王贺垒,范凤翠,耿计申,等. 非水分亏缺条件下设施茄子蒸散量变化特征及其影响因子分析[J]. 江苏农业科学,2019,47(18):150 - 154.
doi:10.15889/j.issn.1002 - 1302.2019.18.032

非水分亏缺条件下设施茄子蒸散量变化特征及其影响因子分析

王贺垒[1], 范凤翠[2], 耿计申[2], 齐　浩[2], 刘胜尧[2], 张　哲[2], 杜凤焕[2], 贾宋楠[2], 赵　楠[2], 韩宪忠[1]
(1. 河北农业大学信息科学与技术学院,河北保定 071001; 2. 河北省农林科学院农业信息与经济研究所,河北石家庄 050051)

摘要:为探明设施茄子在非水分亏缺条件下蒸散量及构成要素的变化特征,围绕关键因子进行调控。以膜下滴灌茄子为研究对象,在苗期、开花坐果期和成熟采摘期土壤水分分别低于田间持水量的 70%、80% 和 70% 时,设置 3 种灌水定额进行灌溉,分析各生育阶段蒸散速率和土壤蒸发速率的变化,并对气象因子(日均温度、湿度、太阳累积辐射)、作物因子(叶面积指数)和土壤水分因子与蒸散量进行相关分析,确定各阶段的关键影响因子。茄子阶段蒸散速率与蒸腾速率变化规律基本一致,均呈单峰型变化曲线,开花坐果期最高,成熟采摘期次之。土壤蒸发速率呈“开口向上”的“U”形变化曲线,开花坐果期最低。蒸散量构成要素所占比重的变化规律为:苗期土壤蒸发量在蒸散量中所占比重最高,达到 22.33% ~31.40%。开花坐果期最低,为 3.31% ~3.89%。影响蒸散量因素中,叶面积指数随生育阶段推进影响程度逐渐降低,土壤质量含水率在苗期影响不显著,在开花坐果期和成熟采摘期均达到极显著水平。因此,开花坐果期可以忽略膜下土壤蒸发对蒸散量变化的影响,而在其他 2 个生育阶段需要充分考虑。叶面积指数对蒸散量的影响主要体现在前中期,而土壤质量含水率主要体现在中后期。

关键词:茄子;蒸散量;构成要素;影响因子
中图分类号: S641.101;S161.4;S275.6　　**文献标志码:** A　　**文章编号:**1002 - 1302(2019)18 - 0150 - 05

近年来,研究作物蒸散量和水分分配规律,分析蒸散量关键影响因子成为农业节水的热点[1]。蒸散是土壤、环境和植株三者共同作用的结果[2-3],受作物受生长发育的影响,不同生育阶段作物蒸腾和土壤蒸发水分分配比例不同,从而引起因子数目和种类的不同。因此,明确茄子在不同生育阶段蒸散量的变化及水分分配规律,分析因子对蒸散量的影响程度,对指导农业科学管理有极大的促进作用。

蒸散量包括土壤蒸发量和作物蒸腾量 2 个部分,它们之间的水分分配规律需要进行深入研究。赵丽雯等在研究绿洲玉米蒸散量分配规律时发现,不同生育阶段蒸腾蒸发比主要受叶面积指数的影响[4]。孙景生等发现,沟灌夏玉米土壤蒸散速率在灌溉后 2 ~3 d 较大,受大气蒸发力影响明显[5]。刘浩等通过研究日光温室萝卜棵间土壤蒸发规律发现,土壤蒸发随生育期的推进有减小的趋势[6]。在设施栽培中,棚室具有相对独立的微环境,它通过棚膜和土墙与外界隔离开来。正是由于这一特点,设施内的环境具有可调的优势,通过对相关因子的调控,实现设施农业资源高效利用的目标。郭春明等研究春玉米蒸散量的影响因子时发现,叶面积指数、气温与蒸散量呈显著正相关关系[7]。龚雪文等研究发现,日光温室番茄蒸散量的主控因子为太阳净辐射,对不同空间尺度蒸散量均有影响[8]。张大龙等通过研究大棚甜瓜蒸腾影响因素发现,空气湿度与蒸腾量呈显著负相关关系,通过对日均温度的间接作用来影响蒸腾[9]。王贺垒等在研究设施茄子蒸散模型时得出,叶面积指数可作为作物因素子模型[10]。尽管华北地区属于半湿润地区,但缺水程度远远高于其他所属同种气候的地域。在设施栽培中,对于覆膜种植往往会忽略土壤蒸发,而膜下土壤蒸发却时刻存在,直接忽略会产生一定偏差。因此,有必要分阶段研究作物蒸腾和土壤蒸发的水分分配规律,明确影响蒸散量的关键因子,提高农田灌溉科学性。

