

# 基于熵权 - TOPSIS 的滴灌春玉米灌水定额研究

李池<sup>1,2</sup>, 陈刚<sup>3</sup>, 梁国成<sup>4</sup>, 杨继革<sup>3</sup>, 曹伟<sup>1,2</sup>, 赵经华<sup>1,2</sup>, 马明杰<sup>1,2</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052; 3. 克拉玛依绿成农业开发有限责任公司, 新疆克拉玛依 834000; 4. 乌鲁木齐经济技术开发区(头屯河区)建设局, 新疆乌鲁木齐 830026)

**摘要:** 为准确得到适宜于北疆地区滴灌春玉米的灌水定额, 设置了  $W_1$  (225  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )、 $W_2$  (300  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )、 $W_3$  (375  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )、 $W_4$  (450  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )、 $W_5$  (525  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )、 $W_6$  (600  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ) 6 个水平的灌水定额, 研究灌水定额对春玉米生长发育和产量的影响。选取部分生长指标、产量指标、节水指标作为评价指标, 结合耗水规律和指标显著性进行分析, 并采用熵权 - TOPSIS 综合评价法, 优选适宜于北疆地区滴灌春玉米的灌水定额。结果表明: 滴灌春玉米的关键生育期为抽雄散粉期, 该生育期最优灌水定额为 525  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ; 耗水量和耗水强度的增长速率在灌水定额大于 525  $\text{m}^3/\text{hm}^2$  后明显下降; 通过各指标显著性分析得出, 灌水定额为 450 ~ 525  $\text{m}^3/\text{hm}^2$  时, 较适宜北疆春玉米的生长; 熵权 - TOPSIS 综合评价结果显示, 灌水定额为 525  $\text{m}^3/\text{hm}^2$  时, 贴近期最高, 评价结果最好, 此时玉米产量为 16 178.71  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。综上所述, 北疆滴灌春玉米的最优灌水定额为 525  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

**关键词:** 滴灌; 玉米灌水定额; 熵权 - TOPSIS; 综合评价

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)02-0216-09

## Irrigation quota of drip-irrigated spring maize based on entropy weight - TOPSIS

LI Chi<sup>1,2</sup>, CHEN Gang<sup>3</sup>, LIANG Guocheng<sup>4</sup>, YANG Jige<sup>3</sup>, CAO Wei<sup>1,2</sup>, ZHAO Jinghua<sup>1,2</sup>, MA Mingjie<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China; 3. Karamay Lücheng Agricultural Development Co., Ltd., Karamay 834000, China; 4. Construction Bureau of Urumqi Economic and Technological Development Zone (Toutunhe District), Urumqi 830026, China)

**Abstract:** In order to obtain an accurate irrigation quota suitable for drip-irrigated spring maize in the northern Xinjiang, six levels of irrigation quotas of  $W_1$  (225  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ),  $W_2$  (300  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ),  $W_3$  (375  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ),  $W_4$  (450  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ),  $W_5$  (525  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ) and  $W_6$  (600  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ) were set to study the effect of irrigation quotas on growth and yield of spring maize. Some growth, yield and water-saving indices were selected as evaluation indices to analyze the law of water consumption and significance of different indices, then the entropy weight - TOPSIS comprehensive evaluation method was used to optimize the irrigation quota suitable for drip-irrigated spring maize in the northern Xinjiang. The results show that the key fertility period for drip-irrigated spring maize is the tasseling pollen period, and the optimal irrigation quota for this period is 525  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ; the growth rate of water consumption and intensity of water consumption decreases significantly after the irrigation quota reaches 525  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ . According to the significance analysis of each index, the irrigation quota of 450 - 525  $\text{m}^3/\text{hm}^2$  is more suitable for the growth of spring maize in the northern Xinjiang. The results of the comprehensive entropy weighted - TOPSIS evaluation show that the highest closeness and the best evaluation results can be achieved when the irrigation quota is 525  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ , at which time the maize yield is about 16, 178.71  $\text{kg}/\text{hm}^2$ . Therefore, we recommend 525  $\text{m}^3/\text{hm}^2$  as the optimal irrigation quota for drip-irrigated spring maize in the northern Xinjiang.

收稿日期: 2022-08-16; 修回日期: 2022-11-11

基金项目: 新疆维吾尔自治区十四五重大专项项目(2020A01003-4)

作者简介: 李池(1995—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 研究方向为灌溉节水理论。

通讯作者: 赵经华(1979—), 男, 新疆奇台人, 教授, 博士生导师, 主要研究节水灌溉理论和作物高效用水。

**Key words:** drip irrigation; irrigation quota of corn; entropy weight-TOPSIS; comprehensive evaluation

## 1 研究背景

新疆维吾尔自治区(以下简称新疆)地处我国的西北边陲,是典型的温带大陆性气候,年降雨量较少,蒸发量较大,农作物生长主要依赖灌溉,为荒漠绿洲型农业<sup>[1]</sup>。针对新疆水资源短缺的形势,在国家“十三五”期间,全疆范围内以滴灌为基础的高效节水灌溉技术得到了快速发展<sup>[2]</sup>。滴灌作为一种封闭管道式输水的灌溉方式,没有输水损失,几乎没有深层渗漏,田间蒸发损失低,可以很好地与施肥相结合<sup>[3]</sup>。节水和水肥耦合的优势使得滴灌成为一种主要的灌溉方式<sup>[4]</sup>。新疆在农作物的种植方面有着得天独厚的地理条件,但农业用水效率低下,制约了新疆农业的发展<sup>[5-6]</sup>。

灌水定额作为影响农业用水量和作物产量的主要因素之一,是新疆农业产业节水增产研究的重点。国内外学者在该方面进行了大量的研究。研究表明,灌水量对春玉米的产量、水分利用效率和灌溉水利用效率影响显著<sup>[7]</sup>;随着灌水定额的增加,玉米的产量呈先增加后降低的趋势<sup>[8]</sup>;灌水量过大或过小会影响作物对于氮素的吸收,从而影响其产量<sup>[9]</sup>。近年来,随着新疆滴灌技术的快速发展,越来越多的学者通过田间试验对玉米的灌水定额与其生长、产量、水分利用效率等综合指标的响应关系进行研究<sup>[10-11]</sup>,而地理位置、气候等因素的变化,也会影响在玉米滴灌方面的试验结果,使得试验结果在定量上存在一定的差异,因此有必要采用综合性的评价方法来研究灌水定额对玉米各项指标的影响<sup>[12]</sup>。

TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) 分析方法与其他综合分析方法相比,更加符合实际属性关系<sup>[13-14]</sup>。营毅等<sup>[15]</sup>利用 TOPSIS 综合评价法对番茄的不同灌溉方式进行了优选,得出交替地下灌溉的灌溉方式最优;李泽东等<sup>[16]</sup>将熵权-TOPSIS 评价法运用到植物抗性综合性评价中,取得了良好的评价效果。本研究从灌水定额对玉米的生长指标、产量指标、节水指标的影响入手,结合新疆北部(以下简称北疆)克拉玛依地区的气候环境,采取定灌水周期、变灌水定额的试验方法,通过采集大田玉米生育期的生长指标及产量数据,分析各个采集指标对灌水定额的响应关系,并采用熵权-TOPSIS 综合评价法对玉米的各项指标进行综合性评价,旨在优选出适宜于北疆克拉玛依地区的滴灌玉米灌水定额,为该地区滴灌玉米

的生产提供技术参考。

## 2 试验与研究方法

### 2.1 试验区概况

试验区位于新疆克拉玛依市东南部9 km 处的农业综合开发区内,地理坐标为东经 84°55'28",北纬 45°27'30",海拔高度为 600~800 m。该区域西北抵准噶尔盆地西部界山加依尔山前山脚,南依天山北麓,东临古尔班通古特沙漠,是准噶尔盆地西北边缘的湖积平原,地势低平,耕地面积约为  $1.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,为克拉玛依市主要农作物种植区,也是“引额济克”引水工程国家级农业综合开发区。试验区属于典型的大陆性干旱气候,灌溉水源主要依靠克拉玛依市西郊水库的地表水,输水方式为自压管道式输水。

该区域昼夜温差较大,多年平均气温为 8.1 °C;降雨主要集中在夏季,常呈阵发性、短历时降雨,多年平均降水量为 101.1 mm,多年平均蒸发量较大,为 3 545.2 mm(20 cm 口径蒸发皿),地下水位在 2~4 m;年积温较高,全年日均稳定大于 0 °C 的年积温为 4 478 °C;年平均无霜期为 197~268 d;多年平均风速为 3.7 m/s。2021 年玉米生育期内(6 月 5 日—10 月 1 日)试验区降雨量及平均气温见图 1。

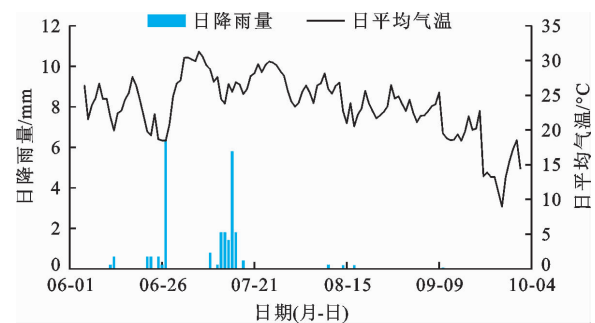


图1 2021年玉米生育期内试验区日降雨量及日平均气温

试验区土壤 0~40 cm 深度多为壤土,40~100 cm 深度多为轻砂土,质地较轻,透水性较好。0~100 cm 土壤平均干容重为  $1.3964 \text{ g/cm}^3$ ,田间持水量为 28.66%,土壤肥力中等,不同土层土壤酸碱度及微量元素含量检测结果见表 1。试验区周围为开阔农田,灌溉水利设施配套齐全,土壤均匀性良好。

### 2.2 试验方案及指标测定

2.2.1 试验布置与处理方案 试验于 2021 年在试验区内完成,选用太玉 339 作为供试玉米品种,试验区呈方形布置,长度为 40.0 m,宽度为 26.4 m,种植模式为无膜一管两行,窄行间距为 40 cm,宽行间距

为70 cm,滴头流量为2.8 L/h。在预定位置埋设土壤水分探管,采用土壤水分廓线仪(Diviner2000)监

测土壤水分变化。玉米种植模式及水分探管具体布置见图2。

表1 试验区土壤酸碱度及微量元素含量

| 土壤深度/<br>cm | pH   | 有机质/<br>(g · kg <sup>-1</sup> ) | 全氮/<br>(g · kg <sup>-1</sup> ) | 全磷/<br>(g · kg <sup>-1</sup> ) | 全钾/<br>(g · kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮/<br>(mg · kg <sup>-1</sup> ) | 速效磷/<br>(mg · kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾/<br>(mg · kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------|------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0~20        | 7.13 | 11.852                          | 0.409                          | 0.878                          | 21.160                         | 29.180                           | 11.847                           | 103.869                          |
| 20~40       | 7.11 | 10.912                          | 0.533                          | 0.827                          | 16.936                         | 30.106                           | 10.605                           | 106.523                          |
| 40~60       | 7.17 | 8.075                           | 0.466                          | 0.785                          | 16.727                         | 25.485                           | 8.034                            | 80.112                           |

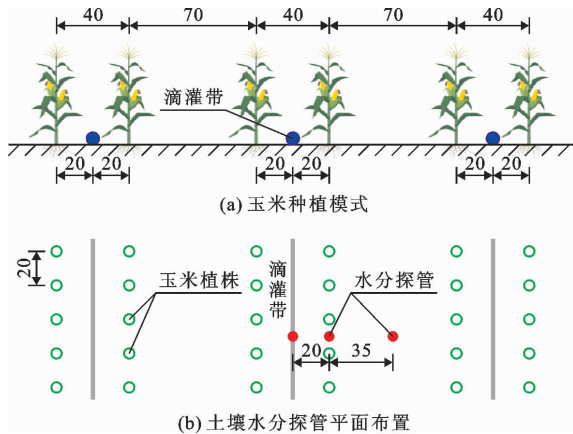


图2 玉米种植模式及 Diviner2000 水分探管布置(单位:cm)

