

晋南旱地麦田夏闲期土壤水分和养分变化特征*

李廷亮¹ 谢英荷^{1*} 洪坚平¹ 冯倩¹ 孙丞鸿² 王志伟³

(¹山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801; ²宁波市鄞州区姜山镇农业技术推广站, 浙江宁波 315191; ³太原市农产品质量安全监测中心, 太原 030000)

摘要 2009—2011年在晋南旱地冬小麦种植区,研究了传统施肥(CF)、推荐施肥(RF)及垄膜沟播(RFFP)处理结合秸秆覆盖措施对夏闲期(6—9月)2 m土层土壤水分、 NO_3^- -N,以及0~40 cm土层速效磷、速效钾含量的影响.结果表明:夏闲期降水可补充旱地麦田2 m土层土壤在冬小麦生长季所消耗的水分,其中94%以上蓄水量集中在0~140 cm土层,休闲效率为6%~27%.夏闲期降水易引起 NO_3^- -N下移;357~400 mm的降水量可使 NO_3^- -N淋移到100 cm土层,积累峰值在20~40 cm土层.夏闲期秸秆覆盖或地膜与秸秆配合覆盖可有效提高0~40 cm土层速效磷和速效钾含量,3个夏闲期累计增加量分别为17%~45%和36%~49%.不同处理间以垄膜沟播+沟内覆盖秸秆的二元覆盖模式蓄水培肥效果最佳,3个夏闲期2 m土层土壤累计蓄水215 mm,累计矿化氮 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,耕层土壤速效磷和速效钾含量分别累计增加2.7和 $83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于推荐施肥和传统施肥处理.推荐施肥和传统施肥处理对土壤水分、养分变化的影响无显著差异.

关键词 晋南旱地 夏闲期 土壤水分 土壤养分

文章编号 1001-9332(2013)06-1601-08 **中图分类号** S158, S512 **文献标识码** A

Change characteristics of soil moisture and nutrients in rain-fed winter wheat field under different fertilization modes in Southern Shanxi of China during summer fallow period. LI Ting-liang¹, XIE Ying-he¹, HONG Jian-ping¹, FENG Qian¹, SUN Cheng-hong², WANG Zhi-wei³ (¹College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China; ²Agro-technical Extension Station of Jiangshan Town, Yinzhou District, Ningbo 315191, Zhejiang, China; ³Taiyuan Monitoring Center for Agricultural Products Quality and Safety, Taiyuan 030000, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(6): 1601–1608.

Abstract: In 2009–2011, a field experiment was conducted in a rain-fed winter wheat field in Southern Shanxi of China to study the effects of different fertilization modes on the change characteristics of soil moisture and nitrate-N contents in 0–200 cm layer and of soil available phosphorus (Oslen-P) and potassium contents in 0–40 cm layer during summer fallow period (from June to September). Three fertilization modes were installed, *i. e.*, conventional fertilization (CF), recommended fertilization (RF), and ridge film furrow planting (RFFP) combined with straw mulch. The results showed that the rainfall in summer fallow period could complement the consumed water in 0–200 cm soil layer in dryland wheat field throughout the growth season, and more than 94% of the water storage was in 0–140 cm soil layer, with the fallow efficiency ranged from 6% to 27%. The rainfall in summer fallow period caused the soil nitrate-N moving downward. 357–400 mm rainfall could make the soil nitrate-N leaching down to 100 cm soil layer, with the peak in 20–40 cm soil layer. Straw mulching or plastic film with straw mulch in summer fallow period could effectively increase the Oslen-P and available K contents in 0–40 cm soil layer, and the accumulative increment in three summer fallow periods was 16–45% and 36–49%, respectively. Among the three modes, the binary coverage mode of RFFP plus furrow straw mulching had the best effect in maintaining soil water and fertility. The accumulative water storage and mineral N in 0–200 cm soil layer

* 公益性行业(农业)科研专项(201303104)、国家小麦现代产业技术体系建设专项、山西农业大学科技创新基金项目(201231)和山西农业大学引进人才科研启动基金项目(XB2011007)资助。

** 通讯作者. E-mail: xieyinghe@163.com

2012-12-13 收稿, 2013-04-08 接受。

in three summer fallow periods were up to 215 mm and $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and the accumulative Olsen-P and available K contents in plough layer were increased by $2.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $83\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, being significantly higher than those in treatments CF and RF. There were no significant differences in the change characteristics in the soil moisture and nutrients between treatments CF and RF.

Key words: dryland in Southern Shanxi; summer fallow period; soil moisture; soil nutrient.

