

Influence of Alternative Drying-Wetting on Phosphorus Fractions in Soils with Different Organic Matter Content and Environmental Implications*

Linlin Wei¹, Gang Xu^{1,2#}, Junna Sun², Wenjun Xie², Hongbo Shao^{1,3#}

¹Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai

²Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta (Binzhou University), Binzhou

³Institute of Life Sciences, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao

Email: {llwei, #gxu, #hbshao}@yic.ac.cn

Received: Mar. 25th, 2012; revised: Apr. 9th, 2012; accepted: Apr. 12th, 2012

Abstract: In the context of global change, it is of significance to study the effect of alternative drying-wetting on the soil fertility level and the environmental quality of water body. In this study, soil P was fractionated by using a modified Hedley fractionation method to examine the effect of alternative drying-wetting on phosphorus fractions in soils with different organic matter content. The results displayed no significant difference of total phosphorus between the two treatments because the coefficient of variance was less than 10%. However, there is a significant change in the distribution of soil phosphorus fractions: increase the content of labile-P (especially resin-P) and organic-P (NaHCO₃-Po, NaOH-Po and Con.HCl-Po) while decreasing the content of NaOH-Pi and occlude-P. Under the alternative drying and wetting condition, resin-P increased by 121% in the organic soil, while only increasing by 31% in the sterile soil, which indicates a significant effect of alternative of drying and wetting on labile-P in soils with high organic matter content. The study indicates that alternative drying and wetting seemed to drive the phosphorus transformation from the occlude-P to labile-P and organic-P. In the context of global change, alternative drying and wetting can increase the content of labile P in the soil to improve crop growth. However, when there is rainfall or irrigation, it may aggravate the loss of soil phosphorus, which will induce the offshore eutrophication and possibly threaten the coastal environmental quality and regional ecological security.

Keywords: Phosphorus Fractionation; Drying-Wetting; Climate Change; Organic Soil; Sterile Soil

干湿交替变化对土壤中磷形态影响及环境意义*

魏琳琳¹, 徐刚^{1,2#}, 孙军娜¹, 谢文军², 邵宏波^{1,3#}

¹中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台

²山东省黄河三角洲生态环境重点实验室(滨州学院), 滨州

³青岛科技大学生命科学研究所, 青岛

Email: {llwei, #gxu, #hbshao}@yic.ac.cn

收稿日期: 2012年3月25日; 修回日期: 2012年4月9日; 录用日期: 2012年4月12日

摘要: 在全球变化的背景下, 干湿交替对于土壤肥力水平和水体环境质量, 具有重要的研究意义。本研究采用修正 Hedley 土壤磷素分级方法, 研究了干湿交替对不同有机质含量土壤磷形态的影响。研究表明, 干湿交替对土壤总磷的影响不大, 变异系数 C.V% < 10%。干湿交替极大的改变了土壤中磷形态的分布: 显著提高了土壤有效磷(尤其是树脂磷)和有机磷(NaHCO₃-Po, NaOH-Po 和 Con.HCl-Po)的含量, 同时降低了土壤中 NaOH-Pi 和闭蓄态磷的含量。在干湿交替条件下, 有机土中树脂磷提高了 121%, 而贫瘠土中树脂磷仅提高了 31%, 这说明干湿交替对有机质含量高的土壤活性磷影响更为显著。该研究表明干湿交替促进了土壤中磷由闭蓄态磷向活

*基金项目: 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金(2009KFJJ05), 国家自然科学基金(41001137; 41171216), 中国科学院百人计划和中国科学院创新团队国际合作伙伴计划, 烟台市科技发展计划重大项目(20102450; 2011016)。

#通讯作者。

性磷和有机磷的转化。在全球变化的背景下，干湿交替可以提高土壤中有效磷含量，促进作物的生长；但当有降水或灌溉时，也可能加剧土壤中磷素的流失，从而引发近海富营养化事件，对于近海环境质量和区域生态安全可能构成威胁。

