

## 不同施肥处理对潮棕壤剖面磷素累积与分布的影响\*

王月立<sup>1,3</sup> 张翠翠<sup>2</sup> 马强<sup>1</sup> 周桦<sup>1</sup> 徐永刚<sup>1</sup> 姜春明<sup>1</sup> 宇万太<sup>1†</sup>

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

(2 河南农业职业学院, 郑州 451450)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要** 以下辽河平原的长期定位试验为平台, 通过比较不同肥料类型和用量条件下表层土壤全磷及土壤剖面(0~80 cm)中速效磷的分布差异, 研究长期不同施肥条件对土壤中磷素垂直迁移的影响。结果表明: 1) 在各施磷肥处理下, 土壤磷素收支盈余, 表层土壤全磷和速效磷含量均明显升高, 且土壤磷收支的盈亏值( $x$ )与土壤速效磷的增减量( $y$ )呈显著直线关系  $y = 0.070 1x + 8.538 9$  ( $R^2 = 0.89 * *$ ), 其中磷素盈余量的 15.8% 进入到土壤速效库内; 2) 化肥磷施用量为 50 和 100 kg hm<sup>-2</sup> 时, 60~80 cm 土层内速效磷含量显著高于对照, 说明存在磷素的垂直迁移; 3) 相对于化肥而言, 施用有机肥更易于磷素向下迁移; 4) 在施肥、有机质含量和作物吸收等多种因素影响下, 土壤速效磷在土壤剖面中呈现上下层高、中间层低的空间分布格局, 最低值出现在 20~40 cm 土层。

**关键词** 长期施肥; 速效磷; 土壤剖面; 下辽河平原**中图分类号** S151 **文献标识码** A

磷是引起淡水水体富营养化现象的主要和关键元素之一<sup>[1-2]</sup>, 农田、农村畜禽养殖和城乡结合部的生活排污是目前造成我国水体氮、磷富营养化的主要原因, 而其中农田的贡献量在逐年增加, 至 2004 年已占这三者氮、磷总发生量的 70% 和 60%<sup>[3]</sup>。土壤中未被植物利用的养分, 可通过径流或淋溶进入地表或地下水, 导致水体富营养化<sup>[4]</sup>。尽管很多研究表明地表径流是耕地磷素损失的主要途径<sup>[5-7]</sup>, 但磷素的淋溶损失在一定条件下也会发生, 也应受到重视。Heckrath 和 Brookes 等<sup>[8]</sup>研究表明长期施磷肥虽然可以提高土壤磷含量, 但当土壤固磷能力达到饱和时, 水溶性磷和吸附磷会通过土壤孔隙下移, 导致地表或地下水污染。Djordjic 等<sup>[9]</sup>研究表明, 即使土壤固磷能力未达到饱和, 若土壤中存在大孔隙, 遇到较强降雨时磷素也可通过大孔隙向下迁移。Jacobsen 等<sup>[10]</sup>通过原状土柱淋溶试验发现, 在有较大孔隙的土壤中, 土壤颗粒磷的迁移占有很高比例, 是一种很重要的迁移方式。Hesketh 等<sup>[11]</sup>通过洛桑试验站 Broadbalk

连作小麦试验地的研究发现, 当速效磷含量达到 60 mg kg<sup>-1</sup> 时, 土壤磷素迁移量明显增加, 因此通常将 60 mg kg<sup>-1</sup> 的速效磷看成是该地土壤磷发生淋溶的“突变点”。

直接观察土壤中的磷素向下淋溶对试验条件要求较为苛刻, 而磷素在土壤剖面的分布与积累情况可以在一定程度上反映磷素垂直迁移特征。例如, Eghball 等<sup>[12]</sup>的试验显示, 在砂质壤土上施用高龄有机肥和化肥, 其深层土壤磷素含量显著高于对照, 表明存在磷素的垂直迁移。也有研究者通过在土壤中埋设测渗计来观测淋溶液中磷素浓度, 结果表明尽管土壤中存在显著的磷素淋溶, 但深层几乎没有磷的积累<sup>[13]</sup>, 若深层存在磷素的累积就必定有磷淋溶的发生。磷素的垂直迁移是一个缓慢和长期的过程, 短期试验很难观测到这一现象。因此, 利用长期定位试验的土壤剖面数据来揭示磷素在土壤中的迁移情况, 不失为一种可行且合理的试验方法。在下辽河平原地区有关于磷素剖面分布的研究, 但没有从磷素垂直迁移角度分析, 本文以下

\* 国家自然科学基金项目(31000206)、国家科技支撑计划课题项目(2012BAD05B01)和辽宁省自然科学基金项目(201102225)资助

† 通讯作者: E-mail: wtyu@iae.ac.cn

作者简介: 王月立(1987—), 男, 黑龙江黑河人, 硕士研究生, 主要从事土壤养分迁移研究。E-mail: wangyueli221@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-05-21; 收到修改稿日期: 2013-03-14

