

DOI: 10.11766/trxb201602220031

氮硫互作对冬小麦旗叶衰老、产量和 氮素利用效率的影响*

王丽 王东[†] 周杰 韩坤

(山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要 试验采用裂裂区设计, 小麦品种(烟农19和汶农6号)为主区, 施氮(N)量为裂区, 设0(N0)、120(N120)、240(N240) kg hm⁻²三个施N水平, 施硫(S)量为裂裂区, 设0(S0)、20(S20)、40(S40)、60(S60) kg hm⁻²四个施S水平。结果表明, 汶农6号开花后旗叶超氧化物歧化酶(SOD)活性、旗叶净光合速率、产量和氮素利用效率均高于烟农19。在一定施氮水平下适量施硫显著提高烟农19和汶农6号小麦开花后旗叶SOD活性和可溶性蛋白质含量, 提高旗叶净光合速率和开花后干物质积累量, 增加植株地上部氮素积累量和籽粒产量; 当施氮水平为120 kg hm⁻²施硫量超过40 kg hm⁻²和施氮240 kg hm⁻²施硫量超过20 kg hm⁻²时, 汶农6号植株地上部氮素积累量仍继续增加, 但旗叶抗氧化能力和光合同化能力均无明显提高, 籽粒产量不再增加, 烟农19号旗叶SOD活性、可溶性蛋白质含量和光合速率均降低, 植株地上部氮素积累量和籽粒产量均减少。在同一施氮水平下, 两小麦品种氮素利用效率总体表现为随施硫量增加而降低的趋势。在土壤有效硫为38.9~42.1 mg kg⁻¹的条件下, 适量施用氮肥和硫肥有利于延缓小麦花后旗叶衰老, 提高光合同化能力, 增加籽粒产量, 但不同品种小麦对氮肥和硫肥施用量的响应不同, 氮素利用效率较高的品种在较高的氮硫供给水平下仍有较好的光合同化和产量表现, 而氮素利用效率相对低的品种对高氮高硫的适应性较差, 后期易早衰, 影响产量和氮素利用效率。

关键词 小麦; 氮硫互作; 超氧化物歧化酶; 干物质; 籽粒产量; 氮素利用效率

中图分类号 S143.1; S512.1[†] **文献标识码** A

小麦灌浆期功能叶片的光合产物是籽粒产量的主要来源^[1]。延缓该时期叶片衰老, 维持旗叶较高的光合能力, 是提高小麦产量的重要途径^[2]。氮和硫是小麦生长发育必需的营养元素, 对籽粒产量形成有重要作用^[3-4]。探明氮、硫素及其互作对冬小麦花后旗叶衰老、籽粒产量及氮素利用效率的调节作用, 对冬小麦合理施肥、实现高产高效有重要理论和实践意义。适量施氮可增加小麦旗叶叶

绿素和可溶性蛋白质含量, 提高超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性、降低膜脂过氧化程度, 延缓旗叶衰老^[5]。而施硫对小麦生育后期植株体内抗坏血酸—谷胱甘肽抗氧化循环系统有加强作用, 亦能延缓小麦衰老^[6]。单施氮或硫可以增加冬小麦干物质积累量, 并促进营养器官开花前贮存干物质向籽粒中的转运, 增加千粒重, 提高产量^[7-9]。但氮硫互作条件下的冬小麦旗叶衰老

* 国家自然科学基金项目(31271660)、公益性行业(农业)科研专项项目(201503130)和山东省2014年度农业重大应用技术创新课题(2014-2016)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31271660), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (No. 201503130), the Agriculture Major Application Technology Innovation Subject of Shandong Province (2014-2016)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangd@sdaau.edu.cn

作者简介: 王丽(1991—), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事小麦高产高效栽培理论与技术研究。E-mail:

18854883203@163.com

收稿日期: 2016-02-22; 收到修改稿日期: 2016-04-17; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-05-17

特性及其对干物质积累与分配和产量形成影响的研究相对较少。另外, 前人的研究多是在缺硫(有效硫含量小于 10 mg kg^{-1})或土壤有效硫含量相对较低的条件下进行的^[10-12], 有关土壤有效硫含量较高地块上小麦对氮硫肥的反应尚需进一步探讨。本文选择土壤有效硫含量在 40 mg kg^{-1} 左右的地块, 以氮素利用效率不同的两个小麦品种为试验材料开展研究。拟探明两小麦品种在不同氮硫施用水平下旗叶衰老特性的差异, 揭示氮硫配施对小麦花后干物质积累分配和产量的调节作用及其与氮素利用效率的关系。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2009—2010年和2010—2011年两年度在山东农业大学实验站(泰安)进行。该区属于暖温带大陆性半湿润季风气候区。供试材料选用氮素

利用效率较低的小麦品种烟农19(Y19)和氮素利用效率较高的小麦品种汶农6号(W6), 按其最适栽培密度种植, 分别为150和225万株 hm^{-2} 。两年度均于10月7日播种, 次年6月14日收获。播种前测定0~20 cm土层土壤养分含量(表1)。

采用裂裂区试验设计, 小麦品种为主区, 施氮水平为裂区, 施硫水平为裂裂区。其中2009—2010年设2个施氮水平, 分别为0(N0)和240(N240) kg hm^{-2} ; 2个施硫水平, 分别为0(S0)和60(S60) kg hm^{-2} 。2010—2011年设3个施氮水平, 分别为0(N0)、120(N120)、240(N240) kg hm^{-2} ; 4个施硫水平, 分别为0(S0)、20(S20)、40(S40)、60(S60) kg hm^{-2} 。小区面积 $1.5 \text{ m} \times 7 \text{ m} = 10.5 \text{ m}^2$, 每处理重复3次。用尿素作氮肥, 重过磷酸钙作磷肥, 硫酸钾作硫肥和钾肥, 用氯化钾平衡钾肥用量。每公顷施磷(P_2O_5)和钾(K_2O)各166.5 kg。氮肥50%基施, 50%拔节期追施, 磷、钾和硫肥全部基施。

表1 试验地0~20 cm土层土壤养分状况

Table 1 Soil nutrient condition in the 0~20 cm soil layer of the experimental field

年份 Year	有机质 Organic matter (g kg^{-1})	全氮 Total N (g kg^{-1})	碱解氮 Alkaline N (mg kg^{-1})	有效磷 Available P (mg kg^{-1})	速效钾 Available K (mg kg^{-1})	有效硫 Available S (mg kg^{-1})
2009—2010	17.9	1.3	112.8	30.3	99.8	42.1
2010—2011	17.6	1.1	99.5	39.5	72.5	38.9

其他管理措施同一般高产田。

1.2 测定项目与方法

小麦旗叶超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(MDA)含量、可溶性蛋白质含量的测定: 取0.500 g剪碎的旗叶样品, 置预冷研钵中, 加50 mmol L⁻¹冷磷酸缓冲液(pH 7.8)5 ml, 冰浴研磨, 匀浆倒入离心管中, 冷冻离心20 min(10 000 r min⁻¹), 上清液倒入离心管中, 4℃保存。采用核黄素法^[13]测定SOD活性, 双组分光光度计法测定MDA含量, 考马斯亮蓝G-250染色法^[14]测定可溶性蛋白质含量。

