

长期施肥下黄土旱塬黑垆土磷平衡及农学阈值

王淑英¹, 樊廷录¹, 李利利², 赵刚¹, 张建军¹, 李尚中¹,
王磊¹, 党翼¹, 程万莉¹, 唐小明¹

(1. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所/甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室, 甘肃兰州 730070;

2. 平凉市农业科学研究院, 甘肃平凉 744500)

摘要:为研究长期施肥条件下土壤磷平衡和土壤有效磷对磷盈亏的响应,明确土壤有效磷(Olsen-P)的农学阈值及合理磷肥施用量,依托甘肃平凉肥料长期定位试验(始于1979),分析了黄土旱塬黑垆土36 a土壤磷盈亏动态、累积磷盈亏与有效磷的响应关系以及土壤磷残余,通过Mitscherlich方程模拟作物相对产量对土壤有效磷的响应关系,计算黄土旱塬黑垆土小麦和玉米的土壤有效磷农学阈值。结果表明:不施肥(CK)和单施氮肥(N)处理土壤磷始终亏缺,N处理每亏缺磷 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,有效磷含量下降 $1.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;施磷处理土壤磷当季盈余 $4.3\sim 207.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,累积盈余 $154.9\sim 7483.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中有机、无机配施(MNP)处理磷盈余最大;土壤累积磷盈余与土壤有效磷增量呈线性正相关,土壤中每盈余 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷,秸秆还田配施化肥(SNP,磷肥隔年施)、氮磷配施(NP)、有机肥(M)和有机、无机配施(MNP)处理土壤有效磷分别增加 7.55 、 2.47 、 $0.28\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.46\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;黄土旱塬黑垆土农田有效磷的小麦和玉米农学阈值分别为 $22.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $13.96\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,MNP处理土壤有效磷含量已高于作物农学阈值,NP和SNP处理土壤有效磷含量达到小麦农学阈值分别需要21 a和24 a,达到玉米农学阈值分别需要2 a和8 a,M处理土壤有效磷含量已高于玉米农学阈值,还需要3 a可达到小麦农学阈值。当磷投入量每年平均达 $22.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,土壤磷呈持平状态;当磷用量达 $33\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,不仅作物产量较高,而且磷肥当季利用率也较高;当磷用量增加到 $233\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,作物产量对增加磷投入无响应,土壤磷残余超过90%,大量磷素累积在土壤中,增加了土壤磷素的流失风险。黄土旱塬小麦玉米一年一熟轮作黑垆土农田土壤有效磷农学阈值为 $13.96\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (玉米)和 $22.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (小麦),秸秆还田可促进旱地农田耕层土壤有效磷含量的增加。

关键词:磷盈亏;农学阈值;黑垆土;长期施肥;黄土旱塬

中图分类号:S147.21⁺1;S513 文献标志码:A

Phosphorus balance and critical value in loessial soil of Loess Plateau under long-term fertilization

WANG Shuying¹, FAN Tinglu¹, LI Lili², ZHAO Gang¹, ZHANG Jianjun¹, LI Shangzhong¹,
WANG Lei¹, DANG Yi¹, CHENG Wanli¹, TANG Xiaoming¹

(1. Dryland Agricultural Institute of Gansu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of High Water Utilization on Dryland of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Pingliang Academy of Agricultural Sciences, Pingliang, Gansu 744500, China)

Abstract: This study examined the relation of soil phosphorus (P) with P balance under long-term fertilization, the critical Olsen-P value for crop yield, and the reasonable P fertilizer application rate, and thus provided theoretical basis for the scientific application of P fertilizer and the maintenance of sustainable high production efficiency in loessial soil of Loess Plateau. Based on the long-term fertilization experiment of loessial soil in Pingling, Gansu (1979-), six fertilizer treatments including no fertilizer (CK), chemical nitrogen (N), chemical N and P (NP), straw plus chemical NP (SNP), farmyard manure (M), and farmyard manure plus chemical NP (MNP)

were used in the cropping system of 4-year continuous winter wheat followed by 2-year spring corn. A total of 36 years (1979–2016) data of loessial soil in Loess Plateau were analyzed for content of soil Olsen-P and the P uptake by plants. Soil accumulated apparent P balance, P residue in soil, and the relationship between soil accumulated apparent P balance and soil Olsen-P were studied. The response of crop yield to soil Olsen-P was examined by the Mitscherlich equation to determine the critical Olsen-P value for crop yield. The soil P content was depleted each year in the no-P treatments, while in the treatments with P fertilization the P surplus was $4.3 \sim 207.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. The accumulative P amount was in the range of $154.9 \sim 7483.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. The P surplus in the MNP treatment was the highest among the treatments. The P balance was significantly ($P < 0.05$) correlated with soil Olsen-P. The Olsen-P decreased by $1.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the N treatments for each $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ P deficiency. For each surplus of $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in soil, the Olsen-P in the SNP, NP, M, and MNP treatments increased by 7.55, 2.47, 0.28, and $0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The agronomic thresholds of wheat and maize were 22.05 and $13.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. It took 21, 24 years for the treatments of NP, SNP, and M to reach the critical Olsen-P value for wheat, respectively, and it took 2 and 8 years for the treatments of NP and SNP to reach the critical Olsen-P value for maize, respectively. When the average P application amount was up to $22.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ per year, the P balance does not change, again, was to $33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ the crop yield and the P utilization rate were both high and the soil P residue was low and the phosphorus accumulation in the soil was less, however to $233 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ yearly, the crop yield did not respond to the P input, and the soil P residue exceeded 90%, which implied much P accumulated in soil and increased high risk of soil P loss. Agronomic critical value of soil Olsen-P was $13.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (maize) and $22.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (wheat.) for dryland cropping system of winter wheat rotated with spring corn yearly in dryland of Loess Plateau. The treatment of SNP can effectively increase soil Olsen-P accumulation.

