

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.014

# 不同沟灌方式下夏玉米棵间蒸发试验\*

汪顺生<sup>1,2</sup> 费良军<sup>1</sup> 高传昌<sup>2</sup> 孙景生<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048; 2. 华北水利水电学院水利学院, 郑州 450011;

3. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453003)

**【摘要】** 采用常规沟灌和交替隔沟灌技术,研究了不同水分处理(水分控制下限为田间持水率的80%、70%、60%)夏玉米的棵间蒸发。结果表明:常规沟灌的灌后蒸发和全生育期棵间蒸发量均大于交替隔沟灌,灌水后短期内由于表层土壤含水率较高,土壤蒸发较大;在满足作物蒸腾耗水的基础上,交替隔沟灌减小了灌溉湿润面积而减小无效蒸发耗水;不同沟灌方式下土壤蒸发与表层土壤含水率呈明显的脉冲波动变化,而深层土壤含水率波动较弱;表层土壤含水率和叶面积指数对棵间蒸发影响明显,二者与相对土面蒸发强度均有良好的指数函数关系。水分下限控制合适,交替隔沟灌棵间蒸发与蒸腾耗水明显降低,是夏玉米适宜的灌水方式。

**关键词:** 沟灌 夏玉米 棵间蒸发 土壤含水率 叶面积指数

中图分类号: S275.3; S152.7<sup>+</sup>5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)09-0066-06

## Soil Evaporation of Summer Maize under Different Furrow Irrigations

Wang Shunsheng<sup>1,2</sup> Fei Liangjun<sup>1</sup> Gao Chuanchang<sup>2</sup> Sun Jingsheng<sup>3</sup>

(1. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. Institute of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China

3. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China)

### Abstract

Different moisture treatments (80%, 70% and 60% of field water holding) of summer maize soil evaporation were studied by using the conventional furrow irrigation and alternative furrow irrigation. The results showed that conventional furrow irrigation evaporation and whole growth period evaporation were greater than the alternative furrow irrigation. Within a short period after irrigation the surface soil with high moisture content, soil evaporation is larger; under the condition of meeting crop transpiration water consumption, alternative furrow irrigation reduced irrigation wetted area and thus reduced the invalid evaporation. With different furrow irrigation ways, soil evaporation and soil surface water content presented pulse fluctuations, while the deep soil moisture fluctuation is weaker; surface soil moisture content and leaf area index of soil evaporation effect are obvious, the two and the relative soil evaporation have a good relationship with exponential function. Moisture control is suitable, with alternative furrow irrigation, evaporation and transpiration water consumption decreased significantly and it is a suitable irrigation way for summer maize.

**Key words** Furrow irrigation, Summer maize, Soil evaporation, Soil moisture content, Leaf area index

### 引言

农业水资源日益紧缺,国内外研究者提出了许

多新的节水技术,如限水灌溉、非充分灌溉、调亏灌溉和局部灌溉等<sup>[1-4]</sup>。康绍忠等<sup>[5]</sup>提出了一种新的农田节水调控技术——控制性交替灌溉,原理是不

收稿日期: 2012-04-04 修回日期: 2012-04-26

\* 国家自然科学基金资助项目(50179030)和“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAD88B02)

作者简介: 汪顺生, 博士生, 华北水利水电学院副教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: wss\_ncwu@126.com

通讯作者: 费良军, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉和农业水资源利用研究, E-mail: Feiliangjun2008@163.com

同区域根系经受水分胁迫锻炼,产生根源信号传输至地上部叶片,调节气孔保持最适开度,不牺牲作物光合产物积累而大量减少其奢侈蒸腾耗水。研究发现<sup>[6]</sup>,玉米在苗期经过一定的水分胁迫锻炼,复水后有补偿生长现象;苏佩、山仑等<sup>[7]</sup>也发现胁迫复水后玉米在其他生理性上表现出类似的效应。控制性交替灌溉是以水分胁迫条件下植株一些生理过程的变化规律为依据,通过有目的地控制水分供给模式,达到提高水分利用效率的目标<sup>[8]</sup>。

