

长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响*

戚瑞生¹ 党廷辉^{1,2†} 杨绍琼² 马瑞萍¹ 周丽萍³

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(3 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070)

摘要 通过对黄土旱塬地区长期定位施肥(26a)条件下的不同轮作系统的土壤磷素形态和吸持参数的测定,研究了轮作和施肥对土壤磷素吸持特性和磷素形态的影响,以及土壤磷素吸持参数与磷素形态之间的关系。结果表明,长期轮作与施肥均可以减低土壤磷素的最大吸附量(Q_m),相对于其他轮作和连作,在氮磷(NP)施肥下,小麦-玉米-豌豆轮作可以减低土壤的 Q_m,在氮磷有机肥(NPM)施肥下,小麦-玉米轮作可以减低土壤的 Q_m。在施肥相同的条件下,小麦-玉米轮作和小麦-豌豆轮作可以显著增加土壤中各形态无机磷的含量,长期轮作较连作可以增加土壤中的有效磷养分,尤其对 Ca₂-P 的提高效果更为显著。相关分析表明, Q_m 和磷吸持指数(PSI)与全磷(T-P)、Olsen-P、CaCl₂-P、Ca₂-P、Ca₃-P、Fe-P、Ca₁₀-P 和有机磷呈极显著负相关($p < 0.01$),与闭蓄态磷(O-P)呈显著负相关($p < 0.05$),与 Al-P 关系不显著。土壤有机质(SOM)与 Q_m、PSI 和磷最大缓冲能力(MBC)之间存在极显著负相关关系,与磷吸持饱和度(DPSS)存在显著正相关。通径系数和逐步回归分析表明,在石灰性黑垆土土壤的无机磷形态中, Ca₂-P 对 Olsen-P 的贡献最大。

关键词 长期轮作; 长期施肥; 吸持特性; 磷素形态

中图分类号 S153.3; S153.6 **文献标识码** A

在农业生产上施用磷肥是提高作物产量的有效措施之一,然而磷肥的当季利用率一般为 15%~25%,大量磷肥在土壤中积累^[1],当地表径流和土壤侵蚀发生时,土壤磷向水体迁移,不仅造成磷肥资源的损失与浪费,而且会加速附近水体富营养化的产生^[2],因此土壤磷素的研究一直是农田土壤养分研究的热点。土壤对磷的吸附特性既制约到磷肥的有效性又影响磷的流失,因此土壤对磷的吸附与解吸的研究更倍受关注。

长期施肥对土壤磷素的吸附研究^[3-6]以及对磷素形态的影响研究^[7-9]一直受到人们的广泛关注,虽然这些研究结果已表明长期不同施肥对土壤磷素的吸附和形态的影响不同,但长期轮作对土壤磷素的吸附和形态的影响研究还很少。本文以黄土高原旱塬农田土壤为研究对象,通过对黄土旱塬地区长期定位施肥(26a)条件下的不同连作和轮作系统的土壤磷素形态及其吸持参数的测定,研究了长

期轮作和施肥对土壤磷素吸持特性和土壤磷素形态的影响,以及土壤磷素吸持参数与磷素形态之间的关系,旨在为磷肥投入和土壤磷素的科学管理提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验区概况

本试验在中国科学院长武黄土高原农业试验站进行。该地位于黄土高原沟壑区长武县内,东经 107°40',北纬 35°12',平均海拔 1 200 m,年平均降水量 584 mm,其中 7 月至 9 月降水量占年总量的 57%,年平均气温 9.3℃,无霜期 171 d,属半干旱半湿润性季风气候。农业生产主要依赖生育期的天然降水和前期土壤蓄水,属于典型的旱作农业区。土壤为中壤质黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,土层深厚,土质疏松,肥力中等,田间持水量为

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2005CB121102)资助

† 通讯作者,党廷辉,博士,研究员。E-mail: dangth@ms.iswc.ac.cn

作者简介:戚瑞生(1987—),男,甘肃武威人,硕士研究生,主要从事土壤化学研究。E-mail: qiruisheng163@163.com

收稿日期:2011-11-05; 收到修改稿日期:2012-01-26

22.4%,凋萎湿度9%。

1.2 试验设计

长期轮作培肥试验于1984年秋季开始,布置试验时耕层土壤本底有机质含量 10.5 g kg^{-1} ,全氮 0.8 g kg^{-1} ,有效磷 4.58 mg kg^{-1} ,速效钾 129.3 mg kg^{-1} 。试验设计了9个轮作系统和6个施肥系统。轮作系统包括:(1)小麦-玉米轮作(W-C-R,轮作方式为小麦1a→小麦+糜子1a→玉米1a);(2)小麦-玉米轮作Ⅱ(W-C-RⅡ,该轮作系统原本为小麦2a→油菜1a轮作,经过轮作20年后改为小麦1a→小麦+糜子1a→玉米1a轮作);(3)小麦-豌豆轮作(W-P-R,小麦1a→小麦+糜子1a→豌豆1a);(4)小麦-玉米-豌豆轮作(W-C-P-R,小麦2a→玉米1a→豌豆1a);(5)小麦-苜蓿轮作(W-A-R,小麦2a→小麦+苜蓿1a→苜蓿4a→马铃薯1a);(6)小麦-红豆草轮作(W-S-R,小麦1a→小麦+红豆草1a→红豆草1a);(7)小麦连作(W-C);(8)玉米连作(C-C);(9)苜蓿连作(A-C),此外还有裸地(Bare land, BL)处理。施肥系统包括:CK、N、P、NP、M和NPM。CK指不施肥,N指施纯N 120 kg hm^{-2} ,P指施 P_2O_5 60 kg hm^{-2} ,M指施有机肥 75 t hm^{-2} ,氮肥用尿素,磷肥用过磷酸钙,有机肥用牛粪。每个处理重复3次,小区面积 66.67 m^2 。不同轮作系统对应的施肥系统在前期研究中有详细论述^[10]。土壤样品的采集主要选取长期轮作培肥试验中9个轮作系统的NP和NPM施肥处理,以及裸地处理,共14个处理的土壤样品。

1.3 土样采集与分析项目

在2011年冬小麦收获后,所有NP和NPM施肥下的轮作处理均采用多点采样法用土钻采集小区耕层(0~20 cm)混合土样,经风干、过筛后测定土壤有机质(SOM)(采用外加热—重铬酸钾氧化法)、有效磷(Olsen-P)(采用pH8.5的 0.5 mol L^{-1} NaHCO_3 溶液浸提1:20土水比,钼锑抗比色法)、水溶性磷($\text{CaCl}_2\text{-P}$)(采用 0.01 mol L^{-1} CaCl_2 溶液浸提1:10土水比,孔雀绿比色法)、全磷(T-P)(采用硫酸-高氯酸消煮,钼锑抗比色法)、pH(1:2.5土水比,电位法)。无机磷的形态(顾益初-蒋柏藩法^[11]),有机磷(Po)含量通过全磷含量与无机磷(Pi)量的差减得到。

