

# 等氮条件下施肥方式对夏玉米产量及土壤养分吸收利用的影响

杨 峰, 闫秋艳, 鲁晋秀, 李 峰, 王 苗, 董 飞

(山西省农业科学院小麦研究所, 山西 临汾 041000)

**摘 要:** 施等氮量 225 kg/hm<sup>2</sup> 条件下, 研究不同施肥方式对夏玉米产量及其构成因素、不同生育期植株对养分吸收及 0~20 cm 和 21~40 cm 土壤速效养分含量的动态变化, 明确不同施肥方式对夏玉米的增产效应。结果表明, 施肥均不同程度增加夏玉米产量, 增产 16.48%~48.15%, 收获指数增加 7.81%~15.52%。缓控释肥处理对夏玉米产量提高作用明显, 最高达 9 697.50 kg/hm<sup>2</sup>。缓控释肥处理在玉米不同生育期土壤养分残留量呈低-高-低的趋势, 能较好协调土壤养分供应与夏玉米地上部养分吸收, 氮肥农学效率、氮肥偏生产力 and 氮肥表观利用率均较高, 利于获得高产。

**关键词:** 夏玉米; 施肥; 产量; 养分吸收

**中图分类号:** S513.062

**文献标识码:** A

## Effects of Different Fertilizer Treatments under Equal Nitrogen Level on the Yield, Soil Nutrient Uptake and Utilization of Summer Maize

YANG Feng, YAN Qiu-yan, LU Jin-xiu, LI Feng, WANG Miao, DONG Fei

(Institute of Wheat Research, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Linfen 041000, China)

**Abstract:** In order to evaluate the effects of different fertilizer treatments on yield increasing and provide reference to fertilize technology for summer maize, the effect of different fertilize treatments on yield and its components, nutrient uptake in different growth period and available nutrient content in soil layer 0–20 cm and 21–40 cm were analyzed under the condition of equal N level (225 kg/ha). The result showed that control to CK, summer maize yield was increased under fertilize treatments, ranged from 16.48% to 48.15%, harvest index increase extent from 0.09 to 0.11. Controlled-release fertilizer of T5 and T6 had perfect effect on yield improving of summer maize under equal N level, the highest grain yield was 9 697.50 kg/ha, which was 48.15% higher than CK treatment. It showed a low-high-low trend soil nutrient residue with the process of growth period. On equal N level, application of controlled-release could perfectly coordinate soil nutrient supply and above-ground growth of summer maize and beneficial to higher yield and nitrogen utilization efficiency, which was beneficial to higher yield.

**Key words:** Summer maize; Fertilize; Yield; Nutrient uptake

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 山西省科技攻关项目(20140311001-1D)、山西省农业科学院攻关项目(YGG1422)、山西省农业科学院博士研究基金(YBSJJ1504)

作者简介: 杨 峰(1972-), 男, 山西运城人, 硕士, 研究方向为大田作物高产栽培技术。E-mail: sxnkyxmstgb@163.com  
闫秋艳和鲁晋秀为本文通讯作者。

夏玉米是我国主要粮食作物和经济作物, 增加产量和提高养分利用率一直是玉米研究的重点<sup>[1]</sup>。玉米生长周期短, 需肥量大, 因施肥方式和肥料种类不同导致施肥后作物的增产效应不同<sup>[2]</sup>。针对夏玉米施肥, 许多研究提出氮素对玉米增产的重要性<sup>[3~5]</sup>, 并对氮肥施用及提高氮肥利用率方面进行了研究和应用<sup>[6, 7]</sup>。研究表明, 华北平原玉米氮肥利用率只有 20%~30%, 未被作物吸收利用而残留在土壤中的肥料氮, 易随雨水或灌溉水淋溶到土壤深

层或地下水,不仅造成很大浪费,而且还污染环境<sup>[8]</sup>。高亚军等<sup>[9]</sup>研究表明,春玉米收获后0~100 cm土层中积累的硝态氮含量占57.9%~70.1%。施氮量为225、337.5、450 kg/hm<sup>2</sup>时,硝态氮积累量分别为不施氮处理的1.6倍、2.1倍和4.1倍。因此,合理施用化肥是协调土壤养分供应与作物吸收,减少肥料损失的有效措施。

近年来,随着农业机械化设计和玉米轻简化施肥技术的发展,施肥次数减少,施肥量加大,复合肥和缓/控释肥的应用比例也相应增加<sup>[10]</sup>。前人研究多是以肥料种类或施肥方式对玉米生长发育及养分吸收的单一研究,其重点在作物及提高产量上<sup>[11,12]</sup>,对肥料施入后土壤速效养分运移、转化、残留,尤其是不同生育期作物-土壤系统间养分吸收的协同效应研究相对较少。养分在作物体内的积累是农作物养分利用的重要过程,同时,留存在土壤中的部分养分量也将发生变化。因此,分析施肥对作物体内养分浓度、吸收量的影响及土壤残留养分含量对研究农田系统中养分的平衡状况及建立可持续发展的农业施肥制度具有重要意义。

本研究在山西省晋南玉米主产区以不施肥为对照,研究不同施肥方式对玉米不同生育时期干物质积累、产量及构成因素、养分吸收及不同土层养分残留量的影响,探讨不同施肥方式下土壤养分供应与作物吸收间的协同效应,对增加夏玉米产量及优化施肥方式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2014年在山西省临汾市吴村镇洪堡村试验基地进行,试验地常年以冬小麦-夏玉米一年两熟种植模式为主。试验地土壤类型为石灰性褐土,耕层(0~20 cm)土壤基础肥力有机质15.20 g/kg、EC值141.40  $\mu$ S/cm、全氮1.68 g/kg、碱解氮78.89 mg/kg、有效磷12.64 mg/kg、速效钾117.0 mg/kg, pH值为8.13。

