

不同耕作方式下缓释肥对夏玉米产量及氮素利用效率的影响

周宝元^{1,2}, 王新兵¹, 王志敏², 马玮^{1*}, 赵明^{1*}

(1 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;

2 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193)

摘要:【目的】氮肥中氮素的合理释放是提高作物产量及氮素利用效率的重要措施之一,耕作方式也可显著影响氮肥施用效果。本文比较了浅旋、免耕和深松三种耕作方式下缓释肥和常规施肥对夏玉米干物质积累、叶面积指数及植株氮素积累的影响,为玉米缓/控释肥的合理应用和耕作方式的选择提供科学依据和技术支撑。【方法】试验于2013年至2014年在河南新乡进行。采用裂区设计,以耕作方式为主区,设浅旋(R)、免耕(N)和条带深松(S)3种耕作方式;肥料类型为副区,设不施氮(CK)、缓释肥(SRF)和常规施肥(CCF)3个处理。【结果】相同耕作方式下,缓释肥处理的夏玉米产量及氮肥利用效率显著高于常规施肥;相同肥料处理,其条带深松耕作的夏玉米产量及氮肥利用效率显著高于浅旋和免耕直播处理。各处理中,以条带深松下的缓释肥处理产量及氮肥利用效率最高,显著高于其他处理,其中两年产量平均增幅为13.4%~59.2%,氮肥农学利用效率(AEN)增幅为27.9%~72.7%,氮素表观利用率(REN)增长15.1~55.7个百分点。分析表明,干物质积累和氮素积累,尤其是花后干物质和氮素积累的增加是产量提高的主要原因。在N、R和S三种耕作方式下,缓释肥处理的花后干物质积累量较常规施肥分别提高13.0%、12.7%和18.7%;花后氮素积累量分别提高14.4%、16.8%和17.8%,其中条带深松耕作的增幅显著高于浅旋和免耕直播。条带深松下缓释肥处理花后干物质和氮素积累量显著高于其他处理。【结论】与传统耕作方式和施肥方式相比,条带深松耕作和缓释肥的施用均显著提高了夏玉米的产量及氮素利用效率,各处理中以条带深松耕作下缓释肥处理的夏玉米产量及氮素效率最高,因此,条带深松深施缓释肥可作为黄淮海区一项有效的合理耕作与施肥措施。

关键词: 夏玉米; 缓释肥; 耕作方式; 产量; 干物质积累; 氮素积累; 氮素利用效率

中图分类号: S513.01; S154.5 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2016)03-0821-09

Effect of slow-release fertilizer and tillage practice on grain yield and nitrogen efficiency of summer maize (*Z. mays* L.)

ZHOU Bao-yuan^{1,2}, WANG Xin-bing¹, WANG Zhi-min², MA Wei^{1*}, ZHAO Ming^{1*}

(1 Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Eco-physiology and Cultivation, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;

2 College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100093, China)

Abstract: 【Objectives】 N release dynamics of fertilizers plays an important role in increasing yield and nitrogen efficiency of maize. Soil tillage practice has remarkable influence on nitrogen use efficiency as well. In this paper, effects of a slow-release fertilizer with different tillage practices on grain yield and nitrogen efficiency of summer maize were compared, to identify the optimum soil tillage for the application of the slow-release fertilizer. 【Methods】 Two factors split plot experiments were conducted in Henan from 2013 to 2014 with summer maize as materials. The main factor was three soil tillage management, rototilling (R), no-tillage (N) and sub-soiling (S); The subplot treatments were nitrogen fertilizer; slow release fertilizer N 270 kg/hm², conventional fertilizer N 270

收稿日期: 2014-11-18 接受日期: 2015-02-09 网络出版日期: 2015-07-17

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203096); 国家科技支撑计划(2013BAD07B00, 2013BAD08B00)资助。

作者简介: 周宝元(1984—), 男, 河北涿州人, 博士研究生, 主要从事玉米高产高效栽培与生理研究。E-mail: zhoubaoyuan2008@163.com

* 通信作者 E-mail: zhaomingcau@163.net; E-mail: weiwei_8200@126.com

kg/hm² (40% as basal application and 60% at the beginning of male tetrad stage), and no nitrogen fertilizer (control). **【Results】** Under the same tillage, the grain yield and nitrogen use efficiency of the slow release fertilizer treatment are higher than those of applying the conventional fertilizer, and the differences are the greatest under the sub-soiling tillage. Among the tillage treatments, the yield of the slow release fertilizer treatment under the sub-soiling tillage (S-SRF) is 13.4% - 59.2% higher than those of other treatments, while the agronomic nitrogen use efficiency of nitrogen (AEN) and recovery efficiency of applied nitrogen (REN) of S-SRF are 27.9% - 72.7% and 15.1 - 55.7 percentage points higher, respectively, compared to those for other treatments. The yield and NUE increases are mainly affected by the dry matter accumulation and nitrogen accumulation (especially post-silking). The post-silking dry matter accumulation of applying the slow release fertilizer is 13.0%, 12.7% and 18.7% higher, respectively, compared to those for the conventional fertilizer treatments under rototilling, no-tillage, and sub-soiling. Furthermore, the post-silking nitrogen accumulation of applying the slow release fertilizer is 14.4%, 16.8% and 17.8% higher, respectively, compared to those for the conventional fertilizer treatments under rototilling, no-tillage, and sub-soiling. The post-silking dry matter accumulation and nitrogen accumulation of S-SRF are significantly higher than those of other treatments. **【Conclusions】** The yield and nitrogen use efficiency of maize in the two years are highest under the sub-soiling with the slow release fertilizer application. From the results we can conclude that the combination of sub-soiling and the application of slow release fertilizer could provide an approach for enhancing the nitrogen fertilizer use efficiency and getting high yield.