辽河平原几组长期定位试验为平台,通过分析不同施肥条件下土壤剖面中磷素的分布与积累情况,旨在揭示不同施肥量和肥料类型与磷素垂直迁移间的相互关系,为合理评价农田生态系统中施肥带来的潜在环境风险提供科学依据和技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验土样取自中国科学院沈阳生态实验站,该站位于沈阳市以南 35 km (E 123°24', N 41°31'),地处下辽河平原,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明、雨热同季、夏季炎热、冬季寒冷,年平均温度为 7~8 °C,  $\geq 10$  °C 活动积温为 3 300~3 400 °C,年降雨量为 650~700 mm,无霜期为 147~164 d。供试土壤为潮棕壤,基本理化性质为:有机质 19.7 g kg<sup>-1</sup>,全氮 1.0 g kg<sup>-1</sup>,全磷 0.47 g kg<sup>-1</sup>,全钾 17.4 g kg<sup>-1</sup>,速效磷 10.1 mg kg<sup>-1</sup>,速效钾 101.4 mg kg<sup>-1</sup>,pH 6.4。

### 1.2 试验设计

试验始于 2002 年,包括不同用量氮肥、磷肥和有机肥 3 组长期试验,为了获取更多信息,每组试验独立设计且包含高、中、低 3 个施肥水平,重复 3 次,共设置 27 个小区,小区面积为 108 m<sup>2</sup>,各小区采取大豆-玉米-玉米轮作方式<sup>[14]</sup>。为了促进大豆生长,改变传统大豆不施氮肥做法,大豆施启动氮肥 25 kg hm<sup>-2</sup>,磷、钾肥同玉米一致,有机肥试验无化肥添加,具体处理和肥料用量见表 1,肥料品种分别为尿素,重过磷酸钙和硫酸钾,有机肥为腐熟猪粪(M),施用量分别为每年 10 t hm<sup>-2</sup>(M1)、25 t hm<sup>-2</sup>(M2)和 50 t hm<sup>-2</sup>(M3),有机肥每年含水量和养分含量均不同,表 1 中数据为 10 年均值。

表 1 长期定位试验的施肥量

Table 1 Application rates of fertilizers in the long-term experiment (kg hm<sup>-2</sup>)

试验设计 Treatment	施肥量 Rate of fertilizer			试验设计 Treatment	施肥量 Rate of fertilizer		
	N	P	K		N	P	K
CK	0	0	0	P2	150	50	60
N1	100	50	60	P3	150	100	60
N2	150	50	60	M1	75	64.9	76.6
N3	250	50	60	M2	187.5	162.2	191.4
P1	150	25	60	M3	375	324.3	382.8

### 1.3 样品采集与测定

2011 年 10 月采集土壤样品,以 S 型在各小区

内随机选取 5 个点,为了避免边际效应,采样时主动放弃小区边上两垄,采样分 4 个层次,分别为 0~20、20~40、40~60 和 60~80 cm。样品经自然风干,去除石砾、根系,过 2 mm 筛备用。每年收获时,各小区按常规方法采集籽实和秸秆样品并称量。

土壤速效磷采用 0.5 mol L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> (pH = 8.5) 浸提,钼锑抗比色法测定;土壤全磷采用 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 熔融-钼锑抗比色法测定<sup>[15]</sup>。作物籽实和秸秆内磷采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮,钼锑抗比色法测定<sup>[15]</sup>。

### 1.4 数据统计与分析

作物磷素移出量 = 籽实内磷素浓度 × 籽实产量 + 秸秆内磷素浓度 × 秸秆产量。

应用 Microsoft Excel 2003 对数据进行整理,Origin 8.0 软件绘图,采用 SAS 9.1 进行数据统计,多重比较采用 SAS 中的 Duncan 法。

## 2 结 果

### 2.1 不同施肥处理下土壤磷的收支情况

从表 2 各处理年均磷素养分收支可以看出,不同施肥和作物吸收导致 10 年间土壤磷素收支不同,对照处理由于没有磷肥投入,每年磷赤字 13.8 kg hm<sup>-2</sup>,其他施磷处理虽有盈余,但盈余量并不相同,盈余最少的是 P1 处理,每年仅盈余磷 2.3 kg hm<sup>-2</sup>,说明在当地的农业经营条件下,每年施用 25 kg hm<sup>-2</sup> 磷肥可基本保障磷素收支平衡,而大剂量施用化肥磷肥并未显著提高因作物收获移出的磷量。值得注意的是,除了 M3 和 M2 处理外,所有施肥处理作物每年收获移出的磷量没有显著性差异,作物产量除 CK 和 M1 外,各处理也没有显著性差异,说明在下辽河平原地区的雨养旱作农田,磷肥施用量为 25 kg hm<sup>-2</sup> 时基本可以满足作物对磷素的需求。大剂量施用磷肥或有机肥固然可实现磷在土壤中的积累,提高磷素肥力水平,但如此高磷量残留于土壤中是否会造成磷的垂直迁移进而对环境构成威胁呢? 这应该是土壤肥料工作者密切关注的问题之一。

### 2.2 不同施肥处理下土壤磷的累积

2.2.1 土壤全磷的累积 由图 1 可见,对于氮肥试验而言,3 个不同施氮量处理表层土壤全磷含量无显著性差异,主要是由于其施磷量一致,由作物带出的磷量又无显著性差异的缘故;对于磷肥试验,从 P1 到 P3 全磷含量呈现增加的态势,10 年间较 CK 处理高出 22%~95%,再次表明 25 kg hm<sup>-2</sup>

(P1)的施磷量不仅能够满足作物的需求,还能保持土壤全磷平衡(与本底相比差异不显著)并略有盈余,长此以往,既有助于土壤磷素的提高,还可以控制磷的垂直迁移,保护环境;对于有机肥试验,由于施入的磷素较多,土壤全磷变化明显并随施肥量增加而增加,处理间差异显著,M1、M2和M3分别为对照的1.58倍、2.58倍和4.18倍,如此高的全磷含量必然导致速效磷含量迅速上升,增加磷素向下迁移的可能性。因此,必须对其进行适时监控,寻找发生磷淋溶的生态阈值。

