

滴灌条件下春小麦耗水规律研究

程裕伟^{1,2}, 马富裕¹, 冯治磊¹, 王 谊¹, 樊 华¹, 廖 江¹, 韩广泉²

(1. 石河子大学/兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003; 2. 新疆巴州农业技术推广中心, 新疆 库尔勒 841100)

摘 要: 通过对滴灌(4个水分处理: 150、300、450 mm和600 mm)和漫灌(CK)不同品种(新春6号、新春22号)的春小麦生育期耗水量的分析, 研究新疆石河子地区滴灌春小麦的作物系数、耗水规律及对产量的影响。结果表明: 滴灌小麦各水分处理耗水量随着灌水量的增大而增大, 整个生育期内蒸发蒸腾量为545.94 mm, 平均阶段耗水强度为5.35 mm/d; 蒸散量、蒸散强度呈抛物线型, 在抽穗~乳熟期达到最高点; 滴灌小麦的产量与耗水量呈单峰曲线关系; 不同生育阶段的作物系数与FAO推荐单值作物系数法查得的作物系数不同, 在初始生长期、生育后期都大于标准条件下的作物系数值。

关键词: 水分处理; 滴灌; 春小麦; 耗水规律

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)02-0112-06

作物耗水量是在田间条件下, 植株棵间的土壤蒸发和作物蒸腾的耗水之和, 又称为蒸散量。不同作物在生长发育过程中对水分的需求不相同, 而同一种作物在不同的自然条件下对水分的需求亦不相同。作物的耗水量不仅是田间水分平衡的重要组成部分, 也是制定灌溉计划、评价气候资源和水分供应状况的前提^[1-2], 其变化规律, 决定于气象因素、作物特性、土壤性质以及农业技术措施等, 也是农田水分循环的重要部分^[3-6]。

滴灌是一种现代化的灌水技术, 也是世界上公认的高效节水的灌溉方式。目前国内外对于滴灌的研究大多是围绕果树、蔬菜、棉花、瓜等产值较高的作物开展, 并已大面积推广应用, 滴灌技术应用于春小麦的种植上最近几年才开始, 对于滴灌条件下的小麦耗水规律研究甚少。本试验从不同的灌溉方式(滴灌、漫灌)、不同的水分处理下研究滴灌小麦的耗水量、作物系数以及耗水量与产量的关系, 以期为农田水分管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于2009年在石河子大学农学院试验站(44°18'N, 86°03'E)进行, 海拔440 m, 土壤为砂壤土, 土壤有机质含量1.12%, 全氮0.68 g/kg、速效磷(P₂O₅)51.2 mg/kg、速效钾(K₂O)194 mg/kg、碱解氮61 mg/kg。0~60 cm土层平均土壤容重为1.34

g/cm³, 田间持水量24.0%, 地下水埋深在2 m以下。供试品种为新疆的主栽新春6号、北疆地区的高产品种新春22号。

1.2 试验设计与实施

试验为双因素试验设计, 设计滴灌和漫灌(CK)2种灌溉模式, 滴灌采取4个灌水处理(表1), 为防止侧渗, 漫灌处理和滴灌处理之间间隔1 m, 用防水毡隔断, 埋深80 cm, 滴灌处理小区间隔1 m; 1管5行的毛管铺设模式, 1条滴灌带灌溉5行小麦, 小麦行距15 cm。滴灌管系北京绿源公司生产的Φ15型内镶式滴灌带, 滴头间距30 cm, 设计滴头流量2.7 L/h, 灌水量由水表控制。播种量375 kg/hm², 播前施磷酸二铵250 kg/hm², 分别在三叶期、分蘖期、孕穗期、拔节期随水施用尿素75 kg/hm², 全生育期合计追施尿素300 kg/hm²。2009年3月25日播种, 小区面积3 m×3.5 m=10.5 m², 随机排列, 3次重复, 管理措施同大田。2009年7月2日收获时, 各小区除去边行50 cm后单打单收, 并以各小区打碾产量为准折算产量。

1.3 测定内容及方法

1.3.1 土壤含水率的测定 本实验利用电阻式水分张力感应器—Watermark(Irrometer company, Inc.生产)测定土壤含水率。感应器的读值即为Watermark所反映的土壤水分张力值, 其范围为0~199 centibars。根据滴灌在其它作物上的研究表明, 滴灌水分含量主要集中在0~30 cm表层^[7-8], 60 cm以下

