排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2014 年 6 月 June 2014 | 第 32 卷 第 6 期 Vol. 32 No. 6
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.13.0010

刘浩

温室番茄节水调质灌水方案评价

刘浩，段爱旺，孙景生，宁慧峰，王峰
（中国农业科学院农田灌溉研究所农业部作物需水与调控重点实验室，河南 新乡 453002）

摘要： 为寻求日光温室番茄优质高效的灌溉制度，采用设置于温室番茄冠层齐平位置的水面蒸发测定装置，设计 3 种基于水面蒸发量的灌水间隔水平和 4 种灌水量水平组合处理，依据小区试验观测结果，分析确定了以番茄产量、水分利用率、单果重、可溶性固形物质量分数及果实硬度等 5 项指标为主的节水调质灌溉制度评价体系；在采用变异系数法确定出各指标权重的基础上，借鉴 TOPSIS 综合评价方法，建立了温室番茄节水、优质、高产相统一的综合评价模型，应用该模型确定基于水面蒸发量的温室番茄节水调质灌溉制度，即当累积水面蒸发量 E_{pan} 达到 10 mm ±2 mm 时进行灌溉，灌水量为 $0.9E_{pan}$，在产量不降低的情况下，提高了水分利用率，并在一定程度上提高了果实的营养品质和储运品质.

关键词： 番茄；灌溉制度；水面蒸发量；变异系数法；TOPSIS 法
中图分类号： S274 **文献标志码：** A **文章编号：** 1674-8530(2014)06-0529-06
刘浩，段爱旺，孙景生，等. 温室番茄节水调质灌水方案评价[J]. 排灌机械工程学报，2014，32(6)：529-534，540.

Evaluation of irrigation scheme with high quality and efficiency for greenhouse grown tomato

Liu Hao, *Duan Aiwang*, *Sun Jingsheng*, *Ning Huifeng*, *Wang Feng*
(Key Laboratory of Crop Water Use and Regulation, Ministry of Agriculture, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002, China)

Abstract: This study was conducted to find an irrigation scheme for greenhouse grown tomato with high quality and efficiency based on evaporation determination from a 20 cm standard diameter pan placed above the crop canopy. Three irrigation intervals based on accumulate pan evaporation (Epan) values and four irrigation level combination treatments were designed. By means of results of plot experiment in greenhouse, the evaluation system of irrigation scheme with water saving and good quality for greenhouse grown tomato was determined by five main indexes such as tomato yield, water use efficiency, mean fruit weight, content of soluble solids and fruit firmness. Based on the weight of each index calculated by variation coefficient method, a comprehensive evaluation model with high quality, yield and efficiency was further established with TOPSIS method. Using the evaluation model, irrigation scheme with water saving and good quality was determined based on pan evaporation. Irrigation was occurred when Epan reached 10 mm ±2 mm with 0.9 Epan irrigation water applied, which could improve water utilization efficiency, fruit nutritional and storage quality in some certain extent without yield reduction.

Key words: tomato; irrigation scheduling; pan evaporation; variation coefficient method; TOPSIS

收稿日期： 2013-01-05；**网络出版时间：** 2014-06-20
网络出版地址： http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.13.0010.html
基金项目： 国家 863 计划项目(2011AA100509，2011AA100502)；国家自然科学基金资助项目(51009140)
作者简介： 刘浩(1977—)，男，内蒙古鄂尔多斯人，助理研究员，博士(liuhao-914@163.com)，主要从事节水灌溉和作物高效用水技术研究.
孙景生(1963—)，男，辽宁建平人，研究员，博士生导师(通信作者，jshsun623@yahoo.com.cn)，主要从事非充分灌溉原理与新技术研究.

番茄种植区域十分广泛,其栽培面积占日光温室总面积的30% ~40%. 番茄富含维生素及其他营养元素,番茄除兼具水果和蔬菜功能外,还具有神奇的治疗保健作用[1-2]. 然而,番茄产量的高低及品质的优劣不仅受遗传因素影响,还受果实生长环境因素影响[3-4]. 研究表明,灌溉制度对番茄整个生育期的生长至关重要,灌溉水的供给量、灌水频率、生长过程中水分亏缺、水分过剩和土壤水分波动太大都会对番茄的产量及品质产生影响[5-6].

