

模拟酸雨对春小麦开花期叶片光合特性及产量的影响

张健¹, 王鹤龄²

(1. 甘肃省定西市旱作农业科研推广中心, 甘肃 定西 743000; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 本试验采用 pH 为 1.5、2.5、3.5、4.5 和 5.6 的模拟酸雨在春小麦开花期对其进行喷淋, 测定不同 pH 模拟酸雨处理后春小麦叶片的光合参数与春小麦产量。研究结果表明: 随着酸雨 pH 的下降, 春小麦叶片净光合速率下降了 24.20% ~ 58.23%, 气孔导度下降了 35.90% ~ 58.37%, 蒸腾速率下降了 36.70% ~ 56.69%, 胞间 CO₂ 浓度上升了 73.26% ~ 101.06%, 叶绿素相对含量下降了 1.96% ~ 15.99%, 产量下降了 12.54% ~ 32.53%。酸雨对春小麦叶片光合特性的影响随酸雨的氢离子浓度增大而愈显著。酸雨 pH 与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、叶绿素相对含量及春小麦最终产量均呈极显著正相关, 与胞间 CO₂ 浓度呈显著负相关。

关键词: 模拟酸雨; 春小麦; 水分利用效率; 光合特性; 产量

中图分类号: S512.1+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)06-0094-05

我国是继欧洲和北美之后, 世界第三大酸雨区。近年来, 我国的酸雨区有向北方扩大的趋势, 酸雨成为我国目前重大的环境问题之一^[1-2]。随着我国工业的迅速崛起, 我国降水酸化由以往的硫酸型转为硫酸和硝酸混合型, 但在我国西部工业欠发达地区, 降水酸化仍为硫酸型, 而且酸度强, 发生频率高, 污染严重^[3]。上世纪 90 年代中期, 我国降水年均 pH 等于 5.6 的等值线从东部走向西部, 直到兰州附近, 然后折向西南^[4], 我国小麦种植区在秦岭及淮河以北, 酸雨已成为影响我国小麦生产的重要环境因素, 因而对小麦进行酸雨胁迫效应研究具有重要意义。

目前对酸雨胁迫下各种农作物光合作用的研究较多, 结果表明, 当酸雨酸度达到一定的阈值时, 破坏植物的微结构, 降低光合效率和叶绿素含量, 出现可见症状, 阻碍其生长发育, 导致减产^[5-8]。长期以来, 酸雨对小麦生育期^[9]、不同品种^[10-11]、不同穗型^[12]、不同外界条件(如光^[13-14]、温^[15]、水^[16]、气^[17]、肥^[18])及光合潜势^[19]、光合效率^[20-21]等方面的研究较多, 而酸雨对小麦生长特征的影响方面, 有的文献也多限于研究酸雨对不同生长期小麦形态学和植株生长特性的影响^[8, 22-23]。在西北干旱半干旱地区, 虽有气候变化对春小麦生长及光合影响的研究^[24-27], 但很少涉及酸雨对春小麦叶片水分利用效率及光合生理特性的影响。开花期是小麦开始形成产量的关键时期, 小麦籽粒产量的 70% ~

90% 来自于抽穗后的光合产物, 特别是旗叶同化产物的累积起着很大的作用^[28]。为此, 本试验在春小麦开花期, 用不同 pH 模拟酸雨喷淋小麦, 探索硫酸型酸雨对春小麦叶片的伤害特征, 以及酸雨对春小麦水分利用效率及叶片光合生理特性等方面的影响, 以期为我国小麦生产中酸雨的防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在甘肃省定西市旱作农业科研推广中心试验基地(35°35'N, 104°37'E)进行, 海拔 1 896.7 m。试验区地处欧亚大陆腹地, 属半干旱区, 大陆性季风气候明显, 其特点是光照充足, 雨热同季, 降水少且变率大, 气候干燥。年均降水量 386.0 mm, 主要集中在 5 ~ 10 月, 占年降水量的 86.9%; 平均无霜期 140 d; 年均日照时数 2 433 h; 年平均气温 6.7℃, 为典型的雨养农业区。

