

砾石覆盖量对夏玉米作物系数及水分利用效率的影响

刘晓青^{1,2}, 左亿球^{1,2}, 冯浩^{1,2,3}, 李毅^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为评价半湿润易旱地区砾石覆盖对土壤贮水量、作物生长与产量及水分利用效率的影响, 利用杨凌地区夏玉米2014年实测数据及气象数据, 基于Penman-Monteith公式计算了砾石不同覆盖量下全生育期内参考作物蒸发蒸腾量, 并根据FAO推荐的分段单值平均法, 计算夏玉米各生育期作物系数, 以及砾石不同覆盖量下作物水分利用效率。结果表明: 砾石覆盖的保水效果主要体现在作物生长初期, 拔节期最大砾石覆盖处理0~200 cm土壤贮水量较对照增大12.8%, 后期由于冠层覆盖影响其效果减弱; 夏玉米全生育期作物系数与覆盖量呈线性关系; 覆盖量越大, 不同生育阶段的作物系数也相应增加; 叶面积和株高与作物系数有着较好的回归关系, 可以对生育期内的玉米蒸散量进行预报; 砾石覆盖可以缩短夏玉米生育期的天数, 最大可缩短19 d; 砾石覆盖能促进作物生长, 提高作物产量, 且在该试验覆盖量范围内, 覆盖量越大, 增产增效越明显, 随覆盖量增加, 各处理分别较对照提高4.65%~38.17%; 作物水分利用效率随覆盖量的增大分别较对照提高2.94%~32.99%。

关键词: 夏玉米; 砾石覆盖; 参考作物腾发量; 作物系数; 水分利用效率

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Effects of gravel mulching level on crop coefficients and water use efficiency of summer corn

LIU Xiao-qing^{1,2}, ZUO Yi-qiu^{1,2}, FENG Hao^{1,2,3}, LI Yi^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Chinese National Academy of Water-saving Agriculture in Arid Region, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to evaluate the effects of gravel mulching in arid and semi-humid regions of China on soil water storage, crop growth, crop yield and water use efficiency, based on the measured data of summer corn grown at Yangling in 2014 and the meteorological data, evapotranspiration of the reference crop was calculated at various growth stages by adopting the formula of Penman-Monteith. The actual crop evapotranspiration was calculated by adopting the formula of field water balance equation, then the variation of the crop coefficient of different growing periods was analyzed, as well as the water use efficiency under different mulching levels. The results showed that gravel mulching could maintain water at the beginning of crop growth by 12.8%, reaching the maximum at the jointing stage, and then became decreased because of canopy. A linear relationship between gravel degree and crop coefficient was found. The larger the amount of coverage, the higher the increases of the corresponding crop coefficients at different growing stages. Leaf area and plant height had good regression relationships with crop coefficient, and thus corn evapotranspiration can be forecasted during the growth period. Gravel mulching made the growing period shortened, reaching a the maximum of nineteen days. Gravel mulching also preserved soil moisture better, and reduced soil evaporation, increased soil water storage and water retention capacity, thereby increasing crop water use efficiency and yield by 4.65%~38.17% and 2.94%~32.00%.

收稿日期: 2015-04-22

基金项目: 国家高技术研究发展‘863’计划(SS2013AA100904); 西北农林科技大学基本科研业务费专项资金(QN2009087)

作者简介: 刘晓青(1989—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向为水资源利用与保护。E-mail: 601654829@qq.com。

通信作者: 冯浩(1970—), 男, 陕西延安人, 研究员, 博导, 研究方向为水土资源高效利用。E-mail: nercwsi@vip.sina.com。

respectively. The effects became enhanced when the mulching coverage was increased extensively within the extent of this research.

Keywords: summer corn; gravel mulching; reference crop evapotranspiration; crop coefficient; water use efficiency

农田砾石覆盖是我国一种传统的抗旱栽培方式,至今已有 300 多年的历史^[1]。近年来,由于全球气候变化和水资源匮乏,水分已经成为限制旱区农业发展的主要因素。国内外学者对砂砾石覆盖的增温效应^[2-3]、水分入渗与蒸散^[3-6]、补灌增产效果^[7-8]等进行了大量研究,结果表明砾石覆盖可以保持土壤水分,减少土壤水分蒸发,增加土壤温度,提高作物产量和水分利用效率^[9]。因此,研究砂砾石覆盖对夏玉米生长发育和耗水特性的影响,对砂砾石覆盖在旱区农业推广应用具有重要的意义。

作物系数(K_c)是作物的实际蒸发蒸腾量(ET_c)与参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)的比值^[10]。 K_c 反映了作物种类、作物本身的生物学特性、产量水平、田间管理水平及土壤水肥状况对农田 ET_c 的影响^[11]。目前,国内外众多学者对农田作物系数给予了关注。Allen, Pereira, Smith^[12-13] 和 Abolfazl 等^[14] 对作物系数与土壤蒸发的关系进行了较为细致的研究;雷志栋和刘钰等根据田间实测资料,对 FAO-56 推荐的作物系数计算方法及相关参数在我国适用性进行了验证并适当修正^[15-16]。利用联合国粮农组织 (FAO) 推荐的标准状态下(白天平均最低相对湿度 45%, 平均风速 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 半湿润气候)的作物系数来估算作物 ET_c , 是普遍使用的手段^[17]。由于作物本身和外界条件不同, K_c 有很大差异,因此有必要针对不同作物、不同的发育时期,确定适宜的作物系数。前人对不同作物系数和水分利用效率的研究较多^[18-20],但对砾石不同覆盖量对于夏玉米作物系数和水分利用效率的影响鲜见报道,需要进一步研究。

本研究基于杨凌地区砾石不同覆盖量条件下夏玉米生长发育过程、土壤水分以及气象观测数据,计算夏玉米作物系数以及作物水分利用效率,研究不同砾石覆盖量对夏玉米不同生育阶段作物系数和水分利用效率的影响,为制定合理的砾石覆盖措施,提高作物水分利用效率提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2014 年布设在陕西杨凌西北农林科技大学教育部农业水土工程重点实验室的灌溉试验站,杨凌地理位置处于东经 $108^{\circ}24'$, 北纬 $34^{\circ}20'$, 海

