

陇东黄土旱塬作物组合系统农田耗水规律研究

李锋瑞 赵松岭 李凤民

(兰州大学干旱农业生态国家重点实验室, 兰州, 730000)

高崇岳

(甘肃省草原生态研究所, 兰州, 730020)

S314

A

摘要 本文根据 1988—1991 年陇东黄土旱塬作物组合模式(即作物轮作与复种模式)田间试验土壤水分测定资料,对作物组合系统中主要组分作物田间耗水量及其构成特征、变异规律及农田土壤水分的利用程度进行了研究,并探讨了不同作物组合系统的田间耗水量及其构成特征。结果表明,不同作物组合系统的田间耗水量及其构成特征存在明显差异,作物田间耗水量是一个动态变量,因作物种类、降水年型等不同而异,并与生育期有效降水量呈显著正相关,来自播前土壤有效储水的土壤供水对秋播作物冬小麦和冬油菜生育期水分不足有重要补偿作用,是维持其较高的生产稳定性的关键原因,无论丰水年还是欠水年,冬小麦、玉米、谷子和马铃薯 4 种主要作物在农田水分利用程度上均存在一定差异。

关键词: 作物组合系统, 农田耗水量, 降水年型, 黄土旱塬。

作物耗水量是衡量和评价农田水分供需状况的重要指标,也是计算作物水分利用效率和降水生产潜力的关键参数,同时也是农田水分调控的主要对象。本文依据 1988—1991 年在陇东黄土旱塬这一特定的雨养农业生态类型区进行的作物组合种植模式(即作物轮作与复种模式)田间试验土壤水分动态资料,对作物组合系统中主要组分作物的田间耗水量及其构成特征、动态变化规律以及对农田土壤水分的利用程度进行了研究,同时探讨了不同作物组合系统的田间耗水量及其构成特征。

1 试验区概况及研究方法

1.1 试验区概况

试验在甘肃省草原生态研究所黄土高原试验站进行。该站位于甘肃省东部黄土高原(简称陇东黄土高原)中南部,地理位置:35°41'N, 107°51'E,属黄土高原残塬区。海拔 1421.9m,典型的暖温带大陆季风气候。年平均太阳辐射量 5547.3MJ/m²,平均气温 8.3℃,最热月(7月)均温 20.5℃,最冷月(1月)均温 -4.6℃,全年≥0℃的有效积温 3446.0℃,年平均降水量 550.5mm,最高 791.0mm,最低 319.9mm,主要集中于 7—9 月,年平均蒸发量 1503.5mm,为降水量的 2.7 倍。无霜期平均为 163d,干燥度为 1.59。根据我国北方旱地农业类型分区为半湿润偏旱雨养农业区。

3 个主要试验年份的基本气候特征为:1989 年低温偏旱,年平均气温为 8.2℃,比多年均值低 0.1℃;年太阳辐射量 5389.2MJ/m²,比多年均值低 158.1MJ/m²;年降水量 483.1mm,比多年均值低 78.4mm。1990 年温暖多雨,年均气温 8.9℃,比多年均值高 0.6℃;年太阳辐射量

收稿日期:1994 01 10,修改稿收到日期:1994 12 25。

5877.7MJ/m²,比多年均值高330.5MJ/m²,年降水量759.1mm,比多年均值高197.6mm。1991年高温少雨,年平均气温9.2℃,比多年值均高0.9℃;年太阳辐射量6119.9MJ/m²,比多年均值高572.7MJ/m²;年降水量443.1mm,比多年均值低118.4mm。试验3年的年平均气温为8.8℃,年太阳辐射量平均为5795.6MJ/m²,年平均降水量为561.9mm。

表1 不同试验年份各作物农田耗水量及其构成特征

Table 1 Water consumption and its constitution for various crops under different trial years