当前,我国地面灌溉面积占全国总灌溉面积的95%以上,仍以传统的畦、沟地面灌溉技术为主<sup>[9]</sup>。交替隔沟灌技术是对传统沟灌的改进,是控制性交替灌溉技术的一种运行形式,与喷灌、微灌等先进灌水技术相比,具有投资少、技术容易掌握等优点,在大田实际灌溉中有广阔的应用前景<sup>[10]</sup>。交替隔沟灌能有效抑制冗余生长,使光合产物向有利于产量形成方向运转,灌水量和耗水量均降低,但产量不受影响,水分生产效率远高于常规沟灌,是夏玉米适宜的供水模式<sup>[11-13]</sup>。但交替隔沟灌是一种新的地面灌水技术,还处于试验探索和理论发展阶段,需研究农田蒸发蒸腾规律,准确测定交替隔沟灌溉条件下的棵间蒸发,研究土壤蒸发与植株蒸腾、作物耗水量之间的比例关系。为此,本文通过测坑试验,研究不同沟灌方式下夏玉米的棵间蒸发及其影响因素,为大田生产实践提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场进行。试验场地理位置为北纬35°19',东经113°53',海拔高度73.2 m。

### 1.2 试验设计

测试作物为夏玉米,进行小区排列试验,采用垄作沟灌方式种植。试验小区为防雨棚下测坑,防雨棚在降雨前关闭,雨后开启,有效隔绝降雨,排除降雨对试验的影响;土壤质地为粉砂壤土,容重1.35 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率为24%(质量分数)。

前茬小麦收获后整地灭茬起垄做沟,沟断面采用梯形形式,沟深0.2 m,相邻两沟的沟中心距离为0.6 m,株行距控制为0.3 m。试验供水方式设为2种沟灌方式和3种水分控制下限,每个处理3个重复;灌水方式为常规沟灌和交替隔沟灌,水分控制下限分别是田间持水率的60%、70%和80%(L-60、L-70和L-80),分别以同种水分处理交替隔沟灌湿沟各生育期湿润层的土壤水分作为标准,当其下降至水分控制下限时进行灌水,全生育期具体的灌水

方案见表1。试验设计共4个处理,随机区组排列,重复3次,每个试验小区(测坑)上口尺寸为2.4 m × 3.2 m。

表1 夏玉米灌水方式及试验方案

Tab.1 Irrigation method and experimental scheme of summer maize

试验处理		灌水次数	每次灌水量 /mm
灌水方式	水分控制		
常规沟灌	L-60	6	45
	L-70	7	45
	L-80	9	45
交替隔沟灌	L-60	6	30
	L-70	7	30
	L-80	9	30

### 1.3 测定项目与方法

(1)土壤水分:播前、全生育期和收获后进行测定,生育期内,5 d测定一次,常规沟灌在沟和垄上各取一个观测点,交替隔沟灌在干沟、垄和湿沟中各取一个观测点,测定深度为1.2 m,分12层,10 cm一层,全部采用土钻取样,加热干燥后测定;作物生育期内的耗水量采用水量平衡方程计算。

(2)气象因子:由试验场内自动气象站观测,包括太阳辐射、气温、空气湿度、风速、日照时数、蒸发量以及天气变化等。

(3)作物生育期:观察并记录各处理的各生育期阶段的起、止时间,作物各发育阶段的特征、生长形态和生理变化状况等。

(4)棵间蒸发量:棵间蒸发量一般用大型称重式蒸渗仪或小型棵间蒸发器测定,用水量平衡法计算<sup>[14-16]</sup>。本文棵间蒸发量用换土称重法测量,采用内径10 cm和5 cm的微型蒸发器,内径10 cm的置于沟中,5 cm的置于垄上;夏玉米播种后每天对所有处理进行测定,常规沟灌选一个沟和垄测定,交替隔沟灌选干沟、湿沟和垄各一个测定;每天早上8:00前在每个处理取原状棵间土样,用微型电子天平称量。

(5)参考作物蒸发蒸腾量:研究表明<sup>[17]</sup>,采用FAO最新修正并推荐的Penman-Monteith公式估算参考作物蒸发蒸腾量可取得较为理想的结果,计算公式为

$$E_{T0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

式中  $R_n$ ——净辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$G$ ——土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$e_s$ ——饱和水汽压, kPa  $T$ ——空气温度, K  
 $e_a$ ——气象观测点实际水汽压, kPa  
 $U_2$ ——在地面以上 2 m 高处的风速, m/s  
 $\Delta$ ——饱和水汽压与温度关系曲线的斜率, kPa/K  
 $\gamma$ ——湿度计常数, kPa/K