Key words: summer maize; slow-release fertilizer; soil tillage; grain yield; dry matter production; nitrogen accumulation; nitrogen utilization efficiency

在作物单产提高的过程中,化肥所起的作用占40%~60%^[1]。然而,随着作物产量水平不断提高,生产中出现了氮肥过量施用、不合理施肥等现象,造成了肥料利用率低,氮素损失和环境污染等问题^[2-4]。研究表明,在华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系中,农民习惯施肥的周年总施氮量超过N 500 kg/hm²,而冬小麦、夏玉米单季作物吸氮量分别仅为N 160和140 kg/(hm²·a)^[2],导致土壤中氮肥盈余达到N 227 kg/hm²^[3]。而该区小麦、玉米平均氮肥回收利用率分别仅为18%和16%^[4-5],远远低于美国玉米生产的氮肥回收利用率(37%)^[6],每年通过氨挥发、反硝化作用和淋洗损失的氮分别为N120、16和136 kg/hm²^[2]。因此,切实有效地提高氮肥利用率,减轻其对环境的威胁,对玉米高产、高效和安全生产具有重要意义。

改善氮肥施用技术,科学合理施用氮肥是提高氮肥利用效率,实现环境友好的重要途径。在华北平原,玉米生长期高温多雨,生产中常采用一炮轰的施肥方式易引起氮素的大量淋失,不仅造成肥料资源浪费,利用率降低,也常常使玉米生长后期发生脱肥早衰^[7];同时,由于玉米植株高大,后期追肥困难,费力费工,且会对玉米造成一定的伤害,导致不同程度的减产^[8]。近年来,缓/控释肥料的研制与应用成为解决上述问题的新途径。缓/控释肥具有

肥效期长且稳定的特点,一次施用能满足玉米在整个生育期对养分的需求,减少施肥的数量和次数,节省成本,也减少了对环境的污染^[9]。前人研究已证明,与等养分量的普通化肥相比,缓/控释肥能够提高肥料的利用效率和作物产量^[10-15]。然而,前人关于缓/控释肥应用效果的研究大多集中于缓/控释肥单因素(不同类型,施用方式等)对玉米产量、生长发育、肥料效率及环境效应的影响等方面^[12-17],很少关注其他栽培措施(如耕作方式)对其肥效的影响。显然,耕作方式对作物产量及施用肥料效应存在较大影响^[18-19]。已有研究证明普通肥料在不同耕作方式下的作用效果不同^[20-21]。而关于缓/控释肥在不同耕作方式下的施用效应研究较少。因此,本试验通过田间试验比较了在灭茬旋耕、免耕直播和条带深松三种耕作方式下缓释肥对玉米产量及氮素利用效率的影响,并通过分析玉米干物质及氮素积累与分配特征进一步研究耕作方式与缓释肥互作的作用效果与增产机理,旨在为玉米缓/控释肥的合理使用和耕作方式的选择提供科学依据和技术支撑。

1 材料与amp;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 °C,全年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 4647.2 °C。年降水量 573.4 mm,多集中于 7、8 月间,年日照时数 2323.9 h。试验地土壤为粘

质壤土,0—20 cm 土层有机质含量 12.55 g/kg、速效氮 61.2 mg/kg、速效磷 16.2 mg/kg、速效钾 110.0 mg/kg、pH 8.21。2013 年和 2014 年夏玉米生长季日照、降水量及温度状况见表 1。

表 1 2013、2014 年夏玉米生长季月平均日照、降雨量及温度状况

Table 1 Monthly active accumulated temperature (°C), rainfall (mm) and sunshine hours (h) during the growing seasons (June – September) of summer maize in 2013 and 2014

月份 Month	2013			2014		
	积温(°C) Acc. temperature	降雨量(mm) Rainfall	日照时数(h) Sunshine hour	积温(°C) Acc. temperature	降雨量(mm) Rainfall	日照时数(h) Sunshine hour
6	802.3	13.8	163.0	795.0	37.8	144.8
7	872.1	231.1	128.6	871.2	134.5	205.6
8	909.5	64.5	269.0	788.3	107.4	143.5
9	685.3	18.8	130.4	638.0	166.5	97.3
Total	3269.2	328.2	691.0	3092.5	446.2	591.2