试验共设置6个水平的处理,分别为灌水定额(225、300、375、450、525、600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>),灌水周期设置为7 d,每个试验小区设置3个重复,另设一行作为保护行,以免水分交叉,影响试验结果。每个试验小区面积为0.017 6 hm<sup>2</sup>,试验区总面积为0.105 6 hm<sup>2</sup>。除统一进行出苗水灌溉外,其余均按照试验设计方案进行灌溉,苗期后灌水处理设计方案见表2。氮肥施用量为600 kg/hm<sup>2</sup>。玉米生育期划分如下:5月23日—5月29日为苗期;5月30日—6月14日为拔节期;6月15日—7月10日为喇叭口期;7月11日—7月31日为抽雄散粉期;8月1日—8月15日为乳熟期;8月16日—9月15日为完熟期。

表2 苗期后灌水处理试验设计方案

| 处理<br>编号       | 灌水周<br>期/d | 单次灌水定额/<br>(m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> ) | 灌水<br>次数 | 总灌水定额/<br>(m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> ) |
|----------------|------------|---|----------|--|
| W <sub>1</sub> | 7          | 225   | 10       | 2250   |
| W <sub>2</sub> | 7          | 300   | 10       | 3000   |
| W <sub>3</sub> | 7          | 375   | 10       | 3750   |
| W <sub>4</sub> | 7          | 450   | 10       | 4500   |
| W <sub>5</sub> | 7          | 525   | 10       | 5250   |
| W <sub>6</sub> | 7          | 600   | 10       | 6000   |

## 2.2.2 指标测定

(1)土壤含水率:利用土壤水分廓线仪及定点布设的土壤水分探管监测土壤水分变化,于灌水前及灌水后24 h各进行一次测量。

(2)株高:在每个生育期内,对各个试验小区内做标记的5株植株使用卷尺进行株高测定,前期株高以地面至玉米主茎顶端计,抽雄期及以后以地面至雄蕊顶端计。

(3)叶绿素含量:在试验初期各个小区各个重复内选取生长状况正常的5株植株进行标记,在每个生育期内对这5株玉米植株的完全展开叶使用SPAD(soil and plant analyzer development)仪进行叶绿素的采集监测,每株测量3~5次取平均值。

(4)秃尖长:使用游标卡尺测量从玉米果实顶端到完整颗粒的距离。

(5)千粒重:对3个重复的样品烤种、脱粒后进行混合,充分混合后,取3次1 000粒玉米种子进行称重,取其平均值。

(6)穗粒数:在每个重复内选取3株植株,取其果实,根据籽粒排数和列数,估算穗粒数,取平均值。

(7)产量测定:对每个小区的每个重复前部、中部和后部的相同位置各取1 m<sup>2</sup>,进行采样,烤种,脱粒,晾晒至恒重,统计每穗粒数、千粒重,并折合成单位面积产量<sup>[17]</sup>。

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 耗水量计算 计算土壤贮水量:

$$H = \sum_{i=1}^n 10\theta_i h_i \quad (1)$$

式中:  $H$  为土壤贮水量,mm;  $\theta_i$  为第  $i$  层土壤体积含水率,%;  $h_i$  为第  $i$  层土壤厚度,cm;  $n$  为土壤层数,每20 cm为一层。

玉米耗水量的计算采用土壤水分平衡公式:

$$ET = \Delta W + P + I + K \quad (2)$$

式中:  $ET$  为作物耗水量,mm;  $\Delta W$  为灌溉始末土壤

剖面水分含量差值(按 100 cm 计),mm;  $P$  为玉米生育期内的降雨量,mm;  $I$  为生育期灌溉量,mm,旱作时  $I = 0$ ;  $K$  为时段内地下水补给量,mm。

利用采集到的土壤水分数据进行玉米各生育期耗水量的计算。

2.3.2 水分利用效率及灌溉水利用效率计算 水分利用效率  $WUE$ (water use efficiency) 和灌溉水利用效率  $IWUE$ (irrigation water use efficiency) 的计算公式如下:

$$WUE = Y/(a \cdot ET) \quad (3)$$

$$IWUE = Y/(a \cdot I) \quad (4)$$

式中: $WUE$  为作物的水分利用效率,kg/m<sup>3</sup>;  $IWUE$  为作物的灌溉水利用效率,kg/m<sup>3</sup>;  $Y$  为作物的产量,kg/hm<sup>2</sup>;  $a$  为单位换算系数,此式中  $a = 10$ 。

2.3.3 熵权 - TOPSIS 计算

(1) 构建评价矩阵及矩阵标准化

$$X_{ij} = (x_{ij})_{n \times m} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad (5)$$

玉米灌水定额原始矩阵设为  $X_{ij}$ ,  $x_{ij}$  为第  $i$  个评价指标所对应的第  $j$  个处理的原始值;  $i = 1, 2, \dots, n$  ( $n$  为评价指标数),  $j = 1, 2, \dots, m$  ( $m$  为处理数)。

对评价矩阵进行标准化处理,以减少量纲系数等带来的误差,正向指标越大表示该指标对灌水处理的响应越强,负向指标则与之相反<sup>[18]</sup>。本研究中,除秃尖长、耗水量为负向指标外,其余均为正向指标,各评价指标的标准化值  $x'_{ij}$  分别采用公式(6)、(7)进行计算。

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (6)$$

$$\text{负向指标: } x'_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (7)$$

(2) 熵权法计算权重

与传统方法相比,熵权加权的数据处理方法有较强的客观性,可以减少主观性因素带来的误差,保证评价结果的准确度<sup>[19]</sup>。

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{j=1}^m x'_{ij}} \quad (8)$$

$$e_i = \frac{\sum_{j=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}}{\ln n} \quad (9)$$

$$g_i = 1 - e_i \quad (10)$$

$$W_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (11)$$

利用公式(8) 计算标准化后的矩阵的特征比重  $P_{ij}$ ; 根据公式(9) 计算出各个指标的信息熵  $e_i$ ;  $g_i$  为指标的差异系数,最终得到  $i$  个指标的权重值  $W_i$ 。

