

长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量 及水分利用的影响

王碧胜¹, 蔡典雄^{1*}, 武雪萍^{1*}, 李景¹, 梁国鹏¹, 于维水¹,
王相玲¹, 杨毅宇^{1,2}, 王小彬¹

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081;
2 山西农业大学, 山西太谷 030801)

摘要:【目的】通过研究保护性耕作对旱地春玉米土壤有机碳(SOC)、产量及水分利用的影响, 分析保护性耕作的增产机制, 为旱作农田耕作技术应用提供理论和技术支持。【方法】采用 2003~2013 年连续 11 年的田间定位试验, 设传统耕作(CT)、少耕(RT)和免耕(NT)3 种耕作措施, 分析土壤 0—20 cm 和 20—40 cm 土层有机碳含量、土壤 0—20 cm 含水量、作物耗水量、玉米产量和水分利用效率的年际变化和耕作处理间的差异, 并对玉米产量与影响因素的相关性进行分析。【结果】1) 保护性耕作能有效提高土壤有机碳含量, 少耕、免耕处理 0—20 cm 土层有机碳含量 11 年平均较传统耕作分别提高了 11.2% 和 3.4%; 至 2013 年, 少耕、免耕 20—40 cm 土层有机碳含量分别较传统耕作增加了 5.53 和 3.29 g/kg; 土壤 0—20 cm 有机碳储量净增加速率分别为 0.365 和 0.754 t/(hm²·a)。2) 保护性耕作具有明显的增产效果, 少耕产量最高, 增产效果最好, 2003~2013 年均产量为 5.83 t/hm², 较传统耕作提高了 14.7%; 免耕次之, 年均产量为 5.39 t/hm², 较传统耕作增产 6.1%。3) 各耕作处理玉米产量与土壤 0—20 cm 土层含水量之间存在显著的二次方程关系, 与作物耗水量之间具有显著的乘幂方程关系。4) 保护性耕作可以增加土壤水分, 减少玉米生育期内的耗水量, 提高水分利用效率, 其中免耕土壤 0—20 cm 土层水分含量最高, 2003~2013 年平均含水量为 15.2%, 较传统耕作和少耕提高了 1.90 和 1.66 个百分点, 且生育期耗水量最少, 2003~2013 年均耗水量为 403.5 mm, 较传统耕作和少耕减少了 16.1 mm 和 7.6 mm; 少耕、免耕的水分利用效率较传统耕作分别提高了 16.1% 和 10.2%, 降水利用效率较传统耕作提高 13.9% 和 5.8%。【结论】长期保护性耕作可以有效地提高土壤有机碳含量、增加土壤水分、减少作物耗水量, 从而显著提高了玉米产量和水分利用效率, 3 种耕作措施中以少耕效果最好, 免耕次之, 在旱作农田推广少、免耕保护性耕作措施是一种增产、节水的有效途径。

关键词: 保护性耕作; 有机碳; 玉米产量; 水分利用

中图分类号: S344; S153.6⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2015)06-1455-10

Effects of long-term conservation tillage on soil organic carbon, maize yield and water utilization

WANG Bi-sheng¹, CAI Dian-xiong^{1*}, WU Xue-ping^{1*}, LI Jing¹, LIANG Guo-peng¹, YU Wei-shui¹,
WANG Xiang-ling¹, YANG Yi-yu^{1,2}, WANG Xiao-bin¹

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National
Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China;
2 Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract: 【Objectives】 Conservation tillage is widely used in dry farmlands of northern China in recent years. A long term field experiment (2003–2013) was conducted to explore impact of the conservation tillage on soil organic

收稿日期: 2015-04-30 接受日期: 2015-07-16

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2015BAD22B03); 国家“863”计划课题(2013AA102901); 公益性行业(农业)科研专项(201203077, 201203030)资助。

作者简介: 王碧胜(1988—), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事农业水资源利用研究。E-mail: wangbisheng2@126.com

* 通信作者 E-mail: caidianxiong@caas.cn; wuxueping@caas.cn.

carbon (SOC), spring maize yield and water utilization. We demonstrated the cause of yield improvement in the conservation tillage further, and then provided theoretical and technical support for dry farmland tillage. **【Methods】** There were three treatments, conventional tillage (CT), reduced tillage (RT) and no-tillage (NT). Annual variations of SOC (0–20 cm and 20–40 cm), soil moisture at 20 cm depth, crop water consumption, maize yield and water use efficiency were analyzed, and effect of the three tillage methods on above factors was also analyzed. Correlation analysis between maize yield and above factors was done in our study. **【Results】** 1) The conservation tillage can improve soil organic carbon (SOC) content, the annual SOC (0–20 cm) contents of the RT and NT treatments were increased by 11.2% and 3.4% compared with CT respectively, and the SOC (20–40 cm) of the RT and NT treatment were increased 5.53 and 3.29 g/kg. The increased rates of 0–20cm SOC stock of RT and NT were 0.365 and 0.754 t/(hm²·a) respectively. 2) The conservation tillage significantly increased crop yields; the average annual yields of 2003–2013 of the RT and NT treatments were 5.83 t/hm² and 5.39 t/hm² respectively, which are 14.7% and 6.1% higher than that of CT. 3) The maize yield under the tillage had significant quadratic relationship with the soil 0–20 cm layer water content, and had significant power equation relationship with crop water consumption. 4) The conservation tillage can increase soil moisture, reduce water consumption during maize growth and improve water use efficiency (WUE): compared with the CT and RT, NT increased the average moisture contents of 2003–2013 by 1.90 and 1.66 percentage points, whereas decreased annual water consumption by 16.1 mm and 7.6 mm; compared with CT, RT and NT increased WUEs by 16.1% and 10.2%, and precipitation use efficiencies (PUE) by 13.9% and 5.8% respectively. **【Conclusions】** The long-term conservation tillage can improve SOC and soil water content and decrease useless water consumption effectively, thus improve yield and water use efficiency. RT has the best performance, followed by NT. In general, promotion of conservation tillage is an effective way for increasing yield and water conservation in dry farmlands. **Key words:** conservation tillage; soil organic carbon; maize yield; water use efficiency