小麦开花后旗叶光合速率(Pn)的测定: 用LI-6400型便携式光合仪(LI-COR公司, 美国)分别于开花后0、7、14、21和28 d上午

9:00~11:00自然光照下测定叶片的光合速率。每处理3个重复。

干物质积累与分配的测定: 于开花期和成熟期进行群体动态调查和取样, 开花期植株样品分为叶片、茎秆+叶鞘、穗三部分; 成熟期分为籽粒、叶片、茎秆+叶鞘、颖壳+穗轴四部分。样品于80℃烘至恒重, 测定干物质质量。计算公式^[15]如下:

营养器官开花前贮存干物质转移量(kg hm^{-2})=营养器官开花期干重—营养器官成熟期干重; 开花后同化干物质输入籽粒量(kg hm^{-2})=成熟期籽粒干重—营养器官花前贮存干物质转移量; 营养器官开花前贮存干物质转移量对籽粒产量的贡献率(%)=开花前营养器官贮存干物质转移量/成熟期籽粒干重×100; 开花后同化干物质输入籽粒量对

籽粒产量的贡献率(%) = 开花后同化干物质输入
籽粒量/成熟期籽粒干重 × 100。

植株全氮含量测定：取成熟期植株样品，采用国标GB2905—1982半微量凯氏定氮法测定植株各器官的含氮量。植株地上部氮素积累量和氮素利用效率的计算如下：

植株地上部氮素积累量的计算公式^[16]为：植株地上部氮素积累量(kg hm^{-2}) = 成熟期植株地上部干重 × 成熟期植株地上部含氮量；氮素利用效率的计算公式^[17]为：氮素利用效率(kg kg^{-1}) = 籽粒产量/植株地上部氮素积累量。氮肥农学利用率计算公式^[18]为：氮肥农学利用率(kg kg^{-1}) = (施氮处理产量—不施氮处理产量)/施氮量。

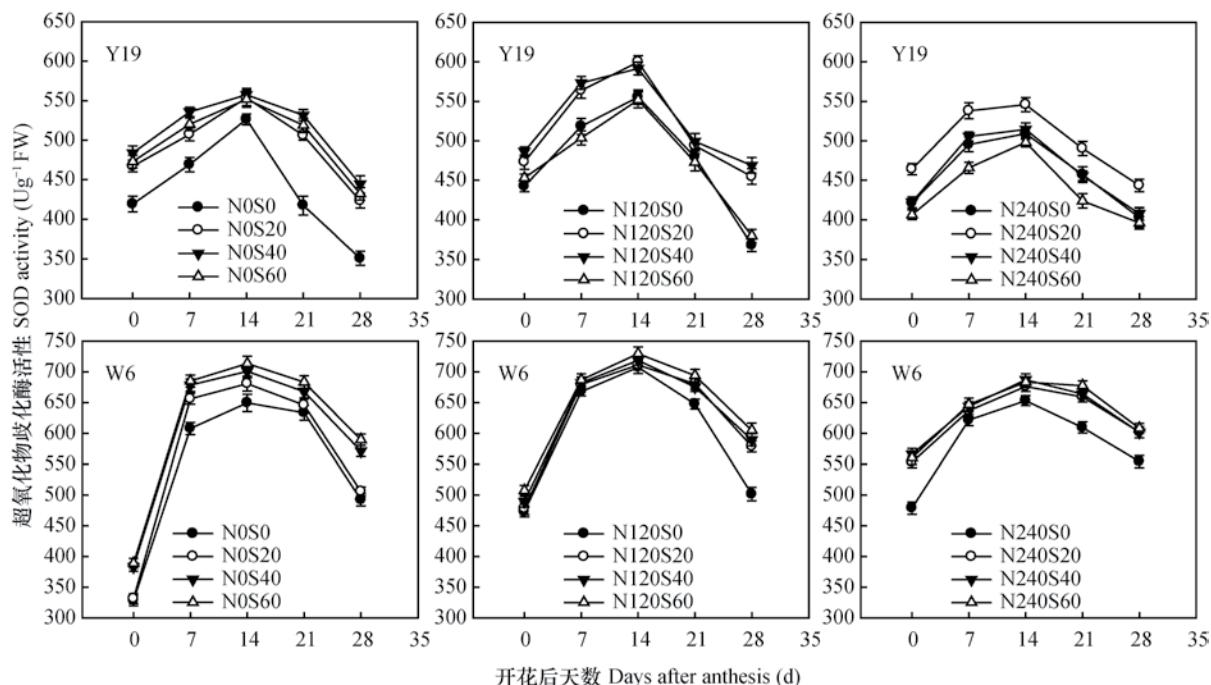
1.3 数据分析

采用Microsoft Excel 2003软件进行数据计算和绘图，用DPS 7.05统计分析软件进行差异显著性检验(LSD法)。

2 结果

2.1 小麦开花后旗叶超氧化物歧化酶(SOD)活性

各处理小麦旗叶SOD活性在开花后均呈先升高后降低的单峰曲线变化(图1)。其中，Y19小麦旗叶SOD活性在开花14 d后下降，而W6小麦旗叶SOD活性在开花21 d后下降。同一施氮水平下，Y19花后旗叶SOD活性随施硫量的增加先升高后降低，在N0水平下以S40处理最高，N120水平下以S20和S40处理较高，二者间在开花0~21 d期间无显著差异，N240水平下以S20处理最高，S60处理显著低于S0处理。N0和N120水平下，W6花后旗叶SOD活性在0~40 kg hm^{-2} 范围内随施硫量的增加呈升高趋势，S60与S40处理间无显著差异；N240水平下，W6小麦S20处理旗叶SOD活性显著高于S0处理，但S20、S40与S60处理间无显著差异。说明适



注：Y19和W6分别表示小麦品种烟农19和汶农6号。N0、N120和N240分别表示施氮0、120和240 kg hm^{-2} ，S0、S20、S40和S60分别表示施硫0、20、40和60 kg hm^{-2} ，下同 Note: Y19 and W6 refers to cultivar Yannong 19 and wennong 6, respectively. N0, N120 and N240 refers to nitrogen application rate of 0, 120 and 240 kg N hm^{-2} , respectively, and S0, S20, S40 and S60 refers to sulfur application rate of 0, 20, 40 and 60 kg S hm^{-2} , respectively. The same below

图1 不同处理对小麦开花后旗叶超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响(2010—2011)

Fig. 1 Superoxide dismutase (SOD) activity in flag leaves of wheat after anthesis as affected by treatment (2010—2011)

量施用氮硫肥可以提高小麦花后旗叶SOD活性, 过多施硫对小麦无益, 高氮(240 kg hm^{-2})高硫(60 kg hm^{-2})还会导致Y19小麦旗叶抗氧化能力显著降低。

