

高氮条件下硫氮互作对冬小麦幼苗生长及氮、硫吸收利用的影响

周杰¹, 王东^{1*}, 满建国¹, 谷淑波¹, 陈茂学², 于振文¹

(1 山东农业大学农学院, 作物生物学国家重点实验室, 农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 山东泰安 271018; 2 山东农业大学信息科学与工程学院, 山东泰安 271018)

摘要: 本试验在水培条件下, 研究了不同氮、硫水平对小麦幼苗生长及氮、硫吸收利用的影响。结果表明, 同一供氮水平下, 在 0.15 ~ 2.40 mmol/L 供硫水平范围内, 小麦幼苗根系活力随供硫水平的提高而显著下降。在 4 mmol/L 供氮水平下提高供硫水平, 小麦幼苗植株地上部含硫量和含氮量均增加, 叶片光合速率提高, 对叶片和次生根的发育均有促进作用, 增加了地上部和根系干物质积累量, 但硫素利用效率和氮素利用效率降低。在 8 mmol/L 供氮水平下, 随供硫水平的提高, 小麦幼苗地上部含硫量增加, 含氮量无显著变化; 供硫水平过高则导致幼苗叶片光合同化能力降低, 对幼苗发育、地上部和根部干物质及氮、硫素积累不利, 氮、硫利用效率降低。在 0.15 mmol/L 供硫水平下提高供氮水平有利于增加小麦幼苗地上部和根系含氮量, 在 2.40 mmol/L 供硫水平下提高供氮水平对小麦幼苗地上部和根系含氮量无显著影响。说明在一定的氮、硫供应水平下, 氮素和硫素之间存在互促效应; 供应水平过高, 则相互抑制, 不利于小麦对氮、硫的吸收和利用。不同品种对氮、硫供应水平的反应不同, 与鲁麦 21 和烟农 19 相比, 在 4 mmol/L 供氮水平下, 较高的供硫水平更有利于豫麦 34 和淄麦 12 各器官硫素和氮素的积累; 在 8 mmol/L 供氮水平下, 豫麦 34 和淄麦 12 对过高供硫水平的耐受能力较强。

关键词: 冬小麦; 氮; 硫; 吸收; 利用

中图分类号: S512.1.01 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2012)01-0042-10

Effects of interaction of nitrogen and sulfur on seedling growth, uptake and utilization of nitrogen and sulfur of winter wheat under high nitrogen conditions

ZHOU Jie¹, WANG Dong^{1*}, MAN Jian-guo¹, GU Shu-bo¹, CHEN Mao-xue², YU Zhen-wen¹

(1 College of Agronomy, Shandong Agricultural University/ State Key Laboratory of Crop Biology / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Production, Ministry of Agriculture, Taian, Shandong 271018, China;

2 College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract: The effects of interaction between nitrogen and sulfur fertilization on seedling growth, uptake and utilization of nitrogen and sulfur of winter wheat were studied in hydroponic conditions. The results show that under the same nitrogen level, the activities of wheat root are decreased significantly in the levels of sulfur from 0.15 mmol/L to 2.40 mmol/L. Under the 4 mmol/L of nitrogen level, the contents of sulfur and nitrogen in shoots of seedlings are increased with the increase of sulfur levels, the photosynthetic rates of leaves are increased, the development of leaves and secondary roots are promoted, and the dry matter accumulations in shoots and roots are increased, while the use efficiencies of sulfur and nitrogen are decreased. Under the 8 mmol/L of nitrogen level, the sulfur contents of wheat shoots are increased with the increase of sulfur levels, while there are not significant changes in the nitrogen

收稿日期: 2011-04-27 接受日期: 2011-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(30800673); 国家小麦产业技术体系项目(CARS-3-1-19)资助。

作者简介: 周杰(1986—), 女, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事小麦营养生理研究。E-mail: sdauzhoujie@163.com

* 通讯作者 E-mail: wangd@sda.u.edu.cn

contents, and the excessive sulfur application can result in the reduce of the ability of photosynthesis. It is also not matter and nitrogen and sulfur in shoots and roots. Under the 0.15 mmol/L of sulfur level, it is conducive to improve the contents of nitrogen in shoots and roots with the increase of nitrogen levels. Under the 2.40 mmol/L of sulfur level, there are no significant differences in the contents of nitrogen in shoots and roots. The results indicate that at certain levels of nitrogen and sulfur application, there is mutual promotion between nitrogen and sulfur, at too high levels of nitrogen and sulfur application, there is mutual inhibition between them, which is not conducive to the absorptions and uses of nitrogen and sulfur in wheat. The responses of different cultivars to the nitrogen and sulfur fertilization are different. Under the 4 mmol/L nitrogen level, higher level of sulfur is more conducive to the accumulations of sulfur and nitrogen in different organs of Yumai 34 and Zimai 12 compared to those of Lumai 21 and Yannong 19, and under the 8 mmol/L nitrogen level, the tolerance abilities of Yumai 34 and Zimai 12 against excessive sulfur are higher.