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,以耕作方式为主区,设浅旋耕作(R)、免耕直播(N)和条带深松(S)3种方式;肥料类型为副区,设不施氮(CK)、常规施肥 N 270 kg/hm² 分次施用(CCF,60%基施,40%拔节期追施),缓释肥 N 270 kg/hm² 一次性基施(SRF)3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,后与免耕处理相同,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研制的 HHN-2BFYC 型立式条带深松精量播种机进行深松、播种及施肥一体化作业,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,阻止已释放养分流失,形成肥料箱,为作物持续不断提供养分;常规施肥处理使用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 P₂O₅ 45 kg/hm² 和 K₂O 45 kg/hm²,其中不施氮处理所用磷、钾肥为常规过磷酸钙和氯化钾肥料。

选用郑单 958 为供试材料,于 6 月中旬播种,种植密度为 60000 plant/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 年为 9 月 28

日,2014 年为 9 月 26 日。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶面积及叶面积指数 于玉米吐丝期、成熟期,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 干物质积累 于玉米吐丝期和成熟期,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,于 105 °C 杀青 30 min,80 °C 烘干至恒重后测定干物重,样品粉碎用于养分(N)的测定。

1.3.3 植株氮素含量及氮肥利用效率 利用 KT-2300 型凯氏定氮仪测定植株不同部位氮素含量。计算方法如下^[22-24]:

植株氮积累量(kg/hm², nitrogen accumulation amount in plant, NAA) = 植株含氮量(%) × 单株干重 × 小区密度;

氮肥农学效率(kg/kg, agronomic use efficiency, AEN) = (施氮区玉米产量 - 对照区玉米产量)/施氮量;

氮肥表观利用率(%, recovery efficiency of applied N, REN) = (施氮区玉米地上部吸氮量 - 对照区玉米地上部吸氮量)/施氮量 × 100。

1.3.4 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

本研究所用产量数据为 2013 年和 2014 年的试验数据,其余均为 2013 年试验数据。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 结果与分析

2.1 不同耕作方式下缓释肥对夏玉米产量的影响

由图 1A 可知,相同耕作方式下,与不施氮对照

(CK)相比,各施氮处理的玉米产量均显著提高,且施缓释肥处理(SRF)的产量显著高于常规施肥(CCF)。2013年,在浅旋(R)耕作下,SRF处理的产量比 CCF 和 CK 分别提高了 6.3% 和 34.8%;免耕直播(N)条件下,SRF 比 CCF 和 CK 分别提高了 7.2% 和 47.0%;条带深松(S)条件下,SRF 比 CCF 和 CK 分别提高了 13.9% 和 49.4%。不同耕作方式比较,条带深松耕作(S)的 SRF 处理的产量最高,分别比浅旋(R)和免耕直播(N)条件下的 SRF 处理提高了 10.7% 和 11.5%,差异显著。

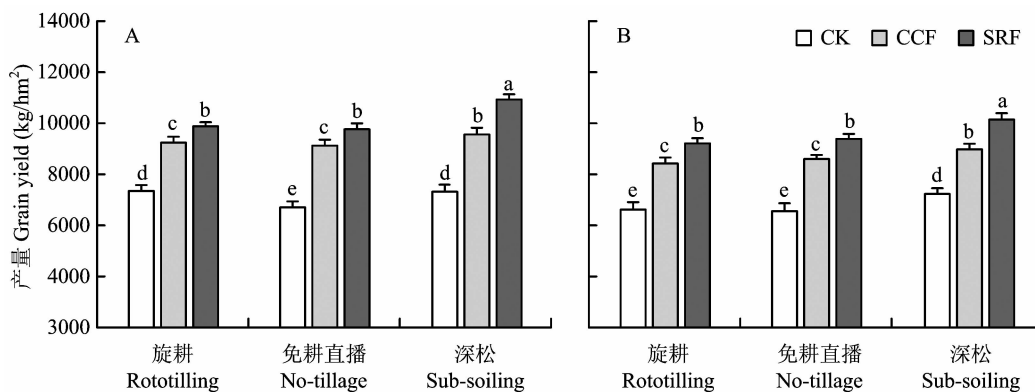


图 1 2013 年和 2014 年不同处理夏玉米产量

Fig. 1 Grain yields of summer maize under different tillage practices and fertilization in 2013 (A) and 2014 (B)

[注(Note): CK—不施氮肥 Without nitrogen; CCF—常规施肥 N 270 kg/hm² Conventional compound fertilizer; SRF—缓释肥 N 270 kg/hm² Slow release fertilizer. 柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at the 5% level.]

在 2014 年的试验中,各处理玉米产量的变化和 2013 年的整体趋势一致,相同耕作方式下,表现为 SRF > CCF > CK。浅旋耕作下 SRF 处理的产量比 CCF 和 CK 分别提高了 9.1% 和 38.9%;免耕直播下分别提高了 9.2% 和 43.0%;深松耕作下分别提高了 12.8% 和 40.7%。不同耕作方式比较,条带深松耕作下 SRF 处理的产量最高,分别比免耕直播和浅旋条件下的 SRF 处理高 10.2% 和 8.2%,且差异显著。

2.2 不同耕作方式下缓释肥对夏玉米花前、花后干物质积累与分配的影响

由表 2 可以看出,相同耕作方式下,常规施肥(CCF)和缓释肥处理(SRF)处理的夏玉米花前干物质积累量、花后干物质积累量及整个生育期总干物质积累量均显著高于 CK。SRF 和 CCF 处理之间花前干物质积累量没有明显差异,而 SRF 处理的花后干物质积累量显著高于 CCF,浅旋耕作(R)下的增幅为 13.0%,免耕(N)条件下增幅为 12.7%,条带