表2 不同施肥处理土壤磷素年均收支

Table 1 Annual budget of soil P in different fertilization treatments ( $\text{kg hm}^{-2}$ )

试验设计 Treatment	产量 Yield	施入量 Input	移出量 Output	P素收支 Budget of P
CK	4459c	0.0	13.8d	-13.8
N1	7183a	50.0	25.3c	24.7
N2	7149a	50.0	25.4c	24.7
N3	7206a	50.0	24.4c	25.6
P1	7132a	25.0	22.7c	2.3
P2	7265a	50.0	24.4c	25.6
P3	7130a	100.0	27.2bc	72.8
M1	6274b	64.9	25.1c	39.8
M2	7304a	162.2	29.6b	132.6
M3	7728a	324.3	34.0a	290.3

注:同一列中不同字母表示差异达到显著水平( $p < 0.05$ ) Note: Different letters affixed to the data in the same column mean significant difference at  $p < 0.05$

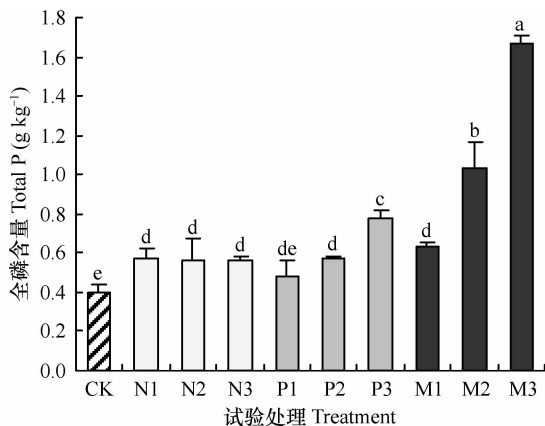


图1 不同施肥处理下表层土壤全磷含量

Fig. 1 Content of total P in the surface soil (0 ~ 20 cm) as affected by fertilization

2.2.2 土壤速效磷与磷素盈亏量之间的关系  
土壤速效磷含量与土壤磷库收支密切相关(图

2),农田磷收支赤字可降低速效磷库,表现为土壤供磷能力减弱,超出缓冲能力之后就会影响作物产量<sup>[16]</sup>。相反,土壤磷盈余则可扩大土壤速效磷库,表现为土壤供磷能力增强,但也增加了磷淋溶的风险。通过对土壤速效磷变化量(速效磷含量与本底值之差)与10年间土壤磷收支盈余总量做相关分析(由于氮肥试验中磷肥施用量相同,故此分析未包含氮肥试验3个处理),结果表明两者之间存在极显著的相关性,相关系数为 $0.94^{**}$ ( $p = 0.001$ )。由其回归方程不难计算出,每提高 $1 \text{ mg kg}^{-1}$ 的速效磷土壤磷盈余 $14.3 \text{ kg hm}^{-2}$ ,反之亦然,速效磷每下降 $1 \text{ mg kg}^{-1}$ 就意味着土壤磷赤字 $14.3 \text{ kg hm}^{-2}$ 。而在本试验土壤上(0 ~ 20 cm 容重为 $1.13 \text{ g cm}^{-3}$ ),土壤速效磷库每发生 $1 \text{ mg kg}^{-1}$ 的变化,意味着速效磷库盈余或赤字 $2.26 \text{ kg hm}^{-2}$ ,也就表明,土壤每盈余 $14.3 \text{ kg hm}^{-2}$ 就有 $2.26 \text{ kg hm}^{-2}$ 进入速效磷库,即有15.8%盈余量进入速效磷库。

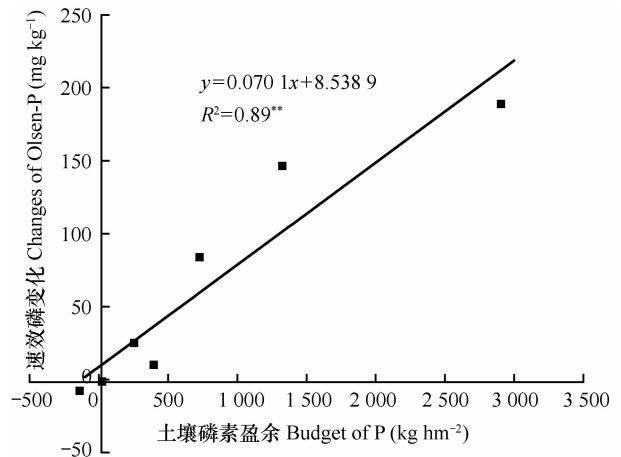


图2 土壤速效磷变化与磷素盈亏量之间的关系

Fig. 2 Relationship between variation of Olsen-P in the surface soil and P budget

