

苑蒙飞,田宇,徐利岗,等.不同土壤水分下限对宁夏玉米生长生理和产量的影响[J].江苏农业科学,2026,54(9):134-141.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2026.09.016

# 不同土壤水分下限对宁夏玉米生长生理和产量的影响

苑蒙飞<sup>1</sup>,田宇<sup>2</sup>,徐利岗<sup>1,3</sup>,窦家暄<sup>1</sup>

(1.宁夏大学土木与水利工程学院,宁夏银川 750021; 2.中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083;  
3.宁夏黄河水联网数字治水重点实验室,宁夏银川 750021)

**摘要:**为明确宁夏干旱区膜下滴灌条件下玉米的适宜灌溉制度,于2023年在宁夏吴忠市扬黄灌区开展田间试验,设置6个土壤水分控制下限[-10 kPa(DI-10)、-15 kPa(DI-15)、-20 kPa(DI-20)、-25 kPa(DI-25)、-30 kPa(DI-30)、-35 kPa(DI-35)]处理,通过负压计控制灌溉,结合土壤水分特征曲线确定灌水定额,系统测定玉米的生长特征、生理特征、地上部干物质、产量及灌溉水利用效率(IWUE),并采用熵权TOPSIS模型进行综合评价。结果表明,DI-35处理下株高和茎粗均最大,其中株高为302.67 cm,茎粗为28.36 mm,玉米穗位高对水分亏缺较为敏感,不同处理穗位高差异明显;玉米日均净光合速率表现为DI-15>DI-20>DI-10>DI-25>DI-35>DI-30,日均蒸腾速率表现为DI-15>DI-20>DI-25>DI-10>DI-30>DI-35;在灌浆期干物质累积量达到最大,其中DI-15处理茎、叶干重最大,分别为461.28、118.23 g。产量、千粒重、穗粒数及IWUE均随着灌水下限的降低而降低,DI-10处理产量最高,为20.17 t/hm<sup>2</sup>。综上,宁夏干旱区在膜下滴灌条件下,以-15 kPa为土壤水分控制下限可兼顾玉米产量与水分利用效率。

**关键词:**土壤水分下限;玉米;膜下滴灌;生物量;熵权TOPSIS

**中图分类号:**S513.07 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2026)09-0134-08

水资源短缺现已成为制约农业可持续发展的重要因素<sup>[1-2]</sup>。预计到2050年,全球人口将达到97

亿<sup>[3]</sup>,随着人口的迅速增加,迫切需要增加作物产量满足人们生活需求。玉米作为宁夏地区主要的粮食作物<sup>[4]</sup>,截至2021年种植面积达到36.74万hm<sup>2</sup><sup>[5]</sup>,占宁夏全区农业灌溉面积的52.7%,因此玉米的科学种植与合理灌溉对宁夏粮食安全具有重要意义。灌溉是提高作物产量的首要因素<sup>[6]</sup>,已有研究表明,合理的灌溉制度可以保证玉米在关键生长阶段(抽穗期和灌浆期)获得充足的水分供应<sup>[7]</sup>,从而促

收稿日期:2025-06-03

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划(编号:2023BCF01017)。

作者简介:苑蒙飞(1999—),男,河南上蔡人,硕士研究生,主要从事节水灌溉及水利工程相关研究。E-mail:ymengf03@163.com。

通信作者:徐利岗,博士,研究员,主要从事水文水资源研究。E-mail:xlg9120@163.com。

[24] 韩玉环,刘晨,杨龙,等.打顶时期和留叶数对山东烤烟上部叶生长发育的影响[J].作物杂志,2023,39(2):157-162.

[25] 李波.外源物质对上部烟叶产质量的影响[J].浙江农业科学,2024,65(2):301-306.

[26] 李代强,刘朝科,古力,等.不同植物生长调节剂对烤烟上部叶品质及可用性的影响[J].江西农业学报,2013,25(5):107-109.

[27] 任志广,杨立均,龚治翔,等.赤霉素与钾肥互作对烤烟生理指标及上部叶化学成分的影响[J].核农学报,2018,32(11):2232-2239.

[28] 陆新莉,苟正贵,刘婕,等.不同基因型烟草叶片在成熟过程中质体色素的变化[J].中国农学通报,2019,35(15):35-39.

[29] 曾嘉楠,叶晓青,蔡民爵,等.外源物质对高温胁迫下烤烟上部叶光合及抗氧化能力的影响[J].作物杂志,2025(5):247-259.

[30] 王子腾.湘南烤烟“高温逼熟”指标监测及光温对烤烟光合生理的影响[D].郑州:郑州大学,2017:34-40.

[31] 顾永丽,胡勇,周建云,等.烟叶成熟过程主要生理生化指标鉴定及相关性分析[J].分子植物育种,2021,19(15):5137-5142.

[32] 王慧芳,张希,冯小虎,等.不同植物生长调节剂对烤烟生长发育的影响[J].作物杂志,2021(3):173-177.

[33] 杜兴良.外源亚精胺对烤烟成熟期上部叶衰老特性及品质的影响[D].郑州:河南农业大学,2022:14-19.

[34] 任志广.外源物质对烤烟上部叶生理特性和品质指标的影响[D].郑州:河南农业大学,2021:17-18.

[35] 卢子琦,王晓宇,张松杰,等.外源壬二酸对烟草抗氧化系统及转录组的影响[J].中国烟草学报,2025,31(3):104-114.

[36] Rodrigues F C T, Silveira P R, Cacique I S, et al. Soybean plants sprayed with azelaic and hexanoic acids and infected by *Phakopsora pachyrhizi* display better photosynthetic performance and a robust antioxidative metabolism[J]. Journal of Phytopathology, 2023, 171(7/8):320-332.

