

施氮水平对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳、氮的影响

郭胜利, 高会议, 党廷辉

(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, 陕西杨陵, 712100)

摘要: 施用氮肥是提高作物产量和土壤有机碳(SOC)、氮(TSN)含量的重要养分管理措施。利用长期田间试验(1984—2007), 定量评价了常规耕作条件下5个施氮水平 N 0(N₀)、45(N₄₅)、90(N₉₀)、135(N₁₃₅)和180(N₁₈₀) kg/hm² 处理下, 小麦子粒产量、SOC、TSN和氮肥利用效率的变化。研究了施氮水平对黄土旱塬区小麦产量、SOC和TSN积累的影响。结果表明, 1984—2007年期间, N₀、N₄₅、N₉₀、N₁₃₅和N₁₈₀处理小麦产量的平均值依次为1.2、2.4、2.9、3.2和3.4 t/hm²; N₀处理的小麦产量随试验年限而降低, 年降低幅度达67 kg/hm² (P<0.001); 但增施氮肥处理小麦产量降低趋势得到显著控制, 当施氮水平提高到N 90 kg/hm²时, 产量随年限呈现出缓慢升高的趋势。随着施氮水平的提高, 地上部氮肥利用率由40% (N₄₅)降低到28% (N₁₈₀)。不同施氮水平条件下, SOC含量随年限呈缓慢升高趋势。23年后(2007年), N₀、N₄₅、N₉₀、N₁₃₅和N₁₈₀处理下, 0—20 cm土层SOC储量依次为16.9、18.2、18.7、19.0和19.1 t/hm²; TSN储量依次为2.03、2.16、2.24、2.34和2.37 t/hm²。施氮水平与产量呈显著的抛物线关系(R²=0.993)。产量与SOC存在着极显著的线性相关关系(R²=0.997)。增施N 1 kg/hm², 小麦产量可提高29 kg/hm², SOC提高1.2 kg/hm², TSN提高0.13 kg/hm²。根茬还田量的增加是导致黄土旱塬区SOC和TSN提高的主要因素。

关键词: 施氮水平; 产量; SOC; TSN

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)04-0808-07

Effects of nitrogen application rates on grain yield, soil organic carbon and nitrogen under a rainfed cropping system in the loess tablelands of China

GUO Sheng-li, GAO Hui-yi, DANG Ting-hui

(Institute of Soil and Water Conservation, Northwest University of Agriculture and Forestry/ Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Nitrogen fertilization significantly influences soil organic carbon (SOC) and total soil N (TSN) in rainfed farming systems. Effects of N application rates on crop yield, SOC and TSN in a rainfed winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system without crop residues returned to soil were studied using a long term field experiment from 1984 to 2007 in a silt loam Heilu soil (Calcarid Regosols). There were five N application rates, 0, 45, 90, 135, and 180 kg/ha N. The averaged grain yields of wheat are 1.2, 2.4, 2.9, 3.2, and 3.4 t/ha for the five treatments, respectively. For the treatment without N fertilization (N₀), the grain yield gradually declines with years at a rate of 67 kg/ha (P<0.001). For the treatments with N fertilization, the grain yields are stable, and even improve with years. Fertilizer N use efficiencies are decreased from 40% to 28% for the N₄₅ treatment and the N₁₈₀ treatment. SOC contents in 0-20 cm depth are significantly influenced by the long-term N fertilization, and the SOC pools in 0-20 cm depth range from 16.9 t/ha for the N₀ treatment to 19.1 t/ha for the N₁₈₀ treatment under the 23 year N applications. Similarly, TSN contents and pools are also significantly affected by the N rates. The TSN pools for 0-20 cm depth range from 2.03 t/ha for the N₀ treatment to 2.37 t/ha for the N₁₈₀ treatment. There are significant correlation between crop yields and the N rates (R²=

收稿日期: 2009-01-15 接受日期: 2009-03-14

基金项目: 中国科学院知识创新方向项目(KZCX2-YW-424); 国家自然科学基金(40771125)资助。

作者简介: 郭胜利(1969—),男,河北栾城人,博士,副研究员,主要从事土壤养分与生态研究。E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

0.993), and as well as the correlation between yields and SOC ($R^2 = 0.997$). The grain yield increase rate is 29 kg/ha per 1 kg N fertilization, and the rates for SOC and TSN in 0-20 cm depth are 1.2 kg/ha and 0.13 kg/ha under crop residues removed from the ground, respectively. Root-derived C and N are the main sources of SOC and TSN under the rainfed wheat cropping system in the loess tablelands.

