

轮耕模式对黄淮海冬小麦-夏玉米两熟区农田土壤改良效应

于淑婷¹, 赵亚丽^{1,2,3}, 王育红⁴, 刘卫玲¹, 孟战赢⁴, 穆心愿⁵, 程思贤¹, 李潮海^{1,2,3}

(¹河南农业大学农学院, 郑州 450002; ²河南粮食作物协同创新中心, 郑州 450002; ³省部共建小麦玉米作物学国家重点实验室, 郑州 450002; ⁴洛阳农林科学院, 河南洛阳 471023; ⁵河南省农业科学院粮食作物研究所, 郑州 450002)

摘要: 【目的】针对黄淮海地区长期采用单一土壤旋耕作业存在的弊端, 研究由秸秆覆盖深松、秸秆还田旋耕和秸秆还田深耕组成的不同轮耕模式对黄淮海两熟区农田的土壤改良效应。【方法】连续 6 年定位实施 5 种轮耕模式: 连年旋耕 (CRT, CK)、连年深松 (CST)、连年深耕 (CDT)、深耕/旋耕 (DT/RT) 和深耕/旋耕/旋耕 (DT/RT/RT), 研究各轮耕模式对冬小麦-夏玉米农田土壤三相比 R 值、土壤有机碳储量、全氮储量、土壤酶活性、土壤呼吸速率和作物经济效益的影响。【结果】轮耕模式、耕层深度、年份对土壤三相比 R 值、土壤有机碳储量、全氮储量和酶活性存在显著或极显著影响。与连年旋耕相比, 连年深松模式有利于表层土壤有机碳储量、氮储量、土壤脲酶和蔗糖酶活性的积累, 而连年深耕、深耕/旋耕和深耕/旋耕/旋耕轮耕模式有利于增加 10—40 cm 土层的有机碳储量、氮储量、土壤脲酶和蔗糖酶活性, 促进土壤营养均匀分布。随着轮耕年限的增加, 0—40 cm 土层的 R 值呈整体降低趋势, 而土壤有机碳储量、全氮储量呈整体增加趋势, 其中深耕/旋耕和深耕/旋耕/旋耕轮耕模式表现更为明显。与试验开展前相比, 秸秆全量还田下的连年旋耕、连年深松、连年深耕、深耕/旋耕和深耕/旋耕/旋耕模式在 0—40 cm 土层的 R 值分别降低 20.8%、33.1%、29.5%、29.7%和 30.7%, 有机碳储量分别增加 6.4%、14.5%、16.0%、20.6%和 23.8%, 全氮储量分别增加 3.1%、11.1%、11.6%、13.3%和 15.7%。轮耕模式对土壤呼吸速率存在极显著影响, 与连年旋耕相比, 连年深松、连年深耕、深耕/旋耕和深耕/旋耕/旋耕模式冬小麦季的土壤呼吸速率分别提高 20.7%、19.3%、13.7%和 9.2%, 夏玉米季分别提高 19.1%、18.1%、15.2%和 10.4%。但与连年深耕相比, 深耕/旋耕和深耕/旋耕/旋耕模式冬小麦季的土壤呼吸速率分别显著降低 5.9%和 9.6%, 夏玉米季分别降低 3.3%和 7.3%。其中, 深耕/旋耕/旋耕模式冬小麦季的土壤呼吸速率比深耕/旋耕降低 4.1%, 夏玉米季降低 4.3%。轮耕模式、年份及其交互对作物产量和经济效益存在极显著影响。对 5 种轮耕模式 6 年的作物周年产量和经济效益综合分析, 以深耕/旋耕模式最高, 但与深耕/旋耕/旋耕模式的作物产量和经济效益差异均不显著。深耕/旋耕/旋耕、深耕/旋耕、连年深耕和连年深松的周年产量比连年旋耕分别增加 18.9%、21.4%、12.9%和 15.7%, 其经济效益比连年旋耕分别增加 31.9%、36.2%、20.3%和 25.4%。【结论】深耕/旋耕/旋耕轮耕模式能够改善耕层结构, 增加土壤耕层碳氮储量和根区酶活性, 且显著降低农田碳排放量, 增产增收效果明显, 为黄淮海地区冬小麦-夏玉米两熟制农田适宜的轮耕模式, 其次是深耕/旋耕轮耕模式。

关键词: 三相比 R 值; 土壤有机碳; 土壤全氮储量; 土壤酶活性; 土壤呼吸; 经济效益

Improvement Effects of Rotational Tillage Patterns on Soil in the Winter Wheat-Summer Maize Double Cropping Area of Huang-Huai-Hai Region

YU ShuTing¹, ZHAO YaLi^{1,2,3}, WANG YuHong⁴, LIU WeiLing¹, MENG ZhanYing⁴, MU XinYuan⁵,
CHENG SiXian¹, LI ChaoHai^{1,2,3}

收稿日期: 2016-12-20; 接受日期: 2017-03-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0300106)、国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201503117)、国家现代玉米产业技术体系 (CARS-02-19)

联系方式: 于淑婷, E-mail: shutingyu2014@163.com。通信作者李潮海, E-mail: lichao hai2005@163.com

(¹College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002; ²Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, Zhengzhou 450002; ³Co-construction State Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science, Zhengzhou 450002; ⁴Luoyang Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Luoyang 471023, Henan; ⁵Cereal Crops Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002)

Abstract: A long-term practice of applying single soil rotary tillage pattern in this area has caused soil compaction, poor ability in retaining rainwater and providing nutrients. Effects of different rotational tillage patterns, which were pairwise combined with subsoiling (ST), rotary tillage (RT) and deep tillage (DT) with straw mulching, on soil long-term improvement effects were studied in the winter wheat-summer maize double cropping area of Huang-huai-hai region. **【Method】** The experiments of CRT (continuous rotary tillage), CST (continuous subsoiling), CDT (continuous deep tillage), DT/RT (rotary tillage in first year, deep tillage in second year, again deep tillage followed by alternating the next year) and DT/RT/RT (deep tillage in first year, rotary tillage in second year, rotary tillage in third year, again deep tillage followed by alternating the next year) were conducted before sowing winter wheat, and different rotational tillage patterns on the ratios of soil solid-liquid-gaseous, soil organic carbon storage, soil total nitrogen storage, soil enzyme activity, soil respiration rate, and crop economic benefit were analyzed. **【Result】** The results showed that, there were significant effects of rotational tillage, soil depth and tillage year on the ratios of soil solid-liquid-gaseous, soil carbon organic storage, soil total nitrogen storage and soil enzyme activity. Compared with CRT, the CST patterns increased soil organic carbon sequestration, soil total nitrogen storage, soil urease and invertase activity of surface soil, and CDT, DT/RT, DT/RT/RT increased soil organic carbon sequestration, soil total nitrogen storage, soil urease and invertase activity at 10-40 cm soil layer of winter wheat and summer maize. With the increasing cultivation, the R value at 0-40 cm soil layer under the five rotational tillage patterns showed a trend of overall decrease, and the soil organic carbon storage and soil total nitrogen storage showed a trend of overall increase, and the variation tendency under DT/RT and DT/RT/RT were more obvious. Compared to pretreatment, the R values under CRT, CST, CDT, DT/RT, DT/RT/RT were significantly decreased by 20.8%, 33.1%, 29.5%, 29.7%, 30.7%, while the soil organic carbon storage significantly increased by 6.4%, 14.5%, 16.0%, 20.6%, 23.8% and the soil total nitrogen storage increased by 3.1%, 11.1%, 11.6%, 13.3%, 15.7%, respectively. There were significant effects of rotational tillage on the soil respiration rate. Compared with CRT, CST, CDT, DT/RT, and DT/RT/RT increased soil respiration rate by 20.7%, 19.3%, 13.7%, and 9.2% during winter wheat season, and increased by 19.1%, 18.1%, 15.2%, and 10.4% during summer maize season, respectively. However, DT/RT, DT/RT/RT declined soil respiration rate by 5.9%, 9.6% during winter wheat season, and declined by 3.3%, 7.3% during summer maize season, respectively, relative to CDT. Compared with DT/RT, the soil respiration rate of DT/RT/RT was declined by 4.1% during winter wheat season and declined by 4.3% during summer maize season. Rotational tillage, tillage year and tillage×year had significant effects on crop yield and economic benefit. Through comprehensive evaluation and analysis of the winter wheat and summer maize annual grain yield and economic benefit of five rotational tillage patterns in six years, DT/RT was the best, but DT/RT/RT had no significant difference relative to DT/RT. Compared with CRT, the average annual yields of 6 years under DT/RT/RT, DT/RT, CDT, CST were increased by 18.9%, 21.4%, 12.9%, 15.7%, and the average economic benefits were increased by 31.9%, 36.2%, 20.3%, 25.4%, respectively. **【Conclusion】** DT/RT/RT improved good tilth soil structure, increased the distribution of soil organic carbon characteristics, total nitrogen storage and enzyme activities of root zone in the top soil layer, declined farmland carbon emission, improved significantly crop yield and economic benefit. Therefore, DT/RT/RT can be selected as a suitable tillage practice for double-crop system of winter wheat-summer maize in Huang-huai-hai area, followed by DT/RT rotation tillage.

