



种植密度与施氮对河西灌区青贮玉米产量 与品质及水分利用效率的影响

王佳,李阳,贾倩民,常生华,Shahzad Ali,张程,刘永杰,侯扶江

(兰州大学 草地农业生态系统国家重点实验室,农业农村部草牧业创新重点实验室,
草地农业教育部工程研究中心,草地农业科技学院,兰州 730020)

摘要 为探索河西灌区青贮玉米高产高效的栽培措施,设置 67 500 株/hm² (L)、82 500 株/hm² (M) 和 97 500 株/hm² (H) 3 个种植密度及不施氮(N₀)、施氮 120 kg/hm² (N₁)、240 kg/hm² (N₂) 和 360 kg/hm² (N₃) 4 个施氮水平。结果表明:在玉米 6 叶期和 12 叶期各施氮处理的株高、茎粗、相对叶绿素含量(SPAD)、叶面积指数(LAI)和地上干物质质量(ADM)无显著差异,但在灌浆期和收获期 M、H 密度下,N₂ 和 N₃ 的上述指标显著高于 N₀,且 N₁、N₂ 和 N₃ 的鲜干草产量显著高于 N₀。在收获期 L 的 SPAD 和茎粗显著高于 H,而 LAI、ADM 和鲜干草产量显著低于 M 和 H。N₂ 和 N₃ 较 N₀ 显著提高粗蛋白、粗脂肪和粗灰分含量,显著降低淀粉和酸性洗涤纤维(ADF)含量,从而提高相对饲用价值(RFV),且 N₂ 和 N₃ 的各营养成分产量显著高于 N₀。随种植密度的增加,粗蛋白、淀粉和粗脂肪含量降低,而中性洗涤纤维(NDF)和 ADF 增高,致使 RFV 下降,但 M 和 H 的粗蛋白、淀粉和粗灰分的产量显著高于 L。N₁、N₂ 和 N₃ 的水分利用效率(WUE)显著高于 N₀,M 和 H 的 WUE 显著高于 L,所有处理中 MN₂ 的 WUE 最高。因此,82 500 株/hm² 的种植密度结合 240 kg/hm² 的施氮量是一种适宜河西灌区青贮玉米生产的栽培措施。

关键词 种植密度;施氮;青贮玉米;粗蛋白;水分利用效率

中图分类号 S816.3+3

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2021)01-0060-14

河西灌区位于甘肃省西北部,面积约 27 万 hm²,该区地势平坦,降水稀少,蒸发量大,光照充足,属典型干旱半干旱大陆性季风气候^[1-2]。近些年由于气候变化和人类活动导致众多生产和生态问题。一方面,大量农田的高水肥投入,造成水资源浪费、土壤养分淋失、水肥利用效率低下等问题^[3-4]。另一方面,该地区可利用地表水资源减少,造成地下水位下降、天然草地退化和土壤次生盐碱化,严重制约农业生产力的提高和生态环境的健康发展^[5-6]。因此,研究适宜河西地区的农业管理措施对保障西北地区粮食安全和生态安全具有重要战略意义。

青贮玉米作为优质饲草,既是牧区饲料供给的重要来源,更是农牧交错带冬春饲料的保障^[7-8]。推广青贮玉米种植是响应国家“粮改饲”

战略、促进种植业结构调整的重要措施之一。种植密度是影响玉米生长发育、产量形成和营养品质的重要因素^[9]。有研究认为,随种植密度的增加,玉米植株明显增高^[10]。然而,窦超银等^[11]认为,增加种植密度,玉米株高降低,但叶面积指数和生物量增加。董飞等^[12]报道,玉米叶片的相对叶绿素含量随种植密度的增加逐渐下降。但是,屈绳娟^[13]认为,增加种植密度,玉米生育前期的叶绿素含量增加,但在生育中后期减少。有研究表明,提高种植密度,玉米生物产量显著增高,而粗蛋白、粗脂肪等营养成分含量下降^[14]。但是,胡文河等^[15]认为,增大密度利于提高青贮玉米的品质。胡春花等^[16]发现,高密度种植下青贮玉米的干物质质量和粗脂肪含量较高,但粗蛋白含量降低,中性和酸性洗涤纤维含量升高,导致品质下

收稿日期:2020-06-02 **修回日期:**2020-08-26

基金项目:长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT_17R50);国家自然科学基金(31901389,31672472);兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2019-33);兰州大学“双一流”引导专项-队伍建设-科研启动费(561119204);973 国家重点基础研究计划课题(2014CB138706);2018 年度甘肃省科技重大专项计划项目(18ZD2FA009)。

第一作者:王佳,女,硕士研究生,从事农业水肥管理研究。E-mail:jwang19@lzu.edu.cn

通信作者:贾倩民,男,博士,研究员,主要从事饲草栽培和放牧管理研究。E-mail:guqm@lzu.edu.cn

降。然而,有研究发现,粗蛋白含量与植株密度之间无显著相关关系,种植密度对青饲玉米的中性洗涤纤维含量也无显著影响^[17]。可见,玉米的植株性状、产量和营养品质与种植密度的关系存在争议,且作用机理尚不明确,该方面的研究需进一步深化。

随施氮量的增加,玉米株高和叶面积指数明显增加,叶片功能期延长,叶绿素含量和籽粒产量显著提高^[13,18]。Chen 等^[19]认为,施氮可以显著增加玉米吐丝期和成熟期的干物质质量,而吐丝前营养器官的干物质转运量随施氮量的增加而降低。但是有研究表明,过量施氮无益于干物质积累,还会降低氮肥利用效率,导致减产^[20-21]。王爽等^[22]发现,随施氮量的增加,饲用玉米的粗蛋白含量升高,而中性和酸性洗涤纤维含量下降。然而,屈绳娟^[13]认为,青贮玉米的粗蛋白和中性洗涤纤维含量随施氮量增加而提高,但酸性洗涤纤维含量变化不明显^[13]。还有研究认为,追施氮肥提高了玉米粗蛋白和粗脂肪含量,同时也提高了粗纤维和粗灰分含量^[23]。多数研究表明,在一定范围内增加施氮量利于植株的氮素吸收,进而提高产量并改善品质,但过量施氮并不能提高籽粒淀粉含量及饲草产量^[24-25]。国内外学者对施氮条件下玉米水分利用的研究结论有所不同,有研究认为施氮减小了作物耗水量^[26],也有研究表明施氮对作物耗水量无显著影响^[27]。宋尚有等^[28]在黄土高原的研究表明,水分利用效率(WUE)随施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,在施氮 180 kg/hm² 时最高。然而,徐振峰等^[29]发现,全膜双垄沟播玉米的 WUE 随施肥量的增加而增高。但是有研究指出,在干旱胁迫下 WUE 并不随施氮量的增加而提高^[27,30]。目前,中国的氮肥消费量已远超作物最高产量的需求量,农业系统中的氮肥盈余量高达 175 kg/hm²^[31]。因此,优化氮肥管理是实现河西地区农业可持续发展的关键。

本试验在河西灌区研究种植密度和施氮水平对青贮玉米生长、产量、营养品质和水分利用的影响,分析田间土壤贮水量和耗水特征,揭示密度和氮肥调控水分利用效率的机制,明确提高青贮玉米产量、品质及水分利用效率的适宜密度和施氮量,旨在为河西灌区青贮玉米的高产栽培与水分高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于 2019 年在甘肃省张掖市临泽县新华镇兰州大学临泽草地农业试验站(39°15' N, 100°02' E)进行,海拔 1 390 m,年平均气温 7.16 °C,年平均降水量 121.5 mm,年降雨分配不均匀,主要集中在 7 至 9 月份,占全年总降水的 60%以上。年均潜在蒸发量为 2 337.6 mm,属于温带大陆性干旱气候,年日照时数 3 042 h,≥0 °C 年积温 3 548 °C,≥10 °C 年积温 3 026 °C。农业灌溉主要依靠祁连山雪水和地下水,是典型的内陆干旱灌区。

