

施氮和垄膜沟播种植对晋南旱地冬小麦水分利用的影响*

谢英荷^{1**} 李廷亮¹ 洪坚平¹ 刘丽萍¹ 庞娇¹ 冯倩¹ 邓树元² 单杰²

(¹山西农业大学资源与环境学院, 山西太谷 030801; ²山西省襄汾县农业委员会, 山西襄汾 041500)

摘要 通过2008—2010年两年的大田试验,研究了基施氮、追氮和垄膜沟播种植对晋南雨养区冬小麦生育期0~2 m土层土壤水分、冬小麦产量和水分利用效率的影响。结果表明:不同处理下冬小麦生育期土壤水分变化趋势一致,表现为播前至返青期稳定升高,返青至抽穗期急剧降低,之后至成熟期又逐渐回升,其中返青期到抽穗期土壤耗水量最大。增施氮肥或追氮可增加土壤耗水量,试验年份生育期间土壤水分变幅较大的活跃层逐渐加深,水分变幅较小的相对稳定层也相对下移,追氮可显著提高旱地冬小麦产量。垄膜沟播种植可减少土壤水分损耗,提高水分利用效率,两年分别比传统种植模式高23.4%和39.1% ($P<0.05$)。垄膜沟播+追氮处理的小麦籽粒产量为3643 kg·hm⁻²,显著高于单一垄膜沟播处理和追氮处理,水肥耦合效应较好。

关键词 旱地 冬小麦 追氮 垄膜沟播种植 水分利用效率

文章编号 1001-9332(2011)08-2038-07 **中图分类号** S512.1, S152.7 **文献标识码** A

Effects of nitrogen application and ridge film furrow planting on water use of winter wheat in dry land of South Shanxi. XIE Ying-he¹, LI Ting-liang¹, HONG Jian-ping¹, LIU Li-ping¹, PANG Jiao¹, FENG Qian¹, DENG Shu-yuan², SHAN Jie² (¹College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China; ²Shanxi Province Xiangfen Agriculture Committee, Xiangfen 041500, Shanxi, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(8): 2038-2044.

Abstract: A 2-year (2008-2010) field experiment was conducted to study the effects of basal dressing nitrogen, topdressing nitrogen, and ridge film furrow planting on the 0-2 m soil moisture status and the grain yield and water use efficiency of winter wheat in rain-fed area of South Shanxi Province. In all treatments, the soil moisture status during winter wheat growth period had the same change trend, being increased steadily from pre-sowing to revival stage and decreased sharply from revival stage to heading stage, and then increased gradually till maturity stage. From revival stage to heading stage, the soil water consumption was the most. Increasing nitrogen basal application rate or topdressing nitrogen increased the soil water consumption, widened the soil moisture active layer, and deepened the relatively stable layer. Topdressing nitrogen increased grain yield significantly; ridge film furrow planting decreased soil water consumption obviously. The water use efficiency under ridge film furrow planting was 23.4% and 39.1% higher than that under conventional planting system in 2009 and 2010 ($P<0.01$). The grain yield under ridge film furrow planting plus topdressing nitrogen was 3643 kg·hm⁻², which was significantly higher than that under single ridge film furrow planting or topdressing nitrogen, displaying a preferable water-fertilizer coupling effect.

Key words: dry land; winter wheat; topdressing nitrogen; ridge film furrow planting; water use efficiency.

旱地小麦在山西省小麦生产中占有十分重要的地位,播种面积占全省小麦播种面积的70%,晋南

是山西省旱地小麦主产区,干旱缺水是限制当地小麦增产的主要因素之一,如何最大限度地利用天然降水,实现水肥高效耦合对提高旱地冬小麦产量具有重要意义。研究表明,地膜覆盖在冬小麦生产中具有增温保墒作用^[1-2],秸秆覆盖能够增加土壤有机

*“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BADA4B09)和国家小麦现代农业产业技术体系专项经费资助。

