

污水土地处理水旱轮作条件下磷素在土层中迁移特征的模拟实验*

刘忠翰, 彭江燕(云南省环境科学研究所, 昆明 650034)

摘要: 为了解污水土地处理过程中不同土壤类型土壤溶液 P 含量和迁移特征, 在一种特殊的大型人工模拟土层和地下水实验装置中进行试验. 研究结果表明: 水田条件下 1.5m ~ 0.5m 土壤溶液 P 含量极低($\leq 0.02\text{mg/L}$), 但在旱地条件下, P 含量上升至 $0.045\text{mg/L} \sim 0.628\text{mg/L}$, P 素随入渗污水向下迁移距离可达 1.1m. 在低水力负荷率和较长停留时间的运行条件下, 1.3m 以下土壤溶液和地下水的 P 含量处于安全水平.

关键词: 污水土地处理, 磷迁移, 土壤溶液, 水田, 旱地, 水旱轮作.

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)03-0048-04

Removal Characteristics of Phosphorus Element in Soil Horizon under Water-Dry Cultivation of Wastewater Land Treatment*

Liu Zhonghan, Peng Jiangyan(Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China)

Abstract In order to understand the concentration of P element of soil solution and the transfer characteristics in different soil type during the wastewater land treatment operation, the experiment was conducted in a special experimental equipment which is a large artificial simulating soil layer and groundwater. The results of experimental researches showed that P content of the soil solution in 1.5m ~ 0.5m soil horizon is very low ($\leq 0.02\text{mg/L}$) under paddy field condition and $0.045\text{mg/L} \sim 0.628\text{mg/L}$ under dry land condition, that the removal distance of P element following percolated wastewater down to bottom slice soil is 1.1m during the dry land condition. The P content of soil solution and groundwater below 1.3m soil horizon is in a safe level under the operation condition of the low hydraulic loading rate and the longer remaining time.

Keywords: wastewater, phosphorous removal, soil solution, paddy field, dry land, water-dry cultivation.

在污水土地处理研究中, 有许多关于土壤除 P 效果的报道^[1-3], 但多数局限于处理系统的整体除 P 效果上, 极少有揭示在不同土壤类型和土层中 P 素迁移特征. 本文针对作物型污水土地处理实际运行过程对不同土层深度渗滤液 P 浓度影响的研究, 了解水旱轮作条件下的土壤 P 素迁移特征, 为进一步改进污水土地处理设计和提高处理系统运行效果提供基础数据和科学依据.

1 试验材料与方法

1.1 供试土样与污水

供试的 3 种土壤分别为采自昆明市北郊和楚雄市东北郊的水稻土、红壤土和紫色土. 水稻土和红壤都发育于第四纪红色粘土, 紫色土的

成土母质为紫色砂页岩. 3 种土壤有关的理化性质列于表 1 中. 试验污水取自昆明市的一条主要纳污河道, 取水口位于昆明市第一污水处理厂进水河道的上游段处, 污水的污染物年均含量为: BOD_5 73.4mg/L 、 COD_{Cr} 135.2mg/L 、 SS 58.3mg/L 、 TN 22.82mg/L 、 TP 1.468mg/L 、可溶性 TP 0.854mg/L .

1.2 研究方法

采用一种特殊的人工模拟土壤-地下水的试验装置. 装置的主体构造为直径 2.0m 的人

* 国家自然科学基金资助项目, 编号: 49661005 (Project Supported by the National Natural Science Foundation of China, numbered: 49661005)

作者简介: 刘忠翰(1943~), 男, 理学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为土壤环境化学和污水自净处理技术.

收稿日期: 1999-06-03

表 1 供试土壤相关的理化性质

土壤类型	采样深度 /cm	pH	有机质/%	全磷/%	全铁/%	全锰 /mg·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	物理性 粒粘/%
水稻土	0~ 20	6.82	4.97	0.192	6.92	291.48	20.00	52.58
	40~ 60	6.89	2.02	0.180	8.80	1307.01	16.98	53.36
	140~ 160	6.70	1.26	0.124	7.49	258.23	11.61	68.03
红 壤	0~ 20	5.65	3.94	0.123	7.60	309.09	31.56	39.58
	40~ 60	4.75	2.50	0.112	7.71	373.05	9.06	39.97
	140~ 160	4.42	1.63	0.125	7.85	374.28	8.50	55.70
紫色土	0~ 20	6.50	1.85	0.035	3.53	370.48	12.55	52.20
	40~ 60	6.87	1.15	0.022	3.02	237.30	9.08	44.90
	140~ 160	7.57	0.39	0.016	3.45	251.20	9.32	47.69

