

土壤耕作和施肥方式对夏玉米干物质积累与产量的影响

周宝元, 孙雪芳, 丁在松, 马玮, 赵明

(中国农业科学院作物科学研究所/农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 【目的】改善土壤耕作方式和氮肥施用技术是进一步提高玉米产量和氮肥利用效率的重要措施。本研究拟通过分析浅旋、免耕和条带深松 3 种耕作方式下缓释肥和常规施肥对夏玉米干物质积累、转运及光合特性的影响, 阐明其产量及氮肥效率差异形成的生理过程。【方法】试验于 2013—2014 年在河南新乡进行。采用裂区设计, 耕作方式为主区, 设浅旋耕作 (rotary tillage, R), 免耕直播 (no-tillage, N) 和条带深松 (sub-soiling, S) 3 种耕作方式; 肥料类型为副区, 设缓释肥 (slow release fertilizer, SRF) 和常规施肥 (conventional compound fertilizer, CCF) 2 个处理。【结果】与传统施肥和土壤耕作方式比, 施用缓释肥与条带深松耕作均能维持植株开花后较高的叶面积指数和光合速率, 且条带深松与缓释肥耦合处理的值最大。成熟期, 3 种耕作方式下, 缓释肥处理叶面积指数降幅两年平均分别低于常规施肥处理 7.5% (N)、9.7% (R) 和 11.8% (S); 缓释肥处理净光合速率降幅两年平均分别低于常规施肥处理 7.3% (N)、11.5% (R) 和 16.8% (S)。条带深松耕作下缓释肥处理 LAI 高于其他处理 16.0%—47.9%, 穗位叶光合速率较其他处理高 14.5%—52.3%。花后较高的叶面积指数和光合速率可促进玉米中后期干物质积累速率及积累持续期的增加, 从而显著提高花后光合产物的积累量及同化量。3 种耕作方式下, 缓释肥处理花后干物质同化量较常规施肥处理两年平均分别提高 1.5% (N)、21.4% (R) 和 24.4% (S); 缓释肥处理花后干物质积累量较常规施肥处理两年平均分别提高 11.0% (N)、12.2% (R) 和 17.0% (S)。其中条带深松耕作与缓释肥耦合处理花后干物质积累量和同化量显著高于其他处理, 两年平均增幅分别为 13.4%—28.9% 和 17.4%—39.6%。玉米花后干物质积累及同化量的增加是玉米籽粒产量提高的主要原因。因此, 施用缓释肥通过增加千粒重, 条带深松耕作通过增加收获穗数分别显著提高夏玉米产量; 条带深松与缓释肥耦合处理产量显著高于其他处理, 增幅为 9.2%—23.2%。【结论】条带深松满足了作物对氮素的空间要求, 缓释肥满足了作物对氮素的时间要求, 施用缓释肥并结合条带深松, 可有效调控土壤的营养供应状况, 提高土壤氮素供应与作物需氮的时空吻合度, 有利于实现黄淮海夏玉米高产高效及生态安全生产的目标。

关键词: 夏玉米; 缓释肥; 耕作方式; 干物质积累与转运; 产量

Effect of Tillage Practice and Fertilization on Dry Matter Accumulation and Grain Yield of Summer Maize (*Zea Mays* L.)

ZHOU BaoYuan, SUN XueFang, DING ZaiSong, MA Wei, ZHAO Ming

(Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Cultivation, Ministry of Agriculture, Beijing 100081)

Abstract: 【Objective】 Soil tillage practice and fertilization have remarkable influence on crop yield and nitrogen use efficiency. The objective of this study was to clarify physiological reason for differences of maize yield and nitrogen efficiency by exploring the effects of the slow release fertilizer on dry matter accumulation and transportation, and characteristics of

收稿日期: 2016-07-11; 接受日期: 2016-09-23

基金项目: 国家科技支撑计划 (2013BAD07B00)、国家重点研发计划 (2016YFD0300103)、国家玉米产业技术体系 (CRRS-02)

联系方式: 周宝元, E-mail: zhoubaoyuan2008@163.com. 通信作者赵明, E-mail: zhaomingcau@163.net. 通信作者马玮, E-mail: weiwei_8200@126.com

photosynthesis of summer maize under different soil tillages. 【Method】 A field experiment was conducted at Xinxiang, Henan province from 2013 to 2014. The experimental design was a split plot. The main plot was three soil tillage management, rototilling (R), no-tillage (N) and sub-soiling (S), and the subplot was nitrogen application, N 270 kg·hm⁻² slow release fertilizer treatment (SRF), and N 270 kg·hm⁻² conventional compound fertilizer with two applications (CCF) (40% as basal application and 60% at the beginning of male tetrad stage). 【Result】 Compared with conventional fertilization and soil tillage practices, the application of slow release fertilizer and the sub-soiling tillage significantly increased post-silking leaf area (LAI) and photosynthetic rate (P_n) of maize. At maturity, the decrease in LAI for SRF was 7.5% (N), 9.7% (R), and 11.8% (S) lower than those for CCF; the decrease in P_n for SRF was 7.3% (N), 11.5% (R), and 16.8% (S) lower than those for CCF averaged the two years. The LAI of the slow release fertilizer under the sub-soiling tillage (S-SRF) increased by 16.0%-47.9%, and the P_n increased by 14.5%-52.3% than that of other treatments. Higher post-silking LAI and P_n promoted the post-silking dry matter accumulation rate and duration increased, eventually increased post-silking dry matter accumulation and its transportation to grain. The averaged dry matter assimilation post-silking of applying the slow release fertilizer across two years were 1.5%, 21.4% and 24.4% higher, and the averaged dry matter accumulation post-silking of applying the slow release fertilizer across two years were 11%, 12.2% and 17% higher, respectively, compared to those in the conventional fertilizer treatment under rototilling, no-tillage, and sub-soiling. The post-silking dry matter accumulation and assimilation of S-SRF were significantly higher than that in other treatments, increased by 13.4%-28.9% and 17.4%-39.6%, respectively. The post-silking dry matter accumulation and assimilation were the main reason for yield increase. As a result, the application of slow release fertilizer and the sub-soiling tillage significantly improved the grain yield of summer maize by increasing 1000-kernel weight and harvest ear numbers, respectively. Among the treatments, the yield of the slow release fertilizer under the sub-soiling tillage (S-SRF) was 9.2%-23.2% higher than that in other treatments. 【Conclusion】 The sub-soiling tillage improved the spatial distribution of soil nitrogen, and the slow release fertilizer improved the temporal distribution of soil nitrogen. The integrated sub-soiling and slow release fertilizer improved N supply corresponded to maize critical growth stages and matched N uptake, which provided an approach for enhancing the nitrogen fertilizer use efficiency and grain yield in Huang-Huai-Hai plain.

