文章编号:1672 - 3317(2017)04 - 0066- 06

种植密度对制种玉米耗水量的影响及模型验证

时荣超，佟 玲，何柳月，姜雪连
（中国农业大学 中国农业水问题研究中心，北京 100083）

摘 要:为探究不同种植密度下制种玉米耗水规律及模型适用性,进行了制种玉米的田间小区试验。试验共设置6个种植密度,分别为6.75、8.25、9.75、11.25、12.75和14.25万株/hm^2,采用随机区组布置,每个处理3次重复,其中9.75万株/hm^{2}为当地种植密度,作为对照(CK)。试验对不同种植密度下的制种玉米的形态指标和耗水量进行了观测。结果表明,制种玉米的*LAI*随种植密度的增加而增加,株高随种植密度的增加没有显著变化;耗水量随种植密度的增加而增加;相比于双作物系数法、SIMDual K_c模型及引入K_d的双作物系数法而言,$K_{density}$法更适合用于估算西北旱区不同种植密度下制种玉米的K_c值。

关 键 词:玉米;种植密度;耗水量;模型
中图分类号:S274.1 **文献标志码**:A doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.04.012
时荣超,佟玲,何柳月,等. 种植密度对制种玉米耗水量的影响及模型验证[J]. 灌溉排水学报,2017,36(4):66-71.

0 引 言

作物的种植密度和群体大小、光能利用和产量高低都密切相关,是农业生产中的重要技术因素[1]。在一定范围内,产量随种植密度的增加而增加,超过一定范围由于株间竞争的加剧,产量随种植密度的增加而减少[2]。从国内外玉米生产发展的历程来看,种植密度的增加是提高玉米单产的重要途径[3]。

作物耗水量是指作物在任何土壤水分条件下实际消耗的植株蒸腾、土壤蒸发与植物体含水率之和[4]。作物耗水量的大小及其变化是气象因子、土壤水分条件、作物特性和农业技术措施综合作用的结果[5],种植密度作为农业技术措施对作物耗水量具有重要影响。近年来,国内外关于种植密度对普通玉米耗水量影响的研究较多,但对制种玉米耗水量及作物系数的研究较少。因此研究不同种植密度对制种玉米耗水及作物系数的影响对确定合理种植密度,制定合理灌溉制度,实现制种玉米的高产、优质有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2015年在中国农业大学石羊河试验站(102º50′ E,37º52′ N,海拔1 581 m)进行,该地区属典型的大陆温带气候,光热资源极其丰富,全年日照时间可达3 000 h以上,年平均气温为8.8 ℃,大于0 ℃的积温为3 550 ℃以上。试验区的平均地下水埋深在25 m以下,多年平均降水量仅为164.4 mm,年均蒸发为2 000 mm。试验区土壤质地为砂壤土,速效磷质量分数为5~8 mg/kg,铵态氮质量分数为5.53 mg/kg,硝态氮质量分数为63.95 mg/kg,有机质质量分数为4~8 g/kg,土壤pH值 为8.2,矿化度为0.71 g/L,速效盐离子质量分数为1.2~5.6 g/kg。土壤体积质量为1.38 g/cm^3,田间持水率为0.29 cm^3/cm^3,凋萎含水率为0.12 cm^3/cm^3。

1.2 试验设计

试验共设置6个种植密度处理(表1),每个处理3个重复,采用随机区组布置,小区面积为9.6 m×7 m,小区间隔1 m。供试制种玉米品种为富农588,按照当地制种玉米种植方式(1行父本,5行母本)种植,母本

收稿日期:2016-03-17
基金项目:国家自然科学基金项目(51379208);农业公益性行业科研专项经费项目(201503125)
作者简介:时荣超(1990-),男。硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: a1633386@163.com
通信作者:佟玲(1979-),女。副教授,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: tongling2001@cau.edu.cn

于4月17日播种，父本分别于4月24日和4月29日播种。施肥量及日期与当地一致，播前施磷酸二铵300 kg/hm²、尿素375 kg/hm²、硫酸钾225 kg/hm²，拔节期追施尿素600 kg/hm²。灌溉方式为覆膜畦灌，全生育期共灌水5次，充分灌溉，于2015年6月8日、7月2日、7月21日、8月7日和8月26日分别灌水28.5、73.5、93.0、93.0、87.0 mm，总灌水量为375.0 mm。全生育期内的有效降雨量（次降雨量不小于5 mm）为112.6 mm。其中苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期的灌水量分别为0、102、93、180、0 mm，有效降雨量分别为16.4、47.8、33.6、0、14.8 mm。