** 通讯作者。E-mail: xieyinghe@163.com

2010-12-20 收稿,2011-05-29 接受。

质,增强土壤蓄水能力^[3-4],垄膜沟播种植能更有效地减少土壤水分蒸发消耗,利于集水保墒,从而提高作物产量和水分利用效率^[5-6]。施肥特别是氮、磷化肥和有机肥的合理配施能促进冬小麦根系生长发育,使植株充分利用土壤水分,提高作物产量和水分利用效率,起到以肥促水的作用^[7-8]。但有关旱地小麦追施氮肥以及追氮和垄膜沟播种植相结合对土壤水分利用影响的研究尚不多见。为此,本试验在山西省襄汾县旱地冬小麦雨养区,研究了基施氮、追氮和垄膜沟播种植对冬小麦生育期土壤水分变化特征的影响,分析了不同措施下冬小麦的产量和水分利用效率,旨在为晋南及我国旱地冬小麦增产增效提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地基本情况

试验于2008—2010年在山西省临汾市襄汾县伯玉村旱地小麦种植区进行,试验地位于35°53' N, 111°25' E,该区属暖温带大陆性季风气候,年平均日照时数2419 h,有效积温4700 °C,年均气温12.6 °C,无霜期180~210 d,年平均降雨量550 mm,主要集中在7、8、9月。2008年和2009年7—9月的降雨量分别为163.2和168.5 mm;2008—2009年和2009—2010年冬小麦生育期降雨量分别为182.6和142.2 mm。降雨分布见图1,累积降水量是降水量的逐月累加。

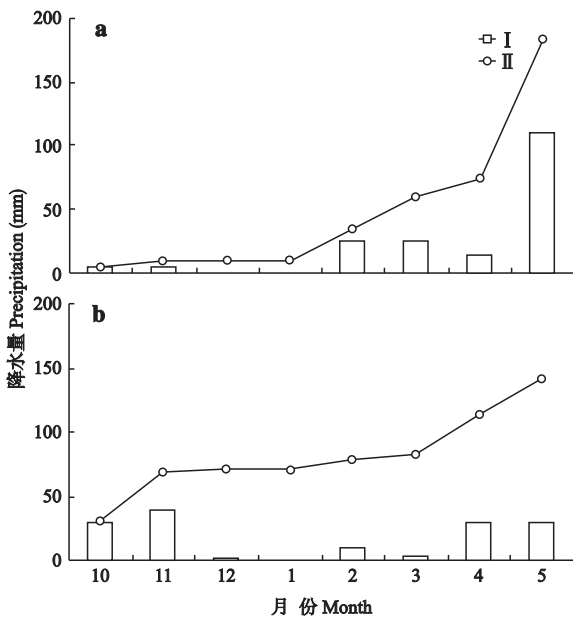


图1 2008—2010年冬小麦生育期降水状况

Fig. 1 Condition of precipitation during the growth period of winter wheat in 2008—2010.

a) 2008—2009; b) 2009—2010. 下同 The same below. I: 降水量 Precipitation; II: 累积降水量 Cumulative precipitation.

供试土壤类型为石灰性褐土,质地为中壤土,pH 8.02,耕层土壤有机质平均含量 $11.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,硝态氮 $14.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $3.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $201.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,容重 $1.14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.2 试验设计

2008年秋试验共设置5个处理,2009年秋试验共设置6个处理(表1),每个处理重复4次,采用随机区组排列,小区面积 $6.25 \text{ m} \times 16 \text{ m} = 100 \text{ m}^2$ 。农户模式为当地农民习惯施肥量,推荐施肥为当地配方施肥。垄膜沟播栽培方式为垄上覆膜、沟内膜侧播种,播种2行,行距20 cm,垄宽35 cm,沟宽30 cm;试验中除垄膜沟播种植外,其他处理均采用露地条播的播种方式。

试验中不施钾肥,磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%),全部做底肥,氮肥为尿素(含N 46%),底施部分与过磷酸钙在小麦播种前均匀撒入相应小区,翻入耕层后耙平。第1季追氮方式是在孕穗期(4月19日)随降雨追肥;第2季追氮方式为顶凌追肥,即在返青期土壤解冻时,用播种耢进行深施追肥,此时上层土壤湿度较大,可借浆溶肥。两年播种时间分别为2008年10月3日和2009年9月25日,收获时间分别为2009年6月3日和2010年6月5日,冬小麦生育期不进行灌溉。供试品种为当地主栽抗旱品种临旱6号,两年播量均为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2009年7—9月为夏休闲期。

1.3 测定项目与方法

2008—2009年和2009—2010年生长季分别于播前(10月2日和9月23日)、返青期(3月10日和3月6日)、拔节期(3月29日和4月2日)、抽穗期(4月27日和5月1日)、灌浆期(5月19日和5月20日)、成熟期(6月3日和6月5日)采集2 m深土

