



不同灌溉模式对小麦冬前幼苗生长及生理特性和产量的影响

王坤坤,李中蔚,李昕悦,刘慧莲,黄敬尧,宋有洪,李金才,李金鹏

(安徽农业大学 农学院,合肥 230036)

摘要 为探明不同灌溉模式对淮北地区小麦冬前幼苗生长及生理特性和产量的影响,以‘烟农19’为供试材料,设置不灌溉(W0)、播后灌溉60 mm(W1)、播种后和分蘖期每次微喷30 mm(W2)共3种灌溉模式,研究不同处理对苗期土壤水分含量变化、幼苗农艺性状、叶片生理特性、籽粒产量及产量构成的影响。结果表明,与W0和W1相比,W2维持了小麦三叶期、六叶期和越冬期土壤0~20 cm适宜的水分含量。W1和W2较W0处理促进三叶期和六叶期幼苗的生长;越冬期幼苗的分蘖数、株高、叶龄、初生根和次生根数目均表现为W2显著高于W1,二者显著高于W0。不同时期幼苗的茎+鞘、叶干质量为W2>W1>W0。W2不同生育时期群体叶面积指数显著高于W1,W0最低;六叶期W1与W2的叶片叶绿素含量无显著差异,二者显著高于W0,越冬期为W2>W1>W0。W0不同时期叶片超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶活性和丙二醛含量显著高于W1,除六叶期W1与W2的过氧化氢酶活性无显著差异外,各时期的超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性均为W2最低。成熟期小麦籽粒产量和产量构成要素均表现为W2>W1>W0。综上,播后和分蘖期利用微喷灌可以维持苗期适宜的土壤水分含量,促进幼苗生长发育,提高幼苗抗逆能力,进而有利于形成壮苗并增加产量。

关键词 小麦;微喷灌;幼苗生长;生理特性;干物质;产量

淮北麦区位于黄淮海平原南部地区,是中国小麦主产区之一。但该地区的降水资源相对匮乏且分布不均,小麦生产过程易遭遇阶段性干旱^[1]。近年来,受全球气候变化的影响,淮北平原冬小麦播种期的干旱事件频繁发生,给冬小麦的播种及幼苗生长带来了非常不利的影 响^[2]。然而,冬前形成壮苗是实现小麦高产优质的基础,达到壮苗标准的植株具有较强的抗逆能力,利于小麦后期的正常生长和发育^[3]。研究发现,小麦播期干旱胁迫的发生不仅会降低其出苗率,幼苗生长较为缓慢,群体数目显著下降^[4]。冬前较弱的小麦幼苗对逆境的抵抗能力明显降低,干旱胁迫的发生对幼苗的伤害程度会加重^[5]。且冬季低温冷害的发生会对弱苗生长造成不利影响,使幼苗叶片黄化,部分分蘖消亡,甚至群体数目下降,进而造成产量降低^[6]。此外,砂姜黑土也是影响该地区小麦壮苗形成的重要原因之一,砂姜黑土蓄水性能差,属性不良,表现为干旱发生时土壤僵硬开

裂,加剧田间水分丧失,水分过多时则使土壤粘密,闭合不透气,对作物根系的生长造成不利影响^[7]。再者,淮北地区主要为小麦-玉米周年轮作制度,前茬作物收获后其残余秸秆直接粉碎还田,还田的玉米秸秆在旋耕后主要分布在土壤表面,易导致土壤蓬松,降低土壤保墒能力,并且容易造成种子与土壤接触不紧密等问题,影响小麦出苗质量及幼苗生长^[8-9]。目前,淮北地区小麦生产实践中农民一般采取抢墒播种或播后再进行补充灌溉,但这两种模式很难保障小麦苗期适宜的土壤水分含量,因而也不利于小麦壮苗的形成。因此,探索出一种适合淮北平原小麦冬前保苗、壮苗的水分管理模式具有重要意义。

胁迫因子在限制作物表型生长的同时往往也会引起内部生理活动的剧烈变化。研究表明,干旱胁迫会导致作物体内产生活性氧(Reactive oxygen species,ROS)的积累,加速细胞膜脂质过氧化链式反应^[10]。而超氧化物歧化酶(Superoxide

收稿日期:2022-07-06 修回日期:2022-09-05

基金项目:国家自然科学基金(32001474);安徽农业大学引进与稳定人才项目(yj2019-01);安徽省小麦产业技术体系“十四五”计划项目。

第一作者:王坤坤,男,硕士研究生,从事小麦高产高效和水氮高效利用栽培生理研究。Email:2311624993@qq.com

通信作者:李金鹏,男,博士,讲师,硕士生导师,主要从事作物绿色抗逆丰产栽培生理研究。Email:jinpeng0103@126.com

dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)和过氧化物酶(Peroxidase, POD)作为抗氧化酶系统的重要组成部分,可降低 ROS 对细胞的毒性作用^[11-12]。植物体内的抗氧化酶活性与土壤水分含量的变化有关,并影响作物的光合能力^[13]。叶片内叶绿素含量通常被作为衡量光合作用强弱的重要指标,以反映不同环境因子对干物质积累的影响^[14]。丙二醛(Malonaldehyde, MDA)则被作为细胞膜脂质过氧化的产物,以判断不利条件下作物细胞的损伤程度^[15]。合理灌溉方式是缓解作物水分亏缺和改善作物生长环境的重要手段。刘丽平等^[16]认为,少量多次灌溉能调控农田小气候条件,降低干旱对幼苗的危害程度,使叶片保持较高的光合能力,促进幼苗生长发育。微喷灌作为一种新型节水灌溉方式,广泛应用于各种大田生产中,其操作简便,生产成本低,可长时间使用,且宜推广^[17]。本试验研究不同灌溉模式对冬前小麦苗期土壤水分含量变化、幼苗农艺性状、叶片生理特性及产量的影响,以期为利用微喷灌技术实现冬前小麦幼苗壮苗提供一定的技术支撑和理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2021—2022 年在安徽省蒙城县农业科技示范农场(33°9′44″N, 116°32′56″E)开展。试验区属黄淮海平原南部,暖温带半湿润季风气候。该地区年降水量历年平均 803 mm,多集中在 6—8 月份,冬小麦季年降水量历年平均 237.4 mm。小麦冬前苗期月份平均降水量及气温见图 1。试验田土壤属砂姜黑土,冬小麦播前 0~20 cm 土壤理化性质分别为有机质 11.3 g·kg⁻¹、速效氮 108.5 mg·kg⁻¹、速效磷 61.9 mg·kg⁻¹、速效钾 189.7 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

