

# 干旱胁迫下腐植酸对燕麦叶片光合性能的调控效应

李英浩, 刘景辉, 朱珊珊, 田露, 张志芬, 戴云仙

(内蒙古农业大学协同创新中心/全国农业科研杰出人才及创新团队, 内蒙古呼和浩特 010019)

**摘要:** 为明确腐植酸在干旱胁迫下对燕麦叶片光合性能的调控效应, 以燕麦品种燕科二号为试验材料, 采用盆栽方式, 分别在正常供水(75%田间持水量)、中度干旱胁迫(60%田间持水量)和重度干旱胁迫(45%田间持水量)3个水分条件喷施腐植酸和等量清水(CK), 分析了干旱胁迫下喷施腐植酸后燕麦叶片光合色素含量、光合特性、干物质积累及产量的变化。结果表明, 随着土壤水分的减少, 燕麦叶片的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量、光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、干物质积累量、产量及其构成因素均呈下降趋势。在正常供水条件下, 喷施 HA 处理的各指标值与 CK 差异不显著; 干旱胁迫下, 与 CK 相比, 喷施腐植酸后各指标值均不同程度提高, 其中在重度干旱胁迫下提高幅度较大, 且差异均达到显著水平。由此说明, 干旱胁迫条件下喷施腐植酸可改善燕麦叶片的光合性能, 促进干物质积累和增加产量, 且在重度干旱胁迫条件下效果最明显。

**关键词:** 腐植酸; 燕麦; 干旱胁迫; 光合特性; 光合色素

**中图分类号:** S512.6; S311

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-1041(2019)11-1385-07

## Effect of Spraying Humic Acid on Photosynthetic Characteristics of Oat Leaves under Drought Stress

LI Linghao, LIU Jinghui, ZHU Shanshan, TIAN Lu, ZHANG Zhifen, DAI Yunxian

(Oat Scientific and Technical Innovation Team, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

**Abstract:** In order to clarify the regulation effect of humic acid (HA) on the photosynthetic characteristics of oat leaves under drought stress, the oat variety Yanke 2 was used as the experimental material, and the pot water was used to set normal water supply (75% field water holding capacity) and moderate drought stress (60% field water holding capacity) and severe drought stress (45% field water holding capacity). HA and equal water (CK) were sprayed under three water conditions. Changes in photosynthetic pigment content, photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and yield of oat leaves were analyzed. The results showed that with the decrease of soil moisture, chlorophyll a content, chlorophyll b content, carotenoid content, photosynthetic rate, stomatal conductance, the transpiration rate, intercellular CO<sub>2</sub> concentration, dry matter accumulation, yield and its components all showed a downward trend. The differences of index values between normal water supply conditions and spraying HA under drought stress was not significant. Under drought stress, compared with CK, the indices increased after spraying HA, and the increase was significant under severe drought stress. This indicates that spraying HA under drought stress improved the photosynthetic performance of oat leaves, promoted dry matter accumulation and increased yield, with a most obvious effect under severe drought stress.

收稿日期: 2019-05-04

修回日期: 2019-06-08

基金项目: 国家燕麦荞麦产业技术体系项目(CARS-08-B-5); 燕麦加工技术研究与旱作高产栽培示范推广项目

第一作者 E-mail: 2466528827@qq.com

通讯作者: 刘景辉(E-mail: cauljh@yahoo.com.cn)

**Key words:** Humic acid; Oat; Drought stress; Photosynthetic characteristics; Photosynthetic pigment

干旱作为一种高发的农业气象灾害,长期困扰着世界各国的农业生产<sup>[1]</sup>。中国是旱灾频发国家之一。近 50 年来在全球变暖和北方干旱化的背景下,中国受旱面积和受旱成灾面积呈上升趋势,全国有 77.4% 的省区旱灾风险增加<sup>[2]</sup>,干旱胁迫在所有非生物胁迫危害中占首位<sup>[3]</sup>。燕麦粮饲兼用,喜冷凉、耐低温,抗逆性强,在中国西北干旱地区被广泛种植<sup>[4]</sup>,这些地区常常遭受到干旱的侵袭,是导致燕麦减产的主要原因之一。因此,燕麦被认为是治理土地荒漠化的先锋作物。