表1 试验设置

处理	D1	D2	D3	D4	D5	D6
行距/cm	40	40	40	40	40	40
株距/cm	37.0	30.3	25.6	22.2	19.6	17.5
种植密度/（株•hm^{-2}）	67 500	82 500	97 500	112 500	127 500	142 500

1.3 观测项目和方法

株高和叶面积指数（*LAI*）：在每个试验小区随机选取有代表性的5株制种玉米，测量株高（由地面至生长点）及每片叶子的长度及最大宽度。每5~7 d测定1次，单叶面积=长×宽×0.74。叶面积指数=单株叶面积/该植株所占面积。

棵间蒸发（*E*）：采用微型蒸渗仪测定，时间为每天19:00，用精度为0.1 g的电子天平称质量，计算得到每天的棵间蒸发量。微型蒸渗仪尺寸为直径*D*=10 cm，高度*h*=20 cm。每个小区布置2个蒸渗桶，分别置于父本与母本间、母本与母本间的裸土上。蒸渗桶底部用纱布封好，外设套筒保护好周边土壤。取原状土放入其中，每隔5 d及降雨和灌水后换土。

土壤蒸发系数K_e用来描述*ET*中的土壤蒸发部分，当降雨或灌溉后，土壤表面较湿润时，K_e达到最大；当土壤表面没有可用于蒸发的水分，K_e很小甚至为0[6]。计算公式为：

$$K_e = \frac{E}{ET_0} \quad , \tag{1}$$

式中：*E*为实测土壤蒸发量（mm）。

土壤含水率(*W*)：采用便携式土壤水分测定仪（Diviner2000, Sentek Pty Ltd., Australia）测定土壤体积含水率，在每个小区的裸土和覆膜处各布置1根测管，测定深度为1 m，测点垂向间距为10 cm，每7 d测定1次，灌水及降雨前后加测，并用取土烘干法对测得值进行校正。

根据水量平衡方程[7]计算耗水量，即：

$$ET = P + I - \triangle W \quad , \tag{2}$$

式中：*ET*为全生育期内的耗水量（mm）；*P*为有效降雨量（mm）；*I*为灌水量（mm）；Δ*W*为根区土壤水分的变化量（mm）。

气象数据及ET_0：采用标准气象站（Hobo, Onset Computer Corp., USA）对气象数据进行连续观测，包括太阳辐射R_s、降雨量*P*、大气温度T_a和相对湿度*RH*，平均每15 min记录1次数据。

ET_0采用FAO-56推荐的Penman-Monteith公式[6]计算。

作物系数K_c计算式为：

$$K_c = \frac{ET}{ET_0} \quad , \tag{3}$$

式中：*ET*为实测作物蒸发蒸腾量（mm）；ET_0为对应的参考作物蒸发蒸腾量（mm）。

耗水模型：作物系数法是估算农田*ET*的最广泛的方法之一，主要分为单作物系数法和双作物系数法。双作物系数法将K_c分为代表作物蒸腾的基础作物系数K_{cb}和代表土壤蒸发的土壤蒸发系数K_e。具体计算方法详见文献[6]。

Allen和Pereira[8]引入密度系数（K_d）估算不同种植密度下双作物系数法中的基础作物系数：

$$K_d = 1 - e^{-0.7LAI} \quad , \tag{4}$$

$$K_{cb\,adj} = K_{c\,min} + K_d\left(K_{cb\,full} - K_{c\,min}\right) \quad , \tag{5}$$

式中：$K_{cb\,adj}$为不同密度下的基础作物系数；$K_{cb\,full}$为作物生长中期的作物系数；$K_{c\,min}$为裸土时最小的作物系数，

K_d为密度系数。

Rosa等[9]开发了基于FAO双作物系数法的SIMDual K_c模型，该模型将土壤蒸发和作物蒸腾分成2部分，利用软件更方便快捷地计算作物系数。需要输入的数据包括：土壤参数、地表覆盖特征、径流参数、作物参数、灌溉系统特点、气象数据等[10]。该模型在中国北部平原、葡萄牙、意大利等地的多种作物上得到验证[11]，但对于不同种植密度下的作物适用性的研究还比较少。