选用半冬性小麦品种‘烟农 19’为供试材料,设置不灌溉(W0)、播后灌溉 60 mm(W1)、播种后和分蘖期每次分别微喷 30 mm(W2)共 3 个处理,其中灌溉用水为井水,灌水量用水表精确控制。微喷灌带水压为 0.02 MPa,带长 40 m,宽 60 mm。采用裂区设计,小区面积为 168 m²(4.2 m×40 m),每处理设 3 个重复,每小区间隔 1 m。本研究采用人工播种,小麦播种量为 225.0 kg·hm⁻²,播种行距为 20 cm,每小区共 20 行,

其中 5~6 行和 15~16 行之间间隔 30 cm,用于铺设微喷灌带。为更好模拟大田生产方式,生育时期内肥料按生产习惯进行施用,其中 W0 处理播前底肥施用纯氮 202.5 kg·hm⁻²,W2 和 W1 处理各施纯氮 112.5 kg·hm⁻²、P₂O₅ 112.5 kg·hm⁻²、K₂O 112.5 kg·hm⁻²,春季追施纯氮 90 kg·hm⁻²。其他田间管理措施同大田生产,播种时间为 2021-10-22,收获时间为 2022-06-10。

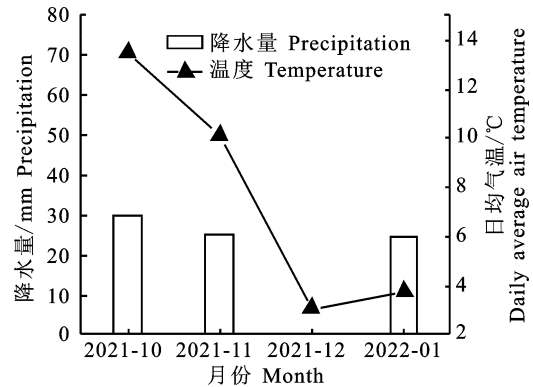


图 1 播前至越冬期降水及温度变化

Fig. 1 Precipitation and temperature changes from pre-sowing to over-wintering stage

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水分含量 分别于三叶期(2021-11-18)、六叶期(2021-12-12)和越冬期(2022-01-11)测定土壤水分含量。测定时,用土钻于每小区取 0~40 cm 土层的土壤,每 10 cm 为 1 层,取样后立即装入铝盒中,称取新鲜土质量,然后 105 °C 烘干至恒质量,称量干土质量,计算土壤含水量。

1.3.2 农艺性状 于三叶期、六叶期和越冬期测定农艺性状。每试验小区取相邻两行 50 cm 代表性样段,根据分蘖比例法挑取 10 株具有代表性的植株,对每株的农艺性状(分蘖数、株高、叶龄、初次生根)进行测量,每个处理重复 4 次。

1.3.3 群体干物质积累 干物质样品的选取时期和方法同上,将测量过农艺性状的 10 株植株以不同部位(茎+鞘、叶片)进行分样,于 105 °C 杀青 30 min 后 75 °C 烘干至恒质量,称量,计算阶段干物质。

1.3.4 叶绿素含量 于六叶期和越冬期每试验小区选取具有代表性的上三叶 20 片,立即放入液氮后在超低温冰箱(-80 °C)保存,用于叶绿素含量的测定。测定时,将叶片剪碎混合均匀后称取 0.10 g,用 25 mL 95%乙醇避光 48 h 浸提,提取液分别在 665 和 649 nm 波长下测定吸光度(OD),每个处理重复 4 次,根据公式计算叶绿素

(a+b)含量^[18]。

1.3.5 群体叶面积指数 于三叶期、六叶期和越冬期用叶面积分析仪测定每试验小区依照分蘖比例法挑选的 10 株植株的叶面积,并换算成叶面积指数(Leaf area index, LAI)。

1.3.6 叶片抗氧化酶及丙二醛含量 取样时期和方法同“1.3.4”,测定时,将叶片剪碎混合均匀后称取 0.10 g,使用冷冻磨样机进行研磨,利用氮蓝四唑(Nitro-blue tetrazolium, NBT)光还原法测定叶片超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性,采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(Catalase, CAT)和过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性,采用硫代巴比妥酸(Thiobarbituric acid, TBA)显色法测定丙二醛(Malonaldehyde, MDA)含量^[19]。

1.3.7 籽粒产量与产量构成 于成熟期时,每试验小区收获长势均匀,具有代表性的 2 m² 面积麦穗,人工脱粒,用以折算籽粒每公顷产量;每试验小区调查 1 m 4 行穗数,用以换算每公顷穗数;每试验小区随机选取相邻 50 穗,用以调查穗粒数;于每试验小区测产的籽粒样品中随机选取 1 000 粒烘干称取质量,用以计算千粒质量,4 次重复。籽粒产量和千粒质量的含水量均换算为 13%。