2.2 小麦开花后旗叶丙二醛(MDA)含量

两小麦品种开花后旗叶MDA含量逐渐升高(图2), Y19旗叶MDA含量高于W6。同一品种不同处理间比较: Y19花后旗叶MDA含量, 在N0水平下以S0处理最高, S40和S60处理最低, 且S40与S60处理间无显著差异; 在N120水平下, 各处理在开花后0~14 d期间无显著差异, 开花14 d后, S20和S40处理显著低于S0和S60处理; 在N240水平下

以S60处理最高, S20处理最低, S40和S0处理居中且二者间无显著差异。W6花后旗叶MDA含量, 在N0水平下S20、S40和S60处理在开花后0~14 d期间无显著差异, 但均显著低于S0处理, 开花14 d后, S40和S60处理间仍无显著差异, 但显著低于S20和S0处理; 在N120和N240水平下, S20、S40和S60处理间无显著差异, 均显著低于S0处理。说明施硫 20 kg hm^{-2} 有利于降低小麦旗叶MDA含量, 但在较高施氮水平下继续提高施硫量, 对W6小麦的调节作用并不明显, 过多施硫还会导致Y19小麦旗叶MDA含量升高。

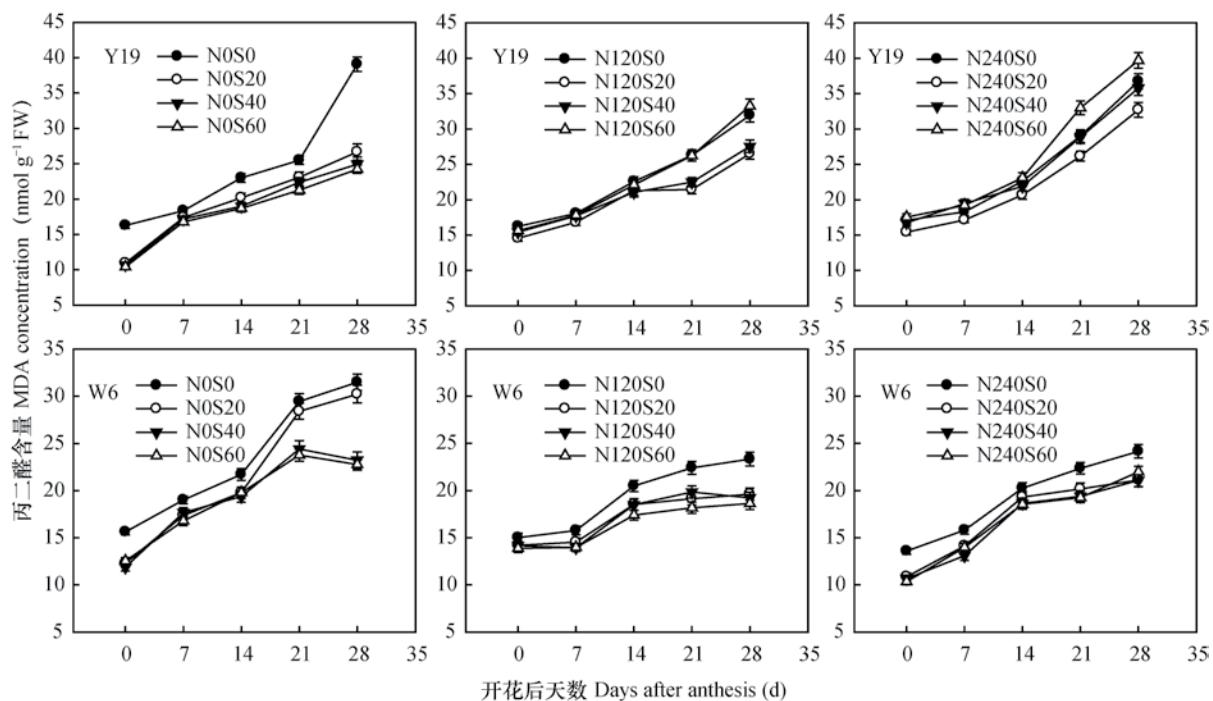


图2 不同处理对小麦开花后旗叶丙二醛(MDA)含量的影响(2010—2011)

Fig. 2 Malondialdehyde (MDA) content in flag leaves of wheat after anthesis as affected by treatment (2010—2011)

2.3 小麦开花后旗叶可溶性蛋白质含量

如图3所示, Y19开花后28 d的旗叶可溶性蛋白质含量各处理间无显著差异, 在开花后0~21 d期间, N0水平下, S20、S40和S60处理显著高于S0处理, 以S40和S60处理最高, 且二者间无显著差异; 在N120水平下, S40与S20处理间无显著差异, 但显著高于S0和S60处理; 在N240水平下, S20>S40、S0>S60。W6旗叶可溶性蛋白质含量, 在N0水平下随施硫量的增加呈升高趋势, 但S60与S40处理间无显著差异, 在N120和N240水平下, S20、S40和S60处理之间无显著差异, 均高于S0处理。说明适量施硫可提高小麦旗叶可溶

性蛋白质含量, 但在较高施氮水平下施硫量超过 20 kg hm^{-2} 对小麦旗叶可溶性蛋白质含量的正向调节作用不明显, 过多施硫反而会降低Y19小麦旗叶可溶性蛋白质含量。

2.4 小麦旗叶光合速率

从图4可以看出, Y19旗叶光合速率, 在N0水平下随施硫量的增加呈升高趋势, 但S60与S40处理间无显著差异; 在N120水平下, S20与S40处理间无显著差异, 但显著高于S0和S60处理; 在N240水平下, S20>S40、S0>S60。W6旗叶光合速率, 在N0水平下随施硫量的增加呈升高趋势, 但S60与S40处理间无显著差异, 在N120和N240水平