工模拟土柱和地下水的含水砂石层, 土柱厚度为 1.8m, 砂石层厚度为 0.5m; 整个装置的池壁为钢筋混凝土结构, 池壁超高 0.3m, 在不同深度的土层和砂石层中设置有采水装置, 依靠土壤重力水的重力作用使不同深度土壤溶液可自然(正压)排出, 为控制地下水的水平补给状况, 装置设计有地下水进水池和出水池, 同时为调控土壤潜水位的高低, 还设置有潜水位调节池(见图 1)。

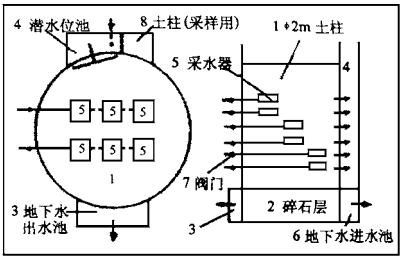


图 1 试验装置示意图

为了尽可能的减少回填土对自然原状土的扰动, 按体积和土壤容重确定的采样面积分层挖取原状土, 分层运输和回填, 然后再经数次灌水浸泡和松土的落实作用, 使人工模拟土柱尽可能恢复自然条件下的层状构造, 提高模拟土柱的真实性. 对投配污水进行计量, 同时对处理装置的排水和蒸散量也进行精密的计量, 按《水和废水监测分析方法》^[4], 定期监测污水、地表淹水、土壤溶液和地下水的 TP 等含量变化. 作为比较用的过磷酸钙处理是以底肥方式施入, 即挖田后以亩施 1.32kgP 的过磷酸钙后将田耙平, 然后灌入自来水, 并以同样的方法定期监测水质的变化.

2 试验结果与讨论

2.1 水旱轮作条件下 P 素在土层中迁移的主要特征

污土壤地的处理过程中, 投配污水的 TP 含量通常比较低. 在试验条件下, 投配污水的 TP 通常在 0.409mg/L ~ 3.783mg/L 之间变化, 其平均浓度含量又与投配的季节与时间有很大关系. 这种低 P 浓度的污水投配进入水旱轮作的土壤后, 不同土层深度土壤溶液和地下水中 TP 含量变化情况如表 2 所示. 表 2 的结果是在水力负荷 2.46m/a 和投配周期 4~ 14d 时获得的一种平均值, 这种低水力负荷率和较长的停留周期对磷的去除是很有利的, 即使如此, 在水田、旱地条件下, TP 在不同深度土层的土壤溶液的浓度存在较大的差异. 以红壤为例, 旱作条件下土壤对 P 的吸附固定能力较弱, 因此在土壤溶液中 TP 浓度较高, P 迁移的距离可达到整个土壤剖面, 且在 1.0m 以上的土层中, 土壤溶液 TP 含量较高, 而 1.0m 以下土层土壤溶液 TP 含量较低, 整个土壤剖面 TP 浓度由上至下呈逐渐减弱的趋势, 地下水 TP 含量也有一定程度的积累, 但较其背景含量 (0.008mg/L) 不显著; 但在水田条件下土壤溶液 TP 含量相对旱地条件不同土层均有明显下降, 地下水的 TP 含量也有所降低. 水稻土也有类似情况, 只是不同土层深度的土壤溶液 TP 含量较红壤的更低.

2.2 影响 P 素在土层中迁移的主要因素

(1) 土壤渗滤速率和停留时间对 P 素在土层中迁移的影响 土壤渗滤速率和停留时间的

表 2 污水土地处理总磷在不同条件下的浓度变化/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

处理	污水	地表淹水	不同采样深度的土壤溶液/ m						地下水 (2.2m)
			0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	
水稻土旱地	1.494		0.374	0.065	0.045	0.003	0.001	0.005	0.009
红壤旱地	1.648		0.628	0.391	0.047	0.062	0.015	0.044	0.019
水稻土水田	0.813	0.224	0.005	0.001	0.004	0.001	0.001	0.006	0.001
红壤水田	1.468	0.388	0.044	0.020	0.018	0.015	0.010	0.003	0.005