1.4 数据处理

数据均采用 SPSS 26.0 软件和 Microsoft Excel 2016 软件进行统计分析,采用最小显著差异法(Least significant difference, LSD)对试验数据进行单因素方差分析和显著性检验($P < 0.05$),并使用 Origin 2021 软件进行主成分分析和作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤含水量的影响

由图 2 可知,不同灌溉处理对小麦各生育时期 30~40 cm 土层中土壤水分含量无显著影响,三叶期和六叶期 20~30 cm 不同处理间无显著差异。三叶期时,0~10 cm 土壤水分含量为 W1 显著高于 W2 和 W0,后两者之间无显著差异;10~20 cm 土层,W1 与 W2 无显著差异,均显著高于 W0。六叶期时,0~10 cm 土壤水分含量为 W0 显著低于 W1 和 W2,后两者间无显著差异;10~20 cm 为 W0 与 W1 无显著差异,均显著低于 W2。越冬期时,W1 与 W2 处理 0~10 cm 土壤水分含量无显著差异,二者显著高于 W0;10~20 cm 为 W2 显著高于 W0 和 W1,后两者无显著差异;20~30 cm 土壤水分含量为 W0 与 W1 无显著差异,W1 与 W2 无显著差异,但 W0 显著低于 W2。总之,冬前苗期微喷少量多次补灌有利于维持适宜的土壤水分含量。

2.2 不同处理对小麦农艺性状的影响

由表 1 可知,W0 处理在不同时期的各农艺指标均为最低。三叶期时,分蘖数和叶龄表现为 W0 显著低于 W1,W1 显著低于 W2;株高和次生根数目为 W0 显著低于 W1 和 W2,后两者间无显著差异;六叶期时,叶龄和初、次生根数为 W0 与 W1 无显著差异,W1 与 W2 也无显著差异,但 W0 显著低于 W2;而分蘖数和株高为 W2 显著高于 W1、W0;越冬期时,各单株农艺性状均表现为 W2 显著高于 W1 和 W0。说明微喷少量多次补灌有利于小麦幼苗的生长。

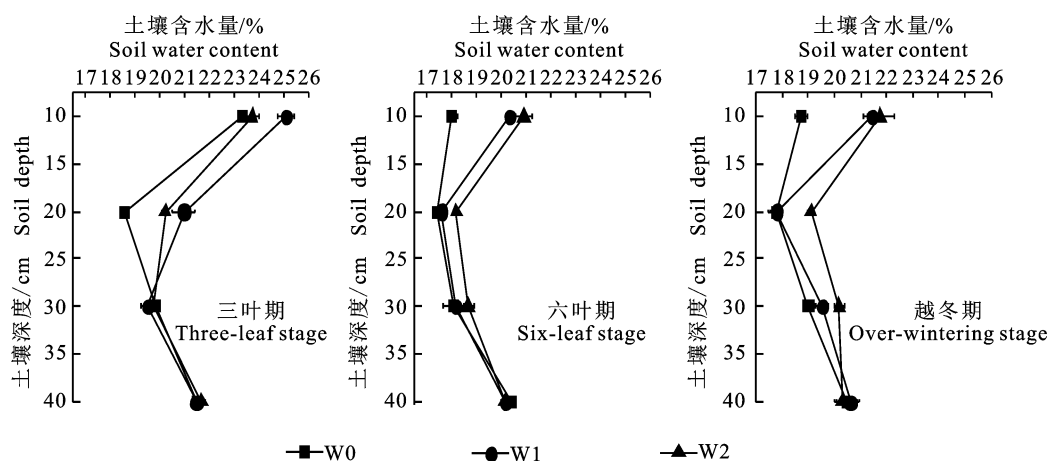


图 2 不同灌溉处理下小麦苗期土壤含水量

Fig. 2 Soil water content of wheat seedling stage under different irrigation treatments

表 1 不同灌溉处理下小麦苗期农艺性状

Table 1 Agronomic characters of wheat seedlings under different irrigation treatments

农艺性状 Agronomic characters	处理 Treatment	三叶期 Three-leaf stage	六叶期 Six-leaf stage	越冬期 Over-wintering stage
分蘖数 Tiller number per plant	W0	1.64 c	4.00 c	7.65 c
	W1	1.79 b	4.05 b	8.81 b
	W2	1.96 a	4.30 a	9.37 a
株高/cm Plant height	W0	21.42 b	22.19 c	22.92 c
	W1	22.50 a	23.63 b	24.38 b
	W2	23.10 a	25.16 a	25.68 a
叶龄 Foliar age of plant	W0	3.24 c	5.59 b	6.82 c
	W1	3.33 b	6.05 ab	7.16 b
	W2	3.58 a	6.27 a	7.98 a
初生根数 Number of primary roots per plant	W0	5.43 a	5.30 b	5.63 c
	W1	5.70 a	5.47 ab	6.00 b
	W2	5.73 a	6.13 a	6.83 a
次生根数 Number of lateral roots per plant	W0	2.63 b	6.25 b	11.30 c
	W1	3.20 a	6.75 ab	13.05 b
	W2	3.17 a	7.25 a	16.70 a

注:同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences after the same columns among treatments at 0.05 level. The same below.

