



灌水和施硅对冬小麦叶片显微结构、光合特性及产量的影响

孙金阳, 曹彩云, 郑春莲, 李科江, 马俊永, 张俊鹏, 党红凯

Effects of irrigation and silicon application on leaf microstructure, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat

SUN Jinyang, CAO Caiyun, ZHENG Chunlian, LI Kejiang, MA Junyong, ZHANG Junpeng, and DANG Hongkai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20230643>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

扁桃-冬小麦间作系统树冠截光程度对小麦产量和灌浆期光合特性的影响

Effect of shading degree on the grain yield and photosynthetic characteristics of wheat at the grain filling stage in an almond-winter wheat intercropping system

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(4): 704-715

微咸水灌溉对冬小麦叶片抗干热风能力的影响

Effect of brackish water irrigation on the resistibility of winter wheat leaf to dry-hot wind

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(10): 1609-1617

腐植酸与氮肥配施对冬小麦氮素吸收利用及产量的影响

Effect of combined application of humic acid and nitrogen fertilizer on nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(3): 365-372

秸秆颗粒还田对土壤养分和冬小麦产量的影响

Effect of granulated straw incorporation on soil nutrient and grain yield of winter wheat

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(12): 1770-1778

不同矿化度微咸水灌溉冬小麦对下季作物产量和周年土壤盐分平衡的影响

Annual soil salt balance and crop performance under brackish water irrigation during the winter wheat season

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(5): 809-820

冬小麦光合特性对CO₂浓度与土壤含水量的响应机制

Response mechanism of photosynthetic characteristics of winter wheat to CO₂ concentration and soil water content

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(7): 1034-1041



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20230643

孙金阳, 曹彩云, 郑春莲, 李科江, 马俊永, 张俊鹏, 党红凯. 灌水和施硅对冬小麦叶片显微结构、光合特性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(5): 827-838

SUN J Y, CAO C Y, ZHENG C L, LI K J, MA J Y, ZHANG J P, DANG H K. Effects of irrigation and silicon application on leaf microstructure, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(5): 827-838

灌水和施硅对冬小麦叶片显微结构、光合特性及产量的影响*

孙金阳^{1,2}, 曹彩云², 郑春莲², 李科江², 马俊永², 张俊鹏^{1**}, 党红凯^{2**}

(1. 山东农业大学水利土木工程学院 泰安 271018; 2. 河北省农林科学院旱作农业研究所/河北省农作物抗旱研究重点实验室 衡水 053000)

摘要: 为探究不同灌水和施硅处理对冬小麦光合器官发育及产量构成的影响, 于2021—2023年采用灌水和施硅二因素区组试验设计, 设置3组灌水处理 [W_0 : 春浇0水; W_1 : 春浇1水(拔节期灌水); W_2 : 春浇2水(拔节期和开花期各灌1次水)] 和2组叶面硅肥处理 [叶面喷施清水 (Si_0)、叶面喷施硅肥 (Si_1)], 共计6组处理, 分析不同灌溉制度下喷施叶面硅肥对冬小麦叶片显微结构、光合特性和产量构成的影响。结果表明, 随灌水次数的增加, 冬小麦叶肉细胞长宽积、叶片厚度、叶绿素相对含量、净光合速率呈上升趋势; 与 W_0 处理相比, W_1 处理单位面积穗数、穗粒数、千粒重、籽粒产量分别增加11.4%、6.8%、1.5%、16.4%, W_2 处理依次增加15.5%、12.4%、4.8%、37.4%。施用硅肥可以提高冬小麦叶片厚度, 延缓花后旗叶叶绿素降解, 提高净光合速率, 促使单位面积穗数增加4.9%, 籽粒产量增加3.3%; 施硅对冬小麦产量的促进效应随灌水次数的增加而减弱, 与 Si_0 相比, Si_1 条件下 W_0 处理冬小麦单位面积穗数和籽粒产量分别增加8.8%和8.3%, W_1 处理依次增加4.2%和3.4%。冬小麦籽粒产量与叶肉细胞长宽积、叶片厚度、叶绿素相对含量、净光合速率呈正相关关系。本研究条件下, 增加灌水有利于提高冬小麦光合能力和籽粒产量, 水分不足时喷施硅肥能优化冬小麦叶片结构, 增强光合作用, 提升产量水平。

关键词: 冬小麦; 灌溉制度; 硅肥; 叶肉细胞; 光合速率; 产量

中图分类号: S275; S512

Effects of irrigation and silicon application on leaf microstructure, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat*

SUN Jinyang^{1,2}, CAO Caiyun², ZHENG Chunlian², LI Kejiang², MA Junyong², ZHANG Junpeng^{1**},
DANG Hongkai^{2**}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tan'an 271018, China; 2. Institute of Dryland Farming, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences / Key Laboratory of Crop Drought Resistance Research of Hebei Province, Hengshui 053000, China)

Abstract: Irrigation is an important cultivation measure that affects plant growth and photosynthesis, and silicon fertilizers can effect-

* 国家重点研发计划项目(2023YFD2301500)、河北省重点研发计划项目(21327003D)、河北省农林科学院基金项目(2021040201)和河北省小麦产业体系衡水站资助

** 通信作者: 张俊鹏, 主要研究方向为节水灌溉理论与新技术, E-mail: jpengzhang@163.com; 党红凯, 主要研究方向为小麦节水技术, E-mail: wheatcrop@126.com

孙金阳, 主要研究方向为农业水资源高效利用。E-mail: sunjinyang123456@126.com

收稿日期: 2023-11-05 接受日期: 2024-01-08

* The study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFD2301500), the Key Research and Development Plan in Hebei Province (21327003D), the Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences Basic Scientific Research Fund Project (2021040201) and the Wheat Industry System Hengshui Station of Hebei Province.

** Corresponding authors: ZHANG Junpeng, E-mail: jpengzhang@163.com; DANG Hongkai, E-mail: wheatcrop@126.com
Received Nov. 5, 2023; accepted Jan. 8, 2024

ively improve the photosynthetic characteristics of crops under low-water conditions. Although many studies exist on the effects of different irrigation systems and silicon application treatments on the growth and yield of winter wheat, only a few have highlighted the effects of silicon application on the microstructure and photosynthetic rate of winter wheat leaves under different irrigation systems. To explore the effects of different irrigation and silicon treatments on the development of photosynthetic organs and yield components of winter wheat, a two-factor experiment was conducted with three groups of irrigation treatments [W_0 : no irrigation in spring; W_1 : irrigation once in spring (irrigation at jointing stage); W_2 : irrigation twice in spring (irrigation once at jointing stage and flowering stage respectively)] and two groups of silicon fertilizer treatments [foliar sprayed with fresh water (Si_0) and foliar sprayed with silicon fertilizer (Si_1)] from 2021 to 2023. Six treatments were used to analyze the effects of spraying silicon fertilizer on leaf microstructure, photosynthetic characteristics, and yield composition of winter wheat under different irrigation systems. The results showed that, with increasing irrigation time, the mesophyll cell size, leaf thickness, relative chlorophyll content, and net photosynthetic rate of winter wheat increased. Compared with W_0 treatment, the spike number per unit area, grain number per spike, 1000-grain weight, and grain yield of W_1 treatment increased by 11.4%, 6.8%, 1.5%, and 16.4%, respectively, and those of W_2 treatment increased by 15.5%, 12.4%, 4.8%, and 37.4%, respectively. The application of silicon fertilizer increased the leaf thickness of winter wheat, delayed the degradation of chlorophyll in flag leaves, and increased the net photosynthetic rate, which contributed to the increase in the number of spikes per unit area by 4.9% and grain yield by 3.3%; the promotional effect of silicon application on the yield of winter wheat diminished with the increase of irrigation frequency. Compared with Si_0 , the spike number per unit area and grain yield of winter wheat increased by 8.8% and 8.3%, respectively, under W_0 treatment and increased by 4.2% and 3.4%, respectively, under W_1 treatment. Correlation analysis showed that winter wheat grain yield was positively correlated with mesophyll cell size, leaf thickness, relative chlorophyll content, and net photosynthetic rate. In summary, under the conditions of this study, increasing irrigation was beneficial in increasing the relative chlorophyll content and net photosynthetic rate of winter wheat, reducing the decrease in relative chlorophyll content and net photosynthetic rate in the middle and late grain-filling stages, and promoting an increase in spike number per unit area, grain amount per spike, 1000-grain weight, and grain yield. Spraying foliar silicon fertilizer improved the leaf structure of winter wheat in the experimental area, enhanced photosynthetic capacity, and increased the spike number per unit area and grain yield of winter wheat. The effect of spraying foliar silicon fertilizer on increasing yield was more obvious when water was insufficient.