不同是造成水旱轮作条件下污水土地处理 P 素在土层中迁移差异的一个重要原因。就试验土壤而言,在淹水条件时,垂直渗漏系数(K_s)通常在 $0.11\text{ cm/h} \sim 1.78\text{ cm/h}$ 之间变化,而旱作灌溉时因土壤潜水位已下降至 1.5 m 左右深度,未构成土壤重力水产生地面积水前,土壤 K_s 通常维持在 $46.5\text{ cm/h} \sim 117.5\text{ cm/h}$ 之间,水稻土土壤 K_s 均处于最低值。红壤在未构成地面积水前,土壤 K_s 为 102.9 cm/h ,当土壤水饱和时,依靠重力作用产生的 K_s 经常保持在 $0.21\text{ cm/h} \sim 2.13\text{ cm/h}$,比水稻土 $0.11\text{ cm/h} \sim 0.67\text{ cm/h}$ 高。 K_s 大,则表明土液接触时间短,造成污水中可溶性 H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 等易以质流方式向下迁移。表 2 红壤在旱地条件下不同土层深度总 P 均明显高于水稻土的,与灌溉前期红壤 $K_s(102.9\text{ cm/h}) >$ 水稻土 $K_s(46.5\text{ cm/h})$ 有极大关系。

(2) 污水中 P 浓度对 P 素在土层中迁移的影响 试验污水的 TP 含量通常处于一种低含量($0.409\text{ mg/L} \sim 3.783\text{ mg/L}$)水平,尽管如此,进入旱地土壤的污水 P 浓度越高, $0.9\text{ m} \sim 1.1\text{ m}$ 以上土层中土壤溶液的 P 浓度也随之升高(见图 2),但在 $0.9\text{ m} \sim 1.1\text{ m}$ 以下土层,土壤溶液的 P 浓度除极少数可达 0.06 mg/L 外,通常在 0.02 mg/L 以下水平。为寻找污水中 P 浓度对 P 素在土层中迁移的影响,投配的污水源不可能提供更高的 P 浓度,在水田试验研究过程采用施用过磷酸钙磷肥的方法。亩施磷肥 1.32 kg ,水稻土灌水 20 cm 、紫色土灌水 35 cm 的情况下,这相当于投配了 $5.66\text{ mg/L} \sim 9.91\text{ mg/L}$ 的 TP,但 P 素在不同土层中迁移曲线仍类似污水处理的(见图 3)。磷化肥的有效 P 浓度虽然很高,但深施与耙田过程使绝大部分可溶性 P 被吸附与固定,故稻田地表淹水 TP

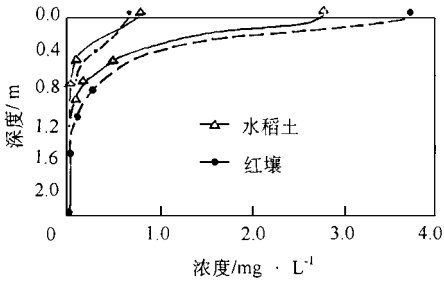


图 2 污水的 TP 在旱地土壤中的迁移

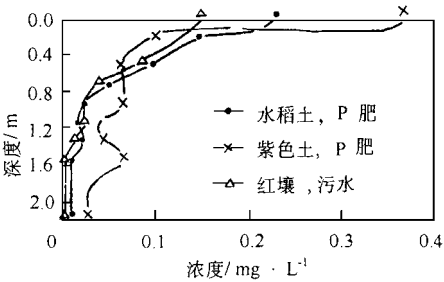


图 3 污水和 P 肥的 TP 在水田土壤中的迁移

浓度降至水稻土的 0.239 mg/L 和紫色土的 0.374 mg/L ; 投配的污水因受稻田残留积水等因素影响, 2 d 后也降至 0.153 mg/L 。以这样的浓度入渗土层中,对土壤溶液 TP 浓度降低是十分有益的, 0.9 m 以下土壤渗滤液 TP 浓度已达到安全的水平($\leq 0.025\text{ mg/L}$),但紫色土磷肥处理 $0.9\text{ m} \sim 1.5\text{ m}$ 土层的土壤溶液 TP 浓度通常在 $0.040\text{ mg/L} \sim 0.076\text{ mg/L}$ 之间变化。无论旱地或水田,对模拟地下水 TP 含量的影响都不明显。

(3) 土壤溶液总 Fe 含量对磷素在土层中迁移的影响 土壤固定 P 的因素已有许多报道^[5-8],包括有机质和高岭石的吸附,无定形硅酸铝和氧化铁、三水铝石对磷酸离子的专性吸附和化学沉淀、pH 和氧化还原电位(E_h)的影响等。在本研究中一个极为主要的因素是土壤溶液的总 Fe 和可溶性 Fe 含量。表 3 表示旱地

