

施磷量对旱地全膜双垄沟播玉米产量土壤 速效磷和磷肥利用率影响

唐文雪¹, 马忠明², 王景才³, 卢颖⁴

(1. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院, 甘肃 兰州 730070;

3. 甘肃省定西市农业科学研究院, 甘肃 定西 741100; 4. 四川农业大学, 四川 雅安 625014)

摘 要: 针对黄土高原半干旱区春玉米全膜双垄沟播栽培中施肥不科学和磷肥利用率低的问题, 2011—2013 年在甘肃省定西市安定区设置了三年定位试验, 研究了 P_2O_5 投入量为 $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (CK)、 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P1)、 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P2) 和 $480\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P3) 对春玉米产量、土壤速效磷及磷肥利用效率的影响。结果表明: 磷肥能显著增加玉米产量, 但过量投入磷肥会使玉米减产, 玉米产量整体表现为 $P1 > P2 > P3 > CK$; 在同一生育时期, 随着施磷量的增加, 土壤速效磷累积量呈增加趋势; 随着种植年限延长, 施磷处理土壤速效磷累积量增幅呈增大趋势, 与 2011 年播前基础量相比, 2013 年收获后累积量增加 $53.6\% \sim 208.5\%$; 磷肥利用率随施磷量的增加而降低, 优化施磷量下, 磷肥当季和累计利用率达到最大, 为 15.51% 、 13.91% 。综合考虑玉米产量、磷肥利用率和生态环境安全, P_2O_5 的投入量以 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为宜。

关键词: 速效磷累积量; 磷肥利用率; 产量; 全膜双垄沟播栽培; 春玉米

中图分类号: S147.21 **文献标志码:** A

Effects of phosphorus rate on maize yield, soil available phosphorus and phosphorus use efficiency by double-bed and furrow-sowing with full plastic film mulching in semi-arid field

TANG Wen-xue¹, MA Zhong-ming², WANG Jing-cai³, LU Ying⁴

(1. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Dingxi Academy of Agricultural Sciences, Dingxi, Gansu 741100, China;

4. Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

Abstract: To focus on the issues of unscientific fertilizer application and lower phosphorus use efficiency by double-bed and furrow-sowing with full plastic film mulching on the semi-arid Loess Plateau, the effects of phosphorus rate ($0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (CK), $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P1), $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P2) and $480\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P3)) on maize yield, soil available phosphorus and phosphorus use efficiency were studied from 2011 to 2013 by using randomized block design. The results showed that yield was significantly increased by application of phosphorus, but went decreased by excessive input of phosphorus. Effects on yield followed the order of $P1 > P2 > P3 > CK$. The accumulation of soil available phosphorus was elevated with the increase of phosphorus at the same growth stage, the increment of soil available phosphorus accumulation by phosphorus treatments was higher than that by no phosphorus treatments. Compared with the basic phosphorus before sowing in 2011, the accumulation of phosphorus in 2013 after harvesting was increased by $53.6\% \sim 208.5\%$. The phosphorus use efficiency became decreased as phosphorus increased. The quarter and accumulative phosphorus use efficiency reached maximums of 15.51% and 13.91% , respectively. Taking comprehensive considerations of maize yield, phosphorus use efficiency and the ecological environment security, the suitable phosphorus input (P_2O_5) was $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

Keywords: accumulation of soil available phosphorus; phosphorus use efficiency; yield; double-bed and furrow-sowing with full plastic film mulching; maize

收稿日期: 2015-07-04

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(20100314-7); 甘肃省科技计划(144NKCA053, 1504WKCA077)