Key words: nitrogen application rate; grain yield; soil organic carbon; total soil N

干旱和土壤贫瘠是影响粮食生产的主要限制因子。增施化肥是改善土壤肥力、提高水分利用效率的重要措施^[1-2]。作物产量的改善提高了根茬还田量,进而促进土壤有机碳积累和减缓温室效应^[3-6]。施用化肥是提高作物产量的重要措施,但施用化肥对土壤有机碳影响结论不一。在有机质含量较低的土壤上,施用足量的化肥对提高有机质含量具有显著作用。在英国洛桑试验站 Broadbalk 的小麦连作长期试验地,144年后,施用 NPK 肥土壤有机碳含量比对照(9.3 g/kg)提高 15%^[7]。但在一些有机质含量较高的土壤上,施用化肥反而导致有机碳含量的降低。在美国密苏里州 Sanborn field 的小麦连作长期试验地,连续施用化肥 99 年后,土壤有机碳含量为 25.1 g/kg,比对照降低了 4%^[8]。国内 10 年以上的试验也有正反两种报道:潘根兴等^[9],陈福兴等^[10],阴红彬^[11]等,王玲莉^[12]等,伊云峰^[13]等的研究表明,施用化肥提高土壤有机碳的积累;而孟磊^[14]等,乔云发^[15]等,李新爱^[16]等的研究结果则相反。马成泽^[17]等,祝华明^[18]等,周卫军等^[19]的研究结果显示,化肥施用只能使土壤有机碳保持现有水平或略有下降。其次,土壤管理和作物种类也是影响施肥条件下土壤有机碳、氮变化的重要因素。相同施肥条件下,免耕土壤有机碳提高 37%,常规耕作仅提高 12%^[20]。Reicosky 等^[21]评述了耕作措施和生物量对农田土壤有机碳含量的影响。结果表明,土壤有机碳含量与作物根茬管理、施肥和气候等因素有关。因此,化肥-作物-土壤有机碳之间关系十分复杂。

黄土高原是我国古老的旱地农业区。区域气候干旱,土壤贫瘠,为我国主要的中低产区之一。冬小麦为该区主要粮食作物,其产量一般低于 1.5 t/hm²,1980 年以来,黄土区耕地化肥投入量由不足 50 kg/hm² 迅速提高到 200 kg/hm² 以上^[22-23],粮食单产较化肥普及前提高了 75%,部分地区提高一倍以上^[1, 24]。与此同时,土壤有机碳储量也得到一定的改善^[25-26]。但不同施肥措施对区域土壤生产力、土壤有机碳的影响及其相互关系尚不清楚。本文以长期肥料定位试验为基础,探讨了黄土旱塬区不同施

氮水平与作物产量和土壤有机碳、氮含量的关系。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本研究的长期试验是黄土旱塬区长期肥料定位试验,位于陕西省长武县十里铺村(东经 107°40',北纬 35°12'),为“中国科学院长武黄土高原农业生态试验站”和“长武农田生态系统国家野外研究站”的试验研究内容。该试验地位于黄土高原南部的渭北旱塬上(地势平坦,海拔 1200 m),为我国典型雨养农业区。土壤为粘壤质黑垆土,1984 年 0-20 cm 土层土壤有机碳含量为 6.50 g/kg,全 N 0.80 g/kg, Olsen-P 5 mg/kg, pH 8.4, CaCO₃ 10.5%,粘粒含量(<0.002 mm) 24%。所在地为半干旱湿润性季风气候,1985-2007 的生育年均降水量(冬小麦播前休闲季和生长季降水量之和)为 560 mm,其中最高年份为 954 mm,最低年份为 296 mm。休闲季(7-9 月)降水量占年总量的 57%左右。地下水位埋深在 60 m 以下。年平均气温 9.2℃,大于 10℃积温为 3029℃,年日照时数为 2230 h,日照率为 51%,年辐射总量为 484 kJ/cm²。平均年蒸发量(PET)为 1565 mm。

