

长期肥料定位试验栗钙土中磷肥在莜麦上的产量效应及行为研究

刘建玲, 杨福存, 李仁岗*

(河北农业大学资源与环境学院, 河北保定 071001)

摘要: 研究了高寒半干旱区 8 年肥料定位试验中, 磷肥和有机肥在莜麦上的产量效应、土壤磷素的平衡、土壤 Olsen-P 及各形态无机磷的变化。结果表明, 单施磷肥(N_0P_1)莜麦增产 30.8%、单施氮肥(N_1P_0)增产 109.4%、氮肥和磷肥配合(N_1P_1)施用莜麦增产 314.0%; NP 间表现出显著正交互作用, NP(N_1 和 P_1)交互作用增产 86.9%; 施用 22.5 和 45.0 t/hm² 有机肥分别比 N_0P_0 处理增产 115.1% 和 220.1%; 施用有机肥基础上增施磷肥无明显增产效应。不同施肥处理土壤 Olsen-P 和各形态无机磷的增减取决于土壤磷素的积累与消耗量, 7 年不施磷肥土壤 Olsen-P 降低 3.3 mg/kg。施用磷肥和有机肥土壤各形态磷库均有不同程度的积累; 土壤磷素积累以无机磷为主, 其中 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 的积累量分别占土壤无机磷变化总量的 19.3% 和 25.4%, Al-P 和 Fe-P 分别占 23.8% 和 14.8%, O-P 和 Ca_{10} -P 共占 13.0%。依据土壤磷素收支平衡状况计算出维持土壤磷素平衡的 P_2O_5 用量为 45.0 kg/hm²。根据肥料效应函数计算出有机肥用量为 0、22.5 t/hm² 时, P_2O_5 的最高产量用量分别为 98.4 kg/hm² 和 87.4 kg/hm²。

关键词: 栗钙土; 肥料定位试验; 磷肥; 莜麦; 产量效应

中图分类号: S147.22; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2006)02-0201-07

The yield responses of naked oats to phosphorus fertilizer and phosphorus behavior in chestnut soil in a long-term experiment

LIU Jian-ling, YANG Fu-cun, LI Ren-gang*

(College of Resource and Environmental Sciences, Hebei Agriculture University, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract: The yield responses of naked oats to phosphorus fertilizer and organic fertilizer, the balance between P input and output, and the changes in soil Olsen-P and inorganic phosphorus fraction pool were studied in 8-year experiments on chestnut soil at arid plateau region. The results showed that P fertilization in combination with N fertilizer could help raise naked oats yield, single application of P (N_0P_1) and N (N_1P_0) fertilizers brought about 30.8% and 109.4% of oats yield, respectively. Combined application of N and P fertilizers (N_1 and P_1) gave an increase of 314.0% compared with the control. There was a significant positive interaction effect of N and P fertilizers on yield which resulted in an increase of 86.9% of oats yield. Application of 22.5 t/ha and 45.0 t/ha of organic fertilizer alone gave an increase of 115.1% and 220.1% compared with N_0P_0 , respectively, however, applying P fertilizer after the application of organic fertilizer did not show a yield-enhancing effect. The content of soil Olsen-P and inorganic phosphorus fractions were changed by applying P fertilizer and organic fertilizer on different treatments, The content of soil Olsen-P decreased by 3.3 mg/kg in no P fertilizer treatment after 7-years cropping. All phosphorus fraction pools addressed with P and organic fertilizers were enhanced at varying degrees. Most of residual P were inorganic phosphorus, among which Ca_2 -P and Ca_8 -P were accounted for 19.2% and 25.3%; Al-P and Fe-P were accounted for 23.4% and 15.3%, respectively; and O-P and Ca_{10} -P were accounted for 13.5% of total inorganic P. According to the balance between P input and output, 45.0

收稿日期: 2005-01-28

修改稿收到日期: 2005-05-27

基金项目: 河北省自然科学基金资助(300130); 河北省教委博士基金; 河北农业大学生物无机试验室资助。

作者简介: 刘建玲(1962—), 女, 河北滦南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事植物营养、施肥与环境研究工作。* 通讯作者感谢河北农业大学刘树庆教授提供 1995 年、1998 年土壤磷后效的产量数据, 廖文华老师参加土壤样品的分析工作。

kg/ha was figured out as the critical rate of P_2O_5 that could maintain the P balance in soil. The recommended application rates of P fertilizer for maximum yield combined with 0 or 22.5 t/ha organic fertilizer using regression equations were 98.4 kg/ha, 87.4 kg/ha respectively.