拔 521 m, 属大陆暖温带湿润季风气候。全年无霜期 221 d, 地形平整, 土层深厚, 土壤质地为中壤土, 1 m 土层的平均田间持水量为 24%, 凋萎含水量为 8.5% (均为质量含水率), 平均干容重为 $1.44 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。多年月平均气温为 12.9°C , 日照时数 2 163.8 h, 多年平均降雨量为 635.1 mm (多集中在 7—10 月), 且降水变化率比较大, 平均蒸发量为 993.2 mm。地下水埋藏较深, 其向上补给量可以忽略不计。站内设有国家一般气象观测站, 按照国家气象局的地面气象观测规范可获得每日的气象资料(气温、湿度、降水、日照、水面蒸发、风速、气压和地温)。

1.2 试验设计

供试作物为夏玉米(品种为秦龙 11)。试验设裸地和砾石覆盖, 其中砾石覆盖量设 4 个梯度: 2、4、6、8 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 共 5 个处理, 分别用 CK、S2、S4、S6、S8 表示, 区组内各处理随机排列, 每个处理设置 3 个重复, 小区面积为 $3 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 在各小区边缘 0~1 m 土层竖直铺一层塑料薄膜, 避免各个小区土壤水分的侧向渗漏。夏玉米种植行距为 60 cm, 株距为 40 cm。打穴播种, 播种深度为 5 cm, 按照试验设计的覆盖量均匀地把砾石铺开, 其砾石粒径范围为 1~3 cm。每个处理除地表覆盖量不同外, 其他管理方式均一致, 灌溉方式采用地表漫灌, 在拔节期灌水 50 mm。全生育期 N、 P_2O_5 的施入量分别为 150、100 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。播种前将基肥一次性施入到土壤中, 生育期内不追肥。

作物生育期内部分气象数据见图 1。由图 1 可知, 夏玉米整个生育期降水量为 380.2 mm, 主要集中在 8—9 月, 其他数据较往年无较大差异, 具有一定的代表性。

1.3 测定项目和和方法

土壤水分测定采用管式土壤水分测定系统 Trime-IPH (TDR), 测量深度为 200 cm, 距地面 0~40 cm 深度, 每隔 10 cm 测定一次, 40 cm 以下每隔 20 cm 测量一次。从播种到收获期, 测定时间间隔为 10 d, 灌溉后或雨后加测一次。有研究表明, 当土壤含水率高于田间持水率的 60% 时, 土壤水分适宜, 作物生长将不受水分胁迫^[21], 本试验中, 由测得的数据了解到在夏玉米整个生育期土壤的含水率均高于田间持水率的 60%, 尤其是在抽穗-灌浆期间, 因此, 本试验条件下作物生长不考虑水分胁迫的影响,

测量的农田蒸散量能够代表无水分胁迫条件下作物的蒸散量水平。

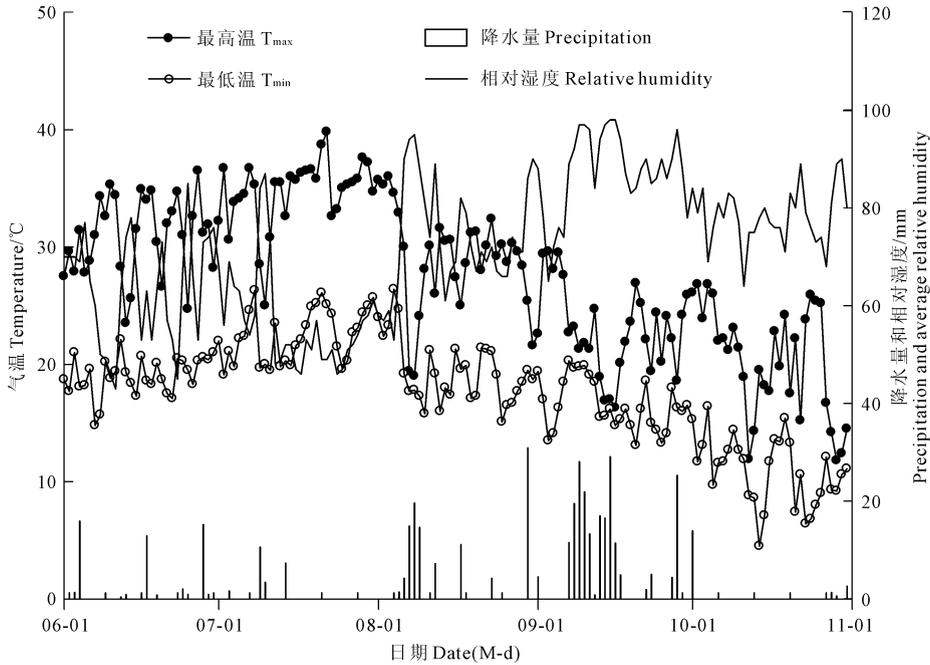


图1 夏玉米生育期气象数据

Fig.1 Meteorological data during the growth period of summer corn

作物出苗后,记录作物发育期(以50%为标准),每隔15d进行作物农艺性状测定,包括植株密度、株高、叶面积和各器官的干物质重等。在每个小区随机选取具有代表性的2株,利用钢尺测定每片叶子长和宽的最大值及植株高度,然后根据经验公式(1)计算叶面积指数,取其平均值。

$$LAI = \rho \cdot \sum a \cdot b \cdot 0.75 / 10000 \quad (1)$$

式中, ρ 为每公顷株数,根据播种的株行距确定; a 为叶片的长度,m; b 为叶片的宽度,m。

根据播种的株行距及出苗率,计算单位面积内的株数。在玉米生理成熟时,每个小区选取10株具有代表性的玉米进行考种,按单株考种,单穗脱粒,籽粒均脱水至恒质量后称重,然后根据每公顷的株数计算每公顷的产量。

1.4 指标计算方法

1.4.1 按生育阶段计算作物系数(K_c) 按照夏玉米整个生育期进行阶段划分可分为播种~出苗、出苗~拔节、拔节~抽雄、抽雄~灌浆、灌浆~成熟5个阶段,各阶段历时天数见表1,利用单作物系数法计算每个生育阶段的作物系数。

1) 实际作物蒸发蒸腾量(ET_c)的计算。

实际作物蒸发蒸腾量^[22]采用农田水量平衡方程计算:

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

式中, P 为时段内降水量(mm); I 为时段内灌溉量

(mm); R 为地表径流量(mm),在平原地区可以忽略不计(mm); D 深层渗漏量(mm),远大于计划湿润层,可以计为0; ΔW 为相邻两次取土测定土壤水分时间间隔内根层土壤贮水量的变化(mm),其中土壤贮水深度(mm)的换算见式(3)。

$$W = \frac{h \cdot d \cdot \theta}{10} \quad (3)$$

式中, h 为土层厚度(cm); d 为土壤容重; θ 为土壤重量含水量。本试验在平原地区进行,且土壤水分测定下边界为200cm,远大于计划湿润层,因此地表径流和深层渗漏可以忽略不计。

2) 参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)的计算。

大量研究表明,用Penman-Monteith公式计算的 ET_0 与实测结果最为接近^[23-24],因此,本文的 ET_0 采用FAO推荐的修订后的Penman-Monteith公式计算:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (4)$$

式中, R_n 为作物冠层的净辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); G 为土壤热通量($MJ \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$),在逐日计算中 $G = 0$; T 为平均气温($^{\circ}C$); u_2 为2m高处的平均风速($m \cdot s^{-1}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率($kPa \cdot$

$^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ 为干湿表常数。

利用气象站逐日气象资料计算 $ET_0(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$, 生育期内逐日累加可求出时段 ET_0 。

3) 作物系数(K_c)的计算。

作物系数 K_c 描述了实际作物在农田下垫面反射率、作物冠层特性及空气动力学阻力等方面(地表覆盖均匀, 土壤水分充足, 生长旺盛, 株高为 12 cm, 具有下垫面反射率 0.23 和冠层阻力 $70 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$) 与参考作物的不同^[16]。 K_c 的计算公式为:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (5)$$

1.4.2 分段单值平均法计算作物系数(K_c) 为简化计算, 根据 FAO 推荐将作物的生育期划分为初期、快速发育期、生育中期及后期 4 个阶段^[10]。初期作物系数记为 K_{cini} ; 生育中期作物系数记为 K_{cmid} ; 后期作物系数记为 K_{cend} 。四个生育期的 3 个作物系数形成了一个折线图, 表示作物系数的变化过程。首先从 FAO 出版的《作物腾发量 - 作物需水量指南》查出夏玉米在特定标准条件下(即最小相对湿度约 45%、2 m 高处日平均风速约 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、供水充足、管理良好)各生育阶段作物系数标准值分别为: $K_{cini}(\text{FAO}) = 0.50$, $K_{cmid}(\text{FAO}) = 1.20$, $K_{cend}(\text{FAO}) = 0.60$ ^[3]。然后根据试验区的气象条件和作物的实际

生长状况, 观察并记录各处理的各生育阶段的起止时间, 利用相关公式^[16] 计算 4 个阶段的 3 个典型作物系数值。

1.4.3 水分利用效率(WUE)的确定 作物水分利用效率为作物消耗单位水量生产出的经济产量或生物产量, 本文利用经济产量进行计算, 其表达式为:

$$WUE = \frac{Y}{E} \quad (6)$$

式中, Y 为单位面积的经济产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); WUE 为作物水分利用效率($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$); E 为作物耗水量(mm), 本试验中 E 可以用作物蒸发蒸腾量来代替, 因此可以利用公式(2) 计算。

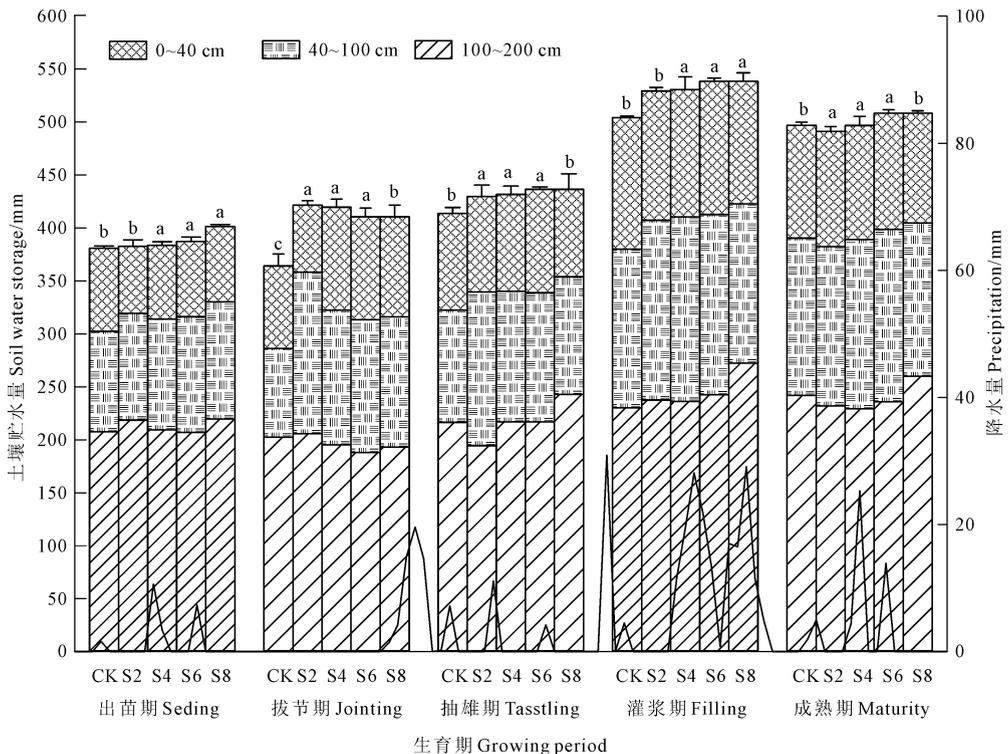
1.5 统计分析

试验数据采用 Sigmaplot11.0 和 Excel 处理和作图, 用 DPS7.05 软件统计分析, 并用 LSD 法检验差异显著性, 显著水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同处理各土壤层贮水量的变化

根据测定水分的方法, 将土壤土层分为 0~40、40~100、100~200 cm 三个层次, 基于实测土壤水分数据, 结合式(2) 分别计算各处理不同土层的贮水量变化, 不同处理土壤储水量的时间变化如图 2 所示。



注(Note): * LSD, least significant difference at 5% level based on 0~200 cm soil layer.

