

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2023.34004

## 不同生态区高粱籽粒产量和品质对氮肥施用的响应

刘秋霞 董二伟 黄晓磊 王劲松 王媛 焦晓燕\*

山西农业大学资源环境学院, 山西太原 030031

**摘要:** 研究不同生态区高粱产量和品质对氮肥施用的响应, 分析生态区影响高粱产量形成机制, 对高粱产区优化和促进高粱产业发展具有重要意义。本研究以 11 个高粱品种为研究材料, 于 2020 和 2021 年在山西朔州和晋中开展田间试验, 研究 2 个生态区高粱抽穗期和收获期的干物质质量和氮素积累量、籽粒产量和产量构成以及籽粒品质对氮的响应, 分析高粱籽粒产量形成与物质积累的关系。结果表明: 除 2021 年不施氮(即连续 2 年不施氮)处理外, 其他处理朔州试验点高粱产量高于晋中, 施氮和不施氮处理平均增产幅度分别为 8.6%~26.7%和 13.8%。氮肥施用降低千粒重, 但提高了高粱穗粒数, 穗粒数对产量的相对贡献率达 97%; 同一施氮条件下朔州试验点穗粒数显著高于晋中。整体来看 2 个试验点抽穗期干物质和氮素积累量分别高达收获期的 51.93%和 68.86%, 且抽穗期干物质和氮素积累量与籽粒产量均呈显著的一元二次回归关系, 表明提高抽穗期干物质积累对高粱产量形成至关重要; 而不施氮时, 抽穗后干物质质量形成也显著影响籽粒产量。与晋中试验点相比, 朔州试验点抽穗期干物质和氮素积累量分别增加 40.17%~61.47%和 15.72%~47.03%, 而抽穗后干物质和氮素积累量小于晋中试验点, 这说明朔州试验点较高产量的形成与抽穗期干物质和氮素积累量密切相关。此外, 除连续 2 年不施氮处理外, 朔州试验点高粱籽粒淀粉和单宁含量高于晋中试验点, 但蛋白质含量相对较低。昼夜温差不同可能是导致 2 个生态区产量品质差异的重要原因。综上可知, 朔州冷凉区高粱产量显著高于晋中温暖半湿润区, 提高高粱抽穗前干物质和氮素积累量对籽粒产量形成十分关键, 冷凉区较大的昼夜温差有利于抽穗前干物质和氮素积累, 促进籽粒产量提高。

**关键词:** 高粱; 生态区; 产量; 干物质; 氮素积累

## Response of sorghum grain yield and quality to nitrogen application in different ecozones

LIU Qiu-Xia, DONG Er-Wei, HAUNG Xiao-Lei, WANG Jin-Song, WANG Yuan, and JIAO Xiao-Yan\*

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

**Abstract:** Identifying the response of sorghum grain yield and quality to nitrogen application in different ecozones can enhance the understanding of the yield formation process, help improve sorghum productivity, and promote the development of the sorghum industry. This experiment was conducted in Shuozhou and Jinzhong of Shanxi province in 2020 and 2021 in the field. Both no nitrogen and nitrogen fertilizer application were included, with 11 sorghum varieties in each nitrogen application plot. The dry matter and nitrogen accumulation both at heading and harvest stages, grain yield and its components, and grain quality were investigated. The relationships between grain yield and biomass at heading and harvest stages were also studied, respectively. Results showed that the average sorghum grain yield in Shuozhou was greater than that in Jinzhong, except for the no nitrogen treatment in 2021 (i.e. no nitrogen applied for two consecutive years). Compared with the yield in Jinzhong experimental sites, grain yield in Shuozhou increased by 8.6%–26.7% when nitrogen was applied in 2020 and 2021, and 13.8% without nitrogen

本研究由省部共建有机旱作农业重点实验室(筹)项目(202001-8), 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-06-14.5-A20)和山西农业大学科研专项(2020xshf18)资助。

This study was supported by the State Key Laboratory of Sustainable Dryland Agriculture (in preparation) (202001-8), the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-06-14.5-A20), and the Special Research Project of Shanxi Agriculture University (2020xshf18).

\* 通信作者(Corresponding author): 焦晓燕, E-mail: xiaoyan\_jiao@126.com

第一作者联系方式: E-mail: liuqiu Xia333@163.com

Received (收稿日期): 2023-01-05; Accepted (接受日期): 2023-04-17; Published online (网络出版日期): 2023-04-24.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20230423.1752.002.html>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

application in 2020, respectively. Nitrogen application decreased 1000-grain weight but improved significantly grains per particle. Grains per particle exerted great influence on grain yield, and contributed 97% to the yield variation. The grains per particle in Shuozhou was higher than in Jinzhong for the same nitrogen treatment. For both experimental sites, dry matter and nitrogen accumulation at heading stage occupied 51.93% and 68.86% of that at harvest stage, respectively. Substrate accumulation at heading stage had significant quadratic regression relationships with sorghum grain yield. This suggested that it was important to improve dry matter and nitrogen accumulation at heading stage for higher sorghum grain yield. Meanwhile, when nitrogen was withdrawn, the grain yield was more closely correlated with dry matter accumulation after heading stage. Compared with Jinzhong experimental site, the dry matter and nitrogen accumulation at heading stage increased by 40.17%–61.47% and 15.72%–47.03% in Shuozhou, respectively. But the regression relationships between their accumulations, from heading to mature stage, and grain yield of Shuozhou were relative low. The enhanced grain yield in Shuozhou, compared with that in Jinzhong, was closely correlated with the improved accumulations of dry matter and nitrogen at heading stage. The contents of both starch and tannin were also higher in Shuozhou, and protein was lower relative to Jinzhong, except for the treatment of no nitrogen applied for two consecutive years. The large daily temperature difference of Shuozhou might account for its promoted yield and quality. The variation in terms of grain yield and quality between two ecozones was resulted from difference diurnal temperature range. Obviously, sorghum grain yield in high latitude and cold area (Shuozhou) was higher than that in warm sub-humid area (Jinzhong). Promoted dry matter and nitrogen accumulation before heading was crucial to achieve high sorghum yield. The larger temperature difference between day and night in high latitude and cold area was conducive to substrate accumulation before heading and improve grain yield.

**Keywords:** sorghum; ecological zone; yield; dry matter; nitrogen accumulation

高粱是世界第五大粮食作物, 广泛种植于非洲、亚洲、中东、美国中北部及澳大利亚等干旱和半干旱区域<sup>[1]</sup>, 耐瘠、耐旱、耐盐碱<sup>[2-4]</sup>, 具有广泛的生态适应性。我国高粱种植区域广, 主要有北方春播早熟区、北方春播晚熟区、黄淮春夏播区和南方春播区<sup>[5]</sup>。不同高粱品种也具有较强的生态环境适应性, 由于现代杂交高粱品种对光周期不敏感<sup>[6]</sup>, 有些品种既适于春播生态区又适宜于夏播生态区。然而, 由于气候和生态环境条件不同, 种植在不同生态区域的高粱产量和品质可能存在差异。对小麦<sup>[7]</sup>、玉米<sup>[8]</sup>、油菜<sup>[9]</sup>等作物的研究表明, 生态区显著影响其籽粒产量和品质。作物产量形成是物质和养分积累的过程, 外界环境通过影响干物质和养分积累过程影响产量, 但生态环境如何影响高粱干物质和养分积累进而影响产量并不明确。

