

疏浚底泥土地投放中活性磷的下移规律

陈英旭 朱广伟^{*} 何云峰 田光明 陈华林 王凤平

(浙江大学环境工程系, 杭州 310029)

摘 要 通过原状土柱淋洗试验研究了运河(杭州段)疏浚底泥土地投放后磷在土层中的分布规律。结果表明,在连续淋洗的条件下,疏浚底泥的土地投放并未显著提高淋洗液中活性磷的浓度;但在干湿交替的淋洗条件下疏浚底泥中活性磷的下移作用却相当明显。疏浚底泥土地投放后显著提高了表层 15 cm 厚的土层中 Olsen-P 含量,而 15 cm 以下土层中的 Olsen-P 的增加并不明显,原因可能与疏浚底泥中有机酸的释放及土壤 pH 的剖面变化特征有关。干湿交替等环境因子的变化对底泥活性磷的下移程度产生更大的影响,且底泥用量越大,其潜在的影响可能越持久。

关键词 底泥, 土地投放, 磷, 土柱, 淋洗

中图分类号 S153

水体疏浚是航道维护、港口整修、水生生态恢复中常用的工程措施,全世界每年都有数亿吨以上的疏浚底泥产生。随着我国社会经济的发展,水体疏浚也为越来越多的地方政府所采纳^[1]。由于这些疏浚底泥往往含有大量重金属、有机化合物、病原体等有毒有害物质^[2],海洋倾倒和陆地填埋历来是其主要的处置方法^[3]。然而近年来随着国际环境意识的不断提高,海洋倾倒正在为越来越多的国家所禁止,陆地填埋的成本也越来越高,因此疏浚底泥的土地综合利用技术日益受到关注^[4]。

在疏浚底泥的土地利用研究中,重金属和有机有毒物质的污染受到了很大的关注,而对疏浚底泥土地投放中磷的环境危害研究较少。尽管磷在土壤中具有较低的迁移性^[5],然而近年来许多研究发现,在一定条件下土地投放的污泥中磷在土层中的下移深度可达数十厘米甚至数米^[6-8],其环境影响不容忽视。疏浚底泥一般都含有较高的活性磷^[9],不恰当的土地投放势必会造成土壤磷污染^[10]。

我们通过原状土柱淋洗试验研究了疏浚底泥土地投放中磷在土层中的下移规律,为疏浚底泥的合理处置提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验用疏浚底泥于 1999 年 3 月采自运河杭州段,经风干、过 2 mm 筛、均匀混合后备用。试验用原状土柱采自杭州市运河-钱塘江连接处附近的稻田,土质为砂壤土。原状土柱高 1 m,直径 105 mm,现场装在高 1.2 m 的 PVC 管中。PVC 管下端用螺盖和 PVC 胶密封,中间留取采集淋洗液用的出口,以活塞控制,出口处用纱布隔开,以防止泥沙下移。为保证各个土柱结构和性质的统一性,所有土柱均采自同一土壤剖面,底泥和土壤的基本性质见表 1。

1.2 研究方法

将风干过筛的疏浚底泥均匀铺在土柱的顶层,底泥添加厚度分别为 0、1、2、5 cm,分别相当于 0、90、180、540 t hm⁻² 的田间投放量,每个处理设三重重复。自 1999 年 7 月 18 日开始用去离子水进行土柱淋洗,淋洗量为每日 173 ml (20 mm 深),总淋洗量为 10 380 ml (1 200 mm 深),相当于杭州地区年均降雨量的 80%。在土柱底端连续收集土柱淋出液,过 0.45 μm 滤膜后测定 PO₄³⁻ 浓度。连续淋洗 30 天后停止,使土柱自然落干 15 天,然后再连续淋洗 30 天,收集淋出液,测定 PO₄³⁻ 浓度,以模拟干湿交替的环境条件。

^{*} 现在中国科学院南京地理与湖泊研究所博士后流动站工作

收稿日期:2001-02-19;收到修改稿日期:2001-09-25

表 1 供试底泥和土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of sediment and soil tested