(3) TOPSIS 模型计算。Hwang 等在 1981 年提出 TOPSIS 模型,该模型用于对有限方案的决策,是一种基于距离的综合评级方法<sup>[20]</sup>。TOPSIS 法的计算过程如下<sup>[21]</sup>:

$$V_{ij} = W_i \cdot X_{ij} \quad (12)$$

$$V^+ = (V_1^+, V_2^+, \dots, V_m^+) = \{\max V_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, n\} \quad (13)$$

$$V^- = (V_1^-, V_2^-, \dots, V_m^-) = \{\min V_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, n\} \quad (14)$$

$$S_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i^+ - V_{ij})^2} \quad (15)$$

$$S_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i^- - V_{ij})^2} \quad (16)$$

$$C_j = \frac{S_j^-}{S_j^+ + S_j^-} \quad (17)$$

通过权重和标准矩阵计算得到加权评价矩阵  $V_{ij}$ ; 对加权评价矩阵计算得到各个指标的理想解  $V^+$  (正理想解) 和  $V^-$  (负理想解); 计算每个处理到正理想解的距离  $S_j^+$  和到负理想解的距离  $S_j^-$ ; 再计算出各个处理的贴近度  $C_j$ , 贴近度越大, 则代表该处理的水平越好。

### 3 结果与分析

#### 3.1 灌水定额对耗水量和耗水强度的影响

图 3 是以灌水日期作为节点计算得到的玉米生长各阶段耗水强度变化; 图 4 为各试验处理下玉米的耗水量。

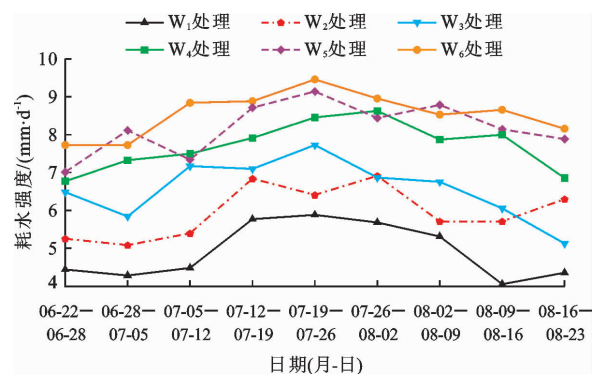


图 3 不同处理下的玉米生长各阶段耗水强度变化

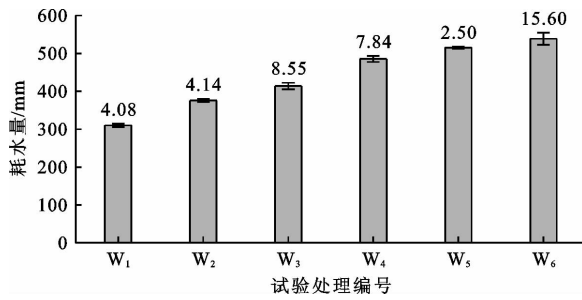


图4 不同试验处理下玉米的耗水量

由图3整体来看,玉米各阶段耗水强度呈先增大后减小的趋势,在7月12日—8月9日期间的耗水强度值较大,该时段玉米主要处于抽雄散粉期;耗水量随灌溉水量的增大逐渐增大。从图3、4中W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>处理的耗水量和耗水强度变化可以看出,当玉米灌水定额维持在中、低水平时,玉米全生育期的耗水量和耗水强度均随灌水定额的增大而增大;在灌水定额达到450 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>后(W<sub>4</sub>处理),耗水量和耗水强度随灌水定额增大的趋势减缓,在玉米喇叭口期,这一规律尤为明显。W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>处理喇叭口期的耗水强度呈递增阶梯型排列,而W<sub>4</sub>、W<sub>5</sub>、W<sub>6</sub>处理的耗水强度在喇叭口期差距较小,但耗水量和耗水强度仍随着灌水定额的增加而有所增大,这表明在玉米喇叭口期450 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>的灌水定额基本可以满足玉米正常的生长需求,继续增大灌水定额虽然有利于玉米的生长发育,但促进作用逐渐减小。在

玉米抽雄散粉期,W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>处理的耗水强度均随灌水定额的增加而明显增大,随着玉米植株由生长发育逐渐转变为生殖发育,植株的需水量增大,450 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>的灌水定额不足以支撑植株的生殖发育,使得W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>处理间差异明显,而W<sub>5</sub>与W<sub>6</sub>处理较为接近,表明了玉米在抽雄散粉期的需水量大于喇叭口期的需水量,约为525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。在玉米生育后期,从各个处理来看,较高的灌水定额会减缓耗水强度的减小速率,如W<sub>6</sub>处理的耗水强度仅减小了4.34%,说明较大的灌水定额会减缓玉米籽粒在成熟期的衰老速度,可能会导致玉米的收获时间延后。综上所述,全生育期中抽雄散粉期为滴灌春玉米的关键生育期,需为作物提供充足水分,玉米进入乳熟期需要适当控水来降低玉米籽粒的含水率。

### 3.2 不同处理间玉米生长指标、产量指标和节水指标的差异性分析

本文选取株高、叶绿素为生长指标;秃尖长、穗粒数、千粒重、产量为产量指标;耗水量、水分利用效率(WUE)、灌溉水利用效率(IWUE)为节水指标,使用每个试验小区所测得的3次重复数据进行单因素方差分析,探究各指标在处理间的显著性水平。使用SPSS (statistical product and service solutions) 数据分析软件,在alpha = 0.05,即置信区间为95%水平下,对灌水定额与选定指标进行显著性分析,分析结果见表3。