Key words: chestnut soil; long-term experiment; phosphate fertilizer; naked oats; yield response

关于长期施用磷肥和有机肥对作物产量和土壤肥力的影响多为研究非雨养条件下施用磷肥和有机肥对土壤磷素平衡及各形态磷库的影响^[1-4]。已有资料表明,小麦—玉米轮作中, P_2O_5 用量为 79 kg/hm²时土壤磷素盈余^[5],目前我国 60% 的土壤磷素达到收支平衡^[6],南方土壤磷素盈余为 100%~150%^[7]。不同生态条件、土壤类型及作物种类等因素均影响磷肥的产量效应及在土壤中的转化^[8]。

冀西北高原属高寒半干旱气候区,年均降水量为 393.3 mm,年蒸发量 1850 mm,土壤磷养分胁迫是限制作物产量的重要因素^[9]。因此,研究该区磷肥在作物上的产量效应、土壤中磷肥转化及维持土壤磷素收支平衡的临界用量等对提高该类型区磷肥的产量效益、水分利用效率和土壤生产力具有重要的意义。本研究通过长期肥料定位试验研究高寒半干旱区栗钙土中磷肥和有机肥在莜麦上的产量效应、土壤磷素收支平衡及土壤各形态磷库的变化等,旨在为该类型区土壤磷素的科学管理提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验设在河北省旱农试验区张北试验站。该站位于内蒙古高原的南缘,属寒温带大陆季风气候高寒半干旱生态类型区,海拔 1300~1400 m,年均气温 1~3 °C,大于 10 °C 积温 1962 °C,年降水 250~450 mm(张北试验站的年均降水 390 mm),年蒸发量为 1710~1980 mm,0—200 cm 土体最大有效水贮水量为 115.7 mm,无霜期为 70~120 d,年均日照时数为 2905 h。土壤为砂质栗钙土,土壤母质以石英为主,并含有少量的长石和高岭石,矿物颗粒周边有铁质粘粒胶膜;土壤质地以中砂为主(1~0.25 mm)占 35.6%,细砂(0.25~0.05 mm)占 29.5%,土壤养分贫瘠^[9]。主要理化性状:pH 7.1、全氮 0.6 g/kg、全磷 142.0 mg/kg、无机磷总量 124.6 mg/kg、Olsen-P 4.5 mg/kg、有效钾 60.0 mg/kg、碱解氮 46.0 mg/kg。土壤无机磷组成:Ca₂-P、Ca₈-P、Fe-P、Al-P、O-P、Ca₁₀-P 含量分别为 4.0、9.0、8.9、13.1、58.6、32.0 mg/kg。供试作物为莜麦(品 5),播量为 150 kg/hm²。

试验采用不完全试验设计,氮(N)、磷(P)、有机

肥(M)各 3 水平,组合成 21 个处理,即: M₀N₀P₀、M₀N₀P₁、M₀N₁P₀、M₀N₁P₁、M₀N₁P₂、M₀N₂P₁、M₀N₂P₂; M₁N₀P₀、M₁N₀P₁、M₁N₁P₀、M₁N₁P₁、M₁N₁P₂、M₁N₂P₁、M₁N₂P₂; M₂N₀P₀、M₂N₀P₁、M₂N₁P₀、M₂N₁P₁、M₂N₁P₂、M₂N₂P₁、M₂N₂P₂。小区面积 133.3 m²,1991~1995 年定位种植 5 年,年间作为重复。1995 年开始每个小区按等面积裂区,一个小区按原试验方案种植,另一小区不施磷肥以研究磷肥的后效。其中 N₀、N₁、N₂N 用量分别为:0、60、120 kg/hm²; P₀、P₁、P₂P₂O₅ 用量分别为:0、45、90 kg/hm²(磷肥:单施磷肥处理用重过磷酸钙,其他处理用磷酸二铵,P₂O₅ 为 46%); M 为腐熟有机肥,M₀、M₁、M₂ 分别为有机肥用量:0、22.5、45.0 t/hm²,有机肥含水量 65%,养分含量(风干基):有机质 30%、N 0.45%、P₂O₅ 0.30%、K₂O 0.60%(有机肥的养分和水分含量按各年份测定的平均含量)。

