植物营养与肥料学报 2001,7(3):311～317
Plant Nutrition and Fertilizer Science

疏浚底泥的养分特征及污染化学性质研究

朱广伟[1], 陈英旭[1],周根娣[2],王凤平[1]
(1 浙江大学环境与资源学院环境工程系, 浙江杭州 310029;
2 杭州市环境保护科学研究所,浙江杭州 310005)

摘要:本文以运河(杭州段)待疏浚底泥为材料,分析了疏浚底泥的养分特征及其污染化学性质。结果发现,疏浚底泥中含有较高的养分,其中有机质、P、K 含量较高而 N 偏低;施入土壤后,有机质矿化很快,P 的供应较为持久。疏浚底泥重金属含量较一般城市污泥低,基本低于污泥农用中污染物控制标准,可考虑直接使用以节约处置费用;重金属的有效态含量不高,相对活性顺序为 Cd > Cu > Pb > Zn,直接大量施用会对种子发芽产生一定的毒害。供试作物种子对疏浚底泥毒害作用的反应不同,抗性顺序为青菜>羊茅草>三叶草。直接利用疏浚底泥比城市污泥具有更大的安全性,只要物种选取合适、用量恰当,是一种很好的肥源和复垦用土。

关键词:疏浚底泥;养分;污染化学
中图分类号:R124;X131.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2001)03-0311-07

景观水体疏浚治理中会产生大量的底泥。与污水污泥及工业废渣等城市固废相比,疏浚底泥的排放量大且集中,污染物成分简单、含量低,理化性质与土壤接近。疏浚底泥的处置费用高,是决定景观水体具体疏浚规模和项目投资的主要因素。林地、城市绿地、农田等土地利用是污水污泥等处置的较为经济的资源化方法[1~3],合理施用可改良土壤、节约大量处置费用[4~6],但施用不当也会破坏土壤结构、引起作物减产、污染物含量超标及地下水污染等不良后果[7~11]。所以在疏浚底泥投放或制作堆肥之前很有必要对其肥力特征及环境危害性进行调查。为此,本文以运河(杭州段)待疏浚底泥(简称底泥)为试验材料,研究了疏浚底泥的养分特征及污染化学性质,以期为景观水体疏浚底泥的土地利用规范提供依据。

1 材料与方法

1.1 底泥样品的采集

本研究在 30.1 公里长的运河(杭州段)上设 12 个断面,每个断面设左、中、右 3 个采样点,用 XY-1 型钻机在采样点钻取直径 108 mm 的柱状样,钻取深度在 2 m 以上,以保证采到底泥下面的河床基地。在每个泥柱的不同层位采集泥样分析其养分和重金属含量,同时分取出河床基底样品进行重金属分析。盆栽用底泥则用采泥器大量挖取而得,盆栽用水稻土采自杭州运河东岸的谢村稻田。

1.2 试验方法

1.2.1 盆栽试验　为检验底泥施入土壤后肥效的变化,将底泥及水稻土风干、过 2 mm 筛后按不同比例混合,分别相当于底泥田间投放量 0、270、540、810、1080、1350 t/hm^2。将混合土装入直径为 15cm 的塑料花盆,每盆装混合土 2kg,在温室中进行鸡冠花盆栽试验。90d 后测定混合土中有机质、全 P 及有效 P 含量、

收稿日期:2000-04-19
基金项目:杭州市环保局资助项目(9812)
作者简介:朱广伟(1972—),男,河南中牟人,博士研究生,主要从事水体沉积物环境化学研究。

土壤呼吸强度。盆栽用底泥和水稻土的基本理化性质见表1。

表1 试验用的底泥和水稻土的基本理化性质

Table 1 Basic properties of dredged sludge and rice soil for experiment

项目 Item	pH	阳离子交换量 CEC (cmol/kg)	有机质 O. M. (%)	总氮 Tot. N (%)	全P Tot. P (%)	有效P Avai. P (mg/kg)	有效K Avai. K (mg/kg)
底泥	6.49	164	17.92	0.25	0.114	89	242
水稻土	5.92	116	3.70	-	0.076	29	83