表3 不同处理下玉米各生长、产量和节水指标的显著性分析结果

| 处理编号           | 株高/cm                 | 叶绿素相对含量             | 秃尖长/cm             | 穗粒数                  | 千粒重/g               | 耗水量/mm              | 平均产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | WUE/(kg·m <sup>-3</sup> ) | IWUE/(kg·m <sup>-3</sup> ) |
|----------------|-----------------------|---------------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| W <sub>1</sub> | 154.33 <sup>c</sup>   | 39.51 <sup>d</sup>  | 29.35 <sup>a</sup> | 365.87 <sup>d</sup>  | 339.42 <sup>c</sup> | 310.00 <sup>f</sup> | 10499.22 <sup>d</sup>       | 3.387 <sup>a</sup>        | 4.667 <sup>a</sup>         |
| W <sub>2</sub> | 166.15 <sup>abc</sup> | 40.20 <sup>cd</sup> | 29.91 <sup>a</sup> | 428.80 <sup>c</sup>  | 375.37 <sup>b</sup> | 375.50 <sup>e</sup> | 12419.78 <sup>c</sup>       | 3.308 <sup>a</sup>        | 4.140 <sup>b</sup>         |
| W <sub>3</sub> | 164.64 <sup>abc</sup> | 42.20 <sup>bc</sup> | 32.23 <sup>a</sup> | 465.73 <sup>bc</sup> | 401.40 <sup>a</sup> | 414.00 <sup>d</sup> | 13743.33 <sup>bc</sup>      | 3.320 <sup>a</sup>        | 3.665 <sup>bc</sup>        |
| W <sub>4</sub> | 158.42 <sup>bc</sup>  | 44.10 <sup>ab</sup> | 31.05 <sup>a</sup> | 512.00 <sup>b</sup>  | 406.62 <sup>a</sup> | 485.30 <sup>c</sup> | 14943.30 <sup>ab</sup>      | 3.080 <sup>a</sup>        | 3.321 <sup>cd</sup>        |
| W <sub>5</sub> | 177.82 <sup>ab</sup>  | 44.26 <sup>ab</sup> | 28.31 <sup>a</sup> | 571.87 <sup>a</sup>  | 412.60 <sup>a</sup> | 515.10 <sup>b</sup> | 16178.71 <sup>a</sup>       | 3.141 <sup>a</sup>        | 3.082 <sup>d</sup>         |
| W <sub>6</sub> | 179.10 <sup>a</sup>   | 45.62 <sup>a</sup>  | 30.74 <sup>a</sup> | 479.20 <sup>bc</sup> | 403.81 <sup>a</sup> | 538.60 <sup>a</sup> | 13327.86 <sup>bc</sup>      | 2.475 <sup>b</sup>        | 2.221 <sup>e</sup>         |

注:同列数据后不同小写字母代表差异显著(P < 0.05)

表3的分析结果表明:W<sub>1</sub>、W<sub>3</sub>和W<sub>5</sub>处理两两之间在产量上均具有显著性差异(P < 0.05),W<sub>3</sub>处理平均产量为13 743.33 kg/hm<sup>2</sup>,比W<sub>1</sub>处理的产量增加了30.90%,W<sub>5</sub>处理的平均产量为16 178.71 kg/hm<sup>2</sup>,比W<sub>3</sub>处理的产量增加了17.72%,且在W<sub>5</sub>处理下,即灌水定额为525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时的产量达到最大值,当继续增大灌水定额后,W<sub>6</sub>处理的平均产量

为13 327.86 kg/hm<sup>2</sup>,比W<sub>5</sub>处理的产量减少了17.62%,灌水定额对玉米增产的正向影响减弱<sup>[22]</sup>。前人对于玉米干物质积累的研究表明,当玉米的灌溉水量较大时,会影响玉米的光合作用产出,减少有机物向籽粒的输送,使得产量下降<sup>[23]</sup>。

由表3还可以看出:株高随灌水定额的增加而增大,两者呈正相关关系,各相邻处理间差异均不显



著 ( $P < 0.05$ ), 本试验中株高随灌水定额持续增大, 无法判断是否达到最大值。叶绿素含量在各相邻处理间的差异也均不显著 ( $P < 0.05$ ), 叶绿素含量随灌水定额的增加而增大的现象不明显, 表明灌水定额对叶绿素含量的影响较小。秃尖长在各处理间差异均不显著 ( $P < 0.05$ ), 有研究表明, 玉米果穗秃尖是由基因型决定的, 与玉米品种的结实习性有关<sup>[24]</sup>, 受灌水定额影响较小。穗粒数与产量的显著性结果一致, 作为产量构成的指标之一, 穗粒数为数据的准确性提供了保障。千粒重在  $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_3$  处理中保持了较高的显著性 ( $P < 0.05$ ), 在灌水定额达到  $375 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  后, 再继续增加灌水定额, 千粒重随灌水定额先增大后减小的趋势与产量的变化情况一致, 但处理间的差异较小导致千粒重指标不显著 ( $P < 0.05$ ), 这与赵经华等<sup>[25]</sup>对玉米灌水定额的研究结果一致。 $WUE$  在  $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_3$  处理下维持在较高水平, 在灌水定额较低的情况下, 试验处理的施肥水平也会影响产量, 结合孟瑶等<sup>[26]</sup>对玉米施氮量的研究表明, 氮肥的合理供应会使得单位面积的产量升高, 这导致在较低灌水定额情况下产量下降不明显, 使得  $WUE$  值偏高, 且各处理间的  $WUE$  值差异不显著。在灌水定额增大到  $375 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  后,  $WUE$  值降低, 对于作物产量的提升作用下降, 造成水资源的浪费。 $IWUE$  随灌水定额的增加逐渐减小, 各相邻处理间差异不显著 ( $P < 0.05$ ), 间隔梯度间差异显著, 表明灌水定额对  $IWUE$  的影响较弱。通过上述各指标的综合性分析可得,  $W_4$  和  $W_5$  处理较优, 即灌水定额为  $450 \sim 525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  时, 适宜北疆春玉米的生长。

3.3 熵权-TOPSIS 综合评价分析

根据株高、叶绿素、秃尖长、穗粒数、千粒重、产

量、耗水量、 $WUE$ 、 $IWUE$  这 9 个指标, 利用公式(5)构建出了原始评价矩阵(矩阵数据同表 3); 利用公式(6)~(7)对原始评价矩阵进行标准化, 再用公式(8)~(11)对标准化后的指标信息熵及权重进行计算, 结果见表 4; 利用公式(12)~(17)对权重值和标准化后的评价矩阵进行计算得到的各个处理的正、负理想值及贴近度见表 5; 根据贴近度对标准化后的矩阵进行重新排序整理得到的最终熵权-TOPSIS 综合评价结果见表 6。

表 4 各指标信息熵及权重

| 指标    | 信息熵    | 权重     |
|-------|--------|--------|
| $I_1$ | 0.1879 | 0.1350 |
| $I_2$ | 0.1881 | 0.1351 |
| $I_3$ | 0.1506 | 0.1082 |
| $I_4$ | 0.1424 | 0.1023 |
| $I_5$ | 0.1157 | 0.0831 |
| $I_6$ | 0.2216 | 0.1592 |
| $I_7$ | 0.1382 | 0.0993 |
| $I_8$ | 0.1083 | 0.0778 |
| $I_9$ | 0.1391 | 0.0999 |