每年 5 月 20 日左右播种,9 月 20 日左右收获。莜麦的生育期依靠自然降水,1991 年春季播种前施肥,1992~1998 年为了土壤保墒改在莜麦收获后秋耕前施肥,所有肥料均做底肥一次撒施后进行翻耕。

1.2 取样及分析方法

每年莜麦收获时每个处理分别选代表性植株样品(地上部),子粒和秸秆烘干后分别粉碎,用于植物养分的分析。

土壤取样时间在莜麦收获后进行,一般在 9 月下旬(此时张北试验区的平均气温为 17~18 °C,0—20 cm 土壤温度约为 16~17 °C)。0—20 cm 土壤取样方法为:每个小区按“S”布点,6~8 个点为一个土壤混合样,控制垄和沟取样点数一致,土壤样品风干后进行土壤养分的分析。

分析方法:土壤无机磷的分析按蒋柏藩和顾益初石灰性土壤无机磷分级方法^[10],其它项目分析按常规植物和土壤方法分析。

2 结果与分析

2.1 磷肥和有机肥在莜麦上的产量效应

磷肥和有机肥在莜麦上的产量效应如表 1 所示。结果表明:单施氮肥和磷肥莜麦分别平均增产

109.4%和30.8%; N_1P_1 比 N_1P_0 莜麦增产 97.7%, 氮和磷配合施用莜麦增产 314.0%, NP 间(N_1 和 P_1) 的交互作用增产 86.9%; N_1P_2 与 N_1P_1 、 N_2P_2 与 N_2P_1 比较, 莜麦产量无明显差异。这些结果说明施用氮肥显著提高了磷肥增产效应, 随磷肥用量的增加其增产效应显著下降。

施用 22.5 和 45.0 t/hm² 有机肥, 莜麦产量分别比 N_0P_0 处理增加 115.1% 和 220.1%; $M_2N_0P_0$ 比 $M_1N_0P_0$ 增产 48.8%; $M_1N_0P_1$ 与 $M_1N_0P_0$ 、 $M_1N_1P_2$ 与 $M_1N_1P_1$ 、 $M_2N_0P_1$ 与 $M_2N_0P_0$ 、 $M_2N_1P_2$ 与 $M_2N_1P_1$ 比较, 莜麦产量均无明显变化或产量有所降低, 这说明了施用有机肥基础上增施磷肥其增产效应显著降低。 $M_1N_0P_1$ 与 $M_1N_0P_0$ 比较, 莜麦增产 2.8%; $M_2N_0P_1$ 与 $M_2N_0P_0$ 比较, 莜麦增产 13.7%, 其原因可能是由于该区土壤供肥能力较低, 土壤氮磷均匮乏, 氮肥的增产效应明显高于磷肥(表 1)。 $M_1N_0P_1$ 处理中有机肥供应的氮素不能满足莜麦的增产需求, 而在 $M_2N_0P_1$ 处理中, 由于增施了 1 倍的有机肥, 也相应增加了 1 倍的氮养分, 因此, 莜麦的增产量较高。

表 1 氮、磷和有机肥在莜麦上的产量效应¹⁾
Table 1 The yield response of naked oats to N, P fertilizers and organic fertilizer

处理 Treat.	M_0		M_1		M_2	
	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)
N_0P_0	405.7	—	872.7	—	1298.8	—
N_0P_1	530.8	30.8	897.5	2.8	1476.2	13.7
N_1P_0	849.5	109.4	1789.1	105.0	1983.4	52.7
N_1P_1	1679.5	314.0	2088.4	139.3	2037.4	56.9
N_1P_2	1678.6	313.8	2030.8	132.7	2038.4	56.9
N_2P_1	1912.7	371.5	2148.6	146.2	1922.8	48.0
N_2P_2	2014.6	396.6	2354.9	169.8	1975.1	52.1

1) 6 年平均产量(1991—1998 年, 不包括 1996、1997)。% = (施肥处理产量 - N_0P_0 处理产量) / N_0P_0 产量 × 100, 下同。

Average yield for 6 years(1991 ~ 1998, without including 1996 and 1997). % = (The yield of fertilizers - The yield of N_0P_0) / The yield of N_0P_0 × 100, same as follow.

