

文章编号: 1007-4929(2006)02-0016-04

# 大棚温室作物需水量计算模型研究进展

孙宁宁,董 斌,罗金耀

(水资源与水电工程科学国家重点实验室 武汉大学,湖北 武汉 430072)

**摘 要:**对目前国内外大棚温室作物需水量计算模型的研究进展进行了归纳总结,在此基础上指出:基于不同气候(主要是室内外气候耦合的相关度)条件下应使用不同的计算模型,并建议对大棚温室微气候复杂的动态系统进行数值模拟及建模,有利于进一步提高计算室内作物需水量模型的精度。

**关键词:**大棚温室;模型;蒸发蒸腾;彭曼-蒙特斯方程

**中图分类号:**S274 **文献标识码:**A

## Advance of Research on Calculation Modeling for Crop Water Requirement in Plastic Greenhouse

SUN Ning-ning, DONG Bin, LUO Jin-yao

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** This paper reviewed the present advance in research on calculation modeling for crop water requirement in plastic greenhouse. Based on it, the authors pointed out that different calculation modeling should be adopted under different climate conditions, which mainly depended on the coupling degree between indoors and outdoors climates. They also suggested that the research on numerical simulation and modeling for complicated dynamic micrometeorological system in greenhouse should be carried out, which was helpful to improve the precise of calculation modeling for water requirement of indoors crops.

**Key words:** greenhouse; modeling; evapotranspiration; Penman-Moneith equation

## 0 引 言

对于水稻、小麦、棉花等大田作物和常见经济作物需水量的研究,国内外已经积累了大量实测资料及一定的理论分析成果<sup>[1~3]</sup>,使之能根据气象、土壤和作物条件,用经验或理论的方法计算作物需水量。但关于蔬菜及设施园艺作物需水量的研究较少,且已取得的成果一般只是局限于当地的气候条件以及特定的温室环境,这些成果能否推广应用,还需进一步的试验资料来证明。因此,通过总结归纳目前国内外大棚温室作物需水量计算模型的进展,正确认识不同气候(主要是室内外气候耦合的相关度)条件下不同模型的特点,以及大棚温室微气候复杂的动态系统,有利于提高对大棚温室作物需水量计算和预测的精度。

## 1 蔬菜作物需水量及其需水规律

### 1.1 计算蔬菜需水量及作物系数 $K_c$ 的方法

与其他农作物相比,蔬菜对水分的反应尤为敏感,叶面积一般比较大,因而水分消耗较多。由于蔬菜需水量受蔬菜种类、品种、当地气候条件、土质、耕作措施及保护地类型影响很大,且对蔬菜需水量的研究工作起步较晚,资料较少,目前对蔬菜的需水量还没有一套成熟的计算方法,一般采用试验测定的方法,或采用需水系数法(蒸发皿法)进行估算<sup>[4,5]</sup>,该法仅需水面蒸发资料,资料易于取得,适用于潮湿的蔬菜地,但在菜地干燥时,误差较大。

齐述华<sup>[6]</sup>根据田间水分和肥料最优控制下测定的土壤水分大小,利用农田水量平衡原理分别计算了花椰菜、苋菜和菠

收稿日期:2005-08-30

基金项目:国家自然科学基金资助研究项目的部分内容(50479040)。

作者简介:孙宁宁(1982-),女,山东人,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。

菜生长期内的作物需水量,并根据实测作物需水量和用气象资料计算得到参考作物蒸散量<sup>[2]</sup>,计算了三种蔬菜在不同生育内的作物系数。结果表明:三种蔬菜在整个生育期需水量分别为 223.8 mm、144.9 mm、148.1 mm;  $K_c$  平均值分别是 0.68、0.94、0.65;除苋菜的  $K_c$  与叶面积指数  $LAI$  的拟合相关性不显著外,花椰菜、苋菜的  $K_c$  与  $LAI$  呈对数关系。