植物的光合作用是干物质积累和产量形成的基础,较高的光合碳同化能力是获得高产的前提。在干旱条件下,作物产量的损失在很大程度上是光能利用效率降低所致;干旱胁迫后,植物叶片的叶绿体片层结构会受到破坏,光合色素含量降低,叶片发黄;在一定范围内,色素含量的高低会直接影响叶片的光合作用,进而影响植物抗旱性的强弱<sup>[5]</sup>。 $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  是植物光合生理生态研究常用的参数。研究表明,在轻度干旱胁迫下,大麦光合作用下降主要由气孔限制所致,而在重度干旱胁迫下由非气孔因素变化所致<sup>[6]</sup>。燕麦光合作用在干旱胁迫下也会被抑制<sup>[7]</sup>,但对其复杂的生理生化调节过程尚不明确。腐植酸是动植物遗骸经过微生物分解和转化等一系列过程形成的一类有机物质<sup>[8]</sup>。研究发现,腐植酸能刺激微型原甲藻的生长发育和增加产量<sup>[9]</sup>。在干旱条件下,黄腐酸能够抑制作物气孔开度,增加气孔阻力,降低蒸腾作用,增强抗旱性<sup>[10]</sup>。腐植酸肥料能提高玉米、小麦、马铃薯、大豆、燕麦等作物的产量及抗旱性<sup>[19]</sup>。腐植酸水溶肥料能显著改善小麦的光合特性,使叶绿素含量和光合速率显著升高<sup>[19]</sup>。腐植酸可以提高水分胁迫下油菜叶绿素含量。腐植酸可以增加绿豆叶片的叶绿素含量,提高产量<sup>[11]</sup>。喷施腐植酸后水稻抽穗期旗叶的  $P_n$ 、 $C_i$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  和 SPAD 值提高<sup>[22]</sup>。前人的研究结果说明,腐植酸在干旱胁迫条件下可以有效改善作物的光合性能并提高产量。但目前关于干旱胁迫后,腐植酸对燕麦光合色素含量、光合特性及产量的调控效应鲜见报道。本研究以燕麦品种燕科二号为材料,分析了不同时期喷施腐植酸对干旱胁迫下燕麦叶片光合性能、干物质积累及产量的影响,以期对燕麦抗旱栽培提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料及设计

试验于 2018 年 6 月—9 月在内蒙古呼和浩特市内蒙古农业大学燕麦产业研究中心温室进行。供试燕麦品种为燕科二号,由内蒙古农牧业科学研究院提供。腐植酸水溶肥料由内蒙古永业农丰生物技术有限责任公司提供,其水溶腐植酸含量  $\geq 50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{N}+\text{P}+\text{K} \geq 200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,微量元素(锰、硼、钼、锌等)  $\geq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。采用盆栽方法,土壤为蛭石与泥炭土按质量比 1:1 的比例混合而成。泥炭土中  $\text{N}+\text{P}+\text{K} > 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有机质含量  $> 50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , pH 5.5~8.5,土壤含水量为 10%。塑料盆高 25 cm,直径 20 cm,每盆装混合土 2.5 kg,播种前底施磷酸二铵(含 N18%,  $\text{P}_2\text{O}_5$  46%) 2 g,在拔节期与抽穗期各追施尿素(含 N46%) 2 g。10 月 15 日播种,每盆播 30 粒,在三叶期定苗,每盆 20 株。试验采用随机区组排列,设置正常供水(75%田间持水量,  $W_1$ )、中度干旱胁迫(60%田间持水量,  $W_2$ )和重度干旱胁迫(40%田间持水量,  $W_3$ ) 3 个水分条件,不同水分条件下喷施 500 倍腐植酸水溶肥料(HA)和等量清水(CK),共 6 个处理,每个处理重复 3 次,每个重复种植 5 盆,共 90 盆。水分胁迫在拔节期开始,每天下午 5 点利用称重法进行补水以保持各处理土壤含水量稳定,土壤田间持水量、永久萎蔫点及土壤质量含水量按 Ryan 等<sup>[12]</sup>的方法分析测定。分别在拔节期、抽穗期和灌浆期喷施腐植酸,喷施后 7 d 进行取样和测定光合指标。