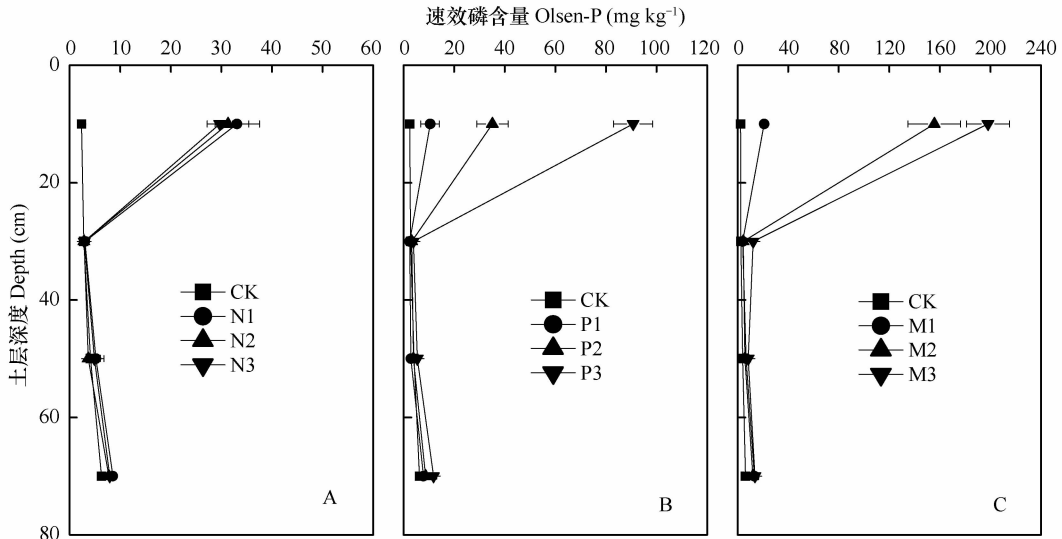
2.3 不同施肥处理对土壤剖面速效磷分布的影响

土壤速效磷(Olsen-P)是评价土壤供磷能力的重要指标。本研究中各处理速效磷含量均呈现明显变化,可见施肥对此已经产生显著影响,但对于不同的试验,其影响程度明显不同。

2.3.1 氮肥对速效磷剖面分布的影响  
对于氮肥用量试验,由于3个处理的施磷量完全相同,作物的携出量又无显著性差异,因此,整个土层中速效磷含量无显著性差异(图3A),但均显著高于对照,其中0 ~ 20 cm以N1处理最高( $33.1 \text{ mg kg}^{-1}$ )、N3处理最低( $29.7 \text{ mg kg}^{-1}$ )。表明在磷素供应充足的

情况下,10年不同施氮处理田间试验,不同用量氮肥尚不足对速效磷产生显著影响,但从N1到N3处理磷已经逐渐表现出递减的趋势,可能是由于田间试验年数原因,其差异还未达到显著性,这与李春越等<sup>[17]</sup>25年田间试验的研究结果相似,在同一施

磷( $P_2O_5$ ,  $90\text{ kg hm}^{-2}$ )水平下,随施氮量从 $45\text{ kg hm}^{-2}$ 、 $135\text{ kg hm}^{-2}$ 至 $180\text{ kg hm}^{-2}$ ,表层速效磷含量呈现递减的变化趋势,不同的是施氮肥 $45\text{ kg hm}^{-2}$ 处理已显著高于施氮肥 $180\text{ kg hm}^{-2}$ 处理。



注: A、B、C分别为不同氮肥、磷肥和有机肥用量试验 Note: A, B and C represent N, P and manure fertilizer treatments, respectively

图3 不同施肥模式下土壤中 Olsen-P 剖面分布

Fig. 3 Distribution of Olsen-P in soil profile as affected by fertilization

**2.3.2 磷肥对速效磷剖面分布的影响** 就磷肥试验而言,各土层速效磷含量均呈现  $P1 < P2 < P3$ 。各处理  $0 \sim 20\text{ cm}$  土层速效磷含量差异显著(图3B),处理  $P3$ 、 $P2$ 、 $P1$  和  $CK$  速效磷含量分别为  $90.8$ 、 $35.1$ 、 $10.5$  和  $2.4\text{ mg kg}^{-1}$ ,即使是施磷最少的  $P1$  处理,速效磷含量也是  $CK$  的  $4.5$  倍。在  $20 \sim 40\text{ cm}$  土层各处理没有显著差异; $40 \sim 60\text{ cm}$  土层  $P3$  处理显著高于其他处理;而  $60 \sim 80\text{ cm}$  土层  $P3$  显著高于其他处理, $P2$  显著高于  $P1$  和  $CK$ ,此层次  $P1$ 、 $P2$  和  $P3$  处理速效磷含量分别为  $7.93$ 、 $8.70$  和  $11.93\text{ mg kg}^{-1}$ 。根据表层本底速效磷含量和2011年收获后土壤速效磷数据,在下辽河平原施磷量  $25\text{ kg hm}^{-2}$ ,不仅可以满足作物生产,还可以维持土壤速效磷库平衡,如果用磷量长期超过  $50\text{ kg hm}^{-2}$ ,土壤磷素存在向下迁移风险。此外, $0 \sim 20\text{ cm}$  和  $60 \sim 80\text{ cm}$  土层各处理速效磷含量差异显著,表明土壤磷素存在垂直迁移。需要强调的是这种变化趋势不是由作物根系分布不同而导致的,因为研究表明,施磷肥可促进根系下扎,增加深层土壤内根的生物量,促进对养分的吸收<sup>[14,18-19]</sup>。

