

常规尿素掺混控释尿素一次施用对旱作春玉米产量及氮素利用的影响

张杰¹, 徐芳蕾¹, 薄其飞¹, 唐安¹, 高嘉瑞¹, 王永亮³, 李世清^{1,2*}, 岳善超^{1,2*}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3 山西农业大学资源环境学院, 山西太原 030031)

摘要:【目的】通过田间试验研究施氮量和施肥方式对旱作春玉米产量、经济效益、干物质累积量、氮素累积利用和土壤无机氮残留的影响, 为春玉米高产及高效施肥提供理论支撑。【方法】本研究采用裂区试验, 以施肥方式为主处理, 包括常规尿素一次施肥 (OF)、常规尿素分次施肥 (TF) 和常规尿素掺混控释尿素一次施肥 (MF); 施氮量为副处理, 设 0、60、120、180、240、300 kg/hm² 6 个施氮水平 (N0、N60、N120、N180、N240、N300)。在玉米十叶期 (V10)、吐丝期 (R1)、灌浆期 (R3)、成熟期 (R6) 分别采集植株样品, 测定植株生物量, 并按器官分类测定不同部位的氮含量。【结果】1) 3 种施肥方式下, 随着施氮量的增加产量逐渐增加, 当施氮量达到 240 kg/hm² 后, 产量不再显著增加。MF 施氮处理的平均产量较 OF 和 TF 处理分别显著提高了 5.0% 和 4.2%, 经济效益分别提高了 7.9% 和 25.7%。2) 增施氮肥显著增加了干物质累积量, 当施氮量达到 240 kg/hm² 后, 收获期干物质累积量不再显著增加。N240 处理吐丝期和收获期的干物质累积量 MF 较 OF 分别增加了 19.5% 和 12.5%。3) 增施氮肥显著增加了花前、花后和氮素总累积量。MF 方式的 N240 处理氮素总累积量较 OF 和 TF 方式分别显著增加了 32.7%、20.9%。4) 增施氮肥显著增加了收获期茎、叶、籽粒氮含量以及茎氮、叶氮转移量。相同施氮量下, 收获期茎、叶、籽粒氮含量和茎、叶氮向籽粒的转移量都表现为 MF>TF>OF, 且 MF 方式显著高于 OF 方式。5) 相比 OF 和 TF 方式, MF 方式显著提高了氮肥农学效率、偏生产力和表观回收率, 显著降低了无机氮残留和氮表观损失。【结论】常规尿素掺混控释尿素一次施肥方式在施氮量为 240 kg/hm² 时, 显著提高了春玉米的产量、经济效益、氮素累积量和肥料利用率, 降低了土壤无机氮残留, 为当地高产和高效施肥的最佳方式。

关键词: 春玉米; 掺混控释尿素; 施氮量; 干物质累积量; 氮素累积转移

Effects of one-time application of controlled-release urea combined with solid granular urea on grain yield and nitrogen utilization of spring maize in dryland

ZHANG Jie¹, XU Fang-lei¹, BO Qi-fei¹, TANG An¹, GAO Jia-rui¹, WANG Yong-liang³, LI Shi-qing^{1,2*}, YUE Shan-chao^{1,2*}

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3 College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: 【Objectives】A two-year on-farm experiment was conducted to evaluate the effects of nitrogen (N) application rate and fertilization method on spring maize yield, economic income, dry matter accumulation, N accumulation and utilization, and soil inorganic N residues in dryland. 【Methods】The experiment had a split-plot design with three fertilization methods (solid granular urea one-time fertilization (OF), solid granular urea basal and top-dress fertilization (TF), and one-time application of a mixture of controlled-release urea and solid granular urea (MF)) as the main factors and six different N application rates of 0, 60, 120, 180, 240, 300 kg/hm²

收稿日期: 2021-01-29 接受日期: 2021-04-29

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0201801, 2017YFD0201807)。

联系方式: 张杰 E-mail: zhangjie668@163.com

* 通信作者 李世清 E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn; 岳善超 E-mail: yueshanchao@nwfau.edu.cn

(expressed as N0, N60, N120, N180, N240, N300, respectively) as the sub-factors. For the assessment of biomass and total N contents, maize samples were collected at stage of 10 expanded leaves (V10), silking stage (R1), milking ripening stage (R3) and harvest stage (R6). **【 Results 】** 1) Yield did not increase when N application rate reached 240 kg/hm² in the three fertilization methods. Yield under MF method was 5.0% and 4.2% higher than those under OF and TF methods, respectively. Economic income under MF method was 7.9% and 25.7% higher than those under OF and TF methods, respectively. 2) Dry matter accumulation increased significantly with increase of N application rate in the three fertilization methods. Dry matter accumulation at silking and harvest stages under MF method were significantly higher (19.5% and 12.5% at 240 kg/hm², respectively) than those under OF method. 3) Periodical N accumulation at silking and harvest stages increased significantly with N application rate. Total N accumulation due to application of MF method at 240 kg/hm² rate (N240) was 32.7% and 20.9% higher than those of OF and TF methods, respectively. 4) N content of stem, leaf and grain at harvest stage and N translocation amount from stem and leave to grain increased significantly with N application rate. Average stem, leaf and grain N contents, and N translocation amount were higher in MF method than those in TF and OF methods. 5) MF method significantly increased the partial factor productivity, agronomic efficiency and apparent recovery rate of N and decreased soil mineral N content at harvest stage and apparent N loss, compared with those of OF and TF methods. **【 Conclusions 】** MF method significantly increased yield, economic income, nitrogen accumulation and utilization, but reduced soil N_{min} at harvest when N application rate was 240 kg/hm².