收稿日期: 2011-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31160260); 石河子大学重大科技攻关项目(gxjs2010-zdgg03-02); 石河子大学高层次人才培养科研启动资金专项(RCZX201009); 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室开放课题发展基金项目(200803)

作者简介: 程裕伟(1981—), 男, 安徽阜阳人, 硕士生, 研究方向为节水灌溉、灌溉制度。E-mail: 48812808@qq.com。

通讯作者: 马富裕(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 从事作物生理生态研究。E-mail: mfy_agr@shzu.edu.cn。

水分含量的变化忽略不计,故试验采用距离滴灌带 15、30、45 cm 不同的距离,0~20、20~40、40~60 cm 不同深度的方法安装 Watermark, 一组共计 9 支, 三次重复。利用烘干方式标定土壤含水率与讯号处理

器量测其土壤水分张力值之间的关系,得到土壤含水率(y)与土壤水分张力值(x)之间的函数关系式为:

$$y = -0.0448 \ln(x) + 0.3045 \quad R^2 = 0.9794 \quad (1)$$

表 1 不同灌水处理/mm
Table 1 The irrigation treatments(mm)

处理 Treatment	日期 Date(M-d)										合计 Total
	02-28	04-15	04-25	05-05	05-15	05-25	06-04	06-14	06-24	07-04	
W1	45	0	15	15	15	15	15	15	15	0	150
W2	45	30	30	30	30	30	30	30	30	15	300
W3	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	450
W4	45	75	60	60	60	60	60	60	60	60	600
CK		135		135		135		135		60	600

1.3.2 作物耗水量的计算 作物耗水量用水量平衡法计算,依据相邻两次土壤水分的测定结果,计算该时段内作物蒸发量。计算公式如下^[9]

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + I + P + K - C \quad (2)$$

式中, ET_{1-2} 为阶段蒸发蒸腾量(mm); i 为土壤层次号数; n 为土壤层次总数目; γ_i 为第*i*层土壤干容重(g/cm^3); H_i 为第*i*层土壤的厚度(cm); W_{i1} 为第*i*层土壤在时段始的含水率(干土重的百分率); W_{i2} 为第*i*层土壤在时段末的含水率(干土重的百分率); I 为时段内的灌水量(mm); P 为时段内的降水量(mm); K 为时段内的地下水补给量(mm); C 为时段内的排水量(地表排水与下层排水之和)(mm),无地表排水, $C = 0$ 。

1.3.3 参考作物蒸发蒸腾量和作物系数的确定方法 利用石河子当地气象站数据,采用联合国粮农组织推荐的 Penman - Montieth 公式计算参考作物蒸散量^[10]。

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (3)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸散量(mm/d); Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线斜率(kPa/°C); R_n 为地表净辐射通量[MJ/(m²·d)]; G 为土壤热通量[MJ/(m²·d)]; e_a 为饱和水汽压(kPa); e_d 为实际水汽压(kPa); γ 为湿度常数(kPa/°C); T 为大气平均温度(°C); U_2 为 2 m 处的风速(m/s)。

计算中所需参数 Δ 、 e_a 、 e_d 、 γ 、 U_2 、 R_n 、 G 的计算方法见文献[11]。

根据实测作物需水量以及由上述 FAO

Penman-Monteith 公式计算得到的相应时段参考作物蒸发蒸腾量结果,二者的比值即为该阶段膜下滴灌条件下的作物系数。

$$K_c = ET_c / ET_0 \quad (4)$$

式中, K_c 为作物系数; ET_c 作物需水量(mm); ET_0 为相应时段参考作物蒸发蒸腾量(mm)。

1.3.4 有效降雨量的测定 有效降雨量采用联合国粮农组织(FAO)推荐经验公式计算^[12],公式如下:

$$P_0 = \begin{cases} 0.5 \times TP - 5 & (TP < 50 \text{ mm}) \\ 0.7 \times TP - 15 & (TP > 50 \text{ mm}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, P_0 为有效降雨量(mm); TP 为总的降雨量(mm)。