1.4 土壤磷素吸附参数的确定

1.4.1 磷等温吸附实验 称量2.500 g过1 mm筛的风干土,放入100 mL离心管中,分别加入50 ml用 0.01 mol L^{-1} CaCl_2 配制的 KH_2PO_4 溶液(pH=7.0),加入P浓度分别为0、2.5、5.0、10.0、15.0、

20.0、25.0、30.0、50.0和 80.0 mg L^{-1} ,滴加2滴甲苯,在 25°C 条件下振荡24 h, 4000 r min^{-1} 离心15 min,吸取上清液用钼蓝比色法测定平衡液P浓度。P吸附量为加入P浓度与吸附平衡时P浓度之差。最大吸附量(Q_m)和吸附能(k)通过吸附等温线方程: $C/Q = 1/k Q_m + C/Q_m$ 获得。公式中的Q为土壤吸磷量(mg kg^{-1}),C为平衡溶液中磷的浓度(mg L^{-1}),k为与吸附能有关的常数(L mg^{-1}), Q_m 是土壤最大吸磷量(mg kg^{-1})。

1.4.2 磷吸持指数(PSI)^[12] 称取2.500 g过1 mm筛的土壤样品于100 mL离心管中,加入P浓度为 150 mg L^{-1} 的 0.01 mol L^{-1} CaCl_2 溶液50 mL(相当于每克土加P量为1.5 mg),其余步骤与磷等温吸附试验相同。PSI(L mol^{-1}) = $Q/\lg C$,C为平衡溶液中磷的浓度($\mu\text{mol L}^{-1}$),Q为土壤吸磷量(mg kg^{-1})。

1.4.3 磷吸持饱和度(DPSS) 采用计算方法,土壤可提取P量与P最大吸附量之比的百分数^[13],即 $\text{DPSS}(\%) = \text{Olsen-P}/Q_m \times 100$ 。

1.4.4 土壤磷最大缓冲能力(MBC) 计算公式: $\text{MBC}(\text{ml g}^{-1}) = \text{吸附反应常数}(k) \times Q_m$ 。

1.5 数据处理与分析

测定结果经EXCEL初步处理以后,用SPSS13.0软件分析。

2 结果与分析

2.1 不同轮作与施肥对土壤磷素吸持特性的影响

土壤的最大吸磷量(Q_m),指在一定温度(一般指 25°C)条件下土壤吸附磷素的最大量,该数值反映土壤吸附磷素量的潜力。表1显示,在NP施肥下,小麦-苜蓿轮作的 Q_m 最大,为 $374.39 \text{ mg kg}^{-1}$,小麦-玉米-豌豆轮作的 Q_m 最小,较小麦-苜蓿轮作减低了 31.57 mg kg^{-1} 。 Q_m 的大小顺序为小麦-苜蓿轮作(W-A-R) > 小麦连作(W-C) > 小麦-豌豆轮作(W-P-R) > 小麦-玉米轮作Ⅱ(W-C-RⅡ) > 小麦-玉米轮作(W-C-R) > 小麦-红豆草轮作(W-S-R) > 小麦-玉米-豌豆轮作(W-C-P-R)。表明相对于其他轮作,小麦-玉米-豌豆轮作和小麦-红豆草轮作可以减低土壤的最大吸磷量。PSI是土壤磷吸持指数,与 Q_m 之间存在线性相关关系,因此可以反映土壤吸附磷素量的大小。PSI的大小顺序为W-C > W-A-R > W-C-RⅡ > W-S-R > W-P-R > W-C-P-R > W-C-R,其变化趋势与 Q_m 的基本一致。k值是

有关的常数,其大小反映了土壤吸附基质与磷素之间吸附力的变化。小麦-玉米-豌豆轮作的土壤对磷素的吸附力最大,而小麦-红豆草轮作的则最小。土壤磷最大缓冲能力(MBC)可以反映土壤体系对外源磷素缓冲能力的大小,小麦-玉米轮作Ⅱ可以增大土壤磷的最大缓冲能力,而小麦-红豆草轮作则减低了土壤磷的最大缓冲能力。磷吸持饱和度(DPSS)决定于土壤可提取磷素水平和此类土壤的固磷能力,可以将磷吸持饱和度视作磷的土壤环境容量。小麦-玉米轮作的 DPSS 最大,比 DPSS 最小的小麦连作提高了 94.2%,表明小麦-玉米轮作较小麦连作可以提高土壤磷素的吸持饱和度。

在 NPM 施肥下,小麦-玉米轮作Ⅱ的 Q_m 和 PSI 最大,分别为 $318.17 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $262.13 \text{ L mol}^{-1}$, Q_m 最小的小麦-玉米轮作较小麦-玉米轮作Ⅱ的减低了 61.56 mg kg^{-1} ,而 PSI 最小的小麦-豌豆轮作较小麦-玉米轮作Ⅱ的减低了 35.52 L mol^{-1} 。 Q_m 和 PSI 的大小顺序分别为 W-C-RⅡ > A-C > C-C > W-C > W-P-R > W-C-R 和 W-C-RⅡ > C-C > W-C > A-C > W-C-R > W-P-R,两者的变化趋势基本一致。表明相对于其他轮作,小麦-玉米轮作和小麦-豌豆轮作均可以减低土壤的最大吸磷量。从 k 值的大小变化可以看出玉米连作的土壤对磷素的吸附力最大,而小麦-玉米轮作的则最小。对于土壤磷最大缓冲能力,玉米连作可以增大土壤磷的最大缓冲能力,而小麦-玉米轮作则使其减小。小麦-玉米轮作的 DPSS 最大,小麦-豌豆轮作的次之,较 DPSS 最小的苜蓿连作分别提高了 144.5% 和 141.2%,表明小麦-玉米轮作和小麦-豌豆轮作较苜蓿连作可以提高土壤磷素的吸附饱和度。

综上所述,在施肥相同的条件下,不同的轮作系统都能够影响土壤磷素的吸持特性。在施肥不同的情况下,各个轮作系统对土壤磷素吸持特性的影响能力也不一样。在 NP 施肥下,相对于其他轮作,小麦-玉米-豌豆轮作和小麦-红豆草轮作可以降低土壤的最大吸磷量。在 NPM 施肥下,相对其他轮作,小麦-玉米轮作和小麦-豌豆轮作可以降低土壤的最大吸磷量。在相同的施肥条件下,不同的轮作系统对土壤磷素的吸持特性的影响不同,同一轮作系统在不同的施肥情况下对土壤磷素吸持特性的影响也不同,这可能与不同生物学特性的作物在高磷和低磷的土壤中表现出的根际效应和养分吸收特性不同有关。

长期有机肥投入可以导致土壤磷素的吸附量和缓冲容量降低,但可以提高土壤磷素的吸附饱和度和。从表 1 可以看出,W-P-R、W-C-R、W-C-RⅡ和 W-C 轮作系统在 NPM 施肥下的 Q_m 、PSI、k 和 MBC 均较 NP 施肥系统的低,而 DPSS 则较 NP 施肥的高。通过计算 NP 施肥和 NPM 施肥下的四种轮作系统的平均值显示,氮磷有机肥配施的 Q_m 、PSI、k 和 MBC 较 NP 施肥系统的分别减低了 23%、9%、8% 和 29%,而 DPSS 则提高了 347%。表明氮磷有机肥配施较氮磷配施可以降低土壤磷素的最大吸附量、吸附力和最大缓冲容量,同时可以提高土壤磷素的吸附饱和度和,即施用有机肥可以降低土壤磷素的最大吸附量、吸附力和最大缓冲容量,可以提高土壤磷素的吸附饱和度。