Key words: winter wheat; nitrogen; sulfur; uptake; utilization

硫和氮在植株体内的生理功能和同化途径相似,氮、硫中的一种元素缺乏会抑制另一种元素的吸收和同化^[1-5]。在低硫和低氮土壤上,单独施用氮和硫,对小麦的干物质产量没有影响,配合施用会显著增加干物质产量,也显著提高植株氮、硫含量和吸收量^[6]。Salvagiotti 和 Miralles^[7]研究表明,随施氮量的增加,硫对小麦叶面积指数和光能辐射截获量的影响增大;与低硫条件下施氮导致的植株干物质积累量的增加量相比,高硫条件下施氮,植株干物质积累量显著增加。朱云集等^[8]的研究表明,在较高施氮量条件下适当施硫有利于小麦子粒产量的提高,而在低氮条件下过多施硫会导致减产。刘宝存等^[9]则认为,在低氮水平下,小麦施硫肥的增产效果最佳。Thomason 等^[10]研究认为,氮硫配合追施对小麦产量并无显著影响。可以看出前人的研究结果尚有较大差异。本文选用 4 个小麦品种,在水培条件下探讨不同氮、硫水平组合对冬小麦幼苗生长及氮、硫吸收利用的影响,以期进一步深化对小麦氮、硫营养互作关系的认识,并为氮、硫肥的合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2009 年 10 月至 2010 年 1 月在山东农业大学温室进行,采用水培方式。供试品种为高产小麦品种鲁麦 21、烟农 19、豫麦 34 和淄麦 12。将精选的小麦种子先用 1.2% NaClO 溶液消毒 20 min,用去离子水多次清洗后,于 25℃ 浸种暗催芽,待种子露白后,选择露白一致的种子,放入培养皿中,用去离子水在 25℃ 培养箱中培养至第一叶完全展开,再移植于相应处理的培养液中。

水培营养液成分采用 Hoagland 营养配方。在钾、磷、钙及微量元素一致的基础上,设 2 个供氮水平,分别为 4(N₄)、8(N₈) mmol/L,3 个供硫水平,分别为 0.15(S_{0.15})、0.60(S_{0.60})、2.40(S_{2.40}) mmol/L,共计 6 个氮硫组合,依次记为 N₄S_{0.15}、N₄S_{0.60}、N₄S_{2.40}、N₈S_{0.15}、N₈S_{0.60}、N₈S_{2.40},采用完全随机区组设计,每处理重复 3 次,每重复 50 株。不同处理的 Hoagland 营养液中各种化合物的浓度如表 1。水培试验在塑料箱中进行,塑料箱长 56 cm、宽 35 cm、高 16 cm。箱内悬挂放置长 55 cm × 宽 34 cm 塑料培养钵板,培养钵板分 20 行 10 列,共 200 孔,每孔移栽 1 株麦苗。营养液 pH 值 7.0 ± 0.1,培养期间每隔 1 d 调节 pH 值,每 3 d 更换营养液 1 次。

1.2 测定项目与方法

于小麦移栽后 74 d,上午 9:00 ~ 11:00,选幼苗主茎倒二叶片(展开叶),用 LI6400 型便携式光合仪测定自然光照下叶片的光合速率。小麦移栽后 75 d,每处理取 30 株,采用 TTC 比色法^[11]测定小麦幼苗根系活力。小麦移栽后 80 d,将幼苗植株全部收获,调查主茎叶龄、分蘖数、单株次生根条数,并将地上部分和根系分离,于 70℃ 烘至恒重,称重计算地上部和根系干物质积累量。地上部和根系烘干样品粉碎后测定全氮和全硫含量。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,半微量凯氏定氮法测氮^[12];HNO₃-HClO₄ 消煮,用日本岛津等离子体分析仪测硫^[13]。

1.3 数据处理

数据统计分析用 DPS 2000 数据处理系统进行。参照 Delogu 等^[14]的方法计算:氮(硫)素利用效率 = 植株(地上部 + 根部)干物质积累量/植株(地上部 + 根部)氮(硫)素积累量。

表 1 不同处理 Hoagland 营养液中各种化合物的浓度

Table 1 The concentrations of various compounds in Hoagland nutrient solution in different treatments

化合物 Compound	单位 Unit	处理 Treatments					
		N ₄ S _{0.15}	N ₄ S _{0.60}	N ₄ S _{2.40}	N ₈ S _{0.15}	N ₈ S _{0.60}	N ₈ S _{0.60}
KH ₂ PO ₄	mmol/L	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
MgSO ₄ · 7H ₂ O	mmol/L	0.2	—	0.5	0.2	—	0.5
K ₂ SO ₄	mmol/L	—	—	0.9	—	—	0.9
KCl	mmol/L	1.8	1.8	—	1.8	1.8	—
CaCl ₂	mmol/L	2.5	1.9	1.5	2.5	1.9	1.5
(NH ₄) ₂ SO ₄ · H ₂ O	mmol/L	—	0.6	1.0	—	0.6	1.0
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	mmol/L	—	0.6	1.0	—	0.6	1.0
MgCl ₂	mmol/L	0.4	0.5	—	0.4	0.5	—
NH ₄ NO ₃	mmol/L	2.0	0.8	—	4.0	2.8	2.0
H ₃ BO ₃	μmol/L	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ · 4H ₂ O	μmol/L	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
CuCl ₂	μmol/L	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ZnCl ₂	μmol/L	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
MnCl ₂	μmol/L	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
FeEDTA	μmol/L	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

2 结果与分析

2.1 氮硫互作对小麦生长和干物质积累的影响

由表 2 看出,在 N₄ 水平下,鲁麦 21 和烟农 19 主茎叶龄、分蘖数和单株次生根数均以 S_{0.60} 处理最高;豫麦 34 和淄麦 12 主茎叶龄和单株次生根数均以 S_{2.40} 处理最高,不同供硫水平的分蘖数无显著差异。在 N₈ 水平下,随供硫水平提高,各品种分蘖数均降低,单株次生根数先增加后降低,以 S_{0.60} 处理最高。

表 3 显示,在 N₄ 水平下,随供硫水平提高,豫麦 34 和淄麦 12 地上部和根干重增加,鲁麦 21 和烟农 19 地上部和根干重先增加后降低。在 N₈ 水平下,随供硫水平提高,豫麦 34 和淄麦 12 地上部和根干重先增加后降低,鲁麦 21 和烟农 19 地上部干重显著降低。说明在 4 mmol/L 供氮水平下,适当提高供硫水平有利于小麦幼苗叶片和次生根的发育,增加地上部和根部干物质积累量。在高供氮水平下,供硫水平过高对小麦幼苗发育和干物质积累不利;豫麦 34 和淄麦 12 对高供硫水平的耐受能力比鲁麦 21 和烟农 19 强。

