

党林学,田甜,韩凡莉,等. 不同氮素水平对于干旱地区冬小麦光合生理、抗氧化特性及籽粒产量的影响[J/OL]. 大麦与谷类科学, 2023,40(2):7-14,20. <https://doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2023.02.002>.

不同氮素水平对干旱地区冬小麦光合生理、抗氧化特性及籽粒产量的影响

党林学¹, 田甜², 韩凡莉¹, 李军¹, 杨永军¹, 张增喜¹, 陈涛², 杨德龙²

(1. 庄浪县农业技术推广中心, 甘肃 庄浪 744699; 2. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为研究不同施氮量对冬小麦旗叶生理性状和产量的影响,以小麦品种庄浪 13 为材料,通过设置 0、75、150、225、300 kg/hm² 5 个氮素水平,测定不同施氮量下小麦花后旗叶叶绿素含量、光合速率、叶绿素荧光参数、抗氧化物质以及穗数、穗粒数、千粒质量和籽粒产量等。结果表明,在适当范围内施氮量增加可以提高小麦的叶绿素含量、光合速率、叶绿素荧光参数、抗氧化酶活性、穗数、穗粒数、千粒质量和籽粒产量,降低叶绿素 a/b 比值(Chl a/b)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、非光化学淬灭系数(NPQ)和丙二醛(MDA)含量。通过相关性分析可知,气孔导度(G)和实际光化学效率(Φ_{PSII})与小麦穗数、穗粒数、千粒质量和籽粒产量呈显著正相关,相关系数较高(r=0.82~0.86)。在本试验条件下,当施氮量为 225 kg/hm² 时,小麦穗数与不施氮相比增加 41.29%,穗粒数增加 46.09%,千粒质量增加 33.43%,籽粒产量增加 58.68%。因此,施氮量 225 kg/hm² 是提高旱地冬小麦产量的最适水平。

关键词:小麦;氮素;光合生理;抗氧化物质;籽粒产量

中图分类号:S512.1+1

文献标志码:A

文章编号:1673-6486-20220123

小麦是我国西北干旱地区主要的粮食作物,其种植面积占西北耕地总面积的 40%左右^[1]。氮(N)素作为作物生长发育所必需的营养元素之一,是限制作物高产的重要因素^[2-5]。施加氮肥是保证小麦高产稳产的重要措施。在生产中,氮肥投入不足影响植株生长发育过程,造成减产;但氮肥投入过量造成氮肥利用率低、环境污染等问题^[6-8]。因此,探索适宜施氮水平,对西北旱区小麦产业的高产稳产及可持续发展具有重要意义。

光合作用是作物产量形成的基础,小麦产量的 90%左右来自于光合作用的贡献,其中旗叶光合作用占 20%~30%^[9-11]。叶绿素荧光参数可以反映光合系统的内在能量转化过程^[12]。前人研究表明,适当的氮素水平可以提高叶片光合色素含量和光系统关键酶活性^[13-14],促进气体交换^[15],影响叶绿素荧光特性,提高光合生理代谢过程^[16]。张元帅等研究发现,氮素水平在 0~240 kg/hm² 时,小麦旗叶的叶绿素

含量、净光合速率(P_n)、最大光化学量子产量(F_v/F_m)和光系统 II(PS II)实际光化学量子产量(Φ_{PSII})随施氮量增加而升高^[17]。此外,合理施氮量也可以提高叶片中抗氧化物质活性,延长功能叶片光合期,影响籽粒形成^[18-21]。蔡瑞国等研究发现,在高氮肥条件下,小麦旗叶的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性均高于低氮肥条件下的,过氧化程度降低^[22]。由此可见,施加氮肥以直接或间接方式参与光合作用,进而影响同化物积累过程,最终影响小麦产量。前人对不同氮素水平下小麦产量效应的研究多集中于光合特性或生理特性单方面,结合二者综合分析的研究较少。为此,本研究以庄浪 13 为供试材料,通过研究不同施氮水平下对其叶绿素含量、光合速率、叶绿素荧光参数和籽粒产量等指标的变化趋势,以期明确氮肥对小麦的生长发育及籽粒灌浆的响应机制,为西北干旱地区冬小麦合理氮肥统筹管理提供理论依据。

收稿日期:2022-11-29;修回日期:2023-03-24

基金项目:甘肃省农业重点研发计划(21YF5NA089);甘肃省高等学校产业支撑计划(2022CYZC-44);甘肃省高等学校创新基金项目(2021B-125)。

作者简介:党林学(1975—),男,高级农艺师,主要从事冬小麦育种及示范推广。Email: 920379810@qq.com。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为抗旱节水冬小麦品种庄浪 13。该品

种由庄浪县农业技术推广中心和甘肃省农业科学院小麦研究所兰天 15 为母本、豫麦 53 为父本杂交选育而成,2018 年通过甘肃省农作物品种审定委员会审定,审定编号:甘审麦 20180018。

1.2 试验设计

试验于 2020 年 10 月—2021 年 7 月在甘肃省平凉市庄浪县南湖试验站 (105°57' E、35°20' N,海拔 1 740 m) 进行。该区属温带大陆性气候,年均气温 7.8 °C,无霜期 148 d,年均降水量 470 mm,降雨主要集中在 7—9 月,年均蒸发量在 1 500 mm 以上。土壤类型为黄绵土,速效氮含量(质量分数,下同)为 60.7 mg/kg,速效磷含量为 11.5 mg/kg,速效钾含量为 83.1 mg/kg,有机质含量为 14.2 g/kg。小麦播前磷按 P_2O_5 150 kg/hm²、钾按 K_2O 60 kg/hm² 施用,氮肥按 5 个水平,即不施加氮肥(N_0)及纯氮 75 kg/hm²(N_1)、150 kg/hm²(N_2)、225 kg/hm²(N_3)、300 kg/hm²(N_4) 作为基肥一次性施入,所用肥料为尿素(N 质量分数为 46%)、磷酸二铵(P_2O_5 质量分数为 46%)和硫酸钾(K_2O 质量分数为 52%),此后整个小麦生育期内均不再施肥。田间试验采用随机区组设计,每处理 3 次重复,小区面积 40 m²(5 m × 8 m),每个小区播种量为 0.9 kg,条播,行距 0.2 m。在小麦抽穗期,每个处理随机选择 10 株长势一致的植株挂牌标记,进行相关生理指标测定。