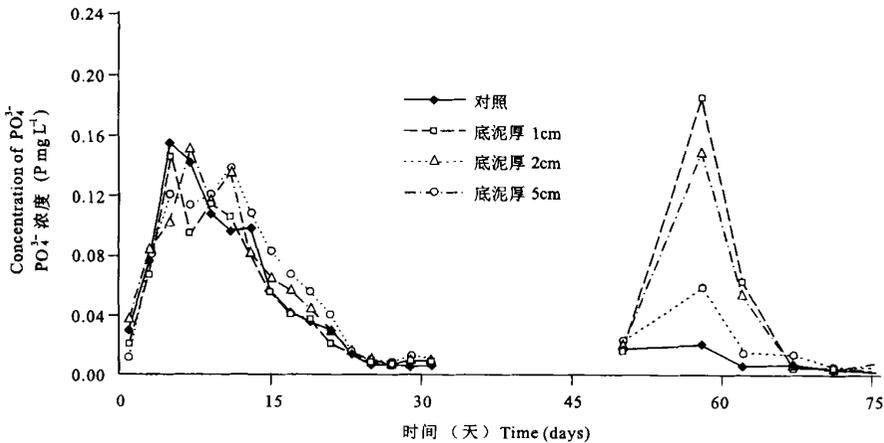
土壤 Soil	pH	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (mg kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	矿质氮 Mineral N (mg kg ⁻¹)	含砂量 Content of sand (%)
疏浚底泥	6.49	2.31	32.3	1136	100.2	242	447	15.05
砂壤土	7.81	0.45	14.0	430	14.5	67	41	44.70

淋洗期间每天收集土柱下部淋出液, 落干期间则未采集到淋洗液。淋洗实验结束后剖开土柱, 自上而下按底泥层和 1、1、1、1、2、3、5、5、10、10、20、30 cm 厚度的土层进行土柱分层, 测定各土层土壤的 pH (H₂O, 1:5) 及 Olsen-P 和有机碳含量^[11,12]。淋洗液中 PO₄³⁻ 的测定采用孔雀绿-钼锑抗显色光度法^[13]。

2 结果与讨论

2.1 淋洗液中 PO₄³⁻ 浓度的变化特征

土壤淋洗液中 PO₄³⁻ 的浓度随淋洗时间的变化如图 1。从图中可以看出, 各处理的变化趋势基本一致, 即在连续淋洗一周以后淋洗液中 PO₄³⁻ 的浓度就达到一个峰值。然后随着连续淋洗的进行, 淋洗液中 PO₄³⁻ 逐渐下降, 三周以后基本平稳, 维持在 0.01 mg L⁻¹ 左右。经落干的土柱在重新淋洗一周以后, 淋洗液中 PO₄³⁻ 浓度再次达到一个峰值, 然后又随着连续淋洗的进行而再次逐渐下降到 0.01 mg L⁻¹ 左右。

图 1 淋洗液中 PO₄³⁻ 的浓度变化Fig. 1 Concentration of PO₄³⁻ in soil column leachate

淋洗液中 PO₄³⁻ 浓度的这种变化说明, 连续淋洗的还原条件有利于土壤中活性磷的迁移, 落干造成的氧化条件则利于疏浚底泥中活性磷的产生。土壤磷迁移的主要“阻滞”因子为铁锰氧矿物等土壤胶体及 CaCO₃ 物质的吸附沉淀作用^[14]。还原条件有利于 Fe²⁺ 及 Mn(III) 等物质的形成, 降低了铁锰胶体活性, 加快了磷在土层中的下移速度^[15,16]。加上土壤中磷的扩散速率随土壤水分含量的增加而增加^[17], 在连续淋洗条件下磷在土壤中扩散很快, 浓度平衡时间短, 因而土柱淋洗液中 PO₄³⁻ 浓度达到平衡的速度很快, 在一周以后土壤中磷的浓度峰值就到达 1 m 深的土柱底部。

从图 1 中可以看出, 在第一个月的连续淋洗中, 各处理之间淋洗液 PO₄³⁻ 浓度的差异不明显, 而在落干以后再次淋洗时, PO₄³⁻ 浓度峰值则差异显著。其中对照土柱在落干以后重新淋洗时, 淋洗液 PO₄³⁻ 浓

度峰值已不太明显,说明其活性磷的补偿不大。而施用底泥的土柱淋洗液中 PO_4^{3-} 浓度明显高于未施用底泥的对照,说明落干的氧化条件下,由于底泥中活性磷的释放。上层土柱中又补充了大量的活性磷。但在峰值强度上底泥用量小的土柱高于底泥用量大的土柱,这说明底泥施用量的大小并非决定淋洗液中 PO_4^{3-} 浓度的峰值强度惟一因素,推测原因是由于用量大的土柱底泥层厚度较大,在落干过程中下层底泥的氧化作用较弱,在淋洗中又吸附了上层淋下的活性磷,从而降低了再次淋洗时 PO_4^{3-} 浓度峰值强度。