因此,本研究以滴灌条件下茄子为研究对象,通过水量平衡法计算作物蒸散量,结合微型蒸渗仪计算土壤蒸发量,进而明确不同生育阶段水分分配比例;通过相关系数法分析各生育阶段影响蒸散量的关键因子,并针对关键因子进行调控,旨在为设施农业的科学管理奠定坚实的理论基础。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验于 2017 年 3—8 月在河北省农林科学院大河综合试验基地内进行,年均气温为 13.3 ℃,年日照时数为 1 776.9 h,四季分明。供试土壤质地为壤质褐土,土壤容重为 1.38 g/cm^3,田间持水量为 22.1%(质量含水率),地下水埋深大于 5 m。茄子品种选择河北主栽品种茄杂 6 号,南北向种植。棚室南北长 30 m,东西宽 15 m,起垄覆膜种植。畦长 6.3 m,宽 2.4 m,采用株距 30 cm、行距 60 cm 进行种植。

1.2　试验设计

试验通过滴灌方式进行灌溉,苗期、开花坐果期、成熟采

收稿日期:2018 - 06 - 16
基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(编号:201303133 - 1 - 3);河北省科技计划(编号:16227005D);现代农业科技创新工程(编号:494 - 0402 - YBN - H5A4)。
作者简介:王贺垒(1993—),男,河北邢台人,硕士,主要从事农业节水模型信息化研究。E - mail:wanghelei20117462@163.com。
通信作者:韩宪忠,教授,硕士生导师,主要研究方向为农业模型与计算机网络研究。E - mail:13832252366@163.com。

摘期计划将湿润层(40 cm)土壤水分分别控制在田间持水量的 70%、80%、70%以上。当低于水分下限时,按照灌水定额 15.0 mm(W1)、22.5 mm(W2)和 30.0 mm(W3)进行灌溉。蒸散量的影响因素主要分为作物因素、气象因素和土壤因素 3 种。其中,作物因素为叶面积指数(LAI);气象因素主要包括温度、湿度、日累积太阳辐射等;土壤因素为土壤质量含水率。

1.3　田间测试

采用土钻法于株间和行间中部位置采集 0 ~ 100 cm 土壤,测定土壤水分含量,每 10 cm 为一土层。每隔 3 ~ 5 d 测定 1 次,灌水前后各加测 1 次。土壤质量含水率测定是在 105 ℃烘箱内,将土样烘干至恒质量,用以计算土壤质量含水率和蒸散量。

利用微型蒸渗仪来测定土壤蒸发量。在膜下 2 株茄子间布置镀锌蒸发皿,该蒸发皿直径为 9 cm,桶体高度为 30 cm,底部用隔水胶带密封。每隔 5 d 更换 1 次土体,从上而下按压桶体取原状土。测定时间为 08:00,用精度为 0.1 g 天平称量桶体质量,灌水后及时更换土体并称质量。

气象数据由设置在棚室中央的小型气候观测仪测定,每隔 10 min 采集 1 次,观测气温、相对湿度、太阳辐射等气象要素,采集的数据用于与蒸散量进行相关分析。

茄子单株叶面积采用直接测量法测定,选择 300 张形状、大小不同的茄子叶片,采用北京益康农科技发展有限公司生产的叶面积仪测定其实际叶面积,建立实际叶面积与长、宽的回归方程[$LA = 0.585\,6 \times (\text{长} \times \text{宽}) + 8.071\,4$, $R^2 = 0.991$]。用钢卷尺测量茄子叶片长、宽,代入建立的回归方程计算其叶面积。

1.4　参考作物蒸散量计算

参考作物蒸散量(ET_0)反映气候特征对蒸散量的综合效应,它是某种特定条件下的假想蒸散速率。假设作物的高度为 0.12 m,固定的叶面阻力为 70 s/m,反射率为 0.23,则其蒸散量类似于表面开阔、高度一致、生长旺盛、完全遮盖地面且不缺水的绿色草地蒸散量[11]。Penman - Monteith(P - M)方程具体计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}。\quad (1)$$