1.2 试验设计与管理

试验开始于 1984 年。试验开始前,一直种植作物(小麦或玉米)。1984 年,在同一施磷水平(P 39 kg/hm²)的基础上,设 5 个氮肥水平处理:N 0、45、90、135 和 180 kg/hm²,以 N₀、N₄₅、N₉₀、N₁₃₅、N₁₈₀表示,三次重复,随机区组排列。种植体系为一年一作,供试作物为冬小麦(*Triticum aestivum* L.,当地主栽品种“长武 131”系列)。小区面积 6 m × 4 m,小区间距 0.3 m,四周保护行 1 m。一般 9 月下旬播种(播量 150-190 kg/hm²,行距 20 cm),生长期人工及时去除杂草,因此杂草对土壤有机碳、氮的影响没有被考虑。成熟期人工收割,所有地上部被移出小区,地表残留麦茬高度低于 5 cm。其中,收获整个小区面积的 1/3,用于估算单位面积地上部生物量和子粒产量。冬小麦收获(次年 6 月)后土壤休闲,期间园盘耙机耕(深度 20 cm)松土蓄墒,播种前再耕翻,准备

下一茬冬小麦苗床。作物生长期间及时防治病虫害。氮、磷肥分别为尿素、三料磷肥,在播种前撒施地表后耕翻入土。

1.3 样品采集与分析

土壤样品: 1989、1994、1997、2002 和 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,5 个处理,每个处理 3 次重复,共计采集 15 个土样。样品风干、过筛,分析土壤有机碳^[27]和土壤全氮^[28]含量。以环刀法测定土壤容重,但不同施肥处理间没有显著差异,因此,利用平均值 1.3 g/cm^3 和土壤有机碳浓度测定值,估算了耕层(0—20 cm)土壤有机碳的储量。1984 年试验开始之初,整个试验用地土壤有机碳含量为 6.4 g/kg 。

植株样品: 每年冬小麦成熟期对一半的小区进行测产,以估算单位面积子粒产量和秸秆及叶片的生物量。秸秆和子粒风干后,在 70°C 条件下烘干到统一水分称重,用于估算小区产量。秸秆和子粒粉碎、过筛后测定氮的含量。分别在 1998、2000、2002 和 2007 年,采集了冬小麦地上部秸秆、叶片和子粒样品,用于测定其氮素含量(凯氏定氮法)^[28]。根据 4 年植物的氮素含量测定结果的平均值和历年小麦产量、秸秆生物量,估算试验期间小麦地上部的吸收量。

作物地上部吸 N 总量 = 试验期间子粒总产量 \times 子粒 N 浓度的当季平均值 + 试验期间秸秆总质量 \times 秸秆 N 浓度的当季平均值。

氮肥利用率 = (试验期间施肥处理地上部吸 N 总量 - 试验期间不施肥处理地上部吸 N 量) / 试验期间氮肥投入总量 $\times 100\%$

1.4 数据统计与分析

采用 SAS8.1(SAS Inst., 1999)^[29] 软件中的 Proc GLM 程序分析随机区组的变异性、不同施氮水平和年际间对小麦产量(或地上部生物量)的影响及其交互效应。在年际间产量差异显著的基础上,进一步分析施氮水平对逐年产量的影响。利用线性回归分析每一小区产量的变化趋势,并通过斜率的 P 值($P > t$)判断其不同及与 1 的差异显著性。利用单因素统计分析施氮水平对土壤有机碳、土壤全氮的影响。当 F 检验显著时,再进行以总施氮量为函数的土壤有机碳、氮储量的回归分析。

