

长期施肥条件下灰漠土磷的吸附与解吸特征*

王 斌^{1,2} 刘 骅² 李耀辉³ 马兴旺² 王西和² 马义兵^{1†}

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

(2 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 乌鲁木齐 830091)

(3 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052)

摘 要 通过等温吸附与解吸试验,研究了长期施肥条件下不同水平的灰漠土耕层 0~20 cm 土壤磷素吸附与解吸特征。结果表明,在实验浓度范围内,不同 Olsen-P 水平的灰漠土土壤,随外源磷量的增加,磷的吸附量、解吸量及解吸率均逐渐增大,吸附率逐渐减小。土壤 Olsen-P 含量水平与土壤磷素吸附饱和度(DPS)的大小呈正相关关系。处理间比较,土壤最大吸附量(X_m)值为 CK > NPK \approx NPKM > PK \approx NPKS,且处理间达到极显著差异水平;NPK 处理的吸附常数(K)值与土壤最大缓冲容量(MBC)值均极显著地大于 CK、PK、NPKM 和 NPKS 处理。该 4 个处理间比较: K 值无显著差异,MBC 值 CK 极显著大于 PK 和 NPKS 处理,CK 与 NPKM、PK 与 NPKS 处理间差异不显著。化肥配施有机肥或秸秆的处理土壤易解吸磷(RDP)值极显著大于单施化肥的处理,释磷效果以化肥有机肥配施为最优。

关键词 长期施肥;磷;灰漠土;吸附与解吸

中图分类号 S153.6⁺1 **文献标识码** A

磷是植物生长的不可缺少的营养元素之一,也是农业生产的重要物质保障^[1-2]。我国多数土壤的磷有效性较低,难以满足植物对养分的需求。土壤对施入的磷具有强烈的吸附、沉淀作用,如何降低磷的固定、提高磷的有效性一直是土壤磷素研究领域的热点^[3-5]。20 世纪 50 年代以来,国内外学者从不同角度对土壤磷的吸附与解吸特性展开了研究。Boparai 和 Sharma^[6] 研究发现,黏粒类型与含量、土壤有效磷(Olsen-P)含量在影响土壤磷素的吸附和解吸方面起主要作用。我国研究者提出,土壤 pH、铁铝氧化物、钙、有机质、黏粒含量等均能影响土壤磷的吸附与解吸^[7-8]。不同土壤颗粒组成^[5]、不同土壤黏粒含量^[2]、以及不同土壤类型^[9]的磷素,吸附与解吸变化特性均有显著差异。外源添加腐植酸^[10-11]、聚丙烯酰胺^[4]等也均对土壤磷素的吸附与解吸影响较大。在同一气候和土壤类型(如灰漠土)条件下,长期不同施肥措施的定位肥料试验中,土壤 Olsen-P 含量差异达到显著水平、极差近 30 mg kg⁻¹^[12]; Olsen-P 含量差异如此巨大的灰漠土,其土壤磷素吸

附与解吸有什么特征,土壤 Olsen-P 含量水平间差异对土壤磷的吸附与解吸又有什么影响?本研究基于 22 a 的灰漠土长期定位肥料试验,研究不同施肥处理下的灰漠土土壤磷的吸附与解吸特征,旨在为灰漠土磷素的合理利用与管理、以及优化施肥(磷肥)提供一定的数据依据。

1 材料与方 法

1.1 试验点与处理

长期定位试验位于新疆乌鲁木齐国家灰漠土土壤肥力与肥料效益长期监测站,始于 1990 年,土壤为典型灰漠土。选取长期定位试验中,土壤 Olsen-P 含量差异极显著(见表 1)的 5 种处理,进行土壤磷素吸附与解吸试验。处理分别为:(1)对照处理(CK);(2)磷、钾化肥配施处理(PK);(3)氮、磷、钾化肥配施处理(NPK);(4)氮、磷、钾化肥加有机肥处理(NPKM);(5)氮、磷、钾化肥加秸秆还田处理(NPKS)。其中,CK 处理为只种作物不施肥,PK、

* 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2011211B42)、国家自然科学基金项目(41161054)、国家灰漠土肥力与肥料效益监测站国家公益性行业专项(200903001-03)资助

† 通讯作者,E-mail:ybma@caas.ac.cn

作者简介:王 斌(1981—),男,新疆吐鲁番人,博士研究生,助理研究员,研究方向为土壤磷素高效利用。E-mail:wbx_wm@sina.com, Tel:0991-4501380 转 8013

收稿日期:2012-08-24;收到修改稿日期:2013-01-08

NPK、NPKM、NPKS 四个处理,按照长期定位试验轮作要求种植作物,一年一季。2011 年种植冬小麦,6 月 23 日采集耕层 0~20 cm 土壤,各处理施肥情况见表 2。