### 1.2 试验设计

供试玉米品种为强盛369。在等氮条件下,施纯氮量为225 kg/hm<sup>2</sup>,设9个施肥处理,CK,不施肥;T1,50%复合肥(N<sub>24</sub>P<sub>10</sub>K<sub>5</sub>)+50%尿素;T2,50%磷酸二铵(N<sub>15</sub>P<sub>42</sub>K<sub>0</sub>)+50%尿素,T1和T2处理50%基肥+50%大喇叭口期追肥。T3,复合肥(N<sub>24</sub>P<sub>10</sub>K<sub>5</sub>);T4,复合肥(N<sub>24</sub>P<sub>9</sub>K<sub>7</sub>);T5,控释掺混肥(N<sub>26</sub>P<sub>12</sub>K<sub>13</sub>);T6,脲甲醛双膜肥(N<sub>27</sub>P<sub>7</sub>K<sub>7</sub>),T3~T6处理全部作为基肥。T7,尿素,全部在大喇叭口期追肥。T8,尿素,50%大喇叭口期

追肥+50%抽穗期追肥。采用随机区组设计,每个处理3次重复,每个小区面积为125 m<sup>2</sup>,株距为24.7 cm,行距60 cm,种植密度为67 500株/hm<sup>2</sup>,在大喇叭口期和抽穗期追施尿素(条施),距离玉米植株10~15 cm,各处理其他田间管理一致。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 土壤基本理化性质

于玉米种植前、苗期(播种后34 d)、大喇叭口期(播种后64 d)和成熟期(播种后115 d)在每个小区按“S”形曲线,采用土钻分别取0~20 cm、21~40 cm土层的新鲜土壤样品,自然风干,研磨过2 mm筛备用。土壤基本理化性质测定参照鲁如坤<sup>[13]</sup>方法测定。

#### 1.3.2 产量及其构成因素

取样后用纯净水洗干净,用脱脂棉将植株擦干,剪成5 cm左右碎段,105℃烘箱杀青30 min,于75℃烘干24 h后,称重、粉碎过筛后备用。参照鲁如坤方法通过H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮,采用半自动凯式定氮仪测定全氮,采用钒钼黄比色法测定全磷含量,采用火焰光度计法测定全钾含量。

在成熟期各处理选取有代表性植株,采集果穗20个,测定单穗重、穗长、穗粗、穗行数,风干脱粒测量百粒重,根据小区产量折算产量。每个处理选取6.66 m<sup>2</sup>进行产量测定(按含水率14%折算),测产前每个小区随机选取20个果穗进行考种。各指标按下列公式计算:

收获指数=玉米产量/生物产量;

养分转运量=后一时期的养分积累量-前一时期的养分积累量;

氮素表观利用率=(施氮区作物吸氮量-不施氮区作物吸氮量)/施氮量×100%;

氮素表观平衡=氮投入量-氮吸收量;

氮肥农学效率=(施氮区植株产量-无氮区植株产量)/施氮量;

氮肥偏生产力=玉米产量/施氮量。

### 1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2007和Sigmplot12.0软件进行数据处理、计算、绘图,采用SPSS10.0软件进行差异显著性检验(显著性水平设定为 $p=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥方式对夏玉米地上部干物质重的影响

表1结果表明,施肥处理对玉米苗期地上部干重的影响不大,处理间差异不显著。施肥使大喇叭口期地上部干重均增加,其中,T5和T6处理玉米地

上部干重显著高于其他处理;T4、T3、T2 和 T1 处理间差异不显著;CK、T7 和 T8 处理间差异不显著。与对照不施肥相比,施肥均使成熟期玉米干物重增加,T5 和 T6 处理增加最多;T7、T8 处理与 CK 处理间差异不显著。玉米苗期根系干重,CK、T7 和 T8 处理显著低于其他处理;大喇叭口期,CK 和 T8 处理显著低于其他处理;成熟期,T3、T4、T5 和 T6 处理间差异不显著,且显著高于其他处理。

表 1 不同施肥处理对玉米植株干物质重积累的影响  
Table 1 Dry matter accumulation related to different fertilize treatments

| 处 理<br>Treatment | 地上部干重(g)<br>Above-ground dry matter |                    |              | 根系干重(g)<br>Root dry matter |                    |              |
|------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------|----------------------------|--------------------|--------------|
|                  | 苗 期                                 | 大喇叭口期              | 成熟期          | 苗 期                        | 大喇叭口期              | 成熟期          |
|                  | Seedling stage                      | Bell-mouthed stage | Mature stage | Seedling stage             | Bell-mouthed stage | Mature stage |
| CK               | 0.41 a                              | 96.75 c            | 145.40 c     | 0.15 b                     | 23.30 b            | 28.60 b      |
| T1               | 0.42 a                              | 119.80 b           | 154.35 bc    | 0.17 a                     | 26.10 a            | 30.20 b      |
| T2               | 0.47 a                              | 116.35 bc          | 166.60 b     | 0.17 a                     | 25.55 ab           | 29.90 b      |
| T3               | 0.40 a                              | 121.90 b           | 175.05 b     | 0.17 a                     | 24.55 ab           | 38.10 a      |
| T4               | 0.46 a                              | 126.31 b           | 179.45 ab    | 0.18 a                     | 28.15 a            | 36.20 a      |
| T5               | 0.48 a                              | 140.95 a           | 194.50 a     | 0.20 a                     | 27.75 a            | 36.10 a      |
| T6               | 0.43 a                              | 145.95 a           | 184.70 a     | 0.18 a                     | 26.70 a            | 38.15 a      |
| T7               | 0.41 a                              | 102.90 c           | 147.05 bc    | 0.15 b                     | 26.50 ab           | 28.75 b      |
| T8               | 0.43 a                              | 106.60 c           | 149.95 bc    | 0.15 b                     | 23.45 b            | 28.65 b      |

注:表中同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下表同。  
Note: Values within each column followed by the different letters showed significant difference( $P<0.05$ ). The same below.

