

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

齐述华 李子忠* 龚元石

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要 根据田间水分和肥料最优控制下测定的土壤水分,利用农田水量平衡原理分别计算了花椰菜、苋菜和菠菜生长期内的作物需水量。根据作物需水量和气象资料计算的参考作物蒸散量,计算3种蔬菜在不同生育期内的作物系数。结果表明,花椰菜、苋菜和菠菜在整个生长期内的需水量分别为223.8 mm,144.9 mm和148.1 mm;作物系数的平均值分别是0.68,0.94和0.65;除苋菜的作物系数与叶面积指数的拟合关系相关性不显著外,花椰菜和菠菜的作物系数与叶面积指数呈对数函数关系。

关键词 蔬菜;作物需水量;作物系数;农田水量平衡;叶面积指数

中图分类号 S152.75;S161.42

Evaluating Crop Water Requirements and Crop Coefficients for Three Vegetables Based on Field Water Budget

Qi Shuhua Li Zizhong* Gong Yuanshi

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract According to the measured soil moisture under the optimal soil water and fertilizer conditions, crop water requirements (ET_c) of three vegetables were calculated by soil water budget model. Crop coefficients (K_c) of cauliflower, amaranth and spinach during growth period were evaluated based on the determined ET_c and reference evapotranspiration (ET_0) by Penman-Monteith procedure. The crop water requirements for cauliflower, amaranth and spinach were 223.8 mm, 144.9 mm and 148.1 mm separately; the mean K_c for above vegetables were 0.68, 0.94 and 0.65 mm separately; the K_c value has a logarithmic function to leaf area index for experimented crops except for amaranth.

Key words vegetable; crop water requirement; crop coefficient; field water budget; leaf area index

当前蔬菜生产中灌水量普遍偏高,导致水资源的大量浪费。据对京郊蔬菜地灌水情况的调查表明:在蔬菜的一个生长季中一般灌水4~8次,每次灌水达75~90 mm,这种灌水方式对于浅根的蔬菜作物是不合理的。在蔬菜的灌溉管理中,蔬菜各生育阶段的需水量和作物系数是指导灌溉的重要参数。国外对蔬菜作物系数的研究较多,如Hanks和Hill^[1]提出多种蔬菜不同生长阶段作物系数平均值;Doorenbos和Pruitt^[2]对多种蔬菜需水量和作物系数也作了较多的研究。但目前国内对作物需水量和作物系数的研究主要集中在大田作物和经济作物上^[3,4],对

收稿日期:2001-04-24

国家“九五”攻关专题(95-001-02-09)和国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999011709)

*李子忠,博士,研究方向为水土资源利用。

蔬菜的研究很少。

本研究根据田间土壤含水量的实测资料,利用农田水量平衡原理计算了花椰菜、苋菜和菠菜的作物需水量和作物系数,分析了3种蔬菜的需水规律。

1 原理和方法

根据农田土壤水分平衡方程,农田蒸散量可由下式计算:

$$ET = I + P + \Delta W - R - S \quad (1)$$

式中, ET 为农田蒸散量, I 为灌水量, P 为降水量, ΔW 为土体贮水量的变化, R 为径流量, S 为土体下边界净通量(向下为正,向上为负),所有变量的单位以mm计。在(1)式中,一般情况下,径流量(R)在平原地区可以忽略不计,降水(P)用雨量筒测定,灌溉量(I)可以由水表控制, ΔW 可通过测定土壤含水量获得,当下边界远大于计划灌水层时,下边界净通量(S)可假设为零。

作物需水量(ET_c)指作物在适宜的土壤水分和肥力水平下,经过正常生长发育,获得高产时的作物蒸腾量和棵间蒸发量之和。在充分满足作物对水肥需要以及上述对各变量的假设情况下,利用农田水量平衡原理计算的农田蒸散量(ET)即为作物需水量,则公式(1)转化为:

$$ET_c = I + P + \Delta W \quad (2)$$

作物系数反映了作物本身的生物学特性、产量水平及土壤肥力和耕作条件对作物需水量的影响^[3]。根据联合国粮农组织(FAO)的定义^[4],作物系数用作物需水量(ET_c)与同一时段内参考作物蒸散量(ET_0)的比值表示:

$$K_c = ET_c / ET_0 \quad (3)$$

式中 ET_0 可以利用测站或当地的气象资料,采用FAO推荐的Penman-Monteith公式计算而得^[4],计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

