

氮硅配施对冬小麦生育后期蚜虫密度及抗虫生化物质含量的影响

王 祎¹, 张月玲^{1,2}, 苏建伟², 王宜伦¹, 谭金芳¹, 韩燕来^{1*}

(1 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002;

2 中国科学院动物研究所, 农业虫鼠害综合治理国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 试验采用氮(N)和硅(SiO₂)两因素2×3完全均衡方案和随机区组设计,氮(N)设180 kg/hm²、270 kg/hm²两个水平,分别配施0 kg/hm²、75 kg/hm²和150 kg/hm²三个水平的硅肥(SiO₂)。研究氮配施硅肥对冬小麦生育后期麦长管蚜盛发期蚜虫密度及抗虫生化物质含量的影响。结果表明,施氮增加平均麦蚜密度的效应与冬小麦叶部、穗部平均可溶性糖、平均总酚、叶部平均单宁含量的降低和叶部、穗部平均可溶性蛋白含量的增加有着密切关系;施硅降低冬小麦平均蚜虫密度的效应与施硅增加冬小麦叶部和穗部平均可溶性糖、平均总酚、平均单宁含量有密切关系。高硅削弱施氮增加小麦蚜虫密度的效应与高硅削弱施氮降低叶部和穗部可溶性糖含量、叶部单宁含量的效应有密切关系;低氮配施低硅即可显著降低蚜虫密度,其效应与施硅增加了穗部可溶性糖的含量有密切关系;而高氮需配施高硅才可显著降低蚜虫密度,其效应与施硅增加了小麦叶部和穗部可溶性糖、叶部单宁含量有密切关系。

关键词: 冬小麦; 麦长管蚜; 氮硅配施; 可溶性糖; 可溶性蛋白; 总酚; 单宁

中图分类号: S512.1⁺1; S435.122⁺.2 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2013)04-0832-08

Effect of nitrogen application combined with silicon on density of *Sitobion avenae* and contents of biochemical materials of winter wheat at the late growth stage

WANG Yi¹, ZHANG Yue-ling^{1,2}, SU Jian-wei², WANG Yi-lun¹, TAN Jin-fang¹, HAN Yan-lai^{1*}

(1 School of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2 State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: To determine the effects of nitrogen (N) application combined with silicon (Si) on population density of *S. avenae* and contents of biochemical materials of winter wheat at the late growth stage, two nitrogen levels (180 kg/ha and 270 kg/ha) combined with three silica levels (0 kg/ha, 75 kg/ha and 150 kg/ha) were randomly designed in fully-balanced blocks. The result shows that the density of wheat aphids is increased under the nitrogen application, which closely relates to the decreases of the average contents of soluble sugar and total phenolic of wheat leaves and ears and tannin contents of wheat leaves, and the increases of soluble protein contents of wheat leaves and ears. The effects of the silicon application on reducing the population density of aphids would be contributed to the increases of the average contents of soluble sugar, total phenolic and tannin of wheat leaves and ears. The effects of the high silicon application on reducing the high aphids population density induced by the high nitrogen level could be contributed to the high silicon application which reduces the effects of nitrogen on the contents of soluble sugar of wheat leaves and ears and tannin content of wheat leaves. Under the low N level, the population density of *S. avenae* is significantly reduced by the combined application with the low level of silicon,

收稿日期: 2012-10-11 接受日期: 2013-03-27

基金项目: 国家科技支撑计划(2008BADA4B07)资助。

作者简介: 王祎(1983—),女,湖北宜城人,博士,主要从事作物营养分子机理研究。E-mail: wangyi0705@gmail.com

* 通信作者 Tel: 0371-63555534, E-mail: hyanlai@126.com

and this effect could be contributed to the high soluble sugar content in wheat ears. However, under the high N level, it should be combined with the high level of silicon to reduce the population density of *S. avenae* effectively, and the application contributes to high soluble sugar contents in wheat leaves and ears and tannin content in leaves.

Key words: winter wheat; *Sitobion avenae*; nitrogen application combined with silicon; soluble sugar; soluble protein; total phenolic; tannin

现代农业生产强烈地依赖于化肥的大量投入^[1],但施肥不当常导致农作物病虫害发生猖獗^[2-3],化学农药的施用量增加,加大了农产品污染风险。蚜虫是世界范围内严重影响小麦产量的害虫之一,可使小麦减产 10% 到 30% 以上^[4]。通过平衡施肥既可增加作物的抗性,又可达到作物高产优质抗逆的生产目的^[5]。研究表明,过量施用氮肥易使作物遭受较大的虫害压力^[6-10]。在供应高氮的小麦和棉花植株上,蚜虫对作物的危害程度加重^[11-16]。已有研究发现,硅有利于提高植物对虫害的抵御能力^[17-19]。过去一般认为,硅在植物组织中沉积可限制刺吸式昆虫口针对组织的刺入^[19-20]。但近来研究发现,施硅对小麦蚜虫生长发育的抑制可能与硅诱导了小麦表皮或叶肉组织释放抗性化学物质有关^[21]。植物中某些营养物质和次生物质的质与量的变化对害虫生长发育及代谢有相当大的影响。研究表明,小麦对蚜虫的抗性与植株体内可溶性糖含量呈正相关^[22],而与可溶性蛋白和氨基酸含量呈负相关^[23-24]。酚类物质是对昆虫有毒的一类次生代谢物质,可使昆虫中毒甚至死亡^[25];单宁可阻碍昆虫的生长发育及繁殖^[26]。目前关于氮配施硅肥对作物抗性的影响及其与体内生物物质的关系的研究鲜见报道。本研究通过对不同氮硅配施的冬小麦生育后期麦长管蚜盛发期蚜虫密度,以及叶部和穗部抗虫生物物质含量的测定,探讨氮硅配施对小麦抗蚜性的影响,以揭示氮配施硅肥提高小麦抗蚜性的机制,为指导合理施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