2.2 氮硫互作对小麦幼苗根系活力的影响

品种间比较,鲁麦 21 和烟农 19 各处理的根系活力均高于豫麦 34 和淄麦 12(表 4)。在 N₄ 和 N₈ 水平下,各品种根系活力均随供硫水平的提高而降低。同一供硫水平下,各品种不同供氮水平的根系活力无显著差异。说明在 4~8 mmol/L 供氮水平范围内,氮水平的变化对小麦根系活力无显著影响,供硫水平高于 0.15 mmol/L 会导致小麦根系活力下降。

2.3 氮硫互作对小麦地上部植株和根系含硫量的影响

由表 5 可以看出,在 N₄ 水平下,随供硫水平的提高,各品种地上部植株含硫量均显著增加,豫麦 34 和淄麦 12 根部含硫量亦显著增加,鲁麦 21 和烟农 19 S_{2.40} 处理的根部含硫量与 S_{0.60} 处理的无显著差异,但显著高于 S_{0.15} 处理。在 N₈ 水平下,随供硫水平提高,鲁麦 21 和烟农 19 地上部植株含硫量显著增加,其 S_{2.40} 处理的根部含硫量与 S_{0.60} 处理的无显著差异,均显著高于 S_{0.15} 处理;豫麦 34 和淄麦 12 的地上部和根部含硫量均表现为 S_{0.60} 处理与 S_{0.15} 处理间无显著差异,均显著低于 S_{2.40} 处理。同一供硫

表 2 不同处理对小麦生长的影响

Table 2 Effects of different treatments on the growth of wheat

品种 Cultivar	处理 Treat.	项目 Item			品种 Cultivar	处理 Treat.	项目 Item		
		主茎叶龄 Main-stem leaf age (No.)	分蘖数 TN (stem/plant)	单株次生根数 SRN (No.)			主茎叶龄 Main-stem leaf age (No.)	分蘖数 TN (stem/plant)	单株次生根数 SRN (No.)
鲁麦 21 Lumai 21	N ₄ S _{0.15}	6.7 a	1.05 c	6.0 c	豫麦 34 Yumai 34	N ₄ S _{0.15}	6.4 b	1.00 b	5.1 c
	N ₄ S _{0.60}	6.9 a	1.40 b	7.4 b		N ₄ S _{0.60}	6.7 ab	1.00 b	5.6 bc
	N ₄ S _{2.40}	6.7 a	1.00 c	6.1c		N ₄ S _{2.40}	7.0 a	1.00 b	7.4 a
	N ₈ S _{0.15}	6.9 a	1.70 a	6.7 bc		N ₈ S _{0.15}	6.9 a	1.20 a	5.6 bc
	N ₈ S _{0.60}	7.0 a	1.40 b	8.6 a		N ₈ S _{0.60}	6.6 ab	1.10 ab	7.8 a
	N ₈ S _{2.40}	7.0 a	1.00 c	7.3 b		N ₈ S _{2.40}	6.4 b	1.00 b	6.8 ab
烟农 19 Yannong 19	N ₄ S _{0.15}	6.8 ab	1.00 c	5.1 bc	淄麦 12 Zimai 12	N ₄ S _{0.15}	6.7 abc	1.00 b	7.2 c
	N ₄ S _{0.60}	7.2 a	1.35 a	6.5 a		N ₄ S _{0.60}	6.6 bc	1.00 b	8.0 bc
	N ₄ S _{2.40}	6.7 b	1.00 c	4.8 bc		N ₄ S _{2.40}	7.1 a	1.10 ab	8.6 ab
	N ₈ S _{0.15}	6.6 b	1.20 b	5.7 ab		N ₈ S _{0.15}	7.0 ab	1.20 a	8.5 ab
	N ₈ S _{0.60}	6.6 b	1.00 c	6.3 a		N ₈ S _{0.60}	6.7 abc	1.20 a	9.4 a
	N ₈ S _{2.40}	6.5 b	1.00 c	4.6 c		N ₈ S _{2.40}	6.4 c	1.00 b	8.5 ab

注 (Note): TN—Tiller number; SRN—The secondary root numbers per plant. 同列数值后不同字母表示同一品种不同处理间在 5% 水平上差异显著 Values followed by different letters within a column for a cultivar are significantly different between treatments at the 5% level.

表 3 不同处理对小麦干物质积累的影响 (mg/plant)

Table 3 Effects of different treatments on the dry matter accumulation of wheat

项目 Item	处理 Treatment	品种 Cultivar			
		鲁麦 21 Lumai 21	烟农 19 Yannong 19	豫麦 34 Yumai 34	淄麦 12 Zimai 12
地上部干重 Shoot dry weight	N ₄ S _{0.15}	202.0 e	174.5 c	319.5 d	205.0 c
	N ₄ S _{0.60}	272.0 b	200.0 b	346.0 cd	245.5 b
	N ₄ S _{2.40}	207.5 de	167.0 c	375.0 b	286.0 a
	N ₈ S _{0.15}	327.5 a	229.5 a	366.5 bc	235.5 b
	N ₈ S _{0.60}	260.0 bc	202.5 b	427.5 a	257.1 b
	N ₈ S _{2.40}	236.0 cd	138.0 d	320.5 d	203.5 c
根干重 Root dry weight	N ₄ S _{0.15}	41.0 c	27.4 c	38.5 d	50.4 d
	N ₄ S _{0.60}	46.0 b	34.3 a	41.3 cd	55.6 ab
	N ₄ S _{2.40}	35.5 d	30.8 b	43.9 bc	58.5 a
	N ₈ S _{0.15}	49.0 ab	35.6 a	46.6 b	54.8 bc
	N ₈ S _{0.60}	53.0 a	34.5 a	52.2 a	58.3 a
	N ₈ S _{2.40}	50.0 ab	23.2 d	39.1 d	52.1 cd

注 (Note): 同一品种和器官不同处理间比较,同列不同字母的值表示在 5% 水平上差异显著 Values followed by different letters within a column for a cultivar and an organ are significantly different between treatments at the 5% level.

