

徐瑶,何玲莉,黄思杰,等. 施硫方式及时期对不结球白菜营养品质与光合特性的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(23):115-120.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.23.030

施硫方式及时期对不结球白菜营养品质与光合特性的影响

徐瑶¹,何玲莉¹,黄思杰²,韩业飞²,牟建梅¹,张国芹¹

(1. 江苏太湖地区农业科学研究所,江苏苏州 215155; 2. 南京农业大学资产经营公司,江苏南京 210000)

摘要:研究土施、喷施 2 种施硫(Na_2SO_4)方式及不同施硫时期对不结球白菜植株产量、营养指标及光合作用的影响,以明确其最佳施硫方式和最适施硫时期。结果表明,土施及喷施 2 种施硫方式可显著提高植株地上部的生物量和维生素 C 含量,硝酸盐积累量显著降低($P < 0.05$);2 种施硫方式能显著提高叶片的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量、净光合速率(P_n)、水分利用效率($P < 0.05$);播种当天施硫,植株地上部的生物量、维生素 C 含量相对最低,硝酸盐积累量相对最高;播种后 15 d 施硫的地上生物量相对最大,播种后 10 d 施硫的维生素 C 含量相对最高,播种后 10~15 d 施硫可使植株硝酸盐含量有显著降低($P < 0.05$);播种后 5 d 施用硫肥,不结球白菜的叶绿素 a、叶绿素 b 含量相对最低,而播种后 15 d 施硫的叶绿素 a、叶绿素 b 含量相对最高,多显著高于其他处理($P < 0.05$);播种当天施硫的叶片 P_n 、蒸腾系数(T_r)、叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)相对最低,播种后 15 d 施硫的相应值相对最高。土施及喷施硫肥均能显著促进不结球白菜的生长发育,两者之间各指标多差异不显著,而土施操作相对简便,应采用土施方式进行施硫;播种后 15 d 为不结球白菜最适施硫时期,可明显提高不结球白菜的单株产量、营养品质及光合作用。

关键词:不结球白菜;施硫方式;施硫时间;品质;光合特性;土施;喷施

中图分类号: S634.301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)23-0115-06

硫(S)为植物生长发育所需的重要的第四大矿物元素之一,是生物合成蛋氨酸与半胱氨酸的主要原料^[1],还是辅酶 A、硫胺素、谷胱甘肽等酶、辅酶及小分子物质的组成元素,对植物生长发育、光合作用、氮代谢、根瘤固氮、激素代谢及抗重

金属毒害等有着重要的作用^[2-4]。

近年来,随着农业形式发展及复种指数不断增加,肥料构成发生变化,含硫肥料投入愈加减少,我国部分地区土壤含硫量急剧下降,土壤缺硫逐渐成为农业生产发展的制约因素^[5],尤其是在南方地区,缺硫现象更为普遍^[6]。不结球白菜等十字花科作物对硫的需求尤其敏感,在生长发育中需要更多的硫,其风味物质的形成更是与硫有着密切关系,芥子油、糖苷油均为硫脂化合物^[7-10]。但是,在我国乃至国际上有关小白菜施硫的研究相对较少^[11-13],精准高效的硫肥施用技术尚未形成,深入研究不结球白菜的施硫技术十分必要,科

收稿日期:2016-06-21

基金项目:江苏省苏州市应用基础研究项目(编号:SYN201421);江苏省苏州市科技支撑项目(编号:SNG201437)。

作者简介:徐瑶(1988—),女,江苏南京人,硕士,研究实习员,长期从事蔬菜科学施肥技术研究。Tel:(0512)65386213;E-mail:xuchenyaoyao@163.com。

位、生产日期和注意事项等内容。

12 建档

做好生产管理记录档案,并将记录保存不少于 2 年。

参考文献:

- [1]梁称福. 蔬菜栽培技术(南方本)[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [2]王立浩,刘伟,张宝玺. 我国辣椒种业科技发展现状、挑战及其思考[J]. 辣椒杂志,2016(3):1-6.
- [3]王立浩,张正海,曹亚从,等. “十二五”我国辣椒遗传育种研究进展及其展望[J]. 中国蔬菜,2016(1):1-7.
- [4]周向阳,王雍涵. 辣椒 2016 年市场分析及 2017 年市场预测(2017-01-22)[2017-05-08]. http://www.moa.gov.cn/zwlwm/jcyj/201701/t20170122_5461573.htm.
- [5]张俊杰,张西群,彭发智,等. 蔬菜工厂化播种育苗技术及应用前

景[J]. 河北农业科学,2013,17(4):20-23.

