

# 水氮耦合条件下打瓜产量及耗水性的模糊综合评判

徐 剑<sup>1</sup>,赵经华<sup>1</sup>,马英杰<sup>1</sup>,杨 磊<sup>2</sup>,陈凯丽<sup>1</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.阿勒泰地区水利管理处,新疆 阿勒泰 836500)

**摘要:**研究水氮耦合对打瓜产量和水分利用效率的影响,以选择适宜的灌溉定额。设置3个不同灌水定额(300、450、600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)和3个不同施氮量(0、138、276 kg·hm<sup>-2</sup>)共9个组合,研究水氮耦合对打瓜产量和水分利用效率影响的同时,利用基于层次分析法(AHP)的模糊综合评价,对各指标进行综合分析。结果表明:当灌水定额增加300 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>、施氮量增加276 kg·hm<sup>-2</sup>,打瓜产量和水分利用效率分别增加1 416.7 kg·hm<sup>-2</sup>和5.24 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>,即打瓜产量和水分利用效率随着灌水定额和施氮量的增大而增加;当灌水定额从450 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>增加到600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>、施氮量从138 kg·hm<sup>-2</sup>增加到276 kg·hm<sup>-2</sup>,打瓜产量减少178.9 kg·hm<sup>-2</sup>,即水肥量继续增加则产量下降;灌水定额450 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>(W2)和施氮量138 kg·hm<sup>-2</sup>(N2)时,组合产量和WUE分别为2 582.9 kg·hm<sup>-2</sup>和10.91 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>,节水增产效果最佳;该组合的模糊综合评价亦为最优,与大田试验分析结果一致。

**关键词:**打瓜;水氮耦合;层次分析法(AHP);模糊评判;产量;水分利用效率;北疆灌区

**中图分类号:**S651 **文献标志码:**A

## Fuzzy comprehensive evaluation of yield and water consumption of seeding-watermelon under water-nitrogen coupling condition

XU Jian<sup>1</sup>, ZHAO Jing-hua<sup>1</sup>, MA Ying-jie<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>2</sup>, CHEN Kai-li<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Water Conservancy Managing Department of Altay Prefecture, Altai, Xinjiang 836500, China)

**Abstract:** The effects of water-nitrogen coupling on yield and water use efficiency of seeding-watermelon were studied, and the suitable irrigation system was selected. Three different irrigation quotas (300, 450 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> and 600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>) and three different nitrogen application rates (0, 138 kg·hm<sup>-2</sup> and 276 kg·hm<sup>-2</sup>) were set in 9 combinations. At the same time, the indexes were comprehensively analyzed by using the fuzzy comprehensive evaluation method based on analytic hierarchy process (AHP). The results showed that when irrigation quota increased by 300 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> and nitrogen application increased by 276 kg·hm<sup>-2</sup>, the yield and water use efficiency of watermelon increased by 1 416.7 kg·hm<sup>-2</sup> and 5.24 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>, respectively. That is to say, the yield and water use efficiency increased with the increase of irrigation quota and nitrogen application rate. When irrigation quota increased from 450 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> to 600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> and nitrogen application increased from 138 kg·hm<sup>-2</sup> to 276 kg·hm<sup>-2</sup>, the yield of watermelon decreased by 178.9 kg·hm<sup>-2</sup>, that is, the yield decreased with the increase of water and fertilizer application. The yield and WUE of irrigation quota 450 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>(W2) and nitrogen application 138 kg·hm<sup>-2</sup>(N2) combination were 2 582.9 kg·hm<sup>-2</sup> and 10.91 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>, respectively. The water saving and yield increasing of W2N2 was the best, and the fuzzy evaluation of W2N2 was also the highest, which was consistent with the results of field experiments.

**Keywords:** seeding-watermelon; water and nitrogen coupling; analytic hierarchy process (AHP); fuzzy valuation; yield; water use efficiency; the irrigation area in northern Xinjiang