氮养管理是农田管理的重点之一, 氮素营养也是影响高粱籽粒产量和品质的关键因子<sup>[10-12]</sup>, 合理施用氮肥可以增强根系养分吸收能力<sup>[13]</sup>, 提高光合作用速率、增加光合作用面积<sup>[14-16]</sup>, 调节源库关系、促进籽粒发育<sup>[17]</sup>; 合理的氮肥管理也能弥补由于生态环境或品种差异引起的小麦产量和品质的不稳定性<sup>[7]</sup>; 对冬油菜的研究表明, 提高苗期干物质积累是增产的关键, 合理施用氮肥能提高苗期物质积累比例, 进而增产<sup>[18]</sup>。高粱籽粒产量对氮的响应已有报道<sup>[10-11,19]</sup>, 然而大都关注氮施用对收获产量的影响, 忽略了高粱不同生育期氮素积累与产量的关系研究, 影响籽粒产量形成的关键氮素积累阶段并不明确; 此外, 在满足生长发育条件下不同生态

区影响同一品种产量差异的机制也未见报道。本研究以能够满足山西北部和中中部 2 个生态区的 11 个品种为对象, 研究不同生态区高粱产量和品质对氮肥施用的响应, 探索不同生态区影响高粱产量形成的关键因素, 研究结果拟为挖掘高粱产量和高粱优化产区布局提供理论依据, 通过氮素合理管理及生产区合理布局, 实现高粱优质高产, 促进高粱产健康发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区域概况

2020 和 2021 连续 2 年在山西省朔州朔城区(39°33'N, 112°43'E)和晋中榆次区(37°33'N, 112°40'E)开展田间试验。朔州属于温带寒冷半干旱气候区, 海拔 1000 m, 年平均气温 6.9℃, 无霜期 129 d, 多年平均降水量 402.4 mm; 晋中为温暖半湿润区, 海拔 802 m, 多年年均气温为 9.8℃, 无霜期 160 d, 多年平均降水量 456.8 mm。2020 年和 2021 年 2 个试验点生育期降水量和气温见图 1, 朔州高粱生育期总降水量分别为 349.80 mm 和 256.90 mm, 日照时数分别为 1467.8 h 和 1189.3 h, 10℃有效积温分别为 1449.9℃和 1476.1℃, 生育期累积昼夜温差分别为 2118.5℃和 2079.6℃; 晋中 2 年生育期降水量分别为 449.40 mm 和 332.40 mm, 日照时数分别为 1486.1 h 和 1483.4 h, 10℃有效积温分别为 1723.3℃和 1807.7℃, 生育期累积昼夜温差分别为 2007.7℃和 1977.9℃(图 1)。试验点土壤理化性质见表 1, 朔州试验点基础土壤全氮、有机质、有效磷、速效钾和硝态氮含量均低于晋中试验点。

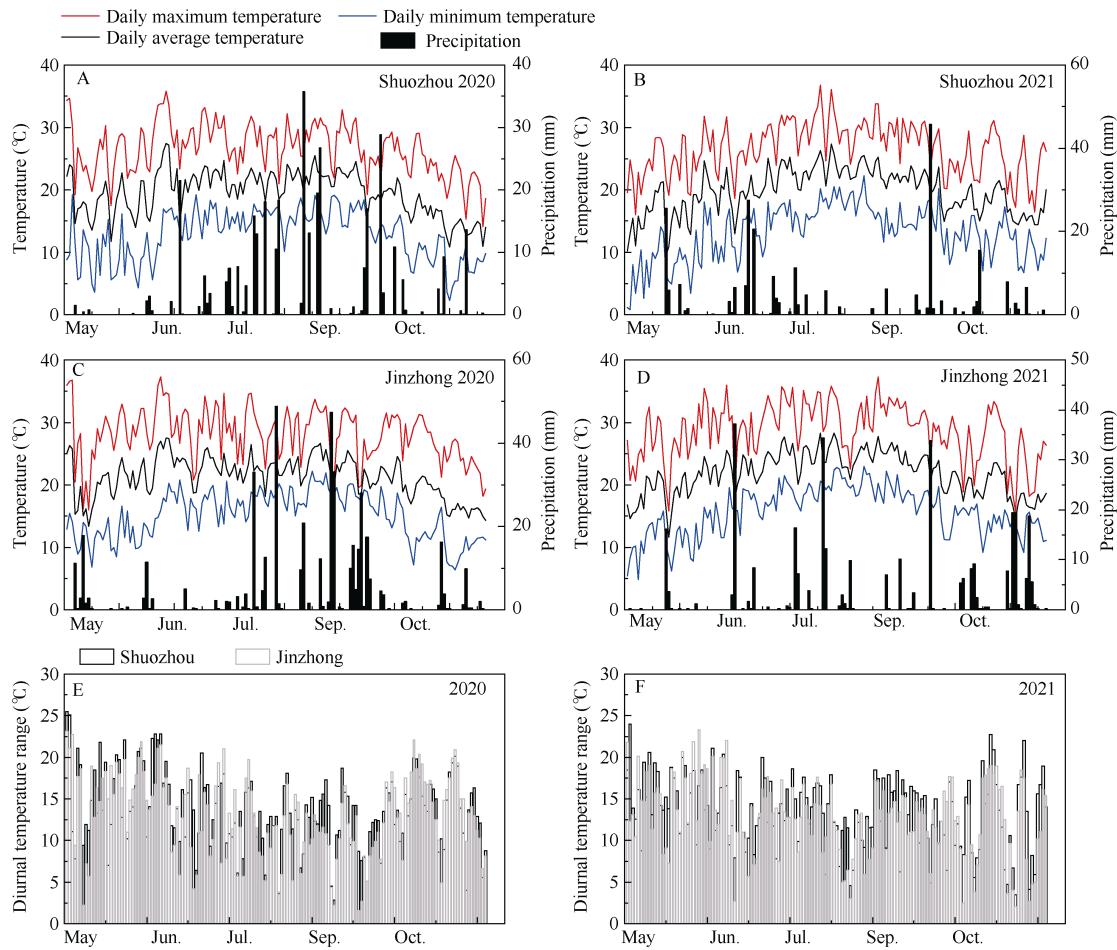


图 1 高粱生育期日降水量、温度和昼夜温差  
**Fig. 1 Daily precipitation, temperature, and diurnal temperature range during planting period in sorghum**  
A~D 分别为朔州和晋中 2020 年和 2021 年生育期降水量、日最高气温、日最低气温和日平均气温; E 和 F 分别为朔州(黑色框)和晋中(浅灰色框)2020 年和 2021 年昼夜温差。  
A~D represent precipitation, daily maximum temperature, daily average temperature, and daily minimum temperature of Shuozhou and Jinzhong in 2020 and 2021, respectively. E and F represent diurnal temperature range of Shuozhou (dark frame) and Jinzhong (light grey frame) in 2020 and 2021, respectively.