Key words: spring maize; a mixture of controlled-release urea and solid granular urea; nitrogen application rate; dry matter accumulation; nitrogen accumulation transfer

玉米是我国主要的粮食作物,对我国粮食安全至关重要^[1]。现阶段玉米生产目标已由产量转向优质、绿色、高效等多目标,增加产量与提高生产效率同等重要^[2]。

合理的施氮量是保证玉米高产的必要条件。受“施氮越多产量越高”的错误观念影响,氮肥过量施用的现象普遍存在,这不仅对产量提高没有帮助,还会导致氮素利用效率下降,造成氮素的大量损失和浪费并引起一系列的环境问题^[3-4]。巨晓棠等^[5]研究表明,当氮肥投入量低于经济最佳施氮量时,玉米增产效果得不到发挥,产量较低;而当氮肥投入量超过经济最佳施氮量时,玉米产量不再随施氮量增加而增加,反而会导致氮肥利用率下降。因此,探索既能满足玉米在整个生育期对养分的需求,又不造成环境污染的施氮量至关重要。

在保证施氮量适宜的条件下,合理的施肥方式也可以提高玉米的产量。“一炮轰”施肥方式虽然提高了劳动效率,但并没有显著提高玉米产量,严重时还会出现前期烧苗后期脱肥早衰的现象^[6]。与“一炮轰”施肥方式相比,氮肥分次施用能够更好的协调养分供应与作物吸收之间的矛盾,利于作物高产,但在覆膜条件下后期追肥困难,费时费工且会对玉米植株造成伤害^[7]。随着技术的发展,控释氮肥的研制与运用成为解决上述问题的新途径。将控

释肥技术融入到一次施肥中,不仅避免了一次性施肥技术的不足,也能够使作物获得与尿素分次施肥相当的产量^[8-10]。尽管控释肥实现了一次施肥技术,但其前期养分释放缓慢且成本较高,阻碍了其大面积推广^[11-12]。为了解决这一矛盾,将控释氮肥与普通尿素按适宜比例进行掺混施用,不仅保证了前期养分供给,也减少了成本投入^[13]。

有关山西省尿素掺混控释肥对春玉米生长影响的研究鲜有报道,且省内玉米产量占粮食总产量的比例逐年增加,截至到2019年已占粮食总产量的68.9%,因此在山西省探索合理的施肥方式和施氮量势在必行。本研究通过2年田间试验比较了常规尿素一次施肥、常规尿素分次施肥和常规尿素掺混控释尿素一次施肥3种施肥技术下,不同施氮量对玉米产量、干物质累积量、氮素累积利用及土壤无机氮残留的影响,进一步明确该区域的最佳施肥方式及最佳施氮量,为当地玉米增产增收提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于2019和2020年在山西省朔州市应县(39°34'9"N、113°6'11"E)试验基地进行。该区位

于山西省北部, 属北温带半湿润大陆性气候, 年均气温 7℃ 左右, 年均降水量 360 mm。试验地土壤为轻度硫酸盐盐化土, 土壤 (0—20 cm) 化学性状: 有机质 10.84 g/kg、矿质氮 7.30 mg/kg、全氮 0.56 g/kg、速效磷 8.36 mg/kg、速效钾 70.0 mg/kg、pH 8.3。2019 和 2020 年月均气温和降雨情况见图 1, 两年春玉米生育期总降水量分别为 264.2 和 325.9 mm。

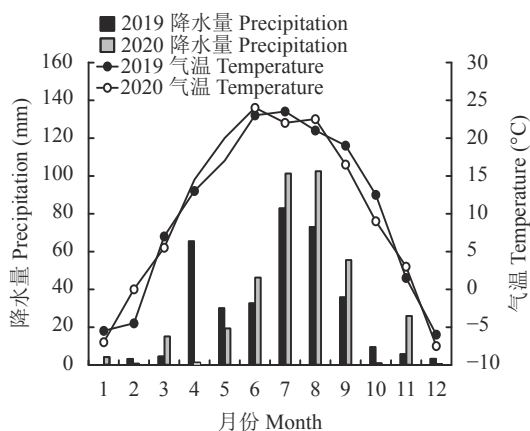


图 1 2019 和 2020 年试验地降水量和气温

Fig. 1 Precipitation and air temperature in the experimental site in 2019 and 2020

1.2 试验设计

本研究采用裂区试验, 主处理为 3 个施肥方式: 常规尿素一次施肥 (OF)、常规尿素分次施肥 (TF) 和常规尿素掺混控释尿素一次施肥 (MF); 副处理为 6 个氮肥用量: 设 0、60、120、180、240、300 kg/hm² (表示为 N0、N60、N120、N180、N240、N300)。OF 和 MF 方式为玉米播种前所有氮肥一次性基施, TF 方式为两次施肥, 总施氮量的 40% 在播前基施, 60% 在十叶期 (V10) 采用穴施方法追施。控释尿素为树脂包膜尿素 (N 44%) 释放期为 70 天, 产自安徽茂施新型肥料有限公司, 常规尿素与控释尿素的掺混比例为 2:1。各处理磷、钾肥施用量相同, 磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅ 12%), 施用量为 P₂O₅ 90 kg/hm²; 钾肥为硫酸钾 (K₂O 51%), 施用量为 K₂O 45 kg/hm², 均于播前以基肥的方式施入。

试验地生育期内覆膜无灌水, 选用 ‘先玉 335’ 为供试品种, 种植密度为 60000 株/hm², 50 cm 等行距种植, 株距 33.3 cm。小区面积为 30 m², 设 3 次重复, 随机区组排列。2019 年 5 月 11 日播种, 10 月 6 日收获; 2020 年 4 月 28 日播种, 10 月 4 日收获。在玉米十叶期 (V10)、吐丝期 (R1)、灌浆期 (R3) 和成熟期 (R6) 每个小区采集 3 株长势相同的玉米, 按器官分类, 在 105℃ 下杀青 1 h 后在 75℃ 下

烘干至恒重, 称取干重后粉碎样品, 测定各器官全氮含量。收获时每小区测产 8 m², 调查株数、穗数, 测定穗行数、行粒数、百粒重、含水量等, 并计算籽粒产量 (按含水量 15.5% 折算)。土壤样品在播前和收获后每个小区按照每层 20 cm 采集 0—100 cm 土样, 用 1 mol/L KCl 溶液浸提, 通过流动分析仪测定土壤无机氮含量。所用数据为两年试验结果的平均值。

