

基于熵权的 TOPSIS 模型在黄瓜适宜抗蒸腾产品评价中的应用

岳焕芳¹, 郭芳¹, 王铁臣¹, 徐进¹, 孟范玉¹, 安顺伟¹, 胡潇怡¹, 祝宁²

(1. 北京市农业技术推广站 北京 100029; 2. 北京市昌平区农业技术推广站 北京 102200)

摘要: 为了筛选适宜的抗蒸腾产品, 提高黄瓜抗旱性, 选用2种代谢型、2种成膜型和1种生长调节剂型共5种抗蒸腾产品进行叶面喷施处理, 以喷施清水作为对照, 测定黄瓜植株生长、植株生物量和产量品质指标, 将熵权法和TOPSIS法相结合, 对11个评价指标及6个评价方案进行综合分析。结果表明, 代谢型国光抗蒸腾剂处理后黄瓜株高比CK提高1.64%, 叶片SPAD比CK提高7.37%, 地上部和地下部含水率比CK分别提高2.7和9.7个百分点, 黄瓜维生素C含量比CK提高25.70%, 利用基于熵权的TOPSIS模型分析, 代谢型国光抗蒸腾剂处理与最优值的相对接近度为0.991 8, 在所有处理中最高。黄瓜整个生育期叶面喷施3次代谢型国光抗蒸腾剂, 可以有效提高抗旱能力, 促进生长和产量品质提升。

关键词: 黄瓜; 抗蒸腾; 熵权; TOPSIS 模型

中图分类号: S642.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2022)2-049-06

Application of TOPSIS model based on entropy weight to evaluate coupling effect of suitable anti-transpiration products on cucumber

YUE Huanfang¹, GUO Fang¹, WANG Tiechen¹, XU Jin¹, MENG Fanyu¹, AN Shunwei¹, HU Xiaoyi¹, ZHU Ning²

(1. Beijing Agriculture Technology Extension Station, Beijing 100029, China; 2. Agricultural Technology Extension Station of Changping District, Beijing 102200, China)

Abstract: Five anti-transpiration products, including two metabolic type, two film-forming type and one growth regulator, were sprayed on the leaves to select suitable anti-transpiration product for improving drought tolerance of cucumber. Spraying water was used as control and the growth index, biomass index, yield and quality index of cucumber were measured. The TOPSIS model based on entropy weight were used to evaluate 11 indexes and 6 comprehensive evaluation plan. The results showed that the height of cucumber treated with metabolized Guoguang anti-transpiration increased by 1.64%, the SPAD of leaves increased by 7.37%, the water content of shoot and underground increased by 2.7 and 9.7 percentage points compared with CK, the content of vitamin C in cucumber increased by 25.70%. The relative close degree of the metabolized Guoguang anti-transpiration treatment and the optimal value was 0.991 8, the highest among all treatments. Cucumber leaves were sprayed with metabolic Guoguang antitranspirant three times throughout the whole growth period, it could improve the drought resistance effectively, promote growth, yield and quality improvement.

Key words: Cucumber; Anti-transpiration; Entropy weight; TOPSIS model

黄瓜作为高耗水作物, 水分需求量较大, 容易缺水萎蔫, 影响产量和品质^[1], 利用现代生物节水技术进行水分调控, 成为重要的研究方向之一。其中, 研制抗蒸腾产品、研究作物的生理生态响应, 以及田间应用效果是其中热点之一^[2]。前人研究表

明, 叶面喷施抗蒸腾剂或者植物激素生长调节物质等可以提高作物抗旱能力^[3]。目前, 抗蒸腾剂产品根据作用机制可以分为代谢型、成膜型和反射型三种类型^[4]。其中, 反射型抗蒸腾剂主要利用高岭土等反射材料, 反射部分太阳辐射能, 减少叶片蒸腾,

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-08-23

基金项目: 北京市果类蔬菜产业创新团队(BAIC01-2020); 2020年北京市农业农村科技新星项目; 2020年北京市主要农作物精准水肥一体化技术集成与推广项目