式中:R_n 为作物表面净辐射,MJ/(m² · d);G 为土壤热通量,MJ/(m² · d);T 为气温,℃;u_2 为 2 m 高处风速,m/s;e_s 为设施内饱和水汽压,kPa;e_a 为设施内实际水汽压,kPa;Δ 为饱和水汽压随温度变化的曲线斜率,kPa/℃;γ 为干湿表常数,kPa/℃。

设施内与露地气象条件差异性较大,棚室内风速几乎为 0,须要对 P - M 方程进行修正。采用陈新明等的方法[12],通过空气动力学阻力公式,将 $u_2 = 0$ 代入空气动力阻力公式计算空气动力学阻抗[13-14]:

$$R_a = 4.72\left\{\ln\left[\frac{z-d}{z_0}\right]\right\}^2。\quad (2)$$

式中:z 为测量风速的高度;z_0 为地面粗糙度;d 为零平面位移长度。$z_0 = 0.13h_c$, $d = 0.64h_c$, h_c 为作物冠层高度,即 0.12 m。通过推导 R_a 得出设施条件下的修正 P - M 方程,具体公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{1\,713}{T+273}(e_s - e_a)}{\Delta + 1.64\gamma}。\quad (3)$$

1.5　数据处理与统计分析

采用 Excel 软件对数据进行统计分析和作图,利用 SPSS 22.0 软件进行蒸散量相关因子分析。

(1)采用水量平衡法测定茄子蒸散量。试验在棚室内进行,不存在地表径流。地下水埋深超过 5 m,地下水补给为零。在棚室内有效隔离自然降水,雨水补给为零。本研究采用滴灌进行灌溉,灌水量不足以产生深层渗漏。因此,蒸散量计算公式可简化为

$$ET_0(\text{mm}) = I - \Delta W。$$

式中:I 为灌水量;ΔW 为土体储水量的变化。

(2)采用 2 次质量差来计算土壤蒸发量。蒸散量由土壤蒸发和作物蒸腾 2 部分组成,作物蒸腾于可由蒸散量减去土壤蒸发量(E)来表示。作物蒸腾量和土壤蒸发量具体计算公式如下:

$$\text{土壤蒸发量} = \frac{\text{2 次称量桶体质量差}}{\pi r^2};$$

$$\text{作物蒸腾量} = ET - E。\quad (4)$$

式中:ET 为实际蒸散量。

2　结果与分析

2.1　参考作物蒸散量在全生育阶段的变化

参考作物蒸散量(ET_0)可反映气象因素对茄子蒸散量的综合影响。由图 1 可以看出,苗期(移栽后 41 d 内)ET_0 的总体呈递增趋势,说明该阶段棚室内气象因素促进 ET_0 的提高。开花坐果期(移栽后 42 ~ 63 d)ET_0 总体变化幅度不大,而成熟采摘期(移栽后 64 ~ 100 d)ET_0 有大幅度变化,这与逐日天气状况有很大关系。通过计算分析,阶段平均 ET_0 苗期为 2.79 mm/d,开花坐果期为 4.28 mm/d,成熟采摘期为 4.31 mm/d。随着生育阶段推进,ET_0 总体呈升高态势,但增速有较大变化。苗期—开花坐果期 ET_0 增速较快,而在开花坐果期—成熟采摘期增速放缓。ET_0 是影响作物实际蒸散量变化的重要因素,要更好地解释不同生育阶段蒸散量变化的导因,须要明确各生育阶段 ET_0 的数值。

2.2　不同灌水定额叶面积指数变化规律

叶面积指数是反映作物实际生长发育状况的重要指标,其对茄子蒸腾量和土壤蒸发量有显著影响。本研究于 2017 年 3 月 27 日移栽,4 月 6 日开始生长。由图 2 可知,3 种灌水定额叶面积指数在全生育阶段变化曲线均整体呈“S”形,苗期 4 月 18 日至 5 月 7 日增速最快,5 月 7 日是 LAI 曲线增速的拐点,LAI 最高值出现在开花坐果期。LAI 变化与植株生理有关,苗期茄子经历移栽缓苗阶段,LAI 增长速度缓慢。之后,LAI 增速明显提高,促进植株形态的快速建成。进入开花坐果期后,茄子由营养生长转为营养生长和生殖生长并进时期,LAI 增速逐渐放缓。进入成熟采摘期后,茄子主要进行生殖生长,LAI 基本保持稳定。图中 LAI 曲线出现波谷,是由田间生产管理引起的,土壤蒸发和作物蒸腾强度与 LAI 有很大关联,LAI 影响水分分配规律。