2.2 淋洗后疏浚底泥的特征

淋洗试验结束后,各个土柱上端加入底泥的 pH、有机碳含量及 Olsen-P 含量见表 2。由表 2 可以看出,底泥用量越大,淋洗后底泥中有机碳含量越高,即其有机质的相对矿化程度越低。底泥用量大的 pH 也相对略低,而 Olsen-P 的剩余量也明显较多,表明仍具有较大的活性磷的释放潜力。

底泥性质的这种变化进一步证实了上述关于底泥用量大的土柱再次淋洗时活性磷峰值较低的推断。底泥层的厚度越大,在落干期间底泥的总体氧化程度就越低,活性磷的产生和下移就受到影响。另外底泥厚度增大,底泥中有机质对活性磷的吸附作用也就越大,从而造成底泥用量大的土柱淋洗液中 PO_4^{3-} 浓度反而较底泥用量小的土柱低。

表 2 淋洗结束后土柱中底泥的性质

Table 2 Characteristics of dredged sediment in soil columns after leaching experiments

项 目 Item	不同底泥厚度 (cm) 的处理中底泥的性质 Properties of sediment in different thickness of sediment layer (cm)		
	1	2	5
pH (H ₂ O, I 5)	7.76±0.09	7.75±0.10	7.56±0.13
有机碳 O. C. (g kg ⁻¹)	1.35±0.03	1.42±0.02	1.46±0.03
有效磷 Olsen-P (mg kg ⁻¹)	49.4±3.8	74.8±5.9	86.2±1.7

2.3 Olsen-P 在土柱中的分布

淋洗结束后不同处理的土柱中 Olsen-P 的垂向分布如图 2。相同深度各处理间土壤 Olsen-P 含量的差异性方差分析见表 3。

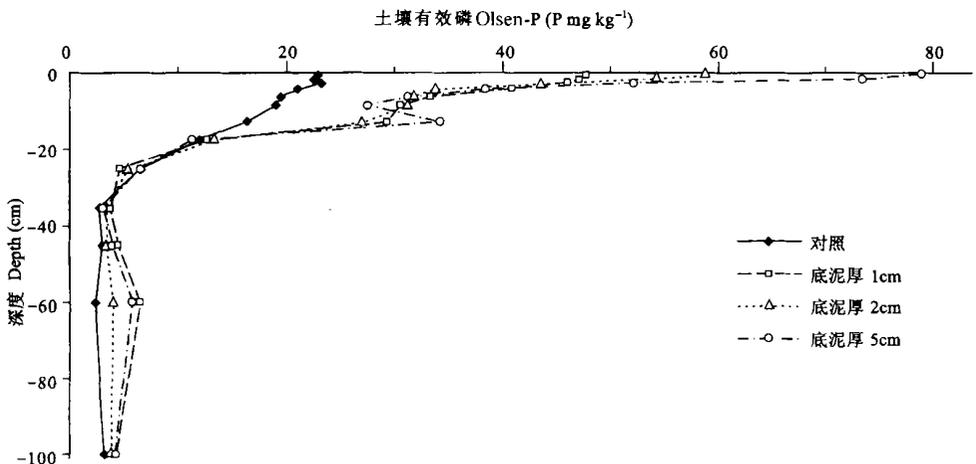


图 2 土柱中 Olsen-P 的垂向分布

Fig. 2 Vertical distribution of Olsen-P in soil columns

表 3 土柱各层不同处理间土壤 Olsen-P 浓度的方差分析表

Table 3 Variance analysis of Olsen-P concentration in different soil layers among different treatments

深度 Depth (cm)	各处理间的 t 值(单尾) t value between treatments					
	AB	AC	AD	BC	BD	CD
0~ 1	4.57*	3.36**	24.08**	0.82	5.71**	1.69
1~ 2	5.89**	3.61*	11.21**	0.73	4.74*	4.28*
2~ 3	3.18*	7.41**	24.29**	0.26	0.88	3.25*
3~ 5	2.79*	7.00**	6.99**	0.84	0.44	1.08
5~ 7	3.01*	5.71**	3.75*	0.55	1.35	0.36
7~ 10	3.89*	6.04**	6.69**	0.38	0.95	3.05*
10~ 15	6.88**	6.87**	3.26*	6.07**	0.68	1.06
15~ 20	0.16	0.46	0.65	0.15	0.45	1.42
20~ 30	1.57	1.30	0.06	0.67	6.51**	0.91
30~ 40	1.85	1.40	0.74	3.37*	2.54	1.94
40~ 50	2.36	0.68	1.62	1.37	0.31	2.69
50~ 70	5.50*	3.40*	4.41*	2.38	1.23	2.29
70~ 100	1.10	0.75	3.65*	2.31	0.22	0.93

