

黄土区旱地春小麦农田水分 生态特征与改善途径

穆兴民 陈国良 赵克学 郭保安 费维温

摘 要

本文应用固原与黄土高原多年多点旱作春麦农田水分资料,对旱地春麦的农田水份平衡、作物耗水规律、土壤耗水分布与利用程度、作物产量与土壤有效贮水和生育期降水的定量关系、提高土壤水分利用率的途径与效益等进行了比较系统的研究。结果:(1)旱作春麦总耗水量平均为300mm左右,丰水年近于400mm,旱年200mm左右;(2)总耗水中,土壤供水占35%,生育期降水占65%;(3)土壤耗水大部分来源于1m土层,占85%;1~2m土层仅占15%;(4)1m土层有效贮水最大利用程度已达86%以上,所剩水量已为难利用水,无多大潜力可控;1~2m土层有效水最大利用程度仅50%左右,尚有60mm以上水分未得到充分利用;(5)生育期降水对产量的贡献大于土壤贮水,其回归系数分别为0.233和0.213kg/mm,单位水量(mm)的产量效应生育期降水比土壤贮水高9.4%;(6)作物耗水强度前期为每天1.0mm,中期为3.0mm,后期为2.0mm,全生育期平均为1.9mm,其耗水进程呈Logistic规律;(7)春麦产量与总耗水量之关系,在耗水量450mm以内呈幂函数关系,其方程为 $Y=aET^b$ 。

春小麦是黄土高原西部及长城沿线北部各县的主要粮食作物,一般占作物总播种面积的30%~40%,多的高达50%以上。春麦生长期短(4个月左右),根系下扎深度浅,其耗水特征自然与冬麦有许多不同之处。加之在黄土高原春麦生长期降水稀少,易受春夏干旱的威胁,故较冬麦难获高产。如据黄土高原287县正常年分(1985年)资料统计,旱地冬麦平均亩产164kg,旱地春麦平均亩产93kg,最低县的平均亩产仅30kg,固原就属这种典型县。该县1949~1980年春麦平均单产38kg,最高年仅65kg,单产波动率31%。旱地春麦产量低而不稳的因素很多,但土壤“底墒”不足(0~100cm土层)、深层水分未能充分利用、关键时段缺少降水乃是其主要原因之一。本文以固原县旱地春麦试验资料为据,探讨旱地春麦农田水分平衡、作物耗水规律、土壤耗水分布与利用程度、春麦产量与土壤“底墒”和生育期降水的定量关系等,以寻求改善旱地农田水分条件、提高旱地水分生产率和春麦产量的途径。

1 旱地春麦农田水分平衡

农田水分平衡方程一般可表为下式:

$$\Delta W = R + I + g - r - d - ET \quad (1)$$

式中: ΔW 为土壤贮水变化量; R 、 I 、 g 分别为降雨量、灌溉量和地下水补给量; r 、 d 、 ET 分别为地表径流量、渗漏量和农田蒸散量(即作物耗水量)。在黄土高原广大的旱

作春麦区, 由于农田土层深厚, 地下水埋藏很深, 而且生长季节降水稀少 ($<150\text{mm}$), 因此可略去渗漏量 d 、地下水补给量 g 及灌溉量 I 。如系平缓农地, 则径流量 r 也可略去不计。因此, 旱作春麦农田水分平衡方程可简写为:

$$\Delta W = R - ET \quad (2)$$

按 (2) 式将固原近10年的观测资料分析整理如表1、表2。

表1 固原旱作春麦农田水分平衡

年 分	年降水量 (mm)	产 量 (kg/亩)	农田总耗水量 (mm)	降 水 供 给		土 壤 水 供 给		年 型
				量(mm)	占耗水(%)	量(mm)	占耗水(%)	
1980	415	100	299	150	50	149	50	轻早年
1981	506	46	231	164	71	67	29	春早年
1982	282	134	233	79	34	154	66	重早年
1983	508	124	328	275	84	53	16	正常年
1984	524	159	393	332	84	61	16	丰水年
1985	571	147	340	223	66	117	34	正常年
1988	430	129	328	196	60	132	40	轻早年
1989	345	95	252	168	67	84	33	中早年
平均	448	116	301	199	65	102	35	—
变率(%)	17.8	32	19	40	—	40	—	—
黄土区平均	283	91	283	212	75	71	25	—

表2 旱作春麦阶段水分平衡 (固原, 1989年)