注:表中  $I_1 \sim I_9$  依次代替表 3 中的 9 个评价指标。

表 5 各处理正、负理想解及贴近度

| 处理编号  | 正理想值   | 负理想值   | 贴近度    |
|-------|--------|--------|--------|
| $W_1$ | 0.0436 | 0.0292 | 0.4013 |
| $W_2$ | 0.0312 | 0.0270 | 0.4643 |
| $W_3$ | 0.0253 | 0.0287 | 0.5317 |
| $W_4$ | 0.0199 | 0.0356 | 0.6413 |
| $W_5$ | 0.0194 | 0.0422 | 0.6851 |
| $W_6$ | 0.0316 | 0.0380 | 0.5465 |

表 6 不同处理下玉米各指标综合评价结果

| 处理编号  | 株高     | 叶绿素含量  | 秃尖长    | 穗粒数    | 千粒重    | 耗水量    | 产量     | $WUE$  | $IWUE$ | 贴近度    |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $W_5$ | 0.0587 | 0.0572 | 0.0413 | 0.0503 | 0.0358 | 0.0749 | 0.0481 | 0.0318 | 0.0349 | 0.6851 |
| $W_4$ | 0.0523 | 0.0570 | 0.0453 | 0.0450 | 0.0353 | 0.0706 | 0.0444 | 0.0312 | 0.0376 | 0.6413 |
| $W_6$ | 0.0591 | 0.0589 | 0.0448 | 0.0421 | 0.0351 | 0.0783 | 0.0396 | 0.0251 | 0.0252 | 0.5465 |
| $W_3$ | 0.0543 | 0.0545 | 0.0470 | 0.0410 | 0.0349 | 0.0602 | 0.0408 | 0.0336 | 0.0415 | 0.5317 |
| $W_2$ | 0.0548 | 0.0519 | 0.0436 | 0.0377 | 0.0326 | 0.0546 | 0.0369 | 0.0335 | 0.0469 | 0.4643 |
| $W_1$ | 0.0509 | 0.0510 | 0.0428 | 0.0322 | 0.0295 | 0.0451 | 0.0312 | 0.0343 | 0.0529 | 0.4013 |

表 4 中经熵权法加权后的权重值体现了各个指标对于综合评价结果的影响程度, 按权重值大小的各指标排序为耗水量 > 叶绿素含量 > 株高 > 秃尖

长 > 穗粒数 >  $IWUE$  > 产量 > 千粒重 >  $WUE$ , 利用信息熵的差异程度计算的权重值更加客观。由表 6 可知, 综合评价所得到的贴近度排序为  $W_5 > W_4 >$

$W_6 > W_3 > W_2 > W_1$ , 即  $W_5$  处理为综合评价最优的灌水处理, 因而确定灌水定额为  $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ; 产量指标的评价结果显示  $W_5 > W_4 > W_3 > W_6 > W_2 > W_1$ , 熵权法加权处理后,  $W_5$  的产量指标最高, 为 0.048 1, 与  $W_4$  较为接近, 且  $W_5$  与  $W_4$  处理的综合性评价结果也最为接近; 高灌水定额  $600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  的  $W_6$  处理在经综合性评价后, 评价值低于  $W_5$  和  $W_4$  处理, 表明过高的灌水定额对增产的促进作用降低, 熵权 - TOPSIS 的分析结果与显著性分析结果相比更接近理想值;  $W_6$  处理的株高评价值仍为最高, 说明灌水定额对于株高的促进作用较强, 且灌水定额的增大始终对株高有着持续的促进作用; 叶绿素含量指标评价值随灌水定额的增加, 呈线性上升趋势, 差异性较小, 与显著性分析结果一致; 秃尖长指标评价结果与灌水定额间未见明显的增长或降低的趋势, 印证了显著性评价的结果, 表明秃尖长基本不受灌水定额的影响; 穗粒数评价结果体现为  $W_5$  处理最优, 且在各处理中优势明显, 增大了各处理间的差异性; 千粒重与产量的综合性评价结果仍保持一致, 且千粒重与  $WUE$  的权重值最低, 对于综合性评价结果的影响最小,  $WUE$  经熵权加权后的指标与原始数据相比, 在低灌水定额下差异仍旧不明显, 且在高灌水定额处理中的差异性被缩小。综上所述, 与显著性分析相比, 熵权 - TOPSIS 综合性分析方法能较为全面地对灌溉模式进行评价, 本试验综合评价结果为灌水定额为  $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  时最优, 在该灌水定额下玉米的产量为  $16\ 178.71 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

## 4 讨论

水分是影响作物产量的关键因素之一, 适宜的灌水定额可以提高作物对养分的吸收, 促进植株的生长, 进而提升作物产量<sup>[27]</sup>; 通过耗水量的计算, 可以较为准确地得出春玉米的需水量大小, 从而给春玉米的生长提供适宜的水分<sup>[28-30]</sup>; 滴灌春玉米的耗水量和产量有着不可分割的关系<sup>[31-33]</sup>。本研究发现, 随着灌水定额的增加, 玉米的耗水量和耗水强度水平也随之上升, 在灌水定额超过  $450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  之后, 两者增长的趋势减缓, 在耗水量超过  $515.10 \text{ mm}$  后, 产量开始下降。王荣荣等<sup>[34]</sup>在研究了小麦耗水量与产量的关系后, 发现随着耗水量的增加, 小麦的产量也存在着类似于二次抛物线的变化形式; 吴克倩等<sup>[35]</sup>对玉米的阶段耗水量进行了分析, 认为灌浆期至成熟期是提升玉米产量的关键时期; 元雪娇<sup>[36]</sup>分析了玉米不同生育期的耗水量, 得出抽雄期耗水