- [6]郝金魁,张西群,齐新,等. 工厂化育苗技术现状与发展对策[J]. 江苏农业科学,2012,40(1):349-351.
- [7]于亚波,伍萍辉,冯青春,等. 我国蔬菜育苗装备研究应用现状及发展对策[J]. 农机化研究,2017(6):1-6.
- [8]陈殿奎. 国内外蔬菜穴盘育苗发展综述[J]. 中国蔬菜,2000(增刊1):7-11.
- [9]肖强,叶文景,朱珠,等. 利用数码相机和 Photoshop 软件非破坏性测定叶面积的简便方法[J]. 生态学杂志,2005,24(6):711-714.
- [10]蔡昆争. 作物根系生理生态学[M]. 北京:化学工业出版社,2010:165-166.
- [11]郑子松,王林闯,李刚,等. 木薯渣复配基质在甘蓝育苗上的应用效果[J]. 江苏农业科学,2013,41(10):108-110.
- [12]贾荣,程智慧,徐文俊,等. 辣椒穴盘育苗有机基质配方的筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(7):135-140.

学施硫方案有待进一步完善。本研究在前期试验已探明不结球白菜最适硫素形态及浓度的基础上,通过对比不同施硫方式及时期对植株产量、营养品质及光合特性指标的影响,确定最佳施硫方式,明确最适施硫时期,为指导不结球白菜科学精准施硫提供依据,并为十字花科及其他作物的施硫提供借鉴和参照。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验于2015年8月在江苏太湖地区农业科学研究所试验基地进行,供试材料为不结球白菜品种华王,采取盆栽方式,所用塑料盆规格为49 cm×20 cm×14 cm;每盆装土7 kg,供试土壤为黄泥土,基本理化性质为有机质含量40.32 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾、有效硫含量分别为117.12、40.36、275.99、11.28 mg/kg,pH值为6.83;以尿素、磷酸氢二氨、氯化钾(分析纯)为基肥,施用量分别为N 80 mg/kg、P₂O₅ 40 mg/kg、K₂O 80 mg/kg;每盆种植不结球白菜30株,全生育期严格水分控制,绝对含水量保持在34%,其他常规管理相同。在前期试验基础上,本试验以无水硫酸钠作为不结球白菜最适合的硫素形态,施用最佳浓度折合S为30 mg/kg,分别采用土施、喷施2种施肥方式,分2次施入,施肥时间分别为播种后10、20 d,以不施硫处理为对照。在施肥方式试验基础上,采取一次性土施进行不同施肥时期试验,施肥时间设5个处理,分别为播种后0(即播种当天)、5、10、15、20 d。每个处理重复3次,随机排列。

1.2 测定项目与方法

播种后27 d进行采收,于采收前后测定各处理地上部生物量(植株质量)、干鲜质量比、维生素C含量、硝酸盐含量及叶绿素含量。维生素C、硝酸盐含量参照李合生的方法^[14]测定,叶绿素含量采用牟建梅等的方法^[15]测定,于采收前选取

晴朗天气的09:00—11:00,用Li-6400便携式光合仪测定叶片光合参数,取植株顶部第3~4张完全展开的功能叶,测定各处理的净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)、蒸腾系数(transpiration rate, T_r)、胞间CO₂浓度(intercellular CO₂ concentration, C_i),计算其水分利用效率(water use efficiency, WUE)。WUE以 P_n 和 T_r 的比值表示,即 $WUE = P_n/T_r$ 。测定时,空气CO₂浓度为400 μmol/mol,光照度为1 000 μmol/(m²·s),温度为30℃。

1.3 数据处理

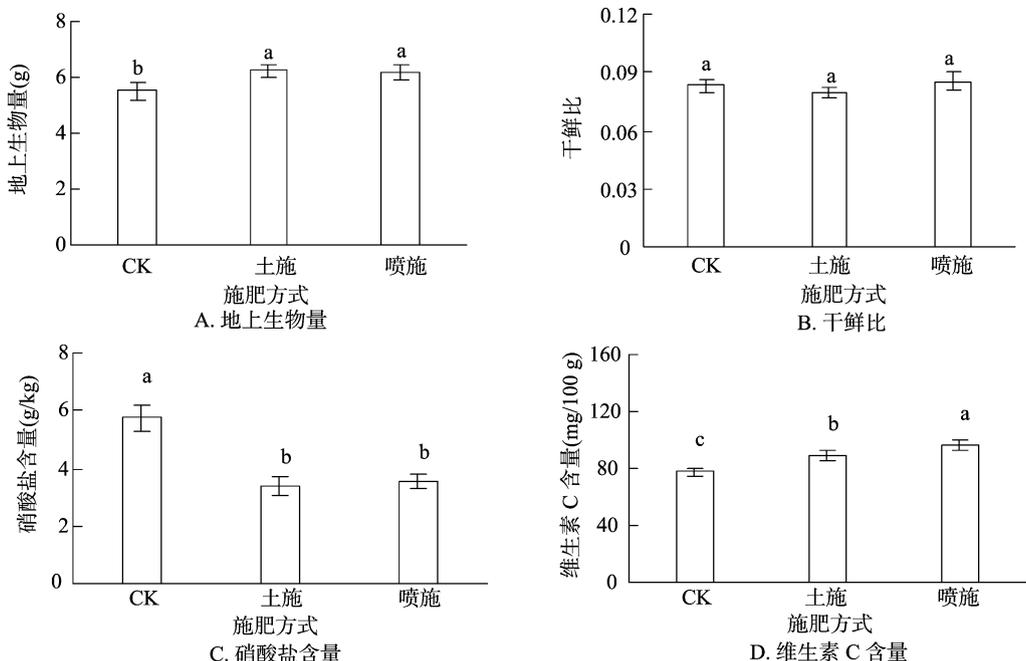
试验数据采用DPS 7.05软件进行统计分析,采用Excel 2007软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同施硫方式对不结球白菜的影响

