

刘 蕾,王鹤雄,张国印,等. 不同土地利用类型优先流对磷素垂直迁移及淋失风险的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(5):204-211.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.05.037

# 不同土地利用类型优先流对磷素垂直迁移及淋失风险的影响

刘 蕾<sup>1</sup>, 王鹤雄<sup>2</sup>, 张国印<sup>1</sup>, 郜 静<sup>1</sup>, 李 玘<sup>1</sup>

(1. 河北省农林科学院农业资源环境研究所/河北省肥料技术创新中心, 河北石家庄 050051;

2. 中国移动通信集团河北有限公司, 河北石家庄 050035)

**摘要:**为揭示磷素在土壤剖面中垂直迁移及淋失机制,选择设施生产条件和露地生产条件 2 种不同土地利用类型为研究对象,通过原位染色示踪试验结合图像解析技术,比较设施样地、粮田样地 2 种土地利用方式下土壤优先流分布特征,探索优先流与基质流路径对 2 种土地利用类型全磷和土壤速效磷(Olsen-P)垂直迁移及分布特征的影响,评估不同迁移路径下磷素淋失风险,并探讨磷素随优先流/基质流迁移的影响因素。结果表明:(1)设施生产条件明显改变了水分入渗过程,优先流发育程度更高,并且优先流路径对水分入渗的贡献更大;而粮田土壤以浅层基质流为主,优先流路径分布较少。(2)设施土壤表层 0~20 cm 全磷和 Olsen-P 迁移方式以基质流为主,而 20 cm 以下土层磷素迁移则以优先流路径为主;与之相比,粮田土壤全磷和 Olsen-P 垂直迁移方式以基质流为主,优先流贡献率很低。(3)设施土壤优先流路径中  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  随 Olsen-P 的增加速率是基质流路径的 2 倍,磷素的优先流迁移路径极大地增加了其向环境淋失的风险。(4)相关分析表明,磷素随基质流迁移深度与土壤磷素最大吸持量  $Q_m$  呈极显著负相关;磷素随优先流迁移深度明显大于基质流部分,磷素随优先流迁移深度与优先流路径中沙粒含量呈极显著正相关。

**关键词:**优先流;土地利用类型;基质流;磷素;垂直迁移

**中图分类号:** S153.6<sup>+</sup>1; X592    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1002-1302(2021)05-0204-07

我国农业土壤磷素从 20 世纪 80 年代开始出现盈余,此后一直呈现上升趋势<sup>[1]</sup>,特别是设施蔬菜产区,土壤磷素累积现象普遍<sup>[2]</sup>,某些地区土壤速效磷(Olsen-P)含量甚至超过 500 mg/kg<sup>[3]</sup>。然而,当土壤 Olsen-P 含量达到一定阈值后,有效磷的增加不仅无法带来产量的升高,反而会增加磷素淋失风险,进而威胁水环境安全,农业面源污染磷损失已被认为是水体磷的重要来源。

土壤磷素流失有地表流失和土体内流失 2 种方式,前者与地表径流和土壤侵蚀密切相关,后者主要包括基质流和优先流 2 种主要类型。当磷素以基质流方式迁移时,作用面积大、流速缓慢,容易与土

壤发生物理、化学作用。然而,当磷素以优先流方式迁移时,可随水分快速通过土壤大孔隙,进入深层土壤和地下水,与周围土壤介质作用时间很短,环境风险极大。研究表明,土壤优先流路径是除地表径流外,对磷素流失作用最大的途径,但关于土壤优先流对磷运移的影响研究仍相当缺乏<sup>[4-5]</sup>。我国针对优先流如何影响磷素运移的研究尚处在起步阶段,仅有的研究或涉及自然生态系统<sup>[6]</sup>,或仅关注露地土壤<sup>[7]</sup>,对于养分、水分、农药等投入更为集中、环境风险更大的设施生产体系研究甚少<sup>[8]</sup>。

本试验以设施生产条件和露地粮田生产条件 2 种不同土地利用类型为研究对象,采用原位亮蓝染色示踪法,结合图像分析技术和统计学方法,研究 2 种土地利用类型下优先流发生及分布特征,并进一步探索优先流与基质流路径对 2 种土地利用类型全磷和 Olsen-P 垂直迁移及分布特征的影响,评估不同迁移路径下磷素淋失风险,并探讨磷素随优先流/基质流迁移的影响因素。本研究结果可为改进传统溶质运移模型提供数据和理论支撑,对降低农业磷素的环境风险和保护水环境安全具有重要指导意义。

收稿日期:2020-07-13

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0800404);河北省农林科学院博士资金;河北省农林科学院青年基金(编号:2018130102)。

作者简介:刘 蕾(1987—),女,河北石家庄人,博士,助理研究员,主要从事农业面源污染防控等方面的研究。E-mail:liuleihbny@163.com。

通信作者:张国印,硕士,研究员,主要从事农业面源污染防控等方面的研究。E-mail:gyzhang1984@126.com。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

试验于 2019 年 6 月在河北衡水国家农业科技园饶阳县大尹村镇南北岩村 (115° 50' 82" E, 38° 16' 14" N) 进行, 河北省饶阳县设施蔬菜经过 30 多年发展, 种植规模达千公顷, 居全省第一。研究区地属冀中平原黑龙港流域, 地貌类型为滹沱河洪积平原, 南北岩村设施大棚建于废弃河床之上, 土