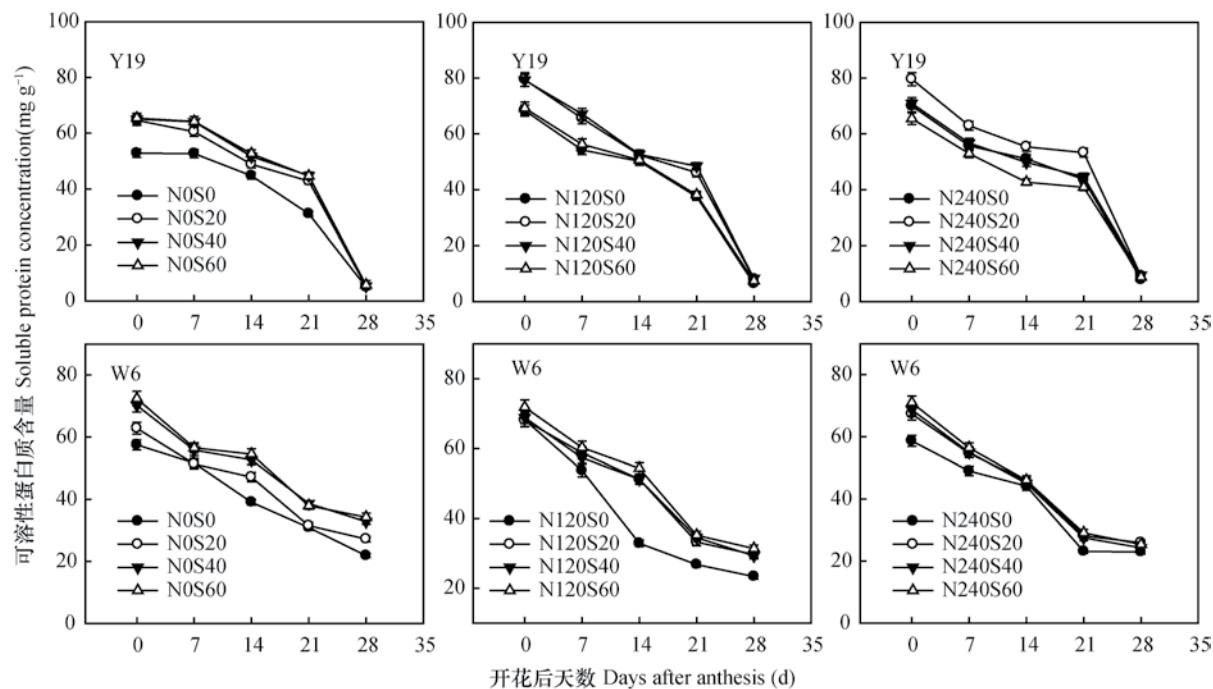


图3 不同处理对小麦开花后旗叶可溶性蛋白质含量的影响 (2010—2011)

Fig. 3 Soluble protein content in flag leaves of wheat after anthesis as affected by treatment (2010—2011)

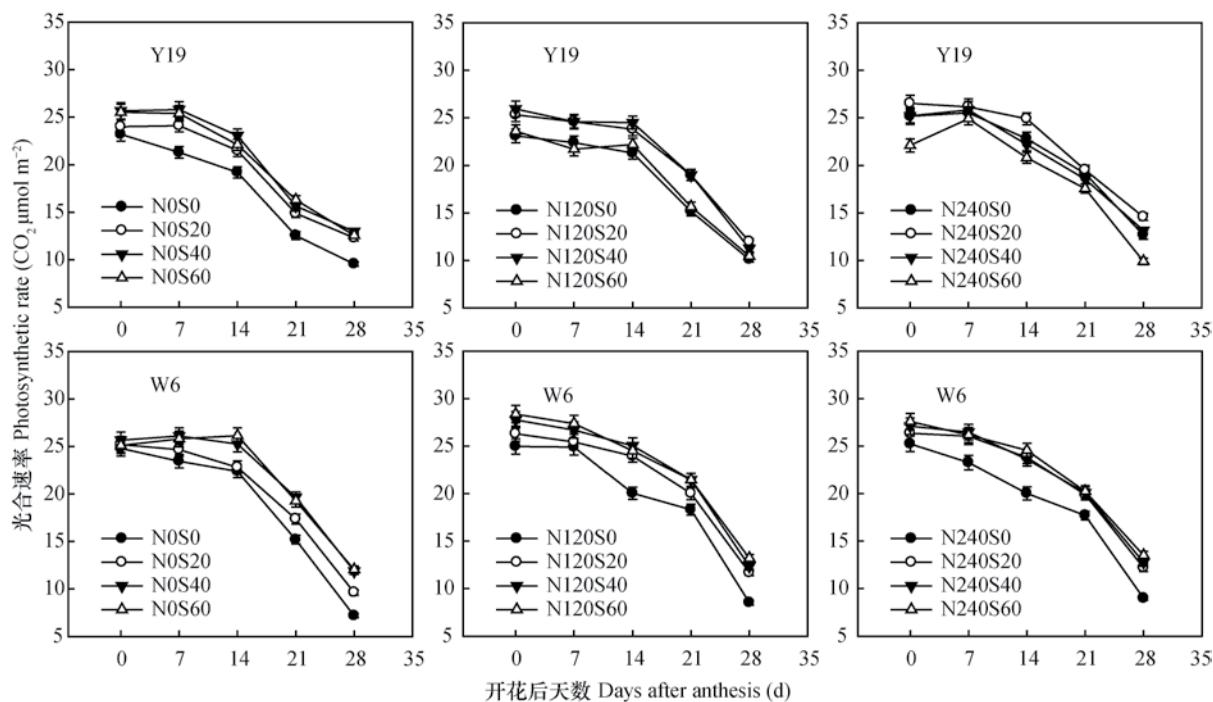


图4 不同处理对小麦旗叶光合速率的影响 (2010—2011)

Fig. 4 Photosynthetic rate of flag leaves in wheat as affected by treatment (2010—2011)

下, S20、S40和S60处理间无显著差异, 均高于S0处理。说明适量施硫可提高小麦开花后旗叶光合速率, 但在较高施氮水平下施硫量超过20 kg hm⁻²对小麦旗叶光合速率的正向调节作用不明显, 过多施硫反而会降低Y19小麦旗叶光合同化能力。

2.5 小麦开花后干物质积累与分配

从表2可以看出, 两年度试验, 品种、氮素、硫素、品种×氮素互作、品种×硫素互作、氮素×硫素互作对开花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率有显著或极显著调节作用。表3示出, Y19营养器官开花前贮存干物质转移量及其对籽粒的贡献率高于W6, 而花后同化干物质输入籽粒量及其对籽粒的贡献率低于W6。不同处理间比较, 2009—2010年, 在N0水平下施硫60 kg hm⁻²显著提高Y19和W6花后同化干物质输入籽粒量及其对籽粒的贡

献率, 在N240水平下施硫60 kg hm⁻²可提高W6开花后同化干物质输入籽粒量及其对籽粒的贡献率, 但对Y19不利。2010—2011年, Y19花后同化干物质输入籽粒量及其对籽粒的贡献率, 在N0水平下随施硫量增加呈升高趋势, 但S60与S40处理间无显著差异, 在N120和N240水平下则随施硫量增加呈先升后降趋势, 分别以S40和S20处理最高; W6花后同化干物质输入籽粒量及其对籽粒的贡献率, 在N0和N120水平下均随施硫量的增加呈升高趋势, 但S60与S40处理间无显著差异, 在N240水平下, S60、S40和S20处理间无显著差异, 均显著高于S0处理。说明在N0和N120水平下施硫40 kg hm⁻²有利于Y19和W6开花后干物质的积累及其向籽粒中的分配, 在N240水平下施硫量超过20 kg hm⁻²对小麦无益, 过多施硫还会显著降低Y19开花后干物质积累量。

表2 不同处理对小麦开花后干物质积累分配影响的方差分析 (F值)

Table 2 Variance analysis of the effects of the treatments on dry matter accumulation and distribution after anthesis in wheat (F value)