1.3 指标测定

1.3.1 叶绿素含量测定。采用 80%丙酮浸提法,分别对花后 0、7、14、21、28 和 35 d 的各处理的小麦旗叶叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)和总叶绿素(Chl a+b)进行测定^[23],并计算 Chl a/b 比值,每处理 3 次重复。

1.3.2 光合速率测定。选用 Li-6400 便携式光合仪,分别于花后 0、7、14、21、28 和 35 d,选择晴朗的天气于 9:00—11:00 测定小麦旗叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。每处理取 10 张受光方向相近的旗叶进行测定。

1.3.3 叶绿素荧光参数测定。选用 FluorPen FP110 便携式荧光仪,分别于花后 0、7、14、21、28 和 35 d,选择晴朗天气的 9:00—11:00,先暗处理 20 min,测定小麦旗叶的最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率(Φ_{PSII})和非光化学淬灭系数(NPQ 值)。每处理取 10 张受光方向相近的旗叶进行测定。采用紫外分光光度法^[24]测定 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶(Rubisco)活性。

1.3.4 抗氧化物质测定。分别于小麦花后 0、7、14、21、28 和 35 d 取样,测定旗叶抗氧化酶活性和丙二醛(MDA)含量。其中,MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸显色法^[24];超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)法^[24];过氧化氢酶(CAT)活性测定采用紫外分光光度法^[24];过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法^[24]。

1.3.5 产量性状测定。于小麦成熟期,每小区随机选择长势均匀的 3 个样方(每个样方面积为 1 m²),测定穗数(SN)、穗粒数(KN)和千粒质量(TKW),实收计算籽粒产量(GY)。

1.4 数据处理与分析

试验数据均采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 进行统计分析,利用 Origin 2021 软件进行绘图。

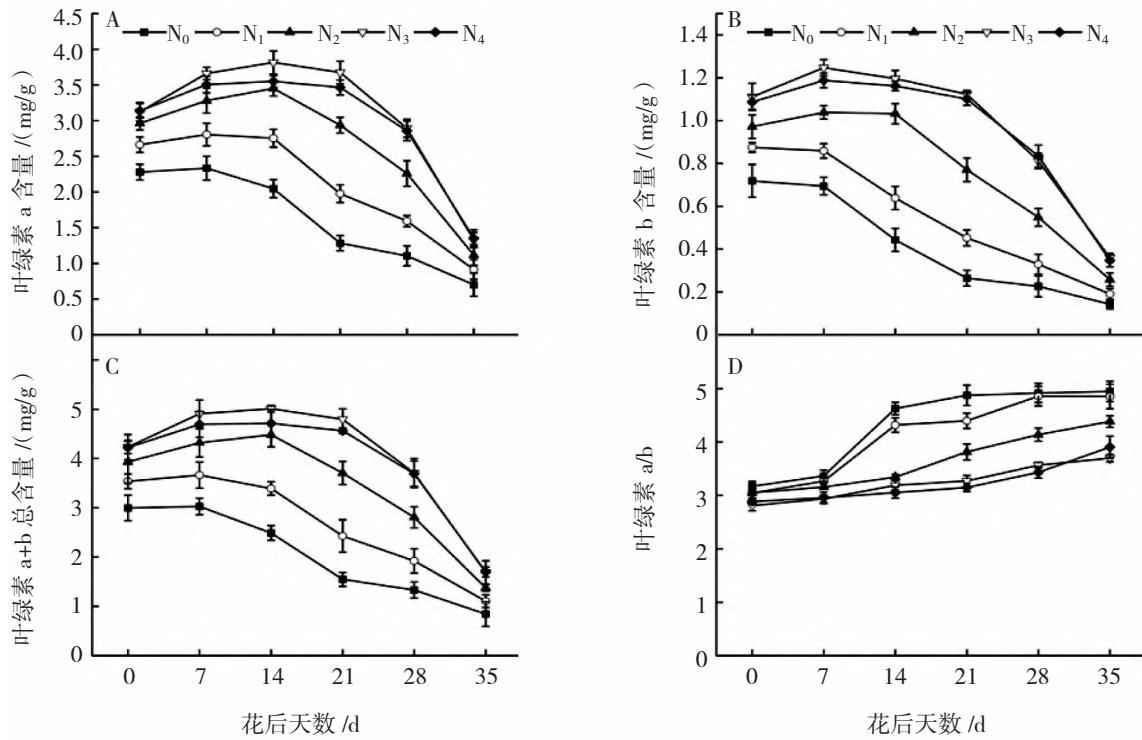
2 结果与分析

2.1 不同氮素水平下小麦旗叶叶绿素含量的变化

如图 1 所示,不同氮素水平下小麦旗叶 Chl a、Chl b 和 Chl a+b 含量随生育期延长呈现先上升后下降的趋势,各处理均在花后 7 d 或花后 14 d 达到峰值,随后下降。同一时期,Chl a、Chl b 和 Chl a+b 含量均表现为 $N_3 > N_4 > N_2 > N_1 > N_0$ 。其中,Chl b 在 N_3 和 N_4 条件下差异无统计学意义,Chl a、Chl b 和 Chl a+b 在不同氮素水平下差异有统计学意义或高度统计学意义。不同氮素水平下小麦旗叶 Chl a/b 整体呈上升趋势,表现为 $N_0 > N_1 > N_2 > N_4 > N_3$ 。此外, N_0 与 N_1 、 N_3 与 N_4 水平下小麦旗叶 Chl a/b 差异无统计学意义。说明合理施加氮肥能显著提高小麦旗叶叶绿素含量。