1.2 试验设计和田间管理

本研究采用两因素随机区组试验设计,设置 3 个种植密度,分别为 6 7500 株/hm²(L)、82 500 株/hm²(M)和 97 500 株/hm²(H)。每个密度设置 4 个施氮水平,分别为不施氮(N0)、施氮 120 kg/hm²(N1)、施氮 240 kg/hm²(N2)、施氮 360 kg/hm²(N3)。播种前,N0 处理只施 138 kg/hm² 过磷酸钙,N1、N2、N3 处理施 300 kg/hm² 磷酸二铵和 75 kg/hm² 尿素作为基肥。N2 处理在拔节期追施 261 kg/hm² 尿素,N3 处理在 6 叶期、12 叶期均追施 261 kg/hm² 尿素。试验共 12 个处理,各处理重复 3 次,随机区组排列,共 36 个小区,小区面积为 38.5 m²(长×宽=7.7 m×5 m),各小区之间设置 1.5 m 宽的隔离带,防止小区间的水分渗漏。采用宽窄行种植方式,宽行间距 60 cm,窄行间距 40 cm,L、M、H 处理的株距分别为 28 cm、23 cm、19 cm。各处理灌溉量均为 200 mm,在拔节期和吐丝期各灌 50%。除杂和病虫害防治措施均一致。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 玉米生长特征 在玉米 6 叶期(V6)、12 叶期(V12)、散粉期(PS)、灌浆期(BL)和收获期(HA),各小区随机选取 5 株玉米,测量植株高度、茎粗(除 6 叶期)、相对叶绿素含量和叶面积。在各时期采用卷尺测量植株基部至最高叶尖的绝对株高(cm),在抽雄期后测量植株基部到玉米雄穗顶端之间的距离作为株高。用游标卡尺测定基部第一节中部宽、窄处横位直径的平均值作为茎粗(mm)。用叶绿素仪(SPAD-502,美能达,日本)测定玉米穗位叶的相对叶绿素含量(SPAD),每个叶片读数 4 次,取平均值作为该植株叶片的

SPAD。用手持叶面积仪(YMJ-D, 浙江托普云农, 中国)测定叶面积, 单位土地面积上植株的总叶面积作为叶面积指数(LAI)。各时期随机选取3株玉米立即称量地上部鲜质量, 于室外风干2周, 之后放置于65℃烘箱烘干至恒量, 称量后根据种植密度计算单位面积上地上干物质量。

1.3.2 地上鲜草和干草产量 在收获期, 各小区随机选取5.5 m²土地上的青贮玉米, 立即称量鲜质量, 计算鲜草产量。之后将植株晾晒2周, 于65℃烘箱内烘干48 h至恒量, 称量干质量, 计算干草产量。

1.3.3 营养品质 用FOSS-Infratec™ 1241型(丹麦)近红外仪测定粉碎样品的粗蛋白、粗脂肪、酸性洗涤纤维(ADF)、中性洗涤纤维(NDF)、淀粉和粗灰分等营养成分含量, 并根据青贮玉米的干草产量计算各营养成分产量。使用以下公式计算相对饲用价值(RFV):

$$RFV = (DDM \times DMI) / 1.29$$

$$DDM = 88.9 - 0.799 \times ADF$$

$$DMI = 120 / NDF$$

式中, ADF为酸性洗涤纤维含量(%); NDF为中性洗涤纤维含量(%); DDM为可消化干物质(%); DMI为粗饲料干物质随意采食量(%)。

1.3.4 土壤水分利用特征 在播种前和收获后采用烘干法对0~100 cm土层土壤水分含量进行测定。使用土钻每隔20 cm取一个土样, 装入铝盒, 置于105℃烘箱烘24 h至恒量后称量, 计算土壤贮水量(SWS), 公式如下:

$$SWS = \sum_{i=1}^n h_i \times \rho_i \times b_i$$

式中, h_i 为第*i*个土层深度(cm); ρ_i 为第*i*个土层的土壤体积质量(g/cm³); b_i 为第*i*个土层的土壤质量含水率(%); *n*为土层个数。

田间耗水量(ET)计算公式如下:

$$ET = P + I + W1 - W2 - D$$

式中, *P*为降水量(mm); *I*为灌溉水量(mm); *W1*为播前土壤贮水量(mm); *W2*为收获期土壤贮水量(mm); *D*为地表径流量(mm)。

水分利用效率(WUE)计算公式如下:

$$WUE = Y / ET$$

式中, *Y*为干草产量(kg/hm²), *ET*为田间耗水量(mm)。

1.4 数据统计与分析

采用Excel 2010进行数据统计, SigmaPlot 13.0进行绘图, 使用SPSS 18.0软件进行方差分

析, 不同处理之间的多重比较采用图基法(Tukey's Method), 显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

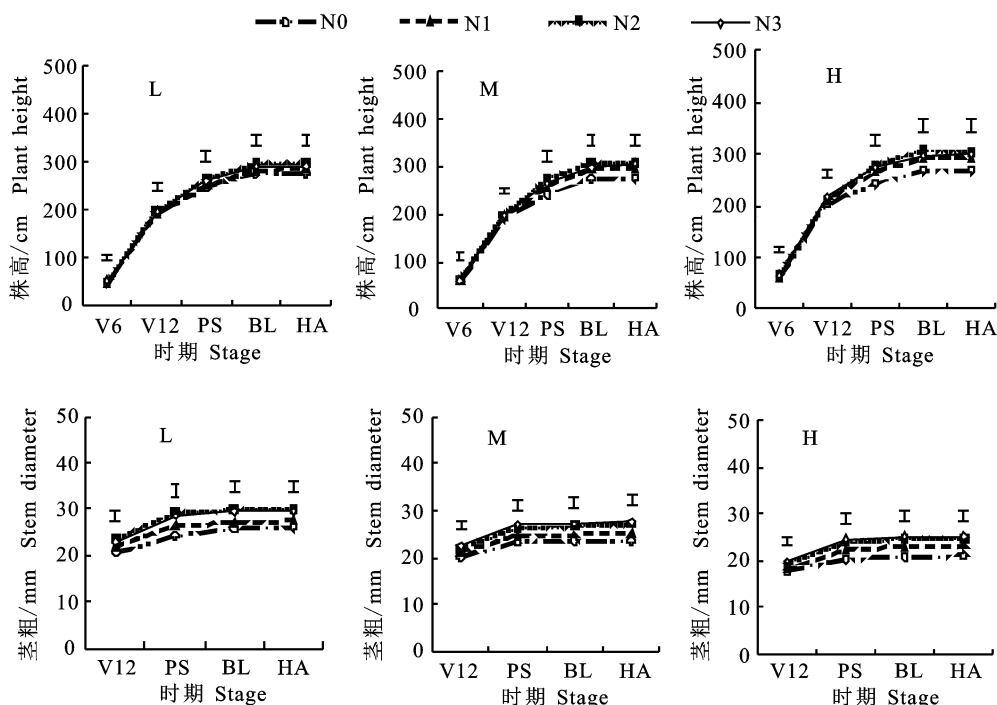
2.1 不同处理对青贮玉米株高和茎粗的影响

如图1所示, 6叶期和12叶期, 相同种植密度下各施氮处理的株高无显著差异, 相同施氮水平下H密度的株高显著大于L, 与M差异不显著。散粉期、灌浆期和收获期, M和H密度下N2和N3处理的株高显著大于N0, 相同施氮水平下各密度的株高无显著差异。因素水平的平均值显示, 收获期N1、N2和N3处理的株高较N0增加6.5%、10.5%和9.0%。散粉期、灌浆期和收获期, L、M和H密度下N2和N3处理的茎粗显著大于N0。平均值显示, 收获期N1、N2和N3处理的茎粗较N0提高7.43%、15.56%和16.25%。收获期, N0水平下M和H的茎粗较L分别降低9.9%和19.2%; N1、N2和N3水平下M较L分别降低8.2%、9.4%和7.1%, H较L分别降低15.1%、17.6%和15.0%。