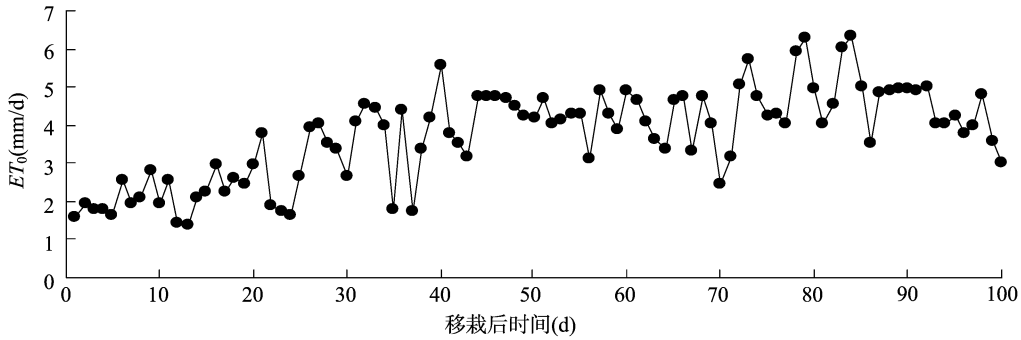


图1　全生育期内参考作物蒸散量

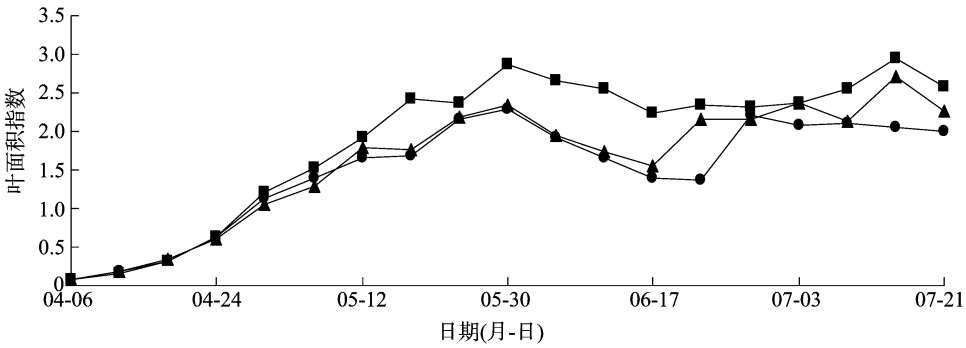
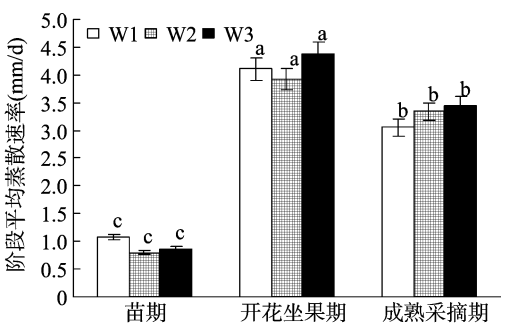


图2　不同灌水定额处理下叶面积指数(LAI)随时间变化趋势

2.3　各生育阶段作物蒸散速率的变化规律

作物蒸散主要受土壤、气象和植株三者共同影响。本研究在适宜土壤水分条件下进行试验,因此作物蒸散可由气象和作物生长发育来表征。由图 3 可知,随着生育阶段的推进,蒸散速率呈单峰型变化曲线,开花坐果期达到峰值,成熟采摘期次之。蒸散速率在 3 个生育阶段有较大差异性,说明茄子耗水主要集中在中后 2 个时期。由阶段参考作物蒸散量变化规律得出,开花坐果期 ET_0 低于成熟采摘期 ET_0,说明开花坐果期茄子长势旺盛,蒸散能力较强,而在进入到成熟采摘期后,随着果实的不断采摘和植株机能的降低,作物蒸散能力呈下降趋势。苗期气象综合蒸散能力较弱,阶段 ET_0 仅为 2.79 mm/d,主要是由于该阶段作物长势偏弱,生长缓慢,因此蒸散量最低。