长期轮作和施肥可以降低土壤磷素的最大吸附量,可以提高土壤磷素的吸附饱和度。NP 和 NPM 施肥处理的所有轮作系统的 Q_m 平均值较裸地分别降低了 20.9% 和 36.6%,PSI 平均值也分别降低了 10.3% 和 17.6%,表明长期氮磷配施和氮磷有机肥配施均能降低土壤的最大吸附磷量,氮磷有机肥配施降低的效果更明显。MBC 平均值在 NP 施肥下较裸地高,而在 NPM 施肥下较裸地低,表明施用化学肥料可以提高土壤磷素的最大缓冲容量,而施用有机肥则可以使其降低。DPSS 平均值较裸地分别提高了 3.5 倍和 17.0 倍,表明长期施肥可以提高土壤磷素的吸附饱和度。土壤吸持磷的能力有限,对于特定的土壤而言,随着其吸磷量增多,土壤吸持磷的饱和程度逐渐提高,因此,可以将磷吸持饱和度视作磷的土壤环境容量,用以评估土壤的固磷能力及磷随径流或被淋溶流失的风险^[2]。Chrysostome 等^[14]研究表明可以将 DPSS 15% 作为土壤磷素的流失的临界值。在氮磷和有机肥配施的情况下,所有轮作的 DPSS 平均值已达 19.64%,其中小麦-玉米轮作和小麦-豌豆的 DPSS 已高达 28.51% 和 28.12%,远远超过了土壤磷素的环境容量,存在极大的土壤磷素淋失风险。

2.2 不同轮作与施肥对土壤磷素形态的影响

表 2 显示,在 NP 施肥系统中,小麦-玉米轮作的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 显著高于其他轮作和连作,小麦-玉米-豌豆轮作则次之,两者较 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 最低的小麦连作分别提高了 73.2% 和 41.5%。小麦-豌豆轮作的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 最高,小麦-玉米轮作的次之,较最低的小麦-苜蓿轮作分别提高了 86.5% 和 81.0%。而小麦-玉米轮作的

表 1 不同轮作与施肥土壤的磷素吸持参数

Table 1 Parameters of phosphorus adsorption in soils under different fertilization and rotation systems

施肥系统 Fertilization system	轮作系统 Rotation system	Q _m (mg kg ⁻¹)	k (L mg ⁻¹)	R ²	MBC (ml g ⁻¹)	PSI (L mol ⁻¹)	DPSS (%)
氮磷 NP	W-P-R	362.6	0.1083	0.9622	39.25	262.6	5.71
	W-C-R	349.8	0.1095	0.9818	38.30	256.8	7.05
	W-C-R II	358.3	0.1312	0.9870	47.00	267.2	4.60
	W-C	370.8	0.1158	0.9326	42.95	269.4	3.63
	W-A-R	374.4	0.1074	0.9730	40.21	267.3	4.13
	W-S-R	344.2	0.1040	0.9860	35.79	265.0	4.12
	W-C-P-R	342.8	0.1333	0.9718	45.69	261.3	4.92
	平均 Mean		357.6	0.1156		41.31	264.2
氮磷有机肥 NPM	W-P-R	261.6	0.1001	0.9833	26.20	226.6	28.1
	W-C-R	256.6	0.0979	0.9267	25.11	230.1	28.5
	W-C-R II	318.2	0.1140	0.9890	36.28	262.1	13.0
	W-C	275.2	0.1145	0.9970	31.52	246.9	24.2
	C-C	300.9	0.1347	0.9904	40.82	247.9	12.4
	A-C	306.8	0.1015	0.9741	31.13	241.8	11.7
	平均 Mean		286.6	0.1105	0.9768	31.84	242.6
裸地 Bare land		452.3	0.0819		37.02	294.5	1.09

注 Note: Q_m:最大吸附量 Maximum adsorption capacity; k:与吸附能有关的常数 A constant related to bonding energy; R²:相关系数 Correlation coefficients; MBC:最大缓冲能力 Maximum buffer capacity; PSI:磷吸持指数 Phosphorus sorption index; DPSS:磷吸持饱和度 Degree of phosphorus sorption saturation; W-P-R:小麦-豌豆轮作 Wheat-pea-crop rotation; W-C-R:小麦-玉米轮作 Wheat-corn-crop rotation; W-C-R II:小麦-玉米轮作 II Wheat-corn-crop rotation II; W-C:小麦连作 Wheat-continuous cropping; W-A-R:小麦-苜蓿轮作 Wheat-alfalfa-crop rotation; W-S-R:小麦-红豆草轮作 Wheat-sainfoin-crop rotation; W-C-P-R:小麦-玉米-豌豆轮作 Wheat-corn-pea-crop rotation; C-C:玉米连作 Corn-continuous cropping; A-C:苜蓿连作 Alfalfa-continuous cropping

Al-P 和 Fe-P 最高,小麦-豌豆轮作的次之,两者较最低的小麦-苜蓿轮作分别提高了 82.7%、72.9% 和 41.7%、28.5%。小麦-玉米轮作的 O-P 含量最高,小麦-豌豆轮作的次之,较最低的小麦-红豆草轮作分别提高了 64.9% 和 38.1%,较次低的小麦-苜蓿轮作分别提高了 61.9% 和 35.6%。小麦-玉米轮作的 Ca₁₀-P 含量最高,较最低的小麦-苜蓿轮作提高了 14.4%。小麦-玉米轮作的 Ca₂-P、Fe-P、O-P 和 Ca₁₀-P 与其他轮作的多重比较均达到差异显著水平,只有 Ca₈-P 和 Al-P 与小麦-豌豆轮作的差异不显著,但两者与其他轮作的差异显著。表明,在施 NP 的情况下,小麦-玉米轮作的各级无机磷形态含量最高,小麦-豌豆轮作则次之,小麦-苜蓿轮作最低。对于有机磷的影响,小麦-豌豆轮作的有机磷含量最高,小麦-苜蓿轮作次之,两者较最低的小麦-红豆草分别提高了 18.4% 和 12.8%,表明小麦-豌豆轮作有利于有机磷的积累。

在 NPM 施肥系统中,小麦-玉米轮作的 Ca₂-P、Fe-P、O-P 和 Ca₁₀-P 含量都最高,较最低的苜蓿连作分别提高了 113.2%、45.6%、82.5% 和 10.0%,次高的小麦-豌豆轮作较最低的苜蓿连作分别提高了 88.9%、43.5%、69.4% 和 7.5%。小麦-豌豆轮作的 Ca₈-P 和 Al-P 最高,小麦-玉米轮作的则次之,两者较最低的苜蓿连作分别提高了 109.9%、106.3% 和 88.1%、83.2%。多重比较显示,对于 Ca₈-P 和 Fe-P,小麦-玉米轮作和与小麦-豌豆轮作之间的差异不显著,但两者与其他轮作的差异达到显著。小麦-玉米轮作的 Ca₂-P 除了与小麦-豌豆轮作的差异不显著外,与其余轮作的差异显著,但 O-P 和 Ca₁₀-P 与其他轮作的差异均显著。对于 Al-P,除了苜蓿连作的差异显著外,其余轮作和连作之间的差异不显著。苜蓿连作的所有无机磷形态的含量均最低,除了 Ca₂-P 与玉米连作和与小麦-玉米轮作 II 的差异不显著外,其他形态磷与其余轮作的差异均达到显著水