作者简介: 唐文雪(1967—), 女, 甘肃临夏人, 副研究员, 主要从事作物栽培与节水农业研究。E-mail: gstw@163.com。

通信作者: 马忠明。E-mail: mazhming@163.com。

磷素是植物生长发育的必需营养元素之一。据统计,全世界约有 43% 的耕地缺磷,我国也有 2/3 农田严重缺磷^[1]。但是,部分地区由于长期大量施用磷肥而造成土壤中磷的富积^[2],使磷肥的利用率降低,我国当季作物磷肥利用率只有 15% ~ 25%^[3-4]。磷肥超量施用以及磷肥利用率下降使得农业面源污染日趋严重。合理利用磷肥,提高磷肥利用率^[5-6]一直是农业研究的重点。黄土高原半干旱区自然降水少且与农作物需水供需错位,粮食产量低而不稳。全膜双垄沟播玉米栽培技术是目前我国干旱半干旱地区大面积推广的一项高产栽培技术,该技术体系集垄面集流、覆膜抑蒸、垄沟种植技术于一体,大幅度提高了土壤水分的利用率,使玉米等作物增产 30% 以上^[7-8],在旱作农田降水高效利用方面取得了重大突破。2014 年在甘肃省推广种植超过 82.1 万 hm^2 。此种植模式下,刘宏胜等对玉米土壤全磷的时空变化、氮磷养分含量的动态变化进行了研究^[9-10]。但磷素的吸收利用累积及不同施磷量对玉米磷肥利用率、产量的影响研究相关报道很少。本试验以春玉米为试验材料,在氮肥合理配施的基础上,研究不同施磷量对土壤速效磷、玉米产量及磷肥利用率的影响,旨在为该区玉米高产高效、合理施用磷肥、有效降低农田污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2011—2013 年在定西市农业科学研究院综合试验站进行。试验区属中温带半干旱区,作物一年一熟,无灌溉,为典型旱地雨养农业。平均海拔 2 000 m,年均太阳辐射 $591.89 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$,日照时数 2 476.6 h,年均气温 6.4°C , $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 $2\,933.5^\circ\text{C}$, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 $2\,239.1^\circ\text{C}$,无霜期 140 d。多年平均降水 390.9 mm,年蒸发量 1 531 mm,干燥度 3.92,20%、50%、75%、95% 保证率的降水量为 462.5、390.8、341.3、283.1 mm,年降水量 $> 462.5 \text{ mm}$ 为丰水年, $390.8 \sim 462.5 \text{ mm}$ 为正常年, $< 390.8 \text{ mm}$ 为枯水年。试验土壤为黄土正常新成土,土壤耕作层有机质含量为 $13.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮、全磷、全钾含量分别为 0.85 、 1.35 、 $2.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。水解氮含量 $33.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $11.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $186.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 平均为 8.26。0~20 cm 土壤容重为 $1.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。2011 年试验区玉米生长季(5—9 月)降雨量仅为 146.0 mm,并且降雨主要集中在 7—9 月份。2012 年和 2013 年生育期降雨量 389.4、

430.7 mm,降雨分布均匀。试验期间降水量分布如图 1 所示。

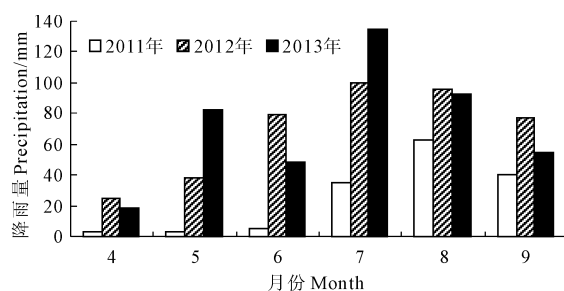


图 1 2011—2013 年玉米生长季节降水量

Fig.1 Precipitation during maize growing period between 2011 and 2013

1.2 试验设计

试验采用随机区组排列,设 6 个处理,分别为 ① 2011—2013 年三年不施磷(CK1)、② 2011 年优化量施磷,2012—2013 年二年不施磷(CK2)、③ 2011—2012 优化量施磷,2013 年一年不施磷(CK3)、④ 优化施磷量 100%,施磷(P_2O_5) $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P1)、⑤ 优化施磷量 200%,施磷(P_2O_5) $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P2)、⑥ 优化施磷量 400%,施磷(P_2O_5) $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P3)。3 次重复,小区面积 30 m^2 (长 6.0 m × 宽 5.0 m)。各处理不施有机肥,氮肥为优化施用量(氮素(N) $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),各处理氮素用量的 2/3、全部磷肥作基肥,将化肥混合均匀撒在划好的小垄的垄带内,然后起垄覆膜。氮素用量的 1/3 在拔节期(七叶期)用人工穴施的方式在种植沟 2 株玉米间追施。供试肥料氮肥为尿素(N 46.4%),磷肥为磷酸二铵(N 11%、 P_2O_5 47%)。

