

旱地小麦全膜覆土穴播技术高效施肥机理研究

刘生学¹, 张 静², 刘广才²

(1. 会宁县农业技术推广中心, 甘肃 会宁 730700; 2. 甘肃省农业技术推广总站, 甘肃 兰州 730020)

摘 要: 采用多点田间小区试验研究了不同旱作区小麦全膜覆土穴播技术的高效施肥机理。结果得出, 随年降雨量由 350→600 mm 增加, 全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾最佳施肥量分别由 N 103.2 kg·hm⁻²→181.3 kg·hm⁻²、P₂O₅ 70.3 kg·hm⁻²→134.1 kg·hm⁻²、K₂O 32.4 kg·hm⁻²→73.0 kg·hm⁻² 显著增加; 最高施肥量分别由 N 113.2 kg·hm⁻²→214.4 kg·hm⁻²、P₂O₅ 76.1 kg·hm⁻²→153.0 kg·hm⁻²、K₂O 40.1 kg·hm⁻²→88.0 kg·hm⁻² 显著增加。全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用率和利用效率随降雨量增加而明显提高。表现在: 随降雨量由 350→600 mm 增加, 全膜覆土穴播小麦平均氮、磷、钾肥料利用率分别由 26.4%、17.0%、20.2% 增加到 32.8%、22.6%、26.8%, 氮、磷、钾肥料利用效率平均分别由 8.8、17.2、7.0 kg·kg⁻¹ 增加到 10.9、22.9、9.3 kg·kg⁻¹。结果还得出, 全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用率和利用效率随施肥水平提高而明显降低。表现在: 随施肥量增加, 全膜覆土穴播小麦平均氮、磷、钾肥料利用率分别由 37.1%、25.6%、31.4% 降低到 17.8%、13.2%、11.8%; 平均氮、磷、钾肥料利用效率分别由 12.4、25.9、10.7 kg·kg⁻¹ 降低到 5.9、13.4、4.1 kg·kg⁻¹。在旱地全膜覆土穴播小麦肥料高效利用机理方面取得明显研究进展。

关键词: 旱地小麦; 高效施肥; 全膜覆土; 穴播; 施肥机理

中图分类号: S147.22 **文献标志码:** A

Mechanismic study on highly efficient fertilization utilizing the technique of full plastic-film mulching overlying soil and bunch planting method for dry-land wheat

LIU Sheng-xue¹, ZHANG Jing², LIU Guang-cai²

(1. Huining Agro-technical Extension Center of Gansu, Huining, Gansu 730700, China;

2. Gansu Agro-technology Extension Station, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: Field plot experiments were employed to investigate fertilization mechanisms with the technique of whole plastic-film mulching overlying soil and bunch planting (WFM) on dry-land wheat. The results showed that with annual rainfall became increased from 350 mm to 600 mm, the N, P, and K optimal fertilizing amounts of WFM were increased from 103.2 to 181.3 kg·hm⁻²(N), 70.3 to 134.1 kg·hm⁻²(P₂O₅) and 32.4 to 73.0 kg·hm⁻²(K₂O), respectively. The N, P, and K maximal fertilizing amounts of WFM were increased from 113.2 to 214.4 kg·hm⁻²(N), 76.1 to 153.0 kg·hm⁻²(P₂O₅) and 40.1 to 88.0 kg·hm⁻²(K₂O), respectively. The fertilizer use rates and efficiencies of WFM were improved significantly with the increased rainfall, which led the average N, P, and K fertilizer use rates elevated from 26.4%, 17.0%, and 20.2% to 32.8%, 22.6% and 26.8%, respectively, and the average N, P, and K fertilizer use efficiencies escalated from 8.8 kg·kg⁻¹, 17.2 kg·kg⁻¹, and 7.0 kg·kg⁻¹ to 10.9 kg·kg⁻¹, 22.9 kg·kg⁻¹ and 9.3 kg·kg⁻¹, respectively. The results showed that the fertilizer use rates and use efficiencies of WFM became decreased remarkably with the increased fertilization levels, which led the average N, P, and K fertilizer use rates dropped from 37.1%, 25.6% and 31.1% to 18.8%, 13.2% and 11.8%, respectively, and the average N, P, and K fertilizer use efficiencies lessened from 12.4 kg·kg⁻¹, 25.9 kg·kg⁻¹ and 10.7 kg·kg⁻¹ to 5.9 kg·kg⁻¹, 13.4 kg·

收稿日期: 2014-04-16
基金项目: 甘肃省农业示范项目“旱地全膜覆土穴播免耕多茬种植技术研究与示范”(甘农科技[2007]05 号); 甘肃省农业示范项目“旱地小麦全膜覆土穴播免耕多茬种植集成技术推广”(2011GB2G100005, 1105NCNA096)
作者简介: 刘生学(1962—), 男, 甘肃会宁人, 高级农艺师, 主要从事农业技术推广工作。E-mail: hmxlx690@163.com。
通信作者: 张 静(1968—), 女, 甘肃镇原县人, 农艺师, 主要从事农业技术推广工作。E-mail: gsnjxnt@163.com。

kg^{-1} and $4.1 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Therefore, apparent research progress was achieved by this research for mechanism study of highly efficient fertilizer utilization in dry land with WFM for wheat.