图 2 不同处理土壤各层贮水量变化

Fig. 2 Changes in soil water storage capacities by different treatments

土壤贮水量的变化与夏玉米的生长发育特点及研究区的降水条件相关,同时灌溉、温度、土壤蒸发等的不同也会引起贮水量的变化。由于本试验中覆盖量不同导致温度、蒸发、玉米生长状况等的不同,所以各处理不同阶段的贮水量有着明显的差异。由图2中可以看出:①对比不同土层,整个生育期内,各处理表层0~40 cm贮水量变化最为明显,受降雨、温度、蒸发等的影响比较大,尤其是灌浆期、成熟期降水量较多,所以0~40 cm贮水量明显高于其他生育期;而深层100~200 cm贮水量变化较小,不易受降雨等的影响。②对比不同覆盖量处理,各层贮水量基本都随着覆盖量的增加而增大,拔节期最为明显,0~200 cm贮水量S8较CK处理增大12.8%,由于灌浆期、成熟期降水量较多,使得各处理之间贮水量相差较小,灌浆期S8较CK处理只增大6.82%。S4、S6、S8较CK、S2处理间差异显著,S4、S6、S8处理之间差异不显著,说明覆盖量的增加能够提高土壤贮水量,且贮水量的变化主要发生在0~40、40~100 cm。分析结果表明砾石覆盖具有较好的保持土壤

水分的作用,且覆盖量越大,作物效果越显著。③对比不同生育期,出苗~拔节期,随着覆盖量的增加,0~200 cm贮水量呈增加趋势,且S4、S6、S8较CK、S2处理间差异显著,这可能是由于在夏玉米生长初期(出苗~拔节期),作物冠层覆盖度较小,日照强度较大,砾石覆盖阻碍了土壤水分向大气逸散的通道,降低了土壤的无效蒸发;抽雄~成熟期,降雨较多,0~200 cm贮水量明显增加,但其随覆盖量增加变化规律一致,增幅较对照减小,S4、S6、S8之间差异性不显著。这可能是由于玉米快速生长,作物耗水量和冠层覆盖度明显增加,加之初期覆盖量大的处理水分供应充足,其玉米长势较对照好,因此冠层覆盖对贮水量影响较砾石覆盖大,各处理之间差异不明显。由此可知,砾石覆盖的保水效果主要体现在作物生长初期,后期由于冠层覆盖影响,其效果减弱。

2.2 夏玉米作物系数

2.2.1 各生育阶段作物系数(K_c) 基于实测土壤水分数据和气象资料,分别计算夏玉米各生育期不同砾石覆盖量下的 ET_0 、 ET_c 和 K_c 值,结果如表1所示。

表1 夏玉米不同处理各生育阶段参考作物蒸发蒸腾量

Table 1 Evapotranspiration of the reference crop during various growth stages by different treatments

生育阶段 Growing periods	蒸发蒸腾量 Reference evapotranspiration	处理 Treatment				
		CK	S2	S4	S6	S8
播种~出苗期 Sowing~emerging	历时 During/d	12	13	13	14	15
	ET_0 /mm	42.62	45.84	45.84	50.53	53.46
	日均量 Daily average/(mm·d ⁻¹)	3.55	3.53	3.53	3.61	3.56
	占全生育期比例 Percentage/%	14.62	15.84	16.27	18.38	19.97
出苗~拔节期 Emerging~jointing	历时 During/d	23	23	22	21	20
	ET_0 /mm	95.10	96.39	91.88	87.19	84.26
	日均量 Daily average/(mm·d ⁻¹)	4.13	4.19	4.18	4.15	4.21
	占全生育期比例 Percentage/%	32.63	33.31	32.60	31.72	31.47
拔节~抽雄期 Jointing~tasstling	历时 During/d	25	24	22	20	18
	ET_0 /mm	72.08	67.57	66.24	60.75	66.24
	日均量 Daily average/(mm·d ⁻¹)	2.88	2.82	3.01	3.04	3.68
	占全生育期比例 Percentage/%	24.73	23.35	23.50	22.10	24.74
抽雄~灌浆期 Tasstling~filling	历时 During/d	31	30	29	27	25
	ET_0 /mm	48.43	47.65	50.55	52.26	41.45
	日均量 Daily average/(mm·d ⁻¹)	1.56	1.59	1.74	1.94	1.66
	占全生育期比例 Percentage/%	16.62	16.47	17.94	19.01	15.48
灌浆~成熟期 Filling~maturity	历时 During/d	28	27	25	24	22
	ET_0 /mm	33.21	31.92	27.32	24.15	22.32
	日均量 Daily average/(mm·d ⁻¹)	1.19	1.18	1.09	1.01	1.01
	占全生育期比例 Percentage/%	11.40	11.03	9.69	8.79	8.34
全生育期 Entire growth period	历时 During/d	119	117	111	106	100
	ET_0 /mm	291.44	289.37	281.83	274.88	267.73
	日均量 Daily average/(mm·d ⁻¹)	2.45	2.47	2.54	2.59	2.68

由表 1 可以看出夏玉米参考作物蒸发蒸腾量表现以下特点:① 夏玉米试验期间 8—9 月的降雨量占了整个生育期的 75%, 因此, 受温度和阴雨天气偏多的影响, 全生育期内的 ET_0 比较小, 主要在 267.73 ~ 291.44 mm 之间。② 整个生育期各处理 ET_0 均呈先增大后减小的变化趋势, 在出苗 ~ 拔节期达到峰值, 分别占了全生育期比例的 32.63%、33.31%、32.60%、31.72%、31.47%; 日均 ET_0 同样在出苗 ~ 拔节期达到峰值, 然后随生育期逐渐减小。③ 同一生育期 ET_0 随覆盖量的增加基本呈减小趋势, 全生育期, S8 较 CK 最大减小 8.14%, 其原因可能是覆盖量的增加促进了玉米生长, 缩短了生育期, 使得 ET_0 随覆盖量的增加而减小。

由表 2 可以看出夏玉米实际蒸发蒸腾量具有以下特点:① 受温度和阴雨天气偏多的影响, 夏玉米全生育期内的 ET_c 主要在 244.81 ~ 254.34 mm 之间;② 各处理 ET_c 在整个生育期内的变化规律与 ET_0 基本一致, 在拔节 ~ 抽雄期达到峰值, 分别占了全生育期比例的 27.38%、26.61%、26.64%、25.19%、27.87%; 日均 ET_0 同样在拔节 ~ 抽雄期达到峰值;③ 全生育期 ET_c 随覆盖量增加而增加, 分析原因可能是冠层覆盖度增加, 使得作物蒸腾所占比例增大, 而覆盖量越大, 作物长势越好, 因此作物蒸腾较 CK 增加, 即 ET_c 增大。