作者简介: 岳焕芳, 女, 农艺师, 主要从事智能灌溉施肥相关研究。E-mail: yuehuanfang@163.com

通信作者: 孟范玉, 男, 高级农艺师, 主要从事节水方面研究推广等工作。E-mail: 253900948@qq.com

实际应用较少。目前,市场上代谢型和成膜型抗蒸腾剂产品应用较多,成膜型抗蒸腾剂利用十六烷醇等高分子化合物,在植物叶片表面形成一层薄膜,减少气孔扩散,降低水分蒸腾损失;代谢型抗蒸腾剂主要是通过调节气孔开度抑制蒸腾,并通过调控保护酶活性,提高抗旱能力;油菜素内酯作为第六大植物激素,被称为“逆境缓和激素”^[5]。在针对抗旱产品的研究中,大部分研究人员关注重点集中在新产品的研发、适用范围和适宜剂量^[6]方面。陈怡昊等^[7]的研究表明,黄瓜喷施 0.5% FA 为适宜浓度,可以提高作物抗旱能力。体积分数为 1.5 mL·L⁻¹ 的复合醇抗蒸腾剂在黄瓜上喷施 3 次,具有明显节水增产作用^[8]。采用 0.10~0.15 μmol·L⁻¹ 的油菜素内酯叶面喷施黄瓜,可以提高其光合效率^[9]。然而,关于不同类型抗蒸腾产品在同一作物使用效果的对比较少,过往研究对象多集中在大田作物和园林植物上^[10]。设施蔬菜蒸发量大,经济价值高,对水分较为敏感,但抗蒸腾产品在设施蔬菜上应用的相关研究匮乏,对于设施农业生产缺少指导性数据,不利于其推广应用。

抗蒸腾产品对于作物生长的影响包括多个方面,比如生长、产量和品质等,客观合理的评价是获得适宜抗蒸腾剂产品的前提。熵在热力学中是系统无序程度的度量,可以反映某个指标在评价体系中起作用的大小,根据指标提供信息量的大小赋予相对应的权值,熵权系数法则是根据熵的定义,建立基于熵值权重的多目标决策评价模型^[11],可以直观反映该指标在项目优先级评价中的作用大小,有效避免主观赋权导致的评价结果失准。TOPSIS 模型是多指标多决策分析中常用的方法^[12],可以将评价对象与最差解和最优解的距离进行排序,传统的 TOPSIS 模型在评价指标权重方面,主观因素会影响最终评价结果的准确性^[13],将熵权法与 TOPSIS 模型相结合,可以获得更客观,更准确的评价结果,在多个研究领域均得到了有效应用,赵思腾等^[14]利用熵权法及 TOPSIS 模型筛选了陇中旱作区适宜玉米轮作的土壤可持续系统,季延海等^[15]利用熵权法和 TOPSIS 法相结合的方法,得出限根栽培下番茄最佳日灌溉量为 0.8 L。笔者旨在利用基于熵权的 TOPSIS 模型,确定黄瓜适宜的抗蒸腾产品,为生产应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试品种为黄瓜津优 35 号,华北型黄瓜,由天津科润黄瓜研究所选育。

试验选用国光抑制蒸腾剂(代谢型)、旱地龙抗蒸腾剂(代谢型)、神润抗蒸腾剂(成膜型)、植物抗蒸腾剂(成膜型)和油菜素内酯(生长调节剂型)5 种抗蒸腾剂产品。

采用混合基质椰糠栽培,容重 0.15 g·cm⁻³,通气孔隙为 9.15%,持水能力 744%,pH 6.8,EC 值为 0.3 mS·cm⁻¹,有机质含量为 66.3%。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 7—10 月在北京市昌平区金六环农业园塑料大棚进行,大棚占地面积 390 m²,棚体为镀锌管组装式结构,跨度 7.8 m、长度 50 m、肩高 1.5 m。7 月 30 日定植,行距为 1.5 m,株距 25 cm,共栽种 1060 株·棚⁻¹,密度合计 271 95 株·hm⁻²。水肥管理通过营养液浓度 EC 值(Electrical Conductivity)和灌溉量调控:8 月 5—22 日为初花期,使用圣诞树水溶肥(20-20-20+TE),EC 值为 1.5~2 mS·cm⁻¹,正常水肥管理;8 月 23 日至 10 月 20 日为结瓜期,营养液 EC 值为 2~2.5 mS·cm⁻¹,期间进行亏缺灌溉:初瓜期(8 月 23 日至 9 月 10 日)平均 600 mL·d⁻¹·株⁻¹,盛瓜期(9 月 11 日至 10 月 2 日)平均 800 mL·d⁻¹·株⁻¹,末瓜期(10 月 3—20 日)平均 720 mL·d⁻¹·株⁻¹,定植到拉秧累计灌溉量为 3004 m³·hm⁻²,总用肥量为 4500 kg·hm⁻²。