如图2所示, 灌浆期, M和H密度及收获期3个密度下, N2、N3处理的叶片相对叶绿素含量(SPAD)显著高于N0, N2与N3无显著差异。收获期, L密度下N1、N2和N3的SPAD较N0分别提高7.2%、26.3%和21.8%, M密度下分别提高13.2%、35.1%和31.1%, H密度下分别提高13.1%、33.3%和37.8%。收获期, N0水平下M和H的SPAD较L降低7.5%和19.8%, N1水平下降低2.3%和15.4%, N2水平下降低1.0%和15.3%, N3水平下降低0.5%和9.4%。收获期, L密度下N1、N2和N3处理的叶面积指数(LAI)较N0分别提高10.2%、38.9%和40.0%, M密度下分别提高24.1%、47.9%和47.7%, H密度下分别提高27.6%、50.6%和47.0%, 差异显著。各时期相同施氮水平下, LAI随种植密度的增大而增加。平均值显示, M和H的LAI显著高于L, 6叶期较L提高46.7%和50.2%, 12叶期提高19.2%和20.0%, 散粉期提高23.9%和28.1%, 灌浆期提高21.6%和28.6%, 收获期提高21.9%和28.2%。

2.2 不同处理对青贮玉米地上干物质的影响

如图3所示, 灌浆期和收获期, 相同种植密度下N2和N3处理的地上干物质质量显著高于N0, 其他时期各施氮处理间无显著差异。收获期,



垂直棒的长度表示 LSD 值($P < 0.05$),下同

Vertical bars represent LSD values($P < 0.05$), the same below

图 1 不同处理青贮玉米的株高和茎粗

Fig. 1 Plant height and stem diameter of silage maize under different treatments

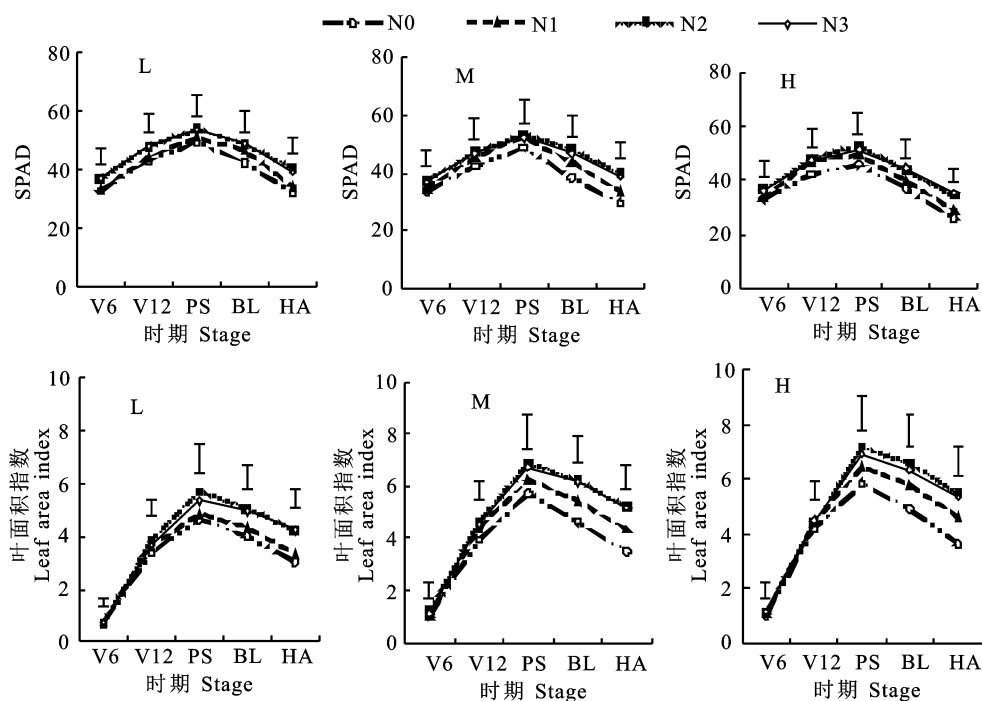


图 2 不同处理青贮玉米的相对叶绿素含量及叶面积指数

Fig. 2 Relative chlorophyll content and leaf area index of silage maize under different treatments

L 密度下 N2 和 N3 处理的地上干物质质量较 N0 提高 6.1% 和 52.3%, M 密度下提高 61.6% 和 51.8%, H 密度下提高 53.9% 和 50.0%。相同施氮水平下,各时期的地上干物质质量随种植密度的

增大而增加。收获期, N0 水平下 M 和 H 的地上干物质质量较 L 提高 21.6% 和 38.7%, N1 水平下提高 31.3% 和 41.9%, N2 水平下提高 30.5% 和 36.8%, N3 水平下提高 25.7% 和 36.6%, 差异显著。

2.3 不同处理对青贮玉米的鲜草和干草产量的影响

由图 4 可知,种植密度与施氮对青贮玉米的鲜草及干草产量影响极显著($P < 0.01$),两因素的交互作用影响不显著。L 密度下 N2 和 N3 的鲜草产量较 N0 显著提高 56.6% 和 49.5%,干草产量显著提高 56.8% 和 50.1%,N2 与 N3 间无

显著差异。M 密度下 N1、N2 和 N3 的鲜草产量较 N0 提高 28.7%、59.4% 和 58.5%,干草产量提高 31.3%、60.4% 和 58.5%,H 密度下鲜草产量提高 29.7%、51.5% 和 55.2%,干草产量提高 29.5%、51.1% 和 55.1%,差异显著。平均值显示,N1、N2 和 N3 处理的鲜草产量较 N0 显著提高 28.7%、55.7% 和 54.7%。N0 水平下各密度

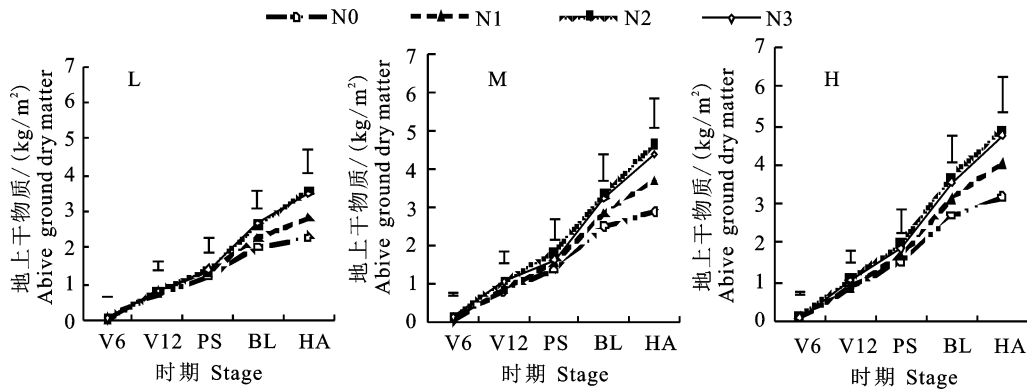
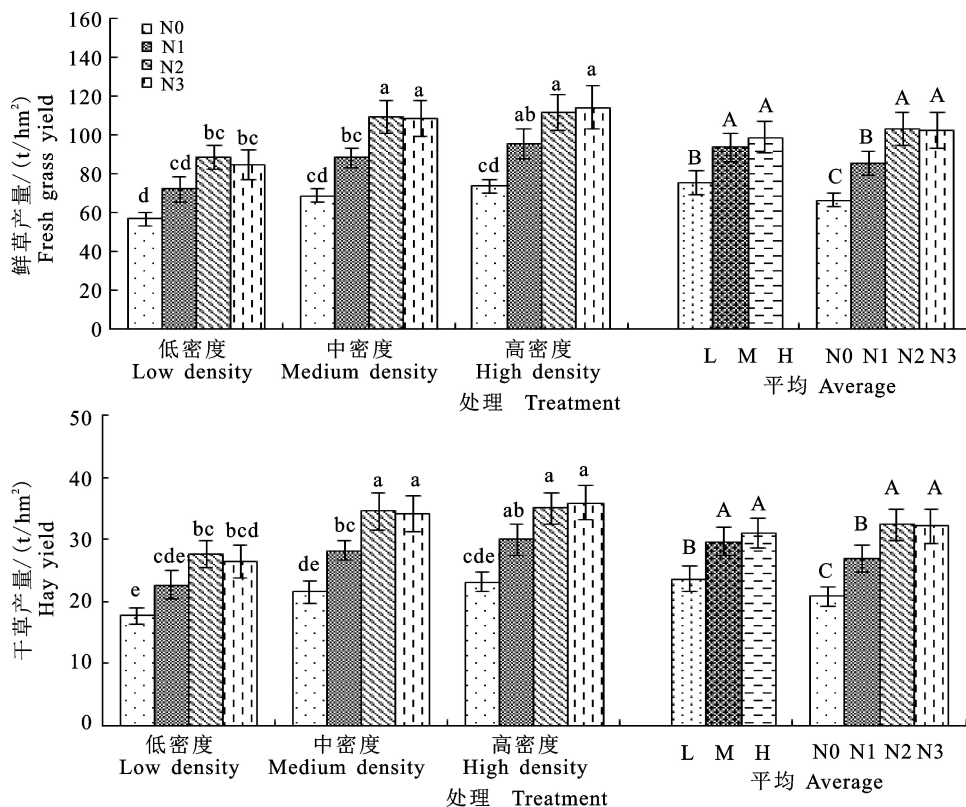