由于高寒半干旱区土壤长期处于低养分投入状态, 土壤中氮、磷养分同时缺乏, 因此, 单施任何一种养分的增产效果都受到另一种缺乏养分的限制, 氮和磷表现出显著正交互作用。然而, 由于该区年降水量只有 250~450 mm, 适量施用肥料时作物高产

的限制因子是土壤水分。因此, 在施用高量磷肥或施用有机肥基础上施用磷肥, 其增产效应均显著下降。

根据肥料定位试验结果, 计算出 M_0 、 M_1 用量下莜麦上的氮、磷肥效应函数:

$$M_0 \quad y_0 = 309.5 + 18.2911N + 14.4448P + 0.1264NP - 0.1193N^2 - 0.1756P^2 (F = 4.20^{**})$$

$$M_1 \quad y_1 = 910.3 + 22.4669N + 5.2858P + 0.0874NP - 0.1421N^2 - 0.0832P^2 (F = 6.50^{**})$$

依上式计算出最高产量的 P_2O_5 用量, M_0 时为 98.4 kg/hm², M_1 时为 87.4 kg/hm²。

施用有机肥 45.0 t/hm² (M_2) 时, 计算的肥料效应函数经 F 检验后差异不显著。由于该区土壤生产能力较低, 施用 M_2 有机肥时基本可满足目前莜麦产量水平下所需的氮磷养分, 在此基础上增施磷肥和氮肥无显著增产效应。

2.2 长期施用磷肥和有机肥土壤磷素的收支平衡

不同磷肥、有机肥施用量下, 土壤磷的收支表观平衡如表 2 所示。结果表明: 不施磷处理土壤磷(P) 亏缺 4.09~7.33 kg/hm²; 各施磷处理土壤磷的积累量为 3.56~21.22 kg/hm²。其中, N_1P_1 处理基本上维持了土壤磷的收支平衡并略有盈余; P_1 基础上增加 1 倍的磷肥(P_2), 莜麦的产量无明显增加, 增施的磷肥主要增加了土壤磷的积累量; 在相同磷肥用量(P_1) 时增加 1 倍的氮肥, 土壤磷素积累量明显减少, 如 N_2P_1 处理, 土壤磷呈现出略为亏缺。这是由于单施磷肥时, 土壤氮素不足限制了作物生长, 莜麦产量较低, 从土壤中携走的磷量较少, 致使土壤积累磷量较高。相反, 增加氮肥用量, 莜麦产量较高, 土壤积累磷素逐渐降低。

施用 22.5 和 45.0 t/hm² 有机肥, 土壤磷(P) 的积累量为 3.72 kg/hm² 和 44.71 kg/hm²; 磷肥和有机肥配合施用, 土壤磷(P) 的积累量分别为 6.67~29.70 kg/hm², 37.89~75.88 kg/hm²。这是由于每年施用 22.5 t/hm² 有机肥, 相当于施用 P 12.8 kg/hm² (表 2)。从目前栗钙土的生产力看, 有机肥的供磷量基本上可以满足作物的需磷量。因此, 施用氮肥的基础上 P_2O_5 用量为 45.0 kg/hm² (P_1) 时基本上可维持土壤磷素的收支平衡, 在此基础上增施磷肥或减少氮肥用量均使土壤积累磷量增加。

表 2 不同处理土壤磷的收支平衡(1991~1997年平均)

Table 2 The balance between P input and output in different treatments(Average from 1991 to 1997)