进其生长<sup>[8]</sup>、提高光合作用效率<sup>[9-10]</sup>、增强根系活力,进而提高干物质积累和最终产量<sup>[11]</sup>。相反,不合理的灌溉策略可能导致水分过多或过少,进而影响玉米生理过程,甚至导致生长停滞、干物质积累减少或产量下降。已有多位学者针对陕西<sup>[12]</sup>、新疆<sup>[13]</sup>、天津<sup>[14]</sup>等地区玉米灌溉管理进行了研究,但不同气候条件、土壤质地及水资源条件,会对研究结论的适用范围造成一定影响,成果也无法直接应用于宁夏灌区。同时,许多研究使用土壤水分传感器监测试验区土壤水分变化,从而决策试验的执行,但土壤水分传感器在测定土壤水分时可能存在超前或滞后等问题<sup>[15]</sup>,也存在一定的局限性。因此本研究以玉米为研究对象,以宁夏中部扬黄灌区为研究区,使用负压计控制田间试验,同时利用土壤水分特征曲线计算灌水定额,研究不同土壤水分控制下限及供水条件下玉米的生长、生理、干物质累积、产量和灌溉水利用效率的响应特征,从而确定宁夏中部干旱带膜下滴灌玉米适宜的灌溉控制指标,以期为干旱半干旱地区玉米种植灌溉策略优化提供科学依据及理论支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验区位于宁夏回族自治区吴忠市红寺堡区红寺堡镇弘德村(106°09'E,37°49'N)。当地属典型的温带干旱区,具有明显的大陆性气候特征,蒸发强烈。多年平均降水量 251 mm,年内分布不均,且主要集中在 7—9 月,多年平均蒸发量为 2 387 mm,干旱指数 4.6。年平均气温 8.7℃,日温差 13.7℃。试验区土壤为沙质土,有机质含量 1.13%,pH 值 8.4,电导率 4.43 dS/m。容重与田间持水量见表 1。2023 年试验区试验期间玉米生育期内降水量为 171.32 mm,其中 6 月份降水量最大,为 64.81 mm。

表 1 试验区不同土层土壤容重与田间持水量

土层 (cm)	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	田间持水率 (%)
0~20	1.21	19.07
20~40	1.14	21.93
40~60	1.38	17.04
60~80	1.48	17.02
80~100	1.37	17.23

注:表中田间持水率为质量分数。

### 1.2 试验材料与 设计

试验供试玉米品种为“金圆 1 号”,采用宽窄行

种植方式,其中宽行行距为 1.05 m,窄行行距为 0.35 m,株距为 0.2 m。采用膜下滴灌,滴头间距 30 cm,滴头流量 2.5 L/h,滴灌带沿玉米种植行方向铺设于窄行。设置土壤水分单因素(土壤水分控制下限),采用裂区试验设计,根据土壤基质势设置 6 个处理(DI-10、DI-15、DI-20、DI-25、DI-30、DI-35),每个处理设置 3 个重复,各小区面积 350 m<sup>2</sup>(35 m×10 m)。在各试验小区中部区域安装负压计(埋置于滴头下方 20 cm 处),当负压计读数达到设计灌水下限时开始灌水,达到灌水上限(统一设置为田间持水率的 95%)时停止灌水。各处理试验设置见表 2。试验区玉米 4 月 25 日播种,10 月 5 日收获。各处理单次灌水定额根据公式(1)计算,具体灌水量如表 3 所示。

$$I_0 = AH(95\% \theta_{ic} - \theta) \rho / \eta \quad (1)$$

式中: $I_0$  为滴灌灌水定额;A 为灌溉面积; $\theta_{ic}$  为田间持水量; $\theta$  为灌水下限对应的土壤含水率(根据土壤水分特征曲线确定,图 1); $\rho$  为滴灌湿润比,取 0.65; $\eta$  为灌溉效率,取 0.95。

表 2 玉米灌溉试验设计

处理	灌水下限 (kPa)	灌水上限
DI-10	-10	95% 田间持水量
DI-15	-15	
DI-20	-20	
DI-25	-25	
DI-30	-30	
DI-35	-35	

表 3 不同处理灌水量

处理	灌水定额 (mm)
DI-10	9.58
DI-15	12.08
DI-20	14.12
DI-25	17.34
DI-30	19.71
DI-35	21.89

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤水分特征曲线 在试验区中部位置开挖土壤剖面,剖面长、宽、高均为 100 cm,利用环刀分别在 0~20、20~60、60~100 cm 处土壤剖面上取各土层原状土,室内将环刀浸泡至饱和,利用离心机测定各土层环刀在不同转速下的土壤含水率,绘制土壤水分特征曲线。

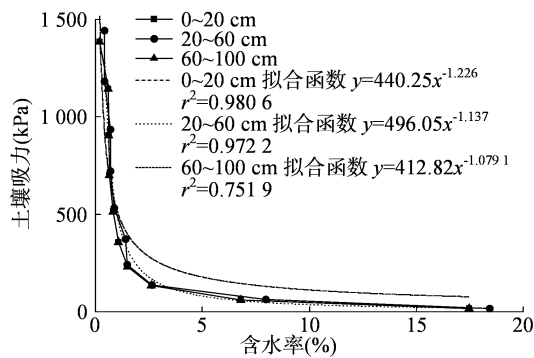


图1 试验区不同土层土壤水分特征曲线

1.3.2 生长参数 每个试验小区选择3株长势一致的典型样株,在玉米每个生育期使用卷尺和电子游标卡尺测量玉米株高、茎粗、穗位高及雄穗长,每个指标重复3次。

1.3.3 叶面积指数 在每个生育期测量玉米叶面积,叶面积根据公式(2)使用长宽系数法计算,叶面积指数=所有展开叶片叶面积之和/植株覆盖土地面积。

$$\text{叶面积} = L \times W \times \alpha \quad (2)$$

式中: $L$ 为叶片长度; $W$ 为叶片最宽断面的宽度; $\alpha$ 为叶面积之折算系数,取值0.75。

1.3.4 生理指标 在玉米大喇叭口期(V10期,即玉米第10张叶子完全舒展时),每个处理选取生长健康、长势均一的典型样株,使用便携式CI-340型光合作用测量系统(美国CID bio-science公司),选择晴朗的天气测定谷子净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )。分别在玉米出苗后69、79、89、100 d使用Minolta SPAD-502型叶绿素仪(日本Konica Minolta公司)选择植株上部完全舒展的叶片测定叶绿素含量(SPAD值)。