由表 3 可以看到: 各个生育期 K_c 随覆盖量增加逐渐增大, CK 最小, S8 最大; 其在整个生育期内的

表 2 夏玉米不同处理各生育阶段实际蒸发蒸腾量

Table 2 Actual evapotranspiration of summer corn during different growth periods by different treatments

生育阶段 Growing periods	蒸发蒸腾量 Reference evapotranspiration	处理 Treatment				
		CK	S2	S4	S6	S8
播种 ~ 出苗期 Sowing ~ emerging	ET_c /mm	26.00	27.50	25.67	28.80	29.40
	日均量 Daily average/(mm·d ⁻¹)	2.17	2.12	1.97	2.06	1.96
	占全生育期比例 Percentage/%	10.62	11.05	10.12	11.27	11.56
出苗 ~ 拔节期 Emerging ~ jointing	ET_c /mm	56.11	57.83	56.05	55.80	54.77
	日均量 Daily average/(mm·d ⁻¹)	2.44	2.51	2.55	2.66	2.74
	占全生育期比例 Percentage/%	22.92	23.24	22.10	21.83	21.53
拔节 ~ 抽雄期 Jointing ~ tassling	ET_c /mm	67.03	66.22	67.56	64.40	70.88
	日均量 Daily average/(mm·d ⁻¹)	2.68	2.76	3.07	3.22	3.94
	占全生育期比例 Percentage/%	27.38	26.61	26.64	25.19	27.87
抽雄 ~ 灌浆期 Tassling ~ filling	ET_c /mm	52.30	53.37	61.67	65.33	53.06
	日均量 Daily average/(mm·d ⁻¹)	1.69	1.78	2.13	2.42	2.12
	占全生育期比例 Percentage/%	21.36	21.45	24.31	25.56	20.86
灌浆 ~ 成熟期 Filling ~ maturity	ET_c /mm	33.21	32.56	29.23	27.29	26.34
	日均量 Daily average/(mm·d ⁻¹)	1.19	1.21	1.17	1.14	1.20
	占全生育期比例 Percentage/%	13.57	13.08	11.52	10.68	10.36
全生育期 Entire growth period	ET_c /mm	244.81	248.86	253.65	255.64	254.34
	日均量 Daily average/(mm·d ⁻¹)	2.06	2.13	2.29	2.41	2.54

表 3 夏玉米不同处理各生育阶段作物系数

Table 3 The crop coefficients of summer corn during different growth periods by different treatments

生育阶段 Growing periods	处理 Treatment				
	CK	S2	S4	S6	S8
播种 ~ 出苗期 Sowing ~ emerging	0.61	0.60	0.56	0.57	0.55
出苗 ~ 拔节期 Emerging ~ jointing	0.59	0.60	0.61	0.64	0.65
拔节 ~ 抽雄期 Jointing ~ tassling	0.93	0.98	1.02	1.06	1.07
抽雄 ~ 灌浆期 Tassling ~ filling	1.08	1.12	1.22	1.25	1.28
灌浆 ~ 成熟期 Filling ~ maturity	1.00	1.02	1.07	1.13	1.18
全生育期 Entire growth period	0.84	0.86	0.90	0.93	0.95

变化规律均先增大后减小,在抽雄~灌浆期达到一个最大值,可见,此时期为夏玉米的水分敏感期,这个结论与其他人关于其他作物的作物系数研究结构一致^[25]。这可能是由于生长初期,作物系数比较小,随着玉米出苗并开始生长,蒸腾开始占日耗水量的很大部分,作物系数也随玉米植株冠层的发育逐渐增大上升。当冠层得到充分发育时,作物系数也

达到最大值,以后随玉米逐渐成熟及叶片的衰老,呼吸作用不断减弱,作物系数又开始下降。

用多项式对不同生育期的作物系数 Y 与覆盖量 $x(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$ 进行拟合,发现二者可用线性方程表达:

$$Y = Ax + B$$

式中的 A, B 分别为线性回归分析参数。将得出的回归参数结果列于表 4 中。

表 4 不同生育期作物系数与覆盖量的回归方程系数

Table 4 Regression equation coefficients of crop coefficient with gravel levels during different growth periods

参数 Regression parameters	播种~出苗期 Sowing~ emerging	出苗~拔节期 Emerging~ jointing	拔节~抽雄期 Jointing~ tasstling	抽雄~灌浆期 Tasstling~ filling	灌浆~成熟期 Filling~ maturity	全生育期 Entire growth period
A	-0.008	0.008	0.018	0.026	0.024	0.015
B	0.608	0.586	0.940	1.084	0.986	0.838
R^2	0.840	0.955	0.961	0.948	0.977	0.987

由表 4 可以看出,出苗期拟合度 R^2 较小,之后生育期 R^2 均达到了 0.94 以上,说明作物系数与砾石覆盖量拟合结果较好,拟合方程系数 A 代表了作物系数与覆盖量变化之间的关系。地表覆盖砾石在出苗期会影响出苗率,而且覆盖量越大,对出苗需要的天数及出苗率的影响更明显,因此播种~出苗期,作物系数与覆盖量成反比。后期作物生长过程中,拟合系数大于零,说明覆盖量越大,作物系数越大;而且,覆盖量对作物生长的影响在出苗~灌浆期比较明显,这与 ET_0, ET_c 和 K_c 的变化规律一致。因此可以在相似的气象条件下,应用表 4 中建立的不同生育期作物系数与砾石覆盖量的回归方程,粗略计算夏玉米不同覆盖量条件下的作物系数。

2.2.2 分段单值平均法计算作物系数(K_c) 根据试验气象数据及作物生长记录情况,将夏玉米初始生长期的数据资料及生育中期和后期的实际气象资料和作物株高代入相关公式^[16],可求得本试验各处理初期作物系数,范围为 0.61~0.80,经计算并四舍五入得到各处理情况下夏玉米中后期作物系数,即 $K_{cmid} \approx 1.10, K_{cend} \approx 0.51$ 。根据作物生长记录情况及四个生育期的作物系数绘制折线图 3。

