

塿土区作物和土壤淋溶磷临界值研究及推荐施磷建议

席雪琴¹, 孙本华^{1*}, 陈勇², 杨学云¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学信息工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 确定临界土壤磷最佳水平及合理的施肥量可为实现作物高产和减少磷素损失提供理论依据。本研究以“国家黄土肥力与肥料效益监测基地”24年长期肥料定位试验为基础, 利用长期试验积累数据并结合相关土壤分析, 通过米切里西指数模型和两段式线性模型确定了塿土区冬小麦和夏玉米高产土壤有效磷临界值以及塿土磷素淋溶阈值并提出了施磷建议。结果表明, 该地区冬小麦高产时土壤有效磷临界值为 26.2 mg/kg, 夏玉米为 13.9 mg/kg。土壤有效磷随全磷的增加存在明显的临界点, 当全磷含量为 1.15 g/kg 时, 有效磷含量为 34.8 mg/kg, 高于此值后有效磷随全磷快速增加。土壤有效磷含量大于 39.3 mg/kg 时, 磷素淋溶风险增大。无论作情况下, 当土壤有效磷含量分别为 < 25、25 ~ 40 和 > 40 mg/kg 时, 冬小麦施磷量分别为 P₂O₅ 80 ~ 95、60 ~ 80 和 10 ~ 15 kg/hm²; 当土壤有效磷 < 15、15 ~ 40 和 > 40 mg/kg 时, 夏玉米施磷量分别为 P₂O₅ 70 ~ 85、55 ~ 70 和 10 ~ 15 kg/hm²。冬小麦-夏玉米轮作体系下, 当土壤有效磷含量分别为 < 15、15 ~ 25、25 ~ 40 和 > 40 mg/kg 时, 冬小麦施磷量分别为 P₂O₅ 100 ~ 120、90 ~ 100、80 ~ 90 和 15 ~ 20 kg/hm², 夏玉米施磷量分别为 P₂O₅ 50 ~ 60、45 ~ 50、25 ~ 40 和 5 ~ 10 kg/hm²。

关键词: 塿土; 有效磷; 临界值; 施磷量

中图分类号: S153.6; S143.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257 (2015) 06-0034-07

关中地区是陕西省粮食生产的主要地区, 冬小麦/夏玉米轮作是该地区最重要的粮食生产方式, 塿土是关中地区主要的土壤类型。近年来, 当地农户存在过量施肥和施肥比例不合理等现象, 造成效益下降, 肥料利用率低, 环境污染等问题^[1]。长期定位试验是全面了解农田生态系统中肥料效应、土壤肥力演变等的重要场所, 可为农业持续发展提供科学依据^[2-3]。

土壤有效磷测定结果可为农业生产提供依据^[4]。根据作物产量效应关系, 当土壤有效磷含量较低时, 产量随有效磷水平的增加而增加, 超过作物要求的水平, 磷肥对作物产量没有显著影响^[5-7]。土壤磷的储量与新施入磷的产量效应显示, 同量磷肥施入到原始含磷水平较高的土壤上达到高产^[8]。但是, 长期大量施磷使外加投入的磷累

积在土壤中, 有可能通过径流和渗漏流失进入水体^[9-10]。利用土壤有效磷与 CaCl₂-P 的关系评估土壤磷流失潜能成为热点^[11-12]。研究磷在土壤中的累积规律, 确定有效磷和全磷的关系, 可以为合理施肥提供理论依据^[13]。以往根据土壤有效磷的含量来进行推荐施肥时, 往往仅考虑作物对磷的反应和土壤有效磷含量的分布, 而同时兼顾土壤有效磷农学阈值和环境学淋溶阈值的研究较少^[14-15]。本文旨在利用长期定位试验的结果研究塿土上施磷对冬小麦和夏玉米产量的影响、土壤有效磷随全磷的积累规律、土壤磷的淋溶阈值, 以期为该地区磷肥的合理施用和优化土壤磷素管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验在“国家黄土肥力与肥料效益监测基地”进行, 试验地位于陕西省杨凌示范区五泉镇, 海拔 524.7 m, 年平均气温 13℃, 年平均降水量 550 ~ 600 mm。土壤为塿土类红油土属厚层红油土种 (土垫旱耕人为土), 黄土母质。初始耕层土壤基本理化性状: pH 值 8.6, 有机质 10.9 g/kg, 全