表 1 各处理 0~20 cm 土壤性质

Table 1 Soil properties (0~20 cm) of different treatments in the experiment

处理 Treatments	pH	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	速效氮 Available N (mg kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)
CK	9.16	12.70	0.54	0.58	38.82	4.27C	216.8	1.56
PK	9.62	12.48	0.48	0.80	40.09	22.39B	222.0	1.50
NPK	9.26	13.30	0.58	0.92	70.64	13.61BC	284.9	1.50
NPKM	9.26	14.96	0.81	0.90	85.92	45.42A	939.9	1.46
NPKS	9.26	13.41	0.69	0.72	51.55	8.93BC	291.9	1.52

注:表 1 为 2011 年 6 月采集的耕层 0~20 cm 土样,测定指标为吸附与解吸试验开始前土壤肥力性状,数字后的大写字母表示在 $p < 0.01$ 显著水平下比较结果 Note:In Table 1 the soil samples were collected from plough layers (0~20 cm) in June 2011, and the data are properties and fertility of the soils before the adsorption and desorption experiment. The capital letters affixed to the numerical digits mean significantly different at 1% level ($p < 0.01$)

表 2 1990—2011 年年均养分输入量

Table 2 Average annual nutrient input from different sources during 1990—2011

处理 Treatment	化肥 Chemical fertilizer			有机肥 Manure	秸秆 Straw
	N(kg hm ⁻²)	P(kg hm ⁻²)	K(kg hm ⁻²)	M(t hm ⁻²)	S(t hm ⁻²)
CK	0	0	0	0	0
PK	0	29.2~60.2	18.8~50.4	0	0
NPK	99.4~241.5	29.2~60.2	18.8~50.4	0	0
NPKM	29.8~84.9	8.7~22.4	6.7~10.1	30	0
NPKS	89.4~216.7	24.5~50.8	16.9~42.3	0	4.5~9

注:CK 处理为只种作物不施肥;PK 处理的 P、K 施肥量与 NPK 处理一致;NPK 处理施肥量分别为:从 1990 年到 1994 年 N 99.4 kg hm⁻²、P 29.2 kg hm⁻²、K 18.8 kg hm⁻²,从 1994 年到 2011 年 N 241.5 kg hm⁻²、P 60.2 kg hm⁻²、K 50.4 kg hm⁻²;NPKM 中有机肥为羊粪,按有机肥当年利用率 15% 计算与 NPK 处理等 N、P、K 量;NPKS 处理中秸秆全部还田,按秸秆当年利用率 10% 计算与 NPK 处理等 N、P、K 量。化肥中 60% 的氮肥及全部磷、钾肥作基肥,40% 的氮肥作追肥 Notes: CK means no fertilizer applied to the crops. Treatment PK and Treatment NPK were the same in P and K application rate. The application rate of N, P and K was 99.4 kg hm⁻², 29.2 kg hm⁻² and 22.7 kg hm⁻², respectively, in 1990—1994 and 241.5 kg hm⁻², 60.3 kg hm⁻² and 50.4 kg hm⁻² in 1995—2011. In Treatment NPKM, the organic manure was sheep droppings, of which the nutrient contribution was calculated on the basis of 15%, the utilization rate of organic manure in the current year and in Treatment NPKS, the nutrient contribution of the straw was calculated on the basis of 10%, the utilization rate of straw in the current year. The two treatments were designed to have the same nutrient application rates as Treatment NPK. Of the chemical fertilizers, all the P and K fertilizers and 60% of the N fertilizer was used as base fertilizer, and 40% of the N fertilizer as topdressing

1.2 测定项目

1.2.1 土壤等温吸附磷的测定 每个土壤样品称取 2.500 g 各 6 份于 100 ml 离心管中,分别加入含 P 量为 0、25、50、75、100 mg L⁻¹ 的 0.01 mol L⁻¹ CaCl₂ 溶液 25 ml,同时加入 3 滴氯仿以抑制微生物的活动。25℃ 下振荡 1 h,静置平衡 24 h 后离心 (4 000 r min⁻¹, 8 min) 并测定平衡溶液中磷浓度,根据其浓度变化计算土壤的吸磷量。以平衡溶液的磷浓度为横坐标,以土壤的吸磷量为纵坐标绘制

等温吸附曲线,并进行方程拟合。

1.2.2 土壤等温解吸磷的测定 将以上吸附试验的上清液去掉,用 25 ml 饱和 NaCl 溶液洗涤 2 次 (4 000 r min⁻¹, 离心 8 min),以除去游离态磷,每管加 0.01 mol L⁻¹ CaCl₂ 溶液 25 ml,同时加入 3 滴氯仿以抑制微生物的活动。25℃ 下振荡 1 h,静置、平衡 24 h,离心 (4 000 r min⁻¹, 8 min) 取上清液测定解吸磷量,并根据解吸出来的磷占土壤所吸附磷的百分比计算解吸率。

1.2.3 土壤有效磷、有机质等项目的测定 土壤有效磷(Olsen-P)用 pH 8.5 的 0.5 mol L⁻¹ NaHCO₃ 提取,钼锑抗比色法测定;土壤有机质等其他项目的测定均采用土壤农化常规分析方法^[13]。