壤类型为潮土, 质地为沙壤, 地下水埋深 3 ~ 7 m。年均温 12.2 °C, 降水量 552.6 mm, 属于温带大陆季风气候。该区典型种植模式为西红柿 - 甜瓜轮作, 秋冬茬为番茄, 平均产量为 67 500 ~ 90 000 kg/km<sup>2</sup>; 冬春茬为甜瓜, 平均产量约 75 000 kg/km<sup>2</sup>。试验选择连续种植超过 10 年的温室大棚样地及紧邻的粮田样地进行, 设施作物为甜瓜, 已拉秧, 粮田作物为玉米, 刚出苗, 试验样地的土壤基本理化性状见表 1。

表 1 试验样地土壤基本理化性状

土地利用类型	土层 (cm)	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	黏粒 (<0.002 mm) 含量 (%)	粉粒 (0.05 ~ 0.002 mm) 含量 (%)	沙粒 (2.0 ~ 0.05 mm) 含量 (%)	初始含水量 (%)	有机质含量 (g/kg)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N 含量 (mg/kg)	Olsen - P 含量 (mg/kg)
设施样地	0 ~ 20	1.01	9.60	33.80	56.60	22.09	45.94	147.13	274.00
	20 ~ 40	1.36	7.10	42.80	50.10	17.34	8.61	37.80	81.70
	40 ~ 60	1.48	17.60	56.80	28.60	19.87	6.02	10.85	43.10
	60 ~ 80	1.59	29.85	52.55	23.60	22.14	9.92	30.25	36.60
	80 ~ 100	1.60	41.85	38.05	20.10	24.21	9.20	7.07	18.70
粮田样地	0 ~ 20	1.47	16.60	54.80	28.60	11.06	10.31	29.53	3.32
	20 ~ 40	1.57	18.60	57.30	24.10	13.04	9.69	13.04	3.15
	40 ~ 60	1.51	19.10	57.80	23.10	18.71	8.72	14.71	2.88
	60 ~ 80	1.60	30.20	49.20	20.60	18.63	6.15	16.63	3.01
	80 ~ 100	1.60	42.10	37.80	20.10	18.01	6.10	18.01	1.87

### 1.2 染色示踪试验

设施样地、粮田样地各选取 3 个重复的 1 m × 1 m 的小区, 两两相距大于 2 m, 小于 4 m, 以免在样地预处理中造成影响, 清理枯枝落叶及杂物后, 使用 1 m × 1 m × 0.6 m 的金属框砸入样地, 砸入深度 40 cm, 露出高度 20 cm, 将框体周围土壤压实, 确保染色液不会集中沿框壁下渗, 影响结果。

染色示踪试验选用无毒且易溶于水的亮蓝溶液 (Brilliant Blue) 进行, 不会对土壤造成污染。将配置好的浓度为 4 g/L 的亮蓝溶液 100 mL 缓慢倒入小区内, 模拟棚内外常规漫灌条件, 静置 24 h。在不破坏原始样地的基础上缓慢移走金属框, 在样方中心未扰动区域, 挖掘 0.6 m 宽, 深度至染色消失的垂直土壤剖面, 修整剖面后配标尺, 采用像素为 4 752 × 3 168 的佳能 500D 数码相机分别对每个剖面进行拍照。每个小区挖掘 2 个重复的垂直土壤剖面, 合计 12 个剖面。

### 1.3 样品采集及测定

染色试验开始前在各小区金属框 4 个外边缘 10 cm 处分别取基础土, 每 10 cm 1 层至 100 cm, 每小区 4 钻合成 1 个样品, 用于测定设施样地、粮田样

地土壤基本理化性状。染色试验结束后, 垂直剖面分染色土、非染色土每 10 cm 1 层采集土壤样品测定理化性质。土壤容重采用环刀法测定<sup>[9-10]</sup>; 土壤含水量采用烘干法测定; 土壤机械组成采用比重计法测定; 土壤有机质含量采用重铬酸钾稀释法测定<sup>[11]</sup>; Olsen - P 含量用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> (pH 值 = 8.5) 溶液浸提 (水土比 20 : 1) 钼锑抗比色法测定<sup>[12]</sup>; CaCl<sub>2</sub> - P 含量用 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液浸提 (水土比 5 : 1) 钼锑抗比色法测定<sup>[13]</sup>; 全磷含量采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - HClO<sub>4</sub> 消煮钼锑抗比色法测定<sup>[14]</sup>。

磷素等温吸附试验取风干土 2.5 g 置于 100 mL 离心管, 加入 P 质量浓度分别为 0.0、2.5、5.0、10.0、20.0、30.0、50.0 mg/L 的 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液 50 mL。同时加入 2 滴甲苯在 25 °C 条件下振荡 24 h, 4 000 r/min 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 量与吸附平衡时溶液中 P 质量浓度的差值<sup>[15]</sup>。

### 1.4 图像处理与数据分析

使用 Photoshop CS 5.1 对照片进行几何校正和剪裁, 保留中心 60 cm 宽度, 垂直至染色消失。然后进行亮度与色彩校正, 调整照片明度 (-100)、颜色

容度差(0~5%),替换颜色,然后进行灰度、阈值调整,使土壤染色部分替换为黑色,未染色部分替换为白色。然后将照片转换为 .bmp 位图格式,利用 Matlab 7.1 对位图进行处理,输出照片二元(0,255)信息矩阵。0 为黑色元素,代表染色;255 为白色元素,代表未染色<sup>[16-18]</sup>。将数据导出到 Excel 进行统计分析。

#### 1.4.1 土壤剖面染色面积比

$$D_c = \frac{D}{D + N_D} \times 100\%。$$

式中: $D_c$  为土壤剖面染色面积比(%); $D$  为土壤剖面总染色面积( $\text{cm}^2$ ); $N_D$  为土壤剖面未染色区域总面积( $\text{cm}^2$ )。