收稿日期: 2014-08-31; 最后修订日期: 2014-12-07

项目基金: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201003014); 农业生态环境保护项目“农业面源污染定位监测与防治技术研究及示范”。

作者简介: 席雪琴 (1988-), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要从事环境化学方面的研究。E-mail: xixueqin2011@163.com。

通讯作者: 孙本华, E-mail: sunbenhua@126.com。

氮 0.83 g/kg, 全磷 (P) 0.61 g/kg, 全钾 (K) 22.8 g/kg, 碱解氮 61.3 mg/kg, 有效磷 (P) 9.6 mg/kg, 速效钾 (K) 191.0 mg/kg。

1.2 试验设计

1990 年秋开始播种, 实行冬小麦 - 夏玉米轮作, 小区面积 196 m² (14 m × 14 m), 不设重复。试验共设 9 个处理, 各处理的施肥量见表 1。氮肥为尿素, 磷肥为过磷酸钙, 钾肥为硫酸钾。秸秆 N、P、K 量未计入, 有机肥 P、K 量未计入。秸秆 (S) 为玉米干秸秆, 用量为 4 500 kg/hm²。有

机肥 (M) 为牛粪, M1NPK 处理有机肥 N: 无机肥 N = 7:3, 并保持 N 用量与施无机肥 N 处理相等; 秋播小麦时 M2NPK 的施用量是 M1NPK 的 1.5 倍, 而夏播玉米时施肥量相等。有机肥和秸秆只在秋播小麦时施用, 所有肥料在播前一次施入。玉米于 5 月末至 6 月初播种, 9 月末至 10 月初收获; 冬小麦于 9 月末至 10 月初播种, 5 月末至 6 月初收获。小麦生长期灌溉 2~3 次, 每次灌水量为 90 mm 左右。玉米的灌溉根据降雨情况而定, 每次灌水量也为 90 mm 左右。

表 1 试验各处理施肥量 (kg/hm²)

处理	冬小麦			夏玉米		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1 CK	0	0	0	0	0	0
2 N	165	0	0	187.5	0	0
3 NP	165	132.0	0	187.5	56.2	0
4 NK	165	0	82.5	187.5	0	93.8
5 PK	0	132.0	82.5	0	56.2	93.8
6 NPK	165	132.0	82.5	187.5	56.2	93.8
7 SNPK	165	132.0	82.5	187.5	56.2	93.8
8M1NPK	165	132.0	82.5	187.5	56.2	93.8
9M2NPK	247.5	198.0	123.7	187.5	56.2	93.8

1.3 土壤取样

每季作物收获后, 多点采集耕层 (0~20 cm) 土壤混合样, 带回实验室风干, 手工拣去植物根系、动物残体和石块等杂物, 研磨, 过 1 mm 和 0.15 mm 筛备用。

1.4 测定方法

全磷 (TP): 硝酸 - 氢氟酸 - 高氯酸消化, 钼锑抗比色法; 有效磷 (Olsen - P): pH 值 8.5 的 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提, 钼锑抗显色剂比色法测定; CaCl₂ - P: 0.01 mol/L CaCl₂ 浸提, 土水比 1:5, 钼锑抗比色法。其含量均以 P 计算。

1.5 计算方法

1.5.1 作物有效磷临界值确定方法

作物产量对磷的效应可受多种因素的影响, 如土壤氮素水平, 因此只有氮肥充足的处理用于建立土壤有效磷对作物产量效应的临界值 (未利用 PK 处理的结果)。临界值的确定采用米切里西指数模型 (Mitscherlich model)^[16], 该模型被定义为:

$$Y = A \times [1 - e^{(-BX)}] \quad (1)$$

式中: Y 表示预测的相对产量 (%); A 是模拟获得的最大相对产量 (%); B 是土壤的供磷能力; X 是土壤有效磷含量 (mg/kg)。米切里西模型采用模拟获得的最大相对产量的 90% 来计算获得其临界值^[7-8,17]。