Keywords: Winter wheat; Irrigation schedule; Silicon fertilizer; Mesophyll cell; Photosynthetic rate; Yield

华北平原是我国小麦 (*Triticum aestivum* L.) 的主产区, 保证该区小麦高效生产对国家粮食安全至关重要^[1]。华北平原冬小麦需水量 400 mm 左右, 但小麦生长季降水只能满足其需水的 25%~40%^[2], 灌溉是维持小麦稳产、高产的重要保障。以河北省为例, 小麦生育期降水与需水的吻合度仅 0.26, 灌溉水需求量大^[3]。然而, 河北省地面淡水资源匮乏, 灌溉用水主要依靠开采地下水, 过量开采导致地下水位明显下降, 形成大面积的地下水降落漏斗区^[4-5], 水资源短缺已成为制约冬小麦安全生产的瓶颈。开展小麦节水灌溉技术研究, 挖掘小麦生理节水潜力, 是实现小麦生产可持续发展的重要保证。已有研究表明, 冬小麦春季需进行 2~3 次灌溉才能满足高产需求^[6-7]。在限水条件下, 通过采用微灌技术^[8]、优化灌溉制度^[9]、调整耕作方式^[10]、运用水肥一体化技术^[11] 等措施能有效缓解水分亏缺带来的不利影响, 如张胜全等^[12] 研究指出, 开花前仅灌一次拔节水可基本满足拔节至开花期耗水需要, 其群体库容量与开花前灌起身水和孕穗水模式无显著差异。硅是地壳中仅次于氧的第 2 丰富的元素, 对植物生长发育极为重要^[13]。以往研究表明硅减轻了小麦所面临的生物胁迫^[14] 和非生物胁迫^[15]。一般认为, 硅可在叶片中积累进而限制

蒸腾作用^[16]、保护细胞膜^[17]、增加抗氧化酶的活性^[18]。张志伟等^[19] 认为不论浇水与否, 施硅均可以增加小麦产量, 且在干旱条件下增幅更加明显; 孙德祥等^[20] 研究表明, 硅肥可以提高小麦植株的抗旱性, 增加籽粒产量。目前有关不同灌水和施硅处理对冬小麦生长发育和产量影响的研究较多, 但不同灌溉制度下施硅对冬小麦叶片显微结构和光合特性影响的研究较为鲜见。因此, 本研究在大田试验条件下设置 3 种灌水处理和 2 种硅肥处理, 研究不同处理对冬小麦叶肉细胞环数、细胞长宽积、叶片厚度、叶绿素相对含量、净光合速率和产量构成的影响, 探索冬小麦叶片显微结构、光合特性和籽粒产量对不同灌水和施硅处理的响应机制, 旨在进一步挖掘冬小麦节水增产潜力, 以期硅肥应用于冬小麦节水稳产栽培技术体系提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2021—2023 年冬小麦生长季在河北省农林科学院旱作节水农业试验站 (37°9'N, 115°72'E) 进行。该地区属于半湿润半干旱气候, 年均气温为 12.8 °C, 年均日照时数为 2509.4 h, 无霜期

为 188 d, 蒸发量为 1785 mm, 降雨量为 510 mm。试验区地势平坦, 地下水埋深大于 5 m, 土壤质地为壤土, 0~100 cm 土层土壤容重为 $1.44 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 田间持水量为 $0.28 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$; 0~20 cm 土层土壤有机质含量为 $22.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮含量为 $99.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷含量为 28.8

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾含量为 $379.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效硅含量为 $109 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。图 1 为 2021—2023 年冬小麦生育期间日均气温和逐日降雨情况, 2021—2022 年和 2022—2023 年冬小麦全生育期平均气温分别为 7.8°C 和 8.35°C , 降雨总量分别为 69.4 mm 和 152.2 mm。

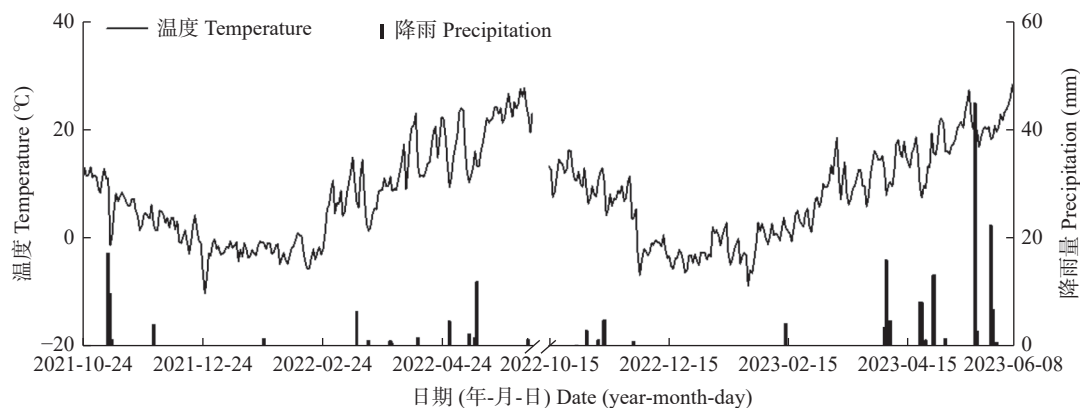


图 1 2021—2023 年冬小麦生育期间日平均气温和降雨量

Fig. 1 Daily average temperature and precipitation during the growth period of winter wheat from 2021 to 2023

1.2 试验设计

试验区种植制度为冬小麦-夏玉米 (*Zea mays* L.) 一年两熟制, 玉米收获后秸秆全部粉碎还田。采用二因素随机区组试验设计, A 因素为灌溉制度, 按照春季灌水次数设置 3 个灌水处理, 分别为 W_0 (春浇 0 水)、 W_1 (春浇 1 水, 拔节期灌水)、 W_2 (春浇 2 水, 拔节期和开花期各灌水 1 次), 灌水定额均为 75 mm ; B 因素为硅肥处理, 设计 2 种情况, 分别为 Si_0 (冬小麦拔节期灌水前, 叶面喷施清水 $600 \text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和 Si_1 [冬小麦拔节期灌水前, 叶面喷施水溶性硅肥 ($\text{SiO} \geq 26\%$, Si 浓度 $\geq 230 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), 喷施量 $30 \text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$, 喷施前加水稀释 20 倍], 共计 6 个处理, 每个处理 3 组重复。田间试验小区面积为 42.75 m^2 ($9.5 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$)。供试冬小麦品种为‘衡 4399’, 播种量为 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 行距 15 cm。冬小麦播种前施磷酸二铵 $525 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、氯化钾 $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 拔节期追加尿素 $375 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 折合 N、 P_2O_5 、 K_2O 施用量分别为 $267 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $241.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各处理冬小麦均为足墒播种, 其中, 2021—2022 年冬小麦播种前灌溉造墒水为 75 mm , 2022—2023 年冬小麦播种前出现强降雨 ($>100 \text{ mm}$), 未灌溉造墒水。2021—2022 年和 2022—2023 年冬小麦播种时间分别为 2021 年 10 月 24 日和 2022 年 10 月 15 日, 收获日期分别为 2022 年 6 月 9 日和 2023 年 6 月 8 日。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶片显微结构特征

冬小麦开花后第 10 天, 每个处理随机选取 10 株

样本采集旗叶, 测定以下指标 (图 2)。

1) 叶肉细胞形态: 选取叶片中部, 采用段续川^[21]的方法, 经固定、氧化、水解、分离后染色制片。每个制片在偏光显微镜 (Model Eclipse Ci-L, Nikon, 日本) 下观察 200 个细胞, 统计每个细胞的形态与环数。

2) 叶肉细胞长宽积: 在偏光显微镜下, 用测微尺连续测量每个制片中 5 环细胞的长度和宽度, 根据长度 \times 宽度计算细胞长宽积, 用来评价细胞大小。

3) 叶片厚度: 于冬小麦叶片中部横切, 并在偏光显微镜下用测微尺测量叶片厚度。

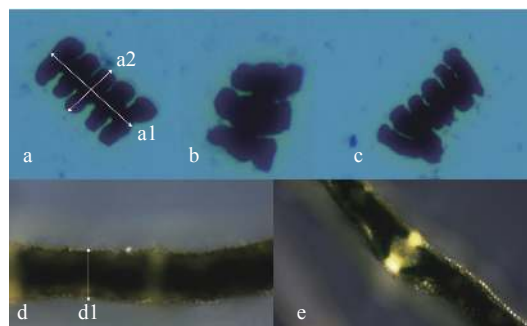


图 2 叶片显微结构测定指标示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measured indicators for leaf microstructure

a1: 叶肉细胞长度; a2: 叶肉细胞宽度; d1: 叶片厚度; a: 5 环细胞; b: 3 环细胞; c: 6 环细胞; d 和 e: 叶片横切面。a1: mesophyll cell length; a2: mesophyll cell width; d1: leaf thickness; a: 5-linked cell; b: 3-linked cell; c: 6-linked cell; d and e refer to leaf cross section.