Jiang等[12]引入密度比$K_{density}$，即：

$$K_{density} = \left(\frac{LAI_i}{LAI_{dense}}\right)^{\beta} \quad , \tag{6}$$

$$K_{c\,adj} = K_{density} \times K_{cm} \quad , \tag{7}$$

式中：LAI_i为不同种植密度下LAI；LAI_{dense}为参考种植密度下LAI；β为经验系数，其中制种玉米取0.45；K_{cm}为参考种植密度（兹选D5）下的作物系数。

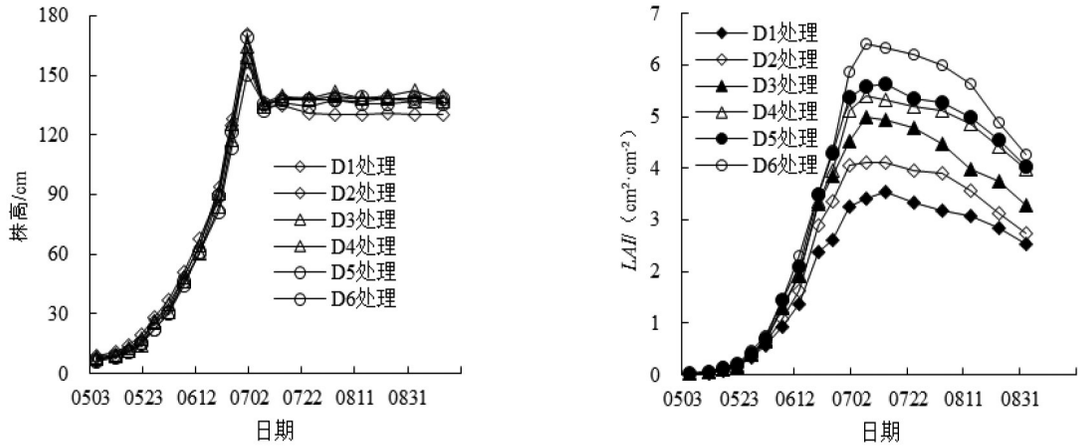
1.4 数据分析

采用SPSS Statistics 20.0和Microsoft Excel 2007进行统计分析，显著性水平为$P<0.05$。

2 结果与分析

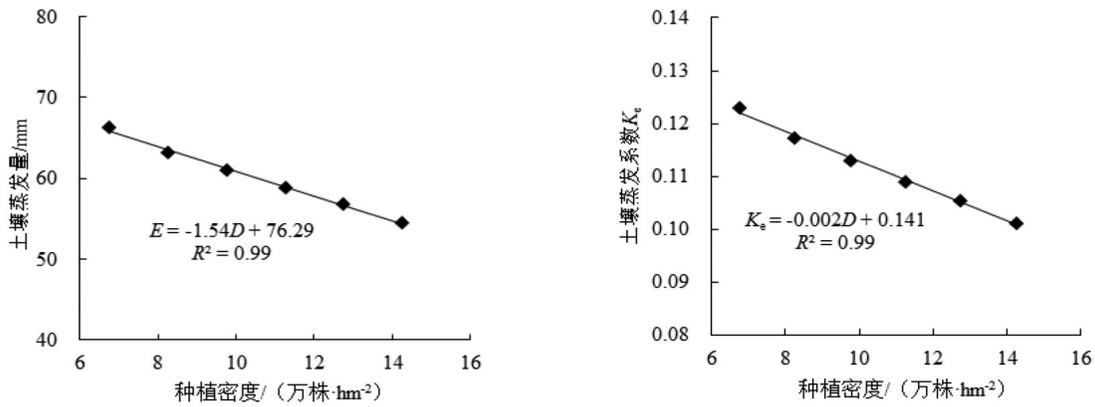
2.1 种植密度对制种玉米形态指标的影响

图1为不同种植密度下制种玉米株高及叶面积指数随时间的变化。由图1可以看出，苗期、拔节期为作物快速生长阶段，LAI迅速增加；制种玉米抽雄后，LAI趋于稳定；抽穗期后期至成熟期阶段，LAI逐渐减小。全生育期内，LAI与种植密度显著正相关，这与刘战东等[13]对夏玉米的研究结果是一致的。因为株高主要由遗传因素决定，所以全生育期内不同种植密度制种玉米株高无明显差异。



