

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

杨俊刚¹, 倪小会¹, 徐凯², 许俊香¹, 曹兵^{1*}, 刘宝存¹

(1 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 2 北京市房山区农业科学研究所, 北京 100015)

摘要: 采用田间小区试验, 研究了习惯施肥与接触施用包膜控释肥料对夏玉米生长、产量、根系分布和土壤无机氮残留的影响。结果表明, 接触施用包膜控释肥料没有抑制玉米的出苗和幼苗生长; 减氮 1/3 的控释肥处理(N 120 kg/hm²) 与习惯施肥处理(N 180 kg/hm²) 的玉米产量没有差异。在 0—30 cm 土层, 与对照和习惯施肥处理相比, 接触施用控释肥增加了距茎基部 0—10 cm 区域内玉米根长密度的分布, 占总根长的 59%—64%; 玉米收获后, 减量控释肥处理土壤剖面各个土层 N_{min} 含量与对照相比无显著增加, 习惯施肥和全量控释肥处理(N 180 kg/hm²) 在 60—90、90—120 cm 土层的 N_{min} 累积显著高于对照。综合考虑玉米生长、产量以及根系分布和氮素淋失风险, 本试验条件下, 接触施用控释肥 N 120 kg/hm² 是夏玉米季较为理想的选择。

关键词: 包膜控释肥; 夏玉米; 接触施肥; 土壤无机氮残留

中图分类号: S145.5; S513.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)04-0924-07

Effects of co-situs application of polymer-coated fertilizers on grain yield, root distribution and soil residual N_{min} in summer maize

YANG Jun-gang¹, NI Xiao-hui¹, XU Kai², XU Jun-xiang¹, CAO Bing^{1*}, LIU Bao-cun¹

(1 Institute of Plant Nutrition and Resource, Beijing Academy of Agricultural and Forest Science, Beijing 100097, China;

2 Institute of Agricultural Science of Fangshan District, Beijing 100015, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study effects of co-situs application of polymer-coated fertilizers (PCF) on the summer maize grain yield, root distribution, and the N_{min} residual in soil profile. Before the maize sowing, the polymer-coated fertilizers were applied in the top-soil with a 4–8 cm depth, which just under the seed point. The amount of applied coated-fertilizers was N 180 kg/ha for the treatment PCFN₁, and N 120 kg/ha for the treatment PCFN₂. A conventional fertilizer treatment that received N 180 kg/ha and a CK treatment that received no N were included. The main results were as follows: 1) No negative impacts on seed generation and seedling growth occurred from the treatments with single co-situs application of coated-fertilizers; 2) The maize grain yields from N fertilized treatments were significantly increased, which were 9.61 to 10.4 t/ha higher than the CK treatment (8.71 t/ha). The yield from the PCFN₂ treatment was same to that from conventional fertilizer treatment; 3) In the plough layers (0–30 cm), root length density in the area of 0 to 10 cm near the stem from PCFN₁ or PCFN₂ treatments accounted for 59%–64% of the total root, which were higher than those from conventional fertilizer or CK treatments; 4) There was no significant increase of accumulation of residual N_{min} in the PCFN₂ treatment compared to CK treatment; N_{min} in the 60–90 and 90–120 cm layers from the conventional fertilizer or PCFN₁ treatments were significantly higher than that of CK treatment after maize harvest. Taking maize yield, root distribution and N leach risk into consideration, the co-situs application of polymer-coated fertilizers with N 120 kg/ha was the best for summer maize in this experimental area.

收稿日期: 2009-02-13

接受日期: 2009-10-19

基金项目: 北京市科委重大项目(D0706004000091); 北京科技新星项目(2005B57)资助。

作者简介: 杨俊刚(1975—), 男, 内蒙古土左旗人, 助理研究员, 主要从事缓控释肥料研制与应用。E-mail: jungangyang@163.com

* 通讯作者: caobing@baafs.net.cn

Key words: polymer-coated fertilizers; summer maize; co-situs application of fertilizers; soil residual N_{\min}