打瓜 (*Citrullus lanatus*. ssp. var. *megalaspermus*. Lin et Chao) 属于西瓜的变种, 白瓢黑籽, 形体为较规则圆形。籽粒作为打瓜主要经济产物, 分红、黑两种, 含有丰富的精氨酸和亚油酸等营养物质<sup>[1]</sup>。打瓜管理简便、对种植土壤要求低、生长周期短, 深受农户喜爱并成为部分地区的首选种植作物<sup>[2-3]</sup>。新疆阿勒泰地区打瓜种植面积逐年增加, 在农产品中的地位越来越高。新疆地处亚洲腹心, 气候干旱少雨, 水资源贫乏, 农业水资源利用效率低<sup>[4-5]</sup>, 新疆农业发展受到巨大挑战。具备土壤肥料资源是农业可持续发展的前提, 但过量使用肥料会破坏土壤结构、污染水源<sup>[6]</sup>。目前新疆肥料利用率较低, 浪费肥料现象严重<sup>[7]</sup>, 日益发展的打瓜产业与易受水肥影响的种植环境之间的矛盾逐步显现。近年来对打瓜的研究多集中在高产栽培技术和取籽机械等方面<sup>[8-10]</sup>, 在不同水肥耦合的基础上, 以节水增产为目的研究打瓜的灌水周期和灌溉定额, 制定种植打瓜合理的灌溉制度具有实际意义。在水肥耦合试验下, 林彦宇<sup>[11]</sup>、韩丙芳等<sup>[12]</sup>分别对水稻和玉米做了模糊评判, 表明该方法能较好地解决大田试验灌溉制度择优问题。本文结合大田试验分析和模糊综合评判方法, 研究不同水氮组合对打瓜产量及耗水指标的影响, 确定有利于打瓜节水增产的水氮组合处理, 为北疆打瓜水肥高效利用灌溉制度提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2017年5月-8月在阿尔泰地区灌溉实验站(东经 87°35'56", 北纬 47°00'56")进行。经测定,

试验地 0~60 cm 土层土壤容重为  $1.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 田间持水量为 20.1%, 土壤全氮 0.027%, 速效氮  $19.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $9.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $92.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2017 年打瓜生育期内气温  $\geq 15^\circ\text{C}$  的活动积温为  $2\ 285^\circ\text{C}$ 。灌溉水源来自哈拉霍英干渠, 水质 pH 值为 8.10, 偏碱性。试验期间气象数据见表 1。

### 1.2 试验设计

试验材料选用黑大片打瓜品种(生育期 105 d 左右), 采用一膜一管两行布置方式和 40+80 cm 宽窄行种植方式。

经过实地调研, 以当地打瓜灌溉制度为基础设计试验。田间试验设计包含灌水定额、施氮量 2 个因素。氮肥(N)设 3 个水平: N1、N2、N3, 分别为 0、138、276  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 灌水定额(W)设 3 个水平: W1、W2、W3, 分别为 300、450、600  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验共 3 个重复, 每个重复 9 个处理, 即 W1N1、W1N2、W1N3、W2N1、W2N2、W2N3、W3N1、W3N2、W3N3 处理, 共 27 个小区, 按照随机方式排列。打瓜试验区面积共 0.513  $\text{hm}^2$ , 单个小区种植宽度 3.6 m, 面积 140  $\text{m}^2$ , 各小区之间相隔 1.2 m。

灌水方式为定周期灌水, 设计灌水周期为 7 d。由于 7 月干燥少雨(表 1), 在试验过程中, 还未达到灌溉设计时间打瓜已出现“塌蔫”现象, 为保证打瓜产量, 故在实际灌水中缩短或延长灌水周期 1~2 d, 实际灌水周期为 5~8 d。5 月 14 日施底肥, 配方为磷酸二铵 195  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和钾肥 105  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 分别在二水和三水追氮肥, 田间灌溉施氮方案如表 2。为保证产量, 当果实横径生长至 4 cm 左右时开始灌溉。其他农艺措施与当地常规管理一致。

表 1 2017 年试验地区基本气象资料

Table 1 Basic meteorological data of the experimental region in 2017

气象因素 Meteorological factor	5月 May		6月 June		7月 July			8月 August		
	下旬 Late	上旬 Early	中旬 Mid	下旬 Late	上旬 Early	中旬 Mid	下旬 Late	上旬 Early	中旬 Mid	下旬 Late
平均风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) Average wind speed	3.34	2.74	1.78	2.17	1.80	1.41	0.85	1.32	1.02	1.00
最大风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) Maximum wind speed	13.09	11.08	14.09	8.56	9.06	6.54	5.54	6.54	8.05	5.03
平均气温/ $^\circ\text{C}$ Average air temperature	20.30	21.63	25.68	25.76	25.12	24.58	26.39	23.25	20.93	18.43
最高气温/ $^\circ\text{C}$ Maximum air temperature	33.42	32.36	37.18	36.20	37.32	33.29	39.29	33.39	35.48	28.52
降雨量/mm Precipitation	24.00	16.80	2.60	4.40	3.40	0	0	10.80	11.80	0