2.1.1 产量及营养品质 由图1可见,施用硫肥能显著提高不结球白菜的单株质量(地上生物量)、维生素C含量,显著降低其硝酸盐积累量($P < 0.05$);与不施硫(对照)相比,土施、喷施Na₂SO₄分别使不结球白菜单株质量提高13.60%、12.39%,植株干鲜质量比与对照差异不显著;2种施硫方式与不施硫(对照)相比,不结球白菜的硝酸盐含量分别降低41.10%、38.70%,且2种施硫方式之间差异不显著,其中土施效果相对略好;喷施Na₂SO₄的不结球白菜维生素C含量相对最高,显著高于土施与对照,比对照提高24.64%。因此,土施及喷施Na₂SO₄处理在提高不结球白菜产量方面差异不显著。

2.1.2 叶绿素含量 由图2可见,土施和喷施Na₂SO₄的不结球白菜,其叶绿素a含量、叶绿素b含量、叶绿素总量(叶绿素a+b)分别比不施硫(对照)提高10.33%、9.76%、23.14%、23.17%、13.28%、13.27%,两者之间差异不显著,均显著高于对照($P < 0.05$);2种施硫方式及不施硫处理的



柱形图中标注不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下图同

图1 土施及喷施硫肥对不结球白菜产量及营养品质的影响

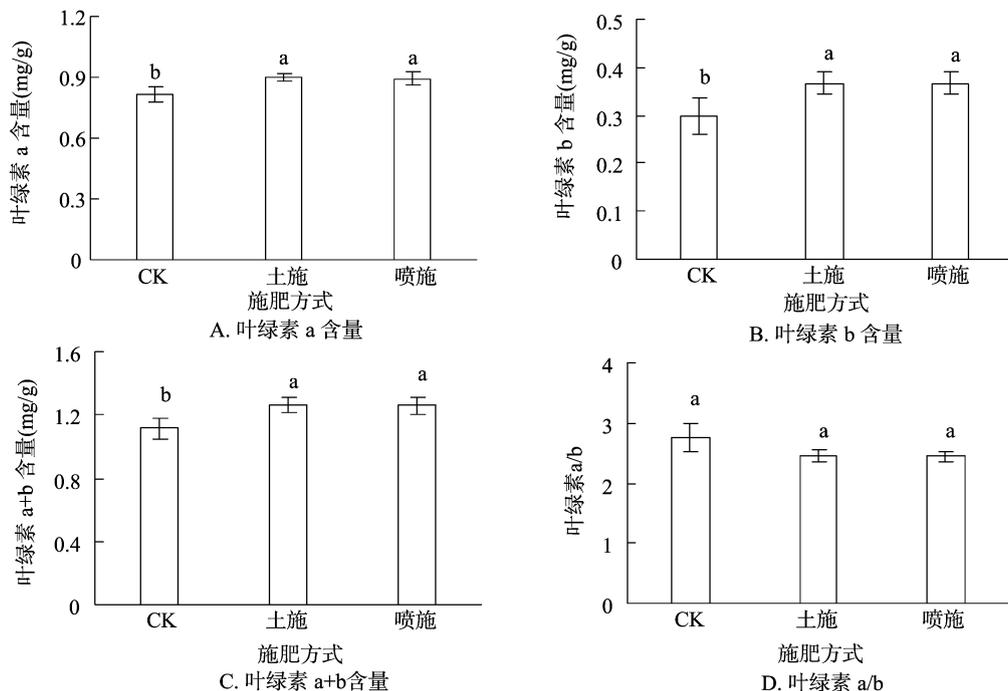


图2 土施及喷施硫肥对不结球白菜叶绿素含量及比值的影响

不结球白菜,其叶绿素 a/b 相互间无显著差异。

2.1.3 光合特性 由图3可见,土施、喷施 Na_2SO_4 的不结球白菜,其叶片净光合速率 (P_n) 分别比对照提高 57.68%、44.40%,而两者之间差异不显著,但均显著高于对照 ($P < 0.05$);土施、喷施 Na_2SO_4 白菜的蒸腾系数分别比对照提高 28.26%、19.77%,土施硫肥显著高于对照 ($P < 0.05$),而喷施硫肥与对照差异不显著;3种处理的叶片胞间 CO_2 浓度以