2.2 施肥方式对玉米产量及其构成因素的影响

表2结果表明,玉米穗粗在各处理间表现不一,T3、T4 和 T6 处理显著高于其他处理,其他处理间差异不显著。施肥对玉米穗长和单穗行数的影响不大,各处理间差异不显著。施肥对玉米百粒重产生影响,T4 和 T5 处理显著高于其他处理。玉米单穗重在 T5 和 T6 处理下最高;T3 处理次之;显著高于其他处理;CK 和 T7 处理最低。与对照不施肥相比,施肥均使玉米生物产量增加,T5 和 T6 处理增加最多,显

著高于其他处理,分别增加 35.17% 和 27.33%;T3、T1、T4 和 T2 处理分别增加 20.73%、17.41%、17.23% 和 15.96%;T8 和 T7 处理分别增加 9.29% 和 6.87%。施肥处理均使玉米子粒产量提高,T5 和 T6 处理增加最多,分别提高 48.15% 和 47.03%;T3、T4、T1、T2 处理分别增加 36.57%、34.57%、29.61% 和 24.95%;T8 和 T7 处理分别增加 19.45% 和 16.48%。施肥使玉米收获指数均增加,其中 T4 和 T6 处理较高。

表 2 不同施肥方式对玉米产量及其构成因素的影响  
Table 2 Effects of different fertilize treatments on maize yield and its components

| 处 理<br>Treatment | 穗 粗<br>(mm)<br>Ear diameter | 穗 长<br>(cm)<br>Ear length | 单穗行数<br>Line number<br>per ear | 百粒重(g)<br>100-kernel<br>weight | 单穗重(g)<br>Grain weight<br>per ear | 生物产量<br>(kg/hm <sup>2</sup> )<br>Biomass | 子粒产量<br>(kg/hm <sup>2</sup> )<br>Yield | 收获指数<br>Harvest index |
|------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|
| CK               | 50.69 bc                    | 17.77 ab                  | 14.70 a                        | 21.37 bc                       | 144.09 c                          | 8 823.60 c                               | 6 545.40 d                             | 0.741 8 b             |
| T1               | 50.22 bc                    | 17.92 ab                  | 14.67a                         | 21.29 bc                       | 163.64 b                          | 10 360.05 ab                             | 8 483.55 bc                            | 0.818 8 ab            |
| T2               | 51.27 b                     | 18.19 a                   | 15.15 a                        | 22.56 b                        | 160.16 b                          | 10 232.55 ab                             | 8 178.60 bc                            | 0.799 2 ab            |
| T3               | 52.19 a                     | 17.95 ab                  | 14.80 a                        | 22.78 b                        | 171.05 ab                         | 10 653.60 ab                             | 8 939.55 ab                            | 0.839 1 a             |
| T4               | 52.20 a                     | 18.35 a                   | 15.09 a                        | 23.12 a                        | 161.90 b                          | 10 344.00 ab                             | 8 808.45 ab                            | 0.851 5 a             |
| T5               | 51.57 b                     | 18.05 a                   | 15.44a                         | 23.83 a                        | 176.14 a                          | 11 926.80 a                              | 9 697.50 a                             | 0.813 1 ab            |
| T6               | 52.12 a                     | 18.53 a                   | 14.91 a                        | 22.69 b                        | 175.94 a                          | 11 235.60 a                              | 9 624.20 a                             | 0.856 6 a             |
| T7               | 51.32 b                     | 18.51 a                   | 14.59 a                        | 21.96 bc                       | 150.13 c                          | 9 429.90 b                               | 7 624.20 c                             | 0.808 5 ab            |
| T8               | 51.25 b                     | 17.91 ab                  | 14.91 a                        | 21.32 bc                       | 156.65 bc                         | 9 643.50 b                               | 7 818.45 cd                            | 0.810 7 ab            |

2.3 施肥方式对玉米不同生育期养分吸收的影响

表3结果表明,玉米苗期各施肥处理单株氮素积累量均高于CK,其中T2处理最高;大喇叭口期各施肥处理单株氮素积累量均高于CK,T6处理最高;成熟期除T7处理略低于CK外,其余处理单株氮素积累量均高于CK,T5处理最高。随玉米生育期延长,从苗期到大喇叭口期,玉米单株氮素积累呈明显上升趋势,CK、T1、T2、T3、T6和T7处理玉米单株氮素积累在成熟期呈下降趋势;T4和T8处理玉米单株

氮素积累量随生育期延长呈上升趋势。  
玉米苗期CK处理单株磷素积累量高于其他处理,T2处理次之;大喇叭口期,各施肥处理玉米单株磷素积累量均高于对照,T6和T5处理最高;成熟期玉米单株磷素积累量除T7处理低于CK外,其他处理均高于CK,T4和T5处理最高。从苗期到大喇叭口期,各处理玉米单株磷素积累量明显增加,到成熟期,CK、T3、T4、T8处理呈继续增长趋势;T1、T2、T5、T6和T7处理呈下降趋势。