年份 Year	变异来源 Source of variation	营养器官开花前贮存 干物质转移量 ^①	开花后同化干物质 输入籽粒量 ^②	营养器官开花前贮存干物质转 移量对籽粒产量的贡献率 ^③	开花后同化干物质 输入籽粒量对籽粒 产量的贡献率 ^④
2009—2010	品种 Cultivars (C)	225.7**	11 450**	384.0**	12 609**
	氮素 Nitrogen (N)	359.7**	4 233**	11.1*	39.7**
	硫素 Sulfur (S)	1.83	1 636**	24.4**	82.8**
	品种×氮素 C×N	0.81	3 931**	83.50**	324.2**
	品种×硫素 C×S	0.85	1 224**	29.40**	98.6**
	氮素×硫素 N×S	30.5**	5 984**	187.6**	641.3**
	品种×氮素×硫素 C×N×S	1.26	3 499**	207.9**	716.6**
2010—2011	品种 Cultivars (C)	6 004**	3 105**	6412**	2141**
	氮素 Nitrogen (N)	279.6**	356.6**	70.91**	183.7**
	硫素 Sulfur (S)	1.47	248.9**	43.70**	24.88**
	品种×氮素 C×N	277.6**	631.3**	220.9**	600.5**
	品种×硫素 C×S	2.20	104.8**	8.64**	5.98**
	氮素×硫素 N×S	0.66	31.69**	5.09**	3.65**
	品种×氮素×硫素 C×N×S	1.52	15.44**	1.41	0.97

注: *和**分别表示在5%和1%水平下差异显著。下同 Note: * Significant difference at 0.05 level; ** Significant difference at 0.01 level. ①Amount of dry matter translocated from vegetative organs; ②Amount of dry matter assimilated and transferred into grain after anthesis; ③Contribution of dry matter accumulation and translocation in vegetative organs before anthesis to grain yield; ④Contribution of the dry matter assimilated and transferred into grain after anthesis to grain yield. The same below

表3 不同处理对小麦开花后干物质积累量和营养器官干物质再分配量的影响

Table 3 Effects of different treatments on dry matter accumulation and dry matter redistribution from vegetative organs to grains after anthesis in wheat

年份 Year	品种 Cultivars	处理 Treatments	营养器官开花前贮存 干物质转移量 ^① (kg hm ⁻²)	开花后同化干物质输 入籽粒量 ^② (kg hm ⁻²)	营养器官开花前贮存 干物质转移量对籽粒 产量的贡献率 ^③ (%)	开花后同化干物质输 入籽粒量对籽粒产量 的贡献率 ^④ (%)
2009—2010	烟农19 Yannong 19	N0S0	2 732c	4 343c	38.6b	61.4c
		N0S60	2 835b	5 795a	32.9d	67.2a
		N240S0	3 052a	5 757a	34.7c	65.4b
		N240S60	3 019a	4 417b	40.6a	59.4d
		汶农6号 Wennong 6	2 097d	5 708c	26.9a	73.1e
	Wennong 6	N0S60	2 209c	6 666b	24.9b	75.1b
		N240S0	2 431a	6 875ab	26.1a	73.9c
		N240S60	2 332b	7 460a	23.8c	76.2a
		N120S0	3 287b	5 839bc	36.0cd	64.0c
		N120S20	3 299b	6 252a	34.6ef	65.5ab
2010—2011	烟农19 Yannong 19	N120S40	3 262b	6 310a	34.1f	65.9a
		N120S60	3 253b	5 889b	34.9def	64.4bc
		N240S0	3 028c	5 371d	36.0cd	64.0c
		N240S20	3 097c	5 858b	34.6ef	65.4ab
		N240S40	2 987cd	5 329d	35.9cde	64.1c
	汶农6号 Wennong 6	N240S60	2 877d	4 992f	36.6c	63.4c
		N0S0	2 483b	6 044g	29.1bc	70.9de
		N0S20	2 484b	6 704e	27.0d	73.0abc
		N0S40	2 424bc	6 985cd	25.8e	74.2a
		N0S60	2 445bc	7 132bc	25.5e	74.5a
	N120S0	N120S20	2 897a	5 747h	33.5a	66.5e
		N120S40	2 906a	6 835de	29.8b	70.2d
		N120S60	2 878a	7 261ab	28.4c	71.6ed
		N240S0	2 408bc	6 323f	27.6d	72.4bc
		N240S20	2 413bc	7 010bc	25.6e	74.4a
	N240S40	N240S60	2 483b	7 000bc	25.1e	73.8ab
		N240S60	2 447bc	7 049bc	25.8e	74.2a

注：数据后不同字母表示不同处理间差异达5%显著水平。下同 Note: Values followed by different letters are significantly different at 5% level between treatments. The same below

2.6 穗粒产量与氮素利用效率

表4示出,两年度试验,品种、氮素、硫素、品种×氮素互作、品种×硫素互作、氮素×硫素互作、品种×氮素×硫素互作对植株地上部氮素积累量有极显著调节作用。品种、硫素、品种×氮素互作、品种×硫素互作、氮素×硫素互作、品种×氮素×硫素互作对小麦穗粒产量有显著或极显著调节作用。表5示出,W6的产量和氮素利用效率显著高于Y19。

不同处理间比较,2009—2010年,Y19穗粒产量表现为N240S0、N0S60>N0S0>N240S60;植株地上部氮素积累量表现为N240S0、N0S60>N240S60>N0S0;W6的产量和植株地上部氮素积累量均表现为N240S60>N240S0、N0S60>N0S0。同一施氮水平下,两品种施硫处理的氮素利用效率均低于不施硫处理;Y19施硫处理的氮肥农学利用率低于不施硫处理,而W6施硫处理的氮肥农学利用率与不施硫处理间无显著差异。

2010—2011年,Y19小麦在N0水平下,穗粒产量随施硫量增加呈升高趋势,但S60与S40处理间无显著差异,植株地上部氮素积累量随施硫量的

增加而增加,氮素利用效率则随施硫量的增加呈先升后降趋势,以S20处理最高;在N120和N240水平下,穗粒产量、植株地上部氮素积累量均呈先升后降趋势,分别以S40和S20处理最高,氮素利用效率和氮肥农学利用率均随施硫量增加呈降低趋势。同一施氮水平下,W6植株地上部氮素积累量随施硫量的增加而增加,氮素利用效率则随施硫量的增加而降低。在N0和N120水平下,随施硫量增加,W6穗粒产量呈升高趋势,但S60与S40处理间无显著差异;在N240水平下,S60、S40和S20处理间穗粒产量无显著差异,均显著高于S0处理。W6氮肥农学利用率在N120水平下表现为不施硫处理显著低于施硫处理,各施硫处理间无显著差异,在N240水平下则表现为不施硫处理高于施硫处理,各施硫处理间无显著差异,说明在一定供氮水平下适量施硫有利于W6氮肥农学利用率的提高,而在较高供氮水平下过多施硫导致W6氮肥农学利用率降低。