处理 Treatments		产量 Yield (kg/hm ²)	秸秆 P Straw P (%)	子粒 P Seed P (%)	施入 P P input (kg/hm ²)	支出 P P output (kg/hm ²)	平衡 Balance (kg/hm ²)
M ₀	N ₀ P ₀	405.7	0.188	0.580	0	4.09	-4.09
	N ₀ P ₁	530.8	0.242	0.590	19.65	6.06	13.59
	N ₁ P ₀	849.5	0.193	0.470	0	7.73	-7.73
	N ₁ P ₁	1679.5	0.201	0.500	19.65	16.09	3.56
	N ₁ P ₂	1678.6	0.218	0.580	39.30	18.09	21.22
	N ₂ P ₁	1912.7	0.222	0.570	19.65	20.58	-0.93
	N ₂ P ₂	2014.6	0.226	0.580	39.30	22.07	17.23
M ₁	N ₀ P ₀	872.7	0.200	0.584	12.80	9.08	3.72
	N ₀ P ₁	897.5	0.222	0.590	32.45	9.91	22.54
	N ₁ P ₀	1789.1	0.203	0.591	12.80	18.85	-6.05
	N ₁ P ₁	2088.4	0.201	0.590	32.45	21.89	10.56
	N ₁ P ₂	2030.8	0.225	0.590	52.10	22.40	29.70
	N ₂ P ₁	2148.6	0.218	0.584	29.90	23.22	6.67
	N ₂ P ₂	2354.9	0.226	0.585	49.56	25.91	23.65
M ₂	N ₀ P ₀	1298.8	0.210	0.591	58.60	13.90	44.71
	N ₀ P ₁	1476.2	0.222	0.590	78.26	16.18	62.08
	N ₁ P ₀	1983.4	0.200	0.588	58.60	20.71	37.89
	N ₁ P ₁	2037.4	0.201	0.590	78.26	21.36	56.90
	N ₁ P ₂	2038.4	0.224	0.588	97.91	22.40	75.51
	N ₂ P ₁	1922.8	0.223	0.591	78.26	21.14	57.12
	N ₂ P ₂	1975.1	0.230	0.591	97.91	21.03	75.88

2.3 土壤积累磷的产量效应

连续4年施用磷肥或磷肥、有机肥配施后停止施用磷肥或有机肥又连续种植4年苜蓿,各施肥处理的苜蓿产量(表3)结果表明:第一年种植中,施用磷肥和有机肥的处理土壤积累磷表现出不同程度的增产效应,其中N₁P₁处理比N₁P₀处理苜蓿的产量无明显变化,这是由于N₁P₁处理土壤磷素积累量较低,因此,土壤积累磷素无明显增产效应;N₁P₂与N₁P₁比较,苜蓿增产12.0%;M₁N₀P₀与N₀P₀、M₁N₁P₁与N₁P₁、M₁N₁P₂与N₁P₂比较,苜蓿分别增产72.7%、70.6%和64.3%。第4年种植中,N₁P₁与N₁P₀、N₁P₂与N₁P₁、N₂P₂与N₂P₁比较,苜蓿产量无明显变化;M₁N₀P₀与N₀P₀、M₁N₁P₁与N₁P₁、M₁N₁P₂与N₁P₂比较,苜蓿分别增产52.6%、100.0%和131.3%。说明高寒半干旱区增施有机肥是增加作物产量和提高土壤供磷能力的有效措施。1995年与1998年各施肥处理苜蓿的产量差异较大,是因为该区作物的产量在很大程度上取决于当年的降水量。1995年和1998年的降水量分别为526.3mm和

642.5mm,1998年各处理苜蓿的平均产量均明显高于1995年。1998年各施磷处理苜蓿的增产量明显低于1995年,说明随着种植年限的增加土壤积累磷的增产效应逐渐降低。可见,土壤积累磷的产量效应取决于土壤磷的积累总量,土壤积累磷在苜蓿的增产量与磷肥用量呈正相关。

2.4 长期施用磷肥和有机肥土壤 Olsen-P 的变化

长期施用磷肥和有机肥土壤 Olsen-P 的变化结果(表4)表明:连续7年不施磷肥土壤 Olsen-P 减少了1.7 mg/kg;N₁P₁和N₂P₁处理基本上维持了土壤磷素的收支平衡并略有盈余,土壤 Olsen-P 平均增加了3.3 mg/kg;N₁P₂和N₂P₂处理,由于磷肥施入量远高于苜蓿的支出量,土壤磷素处于盈余状态,土壤 Olsen-P 平均增加了14.7 mg/kg;施用22.5 t/hm²、45.0 t/hm²有机肥,土壤 Olsen-P 分别增加6.7 mg/kg、11.1 mg/kg;有机肥和磷肥配合施用的处理,土壤 Olsen-P 增加18.6~36.5 mg/kg,平均为25.5 mg/kg。