作物 Crop	试验年份 Trial year	耗水量 (ETa) (mm)	有效降水量 Effective rainfall		土壤供水量 Soil water supply		生育期末 土壤有效水 SAW at maturity (mm)	生育期始 土壤有效水 SAW at sowing (mm)
			(mm)	(%)	(mm)	(%)		
W	1988—1989	364.0	264.6	72.7	99.4	27.3	185.4	284.3
	1989—1990	409.9	361.4	88.2	48.5	11.8	217.7	266.2
	1990—1991	461.3	392.0	85.0	69.3	15.0	229.3	298.6
	Mean	411.7	339.3	82.4	72.4	17.6	210.8	283.2
C	1989	364.4	332.1	91.1	32.3	8.9	247.7	280.0
	1990	446.4	484.9	108.6	-38.5	-8.6	266.2	237.7
	1991	364.7	305.5	83.8	59.2	16.2	162.3	221.5
	Mean	391.8	374.2	95.5	17.6	4.5	225.4	243.0
P	1989	310.2	301.9	97.3	8.3	2.7	247.9	256.2
	1990	458.6	484.8	105.7	-26.2	-5.7	261.6	235.4
	1991	312.7	300.2	96.0	12.5	4.6	208.5	221.0
	Mean	360.5	362.3	100.5	-1.8	-0.5	239.3	237.5
M	1989	300.8	283.0	94.1	17.8	5.9	209.6	227.4
	1990	451.8	485.4	107.4	-33.6	7.4	233.9	200.3
	1991	308.2	265.1	82.5	23.1	7.5	159.9	183.0
	Mean	353.6	351.2	99.3	2.4	0.7	201.2	203.6
Sy	1990	394.6	484.7	122.8	-90.1	-22.8	252.4	162.3
	1991	288.1	290.4	100.8	-2.3	-0.8	183.0	180.7
	Mean	341.4	387.6	113.5	-46.2	-13.5	217.7	171.5
Sg	1990	423.1	484.7	114.6	-61.6	-14.6	263.9	202.3
	1991	342.9	327.2	95.4	15.7	4.6	331.6	247.3
	Mean	383.0	406.0	106.0	-23.0	-6.0	247.7	224.7
L	1990	285.5	317.6	111.2	-32.1	-11.2	254.7	222.6
	1991	258.8	268.0	103.6	-9.2	-3.6	243.1	233.9
	Mean	272.2	292.8	107.6	-20.6	-7.6	248.9	228.3
R	1989—1990	445.4	339.1	76.1	106.3	23.9	173.8	280.1
B _x	1991	272.1	265.2	97.5	6.9	2.5	192.3	199.2
B _x (夏)	1989	149.7	191.3	127.8	-41.6	-27.8	282.4	240.8
	1990	206.6	248.5	120.3	-41.9	-20.3	266.2	224.3
	Mean	178.1	219.9	124.1	-41.7	-24.1	274.3	232.6
Sy(夏)	1990	349.9	400.8	114.4	-50.8	-14.5	266.2	215.4
V(夏)	1989	185.1	212.9	115.0	-27.7	-15.0	273.2	245.5
	1990	218.4	269.3	123.3	-50.8	-23.3	266.2	215.4
	1991	115.9	127.5	110.0	-11.6	-10.0	240.8	230.8
Mean	173.2	203.2	117.4	-30.0	-17.4	260.1	230.1	

W(Winter wheat)——冬小麦;C(Corn)——玉米;P(Potato)——马铃薯;M(Millet)——谷子;Sy(Soybean)——黄豆;Sg(Sorghum)——高粱;L(Linseed)——胡麻;R(Rape)——冬油菜;B_x(Broomcorn)——糜子;V(Vicia Sativa L.)——一年生箭舌豌豆。

试验地土壤为黑垆土,0—200cm 土层内土壤容重变化在 1.1—1.4g/cm³ 之间,平均为 1.3g/cm³,凋萎湿度平均为 7.0%,田间持水量平均为 22.3%。试验地前茬为生长 4a 的苜蓿地,地势平坦,肥力条件良好。由于平茬较早等原因,土壤水分条件较好,作物播种时的底墒较高(见表 1)。