表 1 试验点 0~20 cm 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of 0~20 cm at different experimental sites

试验点 Experimental site	土壤 Soil	土壤质地 Soil texture	EC ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	pH	全氮 Total nitrogen ( $\text{g kg}^{-1}$ )	有机质 Soil organic matter ( $\text{g kg}^{-1}$ )	有效磷 Soil available P ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	速效钾 Soil available K ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	0~20 cm 硝态氮 NO <sub>3</sub> -N of 0~20 cm ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	20~40 cm 硝态氮 NO <sub>3</sub> -N of 20~40 cm ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
朔州 Shuozhou	2020 基础土壤	沙壤土 Sandy loam	138.96	8.30	0.53	11.37	6.88	86.79	11.25	12.72
	2020 Basic soil									
	2021 不施氮土壤				0.56	10.20	7.40	71.19	6.30	5.98
	2021 -N soil									
晋中 Jinzhong	2021 施氮土壤				0.68	11.40	7.34	87.88	8.14	8.53
	2021 +N soil									
	2020 基础土壤	粉沙质壤土 Silty sandy loam	203.86	8.59	0.91	17.48	9.38	118.63	17.86	8.08
	2020 Basic soil									
	2021 不施氮土壤				0.98	17.45	9.27	115.04	12.06	7.43
	2021 -N soil									
	2021 施氮土壤				0.97	19.69	9.25	119.88	15.20	10.14
	2021 +N soil									

## 1.2 试验设计

试验采用裂区设计, 主区为氮处理, 不施氮(-N)和施氮  $150 \text{ kg N hm}^{-2}$  (+N) 2 个处理; 副区为高粱品种, 选择全国高粱主产区主推品种、并能在 2 个试验点自然成熟且生育期接近的 11 个高粱品种, 分别为龙杂 22、白杂 11、凤杂 4 号、吉杂 121、吉杂 127、敖杂 1 号、通杂 108、晋早 5564、晋梁 116、晋杂 22 和晋杂 28。试验采取随机区组设计, 3 次重复, 小区面积均为  $30 \text{ m}^2$  ( $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ), 行距  $50 \text{ cm}$ , 各品种适宜密度分别为  $22.5 \times 10^4$ 、 $12 \times 10^4$ 、 $12 \times 10^4$ 、 $12 \times 10^4$ 、 $12 \times 10^4$ 、 $16.5 \times 10^4$ 、 $16.5 \times 10^4$ 、 $16.5 \times 10^4$ 、 $12 \times 10^4$ 、 $12 \times 10^4$  和  $12 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ 。2021 年是在 2020 年各处理的基础上继续开展。

朔州试验地 2 年均于 5 月 8 日播种, 6 月 1 日定苗, 根据每个品种成熟情况在 9 月 22 日至 10 月 16 日收获; 晋中试验地 2020 年和 2021 年分别于 5 月 1 日和 5 月 5 日播种, 6 月 1 日定苗, 根据每个品种成熟情况于 9 月 8 日至 29 日间收获。播种前均浇水  $900 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$ , 穗花期补水  $900 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$ 。所有处理施  $\text{P}_2\text{O}_5$   $75 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $\text{K}_2\text{O}$   $30 \text{ kg hm}^{-2}$ , 氮为释放期 90 d 的缓释尿素, 磷和钾分别以过磷酸钙和硫酸钾的形式供给, 均在播前一次施入。

## 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 植株样品采集与测定** 在高粱抽穗期和成熟期, 每个小区取代表性 3 株植株, 成熟期将植物分为茎秆和穗部, 在  $105^\circ\text{C}$  下杀青 30 min, 然后在  $65^\circ\text{C}$  下烘干至恒重, 测定各部位烘干重。将烘干植株样品粉碎过筛, 测定植株氮含量。植株全氮用浓  $\text{H}_2\text{SO}_4$  消煮后凯氏定氮仪测定<sup>[20]</sup>, 氮素积累量为各部位干物质质量与氮素含量的乘积之和。

**1.3.2 产量及产量构成** 成熟时人工收获, 去除边行 2 行, 每小区单打单收计产; 选取具有代表性的 10 穗风干后测定千粒重、穗粒重, 根据千粒重和穗粒重计算穗粒数; 收获指数=籽粒产量/地上部总生物量。

**1.3.3 籽粒品质** 将烘干籽粒粉碎过  $0.178 \text{ mm}$  筛后, 采用 Megazyme International Ireland Ltd. (Bray Co., 爱尔兰) 的试剂盒测定淀粉含量<sup>[21]</sup>; 用籽粒氮含量乘以 6.25 折算蛋白质含量; 籽粒单宁含量用 75% 二甲基甲酰胺溶液浸提, 紫外可见分光光度计比色法测定<sup>[22]</sup>。

## 1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 软件进行试验数据处理,

SPSS 18.0 软件进行数据的方差分析, 采用 Origin 8.0 软件进行作图。采用 R 语言 relaimpo 包分析计算各产量因子对产量的相对贡献率。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态区和氮肥对高粱产量及产量构成的影响

施氮显著提高高粱籽粒产量, 且施氮条件下朔州 2 年产量均高于晋中, 但连续 2 年不施氮时, 朔州产量大幅降低, 显著低于晋中不施氮处理(图 2-A, F)。施氮时, 与晋中相比 2020 年和 2021 年朔州分别平均增产 26.7% 和 8.6%, 2021 年不施氮处理平均增产 13.8%。不同施氮处理和生态区高粱收获指数变幅为 0.4~0.6, 2 个试验点整体来看不施氮和施氮平均收获指数分别为 0.51 和 0.53; 2020 年朔州收获指数高于晋中, 但 2021 年施氮时 2 个试验点没有差异(图 2-B)。

一定密度条件下, 高粱籽粒产量由千粒重和穗粒数构成, 不施氮处理高粱籽粒千粒重高于施氮处理(图 2-C), 不同生态区对千粒重没有影响; 穗粒数显著受氮和生态区的影响, 氮肥施用显著提高了高粱穗粒数, 且除 2021 年不施氮处理外, 其余处理均表现为朔州试验点穗粒数高于晋中试验点, 其变化规律与产量相似(图 2-C, D 和表 2)。通过分析产量构成因子对产量的贡献发现, 穗粒数对高粱产量变异贡献率为 97% (图 2-E), 可见, 穗粒数是决定生态区和氮影响高粱籽粒产量的关键构成因子。

### 2.2 生态区和氮肥对高粱生物量和氮素积累量的影响

高粱干物质和氮素积累量受氮肥施用和生态区的影响, 施氮显著提高了抽穗期和收获期干物质和氮素积累量; 综合分析 2 个试验点发现, 与不施氮处理相比, 施氮处理干物质质量和氮素积累量增幅分别为 19.18%~28.81% 和 41.01%~116.36%。生态区影响不同生育阶段干物质积累量和氮素积累量(图 3-A~D 和表 2), 除连续 2 年不施氮处理外, 朔州抽穗期干物质和氮素积累量显著高于晋中, 干物质质量增幅为 40.17%~61.47%, 氮素积累量增幅为 15.72%~47.03%; 成熟收获时 2 个试验点的干物质和氮素积累量差异缩小, 与晋中点比较朔州干物质质量增幅仅为 7.25%~22.16%, 氮素积累量增幅为 -5.29%~1.08% (图 4-A~D)。

整体来看, 抽穗期干物质和氮素积累量分别占收获期的 51.93% 和 68.86%, 但生态区和氮素施用显著影响这个比值, 朔州施氮和不施氮处理干物质积

累量占收获期的 57.0%和 61.12%，晋中试验点这个比值分别为 43.92%和 45.69%；朔州施氮和不施氮处理氮素积累量占收获期的 83.47%和 66.42%，晋中试验点这个比值分别为 63.44%和 62.11%，朔州抽穗前的干物质和氮素积累比例高于晋中。

### 2.3 高粱生物量和氮素积累量与籽粒产量的关系

通过分析抽穗期及抽穗后(即抽穗至收获期)干物质积累量与产量的关系发现，各阶段干物质质量与

产量均呈一元二次曲线关系(图 5-A, B)。氮影响抽穗前和抽穗后干物质质量与产量的关系，回归分析结果表明，施氮条件下抽穗期干物质质量与产量更密切( $R^2=0.56$ ,  $P<0.01$ ) (图 5-A)，而不施氮时抽穗后干物质更能解释产量变异(图 5-B)。不同施氮处理下抽穗期氮素积累量与产量呈显著的一元二次回归关系(图 5-C)，而抽穗后氮素积累量与产量没有明显的回归关系(图 5-D)。