Keywords: phosphate apparent balance; critical value of soil Olsen-P; loessial soil; long-term fertilization; dryland of Loess Plateau

磷是植物生长发育必需的营养元素之一,植物利用的磷素主要来源于土壤,但很多农田土壤的自然供磷能力不能满足植物生长发育及高产对磷的需求,明确不同作物产量对土壤有效磷的响应关系和阈值,可为磷肥的合理利用和优化土壤磷管理提供科学依据。施磷显著改善了土壤磷肥力并提高土壤的供磷能力,但磷肥的当季利用率一般只有 $10\% \sim 25\%$ ^[1],当土壤中磷肥的投入量大于支出量时,剩余的磷素积累在土壤中,积累超过一定限度后向水体迁移,造成资源浪费和环境污染^[2]。英国洛桑试验站长期定位试验表明,施入土壤的磷仅约 13% 以有效磷 (Olsen-P) 形式积累在土壤中,土壤磷的储量与新施入 P 的产量效应显示,磷肥施入到有效磷储备达到某一临界值的土壤时作物产量最高。当土壤有效磷含量低于某一临界值,产量随有效磷水平的增加而显著增加,当有效磷含量高于临界值时,磷肥的投入在增加土壤有效磷的同时不能显著增加产量,还会引起环境污染风险^[3-4],这一临界值即为作物高产的有效磷临界值或农学阈值。短期试验难以确定不同农业管理措施下土壤磷素演变特征、磷盈亏变化、农学阈值和环境阈值,从而无法量化土壤有效磷与磷盈亏的关系。研究表明,

长期施磷后土壤磷平衡与有效磷变化呈极显著正相关,土壤每累积磷 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,土壤有效磷增加值分别为:褐土 $1.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,黑土 $3.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,水稻土 $5.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,紫色土 $2.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,灌淤土 $0.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[5]。我国 7 个点位的长期试验研究表明:施用磷肥每盈余 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,土壤有效磷增加 $1.44 \sim 5.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,每亏缺 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,土壤有效磷下降 $1.44 \sim 5.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[6];有效磷的变化对土壤磷平衡的响应关系因土壤类型、作物种类、施肥和管理方式等不同而差异明显^[7-10]。当土壤有效磷水平超过一定阈值时,磷肥继续投入和提高土壤磷肥力则难以持续提高产量^[11];小麦、玉米和水稻土壤有效磷的农学阈值分别为 $7.5 \sim 23.5$ 、 $5.7 \sim 15.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.3 \sim 14.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,然而,由于气候条件、土壤性质和管理水平的差异,作物土壤有效磷的阈值差异很大^[12-15]。

甘肃平凉长期定位试验站在揭示黄土旱塬黑垆土农田生产力、土壤肥力、肥料效率和碳库演变以及生物活性等方面发挥了重要的平台作用^[16-21]。目前,沈浦、裴瑞娜等^[12,22]利用该试验部分处理 1979—2006 年数据,分析了磷平衡、土壤磷有效性和农学阈值;王淑英等^[23]依据所有处理 36 a 数据,

分析了长期不同施肥下土壤磷和磷肥效率的演变特征,而有关黄土旱塬黑垆土有效磷农学阈值、不同施肥措施对磷盈亏的影响等尚未进行系统全面的分析研究。因此,本文利用该试验 1979—2016 年全部处理数据,分析长期不同施肥措施下土壤有效磷农学阈值、有效磷对磷盈亏的响应,以及达到有效磷农学阈值需要的年限、科学高效的施磷量和施肥措施,旨在为旱地黑垆土雨养农田科学合理施用磷肥和土壤磷肥管理提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验基地概况

试验基地位于甘肃省平凉市泾川县高平镇境

表 1 1979—2016 年各处理年施肥量和磷素养分输入量

Table 1 Annual application amounts of fertilizers and P inputs from different sources of different treatments during 1979—2016

处理 Treatment	化肥 Fertilizer/(kg·hm ⁻²)		秸秆/农家肥 Straw/Manure /(t·hm ⁻²)	氮输入 N input/(kg·hm ⁻²)			磷素输入 P input/(kg·hm ⁻²)		
	N	P ₂ O ₅		S/M	化肥 Fertilizer	总量 Total	S/M	化肥 Fertilizer	总量 Total
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	90	0	0	0	90	90	0	0	0
NP	90	75	0	0	90	90	0	33	33
SNP	90	75 (隔年施 Every 2 years)	3.75	22.9	90	112.9	6.4	16.5	22.9
M	0	0	75	118.5	0	118.5	200	0	200
MNP	90	75	75	118.5	90	208.5	200	33	233