1.5.2 土壤磷淋溶临界值 (阈值) 确定方法

所有处理用于全磷和有效磷及有效磷与 CaCl₂ - P 关系的确定。以不偏离突变点为基础, 将测定的全磷与有效磷及有效磷与 CaCl₂ - P 进行两段式线性回归:

$$y_1 = a_1x + b_1 \quad x < T \quad (2)$$

$$y_2 = a_2x + b_2 \quad x \geq T \quad (3)$$

这里 a₁、a₂、b₁ 和 b₂ 为线性回归系数, 使 a₁ 最大, a₂ 最小, 且两方程线性相关性最高时的交点 T 即为所求临界值^[12]。

1.5.3 推荐施磷量的计算方法

当土壤有效磷水平低于作物高产临界值时^[18]:
 施磷量 = 作物携出量 × (130% ~ 150%) (4)
 当土壤有效磷水平介于高产临界值和环境学阈

值之间时^[19]：

$$\text{施磷量} = \text{作物携出量} \quad (5)$$

当土壤有效磷水平显著高于环境学阈值时^[19]：

$$\text{施磷量} = \text{作物携出量} \times (1/4 \text{ 或 } 1/5) \quad (6)$$

2 结果与分析

2.1 有效磷与作物产量的关系

由图 1 可见，随着土壤有效磷含量的增加，冬

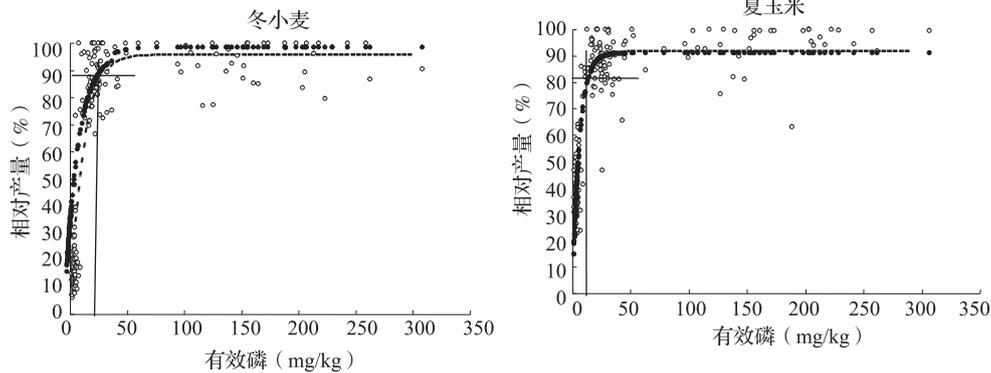


图 1 冬小麦和夏玉米相对产量对土壤有效磷的反应

2.2 全磷和有效磷的关系

由图 2 可见，全磷含量较低时，有效磷随全磷增加而缓慢增加，超过某一临界点后，增加幅度显著增大。全磷含量为 1.15 g/kg 是其变化的临界值。高于此临界值后，增加单位全磷所增加的有效磷含量是低于此临界值时的约 4.9 倍。说明在瘠土上，当全磷高于 1.15 g/kg 时，增加一定量有效磷所需要的施磷量大大减少，施肥时应综合考虑土壤原始含磷水平。

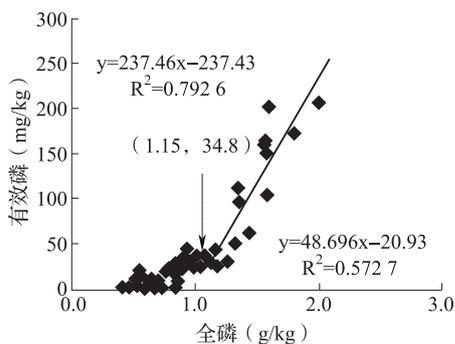


图 2 土壤全磷与有效磷之间的关系

2.3 有效磷与 CaCl₂-P 的关系

由于土壤具有巨大的吸持固定磷的能力，土壤中的磷绝大多数是难溶性的，且很难移动^[20]，但随着土壤含磷量的提高，土壤对磷的吸附饱和度增加，固磷能力减小，固相上的磷容易进入液相^[21]。

小麦和夏玉米的相对产量先显著增加，到一定阶段后相对产量增加不显著。米切里西模型可以很好地描述这种关系，无论是冬小麦还是夏玉米，其相关系数均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。冬小麦和夏玉米达到最佳产量时的有效磷含量临界值分别为 26.2 和 13.9 mg/kg。有效磷含量低于临界值时产量显著降低，但高于临界值时，随有效磷含量增加，作物增产效果不明显。