#### 1.4.2 优先流贡献率

$$R_i = \left( \frac{C_{\text{IPPF}} - C_{\text{IMAT}}}{C_{\text{IMAT}}} \right) \times 100\%。$$

式中: $R_i$  为优先流路径对土壤全磷/Olsen-P 运移的贡献率; $C_{\text{IPPF}}$  为优先流路径(染色土)全磷/Olsen-P 含量; $C_{\text{IMAT}}$  为土壤基质(未染色土)全磷/Olsen-P 含量。

由于本研究 2 种土地利用类型各取了 3 个样地,每个样地挖掘 2 组剖面,土壤剖面较多,结合样地调查情况和试验图像处理结果,每个样地选取 1 组染色图像为例进行展示,但对每种土地利用类型的优先流染色形态特征结果中的数据分析为全部样地的数据。

采用 SPSS 18.0 进行配对样本  $t$  检验、回归分析、Pearson 相关分析, Sigmaplot 10.0 软件进行等温方程拟合及作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用类型对土壤优先流特征的影响

通过对设施样地及粮田样地土壤优先流路径分析和评价得出,土地利用类型对土壤优先流发生及分布影响极大(图 1)。设施样地土壤染色面积比平均值为 40.26%~69.14%,明显高于粮田的 19.63%~40.30%;设施土壤基质流深度为 8.30~30.43 cm,最大染色深度 36.27~70.14 cm,也明显高于粮田土壤 6.43~10.15 cm 和 13.42~54.91 cm,说明设施生产条件明显改变了水分入渗过程,增大了基质流区域面积,优先流路径更多分布在土壤深层,使得其水分入渗能力强于棚外土壤,并且优先流路径对入渗的贡献更大。

通过土壤垂直剖面染色面积比变化(图 1)可以看出,总体上染色面积比随土壤深度的增加而降低,但不同土地利用类型变化规律不同。整体上,粮田样地土壤染色面积比随土层加深降低速率较快,亮蓝在土壤剖面内入渗较浅,说明粮田样地土壤以浅层基质流区域为主,优先流路径深层分布较少。因此,染色图像呈现的规律为在一定土壤深度内染色面积比均大于 80% 且随深度变化不大,但在以下土层染色面积比迅速下降直至消失,整体呈现“L”形变化,转折点发生在 10 cm 左右,对应粮田耕作层深度,表明人为翻耕、除草、施肥等活动破坏了土壤的原有结构,阻断了耕作层与下层结构性土壤之间的联通孔隙,从而阻碍了优先流的发生。而设施土壤剖面染色面积比随深度并不是单调递减模式变化,在一定土壤范围内染色面积会出现明显的反弹现象,总体呈现类似“S”形变化,说明随着土壤深度增加,水分入渗呈现明显的优先流现象,峰值主要出现在 20~30 cm 之间,表明在该土层优先流发生最剧烈。在取样观测中发现,此处根系分布最多,因此出现优先流路径的集中分布。

### 2.2 不同土地利用类型对优先流路径中磷素分布特征及垂直迁移的影响

通过对设施土壤优先流路径和基质流路径中总磷含量进行配对样本  $t$  检验表明,2 种不同路径中总磷含量差异显著(A1,  $t = 4.289$ ,  $P = 0.013$ ; A2,  $t = 2.763$ ,  $P = 0.050$ ; A3,  $t = 2.769$ ,  $P = 0.028$ )。从图 2-A、图 2-B、图 2-C 可以看出,表层 0~20 cm 土壤优先流路径与基质流路径全磷含量差异并不明显,此深度范围全磷迁移随水分入渗以基质流为主。而 20 cm 以下土壤优先流路径全磷含量明显高于基质流路径,表明这些土壤中存在明显的优先流磷素迁移。其中,2 种路径中全磷含量差异在 20~30 cm 处达到最大,正是优先流发育最为剧烈的土层(图 1),表明在 20 cm 以下土壤中全磷迁移以优先流为主。其中,优先流对于全磷的贡献率随土层加深先增加后降低,峰值出现在 20~30 cm 处, A1-A3 样地分别达到 72.11%、97.01% 和 79.80%。

粮田样地土壤优先流路径和基质流路径中总磷含量配对样本  $t$  检验表明,2 种不同路径中总磷含量差异不显著(B4,  $t = -0.582$ ,  $P = 0.619$ ; B5,  $t = 2.008$ ,  $P = 0.182$ ; B6,  $t = 1.251$ ,  $P = 0.266$ )。从图 2-D、图 2-E、图 2-F 可以看出,整个土壤剖面 2 种路径中全磷含量差异不明显,表明粮田样地土壤