冬小麦品种为矮抗 58,供试土壤潮土,质地为粘壤土,常年轮作方式,前茬作物为玉米。耕层土壤的理化性状为有机质 18.9 g/kg、pH 8.67、碱解氮(N) 92.1 mg/kg、速效磷(P) 16.4 mg/kg、速效钾(K) 129.6 mg/kg、有效硅(SiO₂) 140 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2009 年 10 月~2010 年 6 月在河南省浚县刘寨村试验地进行。试验采用 N、Si(2×3) 完全

均衡方案。氮(N) 设 180 kg/hm²(N₁)、270 kg/hm²(N₂) 两个水平,分别配施 0 kg/hm²(Si₀)、75 kg/hm²(Si₁) 和 150 kg/hm²(Si₂) 三个水平的硅肥(SiO₂),共 6 个处理。随机区组排列,小区面积为 28 m²(4 m×7 m),重复 3 次。各处理施用磷肥(P₂O₅) 90 kg/hm²和钾肥(K₂O) 90 kg/hm²作为底肥,分别以重过磷酸钙和氯化钾作为肥源,硅肥用硅钙镁肥(新乡科农硅肥厂生产,有效 SiO₂ 26.3%、有效 CaO 31.5%、有效 MgO 5%)。氮肥用尿素,60% 基施,其余 40% 于拔节期撒施;磷钾和硅肥 100% 基施。小麦于 2009 年 10 月 3 日播种,播种量 150 kg/hm²。小麦田间管理按一般高产田进行施肥灌水,生育中后期防治病害 2 次。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤基本理化指标的测定 参照土壤农化分析方法^[27]。土壤有机质用重铬酸钾外加热法;碱解氮用碱解扩散法;速效磷用 0.5 M NaHCO₃ 浸提,钼蓝比色法测定;速效钾用 1 M NH₄OAc 浸提,火焰光度法测定;有效硅用 pH 4.0 乙酸-乙酸钠缓冲液浸提,硅钼蓝比色法测定。

1.3.2 蚜虫种群调查方法 参照蔡青年^[28]的方法,在麦蚜盛发期(2010.5.20),每小区 5 点取样,每点选取 10 个单茎,调查全株麦长管蚜量。

1.3.3 小麦体内抗虫生物物质含量的测定 在麦长管蚜盛发期(2010 年 5 月 20 日)采集冬小麦叶部和穗部,80℃ 杀青,60℃ 烘干,研磨过 0.425 mm 孔筛后,用于植株总酚和单宁的测定。总酚的测定参照韩富根^[29]的方法,略有改动,称取粉碎过筛样品于 10 mL 离心管中,加入 5 mL 80℃ 蒸馏水,于沸水浴浸提 30 min,冷却,定容过滤,滤液即为待测液。取 2 mL 待测液于 25 mL 试管中,再加入 2 mL 福林试剂,摇匀 3 min 后加入 10% 碳酸钠 2 mL 振荡。静置 1 h 后 700 nm 处比色测定。

单宁的测定参照范璐^[30]的方法。可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法^[31]。可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝比色法。

1.4 统计分析

试验数据采用 Excel、DPS、SPSS 软件进行统计

分析。

2 结果与分析

2.1 氮硅配施对冬小麦蚜虫密度的影响

方差分析表明,氮水平、硅水平对蚜虫平均密度的影响差异均达极显著水平($P < 0.01$),氮硅配施对小麦蚜虫密度影响的交互效应达显著水平($P < 0.05$)。

从表 1 可以看出,氮水平之间平均蚜虫密度表现为 $N_2 > N_1$ ($P < 0.01$);硅水平之间平均蚜虫密度表现为 $Si_0 > Si_1 > Si_2$ ($P < 0.01$);硅水平相同时,蚜虫密度均表现为 $N_2 > N_1$,其中 Si_0 、 Si_1 水平下,氮水平之间差异达极显著水平($P < 0.01$),而在 Si_2 水平下,两者差异达显著水平($P < 0.05$),说明高硅可削