Key words: ratio of soil solid-liquid-gaseous; soil organic carbon; soil total nitrogen storage; soil enzyme activity; soil respiration; economic benefit

0 引言

【研究意义】黄淮海平原是中国粮食主产区，由于该区长期采用土壤旋耕和焚烧作物秸秆，不仅污染环境，还导致土壤耕层变浅、蓄水保墒能力降低和土壤养分流失^[1-2]，阻碍作物生长发育和产量形成。而合

理的耕作方式结合秸秆还田可改善土壤耕层结构^[3]，协调土壤生态环境和养分状况^[4]，为作物高产稳产奠定良好的土壤基础。长期采用单一耕作措施对土壤质量存在不利影响，长期深耕会增加土壤表层水分蒸发^[5]和农田碳排放^[6]，长期深松不利于秸秆分布土壤深层，造成土壤表层养分富集^[7]、病虫害加重和农田

碳投入增加^[8]等,不利于减缓农田温室效应,阻碍固碳减排农业生态系统的发展。因此,研究旋耕、深耕、深松等土壤耕作交替的轮耕模式对建立合理的耕作体系具有重要意义。【前人研究进展】不同耕作措施对土壤性状有显著影响。与旋耕相比,深松、深耕可有效降低三相比 R 值^[9],促进微生物的繁殖和土壤酶活性的增加^[10],使全年土壤呼吸速率增加 37.3%^[11];尹宝重等^[12]在海河低平原 2 年研究表明深松、深耕可有效提高麦田脲酶和碱性磷酸酶活性。而旋耕、深松、深耕等土壤耕作集成的轮耕模式可扬长避短,有效减轻单一耕作措施的弊端,提高土壤质量。有研究表明,轮耕措施可改善土壤耕层结构^[13],提高土壤生产性能^[14],促进养分在耕层间均匀分布^[15],从而实现作物高产^[16]。TIAN 等^[17]研究发现长期旋耕后进行 4 年深耕可显著提高土壤碳储量和作物产量。另外,秸秆中含有大量植物生长所必需的氮、磷、钾及微量元素^[18],秸秆还田后能改善土壤理化性状^[19],优化农田碳排放^[20],改善田间小气候^[21];王芸等^[22]通过大田试验证明秸秆还田显著提高土壤脲酶和蔗糖酶活性,进而影响土壤碳氮转化。【本研究切入点】近年来,关于轮耕技术效应研究多集中在一年一熟区农田土壤理化性状的研究,且主要围绕深松、免耕、旋耕等集成的轮耕模式,

而关于黄淮海两熟制农田秸秆全量还田下深耕和旋耕交替的轮耕模式对土壤长期改良效应的研究却鲜有报道。【拟解决的关键问题】通过黄淮海地区冬小麦-夏玉米两熟制农田 6 年的长期轮耕定位试验,探索秸秆全量还田条件下不同轮耕模式对土壤性状的长期改良效应,掌握土壤质量演变规律,筛选耕层结构好、土壤肥力足、生态效益佳、生产收益好的最佳轮耕模式,以期为该区域适宜轮耕模式的选择和推广应用提供科学支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设置于河南省洛阳市农林科学院试验站(34°62'N, 112°45'E),该区是黄淮海平原典型的冬小麦-夏玉米一年两熟区,属暖温带大陆性季风气候,试验期间年平均气温为 14.86℃,年平均降水量为 578.2 mm,降水主要集中在 7—9 月。试验开始前长期采用冬小麦播前旋耕(10—15 cm)、夏玉米免耕播种的耕作方式,且作物秸秆全部移出。试验地地势平坦,土壤类型为褐土,其中砂粒 30.2%,粉粒 41.6%,黏粒 28.2%,pH 为 8.0。2009 年开始试验前土壤理化性质见表 1。

表 1 2009 年试验前供试土壤基本理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties before experiment in 2009

土层 Depth (cm)	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	有机质 Soil organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)
0—20	1.50	17.8	1.04	60.37	15.85	107.56
20—40	1.59	12.6	0.66	51.07	6.79	78.34

1.2 试验设计

在前茬作物秸秆全量还田(冬小麦秸秆粉碎覆盖还田,夏玉米秸秆粉碎翻埋还田)条件下,2009 年 10 月至 2015 年 6 月连续 6 年进行夏玉米季免耕、冬小麦季实施 5 种不同的轮耕模式:连年旋耕(CRT, CK)、连年深松(CST)、连年深耕(CDT)、深耕/旋耕(DT/RT)、深耕/旋耕/旋耕(DT/RT/RT)。采用随机区组设计,各小区的面积为 300 m² (60 m×5 m),3 次重复。每年各试验处理进行的土壤耕作方式见表 2。其中旋耕处理采用旋耕机旋耕 1 遍,作业深度 10—15 cm;深松处理采用振动式深松机深松 1 遍,作业深度为 30—35 cm;深耕处理采用铧式犁翻耕,作业深度为 30—35 cm,旋耕、深松、深耕作业后均耙地 2

遍。夏玉米秸秆粉碎还田后随耕作混入土壤中(图 1)。

供试冬小麦品种为济麦 20 号,机械条播,2009—2012 年和 2013—2014 年播量为 125 kg·hm⁻²,2014—2015 年播量为 100 kg·hm⁻²;2012—2013 年由于该试验区生态条件受限冬小麦没有种植。2009—2015 年,夏玉米品种为郑单 958,采用机械免耕播种,种植密度为 60 000 株/hm²。每年 10 月中旬播种冬小麦,翌年 6 月 1 日至 5 日收获后种植夏玉米,至 9 月 23 日至 28 日收获。各处理施肥及其他田间管理相同,冬小麦季施肥量为:200 kg N·hm⁻², 150 kg P₂O₅·hm⁻², 100 kg K₂O·hm⁻²,全部的磷肥和钾肥、50%的氮肥做基肥在耕作时一次性全部施入,50%的氮肥在拔节期追施;夏玉米季施肥量为:300 kg N·hm⁻², 150 kg P₂O₅·hm⁻²,

表 2 2009—2015 年在冬小麦季的土壤耕作处理

Table 2 The soil tillage treatments during 2009-2015 in winter wheat season

轮耕处理 Rotation treatment	年份 Year					
	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
CRT (CK)	RT	RT	RT	RT	RT	RT
CST	ST	ST	ST	ST	ST	ST
CDT	DT	DT	DT	DT	DT	DT
DT/RT	DT	RT	DT	RT	DT	RT
DT/RT/RT	DT	RT	RT	DT	RT	RT

RT: 旋耕; ST: 深松; DT: 深耕。下同

RT: Rotary tillage; ST: Subsoiling tillage; DT: Deep tillage. The same as below

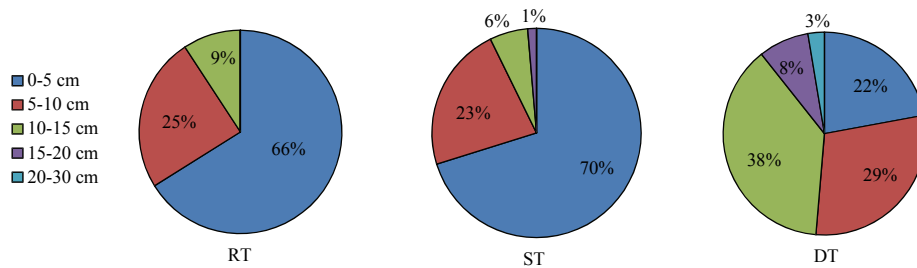


图 1 不同耕作方式下 0—30 cm 土层秸秆分布

Fig. 1 Straw distribution at 0-30 cm soil layer under different soil tillage treatments

150 kg K₂O·hm⁻², 全部的磷肥和钾肥、40%的氮肥在播种时一次性施入, 60%的氮肥按 5:5 比例分别在拔节期和大喇叭口期追施。冬小麦季和夏玉米生长期根据土壤墒情适时灌水, 其他管理同常规大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤物理性状测定 2009 年试验开始前及 2013—2015 年冬小麦成熟期和夏玉米成熟期, 每小区选择 3 个有代表性的区域, 用环刀法测定 0—10、10—20、20—30、30—40 cm 土层土壤容重和土壤孔隙度, 其中土壤孔隙度 (%) = (1-土壤容重/土壤比重) × 100%^[23], 土壤比重近似值为 2.65 g·cm⁻³; 同时用烘干法计算各土层土壤含水量。土壤三相比理想状态是 50:25:25, 采用冀保毅等^[24]的土壤三相比偏离值 R 分析土壤三相比, 其公式为:

$$R = \sqrt{0.4 \times (X-50)^2 + (Y-25)^2 + 0.6 \times (Z-25)^2} \quad (1)$$

$$X = 100 \times (1 - \text{土壤孔隙度}) \quad (2)$$

$$Y = 100 \times \text{土壤含水量} \quad (3)$$

$$Z = 100 \times (\text{土壤孔隙度} - \text{土壤含水量}) \quad (4)$$

式中, R 为所测土壤样品三相比与适宜状态下土壤三相比在空间距离上的差值; X 为所测土壤样品固相的

数值; Y 为所测土壤样品液相的数值; Z 为所测土壤样品气相的数值; 0.4 为土壤固相数据所占有的权重; 0.6 为土壤气相数据所占有的权重。R 值越小, 土壤结构越接近理想状态。

1.3.2 土壤化学性状测定 2009 年试验开始前及 2013—2015 年冬小麦成熟期, 每小区以对角线设置 5 个取样点, 分别采集 0—10、10—20、20—30、30—40 cm 土层土样, 用于测定土壤养分含量。土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定, 全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定^[25]。对于同一深度土壤, 土壤有机碳储量 (soil organic carbon storage, SCS) 与全氮储量 (soil total nitrogen storage, STN) 的计算方法^[7,17]如下:

$$SCS = \sum_{i=1}^n (C_i B_i H_i \times 10^{-1}) \quad (5)$$

式中, *i* 表示土壤层次; SCS 表示 *i* 层土壤的有机碳储量, t·hm⁻²; C_{*i*} 为第 *i* 层土壤有机碳质量分数, g·kg⁻¹; B_{*i*} 是第 *i* 层土壤容重, g·cm⁻³; H_{*i*} 为第 *i* 层土壤深度, cm; 10⁻¹ 是转换系数。同理计算全氮储量 STN。

1.3.3 土壤酶活性测定 2013—2015 年冬小麦成熟期和夏玉米成熟期, 结合土壤养分测定取样, 采

集 0—10、10—20、20—30、30—40 cm 土层土壤鲜样测定土壤酶活性^[26]。脲酶活性采用苯酚钠比色法，蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法。