温度和降水会影响旱地土壤水分及养分的运移转化.我国北方地区绝大部分降水集中在7—9月.在晋南,夏闲期降水占全年降水量的60%以上,该期间光照资源丰富且雨热同期,土壤中水分和养分运移量大,养分转化也比较活跃.因此,研究夏闲期土壤水分和养分变化特征对冬小麦高效用水及合理施肥具有重要意义.水分供应不足是旱地小麦稳产高产的主要限制因子,在黄土高原地区,自然降水的20%~50%形成初级生产力,10%~15%水土流失,60%~70%形成无效蒸发^[1],降水利用效率低,导致农业生产力低且不稳定.夏闲期降水对土壤底墒有一定的补偿作用.侯贤清等^[2]研究表明,在宁夏黄土高原丘陵沟壑区,免耕与深松轮耕可以显著提高休闲期降水蓄水效率和小麦整个生育期降水利用效率. Guo等^[3]在黄土高原雨养区的研究也表明,7—9月降水量与次年冬小麦产量呈显著相关关系.黄土高原旱区土壤多贫瘠,有机质含量低.为了提高产量,氮肥施用量相对偏大,造成了 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 在土壤中的大量残留,夏闲期高强度的降水使表层土壤的 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 下移到较深层次^[4],而深层土壤 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 对作物的贡献率很低,导致氮素浪费及环境污染^[5-6].夏闲期土壤温度和水分会影响磷素、钾素的固定和释放及其生物有效性^[7-8].目前有关水分和养分利用及运移转化规律的研究主要集中在小麦生育期间,有关旱地麦田夏闲期土壤水分和养分变化特征的研究报道较少.为此,本研究通过3年大田试验,系统地研究了晋南旱地麦田夏闲期2 m土层土壤水分、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$,以及0~40 cm土层速效磷(Olsen-P)和速效钾含量的变化特征,以期为我国晋南旱地冬小麦高产高效提供一定的理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

试验于2009—2011年在山西省临汾市襄汾县伯玉村旱地小麦种植区($35^{\circ}53'\text{ N}$, $111^{\circ}25'\text{ E}$)进行.该区属暖温带大陆性季风气候,年均日照时数2419 h,有效积温 $4700\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均气温 $12.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜

期180~210 d,年均降雨量550 mm,其中7—9月降水量占全年降水量的60%以上.2009、2010和2011年夏闲期(6—9月)的降雨量分别为195.7、357.3和400.1 mm.供试土壤类型为石灰性褐土,质地为中壤土,pH 8.02,土壤耕层有机质平均含量 $11.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.88\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ $14.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $5.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,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

试验共设置3个处理:传统施肥(CF)、推荐施肥(RF)和垄膜沟播(RFFP).传统施肥为当地农民习惯施肥: $\text{N }127.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 127.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;推荐施肥为当地配方施肥: $\text{N }165\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 127.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,均不施用钾肥.垄膜沟播处理是在推荐施肥的基础上进行垄膜沟播栽培(垄上覆膜、沟内侧膜播种,播种2行,行距20 cm,垄宽35 cm,沟宽30 cm).其他处理均采用露地条播的播种方式.试验过程中小麦收获后留茬30 cm,秸秆全部覆盖还田,传统施肥和推荐施肥处理的秸秆平铺于麦茬间,垄膜沟播处理夏闲期间不揭膜,秸秆均匀覆盖于垄沟间.具体秸秆还田量及养分含量见表1.每个处理重复4次,采用随机区组排列,小区面积

表1 试验地秸秆还田情况
Table 1 Condition of straw returning in experimental field

年份 Year	处理 Treatment	秸秆还田量 Amount of straw returning	养分含量 Content of nutrients ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)		
			N	P_2O_5	K_2O
2009	CF	2354b	6.21a	0.67a	9.57a
	RF	2380b	6.99a	0.59a	10.74a
	RFFP	2759a	6.45a	0.57a	11.38a
2010	CF	4080c	5.94a	0.56a	11.24a
	RF	4687b	6.68a	0.58a	11.74a
	RFFP	5052a	6.84a	0.58a	12.64a
2011	CF	2987c	5.66b	0.64a	17.44a
	RF	3303b	7.81a	0.78a	18.47a
	RFFP	3995a	7.18ab	0.85a	16.28a

CF:传统施肥 Conventional fertilization; RF:推荐施肥 Recommended fertilization; RFFP:垄膜沟播 Ridge film furrow planting. 同一年度同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Values followed by different letters in the same column meant significant difference in the same year at 0.05 level.

6. 25 m×16 m=100 m².

1.3 测定项目及方法

分别于小麦收获期(2009 年 6 月 3 日、2010 年 6 月 5 日和 2011 年 6 月 5 日),下季冬小麦播种前(2009 年月 23 日、2010 年 10 月 1 日和 2011 年 9 月 28 日)在各小区采集 2 m 深土壤样品,每 20 cm 为一层,垄膜沟播处理的土样采于垄沟播种行. 测定各层土壤水分和 NO₃⁻-N 含量及 0~40 cm 土层速效磷和速效钾含量.

称取 5 g 新鲜土样,加入 50 mL 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂振荡 30 min,过滤,用 AA3 连续流动分析仪测定 NO₃⁻-N 含量^[9]. 用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提(水土比 20:1),过滤,用 AA3 连续流动分析仪测定速效磷含量^[10],用 1 mol·L⁻¹ CH₃COONH₄ 浸提(水土比 10:1),火焰光度法测定速效钾含量^[11]. 用烘干法测定土壤含水量.

1.4 计算公式及统计方法

土壤贮水量(mm)=土壤质量含水量(%)×土壤容重(g·cm⁻³)×土层厚度(cm)/10;休闲效率=夏季休闲期土壤 2 m 土层贮水增加量(mm)/夏季休闲期降水量(mm)×100%^[12];土壤硝态氮累积量(kg·hm⁻²)=土层厚度(cm)×土壤容重(g·cm⁻³)×土壤硝态氮含量(g·kg⁻¹)/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·cm⁻³,80 cm 以下土层按 1.26 g·cm⁻³计算.