弱施氮增加蚜虫密度的效应;相同氮水平下,与 N_1Si_0 相比, N_1 配施 Si_1 、 Si_2 时,蚜虫密度分别降低了 17.98%、18.80%,与前者差异均达显著水平($P < 0.05$),但 N_1Si_1 和 N_1Si_2 之间差异不显著($P > 0.05$);与 N_2Si_0 相比, N_2 配施 Si_1 蚜虫密度降低了 10.16%,与前者差异未达显著水平($P > 0.05$),配施 Si_2 蚜虫密度降低了 32.11%,与前者差异达到极显著水平($P < 0.01$),且 N_2Si_2 蚜虫密度极显著低于 N_2Si_1 ($P < 0.01$)。说明在低氮水平下,配施低硅即可有效降低蚜虫密度;而在高氮水平下,需配施较高水平的硅才更有效地降低蚜虫的密度。在不同处理组合中以 N_2Si_0 、 N_2Si_1 蚜虫密度最高,而以 N_1Si_2 蚜虫密度最低。

表 1 氮硅配施对冬小麦蚜虫密度的影响 (No./plant)

Table 1 The density of aphids in winter wheat leaves and ears under combined application of nitrogen with silicon

| 因素 Factor | Si_0 | Si_1 | Si_2 | N 平均 N average |
|-------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------|
| N_1 | 122.3 ± 3.00 aA(bB) | 100.3 ± 2.03 bA(bB) | 99.3 ± 0.33 bA(bA) | 107.3(bB) |
| N_2 | 164.0 ± 8.08 aA(aA) | 147.3 ± 2.03 aA(aA) | 111.3 ± 10.88 bB(aA) | 140.8(aA) |
| Si 平均 Si average | 143.1 aA | 123.8 bB | 105.3 cC | |
| $F_{N \times Si}$ | | 5.63* | | |

注(Note): 表中数据为三个重复的平均值 ± 标准差 Data in the table are Mean ± SE (replicated 3 times); 数据后括号外小写字母分别表示不同硅水平之间的差异达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的显著水平,括号内小写字母分别表示不同氮水平之间差异达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ Values followed by different small letters and capital letters after data outside/in the brackets mean significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ among Si and N levels, respectively; * 和 ** 分别表示氮和硅的交互效应达显著水平或极显著水平 Mean significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ for the interaction effects of N and Si, respectively.

2.2 氮硅配施对冬小麦叶部和穗部可溶性糖含量的影响

方差分析表明,叶部、穗部不同氮水平、硅水平之间平均可溶性糖含量差异均达极显著水平($P < 0.01$),氮硅配施对小麦叶部、穗部可溶性糖含量影响的交互效应分别达极显著($P < 0.01$)和显著水平($P < 0.05$)。

从表 2 看出,氮水平之间叶部和穗部平均可溶性糖含量表现为 $N_2 < N_1$ ($P < 0.01$);硅水平之间叶部和穗部平均可溶性糖含量表现为 $Si_2 > Si_1 > Si_0$ ($P < 0.01$)。

硅水平相同时,叶部可溶性糖含量均表现为 $N_2 < N_1$ ($P < 0.01$);氮水平相同时,与 N_1Si_0 相比, N_1 配施 Si_1 、 Si_2 时叶部可溶性糖分别增加 -2.53% 和 1.29%,与前者差异均不显著($P > 0.05$);而与 N_2Si_0 相比, N_2 配施 Si_1 、 Si_2 时叶部可溶性糖分别增

加 30.74% 和 34.80%,与前者差异均达极显著水平($P < 0.01$)。说明低氮条件下,配施硅肥增加叶部可溶性糖含量的效应不显著,而高氮条件下增施硅肥对叶部可溶性糖的增加效应明显。

硅水平相同时,穗部可溶性糖均表现为 $N_2 < N_1$,其中 Si_0 、 Si_1 水平下,氮水平之间差异达极显著水平($P < 0.01$),而在 Si_2 水平下,两者差异达显著水平($P < 0.05$),说明高硅水平下不同氮水平之间可溶性糖含量差异缩小;氮水平相同时,与 N_1Si_0 相比, N_1 配施 Si_1 、 Si_2 时穗部可溶性糖分别增加 17.81% 和 10.21%,与前者差异均达极显著水平($P < 0.01$),但 N_1Si_1 、 N_1Si_2 之间差异不显著($P > 0.05$);与 N_2Si_0 相比, N_2 配施 Si_1 穗部可溶性糖增加 3.08%,与前者差异未达显著水平($P > 0.05$),配施 Si_2 时穗部可溶性糖增加 18.80%,与前者差异达极显著水平($P < 0.01$),且 N_2Si_2 极显著高于 N_2Si_1 ,

表 2 氮硅配施冬小麦叶部和穗部可溶性糖的含量 (mg/g)

Table 2 The soluble sugar contents in winter wheat leaves and ears affected by N and Si combined application

| 因素 Factor | 叶部 Leaf | | | | 穗部 Ear | | | |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| | Si ₀ | Si ₁ | Si ₂ | N 平均 N average | Si ₀ | Si ₁ | Si ₂ | N 平均 N average |
| N ₁ | 25.67 ± 1.04 aA (aA) | 25.02 ± 0.66 aA (aA) | 26.00 ± 1.24 aA (aA) | 25.54 aA | 61.59 ± 2.50 bB (aA) | 72.56 ± 3.38 aA (aA) | 67.88 ± 2.14 aA (aA) | 67.34 aA |
| N ₂ | 14.28 ± 0.50 cB (bB) | 18.67 ± 0.56 bA (bB) | 19.25 ± 0.72 aA (bB) | 17.39 bB | 52.98 ± 3.07 bB (bB) | 54.61 ± 2.75 bB (bB) | 62.94 ± 2.35 aA (bA) | 56.84 bB |
| Si 平均 Si average | 19.94 bB | 21.84 aA | 22.62 aA | | 57.28 bB | 63.58 aA | 65.41 aA | |
| F _{N×Si} | | 17.74** | | | | 7.08* | | |