上述结果还表明在N0和N120水平下施硫40 kg hm⁻²可促进Y19和W6两小麦品种对氮素的吸收和积累,提高穗粒产量,在N240水平下施硫量超

表4 不同处理对小麦产量及氮素吸收利用相关性状影响的方差分析(F值)

Table 4 Variance analysis of effects of treatments on grain yield and related traits of nitrogen absorption and utilization in wheat (F value)

年份 Year	变异来源 Source of variation	籽粒产量 Grain yield	植株地上部氮素积累量 Nitrogen accumulation amount of aboveground plant	氮素利用效率 Nitrogen use efficiency
2009—2010	Cultivars (C)	42.25*	142.2**	75.40*
	Nitrogen (N)	0.28	280.3**	97.02**
	Sulfur (S)	10.18*	5 089**	53.06**
	C × N	16.66*	41.81**	4.81
	C × S	144.9**	176.5**	0.52
	N × S	328.4**	5 197**	13.71**
	C × N × S	258.0**	2 280**	0.15
2010—2011	Cultivars (C)	9523**	243.8**	11 464**
	Nitrogen (N)	280.7**	37.16**	77.27**
	Sulfur (S)	64.47**	272.2**	148.9**
	C × N	289.1**	7.94**	10.23**
	C × S	19.39**	35.61**	15.13**
	N × S	18.90**	20.56**	2.66**
	C × N × S	9.27**	21.93**	5.42**

表5 不同处理对小麦籽粒产量和氮素利用效率的影响

Table 5 Effects of treatments on grain yield and nitrogen use efficiency in wheat

年份 Year	品种 Cultivars	处理 Treatments	籽粒产量 Grain yield (kg hm ⁻²)	植株地上部氮素积累量 Nitrogen accumulation amount of aboveground plant (kg hm ⁻²)	氮素利用效率 Nitrogen use efficiency (kg kg ⁻¹)	氮肥农学利用率 N agronomic efficiency (kg kg ⁻¹)
2009—2010	烟农19 Yannong 19	N0S0	7 623b	214.3c	35.6a	—
		N0S60	7 971a	268.7a	29.7b	—
		N240S0	7 989a	263.1a	30.4b	1.53a
		N240S60	7 083c	244.2b	29.0b	-3.70b
	汶农6号 Wennong 6	N0S0	8 403b	180.2c	46.6a	—
		N0S60	8 603a	213.6b	40.3b	—
		N240S0	8 642a	215.3b	40.2b	1.13a
		N240S60	8 766a	233.8a	37.5c	0.68a
	2010—2011	烟农19 Yannong 19	N0S0	7 722e	217.9g	35.4bc
		N0S20	8 897cd	238.4f	37.3a	—
		N0S40	9 161abc	267.0de	34.3cd	—
		N0S60	9 048bcd	280.1bc	32.3e	—
		N120S0	8 726d	232.7f	37.5a	8.36a
		N120S20	9 351ab	259.6e	36.0ab	3.78b
		N120S40	9 472a	296.2a	32.0ef	2.60c
		N120S60	8 862cd	273.3ed	32.4e	-1.55e
		N240S0	7 899e	239.6f	33.0de	0.73d
		N240S20	8 754d	287.9ab	30.4fg	-0.59e
		N240S40	7 816e	264.2de	29.6g	-5.60f
		N240S60	7 169f	242.8f	29.5g	-7.83g
		汶农6号 Wennong 6	N0S0	8 627g	174.7g	49.4a
		N0S20	9 187f	192.0e	47.8b	—
		N0S40	9 409def	213.1d	44.2d	—
		N0S60	9 577cd	231.9b	41.3e	—
		N120S0	8 644g	182.6f	47.3b	0.15d
		N120S20	9 740bc	207.9d	46.8bc	4.61a
		N120S40	9 839ab	223.5e	44.0d	3.59ab
		N120S60	10 078a	243.7a	41.3e	4.18a
		N240S0	9 330ef	193.9e	48.1ab	2.52bc
		N240S20	9 523cde	208.7d	45.6cd	1.40cd
		N240S40	9 584cd	232.1b	41.3e	0.73d
		N240S60	9 597cd	248.4a	38.6f	0.08d

过 20 kg hm^{-2} 则无益于Y19小麦籽粒产量、植株地上部氮素积累量、氮素利用效率和氮肥农学利用率的提高,仍促进W6小麦氮素积累,但W6小麦籽粒产量却不再明显增加,氮素利用效率和氮肥农学利用率降低。综合分析,Y19和W6小麦分别以N120S20和N120S40处理较优,可获得较高产量和氮素利用效率。

3 讨 论

单施氮肥或硫肥有利于保持小麦灌浆后期功能叶片SOD活性,减少MDA的合成,减缓旗叶叶绿素降解,从而延缓衰老^[19-20]。在适量供氮条件下施硫也能显著提高小麦叶片叶绿素含量,减缓叶片衰老^[21]。但杨晴等^[22]的研究结果证明,氮素施用过多($>375 \text{ kg hm}^{-2}$)会导致小麦生育后期叶片SOD活性迅速下降,MDA含量呈直线上升,叶片光合功能期缩短,衰老加快。本试验结果进一步证明,适量施用氮肥或硫肥均有利于延缓小麦花后旗叶衰老,但过多施硫对小麦无益;不同小麦品种旗叶的衰老特性对较高氮硫肥施用量的响应不同,在施氮120和240 kg hm^{-2} 的条件下,施硫量超过 20 kg hm^{-2} 对W6小麦旗叶SOD活性和可溶性蛋白质含量的正向调节作用不再明显,Y19小麦旗叶抗氧化能力则显著降低。

小麦开花后的光合产物约占籽粒产量的75%以上^[23]。因此,维持开花后较高的叶片光合能力和较长的叶片功能期,是实现高产的有效途径。李廷亮等^[24]的研究表明,在 $0 \sim 180 \text{ kg hm}^{-2}$ 范围内,随施氮量增加,小麦灌浆期旗叶叶绿素含量、光合速率和气孔导度均显著增加。在 240 kg hm^{-2} 供氮水平下增施硫肥,小麦旗叶光合速率仍能随施硫量的增加而提高;但在 330 kg hm^{-2} 供氮水平下施硫则导致光合速率降低^[20]。本试验则发现,在土壤有效硫含量为 $38.9 \sim 42.1 \text{ mg kg}^{-1}$ 的条件下,即使施氮量控制在 $0 \sim 240 \text{ kg hm}^{-2}$ 范围内,在不同施氮水平下,不同小麦品种开花后旗叶光合速率对施硫量大小的反应也存在较大差异。不施N或施N 120 kg hm^{-2} 时,施硫 40 kg hm^{-2} 对Y19和W6两小麦品种均有利,继续增加施硫量至 60 kg hm^{-2} ,两小麦品种旗叶光合速率均不再继续提高,在较高施氮水平(N240)下,施硫量超过 20 kg hm^{-2} 的处理均未表现出进一步提高W6小麦旗叶光合速率的作