生 育 期 项 目	播种 ↓ 出苗	出苗 ↓ 拔节	拔节 ↓ 抽穗	抽穗 ↓ 开花	开花 ↓ 成熟	合计	占总耗水 (%)
阶段总耗水(mm)	27	47	73	44	61	252	100
降水供给量(mm)	18	23	65	1	61	168	67
土壤水供给量(mm)	9	24	8	43	0	84	33
土壤供水占阶段 总耗水(%)	33	51	11	98	0	33	—

由表1可见:

1.1 固原旱作春麦农田总耗水不同年分差异较大。丰水年近400mm, 正常年300mm, 早年230mm左右, 变率18%, 略较全区为丰。据统计, 黄土高原区西部旱地春麦农田耗水在150~450mm之间, 平均283mm (72组资料), 变率为24%。

1.2 固原春麦耗水来源。35%为土壤供给 (变幅为16%~66%), 65%为降水供给, 其土壤供水较全区为多, 约高10%左右。在干旱年分 (如1982年), 土壤供水比例高达66%, 表明土壤底墒在干旱频繁的黄土高原旱作春麦生产中起着重要作用。

1.3 黄土高原春麦区, 由于地理位置偏西北, 年降水量较东部及南部冬麦区低150~200mm, 故秋雨底墒一般不如南部多。固原2m土层有效含水量通常为150~200mm, 而东南部的陕西省武功县2m土层有效含水量可达300~400mm, 故生育期降水对旱作春麦耗水补给意义较冬麦区更为重要。如固原县春麦由播种至收获, 农田总耗水约300mm,

但该时段多年(24年)平均降水约220mm, 占农田总耗水的73%左右, 高出10%, 而南部降水平均补给只占60%。

1.4 春麦农田总耗水300mm中, 不同生育时段农田土壤贮水的供给量视不同发育时期(主要影响因子为作物群体大小与根系深度)和降水的多寡而异(如表2)。拔节—抽穗是第一个耗水高峰期, 其耗水总量占全生育期总耗水的29%, 但该时段降水较多, 土壤耗水仅占时段总耗水的11%; 而耗水44mm的抽穗至开花期, 降水仅1mm, 土壤供给水量占阶段总耗水的98%。

2 旱作春麦的农田耗水特征

2.1 土壤的耗水深度。作物耗水是通过根系吸收的。春麦和冬麦同属须根系作物, 但春麦因无越冬期且生长期短, 故根系不如冬麦发达。据测定, 春麦根系一般下扎深度1.5m左右, 日平均生长速率1.2cm, 但最大分布层在0~50cm土层内^[1]。春麦的耗水深度随作物不同发育时期及根系下扎深度而加深, 如图。春麦由播种(3月21日)至分蘖(5月19日), 主要耗水深度在0~90cm; 分蘖至乳熟(7月14日)耗水深度加深至200cm; 至收获下伸至210cm, 但下伸土层耗水甚微, 不足1%。故可认为: 旱作春麦最大耗水深度约在200cm左右。

2.2 不同土层的耗水比重。从固原正常年(1985年)春麦田全生育期水分资料分析(表3), 总耗水为340mm, 其中降水占66%, 土壤供水占34%。在34%的土壤供水29%由0~100cm土壤供水(占土壤总供水的85%), 仅15%由100~200cm土层土壤供水。由此可见, 生育期降水与0~100cm土壤贮水对春麦产量至关重要。

又不同肥力水平, 对深层贮水的利用程度不一。如固原干旱的1982年, 高肥田块(133kg/亩), 100~200cm供水占总耗水23%; 低肥田块(74kg/亩), 100~200cm土层土壤供水仅11%。这说明, 提高土壤肥力, 有利于根系生长和对深层水分的利用, 故可获得较高产量。

2.3 土壤有效贮水利用率。农田土壤有效贮水利用率可用下式表示:

$$SPWR = \frac{UWET}{SUW} (\%) \quad (3)$$

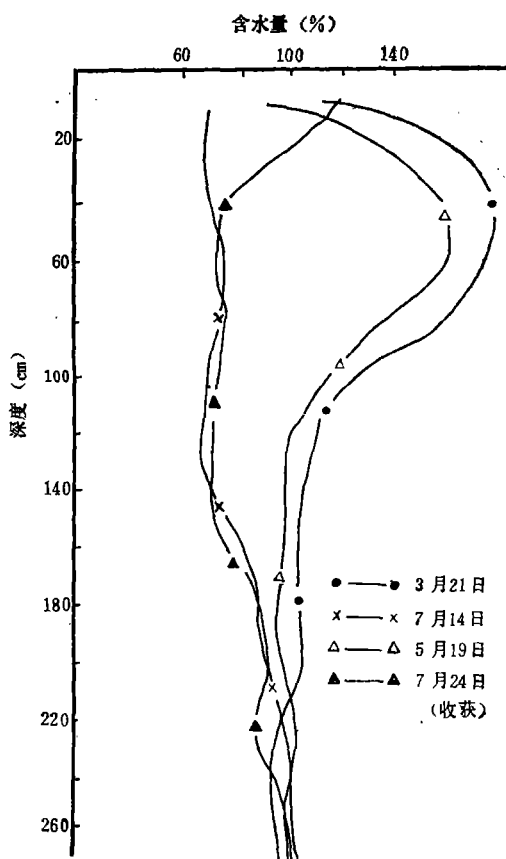


图 旱作麦田土壤含水量剖面图

表3 不同土层土壤耗水比率(固原, 1985年)

水分来源	降水	各土层供水			总耗水 (mm)	土壤总耗 水(mm)
		0~50cm	50~100cm	100~200cm		
供给量(mm)	223	53	45	19	340	117
占耗水(%)	66	16	13	5	100	—
各土层耗水占 土壤耗水(%)	—	45	39	16	—	100

表4 不同时期土壤有效贮水利用率

项 目		播前土壤有效 贮水 SUW (mm)		至土壤含水量最低时						至收获时					
				有效贮水盈 亏量(mm)		$UWET$ (mm)		$SPWR$ (%)		有效贮水盈 亏量(mm)		$UWET$ (mm)		$SPWR$ (%)	
年 分		1982	1983	1982	1983	1982	1983	1982	1983	1982	1983	1982	1983	1982	1983
土 层 深 度 (cm)	0~50	66	58	-6	22	72	36	—	62	15	—	51	—	77	—
	50~100	104	37	32	23	72	14	69	38	40	—	64	—	62	—
	100~150	77	32	44	22	53	10	43	31	58	—	19	—	25	—
	150~200	64	36	47	30	17	6	27	17	48	—	16	—	25	—
	0~50	66	58	-6	22	72	36	109	62	15	—	51	—	77	—
	0~100	172	95	28	45	144	50	84	53	57	—	115	—	67	—
	0~150	249	127	72	67	177	60	71	47	42	—	134	—	54	—
	0~200	314	163	119	89	195	74	62	45	174	—	140	—	45	—

式中:

$SPWR$ 为土壤有效贮水利用率(%) ; $UWET$ 为土壤有效贮水消耗量(mm) ;
 SUW 为土壤有效水分贮存量(mm) 。

该指标可表示作物对有效贮水的利用程度。其值越大,说明作物对土壤有效贮水量的利用程度越大,剩余的有效贮水量越少。对本指标的研究,大多数研究人员都以播种至收获期农田水平衡资料进行分析,但因生育后期降水补给的影响,往往难以得出真实的数字,有时还会误认为土壤贮水远未充分利用。如表4、表5统计资料,1982年(旱年)春麦地水分利用已在6月底、7月初使农田土壤水分含量达到最低,其土壤有效贮水利用率1m土层为84%,2m土层为62%,其中1m土层有效贮水量已接近凋萎湿度。但如以收获时统计,由于降水的补给,土壤有效贮水利用率反而减少,其1m土层降为67%,2m土层降为45%,以致掩盖了1m土壤水分已基本耗尽、2m土壤水分也已耗量过半这一事实。故本文拟以土壤水分最低时的农田土壤有效贮水利用率及剩余贮水量这两个指标来研究土壤贮水的利用程度及有无可能提高的问题。

如表5所列,轻旱的1988年,1m土层最大耗水发生在抽穗时(7月2日),土壤有效水分利用率已达86%,土壤剩余有效水只14mm,已基本耗尽;而2m土层有效水的最大利用时期发生在收获时(7月末),利用率为59%,其1m土层剩余水为17mm,1~2m土层剩余水尚有64mm,相当于42m³,如能促进作物根系早发深扎10cm或增加土壤投肥量,其利用率尚有可能再为提高。

表5 不同时期土壤有效贮水利用率(1988年)