1979 年试验开始的第一季作物为春玉米,多数年份按 2 年春玉米→4 年冬小麦的一年一熟轮作制进行,其中 1993—1998 年为冬小麦连作、1999 年为高粱、2000 年为大豆。各处理按大区顺序排列,每个大区为一个肥料处理,每个处理面积 666.7 m²,大区划分为 3 个顺序排列的重复,每个小区 220 m²。玉米为露地穴播,密度 5.25 万株·hm⁻²,小麦机械条播,播量 187.50 kg·hm⁻²。氮肥为尿素,其用量的 60%做基肥,40%做追肥(均于春玉米、冬小麦拔节期均匀撒在种植行内);磷肥为过磷酸钙;农家肥平均含磷 0.267%、含氮 0.158%;秸秆平均含磷 0.17%、含氮量 61%。农家肥和磷肥在作物播前全部基施,每年作物收获后结合犁地将约 5 cm 长的秸秆翻入土壤 0~20 cm 耕层。试验开始前耕层(0~20 cm)土壤化学性质:有机质 10.75 g·kg⁻¹,全氮 0.95 g·kg⁻¹,全磷 0.57 g·kg⁻¹,碱解氮 65.9 mg·kg⁻¹,有效磷 6.77 mg·kg⁻¹,速效钾 163.2 mg·kg⁻¹。

1.3 样品采样

土壤样品:每季作物收获后(冬小麦 9 月 15 日播种、6 月下旬收获,玉米 4 月 20 日播种、9 月上旬收获)采集每个小区 0~20 cm 土层土样 5 个,均匀混合,土样风干用于土壤速效磷等指标的分析。

植物样品:小麦收获时每小区随机采集面积为

内(107°30'E,35°16'N),是典型的黄土高原雨养农业区,土地平坦,海拔 1 150 m,年均气温 8.6℃,≥10℃积温 2 800℃,年降雨量 540 mm,其中 60%集中在 7—9 月,年蒸发量 1 380 mm,无霜期约 170 d。光、热资源丰富,水热同季,适宜于冬小麦、玉米、果树、杂粮等生长。土壤为黑垆土,黄土母质,土体深厚疏松,利于植物根系伸展下扎,富含碳酸钙,腐殖质累积主要来自土粪堆垫。

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理:不施肥(CK);施氮肥(N);施氮、磷肥(NP);秸秆(S)还田配施氮、磷肥(SNP),其中磷肥为隔年施;施农家肥(M);氮、磷肥配施农家肥(NPM)。各处理的施肥量和磷输入量见表 1。

0.5 m²的 10 个点植株样品混合,玉米收获时每小区随机采集 5 株植株样品混合,样品风干后脱粒,进行收获指数和籽粒及秸秆磷含量测定。各小区的秸秆生物量通过收获指数和籽粒产量计算。

1.4 测定方法

土壤有效磷用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提、钼锑抗比色测定;植株磷含量采用 H₂SO₄-H₂O₂消煮、钼锑抗比色测定。

作物产量:玉米每个小区收获 40 m²,小麦收获 20 m²,自然风干后,每个处理单独计算产量。

1.5 指标计算与数据处理

磷盈亏平衡量:

$$PAB = PI - PO \quad (1)$$

式中,PAB 为磷的盈亏平衡量(kg·hm⁻²);PI 为磷的当季投入量(kg·hm⁻²);PO 为磷的当季支出量(kg·hm⁻²)。

磷累积盈亏量:

$$APAB = API - APO \quad (2)$$

式中,APAB 为磷的累积盈亏平衡量(kg·hm⁻²);API 为磷的累积投入量(kg·hm⁻²);APO 为磷的累积支出量(kg·hm⁻²)。

磷残余率:

$$PSR = PAB / PI \times 100 \quad (3)$$

式中, PSR 为磷的残余率(%); PAB 为施磷处理磷盈余平衡量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); PI 为磷的投入量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

土壤有效磷变化量:

$$\Delta SAP = SAP_n - SAP_0 \quad (4)$$

式中, ΔSAP 为土壤有效磷的变化量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); SAP_n 为每年各处理有效磷含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); SAP_0 为基础土有效磷含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

作物相对产量:

$$RCY = Y_n / Y_{\max} \times 100 \quad (5)$$

式中, RCY 为作物相对产量(%); Y_n 为每年各处理产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y_{\max} 为试验每年所有处理最大产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

作物有效磷农学阈值:

$$Y = A \times (1 - e^{-bX}) \quad (6)$$

式中, Y 为相对产量(%); A 为模拟获得的最大相对产量(%); e 是一个数学常数,即自然对数的底数,约等于 2.718; b 为土壤供磷能力; X 为土壤有效磷含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),作物相对产量达到 90% 最大相对产量所对应的土壤有效磷含量即为该作物的有效磷的农学阈值^[24]。

采用 Excel 和 DPS 5.01 软件模拟作物产量、土壤全磷和有效磷、作物磷肥效率的时间变化趋势,并进行显著性检验;应用 Sigmaplot 12.5 软件,拟合 Mitscherlich 方程,模拟作物相对产量对土壤有效磷的响应关系并作图,用最小显著性检验法(LSD)检验。