平。表明,在施 NPM 的情况下,小麦-玉米轮作的各形态无机磷含量最高,小麦-豌豆轮作则次之,苜蓿连作最低。对于有机磷的影响,苜蓿连作的有机磷

含量最高,小麦-玉米轮作的次之,两者较最低的玉米连作分别提高了 18.4% 和 14.7%,表明苜蓿连作可以使土壤中有有机磷含量累积。

表 2 不同轮作与施肥土壤的各磷素形态含量

Table 2 Contents of different forms of phosphorus in soils under different fertilization and rotation systems (mg kg^{-1})

施肥系统 Fertilization system	轮作系统 Rotation system	无机磷形态 Forms of inorganic phosphorus						有机磷 Organic phosphorus
		Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P	
氮磷 NP	W-P-R	10.4 ± 0.8bc	115.6 ± 3.9a	44.1 ± 0.9a	37.9 ± 0.6b	58.7 ± 2.8b	369.7 ± 9.2b	295.9
	W-C-R	14.2 ± 2.3a	112.2 ± 5.1a	46.6 ± 2.8a	41.8 ± 0.3a	70.1 ± 5.1a	399.8 ± 6.7a	278.3
	W-C-R II	10.3 ± 0.4bc	92.4 ± 3.0b	38.6 ± 4.1b	35.1 ± 1.2c	57.4 ± 2.2bc	371.7 ± 3.7b	275.0
	W-C	8.2 ± 1.7c	94.4 ± 5.5b	36.7 ± 2.8bc	34.4 ± 0.7c	51.5 ± 2.8d	367.8 ± 0.3b	276.8
	W-A-R	8.6 ± 0.7c	62.0 ± 4.0d	25.5 ± 1.3e	29.5 ± 0.3d	43.3 ± 3.5e	349.4 ± 4.3c	281.9
	W-S-R	11.0 ± 0.8b	78.9 ± 2.5c	30.4 ± 0.8d	29.5 ± 0.9d	42.5 ± 2.1e	353.8 ± 3.0c	250.0
	W-C-P-R	11.6 ± 1.0b	90.7 ± 2.3b	33.2 ± 1.6cd	34.4 ± 1.4c	51.9 ± 2.5cd	368.8 ± 2.4b	253.3
平均 Mean		10.6	92.3	36.5	34.7	53.6	368.7	273.0
氮磷有机肥 NPM	W-P-R	44.2 ± 4.1ab	175.7 ± 5.7a	42.5 ± 0.4a	42.2 ± 0.8a	64.7 ± 2.2b	391.1 ± 3.1b	321.8
	W-C-R	49.9 ± 4.9a	172.7 ± 10.7a	41.4 ± 1.5a	42.8 ± 1.3a	69.7 ± 4.1a	400.0 ± 4.5a	322.8
	W-C-R II	27.7 ± 4.6c	127.9 ± 9.4c	38.6 ± 4.8a	34.5 ± 1.8c	57.1 ± 2.1c	376.2 ± 4.5c	288.1
	W-C	41.0 ± 3.1b	156.9 ± 6.6b	41.2 ± 2.5a	39.7 ± 1.5b	61.9 ± 1.0b	379.2 ± 5.1c	288.2
	C-C	26.3 ± 1.8c	128.1 ± 5.7c	38.5 ± 3.5a	31.8 ± 0.3d	62.7 ± 2.7b	375.6 ± 3.1c	281.5
	A-C	23.4 ± 0.7c	83.7 ± 4.4d	22.6 ± 1.5b	29.4 ± 0.9e	38.2 ± 2.2d	363.7 ± 4.3d	333.2
	平均 Mean		35.4	140.8	37.5	36.7	59.1	381.0
裸地 Bare land		3.8 ± 0.7	44.7 ± 0.8	18.3 ± 2.2	18.8 ± 0.9	30.2 ± 1.7	339.0 ± 4.6	223.7

注 Note: 同一列中不同字母表示差异达到新复极差检验 5% 显著水平, 误差为标准差 ($n=3$)。Different letters in the same column mean significant difference according to Duncan's new multiple range test, $p < 0.05$, error is standard deviation ($n=3$)。W-P-R: 小麦-豌豆轮作 Wheat-pea-crop rotation; W-C-R: 小麦-玉米轮作 Wheat-corn-crop rotation; W-C-R II: 小麦-玉米轮作 II Wheat-corn-crop rotation II; W-C: 小麦连作 Wheat-continuous cropping; W-A-R: 小麦-苜蓿轮作 Wheat-alfalfa-crop rotation; W-S-R: 小麦-红苜蓿轮作 Wheat-sainfoin-crop rotation; W-C-P-R: 小麦-玉米-豌豆轮作 Wheat-corn-pea-crop rotation; C-C: 玉米连作 Corn-continuous cropping; A-C: 苜蓿连作 Alfalfa-continuous cropping

综上所述,无论是在 NP 和 NPM 的施肥情况下,小麦-玉米轮作和 小麦-豌豆轮作的各形态无机磷的含量都较其他轮作的高,而小麦-苜蓿轮作和苜蓿连作的各形态无机磷的含量则最低。由于不同作物的生物学特性不同,其根际效应对土壤养分的活化能力不同,他们对土壤中养分的种类、数量和吸收利用率也不同。说明长期轮作的小麦-玉米轮作和 小麦-豌豆轮作可以培肥土壤,活化土壤中各形态无机磷,使其在土壤中累积,而小麦-苜蓿轮作和苜蓿连作则对土壤中各形态无机磷的活化能力较小,使其累积量较小。

对于长期施肥对土壤磷素形态的影响,在同一轮作系统中,W-P-R、W-C-R、W-C-R II 和 W-C 轮作系统在 NPM 施肥下的 Ca₂-P、Ca₈-P 和有机磷均高

于 NP 施肥的,其他形态的磷含量差异不大。通过计算 NP 和 NPM 施肥下的上述四种轮作系统的平均值得出,氮磷有机肥配施的 Ca₂-P、Ca₈-P、Fe-P、O-P、Ca₁₀-P 和有机磷较氮磷配施的分别提高了 280%、53%、7%、7%、2% 和 8%,而 Al-P 则略有降低。表明氮磷有机肥配施较氮磷配施可以培肥土壤,尤其对 Ca₂-P、Ca₈-P 和有机磷的影响较显著。经过 26a 的长期轮作和施肥,NP 施肥的所有轮作系统的平均 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca₁₀-P 和有机磷较裸地分别提高了 180%、106%、99%、85%、77%、9% 和 22%,而 NPM 施肥的则分别提高了 832%、215%、105%、95%、96%、12% 和 37%。表明,长期施肥可以改变土壤磷素的各个形态含量,同时可以使土壤中各形态的磷累积,长期的农业耕