土施硫肥相对较好,但与喷施处理相互间差异不显著;土施 Na_2SO_4 的植株水分利用效率较对照提高 22.51%,与喷施硫肥差异不显著,显著高于不施硫(对照)处理 ($P < 0.05$)。由此可见,在改善不结球白菜的叶片光合效率上,土施及喷施 Na_2SO_4 均有显著效果,土施略好于喷施,但两者之间差异不显著。

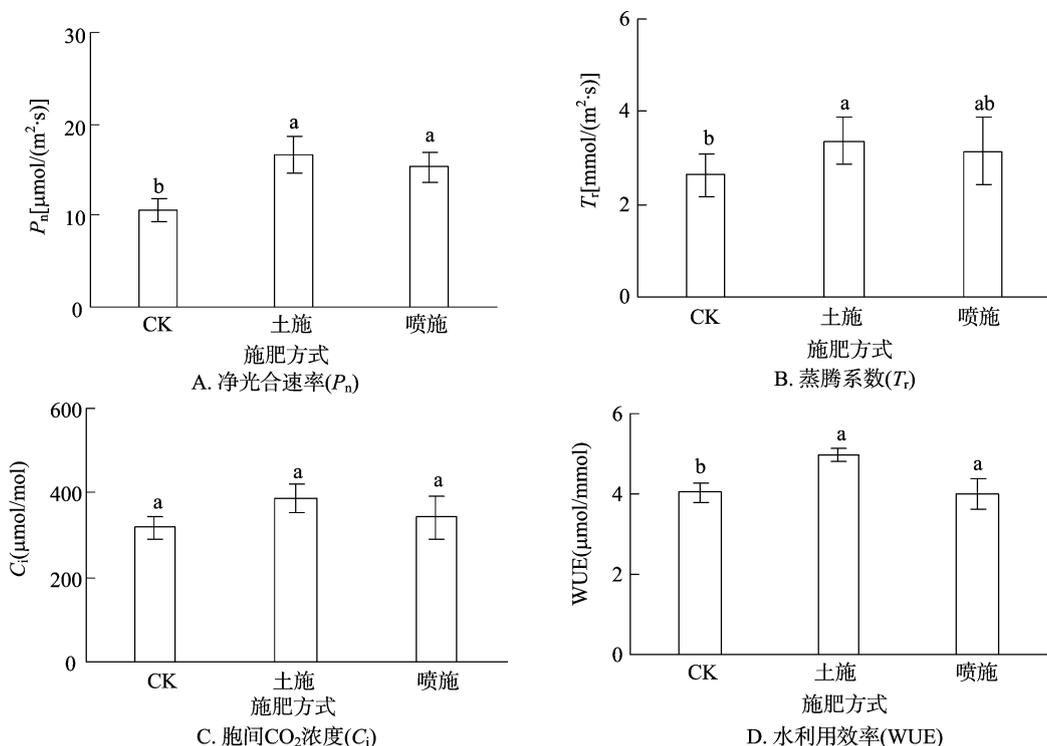


图3 土施及喷施硫肥对不结球白菜光合特性的影响

2.2 不同施硫时间对不结球白菜的影响

2.2.1 产量及营养品质 由图4可见,不同时间施硫对不结球白菜地上生物量的影响较为明显,播种当天的地上生物量(单株质量)相对最低,其他处理的地上生物量较播种当天提高3.80%~16.14%,其中播种后15 d的地上生物量相对最大;随着施用 Na_2SO_4 的时间延长,植株的干鲜质量比越小,最早施用硫肥处理(播种当天)的植株干鲜质量比较最晚施用(播种后20 d)显著增加16.19% ($P < 0.05$),播种后20 d施用硫肥的植株含水量相对较高;播种当天施用 Na_2SO_4 的不结