由图 3 可见，当有效磷水平较低时，CaCl₂-P 随有效磷增加而增加，但增加幅度较小，超过某一临界点后 CaCl₂-P 随有效磷增加的幅度明显变大，这一临界点即磷素淋失临界值或阈值^[10,12,22]。当有效磷含量低于 39.3 mg/kg 时，CaCl₂-P 随有效磷增加而增加的幅度较小，而当有效磷含量高于 39.3 mg/kg 时，增加单位有效磷所增加的 CaCl₂-P 是低于此临界值时的约 2.4 倍。对于瘠土，其有效磷环境学临界值为 39.3 mg/kg，进一步增加有效磷含量将会引起水环境风险。

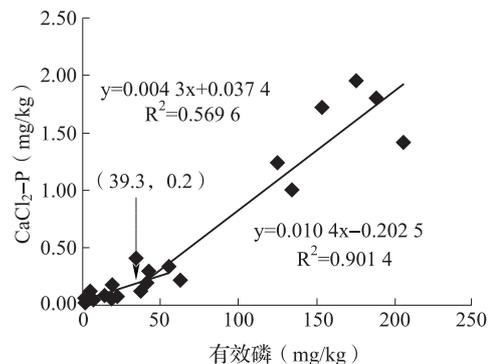


图 3 土壤有效磷与 CaCl₂-P 之间的关系

3 讨论

3.1 作物高产的土壤有效磷临界值

作物产量不提高时土壤有效磷最低值称土壤有效磷临界值, 土壤有效磷低于作物高产临界值时产量明显降低, 会对农民造成经济损失, 但高于临界值时不宜进一步增加有效磷含量。不同地区作物高产所需临界值不同, 可能与不同土壤磷的有效性受土壤 pH、有机质含量、水分状况等因素影响有关, 而同一种土壤上, 不同作物对土壤磷素需求程度不同, 使得高产所需的临界水平也不同^[7]。前人的研究表明, 冬小麦高产土壤有效磷临界值为 7 ~ 20 mg/kg^[7,17], 夏玉米有效磷临界值为 7 ~ 15 mg/kg^[7,23]。Tang 等^[6]利用 3 种不同的模型(双直线模型, 直线平台模型和米切里西模型)对昌平、郑州和杨陵长期定位试验点冬小麦夏玉米高产土壤有效磷临界值的研究结果表明, 冬小麦和夏玉米在 3 个不同地方达到最高产量时的有效磷平均含量分别为 19.0、12.5、17.3 mg/kg 和 17.3、12.1、16.4 mg/kg, 其中由米切里西模型得出到达相对产量增加的 90% 时杨陵塿土冬小麦和夏玉米高产有效磷临界值分别为 22.4 和 20.1 mg/kg, 是双直线模型和直线平台模型的约 1.5 倍。本研究用米切里西模型得出, 达到相对产量的 90% 时冬小麦有效磷临界值为 26.2 mg/kg, 夏玉米为 13.9 mg/kg, 与 Tang 等的结果相比, 冬小麦临界值差异较小, 而夏玉米临界值差异较大, 这很可能是因为 Tang 等采用的是相对产量增加的百分比与土壤有效磷含量回归的结果, 而本研究采用的是作物相对产量和土壤有效磷含量回归的结果, 另外, 所采用的米切里西指数模型也略有不同。Bai^[5]等用直线平台模型得出杨陵塿土上冬小麦和夏玉米高产时有效磷临界值分别为 16.1 和 14.6 mg/kg。本研究与其冬小麦的临界值差异较大, 而夏玉米的结果基本相同, 这可能是由于所采用的模型不同所致, 此外本研究所采用的数据量要多于 Bai 等的研究, 故本研究的结果更具代表性。综上可知, 塿土上冬小麦有效磷的临界值为 26.2 mg/kg, 夏玉米的临界值为 13.9 mg/kg。夏玉米所需有效磷水平低于冬小麦, 与夏季气温高, 土壤中有效磷活性高, 土壤供磷能力强有关^[6]。且玉米根系能够分泌质子和羧酸, 酸化根际土壤使磷的生物有效性提高^[24], 从而导致夏玉米高产所需有效磷水平显著低于冬小麦。关中地区冬小麦-夏玉米轮作情况下, 磷肥应尽量多施在冬小麦上, 夏玉米可以适当少施。