作和施肥可以培肥土壤,而不会使土壤越来越贫瘠。相对于施用氮磷肥,氮磷有机肥配施对 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca_{10} -P 的含量均略有提高,但可以显著提高速效的 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 含量。因此,长期氮磷肥和有机肥结合施用,可以培肥农田土壤,这与党廷辉^[10]的研究结果一致。

由表 2 可以计算出各个形态磷占全磷的百分比,裸地的 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P、Fe-P、O-P、 Ca_{10} -P 和有机磷占全磷的百分比分别为 0.5%、6.5%、2.7%、2.8%、4.5%、50.0% 和 33.0%,NP 施肥下的平均比例依次为 1.3%、10.4%、4.1%、3.9%、5.9%、42.9% 和 31.5%,NPM 施肥下的平均比例依次为 3.5%、14.0%、3.7%、3.7%、5.9%、38.4% 和 30.8%。在 NP 和 NPM 施肥下,除了 Ca_{10} -P 和有机磷的比例较裸地的低之外,其他形态磷的比例均较裸地的高,尤其是 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 的增幅较大,说明长期施肥可以显著增加土壤中有效磷的含量,而降低无效态 Ca_{10} -P 的含量。在 NPM 施肥下,Al-P、Fe-P、O-P 和有机磷的比例较 NP 施肥的变化不大, Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 的比例显著增大,而 Ca_{10} -P 的比例却显著降低,说明氮磷有机肥配施较氮磷配施的培肥效果显著,可以降低无效态磷的转化,而增加有效态磷的转化比例。

从表 2 可以算出,北方石灰性黑垆土土壤的有机磷和无机磷占全磷的平均比例分别为 31.3% 和 68.7%,说明旱塬黑垆土土壤中无机磷约占全磷的 2/3。无机磷中 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca_{10} -P 占无机磷的平均比例分别为 3.1%、17.0%、5.6%、5.5%、8.6% 和 60.2%,其中 Ca_{10} -

P 占了无机磷量的 1/2 以上,钙磷占了无机磷的 80.3%,表明旱塬黑垆土土壤的无机磷主要以钙磷形态存在。作为速效养分的 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 占无机磷的 20.1%,作为缓效养分的 Al-P 和 Fe-P 占无机磷的 11.1%,而利用效率不高的 O-P 和 Ca_{10} -P 则占了无机磷的 68.8%,表明旱塬黑垆土土壤的有效磷养分占无机磷的比例很小,大多以缓效态和无效态存在。

表 3 显示,在 NP 施肥条件下,小麦与其他作物轮作的 Ca_2 -P 平均值较小麦连作的高 34.3%,而其他形态的磷差异不大,无机磷略有提高,而有机磷略有减低。然而在 NPM 施肥条件下,小麦与其他作物轮作的 Ca_2 -P 平均值略小于小麦连作的 Ca_2 -P,但小麦-玉米轮作的 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 平均值较玉米连作的分别高了 47.5% 和 17.3%,其他形态的磷和有机磷均略有提高。对于 Olsen-P,在 NP 施肥下,小麦与其他作物轮作的 Olsen-P 平均值较小麦连作的高 34.4%。在 NPM 施肥下,小麦与其他作物轮作的 Olsen-P 平均值较小麦连作的降低了 5.7%,但小麦-玉米轮作的 Olsen-P 平均值较玉米连作的提高了 53.1%。表明,在 NP 施肥下,小麦轮作较小麦连作可以提高土壤中有效磷养分的含量,但在 NPM 施肥下,小麦轮作的有效磷养分较连作的略有降低,然而玉米轮作较玉米连作也可以提高土壤中有效磷养分的含量,说明轮作方式较连作方式在一定的范围内可以培肥土壤,这可能不仅与作物的根际效应有关,也与轮作中不同作物吸收带走的磷量不同有关,因为不同作物的养分吸收利用率不同。

表 3 轮作与连作之间土壤磷素形态的比较

Table 3 Forms of phosphorus in soils under continuous cropping or rotation systems ($mg\ kg^{-1}$)

施肥系统 Fertilization system	轮作 Rotation	有效磷 Olsen-P	无机磷形态 Inorganic phosphorus forms						无机磷 Inorganic phosphorus	有机磷 Organic phosphorus
			Ca_2 -P	Ca_8 -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca_{10} -P		
氮磷 NP	W-C	13.44	8.17	94.38	36.74	34.44	51.51	367.8	593.0	276.8
	W-R	18.06	11.0	91.96	36.41	34.69	53.99	368.9	596.9	272.4
氮磷有机肥 NPM	W-C	66.53	41.0	156.9	41.20	39.74	61.94	379.2	719.9	288.2
	W-R	62.74	40.6	158.8	40.86	39.84	63.83	389.1	732.9	310.9
	C-C	37.45	26.4	128.1	38.50	31.82	62.71	375.6	663.1	281.5
	C-R	57.33	38.8	150.3	40.02	38.64	63.39	388.1	719.2	305.5

注 Note: W-C: 小麦连作 Wheat continuous cropping; W-R: 小麦轮作 Wheat crop rotation; C-C: 玉米连作 Corn continuous cropping; C-R: 玉米轮作 Corn crop rotation; W-R 和 C-R 的值分别为小麦与其他作物轮作的平均值和玉米与其他作物轮作的平均值 the value of W-R and C-R refers to the average value of wheat and the other crops in the rotation and of corn and other crops in the rotation, respectively

2.3 土壤磷素吸持参数与其形态和有机质之间的关系

表 4 显示,土壤磷素最大吸附量 Q_m 与 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Fe-P、 Ca_{10} -P 和有机磷呈极显著负相关,与 O-P 呈显著负相关,与 Al-P 的关系不显著。k 值是与吸附能有关的常数,其大小反映土壤吸附基质与磷素之间吸附力的变化,k 值与磷素形态之间的关系都不显著,但与 Al-P、Fe-P 和 O-P 的相关性较其他形态磷的高,表明土壤对磷素的吸附力与 Al-P、Fe-P 和 O-P 关系密切。土壤磷最大缓冲能力 MBC 与 Ca_2 -P 呈极显著负相关,与 Ca_8 -P 和有机磷

之间存在显著负相关。土壤磷素吸持指数 PSI 在一定程度上可以反映土壤磷素的吸持能力,PSI 与 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Fe-P、 Ca_{10} -P 和有机磷呈极显著负相关,与 O-P 呈显著负相关,与 Al-P 的关系不显著。土壤磷素吸附饱和度 DPSS 与 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、 Ca_{10} -P 和有机磷呈极显著正相关,与 Fe-P 和 O-P 呈显著正相关,与 Al-P 的关系不显著。综上所述,北方石灰性土壤的磷素吸持特性与钙磷之间存在密切的关系,尤其是 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P,由此可以认为石灰性土壤的钙磷含量也是土壤磷素吸持特性的主要决定性因素。

表 4 土壤磷素吸持参数与磷素形态的相关关系

Table 4 Correlation coefficients between soil phosphorus adsorption parameters and various P forms ($n = 14$)