图 3 不同处理青贮玉米的地上干物质质量

Fig. 3 Above ground dry matter of silage maize under different treatments



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),不同大写字母代表因素水平差异显著($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at $P < 0.05$, different uppercase letters indicate significant difference among different levels of factors at $P < 0.05$

图 4 不同处理青贮玉米的鲜草和干草产量

Fig. 4 Fresh grass yield and hay yield of silage maize under different treatments

的鲜草和干草产量无显著差异。N1 水平下 H 密度的鲜草和干草产量显著高于 L,与 M 差异不显著。N2 水平下 M 和 H 的鲜草产量较 L 显著提高 23.5% 和 26.0%,干草产量显著提高 24.6% 和 26.5%。N3 水平下 M 和 H 的鲜草产量较 L 显著提高 28.6% 和 35.2%,干草产量显著提高 28.6% 和 35.5%。平均值显示,M 和 H 密度的鲜草产量较 L 显著提高 24.2% 和 30.9%,干草产量显著提高 25.2% 和 31.3%。所有处理中 HN3 处理的干草产量(35.9 t/hm²)最高,与 M-N2 差

异不显著。

2.4 不同处理对青贮玉米营养品质的影响

如表 1,种植密度和施氮对青贮玉米粗蛋白、淀粉、粗脂肪和 ADF 含量有极显著影响($P < 0.01$);种植密度对粗灰分含量影响不显著,施氮对其影响极显著($P < 0.01$);种植密度对 NDF 含量影响极显著($P < 0.01$),施氮对其影响显著($P < 0.05$)。相同种植密度下 N2 和 N3 处理的粗蛋白含量显著高于 N0,N2 与 N3 无显著差异。相同施氮水平下各密度的粗蛋白含量无显著差异。

表 1 不同处理青贮玉米的营养成分含量

Table 1 Nutrient content of silage maize under different treatments

种植密度 Planting density	施氮水平 Nitrogen application level	粗蛋白/% Crude protein	淀粉/% Starch	粗脂肪/% Crude fat	粗灰分/% Crude ash	中性洗涤 纤维/% Neutral washing fiber	酸性洗涤纤维/% Acidic washing fiber
L	N0	7.79 de	40.13 a	2.07 efg	3.71 b	35.93 ab	24.59 abc
	N1	8.87 bcd	38.21 abed	2.25 de	4.20 ab	36.18 ab	25.26 ab
	N2	10.02 ab	38.52 abc	2.91 ab	4.40 ab	34.10 ab	22.13 bc
	N3	10.34 a	38.96 ab	3.14 a	4.41 ab	31.30 b	20.40 c
M	N0	7.33 e	39.29 ab	1.86 fgh	3.76 b	37.38 ab	25.25 ab
	N1	8.48 cd	35.35 bcde	2.13 ef	4.18 ab	39.29 a	27.15 a
	N2	9.70 ab	36.55 abcde	2.66 bc	4.41 ab	35.91 ab	23.85 abc
	N3	10.06 ab	35.62 bcde	2.84 abc	4.51 a	35.71 ab	21.65 bc
H	N0	7.07 e	36.80 abcde	1.67 h	3.90 ab	39.94 a	27.02 a
	N1	8.05 de	34.17 de	1.77 gh	4.05 ab	40.38 a	27.31 a
	N2	9.45 abc	34.44 cde	2.19 e	4.26 ab	38.77 a	24.48 abc
	N3	9.79 ab	33.58 e	2.53 cd	4.35 ab	38.12 a	23.54 abc
平均 Average	L	9.14 A	39.04 A	2.58 A	4.11 A	34.48 C	23.20 B
	M	8.96 AB	36.65 B	2.38 B	4.27 A	37.00 B	24.43 AB
	H	8.71 B	34.66 C	2.06 C	4.21 A	39.15 A	25.49 A
	N0	7.39 C	38.75 A	1.86 D	3.78 B	37.73 AB	25.63 A
	N1	8.42 B	35.95 B	2.04 C	4.11 A	38.64 A	26.61 A
	N2	9.82 A	36.44 B	2.60 B	4.42 A	36.18 AB	23.42 B
	N3	10.14 A	36.00 B	2.85 A	4.47 A	34.95 B	21.54 B
因素显著性 Significance of ANOVA	PD	* *	* *	* *	ns	* *	* *
	NA	* *	* *	* *	* *	*	* *
	PD×NA	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注:表中同列不同小写字母代表处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平,不同大写字母代表因素水平的差异达到 $P < 0.05$ 显著水平;PD、NA 和 PD×NA 分别代表种植密度、施氮水平、二者交互作用;* 代表 $P < 0.05$,差异显著;* * 代表 $P < 0.01$,差异极显著;ns 代表 $P > 0.05$,差异不显著,下同。

Note:Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at $P < 0.05$ level,and different uppercase letters indicate significant difference among different levels of factors at $P < 0.05$ level;PD,NA and PD×NA represent planting density,nitrogen application and interaction between them respectively. * represents $P < 0.05$,with significant difference;* * stands for $P < 0.01$,the difference is very significant; ns stands for $P > 0.05$,no significant difference,the same below.

平均值显示,N1、N2 和 N3 处理的粗蛋白含量较 N0 显著提高 9.7%、39.8%和 53.2%。相同种植密度下各施氮处理的淀粉含量无显著差异。N3 水平下 H 密度的淀粉含量较 L 显著降低 13.8%,其他施氮水平下各密度差异不显著。平均值显示,N1、N2 和 N3 处理的淀粉含量较 N0 显著降低 7.2%、6.0%和 7.1%;M 和 H 密度的淀粉含量较 L 显著降低 6.1%和 11.2%。

同一密度下 N2 和 N3 的粗脂肪含量显著高于 N0 和 N1。同一施氮水平下 H 的粗脂肪含量显著低于 L。平均值显示,N1、N2 和 N3 处理的粗脂肪含量较 N0 显著提高 9.7%、39.8%和 53.2%;M 和 H 的粗脂肪含量较 L 显著降低 7.8%和 20.2%。M 密度下 N3 处理的粗灰分含量显著高于 N0,L 和 H 密度下各施氮处理无显著差异。相同施氮水平下各密度的粗灰分含量无

显著差异。平均值显示,N1、N2 和 N3 的粗灰分含量较 N0 显著提高 8.7%、16.9%和 18.3%。所有处理中 MN3 处理的粗灰分含量最高,与 MN2 无显著差异。同一密度下各施氮处理的 NDF 含量无显著差异。N3 水平下 H 密度的 NDF 含量显著高于 L,与 M 无显著差异。平均值显示,N3 处理的 NDF 含量显著低于 N1;M 和 H 密度的 NDF 含量较 L 显著提高 7.3%和 13.5%。L 和 H 密度下 N3 处理的 ADF 含量显著低于 N1,与 N2 差异不显著。相同施氮水平下各密度的 ADF 含量均无显著差异。平均值显示,与 N0 相比,N1 的 ADF 含量提高 3.8%,N2 和 N3 显著降低 8.6%和 14.8%。M 和 H 密度的 ADF 含量较 L 提高 5.3%($P>0.05$)和 9.9% ($P<0.05$)。所有处理中 HN1 处理的 ADF 含量 (27.31%)最高,较 MN2 增加 14.5%。