关键词：磷分级；干湿交替；全球变化；有机土；贫瘠土

1. 引言

磷是植物生长的关键性养分元素之一。同其它养分元素相比，由于磷循环几乎没有气体成分的参与，因此磷循环是一种不完善的生物地球化学循环。从长远来看，磷素是一种不可再生资源，已成为陆地和海洋生态系统生产力的限制性养分元素^[1]。环境因素的变化是影响磷素转化和运移重要因素。在全球变化的背景下，干湿交替极大的影响和改变了土壤磷素生物地球化学循环。一方面，干湿交替使土壤经历了一系列的物理、化学、生物变化过程，对土壤肥力和磷素循环有重要影响^[2,3]。另一方面，土壤中磷素形态和含量的变化加剧了磷素的流失，成为引发近海富营养化事件的罪魁祸首，对于近海环境质量和区域生态安全构成威胁^[4,5]。因此，在全球变化的大背景下，随着极端气候事件(如：高温，干旱和暴雨等)的频发，研究干湿交替对土壤磷素循环的影响，对于土壤肥力水平和近海环境质量，完善磷素的生物地球化学循环，预测全球变化下区域磷素运移规律具有重要的研究意义^[6]。有研究表明胶东半岛近 48 年极端温度、降雨事件频发且变化较剧烈，干湿交替更为显著，是今后需要重点关注的区域^[7-10]。本研究采用修正的 Hedley 磷素分级方法探讨干湿交替变化对土壤 P 形态的影响，评价全球变化下土壤 P 形态的变化趋势及其可能的环境影响，研究结果对近岸土地管理和水体保护等有重要意义。

2. 材料与方 法

2.1. 供试土壤

实验用土选用山东省烟台市，采样深度 0~20 cm，土壤基本理化性状见表 1。有机土为海岸带黑松林土壤，该土质地为壤土，有机质含量较高。贫瘠土有机质含量较低，养分元素匮乏。样品采集后过 2 mm 标准筛，一份样品储存于 0℃~4℃环境中以保存样品的

湿度，另一份样品 30℃风干用于样品测试。

2.2. 样品分析

测试土壤基本理化性质见表 1。土壤 pH 值采用 pH 计在水：风干土 = 2.5：1 条件下测定，有机质采用重铬酸钾-硫酸($K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$)氧化法测定。土壤粒级测定采用激光粒度仪测定。土壤 P 的分级采用经修正的 Hedley 等提出的分级方法进行测定^[8]，即采用连续提取方法，逐级加入离子交换树脂、0.5 mol/L 的 $NaHCO_3$ 溶液、0.1 mol/L 的 NaOH 溶液、1 mol/L 的 HCl 溶液、浓盐酸提取出土壤中稳定性由弱到强的各级无机磷和有机磷。最后浸提的残留土壤经高温消解测定残留磷(Residual-P)。其中 0.5 mol/L 的 $NaHCO_3$ 溶液、0.1 mol/L 的 NaOH 溶液和浓盐酸浸提液中有机磷为总磷和无机磷之差^[9,10]。土壤中磷的形态有着极其重要的生物学意义及地球化学意义^[11](见表 2)。

3. 结果与分析

如图 1 所示，风干和未风干的土壤中，有机土和贫瘠土总磷的变异系数分别为 7.6% 和 5%，这说明风干对土壤中总磷影响可以忽略不计。与总磷的变化不同，风干显著的增加贫瘠土中有机碳的含量。研究表明，干湿交替变换加速了土壤中团聚体的破碎，破碎过程伴随着有机质的释放和分解。

如表 3 所示，风干土壤显著的改变土壤各形态磷的分布。其中树脂变化最为显著：风干大大提高了土壤中树脂磷的浓度，其影响程度有机土高于贫瘠土。

Table 1. Properties of experimental soil
表 1. 供试土壤理化性质

项目	贫瘠土	有机土
含水量/%	6.15%	15.95%
粘粒含量/%	3.28%	12.52%
总有机碳/%	0.27%	5.31%
pH(1:2.5)	6.51	5.49
总磷/mg·kg ⁻¹	103	412