式中 R_n 为地表净辐射通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), T 为日平均温度($^{\circ}\text{C}$), e_a 和 e_d 分别是饱和水汽压和实际水汽压(kPa), U_2 为2m高处的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), Δ 为饱和水汽压与温度的关系曲线的斜率($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ 为干湿表常数($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

2 田间试验设计

试验布置在中国农业大学中德合作项目东北旺试验地,属暖温带半湿润大陆季风气候,年平均温度 11.5°C ,年平均降水630mm,降水主要集中于6~8月份。土壤类型为草甸褐土,1.2m土层土壤质地为砂质壤土到壤土,地下水埋深14m。试验区内设有自动气象观测站。

供试作物为花椰菜(品种是雪峰,生长期为2000-04-03—2000-06-04)、苋菜(品种是红苋,生长期为2000-07-02—2000-07-26)、菠菜(品种是菠菜18,生长期为2000-08-04—2000-10-30)。3种蔬菜以接茬的方式在同一试验小区进行。试验小区面积为 $12\text{m} \times 12\text{m}$,小区内埋设2根分段式时域反射仪(TDR)探针,用于测定0~15,15~30,30~60,60~90和90~120cm

土层的平均土壤含水量。试验期间的施肥量由 N-EXPERT 系统的推荐量确定。试验中的灌水量和施肥量见表 1。

表 1 试验期间施肥方案

蔬菜种类	灌水量/mm	降水量/mm	施氮量(N)/(kg·hm ⁻²)	生长期
花椰菜	268.0	41.5	145	2000-04-03—06-04
苋菜	84.3	146.5	31	2000-07-02—07-26
菠菜	127.8	65.2	68	2000-09-04—10-30

小区灌溉采用微喷方式,每 2 d 测 1 次各土层的土壤含水量,灌水前后或降水后加测,计算计划灌水层的土体贮水量,判断土壤水分是否在适宜范围内。计划灌水层由定期测定的根系埋深来确定,当根系埋深 $d < 20$ cm 时,计划灌水层为 20 cm;当 $20 \text{ cm} < d < 30$ cm 时,计划灌水层为 30 cm;当 $30 \text{ cm} < d < 40$ cm 时,计划灌水层为 40 cm;当 $40 \text{ cm} < d < 50$ cm 时,计划灌水层为 50 cm。已有研究结果表明^[4, 5],3 种蔬菜生长的适宜土壤含水量为 60%~90%、土壤有效含水量(ASW),如果低于灌水下限(60%ASW)则需灌溉至灌水上限(90%ASW),控制计划灌水层的土壤含水量处于 60%~90%ASW,该土壤含水量能够满足蔬菜作物的正常生长^[6, 7],灌溉量由(5)式确定:

$$IRRI = [\theta_w + 0.9 \times ASW - \theta] \times DEPTH \quad (5)$$

式中 θ 为当前土壤含水量, $DEPTH$ 为计划灌水层厚度(mm), ASW 的计算式为:

$$ASW = \theta_t - \theta_w \quad (6)$$

式中 θ_t 为田间持水量, θ_w 为萎蔫含水量。降水和灌溉控制情况见图 1,图中虚线从左向右分别为 20,30,40,50 和 60 cm 的计划灌水层贮水量上下限。