项 目 深 度 (cm)	播前土壤有效 贮水 SUW (mm)	至土壤含水量最低时			至 收 获 时		
		有效贮水盈 亏量(mm)	$UWET$ (mm)	$SPWR$ (%)	有效贮水盈 亏量(mm)	$UWET$ (mm)	$SPWR$ (%)
0~40	32	7	25	78	13	19	59
40~100	70	7	63	88	4	66	94
100~200	94	79	15	16	64	30	32
0~40	32	7	25	78	13	19	59
0~100	102	14	88	86	17	85	83
0~200	196	93	103	53	81	115	59

3 旱作春麦的耗水规律

3.1 耗水进程的动态规律。春麦生育期各时段耗水量如表6。

表6 旱地春麦阶段耗水规律(1989年)

项 目 生 育 期	播种 ↓ 出苗	出苗 ↓ 拔节	拔节 ↓ 抽穗	抽穗 ↓ 开花	开花 ↓ 成熟	合 计
阶段耗水量(mm)	27	47	73	44	61	252
生育期天数(天)	28	40	22	14	29	133
耗水强度(mm/天)	1.0	1.2	3.3	3.1	2.1	—
耗水比率(%)	11	19	29	18	24	100

由表可见,旱作春麦耗水进程与作物生长量的变化类似,前期(出苗—拔节)耗水强度1 mm/天左右;中期(拔节—开花)耗水强度最大,达3.0mm/天;后期(开花—成熟)耗水强度下降为2.0mm/天。

为定量动态显示这一变化,我们以生育期天数为自变量,拟合春麦累积耗水量与发育期天数之关系,得到满意效果。其累积耗水量随生育期天数的变化基本符合Logistic方程:

$$ET(t) = \frac{k}{1 + ae^{-b}} \quad (4)$$

式中: $ET(t)$ 表示播种($t=0$)至生长到第 t 天时旱作春麦的农田耗水量(mm); k 、 a 、 b 为经验系数,经拟合, $k=294.60$ 、 $a=48.37$ 、 $b=0.043$ 。该方程拟合的相关指数 $R=0.999$ 。F检验方差比 $F=3918.4$,均方差 $S_{ET(t)}=4.94$,F检验临界值 $F_{(1,5)}=16.26$,达0.01显著水平。

按文献^[2]的分析, $k=294.60$ 可视为当地气候、土壤条件下该作物品种的最大耗水量。而当年实际耗水为252mm,亏缺43mm。

3.2 旱地春麦产量与农田耗水量的关系。作物产量与农田耗水量(或蒸散量)的关系众说不一,有直线、抛物线及对数型等关系^{[3][4][5]}。我们用74组多年多点旱作春麦试验资料分析后,得出产量与农田耗水呈幂函数关系,其回归方程为:

$$Y = 0.221ET^{1.050} \quad (5)$$

式中: Y 为春麦单产 (kg/mu), ET 为农田耗水量 (mm)。

该方程相关指数 $R = 0.607$, F 检验值 $= 41.9 > F$ 检验临界值 $F_{(1,74)} = 7.0$, 达 0.01 显著水平。

该方程表明, 在农田耗水 100~450mm 之间时, 产量随农田耗水增加近似于正比增高。

3.3 旱地春麦产量与降水和土壤供水的关系。 如前所述, 黄土高原旱地春麦耗水主要来自土壤“底墒”和生育期间的降水。据文献^[6]研究, 固原春麦产量与前年 8~10 月和当年 4~6 月降水呈显著正相关。其上年 8~10 月降水反映了“底墒”的充足与否, 当年 4~6 月降水则说明春麦生长关键时期水分是否得到补给。为定量揭示底墒和生育期降水与产量的关系, 我们建立了下述二元回归方程:

$$Y = -5.018 + 0.213SW + 0.233SR \quad (6)$$

式中: Y 为春麦单产 (kg/mu), SW 为播种时 0~200cm 土层土壤贮水量 (底墒, mm), SR 为 4~6 月降水量 (mm)。

该方程复相关系数 $R = 0.778$, F 检验方差比 $F = 11.49 > F_{(2,18)} = 6.01$, 达 0.01 显著性水平。

又经偏相关分析: 其底墒和 4~6 月降水均与产量呈显著正相关 (偏相关系数分别为 0.686 和 0.553, 达 0.01 显著水平); 与回归方程 (6) 中的回归系数比较表明: 4~6 月降水对产量的正效应稍大于底墒, 这与前述耗水特征与水分平衡部分的分析结论一致。