## 2 结果与分析

### 2.1 夏玉米生育期逐日蒸发蒸腾的变化过程

图 1 是不同沟灌方式 L-60、L-70 和 L-80 水分处理的棵间蒸发与参考作物蒸发蒸腾的逐日变化过程。整个生育期内, 夏玉米的棵间蒸发量与参考作物蒸发蒸腾量呈脉冲状变化, 是受土壤供水状况、沟灌方式、作物生长和气象等因素共同影响的结果。图中可看出, 不同沟灌方式的夏玉米棵间蒸发量有灌水后明显上升, 而后依次减少的趋势。波动变化最大的原因是灌水。但不同沟灌方式的灌后蒸发差异明显, 常规沟灌远大于交替隔沟灌; 而常规沟灌的全生育期棵间蒸发量均大于交替隔沟灌。

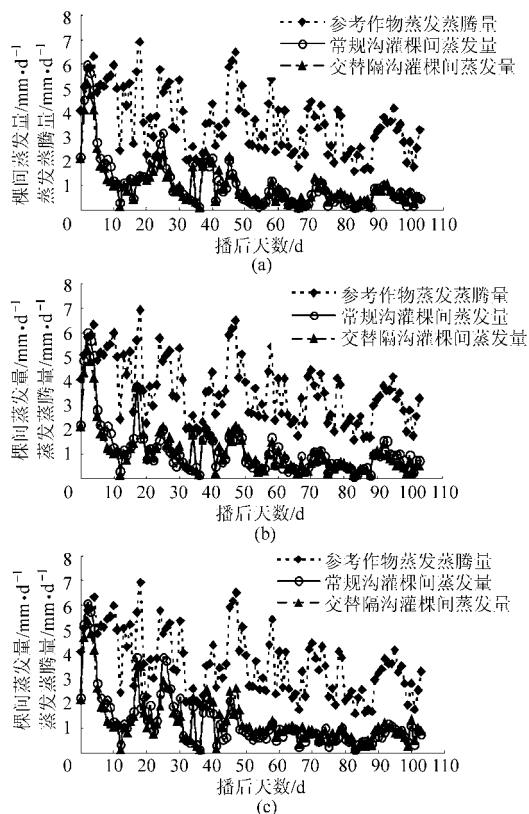


图 1 不同沟灌方式夏玉米生育期棵间蒸发量与参考作物蒸发蒸腾量

Fig. 1 Interim evaporation and reference crop evapotranspiration with different furrow irrigation methods

(a) L-60 处理 (b) L-70 处理 (c) L-80 处理

由图 1 可知, 播种-出苗期, 田块处于裸土蒸发阶段, 首次灌水后, 常规沟灌的棵间蒸发量很大, 接

近参考作物蒸发蒸腾量, 而交替隔沟灌低 20%; 出苗-拔节期夏玉米冠层逐渐发育对棵间蒸发产生抑制作用, 灌水后棵间蒸发量降低; 拔节期, 夏玉米叶面积指数增大, 根系发育, 两种不同沟灌方式的棵间蒸发量差异减小; 成熟期, 夏玉米叶面积指数减小, 灌水后不同沟灌方式的棵间蒸发量产生明显差异。因此, 在满足作物蒸腾的条件下, 保持土壤表层干燥是减少作物棵间蒸发的一种有效措施。灌水后, 因为地表湿润面积的不同, 常规沟灌的棵间蒸发量明显大于交替隔沟灌, 而灌水几天后, 二者差异逐渐变小, 说明灌水方式的影响主要体现在灌水后短期内。交替隔沟灌溉通过减小灌溉湿润面积而减小无效耗水, 有利于水分利用效率提高, 减小地表湿润面积是一种合理的降低棵间蒸发的方法。