吸持参数 Adsorption parameters	无机磷形态 Inorganic phosphorus forms						无机磷 Inorganic phosphorus	有机磷 Organic phosphorus
	Ca_2 -P	Ca_8 -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca_{10} -P		
Q_m	-0.911 **	-0.874 **	-0.532	-0.716 **	-0.657 *	-0.730 **	-0.849 **	-0.762 **
k	-0.092	0.104	0.380	0.245	0.374	0.196	0.168	-0.061
MBC	-0.798 **	-0.602 *	-0.092	-0.322	-0.204	-0.394	-0.522	-0.605 *
PSI	-0.865 **	-0.829 **	-0.494	-0.721 **	-0.633 *	-0.747 **	-0.819 **	-0.851 **
DPSS	0.991 **	0.908 **	0.455	0.647 *	0.600 *	0.688 **	0.849 **	0.696 **

注 Note: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$; Q_m :最大吸附量 Maximum adsorption capacity;k:与吸附能有关的常数 A constant related to bonding energy; MBC:最大缓冲能力 Maximum buffer capacity;PSI:磷吸持指数 Phosphorus sorption index;DPSS:磷吸持饱和度 Degree of phosphorus sorption saturation

由表 5 可见,土壤磷素最大吸附量 Q_m 和吸持指数 PSI 与 T-P、Olsen-P 和 $CaCl_2$ -P 之间均呈现出

极显著的负相关关系,而 DPSS 则反之,呈极显著正相关。MBC 与 Olsen-P 和 $CaCl_2$ -P 呈极显著负相关,

表 5 土壤磷素吸持参数与土壤磷素和有机质的相关关系

Table 5 The correlation coefficients of soil phosphorus adsorption parameters with soil organic matter and soil phosphorus ($n = 14$)

吸持参数 Adsorption parameters	全磷 T-P	有效磷 Olsen-P	$CaCl_2$ -P	土壤有机质 SOM	pH
最大吸附量 Q_m Maximum adsorption capacity (Q_m)	-0.889 **	-0.904 **	-0.852 **	-0.737 **	0.364
与吸附能有关的常数 k A constant related to the bonding energy (k)	0.121	-0.105	-0.087	-0.159	-0.157
最大缓冲容量 MBC Maximum buffer capacity (MBC)	-0.582 *	-0.799 **	-0.737 **	-0.695 **	0.203
磷吸持指数 PSI Phosphorus sorption isotherm (PSI)	-0.888 **	-0.872 **	-0.794 **	-0.763 **	0.405
磷吸持饱和度 DPSS Degree of phosphorus sorption saturation (DPSS)	0.872 **	0.997 **	0.945 **	0.658 *	-0.203

注 Note: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$; T-P:total phosphorus; SOM:soil organic matter

与 T-P 呈显著负相关。k 值与上述指标之间的关系不显著。土壤有机质是土壤固相部分的重要组成部分,其含量与土壤肥力水平是密切相关的。SOM 与 Qm、PSI 和 MBC 之间存在极显著负相关关系,与 DPSS 存在显著正相关。综上表明,土壤中磷素含量和有机质是决定土壤磷素最大吸附量、磷吸持指数、磷最大缓冲能力和磷吸持饱和度的因素之一,土壤磷素和有机质含量高的土壤会降低土壤磷素的吸附量、吸持指数和最大缓冲容量,但可以提高土壤磷素的吸附饱和度。

土壤有机质与 Qm 之间存在负相关,表明有机质可以降低土壤对磷素的吸附量,原因可能在于以下两个方面。一方面,施入土壤中的有机肥在增加土壤有机质的同时,也增加了土壤磷素水平,同时有机肥分解时产生的有机酸可以显著活化土壤本身的磷素,从而导致土壤中的易溶态磷的含量极高。另一方面,有机肥中的碳水化合物可以掩蔽土壤对磷素的吸附位,加上土壤中高含量的磷素,致使土壤磷吸附饱和度的增加,因而导致土壤对磷的吸附固定能力降低。因此,土壤有机质降低了土壤磷素的吸附量。

3 讨 论

长期施用磷肥或者与有机肥配施均可以降低土壤磷素的吸附量,该结果已经得到许多研究者的论证^[4-6,15-16]。长期施用有机肥,土壤磷素大量累积,土壤磷的缓冲能力降低,这与 Sui 等^[17]研究的结果一致。在施肥相同的条件下,长期轮作也可以降低土壤磷素的吸附量。在 NP 施肥下,相对于其他轮作,小麦-玉米-豌豆轮作和小麦-红豆草轮作可以降低土壤的最大吸磷量。在 NPM 施肥下,小麦-玉米轮作和小麦-豌豆轮作较其他轮作可以降低土壤的最大吸磷量。长期轮作对于土壤磷素吸持特性的影响,目前的研究资料几乎是空白,对于上述结果无法论证。

长期施肥可以增加土壤中的有效磷的累积量,这与郭胜利等^[18]和 Hao 等^[19]的研究结果基本一致,还可以改变土壤磷素的各个形态含量,使土壤中各形态无机磷和有机磷累积。杨芳等^[20]采用 Hedley 分级方法研究也表明,施用磷肥能明显增加土壤各形态无机磷含量和有机磷含量。谢林花等^[8]的研究结果表明,23 a 长期施肥增加了壤土无机磷和有机磷总量。然而韩晓日等^[21]研究表明,长

期施肥使 Fe-P、Al-P、Ca₈-P 和 Ca₂-P 的相对含量都有不同程度的上升,但 O-P 和 Ca₁₀-P 均下降。出现这种差异可能与不同类型的土壤有关。在施肥相同的情况下,轮作较连作可以提高土壤中有效磷养分的含量,尤其可以显著增加 Ca₂-P 和 Ca₈-P 含量,说明轮作较连作可以培肥土壤。马艳梅^[22]研究也表明,土壤磷组分以轮作土壤中的 Ca₂-P 增幅最大。与其他轮作和连作相比,小麦-玉米轮作和小麦-豌豆轮作可以使土壤中各形态无机磷累积,而小麦-苜蓿轮作和苜蓿连作对土壤中各形态无机磷的累积量较小。长期轮作对土壤磷素形态的影响,关于这方面的研究资料还很少,有待于更进一步的深入研究。

Bach 和 Williams^[12]经过对多种不同类型土壤的实验研究,发现土壤的磷吸持指数 PSI 与 Qm 之间存在着非常显著的相关关系,因此可将 PSI 值作为 Qm 的替代指标来表征土壤的吸磷能力,此结果得到了其他研究者的证实^[23-24]。高超等^[25]在太湖地区的实验结果表明,PSI 与 Qm 之间存在极显著线性关系 ($r = 0.96^{***}$)。本文研究结果也表明土壤磷素吸持指数 PSI 与 Qm 之间呈极显著正相关 ($PSI = 0.3188Qm + 150.66, r = 0.954^{**}$),与 DPSS 呈极显著负相关 ($r = -0.864^{**}$),与 MBC 呈显著正相关 ($r = 0.669^{*}$)。