Keywords: dry-land wheat; highly efficient fertilizer utilization; whole film mulching overlying soil; bunch planting; fertilizer mechanism

全膜覆土穴播技术是旱作农业又一重大创新技术,是旱地小麦栽培的又一场革命^[1]。该技术集成覆盖抑蒸、膜面播种穴集雨、雨水富集叠加利用、留膜免耕多茬种植等技术于一体,集雨保墒和增温效果极其显著,有效解决了旱地小麦等密植作物生长期缺水 and 产量低而不稳的问题^[2],非常适宜于年降水量 300~600 mm 的小麦、胡麻、谷子、青稞、莜麦等密植作物^[1-2]。大量研究表明,该技术可使旱地小麦平均产量达到 $4\,500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上,平均较露地条播增产 $1\,500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上,增产幅度达到 40% 以上^[3-6]。甘肃省由于种植业结构调整,近年来小麦种植面积持续下降,导致省内小麦供需矛盾突出^[1]。深入研究小麦全膜覆土穴播技术的增产机理,进一步挖掘和发挥旱地小麦全膜覆土穴播技术的增产潜力是缓解小麦供需矛盾、确保粮食安全的有效措施^[1]。目前,关于全膜覆土穴播技术增产机理的研究主要集中在水分效益和温度效益^[4-7],但关于全膜覆土穴播技术高效施肥机理研究较少。为了探讨土壤水、热条件改善情况下全膜覆土穴播小麦的肥料高效利用和土壤养分吸收的机理,2011—2013 年连续 3 年开展了大量的试验研究与探索,以期小麦全膜覆土穴播技术体系提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况及供试土壤

2011—2013 年,在甘肃中东部旱作农业区具有代表性的会宁中川乡、通渭马营镇、庄浪良邑乡、镇原中原乡、张家川梁山乡、清水永清镇,分别代表年降水量 350、400、450、500、550、600 mm 6 个区域,开展了全膜覆土穴播小麦肥料施用机理试验研究。试验区域海拔 1 558~1 865 m,无霜期 115~180 d,年平均气温 $7.1^{\circ}\text{C} \sim 9.0^{\circ}\text{C}$,日照时数 2 725~3 214 h, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温为 $2\,201^{\circ}\text{C} \sim 3\,285^{\circ}\text{C}$,年太阳辐射总量 $120 \sim 172 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。年降雨量 361~608 mm,而年蒸发量为 1 506~2 279 mm,是降雨量的 3~5 倍。供试土壤为黄绵土、黑垆土,地类为旱川、梯田及旱塬地,前茬均为小麦,耕层土壤有机质含量 $12.6 \sim 16.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.69 \sim 0.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $38.5 \sim 45.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $15.4 \sim 21.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $118.4 \sim 152.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

采取“3414”最优试验设计,设氮、磷、钾 3 个因素,设 0、1、2、3 四个水平。0 水平不施肥,所有试验点相同,即: $\text{N} = 0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5 = 0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{K}_2\text{O} = 0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 2 水平是当地最佳施肥水平,会宁、通渭、庄浪三个半干旱区均为: $\text{N} = 120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5 = 90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{K}_2\text{O} = 60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,镇原、张家川、清水三个半湿润偏旱区均为: $\text{N} = 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5 = 120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{K}_2\text{O} = 60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 1 水平 = 2 水平 $\times 0.5$; 3 水平 = 2 水平 $\times 1.5$ (该水平为过量施肥水平),共 14 个处理(表 1)。两次重复,小区面积为 $4.8 \text{ m} \times 8 \text{ m} = 38.4 \text{ m}^2$,随机区组排列。

表 1 试验设计施肥水平及施肥量				
Table 1 Experimental treatments and fertilizing levels				
处理代号 Number of treatment	处理 Treatment	施肥水平 Fertilizing level		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0
2	N ₀ P ₂ K ₂	0	2	2
3	N ₁ P ₂ K ₂	1	2	2
4	N ₂ P ₀ K ₂	2	0	2
5	N ₂ P ₁ K ₂	2	1	2
6	N ₂ P ₂ K ₂	2	2	2
7	N ₂ P ₃ K ₂	2	3	2
8	N ₂ P ₂ K ₀	2	2	0
9	N ₂ P ₂ K ₁	2	2	1
10	N ₂ P ₂ K ₃	2	2	3
11	N ₃ P ₂ K ₂	3	2	2
12	N ₁ P ₁ K ₂	1	1	2
13	N ₁ P ₂ K ₁	1	2	1
14	N ₂ P ₁ K ₁	2	1	1