表 4 不同处理对小麦根系活力的影响 [mg/(g·h), FW]

Table 4 Effects of different treatments on root activity of wheat

处理 Treatment	品种 Cultivar			
	鲁麦 21	烟农 19	豫麦 34	淄麦 12
	Lumai 21	Yannong 19	Yumai 34	Zimai 12
N ₄ S _{0.15}	5.15 a	5.21 a	3.64 a	4.08 a
N ₄ S _{0.60}	4.62 b	4.12 b	2.88 b	3.14 b
N ₄ S _{2.40}	4.07 c	3.33 c	2.24 c	2.60 c
N ₈ S _{0.15}	4.97 a	5.39 a	3.56 a	3.80 a
N ₈ S _{0.60}	4.65 b	3.75 bc	2.83 b	3.25 b
N ₈ S _{2.40}	4.13 c	3.28 c	2.19 c	2.47 c

注 (Note): 同一品种不同处理间比较, 同列不同字母的值表示在 5% 水平上差异显著 Values followed by different letters within a column for a cultivar are significantly different between treatments at the 5% level.

表 5 不同处理对小麦地上部植株和根系含硫量的影响 (g/kg)

Table 5 Effects of different treatments on the contents of sulfur in shoots and roots of wheat

器官 Organ	处理 Treatment	品种 Cultivar			
		鲁麦 21	烟农 19	豫麦 34	淄麦 12
		Lumai 21	Yannong 19	Yumai 34	Zimai 12
地上部 Shoot	N ₄ S _{0.15}	4.28 c	4.67 d	5.14 c	4.51 e
	N ₄ S _{0.60}	5.49 b	5.59 bc	5.75 b	5.32 bc
	N ₄ S _{2.40}	6.83 a	6.27 a	6.48 a	6.01 a
	N ₈ S _{0.15}	4.31 c	4.31 d	5.51 bc	4.71 de
	N ₈ S _{0.60}	5.73 b	5.38 c	5.69 b	5.07 cd
	N ₈ S _{2.40}	6.71 a	5.96 ab	6.41 a	5.67 ab
根系 Root	N ₄ S _{0.15}	5.35b	5.13 bc	5.50 c	4.75 d
	N ₄ S _{0.60}	6.37a	5.77 a	6.19 b	5.29 bc
	N ₄ S _{2.40}	6.47a	5.80 a	7.23 a	6.10 a
	N ₈ S _{0.15}	5.20b	4.81 c	5.67 bc	4.62 d
	N ₈ S _{0.60}	6.09a	5.54 ab	5.71 bc	4.99 cd
	N ₈ S _{2.40}	6.16a	5.75 a	7.39 a	5.63 ab

注 (Note): 同一品种和器官不同处理间比较, 同列标以不同字母的值在 5% 水平上差异显著 Values followed by different letters within a column for a cultivar and an organ are significantly different between treatments at the 5% level.

在 S_{0.15} 水平下, 各品种地上部和根部含氮量均表现为 N₈ 显著高于 N₄ 处理; 在 S_{0.60} 水平下, 各品种根部含氮量亦表现为 N₈ 显著高于 N₄ 处理, 鲁麦 21 和烟农 19 地上部含氮量为 N₈ 显著高于 N₄ 处理, 而豫麦 34 和淄麦 12 N₈ 处理的地上部含氮量与 N₄ 处

水平下, 各品种不同供氮水平的地上部植株和根部含硫量无显著差异。说明在 4 ~ 8 mmol/L 供氮水平范围内, 供氮水平变化对小麦地上部植株和根部含硫量无显著影响。在 N₄ 水平下, 0.15 ~ 2.40 mmol/L 供硫水平范围内, 提高供硫水平可显著增加小麦地上部植株含硫量。在 N₈ 水平下, 较高的供硫水平有利于提高豫麦 34 和淄麦 12 地上部和根部含硫量, 而对鲁麦 21 和烟农 19 根部含硫量无显著影响。

2.4 氮硫互作对小麦地上部植株和根系含氮量的影响

表 6 显示, 各品种地上部植株含氮量, 在 N₄ 水平下随供硫水平的提高而增加, S_{2.40} 处理显著高于 S_{0.15} 处理; 在 N₈ 水平下随供硫水平的提高无显著变化。说明在 4 mmol/L 供氮水平下提高供硫水平有利于小麦地上部植株含氮量的增加, 在高供氮水平下提高供硫水平对地上部植株含氮量无显著影响。

理的无显著差异。在 S_{2.40} 水平下, 各品种地上部和根部含氮量均表现为 N₈ 与 N₄ 处理无显著差异。说明在一定供硫水平下提高供氮水平有利于增加小麦地上部和根部的含氮量; 供硫水平过高, 提高供氮水平对小麦地上部和根部含氮量无显著影响。

表 6 不同处理对小麦地上部植株和根系含氮量的影响(g/kg)
Table 6 Effects of different treatments on the contents of nitrogen in shoots and roots of wheat

器官 Organ	处理 Treatment	品种 Cultivar			
		鲁麦 21 Lumai 21	烟农 19 Yannong 19	豫麦 34 Yumai 34	淄麦 12 Zimai 12
地上部 Shoot	N ₄ S _{0.15}	44.2 c	41.4 c	40.8 b	48.1 b
	N ₄ S _{0.60}	45.5 bc	44.6 bc	47.9 a	54.3 a
	N ₄ S _{2.40}	48.6 ab	47.2 ab	48.9 a	55.0 a
	N ₈ S _{0.15}	49.3 ab	45.8 ab	47.7 a	53.8 a
	N ₈ S _{0.60}	50.4 a	49.5 a	49.1 a	54.2 a
	N ₈ S _{2.40}	49.8 a	47.9 ab	50.6 a	55.1 a
根系 Root	N ₄ S _{0.15}	34.5 c	32.6 c	41.4 c	39.9 b
	N ₄ S _{0.60}	35.1 c	35.0 bc	42.2 bc	40.4 b
	N ₄ S _{2.40}	36.4 bc	36.2 abc	43.9 abc	43.1 ab
	N ₈ S _{0.15}	39.2 ab	36.9 ab	45.7 ab	44.5 a
	N ₈ S _{0.60}	41.5 a	40.1 a	46.7 a	45.6 a
	N ₈ S _{2.40}	38.6 ab	39.3 a	47.6 a	46.0 a

注(Notes): 同一品种和器官不同处理间比较, 同列标以不同字母的值在5%水平上差异显著 Values followed by different letters within a column for a cultivar and an organ are significantly different between treatments at the 5% level.

