控释氮肥全量基施对旱地玉米产量形成和水肥利用效率的影响

张建军[1,2]，党 翼[1]，赵 刚[1]，樊廷录[1,2]，王 磊[1]，李尚中[1]

(1.甘肃省农业科学院旱地农业研究所，兰州 730070；2.甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室，兰州 730070)

摘要：探讨控释氮肥全量基施对旱地玉米干物质积累与转运、产量和水肥利用效率的影响，为建立高效旱地玉米一次性氮肥全量施用和轻简化栽培技术提供支撑。2016—2019 年在甘肃省东部黄土旱塬区连续 4 年设置大田定位试验，研究不同用量控释氮肥全量基施对旱地玉米产量、水肥利用效率及干物质积累与转运规律的影响。结果表明：与普通氮肥相比，相同用量的控释氮肥全量基施有利于提高玉米叶片叶绿素相对含量(SPAD 值)，增加干物质积累量，提高灌浆期茎鞘和叶片干物质输出率和贡献率。无论何种降雨年型，施用控释氮肥均能优化玉米产量构成，平均穗粒数和百粒重分别增加 4.0%和 4.9%，进而显著提高玉米产量，4 年平均增加 9.7%。在产量显著增加而耗水量未明显增加的条件下，控释氮肥明显提高了旱地玉米水分利用效率，4 年平均增加 4.0%；同时显著提高了氮肥偏生产力和农学利用率，4 年平均分别增加 9.5%和 24.7%。因此，与普通氮肥相比，控释氮肥能更好地改善玉米地上部生长发育，增加灌浆期干物质向穗部转移，有利于旱地玉米高产和水肥高效利用。

关键词：控释氮肥；全量基施；产量；水肥利用效率；干物质积累与转运

中图分类号：S143.1；S513 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2021)02-0170-08

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.023

Effects of Application of Controlled-Release Nitrogen on Yield and Water and Fertilizer Use Efficiency of Maize

ZHANG Jianjun[1,2], DANG Yi[1], ZHAO Gang[1], FAN Tinglu[1,2], WANG Lei[1], LI Shangzhong[1]

(1.*Dryland Agriculture Institute, Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou* 730070;
2.*The Key Laboratory of Efficiency Water Utilization of Dry Land Farming Gansu Province, Lanzhou* 730070)

Abstract: In order to establish an efficient total nitrogen fertilizer application technology, and provide technical basis for simplified cultivation maize in arid area, a four-year field experiment was conducted to investigate the effects of controlled-release nitrogen fertilizer (CRNF) application on yield, water and fertilizer use efficiency, dry matter accumulation and transfer of maize in Rain fed highland of China Loess Plateau from 2016—2019. Results showed that the CRNF could increase SPAD value of leaves and dry matter accumulation, as well the output and contribution rates of stem sheath and leaf dry matter at the grain filling stage. Regardless of what kind of rainfall years, the application of CRNF could optimize the maize yield composition. The grain number and grain weight increased by 4.0% and 4.9%, respectively, and maize yield significantly increased by 9.7% on average in four years. Under the significant increase in yield and no significant increase in water consumption, CRNF improved the water use efficiency of maize in arid area, with an increase of 4.0% on average in four years. Besides, CRNF significantly increased the partial factor productivity of nitrogen fertilizer and agronomic nitrogen use efficiency, with the increases of 9.5% and 24.7% on average in four years respectively, both decreased significantly with the increases of nitrogen application. Compared to the conventional nitrogen fertilization, the application of release-controlled urea (CU) could have a positive effect on maize aboveground growth, and increase yield, water and fertilizer use efficiencies of maize.

Keywords: controlled-release nitrogen fertilizer; single basal fertilization; yield; water and fertilizer use efficiency; dry matter accumulation and transfer

收稿日期：2020-08-26

资助项目：国家重点研发计划项目(2018YFD0100206)；甘肃农业科学院院列重点研发计划项目(2019GAAS28)；现代农业产业技术体系项目(CARS02-55)