全膜覆土穴播首先用 1.2 m 的地膜全地面平铺,上面均匀撒一层 1 cm 左右的细土,然后用人力小麦穴播机播种,播种深度 3~5 cm,行距 16 cm,穴距 12 cm,每穴 9~12 粒(会宁 9 粒,通渭 10 粒,镇原、庄浪 11 粒,张家川、清水 12 粒),播量 420~600 万粒 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。全膜覆土穴播较对照(露地条播)推迟 5~10 d 播种。供试小麦品种为陇中 1 号、陇鉴 386 号、兰天 21 号、兰天 26 号等适宜当地栽培的抗旱抗倒伏品种。肥料品种为尿素、二胺复合肥、过磷酸钙及硫酸钾,全部磷肥、钾肥及 2/3 氮肥按小区称量于

覆膜前作基肥施入,1/3 氮肥于小麦拔节期追施。

1.3 测定项目及数据分析

1.3.1 肥料利用率 肥料利用率(%)=(完全施肥区作物吸收养分量-缺素区作物吸收养分量)/肥料施用量×100=[(完全施肥区产量-缺素区产量)/100×100 kg 产量所需养分数量]/肥料施用量×100。每 100 kg 小麦籽粒吸收氮、磷、钾的量按 3.00、0.99、2.90 kg^[6]计算。

1.3.2 肥料利用效率 肥料利用效率(kg·kg⁻¹)=(全肥区产量-缺素区产量)/肥料施用量,即农学效率。

1.3.3 产量测定 按小区收获,单收单打,测定生物产量和籽粒产量。

1.3.4 考种 成熟期每小区取 10 株考种。测定株高、有效分蘖数、穗粒数、穗粒重、经济系数、千粒重、容重。

1.3.5 统计分析 对肥料施用量试验数据进行回归分析,并对不同施肥水平之间 N、P、K 肥料利用率、肥料利用效率进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同降水区域全膜覆土穴播小麦的适宜施肥量

六个试验点三年各处理全膜覆土穴播小麦产量平均结果见表 2。对试验结果进行方差分析,结果表明:不同处理间产量差异达到显著或极显著水平。

表 2 各试验点不同处理全膜覆土穴播小麦产量结果

Table 2 Grain yields of full plastic-film mulching overlying soil and bunch planting for wheat in different experiment spots		各试验点产量/(kg·hm ⁻²) Yields of different experiment spots					
处理代号 Number of treatment	处理 Treatment	会宁 Huining County	通渭 Tongwei County	庄浪 Zhuanglang County	镇原 Zhenyuan County	张家川 Zhangjiachuan County	清水 Qingshui County
1	N ₀ P ₀ K ₀	2250.0	2638.5	2814.0	2875.5	3186.0	3496.5
2	N ₀ P ₂ K ₂	3286.5	3540.0	3979.5	4410.0	4882.5	5203.5
3	N ₁ P ₂ K ₂	4137.0	4500.0	5124.0	5880.0	6426.0	6520.5
4	N ₂ P ₀ K ₂	3675.0	4050.0	4372.5	4692.0	5064.0	5301.0
5	N ₂ P ₁ K ₂	4204.5	5032.5	5556.0	5833.5	6978.0	7806.0
6	N ₂ P ₂ K ₂	5221.5	5713.5	6021.0	6874.5	7900.5	8251.5
7	N ₂ P ₃ K ₂	5031.0	5458.5	5859.0	5844.0	6984.0	7359.0
8	N ₂ P ₂ K ₀	4288.5	4875.0	5464.5	5713.5	6625.5	6937.5
9	N ₂ P ₂ K ₁	4800.0	5422.5	5781.0	6334.5	6990.0	7690.5
10	N ₂ P ₂ K ₃	4926.0	5485.5	5710.5	6042.0	6795.0	7591.5
11	N ₃ P ₂ K ₂	3529.5	4357.5	5302.5	5143.5	6490.5	7647.0
12	N ₁ P ₁ K ₂	3910.5	4207.5	4357.5	5446.5	5814.0	5805.0
13	N ₁ P ₂ K ₁	4062.0	4351.5	4885.5	5701.5	5943.0	6379.5
14	N ₂ P ₁ K ₁	4564.5	4998.0	5421.0	5721.0	6457.5	7734.0

注:表中籽粒产量结果为不同试验点 2011—2013 年各处理的平均值。
Note: Values of grain yield were the mean values of every treatment in different experiment spots between 2011 and 2013.