与 FAO-56 指南中提供的夏玉米在标准状况下的三个典型值($K_{cini(FAO)} = 0.50, K_{cmid(FAO)} = 1.20, K_{cend(FAO)} = 0.60$)相比,本试验中所求得的值与典型值都较接近。再与单作物系数法求得的 K_c 比较,各个生育期的 K_c 值基本上都在折线周围,两种方法求得的作物系数是比较接近的。由图 3 生长天数可以看出,砾石覆盖可以缩短夏玉米生育期的天数,

且覆盖量越大,生育期提前的越多,本试验 S8 较 CK 整个生育期提前了 19 d。但由于受年份的影响,具体情况还需要利用当地多年试验资料验证。

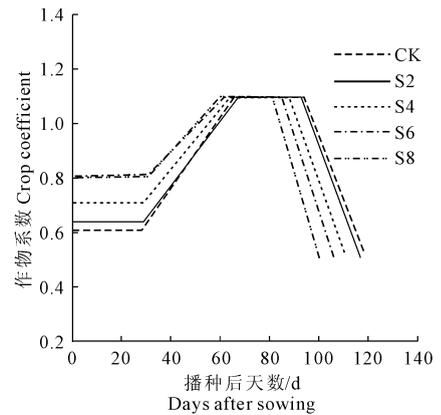


图 3 分阶段作物系数折线图

Fig.3 The crop coefficient with phased line chart

2.3 夏玉米作物系数(K_c)与叶面积(LAI)和株高(H)的关系

由表 3 可以看到,作物生长的初期, K_c 是小于 1.0 的,表明 ET_c 要小于 ET_0 ,这主要是由于初期玉米的叶面积指数较小,依靠作物蒸腾的水分较少;随着叶面积指数的增大,农田蒸散主要是作物的蒸腾耗水,因此 ET_c 逐渐增大,并超过 ET_0 ,这时 K_c 大于 1.0。前人对于冬小麦作物系数与叶面积和株高的关系已有研究,并建立了作物系数(K_c)与叶面积指数(LAI/LAI_{max})和株高(H/H_{max})的关系^[26]。本文利用 2014 年实测数据建立作物系数(K_c)与叶面积指数(LAI/LAI_{max})和株高(H/H_{max})的关系(图 4)。

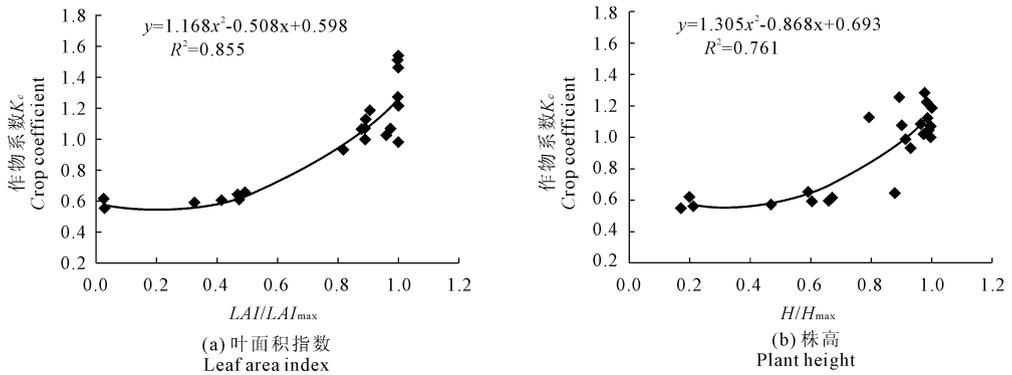


图 4 作物系数 (K_c) 和叶面积指数 (LAI/LAI_{max}) 以及株高 (H/H_{max}) 的关系

Fig. 4 Relationships between crop coefficient (K_c), and leaf area index (LAI/LAI_{max}) and plant height (H/H_{max})

作物叶面积指数一般根据平均单株叶面积和平均单位面积上作物株数来确定。在夏玉米拔节~灌浆期,农田蒸散量的增加主要是由于叶面积指数的增加,作物蒸腾量增大所致。从图 4a 可以看出, K_c 随着 LAI 的增加而增加,而且随着 LAI/LAI_{max} 的增大 K_c 增加的越快。当 LAI 达到最大值时, K_c 也达到最大值。

叶面积增加的同时株高也在增加,二者有着很好的相关性。相对于叶面积的测量和叶面积指数的计算,作物的株高则非常容易测量,固定具有代表性的植株,直接用钢尺测定即可,既不破坏植株体,且具有较好的连续性。因此建立株高和作物系数的回归关系,如图 4b,作物系数与叶面积和株高有着相似的回归关系。随着株高的增加, K_c 逐渐增大。

作物的蒸散量 ET_c 可根据式(5)计算得到,本文可以利用叶面积指数和株高与作物系数的回归方程,结合 ET_0 对生育期内的玉米蒸散量进行预报,而且相关研究计算得到的农田蒸散量差别不大,说明此方法是可行的^[26]。但以叶面积指数计算作物系数主要考虑作物蒸腾在总蒸散量中的比例,因此以此建立的关系可能会低估实际的蒸散量。同时由于株高和叶面积密切相关,因此以株高建立的关系也会遇到同样的问题。

2.4 夏玉米各处理对作物产量和水分利用效率的影响

根据前人的研究可以知道,砾石覆盖可以减少土壤水分蒸发,保持作物关键时期的需水,为作物生长发育提供了有利的水分条件。而且,有关研究结果还表明,砾石覆盖还具有协调养分供应,提高作物产量,进而提高水分利用效率的作用^[1,9]。表 5 列出了本实验各处理的产量、耗水量及水分利用效率。

表 5 砾石覆盖量对作物水分利用效率的影响

Table 5 Effects of gravel mulching levels on crop water use efficiency

处理 Treatment	产量 Yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	耗水量 Water consumption /mm	水分利用效率 WUE /($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)	WUE 提高率 Increase rate /%
CK	4381 ± 94d	244.81 ± 3.41c	16.40	—
S2	4576 ± 262bc	248.86 ± 5.62bc	16.89	2.94
S4	4896 ± 266cd	253.65 ± 2.97ab	18.04	9.98
S6	5126 ± 261bc	255.64 ± 4.73b	20.05	22.23
S8	5549 ± 303a	254.34 ± 3.54a	21.82	32.99

注:同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level.