### 1.2 取样方法

取植株旗叶,液氮速冻并保存,每个重复取样三次,共 6 片叶。

### 1.3 测定指标与方法

#### 1.3.1 光合指标测定

采用 CIRAS-3 便携式光合作用测定系统于晴朗无风天气 9:00—11:00 测定燕麦旗叶中部净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ ),每个重复测定 3 片旗叶,取平均值。

#### 1.3.2 光合色素含量测定

称重 0.2 g 冻干的燕麦叶片,采用分光光度法<sup>[13]</sup>测定旗叶叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)

和类胡萝卜素(Cx+c)含量。

1.3.3 地上部干物质量测定

分别于拔节、抽穗、灌浆期取样,每个重复取 10 株,放入纸袋,在 105 °C 杀青 30 min,80 °C 烘干到恒重。计算每株地上部平均干重。

1.3.4 产量及构成因素测定

成熟期收获没取样的盆内植株用于室内考种,每个重复取 3 株,测定单株穗长、穗粒数、小穗数、穗粒重、千粒重,并计算每盆产量。

1.4 数据分析

试验数据用 Excel 进行整理,用 SAS 19.0 进行统计分析。

2 结果与分析

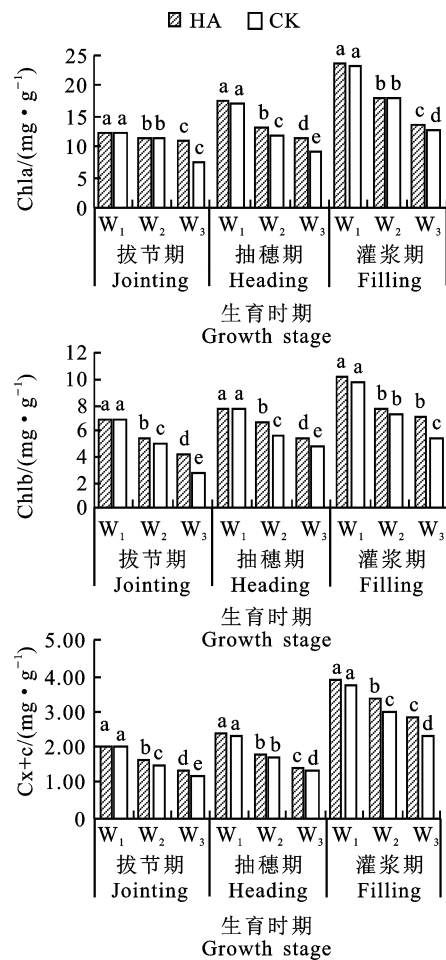
2.1 HA 喷施对干旱胁迫下燕麦叶片光合色素含量的影响

从拔节期到灌浆期,燕麦叶片 Chla、Chlb 和 Cx+c 含量均逐渐提高(图 1)。干旱胁迫导致燕麦叶片三种光合色素含量均下降,且降幅随着干旱胁迫程度的加剧而增加。在正常供水条件下,喷施 HA 后各时期燕麦三种光合色素含量与 CK 差异均不显著;在中度干旱胁迫下,喷施 HA 后叶片三种光合色素含量比 CK 分别平均增加 4.50%、10.02% 和 9.18%,但只有部分时期差异达到显著水平;而重度干旱胁迫下分别增加 6.46%、27.61% 和 23.87%,在不同时期差异均显著。以上结果说明,干旱胁迫对燕麦叶片光合色素含量产生明显的负效应,喷施 HA 可不同程度地减少干旱胁迫的影响,尤其是在重度干旱胁迫下效果最显著。

2.2 HA 喷施对干旱胁迫下燕麦叶片光合指标的影响

从拔节期到灌浆期,燕麦叶片的  $P_n$  逐渐提高,而  $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  均先升后降(图 2)。干旱胁迫导致叶片  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  均降低,且降幅随着干旱胁迫程度的加剧而增加。在正常供水条件下,喷施 HA 后各时期燕麦  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  与 CK 差异均不显著;在中度干旱胁迫下,喷施 HA 后叶片  $P_n$  比 CK 平均增加 23.45%,而  $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  分别比 CK 平均减少 5.39%、5.35% 和 0.6%,但只有部分时期差异达到显著水平;而重度干旱胁迫下  $P_n$  平均增加 32.04%,而  $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  分别平均减少 31.93%、34.91% 和 15.20%,在不同时期差异均显著。以上结果说明,干旱胁迫对燕

麦叶片  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  产生明显的负效应,喷施 HA 可不同程度地减轻干旱胁迫的影响,尤其是在重度干旱胁迫下效果最显著。



图柱上不同字母表示相同时期的不同处理间差异显著(P < 0.05)。图 2 同。

Different letters above the columns indicate significant differences among the treatments at same stages (P < 0.05). The same in figure 2.

