

不同水分条件下施用稻草对土壤有机酸和有效磷的影响*

彭娜^{1,2} 王凯荣^{1†} Buresh R J³ 王开峰^{1,2} 谢小立¹

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(3 International Rice Research Institute, Los Banos, DAPO 7777, Philippines)

EFFECT OF RICE STRAW INCORPORATION ON CONCENTRATION OF ORGANIC ACIDS AND AVAILABLE PHOSPHORUS IN SOIL UNDER DIFFERENT WATER REGIMES

Peng Na^{1,2} Wang Kairong^{1†} Buresh R J³ Wang Kaifeng^{1,2} Xie Xiaoli¹

(1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

(2 The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(3 International Rice Research Institute, Los Banos, DAPO 7777, Philippines)

关键词 土壤水分; 稻草; 有机酸; 有效磷; 树脂磷; 树脂铁
中图分类号 S153.61 文献标识码 A

稻草在分解过程中产生有机酸。高浓度的有机酸一方面对水稻生长产生毒害作用^[1,2], 另一方面, 有机酸可通过酸溶、螯合和竞争吸附等机制活化土壤难溶态磷, 提高磷的生物有效性^[3,4]。所以, 研究稻草分解过程中有机酸和有效磷的动态变化, 对于评价稻草还田在水稻营养中的作用, 指导秸秆管理具有十分重要的意义。

在以往的土壤有机酸研究工作中, 大多采用水提取法来获得土壤有机酸溶液^[2,5]。这一方法改变了土壤溶液原来的化学平衡和化学环境, 因而在一定程度上影响了有机酸分析结果的可信度, 而且也不适合土壤有机酸的动态测定。Alberto 等^[6]设计了一种适用于原位动态取样的方法(多孔聚酯管溶液采集器采样法)。利用多孔聚酯管溶液采集器不会破坏土壤性状, 且土壤溶液取出后仍保持在与自然状态相似的环境中, 因而测得的土壤有机酸动态变化能较好地反映真

实情况。

在土壤有效磷测定方面, 目前多采用化学试剂提取法。化学提取法为静态测定, 不能揭示土壤磷的动态供应特征^[7], 而且测定中的破坏性采样和样品制备也会影响测定结果与真实结果的一致性。美国蒙大拿州立大学的 Skogley 等研究出了用球型混合型树脂包(Resin Capsule)同时提取多种土壤养分, 然后测定单个树脂包所吸附的养分数量, 来反映土壤向植物供应养分能力的方法^[8]。树脂法模拟了植物根系吸收养分的过程, 测得的结果较传统的化学法更接近用生物吸收法测得的结果, 因而在土壤养分有效性研究方面应用得越来越普遍, 特别是在磷的有效性研究中^[9,10]。

本实验采用原位提取土壤溶液和树脂包原位埋置技术, 研究施用稻草对土壤有机酸和有效磷的动态影响, 试图揭示稻草对土壤磷的活化作用与机理, 为稻田秸秆优化管理提供理论指导。

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX-SW-441)、中国科学院野外台站研究基金“亚热带区域农田土壤有机质最适含量阈值及其管理研究”和德国 BMZ/GTZ 项目“基于土壤健康和环境友好的稻作生态系统秸秆管理”(编号:GTZ/IRRI 2002-7860.6-001.00)资助

† 通讯作者, E-mail: krwang@isa.ac.cn

作者简介: 彭娜(1978~), 女, 湖南娄底人, 硕士研究生, 研究方向为农业环境与生态系统管理

收稿日期: 2004-12-20; 收到修改稿日期: 2005-03-22

1 材料与方 法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤 供试土壤取自菲律宾国际水

表 1 供试土壤的基本理化性状

土壤	pH (H ₂ O, 1:1)	有机碳 (g kg ⁻¹)	CEC (cmol kg ⁻¹)	全氮 (g kg ⁻¹)	有效磷 (mg kg ⁻¹)	活性铁 (g kg ⁻¹)	粘粒 (g kg ⁻¹)
火山灰发育水稻土	6.1	22.7	25.3	2.26	80	25.0	300

表 2 供试稻草基本性状

全碳 (g kg ⁻¹)	全氮 (g kg ⁻¹)	全磷 (g kg ⁻¹)	全钾 (g kg ⁻¹)	C/N	C/P
396	5.09	1.43	13.10	77.8	276.9