1.3 数据处理

土壤磷最大缓冲能力(Max buffering capacity of soil phosphorus, *MBC*) (ml g⁻¹) = 吸附反应常数(*K*) × *X_m*^[14],其中,*X_m*为土壤最大吸磷量。土壤易解吸磷(Readily desorbable P, *RDP*):吸附-解吸过程中加磷量为 0 mg L⁻¹时,土壤固相进入液相部分磷的数量^[14]。试验数据采用 SAS 9.1 和 Excel 2003 软件进行统计分析,数据间多重比较采用 LSD 法。

2 结 果

2.1 土壤磷素吸附特性

2.1.1 土壤磷素等温吸附曲线 土壤含磷不同水平的 5 个处理,磷素吸附曲线如图 1 和图 2 所示。加入磷浓度在 0 ~ 100 mg L⁻¹范围内,随外源磷浓度增加,各处理土壤磷吸附量逐渐增大、吸附率逐渐减小;其中,0 ~ 50 mg L⁻¹范围内,除 PK 处理外,吸附量一直呈急速增大趋势;50 ~ 100 mg L⁻¹范围内,5 个处理土壤磷素吸附趋势相对放缓。含磷不同水平的各处理,随外源磷量递增、土壤吸附磷素程度变化趋势为先急后缓、最终趋于平衡趋势,而吸附率呈逐渐下降趋势。为了量化各处理土壤磷素吸附的变化程度,本试验选择用等温吸附方程来模拟外源磷量增加、土壤磷素吸附量增大的过程,具体研究含磷不同水平的各处理的土壤磷素吸附特征。

2.1.2 土壤磷素吸附方程 用平衡法研究土壤体系的磷素吸附现象时,常采用 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 等^[15,24]等温吸附方程,来拟合其

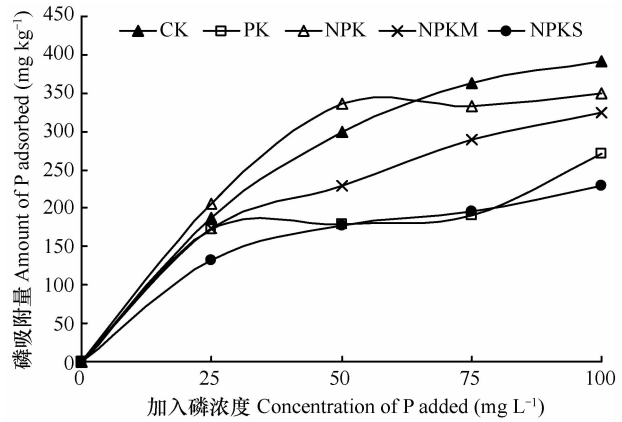


图 1 不同处理土壤磷的等温吸附曲线

Fig. 1 Phosphate isotherm adsorption curves in different treatments

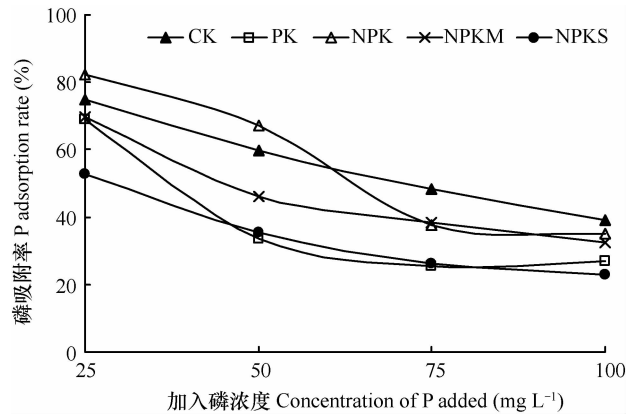


图 2 磷吸附率随外源磷变化

Fig. 2 Change in P adsorption rate with extraneous phosphorus

固体表面吸附量和溶液平衡浓度之间的关系,并可以通过等温吸附方程计算出吸附量等参数值。本研究中,选择了 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 等温吸附方程,模拟含磷不同水平的处理、土壤磷素等温吸附过程,其拟合方程见表 3。

表 3 不同处理等温吸附方程及参数

Table 3 Isothermal adsorption equations and parameters in different treatments

处理 Treatments	Langmuir 吸附等温式 Langmuir adsorption equation			Freundlich 吸附等温式 Freundlich adsorption equation			Temkin 吸附等温式 Temkin adsorption equation		
	$C/X = C/X_m + 1/KX_m$			$X = KC^b$			$X = K_1 \ln C + K_2 \ln K_2$		
	X_m	K	r	b	K	r	K_1	K_2	r
CK	416.7	0.215 6	0.99 **	0.330 5	105.6	0.99 **	91.20	0.254 0	1.00 **
PK	244.6	0.175 3	0.95 *	0.144 1	119.5	0.65	30.72	3.070 4	0.64
NPK	333.6	0.606 5	0.99 **	0.157 2	177.5	0.79	41.24	4.051 1	0.76
NPKM	330.2	0.180 1	0.99 **	0.281 7	96.7	0.99 *	67.01	0.458 0	0.97 *
NPKS	236.1	0.167 4	0.99 **	0.283 4	65.4	0.99 **	48.98	0.176 6	0.99 *