1.3 计算公式

经济效益 (元/hm²) = 产量 × 单价 - 成本 (肥料、种子、地膜、人工、机械)

氮素累积量 (kg/hm²) = 干物质质量 × 氮素含量

花后氮素累积量 (kg/hm²) = 成熟期氮素累积量 - 吐丝期氮素累积量

氮素转移量 (kg/hm²) = 吐丝期营养体氮素累积量 - 成熟期营养体氮素累积量

农学效率 (kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮量

偏生产力 (kg/kg) = 施氮籽粒产量 / 施氮量

表观回收率 (%) = (施氮区氮素累积量 - 不施氮区氮素累积量) / 施氮量 × 100

氮表观损失 (kg/hm²) = 施氮量 + 播前土壤无机氮 + 净矿化量 - 作物吸收 - 收获土壤残留

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2013 软件对数据进行统计, 采用 SPSS 18.0 进行方差齐性检验、方差分析及相关性分析, 采用 Sigmaplot 12.0 作图。

2 结果与分析

2.1 氮肥用量和施肥方式对春玉米产量的影响

由表 1 可知, 施氮量和施肥方式显著影响籽粒产量、百粒重、穗粒数 and 经济效益, 二者对百粒重和经济效益有显著正交互作用。OF、TF、MF 3 种施肥方式下施氮处理的产量和经济效益均在一定氮肥用量范围内随着施氮量的增加而显著增加, 当施氮量达到 240 kg/hm² 后, 3 种施肥方式的产量不再显著增加, 其 N240 处理的产量较其 N0 处理分别提高了 94.0%、103.0%、111.9%; 当 OF、TF、MF 3 种施肥方式的施氮量分别达到 240、180、240 kg/hm² 后, 经济效益不再显著增加, 在这 3 个施氮水平下较 N0 处理经济效益分别提高了 260.7%、198.5%、307.3%。百粒重和穗粒数随施氮量的变化趋势与产量一致。

表 1 氮肥用量和施肥方式对春玉米产量及经济效益的影响

Table 1 Effects of N application rate and fertilization method on yield and economic income of spring maize

施肥方式 Fertilization method	氮肥用量处理 N application rate	产量 Grain yield (t/hm ²)	百粒重 100-grain weight (g)	穗粒数 Kernels (No./ear)	穗数 Spikes (×10 ³ /hm ²)	经济效益 Economic income (yuan/hm ²)
OF	N0	6.7 e	29.1 e	456 e	63.8 b	4978 e
	N60	9.4 d	30.6 d	543 d	65.8 ab	10693 d
	N120	11.0 c	33.0 c	581 c	67.7 ab	14035 c
	N180	11.9 b	34.4 b	590 c	71.5 a	15816 b
	N240	13.0 a	35.7 ab	617 b	70.8 a	17954 a
	N300	13.5 a	36.5 a	631 a	68.1 ab	18648 a
TF	N0	6.7 f	29.1 d	456 d	63.8 b	4978 d
	N60	9.2 e	31.4 c	542 c	68.5 a	8529 c
	N120	11.1 d	33.4 b	584 b	71.0 a	11179 b
	N180	12.4 c	34.8 a	597 b	69.8 a	14861 a
	N240	13.6 a	35.3 a	639 a	71.0 a	16206 a
	N300	13.0 b	34.7 a	604 b	72.7 a	14707 a
MF	N0	6.7 d	29.1 d	456 e	63.8 c	4978 e
	N60	10.3 c	33.3 c	564 d	67.7 b	12769 d
	N120	11.8 b	34.3 b	588 cd	71.9 a	15702 c
	N180	12.8 b	36.1 a	617 bc	70.4 ab	17566 b
	N240	14.2 a	36.7 a	659 a	70.2 ab	20277 a
	N300	13.0 ab	35.9 a	630 b	68.5 b	17286 bc
变异来源 Source of variations						
施肥方式 Fertilization method (F)		**	**	**	ns	**
氮肥用量 N application rate (N)		**	**	**	**	**
F × N		ns	**	ns	ns	**

注 (Note) : OF—尿素一次施用 All the common urea applied as basal fertilizer; TF—常规尿素分次施肥 40% common urea applied as basal fertilizer and 60% top dressed at V10 stage; MF—常规尿素掺混控释尿素一次施肥 All common urea and controlled-release urea applied as basal fertilizer; 同列数据后不同小写字母表示相同施肥方式下处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments for the same fertilization method ($P < 0.05$); ns—差异不显著 No significant difference; **— $P < 0.01$.

OF、TF 和 MF 施肥方式的 5 个施氮处理的平均产量分别为 10.9、11.0、11.5 t/hm², 以 MF 方式最高, 且分别显著高于 OF 和 TF 方式 5.0% 和 4.2%。在 N60 和 N240 处理下, MF 方式产量显著高于 OF 和 TF 方式, 3 种施肥方式的其他施氮量处理的产量差异不显著。将 OF、TF 和 MF 施肥方式的产量与施氮量通过二次函数曲线拟合, 得出最高产量对应的施氮量分别为 311.9、272.2、235.6 kg/hm², 对应产量分别为 13.4、13.3、13.7 t/hm²。OF、TF 和 MF 3 种施肥方式下所有施氮量的平均经济效益分别

为 13687、11743、14763 元/hm², MF 方式分别显著高于 OF 和 TF 方式 7.9% 和 25.7%。同一施氮量下, MF 方式的经济效益均最高, 将 OF、TF 和 MF 3 种施肥方式的经济效益与施氮量通过二次函数曲线拟合, 得出最高经济效益对应的施氮量分别为 297.5、268.8、225.3 kg/hm², 对应的经济效益分别为 18473、15464、19157 元/hm²。