试验采用裂区设计,利用当地主要作物,设计了分别以冬小麦、玉米、马铃薯和谷子为主体作物的若干作物组合模式。试验小区面积为 35m×10m,重复 2 次。在作物生育期内用中子水分仪逐旬测定各作物土壤含水量,测定层次分为 0—10cm、10—20cm、20—30cm、30—50cm、50—75cm、75—100cm、100—150cm 和 150—200cm 8 层。另外,在试验开始和结束时测定各试验小区 0—200cm 土层容重,测定层次与上相同。试验中,各作物施肥水平及其它田间管理措施均保持一致^[1]。

1.2 作物田间耗水量的计算

本文采用农田水分平衡法计算作物田间实际蒸散量 ET_a (Actual evapotranspiration)^[2]。

试区地下水埋深一般都在 10m 以下,据研究^[3-5],当地下水埋深在 4m 以下时,地下水上下移补给量近于零。故本文对此项忽略不计。另据报道*,在黄土高原地区,农田的降水入渗深度一般最大不超过 2m。据此,本试验中深层渗漏量也可忽略不计。此外,试区为典型的雨养农业区,故无人工灌水。因此,适用于计算本试验中作物田间耗水量的农田水分平衡方程为:

$$ET_a = P - V - RO - \Delta W$$

式中 P 为生育期内大气降水量; V 为日降水量或一次降水量小于某一界限值时的无效降水量; RO 为地表径流量; ΔW 为农田土壤储水变化量,等于生育期末土壤储水量与生育期始土壤储水量之差。

本文采用 Forest 的一个近似估计农田降水产流的简单模式来确定农田径流量提出 (RO)^[6]该模式确定农田径流量所依据的基本原理是蓄满产流理论,即认为当某日(或某一次)降水量超过某一阈值(P_s)以后,才开始产流,且产流量与超过该阈值的降水量呈正比关系。其表达式为:

$$\text{如果 } P(D) > P_s \text{ 则 } RO(D) = \beta(P(D) - P_s)$$

$$\text{如果 } P(D) \leq P_s \text{ 则 } RO(D) = 0$$

式中 $P(D)$ 为生育期内某日(或一次)降水量; β 和 P_s 分别是地面坡度和耕作方式函数中的两个参数。Forest(1984)的研究表明^[6],当农田坡度小于 3°时,上述两参数可分别取值 $\beta = 0.15$, $P_s = 25\text{mm}$ 。因本项研究试验地坡度小于 3°,故可选用上述的参数值。

于是,作物生育期内的农田累计径流量(RO)可用下式估算:

$$RO = \sum_{i=1}^n \beta(P(D) - P_s)i$$

这里 n 为生育期内日(或一次)降水量大于阈值(P_s)的总天数(或总次数)。

关于无效降水量的界限值,许多文献中都把日(或一次)降水量 5mm 作为无效降水量的临界值^[7]。据有关研究^[8],当日(或一次)降水量在 3mm 左右时,其大致与作物对降水的截留量

*:赵聚宝等.山西屯留试验区旱地农田水分状况及其调控技术研究.“主要类型旱农地区农田水分状况及其调控技术”课题研究报告,1990.

相等,故本文将小于 3mm 的日(或一次)降水量视为无效降水量。

2 结果与分析

2.1 不同组分作物耗水

2.1.1 作物耗水量及其构成特征

从表 1 看出,同一种作物在不同生长年份和同一试验年份不同作物之间的田间耗水量及其构成特征都有很大差异。这表明:(1)作物田间耗水量不仅与作物本身的需水和耗水特性有关,而且与作物生长年度的气候生态条件和土壤水分含量等因素密切相关;(2)播前土壤储水在作物田间耗水中的重要程度不同。秋播作物冬小麦和冬油菜,由于其主要生育阶段均处于干旱少雨季节(4—6 月),因此,土壤供水量在田间耗水量中占有较大的比例,特别是在干旱年份。这就是为什么在试区冬小麦和冬油菜的降水生态适宜度虽然较低但其实际生产稳定性却较高的真正原因。玉米、马铃薯、谷子、高粱、糜子和黄豆等春播作物,由于其生育期内自然降水量较多,特别是其生育过程中需水关键期与降水高峰期基本相吻合,所以,除个别作物(如需水量较多的玉米)在干旱情较重的试验年份(如 1991 年)中出现土壤向作物供水现象外,从试验各年平均情况来看作物田间耗水量主要来源于生育期的有效降水量。对冬小麦或冬油菜收获后复种的箭舌豌豆、糜子和黄豆等作物,因其生育期恰好处于试区降水高度集中的 7、8、9 月,降水与作物生长需水之间的耦合度很高,所以其耗水量几乎完全来源于生育期间的降水,甚至在降水较多的试验年份,其农田土壤水分还有所增加。