2 结果与分析

2.1 长期施肥下土壤磷盈亏及土壤磷的响应

2.1.1 土壤磷当季盈亏 各处理当季土壤表观磷盈亏差异较大(见图 1),不施磷处理(CK、N)当季土壤磷一直呈亏缺状态,平均亏缺 $9.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $9.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,随试验年限延长作物产量不断降低、

当季磷亏缺值减少。施磷处理(NP、SNP、M、MNP)中 SNP 当季土壤磷盈亏总体上呈盈余状态,平均盈余 $4.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中 26 a 冬小麦全部呈盈余状态,10 a 春玉米呈亏缺状态;NP 处理土壤当季表观磷盈亏个别年份亏缺,平均盈余 $14.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,M 和 MNP 处理土壤磷当季盈余较高,分别为 $178.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $207.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,除第 25~26 年和第 32~33 年有较明显的下降外,其他年份变化不大,可能与 2005 年沈单 16 和 2006 年中单 2 号产量较高以及 2011—2012 年种植作物品种为产量高、养分吸收率高的先玉 335 有关。

2.1.2 土壤累积磷盈亏 随着试验年限的增长,施磷处理土壤累积磷盈余量不断增加,且处理间差异增大。单施化肥 N、不施肥(CK)处理的土壤磷累积亏损量增加。试验进行到 2016 年时,各处理土壤累积磷盈亏为 $-346.5 \sim 7483.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 2),CK 处理因长期不施肥作物产量较低,携出土壤磷量较少,土壤磷亏缺值较低;相对于 CK,单施 N 处理土壤氮素养分状况较好,尤其试验开始前 15 a 内产量较高、土壤磷消耗量大于 CK;MNP 处理土壤累积磷盈余最高,是 NP 处理的 14.3 倍、SNP 处理的 48.3 倍;M 处理土壤累积磷盈余次之,是 MNP 处理的 85.8%,NP 处理的 12.3 倍、SNP 处理的 41.2 倍。

2.1.3 土壤有效磷对土壤累积磷盈亏的响应 所有处理土壤有效磷增量($\Delta \text{Olsen-P}$)与土壤累积磷盈亏显著正相关($P < 0.01$,见图 3),黄土旱塬黑垆土每盈余磷 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,土壤有效磷含量平均提高 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同施肥措施土壤有效磷对土壤累积磷盈亏的响应差异较大(图 4),不施磷肥处理中 N 处理土壤有效磷增量与土壤累积磷亏缺显著正相关($P < 0.05$),土壤每亏缺磷 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,有效磷含量降低 $1.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而 CK 处理土壤有效磷增

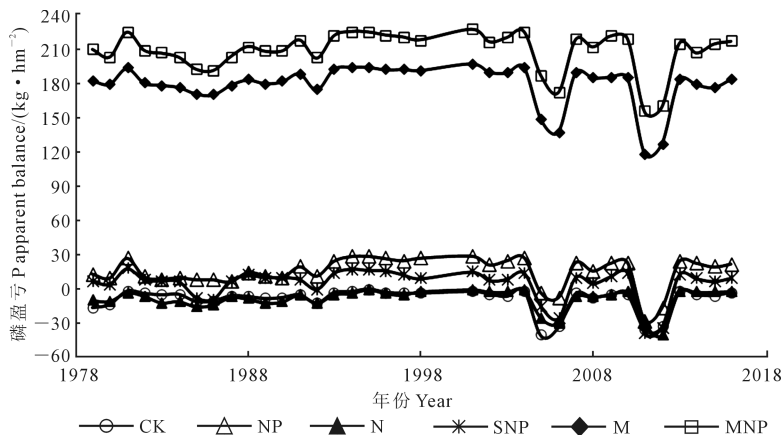


图 1 当季土壤表观磷盈亏

Fig. 1 P apparent balance under long-term fertilization

量与土壤累积磷盈亏相关性不显著;4个施磷处理(NP、SNP、M、MNP)土壤有效磷增量与土壤累积磷盈余极显著正相关($P < 0.01$),土壤每积累磷 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,有效磷分别增加 2.47 、 7.55 、 0.28 、 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,SNP处理土壤有效磷含量对土壤累积磷盈亏的响应最大。

2.2 土壤磷残余率

冬小麦种植年份,NP、SNP、M、MNP处理土壤磷残余率26a的平均值依次为60.7%、46.3%、92.9%、92.5%(图5),玉米种植年份相应处理土壤磷残余率10a平均值为25.0%、-14.9%、86.5%、85.3%。玉米种植年份土壤磷残余率较小麦种植年份