注(Note): 表中数据为三个重复的平均值 ± 标准差 Data in the table are Mean ± SE (replicated 3 times); 数据后括号外小写字母分别表示不同硅水平之间的差异达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的显著水平, 括号内小写字母分别表示不同氮水平之间差异达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ Values followed by different small letters and capital letters after data outside/in the brackets mean significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ among Si and N levels, respectively; * 和 ** 分别表示氮和硅的交互效应达显著水平或极显著水平 Mean significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ for the interaction effects of N and Si, respectively.

说明低氮水平下, 配施低硅即可有效地增加穗部可溶性糖含量; 而在高氮水平下, 需配施较高水平的硅才能更有效地增加穗部可溶性糖含量。

2.3 氮硅配施对冬小麦叶部和穗部可溶性蛋白含量的影响

方差分析表明, 叶部、穗部不同氮水平之间平均可溶性蛋白含量差异均达显著水平 ($P < 0.05$), 表现为 $N_2 > N_1$ 。不同硅水平之间以及氮硅配施对小麦叶部、穗部可溶性蛋白含量影响的交互效应均未达显著水平 ($P > 0.05$) (表 3)。

表 3 氮配施硅肥对冬小麦叶部和穗部可溶性蛋白含量的影响 (mg/g)

Table 3 The effect of nitrogen application combined with silicon on the contents of soluble protein in winter wheat leaf and ear

| 因素 Factor | 叶部 Leaf | | | | 穗部 Ear | | | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| | Si ₁ | Si ₂ | Si ₃ | N 平均 N average | Si ₁ | Si ₂ | Si ₃ | N 平均 N average |
| N ₁ | 10.20 ± 0.63 | 9.26 ± 0.9 | 8.86 ± 1.19 | 9.44 (bB) | 23.41 ± 1.11 | 20.20 ± 2.41 | 20.40 ± 1.98 | 21.27 (bA) |
| N ₂ | 12.32 ± 1.03 | 9.24 ± 0.79 | 9.95 ± 0.91 | 10.57 (aA) | 25.79 ± 1.27 | 22.33 ± 1.38 | 23.76 ± 1.11 | 23.96 (aA) |
| Si 平均 Si average | 11.25 aA | 9.25 aA | 9.45 aA | | 24.50 aA | 22.09 aA | 21.25 aA | |
| F _{N×Si} | | 0.1933 | | | | 0.1159 | | |

注(Note): 表中数据为三个重复的平均值 ± 标准差 Data in the table are Mean ± SE (replicated 3 times); 数据后不同小写字母分别表示不同硅水平之间的差异达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的显著水平, 括号内小写字母分别表示不同氮水平之间差异达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ Values followed by different small letters and capital letters after data outside/in the brackets mean significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ among Si levels, respectively; * 和 ** 分别表示氮和硅的交互效应达显著水平或极显著水平 Means significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ for the interaction effects of N and Si, respectively.

2.4 氮硅配施对冬小麦叶部和穗部总酚含量的影响

方差分析表明, 叶部、穗部不同氮水平之间平均总酚含量差异均达显著 ($P < 0.05$) 或极显著水平 ($P < 0.01$), 表现为 $N_2 < N_1$, 不同硅水平之间平均

总酚含量差异达极显著水平 ($P < 0.01$), 其中叶部不同硅水平之间平均总酚含量表现为 $Si_2 > Si_1 > Si_0$ ($P < 0.01$), 穗部平均总酚含量表现为 $Si_2 > Si_1$ 、 Si_0 ($P < 0.05$)。氮硅配施对冬小麦叶部、穗部总酚含量的交互效应未达显著水平 ($P > 0.05$) (表 4)。

表 4 氮硅配施对冬小麦叶部和穗部总酚含量的影响

Table 4 The total phenolic contents in winter wheat leaves and ears affected by N and Si combined application (mg/g)

| 因素 Factor | 叶部 Leaf | | | | 穗部 Ear | | | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| | Si ₀ | Si ₁ | Si ₂ | N 平均 N average | Si ₀ | Si ₁ | Si ₂ | N 平均 N average |
| N ₁ | 8.10 ± 0.13 | 8.52 ± 0.07 | 9.00 ± 0.02 | 8.53 (aA) | 2.42 ± 0.08 | 2.75 ± 0.04 | 3.08 ± 0.08 | 2.75 (aA) |
| N ₂ | 7.99 ± 0.06 | 8.27 ± 0.01 | 8.70 ± 0.19 | 8.32 (bA) | 2.40 ± 0.04 | 2.43 ± 0.14 | 2.67 ± 0.13 | 2.49 (bB) |
| Si 平均 Si average | 8.04 cC | 8.39 bB | 8.84 aA | | 2.40 bB | 2.58 bAB | 2.87 aA | |
| F _{N×Si} | | 0.6259 | | | | 0.1859 | | |

注(Note): 表中数据为三个重复的平均值 ± 标准差 Data in the table are Mean ± SE (replicated 3 times); 数据后括号外小写字母分别表示不同硅水平之间的差异达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平 括号内小写字母分别表示不同氮水平之间差异达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平 Values followed by different small letters and capital letters after data outside/in the brackets mean significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ among Si and N levels, respectively; * 和 ** 分别表示氮和硅的交互效应达显著水平或极显著水平 Mean significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ for the interaction effects of N and Si, respectively.

