

轮耕秸秆还田促进冬小麦干物质积累提高水氮利用效率

关小康¹, 王静丽¹, 刘影¹, 杨明达¹, 王和洲², 王怀苹³, 王同朝¹

(1. 河南农业大学农学院, 河南粮食作物协同创新中心, 郑州 450046;

2. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 3. 浚县丰黎种业有限公司, 河南 鹤壁 456250)

摘要: 通过田间定位试验, 探究了不同耕作措施及秸秆还田对 2015—2017 年 2 个生长季冬小麦物质积累、氮素积累及水氮利用效率的影响。采用 2 因素裂区试验设计, 主区为秸秆还田(S)和秸秆不还田(NS); 副区分别为深耕(DT)、轮耕(RT)和免耕(NT)处理。结果表明: S 处理较 NS 处理显著增加冬小麦旗叶 SPAD 和光合速率, 提高成熟期植株生物量, 但产量增加不显著。RT 处理于 2015—2016 年和 2016—2017 年较 DT 处理分别显著增产 4.88% 和 9.05%, 2016—2017 年较 NT 处理显著增产 3.64%。秸秆还田和耕作方式交互作用显著影响冬小麦产量, S+RT 处理 2015—2016 年和 2016—2017 年较 NS+DT 处理分别显著提高 8.68% 和 16.98%。S 处理显著增加植株氮素积累量 and 水分利用效率; RT 处理显著提高冬小麦水分利用效率, 增加冬小麦氮素积累量、籽粒氮素积累量、氮素转运及其利用效率。2015—2016 年和 2016—2017 年 RT 处理水分利用效率较 NT 处理分别提高 8.45% 和 8.92%, 2015—2016 年较 DT 处理提高 5.24%; 2016—2017 年 RT 处理氮肥偏生产力较 NT 和 DT 处理分别显著提高 3.68% 和 9.16%; 氮素籽粒生产效率较 NT 和 DT 处理分别显著提高 10.60% 和 4.78%。S+RT 处理花后 SPAD 下降幅度最小, 花期和成熟期均具有较高的光合速率, 产量、水分利用效率和氮肥偏生产力与 NS+DT 和 S+DT 相比分别平均提高了 12.58%, 8.53%, 7.95% 和 4.11%, 19.79%, 11.44%。因此, 秸秆还田配合轮耕措施是黄淮海南部较为适宜的节水省肥型冬小麦耕作栽培措施。

关键词: 秸秆还田; 轮耕; 冬小麦; 水氮利用效率

中图分类号: S145.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0280-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.03.042

Rotational Tillage with Straw Returning Increased Dry Matter Accumulation and Utilization Efficiency of Water and Nitrogen in Winter Wheat

GUAN Xiaokang¹, WANG Jingli¹, LIU Ying¹, YANG Mingda¹,

WANG Hezhou², WANG Huaiping³, WANG Tongchao¹

(1. Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, Agronomy College, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046; 2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of

Agricultural Science, Xinxiang, Henan 453002; 3. Xunxian Fengli Seed Industry Co. Ltd., Hebi, Henan 456250)

Abstract: The field experiment has been conducted to investigate the effects of different tillage practices and straw treatments on dry matter accumulation, nitrogen accumulation, and water, nitrogen use efficiency of winter wheat in 2015—2017. The split-plot experiment design was adopted. The main plot was straw returning (S) and no straw returning (NS). The sub-plot was deep tillage (DT), rotation tillage (RT) and no tillage (NT). The results showed that, compared with NS treatment, S treatment significantly increased flag leaf SPAD, photosynthetic rate and aboveground biomass in mature stage of winter wheat, while the yield of winter wheat was not significantly increased. The yield of winter wheat was significantly influenced by tillage practices. Yield of RT was significantly higher than that of DT for 4.88% and 9.05% in 2015—2016 and 2016—2017 respectively, and it was significantly higher than that of NT for 3.64% in 2016—2017. Significant interaction existed between straw returning and tillage practices. Yield of S+RT was significantly higher than that of NS+DT for 8.68% and 16.98% in 2015—2016 and 2016—2017 respectively. Compared with NS treatment, S treatment significantly increased aboveground N accumulation and water use efficiency of

收稿日期: 2017-12-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(31471452, 31601258); 国家重点研发计划项目(2017YFD0301106)

第一作者: 关小康(1984—), 男, 讲师, 主要从事作物抗旱节水栽培理论与技术研究。E-mail: guanxk06@126.com

通信作者: 王同朝(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事作物抗旱节水栽培理论与技术研究。E-mail: wtcwrn@126.com

winter wheat. RT treatment significantly increased water use efficiency, aboveground N accumulation, kernel N accumulation, nutritional organs N operation rate and N grain production efficiency. Water use efficiency of RT was significantly higher than that of NT for 8.45% and 8.92% in 2015—2016 and 2016—2017 respectively, and it was higher than that of DT for 5.24% in 2015—2016. The partial productivity of N fertilizer in RT was higher than in NT and DT for 3.68% and 9.16% respectively, and N grain production efficiency of RT was significantly higher than that of NT and DT for 10.60% and 4.78%. There was a small decline in SPAD after anthesis, higher photosynthesis rate in anthesis and mature stage of winter wheat existed in S+RT treatment, that yield, water use efficiency, N partial productivity were significantly higher than those of NS+DT and S+DT treatments for 12.58% and 8.53%, 7.95% and 4.11%, 19.79% and 11.44% respectively. Therefore, the treatment of straw returning with rotational tillage was suitable for Huang-Huai-Hai Plain as a water and N saving cultivation practice.