2.3 不同处理对小麦干物质积累的影响

由表 2 可知,不同时期不同处理干物质总量均为 W2 显著高于 W1, W0 最低,不同时期不同器官干质量表现为 W2 显著高于 W1, W0 最低,且不同时期不同处理叶干质量均高于茎+鞘。三

叶期时, W2 总干质量高于 W1 和 W0; 六叶期时, W2 总干质量高于 W1 和 W0; 越冬期时, W2 总干质量高于 W1 和 W0, 且差异显著。综上, 通过微喷灌少量多次补灌可以显著提高小麦苗期干物质积累量, 为壮苗奠定基础。

表 2 不同灌溉处理下小麦苗期地上部干物质积累

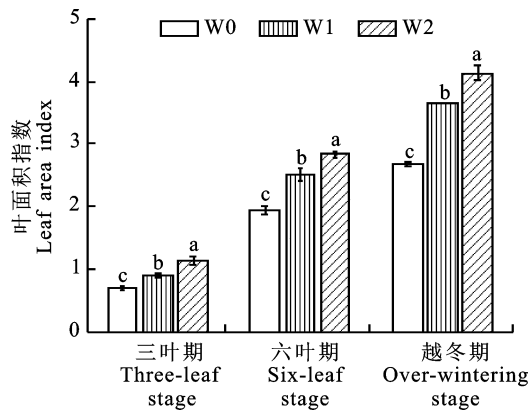
Table 2 Dry matter accumulation of wheat seedlings under different irrigation treatments

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	茎+鞘 Stem and sheath		叶 Leaf		总干质量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Total dry mass
		干质量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Dry mass	比例/% Ratio	干质量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Dry mass	比例/% Ratio	
三叶期 Three-leaf stage	W0	93.65 c	44.8 a	115.56 c	55.2 b	209.21 c
	W1	104.92 b	41.3 b	148.32 b	58.6 a	253.24 b
	W2	129.68 a	41.7 b	180.95 a	58.3 a	310.63 a
六叶期 Six-leaf stage	W0	389.95 c	49.5 a	397.62 c	50.5 c	787.57 c
	W1	445.56 b	46.2 b	508.89 b	53.8 b	964.45 b
	W2	539.05 a	44.0 c	687.14 a	56.0 a	1 226.19 a
越冬期 Over-wintering stage	W0	911.43 c	47.3 a	1 017.46 c	52.7 c	1 928.89 c
	W1	1 048.57 b	44.4 c	1 314.13 b	55.6 a	2 362.7 b
	W2	1 273.65 a	45.8 b	1 506.03 a	54.2 b	2 779.68 a

2.4 不同处理对小麦叶面积指数的影响

由图 3 可知,不同时期叶面积指数(Leaf area index, LAI)均为 W2 显著高于 W1, W0, W0 最低。三叶期时,各处理间叶面积指数虽存在显著差异,但数值均较小。随生育进程的推进,幼苗叶

面积指数呈不断增加的趋势。六叶期和越冬期时,叶面积指数 W2 显著高于 W1, W0 最低,且处理间差异逐渐加大。综上,微喷少量多次补灌有助于促进叶片生长,获得较高的叶面积指数,有利于幼苗生长。



同一时期柱子上的不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

Different lowercase letters on the columns in the same period indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same below

图3 不同灌溉处理下小麦苗期叶面积指数

Fig. 3 Leaf area index of wheat seedling under different irrigation treatments

2.5 不同处理对小麦叶绿素含量的影响

由图4可知,不同时期叶绿素含量均为W0最低。六叶期时,叶绿素含量为W0显著低于W1和W2,后两者间无显著差异;越冬期时,叶绿素含量为W2显著高于W1,W0最低。此外,与六叶期相比,越冬期时W0和W1的叶绿素含量无显著增加,而W2处理的叶绿素含量较之前有显著提升。综上,微喷少量多次补灌能显著提高

幼苗叶片叶绿素含量,有利于提升叶片的光合生产能力。

2.6 不同处理对小麦叶片抗氧化酶活性的影响

由图5可知,不同时期叶片超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)和过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性均为不灌溉(W0)最高。六叶期时,SOD、POD活性W0显著高于W1,W1显著高于W2;CAT活性表现为W1和W2显著低于W0,前两者间无显著差异;越冬期时,叶片SOD、POD和CAT活性均表现为W0高于W1,W2最低。综上,说明微喷少量多次补灌能使叶片保护酶活性保持在较低水平。

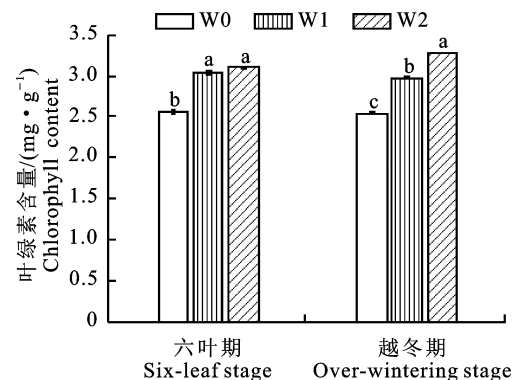


图4 不同灌溉处理下小麦苗期叶绿素含量

Fig. 4 Chlorophyll content of wheat seedlings under different irrigation treatments