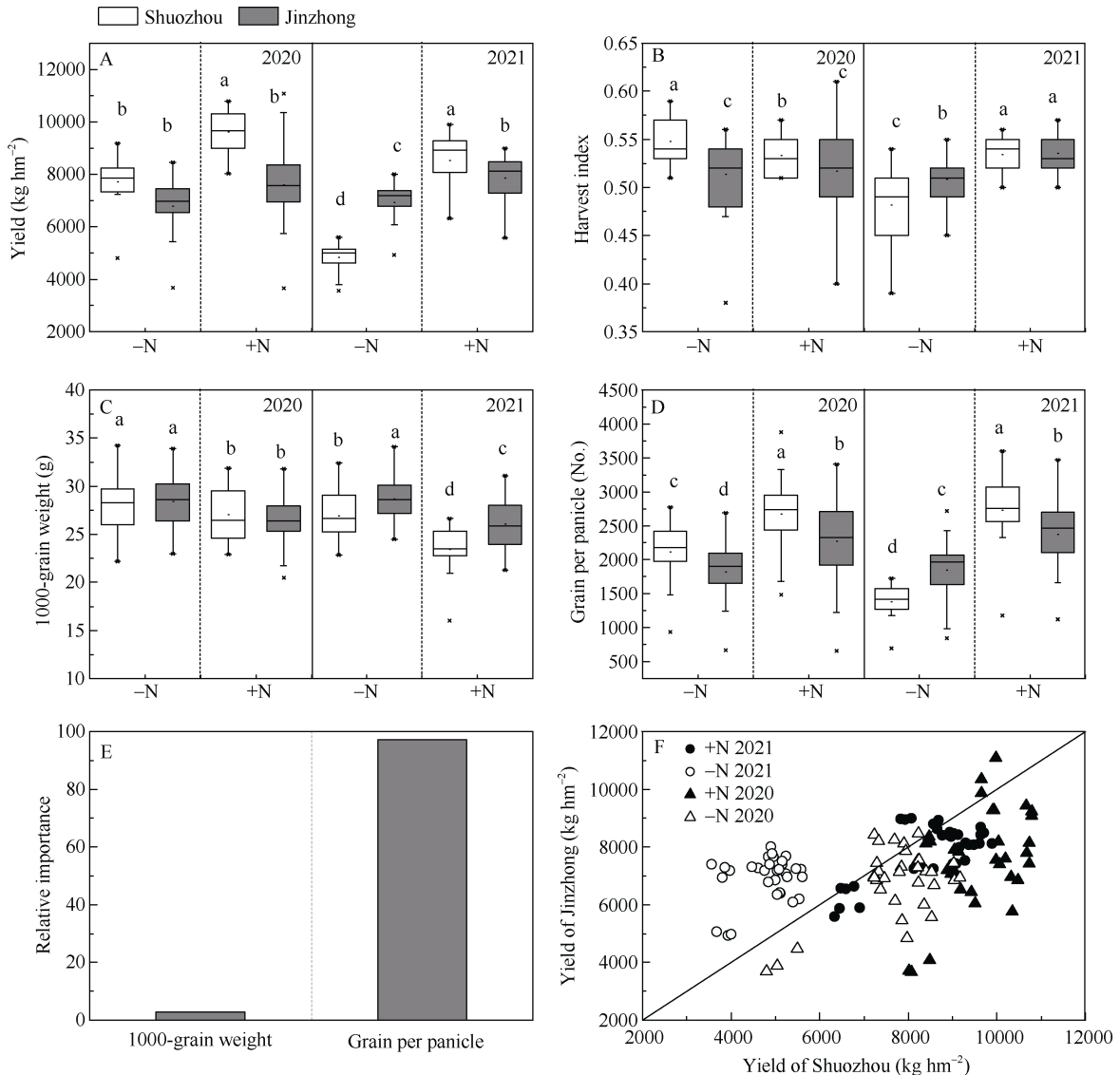


图 2 生态区和氮对高粱产量、收获指数及产量构成的影响

Fig. 2 Effects of different ecozones and nitrogen fertilizer application on grain yield, harvest index, and yield components

A~D 分别为各处理产量、收获指数、千粒重和穗粒数；E 为高粱产量构成因子对籽粒产量的相对贡献；F 为朔州与晋中产量对比图。不同小写字母表示同一年份各试验点和处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

A~D represent yield, harvest index, 1000-grain weight, and grain per panicle of different treatments, respectively. E: the relative importance of yield components to the grain yield. F: yield comparison of Shuozhou and Jinzhong. Different lowercase letters represent significant difference at  $P < 0.05$  at different experimental sites of different treatments in the same year.

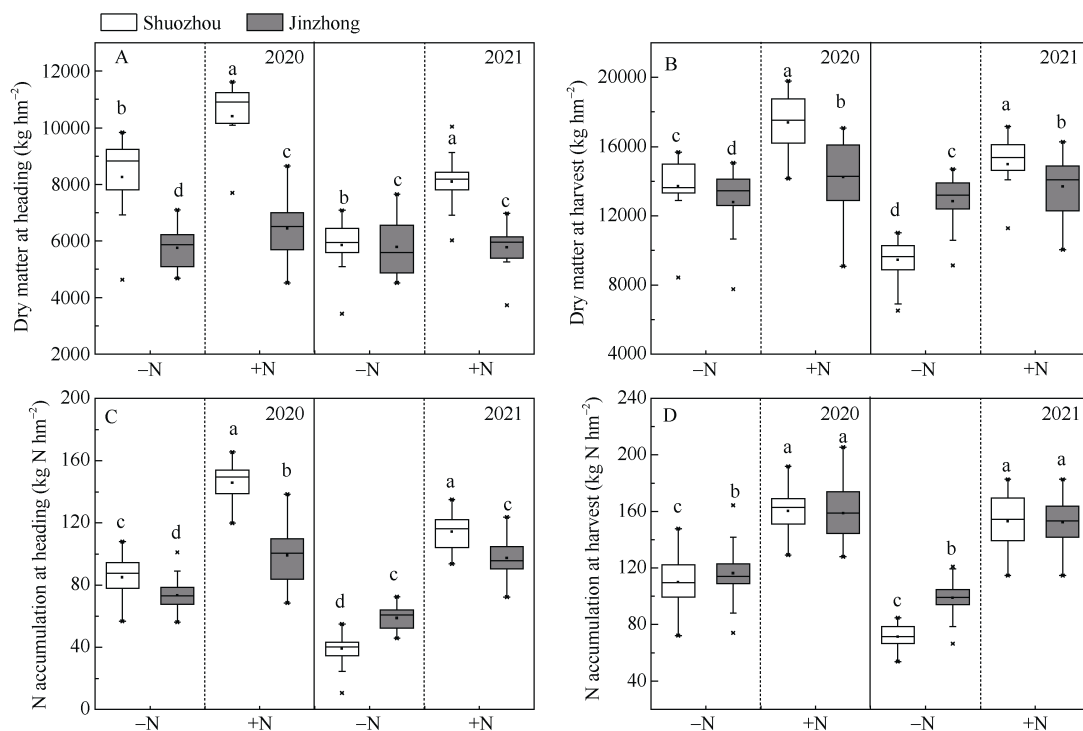


图 3 不同生态区和氮肥施用对高粱抽穗期和收获期干物质及氮素积累量的影响

**Fig. 3** Effects of different ecozones and nitrogen fertilizer application on sorghum dry matter accumulation and N accumulation at heading and harvest stages

不同小写字母表示同一年份各试验点和处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Different lowercase letters represent significant difference at  $P < 0.05$  at different experimental sites of different treatments in the same year.