根据产品说明中推荐的浓度范围进行喷施,将试剂对入清水中搅拌均匀,由上至下均匀喷在黄瓜叶片上,以清水为对照。大棚内株距 25 cm,行距 160 cm,每个处理小区面积为 6.5 m²,每个小区内 16 株,3 次重复,随机区组设计。从初花期开始,共喷施 3 次。其中,8 月 13 日第 1 次喷施,体积约 11 mL·株⁻¹,8 月 27 日和 9 月 11 日分别为第 2、3 次喷施,体积为 22 mL·株⁻¹。

1.3 指标测定及方法

每处理每个重复选生长一致的 3 株黄瓜进行挂牌调查。

1.3.1 植株生长指标 株高:采用直尺测量由植株基部到顶端生长点的高度。

叶片数:数植株叶片数。

叶绿素相对含量:采用 SPAD 502 Plus 叶绿素计(日本 konica minolta 公司)测定第 4 片叶,每个叶片重复测定 3 次,取平均值。

以上指标共测定 3 次,8 月 13 日进行第 1 次测定,8 月 27 日和 9 月 11 日分别测定第 2、3 次。

表1 不同抗蒸腾产品处理

处理	抗蒸腾剂	生产单位	类型	成分	含量	稀释倍数
T1	国光抑制蒸腾剂	四川润尔科技有限公司	代谢型	含腐植酸水溶肥料	腐植酸 $\geq 40 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,氮 $40 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,磷 $40 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,钾 $40 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	500倍
T2	神润抗蒸腾剂	河南神润生物科技有限公司	成膜型	高分子化合物		40倍
T3	植物抗蒸腾剂	河南昌盛园林资材	成膜型	高分子化合物		100倍
T4	油菜素内酯	河北禾润生物科技有限公司	生长调节剂	2,4-表芸薹素内酯	0.01%	3000倍
T5	旱地龙抗蒸腾剂	新疆汇通旱地龙腐植酸有限责任公司	代谢型	有机水溶肥料	有机质 $\geq 50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,主要原料:风化煤,矿化黄腐植酸 $\geq 30\%$	800倍
CK	清水					

1.3.2 植株生理指标 拉秧后取植株地上部和地下部鲜样品,包括茎、叶、果和根,分别称量鲜质量;鲜样品放入烘箱 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,称量干质量,分别计算地上部、地下部含水率。

$$\text{地上部含水率}/\% = \frac{\text{地上部鲜质量} - \text{地上部干质量}}{\text{地上部鲜质量}} \times 100;$$

$$\text{地下部含水率}/\% = \frac{\text{地下部鲜质量} - \text{地下部干质量}}{\text{地下部鲜质量}} \times 100。$$

1.3.3 果实品质指标 盛瓜期采收商品瓜,采用2,6-二氯酚靛酚滴定法测定黄瓜维生素C含量^[16],手持折射仪测定可溶性固形物含量^[17],采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[18],采用考马斯亮蓝G-250染色法测定可溶性蛋白质含量^[19],采用紫外分光光度法测定亚硝酸盐含量^[20],每个处理测定3个黄瓜。

1.3.4 产量指标 在坐果期对各处理标记的黄瓜植株进行累计测产。

1.4 数据处理

采用WPS Office 2019进行数据整理,采用SPSS Statistics 26.0进行数据分析,对测定指标进行单因素LSD方差分析,显著水平为0.05。参考前人基于熵权的TOPSIS模型的研究结果进行相关数据分析^[11]。