2 结果与分析

2.1 不同灌水处理下的滴灌小麦耗水量

由公式(1)、(2)对实测的土壤水分含量、灌水量及降雨资料,采用水量平衡方程计算出不同水分处理下的滴灌小麦及漫灌小麦各生育期的田间耗水量、耗水强度、和阶段耗水强度,结果见表 2。各水分处理耗水量随着灌水量的增大而增大,各处理不同程度消耗了土壤储水量,随着灌水量的增加土壤耗水量减少。春小麦的阶段蒸散量呈现以下特点:整体而言,无论蒸散量还是蒸散强度,都要经历一个由小到大,再到小的过程,呈抛物线型,在抽穗~乳熟期达到最高点,但对于 W1 水分处理则表现为:前期播种~拔节期较大为 3.09 mm/d,抽穗~乳熟期为 2.65 mm/d,乳熟~成熟期仅为 1.22 mm/d。对于 W3、W4 水分处理,耗水强度从小到大的排列顺序为:播种~拔节期,乳熟~成熟期,拔节~抽穗期,抽穗~乳熟期。

表 2 不同水分处理各生育阶段耗水量

Table 2 Water consumption of different treatments in wheat growing stages

处理 Treatment	项目 Item	播种~拔节 (03-25~ 04-30) Sowing~jointing	拔节~抽穗 (05-01~ 05-23) Jointing~heading	抽穗~乳熟 (05-24~ 06-25) Heading~milking	乳熟~成熟 (06-24~ 07-05) Milking~maturity	全生育期 Whole growing period
W1	灌水量(mm) Irrigation amount	60	30	45	15	150
	ET(mm) Evapotranspiration	114.44	82.72	58.39	24.4	279.96
	耗水强度(mm/d) Water consumption intensity	3.09	3.59	2.65	1.22	2.74
	占总耗水量比例(%) The percentage of water consumption	40.87	29.54	20.85	8.74	100
W2	灌水量(mm) Irrigation amount	105	60	90	45	300
	ET(mm) Evapotranspiration	132.77	100.65	127.09	44.80	405.33
	耗水强度(mm/d) Water consumption intensity	3.58	4.37	5.77	2.24	3.97
	占总耗水量比例(%) the percentage of water consumption	32.76	24.834	31.35	11.05	100
W3	灌水量(mm) Irrigation amount	135	90	135	90	450
	ET(mm) Evapotranspiration	136.59	137.50	164.32	107.52	545.94
	耗水强度(mm/d) Water consumption intensity	3.69	5.97	7.46	5.37	5.35
	占总耗水量比例(%) The percentage of water consumption	25.01	68.91	30.09	19.69	100
W4	灌水量(mm) Irrigation amount	180	120	180	120	600
	ET(mm) Evapotranspiration	149.63	179.31	232.205	118.621	679.76
	耗水强度(mm/d) Water consumption intensity	4.04	7.79	10.55	5.93	6.66
	占总耗水量比例(%) The percentage of water consumption	22.02	26.37	34.16	17.45	100
M(CK)	灌水量(mm) Irrigation amount	135	135	270	60	600
	ET(mm) Evapotranspiration	158.44	153.54	279.84	64.301	656.12
	耗水强度(mm/d) Water consumption intensity	4.28	6.67	12.72	3.21	6.43
	占总耗水量比例(%) The percentage of water consumption	24.15	23.40	42.65	9.8	100

2.2 耗水量与产量的关系

研究表明(图 1):2 个品种在不同水分处理条件下,滴灌小麦的产量与耗水量呈单峰曲线关系,产量随着耗水量的增加而增加,当耗水量增加到一定程度,产量反而降低。处理 W4 耗水量最大,但产量却不是最高,新春 6 号为 4 927.14 kg/hm²,新春 22 号为 4 832.43 kg/hm²,分别比产量最高的处理 W3 低 13.17% 和 6.09%; W1 处理耗水量最低,产量也最低。对于滴灌小麦来说,耗水量过高或过低都不利于产量的形成。

根据不同品种、不同水分处理下的滴灌小麦耗水量与产量的关系拟合曲线图可以看出:滴灌小麦的产量与耗水量呈二次抛物线关系。新春 6 号、新

春 22 号产量和耗水量之间的曲线拟合模型分别为:

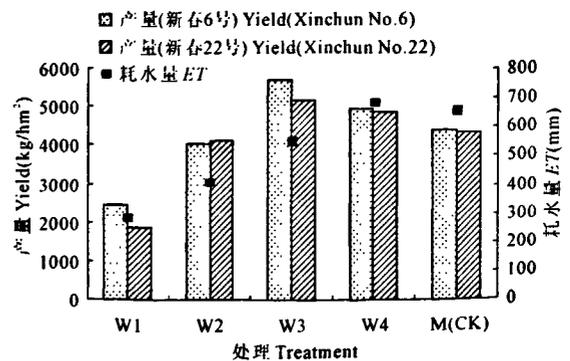


图 1 不同水分处理的耗水量与产量关系

Fig.1 Relationship between water consumption and wheat yield under different treatments

$$y = -0.0342x^2 + 39.637x - 6107.7 \quad R^2 = 0.9562 \quad (5)$$

$$y = -0.0372x^2 + 43.088x - 7274.5 \quad R^2 = 0.9999 \quad (6)$$

模型计算得知:当新春 6 号的耗水量为 579.49 mm 时,所对应的产量最高,为 5 376.92 kg/hm²;当新春 22 号的耗水量为 579.14 mm 时,所对应的产量最高,为 5 202.49 kg/hm²。

2.3 滴灌条件下小麦的耗水量及作物系数

2.3.1 小麦生育期内的 ET_0 的变化 依据本地气象站所测的气象资料,利用 FAO-56 Penman-Monteith 公式逐日计算出小麦生育期内参考作物蒸发蒸

腾量 ET_0 ,如图 2 所示。由图 2 可知, ET_0 在小麦的生育期内表现为持续走高的特征;在各月的分布特征为:4 月份 4~5 mm,5—6 月达到稳定的峰值 6~7 mm,7 月份随着温度、日照及辐射增高, ET_0 变为 7 mm 左右。在整个生育期出现了一些较小值,是因为受当时天气变阴或降雨的影响。太阳辐射和蒸发表面上方大气的对流、紊流和干燥程度对参考作物蒸发蒸腾量的影响,随着时间的变化呈现动态变化的过程^[13]。分析表明在试验期绝大部分时间内太阳辐射项占蒸发蒸腾量的百分比在 60% 以上,特别是在 6—7 月期间,该值平均在 80% 左右。

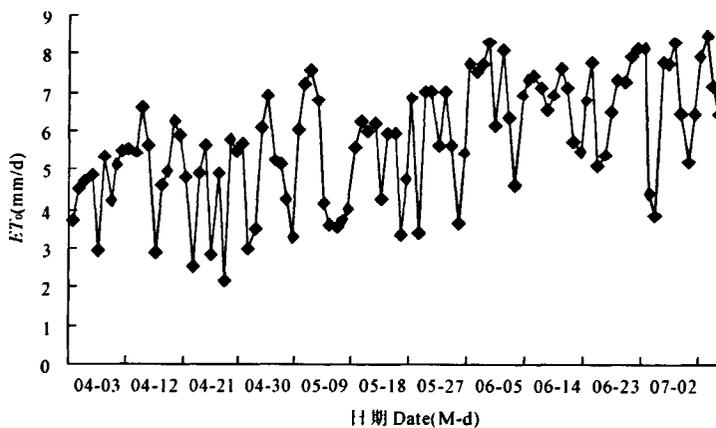


图 2 滴灌小麦生育期内 ET_0 的计算结果

Fig.2 ET_0 of drip irrigated spring wheat at different growing stages

2.3.2 滴灌小麦耗水规律 以产量最高的 W3 处理作为研究滴灌小麦耗水规律的对象,由表 3 可知,在当地地理、气候环境和栽培条件下,整个生育期内小麦的蒸发蒸腾量为 545.94 mm,平均阶段耗水强度为 5.35 mm/d。滴灌小麦在播种-拔节期的需水强度最小,拔节~抽穗期、乳熟~成熟期的需水强度居中,抽穗~乳熟期的需水强度和阶段耗水模数最高,该阶段蒸发蒸腾量占总需水量的 30.09%。在播种-拔节期植株幼小,叶面积指数较小,耗水强度较低,平均耗水为 3.69 mm/d;拔节期之后,植株逐渐变大,叶面蒸腾不断增加,耗水量日益增大,耗水强度达 5.97 mm/d,阶段耗水模数为 25.18%;进入抽穗期后,植株的营养生长和生殖生长都很旺盛,叶面积指数在该时期达到峰值,均耗水强度为 7.46 mm/d,阶段耗水模数为 30.09%;在乳熟~成熟期,叶片开始脱落,蒸腾耗水强度相应降低,耗水强度为