2.2 氮肥用量和施肥方式对春玉米干物质累积的影响

由图 2 可知, 施氮水平对各生育期的干物质累

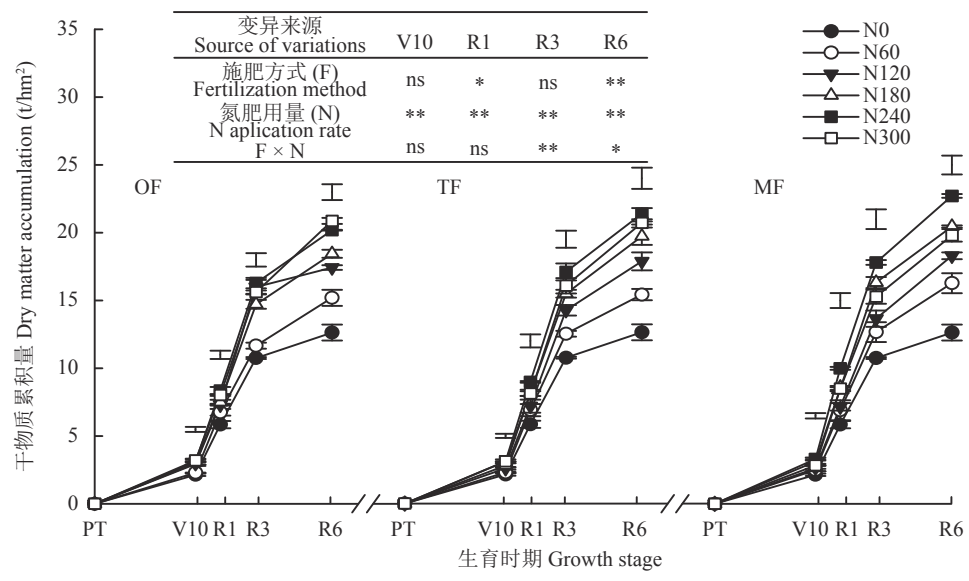


图 2 不同生育期春玉米干物质累积变化趋势

Fig. 2 Dry matter accumulation curves of spring maize at different growth stages

[注 (Note): OF—尿素一次施用 All the common urea applied as basal fertilizer; TF—常规尿素分次施肥 40% common urea applied as basal fertilizer and 60% top dressed at V10 stage; MF—常规尿素掺混控释尿素一次施肥 All common urea and controlled-release urea applied as basal fertilizer; 变异来源 Source of variations; PT—播前 Before seeding; ns—差异不显著 No significant difference; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.]

积量影响极显著 ($P < 0.01$), 施肥方式对 V10 和 R3 的干物质积累量没有显著影响, 对 R1 和 R6 的干物质积累量影响达到显著和极显著水平。OF 施肥方式下, R6 的干物质最大累积量出现在 N300 处理, 而 TF 和 MF 施肥方式出现在 N240 处理。OF、TF、MF 施肥方式下施氮处理干物质的平均累积量在 R1 分别为 7.3、7.5、7.8 t/hm², 在 R6 分别为 17.5、18.0、18.4 t/hm², 均表现为 MF > TF > OF, 且 MF 施肥方式显著高于 OF 方式。当施氮量为 240 kg/hm² 时, MF 施肥方式在 R1 和 R6 的干物质累积量较 OF 施肥方式分别增加了 19.5% 和 12.5%。

2.3 氮肥用量和施肥方式对春玉米氮素吸收的影响

由图 3 可知, 3 种施肥方式下, 花前、花后和氮素总累积量不同氮肥用量处理间差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

增施氮肥显著增加了花前和花后的氮素累积量。当施氮量为 240 kg/hm² 时, OF、TF、MF 3 种施肥方式的花前和花后氮素累积量均较高, 施氮处理花前氮素累积量均值分别为 85.2、96.4、106.2 kg/hm², 花后分别为 52.8、49.2、53.0 kg/hm², 氮素总累积量均值分别为 137.9、145.7、159.2 kg/hm²。MF 方式花前氮素累积量和氮素总累积量平均值显著高于 OF 和 TF 方式。MF 方式在施氮量为 180、

240、300 kg/hm² 时花前氮素累积量分别显著高于 OF 和 TF 方式, 在施氮量为 60、180、240 kg/hm² 时氮素总累积量分别显著高于 OF 和 TF 方式。当施氮量为 240 kg/hm² 时, MF 方式花前和氮素总累积量较 OF 和 TF 方式增加最多, 花前氮素累积量分别增加了 42.1% 和 16.4%, 氮素总累积量分别增加了 32.7% 和 20.9%。

2.4 氮肥用量和施肥方式对春玉米氮素转运的影响

由表 2 可知, 施氮量和施肥方式以及二者互作均极显著影响收获期茎、叶、籽粒氮含量以及茎氮、叶氮转移量。

增施氮肥显著增加了茎、叶、籽粒氮含量以及茎氮、叶氮转移量。在 OF 施肥方式下, 当施氮量达到 300 kg/hm² 时, 茎、叶、籽粒氮含量以及茎氮、叶氮转移量均较高, 较 N0 处理分别增加了 42.0%、68.0%、36.9%、143.3%、86.0%。在 TF 和 MF 施肥方式下, 当施氮量达到 240 kg/hm² 时, 茎、叶、籽粒氮含量以及茎氮、叶氮转移量均较高, 在 TF 施肥方式下较 N0 处理分别增加了 44.9%、82.0%、36.4%、215.5%、111.5%, 在 MF 施肥方式下较 N0 处理分别增加了 40.0%、100.7%、62.8%、350.3%、152.8%。3 种施肥方式下, 收获期茎、叶、籽粒氮含量的均值和茎氮、叶氮转移量的均值