球白菜植株其硝酸盐含量相对最高,其他时间施用硫肥的植株其硝酸盐累积量比播种当天施用的降低26.54%~53.21%,其中播种后15 d的植株硝酸盐含量相对最低,其次为播种后10 d处理的;播种当天施硫的不结球白菜维生素C含量相对最低,播种10 d后处理的显著高于播种当天施硫的($P < 0.05$),其中以播种后10 d处理的维生素C含量相对最高,较播种当天处理高20.29%。由此可见,播种后10、15 d施用 Na_2SO_4 能显著提高不结球白菜的产量,改善其品质,其中播种后15 d处理相对最佳。

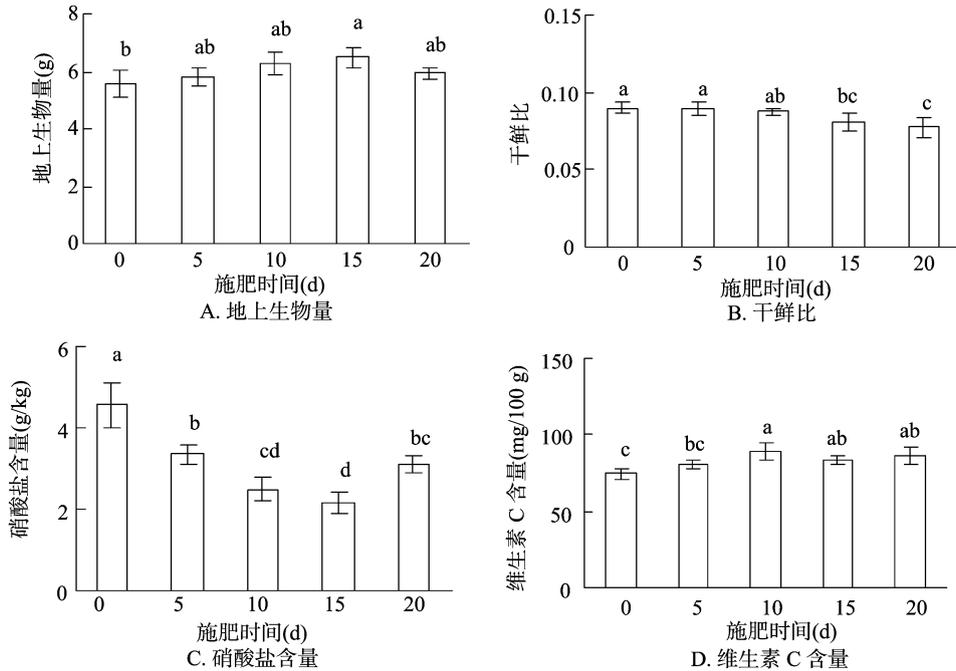


图4 不同施硫时间对不结球白菜产量及营养品质的影响

2.2.2 叶绿素含量 由图5可见,播种后5 d施用硫肥的不结球白菜叶片的叶绿素a含量相对最低,而播种后15、20 d施硫的叶绿素a含量相对较高,分别比播种后5 d施硫的显著高54.88%、23.92% ($P < 0.05$);播种后5 d施用硫肥的不结球白菜叶片的叶绿素b含量也相对最低,而播种后10、15 d施硫的白菜叶片叶绿素b含量相对较高,分别比播种后5 d施硫的高24.52%、44.30% ($P < 0.05$);播种后15 d施用 Na_2SO_4 的叶片叶绿素总量显著高于其他处理;叶绿素a/b在播种后20 d施硫相对最高,播种后10 d施硫相对最低。因此,播种后15 d施用 Na_2SO_4 ,可最大限度提高不结球白菜叶片中的叶绿素含量。

2.2.3 光合特性 由图6可见,与播种后0~5 d相比,播种后10~20 d施用 Na_2SO_4 能显著提高叶片的净光合速率,其中播种后15 d施硫的 P_n 相对最高,是播种当天施硫的2倍;播种后15 d施硫,不结球白菜叶片的蒸腾系数明显高于其他处理,播种当天施硫的 P_n 相对最低;播种后5~20 d施硫的叶片胞间 CO_2 浓度多数显著高于播种当天施硫的,播种后10~20 d施硫的叶片胞间 CO_2 浓度较播种当天施硫的高38.74%~59.61%,其中播种后15 d施硫的叶片胞间 CO_2 浓度相对最高;播种后10~20 d施硫,叶片的水分利用效率显著高于其他处理,较最低的播种后5 d施硫叶片水分利用效

率高55.17%~78.18%,其中以播种后20 d处理效果最好。由此可见,播种后10~20 d施用 Na_2SO_4 能有效改善不结球白菜的光合作用,其中以播种后15 d处理的效果相对更佳。