表 2 不同处理下青贮玉米的饲用价值

Table 2 Feeding value of silage maize under different treatments

种植密度 Planting density	施氮水平 Nitrogen application level	干物质采食量/% Dry matter intake	干物质消化率/% Dry matter digestibility	相对饲用价值/% Relative feeding value
L	N0	3.33 ab	69.15 a	178.34 bcd
	N1	3.29 b	68.47 a	174.58 bcd
	N2	3.52 ab	71.25 a	194.63 ab
	N3	3.83 a	72.59 a	215.71 a
M	N0	3.21 b	68.73 a	171.13 bcd
	N1	3.06 b	67.27 a	159.65 cd
	N2	3.35 ab	69.90 a	181.55 bcd
	N3	3.37 ab	71.62 a	187.08 bc
H	N0	3.02 b	67.39 a	157.65 cd
	N1	2.98 b	67.18 a	155.26 d
	N2	3.10 b	69.41 a	167.02 bcd
	N3	3.16 b	70.15 a	172.08 bcd
平均 Average	L	3.49 A	70.37 A	190.82 A
	M	3.25 B	69.38 A	174.85 B
	H	3.07 C	68.53 A	163.00 C
	N0	3.19 B	68.43 A	169.04 C
	N1	3.11 B	67.64 A	163.16 C
	N2	3.33 AB	70.19 A	181.07 AB
	N3	3.46 A	71.45 A	191.62 A
因素显著性	PD	* *	ns	* *
Significance of ANOVA	NA	* *	ns	* *
	PD×NA	ns	ns	ns

如表 2 所示,种植密度和施氮对青贮玉米干物质采食量和相对饲用价值影响极显著($P<0.01$),对于干物质消化率无显著影响。M 和 H 密度下各施氮处理的干物质采食量、干物质消化率

和相对饲用价值无显著差异,L 密度下 N3 处理的干物质采食量显著高于 N1,相对饲用价值显著高于 N0,与 N2 无显著差异。平均值显示,与 N0 相比,N1 的干物质采食量降低 2.5% ($P>$

0.05),相对饲用价值降低 3.5%($P>0.05$);N2 和 N3 的干物质采食量提高 4.4%($P>0.05$)和 8.5%($P<0.05$),相对饲用价值提高 7.1%($P>0.05$)和 13.4%($P<0.05$)。N3 水平下 H 密度的干物质采食量显著低于 L,与 M 差异不显著。平均值显示,M 和 H 密度的干物质采食量较 L 显著降低 6.9%和 12.0%;N3 水平下 L 密度的相对饲用价值显著大于 M 和 H。平均值显示,M 和 H 密度的相对饲用价值较 L 显著降低 8.4%和 14.6%。

由表 3 可知,种植密度与施氮对青贮玉米粗蛋白、粗灰分、NDF、ADF 的产量影响极显著($P<0.01$)。种植密度对淀粉产量影响显著,对粗脂肪产量无显著影响,施氮对二者有极显著影响($P<0.01$)。同一密度下 N2 和 N3 处理的粗蛋白产量显著高于 N0,N2 与 N3 无显著差异。平均值显示,N1、N2 和 N3 的粗蛋白产量较 N0 显著提高 48.4%、107.2%和 113.1%;同一施氮水平下各密度的粗蛋白产量差异不显著。平均值表明,M 和 H 的粗蛋白产量显著高于 L,较 L 提高 23.2%和 25.5%。12 个处理中 HN3 的粗蛋白产量最高,但与 MN2 无显著差异。L 和 H 密度下各施氮处理的淀粉产量无显著差异,M 密度

下 N2 处理的淀粉产量显著高于 N0。同一施氮水平下各种种植密度的淀粉产量无显著差异。平均值显示,N1、N2 和 N3 处理的淀粉产量较 N0 显著提高 20.1%、46.6%和 43.3%。M 和 H 密度的淀粉产量较 L 显著提高 17.2%和 16.3%。所有处理中 MN2 的淀粉产量最高,为 2.59 t/hm²。

L 和 M 密度下 N2 和 N3 处理的粗脂肪产量显著高于 N0 和 N1,H 密度下 N2 和 N3 显著高于 N0。相同施氮水平下各密度的粗脂肪产量无显著差异。平均值显示,N1、N2 和 N3 的粗脂肪产量较 N0 显著提高 44.7%、118.4%和 139.5%。所有处理中 MN3 的粗脂肪产量(0.97 t/hm²)最高,但与 MN2 无显著差异。相同种植密度下 N2 和 N3 处理的粗灰分产量显著高于 N0,N2 与 N3 无显著差异。相同施氮水平下各密度的粗灰分产量无显著差异。平均值显示,N1、N2 和 N3 的粗灰分产量较 N0 提高 40.5%、81.0%和 82.3%,差异显著。所有处理中 HN3 的粗灰分产量(1.60 t/hm²)最高,与 MN2 无显著差异。

L 密度下各施氮处理的 NDF 产量无显著差异,M 密度下 N2 显著高于 N0,H 密度下 N2 和

表 3 不同处理下青贮玉米的营养成分产量

Table 3 Nutrient component yield of silage maize under different treatments						t/hm ²	
种植密度 Planting density	施氮水平 Nitrogen application level	粗蛋白 Crude protein	淀粉 Starch	粗脂肪 Crude fat	粗灰分 Crude ash	DNF	ADF
L	N0	1.35 e	7.11 c	0.36 d	0.64 c	6.37 d	4.37 c
	N1	1.93 cde	8.71 abc	0.50 d	0.90 bc	8.26 bcd	5.79 abc
	N2	2.79 abc	10.65 abc	0.81 ab	1.23 ab	9.43 bcd	6.11 abc
	N3	2.73 abc	10.34 abc	0.83 ab	1.16 ab	8.30 bcd	5.41 bc
M	N0	1.58 de	8.45 bc	0.40 d	0.81 bc	8.04 cd	5.43 bc
	N1	2.42 bcd	9.97 abc	0.61 bcd	1.19 ab	11.07 abc	7.64 ab
	N2	3.38 ab	12.59 a	0.92 a	1.55 a	12.36 ab	8.21 a
	N3	3.46 a	12.12 ab	0.97 a	1.56 a	12.14 abc	7.38 ab
H	N0	1.66 de	8.51 bc	0.39 d	0.91 bc	9.21 bed	6.24 abc
	N1	2.45 bcd	10.23 abc	0.54 cd	1.24 ab	12.08 abc	8.16 a
	N2	3.35 ab	12.03 ab	0.77 abc	1.51 a	13.54 a	8.54 a
	N3	3.58 a	12.01 ab	0.92 a	1.60 a	13.62 a	8.43 a
平均 Average	L	2.20 B	9.20 B	0.63 A	0.98 B	8.09 B	5.42 B
	M	2.71 A	10.78 A	0.72 A	1.28 A	10.90 A	7.16 A
	H	2.76 A	10.70 A	0.65 A	1.32 A	12.11 A	7.84 A
	N0	1.53 C	8.02 C	0.38 C	0.79 C	7.87 B	5.34 B
	N1	2.27 B	9.63 B	0.55 B	1.11 B	10.47 A	7.20 A
	N2	3.17 A	11.76 A	0.83 A	1.43 A	11.77 A	7.62 A
	N3	3.26 A	11.49 A	0.91 A	1.44 A	11.35 A	7.07 A
因素显著性	PD	**	*	ns	**	**	**
Significance of	NA	**	**	**	**	**	**
ANOVA	PD×NA	ns	ns	ns	ns	ns	ns