Keywords: straw returning; rotational tillage; winter wheat; water and nitrogen utilization efficiency

优良的土壤结构是实现作物高产稳产的基础^[1]。土壤耕作直接作用于土壤,通过改变土壤结构改善土壤水分条件,促进土壤养分的循环与转化,为作物创造良好的耕层环境,从而促进植株生长和氮素吸收运转^[2]。已有研究^[3]表明,以少、免耕结合秸秆还田措施的保护性耕作不仅能有效降低土壤养分流失,而且能够提高土壤养分供应能力,改善土壤生物学活性,提高养分利用效率进而增产。黄明等^[4]研究表明,免耕和秸秆覆盖结合能延缓小麦叶片的衰老,降低旗叶绿素降解,改善其光合特性,从而使干物质积累量增加,提高小麦产量。然而,长期采用单一耕作模式容易产生不利于作物生长的土壤条件,如长期免耕或深松秸秆覆盖后会出现养分及杂草种子在土壤表层富集现象^[5],导致作物早衰、倒伏问题加重,降低作物产量^[6]。长期深耕则易引起耕层土壤养分下移,甚至会造成硝态氮淋失^[7],并且连续深耕增加了动力消耗,提高成本,并导致农田碳排放加剧^[8]。针对连续单一耕作模式存在的问题,国内研究人员提出轮耕概念并建立了适用于不同区域的土壤轮耕技术体系^[9-10]。土壤轮耕继承并发扬了深耕、免耕等耕作方式的优点,可以有效避免长期单一耕作模式下的不利因素,并通过秸秆还田技术有效促进土壤培肥,对维持农田土壤质量健康具有重要作用。

针对轮耕技术体系前人进行的大量研究,蒋向等^[11]研究发现,旋耕2年后再深耕可以有效打破连续旋耕形成的犁底层,并且2年后深耕也未造成新犁底层。在长期免耕的农田上进行适度深耕能够打破机械压迫形成的紧实土壤,降低深层土壤容重,增加土壤孔隙度,改善土壤水气热条件,为作物根系生长创造疏松深厚的土壤环境^[12],从而实现作物增产^[13]。陈宁宁等^[14]的研究也表明,免耕/深松、深松/翻耕和翻耕/免耕的轮耕模式较连续翻耕有利于耕层土壤物理结构构建,免耕/深松模式更有利于耕层形成土壤

大团聚体,稳定的土壤结构利于土壤蓄水保墒和作物增产。此外,秸秆还田也可以改善土壤结构,增强土壤蓄水保墒能力,促进土壤肥力提升和养分循环,提高作物的产量^[15]。秸秆还田结合适宜的轮耕在改变土壤物理结构的基础上,改善土壤养分及水分状况,进而影响植株地上部生理特性、植株对水分和氮素的积累及转运,从而实现作物对水分、氮素的高效利用。然而,有关以深耕/免耕为主并结合秸秆还田措施的轮耕模式对作物生长发育、干物质积累及氮素运转的研究仍然有待深入研究。因此,本研究在长期定位试验的基础上,探究连年深耕、连年免耕及深耕/免耕模式并结合秸秆还田对冬小麦光合特性、氮素转运及水氮利用效率的影响。旨在优化耕作管理,提高冬小麦水氮素利用效率,为黄淮海南部地区选取适宜的耕作模式提供科学依据和技术支撑。

1 试验材料与设计

1.1 试验地概况

2012年10月在河南省商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站(34°34' N, 115°33' E)开始进行大田耕作模式定位试验。本研究在长期定位试验的基础上主要研究了2015年10月至2017年6月连续2年小麦季试验效应。商丘试验站海拔55.6 m,年均气温13.9℃,无霜期180~230 d,年蒸发量1 735 mm,年降水量708 mm,而小麦生育期内近30年的平均降水量为232.8 mm,仅占年降水量的32.9%。试验地土壤类型为潮土,成土母质为黄河冲积后的沉淀物,0—40 cm土层平均土壤容重为1.45 g/cm³,田间持水量为25.21%(质量含水量),地下水埋深2.9~6.8 m。2015年和2016年冬小麦播前试验地0—40 cm耕层土壤全氮含量分别为0.86, 0.95 g/kg,有机质分别为16.39, 15.22 g/kg,速效磷分别为18.52, 10.69 g/kg,速效钾分别为143.02, 131.78 g/kg。2015—2016年冬小麦生育期内降水量为188.8 mm, 2016—2017年冬小麦生育期内降水量为265.0

mm,降水量见图 1。

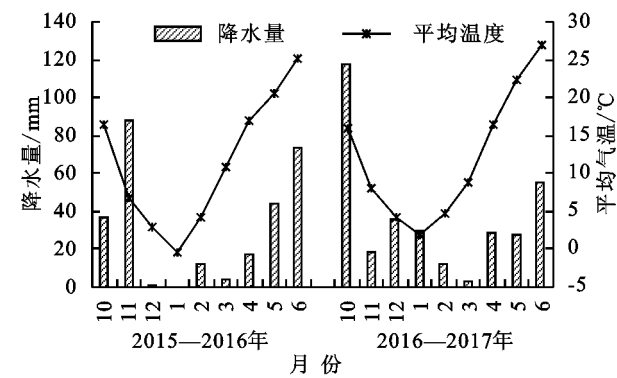


图 1 小麦生育期降水量与月平均气温

1.2 试验设计

试验采用双因素裂区试验设计,主区为 2 种秸秆还田处理,副区为 3 种耕作措施,共计 6 个处理组合,各处理耕作及秸秆处理如表 1 所示,3 次重复,共 18 个小区,每小区大小为 10 m×12 m。主区之间留有 2 m 观测通道,副区之间留出 1 m 的观测通道,试验

区周围 2 m 范围为保护区。

2015—2016 年和 2016—2017 年冬小麦供试品种均为‘矮抗 58’,冬小麦播种日期分别为 2015 年 10 月 15 日和 2016 年 10 月 19 日,播量均为 150 kg/hm²;分别于 2016 年 6 月 4 日和 2017 年 6 月 3 日收获。2015—2016 年冬小麦播前复合肥料(N—P₂O₅—K₂O=20:20:6)600 kg/hm²,拔节期(2016 年 2 月 24 日)追施复合肥料(N—P₂O₅—K₂O=30:10:0)600 kg/hm²;2016—2017 年冬小麦播前施掺混肥料(N—P₂O₅—K₂O=20:20:5)600 kg/hm²,拔节期(2017 年 2 月 19 日)追施复合肥料(N—P₂O₅—K₂O=30:10:0)600 kg/hm²。2015—2016 年冬小麦生育期内降雨量为 188.8 mm,因此在返青期—拔节期间(2016 年 3 月 2 日)采用低压喷灌灌水 45 mm,2016—2017 年冬小麦生育期内降雨量为 265.0 mm,试验期间没有灌溉。试验期间喷施农药防治病虫害,其他田间管理均与一般大田管理相同。

