

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第4期 Vol.34 No.4 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 4 期

2014 年 2 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 富营养化湖泊溶解性有机碳生物可利用性研究进展 叶琳琳,孔繁翔,史小丽,等 (779)
- 黄河下游平原农业景观中非农生境植物多样性 卢训令,梁国付,汤茜,等 (789)

个体与基础生态

- 锰胁迫对杠板归细胞超微结构的影响 王钧,邬卉,薛生国,等 (798)
- 不同渗氧能力水稻品种对砷的耐性和积累 吴川,莫竞瑜,薛生国,等 (807)
- 弱光下水分胁迫对不同产地披针叶茴香幼苗生理特性的影响 曹永慧,周本智,陈双林 (814)
- 不同分枝数对桑树幼苗生长发育的影响 邹慧慧,胥晓,刘刚,等 (823)
- 斑膜合垫盲蝽若虫在国槐上的空间分布型及抽样技术 朱惠英,沈平,吴建华,等 (832)
- 连作苹果园土壤真菌的 T-RFLP 分析 尹承苗,王功帅,李园园,等 (837)
- 棉隆对苹果连作土壤微生物及平邑甜茶幼苗生长的影响 刘恩太,李园园,胡艳丽,等 (847)
- 两株具有芪降解功能的植物内生细菌的分离筛选及其特性 孙凯,刘娟,李欣,等 (853)

种群、群落和生态系统

- 温度对柑橘始叶螨实验种群生长发育繁殖的影响 李迎洁,王梓英,张国豪,等 (862)
- 高原鼠兔有效洞穴密度对青藏高原高寒草甸群落植物生态位的影响 贾婷婷,毛亮,郭正刚 (869)
- 三工河流域琵琶柴群落特征与土壤因子的相关分析 赵学春,来利明,朱林海,等 (878)
- 岷江干旱河谷造林对土壤微生物群落结构的影响 王卫霞,罗达,史作民,等 (890)
- 滩涂围垦和土地利用对土壤微生物群落的影响 林黎,崔军,陈学萍,等 (899)
- 福寿螺对稻田水生植物群落结构的影响 赵本良,章家恩,戴晓燕,等 (907)
- 4 种木本植物在潜流人工湿地环境下的适应性与去污效果 陈永华,吴晓芙,郝君,等 (916)
- 基于静态箱式法和生物量评估海北金露梅灌丛草甸碳收支 李红琴,李英年,张法伟,等 (925)
- 初始 pH 值对碱性和酸性水稻土微生物铁还原过程的影响 吴超,曲东,刘浩 (933)

景观、区域和全球生态

- 库姆塔格柽柳沙包年层稳定碳同位素与气候环境变化 张锦春,姚拓,刘长仲,等 (943)

资源与产业生态

- 大棚甜瓜蒸腾规律及其影响因子 张大龙,常毅博,李建明,等 (953)
- 盐胁迫下荒漠共生植物红砂与珍珠的根茎叶中离子吸收与分配特征 赵昕,杨小菊,石勇,等 (963)
- 普通鹿蹄草品质与根际和非根际土壤的关系 耿增超,孟令军,刘建军 (973)

作物种植前后土壤有机质及养分因子的空间变异分析 方 斌,吴金凤 (983)

城乡与社会生态

城市河流健康评价指标体系构建及其应用 邓晓军,许有鹏,翟禄新,等 (993)

西藏生态足迹与承载力动态分析..... 安宝晟,程国栋 (1002)

研究简报

三峡库区岸坡消落带草地、弃耕地和耕地土壤微生物及酶活性特征 马 朋,李昌晓,雷 明,等 (1010)

盐胁迫对 2 种栎树苗期生长和根系生长发育的影响..... 王树凤,胡韵雪,孙海菁,等 (1021)

恒温 and 变温驯化对大蟾蜍蝌蚪热耐受性的影响 王立志 (1030)

学术信息与动态

国际生物土壤结皮研究发展态势文献计量分析..... 贺郝钰,侯春梅,迟秀丽,等 (1035)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 264 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 30 * 2014-02



封面图说: 大蟾蜍蝌蚪群——大蟾蜍别名癞蛤蟆,体长达 10cm 以上,身体肥胖,四肢短,步态及齐足跳的姿势具特征性。其背部皮肤厚而干燥,通常有疣,呈黑绿色,常有褐色花斑,趾间具蹼。毒腺在背部的疣内,受惊后毒腺分泌或射出毒液。大蟾蜍早春在水中繁殖,可迁移至 1.5km 外或更远的适合繁殖的池塘,产卵量很大,产卵数天后蝌蚪即可孵出,1—3 个月后发育为蟾。大蟾蜍常作为实验动物或药用动物,其耳后腺和皮肤腺的白色分泌物可制成“蟾酥”,可治疗多种疾病。研究表明,大蟾蜍蝌蚪最高逃避温度和最高致死温度比最适温度产生的影响要大。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201210051371

张大龙, 常毅博, 李建明, 张中典, 潘铜华, 杜清洁, 郑刚. 大棚甜瓜蒸腾规律及其影响因子. 生态学报, 2014, 34(4): 953-962.

Zhang D L, Chang Y B, Li J M, Zhang Z D, Pan T H, Du Q J, Zheng G. The critical factors of transpiration on muskmelon in plastic greenhouse. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 953-962.

大棚甜瓜蒸腾规律及其影响因子

张大龙, 常毅博, 李建明*, 张中典, 潘铜华, 杜清洁, 郑 刚

(西北农林科技大学园艺学院, 杨凌 712100)

摘要: 研究大棚甜瓜的蒸腾规律和影响因子, 可以为大棚甜瓜水分优化管理提供理论依据。利用大棚盆栽试验, 设定了 4 个水分梯度, 定量分析了大棚甜瓜蒸腾规律及蒸腾量与植株生理特性、气象环境因子、土壤水分含量的关系。结果表明: (1) 各水分处理条件下甜瓜蒸腾强度日变化曲线均呈“双峰型”, 有明显的“午休”现象。(2) 甜瓜生理需水系数与叶面积指数、有效积温关系显著, 分别呈线性和抛物线函数关系。(3) 甜瓜全生育期累计蒸腾量呈现出“慢—快—慢”的变化规律, 可以用 Logistic 函数进行模拟。(4) 甜瓜叶面积指数、日平均空气温度、日平均空气相对湿度、日太阳辐射累积、土壤相对含水量均与单株日蒸腾量呈显著性相关关系; 甜瓜叶面积指数对蒸腾的综合作用最大, 是决策变量; 土壤水分含量是限制变量, 主要通过对其其他因子的影响间接作用于蒸腾。(5) 气象环境因子对甜瓜蒸腾量的影响力很大程度上取决于土壤水分含量; 气象环境因子与蒸腾量的相关性随土壤水分含量的增大而增大, 在土壤相对含水量为 70%—80% 范围内达到最高值, 当土壤含水量接近田间持水量时, 与各因子的相关系数逐渐下降。(6) 甜瓜水分胁迫指数与土壤相对有效含水量关系显著, 二者呈现线性关系。

关键词: 甜瓜; 蒸腾作用; 生理需水系数; 通径分析; 环境因子; 土壤水分

The critical factors of transpiration on muskmelon in plastic greenhouse

ZHANG Dalong, CHANG Yibo, LI Jianming*, ZHANG Zhongdian, PAN Tonghua, DU Qingjie, ZHENG Gang