表3 不同施肥处理对玉米生育期单株总氮、磷和钾积累量的影响  
Table 3 Effects of different fertilize treatments on total N, P and K accumulation per plant of maize in different growth period  
mg/株

| 处 理<br>Treatment | 氮素积累量<br>N accumulation |             |             | 磷素积累量<br>P accumulation |           |           | 钾素积累量<br>K accumulation |             |             |
|------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------------------|-----------|-----------|-------------------------|-------------|-------------|
|                  | 苗 期                     | 大喇叭口期       | 成熟期         | 苗 期                     | 大喇叭口期     | 成熟期       | 苗 期                     | 大喇叭口期       | 成熟期         |
|                  | SS                      | BS          | MS          | SS                      | BS        | MS        | SS                      | BS          | MS          |
| CK               | 19.43 b                 | 2 573.34 d  | 2 108.14 c  | 2.81 a                  | 284.37 c  | 313.45 b  | 16.19 b                 | 2 298.84 c  | 1 971.65 d  |
| T1               | 20.53 b                 | 3 082.12 cd | 2 522.62 c  | 1.61 b                  | 335.26 b  | 332.45 b  | 15.20 b                 | 2 618.37 bc | 2 424.14 cd |
| T2               | 29.43 a                 | 3 771.02 bc | 3 723.73 ab | 2.49 a                  | 393.11 ab | 353.98 b  | 11.87 c                 | 2 009.00 c  | 1 990.28 d  |
| T3               | 22.84 b                 | 4 322.13 b  | 3 443.29 b  | 1.49 bc                 | 352.10 b  | 383.97 ab | 18.46 b                 | 2 099.82 c  | 2 928.00 c  |
| T4               | 27.04 a                 | 3 694.81 c  | 3 751.65 ab | 1.90 b                  | 365.88 b  | 434.36 a  | 21.49 a                 | 3 143.53 b  | 3 999.80 b  |
| T5               | 27.46 a                 | 4 010.33 b  | 4 656.48 a  | 1.78 b                  | 420.91 a  | 407.23 a  | 25.29 a                 | 4 722.60 a  | 5 525.15 a  |
| T6               | 25.20 ab                | 5 041.73 a  | 3 115.38 b  | 1.57 bc                 | 445.71 a  | 385.64 ab | 16.45 b                 | 3 098.43 b  | 3 195.26 c  |
| T7               | 21.25 b                 | 3 215.95 c  | 2 075.33 c  | 2.12 a                  | 357.00 b  | 304.22 b  | 21.20 a                 | 3 022.59 b  | 3 049.24 c  |
| T8               | 19.51 b                 | 2 747.29 d  | 3 218.06 b  | 2.07 ab                 | 285.00 c  | 404.07 a  | 18.16 b                 | 2 881.36 bc | 2 023.78 d  |

玉米苗期,单株钾素积累量T3、T4、T5、T7和T8处理比CK高,其他处理低于CK;大喇叭口期,单株钾素积累量除T2和T3处理低于CK外,其余处理均高于CK;成熟期各施肥处理均高于CK。随生育期延长,从苗期到大喇叭口期,玉米单株钾素积累呈明显上升趋势;成熟期,T3、T4、T5、T6和T7处理呈继

续增加趋势,其他处理呈下降趋势。  
与对照不施肥相比,施肥均增加夏玉米成熟期子粒氮素积累量,其中,控释肥处理(T5和T6)含量较高(图1),说明控释肥的应用提高了作物对氮肥的吸收利用。

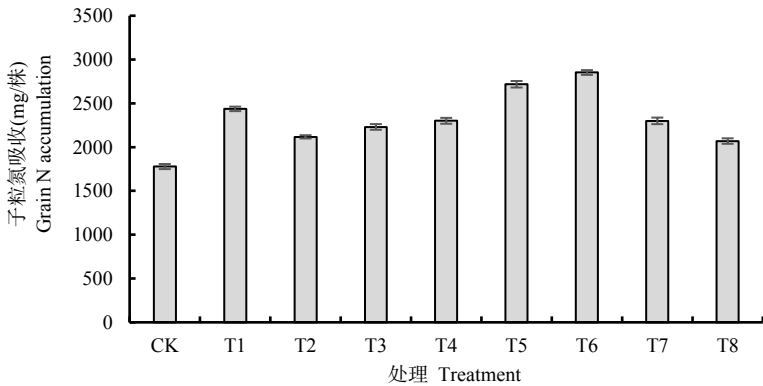


图1 不同施肥处理对成熟期玉米子粒氮总氮积累量的影响  
Fig.1 Effects of different fertilize treatments on total nitrogen accumulation per plant of summer maize

表 4 不同施肥模式对不同生育期玉米植株氮、磷和钾转运量的影响

Table 4 N, P and K translocation in different growth stages under different fertilize treatments kg/hm<sup>2</sup>

| 处 理<br>Treatment | 氮素转运量 N translocation |           | 磷素转运量 P translocation |           | 钾素转运量 K translocation |           |
|------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|
|                  | 苗期-大喇叭口期              | 大喇叭口期-成熟期 | 苗期-大喇叭口期              | 大喇叭口期-成熟期 | 苗期-大喇叭口期              | 大喇叭口期-成熟期 |
|                  | SS to BS              | BS to MS  | SS to BS              | BS to MS  | SS to BS              | BS to MS  |
| CK               | 172.38                | -31.40    | 19.00                 | 1.96      | 154.07                | -22.08    |
| T1               | 206.65                | -37.76    | 22.52                 | -0.18     | 175.71                | -13.11    |
| T2               | 252.55                | -3.19     | 26.36                 | -2.64     | 134.80                | -1.26     |
| T3               | 290.20                | -59.32    | 23.66                 | 2.15      | 140.49                | 55.90     |
| T4               | 247.57                | 3.83      | 24.56                 | 4.62      | 210.73                | 57.79     |
| T5               | 268.84                | 43.61     | 28.29                 | -0.92     | 317.06                | 54.17     |
| T6               | 338.61                | -130.02   | 29.97                 | -4.05     | 208.03                | 6.53      |
| T7               | 215.64                | -76.99    | 23.95                 | -3.56     | 202.59                | 1.79      |
| T8               | 184.12                | 31.77     | 19.09                 | 8.03      | 193.26                | -57.88    |

