

长期秸秆还田对潮土土壤各形态磷的影响*

黄欣欣¹ 廖文华^{1, 2} 刘建玲^{1, 2†} 张 伟¹ 曹彩云³ 郭 丽³

(1 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071001)

(2 河北省农田生态环境重点实验室, 河北保定 071001)

(3 河北省农林科学院旱作农业研究所, 河北衡水 053000)

摘 要 基于黄淮海低平原区潮土上 33 年长期肥料定位试验, 采用蒋柏藩—顾益初的石灰性土壤无机磷分级方法, 研究冬小麦—夏玉米轮作中长期不同氮磷用量下秸秆还田对土壤全磷、有效磷 (Olsen-P) 及各形态无机磷的影响。结果表明: 黄淮海低平原区潮土上冬小麦—夏玉米轮作中 P_2O_5 用量 $0 \sim 240 \text{ kg hm}^{-2}$, 随磷肥用量的增加, 土壤全磷、Olsen-P、无机磷总量及无机磷中 $Ca_2\text{-P}$ 、 $Ca_8\text{-P}$ 、 $Al\text{-P}$ 和 $Fe\text{-P}$ 均显著增加, $O\text{-P}$ 和 $Ca_{10}\text{-P}$ 无显著变化; 当土壤输入磷量低于作物输出磷量时, 无论秸秆还田与否, 土壤全磷、无机磷总量、Olsen-P 和无机磷中除 $Ca_8\text{-P}$ 外的其他各形态磷均无显著变化; 当土壤输入磷量高于作物输出磷量时, 随秸秆用量的增加土壤全磷、Olsen-P 和无机磷中的 $Ca_2\text{-P}$ 、 $Ca_8\text{-P}$ 、 $Al\text{-P}$ 均显著增加, 其中以 Olsen-P 增幅最大, 无机磷中以 $Ca_2\text{-P}$ 增幅最大, 其次为 $Ca_8\text{-P}$, 再次为 $Al\text{-P}$; 土壤磷素盈余和亏缺量与土壤中各磷形态含量均呈显著正相关关系。

关键词 潮土; 长期肥料定位试验; 秸秆还田; 有效磷; 无机磷形态

中图分类号 S153 **文献标识码** A

全国第二次土壤普查结果显示我国 75% 的土壤缺磷, 河北省土壤有效磷平均为 7.8 mg kg^{-1} [1]。20 世纪 80 年代初土壤磷匮乏成为限制作物高产的主要因子, 土壤磷素收支表观平衡多为亏, 因此当时的研究多集中在提高磷肥有效性的理论与技术 [2-3], 并基于肥料效应函数计算磷肥经济合理或经济最佳推荐量 [4-6] 等。近年来, 随着磷肥用量的不断增加, 土壤磷素逐渐由亏转为盈 [7-8], 黄淮海平原冬小麦—夏玉米轮作中磷肥利用率分别只有 10.1%、12.6% [9], 且随着土壤磷素大量积累, 磷肥的产量效应逐渐降低 [10], 农田土壤磷养分的环境风险随之增大 [11-12]。因此, 目前土壤磷素逐渐盈余背景下, 亟待解决磷养分资源的安全、高效利用问题, 而阐明土壤磷素组成状况及其影响因素是

解决上述问题的关键内容。

1957 年张守敬和 Jackson 提出土壤磷素分级体系为土壤无机磷形态及其影响因素研究奠定了基础 [13], 1989 年蒋柏藩和顾益初 [14] 提出石灰性土壤无机磷分级方法, 为深入研究石灰性土壤无机磷形态与转化起了重要推动作用。已有资料表明: 施用磷肥或有机肥均显著提高土壤有效磷, 而土壤各形态无机磷的增加量各异 [15], 王伯仁等 [16] 对 12 年红壤长期肥力定位监测表明, 施用化学磷肥显著增加红壤的全磷含量, 并以 $Al\text{-P}$ 的增幅为最大; 黑土长期定位施肥 15 年, 各形态无机磷含量大小顺序为 $Fe\text{-P} > Ca_{10}\text{-P} > Al\text{-P} > Ca_8\text{-P} > Ca_2\text{-P} > O\text{-P}$, 施用磷肥增加黑土 $Fe\text{-P}$ 含量, $Ca_{10}\text{-P}$ 含量无显著增加 [17]; 韩晓日等 [18] 对棕壤 26 年长期定位试验

* 河北省科技支撑项目 (12220204D) 资助 Supported by the Science and Technology Support Project of Hebei Province of China (No. 12220204D)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jlliu@hebau.edu.cn

作者简介: 黄欣欣 (1989—), 女, 河北省沧州人, 硕士研究生, 主要从事土壤养分化学与调控方向研究。E-mail: hxx1006982489@163.com

收稿日期: 2015-09-21; 收到修改稿日期: 2015-12-18

结果表明：长期施用有机肥或化学磷肥，除耕层Ca₁₀-P含量减少外，其他各形态无机磷含量均有所增加；长期不施磷肥下，Al-P、Fe-P、O-P、Ca₁₀-P含量均减少。刘建玲和张福锁^[19]在石灰性土壤上的研究表明连续12年施用磷肥、有机肥，主要增加无机磷中的Ca₂-P、Ca₈-P，其次为Al-P和Fe-P。

冬小麦—夏玉米轮作是黄淮海区的主要种植方式。河北省低平原区占河北平原63%^[1]，土壤盐碱化是该区影响冬小麦和夏玉米产量重要因素，近年来过量施用磷肥在一定程度加重了土壤盐化程度，秸秆还田对提高土壤有机质和增加土壤肥力起了重要作用^[20-22]，但长期秸秆还田对土壤各形态磷库的影响及秸秆还田下磷肥推荐用量等研究资料甚少，而这一问题的解决对于该区域磷养分的科学管理具有重要理论和实践意义。

基于上述问题，本研究以河北省低平原区典型潮土为供试土壤，以冬小麦—夏玉米轮作33年秸秆还田的长期肥料定位试验为供试材料，系统研究长期秸秆还田及秸秆与氮磷肥配施对土壤各形态磷库的影响，为科学、安全管理土壤磷养分资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地在河北省农林科学院旱作农业研究所试验场，位于东经115°42′，北纬37°53′，暖温带大陆性季风气候，年均温度12.4℃，年均降雨量550 mm，无霜期200 d，属河北省低平原区。