根据六个试验点田间试验产量结果,运用“3414”试验统计方法,经回归分析,建立六个试验点全膜覆土穴播小麦产量(Y)与 N、P、K 肥料之间的回归方程分别为:

会宁中川试验点:
$$Y = 2235.8635 + 46.6547N - 2.9542P - 9.4973K - 0.1729N^2 - 0.0380P^2 - 0.0289K^2 - 0.0399NP - 0.1447NK + 0.3951PK$$
 $R = 0.9670 > R_{0.05} = 0.9186$;通过 F 检验, $F = 6.41 > F_{0.05} = 6.00$ 。

通渭马营试验点:
$$Y = 2602.0446 + 44.4595N + 1.1931P - 12.2786K - 0.1578N^2 - 0.0736P^2 - 0.0092K^2 - 0.0242NP - 0.1166NK + 0.3711K$$
 $R = 0.9671 > R_{0.05} = 0.9186$;通过 F 检验, $F = 6.42 > F_{0.05} = 6.00$ 。

庄浪良邑试验点:
$$Y = 2772.6161 + 39.1998N + 13.9619P - 15.7231K - 0.1158N^2 - 0.0927P^2 - 0.0519K^2 - 0.081NP - 0.0388NK + 0.3198PK$$
 $R = 0.9851 > R_{0.05} = 0.9186$;通过 F 检验, $F = 14.56 > F_{0.05} = 6.00$ 。

镇原中原试验点:
 $Y = 2835.5564 + 24.7565N + 20.6281P + 12.1834K - 0.0838N^2 - 0.1119P^2 - 0.1965K^2 + 0.0119NP + 0.0014NK + 0.081PK$ 。 $R = 0.9802 > R_{0.05} = 0.9186$;通过 F 检验, $F = 10.91 > F_{0.05} = 6.00$ 。

张家川梁山试验点:
 $Y = 3120.2805 + 26.9547N + 15.2902P + 15.6439K - 0.0717N^2 - 0.1155P^2 - 0.2139K^2 + 0.0313NP - 0.0672NK + 0.1765PK$ 。 $R = 0.9714 > R_{0.05} = 0.9186$;通过 F 检验, $F = 7.44 > F_{0.05} = 6.00$ 。

清水永清试验点:
 $Y = 3454.4226 + 36.148N + 21.3369P - 21.2398K - 0.0589N^2 - 0.1693P^2 - 0.2587K^2 - 0.0594NP - 0.04NK + 0.5042PK$ 。 $R = 0.9823 > R_{0.05} = 0.9186$;通过 F 检验, $F = 12.23 > F_{0.05} = 6.00$ 。

按照 2013 年底小麦 $2.10 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、氮肥(纯 N) $4.51 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、磷肥(P_2O_5) $6.25 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、钾肥(K_2O) $6.97 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的价格,对回归方程进行解析,结果见表 3。由结果得出,降雨量不同,全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料最佳和最高施肥量差异较大。随年降雨量由 $350 \text{ mm} \rightarrow 400 \text{ mm} \rightarrow 450 \text{ mm} \rightarrow 500 \text{ mm} \rightarrow 550 \text{ mm} \rightarrow 600 \text{ mm}$ 增加,全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾最佳施肥量由 $\text{N } 103.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 181.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $70.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 134.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $32.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 73.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 显著增加,平均分别为: $\text{N } 139.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $95.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $44.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 1:0.68:0.32$;最高施肥量由 $\text{N } 113.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 214.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $76.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 153.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $40.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 88.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,也显著增加,平均分别为: $\text{N } 155.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $110.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $57.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 1:0.71:0.37$ 。

表 3 不同区域全膜覆土穴播小麦肥料适宜施用量与产量								
Table 3 Suitable fertilizing amounts and grain yields of full plastic-film mulching overlying soil and bunch planting for wheat in different experiment spots								
试验点 Experiment spots	最佳施肥量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Economic optimum application rate			最佳产量 Optimal yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	最高施肥量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Maximum yield application rate			最高产量 Maximum yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
	N	P_5O_2	K_2O		N	P_5O_2	K_2O	
会宁 Huining County	103.2	70.3	32.4	4619.7	113.2	76.1	40.1	4630.3
通渭 Tongwei County	111.9	73.0	33.9	5166.5	122.8	79.3	43.6	5179.8
庄浪 Zhuanglang County	120.5	77.3	35.7	5703.2	136.3	89.9	48.3	5725.8
镇原 Zhenyuan County	142.5	102.4	44.2	6303.6	156.7	121.0	56.5	6366.9
张家川 Zhangjiachuan County	175.3	113.9	48.3	7168.6	188.2	141.7	65.4	7252.3
清水 Qingshui County	181.3	134.1	73.0	7984.0	214.4	153.0	88.0	8002.3
平均 Average	139.1	95.2	44.6	6157.6	155.3	110.2	57.0	6192.9