注:表中, A 为对照处理, B 为底泥厚 1 cm 的处理, C 为底泥厚 2 cm 的处理, D 为底泥厚 5 cm 的处理

* 5% 的显著水平($p < 0.05$); ** 1% 的显著水平($p < 0.01$)

由图 2 和表 3 可以看出, 在 15 cm 深度以上的土层中, 底泥投放引起土壤 Olsen-P 含量显著提高 ($p < 0.05$), 而在 15 cm 以下的土层中底泥投放并未引起土壤 Olsen-P 的显著增加。这也证明: 从对土壤的影响强度上看, 底泥用量大小并非唯一决定因素。

磷在土层中的下移与土层有机碳含量及 pH 密切相关。各处理土柱中有机碳含量及 pH 的垂向分布状况见图 3。

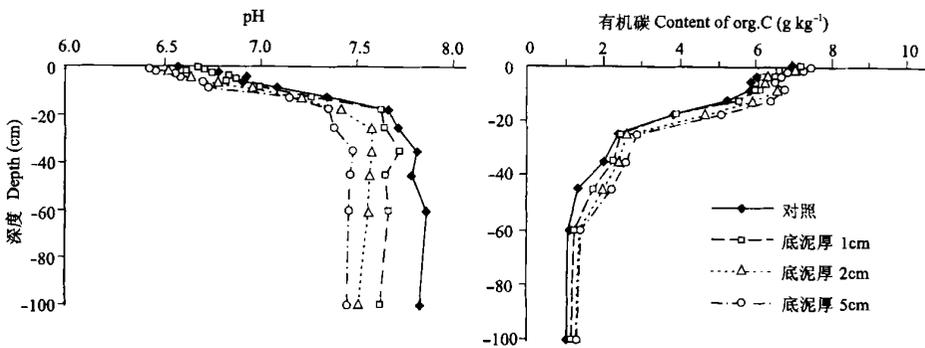


图 3 土柱中有机碳、pH 的垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of organic carbon and pH in soil columns

由图 3 可以看出, 底泥施用提高了整个土壤剖面中的有机质含量, 同时又降低了土壤 pH。各处理土柱中有机质的含量变化与 pH 的变化之间存在着明显的耦合关系。这说明土柱 pH 的变化与土壤有

机质含量的变化密切相关。土柱的这种变化可能是由于底泥中有机酸的释放及下移作用引起的。底泥本身及分解过程产生大量的有机酸,而有机酸又具有较强的迁移能力,使得土柱各层 pH 相应降低。

土壤有机酸既可以通过与铁、铝的磷酸盐络合而增加磷的迁移能力,也可以与磷酸根竞争土壤胶体上的吸附点位,从而间接活化了土壤磷^[18,19]。使得土壤活性磷在土柱中的迁移速度加快。

结合图 2、3 可知,尽管在 20 cm 以下深度上,施用底泥的土柱各层有机质含量及 pH 与未加底泥的对照之间均存在一定程度的不同,但各层 Olsen-P 含量的差异并不显著。这可能归因于该段土柱整体 pH 均较高的缘故。由图 3 可知,20 cm 以下各层土壤的 pH 已基本高于 7.5,这与 Olsen-P 提取剂的 pH 值(8.5)比较接近,其 Olsen-P 在淋洗过程中已基本被淋洗掉了,使得土壤中 Olsen-P 的提取量均较低,各处理间的差异性大为缩小。