3 结论与讨论

土施、喷施 Na_2SO_4 能够显著提高不结球白菜的地上生物量,植株单株质量分别比不施硫提高13.60%、12.39%,大田试验证实,相同浓度的 Na_2SO_4 确实能够有效增产,使不结球白菜增产21.0%,这与吴新德等的研究结论^[16]一致。但是,也有研究显示,施硫不会增加小白菜的生物量^[11-12],这可能与硫肥施用条件及小白菜基因型差异有关。施硫也可实现大葱、油菜、小麦、大麦等作物的增产^[17-20]。施硫方式与不施硫相比,播种后15 d施硫与播种后0 d相比,不结球白菜的硝酸盐含量显著降低($P < 0.05$)。国内外大量研究证实,植物体内氮硫同化存在高度相关性^[12,19,21-22],适当施硫能够有效促进氮的吸收同化,提高氮素利用率,降低植株硝酸盐累积量^[11-12]。在油菜上的研究表明,施硫能够降低植株中硝酸盐含量,并导致其硝酸还原酶(nitrate reductase, NR)及谷氨酰胺合成酶(glutamine synthetase, GS)表达量增加;反之,缺硫使其叶片和根中硝酸盐大幅累积, NR及GS表达量急剧下降^[7]。另有研究报道,小白菜叶片中硫与硝酸盐含量呈显著