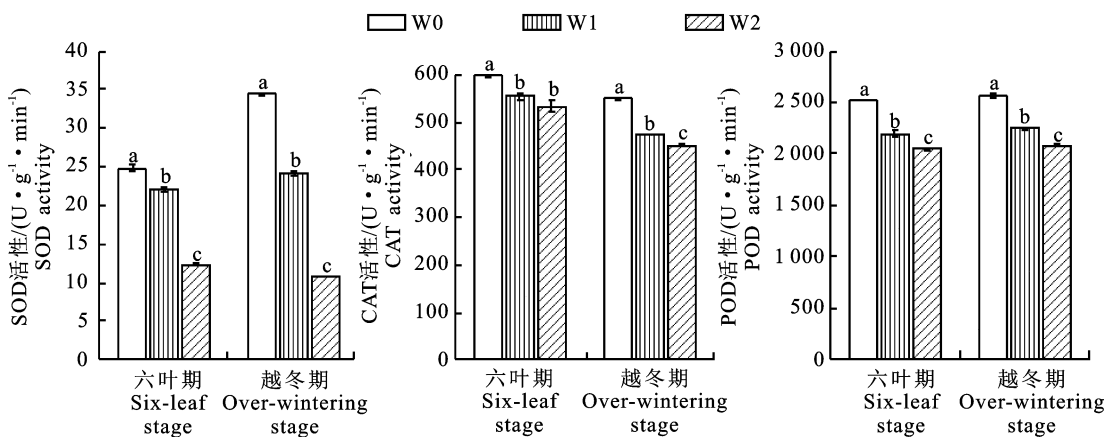


图5 不同灌溉处理下小麦叶片抗氧化酶活性

Fig. 5 Antioxidant activity of wheat seedling leaf under different irrigation treatments

2.7 不同处理对小麦叶片丙二醛含量的影响

由图6可知,越冬期不同处理丙二醛(Malonaldehyde, MDA)含量相比六叶期均有显著提高,六叶期时,MDA含量表现为W0显著高于

W1,W2最低。越冬期各处理间MDA含量变化趋势与六叶期一致,但处理间差异显著增大,且W0高于W1 17.37%、W2 35.49%。此外,各处理越冬期MDA含量比六叶期均显著增加,说明

随生育进程的推进,幼苗所遭受的环境胁迫也逐渐增加,而 W2 却始终处于较低水平。综上,表明

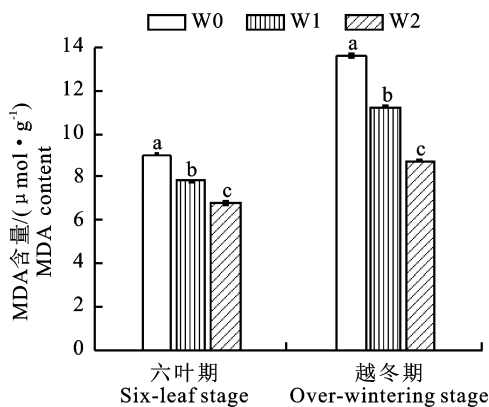


图 6 不同灌溉处理下小麦叶片 MDA 含量
Fig. 6 MDA concentration of wheat seedling leaves under different irrigation treatments

微喷少量多次补灌能够显著降低叶片 MDA 含量。

2.8 不同处理对小麦籽粒产量的影响

由表 3 可知,不同处理下小麦籽粒产量表现为 W0 显著低于 W1, W2 最高, W2 与 W0 和 W1 相比,小麦籽粒产量分别提升 36.59%、17.28%。而不同处理的穗数、穗粒数和千粒质量为 W2 显著高于 W1, W0 最低。可见,微喷减量增次补灌能够显著提高小麦穗数、穗粒数和千粒质量,从而增加小麦产量。

2.9 主成分分析

由表 4 可知,对 3 种灌溉模式的 17 个测定指标进行主成分分析。仅划分出一个主成分,特征值为 16.46,其主成分的累计贡献率为 96.84%,基本可以代表小麦冬前幼苗性状的大部分信息,可作为综合评价冬前幼苗的壮苗强弱和籽粒产量的指标。

表 3 不同灌溉处理下小麦籽粒产量及产量构成

Table 3 Grain yield and yield components of wheat under different irrigation treatments

处理 Treatment	产量/(kg·hm ⁻²) Yield	穗数(×10 ⁴)/hm ⁻² Spike number	穗粒数 Kernel number per spike	千粒质量/g Thousand-kernel mass
W0	8 200.41 c	688.13 c	33.57 c	39.92 c
W1	9 550.48 b	761.88 b	35.57 b	42.34 b
W2	11 200.56 a	881.25 a	38.18 a	46.32 a

表 4 各指标主成分的特征向量及贡献率

Table 4 Eigenvectors and percentage of accumulated contribution of principal components

主成分 Principle factor		1
特征值 Eigen value		16.46
贡献率/% Contribution rate		96.84
累计贡献率/% Cumulative contribution rate		96.84
特征向量 Eigen vector	产量 Yield	0.25
	穗数 Spike number	0.24
	穗粒数 Kernel number per spike	0.25
	千粒质量 Thousand-kernel mass	0.24
	土壤含水量 Soil water content	0.23
	分蘖数 Tiller number per plant	0.24
	株高 Plant height	0.25
	叶龄 Foliar age of plant	0.24
	初生根 Number of primary roots per plant	0.24
	次生根 Number of lateral roots per plant	0.24
	总干质量 Total dry mass	0.25
	叶面积指数 Leaf area index	0.24
	叶绿素 Chlorophyll content	0.25
	POD 活性 POD activity	-0.24
	CAT 活性 CAT activity	-0.24
	SOD 活性 SOD activity	-0.25
	MDA 含量 MDA content	-0.25

3 讨论

3.1 不同水分管理模式对小麦冬前幼苗生长发育的影响

小麦的出苗和生长需要充足的水分供应。冬前苗期是小麦分蘖发生的第一个高峰期,也是形成有效穗数的关键期,而土壤水分含量直接影响小麦的出苗和群体质量^[20-21]。前人研究表明,播期干旱不仅会降低小麦出苗率和群体苗数,同时会使幼苗生长缓慢和耐受性下降^[4-5]。本研究发现,W2较W0和W1处理促进了幼苗分蘖数、株高、叶龄、初生根和次生根的生长(表1)。一方面,W2维持了小麦三叶期、六叶期和越冬期适宜的土壤水分含量(图2);另一方面,可能由于W2促进了小麦幼苗根系的生长发育,尤其是次生根数目显著增加,提高了幼苗根系对土壤水分和养分的吸收能力,满足了幼苗生长发育的物质需求。此外,微喷灌通过保持土壤水分含量,稳定土壤温度变化,影响根系的吸收速率和代谢强度,可能也是促进小麦幼苗壮苗生成的原因之一^[22]。本研究中,W2在播后和三叶期进行了两次补灌,增次减量微喷可能使水分供应与幼苗生长更为协调,从而促进幼苗壮苗的生成,提高了单株农艺性状。而W1处理一次较多灌溉量虽对幼苗质量有部分提升,但效果较W2欠佳。