缓控释肥料在提高氮肥利用率、降低土壤硝态氮的积累、减轻施肥对地下水的污染等方面有较大的应用潜力,已引起国内外的广泛关注。但目前所报道的缓控释肥料绝大多数属于直线型养分释放模式(随时间推移养分均匀释放直至全量的80%),这种模式与作物的S型生长模式不能较好地吻合,因此也造成缓控释肥料的肥效得不到充分发挥^[1-5]。为进一步提高缓控释肥料的利用效率,延迟释放型(S型)控释肥料的研究逐步受到重视。S型控释肥料的养分前期释放较少,一般不超过5%,随后养分快速释放直至全部释放完毕。S型肥料在水稻、蔬菜营养钵育苗以及玉米、大豆接触施肥(Co-situs application)和深施上,取得了较好的效果^[6-8]。接触施肥对于肥料的养分释放要求较为严格,包膜技术较为复杂。目前的报道仅见于日本等少数发达国家。

北京市农林科学院植物营养与资源研究所经多

年研究,已自主开发出具有延迟释放特征的包膜控释肥。为了探明这种肥料在田间条件下的养分溶出过程及其接触施肥对夏玉米生长、子粒产量、玉米根系和土壤剖面无机氮分布的影响,进行了本试验,以期为高效施用控释肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验设在北京市房山区韩村河农业技术试验示范基地。供试土壤为壤质潮土,0—30 cm土壤理化性状为:有机质 15.1 g/kg、全氮 0.97 g/kg、碱解氮 60.6 mg/kg、Olsen-P 43.4 mg/kg、速效钾 185 mg/kg、土壤 pH 8.20,0—30、30—60、60—90、90—120、120—150、150—180 cm各层土壤容重分别为 1.35、1.47、1.51、1.47、1.43、1.40 g/cm³。试验前茬种植青贮春玉米匀地,生育期总降水量 362 mm。近地气温和降雨分布见图 1。

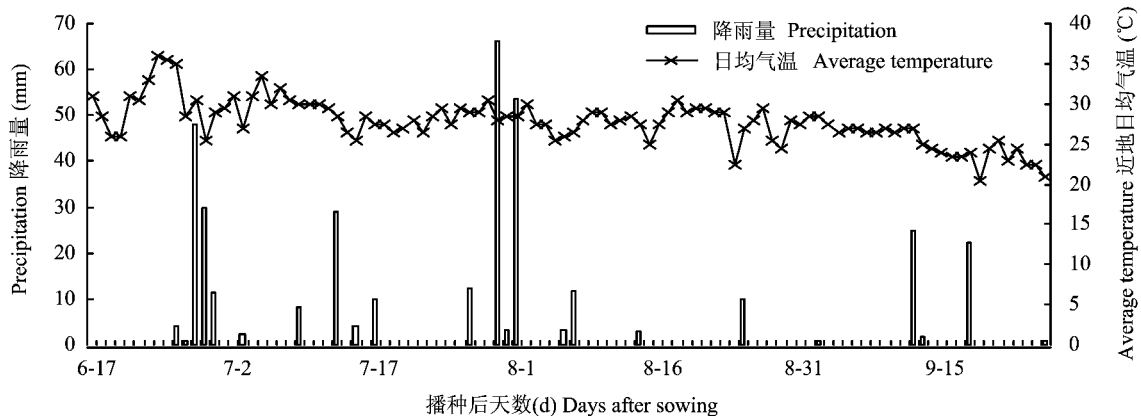


图 1 夏玉米生长季降水量与近地面日均气温

Fig. 1 Precipitation and average air temperature of 50 cm above soil surface in summer maize growth season

夏玉米试验于 2007 年 6 月 15 日播种,供试品种为郑单 958。共设 4 个处理:1) 不施氮对照(No N application, CK),仅施用磷肥(过磷酸钙)和钾肥(氯化钾),用量分别为 P_2O_5 94 kg/hm² 和 K_2O 111 kg/hm²,全部底施;2) 习惯施肥处理(Conventional fertilization with two N splits, Con),施 N 180 kg/hm²,2/3 基施,1/3 于抽穗期开沟追施,磷、钾肥用量同对照;3) 控释肥全量接触施肥处理(Single co-situs application of polymer-coated fertilizers at N 180 kg/ha, PCFN₁),播种前,包膜控释肥料一次性全部施入,具体方法为控释肥在播种沟内按照株距点施,每点用量相同,与土壤轻轻混拌后,把种子放