我国水资源紧缺,干旱、半干旱耕地面积相当大^[1],北方旱作农田就包含其中,怎样高效利用有限的水资源,增加作物产量一直备受学者重视。保护性耕作由于具有增加土壤蓄水,减少耗水量、提高作物产量等作用,在我国北方旱地得到了广泛应用。蔡典雄等^[2]在山西寿阳的耕作试验表明,少耕和免耕可以防风固沙,提高玉米产量和水分利用效率。代快等^[3]通过研究不同耕作模式下氮、磷肥的产量效应,得出少耕、免耕产量和水分利用效率显著高于传统耕作的结论。张德建等^[4]在赤峰进行的耕作试验得到同样的结果。但大多数研究只是单独谈论耕作措施对玉米产量的影响^[5-9]或对土壤有机碳的影响,而很少在保护性耕作下将两者关联起来研究;且一般认为保护性耕作能够增加土壤表层有机碳含量,但对深层土壤有机碳含量是否增加及其是否随耕作年限的增加而持续变化的结论不尽一致^[7-9]。因此,本文依托寿阳旱作试验站,以2003~2013年的数据为基础,研究了保护性耕作对土壤有机碳、玉米产量和水分利用的影响,进一步解释了保护性耕作增产的原因,为保护性耕作长期发展提供一定的理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地点

试验地位于山西省寿阳县宗艾村(东经112°~113°,北纬37°~38°),该地区属中纬度暖温带半湿润偏旱大陆性季风气候区,海拔1066~1159 m,年平均气温7.4℃,近20年的年均降水量为461.8 mm,年均蒸发量约为1700~1800 mm。受季风影响,平均风速可达3.9 m/s,冬春季最大风力可达8级以上。当地气候特征为一年四季分明、季节温差大,无霜期为130 d左右。一年一作春玉米播种面积占粮食播种面积的50%以上^[1]。试验区选在地势较平缓的褐土上,质地为砂质壤土,属于全年无灌溉雨养地。土壤有机质含量25.7 g/kg,全氮1.04 g/kg,速效氮(NH₄⁺ + NO₃⁻)54.0 mg/kg,速效磷(P)7.3 mg/kg,速效钾(K)84.0 mg/kg,pH值7.87。

1.2 试验设计

本长期定位试验开始于2003年4月。供试玉米品种为当地优势品种(2003~2004年为晋单34号,2005~2011年为晋单48号,2012年为晋单76号,2013~2014年为晋单79号,本试验在分析年际

间变化时不考虑品种的影响)。玉米播种量 30 kg/hm²,行距 60 cm,株距 30 cm。试验设 3 种不同耕作措施,分别为传统耕作(CT)、少耕(RT)、免耕(NT)。传统耕作(CT),秋收后秸秆移出,秋耕翻,春季播前撒施化肥并春耕;少耕(RT),秋收后秸秆切碎还田并配合撒施化肥和秋耕;免耕(NT),秋收后将秸秆顺行推倒免耕覆盖,春季免耕并将秸秆移至垄沟,顺垄开 5 cm 深小槽,点播玉米种子并在两播种点之间穴施化肥。处理小区面积为 25 m²,重复 3 次,每年不同耕作措施的氮、磷施用量均为 105 kg/hm²。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品采集与测定 在播种前和收获后取各处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土样,采用重铬酸钾容量法测定土壤有机碳。

降水量由试验点自动气象站获得。土壤质量含水量采用烘干法测定,包括 2003 ~ 2013 年玉米播种前和收获后各处理 2 m 土体含水率和 2006 ~ 2013 年玉米各生育期 0—20 cm 土层的含水量。

每年 10 月份收获后各处理每小区随机取 21 株玉米进行测产,并计算产量。

1.3.2 主要计算公式

$$\text{有机碳储量}(M) = H \times B \times \text{SOC} / 10$$

式中, M 为土壤有机碳储量(C t/hm²); H 为土层厚度(cm); B 为土壤容重(g/cm³); SOC 为土壤有机碳含量(g/kg)。

$$\text{耗水量}(ET) = P + I + U + W_1 - (R + D + W_2)$$

式中, P 为生育期内降水量; I 为灌水量(为零,无灌溉水); U 为地下深层水分上渗量(为零,地下水深

埋); R 为地表径流量(基本为零,地面平坦); D 为土壤水分渗漏量(忽略不计); W_1 为作物播种时土壤剖面初始贮水量; W_2 为作物收获后土壤剖面贮水量。

水分利用效率[WUE,kg/(mm·hm²)] = Y/ET 式中, Y 为作物籽粒产量; ET 为作物生长期间的蒸散量。

降水利用效率[PUE,kg/(mm·hm²)] = Y/P 式中, Y 为作物籽粒产量; P 为作物生长期间的降水量^[8]。

试验数据采用 Excel (2007) 和 Sigmaplot 10.0 进行处理。

2 结果与分析

2.1 试验地降水特征

从图 1 可以看出,2003 ~ 2013 年每年的降水主要集中在 6 ~ 9 月份,约占年降水量的 64% ~ 85.9%。各年间降水量变化较大,其中 2007、2011、2013 年降水较多,全年降水量均在 520 mm 以上,较多年平均降水量(477.3 mm)高 11% ~ 28%,为丰水偏丰年;2005、2006、2010 年降水量较多年平均降水量低 11% ~ 20%,为偏枯年;其余年份降水量在 440 ~ 520 mm 之间,为平水年。此外,每年 4、5 月份降水量均较低,此时正是春玉米播种时期,对出苗率的影响较大。