用 Excel 2003 软件整理数据和作图,用 DPS 统计软件进行统计分析,采用 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验(α=0.05).

2 结果与分析

2.1 麦田夏闲期不同处理 2 m 土层土壤水分变化

夏闲期(6—9 月)降水可以补充 2 m 土层土壤在冬小麦生长季所消耗的水分,其中 94% 以上的蓄水集中在 140 cm 以上土层(图 1). 3 季冬小麦收获期 2 m 土层土壤水分垂直分布特征基本一致,2009 年收获期因采样前期降雨(2009 年 5 月降水量为 109.3 mm),各处理 0~40 cm 土层平均含水量较 2010 和 2011 年分别升高 93.1% 和 63.5%;40~120 cm 土层含水量变化不显著且均比较低;120~200 cm 土层含水量开始逐渐增加,接近播前含水量. 表明当地旱作冬小麦生育期耗水主要发生在 0~120 cm 土层,年度间土层耗水规律相同.

麦田土壤夏闲期蓄水量随降水量增加而增加

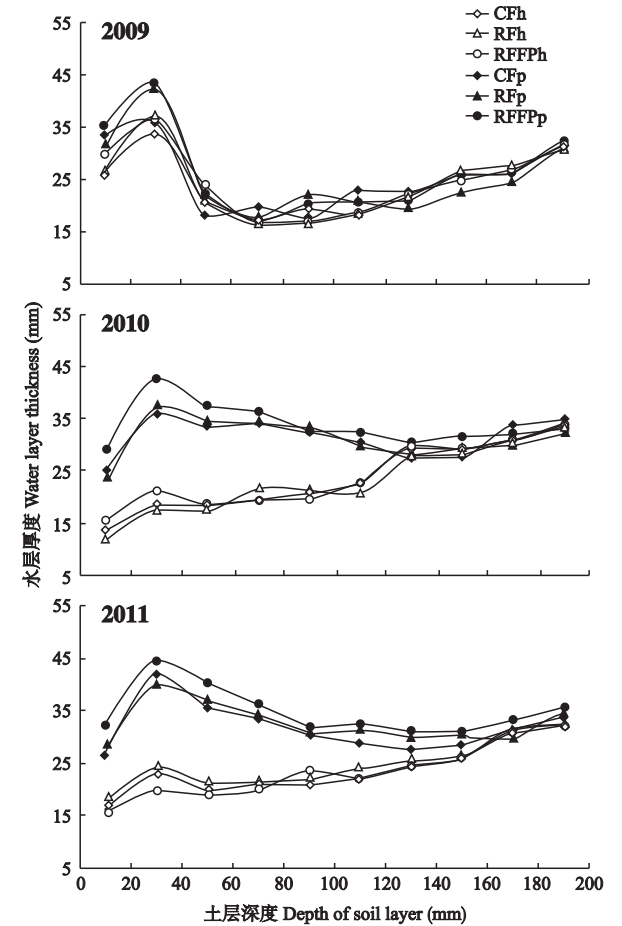


图 1 麦田夏闲期不同处理 0~2 m 土层土壤水分的变化
Fig.1 Variation characteristics of soil water at 0~2 m layer during summer fallow period of wheat field under different treatments.

CF:传统施肥 Conventional fertilization; RF:推荐施肥 Recommended fertilization; RFFP:垄膜沟播 Ridge film furrow planting. h:收获期 Harvest period; p:播前 Pre-sowing.

(表 2),195.7 mm 降水量(2009 年)对 2 m 土层土壤的补墒量平均为 13 mm,主要在 0~40 cm 土层,休闲效率为 6%. 降水量增至 357~400 mm(2010、2011 年)时,明显提高了 0~120 cm 土层的水分含量,蓄水量在 77~108 mm,休闲效率为 20%~27%. 3 季冬小麦播前 2 m 土层土壤贮水量分别为在 257、320 和 330 mm 左右.

方差分析结果表明,传统施肥处理和推荐施肥处理夏闲期贮水量差异不显著,处理间以垄膜沟播处理夏闲期蓄水效果最好,3 个夏闲期 2 m 土层土壤累计蓄水量 215 mm,较传统施肥和推荐施肥处理高 25% 左右(P<0.05),表明垄膜沟播种植后,夏闲期沟内覆盖秸秆较常规秸秆还田覆盖能更有效地接纳和储蓄雨水,而施氮量的提高对夏闲期蓄水量影响不明显.