在上面,覆土,施用量为 N 180kg/hm²,磷、钾肥用量同对照;4) 控释肥减量接触施肥处理(Single co-situs application of polymer-coated fertilizers at N 120 kg/ha, PCFN₂),控释肥料配比和施肥方法同 PCFN₁ 处理,施用量为 N 120 kg/hm²,磷、钾肥用量为对照处理的 2/3。每个处理 3 次重复,随机排列,共 12 个小区。小区面积 3 m × 5 m,每小区种植玉米 100 株,行距 60 cm,株距 24 cm。全生育期共灌水 2 次,分别为播种后 50 mm 和乳熟期 90 mm。

试验所用控释肥采用聚合物包膜工艺制造。供试控释肥释放期分别为 30 d、70 d 的控释复合肥(21-11-13)和 90 d 的控释尿素(释放期为 25°C 下

水浸泡氮素累积释放率达到 80% 所需时间), 3 种肥料均为延迟释放型(S 型), 抑制期分别为 14、20、35 d(25℃ 下水浸泡氮素累积释放率达到 5% 所需时间), 3 种肥料的混配比例为 26.7%、53.3% 和 20%, 设计为玉米拔节期、大喇叭口期、灌浆期供应养分。控释复合肥中全部为尿素态氮, 3 种控释肥料配合后氮、磷、钾比例与习惯施肥相同。

1.2 测定项目与方法

玉米间苗前全小区统计出苗率、株高、茎粗。出苗率按小区内所有植株统计, 株高和茎粗取每小区 10 株的平均值, 株高由地面测量至植株最高点, 茎粗测定茎基部。成熟期每个小区去掉边行, 取中间长势均匀的 3 m² 收获, 脱粒后烘干计产。

抽穗期(7 月 24 日) 分层取玉米根系测定根长密度和根干重, 使用直径 10 cm、深 15 cm 的根钻取样, 在沿地面距植株根部 0—10、10—20、20—30 cm 处分别向下取样, 15 cm 一层, 共取 5 层。将样品置于孔径为 1 mm 的筛内用水冲洗泥土, 挑出根系, 采用交叉网格法测定总根长, 计算根长密度, 同时测定根干重^[9]。

分别在苗期、拔节、抽穗、灌浆和收获后取植株样, 每个小区取 5 株, 烘干后测定干重, 粉碎混匀后取少量, 半微量凯氏定氮法测定样品的全氮含量。

控释肥在土壤中的释放采用田间埋设肥料网袋的方法观测。准确称量供试控释肥料 5.00 g, 装入长 20 cm 宽 5 cm 的尼龙网袋内, 埋前在网袋内装入表层土与肥料混匀, 然后埋入深 15 cm 土中, 共埋 15 袋, 每次取 3 袋, 共取 5 次。取样时间为播种后 10 d、拔节期、抽穗期、灌浆期和收获后。

夏玉米收获后, 在每个小区取土, 取样深度为 0—30、30—60、60—90、90—120、120—150、150—180 cm, 3 点取样。新鲜土样带回实验室后立即过 5 mm 筛, 先取 20.0 g 烘干法测定土壤水分, 再取 12.0 g 土样, 加入 100 mL 0.01 mol/L CaCl₂ 浸提液振荡 60 min, 过滤后采用流动分析仪(TRAAS22000)法测定土壤无机氮(硝态氮和铵态氮之和)。

试验数据采用 SAS6.12 中 ANOVA 程序进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 夏玉米出苗和苗期生长

控释肥接触施肥即使距离种子很近, 对其发芽也不会产生不良影响。不同处理夏玉米的出苗率在 93.7%—97.5% 之间, 处理间差异不显著。不同处理

间苗期玉米的株高和茎粗也没有明显差异(表 1)。

控释肥氮素养分释放的多少与强度是影响玉米种子发芽的主要因素, 氮素释放量控制不好易降低出苗率^[10]。本试验控释肥处理的种子发芽和苗期生长与习惯施肥处理和对照没有差异, 说明控释肥的养分释放没有抑制玉米的发芽和苗期生长。