(a)株高　　(b)叶面积指数

图1 不同种植密度下制种玉米株高及叶面积指数的变化



(a)土壤蒸发量　　(b)土壤蒸发系数

图2 不同种植密度下制种玉米土壤蒸发量与土壤蒸发系数的变化

2.2 种植密度对制种玉米土壤蒸发量的影响

由图2可知，随种植密度的增加，全生育期的土壤蒸发量和土壤蒸发系数线性减小，且相关系数均达0.99，其中土壤蒸发量从66.40 mm减少到54.58 mm，低种植密度下土壤蒸发量比高种植密度增加21.7%；土壤蒸发系数从0.12减小到0.10，低种植密度下土壤蒸发量比高种植密度增加21.8%。由于高种植密度具有较高的叶面积指数，到达地面的辐射量少，土壤上方空气流动速度降低。全生育期内的蒸发量及土壤蒸发系数呈明显的规律性变化，且差异显著。

2.3 种植密度对制种玉米耗水量的影响

图3为不同种植密度下制种玉米耗水量的变化，从全生育期来看，制种玉米的耗水量从477.0 mm增加至505.8 mm，与种植密度呈线性正相关关系，决定系数达到0.99，且各处理间的耗水量差异显著。随种植密度增加，*LAI*随之增加，作物冠层吸收的总辐射增加，蒸腾量增加，进而增加作物耗水量。表明作物密植在提高光合-蒸腾作用能力的同时，也增加了作物耗水量。

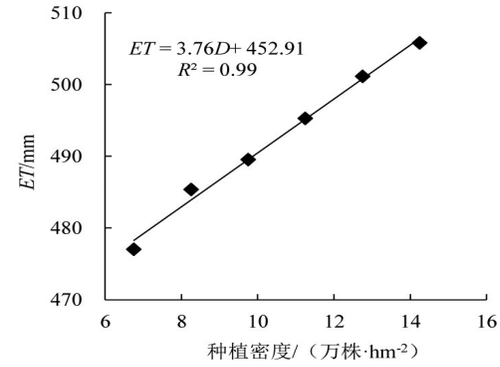


图3 不同种植密度下制种玉米耗水量的变化

2.4 种植密度对制种玉米作物系数的影响

制种玉米全生育期总ET_0为559.31 mm。不同处理下，制种玉米全生育期内的作物系数变化见表2。从表2可以看出，作物系数随生育期的推进呈现出先增加后减小的趋势，在抽穗期达到最大值。在苗期，各处理作物耗水较少，导致各处理的作物系数也较小；拔节期后，随着叶面积指数差异的增大，耗水量逐渐增加，作物系数表现出明显的差异；抽穗期，作物系数达到最大，成熟期处理间作物系数差异不显著。全生育期内，作物系数随种植密度的增加而增加，变化范围为0.88~0.94，且差异显著。

表2 不同种植密度下制种玉米作物系数

生育阶段	D1	D2	D3	D4	D5	D6
苗期（0426—0530）	0.10a	0.11b	0.11b	0.11b	0.13c	0.13d
拔节期（0531—0707）	0.82a	0.82a	0.83ab	0.84bc	0.85cd	0.86d
抽穗期（0708—0804）	1.40a	1.41ab	1.42ab	1.44bc	1.44bc	1.46c
灌浆期（0805—0831）	1.29a	1.32b	1.33bc	1.34c	1.35d	1.36d
成熟期（0901—0915）	1.06a	1.10a	1.10a	1.13a	1.15a	1.16a
全生育期（0426—0915）	0.88a	0.90b	0.91c	0.92d	0.93e	0.94f