以黄瓜的四大类指标体系:生长指标(株高、叶片数、叶绿素相对含量)、生理指标(地上部含水率和地下部含水率)、品质指标(可溶性固形物、可溶性糖、可溶性蛋白、亚硝酸盐、维生素C含量)、产量指标(单株产量),共11个参数,对6个不同处理进行基于熵权的TOPSIS模型的综合评价分析,首先利用熵权系数法计算出各指标的权重,评价方案数量 $n=6$,评价指标数量 $m=11$,根据下述公式计算出初始评价矩阵 $[X]=(x_{ij})_{n \times m}$,第 j 项指标熵值 H_j 计算公式如下:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}。$$

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}, k = \frac{1}{\ln n}。$$

再通过下列公式计算出第 j 项指标熵权:

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{j=1}^m H_j}。$$

其次,利用TOPSIS模型计算各评价方案的正理想解、负理想解,以及各评价方案和正理想解、负理想解之间的欧氏距离,并计算出接近度 C_i 。将标准化矩阵与上述熵权值 ω_j 相乘,计算出加权标准化决策矩阵:

$$[Z] = (z_{ij})_{n \times m}。$$

$$z_{ij} = \omega_j \times r_{ij}; \text{对于高优指标 } r_{ij} = \frac{y_{ij} - \min y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}}, \text{低}$$

$$\text{优指标 } r_{ij} = \frac{\max y_{ij} - y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}}。$$

最后,根据公式计算出接近度 C_i :

$$C_i = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)}$$

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - x_i^+)^2}; d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - x_i^-)^2}。$$

2 结果与分析

2.1 不同抗蒸腾产品对黄瓜生长的影响

由图1可知,定植后42d,在各处理中,T1处理黄瓜株高值最大,为267.3cm,与CK差异不显著,T1处理比T2处理株高显著提高17.75%,T3、T4和T5平均株高分别为247.7、258.7、249.0cm,均与T1和CK差异不显著。T1和CK处理叶片数均为28.3片,分别比T2、T3和T4处理明显提高16.44%、10.36%和11.84%。T1和T5处理SPAD分

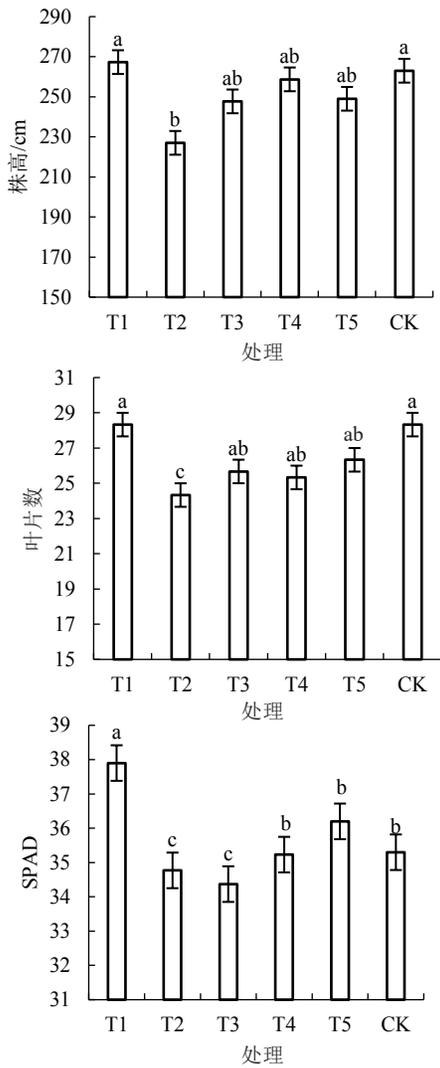


图1 不同抗蒸腾产品对黄瓜生长的影响(定植后42 d)

