植物营养与肥料学报 2013,19(4):790-798
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0403

深松和施氮对夏玉米产量及氮素吸收利用的影响

张总正[1,2], 秦淑俊[1,2], 李 娜[1,2], 郭利伟[1,2], 宁堂原[1,2,3*], 陈国庆[1,2]
(1 山东农业大学作物生物学国家重点实验室, 山东省作物生物学重点实验室,山东泰安 271018;
2 山东农业大学农业部作物水分生理与抗旱种质改良重点实验室,山东泰安 271018;
3 山东农业大学国家缓控释肥工程技术研究中心,山东泰安 271018)

摘要: 于2010年和2011年通过田间裂区试验,研究了在旋茬和旋茬后深松条件下常规尿素分次施用和控释尿素对郑单958夏玉米的花后氮素积累、分配、利用及产量的影响。结果表明,在相同的耕作措施下,氮素积累及其向子粒的分配量均表现为控释尿素>普通尿素两次施用>普通尿素一次施用>不施氮处理;在相同施氮水平下,玉米氮素积累及其向子粒的分配量均表现为深松大于旋茬处理。深松并施用控释尿素处理的夏玉米在两年试验中的子粒产量和氮素利用率均为最高,与其他处理相比差异显著。可见,与传统的旋茬耕作和施肥方式相比,深松耕作和施用控释尿素均能显著提高郑单958夏玉米的氮素利用率和产量。二者的有机结合可为玉米的氮素高效利用和产量的提高提供新的思路。

关键词: 玉米; 深松; 氮肥; 干物质积累; 氮素利用效率; 产量
中图分类号: S513.01.062 **文献标识码**: A **文章编号**: 1008-505X(2013)04-0790-09

Effects of subsoiling and N fertilizer application on dry matter accumulation, nitrogen use efficiency and yield of summer maize

ZHANG Zong-zheng[1,2], QIN Shu-jun[1,2], LI Na[1,2], GUO Li-wei[1,2], NING Tang-yuan[1,2,3*], CHEN Guo-qing[1,2]
(*1 State Key Laboratory of Crop Biology/Shandong Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2 Key Laboratory of Crop Water Physiology and Drought-tolerance Germplasm Improvement of Ministry of Agriculture, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 3 Chinese National Engineering Research Center for Slow-Controlled Release Fertilizers, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China*)

Abstract: To provide the basis for the high-yield summer maize cultivar, field experiments were conducted to study the effects of subsoiling and controlled release urea on nitrogen accumulation, distribution and use efficiency and yield of summer maize in 2010 and 2011. Two sets of treatments were arranged in a split plot design. The whole-plot treatment factor was two tillage methods, rototilling for stubble breaking and subsoiling after rototilling for stubble breaking, and the sub-subplot treatments are the N 225 kg/ha controlled release urea treatment, the N 225 kg/ha conventional urea for two applications treatment (40% was used as basal application and 60% was used at the beginning of male tetrad stage), the N 225 kg/ha conventional urea treatment for one application and no nitrogen fertilizer treatment used as control. The maize cultivar, Zhengdan 958, was chosen as experiment material. The results show that in the same cultivation measure conditions, the trends of the nitrogen accumulation and distribution into the grains of all treatments are the controlled release urea treatment > the conventional urea for two applications treatment > the conventional urea treatment for one application > the no urea treatment. Compared with the rototilling for stubble breaking, the subsoilling could increase the dry matter accumulation, nitrogen accumulation and distribution into the grains under the same nitrogen level. The yields and nitrogen use efficiencies

收稿日期: 2012-12-03 **接受日期**: 2013-04-01
基金项目: 国家自然科学基金(30900876、31101127);公益性行业(农业)科研专项经费(201103001); 科技支撑计划(2012BAD14B07、2011BAD21B06)项目资助。
作者简介: 张总正(1986—), 男, 山东枣庄人,硕士研究生,主要从事农业资源利用研究。Tel: 0538-8249737, E-mail: backhame@126.com
* 通信作者 Tel: 0538-8249737, E-mail: ningty@163.com

of Zhengdan 958 in the two years are highest under the subsoiling and controlled release urea treatment, and are significantly higher than those of the other treatments. It is thus clear that the combination of subsoiling and the application of controlled release urea could provide an approach for using the nitrogen efficiently and getting higher maize yield.

Key words: maize; subsoiling; N fertilizer; dry matter accumulation; nitrogen use efficiency; yield

