试验期间管理措施同大田, 次年 6 月收获后土壤休闲, 期间圆盘耙机耕 (深度小于 20 cm) 松土蓄墒。全部肥料均于播种前作基肥 1 次施入耕层。

1.3 土壤采样与分析方法

土壤样品: 2007 年小麦收获后, 每小区以 S 形采集 5 钻土样, 制成混合土样, 6 个处理, 每处理 3 次重复, 共计采集 18 个土样。样品风干, 过 0.25 mm 筛, 分析 SOC (重铬酸钾容量法—外加加热法)^[18]。用环刀每个小区采集 3 次重复, 每一处理共 9 次重复, 测定土壤容重 (表 3)。利用以下公式估算耕层 (0~20 cm) SOC 的储量 (SSOC t/hm^2):

$$\text{SSOC} = \text{SOC} \times \text{容重} \times \text{H} \times 0.1$$

式中: SOC 为土壤有机碳浓度 (g/kg); 容重为耕层土壤容重 (g/cm^3); H 为土层深度 (cm)。

植株样品: 每年冬小麦成熟期收获小区 1/3, 以

估算单位面积子实产量和地上部分生物量。秸秆和子实风干后,称重,在 70 °C 条件下烘干到统一水分称重,用于估算小区产量(生物产量和子实产量)。

1.4 作物根茬输入碳的估算

小麦子实产量和地上部分生物量为实测值,0—20 cm 土层根茬还田量以地上部分生物量的 35 % 进行估算,秸秆留茬和叶的凋落物以地上生物量的 10 % 估算,根茬含碳量取 36 %^[6,19,21]。

数据采用 SAS8.1 (SAS Inst., 1999) 软件进行统计分析,当 F 检验显著时,进行各处理间的方差分析。

2 结果与分析

2.1 施肥措施对小麦产量和根茬碳的影响

党廷辉等^[17]、郭胜利等^[12]曾对该长期定位试

验的小麦产量进行了系统研究。本文只做简要分析。从表 2 可以看出,施肥措施显著 ($P < 0.05$) 影响作物产量(23 年平均值)。与不施肥处理 CK(1.5 t/hm²) 相比,N(2.0 t/hm²) 和 M 处理(2.6 t/hm²) 小麦产量提高 33 % 和 73 %,NP(3.3 t/hm²) 和 NPM 处理(4.0 t/hm²) 则提高 120 % 和 170 %。相似地,与对照相比,N、M、NP、NPM 处理地上部生物量依次提高了 33 %、73 %、120 %、167 %。依据生物量估算根茬还田量,CK 处理根茬碳还田量仅为 0.56 t/(hm² a),施肥处理则较 CK 显著 ($P < 0.05$) 提高,但不同施肥处理提高幅度存在差异,N 和 NP 处理较 CK 提高 34 % 和 120 %,而 M 和 NPM 则提高 73 % 和 166 %。以上结果表明,黄土高原半干旱地区农田施肥措施可显著提高作物产量、地上部生物量和根茬碳还田量,其中有机无机肥配施效果更为明显^[12]。

表 2 长武长期定位试验不同施肥条件下冬小麦产量和作物根茬碳还田量
Table 2 Wheat yield and residues amount returned to the soil under the treatments of the long-term experiment in Changwu station

处理 Treatment	产量 Yield (t/hm ²)	地上部分生物量 Shoot biomass [t/(hm ² a)]	根茬碳还田量 Root-C input [t/(hm ² a)]	外源碳的输入量 C input from FYM [t/(hm ² a)]
F	0 a	0 a	0 a	0
CK	1.5 b	3.45 b	0.56 b	0
N	2.0 c	4.60 c	0.75 c	0
M	2.6 d	5.98 d	0.97 d	0.8
NP	3.3 e	7.59 e	1.23 e	0
NPM	4.0 f	9.20 f	1.49 f	0.8

注(Note): 有机肥含碳量 1.07 %; 同列数据后不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著,下同 Carbon content of organic fertilizer is 1.07 % . The data in the same column followed by different small letters indicate the significant differences at $P < 0.05$. The same symbol is used for other tables.