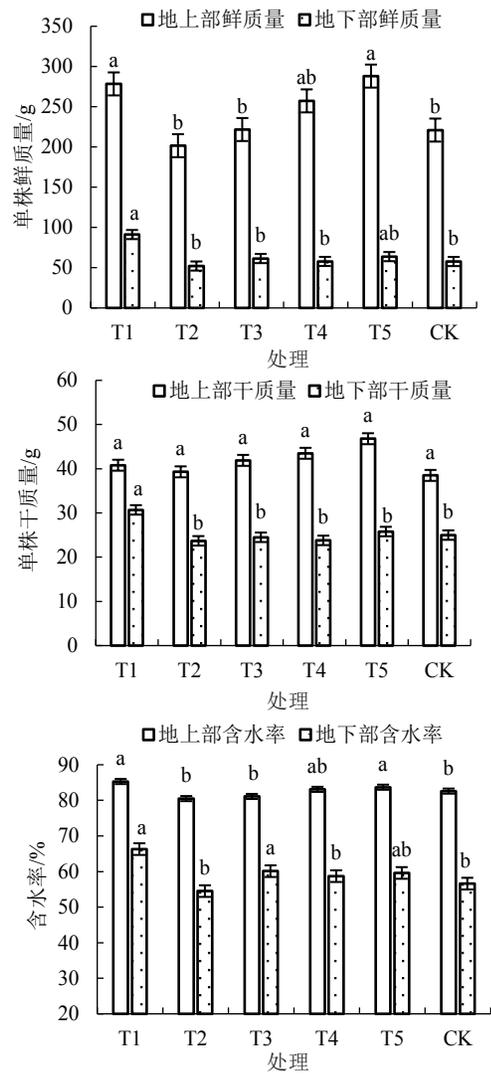


图2 不同抗蒸腾产品对黄瓜生物量的影响

别为37.9、36.2,比CK分别提高7.36%和2.55%。T1处理黄瓜株高、叶片数和SPAD等生长指标优于其他处理。

2.2 不同抗蒸腾产品对黄瓜生物量的影响

从图2可以看出,T1处理地上部单株鲜质量为278.4 g,比CK显著提高了25.97%;地下部单株鲜质量T1处理最大,为91.2 g,显著高于T2、T3、T4、CK处理,比CK处理的57.7 g提高了58.06%。地上部单株干质量中各处理数值均比CK高,T4和T5分别比CK(38.5 g)提高了12.99%和21.56%,但各处理之间差异均不显著。地下部单株干质量T1处理最大,为30.7 g,显著高于其他处理,比CK处理的25.0 g显著提高了22.80%,T1处理地上部和地下部含水率均最大,分别为85.3%和66.3%,比CK的地上部含水率(82.6%)和地下部含水率(56.6%)分别显著提高2.7和9.7个百分点;T5处理的地上部含水率83.7%、T3处理的地下部含水率

60.1%均显著高于CK相应指标,其余各处理含水率与CK差异均不显著。

2.3 不同抗蒸腾产品对黄瓜产量和品质的影响

由表2可以看出,T1、T3和CK单株产量显著高于T2、T4处理,T3单株产量为1.22 kg,比CK提高5.17%,T1单株产量为1.16 kg,比T2和T4处理分别显著提高28.89%和22.11%。

喷施不同抗蒸腾产品,可以对黄瓜果实品质指标产生影响。在各处理中,T1、T4和T5维生素C含量(w,后同)分别为8.74、8.47、7.65 mg·100 g⁻¹,分别比CK显著提高25.70%、21.86%和10.13%。T4处理可溶性固形物含量最高,为3.20 g·100 g⁻¹,T2处理最小,为3.03 g·100 g⁻¹,T4处理显著高于T2,其他处理之间及其他处理与T2、T4之间均无显著差异。T1处理可溶性糖含量最高,为2.31 g·100 g⁻¹,比CK处理显著提高7.00%。T1可溶性蛋白含量最高,为0.290 mg·g⁻¹,但与CK差异不显著,T1和