3.2 塿土的磷淋溶临界值

在中国, 每年通过地表径流、土壤侵蚀和淋溶

从农业土地损失的磷约为 299 ~ 490 kt, 高达总磷肥投入的 10%^[25-26]。一般认为, 地表径流和土壤侵蚀是磷素流失的主要途径^[16], 但近年相关研究表明, 连续长期大量施用磷肥, 导致耕层土壤中磷素大量累积, 磷素渗漏淋溶量增大。Maguire 等^[27]研究表明, 农田土壤中磷素以淋溶(包括亚表层径流)作用损失比例高于地表径流, 可见磷素的淋溶不可忽视。Zhao 等^[12]测得我国不同土壤有效磷淋失临界值在 29.96 ~ 156.78 mg/kg 之间, 认为可以通过测定土壤有机质或活性铁的含量来评价土壤磷素淋失的风险。章明奎等^[28]研究结果表明水稻土有效磷淋失阈值为 53 ~ 84 mg/kg, 临界值的高低主要与土壤中粘粒含量有关。同样在塿土上, 刘利花等^[29]的研究结果表明耕层土壤有效磷发生淋溶的阈值为 23 mg/kg, 而本研究结果则为 39.3 mg/kg, 这很可能是因为所用土壤有效磷的最大含量不同引起的, 其土壤有效磷含量最大只有 60 mg/kg 左右, 而本研究的最大有效磷含量达到了 205 mg/kg。黄绍敏等^[30]发现潮土有效磷淋失阈值 40 mg/kg, Bai 等^[5]对不同类型土壤研究发现, 临界点处有效磷含量在杨凌为 39.9 mg/kg。本研究结果与黄绍敏等和 Bai 等的研究结果非常接近。

3.3 塿土区推荐施磷建议

在付莹莹等^[31-32]划分的关中地区塿土的磷养分丰缺指标体系中, 冬小麦有效磷丰缺等级可划分为低 (< 10 mg/kg)、中 (10 ~ 30 mg/kg)、高 (30 ~ 45 mg/kg) 和极高 (> 45 mg/kg); 夏玉米可划分为低 (< 10 mg/kg)、中 (10 ~ 25 mg/kg)、高 (25 ~ 40 mg/kg) 和极高 (> 40 mg/kg)。该丰缺指标体系仅考虑了作物的反应和土壤有效磷的分布状况, 而没有考虑到高磷时的环境风险。根据本研究的结果, 当塿土的有效磷含量大于 39.3 mg/kg 时, 发生磷淋溶的风险显著增加, 其可以作为塿土区作物推荐施肥时磷临界值(丰缺等级极高)的上限, 这样可以兼顾作物反应和施肥环境效应。根据上述结果, 塿土上冬小麦有效磷的临界值为 26.2 mg/kg, 夏玉米的临界值为 13.9 mg/kg。为方便、实用起见进行取整, 塿土区土壤有效磷的极高等级以 40 mg/kg 为宜, 冬小麦的丰缺等级高以 25 mg/kg 为宜, 夏玉米的丰缺等级高以 15 mg/kg 为宜。故对于塿土区来说, 冬小麦有效磷的丰缺等级的高和极高可分别调整为 25 ~ 40 和 > 40 mg/kg, 而夏玉米有效磷的丰缺等级的高和极高则可调整为 15 ~ 40

和 >40 mg/kg。

鲁如坤等^[19]认为,可以根据土壤有效磷的消长,推断作物反应以及磷肥需要。据“磷钾肥恒量监控技术”中磷肥用量的推荐,土壤有效磷低于丰缺指标高的地块施肥时,建议磷肥用量为作物收获带走磷素的 130% ~ 150%^[18]。土壤有效磷等于丰缺等级高的地块施肥时,采用养分平衡法确定施肥量,即施肥量等于作物的携出量。土壤有效磷高于丰缺指标等级高的田块施肥时,采用“启动施磷”法,即施肥量等于作物携出量的 1/4 或 1/5^[19]。根据本长期试验的研究结果,氮磷养分平衡的处理(NP、NPK、SNPK、M1NPK 和 M2NPK)小麦的地上部吸磷量 22 年的平均值为 26.9 kg/hm²,玉米为 24.5 kg/hm²。据本研究得出的塿土区冬小麦和夏玉米高产有效磷临界值、土壤有效磷淋溶临界值及上述推荐施磷量的计算方法可计算推荐施磷量,其中土壤有效磷水平介于作物高产临界值和淋溶阈值之间时,作物磷携出量采用的范围为多年平均值(多年平均值 + 1 倍标准差)。经计算取整后可得,冬小麦的推荐施磷量:土壤有效磷含量 <25 mg/kg 时,施磷量应为 P₂O₅ 80 ~ 95 kg/hm²;土壤有效磷含量为 25 ~ 40 mg/kg 时,冬小麦施磷量为 P₂O₅ 60 ~ 80 kg/hm²;有效磷含量 >40 mg/kg 时,冬小麦施磷量为 P₂O₅ 10 ~ 15 kg/hm²。夏玉米的推荐施磷量:当土壤有效磷含量 <15 mg/kg 时,施磷量为 P₂O₅ 70 ~ 85 kg/hm²;土壤有效磷含量为 15 ~ 40 mg/kg 时,施磷量为 P₂O₅ 55 ~ 70 kg/hm²;有效磷含量 >40 mg/kg 时,施磷量为 P₂O₅ 10 ~ 15 kg/hm²。对于极低和极高的地块,可分别考虑多施磷和不施磷。