注:“*”和“**”分别表示 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 显著水平 Note: “*” and “**” means significant difference at 5% level ($p < 0.05$) and 1% level ($p < 0.01$)

三种等温吸附方程中(表 3),Langmuir 等温吸附方程的表达式为: $C/X = C/X_m + 1/(KX_m)$,式中, X 为土壤吸磷量, C 为平衡溶液中磷的浓度, K 为与吸附能有关的常数, X_m 为土壤最大吸磷量。Freundlich 等温吸附方程为: $X = KC^b$,式中, X 为单位吸附量, C 为平衡液浓度, K 与 b 是与土壤特性有关的常数。Temkin 等温吸附方程为: $X = K_1 \ln C + K_2 \ln K_2$,式中, X 为单位吸附量, C 为平衡液浓度, K_1 和 K_2 为与土壤性质有关的常数。分别用三种等温吸附方程,对 5 个处理土壤磷素吸附情况进行模拟,等温吸附拟合方程及相关参数值见表 3。结果表明,Langmuir 方程拟合的显著水平($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$)较 Freundlich 方程和 Temkin 方程高,拟合方程相关性好、相关系数 r 值均大于 0.95(表 4),说明 Langmuir 方程为描述灰漠土土壤对磷的吸附特征的最佳方法。因此,本试验选择用 Langmuir 方程,来具体研究土壤磷素的吸附特征。

表 4 各处理 Langmuir 等温吸附方程

Table 4 Langmuir isothermal adsorption equations in different treatments

处理 Treatments	Langmuir 方程 Langmuir equation	相关系数 r
CK	$C/X = 0.0024C + 0.0113$	0.99**
PK	$C/X = 0.0041C + 0.0235$	0.95*
NPK	$C/X = 0.003C + 0.0049$	0.99**
NPKM	$C/X = 0.003C + 0.0178$	0.98**
NPKS	$C/X = 0.0043C + 0.0315$	0.98**

注:“*”和“**”分别表示 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 显著水平

Note: “*” and “**” means significant difference at 5% level ($p < 0.05$) and 1% level ($p < 0.01$)

2.1.3 土壤磷素吸附参数 磷的吸附过程可以用很多参数来表征,本试验选用以下四种参数进行研究:(1)土壤最大吸附量(X_m): X_m 反映土壤胶体吸附点位的多少^[18-19],是土壤磷库容量的一种标志,当土壤磷库达到一定容量时,土壤才有可能向作物提供养分^[2,15]。5 个处理中,CK 处理的 X_m 值最大、高出其他处理 12 倍~18 倍,与其他处理达到极显著差异水平(表 5),NPK 与 NPKM、PK 与 NPKS 处理间差异不显著、但 NPK 与 NPKM 处理均极显著大于 PK 与 NPKS 处理。PK 与 NPK 处理的土壤磷素输入量相同(见表 2),但 PK 处理因缺氮素而产量远小于 NPK 处理^[16-17]、即土壤磷素输出量小于 NPK 处理,土壤磷素盈余量相对较大(见表 1),因此,PK 处理土壤吸附容量相对较小。同理,NPKS 处理土壤磷素输出量小于 NPK 处理,因而土壤磷素吸附容量较小。

(2)吸附常数(K): K 值表示土壤胶体与磷酸根离子亲和力的高低,是土壤吸附的强度因素^[16,18],在一定程度上反映了土壤吸附磷的能级。当 K 为正值时,说明吸附反应在常温下是自发进行的, K 值的大小反映该吸附反应的自发程度,值越大、反应的自发程度越强,生成物越稳定,因而供磷强度较弱^[2]。处理间 K 均为正值,表明各处理的土壤磷素吸附反应在常温下均能自发进行,大小顺序为 NPK > NPKS > CK > NPKM > PK;其中,NPK 处理的 K 值极显著大于其他处理,而其他 4 个处理间差异不显著。表明 N、P、K 肥配施后,土壤吸附磷素强度增强,而不施肥、单施 P、K 肥,以及 NPK 肥配施有机肥或秸秆均能降低土壤对磷的吸附。

表 5 土壤磷的吸附与解吸参数

Table 5 Phosphorus adsorption and desorption parameters in different treatments

处理 Treatments	土壤最大吸附量 Maximum adsorption capacity (X_m)(mg kg ⁻¹)	吸附常数 Adsorption constant (K)	土壤最大缓冲容量 Max buffering capacity of soil P (MBC)(ml g ⁻¹)	磷素吸附饱和度 Phosphorus sorption saturation (DPS)(%)	土壤易解吸磷 Readily desorbable phosphorus (RDP)(mg kg ⁻¹)
CK	416.7A	0.21B	88.78B	1.02D	0.00C
PK	244.6C	0.18B	43.90C	8.83B	0.25C
NPK	333.6B	0.61A	202.7A	4.10C	0.00C
NPKM	330.2B	0.20B	64.37BC	14.24A	3.82A
NPKS	236.1C	0.24B	53.37C	3.87CD	1.39B