2.2 施肥措施对 SOC 积累量的影响

与 1984 年的 SOC(6.50 g/kg) 相比,长期休闲处理(F),因没有有机物质的输入,到 2007 年,随着土壤原有 SOC 的不断矿化分解,耕层 SOC 含量(5.90 g/kg) 降低了 9 %,SOC 积累量为负值(表 3)。这一结果显示,23 年期间休闲处理的土壤一直是大气 CO₂ 的源。CK 处理 23 年后耕层 SOC 积累量(0.76 t/hm²) 略有提高,表明不施肥的条件下,小麦根茬的输入量与土壤的 CO₂ 排放量基本处于平衡状态。N 处理,尽管可以提高 SOC 的积累,但幅度有限(1.02 t/hm²)。NP 处理则可以显著 ($P < 0.05$) 提高 SOC 的积累量(3.42 t/hm²),达到 106 %。直接添加外源有机肥的条件下,SOC 含量得到显著提高,M 和 NPM 处理提高了 157 % 和 159 % ($P < 0.05$)。上述结果说

明,种植植物是维持或提高 SOC 的基础,氮磷配施、有机肥或化肥与有机肥配施可显著提高耕层 SOC 储量。

3 讨论

3.1 土壤生产力的提高是促进 SOC 积累的重要因素

土壤有机物输入、SOC 各组分的分解和矿化、SOC 各组分在分解过程中的相互转化,这三个要素的相互作用决定 SOC 的积累水平。生产力的提高是促进有机物输入,提高 SOC 的重要因素。图 1b 显示,本研究中,作物产量与 SOC 变化呈显著的正相关关系 ($R^2 = 0.796$)。相似的结果在太湖地区^[6],黄淮海地区^[21]、洞庭湖地区^[22]、非洲^[23]、美洲等

表 3 长武长期定位试验不同施肥条件下 SOC 积累量

Table 3 SOC accumulation under the treatments of the long-term experiment in Changwu station

处理 Treatment	1984 yr			2007 yr			SOC 积累量 SOC accumulation (t/hm ²)
	土壤容重 Bulk density (g/cm ³)	SOC (g/kg)	SOC 储量 SOC stock (t/hm ²)	土壤容重 Bulk density (g/cm ³)	SOC (g/kg)	SOC 储量 SOC stock (t/hm ²)	
F	1.3	6.5	16.9	1.34 c	5.9 ±0.1 a	15.81 a	- 1.09 a
CK	1.3	6.5	16.9	1.28 b	6.9 ±0.2 b	17.66 b	0.76 b
N	1.3	6.5	16.9	1.28 b	7.0 ±0.4 b	17.92 b	1.02 b
M	1.3	6.5	16.9	1.18 a	10.8 ±1.2 d	25.49 d	8.59 d
NP	1.3	6.5	16.9	1.27 b	8.0 ±0.5 c	20.32 c	3.42 c
NPM	1.3	6.5	16.9	1.20 a	11.0 ±0.8 d	26.40 d	9.50 e

地^[24-26]都有报道。

由图 1a 中的回归方程可知,作物根茬有机碳的输入量可以解释 SOC 变化的 63%,本研究中外源有机碳的输入量占到了总碳输入量的 30%~50%。根茬碳与外源碳之和可以解释 SOC 变异的 94%(图 1b)。这表明,外源有机碳的输入也是提高 SOC 的

重要措施,这与潘根兴等^[6]的 SOC 积累主要与作物产量有关,而非依赖于有机肥源碳输入研究结果不同。外源有机碳的最终来源也是作物或植物光合作用的产物,只有提高作物产量才能获取更多的外源有机物和根茬有机碳。