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	肥料用量 Fertilizer application ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)				种植方式 Planting mode
	2008—2009		2009—2010		
	N	P_2O_5	N	P_2O_5	
CK	0	120	0	120	CFP
CF	127.5	120	127.5	120	CFP
RF	165	120	165	120	CFP
RF+TN	65+30	120	105+60	120	CFP
RFFP	165	120	165	120	RFFP
RFFP+TN	-	-	165+33	120	RFFP

CK:对照 Control; CF:农户模式 Conventional fertilization; RF:推荐施肥 Recommended fertilization; TN:追氮 Topdressing nitrogen; RFFP:垄膜沟播 Ridge film furrow planting; CFP:传统平作 Conventional flat planting. 下同 The same below.

壤样品,每20 cm为一层,用烘干法测定土壤含水量.垄膜沟播处理的土样采于垄沟播种行.小麦成熟时,在各小区中央收获3 m×10 m面积脱粒计产.土壤贮水量(mm)=土壤质量含水量(%)×土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)×土层厚度(cm)/10,0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm土壤容重分别为1.15、1.49、1.31和1.26 $g \cdot cm^{-3}$,80 cm以下土层按1.26 $g \cdot cm^{-3}$ 计算.

$$ET_{1-2} = \Delta W + P_0 + K - R$$

式中: ET_{1-2} 为阶段耗水量(mm); ΔW 为该阶段土壤贮水量的变化量(mm),即土壤贮水消耗量; R 为地表径流量(mm); P_0 为有效降水量(mm); K 为该时段内的地下水补给量(mm).本试验所在地平坦,同时地下水埋藏很深,因此地表径流和地下水补给量可忽略不计.水分利用效率 $WUE (kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}) = \text{小麦籽粒产量} / \text{耗水量}$.

1.4 数据处理

试验数据用Excel软件整理作图,并用DPS数据处理统计软件进行统计分析,Duncan新复极差法进行多重比较.

2 结果与分析

2.1 冬小麦生育期内土壤贮水量的阶段性变化

由图2可知,不同处理下冬小麦生育期土壤水

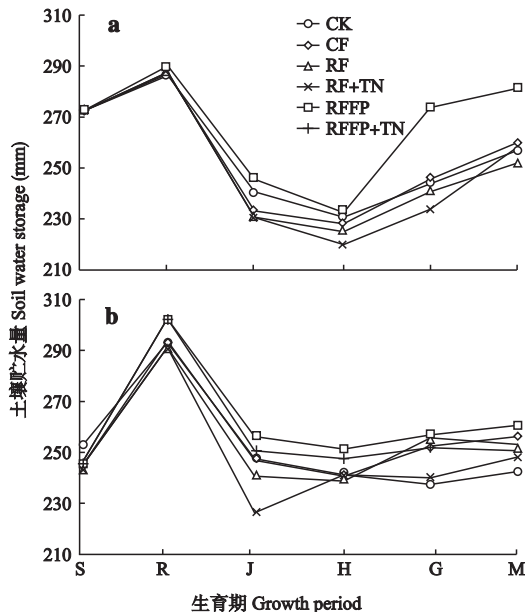


图2 不同处理下冬小麦生育期0~2 m土壤贮水量变化
Fig.2 Variation of soil water storage at 0~2 m layer during growth period of winter wheat under different treatments.

S:播前 Pre-sowing; R:返青期 Revival stage; J:拔节期 Jointing stage; H:抽穗期 Heading stage; G:灌浆期 Grain filling stage; M:成熟期 Maturity stage. CK:对照 Control; CF:农户模式 Conventional fertilization; RF:推荐施肥 Recommended fertilization; TN:追氮 Topdressing nitrogen; RFFP:垄膜沟播 Ridge film furrow planting.

分均呈低-高-低-高的变化趋势.从播前到返青期,2个年度0~2 m土层各处理的平均贮水量分别增加16.0和50.1 mm,土壤水分收入大于支出.2009年11月的强降雪(降水量为39.7 mm)在减少地面水分蒸发的同时,增加了土壤蓄水量,所以2009—2010年播前到返青期土壤贮水量增量明显高于2008—2009年.冬小麦从播前到返青期具体包括雨季土壤水分补偿期、秋季缓慢失墒期和冬季墒情稳定期^[9].从返青期开始到拔节期、抽穗期,冬小麦生殖生长和营养生长并进,是耗水最多的时期,2 m土壤平均贮水量两年分别降低60.4和52.2 mm,土壤水分支出大于收入;从抽穗期到成熟期,2 m土壤平均贮水量呈回升趋势.总体上,土壤水分动态与降水动态相符,降水量多的时期土壤贮水量高,反之亦然.