1.2 研究方法

1.2.1 实验处理 培养实验在温室中进行, 温室中白天平均温度约为 30℃。实验设 4 个处理, 重复 4 次: (1) 连续淹水 (continuous flooding, 以下简称 CF), 即在整个培养期间, 用蒸馏水灌溉, 使盆中水层持续保持约 3 cm; (2) 连续淹水+ 稻草 (continuous flooding, with straw, 以下简称 CF+ S); (3) 干湿交替 (wetting-drying alternatively, 以下简称 WD), 即首先往盆中加入蒸馏水, 使水层达到约 3 cm, 平衡后打开盆底的阀门, 并调节流速, 使盆中的水在 48 h 左右流完, 保持无明水条件 48 h 后, 再补充蒸馏水, 使盆中水层达到约 3 cm, 再放水, 如此循环直至实验结束; (4) 干湿交替+ 稻草 (wetting-drying alternatively, with straw, 以下简称 WD+ S)。每盆装风干土 7.5 kg, 稻草施用率为 5 g kg⁻¹, 稻草破碎至约 5 cm 长。在实施处理前, 所有盆钵均淹水预培养 7 d, 培养实验连续进行 30 d。

1.2.2 土壤溶液采集 利用多孔聚酯管溶液采集器原位采集土壤溶液^[6]。将采集器插在盆中央, 使多孔聚酯管距土表 5 cm。取样时, 将备好的形成负压无氧的承液管用针头与溶液采集器连接, 土壤溶液在负压作用下经多孔聚酯管自动流入承液管。当承液管中的溶液达到约 5 ml 后结束取样, 并马上用凡士林将承液管橡皮塞上的针孔堵住, 以防止空气进入。在培养期间, 每 4d 采集一次土壤溶液。

1.2.3 有机酸测定 取完样后, 立即将承液管带回实验室进行有机酸的测定。用注射器透过承液管的橡皮塞抽取约 1 ml 的溶液, 用 Acrodisc 针孔过滤器 (0.45 μm, 25 mm OD) 将溶液直接过滤于 HPLC 自动进样管 (美国 Waters 公司高效液相色谱系统), 测

定低分子量脂肪酸。采用甲酸、乙酸、丙酸、丁酸作为标准酸进行检测。

1.1.2 供试稻草 供试稻草为“IR72”品种成熟期稻草, 基本性质见表 2。

定低分子量脂肪酸。采用甲酸、乙酸、丙酸、丁酸作为标准酸进行检测。

HPLC 分析条件柱型: Polyspher OA-HY, Merck Cat. No 51272, 有机酸专用柱; 柱温: 30℃; 流动相: 5 mmol L⁻¹ H₂SO₄, 流速 0.75 cm³ min⁻¹; UV 波长: 210 nm。

1.2.4 pH 测定 用 Beckman Phi295 便携式 pH 计每 4 天原位测定一次 pH 值。

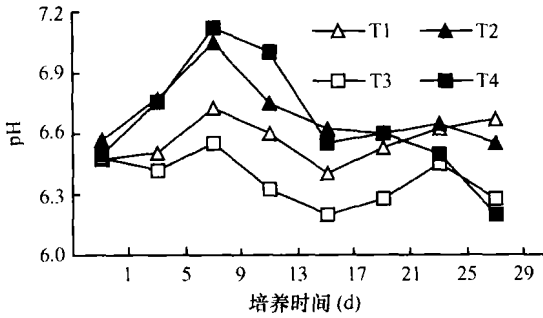
1.2.5 有效磷、铁的测定 采用树脂包 (Resin capsule) 原位埋置法来提取土壤中的有效磷和铁 (树脂可提取磷、铁, 简称树脂磷和树脂铁)。使用的树脂包是从美国进口的“通用佳” (UNIBEST)。实验期间总共埋置 3 批树脂包, 埋置的时间分别为第 1 天、第 8 天和第 15 天, 每批埋置 7 d。每盆埋置树脂包 2 个, 埋置深度为 5 cm。将每批树脂包取出后, 用 2 mol L⁻¹ HCl 提取磷和铁^[8]。树脂磷用钼锑抗比色法测定, 树脂铁用原子吸收光谱法测定。树脂磷和树脂铁的结果以 μmol cm⁻² 表示, 反映在埋置期内目标养分被单位树脂包表面积所吸收的微摩尔数。