2.5 氮硫互作对小麦叶片光合速率的影响

从表 7 的结果可以看出, 在 N₄ 水平下, 鲁麦 21 和烟农 19 叶片光合速率随供硫水平的提高显著增大, 豫麦 34 和淄麦 12 的 S_{2.40} 与 S_{0.60} 处理间无显著差异, 但均显著高于 S_{0.15} 处理。在 N₈ 水平下, 鲁麦 21 和烟农 19 叶片光合速率随供硫水平的提高而降低, 豫麦 34 和淄麦 12 随供硫水平的提高先增加后降低。说明在 4 mmol/L 供氮水平下, 适当提高供硫水平有利于小麦幼苗叶片光合速率的提高, 在高供氮水平下, 供硫水平过高会降低小麦幼苗叶片的光合同化能力。

2.6 氮硫互作对小麦幼苗氮、硫积累与利用的影响

在 N₄ 水平下, 随供硫水平提高, 豫麦 34 和淄麦 12 地上部和根系硫素积累量和氮素积累量均增加, 鲁麦 21 和烟农 19 地上部和根系硫素积累量和氮素积累量先增加后降低, 以 S_{0.60} 处理最高。在 N₈ 水平下, 随供硫水平提高, 豫麦 34 和淄麦 12 地上部硫素积累量与地上部和根系的氮素积累量先增加后降低, 鲁麦 21 和烟农 19 地上部氮素积累量降低, 根部氮素积累量先增加后降低。说明在 4 mmol/L 供氮水平下, 与鲁麦 21 和烟农 19 相比, 较高的供硫水平

表 7 不同处理对小麦叶片光合速率的影响

Table 7 Effects of different treatments on photosynthetic rates in leaves of wheat [CO₂ μmol/(m²·s)]

处理 Treatment	品种 Cultivar			
	鲁麦 21 Lumai 21	烟农 19 Yannong 19	豫麦 34 Yumai 34	淄麦 12 Zimai 12
N ₄ S _{0.15}	8.1 c	8.0 c	6.2 d	9.5 b
N ₄ S _{0.60}	10.8 b	10.6 b	10.9 b	13.7 a
N ₄ S _{2.40}	12.7 a	12.3 a	10.8 b	13.1 a
N ₈ S _{0.15}	11.3 b	12.9 a	10.6 b	12.9 a
N ₈ S _{0.60}	11.0 b	10.5 b	13.2 a	14.3 a
N ₈ S _{2.40}	10.6 b	8.5 c	8.6 c	10.9 b

注(Notes): 同一品种不同处理间比较, 同列标以不同字母的值在5%水平上差异显著 Values followed by different letters within a column for a cultivar are significantly different between treatments at the 5% level.

更有利于豫麦 34 和淄麦 12 各器官硫素和氮素的积累; 在高供氮水平下, 过高的供硫水平对各品种地上部和根系氮、硫的积累均无益(表 8)。

表 8 不同处理对小麦植株氮、硫积累量的影响 (mg/plant)
Table 8 Effects of different treatments on the amounts of sulfur and nitrogen accumulation in wheat

项目 Item	处理 Treatment	品种 Cultivar			
		鲁麦 21	烟农 19	豫麦 34	淄麦 12
		Lumai 21	Yannong 19	Yumai 34	Zimai 12
地上部硫积累量 Sulfur accumulation in shoot	$N_4S_{0.15}$	0.86 c	0.81 c	1.64 c	0.92 d
	$N_4S_{0.60}$	1.49 ab	1.12 a	1.99 b	1.31 b
	$N_4S_{2.40}$	1.42 b	1.05 ab	2.43 a	1.72 a
	$N_8S_{0.15}$	1.41 b	0.99 b	2.02 b	1.11 c
	$N_8S_{0.60}$	1.49 ab	1.09 ab	2.43 a	1.30 b
	$N_8S_{2.40}$	1.58 a	0.82 c	2.05 b	1.15 c
根系硫积累量 Sulfur accumulation in root	$N_4S_{0.15}$	0.22 c	0.14 c	0.21 c	0.24 c
	$N_4S_{0.60}$	0.29 ab	0.20 a	0.26 b	0.29 b
	$N_4S_{2.40}$	0.23 c	0.18 ab	0.32 a	0.36 a
	$N_8S_{0.15}$	0.25 bc	0.17 b	0.26 b	0.25 bc
	$N_8S_{0.60}$	0.32 a	0.19 ab	0.30 ab	0.28 b
	$N_8S_{2.40}$	0.31 a	0.13 c	0.29 ab	0.29 b
地上部氮积累量 Nitrogen accumulation in shoot	$N_4S_{0.15}$	8.93 d	7.22 de	13.04 d	9.86 d
	$N_4S_{0.60}$	12.38 b	8.92 bc	16.57 bc	13.33 b
	$N_4S_{2.40}$	10.08 cd	7.88 cd	18.34 b	15.73 a
	$N_8S_{0.15}$	16.15 a	10.51 a	17.48 bc	12.67 bc
	$N_8S_{0.60}$	13.10 b	10.02 ab	20.99 a	13.93 b
	$N_8S_{2.40}$	11.75 bc	6.61 e	16.22 c	11.21 cd
根系氮积累量 Nitrogen accumulation in root	$N_4S_{0.15}$	1.41 cd	0.89 d	1.59 d	2.01 c
	$N_4S_{0.60}$	1.61 c	1.20 bc	1.74 cd	2.25 b
	$N_4S_{2.40}$	1.29 d	1.11 c	1.93 bc	2.52 a
	$N_8S_{0.15}$	1.92 b	1.31 ab	2.13 b	2.44 ab
	$N_8S_{0.60}$	2.20 a	1.38 a	2.44 a	2.57 a
	$N_8S_{2.40}$	1.93 b	0.91d	1.86 c	2.40 ab