就整个剖面而言, $0 \sim 20\text{ cm}$  显著高于其他土层, $60 \sim 80\text{ cm}$  显著高于  $40 \sim 60\text{ cm}$  和  $20 \sim 40\text{ cm}$ 。在  $20 \sim 40\text{ cm}$  土层内,不仅各处理没有显著性差异,而且速效磷含量也小于其他土层。速效磷呈现上下高,中间低的空间分布格局,其原因与施肥、有机质含量和作物吸收等多种因素有关。

**2.3.3 有机肥对速效磷剖面分布的影响** 有机肥试验速效磷在各土层均以  $M3$  处理最高(图3C), $0 \sim 20\text{ cm}$  土层各处理速效磷含量差异显著; $20 \sim 40\text{ cm}$  和  $40 \sim 60\text{ cm}$  土层内  $M3$  处理显著高于其他处理, $M1$  和  $M2$  显著高于  $CK$ ; $60 \sim 80\text{ cm}$  土层  $M1$ 、 $M2$  和  $M3$  没有显著性差异,但均显著高于  $CK$ ,显示有机肥对速效磷的影响随土层加深逐渐减弱。但无论在哪一层次,施肥处理速效磷含量均显著高于  $CK$ ,说明有机肥的施用已导致磷素向下迁移。

与磷肥试验类似,有机肥试验速效磷剖面分布也呈现上下层高,中间低的空间分布格局,除  $M3$  处理外,速效磷含量最低的层次仍然是  $20 \sim 40\text{ cm}$ 。需要注意的是,有机肥试验  $20 \sim 80\text{ cm}$  土层速效磷含量普遍高于磷肥试验;在  $20 \sim 80\text{ cm}$  土层,磷肥试

验随着土层加深,各处理之间速效磷含量的差异在增大,而有机肥不同处理之间差异却在减少。

### 3 讨 论

#### 3.1 不同施肥处理下土壤磷盈亏量对土壤磷库变化的影响

土壤全磷的变化与土壤质地、农田管理措施和本底值等因素有关。许多研究表明:全磷的变化是一个缓慢的过程,短期耕作不会导致土壤全磷库的改变,但长期不施磷肥会导致土壤全磷含量降低,而长期过量施肥会导致土壤全磷含量升高<sup>[20]</sup>。本研究的结论一致,经过 10 年不施肥耕作,全磷含量下降了 15%,但也有研究证明即使 5 年不施磷肥,土壤全磷也未下降<sup>[21]</sup>,这可能是由于土壤类型和农业管理措施不同造成的。

施用磷肥处理,若施入量大于输出量,磷素在土壤中积累;反之则亏缺,从而降低了土壤的供磷能力。本研究中,潮棕壤上土壤磷收支的盈亏值与土壤速效磷的变化量之间呈显著正相关关系。这与杨学云等<sup>[22]</sup>在壤土上进行的试验结果一致,即土壤磷收支的盈亏值与土壤速效磷的消长是线性相关的。当然也有不同的研究结论,即虽然它们之间关系密切,但却并非等比例变化<sup>[23]</sup>。此外,磷收支盈亏与土壤速效磷消长的关系也受磷肥施用历史的长短以及土壤肥料系统是否已趋于稳定平衡等因素影响。沈善敏等<sup>[24]</sup>的研究结果表明,短期试验有较高比例的残留肥料磷进入速效磷库,而长期试验这一比例则会有所降低。裴瑞娜<sup>[25]</sup>和宇万太等<sup>[26]</sup>的研究结论显示,土壤磷库中大约 10% 的盈余量进入速效磷库,而本研究结果显示,大约有 15.8% 的盈余量进入速效磷库,导致两者之间差异的主要原因是施肥量的不同,本试验中有 3 个处理施磷量超高(均在  $100 \text{ kg hm}^{-2}$  以上),土壤有限的吸附点位满足不了磷的吸附需求,导致更多的磷进入土壤速效磷库中,因此提升了盈余磷进入速效磷库的比例<sup>[27]</sup>。

#### 3.2 不同肥料用量对速效磷垂直分布的影响

除 CK 与 M3 外所有处理的速效磷剖面均呈现上下层高中间低的分布格局,以 20 ~ 40 cm 土层含量最低,尽管很多在其他土壤上的研究表明,速效磷含量随着土壤深度的增加而逐渐降低<sup>[28-30]</sup>,但对于潮棕壤的研究却是例外,结果大多与本文相似<sup>[31-32]</sup>。姜勇等<sup>[31]</sup>认为这种变化趋势主要与作物

对中间土层的磷素吸收有关,王耀生等<sup>[32]</sup>则认为是由于中间土层内有机质含量低导致的。本文认为除了上述原因外,也与该地区成土母质有关。下辽河平原是冲积平原,土层肥沃深厚,由于表层土壤能得到很好补充,底层土壤根系不易到达,导致土壤速效磷上下层高中间低的分布格局。此外,下辽河平原土壤结构发育较好,易产生优势流,导致磷素直接穿过亚耕层使其含量较低<sup>[13]</sup>。很多研究证明优势流是土壤水分垂直迁移的主要途径<sup>[33]</sup>,它可使水分在土壤中的运移速度增加 4.5 倍<sup>[34]</sup>;Djodjic 等<sup>[9]</sup>的研究认为,当优势流是水的主要迁移方式时,可使磷素和水绕过高吸附力的亚耕层土壤,直接进入深层土壤或地下水。速效磷剖面分布格局的具体原因有待于今后进一步研究。