表 2 打瓜滴灌及施氮试验设计

Table 2 Experimental design of drip irrigation and fertilization of the watermelon

时间(月-日) Time (m-d)	灌溉周期/d Irrigation cycle	灌水定额 Irrigation quota/(m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> )			施氮量 Nitrogen rate/(kg · hm <sup>-2</sup> )		
		W1	W2	W3	N1	N2	N3
05-22		出苗水 First irrigation; 75~120					
06-14		补水 Supplementary irrigation; 75~120					
07-04		300	450	600			
07-10		300	450	600	0	55.2	110.4
07-16	6	300	450	600	0	82.8	165.6
07-23	7	300	450	600			
07-28	5	300	450	600			
08-04	7	300	450	600			
08-12	8	300	450	600			
08-25	收获 Harvest						
总计 Total		2100	3150	4200	0	138	276

### 1.3 指标测定与研究方法

1.3.1 土壤含水率测定与计算 利用 TRIME-HD2 (德国)仪器获得土壤含水率数据。参照康洁等<sup>[13]</sup>测量方法,每个处理布设 3 根 Trime 探测管,间距 20 cm,埋深 60 cm。在垂直方向上,每根管隔 10 cm 设 1 个测试点,每根管共 6 个测试点。

作物耗水量:作物全生育期耗水量  $ET$  用水量平衡原理<sup>[14]</sup> 计算得出:

$$ET = P_0 + M + K - S - (W_t - W_o) \quad (1)$$

式中, $P_0$ 为有效降雨量(mm), $\geq 5$  mm 的降雨量为有效降雨量; $W_o$ 、 $W_t$ 分别为计算时段初、计算时段末土壤体积含水率; $K$ 为该时段地下水补给量,经水位取样检测结果表明,该地区地下水水位在 6 m 以下,因此不计地下水补给( $K=0$ ); $S$ 为该时段水的深层渗漏量,经 TRIME-HD2 检测,结果表明试验地 60 cm 以下土壤含水率基本不变,因此不计深层渗漏量( $S=0$ )。

水分利用效率  $WUE = Y/ET$ , $Y$ 为作物产量, $ET$ 为作物全生育期耗水量。在每个小区选中间行,随机取 10 棵连续打瓜植株样品进行测产,利用同倍比放大法<sup>[15]</sup>推得公顷产量;对各小区打瓜数量分别计数,将坏瓜数量与所有果实数量作比求得坏瓜率;将正常结籽的果实数量与小区所有果实数量的比值作为有效果实率;在收获的打瓜中,用各小区打瓜非白片的干质量与全部籽粒干质量的比值作为籽粒质量成熟率(简称籽粒成熟率);当用水分仪测得籽粒含水率为 8%~10%时(当地晾晒时间为 2 d,每年不同),称取黑片干质量。数据整理及方差分析(LSD)分别用 Excel 2010、SPSS 22.0 完成。

1.3.2 模糊综合评判 模糊综合评判能将广大领域中因素之间、因素与目标之间边界模糊定量化,对目标产生唯一评价,综合评价的最终结果是对应目标选出最优对象。为了减小不完全定量化程度,本文用层次分析法(analytic hierarchy process,

AHP)确定因素权重,计算过程用 Excel 2010 实现。模糊综合评判相关公式如下:

隶属度 $r_{ij}$ :

$$r_{ij} = E_{ij} / \sum_{i=1}^W E_{ij}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

异向指标隶属度 $r_{ij}$ :

$$r_{ij} = (1/E_{ij}) / \sum_{i=1}^W 1/E_{ij}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

集间关系采用“相乘有界和”算子。

$$M = (\cdot, \oplus) : f_j = \min\left(1, \sum_{i=1}^n a_i r_{ij}\right) \quad (4)$$

计算综合评判矩阵  $S$ , 评判结果采用最大隶属原则,将  $S_n$  值排序,确定优劣。

$$S = D \circ R = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & \dots & r_{m1} \\ r_{12} & r_{22} & \dots & r_{m2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{1n} & r_{2n} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 水氮耦合对打瓜产量及耗水指标的影响