表 1 各试验处理描述

秸秆处理	耕作措施	代码	处理措施
秸秆不还田(NS)	深耕(DT)	NS+DT	玉米秸秆全部清除,2012 年 10 月开始每年冬小麦种前均进行深耕(耕深 30 cm 左右);试验期 2015 年 10 月、2016 年 10 月均深耕
	轮耕(RT)	NS+RT	玉米秸秆全部清除,2012 年 10 月开始为第 1 年深耕,每 3 年深耕 1 次;试验期 2015 年 10 月深耕后播种,2016 年 10 月免耕播种
	免耕(NT)	NS+NT	玉米秸秆全部清除,2012 年 10 月开始每年冬小麦播种前均无耕作措施;试验期 2015 年 10 月、2016 年 10 月均免耕播种
秸秆还田(S)	深耕(DT)	S+DT	玉米秸秆粉碎全量还田,还田量 11 700 kg/hm ² ;2012 年 10 月开始,耕作措施同于秸秆不还田深耕处理
	轮耕(RT)	S+RT	玉米秸秆粉碎全量还田,还田量 11 700 kg/hm ² ;2012 年 10 月开始,耕作措施同于秸秆不还田轮耕处理
	免耕(NT)	S+NT	玉米秸秆粉碎全量还田,还田量 11 700 kg/hm ² ;2012 年 10 月开始,耕作措施同于秸秆不还田免耕处理

注:耕作均在冬小麦种植前进行,前茬作物均为夏玉米,秸秆还田即经过秸秆粉碎机粉碎后全量均匀抛洒地表还田,秸秆不还田为人工清除植株地上部分;深耕处理采用铧式犁翻耕,作业深度为 30 cm,深耕作业后均耙地 2 遍。

1.3 测定指标

采用 SPAD—502(Konica Minolta,Japan)在冬小麦开花期和灌浆期测定旗叶的 SPAD 值;采用便携式光合测定系统(Li—6400,LI—COR, USA)在冬小麦开花期和灌浆期测定冬小麦旗叶的净光合速率(P_n);在返青期、拔节期、开花期、成熟期于每个小区选取长势均匀一致 30 cm 样段的冬小麦植株在 105 ℃条件下杀青 30 min,80 ℃下烘干至恒重,测定生物量;分别在开花期和成熟期选取植株分样、烘干、粉碎后采用全自动凯氏定氮仪(海能 K1100,中国)测定植株各器官全氮含量;在小麦播种后,采用时域反射仪(TRIME,German)测定土壤体积含水量,在播期—返青期的每个生育时期测定 1 次,在拔节期—收获期间隔 10 d 测定 1 次,测定深度分别为 0—20,20—40,40—

60,60—80,80—100,100—120,120—140 cm。每个处理收获 3 个 1 m² 样方,籽粒脱粒后晒干,测定产量;同时,每个小区选取 10 株进行室内考种。

1.4 指标计算

1.4.1 氮素运转效率

营养器官氮素运转量(kg/hm²)=开花期营养器官氮素积累量(kg/hm²)—成熟期营养器官氮素积累量(kg/hm²)

营养器官氮素运转率(%)=营养器官氮素运转量(kg/hm²)/开花期营养器官氮素积累量(kg/hm²)×100%

氮素收获指数(%)=籽粒氮素积累量(kg/hm²)/植株总氮素积累量(kg/hm²)×100%

氮肥偏生产力(kg/kg)=施氮区产量(kg/hm²)/施氮量(kg/hm²)

氮素籽粒生产效率(kg/kg)=籽粒产量(kg/hm²)/植株总氮素积累量(kg/hm²)

1.4.2 农田耗水量与水分利用效率 采用水分平衡法,按照公式计算农田耗水量(ET_a ,mm)。

$$ET_a = I + P + U - R - F \pm \Delta W$$

式中: I 为时段内灌水量(mm); P 为时段内有效降水量(mm); U 为地下水通过毛管作用上移补给作物的水量(mm),商丘试验点地下水埋深3 m以下,因此地下水补给量视为0; R 为地表径流量(mm),试验地地势平坦,可视地表径流为0; F 为深层渗漏量(mm),商丘试点深层渗漏为0; ΔW 为时段内土壤储水变化量,即土壤贮水消耗量。

土壤贮水消耗量(ΔW)计算公式为:

$$\Delta W = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2})$$

式中: i 为土层编号; n 为总土层数; γ_i 为第 i 层土壤容重(g/cm³); H_i 为第 i 层土壤厚度(cm); θ_{i1} 和 θ_{i2} 分别为第 i 层土壤时段初和时段末土壤质量含水量(%)。

土壤质量含水量计算公式为:

$$\theta = W/\gamma$$

式中: θ 为质量含水量(%); W 为采用TRIME测定所得的体积含水量(%); γ 为土壤容重(g/cm³)。

水分利用效率(WUE,kg/(hm²·mm))=籽粒产量(kg/hm²)/耗水量(mm)

1.5 数据处理及统计分析

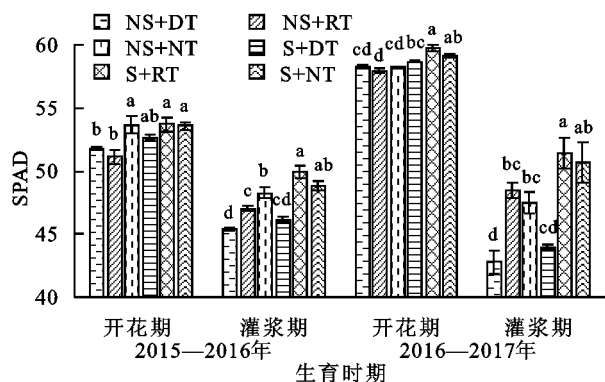
采用Excel 2013对试验数据进行处理分析与作图,并用SAS V8.0进行单因素方差分析和2因素裂区试验方差分析,采用LSD最小显著极差法进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田和耕作措施对冬小麦生长发育的影响

2.1.1 冬小麦 SPAD 值 由图2可知,秸秆还田显著增加2015—2016年和2016—2017年冬小麦开花期、灌浆期SPAD。2015—2016年从开花期到灌浆期S处理下降幅度为7.62%~14.14%,NS处理下降幅度为8.70%~14.06%;2016—2017年从开花期到灌浆期S处理下降幅度为16.25%~33.48%,NS处理下降幅度为15.59%~36.15%,2年S+RT处理开花期到灌浆期SPAD下降幅度均最低,2015—2016年和2016—2017年分别为7.62%和16.25%。耕作处理显著影响两年灌浆期冬小麦旗叶的SPAD。2015—2016年秸秆还田下RT处理冬小麦开花期和灌浆期SPAD较DT处理分别高1.90%和3.68%,秸秆不还田下RT处理冬小麦灌浆期SPAD较DT处理高8.07%;S+RT处理灌浆期SPAD较NS+DT显著高9.98%。2016—2017年秸秆还田下RT