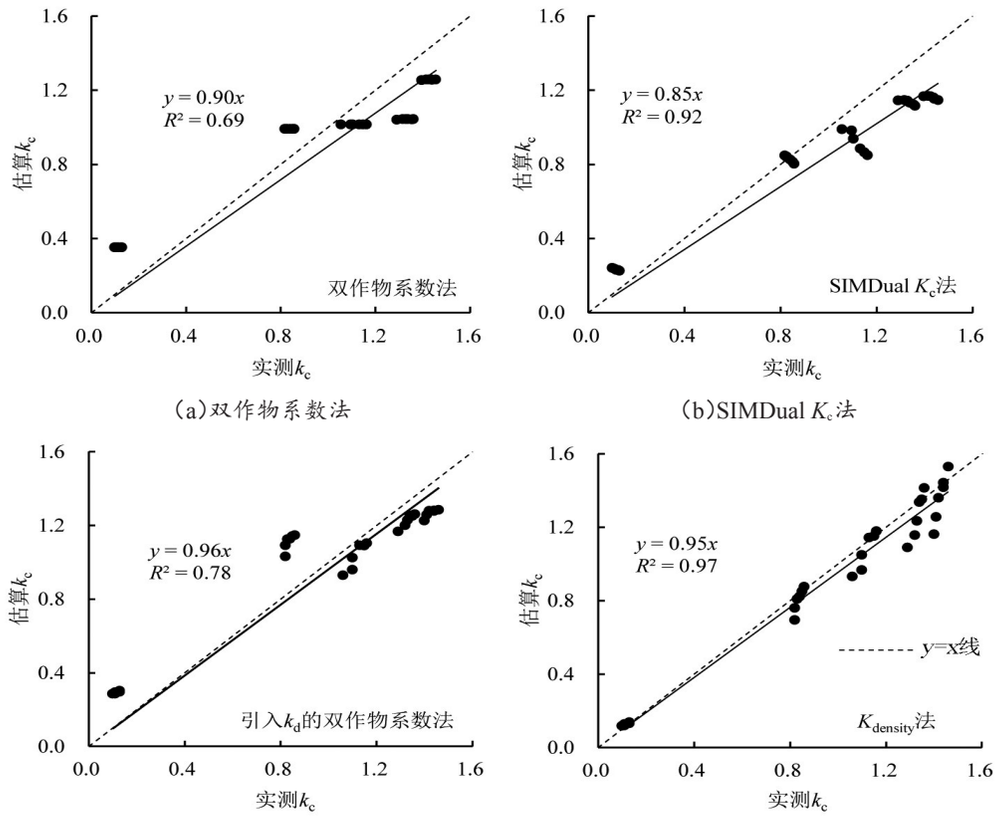
注 不同同行不同小写字母表示处理间差异显著，$P<0.05$。

2.5 不同种植密度下制种玉米耗水模型模拟

采用双作物系数法、基于双作物系数法开发的SIMDualK_c模型、引入K_d的双作物系数法和$K_{density}$法估算了6种种植密度下各生育期的K_c值，结果详见表3、图4。双作物系数法低估值较实测值低10%，*MAE*、*RMSE*和R^2值分别为0.19、0.20和0.69，这是因为原始的双作物系数法缺少密度因子，基础作物系数K_{cb}仅与株高和气象因子有关，而不同种植密度下制种玉米株高没有差异，所以双作物系数法不适合用于估算不同种植密度下的作物系数；SIMDualK_c模型低估值较实测值低15%，*MAE*、*RMSE*和R^2值分别为0.16、0.19和0.92，这是由于SIMDualK_c模型是基于双作物系数法开发的模拟软件，虽然考虑到了冠层覆盖度的影响，但是模型输入的薄膜覆盖度和冠层覆盖度由定期测量得到，不能反映生育期内的动态变化，导致误差较大；Allen和Pereira[8]引入K_d的双作物系数法低估值较实测值低4%，*MAE*、*RMSE*和R^2值分别为0.16、0.17和0.78，该模型考虑到了叶面积指数*LAI*对作物系数的影响，但是在苗期和拔节期叶面积指数过小导致对K_c的估计偏大，进而导致对不同种植密度下作物系数的估计偏差较大；$K_{density}$法在全生育期均有较好的一致性，低估值偏低5%，*MAE*、*RMSE*和R^2值分别为0.06、0.09和0.97，因此$K_{density}$法更适用于估算西北旱区不同种植密度下制种玉米的K_c。

表3 模型评价参数

模型评价参数	双作物系数法	SIMDualK_c法	K_d双作物系数法	$K_{density}$法
MAE	0.19	0.16	0.16	0.06
RMSE	0.20	0.19	0.17	0.09
R^2	0.69	0.92	0.78	0.97



(a)双作物系数法　(b)SIMDual K_c法

(a)引入K_d的双作物系数法　(b)$K_{density}$法

图4 不同模型K_c估算值与实测值关系

3 结 论

1)随种植密度的增加,制种玉米株高变化不显著;叶面积指数与种植密度显著正相关。

2)制种玉米群体蒸腾量及耗水量与种植密度正相关,且差异显著,表明作物在密植条件下提高光合-蒸腾作用能力的同时,也增加了作物的耗水量。

3)各生育期的作物系数与种植密度正相关;相比于双作物系数法、引入K_d的双作物系数法和SIMDual K_c模型双作物系数法,$K_{density}$法更适合用于估算西北旱区不同种植密度下制种玉米的K_c。

参考文献:

[1] 莫惠栋. 种植密度和作物产量——产量和密度的数量关系及其分析[J]. 作物学报,1980(2):65-74.