量最大的结论。本试验中随着春玉米生育期的变化, 耗水强度呈现出先升后降的趋势, 其中抽雄散粉期的耗水强度最大, 也印证了这些观点。

株高和叶绿素含量能直接反映出植株的生长发育状态, 是作物生长评价中的重要指标, 徐剑等<sup>[37]</sup>对滴灌玉米生长指标和产量进行了研究, 发现当灌水定额大于  $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  后, 玉米株高最大值不随灌水定额的增加而增加, 甚至有减小趋势。但在本试验中发现, 灌水定额对玉米的株高有着持续的促进作用, 并未发现灌水定额大于  $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  后产生的株高降低现象, 同时叶绿素含量受灌水定额的影响也较小, 结合王月<sup>[38]</sup>对玉米植株高与施氮量和灌水量的关系研究, 推测上述本实验结果产生的原因可能是较高的施氮水平使得玉米株高持续增加, 氮素吸收量较大也使得叶绿素含量维持在较高水平, 降低了其显著性。

利用 SPSS 对数据进行显著性分析可以对单一指标对灌水定额的响应情况有较为清晰的了解, 但农业领域中精准化灌溉和施肥的发展, 使得单一性的评价指标不足以对作物的长势进行全面评价, 仅仅只用产量或其他单一指标对灌水定额进行评价是片面的<sup>[39]</sup>。在实际生产中, 玉米的收获效益多为籽粒产生, 但不能忽视玉米植株本身所产生的其他产物<sup>[40]</sup>。本研究中利用熵权法对玉米的生长指标、产量指标、节水指标进行了权重计算, 基于指标的均值差异程度来计算权重, 可以较为客观地反映出各指标的权重<sup>[41]</sup>。本研究利用熵值所得到的权重系数将作物的单一性指标进行了有机结合, 不单单以产量和水分利用效率作为评价结果的决策值, 有效地降低了主观性因素对评价结果的影响。熵权法 - TOPSIS 法作为一种综合性评价方法, 对于指导农业生产具有重要意义<sup>[42]</sup>。

## 5 结论

(1) 滴灌春玉米的耗水强度在全生育期呈现先增后减的趋势, 在抽雄散粉期达到最大值; 随着灌水定额的增大, 滴灌春玉米的耗水量和耗水强度均增大, 当灌水定额达到  $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  后, 耗水量和耗水强度的增长速率均显著降低。

(2) 滴灌春玉米的株高和耗水量均随灌水定额的增大而增大; 秃尖长和叶绿素含量受灌水定额的影响较小; 灌溉水利用效率 ( $IWUE$ ) 随灌水定额的增大逐渐降低; 滴灌春玉米的穗粒数、千粒重、产量随灌水定额的增大呈现出单峰变化趋势, 且在灌水

定额为  $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  时达到最大值,此时滴灌春玉米的水分利用效率最高。

(3) 根据熵权 - TOPSIS 综合评价结果,当灌水定额为  $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  时,滴灌春玉米的试验产量最高,为  $16\ 178.71 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,在灌水定额大于  $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  后,产量开始下降,不利于节水增产。因此推荐北疆滴灌春玉米灌溉制度为:全生育期灌水 10 次,灌水周期为 7 d,灌水定额为  $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,该结果可为北疆克拉玛依地区滴灌玉米的灌溉制度提供理论依据,但在实际生产中还需要结合经济效益与环境因素等进行进一步验证。

#### 参考文献:

- [1] 朱金儒. 长期膜下滴灌棉田残膜累积对棉花生长及土壤水分运动的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2021.
- [2] 张 龙. 新疆大型灌区续建配套与节水改造项目的建设成效和问题思考[J]. 水利技术监督, 2020(2): 73 - 75.
- [3] 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.
- [4] 祝海竣, 唐 舟, 石爱龙, 等. 灌溉模式和有机肥配施对水稻产量、光合特性和氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2022, 54(4): 700 - 707.
- [5] 汤明尧, 沈重阳, 陈署晃, 等. 新疆小麦、玉米的产量和氮磷钾肥利用效率[J]. 中国农业科学, 2022, 55(14): 2762 - 2774.
- [6] 覃梦香, 伍国勇. 基于 Super - SBM 模型和 Malmquist 指数的我国农业用水效率分析[J]. 南方农村, 2022, 38(4): 4 - 9 + 30.
- [7] 李 菊, 张富仓, 王艳丽, 等. 灌水量和滴灌频率对甘肃省河西地区春玉米生长和水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(10): 8 - 20.
- [8] 杨恒山, 张明伟, 张瑞富, 等. 滴灌灌溉量、施氮量和种植密度对春玉米产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(5): 16 - 22.
- [9] 张 超, 白云岗, 柴仲平, 等. 水肥协同对葡萄果粒生长、产量及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 44 - 50.
- [10] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 基于评价模型的宁夏沙土春玉米最佳灌水施氮量研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 258 - 265.
- [11] 吴 玥, 李 威, 马德志, 等. 基于熵值赋权的 DTOPSIS 法对不同玉米品种综合评价研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(4): 32 - 41.
- [12] 黄 悦, 李思恩, 胡 丹, 等. 基于 Meta-Analysis 方法分析滴灌对玉米水分利用效率及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 96 - 105.
- [13] 张书铨, 罗东坤, 王 叶, 等. 一种新的多属性决策方法: 广义综合评价模型[J]. 统计与决策, 2021, 37(24): 37 - 41.
- [14] 谭金莉, 张维江, 唐 莲, 等. 基于 AHP 法和 TOPSIS 法的农业水资源确权模型研究[J]. 农业科学研究, 2016, 37(2): 8 - 13.
- [15] 菅 毅, 周金星, 万 龙, 等. 基于 TOPSIS 方法的喀斯特陷盆地番茄地下灌溉技术节水效益综合评价[J]. 节水灌溉, 2022(2): 89 - 94 + 100.
- [16] 李泽东, 曹 振, 张如明, 等. 熵权 - TOPSIS 法在华北石质山区常用造林树种抗旱性评价中的应用[J]. 山东大学学报(理学版), 2020, 55(1): 117 - 126.
- [17] 胡建强, 赵经华, 马英杰, 等. 不同灌水定额对膜下滴灌玉米的生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 249 - 254.
- [18] 周景阳, 常莎莎. 基于熵权 - TOPSIS 原理的济南市资源环境承载力评价研究[J]. 国土与自然资源研究, 2022(1): 32 - 37.
- [19] 张浩渺. 基于熵权改进的 TOPSIS 模型在苏州河水水质综合评价中的应用[J]. 西北水电, 2019(3): 12 - 15.
- [20] BEHZADIAN M, OTAGHSARA S K, YAZDANI M, et al. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(17): 13051 - 13069.
- [21] 刘书斌, 张宏武, 冯晓莉, 等. 基于 AHP 法优化的熵权 TOPSIS 模型对不同产地黄花菜药材质量的综合评价[J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(6): 168 - 174.
- [22] 王鼎新, 窦超银, 孟维忠, 等. 风沙土玉米膜下滴灌灌溉制度试验研究[J]. 节水灌溉, 2019(8): 34 - 38.
- [23] 雷金银, 雷晓婷, 尹志荣, 等. 灌溉制度对贺兰山东麓酿酒葡萄生长、产量及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 32 - 39 + 56.
- [24] 宋旭东, 薛 林, 张振良, 等. 鲜食糯玉米自交系果穗秃尖性状评价及其配合力分析[J]. 玉米科学, 2022, 30(1): 8 - 14 + 22.
- [25] 赵经华, 胡建强, 杨 磊, 等. 不同灌水定额对膜下滴灌玉米生长的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(4): 653 - 662.
- [26] 孟 瑶, 刘赵月, 李 晶, 等. 施氮量对高密春玉米籽粒关键酶及产量品质的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(6): 1146 - 1152.
- [27] 张 舵. 微灌方式和灌水量对河西春小麦生长和水氮利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [28] 蒋钱正, 罗 彪, 郭 萍, 等. 基于粮食生产安全调控的河套灌区农业水土资源管理[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(12): 42 - 58.
- [29] 曹雪松, 郑和祥, 苗 平, 等. 引黄滴灌条件下水氮互作对玉米耗水特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(3): 33 - 39.
- [30] 朱 琪. 不同灌水定额对景电灌区春玉米光合生理特征及经济效益的影响[J]. 水利规划与设计, 2020(2): 38 - 43 + 78.
- [31] 梁 超, 肖 让, 张恒嘉, 等. 河西绿洲灌区制种玉米生长