1.3.4 土壤呼吸 2013—2015 年冬小麦拔节期、开花期、成熟期和夏玉米拔节期、开花期、成熟期，采用美国 LICOR 公司生产的 LI—8100A 土壤呼吸仪定点测量土壤呼吸速率。每小区以对角线设置 5 个固定测量点，测点放置聚氯乙烯圈 (polyvinylchlorid, PVC, 直径 20 cm, 高 11 cm) 作为土壤呼吸测定室，管环顶距地面 2—3 cm。测定时间为 8:00—11:00。

1.3.5 作物产量 冬小麦成熟后每小区选 3 个点，每点 3 m²，脱粒晒干，称重计产；夏玉米成熟后每小区选 3 个点，每点取 20 个果穗，脱粒晒干，称重计产。

1.3.6 经济效益计算 经济效益以单位耕地面积的纯收益表示。

经济效益=总产值-总成本，总产值=作物产量×价格。其中总成本包括机械费（耕作、播种和收获）、化肥费、种子费、农药费等物资成本和除草、收获等劳动成本。冬小麦和夏玉米单价分别为 2.1 元/kg、1.8 元/kg。尿素(N 46%)2.25 元/kg，磷酸二铵(P₂O₅ 46%, N 18%) 3.2 元/kg，硫酸钾 (K₂O 50%) 3.20 元/kg。每公顷机械费用标准如下：收获和秸秆粉碎费用，冬小麦 825 元/hm²、夏玉米 1 050 元/hm²，深耕费 825 元/hm²，深松费 750 元/hm²，旋耕费 450 元/hm²。其他投入（包括种子、农药和人工费）冬小麦合计 1 700 元/hm²，夏玉米合计 1 800 元/hm²。

1.4 数据分析

利用 Excel 2007 进行数据处理，利用 SPSS 17.0

进行数据统计分析，不同处理间用 Duncan 新复极差法 (SSR) 进行多重比较，利用 SigmaPlot 12.5 软件绘制图表。

2 结果

2.1 轮耕、耕深、年份以及其交互对土壤性状和产量的影响

除年份对土壤脲酶的影响不显著外，轮耕、年份、耕深对土壤 R 值、土壤有机碳储量、全氮储量、脲酶活性和蔗糖酶活性均存在极显著影响（表 3），且轮耕、年份对土壤呼吸速率、作物产量和经济效益均存在极显著影响（表 4）。其中轮耕×耕深对各指标均存在显著交互作用；除冬小麦成熟期的土壤有机碳储量、全氮储量、脲酶活性和蔗糖酶活性外，轮耕×年份对各指标均存在显著交互作用；除冬小麦成熟期的土壤全氮储量，年份×耕深对各指标均存在显著影响；除冬小麦成熟期的 R 值、土壤有机碳储量和夏玉米成熟期的脲酶活性外，轮耕×年份×耕深对各指标均存在显著影响。

2.2 轮耕模式对土壤 R 值的影响

不同轮耕模式对 0—40 cm 土层的 R 值具有明显的影响（表 5）。与 2009 年试验前 (BT) 相比，连续 6 年耕作处理后 0—40 cm 土层的 R 值随轮耕周期的延长呈整体降低趋势。CRT、CST、CDT、DT/RT 和 DT/RT/RT 模式 0—40 cm 土层的 R 值比试验前分别降低 20.8%、33.1%、29.5%、29.7% 和 30.7%。R 值随土层深度增加而增加，且土层间差异显著（表 6）。在冬小麦成熟期，CDT、DT/RT、DT/RT/RT 和 CST 模

表 3 轮耕、耕深、年份以及其交互对 R 值、土壤有机碳储量、土壤氮储量、土壤脲酶、土壤蔗糖酶的影响

Table 3 Effects of rotational tillage pattern, soil depth, year and their interaction in the global analyses of variance of soil R value, soil organic carbon storage, soil total nitrogen storage, soil urease and soil invertase activity

项目 Item	R _w	R _m	SCS _w	STN _w	Urease _w	Urease _m	Invertase _w	Invertase _m
轮耕 Rotation	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
年份 Year	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	ns	ns	<0.001	<0.001
耕深 Depth	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
轮耕×年份 Rotation×Year	0.003	<0.001	ns	ns	ns	0.004	ns	0.029
轮耕×耕深 Rotation×Depth	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
年份×耕深 Year×Depth	0.020	<0.001	0.028	ns	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
轮耕×年份×耕深 Rotation×Year×Depth	ns	<0.001	ns	0.034	0.003	ns	<0.001	0.007

R_w, 冬小麦季土壤 R 值；R_m, 夏玉米季土壤 R 值；SCS_w, 冬小麦季土壤有机碳储量；STN_w, 冬小麦季土壤全氮储量；Urease_w, 冬小麦季土壤脲酶活性；Urease_m, 夏玉米季土壤脲酶活性；Invertase_w, 冬小麦季土壤蔗糖酶活性；Invertase_m, 夏玉米季土壤蔗糖酶活性。下同

R_w, soil R value in the winter wheat period; R_m, soil R value in the summer maize period; SCS_w, soil organic carbon storage in the winter wheat period; STN_w, soil total nitrogen storage in the winter wheat period; Urease_w, soil urease activity in the winter wheat period; Urease_m, soil urease activity in the summer maize period; Invertase_w, soil invertase activity in the winter wheat period; Invertase_m, soil invertase activity in the summer maize period. The same as below

表 4 轮耕、年份以及其交互对土壤呼吸速率、作物产量和经济效益的影响

Table 4 Effects of rotational tillage pattern, year and their interaction in the global analyses of variance of soil respiration rate, crop yield and economic benefit

项目 Item	RS _W	RS _M	Yield _W	Yield _M	Yield _{total}	EB _W	EB _M	EB _{total}
轮耕 Rotation	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
年份 Year	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
轮耕×年份 Rotation×Year	<0.001	<0.001	0.004	<0.001	0.003	0.002	<0.001	0.001

RS_W, 冬小麦季土壤呼吸速率; RS_M, 夏玉米季土壤呼吸速率; Yield_W, 冬小麦产量; Yield_M, 夏玉米产量; Yield_{total}, 周年产量; EB_W, 冬小麦经济效益; EB_M, 夏玉米经济效益; EB_{total}, 周年经济效益

RS_W, soil respiration rate in the winter wheat period; RS_M, soil respiration rate in the summer maize period; Yield_W, yield of winter wheat; Yield_M, yield of summer maize; Yield_{total}, annual yield; EB_W, economic benefit of winter wheat; EB_M, economic benefit of summer maize; EB_{total}, annual economic benefit

表 5 轮耕模式对 0—40 cm 土层 R 值的影响

Table 5 Effects of rotational tillage patterns on the R value in 0-40 cm soil layer

年份 Year	处理 Treatment	冬小麦 Winter wheat					夏玉米 Summer maize				
		0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	均值 Mean	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	均值 Mean
2009	BT	9.90	10.56	11.63	11.93	11.01					
2013—2014	CRT	9.25a	9.10a	10.78a	11.42a	10.14a	9.02a	8.08a	9.27a	8.37a	8.68a
	CST	8.14b	8.36c	9.45c	10.29c	9.06c	8.99a	7.06b	8.35b	7.08c	7.87b
	CDT	9.24a	8.93ab	9.75bc	10.71b	9.66b	8.74a	5.13d	6.27d	6.91c	6.76c
	DT/RT	9.11a	8.90ab	9.69bc	10.48bc	9.54b	8.75a	6.46c	7.00c	6.81c	7.25bc
	DT/RT/RT	8.21b	8.47bc	9.81b	10.41c	9.23c	8.83a	7.99a	9.09a	7.63b	8.38ab
2014—2015	CRT	10.22a	10.44a	11.57a	12.04a	11.07a	2.96a	4.87a	8.80a	8.82a	6.36a
	CST	8.47c	8.55c	10.26b	10.81b	9.52c	1.83b	3.44c	7.91bc	7.60bc	5.20b
	CDT	9.36b	9.62b	10.41b	10.97b	10.09b	2.70a	4.03b	7.59c	7.41c	5.43b
	DT/RT	8.92bc	9.02bc	10.40b	11.15b	9.87bc	2.33ab	4.05b	8.16bc	7.91bc	5.61b
	DT/RT/RT	8.46c	8.78c	10.61b	11.12b	9.74bc	1.81b	3.80bc	8.33ab	8.16ab	5.52b

BT: 2009 年试验前; 相同土层、同列数据后不同小写字母表示同年份不同处理间差异达到 5% 的显著水平 ($P < 0.05$)。下同

BT: Before 2009; Different lowercase letters in the same column meant significant difference at the 0.05 level in the same soil layer and same year. The same as below

表 6 轮耕、耕深、年份对土壤性质的影响

Table 6 Effects of rotational tillage pattern, soil depth and year on soil characteristics

项目 Item		R _W	R _M	SCS _W (t·hm ⁻²)	STN _W (t·hm ⁻²)	Urease _W (mg/(g·24h))	Urease _M (mg/(g·24h))	Invertase _W (mg/(g·24h))	Invertase _M (mg/(g·24h))
年份 Year	2013—2014	9.53a	7.79a	60.74a	5.60a	3.93a	3.50a	32.11b	34.52b
	2014—2015	10.06a	5.62b	62.98a	5.75a	3.89a	3.51a	33.90a	36.30a
轮耕 Rotational tillage	CRT	10.60a	7.52a	57.04c	5.31c	3.25c	2.87c	26.71c	30.58c
	CST	9.29b	6.53bc	61.73b	5.71b	3.94b	3.55b	32.32b	34.80b
	CDT	9.87ab	6.10c	60.88b	5.68b	4.13a	3.78a	35.39a	37.52a
	DT/RT	9.71b	6.43bc	63.86a	5.76b	4.15a	3.74a	35.89a	37.87a
	DT/RT/RT	9.48b	6.95b	65.78a	5.90a	4.07a	3.60ab	34.43a	36.29ab
耕深 Depth	0-10 cm	8.94b	5.60b	19.20a	1.83a	5.59a	4.74a	52.89a	52.81a
	10-20 cm	9.02b	5.49b	17.12b	1.57b	4.73b	3.95b	40.06b	40.67b
	20-30 cm	10.27a	8.08a	14.80c	1.29c	3.31c	3.11c	25.92c	29.96c
	30-40 cm	10.94a	7.67a	10.73d	0.99d	2.01d	2.22d	13.16d	18.21d