2.2 麦田夏闲期不同处理 2 m 土层土壤 NO₃⁻-N 变化

随着种植年限增加,2 m 土层土壤 NO₃⁻-N 残留

量逐渐增加(表 3),2009 年收获期为 135 ~ 157 kg · hm⁻²,至 2011 年收获期增加到 202 ~ 229 kg · hm⁻²,增加幅度为46% ~ 58% ,NO₃⁻-N积累主

表 2 麦田夏闲期不同处理 2 m 土层土壤蓄水量和休闲效率

Table 2 Soil water storage amount and fallow efficiency of wheat field during summer fallow period under different treatments

处理 Treat- ment	2009		2010		2011	
	土壤蓄水量 Soil water storage (mm)	休闲效率 Fallow efficiency (%)	土壤蓄水量 Soil water storage (mm)	休闲效率 Fallow efficiency (%)	土壤蓄水量 Soil water storage (mm)	休闲效率 Fallow efficiency (%)
CF	12.2a	6.2a	77.4b	21.7b	82.5b	20.6b
RF	11.5a	5.9a	80.4ab	22.5ab	79.0b	19.8b
RFFP	14.0a	7.1a	92.4a	25.9a	108.8a	27.2a

表 3 麦田夏闲期不同处理 0 ~ 2 m 土层的土壤 NO₃⁻-N 的变化

Table 3 Variation of NO₃⁻-N at 0~2 m soil layer during summer fallow period of wheat field under different treatments (kg · hm⁻²)

年份 Year	土壤深度 Depth of soil (cm)	收获期 Harvest period			播前 Pre-sowing		
		CF	RF	RFFP	CF	RF	RFFP
2009	0 ~ 20	26.79a	26.78a	28.39a	26.59b	28.39ab	30.97a
	20 ~ 40	28.09c	32.93b	39.08a	35.92c	40.46b	50.49a
	40 ~ 60	22.05b	24.47ab	26.57a	25.96a	27.16a	28.96a
	60 ~ 80	11.38b	14.93a	15.59a	12.87b	16.06a	14.86ab
	80 ~ 100	12.52a	12.48a	12.87a	12.57b	13.88ab	16.31a
	100 ~ 120	5.14b	7.73ab	8.71a	6.15b	8.54a	9.71a
	120 ~ 140	8.51a	8.27a	6.45a	7.92a	9.92a	8.61a
	140 ~ 160	4.02a	4.44a	5.11a	6.77b	7.00b	9.78a
	160 ~ 180	8.78a	6.48ab	5.02b	7.60a	6.67a	5.99a
	180 ~ 200	8.08a	5.11b	8.75a	8.00a	4.19b	6.09ab
	合计 Total	135.37b	143.61ab	156.54a	150.35b	162.28b	181.76a
2010	0 ~ 20	29.74a	30.53a	32.13a	32.15b	35.30ab	39.24a
	20 ~ 40	33.30b	44.91a	42.61b	37.57b	50.21a	57.02a
	40 ~ 60	31.75a	30.97a	31.70a	35.11b	39.92a	40.61a
	60 ~ 80	23.44a	23.84a	21.18a	27.41a	25.81a	25.38a
	80 ~ 100	12.92a	15.94a	12.83a	15.74b	18.65a	15.45b
	100 ~ 120	6.59a	8.08a	7.04a	8.52a	8.79a	8.92a
	120 ~ 140	8.73a	7.19a	7.55a	9.05a	8.62a	8.31a
	140 ~ 160	6.61a	6.88a	6.69a	9.00a	8.53a	7.73a
	160 ~ 180	7.38a	8.43a	6.50a	6.15a	7.37a	6.16a
	180 ~ 200	7.52a	7.98a	7.25a	6.05a	6.99a	5.02a
	合计 Total	167.99b	184.75a	175.46ab	186.74b	210.18a	213.84a
2011	0 ~ 20	35.74b	40.52a	42.27a	35.24c	40.3b	48.03a
	20 ~ 40	40.3b	55.91a	55.45a	45.19b	57.31a	60.83a
	40 ~ 60	38.75a	39.97a	40.91a	43.65a	45.04a	45.14a
	60 ~ 80	29.44a	30.84a	27.98a	32.49a	36.88a	33.45a
	80 ~ 100	16.29b	21.59a	17.65ab	18.65b	22.02a	20.76ab
	100 ~ 120	9.36a	9.46a	9.88a	10.84a	10.04a	10.08a
	120 ~ 140	8.82a	9.1a	9.21a	9.23a	8.46a	10.93a
	140 ~ 160	8.65a	6.72a	8.97a	9.16a	9.06a	9.84a
	160 ~ 180	7.47a	6.83a	7.68a	9.63a	7.55ab	7.1b
	180 ~ 200	7.3ab	6.02b	9.02a	7.17b	8.17ab	9.09a
	合计 Total	202.12b	226.96a	229.02a	221.25b	244.83a	255.25a

同行同一时期不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same line meant significant difference in the same period at 0.05 level. 下同 The same below.

要发生在 100 cm 以上土层. 3 个年度间 100 ~ 200 cm 土层 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 积累量差异不明显, 均值为 $39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 夏季良好的水热条件有利于土壤氮素的矿化^[13], 3 年均表现为播种期(9—10 月)土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 积累量高于收获期(同年 6 月), 3 个夏闲期 2 m 土层土壤矿化氮量分别为 15 ~ 30、18 ~ 38、19 ~ 26 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中 71% ~ 97% 的增加量集中在 100 cm 以上土层, 以 20 ~ 40 cm 土层增加最为明显.

2010、2011 年播种期 2 m 土层土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 积累量与 2009 年相比有下移趋势, 其 40 ~ 100 cm 土层较收获期的增加量($37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 高于 2009 年($16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 增加幅度随深度增加而逐渐降低. 这是因为 6—9 月的降水引起了 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 向下淋移, 且移动强度与该期间的降水量呈正相关.