2.2 不同处理对冬小麦生育期内土壤水分变化的影响

2.2.1 0~2 m土壤贮水量和耗水量 整个冬小麦生育期垄膜沟播处理土壤贮水量均高于其他处理,不同处理在播前到拔节期差异不明显,从拔节期到收获期存在明显差异(图2,表2).抽穗期是冬小麦生长期中土壤水分含量最低的时期.两年度抽穗前各处理平均耗水量分别占全生育期耗水量的61%和85%.

两年度垄膜沟播处理从播前到抽穗期的耗水量分别为112.6和106.7 mm,较农户模式分别低3.6%和7.9%.从抽穗期到成熟期土壤贮水量较其

表2 不同处理下冬小麦各生育期土壤耗水量

Table 2 Soil water consumption during growth period of winter wheat in different treatments

年份 Year	处理 Treatment	播种-返青期 Sowing-revival period	返青-抽穗期 Revival-heading period	抽穗-成熟期 Heading-maturity period	全生育期 Whole growth period
2008—2009	CK	19.5a	95.1b	83.0a	197.6a
	CF	18.8a	98.1b	77.6ab	190.9a
	RF	18.3a	101.4ab	82.4a	202.1a
	RF+TN	18.3a	106.4a	71.3b	196.0a
	RFFP	15.4b	97.2b	60.2c	172.8b
	RFFP+TN	22.1b	84.5a	9.7d	126.4c
2009—2010	CK	38.3a	85.4a	28.2a	151.9a
	CF	28.8b	87.0a	13.8c	129.6bc
	RF	31.9ab	86.6a	14.6c	133.1bc
	RF+TN	31.9ab	83.8a	22.3b	137.9b
	RFFP	22.1b	84.5a	9.7d	126.4c
	RFFP+TN	22.1b	88.4a	25.6ab	136.1b

同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different small letters in the same column meant significant difference at 0.05 level.

他处理增幅更大,其中,收获期两年度贮水量分别比农户模式高 8.0% 和 5.8%,耗水量分别比农户模式低 22.4% 和 29.7% ($P < 0.05$). 表明垄膜沟播种植可有效减少土壤水分地面蒸发,增加水分入渗,提高土壤贮水能力,具有良好的集水保墒作用.

旱地冬小麦增施氮肥或追氮可增加作物耗水量,使土壤贮水量减少. 2008—2009 年,拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期推荐施肥处理较农户模式 0~2 m 土壤贮水量分别减少 2.5、2.9、5.1 和 7.7 mm. 但由于灌浆期降雨量丰沛,除垄膜沟播处理外其他处理间耗水量无显著差异,平均值为 197 mm. 2009—2010 年,整个冬小麦生育期除灌浆期外,推荐施肥处理 0~2 m 土壤贮水量均低于农户模式. 推荐施肥+追氮处理全生育期耗水量为 137.9 mm,比推荐施肥处理高 4%,垄膜沟播+追氮处理耗水量为 136.1 mm,比垄膜沟播处理高 7.8%.

将冬小麦生育期进程和耗水层次结合分析,冬小麦返青时各处理 0~100 cm 土层水分与播前相比均有明显变化,100~200 cm 土层基本相同. 返青后各处理耗水深度逐渐加深,至抽穗期 0~200 cm 土层水分含量较返青期均有不同程度的降低,以对照和垄膜沟播处理降低最少. 说明不同处理在同一生育期对冬小麦耗水深度影响不大,但耗水程度不同.

2.2.2 0~2 m 土壤水分垂直变化 冬小麦生育期土壤贮水量和不同深度的土壤含水量随根系消耗、土面蒸发和降水补给的变化而变化,且土壤水分收支随深度的变化呈现明显的层次. 一般通过划分标准差(S)或变异系数(CV)来确定土壤水分的垂直变化特征^[10-11],但对于同一项目不同的样本,标准差缺乏可比性,所以实际划分中常以变异系数为准. 通过聚类分析可将土壤剖面水分变幅大致划分为 4 个层次^[9,12]:速变层($CV > 43\%$)、活跃层($29\% < CV < 43\%$)、次活跃层($25\% < CV < 29\%$)和相对稳定层($CV < 25\%$).