1.3.2 叶绿素相对含量 (SPAD 值)

分别于开花期 (AS)、开花后第 10 天 (AA10)、

开花后第 20 天 (AA20) 和开花后第 30 天 (AA30), 采用叶绿素测量仪 (SPAD-502Plus, Konica Minolta, 日本) 测定各处理冬小麦旗叶的叶绿素相对含量 (SPAD 值), 每个小区测定 10 株。

1.3.3 净光合速率 (P_n)

分别于开花期 (AS)、开花后第 10 天 (AA10) 和开花后第 20 天 (AA20), 采用便携式手持式光合作用测量仪 (CI-340, CID, 美国) 于上午 9:00—11:00 (保证光合有效辐射为 $900\sim 1200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 测定各处理冬小麦旗叶的净光合速率 (P_n), 每个小区测定 3~5 株。

1.3.4 产量及产量构成

于小麦收获时, 每个小区随机选取 2 个点调查 1 m 双行的穗数, 换算成每公顷穗数; 每个小区随机选取 40 穗小麦测定穗粒数; 各小区随机收获 3 m^2 测产, 脱粒风干称重后计算每公顷产量, 并测定千粒重。

1.4 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2021 进行处理, 绘图和统计分析分别采用 Origin 2022 和 SPSS 26.0 软件进行处理, 通过单因素方差分析 (ANOVA) 检验不同处理之间差异的显著性, 通过单因素变量一般线

性模型对统计结果进行 F 值检验, 显著性检验采用 LSD 法, 差异显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同灌水和施硅处理对冬小麦旗叶显微结构特征的影响

2.1.1 冬小麦叶肉细胞环数

图 3 为不同处理冬小麦旗叶叶肉细胞环数的组成。冬小麦叶肉细胞的平均环数为 5.4~6.2, 其中, 以 3~7 环居多, 比例为 62.5%~80.0%。同一硅肥条件下, 叶肉细胞平均环数呈现出随灌水次数增加而减低的态势。与 W_0 相比, 2021—2022 年和 2022—2023 年 W_1 处理冬小麦旗叶的叶肉细胞平均环数分别降低 3.8% 和 3.7%, W_2 处理依次降低 7.6% 和 7.1%。同一水分条件下, 喷施叶面硅肥有降低小麦叶肉细胞环数的趋势, 与 Si_0 相比, 2021—2022 年和 2022—2023 年 Si_1 处理小麦叶肉细胞环数分别下降 3.3% 和 2.9%。年际之间, 2022—2023 年各处理小麦旗叶叶肉细胞平均环数小于 2021—2022 年, 其中, W_0 、 W_1 、 W_2 处理的降幅分别为 3.2%、3.1%、2.7%; Si_0 和 Si_1 处理的降幅依次为 3.2% 和 2.8%。

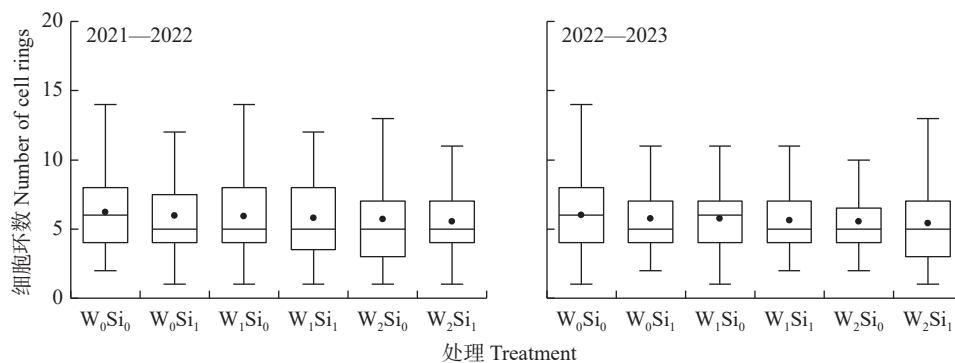


图 3 2021—2023 年不同灌水和施硅处理对冬小麦叶肉细胞环数的影响

Fig. 3 Effects of irrigation and silicon application on the number of mesophyll cell rings of winter wheat from 2021 to 2023

W_0 、 W_1 和 W_2 分别表示春浇 0 水、春浇 1 水和春浇 2 水处理; Si_0 和 Si_1 分别表示叶面喷施清水和叶面喷施硅肥处理。 W_0 、 W_1 、and W_2 represent no irrigation in spring, irrigation once in spring and irrigation twice in spring, respectively; Si_0 and Si_1 represent foliar sprayed with fresh water and foliar sprayed with silica fertilizer, respectively.

2.1.2 冬小麦叶肉细胞长宽积

图 4 为冬小麦旗叶叶肉细胞长宽积。可以看出, 叶肉细胞长宽积均随灌水次数的增加而增大, 与 W_0 相比, 2021—2022 年 W_1 和 W_2 处理叶肉细胞长宽积分别增加 2.9% 和 3.8%, 2022—2023 年依次增加 3.2% 和 4.2%。喷施叶面硅肥有增加小麦叶肉细胞长宽积的趋势, 各处理间差异并不显著。年际之间, 2022—2023 年各处理叶肉细胞大于 2021—2022 年, 其中, W_0 、 W_1 、 W_2 处理叶肉细胞长宽积分别增加 3.5%、

3.8%、3.8%。

2.1.3 冬小麦叶片厚度

从图 5 可以看出, 不同水分条件下, 叶片厚度随着灌水次数的增加而增大, 与 W_0 相比, 2021—2022 年 W_1 和 W_2 处理叶片厚度分别增加 6.3% 和 19.9%, 2022—2023 年依次增加 17.4% 和 33.2%。喷施叶面硅肥有利于小麦叶片厚度的增加, 与 Si_0 相比, 2021—2022 年和 2022—2023 年 Si_1 处理叶片厚度分别提高 4.5% 和 3.9%。硅肥对叶片厚度的影响随灌水次数

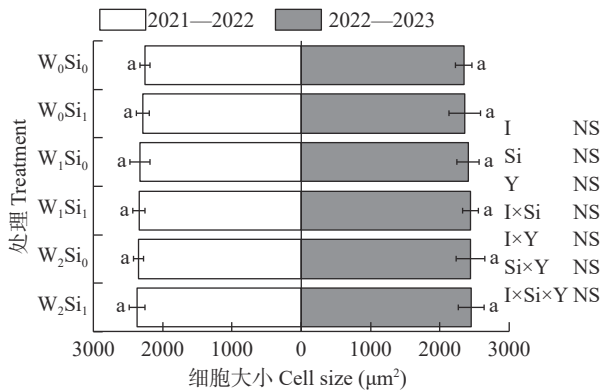


图 4 2021—2023 年不同灌水和施硅处理对冬小麦叶肉细胞长宽积的影响
Fig. 4 Effects of different treatments of irrigation and silicon application on mesophyll cell size of winter wheat from 2021 to 2023

W₀、W₁ 和 W₂ 分别表示春浇 0 水、春浇 1 水和春浇 2 水处理; Si₀ 和 Si₁ 分别表示叶面喷施清水和叶面喷施硅肥处理; I: 灌水处理; Si: 硅肥处理; Y: 年份。不同小写字母表示同一年份不同处理在 P<0.05 水平差异显著; NS 表示无显著性差异。W₀, W₁, and W₂ represent no irrigation in spring, irrigation once in spring and irrigation twice in spring, respectively; Si₀ and Si₁ represent foliar sprayed with fresh water and foliar sprayed with silica fertilizer, respectively; I: irrigation treatment; Si: silicon fertilizer treatment; Y: year. Different lowercase letters represent significant differences among different treatments in the same year at P<0.05 level; NS represents no significant difference.