表 1 玉米生长前期不同处理出苗率、株高和茎粗

Table 1 Rate of seed generation, height and diameter of maize plant

处理 Treatment	出苗率(%) Generation rate	株高(cm) Plant height	茎粗(mm) Plant diameter
CK	93.7 a	50.4 a	5.98 a
Con	97.2 a	52.9 a	6.89 a
PCFN ₁	97.5 a	50.3 a	6.15 a
PCFN ₂	97.3 a	50.0 a	5.90 a

注(Note): 数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平
Values followed by different letters in the same column mean significant at 5% level.

2.2 夏玉米产量、氮素吸收和控释肥氮素释放

本试验各处理夏玉米产量为 8.71 ~ 10.4 t/hm², 2 个控释肥处理与习惯施肥处理的产量差异不显著(表 2)。大喇叭口期至灌浆期是玉米子粒产量形成的关键时期, 这段时期的养分供应对夏玉米产量的影响至关重要。本试验中习惯施肥处理在子粒形成的关键时期追施一次氮肥很好地保证了产量的形成, 而控释肥处理省去了追肥环节, 但从产量结果看, 减量控释肥处理(PCFN₂)并没有因省去追肥而使产量降低。

表 2 还看出, 玉米氮素吸收量与产量的变化趋势相同, 施肥显著增加了玉米氮素吸收量, 但施肥处

表 2 不同施肥处理夏玉米产量、吸氮量和氮肥利用率

Table 2 Yield, N uptake, and N recovery of summer maize from the different N treatments

处理 Treatment	产量(t/hm ²) Grain yield	吸氮量(kg/hm ²) N uptake	氮肥利用率(%) N recovery
CK	8.71 b	185 b	—
Con	9.72 a	249 a	35.5
PCFN ₁	10.4 a	240 a	30.5
PCFN ₂	9.61 a	232 a	39.2

注(Note): 数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平
Values followed by different letters in the same column mean significant among different treatments at 5% level.

理间差异不显著。说明减量控释肥处理降低 1/3 施氮量后玉米氮素吸收没有明显减少。施肥处理氮肥利用率为 30.5%~39.2%, 全量控释肥处理(PCFN₁)的利用率低于习惯施肥(Con)和减量控释肥处理(PCFN₂),说明 PCFN₁ 处理的玉米氮素吸收没有明显增加。

本试验所用控释肥在室温下水浸泡时的养分释放基本符合夏玉米的吸氮规律,但从其田间释放测定结果看(图 2),在施肥后第 40 d 氮素释放达到总氮量的 64%,说明控释肥料的养分释放在农田土壤环境下抑制期缩短,提前进入快速释放期,超出设计的预期。氮肥利用率在作物不同的生育时期是不相同的,玉米播种后 50 d 左右,氮素吸收速率达到最大值,氮肥利用率也随之达到最大;而在此之前由于玉米个体较小,氮肥的利用率则较低^[11]。可以看出,本试验中在氮素利用效率最大时期到来之前,控释肥处理的氮素的大量释放提前发生,其中 PCFN₁

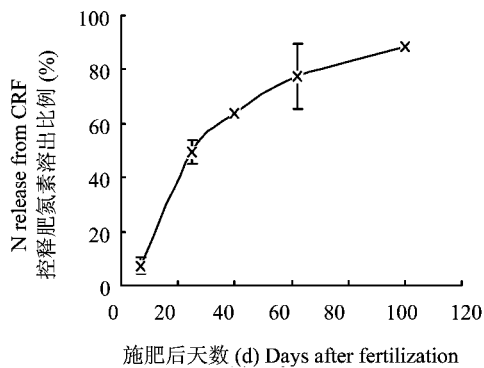


图 2 田间条件下包膜控释肥氮素养分释放累积曲线
Fig. 2 Courses of cumulative nitrogen release from coated fertilizers under the field condition