3.2 不同水分管理模式对小麦冬前幼苗干物质积累的影响

叶绿素含量与植物的光合能力、干物质积累密切相关,它通常是反映光合作用能力和植物发育状况的重要指标^[23]。研究发现,水分胁迫可导致植株缺水萎蔫,叶片黄化,叶绿素含量下降,光合产物积累减少等状况^[24-25]。在本研究中,与W0和W1相比,W2处理提高了幼苗各时期干物质积累量(表2),生长速率明显提高,主要可能在于W2提高了小麦叶绿素含量、叶面积指数(图3,图4)。而叶绿素的合成和叶片的伸长生长均需要充足的水分和养分供应^[26]。W2处理下小麦幼苗叶绿素含量和叶面积指数较高的原因可能在于:一方面苗期进行多次补灌满足了小麦幼苗的生理需水和生态需水,改善了农田小环境^[27],使得叶绿素生物合成反应能够正常进行;另一方面,较发达幼苗根系则能够吸收更多的土壤养分,如氮、镁等元素,可能也是增加幼苗叶绿素和叶面积,提高光合产物积累的直接原因^[28-29];另外,增

加的生物量也不断充实新的营养器官,投入物质的吸收和生产中,使二者形成相互促进、相互依赖的统一整体。而W1处理播后一次性灌溉并不能显著改变农田环境及充分发挥小麦幼苗的生长潜力,反而易加剧砂姜黑土对小麦幼苗的不利影响^[7]。因此,微喷灌少量多次补灌同步提升了幼苗的生物量积累能力和光合能力,这对于小麦形成冬前壮蘖和壮苗十分有利。

3.3 不同水分管理模式对小麦冬前幼苗抗逆性的影响

研究发现,干旱胁迫在限制作物表型生长的同时,往往也会引起内部环境发生剧烈变化,如活性氧(Reactive oxygen species, ROS)积累,会导致质膜相对透性增大,而叶片超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)和过氧化物酶(Peroxidase, POD)等保护酶活性的提高则能缓解或降低ROS对质膜和细胞的攻击,减轻其对作物造成的伤害程度^[8]。本试验发现,W0处理下小麦幼苗叶片各时期丙二醛(Malonaldehyde, MDA)含量和SOD、POD、CAT活性显著高于W1,W2为最低(图5,图6)。一般条件下,小麦叶片MDA含量的高低反映了内环境的稳定性,低水平的MDA含量有利于减轻膜脂过氧化程度^[30-31]。本研究中,W0和W1相比于W2处理,小麦幼苗MDA含量和抗氧化酶活性较高的主要原因可能是试验过程中降雨较少,土壤现有水分含量不能满足小麦幼苗生长发育的需要,导致幼苗前期长势弱和长期水分胁迫形成了双重限制因子,使得过氧化产物MDA过量积累,及抗氧化酶活性升高,而较高水平的过氧化产物的积累,说明幼苗叶片细胞结构和功能已经受到活性氧的破坏而损伤,如叶绿体的降解等^[32]。此外,活性氧还会造成植物体内核酸结构的定位损伤和蛋白质的空间结构破坏而变性,使植物体内保护酶系统失衡,从而抑制小麦生长^[32-33]。而微喷灌模式下进行了多次补灌,降低了这些不利因素对幼苗生长发育的影响,稳定的叶片内环境促进了壮苗的发生。

综上,通过试验讨论分析发现,在本研究中,微喷少量多次补灌(W2)相比于雨养(W0)和播后漫灌(W1)显著提高了籽粒产量和产量构成要素(表3),其原因可能是多方面因素的共同作用(表4)。适宜的土壤水分供应不仅促进了根系的生长稳定了叶片内环境,并提高植株同化物的积累量,

这为小麦后期的生长与发育打下了良好的物质基础。而后期小麦穗数增加的主要原因在于前期较多的物质积累增加了分蘖数,强大根系和营养基础减少了后期有效分蘖的消亡所致;同时较高的光合面积和干物质积累还提高后期籽粒物质分配比例,增加籽粒千粒质量。此外,充足的源物质基础和适宜的环境条件也是穗粒数增加的重要原因。因此,小麦籽粒产量的增加绝不是单因素的调控,而是由生育期内多种生长指标共同协调控制。然而,虽然微喷补灌模式在大田试验效果良好,但其对小麦冬前幼苗生长和叶片生理特性调控机制尚不明确,对后期群体形成及其光合生理特性的影响仍需进一步的研究和探讨。

4 结 论

通过利用微喷灌技术在播后和分蘖期每次灌溉 30 mm 相比于雨养和播后一次性灌溉模式能够长期维持小麦冬前苗田土壤的适宜水分含量,促进幼苗地上部分和地下根系生长,增强叶片的抗逆性,提高叶片叶绿素含量及植株光合面积,使得植株干物质积累量显著增加,实现越冬期小麦壮苗的生成和产量的增加。本研究为淮北地区利用微喷灌进行少量增次灌溉实现冬小麦越冬期壮苗抗逆栽培提供了一定的理论依据和和技术支撑。