不同灌水定额和施氮量对产量构成及耗水指标影响不同(表 3)。一定施氮量下,随着灌水定额的增大,黑片干重、有效果实率、籽粒成熟率、产量、 $WUE$  逐渐增大。 $W2N2$  处理和  $W3N2$  处理产量分别是  $W1N2$  的 1.6 倍和 1.5 倍;一定灌水定额处理下,随着施氮量的增加,黑片干重、百粒重、耗水量、 $WUE$ 、产量逐渐增大。 $W3N2$  处理和  $W3N3$  处理的产量分别是  $W3N1$  处理的 2.3 倍和 2.2 倍。分析表明,产量、产量构成及耗水指标随单因素灌水定额或施氮量的增加而增加;与增加灌水定额相比,增加施氮量打瓜增产效果明显。

由表3可以看出,W2N2处理黑片干重、有效果实率最高,黑片干重较其他处理差异显著,W1N1处理黑片干重最小,W2N2处理黑片干重是W1N1处理的3.1倍。表明增大灌水定额和施氮量能促进黑片干重的增加。其中W3N1处理坏瓜率最大为1.42%,W3N2处理籽粒成熟率最大,W1N1处理有效果实率和籽粒成熟率最小。W1N1处理果实数量最大,产量最低。与W1N1处理与W1N2处理相比,W2N3处理耗水量最高且差异显著。产量由高到低排序前5位的处理为:W2N2>W2N3>W3N2>W3N3>W1N3,W1N1处理产量最小,W2N2处理产量是W1N1处理的2.62倍,W3N3处理产量是W1N1处理的2.43倍。水分利用效率前5位的处理由高到低排序为W3N3>W2N2>W3N2>W2N3>W1N3,W3N1处理水分利用效率最小,W3N3处理是W3N1处理的2.1倍。分析表明,较低的水氮量限制打瓜增产,较高的灌水定额和施氮量促进增产,并提高水分利用效率,随着水氮量继续增加产量不再增加。在9种处理中,W3N3处理水分利用效率最高,

产量绝对值为第4位;W2N2处理产量最高,比W3N3处理高7.3%,其水分利用效率仅次于W3N3处理。W2N2与W3N3的产量、UWE无显著差异,与W3N3相比,W2N2处理节水省肥且有利于打瓜增产,更符合节水灌溉需求。

## 2.2 确定评价指标与计算模糊集矩阵

根据节水增产的目的,本文将黑片干重、果实数量、坏瓜率、有效果实率、百粒重、籽粒成熟率、产量、打瓜耗水量、水分利用效率(WUE)作为一级评价指标(表3)。以大田试验数据为基础,将指标数值归一化处理,得到3组性状模糊集 $R_{11}$ 、 $R_{12}$ 、 $R_{13}$ (表4)。

## 2.3 确定权重

因素间重要程度存在差异,故不同因素对应权重不同。本文采用AHP中的“和法”确定因素权重。由判断矩阵(表5)可以看出因素A1~A9的权重分别为: $D_1 = (0.142, 0.079, 0.030, 0.062, 0.021, 0.043, 0.274, 0.086, 0.262)$ 。判断矩阵A的最大特征根 $\lambda_{1\max} = 10.14$ ,计算得 $C.I. = 0.1430$ ,9维矩阵 $R.I. = 1.46$ , $C.R. = 0.097$ ,故由判断矩阵A所得的权重效率可靠。

表3 水氮耦合下打瓜产量构成和耗水指标

Table 3 The yield, yield components and water consumption index of the watermelon with water and nitrogen coupling

处理 Treatment	黑片干重 /(g·(10株) <sup>-1</sup> ) Dry weight of grain /(g·(10 plants) <sup>-1</sup> )	果实数量 No. of fruit /(10 <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	百粒质量 100-grain mass /g	坏瓜率 Proportion of rotten melon/%	有效果实率 Proportion of normal fruit/%	籽粒成熟率 Proportion of seed maturity/%	产量 Yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率 WUE /(kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	耗水量 Water consumption /mm
W1N1	148.33d	104.9ab	29.19b	0.90a	92a	85b	987.3d	5.92bc	174c
W1N2	297.33c	96.5ab	29.86ab	0.64a	93a	89ab	1591.7bc	8.74abc	184bc
W1N3	360.09bc	90.4b	29.90ab	0.72a	95a	90ab	1834.4b	10.01ab	204abc
W2N1	183.33d	99.7ab	29.46b	1.15a	94a	92ab	1212.5cd	6.02bc	201abc
W2N2	454.45a	90.5b	30.18ab	1.04a	96a	93ab	2582.9a	10.91a	238ab
W2N3	355.36bc	113.7a	30.77ab	0.64a	96a	92ab	2581.6a	10.53a	248a
W3N1	167.67d	101.8ab	30.32ab	1.42a	93a	91ab	1083.9cd	5.37c	203abc
W3N2	368.23bc	110.5ab	31.41ab	0.75a	96a	96ab	2543.3a	10.60a	243a
W3N3	412.47ab	94.7ab	32.04a	1.18a	95a	88ab	2404.0a	11.16a	220abc