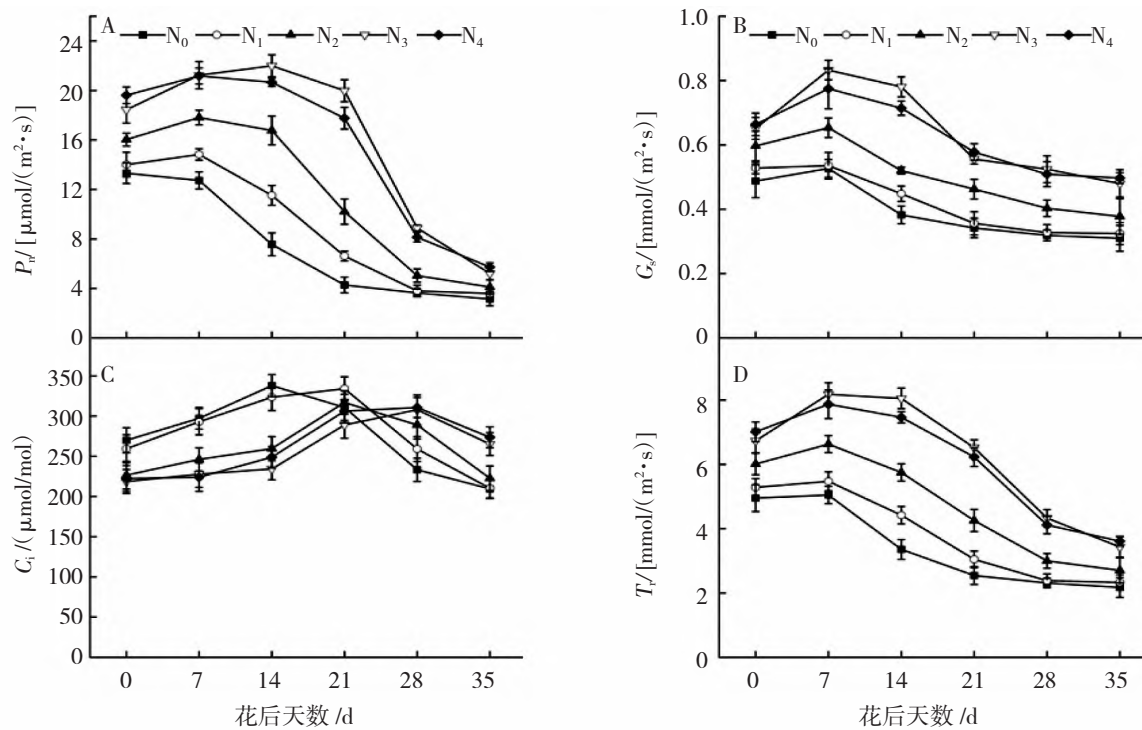
2.2 不同氮素水平下小麦旗叶光合速率的变化

如图 2 所示,不同氮素水平下小麦旗叶 G_s 和 T_r 随生育期延长呈现先上升后下降的趋势,各处理均在花后 7 d 达到峰值,随后下降, P_n 在花后 14 d 达到峰值,随后下降。同一时期, P_n 、 G_s 和 T_r 基本表现为 $N_4 > N_3 > N_2 > N_1 > N_0$ 。不同氮素水平下小麦旗叶 C_i 整体呈先上升后下降趋势, N_0 在花后 14 d C_i 值最高,可达 337.9 $\mu\text{mol/mol}$; N_1 和 N_2 处理下 C_i 在花后 21 d 达到峰值,分别为 336.90、316.08 $\mu\text{mol/mol}$; N_3 和 N_4 在花后 28 d C_i 值较高,分别达 307.88、310.62 $\mu\text{mol/mol}$ 。 N_3 和 N_4 水平下的 P_n 、 G_s 、 T_r 和 C_i 差异均无统计学意义,说明当施氮量超过 225 kg/hm² 后,施氮量不再是影响小麦旗叶光合速率的主要因子。