1.2 试验设计

向蒸馏水中滴加 98% 浓硫酸, 配制一系列模拟酸雨, 采用 pH S-3C 型数显酸度计测定 pH。分别调节 pH 为 1.5、2.5、3.5、4.5 和 5.6 共 5 组处理, 其中 pH 5.6(蒸馏水与大气平衡后形成的溶液)处理为对照组。

采用完全随机区组设计, 15 个小区(1.5 m ×

收稿日期: 2012-06-19

基金项目: 甘肃省科技支撑项目计划“利用杂交与单倍体加倍技术选育丰产优质春小麦新品种”(1104NKJ099)

作者简介: 张健(1978—), 男, 甘肃定西人, 助理研究员, 主要从事春小麦新品种选育及推广研究。E-mail: zj0932@126.com.cn。

1.5 m),小区之间预留 0.5 m 的缓冲区,以防相互干扰,每个处理设 3 次重复。在小麦开花期(6 月 15 日),用小型喷雾器仿照自然降水分别对各小区喷淋 5 种浓度的模拟酸雨 1 次,每次喷淋量约 660 ml/m²,以叶片滴液为度(避免改变土壤 pH 值)。

试验材料为春小麦,品种为西早 1 号(D92067)。田间施肥和病虫害防治同当地大田管理。

1.3 光合参数测定

在喷淋模拟酸雨后第 2 天(6 月 16 日,晴朗无风),上午 9:00~11:00,采用美国 Li-6400 光合测定仪分别测定各植株旗叶的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和细胞间隙 CO₂ 浓度(C_i)等指标。每个小区随机选取 3 株植株,每株测 1 片旗叶(选中上部位),每次共测 3 片叶,每片叶各测 5 个数据,取其平均值代表其指标值。

采用美国 CM1000 叶绿素仪活体测定小麦各植株旗叶的叶绿素相对含量(Cr)。每个小区随机选取 3 株植株,每株测 1 片旗叶(选中上部位),每次共测 3 片叶,每片叶测 1 个数据,取平均值代表其指标值。

水分利用效率(WUE)采用 Fischer and Turner 的

方法,以 $WUE = P_n/T_r$ 计算单叶水平上的 WUE ^[29]。小麦成熟后分别对各小区进行小区全收获产量(Y_i)测定,取各处理的 3 个重复的平均值代表其产量值。

1.4 数据处理

数据分析采用 STATISTICA 6.0 统计软件,对试验数据进行单因素方差分析(ANOVA),利用最小显著性差异(LSD)多重比较方法,对不同处理之间的差异性进行多重比较,采用 Pearson 相关分析法进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 春小麦光合生理参数变化

由表 1 方差分析结果可知,春小麦叶片经模拟酸雨喷淋后,pH 对春小麦叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、细胞间隙 CO₂ 浓度以及产量的影响均表现出极显著性差异($P < 0.001$),叶绿素相对含量表现出显著性差异($0.001 < P < 0.01$)。说明酸雨对春小麦叶片光合作用的抑制作用是非常明显。而酸雨对春小麦水分利用效率的影响差异不显著($P > 0.05$),可能与酸雨同时降低春小麦叶片的净光合速率和蒸腾速率有关。

表 1 模拟酸雨处理后春小麦叶片生理特征参数及产量变化

Table 1 The principal physiological parameters of spring wheat leaves and yield under simulated acid rain treatments