2 结果与分析

2.1 施氮水平对冬小麦产量的影响

统计分析显示,施氮水平显著影响小麦产量,降水、降水与施肥间的交互作用对小麦产量也有显著影响(表 1)。小麦产量由不施氮肥时的 1.2 t/hm^2 提高到施氮 N 180 kg/hm^2 时的 3.5 t/hm^2 (表 1)。氮肥的产量效应方程为 $\text{Yield} = -0.0001\text{N}^2 + 0.0294\text{N} + 1.2543$ ($R^2 = 0.9926$)。由此可见,投入 N 1 kg/hm^2 ,冬小麦子粒产量大约提高 29 kg/hm^2 。小麦产量统计结果显示,施氮处理显著高于对照处理,并且不施氮处理产量的波动性(CV 为 66%)显著高于 4 个施氮处理(CV 为 35%—40%)。表明土壤肥力的改善有助于降低作物产量的波动性。随着时间延长,不施氮处理的产量因养分耗竭而逐渐降低,年降低率为 67 kg/hm^2 ($P < 0.001$),但增施氮肥后降低趋势得到显著抑制($P < 0.05$)。当施氮水平提高到 N 90 kg/hm^2 时,产量随时间呈现出缓慢升高的趋势,但年提高率没有达到显著水平(表 1)。这些结果表明,在黄土旱塬区增施氮肥在维持或改善土壤生产力、降低产量波动性方面具有重要意义。Pan 等的研究结果也表明,提高土壤有机质含量有助于维持土壤生产力和降低禾谷类作物产量的波动性^[30]。

表 1 不同施氮水平条件下的小麦产量、产量随时间的变化趋势及其产量变异分析

Table 1 Grain yields, significance of the yields over years, and analysis of variation (ANOVA) in the long-term fertilization experiment

氮水平 N rates	产量 Yield (t/hm^2)	年变化率 Change [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]	$P > t$
N ₀	1.2 (66%)	- 0.067	0.0006
N ₄₅	2.4 (35%)	- 0.005	0.74
N ₉₀	2.9 (34%)	0.009	0.76
N ₁₃₅	3.2 (38%)	0.014	0.73
N ₁₈₀	3.4 (40%)	0.005	0.97
LSD (0.05)	0.40	0.027	0.29
显著性分析 Significance analysis			
ANOVA	DF	F	$P > F$
Year (Y)	22	223	< 0.0001
T	4	695	< 0.0001
Y \times T	88	25	< 0.0001

注 (Note): 括号内的数字为产量年际间的变异系数, $P > t$ 为产量随时间变化的斜率等于 1 的可能性。Values in parentheses are coefficient of variance, $P > t$ probability value for testing slopes different from 1.

2.2 施氮水平对土壤有机碳、氮的影响

在试验的 1984~2007 年间,对照处理的有机碳含量在 6.4 g/kg 水平小幅度波动(与试验之初含量相近),显示该处理土壤有机碳含量基本处于周转平衡状态。对于不同施氮水平的处理,其土壤有机碳含量随着时间呈缓慢升高趋势(图 1)。10 a 后,不同施氮水平的有机碳含量显现出显著差异,15 a 以后,土壤有机碳接近周转平衡状态。截止到 2007 年, N₄₅、N₉₀、N₁₃₅ 和 N₁₈₀ 处理分别较 N₀ 处理提高了 8.5%、10.5%、12.5% 和 13.1%。