表 3 土壤积累磷在莪麦上的产量效应¹⁾

Table 3 The yield response of naked oats to residual phosphorus in soil

处理 Treat.	1995				1998			
	M ₀		M ₁		M ₀		M ₁	
	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)
N ₀ P ₀	326	—	563	72.7	426	—	650	52.6
N ₀ P ₁	338	3.7	650	99.4	438	2.8	776	82.1
N ₁ P ₀	413	26.7	669	105.2	450	5.6	876	105.6
N ₁ P ₁	425	30.4	725	122.4	450	5.6	900	111.3
N ₁ P ₂	476	46.0	782	139.9	476	11.7	1101	158.5
N ₂ P ₁	606	85.9	888	172.4	551	29.3	1151	170.2
N ₂ P ₂	626	92.0	1025	214.4	600	40.9	1151	170.2

表 4 不同施肥处理土壤 Olsen-P 的变化量 (mg/kg)

Table 4 The changes of soil Olsen-P in different treatments

处理 Treatments	1992	1993	1994	1997
M ₀ N ₁ P ₀	0	-0.5	-0.2	-1.7
N ₁ P ₁	1.7	3.0	1.7	3.6
N ₁ P ₂	3.0	5.3	5.9	18.4
N ₂ P ₁	1.4	1.6	2.3	3.0
N ₂ P ₂	4.1	1.5	5.7	10.9
M ₁ N ₁ P ₀	1.5	2.2	3.0	6.7
N ₁ P ₁	4.2	4.2	15.7	20.2
N ₁ P ₂	12.0	17.0	19.0	22.5
N ₂ P ₁	3.7	4.7	11.1	18.6
N ₂ P ₂	10.8	13.0	16.1	21.1
M ₂ N ₁ P ₀	5.1	8.6	14.2	11.1
N ₁ P ₁	6.0	8.2	16.1	31.9
N ₁ P ₂	14.6	15.3	28.6	28.2
N ₂ P ₁	4.8	4.9	14.6	25.2
N ₂ P ₂	13.4	20.6	28.2	36.5

2.5 长期施磷肥和有机肥土壤各形态无机磷变化

长期施用磷肥和有机肥土壤各形态无机磷的变化如表 5 所示。结果表明:7 年不施磷肥的处理土壤无机磷总量减少了 22.6 mg/kg, 其中, Ca₂-P 和 Ca₈-P 的减少量分别占无机磷减少总量的 12.8% 和 30.1%, Fe-P 和 Al-P 各占 21.2%, O-P 和 Ca₁₀-P 共占 14.6%; N₁P₁ 处理基本上维持了土壤各形态无机磷的收支平衡, 土壤无机磷总量无显著变化; N₁P₂ 处理 Ca₂-P 和 Ca₈-P 的积累量分别占土壤无机磷积累总量的 30.2% 和 16.8%, Fe-P 和 Al-P 分别占 25.2% 和 19.4%, O-P 和 Ca₁₀-P 共占 8.4%; 施用 22.5 t/hm²、45.0 t/hm² 有机肥及有机肥和磷肥配合施用 Ca₂-P 和 Ca₈-P 的积累量分别占无机磷积累总量的 17.5% 和 26.8%, Fe-P 和 Al-P 分别占 23.5% 和 14.0%、O-P 和 Ca₁₀-P 共占 18.1%。可见, 栗钙土中长期施用磷肥和有机肥土壤磷素积累以无机磷为主, 其中 Ca₂-P 和 Ca₈-P 的积累量占土壤无机磷变化总量的 44.7%; Al-P 和 Fe-P 占 38.6%, O-P 和 Ca₁₀-P 共占 16.7%。

表 5 不同施肥处理土壤无机磷的变化 (mg/kg)

Table 5 The changes of soil inorganic P in different treatments

处理 Treatments	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P	Total-P
1991 基础土样 1991 basic soil	4.0	9.0	8.9	13.1	58.6	32.0	125.6
M ₀ N ₁ P ₀ ¹⁾	1.1	2.2	4.1	8.3	56.3	31.0	103.0
M ₀ N ₁ P ₁	6.5	5.3	7.4	12.6	60.1	34.8	126.7
M ₀ N ₁ P ₂	20.5	18.2	22.7	23.7	62.5	32.7	180.3
M ₁ N ₁ P ₀	7.7	16.2	15.0	16.0	54.4	45.3	154.6
M ₁ N ₁ P ₁	22.1	28.5	27.0	22.2	59.4	41.3	200.5
M ₁ N ₁ P ₂	24.0	45.0	40.4	30.1	68.6	41.6	249.7
M ₂ N ₁ P ₀	13.0	27.8	26.8	27.8	62.0	37.7	195.1
M ₂ N ₁ P ₁	30.0	49.3	39.7	33.6	72.0	42.5	267.1
M ₂ N ₁ P ₂	40.6	54.3	49.8	35.8	75.6	46.7	302.8

1) 为 1997 年的土壤样品, Soil sample collected in 1997.