Key words: summer maize; slow-release fertilizer; soil tillage; dry matter accumulation and transportation; grain yield

0 引言

【研究意义】改善土壤耕作方式和氮肥施用技术是同步提高作物产量和氮肥利用效率的重要措施^[1-2]。研究耕作方式和肥料类型对玉米干物质积累与转运的影响,可更好地协调作物生长发育对肥料的需求与土壤氮肥供应,高效利用氮肥,增加产量,并实现环境友好。【前人研究进展】黄淮海平原夏玉米生长季高温多雨,农民习惯采用的传统施肥方式常将大部分的氮肥(60%)在玉米播种或生育前期施用,而多半常规速效化肥由淋失、挥发等途径损失掉,不仅造成资源浪费和环境污染^[3],也常常使玉米生长发育后期发生脱肥早衰,导致不同程度的减产^[4-5]。与常规化学肥料比,缓/控释肥具有肥效期长且稳定的特点,能源源不断地供给养分,一次施用能满足玉米在整个生育期对养分的需求,减少营养元素的损失,提高作物产量和肥料利用效率^[5-7]。前人研究表明,施用玉米缓/控释肥比相应等养分含量的普通肥料处理增产 7.6%—21.1%,土壤剖面硝态氮累积量降低 20%—70%,降低了地下水硝态氮污染的生态风险^[6,8-9]。除了肥料类型,

土壤耕作等栽培措施对作物生长发育及肥料利用效率也存在较大影响^[2,10-11]。在黄淮海平原,由于传统的耕作措施常采用机械灭茬加旋耕或免耕直播,常年机械压实导致土壤耕层变浅,容重增加,产生坚硬的犁底层,限制土壤水分、养分、气体的运动,抑制作物根系的生长^[12-13],进而造成玉米的倒伏及产量降低^[13-14]。深松耕作可以有效打破土壤犁底层,降低容重,增加孔隙度,提高土壤蓄水能力^[15-16],为玉米生长创造适宜的土壤环境,增强植株根系从土壤中吸收水分和养分的能力,从而提高作物产量^[17-18]。玉米产量是由植株干物质的积累分配与转移特性所决定的,提高干物质的生产能力及花后干物质向籽粒的转移能力是提高玉米籽粒产量的有效途径^[19-21]。【本研究切入点】目前,关于耕作方式与缓/控释肥耦合对玉米水氮吸收利用及产量的影响已有部分报道^[2,22],但缺乏从整个生育期干物质积累动态及花后物质转运与同化角度系统分析耕作方式与缓/控释肥耦合影响玉米产量的研究。【拟解决的关键问题】本研究通过田间试验比较了在灭茬旋耕、免耕直播和条带深松 3 种耕作方式下施用缓释肥对玉米干物质积累过程及花前、花

后物质生产与转运的影响,并结合分析玉米叶面积指数动态及光合速率的差异进一步阐明耕作方式与缓释肥耦合的作用效果与增产机理,旨在为黄淮海地区夏玉米高产高效生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2013—2014 年在中国农业科学院河南新乡 (37°41'02"N, 116°37'23"E) 试验基地进行。该区位于黄淮海平原区,属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温 14℃,全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 4 647.2℃。年降水量 573.4 mm,多在 7、8 月间,年日照时数 2 323.9 h。试验地土壤为黏质壤土,0—20 cm 土层有机质含量 12.6 g·kg⁻¹,速效氮 61.2 mg·kg⁻¹,速效磷 16.2 mg·kg⁻¹,速效钾 110.0 mg·kg⁻¹,pH 8.2。图 1 为 2013 年和 2014 年夏玉米生长季降雨量及温度状况。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,以耕作方式为主区,设免耕

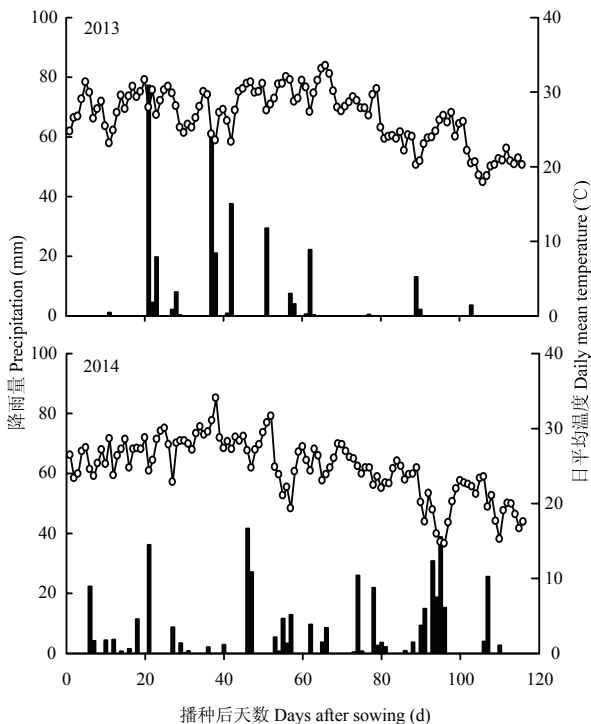


图 1 2013—2014 年夏玉米生长季日降雨量及平均温度变化

Fig. 1 Daily precipitation (mm), and mean temperature (°C) during the growing seasons (June-September) of summer maize in 2013 and 2014

直播 (N), 浅旋耕作 (R) 和条带深松 (S) 3 个处理; 以肥料类型为副区, 设缓释肥 270 kg N·hm⁻² 一次性基施 (slow release fertilizer, SRF), 常规施肥 270 kg N·hm⁻² 分次施用 (conventional compound fertilizer, CCF, 60%基施, 40%拔节期追施) 2 个处理。免耕处理使用当地的农哈哈免耕播种机进行播种, 一次作业同时完成播种及施种肥作业; 浅旋处理利用卧式旋耕耙进行 10—15 cm 旋耕, 后同免耕处理一样, 使用农哈哈播种机进行播种、施种肥作业; 条带深松处理采用中国农科院作物所与北京禾惠农科技有限公司共同研制的玉米推茬清垄精量播种机进行条带深松、精量播种及深施肥一体化作业, 深松深度为 25—30 cm, 施肥深度为 10 cm。试验用缓释肥由河南省心连心化肥有限公司生产, 其 N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 30%、5%、5%, 该肥料采用高分子网捕技术, 控失率高, 为作物持续不断提供养分; 常规施肥处理由普通复合肥和尿素混合配制出与缓释肥处理等养分量的肥料。各处理磷、钾肥施用量相同, 均为 45 kg P₂O₅·hm⁻² 和 45 kg K₂O·hm⁻²。

选用郑单 958 为供试材料, 于 6 月中旬播种, 种植密度为 60 000 株/hm², 60 cm 等行距种植, 株距 25 cm。小区面积为 96 m² (4.8 m×20 m), 每小区种植 8 行, 3 次重复。其他管理措施同夏玉米高产田。在玉米达到生理成熟后收获, 2013 年收获期为 9 月 28 日, 2014 年收获期为 9 月 26 日。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶面积指数 于玉米拔节期 (V6)、大喇叭口期 (V12)、吐丝期 (VT)、乳熟期 (R3)、成熟期 (R6), 田间活体测量 5 株叶面积, 采用长宽系数法计算叶面积 (0.75), 叶面积指数 (LAI) = 该土地面积上的总叶面积/土地面积。

1.3.2 穗位叶净光合速率 在玉米开花期和成熟期, 采用 LI-6400 光合测定系统 (LI-COR, 美国), 开放式气路, 冠层穗位叶附近 CO₂ 浓度 360—380 μmol·mol⁻¹, 应用系统 LED 光源补光, 光量子通量为 1 800 μmol·m⁻²·s⁻¹。选择天气晴朗的 10: 00—12: 00 测定穗位叶中部上表面净光合速率, 每处理测代表性植株 10 株。

1.3.3 干物质积累 于玉米拔节期 (V6)、大喇叭口期 (V12)、吐丝期 (VT)、乳熟期 (R3)、成熟期 (R6), 每个小区取代表性植株 3 株, 按不同器官 (茎鞘、叶片、籽粒和穗轴) 分开, 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘干至恒重后测定干物重。