从对土壤水分的利用来看,在全部作物当中,秋播作物冬小麦和冬油菜对土壤水分的利用程度最高。作物在欠水年比在丰水年对土壤水分利用的程度要高。这里值得注意的是,无论丰水年还是欠水年,在作物收获时遗留在土壤中的有效水分均较高。这说明作物对土壤水分资源的利用程度还不够充分,尤其是春播作物。因此,采用各种有效的农业技术措施,努力提高作物的农田土壤有效储水的利用率,对提高农田生产力水平,无疑具有十分重要的现实意义。

2.1.2 作物耗水量变异的影响因素 为了定量探讨气候生态因子对作物耗水量的影响,揭示作物耗水量变异的主要原因及变化规律,笔者以冬小麦、玉米、马铃薯和谷子 4 种主要作物为例,对其田间耗水量与生育期有效降水量(EP)、积温($AT, \geq 0^\circ\text{C}$)、气温(T)和地温($ST, 0-20\text{cm}$)4 个气候因子的关系进行了相关分析。结果表明,田间耗水量与生育期有效降水量相关显著或极显著,而与其它三个气象因子相关不显著。说明生育期有效降水量是影响作物耗水量的主要因素,分析结果如下:

$$\text{冬小麦: } ETa = 241.6423 + 1.001632^{EP} \quad (r = 0.9785^{**}; F = 32.3708^*)$$

$$\text{玉米: } ETa = 118.7196 + 0.678416EP \quad (r = 0.9327^*; F = 21.4617^*)$$

$$\text{马铃薯: } ETa = -33.2233 + 1.031535EP \quad (r = 0.9930^{**}; F = 140.6283^{**})$$

$$\text{谷子: } ETa = 90.1841 + 0.734994EP \quad (r = 0.9918^{**}; F = 121.1486^{**})$$

其中,冬小麦田间耗水量与生育期有效降水量呈指数函数关系,这可能与冬小麦大量利用播前土壤有效储水有关。

此外,还对同一试验年份各组分作物田间耗水量与生育期有效降水量、积温、气温和地温的关系进行了相关分析,所得结果与上述情况十分相似。即作物田间耗水量与生育期有效降水量呈极显著正相关,而与其它因子相关不显著。

2.2 作物组合系统耗水特征

表2 不同作物组合系统农田总耗水量及其构成

Table 2 Total water consumption and its constitution for different complex crop systems