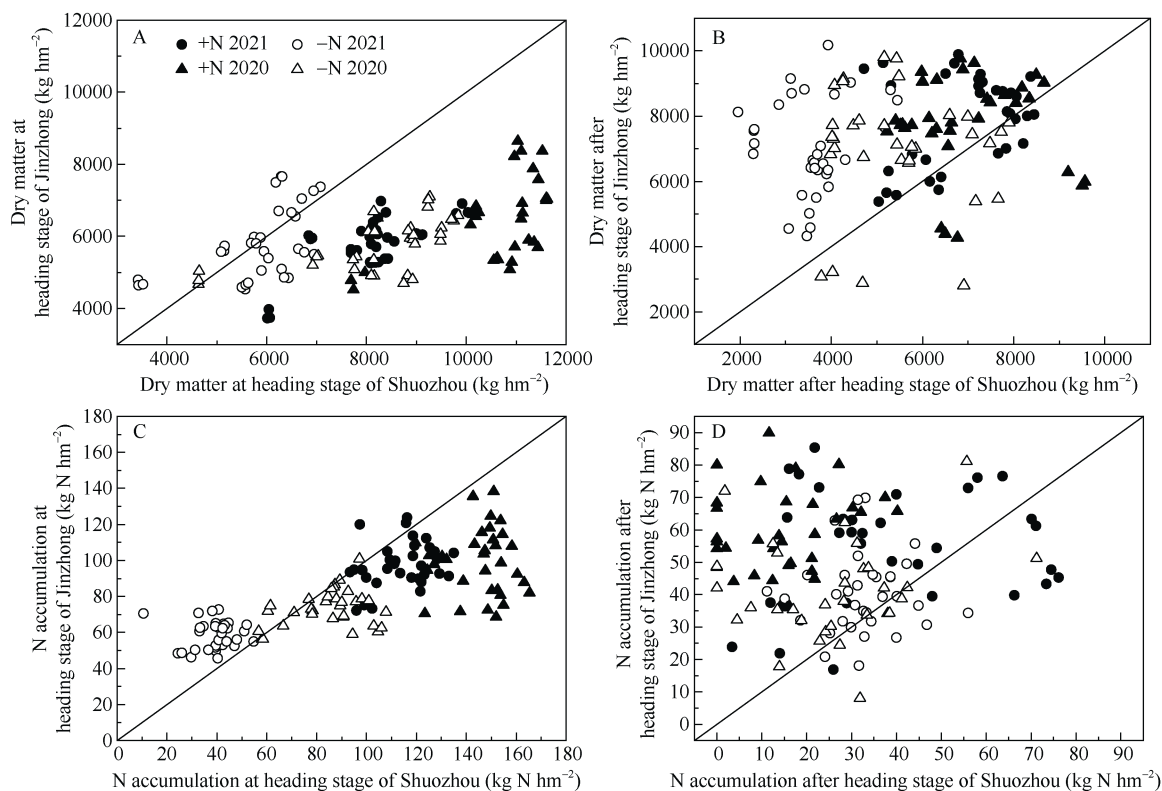


图 4 朔州和晋中抽穗前后干物质及氮素积累量比较

**Fig. 4** Comparison of sorghum dry matter accumulation and N accumulation before and after heading stage between Shuozhou and Jinzhong

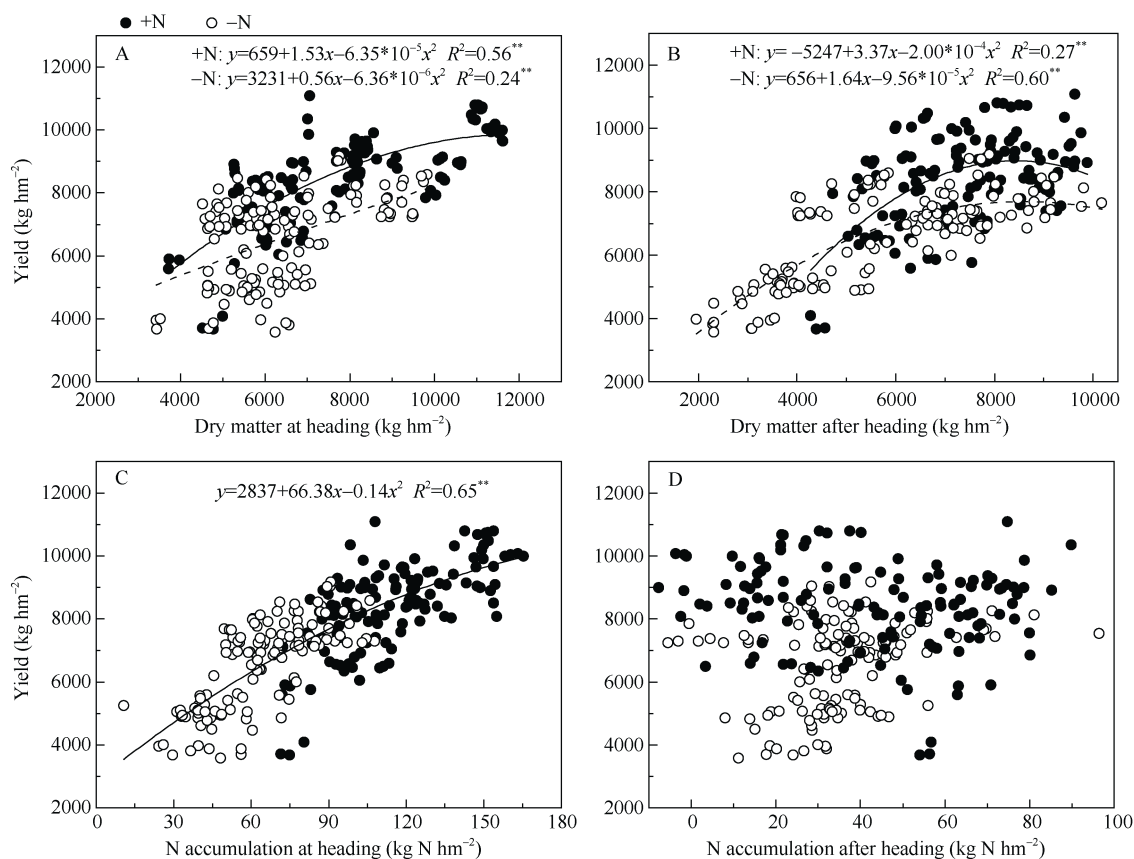


图 5 高粱抽穗期及抽穗后干物质和氮素积累量与产量的关系

Fig. 5 Relationships between the dry matter and N accumulation and sorghum grain yield before and after heading stage

## 2.4 生态区和氮肥对高粱籽粒品质的影响

氮肥施用和生态区也影响高粱籽粒品质, 其中生态区显著影响籽粒蛋白质含量和单宁含量(表 2)。除连续 2 年不施氮处理外, 朔州高粱籽粒蛋白质含量均低于晋中, 而淀粉含量高于晋中; 不同生态区单宁含量存在显著差异, 朔州各处理单宁含量均高于晋中。氮肥施用显著提高了籽粒蛋白质含量, 降低淀粉含量, 对单宁含量没有显著影响(图 6)。

## 3 讨论

合理施氮不仅对高粱高产十分重要, 也有利于维持高粱稳产、避免产量大幅的变化(如朔州不施氮处理第 2 年产量大幅降低)。Macholdt 等<sup>[23]</sup>通过长期定位试验表明, 与缺氮、缺磷、缺钾处理相比, 合理的养分管理作物产量稳定性最高; 在全球气候变化背景下, 科学合理的养分管理对保证作物高产稳产具有重要的意义。在一定密度条件下高粱籽粒的干