2.2 不同耕作措施下 0—20 cm 土层水分变化特征

从图 2 可以看出,各处理 0—20 cm 土壤水分变化趋势一致,且与年降水量变化的趋势基本一致。2003 ~ 2013 年期间,3 种处理的土壤水分含量均在

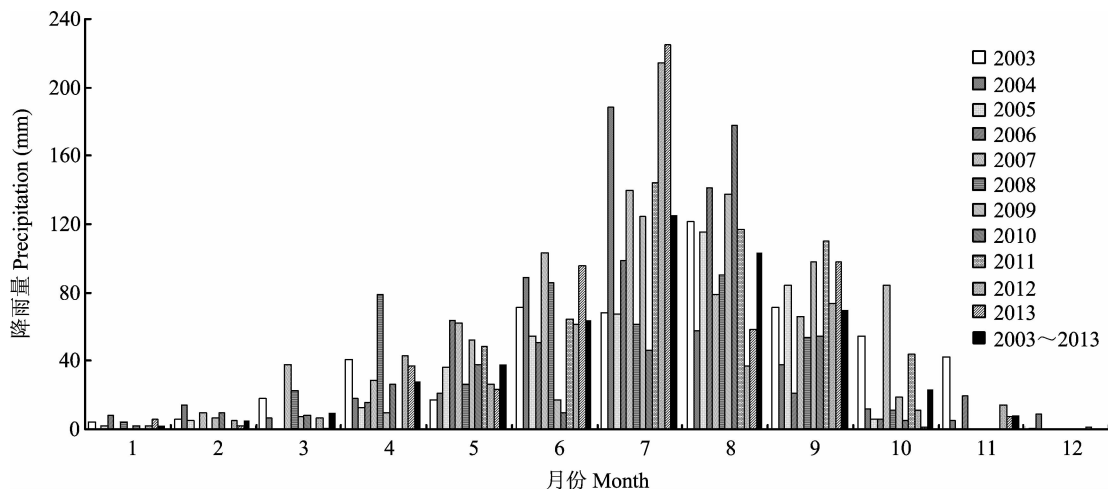


图 1 2003 ~ 2013 年试验地各月份降水量

Fig. 1 Monthly dynamic precipitations from 2003 to 2013 in the experimental field

2007 年达到最高值,之后逐渐下降,传统耕作在 2010 年达到最小值,之后逐渐回升;少耕处理于 2009 年后水分含量开始逐渐增加;免耕处理直至 2011 年后开始回升。3 个处理相比,免耕处理的水分含量一直保持最高,显著高于传统耕作和少耕,11 年平均含水量为 15.2%,分别较传统耕作和少耕提高 1.90 和 1.66 个百分点,水分含量波动比较小,质量含水量的变化范围为 13.4%~17.1%;少耕处理的土壤含水量各年份(2003 年除外)均高于传统耕作,但差异较小,仅在 2008、2010 和 2012 年存在显著性差异,多年平均值比传统耕作提高了 0.24 个百分点。由此可知,保护性耕作措施具有明显的土壤水分保持作用,尤其是免耕处理,历年土壤水分含量均显著高于传统耕作。

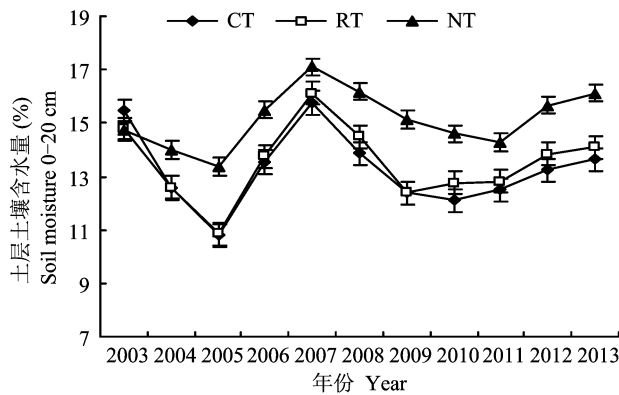


图 2 不同耕作措施玉米生育期 0—20 cm 土层平均含水率
Fig. 2 Average moisture of 0-20 cm layer in the growing seasons of spring maize under different tillage practices

2.3 不同耕作措施对春玉米耗水量的影响

从表 1 中可以看出,试验开始后几乎各年的耗水量较试验初(2003 年)均有所增加,其中 2008 年增加最多,达 166.4~169.1 mm,多年平均耗水量较试验初增加了 71.5~76.3 mm。各处理以免耕的耗水量最低,2003~2013 年平均耗水量为 403.5 mm,显著低于传统耕作,与传统耕作相比,11 年累计降低耗水量 177.1 mm;少耕处理同样具有减少耗水量的作用,11 年累计减少耗水量 94.2 mm,年均耗水量为 411.1 mm,与传统耕作间无显著差异 ($P>0.05$)。综上,各处理整体上表现为免耕、少耕低于传统耕作,其中免耕的耗水量最低,由此可知,保护性耕作可以减少玉米生育期耗水量,年均减少 8.5~16.1 mm;免耕和少耕之间也存在差异,年均耗水量免耕较少耕减少了 7.6 mm,显著低于少耕处理 ($P<0.05$)。

2.4 不同耕作措施对土壤有机碳的影响

2.4.1 耕作措施对土壤有机碳含量的影响 由图 3 可以看出,0—20 cm 土层有机碳含量年际间波动较大,传统耕作为 11.76~16.65 g/kg,少耕为 14.86~18.89 g/kg,免耕为 11.88~18.40 g/kg。与传统耕作相比,少耕处理各年有机碳含量均显著提高,提高幅度为 4.7%~26.3%,最高增加 3.09 g/kg;免耕处理对有机碳的增加效果出现较晚,直至 2007 年首次高于传统耕作,最高增加有机碳 1.85 g/kg。由此可知,保护性耕作可提高土壤表层有机碳含量,少耕、免耕较传统耕作年均含量分别提高 11.3% 和 3.9%。

表 1 2003~2013 年不同耕作措施下玉米生育期平均耗水量 (mm)

Table 1 Water consumption at the growth stages of maize under different tillage practices in 2003-2013