Table 2. Geochemical and ecological significance of sequential extracted P^[10]
表 2. 连续提取中土壤磷的形态及其重要性^[10]

磷形态	生物学意义	地球化学意义
Resin-P	易解离, 有效性最高	吸附于晶体矿物表面的磷
NaCO ₃ -Pi	有效性较高	吸附于晶体矿物表面的磷
NaCO ₃ -Po	易矿化, 有效性高	吸附于胶体矿物表面
NaOH-Pi	矿化速率慢, 有效性一般	同 Fe, Al 及有机物通过化学作用键结合的磷
NaOH-Po, Con.HCl-Po	矿化速率慢, 有效性低	同 Fe, Al 及有机物通过化学作用键结合的磷
Dil.HCl	有效性低	同 Ca 结合磷
Con.HCl-Pi	有效性低	同 Fe, Al 矿物内部结合的磷
Redual-P	难以利用磷	惰性磷

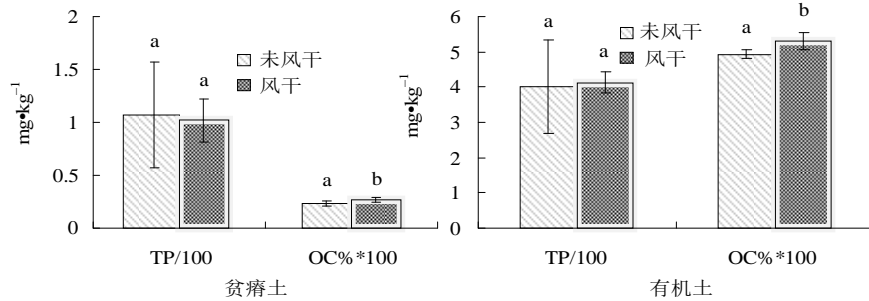


Figure 1. Content of total-P and organic carbon in moist, alternative drying-wetting soils for SS and OS sites (The data indicates the average values and deviations of the four treatments; The different letters indicate significant at $p < 0.05$)

图 1. 贫瘠土和有机土中总磷和有机质受干后含量变化(数据代表 4 次处理平均值及偏差; 不同字母表示显著性 $p < 0.05$)

Table 3. Comparisons of changes in the relative proportion of phosphorus fractions in SS soil and OS soil (*, ** indicates a significant at $p < 0.05$, $p < 0.01$)

表 3. 干湿交替变化对土壤中磷形态的影响(*, ** 分别代表显著性水平 $p < 0.05$, $p < 0.01$)

P 形态 (n = 4)	贫瘠土			有机土		
	未风干/mg·kg ⁻¹	风干/mg·kg ⁻¹	变化/%	未风干/mg·kg ⁻¹	风干/mg·kg ⁻¹	变化/%
Resin-P	6.2 (0.5)	8.1 (0.5)	30.8%**	5.2 (0.3)	11.5 (1.6)	120.5%**
NaCO ₃ -Pi	6.6 (1.0)	7.4 (1.0)	11.5%	8.9 (0.7)	8.5 (0.6)	-4.0%
NaCO ₃ -Po	2.7 (0.1)	3.9 (1.1)	43.0%**	27.0 (0.7)	26.4 (2.2)	-2.2%
NaOH-Pi	19.8 (1.3)	19.3 (0.9)	-2.7%	34.3 (1.0)	28.3 (0.7)	-17.7%*
NaOH-Po	7.0 (0.4)	7.2 (0.3)	2.6%	194 (8.5)	218.9 (6.4)	12.8%
Dil-HCl	6.1 (1.3)	4.1 (0.8)	-32.8%**	24.1 (1.6)	20.6 (0.2)	-14.3%*
Con-HCl-Po	4.2 (0.4)	4.5 (0.6)	7.4%	15.6 (2.3)	18.6 (0.3)	19.1%*
Con-HCl-Pi	105.1 (1.6)	100.1 (2.0)	-4.8%	163.9 (7.1)	146.57 (3.7)	-10.6%
Residual-P	6.9 (0.5)	56.0 (0.8)	-13.6%	53.9 (8.1)	52.0 (8.8)	-3.5%