表 4 对植株氮、磷和钾素的转运量进行不同生育阶段划分。从苗期至大喇叭口期施肥处理氮肥转运量与对照相比均增加,其中,T6 处理增加最多;从大喇叭口期至成熟期,玉米植株氮素积累量在大部分处理均有所减少,T4 处理有缓慢增长趋势,T5 和 T8 处理增加程度较大。磷肥转运量从苗期至大喇叭口期在各施肥处理下均高于对照,T6 处理转运量最大;从大喇叭口期至成熟期 CK、T3、T4 和 T8 处理呈继续增长趋势,其他处理开始下降。钾肥转运量从苗期至大喇叭口期在各处理间差异较大,T5 处理转运量最多,T2 和 T3 处理低于 CK;从大喇叭口期至成熟期除 CK、T1、T2、T8 处理转运量降低外,其他处理呈继续增长趋势。

2.4 施肥方式对玉米不同生育期土壤基本理化性质的影响

从图 2 可以看出,施肥使玉米苗期 0~20 cm 土壤碱解氮含量增加,T2 处理增加最多;大喇叭口期除 T2、T3 处理降低外,其余处理均增加;成熟期施肥处理 0~20 cm 土壤碱解氮含量均高于 CK。随着玉米生育期延长,CK 处理碱解氮含量呈下降趋势,T1、T5 和 T6 处理呈低-高-低的趋势,T2、T3 和 T4 处理呈高-低-高趋势,T7 和 T8 处理呈升高趋势。T1、T2、T3 和 T4 处理使玉米苗期 21~40 cm 土壤碱解氮含量增加,其他处理与 CK 间差异不大;大喇叭口期 T1、T2、T5、T6、T7 和 T8 处理 21~40 cm 土壤碱解氮含量高于 CK,T3、T4 处理较 CK 处理低;成熟期除 T3 和 T4 处理低于 CK 外,其余处理均高于 CK。随玉米生育时期延长,CK 处理 21~40 cm 土壤碱解氮含量变化较小;T1、T2、T7 和 T8 处理呈上升趋势;T3、T4 处理在苗期较高,大喇叭口期和成熟期降低,后期差异不大;T5 和 T6 处理呈低-高-低的趋势。

与对照相比,施肥处理均使玉米苗期 0~20 cm 土壤有效磷含量增加,T1 处理增加最多,T6 处理次之,T1 和 T4 处理对土壤有效磷含量增加作用较小。大喇叭口期各施肥处理 0~20 cm 土壤有效磷含量均高于对照处理;成熟期除 T1、T7 和 T8 处理低于 CK 外,其余处理均高于 CK。随着玉米生育期的延长,CK、T1、T4、T7 和 T8 处理使 0~20 cm 土壤有效磷含量呈降低趋势;T2、T5、T6 处理在大喇叭口期较苗期和成熟期土壤有效磷含量高;T3 处理呈高-低-高的趋势。施肥处理对苗期 21~40 cm 土壤有效磷含量的作用表现不一,T5 和 T6 处理增加明显;T2、T7 和 T8 处理与 CK 处理间差异不明显;T1、T3 和 T4 处理有效磷含量低于 CK。大喇叭口期 21~40 cm 土壤有效磷含量除 T3 处理低于 CK 外,其余处理均高于 CK;成熟期除 T1 处理低于 CK 外,其余处理均高于 CK。随着玉米生育期延长,CK、T4、T5 和 T8 处理 21~40 cm 土壤有效磷含量呈下降趋势;T2 和 T3 处理呈升高趋势;T3 处理呈高-低-高趋势;T1 和 T6 处理呈低-高-低趋势。

与对照不施肥相比,施肥处理均使玉米苗期 0~20 cm 土壤速效钾含量不同程度增加,T4、T5、T6 处理增加最多;大喇叭口期除 T1、T4、T5 和 T6 处理高于 CK 处理外,其余处理均低于 CK;成熟期除 T3 和 T4 处理高于 CK 外,其余处理均低于 CK;随着玉米生育时期的延长,各施肥处理对 0~20 cm 土壤速效钾含量均呈高-低-高趋势。施肥使玉米苗期 21~40 cm 土壤速效钾含量均有所增加,大喇叭口期除 T2 和 T7 处理低于 CK 外,其余处理高于 CK;成熟期除 T1 处理与 CK 间无差异外,其余处理均高于 CK;随玉米生育时期延长,各处理均呈高-低-高趋势。