供试土壤为壤质化潮土，基本理化性状：土壤pH 8.7，有机质11.50 g kg⁻¹，全氮0.83 g kg⁻¹，全磷1.03 g kg⁻¹（测定方法为NaOH熔融—钼锑抗比色法测定），有效磷（Olsen-P）12.30 mg kg⁻¹，速效钾109.8 mg kg⁻¹^[23]。

1.2 试验设计

采用裂区设计，主处理为氮磷肥用量（NP表示），分4个水平，副处理为秸秆用量（S表示），分3个水平，共12个处理，3次重复，随机排列，小区面积67 m²，各施肥处理代码及肥料用量如表1所示。

试验时间：1981年10月—2014年6月，冬小麦种植33茬、夏玉米32茬。

夏玉米秸秆还田情况：1981年10月—2004年

表1 试验方案和各处理施肥量

Table 1 Experimental design and fertilization rates set for various treatments (kg hm⁻²)

处理代码 Treatment Code	主处理 Main treatments		副处理 Auxiliary treatments	处理代码 Treatment Code	主处理 Main treatments		副处理 Auxiliary treatments
	N	P ₂ O ₅	秸秆Straw		N	P ₂ O ₅	秸秆Straw
N ₀ P ₀ S ₀	0	0	0	N ₂ P ₂ S ₀	180	120	0
N ₀ P ₀ S ₁	0	0	2 250	N ₂ P ₂ S ₁	180	120	2 250
N ₀ P ₀ S ₂	0	0	4 500	N ₂ P ₂ S ₂	180	120	4 500
N ₁ P ₁ S ₀	90	60	0	N ₃ P ₃ S ₀	360	240	0
N ₁ P ₁ S ₁	90	60	2 250	N ₃ P ₃ S ₁	360	240	2 250
N ₁ P ₁ S ₂	90	60	4 500	N ₃ P ₃ S ₂	360	240	4 500

10月的24年间每6年一个周期，前3年按表1的施肥方案施氮磷肥和玉米秸秆还田，后3年不施氮磷和秸秆以观察后效，即1981—1983、1987—1989、1993—1995、1999—2001年秸秆还田12年并施用磷肥，其他年份为观察后效；从2005年6月—2013年6月9年间每年均按表1的施肥方案施肥和玉米秸

秆还田，即玉米秸秆共还田21年；小麦秸秆还田情况：1982年6月—1999年6月，小麦秸秆移出不还田（玉米秸秆清除出后再按秸秆用量还田），2000年6月—2014年6月，小麦秸秆原位还田，即小麦秸秆还田15年。

施肥方法：冬小麦茬口：50% 氮肥（尿

素)、100% 磷肥(过磷酸钙)和玉米秸秆均在播种整地前一次性做基肥施用,50% 氮肥在小麦起身至拔节期追施;夏玉米茬口:100%氮肥作追肥,不施磷钾肥,其他同常规田间管理。

1.3 分析项目及方法

土壤样品:2014年6月收获冬小麦后采用“之”字布点取各处理0~20 cm土样,每个小区取6个样点混合成一个土壤样品,风干后备用。

测定项目与方法:土壤全磷采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮—钼锑抗比色法测定;有效磷(Olsen-P)采用 NaHCO_3 浸提—钼锑抗比色法测定^[24];土壤各形态无机磷采用顾益初和蒋柏藩^[25]的石灰性土壤无机磷分级方法。

土壤磷盈余与亏缺计算:小麦和玉米谷秆比分别按1:1.1、1:1.2,小麦和玉米籽粒全磷(P)分别为0.392%、0.298%;秸秆全磷(P)分别为0.238%、0.196%^[26]。

表观平衡%=(输入磷-输出磷)/输出磷×100

1.4 数据处理

采用Excel 2003以及SPSS 7.0进行数据分析和制图。

2 结 果

2.1 长期秸秆还田与氮磷配施下土壤磷素平衡

33年肥料定位试验中冬小麦种植33茬,夏玉米种植32茬。基于小麦和玉米轮作期间的平均产量、磷肥和秸秆用量,计算各处理土壤磷素收支表观平衡状况(表2)。玉米秸秆还田 S_1 、 S_2 (2 250、4 500 kg hm^{-2} ,下同)21年,小麦秸秆原位还田15年,相当于年均秸秆还田磷4.18、7.55 kg hm^{-2} ; N_1P_1 、 N_2P_2 、 N_3P_3 下(P_2O_5 用量60、120、240 kg hm^{-2} ,下同)玉米秸秆还田 S_1 、 S_2 ,相当于年均秸秆还田磷9.12、12.13 kg hm^{-2} ; N_0P_0 、 N_1P_1 、 N_2P_2 基础上无论秸秆还田与否,土壤磷收支表观平衡均亏缺,亏缺量为0.92~16.51 kg hm^{-2} (2.2%~93.2%); N_3P_3 基础上无论秸秆还田与否,土壤磷素收支表观平衡均为盈余,盈余量20.51~31.11 kg hm^{-2} (37.5%~62.5%)。

2.2 土壤磷素组成

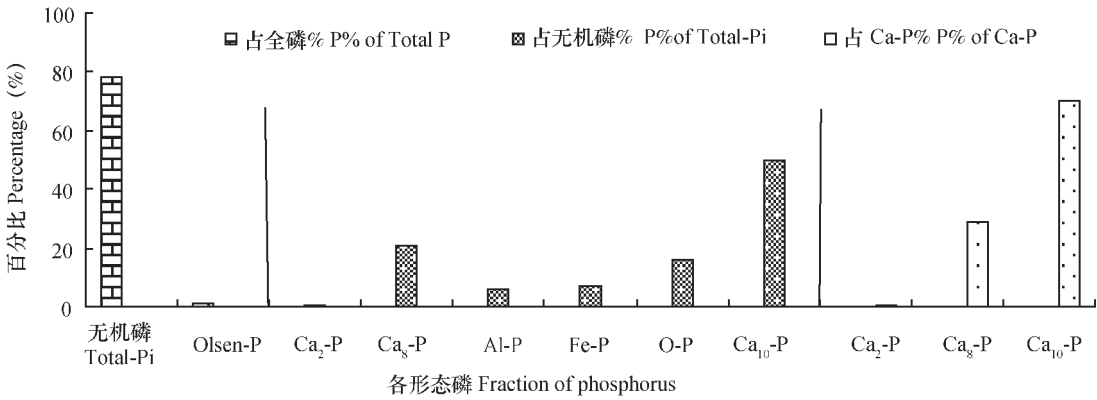
33年定位施肥后,土壤磷素组成状况如图1所示。结果表明:土壤全磷含量为825 mg kg^{-1} ,土