第一作者：张建军(1977—)，男，甘肃靖远人，研究员，硕士，主要从事旱作农田水肥高效利用及生理生态研究。E-mail：hnszhjj@163.com

甘肃黄土旱塬半湿润易旱区位于甘肃省东部的庆阳、平凉地区,因地势相对平坦,水热条件较好,是西北旱作春玉米主产区,其玉米种植面积和单产均占到甘肃省的 80%左右[1-2]。该区域玉米传统施氮模式为 50%的氮肥结合播前整地基施,50%于拔节期人工追施。在旱地玉米生产中,由于中后期追肥困难,追施的氮肥难以协调玉米灌浆期需肥与土壤供肥间的关系,易造成灌浆期氮素亏缺,使灌浆速率和氮肥利用率降低[3],而生育后期缺氮会引起叶片早衰,造成产量下降[4]。作物产量提高过程中氮肥贡献率超过 40%[5],但随氮肥投入量增加,其利用效率逐渐下降,我国玉米氮肥生产效率由 13.8 kg/kg 下降至 11.5 kg/kg[6],在浪费氮肥资源的同时增加了水体环境负担[7],而合理施氮可提高氮素养分利用率[8],减小氮素对环境的污染[9]。控释氮肥通过减缓和控制肥料溶解及释放速度而实现氮肥后移[10],氮肥后移相比于传统一次性全量基施可增加拔节后玉米叶绿素含量和光合特性[11],提高籽粒灌浆速率[12],减少氮素田间表观损失,显著提高氮肥利用率[13],最终提高粒重和产量[14]。而改变传统的普通氮肥基追 2 次施氮为控释氮肥播前 1 次性基施,既可减少追肥成本,又能提供玉米前期生长的氮素需求,促进器官形态建成和干物质积累,同时可解决灌浆前中期干物质最大积累速率出现时氮素匮乏[15],是玉米高产稳产的重要保证。培肥地力和提高水分利用效率是提高旱地玉米产量的关键,而合理施氮是提高旱地玉米水分利用率的主要途径[16]。Deng 等[17]认为,玉米产量的提高依赖于土壤水分和养分协调供应,与普通氮肥相比,控释氮肥显著的氮素养分缓慢释放特性与玉米需肥规律基本吻合,可减少氮肥损失、增加产量和节约劳动成本[18-19]。但也有不同研究[20]认为,一次性施氮显著降低了玉米产量。研究结果差异可能是由于研究者所施用的氮肥类型、土壤质地以及生态区等因素差异引起的。控释氮肥通过控制氮素养分的缓慢释放来实现氮肥后移,有望同步优化干物质积累和产量性状,提高水肥利用效率,实现旱地玉米生长氮素需求特性与氮素供应间的吻合度,建立适用于黄土旱塬区玉米生产的高效氮肥管理模式。通过施用控释氮肥实现氮肥后移,将传统施肥制度中拔节肥取消,研究其全量基施的施肥方式对不同降雨年型旱地玉米产量性状、水肥利用特性及干物质积累与转运规律的影响,以期为优化试区施氮制度提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2016—2019 年在农业农村部西北旱作营养与施肥科学观测实验站(甘肃省庆阳市镇原县上肖镇,35°29′42″N,107°29′36″E)进行,土壤类型为发育良好的覆盖黑垆土,该区年均降水量 540 mm,主要集中在 7—9 月,占年降水量的 60%,季节和年际间降水分配不均,年蒸发量 1 532 mm,年均气温 8.3 ℃,无霜期 170 d,海拔 1 279 m,500 mm 降雨量保证率 57.1%,为暖温带半湿润偏旱大陆性季风气候,属典型的旱作雨养农业区。根据玉米生育期(4—9 月)降水量与对应期间降水分析[21],2016 年为干旱年,2018 年丰水年,2017 年和 2019 年为季节性干旱正常年(表 1),其中 7 月是黄土旱塬玉米抽雄—扬花期,此阶段降雨量多寡直接影响玉米产量(图 1),2017 年和 2019 年 7 月降雨量仅是多年同期平均值的 55.6%和 33.5%,玉米受季节性干旱影响。

表 1　2016—2019 年试验期间降水量

年份	玉米生育期月降雨量/mm						生育期(4—9 月)降雨量/mm	生育期降雨量/mm	年型划分
	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月			
2016	31.0	44.8	75.5	105.2	48.0	28.8	333.3	273.5	干旱年
2017	19.5	62.1	102.8	64.0	211.3	13.3	473.0	440.2	正常年
2018	49.7	80.2	80.6	253.9	65.6	46.3	576.3	526.8	丰水年
2019	42.0	77.2	102.7	38.5	137.2	98.3	495.9	465.3	正常年
多年平均(2005—2015 年)	27.5	43.5	49.4	115.1	85.6	96.4	417.5	—	—

注:(生育期降水−对应期间多年平均降水)/对应期间多年平均降水>25%为丰水年,<25%为干旱年,−10%~10%为正常年。

1.2　试验设计

试验采用完全随机区组设计,普通氮肥和控释氮肥分别用 U 和 C 表示,设 6 个施氮处理,分别为 U N 75 kg/hm²(T1)、U N 150 kg/hm²(T2)、U N 225 kg/hm²(T3)、C N 75 kg/hm²(T4)、C N 150 kg/hm²(T5)、C N 225 kg/hm²(T6),以不施氮肥为对照(CK),共 7 个处理。其中,225 kg/hm²为农户传统氮肥用量。3 次重复,小区面积 4.4 m×5.0 m(22 m²)。

控释氮肥为聚氨酯包膜尿素,释放期>60 天,氮含量 45%,初始释放率<10%,由安徽茂施农业科技股份有限公司生产;普通氮肥由中国石油西北化工销售公司生产,氮含量 46%;磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 16%)937.5 kg/hm²。

控释氮肥和普通氮肥按试验设计用量,控释氮肥

结合播前整地覆膜一次性基施，整个生育期不再追肥，普通氮肥采用农户传统施氮模式，为 50%做基肥，50%做追肥于拔节期人工穴施。磷肥一次性基施。全膜双垄沟播种植，玉米人工穴播在播种沟内，平均行距 55 cm，株距 24.2 cm，密度 7.5 万株/hm^2，玉米品种为抗逆性和丰产性好的耐密植高产品种“先玉 335”，于每年 4 月下旬播种，9 月上中旬收获，其他田产管理措施同一般高产田。

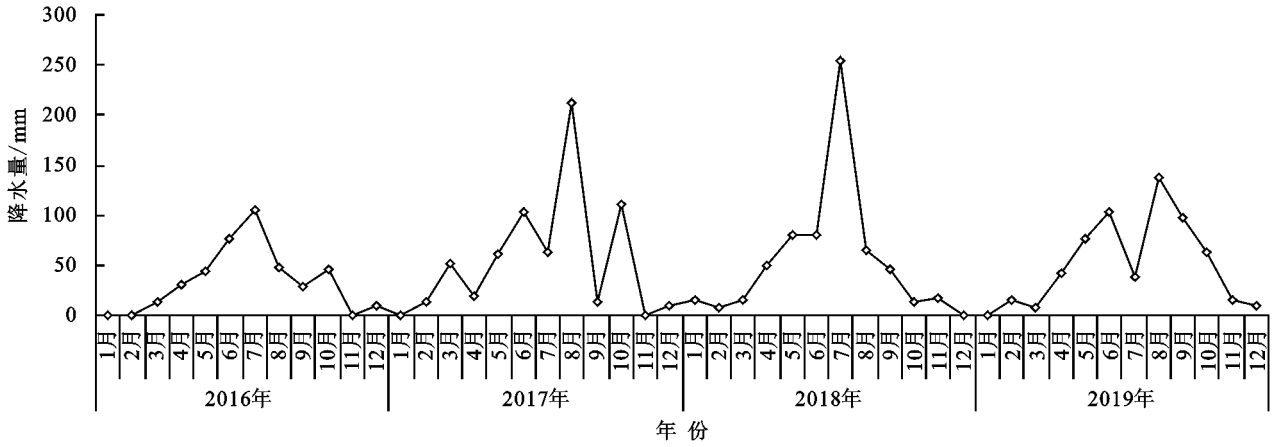


图 1 2016—2019 年试验期间降水量变化

1.3 测定指标与计算方法

1.3.1 土壤水分 在播前和收获时每 20 cm 为 1 个土层，采用土钻采集 0—200 cm 土样，烘干法测定土壤水分。

1.3.2 干物质积累与转运 采用烘干称重法进行测定。于玉米苗期开始，选择长势一致、有代表性的植株挂牌标记，在苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期和收获期各处理分别取样 3 株，灌浆期和收获期按叶片、茎鞘、籽粒等器官分开，105 ℃杀青 30 min 后 75 ℃恒温烘干，采用电子天平称各器官的干重，计算灌浆期和收获期各器官干物质分配量、转运量、转运率及生物产量[22]。