处理的氮素供应量达到 N 115 kg/hm²,远远超出玉米的氮素需求,造成部分氮素损失,利用率降低;PCFN₂ 处理的氮素供应虽然也提前,但供氮量较小,仅为 N 76 kg/hm²,在同样的玉米吸氮速率情况下,相比 PCFN₁ 处理氮素损失较少,利用率有所提高。但由于控释肥氮素释放与玉米氮素需求吻合度不高,使得控释肥处理的氮肥利用率提高不多。习惯施肥处理由于开沟追肥这一外源因素的存在,对氮肥利用率的提高起到较好的作用^[11]。

2.3 控释肥接触施用对玉米根系的影响

本试验结果表明,控释肥接触施用主要增加了近根表土层的根系分布(根系分布用根长密度表示)。图 3 看出,两个控释肥处理的夏玉米根系主要分布在距茎基部 0—10 cm 范围内,10 cm 以外则急剧减少,如以 0—30 cm 土层为例,施用控释肥的处理在距茎基部 10 cm 范围内的根系分布占全部根系的 59%~64%,对照和习惯施肥的根系分布则占其全部根系的 27%~40%;而相应的距茎基部 10—30 cm 区域的控释肥处理玉米根系分布则仅占 23%~33%,低于 CK 和 Con 处理的 37%~49%。另外,根系干重在土壤中的分布与根长密度的规律一致,各处理在近根 0—10 cm 的分布占总干重的 70%~87.8% (图 4)。控释肥料接触施用明显改变了夏玉米根系的分布,这种变化显然受到肥料施肥方法及其养分释放特征的影响,由于作物根系的生长通常有趋肥的特性,本试验控释肥采用同穴接触施肥,释放出的养分主要集中在玉米播种区域附近,所以夏玉米根系也主要密集在这一区域。习惯施肥处理的养分分布比较分散,导致夏玉米的根系分布也相对分散。

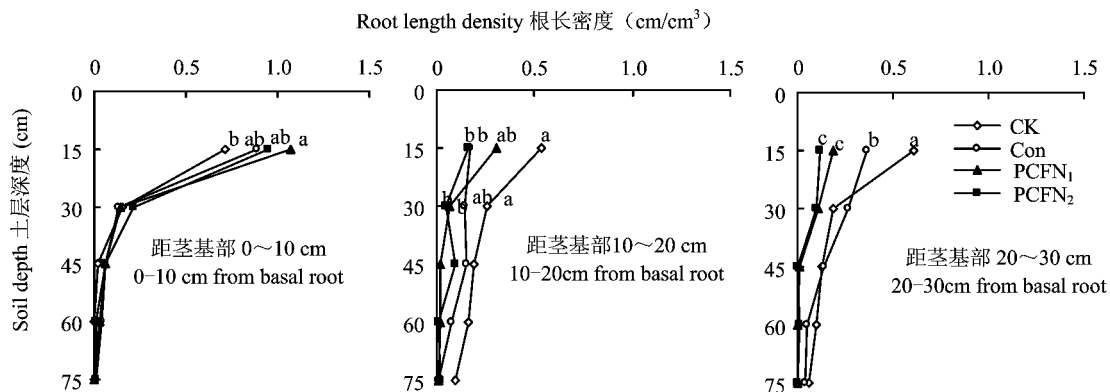


图 3 玉米抽穗期根系在不同土层距茎基部 0~10、10~20、20~30 cm 的分布
Fig. 3 Root length density from the area of 0-10, 10-20, 20-30 cm near the stem in different layers during the heading stage

[注(Note): 不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters in the same layer mean significant among different treatments at 5% level.]

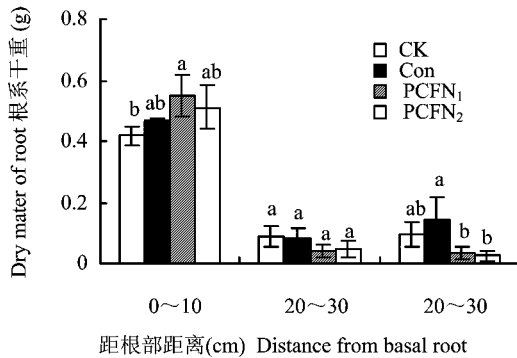


图4 玉米抽穗期0—75 cm 土壤剖面内距茎基部0~10、10~20、20~30 cm 根系干重

Fig. 4 Root dry matter from the area of 0–10, 10–20, 20–30 cm near the stem in the 0–75 cm soil layers during the heading stage

[注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters above bars in the same layer mean significant among different treatments at 5% level.]