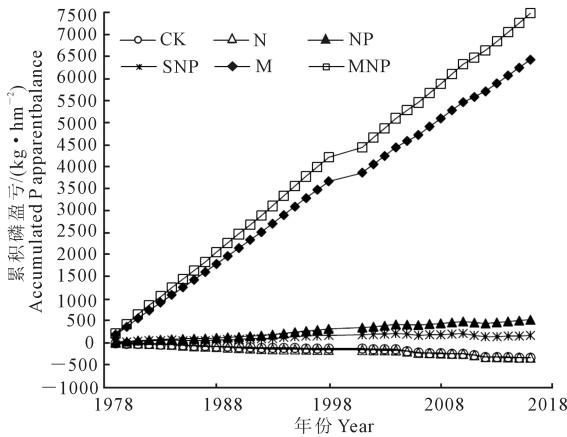


图 2 土壤累积磷盈亏

Fig.2 Accumulation of P balance

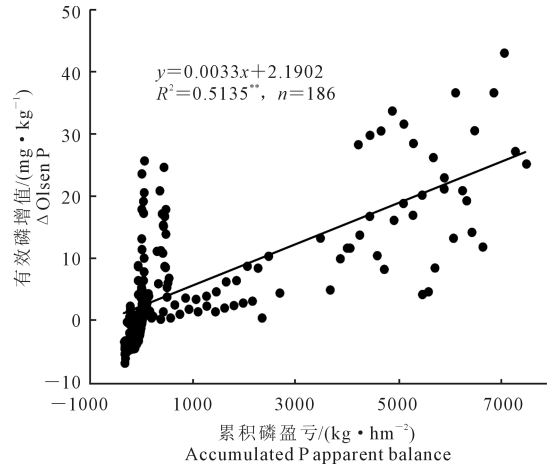


图 3 有效磷对土壤累积磷盈亏的响应

Fig.3 Response of soil Olsen-P to the accumulation of P

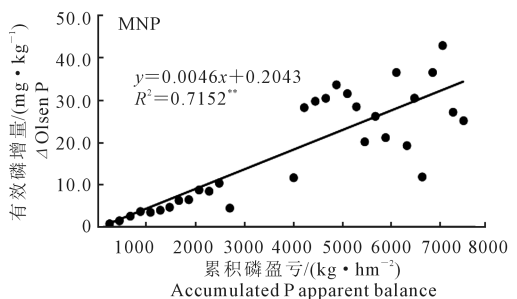
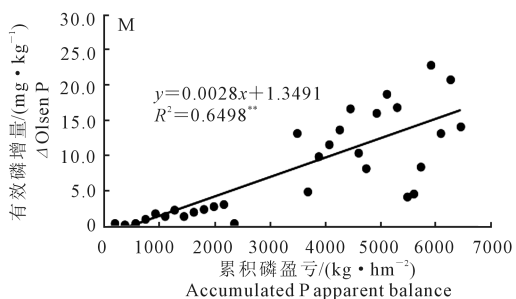
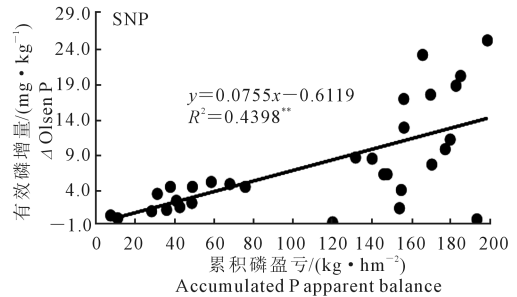
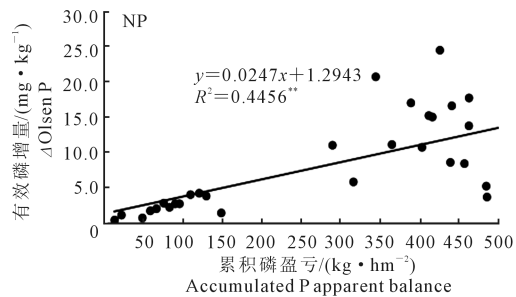
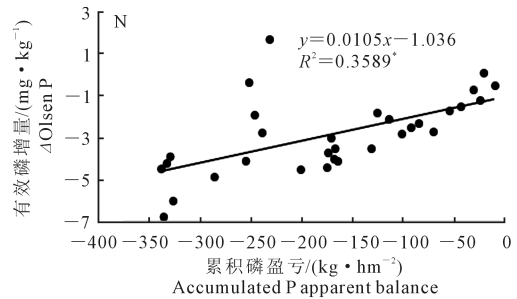
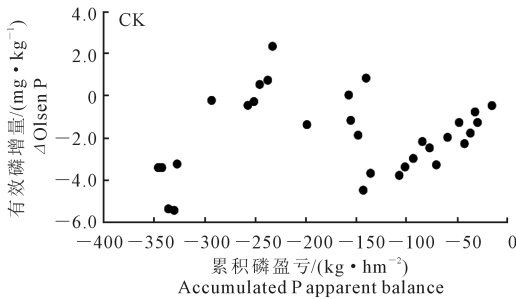


图 4 各处理土壤有效磷对累积磷盈亏的响应

Fig.4 Response of soil Olsen-P to the accumulation of P under different fertilizations

下降 6.4%~61.2%, SNP 处理下降幅度最大, M 处理下降幅度最小。SNP 处理小麦种植年份土壤磷盈余, 土壤磷残余率在 17.7%~75.9% 之间; 玉米种植年份土壤磷总体亏缺, 10 a 间玉米种植年份土壤磷残余率在 -78.7%~47.9% 之间, 其中有 6 a 作物携出磷量大于当年施入磷量。无论小麦还是玉米种植年份, NP、M、MNP 处理磷的施入量始终大于作物携出量。