注:同一列不同小写字母代表处理间差异达到显著水平( $P<0.05$ )。下同。

Notes: The same list of different lowercase letters represents a significant difference within treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

表4 水氮耦合下打瓜的性状模糊集

Table 4 The melon characters of fuzzy sets with water and nitrogen coupling

性状模糊集 Character fuzzy set	黑片干重 Dry weight of black grain	果实数量 Quantity of fruit	坏瓜率 Proportion of rotten melon	果实有效率 Proportion of normal fruit	百粒质量 100-grain mass	籽粒成熟率 Proportion of seed maturity	产量 Yield	耗水量 Water consumption	水分利用效率 WUE
$R_{11}$	0.184	0.359	0.272	0.329	0.328	0.321	0.224	0.358	0.240
	0.369	0.331	0.387	0.332	0.336	0.336	0.361	0.337	0.354
	0.447	0.310	0.342	0.339	0.336	0.342	0.416	0.305	0.406
$R_{12}$	0.185	0.328	0.255	0.330	0.326	0.332	0.190	0.376	0.219
	0.458	0.335	0.284	0.335	0.334	0.335	0.405	0.319	0.397
	0.358	0.374	0.460	0.335	0.340	0.333	0.405	0.305	0.383
$R_{13}$	0.177	0.332	0.243	0.327	0.323	0.331	0.180	0.363	0.198
	0.388	0.360	0.464	0.337	0.335	0.349	0.422	0.303	0.391
	0.435	0.308	0.293	0.336	0.342	0.320	0.399	0.334	0.411

表 5 判断矩阵 A 及权重

Table 5 Judgement matrix A and its weight

因素 Factor	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	$D_1$
A1	1	3	5	3	7	5	1/3	3	1/3	0.142
A2	1/3	1	3	3	3	5	1/5	1	1/5	0.079
A3	1/5	1/3	1	1/5	3	1/3	1/7	1/3	1/7	0.030
A4	1/3	1/3	5	1	3	3	1/5	1/3	1/5	0.062
A5	1/7	1/3	1/3	1/3	1	1/5	1/7	1/5	1/7	0.021
A6	1/5	1/5	3	1/3	5	1	1/7	1/5	1/7	0.043
A7	3	5	7	5	7	7	1	5	1	0.274
A8	1/3	1	3	3	5	5	1/5	1	1/5	0.086
A9	3	5	7	5	7	7	1	5	1	0.262

注: A1~A9 依次代表一级评价指标;  $D$  表示权重。

Note: A1~A9 represents the first-level evaluation index in turn;  $D$  represents the weight.

2.4 一级评判

集间关系采用“相乘有界和”法则, 分别计算权重  $D_1$  与性状矩阵  $R_{11}$ 、 $R_{12}$ 、 $R_{13}$  的乘积, 得到一级综合评判矩阵  $S_{11}$ 、 $S_{12}$ 、 $S_{13}$ 。

$$S_{11} = D_1 \circ R_{11} = (0.142, 0.079, 0.030, 0.062, 0.021, 0.043, 0.274, 0.086, 0.262)$$

$$\circ \begin{bmatrix} 0.184 & 0.369 & 0.447 \\ 0.359 & 0.331 & 0.310 \\ 0.272 & 0.387 & 0.342 \\ 0.329 & 0.332 & 0.339 \\ 0.328 & 0.336 & 0.336 \\ 0.321 & 0.336 & 0.342 \\ 0.224 & 0.361 & 0.416 \\ 0.358 & 0.337 & 0.305 \\ 0.240 & 0.354 & 0.406 \end{bmatrix}$$

$$= (0.259 \quad 0.353 \quad 0.388)$$

$$S_{12} = D_1 \circ R_{12} = (0.142, 0.079, 0.030, 0.062, 0.021, 0.043, 0.274, 0.086, 0.262)$$

$$\circ \begin{bmatrix} 0.185 & 0.458 & 0.358 \\ 0.328 & 0.335 & 0.374 \\ 0.255 & 0.284 & 0.460 \\ 0.330 & 0.355 & 0.335 \\ 0.326 & 0.334 & 0.340 \\ 0.332 & 0.335 & 0.333 \\ 0.190 & 0.405 & 0.405 \\ 0.376 & 0.319 & 0.305 \\ 0.219 & 0.397 & 0.383 \end{bmatrix}$$