A.叶绿素 a;B.叶绿素 b;C.叶绿素 a+b;D.叶绿素 a/b

图 1 不同氮素水平对小麦叶片叶绿素含量的影响



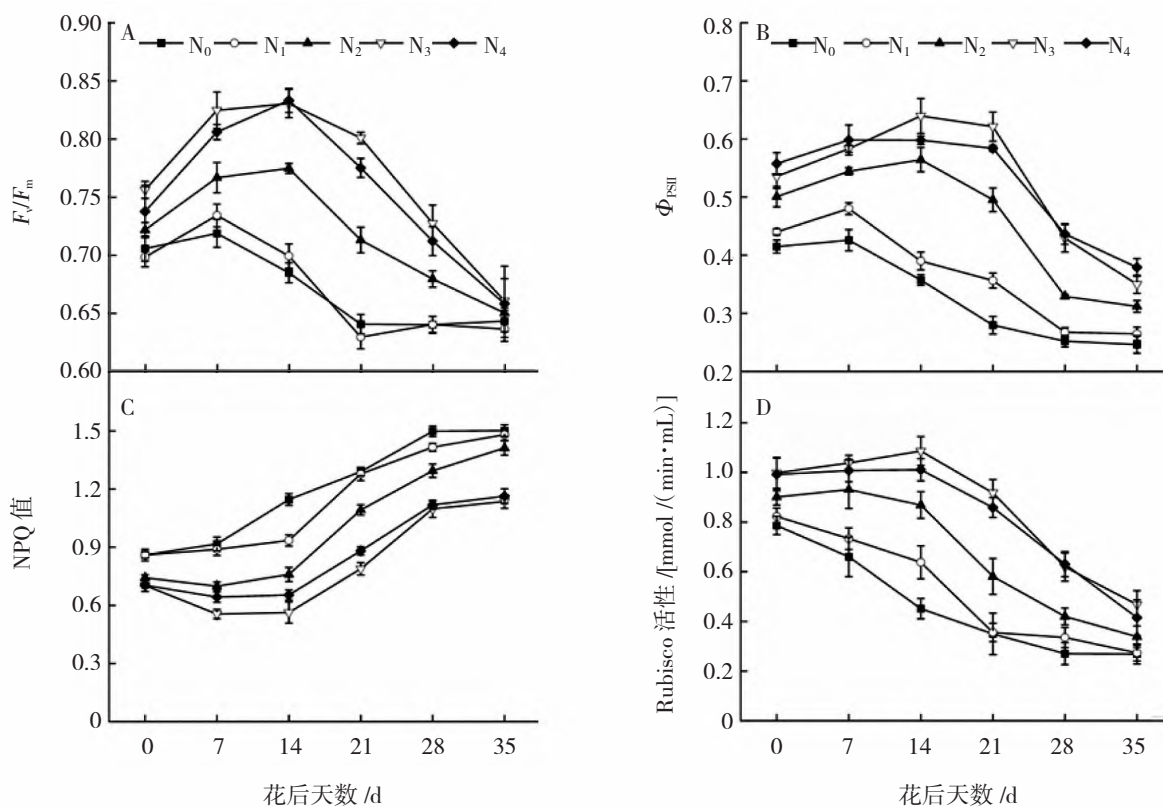
A. P_n ;B. G_s ;C. C_i ;D. T_r

图 2 不同氮素水平对小麦叶片光合速率的影响

2.3 不同氮素水平下小麦旗叶叶绿素荧光参数的变化

如图3所示,随着生育期延长,不同氮素水平下小麦旗叶NPQ值整体呈先下降后上升趋势,表现为 $N_0 > N_1 > N_2 > N_4 > N_3$,花后7d各处理的NPQ值最低。不同氮素水平下小麦旗叶的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和Rubisco活性均整体表现为 $N_3 > N_4 > N_2 > N_1 > N_0$ 。

和 Φ_{PSII} 随生育期延长呈现先上升后下降的趋势, N_0 和 N_1 处理下 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 在花后7d达到峰值, N_2 和 N_3 处理下在花后14d达到峰值随后下降。而Rubisco活性在花后14d随生育期延长呈现下降趋势。说明施氮量增加能在小麦生育后期有效提高Rubisco活性,延缓叶片衰老,增强叶片光合作用。



A. F_v/F_m ; B. Φ_{PSII} ; C.NPQ 值; D.Rubisco 活性

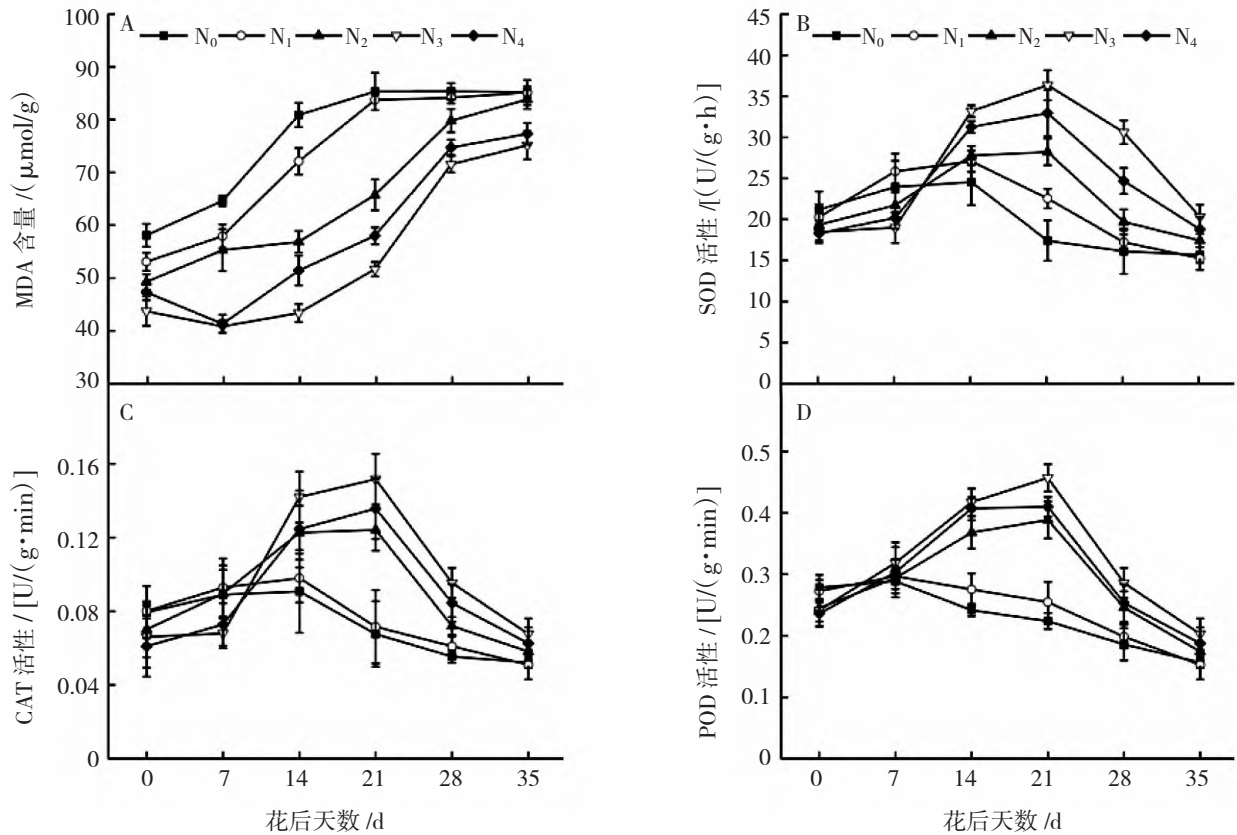
图3 不同氮素水平对小麦叶片叶绿素荧光参数的影响

2.4 不同氮素水平下小麦旗叶抗氧化物质的变化

如图4所示,不同氮素水平下小麦旗叶SOD、CAT和POD活性均随生育期延长呈现先上升后下降的趋势。不同氮素水平下小麦旗叶MDA整体呈上升趋势,表现为 $N_0 > N_1 > N_2 > N_4 > N_3$, N_0 的MDA含量为 $76.59 \mu\text{mol/g}$, N_3 的MDA含量为 $54.38 \mu\text{mol/g}$ 。 N_0 与 N_1 、 N_2 与 N_4 水平下的CAT和POD活性差异无统计学意义,但 N_3 水平下SOD、POD和MDA均与其他氮素处理的差异表现出统计学意义,说明适宜的氮素水平会提高小麦叶片抗氧化酶活性,降低膜脂抗氧化产物,增强光合作用,而过高或过低的施氮量将有可能降低小麦叶片抗氧化能力。