氮素是玉米生长发育的必需营养元素之一[1]，而且施氮量多少对玉米产量和生态环境均有一定的影响，过量施氮除了造成不必要的浪费之外，还会对生态环境造成严重的威胁[2]。有研究表明，当氮肥施用量在 N 90～270 kg/hm^2 范围内时，玉米产量会随氮肥用量的增加而提高，而当氮肥施用量达 N360 kg/hm^2 时玉米产量则下降[3]。还有研究表明，施氮量为 N 200 kg/hm^2 时，玉米及其秸秆的生物量随着施氮量的增加而增加，而当施氮量达 N 240 kg/hm^2 后，玉米子粒产量不再增加，且玉米秸秆产量呈下降趋势[4]。在黄淮海地区，玉米生长季属雨热同期，传统生产中常采用的一炮轰的施肥方式易引起氮素的淋失，使玉米常常在生长后期发生脱肥早衰，同时玉米生育后期追肥难度大，需要消耗大量的人力物力，并且还会对玉米植株造成一定的伤害，从而对玉米产量造成不良影响[5]。此外还有研究表明，前期适当控氮能够促进玉米的干物质和氮素向子粒的运转，实现玉米产量与氮素利用的协同提高[6]。氮肥肥效适当后移能提高夏玉米植株氮积累量和肥料利用效率，促进玉米子粒灌浆，增加其百粒重和产量[7]。控释肥能显著增加玉米产量，在产量构成因素中增加千粒重的优势较大，能显著提高氮素利用效率和农学效率[8]。在半干旱地区由于传统的耕作措施会导致耕层浅薄，犁底层逐年加厚，其坚硬的犁底层会阻碍水分入渗和根系穿透，而夏季降水强度大且较为集中，使降水不能及时渗入土壤而产生径流，造成了水资源的浪费，不利于土壤的蓄墒[9]。深松处理可以为于旱地区玉米生长创造良好的土壤环境条件，促进玉米生长发育和产量提高[10-12]。近年来，关于控释尿素和深松的研究大都集中在深松、控释尿素单因素对作物生长发育的影响[13-16]或者两者耦合通过影响水分利用率来影响作物的发育[17]，但关于深松和控释尿素影响玉米氮素吸收利用和分配进而影响玉米产量的研究却鲜见报道。所以在理论上和生产上均迫切需要明确控释尿素和深松耕作配合使用对玉米产量和氮素利用效率的影响，为此本试验采用在两种耕作措施条件下研究不同施氮处理对玉米干物质积累、氮素吸收分配及产量的影响，以期为确定玉米节本省肥高产的高效施肥模式和耕作方式提供理论依据。

1　材料和方法

1.1　试验材料

试验于 2010～2011 年在山东农业大学农学试验站进行，试验地点位于 35°38′～36°33′N，116°02′～117°59′E，属于温带半湿润大陆性气候，玉米生育期间（6 月中旬～10 月中旬）多年平均降水量为 512 mm。2010 年降水量为 492 mm，平均气温 22.97℃；2011 年降水量 608.5 mm，平均气温 22.50℃。土壤为棕壤土，0—20 cm 土层有机质含量 12.9 g/kg，全氮 1.0 g/kg，碱解氮 89.8 mg/kg，速效磷 52.6 mg/kg，速效钾 88.9 mg/kg。

1.2　试验设计

采用大田裂区设计，耕作措施为主区，设旋茬（R）和旋茬以后再深松（S）两种处理；施氮水平为副区，设不施氮（CK），常规尿素 N 225 kg/hm^2 一次基施（U），常规尿素 N 225 kg/hm^2 分次施用（T，40% 基施、60% 大口期追施），控释尿素 N 225 kg/hm^2 一次施用（C）4 个处理。控释尿素为树脂包膜尿素，含 N 43.4%，由山东农业大学研制、山东金正大生态工程股份有限公司生产。种植玉米品种为郑单 958，玉米于 6 月中旬播种，每个小区宽 4 m（畦宽 3.6 m），长 25 m，种 6 行玉米，每个处理 3 次重复。播种深度 3～5 cm，行距 60 cm，株距约 25 cm。播前对种子进行精选，以保证纯度和出苗整齐。各处理均施 $P_2O_5$150 kg/hm^2 和 K_2O 150 kg/hm^2，全部旋茬前基施。施肥深度 5～7 cm。其余管理同一般高产田。

1.3　测定项目及方法

在玉米开花期、花后 20 d、收获期采取各处理小区玉米植株地上部样品，按不同器官（茎鞘、叶片、子粒）分开，烘干、称重、粉碎，分析植株不同部位氮含量，用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮，凯氏定氮法测定。

玉米成熟后，测定各试验小区的株数、穗数和穗粒数等产量构成因素，测定所取子粒样品的千粒重，计算各试验小区的产量。

植株氮素总积累量(TNAA,kg/hm^2) = 收获期单株干重 × 小区植株密度 × 收获期单株含氮量(%)[18];

氮肥农学利用率(NAE,kg/kg) = (施氮区子粒产量-无氮区子粒产量)/施氮量[18];

氮肥偏生产力(NPFP,kg/kg) = 施氮区子粒产量/施氮量[18]。

1.4 数据处理

采用 OriginPro 8.0 作图, DPS7.05 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对玉米产量的影响

由图1可以看出,2010年的结果显示,与不施氮(CK)相比,各施氮处理的玉米产量明显提高,且差异显著。施用控释尿素(C)与普通尿素一次施用(U)、普通尿素分两次施用(T)相比产量均有一定程度的提高,各处理中以施控释尿素和深松耕作措施的处理玉米产量最高。在深松条件下,处理C、T、U分别比CK增产43.48%、40.94%、33.08%;旋茬条件下,处理C、T、U分别比CK增产41.72%、37.41%、30.48%,深松处理(S)的产量平均比旋茬处理(R)高2.10%。