2.4 控释肥接触施用对土壤残留无机氮的影响

施肥处理土壤 N_{min} 有增加趋势, 0—90 cm 土层中各处理 N_{min} 总含量为 89~138 kg/hm², Con 处理残留量最高, 其次为 PCFN₁、PCFN₂、CK 处理; 90—180 cm 土层中 N_{min} 总含量为 100~166 kg/hm², N_{min} 含量由高到低依次为 PCFN₁、Con、PCFN₂、CK。不同土层 N_{min} 含量也看出, PCFN₂ 处理各层 N_{min} 含量与 CK 相比均无显著差异, PCFN₁ 和 Con 处理 60—90、90—120 cm 土层的 N_{min} 含量显著高于 CK, 其他土层各处理间均无明显差异(图5)。说明虽然 PCFN₁ 处理施用的控释肥料对养分释放有控制作用, 但养分在土壤中的累积仍有可能达到与习惯施肥相当的水平。控释肥料出现这种现象主要是因为氮未及时被作物吸收而被淋洗到下层土壤。减量控释肥氮素在生长前期释放较快(图2), 不施肥处理虽然也存在养分较早释放的问题, 但由于氮素供应总量减小使得不被作物吸收的氮素数量较少, 因而剖面无机氮残留较低。

3 讨论

接触施肥是对控释肥料高效利用的一种探索, 此法不仅能减少追肥环节, 节省肥料投入, 而且在播种机械稍加改动后即可与播种同时进行, 可极大地提高播种和施肥的效率。本试验表明, 接触施肥可一次性把全生育期所需肥料施入, 在大量肥料与种子处于接触状态下, 玉米种子发芽和出苗没有受到影响; 控释肥降低 1/3 施氮量与习惯处理玉米产

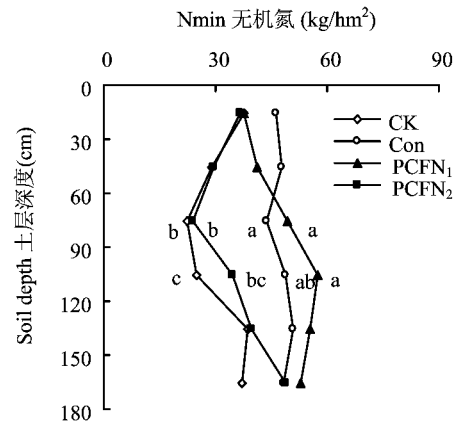


图5 玉米收获后土壤无机氮(N_{min})在0—180 cm 剖面的分布

Fig. 5 N_{min} accumulation in 0–180 cm soil profile after harvest

[注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters in the same layer mean significant among different treatments at 5% level.]

量也无显著差异。说明控释肥在施肥方式上可以有更多的选择。

接触施肥使控释肥最大可能地接近作物根系, 减少养分运输距离和迁移过程中的固定和损失, 有利于提高养分利用效率。水稻是应用接触施肥最多的作物。主要是在水稻育苗时一次性将全部控释肥施入育苗盘或育苗箱内, 按施肥的位置分为表层全层(0—5 cm)混和, 土表与种子接触, 或侧条施肥(施在种子旁3—5 cm, 深2—5 cm 沟施)等, 在移栽时全部移入稻田中, 这些方法都取得了较好的效果^[1,6,12]。虽然水稻与旱地作物的种植环境有一定差异, 但这种施肥方式在旱地作物上的应用也受到了重视。Ombodi & Saigusa^[13]在日本北部采用控释肥营养钵接触施肥培育青椒并移栽种植, 证明营养钵育苗移栽是一种非常理想的节本增效的施肥方法。Tian 等^[10]在日本同一地区旱地玉米上比较了控释肥原位接触点施与条施对玉米生长的影响, 结果表明, 原位条施促进了玉米的生长, 比原位点施显著增产, 而与习惯施肥相当。由此可见, 根据不同的环境条件和作物生长特点选择更加多样化的施肥方法, 可以较大限度地发挥控释肥料的优势。