2.5 不同氮素水平对小麦产量的影响

穗数、穗粒数和千粒质量是评价小麦产量的重要指标,施加不同水平的氮肥对小麦的产量及其构成因子均存在不同程度的影响。由表1可知,随施氮量的增加,小麦穗数、穗粒数、千粒质量和籽粒产量均表现为增加趋势。与 N_0 相比, N_1 处理下小麦的籽粒产量增加 195.48 kg/hm^2 , N_2 增加 546.64 kg/hm^2 , N_3 增加 1465.36 kg/hm^2 ,而 N_4 比 N_3 减少 561.32 kg/hm^2 ,说明适当增加氮肥会使小麦产量增加,而氮肥施加量超过 225 kg/hm^2 水平后,对小麦的增产效应不显著,甚至会造成减产情况。



A.MDA 含量;B.SOD 活性;C.CAT 活性;D.POD 活性

图 4 不同氮素水平对小麦叶片抗氧化物质的影响

表 1 不同氮素水平对小麦籽粒产量及其构成因素的影响

处理	穗数/(万个/hm ²)	穗粒数/(粒/穗)	千粒质量/g	籽粒产量/(kg/hm ²)
N ₀	210.73 c	22.76 c	34.58 c	2 496.83 d
N ₁	223.97 bc	23.20 c	36.60 c	2 692.31 cd
N ₂	243.68 bc	28.88 b	42.56 b	3 043.47 bc
N ₃	297.75 a	33.25 a	46.14 a	3 962.19 a
N ₄	255.09 b	33.56 a	43.15 ab	3 400.87 b

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理下差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。

2.6 小麦旗叶光合生理性状、抗氧化物质及产量之间的相关性

对小麦旗叶光合生理性状、抗氧化物质与产量相关性状进行相关分析(简略示于图 5)发现, Chl a、Chl b、Chl a+b、 P_n 、 G_s 、 T_r 、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、Rubisco活性、SOD活性和POD活性均与SN、KN、TKW和GY呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)正相关,相关系

数(r)在0.54~0.86,而CAT活性与SN、TKW和GY呈显著或极显著正相关,相关系数在0.58~0.65。其中: G_s 和 Φ_{PSII} 与产量各组成因子相关系数较高($r = 0.82 \sim 0.86$)。NPQ值和MDA含量则与SN、KN、TKW和GY呈不显著负相关($r = -0.22 \sim -0.45$); Chl a/b与KN呈显著负相关,相关系数较高($r = -0.52$)。

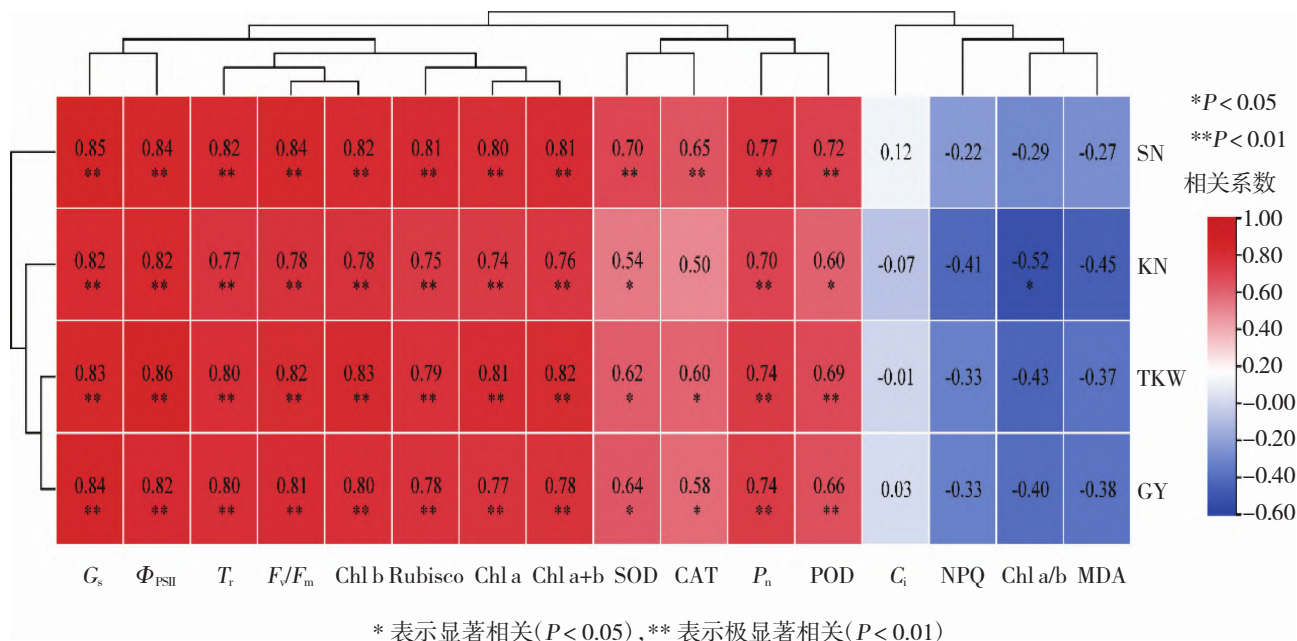


图5 小麦叶片光合生理性状、抗氧化物质及产量之间的相关系数

3 讨论

氮是植物生长发育所必需的营养元素,也是限制作物产量的主要因素。适当增加氮肥可以促进植物生长发育,有效抗逆抗病虫害,增强氮吸收能力;施氮量过高则会降低植物本身对磷、钾以及其他微量元素的吸收,降低作物产量^[2,25-28]。本研究发现,随施氮量的增加,小麦叶片的光合作用和籽粒产量也随之增加,但当施氮量超过 225 kg/hm² 后,各项指标均降低,说明该氮素水平是实现旱地小麦增产的最优水平,这与前人研究结果^[29-30]较为一致。