收获期, 垄膜沟播或推荐施肥处理 2 m 土层土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 残留量显著高于传统施肥处理, 说明试验增加的氮肥用量很大程度上以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 形式残留于土壤中. 各处理夏闲期氮素矿化量以垄膜沟播处理最高, 3 个夏闲期累计达 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2 m 土层土壤矿化氮量分别较推荐施肥和传统施肥处理高 46% ~ 62% 和 37% ~ 105%, 差异达显著水平. 推荐施肥和传统施肥处理间矿化氮量无显著差异.

2.3 麦田夏闲期不同处理 0 ~ 40 cm 土层土壤速效磷变化

试验地磷素水平比较低, 0 ~ 40 cm 土层速效磷含量在 $4.76 \sim 8.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但总体上随各处理种植年限的延长和施氮量的增加呈逐渐增加趋势(表 4). 经过 3 个夏闲期和 2 个生长季(2009—2011 年), 不同处理 0 ~ 20 cm 土层速效磷含量增幅在 31.3% ~ 46.4%, 20 ~ 40 cm 土层增幅在 24.9% ~ 40.8%, 其中 0 ~ 20 cm 土层 3 个夏闲期速效磷增幅基本相同, 分别为 5.3% ~ 14.0%、4.8% ~ 11.5%

表 4 麦田夏闲期不同处理 0 ~ 40 cm 土层土壤速效磷的变化
Table 4 Variation of available P at 0–40 cm soil layer during summer fallow period of wheat field under different treatments ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

年份 Year	土壤深度 Depth of soil (cm)	收获期 Harvest period			播前 Pre-sowing		
		CF	RF	RFFP	CF _p	RF	RFFP
2009	0 ~ 20	5.71a	5.61a	5.86a	6.02b	5.91ab	6.68a
	20 ~ 40	5.19a	4.76a	4.80a	5.28a	4.96a	4.76a
2010	0 ~ 20	6.52a	6.24a	6.71a	6.83ab	6.56b	7.58a
	20 ~ 40	5.42a	5.15a	5.06a	5.43a	5.53a	5.77a
2011	0 ~ 20	7.15a	7.07a	7.16a	7.50b	7.67b	8.58a
	20 ~ 40	5.96a	5.73a	5.83 a	6.48 a	6.44a	6.76a

和 4.9% ~ 14.2%, 而 20 ~ 40 cm 土层速效磷的增加主要发生在 2010 和 2011 年的夏闲期. 以上结果表明, 夏闲期降水结合秸秆覆盖可有效地提高土壤耕层土壤速效磷含量, 20 ~ 40 cm 土层速效磷的增加可能主要与降水量对上层土壤中磷素的淋洗有关, 表现为随降水量的增加而增加.

传统施肥和推荐施肥处理的耕层(0 ~ 20 cm)土壤速效磷含量差异不显著, 夏闲期秸秆覆盖后速效磷增加量也基本相同, 表明在 $127.5 \sim 165.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮范围内, 施氮量对耕层土壤速效磷含量变化没有影响. 夏闲期“垄膜+沟内覆盖秸秆”二元覆盖模式可有效提高耕层土壤速效磷含量, 累计增加 $2.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 3 个夏闲期分别增加 14.0%、13.0% 和 12.7%, 2011 年播种期垄膜沟播处理耕层土壤速效磷含量显著高于其他两个处理, 原因可能是其良好的水热条件促进了耕层土壤有机磷的矿化及无机磷的转化和解析. 不同处理在 20 ~ 40 cm 土层的速效磷含量无显著差异.

2.4 麦田夏闲期不同处理 0 ~ 40 cm 土层土壤速效钾变化

试验地耕层土壤速效钾含量在 $168 \sim 235 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 20 ~ 40 cm 土层土壤速效钾含量在 $129 \sim 173 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 钾素水平较高(表 5). 夏闲期充足降水和秸秆覆盖增加了土壤中速效钾含量, 3 个夏闲期耕层土壤速效钾增加量分别为 19 ~ 22、24 ~ 32 和 22 ~ 29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 20 ~ 40 cm 土层增加量分别为 13 ~ 20、13 ~ 23 和 16 ~ 21 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 钾素增加的原因一方面可能来源于缓效钾的有效化, 另一方面可能与秸秆中离子态钾的溶解淋洗有关^[14].

“垄膜+沟内覆盖秸秆”二元覆盖模式可有效提高土壤速效钾含量. 试验期间垄膜沟播处理 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 土层土壤速效钾含量分别提高了 30%

表 5 麦田夏闲期不同处理 0 ~ 40 cm 土层土壤速效钾的变化
Table 5 Variation of available K at 0–40 cm soil layer during summer fallow period of wheat field under different treatments ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

年份 Year	土壤深度 Depth of soil (cm)	收获期 Harvest period			播前 Pre-sowing		
		CF	RF	RFFP	CF	RF	RFFP
2009	0 ~ 20	168.4a	170.5a	180.7a	187.5a	191.5a	202.7a
	20 ~ 40	134.3a	130.2a	129.2a	147.5a	145.3a	149.3a
2010	0 ~ 20	172.6b	180.7ab	186.6a	197.0b	206.9b	218.2a
	20 ~ 40	135.1a	138.1a	142.1a	148.8b	156.8ab	165.1a
2011	0 ~ 20	186.7b	190.2b	206.0a	208.2b	212.4b	235.0a
	20 ~ 40	140.9b	148.9ab	152.8a	162.8b	165.3ab	173.4a