2.5 氮硅配施对冬小麦叶部和穗部单宁含量的影响

方差分析表明,不同氮水平、不同硅水平之间叶部平均单宁含量差异均达极显著水平 ($P < 0.01$); 氮硅配施对小麦叶部单宁含量影响的交互效应亦达极显著水平 ($P < 0.01$)。

从表 5 可知,不同氮水平之间叶部平均单宁含量差异呈 $N_2 < N_1$ ($P < 0.01$), 不同硅水平之间叶部单宁含量呈 $Si_2 > Si_1 > Si_0$ ($P < 0.05$) 的趋势; 相同硅水平下, 叶部单宁含量表现为 $N_1 > N_2$ ($P < 0.01$),

Si_2 时叶部单宁含量差异不显著 ($P > 0.05$), 说明高硅水平下不同氮水平之间叶部单宁含量含量差异缩小; 氮水平相同时, 与 N_1Si_0 相比, N_1 配施 Si_1 叶部单宁含量增加 4.61%, 与前者差异不显著 配施 Si_2 叶部单宁增加 8.83%, 与前者差异达显著水平 ($P < 0.05$) 但 N_1Si_1 与 N_1Si_2 之间差异不显著; 而与 N_2Si_0 相比, N_2 配施 Si_1 、 Si_2 时叶部单宁分别增加 5.17% 和 36.34%, 与前者差异分别达显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 水平, 且 N_2Si_2 极显著高于 N_2Si_1 ($P < 0.01$), 说明高氮水平下, 配施较高水平的硅能更

表 5 硅氮配施对冬小麦叶部和穗部单宁含量的影响

Table 5 The tannin contents in winter wheat leaves and ears affected by N and Si combined application (mg/g)

| 因素 Factor | 叶部 Leaf | | | | 穗部 Ear | | | |
|---------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| | Si ₀ | Si ₁ | Si ₂ | N 平均 N average | Si ₀ | Si ₁ | Si ₂ | N 平均 N average |
| N ₁ | 18.01 ± 0.54 bA(aA) | 18.84 ± 0.70 abA(aA) | 19.60 ± 0.66 aA(bA) | 18.80(aA) | 9.84 ± 0.22 | 10.13 ± 0.18 | 10.15 ± 0.26 | 10.04 (aA) |
| N ₂ | 14.50 ± 0.90 bB(bA) | 15.25 ± 0.90 bB(bA) | 19.77 ± 0.53 aA(bA) | 16.51(bB) | 9.93 ± 0.36 | 10.12 ± 0.17 | 10.06 ± 0.16 | 10.03 (aA) |
| Si 平均 Si average | 16.26 cB | 17.04 bB | 19.67 aA | | 9.88 bA | 10.10 aA | 10.12 aA | |
| F _{N×Si} | | 19.39 ** | | | | 0.1859 | | |

注(Note): 表中数据为三个重复的平均值 ± 标准差 Data in the table are Mean ± SE (replicated 3 times); 数据后括号外小写字母分别表示不同硅水平之间的差异达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的显著水平 括号内大小写字母分别表示不同氮水平之间差异达 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ Values followed by different small letters and capital letters after data outside/in the brackets mean significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ among Si and N levels, respectively; * 和 ** 分别表示氮和硅的交互效应达显著水平或极显著水平 Mean significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ for the interaction effects of N and Si, respectively.

有效地增加叶部单宁含量。

方差分析还表明,不同硅水平之间穗部平均单宁含量差异达显著水平($P < 0.05$),表现为 Si_2 、 $Si_1 > Si_0$ ($P < 0.05$),不同氮水平以及氮硅配施对穗部单宁含量的影响均未达显著水平($P > 0.05$)。

3 讨论与结论

本试验结果表明,不同氮水平间冬小麦平均蚜虫密度均表现为 $N_2 > N_1$ ($P < 0.01$),这和前人的研究结果一致^[11-16]。Bryant 等^[32]人曾报道,氮肥的施用降低了植物次生代谢物质的含量,加大了虫害的发生。辛苗等^[24]研究发现,高氮水平下黄瓜蚜的生殖力明显高于低氮水平,并且随着氮水平增加,黄瓜叶片中可溶性糖含量降低、游离氨基酸总量增加。本研究结果表明,小麦叶部、穗部平均可溶性糖含量、平均总酚含量、平均单宁含量均表现为 $N_1 > N_2$,而叶部、穗部平均可溶性蛋白含量 $N_1 < N_2$,进一步表明,增施氮肥对麦蚜密度的增加与施氮降低了冬小麦体内平均可溶性糖、总酚含量和增加了可溶性蛋白含量有密切关系。