以播种后天数 (t) 为自变量, 以播种后 0、26 d (V6)、55 d (VT)、109 d (R6) (2013 年) 和 0、27 d (V6)、43 d (V12)、53 d (VT)、76 d (R3)、106 d (R6) (2014 年) 测得单株地上部干重为因变量 (W), 可用 Logistic 方程 $y=a/(1+be^{-cx})$ 对干物质积累过程进行模拟^[23]。对 Logistic 方程求一阶导数可得到玉米干物质积累速率方程。对 Logistic 方程求二阶导数, 并令其为 0, 可得两个拐点在 t 坐标上的值 t_1 和 t_2 , 试验结束时间 t_3 , 确定干物质积累过程的 3 个阶段, 分别为渐增期 (0— t_1)、快增期 (t_1 — t_2) 和缓增期 (t_2 — t_3)。并求出各阶段持续时间 (T) 和平均干物质积累速率 (G_{mean})。

1.3.4 干物质转运 相关参数计算参照参考文献[24]。干物质转运量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 开花期营养器官干重 - 成熟期营养器官干重; 干物质转运效率 (%) = 干物质转运量 / 开花期营养器官干重 $\times 100$; 转运干物质对籽粒的

贡献率 (%) = 干物质转运量 / 粒重 $\times 100$ 。

1.3.5 测产、考种 每小区去掉两侧边行和每行两端各五株后, 调查相应的空秆数、双穗数; 测定全部收获穗的穗鲜重、穗数; 选取样本穗 20 穗 (误差小于 0.1 kg), 风干后脱粒, 称重, 测定含水量, 换算成 14% 含水量的重量, 进而折合成公顷产量; 另外选取 20 穗进行考种。

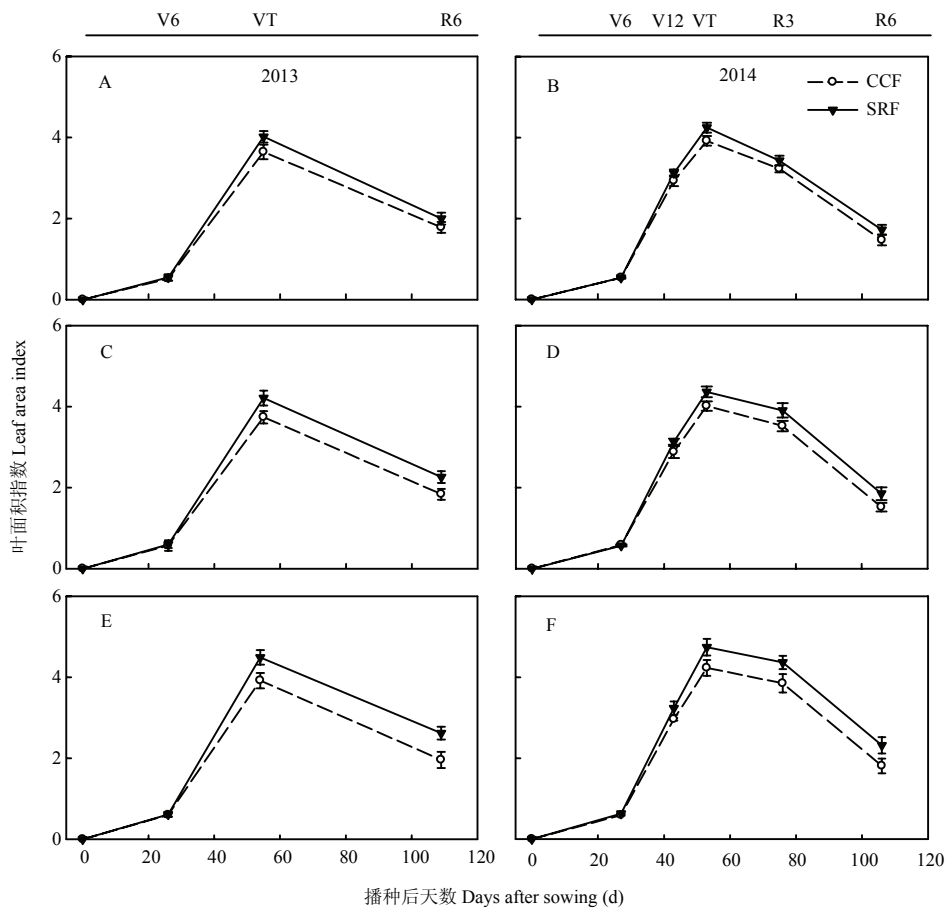
1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理, 采用 SPSS 16.0 统计软件进行方差分析和多重比较, 利用 SigmaPlot 10.0 软件作图。

2 结果

2.1 土壤耕作与施肥方式对夏玉米叶面积指数 (LAI) 的影响

由图 2 可以看出, 相同耕作方式下, 施用缓释肥



A, B: 旋耕; C, D: 免耕直播; E, F: 深松; CCF: 常规肥; SRF: 缓释肥。下同

A, B: Rototilling; C, D: No-tillage; E, F: Sub-soiling; CCF: 270 kg N·hm⁻² conventional compound fertilizer; SRF: 270 kg N·hm⁻² slow release fertilizer. The same as below

图 2 不同处理夏玉米群体叶面积指数 (LAI) 动态

Fig. 2 Leaf area index (LAI) of summer maize under different tillage practices and fertilizations

处理 (SRF) 和常规施肥处理 (CCF) 开花前 (V6 和 V12) 叶面积指数 (LAI) 差异不显著, 开花至成熟期 SRF 处理 LAI 显著高于 CCF 处理。开花期各处理 LAI 达最大值, 3 种耕作方式下 SRF 处理 LAI 均显著高于 CCF 处理, 2013 年增幅分别为 10.3% (R)、12.7% (N) 和 14.7% (S), 2014 年增幅分别为 8.7% (R)、8.4% (N) 和 12.1% (S)。不同耕作方式比较, 条带深松耕作下 CCF 和 SRF 处理开花期 LAI 分别显著高于浅旋和免耕条件下相应处理, 浅旋和免耕条件下各相应处理之间差异不显著。各处理中, 以条带深松耕作下 SRF 处理开花期 LAI 最高, 显著高于其他处理, 2013 年增幅为 6.6%—23.2%, 2014 年增幅为 8.6%—21.0%。

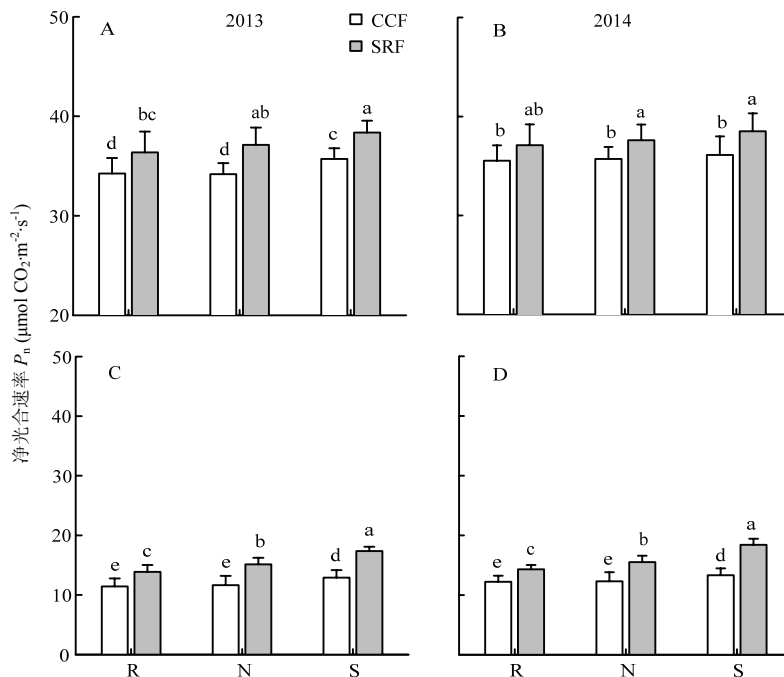
开花至成熟期, 各处理 LAI 均逐渐降低, 同一耕作方式下 SRF 处理 LAI 降幅显著低于 CCF 处理, 条带深松耕作下二者差异达最大。2013 年, 3 种耕作方式下, CCF 处理 LAI 降幅分别为 51.1% (R)、50.9% (N) 和 48.6% (S); SRF 处理 LAI 降幅分别为 47.7% (R)、46.4% (N) 和 41.7% (S)。2014 年, 3 种耕作方式下, CCF 处理 LAI 降幅分别为 62.2% (R)、62.6% (N) 和 57.3% (S); SRF 处理 LAI