图 1 不同处理下燕麦叶片 Chla、Chlb 和 Cx+c 含量的变化

Fig. 1 Changes of Chla, Chlb and Cx+c content in oats under different treatments

2.3 HA 喷施对干旱胁迫下燕麦干物质积累的影响

燕麦地上部干物质量随生育期的推进而逐渐提高,干旱胁迫导致燕麦地上部干物质量下降,且降幅随着干旱胁迫程度的加剧而增加(表 1)。正常供水条件下,喷施 HA 对干物质量影响不显著;中度干旱胁迫条件下喷施 HA 后干物质量与 CK 相比虽有提升,但只在拔节期差异达到显著

水平;在重度干旱胁迫条件下,喷施 HA 后各时期干物质质量均较 CK 显著增加。这说明喷施 HA

可缓解干旱胁迫对燕麦地上部干物质积累造成的抑制作用,且在重度干旱胁迫下效果最显著。

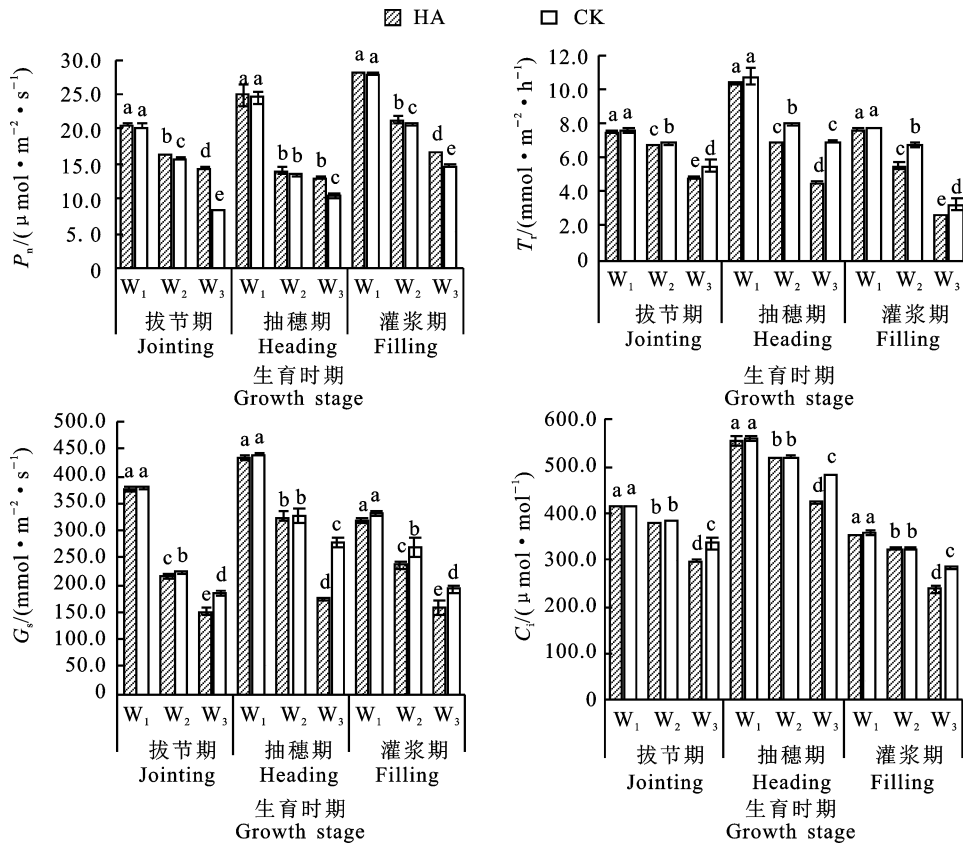


图 2 不同处理下燕麦叶片  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  的变化

Fig. 2 Changes of  $P_n$ ,  $T_r$ ,  $G_s$  and  $C_i$  in oats under different treatments