由通径分析的数学原理可知,通径系数是标准化后的变量对自变量的偏回归系数,是反映自变量对变量影响大小的一个重要量度,由通径链系数可清楚地了解变量间相关发生的影响程度和途径。比较土壤各组磷对有效磷的通径系数可看出,他们对有效磷的相对重要性依次为(括号内为直接通径系数): Ca₂-P (0.844) > Ca₈-P (0.162) > Fe-P (0.143) > O-P (-0.082) > Ca₁₀-P (-0.070) > 有机磷 (0.028) > Al-P (-0.019)。由通径分析表明, Ca₂-P 对土壤有效磷的贡献最大,其次为 Ca₈-P 和 Fe-P,可以将其看作为缓效磷。为进一步证明通径分析得出的结果,将土壤磷组分与有效磷进行逐步回归分析,得出: $Y = 0.469 + 1.543X$, ($R^2 = 0.985^{**}$),式中 X 为 Ca₂-P。逐步回归分析表明, Ca₂-P 是土壤有效磷的主要贡献者,与沈仁芳等^[26]和卜玉山等^[27]对石灰性土壤不同形态无机磷对植物吸磷量和有效磷的逐步回归分析结果相一致。然而吕家珑等^[28]经过通径分析及逐步回归分析得到, Ca₂-P 和 Ca₈-P 是有效磷的主要磷源, Wang 等^[29]的研究结果则表明,黑垆土无机形态磷中 Ca₈-

P 对有效磷的直接影响最大,王道中等^[9]对砂姜黑土的研究表明,Al-P、Fe-P、Ca₂-P、Ca₈-P 和 Ca₁₀-P 均对有效磷有贡献。这些差异出现的原因除了与土壤类型不同有关外,还需要更进一步的研究论证。

有效磷与各形态无机磷的相关系数大小依次为:Ca₂-P (0.992^{**}) > Ca₈-P (0.918^{**}) > 有机磷 (0.717^{**}) > Ca₁₀-P (0.706^{**}) > Fe-P (0.664^{**}) > O-P (0.621^{*}) > Al-P (0.481),除了与 Al-P 关系不显著外,与其他形态磷素均呈极显著和显著正相关,与许多研究者^[21,27]的研究结果基本一致。相关分析表明,Ca₂-P 和 Ca₈-P 与有效磷的相关性最高,虽然有机磷、Ca₁₀-P、Fe-P 和 O-P 的相关性都很高,但他们对有效磷的直接通径系数都很低,有些甚至为负作用,说明这些形态的磷对有效磷的贡献是间接的,是通过影响其他形态的磷来影响有效磷的。

土壤的最大吸磷量 Q_m 与土壤 Olsen-P 呈显著负相关,这与张海涛等^[6]和颜明娟等^[30]的研究结果一致。土壤有机质与 Q_m 之间存在极显著负相关关系($r = -0.737^{**}$),与 DPSS 存在显著正相关($r = 0.658^{*}$)。郭胜利等^[5]研究表明,SOC 与 DPSS 存在极显著的线性相关关系($r = 0.9100^{**}$),与 Q_m 存在显著负相关($r = -0.5169^{*}$),这与本文研究结果基本一致,李春越等^[31]研究了腐植酸与土壤磷素吸附量的关系,结果表明腐植酸具有解磷作用,加入腐植酸明显地减少土壤对磷素的吸附量和吸附速率。王新民等^[32]研究也表明,有机物料单施或者与磷肥混施都可以减少土壤对 P 的吸附量。然而赵小蓉等^[33]研究表明,在碱性土壤有机质增加磷的吸附,而酸性土壤有机质则降低磷的吸附,颜明娟等^[30]研究也表明,PO₄³⁻ 的 Q_m 值与土壤有机质之间存在显著的线性正相关。这一方面说明有机质对土壤吸附磷影响的双重性,另一方面也反映土壤吸附磷的复杂性和不同土壤吸附磷机制的差异性,土壤有机质对土壤磷素吸附特性的影响机理还有待于更进一步的研究。

4 结 论

1) 长期磷肥和有机肥投入可以减低土壤磷素的最高吸附量,长期轮作也可以减低土壤磷素的最高吸附量。相对于其他轮作和连作,在 NP 施肥下,小麦-玉米-豌豆轮作可以降低土壤的最高吸磷量,在 NPM 施肥下,小麦-玉米轮作可以降低土壤的最高吸磷量。

2) 长期施肥可以使土壤中各种形态的磷累积,长期轮作也可以显著影响土壤中各形态磷的含量。在施肥相同的条件下,相对于其他轮作和连作,长期小麦-玉米轮作和小麦-豌豆轮作可以培肥土壤,可以使土壤中各形态无机磷含量显著增加。

3) 长期轮作较连作可以增加土壤中的有效磷养分,尤其对 Ca₂-P 的提高效果更为显著。通径系数和逐步回归分析表明,在北方石灰性土壤的无机磷形态中,Ca₂-P 对有效磷的贡献最大。

参 考 文 献

- [1] 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. 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 (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(1): 81—87
- [2] Sharpley A N, Daniel T C, Sims J T, et al. Determining environmentally sound soil phosphorus levels. J Soil and Water Cons, 1996, 51(2): 160—166
- [3] Lin C Y, Wang Z G, He M C, et al. Phosphorus sorption and fraction characteristics in the upper, middle and low reach sediments of the Daliao river systems, China. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170(1): 278—285.
- [4] Guo S L, Dang T H, Hao M D. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization. Pedosphere, 2008, 18(2): 248—256
- [5] 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. 植物营养与肥料学报, 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 Science, 2005, 11(1): 33—39
- [6] 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. 植物营养与肥料学报, 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 Fertilizer Science, 2008, 14(2): 284—290
- [7] Wei X R, Shao M A, Shao H B, et al. Fractions and bioavailability of soil inorganic phosphorus in the Loess Plateau of China under different vegetations. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(1): 263—270
- [8] 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 II. 无机磷和有机磷. 应用生态学报, 2004, 15(5): 790—794. Xie L H, Lü J L, Zhang Y P, et al. Influence of long-term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil II. Inorganic and organic phosphorus (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(5): 790—794
- [9] 王道中,郭熙盛,刘枫,等. 长期施肥对砂姜黑土无机磷形态