与对照相比,在投入 N 45 kg/hm² 条件下,2007 年耕层 SOC 储量提高 1.3 t/hm²,年均提高率为 C 57 kg/(hm²·a); N 90 kg/hm² 条件下,提高 1.8 t/hm²,提高率为 C 78 kg/(hm²·a); N 135 kg/hm² 条件下,提高 2.1 t/hm²,提高率为 C 90 kg/(hm²·a); 投入 N 180 kg/hm² 时,SOC 储量提高 2.2 t/hm²,相当于每年增加 C 96 kg/(hm²·a)。试验期间 SOC 提高量和变化速率随施氮水平而提高。SOC 与施氮量之间存在显著的回归关系 $SOC = -0.0917N^2 + 28.064N + 16968 (R^2 = 0.987)$ 。可知,23 年期间每施入 N 1 kg/hm² 可提高 SOC 1.2 kg/hm²。

与对照相比,N₄₅、N₉₀、N₁₃₅ 和 N₁₈₀ 处理 TSN 含量分别提高 0.2、0.4、0.5 和 0.6 t/hm²,年提高速率依次为 N 57、91、135 和 148 kg/(hm²·a)。由回归方程 $TSN = -0.00571N^2 + 2.84N + 2035 (R^2 = 0.995)$ 可知,23 年期间每增施 N 1 kg/hm²,TSN 可提高 0.13 kg/(hm²·a)。

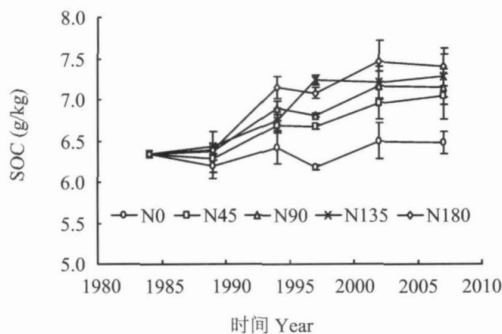


图 1 不同施氮条件下土壤有机碳动态变化(1984~2007)
Fig.1 Changes of SOC under the N rates between 1984 and 2007 in the long-term fertilization experiment

2.3 施氮水平对冬麦连作系统氮素吸收量的影响

随着施氮水平的提高,冬小麦地上部氮的吸收总量提高,但地上部平均当季氮肥利用率由 40%

(N₄₅)降低到 28% (N₁₈₀) (表 2)。土壤剖面中 NO₃⁻-N 含量的分析结果表明,15 a 后,施氮量 N 135 kg/hm² 时,0—300 cm 土层中 NO₃⁻-N 的积累量达到了 317 kg/hm²; 在 N 180 kg/hm² 时,达到 460 kg/hm²[23]。这一结果从农田生态系统氮素平衡的角度进一步解释了没有被作物吸收利用的氮的去向。

表 2 施氮水平对农田生态系统中子粒、秸秆氮吸收和氮肥利用率的影响

Table 2 Effects of the N rates on N in grain and straw, and fertilizer N use efficiency (FNUE) in the long-term fertilization experiment

氮水平 N rates	子粒氮 N in grain (kg/hm ²)	秸秆氮 N in straw (kg/hm ²)	氮肥利用率 FNUE (%)
N ₀	435	81	
N ₄₅	787	213	40
N ₉₀	1259	272	34
N ₁₃₅	1441	380	32
N ₁₈₀	1603	379	28

3 讨论

本研究显示,随着施氮水平的提高,作物产量逐渐提高,并呈显著的抛物线变化趋势(图 2 a)。土壤有机碳随施氮量的变化与产量的变化趋势相同(图 2 b)。有研究表明,根源碳输入量的提高是影响土壤有机碳周转的重要因素。例如 Balesdent 和 Balabane 发现,玉米根源有机碳的输入量是地上部秸秆碳的 1.6 倍^[31]。作物根源碳的输入与作物产量密切相关^[32-33]。施氮后作物生产力的提高促进了作物地下部根茬及其分泌物输入,进而促进了土壤有机碳积累。本研究中,产量与土壤有机碳含量存在极显著的线性相关关系(图 2 c)。尽管土壤生产力和土壤有机碳同步提高,但二者的提高幅度显著不同。如施入 N 1 kg/hm²,SOC 提高 1.2 kg,产量提高 29 kg/hm²。显示了在旱地小麦系统中,氮对作物-土壤系统碳、氮分配和循环的不同机理。此外,本试验的研究结果显示,施氮后土壤有机碳的年固碳效率为 SOC 57~96 kg/(hm²·a)。显著低于秸秆还田条件下施氮的 SOC 提高速率。Jagadamma 等^[34]发现,在 0—30 cm 土层,随着施氮量提高,SOC 提高速率为 175~316 kg/(hm²·a) (折合成 0—20 cm 为 120~210 kg/(hm²·a)); Halvorson 等^[6]的研究结果显示,