表 1 不同处理对燕麦地上部干物质质量的影响

Table 1 Effect of different treatments on the shoot dry matter amount of oats  $g \cdot plant^{-1}$

处理 Treatment	生育时期 Growth stage		
	拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage
W <sub>1</sub> HA	0.43±0.010a	2.1±0.015a	4.15±0.010a
W <sub>1</sub> CK	0.42±0.010a	2.08±0.012a	4.14±0.006a
W <sub>2</sub> HA	0.38±0.010b	1.82±0.006b	3.99±0.012b
W <sub>2</sub> CK	0.33±0.020c	1.85±0.021b	3.97±0.010b
W <sub>3</sub> HA	0.27±0.015d	1.81±0.064bc	3.91±0.010c
W <sub>3</sub> CK	0.19±0.005e	1.74±0.119c	3.80±0.010d

同列数值后不同字母表示相同时期的不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。表 2 同。

Different letters following the values in the same columns indicate significant differences among the treatments at same stages ( $P < 0.05$ ). The same in table 2.

### 2.4 HA 喷施对干旱胁迫下燕麦产量及其构成的影响

燕麦产量随干旱胁迫程度的加剧而逐渐降低(表 2)。在正常供水条件下,喷施 HA 后燕麦产量与 CK 差异不显著;在中度和重度干旱胁迫下,

喷施 HA 后产量比 CK 均显著增加,增幅分别为 3.52% 和 8.43%。穗长、穗数、单穗小穗数、穗粒重、穗粒数和千粒重均表现为正常供水 > 中度干旱 > 重度干旱;喷施 HA 处理高于 CK,其中正常供水和中度干旱胁迫下,喷施 HA 处理与 CK 差

异均不显著,而在重度干旱胁迫下,喷施 HA 后穗长、穗粒重及千粒重显著增加,增幅分别为 29.51%、10.96%和 12.70%。这说明,干旱胁迫

对燕麦的产量及穗部发育产生明显的负效应,喷施 HA 可不同程度地缓解干旱胁迫的影响,尤其是在重度干旱胁迫下效果最显著。

表 2 不同处理对燕麦产量及其构成因素的影响

Table 2 Effect of different treatments on yield and its components of oat

处理 Treatment	产量 Yield/ (g · pot <sup>-1</sup> )	穗长 Length of spike/cm	每盆穗数 Spike Number per pot	单穗小穗数 Number of spikelets	穗粒重 Grain weight per spike/g	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/g
W <sub>1</sub> HA	18.05a	20.0±2.000a	28±0.577a	17.7±0.577a	0.90±0.020a	34.7±1.155a	28.63±0.416a
W <sub>1</sub> CK	17.89a	20.2±0.764a	28±1.555ab	17.3±2.082a	0.89±0.031a	34.0±3.464a	27.62±0.605a
W <sub>2</sub> HA	17.66b	17.3±1.041b	27±2.000ab	16.3±1.528a	0.88±0.031a	30.7±1.155ab	26.31±1.424b
W <sub>2</sub> CK	17.06c	16.2±1.258b	26±2.082b	15.3±1.528ab	0.85±0.025ab	29.7±2.517bc	25.29±0.336bc
W <sub>3</sub> HA	16.21d	15.8±0.289b	23±1.528c	13.0±2.646bc	0.81±0.050b	25.7±3.214cd	24.58±0.372c
W <sub>3</sub> CK	14.95e	12.2±1.041c	21±0.577c	11.3±0.577c	0.73±0.038c	22.7±1.155d	21.81±0.230d