和 34%, 其中 3 个夏闲期的累计增加量分别为 83 和 64 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 2011 年播前耕层土壤速效钾含量与其他处理的差异达显著水平. 推荐施肥和传统施肥处理结合秸秆还田在一定程度上提高了土壤速效钾含量, 但两者差异不显著, 表明在 127.5 ~ 165.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮范围内, 施氮量对土壤速效钾含量的变化没有影响.

每经过 1 个生长季后, 收获期土壤速效钾含量均比播前有所下降, 下降幅度为 5% ~ 8%. 钾素减少一方面是因为作物吸收携出, 而秸秆还田并不能在一个生长季内全部分解释放出钾素; 另一方面可能是因为生育期的干湿交替促进了速效钾的晶层固定^[15]. 但总体上, 随着秸秆还田和缓效钾有效化, 各处理 0 ~ 40 cm 土层土壤速效钾含量均有所提高, 增加幅度为 21% ~ 34%.

3 讨 论

自然降水是旱地土壤贮水的唯一来源. 黄土高原旱区年降水量的 60% 以上集中在夏闲期 (6—9 月). 但是旱地土壤多贫瘠, 自身蓄水能力差, 夏闲期土面蒸发强烈, 播前土壤底墒差, 所以旱地冬小麦的抗旱增产更应该考虑夏闲期集雨增墒. 杨海迪等^[16]研究表明, 渭北旱塬夏闲期覆盖地膜有利于土壤水库扩蓄增容, 提高土壤底墒, 保墒率在 68% 以上. 本研究表明, 夏闲期降水可补充晋南旱地麦田 2 m 土层土壤在冬小麦生长季消耗的水分, 播前土壤水分恢复深度取决于夏闲期降水量, 195.7 mm 的降水量主要恢复了 0 ~ 40 cm 土层土壤水分, 357 ~ 400 mm 的降水量恢复了 0 ~ 120 cm 土层土壤水分. 而廖允成等^[17]研究表明, 黄土台塬夏闲期降水量超过 350 mm 时, 可使 2 m 土层土壤水分得到较好恢复, 这可能与土壤质地构型等环境条件差异有关. 本研究结果表明, 当地旱作冬小麦生育期耗水主要发生在 0 ~ 120 cm 土层, 年度间土层耗水规律相同.

与常规秸秆还田覆盖相比, 垄膜沟播种植夏闲期不揭膜配合沟内秸秆覆盖更能有效接纳和保蓄雨水. 这是因为垄上覆膜可阻断水分从垄上蒸发损失, 并可将降水汇集至沟内; 而沟内秸秆覆盖可减少沟内水分蒸发, 增加土壤水分入渗^[12]. 本研究中, 垄膜沟播处理 3 个夏闲期 2 m 土层土壤累计蓄水 215 mm, 较传统施肥和推荐施肥处理提高 25% 左右 ($P < 0.05$); 樊廷录^[18]研究表明, 夏闲期起垄覆膜可在更大程度上促进雨水富集入渗.

本研究中, 休闲效率年际差异较大, 2010、2011

年为 21% ~ 27%, 而 2009 年仅为 6%. 分析其原因: 休闲效率不仅与土体构型、土壤孔隙状况、夏闲期降水量有关, 而且在很大程度上取决于夏闲期降水量的分布、降水强度以及由空气干燥程度引起的土面蒸发量. 如果夏闲期 (6—9 月) 降水量少且多以暴雨形式集中分布在前期, 后期分布比例小, 再加上期间光照强度大、蒸发量大, 休闲效率就会偏低.

张福锁等^[19]对我国 2000—2005 年不同区域作物研究结果表明, 目前我国主要粮食作物氮肥利用率在 10.8% ~ 40.5%, 平均为 27.5%. 旱地作物由于受到水分限制, 氮肥利用率更低且年际差异更大, 导致 NO_3^- -N 在土壤中大量残留. NO_3^- -N 不易被土壤胶体吸附, 很容易随降水向下淋失^[4,20], 同时因下移深度增加, NO_3^- -N 对产量的贡献率逐渐降低^[5]. 本研究结果表明, 随种植年限增加, 晋南旱地麦田 2 m 土层土壤 NO_3^- -N 残留量逐渐增加, 3 年累计增加 46% ~ 58%. 夏闲期降水易引起 NO_3^- -N 下移, 357 ~ 400 mm 的降水量可使 NO_3^- -N 淋移到 100 cm 土层, 下移深度小于蓄水深度, 积累峰值在 20 ~ 40 cm 土层. 关于旱地土壤 NO_3^- -N 淋移强度与降水量的数量关系很复杂, 夏季强烈的降水并不一定引起 NO_3^- -N 的强烈淋失, 而低强度、长时间的降水则能引起氮的大量损失, 但土壤中 NO_3^- -N 的下移距离往往小于土壤水分下渗深度^[21]. 本研究还表明, 夏闲期水热条件有利于土壤氮素矿化, 垄膜沟播处理 3 个夏闲期累计矿化氮量达 90 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于推荐施肥和传统施肥处理.