2 结果与讨论

2.1 不同水分条件下施用稻草对土壤 pH 的影响

图 1 表明, 在没有施用稻草的情况下, 整个培养过程中连续淹水和干湿交替处理土壤溶液 pH 分别在 6.5 和 6.3 上下波动。连续淹水处理的土壤 pH 始终高于干湿交替处理 ($p < 0.05$)。施用稻草后, 从第 5 天开始, 无论是连续淹水还是干湿交替, 土壤 pH 均显著升高 ($p < 0.05$), 且均在第 9 天达到峰值。之后, 土壤 pH 逐渐下降, “连续淹水+ 稻草”处理和“干湿交替+ 稻草”处理土壤 pH 分别第 21 天和第

25 天降至其不施用稻草处理的水平。



T1: 连续淹水(CF); T2: 连续淹水+ 稻草(CF+ S);

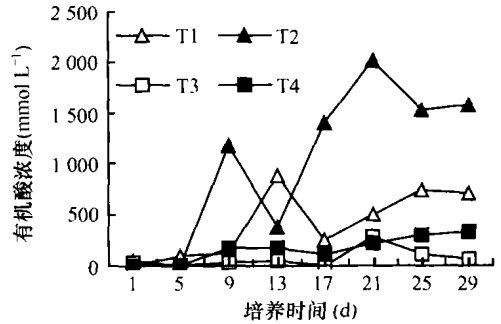
T3: 干湿交替(WD); T4: 干湿交替+ 稻草(WD+ S)

图1 不同水分条件下施用稻草对土壤 pH 的影响

2.2 不同水分条件下施用稻草对土壤有机酸的影响

从图 2 可以看出,在不施用稻草的情况下,连续淹水 9 d 后,可以测出土壤溶液中有有机酸的积累,最大值为 885 mmol L^{-1} ,而干湿交替则没有有机酸积累的现象,平均浓度只有 71 mmol L^{-1} 。在施用稻草的情况下,连续淹水能导致大量有机酸的积累。在培养的第 9 天和第 21 天出现两个有机酸浓度高峰,分别为 1186 mmol L^{-1} 和 2007 mmol L^{-1} ,整个培养过程中的平均浓度达到 1013 mmol L^{-1} ,比对应的不施用稻草处理高出了 146.7%。而同样施用稻草,实行干湿交替则没有发现土壤有机酸积累现象,平均浓度只有 161 mmol L^{-1} ,只略高于对应的不施稻

草处理,且明显低于连续淹水不施稻草处理。其原因可能是,在土壤干湿交替条件下,稻草分解产生的有机酸会迅速氧化分解,而不土壤中积累^[11]。另外,排水过程也可以将有机酸排出土壤系统。



T1: 连续淹水(CF); T2: 连续淹水+ 稻草(CF+ S);

T3: 干湿交替(WD); T4: 干湿交替+ 稻草(WD+ S)

图2 不同水分条件下施用稻草对土壤溶液有机酸浓度的影响

对各处理有机酸的组成分析(表 3)表明,无论是连续淹水或干湿交替,也无论是否施用稻草,土壤溶液有机酸均以乙酸为主,其占有有机酸总量的 71.1%~95.1%;其次为甲酸,含量 3.0%~19.6%,丙酸和丁酸占的比例相对较低。无论是否施用稻草,干湿交替均明显降低了乙酸的相对含量,而水分管理对甲酸、丙酸和丁酸相对含量的影响似乎与稻草处理有关(表 3)。

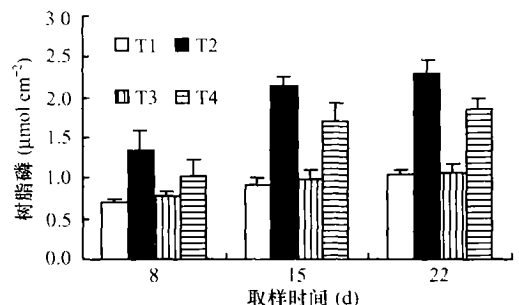
表 3 不同水分条件下施用稻草对有机酸组分浓度(mmol L^{-1})及其相对含量(%)的影响

有机酸种类	连续淹水 CF			连续淹水+ 稻草 CF+ S			干湿交替 WD			干湿交替+ 稻草 WD+ S		
	平均浓度	最高浓度	相对含量	平均浓度	最高浓度	相对含量	平均浓度	最高浓度	相对含量	平均浓度	最高浓度	相对含量
甲酸	12.21	90.39	3.00	198.9	1404	19.6	8.53	36.93	12.0	23.16	84.41	14.4
乙酸	390.4	872.1	95.1	804.5	2007	79.4	61.85	285.6	87.3	114.7	295.5	71.1
丙酸	2.48	19.80	0.600	0.93	7.47	0.100	0.03	0.26	0.100	9.67	30.31	6.00
丁酸	5.53	31.40	1.35	8.54	68.34	0.840	0.47	2.62	0.660	13.69	80.95	8.49