柱上不同小写字母表示同一处理不同阶段在 0.05 水平上差异显著。图 5 同

图3　不同灌水定额的阶段平均蒸散速率变化

2.4　各生育阶段土壤蒸发速率的变化规律

蒸散是由土壤蒸发和作物蒸腾 2 个部分组成。明确土壤蒸发量的变化过程,对理解不同生育阶段水分分配规律有重要作用。由图 4 可知,W1、W2、W3 处理土壤蒸散速率随移栽后天数的增加总体变化趋势相似,移栽后 35 ~ 65 d 位于曲线波谷,该阶段土壤蒸散速率较低,正处于茄子的开花坐果期。W1、W2、W3 处理阶段平均土壤蒸发速率苗期分别为 0.24、0.23、0.27 mm/d,开花坐果期分别为 0.16、0.13、0.15 mm/d,成熟采摘期为 0.27、0.34、0.33 mm/d(图 5)。土壤蒸发量占蒸散量的比重,苗期集中在 22.33% ~ 31.40%,开花坐果期为 3.31% ~ 3.89%,成熟采摘期为 8.85% ~ 10.19%。由全生育阶段参考作物蒸散量变化曲线可以得出,ET_0 随着生育阶段的推进总体呈递增趋势,而开花坐果期阶段土壤蒸发速率均低于苗期和成熟采摘期。这与作物冠层有很大关系,地面覆盖度是影响土壤蒸发最主要的因子[15]。开花坐果期 LAI 达到峰值,冠层对土壤遮阴效果显著,降低了土壤温度,从而引起土壤蒸散强度的下降。而苗期茄子植株弱小,土壤裸露度较高,促进土壤表层蒸发。成熟采摘期 LAI 低于开花坐果期,提高了该阶段土壤蒸发速率。

2.5　各生育阶段蒸散水分分配比例

作物蒸腾量可由蒸散量与土壤蒸发量之差来表示。由图 5 可以看出,茄子蒸腾强度与蒸散强度变化曲线一致,呈先增大后降低的趋势,在开花坐果期蒸腾强度最高。阶段土壤蒸散速率与作物蒸腾强度的比值苗期集中在 28.75% ~ 45.76% 范围内,开花坐果期为 3.42% ~ 4.05%,成熟采摘期为 9.71% ~ 11.34%。由此可知,各生育阶段蒸散水分主要流向作物蒸腾,但各生育阶段之间流向比例有较大变化。其中,开花坐果期蒸散水分的 95% 以上流向作物蒸腾,土壤蒸发占蒸散量的比重低于 5%。而在其他 2 个生育阶段蒸散水分流向土壤蒸发的比重均高于开花坐果期。蒸发蒸腾比在分析不同生育阶段蒸散量影响因子的类型和数目时极为关键,它兼顾作物蒸腾和土壤蒸发。当蒸发蒸腾比较高时,影响蒸