由表 5 数据可以得到, S2、S4、S6、S8 较 CK 产量分别提高了 4.65%、13.96%、27.63%、38.17%,本文中耗水量用 ET_c 代替,由表中数据计算得到, S2、S4、S6、S8 耗水量较 CK 分别增加了 1.65%、3.61%、4.42%、3.89%,各处理较 CK 具有显著性差异,说明作物获得较高产量需要消耗的水分也会相应增加。由式(6)可以看出,作物水分利用效率与产量成正比,产量越高,作物水分利用效率越高。从表 5 可以看出,水分利用效率随着覆盖量的增加而增大, S2、S4、S6、S8 较 CK 水分利用效率分别提高了 2.94%、9.98%、22.23%、32.99%。因此,覆盖量的增加,有效提高了水分利用效率,而且覆盖量越大, WUE 增加越明显,说明砾石覆盖量的增加可以促进作物的生长,提高作物产量,进而提高作物水分利用效率。

3 讨论

在干旱半干旱地区,作物增产主要依赖于生育期间的有效降水、土壤的蓄水和土壤蒸发^[27-28],因此,保持土壤水分,减少土壤无效蒸发,为后期作物

生长提供充足的水分供应是增加作物产量的首要任务。特别是在干旱年份,由于气候干燥,降雨后,地表蒸发强烈,土壤含水率下降很快,难以满足作物生长需要,因此对农田采用保护性耕作措施,有利于将降雨贮存在深层土壤,以供作物生长需要^[29]。砾石覆盖措施对土壤水分的影响较大,其与作物生育期降水量及土壤蒸发关系密切,而且其密切程度与砾石覆盖量又紧紧相关。有研究证明,砾石覆盖可以保持土壤水分、减少土壤水分蒸发、提高作物产量和水分利用效率^[9],并在干旱地区得到了广泛应用^[1]。

本试验通过田间试验,观察记录整个生育期内生长状况,分析了砾石不同覆盖量对土壤储水量、作物生长、产量及耗水的影响,表明砾石覆盖能够较好的保持土壤水分,降低农田蒸散量,而且其在作物生长初期表现较明显,后期由于受冠层覆盖增加的影响效果减弱;砾石覆盖的保水抑蒸作用与覆盖量密切相关,覆盖量增加,其对土壤的保水抑蒸作用更明显,特别是有降雨发生的时期。因此砾石覆盖促进了作物生长,缩短了作物生育期天数,提高作物产量,进而提高作物水分利用效率,且在本试验范围内,随覆盖量的增加效果越明显。

本试验就砾石覆盖量对土壤贮水量、作物生长与产量及水分利用效率的影响展开研究,目的在于有效地蓄积降雨以增加土壤贮水量,提高作物水分利用效率,进而达到增产的效果,并根据覆盖量对研究指标的影响程度,制定合理的砾石覆盖量,为提高作物水分利用效率和增产提供依据。此研究结果对于干旱半干旱区域的玉米节水高产栽培具有一定的意义,并加以验证可推广应用于干旱半干旱地区,根据不同地区的降雨程度,采取不同覆盖量措施,达到作物增产效果。

4 结 论

1) 各处理表层 0~40 cm 贮水量变化最为明显, 100~200 cm 贮水量变化很小;各层贮水量基本都随着覆盖量的增加而增大,拔节期最为明显,0~200 cm 贮水量 S8 较 CK 处理增大 12.8%。在作物生长后期,各处理 0~200 cm 贮水量均明显增加,但与 CK 差异不显著。砾石覆盖能较好的保持土壤水分,且在作物生长初期效果明显,在作物生长后期作用效果不明显。

2) 各生育阶段作物系数与覆盖量有着较好的线性关系,覆盖量越大,作物系数越大;各处理整个生育期内, K_c 先增大后减小,在抽雄~灌浆期达到最大;分阶段计算得到的夏玉米作物系数 K_{cini} 、

K_{cmid} 、 K_{cend} 与 FAO-56 指南中提供三个典型值都较接近,且两种方法计算得到的 K_c 在各生育阶段是一致的。

3) 叶面积和株高与作物系数有着较好的回归关系,可以对生育期内的玉米蒸散量进行预报。

4) 砾石覆盖措施较对照能有效提高作物产量和水分利用效率,且随着覆盖量的增加,作用效果越明显。其中, S8 处理作用效果最为显著,其夏玉米产量和水分利用效率为 5 548.62 kg·hm⁻² 和 21.82, 分别较 CK 提高了 38.1% 和 32.99%。

参 考 文 献:

- [1] Burns R G. Enzyme activity in soil: implication and a possible role in microbial ecology[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1982, 12:423-427.
- [2] 胡恒觉. 我国砂田免耕法[C]//耕作制度论文集. 北京: 农业出版社, 1981, 206-217.
- [3] 贾登云, 曾希琳, 张永洋, 等. 籽用西瓜旱砂田覆膜栽培技术试验[J]. 中国西瓜甜瓜, 1998, (1): 20-21.
- [4] Nachtergaele J, Poesen J W, Van Wesemael B. Gravel mulching in vineyards of southern Switzerland [J]. Soil and Tillage Research, 1998, 46:51-59.
- [5] Lamb J, Chapman J E. Effect of surface stones on erosion, evaporation, soil temperature and soil moisture[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1943, 35:567-578.
- [6] William J, Gale R W. Sandy fields traditional farming for water conservation in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 48:474-477.
- [7] Li X Y, Zhang R L, Gong J D, et al. Soil and water accumulation by gravel and sand mulches in western loess plateau of northwest China [C]//12th ISCO Conference Proceedings, 2002, 192-197.
- [8] 王天送, 苏贺昌, 杨世维. 兰州地区砂田土壤的水分特征[J]. 干旱地区农业研究, 1991, (1): 66-69.
- [9] Li X Y. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semi-arid loess region of northwest China[J]. Catena, 2003, 52(2): 105-127.
- [10] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration. Guidelines or Computing Crop Water Requirements [R]. Irrigation and Drainage Paper No.56, FAO, Rome, 1998.
- [11] 韦斯·沃伦德, 唐·格兰姆斯著. 水利部国际合作司等编译. 美国国家灌溉工程手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [12] Allen R G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study [J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1-2): 27-41.
- [13] Allen R G, Pereira L S, Smith M, et al. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evapotranspiration from soil and application extensions[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(1): 2-13.
- [14] Abolfazl M H, Ali A S, Amir H N, et al. Determination of single and dual crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration for canola[J]. Annals of Biological Research, 2012, 3(4): 1885-1894.