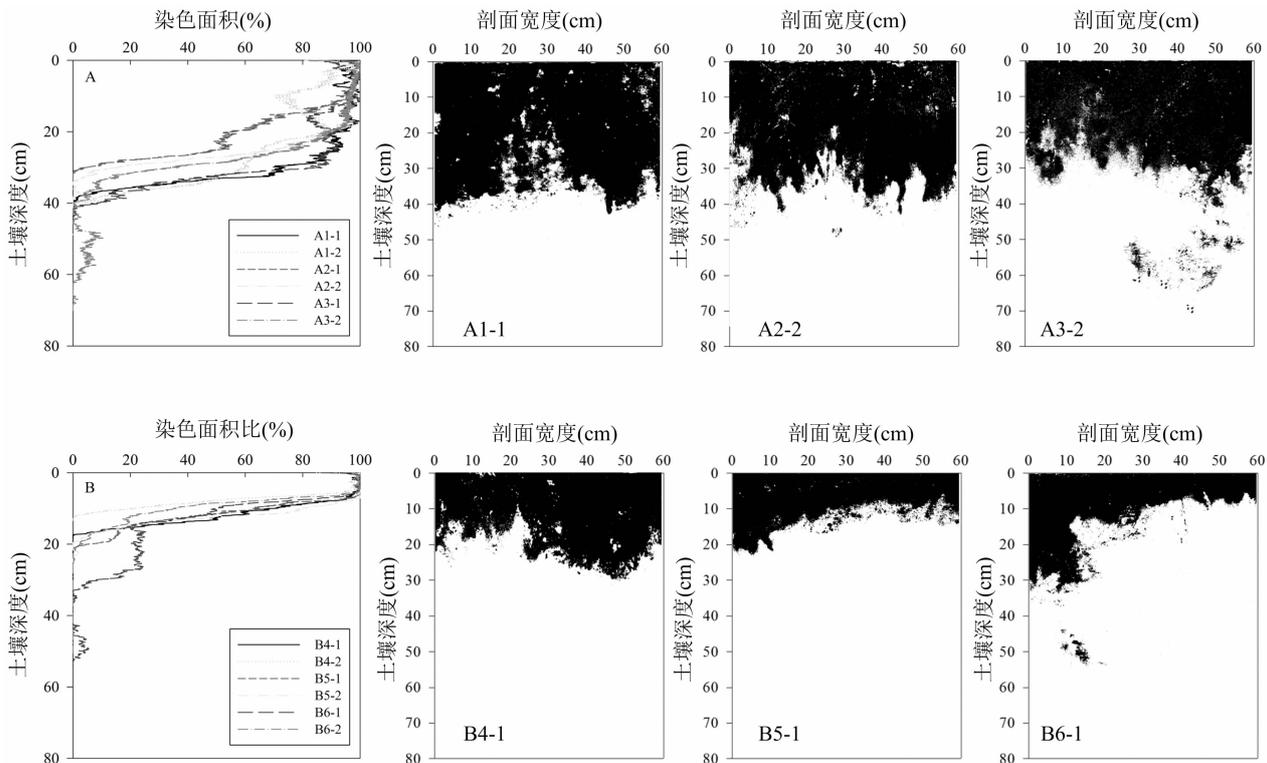


图1 不同土地利用类型土壤优先流染色面积比

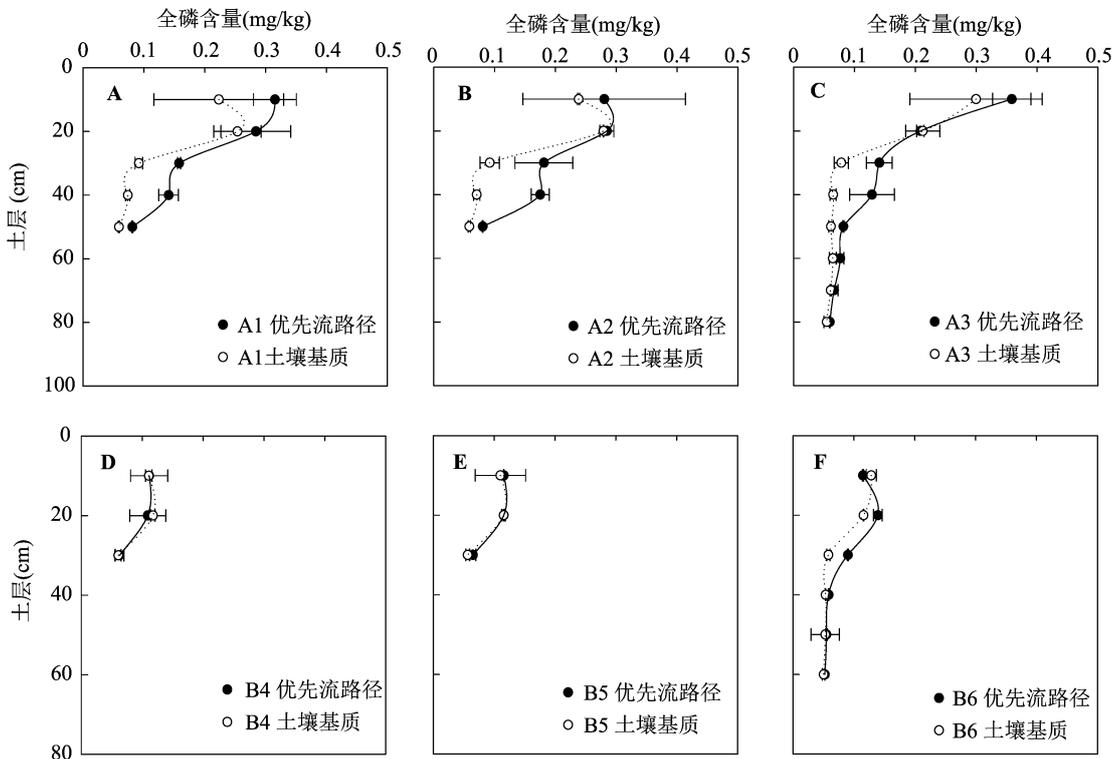


图2 设施样地(A~C)和粮田样地(D~F)土壤优先流路径及基质路径全磷垂直分布特征

全磷迁移以基质流为主, 优先流对全磷的贡献率仅为 0 ~ 20.34%。

与全磷含量相比, 土壤优先流对不同土地利用

类型土壤速效磷的垂直迁移贡献更大。对于设施土壤, 优先流路径中速效磷含量与基质流路径差异显著 ( $A1, t = 2.987, P = 0.040$ ;  $A2, t = 3.384, P =$