在2011年的试验中,各处理对玉米产量的影响和2010年的整体趋势一致,表现为SC > ST > SU > SCK,RC > RT > RU > RCK,在相同耕作措施下,各施氮处理(C、T、U、CK)间差异显著,除CK之外,其他相同施氮条件下,两耕作措施处理(S和R)间差异显著。

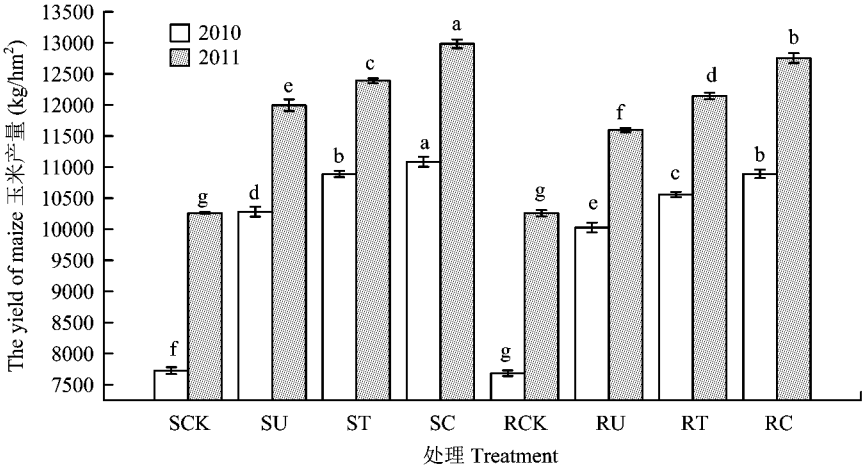

图1 2010年和2011年各处理对玉米产量的影响

Fig.1 The effect of different treatments on the maize yield in 2010 and 2011 years

[注(Note): S—旋茬后深松 Subsoiling after rototilling for stubble breaking; R—旋茬 Rototilling for stubble breaking; CK—不施肥 Without urea; U—一次施常规尿素 N 225 kg/hm^2 conventional urea; T—分次施常规尿素(40%基施,60%大喇叭口期追施)N 225 kg/hm^2 conventional urea for two applications (40% was used as basal application and 60% was used at the beginning of male tetrad stage); C—施控释尿素 N 225 kg/hm^2 controlled-release urea. 柱上不同字母表示差异达5%显著水平 Different letters within a column mean significant at the 5% level.]

2.2 不同处理对玉米干物质积累及分配的影响

2.2.1 对玉米干物质积累的影响 随着玉米生育进程的推进,花后各处理干物质积累量均呈逐渐增加的趋势。深松和控释尿素处理下,收获期的单株干物质积累量最大,除与ST处理差异不显著外,与其他各处理差异显著(图2),两年玉米干物质积累量均表现为SC > ST > SU > SCK,RC > RT > RU > RCK的趋势。

在2010年,郑单958夏玉米自开花期以后深松加控释尿素处理的干物质积累量均为最大;花后20d干物质积累的变化趋势与开花期一致,深松条件下,处理C、T、U分别比CK增加4864、3294、1491 kg/hm^2,差异显著;旋茬条件下,处理C、T、U分别比CK增加3767、2617、1410 kg/hm^2,且差异显著;深松处理比旋茬处理干物质积累量平均增加4674 kg/hm^2,差异达显著水平(图2)。收获期玉米干物质积累量与前两期表现一致,深松条件下,处理C、T、U分别比CK高39.42%、34.68%、19.98%,除C和T处理间差异不显著外,其他处理间差异均达显著水平;旋茬条件下,表现为处理C、

T、U 分别比 CK 高 42.36%、34.89%、18.09%,且差异显著。深松处理单株干物质积累量平均比旋茬处理高 3.90%,ST 和 RT、SC 和 RC 处理间差异不显著,SCK 和 RCK、SU 和 RU 处理间差异显著。

2011 年和 2010 年试验的各处理对玉米单株干物质积累量的影响表现基本一致,且相应处理间的差异达显著水平。

2.2.2 对玉米干物质向子粒分配的影响　在 2010 年,郑单 958 夏玉米在开花期以后,深松并施控释尿素的处理干物质重向子粒的分配量最高,除了 ST 处理外,与其他处理间差异显著(图 2)。花后 20 d 时,深松和旋茬处理在干物质向子粒的分配上表现出相同的趋势,即为 C > T > U > CK,且 S > R,差异显著。收获期时,在深松条件下,处理 C、T、U 的子粒干物质重分别比 CK 多 44.32%、33.36%、22.99%,除 T、C 处理外,其他处理之间差异显著;旋茬处理下,处理 C、T、U 的子粒干物质重比 CK 分别增加 53.40%、48.68%、25.58%,差异达显著水平;深松处理的子粒干物质重平均比旋茬处理高 6.02%。在 2011 年,玉米干物质向子粒的分配和 2010 年的表现基本一致,而且各处理间差异均达显著水平(图 2)。