1.3.5 地上部位生物量 于V10期、抽穗期、灌浆期、乳熟期及蜡熟期在每个试验小区选择3棵样株,整株挖出,用剪刀将各器官剪切分开,用电子秤(精度0.01 g)称量茎、叶和穗鲜重,并迅速装入自封袋带回实验室,在烘箱中105℃杀青30 min后,80℃烘至恒质量,用电子秤(精度0.01 g)称量各器官干重。

1.3.6 产量 玉米成熟后,在每个试验小区选取3个2.5 m×2.5 m的样方,测定玉米粒干重,根据样方面积折算玉米产量,同时测量玉米千粒重及单穗粒数。

1.3.7 灌溉水利用效率(IWUE) 玉米灌溉水利用效率利用公式(3)计算。

$$IWUE = Y/I \quad (3)$$

式中: $IWUE$ 为灌溉水利用效率,kg/m<sup>3</sup>; $Y$ 为单位面积的总产量,kg/hm<sup>3</sup>;  $I$ 为单位面积灌水量,m<sup>3</sup>/hm<sup>3</sup>。

## 1.4 综合评价方法构建

采用熵权TOPSIS综合评价方法<sup>[16-18]</sup>,对不同处理下玉米生长、生理、地上部位干物质及产量等指标进行综合评价分析,并根据结论提出合理的玉米灌溉控制指标。

1.4.1 数据处理 假设有 $n$ 个评价指标和 $m$ 个待评价方案,构建标准化矩阵 $R = (x_{ij})$ ,式中: $x_{ij}$ 为第 $i$ 个评价对象的第 $j$ 个指标(其中, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ )。对标准化矩阵按公式(4)进行正向化处理。

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} + 0.001 \quad (4)$$

式中: $\min x_{ij}$ 、 $\max x_{ij}$ 分别表示第 $i$ 个评价对象第 $j$ 个指标的最小值、最大值。

1.4.2 熵权TOPSIS综合评价方法 利用公式(5)计算每项 $x_{ij}$ 的比重 $P_{ij}$ ,根据公式(6)计算各项指标的熵值 $e_j$ ,利用公式(7)计算各项指标权重 $w_j$ ,最后通过公式(8)将矩阵 $R$ 转化为加权规范化矩阵 $R_v$ 。

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (5)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \left( \sum_{i=1}^m P_{ij} \cdot \ln P_{ij} \right) \quad (6)$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (7)$$

$$v_{ij} = w_j \cdot x_{ij} \quad (8)$$

确定正负理想解( $v_j^+$ 、 $v_j^-$ ),以各项正负理想解为评价标准,按公式(9)和公式(10)计算各指标与正负理想解的欧氏距离( $d_i^+$ 、 $d_i^-$ )。

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (9)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (10)$$

相对贴近度 $C_j$ 作为各评价方案得分指标进行排序,相对贴近度越大,则对象越接近最优解,处理表现越好。

$$C_j = \frac{d^-}{d^- + d^+} \quad (11)$$

## 1.5 数据分析

数据使用SPSS 27.0软件进行单因素方差分析(ANOVA),所有图形使用Origin Pro 2021绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水分处理对玉米生长的影响

整理不同水分处理下玉米株高、茎粗、穗位高、

雄穗长及叶面积指数生长指标数据并绘制图形(图2)。由图2可知,不同处理下玉米株高变化趋势相同,在苗期不同处理株高差异不大,随着时间的推移,各处理株高差异逐渐明显。在V10生育期,DI-15处理株高最大,为222.27 cm,其次是DI-25处理,为220.62 cm,DI-30处理最小,仅为189.23 cm。在灌浆期,除DI-20处理外,其余处理株高均未达到最大值。从全生育期来看,DI-35处理株高最大,为302.67 cm,DI-25处理株高最小,为279.00 cm。不同处理下玉米茎粗变化趋势与株高变化趋势相同,在苗期不同处理茎粗差异不大。除DI-20和DI-25处理外,其余处理均在抽穗期达到最大值,其中DI-35处理茎粗最大,为

28.36 mm,DI-30处理最小,为24.51 mm。在蜡熟期,所有处理茎粗相较于最大值均有所下降,所有处理平均下降了3.86 mm。在各生育期不同处理玉米穗位高差异均较明显,分析认为玉米穗位高对水分较为敏感。在抽穗期之后,各处理穗位高变化不大。DI-20处理穗位高最大,为126.00 cm,DI-30处理最小,为117.33 cm。在不同生育期不同水分处理下雄穗长差异较为明显,表明雄穗长受水分影响较大。除DI-25和DI-30处理外,其余处理均在乳熟期达到最大值,其中DI-20处理表现最好,雄穗长达到了42.00 cm。不同处理下玉米叶面积指数(LAI)随着生育期的进行呈先上升后下降的趋势。随着时间推移,水分对LAI的影响逐渐增大,除