0.028; A3,  $t = 3.359, P = 0.012$ )。速效磷含量垂直分布特征与优先流发育特征吻合度更高,在优先流发育滞后的表层0~20 cm范围内,2种路径中速效磷含量差异不明显,说明该区土壤速效磷迁移以基质流为主;而在土壤优先流发育程度较高的20 cm以下土层,优先流路径中 Olsen-P 含量明显高于基质流,且优先流对 Olsen-P 垂直迁移的贡献率也随土壤深度增加而增大,从表层的1.28%~6.59% (样地1)、3.82%~10.14% (样地2)、0%~4.81% (样地3)迅速增加到80.57%~291.30% (样地1)、89.09%~241.06% (样地2)、50.21%~517.67% (样地3),说明在20 cm以下的土层 Olsen-P 垂直迁移以优先流为主。与全磷相似,土壤 Olsen-P 也呈现明显的深层积累现象,且20~40 cm范围内 Olsen-P 含量与全磷积累状况吻合,进一步说明优先流附近的土壤中,随着 Olsen-P 含量的增加,全磷含量也在增加。然而,样地3中优先流途径 Olsen-P 含量在50~60 cm处也出现累积峰值(图3-C),与样地3优先流染色结果(图1-A)一致,即在50~60 cm处又出现优先流剧烈发生层次,在

取样中发现该层次主要由于深根的作用导致,然而,全磷剖面却未呈现一致结果(图2-C),表明该层次 Olsen-P 迅速通过优先流路径抵达更深层土壤甚至地下水,由于作用时间很短,周围全磷含量并未增加。

与全磷相同,粮田土壤优先流路径和基质流路径中 Olsen-P 含量差异也不显著(B4,  $t = -0.329, P = 0.774$ ; B5,  $t = 3.231, P = 0.084$ ; B6,  $t = 1.115, P = 0.315$ )。除样地2土层10~20 cm及样地3土层20~30 cm优先流对于 Olsen-P 贡献率达到50.11%及45.10%外,其余土层优先流贡献率全都小于20%。从图3-D、图3-E、图3-F也可以看出,绝大多数土层2种路径中 Olsen-P 含量差异不明显。进一步说明棚外土壤 Olsen-P 迁移以基质流为主。

### 2.3 优先流/基质流迁移路径对磷素淋失风险的影响

目前,环境上常以0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub>溶液浸提的水溶性磷与 Olsen-P 之间的关系评估土壤磷素淋失潜能。笔者所在课题先前研究发现,该区土壤