采用全膜双垄沟播种植,玉米播种前一周先起双垄,大垄宽 60 cm,高 10 cm,小垄宽 40 cm,高 15 cm,大小垄相接处形成播种沟,然后采用宽 130 cm 的薄膜全地面覆盖,最后在沟内播种。株距 0.35 m,每小区种 10 行,每行 18 株,播深 2.0~2.5 cm。播种密度 $53\,500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2011 年 5 月 7 日播种,10 月 2 日收获;2012 年 5 月 2 日播种,10 月 1 日收获;2013 年 5 月 3 日播种,10 月 1 日收获。2011 年由于玉米播种、抽穗期严重干旱,于 5 月 2 日覆膜前及 8 月 13 日抽穗前喷灌 70 mm 和 50 mm 水分。

指示玉米品种:中玉 9 号。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品采集 分别于 2011 年 4 月 25 日玉米播前和 2011 年 10 月 3 日、2012 年 10 月 4 日、2013 年 10 月 2 日收获期用土钻采集 0~20 cm 土层土样。以对角线法确定测点位置,每小区测定 6 个点,在大

垄、垄沟、小垄上各测定 2 个点,种植行内定在两棵玉米中间,大、小垄定在垄中间。最后 6 个点土样混合成一个样品风干,用于测定土壤速效磷的含量;植株样品于收获时各小区去掉边上 2 行及每行头 3 株,玉米植株地上部全株采样,测定作物生物产量、籽粒产量。每小区随机取 10 株分籽粒和秸秆两部分,风干、粉碎、过筛,分析籽粒和秸秆含磷量。

1.3.2 测定项目与方法 土壤容重采用环刀法取样测定。2011 年 4 月玉米整地覆膜前,在试验区内以对角线法选 5 个点,挖 0~20 cm 土壤剖面用环刀法取样,测定 5 个点 0~20 cm 土层土壤容重,最后将平均值作为该试验区 0~20 cm 土层土壤容重;植株全磷采用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮后用钒钼黄比色法测定。土壤速效磷(Olsen-P)用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定。

1.4 数据处理与分析方法

数据统计分析采用 Excel 软件和 DPS 软件。
磷吸收量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 籽粒产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) × 籽粒含磷量 (%) + 秸秆产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) × 秸秆含磷量 (%) / 100

土壤速效磷累积量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 土层厚度 (cm) × 土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) × 土壤速效磷含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) / 10。

磷肥吸收利用率 (%) = [施磷区吸磷量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) - 不施磷区吸磷量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)] × 100 / 施磷量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

磷素的累积利用率 % = [施磷肥区作物累积吸磷量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) - 无磷肥区作物累积吸磷量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)] × 100 / 施磷肥区累积进入土壤磷素量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) [11]

2 结果与分析

2.1 不同施磷量对 0~20 cm 土壤速效磷累积量的影响

土壤速效磷是指土壤中 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠 (pH 8.5) 提取的磷 (Olsen-P)。施用磷肥可显著提高土壤速效磷累积量。从图 2 可看出,2011—2013 年作物收获后,施磷处理土壤速效磷累积量均高于播前或上年收获后,并且随着施磷量的增加和种植年限延长,速效磷累积量呈增加趋势。施磷量 (P_2O_5) 为 0、120、240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 到 480 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,玉米种植 1 年后 (2011 年 10 月),在 0~20 cm 土层,速效磷累积量为 66.80 (dC)、72.09 (cC)、80.26 (bB)、90.23 (aA) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($P < 0.05$ 、 $P < 0.01$,数值后不同字母表示差异达 5%、1% 显著水平)。玉米种植 2