处理冬小麦开花期和灌浆期SPAD较DT处理分别高1.75%和16.82%,秸秆不还田下RT处理冬小麦灌浆期SPAD较DT处理高13.25%;S+RT处理灌浆期SPAD较NS+DT显著高20.09%。



注:同一组内不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图2 秸秆处理与耕作措施对冬小麦各生育期SPAD的影响

2.1.2 冬小麦光合速率 由图3可知,秸秆还田显著增加2015—2016年和2016—2017年冬小麦开花期和灌浆期旗叶光合速率。耕作处理对2年冬小麦开花期和灌浆期冬小麦旗叶的光合速率影响显著。2015—2016年开花期秸秆还田下RT处理和DT处理冬小麦光合速率较NT处理分别高18.72%和20.47%,秸秆不还田下RT处理和DT处理冬小麦光合速率较NT处理分别高20.77%和20.43%;灌浆期秸秆还田下RT处理冬小麦光合速率较DT处理高7.10%,秸秆不还田下RT处理冬小麦光合速率较DT处理高15.33%;S+RT处理灌浆期光合速率较NS+DT处理显著高22.53%。2016—2017年开花期秸秆还田下RT处理冬小麦光合速率较NT处理高4.10%,秸秆不还田下RT处理冬小麦光合速率较DT处理高5.75%;灌浆期秸秆还田下RT处理冬小麦光合速率较DT处理高31.34%,秸秆不还田下RT处理冬小麦光合速率较DT处理高33.63%;S+RT处理灌浆期光合速率较NS+DT处理显著高34.41%。

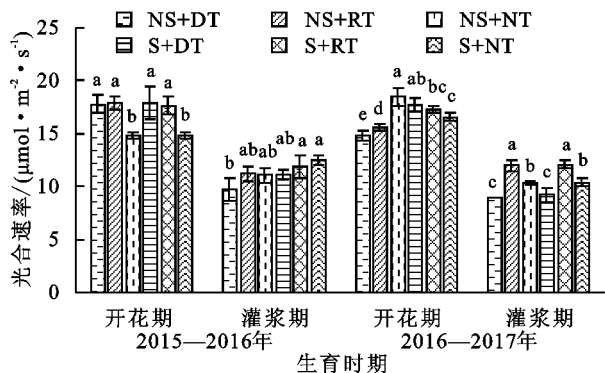


图3 秸秆处理与耕作措施对冬小麦各生育期光合速率的影响

2.2 秸秆还田和耕作措施冬小麦生物量和产量的影响

2.2.1 冬小麦生物量 由图4可知,2015—2016年

秸秆还田冬小麦返青期和拔节期的生物量与秸秆不还田差异不显著,但开花期和成熟期生物量较秸秆不还田显著增加 4.78%~18.89%。2016—2017 年秸秆还田冬小麦开花期、成熟期生物量较秸秆不还田显著增加 2.19%~5.70%。耕作处理显著影响两年冬小麦开花期和成熟期生物量。2015—2016 年拔节期秸秆还田下 RT 处理和 DT 处理冬小麦生物量较 NT 处理分别高 11.63%和 8.94%,秸秆不还田下 RT 处理和 DT 处理冬小麦生物量较 NT 处理分别高 2.81%和 13.69%;开花期秸秆还田下 RT 处理冬小麦生物量较 DT 处理低 12.46%,秸秆不还田下 RT

处理冬小麦生物量较 DT 处理高 6.60%;成熟期秸秆还田下 RT 处理冬小麦生物量较 NT 处理高 4.52%,秸秆不还田下 RT 处理冬小麦生物量较 DT 处理高 3.18%;成熟期 S+RT 处理冬小麦生物量显著高于 NS+DT 处理 9.52%。2016—2017 年度开花期秸秆还田下 RT 处理冬小麦生物量较 DT 处理高 13.61%,秸秆不还田下 RT 处理较 DT 处理高 7.93%;成熟期秸秆还田下 RT 处理冬小麦生物量较 DT 处理高 3.65%,秸秆不还田下 RT 处理冬小麦生物量较 DT 处理高 3.58%;成熟期 S+RT 处理较 NS+DT 处理显著高 6.81%。

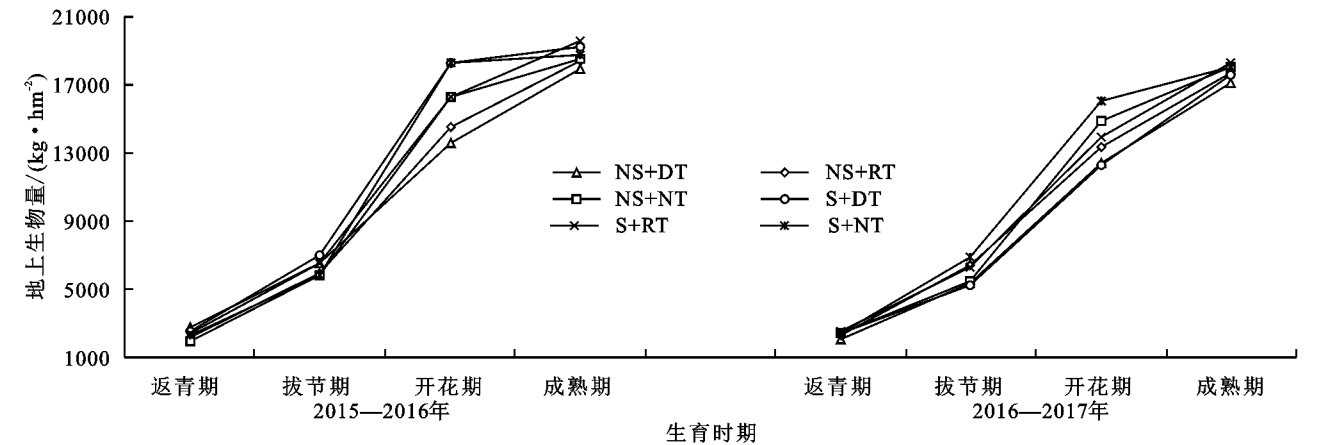


图 4 秸秆处理与耕作措施对冬小麦各生育期地上生物量的影响

2.2.2 冬小麦产量及构成要素 由表 2 可知,秸秆处理方式显著影响 2015—2016 年和 2016—2017 年冬小麦穗粒数、2015—2016 年冬小麦千粒重($P<0.05$),耕作处理和秸秆处理两者交互作用显著影响 2 年度冬小麦的穗粒数、千粒重和产量及其 2016—2017 年有效穗数($P<0.05$)。2 年度秸秆还田处理平均穗粒数、千粒重均高于秸秆不还田处理,2015—2016 年和 2016—2017 年秸秆还田冬小麦产量较秸秆不还田分别高 1.24%和 1.63%。2015—2016 年秸秆还田下 RT 处理冬小麦有效穗数和穗粒数较 NT 处理分别高 3.26%和 11.26%,千粒重和产量分