降幅分别为 57.6% (R)、57.1% (N) 和 51.1% (S)。3 种耕作方式比较, 条带深松耕作下 CCF 和 SRF 处理成熟期 LAI 降幅分别显著低于浅旋和免耕条件下相应处理的降幅。各处理中, 以条带深松耕作下缓释肥处理开花至成熟期 LAI 降幅最小, LAI 值最大, 2013 年高于其他处理 16.0%—46.9%, 2014 年高于其他处理 20.3%—47.9%。

2.2 土壤耕作与施肥方式对夏玉米穗位叶净光合速率的影响

由图 3 可以看出, 开花期和成熟期穗位叶光合速率均不同程度受到施肥和耕作方式的影响。开花期, 3 种耕作方式下, 2013 年 SRF 处理光合速率分别比 CCF 处理高 6.2% (R)、8.7% (N) 和 7.5% (S); 2014 年 SRF 处理光合速率分别比 CCF 处理高 4.4% (R)、5.3% (N) 和 6.6% (S)。各处理中, 以条带深松耕作下 SRF 处理开花期穗位叶光合速率最高, 2013 年比其他处理高 3.3%—12.1%, 2014 年比其他处理高 2.4%—8.3%。

开花至成熟期, 各处理穗位叶光合速率均显著下降, 而施用缓释肥可以延缓后期穗位叶光合速率



R: 浅旋耕作; N: 免耕直播; S: 条带深松。不同小写字母表示处理间 5% 水平上的差异显著
R: Rototilling; N: No-tillage; S: Sub-soiling. Different letters in the same line indicated the significant difference at 5% level

图 3 不同处理夏玉米开花期 (A, B) 和成熟期 (C, D) 穗位叶净光合速率

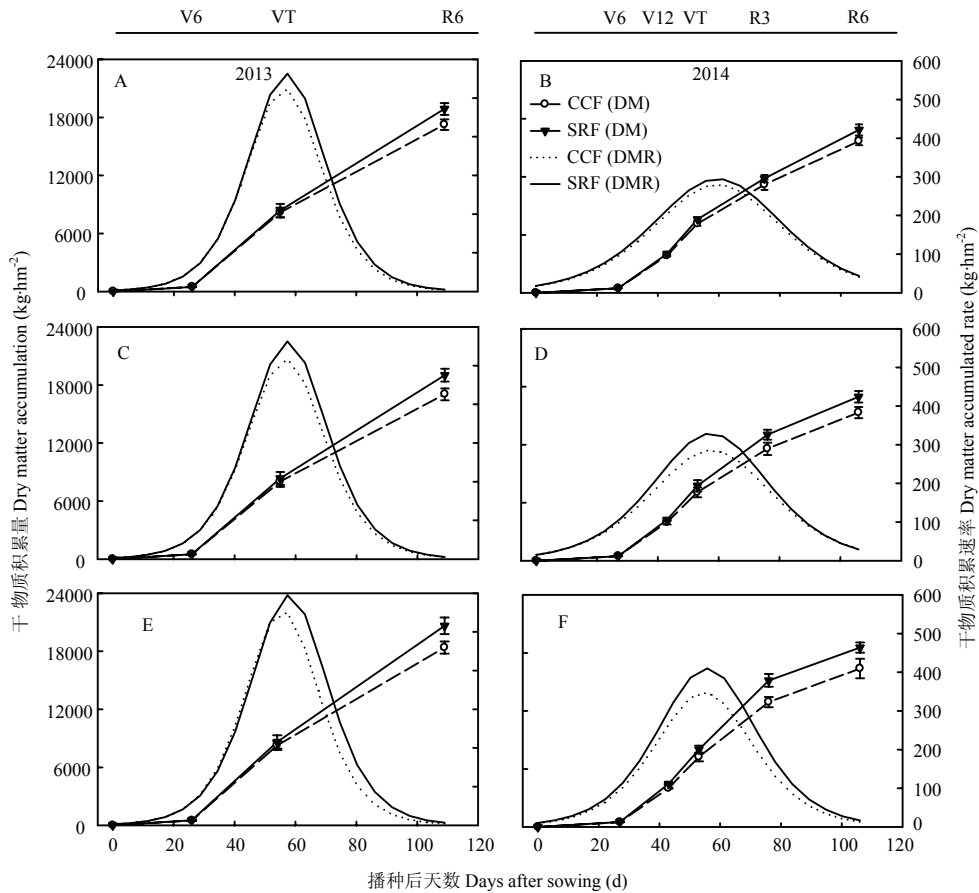
Fig. 3 Photosynthetic rate of summer maize ear leaf at silking (A, B) and maturity (C, D) stages under different tillage practices and fertilizations

下降，其降幅显著低于常规施肥处理，且在条带深松耕作下二者差异最大。2013 年，3 种耕作方式下，CCF 处理成熟期穗位叶光合速率降幅分别为 66.7% (R)、65.9% (N) 和 62.8% (S)；SRF 处理成熟期穗位叶光合速率降幅分别为 61.9% (R)、59.2% (N) 和 54.8% (S)。2014 年，3 种耕作方式下，CCF 处理成熟期穗位叶光合速率降幅分别为 65.7% (R)、65.6% (N) 和 62.1% (S)；SRF 处理成熟期穗位叶光合速率降幅分别为 61.5% (R)、58.8% (N) 和 52.2% (S)。各处理中，以条带深松耕作下 SRF 处理成熟期穗位叶光合速率降幅最小，光合速率值最高，2013 年较其他处理高 14.5%—52.3%，2014 年较其他处理高 18.7%—50.8%。

2.3 土壤耕作与施肥方式对夏玉米干物质积累动态的影响

由图 4 可以看出，相同耕作方式下，SRF 和 CCF

处理拔节 (V6) 至开花期 (VT) 干物质积累量没有明显差异，而开花至成熟期 SRF 处理干物质积累量显著高于 CCF 处理。3 种耕作方式下，2013 年 SRF 处理花后干物质积累量分别比 CCF 处理高 13.0% (R)、12.7% (N) 和 18.7% (S)；2014 年 SRF 处理花后干物质积累量分别比 CCF 处理高 8.9% (R)、11.7% (N) 和 15.3% (S)。不同耕作方式比较，各处理花前干物质积累量没有明显差异，条带深松耕作下 CCF 和 SRF 处理的花后干物质积累量分别显著高于浅旋和免耕条件下相应处理，而浅旋和免耕条件下各相应处理之间差异不显著。各处理中，以条带深松耕作下缓释肥处理 (S-SRF) 花后干物质积累量显著高于其他处理，2013 年增幅为 12.5%—30.0%，2014 年增幅为 14.3%—27.8%。



A, B: 浅旋耕作; C, D: 免耕直播; E, F: 条带深松; DM: 干物质积累量; DMR: 干物质积累速率
A, B: Rototilling; C, D: No-tillage; E, F: Sub-soiling; DM: Dry matter accumulation; DMR: Dry matter accumulated rate