College of Horticulture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: Although there is a rich history of studies of transpiration, a full description of the mechanisms that control this process still eludes us. This lack is related to the fact that control of this process is distributed over a large range of scales from atmospheric turbulence to the regulation of ion transporter in the membranes of cells. The aim of this study was to determine the actual relationship between muskmelon transpiration and multiple environmental and physiological factors under greenhouse condition. Pot experiments were conducted in a plastic greenhouse and physiological and ecological parameters were periodically measured as well as vegetative development. It is possible to draw some firm conclusions: (1) The diurnal course of muskmelon transpiration appeared as double-peak curve, with the peaks respectively appearing at 12:00 and 16:00; The double-peak curve showed gentle change tendency under water stress condition and acute fluctuation under sufficient water condition. (2) The physiological water requirement coefficients (K , ratio of crop transpiration to atmospheric evaporation) was characteristic index of internal biological control of transpiration, variation of K during whole growth period appeared as a quadratic function; There was a strong relationship between K and leaf area index (LAI), effective accumulated temperature (TU) with high coefficients of determination (R^2) of 0.941 and 0.909, respectively; The relationship between K and the two variables were explained with a linear function ($K = 0.439LAI + 0.093$) and exponential function ($K = -5 \times 10^{-7} TU^2 + 0.006TU - 0.014$). (3) The accumulative transpiration of muskmelon during growth period presented “S” dynamic course feasible for the logistic function to simulate with the independent variable of days (t) after

基金项目: 国家“十二五”863 计划资助项目(2011AA100504); 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2011BAD29B01)

收稿日期: 2012-10-05; 修订日期: 2013-05-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijianming66@163.com

transplanting $[ET = 70.188 / (1 + 63.553e^{-0.106t})]$, $R^2 = 0.997$]. (4) Significant correlation was found between muskmelon daily transpiration and leaf area index (LAI), daily average temperature (T), daily average relative humidity (RH), daily solar radiation accumulation (PAR), relative soil water content (W); LAI was the decision variable since it made greatest comprehensive effect on transpiration; W was the limiting variable since it made indirect influence on transpiration through other factors such as LAI ; The decision coefficient of surplus factors was 22.13%, indicating that some other factors making significantly impact on transpiration had not been taken into account. (5) The response of muskmelon transpiration to meteorological environmental factors was determined by soil moisture content; the correlation coefficient between daily transpiration and meteorological environmental factors increased with the soil moisture content and reached the peak with the relative soil water content of 70%—80%, then decreased gradually. (5) Crop water stress index ($CWSI$) quantified the effect of soil water content made on transpiration, decoupling the interference function of meteorological environment; $CWSI$ was significantly related with soil relative effective moisture content (A_w) and an empirical model was constructed ($CWSI = -1.203 A_w + 0.874$, $R^2 = 0.809$). Plant transpiration was a complicated biological and physical process affected by multiple factors, meanwhile, there was an interaction effect between influencing factors, so the crop transpiration should not be analyzed in isolation. It seems that crop transpiration under greenhouse condition was most closely correlated with the minimum limiting factor, this conclusion was in accord with the law of minimum limiting factor. Further research was necessary to improve mechanistic understanding of transpiration process from crop canopy level to leaf stomata level.

Key Words: muskmelon; transpiration; physiological water requirement coefficients; path analysis; meteorological environmental factors; soil moisture

在设施作物生产中,作物蒸腾量不仅是确定合理的作物肥水灌溉控制目标的依据,同时对设施内的环境有重要影响,进而影响作物的产量和品质及经济效益^[1]。蒸腾作用在植物生活过程中具有重要的意义,植物根系在一生中吸收的大部分水分都被蒸腾散失掉了,只有小部分参加生理活动^[2]。蒸腾作用是一个复杂的植物生理过程和水分运动的物理过程,它与外界环境因子之间关系密切,温室大棚是一个半封闭体系,作物通过蒸腾作用与设施环境因子互相影响,在这个过程中,设施内作物形成了独特的蒸腾规律。设施内土壤-植物-环境系统和蔬菜的蒸腾耗水规律等问题的研究受到广泛重视,作物蒸腾耗水已成为设施作物灌溉制度中的重要内容^[3]。研究设施作物蒸腾规律和影响因子,系统探索作物蒸腾规律,找出主要影响因素及影响机理,在设施农业节水灌溉中具有重要理论价值和实践意义。

近年来,设施作物蒸腾研究主要集中在 Penman-Monteith 公式的应用和设施内环境因素对作物蒸腾的影响^[4-5]。目前,关于土壤水分、植株生理特性、设施内环境因素对作物蒸腾综合影响的研究还鲜见报道。本文以甜瓜为研究对象,研究了设施栽培条件下蒸腾日变化和全生育期变化规律,综合考察了大

棚甜瓜蒸腾的生理生态影响因子,并且定量分析了各因子之间的相互作用,较为深入的揭示了各因子影响蒸腾的机理。本研究对于根据作物长势、土壤墒情和设施内气象状况制定设施栽培节水灌溉制度具有一定参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用的厚皮甜瓜品种为“一品天下 208”,由杨凌千普农业公司提供。

1.2 试验区概况

试验在西北农林科技大学新天地试验基地塑料大棚内进行。试验地年均温 12.9 °C,无霜期 220 d,日照时数 2196 h,年降水量 660 mm,年蒸发量 993 mm。试验用大棚长 45 m,宽 7.8 m,高 3.5 m,南北走向,覆盖无滴聚乙烯薄膜。土质为壤土,肥力中等。

1.3 试验方法

试验分别于 2011 年 8—10 月,2012 年 3—6 月进行,均按常规栽培管理方式进行。

栽培盆高 48 cm,直径 35 cm。栽培基质体积配比为菜园土:腐熟牛粪 = 2:1,每盆装基质 16 kg。基质容重为 1.26 g/kg,田间质量持水率为 27.1%。每

盆底部放置托盘盛装下渗的土壤重力水,盆内用地膜覆盖防止土面蒸发。株距 40 cm,行距 60 cm。试验设定 4 个水分梯度:重度亏缺 (W_1)、轻度亏缺 (W_2)、适宜供水 (W_3)、充分供水 (W_4),其土壤含水量分别为田间持水量的 45%—55%、60%—70%、75%—85%、90%—100%。参考李建明^[6]等方法每天早上称重后按照单株日蒸腾量的 100% 进行补充灌溉,结合烘干法校正盆内土壤水分含量,使各处理土壤含水量分别保持在设定的范围。每个土壤水分处理定植 25 盆,计算各水分处理下甜瓜每日平均单株蒸腾量。

1.4 测定项目及方法

(1) 单株日蒸腾量 采用称重法计算甜瓜单株日蒸腾量。用上海友声衡器有限公司生产的精度为 0.1 g 的 BS 系列精密电子计重秤每天 8:00 定时称盆重,盆重的减少量即为单株的当日蒸腾耗水量。将每天耗水质量 M (g) 转化为 ET (mm):

$$\text{栽培盆的底面积 } S = \pi r^2 = 961.6 \text{ cm}^2$$

$$ET = M/S = M/961.6 \text{ cm} = M/96.16 \text{ mm}$$

(2) 叶面积指数 每 4—5 d 测量 1 次所有植株叶片的叶长,根据实际拟合的叶面积-叶长回归公式计算。单叶叶面积采用叶面积仪测定,通过回归分析得到甜瓜单叶面积 LA 单 (cm^2) 与叶长 L (cm) 为幂函数关系:

$$LA = 0.728L^{2.024}$$

$$(R^2 = 0.989)$$

计算得到测量日的单株总叶面积,再根据倪纪恒^[7]等提出的辐热积法计算每天的单株总叶面积,进而计算叶面积指数:

$$LAI = \sum LA \times d / 10000$$

式中, d 为种植密度 (株/ m^2)。

(3) 土壤相对含水量 采用烘干法测定土壤相对含水量,试验每隔 7 d 在灌水前取土样同时回填相同质量相同含水量土壤,取土深度为自表层向下 5—6 cm^[8]。