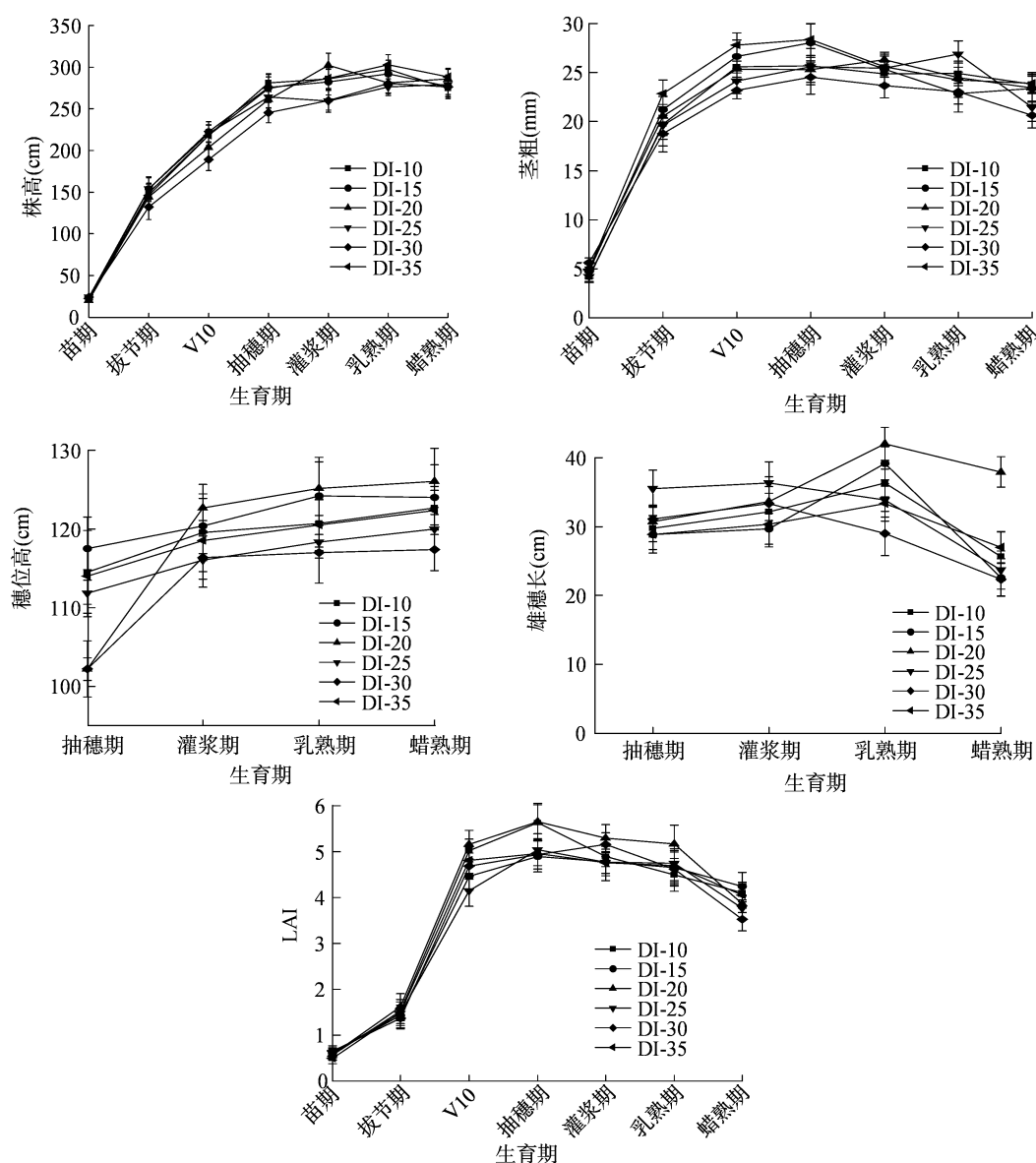


图2 不同处理下玉米生长指标变化过程线

DI-30 处理外,其余各处理 LAI 均在抽穗期达到最大值。从全生育期来看,各处理 LAI 表现为 DI-20 > DI-10 > DI-30 > DI-25 > DI-35 > DI-15。

### 2.2 不同水分处理对玉米生理指标的影响

2.2.1 不同处理对玉米净光合速率和蒸腾速率的影响 整理 V10 期不同水分处理下玉米净光合速率( $P_n$ )及蒸腾速率( $T_r$ )并绘制变化过程线(图 3)。由图 3 可知,随着时间的推移, $P_n$  呈现先上升后下降的趋势,在 10:00—12:00,低灌水下限(DI-25、DI-30 和 DI-35)的净光合速率低于高灌水下限,随着时间的推移, $P_n$  呈现先上升后下降的趋势,在 12:00—14:00 左右,各处理  $P_n$  均达到最大值,其中 DI-15 处理最大,为  $31.33 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,其次是 DI-20,为  $28.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,表明低灌水下限有利于玉米光合作用的进行。在 14:00—16:00,不同处理下的  $P_n$  与 12:00—14:00 相比均有所下降,其中 DI-10 处理下降最多,下降了  $15.74 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