别较 DT 处理高 4.32%和 6.42%;秸秆不还田下 RT 处理冬小麦有效穗数、千粒重和产量分别较 DT 处理高 3.60%,4.73%,3.31%;S+RT 处理冬小麦穗粒数、千粒重和产量较 NS+DT 处理分别显著高 5.19%,8.78%,8.68%。2016—2017 年秸秆还田下 RT 处理冬小麦有效穗数、穗粒数、千粒重和产量较 NT 处理分别高 6.51%,8.01%,1.35%,13.88%;秸秆不还田下 RT 处理冬小麦有效穗数、穗粒数、千粒重和产量分别较 DT 处理高 9.87%,2.96%,9.76%,6.53%;S+RT 处理有效穗数、穗粒数、千粒重和产量显著高于 NS+DT 处理,分别高 8.90%,9.61%,9.76%,16.98%。

表 2 不同处理对冬小麦产量及其构成要素的影响

处理		2015—2016 年				2016—2017 年			
		有效穗数/ ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数	千粒重/ g	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	有效穗数/ ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数	千粒重/ g	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
NS	DT	555.0ab	38.5b	44.4c	8497.0d	515.6d	40.6c	41.0c	7546.0c
	RT	575.0a	35.9c	46.5b	8778.0bc	566.5a	41.8bc	45.0a	8038.7b
	NT	560.0ab	36.0c	48.2a	9012.0ab	539.9bc	42.4b	44.7a	8522.2a
	均值	563.4	36.8	46.3	8762.3	540.7	41.58	43.6	8035.6
S	DT	557.5ab	41.8a	46.3b	8677.4cd	535.8cd	42.0bc	43.4b	7920.2bc
	RT	566.3ab	40.5a	48.3a	9234.8a	561.5ab	44.5a	45.0a	8827.2a
	NT	548.4b	36.4c	48.2a	8700.2cd	527.2cd	41.2bc	44.4ab	7751.6bc
	均值	557.4	39.6	47.6	8870.8	541.5	42.58	44.3	8166.4
秸秆处理		1.29	35.45**	34.25**	2.64	0.03	8.97*	4.41	1.73
F 值 耕作处理		3.87	23.91**	61.88**	13.48**	23.26**	10.84**	26.97**	16.64**
交互作用		0.67	7.17*	7.72*	11.33**	4.19	11.78**	6.94*	21.98**

注:同一栏中不同字母表示差异显著($P<0.05$);*表示在 0.05 水平上差异显著;**表示在 0.01 水平上差异极显著。下同。

2.3 冬小麦氮素积累及其水氮利用效率

2.3.1 氮素在冬小麦茎、叶、穗中的分配 由表 3 可知,2016—2017 年秸秆还田方式和耕作措施均对冬小麦的氮素积累量具有显著影响。从冬小麦开花期到成熟期氮素在茎、叶和颖壳中的分配比例逐渐下降,其中开花期氮素分配比例表现为茎、叶>颖壳,成熟期氮素分配比例由大到小为籽粒>叶、茎>颖壳。

2016—2017 年秸秆还田处理与秸秆不还田处理相比,在开花期和成熟期小麦植株氮素总积累量分别显著提高 10.25%和 3.81%。开花期秸秆还田较秸秆不还田处理茎、叶、颖壳平均氮素积累量分别提高 8.94%,15.12%,3.71%,成熟期秸秆还田较秸秆不还田处理籽粒氮素积累量提高了 1.78%。开花期秸

秆还田下 RT 处理较 DT 处理显著增加了小麦氮素总积累量 18.36%,茎、叶、颖壳氮素积累量分别提高了 25.03%,19.70%,4.14%;秸秆不还田下 RT 处理小麦氮素总积累量较 DT 处理提高 1.79%,茎和叶氮素积累量分别提高 0.69%和 6.02%。成熟期秸秆还田下 RT 处理较 DT 处理小麦氮素总积累量显著增加了 8.87%,颖壳和籽粒的氮素积累量分别提高 24.27%和 8.76%;秸秆不还田下 RT 与 DT 处理小麦氮素总积累量差异不显著,但籽粒的氮素积累量 RT 处理较 DT 处理提高 7.81%。S+RT 处理冬小麦开花期和成熟期的氮素总积累量,成熟期籽粒氮素积累量均高于其他处理,分别比 NS+DT 处理增加 21.52%,11.74%,21.86%。

表 3 不同处理对开花期和成熟期各器官氮素积累量的影响

生育期	处理	植株氮素总积累量/ (kg·hm ⁻²)	叶氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	茎氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	颖壳氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	籽粒氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)
开花期	NS+DT	188.75c	75.79d(40.15bc)	71.81d(38.05b)	41.15c(21.81ab)	
	NS+RT	192.12c	76.31d(39.73c)	76.13cd(39.63a)	39.69c(20.64bc)	
	NS+NT	213.66b	85.35c(39.99bc)	78.04bc(36.52c)	50.28a(23.49a)	
	S+DT	193.79c	76.59d(39.53c)	74.25cd(38.29b)	42.95bc(22.81ab)	
	S+RT	229.37a	95.76b(41.75ab)	88.88a(38.75ab)	44.73abc(19.50c)	
	S+NT	232.22a	100.99a(43.49a)	83.02b(35.74c)	48.31ab(20.77c)	
	秸秆处理	58.05**	158.86** (9.26*)	24.11** (2.15)	1.26(4.93)	
成熟期	耕作处理	47.97**	107.50** (4.19)	17.74** (30.95**)	10.89** (6.49*)	
	交互作用	12.25**	35.89** (5.03*)	5.12* (1.24)	1.96(2.91)	
	NS+DT	224.52b	32.14b(15.73a)	23.96c(11.73bc)	12.35a(6.04a)	135.78c(66.49b)
	NS+RT	223.32b	24.21c(12.05b)	21.96c(10.89c)	8.88b(4.41bcd)	146.39b(72.65a)
	NS+NT	252.28a	39.63a(17.26a)	28.65b(12.50b)	8.77b(3.82d)	152.4b(66.41b)
	S+DT	233.67b	25.09c(11.89b)	25.13c(11.91bc)	8.57b(4.06cd)	152.14b(72.13a)
	S+RT	254.40a	28.95bc(12.80b)	24.61c(10.88c)	10.65a(4.71bc)	165.46a(73.16a)
F 值	S+NT	253.42a	39.44a(17.03a)	31.96a(13.80a)	11.53a(4.98b)	148.33b(64.19b)
	秸秆处理	28.94**	0.50(4.65)	8.66* (2.29)	0.31(0.86)	33.71** (4.75)
	耕作处理	28.71**	46.96** (30.30**)	28.64** (19.17**)	0.82(4.12)	14.79** (52.00**)
	交互作用	12.09**	8.48* (7.52*)	0.61(1.9)	21.05** (24.95**)	16.61** (14.05**)