茎鞘叶物质转运量＝灌浆期茎鞘叶干重－收获期茎鞘叶干重

茎鞘叶物质转运率(%)＝(茎鞘叶物质转运量/灌浆期茎鞘叶干重)×100%

茎鞘叶物质贡献率(%)＝(茎鞘叶物质转运量/收获期籽粒干重)×100%

1.3.3 产量测定 收获前每小区选择长势均匀一致处作为采样区，按 2 整行(去除边行株)逐株取 30 株测产，脱粒后用 PM－8188－A 谷物水分测定仪(上海冠唯仪器有限公司)测定含水量，然后换算成标准含水量(14%)下的公顷产量。另每小区取 10 株调查穗行数、行粒数，计算穗粒数和百粒重。

1.3.4 土壤贮水量、耗水量及作物水分利用效率：

$$SWS=10\times h\times d\times w$$

式中：SWS 为土壤贮水量(mm)；10 为单位换算系数；h 为土层深度(cm)；d 为土壤容重(g/cm^3)；w 为土壤重量含水量(%)。

作物耗水量(evapotranspiration，ET)由水分平衡方程计算，ET(mm)＝(SWS_2－SWS_1)＋SR。式中：SWS_1和 SWS_2为收获和播种时 0—200 cm 土壤贮水量(mm)；SR 为生育期降雨量(mm)，通过 Campbell cr1000(美国)自动气象站记录仪获得。

作物水分利用效率(water use efficiency，WUE，kg/(mm·hm^2))＝Y/ET。式中：Y(yield)为含水量 14%的玉米籽粒产量。

1.3.5 氮肥偏生产力及农学效率

(1)氮肥偏生产力(PFP)：PFP＝Y_d/F

式中：Y_d为玉米单位面积产量(kg/hm^2)；F 为氮肥总用量(kg/hm^2)。

(2)氮肥农学效率(kg/kg)＝(施肥区产量－不施肥区产量)/施肥量

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据处理、表格制作和作图，采用 DPS 7.01 统计软件进行方差分析(ANVOA)，LSD 法多重比较(P＝0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理旱地玉米产量及产量构成变化

氮肥类型对玉米产量的影响在不同年份均表现为控释氮肥明显高于普通氮肥(表 2)。2016—2019 年控释氮肥较普通氮肥玉米平均产量分别增加 7.5%，7.5%，10.0%，11.8%，平均增加 9.7%，差异显著。相同施氮量 75，150，225 kg/hm^{2}条件下，不同年份控释氮肥较普通氮肥产量分别增加 1.8%，7.8%，12.2%；3.6%，7.5%，10.9%；18.1%，10.6%，2.5%和 18.0%，12.8%，6.0%，平均分别增加 8.8%，10.3%，10.0%。相同类型氮肥玉米产量随施氮量增加而增加，4 年平均控释氮肥 T6 较 T5、T4 分别增加 9.2%，19.4%，T5 较 T4 增加 9.4%；与 CK 相比，T6、T5、T4 分别增加 99.9%，83.0%，67.4%。普通氮

肥 T3 较 T2、T1 分别增加 9.4%,18.1%,T2 较 T1 增加 7.9%;与 CK 相比,T3、T2、T1 分别增加 81.6%,66.0%,53.8%。玉米产量构成因素中穗粒数和百粒重在不同年份整体上表现为控释氮肥优于普通氮肥,2016—2019 年分别提高 2.5%,3.9%,3.4%,6.4%和 3.2%,6.3%,3.7%,6.9%,4 年平均穗粒数和百粒重分别增加 4.0%和 4.9%。

不同施肥处理玉米产量变化因降雨年型和关键生育期降雨量而异。丰水年产量高于干旱年和正常年,施氮处理平均产量丰水年较干旱年(2016 年)和正常年(2017 年、2019 年)分别增加 21.0%,97.3%,13.6%,差异显著。而正常年与干旱年产量变化与播前底墒及关键生育期降雨量关系密切。2017 年播前施氮处理 0—200 cm 土层平均贮水量 370.8 mm,且玉米产量形成关键期(7 月)降雨量仅为 64.0 mm,占多年平均 115.1 mm 的 55.4%,播前底墒较低和 7 月降雨量减少使玉米出现卡脖子旱,玉米扬花授粉不良,虽在 8 月降雨量达 211.3 mm,但对玉米产量恢复作用不明显,故 2017 年(季节性干旱正常年)施氮处理平均产量较 2016 年(干旱年)显著降低 38.7%。而 2019 年 7 月份降雨量虽仅为 38.5 mm,占多年平均 115.1 mm 的 33.4%,但播前 0—200 cm 贮水量(443.4 mm)高于 2016 年(436.5 mm),播前 0—200 cm 底墒和 7 月降雨量较 2016 年增加 40.2 mm,玉米未出现明显旱情,且 8 月 137.2 mm 的降雨量有效缓解了旱情,故 2019 年(季节性干旱正常年)施氮处理玉米平均产量显著高于 2016 年(干旱年),平均增加 6.5%。