贫瘠土中树脂磷的含量从未风干 6.16 ± 0.52 mg/kg 提高到风干土 8.06 ± 0.5 mg/kg。而有机土树脂磷含量从未风干 5.12 ± 0.27 mg/kg 提高到风干土 11.49 ± 1.61 mg/kg, 树脂磷增加了 1 倍多。NaHCO₃-Pi 和 NaHCO₃-Po 对于干湿交替响应较小, 只有贫瘠土中 NaHCO₃-Po 从未风干土 2.72 ± 0.08 mg/kg 提高到风干土 3.89 ± 1.12 mg/kg。同树脂磷相比, 风干土壤对有机磷影响

程度较低。其中, NaOH-Po 浓度增加了 2.6%(贫瘠土)和 12.8%(有机土), 而 Con-HCl-Po 浓度增加 7.4%(贫瘠土)和 19%(有机土)。

同活性磷和有机磷变化不同的是, 闭蓄态磷(如 Dil.HCl-P 和 Con.HCl-Pi)在风干条件下其浓度呈降低的趋势。土壤风干后, 贫瘠土中 Con.HCl-Pi 浓度从未风干时 105.11 ± 1.61 mg/kg 降低到风干后 $100.06 \pm$

1.91 mg/kg, 而在有机土中其浓度从未风干时 163.86 ± 7.14 mg/kg 降低到风干后 146.57 ± 3.71 mg/kg。同样的, Dil.HCl-P 也分别降低了 32.8%(贫瘠土)和 14.3%(有机土)。风干对残渣态磷无显著变化。

4. 讨论

研究结果表明, 干湿交替极大的改变了土壤磷形态分布。土壤风干后, 活性磷(特别是树脂磷)和有机磷含量显著增加, 而 NaOH-Pi 和闭蓄态磷(Dil.HCl-P, Con.HCl-Pi)含量却发生降低。干湿交替使得贫瘠土和有机土中树脂磷含量分别增加了 30.8%和 120.5%, 这说明有机质含量高和磷含量高的土壤更容易受干湿交替作用的影响。Umer 等报道了英国草地土壤受干后, NaHCO_3 (0.5 M)提取磷和有机磷的含量分别增加了 11%~165%和 -2%~137%。一般认为, 一方面, 受干土壤水溶性磷含量增加跟干湿交替下微生物死亡后机体磷的释放有关^[11]。Blackwell 等^[5]研究表明, 土壤受干后, 土壤含水势降低, 微生物细胞会受到一定程度破坏甚至死亡, 这一过程大约可以杀死 70%土壤微生物, 死亡的微生物是水溶性磷一个重要来源。另一方面, 干湿交替使得土壤有机质发生了一系列物理和化学变化, 这一过程伴随着磷的释放^[4,5]。干湿交替加速了土壤中大的团聚体的破碎和崩解, 在土壤团聚体破碎过程中, 受物理保护的有机质被暴露出来, 伴随着有机质降解, 使得可提取水溶性磷和有机磷含量增加^[12]。风干导致有机凝胶体发生变化, 风干时凝胶体破碎或增加孔隙度, 致使表面积的增加, 而潮湿所导致的变化是可逆的。由于这种原因, 从干燥土壤萃取的有机物质的数量多于潮湿土壤^[13]。另外, Birch 和 Friend^[14]实验表明: 大量多次的干湿往复处理可使土壤中有有机磷显著地下降, 所以土壤中有有机磷矿化作用加强可能导致水溶性磷增加^[15]。有研究表明干湿交替将引起土壤中好氧和厌氧条件的变化, 导致可溶性磷含量的波动。好氧环境促进了有机磷的降解, 更易导致磷的淋溶释放^[16]。