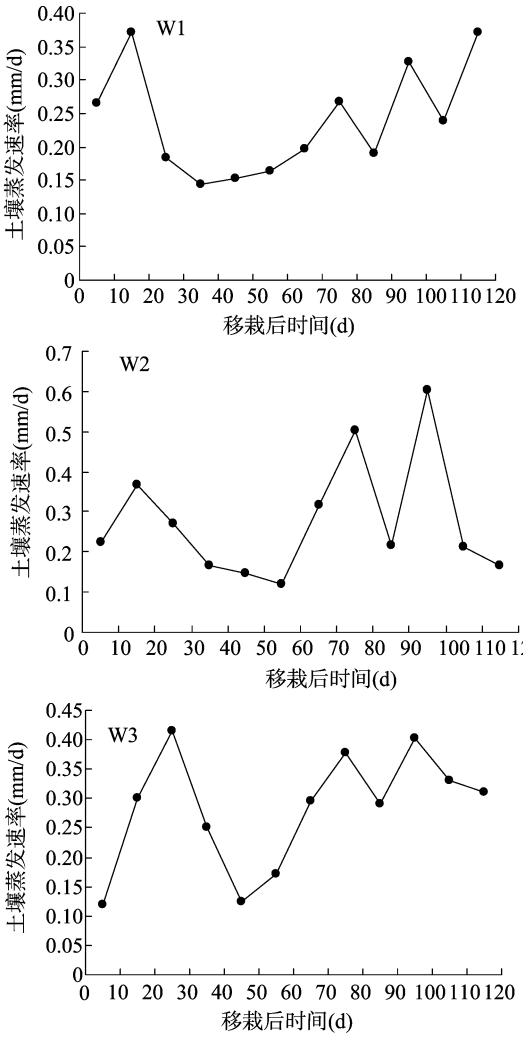


图4　全生育阶段不同灌水定额土壤蒸散速率的变化

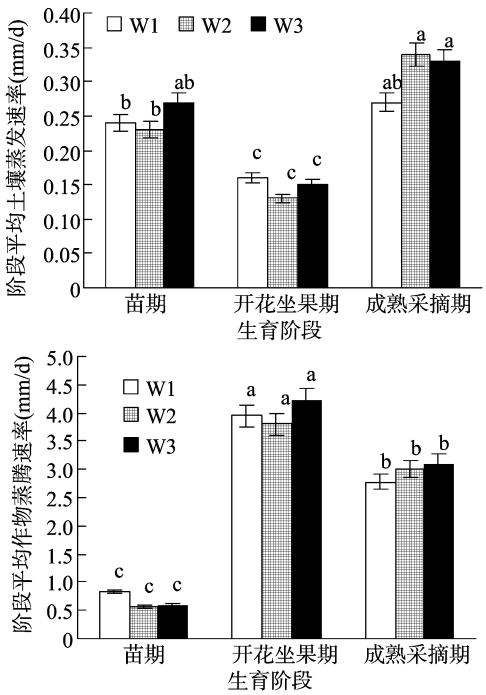


图5　全生育阶段不同灌水定额土壤蒸发和作物蒸腾强度的变化

表 1　各生育阶段因子与日蒸散量关系

影响因子	与日蒸散量相关系数		
	苗期	开花坐果期	成熟采摘期
T_{mean}	0.750**	−0.403*	0.252
RH	−0.358*	−0.114	−0.131
I_a	0.402**	0.022	0.725**
M_s	−0.211	0.667**	0.346**
LAI	0.441**	0.394*	0.149

注：T_{mean}表示日均温度；*RH* 表示日均相对湿度；I_a 表示日累积太阳辐射；M_s 表示土壤质量含水率；LAI 表示叶面积指数。“*”、“**”分别表示相关性在 0.05、0.01 水平上显著。

散量的因子既包括对土壤蒸发的作用，又包含对作物蒸腾的作用。而蒸发蒸腾比低时，可以忽略土壤蒸发对蒸散量的影响，影响因子主要体现在对作物蒸腾的影响上。

2.6　各生育阶段蒸散量与影响因子的相关分析

蒸散量的变化受气象因子、作物因子和土壤因子的共同影响，选择日累积太阳辐射（I_a）、叶面积指数（LAI）、空气温度（*T*）、相对湿度（*RH*）和土壤质量含水率（M_s）作为主要影响因子与蒸散量进行相关分析。由表 1 可以看出，随着生育阶段的推进蒸散量主要影响因子的类型和数目发生较大变化，其中 *RH* 在 3 个生育阶段与蒸散量呈负相关关系，表示 *RH* 越大蒸散量越低。苗期除了 M_s 外，其他因子均与蒸散量呈显著相关关系，LAI、I_a 和 *T* 3 个因子达到极显著水平，具体表现为 T_{mean} > LAI > I_a > *RH*。开花坐果期 M_s 与蒸散量的相关性达到极显著水平，T_{mean} 和 LAI 达到显著水平，具体表现为 M_s > T_{mean} > LAI。成熟采摘期 I_a 和 M_s 与蒸散量的相关性达到极显著水平，其他因子影响程度不显著，具体表现为 I_a > M_s。由此可知，LAI 随着生育阶段的推进与蒸散量相关程度逐渐下降，其影响主要体现在苗期及开花坐果期，M_s 与蒸散量的相关性主要体现在开花坐果期和成熟采摘期。