### 3 讨论

光合色素在植物光合作用能量转化过程中担负着光能吸收和传递的重任,光合色素含量的高低与植物生长动态有一定联系,含量越高,光合作用越强<sup>[14]</sup>。随着干旱胁迫程度的加剧,植物叶片叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量均显著下降<sup>[15-17]</sup>,这与本研究结果基本一致。本试验中,随着干旱胁迫程度的增加,燕麦叶片光合色素含量逐渐下降,说明干旱胁迫能够抑制燕麦叶片光合色素的合成,不利于作物的光合作用。研究表明,施用适量的腐植酸会增加小麦叶片叶绿素 a、叶绿素 b 含量<sup>[18]</sup>。腐植酸浸种可提高小麦叶绿素 a/叶绿素 b 的比值<sup>[19]</sup>。彭正萍等<sup>[20]</sup>研究发现,腐植酸能提高燕麦叶片叶绿素含量。本研究也结果显示,3 种胁迫条件下,喷施腐植酸后燕麦叶片叶绿素 a、叶绿素 b 的含量均有所提高。刘伟等<sup>[21]</sup>研究认为,中度胁迫后喷施腐植酸使小麦叶绿素含量增幅最大,与本研究结果不同。本研究结果显示,与正常供水相比较,重度胁迫条件下喷施 HA 后燕麦叶片叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量与 CK 相比提高幅度最大,中度胁迫条件下其含量虽有提高,但幅度较小,说明重度胁迫条件下腐植酸对于燕麦色素合成的促进效果最佳,可能因为水分的过度缺失,腐植酸会在一定程度上更能加快燕麦叶片光合色素的合成,但具体原因还需进一步探讨。

光合作用是燕麦产量形成的基础,产量的高低直接由光合作用决定。前人研究认为,水分胁迫

引起植物光合作用减弱是导致作物减产的一个关键因素<sup>[22]</sup>。有研究表明,干旱胁迫下玉米叶片  $P_n$  和  $T_r$  显著下降, $C_i$  则先下降后上升,而  $G_s$  先上升后下降<sup>[23]</sup>,在本试验中,随着干旱胁迫程度的加剧,燕麦叶片的  $P_n$ 、 $G_s$  和  $C_i$  均逐渐降低,与上述研究结果不同,说明不同干旱胁迫条件下,燕麦叶片的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  变化受气孔因素的影响较大。喷施腐植酸可增加水稻抽穗期旗叶的  $P_n$ 、 $C_i$ 、 $G_s$  和  $T_r$ <sup>[24]</sup>;在辣椒生长初期,用腐植质处理后, $P_n$  和  $G_s$  分别提高了 48% 和 63%<sup>[25]</sup>;黄腐酸能够降低紫花苜蓿叶片  $T_r$ ,使植株和土壤保持较多的水分,提高作物抗旱能力<sup>[26]</sup>。李茂松等<sup>[27]</sup>研究表明,FA 抗蒸腾剂可提高小麦光合速率,减小气孔开度、降低蒸腾强度,起到促进冬小麦生长和减少水分散失的作用。HA 可显著提高小麦  $P_n$ ,延缓光合速率下降,显著降低小麦  $G_s$  和  $T_r$ ,增强光合速率和光合产物积累,延缓植株衰老,小麦抗旱性增强<sup>[28]</sup>。施用 HA 抑制了干旱胁迫下烤烟幼苗叶绿素的降解,减缓了  $P_n$  和  $T_r$ <sup>[29]</sup>。本研究表明,在干旱胁迫程度下,喷施腐植酸后,燕麦叶片的  $P_n$  提高,而  $G_s$ 、 $T_r$  和  $C_i$  均降低。以上结果说明干旱胁迫下喷施腐植酸对光合特性的影响因作物种类的不同而异。前人研究表明,经过适当的干旱胁迫能促进小麦花前茎、叶、叶鞘和穗颖等贮存物质在花后向籽粒的转运,促进籽粒灌浆和增加产量,对籽粒干物质积累的贡献率达 10%~70%;随着干旱胁迫程度的增加,喷施腐植酸后的燕麦单产增幅呈上升趋势<sup>[30]</sup>。本试验结果显示,干旱胁迫会减少燕麦的千粒重,从而造成