(4) 大棚内环境因子 空气温度、空气相对湿度和太阳辐射采用浙江托普仪器有限公司生产的气象环境记录仪记录,仪器悬挂于试验区中部地面上方 1 m 处,每 0.5 h 记录 1 次,计算日平均空气温度、日平均空气相对湿度、日太阳总辐射。

(5) 水面蒸发量 将直径 20 cm 的标准蒸发皿

置于甜瓜冠层上方,其高度随着植物的生长而进行调整,每天 8:00 用精度为 0.1 mm 的配套量筒进行测量

2 结果与分析

2.1 大棚甜瓜蒸腾规律

2.1.1 不同水分条件下甜瓜日蒸腾强度变化过程

试验日选取 2012 年 5 月 15 日 (定植后第 40 天),晴天,棚内白天温度 19.6—42.7℃,甜瓜处在伸蔓期,蒸腾作用处于较旺盛状态。

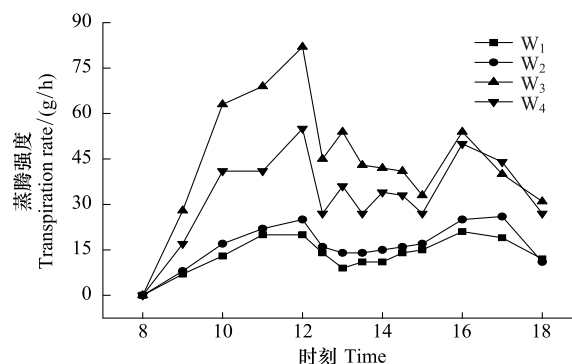


图 1 不同水分处理条件下甜瓜日蒸腾强度变化曲线

Fig.1 Curve of transpiration rate for muskmelon under different water treatments

W_1 : 重度亏缺; W_2 : 轻度亏缺; W_3 : 适宜供水; W_4 : 充分供水

由图 1 可知,4 种土壤水分处理下,甜瓜蒸腾强度日变化曲线均呈双峰型,在午间表现出清晰的下凹趋势,即植物的“午休”现象。在供水充分 (W_4) 和适宜 (W_3) 的条件下,蒸腾强度变化趋势基本一致,甜瓜蒸腾速率有一个较强的峰值,峰值出现在 12:00 和 16:00,最大值出现在 12:00 左右,随后下降,因为中午光照强度最大,为了保护叶片不被灼伤、减少水分的耗损,气孔会关闭一段时间,随之蒸腾速率也下降。当光强午后减弱时,蒸腾作用又逐渐增强^[2]。重度亏缺 (W_1) 和轻度亏缺 (W_2) 处理下曲线变化趋势较为平缓,蒸腾速率高峰有提前到来的趋势,说明土壤含水量过低影响了甜瓜正常生理过程,叶片水分亏缺提早出现。当发生水分胁迫时,降低蒸腾作用,这样保证了植物体内正常需水量。蒸腾的减弱在午后得到一定程度的恢复,蒸腾有所回升,然后随着气温及光强的下降和日落前后气孔的逐步关闭,蒸腾又趋减弱。

2.1.2 大棚甜瓜全生育期蒸腾规律

植物蒸腾耗水除取决于本身的生物学特性外,

常因环境条件的变化而变化,为消除气候变化对耗水的影响,本文采用蒸发比的方法,即相对蒸腾量,用作物生理需水系数 K 表示:

$$K = E_p / E_0$$

式中, E_p 为土壤供水充分时作物蒸腾耗水量; E_0 为大气蒸发力,用同期水面蒸发量表示,由于水面蒸发综合了气象因子对蒸发的影响,是表征气候环境影响力的综合指标。生理需水系数 K 反映了作物的生物学蒸腾特性。

由图 2 可以看出,甜瓜全生育期生理需水系数变化趋势呈现单峰曲线。甜瓜刚移栽后因缓苗而生长缓慢,植株较弱小,蒸腾量低,随着生育进程的推进,甜瓜逐渐生长壮大,叶面积迅速增长,进入果实膨大期后,需水系数维持在较高水平,之后随着植株衰老逐渐变小。以定植后天数 t 为自变量,可拟合得到甜瓜生理需水系数的时间模型:

$$K(t) = -0.001t^2 + 0.095t - 0.412$$

$$(R^2 = 0.909, P < 0.01)$$

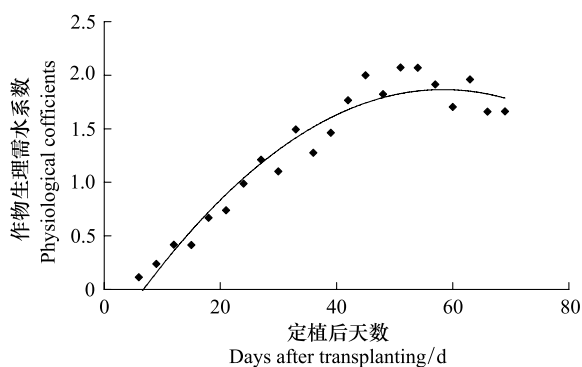


图 2 甜瓜生育期生理需水曲线

Fig.2 Physiological water requirement curve of muskmelon during growth period

为检验甜瓜生理需水系数模型的适用性和精度,分别对 2012 年 4 月 14—26 日(伸蔓期)和 5 月 20 日—6 月 1 日(开花坐果期)两个阶段的需水系数进行模拟,并与相应实测值进行对比,由图 3 可以看出,实测值与模拟值具有较好的一致性,2 个时段平均相对误差分别为 16.8% 和 15.6%。

2.1.3 甜瓜生理需水系数与叶面积指数、有效积温的关系

作物生理需水系数表征作物生物学耗水特性,与作物生长发育状况密切相关,而叶面积指数和有效积温是作物形态建成和模拟常用的指标^[9]。根据

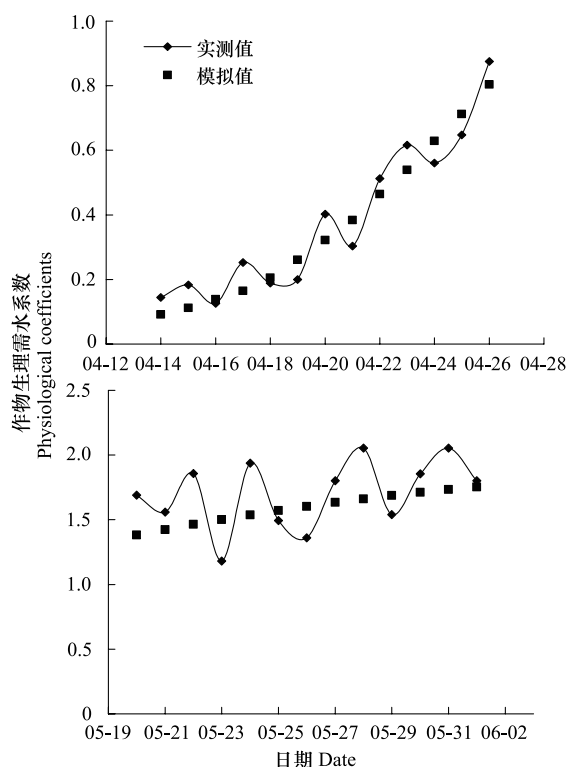


图 3 甜瓜生理需水系数模拟值与实测值的比较

Fig.3 Comparison of simulation and measured values of physiological water requirement coefficients

实测甜瓜生长发育过程中叶面积指数和有效积温,由图 4 可以看出,甜瓜生理需水系数与叶面积指数和有效积温均存在较好相关性,可分别以二者为自变量建立生理需水系数预测模型。