3　讨论与结论

3.1　各生育阶段茄子蒸散强度的变化规律

蒸散强度反映作物实际生长状况的指标，作物生长越旺盛，蒸散量越大[16]。蒸散是作物完成生长发育和有机物积累的重要途径。由试验结果分析，茄子蒸散速率苗期较弱，而在开花坐果期达到最高，成熟采摘期下降。说明早春茬的茄子前期需水量偏低，在中后期需水量较高，这主要是植株和气象综合作用的反映。在前期棚室气象因素对蒸散量影响偏低，且作物长势较弱，从而表现出较低的耗水量。而在中后期气象综合蒸散能力较强，作物叶面积指数较高，表现出较高的耗水量。而成熟采摘期蒸散速率低于开花坐果期，主要是因为随着生殖生长和作物的衰老，叶片功能和叶面积指数逐渐降低，蒸散能力呈下降趋势。因此，在前期要降低灌水频率和灌水定额，减少无效水分的消耗，提高农田水资源的利用率。在中后期要给作物提供适量的水分，避免出现水分胁迫，对作物生长和产量形成产量影响。

3.2　茄子蒸散量的水分分配去向及比例分析

蒸散主要由作物蒸腾和土壤蒸发 2 个部分构成[5]，明确不同生育阶段蒸散水分流向和分配比例[3]，在提高农田科学管理中有关键作用。作物蒸腾和土壤蒸发受环境因素、植株因素和土壤因素共同影响，引起作物耗水强度的变化。由试验结果可知，蒸散量水分分配比例表现出苗期土壤蒸发比重最大，所占比重在 22.33% ~31.40% 之间；开花坐果期比重最低，低于 3.90%；成熟采摘期比重低于 10.20%。由此说明，蒸散水分分配在各生育阶段有较大差异。苗期水分分配主要受气象综合蒸散能力和叶面积指数 LAI 的影响，因为该阶段作物 LAI 偏低，长势偏弱，茄子蒸腾强度较低。同时，LAI 未对土壤形成良好荫蔽，土壤裸露在表面，促进土壤蒸发。因此，苗期土壤蒸发量在蒸散量中所占比重最高。开花坐果期水分分配主要受作物冠层的影响，LAI 在开花坐果期达到最高值，茄子已经完成封垄，在土壤表层形成很好的荫蔽环境，降低土壤蒸散速率；同时，该阶段 LAI 较高，作物长势较强，蒸腾速率最强，蒸散水分主要来源于作物蒸腾。在成熟采摘期水分分配受气象综合蒸散能力和 LAI 的共同影响，该阶段 LAI 呈下降趋势，而参考作物蒸散量最高。作物实际蒸散量成熟采摘期低于开花坐果期，说明气象综合蒸散能力促进土壤蒸发，而 LAI 降低造成作物蒸腾减弱，蒸散水分分配到土壤蒸发比例升高。

3.3　茄子各生育阶段蒸散量影响因子的变化

在不同生育阶段蒸散量受相关因子影响程度不同[16-17]。由本试验结果分析可知，土壤质量含水率与蒸散量相关性在苗期不显著，而在开花坐果期和成熟采摘期均达到极显著水平；LAI 随着生育阶段的推进，相关性由极显著变为不显著。日均温度、土壤质量含水率和日累积太阳辐射分别在苗期、开花坐果期和成熟采摘期为第 1 相关因子，这主要由于苗期 T_{mean} 既可通过增加有效积温来促进植株生长发育，提高作物蒸腾量又通过提高地温来促进土壤蒸发，因此 T_{mean} 在苗期表现为第 1 相关因子。开花坐果期蒸散强度最大，对水分需求程度高，水分来源为土壤，因此 M_s 在开花坐果期表现为第 1 相关因子。成熟采摘期为产量形成关键期，生育后期 I_a 对产量影响显著[18]，产量与蒸散密切相关[19]，因此 I_a 表现为第 1 相关因子。因此，明确各生育阶段第 1 相关因子，有助于对关键影响因子进行科学调控，进而达到按需灌溉、节本增效的目标。