杨启国<sup>[7]</sup>利用大田经验公式来估算温室作物需水量:

$$ET_M = K_c ET_0 \quad (1)$$

式中:  $ET_M$  为作物需水量;  $ET_0$  为参考作物蒸散量,采用 FAO 推荐的布莱尼-柯雷多(Blaney-Criddle)公式<sup>[1]</sup>来计算。

然后参考灌溉区温室实际灌溉量资料,确定了旱作农业区节能日光温室滴灌用水量:

$$ET_a = K_r ET_M \quad (2)$$

式中:  $ET_a$  为滴灌用水量, mm/d;  $K_r$  为作物遮荫率对耗水量的修正系数。

与露地相比,大棚温室内作物生长环境发生了很大的变化,“水分-土壤-植物-空气”系统有着独特的封闭或半封闭性特点:①室内增温保温及小气候效应显著;②由于覆盖,室内光照强度明显弱于室外;③由于封闭,室内空气流动性差,风速接近于零且空气相对湿度经常接近于饱和;④由于自然降水受到阻隔,土壤水分运动方向由下至上的蒸发作用比露地强<sup>[8]</sup>。Forgaz<sup>[9]</sup>对不加热温室大棚园艺作物的蒸发蒸腾研究表明,在作物生长季节,室内作物的腾发量比室外低 30%~40%,并且温室大棚作物由于有支撑作用,其高度往往达到 1.5~2.0 m,这一特性使得有支撑作用的高作物较无支撑作用的矮作物截取更多的太阳辐射,且其较大的  $LAI$  和广阔的冠层结构,能够较好的吸收太阳辐射,从而提高了植物的水热运移,因而具有较高的  $K_c$  值。因此,在计算大棚温室作物需水量时,不能直接套用已有的大田作物需水量的研究成果,而是需要系统地研究大棚温室蔬菜需水量的日变化规律、全生育期内变化规律及年际变化规律,找出主要影响因素及影响机理<sup>[10]</sup>。

## 1.2 温室作物需水规律及其影响因子

温室能够营造或部分营造作物生长的环境,因而使作物免受恶劣气候等自然灾害,实现全天候(或反季节)生长,从而大大提高产量。

徐淑贞等<sup>[11]</sup>通过对日光温室滴灌番茄需水试验发现,在适宜水分条件下,温室内早春番茄的需水规律表现为前期小,中期大,后期小,需水高峰期出现在结果盛期,需水强度主要随气温的升高、番茄株体的增大和蒸腾力的增强而加大,且其需水量与产量之间呈二次抛物线关系。

原保忠<sup>[12]</sup>对番茄膜下滴灌技术在日光温室内的耗水规律研究表明,番茄生育期内实际累计灌水量、日光温室内的累计水面蒸发量和作物的累计需水量,三者基本一致。因此可将日光温室作物冠层的水面蒸发量作为指导灌溉的灌溉量,也可以用室外水面蒸发量的 1/2 作为指导灌溉的指标。

Flávio F 等<sup>[13]</sup>用蒸发皿法对巴西春季温室黄瓜的需水量和作物系数进行了研究,结果表明,黄瓜蒸发蒸腾量和作物系数随着灌水盐度的升高呈线性下降关系,且每增加一个电导

度,蒸发蒸腾量降低 4.6%;  $K_c$  值由于微气候以及作物生长发育的变化,在生长期表现为一定的振荡性。

彭致功等<sup>[14]</sup>通过采用径流计测定日光温室内茄子植株蒸腾速率,系统地研究了茄子的径流变化规律,发现无论在晴、阴天条件下,径流的变化总是紧随太阳辐射的变化而发生规律性的变化(同步甚至超前辐射的变化),且高水分处理的径流大于低水分处理。在茄子径流速率受外界因素的影响中,以光照为最主要因子,其次是气温,再次是大气湿度,土温影响最小,运用回归分析法建立了主要环境气象因子与蒸腾之间的数量关系,不但揭示了环境气象因子对植物水分生理变化的影响,而且还可以利用气象参数预测日光温室内茄子的蒸腾耗水量,然后根据预测值适时适量地供给作物水分。