前人研究表明通过喷施有机硅表面活性剂可以防治小麦蚜虫^[33-34]。宫海军等^[35]报道施硅可以增强植物的抗虫性。本试验结果进一步表明,施硅可显著降低冬小麦蚜虫密度,这和前人的研究结果相一致。过去一般认为,硅在植物组织中沉积可限制刺吸式昆虫口针对组织的刺入^[19-20],但近来研究发现,施硅对小麦蚜虫生长发育的抑制可能与硅诱导了小麦表皮或叶肉组织释放抗虫性化学物质有关^[21]。Mittler^[36]早在 1967 年就已研究发现蔗糖和氨基酸的浓度显著影响蚜虫的进食,当蔗糖的浓度超过 20% 以后,蚜虫的进食严重减弱。刘旭明和杨奇华^[23]研究发现棉株体内可溶性糖和单宁的含量与其抗蚜性呈正相关。对燕麦的研究发现,高抗蚜品种受到蚜虫危害后体内可溶性糖含量的增加显著高于感蚜品种^[37]。武德功等^[38]对不同抗蚜苜蓿进行研究发现,蚜虫刺吸诱导过程中抗虫品种的单宁含量显著高于低抗品种。一些研究表明,增加硅的供应可提高水稻可溶性糖的含量^[39],然而关于施硅对冬小麦蚜虫发生的影响是否与硅影响了上述生化物质含量有关还鲜见报道。本研究表明,随着硅水平的增加冬小麦蚜虫密度呈下降趋势,而相反,叶部和穗部平均可溶性糖、平均总酚、叶部平均单宁含量则呈增加趋势,而叶部和穗部平均可溶性蛋白含量和穗部平均单宁含量差异不显著,说明施硅降低

冬小麦平均蚜虫密度的效应与施硅增加叶部和穗部平均可溶性糖、平均总酚、平均单宁含量关系密切。

研究还进一步表明,氮硅配施对冬小麦蚜虫密度具有极显著的交互效应。硅水平相同时,高硅水平下不同氮水平之间蚜虫密度差异缩小;氮水平相同时,低氮水平下蚜虫密度表现为 $Si_0 > Si_1$ 、 Si_2 ($P < 0.05$),而在高氮水平下蚜虫密度表现为 Si_0 、 $Si_1 > Si_2$ ($P < 0.05$),即低氮水平下配施较低水平的硅即可有效降低蚜虫密度,而高氮水平下需配施较高水平的硅才可有效降低蚜虫密度。同时研究亦表明,氮硅配施对叶部、穗部可溶性糖和叶部单宁含量亦具有极显著或显著的 ($P < 0.01$ 、 $P < 0.05$) 交互效应,其中,硅水平相同时,高硅水平下不同氮水平之间叶部和穗部可溶性糖含量、叶部单宁含量差异缩小,与高硅水平下不同氮水平之间蚜虫密度差异缩小趋势一致,可见,高硅削弱施氮增加小麦蚜虫密度的效应与高硅削弱施氮增加叶部和穗部可溶性糖、叶部单宁含量的效应有密切关系;氮水平相同时,低氮水平下穗部可溶性糖含量表现为 Si_2 、 $Si_1 > Si_0$,与小麦蚜虫密度随硅水平变化规律相反;高氮水平下,小麦叶部和穗部可溶性糖、叶部单宁含量均表现为 $Si_2 > Si_1$ 、 Si_0 ($P < 0.01$),与小麦蚜虫随硅水平变化规律相反,可见,低氮水平下,施硅降低蚜虫密度的效应与其增加了穗部可溶性糖含量有密切关系,而高氮条件下,施硅降低蚜虫密度的效应则与其增加了小麦叶部和穗部可溶性糖、叶部单宁含量有密切关系。

本研究证实了氮硅配施显著影响蚜虫危害后冬小麦体内可溶性糖和单宁的含量,并且显著降低了蚜虫密度,初步揭示了氮硅配施对蚜虫密度的影响和营养调控机制。

致谢:河南农业大学资源与环境学院汪强副教授对田间试验的指导,中国科学院动物研究所戈峰研究员对论文的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 王激清,马文奇,江荣凤,张福锁. 养分资源综合管理与中国粮食安全[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 415-422.
Wang J Q, Ma W Q, Jiang R F, Zhang F S. Integrated soil nutrients management and China's food security[J]. Resour. Sci., 2008, 30(3): 415-422.
- [2] 曹雅忠,尹姣,李克斌,等. 小麦蚜虫不断猖獗原因及控制对策的探讨[J]. 植物保护, 2006, 32(5): 72-75.
Cao Y Z, Yin J, Li K B et al. Exploration of the factors causing