化肥磷肥用量超过作物需求,可使磷在土壤中累积,导致速效磷含量增加,长此以往会造成土壤中磷素向下迁移。本研究连续 10 年施用化肥  $\text{P } 50 \text{ kg hm}^{-2}$ ,可使 60 ~ 80 cm 土层速效磷含量显著高于对照,表明磷肥的施用已造成土壤中易于移动的磷向深层迁移。此时,表层土壤速效磷含量为  $35.1 \text{ mg kg}^{-1}$ ,已超过农作物获得高产的临界值  $20 \text{ mg kg}^{-1}$ <sup>[16]</sup>,因此在实际生产中只要注意调整施肥量和施肥方式,适时监测速效磷含量,就可实现高产和保护环境的双赢目标。

有机肥的施用导致整个土体速效磷高于对照,其增加幅度随施肥量的增加而增加,但随着土层的加深增加幅度减弱,至 60 ~ 80 cm 有机肥处理之间差异已不显著。说明两个问题,首先大量施用有机肥确实可以使磷素向下迁移,其次下层土壤对迁移的磷素有很强的吸附能力。此外,20 cm 以下层次施磷肥处理速效磷含量差异增大,而有机肥各处理差异减弱的原因,可能是因为随着有机肥用量进一步增大,亚耕层土壤大孔隙减少,一定程度上限制了磷素通过大孔隙直接向下层土壤迁移。Brock 等<sup>[35]</sup>通过原状土柱淋溶模拟试验,发现一组原本淋溶量很大的处理在施用有机肥后淋溶量和淋失的磷量均减少,认为是添加有机肥堵塞了大孔隙所致。现有数据还表明,每年施用  $50 \text{ t hm}^{-2}$  有机肥,已使磷的投入量每年达  $324.3 \text{ kg hm}^{-2}$ ,但增加的速效磷主要体现在表层 0 ~ 20 cm 较对照增加 85 倍,下层增加的幅度明显减少,尤其是 40 ~ 60 和 60 ~ 80 cm 仅增加了 2.0 倍和 2.2 倍。其速效磷的含量最高仅为  $13.9 \text{ mg kg}^{-1}$ ,表明迁移到此层次的磷有限。

### 3.3 不同肥料类型对速效磷垂直分布的影响

有机肥相对于化肥而言更易于磷素向下层迁移,污染地下水。Eghball 等<sup>[12]</sup>在美国 40 年连作玉米农田试验表明,施用有机肥的农田磷下移达 1.5~1.8 m,而化肥仅为 1.1 m。本研究中 20~80 cm 土层内,以施用有机肥的 3 个处理速效磷含量最高,说明有机肥的施用导致更多的磷素向下迁移,尤其是比较 M1 处理(施 P 64.9 kg hm<sup>-2</sup>)和 P3 处理(施 P 100 kg hm<sup>-2</sup>)时,即使随有机肥进入农田磷量低于化肥,但深层土壤剖面中速效磷仍高于化肥处理。Sharpley 等<sup>[36]</sup>对这一现象的解释是随有机肥施用带入的有机酸利于活化土壤中的磷素,降低土壤对磷的吸附,使磷素更易于向土壤深层移动。也有一些研究者通过向土壤中施用或配施有机酸来提高土壤中磷的有效性,以期实现土壤磷素高效利用的目的<sup>[37]</sup>。同时,与无机磷相比,有机磷在土壤中移动性更强,Gebrim 等<sup>[38]</sup>研究表明在施用高量有机肥时,损失的有机磷是无机磷的 6.4 倍;Chardon 等<sup>[39]</sup>也发现有机肥中淋失的磷 70%~90% 为可溶性有机磷,淋失量可达到 4.7 kg hm<sup>-2</sup>。此外,有机肥的施用量往往以作物需 N 量为施用标准,导致磷素养分供给高于作物需求,造成磷在土壤中的累积<sup>[40]</sup>,若遇降雨丰沛年景易使磷素向下迁移,对地下水构成威胁。