由表 3 可知,随土层深度的增加各处理土壤容积含水量变异系数不断减小,稳定性增强. 随施氮量的增加,对照、农户模式、推荐施肥处理活跃层逐渐加深,相对稳定层也相对下移. 对照处理 40 cm 以下为相对稳定层,而农户模式和推荐施肥处理在 60 cm 处仍为活跃层,且推荐施肥处理的相对稳定层下移到 80~200 cm. 可见,施氮促进了冬小麦对土壤水分的吸收利用,这可能是由于施氮提高了土壤水势,降低了土壤的水溶比,最低土壤水势层有下移趋势,使原来深层不易被利用的水分变成有效水,增强

表 3 不同处理下冬小麦生育期 0~2 m 土层土壤水分的垂直变化
Table 3 Vertical variations of soil water content at 0~2 m layer during growth period of winter wheat under different treatments

处理 Treatment	土层 Soil layer (cm)	标准差 S	变异系数 CV (%)	层次 Layer
CK	0~20	5.4	49.7	I
	20~40	5.0	36.7	II
	40~200	1.0~1.8	9.5~18.5	IV
CF	0~40	5.0~5.1	45.1~61.2	I
	40~60	3.6	34.1	II
	60~200	1.39~3.8	11.0~24.1	IV
RF	0~20	4.5	41.6	I
	20~60	3.2~4.7	29.3~38.8	II
	60~80	2.6	25.5	III
	80~200	1.1~1.9	7.1~13.0	IV
RF+TN (2008—2009)	0~20	5.1	48.6	I
	20~60	2.9~3.6	37.6~42.7	II
	60~80	2.8	26.3	III
	80~200	1.2~1.9	8.2~11.6	IV
RF+TN (2009—2010)	0~40	5.0~5.5	49.9~53.8	I
	40~60	3.6	29.7	II
	60~80	3.1	28.7	III
	80~200	1.6~2.5	14.4~23.9	IV
RFFP	0~40	5.5~5.6	43.7~58.5	I
	40~80	2.9~3.1	27.0~30.9	II
	80~200	1.0~1.7	8.0~14.9	IV
RFFP+TN	0~40	5.0~5.7	43.1~48.8	I
	40~60	3.4	32.4	II
	60~80	3.0	28.5	III
	80~200	1.1~2.2	8.6~17.4	IV

I:速变层 Fast-changing layer; II:活跃层 Active layer; III:次活跃层 Second active layer; IV:相对稳定层 Relatively stable layer. 表中除标注处理外均为两年的平均值. The values were average of the two years except the marked treatments.

了土壤的供水能力^[13];同时氮肥促进了小麦地上部分的生长,从而使植株蒸腾耗水量增加.

2008—2009 年随降雨追氮处理的土壤水分垂直变化特征与推荐施肥处理相似,这是由于孕穗期追肥后到成熟期之间降雨量多,土壤水分消耗不明显. 2009—2010 年顶凌追氮处理与推荐施肥处理相比,速变层由 0~20 cm 增加到 0~40 cm,说明顶凌追氮同样可促进冬小麦中后期的生长发育,加剧植株水分蒸腾,使水分消耗速变层加深.

垄膜沟播和垄膜沟播+追氮处理的速变层位于 0~40 cm 土层,相对稳定层在 80 cm 以下. 速变层较推荐施肥处理增加了 20 cm,这可能是由于地膜覆盖下的水热条件促进了冬小麦根系生长和下扎,植株中下层根系比例增加^[14-15],干旱时可加剧对深层土壤水分的消耗,当降雨量多时沟播种植方式可有效接纳雨水,增加入渗,有效补偿土壤水分消耗.