表2 不同施肥水平下土壤磷素平衡状况

Table 2 P balance in soil relative to fertilizer level (average result, kg hm^{-2})

处理 Treatments	小麦产量 Wheat yield	玉米产量 Maize yield	磷素平衡 P balance					表观平衡 Apparent balance (%)
			总输入 Total input	秸秆还田 Straw return	磷肥 Phosphate fertilizer	输出 Output	盈余或亏缺 Surplus	
$N_0P_0S_0$	994	2 480	1.21	1.21	0	17.72	-16.51	-93.2
$N_0P_0S_1$	1 060	2 868	4.18	4.18	0	19.63	-15.45	-78.7
$N_0P_0S_2$	1 467	3 044	7.55	7.55	0	21.89	-14.34	-65.5
$N_1P_1S_0$	3 067	4 564	21.03	4.36	16.67	36.14	-15.11	-41.8
$N_1P_1S_1$	3 027	4 862	23.91	7.24	16.67	37.26	-13.35	-35.8
$N_1P_1S_2$	3 047	5 164	26.79	10.12	16.67	38.70	-11.91	-30.8
$N_2P_2S_0$	3 868	5 603	39.26	5.91	33.35	44.90	-5.64	-12.6
$N_2P_2S_1$	3 718	5 322	41.96	8.61	33.35	42.88	-0.92	-2.1
$N_2P_2S_2$	4 116	6 197	45.36	12.02	33.35	48.02	-2.66	-5.5
$N_3P_3S_0$	5 023	6 314	75.14	8.45	66.69	54.63	20.51	37.5
$N_3P_3S_1$	5 161	6 518	78.21	11.52	66.69	56.28	21.93	39.0
$N_3P_3S_2$	4 948	6 270	80.93	14.24	66.69	49.82	31.11	62.4

注:基于33年小麦和玉米平均产量计算土壤磷收支表观平衡,其中输出磷为小麦、玉米籽粒和秸秆输出磷量,输入磷为肥料、玉米秸秆中的磷和小麦秸秆中的磷 Note: Apparent P balances were figured out, based on at different treatments were calculated based on the average yields of wheat and maize in the 33 years, where the output included P removal with grains and straws of wheat and maize, and the input included P in applied chemical fertilizers and in returned straw of preceding wheat and maize crops



注：图中数据为各处理土壤磷形态含量的平均值 Note: Data in the figure were means of each treatment

图1 长期秸秆还田下土壤磷素组成

Fig. 1 Fractionation of soil phosphorus under long-term straw return

壤磷素组成以无机磷为主，占土壤全磷的78.2%，无机磷中以Ca-P为主，占无机磷总量的71.0%，其中，Ca₂-P、Ca₈-P和Ca₁₀-P分别占Ca-P量的0.6%、29.1%和70.2%；Al-P、Fe-P和O-P分别占无机磷总量的6.0%、6.8%和16.1%；Olsen-P占全磷的1.0%，占无机磷总量的1.3%。

2.3 长期秸秆还田对土壤全磷、无机磷和Olsen-P的影响

长期秸秆还田和氮磷肥配施对土壤全磷、无机磷总量和Olsen-P的影响如表3所示。长期施肥33年后，在相同氮磷用量下，当土壤磷素收支平衡亏缺时，无论秸秆还田与否，土壤全磷、无机磷总量和Olsen-P变化均不显著；当土壤磷素收支平

衡盈余时，长期秸秆还田均显著增加土壤全磷、无机磷总量和Olsen-P。即N₃P₃S₀基础上秸秆还田S₂（N₃P₃S₂），土壤磷素收支平衡为盈余，土壤全磷、无机磷总量和Olsen-P含量分别增加302、261和7.34 mg kg⁻¹（33.5%、34.4%和56.5%），差异达到显著水平。相同秸秆还田量不同磷用量对土壤全磷、无机磷总量和Olsen-P的影响：土壤全磷、无机磷总量和Olsen-P均随着磷肥用量的增加而增加；与N₀P₀相比，当化肥用量在N₃P₃水平，全磷和无机磷总量达显著差异；而对于Olsen-P，只要施入磷肥，Olsen-P均显著增加。与N₀P₀S₀比较，N₁P₁S₀、N₂P₂S₀和N₃P₃S₀土壤全磷、无机磷总量和Olsen-P分别平均增加154、164和7.24 mg kg⁻¹

表3 长期秸秆还田下的土壤全磷、无机磷总量和Olsen-P

Table 3 Soil total-P, Pi and Olsen-P under long-term straw return (mg kg⁻¹)

处理 Treatments		N ₀ P ₀	N ₁ P ₁	N ₂ P ₂	N ₃ P ₃
全磷 Total-P	S ₀	667a (b)	772a (ab)	790a (ab)	901b (a)
	S ₁	679a (b)	784a (b)	800a (b)	1 008b (a)
	S ₂	685a (b)	794a (b)	819a (b)	1 203a (a)
无机磷总量 Total-Pi	S ₀	458a (b)	526a (ab)	581a (ab)	760b (a)
	S ₁	502a (b)	568a (ab)	616a (ab)	900b (a)
	S ₂	550a (b)	613a (b)	655a (b)	1 021a (a)
Olsen-P	S ₀	1.22a (d)	4.48a (c)	7.89a (b)	13.00b (a)
	S ₁	2.55a (d)	5.07a (c)	9.22a (b)	15.74b (a)
	S ₂	2.90a (d)	5.81a (c)	10.56a (b)	20.34a (a)

注：小写字母分别表示差异达5%显著水平；括号外为列的差异显著性比较，括号内为行的差异显著性比较，下同 Note: Different lower case letter in the table showed the significant difference at 5% level; the significant difference of each column and row were indicated by the letters outside and inside of the parentheses, respectively. The same below

(23.1%、35.9%和593.2%)；氮磷肥和秸秆配合施用下， $N_1P_1S_1$ 、 $N_1P_1S_2$ 、 $N_2P_2S_2$ 、 $N_2P_2S_2$ 、 $N_3P_3S_1$ 和 $N_3P_3S_2$ 处理，土壤全磷、无机磷总量和Olsen-P分别平均增加234、271和9.90 mg kg^{-1} (35.1%、59.1%和811.7%)。