年后 (2012 年 10 月),速效磷累积量分别为 71.78 (cCD)、96.38 (bBC)、100.95 (bB) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 134.18 (aA) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。玉米种植 3 年后 (2013 年 10 月),速效磷累积量分别为 75.46 (dC)、104.11 (cB)、123.01 (bB) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 209.10 (aA) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与试验前相比,三年中施磷处理速效磷累积量增加 36.33 ~ 141.32 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。优化施磷 P1 处理速效磷累积量增幅最小,为 53.6%。P2 处理增幅位居第二,为 81.5%。P3 处理增幅度最大,为 208.5%。3 年定位试验结果表明,过量施磷条件下,旱地农田速效磷累积量是急剧增加的。

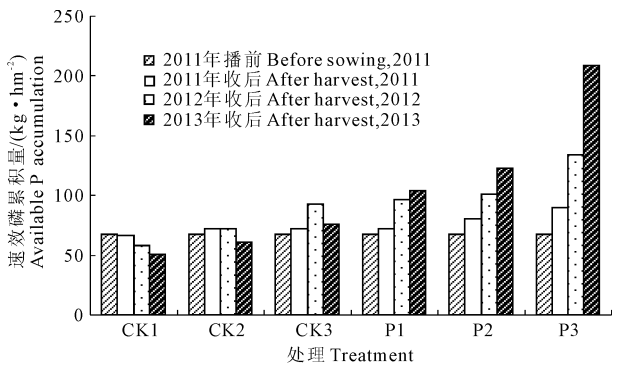


图 2 不同施磷量对 0~20 cm 土壤速效磷累积量的影响
Fig.2 The accumulations of soil available P under different phosphorus rates in the 0~20 cm soil layer

2.2 施磷量对玉米产量的影响

玉米是典型的对磷敏感的作物。该试验三年产量结果表明磷肥能显著增加玉米产量,但过量施肥会使产量下降。2011 年,P1 处理玉米产量达到最大,为 4 844 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于 CK1,之后随施磷量的增加,产量减小。2012 年,产量以 P2 最高,为 10 494 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于 CK2。2013 年,产量以 P1 最高,为 9194 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于 CK3 及 P2、P3 高磷处理。从表 1 还可看出,与不施磷对照相比,施 P_2O_5 120、240、480 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,2011 年依次增产 36.68%、35.74%、23.20%;2012 年增产 5.54%、7.33%、2.29%;2013 年增产 4.18%、-1.18%、-1.97%。随着施磷量及种植年限的增加,产量增幅变小,甚至在 2013 年 P2、P3 处理增产率变为负值。

在旱作农业区,降雨量是影响作物产量的重要因子。在相同施磷量下,2012 和 2013 年产量显著高于 2011 年,造成产量差异的原因主要为年际间降雨量悬殊,2012 年、2013 年生育期降雨量高达 389.4、430.7mm,降雨时空分布均匀,而 2011 年仅为 146.0 mm,并且主要集中在 7 至 9 月份。

表 1 施磷量对玉米产量的影响

Table 1 Effects on maize yield of different phosphorus rates			
处理 Treatments	2011 年产量 Yield in 2011 /(kg·hm ⁻²)	2012 年产量 Yield in 2012 /(kg·hm ⁻²)	2013 年产量 Yield in 2013 /(kg·hm ⁻²)
CK1	3544c	9522b	8438c
CK2	4689a	9777b	8791b
CK3	4689a	10331ab	8825b
P1	4844a	10318ab	9194a
P2	4811a	10494a	8721b
P3	4367b	10001ab	8651bc

注:2011 年对照采用 CK1,2012 年采用 CK2,2013 年采用 CK3。
Note: CK1 for the experimental refers to year of 2011, CK2 to 2012, and CK3 to 2013.