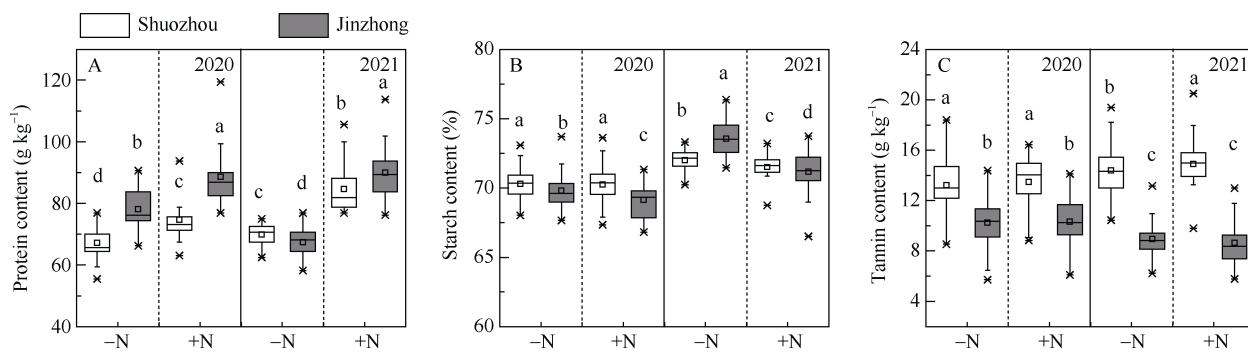


图 6 不同生态区和氮肥施用对高粱籽粒蛋白质、淀粉和单宁含量的影响

Fig. 6 Effects of different ecozones and nitrogen fertilizer application on sorghum grain content of starch, protein, and tannin

不同小写字母表示同一年份各试验点和处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

Different lowercase letters represent significant difference at  $P < 0.05$  at different experimental sites of different treatments in the same year.

表 2 产量、产量构成、干物质和氮素积累及高粱品质方差分析

Table 2 ANOVA analysis of yield, yield components, dry matter accumulation, N accumulation, and grain quality																		
变异来源 Source of variation	产量 Yield	千粒重 1000-grain weight	穗粒数 Grain per panicle	抽穗期		抽穗后		收获期		抽穗期氮素		抽穗后氮素		收获期氮素		淀粉含量 Starch content	蛋白质含量 Protein content	单宁含量 Tannin content
				干物质质量 Dry matter at heading	干物质质量 Dry matter at heading	干物质质量 Dry matter after heading stage	干物质质量 Dry matter at harvest	生物量 Dry matter at harvest	N accumulation at heading	N accumulation after heading	N accumulation at harvest							
生态区 Ecological zone (E)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	**	**
氮 Nitrogen (N)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns
年际 Year (Y)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	ns
品种 Variety (V)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
生态区×氮 E×N	**	ns	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*
生态区×年际 E×Y	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
生态区×品种 E×V	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
氮×年际 N×Y	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns
氮×品种 N×V	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
年际×品种 Y×V	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
生态区×氮×年际 E×N×Y	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns
生态区×氮×品种 E×N×V	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**	*	*
生态区×年际×品种 E×Y×V	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
氮×年际×品种 N×Y×V	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns
生态区×氮×年际×品种 E×N×Y×V	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*

ns 表示差异不显著, \*表示 0.05 概率水平差异显著, \*\*表示 0.01 概率水平差异显著。

ns means no significant difference; \* means significant difference at the 0.05 probability level; \*\* means significant difference at the 0.01 probability level.



粒重和穗粒数决定产量, 籽粒产量变化主要受穗粒数的影响, 穗粒数对产量的贡献达 97%。本研究发现, 施氮和生态区影响高粱的穗粒数。Gerik 等<sup>[5]</sup>研究也表明单株籽粒数对高粱产量贡献达 70%, 因此, 通过养分管理和栽培, 提高穗粒数对产量的提升至关重要。

小麦产量与花后干物质积累密切相关<sup>[24]</sup>, 与低产玉米相比, 高产玉米具有较高的花后干物质和氮素积累<sup>[25]</sup>, 加强水稻后期的氮肥供应也能促进籽粒灌浆而提高收获指数<sup>[26]</sup>; 故提高小麦、玉米、水稻等作物花后干物质积累是提高产量的关键。然而, 夏季旱地作物玉米的花期干物质积累占收获期干物质质量比例不足 50%<sup>[25]</sup>, 而高粱抽穗期干物质积累比例超过 50%, 因此高粱物质积累关键期可能与小麦、玉米和水稻不同。分析抽穗前和抽穗后的干物质积累量与产量关系发现, 高粱籽粒产量与抽穗期氮素积累量和干物质积累量密切相关; 但养分供应不足时, 籽粒产量与抽穗后干物质积累量亦呈显著的一元二次回归关系(图 5-A); 当后期养分供应不足时, 库活力降低<sup>[27-28]</sup>, 物质转运受到影响<sup>[29]</sup>, 不利于产量形成, 因此, 在贫瘠土壤上, 后期的干物质积累对保证高粱产量十分重要, 但在正常农田管理中应尽量保障高粱前期的氮素供应。高粱干物质最大积累速度在抽穗前 14 d<sup>[30]</sup>, 也就是拔节至抽穗阶段, 该阶段干物质积累和氮素吸收速率快, 是高粱物质形成的重要阶段<sup>[31]</sup>。穗粒数是决定产量的关键因子, 穗分化和穗形成均在抽穗期前完成。为此提高抽穗前的干物质和氮素积累量更有利于保障高粱产量。本研究中 2 年连续不施氮朔州抽穗期干物质和氮积累量低于晋中, 这是由于朔州土壤肥力较低和土壤质地较轻(表 1), 连续 2 年不施氮导致氮素营养供应不足影响了高粱正常生产。

本研究选取的 11 个高粱品种在 2 个生态区均有较好的适应性。除连续 2 年不施氮处理外, 朔州高粱籽粒产量均高于晋中, 且 11 个品种中 8 个品种均符合这一规律(图 2-F)。光照、温度和降雨是影响不同生态区作物产量的主要气象因子, 光照条件较好的辽西地区玉米容易获得高产<sup>[8]</sup>, 日照时数和日温差也明显影响油菜单株果数和分枝高度<sup>[9]</sup>, 生育期内气象因子均能影响高粱籽粒产量<sup>[32]</sup>, 生育期内最低温和日照时数与高粱辽粘 3 号和辽杂 37 单株产量密切相关<sup>[33]</sup>。与晋中试验点相比, 尽管朔州试验点基础地力差, 5 月至 9 月的总日照时数和 10℃有

效积温低, 但昼夜温差较大(图 1-E, F), 这说明在整体气候条件能够满足高粱生长时, 昼夜温差可能是引起这 2 个生态区产量差异的重要原因。朔州试验点收获时的产量优势源于较高的收获指数(比晋中提高 0~1.82%, 图 2-B)和干物质质量(比晋中提高 7.25%~22.16%, 图 3-B), 其中干物质质量较高是主要原因。对比 2 个试验点抽穗前和抽穗后干物质积累发现, 除连续 2 年不施氮处理外, 朔州抽穗期干物质质量和氮素积累量高于晋中, 而抽穗后干物质质量和氮素积累量小于为晋中; 同时抽穗前朔州累积昼夜温差(2020 年和 2021 年分别为 2007.7℃和 1977.9℃)高于晋中(2020 年和 2021 年分别为 1268.9℃和 1237.7℃)(图 1-E, F)。据此, 我们推测抽穗前昼夜温差导致物质积累量差异可能是 2 个生态区产量差异的关键。生态区自然条件影响高粱籽粒产量, 但在具有产量优势的朔州冷凉产区, 连续 2 年不施氮, 各高粱品种产量均低于晋中, 因此合理的养分管理对发挥生态区优势十分重要。