N3 显著高于 N0。平均值显示,N1、N2 和 N3 的 NDF 产量较 N0 显著提高 33.0%、49.6% 和 44.2%,而 3 个施氮处理间差异不显著。N2 和 N3 水平下,H 密度的 NDF 产量显著高于 L,与 M 差异不显著。平均值显示,M 和 H 的 NDF 产量较 L 显著提高 34.78%和 49.7%。L 和 H 密度下各施氮处理的 ADF 产量无显著差异,M 密度下 N2 显著高于 N0。N3 水平下,H 密度的 ADF 产量显著大于 L。平均值显示,N1、N2 和 N3 的 ADF 产量较 N0 显著提高 34.8%、42.7% 和 32.4%;M 和 H 的 ADF 产量较 L 显著提高 32.1%和 44.6%,M 与 H 差异不显著。

2.5 不同处理对青贮玉米水分利用的影响

如表 4 所示,种植密度、施氮及两者的交互作用对播前土壤贮水量影响不显著,种植密度和交互作用对收获期土壤贮水量无显著影响,施氮对其影响极显著($P<0.01$)。种植密度和交互作用

对田间耗水量影响不显著,施氮对其影响显著,种植密度和施氮对水分利用效率(WUE)影响极显著($P<0.01$),交互作用对其无显著影响。所有处理的播前和收获期土壤贮水量及田间耗水量均无显著差异。平均值显示,N1、N2 和 N3 处理的收获期土壤贮水量较 N0 降低 4.9%($P>0.05$)、12.5%($P<0.05$)和 17.6%($P<0.05$),田间耗水量较 N0 显著提高 5.1%、11.4%和 13.6%;各种种植密度的播前和收获期土壤贮水量及田间耗水量无显著差异。相同种植密度下 N2 和 N3 处理的 WUE 显著高于 N0,N2 与 N3 无显著差异。N2 和 N3 水平下 M 和 H 的 WUE 显著高于 L,M 与 H 无显著差异。平均值显示,N1、N2 和 N3 处理的 WUE 较 N0 显著提高 23.1%、40.0%和 36.0%;M 和 H 密度的 WUE 较 L 显著提高 24.7%和 25.8%。所有处理中 MN2 的 WUE [84.61 kg/(hm²·mm)]最高。

表 4 不同处理下青贮玉米的水分利用状况

Table 4 Water use status of silage maize under different treatments

种植密度 Planting density	施氮水平 Nitrogen application level	播前贮水量/mm Water storage before sowing	收获期贮水量/mm Water storage at harvesting	田间耗水量/mm Field water consumption	水分利用效率/% Water use efficiency
L	N0	333.39 a	267.69 a	368.20 a	47.96 d
	N1	337.86 a	256.91 a	383.45 a	59.05 cd
	N2	343.38 a	234.44 a	411.44 a	67.29 bc
	N3	335.46 a	229.24 a	408.72 a	64.87 bc
M	N0	334.62 a	272.65 a	364.47 a	59.02 cd
	N1	335.44 a	255.41 a	382.52 a	73.82 ab
	N2	340.44 a	235.06 a	407.88 a	84.61 a
	N3	333.65 a	214.45 a	421.70 a	80.86 a
H	N0	340.18 a	262.67 a	380.01 a	60.97 c
	N1	354.76 a	250.94 a	406.32 a	73.86 ab
	N2	350.78 a	232.75 a	420.53 a	83.25 a
	N3	349.77 a	218.16 a	434.11 a	82.74 a
平均 Average	L	337.52 A	247.07 A	392.95 A	59.79 B
	M	336.04 A	244.39 A	394.14 A	74.58 A
	H	348.87 A	241.13 A	410.24 A	75.21 A
	N0	336.07 A	267.67 A	370.90 B	55.98 C
	N1	342.69 A	254.42 AB	390.76 AB	68.91 B
	N2	344.87 A	234.08 BC	413.28 A	78.39 A
	N3	339.63 A	220.61 C	421.51 A	76.16 A
因素显著性	PD	ns	ns	ns	* *
Significance	NA	ns	* *	*	* *
of ANOVA	PD×NA	ns	ns	ns	ns

3 讨论

3.1 种植密度与施氮对青贮玉米生长和产量的影响

有研究表明,在玉米生育前期各密度的叶面积指数差异较小,而在生育后期差异增大^[32-33]。本试验结果与上述相似,6 叶期各密度的叶面积指数无显著差异,而生育后期中、高密度的 LAI 显著高于低密度。贾倩民^[34]认为,在吐丝期和灌浆期,低密度下玉米叶片的相对叶绿素含量显著大于高密度。王广福^[35]研究也发现,玉米叶片的相对叶绿素含量与种植密度呈负相关。本研究结果与以上相似,在灌浆期和收获期,低密度下青贮玉米的相对叶绿素含量显著大于高密度。本试验还发现,6 叶期青贮玉米的株高随种植密度的增大而增加,而生育中后期各种种植密度的株高无显著差异,但高密度种植显著降低茎粗。大量研究表明,施氮不足或过量会降低玉米的叶面积指数和地上干物质量^[19-21]。杜斌等^[36]报道,当施氮量低于 240 kg/hm² 时,玉米的地上干物质量与施氮量呈正相关关系,继续增施氮肥后其干物质积累增加不显著。本试验中,在生长后期 240 kg/hm² 和 360 kg/hm² 施氮处理较不施氮显著提高青贮玉米的株高、茎粗、相对叶绿素含量、叶面积指数和鲜干草产量,但施氮 360 kg/hm² 与 240 kg/hm² 无显著差异。

3.2 种植密度与施氮对青贮玉米营养品质的影响

青贮玉米的粗蛋白质和粗脂肪含量随种植密度的增大而减小,酸性和中性洗涤纤维含量随种植密度的增大而增加^[37-38]。本试验中,粗蛋白、淀粉和粗脂肪含量随种植密度的增加而降低,但酸性和中性洗涤纤维含量随密度的增加而升高,这与王晓娟等^[37]的研究结果一致。Dado 和 Allen^[39]指出,适当降低饲料的中性洗涤纤维含量可以提高奶牛的干物质采食量。笔者研究发现,玉米的中性洗涤纤维含量随种植密度的增加而提高,干物质采食量和相对饲用价值随密度的增加而降低。Oikeh 等^[40]发现,在一定施氮量范围内,玉米籽粒的粗蛋白含量随施氮量的增加而增加。刘恩科等^[41]研究表明,施氮可以提高玉米籽粒的蛋白质、总氨基酸、粗脂肪和粗灰分的含量,但是淀粉含量与施氮量呈负相关。王爽等^[22]和李建奇等^[42]认为,粗蛋白含量与施氮量呈正相关,而淀粉、中性和酸性洗涤纤维含量随施氮量的

增加逐渐降低。本试验结果与上述相似,施氮较不施氮显著提高了玉米的粗蛋白、粗脂肪和粗灰分含量,显著降低淀粉含量。

3.3 种植密度与施氮对青贮玉米水分利用的影响

有研究表明,无论平水年还是丰水年,增加种植密度显著增大生长前期的田间耗水量^[42]。本试验中种植密度对土壤贮水量和田间耗水量无显著影响,可能是研究区潜在蒸发量较高,低密度下叶面积指数较低,到达地表的太阳辐射较多,土壤水分主要以蒸发为主,高密度种植下虽然植株蒸腾耗水较多,但群体结构紧凑,可形成一定的“遮阴效益”^[43],减少了土壤蒸发,从而使田间耗水量较低密度无显著差异。有研究表明,玉米产量和 WUE 随种植密度的增加而增高^[44]。本研究结果与以上相似,中、高密度较低密度显著提高玉米的干草产量,但并未显著增加田间耗水量,因此提高了 WUE。Li 等^[45]研究发现,在相同的种植模式下,当施氮量增大至 200 kg/hm²,土壤贮水量显著提高,当施氮达 300 kg/hm² 时,土壤贮水量和蒸散速率显著降低。本研究发现,中、高施氮处理较不施氮显著降低收获期土壤贮水量,显著提高田间耗水量和 WUE。翟丙年和李生秀^[46]认为,夏玉米的 WUE 与施氮时期相关,苗期和拔节期施氮对其影响较大。不同施氮处理下玉米的 WUE 存在显著差异,这也可能与施肥时期有关。因此,需进一步研究施氮水平和时期对青贮玉米水分利用的影响及其调控机制。