注:括号内数值为氮素分配比例及差异 F 值。

2.3.2 冬小麦氮素转运及其利用率 由表 4 可知,秸秆处理对 2016—2017 年冬小麦营养器官氮素转运量和氮素籽粒生产效率影响显著($P<0.05$)。耕作措施对营养器官氮素转运量、转运率、氮肥偏生产力、氮素生产指数及其氮素籽粒生产效率影响显著($P<0.05$)。秸秆处理和耕作措施两者交互作用对冬小麦营养器官氮素转运量、氮肥偏生产力、氮素生产指数影响和氮素籽粒生产效率具有显著影响($P<0.05$)。秸秆还田营养器官氮素转运量较秸秆不还田高 7.51%;秸秆还田下 RT 处理冬小麦氮素转运量、运转率、氮肥偏生产力、氮素生产指数和氮素籽粒生产效率较 NT 处理分别高 17.28%,11.33%,13.85%,8.62%,11.24%;秸秆不还田 RT 处理冬小麦氮素转运量、氮运转率、氮素生产指数和氮素籽粒生产效率较 DT 处理分别提高了 13.99%,9.90%,9.39%,8.36%,8.09%。S+RT 处理氮素转运量、运转率、氮肥偏生产力和氮素生产指数均高于其他处理,较

NS+DT 处理分别提高了 33.66%,6.47%,19.85%,6.41%,氮素籽粒生产效率较 S+NT 高 11.24%。

2.3.3 冬小麦耗水量及其水分利用率 由表 5 可知,2015—2016 年秸秆还田下 RT 处理土壤贮水消耗量较 NT 处理减少 48.22%,耗水量较 NT 处理减少 9.72%,水分利用效率较 DT 和 NT 处理分别提高了 5.23%和 16.49%。秸秆不还田下 RT 处理土壤贮水消耗量较 NT 处理减少 14.95%,耗水量较 NT 处理减少 3.71%。S+RT 处理冬小麦水分利用效率显著高于 NS+DT 和 NS+NT 处理,分别高 6.22%和 12.91%;2016—2017 年秸秆还田下 RT 处理土壤贮水消耗量 NT 处理减少 10.61%,耗水量较 NT 处理减少 10.26%,水分利用效率较 DT 和 NT 处理分别提高了 2.85%和 15.86%。秸秆不还田下 RT 处理土壤贮水消耗量 NT 处理减少 75.43%,耗水量较 NT 处理减少 8.70%,水分利用效率较 DT 处理高

7.83%。S+RT 处理冬小麦水分利用效率分别比 S +NT 和 NS+DT 显著提高了 15.86%和 10.00%。

表 4 不同处理对 2016—2017 年冬小麦植株氮素运转及氮素利用的影响

处理		营养器官氮素运转 量/(kg·hm ⁻²)	营养器官 氮素运转率/%	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	氮素收获 指数/%	氮素籽粒生产效率/ (kg·kg ⁻¹)
NS	DT	123.56d	65.53b	24.56c	69.52b	32.15b
	RT	140.85b	72.02a	26.80b	75.33a	34.75a
	NT	142.51b	65.2b	28.40a	69.44b	32.31b
	均值	135.64	67.58	26.78	71.43	33.07
S	DT	130.02c	67.16b	26.40bc	74.84a	32.67b
	RT	165.16a	72.00a	29.42a	75.93a	32.46b
	NT	140.82b	60.67c	25.84bc	67.31b	29.18c
	均值	145.34	66.61	27.22	72.70	31.45
F 值	秸秆处理	60.59**	1.03	1.74	4.75	17.84**
	耕作处理	148.49**	30.50**	16.65**	52.00**	18.36**
	交互作用	37.98**	3.70	21.80**	14.05**	8.10*

表 5 不同处理对小麦耗水量及水分利用效率的影响

处理		2015—2016 年			2016—2017 年		
		土壤贮水	耗水量/	水分利用效率/	土壤贮水	耗水量/	水分利用效率/
		消耗量/mm	mm	(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	消耗量/mm	mm	(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
NS	DT	47.23b	281.00b	29.72b	38.13b	303.14b	24.90bc
	RT	77.10a	310.89a	28.23c	34.60b	299.61b	26.85a
	NT	88.63a	322.42a	27.96c	60.70a	325.67ab	26.16ab
	均值	70.99	304.77	28.64	49.79	309.47	25.97
S	DT	55.47b	289.26b	30.00b	29.10b	294.11b	26.63a
	RT	58.90b	292.67b	31.57a	57.20a	322.22a	27.39a
	NT	87.30a	321.11a	27.10c	63.07a	328.05a	23.64c
	均值	67.22	301.01	29.55	51.30	314.79	25.89
F 值	秸秆处理	1.19	1.19	14.39**	1.79	1.79	0.05
	耕作处理	37.49**	37.32**	42.24**	16.96**	16.89**	12.57**
	交互作用	4.99*	5.03*	26.93**	5.42*	5.41*	12.05**

3 讨论

3.1 耕作措施和秸秆还田对冬小麦光合特性、生物量及产量的影响

小麦生育后期的光合性能对干物质积累和转运具有重要作用,作物光合作用除了受其遗传因素的影响外,同时还会受外部环境条件的限制。已有研究^[16]表明,不同耕作措施能通过调节土壤环境来影响作物的旗叶绿素含量和光合特性,增加后期干物质积累,提高小麦的籽粒产量。侯贤清等^[16]于宁夏南部旱区以浅耕和深松相结合的轮耕模式与传统翻耕相比,免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松模式均能显著提高小麦旗叶绿素含量,使小麦花后旗叶保持较高的光合能力,显著提高产量。张盼峰等^[17]于河南西部半干旱区的研究结果也表明,在常年旋耕后深耕,提高了小麦、玉米功能叶 SPAD 值,显著提高了净光合速率,使小麦—玉米周年产量提高了 6.7%~13.0%。本研究结果表明,耕作方式显著影响冬小麦的光合特性、生物量及产量,尤其是通过秸秆还田措施配合轮耕处理在冬小麦开花期和灌浆期均具有较高的 SPAD 和光合速率(图 1,图 2)。花后冬小麦叶片保持较高光合能力和较长的叶片功能期是提高冬小麦产量的重要的基础条件^[18]。本研究中秸秆还田配合轮耕处理花后 SPAD 和光合速率下降幅度最