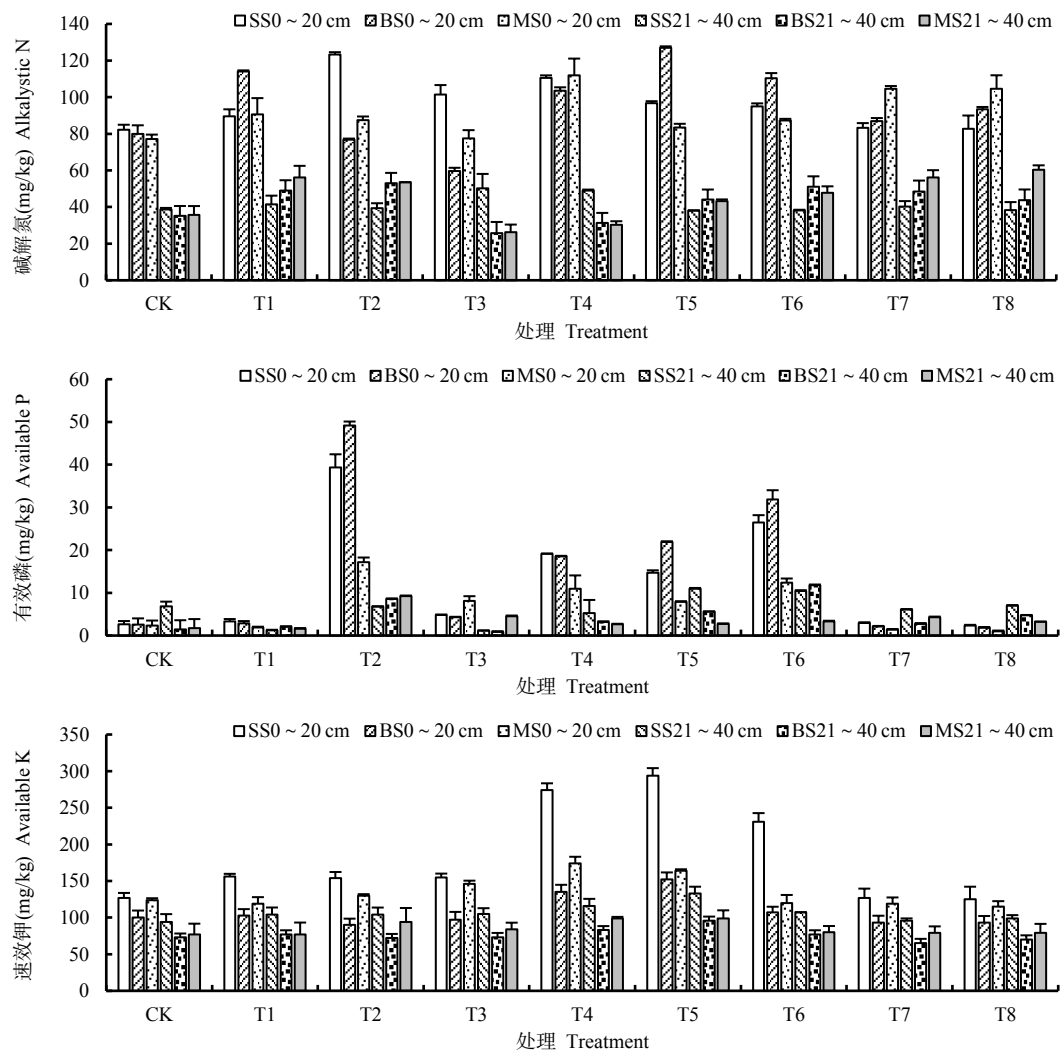


图2 不同施肥处理对玉米苗期、大喇叭口期和成熟期土壤基本理化性质的影响

Fig.2 Effects of different fertilize treatments on soil basic physical and chemical properties of maize seedling stage (SS), bell-mouthed stage (BS) and mature stage (MS)

2.5 施肥方式对玉米氮素利用的影响

表5 不同施肥方式的氮肥利用率

Table 5 Utilization efficiency of fertilizer under different fertilization modes

| 处 理<br>Treatment | 氮素表观平衡(kg/hm <sup>2</sup> ) N apparent balance |             |           | 氮肥农学效率<br>(kg/kg)<br>AEN | 氮肥偏生产力<br>(kg/kg)<br>PFPN | 氮肥表观利用率<br>(%)<br>NAU |
|------------------|------------------------------------------------|-------------|-----------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|
|                  | 苗期<br>SS                                       | 大喇叭口期<br>BS | 成熟期<br>MS |                          |                           |                       |
| CK               | —                                              | —           | —         | —                        | —                         | —                     |
| T1               | 224.93 a                                       | 190.66 a    | 197.02 a  | 8.61 b                   | 37.70 b                   | 42.43 bc              |
| T2               | 224.33 a                                       | 144.16 ab   | 115.94 c  | 7.26 bc                  | 36.34 b                   | 48.46 b               |
| T3               | 224.77 a                                       | 106.96 b    | 134.87 b  | 10.64 b                  | 39.73 a                   | 40.05 bc              |
| T4               | 224.49 a                                       | 149.30 ab   | 114.06 c  | 10.06 b                  | 39.15 a                   | 49.30 b               |
| T5               | 224.46 a                                       | 128.00 b    | 52.98 d   | 14.01 a                  | 43.10 a                   | 76.45 a               |
| T6               | 224.61 a                                       | 58.38 c     | 157.01 b  | 13.68 a                  | 42.77 a                   | 74.05 a               |
| T7               | 224.88 a                                       | 181.62 a    | 227.21 a  | 4.79 c                   | 33.88 bc                  | 30.21 c               |
| T8               | 224.99 a                                       | 213.26 a    | 150.08 b  | 5.65 c                   | 34.74 bc                  | 33.29 c               |