2.2　不同施肥处理对玉米耗水量及水分利用效率的影响

不同施氮处理对玉米耗水量与水分利用效率存在明显影响(表 3)。4 年研究期间,不同类型氮肥随施氮量增加,耗水量呈增加趋势,整体上差异不显著,而氮肥类型间为控释氮肥高于普通氮肥,2016—2019 年分别增加 4.0%,0.4%,3.3%,1.4%,4 年耗水量平均增加 2.4%。控释氮肥在产量显著增加,耗水量未显著增加的前提下,不同年份水分利用效率均有所提高,2016—2019 年各施氮处理分别增加 3.8%,4.9%,3.7%,3.8%,4 年平均增加 4.0%。而不同年份氮肥类型间水分利用效率整体表现为控释氮肥高于普通氮肥,与 CK 差异显著。相同施氮量 75,150,225 kg/hm^2 条件下,不同年份控释氮肥较普通氮肥水分利用效率分别增加 1.1%,1.8%,8.8%;1.4%,6.3%,12.3%;5.1%,7.3%,9.7%和 15.1%,11.9%,5.4%,平均分别增加 5.4%,7.1%,8.3%。

表 2　不同处理玉米产量及产量构成变化

处理	产量/(kg·hm^{-2})					穗粒数/(粒·穗$^{-1}$)					百粒重/g				
	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	平均	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	平均	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	平均
T1	12366.7±185.4d	7686.5±24.3d	15982.7±8.8d	12491.0±703.7d	11756.7±2881.5	647.2±14.6ab	469.2±95.7a	659.5±10.9a	597.8±43.4a	593.4±87.0	30.4±0.27bc	22.7±0.6c	36.8±0.13c	31.3±0.94d	30.3±5.8
T2	13289.6±244.1c	8113.5±29.3bcd	17283.2±35.4c	13556.6±375.2c	12685.7±3246.7	649.9±22.1ab	482.8±55.3a	676.3±19.7a	613.5±23.7a	605.6±85.8	31.2±0.37b	24.0±0.7abc	38.1±0.49bc	33.5±2.17c	31.7±5.9
T3	14185.4±530.8b	8639.05±27.0bc	18666.8±16.4b	15535.6±294.4ab	13881.7±3701.6	658.4±40.9ab	491.2±10.7a	687.4±29.2a	617.0±23.2ab	613.5±86.5	31.5±0.37b	24.5±0.4abc	39.0±0.61ab	34.2±0.72bc	32.3±6.1
T4	12585.9±160.1d	7962.2±51.9cd	18880.6±43.9c	14740.1±764.6b	12792.2±3497.8	661.1±53.0ab	480.9±17.8a	693.9±26.5a	648.6±22.9ab	621.1±95.4	31.4±0.97b	24.4±1.4abc	38.8±0.76ab	34.8±1.37abc	32.4±6.1
T5	14331.0±152.6b	8725.7±73.0b	19107.4±15.5b	15291.1±429.3b	13988.8±3768.6	662.7±15.1ab	493.1±18.2a	698.8±18.5a	655.1±21.7ab	627.4±91.6	31.6±0.45b	25.2±1.7ab	39.2±0.74ab	35.2±0.92ab	32.8±6.0
T6	15822.6±146.8a	9583.8±73.2a	19126.7±48.0a	16461.2±656.5a	15273.6±4043.6	680.4±31.2a	525.9±31.5a	700.0±23.0a	641.1±27.1b	636.9±77.9	33.0±0.26a	26.1±1.7a	40.0±1.10a	35.9±0.25a	33.8±5.9
CK	10725.2±97.6e	5864.6±14.3e	8502.1±9.9d	5476.5±382.5e	7642.1±245.9	610.9±4.7b	400.6±14.2b	584.2±64.0b	461.9±7.9c	514.4±99.8	29.2±0.58c	23.9±1.8bc	26.8±2.34d	25.1±0.69e	26.2±2.3

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

表 3　不同处理玉米水分利用效率及耗水量变化

处理	水分利用效率/(kg·mm^{-1}·hm^{-2})					耗水量/mm				
	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	平均	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	平均
T1	26.6±0.9c	21.7±1.9c	27.6±0.7a	27.2±1.8b	25.9±2.8	459.6±19.2e	354.6±3.3c	525.1±6.1e	459.1±15.7d	449.6±70.5
T2	27.2±1.6bc	22.3±1.6bc	28.9±1.1b	28.5±0.7b	26.7±3.1	489.7±19.7c	364.4±9.1b	546.3±7.2d	475.2±5.8bcd	468.9±76.1
T3	27.3±2.2bc	22.0±1.7bc	30.0±1.3bc	31.7±0.4a	27.8±4.3	519.9±21.7b	393.0±5.7a	572.2±12.8ab	490.0±3.3ab	493.8±75.3
T4	26.9±1.3bc	22.0±1.6bc	29.0±0.8c	31.3±2.0a	27.3±4.0	473.2±18.4d	360.9±9.0bc	547.3±18.0cd	470.5±6.0cd	463.0±76.8
T5	27.7±1.31b	23.7±2.7ab	31.0±0.8cd	31.9±1.3a	28.6±3.7	517.3±18.9b	367.6±4.6b	567.9±9.9b	479.7±6.5abc	483.1±85.0
T6	29.7±1.5a	24.7±2.7a	32.9±1.7d	33.4±2.3a	30.1±4.0	537.8±26.1a	388.4±2.1a	582.4±13.4a	494.2±15.2a	500.7±83.1
CK	21.9±1.0d	17.5±0.7d	15.2±0.8e	13.9±0.5c	17.1±3.5	489.8±18.9c	336.1±3.0d	561.1±18.5bc	393.0±12.4e	445.0±100.1

2.3　不同施肥处理对玉米干物质积累及各器官干物质积累与转运的影响

2.3.1　*群体干物质积累*　干物质量是群体数量和个体质量的综合反映,同时也是产量形成的物质基础。由图 2 可知,同等数量的控释氮肥较普通氮肥明显提高了各生育阶段干物质积累量,表现为随生育时期推进,不同施氮处理干物质平均积累量呈逐渐增加趋势,进入灌浆中期,干物质积累量变缓。氮肥类型间控释氮肥较普通氮肥在苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期、收获期干物质平均积累量分别提高 5.6%,7.4%,