Morries 等<sup>[15]</sup>和 Yang 等<sup>[16]</sup>通过试验研究发现,作物的蒸腾主要受温室内太阳净辐射和空气饱和和水汽压差 VPD 的影响,而受  $CO_2$  浓度、加热管的温度和营养液传导率的影响较小。这些研究主要限于气候温和(温、湿度较为适中)的海洋性气候和夏季高温低湿的地中海气候区,其结果并不一定适用于我国(季风气候区)或其他气候区的温室环境<sup>[17]</sup>。

## 2 棚室作物需水模型研究进展

作物需水量的大小与气象条件(辐射、温度、日照、湿度、风速)、土壤水分状况、作物种类及其生长发育阶段、农业技术措施、灌溉排水措施等有关。这些因素对需水量的影响既错综复杂又相互联系。对于大棚温室蔬菜需水量,仅有定性的研究分析是远远不够的,如何定量地计算棚室作物腾发量才是关键,所以建立能够精确计算棚室蔬菜需水量的模型成为作物水分研究的热点。A Kano 建立了基于光合生理的经验腾发模型; Legg 提出了基于植物密度、太阳辐射、水汽压为环境变量的经验蒸腾模型<sup>[18]</sup>; Heilman 以及 Yang<sup>[16]</sup>认为成熟作物蒸腾速率主要取决于太阳辐射,并分别建立了紊流扩散模型:

$$ET = (q_{叶} - q_{气}) / (r_a - r_s) \quad (3)$$

式中:  $q_{叶}$ 、 $q_{气}$  分别为叶面和空气的相对湿度;  $r_a$ 、 $r_s$  分别为空气动力学阻力和气孔阻力。

Stanghellini<sup>[19]</sup>提出了受太阳辐射、叶片水汽压差、叶温和  $CO_2$  影响的气孔阻力模型,并根据能量平衡原理建立了叶面蒸腾模型,而 Montero 等<sup>[20]</sup>也用该模型与 Penman-Monteith 方程<sup>[2]</sup>(P-M 方程)进行了比较:

$$\lambda E = \frac{\rho c_p LAI}{\gamma} \left( \frac{e_f^* - e_i}{r_s + r_a} \right) \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为水的蒸发潜热;  $E$  为蒸发率;  $e_f^*$  和  $e_i$  为叶片饱和水汽压和室内实际水汽压;  $\rho$  为室内空气密度;  $c_p$  为空气定压比热;  $\gamma$  为湿度计常数;其他符号意义同前。

Wang 和 Boulard<sup>[21]</sup>认为作物气孔阻力取决于温室气候状况,并对紊流扩散模型和 P-M 方程模型进行改进,结果表明改进模型对白天和黑夜的模拟效果均好; Fatnassi 和 Boulard<sup>[22]</sup>基于温室作物热量平衡,通过计算室内空气温度、湿度及作物温度,提出了简单的温室作物腾发量的线性模型,但该模型只适用于室内外温差较低的夏季通风条件下且无水分胁迫的成熟作物。

可以看出目前以 P-M 方程作为模型的基础来计算温室作物的蒸发蒸腾量的方法使用较多。P-M 方程<sup>[23]</sup>最初是计算均一植物覆盖层的蒸发蒸腾量,如应用到温室环境则可写为<sup>[24]</sup>:

$$\lambda E_s = A(N_g - G_g) + B(\hat{\omega} - \omega_g) \quad (5)$$

式中:  $E_s$  为蒸发蒸腾率;  $N_g$  和  $G_g$  分别是冠层上方的净辐射和土壤热通量;  $\hat{\omega}$  和  $\omega_g$  分别为室内空气饱和湿度和实际湿度;  $A$ 、 $B$  代表冠层对流-扩散阻力综合系数。