综上所述，茄子蒸散强度在各生育阶段间变化规律呈单峰型变化曲线，开花坐果期蒸散强度最高。作物蒸腾速率与蒸散强度变化趋势一致，土壤蒸发速率与二者变化趋势相反。土壤蒸发在开花坐果期可以被忽略，而在苗期和成熟采摘期需要充分考虑，才能正确分析因子对蒸散量的作用。茄子蒸散量受不同因子的影响程度不同，土壤质量含水率在苗期与蒸散量相关性不显著，可在苗期适当降低土壤含水率，从而实现节水目标。在开花坐果期和成熟采摘期要保持适宜的土壤水分，避免水分胁迫或过量供水而引起“奢侈”耗水，从而提高水分利用效率。LAI 随生育阶段的推进与蒸散量的相关性逐渐降低，而日累积太阳辐射在后期与蒸散量的相关性达到极显著水平，可在茄子生长发育后期创造良好株型，提高通风透光性，进而提高作物生长发育水平。

参考文献：

[1]张俊俊，刘文兆，韩晓阳. 陕西长武塬区冬小麦的蒸散特征[J]. 江苏农业科学，2013，41(12)：60-63.

[2]王贺垒，李家曦，范凤翠，等. 华北地区设施茄子蒸散量估算模型及作物系数确定[J]. 中国生态农业学报，2018，26(12)：1819-1827.

[3]胡程达，刘荣花，张永录. 不同水分条件下冬小麦农田蒸散研究[J]. 江苏农业科学，2016，44(7)：484-487.

[4]赵丽雯，赵文智，吉喜斌. 西北黑河中游荒漠绿洲农田作物蒸腾与土壤蒸发区分及作物耗水规律[J]. 生态学报，2015，35(4)：1114-1123.

[5]孙景生，康绍忠，王景雷，等. 沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律的试验研究[J]. 农业工程学报，2005，21(11)：28-32.

[6]刘　浩，孙景生，段爱旺，等. 日光温室萝卜棵间土壤蒸发规律试验[J]. 农业工程学报，2009，25(1)：176-180.

[7]郭春明，任景全，张铁林，等. 东北地区春玉米生长季农田蒸散量动态变化及其影响因子[J]. 中国农业气象，2016，37(4)：400-407.

[8]龚雪文，刘　浩，孙景生，等. 日光温室番茄不同空间尺度蒸散量变化及主控因子分析[J]. 农业工程学报，2017，33(8)：166-175.

[9]张大龙，常毅博，李建明，等. 大棚甜瓜蒸腾规律及其影响因子[J]. 生态学报，2014，34(4)：953-962.

[10]王贺垒，韩宪忠，范凤翠，等. 基于有效积温的设施茄子营养生长期蒸散量模拟系统[J]. 节水灌溉，2019(2)：11-17.

[11]Zermenio-Gonzalez A，Melendres-Alvarez A I，Fuerte-Mosqueda L A，et al. Evapotranspiration rate of a vineyard and its relation to the reference of the FAO penman-monteith method[J]. Agrociencia，2017，51(1)：1-12.

[12]陈新明，蔡焕杰，李红星，等. 温室大棚内作物蒸发蒸腾量计算[J]. 应用生态学报，2007，18(2)：317-321.

[13]Kumar S. Effect of different vegetation systems on soil erosion and soil nutrients in red soil region of southeastern China[J]. Pedosphere，2003，13(2)：121-128.

[14]Baselga Y J J，Prieto L M H，Rodríguez A. Response of processing tomato to three different levels of water and nitrogen applications[C]//International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops，1992.

[15]王子申，蔡焕杰，虞连玉，等. 基于 SIMDualKc 模型估算西北旱区冬小麦蒸散量及土壤蒸发量[J]. 农业工程学报，2016，32(5)：126-136.

[16]齐智娟. 黑土坡耕地不同水土保持耕作措施的土壤水蚀特征研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2012.

[17]周林飞，高宇龙，张　静. 蒲草群落蒸散耗水规律及影响因子研究[J]. 灌溉排水学报，2016，35(2)：90-94.

[18]高　佳，史建国，董树亭，等. 花粒期光照强度对夏玉米根系生长和产量的影响[J]. 中国农业科学，2017，50(11)：2104-2113.

[19]张永久，马忠明，邓　斌，等. 有限灌溉条件下春小麦的蒸散特征及其与产量的关系[J]. 麦类作物学报，2006，26(4)：98-102.