生理需水系数随叶面积的增大而增大,存在极显著线性关系,拟合得到关系式为:

$$K(LAI) = 0.439LAI + 0.093$$

$$(R^2 = 0.941, P < 0.01)$$

生理需水系数随有效积温的增大呈现先增大后减小的变化趋势,可用二次函数来模拟,

拟合得到关系式为:

$$K(TU) = -5 \times 10^{-6} TU^2 + 0.006 TU - 0.014$$

$$(R^2 = 0.909, P < 0.01)$$

式中, TU 为有效积温,用下列公式计算:

$$TU = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b)$$

式中, T_i 为第 i 天日平均温度, T_b 为生长基点温度,参考李建明等的文献^[10],甜瓜出苗期 T_b 取值 18℃,出苗后取值 13℃。

2.1.4 甜瓜生育期内累计蒸腾量变化规律

依据农田生态系统动力学和生物学原理,在一

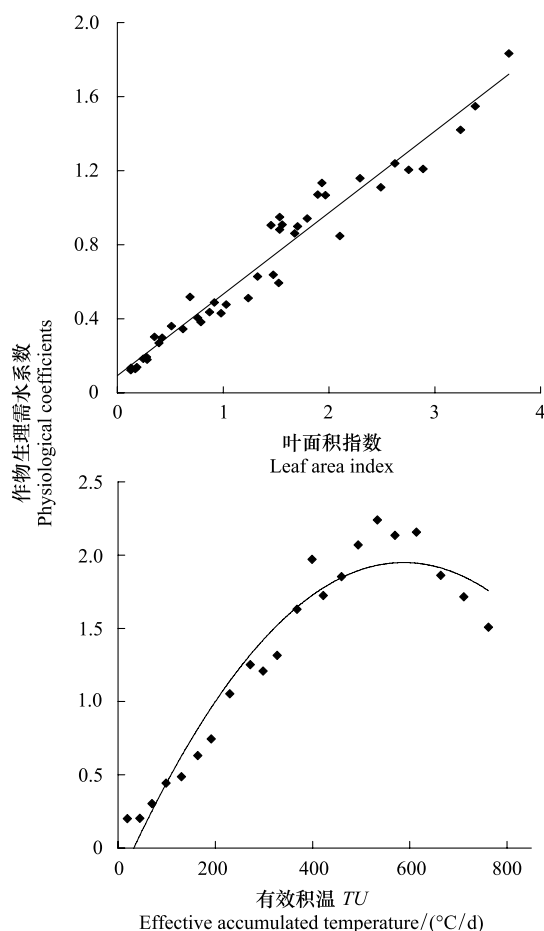


图4 甜瓜生理需水系数与叶面积指数、有效积温的关系

Fig.4 Relationship between physiological coefficients and leaf area index, effective accumulated temperature for muskmelon

定的环境中,生物生长的结果都趋近于一个期望的顶极,由作物因素、气候因素、土壤因素共同决定的作物累计蒸腾量变化也符合这一规律^[11]。由图5可以看出,随着生育进程的推进,甜瓜累计蒸腾量遵从S型渐进增长曲线的变化规律,增长速率呈现“慢—快—慢”的变化趋势,可以用 Logistic 函数进行模拟和生长阶段划分。采用殷祚云^[12]方法,对模型参数进行估计,模型表达式为:

$$Y = \frac{70.188}{1 + 63.553e^{-0.106t}}$$

($R^2 = 0.997, P < 0.01$)

模型表达式中各参数的含义: t 为定植后天数;70.188 为增长极限,表征甜瓜日蒸腾量的极限值;0.106 为增长率系数,表征系统状态趋近于顶级的速度;63.553 为截距系数,表征基础状态参数。

对 Logistic 模型求导,其二阶导数 $\frac{d^2y}{dt^2} = 0$ 的点记

作 t_0 ,三阶导数 $\frac{d^3y}{dt^3} = 0$ 的点记作 t_1 和 t_2 ,根据模型参数求得 $t_0 = 39.1$ 、 $t_1 = 26.7$ 、 $t_2 = 51.5$,这3个点是 Logistic 模型的特征点,这3个特征点把甜瓜生育期蒸腾耗水量变化趋势分为增长前期、增长中期前段、增长中期后段、增长后期4个子区间。

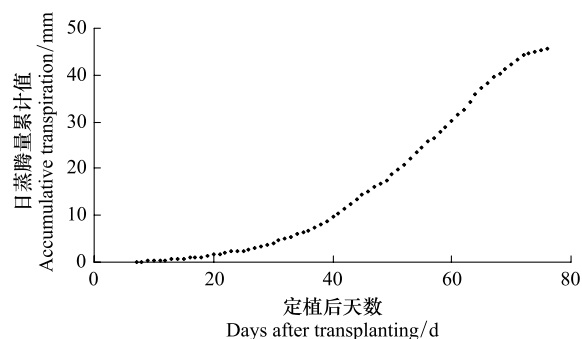


图5 甜瓜生育期累计蒸腾量曲线

Fig.5 Curve of accumulative transpiration for muskmelon

2.2 大棚甜瓜蒸腾量影响因子分析

2.2.1 大棚甜瓜蒸腾量与影响因子的 pearson 相关分析及通径分析

选取叶面积指数 (LAI)、土壤相对含水量 ($W, \%$)、日平均气温 ($T, ^\circ\text{C}$)、日平均空气相对湿度 ($RH, \%$)、日太阳辐射累计 ($PAR, \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 作为影响大棚甜瓜日蒸腾量 $ET(\text{mm})$ 的主要因子。根据实测 ET 与 LAI 、 W 、 T 、 RH 、 PAR 进行多元线性回归,得到方程为:

$$ET = -344.88 + 84.619W + 153.56LAI + 15.081T - 2.747RH + 21.633PAR$$

F 检验表明,回归模型的可信度达到 97.52% ($R^2 = 0.9510$),说明甜瓜日蒸腾量的变异平方和有 95.10% 是由上述因子的变化造成的。

对 ET 及影响因子进行相关性分析,由表1可以看出,除日平均空气相对湿度与甜瓜日蒸腾量呈显著负相关 ($P < 0.05$),其他各因子均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。其中,叶面积指数正相关性最强,其次是土壤相对含水量、日平均气温、日太阳辐射累计。

在各自变量间相关,且自变量又都和因变量相关的情况下,自变量和因变量之间的相关系数既包含着这一自变量对因变量的直接贡献,也包含着通过其他自变量而起的间接贡献^[13]。影响植物蒸腾的各因子并不是孤立的,它们共同作用于蒸腾,且相互影响。通径分析在多元回归的基础上将相关系数

分解为直接途径系数(某一自变量对因变量的直接作用)和间接途径系数(该自变量通过其他自变量对因变量的间接作用)^[14]。由表 2 途径系数可看出,对甜瓜蒸腾直接影响最大的是叶面积指数 *LAI*,其次是日平均气温 *T*,而土壤含水量 *W*、日平均空气相对湿度 *RH*、日太阳总辐射 *PAR* 的直接影响作用都较小。

根据以上分析建立因子影响路径图,如图 6 所示,可见叶面积指数 *LAI* 是连接土壤水分、气象环境与作物蒸腾的重要中转因子。土壤含水量 *W* 主要通过叶面积指数 *LAI* 的增强作用对蒸腾间接产生正影响。日平均空气相对湿度 *RH* 主要通过日平均