表 4 不同处理下冬小麦产量、产量构成因素和水分利用效率

Table 4 Yield, yield components and water use efficiency of winter wheat in different treatments

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	生物产量 Biological yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗数 Spike number ($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Kernel number per spike	千粒重 1000-grain mass (g)	水分利用效率 Water use efficiency ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)
2008—2009	CK	1599c	3579d	382b	18a	35.3a	8.09d
	CF	1802b	4157c	404b	19a	35.3a	9.44c
	RF	1918ab	4297bc	403b	20a	36.2a	9.49c
	RF+TN	2053a	4591ab	453a	21a	35.4a	10.47b
	RFFP	2014a	4773a	472a	21a	35.4a	11.65a
2009—2010	CK	1402e	3342d	341e	16d	28.4c	9.23e
	CF	2452d	6532c	432d	19c	30.7bc	18.92d
	RF	2963c	7649b	474c	23b	32.6ab	22.26c
	RF+TN	3397b	8450a	491b	23b	32.8ab	24.64b
	RFFP	3324b	8377a	486b	24ab	34.4a	26.31ab
	RFFP+TN	3643a	8567a	527a	25a	34.6a	26.76a

2.3 不同处理对冬小麦产量和水分利用效率的影响

由表 4 可知,随施氮量的增加,两年度冬小麦籽粒产量和生物量均提高,且 2009—2010 年对照、农户模式、推荐施肥处理之间差异达显著水平 ($P < 0.05$);2008—2009 年追氮处理的籽粒产量和生物量分别较农户模式增加 13.9% 和 10.5% ($P < 0.05$),2009—2010 年推荐施肥+追氮处理的籽粒产量分别比农户模式和推荐施肥处理高 38.6% 和 14.7% ($P < 0.05$).可见,旱地冬小麦生育中期追氮是增产的重要技术措施.垄膜沟播处理籽粒产量和生物量两年分别比农户模式高 11.7%、14.8% 和 35.6%、28.2% ($P < 0.05$).垄膜沟播种植与推荐施肥+追氮处理间的增产效果无显著差异,但垄膜沟播+追氮处理的小麦籽粒产量高达 $3643 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于单一垄膜沟播处理和追氮处理,实现了水肥高效耦合.

小麦产量构成的三要素中,除对照外各处理的穗粒数和千粒重差异不明显,但通过追氮或垄膜沟播种植可显著增加穗数.不同处理间穗数的变异系数较穗粒数和千粒重大,两年分别为 9.0% 和 14.2%,所以提高小麦穗数是提高当地小麦产量的关键.

两年试验结果表明,垄膜沟播种植可减少小麦生育期耗水量,提高水分利用效率.2008—2009 年垄膜沟播处理耗水量在所有处理中最低,为 172.8 mm(表 2),水分利用效率比农户模式高 23.4% ($P < 0.05$);2009—2010 年垄膜沟播处理耗水量仅为 126.4 mm,水分利用效率为 $26.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,显著高于相同施肥量的推荐施肥处理.

3 讨 论

本试验结果表明,不同栽培措施下冬小麦生育期间土壤水分变化趋势一致,从播前到返青期,土壤水分收入大于支出,到抽穗期降至最低,之后呈回升趋势,土壤水分最大损耗期为返青期到抽穗期,2 年度最低土壤平均贮水量分别为 227.3 和 243.4 mm.黄明镜等^[16]和黄斌等^[17]研究表明,冬小麦进入拔节至抽穗期,叶面积增大,蒸腾速率增加,耗水逐渐增多,土壤贮水量急剧下降,与本研究结果相同.但也有研究表明,冬小麦灌浆期是生育期土壤贮水量最低的时期^[18].结论不同的原因与土壤底墒、生育期降水量和降水时间分布有关,但大部分研究表明,冬小麦在返青期土壤贮水量有所增加,之后由于进入旺盛生长期,贮水量显著降低^[19-20].

水分是制约旱区作物生长的主要因子,地面覆盖能有效减少土壤水分蒸发.大量研究表明,地膜覆盖、秸秆覆盖^[1-4,21]和垄上覆膜沟内覆草^[22]均可显著提高作物产量和水分利用效率.但有研究表明,秸秆覆盖或覆草形成的特殊农田小气候会在早期产生低温效应,影响冬小麦出苗及生长,同时农田秸秆覆盖下冬小麦能否增产与水肥关系密切,雨养农田氮肥投入较少时显著增产,氮肥用量较高时产量低于未覆盖处理^[23-24].本试验中,垄膜沟播处理 2 个年度耗水量在所有处理中均最低,水分利用效率显著高于农户模式,表明垄膜沟播种植可有效降低土壤水分损耗和提高作物产量,具有较好的集雨保墒作用,是解决干旱地区土壤水分紧缺问题的重要措施.