已有的报道表明,在冬小麦-夏玉米轮作制中,将磷肥重点施于冬小麦,麦收后土壤中残留磷肥对下茬夏玉米的有效程度几乎与夏玉米当季施磷的效果相当^[33]。在中、高肥力土壤上,冬小麦-夏玉米一年两熟制茬口间磷肥分配应掌握“重冬轻夏”的原则,在不降低粮食产量的前提下,可提高磷肥利用效率并降低了成本^[33-34]。冬小麦-夏玉米轮作是目前本区域的主要种植形式,应将小麦-玉米作为一个整体,在区域磷分期调控中将小麦-玉米轮作周期的磷统一运筹,2/3 磷肥用在小麦季,1/3 磷肥用在玉米季^[18]。在考虑农田土壤有效磷状况、冬小麦和夏玉米高产有效磷临界值等因素的情况下,在冬小麦-夏玉米轮作体系下,冬小麦的推

荐施磷量:当土壤有效磷含量 <15 mg/kg 时,施磷量为 P₂O₅ 100 ~ 120 kg/hm²;土壤有效磷含量 15 ~ 25 mg/kg 时,施磷量为 P₂O₅ 90 ~ 100 kg/hm²;土壤有效磷含量为 25 ~ 40 mg/kg 时,施磷量为 P₂O₅ 80 ~ 90 kg/hm²;有效磷含量 >40 mg/kg 时,施磷量为 P₂O₅ 15 ~ 20 kg/hm²。夏玉米的推荐施磷量:当土壤有效磷含量 <15 mg/kg 时,施磷量为 P₂O₅ 50 ~ 60 kg/hm²;土壤有效磷含量 15 ~ 25 mg/kg 时,施磷量为 P₂O₅ 45 ~ 50 kg/hm²;土壤有效磷含量 25 ~ 40 mg/kg 时,施磷量为 P₂O₅ 40 ~ 45 kg/hm²;有效磷含量 >40 mg/kg 时,施磷量为 P₂O₅ 5 ~ 10 kg/hm²。

根据付莹莹等^[31-32]的调查结果,在当地农民习惯施肥和管理模式下,关中地区塿土有效磷含量在 26.25 ~ 29.62 mg/kg,平均为 28.02 mg/kg,说明该地区有效磷含量普遍较高,本研究推荐养分含量高时的施磷量可作为一个普遍的施磷标准,但还需在田间进行多点的进一步验证。有机肥施用一般是以氮的含量为基础^[3,6,12],连续大量施用有机肥,使土壤中有效磷大量积累,远超过了作物的高产要求^[35-36],增加了向环境流失的风险,建议有机肥的施用应加强磷素方面的管理。

4 结论

塿土冬小麦土壤有效磷临界值为 26.2 mg/kg,夏玉米为 13.9 mg/kg。

土壤有效磷随全磷的增加存在明显的临界点,当全磷含量高于 1.15 g/kg 时,增加单位量有效磷所需施磷量大大减少;土壤有效磷含量大于 39.3 mg/kg 时,磷素淋溶风险增大。