叶片是植株进行光合作用、呼吸作用及蒸腾作用的主要场所,小麦旗叶功能期的长短及光合作用的强弱严重影响籽粒灌浆过程^[31-34]。Chl a 和 Chl b 是直接影响植物光合作用的重要色素。本试验研究结果显示,小麦旗叶 Chl a、Chl b 和 Chl a+b 含量随施氮量增加呈先升后降的趋势,表明合理的氮素水平可以提高旗叶叶绿素合成量,延缓叶片衰老,这与前人研究结果^[35]一致。光合作用强度决定同化物的积累量,与小麦产量密切相关^[2]。史辛凯等研究发现,小麦 P_n 、 G_s 和 T_r 均随施氮量增加呈先增后降的趋势^[36]。本研究结果与前人结果^[31]相似,在 225 kg/hm² 氮素水平下, P_n 、 G_s 和 T_r 均高于其他氮素水平条件,而 C_i 则低于其他氮素水平条件,说明合适的氮素水平可以提高光合速率和 CO₂ 的同化能力,促进光系统运转。叶绿素荧光参数可以直接反映小麦光合作用的变化信

息^[37]。 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 是反映 PS II 反应中心光化学效率和光能吸收的重要指标,0~225 kg/hm² 氮素水平下,它们随施氮量增加而升高,说明适量施氮可以增强 PS II 反应中心的活性,提高叶片对光能的捕获能力。此外,本研究中 NPQ 值的变化趋势与 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 相反,在 0~225 kg/hm² 氮素水平下表现为随施氮量增加而降低,后随施氮量增加而升高,表明施氮量会影响热耗散的量子比率,合理施氮量可以提高光反应中心的耐受性。Rubisco 是碳同化过程中的关键酶,其活性显著影响光合作用。王海琪等研究发现,施氮量高于 225 kg/hm² 会导致 Rubisco 活性下降^[38],这与本研究结果一致,进一步说明 Rubisco 活性受施氮量影响。

在小麦生育后期,由于细胞内活性氧的大量累积,小麦叶片细胞膜脂过氧化加剧,造成膜系统的损坏,进而导致叶片衰老进程加快,影响光合作用,导致减产^[39-40]。适当施加氮肥可以提高小麦旗叶细胞内抗氧化酶活性,清除过量活性氧,延缓叶片衰老^[41-42]。王贺正等研究发现,随着施氮量增加,SOD、CAT 和 POD 的活性增加,而 MDA 含量降低^[43]。本研究中,随施氮量的增加,SOD、CAT 和 POD 的活性也显著提高,但当施氮量达 300 kg/hm² 时,抗氧化酶的活性则呈现不同程度的降低。这表明,适当施加氮肥可以有效提高抗氧化酶的活性,延长小麦叶片光合作用天数,而施氮量过高则会抑制小麦抗氧化酶的活性。施氮量增加,MDA 含量随之增加,而 SOD、

CAT 和 POD 活性缓慢上升,到达峰值后下降,说明不同氮素水平下花后 0~21 d 抗氧化酶活性均会增强,利于清除活性氧,延长光合作用,为小麦籽粒灌浆提供碳源;而随生育期延长,小麦叶片内活性氧过度积累,导致抗氧化酶合成速度变慢而降解增强。在小麦生育后期,不同氮素水平下膜脂过氧化产物 MDA 含量与 SOD、CAT、POD 活性变化趋势相反,说明施氮量会影响小麦叶片抗氧化进程,影响小麦叶片衰老速度,因此适当施加氮肥能提高小麦叶片抗衰老能力,进而增强小麦籽粒灌浆能力,保证产量。

穗数、穗粒数和千粒质量是小麦产量的决定因素^[44]。研究发现,适当施加氮肥会显著提高小麦的穗数、穗粒数和千粒质量^[45]。王志勇等研究发现,施氮量在 0~240 kg/hm² 范围内,小麦的穗数、穗粒数和千粒质量增加,超过 240 kg/hm² 后,穗粒数和千粒质量降低^[46]。本研究发现,与不施加氮肥相比,氮肥施加量达 225 kg/hm² 时,小麦的穗数增加 41.29%,穗粒数增加 46.09%,千粒质量增加 33.43%,籽粒产量增加 58.69%;当施氮量达 300 kg/hm² 时,小麦的籽粒产量比施氮量 225 kg/hm² 的下降 14.17%。通过各项生理性状与籽粒性状的相关分析,发现 G_s 和 Φ_{PSII} 与产量各组成因子表现为较显著正相关关系。可见,适度施加氮肥会提高小麦产量,而施氮过少或过多都会使小麦产量下降。

4 结论

适当施加氮肥能够提高小麦植株体内叶绿素含量、荧光速率、叶绿素荧光特性和抗氧化酶活性,降低丙二酮含量,增加小麦籽粒产量。225 kg/hm² 是本研究最适施氮水平,在该氮素水平下,小麦产量最高,可达 3 962.19 kg/hm²。不同品种、不同种植地等均会影响小麦对氮素的吸收和利用。

参考文献:

[1] 马龙,王书停,史雷,等.有机肥配施氮肥对西北旱地冬小麦产量、品质及土壤生物学特性的影响[J].应用生态学报,2022,33(10):2718-2724.
 [2] 王西娜,王朝辉,李生秀.施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响[J].生态学报,2007,27(1):197-204.
 [3] 邢佳伊,李丽,王超,等.施氮水平和干旱锻炼后复水程度对小麦水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,

2022,40(5):52-61.