结果还得出,当年降雨量由 $350 \rightarrow 600 \text{ mm}$ 增加,最佳施氮量增加 $78.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,最佳施磷量增加 $63.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,最佳施钾量增加 $40.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;最高施氮量增加 $101.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,最高施磷量增加 $76.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,最高施钾量增加 $47.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这是由于随着降雨量增加,土壤水分含量增加,小麦生长旺盛,根系发达,促进了小麦对土壤养分的吸收利用。

2.2 不同施肥水平下全膜覆土穴播小麦的氮、磷、钾肥料利用率

根据肥料利用率计算公式,利用处理 2、3、6、11 中小麦吸收的氮素量及所施氮肥中的氮含量得出不同施氮水平下六个试验点氮肥利用率,利用处理 4、5、6、7 中小麦吸收的磷素量及所施磷肥中的磷含量得出不同施磷水平下六个试验点磷肥利用率,利用处理 8、9、6、10 中小麦吸收的钾素量及所施钾肥中

的钾含量得出不同施钾水平下六个试验点钾肥利用率(表 4)。

由表 3 结果计算得出,六个不同区域全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用率随降雨量由低到高而呈明显增加趋势。表现为:全膜覆土穴播小麦低、中、高三个施肥水平氮肥平均利用率由 26.4% 增加到 32.8% ,最高为 40.2% ;磷肥平均利用率由 17.0% 增加到 22.6% ,最高为 29.0% ;钾肥平均利用率由 20.2% 增加到 26.8% ,最高为 35.5% 。以上结果表明,相同施肥水平下随降雨量增加,全膜覆土穴播小麦对氮、磷、钾肥料的利用率明显提高。同时,说明降水量过少不利于小麦对土壤养分的吸收利用。反之,在一定降水范围之内,随降雨量增加,土壤水分含量增加,水肥耦合效应促进了小麦对土壤养分的吸收利用。

表 4 不同施肥水平下小麦肥料利用率
Table 4 Wheat fertilizer use rates under different fertilizing levels

试验点 Experiment spots	氮肥利用率/% N use rate			磷肥利用率/% P use rate			钾肥利用率/% K use rate		
	N ₁	N ₂	N ₃	P ₁	P ₂	P ₃	K ₁	K ₂	K ₃
会宁 Huining County	34.3	30.4	14.6	22.2	17.3	11.5	26.2	24.1	10.2
通渭 Tongwei County	35.3	31.8	16.1	23.3	18.3	12.0	28.3	25.3	11.0
庄浪 Zhuanglang County	36.6	32.3	17.8	24.4	19.3	12.4	30.3	26.5	11.6
镇原 Zhenyuan County	37.7	34.8	18.2	26.5	21.3	13.6	32.2	27.4	12.0
张家川 Zhangjiachuan County	38.5	36.6	19.4	28.4	22.8	14.8	34.2	29.9	12.6
清水 Qingshui County	40.2	37.4	20.7	29.0	23.7	15.2	35.5	31.8	13.2
平均 Average	37.1	33.9	17.8	25.6	20.5	13.2	31.1	27.5	11.8

注:N₁、N₂、N₃ 值分别指 N₁P₂K₂、N₂P₂K₂、N₃P₂K₂ 处理即 P、K 充分供给条件下不同施 N 水平的氮肥利用率,P₁、P₂、P₃ 及 K₁、K₂、K₃ 类同。
Note: Values of N₁, N₂ and N₃ were N fertilizer use rates with N₁P₂K₂, N₂P₂K₂ and N₃P₂K₂ treatments, as the N levels under the conditions with sufficient P and K supplies. Values of P₁, P₂, P₃ and K₁, K₂, K₃ were similar.

计算结果还得出,全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用率随施肥水平增加而显著降低。当施氮量由 60.0→180.0 kg·hm⁻²、90.0→270.0 kg·hm⁻² 增加,六个区域全膜覆土穴播小麦氮肥平均利用率由 37.1%降低到 17.8%;当施磷量由 45.0→135.0 kg·hm⁻²、60.0→180.0 kg·hm⁻² 增加,小麦磷肥利用率平均由 25.6%降低到 13.2%;当施钾量由 30.0→90.0 kg·hm⁻² 增加,小麦钾肥利用率平均由 31.1%降低到 11.8%,呈明显降低趋势。说明适量施肥有利于提高全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用率,过量施肥不利于小麦对养分的充分吸收利用。