用,施硫 60 kg hm^{-2} 的处理则显著降低了Y19小麦旗叶光合同化能力。上述研究结果说明小麦适宜的施硫量并非随着供氮水平的提高而增加,在高供氮水平下过多施硫无益甚至有害。

前人研究发现不同小麦品种籽粒产量对施硫量的反应存在差异。在土壤有效硫含量为 15.8 mg hm^{-2} 的条件下,施硫量超过 120 mg hm^{-2} 时,豫麦49的籽粒产量仍继续增加,但豫麦66的籽粒产量不再提高^[25]。本试验所选地块土壤碱解氮和有效硫含量分别为 $99.5 \sim 112.8 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $38.9 \sim 42.1 \text{ mg kg}^{-1}$,当施氮量为0和 120 kg hm^{-2} 时,在 $0 \sim 40 \text{ kg hm}^{-2}$ 范围内施硫可明显提高Y19和W6两小麦品种籽粒产量,继续增加施硫量,W6籽粒产量不再增加,而Y19籽粒产量反而降低;当施氮量为 240 kg hm^{-2} 时,施硫量超过 20 kg hm^{-2} ,W6籽粒产量不再增加,Y19籽粒产量则随施硫量的增加而降低。说明土壤供硫水平、小麦品种和施氮水平是决定硫素适宜施用量的重要因素。Salvagiotti等^[26]研究认为施硫可以通过增加小麦吸氮量提高氮素利用效率。从本试验结果看,W6氮素利用效率显著高于Y19,虽然在同一施氮水平下和一定施硫量范围内提高施硫量显著促进Y19和W6两小麦品种对氮素的吸收和积累,但两小麦品种氮素利用效率总体表现为随施硫量增加而降低的趋势,只有Y19小麦在N0水平下施硫 20 kg hm^{-2} 的处理比不施硫处理表现出提高氮素利用效率效果,说明在本试验条件下增加施硫量促使产量提高的幅度明显小于其促使植株地上部氮素积累量增加的幅度,小麦表现为对氮素的奢侈吸收。此外,Y19和W6两品种对氮肥、硫肥的反应还表现为,氮素利用效率较高的品种在较高的氮硫供给水平下仍有较好的产量表现,而氮素利用效率相对低的品种对高氮高硫的适应性较差。

4 结 论

适量施用氮肥和硫肥有利于延缓小麦花后旗叶衰老,提高光合同化能力及花后同化干物质输入籽粒量对籽粒的贡献率,增加籽粒产量,但不同小麦品种对氮肥、硫肥施用量的响应不同,氮素利用效率较高的品种在较高的氮硫供给水平下仍有较好的光合同化和产量表现,而氮素利用效率相对低的品种对高氮高硫的适应性较差,后期易早衰。

参考文献

- [1] 郑丕尧. 作物生理学导论. 北京: 北京农业大学出版社, 1992: 121—127
Zheng P Y. Induction of crop physiology (In Chinese). Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1992: 121—127
- [2] 范雪梅, 姜东, 戴廷波, 等. 花后干旱和渍水下氮素供应对小麦旗叶衰老和粒重的影响. 土壤学报, 2005, 42 (5) : 875—879
Fan X M, Jiang D, Dai T B, et al. Effects of nitrogen supply on flag leaf senescence and grain weight in wheat grown under drought or waterlogging from anthesis to maturity (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (5) : 875—879
- [3] 冯波, 孔令安, 张宾, 等. 施氮量对垄作小麦氮肥利用率和土壤硝态氮含量的影响. 作物学报, 2012, 38 (6) : 1107—1114
Feng B, Kong L A, Zhang B, et al. Effects of nitrogen application level on nitrogen use efficiency in wheat and soil nitrate-N content under bed planting condition (In Chinese). Acta Agronomica Sinica, 2012, 38 (6) : 1107—1114
- [4] Rausch T, Wachter A. Sulfur metabolism: A versatile platform for launching defense operations. Trends in Plant Science, 2005, 10 (10) : 503—509
- [5] 高茂盛, 吴清丽, 廖允成, 等. 施氮对旱地冬小麦旗叶衰老及其活性氧代谢的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37 (6) : 73—78
Gao M S, Wu Q L, Liao Y C, et al. Aging of winter wheat flag leaves and oxygen metabolism under nitrogen provision (In Chinese). Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2009, 37 (6) : 73—78
- [6] 朱云集, 田文仲, 谢迎新, 等. 硫素对冬小麦旗叶抗坏血酸—谷胱甘肽循环系统的影响. 西北植物学报, 2010, 30 (11) : 2191—2196
Zhu Y J, Tian W Z, Xie Y X, et al. Effects of sulphur ascorbic acid and glutathione circulatory system in flag leaf of winter wheat (In Chinese). Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 30 (11) : 2191—2196
- [7] 王东, 于振文, 王旭东. 硫肥对冬小麦硫素吸收分配和产量的影响. 作物学报, 2003, 29 (5) : 791—793
Wang D, Yu Z W, Wang X D. Effect of sulfur fertilizer on sulfur absorption and distribution yield of winter wheat (In Chinese). Acta Agronomica Sinica, 2003, 29 (5) : 791—793
- [8] 蔡瑞国, 张迪, 张敏, 等. 雨养和灌溉条件下施氮量对小麦干物质积累和产量的影响. 麦类作物学报, 2014, 34 (2) : 194—202
Cai R G, Zhang D, Zhang M, et al. Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation and grain yield of winter wheat under irrigated and rainfed condition (In Chinese). Journal of Triticeae Crops, 2014, 34 (2) : 194—202
- [9] 王林林, 陈炜, 徐莹, 等. 氮素营养对小麦干物质积累与转运的影响. 西北农业学报, 2013, 22 (10) : 85—89
Wang L L, Chen W, Xu Y, et al. Nitrogen nutrition affects dry matter accumulation and transportation in winter wheat (In Chinese). Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22 (10) : 85—89
- [10] 谢迎新, 刘超, 朱云集, 等. 氮、硫配施对冬小麦氮素利用效率及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (1) : 64—71
Xie Y X, Liu C, Zhu Y J, et al. Effects of nitrogen and sulfur combined application on nitrogen use efficiency and grain yield of winter wheat (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21 (1) : 64—71
- [11] 赵玉霞, 李娜, 周芳, 等. 氮硫配施对冬小麦籽粒灌浆特性及产量的影响. 应用生态学报, 2014, 25 (5) : 1366—1372
Zhao Y X, Li N, Zhou F, et al. Effects of N and S application on grain filling characteristics and yield of winter wheat (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25 (5) : 1366—1372
- [12] Salvagiotti F, Miralles D J. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. European Journal of Agronomy, 2008, 28 (3) : 282—290
- [13] 王爱国, 罗文华, 邵从本, 等. 大豆种子超氧化物歧化酶的研究. 植物生理学报, 1983, 9 (1) : 77—84
Wang A G, Luo W H, Shao C B, et al. A study on the superoxide dismutase of soybean seeds (In Chinese). Acta Phytophysiologia Sinica, 1983, 9 (1) : 77—84
- [14] Read S M, Northcote D H. Minimization of variation in the response to different protein of the Coomassie Blue G dye-binding assay for protein. Analytical Biochemistry, 1981, 116 (1) : 53—64
- [15] 王德梅, 于振文, 张永丽, 等. 灌水对不同小麦品种物质生产及水分利用的影响. 作物学报, 2010, 30 (2) : 366—371
Wang D M, Yu Z W, Zhang Y L, et al. Effects of irrigation on dry matter production and water use of different wheat cultivars (In Chinese). Acta