注 (Note): 同一品种和项目不同处理间比较, 同列不同字母的值表示在 5% 水平上差异显著 Values followed by different letters within a column for a cultivar and an item are significantly different between treatments at the 5% level.

如表 9 所示, 在同一供氮水平下, 各品种硫素利用效率和氮素利用效率均随供硫水平的提高而降低。同一供硫水平下提高供氮水平, 各品种氮素利用效率降低, 硫素利用效率无显著差异。表明供硫水平超过 0.15 mmol/L 会导致小麦对氮素和硫素的利用效率降低, 在 4~8 mmol/L 供氮水平范围内, 提高供氮水平降低了小麦的氮素利用效率, 对硫素利用效率无显著影响。

2.7 品种、氮、硫三因素对小麦生长及氮、硫吸收利用相关性影响的方差分析

由表 10 看出, 品种和硫素营养对小麦根系活力、光合速率、地上部和根部的干物重、氮、硫含量及硫素利用效率和氮素利用效率均有显著或极显著影响。氮素对根系活力、地上部植株含硫量和硫素利用效率均无显著影响。品种×氮(C×N)、品种×硫(C×S)、氮×硫(N×S)和品种×氮×硫(C×N×S)

表 9 不同处理对小麦氮、硫利用效率的影响(mg/mg)

Table 9 Effects of different treatments on sulfur use efficiency and nitrogen use efficiency in wheat

项目 Item	处理 Treatment	品种 Cultivar			
		鲁麦 21	烟农 19	豫麦 34	淄麦 12
		Lumai 21	Yannong 19	Yumai 34	Zimai 12
硫素利用效率 Sulfur use efficiency	N ₄ S _{0.15}	224.2 a	211.3 a	193.1 a	219.4 a
	N ₄ S _{0.60}	178.0 b	178.1 bc	172.5 b	188.2 cd
	N ₄ S _{2.40}	147.5 c	161.4 c	152.5 c	166.0 e
	N ₈ S _{0.15}	225.9 a	228.5 a	180.9 ab	213.1 ab
	N ₈ S _{0.60}	172.7 b	185.1 b	175.7 b	197.8 bc
	N ₈ S _{2.40}	151.2 c	168.6 bc	153.5 c	176.6 de
氮素利用效率 Nitrogen use efficiency	N ₄ S _{0.15}	23.5 a	24.9 a	24.5 a	21.5 a
	N ₄ S _{0.60}	22.7 ab	23.2 ab	21.1 b	19.3 b
	N ₄ S _{2.40}	21.4 bc	22.0 bc	20.7 b	18.9 b
	N ₈ S _{0.15}	20.8 c	22.4 bc	21.1 b	19.2 b
	N ₈ S _{0.60}	20.5 c	20.8 c	20.5 b	19.0 b
	N ₈ S _{2.40}	20.9 c	21.4 bc	19.9 b	18.8 b

注(Note): 同一品种和项目不同处理间比较, 同列不同字母的值表示在 5% 水平上差异显著 Values followed by different letters within a column for a cultivar and an item are significantly different between treatments at the 5% level.

表 10 品种、氮、硫三因素对小麦生长及氮硫吸收利用相关性状影响的方差分析(F 值)

Table 10 The three-way ANOVA results of cultivar, nitrogen and sulfur on the related traits of wheat growth, uptake and utilization of nitrogen and sulfur (F value)

变异来源 Source of variation	根系活力 Root activity	光合速率 Photosynthetic rate	干物重 Dry matter weight		含硫量 Sulfur content		含氮量 Nitrogen content		硫素 利用效率 SUE	氮素 利用效率 NEU
			地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root		
			C	194.8**	38.9**	383.9**	317.4**	21.5**		
N	1.4	18.4**	20.9**	46.5**	1.6	9.2**	28.7**	56.4**	0.8	28.9**
S	210.7**	45.8**	29.0**	32.6**	264.2**	108.4**	17.7**	4.6*	76.7**	13.6**
C × N	0.1	2.7	11.8**	17.0**	2.3	0.7	0.5	0.0	0.7	0.6
C × S	5.7**	11.4**	8.7**	2.9*	10.3**	7.5**	0.6	0.5	2.7*	0.6
N × S	0.1	133.8**	59.1**	20.0**	1.9	0.9	5.5**	1.4	0.2	5.1*
C × N × S	1.1	2.6*	11.3**	9.9**	1.0	0.9	0.8	0.1	0.4	0.5

注(Note): SUE—Sulfur use efficiency; NEU—Nitrogen use efficiency; C、N、S 分别表示品种、氮素、硫素 Indicate cultivar, nitrogen and sulfur, respectively; *, ** 分别表示在 5% 和 1% 水平差异显著 Indicate significance at the 5% and 1% levels, respectively.