- 特征及产量对不同抗旱措施响应[J]. 玉米科学, 2022, 30(5): 80-89.
- [32] 杨睿, 范军亮, 赖珍林, 等. 河西地区滴灌春玉米对不同灌溉决策方法的响应[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(9): 966-972.
- [33] 王玉凤, 李庆, 张翼飞, 等. 耕作方式对三江平原玉米生长发育及水分利用影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(3): 116-125.
- [34] 王荣荣, 王海琪, 蒋桂英, 等. 2个不同抗旱性小麦品种耗水特征及根系生理特性对开花期干旱的响应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 253-264.
- [35] 吴克倩, 肖让, 赵文举, 等. 降解地膜对河西干旱区土壤水热及制种玉米产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(9): 952-958.
- [36] 元雪娇. 基于遥感技术的内蒙古东部干旱对玉米物候及产量的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2022.
- [37] 徐剑, 赵经华, 黄红建, 等. 不同灌水定额对膜下滴灌玉米生长指标及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2017(1): 28-32.
- [38] 王月. 关中西部小麦-玉米轮作系统水氮周年统筹优化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [39] 熊雪, 邵玲智, 董建新, 等. 承德坝上御道口地区不同燕麦品种生产性能及饲用价值[J]. 草业科学, 2022, 39(7): 1412-1418.
- [40] 宋建华. 全株玉米青贮的收购价格分析[J]. 中国畜牧业, 2022, 18(6): 49-50.
- [41] 姜春光, 郑鑫慧. 基于熵权-TOPSIS模型的电网企业应急能力建设评价[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(12): 50-53.
- [42] 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.

(上接第215页)

- [7] 邓箴, 尹娟, 尹亮. 不同水肥处理对宁夏枸杞产量及水肥利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2021(3): 25-30.
- [8] 尹亮, 尹娟, 赵彦波, 等. 旱区水肥耦合对枸杞果实糖类和类胡萝卜素的影晌[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 27-31.
- [9] 韩宏伟, 王建友, 李勇, 等. 沙壤土条件下不同施肥水平对成龄枸杞生长及产量的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(4): 46-50.
- [10] 刘晓丽, 马理辉, 李娟娟, 等. 滴灌水肥一体化对陕北沙地枸杞产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(S1): 13-16+25.
- [11] 刘朋召, 李孟浩, 宋仰超, 等. 滴灌水肥一体化对枸杞产量、水氮利用及经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(10): 1820-1828.
- [12] 刘得俊, 李润杰. 柴达木巴隆地区枸杞滴灌水肥耦合效应研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(32): 117-118+199.
- [13] 马波, 田军仓. 基于水氮耦合的枸杞灌溉制度优化[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 235-243.
- [14] 朱和, 田军仓, 杨凡, 等. 水肥气热耦合对枸杞光合作用和产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(5): 511-518.
- [15] 张自刚. 枸杞生长水分和养分需求规律研究进展[J]. 中国农业信息, 2016(24): 75-77.
- [16] 刘宇朝, 尹娟, 耿浩杰, 等. 水肥耦合对枸杞生长特性及光合作用的影响[J]. 节水灌溉, 2019(3): 34-37+42.
- [17] 杜宇旭, 王建东, 鲍子云, 等. 覆膜滴灌下枸杞耗水规律研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(3): 166-170.
- [18] 李金泽, 杜历, 唐瑞, 等. 不同灌溉定额对枸杞产量和品质的影响[J]. 黑龙江水利, 2017, 3(11): 1-5.
- [19] 陈爽, 田军仓, 马波. 滴灌灌溉定额对贺兰山东麓枸杞生长和产量的影响[J]. 宁夏工程技术, 2019, 18(4): 367-370+374.
- [20] 郑艳军, 尹娟, 尹亮, 等. 不同灌水处理对枸杞产量和品质的影响[J]. 节水灌溉, 2017(9): 28-32.
- [21] 尹志荣, 雷金银, 桂林国, 等. 不同滴灌量对不同品种枸杞生长、产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 28-34.
- [22] 周波涛. 全球气候变暖: 浅谈从AR5到AR6的认知进展[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 667-671.