综合评价优劣的关键在于各指标在评价体系中权重的确定,评价指标权重确定得是否得当直接决定着评价结果的准确性. 权重的确定方法主要分为主观权重和客观权重两大类. 主观赋权法主要包括专家调查法、层次分析方法、模糊综合评价方法等,其权重的确定是在评价者主观判断的基础上,通过加工处理得到. 客观赋权法可以充分利用评价对象所提供的数据信息,客观地给各指标赋权,这种方法操作简单且具有科学性,包括变异系数法、主成分分析法、因子分析法、熵权系数法、局部变权法等. 不论主观赋权法还是客观赋权法,各种方法都有优缺点,对不同的评价目标而言,采取适宜的权重确定方法是评价结果是否可信的关键.

蒸发皿测量的水面蒸发量 E_p 能够综合反映当时的气象状况,根据预先设定的蒸发皿系数 K_{cp} 来制定灌溉计划,A 级标准蒸发皿在作物灌溉制度研究中得到了广泛应用[7-10],但由于 A 型蒸发皿的价格昂贵,国内的研究多采用 20 cm 标准水面蒸发皿制定灌溉制度[6,11-13]. 各种基于水面蒸发量的灌溉制度均可对适宜灌水做出判断,但大多是在对试验资料的分析基础上通过主观判断得到,判断结果会因决策者的阅历和角度的不同而出现差异,建立适应的评价体系、指标和评价方法能够弥补主观判断的不足,而在节水调质灌溉制度综合评价体系方面研究较少[14]. 基于此,文中综合考虑高产、节水和优质,采用变异系数法确定评价体系中各评价指标的权重,借鉴 TOPSIS 综合评价方法,建立温室番茄综合评价模型,从而确定基于水面蒸发量的温室番茄节水调质灌溉制度.

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验于 2011 年和 2012 年 3 月至 7 月在中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场日光温室中进行,试验地位于 N35°19′,E113°53′,海拔 73.2 m,多年平均气温 14.1 °C,无霜期 210 d,日照时数 2 398.8 h. 番茄试验所用温室长 40 m、宽 8.5 m;温室为东西走向,覆盖无滴聚乙烯薄膜,且温室内没有补温设施. 试验地土质为沙壤土,耕层土壤容重为 1.38 g/cm^3,田间持水量为 24%(质量分数),地下水埋深大于 5 m. 土壤碱解氮、速效磷和有效钾质量比分别为 45.3,4.2,91.2 mg/kg,土壤有机质质量比为 31.3 g/kg.

1.2 试验设计

将直径为 20 cm 的标准蒸发皿置于番茄冠层上方,蒸发皿的底部与冠层高度齐平,其高度随着植物的生长而进行调整,测定温室内的水面蒸发量. 番茄供试品种为金顶新星,在温室中整畦种植,畦长 7.5 m,宽 1.1 m,采用宽窄行种植方式,宽行 65 cm,窄行 45 cm,株距 30 cm. 在宽行中起垄以便试验观测. 在每行上铺设 1 条滴灌管,滴头间距与株距相同. 为确保幼苗的成活率,定植后各处理均进行 1 次灌水,灌水定额为 20 mm. 试验设计 3 种基于累积水面蒸发量的灌水间隔(I_1,10 mm ±2 mm;I_2,20 mm ±2 mm;I_3,30 mm ±2 mm),当相邻 2 次灌溉之间的累积水面蒸发量达到目标值时进行灌溉;为确定适宜灌水定额,设计 4 种基于蒸发皿系数的灌水量水平,蒸发皿系数 K_{cp1},K_{cp2},K_{cp3},K_{cp4} 分别为 0.50,0.70,0.90,1.10,将 3 种灌水间隔水平和 4 种灌水量水平进行完全组合,共设计 12 个处理,每个处理 3 次重复;灌水量用水表计量. 各处理之间埋设塑料膜,以防止土壤水分的侧向渗透.