水分供应不足是旱地小麦产量的主要限制因子,而养分不足也会在很大程度上限制水分作用的

发挥,因此,旱地农业生产的关键是水分和养分的高效耦合,水肥高效耦合不仅是量上的配合,也与作物的生育时期关系密切^[25-26]。本研究表明,在当地自然降水条件下,增施氮肥(0~165 kg·hm⁻²)可增强土壤耗水强度,提高作物产量及水分利用效率。施氮增加土壤水消耗通常是由于施用氮肥促进了小麦地上部分生长,使植株蒸腾耗水增加所致^[27]。本试验根据冬小麦的氮素吸收累积规律,将部分基施氮后移改为追氮,籽粒产量达 3397 kg·hm⁻²,显著高于相同施肥量的推荐施肥处理,产量可提高到覆膜水平。2009—2010 年试验中,垄膜沟播+追氮处理的小麦籽粒产量为 3643 kg·hm⁻²,显著高于单一垄膜沟播处理和追氮处理,水肥耦合效应较好。

研究表明,充足的底墒可促进小麦形成深根系,增加冬前分蘖,提高小麦产量和水分利用效率^[28-30]。本试验 2009—2010 年冬小麦生育期降水量为 142.2 mm,比 2008—2009 年低 40.4 mm,但冬小麦籽粒产量平均增加了 55.3%,主要是由于 9 月到 12 月的降水量比 2008—2009 年同期增加了 60.9 mm。可见,冬前充足的土壤墒情是旱地小麦实现高产的保证。本试验同时表明,冬小麦抽穗前的耗水量占全生育期的 60%~85%。总体来看,当地旱作冬小麦生产应注重前期保墒中期补氮。

参考文献

- [1] Ramakrishna A, Tam HM, Wani SP, *et al.* Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam. *Field Crops Research*, 2006, **95**: 115-125
- [2] Zhang SL, Li PR, Yang XY, *et al.* Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize. *Soil and Tillage Research*, 2011, **112**: 92-97
- [3] Canqui HB, Lal R. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till. *Soil and Tillage Research*, 2007, **95**: 240-254
- [4] Cook HF, Valdes GSB, Lee HC. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays* L. *Soil and Tillage Research*, 2006, **91**: 227-235
- [5] Chen H-L (陈辉林), Tian X-H (田霄鸿), Wang X-F (王晓峰), *et al.* Effects of different cultivation models on soil water, soil temperature and yield during the winter wheat growth in the Weibei Dry Highland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(9): 2424-2433 (in Chinese)
- [6] Li W-Q (李吾强), Wen X-X (温晓霞), Gao M-S (高茂盛), *et al.* Studies on water and physiological effect of winter wheat with plastic film mulching in semi-

- arid farmland. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica* (西北农业学报), 2008, **17**(5): 146-151 (in Chinese)
- [7] Guo S-L (郭胜利), Dang T-H (党廷辉), Hao M-D (郝明德). Effects of fertilization on wheat yield, NO₃⁻-N accumulation and soil water content in semi-arid area of China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(4): 754-760 (in Chinese)
- [8] Fan TL, Wang SY, Tang XM, *et al.* Grain yield and water use in a long-term fertilization trial in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 2005, **76**: 36-52
- [9] Wang X-F (王晓峰), Tian X-H (田霄鸿), Chen Z-H (陈自惠), *et al.* Effects of mulching and fertilization on winter wheat field soil moisture in dry highland region of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(5): 1105-1112 (in Chinese)
- [10] Li H-J (李洪建), Wang M-B (王孟本), Chai B-F (柴宝峰). Spatial and temporal characteristics of soil moisture dynamics in Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(4): 515-519 (in Chinese)
- [11] You W-Z (尤文忠), Zeng D-H (曾德慧), Liu M-G (刘明国), *et al.* Soil moisture characteristics at the boundary of forestland-grassland in hilly area of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(6): 967-971 (in Chinese)
- [12] Jia Z-Q (贾志清), Song G-P (宋桂萍), Li Q-H (李清河), *et al.* Study on soil moisture dynamic variation law of typical watershed in the southern mountainous area of Ningxia Hui Autonomous Region. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 1997, **19**(3): 15-19 (in Chinese)
- [13] Zhang F-C (张富仓), Kang S-Z (康绍忠), Li Z-J (李志军), *et al.* Effects of fertilization on the properties of soil water supply in dryland. *Journal of Shenyang Agricultural University* (沈阳农业大学学报), 2004, **35**(5): 408-410 (in Chinese)
- [14] Lü L-H (吕丽红), Wang J (王俊), Ling L (凌莉), *et al.* The integrated effect of plastic film mulching, soil water storage amount before sowing and nitrogen fertilizer on spring wheat root growth. *Journal of Northwest A & F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报·自然科学版), 2003, **31**(3): 26-30 (in Chinese)
- [15] Fan T-L (樊廷录), Wang Y (王勇), Wang L-M (王立明), *et al.* Yield-increasing mechanism and key cultivation techniques of winter wheat with perennial film mulching in dryland of East Gansu. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 1999, **17**(2): 1-8 (in Chinese)
- [16] Huang M-J (黄明镜), Jin F-S (晋凡生), Chi B-L (池宝亮), *et al.* A study on characteristics of water consumption in winter wheat under plastic covering. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 1999, **17**(2): 20-23 (in Chinese)