2.3 土壤有效磷农学阈值

2.3.1 旱塬农田小麦、玉米的有效磷农学阈值 用 Mitscherlich 方程模拟土壤有效磷含量对作物产量的效应, 作物相对产量达到 90% 最大相对产量所对应的土壤有效磷含量即为该作物的有效磷的农学阈值。当土壤有效磷含量低于该阈值时, 作物产量随磷肥用量增加而显著提高; 当土壤有效磷高于该阈值时, 作物产量随磷肥的增加提高缓慢, 或者无提高趋势。利用长期定位试验的各处理土壤有效磷含量与作物产量数据, 运用 Sigmaplot 9.0 拟合出

小麦和玉米相对产量与土壤有效磷的指数曲线 (图 6), 玉米: $Y=95.88(1-e^{-0.20x})$ ($R^2=0.58, p<0.0001, n=54$), 小麦: $Y=93.42(1-e^{-0.15x})$ ($R^2=0.56, p<0.0001, n=132$), 玉米和小麦相对产量达到 90% 最大相对产量时的土壤有效磷值分别为 $13.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $22.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3.2 不同施磷处理土壤有效磷含量达到农学阈值的年限 4 个施磷处理 (NP、SNP、M、MNP) 耕层土壤有效磷含量 (2016 年) 分别为 13.48、10.05、20.74、32.20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, M 和 MNP 处理耕层土壤有效磷含量已超过小麦和玉米农学阈值, M 处理耕层土壤有效磷含量超过玉米农学阈值但没达到小麦农学阈值, 而 NP 和 SNP 处理耕层土壤有效磷含量低于玉米农学阈值。本长期定位试验中 NP 和 SNP 处理分别需要 21a 和 24a 耕层土壤有效磷含量才能达到小麦农学阈值, 分别需要 2a 和 8a 耕层土壤有效磷含量才能达到玉米农学阈值; M 处理需要 3 年耕层土壤有效磷含量才能达到小麦农学阈值。

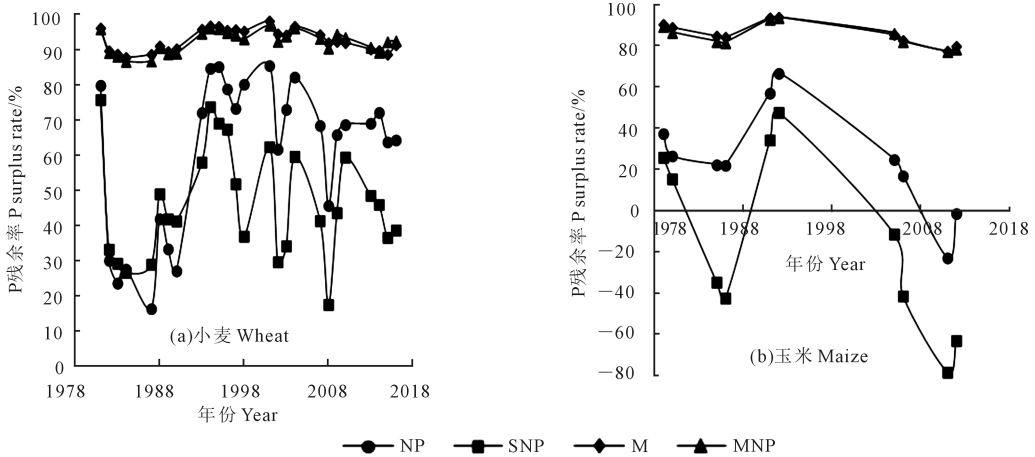


图 5 各处理磷的当季土壤残余率 (%)