气温 *T* 的限制作用对蒸腾间接产生负影响。日太阳总辐射 *PAR* 主要通过对叶面积指数 *LAI* 和日平均气温 *T* 的增强作用对蒸腾间接产生正影响。

决策系数 *R* 是途径分析的决策指标,可以把各自变量对因变量的综合作用进行排序,以确定主要决策变量和限制变量^[15]。将各因子的决策系数进行排序,顺序为: $R_{(LAI)} > R_{(T)} > R_{(PAR)} > R_{(RH)} > R_{(W)}$ 。因此,叶面积指数 *LAI* 是主要决策变量,对蒸腾的综合作用最大,土壤水分是主要限制变量。剩余因子的决策系数为 22.13%,该值较大,说明还有一些影响蒸腾量的因子未被考虑,有待于进一步研究。

表 1 大棚甜瓜日蒸腾量与影响因子的相关和途径分析

Table 1 Path and correlation analysis of muskmelon transpiration with impact factors in plastics greenhouse									
变量 Variable	<i>X_i</i> 对 <i>ET</i> 的总作用 Total effect of <i>X_i</i> to <i>ET</i>	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient					决策系数 <i>R</i> Decision coefficient	
			Σ	<i>W</i>	<i>LA</i>	<i>T</i>	<i>RH</i>	<i>PAR</i>	
<i>W</i>	0.48211 **	0.05	0.4321		0.4286	−0.0237	0.0078	0.0193	0.0459
<i>LA</i>	0.89536 **	0.798	0.0973	0.0268		0.0405	0.0091	0.0208	0.7969
<i>T</i>	0.45009 **	0.245	0.2050	−0.0048	0.1320		0.0422	0.0356	0.1623
<i>RH</i>	−0.34904 *	−0.093	−0.2560	−0.0042	−0.0783	−0.1112		−0.062	0.0560
<i>PAR</i>	0.438586 **	0.093	0.3455	0.0103	0.1788	0.0940	0.0623		0.0737

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; *LAI*: 叶面积指数 Leaf area index; *W*: 土壤相对含水量 Soil relative water content (%); *T*: 日平均气温 Daily average temperature (°C); *RH*: 日平均空气相对湿度 Daily average relative humidity (%); *PAR* 日太阳辐射累计 Photosynthetically active radiation ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); *ET*: 日蒸腾量 Daily transpiration (mm)

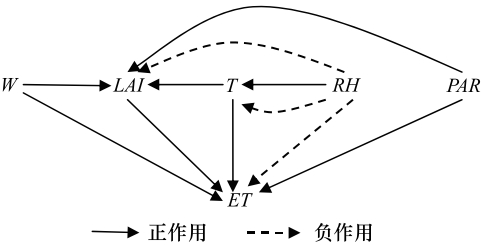


图 6 各因子影响甜瓜日蒸腾量的主要路径

Fig.6 Influence path of factor on transpiration for muskmelon
LAI: 叶面积指数 Leaf area index; *W*: 土壤相对含水量 Soil relative water content (%); *T*: 日平均气温 Daily average temperature (°C); *RH*: 日平均空气相对湿度 Daily average relative humidity (%); *PAR* 日太阳辐射累计 Photosynthetically active radiation ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); *ET*: 日蒸腾量 Daily transpiration (mm)

2.2.2 土壤水分对甜瓜蒸腾的影响

土壤水分含量为甜瓜蒸腾作用的限制变量,对蒸腾的直接作用很小,但与蒸腾的相关系数达到极显著水平($P < 0.01$),其通过对其他各变量对蒸腾产

生间接影响的作用机理值得进一步探讨。

对不同土壤含水量条件下蒸腾与各环境因子分别进行 Pearson 相关性分析发现甜瓜蒸腾量与气象环境因子的相关性与土壤水分含量存在密切关系。由表 2 和图 7 可以看出,甜瓜日蒸腾量与温度,空气相对湿度,太阳辐射的相关系数随土壤水分含量的增大而增大,在 70%—80% 土壤水分范围内达到最高值,当土壤含水量逐渐接近田间持水量时,与各因子的相关系数逐渐下降。由此可见,土壤水分含量对蒸腾起限制作用主要是在水分亏缺和过饱和的情况下,甜瓜蒸腾量与环境因子的相关性变小。在水分适宜的条件下,植株的蒸腾受环境因子影响较高,主要由其生物学特性与气象环境因子决定。环境因子对蒸腾的影响很多程度上通过植物本身调节气孔形态来实现,当土壤水分亏缺时,作物根系会发出信号传递到叶片气孔,气孔导度降低^[16]。土壤水分含量过大时,土壤通气性差,根系呼吸减弱,导致根系

吸水和蒸腾的减小。

表 2 不同土壤含水量下甜瓜蒸腾量 T_{LA} 与环境因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of melon water consumption and environmental factors under different soil moisture

蒸腾量 ET_{LA} Daily transpiration	空气温度 Air temperature	空气相对湿度 Relative air humidity	太阳辐射 Photosynthetically active radiation
W_1 (45%—55% W)	0.151	-0.421	0.595 **
W_2 (60%—70% W)	0.466	-0.686 **	0.694 **
W_3 (75%—85% W)	0.590 *	-0.789 **	0.773 **
W_4 (90%—100% W)	0.244	-0.418	0.440

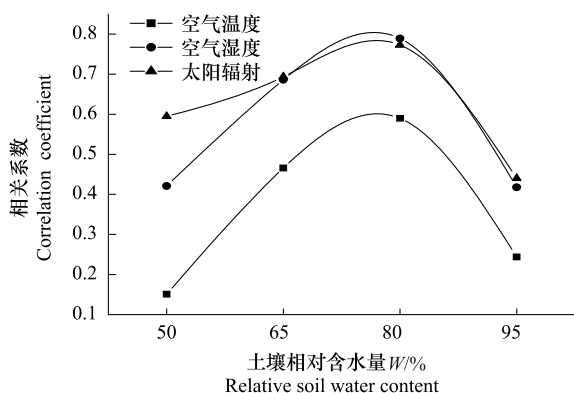


图 7 蒸腾量与环境因子的相关性与土壤含水量的关系

Fig. 7 Trend of correlation between transpiration and environmental factors with soil moisture

水分胁迫条件下,蒸腾量减少,由气候决定的胁迫程度不同,可用相对蒸腾量的减少来表示作物的水分胁迫状况,即:

$$CWSI = 1 - \frac{ET_c}{ET_m}$$

式中, $CWSI$ 为作物水分胁迫指数; ET_c 为缺水处理的实际蒸腾量; ET_m 为充分供水时潜在蒸腾量。 $CWSI$ 较好的反映了水分胁迫强度和持续期长短对作物生长的影响。用相对蒸腾蒸发亏缺能较好的反映作物的受旱状况,是一个较叶水势、气孔阻力、细胞液浓度更宏观的实用指标。

通过实测各水分处理条件下甜瓜实际蒸腾量,如图 8 所示, $CWSI$ 与土壤相对有效含水率 A_w 存在较显著负相关关系,随土壤含水量的增加,甜瓜水分胁迫程度降低。 $CWSI$ 与 A_w 的回归关系方程式为:

$$CWSI = -1.203A_w + 0.874 \quad (R^2 = 0.809)$$

其中, $A_w = \frac{\theta_i - \theta_p}{\theta_f - \theta_p}$

式中, θ_i 为土壤含水率, θ_p 、 θ_f 分别为凋萎系数和田间

持水率。方程的相关系数 $r = -0.899$, $F = 106.242 > F(0.01) = 7.95$, 通过显著性检验,因此采用土壤相对有效含水量表示甜瓜水分胁迫程度具有一定可行性。