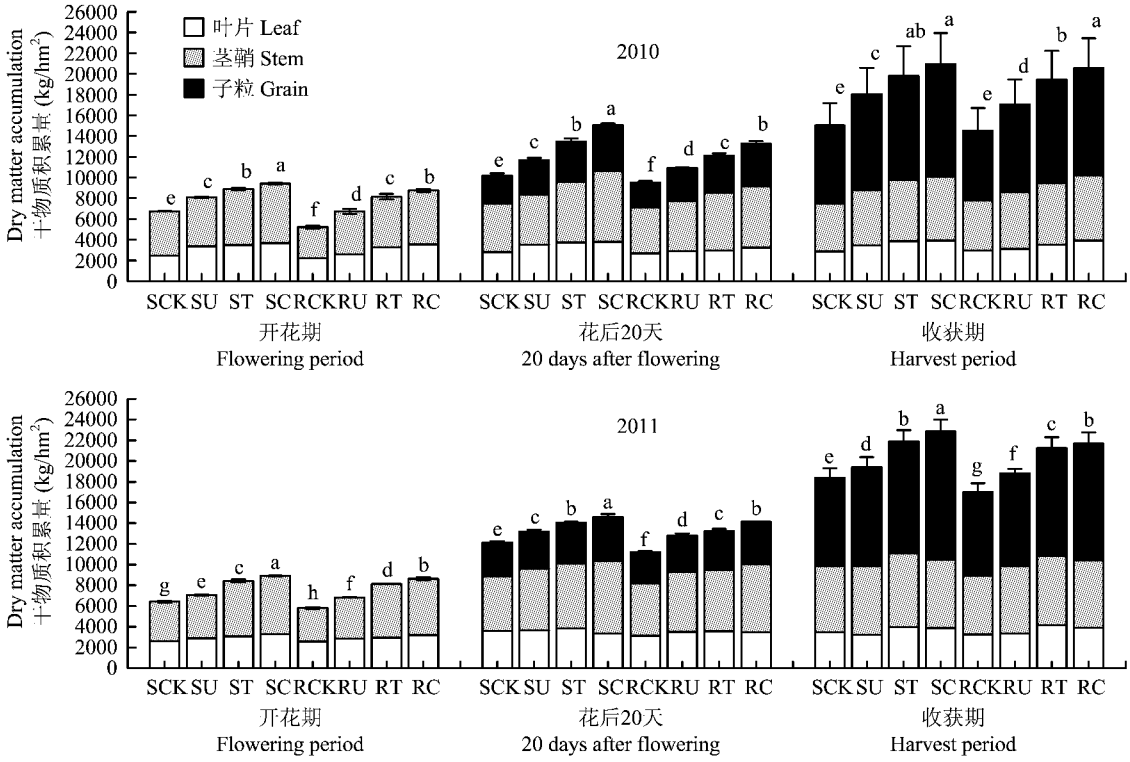

图 2　2010 和 2011 年各处理玉米干物质的积累和分配

Fig. 2　Accumulation and distribution of dry matter of maize under different treatments in 2010 and 2011 years

[注(Note):S—旋茬后深松 Subsoiling after rototilling for stubble breaking; R—旋茬 Rototilling for stubble breaking; CK—不施肥 Without urea; U——次施常规尿素 N 225 kg/hm² conventional urea; T—分次施常规尿素(40%基施,60%大喇叭口期追施)N 225 kg/hm² conventional urea for two applications (40% was used as basal application and 60% was used at the beginning of male tetrad stage); C—施控释尿素 N 225 kg/hm² controlled-release urea. 柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters within a column mean significant at the 5% level.]

2.3　不同处理对玉米花后氮素积累和运转的影响

2.3.1 对玉米花后氮素积累的影响　氮素的积累多少反映了玉米整个生育期对氮素营养的吸收情况。随着生育期的推进,玉米的氮素积累量在逐渐增多,但增加幅度逐渐减少,收获期氮素积累量达到最高。

从图 3 可以看出,2010 年,郑单 958 夏玉米花后的氮素积累量在各处理同时期表现出相同的趋势,即 SC > ST > SU > SCK 和 RC > RT > RU > RCK,SC 为最多且与其他处理相比差异显著。在相同的施氮条件下,旋茬后深松处理大于旋茬处理。收获期时,深松条件下的氮素积累量,处理 C、T、U 比 CK 多 75.14%、62.70%、49.73%,差异显著;旋茬条件下,处理 C、T、U 比 CK 多 80.47%、68.64%、44.38%,差异也达显著水平;深松处理玉米平均单

株氮素积累量比旋茬处理高8.37%。

2011年试验的各处理对郑单958夏玉米花后氮素积累量影响的趋势与2010年的大体一致,收获期单株氮素积累量表现为SC>ST>SU>SC和RC≈RT>RU>RCK,SC为最多(图3)。

2.3.2 对玉米花后氮素向子粒运转的影响 不同器官氮素积累量表现出的趋势与干物质积累相似,随着生育进程的推进,花后叶片和茎鞘的积累量比例逐渐下降,子粒的氮素积累逐渐增加,在收获期达到最高,表现为SC>ST>SU>SCK,RC>RT>RU>RCK,处理SC的子粒氮素积累最多(图3)。