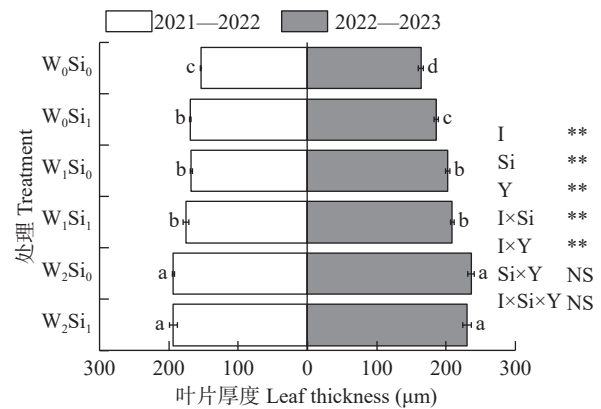


图 5 2021—2023 年不同灌水和施硅处理对冬小麦叶片厚度的影响
Fig. 5 Effects of different treatments of irrigation and silicon application on leaf thickness of winter wheat from 2021 to 2023

W₀、W₁ 和 W₂ 分别表示春浇 0 水、春浇 1 水和春浇 2 水处理; Si₀ 和 Si₁ 分别表示叶面喷施清水和叶面喷施硅肥处理; I: 灌水处理; Si: 硅肥处理; Y: 年份; 不同小写字母表示同一年份不同处理在 P<0.05 水平差异显著; **表示在 P<0.01 水平差异显著; NS 表示无显著性差异。W₀, W₁, and W₂ represent no irrigation in spring, irrigation once in spring and irrigation twice in spring, respectively; Si₀ and Si₁ represent foliar sprayed with fresh water and foliar sprayed with silica fertilizer, respectively; I: irrigation treatment; Si: silicon fertilizer treatment; Y: year; different lowercase letters represent significant differences among different treatments in the same year at P<0.05 level; ** represents significant differences at P<0.01 level, and NS represents no significant difference.

的减少而增强, 其中 2021—2022 年和 2022—2023 年 W₀ 条件下施硅处理小麦的叶片厚度较不施硅处理分别增加 9.7% 和 13.6%。年际间, 2022—2023 年各处理小麦旗叶叶片厚度大于 2021—2022 年, 其中, W₀、W₁、W₂ 处理分别增加 8.9%、20.4%、20.9%; Si₀ 和 Si₁ 处理依次提高 17.4% 和 16.7%。统计结果表明, 灌水、施硅、年份以及水硅(灌水和施硅)交互均对冬小麦叶片厚度产生极显著影响。

2.2 不同灌水和施硅处理对冬小麦光合特性的影响

2.2.1 冬小麦叶绿素相对含量

图 6 为冬小麦旗叶叶绿素相对含量 (SPAD 值)。从图 6 可以看出, 各处理 SPAD 值随开花后天数的增加呈先增后减的趋势, 最大值出现在开花后第 10 天。SPAD 值随着灌水次数的增加而增大, 灌浆后期 SPAD 值下降幅度随灌水次数的增加而减缓。与 W₀ 相比, 2021—2022 年 W₁ 和 W₂ 处理小麦旗叶 SPAD 均值分别增加 12.5% 和 21.4%, 2022—2023 年依次增

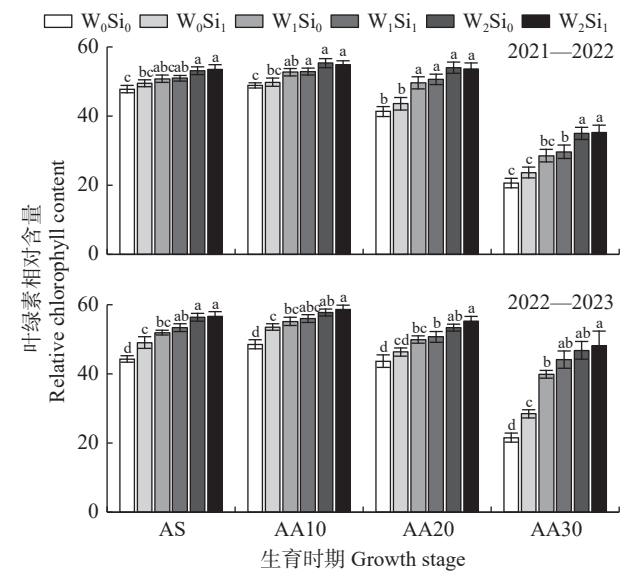


图 6 2021—2023 年不同灌水和施硅处理对冬小麦叶绿素相对含量的影响

Fig. 6 Effects of irrigation and silicon application on the relative chlorophyll content of winter wheat from 2021 to 2023

AS: 开花期; AA10: 开花后 10 d; AA20: 开花后 20 d; AA30: 开花后 30 d; W₀、W₁ 和 W₂ 分别表示春浇 0 水、春浇 1 水和春浇 2 水处理; Si₀ 和 Si₁ 分别表示叶面喷施清水和叶面喷施硅肥处理。不同小写字母表示同一生育时期不同处理在 P<0.05 水平差异显著。AS: anthesis stage; AA10: 10 days after anthesis; AA20: 20 days after anthesis; AA30: 30 days after anthesis; W₀, W₁, and W₂ represent no irrigation in spring, irrigation once in spring and irrigation twice in spring, respectively; Si₀ and Si₁ represent foliar sprayed with fresh water and foliar sprayed with silica fertilizer, respectively. Different lowercase letters represent significant differences among different treatments at the same growth stage at P<0.05 level.

大 19.6% 和 29.1%; 与开花后第 10 天相比, 2021—2022 年 W_0 、 W_1 、 W_2 处理冬小麦开花后第 30 天旗叶 SPAD 值的降幅分别为 55.1%、44.8%、36.3%, 2022—2023 年依次为 51.2%、24.5%、18.5%。中低水分条件下, 喷施叶面硅肥有增加小麦旗叶 SPAD 值的趋势。2021—2022 年施硅条件下 W_0 和 W_1 处理冬小麦旗叶 SPAD 均值较不施硅处理分别增加 5.0% 和 1.4%, 2022—2023 年依次增加 12.3% 和 3.7%。年际间, 2022—2023 年冬小麦旗叶 SPAD 值总体上高于 2021—2022 年。与 2021—2022 年相比, 2022—2023 年 W_0 、 W_1 、 W_2 处理冬小麦旗叶 SPAD 均值分别增加 3.1%、9.6%、9.6%, Si_0 和 Si_1 条件下依次增大 5.8% 和 9.5%。

2.2.2 冬小麦净光合速率 (P_n)

图 7 为冬小麦旗叶净光合速率。随开花后天数的增加, 各处理冬小麦旗叶净光合速率呈现出下降的趋势。同一硅肥条件下, 冬小麦旗叶净光合速率随灌水次数的增加而增大。与 W_0 相比, 2021—

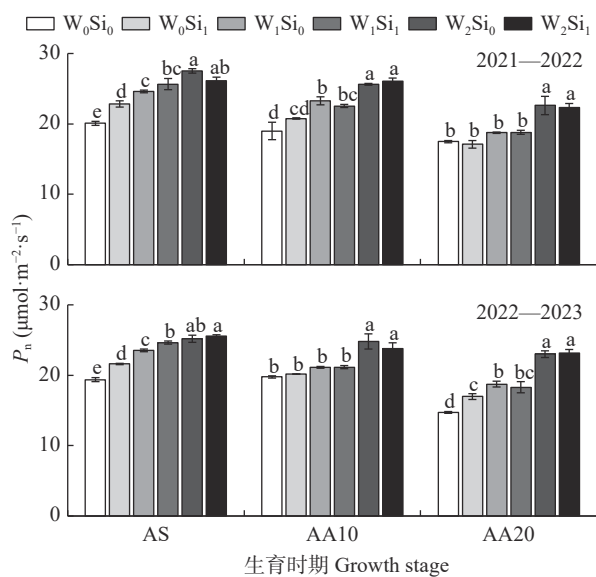


图 7 2021—2023 年不同灌水和施硅处理对冬小麦净光合速率 (P_n) 的影响

Fig. 7 Effects of irrigation and silicon application on the net photosynthetic rate (P_n) of winter wheat from 2021 to 2023

AS: 开花期; AA10: 开花后 10 d; AA20: 开花后 20 d; W_0 、 W_1 和 W_2 分别表示春浇 0 水、春浇 1 水和春浇 2 水处理; Si_0 和 Si_1 分别表示叶面喷施清水和叶面喷施硅肥处理。不同小写字母表示同一生育时期不同处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著。AS: anthesis stage; AA10: 10 days after anthesis; AA20: 20 days after anthesis; W_0 , W_1 , and W_2 represent no irrigation in spring, irrigation once in spring and irrigation twice in spring, respectively; Si_0 and Si_1 represents foliar sprayed with fresh water and foliar sprayed with silica fertilizer, respectively. Different lowercase letters represent significant differences among different treatments at the same growth stage at $P < 0.05$ level.