2.4 长期秸秆还田对土壤各形态无机磷的影响

长期秸秆还田和氮磷肥配施对土壤各形态无机磷的影响如表4所示：土壤磷素收支平衡亏缺时，相同磷用量下，随秸秆还田量的增加土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 显著增加，土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 变化均不显著；土壤磷素收支平衡盈余时，随秸秆还田量的增加，土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Al-P 均显著增加。相同秸秆还田量下，随磷肥用量的增加，土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 均显著增加。其中，与 $N_0P_0S_0$ 比较， $N_0P_0S_2$ 处理的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 增加7.33 mg kg^{-1} (10.2%)；与 $N_1P_1S_0$ 比较， $N_1P_1S_2$ 处理的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 增加24.39 mg kg^{-1} (32.5%)；与 $N_2P_2S_0$ 比较， $N_2P_2S_1$ 和 $N_2P_2S_2$ 处理 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 分别增加10.07和26.71 mg kg^{-1} (10.3%和27.3%)；与 $N_3P_3S_0$

比较， $N_3P_3S_1$ 和 $N_3P_3S_2$ 处理 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 分别增加2.47、6.84 mg kg^{-1} (64.5%、178.6%)； $\text{Ca}_8\text{-P}$ 分别增加80.15、129.3 mg kg^{-1} (42.0%、67.8%)； Al-P 分别增加15.68、26.14 mg kg^{-1} (37.0%、61.7%)，差异均达到显著水平，相对增加量 $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Al-P}$ 。

相同秸秆还田量不同磷用量对土壤各形态无机磷的影响：增施磷肥主要增加土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ ，其次为 Al-P ，再次为 Fe-P ，而 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 均无显著变化。其中，与 $N_0P_0S_0$ 比较， $N_1P_1S_0$ 、 $N_2P_2S_0$ 和 $N_3P_3S_0$ 处理土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 平均增加1.53、49.43、14.18和13.09 mg kg^{-1} (242.9%、68.9%、59.5%和40.7%)；与 $N_0P_0S_1$ 比较， $N_1P_1S_1$ 、 $N_2P_2S_1$ 和 $N_3P_3S_1$ 处理土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 平均增加2.60、85.29、20.44和14.66 mg kg^{-1} (305.5%、118.2%、84.7%和45.2%)；与 $N_0P_0S_2$ 比较， $N_1P_1S_2$ 、 $N_2P_2S_2$ 和 $N_3P_3S_2$ 处理土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 平均增加4.18、102.23、23.98和18.33 mg kg^{-1} (435.8%、129.3%、

表4 长期秸秆还田下的土壤各形态无机磷

Table 4 on Fractions of soil inorganic P under long-term straw return (mg kg^{-1})

无机磷 Inorganic P fractions	处理 Treatments	N_0P_0	N_1P_1	N_2P_2	N_3P_3
$\text{Ca}_2\text{-P}$	S_0	0.63a (b)	0.95a (b)	1.70a (b)	3.83c (a)
	S_1	0.85a (b)	2.01a (b)	2.03a (b)	6.30b (a)
	S_2	0.96a (c)	2.10a (bc)	2.66a (b)	10.67a (a)
$\text{Ca}_8\text{-P}$	S_0	71.75b (b)	75.08b (b)	97.73c (ab)	190.74c (a)
	S_1	72.19b (c)	93.76b (b)	107.80b (b)	270.89b (a)
	S_2	79.08a (d)	99.47a (c)	124.44a (b)	320.02a (a)
Al-P	S_0	23.81a (c)	35.54a (b)	36.07a (b)	42.35c (a)
	S_1	24.14a (c)	35.93a (b)	39.79a (b)	58.03b (a)
	S_2	25.04a (d)	36.31a (c)	42.26a (b)	68.49a (a)
Fe-P	S_0	32.15a (c)	38.80a (b)	44.20a (ab)	52.73a (a)
	S_1	32.44a (c)	42.00a (b)	46.28a (b)	53.02a (a)
	S_2	32.95a (c)	43.66a (b)	48.70a (b)	61.48a (a)
O-P	S_0	67.87a (a)	93.08a (a)	91.45a (a)	111.6a (a)
	S_1	86.61a (a)	97.64a (a)	98.67a (a)	121.2a (a)
	S_2	117.6a (a)	120.6a (a)	103.2a (a)	137.0a (a)
$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	S_0	261.9a (a)	282.3a (a)	310.1a (a)	358.6a (a)
	S_1	284.9a (a)	296.7a (a)	321.2a (a)	389.7a (a)
	S_2	293.9a (a)	310.8a (a)	333.1a (a)	423.3a (a)

95.8%和55.6%)；即氮磷肥和秸秆配合施用下， $N_1P_1S_1$ 、 $N_1P_1S_2$ 、 $N_2P_2S_1$ 、 $N_2P_2S_2$ 、 $N_3P_3S_1$ 和 $N_3P_3S_2$ 处理，土壤 Ca_2-P 、 Ca_8-P 、 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 分别平均增加3.67、97.65、22.99和17.04 $mg\ kg^{-1}$ （581.7%、136.1%、96.6%和53.0%）。可见，相同秸秆还田量下，随施磷肥量的增加，土壤各形态无机磷的相对增加量 $Ca_2-P > Ca_8-P > Al-P > Fe-P$ 。

2.5 土壤磷盈亏量与各形态磷含量的关系

土壤磷盈余与亏缺量与各形态磷的相关关系如表5所示。根据连续施肥33年后土壤中各形态磷的年均盈亏量与33年后各处理的磷素含量建立相关关系，结果表明，土壤磷素年均盈亏量与Olsen-P、全磷、无机磷总量、 Ca_2-P 、 Ca_8-P 、 $Al-P$ 、 $Fe-P$ 、 $O-P$ 和 $Ca_{10}-P$ 的含量均呈显著正相关关系。