1.2.2 种子发芽试验 为评价疏浚底泥的生物毒性,选用青菜(*Brassica chinensis* L.)、羊茅草(*Fescuta ovina var. brachyphylla* (Schult.) Piper)和三叶草(*Trifolium repens* L.)的种子进行。测定方法为:在Φ10cm高1.5cm的培养皿中铺混合土1cm,加水浸透调匀,凉至稍干后将表层土捏碎,播种子各50粒,用一层松软表土覆盖,,喷水润湿后在25℃培养箱中避光培养,重复6次。5d后记取发芽种子数目,并测定每个芽苗的高度。

底泥和土壤中养分、重金属总量及形态分级均按常规分析法。

2 结果与讨论

2.1 底泥的养分特征

运河(杭州段)底泥中主要养分含量及其与杭嘉湖平原土壤背景值和城市污泥的对比结果见表2。表2看出,疏浚底泥中有机质、全P、有效K、Ca均高出土壤数倍,有效P的含量也较高,全K、Mg的含量与土壤大致相当,而全N含量明显偏低。若将底泥作为肥料使用时要注意补充N肥以平衡营养。

表2 疏浚底泥中的养分特征

Table 2 Characteristic of nutrients in dredged sludge

养分 Nutrients	疏浚底泥 Dredged sludge		杭嘉湖平原土壤背景值 Background value of H-J-H plain			消化污泥 Digested sludge	未消化污泥 Undigested sludge	牛厩肥[6] cattle manure
	范围 Range	均值 Mean	水稻土 Paddy soil	潮土 Aquult	黄红壤 Yellow laterite			
有机质(%)	0.87~47.54	15.50	3.10	1.30	1.72	27.3a	38.7a	52.31a
全N(%)	0.02~0.46	0.22	-	-	-	4.23	4.80	1.51
全P(%)	0.04~0.26	0.12	0.06	0.07	0.06	1.75	1.31	0.31
全K(%)	0.33~3.21	0.91	1.86	1.90	0.89	0.33	0.44	1.47
全Ca(%)	0.83~4.72	2.54	0.67	0.81	0.08	-	-	-
全Mg(%)	0.21~1.45	0.81	0.82	0.90	0.23	-	-	-
C/N	-	70.45	-	-	-	6.44	8.02	34.64
有效P(P,mg/kg)	-	38.90	6.70	12.70	47.30	350.00	960.00	-
有效K(K,mg/kg)	-	242.00	82.80	97.20	56.20	-	-	-
有效N(N, mg/kg)	-	447.00	-	-	-	7870.00	2760.00	-

注:后加字母a的数据为有机碳.

Note: The data appended "a" means organic carbon.

与城市污泥相比，底泥中有机质、N、P 等养分含量均低于生活污泥，与牛厩肥相比则更是明显偏低，K 的含量略高于生活污泥，这与运河底泥含有较多的建筑垃圾有关。所以从营养成分看，运河底泥的肥力介于肥沃土壤和污泥之间（有部分河段的养分含量较高），若制成堆肥其肥力相对较低，可以直接投放农田或有待复垦的土地。对部分养分含量高的底泥也可以掺加一些含 N 较高的有机肥进行堆肥，作为肥料使用。

底泥养分含量的另一个显著特点是各养分的含量变化很大，如有机质、全 N 的变化范围都在一个数量级以上，这是因为 30.1km 长的运河（杭州段）包括了运河-钱塘江连通河段、长期接纳大量生活污水的市区河段、曾接纳大量工业废水的半山工业区河段及两岸以农田为主的余杭县农村河段，不同河段的不同污染来源使运河底泥的成分差异很大。这就要求在选取具体处置方案时针对不同河段的养分特点分别选用直接投放、堆肥投放或卫生填埋等不同方案。

2.2　施用底泥对土壤肥力的影响

鸡冠花盆栽 90d 后底泥与水稻土混合土中有机质、全磷、Olsen-P、土壤呼吸强度等肥力指标状况见表 3。

表 3　鸡冠花种植后混合土的养分指标

Table 3　Nutrient contents of mixed soil with different sludge rates after planting cockscomb

底泥用量 Rate of sludge (t/hm^2)	有机质 O. M. (%)	全 P Total P (mg/kg)	有效 P Olsen-P (mg/kg)	呼吸强度 Respiratory intensity (CO_2 mg. $m^{-2}\cdot h^{-1}$)
0	3.63	633	39.9	236.1
270	3.56	669	58.3	248.3
540	3.44	778	90.9	275.0
810	3.24	824	89.1	292.0
1080	3.22	898	100.4	325.4
1350	3.09	969	102.5	353.0