$$= (0.244 \quad 0.385 \quad 0.374)$$

$$S_{13} = D_1 \circ R_{13} = (0.142, 0.079, 0.030, 0.062, 0.021, 0.043, 0.274, 0.086, 0.262)$$

$$\circ \begin{bmatrix} 0.177 & 0.388 & 0.435 \\ 0.332 & 0.360 & 0.308 \\ 0.243 & 0.464 & 0.293 \\ 0.327 & 0.337 & 0.336 \\ 0.323 & 0.335 & 0.342 \\ 0.331 & 0.349 & 0.320 \\ 0.180 & 0.422 & 0.399 \\ 0.363 & 0.303 & 0.334 \\ 0.198 & 0.391 & 0.411 \end{bmatrix}$$

$$= (0.233 \quad 0.385 \quad 0.383)$$

计算表明, 在灌水定额 W1 处理 ( $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 下, N3 处理 (施氮量为  $276 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 的评价最高; N2 处理 (施氮量为  $138 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 次之, N1 处理 (施氮量为  $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 评价最低。在灌水定额 W2 和 W3 处理 (灌水定额  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 下, 对 N2 处理的评价均最高, N1 处理评价均最低, 故选择 N2 处理作为打瓜施肥方案较为合适。由打瓜大田指标数据表可知, 在 W1 处理中, N3 处理产量与 WUE 均最大; N1 处理除坏瓜率外, 其他指标均最小, 说明 N3 处理有利于打瓜增产; 在灌水定额 W2 和 W3 处理中, N2 处理产量、WUE、黑片干重、籽粒成熟率、有效果实率均最大。N1 处理产量和 WUE 等指标值相对其他处理最小。因此, 选择 N2 处理作为打瓜种植施肥方案较为合适。综合分析表明评判结果与大田试验结果一致。

2.5 二级评判

利用 3 种不同的灌水定额, 构造判断矩阵 C (表 6), 用 C1、C2 和 C3 分别作为 W1、W2 和 W3 三种灌水定额的因素符号, 权重为  $D_2 = (0.228, 0.648, 0.125)$ 。其中判断矩阵 C 的最大特征值  $\lambda_{2\max} = 3.085$ ,  $C.I. = 0.043$ , 3 维  $R.I. = 0.52$ ,  $C.R. = 0.082 < 0.1$ 。经一致性检验  $D_2$  效度可靠。

表 6 判断矩阵 C

Table 6 Judgment matrix C

因素 Factor	C1	C2	C3	$D_2$
C1	1	1/3	3	0.228
C2	3	1	5	0.648
C3	1/3	1/5	1	0.125

二级综合评判集  $R_2 = (S_{11}^T \quad S_{12}^T \quad S_{13}^T)$ , 二级评判矩阵的集间关系  $S_2 = D_2 \cdot R_2$ , 求得:

$$S_2 = (0.228, 0.648, 0.125) \cdot \begin{pmatrix} 0.259 & 0.243 & 0.233 \\ 0.353 & 0.385 & 0.385 \\ 0.387 & 0.374 & 0.383 \end{pmatrix}$$

$$= (0.336 \quad 0.352 \quad 0.349)$$

结果表明, 灌水定额的评价由高到低顺序为  $W2 > W3 > W1$ , 其中对  $W2$  处理评价最高。与  $W1$  处理和  $W3$  处理相比,  $W2$  处理更有利于打瓜节水增产。综合两次评判结果表明, 对  $W2N2$  处理评价最高,  $W2N3$  处理次之, 对  $W1N1$  评价最低, 说明  $W2N2$  处理更适合作为打瓜灌溉施肥制度, 与 2.1 分析结果一致。