2022 年 W_1 和 W_2 处理净光合速率的均值分别增加 14.0% 和 28.2%, 2022—2023 年依次增加 13.2% 和 29.2%。干旱条件下, 喷施叶面硅肥有提高冬小麦旗叶净光合速率的趋势。与不施硅相比, 2021—2022 年喷施叶面硅肥条件下 W_0 和 W_1 处理冬小麦旗叶净光合速率分别增加 7.3% 和 0.5%, 2022—2023 年依次增加 9.0% 和 1.0%。年际之间, 2022—2023 年冬小麦旗叶净光合速率总体上低于 2021—2022 年, 其中, W_1 、 W_2 、 W_3 处理的降幅分别为 3.9%、4.6%、3.1%, Si_0 、 Si_1 处理降幅依次为 4.4%、3.4%。

2.3 不同灌水和施硅处理对冬小麦产量及产量构成的影响

由表 1 可以看出, 同一硅肥条件下, 随灌水次数的增加, 冬小麦穗数、穗粒数和粒重 3 个产量构成要素均呈现出增加的态势。与 W_0 相比, 2021—2022 年 W_1 处理冬小麦单位面积穗数、穗粒数和千粒重分别平均增加 5.6%、4.0% 和 2.4%, W_2 处理依次增加 9.1%、10.7% 和 8.9%; 2022—2023 年 W_1 处理的平均增幅分别为 18.3%、9.4% 和 0.6%, W_2 处理的平均增幅依次为 23.0%、14.1% 和 0.6%。由此导致 2021—2022 年 W_1 和 W_2 处理籽粒产量较 W_0 处理平均分别增加 12.8% 和 33.4%, 2022—2023 年依次增加 20.6% 和 41.9%。

同一水分条件下, 喷施叶面硅肥增加了冬小麦单位面积穗数, 促进产量提高, 这种促进效应随灌水次数的减少而增强。与 Si_0 相比, 2021—2022 年 Si_1 条件下 W_0 和 W_1 处理冬小麦单位面积穗数分别增加 6.3% 和 5.7%, 籽粒产量依次提高 8.4% 和 3.5%; 2022—2023 年施硅条件下 (Si_1), W_0 和 W_1 处理小麦单位面积穗数分别增加 11.8% 和 2.6%, 籽粒产量依次提高 8.1% 和 3.2%。年际间, 2022—2023 年各处理冬小麦籽粒产量低于 2021—2022 年, 与 2021—2022 年相比, 2022—2023 年 W_0 、 W_1 、 W_2 处理小麦产量分别降低 11.9%、5.9%、6.3%; Si_0 和 Si_1 处理依次下降 8.1% 和 7.5%。统计分析结果表明, 灌水和年份对籽粒产量及其构成要素均具有极显著影响 ($P < 0.01$), 施硅对单位面积穗数和千粒重具有极显著影响 ($P < 0.01$)、对籽粒产量具有显著影响 ($P < 0.05$); 灌水与年份交互仅对单位面积穗数和千粒重产生极显著影响 ($P < 0.01$), 施硅与年份交互对千粒重产生极显著影响 ($P < 0.01$)、对穗粒数产生显著影响 ($P < 0.05$)。

由表 2 可知, 冬小麦籽粒产量与单位面积穗数、穗粒数和千粒重呈极显著正相关关系。籽粒产量与单位面积穗数、穗粒数和千粒重可拟合成为极

表 1 2021—2023 年不同灌水和施硅处理对冬小麦籽粒产量和产量构成的影响
Table 1 Effects of irrigation and silicon application on the grain yield and yield components of winter wheat from 2021 to 2023

年份 Year	处理 Treatment	单位面积穗数 Spike number per unit area ($\times 10^4$ spike·hm ⁻²)	穗粒数 Grain amount per spike (grain·spike ⁻¹)	千粒重 1000-grain weight (g)	籽粒产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)	
2021—2022	W ₀	Si ₀	648.7±10.0f	29.8±0.7bcd	43.9±0.5e	7402.9±147.6f
		Si ₁	689.8±15.5cde	29.1±2.4cd	48.5±1.0bc	8024.2±90.4e
	W ₁	Si ₀	687.0±17.0cde	31.8±0.8abc	45.9±0.2de	8548.7±288.6de
		Si ₁	725.9±5.6ab	29.5±1.2bcd	48.8±1.0bc	8848.9±185.7d
	W ₂	Si ₀	719.3±10.6abc	33.3±1.3a	49.2±1.4b	10368.8±475.2a
		Si ₁	740.9±8.2a	31.9±0.2abc	51.5±0.8a	10213.8±9.8ab
2022—2023	W ₀	Si ₀	534.3±1.5h	28.4±0.2d	46.9±0.2cd	6528.2±33.8g
		Si ₁	597.0±5.4g	32.0±0.2ab	45.6±0.4de	7056.9±40.0fg
	W ₁	Si ₀	660.3±16.1ef	33.3±0.7a	46.4±0.5d	8060.1±222.1e
		Si ₁	677.6±16.2def	32.9±0.7a	46.7±0.1cd	8317.1±55.3de
	W ₂	Si ₀	690.4±10.4cde	34.5±0.3a	46.3±0.8d	9589.7±169.9c
		Si ₁	700.9±11.1bcd	34.4±0.7a	46.8±0.3cd	9692.2±93.7bc
显著性水平 Significant level						
	I	**	**	**	**	
	Si	**	NS	**	*	
	Y	**	**	**	**	
	I×Si	NS	NS	NS	NS	
	I×Y	**	NS	**	NS	
	Si×Y	NS	*	**	NS	
	I×Si×Y	NS	NS	NS	NS	

W₀、W₁和W₂分别表示春浇0水、春浇1水和春浇2水处理; Si₀和Si₁分别表示叶面喷施清水和叶面喷施硅肥处理; I: 灌水处理; Si: 硅肥处理; Y: 年份。同列不同小写字母表示同一年份不同处理在P<0.05水平差异显著; *表示在P<0.05水平差异显著, **表示在P<0.01水平差异显著, NS表示无显著性差异。W₀, W₁, and W₂ represent no irrigation in spring, irrigation once in spring and irrigation twice in spring, respectively; Si₀ and Si₁ represent foliar sprayed with fresh water and foliar sprayed with silica fertilizer, respectively; I: irrigation treatment; Si: silicon fertilizer treatment; Y: year. Different lowercase letters in the same column represent significant differences among different treatments in the same year at P<0.05 level; * represents significant differences at P<0.05 level, ** represents significant differences at P<0.01 level, and NS represents no significant difference.

表 2 冬小麦籽粒产量及其构成要素的通路分析
Table 2 Path analysis of grain yield and its components of winter wheat

因子 Factor	相关系数 Correlation coefficient	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient		
			通过x ₁ Through x ₁	通过x ₂ Through x ₂	通过x ₃ Through x ₃
x ₁	0.829**	0.564**			
x ₂	0.563**	0.434**	0.1246	0.1619	
x ₃	0.530**	0.332**	0.1406	-0.0323	0.2403

x₁: 单位面积穗数; x₂: 穗粒数; x₃: 千粒重; **表示在P<0.01水平差异显著。x₁: spike number; x₂: grain amount per spike; x₃: 1000-grain weight. ** represents significant differences at P<0.01 level.