表5 土壤磷盈亏量与各形态磷含量的相关关系

Table 5 Relationships of P balance with various inorganic P fractions

磷形态 P fractions	相关方程 The equation	磷形态 P fractions	相关方程 The equation	磷形态 P fractions	相关方程 The equation
Olsen-P	$y=0.33x+8.85$ ($r=0.9649^{**}$)	Ca_2-P	$y=0.16x+3.18$ ($r=0.9081^{**}$)	$Fe-P$	$y=0.49x+44.95$ ($r=0.9128^{**}$)
全磷 Total-P	$y=9.35x+841$ ($r=0.9250^{**}$)	Ca_8-P	$y=4.73x+142.37$ ($r=0.9081^{**}$)	$O-P$	$y=0.75x+105.28$ ($r=0.6783^{*}$)
无机磷总量 Total inorganic-Pi	$y=9.54x+663.00$ ($r=0.9590^{**}$)	$Al-P$	$y=0.71x+40.30$ ($r=0.8994^{**}$)	$Ca_{10}-P$	$y=2.70x+327.22$ ($r=0.9654^{**}$)

注：相关方程 $y=bx+a$ ，其中 y 分别表示各形态磷（ $mg\ kg^{-1}$ ）； x 为年均土壤磷的盈亏量（ $kg\ hm^{-2}$ ），*表示 $p < 0.05$ ，**表示 $p < 0.01$ 。 $n=12$ ， $r_{0.05}=0.5530$ ， $r_{0.01}=0.6840$ Note: Of the equation $y=bx+a$, y stands for phosphorus fractions ($mg\ kg^{-1}$), x for surplus P ($kg\ hm^{-2}$), * for $p < 0.05$, and ** for $p < 0.01$. the sample size $n = 12$, $r_{0.05} = 0.5530$, $r_{0.01}=0.6840$

3 讨 论

3.1 长期秸秆还田对各形态磷库的影响

秸秆还田对增加土壤有机质和改善土壤理化性状有重要作用^[27]，而对土壤各形态磷影响的研究结果各异：徐国伟等^[28]研究认为，水稻土中连续3年麦秆还田（还田量7 560~7 380 $kg\ hm^{-2}$ ，磷肥用量75 $kg\ hm^{-2}$ ），土壤全磷含量显著增加，张振江^[29]在草甸暗棕壤上小麦秸秆还田（还田量6 000 $kg\ hm^{-2}$ ，磷肥用量150 $kg\ hm^{-2}$ ）10年显著增加土壤全磷和有效磷的含量；赵士诚等^[23]在与本研究同一试验地上，同一施肥水平下研究得出玉米秸秆用量的增加提高了土壤全磷含量；而中国农大课题组在北京郊区农场6年，38块典型地块秸秆还田试验地的长期观测得出土壤全磷和有效磷仅仅有提高趋势；黄淮海平原寿阳小麦—玉两熟区壤质褐上长期秸秆还田得出，3年秸秆还田后不同秸秆还田量与土壤有效磷含量之间无明显相关关系；张家港稻—麦两熟区8年秸秆还田后有效磷无明显变化^[30]。

本试验研究结果：冬小麦—夏玉米轮作种植33年中，玉米秸秆还田21年，还田量0~4 500 $kg\ hm^{-2}$ ，

小麦秸秆原位还田15年， P_2O_5 用量0~240 $kg\ hm^{-2}$ 配合施用下，当土壤磷素收支表观平衡为盈余时，在相同磷肥用量下，随秸秆还田量的增加，土壤全磷、无机磷总量和Olsen-P均显著增加；无机磷中的 Ca_2-P 、 Ca_8-P 和 $Al-P$ 均显著增加， $Fe-P$ 、 $O-P$ 和 $Ca_{10}-P$ 无显著变化；当土壤磷输入小于输出时，长期秸秆还田下土壤 Ca_8-P 有逐渐增加趋势，而Olsen-P、无机磷中 Ca_2-P 及其他形态磷无显著变化。以上结果说明，秸秆还田对土壤Olsen-P，无机磷中的 Ca_2-P 、 Ca_8-P 和 $Al-P$ 等有效磷源的影响取决于土壤磷积累与消耗状况。冬小麦—夏玉米轮作中，不施磷肥单秸秆还田，土壤磷处于逐渐亏缺状态，各处理之间土壤有效磷无明显变化。河北省低平原区是土壤有效磷水平相对较低的区域^[1]，因此，当土壤有效磷水平相对较低时，秸秆还田时需适量增施速效性磷肥，以补充秸秆矿化时微生物消耗的土壤速效磷，同时满足作物生长需求。这一结果也验证了鲁如坤和史陶钧^[31]认为土壤全磷和有效磷的增长与土壤磷的收支平衡相一致的结论。

3.2 土壤无机磷变化区域特点

农田土壤中磷的形态和含量受多种因素影响，

如土壤类型、地理位置、气候条件、作物种植方式和施肥方式等^[32]。已有资料表明: 石灰性潮褐土土壤无机磷组成中Ca-P占无机磷71.9%~90.8%, Ca₂-P占Ca-P的0.9%~3.6%, Ca₈-P占Ca-P的1.7%~44.8%, Ca₁₀-P占Ca-P的51.7%~97.4%^[19]; 无论施用有机肥或磷肥, 石灰性土壤主要增加土壤有效磷及无机磷中的有效磷源Ca₂-P和缓效磷源的Ca₈-P^[19, 33-34]; 潮土上施用有机肥(牛马粪、麦秸和家禽粪堆沤肥)与化肥配施定位施肥16年, 无机磷约有2/3转化为Ca₂-P和Ca₈-P^[35]; 潮土上长期定位施用磷肥和有机肥(鸡粪)12年, 以无机磷增加为主, 无机磷中以Ca₂-P和Ca₈-P为主, 其次为Al-P、Fe-P, 再次为O-P, 土壤Ca₁₀-P无显著增加^[19]。本研究结果表明: 石灰性潮土上长期定位施肥33年, 所有施肥处理土壤无机磷组分均以Ca-P为主, 占无机磷总量的71.0%, 且随施入磷肥与秸秆的增加, 主要增加Ca₂-P、Ca₈-P, 其次为Al-P和Fe-P, 增加幅度分别为64.5%~435.8%、42.0%~129.3%、37.0%~95.8%和40.7%~55.6%, 此结果与前人研究结果一致。而酸性红壤长期定位施肥33年后, 所有施肥处理土壤的无机磷组分主要为Fe-P, 占总量的50%左右, 且增施磷肥后, 土壤中Al-P、Fe-P和Ca-P含量均有不同程度的增加, 增加幅度Fe-P(65.4%)>Al-P(52.5%)>Ca-P(46.5%)^[36]。这是由于南方土壤成土母质主要为玄武岩、浅海沉积物、花岗岩和红色砂石等, 含有较高无定型氧化铁、铝; 而北方主要土壤类型成土母质主要是黄土、黄土状物质和河流冲积物, 碳酸钙含量较高。