Montero 等<sup>[20]</sup>研究表明:在温度(36℃)和空气饱和水汽压差 VPD(3.4 KPa)都很高的条件下用 P-M 方程模型可以精确预报温室天竺葵的蒸发蒸腾量,且随着气温和 VPD 的增大,用气孔计测得的气孔阻力值并没有下降,因而在该试验条件下计算作物腾发率,冠层阻力只是有效辐射( PAR )的函数,而与温度及 VPD 无关。

汪小岳等<sup>[17]</sup>采用 P-M 方程:

$$\lambda E = \frac{R'_n \Delta + (\rho c_p / r_a)(e_a^* - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} \quad (6)$$

式中:  $\Delta$  为饱和水汽压随温度变化曲线的斜率;  $R'_n$  为冠层所得的净辐射;  $e^*$  和  $e_a$  分别为室内饱和水汽压和实际水汽压;  $r_c$  为冠层阻力;其他符号意义同前。

用式(6)模拟南方现代化温室黄瓜在夏季高温高湿条件下的蒸腾速率,并通过冠层微气候和蒸腾速率的观测,分析影响蒸腾的主要温室环境因素,结果表明 P-M 方程模拟黄瓜夏季蒸腾速率结果较为可靠且模型具有一定的鲁棒性。温室黄瓜夏季蒸腾速率随辐射强度(净辐射)和 VPD 的增加而线性增大,但蒸腾速率日最大值出现时间较净辐射滞后而与 VPD 较为一致。

然而不同的季节气候对同一研究模型可能产生不同的影响,罗卫红等<sup>[25]</sup>通过对冬季温室小气候和蒸腾速率与气孔阻力的试验观测,分析了冬季南方温室黄瓜蒸腾速率的变化特征及其与温室小气候要素之间的定量关系,确定了南方现代温室冬季黄瓜冠层阻力  $r_c$  和边界层动力学阻力  $r_a$  的特征值分别为 100 s/m 和 600 s/m,并且采用实际变化的  $r_c$  与  $r_a$  值计算的作物蒸腾速率和累积蒸腾量,和其特征值计算的作物蒸腾速率和累积蒸腾量,与实测值相比较,结果基本一致。冬季温室作物蒸腾消耗的潜热占到达冠层上方的净辐射的比例为 46%,比夏季低 20%,且在我国南方温室冬季高湿的环境下(VPD < 2kPa),作物蒸腾速率日变化主要取决于太阳辐射日变化,而与 VPD 的日变化关系不大,所以用作物蒸腾消耗的潜热占到达冠层上方的净辐射的比例和太阳辐射的测值,就可以确定作物的蒸腾耗水量,从而为温室作物灌溉管理提供依据。

Seginer<sup>[24]</sup>把 P-M 方程与能量平衡相结合,并修正了一些参数,改进的模型为:

$$\lambda E = (A + B \zeta) \tau S_0 + B \theta \quad (7)$$

式中:  $\zeta$  和  $\theta$  为常数;  $\tau$  为覆盖层太阳辐射利用率;  $S_0$  为室外太阳辐射;其他符号意义同前。

改进后的模型能自动适应无论是辐射、温度还是湿度的变化。在温室通风设计条件下新的综合模型克服了以往只是定性考虑腾发系数(植物截取太阳辐射通过蒸腾化为潜热的部

分)的不足,且在装备有蒸发制冷系统的温室中得到了修正,并提出可以把室内空气温度或冠层温度作为设计标准,然而这种方法的可行性取决于 P-M 方程中 A、B 的可靠性。

国外一些学者<sup>[16,19,26,27]</sup>分别基于平流概念提出了塑料大棚气候条件下番茄、黄瓜、莴苣的蒸腾模型。他们认为作物蒸发蒸腾是作物冠层与室内空气之间进行水汽交换,主要取决于作物冠层接受辐射和室内饱和水汽压差的大小。在温度较低的冬季或早春等季节,作物生长期的绝大部分时间,由于温室大棚很少通风,作物表面释放的热量就会累积在室内,当室内气候表现为平衡状态时,作物的蒸腾速率也会随之变化直至达到一个稳定的蒸腾速率,此时作物蒸腾易受室内气候的影响,利用室内气候状况建立的模型精度较高且较为合理。