- Agronomica Sinica, 2010, 30 (2) : 366—371
- [16] Delogu G, Cattivelli L, Pecchioni N, et al. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. European Journal of Agronomy, 1998, 9: 11—20
- [17] 王东, 桑晓光, 周杰, 等. 不同类型冬小麦氮、硫积累分配及利用效率的差异. 中国农业科学, 2010, 43 (22) : 4587—4597
- Wang D, Sang X G, Zhou J, et al. Differences in accumulation and distribution and use efficiency of nitrogen and sulfur in different types of winter wheat (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43 (22) : 4587—4597
- [18] 于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析. 土壤学报, 2015, 52 (6) : 1311—1324
- Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (6) : 1311—1324
- [19] 冯波, 王法宏, 刘延忠, 等. 施氮水平对不同栽培模式小麦旗叶衰老及产量的影响. 中国农学通报, 2010, 26 (8) : 189—193
- Feng B, Wang F H, Liu Y Z, et al. Effect of nitrogen application on senescence of flag leaf and grain yield in wheat in different planting models (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26 (8) : 189—193
- [20] 朱云集, 李国强, 郭天财, 等. 不同供氮条件下施硫对冬小麦光合特性及籽粒产量的影响. 水土保持学报, 2007, 21 (2) : 142—146
- Zhu Y J, Li G Q, Guo T C, et al. Effects of sulfur on photosynthesis characteristics and grain yield of winter wheat under different nitrogen application rate (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21 (2) : 142—146
- [21] 刘洋, 石慧清, 龚月桦. 硫氮配施对持绿型小麦氮素转运及叶片衰老的影响. 西北植物学报, 2012, 32 (6) : 1206—1213
- Liu Y, Shi H Q, Gong Y H. Effects of sulfur and nitrogen fertilizer combination on nitrogen transfer and leaf senescence in stay-green wheat (In Chinese). Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 32 (6) : 1206—1213
- [22] 杨晴, 李雁鸣, 肖凯, 等. 不同施氮量对小麦旗叶衰老特性和产量性状的影响. 河北农业大学学报, 2002, 25 (4) : 20—24
- Yang Q, Li Y M, Xiao K, et al. Effect of different amount of nitrogen on flag leaf senescence and yield components of wheat (In Chinese). Journal of Agricultural University of Hebei, 2002, 25 (4) : 20—24
- [23] Mu H, Jiang D, Wollenweber B, et al. Long-term low radiation decreases leaf photosynthesis, photochemical efficiency and grain yield in winter wheat. Journal of Agronomy and Crop Science, 2010, 196 (1) : 38—47
- [24] 李廷亮, 谢英荷, 洪坚平, 等. 施氮量对晋南旱地冬小麦光合特性、产量及氮素利用的影响. 作物学报, 2013, 39 (4) : 704—711
- Li T L, Xie Y H, Hong J P, et al. Effects of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics, yield, and nitrogen utilization in rainfed winter wheat in southern Shanxi (In Chinese). Acta Agronomica Sinica, 2013, 39 (4) : 704—711
- [25] 谢迎新, 朱云集, 郭天财, 等. 施用硫肥对冬小麦光合特性及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (2) : 403—409
- Xie Y X, Zhu Y J, Guo T C, et al. Effects of sulphureous fertilization on photosynthetic and physiological characteristics and yields of winter wheat (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15 (2) : 403—409
- [26] Salvagiotti F, Castellarin J M, Miralles D J, et al. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. Field Crops Research, 2009, 113 (2) : 170—177

Interactive Effects of Nitrogen and Sulfur on Flag Leaf Senescence, Yield and Nitrogen Use Efficiency of Winter Wheat

WANG Li WANG Dong[†] ZHOU Jie HAN Kun

(College of Agronomy, Shandong Agricultural University/ State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract 【Objective】 Nitrogen (N) and sulfur (S) are nutrient elements essential to winter wheat in growth and development. The purpose of this article was to determine the effects of nitrogen and sulfur and their interaction on flag leaf senescence, photosynthetic rate after anthesis, accumulation and distribution of

dry matter, grain yield and nitrogen use efficiency (NUE) of winter wheat. **【Method】** A field experiment, designed to have two cultivars (Yannong 19 and Wennong 6) of wheat, three levels of N application rate, that is 0 (N0), 120 (N120) and 240 kg N hm⁻² (N240) and four levels of S application rate, that is 0 (S0), 20 (S20), 40 (S40) and 60 kg S hm⁻² (S60), was carried out. **【Result】** Results show that Wennong 6 was higher than Yannong 19 in all the four following indices, that is, superoxide dismutase (SOD) activity in flag leaf, photosynthetic rate (Pn) in flag leaf, yield, and NUE. Application of an appropriate rate of S in addition to the application of a certain amount of nitrogen significantly increased the activity of SOD, the concentration of soluble protein, Pn and dry matter accumulation in flag leaf after anthesis, and hence nitrogen accumulation in the shoot and grain yield in both cultivars of wheat. In the plots applied with 120 kg hm⁻² of N and over 40 kg hm⁻² of S or with 240 kg hm⁻² of N and over 20 kg hm⁻² of S, nitrogen accumulation in the shoot kept on rising, but no more positive effects on antioxidant ability and photosynthetic assimilation capacity of the flag leaf and grain yield were observed in Wennong 6, while SOD activity, soluble protein concentration and Pn in the flag leaf, nitrogen accumulation in the shoot and grain yield all declined in Yannong 19. **【Conclusion】** In the plots the same in N application rate, NUE of the two cultivars generally decreased with increasing sulfur rate. In the plots where soil available sulfur in the 0~20 cm soil layer was in the range of 38.9~42.1 mg kg⁻¹, application of an appropriate amount of N and S could delay senescence of the flag leaves was delayed, thus increasing photosynthetic assimilation capacity of the flag leaf and grain yield in both wheat varieties, but the two varieties differed in response to application of relatively high rates of N and S. The one, higher in NUE, still performed quite well in photosynthetic assimilation and yield, while the one, lower in NUE, was not so good in adaptability to a high application rate of N or S and tended to start senescence earlier at the late stage, thus affecting its yield and NUE.

Key words Wheat; Interactive effects of nitrogen and sulfur; Superoxide dismutase; Dry matter; Grain yield; Nitrogen use efficiency

(责任编辑: 陈荣府)