本实验中检测到的土壤溶液中的乙酸浓度大大高于以往的研究结果^[2,5],这可能与实验中采用的分离、测定有机酸方法的不同有关。本实验中,土壤溶液是利用负压无氧承液管收集的,空气成分对溶液样品的影响相对较小。

2.3 不同水分条件下施用稻草对土壤有效磷的影响

图 3 是不同水分条件下施用稻草对土壤有效磷(树脂磷)浓度的影响结果。方差分析表明,水分处理与施用稻草对土壤有效磷浓度的影响存在显著交互作用($p < 0.05$)。从图 3 可以看出,在不施稻草的情况下,连续淹水和干湿交替中有效磷浓度无明显



T1: 连续淹水(CF); T2: 连续淹水+ 稻草(CF+ S);

T3: 干湿交替(WD); T4: 干湿交替+ 稻草(WD+ S)

图3 不同水分条件下施用稻草对土壤树脂磷浓度的影响

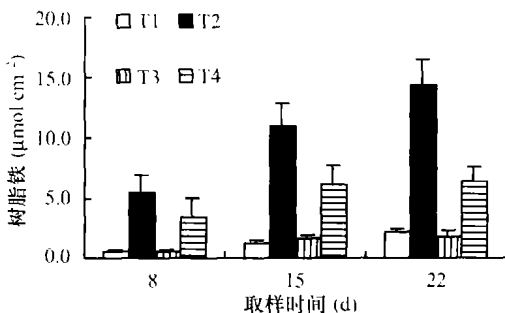
差异。施用稻草后,土壤有效磷浓度显著升高($p < 0.05$),且在连续淹水处理中升高的幅度显著高于干湿交替处理($p < 0.05$),说明施用稻草能提高土壤有效磷浓度,特别是在连续淹水条件下。

稻草矿化释放出部分无机磷,可以提高土壤有效磷浓度,但这部分磷的量是非常低的,施用稻草提高土壤有效磷的主要原因应是稻草对土壤磷的活化作用^[3, 11, 12]。

一般认为提高酸性土壤 pH, 会促进磷酸铁、铝的水解从而提高土壤磷的有效性^[12]。本实验中培养前期无论水分管理如何,施用稻草后都导致土壤 pH 的升高,这可以部分解释稻草对土壤磷的活化作用。

许多研究^[3, 11]认为,有机物可通过产生有机酸而活化土壤磷素,进而提高磷的生物有效性。从本实验测得的有机酸浓度变化(图 2)看,在“连续淹水+稻草”处理条件下,土壤有机酸总量大幅度提高,似可解释土壤有效磷含量升高(图 3)的原因。然而从图 2 也可以看出,连续淹水不施稻草的土壤有机酸总量也很高,甚至比“干湿交替+稻草”处理的有机酸含量还高,但其有效磷浓度却表现为低于“干湿交替+稻草”处理(图 3)。因此可以认为,稻草分解释放有机酸,特别是低分子量有机酸,并不是促进土壤有效磷提高的唯一原因,虽然这并不排除稻草可分解产生多元酸(如柠檬酸)对土壤磷产生强烈的活化效应^[3, 11]。

施用稻草导致大量 Fe^{3+} 化合物的还原,土壤磷的有效性随 Fe^{3+} 化合物的还原而提高^[13]。本实验对树脂铁进行测定发现,树脂铁浓度与树脂磷浓度的变化规律基本一致(图 3, 图 4),二者有很好的线性关系($r = 0.9578, p < 0.01$)(图 5),树脂磷浓度随树脂铁浓度的增加而增加,这证实了施用稻草导致铁氧化物的还原,使被高铁吸持的磷和铁质胶膜包裹的闭蓄态磷得以释放,从而提高土壤有效磷的结论^[13]。



T1: 连续淹水 (CF); T2: 连续淹水+稻草 (CF+S);
T3: 干湿交替 (WD); T4: 干湿交替+稻草 (WD+S)