在 0—15 cm 土层,施氮后 SOC 提高速率为 140~182 kg/(hm² a); Dumanski 等^[35]则发现,施氮后 SOC 提高速率为 500~750 kg/(hm² a)。分析其原因,可能在本试验中,尽管氮肥显著提高作物产量,但由于秸秆没有还田而无法参与土壤有机碳氮的周转,从而降低了氮肥转化成土壤有机碳、氮的效益。随着保护耕作措施的实施,施氮影响土壤有机碳、氮的效果将会进一步显现。此外,本研究的固碳效率也低于南方的水稻田的固碳效率[大约为 100 kg/(hm² a)左右]^[9]。其原因可能是南方地区水热条件较好,一年多作,根茬碳还田量高于西北雨养农业区。

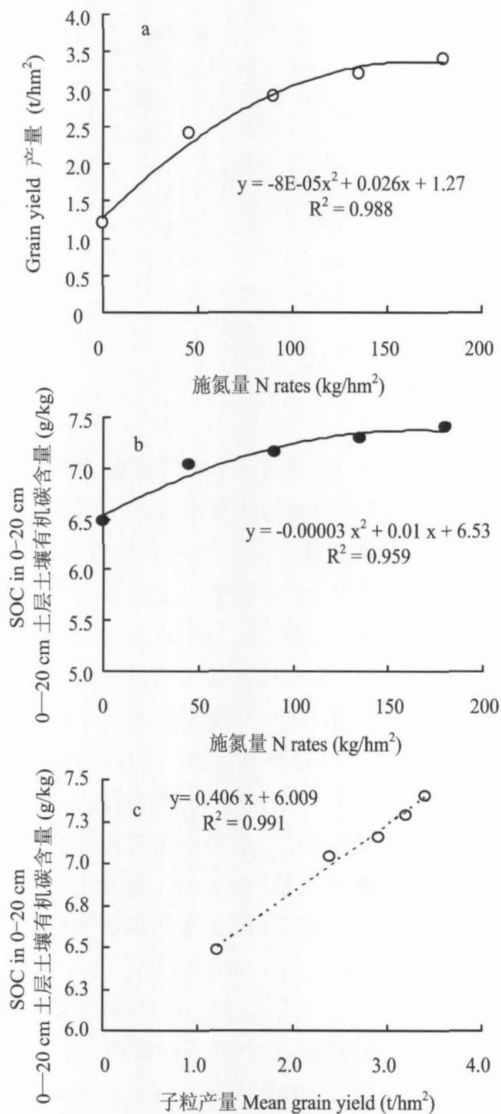


图 2 不同处理下施氮量、产量、SOC 之间的关系

Fig. 2 Relationships between the N rates, grain yields and SOC in the long-term fertilization experiment

4 结论

在黄土旱塬区,长期增施氮肥有助于提高土壤生产力,降低产量波动性,促进 SOC 和 TSN 的积累。N₄₅、N₉₀、N₁₃₅和 N₁₈₀处理,子粒产量较对照分别提高 100%、142%、167%和 183%,SOC 依次提高 8.5%、10.5%、12.5%和 13.1%。产量与 SOC 存在着极显著的相关关系($r^2 = 0.991$)。增施 N 1 kg/hm²可使小麦产量提高 29 kg/hm²,SOC 提高 1.2 kg/hm²,TSN 提高 0.13 kg/hm²。目前常规管理条件下,施肥后根茬及其分泌物的提高是黄土旱塬区农田 SOC 和 TSN 积累的重要驱动因素,但氮肥利用率随施氮水平升高而显著降低。