3.4 产量与水分生产率的关系。 水分生产率系指单位面积上每消耗 1 mm 的水分所能生产出的经济学产量, 即:

$$WPR = \frac{Y}{ET} \quad (7)$$

式中: WPR 指水分生产率 (kg/mm), Y 和 ET 同前。

分析表明: Y 与 WPR 呈直线关系:

$$Y = -1.404 + 318.95WPR \quad (8)$$

该式单相关系数 $r = 0.825 > r_{74}^{0.050} = 0.302$, 达极显著水平。

当 $WPR = 0.0$ 时, 由 (8) 式知 $Y = -1.404$, 接近零。表明随水分生产率提高, 产量呈正比增加。因此, 可以水分生产率作为衡量旱地春麦水分利用的一个较为直观的综合指标。水分生产率每提高 0.1, 亩产量可提高 31.9kg。目前, 黄土高原旱作春麦区平均单产 91kg, 平均水分生产率 0.322kg/mm, 最高 0.55kg/mm, 说明黄土高原旱作春麦水分生产潜力还很大。

4 旱作区麦田水分生产率的改善途径

4.1 运用传统抗旱耕作技术, 提高土壤蓄水量。 “蓄贮天上水, 保住地中墒”是传统旱作农业中抗旱耕作的宝贵经验。早耕深耕以“蓄贮天上水”, 雨后耙耱、冬春打

碾可以有效地“保住地中墒”，以达“秋雨春用”之目的。据测定^[7]，早耕的夏茬地比迟耕的夏茬地0~200cm土层贮水量多49mm；伏耕早10天，0~50cm土层贮水量增加5~7mm。深耕蓄水效果亦很显著，据春麦分蘖期测定^[8]，深耕(23.3cm)比浅耕(13.3cm)0~20cm土层含水量高4.3% (占干土重，下同)。另据1964年7月17日后测定，机耕比牛耕地0~10cm土层含水量高2.2%，10~20cm土层高2.4%。

早耕深耕蓄住了“天上水”，再结合雨后耙耱，冬春镇压，减少水分蒸发，可为春播打下良好的水分条件(表7、表8)。表7表明在秋翻基础上，经过不同镇压、耙耱保墒处理，都能有效地提高表层含水量，从而基本苗数增加，保证了苗齐，为丰产打下了基础。

表7 不同耕作保墒处理对土壤含水量的效应^[9]

处 理 项 目	秋翻不耙不镇压	秋翻春镇压	秋翻镇压	秋翻耙耱
0~130cm 土层含水量(%)	10.8	12.7	14.7	12.1
提 高 (%)	—	18	36	12

表8 春季保墒与表层含水量和春麦出苗^[9]

处 理 项 目	未耙耱	未 碾	碾 一 次	碾二次
0~20cm含水量(%)	8.2	9.2	10.5	11.7
春麦基本苗(株/亩)	18.6	20.5	23.5	28.7

4.2 秋施深施多施肥，是提高水分生产率和旱地作物产量的突破口。 培肥地力，提高水分生产率，挖掘深层土壤贮水是提高旱作春麦、乃至其它作物产量之关键。据辛业全研究，化肥秋施深施，能有效地提高春麦产量和水分生产率(表9、10)。由表9可见，化肥秋施比不施肥的耗水量增加12mm，而亩产则提高50kg，水分生产率提高0.137kg/mm。而同样施肥水平下，秋施比春施耗水减少6mm，而产量提高17kg，水分生产率提高0.061kg/mm。不同施肥量下的产量与水分生产率如表10。与不施肥的

表9 不同施肥方法的产量与水分生产率^[8]

处 理 项 目	亩 产 量 (kg/亩)	耗 水 量 (mm)	水分生产率 (kg/mm)
CK	132	311	0.424
化肥春施	165	329	0.502
化肥秋施	182	323	0.563

相比，氮肥的增产效果比磷肥大，氮磷肥配合施用增产效果最显著，随产量提高水分生产率相应提高。而目前黄土高原春麦产量低的根本原因主要是肥料投入不足(现每亩仅5kg

表10 秋施不同化肥量的产量与水分生产率^[10]

施 肥 量		亩 产 量		耗 水 量	水分生产率
N	P ₂ O ₅	生物学产量	籽粒产量		
(kg/亩)	(kg/亩)	(kg/亩)	(kg/亩)	(mm)	(kg/mm)
2	2	206.2	79.3	305	0.260
0	2	134.3	44.8	230	0.160
2	0	166.9	61.8	291	0.212
0	0	131.0	43.7	285	0.153