注:数字后面的字母表示差异显著水平为 $p < 0.01$ Note: The capital letters affixed to the numerical digits mean significant difference at 1% level ($p < 0.01$)

(3) 土壤最大缓冲容量 (MBC): MBC 为 Langmuir 方程中 K 与 X_m 的乘积, 即 $MBC = KX_m$; 它是磷吸附强度 (K) 与容量 (X_m) 两个因子的综合参数, 是判断土壤供磷特性的一项综合指标^[15,18-19]。该值越大, 说明土壤贮存磷的能力越强、供磷特性越大。当土壤间供磷强度相近时, MBC 值大者, 其有效磷贮量多, 土壤向作物提供的有效磷就多; 当土壤间的吸附磷量相近时, MBC 值大者, 其吸附的磷所处能态较低, 吸附的磷较易被作物吸收利用, 因而其供磷强度就较小^[3,20]。如表 5 所示, NPK 处理的 MBC 值最大、并与其他处理形成极显著差异, CK 处理极显著大于 PK 和 NPKS 处理, PK、NPKM、NPKS 处理之间差异不显著。处理间比较, NPK 处理因具有极大值 K 与相对较大的 X_m 值, 而 MBC 值极显著大于其他处理; CK 处理具有极大的 X_m 值、因而 MBC 值极显著大于 PK 和 NPKS、而小于 NPK 处理; PK、NPKS 之间因 K 值、 X_m 值差异均不显著, 故 MBC 值也无显著差异。

(4) 磷素吸附饱和度 (DPS): DPS 反映了土壤有效磷含量与最大吸附量之间的比例关系^[2]。 $DPS = \text{土壤可提取磷 (Olsen-P)} \times 100 / \text{磷的最大吸附量}$, 磷的最大吸附量由 Langmuir 方程计算。从表 5 中可以看出, 处理间的磷素吸附饱和度关系为: $NPKM > PK > NPK > NPKS > CK$; 其中, 除 NPKS 与 CK、NPK 关系不显著外, 其余处理间均达到极显著差异水平; 处理间 DPS 值大小变化趋势与土壤 Olsen-P 含量变化趋势一致(表 1)。

2.2 土壤磷素解吸特性

2.2.1 土壤磷素的解吸量和解吸率

磷素在土壤中的解吸过程通常被认为是吸附的逆向过程, 涉及到被吸附磷的再利用。从图 3 和图 4 看出, 随外源磷用量的增加, 含磷不同水平的各处理土壤磷素解吸量均逐渐增加, 表明土壤磷的解吸量与外源磷的加入量有关。处理间比较, 解吸量大小顺序为 $CK > NPKM > PK > NPKS > NPK$ 。解吸磷量占解吸前吸附磷量的百分数即为磷的解吸率, 解吸率与解吸量的变化趋势相似, 均随外源磷量增加而增大, 这一结果与陈波浪等^[2]、郭胜利等^[21] 和陈波浪等^[22] 研究结果一致。处理间的解吸率差异为: $PK > NPKM > CK > NPKS > NPK$, 这一变化趋势与处理间 K 值的变化呈显著负相关(见表 5), 即 K 值越大、其土壤解吸率越小。NPK 处理的 K 值极显著的大于其他 4 个处理, 因而, 其解吸率显著较小, 见图 4。

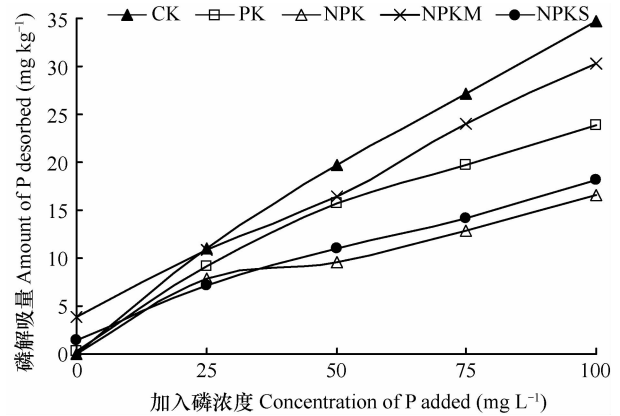


图 3 不同处理土壤磷的等温解吸曲线

Fig. 3 Phosphate isothermal desorption curves in different treatments

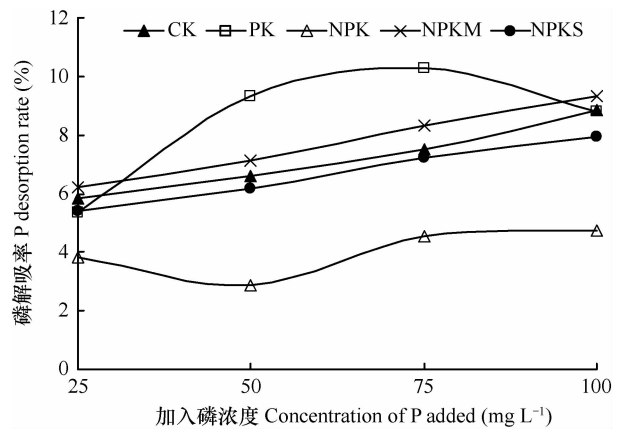


图 4 不同处理土壤磷的等温解吸率

Fig. 4 Phosphate isothermal desorption rates in different treatments

2.2.2 土壤易解吸磷 (RDP)