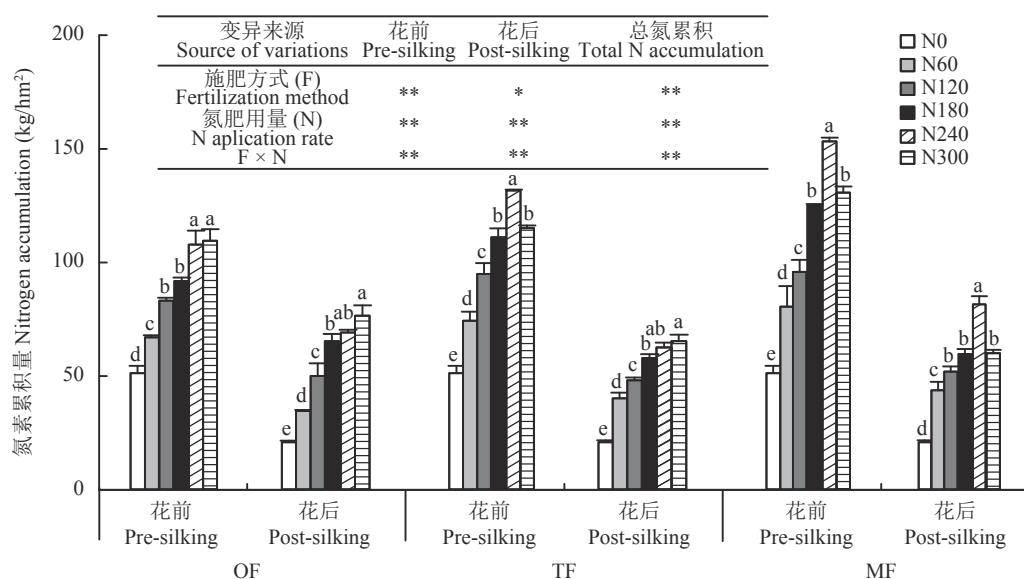


图3 春玉米花前、花后氮素累积量

Fig. 3 N accumulation of spring maize before and after silking

[注 (Note): OF—尿素一次施用 All the common urea applied as basal fertilizer; TF—常规尿素分次施肥 40% common urea applied as basal fertilizer and 60% top dressed at V10 stage; MF—常规尿素掺混控释尿素一次施肥 All common urea and controlled-release urea applied as basal fertilizer; 柱上不同小写字母表示相同施肥方式处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments under the same fertilization method ($P < 0.05$); ns—差异不显著 No significant difference; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.]

都表现为 $MF > TF > OF$, 且 MF 方式显著高于 OF 方式, 茎氮含量在施氮量为 120 kg/hm^2 时增加最多, 增加了 32.3%; 叶氮、籽粒氮含量及茎氮转移在施氮量为 240 kg/hm^2 时增加最多, 分别增加了 34.5%、18.9%、89.9%; 叶氮转移在施氮量为 180 kg/hm^2 时增加最多, 增加了 40.6%。

2.5 氮肥用量和施肥方式对春玉米氮肥利用的影响

由表 3 可知, 施氮量和施肥方式以及二者互作极显著影响氮肥农学效率、偏生产力和表观回收率。OF、TF、MF 施肥方式下, 氮肥农学效率、偏生产力和表观回收率均随施氮量的增加显著降低, 农学效率分别从 45.3、51.6、61.6 kg/kg 降低至 22.7、21.3、21.2 kg/kg ; 偏生产力分别从 156.1、162.5、172.5 kg/kg 降低至 44.9、43.4、43.4 kg/kg ; 表观回收率分别从 49.3%、70.7%、87.0% 降低至 38.0%、36.1%、39.6%。3 种施肥方式下, 农学效率、偏生产力和表观回收率的均值均表现为 $MF > TF > OF$, 且 MF 施肥方式显著大于 OF 和 TF 施肥方式。与 OF 施肥方式相比, 当施氮量为 240 kg/hm^2 时 MF 施肥方式的农学效率、偏生产力、表观回收率分别增加了 18.8%、9.2%、55.1%; 与 TF 施肥方式相比, 当施氮量为 240 kg/hm^2 时 MF 施肥方式的

农学效率、偏生产力、表观回收率分别增加了 9.1%、4.6%、33.2%。

由表 4 可知, 施氮量和施肥方式显著影响土壤无机氮残留和氮表观损失, 二者交互对其影响不显著。氮输入方面以施氮量为主, 占总氮输入量的 37.8%~72.2%。氮输出方面, 随着施氮量的增加, 土壤无机氮残留和氮表观损失显著增加。3 种施肥方式下, MF 方式无机氮残留的均值显著低于 TF 方式, 当施氮量为 240、300 kg/hm^2 时显著降低; MF 方式表观损失的均值显著低于 OF 方式, 当施氮量为 240 kg/hm^2 时显著降低, 在其它施氮量下 3 种施肥方式无机氮残留和表观损失差异不显著。

3 讨论

合理的施氮量和施肥方式是保证春玉米产量和氮素累积量提高的前提。罗上轲等^[14]研究表明, 随着施氮量的增加, 春玉米产量和氮素累积量呈先增加后降低的趋势, 当施氮量为 240 kg/hm^2 时产量和氮素累积量达到最大值。Liu 等^[15]研究表明, 黄土旱塬区覆膜玉米施氮量在 $0 \sim 240 \text{ kg/hm}^2$ 时, 产量和氮素累积量随施氮量的增加而显著提高。本研究中, 产量和氮素累积量随施氮量的增加而显著增加, 当施氮量达到 240 kg/hm^2 后不再显著增加。合理的施肥

表 2 氮肥用量和施肥方式对春玉米收获期氮含量和氮素转运的影响

Table 2 Effects of N application rate and fertilization method on N concentration at harvest and N translocation of spring maize