3.3 土壤磷素盈亏与土壤磷宏观和微观管理

土壤磷素表现盈亏能反应土壤各形态磷库积累与消耗状况, 是影响土壤磷库科学管理的重要指标。而影响土壤磷素表现盈亏的主要因素是当季施磷量和作物输出磷量, 理论上土壤磷素投入远远高于作物需求, 则会导致磷素大量盈余。近年来从宏观上计算土壤磷输入输出平衡有不少文献^[7-8], 为区域农田土壤磷管理提供重要支撑。杨学云等^[37]对陕西塬土磷素平衡状况研究表明: 随着土壤中磷素累积量的增加, 土壤有效磷增加, 其增加量与土壤磷素盈亏呈极显著正相关。本研究结果表明磷素的盈亏量与Olsen-P、全磷、无机磷总量、Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P和Fe-P的含量均呈显著正相关关系。土壤磷素长期过量积累尤其是距离地表水体近的农

田土壤, 土壤磷水平过高会导致农田土壤磷通过径流和土壤侵蚀流向地表水体^[38], 与此同时土壤磷水平过高加速土壤磷渗漏、向下运移^[39-40]。因此, 如何综合考虑不同区域、不同土壤类型、区域主栽作物对磷肥反应和土壤磷素平衡状况等宏观结果, 结合不同区域磷肥、有机肥或秸秆等在土壤中转化特点等, 环境安全、作物高产下推荐磷肥用量等问题有待于进一步探讨。

4 结 论

河北省冬小麦—夏玉米轮作区典型潮土上长期秸秆还田主要增加土壤无机磷中的Ca₈-P, Ca₈-P的增加量随秸秆用量的增加而增加; 土壤磷素收支表观平衡为盈余时, 随秸秆用量的增加, 土壤全磷、无机磷总量和Olsen-P, 以及无机磷中Ca₂-P、Ca₈-P和Al-P均呈显著增加趋势, 并以Olsen-P的增幅最大, 其次为无机磷总量及全磷; 无机磷中以Ca₂-P增幅最大, 其次为Ca₈-P和Al-P, 再次为Fe-P; 长期秸秆还田与否, 土壤O-P和Ca₁₀-P均无显著变化。相同秸秆还田量下随着磷用量增加, 土壤全磷、无机磷总量和Olsen-P以及无机磷中的Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P和Fe-P均呈显著增加趋势, Olsen-P增幅最大, 其次无机磷总量及全磷; 无机磷中以Ca₂-P增幅最大, 其次Ca₈-P和Al-P、再次为Fe-P; O-P和Ca₁₀-P变化不显著。土壤磷的盈余与亏缺量与土壤中各形态磷含量呈显著正相关关系。

致 谢: 感谢河北农业大学资源与环境科学学院高志岭博士指导撰写英文摘要。

参 考 文 献

- [1] 李承绪. 河北土壤. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1990
Li C X. Hebei Soil (In Chinese). Shijiazhuang: Science and Technology of Hebei Press, 1990
- [2] 林葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化. 植物营养与肥科学报, 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 (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1994(1): 6—18
- [3] 梁庆国, 林葆, 林继雄, 等. 长期施肥对石灰性潮土无机磷形态的影响. 植物营养与肥科学报, 2001, 7(3): 241—248