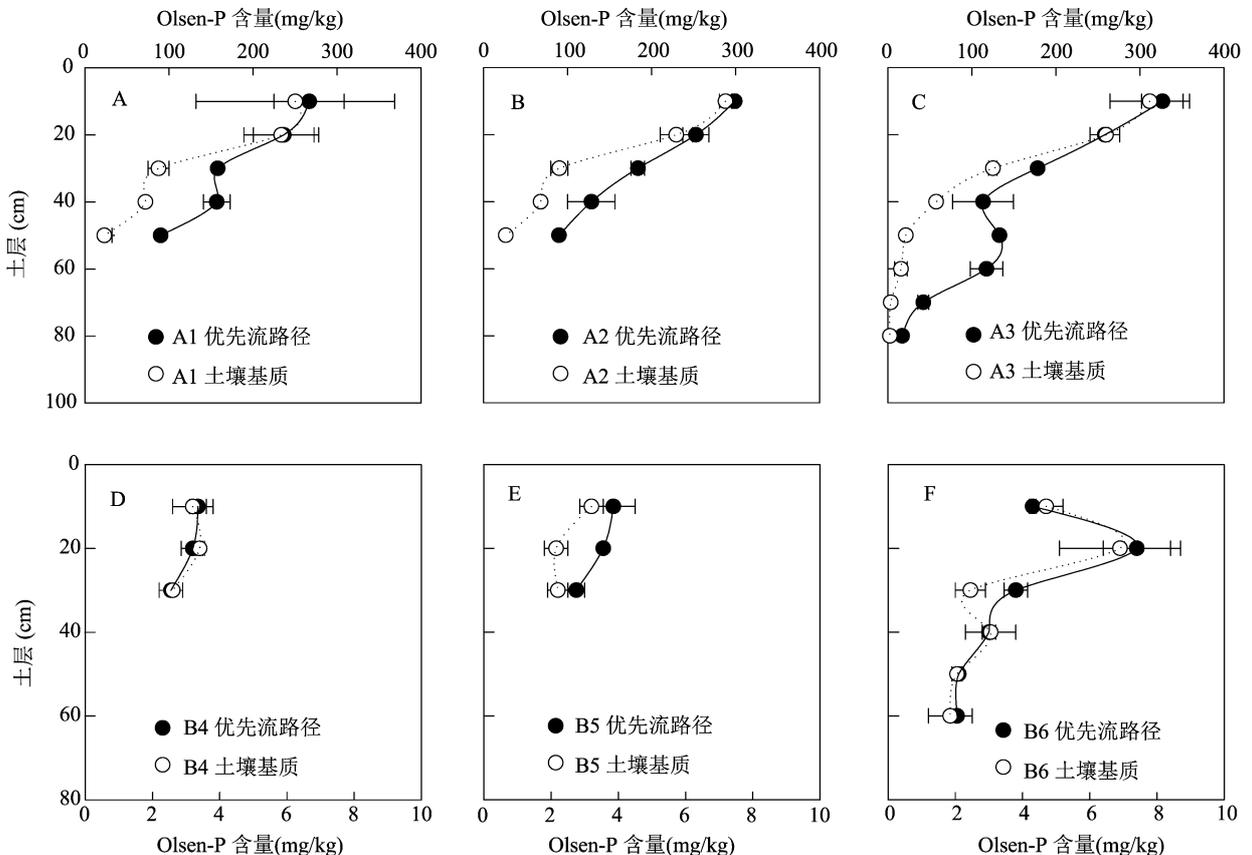


图3 设施样地(A-C)、粮田样地(D-F)土壤优先流路径及基质路径 Olsen-P 垂直分布特征

Olsen - P 与  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  之间存在拐点,当土壤 Olsen - P 含量低于 58.39 mg/kg(对应  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  含量 3.88 mg/kg)时,土壤磷素淋失风险较低,反之磷素淋失风险急剧增加<sup>[19]</sup>。从图 4 - A 观察到,设施条件绝大多数土壤  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  含量均大于 4 mg/kg,磷素淋失风险极高。特别是优先流路径中土壤  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  随 Olsen - P 的增加速率是基质流路径的 2 倍,因此,磷素的优先流迁移路径极大地增加了其向环境淋失的风险。而粮田土壤  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  含量处在阈值范围内,加上以基质流为主的迁移方式,磷

素可以与土壤发生充分的作用,使得磷素淋失的环境风险较低(图 4 - B)。

将 2 种土地利用类型相对比,设施土壤优先流发育程度明显高于粮田土壤,且设施土壤浅层基质流区以下磷素迁移以优先流为主,使得设施土壤磷素随水分以更快速度向深层土壤和地下水运移,极大地增加了环境风险。因此,虽然优先流途径仅占土壤的很小一部分,考虑到该途径下溶质与土壤接触面积小且作用时间短,离子与土壤作用弱,土壤的缓冲性能来不及发挥,其对环境的影响仍不可忽视。

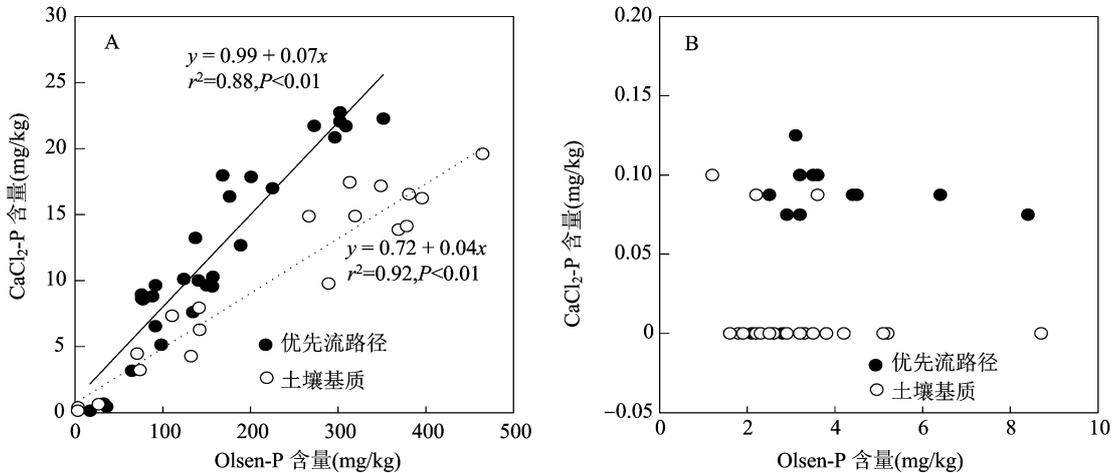


图4 不同土地利用类型优先流路径与基质流路径 Olsen-P 含量与  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  含量的关系

#### 2.4 磷素随优先流/基质流迁移的影响因素

Pearson 相关分析表明,磷素随基质流迁移深度与土壤磷素最大吸持量  $Q_m$ (表 2)呈极显著负相关( $r = -0.834, P = 0.001$ ),表明土壤对磷素吸附固定作用越强,磷素在土壤剖面中迁移难度越大。进一步分析表明,土壤  $Q_m$  与有机质含量成反比( $r = -0.764, P = 0.004$ ),即随着有机肥施用量的增加,土壤对磷的吸附固定能力和容量明显下降,设施土壤中大量累积的磷素迁移性增强,造成环境污染的风险也在增加。另外, $Q_m$  与土壤黏粒含量成正比( $r = -0.605, P = 0.037$ ),因此粉/沙质土壤磷素迁移造成的环境风险更大。

磷素随优先流迁移深度明显大于基质流部分,且迁移速度更快,对环境造成的风险较基质流迁移路径更大,相关分析表明,磷素随优先流迁移深度与优先流路径中沙粒含量呈极显著正相关( $r = -0.878, P = 0.000$ )。

### 3 讨论与结论

传统认为,施于表土的磷素在向下迁移过程中

表 2 不同样地土壤磷素吸持参数

编号	磷素最大吸持量 $Q_m$ (mg/kg)	常数 $k$	$r^2$ 范围
A1	385	0.240	0.991
A2	417	0.087	0.996
A3	355	0.141	0.993
B4	610	0.123	0.998
B5	566	0.089	0.992
B6	625	0.129	0.996