图 4 不同处理夏玉米干物质积累动态

Fig. 4 Dry matter accumulation of summer maize under different tillage practices and fertilization

成熟期 (R6), 3 种耕作方式下, 2013 年 SRF 处理成熟期总干物质积累量分别为 18 875.7 kg·hm⁻² (R)、19 022.6 kg·hm⁻² (N) 和 20 627.7 kg·hm⁻² (S), 分别高于 CCF 处理 9.5%、11.7%和 12.3%; 2014 年 SRF 处理成熟期干物质积累量分别为 16 968.1 kg·hm⁻² (R)、16 666.6 kg·hm⁻² (N) 和 18 551.6 kg·hm⁻² (S), 分别高于 CCF 处理 7.8%、10.7%和 13.3%。不同耕作方式比较, 条带深松耕作下 CCF 和 SRF 处理的总干物质积累量分别显著高于浅旋和免耕条件下相应处理, 而浅旋和免耕条件下各相应处理之间差异不显著。各处理中, 以条带深松耕作下 SRF 处理总干物质积累量显著高于其他处理, 2013 年增幅为 8.4%—21.1%, 2014 年增幅为 9.3%—21.0%。

根据干物质积累速率变化, 可将干物质积累过程分为 3 个时期, 即渐增期, 快增期和缓增期 (表 1)。由表 1 可以看出, 3 种耕作方式下 SRF 处理和 CCF 处理的干物质积累 3 个时期的持续时间均无显著差异, 而 SRF 处理快增期和缓增期的平均积累速率显著高于 CCF 处理。快增期, 3 种耕作方式下 SRF 处理平均积累速率两年分别比 CCF 处理高 7.3%和 5.3%, 8.6%和 15.2%, 7.1%和 17.8%; 缓增期, 3 种耕作方式下 SRF 处理平均积累速率两年比 CCF 处理高 10.5%和 33.6%, 10.7%和 12.1%, 19.6%和 21.7%。不同耕作

方式比较, 条带深松耕作下 CCF 和 SRF 处理的缓增期持续时间显著高于免耕和浅旋耕作下的相应处理。

2.4 土壤耕作与施肥方式对夏玉米干物质转运的影响

由表 2 可知, 不同施肥方式和耕作方式处理间花前干物质转运量差异显著。浅旋耕作下, SRF 处理花前干物质转移量、转运率及其对籽粒的贡献率显著高于 CCF 处理, 2013 年增幅分别为 44.9%、23.6%和 42.2%, 2014 年增幅分别为 65.3%、51.3%和 41.1%。免耕条件下, SRF 处理花前干物质转移量显著低于 CCF 处理, 2013 年分别降低 42.3%、48.5%和 68.9%, 2014 年分别降低 34.9%、43.6%和 30.1%。条带深松耕作下, SRF 处理花前干物质转移量显著低于 CCF 处理, 2013 分别降低 37%、40%和 41.7%, 2014 年分别降低 33.9%、49.2%和 60.4%。

花后干物质同化量也受施肥方式和耕作方式影响较大。浅旋耕作下, SRF 处理与 CCF 处理花后干物质同化量无显著差异。免耕和条带深松耕作下, SRF 处理花后干物质同化量显著高于 CCF 处理, 两年增幅分别为 15.3%和 27.5% (N), 26.2%和 22.6% (S)。

以上结果表明, 浅旋耕作下缓释肥处理花前干物质转移量对籽粒的贡献占优势, 而在免耕和条带深松耕作下缓释肥处理花后干物质同化量占优势。

表 1 不同处理夏玉米干物质积累阶段特征

Table 1 Dry matter accumulation stage characteristics of summer maize under different tillage practices and fertilizations

年份 Year	处理 Treatment		渐增期 Early stage		快增期 Fast stage		缓增期 Late stage	
			持续时间 Duration (d)	积累速率 Accumulate rate (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	持续时间 Duration (d)	积累速率 Accumulate rate (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	持续时间 Duration (d)	积累速率 Accumulate rate (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)
2013	浅旋 Rotary tillage	CCF	45.2 a	83.7d	22.2a	460.6c	41.7bc	88.9c
		SRF	45.9a	85.9bcd	22.3a	494.1b	40.7cd	98.2b
	免耕 No-tillage	CCF	45.4a	84.2cd	22.7a	454.3c	40.8cd	91.5c
		SRF	46.1a	87.3ab	22.8a	493.4b	40.1d	101.3b
	条带深松 Sub-soil tillage	CCF	44.8a	86.8abc	21.8a	487.5b	42.4ab	91.0c
		SRF	46.5a	90.0a	22.9a	522.0a	43.6a	108.8a
2014	浅旋 Rotary tillage	CCF	40.7a	83.2bc	37.7a	245.5d	27.5c	97.5e
		SRF	40.7a	86.3ab	38.0a	258.5c	27.4c	130.3a
	免耕 No-tillage	CCF	39.9a	82.6c	35.5b	250.6c	30.6b	103.3d
		SRF	40.5a	85.8abc	34.0b	288.8b	31.5b	117.5b
	条带深松 Sub-soil tillage	CCF	40.4a	85.7abc	28.8c	305.4b	36.9a	90.3f
		SRF	41.1a	88.0a	29.1c	359.8a	35.8a	109.9c

同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。下同

Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level. The same as below

表 2 不同处理夏玉米营养器官干物质向籽粒的转运

Table 2 Dry matter translocation from vegetative organ to grain of summer maize under different tillage practices and fertilizations

处理 Treatment		2013				2014			
		花前转移量 Translocation amount (kg·hm ⁻²)	转运率 Transportation efficiency (%)	贡献率 Contribution rate (%)	花后同化量 Post-silking accumulation	花前转移量 Translocation amount (kg·hm ⁻²)	转运率 Transportation efficiency (%)	贡献率 Contribution rate (%)	花后同化量 Post-silking accumulation
浅旋 Rotary tillage	CCF	1643.6c	20.8c	16.6c	7628.1c	1079.6d	15.2d	14.1d	7410.2b
	SRF	2381.5a	25.7b	23.6a	7469.3c	1784.2b	23.0b	20.9b	7476.9b
免耕 No-tillage	CCF	1577.4c	19.9c	16.7c	7541.5c	2311.0a	32.3a	25.5a	6057.8c
	SRF	1108.3d	13.4d	11.1e	8693.2b	1712.7b	22.5b	19.6b	7721.5b
条带深松 Sub-soil tillage	CCF	2219.5b	28.0a	22.1b	7353.8c	1391.4c	19.1c	17.8c	7558.5b
	SRF	1620.6c	20.0c	15.6d	9280.6a	1039.5d	12.8e	11.1e	9267.1a

2.5 土壤耕作与施肥方式对夏玉米产量及其构成因素的影响

由表 3 可知, 不同耕作方式下, 施用缓释肥处理玉米产量均显著高于常规施肥处理。在浅旋、免耕直播和条带深松耕作下, 2013 年 SRF 处理产量比 CCF 处理分别提高 6.3%、7.5%和 13.9%, 2014 年 SRF 处理产量比 CCF 分别提高 9.1%、12.7%和 15.2%。不同耕作方式比较, 条带深松耕作下各处理的产量分别显著高于浅旋和免耕条件下相应处理, 而浅旋和免耕条件下各相应处理之间差异不显著。各处理中, 以条带深松下 SRF 处理产量显著高于其他处理, 2013 年增幅为 10.7%—19.5%, 2014 年增幅为 9.2%—23.2%。