在2010年的试验中,郑单958夏玉米花后,控释尿素处理的子粒吸收了更多的氮素,与其他处理相比差异显著。各处理对子粒氮素积累的影响表现为处理C>T>U>CK,处理S>R。收获期时,在深松条件下,处理C、T、U分别比CK多52.43、38.65、30.21 kg/hm^2;旋茬条件下,处理C、T、U分别比CK多53.91、41.95、29.01 kg/hm^2,深松处理的子粒氮素积累量平均比旋茬处理高8.36%,处理SC的子粒氮素积累量最多,且与其他处理差异显著(图3)。

2011年的试验结果显示,郑单958夏玉米的植株叶片、茎鞘、子粒花后氮素分配趋势和2010年的基本一致(图3)。

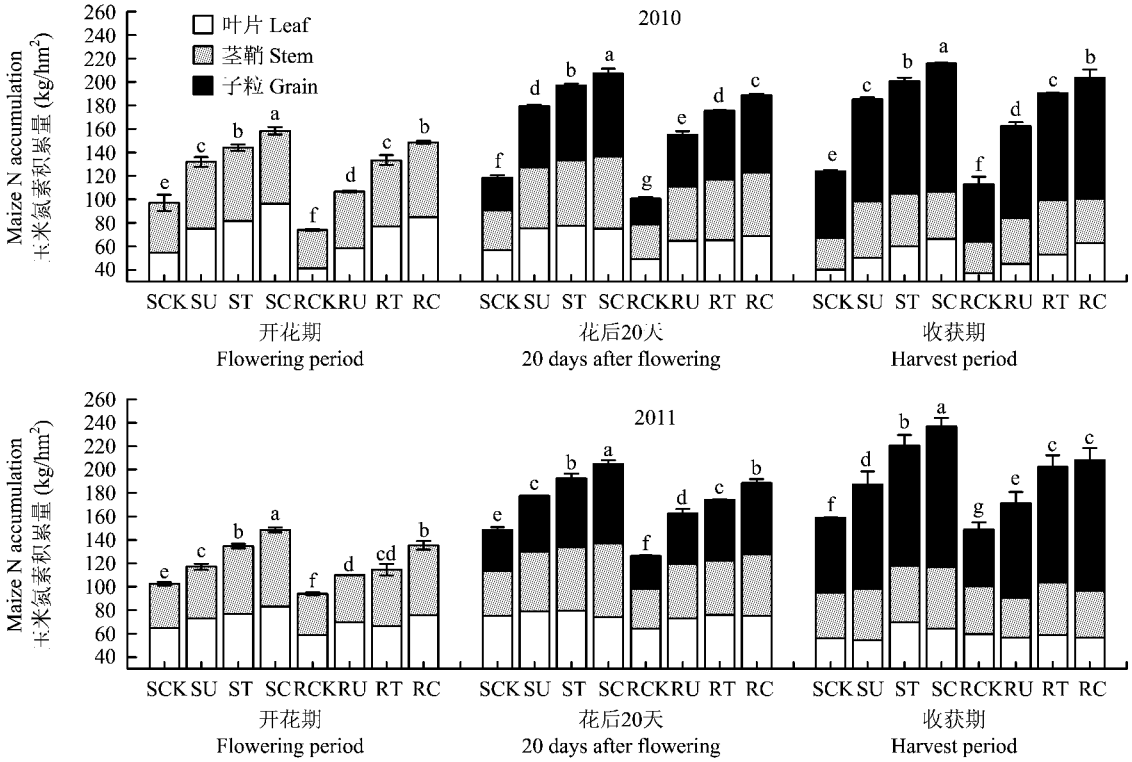

图3 2010和2011年各处理玉米氮素的积累与分配

Fig.3 N Accumulation and distribution of maize under different treatments in 2010 and 2011

[注(Note):S—旋茬后深松 Subsoiling after rototilling for stubble breaking; R—旋茬 Rototilling for stubble breaking; CK—不施肥 Without urea; U—一次施常规尿素 N 225 kg/hm^2 conventional urea; T—分次施常规尿素(40%基施,60%大喇叭口期追施)N 225 kg/hm^2 conventional urea for two applications (40% was used as basal application and 60% was used at the beginning of male tetrad stage); C—施控释尿素 N 225 kg/hm^2 controlled-release urea. 柱上不同字母表示差异达5%显著水平 Different letters within a column mean significant at the 5% level.]