- the outbreak of wheat aphids and the control strategies [J]. *Plant Protect.*, 2006, 32(5): 72-75.
- [3] 吕仲贤, 俞晓平, Heong K L, 胡萃. 氮肥对植食性昆虫的影响及其对水稻主要害虫种群的诱导 [J]. *中国水稻科学*, 2006, 20(6): 649-656.
Lu Z X, Yu X P, Heong K L, Hu C. Nitrogen fertilizer affects herbivores and stimulates the populations of major insect pests of rice [J]. *Chin. J. Rice Sci.*, 2006, 20(6): 649-656.
- [4] 王美芳, 原国辉, 陈巨莲, 等. 麦蚜发生危害特点及小麦抗蚜性鉴定的研究 [J]. *河南农业科学*, 2006, (7): 58-60
Wang M F, Yuan G H, Chen J L *et al.* The characteristic of hazard to wheat aphid and research on identifying resistance to wheat aphids [J]. *J. Henan Agric. Sci.*, 2006, (7): 58-60.
- [5] Marschner H. Relationship between mineral nutrition and plant disease and pests. mineral nutrition of higher plants (2nd ed.) [M]. London: Academic Press, 1995. 436-460.
- [6] Minkenberg O P, Ottenheim J J. Effect of leaf nitrogen content of tomato plants on preference and performance of a leafmining fly [J]. *Oecologia*, 1990, 83(3): 291-298.
- [7] Bentz J A, Reeves J III, Barbosa P, Francis B. Effect of nitrogen fertilizer source and level on ovipositional choice of poinsettia by *Bemisia argentifolii* [J]. *J. Econ. Entomol.*, 1995, 88(5): 1388-1392.
- [8] Bentz J A, Larew H G. Ovipositional preference and nymphal performance of *Trialeurodes vaporariorum* on *Dendranthema grandiflora* under different fertilizer regimes [J]. *J. Econ. Entomol.*, 1992, 85(2): 514-517.
- [9] Cisneros J J, Godfrey L D. Midseason pest status of the cotton aphid in California cotton: Is nitrogen a key factor? [J]. *Environ. Entomol.*, 2001, 30(3): 501-510.
- [10] Chen Y G, John R R, Dawn M O. Nitrogen fertilization rate affects feeding, larval performance, and oviposition preference of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* on cotton [J]. *Entomol. Exp. Appl.*, 2008, 126(3): 244-255.
- [11] Ponder K L, Pritchard J, Harrington R, Bale J S. Difficulties in location and acceptance of phloem sap in addition to reduced amino acid concentration explain lowered performance of the aphid *Rhopalosiphum padi* on nitrogen-deficient barley (*Hordeum vulgare*) seedlings [J]. *Entomol. Exp. Appl.*, 2000, 97(2): 203-210.
- [12] Douglas A E. The nutritional quality of phloem sap utilized by natural aphid populations [J]. *Ecol. Entomol.*, 1993, 18(1): 31-38.
- [13] Dixon A F G. Cereal aphids as an applied problem [J]. *Agric. Zool. Rev.*, 1987, 2: 1-57.
- [14] Aqueel M A, Leather S R. Effect of nitrogen fertilizer on the growth and survival of *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Sitobion avenae* (F.) (Homoptera: Aphididae) on different wheat cultivars [J]. *Crop Prot.*, 2011, 30(2): 216-221.
- [15] Ai T C, Liu Z Y, Li C R *et al.* Impact of fertilization on cotton aphid population in Bt-cotton production system [J]. *Ecol. Complex.*, 2011, 8(1): 9-14.
- [16] 戈峰, 刘向辉, 李泓达, 等. 氮肥对棉田主要害虫种群密度及棉花产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1735-1738.
Ge F, Liu X H, Li H D *et al.* Effect of nitrogen fertilizer on pest population and cotton production [J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2003, 14(10): 1735-1738.
- [17] Goussain M M, Moraes J C, Carvalho J G *et al.* Effect of silicon application on corn plants upon the biological development of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Neotrop. Entomol.*, 2002, 31(2): 305-310.
- [18] Keeping M G, Meyer J H. Calcium silicate enhances resistance of sugarcane to the African stalk borer *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. *Agric. Forest. Entomol.*, 2002, 4(4): 265-274.
- [19] Peterson S S, Scriber J M, Coors J G. Silica, cellulose and their interactive effects on the feeding performance of the southern armyworm *Spodoptera eridania*, (Cramer) (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *J. Kansas Entomol. Soc.*, 1988, 61(2): 169-177.
- [20] Hayward D M, Parry D W. Electron-probe microanalysis studies of silica distribution in barley (*Hordeum sativum* L.) [J]. *Ann. Bot.*, 1973, 37(3): 579-591.
- [21] Goussain M M, Prado E, Moraes J C. Effect of Silicon Applied to Wheat Plants on the Biology and Probing Behaviour of the Greenbug *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae) [J]. *Neotrop. Entomol.*, 2005, 34(5): 807-813.
- [22] 陈建新, 宋敦伦, 采长群, 等. 小麦抗禾缢管蚜的生化研究 [J]. *昆虫学报*, 1997, 40(增刊): 186-189.
Chen J X, Song D L, Cai C Q, Cheng D F, Tian Z. Biochemical studies on wheat resistance to the grain aphid, *Rhopalosiphum padi* (L.) [J]. *Acta Entomol. Sin. (Suppl.)*, 1997, 40: 186-189.
- [23] 刘旭明, 杨奇华. 棉花抗蚜的生理生化机制及其与棉蚜种群数量消长关系的研究 [J]. *植物保护学报*, 1993, 20(1): 25-29
Liu X M, Yang Q H. The relationships between the physiological and biochemical mechanisms of aphid resistance of cotton and the population dynamics of cotton aphid [J]. *Acta Phytophyl. Sin.*, 1993, 20(1): 25-29.
- [24] 辛苗, 杜相革, 朱晓清. 不同氮水平对黄瓜蚜虫生长发育的影响 [J]. *植物保护学报*, 2010, 37(5): 408-412
Xin M, Du X G, Zhu X Q. Influence of variable nitrogen fertilization on growth and development of aphid *Aphis gossypii* [J]. *Acta Phytophyl. Sin.*, 2010, 37(5): 408-412.
- [25] 张文辉, 刘光杰. 植物抗虫性次生物质的研究概况 [J]. *植物学通报*, 2003, 20(5): 522-530
Zhang W H, Liu G J. A review on plant secondary substances in plant resistance to insect pests [J]. *Chin. Bull. Bot.*, 2003, 20(5): 522-530.
- [26] 刘兴平, 陈春平, 王国红, 李镇宇, 戈峰. 我国松树诱导抗虫性研究进展 [J]. *林业科学*, 2003, 39(5): 119-128.