产量构成因素中, 千粒重受肥料和耕作方式处理影响较大。不同耕作方式下, SRF 处理千粒重均显著高于 CCF 处理。在浅旋、免耕直播和条带深松耕作下, 2013 年 SRF 处理千粒重比 CCF 处理分别提高 4.1%、5.4%和 9.6%, 2014 年 SRF 处理千粒重比 CCF 分别提高 5.0%、7.8%和 10.1%。不同耕作方式比较, 条带深松耕作下 CCF 和 SRF 处理的千粒重分别显著高于浅旋和免耕条件下相应处理, 而浅旋和免耕条件下各相应处理之间差异不显著。

穗数受肥料处理影响较小, 受耕作方式影响较大。CCF 处理和 SRF 处理穗数在各耕作方式下均没有显著差异。不同耕作方式比较, 条带深松耕作下 CCF 和

表 3 不同处理夏玉米产量及产量构成因素

Table 3 Grain yield and yield components of summer maize under different tillage practices and fertilization

处理 Treatment		2013				2014			
		穗数 Ear numbers (No./hm ²)	穗粒数 Kernels per ear	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	穗数 Ear numbers (No./hm ²)	穗粒数 Kernels per ear	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Yield (kg·hm ⁻²)
浅旋 Rotary tillage	CCF	6.02ab	571.0a	270.4e	9271.7d	5.56b	588.4a	265.6c	8489.8d
	SRF	6.08a	576.2a	281.5cd	9851.7b	5.58b	593.3a	284.1b	9261.1bc
免耕 No-tillage	CCF	5.84de	568.3a	275.0de	9118.9e	5.53b	586.1a	266.7c	8368.8d
	SRF	5.94bc	569.6a	289.8c	9801.5b	5.62b	584.5a	287.4b	9434.2b
条带深松 Sub-soil tillage	CCF	5.89cd	571.7a	296.5b	9573.3c	5.72a	583.0a	280.3b	8949.9c
	SRF	5.82e	573.0a	319.6a	10901.2a	5.75a	591.3a	308.4a	10306.6a
变异来源 Source of variation									
耕作方式 Tillage (T)		31.043*	7.176ns	50.063*	249.094*	24.051*	20.354*	5.284*	128.386*
肥料类型 Fertilizer (F)		3.007ns	5.613ns	33.852*	896.552*	2.062ns	9.912ns	75.136**	562.125**
T×F		0.272ns	1.051ns	2.135ns	67.944**	0.365ns	0.455ns	4.116*	16.566**

*差异达 0.05 显著水平; **差异达 0.01 显著水平; ns, 无显著性差异

* represents significant at $P < 0.05$; ** represents significant at $P < 0.01$; ns represents non-significant

SRF 处理的穗数分别显著高于浅旋和免耕条件下相应处理, 而浅旋和免耕条件下各相应处理之间差异不显著。

穗粒数受肥料和耕作方式处理影响较小, 各处理之间穗粒数均没有明显的差异。

3 讨论

氮是作物产量形成的重要限制因子^[25], 氮肥施用不当, 不仅导致作物产量和氮肥利用率下降, 且会引发一系列的环境问题^[26-27]。近年来, 中国在提高化肥利用率方面取得了一些成果, 如氮肥深施、以水带肥、平衡施肥等技术^[28-29]。然而, 在提高肥料利用率的同时, 能够显著增加玉米产量的能力还有待进一步提高^[30]。缓/控释肥料的应用既能满足作物对养分的需求, 提高作物产量, 也能够降低肥料损失, 显著提高肥料利用效率^[5-6, 8-9]。本研究中, 与常规肥料处理比, 施用缓释肥处理夏玉米的产量显著提高。除了肥料类型, 土壤耕作等栽培措施对作物生长发育及氮肥利用效率也存在较大影响^[2, 10-11]。本研究比较了传统免耕、浅旋和条带深松耕作的的作用效果, 结果表明条带深松耕作处理玉米产量显著高于免耕和浅旋耕作, 且在条带深松耕作下, 缓释肥处理产量增幅最大, 其次为免耕耕作, 浅旋耕作下增幅最小。耕作方式与施肥方式耦合各处理中, 以条带深松与缓释肥互作处理产量最高。从产量构成因素看, 施用缓释肥通过增加千粒重, 条带深松耕作通过增加收获穗数达到了增加产量的目的。2013 年玉米开花期遇到高温干旱的天气, 玉米授粉受到影响, 穗粒数较低, 但由于及时进行了灌水补救, 保证了较高的千粒重, 因此产量没有显著降低; 而 2014 年玉米开花期前后遇到阴雨寡照的天气, 影响玉米正常授粉, 且没有良好的补救措施, 因此玉米收获穗数和千粒重均较低, 与 2013 年比产量下降显著。

作物生育期内干物质的积累是产量形成的基础, 干物质积累的水平决定了最终籽粒产量的高低^[31-33]。本研究中, 缓释肥处理玉米总干物质积累量 2013 年和 2014 年均显著高于常规施肥处理。另外, 条带深松耕作处理玉米干物质积累量显著高于免耕和浅旋耕作, 且条带深松与缓释肥互作处理干物质积累量显著高于其他处理。研究表明, 禾谷类作物经济产量主要依赖于开花后到成熟期的光合代谢产物积累^[34-35]。本研究中, 与常规施肥和土壤耕作方式比, 缓释肥和条带深松耕作处理拔节至开花期干物质积累量没有显著增加, 而二者开花至成熟期干物质积累量分别显著高于

常规施肥和其他土壤耕作处理, 且条带深松与缓释肥互作处理花后干物质积累量显著高于其他处理。说明施用缓释肥和条带深松耕作及其二者的有机结合均有利于玉米干物质的积累, 尤其是花后干物质积累。进一步研究表明, 干物质积累量取决于其积累速率和积累持续期的长短^[36-37]。本研究中, 玉米生育前期(渐增期)缓释肥处理和常规施肥处理干物质积累速率和持续期均无明显差异, 而中后期(快增期和缓增期)缓释肥处理干物质积累速率显著高于常规施肥处理, 二者持续期无明显差异。条带深松耕作显著提高玉米中期(快增期)干物质积累速率和后期(缓增期)持续时间。条带深松耕作与缓释肥耦合通过提高玉米中后期干物质积累速率和持续时间实现生育期总干物质积累量的增加。

作物籽粒中干物质积累主要来源于开花前营养器官贮存同化物转移到籽粒中的部分和开花后的同化产物^[38]。本研究表明, 与常规施肥处理比, 浅旋耕作下缓释肥处理玉米花前干物质转移量及其对籽粒的贡献率显著提高, 而在免耕和条带深松耕作下显著下降。然而, 有研究表明玉米营养器官干物质转运对籽粒的贡献率不易过高, 超过 20%会导致叶片早衰, 影响后期光合生产, 进而明显影响产量的提高^[39]。本研究中浅旋耕作下缓释肥处理营养器官干物质转移量对籽粒的贡献率大于 20%, 而免耕和条带深松耕作下均在 20%以下。说明免耕和条带深松耕作与缓释肥耦合更利于协调玉米籽粒灌浆期源库平衡, 也进一步验证了前人的研究结果。另外, 与常规施肥处理比, 免耕和条带深松耕作下缓释肥处理花后干物质同化量显著增加, 且条带深松与缓释肥互作处理花后干物质同化量显著高于其他处理。说明条带深松与缓释肥耦合在促进花后干物质积累的同时, 明显增加了花后干物质向籽粒的分配。