易被土壤中氧化铁/铝、有机质和黏粒矿物固定,使得其沿土壤剖面垂直向下淋溶的可能性不大。但近年来田间观察表明,土壤磷的垂直迁移不容忽视,磷素的土体内流失对水体富营养化影响很大,许多研究提出这与土壤优先流路径有关<sup>[20-22]</sup>。鲁如坤等也指出,我国蔬菜产区由于肥料投入量是作物带走的数 10 倍,导致土壤养分大量积累,是水体富营养化的巨大威胁<sup>[23-24]</sup>。因此,研究设施土壤磷素随优先流迁移特征及环境淋失风险意义重大。

本研究得到的设施土壤全磷和 Olsen - P 垂直迁移机制与章明奎等试验结果<sup>[7]</sup>一致,即磷素在

0~20 cm 表层分布均匀,优先流不明显;而在 30 cm 以下土层优先流路径全磷和 Olsen-P 含量显著高于基质流部分,存在明显的优势流磷素迁移。赵牧秋等也发现,表层 0~10 cm 范围内全磷迁移主要靠基质流,而随着土层加深,优先流对全磷迁移的贡献率开始增加,在 15~45 cm 范围内,其贡献率可达到 20%~70%<sup>[8]</sup>。然而,大部分研究土地利用类型对优先流路径中磷素迁移特征的结果都集中在森林、草地等自然生态系统<sup>[4-6]</sup>,对于磷素大量富集且灌水更加频繁的设施生产条件下优先流路径中磷素迁移特征的研究却十分匮乏。

农业土壤作为磷源向水体迁移而造成的环境风险已引起广泛关注,但以往研究多关注随土壤侵蚀和地表径流一起流失的磷,但事实证明,通过优先流路径进行土体内迁移的磷素是不可忽视的,然而,这些随水分在土壤大孔隙中快速迁移的溶质研究在我国仍处于起步阶段<sup>[25-26]</sup>。李勇等通过土柱模拟试验指出,大孔隙引起的优先流对有效磷下渗起决定性作用,是太湖地区农田磷素淋失到浅层地下水的主要途径<sup>[27]</sup>。章明奎等研究结果与本研究相似,指出磷素随基质流迁移深度与土壤  $Q_m$  成反比,但与本结果不同的是并没有发现磷素随优先流迁移深度与土壤质地的关系,而是发现磷素随优先流迁移深度与随基质流迁移深度的比值随土壤黏粒含量增加而增加<sup>[7]</sup>。

综上所述,本研究首次探索了养分、水分、农药等投入更为集中的设施集约化生产条件下土壤优先流发生及分布特征,结果显示设施样地土壤优先流发育程度明显高于粮田样地土壤,使得磷素等养分随水分以更快速度向深层土壤和地下水迁移,并强调了由此产生的环境风险不容忽视。为了更好地控制此类环境风险,本研究进一步对磷素随优先流/基质流迁移的影响因素进行了初步探索。本结果可为改进传统溶质运移模型提供数据和理论支撑,并对降低农业磷素的环境风险和保护水环境安全具有重要指导意义。

#### 参考文献:

- [1]孔庆波. 基于 GIS 我国农田土壤磷素管理及磷肥需求预测研究 [D]. 北京:中国农业科学院,2008.
- [2]刘蕾,王凌,刘晓艳,等. 河北省设施蔬菜生产中水肥管理存在的问题与发展策略[J]. 河北农业科学,2017,21(3):59-62.
- [3]袁丽金,巨晓棠,张丽娟,等. 设施蔬菜土壤剖面氮磷钾积累及对地下水的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(1):14-19.
- [4]Backnäs S, Laine-Kaulio H, Kløve B. Phosphorus forms and related soil chemistry in preferential flowpaths and the soil matrix of a forested podzolic till soil profile [J]. Geoderma, 2012, 189/190: 50-64.
- [5]Julich D, Julich S, Feger K H. Phosphorus fractions in preferential flow pathways and soil matrix in hillslope soils in the Thuringian Forest (Central Germany) [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2017, 180: 1-11.
- [6]梁建宏,吴艳宏,周俊,等. 土壤类型对优先流路径和磷形态影响的定量评价[J]. 农业机械学报,2017,48(1):220-227.
- [7]章明奎,王丽平. 旱耕地土壤磷垂直迁移机理的研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(1):282-285.
- [8]赵牧秋,陈欣,史云峰. 土壤优先流对磷素垂直迁移贡献的研究[J]. 琼州学院学报,2012,19(2):66-69.
- [9]邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:37-38.
- [10]杜森,高祥照,全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 2版. 北京:中国农业出版社,2006.
- [11]鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2000.
- [12]Olsen S R, Cole C V, Watanabe F S. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate [M]. Washington DC: United States Department of Agriculture, 1954.
- [13]Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1):105-110.
- [14]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [15]Barrow N J. Modeling the effect of phosphate from soil using anion exchange resins [J]. Journal of Soil Science, 1980, 31(2):297-306.
- [16]吴庆华,张家发,蔺文静,等. 土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J]. 农业工程学报,2014,30(7):82-90.
- [17]陈晓张,张洪江,程金花,等. 基于染色图像变异性分析的优先流程度定量评价[J]. 农业机械学报,2015,46(5):93-100.
- [18]郑欣,程金花,张洪江,等. 北京地区 2 种类型土壤优先流染色形态特征及其影响因素[J]. 水土保持学报,2018,32(3):113-119,131.
- [19]刘蕾,王凌,徐万强,等. 设施土壤磷素淋失环境阈值及防控措施[J]. 华北农学报,2019,34(增刊1):197-203.
- [20]Ghodrati M, Jury W A. A field study using dyes to characterize preferential flow of water [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(6):1558-1563.
- [21]Simard R R, Beauchemin S, Haygarth P M. Potential for preferential pathways of phosphorus transport [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1):97-105.
- [22]Gazis C, Feng X. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths [J]. Geoderma, 2004, 119(1/2):97-111.
- [23]鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1):4-8.