特征参数 Physiological parameter	模拟酸雨 pH					F 值 F - value
	1.5	2.5	3.5	4.5	5.6	
净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ Net Photosynthetic rate	3.63 ± 0.96a	5.28 ± 0.22ab	6.33 ± 1.35b	6.58 ± 1.72bc	8.68 ± 1.01c	7.60***
气孔导度 $G_s/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ Stomatal conductance	0.038 ± 0.006a	0.041 ± 0.010a	0.058 ± 0.012b	0.058 ± 0.008b	0.091 ± 0.010c	15.21***
蒸腾速率 $T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ Transpiration rate	1.48 ± 0.45a	1.75 ± 0.35ab	2.05 ± 0.27ab	2.16 ± 0.39b	3.42 ± 0.29c	13.26***
胞间 CO ₂ 浓度 $C_i/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$ Intercellular CO ₂ concentration	194.80 ± 20.72a	194.60 ± 24.56a	187.07 ± 2.60a	167.87 ± 26.81a	96.89 ± 6.87b	14.22***
水分利用效率 $WUE/(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})$ Water use efficiency	2.74 ± 1.47a	3.12 ± 0.78a	3.18 ± 1.11a	3.20 ± 1.34a	2.54 ± 0.08a	0.91
叶绿素相对含量 Cr Relative chlorophyll content	185.67 ± 8.02a	209.33 ± 7.09b	211.67 ± 12.66b	216.67 ± 2.31b	221.00 ± 13.00b	6.30**
产量 Y_i Yield/kg	222.153 ± 12.36a	248.98 ± 21.72ab	259.96 ± 10.28bc	287.95 ± 21.07cd	329.25 ± 16.62d	17.03***

注:表中数据为 mean ± S.D. $n = 3$;同行中标注相同字母的值之间差异不显著($P < 0.05$);***表明方差分析结果为极显著的差异($P < 0.001$);**表明方差分析结果为显著性差异($0.001 < P < 0.01$);*表明方差分析结果为一般显著性差异($0.01 < P < 0.05$),下同。

Note: All data in the table are mean ± S.D. $n = 3$; Values followed by a common letter within a column are not significantly different at 0.05 probability level; Mark "***" shows very significant difference ($P < 0.001$), Mark "**" shows significant difference ($0.001 < P < 0.01$), Mark "*" shows common significant difference ($0.01 < P < 0.05$). They are the same as below.

2.2 模拟酸雨对春小麦叶片净光合速率的影响

从图 1 和表 1 可以看出,随着模拟酸雨 pH 的降低,小麦叶片的净光合速率显著下降。模拟酸雨喷淋后,对照组 pH 5.6 的叶片净光合速率高于 pH 为 4.5 的叶片净光合速率,显著高于 pH 为 3.5、2.5、

1.5 的净光合速率($P < 0.05$)。pH 4.5、3.5、2.5、1.5 模拟酸雨喷淋后叶片的净光合速率平均值分别下降了 24.20%、27.05%、39.18%、58.23%。本试验小麦在喷淋模拟酸雨后,净光合速率很快降低,而且模拟酸雨 pH 越小,下降幅度越大。可能与酸雨中 H⁺

离子有关,它破坏了叶绿体膜结构的完整性,降低细胞内酶系统的活性,从而导致光合功能的降低;另外,高浓度的酸雨溶液造成叶片细胞脱水,引起低水势的水分胁迫,导致了净光合速率的下降^[30]。

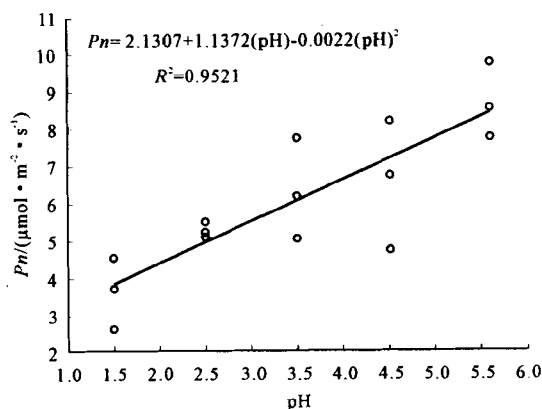


图 1 模拟酸雨对春小麦叶片净光合速率的影响

Fig.1 Effect of simulated acid rain treatments on photosynthetic rate of spring wheat leaves

2.3 模拟酸雨对春小麦叶片气孔导度的影响

气孔导度是衡量气体通过气孔的难易程度,其越大则气孔张开度越大,即气孔阻力越小。从图 2 和表 1 可以看出,随着模拟酸雨 pH 的降低,小麦叶片的气孔导度显著下降。模拟酸雨喷淋后对照组 pH 5.6 的叶片气孔导度高于 pH 为 4.5、3.5 的气孔导度,显著高于 pH 为 2.5、1.5 的气孔导度 ($P < 0.05$)。pH 4.5、3.5、2.5、1.5 模拟酸雨喷淋后叶片的气孔导度分别下降了 35.90%、36.23%、55.20%、58.37%。本试验气孔导度值普遍偏小,可能是定西试验基地 4—6 月份降水严重偏少,引起小麦植株受到比较严重的干旱胁迫所致。