参考文献 Reference:

- [1] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(一)[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(5): 886-895.
ZHAO G C. Study on Chinese wheat planting regionalization (I) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30 (5) : 886-895.
- [2] GOU Q Q, ZHU Y H, LU H SH, *et al.* Application of an improved spatio-temporal identification method of flash droughts[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 604: 127224.
- [3] 李 岗, 王虎全, 谢惠民, 等. 渭北旱地小麦生产潜力及开发对策研究[J]. 西北农业大学学报, 1997, 25(3): 26-30.
LI G, WANG H Q, XIE H M, *et al.* Potential productivity and developmental countermeasures of wheat in Weibei dryland[J]. *Acta University Agricultural Boreali-occidentalis*, 1997, 25(3): 26-30.
- [4] WANG SH, WEI M, WU B D, *et al.* Does N deposition mitigate the adverse impacts of drought stress on plant seed germination and seedling growth? [J]. *Acta Oecologica*, 2020, 109: 103650.
- [5] CHEN Y, ZHANG ZH, TAO F L, *et al.* Spatio-temporal patterns of winter wheat yield potential and yield gap during the past three decades in North China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 206: 11-20.
- [6] 柴雨葳, 黄彩霞, 陆军胜, 等. 水分胁迫条件下低温对小麦幼苗生长发育的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(4): 53-58.
CHAI Y W, HANG C X, LU J SH, *et al.* Effects of low temperature on growth and development of wheat seedling under drought [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(4): 53-58.
- [7] 李德成, 张甘霖, 龚子同. 我国砂姜黑土土种的系统分类归属研究[J]. 土壤, 2011, 43(4): 623-629.
LI D CH, ZHANG G L, GONG Z T. On Taxonomy of Shajiang black soils in China [J]. *Soils*, 2011, 43 (4) : 623-629.
- [8] 李少昆, 王克如, 冯聚凯, 等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. 作物学报, 2006, 32 (3) : 463-465, 478.
LI SH K, WANG K R, FENG J K, *et al.* Factors affecting seedling emergence in winter wheat under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32 (3) : 463-465, 478.
- [9] 孟晓瑜, 王朝辉, 李富翠, 等. 底墒和施氮量对渭北旱塬冬小麦产量与水分利用的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 369-375.
MENG X Y, WANG ZH H, LI F C, *et al.* Effects of soil moisture before sowing and nitrogen fertilization on winter wheat yield and water use on Weibei Plain of Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (2) : 369-375.
- [10] OSAKABE Y, OSAKABE K, SHINOZAKI K, *et al.* Response of plants to water stress [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 3(5): 86.
- [11] LAXA M, LIEBTHAL M, TELMAN W, *et al.* The role of the plant antioxidant system in drought tolerance [J]. *Antioxidants*, 2019, 8(94): 1-31.
- [12] ABID M, ALI S, QI L K, *et al.* Physiological and biochemical changes during drought and recovery periods at tillering and jointing stages in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-15.
- [13] HAO SH X, CAO H X, WANG H B, *et al.* The physiological responses of tomato to water stress and re-water in different growth periods [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 143-154.
- [14] NIKOLAEVA M K, MAEVCKAYA S N, SHUGAEV A G, *et al.* Effect of drought on chlorophyll content and antioxidant enzyme activities in leaves of three wheat cultivars varying in productivity [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2010, 57(1): 87-95.
- [15] IQBAL H, YANING C, WAQAS M, *et al.* Hydrogen peroxide application improves quinoa performance by affecting physiological and biochemical mechanisms under water - deficit conditions [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2018, 204(6): 541-553.
- [16] 刘丽平, 欧阳竹, 武兰芳, 等. 灌溉模式对不同群体小麦光合特性的调控机制 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(2): 189-196.
LIU L P, OUYANG ZH, WU L F, *et al.* Regulation mech-