塿土区无轮作的情况下,当土壤有效磷含量 <25 mg/kg,冬小麦施磷量应为 P₂O₅ 80 ~ 95 kg/hm² 以上;土壤有效磷含量为 25 ~ 40 mg/kg 时,冬小麦施磷量为 P₂O₅ 60 ~ 80 kg/hm²;当有效磷含量 >40 mg/kg 时,冬小麦施磷量为 P₂O₅ 10 ~ 15 kg/hm²。当土壤有效磷含量低于 15 mg/kg 时,夏玉米施磷量为 P₂O₅ 70 ~ 85 kg/hm² 以上;土壤有效磷含量为 15 ~ 40 mg/kg 时,夏玉米施磷量为 P₂O₅ 55 ~ 70 kg/hm²;当有效磷含量 >40 mg/kg 时,夏玉米施磷量应为 P₂O₅ 10 ~ 15 kg/hm²。在冬小麦-夏玉米轮作体系下,当土壤有效磷含量为 <15 、15 ~ 25、25 ~ 40 和 >40 mg/kg 时,冬小麦施磷量分别为 P₂O₅ 100 ~ 120、90 ~ 100、80 ~ 90 和 15 ~ 20

kg/hm², 夏玉米施磷量分别为 P₂O₅ 50 ~ 60、45 ~ 50、25 ~ 40 和 5 ~ 10 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 王圣瑞, 马文奇, 徐文华. 陕西省小麦施肥现状与评价研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21 (1): 31-37.
- [2] 魏孝荣, 郝明德, 张春霞. 黄土区长期定位培肥试验对土壤肥力的影响 [J]. 水土保持研究, 2003, 10 (1): 37-39.
- [3] 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.
- [4] 宋春雨, 韩俊杰, 高崇升. 土壤有效磷及其化学测试方法研究进展 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, 26 (3): 283-287.
- [5] 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.
- [6] Tang X, Ma Y, Hao X, et al. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China [J]. Plant and Soil, 2009, 323: 143-151.
- [7] Johnston A E, Poulton P R, White R P. Plant-available soil phosphorus. Part II: the response of arable crops to Olsen P on a sandy clay loam and a silty clay loam [J]. Soil Use and Management, 2013, 29 (1): 12-21.
- [8] Higgs B, Johnston A E, Salter J L, et al. Some aspects of achieving sustainable phosphorus use in agriculture [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29 (1): 80-87.
- [9] McDowell R, Sinaj S, Sharpley A, et al. The use of isotopic exchange kinetics to assess phosphorus availability in overland flow and subsurface drainage waters [J]. Soil Science, 2001, 166 (6): 365-373.
- [10] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29 (1): 105-110.
- [11] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment [J]. Journal of Environmental Quality, 1995, 24: 904-910.
- [12] Zhao X R, Zhong X Y, Bao H J, et al. Relating soil P concentrations at which P movement occurs to soil properties in Chinese agricultural soils [J]. Geoderma, 2007, 142: 237-244.
- [13] 鲁如坤, 史陶钧. 土壤磷素在利用过程中的消耗与累积 [J]. 土壤通报, 1980, 5: 6-8.
- [14] 孙克刚, 李丙奇, 和爱玲, 等. 砂姜黑土区麦田土壤有效磷丰缺指标及推荐施磷量研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28 (2): 159-161, 182.
- [15] 刘志琴, 丁桂云, 袁冬梅, 等. 小麦磷的临界值试验研究 [J]. 现代农业科技, 2011, 20: 47, 50.
- [16] Peaslee D E. Relationships between relative crop yields, soil test phosphorus levels, and fertilizer requirements for phosphorus [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1978, 9 (5): 429-442.
- [17] Colomb B, Debaeke P, Jouany C, et al. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France [J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26 (2): 154-165.
- [18] 陈新平, 张福锁, 崔振岭, 等. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006. 75-84, 103.
- [19] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护 [J]. 磷肥与复肥, 2003, 18 (1): 4-8.
- [20] Tunney H, Carton O T, Brookes P C, et al. Phosphorus loss from soil to water [M]. UK: CAB international, 1997, 164 (4): 253-271.
- [21] 刘建玲, 廖文华, 王新军, 等. 大量施用磷肥和有机肥对白菜产量和土壤磷积累的影响 [J]. 中国农业科学, 2006, 39 (10): 2147-2153.
- [22] Sharpley A N, Daniel T, Sims T, et al. Agricultural phosphorus and eutrophication [R]. USA: United States department of agriculture, 2003.
- [23] Mallarino A P, Atia A M. Correlation of a resin membrane soil phosphorus test with corn yield and routine soil tests [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69 (1): 266-272.
- [24] Zhang F S, Shen J B, Zhang J L, et al. Rhizosphere processes and management for improving nutrient use efficiency and crop productivity: implications for China [J]. Advances in Agronomy, 2010, 107: 1-32.
- [25] Ma L, Ma W Q, Velthof G L, et al. Modeling nutrient flows in the food chain China [J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39 (4): 1279-1289.
- [26] Wang F, Sims J T, Ma L, et al. The phosphorus footprint of China's food chain: implications for food security, natural resource management, and environmental quality [J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40 (4): 1081-1089.
- [27] Maguire R O, Sims J T. Measuring agronomic and environmental soil phosphorus saturation and predicting phosphorus leaching with Mehlich3 [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66 (6): 2033-2039.
- [28] 张慧敏, 章明奎. 稻田土壤磷淋失潜力与磷积累的关系 [J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24 (1): 59-62.
- [29] 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.
- [30] 黄绍敏, 郭斗斗, 张水清. 长期施用有机肥和过磷酸钙对潮土有效磷积累与淋溶的影响 [J]. 应用生态学报, 2011, 22 (1): 93-98.
- [31] 付莹莹, 同延安, 李文祥, 等. 陕西关中灌区冬小麦土壤养分丰缺指标体系的建立 [J]. 麦类作物学报, 2009, 29 (5): 897-900.