表5表明,各施肥处理对玉米苗期氮素表观平衡影响无显著差异,大喇叭口期氮素表观平衡在各处理间差异较大,T6处理值最小,成熟期T5处理值最小。T5和T6处理下氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥表观利用率均较高,T7和T8处理最低。

### 3 结论与讨论

施肥在我国农业生产中发挥着重要作用,肥料的合理施用要根据作物养分需求量决定,施肥量的确定对肥料高效利用起着关键作用。适宜夏玉米高产的氮肥用量在185~235 kg/hm<sup>2</sup><sup>[14~16]</sup>。本研究氮肥用量推荐225 kg/hm<sup>2</sup>。此氮肥用量下的不同施肥方式对夏玉米均有一定增产效果,增产幅度达16.48%~48.15%,收获指数增加7.81%~15.52%。缓控释肥的T5和T6处理和普通复合肥T3和T4处理,一次性作为基肥施用均比尿素追肥处理产量提高,其中,缓控释肥的提高作用更明显,最高达9697.50 kg/hm<sup>2</sup>。相关研究也证实,控释肥较尿素更有助于玉米获得高产,增产幅度达5%~20%<sup>[17]</sup>。

大量的干物质积累是玉米高产的基础,直接影响夏玉米生物和经济产量<sup>[18]</sup>。本研究表明,施肥对玉米苗期干物质质量的影响较小,随着夏玉米生育期延长,大喇叭口期和成熟期干物质质量在各处理间差异更明显,且持续增加。成熟期施肥处理较CK使单株干物质重增加1.03%~32.53%,其中,缓控释肥处理(T5和T6)单株干物质积累最多,刘德江等<sup>[19]</sup>利用不同氮、磷和钾配比施肥对夏玉米养分吸收利用研究表明,施肥处理较不施肥处理均增加作物单株养分含量,氮增加12.17%~54.9%。本研究表明,单株养分积累量从苗期至大喇叭口期呈大幅增加趋势,从大喇叭口期至成熟期养分在植株内积累量呈减少的趋势。从大喇叭口期至成熟期T6处理植株氮素转运量值最小,且为负值,但子粒中氮素积累量最大,说明较多的氮素从植株向子粒运移。

本研究表明,施肥处理较对照提高夏玉米不同生育期土壤碱解氮、速效磷和缓效钾含量。玉米收获后缓控释肥处理碱解氮残留相比其他施肥处理低,几乎回到播种前土壤的背景值,因此不会使氮素过多损失。缓控释肥土壤21~40 cm速效养分含量在玉米不同生育期变化比较稳定,说明其释放的养分及时供应植物吸收利用,向下层土壤运移的较少,土壤养分供应与夏玉米养分吸收形成一定协同效应。单施尿素处理,土壤碱解氮盈余不断增加,玉米收获后大量氮素残留在土壤中,同时使21~40 cm土层氮素积累量升高,造成较大的氮素损失,玉米植

株成熟期氮和磷浓度以及单株积累量均较低。相关研究表明,常规尿素处理和控释尿素处理,土壤硝态氮含量均随着夏玉米生育期的推进呈下降趋势<sup>[20]</sup>。靳立斌等<sup>[21]</sup>对黄淮海地区夏玉米尿素氮肥处理的研究也表明,“一炮轰”的施肥方式0~30 cm和31~60 cm土层硝态氮积累量较高,肥料利用率降低。

从土壤-作物系统氮素平衡看,缓控释肥能提高氮素的农学效率和表观利用率,减少玉米收获后土壤碱解氮养分的盈余量。在大喇叭口期是缓控释肥释放量较大,正是玉米氮素吸收的高峰期,使土壤养分与作物吸收间协同,提高了肥料的利用率。追施尿素的处理对玉米产量的提高作用不如一次性单施复合肥和缓控释肥。一次性追施(T7)不如两次追施(T8)效果好,养分利用率低。本研究表明,控释肥、复合肥和复合肥+尿素追肥模式均能提高夏玉米子粒产量和氮肥利用率,以控释肥效果较明显。因此,合理使用一次性缓控释肥施肥技术,是增加玉米产量,提高氮肥利用率,提高经济效益,减少氮肥损失和降低环境污染的有效措施。综合作物产量、土壤-作物系统养分吸收利用等指标,等氮(225 kg/hm<sup>2</sup>)条件下,一次性基施缓控释肥优于复合肥和复合肥+尿素追肥处理,比单施尿素处理更能提高氮素利用率,减少养分损失。

#### 参考文献:

- [1] 赵萍萍,王宏庭,郭军玲,等. 氮肥用量对夏玉米产量、收益、农学效率及氮肥利用率的影响[J]. 山西农业科学, 2010, 38(11): 43-46, 80.  
Zhao P P, Wang H T, Guo J L, et al. Influence to the rate of nitrogen fertilizer application on summer maize yield, net return, agronomic efficiency and nitrogen use recovery[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2010, 38(11): 43-46, 80. (in Chinese)
- [2] 易镇邪,王 璞,陶洪斌,等. 氮肥基/追比对华北平原夏玉米生长发育与水、氮利用的影响Ⅱ. 夏玉米氮素累积、转运与土壤无机氮动态[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 86-90.  
Yi Z X, Wang P, Tao H B, et al. Effect of base N to dress N ratio on water and nitrogen utilization, growth of summer maize in North China Plain. II. Nitrogen accumulation and translocation of summer maize and dynamics of soil inorganic N[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(1): 86-90. (in Chinese)
- [3] 何 萍,徐新朋,仇少君,等. 我国北方玉米施肥产量效益和经济效益分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1387-1394.  
He P, Xu X P, Qiu S J, et al. Yield response and economic analysis of fertilizer application in maize grown in North China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1387-1394. (in Chinese)
- [4] 赵洪祥,边少锋,孙 宁,等. 氮肥运筹对玉米氮素动态变化和氮肥利用的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(3): 122-129.  
Zhao H X, Bian S F, Sun N, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen dynamic changes and nitrogen use efficiency in maize[J].