2.3 不同施肥水平下全膜覆土穴播小麦的氮、磷、钾肥料利用效率

利用肥料利用效率即农学效率计算公式,利用处理 2、3、6、11 中小麦产量及所施氮肥中的氮含量得出不同施氮水平下六个试验点氮肥利用效率,利用处理 4、5、6、7 中小麦产量及所施磷肥中的磷含量得出不同施磷水平下六个试验点磷肥利用效率,利用处理 8、9、6、10 中小麦产量及所施钾肥中的钾含量得出不同施钾水平下六个试验点钾肥利用效率(表 5)。

表 5 不同施肥水平下小麦肥料利用效率
Table 5 Wheat fertilizer use efficiencies under different fertilizing levels

试验点 Experiment spots	氮利用效率/(kg·kg ⁻¹) N use efficiency			磷利用效率/(kg·kg ⁻¹) P use efficiency			钾利用效率/(kg·kg ⁻¹) K use efficiency		
	N ₁	N ₂	N ₃	P ₁	P ₂	P ₃	K ₁	K ₂	K ₃
会宁 Huining County	11.4	10.1	4.9	22.4	17.5	11.6	9.1	8.3	3.5
通渭 Tongwei County	11.8	10.6	5.4	23.5	18.5	12.1	9.8	8.7	3.8
庄浪 Zhuanglang County	12.2	10.8	5.9	24.6	19.5	12.6	10.5	9.1	4.0
镇原 Zhenyuan County	12.6	11.6	6.1	26.8	21.6	13.7	11.1	9.5	4.1
张家川 Zhangjiachuan County	12.8	12.2	6.5	28.7	23.0	14.9	11.8	10.3	4.4
清水 Qingshui County	13.4	12.5	6.9	29.3	24.0	15.4	12.3	11.0	4.6
平均 Average	12.4	11.3	5.9	25.9	20.7	13.4	10.7	9.5	4.1

注:N₁、N₂、N₃ 值分别指 N₁P₂K₂、N₂P₂K₂、N₃P₂K₂ 处理即 P、K 充分供给条件下不同施 N 水平的氮肥利用效率,P₁、P₂、P₃ 及 K₁、K₂、K₃ 类同。
Note: Values of N₁, N₂ and N₃ were N fertilizer use rates with N₁P₂K₂, N₂P₂K₂ and N₃P₂K₂ treatments, as the N levels under the conditions with sufficient P and K supplies. Values of P₁,P₂,P₃ and K₁,K₂,K₃ were similar.

由表 4 结果计算得出,不同区域全膜覆土穴播小麦低、中、高三个施肥水平平均氮、磷、钾肥料利用率也随降雨量由低到高而呈明显增加。分别为:氮肥平均利用效率由 8.8 kg·kg⁻¹ 增加到 10.9 kg·kg⁻¹,最高为 13.4 kg·kg⁻¹;磷肥平均利用效率由

17.2 kg·kg⁻¹ 增加到 22.9 kg·kg⁻¹,最高为 29.3%;钾肥平均利用效率由 7.0 kg·kg⁻¹ 增加到 9.3 kg·kg⁻¹,最高为 12.3 kg·kg⁻¹。以上结果表明,相同施肥水平下随降雨量增加,全膜覆土穴播小麦对氮、磷、钾肥料的利用效率即农学效率明显提高。

结果还得出,同一降水区域全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用效率随施肥量增加而明显降低,低施肥水平明显高于高施肥水平。当施氮量由 $60.0 \rightarrow 180.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $90.0 \rightarrow 270.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加,小麦氮肥平均利用效率由 $12.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $5.9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$;当施磷量由 $45.0 \rightarrow 135.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $60.0 \rightarrow 180.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加,小麦磷肥利用效率平均由 $25.9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $13.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$;当施钾量由 $30.0 \rightarrow 90.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加,小麦钾肥利用效率平均由 $10.7 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $4.1 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3 讨 论

目前,关于小麦全膜覆土穴播技术的高效施肥机理研究较少。袁伟等^[8]研究了陇东旱塬区黑垆土全膜覆土穴播冬小麦的施肥机理,结果得出,全膜覆土穴播小麦最高产量为 $6\ 166.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较不施肥区增产 $3\ 121.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,增产率 102.5% ;全膜覆土穴播小麦最大施肥量为 $\text{N } 294.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 162.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 34.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 1:0.55:0.12$;最佳施肥量为 $\text{N } 243.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 115.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 57.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 1:0.48:0.23$ 。张平良等^[9]研究了定西半干旱区全膜覆土穴播小麦高产施肥技术,结果得出,全膜覆土穴播小麦最高产量为 $4\ 631.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,施肥量为 $\text{N } 180.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 180.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 90.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本研究得出,随年降雨量由 $350 \rightarrow 600 \text{ mm}$ 增加,全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾最佳施肥量分别由 $\text{N } 103.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 181.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 70.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 134.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 32.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 73.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加,平均分别为: $\text{N } 139.1$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 95.2$ 、 $\text{K}_2\text{O } 44.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 1:0.68:0.32$;最高施肥量分别由 $\text{N } 113.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 214.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 76.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 153.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 40.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 88.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加,平均分别为: $\text{N } 155.3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 110.2$ 、 $\text{K}_2\text{O } 57.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 1:0.71:0.37$ 。