深松耕作(S)下增幅为 18.7%。各处理中,以条带深松耕作(R)缓释肥处理的花后干物质积累量最高,显著高于其他处理,增幅为 8.4%~41.1%。由于花后干物质积累的显著增加,SRF 处理全生育期总干物质质量显著高于 CCF,3 种耕作方式下增幅分别为 8.1%(R)、8.9%(N)和 12.3%(S),且条带深松与缓释肥互作处理的总干物质积累量最高,显著高于其他处理,增幅为 6.2%~57.1%。同时,相同耕作方式下,SRF 处理的花后干物质积累量占全生育期总干物质积累量的比值显著高于 CCF 和 CK 处理。不同耕作方式之间,条带深松耕作下各处理的花后干物质积累量占全生育期的比值均高于免耕直播和浅旋耕作。各处理中,以条带深松下缓释肥处理的花后干物质积累量占全生育期的比值最高。

以上结果说明,与常规施肥相比,缓释肥能够显著提高玉米花后干物质积累量及花后干物质积累量占总干物质积累量的比例,其中在条带深松耕作条件下缓释肥处理的增幅最大。

表 2 2013 年不同处理夏玉米花前与花后干物质积累

Table 2 Dry matter accumulation of summer maize before and after the silking under different tillage practices and fertilization in 2013

耕作方式 Soil tillage	施肥处理 Fertilization	植株干物质积累量 Dry matter accumulation in plant(kg/hm ²)			花后/整个生育期 Rate of post-silking and total biomass
		花前 Pre-silking	花后 Post-silking	全生育期 Whole growth period	
浅旋(R)	对照 CK	6056.5 c	7075.5 d	13132.0 e	0.54 d
Rotary tillage	常规施肥 CCF	8174.3 b	9468.6 c	17642.9 d	0.54 d
	缓释肥 SRF	8372.1 ab	10703.6 b	19075.7 bc	0.56 bc
免耕(N)	对照 CK	6152.2 c	7128.2 d	13280.4 e	0.54 d
No-tillage	常规施肥 CCF	8010.7 b	9826.4 c	17837.1 d	0.55 cd
	缓释肥 SRF	8345.7 ab	11076.9 b	19422.6 b	0.57 ab
条带深松(S)	对照 CK	6113.5 c	7089.9 d	13203.4 e	0.54 d
Sub-soil tillage	常规施肥 CCF	8260.4 ab	10113.8 bc	18374.2 cd	0.55 cd
	缓释肥 SRF	8618.4 a	12009.9 a	20628.3 a	0.58 a

注(Note): CK—不施氮肥 Without nitrogen; CCF—常规施肥 N 270 kg/hm² Conventional compound fertilizer; SRF—缓释肥 N 270 kg/hm² Slow release fertilizer. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level.

2.3 不同耕作方式下缓释肥对夏玉米叶面积指数(LAI)的影响

图 2A 显示,相同耕作方式下,缓释肥处理(SRF)处理和常规施肥处理(CCF)处理的开花期叶面积指数(LAI)均显著高于CK,在浅旋耕作(R)条件下,CCF和SRF处理分别比CK提高了68.2%和74.5%;免耕直播(N)条件下,CCF和SRF分别比CK提高了57.9%和63.6%;条带深松(S)条件下,CCF和SRF分别比CK提高了50.3%和62.5%。而SRF处理和CCF处理之间开花期的LAI没有显

著差异。

成熟期(图 2B),各处理 LAI 均显著降低。R、N 和 S 三种耕作方式下,CK 处理的 LAI 降幅分别为 70.4%、71.7% 和 69.9%; CCF 处理的 LAI 降幅分别为 66.1%、63.7% 和 61.2%; SRF 处理的 LAI 降幅分别为 57.3%、54.8% 和 50.0%,显著低于 CK 和 CCF 处理。3 种耕作方式比较,条带深松耕作(S)下各处理(CK, CCF 和 SRF)的 LAI 下降幅度最小,显著低于浅旋(R)和免耕直播(N)下的各处理($P < 0.05$)。另外,各处理中,以条带深松耕作下缓释肥