移栽前施干鸡粪 25 t/hm^2、二元复合肥(N,P,K 质量分数的比例为 18∶46∶0)390 kg/hm^2、硫酸钾(含 K 50%)260 kg/hm^2 作为底肥,在番茄开花坐果期随灌溉水追施尿素 240 kg/hm^2. 为了防止番茄苗徒长,前 3 周不进行灌溉,直至 0 ~40 cm 土层的土壤含水率低于田间持水率的 60% 时各处理均灌水 20 mm,基于水面蒸发量的灌溉制度开始实施,累积水面蒸发量由安装在番茄冠层上方的 20 cm 标准蒸发皿测量得到.

1.3 测定项目与试验方法

1.3.1 耗水量

土壤含水率采用烘干法每 7 ~10 d 测定 1 次,每 20 cm 为 1 层,测定深度为表层以下 100 cm 土层,温室番茄的耗水量采用水量平衡法计算.

灌水量计算公式为

$$I_r = \frac{1}{1\,000} A K_{cp} E_{pan}, \quad (1)$$

式中：I_r 为小区灌溉量，m^3；A 为小区面积，m^2；E_{pan} 为番茄冠层上方 20 cm 标准蒸发皿的累积水面蒸发量，mm；K_{cp} 为蒸发皿系数；1 000 为单位转换系数.

1.3.2　水分利用率

水分利用率计算公式为

$$WUE = \frac{100 Y_a}{ET}, \quad (2)$$

式中：WUE 为水分利用率，kg/m^3；Y_a 为番茄产量，t/hm^2；ET 为番茄耗水量，mm；100 为单位转换系数.

每次果实采摘后，各处理均采用精度为 5 g 的电子秤称量计产，每个小区产量单独核算，同时每个处理选取有代表性的植株 20 株，用精度为 0.01 g 的电子天平测定单果鲜质量，用游标卡尺测定果实横径和纵径. 番茄采摘后，各处理每个小区选取有代表性番茄果实 2 颗测定可溶性固形物和硬度，可溶性固形物采用 Atago 公司生产的 PR－32α 型折射计测定，硬度采用 GY－3 型硬度计测定，每隔 7～10 d 测定 1 次.

2　结果与分析

2.1　评价指标的确定

表 1 给出了 2011 年和 2012 年基于水面蒸发量的不同灌水间隔和灌水量对温室番茄产量 Y_a、水分利用率 WUE、单果重 M_F、果实可溶性固形物 TSS 和果实硬度 F_F 的影响.

表 1　综合评价体系中各指标的试验结果

Tab.1　Experimental result of indicators for comprehension evaluation system

年份	处理	Y_a/（t·hm^{-2}）	WUE/（kg·m^{-3}）	M_F/g	TSS/%	F_F/（kg·cm^{-2}）
2011	I_1K_{cp1}	108.51f	39.98d	131.2c	5.69a	2.43a
	I_1K_{cp2}	141.76c	47.94a	150.2b	5.21bcd	2.26ab
	I_1K_{cp3}	151.79a	46.98a	157.8a	5.02cde	2.13bc
	I_1K_{cp4}	149.20ab	38.45e	159.0a	4.39fg	2.08bcd
	I_2K_{cp1}	105.64f	40.28d	127.1c	5.65ab	2.38a
	I_2K_{cp2}	140.32cd	47.70a	151.0b	4.80de	2.21ab
	I_2K_{cp3}	147.54b	43.73b	157.3a	4.59ef	2.09bcd
	I_2K_{cp4}	148.04ab	38.42e	159.9a	4.38fg	2.05bcd
	I_3K_{cp1}	99.59g	39.98d	124.5c	5.33abc	2.31ab
	I_3K_{cp2}	131.24e	46.97a	152.1b	4.75ef	2.07bcd
	I_3K_{cp3}	137.04d	42.28c	156.3a	4.40fg	2.00cd
	I_3K_{cp4}	137.88cd	36.21f	159.8a	4.28g	1.99d
2012	I_1K_{cp1}	121.25e	45.70abc	146.2d	4.80a	2.43a
	I_1K_{cp2}	143.63bc	47.05a	163.2c	4.37b	2.26ab
	I_1K_{cp3}	152.08a	45.03abc	165.1bc	4.30bc	2.18b
	I_1K_{cp4}	156.02a	42.22de	174.8ab	3.96cd	2.08bc
	I_2K_{cp1}	116.29e	46.06ab	145.8d	4.76a	2.45a
	I_2K_{cp2}	139.82cd	46.55ab	164.0c	4.19bcd	2.14b
	I_2K_{cp3}	150.22ab	43.60cd	165.8bc	4.08bcd	2.02bc
	I_2K_{cp4}	152.05a	39.39fg	176.8a	3.95cd	2.02bc
	I_3K_{cp1}	104.81f	40.72ef	142.6d	4.75a	2.45a
	I_3K_{cp2}	135.33d	44.79bc	160.2c	4.21bc	2.08bc
	I_3K_{cp3}	144.31bc	43.52cd	168.5ab	3.96cd	1.95c
	I_3K_{cp4}	141.91cd	37.48g	166.7bc	3.91d	1.95c