本试验所用的控释肥料在田间条件下的释放, 与实验室测定的 S 型延迟释放曲线相比, 其抑制期缩短, 养分快速释放期提前(图2)。玉米生长前期较高的温度和较大的降水量可能是导致控释肥料在土壤中养分释放和迁移加快的主要原因。一般来讲, 生长

季积温的升高会加快控释肥养分的释放,土壤含水量增加有利于养分的释放和迁移^[14-15],因此可以根据当地玉米生长季的历史积温来确定肥料的释放期。本试验在玉米生长前期温度和降水量(图1)均大于往年的平均水平^[16],导致前期养分抑制期缩短,养分提前快速释放,未能达到预期的养分释放与作物吸收同步,使得控释肥的增产效应不明显(表2)。虽然控释肥的养分释放在土壤中受到一定的影响,但总体来看控释肥的养分供应基本满足了玉米生长的需要。2005年在同一地区研究了不同释放期控释尿素对夏玉米产量的影响结果表明,释放期30 d的控释尿素在田间的氮素释放规律与玉米吸收较为接近,产量明显增加。而释放期为60 d的控释尿素则在收获时仍没有释放完毕^[17]。按照水中养分释放期测定,30 d的控释尿素后期养分供应不及60 d的控释尿素,但实际应用效果正相反,由于当年生长季试验区降水较少,说明土壤水分对控释肥养分释放的影响确实存在。因此,在施用控释肥时,应重视控释肥施用的环境条件,通过农艺措施或调整播期等使得温度和水分条件有利于控释肥养分释放与作物吸收的吻合,更好地发挥控释肥的肥效。

据报道,控释肥基施和全层基施有利于水稻和玉米根系在生长中后期的生长发育,主要表现为作物根系数量增加和活性增强^[18-19]。这是控释肥的养分在中后期供应数量增多,调整了作物地上部和根系对养分的分配矛盾,促进了根系的生长。可见,控释肥的施肥位置可以影响和改变作物根系的发育和分布。研究表明,当控释肥集中施在种子下方时,引起玉米根系分布发生变化,使近根部(0—10 cm)表土层(0—30 cm)根系分布增多。Yoshihiro^[6]在水稻试验中有类似的结果,即,61%的水稻根系分布在土表0—5 cm土壤中,对水稻的增产效果明显。郑圣先等^[20]将控释氮肥一次性全量施入5 cm深的土层内,明显地增加杂交水稻生育后期的根干重、根长和根长密度,说明控释肥集中施在种子下方,使根系集中分布在最接近肥料养分的地方,有利于根系快捷地吸收养分,促进了表层根系的生长。从理论上讲,只要养分供应的数量和强度能与作物需要一致,不仅有利于提高养分的利用效率,而且可以减少多余养分的向下迁移。但从目前的控释肥应用技术来看,还不能达到控释肥养分供应与作物吸收的精确吻合。因此,进一步调控控释肥养分供应与作物吸收在时间和空间上的同步,仍是值得深入研究的一个问题。

参 考 文 献:

- [1] 曹兵,徐秋明,任军,等. 延迟释放型包衣尿素对水稻生长和氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(3): 352-356.
Cao B, Xu Q M, Ren J *et al.* Effects of delayed release coated urea on rice growth and nitrogen absorption[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2005, 11(3): 352-356.
- [2] 奚振邦. 缓释化肥再认识[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(4): 578-583.
Xi Z B. Review on slow release fertilizer[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2006, 12(4): 578-583.
- [3] 杨雯玉,贺明荣,王远军,等. 控释尿素与普通尿素配施对冬小麦氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(5): 627-633.
Yang W Y, He M R, Wang Y J *et al.* Effect of controlled-release urea combined application with urea on nitrogen utilization efficiency of winter wheat[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2005, 11(5): 627-633.
- [4] 易镇邪,王璞. 包膜复合肥对夏玉米产量、氮肥利用率与土壤速效氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(2): 242-247
Yi Z X, Wang P. Effect of coated compound fertilizer on yield, nitrogen use efficiency and soil available nitrogen in summer maize[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2007, 13(2): 242-247
- [5] 汪强,李双凌,韩燕来,等. 缓/控释肥对小麦增产与提高氮肥利用率的效果研究[J]. 土壤通报,2007,38(4): 693-696.
Wang Q, Li S L, Han Y L *et al.* Effects of slow/controlled release fertilizers on yield and fertilizer-nitrogen use efficiency[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2007, 38(4): 693-696.
- [6] Yoshihiro K. Innovation of fertilizer application by using controlled-release fertilizer 2. The single application of fertilizer in nursery box to non tillage transplanted rice[J]. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 1995, 66(2): 176-181.
- [7] Yoshihiko T. Innovation of fertilizer application by using controlled-release fertilizer 3. Deep placement technique of coated urea fertilizer in soybean plants[J]. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 1995, 66(3): 277-285.
- [8] Toru K, Kazuhiko T, Norio S. Reduction of fertilizer amount by use of release-controlled fertilizer to celery grown in nursery bowl[J]. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 2003, 75(3): 373-376.
- [9] Tennant D A. Test of a modified line interest method of estimating root length[J]. *J. Ecol.*, 1975, 63: 995-1001.
- [10] Tian X H, Saigusa M. Response of dent corn and sweet corn to two different forms of co-situs application methods of controlled release fertilizer in upland field of a volcanic ash soil[J]. *Tohoko J. Agric. Res.*, 2003, 54(1-2): 1-15.
- [11] 宋海星,李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化[J]. 中国农业科学,2003,36(1): 71-76.
Song H X, Li S X. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and N supply conditions[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2003, 36(1): 71-76.
- [12] Yoshihiro K, Hirotohi A, Yutaka M. The non-tillage rice cul-

- ture by single application of fertilizer in a nursery box with controlled-release fertilizer [J]. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 1994, 65(4): 385-391.
- [13] Ombodi A, Saigusa M. Band versus nursery pot application of polyolefin-coated fertilizer for bell peppers grown in the field[J]. *JIFS*, 2005, 2: 107-112.
- [14] Shoji S, Ambrosio T. Controlled release fertilizers-with polyolefin resin coating[M]. Sendai, Japan; Konno Printing Co., Ltd., 1992.
- [15] Kobayashi A, Fujisawa E, Hanyuu T. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizer and its estimation by kinetic methods 1. Effect of water vapor pressure on nutrient release[J]. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 1997, 68(1): 8-13.
- [16] 孙振华, 冯绍元, 杨忠山, 吴海山. 1950-2005年北京市降水特征初步分析[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(2): 12-16.
Sun Z H, Feng S Y, Yang Z S, Wu H S. Primary analysis of the precipitation characteristics for Beijing during the period from 1950 to 2005[J]. *J. Irrig. Drain.*, 2007, 26(2): 12-16.
- [17] 曹兵, 李亚星, 徐凯, 等. 不同释放期的包衣尿素在夏玉米上应用效果研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(3): 621-624.
Cao B, Li Y X, Xu K *et al.* Effects of coated urea with different release duration on summer corn[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2009, 40(3): 621-624.
- [18] 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 Agron. Sin.*, 2009, 35(1): 118-123.
- [19] 唐拴虎, 徐培智, 张发宝, 等. 一次性全层施用控释肥对水稻根系形态发育及抗倒伏能力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 63-69.
Tang S H, Xu P Z, Zang F B *et al.* Influence of single basal application controlled-release fertilizer on morphologic development of root system and lodging resistance of rice [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2006, 12(1): 63-69.
- [20] 郑圣先, 聂军, 戴平安, 郑颖俊. 控释氮肥对杂交水稻生育后期根系形态生理特征和衰老的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(2): 188-194.
Zheng S X, Nie J, Dai P A, Zheng Y J. Effect of controlled release nitrogen fertilizer on the morphological and physiological characteristics and senescence of root system during late growth stages of hybrid rice [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2006, 12(2): 188-194.