式 0—40 cm 土层的 R 值比对照分别降低 6.9%、8.4%、10.5%和 12.4%，各土层的 R 值均以 CST 最低，其次是 DT/RT/RT，且显著高于 CRT。在夏玉米成熟期，CDT、DT/RT、DT/RT/RT 和 CST 模式 0—40 cm 土层的 R 值比 CRT 分别降低 19.0%、14.5%、7.6%和 13.2%。其中 20—40 cm 土层的 R 值以 CDT 最低，且显著高于 DT/RT/RT、CRT，这与冬小麦季的结果相反，可能与该地区夏玉米季降雨较多有关（每年 7—9 月的降雨量占全年降雨量的 72%以上）。

2.3 轮耕对土壤有机碳储量的影响

与 2009 年试验前相比，各耕作模式 0—40 cm 土层有机碳储量呈现整体增加趋势（图 2）。CRT、CST、CDT、DT/RT 和 DT/RT/RT 模式 0—40 cm 土层的有机碳储量比试验前分别显著增加 6.4%、14.5%、16.0%、20.6%和 23.8%，年平均累积增加速率分别为 0.58、1.31、1.44、1.86 和 2.15 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。2013—2015 年冬小麦成熟期 0—40 cm 土层的土壤有机碳储量均以 DT/RT/RT 最高，DT/RT 次之，且显著高于 CST、CDT 和 CRT 模式，而 CST 和 CDT 显著高于对照 CRT。土壤有机碳储量随土层深度增加而减少，且土层间差异显著（表 6）。不同耕作模式主要增加了 10—40 cm 土层的有机碳储量。2013—2015 年 10—40 cm 土层的有机碳储量均表现为 DT/RT/RT > DT/RT > CDT > CST > CRT，其中 DT/RT/RT 与 DT/RT 差异不显著，较 CDT、CST、CRT 分别增加 5.7%、11.9%、19.9%，CDT 与 CST 差异不显著，均显著高于 CRT。

2.4 轮耕对土壤全氮储量的影响

与 2009 年试验前相比，2013—2015 年的土壤全氮储量有不同程度的增加（图 3）。CRT、CST、CDT、DT/RT 和 DT/RT/RT 模式 0—40 cm 土层全氮储量比试验前分别增加 3.1%、11.1%、11.6%、13.3%和 15.7%，年平均累积增加速率分别为 26.9、96.0、100.3、114.6 和 135.3 $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。在 2013—2015 年冬小麦成熟期，0—40 cm 土层的全氮储量以 DT/RT/RT 最高，与 CST、CDT、DT/RT 三者差异不显著，比对照 CRT 显著增加 11.1%。土壤全氮储量的变化趋势与土壤有机碳储量一致，土壤全氮储量随耕层的加深递减，且不同耕作模式主要增加了 10—40 cm 土层的全氮储量。其中以 DT/RT/RT 最高，与 CDT、DT/RT 之间相差不大，较 CST、CRT 分别增加 5.4%和 11.0%，CST 较 CRT 增加 4.9%。

2.5 轮耕对土壤脲酶活性的影响

土壤脲酶能促进尿素水解生成利于作物生长的氨，反应了土壤的供氮能力和水平。由表 6 可知，土壤脲酶活性的变化在年际间差异不大，随耕层增加递减，且土层间差异显著。在冬小麦成熟期，DT/RT/RT、DT/RT 和 CDT 模式在 0—40 cm 土层的脲酶活性无显著差异，均显著高于 CST、CRT，而 CST 比 CRT 显著增加 20.7%。在夏玉米成熟期，CDT、DT/RT、DT/RT/RT 和 CST 模式在 0—40 cm 土层的脲酶活性比对照 CRT 显著增加 31.9%、30.4%、25.8%和 23.7%，其中 DT/RT/RT、DT/RT、CDT 之间相差不大，DT/RT、CDT 与 CST 差异显著。由图 4

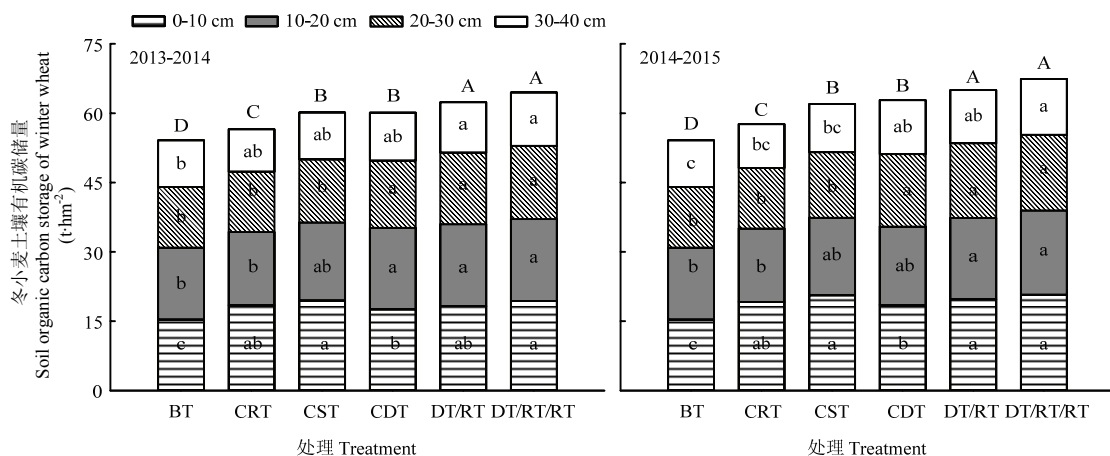


图 2 上不同小写字母表示同土层不同处理间差异达到 5% 显著水平；图 2 上不同大写字母表示 0—40 cm 土层不同处理间差异达到 5% 显著水平。下同
Different lowercase letters above the bars meant significant differences at the 0.05 level in the same soil layer; Different uppercase letters above the bars meant significant differences at the 0.05 level in 0-40 cm soil layer. The same as below

图 2 轮耕模式对 0—40 cm 土层土壤有机碳储量的影响

Fig. 2 Effects of rotational tillage patterns on soil organic carbon storage in 0-40 cm soil layer ($t \cdot hm^{-2}$)

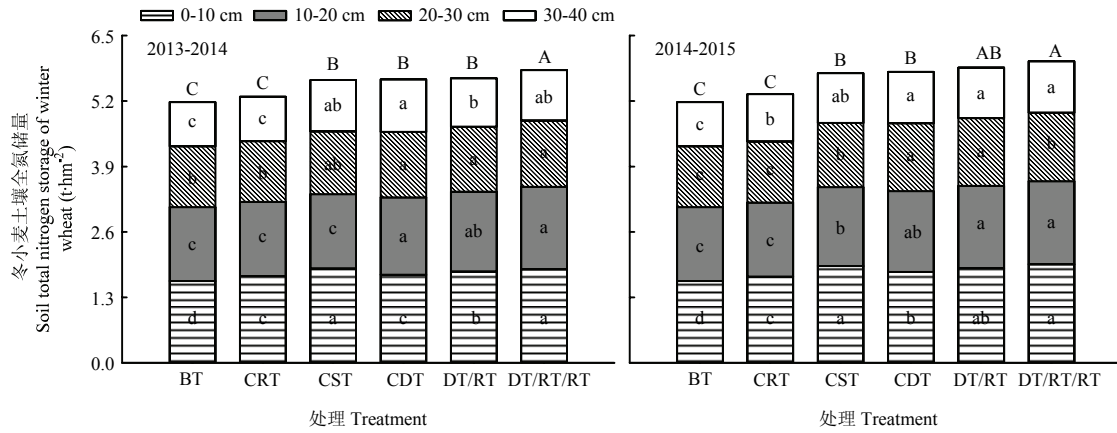


图 3 轮耕模式对 0—40 cm 土层土壤全氮储量的影响

Fig. 3 Effects of rotational tillage patterns on soil total nitrogen storage in 0-40 cm soil layer (t·hm⁻²)