5.37 mm/d,阶段耗水模数为 19.69%。

2.3.3 滴灌小麦作物系数 作物系数 K_c 反映了作物类型、生长阶段对蒸发蒸腾量的影响,在生育期内是一个动态的变化过程,反映了作物在整个生长季节耗水的变化率。由表 3 可知,滴灌小麦的作物系数在生育期内,播种~拔节期有一个最小值 0.75,到拔节~抽穗期上升到 1.05,抽穗~乳熟期达到整个生育期的峰值 1.09,在乳熟~成熟期作物系数又开始降低为 0.79。这与 FAO 推荐的单值作物系数法^[13]查得的春小麦不同生育阶段的作物系数(表 4)不同,在初始生长期、生育后期都大于标准条件下的作物系数值。滴灌条件下,春小麦的生长与常规漫灌不同,因影响作物需水量的一些基本条件都发生了变化,对于滴灌小麦的作物系数在各生育阶段的分布规律还需要作进一步研究。

表 3 W3 处理条件下滴灌春小麦的蒸发蒸腾规律
Table 3 Water requirement rule of drip irrigated spring wheat under W3 treatment

项目 Item	播种~拔节 (03-25-04-30) Sowing~jointing	拔节~抽穗 (05-01-05-23) Jointing~heading	抽穗~乳熟 (05-24-06-25) Heading~milking	乳熟~成熟 (06-24-07-05) Milking~maturity	全生育期 Whole growing period
天数 Days(d)	37	23	22	20	102
ET_c (mm) Evapotranspiration	136.59	137.507	164.32	107.52	545.94
阶段耗水强度(mm/d) Water consumption intensity	3.69	5.97	7.46	5.37	5.35
ET_0 (mm) Evaporation	181	130	150.14	135	596.15
K_c crop coefficient	0.75	1.05	1.09	0.79	0.91
阶段耗水模数(%) Water consumption rate	25.04	25.18	30.09	19.69	100

根据试验结果,通过运用土壤水分平衡方程结合降水资料,计算出滴灌春小麦田的日蒸散量,然后利用 FAO-56 Penman-Monteith 公式估算出的平均日蒸散量相比较,结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,大部分点分布在 1:1 直线附近,表明实际计算的蒸散量和估算蒸散量差异不大,大部分的点都位于

1:1 直线上方,说明估计的滴灌小麦的蒸散量大于实际计算的蒸散量。在滴灌条件下,小麦生长与常规灌溉条件不同,因此影响小麦需水量的一些基本条件发生了变化,对于滴灌小麦的作物系数在各生育阶段的分布规律还需要作进一步研究。

表 4 春小麦不同生育阶段作物系数
Table 4 Crop coefficient of drip irrigated spring wheat at different growing stages

生育阶段 Growing stage	初始生长期 Early growth stage	快速生长期 Quick growth stage	生育中期 Middle growth stage	生育后期 Late growth stage	全生育期 Whole growing period
作物系数 Crop coefficient	0.30	0.30~1.15	1.15~1.25	1.15	0.75

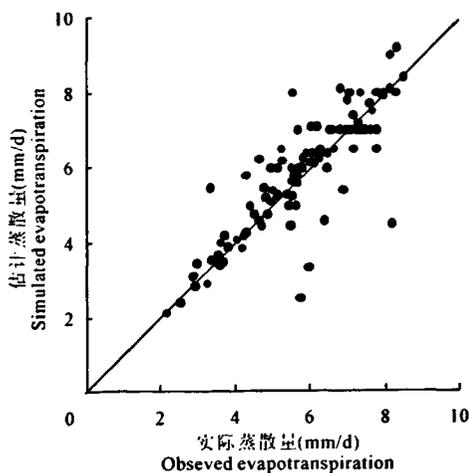


图 3 滴灌春小麦蒸散量实际值与估算值之比较
Fig.3 The comparison of observed and simulated evapotranspiration of drip irrigated spring wheat

3 结论

1) 各水分处理耗水量随着灌水量的增大而增大,对于灌量为 150 mm 的水分处理则表现为前期播种到拔节期较大,为 3.09 mm/d,而到抽穗~乳熟期

为 2.65 mm/d,乳熟~成熟期仅为 1.22 mm/d,这可能与小麦所受的干旱胁迫有关。对于灌量为 450 mm、600 mm 的水分处理,耗水强度从小到大的排列顺序为:播种~拔节,乳熟~成熟,拔节~抽穗,抽穗~乳熟。