表 5 显示不同处理间的 RDP 值大小为: $NPKM > NPKS > PK > NPK = CK$; 其中, PK、NPK、CK 三处理间差异不显著, 其余处理间 RDP 值均达到极显著差异水平。处理间的大小关系表明, 化肥配合有机肥、化肥加秸秆还田均能显著增加土壤易解吸磷的含量、影响作用要极显著地大于单施化肥的处理。处理中, 化肥与有机肥配合施用的 RDP 值最大、并与其他处理达到极显著差异水平, 表明化肥配施有机肥能极显著地增加土壤磷素解吸, 对提高土壤有效磷含量作用极为显著。

3 讨论

刘骅等^[12] 研究表明, 灰漠土经过 11 a 长期定位施肥, 不同处理间、土壤有效磷含量达到显著差

异水平(近 30 mg kg^{-1})。本研究中,定位施肥试验又持续了 11 年,各施肥处理间 Olsen-P 含量差异进一步增大,极差值达到 41 mg kg^{-1} 。长期不同施肥措施引起土壤磷素养分盈(施肥输入)亏(生物量输出)差异^[25],土壤磷素的吸附与解吸也发生着相应变化。本研究选用土壤 Olsen-P 含量由低到高的 5 种施肥处理,除 PK 处理外,均分别代表了当今农户长期不同的施肥习惯。

长期生物量输出而无养分输入的 CK 处理,土壤库磷素养分得不到有效补充,土壤处于持续耗竭状态。因而,等温吸附试验中,CK 表现出具有极大的磷素吸附容量(X_m)值和极小的磷素吸附饱和度(DPS)值,在等温解吸试验中则表现为无土壤易解吸磷量;土壤有效磷含量低与磷素吸附量高,又决定了 CK 具有极低的 DPS 值($p < 0.01$)。化肥配施有机肥处理(NPKM)的土壤易解吸磷较大、土壤最大吸附量 X_m 相对较低,因此,NPKM 处理的 DPS 值极显著地大于其他处理。说明土壤磷的吸附量和吸附强度受土壤磷素水平影响较大,这与张海涛等^[14]、何振立等^[3]的观点一致。依据土壤磷素吸附饱和度值,得到 CK、PK、NPK、NPKM、NPKS 五个处理耕层 0~20 cm 土壤达到磷素吸附饱和时的需磷量,分别为 1 287、670、960、828、691 kg hm^{-2} 。如果按照灰漠土土壤磷素饱和时所需要的施磷量、以及每年养分的输入量来计算,那么理论上,PK、NPK、NPKM、NPKS 四个处理大概分别需要 14、36、44、26 a 左右的时间,土壤磷素才可以达到吸附饱和的程度。然而,本研究是将长期定位施肥耕层 0~20 cm 土壤作为研究对象、而并非 0~60 cm 的整个耕作层,采样时间为冬小麦生长的后期、而并非收获后,因此,在长期施肥条件下,土壤达到磷素吸附饱和度的实际时间应该远长于 14~44 a 的时间范围。这个结果也说明,灰漠土上磷素的吸附与解吸是一个动态的、长期的过程,灰漠土具有巨大的磷素吸附容量潜力。

4 结 论

在外源磷浓度 0~100 mg L^{-1} 范围内,灰漠土磷的等温吸附曲线与 Langmuir 方程的拟合度达到显著及以上水平($r \geq 0.95$);不同 Olsen-P 水平的灰漠土土壤,随外源磷量增加,磷的吸附量、解吸量及解吸率均逐渐增大、而吸附率逐渐减小。灰漠土土壤 Olsen-P 含量水平与土壤磷素吸附饱和度(DPS)

的大小呈正相关关系。即,土壤 Olsen-P 含量水平决定了 DPS 值的大小,表明土壤 Olsen-P 含量水平是影响 DPS 的关键因素。

灰漠土不同土壤 Olsen-P 含量水平的处理间比较:土壤最大吸附量(X_m)顺序为 CK > NPK \approx NPKM > PK \approx NPKS、且处理间达到极显著差异水平;CK、PK、NPKM、NPKS 处理间的吸附常数(K)值无显著差异,NPK 处理极显著大于该 4 个处理;NPK 的土壤最大缓冲容量(MBC)值最大、极显著大于其余 4 处理,CK 极显著大于 PK 和 NPKS 处理,CK 与 NPKM、PK 与 NPKS 处理间差异不显著。化肥配施有机肥或秸秆的处理,土壤易解吸磷(RDP)值极显著大于单施化肥的处理、且以化肥有机肥配施效果最优。因此,有机无机肥配施措施是提高土壤供磷水平的最佳推荐施肥方式。