- Liang Q G, Lin B, Lin J X, et al. Effect of long term fertilization on the forms of phosphorus sorption and desorption in soils with different phosphorus levels (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7 (3) : 241—248
- [4] 鲁如坤, 时正元, 顾益初. 土壤盈余态磷研究 II. 磷肥的表观盈余利用率. *土壤*, 1995, 27 (6) : 286—289
- Lu R K, Shi Z Y, Gu Y C. Soil phosphorus accumulation state II. Phosphorus apparent utilization ratio (In Chinese). *Soils*, 1995, 27 (6) : 286—289
- [5] 沈善敏, 廉鸿志, 张璐, 等. 磷肥残效及农业系统养分循环再利用中长期试验. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4 (4) : 339—344
- Shen S M, Lian H Z, Zhang L, et al. A long-term field trial on residual effect of phosphorus and on the use of recycled nutrients in a farming system (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4 (4) : 339—344
- [6] 申建波, 李仁岗. 利用正交趋势分析进行大面积经济施肥建模. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5 (3) : 258—262
- Shen J B, Li R G. Using orthogonal trend analysis to develop the large area economic fertilization models (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5 (3) : 258—262
- [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. *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 (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33 (2) : 63—67
- [8] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡. *中国农业科学*, 2011, 44 (20) : 4207—4229
- Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input /output and nutrient balance in different regions of China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44 (20) : 4207—4229
- [9] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 45 (5) : 915—924
- Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (5) : 915—924
- [10] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期施肥对潮土土壤磷素利用与盈余的影响. *中国农业科学*, 2006, 39 (1) : 102—108
- Huang S M, Bao D J, Huangfu X R, et al. Effect of long term fertilization on utilization and accumulation of phosphate nutrient in fluvo-aquic soil (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39 (1) : 102—108
- [11] Sharpley A N, McDowell R W, Kleinman P J A. Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (6) : 2048—2057
- [12] Singh B R, Krogstad T K, Shinvay Y S, et al. Phosphorus fraction and sorption in P-enriched soils of Norway. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 73 (2/3) : 245—256
- [13] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus in soils. *Soil Science*, 1957, 84: 1334—1447
- [14] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究. *中国农业科学*, 1989, 22 (3) : 58—66
- Jiang B F, Gu Y C. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22 (3) : 58—66
- [15] 李中阳, 徐明岗, 李菊梅, 等. 长期施用化肥有机肥下我国典型土壤无机磷的变化特征. *土壤通报*, 2010, 41 (6) : 1434—1439
- Li Z Y, Xu M G, Li J M, et al. Changes of inorganic phosphorus in typical soils of China under long-term combined application of chemical and organic fertilizer (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41 (6) : 1434—1439
- [16] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响. *水土保持学报*, 2005, 19 (1) : 97—100, 144
- Wang B R, Xu M G, Wen S L. Effect of long time fertilizers application on soil characteristics and crop growth in red soil upland (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19 (1) : 97—100, 144
- [17] 林德喜, 范晓辉, 胡峰, 等. 长期施肥后简育湿润均腐土中磷素形态特征的研究. *土壤学报*, 2006, 43 (4) : 605—610
- Lin D X, Fan X H, Hu F, et al. Forms of phosphorus in haplydic isohumols soils after long-term fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (4) : 605—610
- [18] 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, 144
- Han X R, Ma L L, Wang Y Q, et al. Effect 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, 144
- [19] 刘建玲, 张福锁. 小麦—玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化 II. 土壤 Olsen-P 及各形态无机磷的动态变化. *应用生态学报*, 2000, 11 (3): 365—368
- Liu J L, Zhang F S. Dynamics of soil P pool in long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation II. Dynamics of soil Olsen-P and inorganic P (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11 (3): 365—368
- [20] 张亚丽, 吕家珑, 金继运, 等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18 (2): 307—314
- Zhang Y L, Lv J L, Jin J Y, et al. Effects of chemical fertilizer and straw return on soil fertility and spring wheat quality (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18 (2): 307—314
- [21] 邢素丽, 刘孟朝, 徐明岗. 有机无机配施对太行山山前平原小麦产量和土壤培肥的影响. *华北农学报*, 2010, 25 (S1): 212—216
- Xing S L, Liu M C, Xu M G. The research of NPK fertilizer combined with soil organic manure enhancing soil fertilization in Taihang Piedmont Plain (In Chinese). *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25 (S1): 212—216
- [22] 杨昆仑, 杨守军, 辛秀琛. 玉米秸秆还田对土壤中磷有效性的影响. *安徽农业科学*, 2012, 40 (28): 13782—13783, 13806
- Yang K L, Yang S J, Xin X C. Effect of maize straw returning to soil on phosphorus availability (In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40 (28): 13782—13783, 13806
- [23] 赵士诚, 曹彩云, 李科江, 等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (6): 1441—1449
- Zhao S C, Cao C Y, Li K J, et al. Effects of long-term straw return on soil fertility, nitrogen pool fractions and crop yields on a fluvo-aquic soil in North China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20 (6): 1441—1449
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社. 2001
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2001
- [25] 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, 110
- Gu Y C, Jiang B F. The methods of determining inorganic phosphorus in calcareous soils (In Chinese). *Soils*, 1990, 22 (2): 101—102, 110
- (2): 101—102, 110
- [26] 董若征, 贾可, 廖文华, 等. 氮磷钾在冬小麦上的产量效应与养分平衡. *华北农学报*, 2012, 27 (4): 175—180
- Dong R Z, Jia K, Liao W H, et al. Yield responses of winter wheat to N, P and K fertilizations and nutrient balances (In Chinese). *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27 (4): 175—180
- [27] 马俊永, 李科江, 曹彩云, 等. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13 (2): 236—241
- Ma J Y, Li K J, Cao C Y, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on fluvo-aquic soil fertility and crop yield (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13 (2): 236—241
- [28] 徐国伟, 段骅, 王志琴, 等. 麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响. *中国农业科学*, 2009, 42 (3): 934—942
- Xu G W, Duan Y, Wang Z Q, et al. Effect of wheat-residue application on physical and chemical characters and enzymatic activities in soil (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42 (3): 934—942
- [29] 张振江. 长期麦秆直接还田对作物产量与土壤肥力的影响. *土壤通报*, 1998, 29 (6): 32—35
- Zhang Z J. Effect of long-term wheat-straw returning on yield and soil fertility (In Chinese). *Chinese Journal and Soil Science*. 1998, 29 (6): 32—35
- [30] 刘巽浩, 高旺盛, 朱文珊. 秸秆还田的机理与技术模式. 北京: 中国农业出版社, 2001: 16
- Liu X H, Gao W S, Zhu W S. The mechanism of the straw returned and technology mode (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2001: 16
- [31] 鲁如坤, 史陶均. 土壤磷素在利用过程中的消耗和积累. *土壤通报*, 1980, 11 (5): 6—8
- Lu R K, Shi T J. The consumption and accumulation of phosphorus (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1980, 11 (5): 6—8
- [32] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素. *应用生态学报*, 2013, 24 (1): 260—268
- Wang Y Z, Chen X, Shi Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (1): 260—268
- [33] 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. *土壤学报*, 1997, 34 (1): 81—87
- Chen X, Yu W T, Shen S M. Changes of soil phosphorous pool under low-input phosphorus fertilization system II. Soil available phosphorus and the composition of soil inorganic phosphorus (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34 (1): 81—87

- [34] 刘建玲, 杨福存, 李仁岗. 长期肥料定位试验栗钙土中磷肥在苜蓿上的产量效应及行为研究. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (2) : 201—207
- Liu J L, Yang F C, Li R G. The yield responses of naked oats to phosphorus fertilizer and phosphorus behavior in chestnut soil in a long-term experiment (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12 (2) : 201—207
- [35] 顾益初, 钦绳武. 长期施用磷肥条件下潮土磷素的盈余、形态转化和有效性. 土壤, 1997, 29 (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 (In Chinese). *Soils*, 1997, 29 (1) : 13—17
- [36] 史静, 张誉方, 张乃明, 等. 长期施磷对山原红壤磷库组成及有效性的影响. 土壤学报, 2014, 51 (2) : 351—359
- Shi J, Zhang Y F, Zhang N M. et al. Effects of long-term fertilization on forms and availability of phosphorus in Mountain Red soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (2) : 351—359
- [37] 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. 西北农业学报, 2007, 16 (5) : 118—1236
- Yang X Y, Sun B H, Gu Q Z, et al. Phosphorus balances and its effects on soil phosphorus status under long-term fertilization (In Chinese). *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2007, 16 (5) : 118—123
- [38] 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. 植物营养与肥料学报. 2009, 15 (6) : 1280—1287
- Zhang F H, Liao W H, Liu J L. Applications of phosphorus and organic fertilizers on yields of vegetables and their environmental impacts (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 (6) : 1280—1287
- [39] 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. Applications of phosphorus and organic fertilizers on yields of vegetables and their environmental impacts. (In Chinese) *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14 (2) : 284—290
- [40] 张作新, 刘建玲, 廖文华, 等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷渗漏影响研究. 农业环境科学学报, 2009, 28 (4) : 729—735
- Zhang Z X, Liu J L, Liao W H, et al. The effect of phosphate fertilizer and manure on phosphorus leaching in different phosphorus levels soil (In Chinese). *Journal of Agr-Environment Science*, 2009, 28 (4) : 729—735