处理 Treatment	2003	2004	2005	2006	2007	2008
CT	345.1	468.2 ± 5.9 a	368.5 ± 1.8 a	398.0 ± 4.1 a	494.9 ± 7.1 a	511.5 ± 5.7 a
RT	334.8	462.3 ± 5.9 a	343.0 ± 13.7 b	391.1 ± 16.6 a	480.1 ± 11.0 ab	503.9 ± 2.0 a
NT	332.0	426.6 ± 17.2 b	345.5 ± 9.5 b	375.9 ± 19.6 a	468.3 ± 0.9 b	499.4 ± 11.9 a
处理 Treatment	2009	2010	2011	2012	2013	11 年平均值 Mean of 11 years
CT	395.3 ± 7.4 a	396.0 ± 5.0 a	340.8 ± 9.7 a	461.1 ± 10.7 b	436.5 ± 9.1 a	419.6 ± 4.0 a
RT	390.6 ± 9.0 a	380.5 ± 9.2 b	356.9 ± 13.9 a	458.7 ± 6.8 b	419.8 ± 12.3 a	411.1 ± 3.8 a
NT	385.2 ± 6.4 a	386.2 ± 3.1 ab	309.6 ± 6.7 b	487.7 ± 2.7 a	422.4 ± 26.9 a	403.5 ± 4.6 b

注 (Note): 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.

从图 3 可以看出,传统耕作 20—40 cm 土壤有机碳含量呈下降趋势,而少耕、免耕具有缓慢提高的趋势,因此,土壤有机碳在传统耕作和少耕、免耕间的差异越来越大,逐渐达到显著水平。至 2013 年各处理土壤 20—40 cm 土层有机碳含量与 2003 年相比,传统耕作减少了 0.21 g/kg,而少耕和免耕分别增加了 6.05 g/kg 和 3.03 g/kg,均显著高于传统

耕作 ($P < 0.05$); 与传统耕作相比,少耕和免耕分别增加 5.53 g/kg 和 3.29 g/kg,可见长期保护性耕作可增加土壤 20—40 cm 土层有机碳含量。总体上看,20—40 cm 土层的有机碳含量少耕最高,免耕次之,传统耕作最低。2003~2013 年平均有机碳含量少耕和免耕分别较传统耕作提高了 14.2% 和 8.9%,差异达显著水平。

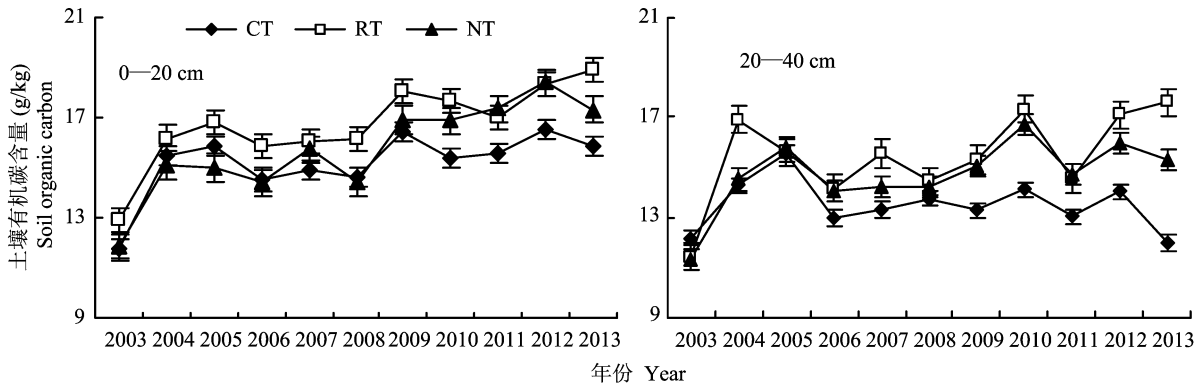


图 3 2003~2013 年各耕作处理土壤有机碳含量

Fig. 3 Soil organic carbon and precipitation under different tillage practices (2003–2013)

2.4.2 耕作措施对有机碳储量的影响 由图 4 可以看出,各耕作措施均显著提高了土壤有机碳储量,其中少耕、免耕的增加效果达到极显著水平。2003 年试验开始时,传统耕作、少耕和免耕的有机碳储量分别为 C 24.7、27.0 和 25.0 t/hm²,至 2013 年各耕作处理的有机碳储量分别达到 C 34.2、41.0 和 41.4 t/hm²,分别较 2003 年提高了 38.5%、51.9% 和 65.9%;少耕、免耕有机碳储量净增加值,分别为 C 4.5 和 6.9 t/hm²,提高幅度分别达 16.7% 和 27.8%,

由此可知,保护性耕作可显著增加土壤有机碳储量。

图 4 中各耕作处理中的一元线性回归方程代表有机碳储量与试验年限的关系,方程斜率表示土壤的固碳速率,是有机碳演变的重要特征参数。由 2003~2013 年有机碳储量的数据可得到传统耕作、少耕和免耕的固碳速率,分别为 C 0.565、0.930 和 1.319 t/(hm²·a);用少耕、免耕固碳速率减去传统耕作固碳速率可得对应耕作措施固碳净速率,即 C 0.365 t/(hm²·a) 和 0.754 t/(hm²·a)。

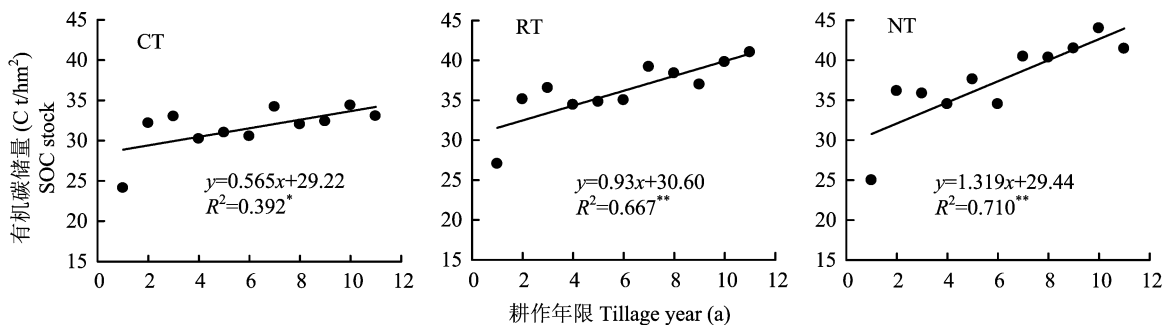


图 4 各耕作措施土壤有机碳储量变化

Fig. 4 Changes of SOC stock under different tillage practices (2003–2013)

[注(Notes): *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.]