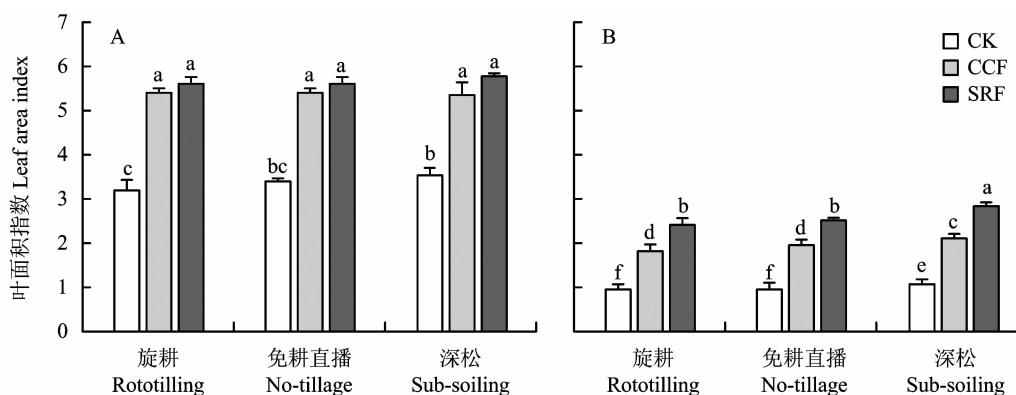


图 2 2013 年不同处理夏玉米开花期和成熟期群体叶面积指数

Fig. 2 Leaf area index (LAI) of summer maize at the silking and maturity under different tillage practices and fertilization in 2013

[注(Note): CK—不施氮肥 Without nitrogen; CCF—常规施肥 N 270 kg/hm² Conventional compound fertilizer; SRF—缓释肥 N 270 kg/hm² Slow release fertilizer. 柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at the 5% level.]

处理的 LAI 下降幅度最小,比其它处理低 8.8%~30.3% ($P < 0.05$)。

2.4 不同耕作方式下缓释肥对夏玉米花前、花后氮素积累与分配的影响

表 3 结果表明,相同耕作方式下,CCF 和 SRF 处理的夏玉米花前氮素积累量、花后氮素积累量及整个生育期总氮素积累量均显著高于 CK 对照,而 SRF 和 CCF 处理之间花前氮素积累量没有明显差异。但是,SRF 处理的花后氮素积累量显著高于 CCF,3 种耕作方式下增幅分别为 14.4%、16.8% 和 17.8%。各处理中以条带深松耕作下缓释肥处理的花后氮素积累量最高,显著高于其他

处理,增幅为 17.1%~401.7%。因此,SRF 处理全生育期总氮素积累量显著高于 CCF,3 种耕作方式下增幅分别为 8.8% (R)、8.3% (N) 和 9.1% (S),且条带深松下缓释肥处理的总氮素积累量最高,显著高于其他处理,增幅为 8.2%~162.2%。同时,相同耕作方式下,SRF 处理的花后干物质积累量占全生育期总氮素积累量的比值显著高于 CCF 和 CK 处理。不同耕作方式比较,条带深松耕作下各处理的花后氮素积累量占全生育期的比值均高于免耕直播和浅旋耕作。各处理中,以条带深松与缓释肥互作处理的花后氮素积累量占全生育期的比值最高。

表 3 2013 年不同处理夏玉米花前与花后氮素积累与分配

Table 3 Nitrogen accumulation and distribution of summer maize before and after the silking under different tillage practices and fertilization in 2013

耕作方式 Soil tillage	施肥处理 Fertilization	植株氮素积累量 Nitrogen accumulation in plant (kg/hm ²)			花后/整个生育期 Rate of post-silking and total biomass
		花前 Pre-silking	花后 Post-silking	全生育期 Whole growth period	
浅旋 Rotary tillage	对照 CK	72.7 c	23.1 g	95.8 e	0.24 f
	常规施肥 CCF	126.8 b	78.5 e	205.2 c	0.38 d
	缓释肥 SRF	133.5 a	89.8 c	223.3 b	0.40 c
免耕 No-tillage	对照 CK	71.1 c	23.2 h	94.4 e	0.25 f
	常规施肥 CCF	126.4 b	84.7 d	211.2 c	0.40 c
	缓释肥 SRF	129.8 ab	99.0 b	228.7 b	0.43 b
条带深松 Sub-soil tillage	对照 CK	75.1 c	30.8 f	105.9 d	0.29 e
	常规施肥 CCF	128.5 ab	98.4 b	226.9 b	0.43 b
	缓释肥 SRF	131.6 a	115.9 a	247.5 a	0.47 a

注 (Note): CK—不施氮肥 Without nitrogen; CCF—常规施肥 N 270 kg/hm² Conventional compound fertilizer; SRF—缓释肥 N 270 kg/hm² Slow release fertilizer. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level.

以上结果说明,与不施肥和常规施肥处理相比,施用缓释肥能够显著提高玉米花后氮素积累量及其占总氮素积累量的比例,且在条带深松耕作下增幅最大。

2.5 不同耕作方式下缓释肥对夏玉米氮素利用效率的影响

从表 4 可以看出,相同耕作方式下,缓释肥处理的氮肥农学利用效率及氮肥表观利用率均显著高于常规施肥处理。与常规施肥处理相比,浅旋耕作 (R) 下缓释肥处理的氮肥农学效率提高 11.7%,氮肥表观利用率提高 18.2%;免耕直播下 (N) 缓释肥处理的氮肥农学效率提高 25.0%,氮肥表观利用率

提高 15.0%;条带深松耕作 (S) 下缓释肥处理的氮肥农学效率提高 38.5%,氮肥表观利用率提高 15.5%。不同耕作方式比较,条带深松耕作的氮肥农学利用效率及氮肥表观利用率均高于浅旋和免耕直播处理。各处理中,条带深松耕作下缓释肥处理氮素利用效率最高,与浅旋和免耕直播条件下的 SRF 处理相比,氮肥农学效率分别提高了 54.7% 和 27.9%,氮素表观利用率分别提高了 31.7% 和 15.1%。