图 4 不同水分条件下施用稻草对土壤树脂铁浓度的影响

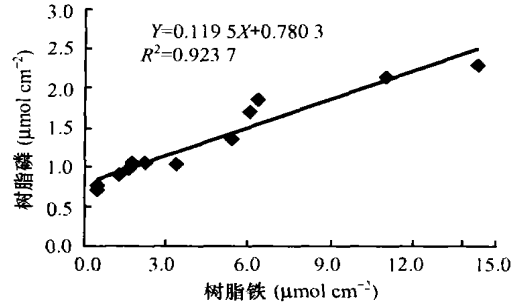


图 5 土壤树脂磷与树脂铁的相关性

3 结论

本文采取原位提取土壤溶液法分析有机酸,以及树脂包原位埋置法提取土壤有效磷,研究了不同水分条件下施用稻草对土壤有机酸和有效磷的影响。取得的主要研究结果为:

1) 稻草分解对土壤有机酸积累的影响取决于水分管理模式。在连续淹水灌溉条件下,施用稻草能显著提高土壤溶液中的有机酸含量。有机酸的最高浓度出现在施稻草之后的第 21 天。有机酸构成以乙酸为主,占有有机酸总量的 79.4%,其次是甲酸,占 19.6%,丁酸和丙酸的含量分别只占总量的 0.8% 和 0.1%。采用干湿交替的水分管理模式,可有效消除有机酸在土壤中的积累,使有机酸浓度控制在底范围之内。

2) 施用稻草能显著提高土壤有效磷(树脂磷)的含量($p < 0.05$),且连续淹水条件下的提高幅度又显著高于干湿交替条件下($p < 0.05$)。在酸性土壤施用稻草提高土壤有效磷的机理,除了稻草可直接矿化出部分无机磷外,还有三种可能:一是提高土壤 pH(图 1),增加磷酸铁、铝的溶解度;二是产生有机酸,促进土壤磷的溶解与活化,这一机制可能主要在连续淹水环境中发挥作用(图 2);三是导致 Fe^{3+} 化合物的还原,使吸附在其表面和闭蓄的部分磷得以释放,这一机制在连续淹水环境中的作用较大(图 4、图 5)。

致谢 本实验得到国际水稻研究所土壤研究室 Angeles Olivyn 和 Sarah Johnson 的指导,特此致谢!

参考文献

- [1] Takijima Y. Studies on organic acids in paddy field soils with reference to their inhibitory effects on rice plants. *Soil Sci. and Plant Nutr.*, 1964, 10: 212~219

- [2] Gotoh S, Onikura Y. Organic acids in a flooded soil receiving added rice straw and their effect on the growth of rice. *Soil Sci. and Plant Nutr.*, 1971, 17: 1~ 8
- [3] 章永松, 林咸永, 罗安程, 等. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究 II 有机肥(物)分解产生的有机酸及其对不同形态磷的活化作用. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 151~ 155
- [4] 陆文龙, 王敬国, 曹一平, 等. 低分子量有机酸对土壤磷释放动力学的影响. *土壤学报*, 1998, 35(4): 493~ 500
- [5] Shen A L, Li X Y, Anamori K, *et al.* Low molecular weight aliphatic acids in soils incubated with plant residues under different moisture conditions. *Pedosphere*, 1997, 7(1): 79~ 86
- [6] Alberto M C R, Arah J R M, Neue R, *et al.* A sampling technique for the determination of dissolved methane in soil solution. *Chemosphere: Global Change Science*, 2000, 2: 57~ 63
- [7] 李立平, 张佳宝, 朱安宁, 等. 土壤养分有效性测定及其方法. *土壤通报*, 2004, 35(1): 84~ 90
- [8] Skogley E O, Georgitis S J, Yang J E, *et al.* The phytoavailability soil test-PST. *Commun. Soil Science Plant Anal.*, 1990, 21(13/16): 1 229~ 1 243
- [9] Abrams M M, Jarred W M. Bioavailability index for phosphorus using ion exchange resin impregnated membranes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 1 532~ 1 537
- [10] Cooperband L R, Logan T J. Measuring in situ changes in labile soil phosphorus with anion exchange membranes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 105~ 114
- [11] 莫淑勋. 土壤中有机酸的产生、转化及对土壤肥力的某些影响. *土壤学进展*, 1986, 4: 1~ 10
- [12] 沈善敏主编. *中国土壤肥力*. 北京: 中国农业出版社, 1998. 232~ 233
- [13] Kirk G. *The Biogeochemistry of Submerged Soils*. England: John Wiley and Sons Ltd, 2004. 124~ 126