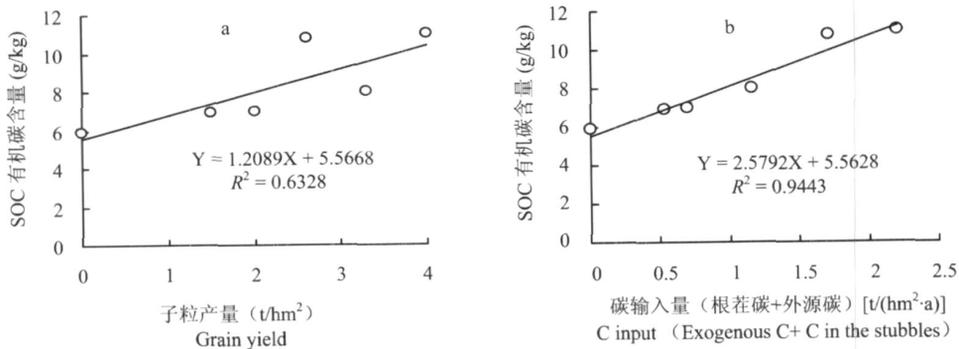


图 1 子实产量和碳输入量(根茬碳 + 外源碳)与 SOC 变化的关系

Fig. 1 Relationship between SOC and grain yield and C input

3.2 施肥措施对作物固碳和土壤固碳的差异

在农田生态系统中,作物固碳和 SOC 变化密切相连,但施肥措施对作物固碳和 SOC 影响存在显著差异。相对于 CK,同样的施肥措施对作物固碳的提高量明显高于 SOC。例如,N 处理的作物产量比 CK 提高了 33%,但 N 处理的 SOC 基本上没有明显变化(较 CK 处理提高了 1%)。NP 处理,作物产量较对照提高了 73%,SOC 较 CK 提高了 17%。作物的固碳能力与品种、养分、水分的供应、耕作管理等密切相关。SOC 积累与有机物输入量、土壤的固碳效率等有关。

3.3 土壤质地、气候和耕作管理对土壤固碳效率的影响

长期施用有机肥和化肥对 SOC 的影响因土壤类型、耕作管理和气候而呈现差异。在黄土高原地区 SOC 变化速率与碳年输入量存在极显著的相关关系($Y = 0.231X - 0.0813, R^2 = 0.9582$) (图 2)。每年输入 1 t 的有机碳,其转化为 SOC 的量大约为 0.23 t。这一结果与此区域有机物料矿化模拟试验所得到的腐殖化系数(0.21~0.37)基本一致^[27],但明显高于同纬度的黄淮海地区的试验结果^[2]。孟磊等^[2]在潮土上的长期试验结果表明,SOC 变化速率与年碳输入量(根茬碳 + 有机肥碳)存在如下关系 $Y = 0.1018X - 149.44 (R^2 = 0.9683)$,孟磊等^[2]还认为收获期作物根茬碳与有机肥中碳之和可作为 SOC 输入量。因国内外对作物根茬碳还田量的估算方法

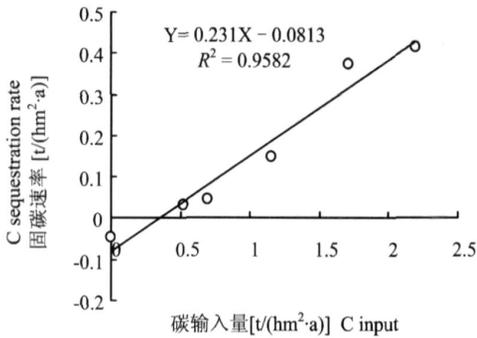


图2 长武长期定位试验土壤碳输入与固氮速率的相互关系

Fig. 2 Relationships between C input and C sequestration rate of the long-term experiment in Changwu station

不统一^[2,6,19],为了便于比较,依据孟磊等^[2]在潮土试验中根茬碳占子实碳的比例为 39%,重新估算了本研究中根茬碳输入量,得到 SOC 变化速率与碳年输入量的回归方程为 $Y = 0.3415X - 0.0419$ ($R^2 = 0.9817$)。在计算方法相近的条件下,对比两个试验得到的方程可以看出,黄淮海平原上潮土的固碳效率大约为 0.10,此数值远低于黄土区的黑垆土(0.34)。其原因可能与下列因素有关: 1) 本研究的供试土壤为粘壤质黑垆土, <0.001 mm 的粘粒含量为 15%^[28],孟磊等^[2]的研究的土壤为轻壤质黄潮土, <0.001 mm 的粘粒含量为 11%^[28]; 2) 本研究所所在地的年降水量(580 mm)比孟磊等^[2]研究所在地的降水量稍低(605 mm),且年均气温(9.4)也低于后者(13.9)。黄土区,土壤粘粒含量高、温度低,因此,在同样有机物输入的条件下,黑垆土较黄淮海潮土的固碳效率要高。但由于黄淮海地区温度高,加上灌溉,一年两熟,土壤休闲时间短于黄土区,土壤生产力也显著高黄土区。因此有机物年输入总量高于黄土区,这可能是同纬度黄淮海地区 SOC(1.61 g/kg)稍高于黄土区(1.14 g/kg)的原因所在^[19]。所以在黄土区采用高留茬等秸秆还田措施对提高 SOC 积累,发挥区域土壤固碳能力具有一定的实践意义。