Effects of Long-term Straw Return on Various Fractions of Phosphorus in Fluvo-aquic Soil

HUANG Xinxin¹ LIAO Wenhua¹ LIU Jianling^{1, 2†} ZHANG Wei¹ CAO Caiyun³ GUO Li³

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China)

(2 Key Laboratory for Farmland Eco-Environment of Hebei Province, Baoding, Hebei 071001, China)

(3 Dryland Farming Institute, Hebei Academy of Agriculture & Forestry sciences, Hengshui, Hebei 053000, China)

Abstract During the last decades, long-term fertilization has improved soil fertility in the Huang-Huai-Hai Plain. With increasing soil available P, crop response in yield to phosphorus fertilization has been found declining, while environmental risks of unreasonable fertilization are becoming an hot issue of concern. In recent years, returning straw to fields is a farming practice getting more and more popular in the Huang-Huai-Hai Plain, however, few studies, let alone long-term straw return field experiments, have been carried out to investigate impacts of such changes in field management on fractions of soil inorganic P, soil P availability, yield response as well as potential environmental risks. Therefore, based on the 33-year long-term fertilization field experiment effects of straw return in conjunction with chemical P fertilization on total-P, Olsen-P as well as fractions of inorganic phosphorus in fluvo-aquic soil in the Huang-Huai-Hai Plain were studied.

Fractionation of inorganic P was done using the Gu Y-C, Jiang B-F method. In this experiment, the split-plot method was used, and 4 main plots, i.e. N_0S_0 , N_1S_1 , N_2S_2 and N_3S_3 were laid out. Each main plot was split into 3 sub-plots, applied with straw at a rate of 0, 2 250 and 4 500 kg hm^{-2} , separately. This experiment under a winter wheat-summer maize rotation system was initiated in 1981, and designed to have maize straw returned to the field in 1981–1983, 1987–1989, 1993–1995, 1999–2001 and 2005–2013 and winter wheat straw returned in 2000 and on.

Results show that among the plots the same in P_2O_5 application rate, (0, 60 or 20 kg hm^{-2} in chemical phosphorus), those having maize straw returned for 21 years and those having wheat straw returned for 15 years witnessed soil Ca_8-P significantly increased with rising straw return rate; in plots applied with P_2O_5 at 240 kg hm^{-2} in chemical phosphorus, soil total P, available P and inorganic P, such as Ca_2-P , Ca_8-P and $Al-P$, were all significantly increased with rising straw return rate, but $Fe-P$, $O-P$ and $Ca_{10}-P$ did not change much in content. Compared to Plot $N_0P_0S_0$, Plot $N_0P_0S_2$ (maize straw returned at 4 500 kg hm^{-2}) was 10.2% or 7.33 mg kg^{-1} higher in content of soil Ca_8-P ; compared to Plot $N_1P_1S_0$, Plot $N_1P_1S_2$ was 32.5% or 24.39 mg kg^{-1} higher in content of soil Ca_8-P ; compared to Plot $N_2P_2S_0$, Plot $N_2P_2S_1$ was 10.3% or 10.07 mg kg^{-1} and Plot $N_2P_2S_2$ was 27.3% or 26.71 mg kg^{-1} higher in content of soil Ca_8-P ; and in comparison with Plot $N_3P_3S_0$, Plot $N_3P_3S_1$ and $N_3P_3S_2$ was 64.5% or 2.47 mg kg^{-1} and 178.6% or 6.84 mg kg^{-1} higher in content of soil Ca_2-P , 42.0% or 80.15 mg kg^{-1} and 67.8% or 129.3 mg kg^{-1} higher in content of soil Ca_8-P and 37.0% or 15.68 mg kg^{-1} and 61.7% or 26.14 mg kg^{-1} , higher in content of $Al-P$, respectively. In terms of relative increment ($p < 0.05$) the fractions of inorganic P displayed an order of $Ca_2-P > Ca_8-P > Al-P$. In addition, in the plots the same in straw return rate, impacts of chemical P fertilization rate on soil P were also examined: in comparison with Plot $N_0P_0S_0$, Plots $N_1P_1S_0$, $N_2P_2S_0$ and $N_3P_3S_0$ had soil total P, inorganic P and Olsen-P increased on average by 154, 164 and 7.24 mg kg^{-1} (23.1%, 35.9%, 593.2%), respectively, and Ca_2-P , Ca_8-P , $Al-P$ and $Fe-P$ increased on average by 1.53, 49.43, 14.18 and 13.09 mg kg^{-1} (242.9%, 68.9%, 59.5% and 40.7%), respectively. Furthermore, in comparison with $N_0P_0S_0$, Plots $N_1P_1S_1$, $N_1P_1S_2$, $N_2P_2S_1$, $N_2P_2S_2$, $N_3P_3S_1$ and $N_3P_3S_2$ had soil total P, inorganic P and Olsen-P increased on average by 2013, 271 and 9.90 mg kg^{-1} (35.1%, 59.1%, 811.7%), and Ca_2-P , Ca_8-P , $Al-P$ and $Fe-P$ increased by 3.67, 97.65, 22.99 and 17.04 mg kg^{-1} (581.7%, 136.1%, 96.6% and 53.0%), respectively.

In conclusion, in the farmlands under the winter wheat-summer maize rotation system in the Huang-Huai-Hai Plain, when P input falls lower than P output (120 kg hm^{-2}), the soils would not have much changes in total P, inorganic P, Olsen-P and fractions of inorganic P, regardless of whether straw is returned in addition to fertilization. However, when P input goes beyond P output, soil total P, Olsen-P as well as Ca_2-P , Ca_8-P , $Al-P$ and $Fe-P$ will all increase, and among the P fractions, Olsen-P ranks first in relative increment, and is followed by Ca_2-P , Ca_8-P and $Al-P$. In addition, balance of soil phosphorus input and output is positively related to contents of the various fractions of soil phosphorus ($p < 0.05$).

Key words Fluvo-aquic soil; Long-term fertilization experiment; Straw return; Olsen-P; Fractions of inorganic phosphorus

(责任编辑：陈荣府)