的交互作用对地上部和根部干物重均有显著或极显著调节作用,但 C × N 和 C × N × S 对根系活力及硫素利用效率和氮素利用效率均无显著影响。C × S 显著影响小麦根系活力、光合速率、地上部和根部含

硫量及硫素利用效率;N × S 显著影响地上部植株含氮量和氮素利用效率,对植株含硫量和硫素利用效率无显著影响。说明在高氮供应条件下,小麦幼苗生长及氮、硫吸收利用相关性状受品种及硫素供应

水平影响显著;氮素水平的变化对小麦幼苗根系活力无显著影响,但氮硫互作对叶片光合速率、干物质积累、地上部植株含氮量及氮素利用效率仍有显著调节作用。

3 讨论

根系是作物吸收养分、水分及合成某些内源激素的重要器官,其发育状况与地上部形态建成和产量密切相关^[15-17]。土壤营养元素含量高低可以调控作物根系的生长发育,显著影响根系活力^[18]。熊明彪等^[19]研究表明,土壤速效氮、速效钾、非交换性钾含量与小麦根系活力呈显著或极显著正相关。施肥能显著增强根系活力,提高养分吸收速率,改善根系生理功能^[20]。门中华和李生秀^[21]则认为,中等的供氮水平有利于提高幼苗根系活力,供氮水平过高则导致根系活力下降,抑制根系对氮素的吸收利用。本试验设计的氮素供应水平偏高($> 2.0 \text{ mmol/L}$),在高氮供应条件下,小麦幼苗根系活力与品种及硫素供应水平密切相关,受氮素水平影响较小。氮硫交互作用对根系活力的影响亦不显著,但对氮、硫吸收积累量有显著影响($F_{\text{地上部硫积累量}} = 96.5^{**}$; $F_{\text{根部硫积累量}} = 9.6^{**}$; $F_{\text{地上部氮积累量}} = 48.1^{**}$; $F_{\text{根部氮积累量}} = 22.1^{**}$)。在 4 mmol/L 和 8 mmol/L 两种供氮水平下,提高供硫水平均导致根系活力显著下降,但在 4 mmol/L 供氮水平下并没有因根系活力的降低减少小麦的氮、硫吸收积累量;氮、硫供应水平过高时,小麦氮、硫吸收积累量不再增加,甚至显著降低。说明在一定氮、硫供应水平上,小麦根系活力的下降是其反馈调节的结果,可以减少对氮、硫素的过多吸收;过多的氮、硫供应则显著抑制小麦对氮、硫的吸收与积累。

前人研究表明,氮硫配合施用可显著增加小麦干物质产量、植株氮、硫含量和吸收量^[6]。Withers等^[22]研究认为,作物对硫的吸收往往取决于氮肥的供应量,大量施用氮肥会导致作物对硫素的缺乏。随施氮量增加,硫素对小麦叶面积指数和光能辐射截获量的影响增大。与低硫条件下施氮导致的植株干物质积累量的增加量相比,高硫条件下施氮,植株干物质积累量的增加量显著增大^[7]。刘宝存等^[9]则认为,硫肥在低氮条件下的增产效果最佳。本试验结果表明,在相对较低的供氮水平(4 mmol/L)下适当提高供硫水平,或在相对较低的供硫水平(0.15 mmol/L)下适当提高供氮水平,均有利于增加植株氮、硫含量,提高叶片光合速率,促进干物质

积累;相反,在过高的供氮或供硫条件下继续增加硫或氮的供应,则会抑制氮、硫的吸收和积累,降低叶片光合同化能力,不利于小麦生长发育。说明氮素和硫素在适量范围内,二者存在互促效应,供应水平过高,则相互抑制,对小麦生长发育不利。

前人研究结果还表明,不同品质类型小麦子粒蛋白质的合成对氮、硫供应水平的反应存在显著差异^[23]。施硫对不同穗型小麦子粒产量的调控效果亦不同。施硫后,多穗型品种豫麦49的产量显著提高,大穗型品种兰考906的产量无显著变化^[24]。王凡等^[25]根据不同品种子粒产量、硫素吸收和利用效率的差异,将小麦划分为硫低效低响应型、低效高响应型、高效低响应型和高效高响应型。硫高效高响应型的品种耐低硫胁迫能力强,不仅能在土壤缺硫条件下获得较高产量,而且随硫供应量的增加,产量亦显著增加。本试验结果表明,在不同氮素供应水平下,不同品种对硫素的反应存在显著差异。与鲁麦21和烟农19相比,在 4 mmol/L 供氮水平下,较高的供硫水平更有利于豫麦34和淄麦12各器官硫素和氮素的积累;在高供氮水平下,适当提高供硫水平仍有利于豫麦34和淄麦12的生长发育。这为土壤氮、硫含量不同的麦田选择适宜种植品种及氮、硫肥的调控提供了参考依据。本文仅在水培条件下研究了小麦苗期对不同氮、硫供应水平的反应,有关氮硫互作对小麦生育中后期生长发育和氮、硫吸收利用的影响还有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] Kettlewell P S, Griffiths M W, Hocking T J, Wallington D J. Dependence of wheat dough extensibility on flour sulphur and nitrogen concentrations and the influence of foliar-applied sulphur and nitrogen fertilizers [J]. *J. Cereal Sci.*, 1998, 28: 15-23.
- [2] Zhao F J, Hawkesford M J, McGrath S P. Sulfur assimilation and effects on yield and quality of wheat [J]. *J. Cereal Sci.*, 1999, 30: 1-17.
- [3] Hesse H, Nikiforova V, Gakière B, Hoefgen R. Molecular analysis and control of cysteine biosynthesis: Integration of nitrogen and sulphur metabolism [J]. *J. Exp. Bot.*, 2004, 55(401): 1283-1292.
- [4] Guarda G, Padovan S, Delogu G. Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels [J]. *Eur. J. Agron.*, 2004, 21: 181-192.
- [5] Khan N A, Mobin M, Samiullah. The influence of gibberellic acid and sulfur fertilization rate on growth and S use efficiency of mustard (*Brassica juncea*) [J]. *Plant Soil*, 2005, 270: 269-274.
- [6] 吴巍, Sehoenau J J, 钱佩源, Grear K J. 氮硫对小麦产量及养