2.5 不同耕作措施对玉米产量的影响

2.5.1 玉米产量 由各年玉米产量(图 5)可以看出,各处理产量的年际变化趋势一致,呈波动性增

加,少耕、免耕处理较传统耕作均有增产效果。其中,少耕处理增产的效果出现较早,产量由 2004 年开始一直高于传统耕作,增产幅度为 0.9%~

35.7%,最高增产 2.33 t/hm²(2012 年)。免耕的增产效果出现较晚,2006 年免耕产量首次高于传统耕作,达 5.29 t/hm²,增产 16.9%;2006~2013 年增产幅度为 -2.5%~30.2%,最高增产 1.61 t/hm²(2008 年)。传统耕作、少耕、免耕 11 年平均产量分别为 5.08 t/hm²、5.83 t/hm²、5.39 t/hm²,以少耕处理产量最高,年均增幅为 14.7%,显著高于传统耕作($P < 0.05$);免耕相对于传统耕作年均增产幅度为 6.1%,未达到显著水平($P > 0.05$),与少耕之间差异也不显著。由以上结果可知,少耕、免耕处理均能提高玉米产量,整体上产量表现

为少耕 > 免耕 > 传统耕作。

2.5.2 玉米产量与水分的相关性分析 由玉米产量与土壤 0—20 cm 土层含水量及作物耗水量之间的相关关系(图 6)。可以看出,各耕作处理的玉米产量与土壤表层含水量间呈显著二次方程关系,其中免耕处理的决定系数 R^2 最大,为 0.722,传统耕作次之,为 0.631,少耕处理的最小,为 0.514。由此可知,玉米产量受土壤表层含水量影响的高低顺序依次为免耕、传统耕作、少耕。此外,由二次方程特性可知,产量达到最高值的土壤表层含水量传统耕作、少耕、免耕处理依次为 15.4%、14.9%

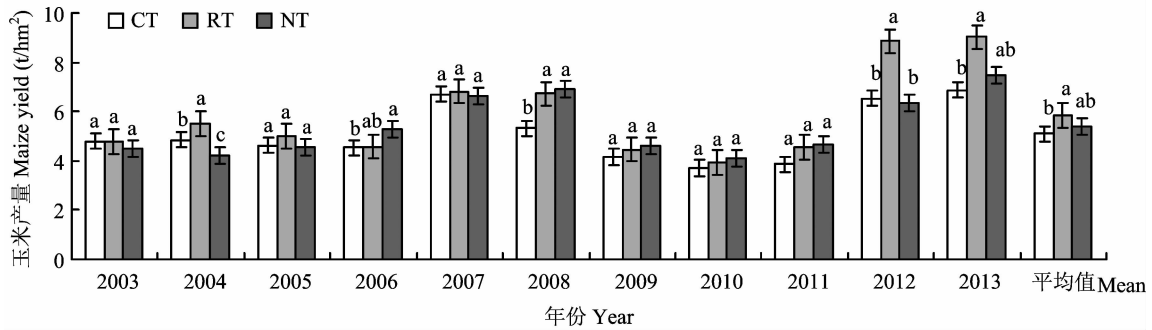


图 5 不同耕作措施对玉米产量的影响

Fig. 5 Effects of different tillage practices on maize yield

[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 among treatments at the 5% level.]

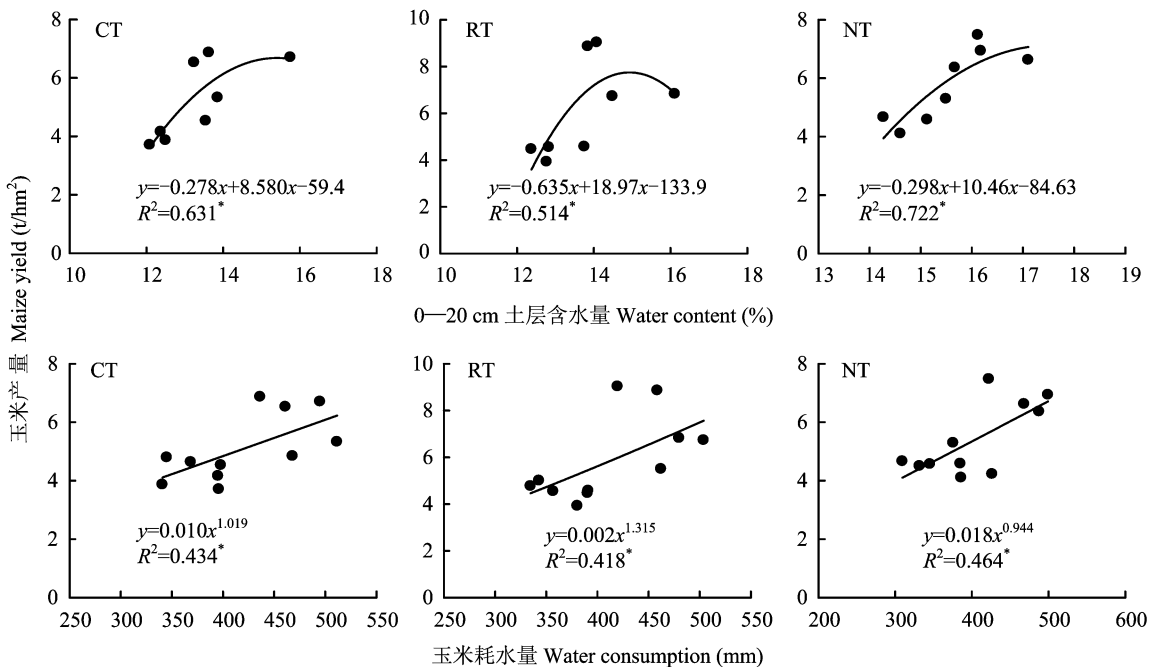


图 6 玉米产量与 0—20cm 土层含水量、玉米耗水量的关系

Fig. 6 Relationships between maize yield and 0—20cm water content and water consumption

[注(Note): *— $P < 0.05$.]