条件下 2 种土壤的总 Fe 含量较低,但在水田条件下,2 种土壤不同土层土壤溶液的总 Fe 含量均有不同程度的提高,水稻土中总 Fe 平均含量增加了 2.35 ~ 6.32mg/L,红壤增加了 29.17mg/L~ 93.27mg/L. 水田土壤溶液总 Fe (几乎都为 Fe^{2+}) 含量增加,使污水在入渗过程有可能发生 Fe^{2+} 与 H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 的化学作用生成 $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 沉淀或被无定形态铁化合物所吸附. 已有的研究成果认为, $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的溶度积(PK_{sp}) 为 35.35,只要土壤溶液中 P 与 Fe、Al 和 Mn 离子的离子活度积高于其相应难溶化合物的溶度积, P 就会

与这些离子反应并结晶形成新的化合物沉淀^[8]. 虽然在土壤矿物中铁、铝氧化物吸附 P 的能力最强,但在不同形态铁、铝氧化物中,三水铝石和无定形氧化铁的 P 解吸量分别为吸附总量的 23% 和 29%,比无定形硅酸铝(60%) 低得多^[7]. 关注土壤溶液 Fe 含量变化,这是因为铁锰氧化物还原淋溶和氧化淀积是水稻土形成的重要特征之一,其氧化铁形态深受水分状况的影响,与作物轮作有关^[9],水田条件有利于游离氧化铁含量及 Fe 的游离度增加,这种变化过程必然有益于污水中 P 素在土壤中被吸附或沉淀固定.

表 3 旱作和水作条件不同土壤中不同采样深度土壤溶液总 Fe 含量变化/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

处理	污水	地表淹水	不同采样深度的土壤溶液/ m						地下水 (2.2m)
			0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	
水稻土旱地	15.45		6.32	12.42	8.65	18.95	28.34	11.36	0.48
红壤旱地	16.78		31.19	14.42	67.34	15.13	21.17	17.85	
水稻土水田	12.14	2.60	11.96	13.81	14.17	21.63	30.69	17.68	0.60
红壤水田	12.14	2.57	73.82	43.59	104.61	105.87	96.15	111.12	3.46

3 结论

污水中 P 素在土层中的迁移与污水投配水力负荷率、污染负荷率,投配周期等因素有关,即使在本研究的一种低水力负荷率(2.46~3.61 m^3/a) 和较长的停留时间条件下,仍然监测到旱地条件下 P 素在红壤土层中迁移距离达 1.1 m . 通常,水稻土和红壤在旱地栽培时, P 素易随入渗的污水向下层土壤迁移,水稻土磷素迁移深度小于红壤的主要原因是水稻土的饱气带土层厚度较小. 在水田条件下,污水中的 P 素很难向下层土壤迁移,是因为投配污水浓度较低,而土壤溶液中 Fe^{2+} 浓度含量较高,在一个长的停留时间里,有利于 Fe、Al、Mn 等离子与可溶性 PO_4^{3-} 反应形成新的化合物沉淀. 本研究结果证明我国南方红壤区污水土地处理过程除 P 效果所需要的条件,这对污水土地处理设计中的土层饱气带和非饱气带控制、排水暗管埋深等参数选择是有帮助的. 只要充分运用水旱轮作过程 P 素在土层中迁移特征变化规律,可将土壤除 P 效果提高到一个最佳的水平.

参考文献

- 1 U. S. Environmental Protection Agency. Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater. Cincinnati: U. S. EPA Center for Environmental Research Information, 1981. 4~ 7.
- 2 孙铁珩,曲向荣,韩淑华等. 城市污水慢速渗滤土地处理系统净化功能的研究,水污染防治及城市污水资源化技术. 北京: 科学出版社,1993. 279~ 290.
- 3 刘忠翰. 慢速渗滤土地处理设计参数的研究. 环境科学, 1991, 12(4): 57~ 61.
- 4 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1989, 280~ 286.
- 5 Amer F, Saleh M E and Mostafa H E. Phosphate behavior in submerged calcareous soils. Soil Science, 1991, 151 (4): 306~ 311.
- 6 Porter P S and Sanchez C A. The effect of soil properties on phosphorus sorption by everglades histosols. Soil Science, 1992, 154(5): 387~ 398.
- 7 王建林,陈家坊. 土壤中可变电荷表面磷的解吸特征. 土壤学报, 1991, 28(1): 14~ 23.
- 8 王敬国. 植物营养的土壤化学. 北京: 北京农业大学出版社, 1995. 92~ 106.
- 9 马毅杰,赵红挺,陈家坊. 水稻土铁锰氧化物迁移特点. 土壤学报, 1995, 32(增刊 2): 101~ 109.