刘晓宇,刘 杨,冯彦房,等. 水稻秸秆生物炭对渍害胁迫下稻麦轮作土壤的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(5):211-215.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.05.038

# 水稻秸秆生物炭对渍害胁迫下稻麦轮作土壤的影响

刘晓宇<sup>1,3</sup>, 刘 杨<sup>2,3</sup>, 冯彦房<sup>3</sup>, 陈 寅<sup>1</sup>, 石春林<sup>2</sup>

(1. 江苏农林职业技术学院信息工程学院,江苏句容 212400; 2. 江苏省农业科学院农业信息研究所,江苏南京 210014;

3. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室,江苏南京 210014)

**摘要:**长江中下游地区稻麦轮作的生产方式往往导致土壤排水不畅和养分流失。且该地区小麦生长季多阴雨,导致小麦渍害胁迫减产。探索合理的方法来缓解小麦渍害胁迫有重要意义。本研究开展盆栽试验,设置不同生物炭施用量和渍水处理,研究水稻秸秆生物炭对稻麦轮作土壤理化性质的影响。结果表明,随着生物炭施用量的增加,土壤容重呈下降趋势,有助于改善稻麦轮作土壤排水不畅的特点。同时,施用生物炭可显著增加土壤 pH 值、有机碳和有效磷的含量( $P < 0.05$ )。施用生物炭和渍水处理对土壤总氮含量没有显著影响,但生物炭施用量达到  $40 \text{ t/hm}^2$  时,渍水处理会导致土壤碱解氮含量显著下降( $P < 0.05$ ),表明生物炭有助于固定土壤氮。总体来看,施用水稻秸秆生物炭可改善稻麦轮作土壤的排水条件,维持土壤养分,有助于抵御渍害胁迫造成的小麦减产。

**关键词:**水稻秸秆;生物炭;稻麦轮作;渍害胁迫;土壤养分

**中图分类号:** S156.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)05-0211-05

长江中下游地区是我国主要的粮食产区之一<sup>[1]</sup>,种植制度以稻麦轮作为主<sup>[2]</sup>。该地区稻麦轮作土壤以黏粒含量较高的水稻土为主,一般具备较好的保水能力,有助于水稻在水分充足的环境下生长<sup>[3]</sup>。但小麦对过量水分较为敏感<sup>[4]</sup>,麦季降雨过多,土壤含水量长期维持在较高水平,将导致渍害胁迫,甚至引发赤霉病,造成小麦减产。据报道,不同程度的渍害胁迫可造成小麦减产 20% ~ 50%<sup>[5]</sup>,直接影响当地粮食安全。

由于人口快速增长和农用地面积减少,为保证粮食产量,我国施用大量化肥以提高农作物单产。

据报道,我国化肥消耗量约占世界总量的 30%<sup>[6]</sup>,长江中下游地区是我国施肥强度最大的区域之一,以氮肥为例,年施用量可达  $550 \sim 650 \text{ kg/hm}^2$ <sup>[7]</sup>。然而,过量施用氮肥会降低氮利用效率,同时增加环境污染风险<sup>[8]</sup>。目前,渍后补施氮肥是应对小麦渍害减产的主要方法之一<sup>[9]</sup>,但该方法的经济成本和人力成本较高,且会进一步加重该地区养分流失和面源污染的风险。因此,探索更合理的方法来缓解该地区小麦渍害胁迫有重要意义。

生物炭(biochar)是一种常用的土壤改良剂,是生物质在缺氧条件下,经热解产生的一种以碳为主、性质稳定的黑色固体<sup>[10-11]</sup>。前人采用荟萃分析和试验分析进行研究表明,施用生物炭可以使小麦增产 11.3% ~ 30.0%<sup>[12-14]</sup>,且生物炭主要通过影响土壤理化性质来影响作物产量<sup>[15]</sup>。前人研究认为,施用生物炭可以改良土壤结构和土壤养分的有效性<sup>[16]</sup>,且特别适用于酸化、退化和粗质地土壤<sup>[17]</sup>。但关于生物炭如何影响质地黏重、养分充足的稻麦轮作土壤理化性质的相关研究相对较少。此外,这种影响在渍害胁迫发生时有何变化,施用

收稿日期:2020-06-23

基金项目:江苏农林职业技术学院科技项目(编号:2019kj014);江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(19)3099];国家自然科学基金(编号:31800358);长江下游平原农业环境重点实验室开放基金(编号:AE2018006)。

作者简介:刘晓宇(1987—),女,江苏扬州人,博士,讲师,主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail:xyliu@jsafc.edu.cn。

通信作者:石春林,博士,研究员,主要从事农业气象研究。E-mail:shicl@jaas.ac.cn。

[24] 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[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.

[25] 倪余文,区自清. 土壤优先水流及污染物优先迁移的研究进展[J]. 土壤与环境,2000,9(1):60-63.

[26] 郝振纯,冯 杰. 水及溶质在大孔隙土壤中运移的实验研究进展[J]. 灌溉排水,2002,21(1):67-71.

[27] 李 勇,袁佳慧,张维维,等. 太湖地区农田土壤大孔隙及胶体释放对有效磷下渗的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(1):7-13.