7.2%,10.1%,7.6%,平均增加 7.6%,差异显著。施氮量 75,150,225 kg/hm² 条件下,控释氮肥较普通氮肥在苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期、收获期干物质平均积累量分别提高 11.5%,1.8%,7.9%,6.8%,9.4%;2.5%,1.7%,7.2%,7.2%,3.6%和 4.1%,18.0%,6.6%,15.8%,10.1%。从整个生育期来看,控释氮肥通过控制氮素养分的缓慢释放来实现氮肥后移,满足玉米整个生育期特别是抽雄后对氮素养分的需求,能明显加快抽雄期后干物质积累速率,提高成熟期干物质积累量,为获得高产奠定基础。

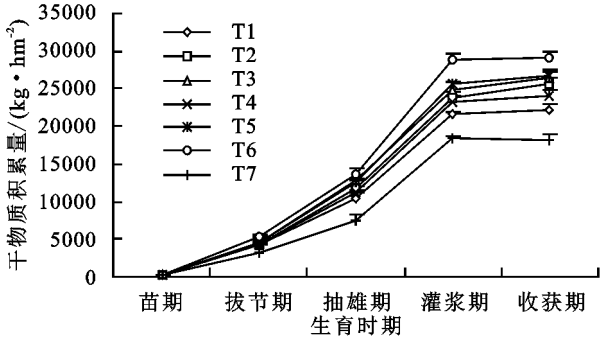


图 2 2019 年不同生育时期各处理干物质积累动态

2.3.2 各器官干物质积累与转运 干物质积累在各器官中的分配随生长中心转移而发生变化。由表 4 可以看出,灌浆期和收获期茎鞘、叶片和籽粒干物质积累量整体上表现为控释氮肥显著高于普通氮肥。茎鞘、叶片和籽粒干物质平均积累量控释氮肥较普通氮肥分别增加 11.1%,19.3%,10.0%和 1.5%,8.6%,3.4%,均显著高于 CK。施氮量 75,150,225 kg/hm² 条件下,灌浆期控释氮肥茎鞘、叶片和籽粒干物质积累量较普通氮肥分别增加 12.6%,7.8%,12.9%;25.5%,18.2%,15.7%和 5.5%,11.2%,12.3%,收获期分别增加 3.8%,0.5%,0.5%;11.7%,12.0%,3.0%和 8.9%,0.9%,1.2%。相同氮肥类型间,茎鞘、叶片和籽粒干物质积累量同样表现为随施氮量增加而显著增加。灌浆期控释氮肥 T6 较 T5、T4 分别增加 15.4%,24.6%;13.5%,24.7%和 22.3%,39.2%,T5 较 T4 分别增加 8.0%,9.9%,13.9%;普通氮肥 T3 较 T2、T1 分别增加 10.2%,24.3%;15.9%,35.3%和 21.1%,30.9%,T2 较 T1 分别增加 12.8%,16.7%,8.0%,均显著高于 CK。收获期控释氮肥 T6 较 T5、T4 分别增加 4.4%,13.4%;6.8%,10.5%和 10.4%,16.9%,T5 较 T4 分别增加 8.6%,3.5%,5.9%;普通氮肥 T3 较 T2、T1 分别增加 4.4%,17.2%;16.0%,19.9%和 10.0%,25.8%,T2 较 T1 分别增加 12.2%,3.3%,14.4%,均显著高于 CK。

茎鞘和叶片干物质输出率和贡献率与干物质积累量变化趋势相同。控释氮肥干物质输出率和贡献率显著高于普通氮肥,茎鞘和叶片输出率和贡献率分别增加 12.1%,20.4%和 40.1%,60.7%。施氮量 75,150,225 kg/hm² 条件下,灌浆期控释氮肥茎鞘干物质输出率和贡献率较普通氮肥分别增加 11.5%,10.0%,14.5%和 15.6%,17.5%,27.5%,叶片干物质输出率和贡献率分别增加 81.5%,19.1%,38.6%和 107.1%,38.5%,58.2%。相同类型氮肥茎鞘和叶片干物质输出率和贡献率随施氮量增加整体上呈显著增加趋势,其中控释氮肥茎鞘干物质输出率和贡献率 T6 较 T5、T4 分别增加 12.2%,11.2%和 17.1%,18.4%;普通氮肥茎鞘干物质输出率和贡献率 T3 较 T2、T1 分别增加 7.7%,8.3%和 7.9%,7.4%,与 CK 差异显著。表明旱作雨养条件下,控释氮肥通过控制氮素养分的释放速率来实现氮素后移,改善了玉米生长状况,明显促进干物质积累,提高灌浆期茎鞘和叶片干物质向库器官籽粒的转移,增加了对籽粒的贡献率,为高产奠定基础。

表 4 2019 年不同施肥处理玉米各器官平均单株干物质积累与转运比较

处理	茎鞘				叶				籽粒	
	生育时期		灌浆期		生育时期		灌浆期		生育时期	
	灌浆期/(g·株⁻¹)	收获期/(g·株⁻¹)	输出率/%	贡献率/%	灌浆期/(g·株⁻¹)	收获期/(g·株⁻¹)	输出率/%	贡献率/%	灌浆期/(g·株⁻¹)	收获期/(g·株⁻¹)
T1	208.0b	125.1bc	40.0b	51.1d	37.7e	33.2d	11.9d	2.8e	90.7cd	162.2d
T2	234.7ab	140.4ab	40.2ab	50.9cd	44.0cd	34.3c	22.0bc	5.2c	98.0bcd	185.6bc
T3	258.7ab	146.6a	43.3ab	54.9bc	51.0b	39.8b	22.0bc	5.5bc	118.7ab	204.1a
T4	234.3b	129.9abc	44.6ab	59.1bcd	47.3bc	37.1bc	21.6cd	5.8bc	95.7bcd	176.7c
T5	253.0ab	141.1ab	44.2ab	59.8b	52.0b	38.4b	26.2b	7.2b	109.0abc	187.2b
T6	292.0a	147.3a	49.6a	70.0a	59.0a	41.0a	30.5a	8.7a	133.3a	206.6a
CK	129.9c	109.7c	15.6c	20.7e	38.3de	34.3c	10.4e	4.1d	82.3d	97.7e