参考文献:

- [1] 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实践[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, 155-204.
- [2] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业[M]. 北京:农业出版社,1989. 36-53.
Zhu X M. Soil and agriculture on the Loess Plateau of China[M]. Beijing: Agriculture Press, 1989. 36-53.
- [3] Halvorson A D, Reule C A, Follett R F. Nitrogen fertilization effects on soil carbon and nitrogen in a dryland cropping system[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, 63: 912-917.
- [4] Halvorson A D, Wienhold B J, Black A L. Tillage, nitrogen, and cropping system effects on soil carbon sequestration[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, 66: 906-912.
- [5] Lal R, Kimble J, Follett R F, Cole C V. The potential of U. S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect [M]. Chelsea, MI: Ann Arbor Press, 1998.
- [6] Peterson G A, Halvorson A D, Havlin J L, Jones O R, Lyon D J, Tanaka D L. Reduced tillage and increasing cropping intensity in the Great Plains conserves soil C[J]. Soil Till. Res., 1998, 47(3-4): 207-218.
- [7] 吴金水. 土壤有机质及其周转动力学[A]. 何电源. 中国南方土壤肥力与栽培植物施肥[M]. 北京:科学出版社,1994. 43.
Wu J S. Soil organic matter and its turnover dynamics[A]. He D Y. Soil fertility and fertilization of crops in Southern China[M]. Beijing: Science Press, 1994. 43.
- [8] Mitchell C C, Weateman R L, Brown J R, Peck T R. Overview of long-term agronomic research[J]. Agron. J., 1991, 83: 24-29.
- [9] 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 X 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.
- [10] 陈福兴, 秦道珠, 谢良商. 长期施用有机肥对土壤养分平衡及增产作用 - 肥料效应监测试验结果[J]. 土壤肥料, 1991, (1): 13-16.
- Chen F X, Qin D Z, Xie L S. Result of fertilizer monitoring test-soil nutrient balance and yield increasing by long-term fertilization of organic manure[J]. *Soils Fert.*, 1991, (1): 13-16.
- [11] 阴红彬, 韩晓日, 谢芳, 等. 长期定位施肥对棕壤有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1102-1105.
- Yin H S, Han X R, Xie F *et al.* Effect on soil organic carbon in brown soil by long-term site-specific fertilization[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2006, 37(6): 1102-1105.
- [12] 王玲莉, 姜翼来, 石元亮, 韩晓日. 长期施肥对土壤活性有机碳指标的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 752-755.
- Wang L L, Lou Y L, Shi Y L, Han X R. Effect on index of soil active organic carbon by long-term fertilization[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2008, 39(4): 752-755.
- [13] 伊云峰, 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] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 钦绳武. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687-692.
- Meng L, Ding W X, Cai Z C, Qin S W. Storage of soil organic C and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization[J]. *Adv. Ear. Sci.*, 2005, 20(6): 687-692.
- [15] 乔运发, 苗淑杰, 韩晓增. 长期施肥条件下黑土有机碳和氮的动态变化[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 545-548.
- Qiao Y F, Miao S J, Han X Z. Dynamic changes of soil organic carbon and nitrogen in black soil under long-term fertilization[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2008, 39(3): 545-548.
- [16] 李新爱, 童成立, 蒋平, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3): 298-303.
- Li X A, Tong C L, Jiang P *et al.* Effects of long-term fertilization on soil organic matter and total nitrogen in paddy soil[J]. *Soils*, 2006, 38(3): 298-303.
- [17] 马成泽, 周勤, 何方. 不同肥料配合施用土壤有机碳盈亏分布[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 34-42.
- Ma C Z, Zhou Q, He F. Suplus-deficit distribution of organic carbon in soil under combined fertilization[J]. *Acta Pathol. Sin.*, 1994, 31(1): 34-42.
- [18] 祝华明, 王美琴, 吴樟梅. 施肥对红砂田有机质及土壤养分演变与作物产量的影响研究[J]. 土壤通报, 1995, 26(2): 76-77.