注：表中同列小写字母相同者，表示差异不具有统计学意义（$P>0.05$）.

从表中可以看出，不同水分处理对番茄产量、水分利用率、单果重、果实可溶性固形物及硬度等指标的影响均达到显著水平（$P<0.05$）. 综合 2 年的试验结果可以看出，在同一灌水量下，Y_a，WUE，M_F，TSS，F_F 均有随灌水间隔的减小而增大的趋势. 在同一灌水间隔下，产量对灌水量的响应有一阈值（$0.9E_{pan}$），当灌水量小于该值时，产量随灌水量的增大而增大，当灌水量大于该值时，产量随灌水量的增大而增大的程度较小，甚至有降低的趋势；WUE 对灌水量的响应也存在一阈值，但与产量响应结果不一致，该阈值为 $0.7E_{pan}$，当灌水量小于该值时，WUE 随灌水量的增大而增大，当灌水量大于该值时，WUE 随灌水量的增大而逐渐降低；M_F 随灌水量的增大而逐渐增大，而 TSS 含量与 F_F 随灌水量的

增大而逐渐减小. 由此可见,各评价指标对水分状况的响应规律和程度均不一致,单独采用任何一个指标都不能合理确定优质、高产、高效的灌溉制度,需建立一个综合评价模型.

温室番茄节水调质灌溉制度的确定原则是在不减产或产量降低程度较小的情况下,提高 *WUE* 和果实品质. *TSS* 质量分数、VC 质量分数、可溶性糖质量分数等品质指标是番茄果实的主要营养品质指标,从有关文献的研究结果表明,*TSS* 质量分数、VC 质量分数及可溶性糖质量分数对水分状况的响应规律一致,三者均随着水分亏缺程度的增大而增大[15-16],且三者呈极显著的正相关关系($P<0.01$),说明上述3个指标均可表征番茄果实的营养品质,考虑到 *TSS* 质量分数测定方法简单,且测定结果相对于其他指标更稳定,可将 *TSS* 质量分数作为综合反映番茄果实营养品质的指标. 单果重和硬度分别代表了番茄果实的外观品质和储运品质. 综上所述,文中将果实可溶性固形物质量分数、单果重、硬度分别作为果实营养品质、外观品质、贮运品质的评价指标,这些指标可综合反映番茄果实的品质优劣;另外,将番茄产量、*WUE* 作为高产节水指标. 综合考虑上述5项指标,采用数学统计方法,对温室番茄优质、高产、高效相统一的灌溉制度做出最佳判断.

2.2 评价体系中各指标权重确定

变异系数法(coefficient of variation method)是直接利用各项指标所包含的信息,通过计算得到评价体系中指标的权重,由于评价体系中各指标的量纲不同,不能直接比较各指标的差异程度,为了消除各指标不同的影响,用各指标的变异系数来表征其取值的差异程度. 在温室番茄节水调质灌溉制度的综合评价体系中,各指标的变异系数 *CV* 表征了各指标数据差异的相对大小. 指标取值的差异越大,则由其反映的信息相对较为充分,也就是越难实现的指标,说明该指标在处理间差异具有统计学意义,该指标能反映被评价处理间的差距. 否则,如果某项指标数据在处理间差异不大,有明显的集中趋势,该指标不能反映被评价处理间的差距,利用这项指标的数据辨别不同处理差异的能力较小. 在节水调质灌溉制度的综合评价体系中,上述各项评价指标在评价体系中的作用相当,因而变异系数法适用于各指标权重确定. 变异系数法确定权重的计算公式为

$$W_i = CV_i / \sum_{i=1}^{n} CV_i, \tag{3}$$

$$CV_i = \sigma_i / \bar{x}_i, \tag{4}$$

式中:W_i 为第 i 个指标的权重;CV_i 为第 i 个指标的变异系数;σ_i 为第 i 个指标的标准差;$\bar{x}_i$ 为第 i 个指标的平均值.