显著 的多元线性回归方程 $y=11.823x_1+216.147x_2+186.836x_3-15\ 079.498$ ($R^2=0.888$), 式中 x_1 为单位面积穗数, x_2 为穗粒数, x_3 为千粒重。通路分析结果表明, 3 个产量构成要素对小麦籽粒产量的直接作用均达到极显著水平 ($P<0.01$), 单位面积穗数对产量的影响作用最大, 穗粒数居中, 千粒重最小, 三者的直接途径系数分别为 0.564、0.434 和 0.332。

2.4 冬小麦叶片显微结构参数、生理指标和籽粒产量的相关性

由图 8 可知, 冬小麦籽粒产量与叶肉细胞长宽积、叶片厚度、叶绿素相对含量均值 (SPAD 值)、净光合速率呈显著或极显著正相关关系, 但产量与叶肉

细胞平均环数呈极显著负相关关系。净光合速率与 SPAD 值呈极显著正相关, 二者与叶片厚度、细胞长宽积呈显著或极显著正相关, 与叶肉细胞平均环数呈极显著负相关关系。

3 讨论

3.1 灌水和施硅对冬小麦叶片显微结构特征的影响

叶肉细胞环数、长宽积及叶片厚度是表征叶片显微结构特征的重要指标。有研究表明^[22-23], 冬小麦叶肉细胞呈现出多环状结构, 并由峰、谷、腰、环组成, 多环细胞比例的增加使单位叶面积内叶肉细胞表面积增大, 其峰谷排列扩大了细胞间隙, 减小了

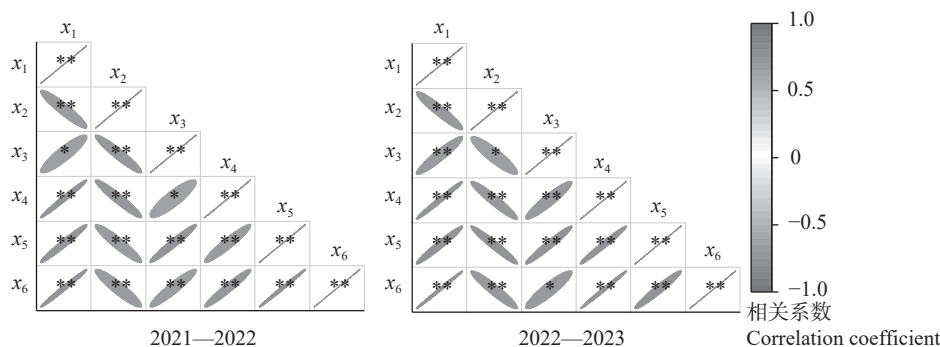


图 8 2021—2023 年不同处理下冬小麦各参数的相关系数

Fig. 8 Correlation coefficients of winter wheat parameters under different treatments from 2021 to 2023

椭圆上部向右表示两者之间呈正相关, 椭圆上部向左表示两者之间呈负相关; 颜色深浅与椭圆形状表示相关性高低, 颜色越深、椭圆越扁说明相关性越强, 当椭圆为一条斜线时说明相关性系数为 1; * 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关。x₁: 籽粒产量; x₂: 平均环数; x₃: 细胞长宽积; x₄: 叶片厚度; x₅: 叶绿素相对含量均值; x₆: 净光合速率均值。The upper part of the ellipse pointing to right indicates a positive correlation, and the upper part of the ellipse pointing to left indicates a negative correlation. Shade of the color and the oval shape indicate the correlation level. Deeper color and flatter ellipse indicate stronger correlation. When the ellipse is an oblique line, the correlation coefficient is 1. * represents a significant correlation at $P < 0.05$ level; ** indicates significant correlation at $P < 0.01$ level. x₁: grain yield; x₂: average ring number; x₃: cell size; x₄: leaf thickness; x₅: mean relative chlorophyll content; x₆: mean net photosynthetic rate.

光合产物在运输过程中的阻力。王妙等^[24]认为细胞环数期望值的增加可以增强植株光合速率, 有利于产量的提高; 而王连敏等^[25]发现叶肉细胞环数较多的小麦品种, 最大光合速率相对较低, 并认为这种结构的变化与其所处环境的差异密不可分; 王静等^[26]研究表明, 小麦叶肉细胞环数与环境水分状况的相关性不大。本试验结果表明, 增加灌水次数与喷施叶面硅肥均有降低旗叶叶肉细胞环数的趋势, 但降低幅度并不明显。究其原因, 增加灌水和施硅提高了冬小麦群体数量和叶面积指数^[27-28], 致使叶片之间相互遮蔽的程度提高, 改变旗叶的受光条件, 然而小麦叶肉细胞峰、谷、腰、环结构的形成是对强光的反应^[29], 余燕^[30]的研究指出遮光会导致小麦叶肉细胞环数的降低, 因此, 冬小麦叶肉细胞环数的改变可能与其受光条件有一定的关系。

细胞缩小有利于细胞在水分胁迫时保持膨压, 以减缓干旱环境带来的不利影响^[31]。本试验研究表明, 增加灌水次数有提高冬小麦叶肉细胞长宽积的趋势。Ahmed 等^[32]研究发现, 干旱会导致冬小麦叶表皮细胞大小下降; 赵美荣^[33]指出, 干旱胁迫通过抑制细胞分裂的伸长对植物生长产生抑制, 且细胞的伸长比分裂对于干旱胁迫更敏感, 这些研究与本试验结果相似。原因是干旱条件下土壤相对含水率相对较低, 水分胁迫对细胞的增大起到了抑制作用, 较小的细胞可缓解因干旱导致的细胞收缩带来的机械损伤, 进而缓解干旱胁迫带来的不利影响。叶片厚度的升高促使单位叶面积叶肉细胞数量增加, 有助于增强光合作用^[22-23]。本试验中, 增加灌水次数与叶片

喷施硅肥均有提高冬小麦旗叶叶片厚度的趋势。崔桂宾^[34]研究指出干旱胁迫会造成小麦叶片失水, 降低叶片厚度, 这与本研究结果相似。究其原因, 叶片厚度体现出植物对水分存储和利用的能力, 增加灌水次数直接提高了土壤水分含量, 叶片喷施硅肥改善作物水分关系^[35], 在叶表皮下形成二氧化硅角质层, 减少作物蒸腾^[36], 二者优化了小麦水分状况, 进而提高叶片厚度。年际之间, 2021—2022 年和 2022—2023 年冬小麦开花前 15 d 降雨量分别是 4.8 mm 和 32.1 mm, 进入开花期后, 相对较好的水分条件促使冬小麦旗叶叶肉细胞增大, 叶片厚度增加。然而, 叶肉细胞环数、长宽积和叶片厚度等叶片结构指标受到气候条件、作物水分胁迫程度、胁迫持续时间、自身抗逆能力、硅肥喷施量和喷施时间等多个因素的影响, 有关冬小麦叶片结构对不同灌水和施硅处理的响应机制尚有待进一步研究。

3.2 灌水和施硅对冬小麦光合特性的影响

光合作用的强弱在一定程度上决定着小麦光合产物的多少, 对籽粒产量的增加有着重要意义, 而叶绿素是植物光合作用的重要参数, 其高低直接影响着光合速率^[37-38]。本研究表明, 冬小麦花后 SPAD 值和净光合速率随着灌水次数的增加而增大, 同时增加灌水次数能有效降低小麦灌浆中后期旗叶 SPAD 值的下降幅度。何璐等^[39]研究表明, 春季灌水处理小麦灌浆期的群体光合速率显著高于不灌水处理, 付佳祥^[27]和柳斌辉等^[40]研究均得出与本试验相似的结论。出现这种情况的原因是水分亏缺会增强活性氧和活性氮的产生, 扰乱了细胞氧化还原的调节功

能,加速了植物衰老^[41];而充足的水分可缓解叶绿素分解,有利于维持较高的光合速率。以往研究表明^[42],喷施叶片硅肥能够增强冬小麦旗叶光合性能。丁燕芳等^[43]认为,施硅通过降低干旱胁迫对小麦叶片叶绿体膜的损坏程度,保持了叶绿体结构的完整性,抑制了叶绿素的降解。Gong等^[44]研究指出,干旱条件下施硅改善了冬小麦C₄光合能力,进而促进光合产物的积累。本研究中,喷施叶面硅肥提高旗叶SPAD值和净光合速率,这种促进效应随灌水次数的减少而增强。究其原因,喷施外源硅可提高植物对干旱胁迫的耐受能力,改善植物的抗氧化防御机制,避免活性氧损伤,缓解水分供应不足造成的不利影响^[45]。