磷素在石灰性旱作土壤中易被固定, 移动性差. 但土壤温度和水分可以影响土壤磷的有效性. 当土壤水分充足时, 土壤磷有效性高; 土壤温度增加也可增加土壤磷的有效性, 土壤速效磷含量随季节变化波动较大^[7]. 有研究表明, 作物生育期覆盖地膜由于显著提高了作物产量, 导致土壤中速效磷含量下降, 但差异不显著^[22-23]. 秸秆覆盖可以提高耕层土壤有机质及速效养分含量^[24-25]. 本研究表明, 夏闲期覆盖地膜或秸秆可提高耕层土壤速效磷含量, 3 个夏闲期累计增加 17% ~ 45%, 不同处理间以夏闲期垄膜+沟内覆盖秸秆二元覆盖模式增加量最高, 3 个夏闲期增幅分别为 14.0%、13.0% 和 12.7%, 使该处理耕层土壤速效磷含量显著高于其他两个处理. 这与李富翠等^[26]的研究结论相同. 其原因一方面可能是夏闲期覆盖良好的水热条件可促使有机磷矿化和矿质态磷、吸附态磷的有效化, 另一方面可能是秸秆分解释放了一定的磷素.

黄土高原地区受气候和成土母质等因素影响, 土壤风化程度较南方低, 当前土壤速效钾、缓效钾和全钾含量均比较高, 秸秆还田也可补充一定量的钾素, 减缓作物对土壤钾素的耗竭^[11,27]. 土壤钾素的固定和释放受土壤水分、温度等因素的影响^[14-15]. 本研究表明, 晋南旱地麦田钾素含量丰富, 且夏闲期充足的降水和秸秆覆盖增加了土壤速效钾含量, 垄膜+沟内覆盖秸秆较单纯秸秆覆盖处理土壤速效钾增幅更大, 试验期间 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤速效钾含量分别提高了 30% 和 34%, 2011 年播前耕层土壤的速效钾含量显著高于其他处理. 李艳丽等^[28]研究也表明, 覆膜结合覆草能显著提高土壤速效钾含量.

试验期间, 垄膜沟播处理夏闲期 2 m 土层土壤累计蓄水量较传统施肥和推荐施肥处理高 25% 左右 ($P<0.05$), 且经过 3 个夏闲期和 2 个生长季, 垄膜沟播处理耕层土壤速效磷和速效钾含量也显著高于其他两个处理, 表明夏闲期的蓄水效应可在一定程度上促进耕层土壤速效养分的增加. 传统施肥和推荐施肥处理夏闲期 2 m 土层土壤贮水量、矿化氮量以及耕层土壤速效磷和速效钾含量均无显著差异, 表明在 127.5~165.0 kg·hm⁻² 施氮范围内, 施氮量对土壤蓄水量和养分变化没有明显影响. 但正常年份推荐施肥量下的小麦产量要显著高于传统施肥处理^[29], 说明施氮量的增加有利于旱作小麦生长发育和产量形成.

参考文献

- [1] Kang X-L (亢秀丽), Wang J-L (王娟玲), Ma A-P (马爱平), *et al.* Influence of rainwater harvesting pattern of winter wheat on soil water dynamic and water use efficiency. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2010, **24**(4): 167-170 (in Chinese)
- [2] Hou X-Q (侯贤清), Wang W (王 维), Han Q-F (韩清芳), *et al.* Effects of rotational tillage during summer fallow on wheat field soil water regime and grain yield. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(10): 2524-2532 (in Chinese)
- [3] Guo SL, Zhu HH, Dang TH, *et al.* Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China. *Geoderma*, 2012, **189/190**: 442-450
- [4] Ju X-T (巨晓棠), Zhang F-S (张福锁). Nitrate accumulation and its implication to environment in north China. *Ecology and Environment* (生态环境), 2003, **12**(1): 24-28 (in Chinese)
- [5] Fan J (樊 军), Hao M-D (郝明德). Utilization of soil water and nitrogen resources in dry land under a long-term fertilizer experiment. *Chinese Journal of Eco-*