[2] 马兴林,关义新,逄焕成,等. 种植密度对3个玉米杂交种产量及品质的影响[J]. 玉米科学,2005(3):86-88.

[3] 李少昆,王崇桃. 我国玉米产量变化及增产因素分析[J]. 玉米科学,2008(4):26-30.

[4] 史海滨,田军仓,刘庆华. 灌溉排水工程学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

[5] 程维新,赵家义. 关于灌溉农田作物耗水量问题[J]. 水利学报,1983(4):45-50.

[6] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evaporation-guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Papers, 1998.

[7] RANA G, KATERJI N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review[J]. European Journal of Agronomy, 2000,13(2/3):125-153.

[8] ALLEN R G, PEREIRA L S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height[J]. Irrigation Science, 2009, 28(1):17-34.

[9] ROSA R D, PAREDES P, RODRIGUES G C, et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy[J]. Agricultural Water Management, 2012,103:8-24.

[10] 石小虎,蔡焕杰,赵丽丽,等. 基于SIMDualKc模型估算非充分灌水条件下温室番茄蒸发蒸腾量[J]. 农业工程学报,2015, 31(22):131-138.

[11] 邱让建,杜太生,陈任强. 应用双作物系数模型估算温室番茄耗水量[J]. 水利学报,2015, 46(6):678-686.

[12] JIANG X, KANG S, TONG L, et al. Crop coefficient and evapotranspiration of grain maize modified by planting density in an arid region of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2014,142:135-143.

[13] 刘战东,肖俊夫,南纪琴,等. 种植密度对夏玉米形态指标、耗水量及产量的影响[J]. 节水灌溉,2010(9):8-10.

Effect of Planting Density on Water Consumption of Seed-Maize and Validation of a Model

SHI Rongchao, TONG Ling, HE Liuyue, JIANG Xuelian
(Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Field experiments were conducted from March to September in 2015 to study the law of water consumption and applicability of water consumption model in seed corn with different planting densities. The experimental treatments of six planting densities (67 500, 82 500, 97 500, 112 500, 127 500 and 142 500 plants/hm^2) were laid out in a randomized complete block design with three replicates, and 97 500 plants/hm^2 was the local planting density, which was used as a control treatment. The morphological traits and water consumption of seed corn plants in different densities condition were observed. The results indicated that *LAI* and water consumption of plants increased with the increase of planting density, and the effect of planting density on crop height was not significant. Compared to the dual crop coefficient method, SIMDual K_c model and the dual crop coefficient with K_d method, $K_{density}$ method had better performance in estimating the value of K_c under different planting densities of seed corn in an arid region of Northwest China.

Key words: corn; planting density; water consumption; model

责任编辑:白芳芳

（上接第25页）

Impact of Water Deficits in Different Growing Stages on Growth and Water Consumption of Grape

MA Qimei[a], ZHANG Rui[a], CHENG Ziyong[a], LI Min[b], LIU Jingxia[a], DAI Wenyuan[a], CHEN Na'na[a], WANG Fei[a]
(a.College of Engineering; b.College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This paper investigated experimentally the impact of water deficit in different growing stages on water consumption and growth of wine grape. The experiment was conducted at Wuwei under drip irrigation, and during the experiment, the grain diameter, yield, and water use efficiency were measured. The results revealed that the transverse and longitudinal diameters of the grapes showed a fast increase first, following by slow increase, and fast increase again before becoming stabilized. Occurrence of water deficit in fruit enlargement stage could seriously deteriorate growth of the grapes in both transverse and longitudinal directions. The increase in the grain size, together with the yield, are positively related to water use efficiency and irrigation water use efficiency. Depending on growing stages, water deficitsconsiderably reduced water consumption. The water consumption in fruit enlargement period accounted for more than 50% of the overall water consumption, and occurrence of a water deficit in this stage could result in 30.2% of reduction in yield. Therefore, avoiding water insufficiency at fruit enlargement stage is critical. It was also found that making water deficit at shoot-growingstage could increase yield by 10.1% in the experiments. It was advisable that keeping sufficient water in fruit enlargement period with a compensation by reducing water supply at new shoot growing stage could increase water use efficiency.

Key words: grape; fruit grain diameter; water consumption characteristics; yield

责任编辑:刘春成