IPCC(2007)评估报告指出 20 世纪 80 年代以来全球温度的上升幅度已高达 3℃, 因此全球变暖的格局正在发生, 而且范围和程度将进一步加深。全球变暖导致区域温度升高, 使得土壤遭受干湿交替作用加剧。土壤受干后改变了土壤的化学性质, 包括生物和

非生物学性质的改变极大的影响土壤磷动力学和生物有效性^[17]。Jackson 通过调查全球不同区域、不同植被类型土壤, 其结果表明, 生物活性磷主要聚集在土壤表层 0~30 cm^[18-25,27-30]。这说明土壤活性磷主要聚集在浅层土壤中。随全球变暖预期的增强, 土壤受干促使了土壤中闭蓄态磷向活性磷的转化, 活化的磷可以极大满足缺磷土壤对磷的需求, 但是也有研究表明, 在草地等受人类影响小生态系统中, 活性磷的增加会降低生物多样性, 对该类系统发育造成不良影响^[19-26]。另一方面, 颗粒态和溶解态的土壤磷通过地表径流和渗漏等方式迁移进入受纳水体, 成为水体磷的潜在补给源, 磷酸盐是水体发生富营养化的主要因素之一, 因此增加的活性磷对相邻的水体构成威胁^[25-30]。如 Blackwell 通过柱淋溶实验表明, 干湿交替可增加淋出液中可溶性磷的浓度, 加大了临近水体富营养化的风险^[4,5,25-30]。

5. 结论

为考察干湿交替对土壤和相邻水体环境质量的影响, 两种不同有机质含量土壤采用修正 Hedley 分级方法对土壤受干前后的磷形态进行了研究。结果表明风干土壤极大的改变了土壤中磷形态的分布, 尤其是土壤中生物活性磷-树脂磷的含量发生较大的提高, 贫瘠土和有机土中活性磷在受干前后其浓度提高了 31%和 121%。这说明土壤中活性磷的活化跟土壤有机质含量密切相关。同时, 有机磷的含量受风干的影响也出现了小幅提高。另外, 干湿交替也引起了闭蓄态磷(Dil.HCl-P and Con.HCl-Pi)浓度的下降。这说明土壤中活性磷和有机磷的提高是以闭蓄态磷的降低为代价的, 干湿交替促进了土壤难溶性磷向活性磷或生物有效磷的转化。全球变化导致气温的升高和极端降雨事件的频发, 海岸带地区尤为严重, 这使得土壤遭受干湿交替变化更加的频繁, 因此土壤中有效磷的含量会逐渐增高, 这一方面会有利于作物的生长, 但同时也会加剧土壤中磷素流失的风险, 进而加剧湖泊和近海富营养化水平, 这不得不引起我们的关注。

参考文献 (References)

- [1] G. M. Filippelli. The global phosphorus cycle: Past, present, and future. *Elements*, 2008, 4(2): 89-95.
- [2] B. L. Turner, P. M. Haygarth. *Biogeochemistry: Phosphorus*