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平($P<0.05$)。

2.4 不同施肥处理不同生育时期玉米叶片 SPAD 值变化

从图 3 可以看出,相同施氮量和施用方式下,无论何种降雨年型,SPAD 值均表现为控释氮肥优于普通氮肥,整体上随施氮量增加和生育时期推进,SPAD 值呈增加趋势,CK 随生育进程推进,SPAD 值

逐渐降低。2016—2018 年抽雄期、拔节期、灌浆期 SPAD 平均值控释氮肥较普通氮肥分别提高 1.3%,1.5%,2.5%;2.3%,3.5%,4.9%和 13.1%,11.2%,10.8%。说明控释氮肥缓慢的养分释放特性有利于增加叶片叶绿素相对含量,延长玉米叶片持绿期,增加光合产物积累,为玉米高产奠定生理基础。降雨年型间为干旱年(2016 年)和丰水年(2018 年)随生育进程推进,SPAD 值呈增加趋势,而 CK 随生育进程推进逐渐降低。季节性干旱正常年(2017 年)7 月降雨量减少使玉米出现卡脖子旱、叶片干枯,灌浆期 SPAD 值显著降低。因此,2017 年玉米产量低于 2016 年和 2018 年。

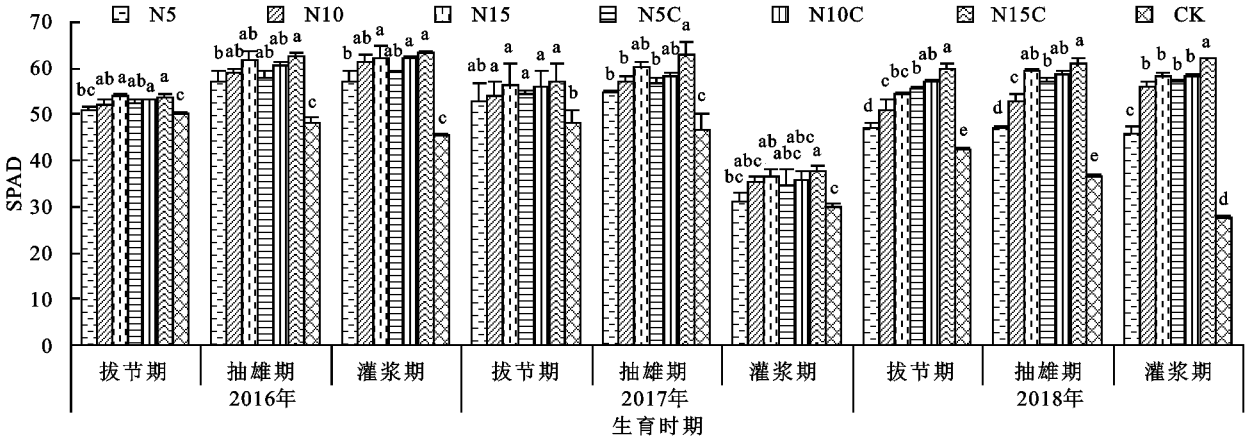


图 3　不同降雨年型不同处理各生育时期 SPAD 值变化

2.5　不同施肥方式对玉米氮肥偏生产力及农学利用率的影响

由图 4a 可知,不同年份氮素偏生产力整体上表现为控释氮肥显著高于普通氮肥,分别增加 5.6%,6.1%,12.8%,14.0%,4 年平均增加 9.5%。施氮 75,150,225 kg/hm^2 条件下,不同年份氮素偏生产力控释氮肥较普通氮肥分别增加 1.78%,7.83%,12.25%;3.58%,7.55%,10.94%;18.13%,10.55%,2.46%和 18.00%,12.79%,5.98%。相同类型氮肥,高氮量投入可显著降低氮素偏生产力,不同年份控释氮肥 T6 较 T5、T4 分别降低 25.9%,57.8%;26.7%,59.9%;33.3%,66.2%;28.2%,62.8%,4 年平均减少 27.2%,67.2%,T5 较 T4 降低 43.1%,45.2%,49.4%,48.1%,4 年平均减少 45.3%;普通氮肥 T3 较 T2、T1 分别降低 28.8%,61.8%;29.0%,62.5%;28.0%,61.1%;23.6%,58.5%,4 年平均减少 27.0%,60.6%,T2 较 T1 分别减少 46.3%,47.2%,45.9%,45.7%,4 年平均减少 46.0%。

氮肥农学利用率与氮肥偏生产力变化趋势基本一致(图 4b),不同年份氮肥农学利用率整体上表现为控释氮肥显著高于普通氮肥,分别增加 32.4%,23.2%,26.0%,23.8%,4 年平均增加 24.7%;施氮 75,150,225 kg/hm^2 条件下,不同年份氮素农学利用率控释氮肥较普通氮肥分别增加 13.4%,40.6%,50.2%;15.1%,27.2%,34.1%;38.7%,20.8%,4.5%和 32.1%,21.5%,9.2%。相同类型氮肥,高氮量投入可显著降低氮素农学利用率,不同年份控释氮肥 T6 较 T5、T4 分别降低 3.9%,6.9%;13.3%,40.9%;33.2%,65.9%;25.4%,62.8%,4 年平均减少 19.8%,50.6%,T5 较 T4 降低 3.1%,31.8%,48.9%,47.0%,4 年平均减少 38.4%;普通氮肥 T3 较 T2、T1 分别降低 10.0%,29.7%;17.7%,49.2%;22.8%,54.7%;17.0%,52.2%,4 年平均减少 17.5%,49.5%,T2 较 T1 分别减少 21.9%,38.3%,41.3%,42.4%,4 年平均减少 38.7%。表明无论何种类型氮肥,高氮肥用量均不利于玉米氮肥偏生产力和农学利用率的提高,而控释氮肥可通过控制氮素养分的缓慢释放较普通氮肥整体上显著提高氮肥偏生产力和农学利用率。