本试验小麦叶片在喷淋模拟酸雨后,因外界离子浓度升高,致使保卫细胞失水,从而导致气孔关闭,气孔导度减小。随着模拟酸雨 pH 的减小,保卫细胞失水越多,气孔导度也就越小。

2.4 模拟酸雨对春小麦叶片蒸腾速率的影响

从图 3 和表 1 可以看出,随着模拟酸雨 pH 的降低,小麦叶片的蒸腾速率显著下降。模拟酸雨喷淋后对照组 pH 5.6 的蒸腾速率高于 pH 为 4.5、3.5 的蒸腾速率,显著高于 pH 为 2.5、1.5 的蒸腾速率 ($P < 0.05$)。pH 4.5、3.5、2.5、1.5 模拟酸雨喷淋后,叶片的蒸腾速率分别下降了 36.70%、39.90%、48.82%、56.69%。叶片的蒸腾有两种方式,气孔蒸腾占到总蒸腾量的 90%~95%^[31]。因此,影响蒸腾速率的最主要因素是叶片的气孔导度。本试验小麦在喷淋模拟酸雨后,气孔导度随模拟酸雨 pH 的下

降而显著下降,同时也就导致了蒸腾速率的显著下降。

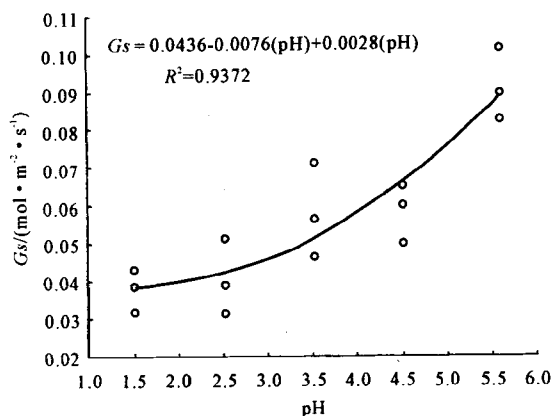


图 2 模拟酸雨对春小麦叶片气孔导度的影响

Fig.2 Effect of simulated acid rain treatments on stomatal conductance of spring wheat leaves

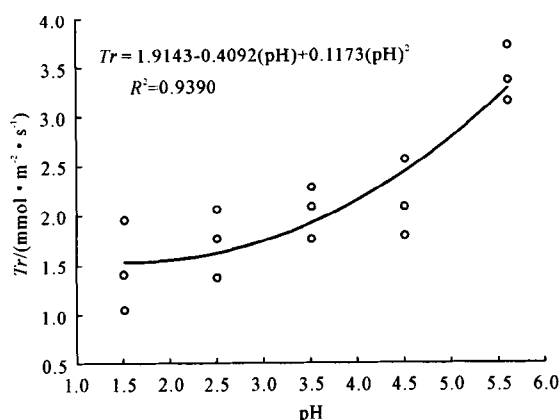


图 3 模拟酸雨对春小麦叶片蒸腾速率的影响

Fig.3 Effect of simulated acid rain treatments on transpiration rate of spring wheat leaves