- 分吸收的影响[J]. 吉林农业科学, 1997, (1): 68-71.
- Wu W, Sehoenau J J, Qian P Y, Grear K J. Effects of nitrogen and sulfur on yield of wheat and nutrient uptake [J]. *J. Jilin Agric. Sci.*, 1997, (1): 68-71
- [7] Salvagiotti F, Miralles D J. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat [J]. *Eur. J. Agron.*, 2008, 28 (3): 282-290.
- [8] 朱云集, 沈学普, 李国强, 等. 硫氮配施对弱筋小麦品种豫麦 50 子粒产量和淀粉性状的影响[J]. 麦类作物学报, 2007, 27 (2): 271-275.
- Zhu Y J, Shen X S, Li G Q *et al.* Effect of the combined application of sulfur and nitrogen fertilizers on yield and starch quality traits of soft-gluten wheat cultivar Yumai 50 [J]. *J. Triticeae Crops*, 2007, 27(2): 271-275.
- [9] 刘宝存, 孙明德, 吴静, 黄德明. 氮硫交互作用对小麦苗期生长和养分吸收的影响[J]. 华北农学报, 2002, 17(3): 90-93.
- Liu B C, Sun M D, Wu J, Huang D M. Effect of interaction between nitrogen and sulfur on wheat growth and its nutrient uptake [J]. *Acta Agric. Boreali-Sin.*, 2002, 17(3): 90-93.
- [10] Thomason W E, Phillips S B, Pridgen T H *et al.* Managing nitrogen and sulfur fertilization for improved bread wheat quality in humid environments [J]. *Cereal Chem.*, 2007, 84(5): 450-462.
- [11] 吴岳轩, 吴振球. 杂交稻根系代谢活性与叶片衰老进程相关研究[J]. 杂交水稻, 1992, (6): 36-39.
- Wu Y X, Wu Z Q. A study on the correlation between root metabolic activity and leaf senescing process of hybrid rice [J]. *Hybrid Rice*, 1992, (6): 36-39.
- [12] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999. 302-315.
- Soil Science Society of China. Analysis methods of soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999. 302-315.
- [13] Zhao F J, Mc Grath S P, Crosland A R. Comparison of three wet digestion methods for the determination of plant sulphur by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP - AES) [J]. *Comm. Soil. Sci. Plant. Anal.*, 1994, 25: 407-418.
- [14] Delogu G, Cattivelli L, Pecchioni N *et al.* Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat [J]. *Eur. J. Agron.*, 1998, 9: 11-20.
- [15] 刘桃菊, 戚昌瀚, 唐建军. 水稻根系建成与产量及其构成关系的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1416-1419.
- Liu T J, Qi C H, Tang J J. Studies on relationship between the character parameters of root and yield formation in rice [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2002, 35(11): 1416-1419.
- [16] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻根系的空分布及其与产量的关系[J]. 华南农业大学学报(自然科学版), 2003, 24 (3): 1-4.
- Cai K Z, Luo S M, Duan S S. The relationship between spatial distribution of rice root system and yield [J]. *J. South China Agric. Univ. (Nat. Sci.)*, 2003, 24(3): 1-4.
- [17] 朱德峰, 林贤青, 曹卫星. 水稻深层根系对生长和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2001, 34(4): 429-432.
- Zhu D F, Lin X Q, Cao W X. Effects of deep roots on growth and yield in two rice varieties [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2001, 34 (4): 429-432.
- [18] 王法宏, 任德昌, 王旭清, 等. 施肥对小麦根系活性、延缓旗叶衰老及产量的效应[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(3): 51-54.
- Wang F H, Ren D C, Wang X Q *et al.* Effect of applying fertilizer on root activity, delaying the senescence of the flag leaf and yield in winter wheat [J]. *J. Triticeae Crops*, 2001, 21(3): 51-54.
- [19] 熊明彪, 胡恒, 田应兵, 等. 小麦生长期土壤养分与根系活力变化及相关性研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 700-703.
- Xiong M B, Hu H, Tian Y B *et al.* Dynamics of soil nutrition and wheat root activities during wheat growth [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2005, 36(5): 700-703.
- [20] 唐拴虎, 徐培智, 陈建生, 等. 一次性施用控释肥对水稻根系活力及养分吸收特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 591-596.
- Tang S H, Xu P Z, Chen J S *et al.* Effects of single basal application of controlled-release fertilizer on root activity and nutrient absorption of rice (*Oryza Satava* L.) [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2007, 13(4): 591-596.
- [21] Men Z H, Li S X. Effects of concentration of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ on root vigor and rhizosphere pH of winter wheat seedlings [J]. *Agric. Sci. Technol.*, 2008, 9(5): 24-26, 30.
- [22] Withers P J A, Zhao F J, McGrath S P *et al.* Sulphur inputs for optimum yields of cereals [J]. *Aspects. Appl. Biol.*, 1997, 50: 191-198.
- [23] 赵首萍, 胡尚连, 李文雄, 杜金哲. 硫对春小麦不同品质类型子粒蛋白质及贮藏蛋白质含量的效应[J]. 作物学报, 2003, 29(6): 847-852.
- Zhao S P, Hu S L, Li W X, Du J Z. Effects of sulphur on grain protein content and storage protein content in spring wheat with different quality [J]. *Acta Agron. Sin.*, 2003, 29(6): 847-852.
- [24] 谢迎新, 朱云集, 郭天财. 施用硫肥对两种穗型冬小麦品种群体生理、产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2003, 23 (1): 44-48.
- Xie Y X, Zhu Y J, Guo T C. Effect of different sulphur application on yield and quality of two spike type winter wheat cultivars [J]. *J. Triticeae Crops*, 2003, 23 (1): 44-48.
- [25] 王凡, 朱云集, 郭天财, 等. 不同基因型小麦硫素利用效率研究[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(6): 999-1004.
- Wang F, Zhu Y J, Guo T C *et al.* Genotypic variations of sulfate use efficiency in wheat [J]. *J. Triticeae Crops*, 2008, 28(6): 999-1004.