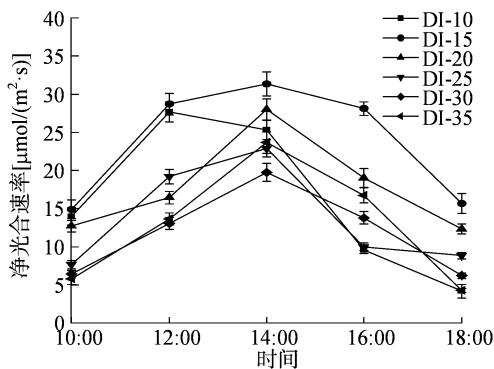
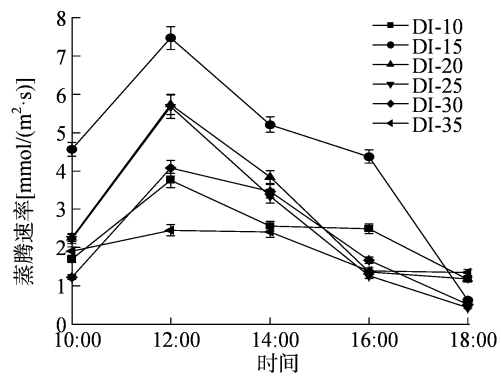


图3 不同处理玉米净光合速率及蒸腾速率变化过程线

DI-15 处理  $P_n$  在全天均大于其他处理,表明在灌水下限为 -15 kPa 时有利于玉米光合作用的进行。不同处理下日均  $P_n$  表现为 DI-15 > DI-20 > DI-10 > DI-25 > DI-35 > DI-30。

图 3 展示了不同处理下玉米蒸腾速率( $T_r$ )在 V10 期的整天变化趋势, $T_r$  日动态变化趋势与  $P_n$  变化趋势较为相似,均随着时间的推移呈先上升后下降的趋势,DI-15 处理下,除 18:00 外,其余时间点  $T_r$  均大于其他处理。在 10:00—12:00,由于光照强度增加,气温升高,使得叶温增大,从而促使叶片气孔开放,各处理  $T_r$  均达到最大值,其中 DI-15 处理最大,为  $7.47 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,DI-35 最小,为  $2.45 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。整体来看不同处理下的日均  $T_r$  表现为 DI-15 > DI-20 > DI-25 > DI-10 > DI-30 > DI-35,日均  $T_r$  随着灌水下限的降低呈现先上升后下降的趋势。



2.2.2 不同处理对玉米 SPAD 值的影响 整理不同水分处理下玉米各生长期 SPAD 值数据并绘制变化图(图 4)。由图 4 可知,不同处理下玉米 SPAD 值随着时间的推移呈现先快速上升后缓慢增加的趋势,在出苗后 69 d DI-10 处理下 SPAD 值最大,为 40.96,其次是 DI-35 处理,为 39.62,DI-30 处理下最小,仅为 33.46。出苗 79 d 与 69 d 相比,DI-15 处理增长最快,平均每天增加 1.52,其次是 DI-35,日均增加量为 1.43,DI-20 日均增加最少,仅为 0.96,表明 DI-15 处理有利于叶片叶绿素的合成。出苗 79 d 到 89 d,不同处理玉米 SPAD 值平均增加了 4.66,而在 89 d 到 100 d,SPAD 值增加量进一步下降,不同处理平均增加 1.90。

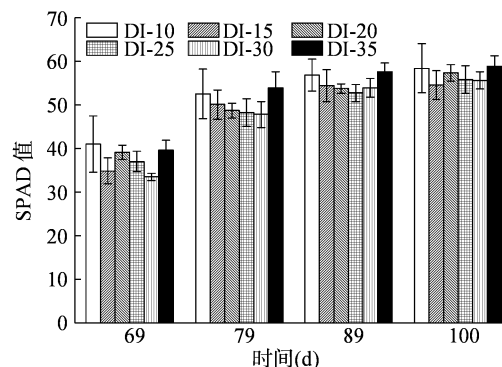


图4 不同水分处理下玉米 SPAD 值变化

### 2.3 不同水分处理对玉米地上部位生物量的影响

整理不同水分处理下玉米地上部位(茎、叶、

穗)干物质累积数据并绘制图形(图 5)。玉米茎干重随着时间的推移呈现先上升后下降最后趋于稳定的趋势,在灌浆期各处理茎干重达到最大值,其中 DI-15 处理干物质累积量最多,为 461.28 g,DI-20 干物质累积量最少,为 362.14 g。灌浆期与

V10 期相比,不同处理茎干重平均增加了 227.45 g,其中 DI-15 增加最多,为 323.59 g。在进入乳熟期之后,茎干物质迅速下降,不同处理平均下降了 261.98 g。随着时间的推移,叶干重呈现先上升后下降的趋势。在抽穗期,DI-10 处理叶干重最大,为 116.42 g,DI-35 最小为 78.19 g。在灌浆期,DI-15 处理叶干重最大,为 118.23 g;除 DI-10 出来外,其余各处理相较于上一生育期叶干重均有所增加,其中 DI-35 增加最多,为 31.55 g,DI-30 增加最少,为 2.71 g。穗干重随着时间的推移呈现逐

渐上升的趋势,在灌浆期不同处理下穗干重表现 DI-10 > DI-20 > DI-25 > DI-30 > DI-15 > DI-35,在乳熟期,DI-15 处理穗干重最大,相较于上一生育期增加了 102.25 g,DI-35 最小,穗干重仅为 164.63 g。在蜡熟期,各处理穗干重相较于乳熟期平均增加 29.36 g。分析认为在进入乳熟期后,籽粒发育需要大量碳水化合物(如葡萄糖、蔗糖)和氮、磷等矿质元素来合成淀粉和蛋白质,从而促使积累在茎和叶片中的碳水化合物向籽粒中转移,导致茎和叶片干重下降。