采用变异系数法计算出温室番茄节水调质灌溉制度综合评价体系中各指标的权重结果,如表2所示. 从表中可以看到,2011年番茄试验期5项评价指标中产量的权重最大,果实硬度的权重最小;2012年试验期5项评价指标中产量的权重最大,单果重的权重最小,说明番茄产量在各水分处理的差异最大,其数据信息能较为充分地反映处理间的差异. 各指标的权重在一定程度上受年际变化的影响,但同一指标权重在不同年份的变化幅度相对较小,说明采用变异系数法确定本研究综合评价体系中各指标权重较为稳定,可以用来确定评价指标的权重.

表2 各指标在评价体系中的权重

Tab. 2 Weight of evaluation indicators for comprehension evaluation system

年份	处理	Y_a/(t·hm^{-2})	*WUE*/(kg·m^{-3})	M_F/g	*TSS*/%	F_F/(kg·cm^{-2})	总和
2011	标准差	18.32	4.14	13.31	0.50	0.15	
	平均值	133.21	42.41	148.87	4.87	2.17	
	变异系数	0.137 5	0.097 6	0.089 4	0.102 6	0.068 7	0.495 9
	权重	0.277 3	0.196 8	0.180 4	0.206 9	0.138 6	1
2012	标准差	16.01	3.01	11.16	0.33	0.19	
	平均值	138.14	43.51	161.64	4.27	2.17	
	变异系数	0.115 9	0.069 2	0.069 0	0.078 4	0.087 0	0.419 5
	权重	0.276 2	0.164 9	0.164 5	0.186 9	0.207 4	0.999 9

2.3 基于 TOPSIS 法的综合评价模型

TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)法是 C. L. Hwang 和 K. Yoon 于1981年首次提出. TOPSIS 法根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序的方法,是在现有的对象中进行相对优劣的评价. 其基本思

想是：基于归一化后的原始数据矩阵，找出有限方案中最优方案和最劣方案（分别用最优向量和最劣向量表示），然后分别计算各评价对象与最优方案和最劣方案的距离，获得各评价对象与最优方案的相对接近程度，以此作为评价优劣的依据.

针对本研究的具体方法：有 12 个评价处理、5 个评价指标，原始评价指标的数据可写为矩阵 $\boldsymbol{X}=(X_{ij})_{12\times5}$. 对高优（越大越好）、低优（越小越好）指标分别进行归一化变换，构造出规范化后的加权矩阵，即

$$Z_{ij}=W_i\frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{12}X_{ij}^2}},\tag{5}$$

或

$$Z_{ij}=W_i\frac{1/X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{12}1/X_{ij}^2}}.\tag{6}$$

归一化得到加权矩阵 $\boldsymbol{Z}=(Z_{ij})_{12\times5}$ 及各列的最大和最小值构成的最优和最劣向量结果如表 3 所示.