籽粒产量降低,而干旱胁迫时喷施腐植酸可以一定程度上提高千粒重,稳定产量,且在重度干旱胁迫下腐植酸的增产效果最明显,与前人研究结果一致。

#### 参考文献:

- [1]赵莉,牟书勇,张鲜花. 干旱胁迫下新疆野生鸭茅(*Dactylis glomerata*)苗期抗旱性生理特性[J]. 干旱区研究,2015,32(5):953.  
ZHAO L, YAN S Y, ZHANG X H. Physiological characteristics of drought resistance in Xinjiang at the seedling stage of *Dactylis glomerata* [J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32(5): 953.
- [2]王静爱,商彦蕊. 中国农业旱灾承灾体脆弱性诊断与区域可持续发展[J]. 北京师范大学学报(社会科学版),2005(3):130.  
WANG J A, SHANG Y R. Vulnerability diagnosis and regional sustainable development of agricultural drought disasters in China [J]. *Journal of Beijing Normal University (Social Science Edition)*, 2005(3):130.
- [3]林世青,许春辉,张其德,等. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的作用[J]. 植物学通报,1992,9(1):1.  
LIN S Q, XU C H, ZHANG Q D, et al. The role of chlorophyll fluorescence kinetics in plant resistance physiology, ecology and agricultural modernization [J]. *Bulletin of Botany*, 1992, 9(1):1.
- [4]刘景辉,赵海超,任永峰,等. 土壤水分胁迫对燕麦叶面渗透调节物质含量的影响[J]. 西北植物学报,2009,29(7):1432.  
LIU J H, ZHAO H C, REN Y F, et al. Effects of soil water stress on the content of osmotic adjustment substances in oat leaf [J]. *Acta Botanica Boreologica Sinica*, 2009, 29(7): 1432.
- [5]MOHSENZADE H S, MALBOOBI M A, RAZAVI K, et al. Physiological and molecular responses of *Aeluropus lagopoides* (Poaceae) to water deficit [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56(3):314.
- [6]LI R H, MSC C, GUO P G, et al. Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley [J]. *Agricultural in Sciences in China*, 2006, 5(10):751.
- [7]付士磊,周永斌,何兴元,等. 干旱胁迫对杨树光合生理指标的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(11):2016.  
FU S L, ZHOU Y B, HE X Y, et al. Effects of drought stress on photosynthetic physiological indexes of poplars [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11):2016.
- [8]杨春刚,朱智伟,章秀福,等. 重金属镉对水稻生长影响和矿物质元素代谢的关系[J]. 中国农学通报,2005,21(11):176.  
YANG C G, ZHU Z W, ZHANG X F, et al. The relationship between the effects of heavy metal cadmium on rice growth and mineral element metabolism [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(11):176.
- [9]HEIL C A. Influence of humic, fulvic and hydrophilic acids on the growth, photosynthesis and respiration of the dinoflagellate *Prorocentrum minimum* (Pavillard) Schiller [J]. *Harmful Algae*, 2005(4):603.
- [10]丁钟荣. 几种抗蒸腾剂对植物气孔开张度和蒸腾失水的影响[J]. 西北农学院学报,1985(1):76.  
DING Z R. Effects of several anti-transpiration agents on plant stomatal opening and transpiration loss [J]. *Journal of Northwest Agricultural College*, 1985(1):76.
- [11]王日鑫,程刚. 腐植酸缓释磷肥的试验研究[J]. 腐植酸,2006(2):33.  
WANG R X, CHENG G. Experimental study on humic acid slow-release phosphate fertilizer [J]. *Humic Acid*, 2006(2): 33.
- [12]RYAN J, ESTEFAN G, RASHID A. Soil and plant analysis laboratory manual [M]. Aleppo: Jointly published by the International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA) and the National Agricultural Research Center (NARC), 2001:25-36.
- [13]华中师范大学. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,1985.  
Huazhong Normal University. Plant physiology experiment guide [M]. Beijing: Higher Education Press, 1985.
- [14]邹琦,李德全,郑国生. 作物耐旱生理生态研究[M]. 济南:山东科学技术出版社,1994.  
ZOU Q, LI D Q, ZHENG G S. Study on drought-tolerant physiological ecology of crops [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1994.
- [15]郭有燕,刘宏军,孔东升,等. 干旱胁迫对黑果枸杞幼苗光合特性的影响[J]. 西北植物学报,2016,36(1):124.  
GUO Y Y, LIU H J, KONG D S, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics of *Lycium ruthenicum* seedlings [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2016, 36(1):124.
- [16]兰艳,徐应杰,谭枫,等. 干旱胁迫下油橄榄品种光合特性研究[J]. 西北植物学报,2016,36(11):2247.  
LAN Y, XU Y J, TAN F, et al. Study on photosynthetic characteristics of olive cultivars under drought stress [J]. *Northwest Botanical Journal*, 2016, 36(11):2247.
- [17]柴胜丰,唐健民,王满莲,等. 干旱胁迫对金花茶幼苗光合生理特性的影响[J]. 西北植物学报,2015,35(2):322.  
CHAI S F, TANG J M, WANG M L, et al. Effects of drought stress on photosynthetic physiological characteristics of *Camellia sinensis* seedlings [J]. *Northwest Botanical Journal*, 2015, 35(2):322.
- [18]梁太波,王振林,刘娟,等. 灌溉和旱作条件下腐植酸复合肥料对小麦生理特性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2009,17(5):900.  
LIANG T B, WANG Z L, LIU J, et al. Effects of humic acid compound fertilizer on physiological characteristics and yield of wheat under irrigation and dry farming conditions [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(5):900.
- [19]中国作物学会. 中国作物学会50周年庆祝会暨2011年学术