施肥方式 Fertilization method	氮肥用量处理 N application rate	收获期氮含量 (g/kg) N concentration at harvest			氮素转移量 (kg/hm ²) N translocation amount	
		茎 Stem	叶 Leaf	籽粒 Grain	茎 Stem	叶 Leaf
OF	N0	2.3 cd	6.2 d	8.7 c	8.4 d	20.2 c
	N60	2.2 d	8.3 c	9.0 c	14.4 c	22.7 c
	N120	2.3 cd	8.6 bc	10.5 b	17.2 b	26.5 bc
	N180	2.5 c	9.3 b	11.6 a	18.4 ab	30.3 b
	N240	2.8 b	9.2 b	11.8 a	19.8 ab	37.8 a
	N300	3.3 a	10.4 a	11.8 a	20.3 a	37.6 a
TF	N0	2.3 b	6.2 e	8.7 e	8.4 e	20.2 e
	N60	2.4 b	8.3 d	10.2 d	15.6 d	25.3 d
	N120	3.1 a	9.2 c	10.9 c	19.6 cd	32.1 c
	N180	3.0 a	10.5 b	11.3 b	21.0 bc	38.3 b
	N240	3.4 a	11.2 a	11.8 a	26.4 a	42.8 a
	N300	3.3 a	11.0 ab	11.6 ab	24.7 ab	37.0 b
MF	N0	2.3 c	6.2 d	8.7 d	8.4 e	20.2 d
	N60	2.5 c	8.0 c	10.6 c	17.9 d	30.0 c
	N120	3.0 b	9.1 c	10.6 c	22.0 c	35.3 c
	N180	3.3 b	11.3 ab	12.1 b	25.7 b	42.6 b
	N240	3.2 b	12.4 a	14.1 a	37.6 a	51.1 a
	N300	3.8 a	11.0 b	12.8 b	26.4 b	48.3 ab
变异来源 Source of variations						
施肥方式 Fertilization method (F)		**	**	**	**	**
氮肥用量 N application rate (N)		**	**	**	**	**
F × N		**	**	**	**	*

注 (Note): OF—尿素一次施用 All the common urea applied as basal fertilizer; TF—常规尿素分次施肥 40% common urea applied as basal fertilizer and 60% top dressed at V10 stage; MF—常规尿素掺混控释尿素一次施肥 All common urea and controlled-release urea applied as basal fertilizer; 同列数据后不同小写字母表示相同施肥方式同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments for the same fertilization method ($P < 0.05$); ns—差异不显著 No significant difference; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

方式可以促进产量、经济效益和氮素累积量的提高。本研究中产量、经济效益和氮素累积量在 MF 施肥方式下均显著提高, 较 OF 施肥方式分别提高了 5.0%、7.9% 和 32.7%, 较 TF 施肥方式分别提高了 4.2%、25.7% 和 20.9%。这与 Guo 等^[16]普通尿素掺混控释尿素一次施用可以提高产量、经济效益和氮素累积量的结果一致。

干物质作为光合作用产物的最高形式, 其累积量与产量密切相关。干物质累积量的增加直接或间

接促进籽粒干重的形成, 为作物增产奠定基础^[17-18]。Shi 等^[19]和张磊等^[20]研究表明, 随着施氮量的增加, 干物质累积量呈先增加后降低的趋势, 当施氮量达到 210 kg/hm² 时, 干物质累积量开始下降。本研究中增施氮肥对干物质累积趋势的影响与上述研究结果一致, 而最佳施氮量有所不同, 在吐丝期和收获期, 当施氮量为 240 kg/hm² 时干物质累积量较大。造成该差异的原因可能是土壤基础肥力、降雨以及气温不同。除了合适的施氮量外, 适宜的施肥方式

表 3 氮肥用量和施肥方式对春玉米氮肥利用效率的影响

Table 3 Effects of N application rate and fertilization method on nitrogen use efficiency of spring maize

施肥方式 Fertilization method	氮肥用量处理 N application rate	农学效率 (kg/kg) Agronomic efficiency	偏生产力 (kg/kg) Aartial factor productivity	表观回收率 (%) Apparent recovery rate of N
OF	N0			
	N60	45.3 a	156.1 a	49.3 a
	N120	36.3 b	91.7 b	50.9 a
	N180	29.4 c	66.3 c	47.3 a
	N240	26.6 cd	54.3 d	43.7 ab
	N300	22.7 d	44.9 e	38.0 b
TF	N0			
	N60	51.6 a	162.5 a	70.7 a
	N120	36.8 b	92.3 b	59.1 b
	N180	34.5 bc	71.5 c	53.8 b
	N240	28.9 c	56.6 d	50.9 b
	N300	21.3 d	43.4 e	36.1 c
MF	N0			
	N60	61.6 a	172.5 a	87.0 a
	N120	43.2 b	98.6 b	63.1 c
	N180	34.4 c	71.3 c	62.5 c
	N240	31.5 c	59.3 d	67.8 b
	N300	21.2 d	43.4 e	39.6 d
变异来源 Source of variations				
施肥方式 Fertilization method (F)		**	**	**
氮肥用量 N application rate (N)		**	**	**
F × N		**	**	**

注 (Note) : OF—尿素一次施用 All the common urea applied as basal fertilizer; TF—常规尿素分次施肥 40% common urea applied as basal fertilizer and 60% top dressed at V10 stage; MF—常规尿素掺混控释尿素一次施肥 All common urea and controlled-release urea applied as basal fertilizer; 同列数据后不同小写字母表示相同施肥方式不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments for the same fertilization method ($P < 0.05$); ns—差异不显著 No significant difference; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

也会促进干物质的累积。本研究中, MF 施肥方式相比 OF 方式显著增加了吐丝期和收获期的干物质累积量, 这可能是因为控释尿素缓慢释放的特性保证了后期充足的养分^[21], 使干物质累积量显著增加。这与王寅等^[21]和 Zheng 等^[22]在东北、华北地区关于普通尿素和控释尿素掺混施用能够显著提高春玉米地上部干物质累积量的结果一致。

施氮量和施肥方式不仅影响玉米的干物质累积, 也影响各器官的氮含量和氮吸收转移。本试验中, MF 施肥方式在吐丝期显著增加了干物质累积量、茎氮和叶氮含量, 使花前氮素累积量显著增