表 3　各指标归一化后的加权矩阵

Tab. 3　Weighted matrix of evaluation indicator normalized

年份	处理	Y_a	*WUE*	M_F	*TSS*	F_F
2011	I_1K_{cp1}	0.064 649	0.053 327	0.045 731	0.069 386	0.044 772
	I_1K_{cp2}	0.084 457	0.063 939	0.052 360	0.063 491	0.041 702
	I_1K_{cp3}	0.090 434	0.062 663	0.055 011	0.061 255	0.039 195
	I_1K_{cp4}	0.088 889	0.051 283	0.055 429	0.053 598	0.038 376
	I_2K_{cp1}	0.062 940	0.053 730	0.044 300	0.068 878	0.043 928
	I_2K_{cp2}	0.083 600	0.063 615	0.052 634	0.058 511	0.040 628
	I_2K_{cp3}	0.087 901	0.058 320	0.054 842	0.056 003	0.038 581
	I_2K_{cp4}	0.088 197	0.051 242	0.055 743	0.053 361	0.037 762
	I_3K_{cp1}	0.059 331	0.053 322	0.043 393	0.064 948	0.042 521
	I_3K_{cp2}	0.078 189	0.062 654	0.053 029	0.057 935	0.038 171
	I_3K_{cp3}	0.081 647	0.056 391	0.054 465	0.053 683	0.036 764
	I_3K_{cp4}	0.082 145	0.048 291	0.055 708	0.052 243	0.036 688
	最优向量	0.090 434	0.063 939	0.055 743	0.069 386	0.044 772
	最劣向量	0.059 331	0.048 291	0.043 393	0.052 243	0.036 688
2012	I_1K_{cp1}	0.069 555	0.049 920	0.042 850	0.060 480	0.066 890
	I_1K_{cp2}	0.082 393	0.051 395	0.047 848	0.055 062	0.062 211
	I_1K_{cp3}	0.087 240	0.049 188	0.048 405	0.054 180	0.060 009
	I_1K_{cp4}	0.089 501	0.046 119	0.051 234	0.049 896	0.057 256
	I_2K_{cp1}	0.066 709	0.050 313	0.042 732	0.059 976	0.067 441
	I_2K_{cp2}	0.080 207	0.050 849	0.048 062	0.052 794	0.058 907
	I_2K_{cp3}	0.086 173	0.047 626	0.048 613	0.051 408	0.055 604
	I_2K_{cp4}	0.087 223	0.043 028	0.051 820	0.049 770	0.055 604
	I_3K_{cp1}	0.060 124	0.044 480	0.041 794	0.059 850	0.067 441
	I_3K_{cp2}	0.077 632	0.048 926	0.046 968	0.053 046	0.057 256
	I_3K_{cp3}	0.082 783	0.047 539	0.049 399	0.049 896	0.053 677
	I_3K_{cp4}	0.081 406	0.040 941	0.048 880	0.049 266	0.053 677
	最优向量	0.089 501	0.051 395	0.051 820	0.060 480	0.067 441
	最劣向量	0.060 124	0.040 941	0.041 794	0.049 266	0.053 677

第 i 个评价处理与最优和最劣方案的距离分别用式(7)，(8)计算，计算结果如表 4 所示.

$$D_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{5}(Z_{\max j}-Z_{ij})^2},\tag{7}$$

$$D_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{5}(Z_{\min j}-Z_{ij})^2}.\tag{8}$$

第 i 个评价处理与最优方案的接近程度 C_i（综合评价值）采用式(9)计算：

$$C_i=D_i^-/(D_i^++D_i^-).\tag{9}$$

综合评价值 C_i 值越大，说明该处理的综合效益越好，然后根据 C_i 的计算值的大小对不同水分处理进行排序，文中 C_i 的计算值和各处理的排名结果如表 4 所示. 从表中可以看出，2 个试验期的综合评价体系的决策结果基本一致，最优灌水间隔和灌水量组合是 I_1K_{cp3} 处理，2 年的 C_i 值分别为 0.789，0.737；I_1K_{cp2} 处理次之，2 年的 C_i 值分别为 0.777，0.712；I_3K_{cp1} 处理最差，2 年的 C_i 值分别为 0.295，0.358. 在同一灌水间隔下，温室番茄的综

合效益对灌水量的响应存在一个阈值($0.9E_{pan}$),当灌水量高于或低于此阈值后,番茄的综合效益均有降低的趋势;在同一灌水量下,温室番茄的综合效益随灌水间隔的减小而提高. 总体而言,I_1K_{cp3}处理可实现温室番茄优质高产高效的有机统一,该处理的灌溉控制指标可以作为温室番茄节水调质的灌溉指标.