## 4 结 论

本文以下辽河平原地区 2002 年至 2011 年的 10 年长期定位试验为平台,通过表层土壤速效磷变化量与磷素盈余量之间的关系,计算出潮棕壤内盈余磷向速效磷的转化率 15.8%。其次,分析了化肥和有机肥对磷素垂直迁移的影响,研究通过比较土壤速效磷剖面数据发现,P2 和 P3 处理 60~80cm 土壤速效磷显著高于对照,P1 处理在 20~80 cm 速效磷含量与对照几无差别,说明后者未有磷素垂直迁移发生;有机肥试验三个处理 60~80 cm 土壤速效磷均显著高于对照,说明存在磷素的垂直迁移。而有机肥相对于化学磷肥,土壤速效磷更易于向下层迁移。再次,无论施用磷肥还是有机肥,土壤速效磷在剖面中均呈上下层高,中间层低的空间分布格局。另结合产量与速效磷本底可知,25 kg hm<sup>-2</sup> 的施磷量不仅能够满足作物产量的需求并可维持土壤速效磷在一适宜水平,该值可认为是该地区大豆-玉米-玉米轮作模式的适宜磷肥用量。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Schindler D W. Evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science*, 1977, 195(4275): 260—262
- [ 2 ] 聂泽宇, 梁新强, 邢波, 等. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略. *生态学报*, 2012, 32(1): 48—55. Nie Z Y, Liang X Q, Xing B, et al. The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1): 48—55
- [ 3 ] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 1008—1017. Zhang W L, Wu S X, Ji H J, et al. Estimation of Agricultural Non-Point Source Pollution in China and the Alleviating Strategies I. Estimation of Agricultural Non-Point Source Pollution in China in Early 21 Century (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008—1017
- [ 4 ] Maguire R O, Sims J T. Soil testing to predict phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(5): 1601—1609
- [ 5 ] Kleinman P J A, Sharpley A N, Saporito L S, et al. Application of manure to no-till soils: Phosphorus losses by sub-surface and surface pathways. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 84(3): 215—227
- [ 6 ] 周林飞, 郝利朋, 孙中华. 辽宁浑河流域不同土地类型地表径流和壤中流氮、磷流失特征. *生态环境学报*, 2011, 20(4): 737—742. Zhou L F, Hao L P, Sun Z H. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses through surface flow and interflow on different types of land in Liaoning Hunhe Basin (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4): 737—742
- [ 7 ] 文波龙, 刘兴土, 张乃明. 滇池大河流域农田土壤磷素空间变异特征及对地表径流的影响. *土壤学报*, 2012, 49(1): 173—178. Wen B L, Liu X T, Zhang N M. Spatial variation of soil phosphorus in farmland and its effect on surface runoff pollution load in the Daqinghe watershed of Dianchi Lake (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1): 173—178
- [ 8 ] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(5): 904—910
- [ 9 ] Djodjic F, Borling K, Bergstrom L. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2): 678—684
- [ 10 ] Jacobsen O H, Moldrup P, Larsen C, et al. Particle transport in macropores of undisturbed soil columns. *Journal of Hydrology*, 1997, 196(1/4): 185—203
- [ 11 ] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 105—110
- [ 12 ] Eghball B, Binford G D, Baltensperger D D. Phosphorus move-

- ment and adsorption in a soil receiving long-term manure and fertilizer application. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25 (6): 1339—1343
- [13] Haygarth P M, Hepworth L, Jarvis S C. Forms of phosphorus transfer in hydrological pathways from soil under grazed grassland. *European Journal of Soil Science*, 1998, 49(1): 65—72
- [14] 袁丽金, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 磷对小麦利用土壤深层累积硝态氮的影响. *中国农业科学*, 2009, 42(5): 1665—1671. Yuan L J, Ju X T, Zhang L J, et al. Effects of phosphorus fertilizer on the utilization ratio of nitrate accumulated in deep soil profile by wheat (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(5): 1665—1671
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [16] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4—8. Lu R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body (In Chinese). *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 4—8
- [17] 李春越, 王益, 党廷辉, 等. 不同施肥配比对土壤磷素固液相分配及组分的影响. *中国环境科学*, 2011, 31(2): 265—270. Li C Y, Wang Y, Dang T H, et al. Effect of fertilizing proportion on the distribution of phosphorus between solid and liquid phase in long term experiment (In Chinese). *China Environmental Science*, 2011, 31(2): 265—270
- [18] 张礼军, 张恩和. 灌溉与供磷对复合群体作物根系的调控及其产量效应. *中国农学通报*, 2006, 22(12): 133—138. Zhang L J, Zhang E H. Effect of irrigation and phosphorus application on crop root and yield in intercropping system (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(12): 133—138
- [19] 张礼军, 张恩和, 郭丽琢, 等. 水肥耦合对小麦/玉米系统根系分布及吸收活力的调控. *草业学报*, 2005, 14(2): 102—108. Zhang L J, Zhang E H, Guo L Z, et al. Regulation of water-fertilizer coupling on root distribution and absorbing ability in *Triticum aestivum-Zea mays* intercrop system (In Chinese). *Acta Pratacultural Science*, 2005, 14(2): 102—108
- [20] 王艳玲, 何园球, 吴洪生, 等. 长期施肥下红壤磷素积累的环境风险分析. *土壤学报*, 2010, 47(5): 880—887. Wang Y L, He Y Q, Wu H S, et al. Environmental risk analysis of accumulated phosphorus in red soil under long-term fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 880—887
- [21] Rehm G W, Sorensen R C, Wiese R A. Soil test values for phosphorus, potassium, and zinc as affected by rate applied to corn. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(4): 814—818
- [22] 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—123. Yang X Y, Sun B H, Gu Q Z, et al. Phosphorus balances and its effects on soil phosphorus status under a 12-year long-term fertilization (In Chinese). *Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2007, 16(5): 118—123
- [23] 周修冲, 谭允阳, 陈天生. 连续施用高量化肥对稻谷产量及土壤养分影响的研究. *土壤*, 1988, 20(1): 10—13. Zhou X C, Tan Y Y, Chen T S. Effect of continuous application high levels fertilizer on rice yield and soil nutrient (In Chinese). *Soils*, 1988, 20(1): 10—13
- [24] 沈善敏, 殷秀岩, 张璐. 农业系统中磷肥残效及磷循环研究 I. 作物吸磷量、磷肥残效及土壤有效磷变化. *应用生态学报*, 1992, 3(2): 138—143. Shen S M, Yin X Y, Zhang L. Residual effect of phosphorus fertilizer and phosphorus recycling in a farming system I. Phosphorus uptake by crops, residual effect of phosphorus fertilizer and changes of soil available phosphorus (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1992, 3(2): 138—143
- [25] 裴瑞娜, 杨生茂, 徐明岗, 等. 长期施肥条件下黑垆土有效磷对磷盈亏的响应. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 4008—4015. Pei R N, Yang S M, Xu M G, et al. Response of Olsen-P to P balance in black loessial soil under long-term fertilization (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 4008—4015
- [26] 宇万太, 姜子绍, 马强, 等. 不同施肥制度对作物产量及土壤磷素肥力的影响. *中国生态农业学报*, 2009, 17(5): 885—889. Yu W T, Jiang Z S, Ma Q, et al. Effect of different fertilization systems on soil phosphorus fertility and crop yield (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(5): 885—889
- [27] 沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998. Shen S M. Soil fertility of China (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1998
- [28] 何文寿, 何进勤, 解楠, 等. 宁夏不同地区农田土壤磷素养分的空间变异特征. *土壤通报*, 2006, 37(3): 460—464. He W S, He J Q, Xie N, et al. Spatial variation of soil phosphorus of farmlands in different regions of Ningxia (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3): 460—464
- [29] 张汉荣. 平和‘琯溪蜜柚’果园剖面土壤磷特性及其改善措施. *中国农学通报*, 2011, 27(33): 98—103. Zhang H R. Phosphorus of orchards soil profile and its improvement measures of ‘Guanximiyou’ in Pinghe County (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(33): 98—103
- [30] 吕家珑, 张一平, 陶国树, 等. 23 年肥料定位试验 0~100cm 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
- [31] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 土地利用方式对潮棕壤磷素剖面分布的影响. *农业环境科学学报*, 2005, 24(3): 512—516. Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J, et al. Effects of land use on the profile distribution of phosphorus in aquic brown soil (In Chinese). *Journal of Agro-environmental Science*, 2005, 24(3): 512—516
- [32] 王耀生, 张玉龙, 虞娜, 等. 渗灌灌水控制下限对保护地土壤剖面磷素分布的影响. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 66—70. Wang Y S, Zhang Y L, Yu N, et al. Effect of control lower limit of subsurface irrigation on phosphorus distribution in soil