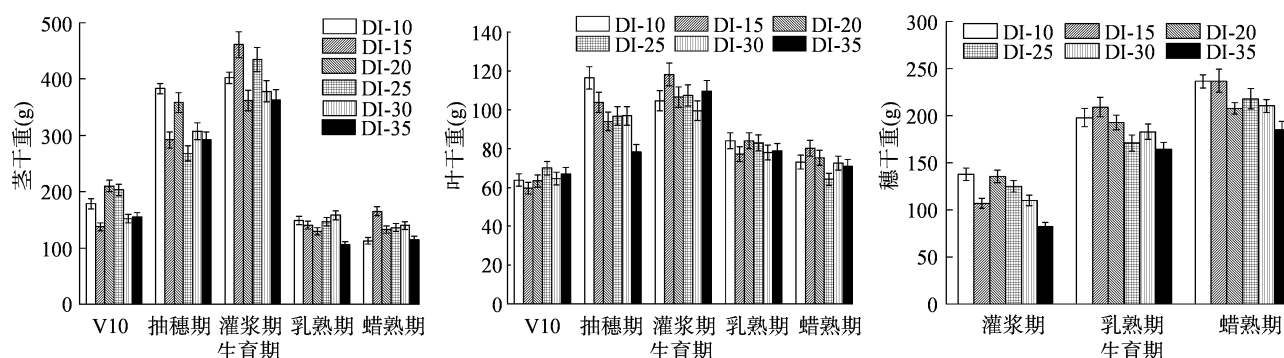


图5 不同水分处理对玉米地上上部干物质累积的影响

#### 2.4 不同水分处理对玉米产量及灌溉水利用效率的影响

由表 5 可知,玉米产量随着灌水下限的降低呈现逐渐下降的趋势,其中 DI-10 处理下产量最高,达 20.17 t/hm<sup>2</sup>,其次是 DI-15 处理,为 19.30 t/hm<sup>2</sup>,DI-35 处理下玉米产量最低,仅为 13.24 t/hm<sup>2</sup>,与 DI-10 处理相比降低了 34.36%。不同处理下玉米千粒重和穗粒数随着灌水下限的降低变化趋势与玉米产量相似,均呈现逐渐下降的趋势,DI-10 处理下千粒重和穗粒数最大,分别为 311.82 g 和 725 粒/穗,与 DI-10 相比,DI-35 处理的千粒重和穗粒数分别降低了 23.75% 和 25.10%。表明过低的灌水下限不利于玉米产量的形成。

表 5 不同处理下玉米产量指标

处理	产量 (t/hm <sup>2</sup> )	千粒重 (g)	穗粒数 (粒/穗)
DI-10	20.17 ± 0.17a	311.82 ± 12.77a	725 ± 44.56a
DI-15	19.30 ± 0.65ab	307.95 ± 17.35ab	629 ± 35.77ab
DI-20	16.14 ± 0.54ab	301.26 ± 12.84ab	626 ± 29.78ab
DI-25	14.80 ± 0.97ab	288.19 ± 31.70ab	619 ± 24.01ab
DI-30	14.23 ± 0.86b	252.56 ± 29.72ab	602 ± 13.10ab
DI-35	13.24 ± 0.58b	237.75 ± 56.90b	543 ± 37.32b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P < 0.05)。

整理不同处理下玉米灌溉水利用效率(IWUE)并绘图,由图 6 可知,不同水分处理下玉米 IWUE 随着灌水下限的降低,呈现逐渐下降的趋势,其中 DI-35 最小,为 2.03 kg/m<sup>3</sup>,较 DI-10 和 DI-15 分别低 14.71% 和 11.35%。这是由于过低的灌水下限导致单次灌水量较大,但玉米利用的水分有限,从而导致过多水分蒸发或者渗漏,降低了 IWUE。

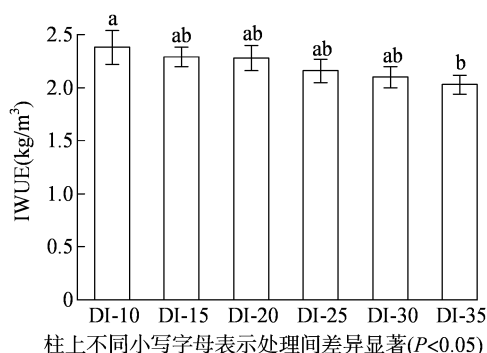


图6 不同处理下玉米灌溉水利用系数

#### 2.5 基于熵权 TOPSIS 模型玉米多目标综合评价

采用熵权 TOPSIS 方法,以株高、茎粗、穗位高、雄穗长、地上部位干重、产量及灌溉水利用效率作为综合评价指标,优化确定宁夏中部地区玉米灌溉制度。株高、茎粗、穗位高、雄穗长、叶面积指数、净光合速率、蒸腾速率、叶绿素、茎干物质、叶干物质、

穗干物质、产量、千粒重、穗粒数以及灌溉水利用效率的指标权重分别为 7.91%、5.06%、5.59%、7.51%、6.98%、6.04%、6.01%、6.44%、11.60%、5.98%、4.96%、8.30%、5.77%、5.57% 和 6.27%。各处理相对贴适度与评价结果如表 6 所示,根据贴适度排名,各处理优劣程度为 DI-15 > DI-10 > DI-20 > DI-25 > DI-35 > DI-30, DI-15 处理相对较优,推荐作为宁夏中部地区玉米灌溉适宜的水分控制下限。

表 6 不同水分处理的贴适度与评价结果

处理	正理想解距离 $d^+$	负理想解距离 $d^-$	相对贴适度 $C_j$	排名
DI-10	0.088	0.133	0.600	2
DI-15	0.070	0.155	0.688	1
DI-20	0.117	0.115	0.494	3
DI-25	0.117	0.093	0.443	4
DI-30	0.166	0.034	0.170	6
DI-35	0.157	0.079	0.334	5