高粱作为主要杂粮作物, 主要为酒用和饲用, 酒用高粱更为关注籽粒淀粉、单宁含量。淀粉是形成酿造产品的主要物质基础, 需要具有较高的淀粉含量<sup>[34]</sup>; 籽粒中少量的单宁对发酵过程中有害微生物有一定的抑制作用, 是影响高粱出酒率和酒风味的关键因子, 因此在一定范围内提高单宁含量有助于提高酿造高粱品质<sup>[35]</sup>。在一定范围内蛋白质含量与出酒率呈显著正相关<sup>[36]</sup>, 但蛋白质含量过高, 氨基酸会生成较多的杂醇油, 影响酒体的品质<sup>[34]</sup>。王艳秋等<sup>[37]</sup>对 28 个高粱研究认为酒用高粱品质应达到淀粉含量 70%、单宁含量 0.8%~2.0%、蛋白质含量 9.0%~12.0%, 但也有人提出酱香型白酒酿造一般要求高粱中蛋白质含量为 7%~9%<sup>[38]</sup>。朔州生态区高粱籽粒不仅单宁含量高于晋中, 正常施氮时具有较高的淀粉含量和较低的蛋白质含量(图 6)。为此整体说来, 朔州可以作为酒用高粱的优质生产区; 由于生态区和养分管理均显著影响高粱品质, 合理布局, 充分发挥优势生态区的生产潜力, 结合合理养分管理, 则有利于实现高粱的优质稳产。

## 4 结论

在满足高粱生长发育条件下, 昼夜温差较大的朔州冷凉区促进了抽穗期前的干物质和氮素积累, 通过提升穗粒数提高了高粱籽粒产量, 同时也有利于籽粒淀粉和单宁的形成, 但只有满足养分供给时

才能充分挖掘优势产区的生产潜力。高粱穗粒数对籽粒产量变异贡献率达 97%, 抽穗前干物质和氮素积累量有利于高粱穗粒数形成, 为此保证高粱抽穗前的干物质和氮素积累对籽粒产量至关重要。

## References

- [1] Khoddami A, Messina V, Venkata K V, Farahnaky A, Blanchard C L, Roberts T H. Sorghum in foods: functionality and potential in innovative products. *Crit Rev Food Sci*, 2023, 63: 1170–1186.
- [2] Wagaw K. Review on mechanisms of drought tolerance in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) basis and breeding methods. *Acad Res J Agric Sci Res*, 2019, 7: 87–99.
- [3] Hadebe S T, Modi A T, Mabhaudhi T. Drought tolerance and water use of cereal crops: a focus on sorghum as a food security crop in Sub-Saharan Africa. *J Agron Crop Sci*, 2017, 203: 177–191.
- [4] Moore J W, Dittmore M, Tebeest D O. The effects of cropping history on grain sorghum yields and anthracnose severity in Arkansas. *Crop Prot*, 2009, 28: 737–743.
- [5] 卢庆善, 邹剑秋, 朱凯, 张志鹏. 试论我国高粱产业发展: 论全国高粱生产优势区. *杂粮作物*, 2009, 29(2): 78–80.  
Lu Q S, Zou J Q, Zhu K, Zhang Z P. Discussion of the development of Chinese sorghum industry: on the dominant areas of sorghum production. *Rain Fed Crops*, 2009, 29(2): 78–80 (in Chinese).
- [6] Gerik T, Bean B W, Vanderlip R. Sorghum growth and development. Texas Cooperative Extension Texas A&M University System, College Station, 2003.
- [7] 陈荣俊. 江苏省不同生态区小麦高产优质品种筛选与适宜施氮量研究. 南京农业大学硕士学位论文, 江苏南京, 2015.  
Chen R J. The Screening of Wheat Cultivar and Appropriate N rate for High Yield and Quality Cultivation in Different Ecological Zones in Jiangsu Province. MS Thesis of Graduate School of Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu, China, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [8] 葛选良, 史振声, 李凤海, 王志斌, 王宏伟, 吕香玲. 辽宁省不同生态区玉米产量及农艺性状差异研究. *玉米科学*, 2013, 21(1): 75–78.  
Ge X L, Shi Z S, Li F H, Wang Z B, Wang H W, Lyu X L. Differences of yield and agronomy trait of maize in different ecological regions of Liaoning province. *J Maize Sci*, 2013, 21(1): 75–78 (in Chinese with English abstract).
- [9] 赵丽. 长江流域不同油菜品种产量与倒伏生态区差异研究. 华中农业大学硕士学位论文, 湖北武汉, 2018.  
Zhao L. Study on the Difference of Yield and Lodging of Rape-seed in the Yangtze River Basin. MS Thesis of Graduate School of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王劲松, 董二伟, 武爱莲, 白文斌, 王媛, 焦晓燕. 不同肥力条件下施肥对粒用高粱产量、品质及养分吸收利用的影响. *中国农业科学*, 2019, 52: 4166–4176.  
Wang J S, Dong E W, Wu A L, Bai W B, Wang Y, Jiao X Y. Responses of fertilization on sorghum grain yield, quality and nutrient utilization to soil fertility. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 4166–4176 (in Chinese with English abstract).
- [11] 曹晓燕, 武爱莲, 王劲松, 董二伟, 焦晓燕. 施氮量对高粱产量、品质及氮利用效率的影响. *作物杂志*, 2021, (2): 108–115.  
Cao X Y, Wu A L, Wang J S, Dong E W, Jiao X Y. Effects of nitrogen fertilization on yield, quality and nitrogen utilization efficiency of sorghum. *Crops*, 2021, (2): 108–115 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王媛, 王劲松, 董二伟, 刘秋霞, 武爱莲, 焦晓燕. 施氮量对高粱籽粒灌浆及淀粉累积的影响. *作物学报*, 2023, 49: 1968–1978.  
Wang Y, Wang J S, Dong E W, Liu Q X, Wu A L, Jiao X Y. Effect of nitrogen application level on grain starch accumulation at grain filling stage in sorghum spikelets. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 1968–1978 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘秋霞, 任涛, 廖世鹏, 李小坤, 丛日环, 石磊, 鲁剑巍. 不同氮素供应对油菜苗期生长及碳氮分配的影响. *中国油料作物学报*, 2019, 41(1): 92–100.  
Liu Q X, Ren T, Liao S P, Li X K, Cong R H, Shi L, Lu J W. Effect of different nitrogen application on seedling growth and allocation of carbon and nitrogen in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Chin J Oil Crop Sci*, 2019, 41: 92–100 (in Chinese with English abstract).
- [14] Fukayama H, Ueguchi C, Nishikawa K, Katoh N, Ishikawa C, Masumoto C, Hatanaka T, Misoo S. Overexpression of Rubisco activase decreases the photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation rate by reducing Rubisco content in rice leaves. *Plant Cell Physiol*, 2012, 53: 976–986.
- [15] Xiong D, Liu X L, Liu L, Douthe C, Li Y, Peng S, Huang J. Rapid responses of mesophyll conductance to changes of CO<sub>2</sub> concentration, temperature and irradiance are affected by N supplements in rice. *Plant Cell Environ*, 2015, 38: 2541–2550.
- [16] Schjoerring J K, Bock J G, Gammelvind L, Jensen C R, Mogenssen V O. Nitrogen incorporation and remobilization in different shoot components of field-grown winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) as affected by rate of nitrogen application and irrigation. *Plant Soil*, 1995, 177: 255–264.
- [17] Santiago J P, Tegeder M. Connecting source with sink: the role of *Arabidopsis* AAP8 in phloem loading of amino acids. *Plant Physiol*, 2016, 171: 508–521.
- [18] 刘秋霞. 氮肥施用调控直播冬油菜产量构成因子的机制研究. 华中农业大学博士学位论文, 湖北武汉, 2020.  
Liu Q X. Study on the Mechanism of Yield Components of Direct-sown Oilseed rape (*Brassica napus* L.) under Regulation of Nitrogen Fertilizer. PhD Dissertation of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王媛, 王劲松, 董二伟, 武爱莲, 焦晓燕. 长期施用不同剂量氮肥对高粱产量、氮素利用特性和土壤硝态氮含量的影响. *作物学报*, 2021, 47: 342–350.  
Wang Y, Wang J S, Dong E W, Wu A L, Jiao X Y. Effects of long-term nitrogen fertilization with different levels on sorghum grain yield, nitrogen use characteristics and soil nitrate distribution. *Acta Agron Sin*, 2021, 47: 342–350 (in Chinese with English abstract).
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析方法. 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 25–114.  
Bao S D. Analytical Methods for Soil and Agro-chemistry.

- Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. pp 25–114 (in Chinese).
- [21] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000. pp 203–205.  
Li H S. Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments. Beijing: Higher Education Press, 2000. pp 203–205 (in Chinese).
- [22] 霍权恭, 范璐, 周展明. GB/T 15686-2008 高粱单宁含量的测定. In: 全国粮油标准化技术委员会. 中华人民共和国国家标准. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
Huo Q G, Fan L, Zhou Z M. GB/T 15686-2008 Sorghum-Determination of Tannin Content. In: Grains and Oils. State Standard of the People's Republic of China. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese).
- [23] Macholdt J, Piepho H P, Honermeier B. Mineral NPK and manure fertilization affecting the yield stability of winter wheat: results from a long-term field experiment. *Eur J Agron*, 2019, 102: 14–22.
- [24] Ye Y, Wang G, Huang Y, Zhu Y, Meng Q, Chen X, Zhang F, Cui Z. Understanding physiological processes associated with yield-trait relationships in modern wheat varieties. *Field Crops Res*, 2011, 124: 316–322.
- [25] Yan P, Yue S C, Meng Q F, Pan J X, Ye Y L, Chen X P, Cui Z L. An understanding of the accumulation of biomass and nitrogen is benefit for Chinese maize production. *Agron J*, 2016, 108: 895.
- [26] Liu H Y, Won P L P, Banayo N P M, Nie L X, Peng S B, Kato Y. Late-season nitrogen applications improve grain yield and fertilizer-use efficiency of dry direct-seeded rice in the tropics. *Field Crops Res*, 2019, 233: 114–120.
- [27] 王国琴, 孟祥兆, 郭法申. 气候条件与高粱干物质积累动态特征分析. *生态学杂志*, 1992, 11(5): 7–11.  
Wang G Q, Meng X Z, Guo F S. Climate conditions and dynamic characteristics of dry matter accumulation in sorghum. *Chin J Ecol*, 1992, 11(5): 7–11 (in Chinese with English abstract).
- [28] Brenner M L, Cheikh N. The Role of Hormones in Photosynthate Partitioning and Seed Filling. In: Davies P J, eds. *Plant Hormones*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. pp 649–670.
- [29] Jameson P E, Song J. Cytokinin: a key driver of seed yield. *J Exp Bot*, 2005, 67: 593–606.
- [30] Li G, Hu Q, Shi Y, Cui K, Nie L, Huang J, Peng S. Low nitrogen application enhances starch-metabolizing enzyme activity and improves accumulation and translocation of non-structural carbohydrates in rice stems. *Front Plant Sci*, 2018, 9: 1128.
- [31] 钱晓刚, 陆引罡, 魏成熙, 周炎. 贵州酒用高粱对氮磷钾养分的吸收规律. *土壤通报*, 1997, 28(1): 31–33.  
Qian X G, Lu Y G, Wei C X, Zhou Y. Nitrogen, phosphorus and potassium nutrients absorption of sorghum for wine use in Guizhou province. *Chin J Soil Sci*, 1997, 28(1): 31–33 (in Chinese).
- [32] 屈洋, 张飞, 王可珍, 韩芳, 刘洋, 罗艳, 高小丽, 冯佰利, 卢峰. 黄淮西部高粱籽粒产量与品质对气候生态条件的响应. *中国农业科学*, 2019, 52: 3242–3257.  
Qu Y, Zhang F, Wang K Z, Han F, Liu Y, Luo Y, Gao X L, Feng B L, Lu F. Response of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) yield and quality to climatic and ecological conditions on the west Yellow-Huaihe-Haihe Rivers plain. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 3242–3257 (in Chinese with English abstract).
- [33] 柯福来, 邹剑秋, 朱凯. 气象因子与不同高粱品种产量的相关分析. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(3): 69–77.  
Ke F L, Zou J Q, Zhu K. Correlation analysis of yield and Meteorological factors in different Sorghum varieties. *J Shanxi Agric Univ* (Nat Sci Edn), 2020, 40(3): 69–77 (in Chinese with English abstract).
- [34] 时伟, 郑红梅, 柴丽娟, 陆震鸣, 张晓娟, 许正宏. 酒用高粱的营养成分及其酿造性能研究进展. *食品与发酵工业*, 2022, 48(21): 307–317.  
Shi W, Zheng H M, Chai L J, Lu Z M, Zhang X J, Xu Z H. Research progress on the nutritional components and brewing performance of brewing sorghum. *Food Ferm Ind*, 2022, 48(21): 307–317 (in Chinese with English abstract).
- [35] 季树太, 王佐民, 郭书刚. 酿酒高粱研究刍议. *酿酒*, 2019, 46(2): 28–30.  
Ji S T, Wang Z M, Guo S G. Discussion on the research of sorghum for liquor making. *Liquor Making*, 2019, 46(2): 28–30 (in Chinese with English abstract).
- [36] 田新惠, 唐玉明, 任道群, 姚万春, 刘茂柯, 刘颖. 酿酒高粱蛋白提取工艺优化及其亚基组成分析. *食品工业*, 2018, 39(3): 48–51.  
Tian X H, Tang Y M, Ren D Q, Yao W C, Liu M K, Liu Y. Optimization of extraction process and analysis of subunit component of protein from brew sorghum seed. *Food Ind*, 2018, 39(3): 48–51 (in Chinese with English abstract).
- [37] 王艳秋, 张飞, 张旷野, 王佳旭, 朱凯, 熊文强, 郭晓雷, 邹剑秋. 春播晚熟酿造高粱不同生态区高产高效品种筛选与评价. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(6): 91–98.  
Wang Y Q, Zhang F, Zhang K Y, Wang J X, Zhu K, Xiong W Q, Guo X L, Zou J Q. Screening and evaluation of high-yielding and high-efficiency varieties of spring-sown late-maturing brewing sorghum in different ecological zones. *J Shanxi Agric Univ* (Nat Sci Edn), 2021, 41(6): 91–98 (in Chinese with English abstract).
- [38] 程度, 曹建兰, 王珂佳, 李豆南, 罗小叶, 陈杰, 邱树毅. 高粱对酱香型白酒品质影响的研究进展. *食品科学*, 2022, 43(7): 356–364.  
Cheng D, Cao J L, Wang K J, Li D N, Luo X Y, Chen J, Qiu S Y. Progress in understanding the effect of sorghum on the quality of Maotai flavor Baijiu. *Food Sci*, 2022, 43(7): 356–364 (in Chinese with English abstract).