Harmanto 和 Salokhe<sup>[28]</sup>也赞同上述观点,他们在 P-M 方程的基础上,采用灌水量相当于 100%、75%、50% 和 25% 的  $ET_c$  (作物蒸发蒸腾量)4 种肥水滴灌水平对热带温室西红柿的生产、产量及水分生产率的影响进行了试验,结果表明: Tory489 西红柿的最优需水量大约是  $ET_c$  的 75%,此时西红柿的实际灌水量为 4.1~5.6 mm/d;利用温室气象数据计算得到的  $ET_c$  相当于露天气象条件下计算得到  $ET_c$  的 75%~80%,建议应当从室内小气候中直接测得的气象数据来计算作物蒸发蒸腾量。

但在晚春和夏季气温较高的条件下,大棚温室要降温排湿,因而通风(自然通风)较频繁或者紊流混合强烈,叶表面的饱和水汽压差与周围空气的饱和差紧密相关,且后者受室外饱和差的影响,此时大棚作物蒸腾更依赖于对流, Jemaa<sup>[29]</sup>研究表明,在法国南部 5~7 月,温室西红柿的蒸发蒸腾 43%来自对流。因此,建立通风条件下的蒸腾模型时要同时考虑辐射和对流的影响<sup>[30,31]</sup>。

Boulard 和 Wang<sup>[32]</sup>利用室内能量平衡和 P-M 方程推导出基于棚室外气象数据的温室作物需水量模型:

$$\lambda E = \frac{\delta(\lambda E + H) + 2 LAI \rho C_p D_i / r_a}{\delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} \quad (8)$$

式中:  $\delta$  为温度~饱和水汽压变化曲线的斜率;  $H$  为增热室内空气所消耗的显热;  $D_i$  为室内空气饱和差;其他符号意义同前。

从春季到夏季的过程中,由于自然通风影响,室内与室外气候紧密耦合,用该模型计算结果较好;但当温室关闭时,室内外的气候条件相关性明显降低,用室外气象数据作为边界条件代替室内气象参数估计腾发量时就会降低精度。

Johes 和 Tardiel<sup>[33]</sup>建议在温室条件下,蒸发蒸腾预测方程中可以消除空气动力学项。他们认为 P-M 方程中辐射和空气动力学项相互关联,由于温室与露天环境不同(主要是风速很小,几乎接近于零),因此应消减空气动力学部分。在通风量很小的情况下,这种温室“消退”(decoupled)模型可能会被接受,但在通风设计条件下,上述假设就存在问题。因而很多研究者不赞同温室蒸腾“消退”观点,因为在计算得到 P-M 方程中的两项系数中,辐射与水汽压差是不相关的,这可能是由于人为的各项温室控制性措施(如加热、降温、排湿)导致的。另外,雷水玲等<sup>[34]</sup>通过对温室作物周围环境微气象条件的连续观测,计算分析了温室作物叶-气系统水流阻力各分项,即叶

片周围层流边界层阻  $r_b$ 、冠层上方湍流边界层阻力  $r_g$ 、空气动力学阻力  $r_e$  和叶片气孔阻力  $r_i$  的变化规律。结果表明：温室内  $r_b$  比较稳定，平均约 235 s/m，且与环境因素关系不甚密切；温室内黄瓜、西红柿类植物生殖生长期  $r_g \ll r_b$  ( $r_g$  仅占  $r_b$  的  $1/56 \sim 1/8$ )，在计算  $r_e$  时， $r_g$  的影响可忽略，取  $r_e \approx r_b$ ，利用能量平衡方程和空气动力学方程得出的叶—气温差计算公式计算得到  $r_i$ ，符合其变化的一般规律。在此基础上用 P-M 方程计算得到的温室黄瓜的蒸腾速率与实测值的一致性较好。