- 年会论文集[C]. 中国作物学会,2011:1.  
Chinese Crop Society. 50th Anniversary of China Crop Society and Proceedings of 2011 Annual Conference [C]. China Crop Society,2011:1.
- [20]彭正萍,薛世川,孙志梅,等. 腐殖酸复合肥对油菜品质及生理指标的影响[J]. 河北农业大学学报,2001,24(1):24.  
PENG Z P,XUE S C,SUN Z M,*et al.* Effects of humic acid compound fertilizer on quality and physiological indexes of rape [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2001,24(1):24.
- [21]刘伟,刘景辉,萨如拉,等. 腐殖酸水溶肥料对水分胁迫下小麦光合特性及产量的影响[J]. 中国农学通报,2014,30(3):196.  
LIU W,LIU J H,SA R L,*et al.* Effects of humic acid water-soluble fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of wheat under water stress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2014,30(3):196.
- [22]LEGG B J,DAY W,LAWLOR D W,*et al.* The effects of drought on barley growth; Models and measurements showing the relative importance of leaf area and photosynthetic rate [J]. *Journal of Agricultural Science*,1979,92:703.
- [23]张杰,张强,赵建华,等. 作物干旱指标对西北半干旱区春小麦缺水特征的反映[J]. 生态学报,2008,28(4):1646.  
ZHANG J,ZHANG Q,ZHAO J H,*et al.* Reflection of crop drought index on water deficit characteristics of spring wheat in semi-arid areas of Northwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2008,28(4):1646.
- [24]张沁怡,李文蔚,阳晶,等. 腐植酸对水稻剑叶光合特性、必需元素和产量的影响及其相关性研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2015,30(2):185.  
ZHANG Q Y,LI W W,YANG J,*et al.* Effects of humic acid on photosynthetic characteristics, essential elements and yield of rice flagleaves and their correlations [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*,2015,30(2):185.
- [25]AZCONA I,PASCUAL I,AGUIRREOLEA J,*et al.* Growth and development of pepper are affected by humic substances derived from composted sludge [J]. *Plant Nutrition And Soil Science*,2011,174:916.
- [26]韩玉竹,李阳春,刘晓静. 黄腐酸对紫花苜蓿种子活力的影响[J]. 种子,2009,28(7):50.  
HAN Y Z,LI Y C,LIU X J. Effects of fulvic acid on the vigor of alfalfa seeds [J]. *Seed*,2009,28(7):50.
- [27]李茂松,李森,张述义,等. 灌浆期喷施新型 FA 抗蒸腾剂对冬小麦的生理调节作用研究[J]. 中国农业科学,2005,38(4):703.  
LI M S,LI S,ZHANG S Y,*et al.* Study on physiological regulation of winter wheat by spraying new FA anti-transpiration agent during filling stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2005,38(4):703.
- [28]张娜,赵宝平,郭若龙,等. 水分胁迫对不同抗旱性燕麦品种生理特性的影响[J]. 麦类作物学报,2012,32(1):150.  
ZHANG N,ZHAO B P,GUO R L,*et al.* Effects of water stress on physiological characteristics of different drought-tolerant oat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2012,32(1):150.
- [29]赵永长. 黄腐酸钾对干旱胁迫下烤烟生长的调控效应及机理研究[D]. 北京:中国农业科学院,2017:1-2.  
ZHAO Y C. Regulatory effects and mechanism of potassium humate on growth of flue-cured tobacco under drought stress [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017:1-2.
- [30]EHDAIE B,ALLOUSH G A,MADORE M A,*et al.* Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat. I. Postanthesis changes in internode drymatter [J]. *Crop Science*,2006,46:735.