2.4 不同处理对玉米氮素利用效率的影响

表1表明,2010年,在相同的耕作措施下,控释尿素处理和深松处理郑单958夏玉米的氮素积累量、氮肥偏生产力、农学效率最高,不同耕作措施比较,深松处理的氮肥偏生产力平均比旋茬处理提高2.49%,农学利用率平均提高7.77%,差异显著。在深松条件下,处理C比T和U的氮素积累量分别提高了10.51%和17.96%,农学效率提高了6.19%和31.42%,氮肥偏生产力提高了1.80%和7.81%;旋茬条件下,处理C比T和U的氮素积累量分别提高了6.99%和25.41%,农学效率提高了11.50%和36.89%,氮肥偏生产力提高了3.13%和8.62%。

2011 年的结果显示，郑单 958 夏玉米的肥料利用率等几个重要指标的结果与 2010 年的趋势大体一致，SC 的氮素积累总量、氮肥偏生产力和农学利用率在各处理中最高，且与其他各处理差异显著。

表 1　不同处理对夏玉米氮素利用效率的影响

Table 1　Effect of different treatments on N use efficiency of summer maize

处理 Treatment	2010			2011		
	氮素总积累量 TNAA (kg/hm^2)	氮肥农学利用率 NAE (kg/kg)	氮肥偏生产力 NPFP (kg/kg)	氮素总积累量 TNAA (kg/hm^2)	氮肥农学利用率 NAE (kg/kg)	氮肥偏生产力 NPFP (kg/kg)
SCK	123.99 e			158.79 f		
SU	185.10 c	11.36 e	45.71d	187.11 d	7.71 d	53.32 e
ST	197.58 b	14.06 c	48.41 b	220.34 b	9.45 c	55.07 c
SC	218.35 a	14.93 a	49.28 a	236.79 a	12.09 a	57.71 a
RCK	113.02 f			148.62 g		
RU	162.43 d	10.41 f	44.57 e	171.26 e	5.95 e	51.55 f
RT	190.40 c	12.78 d	46.94 c	206.06 c	8.38 d	53.98 d
RC	203.70 b	14.25 b	48.41 b	208.09 c	11.08 b	56.68 b

注(Note)：S—旋茬后深松 Subsoiling after rototilling for stubble breaking；R—旋茬 Rototilling for stubble breaking；CK—不施肥 Without urea；U——次施常规尿素 N 225 kg/hm^2 conventional urea；T—分次施常规尿素(40%基施，60%大喇叭口期追施)N 225 kg/hm^2 conventional urea for two applications (40% was used as basal application and 60% was used at the beginning of male tetrad stage)；C—施控释尿素 N 225 kg/hm^2 controlled-release urea. TNAA—Total nitrogen accumulation amount；NAE—Nitrogen agronomic efficiency；NPFP—Nitrogen partial factor productivity. 柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters within a column mean significant at the 5% level.

3　讨论

不同类型的氮肥会对作物的氮素吸收利用造成一定的影响[19-20]。本研究表明，郑单 958 两年花后植株氮素利用效率和积累氮素向子粒的分配量均表现为施用控释尿素高于传统的施用常规尿素。原因是常规尿素前期大量的吸收和淋失造成花后表层土壤氮素损失，导致植株根系周围出现氮素亏缺，花后玉米氮素供需矛盾加重，不利于植株花后氮素的吸收。前期适当控氮可提高根系的吸收和合成能力，后期还可使植株保持较强的光合生产能力，增强根系吸收氮素的能力，并促进氮素向子粒的运转，促使玉米氮素利用的提高[6]。而氮肥适当后移也可提高夏玉米植株氮积累量和氮肥利用效率[21]。玉米专用控释尿素是针对玉米生长特性而选择性释放的一种肥料，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，利于植株氮素的积累及向子粒转运[22]。可见，施用包膜控释尿素能显著提高玉米的氮素积累利用及向子粒的分配。

改善供氮能力是使玉米获得高产的有力措施之一[23]。本研究结果表明，与传统一次施常规尿素相比，控释尿素能显著提高花后植株的干物质积累量、向子粒的转运量以及产量。因为充足的氮素供应可促进作物的养分吸收和干物质累积，不但对作物的生长发育有直接贡献，而且也改善了作物后期营养体养分向子粒的运输，从而增加了收获期植株养分总量中子粒养分所占的比例[24]，但一次性施肥由于是过早施底肥或苗肥，或者过晚施粒肥均对产量形成不利，前期不施氮或者施氮过多都会增加败育粒，对产量的形成造成不良的影响[25]。由于夏玉米生育后期追施氮肥极不方便，而控释尿素具有肥效长且稳定，能满足玉米在整个生育期对养分的需求的优点，一次性大量施入不会造成“烧苗”，并可减少施肥数量和次数，提高产量[26-28]。2010 和 2011 年的两年试验中，在深松条件下，施用控释尿素和追施常规尿素对玉米干物质积累和产量的影响有差异，原因可能是降水影响了控释尿素的释放。

耕作措施通过影响土壤环境进而影响作物对养分的吸收[9,12]。本试验中，与旋茬处理相比，深松能

显著提高郑单958夏玉米的氮素利用效率,促进氮素的吸收及向子粒的分配。其可能的原因是在传统的耕整地中大量使用机械灭茬加旋耕致使耕层变浅,犁底层透水性差,雨水因不能很快渗入而流失,从而造成作物后期易倒伏,造成减产[29]。而深松能打破犁底层减小根系穿透阻力,提高土壤蓄水能力,增加土壤水库容,提高自然降水的利用率和利用效率,扩大了根系的生长空间,改善了根系的生态条件[30-31]。有研究表明,土壤中的水分可以调节氮肥的吸收,而深松比旋茬具有更好的水分调节能力[17]。因此,深松可以促进玉米对氮素的吸收利用。