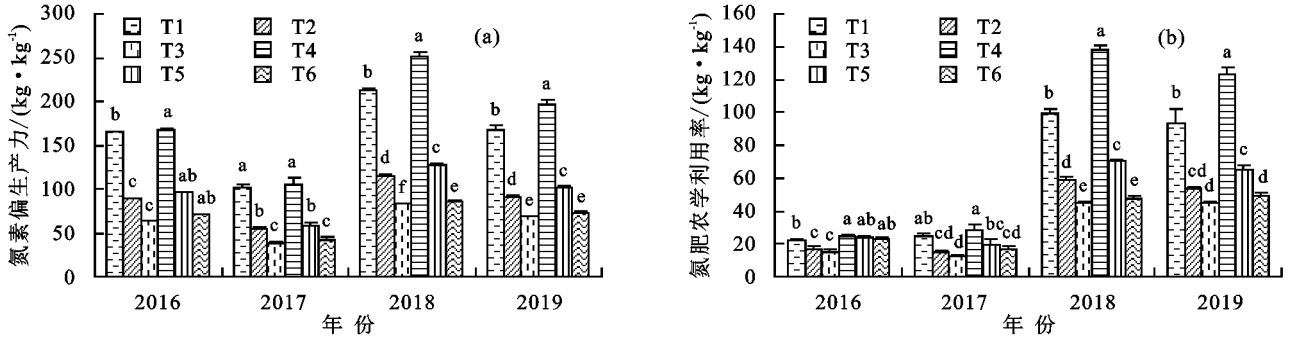


图 4　不同施肥处理对玉米氮素偏生产力和农学利用率的影响

3 讨 论

3.1 控释氮肥通过控制氮素养分释放时间后移来实现高产和水分高效

控释氮肥具有调控氮素的释放时间以同步满足作物营养需求的特点[23],与普通氮肥相比,控释氮肥可使养分释放时间后移[10]。作物水分利用效率因施氮量不同而变化[24],氮肥后移可使土壤中更多的水分用于作物生长[25],促进干物质累积并向籽粒转运,提高 WUE[24]和籽粒产量[26]。本研究条件下,与普通氮肥相比,不同用量控释氮肥明显改善了玉米穗部性状,穗粒数和百粒重分别平均增加 4.0%和 4.9%,显著提高玉米产量,平均增加 1 243.5 kg/hm^2,增产 9.7%,耗水量无显著差异,但水分利用效率明显得到提高,4 年平均增加 4.0%。另外,产量和水分利用效率变化因降雨年型和关键生育期降雨量而异,丰水年大于干旱年和平水年,干旱年和平水年玉米产量与关键生育期降雨量密切相关。可能由于控释氮肥通过控制氮素养分的释放速率来实现氮素养分后移,有效调节玉米水分耗散进程,促进水分高效利用来实现高产。

3.2 控释氮肥通过控制氮素养分释放时间后移对干物质积累与转运、叶片 SPAD 值形成调控

过量施氮由于营养器官氮素代谢过旺,运往籽粒的氮素减少,营养器官氮素再分配率和对籽粒氮贡献率降低[27]。氮肥后移通过适当减少作物生长前期氮肥施用量,将节省的氮肥用于作物旺盛生长期[28]。魏廷邦等[25]认为,玉米抽雄期至灌浆期追施氮肥可使玉米干物质积累提高 24.5%～33.9%。本研究结果显示,相同施氮量和施用方式下,与普通氮肥相比,控释氮肥处理玉米干物质平均积累量始终显著高于普通氮肥,平均增加 7.6%。进入灌浆期后,控释氮肥缓慢的养分释放速率能保持玉米旺盛生长,促进茎鞘和叶片干物质向穗部转移,进而提高干物质向籽粒分配比例,使茎鞘和叶片干物质输出率和贡献率较普通氮肥分别显著增加 12.1%,20.4%和 40.1%,60.7%。SPAD 值为控释氮肥优于普通氮肥,整体上随施氮量增加和生育时期推进而提高。可能原因是普通氮肥一次性基施使玉米生育前期氮素累积过多,对后期氮素吸收及转运有抑制作用,而控释氮肥通过控制氮素养分释放速率实现氮肥后移,保证玉米生育后期高的叶片叶绿素相对含量(SPAD 值),增加绿叶面积,延长叶片持绿时间,推迟玉米植株氮素积累速率最大值出现的时间[29]。而对于控释氮肥与普通氮肥配施比例及施用时期对甘肃黄土旱塬区玉米产量水分效应、生长发育、生理生态指标、土壤生物学活性及氮素吸收与分配的影响,还有待更深入地研究。

3.3 控释氮肥通过控制氮素养分释放时间后移实现“以肥调水、以水促肥”效果

控释氮肥通过控制氮素养分释放速率实现氮肥后移[20],而氮肥后移能够显著提高作物水肥利用效率[28-29],实现旱区农业“以肥调水、以水促肥”的养分管理目标[30],显著提高氮肥农学效率和氮肥偏生产力[31]。当前我国玉米生产中氮肥偏生产力平均为 51.6 kg/kg[32]。王寅等[33]和张敬昇等[34]认为,控释氮肥主要通过满足玉米生长发育中后期对氮素养分的需求,保证玉米高产的同时提高氮肥偏生产力。本研究结果显示,与普通氮肥相比,无论何种降雨年型,控释氮肥均能显著提高氮肥偏生产力和农学利用率,4 年平均增加 9.5%和 24.7%,且二者均随施氮量的增加而显著减少。原因在于普通氮肥为速效氮肥,氮素养分释放速率快,再加上抽雄前的 4—6 月降雨量接近玉米生育期 4—9 月降雨量的 50%,充足的降水达到以水促肥的效果,保证了玉米抽雄前的养分需求,同时过多的氮素养分随水下渗及地表径流而损失;而控释氮肥通过控制氮素养分释放速率使玉米氮素供需吻合度高于普通氮肥,进而实现玉米整个生育期对氮素养分的需求来实现增产,这与 Zheng 等[23]研究结果基本一致。