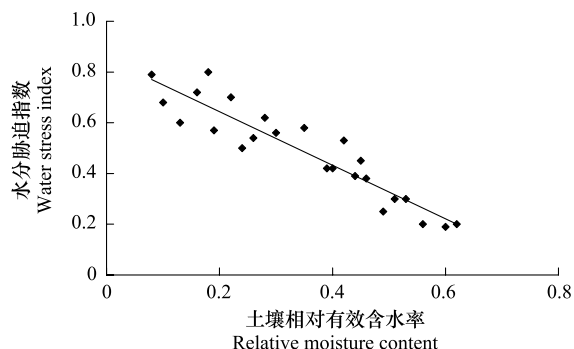


图 8 水分胁迫指数与土壤相对有效含水率的关系

Fig. 8 Relationship between water stress index and relative effective moisture content

3 讨论与结论

3.1 大棚甜瓜蒸腾规律

以往的设施作物蒸腾规律研究^[17-19]一般忽略了对同期大气蒸发力的观测,因不同年份气象存在的较大差异限制了研究成果的应用。作物生理需水系数以作物蒸腾量与大气蒸发力的比值形式较好的消除了气象因素的影响,汪耀富^[20]等研究了烤烟生理需水系数生育期内的变化规律,并以生长历时为自变量得到烤烟生理需水时间系数的模型。本研究在此基础上发现以有效积温和叶面积作为生理发育尺度,也可以较好的模拟甜瓜生理需水系数生育期内变化规律。生理需水系数与基于 Penman-Monteith 公式作物系数同为反映作物蒸腾特性与生育进程关系的重要参数,用作物系数来预测作物蒸腾量虽具有充分理论依据和较高精度,但参数繁杂且不易获

得,我国目前能提供如此详尽资料的气象站点相对不多。用生理需水系数法模拟蒸腾仅需水面蒸发量资料,是一种方便有效的估算设施作物蒸腾量的方法,具有较好的推广应用价值。由于蒸发皿具有能量贮存的特点导致皿蒸发速率变化幅度一般比作物日蒸腾速率变化幅度小,依此估算短期蒸腾量会产生较大误差,因蒸发皿热效应对作物蒸腾估算产生的影响还有待于进一步研究。

很少有研究注意到设施作物累积蒸腾量的变化规律。郭占奎^[21]等和牛勇^[22]等分别建立了日光温室西红柿、黄瓜耗水量累计值与水面蒸发量和积温的经验回归关系式,但未能解释作物累积蒸腾量变化的生物学机理意义。本研究在此基础上探讨了甜瓜全生育期内累积蒸腾量的变化趋势,发现呈现“慢—快—慢”的S形变化曲线,用 Logistic 模型进行了模拟,建立了甜瓜蒸腾动态变化模型,并且对模型表达式中各参数所代表的累计蒸腾量趋近的值、增长率系数和系统基础参数等生物学意义做出了解释。

3.2 大棚甜瓜蒸腾的影响因子

对于作物蒸腾与气象环境因子的关系国内外已经做了大量的经验分析和机理研究。经验分析多集中于植株蒸腾与环境因子之间的相关分析^[23]和回归分析^[24-25]。Penman-Monteith 公式是目前精度最高的定量描述作物蒸腾与气象环境因子关系的普适机理模型,国外对温室大棚作物蒸腾的研究多限于气候温和的海洋性气候和地中海气候^[26-29],其结果不一定适用于我国季风气候区。近些年,国内已经对我国南方高温高湿环境下设施作物蒸腾机理开展了研究^[1,30-31],但针对西北地区干旱半干旱环境下设施作物蒸腾的系统研究少见报道。

P-M 方程以能量平衡和水汽扩散理论为基础,充分考虑了空气动力学参数的变化,但 P-M 方程基于土壤水分适宜作物生长良好的理想条件,未包含土壤水分参数。气象环境因子对蒸腾的作用在不同土壤水分含量条件下差异较大,因此很难建立一种通用的作物蒸腾-环境因子关系式。本研究综合考察了影响作物蒸腾的环境气象参数、植株生理参数、土壤水分参数,定量分析了各因子对蒸腾的直接作用和通过其他因子产生的间接作用,并且对不同土壤水分条件下环境因子与蒸腾的关系及影响机理进

行了探究。利用通径分析和决策系数的方法发现在所考察的因子中,对甜瓜日蒸腾量直接影响最大的是甜瓜叶面积指数,而土壤含水量直接影响作用最小,主要通过对叶面积指数的增强作用对日蒸腾量间接产生正影响。将各因子的决策系数进行排序,发现叶面积指数是主要决策变量,对蒸腾的综合作用最大,而土壤水分含量决策系数最小,是主要限制变量。剩余因子的决策系数为 22.13%,可能包括大棚内风速、土壤温度、土壤营养状况等,这些因子对甜瓜日蒸腾量的影响机理还不明确,有待于进一步研究。

基于土壤水分含量是影响甜瓜蒸腾的限制变量,对甜瓜蒸腾的直接作用很小,但与甜瓜蒸腾的相关系数达到极显著水平,对土壤水分含量影响蒸腾的机理做了进一步探究。土壤水分与大棚甜瓜蒸腾存在着两种关系:当土壤供水适宜时,甜瓜的蒸腾主要受其本身的生物学特性与外界气象因子的影响;当土壤供水亏缺或过饱和时,土壤含水量为影响蒸腾的主导因子,蒸腾与环境因子的相关性较差。这与刘硕^[32]等研究不同土壤水分条件下山杏的蒸腾特性时得出的结论相似。研究结果进一步说明植物蒸腾是一个复杂的过程,受多种因子综合影响,按最小限制因子定律,作物蒸腾量可能和最小限制因子关系最密切,需今后的研究进一步证实。

水分胁迫条件下,土壤含水量作为限制因子使甜瓜蒸腾量少于土壤水充足条件下的蒸腾量,很难从本质上建立起土壤含水量与植物蒸腾之间的固定关系模式,这可能一方面与土壤性质和含水量本身存在着较大的空间变异有关;另一方面与植物蒸腾受其他天气变量影响有关^[33]。关于植物蒸腾与土壤水分的研究多集中于林木和农作物,比较不同水分条件下植物蒸腾量差异或建立蒸腾量与土壤含水量的经验回归模型^[34-37],但因气象环境的差异对作物耗水量的影响使研究结果的应用受到限制。本研究引用了作物水分胁迫指数,以比值形式消除了棚室气象环境的影响,可以较好的揭示了水分亏缺对作物蒸腾的影响,发现水分胁迫指数与土壤相对有效含水率之间存在显著的负相关关系,与孟平^[38]在研究苹果树水分胁迫系数与土壤水分关系时得到的结论相似,对节水灌溉条件下作物蒸腾的研究具有一定意义。

References:

- [1] Dai J F, Jin L, Luo W H, Ni J H, Li Y X, Yuan C M, Xu G. Simulation of greenhouse tomato canopy transpiration In Yangtze River Delta. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(3): 99-103.
- [2] Pan R C. Plant Physiology. Beijing: Higher Education Press, 2008:18-19.
- [3] Li X. Study of Mechanism and Methods of Protected Vegetable Transpiration Control [D]. Yangling: Northwest A& F University, 2009.
- [4] Liu H, Duan A W, Sun J S, Liu Z G. Estimating model of transpiration for greenhouse tomato based on Penman-Monteith equation. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 208-213.
- [5] Dong B, Sun N N, Luo J Y. Calculation of greenhouse tomato transpiration based on indoor meteorological data in winter. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(5): 601-604.
- [6] Li J M, Wang P, Li J. Effect of irrigation amount on physiology, biochemistry and fruit quality of greenhouse tomato under sub-low temperatures. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2): 129-134.
- [7] Ni J H, Luo W H, Li Y X, Dai J F, Jiang J, Xu G B, Chen Y S, Chen C H, Bu S X, Xu G. Simulation of leaf area and dry matter production in greenhouse tomato. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(8): 1629-1635.
- [8] Lu X. Soil and Fertilizer. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 440-441.
- [9] Zhang Z X, Cheng Z H. Senior Vegetable Physiology. Beijing: China Agricultural University Press, 2008:98-99.
- [10] Li J M, Zou Z R, Liu Y C, Wang Z H. Temperature and water driven growth shape simulation and model of muskmelon seedlings. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(11): 203-208.
- [11] Xu J Z, Peng S Z, Li D X, Ye L T. Simulation of crop accumulative evapotranspiration based on Logistic curve. Journal of Hehai University: Natural Sciences, 2007, 35(2): 225-228.
- [12] Yin Z Y. Study on the fitting methods of logistic curve. Application of Statistics and Management, 2002, 21(1): 41-46.
- [13] Yao Y Z, Li J M, Zhang R, Sun S J, Chen K L. Greenhouse tomato transpiration and its affecting factors: Correlation analysis and model simulation. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(7): 1869-1874.
- [14] Jing Y H, Xing L W. Path analysis and its applications. Statistical Education, 2006, 77(2): 24-26.
- [15] Yuan Z F, Zhou J Y, Guo M C, Lei X Q, Xie X L. Decision coefficient-the decision index of path analysis. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2001, 29(5): 131-133.
- [16] Gao Q, Zhao P, Zeng X, Cai X, Shen W. A model of stomatal conductance to quantify the relationship between leaf transpiration, microclimate and soil water stress. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(11): 1373-1381.
- [17] Impron I, Hemming S, Bot G P A. Effects of cover properties, ventilation rate, and crop leaf area on tropical greenhouse climate. Biosystems Engineering, 2008, 99(4): 553-564.
- [18] Orgaz F, Fernández M D, Bonachela S, Gallardo M, Fereres E. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. Agricultural water management, 2005, 72(2): 81-96.
- [19] Katsoulas N, Baille A, Kittas C. Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. Agricultural and forest meteorology, 2001, 106(3): 233-247.
- [20] Wang Y F, Cai H Y, Li J P, Chen Z G. Relationship between soil moisture and transpirational water-consumption of flue cured tobacco under different water supplying conditions. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(1): 19-23.
- [21] Guo Z K, Liu H L, Wu W Y, Yang S L. Water consumption of cherry tomato with mulched drip irrigation in solar greenhouse. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 53-58.
- [22] Niu Y, Liu H L, Wu W Y, Yang S L. Cucumber transpiration by largescale weighting lysimeter in solar greenhouse. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 52-56.
- [23] Li S, Ma L L, He C X, Yan Y. Simulation study between water evaporation of cultivation substrate and environmental factor of greenhouse. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(8): 144-149.
- [24] Xin X G, Wu P T, Wang Y K, Lin J. A model for water consumption by mountain jujube pear-like. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7473-7482.
- [25] Zhang Z K, Liu S Q, Liu S H, Huang Z J. Estimation of cucumber evapotranspiration in solar greenhouse in northeast china. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(4): 512-518.
- [26] Boulard T, Wang S. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1/3): 173-190.
- [27] Leonardi C, Baille A, Guichard S. Predicting transpiration of shaded and non-shaded tomato fruits under greenhouse environments. Scientia Horticulturae, 2000, 84(1/3): 297-307.
- [28] Fatnassi H, Boulard T, Lagier J. Simple indirect estimation of ventilation and crop transpiration rates in a greenhouse. Biosystems Engineering, 2004, 88(4): 467-478.
- [29] Demrati H, Boulard T, Fatnassi H, Bekkaoui A, Majdoubi H, Elattir H, Bouirden L. Microclimate and transpiration of a greenhouse banana crop. Biosystems Engineering, 2007, 98(1): 66-78.
- [30] Luo W H, Wang X C, Dai J F, Ding W M, Guo S R, Li S J. Measurement and simulation of cucumber canopy transpiration in a subtropical modern greenhouse under winter Climate conditions. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(1): 59-65.
- [31] Li J, Yao Y P, Luo W H, Dai J F, Hu N, Xu R, Han X B, Zhang H J. Transpiration of *Brassica chinensis* L in a plastic greenhouse covered with insect-proof nets in lower reaches of Yangtze River: A simulation study. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2241-2248.

- [32] Liu S, He K N. Relationship between transpiration character of *Prunus armeniaca* and environmental factors under different soil moisture. *Science of Soil and Water Conservation* 2006, 4(6): 66-70.
- [33] Liu J L, Cheng L L, Xu X X. Influencing factors of water consumption from tree transpiration. *World Forestry Research*, 2009, 22(4): 34-40.
- [34] Yang J W, Liang Z S, Han R L, Sun Q, Cui L J. Water use efficiency and water consumption characteristics of poplar under soil drought conditions. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(5): 630-636.
- [35] Moore G W, Jones J A, Bond B J. How soil moisture mediates the influence of transpiration on stream flow at hourly to interannual scales in a forested catchment. *Hydrological Processes*, 2011, 25(24): 3701-3710.
- [36] Shin J H, Noh E H, Son J E. Transpiration, growth, and water use efficiency of paprika plants (*Capsicum annuum* L.) as affected by irrigation frequency. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2012, 53(2): 129-134.
- [37] Naithani K J, Ewers B E, Pendall E. Sap flux-scaled transpiration and stomatal conductance response to soil and atmospheric drought in a semi-arid sagebrush ecosystem. *Journal of Hydrology*, 2012, 464/465: 176-185.
- [38] Meng P. Characteristics of Apple Tree Transpiration and Models for Prediction and Diagnosis of Water Stress Beijing: China Meteorological Press, 2005: 136-137.
- [9] 张振贤, 程智慧. 高级蔬菜生理学. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 98-99.
- [10] 李建明, 邹志荣, 刘迎春, 王忠红. 温度与水分驱动的甜瓜幼苗生长形态模拟模型研究. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 203-208.
- [11] 徐俊增, 彭世彰, 李道西, 叶澜涛. 基于 Logistic 曲线的作物累积蒸发蒸腾量模拟研究. *河海大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(2): 225-228.
- [12] 殷祚云. Logistic 曲线拟合方法研究. *数理统计与管理*, 2002, 21(1): 41-46.
- [13] 姚勇哲, 李建明, 张荣, 孙三杰, 陈凯利. 温室番茄蒸腾量与其影响因子的相关分析及模型模拟. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1869-1874.
- [14] 敬艳辉, 邢留伟. 通径分析及其应用. *统计教育*, 2006, 77(2): 24-26.
- [15] 袁志发, 周静芊, 郭满才, 雷雪芹, 解小莉. 决策系数——通径分析中的决策指标. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2001, 29(5): 131-133.
- [20] 汪耀富, 蔡寒玉, 李进平, 陈振国. 不同供水条件下土壤水分与烤烟蒸腾耗水的关系. *农业工程学报*, 2007, 23(1): 19-23.
- [21] 郭占奎, 刘洪禄, 吴文勇, 杨胜利. 日光温室覆膜滴灌条件下樱桃西红柿耗水规律. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 53-58.
- [22] 牛勇, 刘洪禄, 吴文勇, 杨胜利. 基于大型称重式蒸渗仪的日光温室黄瓜蒸腾规律研究. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 52-56.
- [23] 李珊, 马丽丽, 贺超兴, 闫妍. 温室栽培基质耗水量与环境因子相关性的研究. *中国农学通报*, 2011, 27(8): 144-149.
- [24] 辛小桂, 吴普特, 汪有科, 蔺君. 山地梨枣树耗水特征及模型. *生态学报*, 2012, 32(23): 7473-7482.
- [30] 罗卫红, 汪小岳, 戴剑峰, 丁为民, 郭世荣, 李式军. 南方现代化温室黄瓜冬季蒸腾测量与模拟研究. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 59-65.
- [31] 李军, 姚益平, 罗卫红, 戴剑峰, 胡凝, 徐蕊, 韩娴博, 张红菊. 长江下游防虫网覆盖塑料大棚内小白菜蒸腾模拟. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2241-2248.
- [32] 刘硕, 贺康宁. 不同土壤水分条件下山杏的蒸腾特性与影响因素. *中国水土保持科学*, 2006, 4(6): 66-70.
- [33] 刘建立, 程丽莉, 余新晓. 乔木蒸腾耗水的影响因素及研究进展. *世界林业研究*, 2009, 22(4): 34-40.
- [34] 杨建伟, 梁宗锁, 韩蕊莲, 孙群, 崔浪军. 不同干旱土壤条件下杨树的耗水规律及水分利用效率研究. *植物生态学报*, 2004, 28(5): 630-636.
- [38] 孟平. 苹果耗水特征及水分胁迫诊断预报模型研究. 北京: 气象出版社, 2005: 136-137.