综上所述，计算大棚温室作物蒸发蒸腾量最常见且较为合理的方法是以 P-M 方程为理论基础的计算模型。P-M 方程的重要意义就在于将叶—气系统的水流阻力以气孔阻力和空气动力学阻力的形式引入到以能量平衡和质量传输为基础的计算作物蒸腾速率的公式中，既考虑了空气动力学和辐射项的作用，又涉及到作物的生理特征。

### 3 结 语

从上述已有的研究成果来看，棚室作物需水量计算模型的研究虽多但较为分散，由于地区、气候、棚室环境等差异得到的结论往往具有一定的经验性和局限性，在其他地区或其他温室是否适用，尚需进一步的试验资料来证明。

可以得出，计算模型中较为合理的方法多是以 Penman-Monteith 模型为基础的。因此，建议在计算具体温室大棚作物需水量时，应根据室内外气候耦合的相关度，基于当地的气候，在不同的季节，不同的通风条件下，通过主要的影响控制因子（例如室内外温差的大小）来建立不同的棚室结构类型作物需水量的模型；在室外温度较低的冬~春季节，考虑到保温要求，棚室多密闭，室内外温差很大，通风时间短及气体交换量少，此时应采用基于室内气象资料的 P-M 模型；而在室外温度较高的夏~秋季，室内外温差较小，由于降温排湿棚室多与外界通风，室内外气候耦合较强，此时应采用基于室外气象资料的 P-M 模型。

棚室环境内的光、温、湿、气、土 5 个环境因素综合影响作物的生长发育，当其中某一个因子起变化时，其他因子也会受到影响，随之变化。例如：室内光照充足时，温度会升高，植物蒸腾加速，从而空气湿度加大，此时若开窗通风，各项环境因子又会出现一系列的改变，因此棚室气候是一个非线性、多输入多输出、强耦合、时变、大时延的动态环境，对大棚温室微气候复杂的动态系统进行数值模拟及建模，不仅有利于进一步提高室内作物需水量模型的精度，还可以对温室环境精确控制，从而为温室作物提供最适宜的生长环境。另外，将棚室土壤植物环境水热系统 (SPEC: Soil-Plant-Environment-Continuum)<sup>[35]</sup> 作为一个整体进行研究的思路，对于优化蒸腾模型及棚室水热环境控制，促进棚室的节能、降耗与作物的优质高产具有重要意义。

如何采用现代化手段，更精确地测定温室大棚作物需水量，同时深入探讨其需水量变化的机理，用半理论或理论方法，比较准确、可靠地计算大棚温室作物需水量，并且从增产，节水等角度出发，以实测数据为基础，结合时间序列、组合预测理论、神经网络理论用于表达不同作物、不同灌水技术、不同气候