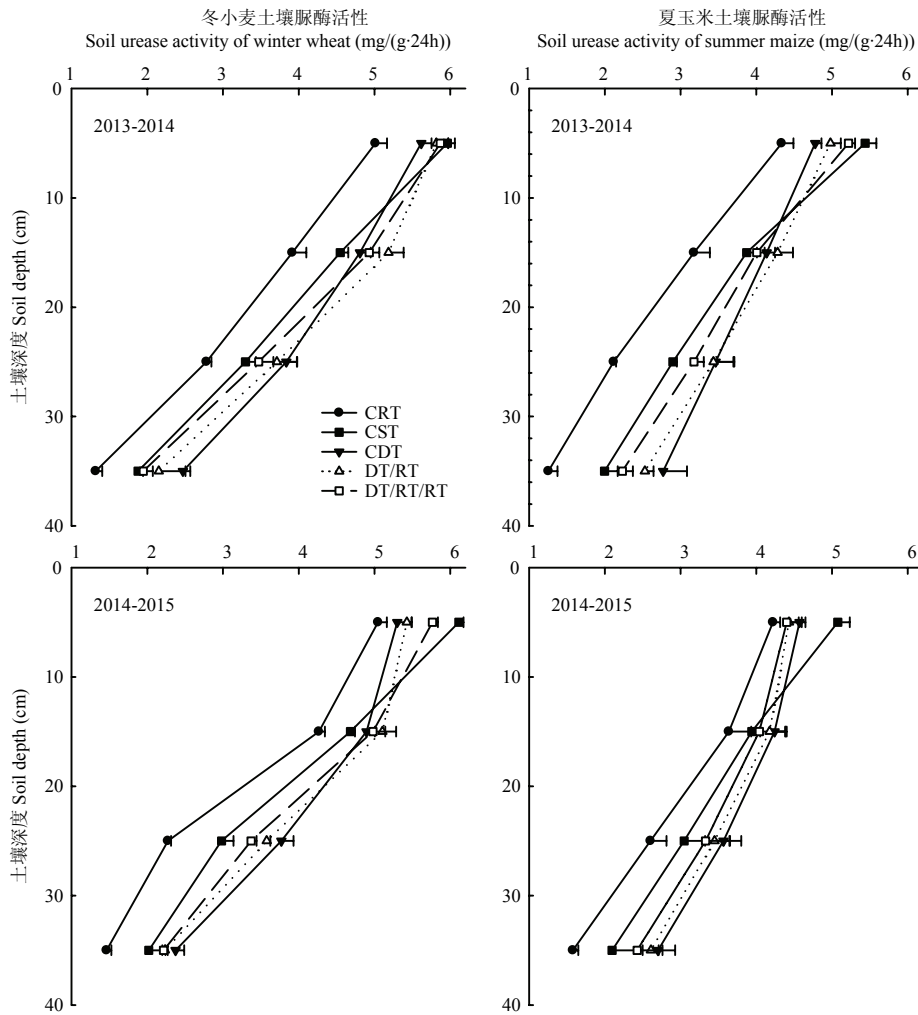


图 4 轮耕模式对 0—40 cm 土层土壤脲酶活性的影响

Fig. 4 Effects of rotational tillage patterns on soil urease activity in 0-40 cm soil layer

可知,各耕作模式对不同土层脲酶活性的影响显著,主要增加了10—40 cm土层的脲酶活性。在冬小麦成熟期,以CDT和DT/RT的脲酶活性较高,与DT/RT/RT差异不显著,而与CST、CRT差异显著,DT/RT/RT与CST差异不显著,比CRT显著增加26.6%。在夏玉米成熟期,CDT、DT/RT、DT/RT/RT模式比CST分别增加17.0%、14.7%和7.6%,而CST与CRT差异显著。

2.6 轮耕对土壤蔗糖酶活性的影响

土壤蔗糖酶可使蔗糖分解为易溶性的营养物质,表征了土壤有机碳累积与分解转化规律^[27]。由表6可知,土壤蔗糖酶活性随轮耕年限延长有不同程度的增加,并随耕层增加递减,土层间差异显著。在冬小麦

成熟期,CDT、DT/RT、DT/RT/RT和CST模式在0—40 cm土层蔗糖酶活性较CRT显著增加32.5%、34.4%、30.0%和21.0%,其中CDT、DT/RT和DT/RT/RT三者间差异不显著,比CST显著增加9.5%、11.1%和7.4%。在夏玉米成熟期,CDT、DT/RT与DT/RT/RT差异不显著,比CRT分别显著增加22.7%和23.9%,CST比CRT显著增加13.8%。由图5可知,各耕作模式主要增加了10—40 cm土层的蔗糖酶活性。在冬小麦成熟期,CDT、DT/RT和DT/RT/RT比CST显著增加28.9%、26.6%和17.2%,比CRT显著增加51.7%、48.9%和38.0%。在夏玉米成熟期,以CDT的蔗糖酶活性最高,与DT/RT和DT/RT/RT差异不显著,而显著高于CST和CRT。结果表明经过长

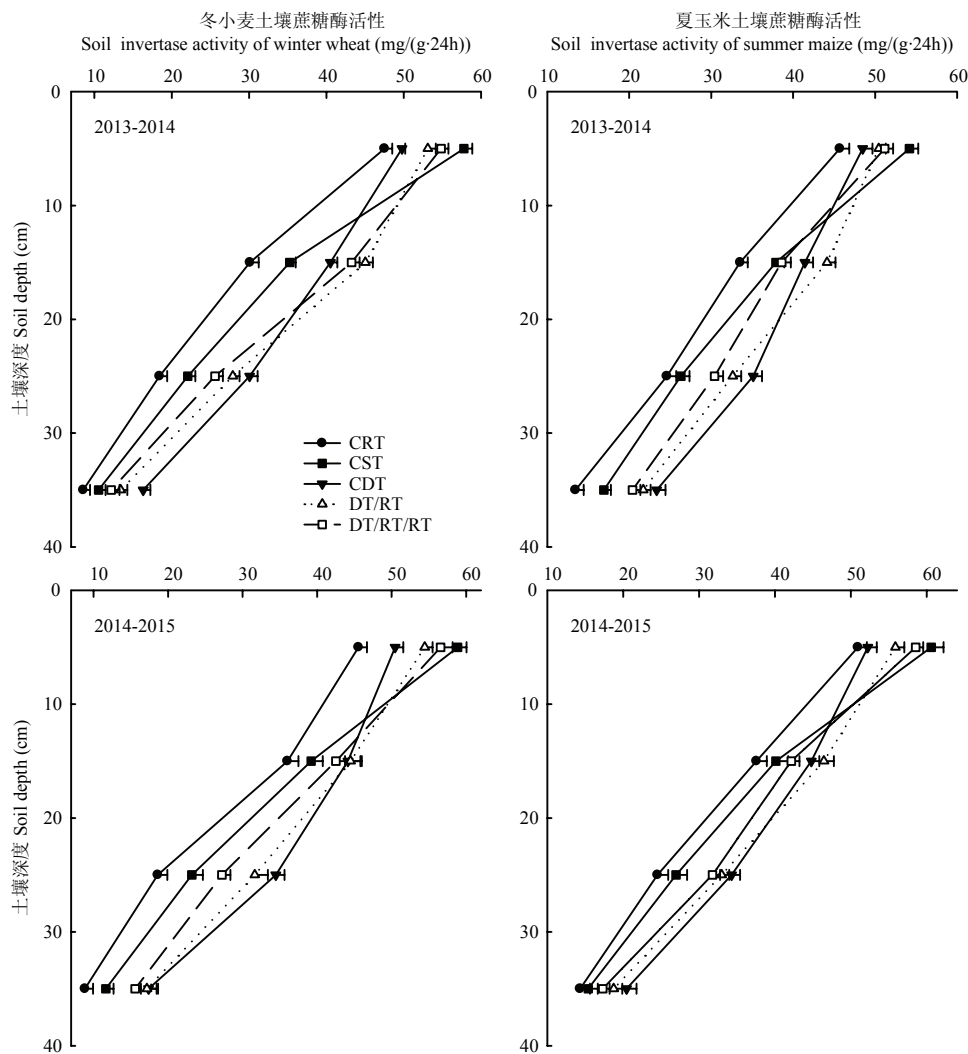


图5 轮耕模式对0—40 cm土层土壤蔗糖酶活性的影响

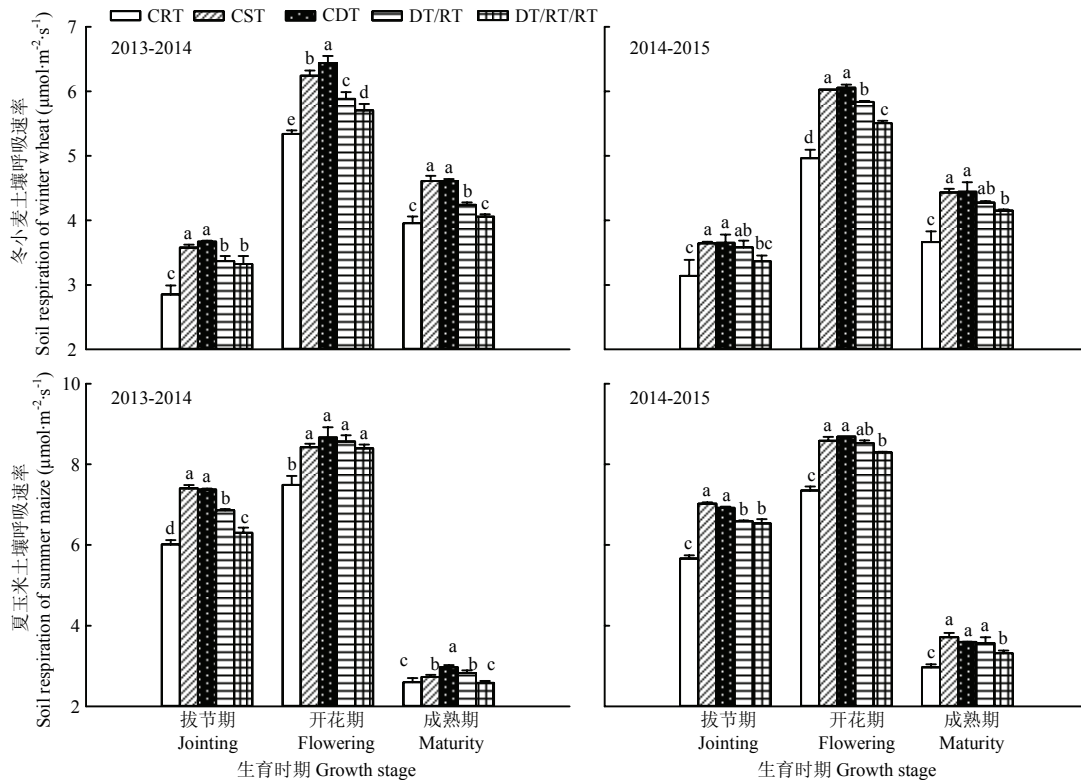
Fig. 5 Effects of rotational tillage patterns on soil invertase activity in 0-40 cm soil layer