玉米干物质生产的绝大部分来自叶片的光合作用^[20]。生育后期干物质积累多, 说明花后光合生产能力强^[40]。本研究发现, 与常规耕作和施肥处理比, 条带深松和施用缓释肥明显改善了玉米的光合性能, 使得植株开花后仍然保持较高的叶面积指数和光合速率, 且下降缓慢, 有利于生产更多的光合产物。这主要是因为传统浅旋和免耕耕作常年的机械压实使土壤耕层变浅, 产生坚硬的犁底层, 影响作物根系的正常生长^[11-12], 且施用的常规化学肥料大量的淋失造成花后氮素不足^[5], 植株根系周围出现氮素亏缺, 加速了花后植株衰老^[4], 进而导致花后光合物质生产能力下

降^[41]。而条带深松可以打破土壤犁底层,增加耕层深度,提高蓄水保墒能力,促进根系生长发育^[11,22]。同时,缓释肥根据玉米生长特性进行选择释放,显著提高花后土壤氮素的供应能力^[5-6],从而改善后期光合性能,延缓了叶片衰老^[42-43]。条带深松满足了作物对氮素的空间要求,缓释肥满足了作物对氮素的时间要求,因此,条带深松与缓释肥耦合能够更好地实现土壤养分的时空高效管理,满足玉米对氮素的需求,实现玉米产量和氮素利用效率的同步提高。

4 结 论

与常规耕作和施肥处理比,条带深松耕作和施用缓释肥明显改善了玉米的光合性能,使得植株开花后仍然保持较高的叶面积指数和光合速率,延缓玉米后期衰老,促进花后光合产物积累的增加及其向籽粒的转运,最终显著提高玉米产量。因此,在黄淮海夏玉米种植区,施用缓释肥并结合条带深松,可以更好地调控土壤的养分供应状况,实现土壤氮素供应与作物需氮的时空吻合,有助于实现夏玉米高产高效生态安全生产。

References

- [1] 张哲元, 张玉龙, 黄毅, 邹洪涛, 张玉玲. 覆膜及深松配合措施对玉米生长发育及产量的影响. *土壤通报*, 2009, 40(5): 1156-1159.
ZHANG Z Y, ZHANG Y L, HUANG Y, ZOU H T, ZHANG Y L. Effects of plastic-film mulching and sub-soiling measures on growth and yield of maize. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(5): 1156-1159. (in Chinese)
- [2] 张总正, 秦淑俊, 李娜, 郭利伟, 宁堂原, 陈国庆. 深松和施氮对夏玉米产量及氮素吸收利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 790-798.
ZHANG Z Z, QIN S J, LI N, GUO L W, NING T Y, CHEN G Q. Effects of sub-soiling and N fertilizer application on dry matter accumulation, nitrogen use efficiency and yield of summer maize. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4): 790-798. (in Chinese)
- [3] JU X T, KOU C L, ZHANG F S, CHRISTIE P. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environmental Pollution*, 2006, 143(1): 117-125.
- [4] MENG Q F, CHEN X P, ZHANG F S, CAO M H, CUI Z L, BAI J S, YUE S C, CHEN S Y, MÜLLER T. In-season root-zone nitrogen management strategies for improving nitrogen use efficiency in high-yielding maize production in China. *Pedosphere*, 2012, 22(3): 294-303.
- [5] 王宜伦, 李潮海, 王瑾, 谭金芳. 缓/控释肥在玉米生产中的应用与展望. *中国农学通报*, 2009, 25(24): 254-257.
WANG Y L, LI C H, WANG J, TAN J F. Application and prospect of slow/controlled release fertilizers in maize production. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(24): 254-257. (in Chinese)
- [6] 邵国庆, 李增嘉, 宁堂原, 张民, 焦念元, 韩宾, 白美, 李洪杰. 灌溉和尿素类型对玉米氮素利用及产量和品质的影响. *中国农业科学*, 2008, 41(11): 3672-3678.
SHAO G Q, LI Z J, NING T Y, ZHANG M, JIAO N Y, HAN B, BAI M, LI H J. Effects of irrigation and urea types on N utilization, yield and quality of maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(11): 3672-3678. (in Chinese)
- [7] OGOLA J B O, WHEELER T R, HARRIS P M. Effects of nitrogen and irrigation on water use of maize crops. *Field Crops Research*, 2002, 78(2/3): 105-117.
- [8] 易镇邪, 王璞, 陈平平, 屠乃美, 兰林旺. 包膜尿素在华北平原夏玉米上的应用. *生态学报*, 2008, 28(10): 4919-4928.
YI Z X, WANG P, CHEN P P, TU N M, LAN L W. Application of coated urea in summer maize in North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4919-4928. (in Chinese)
- [9] 邵国庆, 李增嘉, 宁堂原, 张民, 江晓东, 王芸, 赵建波, 吕美蓉, 赵杰. 不同水分条件下常规尿素和控释尿素对玉米根冠生长及产量的影响. *作物学报*, 2009, 35(1): 118-123.
SHAO G Q, LI Z J, NING T Y, ZHANG M, JIANG X D, WANG Y, ZHAO J B, LÜ M R, ZHAO J. Effects of normal urea and release-controlled urea on root and shoot growth and yield of maize in different water conditions. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(1): 118-123. (in Chinese)
- [10] HUANG G B, CHAI Q, FENG F X, YU A Z. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in arid Northwest China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2011, 11(8): 1286-1296.
- [11] WANG X B, ZHOU B Y, SUN X F, YUE Y, MA W, ZHAO M. Soil tillage management affects maize grain yield by regulating spatial distribution coordination of roots, soil moisture and nitrogen status. *PLoS ONE*, 2015, 10(6): e0129231.
- [12] HARTMANN P, ZINK A, FLEIGE H, HOM R. Effect of compaction, tillage and climate change on soil water balance of arable Luvisols in Northwest Germany. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124(4): 211-218.
- [13] 韩宾, 孔凡磊, 张海林, 陈阜. 耕作方式转变对小麦/玉米两熟农田