- [17] Huang B (黄斌), Zhang H-F (张洪芬), Qiang Y-Z (强玉柱). Analysis of the speed of soil moisture loss in the growth period of crops in the Loess Plateau of Xifeng. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2008, **26**(1): 241-245 (in Chinese)
- [18] Yao Y-Q (姚宇卿), Wang Y-H (王育红), Lü J-J (吕军杰), *et al.* Effects of different conservation tillage practices on winter wheat growth and water use efficiency. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture* (农业系统科学与综合研究), 2008, **24**(2): 249-256 (in Chinese)
- [19] Hou X-Q (侯贤清), Han Q-F (韩清芳), Jia Z-K (贾志宽), *et al.* Effects of different tillage practices in summer fallow period on soil water and crop water use efficiency in semi-arid areas. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2009, **27**(5): 52-58 (in Chinese)
- [20] Gao Y-J (高亚军), Yang J-L (杨君林), Chen L (陈玲), *et al.* Effect of cultivation methods, N fertilizer rate and winter wheat planting density on soil water utilization in dryland. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2007, **25**(3): 45-50 (in Chinese)
- [21] Singh B, Humphreys E, Eberbach PL, *et al.* Growth, yield and water productivity of zero till wheat as affected by rice straw mulch and irrigation schedule. *Field Crops Research*, 2011, **121**: 209-225
- [22] Liao Y-C (廖允成), Wen X-X (温晓霞), Han S-M (韩思明), *et al.* Effect of mulching of water conservation for dryland winter wheat in the Loess Tableland. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2003, **36**(5): 548-552 (in Chinese)
- [23] Gao Y-J (高亚军), Zheng X-F (郑险峰), Li S-Q (李世清), *et al.* Requirements of water and nitrogenous fertilizer to increase winter wheat yield under straw mulch. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2008, **24**(1): 55-59 (in Chinese)
- [24] Gao Y-J (高亚军), Li S-X (李生秀). Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2005, **21**(7): 15-19 (in Chinese)
- [25] Zhai B-N (翟丙年), Li S-X (李生秀). Study on the key and sensitive stage of winter wheat responses to water and nitrogen coordination. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(6): 1188-1195 (in Chinese)
- [26] Gao Y-J (高亚军), Li S-X (李生秀). Analysis of the effect of water and fertilizer on crop production in farmland of arid zone in Northern China. *Engineering Science* (中国工程科学), 2002, **4**(7): 22-27 (in Chinese)
- [27] Hu Y-N (胡亚妮), Liu W-Z (刘文兆), Wang J (王俊), *et al.* Photosynthetic characteristics, yield and water use of winter wheat under different nitrogen and phosphorus fertilization on Loess Tableland. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2007, **21**(6): 159-161 (in Chinese)
- [28] Li FM, Yan X, Li FR, *et al.* Effects of different water supply regimes on water use and yield performance of spring wheat in a simulated semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 2001, **47**: 25-35
- [29] Wang Y (王勇). Effect of soil stored water before sowing on yield of winter wheat mulched with plastic film in dryland. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2003, **11**(3): 117-120 (in Chinese)
- [30] Wang Z-X (王正祥), Zhang G-G (张国刚), Xia S-Y (夏时云). Black film of the winter wheat yield and moisture-retaining properties of the impact. *Journal of Hebei Agricultural Sciences* (河北农业科学), 2007, **11**(2): 5-6 (in Chinese)

作者简介 谢英荷,女,1958年生,教授. 主要从事土壤肥力与环境方面的研究. E-mail: xieyinghe@163.com

责任编辑 张凤丽