表4 各处理的排序指标值

Tab.4 Index value for sorting different irrigation treatments

处理	2011				2012			
	D^+	D^-	C_i	名次	D^+	D^-	C_i	名次
I_1K_{cp1}	0.030	0.020	0.408	10	0.022	0.022	0.497	10
I_1K_{cp2}	0.010	0.033	0.777	2	0.011	0.027	0.712	2
I_1K_{cp3}	0.010	0.037	0.789	1	0.011	0.030	0.737	1
I_1K_{cp4}	0.021	0.032	0.602	5	0.016	0.031	0.669	3
I_2K_{cp1}	0.031	0.019	0.380	11	0.025	0.021	0.460	11
I_2K_{cp2}	0.014	0.031	0.691	3	0.015	0.024	0.612	6
I_2K_{cp3}	0.016	0.033	0.671	4	0.016	0.028	0.635	4
I_2K_{cp4}	0.022	0.032	0.592	6	0.018	0.029	0.615	5
I_3K_{cp1}	0.035	0.015	0.295	12	0.032	0.018	0.358	12
I_3K_{cp2}	0.018	0.026	0.590	7	0.018	0.021	0.532	8
I_3K_{cp3}	0.021	0.026	0.554	8	0.019	0.025	0.564	7
I_3K_{cp4}	0.026	0.026	0.500	9	0.022	0.022	0.501	9

3 结 论

1)以温室番茄的产量、水分利用率、单果重、可溶性固形物质量分数和硬度为评价指标,采用变异系数法可较为稳定地反映各评价指标对温室番茄节水调质灌溉制度综合评价体系的影响程度. 结合2011,2012年温室番茄试验数据确定了评价体系中各指标的权重,利用2年试验数据所得到各指标的权重中番茄产量的权重最大,2年分别为0.277 3,0.276 2.

2)采用TOPSIS综合评价方法计算评价值C_i,利用C_i值对不同灌溉制度进行排序. 评价结果表明,I_1K_{cp3}为最优灌水间隔和灌水量组合处理,2年的C_i值分别为0.789,0.737;I_1K_{cp2}处理次之,2年的C_i值分别为0.777,0.712;I_3K_{cp1}处理最差,2年的C_i值分别为0.295,0.358.

3)基于水面蒸发量的温室番茄节水调质灌溉制度:当累积水面蒸发量E_{pan}达到10 mm ± 2 mm时进行灌溉,灌水量为累积水面蒸发量的0.9倍,在产量不降低的情况下,提高了水分利用率,还可以在一定程度上改善果实营养品质和储运品质,从而使番茄的商品价值得到提升,给生产者带来更多的经济效益.

4)节水调质灌溉制度评价体系的关键在于各指标权重的确定,变异系数法有效地传递了评价指标的数据信息与差别,缺点是仅依据了客观数据,忽视了决策者的知识与经验等主观偏好信息,把各指标的实际重要性等同化,有时可能会出现权重计算结果不合理的现象. 因此,今后研究中应将主观权重法和客观权重法结合在一起进行综合评价,这势必将会提高评价结果的准确性和实用性.

参考文献(References)

[1] Favati F, Lovelli S, Galgano F, et al. Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling [J]. Scientia Horticulturae, 2009, 122(4):562-571.

[2] Nguyen M L, Schwartz S J. Lycopene:Chemical and biological properties [J]. Food Technology, 1999, 53(2): 38-45.

[3] Hanson B R, May D M. Crop coefficients for drip-irrigated processing tomato [J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(3): 381-399.

[4] Machado R M A, Oliveira M R G. Tomato root distribution, yield and fruit quality under different subsurface drip irrigation regimes and depths [J]. Irrigation Science, 2005, 24(1):15-24.

[5] Wang D, Kang Y, Wang S. Effect of soil matric potential on tomato yield and water use under drip irrigation condition [J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(2):180-186.

[6] Yuan B Z, Kang Y H, Nishiyama S. Drip irrigation scheduling for tomatoes in unheated greenhouse [J]. Irrigation Science, 2001, 20(3):149-154.

[7] Ertek A, Şensoy S, Kücükyumuk C, et al. Determination of plant-pan coefficients for field-grown eggplant (Solanum melongena L.) using class A pan evaporation values [J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 58-66.

[8] Ertek A, Şensoy S, Gedik Ï, et al. Irrigation scheduling based on pan evaporation values for cucumber (Cucumis sativus L.) grown under field conditions [J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1/2): 159-172.

[9] Simsek M, Kacira M, Tonkaz T. The effect of different drip irrigation regimes on watermelon [Citrullus lanatus (Thunb)] yield and yield components under semi-arid climatic conditions [J]. Aust J Agric Res, 2004, 55(11): 1149-1157.

(下转第540页)