本研究还表明,与传统旋茬耕作相比,深松能显著提高玉米的干物质积累和产量。由于常年的旋茬耕作,会使土壤耙底层变浅,而耙底层能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]。而深松耕作对玉米生长后期的根系活力和植株的抗逆能力有积极的促进作用[10],此外,深松还能够提高玉米生育后期的叶面积指数(LAI)和干物质积累量,有助于植株合成较多的"源"物质,为获得较高的子粒产量提供了保障[33]。本试验中,2010年玉米成熟期的TS和TR、CS和CR处理干物质积累量差异不显著,可能是降水量少影响了深松耕作对水分的调控作用,进而降低了施用控释尿素和追施常规尿素对干物质积累的贡献。

4 结论

与一次施常规尿素或者分次施常规尿素相比,施控释尿素可更好地促进郑单958夏玉米花后氮素吸收利用及干物质向子粒的分配,提高玉米产量。与传统的旋茬耕作相比,深松耕作措施可有效利用降水,提高玉米干物质积累量和氮素吸收及其向子粒的分配,且在降水较多的年份调控效果更显著。因此,控释尿素与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] 王进军,柯福来,白鸥,黄瑞冬. 不同施氮方式对玉米干物质积累及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2008,39(4):392-395.
Wang J J, Ke F L, Bai O, Huang R D. Effect of dry weight accumulation and yields of maize under different nitrogen application[J]. J. Shenyang Agric. Univ., 2008, 39(4): 392-395.

[2] 赵允格,邵明安,张兴昌. 成垄压实施肥对氮素运移及氮肥利用率的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(1):68-72.
Zhao Y G, Shao M A, Zhang X C. Impact of localized compaction and ridge fertilization on field nitrate transport and nitrate use efficiency[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(1): 68-72.

[3] 王友华,许海涛,许波,等. 施用氮肥对玉米产量构成因素及其根系生长的影响[J]. 中国土壤与肥料,2010,(3):55-57.
Wang Y H, Xu H T, Xu B *et al*. Effect of N fertilizer application on yield components and root system growth of maize[J]. China Soils Fert., 2010, (3): 55-57.

[4] 孙占祥,邹晓锦,张鑫,安景文. 施氮量对玉米产量和氮素利用效率及土壤硝态氮累积的影响[J]. 玉米科学,2011,19(5):119-123.
Sun Z X, Zou X J, Zhang X, An J W. Effects of maize yield and N application on N utilization and content of soil nitrate[J]. J. Maize Sci., 2011, 19(5): 119-123.

[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[J]. 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[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2009, 25(24): 254-257.

[6] 王彩彩,陶洪斌,王璞,戴明宏. 前期控氮对夏玉米产量物质生产及氮素利用的影响[J]. 玉米科学,2010,18(5):99-104.
Wang C C, Tao H B, Wang P, Dai M H. Grain yield, dry matter productivity and nitrogen use efficiency of summer maize under reduced N supply at earlier stage[J]. J. Maize Sci., 2010, 18(5): 99-104.

[7] 王宜伦,李潮海,谭金芳,等. 氮肥后移对超高产夏玉米产量及氮素吸收和利用的影响[J]. 作物学报,2011,37(2):339-347.
Wang Y L, Li C H, Tan J F *et al*. Effect of postponing N application on yield, nitrogen absorption and utilization in super-high-yield summer maize[J]. Acta Agron. Sin., 2011, 37(2): 339-347.

[8] 赵斌,董树亭,张吉旺,刘鹏. 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, Liu P. Effects of controlled-release fertilizer on yield and nitrogen accumulation and distribution in summer maize[J]. Acta Agron. Sin., 2010, 36(10): 1760-1768.

[9] 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 subsoiling on soil water and crop yield in semi-arid area[J]. Chin. J. Soil Sci., 2011, 42(3): 709-714.

[10] 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 subsoiling on root growth of maize[J]. J. Jilin Agric. Univ., 2000, 22(4): 73-75, 80.

[11] 邹洪涛,张玉龙,黄毅,等. 辽西北半干旱区土壤深松对玉米生长发育及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2009,

40(4):475-477.

Zou H T, Zhang Y L, Huang Y *et al.* Effect of deep tillage on maize growth in the semi-arid region of Liaoning Northwest area [J]. J. Shenyang Agric. Univ., 2009, 40(4): 475-477.

[12] 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 subsoiling measures on growth and yield of maize [J]. Chin. J. Soil Sci., 2009, 40(5): 1156-1159.

[13] 满建国,周杰,王东,等. 硫加树脂包膜尿素控释肥对小麦干物质积累分配及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1175-1182.

Man J G, Zhou J, Wang D *et al.* Effects of sulfur plus resin-coated controlled release urea fertilizer on winter wheat dry matter accumulation and allocation and grain yield[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(5): 1175-1182.

[14] 李学刚,宋宪亮,孙学振,等. 控释氮肥对棉花纤维品质、产量及氮肥利用效率的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(30): 18567-18568.

Li X G, Song X L, Sun X Z *et al.* Effects of controlled release nitrogen fertilizer on fiber quality, yield, and nitrogen use efficiency[J]. J. Anhui Agric. Sci., 2011, 39(30): 18567-18568.