- Liu X P, Chen C P, Wang G H, Li Z Y, Ge F. Progress in induced resistance of pines [J]. *Sci. Silv. Sin.*, 2003, 39(5): 119-128.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [28] 蔡青年, 张青文, 高希武, 王宇, 周明祥. 小麦体内次生物质对麦蚜的抗性作用研究 [J]. *中国农业科学*, 2003, 36(8): 910-915.
Cai Q N, Zhang Q W, Gao X W *et al.* Effects of the secondary substances on wheat resistance to *Sitobion avenae* (F) [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2003, 36(8): 910-915.
- [29] 韩富根, 刘学芝, 焦桂珍. 用福林法测定烟叶中总酚含量的探讨 [J]. *河南农业大学学报*, 1993, 27(1): 95-98.
Han F G, Liu X Z, Jiao G Z. The use of folin method for determining the total phenols content in tobacco leaves [J]. *J. Henan Agric. Univ.*, 1993, 27(1): 95-98.
- [30] 范璐, 霍权恭, 周展明, 朱之光, 蔡凤英. 高粱中单宁含量测定方法的研究 [J]. *中国粮油学报*, 2001, 16(2): 13-17.
Fan L, Huo Q G, Zhou Z M *et al.* Studies on the determination of Tannin content in sorghum [J]. *J. Chin. Cereal. Oil. Assoc.*, 2001, 16(2): 13-17.
- [31] 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, 194-202.
Li H S. Plant physiology and biochemistry experiment principle and technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 194-202.
- [32] Bryant J P, Clausen T P, Reichardt P B *et al.* Effect of nitrogen fertilization upon the secondary chemistry and nutritional value of quaking aspen leaves for the large aspen tortrix [J]. *Oecologia*, 1987, 73(4): 513-517.
- [33] 邱占奎, 袁会珠, 李永平, 等. 添加有机硅表面活性剂对低容量喷雾防治小麦蚜虫的影响 [J]. *植物保护*, 2006, 32(2): 34-37.
Qiu Z K, Yuan H Z, Li Y P *et al.* Influence of the surfactant Silwet408 on wheat aphids control efficacy using low volume spraying [J]. *Plant Prot.*, 2006, 32(2): 34-37.
- [34] 李英. 有机硅助剂在提高麦蚜防效上的应用效果研究报告 [J]. *科技信息*, 2012, 7: 618-625.
Li Y. Application effect of silicone additives improving wheat aphid control [J]. *Sci. Tech. Infor.*, 2012, 7: 618-625.
- [35] 宫海军, 陈坤明, 王锁民, 张承烈. 植物硅营养的研究进展 [J]. *西北植物学报*, 2004, 24(12): 2385-2392.
Gong H J, Chen K M, Wang S M, Zhang C L. Advances in silicon nutrition of plants [J]. *Acta Bot. Bor-Occid. Sin.*, 2004, 24(12): 2385-2392.
- [36] Mittler T E. Effect of amino acid and sugar concentrations on the food uptake of the aphid *Myzus Persicae* [J]. *Entom. Exp. Appl.*, 1967, 10(1): 39-51.
- [37] 朱永峰, 陈明, 刘长仲. 蚜虫为害对五个燕麦品种苗期体内几种物质的影响 [J]. *植物保护*, 2011, 37(2): 55-58.
Zhu Y F, Chen M, Liu C Z. Variations of several substances in the seedlings of five oat varieties infested by aphids [J]. *Plant Prot.*, 2011, 37(2): 55-58.
- [38] 武德功, 王森山, 刘长仲, 等. 豌豆蚜刺吸胁迫对不同苜蓿品种体内单宁含量及生理活性的影响 [J]. *草地学报*, 2011, 19(2): 351-355.
Wu D G, Wang S S, Liu C Z *et al.* Effects of herbivore stress by *Acyrtosip hon pisum* on the contents of tannin and physiological activity in different alfalfa cultivar [J]. *Acta Agrestia Sin.*, 2011, 19(2): 351-355.
- [39] Zeng F R, Zhao F S, Qiu B Y *et al.* Alleviation of chromium toxicity by silicon addition in rice plants [J]. *Agric. Sci China*, 2011, 10(8): 1188-1196.