4 结论

增大种植密度和提高施氮量主要在生育后期促进玉米的生长和干物质积累,实现对青贮玉米群体指标的良好促进。合理的种植密度和施氮量(MN2)显著提高青贮玉米的粗蛋白产量和鲜干草产量,降低酸性和中性洗涤纤维含量,提高相对饲用价值,改善青贮玉米的营养品质,同时提高水分利用效率。因此,82 500 株/hm² 的种植密度结合 240 kg/hm² 的施氮量是一种适宜中国河西灌区青贮玉米生产的栽培措施。

参考文献 Reference:

- [1] 张雪婷,王新永,杨文雄,等.河西绿洲灌区节水抗旱型玉米品种的评价方法探讨[J].草业学报,2020,29(2):134-148.
ZHANG X T, WANG X Y, YANG W X, *et al.* Evaluation

- of water-saving and drought-resistant maize varieties in the Hexi oasis irrigation corridor[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(2): 134-148.
- [2] ZHANG K, SU Y Z, YANG R. Biomass and nutrient allocation strategies in a desert ecosystem in the Hexi Corridor, northwest China[J]. *Journal of Plant Research*, 2017, 130(4): 699-708.
- [3] 李 莉, 刘佳莉, 王军德, 等. 甘肃省河西内陆区节水灌溉技术经济可行性评价[J]. *水利规划与设计*, 2019(1): 9-11, 24.
- LI L, LIU J L, WANG J D, *et al.* Technical and economic feasibility evaluation of water-saving irrigation in Hexi inland area of Gansu province[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2019(1): 9-11, 24.
- [4] 潘艳花, 马忠明, 吕晓东, 等. 河西绿洲灌区不同耕作方式对春小麦土壤水分和产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2012, 21(11): 53-59.
- PAN Y H, MA ZH M, LÜ X D, *et al.* Effects of different tillage on soil water and yield of spring wheat in oasis irrigation areas[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2012, 21(11): 53-59.
- [5] 蔺宝军, 张 芮, 高彦婷, 等. 西北地区高效节水灌溉技术发展现状及对策[J]. *水利规划与设计*, 2019(3): 29-33.
- LIN B J, ZHANG R, GAO Y T, *et al.* Analysis on the development status and countermeasures of high-efficiency water-saving Irrigation technology in northwest China[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2019(3): 29-33.
- [6] 侯扶江, 李 广. 河西地区生态景观的演变[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(6): 53-57.
- HOU F J, LI G. Change of ecological landscape in hexi region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(6): 53-57.
- [7] BAO C, FANG C L. Water resources constraint force on urbanization in water deficient regions: a case study of the Hexi corridor, arid area of NW China[J]. *Ecological Economics*, 2007, 62(3): 508-517.
- [8] 李正春, 杨永林, 孟季蒙, 等. 青贮玉米的种植、利用及经济效益[J]. *草业科学*, 2006, 23(10): 53-56.
- LI ZH CH, YANG Y L, MENG J M, *et al.* Planting utilization and economic benefits of silage maize[J]. *Pratacultural Science*, 2006, 23(10): 53-56.
- [9] HALLAUER A R. Specialty Corn [M]. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001: 347-380.
- [10] 何俊欧. 不同密度与施氮量对湖北省春玉米产量形成及氮素利用的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- HE J O. Effects of different density and nitrogen application on yield formation and nitrogen utilization of spring maize in Hubei province[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [11] 窦超银, 于秀琴, 于景春. 控制灌溉处理下种植密度对玉米‘中地 77’生长和耗水的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(2): 141-145.
- DOU CH Y, YU X Q, YU J CH. Effects of planting density on plant growth and water consumption of ‘Zhongdi 77’ maize under controlled irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(2): 141-145.
- [12] 董 飞, 闫秋艳, 李 峰, 等. 宽垄沟播种植模式对夏玉米生长发育及水分利用率的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 266-271.
- DONG F, YAN Q Y, LI F, *et al.* Effects of wide ridge and furrow planting on growth and water use efficiency of summer maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 266-271.
- [13] 屈绳娟. 施氮量与种植密度对青贮玉米产量和品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- QU SH J. Effect of nitrogen rate and planting density on forage yield and quality in Maize[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [14] 华鹤良, 卞云龙, 李国生, 等. 密度和施氮量对青贮玉米产量与品质的影响[J]. *上海农业学报*, 2014, 30(4): 81-84.
- HUA H L, BIAN Y L, LI G SH, *et al.* Effects of planting density and nitrogen fertilizer rate on biological yield and quality of silage maize[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2014, 30(4): 81-84.
- [15] 胡文河, 宋红凯, 吴春胜, 等. 密度对青贮玉米产量和品质的影响[J]. *玉米科学*, 2008, 16(6): 100-102, 107.
- HU W H, SONG H K, WU CH SH, *et al.* Effect of density on yield and quality of silage maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(6): 100-102, 107.
- [16] 胡春花, 张吉贞, 孟卫东, 等. 不同栽培措施对青贮玉米产量和营养品质的影响[J]. *热带作物学报*, 2015, 36(5): 847-853.
- HU CH H, ZHANG J ZH, MENG W D, *et al.* Effects of different cultivation measures on silage maize yield and nutrition quality[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2015, 36(5): 847-853.
- [17] MOOSAVI S G, SEGHA TOLESLAMI M J, MOAZENI A. Effect of planting date and plant density on morphological traits, LAI and forage maize (Sc. 370) yield in second cultivation[J]. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 2012, 3(1): 57-63.
- [18] JIA Q M, XU R R, CHANG S H, *et al.* Planting practices with nutrient strategies to improve productivity of rain-fed corn and resource use efficiency in semi-arid regions[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 228: 105879.
- [19] CHEN K, KUMUDINI S V, TOLLENAAR M, *et al.* Plant biomass and nitrogen partitioning changes between silking and maturity in newer versus older maize hybrids[J]. *Field Crops Research*, 2015, 183: 315-328.
- [20] 吕 鹏, 张吉旺, 刘 伟, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 852-860.
- LÜ P, ZHANG J W, LIU W, *et al.* Effects of nitrogen application rate on yield and nitrogen absorption and utiliza-