3 结论

1. 在连续淋洗下疏浚底泥并未显著提高淋洗液中 PO_4^{3-} 的浓度,但在干湿交替的环境下疏浚底泥中活性磷的释放明显。

2. 疏浚底泥显著提高了 15 cm 以上土层中活性磷强度,更深土层中的则不明显。原因可能与疏浚底泥中有机酸的释放及土壤 pH 的共同作用有关。

3. 三种疏浚底泥用量对土壤 Olsen-P 的影响差异不显著。干湿交替等环境因子对底泥活性磷的释放强度产生更大的影响。

参考文献

1. 金相灿,荆一凤,刘文生. 湖泊污染底泥疏浚工程技术:滇池草海底泥疏浚及处置. 环境科学研究, 1999, 12(5): 9~ 12
2. Flinstner U, Calmano W. Characterisation of dredged materials. Water Science Technology, 1998, 38(11): 149~ 157
3. Massa A A, Del Vicario M, Pabst D. Disposal of wastes and dredged sediments in the New York Bight. Northeastern Geology and Environmental Sciences, 1996, 18(4): 265~ 285
4. Woodard H J. Plant growth on soils mixed with dredged lake sediment. J. Environ. Sci. Health, Part A: Toxic Hazard Substance Environ. Eng., 1999, 34: 1 229~ 1 252
5. Lauer D A. Vertical distribution in soil of unincorporated surface-applied phosphorus under sprinkler irrigation. Soil Sci. Soc. Am. J., 1988, 52: 1 685~ 1 692
6. Eghball B, Binford G D, Battersperger D D. Phosphorus movement and desorption in a soil receiving long-term manure and fertilizer application. J. Environmental Quality, 1996, 25: 1 339~ 1 343
7. 刘忠翰, 彭江燕. 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. 环境科学, 2000, 21(3): 48~ 51
8. Loganathan P, Hedley M J. Downward movement of cadmium and phosphorus from phosphatic fertilizers in a pasture soil in New Zealand. Environmental Pollution, 1997, 95: 319~ 324
9. Combs S M, et al. Chemical properties and mineralogical characteristics of selected dredged material. J. Environmental Quality, 1982, 11: 255~ 261
10. Cameron K C, Di H J, McLaren R J. Is soil an appropriate dumping ground for our waste? Australian Journal of Soil Research, 1997, 35(5): 995~ 1 035
11. Nelson D V, Sommers L E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page A L, Miller R M, Keeney D R eds. Methods of Soil Analysis. Part 2. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI. 1982. 539~ 579
12. Olsen S R, Cole C V, Watanabe F S, et al. Estimation of available P in soils by extraction with sodium bicarbonate. U. S. D. A. Circular, 939, 1954: 1~ 19
13. Rao A S, Reddy K S, Takkar P N. Malachite green method compared to ascorbic acid for estimating small amounts of phosphorus in water, 0.01M calcium chloride, and Olsen soil extracts. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1997, 28(6~ 8): 589~ 601
14. 吕家珑, 张一平, 张君常. 土壤磷运移研究. 土壤学报, 1999, 36(1): 75~ 82
15. Amer F, Saleh M E, Mostafa H E. Phosphate behavior in submerged calcareous soils. Soil Science, 1991, 151(4): 306~ 311
16. Jensen M B, et al. Phosphate leaching from intact soil column response to reducing conditions. Water Air Soil Pollution, 1999, 113(1~ 4): 411~ 423

17. 徐明岗, 张一平, 王锐群. 土壤磷扩散规律及其能量特征的研究 I . 水分、质地、温度及其相互作用对磷矿扩散的影响. 土壤学报, 1996, 33(2): 148~ 157
18. Yang X, Werner W, Scherer H W, *et al.* Effects of organic manure on solubility and mobility of different phosphate fertilizers in two paddy soils. Fertilizer Research, 1994, 38: 233~ 238
19. 赵晓齐, 鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响. 土壤学报, 1991, 28(1): 7~ 13

DOWNWARD MOVEMENT OF AVAILABLE PHOSPHORUS AFTER LAND APPLICATION OF DREDGED SEDIMENT

Chen Ying-xu Zhu Guang-wei He Yun-feng Tian Guang-ming Chen Hua-lin Wang Feng-ping
(*Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China*)

Summary

Effects of land application of dredged sediment from the Grand Canal (Hangzhou section) on the distribution of phosphorus in soil layers were studied by soil column leaching experiments. The results showed that application of dredged sediment did not significantly increase phosphorus concentration in the soil column leachate. Dry-wet alternative treatment has strong effect on the release of available phosphorus from dredged sediment to subjacent soil layer. After application of dredged sediment, contents of Olsen-P in the upper 15 cm soil layers were markedly higher than that of the control column, but in deeper soil layers, increasing in Olsen-P was insignificant. The increase in Olsen-P was partly due to release of organic acid from dredged sediment, which increased soil organic carbon content and decreased soil pH in the whole soil column. The more dredged sediment was applied, the longer effect on soil and ground water may last.

Key words Sediment, Land application, Phosphorus, Soil column, Leaching