和 17.6%。玉米产量与作物耗水量之间存在乘幂关系,且均达到显著水平($P < 0.05$),传统耕作、少耕、免耕处理决定系数 R^2 依次为 0.434、0.418 和 0.464,由此可知 3 种耕作处理下玉米产量与耗水量间的相关程度非常接近,受耕作处理的影响不大。

2.6 不同耕作措施对水分利用效率、降水利用效率的影响

从表 2 可知,少耕处理的水分利用效率一直高

于传统耕作,最高时比传统耕作提高 36.7% (2013 年),多年平均水分利用效率提高 16.1%,显著高于传统耕作($P < 0.05$)。与传统耕作相比,免耕处理可提高水分利用效率 2.6% ~ 33.7%,最高增加 3.72 kg/(hm²·mm) (2011 年),多年平均水分利用效率较传统耕作提高 10.2%,差异不显著($P > 0.05$);与少耕相比,免耕处理水分利用效率有所降低,年均降低 0.71 kg/(hm²·mm),但多年均值与少耕间无显著差异。

表 2 不同耕作措施下玉米水分利用效率[kg/(hm²·mm)]

Table 2 Water use efficiency under different tillage practices in 2003–2013

处理 Treatment	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CT	13.89	10.34	12.57	11.37	13.78	10.4	10.52
RT	14.23	11.89	14.57	11.68	13.96	13.3	11.42
NT	13.55	9.90	13.22	14.08	14.14	13.9	11.89

处理 Treatment	2010	2011	2012	2013	平均值 Mean	比 CT 提高(%) Increased than CT
CT	9.36	11.33	14.15	15.73	12.13 b	
RT	10.31	12.72	19.30	21.50	14.08 a	16.1
NT	10.62	15.05	13.05	17.70	13.37 ab	10.2

注(Note): 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 3 显示,降水利用效率的变化规律基本与水分利用效率相同,少耕处理较传统耕作提高幅度为 0.9% ~ 35.7%,最高增加 5.50 kg/(hm²·mm) (2012 年);免耕处理与传统耕作相比,在 2003 ~ 2007 年期间降水利用效率有所降低,2007 年后显著

提高,最大提高幅度为 30% (2008 年)。11 年均值少耕、免耕分别较传统耕作提高 13.9% 和 5.8%。综上可知,水分利用效率、降水利用效率均表现为少耕和免耕高于传统耕作。

表 3 不同耕作措施下玉米降水利用效率[kg/(hm²·mm)]

Table 3 Precipitation use efficiency under different tillage practices in 2003–2013

处理 Treatment	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CT	12.50	11.80	12.70	11.70	12.90	13.00	9.10
RT	12.50	13.40	13.70	11.80	12.70	16.40	9.70
NT	11.80	10.30	12.50	13.70	12.50	16.90	10.00

处理 Treatment	2010	2011	2012	2013	平均值 Mean	比 CT 提高(%) Increased than CT
CT	10.50	7.70	15.40	13.70	11.90 b	
RT	11.10	9.10	20.90	18.00	13.60 a	13.9
NT	11.60	9.30	15.00	14.90	12.60 ab	5.8

注(Note): 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.

3 讨论

3.1 土壤有机碳

保护性耕作可不同程度地增加土壤有机碳储量。吕瑞珍等^[10]研究发现,旋耕覆盖、免耕覆盖土壤有机碳含量分别较对照提高了 11.99% 和 6.09%。姬强等^[11]在连续 8 年的田间定位试验基础上,分析了不同耕作措施对土壤有机碳的影响,结果表明,相对于传统耕作保护性耕作有利于土壤有机碳的提高,免耕模式有效提高了 0—10 cm 土层有机碳含量。但李琳等^[12]认为免耕秸秆还田对于有机碳的增加效果不够理想,同时只提高 0—10 cm 土层的有机碳含量。Kahlon 等^[13]对 22 年的耕作试验研究得出,0—20 cm 免耕土壤全碳含量较翻耕增加约 30%,且随着秸秆覆盖量的增加而增加。Ussiri 和 Lal 通过 43 年长期定位试验研究认为^[14],免耕由于减少了对土壤的扰动而降低了土壤有机碳的矿化率,显著增加 0—15 cm 土层有机碳含量;但不同的耕作措施下 15—30 cm 土层有机碳含量差别不大。本研究结果表明,保护性耕作能够提高土壤 0—20 cm 土层有机碳含量,且少耕效果最好,免耕虽较传统耕作有提高,但不显著,究其原因,主要是因为少耕和免耕处理都有秸秆投入,在很大程度上增加了土壤有机碳含量,同时对土壤破坏小,土壤中有机碳氧化和矿化少;因此,保护性耕作可不同程度地增加土壤有机碳储量^[15]。但由于两者的处理方式不同,少耕秸秆经过粉碎后翻入土壤,而免耕秸秆顺行推倒,并没有加工处理,暴露于土壤表面,因此秸秆分解速率远不如少耕处理,有机碳含量低于少耕。0—20 cm 土层有机碳储量增加速率以少耕最高,少耕次之,传统耕作最低,分别为 C 1.319、0.930、0.565 t/(hm²·a)。对于 20—40 cm 土层的土壤有机碳,免耕和少耕均较传统耕作含量高,且通过年际间的变化趋势可知,传统耕作呈下降趋势,而保护性耕作有缓慢增加的趋势,随着时间的延长,保护性耕作有机碳含量显著高于传统耕作,至 2013 年少耕、免耕分别较传统耕作增加了 C 5.53 g/kg 和 3.29 g/kg。可知,保护性耕作对于深层土壤有机碳有保持、积累和增加的作用,这与保护性耕作有利于增加土壤团聚体的稳定性,促进土壤有机碳的增加与积累有关^[16-17]。