- tion of super high yield summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(4): 852-860.
- [21] JU X T, XING G X, CHEN X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9).
- [22] 王 爽, 章建新, 王俊铃, 等. 不同施氮量对饲用玉米产量和品质的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2007(1): 17-20.
WANG SH, ZHANG J X, WANG J L, *et al.* Effects of different nitrogen on yield and quality of forage maize[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2007(1): 17-20.
- [23] 安道渊, 黄必志. 栽培技术措施对青贮玉米生物产量和品质的影响[J]. 云南农业大学学报, 2007(4): 514-518.
AN D Y, HUANG B ZH. The impact of cultivation technology on biological yield and quality of silage maize[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2007(4): 514-518.
- [24] 杨思琼, 黄建国, 何腾兵, 等. 氮肥用量对普通玉米产量和营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 509-513.
YANG E Q, HUANG J G, HE T B, *et al.* Effect of nitrogen fertilization on yield and nutritional qualities of food maize [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3): 509-513.
- [25] 赵广才, 常旭虹, 刘利华, 等. 施氮量对不同强筋小麦产量和加工品质的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(5): 723-727.
ZHAO G C, CHANG X H, LIU L H, *et al.* Effect of nitrogen application on grain yield and processing quality in different strong gluten wheats[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(5): 723-727.
- [26] 石多琴. 水氮配施对玉米水分传输和利用的互作效应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
SHI D Q. Coupling effects of irrigation and nitrogen on water transport and utilization in maize planting system [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.
- [27] KI-IN K, CLAY D E, CARLSON C G, *et al.* Do synergistic relationships between nitrogen and water influence the ability of corn to use nitrogen derived from fertilizer and soil [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(3): 173.
- [28] 宋尚有, 王 勇, 樊廷录, 等. 氮素营养对黄土高原旱地玉米产量、品质及水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007(3): 387-392.
SONG SH Y, WANG Y, FAN T L, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer on grain yield, quality and water use efficiency of corn in dryland of Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007(3): 387-392.
- [29] 徐振峰, 刘宏胜, 高玉红, 等. 密肥互作对全膜双垄沟播玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 85-90.
XU ZH F, LIU H SH, GAO Y H, *et al.* Effect of density and fertilizer interaction on yield and water use efficiency of maize cultivated by system of full plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2014, 32(2): 85-90.
- [30] PAOLO D E, RINALDI M. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment[J]. *Field Crops Research*, 2007, 105(3): 202-210.
- [31] 张卫峰, 马 林, 黄高强, 等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3161-3171.
ZHANG W F, MA L, HUANG G Q, *et al.* The development and contribution of nitrogenous fertilizer in China and challenges faced by the country[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15): 3161-3171.
- [32] WU Y, JIA Z K, REN X L, *et al.* Effects of ridge and furrow rainwater harvesting system combined with irrigation on improving water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) in semi-humid area of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 158: 1-9.
- [33] SINHA E, MICHALAK A M, BALAJI V. Eutrophication will increase during the 21st century as a result of precipitation changes[J]. *Science*, 2017, 357: 405-408.
- [34] 贾倩民. 半干旱区集雨补灌与种植密度对玉米生长及光合生理特性的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
JIA Q M. Effects of rain water-harvesting planting with supplemental irrigation and planting densities on the growth and photosynthetic physiology of maize in the semi-arid regions[D]. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.
- [35] 王广福. 播期和密度对不同玉米品种生长发育及产量和品质的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
WANG G F. Effects of sowing date and planting density on maize yield and quality of different maize varieties [D]. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [36] 杜 斌, 郭兴臻, 王延良, 等. 施氮量对玉米干物质重、产量和经济效益的影响[J]. 农业科技通讯, 2015(10): 47-49.
DU B, GUO X ZH, WANG Y L, *et al.* Effects of nitrogen application rate on dry matter weight, yield and economic benefit of maize [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2015(10): 47-49.
- [37] 王晓娟, 何海军, 寇思荣, 等. 种植密度对不同品种青贮玉米生物产量和品质的影响[J]. 草业科学, 2019, 36(1): 169-177.
WANG X J, HE H J, KOU S R, *et al.* Effect of different planting densities on biomass yield and quality for various varieties of silage maize [J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(1): 169-177.
- [38] 底姝霞, 苏东升, 朱 媛. 不同种植密度对青贮玉米产量和营养价值的影响[J]. 中国饲料, 2018(12): 26-30.
DI SH X, SU D SH, ZHU Y. Effects of different planting densities on yield and nutritive value of silage corn [J]. *China Feed*, 2018(12): 26-30.

- [39] DADO R G, ALLEN M S. Intake limitations feeding behavior and rumen function of cows challenged with rumen fill from dietary fiber or inert bulk[J]. *Journal of Dairy Science*, 1995, 78(1): 118.
- [40] OIKEH S O, KLING J G, OKORUWA A E. Nitrogen fertilizer management effects on maize grain quality in the west Africa moist savanna[J]. *Crop Science*, 1998, 38: 1056-1061.
- [41] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期不同施肥制度对玉米产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(5): 711-716.
- LIU E K, ZHAO B Q, HU CH H, *et al.* Effects of long-term fertilization systems on yield and quality of maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(5): 711-716.
- [42] 李建奇, 黄高宝, 牛俊义. 氮磷营养对覆膜春玉米产量与品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(5): 62-67.
- LI J Q, HUANG G B, NIU J Y, *et al.* Effect of nitrogen and phosphorus on yield and quality of spring maize mulched with plastic film[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(5): 62-67.
- [43] LI C J, WEN X X, WAN X J, *et al.* Towards the highly effective use of precipitation by ridge-furrow with plastic film mulching instead of relying on irrigation resources in a dry semi-humid area[J]. *Field Crops Research*, 2016, 188: 62-73.
- [44] 邵立威, 王艳哲, 苗文芳, 等. 品种与密度对华北平原夏玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(3): 182-188.
- SHAO L W, WANG Y ZH, MIAO W F, *et al.* Effect of cultivar and plant density on summer maize grain yield and water use efficiency in North China Plain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(3): 182-188.
- [45] LI Y, WANG H, XU R R, *et al.* Nutrient and planting modes strategies improves water use efficiency, grain-filling and hormonal changes of maize in semi-arid regions of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 223: 105723.
- [46] 翟丙年, 李生秀. 不同水分状况下施氮对夏玉米水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005(4): 473-480.
- ZHAI B N, LI SH X. Effects of nitrogen nutrition on summer maize water use efficiency under different status of soil moisture[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005(4): 473-480.

Effects of Planting Density and Nitrogen Application on Yield, Quality and Water Use Efficiency of Silage Maize in Hexi Irrigation Region

WANG Jia, LI Yang, JIA Qianmin, CHANG Shenghua, Shahzad Ali, ZHANG Cheng, LIU Yongjie and HOU Fujiang

(State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems; Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Engineering Research Center of Grassland Industry, Ministry of Education; College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

Abstract The objective of this experiment is to explore the high-yield and high-efficiency cultivation measures for silage maize in Hexi irrigation region. In this study, three planting densities of 67 500 plant/hm² (L), 82 500 plant/hm² (M), 97 500 plant/hm² (H) and four nitrogen application levels [0 (N0), 120 (N1), 240 (N2), 360 (N3) kg/hm²] were set under each planting density. The experimental results showed that there was no significant difference in plant height, stem diameter, relative chlorophyll content (SPAD), leaf area index (LAI) and aboveground dry matter quality (ADM) under different nitrogen application treatments at 6-leaf stage and 12-leaf stage of maize, but the above indexes under N2 and N3 treatments were significantly higher than those of N0 at M and H densities at grain filling and harvest stages, the fresh and hay yield of N1, N2 and N3 treatments were significantly higher than that of N0 treatment. The SPAD and stem diameter of L were significantly higher than that of H at harvest, while LAI, ADM and fresh hay yield of L were significantly lower than that of M and H treatments. Compared with N0, N2 and N3 treatments significantly increased the content of crude protein, crude fat and crude ash, and significantly reduced the content of starch and acid detergent fiber (ADF), thereby increasing the relative feed value (RFV) and the output of most nutrient component of N2 and N3 treatments were significantly higher than that of N0. With the increase of planting density, the content of crude protein, starch, crude fat and RFV decreased, while the neutral detergent fiber

(NDF) and ADF increased, and the yield of crude protein, starch and crude ash of M and H planting density were significantly higher than that of L. The water use efficiency (*WUE*) of N1, N2 and N3 treatments was significantly higher than that of N0 treatment, the *WUE* of M and H planting density was significantly higher than that of L, and the *WUE* of M-N2 planting model was the highest among all treatments. Therefore, a planting density of 82 500 plant/hm² in combination of 240 kg/hm² nitrogen is a suitable cultivation measure for silage maize production in Hexi irrigation region.

Key words Planting density; Nitrogen application; Silage maize; Crude protein; Water use efficiency

Received 2020-06-02

Returned 2020-08-26

Foundation item Project of Cheung Kong Scholars and Innovation Team Development (No. IRT_17R50); National Natural Science Foundation of China (No. 31901389, No. 31672472); Special Fund for Basic Scientific Research Expenses for Universities under Chinese Central Government of Lanzhou University (No. lzujbky-2019-33); Double-Class Special Project for Guidance, Team Construction and Research Start Up Fund of Lanzhou University (No. 561119204); Project of 973 National Key Basic Research Plan No. (2014CB138706); Important Special Project for Science and Technology of Gansu Province (No. 18ZD2FA009)

First author WANG Jia, female, master student. Research area: agricultural water and fertilizer management. E-mail: jwang19@lzu.edu.cn

Corresponding author JIA Qianmin, male, Ph. D, research fellow. Research area: forage grass cultivation and grazing management. E-mail: guqm@lzu.cn

(责任编辑: 史亚歌 **Responsible editor: SHI Yage**)