[15] 李旭,闫洪奎,曹敏建,等. 不同耕作方式对土壤水分及玉米生长发育的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(6): 76-78, 81.

Li X, Yan H K, Cao M J *et al.* Effects of different tillage managements on soil moisture and growth of maize[J]. J. Maize Sci., 2009, 17(6): 76-78, 81.

[16] 宫秀杰,钱春荣,于洋,等. 深松免耕技术对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(5): 134-137.

Gong X J, Qian C R, Yu Y *et al.* Effects of subsoiling and no-tillage on soil physical characters and corn yield[J]. J. Maize Sci., 2009, 17 (5): 134-137.

[17] 胡恒宇,李增嘉,宁堂原,等. 深松和尿素类型对不同玉米品种水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(9): 1963-1972.

Hu H Y, Li Z J, Ning T Y *et al.* Effects of subsoiling and urea types on water use efficiency of different maize cultivars[J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(9): 1963-1972.

[18] 霍中洋,葛鑫,张洪程,等. 施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(5): 449-454.

Huo Z Y, Ge X, Zhang H C *et al.* Effect of different nitrogen application types on N absorption and N utilization rate of specific use cultivars of wheat[J]. Acta Agron. Sin., 2004, 30(5): 449-454.

[19] 邵蕾,张民,王丽霞. 不同控释肥类型及施肥方式对肥料利用率和氮素平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 115-119.

Shao L, Zhang M, Wang L X. Effects of different controlled-release fertilizers and different applying methods on fertilizer use efficiency and nitrogen balance[J]. Bull. Soil Water Conserv., 2006, 20(6): 115-119.

[20] 易镇邪,王璞,张红芳,申丽霞. 氮肥类型与施用量对夏玉米生长发育及氮肥利用的影响[J]. 华北农学报, 2006, 21(1): 115-120.

Yi Z X, Wang P, Zhang H F, Shen L X. Effect of type and application rate of nitrogen fertilizer on development and nitrogen utilization in summer maize [J]. Acta Agric. Boreali-Sin., 2006, 21(1): 115-120.

[21] 王宜伦,张许,李文菊,等. 氮肥后移对晚收夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(1): 117-120.

Wang Y L, Zhang X, Li W J *et al.* Effects of postponing N application on yield and N absorption and utilization of summer maize in later harvest time[J]. J. Maize Sci., 2011, 19(1): 117-120.

[22] 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]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(11): 3672-3678.

[23] 高亚军,李生秀,田霄鸿,等. 不同供肥条件下水分分配对旱地玉米产量的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 415-422.

Gao Y J, Li S X, Tian X H *et al.* Effects of water supply levels in different growth stages on maize yield under different fertilizer levels[J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32(3): 415-422.

[24] 宋海星,李生秀. 不同水、氮供应条件下夏玉米养分累积动态研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 399-403.

Song H X, Li S X. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and nitrogen supply conditions[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2002, 8(4): 399-403.

[25] 徐丽娜,黄收兵,陶洪斌,等. 不同氮肥模式对夏玉米冠层结构及部分生理和农艺性状的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(2): 301-306.

Xu L N, Huang S B, Tao H B *et al.* Effects of different nitrogen regimes on canopy structure and partial physiological and agronomic traits in summer maize[J]. Acta Agron. Sin., 2012, 38(2): 301-306.

[26] 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(3): 95-97.

Zhao X G, Xiao L. Current research on controlled release fertilizers[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2002, 10(3): 95-97.

[27] 巨晓棠,刘学军,邹国元,等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1493-1499.

Ju X T, Liu X J, Zou G Y *et al.* Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system [J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(12): 1493-1499.

[28] Sadao S, Hitoshi K. Use of polyolefin-coated fertilizers for

increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emissions[J]. Fert. Res., 1994, 39(2): 147-152.

[29] 刘远和，刘远兴，陈红艳. 深松耕作与保护性耕作推广的浅析[J]. 农业装备技术，2009，35(5)：35-36.
Liu Y H, Liu Y X, Chen H Y. Analysis of subsoiling function and protection cultivation extension[J]. Agric. Equi. Tech., 2009, 35(5): 35-36.

[30] 何进，李洪文，高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J]. 农业工程学报，2006，22(10)：62-67.
He J, Li H W, Gao H W. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2006, 22 (10): 62-67.

[31] 秦红灵，高旺盛，马月存，等. 两年免耕后深松对土壤水分的影响[J]. 中国农业科学，2008，41(1)：78-85.
Qin H L, Gao W S, Ma Y C *et al.* Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(1): 78-85.

[32] 赵秉强，李凤超，薛坚，李增嘉. 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, Li Z J. Effect of different tillage methods on root growth of winter wheat[J]. Acta Agron. Sin., 1997, 23(5): 587-596.

[33] 李立娟，崔彦宏，李琦，等. 条深旋耕作方式对早春玉米产量性能的影响[J]. 作物杂志，2011，(5)：96-99.
Li L J, Cui Y H, Li Q *et al.* Effect on yield performance of early spring maize in strip deep tillage[J]. Crops, 2011, (5): 96-99.