4 结论

黄土高原半干旱地区农田施肥可显著提高作物产量和根茬碳还田量。与对照(CK, 1.5 t/hm²)相比,施氮肥(N),有机肥(M),氮、磷肥(NP),氮、磷与有机肥(NPM)等 5 种处理使得小麦平均产量分别提高了 33%、73%、120%和 167% ($P < 0.05$); 根茬碳

还田量分别提高了 34%、73%、120%和 166%。与休闲地相比,种植植物是维持或提高 SOC 的基础,施肥在不同程度上促进了 SOC 的积累,氮磷配施、有机肥或化肥与有机肥配施可显著 ($P < 0.05$) 提高耕层 SOC 储量。根据 SOC 库的储量与土壤碳的输入之间呈显著的线性关系,认为 SOC 的固定主要来源于作物根茬和有机肥源碳的总输入量的增加。

参考文献:

[1] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 282-289.
Pan G X. Soil organic carbon stock, dynamics and climate change mitigation of China [J]. Adv. Clim. Change Res., 2008, 4(5): 282-289.

[2] 孟磊,蔡祖聪,丁维新. 长期施肥对土壤碳储量和作物固定碳的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 769-776.
Meng L, Cai Z C, Ding W X. Carbon contents in soils and crops as affected by long-term fertilization [J]. Acta Ped. Sin., 2005, 42(5): 769-776.

[3] 潘根兴,赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究:全球变化和粮食安全[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384-393.
Pan X G, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security [J]. Adv. Earth Sci., 2005, 20(4): 384-393.

[4] 杨学明,张晓平,方华军. 农业土壤固碳对缓解全球变暖的意义[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 101-106.
Yang X M, Zhang X P, Fang H J. Importance of agricultural soil sequestering carbon to offsetting global warming [J]. Sci. Geograph. Sin., 2003, 23(1): 101-106.

[5] 张国盛,黄高宝, Yin C. 农田土壤有机碳固碳研究进展[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 351-357.
Zhang G S, Huang G B, Yin C. Soil organic carbon sequestration potential in cropland [J]. Acta Ecol. Sin., 2005, 25(2): 351-357.

[6] 潘根兴,周萍,张旭辉,等. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响—以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3704-3710.
Pan G X, Zhou P, Zhang X H et al. Effect of different fertilization practices on crop carbon assimilation and soil carbon sequestration: A case of a paddy under a long-term fertilization trial from the Tai Lake region, China [J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(11): 3704-3710.

[7] 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): 327-337.
Pan G X, Zhou P, Li L Q, Zhang X H. Core issues and research progresses of soil science of C sequestration [J]. Acta Ped. Sin., 2007, 44(2): 327-337.

[8] 伊云锋,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.
Yin 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]. Soil, 2006, 38(6): 745-749.