- profiles of protected land (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6): 66—70
- [33] Kohler A, Abbaspour K C, Fritsch M, et al. Using simple bucket models to analyze solute export to subsurface drains by preferential flow. Vadose Zone Journal, 2003, 2(1): 68—75
- [34] 蒋小金, 王恩姮, 陈祥伟, 等. 典型黑土耕地土壤优先流环绕特征. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3127—3132. Jiang X J, Wang E H, Chen X W, et al. Surrounding characteristics of preferential flow in cultivated typical black soils of Northeast China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(12): 3127—3132
- [35] Brock E H, Ketterings Q M, Kleinman P J A. Phosphorus leaching through intact soil cores as influenced by type and duration of manure application. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 77(3): 269—281
- [36] 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
- [37] 王艳玲, 朱红霞, 王琳, 等. 有机酸对红壤磷素吸附特性的影响. 土壤通报, 2011, 42(3): 685—691. Wang Y L, Zhu H X, Wang L, et al. Effect of organic acids on phosphorus adsorption characteristic in red soil (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 685—691
- [38] Gebrem F D, Novais R F, da Siva I R, et al. Mobility of inorganic and organic phosphorus forms under different levels of phosphate and poultry litter fertilization in soils. Revista Brasileira De Ciencia Do Solo, 2010, 34(4): 1195—1205
- [39] Chardon W J, Oenema O, delCastilho P, et al. Organic phosphorus in solutions and leachates from soils treated with animal slurries. J Environ Qual, 1997, 26(2): 372—378
- [40] Eghball B. Nitrogen mineralization from field-applied beef cattle feedlot manure or compost. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(6): 2024—2030

## EFFECTS OF FERTILIZATION ON ACCUMULATION AND PROFILE DISTRIBUTION OF PHOSPHORUS IN AQUIC BROWN SOIL

Wang Yueli<sup>1,3</sup> Zhang Cuicui<sup>2</sup> Ma Qiang<sup>1</sup> Zhou Hua<sup>1</sup> Xu Yonggang<sup>1</sup> Jiang Chunming<sup>1</sup> Yu Wantai<sup>1†</sup>

(1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

(2 Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Comparisons were made between treatments of a long-term stationary experiment in a field of aquic brown soil in the lower reaches of the Liaohe River Plain for analysis of effects of type and application rate of fertilizer on distribution of total phosphorus (TP) in the surface soil layer and of available phosphorus (AP) throughout the soil profile (0 ~ 80cm). Result show that in all the treatments receiving fertilizer P, soil P gained in positive budget of TP in the surface soil layer and AP increasing obviously, and a significant linear relationship was found between budget of soil P ( $x$ ) and balance of AP ( $y$ )  $y = 0.070 1x + 8.538 9$  ( $R^2 = 0.89 * *$ ). About 15.8% of the surplus P entered AP pool. When P application rate went beyond  $50 \text{ kg hm}^{-2}$ , the AP content in the 60 ~ 80 cm soil layer was significantly higher than that in the control, suggesting that vertical transport of P existed. Compared with chemical fertilizer, organic manure is more likely to cause downwards transport of P. Affected by a number of factors, like fertilizer, organic matter content, crop uptake, etc., the distribution of soil available phosphorus in the soil profile showed a pattern of being high in the upper and lower layers and low in the middle layer, with the lowest observed in the 20 ~ 40 cm soil layer.

**Key words** Long-term fertilization; Available phosphorus; Soil profile; Lower reach of the Liaohe River Plain

(责任编辑:檀满枝)