条件下的棚室作物需水量计算模型，并将特定区域的需水模型推广应用到任意区域是今后研究的主要目标。

### 参考文献：

- [1] 联合国粮食及农业组织. 作物需水量[M]. 罗马, 1977.
- [2] Allen, R G, Pereira, L S, Raes, D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: 1998.
- [3] 陈玉民. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [4] Abou-Hadid A F, El-Shinawy M Z, El-Oksh I, et al. Studies on water consumption of sweet pepper plant under plastic house[J]. Acta Hort. (ISHS) 1994, 366: 365—372.
- [5] Tuzel Y, Ul M A, Tuzel I H. Effects of different irrigation intervals and rates on spring season glasshouse tomato production: II. Fruit quality[J]. Acta Hort. (ISHS) 1994, 366: 389—396.
- [6] 齐述华. 应用农田水量平衡原理计算三种蔬菜的需水量和作物系数[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(1): 71—76.
- [7] 杨启国. 甘肃旱作农业区发展节能日光温室蔬菜生产可行性探讨[J]. 干旱气象 2004, 20(2): 112—115.
- [8] 李援农. 保护地节水灌溉技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [9] F Orgaza, M D Fernandeb. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse[J]. Agricultural Water Management. 2005, 72: 81—96.
- [10] 罗金耀. 我国设施农业节水灌溉理论与技术研究进展[J]. 节水灌溉, 2003(3): 111—113.
- [11] 徐淑贞. 日光温室滴灌番茄需水规律及水分生产函数的研究与应用[J]. 节水灌溉, 2001, (4): 26—28.
- [12] 原保忠. 番茄滴灌在日光温室内耗水规律的初步研究[J]. 节水灌溉, 2000, (3): 25—27.
- [13] Flavio F, Blancel, Marcos. Evapotranspiration and crop coefficient of cucumber in greenhouse[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2003, 17(2): 285—291.
- [14] 彭致功. 日光温室条件下茄子植株蒸腾规律的研究[J]. 灌溉排水, 2002, 21(2): 47—50.
- [15] Morris L G, Neale F E. The transpiration of glasshouse crops and its relationship to the incoming solar radiation[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1957, (2): 111—112.
- [16] Yang X, Short T H, Robert D F. Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a cucumber crop[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, 51: 197—209.
- [17] 汪小岳. 南方现代化温室黄瓜夏季蒸腾研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1390—1395.
- [18] 吴文勇. 温室土壤—植物—环境连续体水热运移研究进展[J]. 灌溉排水, 2002, 21(1): 76—78.
- [19] Stanghellini C. Transpiration of greenhouse crops[D]. Wageningen Agricultural University, 1987.
- [20] J I Montero, A Antón a. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107: 323—332.
- [21] Wang S, Boulard T. Predicting the microclimate in a naturally ventilated plastic house in a mediterranean climate[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75: 27—38.

各不相同,种植结构调整后,水稻与旱作的调整使得不同计算顺序采用的田间水利用系数不同。例如在顺序1中,因首先计算种植结构调整节水潜力,则将8.95万hm<sup>2</sup>水稻调整为6.67万hm<sup>2</sup>水稻,其余2.28万hm<sup>2</sup>改为旱作,在计算沟畦改造节水潜力时,沟畦改造后的田间水利用系数,6.67万hm<sup>2</sup>水稻和2.28万hm<sup>2</sup>旱作分别按0.95和0.90计算;而在顺序2中,首先进行沟畦改造,8.95万hm<sup>2</sup>水稻沟畦改造后的田间水利用系数全部按0.95计算,故造成了田间节水潜力有一定误差。内蒙古引黄灌区只有旱作,避免了因水稻与旱作田间水利用系数变化所产生的误差。

#### 4.2 综合法

根据式(5),采用不同计算顺序对不同区域田间节水潜力进行了计算。经计算,宁蒙引黄灌区顺序1与顺序2计算的田间节水潜力分别为11.76亿m<sup>3</sup>和11.80亿m<sup>3</sup>。宁蒙引黄灌区综合法田间节水潜力计算结果见表5。

表5 宁蒙引黄灌区综合法田间节水潜力计算结果

| 区域          | 灌溉水量/亿m <sup>3</sup> |        |        | 田间节水潜力/亿m <sup>3</sup> |       |
|-------------|----------------------|--------|--------|------------------------|-------|
|             | 现状                   | 顺序1节水后 | 顺序2节水后 | 顺序1                    | 顺序2   |
| 宁<br>夏      | 8.24                 | 5.47   | 5.47   | 2.77                   | 2.77  |
|             | 2.82                 | 0.82   | 0.77   | 2.00                   | 2.04  |
|             | 11.45                | 9.54   | 9.54   | 1.91                   | 1.91  |
| 内<br>蒙<br>古 | 22.51                | 15.83  | 15.78  | 6.68                   | 6.72  |
|             | 23.08                | 18.40  | 18.40  | 4.68                   | 4.68  |
|             | 1.21                 | 0.81   | 0.81   | 0.40                   | 0.40  |
|             | 24.29                | 19.21  | 19.21  | 5.08                   | 5.08  |
|             | 46.79                | 35.03  | 34.99  | 11.76                  | 11.80 |