- anism of irrigation schedule on population photosynthesis of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(2): 189-196.
- [17] 周 斌, 封 俊, 张学军, 等. 微喷带单孔喷水量分布的基本特征研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 101-103.
ZHOU B, FENG J, ZHANG X J, *et al.* Characteristics and indexes of water distribution of punched thin-soft tape for spray[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(4): 101-103.
- [18] 李金鹏, 宋文越, 姚春生, 等. 微喷水肥一体化对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 1-9.
LI J P, SONG W Y, YAO CH SH, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application and micro-sprinkling irrigation integration on grain yield and water use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(3): 1-9.
- [19] WENG M, CUI L, LIU F, *et al.* Effects of drought stress on antioxidant enzymes in seedlings of different wheat genotypes[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2015, 47(1): 49-56.
- [20] 刘阿康, 马瑞琦, 王德梅, 等. 覆膜和补施氮肥对晚播冬小麦冬前植株生长及群体质量的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(7): 1771-1786.
LIU A K, MA R Q, WANG D M, *et al.* Effects of filming and supplemental nitrogen fertilizer application on plant growth and population quality of late sowing winter wheat before winter[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(7): 1771-1786.
- [21] 刘义国, 万雪洁, 张 艳, 等. 干旱锻炼对小麦幼苗期形态指标的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(2): 157-163.
LIU Y G, WAN X J, ZHANG Y, *et al.* Effect of drought priming on morphological indices of wheat seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2022, 31(2): 157-163.
- [22] 刘秀位, 苗文芳, 王艳哲, 等. 冬前不同管理措施对土壤温度和冬小麦早期生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1135-1141.
LIU X W, MIAO W F, WANG Y ZH, *et al.* Effects of different pre-winter management practices on soil temperature and winter wheat seedling growth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(9): 1135-1141.
- [23] ALI S, XU Y Y, JIA Q M, *et al.* Interactive effects of plastic film mulching with supplemental irrigation on winter wheat photosynthesis, chlorophyll fluorescence and yield under simulated precipitation conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 207: 1-14.
- [24] 田梦雨. 干旱胁迫对小麦苗期生长的影响及其生理机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
TIAN M Y. Effects of drought stress on seedling growth of wheat and its physiological mechanism[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [25] AHMED K S, AHMED M, SHAH K N. Phenotyping for drought resistance in bread wheat using physiological and biochemical traits[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 729: 139082.
- [26] 王平荣, 张帆涛, 高家旭, 等. 高等植物叶绿素生物合成的研究进展[J]. 西北植物学报, 2009, 29(3): 629-636.
WANG P R, ZHANG F T, GAO J X, *et al.* An overview of chlorophyll biosynthesis in higher plants[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(3): 629-636.
- [27] 张英华, 张 琪, 徐学欣, 等. 适宜微喷灌水频率及氮肥量提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 88-95.
ZHANG Y H, ZHANG Q, XU X X, *et al.* Optimal irrigation frequency and nitrogen application rate improving yield formation and water utilization in winter wheat under micro-sprinkling condition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(5): 88-95.
- [28] TMKNER M, JAGHDANI S J. Minimum magnesium concentrations for photosynthetic efficiency in wheat and sunflower seedlings[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 144: 234-243.
- [29] 杨世丽, 张凤路, 贾秀领, 等. 水氮耦合对冬小麦叶片叶绿素含量和光合速率的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(5): 161-164.
YANG SH L, ZHANG F L, JIA X L, *et al.* Effects of water and nitrogen coupling on chlorophyll content and photosynthetic rate of winter wheat leaves[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(5): 161-164.
- [30] 米少艳, 靖姣姣, 白志英, 等. 低磷对小麦代换系幼苗根系保护酶活性和丙二醛含量的影响及染色体效应[J]. 华北农学报, 2013, 28(2): 91-95.
MI SH Y, JING J J, BAI ZH Y, *et al.* Effects of phosphorus deficiency stress on protective enzyme activities, MDA content and chromosome of wheat substitution lines seedling roots[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(2): 91-95.
- [31] AHMED H G M D, ZENG Y W, YANG X M, *et al.* Confering drought-tolerant wheat genotypes through morpho-physiological and chlorophyll indices at seedling stage[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2020, 27(8): 2116-2123.
- [32] 李合生, 王学奎. 现代植物生理学 [M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 301-302.
LI H SH, WANG X K. *Modern Plant Physiology* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2019: 301-302.
- [33] C TRIANTAPHYLIDÉS, HAVAUX M. Singlet oxygen in plants: production, detoxification and signaling[J]. *Trends in Plant Science*, 2009, 14(4): 219-228.

Effects of Different Irrigation Patterns on Growth, Physiological Characteristics and Yield of Wheat Seedlings before Over-wintering

WANG Kunkun, LI Zhongwei, LI Xinyue, LIU Huilian, HUANG Jingyao,
SONG Youhong, LI Jincai and LI Jinpeng

(School of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract In order to explore the effects of different irrigation patterns on the growth and physiological characteristics of winter wheat seedling before over-wintering in Huaibei Plain, ‘Yannong 19’ was used as experimental material, three irrigation patterns were set up, which included no irrigation (W0), irrigation with 60 mm after sowing (W1), micro-sprinkling irrigation with 30 mm after sowing and tillering stage (W2), the effects of different treatments on soil moisture content change, seedling agronomic characters, leaf physiological characteristics and grain yield and yield components of wheat seedling were investigated. The results showed that, compared with W0 and W1, W2 maintained the suitable soil water content at three-leaf, six-leaf and over-wintering stages of wheat seedling in the soil depth of 0–20 cm. Compared with W0, W1 and W2 promoted the growth of seedling at three-leaf and six-leaf stages, and W2 significantly improved the number of tillers, plant height, leaf age of leaves, the number of primary root and secondary root of wheat seedling at over-wintering stage compared with W1 and W0, and W1 was significantly higher than W0. Dry mass of stem and sheath and leaf were presented as $W2 > W1 > W0$. Leaf area index in W2 was significantly higher than that of W1 at different growth stages, W0 was the lowest. There was no significant difference in chlorophyll content of leaf between W1 and W2 at six-leaf stage, and they were significantly higher than that of W0. However, the chlorophyll content among different treatments showed as $W2 > W1 > W0$ at over-wintering stage. The activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD) and malondialdehyde in leaf of W0 at different stages were significantly higher than those of W1. Besides there was no significantly difference in CAT activity between W1 and W2 at six-leaf stage, the activities of SOD and POD were the lowest in W2. The grain yield and yield components were presented as $W2 > W1 > W0$. In conclusion, irrigation with micro-sprinkling after sowing and at tillering stage can maintain the suitable soil water content at seedling stage of wheat, promote the seedling growth and development, improve seedling stress tolerance, help form strong seedling and increase yield in Huaibei Plain.

Key words Wheat; Micro-sprinkling irrigation; Seedling growth; Physiological characteristics; Dry matter; Yield

Received 2022-07-06

Returned 2022-09-05

Foundation item The National Natural Science Foundation of China (No. 32001474); the Introduction and Stabilization of Talents Project of Anhui Agricultural University (No. yj2019-01); the Project of Modern Industrial Technology System During the “14th five-Year Plan” of Anhui Province.

First author WANG Kunkun, male, master student. Research area: wheat high yield and efficient utilization of water and nitrogen. E-mail: 2311624993@qq.com

Corresponding author LI Jinpeng, male, master supervisor. Research area: physiology and ecology of wheat cultivation. E-mail: jinpeng0103@126.com