### 2.2 棵间蒸发量占阶段耗水量的百分比

表 2 给出了夏玉米生长期各生育期的棵间蒸发量  $E$ 、阶段耗水量  $E_T$  与蒸发占耗水量的百分比。常规沟灌播种-出苗期, 播后同时灌水, 不同水分处理棵间蒸发量和耗水量差异不大; 由于属裸土蒸发阶段, 棵间蒸发量占阶段耗水量的百分比达 90%。出苗-拔节期, 蒸发量占阶段耗水量的百分比明显降低, 3 种处理分别为 44.43%、34.95% 和 37.09%, 植株蒸腾耗水超过棵间蒸发。拔节-抽雄期, 田间耗水以植株体蒸腾为主, 棵间蒸发量占阶段耗水量的百分比分别减小为 18.14%、23.38% 和 22.35%。抽雄-灌浆期, 棵间蒸发占阶段耗水量的百分比降至最低点, 不足 20%, 田间耗水主要用于植株蒸腾, 为作物产量形成奠定基础。灌浆-成熟期棵间蒸发占阶段耗水量的百分比上升。交替隔沟灌各生育阶段棵间蒸发量占阶段耗水量百分比变化趋势与常规沟灌基本一致, 即播种-出苗期百分比最高, 均在 88% 以上; 而进入出苗期以后, 随着夏玉米的生长, 叶面积指数增加, 百分比开始降低, 到抽雄-灌浆期达到最低; 而灌浆后由于植株衰老, 叶片变黄, 植株蒸腾降低, 百分比又明显增加。

由图 1 和表 2 知, 同一种灌水控制下限, 夏玉米沟灌方式不同, 则地面湿润方式不同, 棵间蒸发量和植株蒸腾量也不同。同种水分处理的常规沟灌由于地表湿润面积大、灌水量大, 各生育阶段蒸发量均大于交替隔沟灌; 沟灌方式不同, 夏玉米各生育阶段的植株蒸腾量不同, 导致棵间蒸发量占阶段耗水量的百分比不同。表 2 试验结果表明, 对于同种水分控制下限, 播种-出苗期和出苗-拔节期, 常规沟灌的棵间蒸发量占阶段耗水量的百分比高于交替隔沟灌; 拔节-抽雄期、抽雄-灌浆期和灌浆-成熟期, 常规沟灌低于交替隔沟灌。产生该现象的原因是播种-拔

表 2 夏玉米生育阶段棵间蒸发量  $E$  占阶段耗水量  $E_T$  的百分比  
Tab.2 Percentage of interim evaporation against water consumption

沟灌方式	水分处理	参数	播种-出苗	出苗-拔节	拔节-抽雄	抽雄-灌浆	灌浆-成熟	全生育期
常规沟灌	L-60	$E/\text{mm}$	32.23	38.66	17.72	8.39	13.42	110.42
		$E_T/\text{mm}$	35.95	87.02	97.68	44.82	45.15	310.62
		$EE_T^{-1}/\%$	89.65	44.43	18.14	18.72	29.72	35.55
	L-70	$E/\text{mm}$	32.89	36.40	21.93	10.38	19.12	120.72
		$E_T/\text{mm}$	36.53	104.16	93.80	54.03	46.98	335.50
		$EE_T^{-1}/\%$	90.04	34.95	23.38	19.21	40.70	35.99
	L-80	$E/\text{mm}$	42.64	54.80	23.95	13.41	22.48	157.28
		$E_T/\text{mm}$	47.17	147.77	107.15	71.44	57.75	431.28
		$EE_T^{-1}/\%$	90.40	37.09	22.35	18.78	38.93	36.45
交替隔沟灌	L-60	$E/\text{mm}$	27.64	34.54	19.09	8.90	16.15	106.32
		$E_T/\text{mm}$	31.41	83.10	65.98	32.45	32.12	245.06
		$EE_T^{-1}/\%$	88.00	41.56	28.93	27.42	50.28	43.28
	L-70	$E/\text{mm}$	28.15	39.44	23.19	9.77	16.45	117.00
		$E_T/\text{mm}$	31.99	98.88	70.92	30.45	32.63	264.87
		$EE_T^{-1}/\%$	88.00	37.89	32.69	32.09	50.41	44.17
	L-80	$E/\text{mm}$	28.70	44.48	27.18	12.34	20.88	133.58
		$E_T/\text{mm}$	32.51	121.38	63.45	32.88	39.24	289.46
		$EE_T^{-1}/\%$	88.28	36.65	42.84	37.53	53.21	46.15