低,显著提高了冬小麦的千粒重,增加了成熟期生物量和籽粒产量,两年平均产量分别比深耕、免耕处理提高了 6.86%和 2.36%(表 2)。

秸秆还田对作物产量的影响并不完全是正向增产效应^[19-20]。本研究表明与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理虽然增加成熟期生物量,但 2015—2016 年秸秆还田冬小麦产量与不还田处理相比差异不显著,2016—2017 年秸秆还田与不还田冬小麦产量与地上生物量差异均不显著,说明秸秆还田并未促进干物质向籽粒运转。张素瑜等^[21]研究指出,干旱条件下进行秸秆还田,秸秆腐解时会导致与作物争夺水分现象,加重作物的干旱程度,显著降低产量。战秀梅等^[19]的研究也表明,秸秆还田显著抑制了花后干物质从营养器官向籽粒转移的效率,从而导致产量并未显著增加。同时,本研究还发现虽然秸秆还田显著提高了冬小麦穗粒数和千粒重,但有效穗数降低影响了秸秆还田条件下冬小麦产量提升,其中 2015—2016 年秸秆还田处理冬小麦有效穗数低于不还田处理,致使秸秆还田下冬小麦产量较秸秆不还田虽然略有增加,但两者差异不显著。张姍等^[22]和陈金等^[23]研究也表明,秸秆还田会降低冬小麦的穗数。秸秆还田和轮耕处理 2 因素交互作用使得该处理冬小麦开花期和灌浆期均具有较高的 SPAD 和光合速率,且花后

SPAD 和光合速率的下降幅度最低,从而提高了冬小麦穗粒数和千粒重,增加了成熟期生物量和产量。

3.2 耕作措施和秸秆还田对冬小麦水氮利用效率的影响

作物吸收的氮素一方面用以实现营养器官生长发育,另一方面通过营养器官物质转运和花后氮素吸收利用来实现籽粒氮素供给。采用适当的耕作措施可以调节土壤团聚体大小、孔隙度、土壤水分状况等促进土壤微生物进行硝化作用,促进作物氮素吸收利用,提高作物水氮利用效率。刘世平等^[24]研究表明,轮耕(犁耕1季,旋耕3季)促进了土壤氮素矿化,增加了土壤供氮能力,连续旋耕、连续犁耕和轮耕(犁耕1季,旋耕3季)3种耕作措施下无论施肥或不施肥籽粒含氮率和累积吸氮量多以轮耕为最高。本研究发现轮耕处理显著提高了籽粒氮素积累量、营养器官氮素转运量、转运效率、植株籽粒氮素生产效率和氮肥偏生产力。张静等^[25]研究表明,秸秆还田能够有效缓解土壤氮流失,提高土壤微生物氮的固持和供给效果,增强土壤供氮水平。赵鹏等^[26]研究也认为,秸秆还田增强了氮素再利用能力,优化了氮素分配,增加籽粒含氮量,从而提高了氮转运效率和氮收获指数。本研究表明,秸秆还田显著增加了花期和成熟期植株氮素总积累量,并且显著增加了成熟期籽粒氮素积累量与分配比例,显著提高营养器官氮素向籽粒的运转量,从而提高了氮素收获指数。

提高作物水分利用效率的关键在于通过适当农艺措施增加产量,降低耗水量。虽然秸秆还田可以降低土面无效蒸发^[27],但是由于还田秸秆的培肥作用,促进小麦生长,提高小麦叶面积指数,增加小麦蒸腾量^[28],其耗水量也同时增加。赵亚丽等^[29]研究表明,秸秆还田虽然增加了冬小麦耗水量,但秸秆还田增产幅度更大,因此显著提高了水分利用效率。本研究中秸秆还田冬小麦耗水量并未降低(表5),但产量略高于秸秆不还田,因此提高了其水分利用效率,2015—2016年秸秆还田冬小麦水分利用效率较不还田处理显著提高了3.18%。从耕作措施来看,轮耕处理土壤贮水消耗量和耗水量均小于免耕处理,而大于深耕处理,这是由于免耕处理增加了花前冬小麦干物质积累,而深耕处理花前冬小麦干物质积累量显著低于轮耕处理,因此轮耕处理耗水量和土壤贮水量介于二者之间,说明轮耕处理能够增加水分入渗,增加蓄水能力^[30]。轮耕处理在耗水量低于免耕处理的条件下,显著提高了产量,因此其水分利用效率两年分别较免耕处理提高了8.92%和8.45%。柏炜霞^[31]的研究也表明,免耕/深松和深松/翻耕轮耕处理比传统连续翻耕水分利用效率提高9.6%和11.0%。秸秆还田配合适当的耕作措施能够有效提高耕层土壤蓄水量,促进了冬小麦获得较高的物质生产,2015—2016年和2016—2017年秸秆还田和轮耕

处理冬小麦的水分利用效率分别高于其他处理2.01%~18.86%和5.23%~16.49%。

4 结论

通过连续2年研究表明,秸秆还田显著增加冬小麦旗叶 SPAD 和光合速率,提高成熟期植株生物量,但并未显著增加产量;轮耕处理显著增加冬小麦产量。秸秆还田轮耕处理2年度冬小麦产量较秸秆不还田深耕处理高8.68%和16.98%。秸秆还田显著提高植株氮素积累量和水分利用效率,分别较秸秆不还田增加5.91%和6.34%。轮耕显著提高冬小麦水分利用效率,增加冬小麦氮素积累量、籽粒氮素积累量、氮素转运及其利用效率。秸秆还田结合轮耕延缓花后 SPAD 下降速度,提高花期和成熟期光合速率,增加冬小麦产量、水分利用效率和氮肥偏生产力。

参考文献:

- [1] Chen W, Liang X, Sheng X U, et al. Effects of conservation tillage on the content of carbon, nitrogen in fluvo-aquic soil [J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(2): 379-384.
- [2] 侯贤清,李荣,贾志宽,等.不同农作区土壤轮耕模式与生态效应研究进展[J].生态学报,2016,36(5):1215-1223.
- [3] 曲超,刘俊梅,胡昌录,等.氮肥施用对旱地秸秆覆盖冬小麦旗叶生理特性的影响[J].麦类作物学报,2015,35(2):207-214.
- [4] 黄明,吴金芝,李友军,等.不同耕作方式对旱作冬小麦旗叶衰老和籽粒产量的影响[J].应用生态学报,2009,20(6):1355-1361.
- [5] Fabrizio K P, Garci A F O, Costa J L, et al. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 81(1): 57-69.
- [6] 孔凡磊,袁继超,张海林,等.耕作方式对华北两熟区冬小麦生长发育和产量的影响[J].作物学报,2013,39(9):1612-1618.
- [7] 胡立峰,胡春胜,安忠民,等.不同土壤耕作法对作物产量及土壤硝态氮淋失的影响[J].水土保持学报,2005,19(6):186-189.
- [8] 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[J].环境科学,2015,36(6):2266-2273.
- [9] 高旺盛.论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势[J].中国农业科学,2007,40(12):2702-2708.
- [10] 王振忠,许学前.“久免需耕”:再谈轮耕的意义[J].江苏农业科学,1995(5):43-45.
- [11] 蒋向,贺德先,任洪志,等.轮耕对麦田土壤容重和小麦根系发育的影响[J].麦类作物学报,2012,32(4):711-715.
- [12] 谢迎新,靳海洋,孟庆阳,等.深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J].农业工程学报,2015,31(10):167-173.
- [13] 孔凡磊,陈阜,张海林,等.轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):150-155.

- [14] 陈宁宁,李军,吕薇,等.不同轮耕方式对渭北旱塬麦玉轮作田土壤物理性状与产量的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(9):1102-1111.
- [15] 赵鹏,陈阜.秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J].作物学报,2008,34(6):1014-1018.
- [16] 侯贤清,贾志宽,韩清芳,等.轮耕对宁南旱区冬小麦花后旗叶光合性能及产量的影响[J].中国农业科学,2011,44(15):3108-3117.
- [17] 张盼峰,杨鹏,焦念元,等.轮耕与隔灌对麦玉两熟光合特性的影响[J].核农学报,2014,28(1):131-137.
- [18] Thomas H, Morgan W G, Thomas A M, et al. Expression of the stay-green character introgressed into *Lolium temulentum* Ceres from a senescence mutant of *Festuca pratensis* [J]. Theoretical & Applied Genetics, 1999, 99(1/2): 92-99.
- [19] 战秀梅,李秀龙,韩晓日,等.深耕及秸秆还田对春玉米产量、花后碳氮积累及根系特征的影响[J].沈阳农业大学学报,2012,43(4):461-466.
- [20] 朱利群,张大伟,卞新民.连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作田土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响[J].土壤通报,2011,42(1):81-85.
- [21] 张素瑜,王和洲,杨明达,等.水分与玉米秸秆还田对小麦根系生长和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2016,49(13):2484-2496.
- [22] 张娜,石祖梁,杨四军,等.施氮和秸秆还田对晚播小麦养分平衡和产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(9):2714-2720.
- [23] 陈金,唐玉海,尹燕桦,等.秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响[J].作物学报,2015,41(1):160-167.
- [24] 刘世平,陆建飞,单玉华,等.稻田轮耕土壤氮素矿化及土壤供氮量的研究[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2003,24(2):36-39.
- [25] 张静,温晓霞,廖允成,等.不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):612-619.
- [26] 赵鹏,陈阜.豫北秸秆还田配施氮肥对冬小麦氮利用及土壤硝态氮的短期效应[J].中国农业大学学报,2008,13(4):19-23.
- [27] 逢焕成.秸秆覆盖对土壤环境及冬小麦产量状况的影响[J].土壤通报,1999,30(4):174-175.
- [28] 王庆杰,王宪良,李洪文,等.华北一年两熟区玉米秸秆覆盖对冬小麦生长的影响[J].农业机械学报,2017,48(8):192-198.
- [29] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等.耕作方式与秸秆还田对冬小麦一夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2014,47(17):3359-3371.
- [30] 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[J].农业工程学报,2015,31(1):107-116.
- [31] 柏炜霞.渭北旱塬小麦玉米轮作制保护性耕作与轮耕效应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2014.

(上接第 288 页)

- [27] Li Z W, Liu C, Dong Y T, et al. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China [J]. Soil & Tillage Research, 2017, 166: 1-9.
- [28] 吕金林,闫美杰,宋变兰,等.黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征[J].生态学报,2017,37(10):3385-3393.
- [29] 南雅芳,郭胜利,张彦军,等.坡向和坡位对小流域梯田土壤有机碳、氮变化的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):595-601.
- [30] 王泽,颜安,张文太.区域绿洲农田土壤有机碳分布及其影响因子研究[J].农业资源与环境学报,2014,31(4):308-312.
- [31] 邵继承,杨恒山,张庆国,等.种植年限对紫花苜蓿人工草地土壤碳、氮含量及根际土壤固氮力的影响[J].土壤通报,2010,41(3):603-607.
- [32] 李龙,姚云峰,秦富仓,等.黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素[J].应用生态学报,2015,26(5):1306-1312.
- [33] Sudeshna B, Debarati B, Swati C, et al. Comparative evaluation of three contrasting land use systems for soil carbon, microbial and biochemical indicators in North-Western Himalaya [J]. Ecological Engineering, 2017, 103: 21-30.
- [34] Van Leeuwen J P, Djukic I, Bloem J, et al. Effects of land use on soil microbial biomass, activity and community structure at different soil depths in the Danube floodplain [J]. European Journal of Soil Biology, 2017, 79: 14-20.
- [35] 付勇,庄丽,王仲科,等.新疆野生多伞阿魏生境土壤理化性质和土壤微生物[J].生态学报,2012,32(10):3279-3287.
- [36] 薛莲,刘国彬,戴全厚,等.不同植被恢复模式对黄土丘陵区侵蚀土壤微生物量的影响[J].自然资源学报,2007,22(1):20-27.
- [37] 吴然,康峰峰,韩海荣,等.环境因子对山西太岳山土壤微生物量的影响[J].土壤通报,2016,47(5):1126-1133.
- [38] 赵彤,闫浩,蒋跃利,等.黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J].生态学报,2013,33(18):5615-5622.
- [39] Shipra S, Mastro R E, Ram L C, et al. Rhizosphere soil microbial index of tree species in a coal mining ecosystem [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(9): 1824-1832.