- 土壤固碳能力的影响. 应用生态学报, 2010, 21(1): 91-98.
- HAN B, KONG F L, ZHANG H L, CHEN F. Effects of tillage conversion on carbon sequestration capability of farmland soil doubled cropped with wheat and corn. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 91-98. (in Chinese)
- [14] 肖继兵, 孙占祥, 杨久廷. 半干旱区中耕深松对土壤水分和作物产量的影响. 土壤通报, 2011, 42(3): 709-714.
- XIAO J B, SUN Z X, YANG J T. Effect of subsoiling on soil water and crop yield in semi-arid area. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 709-714. (in Chinese)
- [15] SASAL M C, ANDRIULO A E, TABOADA M A. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil & Tillage Research*, 2006, 87(1): 9-18.
- [16] MOTAVALLI P P, STEVENS W E, HARTWIG G. Remediation of subsoil compaction and compaction effects on corn N availability by deep tillage and application of poultry manure in a sandy-textured soil. *Soil & Tillage Research*, 2003, 71(2): 121-131.
- [17] JI B, ZHAO Y, MU X, LIU K, LI C H. Effects of tillage on soil physical properties and root growth of maize in loam and clay in central China. *Plant soil and Environment*, 2013, 59(7): 295-302.
- [18] 王群, 李潮海, 李全忠, 薛帅. 紧实胁迫对不同类型土壤玉米根系时空分布及活力的影响. 中国农业科学, 2011, 44(10): 2039-2050.
- WANG Q, LI C H, LI Q Z, XUE S. Effect of soil compaction on spatio-temporal distribution and activities in maize under different soil types. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(10): 2039-2050. (in Chinese)
- [19] TOLLENAAR M, DAYNARD T B. Effect of source-sink ration on dry matter accumulation and leaf senescence of maize. *Canadian Journal of Plant Science*, 1982, 62(4): 855-860.
- [20] 黄振喜, 王永军, 王空军, 李登海, 赵明, 柳京国, 董树亭, 王洪军, 王军海, 杨今胜. 产量 15 000kg·ha⁻¹ 以上夏玉米灌浆期间的光合特性. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1898-1906.
- HUANG Z X, WANG Y J, WANG K J, LI D H, ZHAO M, LIU J G, DONG S T, WANG H J, WANG J H, YANG J S. Photosynthetic characteristics during grain filling stage of summer maize hybrids with high yield potential of 15000 kg·ha⁻¹. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1898-1906. (in Chinese)
- [21] KARLENDL D L, SADLER E J, CAMP C R. Dry matter nitrogen, phosphorus and potassium accumulation rate by corn on Norfolk Loamy Sand. *Agronomy Journal*, 1987, 79(4): 649-656.
- [22] 胡恒宇, 李增嘉, 宁堂原, 王瑜, 田慎重, 仲惟磊, 张总正. 深松和尿素类型对不同玉米品种水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2011, 44(9): 1963-1972.
- HU H Y, LI Z J, NING T Y, WANG Y, TIAN S Z, ZHONG W L, ZHANG Z Z. Effects of subsoiling and urea types on water use efficiency of different maize cultivars. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(9): 1963-1972. (in Chinese)
- [23] 杨今胜, 王永军, 张吉旺, 刘鹏, 李从锋, 朱元刚, 郝梦波, 柳京国, 李登海, 董树亭. 三个超高产夏玉米品种的干物质生产及光合特性. 作物学报, 2011, 37(2): 355-361.
- YANG J S, WANG Y J, ZHANG J W, LIU P, LI C F, ZHU Y G, HAO M B, LIU J G, LI D H, DONG S T. Dry matter production and photosynthesis characteristics of three hybrids of maize (*Zea mays* L.) with super-high-yielding potential. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2): 355-361. (in Chinese)
- [24] 郑成岩, 崔世明, 王东, 于振文, 张永丽, 石玉. 土壤耕作方式对小麦干物质生产和水分利用效率的影响. 作物学报, 2011, 37(8): 1432-1440.
- ZHENG C Y, CUI S M, WANG D, YU Z W, ZHANG Y L, SHI Y. Effects of soil tillage practice on dry matter production and water use efficiency in wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(8): 1432-1440. (in Chinese)
- [25] CASSMAN K G. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 1999, 96(11): 5952-5959.
- [26] HE P, LI S T, JIN J Y, WANG H T, LI C J, WANG Y L, CUI R Z. Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-central China. *Agronomy Journal*, 2009, 101(6): 1489-1496.
- [27] JU X T, XING G X, CHEN X P, ZHANG S L, ZHANG L J, LIU X J, CUI Z L, YIN B, CHRISTIE P, ZHU Z L, ZHANG F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [28] 闫湘, 金继运, 何萍, 梁鸣早. 提高肥料利用率技术研究进展. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459.
- YAN X, JIN J Y, HE P, LIANG M Z. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2): 450-459. (in Chinese)
- [29] 朱菜红, 沈其荣, 徐阳春. 配施有机肥提高化肥氮利用效率的微生物作用机制研究. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 282-288.
- ZHU C H, SHEN Q R, XU Y C. Microbial mechanism on enhancement of inorganic fertilizer use efficiency for combined use of inorganic and organic fertilizers. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 282-288. (in Chinese)

- [30] CUI Z L, CHEN X P, MIAO Y X, ZHANG F S, SUN Q P, SCHRODER J, ZHANG H L, LI J L, SHI L W, XU J F, YE Y L, LIU C S, YANG Z P, ZHANG Q, HUANG S M, BAO D J. On-farm evaluation of the improved soil Nmin-based nitrogen management for summer maize in North China Plain. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 517-525.
- [31] DING L, WANG K J, JIANG G M, LIU M Z, NIU S L, GAO L M. Post-anthesis changes in photosynthetic traits of maize hybrids released in different years. *Field Crops Research*, 2005, 93(1): 108-115.
- [32] FAGERIA N K, BALIGAR V C, CLARK R B. *Physiology of Crop Production*. Food Products Press. An Imprint of the Haworth Press, Inc. New York, London, Oxford, 2005: 72-82.
- [33] HOU P, GAO Q, XIE R Z, LI S K, MENG Q F, KIRKBY E A, RMHELD V, MÜLLER T, ZHANG F S, CUI Z L, CHEN X P. Grain yields in relation to N requirement: Optimizing nitrogen management for spring maize grown in China. *Field Crops Research*, 2012, 129(1): 1-6.
- [34] YE Y L, WANG G L, HUANG Y F, ZHU Y J, MENG Q F, CHEN X P, ZHANG F S, CUI Z L. Understanding physiological processes associated with yield-trait relationships in modern wheat varieties. *Field Crops Research*, 2012, 124(3): 316-322.
- [35] KHAN M N A, MURAYAMA S, ISHIMINE Y, TSUZUKI E, NAKAMURA I. Physiomorphological studies of F1 hybrids in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, 1998, 1: 231-239.
- [36] 胡昌浩, 董树亭, 王空军, 孙庆泉. 我国不同年代玉米品种生育特性演进规律研究 II 物质生产特性的演进. *玉米科学*, 1998, 6(3): 49-53.
- HU C H, DONG S T, WANG K J, SUN Q Q. Change of growth traits in maize hybrids released in China in different era. II. Dry matter production. *Maize Science*, 1998, 6(3): 49-53. (in Chinese)
- [37] ZHOU B Y, YUE Y, SUN X F, WANG X B, WANG Z M, MA W, ZHAO M. Maize grain yield and dry matter production responses to variations in weather conditions. *Agronomy Journal*, 2016, 108(1): 1-9.
- [38] MACKOWN C T, VAN SANFORD D A, ZHANG N Y. Wheat vegetative nitrogen compositional changes in response to reduced reproductive sink strength. *Plant Physiology*, 1992, 99(4): 1469-1474.
- [39] 田立双, 李国红, 杨恒山, 张瑞富, 毕文波, 智沈伟. 不同栽培模式对春玉米干物质积累及转运的影响. *作物杂志*, 2014(1): 89-93.
- TIAN L S, LI G H, YANG H S, ZHANG R F, BI W B, ZHI S W. Effects of different cultivation patterns on dry matter accumulation and transportation of spring maize. *Crops*, 2014(1): 89-93. (in Chinese)
- [40] 戴明宏, 赵久然, 杨国航, 王荣焕, 陈国平. 不同生态区和不同品种玉米的源库关系及碳氮代谢. *中国农业科学*, 2011, 44(8): 1585-1595.
- DAI M H, ZHAO J R, YANG G H, WANG R H, CHEN G P. Source-sink relationship and carbon-nitrogen metabolism of maize in different ecological regions and varieties. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(8): 1585-1595. (in Chinese)
- [41] DING L, WANG K J, JIANG G M, BISWAS D K, XU H, LI L F, LI H. Effects of nitrogen deficiency on photosynthetic traits of maize hybrids released in different years. *Annals Botany*, 2005, 96(5): 925-930.
- [42] RAJCAN I, TOLLENAAR M. Source: Sink ratio and leaf senescence in maize. II. Nitrogen metabolism during grain filling. *Field Crops Research*, 1999, 60(3): 255-265.
- [43] ECHARTE L, ROTHSTEIN S, TOLLENAAR M. The response of leaf photosynthesis and dry matter accumulation to nitrogen supply in an older and a newer maize hybrid. *Crop Science*, 2008, 48(2): 656-665.

(责任编辑 杨鑫浩)