3 讨论

3.1 土壤中的磷肥转化与土壤磷素组成的关系

据报道,磷肥在栗钙土中的转化为: Ca_2-P 和 Ca_8-P 的变化量平均占土壤无机磷变化总量的 42.2%, $Al-P$ 和 $Fe-P$ 为 43.8%, $O-P$ 和 $Ca_{10}-P$ 变化量较少^[11]。本研究结果同样表明, Ca_2-P 和 Ca_8-P 的变化量分别占土壤无机磷变化总量的 19.3% 和 25.4%; $Al-P$ 和 $Fe-P$ 分别为 23.8% 和 14.8%; $O-P$ 和 $Ca_{10}-P$ 变化量较少。土壤 Ca_2-P 和 Ca_8-P 及 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 变化所占无机磷的比重相近。而潮土、潮褐土及褐土中磷肥的动态转化为: Ca_2-P 和 Ca_8-P 的积累与消耗量平均占土壤无机磷变化总量的 71.1%, $Al-P$ 和 $Fe-P$ 为 25.4%^[12]。与潮土、潮褐土及褐土中各形态无机磷素的转化比较,栗钙土中 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 的变化量明显增加。其原因可能是因为本试验所用栗钙土的土壤母质矿物颗粒铁铝含量较高^[13],栗钙土中的磷素组成中 Ca_2-P 、 Ca_8-P 和 $Ca_{10}-P$ 占无机磷总量的 35.8%, $Al-P$ 、 $Fe-P$ 和 $O-P$ 占 64.2%,而潮土、潮褐土和褐土中 Ca_2-P 、 Ca_8-P 和 $Ca_{10}-P$ 占无机磷比重为 74.7%, $Al-P$ 、 $Fe-P$ 、 $O-P$ 占 25.3%^[12]。因此,在栗钙土中磷素积累与消耗量中 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 占土壤无机磷的变化量较高。关于石灰性土壤中母质土壤磷素组成对土壤中磷肥转化的影响有待于进一步探讨。

3.2 维持土壤磷素收支平衡的磷肥临界用量

经济施肥是以获得最大经济效益为原则,经济施肥的上限是经济最佳施肥量、经济施肥的下限是最大利润率施肥量。生产上为了避免自然灾害给肥料投资带来的风险,通常不选用经济最佳($R=0$)这样高的施肥量。在经济水平较高地区一般选用边际利润 $R=0.1\sim 0.3$ 的施肥量,此时追求的是单位面积上获得较高施肥利润,计算的经济最佳施用量未考虑长期施肥对生态环境的影响;而在经济水平较低的地区一般选用 R 较高的施肥量,此时追求的是单位肥料获得较高施肥利润。冀西北高原干旱、半干旱区水分胁迫是影响作物高产的重要因子,肥料投资的风险较大,当地经济水平较低,一般选用边际利润值(R)高于 0.3 的施肥量。

从土壤养分的动态平衡来看,要持续利用该区的土地资源必须保持农田土壤养分的收支平衡,这种平衡受气候、栽培技术、产量水平等因素的影响。维持这一平衡的施肥量应该是持续农业中最低临界值施肥量,低于此值必然导致土壤肥力的下降。依