期定位后，耕作措施不仅对当季作物的土壤蔗糖酶活性影响显著，还对后茬作物的土壤性质改良效应显著。

2.7 轮耕对土壤呼吸速率的影响

在冬小麦-夏玉米两熟区农田，土壤呼吸速率均在冬小麦开花期和夏玉米开花期出现高峰，深耕、深松和轮耕模式均显著提高土壤呼吸速率（图 6）。在冬小麦和夏玉米的各个生育时期，土壤呼吸速率均表

现为 CDT>CST>DT/RT>DT/RT/RT>CRT。CDT、CST、DT/RT 和 DT/RT/RT 的土壤呼吸速率平均值比 CRT 模式在冬小麦季分别显著提高 19.3%、20.7%、13.7%和 9.2%，在夏玉米季分别提高 18.1%、19.1%、15.2%和 10.4%。CDT 与 CST 差异不显著，显著高于 2 种轮耕模式，DT/RT 比 DT/RT/RT 在冬小麦季显著提高 4.1%，在夏玉米季显著提高 4.3%。



图柱上不同小写字母表示同生育时期不同处理间差异达到 5%显著水平
Different lowercase letters above the bars meant significant differences at the 0.05 level in the same growth stage

图 6 轮耕模式对土壤呼吸速率的影响

Fig. 6 Effects of rotational tillage patterns on soil respiration rate

2.8 轮耕对作物产量的影响

2009—2015 年各耕作模式的冬小麦和夏玉米产量如表 7 所示。5 种耕作模式 5 年的冬小麦产量平均值由高到低依次为 DT/RT>DT/RT/RT>CST>CDT>CRT，且 DT/RT/RT、DT/RT、CST 和 CDT 比对照 CRT 分别增产 14.8%、16.8%、11.5%、13.4%。DT/RT/RT 的夏玉米产量和周年产量介于 DT/RT 和 CST 之间，且与两者差异不显著，其周年产量比 CRT 显著增产 18.9%，DT/RT、CST 和 CDT 的周年产量比 CRT 分别显著增产 21.4%、15.7%和 12.9%。

2.9 轮耕对作物经济效益的影响

由于不同年份作物产量和农资投入不同，各轮耕模式的经济效益存在显著差异（表 8）。不同年份作物周年总产值的变化规律与作物周年产量一致，CDT、CST、DT/RT、DT/RT/RT 和 CRT 模式 6 年的总成本依次是 10 941.9、10 866.9、10 754.4、10 691.9 和 10 566.9 元/hm²，其中以 CDT 最高，CRT 最低。比较 5 种耕作模式 6 年的经济效益，DT/RT/RT 与 DT/RT、CST 差异不显著，但比 CDT 显著增收 10.1%，比 CRT 显著增收 31.9%。

表 7 2009-2015 年轮耕模式对冬小麦-夏玉米产量及周年产量的影响

Table 7 Effects of rotational tillage patterns on winter wheat-summer maize yield and annual yield in 2009-2015 (t·hm⁻²)

作物 Crop	处理 Treatment	年份 Year						平均 Average
		2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	
冬小麦 Winter wheat	CRT	6.23b	6.76b	6.16bc	—	7.01c	4.86c	6.21b
	CST	6.73ab	8.05a	6.75ab	—	8.44ab	5.21ab	7.03a
	CDT	6.78ab	8.12a	6.54b	—	8.12b	5.04bc	6.92a
	DT/RT	6.96a	8.25a	7.37a	—	8.01b	5.64a	7.24a
	DT/RT/RT	6.86a	7.98a	6.92ab	—	8.96a	4.92bc	7.13a
夏玉米 Summer maize	CRT	5.51c	5.51c	8.38c	7.47c	8.19d	10.06d	7.52d
	CST	6.57ab	6.20ab	10.04ab	8.88ab	9.45c	11.79bc	8.82bc
	CDT	6.42b	5.82bc	9.49b	8.37b	9.93bc	11.34c	8.56c
	DT/RT	7.13a	6.51a	9.82ab	9.20a	10.55ab	13.03a	9.37a
	DT/RT/RT	6.53ab	6.12ab	10.57a	8.63ab	10.77a	12.26b	9.15ab
周年产量 Annual yield	CRT	11.74b	12.27b	14.54c	7.47c	15.20c	14.92c	12.69c
	CST	13.30a	14.24a	16.79ab	8.88ab	17.89b	17.00b	14.68ab
	CDT	13.19a	13.94a	16.04b	8.37b	18.05b	16.38bc	14.33b
	DT/RT	14.09a	14.75a	17.19a	9.20a	18.55ab	18.67a	15.41a
	DT/RT/RT	13.39a	14.10a	17.49a	8.63ab	19.73a	17.18b	15.09ab

相同年份、同列数据后不同小写字母表示同作物不同处理间差异达到 5% 显著水平。下同

Different lowercase letters in the same column meant significant difference at the 0.05 level in the same crop and same year. The same as below

表 8 不同轮耕模式对作物生产成本和经济效益的影响

Table 8 Effects of different rotational tillage patterns on total cost and economic benefits (yuan/hm²)

项目 Item	处理 Treatment	年份 Year						平均 Average
		2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	
总产值 Total output	CRT	22996.6b	24116.7b	28017.8c	13450.2c	29465.0c	28320.0c	24394.4c
	CST	25961.8a	28052.7a	32246.2ab	15982.5ab	34734.7b	32156.4b	28189.0ab
	CDT	25691.4a	27521.0a	30830.3b	15065.7b	34926.5b	31002.2b	27506.2b
	DT/RT	27452.4a	29026.2a	33152.8a	16555.2a	35796.7ab	35240.1a	29537.2a
	DT/RT/RT	26149.4a	27779.3a	33553.9a	15530.7ab	38202.2a	32397.6b	28935.5ab
总成本 Total cost	CRT	11383.4	11383.4	11383.4	6484.45	11383.4	11383.4	10566.9
	CST	11683.4	11683.4	11683.4	6784.45	11683.4	11683.4	10866.9
	CDT	11758.4	11758.4	11758.4	6859.45	11758.4	11758.4	10941.9
	DT/RT	11758.4	11383.4	11758.4	6484.45	11758.4	11383.4	10754.4
	DT/RT/RT	11758.4	11383.4	11383.4	6859.45	11383.4	11383.4	10691.9
经济效益 Economic benefit	CRT	11613.2c	12733.3c	16634.4c	6965.7d	18081.6c	16936.6c	13827.5c
	CST	14278.4b	16369.3ab	20562.8ab	9198.0b	23051.3b	20473.0b	17322.1ab
	CDT	13933.0b	15762.6b	19071.9b	8206.3c	23168.1b	19243.8b	16564.3b
	DT/RT	15694.0a	17642.8a	21394.4a	10070.8a	24038.3b	23856.7a	18782.8a
	DT/RT/RT	14391.0ab	16395.9ab	22170.5a	8671.2bc	26818.8a	21014.2b	18243.6a

3 讨论

耕作的目的是改善土壤质量, 通过调节土壤微环境的水、肥、气、热关系, 综合改善土壤的物理、化学和生物性状^[28]。其中土壤三相比能反映土壤的松紧程度、充水和充气程度及水汽容量^[29], 是衡量农田土壤物理性状的重要指标。前人研究表明, 长期旋耕易形成明显的犁底层, 阻碍作物根系生长及对土壤养分的充分利用^[30], 而小麦季深松可改善土壤孔隙状况^[13], 增加土壤深层蓄水量^[31], 深耕可降低冬小麦季 20—35 cm 土层容重和夏玉米季 15—25 cm 土层容重, 增加 0—40 cm 土层含水量^[32]。平衡土壤容重、孔隙度和土壤含水量间的比例, 可创造良好耕层结构和适宜孔隙比例。本研究结果表明, 与连年旋耕相比, 冬小麦季连年深松、深耕及深耕和旋耕组合的轮耕模式均显著降低土壤亚表层 R 值, 这与郭海斌等^[9]的研究结果相似。土壤亚表层的 R 值在冬小麦成熟期以连年深松最低, 夏玉米成熟期以连年深耕最低, 主要是因为该区冬小麦季降雨较少, 深松的土壤蓄水保墒能力最好^[33], 而夏玉米季降雨、灌溉充分, 深耕后翻转的土壤能最大限度地接纳雨水和灌溉水, 扩大土壤水库容^[1]。

轮耕可改善土壤耕层物理结构, 协调耕层良好的水热条件, 平衡有机质和全氮在耕层间分布^[15]。本研究结果表明, 连年旋耕和连年深松的土壤有机碳、氮储量表现为表层富集现象, 而连年深耕、深耕/旋耕和深耕/旋耕/旋耕模式促进了 10—40 cm 土层有机碳、氮储量的增加, 其可能原因有 2 个方面: 一是耕作处理改变了秸秆在耕层的分布特征, 其中旋耕和深松 0—10 cm 土层分别占 91%、93%, 而深耕 0—10 cm 土层占 51%, 10—30 cm 土层占 49% (图 1), 秸秆腐解释放养分到土壤, 从而提高下层土壤碳氮储量^[4]。二是轮耕增加了耕层根系的数量和分布^[34], 促进了土壤碳库的输入。深耕和旋耕集成的轮耕模式固碳、固氮效果较连年深耕模式不显著, 可能是因为定位时间较短, 秸秆还田对土壤改良效应明显, 使土壤有机碳的分解减慢。本文采用等深度法计算土壤有机碳、全氮储量, 与多数研究^[7,15,17]结果一致。随轮耕年限的延长, 5 种耕作措施各土层的碳、氮储量均有不同程度的增加, 且土层间差异显著。但是目前国内外关于土壤碳、氮储量是否随轮耕年限增加而增加的结论不一, VALBOA 等^[35]研究连续 24 年的深耕、深松试验结果