### 3 讨论

植物的形态指标可直观地反映植物的生长状况,其中株高和茎粗是作物生长状况对水分响应的重要农业指标<sup>[19-20]</sup>。本研究发现不同水分处理下株高、茎粗及叶面积指数在苗期差异不大,这与曾雪梅等的研究结果<sup>[21]</sup>相似,这是由于在苗期玉米对水分需求不大,根区土壤水分供应充足,玉米长势受到明显抑制。从全生育期来看,DI-35 处理下茎粗最大,达到 28.36 mm,这是由于较低的灌水下限导致根区土壤水分含量降低,促使玉米根系发育,减缓植株生长,从而促进茎秆变粗达到壮苗效果。玉米 LAI 随着时间的推移,呈现先上升后下降的趋势,在 V10 期到乳熟期,DI-20 处理下 LAI 大于其他处理,表明该处理有利于玉米叶片的发育,所有处理下玉米 LAI 在抽穗或灌浆期达到最大,随后 LAI 逐渐下降,这是由于在灌浆期之后,玉米生长以生殖生长为主。马士萌等研究也发现,玉米 LAI 在灌浆期之后逐渐降低<sup>[22-23]</sup>。光合作用是指植物叶片通过太阳光的照射来吸收水分产生有机物,并释放氧气的生理过程<sup>[24-25]</sup>。本研究发现,不同处理下日均  $T_r$  随着灌水下限的降低,呈现先上升后下降的趋势,这与吴梅等的研究结论<sup>[26]</sup>相似。DI-15 处理下光合作用较高,其中日均  $P_n$  为 23.74  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,日均  $T_r$  为 4.45  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,这是由于灌水下限低导致植物根部由于干旱胁迫产生大量脱落酸

(abscisic acid, ABA),根系生长和活动受到抑制,根系水力导度降低,韧皮部运输减弱导致叶中 ABA 积累,致使气孔关闭<sup>[27-28]</sup>,从而降低作物光合作用。玉米茎叶干重在灌浆期达到最大,其中 DI-15 茎干重最大,为 461.28 g,随后玉米茎叶干物质累积量随着时间推移逐渐下降,这与张旭婷等的研究结论<sup>[29]</sup>相似。这是由于在生长前期,玉米茎秆内部会积累大量的非结构性碳水化合物,在灌浆期之后,玉米主要以生殖生长为主,植株通过分解茎秆中储存物质,将其转化为可溶性糖转运至籽粒<sup>[30-31]</sup>。千粒重及穗粒数是构成玉米产量的重要因素<sup>[32]</sup>,本研究发现产量、千粒重及穗粒数与灌水下限呈正相关,这与张雪晨等的研究结论<sup>[33-34]</sup>相似。产量、千粒重及穗粒数均为 DI-10 处理最大,分别为 20.17  $\text{t}/\text{hm}^2$ 、311.82 g 和 725 粒/穗,高灌水下限条件下的产量显著高于低灌水下限。节水农业应当寻找产量和水分利用效率的最佳结合<sup>[35-36]</sup>。本研究发现,灌溉水利用效率随着灌水下限的下降而下降,DI-10 处理下灌溉水利用效率最大,为 2.38  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,这是由于灌水下限过低,导致单次灌水量过大,而过量灌溉容易导致淋洗作物根部硝酸盐,造成作物水分与养分的有效吸收与植株根部早衰的后果,甚至降低灌溉水利用效率<sup>[37]</sup>。

### 4 结论

不同处理苗期玉米株高、茎粗差异不大,从全生育期来看 DI-35 处理下株高和茎粗均最大,其中株高为 302.67 cm,茎粗为 28.36 mm。DI-25 处理株高最小,为 279.00 cm; DI-30 茎粗最小,为 24.51 mm。玉米穗位高对水分亏缺敏感,不同处理下穗位高差异较大。不同处理下玉米茎、叶干物质随着时间推移先上升后下降,在灌浆期干物质累积量达到最大,其中 DI-15 处理茎、叶干重最大,分别为 461.28、118.23 g。

玉米日均净光合速率表现为 DI-15 > DI-20 > DI-10 > DI-25 > DI-35 > DI-30; 日均蒸腾速率均随着灌水下限的降低呈现先上升后下降的趋势,具体表现为 DI-15 > DI-20 > DI-25 > DI-10 > DI-30 > DI-35。产量、千粒重、穗粒数及 IWUE 均随着灌水下限的降低而降低,DI-10 处理下产量最高,为 20.17  $\text{t}/\text{hm}^2$ 。