2.5 模拟酸雨对春小麦叶片胞间 CO₂ 浓度的影响

胞间 CO₂ 浓度不仅受大气 CO₂ 浓度和气孔导度的影响,同时也受叶片的净光合速率的影响。从图 4 和表 1 可以看出,pH 1.5、2.5、3.5、4.5 模拟酸雨喷淋后叶片的胞间 CO₂ 浓度都显著高于对照组 pH 5.6 的胞间 CO₂ 浓度,并且随着模拟酸雨 pH 的降低,小麦叶片胞间 CO₂ 浓度呈上升趋势。pH 4.5、3.5、2.5、1.5 模拟酸雨喷淋后叶片的胞间 CO₂ 浓度分别比对照组 pH 5.6 的高 73.26%、93.08%、100.85%、101.06%。气孔导度随模拟酸雨 pH 的下降而下降,胞间 CO₂ 浓度却有所升高,那是因为酸雨酸性比较弱的条件下,叶片的净光合速率更大,而光合作用越强,消耗的 CO₂ 就越多,而气态的 CO₂ 在液相的细胞胞间和细胞内存在着扩散阻力,胞间 CO₂ 得不到迅速的补充,浓度下降。反之,若光合作用

用强度小,胞间 CO_2 浓度增加^[32]。

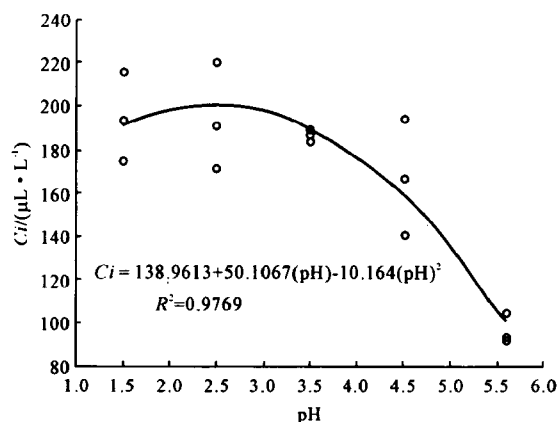


图4 模拟酸雨对春小麦叶片胞间 CO_2 浓度的影响

Fig.4 Effect of simulated acid rain treatments on intercellular CO_2 concentration of spring wheat leaves

2.6 模拟酸雨对春小麦叶片叶绿素相对含量的影响

从图6和表1可以看出,随着模拟酸雨 pH 的降低,小麦叶片的叶绿素相对含量显著下降。用 pH 4.5、3.5、2.5、1.5 模拟酸雨喷淋后叶片的叶绿素相对含量分别下降了 1.96%、4.22%、5.28%、15.99%。植物在酸雨胁迫后,由于 H^+ 本身的毒害作用,以及高浓度的酸雨溶液导致叶绿体失水,从而降低了叶绿体的活性,引起了叶片中叶绿素降解加强、生物合成减弱、光合器官受到损伤,因此叶绿素含量的降低是光合作用减弱的主要原因之一^[33]。

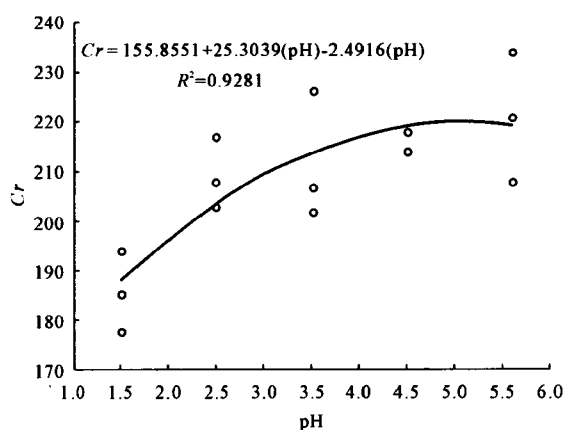


图5 模拟酸雨对春小麦叶片叶绿素相对含量的影响

Fig.5 Effect of simulated acid rain treatments on chlorophyll content of spring wheat leaves

2.7 模拟酸雨对春小麦产量的影响

随着模拟酸雨 pH 的降低,春小麦产量显著降低(表1)。模拟酸雨喷淋后对照组 pH 5.6 的叶片气孔导度高于 pH 为 4.5 的气孔导度,显著高于 pH 为 3.5、2.5、1.5 的气孔导度($P < 0.05$)。pH 4.5、3.5、2.5、1.5 模拟酸雨喷淋后春小麦产量分别下降了