以上结果表明,与常规施肥相比,缓释肥能够显著提高玉米氮肥利用效率,且耕作方式对不同施肥处理的氮肥利用效率影响较大,条带深松耕作下缓释肥处理的氮肥利用率增幅最大。

表 4 2013 年不同处理夏玉米氮素利用效率
Table 4 Nitrogen utilization efficiency of summer maize under different tillage practices and fertilization in 2013

耕作方式 Soil tillage	施肥处理 Fertilization	氮肥	氮肥表观
		农学效率 AEN (kg/kg)	利用率 REN (%)
浅旋 Rotary tillage	对照 CK		
	常规施肥 CCF	7.7 e	36.8 d
	缓释肥 SRF	8.6 d	43.5 c
免耕 No-tillage	对照 CK		
	常规施肥 CCF	8.3 d	43.3 c
	缓释肥 SRF	10.4 b	49.8 b
深松 Sub-soil tillage	对照 CK		
	常规施肥 CCF	9.6 c	49.6 b
	缓释肥 SRF	13.3 a	57.3 a

注 (Note): CK—不施氮肥 Without nitrogen; CCF—常规施肥 N 270 kg/hm² Conventional compound fertilizer; SRF—缓释肥 N 270 kg/hm² Slow release fertilizer. AEN—Nitrogen agronomic efficiency; REN—Recovery efficiency of nitrogen. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level.

3 讨论

缓/控释肥料的应用不仅能满足作物对养分的需求,更重要的是能够降低肥料损失,显著提高肥料利用效率^[25-28]。在本研究中,与常规施肥比,施用缓释肥处理的夏玉米产量显著提高,且产量的提高主要来自于花后干物质积累的增加(表 2)。前人研究已证明,禾谷类作物经济产量的 60% 以上来自开花后到成熟期的光合代谢产物^[29-31]。本研究表明,缓释肥处理与常规施肥处理的花前干物质积累量没有显著差异,而缓释肥处理花后干物质积累量显著高于常规施肥处理,且花后干物质积累量占全生育期总干物质质量的比例接近 60%,显著高于常规施肥处理。说明施用缓释肥有利于灌浆期干物质的积累,这与前人关于不同包膜材料控释复合肥的研究结果类似^[17]。这主要是因为常规施肥前期大量的氮素淋失造成花后氮素不足,植株根系周围出现氮素亏缺^[32],加速了花后植株衰老^[7],进而导致花后干物质合成能力下降^[33];而缓释肥根据玉米生长特性进行选择释放,前期释放缓慢,从大口期以后释放速率加快,花后土壤氮素的供应能力显著提高^[34],降低了营养器官,尤其是叶片中氮素向生殖

器官的转运量,从而延缓了叶片衰老,显著提高花后干物质积累量^[35]。本研究中,缓释肥处理花后氮素积累量显著高于常规施肥处理,而花前氮素积累量没有显著差异。同时,由于缓释肥处理促进了植株对养分的吸收,与常规施肥比,缓释肥处理玉米氮肥农学效率和氮素表观利用率显著提高。

然而,耕作措施可通过调节土壤环境对作物养分的吸收及利用产生重要影响,进而影响产量^[36-37]。本研究中,与浅旋耕作和免耕直播比,条带深松耕作下各施肥处理的花后氮素积累量显著增加,而花前氮素积累量没有显著差异。较高的花后氮素积累有利于延缓叶片衰老,因此各施肥处理在条带深松耕作下的花后叶面积指数显著高于浅旋和免耕处理(图 2),从而促进了花后干物质积累量的增加(表 3),最终提高了产量。另外,由于各施肥处理在条带深松耕作下氮素积累量和产量显著高于浅旋和免耕处理,因此,条带深松耕作下各处理玉米氮素农学效率及氮肥回收利用效率显著提高。其原因可能是浅旋耕作由于常年的机械压实会使土壤耕层变浅,影响作物根系的正常下扎和活性,使作物花后根系衰老加快^[32, 38];同时,免耕直播由于播种和施肥深度较浅,且土壤坚实,不利于根系下扎;而条带深松由于耕作较深,增加了耕层深度,降低了土壤容重,有利于根系下扎^[32, 39],使玉米生长后期能够保持较高的根系活力,从而维持较高的养分吸收能力。因此,条带深松耕作可以促进玉米对土壤中的氮素的吸收与利用。

总之,在本研究条件下,缓释肥能够显著提高夏玉米产量及氮素利用效率,且耕作方式对缓释肥的施用效果影响较大,在条带深松耕作下施用缓释肥的产量及氮素利用效率最高。但是,缓释肥的应用效果除了受耕作方式的影响外,还受土壤温度、湿度、微生物及玉米品种等因素对养分释放的影响。因此,为更好指导控释肥的应用,这些问题还有待进一步研究。