利用熵权 TOPSIS 综合评价各灌水方案,DI-15 处理最优,则宁夏玉米膜下滴灌适宜的灌水下限为

- 15 kPa。

#### 参考文献:

- [1] Li M, Guo P. A coupled random fuzzy two-stage programming model for crop area optimization; a case study of the middle Heihe River Basin, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 155: 53-66.
- [2] Streimikis J, Baležentis T. Agricultural sustainability assessment framework integrating sustainable development goals and interlinked priorities of environmental, climate and agriculture policies [J]. *Sustainable Development*, 2020, 28(6): 1702-1712.
- [3] Gerland P, Raftery A E, Sevčiková H, et al. World population stabilization unlikely this century [J]. *Science*, 2014, 346(6206): 234-237.
- [4] 李智, 尹娟, 周乾, 等. 宁夏黄土高原区滴灌青贮玉米灌溉参数试验研究[J]. *节水灌溉*, 2017(1): 5-8.
- [5] 关雅静, 张茜, 李新, 等. 宁夏中部干旱带玉米高产、高效生产存在问题、研究现状及展望[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(13): 22-31.
- [6] Gerçek S, Demirkaya M, Işık D. Water pillow irrigation versus drip irrigation with regard to growth and yield of tomato grown under greenhouse conditions in a semi-arid region [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 180: 172-177.
- [7] 李嘉兴. 灌溉模式和施氮量对小麦田土壤碳排放的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024: 20-23.
- [8] Wang F J, Wang Z H, Zhang J Z, et al. Combined effect of different amounts of irrigation and mulch films on physiological indexes and yield of drip-irrigated maize (*Zea mays* L.) [J]. *Water*, 2019, 11(3): 472.
- [9] Liu Y Q, Gu J, Ma N N, et al. Optimizing spring maize growth and yield through balanced irrigation and nitrogen application: a TOPSIS method approach [J]. *Agronomy*, 2024, 14(8): 1825.
- [10] 李淦, 高丽丽, 张巨松. 适宜膜下滴灌频次提高北疆机采棉光合能力及产量[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 178-185.
- [11] Xu C, Zhao H X, Li Q, et al. Study on dry matter accumulation and leaf response to light and CO<sub>2</sub> of maize under irrigation quota [J]. *Cereal Research Communications*, 2020, 48(2): 173-178.
- [12] 陈梦茹, 邢英英, 张帆, 等. 不同灌水定额下缓释氮肥与尿素混掺对玉米生长和产量及水肥利用效率的影响[J]. *西北农业学报*, 2024, 33(7): 1235-1248.
- [13] 赵经华, 袁如芯, 王金茂, 等. 不同灌水处理对春玉米土壤水分、耗水特征及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(5): 1-7, 15.
- [14] 常梅, 周青云, 尹林萍. 不同灌溉方式和灌水定额对夏玉米生长的影响及 AquaCrop 模型的适应性研究[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(3): 32-39.
- [15] 梁雪, 薛冰, 李芳芳, 等. 基于土壤水分下限和作物耗水强度优化玉米阶段灌水量[J]. *灌溉排水学报*, 2025, 44(1): 17-24.
- [16] 李若帆, 马娟娟, 孙西欢, 等. 不同水肥管理模式下糯玉米水氮利用及熵权 TOPSIS 综合评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 111-120.
- [17] 李池, 陈刚, 梁国成, 等. 基于熵权-TOPSIS 的滴灌春玉米灌水定额研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(2): 216-224.
- [18] 张芮, 李红霞, 高彦婷, 等. 基于熵权-TOPSIS 模型的黄土高原半干旱区玉米覆膜类型综合评价[J]. *甘肃农业大学学报*, 2024, 59(1): 74-85.
- [19] Zheng L L, Hu Y F, Yang T Z, et al. A root cap-localized NAC transcription factor controls root halotropic response to salt stress in *Arabidopsis* [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 2061.
- [20] 赵方洋, 曹红霞, 马丽娜, 等. 补充灌溉对黄土高原谷子生长、产量及水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(5): 44-53, 84.
- [21] 曾雪梅, 白清俊, 马丽娜, 等. 陕北榆林滴灌春玉米不同生育期适宜土壤水分控制界限研究[J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(S1): 77-84.
- [22] 马士萌, 佟玲, 王素芬, 等. 灌水技术参数对覆膜制种玉米生长与蒸腾耗水的影响[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(9): 396-406, 438.
- [23] 盛统民, 张胜江, 肖兵. 磁化水灌溉对土壤水盐分布和春玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 289-295.
- [24] 邢红爽, 乌佳美, 陈健, 等. 植物光合作用限制因素与植被生产力研究进展[J]. *生态学报*, 2023, 43(12): 5186-5199.
- [25] 张家亮, 杨升, 唐珠, 等. 养猪废水中抗生素和铜对潜流人工湿地土壤呼吸和芦苇光合作用的影响[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(7): 1803-1811.
- [26] 吴梅, 张金珠, 王振华, 等. 水气互作对膜下滴灌玉米生理生长及产量的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2024, 26(8): 189-200.
- [27] 法晓彤, 孟庆好, 王琛, 等. 水稻根系形态生理对干湿交替灌溉方式的响应研究进展[J]. *作物杂志*, 2024(6): 1-8.
- [28] 秦莉, 马庆, 路小铎. 玉米萌发期耐盐性全基因组关联分析与耐盐候选基因鉴定[J]. *玉米科学*, 2025, 33(2): 21-27.
- [29] 张旭婷, 张海龙, 张佳倩, 等. 叶面氮肥不同施用量对玉米干物质积累分配与转运的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2025, 56(1): 9-17.
- [30] 翟娟, 薛军, 张园梦, 等. 水肥一体化条件下施氮量对密植春玉米茎秆抗倒伏性状的影响[J]. *玉米科学*, 2021, 29(5): 137-144.
- [31] 刘晓庆. 玉米籽粒响应乙烯利处理的生理及分子机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 30-37.
- [32] 李欢, 鲁溢超, 王良, 等. 不同氮磷配比对夏玉米花后光合特性和产量的影响[J]. *玉米科学*, 2023, 31(3): 152-159.
- [33] 张雪晨, 李越, 陈志君, 等. 膜下滴灌土壤水盐与玉米产量对节水控盐灌溉模式响应的模拟[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(增刊1): 47-58.
- [34] 丁运韬, 程煜, 张体彬, 等. 滴灌灌水下限对夹砂层农田土壤水盐分布和玉米生长的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(3): 733-744.
- [35] Feng S W, Ding W H, Shi C C, et al. Optimizing the spatial distribution of roots by supplemental irrigation to improve grain yield and water use efficiency of wheat in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 275: 107989.
- [36] 刁爱琳, 侯晓雯, 李雨佳, 等. 玉米秸秆对水分和养分的吸收效率研究[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(19): 266-271.
- [37] Agami R A, Alamri S A M, Abd El-Mageed T A, et al. Role of exogenous nitrogen supply in alleviating the deficit irrigation stress in wheat plants [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 210: 261-270.