3.3 灌水和施硅对冬小麦产量的影响

灌水和施硅均会对籽粒产量造成影响^[9,46]。赵广才等^[47]研究表明,随灌水次数的增加,产量构成要素更加协调一致,进而促进产量提升。杨洪强等^[48]研究发现,灌水处理小麦的穗数有所增加,产量随灌水次数的增加而提高。本试验中,增加灌水次数提高了冬小麦单位面积穗数、穗粒数和千粒重,进而增加了籽粒产量。刘志良等^[9]得到与之相似的结论。究其原因,灌水可以有效减少冬小麦分蘖消亡,并使小花发育持续时间延长、退化减少,有利于单位面积穗数和穗粒数的增加^[9],同时灌水有助于延长灌浆持续期,进而增大千粒重,促进产量水平的提升^[49]。施硅能有效改善水分胁迫条件下冬小麦的籽粒产量^[18]。Ning等^[18]认为,施硅可在缺水条件下增强光合作用,促进产量增加。Ahmad等^[50]研究表明,硅肥可以通过增加叶片可溶性蛋白质含量、脯氨酸和甘氨酸甜菜碱等物质的累积来减轻干旱胁迫的影响,进而促进小麦产量提升。本试验表明,喷施叶面硅肥可以促进单位面积穗数和籽粒产量的提高,这种促进效应随灌水次数的减少而增强。原因可能是施硅提高了植物对干旱的耐受能力^[36],改善植物的抗氧化防御机制^[18],减轻了水分胁迫带来的不利影响,减少了分蘖的消亡。年际间各处理冬小麦籽粒产量差异较大,究其原因,2021—2022年和2022—2023年5月下旬平均温度分别是24.1℃和19.8℃,后者温度较低,不利于籽粒灌浆。党芳芳^[51]研究表明,干旱胁迫下3个产量构成要素与产量的相关系数从大到小分别为穗数、千粒重、每穗粒数。孙德祥^[52]指出,施用硅肥增加了冬小麦的千粒重和产量。本研究通径分析结果表明,单位面积穗数对籽粒产量影响最大,这说明灌水和施硅主要是通过降低小麦无效分蘖增加成穗数,进而提高籽粒产量。本研究中,冬小

麦籽粒产量与叶肉细胞长宽积、叶片厚度、SPAD值、净光合速率呈显著或极显著正相关关系,其与叶肉细胞平均环数呈极显著负相关关系。这说明灌水和施硅通过优化冬小麦旗叶叶片结构,增加叶绿素含量、提升净光合速率,进而促使产量水平提高。本研究结论是基于2年小区试验得出的,其在生产中的应用效果尚有待进一步探索和验证。

4 结论

增加灌水次数能够改善冬小麦叶片显微结构,提高光合能力,优化单位面积穗数、穗粒数、千粒重,实现籽粒产量的提高,与W₀相比,2021—2022年W₁和W₂处理冬小麦籽粒产量分别增加12.8%和33.4%,2022—2023年依次提高20.6%和41.9%。施用硅肥有提高试验区冬小麦叶片厚度和净光合速率的趋势,促使单位面积穗数增加,进而提高小麦籽粒产量。水分不足时喷施叶面硅肥的增产效果更为明显,与Si₀相比,2021—2022年Si₁条件下W₀和W₁处理冬小麦籽粒产量分别增加8.4%和3.5%,2022—2023年依次提高8.1%和3.2%。综上所述,试验区亏缺灌溉条件下增施叶面硅肥,可优化冬小麦叶片结构,提升光合能力,增加小麦产量。

参考文献 References

- [1] 沈彦俊,齐永青,罗建美,等. 地理学视角的农业节水理论框架与水资源可持续利用[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1718–1730
SHEN Y J, QI Y Q, LUO J M, et al. The combined pathway to sustainable agricultural water saving and water resources management: an integrated geographical perspective[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1718–1730
- [2] 阚正荣,濮超,祁剑英,等. 施用生物炭对华北平原冬小麦土壤水分和籽粒产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(4): 1–10
KAN Z R, PU C, QI J Y, et al. Effects of biochar on soil water and grain yield of winter wheat in the North China Plain[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(4): 1–10
- [3] 曹彩云,党红凯,郑春莲,等. 水肥管理模式对小麦氮素吸收及转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(11): 1367–1380
CAO C Y, DANG H K, ZHENG C L, et al. Effect of irrigation and fertilizer management mode on nitrogen uptake and transfer of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(11): 1367–1380
- [4] 李文鹏,王龙凤,杨会峰,等. 华北平原地下水超采状况与治理对策建议[J]. 中国水利, 2020(13): 26–30
LI W P, WANG L F, YANG H F, et al. The groundwater overexploitation status and countermeasure suggestions of the North China Plain[J]. China Water Resources, 2020(13): 26–30
- [5] 钱永,张兆吉,费宇红,等. 华北平原浅层地下水可持续利用

- 潜力分析[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 890–897
- QIAN Y, ZHANG Z J, FEI Y H, et al. Sustainable exploitable potential of shallow groundwater in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 890–897
- [6] 阚茗溪, 王艳杰, 于慧玲, 等. 灌水对节水小麦“衡观 35”产量、蛋白质含量及光合性能的影响[J]. 作物杂志, 2023(1): 68–75
- KAN M X, WANG Y J, YU H L, et al. Effects of irrigation on yield, protein content and photosynthetic performance of water-saving wheat “Hengguan 35”[J]. Crops, 2023(1): 68–75
- [7] 肖轶娆, 景东林. 不同灌水次数对邢麦 7 号产量和水分利用率的影响[J]. 现代农业科技, 2016(2): 14, 18
- XIAO Y R, JING D L. Effect of different irrigation times on the yield and water use efficiency of Xingmai No. 7[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(2): 14, 18
- [8] 吕丽华, 王学清, 黄冀楠, 等. 不同灌溉集成模式对冬小麦产量形成特点的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(6): 219–226
- LÜ L H, WANG X Q, HUANG J N, et al. Effect of different irrigation mode on yield formation characteristics of winter wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(6): 219–226
- [9] 刘志良, 李晓爽, 曹彩云, 等. 春灌一水时间对冬小麦灌浆特性和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1296–1304
- LIU Z L, LI X S, CAO C Y, et al. Effects of time of spring one irrigation on the grain filling characteristics and water use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(8): 1296–1304
- [10] 辛秀竹, 石怡彤, 张璐鑫, 等. 土壤耕作与春季灌水次数对冬小麦产量要素与经济效益的影响[J]. 节水灌溉, 2021(10): 18–23
- XIN X Z, SHI Y T, ZHANG L X, et al. Effects of soil tillage and spring irrigation times on yield factors and economic benefits of winter wheat[J]. Water Saving Irrigation, 2021(10): 18–23
- [11] 姚春生, 任婕, 张震, 等. 微喷水肥一体化氮肥管理对冬小麦产量、品质、氮素积累和利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(3): 25–37
- YAO C S, REN J, ZHANG Z, et al. Effects of micro-sprinkler irrigation integration and nitrogen fertilizer management on yield, quality and nitrogen accumulation and utilization of winter wheat[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(3): 25–37
- [12] 张胜全, 方保停, 王志敏, 等. 春灌模式对晚播冬小麦水分利用及产量形成的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 2035–2044
- ZHANG S Q, FANG B T, WANG Z M, et al. Influence of different spring irrigation treatments on water use and yield formation of late-sowing winter wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 2035–2044
- [13] EPSTEIN E. Silicon[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1999, 50: 641–664
- [14] MOLDES C A, DE LIMA FILHO O F, MERINI L J, et al. Occurrence of powdery mildew disease in wheat fertilized with increasing silicon doses: a chemometric analysis of antioxidant response[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(8): 206
- [15] AHMED M, KAMRAN A, ASIF M, et al. Silicon priming: a potential source to impart abiotic stress tolerance in wheat: a review[J]. Australian Journal of Crop Science, 2013, 7: 484–491
- [16] MATOH T, KAIRUSMEE P, TAKAHASHI E. Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1986, 32(2): 295–304
- [17] LIANG Y C, DING R X. Influence of silicon on micro distribution of mineral ions in roots of salt-stressed barley as associated with salt tolerance in plants[J]. Science in China Series C: Life Sciences, 2002, 45(3): 298–308
- [18] NING D F, ZHANG Y Y, LI X J, et al. The effects of foliar supplementation of silicon on physiological and biochemical responses of winter wheat to drought stress during different growth stages[J]. Plants, 2023, 12(12): 2386
- [19] 张志伟, 魏秀华, 于海涛, 等. 施用液体硅肥对小麦生长发育及产量的影响[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(6): 101–102
- ZHANG Z W, WEI X H, YU H T, et al. Effect of liquid silicon fertilizer on wheat growth and yield[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(6): 101–102
- [20] 孙德祥, 秦海霞, 丁会纳, 等. 硅肥对干旱胁迫下冬小麦旗叶抗坏血酸-谷胱甘肽循环系统及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(5): 693–698
- SUN D X, QIN H X, DING H N, et al. Effect of silicon fertilizer on ascorbic acid and glutathione circulatory system in flag leaf and yield of winter wheat under drought stress[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(5): 693–698
- [21] 段续川. 植物细胞和细胞器的固定、水解、分离和染色的革新[J]. 植物学报, 1959, 1(1): 1–14
- DUAN X C. Renovation in technique for the study of plant cells and their organoids[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 1959, 1(1): 1–14
- [22] 党红凯, 李瑞奇, 李雁鸣, 等. 冬小麦叶片显微结构和光合特性与产量的关系[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(6): 742–751
- DANG H K, LI R Q, LI Y M, et al. Relationship among leaf micro-structure, photosynthetic characteristics and yield traits of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(6): 742–751
- [23] 党红凯. 小麦/玉米不同复合群体对光合器官生态生理特性和产量形成的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2010
- DANG H K. Effects of Different wheat/maize complex populations on eco-physiological characteristics of photosynthetic organs and yield formation[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2010
- [24] 王妙, 杨作仁, 杨贵莉, 等. 高产小麦旗叶细胞结构与产量关系的研究[J]. 生物技术通报, 2009(S1): 139–142
- WANG M, YANG Z R, YANG G L, et al. Study on the relationship between flag leaf cell structure and yield of high yield wheat[J]. Biotechnology Bulletin, 2009(S1): 139–142
- [25] 王连敏, 王春艳. 春小麦旗叶解剖构造与光合能力关系的研究[J]. 黑龙江农业科学, 1988(3): 1–5
- WANG L M, WANG C Y. Study on the relationship between anatomical structure of flag leaf and photosynthetic capacity of