[4] THANGARAJAN R,BOLAN N S,KUNHIKRISHNAN A,et al. The potential value of biochar in the mitigation of gaseous emission of nitrogen[J]. Science of the Total Environment,2018, 612:257-268.
 [5] 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):3041-3046.
 [6] 贾峥嵘,郝佳丽,郝艳芳,等.不同施氮量对冬小麦灌浆特性及产量的影响[J].山西农业科学,2022,50(6):823-829.
 [7] 易媛,刘静,王静,等.氮肥对淮东北地区强筋小麦产量与品质的调控效应[J].麦类作物学报,2022,42(4):457-464.
 [8] YANG J W,SHI Y G,SHI H W,et al. Screening of wheat (*Triticum aestivum* L.) Varieties with high nitrogen use efficiency under rainfed and irrigated conditions[J]. Turkish Journal of Field Crops,2019,24(2):121-131.
 [9] 黄明,吴金芝,李友军,等.干旱对不同抗旱性小麦旗叶光响应特征和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(3):64-73.
 [10] WATANABE T,OKADA R,TOKUNAGA S,et al. Nitrogen deficiency-induced molybdenum accumulation in wheat[J]. Journal of Plant Nutrition,2022,45(9):1413-1424.
 [11] ZHANG F F,GAO S,ZHAO Y Y,et al. Growth traits and nitrogen assimilation-associated physiological parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.) under low and high N conditions[J]. Journal of Integrative Agriculture,2015,14(7):1295-1308.
 [12] WEI M M,WANG X Y. Differences in chlorophyll fluorescence parameters,yield and its components between different genotypes of wheat under waterlogging conditions at anthesis[J]. Agricultural Biotechnology,2019,8(4):7-13.
 [13] 刘耀权,王林林,李玲玲,等.施氮促进旱作覆膜玉米产量和水分利用效率的生理机制[J].云南农业大学学报(自然科学版),2022,37(2):193-202.
 [14] KAUR A,PANNU R K,BUTTAR G S. Impact of nitrogen application on the performance of wheat (*Triticum aestivum*) and nitrogen use efficiency under different dates of sowing[J]. The Indian Journal of Agronomy,2010,55(1):40-45.
 [15] 方辉,范贵强,高永红,等.施氮对不同小麦品种光合荧光特性及产量的影响[J].新疆农业科学,2022,59(1):55-62.
 [16] ALI N,AKMAL M. Wheat growth,yield,and quality under water deficit and reduced nitrogen supply. A review[J]. Gesunde Pelanzen, 2022,74:371-383.
 [17] 张元帅,冯伟,张海艳,等.遮阴和施氮对冬小麦旗叶光合特性及产量的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(9): 1177-1184.
 [18] 赵长星,马东辉,王月福,等.施氮量和花后土壤含水量对

- 小麦旗叶衰老及粒重的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(11):2388-2393.
- [19] 刘宏胜,李映,牛俊义,等. 不同旱地春小麦品种(系)花后旗叶生理特性和籽粒产量的分析[J]. 土壤与作物,2018,7(3):356-364.
- [20] 胡承孝,王运华,谭启玲,等. 钼、氮肥配合施用对冬小麦子粒蛋白质及其氨基酸组成的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(2):224-228.
- [21] WANG Z,HUANG W J,YANG K M,et al. Estimation of leaf nitrogen and grain protein content by hyperspectral vegetation index in winter wheat[J]. Sensor Letters,2013,11(6/7):1115-1120.
- [22] 蔡瑞国,张敏,尹燕枰,等. 小麦灌浆过程中旗叶光合及抗氧化代谢与氮素营养关系研究[J]. 中国农业科学,2008,41(1):53-62.
- [23] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 2版. 广州:华南理工大学出版社,2006.
- [24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [25] EBRAHIMIAN E,KOOCHEKI A,MAHALLATI M N,et al. The effect of tillage and wheat residue management on nitrogen uptake efficiency and nitrogen harvest index in wheat[J]. Turkish Journal of Field Crops,2016,21(2):233-239.
- [26] MIROSAVLJEVIĆ M,AĆIN V,SABADOŠV,et al. Variation in nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Genetika Belgrade,2019,51(3):1165-1174.
- [27] MEI S W,WANG S,YANG X W. Straw returning and nitrogen application on winter wheat quality and yield under wheat-maize multiple cropping system[J]. Ekoloji,2019,28(107):2183-2192.
- [28] LI S D,LI Z X,BI X J,et al. Nitrogen fertilizer management on wheat yield and nitrogen utilization[J]. Journal of Plant Nutrition,2022,45(13):1953-1960.
- [29] 高素玲,苗丰,陈建辉,等. 氮素水平对旱作小麦光合特性的影响[J]. 华北农学报,2013,28(4):169-173.
- [30] 张杰,王备战,冯晓,等. 氮肥调控对冬小麦干物质、产量和氮素利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(4):516-520.
- [31] PLAUT Z,BUTOW B J,BLUMENTHAL C S,et al. Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficits and elevated temperature[J]. Field Crops Research,2004,86:185-198.
- [32] 郭伟,李建伟. 花后外源碳氮供应对小麦加工品质的影响[J]. 生态学杂志,2016,35(1):11-16.
- [33] 江文文,尹燕枰,王振林,等. 花后高温胁迫下氮肥追施后移对小麦产量及旗叶生理特性的影响[J]. 作物学报,2014,40(5):942-949.
- [34] 胡燕美,苏慧,朱玉磊,等. 花后早期增温对小麦旗叶光合和抗氧化特性及籽粒发育的影响[J]. 麦类作物学报,2020,40(10):1247-1256.
- [35] 赵广才,常旭虹,杨玉双,等. 追氮量对不同品质类型小麦产量和品质的调节效应[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(4):859-865.
- [36] 史辛凯,于振文,赵俊晔,等. 施氮量对高产小麦光合特性、干物质积累分配与产量的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(6):713-721.
- [37] 朱荣慕,宇康建宏,等. 不同施氮量对花后高温春小麦叶绿素含量及荧光特性的影响[J]. 南方农业学报,2017,48(4):609-615.
- [38] 王海琪,王荣荣,蒋桂英,等. 施氮量对滴灌春小麦叶片光合生理性状的影响[J]. 作物学报,2023,49(1):211-224.
- [39] YU L L,TANG Y L,WANG Z G,et al. Nitrogen-cycling genes and rhizosphere microbial community with reduced nitrogen application in maize/soybean strip intercropping[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2019,113(1):35-49.
- [40] JI X M,SHIRAN B,WAN J L,et al. Importance of pre-anthesis anther sink strength for maintenance of grain number during reproductive stage water stress in wheat[J]. Plant,Cell and Environment,2010,33(6):926-942.
- [41] SMIMOFF N. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation[J]. New Phytologist,1993,125(1):27-58.
- [42] ZHANG J X,KIRKHAM M B. Lipid peroxidation in sorghum and sunflower seedlings as affected by ascorbic acid,benzoic acid and propyl gallate[J]. Journal of Plant Physiology,1996,149(5):489-493.
- [43] 王贺正,张钧,吴金芝,等. 不同氮素水平对小麦旗叶生理特性和产量的影响[J]. 草业学报,2013,22(4):69-75.
- [44] 马瑞琦,王德梅,陶志强,等. 不同筋型小麦干物质和氮素积累对追施氮量的响应[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(4):622-631.
- [45] LI S,LEI Y D,ZHANG Y Y,et al. Rantional trade-offs between yield increase and fertilizer inputs are essential for sustainable intensification:A case study in wheat-maize cropping systems in China[J]. Science of the Total Environment,2019,679:328-336.
- [46] 王志勇,白由路,王磊,等. 氮素营养水平对冬小麦产量及生物学性状的影响[J]. 中国土壤与肥料,2011(4):22-25.