12.54%、21.04%、24.38%、32.53%。

3 结论与讨论

1) 酸雨污染会明显改变春小麦的各个光合作用特征参数值,从而能明显地影响春小麦叶绿体的光合功能,尤其当 $\text{pH} < 3.5$ 时,春小麦叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率以及胞间 CO_2 浓度都与对照组形成显著性的差异(表1)。

小麦叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度等参数值受到多个环境因子的影响,且各个因子相互作用、相互制约。气孔导度在受到环境因子影响的同时,还会对净光合速率和蒸腾作用造成影响^[34]。诸多研究表明^[8,23,35],模拟酸雨下光合作用受抑制是多种因素共同作用的结果,既包括渗透胁迫引起的气孔限制因素,也包括非气孔限制因素。当胞间 CO_2 浓度降低和气孔导度下降,则气孔因素是主要的;如胞间 CO_2 浓度升高和气孔导度下降则非气孔因素是主要的^[36]。本试验表明,模拟酸雨喷淋后,随着酸雨 pH 的降低,春小麦叶片净光合速率下降,蒸腾速率降低,气孔导度下降,水分利用率降低,唯独胞间 CO_2 浓度升高,这与惠红霞等在枸杞叶片受盐分胁迫条件下叶片光合特征的研究结果基本一致^[37],说明酸雨胁迫与盐分胁迫对春小麦叶片光合作用的影响可能具有共性。出现这种现象的原因可能是随着模拟酸雨 pH 的下降,气孔导度虽然下降了,但是同时叶肉细胞的光合活性下降,导致净光合速率也非常明显地下降,使得胞间 CO_2 的消耗降低,所以滞留在细胞间的 CO_2 浓度会升高。由此可见,模拟酸雨喷淋后,春小麦叶片光合作用的降低是气孔因素与非气孔因素共同作用的结果,其主要的限制因素是非气孔因素。而酸雨胁迫下春小麦叶片水分利用效率随模拟酸雨的 pH 的下降虽呈下降趋势,但下降幅度不大,那是因为酸雨在降低净光合速率的同时,也降低了叶片的气孔导度,使叶片蒸腾速率也下降了,净光合速率与蒸腾速率两者下降的幅度大致相当,所以水分利用效率的变化不很明显。

2) 酸雨污染会显著降低春小麦的最终产量。叶绿体是植物行使光合作用、最初合成(生产)有机物质(糖类)的器官,是植物体生长、发育的物质源泉,也是整个生物界赖以生存的有机物质的最初源泉,而大量的研究揭示和证实,叶绿体是细胞对胁迫生境最敏感的细胞器^[38]。从酸雨 pH 与春小麦叶片各生理特征参数的相关性上来看,酸雨 pH 与春小麦叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度以及叶绿

素相对含量均呈极显著的正相关,与春小麦叶片胞间 CO_2 浓度也呈极显著的负相关,既说明酸雨明显地改变小麦灌浆期光合的各个生理特性,也表明在酸雨胁迫的条件下,酸雨酸度是春小麦光合作用变化的主要影响因子。而光合作用又是作物形成产量的主要途径,因此,本试验春小麦的产量会随着酸雨 pH 值的下降而非常明显地降低,它们之间会呈现出极显著的正相关关系。

参考文献:

- [1] 任 仁. 中国酸雨的去、现在和将来[J]. 北京工业大学学报, 1997, 23(3): 128-132.
- [2] 吴杏春, 林文雄, 洪清培, 等. 模拟酸雨对草坪草若干生理指标的影响[J]. 草业科学, 2004, 21(8): 88-92.
- [3] 叶小峰, 王自发, 安俊岭, 等. 东亚地区降水离子成分时空分布及其特征分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(1): 115-123.
- [4] 李宗恺, 王体健, 金龙山. 中国的酸雨模拟及控制对策研究[J]. 气象科学, 2000, 20(3): 339-347.
- [5] 邱栋梁, 刘星辉, 郭素枝. 模拟酸雨对龙眼叶片气体交换和叶绿素 a 荧光参数的影响[J]. 植物生态学报, 2002, 26(4): 441-446.
- [6] 顾明华, 陆申年, 黎晓峰. 模拟酸雨和酸雾对水稻生理和生长的影响[J]. 广西农业大学学报, 1994, 13(3): 217-222.
- [7] 蒋馥蔚, 江 洪, 李 巍, 等. 不同起源时期的 3 种被子植物对酸雨胁迫响应的光合生理生态特征[J]. 植物生态学报, 2009, 33(1): 125-133.
- [8] 倪寿清, 赵大传, 崔清洁, 等. 模拟酸雨对北方小麦生长规律影响的研究[J]. 山东大学学报(理学版), 2006, 41(6): 109-113.
- [9] 魏道智, 宁书菊, 林文雄. 激素对不同发育阶段小麦旗叶光合速率调控研究[J]. 2004, 15(11): 2083-2087.
- [10] 马新明, 熊淑萍, 李 琳, 等. 土壤水分对不同专用小麦后期光合特性及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 83-87.
- [11] 周续莲, 康建宏, 马文礼, 等. 宁夏灌区春小麦更替品种的光合作用日变化研究[J]. 宁夏农学院学报, 2003, 24(4): 9-13.
- [12] 郭天财, 王之杰, 王永华. 不同穗型小麦品种旗叶光合作用日变化的研究[J]. 西北植物学报, 2002, 22(3): 554-560.
- [13] 张黎萍, 荆 奇, 戴廷波, 等. 温度和光照强度对不同品质类型小麦旗叶光合特性和衰老的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 311-316.
- [14] Jacques D, Jeanette B. Evidence for a light-harvesting chlorophyll a-protein complex in a chlorophyll b-less barely mutant[J]. Photosyn Res, 1987, 11: 141-151.
- [15] 刘东焕, 赵世伟, 高荣孚, 等. 植物光合作用对高温的响应[J]. 植物研究, 2002, 22(2): 205-212.
- [16] 李秧秧, 刘文兆. 灌水对小麦旗叶光合功能衰退的影响[J]. 西北植物学报, 2001, 21(1): 75-80.
- [17] 魏小平, 王根轩, 吴冬秀. 干旱和 CO_2 浓度升高对不同春小麦光合作用和气孔阻力及水分蒸腾效率的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2005, 42(6): 42-46.
- [18] 童贯和. 不同供钾水平对小麦旗叶光合速率日变化的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 547-553.
- [19] 牛立元, 茹振钢, 刘明元, 等. 小麦光合作用日变化及光合潜势评价方法研究[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(2): 51-54.
- [20] Kemanian A R, Stockle C O, Huggins D R. Variability of barley radiation-use efficiency[J]. Crop Sci, 2004, 44: 1662-1672.
- [21] Malkin S. Estimation of the light distribution between photosystem I and II in intact wheat leaves by fluorescence and photoacoustic measurements[J]. Photosyn. Res., 1986, (7): 257-267.
- [22] 曹洪法, 高映新, 舒俭民, 等. 模拟酸雨对农作物生长和产量影响的初步研究[J]. 植物生态学报, 1989, 13(1): 58-65.
- [23] 倪寿清, 宋晓东, 崔清洁, 等. 模拟酸雨胁迫下中国北方小麦生理特性研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2008, 39(1): 19-22.
- [24] 吕金印, 山 仑, 高俊凤, 等. 干旱对小麦灌浆期旗叶光合等生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 77-81.
- [25] 赵 鸿, 肖国举, 王润元, 等. 气候变化对半干旱雨养农业区春小麦生长的影响[J]. 地球科学进展, 2007, 22(3): 636-641.
- [26] 赵 鸿, 王润元, 王鹤龄, 等. 西北干旱半干旱区春小麦对气候变暖响应的区域差异[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 636-641.
- [27] 王润元, 张 强, 杨兴国, 等. 西北干旱区春小麦对变暖的响应[J]. 地球科学进展, 2005, 20(特刊): 197-201.
- [28] 王太霞, 丁位华, 李景原. 芦荟蒽醌类物质对灌浆期冬小麦光合作用及产量的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1818-1821.
- [29] Fischer R A, Turner N C. Plant production in the arid and semiarid zones. Annu Rev Plant Phys, 1978, 29: 277-317.
- [30] 简令成, 王 红. 逆境植物细胞生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [31] 王宝山. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [32] 张大鹏, 黄丛林, 王学臣, 等. 葡萄叶片光合速率与量子效率日变化的研究及利用[J]. 植物学报, 1995, 37(1): 25-33.
- [33] 谢寅峰, 杨万红, 杨 阳. 外源一氧化氮对模拟酸雨胁迫下箬竹光合特性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5193-5201.
- [34] 王润元, 杨兴国, 赵 鸿, 等. 半干旱雨养区小麦叶片光合生理生态特征及其对环境的响应[J]. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1161-1166.
- [35] 刘建福. 模拟酸雨对杨梅生理生化特征的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(10): 110-113.
- [36] Cakamsk I, Marschner H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and glutathione reductase in bean leaves[J]. Plant Physiol, 1992, 98: 1222-1227.
- [37] 惠红霞, 许 兴, 李守明. 盐胁迫抑制枸杞光合作用的可能机理[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 5-9.
- [38] 刘建福. 磷胁迫对澳洲坚果幼苗叶片光合作用的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2007, 32(2): 45-48.