参 考 文 献

- [1] 兰中东,王周琼. 不同处理的灰漠土对磷吸附与解吸的影响. 干旱区研究, 2002, 19(3): 49—51. Lan Z D, Wang Z Q. Effect of gray desert soil fertilized by the different ways on the adsorption and desorption of phosphorus (In Chinese). Arid Zone Research, 2002, 19(3): 49—51
- [2] 陈波浪,盛建东,蒋平安,等. 不同质地棉田土壤对磷吸附与解吸研究. 土壤通报, 2010, 41(2): 303—307. Chen B L, Sheng J D, Jiang P A, et al. Study on characteristics of phosphorus adsorption and desorption of cotton field with different soil textures (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(2): 303—307
- [3] 何振立,朱祖祥,袁可能,等. 土壤对磷吸附特性及其与土壤供磷指标的关系. 土壤学报, 1988, 25(4): 397—404. He Z L, Zhu Z X, Yuan K N, et al. Potential phosphate sorption value from langmuir equation and its application for phosphate fertilizer recommendation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1988, 25(4): 397—404
- [4] 杨雪芹,胡田田,王旭东,等. 聚丙烯酰胺对磷素在土壤中吸附-解析与迁移的影响. 水土保持学报, 2006, 20(1): 87—90. Yang X Q, Hu T T, Wang X D, et al. Effect on PAM on phosphorus adsorption and desorption in lou soil (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(1): 87—90
- [5] 罗敏,王旭东. 不同肥力壤土的土壤颗粒分布及其磷素吸附-解析规律. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 106—109. Luo M, Wang X D. Distribution of particles size and their phosphorus adsorption and desorption characteristics of lou soils with different fertility (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(6): 106—109
- [6] Boparai H K, Sharma K N. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of some soils as affected by clay and available phosphorus content. Journal of the Indian Society of Soil Science, 2006, 54(1): 111—114