Fig.5 The soil phosphorus residue of different fertilizations

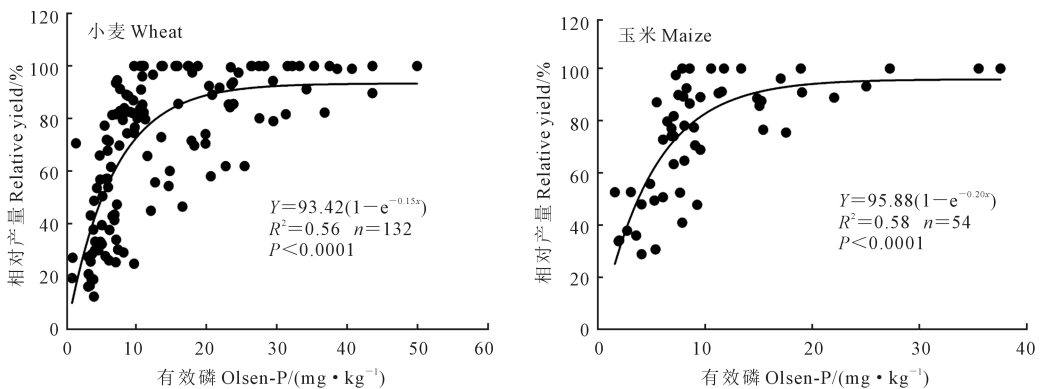


图 6 作物产量对土壤有效磷的响应

Fig.6 Response of crop yield to the soil Olsen-P under long-term fertilization

3 讨论

3.1 土壤磷对累积磷盈亏的响应及磷残余

黄土旱塬黑垆土农田耕层土壤有效磷变化与土壤磷累积盈亏呈正相关。不施磷肥的2个处理(CK、N)土壤磷长期亏缺,但CK耕层土壤有效磷对磷亏缺的响应小于N处理,土壤每亏缺 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷,CK土壤有效磷的减幅是N处理的19.05%,与N处理产量和携出土壤磷量大于CK处理有关,同时也可能与N处理长期单施无机氮肥、耕层土壤pH值下降有关^[15,17]。施磷处理(NP、SNP、M、MNP)中SNP年均施磷量最小,36 a平均当季盈余和累积磷盈余也最低,但土壤有效磷对累积磷盈亏响应最大,土壤每盈余 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷,有效磷含量提高 $7.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这可能与还田秸秆使微生物繁殖增强、提高了土壤生物活性、加速磷的矿化有关^[25-26];NP、M和MNP处理土壤有效磷增量均与土壤累积磷盈亏呈正相关,土壤每积累 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷,有效磷增加 $0.28\sim 2.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,单施农家肥处理(M)耕层土壤有效磷对土壤磷素累积盈亏的响应最小,化学磷肥比农家肥更有利于土壤有效磷的增加,这与裴瑞娜等^[18]研究结果一致,也与张淑香等^[27]对我国50个长期肥料试验的研究结果(每 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷盈余使得各土壤有效磷含量提高 $1\sim 6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)相近。本研究中2个施磷处理土壤磷残余既与土壤投入磷量有关,也与作物吸收携出土壤磷量有关,总体上土壤投入磷量越多、利用率越低,土壤磷残余率越高,但M处理比MNP处理磷投入量减少14.2%,磷素利用率降低18.9%,土壤磷残余率高0.4%。这也许归结于MNP处理比M处理磷活化率高(2016年高37.8%)、农田土壤磷的作物有效性较好(2012—2016年有效磷含量平均提高59.1%),最终引起作物产量大幅度提高、吸磷量增加(2012—2016年作物吸磷量平均增加10.2%)^[23]。本研究结果表明,当磷素年均投入量为 $22.9\sim 33\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时可以满足旱塬黑垆土作物生长需求,磷肥当季利用率较高,磷素在土壤中累积量较少;当磷素年均投入量大于 $233\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 后会造成磷素在土壤中大量残余累积,作物产量对磷肥增加和土壤有效磷提高没有响应,与杨振兴等研究结果基本一致^[28]。

3.2 土壤有效磷的农学阈值

土壤有效磷含量是影响作物产量的重要因素,

土壤有效磷含量较低造成作物明显减产,但当土壤有效磷含量超过阈值时,增加磷肥施入对作物的增产效果不明显,甚至可能由于淋溶或者地表径流造成环境污染。因此,全面分析长期试验多年历史系统数据,明确土壤有效磷对磷盈亏的响应,确定土壤有效磷农学阈值以及达到有效磷农学阈值需要的年限,对旱地黑垆土雨养农田科学合理施用磷肥、采取高效的土壤磷肥管理措施至关重要。多项研究显示在小麦-玉米轮作中,小麦土壤有效磷农学阈值总是高于玉米^[10-12],陕西的塿土、安徽的黄棕壤、湖南和江西的红壤、河南和河北的潮土、江苏的水稻土、甘肃的灌淤土等6种土壤盆栽试验研究也说明冬小麦有效磷农学阈值($13.1\sim 26.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)高于夏玉米($9.78\sim 16.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[29];本研究黄土旱塬黑垆土农田小麦、玉米的有效磷农学阈值分别为 $22.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $13.96\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与上述研究结果一致,与沈浦^[12]利用该试验5个处理(CK、N、NP、M、MNP)1979—2006年数据研究结果(小麦 $19.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、玉米 $15.14\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比,本研究的玉米有效磷农学阈值略低、而小麦农学阈值高,与SNP处理土壤有效磷含量较低、而作物产量相对较高有关。施磷处理耕层土壤有效磷含量1979—2016年平均在 $13.7\sim 24.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,小麦和玉米平均产量分别在 $3.83\sim 4.65\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $7.14\sim 8.73\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,其中SNP处理土壤有效磷含量最低,而作物产量仅次于MNP处理,高于NP、M处理^[23]。郭斗斗等^[24]研究认为小麦和玉米有效磷农学阈值差异的主要原因是小麦对磷缺乏更为敏感,土壤磷素养分充足时,小麦对磷的吸收量大于玉米,且小麦茎秆磷浓度和吸磷量随土壤有效磷含量增加而大幅度提高。

4 结论

不施肥和单施氮肥土壤磷始终亏缺,单施氮处理每亏缺磷 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,有效磷含量下降 $1.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;施磷处理(SNP、NP、M和NPM)土壤每盈余磷 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,有效磷含量提高 $0.28\sim 7.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,SNP处理土壤有效磷对磷盈亏响应最大。每年磷投入量 $22.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,土壤磷素呈持平状态,达到 $33\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时既可获得较高产量,又能增加土壤有效磷含量,同时磷肥当季利用率也较高;当磷用量达到 $233\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,作物产量对磷增加无响应,土壤磷残余超过90%,大量磷素累积在土