- Agriculture* (中国生态农业学报), 2003, **11**(2): 57-60 (in Chinese)
- [6] Zhao BZ, Zhang JB, Flury M, *et al.* Groundwater contamination with NO₃⁻-N in a wheat-corn cropping system in the North China Plain. *Geoderma*, 2007, **17**: 721-731
- [7] Liu J-L (刘建玲), Zhang F-H (张凤华). The progress of phosphorus transformation in soil and its influencing factors. *Journal of Agricultural University of Hebei* (河北农业大学学报), 2000, **23**(3): 36-45 (in Chinese)
- [8] Cong R-H (丛日环), Li X-K (李小坤), Lu J-W (鲁剑巍). Advances in research on influence factors of soil potassium transformation. *Journal of Huazhong Agricultural University* (华中农业大学学报), 2007, **26**(6): 907-913 (in Chinese)
- [9] Li T-L (李廷亮), Xie Y-H (谢英荷), Hong J-P (洪坚平), *et al.* Effects of topdressing nitrogen and plastic film mulched ridge-sowing furrow cultivation on nitrogen utilization of winter wheat on rainfed lands in Southern Shanxi. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(6): 1300-1308 (in Chinese)
- [10] Zhang Y-L (张英利), Xu A-M (许安民), Shang H-B (尚浩博), *et al.* Determination study and improvement of nitrate and available phosphorus in soil by Continuous Flow Analytical System. *Soils and Fertilizers Sciences in China* (中国土壤与肥料), 2008(2): 77-80 (in Chinese)
- [11] Wang H-T (王宏庭), Jin J-Y (金继运), Wang B (王 斌), *et al.* Effects of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(4): 801-808 (in Chinese)
- [12] Xue C (薛 澄), Wang Z-H (王朝辉), Li F-C (李富翠), *et al.* Effects of different fertilization and mulching cultivation methods on yield and soil water use of winter wheat on Weiwei Dryland. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2011, **44**(21): 4395-4405 (in Chinese)
- [13] Zhao C-S (赵长盛), Hu C-X (胡承孝), Huang W (黄 巍), *et al.* The mineralization of nitrogen from intensively irrigated vegetable field of Central China: A soil core lysimeter study. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2012, **43**(4): 883-889 (in Chinese)
- [14] Dai Z-G (戴志刚), Lu J-W (鲁剑巍), Li X-K (李小坤), *et al.* Nutrient release characteristic of different crop straws manure. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(6): 272-276 (in Chinese)
- [15] Liang C-H (梁成华), Wei L-P (魏丽萍), Luo L (罗磊). Advance in research on mechanical of potassium release and fixing in soils. *Advance in Earth Science* (地球科学进展), 2002, **17**(5): 679-684 (in Chinese)
- [16] Yang H-D (杨海迪), Hai J-B (海江波), Jia Z-K (贾志宽), *et al.* Effect of different plastic-film mulching in

- the whole growth period on soil moisture and water use efficiency of winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2011, **29**(2): 27–34 (in Chinese)
- [17] Liao Y-C (廖允成), Han S-M (韩思民), Wen X-X (温晓霞). Study on characteristics of soil moisture and its use efficiency in dryland wheat in the loess tableland. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2002, **10**(3): 55–58 (in Chinese)
- [18] Fan T-L (樊廷录). Study on mechanism of developing water potential in inner field rainwater harvesting of dryland. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2003, **10**(1): 98–100 (in Chinese)
- [19] Zhang F-S (张福锁), Wang J-Q (王激情), Zhang W-F (张卫峰), *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(5): 915–924 (in Chinese)
- [20] Chuan L-M (串丽敏), Zhao T-K (赵同科), An Z-Z (安志装), *et al.* Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2010, **26**(11): 200–205 (in Chinese)
- [21] Yuan X-M (袁新民). Nitrate nitrogen leaching and factors influencing it. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2000, **17**(4): 46–52 (in Chinese)
- [22] Chen L-F (陈丽芳), Wang Y (王莹), Wang J-K (汪景宽). Effects of long-term mulching and fertilization on phosphorus in soil and corn. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2006, **37**(1): 76–79 (in Chinese)
- [23] Shi W-J (史文娇), Wang J-K (汪景宽), Zhu F-C (祝凤春), *et al.* Effects of fertilization and mulching with plastic film on profile distribution and dynamics of Olsen-P in brown earth. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2007, **13**(2): 248–253 (in Chinese)
- [24] Bu Y-S (卜玉山), Miao G-Y (苗果园), Zhou N-J (周乃健), *et al.* Analysis and comparison of the effects of plastic film mulching and straw mulching on soil fertility. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2006, **39**(5): 1069–1075 (in Chinese)
- [25] Wu J (武际), Guo X-S (郭熙盛), Lu J-W (鲁剑巍), *et al.* Effects of continuous straw mulching on soil physical and chemical properties and crop yield in paddy-upland rotation system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(3): 587–594 (in Chinese)
- [26] Li F-C (李富翠), Zhao H-B (赵护兵), Wang Z-H (王朝辉), *et al.* Effects of straw mulching and planting green manure on soil water, nutrient and winter wheat yield on Weibei Plateau, China. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2011, **30**(9): 1861–1871 (in Chinese)
- [27] Liu R-L (刘荣乐), Jin J-Y (金继运), Wu R-G (吴荣贵), *et al.* Study on the characteristics of potassium cycling in different soil-crop systems in northern China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2000, **6**(2): 123–132 (in Chinese)
- [28] Li Y-L (李艳丽), Zhao H-B (赵化兵), Xie K (谢凯), *et al.* Effects of different soil managements on pear orchard soil biological properties and nutrient contents. *Soils* (土壤), 2012, **44**(5): 788–793 (in Chinese)
- [29] Xi Y-H (谢英荷), Li T-L (李廷亮), Hong J-P (洪坚平), *et al.* Effects of nitrogen application and ridge film furrow planting on water use of winter wheat in dry land in Southern Shanxi. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(8): 2038–2044 (in Chinese)

作者简介 李廷亮,男,1982年生,讲师.主要从事土壤肥力与环境方面的研究. E-mail: litingliang021@126.com

责任编辑 张凤丽