Effects of complementary irrigation on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in summer maize

WANG Ce, WANG Zhi-qiang, ZHANG Zhi-wei, LIN Tong-bao*

(College of Agronomy, Henan Agricultural University, Key Laboratory of Physiology, Ecology and

Genetic Improvement of Food Crops in Henan Province, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: Pool experiment was conducted to investigate the responses of photosynthetic characteristics, chlorophyll fluorescence parameters, and yield of summer maize to different supplemental irrigations using four cultivars of Zhengdan958, Zhongke11, Xundan20 and Xundan22 as materials. Maize growth was inhibited following the supplemental irrigations was reduced. Leaf area index, net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i), chlorophyll relative content ($SPAD$) and photochemical quenching (qP) also decreased, while the leaf water use efficiency ($LWUE$) increased with the decreasing of irrigation. The difference between normal irrigation and moderate deficit was not significant, while that between normal irrigation and severe deficit was significant. The initial fluorescent (F_o), PS II biggest photochemical efficiency (F_v/F_m) and non-photochemical quenching (NPQ) showed insignificant changes. The results indicated that the reduction in photosynthetic capacity and light energy transfer efficiency were the main factors for the loss in yield. However, various cultivars showed different changing amplitude, the smaller changing amplitude showed less influence by drought stress and relatively stronger drought resistance. Cultivars performance on drought resistance is Zhongke11 > Zhengdan958 and Xundan20 > Xundan22. Because of regional climate effects, moderate supplementary irrigation play key roles in saving water and stabilizing production under seasonal drought condition.

Keywords: summer maize; complementary irrigation; photosynthesis; chlorophyll fluorescence; yield

(上接第 98 页)

Effects of simulated acid rain on photosynthetic characteristics and yield of spring wheat at flowering stage

ZHANG Jian¹, WANG He-ling²

(1. Dingxi Dryland Agricultural Research and Extension Center, Dingxi, Gansu 743000, China;

2. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: Spring wheat at flowering stage was sprayed with simulated acid rain at different pH levels of 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 and 5.6, and then, the yield and the photosynthetic parameters of spring wheat leaves were monitored. The results indicate: The net photosynthetic rate reduces in the range of 24.20% ~ 58.23%, stomatal conductance reduces in the range of 35.90% ~ 58.37%, transpiration rate reduces in the range of 36.70% ~ 56.69%, intercellular CO_2 concentration increases in the range of 73.26% ~ 101.06%, the chlorophyll relative content reduces in the range of 1.96% ~ 15.99%, and the yield of spring wheat reduces in the range of 12.54% ~ 32.53%. The effect of simulated acid rain on photosynthetic characteristics of spring wheat leaves increases more and more remarkable with the increase of hydrogen ion concentration. The pH values of simulated acid rain are significantly positively correlated with net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, relative chlorophyll content and the yield, while they are significantly negatively correlated with intercellular CO_2 concentration.

Keywords: simulated acid rain; spring wheat; water use efficiency; photosynthetic characteristics; yield