- [7] 赵晓齐,鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响. 土壤学报, 1991,28(1):7—13. Zhao X Q, Lu R K. Effect of organic manures on soil phosphorus adsorption (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(1):7—13
- [8] 吕珊珊,杨熙仁,康新茸. 土壤对磷的吸附与解吸及需磷量探讨. 植物营养与肥科学报,1995,1(3/4):29—35. Lu S L, Yang X R, Kang X R. Study on the adsorption and desorption of phosphorus in soils and phosphorus requirement (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 1995, 1(3/4):29—35
- [9] 韩旭,吴东洋,王新刚. 不同土壤对磷的吸附特性研究. 现代农业科技,2011,20:285—286. Han X, Wu D Y, Wang X G. Study on the adsorption characteristics of phosphorus in different soils (In Chinese). *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011, 20:285—286
- [10] 杨凯,关连珠,颜丽,等. 外源腐殖酸对三种土壤磷吸附与解吸特性的影响. 生态学杂志,2009,28(7):1303—1307. Yang K, Guan L Z, Yan L, et al. Effects of exogenous humic acids on soil phosphorus adsorption and desorption (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(7):1303—1307
- [11] 李春越,党廷辉,王万忠,等. 腐殖酸对农田土壤磷素吸附行为的影响研究. 水土保持学报,2011,25(3):77—82. Li C Y, Dang T H, Wang W Z, et al. Influence of humic acid on the adsorption behavior of phosphorus in agricultural soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3):77—82
- [12] 刘骅,王讲利,谭新霞,等. 长期定位施肥对灰漠土磷肥效与形态的影响. 新疆农业科学,2003,40(2):111—115. Liu H, Wang J L, Tan X X, et al. The effect of long-term fertilization on phosphorefficiency and modality in grey desert soil (In Chinese). *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2003, 40(2):111—115
- [13] 鲍士旦. 土壤化学分析. 北京:中国农业出版社,2007. Bao S D. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2007
- [14] 张海涛,刘建玲,廖文华,等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸的影响. 植物营养与肥科学报,2008,14(2):284—290. Zhang H T, Liu J L, Liao W H, et al. Effect of phosphate fertilizer and manure on properties of phosphorus sorption and desorption in soils with different phosphorus levels (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2008, 14(2):284—290
- [15] 夏瑶,娄运生,杨超光,等. 几种水稻土对磷的吸附与解吸特性研究. 中国农业科学,2002,35(11):1369—1374. Xia Y, Lou Y S, Yang C G, et al. Characteristics of phosphate adsorption and desorption in paddy soils (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11):1369—1374
- [16] 王讲利,凌慧娟,孙建光,等. 灰漠土长期定位施肥试验研究. I 施肥对作物产量、肥料效益及水效益影响. 植物营养与肥科学报,2002,8(增刊):82—86. Wang J L, Ling H J, Sun J G, et al. Study of long-term fertilization in gray desert soil. I The effect of fertilization on crop yields, fertilizer and water efficiency (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2002, 8(supp.):82—86
- [17] 曲环,赵秉强,陈雨海,等. 灰漠土长期定位施肥对小麦质量和产量的影响. 植物营养与肥科学报,2004,10(1):12—17. Qu H, Zhao B Q, Chen Y H, et al. Effect of long-term fertilization on wheat quality and yield in grey desert soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 2004, 10(1):12—17
- [18] 张迪,魏自民,李淑芹,等. 生物有机肥对土壤中磷的吸附和解吸特性的影响. 东北农业大学学报,2005,36(5):571—575. Zhang D, Wei Z M, Li S Q, et al. Effect of bio-organic fertilizers on phosphorus adsorption-desorption (In Chinese). *Journal of Northeast Agricultural University*, 2005, 36(5):571—575
- [19] 赵庆雷,王凯荣,谢小立. 长期有机物循环对红壤稻田土壤磷吸附和解吸特性的影响. 中国农业科学,2009,42(1):355—362. Zhao Q L, Wang K R, Xie X L. Effects of organic nutrient recycling on phosphorus adsorption-desorption characteristics in a reddish paddy rice system (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1):355—362
- [20] 郭晓东,张雪琴,杨玲. 甘肃省主要农业区土壤对磷的吸附与解吸特性. 西北农业学报,1997,6(2):7—12. Guo X D, Zhang X Q, Yang L. Phosphorus sorption and desorption properties of agricultural soils in Gansu Province (In Chinese). *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 1997, 6(2):7—12
- [21] 郭胜利,党廷辉,刘守赞,等. 磷素吸附特性演变及其与土壤磷素形态、土壤有机碳含量的关系. 植物营养与肥科学报,2005,11(1):33—39. Guo S L, Dang T H, Liu S Z, et al. Changes in characterization of phosphorus sorption in relation to its forms and soil organic carbon (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 2005, 11(1):33—39
- [22] 陈波浪,盛建东,文启凯,等. 不同施肥制度对红壤耕层磷的吸持特性影响的研究. 新疆农业大学学报,2005,28(1):22—26. Chen B L, Sheng J D, Wen Q K, et al. Effects of different fertilizer system in long-term stationary experiment on the sorption characteristics of phosphate by arable layer red-soils (In Chinese). *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2005, 28(1):22—26
- [23] 高超,张桃林. 面向环境的土壤磷素测定与表征方法研究进展. 农业环境保护,2000,19(5):282—285. Gao C, Zhang T L. Review on environment oriented soil phosphorus testing procedures and interpreting methods (In Chinese). *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(5):282—285
- [24] 陈亚东,梁成华,王延松,等. 氧化还原条件对湿地土壤磷吸附与解吸特性的影响. 生态学杂志,2010,29(4):724—729. Chen Y D, Liang C H, Wang Y S, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of wetland soil under different redox conditions (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4):724—729
- [25] Ma Y B, Li J M, Li X Y, et al. Phosphorus accumulation and depletion in soils in wheat-maize cropping systems: Model and validation. *Field Crops Research*, 2009, 110:207—212

PHOSPHORUS ADSORPTION AND DESORPTION CHARACTERISTICS OF GRAY DESERT SOIL UNDER LONG-TERM FERTILIZATION

Wang Bin^{1,2} Liu Hua² Li Yaohui³ Ma Xingwang² Wang Xihe² Ma Yibing^{1†}

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

(2 Institute of Soil Fertilizer and Agricultural Water Saving, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

(3 College of Pratacultural and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract Phosphorus sorption and desorption characteristics of gray desert soil (0 ~ 20 cm) under long-term fertilization as affected by phosphorus content level were studied through an isothermal P adsorption and desorption experiment. Results show that within the range of P concentrations set for the experiment, in all the gray desert soil samples, regardless of Olsen-P level, P adsorption, P desorption and P desorption rate gradually increased and P adsorption rate gradually decreased, with the increasing amount of extraneous phosphorus added. A positive correlation was observed between Olsen-P content and phosphorus sorption saturation (*DPS*) in the soil. In terms of soil maximum adsorption capacity (X_m), the treatments of the experiment followed a decreasing order of CK > NPK \approx NPKM > PK \approx NPKS, and the differences between the treatments were extremely significant; Treatment NPK was much higher than CK and Treatments PK, NPKM and NPKS in adsorption constant (*K*) and maximum buffer capacity (*MBC*). And the comparison between last four treatments showed no significant difference in *K* value, and CK was extremely higher than Treatments PK and NPKS in *MBC* value, but the difference between CK and Treatment NPKM, and between Treatments PK and NPKS was not significant. Treatments NPKM and NPKS were significantly higher than Treatments NK and NPK in *RDP*, and Treatment NPKM was the highest in P desorption rate.

Key words Long-term fertilization; Phosphorus; Gray desert soil; Adsorption and desorption

(责任编辑:汪枫生)