- [9] 佟小刚,徐明岗,张文菊,卢昌艾.长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(11): 3664-3671.
Tong X G, Xu M G, Zhang W J, Lu C A. Influence of long-term fertilization on content and distribution of organic carbon in particle-size fractions of red soil and fluvo-aquic soil in China[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2008, 41(11): 3664-3671.
- [10] 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 sequestration of paddy soils in Subtropical China [J]. *Acta Ped. Sin.*, 2006, 43(1): 46-52.
- [11] Li Z, Zhao Q G. Carbon dioxide fluxes and potential mitigation in agriculture and forestry of tropical and subtropical China [J]. *Clim. Change*, 1998, 40: 119-132.
- [12] 郭胜利,党廷辉,郝明德.施肥对半干旱区小麦产量、NO₃-N 累积和水分平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 754-760.
Guo S L, Dang T H, Hao M D. Effects of fertilization wheat yield, NO₃-N accumulation and soil water content in semi-arid area of China[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2005, 38(4): 754-760.
- [13] 中国科学院黄土高原综合科学考察队.黄土高原地区农林牧综合发展与合理布局[M].北京:科学出版社,1991. 1-12.
Team of loess plateau survey under Chinese academy of science. Development of agriculture, forestry, and husbandry on Loess Plateau and it's planning [M]. Beijing: Science Press, 1991. 1-12.
- [14] 杨文治,余存祖.黄土高原区域治理与评价[M].北京:科学出版社,1992. 125-189.
Yang W Z, Yu C Z. Control and assessment on Loess Plateau of China [M]. Beijing: Science Press, 1992. 125-189.
- [15] 郝明德,张俊兴,胡克昌.高原沟壑区农田生态系统中的肥料投入[J]. 水土保持通报, 1995, 15(6): 16-21.
Hao M D, Zhang J X, Hu K C. Fertilizer input to field ecosystem of Plateau Gully region [J]. *Bull. Soil Water Cons*, 1995, 15(6): 16-21.
- [16] 李玉山,郑吉文.黄土高原沟壑区旱作粮食短期内大幅度增产的理论和技巧[A].李玉山,苏陕民.长武王东沟高效生态经济系统综合研究[M].北京:科学技术文献出版社,1991. 285-292.
Li Y S, Zheng J W. Theory and technique of great and quick increase of arid grain yield in loess plateau gully regions [A]. Li Y S, Su S M. Efficient ecological and economic system in Wangdonggou watershed of Changwu County [M]. Beijing: Scientific and Technical Publishers of China, 1991. 285-292.
- [17] 党廷辉.不同降水年型旱塬冬小麦优化施肥模式研究[A].郝明德,梁银丽.长武农业生态系统结构、功能及调控原理与技术[C].北京:气象出版社,1998. 76-80.
Dang T H. Optimum fertilization model on winter wheat in dry highland in different hydrological year [A]. Hao M D, Liang Y L. The structure, function and command principle and technology of the agroecosystem in Changwu station [C]. Beijing: China Meteorological Press, 1998. 76-80.
- [18] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter, in methods of soil analysis (part 2) [A]. Page A L, Miller R H, Keeney D R. Chemical and microbiological properties (Second edition) [M]. Wisconsin USA: Madison, 1982. 562-564.
- [19] 郭胜利,吴金水,党廷辉.轮作和施肥对半干旱区作物地上部生物量与土壤有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3): 744-751.
Guo S L, Wu J S, Dang T H. Effects of crop rotation and fertilization on aboveground biomass and soil organic C in Semi-arid Region[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2008, 41(3): 744-751.
- [20] 张镜清,王文山.农作物根茬培肥土壤的作用[J]. 土壤通报, 1984, 15(2): 63-64.
Zhang J Q, Wang W S. Effects of rooted residues on soil fertility [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 1984, 15(2): 63-64.
- [21] 沈善敏.农业系统中碳与主要营养元素循环及中国农田土壤养分收支[A].沈善敏.中国土壤肥力[M].北京:中国农业出版社,1998. 57-60.
Shen S M. Cycling of carbon and mineral nutrients in cropland of China and it's balance [A]. Shen S M. Soil fertility of China [M]. Beijing: Agriculture Press, 1998. 57-60.
- [22] 唐国勇,彭佩钦,苏以荣,等.洞庭湖区不同利用方式下农田土壤有机碳含量特征[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(2): 219-222.
Tang G Y, Peng P Q, Su Y R *et al.* Contents of soils carbon under various land-use types at farmland in Dongting Lake region [J]. *Res. Environ. Yangtze Basin*, 2006, 15(2): 219-222.
- [23] Graham R J, Haynes J, Meyer H. Soil organic matter content and quality: Effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2002, 34: 93-102.
- [24] Halvorson A D, Wienhold B J, Black A L. Tillage, nitrogen, and cropping system effects on soil carbon sequestration [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 2002, 66(3): 906-912.
- [25] Sherrod L A, Peterson G A, Westfall D G, Ahuja L R. Cropping intensity enhances soil organic carbon and nitrogen in a no-till agroecosystem [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2003, 67(5): 1533-1543.
- [26] Robinson C S, Cruse R M, Chaffarzadeh M. Cropping system and nitrogen effects on Mollisol organic carbon [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1996, 60(1): 264-269.
- [27] 刘耀宏,戴鸣钧,余存祖.施加有机物料对土壤有机质影响的研究[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1989, (1): 117-123.
Liu Y H, Dai M J, Yu C Z. The effect of Application of organic substances upon soil organic matter [J]. *Northwestern Ins. Soil Water Conserv. Acad. Sin.*, 1989, (1): 117-123.
- [28] 熊毅,李庆逵.中国土壤(第二版)[M].北京:科学出版社, 1990. 92-168.
Xiong Y, Li Q K. Soil in China (2nd.) [M]. Beijing: Science Press, 1990. 92-168.