加, 从而促进茎和叶的氮素转移。这一研究结果与王晓琪等^[23]普通尿素和缓释氮肥掺混施用可以提高营养器官的氮素转移量结果一致。籽粒氮含量取决于吐丝后氮累积和吐丝前营养器官再转移^[24], 本研究中 MF 施肥方式的茎氮、叶氮含量在吐丝期显著提高, 从而增加了氮素向籽粒中转移的潜力, 使得收获期籽粒氮含量显著增加, 为作物增产奠定基础。这与佟玉欣等^[25]尿素掺混缓释尿素可以提高植株和籽粒氮含量进而提高产量的结果一致。作物对氮素的吸收、转移是植株利用氮素的主要形式^[26]。前人研究表明, 玉米营养器官氮素转移量随着施氮量的增加

表 4 氮肥用量和施肥方式对 2019—2020 年土壤氮平衡的影响 (kg/hm²)

Table 4 Effects of N application rate and fertilization method on soil nitrogen balance during 2019–2020

施肥方式 Fertilization method	氮肥用量处理 N application rate	氮输入量 N input			氮输出量 N output		两年氮表观损失 Apparent N loss in two years
		两年施氮量 N application rate in two years	2019年播前土壤 无机氮 N _{min} before sowing in 2019	氮素矿化量 Apparent N mineralization	两年作物吸收 N removed by grain and straw	2020年收获期 无机氮残留 N _{min} at harvest in 2020	
OF	N0	0	54.7	122.8	144.4	33.1 e	
	N60	120	75.0	122.8	203.6	48.0 d	66.2 d
	N120	240	78.8	122.8	266.6	54.5 d	120.5 d
	N180	360	88.8	122.8	314.5	66.1 c	191.0 c
	N240	480	92.5	122.8	354.2	78.9 b	262.3 b
	N300	600	108.0	122.8	372.5	126.9 a	331.3 a
TF	N0	0	54.7	122.8	144.4	33.1 d	
	N60	120	75.0	122.8	229.3	50.1 cd	38.4 e
	N120	240	78.8	122.8	286.3	61.4 c	93.9 d
	N180	360	88.8	122.8	338.2	73.7 bc	159.8 c
	N240	480	92.5	122.8	388.7	90.2 b	216.4 b
	N300	600	108.0	122.8	361.0	147.5 a	322.4 a
MF	N0	0	54.7	122.8	144.4	33.1 d	
	N60	120	75.0	122.8	248.8	41.7 cd	27.3 d
	N120	240	78.8	122.8	295.8	50.8 c	95.0 c
	N180	360	88.8	122.8	369.5	65.9 b	136.3 bc
	N240	480	92.5	122.8	469.8	68.0 b	157.5 b
	N300	600	108.0	122.8	381.8	129.6 a	319.4 a
变异来源 Source of variations							
施肥方式 Fertilization method (F)						**	**
氮肥用量 N application rate (N)						**	**
F × N						ns	ns

注 (Note): OF—尿素一次施用 All the common urea applied as basal fertilizer; TF—常规尿素分次施肥 40% common urea applied as basal fertilizer and 60% top dressed at V10 stage; MF—常规尿素掺混控释尿素一次施肥 All common urea and controlled-release urea applied as basal fertilizer; 同列数据后不同小写字母表示相同施肥方式处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments for the same fertilization method ($P < 0.05$); ns—差异不显著 No significant difference; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

呈先增加后减小的变化趋势^[27-28]。本研究表明, 茎氮、叶氮转移量在施氮量小于 240 kg/hm² 时随施氮量的增加而增加, 当施氮量继续增加时茎氮、叶氮转移量呈下降趋势, 过量施氮并没有进一步提高氮素的转移量。随着施氮量的增加, 土壤无机氮残留和表观损失显著增加而农学效率、偏生产力和表观回收率显著降低 (表 3、表 4), 这与侯云鹏等^[29]、高洪军等^[30]研究结果一致。因此, 玉米种植中施氮量在

保证高产的同时应尽量减小无机氮残留和损失。

4 结论

常规尿素掺混控释尿素一次施肥相比常规尿素一次施肥和分次施肥显著增加了春玉米产量、经济效益、氮素累积量和肥料利用率, 减少了无机氮残留和表观损失。采用常规尿素掺混控释尿素一次施肥方式, 实现最大产量、经济效益和氮素

累积量的施氮量为 240 kg/hm², 且残留在土壤中的氮素较少。

参 考 文 献:

- [1] Guo R Y, Miao W, Fan C Y, *et al.* Exploring optimal nitrogen management for high yielding maize in arid areas via ¹⁵N-labeled technique[J]. *Geoderma*, 2021, 382: 114711.
- [2] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 1941–1959.
Li S K, Zhao J R, Dong S T, *et al.* Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941–1959.
- [3] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. *植物学通报*, 2007, 24(6): 687–694.
Zhang F S, Cui Z L, Wang J Q, *et al.* Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies[J]. *Bulletin of Botany*, 2007, 24(6): 687–694.
- [4] Pamela A M, Rosamond N, Ivan O M. Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management[J]. *Science*, 1998, 280(5360): 112–115.
- [5] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 783–795.
Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 783–795.
- [6] 葛均筑, 展茗, 赵明, 等. 一次性施肥对长江中游春玉米产量及养分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5): 1073–1082.
Ge J Z, Zhan M, Zhao M, *et al.* Effects of single basal fertilization on yield and nutrient use efficiencies of spring maize in the Middle Reaches of Yangtze River[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(5): 1073–1082.
- [7] 王激清, 马文奇, 江荣凤, 张福锁. 我国水稻、小麦、玉米基肥和追肥用量及比例分析[J]. *土壤通报*, 2008, (2): 329–333.
Wang J Q, Ma W Q, Jiang R F, Zhang F S. Analysis about amount and ratio of basal fertilizer and topdressing fertilizer on rice, wheat, maize in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, (2): 329–333.
- [8] 王文岩, 董文旭, 陈素英, 等. 连续施用控释肥对小麦/玉米农田氮素平衡与利用率的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 135–141.
Wang W Y, Dong W X, Chen S Y, *et al.* Effect of continuously applying controlled-release fertilizers on nitrogen balance and utilization in winter wheat-summer maize cropping system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 135–141.
- [9] 王宜伦, 白由路, 谭金芳, 等. 采用粒片状肥料实现夏玉米一次施肥的可行性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 1126–1132.
Wang Y L, Bai Y L, Tan J F, *et al.* Availability study of once quantitative fertilization in summer maize using fertilizer tablets[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(4): 1126–1132.
- [10] 谢春生, 唐拴虎, 徐培智. 一次性施用控释肥对水稻植株生长及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(2): 177–182.
Xie C S, Tang S H, Xu P Z. Effects of single basal application of controlled-release fertilizers on growth and yield of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(2): 177–182.
- [11] 钱银飞, 邵彩虹, 邱才飞, 等. 包膜缓释尿素与普通尿素配施对双季超级稻产量及氮肥利用的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (5): 27–32.
Qian Y F, Shao C H, Qiu C F, *et al.* Effects of the different mixture rates of coated slow-release urea and prilled urea on the growth of double-cropping super rice and the utilizing rate of nitrogen[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015, (5): 27–32.
- [12] Sadao S J, Hitoshi K. Use of polyolefin-coated fertilizers for increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emissions[J]. *Fertilizer Research*, 1994, 39(2): 147–152.
- [13] Ke J, Xing X M, Li G H, *et al.* Effects of different controlled-release nitrogen fertilizers on ammonia volatilisation, nitrogen use efficiency and yield of blanket-seedling machine-transplanted rice[J]. *Field Crops Research*, 2017, 205: 147–156.
- [14] 罗上轲, 刘婕, 叶开梅, 等. 覆膜方式与施氮量对春玉米产量、干物质和氮素积累与转运的影响[J]. *玉米科学*, 2020, 28(4): 146–154.
Luo S K, Liu J, Ye K M, *et al.* Effects of plastic film mulching mode and nitrogen application rate on spring maize yield, dry matter and nitrogen accumulation and translocation[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(4): 146–154.
- [15] Liu J L, Bu L D, Zhu L, *et al.* Optimizing plant density and plastic film mulch to increase maize productivity and water-use efficiency in semiarid areas[J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106(4): 1138.
- [16] Guo J M, Wang Y H, Blaylock A D, *et al.* Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding (> 15Mg ha⁻¹) maize[J]. *Field Crops Research*, 2017, 204: 23–30.
- [17] Yan D C, Zhu Y, Wang S H, *et al.* A quantitative knowledge-based model for designing suitable growth dynamics in rice[J]. *Plant Production Science*, 2006, 9(2): 93–105.
- [18] Schmidt J, Beegle D, Zhu Q, *et al.* Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor[J]. *Field Crops Research*, 2011, 120(1): 94–101.
- [19] Shi D Y, Li Y H, Zhang J W, *et al.* Increased plant density and reduced N rate lead to more grain yield and higher resource utilization in summer maize[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(11): 2515–2528.
- [20] 张磊, 孔丽丽, 侯云鹏, 等. 施氮水平对玉米开花后干物质积累、转运及土壤无机氮含量的影响[J]. *玉米科学*, 2020, 28(4): 155–164.
Zhang L, Kong L L, Hou Y P, *et al.* Effects of nitrogen application on dry matter accumulation, translocation, and inorganic nitrogen content in soil after anthesis of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(4): 155–164.
- [21] 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.
- [22] Zheng W K, Zhang M, Liu Z G, *et al.* Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield

- under wheat-maize double cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2016, 197: 52–62.
- [23] 王晓琪, 朱家辉, 陈宝成, 等. 控释尿素不同比例配施对水稻生长及土壤养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 178–182.
Wang X Q, Zhu J H, Chen B C, *et al.* Effects of different proportion of controlled-release urea on rice growth and soil nutrient[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 178–182.
- [24] Ciampitti I A, Vyn T J. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review[J]. *Field Crops Research*, 2012, 133: 48–67.
- [25] 佟玉欣, 李玉影, 刘双全, 等. 黑龙江春玉米籽粒产量与氮素吸收变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1094–1102.
Tong Y X, Li Y Y, Liu S Q, *et al.* Variations of the grain yields and N absorption of spring maize in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(5): 1094–1102.
- [26] Zotarelli L, Scholberg J M, Dukes M D, *et al.* Fertilizer residence time affects nitrogen uptake efficiency and growth of sweet corn[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(3): 1271–1278.
- [27] 王泽林, 白炬, 李阳, 等. 氮肥施用和地膜覆盖对旱作春玉米氮素吸收及分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1): 74–84.
Wang Z L, Bai J, Li Y, *et al.* Effects of nitrogen application and plastic film mulching on nitrogen uptake and allocation in dry-land spring maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 74–84.
- [28] 郭金金, 张富仓, 王海东, 等. 不同施氮量下缓释氮肥与尿素掺混对玉米生长与氮素吸收利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(20): 3930–3943.
Guo J J, Zhang F C, Wang H D, *et al.* Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth and nitrogen uptake under different nitrogen application rates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20): 3930–3943.
- [29] 侯云鹏, 尹彩侠, 孔丽丽, 等. 氮肥对吉林春玉米产量、农学效率和氮养分平衡的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016, (6): 93–98.
Hou Y P, Yin C X, Kong L L, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer application on yield, agronomic efficiency and nitrogen balance of spring maize[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016, (6): 93–98.
- [30] 高洪军, 彭畅, 窦森, 等. 秸秆还田配施氮肥对春玉米氮素利用及土壤氮素平衡的影响[J]. *玉米科学*, 2020, 28(6): 134–141.
Gao H J, Peng C, Dou S, *et al.* Effects of combined straw returning and nitrogen application on nitrogen utilization of spring maize and soil nitrogen balance[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(6): 134–141.