4 结论

与常规肥料相比,缓释肥能够显著提高夏玉米产量及氮素利用效率,主要是因为施用缓释肥显著提高了玉米干物质积累量和植株氮素积累量,尤其是花后干物质及氮素积累量。三种耕作方式中,条带深松耕作下缓释肥的作物产量及氮素利用效率最高。可见,缓释肥与条带深松耕作相结合能够更加有效地提高玉米产量和氮素利用效率。

参 考 文 献:

- [1] 张民, 史衍玺, 杨守祥, 等. 控释和缓释肥的研究现状与进展[J]. 化肥工业, 2001, 28(5): 27-30.
Zhang M, Shi Y X, Yang S X, *et al.* Status quo of study of controlled-release and slow-release fertilizers and progress made in this respect [J]. Journal of the Chemical Fertilizer Industry, 2001, 28(5): 27-30.
- [2] 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 684-697.
Zhao R F, Chen X P, Zhang F S. Nitrogen cycling and balance in winter wheat-summer maize rotation system in North China Plain [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (4): 684-697.
- [3] Vitousek P M, Naylor R, Zhang F S. Nutrient imbalance in agricultural development[J]. Science, 2009, 324: 1519-1520.
- [4] Cui Z L, Chen X P, Miao X Y, *et al.* On-farm evaluation of the improved soil N min-based nitrogen management for wheat in North China Plain [J]. Agronomy Journal, 2008, 100 (100): 517-525.
- [5] Cui Z L, Chen X P, Miao X Y, *et al.* Soil nitrate N levels required for high yield maize production in the North China Plain [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 82 (2): 187-196.
- [6] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, 31: 132-140.
- [7] Meng Q F, Chen X P, Zhang F S, *et al.* In-season root-zone nitrogen management strategies for improving nitrogen use efficiency in high-yielding maize production in China [J]. Pedosphere, 2012, 22(3): 294-303.
- [8] 王宜伦, 李潮海, 王瑾, 等. 缓/控释肥在玉米生产中的应用与展望[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 254-257.
Wang Y L, Li C H, Wang J, *et al.* Application and prospect of slow/controlled release fertilizers in maize production[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(24): 254-257.
- [9] Kaneta Y, Awasaki H, Murai T. The non-tillage rice culture by single application of fertilizer in a nursery box with controlled-release fertilizer[J]. Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, 1994, 65: 385-391.
- [10] 赵先贵, 肖玲. 控释肥料的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(9): 95-97.
Zhao X G, Xiao L. Current research on controlled release fertilizers [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, 10 (9): 95-97.
- [11] Shoji S, Kanno H. Use of polyolefin-coated fertilizers for increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emission [J]. Fertilizer Research, 1994, 3: 147-152
- [12] 颜冬云, 张民. 控释复肥在盆栽玉米上的肥效研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 454-458.
Yan D Y, Zhang M. Effects of controlled-release compound fertilizers on the growth of potted corn [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(4): 454-458.
- [13] 易镇邪, 王璞, 陈平平, 等. 包膜尿素在华北平原夏玉米上的应用[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 4919-4928.
Yi Z X, Wang P, Chen P P, *et al.* Application of coated urea in summer maize in North China Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4919-4928.
- [14] 邵国庆, 李增嘉, 宁堂原, 等. 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[J]. 作物学报, 2009, 35(1): 118-123.
Shao G Q, Li Z J, Ning T Y, *et al.* Effects of normal urea and release-controlled urea on root and shoot growth and yield of maize in different water conditions [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(1): 118-123.
- [15] 卫丽, 马超, 黄晓书, 等. 控释肥对土壤全氮含量及夏玉米产量品质的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 176-179.
Wei L, Ma C, Huang X S, *et al.* Effects of controlled-release nitrogen fertilizer on total N of soil and yield and quality of summer maize [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 176-179.
- [16] 杨俊刚, 倪小会, 徐凯, 等. 接触施用包膜控释肥对玉米产量、根系分布和土壤残留无机氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 924-930.
Yang J G, Ni X H, Xu K, *et al.* Effects of co-situs application of polymer-coated fertilizers on grain yield, root distribution and soil residual Nmin in summer maize [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 924-930.
- [17] 赵斌, 董树亭, 张吉旺, 等. 控释肥对夏玉米产量和氮素积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(10): 1760-1768.
Zhao B, Dong S T, Zhang J W, *et al.* Effects of controlled-release fertilizer on yield and nitrogen accumulation and distribution in summer maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(10): 1760-1768.
- [18] Edwards J H, Wood C W, Thurlow D L, *et al.* Tillage and crop rotation effects on fertility status of a Hapludult soil [J]. Soil Science Society of American Journal, 1992, 56: 1577-1582.
- [19] Huang G B, Chai Q, Feng F X, *et al.* 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 [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2011, 11(8): 1286-1296.
- [20] 梁熠, 马琨, 朱海燕, 等. 深松与施氮量对春玉米产量及氮素吸收利用率的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(2): 129-134.
Liang Y, Ma K, Zhu H Y, *et al.* Effect of sub-soiling strategies and nitrogen application on the nitrogen utilization efficiency and grain yield of spring maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(2): 129-134.
- [21] 于晓芳, 高聚林, 叶君, 等. 深松及氮肥深施对超高产春玉米根系生长、产量及氮肥利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(1): 114-119.
Yu X F, Gao J L, Ye J, *et al.* Effects of deep loosening with