3.2 玉米产量

少、免耕能提高玉米产量。李龙等^[18]在渭北平原的试验结果表明,免耕结合秸秆覆盖处理的产

量显著高于传统耕作。张德建等^[4]在赤峰的研究发现,机械灭茬免耕播种、浅旋根茬还田常规播种处理玉米产量分别比传统耕作高出 9.01% 和 3.23%。周怀平等^[6]通过 19 年的试验研究秸秆还田对玉米产量和经济效益的影响,结果表明,秸秆还田处理玉米籽粒累计比对照增加 13.427 ~ 24.284 t/hm²,增产幅度达 11.57% ~ 20.92%。但禄兴丽等^[19]研究发现,免耕(NTS)、少耕(RTS)虽然能提高玉米产量 6.96%、9.17%,但与传统耕作(CK)的差异不显著。本研究中对传统耕作、少耕和免耕 11 年的平均产量进行比较,其中以少耕产量最高,达 5.83 t/hm²,增产效果最明显,年均增产幅度为 14.7%,免耕次之,年均增产幅度为 6.1%,少耕、免耕对玉米产量的增加效果具有明显年际变化,增产幅度分别为 0.9% ~ 35.7% 和 -2.5% ~ 30.2%;由玉米产量与土壤表层水分含量、作物耗水量的相关性分析可知,玉米产量受土壤表层含水量和作物耗水量的影响显著。总体上保护性耕作通过增加水、碳提升产量主要表现在两方面,一是保护性耕作通过减少对土壤的翻动,降低了土壤水分的蒸发,减少了土壤的风蚀和水蚀从而使土壤养分得到保存;另一方面,保护性耕作有秸秆投入,增加了土壤表面的覆盖度,从而增加土壤有机碳储量,提高土壤导水率,增加降水入渗,为作物的生长提供了较好的营养条件。因此,可以不同程度地增加作物产量^[4-5,18]。

3.3 水分利用效率

水分利用效率受耕作措施的影响显著。刘战东等^[20]在西南区的耕作试验表明,免耕处理在全生育期内耗水量显著低于对照。李龙等^[18]在常规保护性耕作的基础上,研究了免耕+秸秆地膜双覆盖对春玉米的产量效应及水分利用情况,发现免耕秸秆地膜双覆盖的水分利用效率比传统耕作提高了 40.28%。禄兴丽等^[5]通过研究保护性耕作对旱作玉米水分利用效率的日变化发现,免耕秸秆还田处理玉米叶片水分利用效率(WUE)日均值显著高于传统耕作。其他学者也通过试验证明了保护性耕作能有效提高水分利用效率^[21-24]。本研究中,少耕、免耕 11 年年均水分利用效率分别较传统耕作提高了 16.1% 和 10.2%;降水利用效率分别比传统耕作提高了 13.9% 和 5.8%。这对于水资源有限的旱作农田来说,无疑是一种有效的节水措施。保护性耕作之所以能提高水分利用效率,关键在于提高玉米产量和减少耗水量,一方面保护性耕作增加了土壤有机碳含量,使土壤结构及通气状况得到改

善^[25],为作物提供充足养分,使光合作用、蒸腾作用增强,有利于有机物积累;另一方面保护性耕作对土壤的扰动次数少,有效减小了土壤表面的无效蒸发,涵养水源的功能得到加强。

4 结论

通过 11 年的长期耕作试验,结果表明,少耕、免耕措施均显著提高了 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的有机碳含量,且随试验年限的延长差异愈加明显;至 2013 年,少耕、免耕 0—20cm 土层土壤有机碳储量分别较传统耕作净增加 C 4.5 t/hm² 和 6.9 t/hm²。少耕、免耕措施的增产效果随试验的延长而愈加明显,11 年玉米平均产量以少耕最高,免耕次之,传统耕作最低。3 种耕作措施中以免耕的保水性最好,0—20 cm 土层的含水量和作物耗水量均表现最佳;同时,少、免耕均能提高玉米的水分利用效率,又以少耕的效果最佳。因此,少、免耕保护性耕作可增加土壤有机碳含量,改善土壤保水性,提高水分利用效率,在水资源短缺的旱作地区是一种有效的节水增产措施。

参考文献:

- [1] 蔡典雄,王小彬,Keith Saxton. 土壤保水剂对土壤持水特性及作物出苗的影响[J]. 土壤肥料,1999,(1):13-16.
Cai D X, Wang X B, Keith S. Effects of soil water retention agent on soil water properties and crop emergence [J]. Soil and Fertilizer, 1999, (1): 13-16.
- [2] 蔡典雄,王小彬,张志田,等. 寿阳旱农试区保护耕作体系研究[J]. 干旱地区农业研究,1998,16(3):41-46.
Cai D X, Wang X B, Zhang Z T *et al.* Conservation tillage systems in arid areas in Shouyang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(3): 41-46.
- [3] 代快,蔡典雄,张晓明,等. 不同耕作模式下旱作玉米氮磷肥产量效应及水分利用效率[J]. 农业工程学报,2011,27(2):74-82.
Dai K, Cai D X, Zhang X M *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus on dry farming spring maize yield and water use efficiency under different tillage practices[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 74-82.
- [4] 张德健,路战远,张向前,等. 不同耕作措施对玉米产量和土壤理化性质的影响[J]. 中国农学通报,2014,30(12):209-213.
Zhang D J, Lu Z Y, Zhang X Q *et al.* Effects of different tillage methods on maize yield and soil physical and chemical characters of maize field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(12): 209-213.
- [5] 禄兴丽. 旱地保护性耕作对土壤呼吸和夏玉米产量的影响[J]. 安徽农业科学,2013,41(8):3352-3354.
Lu X L. Effects of conservation tillage on soil respiration and summer maize yield in the arid areas [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(8): 3352-3354.
- [6] 周怀平,解文艳,关春林,等. 长期秸秆还田对旱地玉米产量,效益及水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):321-330.
Zhou H P, Xie W Y, Guan C L *et al.* Effects of long-term straw-returning on maize yield, economic benefit and water use in arid farming areas[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(002): 321-330.
- [7] 薛建福,赵鑫,陈阜,等. 保护性耕作对农田碳,氮效应的影响研究进展[J]. 生态学报,2013,33(19):6006-6013.
Xue J F, Zhao X, Chen *et al.* Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6006-6013.
- [8] 常春丽,刘丽平,张立峰,刘玉华. 保护性耕作的发展研究现状及评述[J]. 中国农学通报,2008,24(2):167-172.
Chang C L, Liu L P, Zhang L F, Liu Y H. Development situations and comments on conservation tillage [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(2): 167-172.
- [9] 王立影. 发展保护性耕作的意义及作用[J]. 现代农业科技,2014(2):260-260.
Wang L Y. Significance and role in the development of conservation tillage [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2014 (2): 260-260.
- [10] 吕瑞珍,熊瑛,李友军,等. 保护性耕作对农田土壤碳库特性的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(4):206-209.
Lü R Z, Xiong Y, Li Y J *et al.* Effect of conservation tillage on soil carbon pool in farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 206-209.
- [11] 姬强,孙汉印,王旭东. 不同耕作措施对冬小麦-夏玉米复种连作系统土壤有机碳和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(4):1029-1035.
Ji Q, Sun H Y, Wang X D. Impact of different tillage practices on soil organic carbon and water use efficiency under continuous wheat-maize binary cropping system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1029-1035.
- [12] 李琳,李素娟,张海林,陈阜. 保护性耕作下土壤碳库管理指数的研究[J]. 水土保持学报,2006,20(3):106-109.
Li L, Li S J, Zhang H L, Chen F. Study on soil C pool management index of conversation tillage[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 106-109.
- [13] Kahlon M S, Lal R, Ann-Varughese M. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126; 151-158.
- [14] Ussiri D A N, Lal R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous maize cropping system from an alfisol in Ohio [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 39-47.
- [15] 王燕,王小彬,刘爽,等. 保护性耕作及其对土壤有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报,2008,16(3):766-771.

- Wang Y, Wang X B, Liu S *et al.* Conservation tillage and its effect on soil organic carbon [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 766-771.
- [16] 康轩, 黄景, 吕巨智, 等. 保护性耕作对土壤养分及有机碳库的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2339-2343.
Kang X, Huang J, Lü J Z *et al.* Effects of conservation tillage on soil nutrient and organic carbon pool [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2339-2343.
- [17] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期不同耕作措施对土壤团聚体特征及微生物多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2341-2348.
Li J, Wu H J, Wu X P *et al.* Effects of long-term tillage measurements on soil aggregate characteristic and microbial diversity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2341-2348.
- [18] 李龙, 郝明德, 王缠军, 董晓兵. 渭北旱塬保护性耕作对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *西北农林科技大学学报*, 2014, 42(12): 1-7.
Li L, Hao M D, Wang C J, Dong X B. Effects of conservation tillage on water use efficiency and yield of spring maize on WeiBei highland[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(12): 1-7.
- [19] 禄兴丽, Sikander Khan Tanveer. 保护性耕作对旱作夏玉米光合和水分利用效率日变化的影响[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(9): 3809-3812.
Lu X L, Tanveer S K. Effects of conservation tillage on diurnal variation of leaf photosynthesis and water use efficiency of summer maize under rainfed condition[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(9): 3809-3812.
- [20] 刘战东, 刘祖贵, 王秀全, 等. 西南区不同耕作措施对玉米水分利用效率及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(4): 40-44.
Liu Z D, Liu Z G, Wang X Q *et al.* Effects of different tillage practices on maize yield and water use in Southwest China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(4): 40-44.
- [21] 杨永辉, 武继承, 李学军, 等. 耕作和保墒措施对冬小麦生育时期光合特征及水分利用的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(5): 534-542.
Yang Y H, Wu J C, Li X J *et al.* Impact of tillage and soil moisture conservation measures on photosynthetic characteristics and water use of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(5): 534-542.
- [22] 张鑫, 隋世江, 于涛, 刘慧颖. 不同量秸秆还田对玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(19): 4581-4583.
Zhang X, Sui S J, Yu T, Liu H Y. Effects of different amounts of straw returning on maize yield and water use efficiency [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(19): 4581-4583.
- [23] 张风云, 张恩和. 保护性耕作对黑河流域农田土壤水分利用的影响[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(2): 234-243.
Zhang F Y, Zhang E H. Effects of conservation tillage on soil water regimes and water use efficiency in farmland of Heihe River Basin in Northwest China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(2): 234-243.
- [24] 汪可欣, 王丽学, 吴琼, 等. 保护性耕作措施对夏玉米产量和水分利用效率的影响[J]. *节水灌溉*, 2009, (1): 31-35.
Wang K X, Wang L X, Wu Q *et al.* Effect of different conservation tillage ways on water use efficiency and yield of maize [J]. *Water Saving Irrigation*, 2009, (1): 31-35.
- [25] 关振寰, 李巧云, 张仁陟, 等. 保护性耕作对土壤易氧化和总有机碳的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(2): 420-426.
Guan Z H, Li Q Y, Zhang R Z *et al.* Effects of conservation tillage on readily oxidizable and total organic carbon in soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(2): 420-426.