- solubilization in rewetted soils. *Nature*, 2001, 411(6835): 258.
- [3] D. Styles, C. Coxon. Laboratory drying of organic-matter rich soils: Phosphorus solubility effects, influence of soil characteristics, and consequences for environmental interpretation. *Geoderma*, 2006, 136(1-2): 120-135.
- [4] M. S. A. Blackwell, P. C. Brookes, N. de la Fuente-Martinez, et al. Effects of soil drying and rate of re-wetting on concentrations and forms of phosphorus in leachate. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 45(6): 635-643.
- [5] M. S. A. Blackwell, P. C. Brookes, N. de la Fuente-Martinez, et al. Phosphorus solubilization and potential transfer to surface waters from the soil microbial biomass following drying-rewetting and freezing-thawing. *Advances in Agronomy*, 2010, 106: 1-35.
- [6] K. Pettersson, G. N. George, P. Ges, et al. The impact of the changing climate on the supply and re-cycling of phosphorus. *The Impact of Climate Change on European Lakes*, 2010, 4: 121-137.
- [7] 姜德娟, 李志, 王昆. 1961~2008年山东省极端温度事件时空特征分析[J]. *科技导报*, 2011, 29(1): 30-35.
- [8] M. J. Hedley, J. W. B. Chauhan. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(5): 970.
- [9] 秦胜金, 刘景双, 王国平等. 三江平原湿地土壤磷形态转化动态[J]. *生态学报*, 2007, 27(9): 3844-3851.
- [10] H. Tiessen, J. O. Moir. Characterization of available P by sequential extraction. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 1993, 824: 75-87.
- [11] A. F. Cross, W. H. Schlesinger. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, 1995, 64(3-4): 197-214.
- [12] B. L. Turner, P. M. Haygarth. Changes in bicarbonate-extractable inorganic and organic phosphorus by drying pasture soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(1): 344-350.
- [13] 朴河春, 刘广深. 干湿交替和冻融作用对土壤肥力和生态环境的影响[J]. *生态学杂志*, 1995, 14(6): 29-34.
- [14] H. F. Birch, M. T. Friend. Resistance of humus to decomposition. *Nature*, 1961, 191: 81-96.
- [15] 李晨华, 唐立松, 李彦. 干湿处理对灰漠土土壤理化性质及微生物活性的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(2): 364-367.
- [16] 王国平. 湿地磷的生物地球化学特性[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 193-199.
- [17] E. Lichtfouse. *Sociology, organic farming, climate change and soil science*. New York: Springer, 2010.
- [18] R. B. Jackson, H. J. Schenk, E. G. Jobbágy, et al. Belowground consequences of vegetation change and their treatment in models. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 470-483.
- [19] M. Hejman, M. Klaudisov, J. Schellberg, et al. The Rengen grassland experiment: Plant species composition after 64 years of fertilizer application. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 122(2): 259-266.
- [20] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵. 黄壤旱坡地退耕还林还草对减少土壤磷流失的作用[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(3): 20-23.
- [21] J. G. Kerr, M. Burford, J. Olley, et al. The effects of drying on phosphorus sorption and speciation in subtropical river sediment. *Marine and Freshwater Research*, 2010, 61(8): 928-935.
- [22] H. B. Shao, L. Y. Chu, G. Xu, et al. Understanding molecular mechanisms for improving phytoremediation of heavy metal-contaminated soils. *Critical Review in Biotechnology*, 2010, 30: 23-30.
- [23] W. Y. Shi, H. B. Shao, H. Li, et al. Progress in the remediation of hazardous heavy metal-polluted soils by natural zeolite. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 170: 1-6.
- [24] G. Wu, H. B. Kang, H. B. Shao, et al. Critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174: 1-8.
- [25] J. H. Bai, R. Xiao, B. S. Cui, et al. Assessment of heavy metal pollution in wetland soils from the young and old reclaimed regions in the Pearl River Estuary, South China. *Environmental Pollution*, 2011, 159(3): 817-824.
- [26] J. H. Bai, H. F. Gao, W. Deng, et al. Nitrification potential of marsh soils from two natural saline-alkaline wetlands. *Biology and Fertility Soils*, 2010, 46(5): 525-529.
- [27] J. H. Bai, H. Ouyang, R. Xiao, et al. Spatial variability of soil carbon, nitrogen, and phosphorous content and storage in an alpine wetland in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(8): 730-736.
- [28] Editorial. 90 years of journal of plant nutrition and soil science (JPNSS). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175: 3.
- [29] K. K. Ingrid, G. Georg, K. Markus, et al. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171: 61-82.
- [30] Z. J. Chen, X. L. Zhang, M. X. Cui, et al. Tree-ring based precipitation reconstruction for the forest-steppe ecotone in northern Inner Mongolia, China and its linkages to the Pacific Ocean variability. *Global and Planetary Change*, 2012, 86-87: 45-56.