### 3 讨论

#### 3.1 评判指标的确定

单个评判因素的质量直接影响评判目标的实现程度。当评判因素质量越高, 其对于目标的真实性、全面性就越清晰, 目标的实现程度也随之增大<sup>[16-17]</sup>。韩丙芳等<sup>[12]</sup>以水肥互调和提高水分利用效率为目标, 认为利用模糊评判选出最优水肥组合处理与玉米产量相关性有着密切的联系, 这与本研究不同。本研究目标层是选择最优水肥耦合处理, 为北疆打瓜水肥高效利用提供科学依据。为建立能够反映目标层实际情况的评判因素, 将增产指标、节水指标、环境映射指标、果实品质指标作为基础评判因素, 并构成一级评判体系。为了直接体现不同水氮处理下打瓜增产情况, 将产量和黑片干重作为评价增产指标。作物水分利用效率 (WUE) 是对农业种植生产活动节水评价的重要指标<sup>[18]</sup>, 且 WUE 与耗水量是受生物学特性、气象条件、土壤条件、作物栽培措施综合影响的指标。WUE 和耗水量能够反映当地打瓜在不同水氮条件下种植的节水情况, 故选择 WUE 和耗水量作为评价节水指标。通过对果实数量、百粒重、坏瓜率、有效果实率、籽粒成熟率指标方差分析, 发现各处理间坏瓜率与有效果实率差异不显著, 部分处理籽粒成熟率、果实数量、百粒重差异显著。说明普遍因素 (外部环境、农艺措施、品种) 对各处理打瓜影响较大, 果实数量、百粒重、坏瓜率、有效果实率、籽粒成熟率与环境之间表现出多对一的映射关系。将坏瓜率、有效

果实率、籽粒成熟率、果实数量、百粒重作为评判因素, 具有对研究区打瓜种植环境、该地区农艺措施、打瓜品种的代表性。其中坏瓜率、有效果实率、籽粒成熟率、果实数量是反映果实品质的重要指标, 将果实品质指标作为评判因素, 有利于体现目标真实性与全面性。

#### 3.2 大田试验分析在综合评判法中的实现

结合评判结果与大田试验结果表明, 模糊综合评判结果和大田试验结果基本一致, 说明  $W2N2$  处理较其他处理更适合北疆打瓜节水增产种植, 基于 AHP 的模糊综合评判模型能够较好解决北疆打瓜大田试验灌溉制度择优问题, 这与汪顺生等<sup>[19]</sup>的结论一致。但是, 该模型考虑的因素尚不完善, 在以后的研究中, 可以将打瓜籽粒生化与形态品质和干物质中肥料元素积累量等指标作为讨论因素, 对打瓜大田试验进行多层次分析。

林彦宁、韩丙芳等<sup>[11-12]</sup>将水肥组合处理作为一个整体因素进行讨论, 其优点是能够体现各水肥组合处理间交叉的优劣顺序, 这与本研究不同。本研究将水肥分开讨论, 其优点是能说明何种单个氮处理、单个灌水处理有利于作物节水增产; 缺点是不能体现各组合处理间交叉的优劣顺序。在以后的研究中可以结合上述 2 种方法对水肥耦合打瓜进行分析。

#### 3.3 水肥耦合对产量和耗水指标的影响

在农田生产中, 灌溉和施肥是不可缺少的农艺措施, 其中水分和肥料的定量是一个重要的理论问题。水分和肥料对作物有着交叉影响, 找到水肥对作物影响的最优交点, 就可能实现低投入和高产出的目标<sup>[20]</sup>。本研究结果表明, 各水氮处理坏瓜率、有效果实率、籽粒成熟率差异不显著, 可能原因是: 成熟后期是打瓜瓢变关键期<sup>[21]</sup>, 由于试验条件限制, 提前 7 d 收获打瓜, 成熟期从 32 d 缩减至 25 d, 造成瓢变不充分, 可能使得有效果实率、籽粒成熟率差异不显著。不同水氮处理间打瓜产量和 WUE 差异显著, 且当水氮供应量接近阈值时打瓜产量和 WUE 更高。水肥量远离阈值, 打瓜产量下降。当水氮量继续增大时, 造成打瓜产量下降和成本增加, 与王力和岳文俊等<sup>[22-23]</sup>结论一致 (由于对水肥耦合打瓜的研究鲜有报道, 故与同科作物比较分析)。高水高氮处理 WUE 最高, 这点与王力结论不同。在 9 个处理中, 部分水氮处理之间耗水量差异不显

著,造成此现象的原因可能是:打瓜在成熟期耗水量较高,仅次于耗水量最高阶段的膨大期(另文发表,同科作物甜瓜耗水量变化规律<sup>[24]</sup>与打瓜类似,可作参考),成熟期被缩减 7 d 或将影响各水肥处理间耗水量差异性。

本文研究未考虑籽粒品质,在以后的研究中可以将籽粒品质作为研究对象,分析出有利于提高打瓜籽粒品质的灌溉施肥制度,为北疆地区打瓜节水调质灌溉提供科学依据。由 W2 处理和 W3 处理产量分析表明,在该试验设计范围内,最高产量的阈值在 W2 和 W3 处理间。本试验灌水定额梯度增量为  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,在以后的研究中可以在  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  灌水定额范围内设计试验,并减小灌水定额梯度,进一步优化试验。