表 2 不同施磷量对磷肥利用率的影响

Table 2 Effects on phosphorus use efficiency of different phosphorus rates						
处理 Treatment	磷素用量 P rate/(kg·hm ⁻²)		磷素吸收量 P uptake/(kg·hm ⁻²)		磷素利用率 P use efficiency/%	
	2011 年当季 2011	2011—2013 年累积 Accumulation of 2011—2013	2011 年当季 2011	2011—2013 年累积 Accumulation of 2011—2013	2011 年当季 2011	2011—2013 年累积 Accumulation of 2011—2013
CK1	0	0	17.95	85.63		
CK2	52.4	52.4	25.52	98.27	14.45	24.13
CK3	52.4	104.8	26.44	104.85	16.21	18.34
P1	52.4	157.2	26.27	107.50	15.88	13.91
P2	104.8	314.4	25.99	107.62	7.67	7.00
P3	209.6	628.8	21.33	99.20	1.61	2.16

3 结论与讨论

王生录等^[12]认为,增施磷肥对提高土壤速效磷具有重要作用。谢林花等^[13]认为,长期单施化肥可增加土壤全磷、无机磷和速效磷含量。本试验条件下,施用磷肥显著提高了土壤速效磷累积量。随磷肥投入量增加,土壤速效磷累积量明显增加,不同施磷处理土壤速效磷累积量差异均达显著水平。2013 年收获后,P1、P2、P3 处理速效磷累积量分别为 104.11、123.01 kg·hm⁻²和 209.10 kg·hm⁻²,比基础土壤分别增加 53.6%、81.5%和 208.5%。过量投入磷肥导致大量磷素残留在土壤中。黄绍敏^[11]通过长期施肥对潮土土壤磷素利用与积累研究中提出石灰性土壤很容易造成磷素的固定或无效化。刘利花等^[14]以西北农林科技大学实验农场的瘠土为对象研究得出,当土壤 Olsen - P 含量小于 23 mg·kg⁻¹时,土壤磷素不淋溶或很少发生淋溶;而土壤 Olsen - P 含量大于 23 mg·kg⁻¹时,土壤磷素发生淋溶。由以上研究可知,土壤中大量速效磷若不加以科学管理,土壤磷素就会达到磷素吸附饱和而发生淋溶、

2.3 施磷量对玉米磷肥利用率的影响

磷肥利用率是磷肥使用效果的一个综合评价指标。本研究提出,磷肥利用率随施磷量增加而降低,并且当季利用率低,累计利用率高。从 2011 当季利用率看,磷素施用量为 52.42 kg·hm⁻²,磷素利用率为 15.51%;施用量为 104.8、209.6 kg·hm⁻²时,即 P2、P3 处理利用率仅为 7.67%、1.61%,进入到土壤的磷素有 92.3% ~ 98.4% 积累在土壤中,没有被当季作物吸收利用。从磷素累计利用率看,2013 年,磷素累计施用量为 52.4、104.8、157.2 kg·hm⁻²,累计利用率为 24.13%、18.34%、13.91%;磷素累计施用量为 314.4、628.8 kg·hm⁻²,即 P2、P3 处理下磷肥累计利用率仍很低,仅为 7.00%、2.16%。

固定或无效化。本试验未对磷素的淋溶和固定进行测定,需在下一步试验中加以研究。

施磷可以增强作物抗性,促进根系发育,增强吸收水分、养分的能力^[15-16]。该试验三年产量结果表明使用磷肥能显著增加玉米产量,随施磷量的增加,玉米产量增幅呈下降的趋势,并且随着种植年限的增加,产量增幅变小。虽然 P1、P2 处理 2013 年播前土壤速效磷含量相近,但由于施磷量不同,玉米收获后与对照 CK3 相比,P1 处理产量增产 368.99 kg·hm⁻²,而 P2 处理减产 103.59 kg·hm⁻²。本试验认为土壤速效磷含量大于 42 mg·kg⁻¹时,继续过量施磷会导致玉米减产。出现这种情况,是因为磷肥过量会促使作物呼吸作用过于旺盛,消耗的干物质大于积累的干物质,造成繁殖器官提前发育,引起作物过早成熟,籽粒小,产量低^[17],还会造成土壤中养分失衡,进而导致玉米营养失调^[18],最终导致减产。高量施磷不仅不能提高作物产量,还会增加生长后期作物体内的氮磷钾养分损失,特别是氮以氨、氮氧化物等形式的气态氮损失及其环境效应,已引起了人们的高度重视^[16]。合理的磷肥投入量不仅是产量