表2 不同抗蒸腾产品对黄瓜单株产量和果实品质的影响

处理	单株产量/kg	w(维生素 C)/ (mg·100 g ⁻¹)	w(可溶性固形物)/ (g·100 g ⁻¹)	w(可溶性糖)/ (g·100 g ⁻¹)	w(可溶性蛋白)/ (mg·g ⁻¹)	w(亚硝酸盐)/ (mg·kg ⁻¹)
T1	1.16±0.22 a	8.74±0.12 a	3.17±0.03 ab	2.31±0.05 a	0.290±0.003 a	0.338±0.027 a
T2	0.90±0.12 b	7.41±0.22 bc	3.03±0.03 b	2.10±0.09 c	0.204±0.006 c	0.218±0.013 b
T3	1.22±0.16 a	7.23±0.07 bc	3.13±0.03 ab	2.29±0.03 ab	0.260±0.032 ab	0.124±0.016 c
T4	0.95±0.09 b	8.47±0.20 a	3.20±0.06 a	2.21±0.03 abc	0.173±0.016 c	0.077±0.005 d
T5	1.01±0.14 ab	7.65±0.001 b	3.17±0.07 ab	2.26±0.003 ab	0.192±0.008 c	0.095±0.004 cd
CK	1.16±0.13 a	6.95±0.21 c	3.13±0.07 ab	2.16±0.03 bc	0.264±0.008 a	0.115±0.007 cd

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

CK 显著高于 T2、T5、T4, T4 处理可溶性蛋白含量最低,为 0.173 mg·g⁻¹。T4 处理亚硝酸盐含量最低,为 0.077 mg·kg⁻¹; T1 处理亚硝酸盐含量最高,为 0.338 mg·kg⁻¹, T1、T2 亚硝酸盐含量均显著高于 CK, T3、T4、T5 和 CK 相比无显著差异。综合分析表明, T1 处理维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白含量均显著高于对照,但亚硝酸盐含量也最高。

2.4 基于熵权的 TOPSIS 模型的不同抗蒸腾产品对黄瓜影响综合评价分析

通过熵权计算公式,计算得出熵值 $H_j=(0.999 2, 0.999 1, 0.999 7, 0.999 4, 0.998 9, 0.999 9, 0.999 7,$

$0.990 3, 0.920 6, 0.998 1, 0.996 5)$, 根据熵值计算出不同指标的熵权重,判断出各个指标对于评定最优方案重要性, $\omega_j=(0.007 9, 0.009 1, 0.003 0, 0.006 2, 0.010 7, 0.000 8, 0.003 1, 0.098 0, 0.805 7, 0.019 7, 0.035 8)$ 。可以看出黄瓜果实内亚硝酸盐含量熵权值最大为 0.805 7, 表示该指标变异性小,提供的信息量少;黄瓜果实内可溶性固形物含量的熵权值为 0.000 8, 表征指标变异性大,提供的信息量最多,为了消除评价指标之间不同量纲对决策方案造成的影响,利用熵权重将原始矩阵进行标准化处理,计算出标准化决策矩阵如下(图 3)。

$$Z = \begin{bmatrix} 0.007 9 & 0.009 1 & 0.003 0 & 0.006 2 & 0.010 7 & 0.000 6 & 0.003 1 & 0.098 0 & 0 & 0.019 7 & 0.029 1 \\ 0 & 0 & 0.000 3 & 0.003 7 & 0 & 0 & 0 & 0.026 0 & 0.369 3 & 0.005 1 & 0 \\ 0.004 1 & 0.003 0 & 0 & 0.004 0 & 0.005 1 & 0.000 5 & 0.002 8 & 0.073 3 & 0.659 3 & 0.003 1 & 0.035 8 \\ 0.006 2 & 0.002 3 & 0.000 7 & 0.005 0 & 0.003 9 & 0.000 8 & 0.001 6 & 0 & 0.805 7 & 0.016 7 & 0.005 6 \\ 0.004 3 & 0.004 5 & 0.001 5 & 0.005 4 & 0.004 6 & 0.000 6 & 0.002 4 & 0.016 2 & 0.748 8 & 0.007 8 & 0.012 3 \\ 0.007 1 & 0.009 1 & 0.000 8 & 0 & 0.002 0 & 0.000 5 & 0.000 9 & 0.076 3 & 0.689 0 & 0 & 0.029 1 \end{bmatrix}$$