- [8] 汤松.我国油料供需形势及发展对策[J].中国食物与营养, 2012, 18(7):25-28.
- [9] 闫志利,郭丽琢,方子森,等.有机肥对胡麻干物质积累、分配及产量的影响研究[J].中国生态农业学报, 2012, 20(8):988-995.
- [10] 于琳,李明,李冬梅,等.不同施肥水平对亚麻氮、磷、钾积累量及生长动态的影响[J].东北农业大学学报, 2007, 38(6):757-762.
- [11] 高小丽,刘淑英,王平,等.西北半干旱地区有机无机肥配施对胡麻养分吸收及产量构成的影响[J].西北农业学报, 2010, 19(2):106-110.
- [12] 谢亚萍,李爱荣,闫志利,等.不同供磷水平对胡麻磷素养分转运分配及其磷肥效率的影响[J].草业学报, 2014, 23(1):158-166.
- [13] 谢亚萍,吴兵,牛俊义,等.施氮量对旱地胡麻养分积累、转运及氮素利用率的影响[J].中国油料作物学报, 2014, 36(3):357-362.
- [14] 刘兴丽,王利民.景泰引黄灌区胡麻两种套种模式比较[J].甘肃农业科技, 2008, (12):26-28.
- [15] 肖焱波,李隆,张富锁.小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究[J].中国农业科学, 2005, 38(5):965-973.
- [16] Li L, Sun J H, Zang F S, et al. wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping. I. Yield advantage and interspecific interaction on nutrients[J]. Field Crops Res., 2001, 71:123-137.
- [17] Zhang L, Spiertz J H J, Zhang S, et al. Nitrogen economy in relay intercropping systems of wheat and cotton[J]. Plant Soil, 2008, 303:55-68.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2000.
- [19] 陈磊,郝明德,张少民,等.黄土高原旱地长期施肥对春小麦养分吸收和土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报, 2007, 13(2):230-235.
- [20] 曹秀霞.旱地胡麻密肥高产栽培技术模型[J].陕西农业科学, 2009, (6):51-53.
- [21] 高小丽,刘淑英,王平,等.西北半干旱地区有机无机肥配施对胡麻养分吸收及产量构成的影响[J].西北农业学报, 2010, 19(2):106-110.
- [22] 汪磊,严兴初,谭美莲.我国胡麻施肥技术研究进展[J].湖北农业科学, 2011, (2):217-210.
- [23] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: Non-nitrogen nutrition[J]. Field Crops Research, 1993, 34:319-334.
- [24] Stem W R. Nitrogen fixation and transfer in intercrop system[J]. Field Crops Research, 1993, 34:335-356.
- [25] 许振柱,王崇爱,李晖.土壤干旱对小麦叶片光合和氮素水平及其转运效率的影响[J].干旱地区农业研究, 2004, 22(4):75-79.
- [26] Gooding M J, Ellis R H, Shewry P R, et al. Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat[J]. Journal of Cereal Sci., 2003, 37(3):295-309.
- [27] Kibe A M, Singh S, Kalra N. Water-nitrogen relationships for wheat growth and productivity in late sown conditions[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(3):221-228.
- [28] 尹光华,刘作新,陈温福,等.水肥耦合条件下春小麦叶片的光合作用[J].兰州大学学报(自然科学版), 2006, 42(1):40-43.
- [29] 曲威,刘作新,张法升,等.水肥耦合对玉米籽粒全氮含量的影响[J].生态学杂志, 2010, 29(9):1749-1753.
- [30] 雍太文,杨文钰,向达兵,等.小麦/玉米/大豆套作的产量、氮营养表现及其种间竞争力的评定[J].草业学报, 2012, 21(1):50-58.

(上接第23页)

- [15] 雷志栋,罗毅,杨诗秀,等.利用常规气象资料模拟计算作物系数的探讨[J].农业工程学报, 1999, 15(3):119-122.
- [16] 刘钰, L. S. Pereira. 对FAO推荐的作物系数计算方法的验证[J].农业工程学报, 2000, 16(5):26-30.
- [17] 纪瑞鹏,班显秀,张淑杰.辽宁地区玉米作物系数的确定[J].中国农学通报, 2004, 20(3):246-268.
- [18] 陈凤,蔡焕杰,王健,等.杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸腾和作物系数的确定[J].农业工程学报, 2006, 22(5):191-193.
- [19] 梁文清,蔡焕杰,王健.陕西关中地区夏玉米作物系数试验研究[J].节水灌溉, 2011, (12):1-4.
- [20] 严菊芳,杨晓光.陕西关中地区大豆作物系数试验研究[J].中国农业科技导报, 2010, 12(2):116-121.
- [21] 居辉,兰霞,李建民,等.不同灌溉制度下冬小麦产量效应与耗水特征研究[J].中国农业大学学报, 2000, 5(5):23-29.
- [22] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. Rome: FAO, 1998.
- [23] Allen G, Jensen M E, Wright J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration[J]. Agron, 1989, 81:650-662.
- [24] 杜尧东,刘作新,张运福.参考作物蒸散计算方法及其评价[J].河南农业大学学报, 2001, 35(1):57-61.
- [25] 李彩霞,陈晓飞,韩国松,等.沈阳地区作物需水量的预测研究[J].中国农村水利水电, 2007, (5):61-67.
- [26] 刘海军,康跃虎.冬小麦拔节抽穗期作物系数的研究[J].农业工程学报, 2006, 22(10):52-56.
- [27] 解文艳,樊贵盛,周怀平,等.秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J].农业机械学报, 2011, 42(11):60-67.
- [28] 严昌荣,居辉,彭世琪,等.中国北方旱农地区农田水分动态变化特征[J].农业工程学报, 2002, 18(2):11-14.
- [29] 秦红灵,高旺盛,马月存,等.两年后免耕后深松对土壤水分的影响[J].中国农业科学, 2008, 41(1):78-85.