#### 4.3 综合分析

采用分项法和综合法对宁蒙引黄灌区田间节水潜力进行

计算,顺序1中田间节水潜力分别为11.75亿m<sup>3</sup>和11.76亿m<sup>3</sup>,顺序2的计算结果均为11.80亿m<sup>3</sup>。可见按顺序2计算,误差相对较小。

综上所述,分项法和综合法两种方法计算的田间节水潜力结果基本一致,不同计算顺序虽对计算结果有一定影响,但如果不对水稻和旱作区分别计算,或沟畦改造后水稻与旱作采用相同的田间水利用系数进行计算,则不同的计算顺序将不会影响计算结果。例如内蒙古引黄灌区田间节水潜力计算结果,不同方法、不同计算顺序对其计算结果几乎没有影响。

### 5 结 语

(1)采用分项法对宁蒙引黄灌区田间节水潜力进行了计算,采用综合法对分项法计算结果进行了验证,计算结果表明分项计算法可靠。

(2)采用不同计算顺序计算田间节水潜力对计算结果略有影响,按顺序2即沟畦改造→种植结构调整→节水灌溉制度计算,误差相对较小。

(3)在分项计算过程中,要注意灌溉定额以及田间水利用系数的选取必须按照一定的顺序环环相扣,才能避免重复计算量,以免造成计算结果偏大,并应采用综合法进行验证。

#### 参考文献:

[1] 汪 林,甘 泓. 宁夏引黄灌区水盐循环演化与调控[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.  
 [2] 许迪,蔡林根,茆 智,等. 引黄灌区节水决策技术应用研究[M]. 北京:中国农业出版社,2004.  
 [3] 中国灌溉排水发展中心. 黄河流域大型灌区节水改造战略研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002.  
 [4] 程满金,申利刚. 大型灌区节水改造工程技术试验与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.  
 [5] SL207-98,节水灌溉技术规范[S]. 1998.

(上接第19页)

[22] H Fatnassi, T. Boulard. Simple Indirect Estimation of Ventilation and Crop Transpiration Rates in a Greenhouse[J]. Biosystems Engineering, 2004,88(4):467-478.  
 [23] Monteith J L. Principles of Environmental Physics[M]. Paris, 1973.  
 [24] Ido Seginer. The Penman-Monteith Evapotranspiration Equation as an Element in Greenhouse Ventilation Design[J]. Biosystems Engineering, 2002,82(4):423-439.  
 [25] 罗卫红. 南方现代化温室黄瓜冬季蒸腾量与模拟研究[J]. 植物生态学报,2004,28(1):59-65.  
 [26] Jolliet O, Bailey B J. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouse: measurements and models comparison[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992,58,42-62.  
 [27] Pollet S. Application of the Penman-Monteith model to calculate the evapotranspiration of head lettuce *Lactuca sativa* L. var capitata in glasshouse conditions[J]. Acta Horticulture, 1999, 519:151-161.  
 [28] Harmant, V. M. Salokhe. Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment[J]. Agri-

cultural Water Management, 2005,71:225-242.  
 [29] Jemaa, R. Mise au point et validation de models de transpiration de cultures de tomate hors sol sous serre. Application à la conduite de la fert-irrigation[M]. Thèse de l'ENSA Rennes, 1995.  
 [30] Boulard T, Baille A, Mermier M, et al. Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomate de serre[J]. Agronomie,1991,11:259-274.  
 [31] Papadakis G, Frangoudakis A, Kiritsis, S. Experimental investigation and modelling of heat and mass transfer between a tomato crop and the greenhouse environment[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1994,57:217-227.  
 [32] T Boulard, S Wang. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2000,100:25-34.  
 [33] Jones H G, Tardieu F. Modelling water relations of horticultural crops: A review[J]. Scientia Horticulturae,1999,74:21-46.  
 [34] 雷水玲. 温室作物叶-气系统水流阻力研究初探[J]. 农业工程学报,2004,20(6):46-50.  
 [35] 吴文勇. 日光温室土壤-植物-环境系统水热耦合运移动态模拟[J]. 灌溉排水学报,2003,22(3):49-53.