袁伟等^[8]研究了陇东旱塬区黑垆土全膜覆土穴播冬小麦肥料效益,结果得出,氮、磷、钾肥料利用率均随施肥水平的提高而逐渐降低,其中氮肥利用率为 $33.6\% \sim 17.6\%$,磷肥利用率为 $30.8\% \sim 13.6\%$,钾肥利用率为 $31.3\% \sim 11.3\%$ 。许婷等^[10]研究了不同肥料处理下全膜覆土穴播小麦的养分积累规律,结果表明,全膜覆土穴播各施肥处理小麦产量与其 N、P、K 养分吸收量分别高于露地种植;成熟期,全膜覆土穴播配方施肥处理小麦植株吸氮、磷、钾量

比露地穴播小麦分别增加 48.3% 、 39.7% 、 53.3% 。说明全膜覆土穴播种植抑蒸保墒作用有效提高了小麦肥料的利用率。本研究得出,在年降水 $350 \sim 600 \text{ mm}$ 区域全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用率均随施肥水平的提高而降低。氮肥平均利用率由 37.1% 降低到 17.8% ,磷肥平均利用率由 25.6% 降低到 13.2% ,钾肥平均利用率由 31.1% 降低到 11.8% ,呈明显降低趋势。全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用效率也均随施肥量的增加而降低,氮肥平均利用效率由 $12.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $5.9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,磷肥平均利用效率由 $25.9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $13.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,钾肥平均利用效率由 $10.7 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $4.1 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。表明适量施肥有利于提高全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用率和肥料利用效率,过量施肥不利于小麦对养分的充分吸收利用。

4 结 论

1) 随降雨量由低到高增加,全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾最佳施肥量和最高施肥量明显增加。当年降雨量由 $350 \rightarrow 600 \text{ mm}$ 增加,全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾最佳施肥量由 $\text{N } 103.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 181.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 70.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 134.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 32.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 73.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别增加 78.1 、 63.8 、 $40.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;最高施肥量由 $\text{N } 113.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 214.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 76.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 153.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 40.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \rightarrow 88.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别增加 101.2 、 76.9 、 $47.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2) 随降雨量由低到高增加,全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用率明显提高。随年降雨量由 $350 \rightarrow 600 \text{ mm}$ 增加,全膜覆土穴播小麦低、中、高三个施肥水平氮肥平均利用率由 $26.4\% \rightarrow 32.8\%$ 增加,最高为 40.2% ;磷肥平均利用率由 $17.0\% \rightarrow 22.6\%$ 增加,最高为 29.0% ;钾肥平均利用率由 $20.2\% \rightarrow 26.8\%$ 增加,最高为 35.5% 。

3) 随降雨量由低到高增加,全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用效率明显提高。随年降雨量由 $350 \rightarrow 600 \text{ mm}$ 增加,全膜覆土穴播小麦低、中、高三个施肥水平氮肥平均利用效率由 $8.8 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \rightarrow 10.9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加,最高为 $13.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$;磷肥平均利用效率由 $17.2 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \rightarrow 22.9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加,最高为 29.3% ;钾肥平均利用效率由 $7.0 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \rightarrow 9.3 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加,最高为 $12.3 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

4) 随施肥水平增加,全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用率明显降低。当施氮量由 $60.0 \rightarrow 180.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $90.0 \rightarrow 270.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加,六个区域氮肥

利用率平均由 37.1%→17.8%降低;当施磷量由 45.0→135.0 kg·hm⁻²、60.0→180.0 kg·hm⁻²增加,磷肥利用率平均由 25.6%→13.2%降低;当施钾量由 30.0→90.0 kg·hm⁻²增加,钾肥利用率平均由 31.1%→11.8%降低,呈明显降低趋势。

5) 随施肥水平增加,全膜覆土穴播小麦氮、磷、钾肥料利用效率呈明显降低趋势。施氮量由 60.0→180.0 kg·hm⁻²、90.0→270.0 kg·hm⁻²增加,全膜覆土穴播小麦氮肥料利用效率平均由 12.4→5.9 kg·kg⁻¹降低;当施磷量由 45.0→135.0 kg·hm⁻²、60.0→180.0 kg·hm⁻²增加,小麦磷肥利用效率平均由 25.9→13.4 kg·kg⁻¹降低;当施钾量由 30.0→90.0 kg·hm⁻²增加,小麦钾肥利用效率平均由 10.7→4.1 kg·kg⁻¹降低。

参 考 文 献:

[1] 李 福,李城德,刘广才,等.甘肃发展旱地全膜覆土穴播技术

的重要意义[J].农业科技与信息,2010,(23):3-4,27.