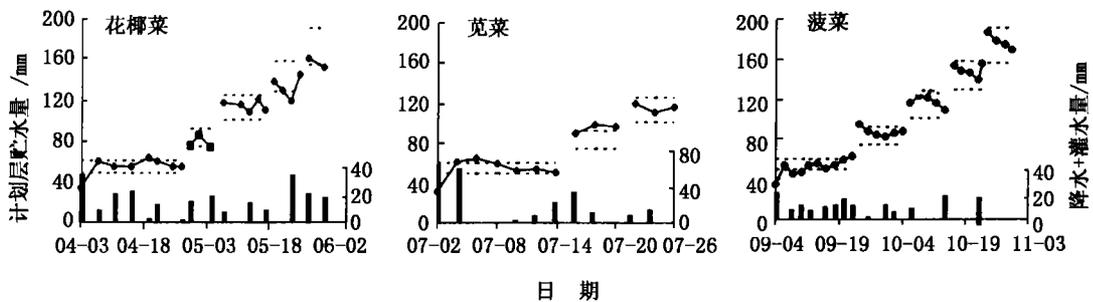


图 1 计划层土体贮水量的控制

利用 C1-203 激光叶面积仪测定一定数量叶片的面积,然后利用直尺测定叶片的最大长、最大宽,以最大长和最大宽的乘积值与叶面积进行线性拟合^[8]。根据拟合结果定期测算单位地表面积叶片的总面积,花椰菜、苋菜和菠菜的测算频率分别为 10 d,5 d 和 7 d。试验中花椰菜、苋菜和菠菜的最大长×宽的值与叶面积的拟合关系见图 2。

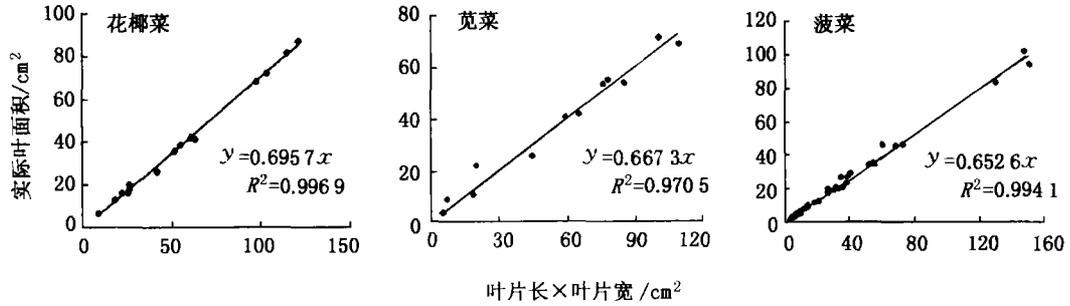


图2 叶片面积与叶片长×宽的线性关系

3 结果与讨论

3.1 供试蔬菜作物需水量

根据公式(2)分别计算了花椰菜、苋菜、菠菜在不同生育阶段需水量(表2,图3)。表2中花椰菜的生育阶段可以划分为莲座期和花球生长期,由于在花椰菜移栽时具有7片真叶,没有考虑幼苗期;而苋菜和菠菜属叶菜类,没有生育期的划分,生长阶段由根系埋深来划分。结果表明,花椰菜在2个月的生育期内总需水量为223.8 mm,其中莲座期(2000-04-03—2000-05-06)的需水量为73.9 mm,花球生长期(2000-05-06—2000-06-04)的需水量为149.9 mm;苋菜在25天生育期内需水量为144.9 mm,菠菜在2个月内需水量为148.1 mm。从日平均需水量来看,花椰菜在莲座期平均每天2.2 mm,且增加缓慢,进入花球生长期需水量显著增加,平均每天的需水量为5.4 mm;苋菜在整个生育期内的日平均需水量呈增加趋势,且需水量较大,变化范围为2.5~9.8 mm;菠菜生育期内日平均需水量在初期逐渐增大,至10月中旬达最大值4.8 mm,以后逐渐降低。

表2 参考作物蒸散量、蔬菜需水量和作物系数

蔬菜种类	起止日期	根系深度 d/cm	t/d	ET_c				K_c
				ET_c	日平均 ET_c	ET_c	日平均 ET_c	
				/mm				
花椰菜	04-03—05-06	<30	34	73.9	2.2	191.2	5.6	0.39
	05-07—05-18	<40	12	53.8	4.5	80.3	6.7	0.67
	05-19—06-04	<50	16	96.1	6.0	87.0	5.4	1.11
苋菜	07-02—07-15	<20	14	52.4	3.7	75.8	5.4	0.69
	07-16—07-21	<30	6	43.8	7.3	35.9	6.0	1.22
	07-22—07-26	<40	5	48.7	9.7	43.3	8.7	1.12
	09-04—09-23	<20	20	34.2	1.7	90.7	4.5	0.38
菠菜	09-24—10-05	<30	13	31.5	2.4	46.5	3.6	0.68
	10-06—10-15	<40	10	32.9	3.3	32.8	3.3	1.00
	10-16—10-23	<50	8	29.2	3.7	27.5	3.5	1.06
	10-24—10-30	<60	7	20.3	2.9	20.9	3.0	0.97