的保证,也是保护环境与提高经济效益的举措。

本试验磷肥吸收利用率随磷肥施用量的增加呈降低的趋势。2011 年优化施磷量下,磷肥当季利用率为 15.51%,在高施肥量下磷肥利用率降为 7.67%、1.61%。2013 年磷肥累计利用率虽然高于 2011 年当季利用率,但高施肥下,磷肥累计利用率仍很低。这与彭正萍^[19]提出高磷用量显著降低磷肥表观利用率,并且低于 10%,杨学云^[20]提出的长期不平衡施肥或大量施磷,导致磷素利用率降低,其累积表观利用率低于 15% 的结论是一致的。综合考虑玉米产量、磷肥利用效率和生态环境安全,P₂O₅ 的适宜投入量以 120 kg·hm⁻²为宜。

参 考 文 献:

[1] 刘建中,李振声,李继云.利用植物自身潜力提高土壤中磷的生物有效性[J].生态农业研究,1994,2(1):16-23.

[2] 彭正萍,李迎春,薛世川,等.土壤磷钾供应能力研究[J].中国农业科技导报,2007,9(2):57-60.

[3] 朱兆良.肥料与农业和环境[J].大自然探索,1998,17(4):25-28.

[4] 鲁如坤.我国的磷矿资源和磷肥生产消费Ⅰ:磷矿资源和磷肥生产[J].土壤,2004,36(2):113-116.

[5] 林继雄,林葆,艾卫.磷肥后效及利用率的定位试验[J].土壤肥料,1995,(6):1-5.

[6] 程传敏,曹翠玉.干湿交替过程中石灰土壤无机磷的转化及有效性[J].土壤学报,1997,34:282-291.

[7] 张雷,牛建彪,赵凡.旱作玉米提高降水利用率的覆膜模式研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):8-17.

[8] 谭军利,王林权,李生秀.地面覆盖的保水增产效应及其机理研

究[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):50-54.

[9] 汪佳,黄高宝,李玲玲,等.全膜双垄沟播玉米对土壤全氮及全磷时空变化的影响[J].甘肃农业大学学报,2011,1(2):22-29.

[10] 刘宏胜,徐振峰,闫志利,等.不同施肥水平下全膜双垄沟播玉米土壤酶活性及氮磷养分含量的动态变化[J].干旱地区农业研究,2013,31(5):61-67.

[11] 黄绍敏,宝德俊,皇甫湘荣,等.长期施肥对潮土土壤磷素利用与积累的影响[J].中国农业科学,2006,39(1):102-108.

[12] 王生录,黄土高原旱地磷肥残效及利用率研究[J].水土保持研究,2003,10(1):71-75.

[13] 谢林花,吕家珑,张一平,等.长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响[J].应用生态学报,2004,15(5):787-789.

[14] 刘利花,杨淑英,吕家珑.长期不同施肥土壤中磷淋溶阈值研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(3):123-126.

[15] 李虹,张锡梅.不同基因型小麦苗期对低磷和水分胁迫的反应[J].干旱地区农业研究,2001,19(1):72-78.

[16] 王荣辉,王朝辉,李生秀,等.施磷量对旱地小麦氮磷钾和干物质积累及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):115-121.

[17] 耿玉辉,曹国军,叶青,等.磷肥不同施用方式对土壤速效磷及春玉米磷素吸收和产量的影响[J].华南农业大学学报,2006,34(4):470-474.

[18] 李志伟,崔力拓.大量施磷对旱地土壤养分、酶活性及作物生长的影响[J].土壤通报,2009,40(4):860-863.

[19] 彭正萍,张家铜,袁硕,等.不同供磷水平对玉米干物质和磷动态积累及分配的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(4):793-798.

[20] 杨学云,孙本华,古巧珍,等.长期施肥磷素盈亏及其对土壤磷素状况的影响[J].西北农业学报,2007,16(5):118-123.