表明, 0—40 cm 土层的碳、氮储量无明显变化; 但有学者指出长期旋耕后进行深松 6 年^[36]和深耕 4 年^[17]均能显著提高 0—30 cm 土层固碳量, 这与本研究结果一致。

土壤酶活性是土壤生物学活性的重要表现, 土壤蔗糖酶和脲酶在土壤碳氮循环中起着重要作用^[37]。孟庆阳等^[38]研究发现与旋耕措施相比, 小麦季深耕对 20—40 cm 土层的蔗糖酶活性无显著影响, 这可能主要与秸秆还田后对土壤亚表层的长期改良效应有关。本研究通过 6 年的定位试验, 研究结果表明与连年旋耕相比, 连年深松的脲酶和蔗糖酶活性在 0—10 cm 土层富集, 连年深耕和 2 种轮耕模式在 10—40 cm 土层的脲酶活性增加 38.4%, 蔗糖酶活性增加 38.2%, 这主要由于深耕措施将秸秆翻埋到土壤亚表层, 增加了亚表层的秸秆还田量和土壤有机碳、氮含量, 土壤有机质等营养物质是土壤酶促反应的底物, 土壤有效养分的增加能够提高有机碳矿化率、微生物量和土壤酶活性^[30,39], 这与孙瑞莲等^[40]研究指出土壤脲酶、蔗糖酶活性与有机质、碱解氮均呈显著正相关的结果一致。

土壤有机质是微生物进行分解活动排放 CO₂ 的物质基础, 土壤酶活性反映了土壤中物质代谢的旺盛程度, 与土壤微生物数量及呼吸强度有直接关系^[41]。本试验中, 连年深松、连年深耕和 2 种轮耕模式的有机碳氮储量和土壤酶活性较高, 进而加速土壤呼吸速率。土壤呼吸速率均在冬小麦开花期和夏玉米开花期出现高峰, 这可能与施肥有关, 同时根系生长旺盛, 产生的分泌物促进根际微生物呼吸, 根呼吸和微生物呼吸增加促进了土壤呼吸速率的提高。较连年深耕模式, 深耕和旋耕结合的轮耕模式冬小麦季的平均土壤呼吸速率显著降低 7.7%, 夏玉米季降低 3.5%。主要是因为深耕、旋耕隔年轮换改善了土壤的通气性, 减少了土壤扰动, 降低了土壤有机质的分解, 进而造成土壤呼吸速率下降, 这与张俊丽等^[42]研究结果相似, 即土壤耕层扰动越深, 土壤呼吸速率越高。深耕/旋耕/旋耕的土壤呼吸速率显著低于深耕/旋耕, 表明在改良深层土壤结构的同时, 适当减少土壤扰动频率, 可有效减少农田碳排放, 促进土壤固碳固氮。

孔凡磊等^[43]研究发现多年免耕后进行翻耕、旋耕使冬小麦有效穗数提高 23.2%, 增产 14.4%。隔年深耕、旋耕处理可有效打破犁底层, 加速土壤的熟化, 提高了土壤养分含量和深层根系活力^[34], 从而提高作物产量。另外, 小麦季轮耕不仅提高了冬小麦的产量,

其后效影响到夏玉米季,显著提高夏玉米产量,结果表明经过长期定位后,耕作措施不仅对当季作物的土壤性状影响显著,还对后茬作物的土壤性质改良效应显著,这与聂良鹏等^[13]的结果一致。本试验通过比较轮耕模式6年的周年产量和经济效益发现,深耕/旋耕、深耕/旋耕/旋耕和连年深松增产效应差异不明显,主要是由于该地区冬小麦季降雨较少,深松和隔年深耕旋耕交替的耕作措施可减少土壤表面水分的蒸发,提高水分利用效率,使各处理间的冬小麦产量差异不明显。并且与深耕/旋耕、连年深松相比,长期进行深耕/旋耕/旋耕模式不但使农机具田间操作化繁为简,节省人力及物力的消耗和开支,而且减少了土壤亚表层的扰动频率,进而有效降低了农田呼吸速率,提高了土壤碳氮储量,因此深耕/旋耕/旋耕模式更适宜在该区进行试验推广。

轮耕后土壤耕作改变不同土层碳氮储量的内在机制是复杂的,受耕作方式、土壤水热状况等特性影响,特别是轮耕模式对土壤磷、钾、水肥利用效率和秸秆在耕层间腐解、释放养分的机制,需进行更加深入的研究,才能更加准确地评价各轮耕模式对土壤的培肥效应。

4 结 论

秸秆还田条件下,深松、深耕和旋耕结合的轮耕模式可显著降低0—40 cm土层的R值,改善土壤物理性状,增加0—40 cm土层碳氮储量、脲酶和蔗糖酶活性;通过对处理6年后的土壤性状、作物产量和经济效益综合评价分析,以深耕/旋耕/旋耕轮耕模式最佳。深耕/旋耕/旋耕的轮耕模式创造了良好的耕层结构,提高了土壤碳氮储量,优化了土壤根区酶活性和农田碳排放机制,可作为黄淮海地区冬小麦-夏玉米两熟制农田适宜的轮耕模式。

References

- [1] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,穆心愿,李潮海.耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响.中国农业科学,2014,47(17):3359-3371.
ZHAO Y L, XUE Z W, GUO H B, MU X Y, LI C H. Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17): 3359-3371. (in

- Chinese)
[2] SALEM H M, VALERO C, MUÑOZ M Á, RODRÍGUEZ M G, SILVAL L L. Short-term effects of four tillage practices on soil physical properties, soil water potential, and maize yield. *Geoderma*, 2015, 237/238: 60-70.
[3] LI J, WANG E, WANG Y, XING H, WANG D, WANG L, GAO C. Reducing greenhouse gas emissions from a wheat-maize rotation system while still maintaining productivity. *Agricultural Systems*, 2016, 145: 90-98.
[4] DIKGWATLHE S B, CHEN Z D, LAL R, ZHANG H L, CHEN F. Changes in soil organic carbon and nitrogen as affected by tillage and residue management under wheat-maize cropping system in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 2014, 144(4): 110-118.
[5] 王淑兰,王浩,李娟,吕薇,陈宁宁,李军.不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响.应用生态学报,2016,27(5):1530-1540.
WANG S L, WANG H, LI J, LÜ W, CHEN N N, LI J. Effects of long-term straw mulching on soil organic carbon, nitrogen and moisture and spring maize yield on rain-fed croplands under different patterns of soil tillage practice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1530-1540. (in Chinese)
[6] 禄兴丽,廖允成.不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响.环境科学,2015,36(6):2266-2273.
LU X L, LIAO Y C. Effects of tillage on soil respiration and root respiration under rain-fed summer corn field. *Environmental Science*, 2015, 36(6): 2266-2273. (in Chinese)
[7] 李娟,李军,尚金霞,贾志宽.轮耕对渭北旱塬春玉米田土壤理化性状和产量的影响.中国生态农业学报,2012,20(7):867-873.
LI J, LI J, SHANG J X, JIA Z K. Effects of rotational tillage on soil physiochemical properties and spring maize yield in Weibei Highlands. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(7): 867-873. (in Chinese)
[8] ZHANG X Q, PU C, ZHAO X, XUE J F, ZHANG R, NIE Z J, CHEN F, LAL R, ZHANG H L. Tillage effects on carbon footprint and ecosystem services of climate regulation in a winter wheat-summer maize cropping system of the North China Plain. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 821-829.
[9] 郭海斌,冀保毅,王巧锋,赵亚丽,穆心愿,薛志伟,李潮海,赵志杰.深耕与秸秆还田对不同质地土壤物理性状和作物产量的影响.河南农业大学学报,2014,48(4):505-511.
GUO H B, JI B Y, WANG Q F, ZHAO Y L, MU X Y, XUE Z W, LI C H, ZHAO Z J. Effects of deep tillage and straw returning on soil