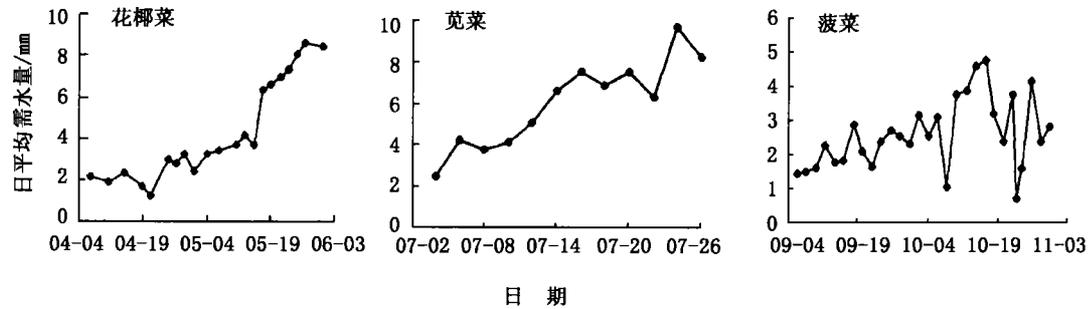


图 3 3 种蔬菜的日平均需水量

3.2 蔬菜的作物系数

根据公式(3)确定的花椰菜、苋菜和菠菜的作物系数见表 2 最后一列,生长期内动态变化见图 4。结果表明,花椰菜的 K_c 在莲座期平均为 0.39,花球生长前期平均 0.69,花球生长后期平均 1.11,整个生长期变化范围是 0.31~1.20;苋菜的 K_c 在作物生长前期约为 0.69,中期约为 1.22,后期约为 1.12,整个生长期变化范围是 0.40~1.40;菠菜的 K_c 在作物生长前期约为 0.38~0.68,中期约为 0.68~1.06,后期为 1.0 左右,整个生长期变化范围是 0.25~1.17。从整个生长期来看,作物系数的变化具有很明显的规律,在生长初期作物系数逐渐增大,在中后期达到最大值,随后开始下降,但在短时期内,作物系数表现出明显的波动,这种波动是由降水或灌水引起土面蒸发有直接关系,从图中可以看出,在作物生长初期,这种波动更显著,在中后期,随着作物冠层覆盖度的增大,蒸腾量占蒸散量的比例逐渐增大,土面蒸发占比例降低,所以土面蒸发不会引起较大的波动。

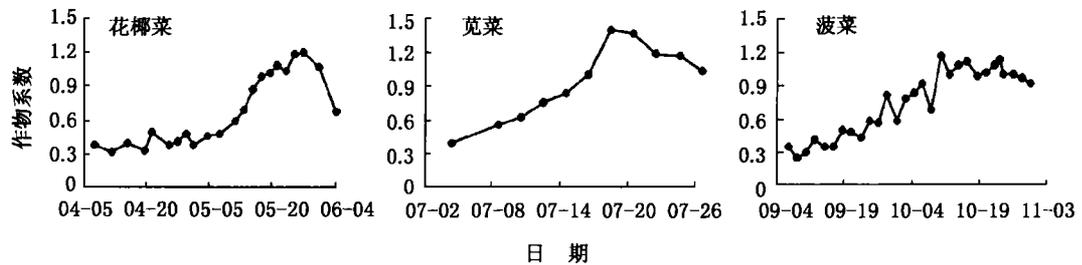


图 4 3 种蔬菜的作物系数

对作物系数的研究通常是将作物系数看作从播种(定植)开始的时间的函数,这对于制定灌水方案是比较方便的,然而这种方法存在的一个缺点是没有考虑环境和种植因子的影响,这种影响主要与作物生长的冠层覆盖度有关,特别是在作物生长的初期,行间距和种植密度都受间苗的影响,从而引起冠层覆盖度的变化,因而将作物系数描述为时间的函数必然会引起较大的误差^[9]。在这里试图建立各蔬菜作物系数与叶面积指数的关系(图 5),由图 5 可以看出除苋菜的作物系数与叶面积指数的拟合关系相关性不显著外,花椰菜和菠菜的作物系数与叶面积指数的拟合关系都极显著相关。苋菜作物系数与叶面积指数的拟合关系不显著与作物系数测定过程中难以控制进入田间的水分,从而引起计算的作物系数偏大直接有关。