- Zhu H M, Wang M Q, Wu Z M. Research on effect of fertilizers on soil nutrient, yield and SOC[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 1995, 26(2): 76-77.
- [19] 周卫军, 王凯荣. 不同施肥制度对红壤性水稻土有机质含量及品质的影响[J]. 土壤通报, 1998, 29(5): 201-202.
- Zhou W J, Wang K R. Effect of different fertilizations on SOC content and quality of red paddy soil[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 1998, 29(5): 201-202.
- [20] Blevins R L, Thomas G W, Smith M S, Frye W W, Cornelius P L. Changes in soil properties after 10 years of continuous non-tilled and conventionally-tilled corn[J]. *Soil Till. Res.*, 1983, 3: 135-136.
- [21] Reicosky D C, Kemper W D, Langdale G W, Jr, Douglas C L, Rasmussen P E. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production[J]. *J. Soil Water Conserv.*, 1995, 50: 253-261.
- [22] 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 Conserv.*, 1995, 15(6): 16-21.
- [23] 彭琳, 彭珂珊. 粮食生产与施肥[J]. 西北农业学报, 1998, (2): 104-108.
- Peng L, Peng K S. Grain production and fertilization[J]. *Acta Agric. Boreali-Occid. Sin.*, 1998, (2): 104-108.
- [24] 李玉山. 黄土高原治理开发之基本经验[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 51-57.
- Li Y S. Fundamental experiences for harness and development in the Loess Plateau of China[J]. *J. Soil Eros. Soil Water Conserv.*, 1999, 5(2): 51-57.
- [25] 张春霞, 郝明德, 谢佰承. 不同化肥用量对土壤碳库的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 861-864.
- Zhang C X, Hao M D, Xie B C. Effect of application amounts of different chemical fertilizers on soil carbon pool[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2006, 37(5): 861-864.
- [26] 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.
- Gao 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.
- [27] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter[A]. Page A L, Miller R H, Keeney D R. In methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties (Second edition) [M]. Wisconsin USA: Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1982. 562-564.
- [28] Bremner J M, Mulvaney C S. Regular Kjeldahl method[A]. Page A L, Miller R H, Keeney D R. Methods of soil analysis, part 2 chemical and microbiological properties (Second edition) [M]. Wisconsin USA: Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1982. 610-616.
- [29] SAS Release (6.12) [CP/DK]. Cary, USA: SAS Institute Inc., 1998.
- [30] Pan G X, Pete S, Pan W N. The role of soil organic matter in main

- taining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2009, 129(1-3): 344-348
- [31] Balesdent J, Balabane M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1996, 28: 1261-1263.
- [32] Wilts A R, Reicosky D C, Allmaras R R, Clapp C E. Long-term corn residue effects: harvest alternatives, soil carbon turnover, and root-derived carbon[J]. *Soil Sci. Am. J.* 2004, 68:1342-1351.
- [33] Amos B, Walters D T. Maize root biomass and net rhizodeposited carbon: an analysis of the literature[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2006, 70:1489-1503.
- [34] Jagadamma S, Lal R, Høft R G, Nafziger ED, Adee EA. Nitrogen fertilization and cropping systems effects on soil organic carbon and total nitrogen pools under chisel-plow tillage in Illinois[J]. *Soil Till. Res.*, 2007, 95: 348-356.
- [35] Dumanski J, Desjardins R L, Tarnocai C *et al.* Possibilities for future carbon sequestration in Canadian agriculture in relation to land use changes[J]. *Clim. Change*, 1998, 40 (1): 81-103.
- [36] 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. 159.
- Yang W Z, Yu C Z. Control and assessment on Loess Plateau of China[M]. Beijing: Science Press, 1992. 159.

www.cnki.net