2) 不同品种、不同水分处理下滴灌小麦产量随着耗水量的增加而增加,但当耗水量到了一定程度,产量反而降低。滴灌小麦的产量与耗水量呈二次抛物线关系;新春 6 号的耗水量为 579.49 mm 时,所对应的产量最高,为 5 376.92 kg/hm²,新春 22 号的耗水量为 579.14 mm 时,所对应的产量最高,为 5 202.49 kg/hm²。

3) 整个生育期内滴灌小麦的蒸发蒸腾量为 545.94 mm,平均阶段耗水强度为 5.35 mm/d,估计的蒸散量大于实际计算的蒸散量。滴灌小麦的作物系数在播种~拔节期有一个最小值 0.75,拔节~抽穗期上升到 1.05,抽穗~乳熟期达到整个生育期的峰值 1.09,在乳熟~成熟期作物系数又开始降低为 0.79。

参考文献:

- [1] 肖娟,雷廷武,李光多,等.西瓜和蜜瓜咸水滴灌的作物系数和耗水规律[J].水利学报,2004,(6):119-124.
- [2] 西北农业大学农业水土工程研究所,农业部农业水土工程重点开放实验室.西北地区农业节水与水资源持续利用[M].北京:中国农业出版社,1999.
- [3] “华北平原作物水分胁迫与干旱研究”课题组.作物水分胁迫与干旱研究[M].郑州:河南科学技术出版社,1991.
- [4] 陆葆跃,严文生.春玉米耗水量及其抗旱决策[J].南京气象学院学报,1994,(增刊):9-11.
- [5] 陈玉民,肖俊夫.估算冬小麦平均日耗水量模型的初步研究[J].水利学报,1999,(12):49-54.
- [6] 朱自玺,赵国强,邓天宏,等.棉花耗水规律与灌溉随机控制[J].应用气象学报,1998,9(4):417-424.
- [7] 李富先,杨举芳,张玲,等.棉花膜下滴灌需水规律和最大耗水时段及耗水量的研究[J].新疆农业大学学报,2002,25(3):43-47.
- [8] 郑旭荣,胡晓棠,李明思,等.棉花膜下滴灌田间耗水规律的试验研究[J].节水灌溉,2000,(5):25-27.
- [9] 中华人民共和国水利部.SL13-2004.灌溉试验规范[S].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [10] Smith M. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirement[R]. Rome:FAO, 1991.
- [11] 郭群善,雷志栋,杨诗秀.作物生长条件下田间土壤水分平衡计算的研究[J].水利学报,1997,(增刊):40-46.
- [12] Clarke D, Smith M, El-Askari K. CropWat for Windows: User Guide Version 4.2[M]. 1998:13-14.
- [13] Allen G, Pereira L S, Rses D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing prop water requirements[C]//FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome: FAO, 1998.

Study on water consumption rules in spring wheat under drip irrigation

CHENG Yu-wei^{1,2}, MA Fu-yu¹, FENG Zhi-lei¹, WANG Yi¹, FAN Hua¹, LIAO Jiang¹, HAN Guang-quan²

(1. Shihezi University/Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture of Xinjiang Bingtuan, Shihezi, Xinjiang 832003, China;

2. Center of Bazhou Agricultural Technology Promotion, Korla, Xinjiang 841100, China)

Abstract: Field experiment was conducted at experimental station of Shihezi University in 2009, which included 5 water treatments (150 mm(drip irrigation), 300 mm(drip irrigation), 450 mm(drip irrigation), 600 mm(drip irrigation) and 600 mm(furrow irrigation)) and 2 wheat varieties (Xin Chun No.6 and Xin Chun No.22). To assess wheat yield, crop coefficients and water consumption rules in spring wheat under drip irrigation, watermark was used to detect soil moisture dynamics at the depth of 0~60 cm in wheat field during the whole growing season. The results showed that, water consumption of spring wheat increased with irrigation amount. Its total evapotranspiration was 545.94 mm, and water consuming intensity was 5.35 mm/d. Evapotranspiration and transpiration intensity first increased then decreased with wheat growing, which reached their maxmum at heading-milking stage. Wheat yield first increased then decreased with water consumption. The crop coefficients of different growth stages was different from the data offered by FAO, which was greater than that of standard conditions at initial growth stage and late growth stage.

Keywords: water treatment; drip irrigation; spring wheat; water consumption