(下转第20页)

Effects of Soaking Millet Seeds with Uniconazole on Seed Germination and Seedling Growth

JU Le, CHEN Peiyu, NIU Yinting, YIN Zhigang, QIANG Xuejie, YU Xingjian, GUO Tengfei
(Nanyang Academy of Agricultural Sciences, Nanyang 473000, China)

Abstract: The present study was undertaken to assess the effects of soaking millet seeds with uniconazole on seed germination and seedling growth, using the millet variety Wangu No.2 as the experimental material. Different lengths of soaking time (12, 24 h) and concentrations of uniconazole (0, 10, 20, 30, 40, 50 mg/L) were set for the germination experiment, in which germination potential, bud length, bud sheath length, root length, root number, bud dry weight, and root dry weight were measured. The results are as follows. Firstly, seed germination potential decreased after seeds were treated with uniconazole. Secondly, soaking time with uniconazole produced statistically significant or even very significant effects on germination potential, root number, shoot length, dry weight of shoots, root-shoot ratio, and the rate of material transport, while it had no statistically significant effect on root length, sheath length, and dry weight of roots of millet seedlings. Under the condition of the same length of soaking time with uniconazole, increasing its concentration significantly inhibited the growth of millet seedlings, shown by a downward trend of germination potential, root length, shoot sheath length, shoot length, dry weight of roots, dry weight of shoots, and material transport rate. Thirdly, shoot length, dry weight of roots, material transport rate, shoot sheath length, root length, germination potential, and dry weight of shoots were all positively correlated with the sensitivity of millet seeds to uniconazole in the germination stage. Thus, shoot length, dry weight of roots, and material transport rate can be used as indicators of the sensitivity of millet germplasm to uniconazole in the germination stage.

Key Words: Plant growth regulator; Millet; Germination; Membership function method

(上接第 14 页)

Effects of Different Nitrogen Application Rates on the Photosynthesis and Antioxidant Characteristics and Grain Yield of Winter Wheat Planted in an Arid Area

DANG Linxue¹, TIAN Tian², HAN Fanli¹, LI Jun¹, YANG Yongjun¹, ZHANG Zengxi¹, CHEN Tao²,
YANG Delong²

(1. Agricultural Technology Extension Center of Zhuanglang County, Zhuanglang 744699, China; 2. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to evaluate the effects of different nitrogen (N) application rates on the physiological traits of the flag leaf and yield of winter wheat, a field trial was carried out at Nanhu Experimental Station of Zhuanglang County from October 2020 to July 2021, using the wheat variety Zhuanglang 13 as the plant material. Five treatments with the N application rates at 0, 75, 150, 225, and 300 kg/hm² were set, which were compared in the physiological traits (chlorophyll content, photosynthetic rate, chlorophyll fluorescence parameters, and antioxidants) of wheat flag leaf after anthesis, yield components (spike number, spike grain number, thousand-grain weight), and grain yield. The results showed that increasing N application rate in the certain range elevated chlorophyll content, photosynthetic rate, chlorophyll fluorescence parameters, antioxidant enzyme activity, spike number, grain number per spike, thousand-grain weight, and grain yield; and decreased chlorophyll a/b ratio (Chl a/b), intercellular CO₂ concentration (C_i), non-photochemical quenching coefficient (NPQ), and malondialdehyde (MDA) content in wheat. Stomatal conductance (G_s) and photochemical efficiency (φ_{PSII}) showed significant positive correlations with each of the yield components with high correlation coefficients (r = 0.82-0.86). Moreover, the study showed that the yield-related traits increased by 33.43% (1 000-grain mass), 58.68% (grain yield) in the treatment with the N application rate at 225 kg/hm² compared with the control without N application; therefore, the N application rate at 225 kg/hm² is optimum for improving the yield of winter wheat planted in the arid area. This study lays a foundation for the appropriate management of N fertilizer in winter wheat production in arid areas of Northwest China.

Key Words: Wheat; Nitrogen; Photosynthetic physiology; Antioxidant; Grain yield