图3 标准化决策矩阵

接着,计算出各评价方案和最佳方案的正理想解、负理想解向量,对于高优指标则最大值为正理想解,最小值为负理想解,低优指标则相反,正理想解 $x^+=(0.007 9, 0.009 1, 0.003 0, 0.006 2, 0.010 7, 0.000 8, 0.003 1, 0.098 0, 0, 0.019 7, 0.035 8)$ 。

负理想解 $x^-=(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.805 7, 0, 0)$ 。其中黄瓜果实中亚硝酸盐含量属于低优指标,其余指标均为高优指标。最终根据各个评价方案与理想方案的欧氏距离,计算出接近度 C_i ,由表 3 可以看出,各个方案的评价顺序为 T1>T2>T3>CK>T5>T4, T1 处理综合分析排名最高。

3 讨论与结论

水分对于黄瓜正常生长具有重要作用,在黄瓜处于干旱缺水条件下,水分胁迫会减缓其生长发育

表3 不同抗蒸腾产品处理对黄瓜影响的 TOPSIS 综合分析

处理	C_i	排序
T1	0.991 8	1
T2	0.535 9	2
T3	0.202 8	3
T4	0.024 0	6
T5	0.075 7	5
CK	0.171 6	4

进程,株高、茎粗等生长指标会受到不同程度的影响,光合产物运输受阻,最终会影响黄瓜产量和品质形成^[21]。减少水资源用量,发展节水农业,是实现农业可持续发展的必经之路,利用各项技术手段提高作物的抗旱能力具有重要意义^[22],当作物遭受干旱胁迫时,叶片气孔导度降低,抑制了蒸腾的同时,正常光合作用也受到影响,通过喷施抗蒸腾剂产

品,优化气孔导度,在保持正常光合作用的前提下,减少奢侈蒸腾量,具有重要意义^[6]。前人研究表明,喷施抗蒸腾剂产品后,可以提高葡萄叶片叶绿素含量^[23]。本试验表明,不同类型抗蒸腾剂产品应用效果不同,其中代谢型国光抗蒸腾剂处理黄瓜叶片 SPAD 比 CK 提高 7.37%,可能是因为不同产品适用范围不一致,黄瓜叶片叶面积较大,通过高分子化合物在叶片表面形成薄膜,减少了气孔水分散失,减缓干旱胁迫对黄瓜叶片造成的影响^[24]。

抗蒸腾剂产品可以降低蒸腾强度,减缓植物的萎蔫程度,提高组织含水率。前人在小麦^[25]、黄瓜^[7]等作物上的研究表明,喷施抗蒸腾剂产品后均起到减少水分散失的作用。笔者研究表明,代谢型抗蒸腾剂使用效果优于成膜型抗蒸腾剂,T1 处理地上部和地下部含水率均最大,分别为 85.3%和 66.3%,比 CK 提高 2.7 和 9.7 个百分点。原因可能是代谢型抗蒸腾剂通过调控脯氨酸等抗旱物质,提高了根系渗透势,促进黄瓜吸水^[26]。水分对于作物产量和品质形成具有重要的调控作用,植物在遇到干旱胁迫时,会造成产量损失^[22],抗蒸腾剂产品减缓植物萎蔫,确保光合产物的供应,增强根系吸收养分的能力,从而提高产量和品质,本研究结果和已有研究成果一致^[27],T3 处理单株产量比 CK 提高 5.17%。维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白含量等是评价黄瓜品质的重要指标,T1、T4 和 T5 处理维生素 C 含量分别比对照提高 25.70%、21.86%和 10.13%,T1 处理维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白含量均显著高于对照。

通过采用基于熵权的 TOPSIS 模型对不同抗蒸腾剂产品对黄瓜的影响进行综合评价,黄瓜果实内可溶性固形物含量为评价结果提供最多信息量,最终评价结果显示 T1 处理与最优值的相对接近度为 0.991 8,在所有处理中最高,T4 处理为 0.024 0,为所有处理中最低。T1 处理为代谢型国光抗蒸腾剂,主要功能成分为黄腐酸,稀释 500 倍,通过叶面喷施,共喷施 3 次,可以有效提高黄瓜抗旱能力,促进生长和产量、品质形成。