节期,地表裸土所占比例很大,耗水以蒸发为主,常规沟灌由于湿润面积大、灌水量大,蒸发量大于交替隔沟灌,棵间蒸发占阶段耗水量的百分比较高;而在玉米拔节以后,由于生长旺盛,植株增高,叶面积指数大大增加,耗水以蒸腾为主,由于常规沟灌的灌水量大于交替隔沟灌,植株蒸腾耗水也大于交替隔沟灌,棵间蒸发占阶段耗水量的百分比要小于交替隔沟灌。全生育期内,同一水分处理交替隔沟灌的棵间蒸发量低于常规沟灌,但耗水量少得更多,棵间蒸发量占耗水量的百分比要高于常规沟灌。

### 2.3 土壤含水率和叶面积指数对棵间蒸发的影响

#### 2.3.1 棵间蒸发与土壤含水率关系

图 2 是不同沟灌方式下 L-70 水分处理蒸发与灌水沟中不同深度土壤含水率的关系,可看出两种沟灌方式的土壤含水率呈脉冲波动变化趋势,20 cm 土层波动很大,而 40 cm 土层波动较弱,到 60 cm 以下变化平缓。土壤蒸发同时呈现脉冲变化趋势,变化幅度很大,趋势与 20 cm 土层土壤含水率相似。说明土壤蒸发与表层土壤含水率关系密切,不同沟灌方式下灌后土壤蒸发随表层土壤含水率的增加而上升,而后随表层土壤含水率的减小,相应降低。

#### 2.3.2 相对土面蒸发强度与土壤含水率关系

由图 3 可知,叶面积指数  $I_{LA}$  小于 1.0 和  $I_{LA}$  大于 3.0 时,在表层土壤含水率在 12% ~ 24% 之间时,交

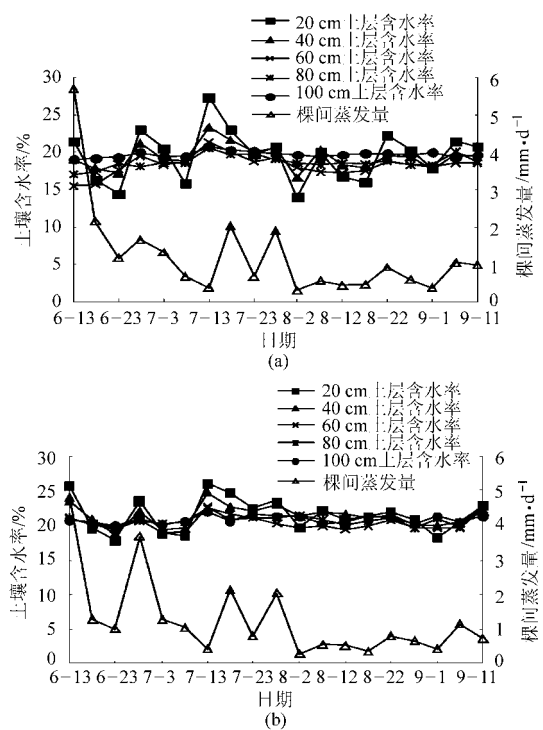


图 2 不同沟灌方式 L-70 处理棵间蒸发与土壤含水率关系  
Fig.2 Relation between evaporation and soil water-content with L-70 of furrow irrigation  
(a) 常规沟灌 (b) 交替隔沟灌

替隔沟灌的湿沟表层土壤含水率与相对土面蒸发强度  $E/E_{T0}$  有良好的指数函数关系,回归关系式为:当

$I_{LA}$  小于 1.0 时,  $E/E_{T0} = 1.3603e^{0.1636\theta}$ ,  $R^2 = 0.8628$ ;

$I_{LA}$  大于 3.0 时,  $E/E_{T0} = 6.4055e^{0.0622\theta}$ ,  $R^2 = 0.8154$ 。

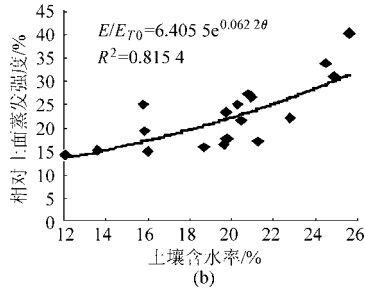
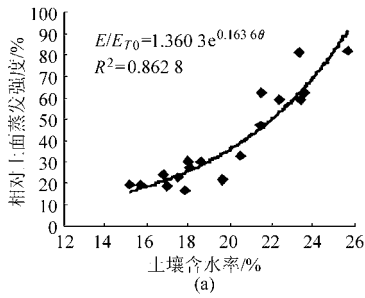