[2] 李 福,李城德,刘广才,等.旱地全膜覆土穴播免耕多茬种植技术[J].中国农技推广,2011,27(1):24-25,19.

[3] 李 福,刘广才.甘肃省小麦全膜覆土穴播技术的增产效果[J].农业科技与信息,2011,(23):3-4.

[4] 何春雨,周祥椿,杜久元,等.全膜覆土免耕穴播栽培技术对冬小麦产量效应的研究[J].农业现代化研究,2010,31(6):746-749.

[5] 侯慧芝,吕军峰,张绪成,等.陇中半干旱区全膜覆土穴播小麦的土壤水分及产量效应[J].作物杂志,2010,(1):21-25.

[6] 刘晓伟,何宝林,康恩祥,等.播种方式对旱区冬小麦产量及土壤水分、土壤温度的影响[J].作物杂志,2011,(5):77-81.

[7] 李 福,刘广才,李城德,等.旱地小麦全膜覆土穴播技术的土壤水分效应[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):73-78,98.

[8] 袁 伟,薛福元.泾川县旱塬区全膜覆土穴播冬小麦“3414”施肥试验[J].甘肃农业科技,2013,(2):27-29.

[9] 张平良,郭天文,侯慧芝,等.半干旱区全膜覆土穴播小麦高产施肥技术研究[J].作物杂志,2011,(6):99-101.

[10] 许 婷,张平良,郭天文,等.全膜覆土穴播小麦养分积累规律及其水分利用效率研究[J].甘肃农业大学学报,2011,46(3):22-27.

(上接第 163 页)

因此,综合考虑间作体系作物产量优化和种间竞争互补等因素,在本试验中,玉米种植行距在 45 cm 左右时是大豆/玉米体系产量优化的最佳配置。这也与赵建华等^[17]在豌豆/玉米间作体系玉米行距试验中玉米最佳行距为 40 cm 的结果相印证。

本研究仅从大豆/玉米间作体系中玉米行距变化对于间作体系产量的影响进行了初步的分析,而对于玉米种植行距变化对作物对于地上部、地下部空间资源利用的影响机理有待于在今后的工作中开展。

参 考 文 献:

[1] 刘巽浩.耕作学[M].北京:中国农业出版社,1994:154-155.

[2] 李 隆.间作作物种间促进与竞争作用研究[D].北京:中国农业大学,1999.

[3] Mao L L, Zhang L Z, Li W Q, et al. Yield advantage and water saving in pea/maize intercrop[J]. Field Crop Research, 2012,138(3):11-20.

[4] 张恩和,李玲玲,黄高宝,等.供肥对小麦间作蚕豆群体产量及根系的调控[J].应用生态学报,2002,13(8):939-942.

[5] Vandermeer J. The Ecology of Intercropping[M]. New York: Cambridge University Press, 1989.

[6] 齐万海,柴 强.不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争能力及产量响应[J].中国生态农业学报,2010,18(1):31-34.

[7] 李淑敏,李 隆,张福锁.玉米/鹰嘴豆间作对有机磷利用差异的研究[J].中国科技导报,2004,6(3):45-49.

[8] 宋 日,牟 瑛,王玉兰,等.玉米、大豆间作对两种作物根系形态特征的影响[J].东北师大学报,2002,34(3):83-86.

[9] 高 阳,段爱旺,刘祖贵,等.间作种植模式对玉米和大豆干物质积累与产量组成的影响[J].中国农学通报,2009,25(2):214-221.

[10] Willey R W. Intercropping its importance and research needs, Part I. Competition and yield advantage[J]. Field Crops Research, 1979, 32:1-10.

[11] Trenbath B R. Resource Use by Intercrops: In Multiple Cropping Systems[M]. New York: Macmillan Publishing Co., 1986:57-81.

[12] Willey R W, Rao M R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops[J]. Experimental Agriculture, 1980,16:117-125.

[13] Lesoing G W, Francis C A. Strip intercropping effects on yield and yield components of corn, grain sorghum, and soybean[J]. Agronomy Journal, 1999,91:807-813.

[14] 吕 越,吴普特,陈小莉,等.地上部与地下部作用对玉米/大豆间作优势的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):129-136.

[15] 高 阳,段爱旺,刘祖贵,等.玉米和大豆条带间作模式下的光环境特性[J].应用生态学报,2008,19(6):1248-1254.

[16] Davis J H C, Woolley J N. Genotypic requirement for intercropping[J].Field Crops Research, 1993,34:407-430.

[17] 赵建华,孙建好,李 隆,等.改变玉米行距种植对豌豆/玉米间作体系产量的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(11):1451-1456.