4 结 论

与普通氮肥相比,相同施氮量的控释氮肥播前一次性施用,生育后期不再追肥的施肥方式可明显提高玉米叶片叶绿素相对含量(SPAD 值),干物质积累量显著增加,灌浆期茎鞘和叶片干物质向库器官的转运比例显著提高,增加对籽粒的贡献率,改善穗部性状,增加穗粒数和百粒重,进而显著提高玉米产量。降水年型间丰水年产量显著高于干旱年和正常年,正常年与干旱年产量变化与关键生育期降雨多寡关系密切。无论何种降雨年型,施用控释氮肥通过优化玉米产量构成因素,显著提高玉米产量。耗水量及水分利用效率与关键生育期降雨量及降雨时期密切相关,控释氮肥在产量显著增加,耗水量未明显增加的条件下,明显提高旱地玉米水分利用效率。同时,控释氮肥显著提高氮肥偏生产力和农学利用率。因此,与普通氮肥相比,控释氮肥一次性基施既能满足玉米植株生长发育对氮素养分的需求,显著提高干物质积累量,又能优化产量构成,增产显著且省工高效。

参考文献:

[1] Zhu S S, Vivanco J M, Manter D K. Nitrogen fertilizer rate affects root exudation, the rhizosphere microbiome and nitrogen-use-efficiency of maize[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 107: 324-333.

[2] Guo G, Wang Y Y, Zhang Z X, et al. A gas chromatographic method for determination of nitrous oxide in

waste water treatment[J].Journal of Instrumental Analysis,2011,30(9):1050-1054.

[3] 李青军,张炎,胡伟,等.氮素运筹对玉米干物质积累、氮素吸收分配及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):755-760.

[4] 赵士诚,裴雪霞,何萍,等.氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(2):492-497.

[5] Elisante E, Muzuka A N. N. Occurrence of nitrate in Tanzanian groundwater aquifers: A review[J].Applied Water Science,2017,7(1):71-87.

[6] 李红莉,张卫峰,张福锁,等.中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1136-1143.

[7] Trenton F S, Joseph G L. Crop grain yield response to crop ration and nitrogen over 35 years[J]. Agronomy Journal,2008,100(3):643-650.

[8] 刘汝亮,王芳,王开军,等.控释氮肥侧条施用对东北地区水稻产量和氮肥损失的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):252-256.

[9] 周培禄,任红,齐华,等.氮肥用量对两种不同类型玉米杂交种物质生产及氮素利用的影响[J].作物学报,2017,43(2):263-276.

[10] 马富亮,宋付朋,高杨,等.硫膜和树脂膜控释尿素对小麦产量、品质及氮素利用率的影响[J].应用生态学报,2012,23(1):67-72.

[11] 高素玲,刘松涛,杨青华,等.氮肥减量后移对玉米冠层生理性状和产量的影响[J].中国农学通报,2013,29(24):114-118.

[12] 王云奇,陶洪斌,王璞,等.施氮模式对夏玉米产量和籽粒灌浆的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(12):1594-1598.

[13] 李东坡,武志杰,梁成华,等.缓/控释氮素肥料对土壤生物学活性的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(3):664-669.

[14] 邹晓锦,张鑫,安景文.氮肥减量后移对玉米产量和氮素吸收利用及农田氮素平衡的影响[J].中国土壤与肥料,2011(6):25-29.

[15] 尹彩侠,刘宏伟,孔丽丽,等.控释氮肥对春玉米干物质积累、氮素吸收及产量的影响[J].玉米科学,2014,22(6):108-113.

[16] 周怀平,杨治平,李红梅,等.施肥和降水年型对旱地玉米产量及水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2004,22(3):27-31.

[17] Deng X P, Shan L, Zhang H P, et al. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China[J].Agricultural Water Management,2006,80(1):23-40.

[18] Ogola J B O, Wheeler T R, Harris P M. Effects of nitrogen and irrigation on water use of maize crops[J]. Field Crops Research,2002,78(2):105-117.

[19] 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.

[20] 高强,李德忠,汪娟娟,等.春玉米一次性施肥效果研究[J].玉米科学,2007,15(4):125-128.

[21] 樊廷录,李永平,李尚中,等.旱作地膜玉米密植增产用水效应及土壤水分时空变化[J].中国农业科学,2016,49(19):3721-3732.

[22] 王小春,杨文钰,邓小燕,等.玉米/大豆和玉米/甘薯模式下玉米干物质积累与分配差异及氮肥的调控效应[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):46-57.

[23] Zheng W K, Liu Z G, Zhang M, et al, Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J].Field Crops Research,2017,20(5): 106-115.

[24] 腾圆圆,赵财,柴强,等.氮肥后移对玉米间作豌豆耗水特性的调控效应[J].作物学报,2016,42(3):446-455.

[25] 魏廷邦,胡发龙,赵财,等.氮肥后移对绿洲灌区玉米干物质积累和产量构成的调控效应[J].中国农业科学,2017,50(15):2916-2927.

[26] 文熙宸,王小春,邓小燕,等.玉米—大豆套作模式下氮肥运筹对玉米产量及干物质积累与转运的影响[J].作物学报,2015,41(3):448-457.

[27] 刘占军,谢佳贵,张宽,等.不同氮肥管理对吉林春玉米生长发育和养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):38-47.

[28] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J].Nature: International Weekly Journal of Science,2014,514:486-489.

[29] 王丽梅,李世清,邵明安.水、氮供应对玉米冠层营养器官干物质和氮素累积、分配的影响[J].中国农业科学,2010,43(13):2697-2705.

[30] 张绪成,于显枫,王红丽,等.半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控[J].中国农业科学,2016,49(5):852-864.

[31] 董强,吴得峰,党廷辉,等.黄土高原南部不同减氮模式对春玉米产量及土壤硝态氮残留的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):856-863.

[32] 王崇桃,李少昆.玉米高产产量形成特征及其验证[J].科技导报,2013,31(25):61-67.

[33] 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.

[34] 张敬昇,李冰,王昌全,等.控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和稻麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):110-118.