图3 交替隔沟灌相对土面蒸发强度与土壤含水率关系

Fig.3 Relation between  $E/E_{T0}$  and soil water-content

(a)  $I_{LA}$  小于 1.0 (b)  $I_{LA}$  大于 3.0

相对土面蒸发强度随表层土壤含水率增加而增大,当  $I_{LA}$  小于 1.0 时,增大幅度明显高于  $I_{LA}$  大于 3.0 时,原因是地表覆盖度较低时,地表接受太阳净辐射较多,表层土壤失水速率较快,相对土面蒸发强度较高,而叶面积指数较大时,玉米冠层截留太阳辐射,表层土壤失水速率减慢,使相对土面蒸发强度变低。

### 2.3.3 相对土面蒸发强度与叶面积指数关系

由图 4 可知,相对土面蒸发强度随夏玉米叶面积指数的增加而下降,当  $I_{LA}$  小于 3.0 时,  $E/E_{T0}$  随  $I_{LA}$  增加显著下降;而当  $I_{LA}$  大于 3.0 时,下降速率变慢,关系曲线较为平缓。二者之间呈指数函数关系,回归关系式为

$$E/E_{T0} = 74.026e^{-0.3848I_{LA}} \quad (R^2 = 0.9322)$$

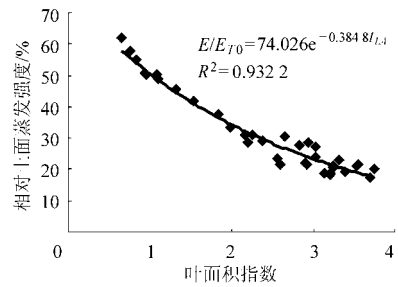


图4 相对土面蒸发强度与夏玉米叶面积指数的关系

Fig.4 Relation between  $E/E_{T0}$  and  $I_{LA}$

## 3 结论

(1) 常规沟灌的灌后蒸发和全生育期棵间蒸发量均大于交替隔沟灌;灌水后短期内由于表层土壤含水率较高,土壤蒸发较大,灌溉实施中提倡大定额灌溉,减少灌溉次数,缩短表层土壤湿润时间,降低棵间蒸发量。

(2) 不同沟灌方式和水分控制下限对夏玉米蒸发蒸腾影响明显,交替隔沟灌在满足作物蒸腾耗水的基础上,因减少灌溉湿润面积而减小无效蒸发耗水,水分下限控制适宜,棵间蒸发与蒸腾耗水明显降低。

(3) 不同沟灌方式下土壤蒸发与表层土壤含水率呈明显的脉冲波动变化,而深层土壤含水率波动较弱;灌后土壤蒸发随表层土壤含水率增加而上升,后随表层土壤含水率减小而降低。

(4) 棵间蒸发与表层土壤含水率关系密切,表层土壤含水率在 12% ~ 24% 之间时,相对土面蒸发强度与表层土壤含水率之间呈指数函数关系。

(5) 叶面积指数对土壤蒸发的影响很大,相对土面蒸发强度随夏玉米叶面积指数的增加而下降,二者之间呈指数函数关系。

## 参 考 文 献

- 唐立松,张建龙,李彦,等. 植物对土壤水分变化的响应与控制性根分枝交替灌溉[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 18~21.  
Tang Lisong, Zhang Jianlong, Li Yan, et al. Response of plants to the change of soil moisture content and the controlled alternative partial root-zone irrigation [J]. Arid Zone Research, 2005, 22(1): 18~21. (in Chinese)
- 康绍忠,胡笑涛,蔡焕杰,等. 现代农业与生态节水的理论创新及研究重点[J]. 水利学报, 2004, 35(12): 1~7.  
Kang Shaozhong, Hu Xiaotao, Cai Huanjie, et al. New ideas and development tendency of theory for water saving in modern agriculture and ecology [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(12): 1~7. (in Chinese)
- 李志军,张富仓,康绍忠. 控制性根系分区交替灌溉对冬小麦水分与养分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 22(8): 17~21.  
Li Zhijun, Zhang Fucang, Kang Shaozhong. Impacts of the controlled roots-divided alternative irrigation on water and nutrient use of winter wheat [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 22(8): 17~21. (in Chinese)
- 李彩霞,陈晓飞,王铁良,等. 控制性交替灌溉情况下土壤蒸发的预测研究[J]. 节水灌溉, 2007(3): 29~31.  
Li Caixia, Chen Xiaofei, Wang Tieliang, et al. Research on prediction of soil evaporation under controlled alternative

- irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2007(3):29~31. (in Chinese)
- 5 胡笑涛,康绍忠,蔡焕杰,等. 作物根系分区交替灌溉田间实施技术探索[J]. *农业工程学报*,2003,19(11):145~148.  
Hu Xiaotao, Kang Shaozhong, Cai Huanjie, et al. Study on field operating methods of controlled roots-divided alternate irrigation [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(11):145~148. (in Chinese)
- 6 José Caverro. Maize growth and yield under daytime and nighttime solid-set sprinkler irrigation [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(6):1573~1579.
- 7 卜令铎,张仁和,常宇,等. 苗期玉米叶片光合特性对水分胁迫的响应[J]. *生态学报*,2010,30(5):1184~1191.  
Bu Lingduo, Zhang Renhe, Chang Yu, et al. Response of photosynthetic characteristics to water stress of maize leaf in seeding [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5):1184~1191. (in Chinese)
- 8 苏佩,山仑. 拔节期复水对玉米苗期受旱胁迫的补偿效应[J]. *植物生理学通讯*,1995,32(5):341~344.
- 9 水利部农村水利司. 节水灌溉[M]. 北京:中国农业出版社,1998.
- 10 孙景生,康绍忠,蔡焕杰,等. 控制性交替灌溉技术的研究进展[J]. *农业工程学报*,2001,17(4):1~5.  
Sun Jingsheng, Kang Shaozhong, Cai Huanjie, et al. Review on research progress of controlled alternate irrigation techniques [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001,17(4):1~5. (in Chinese)
- 11 汪顺生,费良军,孙景生,等. 控制性交替隔沟灌溉对夏玉米生理特性和水分生产效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*,2011,29(5):115~119,138.  
Wang Shunsheng, Fei Liangjun, Sun Jingsheng, et al. Effects of controlled alternative furrow irrigation on physical properties and water use efficiency of summer maize [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(5):115~119,138. (in Chinese)
- 12 Hu Tiantian, Kang Shaozhong. Effects of partial root-zone irrigation on the nitrogen absorption and utilization of maize [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(2):208~214.
- 13 刘小刚,张富仓,杨启良,等. 交替隔沟灌溉条件下玉米群体水氮利用研究[J]. *农业机械学报*,2011,42(5):100~105.  
Liu Xiaogang, Zhang Fucang, Yang Qiliang, et al. Group use of water and nitrogen on maize under alternative furrow irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(5):100~105. (in Chinese)
- 14 王健,蔡焕杰,陈凤,等. 夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究[J]. *水利学报*,2004,35(11):108~113.  
Wang Jian, Cai Huanjie, Chen Feng, et al. Experimental study on evapotranspiration and soil evaporation in summer maize field [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004,35(11):108~113. (in Chinese)
- 15 刘浩,段爱旺,高阳. 间作种植模式下冬小麦棵间蒸发变化规律及估算模型研究[J]. *农业工程学报*,2006,22(12):34~38.  
Liu Hao, Duan Aiwang, Gao Yang. Soil evaporation variation and estimating model from winter wheat field in intercropping patterns [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(12):34~38. (in Chinese)
- 16 孙景生,康绍忠,王景雷,等. 沟灌夏玉米棵间蒸发规律的试验研究[J]. *农业工程学报*,2005,21(11):20~24.  
Sun Jingsheng, Kang Shaozhong, Wang Jinglei, et al. Experiment on soil evaporation of summer maize under furrow irrigation condition [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005,21(11):20~24. (in Chinese)
- 17 刘钰,Pereira L S,Teixeira J L,等. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. *水利学报*,1997,28(6):27~33.  
Liu Yu, Pereira L S, Teixeira J L, et al. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,1997,28(6):27~33. (in Chinese)