- [32] 付莹莹, 同延安, 李文祥, 等. 陕西关中灌区夏玉米土壤养分丰缺指标体系的建立 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28 (1): 88-93.
- [33] 张漱茗, 周景明, 张增俭. 磷肥在冬小麦、夏玉米轮作中的合理分配 [J]. 土壤肥料, 1995, (1): 26-29.
- [34] 孙政才. 全年定量磷肥在冬小麦和夏玉米两茬间合理分配 [J]. 北京农业科学, 1997, 15 (5): 32-34.
- [35] 杨学云. 长期施肥条件下壤土磷素累积与淋失研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [36] 张风华, 廖文华, 刘建玲. 连续过量施磷和有机肥的产量效应及环境风险评价 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (6): 1280-1287.

Research of phosphorus critical value for crop yield and soil leaching, and phosphorus fertilizer recommendation on an anthropogenic Loess soil area

XI Xue-qin¹, SUN Ben-hua^{1*}, CHEN Yong², YANG Xue-yun¹ (1. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture; College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling Shaanxi 712100; 2. College of Information Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling Shaanxi 712100)

Abstract: It can provide a theoretical basis for achieving optimal crop yields and minimal P losses to determine the critical soil P level and reasonable fertilization. Based on a 24-year long-term fertilization experiment on 'The national fertility and fertilizer efficiency monitoring base of loess soil' in Yangling, Shaanxi province, long-term history data and the related analysis of soil were used to determine the critical value of soil Olsen-P for crop yield and soil P leaching threshold by the Mitscherlich index model and the two-segment linear model respectively. The results showed that, the critical value of soil Olsen-P was 26.2 mg/kg for winter wheat, and 13.9 mg/kg for summer maize. There existed an evident change-point on soil Olsen-P along with the increasing of soil total P, which was total P at 1.15 g/kg and Olsen-P at 34.8 mg/kg, and the Olsen-P increased greatly with the increasing of soil total P above the change-point. Similar change-point was found also between soil Olsen-P and CaCl₂-P, the risk of P leaching increased greatly when Olsen-P was above 39.3 mg/kg. Under the condition of no rotation, the application rates of phosphorus fertilizer (P₂O₅) were 80~95, 60~80 and 10~15 kg/hm² respectively, when soil Olsen-P were < 25, 25~40 and >40 mg/kg for winter wheat. The application rates were 70~85, 55~70 and 10~15 kg/hm² respectively, when soil Olsen-P were <15, 15~40 and >40 mg/kg for summer maize. Under the condition of winter wheat-summer maize rotation, the application rates of phosphorus fertilizer (P₂O₅) were 100~120, 90~100, 80~90, and 15~20 kg/hm² for winter wheat, and the application rates of phosphorus fertilizer (P₂O₅) were 50~60, 45~50, 25~40, and 5~10 kg/hm² for summer maize, when soil Olsen-P were <15, 15~25, 25~40 and >40 mg/kg, respectively.

Key words: Loess soil; Olsen-P; critical value; phosphorus application rates