左右), 以致水分生产率不高, 1 m以下深层贮水也尚未得到充分利用, 故以化肥为突破口, 对进一步提高粮食产量将起重要作用。

4.3 选育强冬性冬小麦品种, 改春麦为冬麦, 以充分利用深层土壤贮水。春麦根系分布在1.5m左右, 主要分布层在0~50cm之内, 其主要耗水层在0~70cm之间, 整个生育期内0~100cm土层农田总耗水占0~200cm总耗水的90%以上, 其中土壤耗水占0~200cm土壤水的85%以上。100~200cm土层有效贮水利用率即使在干旱的1982年也只50%左右, 仍有90mm左右的有效土壤水分盈余尚可利用。冬小麦根系分布深度近于3.0m, 相当于春麦的2倍, 至春季返青时根系已深入到280cm土层^[11]。由于冬小麦根系这一分布和生长规律, 使其更能适应半干旱地区的土壤水分条件和大气降水规律: 春季吸收深层土壤贮水, 减轻春季干旱危害; 后期利用天然降水, 有利于结实灌浆, 提高千粒重, 从而达到高产。

参 考 文 献

- [1] 甘肃小麦丰产栽培组:《甘肃小麦栽培》, 甘肃人民出版社, 1984年
- [2] 穆兴民: Logistic方程拟合方法,《六盘山科技》, 1986年第2期
- [3] 何塞·R·科尔多互等著, 谢安周等译:《灌溉系统的随机控制》(第二章), 农业出版社, 1985年
- [4] 邓振镛等: 甘肃省干旱农业类型作物水分供求矛盾研究,《干旱地区农业研究》, 1987年第2期
- [5] 韩仕峰: 立体利用土壤水分的生物结构探讨,《水土保持学报》, 1988年第4期
- [6] 中国科学院宁夏回族自治区固原县基地办:《黄土高原典型地区、固原县综合考察与应用》, 宁夏人民出版社
- [7] 李永平等: 宁南山区旱地农田贮水状况与主要作物生产力关系的探讨,《干旱地区农业研究》, 1986年, 第3期
- [8] 杜守宇等: 旱作春麦大面积均衡增产栽培技术的研究、示范与推广,《宁夏农业科技》, 1986年第3期
- [9] 孙纪斌: 有机旱农耕作是农业生产的重要途径,《六盘山科技》, 1983年第1期
- [10] 辛业全等: 旱地作物合理施肥从提高用水效率的研究,《六盘山科技》, 1983年第1期
- [11] 朱显谟:《黄土高原土壤与农业》, 农业出版社, 1989年, 第859页

Ecological Features and Improving Approaches of Moisture in the Spring Wheat Field on Dryland

Mu Xingmin Chen Guoliang Zhao Kexue Guo Baoan

Abstract

In this paper the moisture, data in spring wheat field obtained from several spots and years in Guyuan county and the Loess Plateau were used to systematically study the water balance of spring wheat field on dryland, water consumption law, the distribution of soil water depletion and utilizing degree, the relationship among crop yield, available water stored in soil and precipitation in plant growth period, the approaches and benefits of promoting soil water use efficiency. The results were as follows: (1) The total average water consumption of spring wheat was 300 mm or so, about 400 mm in the year of abundant rainfall and 200 mm in dry year. (2) Soil water supply took up 35% and rainfall in the plant growth period took up 65% in total water consumption. (3) Most of water consumption was from 1 m soil layer, which took up 85% and that in 1~2 m soil layer took up only 15%. (4) The utilizing degree of available water in 1 m layer was more than 85%, the left water was difficult to be utilized and the potential of water use was little. However, the utilizing degree of available water in 1~2 soil layer was about 50%, and more than 60 mm water was not used. (5) The rainfall in plant growth period was more helpful than stored soil water to yield. Both coefficients of regression were 0.233 and 0.213 (kg/mm), respectively. The effects of rainfall in plant growth period on the yield was 9.4% higher than that of stored soil water. (6) The quantities of water consumption were 1.0 mm per day in earlier period, 3.0 mm per day in medium period, 2.0 mm per day in later period and 1.9 mm in total growth period. The process of water consumption fixed to Logistic law. (7) The relationship between yield and total water consumption of spring wheat could be described by power function below the water consumption of 450 mm, and the equation was $Y = a \cdot E \cdot T^b$.