- physical properties and grain yield of different soil texture. *Journal of Henan Agricultural University*, 2014, 48(4): 505-511. (in Chinese)
- [10] PANDEY D, AGRAWAL M, BOHRA J S. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation. *Soil and Tillage Research*, 2014, 136: 51-60.
- [11] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 穆心愿, 李潮海. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 155-165. ZHAO Y L, XUE Z W, GUO H B, MU X Y, LI C H. Effects of tillage and crop residue management on soil respiration and its mechanism. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 155-165. (in Chinese)
- [12] 尹宝重, 甄文超, 郭丽果. 海河低平原不同耕作方式下麦田土壤生态环境特征. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 186-194. YIN B Z, ZHEN W C, GUO L G. The soil ecological-environment characteristics in wheat growing season under different tillage treatments in Haihe lowland plain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 186-194. (in Chinese)
- [13] 聂良鹏, 郭利伟, 牛海燕, 魏杰, 李增嘉, 宁堂原. 轮耕对小麦-玉米两熟农田耕层构造及作物产量与品质的影响. *作物学报*, 2015, 41(3): 468-478. NIE L P, GUO L W, NIU H Y, WEI J, LI Z J, NING T Y. Effects of rotational tillage on till soil structure and crop yield and quality in maize-wheat cropping system. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(3): 468-478. (in Chinese)
- [14] 王玉玲, 李军, 柏炜霞. 轮耕体系对黄土台塬麦玉轮作土壤生产性能的影响. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 107-116. WANG Y L, LI J, BAI W X. Effects of rotational tillage systems on soil production performance in wheat-maize rotation field in Loess Platform region of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(1): 107-116. (in Chinese)
- [15] 吕薇, 李军, 岳志芳, 陈宁宁, 王淑兰. 轮耕对渭北旱塬麦田土壤有机质和全氮含量的影响. *中国农业科学*, 2015, 48(16): 3186-3200. LÜ W, LI J, YUE Z F, CHEN N N, WANG S L. Effects of rotational tillage on soil organic matter and soil total nitrogen contents of continuous cropping wheat field in Weibei Highland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(16): 3186-3200. (in Chinese)
- [16] 王玉玲, 李军. 黄土旱塬区平衡施肥下不同土壤耕作模式的蓄水纳墒及作物增产增收效应研究. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 151-163. WANG Y L, LI J. Study on soil water storage, crop yields and incomes under different soil tillage patterns with balance fertilization in the Loess Dryland region. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 151-163. (in Chinese)
- [17] TIAN S Z, NING T Y, WANG Y, LIU Z, LI G, LI Z J, LAL R. Crop yield and soil carbon responses to tillage method changes in North China. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 207-213.
- [18] 于寒, 梁烜赫, 张玉秋, 孙杨, 吴春胜, 谷岩. 不同秸秆还田方式对玉米根际土壤微生物及酶活性的影响. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(3): 305-311. YU H, LIANG X H, ZHANG Y Q, SUN Y, WU C S, GU Y. Effects of different straw returning modes on the soil microorganism and enzyme activity in corn field. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(3): 305-311. (in Chinese)
- [19] ZHANG P, WEI T, LI Y L, WANG K, JIA Z K, HAN Q F, REN X L. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C: N ratio in a semiarid region of China. *Soil & Tillage Research*, 2015, 153: 28-35.
- [20] 胡发龙, 柴强, 甘延太, 殷文, 赵财, 冯福学. 少免耕及秸秆还田小麦间作玉米的碳排放与水分利用特征. *中国农业科学*, 2015, 49(1): 120-131. HU F L, CHAI Q, GAN Y T, YIN W, ZHAO C, FENG F X. Characteristics of soil carbon emission and water utilization in wheat/maize intercropping with minimal/zero tillage and straw retention. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 49(1): 120-131. (in Chinese)
- [21] LI S, LI Y B, LI X S, TIAN X H, ZHAO A Q, WANG S J, WANG S X, SHI J L. Effect of straw management on carbon sequestration and grain production in a maize-wheat cropping system in Anthrosol of the Guanzhong Plain. *Soil & Tillage Research*, 2016, 157(303): 43-51.
- [22] 王芸, 韩宾, 史忠强, 邵国庆, 江晓东, 宁堂原, 焦念元, 李增嘉. 保护性耕作对土壤微生物特性及酶活性的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 120-123. WANG Y, HAN B, SHI Z Q, SHAO G Q, JIANG X D, NING T Y, JIAO N Y, LI Z J. Effects of conservation tillage on soil microbial characters and soil enzyme activities. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4): 120-123. (in Chinese)
- [23] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 66-69. HUANG C Y. *Soil Science*. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 66-69. (in Chinese)
- [24] 冀保毅, 李潮海, 赵亚丽, 王群, 穆心愿, 郭海斌, 薛志伟, 牛平. 一种用立体几何知识分析土壤三相比数据的方法: 103197045A[P].

- [2013-07-10].
- JI B Y, LI C H, ZHAO Y L, WANG Q, MU X Y, GUO H B, XUE Z W, NIU P P. A method that making use of the solid geometry knowledge analyzes ratio of soil solid-liquid-gaseous data: 103197045A[P]. [2013-07-10]. (in Chinese)
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2008: 22-24.
- BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 22-24. (in Chinese)
- [26] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986: 260-360.
- GUAN S Y. *Study Way of Soil Enzymes*. Beijing: Agriculture Press, 1986: 260-360. (in Chinese)
- [27] 张丽琼, 郝明德, 臧逸飞, 李丽霞. 苜蓿和小麦长期连作对土壤酶活性及养分的影响. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3191-3196.
- ZHANG L Q, HAO M D, ZANG Y F, LI L X. Effects of continuous cropping of wheat and alfalfa on soil enzyme activities and nutrients. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(11): 3191-3196. (in Chinese)
- [28] 马海燕, 徐瑾, 郑成淑, 孙霞, 束怀瑞. 非洲菊连作对土壤理化性状与生物性状的影响. 中国农业科学, 2011, 44(18): 3733-3740.
- MA H Y, XU J, ZHENG C S, SUN X, SHU H R. Effects of continuous cropping system on the soil physical-chemical properties and biological properties of *Gerbera jamesonii*. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(18): 3733-3740. (in Chinese)
- [29] 张久明, 迟凤琴, 宿庆瑞, 匡恩俊, 金梁, 蔡姗姗. 不同耕作方式对瘠薄型黑土区土壤结构的影响. 玉米科学, 2013, 21(5): 109-113.
- ZHANG J M, CHI F Q, SU Q R, KUANG E J, JIN L, CAI S S. Influence of different tillage modes on the structure of dystrophic black soil. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(5): 109-113. (in Chinese)
- [30] 翟振, 李玉义, 逢焕成, 王婧, 张莉, 董国豪, 郭建军, 郭智慧. 黄淮海北部农田犁底层现状及其特征. 中国农业科学, 2016, 49(12): 2322-2332.
- ZHAI Z, LI Y Y, PANG H C, WANG J, ZHANG L, DONG G H, GUO J J, GUO Z H. Study on present situation and characteristics of plow pan in the northern region of Huang huai hai Plain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(12): 2322-2332. (in Chinese)
- [31] 孙敏, 高志强, 赵维峰, 任爱霞, 邓妍, 苗果园. 休闲期深松配施氮肥对旱地土壤水分及小麦籽粒蛋白质积累的影响. 作物学报, 2014, 40(7): 1286-1295.
- SUN M, GAO Z Q, ZHAO W F, REN A X, DENG Y, MIAO G Y. Effect of subsoiling in fallow period and nitrogen application on soil moisture and grain protein accumulation in dryland wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(7): 1286-1295. (in Chinese)
- [32] 靳海洋, 谢迎新, 李梦达, 刘宇娟, 贺德先, 冯伟, 王晨阳, 郭天财. 连续周年耕作对砂姜黑土农田蓄水保墒及作物产量的影响. 中国农业科学, 2016, 49(16): 3239-3250.
- JIN H Y, XIE Y X, LI M D, LIU Y J, HE D X, FENG W, WANG C Y, GUO T C. Effects of annual continuous tillage on soil water conservation and crop yield in lime concretion black soil farmland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(16): 3239-3250. (in Chinese)
- [33] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 马丽, 尹春梅. 两年免耕后深松对土壤水分的影响. 中国农业科学, 2008, 41(1): 78-85.
- QIN H L, GAO W S, MA Y C, MA L, YIN C M. Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 78-85. (in Chinese)
- [34] 祝飞华, 王益权, 石宗琳, 张润霞, 冉艳玲, 王亚城. 轮耕对关中一年两熟区土壤物理性状和冬小麦根系生长的影响. 生态学报, 2015, 35(22): 7454-7463.
- ZHU F H, WANG Y Q, SHI Z L, ZHANG R X, RAN Y L, WANG Y C. Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat root growth on annual double cropping area. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(22): 7454-7463. (in Chinese)
- [35] VALBOA G, LAGOMARSINO A, BRANDI G, AGNELLI A E, SIMONCINI S, PAPINI R, VIGNOZZI N, PELLEGRINI S. Long-term variations in soil organic matter under different tillage intensities. *Soil and Tillage Research*, 2015, 154: 126-135.
- [36] 田慎重, 郭洪海, 董晓霞, 董亮, 郑东峰, 孙泽强, 王学君, 刘盛林. 耕作方式转变和秸秆还田对土壤活性有机碳的影响. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 2): 39-45.
- TIAN S Z, GUO H H, DONG X X, DONG L, ZHENG D F, SUN Z Q, WANG X J, LIU S L. Effect of tillage method change and straw return on soil labile organic carbon. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl.2): 39-45. (in Chinese)
- [37] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 万水霞, 王允青, 许征宇, 张晓玲. 不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响. 生态学报, 2013, 33(2): 565-575.
- WU J, GUO X S, LU J K, WAN S X, WANG Y Q, XU Z Y, ZHANG X L. Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 565-575. (in Chinese)
- [38] 孟庆阳, 王永华, 靳海洋, 晁岳恩, 段剑钊, 郭天财. 耕作方式与秸秆还田对砂姜黑土土壤酶活性及冬小麦产量的影响. 麦类作物

- 学报, 2016, 36(3): 341-346.
- MENG Q Y, WANG Y H, JIN H Y, CHAO Y E, DUAN J D, GUO T C. Effect of tillage and straw returning on soil enzyme activity and yield of winter wheat in lime concretion black soil. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(3): 341-346. (in Chinese)
- [39] 矫丽娜, 李志洪, 殷程程, 王晓飞, 辛士颖, 于磊. 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响. *土壤学报*, 2015, 52(3): 665-672.
- JIAO L N, LI Z H, YIN C C, WANG X F, XIN S Y, YU L. Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 665-672. (in Chinese)
- [40] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 徐晶, 张夫道. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用. *植物营养与肥科学报*, 2003, 9(4): 406-410.
- SUN R L, ZHAO B Q, ZHU L S, XU J, ZHANG F D. Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(4): 406-410. (in Chinese)
- [41] 陈娟, 马忠明, 刘莉莉, 吕晓东. 不同耕作方式对土壤有机碳、微生物量及酶活性的影响. *植物营养与肥科学报*, 2016, 22(3): 667-675.
- CHEN J, MA Z M, LIU L L, LÜ X D. Effect of tillage system on soil organic carbon, microbial biomass and enzyme activities. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3): 667-675. (in Chinese)
- [42] 张俊丽, SIKANDER K T, 温晓霞, 陈月星, 高明博, 刘杨, 廖允成. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 192-199.
- ZHANG J L, SIKANDER K T, WEN X X, CHEN Y X, GAO M B, LIU Y, LIAO Y C. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(18): 192-199. (in Chinese)
- [43] 孔凡磊, 陈阜, 张海林, 黄光辉. 轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 150-155.
- KONG F L, CHEN F, ZHANG H L, HUANG G H. Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat yield. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 150-155. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)