- nitrogen deep placement on root growth, grain yield and nitrogen use efficiency of super high-yield spring maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(1): 114–119.
- [22] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization [J]. *Agronomy Journal*, 1982, 74: 562–564.
- [23] 张银锁, 宇振荣, Driessen P M. 环境条件和栽培管理对夏玉米干物质积累、分配及转移的试验研究 [J]. *作物学报*, 2002, 28(1): 104–109.
Zhang Y S, Yu Z R, Driessen P M. Experimental study of assimilate production, partitioning and translocation among plant organs in summer maize (*Zea mays*) under various environmental and management conditions [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1): 104–109.
- [24] 李潮海, 刘奎, 周苏玫, 等. 不同施肥条件下夏玉米光合对生理生态因子的响应 [J]. *作物学报*, 2002, 28(2): 265–269.
Li C H, Liu K, Zhou S M, *et al.* Response of photosynthesis to eco-physiological factors of summer maize on different fertilizer amounts [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(2): 265–269.
- [25] 张总正, 秦淑俊, 李娜, 等. 深松和施氮对夏玉米产量及氮素吸收利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 790–798.
Zhang Z Z, Qin S J, Li N, *et al.* Effects of sub-soiling and N fertilizer application on dry matter accumulation, nitrogen use efficiency and yield of summer maize [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4): 790–798
- [26] 于立芝, 李东坡, 俞守能, 等. 缓/控释肥料研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2006, 25(12): 1559–1563.
Yu L Z, Li D P, Yu S N, *et al.* Research advances in slow/controlled release fertilizers [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(12): 1559–1563.
- [27] 樊小林, 廖宗文. 控释肥料与平衡施肥和提高肥料利用率 [J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(3): 219–223.
Fan X L, Liao Z W. Increase fertilizer use efficiency by means of controlled-release fertilizer production according to theory and techniques of balance fertilization [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(3): 219–223.
- [28] 符建荣. 控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(2): 145–152.
Fu J R. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and N recovery [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(2): 145–152.
- [29] 潘庆民, 于振文, 王月福, 等. 公顷产 9000 kg 小麦氮素吸收分配的研究 [J]. *作物学报*, 1999, 25: 541–547.
Pan Q M, Yu Z W, Wang Y F, *et al.* Studies on uptake and distribution of nitrogen in wheat at the level of 9000 kg per hectare [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25: 541–547.
- [30] Ye Y L, Wang G L, Huang Y F, *et al.* Understanding physiological processes associated with yield-trait relationships in modern wheat varieties [J]. *Field Crops Research*, 2011, (124): 316–322.
- [31] Khan M N A, Murayama S, Ishimine Y, *et al.* Physiomorphological studies of F1 hybrids in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant Production Science*, 1998, 1: 231–239.
- [32] 王新兵, 侯海鹏, 周宝元, 等. 条带深松对不同密度玉米群体根系空间分布的调节效应 [J]. *作物学报*, 2014, 40(12): 2136–2148.
Wang X B, Hou H P, Zhou B Y, *et al.* Effect of strip subsoiling on population root spatial distribution of maize under different planting densities [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(12): 2136–2148.
- [33] Ding L, Wang K J, Jiang G M, *et al.* Effects of nitrogen deficiency on photosynthetic traits of maize hybrids released in different years [J]. *Annals Botany*, 2005, 96: 925–930.
- [34] 邵国庆, 李增嘉, 宁堂原, 等. 灌溉和尿素类型对玉米氮素利用及产量和品质的影响 [J]. *中国农业科学*, 2008, 41(11): 3672–3678.
Shao G Q, Li Z J, Ning T Y, *et al.* Effects of irrigation and urea types on N utilization, yield and quality of maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(11): 3672–3678.
- [35] Rajcan I, Tollenaar M. Source: sink ratio and leaf senescence in maize. II. Nitrogen metabolism during grain filling [J]. *Field Crops Research*, 1999, 60: 255–265.
- [36] 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 [J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 709–714.
Xiao J B, Sun Z X, Yang J T. Effect of sub-soiling on soil water and crop yield in semi-arid area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 709–714.
- [37] 张哲元, 张玉龙, 黄毅, 等. 覆膜及深松配合措施对玉米生长发育及产量的影响 [J]. *土壤通报*, 2009, 40(5): 1156–1159.
Zhang Z Y, Zhang Y L, Huang Y, *et al.* Effects of plastic-film mulching and sub-soiling measures on growth and yield of maize [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(5): 1156–1159.
- [38] 赵秉强, 李凤超, 薛坚, 等. 不同耕作法对冬小麦根系生长发育的影响 [J]. *作物学报*, 1997, 23(5): 587–596.
Zhao B Q, Li F C, Xue J, *et al.* Effect of different tillage methods on root growth of winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(5): 587–596.
- [39] 宋日, 吴春胜, 牟金明. 深松土对玉米根系生长发育的影响 [J]. *吉林农业大学学报*, 2000, 22(4): 73–75, 80.
Song R, Wu C S, Mou J M. Effect of sub-soiling on root growth of maize [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2000, 22(4): 73–75, 80.