作物组合系统 Complex crop system	总耗水量 (<i>TETa</i>) (mm)	总有效降水量(<i>TEP</i>)		总土壤供水量(<i>TSWS</i>)	
		(mm)	(%)	(mm)	(%)
C-C-C	1175.5	1122.5	95.5	53.0	4.5
C-C-W	1272.1	1209.0	95.0	63.1	5.0
C-P-W	1284.3	1026.0	79.9	258.3	20.1
C-Sy-W	1220.3	1182.2	96.9	38.1	3.1
C-M-C	1180.9	1123.0	95.1	57.9	4.9
C-C-M	1119.0	1102.1	98.5	16.9	1.5
C-P-Sy	1111.1	1107.3	99.7	3.8	0.3
C-Sy-C	1123.7	1122.3	99.9	1.4	0.1
C-M-P	1128.9	1117.7	99.0	11.2	1.0
C-W-C	1139.0	999.0	87.7	140.0	12.3
C-W-P	1087.0	993.7	91.4	93.3	8.6
C-W-M	1082.5	978.6	90.4	103.9	9.6
C-W-W	1235.6	1085.5	87.9	150.1	12.1
P-P-P	1061.5	1086.9	100.5	-5.4	-0.5
P-P-Sy	1056.9	1077.1	101.9	-20.2	-1.9
P-C-M	1064.8	1071.9	100.7	-7.1	-0.7
P-Sy-C	1069.5	1092.1	102.1	-22.6	-2.1
P-M-P	1074.7	1087.5	101.2	-12.8	-1.2
P-M-P	1126.7	1092.8	97.0	33.9	3.0
M-M-M	1060.8	1053.6	99.3	7.2	0.7
M-M-C	1116.8	1073.9	96.2	42.9	3.8
M-C-C	1111.9	1073.4	96.5	38.5	3.5
M-P-P	1072.1	1068.0	99.6	4.1	0.4
M-P-C	1124.1	1073.3	95.5	50.8	4.5
M-P-Sy	1047.5	1058.2	101.0	-10.7	-1.0
M-Sy-M	1003.6	1052.8	104.9	-49.2	-4.9
W-W-W	1235.1	1017.9	82.4	217.2	17.6
W+V-W+V-W+V	1754.5	1627.3	92.8	127.2	7.2
W+V-Sg-C	1336.9	1267.6	94.8	89.3	5.2
W+V-C-Sg	11338.4	1289.5	96.3	48.9	3.7
W+V-M-Sy	1289.0	1253.2	97.2	35.8	2.8
W+V-L-M	1295.9	1187.0	91.6	108.9	8.4
W+V-C-Sy	1283.6	1252.7	97.6	30.9	2.4
W+V-C-W	1456.8	1354.3	93.0	102.5	7.0
W+B _M -Sy-C	1273.6	1246.1	97.9	26.9	2.1
W-B _M -Sg-L	1195.6	1208.6	101.1	-13.0	-1.1
W+B _M -C-L	1218.9	1208.0	99.2	10.1	0.8
W+B _M -P-Sy	1260.4	1231.0	97.7	29.3	2.3
W+R-R+V-W	1489.1	1264.9	84.9	224.2	15.1
W+R-R+V-P	1340.5	1173.1	87.5	167.4	12.5
W+R-R+V-M	1336.0	1158.0	86.7	178.0	13.3
W+R-V-B _M	1299.9	1138.1	87.6	161.8	12.4
W+R-R+Sy-C	1524.0	1309.9	86.0	214.1	14.0
W+R-R+Sy-M	1467.5	1289.5	87.9	178.0	12.1
W+R-R+Sy-W	1620.6	1396.4	86.2	224.2	13.8
W+R-R+B _M -Sg	1344.8	1179.4	87.7	165.4	12.3
W+R-R+B _M -Sy	1290.0	1142.6	88.6	147.4	11.4

注(Note): *TEP*—Total effective precipitation; *TSWS*—Total soil water supply;

“-”代表隔年(Referring to next year);

“+”代表复种(Referring to multiple cropping).

2.2.1 田间耗水量及其构成 作物组合系统田间总耗水量 $TETa$ (Total actual evapotranspiration) 是指作物组合系统中各组分作物全生育期田间耗水量之和。从表 2 看出, 各作物组合系统的田间总耗水量差异很大, 变异系数为 13.1%。农田耗水量的构成也明显不同, 主要表现在: 大部分单一轮作种植模式的农田耗水量几乎完全来源于生育期的自然降水, 而土壤供水量的比例很小, 甚至近乎为零; 大部分轮作复种模式的农田耗水量构成虽仍以生育期自然降水为主, 但土壤供水量亦占有一定的比例。显然, 在轮作系统中加入复种后将有效地提高作物组合系统的农田总耗水量及农田土壤水分的利用程度。因此, 通过对若干在生育特性上相异、在水分需求和利用能力上不同的作物种类进行合理组合与配置, 可以提高作物组合系统的农田耗水量, 最终提高农田总的水分利用效率和生产力。而这正是合理轮作及复种调控农田水分并使作物系统增产的重要机理所在。