## 4 结 论

1) 与其他处理相比,施氮量  $138 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  与灌水定额  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  水氮处理黑片干重、有效果实率、产量最高,水分利用效率较高,仅次于最高处理且无显著性差异,该水氮处理适合作为节水增产的灌溉制度。

2) 在产量构成及耗水指标的基础上,利用模糊评判对水氮耦合条件下打瓜产量和水分利用效率进行分析,结果表明施氮量  $138 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  与灌水定额  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  的水氮组合评价最优,评判结果与试验分析结果一致。结合评判结果与大田试验结果,建议选用施氮量  $138 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  与灌水定额  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  的水氮处理构建打瓜灌溉施肥制度。

### 参 考 文 献:

[1] 李颖慧,长城,李建波,等.打瓜中的生理活性物质与打瓜籽蛋白的功能特性[J].畜牧兽医科技信息,2018,501,(9):38-39.

[2] 李燕.北屯垦区打瓜加压滴灌高产栽培技术[J].农村科技,2017,(4):18-21.

[3] 蒋德莉,任志强,田宇,等.铺膜铺管气吸式打瓜精量播种机的设计[J].新疆农机化,2016,(6):8-11.

[4] 何英.干旱区典型流域水资源优化配置研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2010.

[5] 田龙,李锡铜,邝海菊.基于农业用水的新疆水资源利用策略研究[J].山西科技,2017,(5):21-24.

[6] 李秀青.农业可持续发展中土壤肥料相关问题分析[J].河南农业,2017,(17):30-32.

[7] 吾尔曼·特尔德别克.新疆地区提高肥料利用率的有效措施[J].农业工程技术,2017,37(20):45.

[8] 马振,胡斌,陈永,等.联合作业打瓜取籽机关键部件的设计与研究[J].农机化研究,2017,39(7):121-124.

[9] 钟芹,陈国刚.打瓜籽蛋白功能特性的分析研究[J].农产品加工,2015,(4):46-50.

[10] 郑庆伟.打瓜白粉病的发生原因及防治建议[J].农药市场信息,2013,(20):40.

[11] 林彦宇,徐丹.基于模糊综合评判法的稻作水肥耦合综合评价[J].黑龙江水利,2015,(1):39-41.

[12] 韩丙芳,田军仓,李应海,等.宁夏灌区不同水肥处理对膜上灌玉米性状影响的模糊评判[J].灌溉排水学报,2005,24(4):29-32.

[13] 康洁,张维江,李娟,等.TRIME-T3 管式 TDR 土壤水分测定系统在宁夏泾源地区的标定研究[J].宁夏工程技术,2015,14(2):146-148.

[14] 迟道才.灌溉排水工程学[M].北京:中国水利水电出版社,2010:48-49.

[15] 艾鹏睿,赵经华,马英杰,等.不同灌水定额下北疆地区滴灌打瓜耗水规律的研究[J].节水灌溉,2016,(11):39-43.

[16] 赵艳龙,熊兰,徐敏捷,等.基于模糊层次分析法的干式变压器运行状态综合评估[J].重庆理工大学学报,2013,27(4):60-67.

[17] 黄鑫,陈桂明,游园.模糊综合评判法在能力评价中的应用[J].兵器装备工程学报,2010,31(7):131-132.

[18] 文冶强,杨健,尚松浩.基于双作物系数法的干旱区覆膜农田耗水及水量平衡分析[J].农业工程学报,2017,33(1):138-147.

[19] 汪顺生,刘东鑫,孟鹏涛,等.不同种植模式冬小麦产量与耗水量的模糊综合评判[J].农业工程学报,2016,32(1):161-166.

[20] 邢英英,张富仓,张燕,等.膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J].农业工程学报,2014,30(21):70-80.

[21] 中国农业科学院郑州果树研究所.中国西瓜甜瓜[M].北京:中国农业出版社,2000:91-103.

[22] 王力,孙兆军,焦炳忠,等.不同灌溉定额及施氮量对西瓜产量及水分利用效率的影响[J].中国农村水利水电,2017,(7):18-21.

[23] 岳文俊,张富仓,李志军,等.水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J].农业机械学报,2015,46(2):88-96.

[24] 桑艳朋.膜下滴灌条件下甜瓜田间需水规律的研究[D].石河子:石河子大学,2005.