- spring wheat[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 1988(3): 1-5
- [26] 王静, 续惠云. 水分胁迫对春小麦苗期叶肉细胞和气孔数的影响[J]. 西北植物学报, 2000, 20(5): 842-846
WANG J, XU H Y. Effect of water stress on mesophyll cells and the number of stomata of spring wheat growing in semi arid region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2000, 20(5): 842-846
- [27] 付佳祥. 黑龙江流域冬小麦节水稳产减排灌溉制度研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2022
FU J X. Research on irrigation scheduling of winter wheat water-saving, stable yield and emission reduction in Heilongjiang watershed[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022
- [28] OTHMANI A, AYED S, BEZZIN O, et al. Effect of silicon supply methods on durum wheat (*Triticum durum* Desf.) response to drought stress[J]. *Silicon*, 2021, 13(9): 3047-3057
- [29] 王连敏. 小麦叶肉细胞构造与光合能力的关系[J]. 麦类作物学报, 1990, 10(6): 22-23
WANG L M. Relationship between mesophyll cell structure and photosynthetic capacity in wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 1990, 10(6): 22-23
- [30] 余燕. 遮荫对冬小麦绵阳 26 小花和籽粒生长发育的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2012
YU Y. Effect of shading on grain growth and development of winter wheat Mianyang 26 Kobanawa[D]. Chongqing: Southwest University, 2012
- [31] 郭水良, 周平, 印丽萍, 等. 植物 DNA C-值在种间和种内的变异及其生物学意义[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2011, 40(1): 102-110
GUO S L, ZHOU P, YIN L P, et al. Interspecific and intraspecific variations of plant DNA C-values and its biological significance[J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2011, 40(1): 102-110
- [32] AHMED H G M D, MUHAMMAD D, KHAN M A, et al. Genetic basis of physiological and yield attributes in spring wheat for water-deficit environments[J]. *Gesunde Pflanzen*, 2022, 74(4): 1029-1039
- [33] 赵美荣. 扩展蛋白与植物激素调节的干旱胁迫下小麦细胞生长的关系研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011
ZHAO M R. Study on the relationship between expansin and wheat cell growth under drought stress regulated by plant hormones[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2011
- [34] 崔桂宾. 干旱和 PEG 胁迫下小麦幼苗对褪黑素处理的生理响应及其蛋白质组学分析[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020
CUI G B. Physiological responses and proteomic analysis of melatonin treatment in wheat seedlings under drought and PEG stress[D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2020
- [35] SOGARWAL A, KUMARI N, SHARMA V. Role of silicon in abiotic stress tolerance in wheat[J]. *Cereal Research Communications*, 2023, 51(4): 809-819
- [36] GONG H J, CHEN K M, CHEN G C, et al. Effects of silicon on growth of wheat under drought[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2003, 26(5): 1055-1063
- [37] 张永强, 方辉, 陈传信, 等. 外源硅滴施对弱光胁迫下冬小麦生长及生理特性的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(2): 336-343
ZHANG Y Q, FANG H, CHEN C X, et al. Effect of exogenous silicon drip application on growth and physiological characteristics of winter wheat under low light stress[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(2): 336-343
- [38] 王磊, 董树亭, 刘鹏, 等. 水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 301-308
WANG L, DONG S T, LIU P, et al. Effects of water and nitrogen interaction on physiological and photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 301-308
- [39] 何璐, 张利茹, 杨若沂, 等. 限水灌溉时期对冬小麦各叶层衰退和群体光合的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(4): 167-173
HE L, ZHANG L R, YANG R Q, et al. Effects of water-limited irrigation period on decay of each leaf layer and population photosynthesis of winter wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2023, 38(4): 167-173
- [40] 柳斌辉, 王变银, 陈朝阳, 等. 春一水灌溉时间对冬小麦产量和生长特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(S2): 122-128
LIU B H, WANG B Y, CHEN Z Y, et al. Effect of irrigation time in spring on yield and growth characteristics of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(S2): 122-128
- [41] LAXA M, LIEBTHAL M, TELMAN W, et al. The role of the plant antioxidant system in drought tolerance[J]. *Antioxidants*, 2019, 8(4): 94
- [42] 高淑萍, 笄林生. 硅肥对小麦养分吸收与光合物质生产的影响[J]. 土壤肥料, 2001(5): 35-37
GAO S P, ZAN L S. Effects of silicon fertilizer on nutrient absorption and photosynthetic matter production in wheat[J]. Soils and Fertilizers, 2001(5): 35-37
- [43] 丁燕芳, 梁永超, 朱佳, 等. 硅对干旱胁迫下小麦幼苗生长及光合参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 471-478
DING Y F, LIANG Y C, ZHU J, et al. Effects of silicon on plant growth, photosynthetic parameters and soluble sugar content in leaves of wheat under drought stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(3): 471-478
- [44] GONG H J, CHEN K M. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34(4): 1589-1594
- [45] MAGHSOUDI K, EMAM Y, ASHRAF M, et al. Alleviation of field water stress in wheat cultivars by using silicon and salicylic acid applied separately or in combination[J]. *Crop and Pasture Science*, 2019, 70(1): 36
- [46] 宫海军, 陈坤明, 王锁民, 等. 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, et al. Advances in silicon nutrition of plants[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2004, 24(12): 2385-2392

- [47] 赵广才,常旭虹,刘利华,等.不同灌水处理对强筋小麦籽粒产量和蛋白质组分含量的影响[J].*作物学报*, 2007, 33(11): 1828–1833
ZHAO G C, CHANG X H, LIU L H, et al. Grain yield and protein components responses to irrigation in strong gluten wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(11): 1828–1833
- [48] 杨洪强,顾晶晶,田文仲,等.不同灌水处理对小麦产量和籽粒品质的影响[J].*江苏农业科学*, 2022, 50(19): 74–78
YANG H Q, GU J J, TIAN W Z, et al. Effects of different irrigation treatments on wheat yield and grain quality[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(19): 74–78
- [49] 王文杰,刘玉秀,张正茂,等.灌水对黑小麦产量和籽粒微量元素含量的影响[J].*西北农业学报*, 2020, 29(10): 1510–1519
WANG W J, LIU Y X, ZHANG Z M, et al. Effect of irrigation on yield and trace element content in grains of black wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(10): 1510–1519
- [50] AHMAD S T, HADDAD R. Study of silicon effects on antioxidant enzyme activities and osmotic adjustment of wheat under drought stress[J]. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 2011, 47(1): 17–27
- [51] 党芳芳.硅钙肥与纳米碳不同配施对干旱胁迫下小麦抗旱性的研究[D].太原:山西农业大学, 2019
DANG F F. Research on silicon calcium fertilizer and nano-carbon on drought resistance of wheat under drought stress[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2019
- [52] 孙德祥.外源施加锌、硅肥对干旱胁迫下小麦旗叶生理特性及产量的影响[D].郑州:河南农业大学, 2015
SUN D X. Effects of exogenous application of zinc and silicon fertilizers on physiological characteristics and yield of flag leaves of wheat under drought stress[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2015