2.2.2 单一轮作与轮作复种两种模式对土壤水分状况的影响 在冬小麦系列中(表 2), 作为对照的 W-W-W 连体系统, 在整个系列中它对土壤水分的消耗量几乎是最多的, 而对同期降水的截留却最少, 对降水资源的利用很不充分。不同程度的复种对水资源的利用都有不同程度的提高, 随复种次数的增加, 对水资源的利用程度也在相应提高, 而且主要提高对降水资源的利用效率。因此, 复种效率的获得并不是以牺牲大量的土壤水分为代价, 而是以截获大量降水为基础。所以, 复种一般不会因对土壤水分的较多消耗而影响作物组合系统的农田生产稳定性。

3 结论

3.1 不同作物组合系统的农田耗水量及其构成特征差异很大, 表明不同作物组合及配置方式对农田土壤水分的调节与利用能力不同。

3.2 同一试验年份各作物及同一作物各试验年份的农田耗水量存在明显差异, 生育期有效降水量是引起这种差异的主要因素。

3.3 同一试验年份各作物及同一作物各试验年份的农田耗水量构成或耗水来源亦存在很大差异。对于秋播冬小麦和冬油菜来说, 由于其主要生育阶段均处于干旱少雨季节(4—6月), 播前土壤有效储水对其育期降水可供具重要的补偿作用, 是维持生产的稳定性的关键因素。玉米、谷子、马铃薯、高粱、糜子和黄豆等春播作物, 因其生育期间天然降水量较多, 播前土壤储水对田间耗水的补偿意义不大。

3.4 无论丰、欠水年, 作物对农田对水分资源的利用都不充分, 特别是春播作物。因此, 采用各种有效的农业技术措施, 努力提高农田土壤有效储水利用率, 对试区自然降水生产潜力开发具有重要的现实意义。

3.5 单一轮作和轮作复种相比, 后者对降水资源的利用更合理和更充分, 有利于提高土地的生产效益, 应予提倡。

参 考 文 献

- 1 李锋瑞等. 若干优化作物组合模式的生态效能特征分析. 草业学报, 1994, 3(1): 48—55
- 2 信乃途. 计算农田蒸发的水量平衡法. 干旱地区农业研究, 1986, (2): 33—40
- 3 袁育枝. 试论华北半湿润半干旱地区降水资源的农业气候评价. 气象学报, 1984, 42(4): 440—447
- 4 张乃让. 河北省地下水资源的探讨. 海河科技, 1980, (8): 45—53
- 5 吉中礼. 干旱半干旱地区的有效雨量及确定方法(综述). 干旱地区农业研究, 1985, (1): 100—107
- 6 Jean-paul Lhomme. A Simple Modelling of Crop Water Balance for Agrometeorological Applications. *Ecological Mod-*

elling, 1991, 57, 11—25

7 Dastance N C. Effective rainfall in irrigated agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper 25*, Rome, 1978

8 施成熙. 陆地水文学(上册). 北京: 科学出版社, 1959

STUDY ON THE WATER CONSUMPTION LAW OF COMPLEX CROP SYSTEMS IN THE TABLELANDS OF THE EASTERN GANSU LOESS PLATEAU

Li Fengrui Zhao Songling Li Fengmin

(National key Laboratory of Arid Agroecology, Lanzhou university, Lanzhou, China, 730000)

Gao Chongyue

(Institute of grassland Ecology in Gansu, Lanzhou, China, 730020)

Field water consumption, constitution, variational law, and utilization degree of available soil water for the main crop components in the complex crop systems were studied in this paper, and at the same time the field water consumption and its constitution for different complex crop systems was also examined based on the soil water observations from the experiments of crop rotations with multiple cropping conducted on the tablelands of the Eastern Gansu Loess Plateau during 1988—1991. The results showed that: there were quite great differences in the field water consumption among the crops and the crop systems, crop water consumption was a dynamic variable that varied within the species and the year types of precipitation, and effective precipitation with the phenological stages had a great impact on crop water consumption, soil water supply from the pre-sowing available soil water played an important role in compensation for precipitation shortages during the growing period of winter wheat and winter rape sown in autumn and was a key factor maintaining production stability of the above two crops, the four major crops of winter wheat, corn, millet and potato differed greatly in the utilization degree of available soil water either in a dry year or in a wet year.

Key words: complex crop systems, field water consumption, year types of precipitation, tablelands of the Loess Plateau.