- 的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 601—606. Wang D Z, Guo X S, Liu F, et al. Effects of long-term fertilization on inorganic phosphorus fractions in lime concretion black soil (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(3): 601—606
- [10] 党廷辉. 黄土旱原区轮作培肥试验研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 44—47. Dang T H. Influence of crop rotation on soil fertility in arid highland of Loess Plateau (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(3): 44—47
- [11] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法. 土壤, 1990, 22(2): 101—102. Gu Y C, Jiang B F. Determination method of inorganic phosphorus fractionation in Calcareous soil (In Chinese). Soils, 1990, 22(2): 101—102
- [12] Bache B W, Williams E G. A phosphate sorption index for soils. J Soil Sci, 1971, 22(3): 288—301
- [13] Sharpley A N, Chapra S C, Wedepohl R, et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and Options. J Environ Qual, 1994, 23(3): 437—451
- [14] Chrysostome M, Nair V D, Harris W G, et al. Laboratory validation of soil phosphorus storage capacity predictions for use in risk assessment. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(5): 1564—1569
- [15] Siddique M T, Robinson J S. Phosphorus sorption and availability in soil amended with animal manures and sewage sludge. J Environ Qual, 2003, 32(3): 1114—1121
- [16] Song C, Han X Z, Tang C. Changes in phosphorus fractions, sorption and release in Udic Mollisols under different ecosystems. Biol Fertil Soils, 2007, 44(1): 37—47
- [17] Sui Y B, Thompson M L. Phosphorus sorption, desorption, and buffering capacity in a biosolids-amended mollisol. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1): 164—169
- [18] 郭胜利, 车升国, 梁伟, 等. 小流域土壤磷的积累特征及其环境效应—以黄土高原沟壑区王东沟小流域为例. 自然资源学报, 2009, 24(7): 1171—1180. Guo S L, Che S G, Liang W, et al. Phosphorus accumulation in soils of a catchment on the Loess Plateau and potential environmental implications (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2009, 24(7): 1171—1180
- [19] Hao M D, Fan J, Wei X R, et al. Effect of fertilization on soil fertility and wheat yield of dryland in the Loess Plateau. Pedosphere, 2005, 15(2): 189—195
- [20] 杨芳, 何园球, 李成亮, 等. 不同施肥条件下红壤旱地磷素形态及有效性分析. 土壤学报, 2006, 43(5): 793—799. Yang F, He Y Q, Li C L, et al. Effect of fertilization on phosphorus forms and its availability in upland red soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 793—799
- [21] 韩晓日, 马玲玲, 王晔青, 等. 长期定位施肥对棕壤无机磷形态及剖面分布的影响. 水土保持学报, 2007, 21(4): 51—55. Han X R, Ma L L, Wang Y Q, et al. Effects of long-term fertilization on inorganic phosphorus forms and profile distribution in brown soil (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(4): 51—55
- [22] 马艳梅. 长期轮作连作对不同作物土壤磷组分的影响. 中国农学通报, 2006, 22(7): 355—358. Ma Y M. Effects of long-term crop rotation and continuous cropping on phosphorus forms in different crop soil (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(7): 355—358
- [23] Mozaffari M, Sims J T. Phosphorus availability and sorption in an Atlantic coastal plain watershed dominated by animal-based agriculture. Soil Sci, 1994, 157(2): 97—107
- [24] Indiat R, Sharpley A N. Soil phosphate sorption and simulated runoff parameters as affected by fertilizer addition and soil properties. Comm Soil Sci Plant Anal, 1995, 26(15/16): 2319—2331
- [25] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价. 环境科学学报, 2001, 21(3): 344—348. Gao C, Zhang T L, Wu W D. Risk evaluation of agricultural soil phosphorus release to the water bodies (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(3): 344—348
- [26] 沈仁芳, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性. 土壤学报, 1992, 29(1): 80—86. Shen R F, Jiang B F. Distribution and availability of various forms of inorganic-P in calcareous soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(1): 80—86
- [27] 卜玉山, 梁美英, 张广峰, 等. 不同石灰性土壤磷素形态及其有效性差异. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2011, 31(3): 193—199. Bu Y S, Liang M Y, Zhang G F, et al. Difference of phosphorus fractions and availability of different calcareous soils (In Chinese). J Shanxi Agric Univ: Natural Science Edition, 2011, 31(3): 193—199
- [28] 吕家珑, 张一平, 陶国树, 等. 23 年肥料定位试验 0~100 cm 土壤剖面中各形态磷之间的关系研究. 水土保持学报, 2003, 17(3): 48—50. Lü J L, Zhang Y P, Tao G S, et al. Relationship among phosphorus forms in 0~100cm soil profiles after 23 year application of fertilizers (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 48—50
- [29] Wang J, Liu W Z, Mu H F, et al. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate application. Pedosphere, 2010, 20(3): 304—310
- [30] 颜明娟, 章明清, 陈防, 等. 一个改进的土壤铵、磷和钾等温吸附新模型. 土壤学报, 2010, 47(3): 458—464. Yan M J, Zhang M Q, Chen F, et al. A modified isothermal adsorption model for NH_4^+ , PO_4^{3-} and K^+ sorption in soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 458—464
- [31] 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 adsorption behavior of phosphorus in agricultural soil (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 77—82
- [32] 王新民, 侯彦林. 有机物料对石灰性土壤磷素形态转化及吸附特性的影响. 环境科学学报, 2004, 24(3): 440—443. Wang X M, Hou Y L. Effects of organic matter addition on the characteristics of phosphorus adsorption and forms of phosphorus in a calcareous soil (In Chinese). Acta Sci Circumst, 2004, 24(3): 440—443
- [33] 赵小蓉, 钟晓英, 李贵桐. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估

II. 淋失临界值与土壤理化性质和磷吸附特性的关系. 生态学报, 2006, 26(9): 3 011—3 017. Zhao X R, Zhong X Y, Li G T. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils

II. The relationships between soil properties, P adsorption characteristics and the leaching criterion (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 3 011—3 017

FORMS OF SOIL PHOSPHORUS AND P ADSORPTION IN SOILS UNDER LONG-TERM CROP ROTATION AND FERTILIZATION SYSTEMS

Qi Ruisheng¹ Dang Tinghui^{1,2†} Yang Shaoqiong² Ma Ruiping¹ Zhou Liping³

(1 College of Resources and Environment, Northwestern Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract Forms of P and P sorption parameters in soils under different crop rotation systems in a 26a long-term fertilization field experiment in an arid loess plateau were determined for study of effects of crop rotation and fertilization on forms and adsorption of the phosphorus in the soil and relationships between soil phosphorus adsorption parameters and phosphorus forms. Results show that both long-term crop rotation and long-term fertilization reduced the maximum P adsorption capacity (Q_m) of the soil; relative to other crop rotation and continuous cropping systems, the application of nitrogen and phosphorus fertilizer (NP) reduced Q_m of the soil under the Wheat-Corn-Pea crop rotation system, and the application of NP plus organic manure (NPM) had a similar effect on Q_m of the soil under the Wheat-Corn crop rotation system. The same in fertilization, the Wheat-Corn rotation and Wheat-Pea rotation systems significantly increased the contents of various forms of inorganic phosphorus, and the soils were higher in available P under long-term crop rotation than under continuous cropping, especially in Ca_2 -P. Correlation analysis shows that Q_m and phosphorus sorption index (PSI) were significantly negatively related to total phosphorus (T-P), Olsen-P, $CaCl_2$ -P, Ca_2 -P, Ca_8 -P, Fe-P, Ca_{10} -P and organic phosphorus ($p < 0.01$), and to occluded phosphorus (O-P, $p < 0.05$), too, but insignificantly to Al-P. Soil organic matter (SOM) was found to be in extremely significant negative relations to Q_m , PSI and maximum buffer capacity (MBC), but in positive one related to the degree of P sorption saturation (DPSS). Path analysis and stepwise regression analysis show that among the inorganic phosphorus fractions in calcareous Heilu soil, Ca_2 -P contributed the most to Olsen-P.

Key words Long-term rotation; Long-term fertilization; Adsorption characteristics; Soil phosphorus forms