据本肥料定位试验的结果,当 P_2O_5 用量为 39.2~45.1 kg/hm² 时,可基本维持土壤磷素的收支平衡;氮肥用量较高时(120 kg/hm²),可适量增加磷肥用量。因此,推荐 P_2O_5 的最低临界用量为 45.0 kg/hm²。由上述肥料效应函数及边际效益理论可计算出此施肥量时的边际利润 $R=2.3$ (苜蓿、N、 P_2O_5 价格分别按 2.00、3.80、4.80 yuan/kg 计算)。当施肥量低于此值时,土壤肥力逐渐下降,不能保证农业的持续增长,此施肥量可视为持续高效施肥的临界值;推荐大面积施肥量应以此量为下限,从而达到持续增产高效益的目的。对经济条件较好的地区,可依其经济水平适当降低 R 值,以提高单位面积的施肥效益,但施肥量不宜超过经济最佳施肥量(P_2O_5) 72.9 kg/hm²,施用有机肥时不超过 66.2 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 林葆,林继雄,李家康.长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J].植物营养与肥料学报,1994,1: 6-18.
Lin B, Lin J X, Li J K. The changes of crop yield and soil fertility with long-term fertilizer application [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1994, 1: 6-18.
- [2] 顾益初,钦绳武.长期施用磷肥条件下潮土中磷素的积累、形态转化及有效性[J].土壤,1997(1): 13-17.
Gu Y C, Qin S W. The availability of phosphorus and transformation of residual phosphorus in meadow soil in long-term experiment [J]. Soil, 1997(1): 13-17.
- [3] 陈欣,宇万太,沈善敏.磷肥低量施用制度下土壤磷库的发展变化 II. 土壤有效磷及土壤无机磷组成[J].土壤学报,1997,34(1): 81-87.
Chen X, Yu W T, Shen S M. Changes of soil phosphorus pool under low-input phosphorus fertilization system II. Soil available phosphorus and the composition of soil inorganic phosphorus [J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(1): 81-87.
- [4] 樊廷录,周广业,王勇,等.甘肃省黄土高原旱地冬小麦—玉米轮作制长期定位施肥的增产效果[J].植物营养与肥料学报,2004,10(2): 127-131.
Fan T L, Zhou G Y, Wang Y et al. Long-term fertilization on yield increase of winter wheat-maize rotation system in Loess Plateau dryland of Gansu [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(2): 127-131.
- [5] 李秋梅,陈新平,张福锁, V. Romheld. 冬小麦—夏玉米轮作体系中磷钾平衡的研究[J].植物营养与肥料学报,2002,8(2): 152-156.
Li Q M, Chen X P, Zhang F S, Romheld V. Study on balance of phosphorus and potassium in winter wheat and summer maize rotation system [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 152-156.
- [6] 高祥照,马文奇,崔勇,等.我国耕地土壤养分变化与肥料投入状况[J].植物营养与肥料学报,2000,6(4): 363-369.

- Gao X Z, Ma W Q, Cui Y *et al.* Change of soil nutrient contents and input of nutrients in arable of China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(4): 363-369.
- [7] 鲁如坤,时正元,施建平.我国南方6省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J].*中国农业科学*,2000,33(2): 63-67.
- Lu R K, Shi Z Y, Shi J P. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in southern China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2): 63-67.
- [8] Masasha Uwasawa, Prapit Sangtong, Wisit Cholitkl. Behavior of phosphorus in paddy soils of Thailand II. Fate of phosphorus during rice cultivation in some representative soils [J]. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1988, 34(2): 183-194.
- [9] 张立峰,刘树庆.旱地农业研究[M].北京:中国科学技术出版社,1997.1-8.
- Zhang L F, Liu S Q. The research of in arid soil [M]. *China Science and Technology Press*, 1997. 1-8.
- [10] 顾益初,蒋柏藩.石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J].*土壤*,1990,22(2): 101-102.
- Gu Y C, Jiang B F. The methods of determining inorganic phosphorus in calcareous soil [J]. *Soils*, 1990, 22 (2): 101-102, 110.
- [11] 刘建玲,李仁岗,杨福存.栗钙土磷肥转化与效应的研究[J].*植物营养与肥料学报*,1996,2(3): 206-211.
- Liu J L, Li R G, Yang F C. Transformation of applied phosphorus and yield response of naked oat to P fertilizer in chestnut soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1996,2(3): 206-211.
- [12] 李承绪.河北土壤[M].石家庄:河北科学技术出版社,1990.
- Li C X. Hebei soils [M]. *Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press*, 1990.
- [13] 刘建玲,李仁岗,张福锁.小麦—玉米轮作中磷肥化学行为及积累态磷生物有效性的研究[J].*植物营养与肥料学报*,1999,5(1): 14-20.
- Liu J L, Li R G, Zhang F S. Transformation of applied phosphorus and yield response of naked oat to P fertilizer in chestnut soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(1): 14-20.