壤中,增加了土壤磷的流失风险。玉米和小麦有效磷农学阈值分别为 $13.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $22.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, NP 和 SNP 处理分别需要 21 a 和 24 a 耕层土壤有效磷含量可达到小麦农学阈值, M 处理需要 3 a 耕层土壤有效磷含量可达到小麦农学阈值; MNP 处理耕层土壤有效磷含量已高于黄土旱塬 2 a 春玉米→4 冬小麦一年一熟轮作黑垆土土壤有效磷农学阈值, 每年 $233 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 输入除了不断扩大土壤磷库、提高土壤有效磷含量之外, 不能持续提高作物产量。黄土旱塬小麦玉米一年一熟轮作黑垆土雨养农田土壤有效磷农学阈值为 $13.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (玉米) 和 $22.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (小麦), 秸秆还田配施氮肥加隔年施磷是甘肃黄土旱塬黑垆土农田科学高效的施肥措施。

参 考 文 献:

- [1] Shen W H, Lin X G, Shi W M, et al. Higher rates of nitrogen fertilization decrease soil enzyme activities, microbial functional diversity and nitrification capacity in a Chinese polytunnel greenhouse vegetable land [J]. *Plant and Soil*, 2010, 337(1/2): 137-150.
- [2] 甄兰, 廖文华, 刘建玲. 磷在土壤环境中的迁移及其在水环境中的农业非点源污染研究[J]. *河北农业大学学报*, 2002, 25(增刊): 55-59.
- [3] Higgs B, Johnston A E, Salter J L, et al. Some aspects of achieving sustainable phosphorus use in agriculture [J]. *Journal of Environment Quality*, 2000, 29(1): 80-87.
- [4] 刘建玲, 廖文华, 张作新, 等. 磷肥和有机肥的产量效应与土壤积累磷的环境风险评价[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(5): 959-965.
- [5] 展晓莹, 任意, 张淑香, 等. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4728-4737.
- [6] Cao N, Chen X P, Cui Z L, et al. Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(2-3): 161-170.
- [7] Xu T, Li J M, Ma Y B, et al. Phosphorus efficiency in long-term (15 years) wheat-maize cropping systems with various soil and climate conditions [J]. *Field Crops Research*, 2008, 108: 231-237.
- [8] 周宝库, 张喜林, 李世龙, 等. 长期施肥对黑土磷素积累及有效性影响的研究[J]. *黑龙江农业科学*, 2004, (4): 5-8.
- [9] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土磷平衡及农学阈值的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(10): 1903-1912.
- [10] 唐旭. 小麦-玉米轮作土壤磷素长期演变规律研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- [11] Bai Z H, Li H G, Yang X Y, et al. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types [J]. *Plant and Soil*, 2013, 372: 27-37.
- [12] 沈浦. 长期施肥下典型农田土壤有效磷的演变特征及机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [13] Wang B, Li J M, Ren Y, et al. Validation of a soil phosphorus accumulation model in the wheat-maize rotation production areas of China [J]. *Field Crops Research*, 2015, 178: 42-48.
- [14] Tang X, Ma Y B, Hao X Y, et al. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China [J]. *Plant & Soil*, 2009, 323: 143-151.
- [15] 习斌. 典型农田土壤磷素环境阈值研究—以南方水旱轮作和北方小麦玉米轮作为例[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [16] 裴瑞娜. 长期施肥对黑垆土冬小麦、玉米产量和磷素利用效率的影响[J]. *甘肃农业科技*, 2015, (8): 48-53.
- [17] 徐明岗, 张文菊, 张夫道, 等. 中国土壤肥力演变, 第 2 版[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.
- [18] 王淑英, 樊廷录, 丁宁平, 等. 长期定位施肥条件下黄土旱塬农田作物产量、水分利用效率的变化[J]. *核农学报*, 2010, 24(5): 1044-1050.
- [19] 王淑英, 樊廷录, 丁宁平, 等. 长期定位施肥对黄土旱塬黑垆土土壤酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(2): 307-310.
- [20] Liu E K, Yan C Y, Mei X R, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China [J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 173-180.
- [21] 王淑英, 樊廷录, 丁宁平, 等. 长期施肥下黄土旱塬黑垆土供氮能力的变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1487-1495.
- [22] 裴瑞娜, 杨生茂, 徐明岗, 等. 长期施肥条件下黑垆土有效磷对磷盈亏的响应[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 4008-4015.
- [23] 王淑英, 樊廷录, 丁宁平, 等. 黄土旱塬黑垆土长期肥料试验土壤磷素和磷肥效率的演变特征[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(7): 791-798.
- [24] 郭斗斗, 黄绍敏, 张水清, 等. 潮土小麦和玉米有效磷农学阈值及其差异分析[J]. *植物营养与肥料学报* 2017, 23(5): 1184-1190.
- [25] 战厚强, 颜双双, 王家睿, 等. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响[J]. *作物杂志*, 2015, (2): 78-83.
- [26] 胡心意. 有机物料和耕作深度对稻田耕层土壤生物学性状的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [27] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1389-1393.
- [28] 杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥褐土有效磷对磷盈亏的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1529-1535.
- [29] 席雪琴. 土壤磷素环境阈值与农学阈值研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015.