参考文献

[1] WANG Z Y, LIU Z X, ZHANG Z K, et al. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in solar greenhouse based on 20 cm standard pan evaporation in Northeast China[J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, 123(1): 51-57.
 [2] 吴普特,冯浩,牛文全,等.现代节水农业技术发展趋势与未来研发重点[J]. *中国工程科学*, 2007, 9(2): 12-18.
 [3] 聂书明.油菜素内酯外源施用与其受体过表达对番茄耐旱性和品质的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2018.
 [4] 王一鸣.我国抗蒸腾剂的研究和应用[J]. *腐植酸*, 2000(4):

35-40.
 [5] 李程,梁宝魁,王晓峰.油菜素内酯提高蔬菜作物抗逆性的研究进展[J]. *中国蔬菜*, 2015(11): 12-18.
 [6] 张小雨,张喜英.抗蒸腾剂研究及其在农业中的应用[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8): 938-944.
 [7] 陈怡昊,李波,王奇峰,等.FA 型抗蒸腾剂对温室黄瓜生长和产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(4): 131-134.
 [8] 陈怡昊,李波,丰雪,等.复合醇抗蒸腾剂喷施模式对黄瓜产量、品质及水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(6): 9-15.
 [9] JIANG Y P, CHENG F, ZHOU Y H, et al. Cellular glutathione redox homeostasis plays an important role in the brassinosteroid-induced increase in CO₂ assimilation in *Cucumis sativus*[J]. *New Phytologist*, 2012, 194(4): 932-943.
 [10] KETTLEWELL P S. Waterproofing wheat - a re-evaluation of film antitranspirants in the context of reproductive drought physiology[J]. *Outlook on Agriculture*, 2014, 43(1): 25-29.
 [11] 虞娜,吴昌娟,张玉玲,等.基于熵权的 TOPSIS 模型在保护地番茄水肥评价中的应用[J]. *沈阳农业大学学报*, 2012, 43(4): 456-460.
 [12] 张浩渺.基于熵权改进的 TOPSIS 模型在苏州河水质综合评价中的应用[J]. *西北水电*, 2019(3): 12-15.
 [13] FENG W, KANG S, DU T, et al. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1228-1238.
 [14] 赵思腾,师尚礼,李小龙,等.基于熵权-TOPSIS 模型筛选中旱作区适宜玉米轮作的土壤可持续系统[J]. *草地学报*, 2019, 27(4): 997-1005.
 [15] 季延海,李炎艳,武占会,等.灌溉量对根际栽培番茄生长和品质的影响[J]. *中国蔬菜*, 2019(10): 19-25.
 [16] 蔡庆生.植物生理学实验[M].北京:中国农业大学出版社, 2013.
 [17] 孟宪敏,刘明池,季延海,等.种植密度对封闭式槽培黄瓜产量、品质及光合作用的影响[J]. *北方园艺*, 2019(9): 60-68.
 [18] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社, 1998.
 [19] 赵世杰,史国安,董新纯.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业科学技术出版社, 2002.
 [20] 张洋.不同施氮处理对温室黄瓜产量、品质及效益的影响[J]. *青海农林科技*, 2017(4): 5-8.
 [21] 张敏,李静媛,张占彪,等.干旱胁迫对‘夕阳红’幼苗生长和生理生化指标的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(9): 99-104.
 [22] 徐银萍,潘永东,刘强德,等.生长后期干旱早水对饲草大麦产量、品质及叶绿素含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(2): 192-197.
 [23] 白云岗,张江辉,卢震林,等.极端干旱区葡萄园喷施抗旱蒸腾剂效果研究[J]. *北方园艺*, 2010(16): 44-46.
 [24] 师长海,孔少华,翟红梅,等.喷施抗蒸腾剂对冬小麦旗叶蒸腾效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1091-1095.
 [25] 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): 703-708.
 [26] 周莉娜,孙丽蓉,毛晖,等.黄腐酸抗旱营养剂对小麦和玉米生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(1): 154-158.
 [27] 徐磊,杨培岭,韩玉国,等.FA 旱地龙在京郊甜瓜栽培上的应用研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 183-185.