- Journal of Maize Sciences, 2012, 20(3):122-129. (in Chinese)
- [5] 王小明, 谢迎新, 王永华, 等. 施氮模式对冬小麦/夏玉米产量及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 578-582.
- Wang X M, Xie Y X, Wang Y H, et al. Effects of nitrogen application patterns on yields of winter wheat and summer maize and nitrogen use efficiency[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(3): 578-582. (in Chinese)
- [6] 王忠美, 赵 敏, 朱玲玲, 等. 氮缓释复合肥对坝上地区青贮玉米产量及氮素利用率的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(5): 888-893.
- Wang Z M, Zhao M, Zhu L L, et al. Yield of silage corn (*Zea mays* L.) and utilization efficiency as effected by slow-release nitrogen[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(5): 888-893. (in Chinese)
- [7] 易镇邪, 王 璞, 陈平平, 等. 氮肥类型对夏玉米氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 472-478.
- Yi Z X, Wang P, Chen P P, et al. Effect of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization of summer maize (*Zea mays* L.)[J]. Plant Nutrition and fertilizer Science, 2008, 14(3): 472-478. (in Chinese)
- [8] 张邦喜, 秦 松, 范成五, 等. 优化施肥对黄壤坡地夏玉米产量及肥料利用率的影响[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(7): 81-83.
- Zhang B X, Qin S, Fan C W, et al. Effect of optimized fertilization on yield of summer maize and fertilizer efficiency in yellow soil on sloping land[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2014, 42(7): 81-83. (in Chinese)
- [9] 高亚军, 李生秀, 李世清, 等. 施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 61-64.
- Gao Y J, Li S X, Li S Q, et al. Effects of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 61-64. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 张 华, 吴士强, 蒋保娟. 肥料类型及用量对夏玉米产量形成及氮肥效率的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(16): 191-194.
- Zhang H, Wu S Q, Jiang B J. Effects of different type of nitrogen fertilizer on yield formation and nitrogen efficiency of summer maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(16): 191-194. (in Chinese)
- [12] 闫广艳, 黄剑秋. 玉米一次深施复合肥对产量及施肥效率的影响[J]. 吉林农业科学, 2007, 32(3): 48-50.
- Yan G Y, Huang J Q. Studies of effect of once deep application of multi-elements fertilizer to yield and fertilizer efficiency of maize [J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2007, 32(3): 48-50. (in Chinese)
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [14] 郑 伟, 何 萍, 高 强, 等. 施氮对不同土壤肥力玉米氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 301-309.
- Zheng W, He P, Gao Q, et al. Effect of N application on nitrogen absorption and utilization of spring maize under different soil fertilities[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 301-309. (in Chinese)
- [15] 衣文平, 史桂芳, 武 良, 等. 不同释放期包膜控释尿素与普通尿素配施在夏玉米上的应用效果研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 931-937.
- Yi W P, Shi G F, Wu L, et al. Applications of polymer coated urea with different release time and conventional urea on summer maize growth[J]. Plant Nutrition and fertilizer Science, 2010, 16(4): 931-937. (in Chinese)
- [16] 王 寅, 冯国忠, 张天山, 等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 518-528.
- Wang Y, Feng G Z, Zhang T S, et al. Effects of mixed application of controlled-release N fertilizer and common urea on grain yield, N uptake and soil N balance in continuous spring maize production [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(3): 518-528. (in Chinese)
- [17] 鲍彦屹, 高聚林, 胡树平, 等. 一次性施用缓控释复合肥对春玉米产量及氮素积累转运的影响[J]. 内蒙古农业科技, 2015, 43(5): 23-27.
- Bao Y Y, Gao J L, Hu S P, et al. The effect of the one-time use of sustained release compound fertilizer on product and the nitrogen accumulation and transport of spring maize[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2015, 43(5): 23-27. (in Chinese)
- [18] 姜佰文, 逢 妍, 于亚利, 等. 氮钾配比对寒地玉米干物质积累、产量及品质的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(1): 137-142.
- Jiang B W, Pang Y, Yu Y L, et al. Effect of ratios of nitrogen to potassium on dry matter accumulation, yield and quality of corn in cold area[J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(1): 137-142. (in Chinese)
- [19] 刘德江, 李青军, 高 伟, 等. 施肥对玉米养分吸收利用、产量及肥料效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2009(4): 56-59.
- Liu D J, Li Q J, Gao W, et al. Effects of fertilization on nutrient absorption, yield and fertilizer benefit of maize[J]. Soil and Fertilizer Sciences, 2009(4): 56-59. (in Chinese)
- [20] 朱宝国. 控释氮肥对土壤硝态氮和玉米植株全氮含量及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(6): 220-223.
- Zhu B G. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on soil nitrate nitrogen and plant total nitrogen content and yield of corn[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(6): 220-223. (in Chinese)
- [21] 靳立斌, 崔海岩, 李 波, 等. 综合农艺管理对夏玉米氮效率和土壤硝态氮的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(11): 2009-2015.
- Jin L B, Cui H Y, Li B, et al. Effects of integrated agronomic practices on nitrogen efficiency and soil nitrate nitrogen of summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(11): 2009-2015. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)