参考文献:

- [1] 戴剑锋, 金亮, 罗卫红, 倪纪恒, 李永秀, 袁昌梅, 徐刚. 长江中下游 Venlo 型温室番茄蒸腾模拟研究. *农业工程学报*, 2006, 22(3): 99-103.
- [2] 潘瑞炽. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社, 2008: 18-19.
- [3] 李霞. 设施蔬菜蒸腾调控机理与方法的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [4] 刘浩, 段爱旺, 孙景生, 刘祖贵. 基于 Penman-Monteith 方程的日光温室番茄蒸腾量估算模型. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 208-213.
- [5] 董斌, 孙宁宁, 罗金耀. 基于棚内气象数据的冬季大棚番茄蒸腾计算. *武汉大学学报: 工学版*, 2009, 42(5): 601-604.
- [6] 李建明, 王平, 李江. 灌溉量对亚低温下温室番茄生理生化与品质的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 129-134.
- [7] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 戴剑锋, 金亮, 徐国彬, 陈永山, 陈春宏, 卜崇兴, 徐刚. 温室番茄叶面积与干物质生产的模拟. *中国农业科学*, 2005, 38(8): 1629-1635.
- [8] 陆欣. 土壤肥科学. 北京: 中国农业大学出版社, 2003:

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.4 Feb., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The bioavailability of dissolved organic carbon in the eutrophic lakes YE Linlin, KONG Fanxiang, SHI Xiaoli, et al (779)
- Plant species of the non-agricultural habitats in the lower reaches of the Yellow River plain agro-landscape
..... LU Xunling, LIANG Guofu, TANG Qian, et al (789)

Autecology & Fundamentals

- Manganese stress on the ultrastructures of a manganese tolerant plant, *Polygonum perfoliatum* L.
..... WANG Jun, WU Hui, XUE Shengguo, et al (798)
- Characteristics of arsenic (As) tolerance and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different radial oxygen loss
..... WU Chuan, MO Jingyu, XUE Shengguo, et al (807)
- Effects of water stress on physiological characteristics of different *Illicium lanceolatum* ecotypes under low light intensity
..... CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin (814)
- Effect of branch number on the growth and development of *Morus alba* saplings ... HUAN Huihui, XU Xiao, LIU Gang, et al (823)
- Spatial distribution pattern and sampling technique for *Orthotylus* (*O.*) *sophorae* nymphs on *Sophora japonica*
..... ZHU Huiying, SHEN Ping, WU Jianhua, et al (832)
- Assessment of fungal diversity in apple replanted orchard soils by T-RFLP analysis
..... YIN Chengmiao, WANG Gongshuai, LI Yuanyuan, et al (837)
- Effects of dazomet on edaphon and growth of *Malus hupehensis* rehd. under continuous apple cropping
..... LIU Entai, LI Yuanyuan, HU Yanli, et al (847)
- Isolation, identification, and performance of two pyrene-degrading endophytic bacteria SUN Kai, LIU Juan, LI Xin, et al (853)

Population, Community and Ecosystem

- Effects of different temperatures on the growth and development of *Eotetranychus Kankitus* (Ehara)
..... LI Yingjie, WANG Ziyang, ZHANG Guohao, et al (862)
- Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on plant niche of alpine meadow communities in the
Qinghai-Tibet Plateau JIA Tingting, MAO Liang, GUO Zhenggang (869)
- Correlation between characteristics of *Reaumuria soongarica* communities and soil factors in the Sangong River basin
..... ZHAO Xuechun, LAI Liming, ZHU Linhai, et al (878)
- Effects of afforestation on soil microbial community structure in the arid valley of Minjiang River
..... WANG Weixia, LUO Da, SHI Zuomin, et al (890)
- Effects of reclamation on tidal flat and land use on soil microbial community
..... LIN Li, CUI Jun, CHEN Xueping, FANG Changming (899)
- Effects of *Pomacea canaliculata* on aquatic macrophyte community structure in paddy fields
..... ZHAO Benliang, ZHANG Jiaen, DAI Xiaoyan, et al (907)
- The adaptability and decontamination effect of four kinds of woody plants in constructed wetland environment
..... CHEN Yonghua, WU Xiaofu, HAO Jun, et al (916)
- Carbon budget of alpine *Potentilla fruticosa* shrubland based on comprehensive techniques of static chamber and biomass harvesting ...
..... LI Hongqin, LI Yingnian, ZHANG Fawei, et al (925)
- Effect of initial pH value on microbial Fe (III) reduction in alkaline and acidic paddy soils ... WU Chao, QU Dong, LIU Hao (933)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Climate environmental change and stable carbon isotopes in age layers of *Tamarix* sand-hillocks in Kumtag desert
..... ZHANG Jinchun, YAO Tuo, LIU Changzhong, et al (943)

Resource and Industrial Ecology

- The critical factors of transpiration on muskmelon in plastic greenhouse ZHANG Dalong, CHANG Yibo, LI Jianming, et al (953)
- Ion absorption and distribution of symbiotic *Reaumuria soongorica* and *Salsola passerina* seedlings under NaCl stress
..... ZHAO Xin, YANG Xiaojun, SHI Yong, et al (963)
- The relationship between selected rhizosphere and non-rhizosphere soil properties and the quality of *Pyrola decorata*
..... GENG Zengchao, MENG Lingjun, LIU Jianjun (973)
- Spatial variation analysis of soil organic matter and nutrient factor for before and after planting crops
..... FANG Bin, WU Jinfeng (983)

Urban, Rural and Social Ecology

- Establishment and application of the index system for urban river health assessment
..... DENG Xiaojun, XU Youpeng, ZHAI Luxin, et al (993)
- Dynamic analysis of the ecological footprint and carrying capacity of tibet AN Baosheng, CHENG Guodong (1002)

Research Notes

- Responses of soil microorganisms and soil enzyme activities to different land use patterns in the water-level-fluctuating zone of
the Three Gorges Reservoir region MA Peng, LI Changxiao, LEI Ming, et al (1010)
- Effects of salt stress on growth and root development of two oak seedlings
..... WANG Shufeng, HU Yunxue, SUN Haijing, et al (1021)
- The effects of constant and variable thermal acclimation on thermal tolerance of the common giant toad tadpoles (*Bufo gargarizans*) ...
..... WANG Lizhi (1030)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 董 鸣 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 34 卷 第 4 期 (2014 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34 No. 4 (February, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元