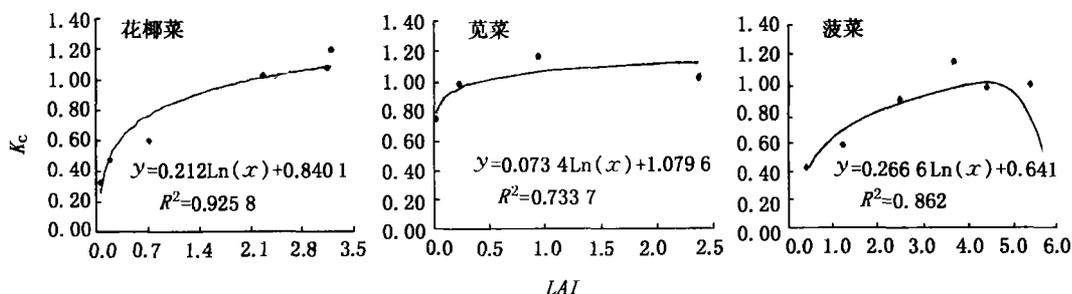


图5 作物系数与叶面积指数的关系

4 结论与讨论

1) 本文根据田间水量平衡原理计算了3种蔬菜的作物需水量,在整个生育期内花椰菜、苋菜和菠菜的需水量分别是223.8 mm, 144.9 mm和148.1 mm。

2) 花椰菜、苋菜和菠菜作物系数的变化范围分别是0.31~1.20, 0.40~1.40和0.25~1.17;全期作物系数的平均值分别是0.68, 0.94和0.65。花椰菜和菠菜在不同时期的作物系数与叶面积指数呈显著对数关系。

3) 由于作物生长期间灌水计划层都远小于1.2 m,并且灌水上限小于田间持水量,因而灌水难以到达下边界^[10];另外由于京郊地区的地下水较深,难以经由下边界进入土层,所以在降水较少的花椰菜和菠菜生长期,假定下边界1.2 m处通量为零不会产生大的误差。但在多雨的苋菜生长初期,由于难以控制土壤含水量小于田间持水量,土壤水分有可能经过下边界渗漏到下层土壤,此外地表积水和地表径流的发生都会引起计算的需水量偏大,从而引起计算的作物系数偏大。为了准确获得夏季作物的作物系数,找出合理的方法确定下边界通量和有必要搭建防雨棚以严格控制进入田间的降水量。

参 考 文 献

- 1 Hanks R J, Hill R W. Modeling crop responses to irrigation in relation to soil, climates and salinity. International Irrigation Information Center, 1980
- 2 Doorenbos J, Pruitt W O. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24, Italy, 1977
- 3 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究. 北京: 农业出版社, 1993
- 4 龚元石, 李子忠, 李春友, 等. 应用时域反射仪测定作物需水量和作物系数. 中国农业大学学报, 1998, 3(5): 61~67
- 5 Allen R G, Jensen M E, Wright J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agron J, 1989, 81: 650~662
- 6 丁正熙, 郑大玮. 蔬菜节水栽培. 北京: 农业出版社, 1990. 33~41
- 7 中国农业科学院蔬菜研究所. 中国蔬菜栽培学. 北京: 农业出版社, 1982. 472~519
- 8 段爱旺. 作物群体叶面积指数的测定. 灌溉排水, 1996, (1): 50~53
- 9 Stephen R, Grattan W B, Allen G, et al. New crop coefficients estimate water use of vegetables, row crops. California Agriculture, 1998, 52(1): 16~21
- 10 姚贤良, 陈云生. 土壤物理学. 北京: 农业出版社, 1986. 345~353