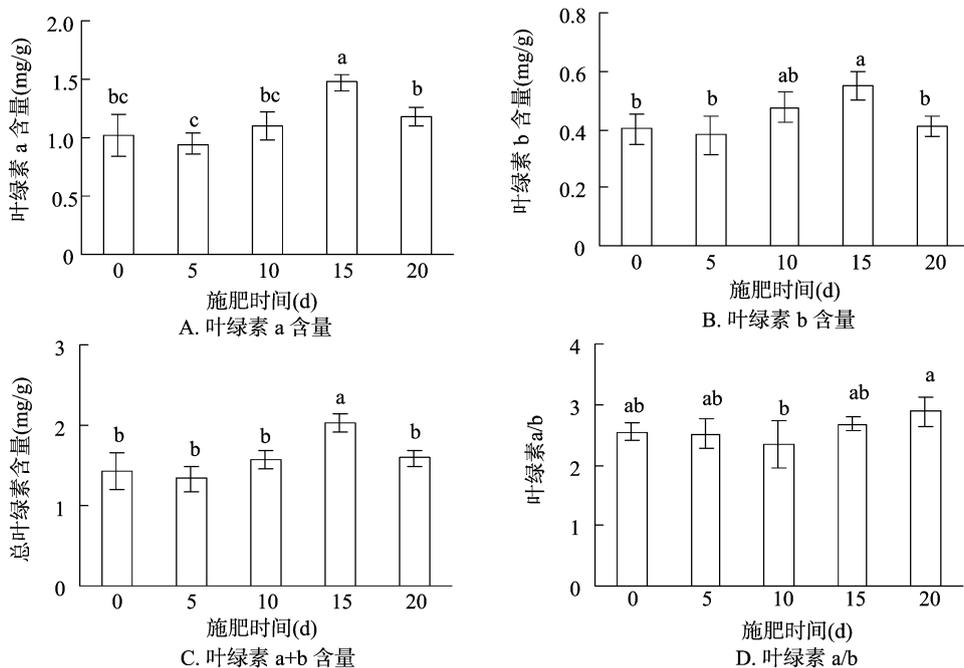


图5 不同施硫时间对不结球白菜叶绿素含量及比值的影响

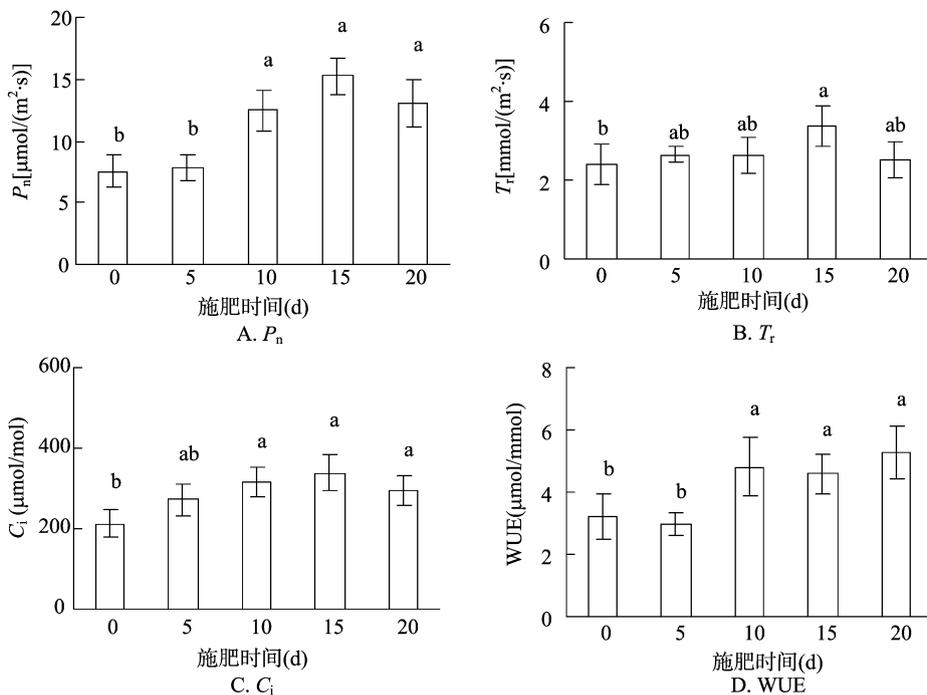


图6 不同施硫时间对不结球白菜光合特性的影响

负相关^[23], 喷施硫能提高 NR、谷氨酸丙酮酸转氨酶 (glutamate pyruvate transaminase, GPT)、谷氨酸草酰乙酸转氨酶 (glutamate oxaloacetate transaminase, GOT) 的活性, 植株硝酸盐含量降低^[11-12]。

硫是铁氧还蛋白的重要组成部分, 参与叶绿素的合成和光合电子传递, 对植物光合作用有着重要的作用^[24-25]。土施及喷施硫肥均能显著提高不结球白菜叶绿素含量 ($P < 0.05$), 播种后 10、15 d 施用硫肥也能够最大限度地提高植株叶绿素含量, 可见施硫能够有效促进叶片的叶绿素合成, 这与

Carfagna 等的研究结论^[20,26-27]类似。霍捷等研究表明, 叶面喷施 NaHSO_3 能在一定程度上提高小白菜叶片的净光合速率 (P_n), 且不同浓度 NaHSO_3 处理后表现出明显的浓度效应和时间效应^[12]。本研究中文施和喷施 2 种施硫方式均能显著提高植株的 P_n 、蒸腾系数 (T_r)、叶片胞间 CO_2 浓度 (C_i) 及水分利用率 (WUE) 等光合指标, 且播种后 10、15 d 施用 Na_2SO_4 的光合指标相对最佳, 这可能是导致小白菜增产的重要原因之一。同时试验发现, 施硫后植株 P_n 的增加与 C_i 的增加呈正相关, 这与 Nazar 等的研究结论^[26-27]基本一致, 这可能是

硫对不结球白菜 P_n 的影响是由于气孔因素引起的^[28]。值得注意的是,施硫会对小白菜叶片 T_r 及 WUE 产生积极影响,显著提升植株水分的利用机能。

土施、喷施 2 种施硫方式与不施硫处理相比,可显著增加地上生物量、维生素 C 含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量、 P_n 、 T_r 、 WUE , 植株硝酸盐含量显著降低 ($P < 0.05$), 而 2 种施硫方式之间差异不显著, 土施及喷施 2 种施硫方式均适合在不结球白菜上使用, 这与霍捷的研究结果^[29]相反, 这可能是不同基因型不结球白菜对硫的敏感性不同造成的。鉴于土施操作方便、利于推广, 采用土施硫肥研究不同播种时间对不结球白菜的影响, 结果表明, 播种后 10、15 d 分别施用 Na_2SO_4 与其他处理相比, 可明显增加不结球白菜的地上生物量、维生素 C 含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量、 P_n 、 T_r 、 C_i 、 WUE , 植株硝酸盐含量有明显降低。因此, 不结球白菜播种后 10 ~ 15 d 为施硫最佳时期, 其中以播种后 15 d 施硫相对更好, 而播种当天施硫处理的效果最不理想。

参考文献:

- [1] Takahashi H, Kopriva S, Giordano M, et al. Sulfur assimilation in photosynthetic organisms: molecular functions and regulations of transporters and assimilatory enzymes [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2011(62): 157 - 184.
- [2] Shahbaz M, Tseng M H, Stuiver C E, et al. Copper exposure interferes with the regulation of the uptake, distribution and metabolism of sulfate in Chinese cabbage [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167(6): 438 - 446.
- [3] Abdallah M, Etienne P, Ourry A, et al. Do initial S reserves and mineral S availability alter leaf S - N mobilization and leaf senescence in oilseed rape? [J]. *Plant Science*, 2011, 180(3): 511 - 520.
- [4] Honsel A, Kojima M, Haas R, et al. Sulphur limitation and early sulphur deficiency responses in poplar: significance of gene expression, metabolites, and plant hormones [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(5): 1873 - 1893.
- [5] 包荣军, 郑树生. 土壤硫肥力与作物硫营养研究进展 [J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2006, 18(3): 37 - 40.
- [6] 王利, 高祥照, 马文奇, 等. 中国农业中硫的消费现状、问题与发展趋势 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(6): 1219 - 1226.
- [7] Zhang Q, Lee B R, Park S H, et al. Sulfate resupply accentuates protein synthesis in coordination with nitrogen metabolism in sulfur deprived *Brassica napus* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015(87): 1 - 8.
- [8] Yatusевич R, Mugford S G, Matthewman C, et al. Genes of primary sulfate assimilation are part of the glucosinolate biosynthetic network in *Arabidopsis thaliana* [J]. *The Plant Journal*, 2010, 62(1): 1 - 11.
- [9] Zhang B, Pasini R, Dan H, et al. Aberrant gene expression in the *Arabidopsis* SULTR 1;2 mutants suggests a possible regulatory role for this sulfate transporter in response to sulfur nutrient status [J]. *The Plant Journal*, 2014, 77(2): 185 - 197.
- [10] Lee B R, Muneer S, Kim K Y, et al. S - deficiency responsive accumulation of amino acids is mainly due to hydrolysis of the previously synthesized proteins - not to de novo synthesis in *Brassica napus* [J]. *Physiologia Plantarum*, 2013, 147(3): 369 - 380.
- [11] 付雪清, 王俊玲, 高志奎. $NaHSO_3$ 和 Na_2SO_4 配施对小白菜叶片硝酸盐含量及营养品质的影响 [J]. *河北农业大学学报*, 2013, 36(6): 43 - 47.
- [12] 霍捷, 王俊玲, 薛占军, 等. 亚硫酸氢钠对白菜叶片硝酸盐还原及光合能力的影响 [J]. *园艺学报*, 2012, 39(4): 669 - 676.
- [13] 梁素帅, 刘昌欣, 康靖全, 等. 硫对镉胁迫下小白菜镉富集、光合速率等生理特性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(8): 1455 - 1463.
- [14] 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.
- [15] 牟建梅, 张国芹, 刘凤军, 等. 白菜叶绿素含量的测定方法筛选 [J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(9): 289 - 290.
- [16] 吴新德, 江志根, 朱勤, 等. 硫衣尿素对安徽沿江地区几种作物产量和效益的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2007(6): 64 - 67.
- [17] 孔灵君, 徐坤, 张永征, 等. 硫对大葱生长及氮硫同化关键酶活性的影响 [J]. *园艺学报*, 2013, 40(12): 2505 - 2512.
- [18] Dubouset L, Abdallah M, Desfeux A S, et al. Remobilization of leaf S compounds and senescence in response to restricted sulphate supply during the vegetative stage of oilseed rape are affected by mineral N availability [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(11): 3239 - 3253.
- [19] 谢迎新, 朱云集, 郭天财, 等. 施用硫肥对冬小麦光合生理特性及产量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 403 - 409.
- [20] Carfagna S, Vona V, di Martino V, et al. Nitrogen assimilation and cysteine biosynthesis in barley: evidence for root sulphur assimilation upon recovery from N deprivation [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 71(1): 18 - 24.
- [21] Hoefgen R, Nikiforova V J. Metabolomics integrated with transcriptomics: assessing systems response to sulfur - deficiency stress [J]. *Plant Physiology*, 2008, 132(2): 190 - 198.
- [22] Kridelbaugh D M, Nelson J, Engle N L, et al. Nitrogen and sulfur requirements for *Clostridium thermocellum* and *Caldicellulosiruptor bescii* on cellulosic substrates in minimal nutrient media [J]. *Bioresource Technology*, 2013(130): 125 - 135.
- [23] 崔秀敏, 张义凯, 王秀峰, 等. 不结球白菜品质性状与矿质营养的典型相关及逐步回归分析 [J]. *华北农学报*, 2008, 23(增刊 2): 25 - 28.
- [24] Giordano M, Raven J A. Nitrogen and sulfur assimilation in plants and algae [J]. *Aquatic Botany*, 2014, 118: 45 - 61.
- [25] Nazar R, Iqbal N, Masood A, et al. Understanding the significance of sulfur in improving salinity tolerance in plants [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 70(2/3): 80 - 87.
- [26] Nazar R, Khan M R, Iqbal N, et al. Involvement of ethylene in reversal of salt - inhibited photosynthesis by sulfur in mustard [J]. *Physiologia Plantarum*, 2014, 152(2): 331 - 344.
- [27] 刘中良, 刘世琦, 张自坤, 等. 硫对设施水培大蒜光合特性和鳞茎品质的影响 [J]. *园艺学报*, 2010, 37(4): 581 - 588.
- [28] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982(33): 317 - 345.
- [29] 霍捷. 无机硫降低小白菜叶片硝酸盐积累的效应及机理研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2012.