对比表 1 和表 3 中的有机质含量可见，虽然所用的新鲜底泥中有机质含量高达 17.92%，经历了干化、过筛（2 mm）和盆栽后其含量迅速下降到了 3.28%，其分解速率如此之快可能是由于底泥的有机质主要来源是杭州市的生活废水，沉积到底泥中的有机质大部分是由极易腐烂的食物残渣等组成，加之长期在厌氧条件下的腐烂，一旦转为好氧条件则很快分解，同时释放出大量的活性 P 等养分。

表 3 还看出，土壤中全 P、Olsen-P 的含量随底泥用量的增加而增加，说明底泥能提供稳定、持久的土壤 P，这与 P 在土壤中的迁移性较小有关[12]。新鲜的底泥中的有效 P 含量仅为 89 mg/kg（表 1），但经历了风干、盆栽后，底泥中有效 P 含量却超过 100mg/kg 以上，可能是底泥中大量有机质分解的结果。

土壤呼吸强度是表征土壤中微生物活性的一个主要指标。从表 3 看出，土壤呼吸强度随底泥用量的增加，水稻土中土壤呼吸强度与底泥用量的相关系数为 0.985，说明土壤中添加底泥能提高了土壤微生物的活性。

2.3 疏浚底泥中重金属的含量特征

对运河(杭州段)的36个泥柱不同层位底泥的重金属含量及相关值见表4。与河床基地和两岸土壤的背景值相比,底泥中各重金属元素均有较多的积累,其中以Zn、Cu、Cd较高,这与运河长期接受生活和工业污水有关。与城市污泥相比,底泥中各重金属元素含量相对较低,且都低于农用污泥中污染物控制标准(GB4284-84),因而在利用时可以采取比污泥更大的投放量,以弥补其养分含量偏低的不足。谢正苗[13]等研究发现,Cd、Pb、Zn(氯化物)对土壤微生物显著影响的临界值分别为30、450、200 mg/kg,而污泥中重金属的毒性远小于相应的金属盐[14]。运河底泥中重金属的含量并未显著超过影响微生物活性的临界值,施入土壤后反而增加了大量的微生物营养源,总体上对微生物活性起到了促进作用。

表4 疏浚底泥中的重金属含量 (mg/kg)

Table 4 Contents of heavy metals in dredged sludge

元素 Element	疏浚底泥 Dredged sludge 范围 Range	均值 Mean	消化污泥 Digested sludge	未消化污泥 Undigested sludge	河床基底 Sediment Under sludge	两岸土壤背景值[15] Background soil value	污泥农用标准 Agricultural Application Standard pH≤6.5	pH>6.5
Zn	53~2823	561	722.9	1738.0	148.3	82.74	500	1000
Cu	17.3~607.2	110.2	356.9	88.8	37.82	26.47	250	500
Cd	0.06~5.77	1.15	5.50	1.26	0.63	0.301	5	20
Pb	22.9~174.6	75.3	587.7	61.6	39.94	32.12	300	1000
Hg	0.02~2.41	0.61	5.57	-	0.25	0.217	5	15
Cr	48~141	90.0	508.1	-	69.37	69.26	600	1000
As	4.53~35.98	15.71	20.63	-	10.05	7.86	75	75

2.4 重金属的形态

重金属的赋存形态是影响重金属的生物毒性及其在生态环境的迁移性的主要因素。在利用底泥时,有必要调查其重金属的赋存形态,以便更好地防止造成土地污染。表5看出,底泥中Zn主要以残渣态存在,其含量超过了底泥Zn总量的一半以上,其次是碳酸盐态和Fe/Mn氧化态;底泥中有机态Zn的含量并不高,说明在底泥中Zn并不易与有机质结合,这可能是因底泥有机质的组成比较特殊,腐殖质类物质含量较低引起的。Cu主要以有机态和残渣态形式存在,2种形态之和占总量的60%~90%,这可能与Cu易于形成难分解的有机配合物和硫化铜等难分解矿物的性质有关。由于Cu在氧化还原条件改变后其形态变化很小[16],而有机态Cu的生物毒性又很低[17],因此运河(杭州段)疏浚底泥中Cu对环境危害较小。Pb的有效态比例很低,有机态Pb低于总量的10%;Pb主要以残渣态和Fe/Mn氧化物态存在,这与乐安江底泥Pb的赋存形态特征差别很大(乐安江沉积物中残渣态Pb所占比例仅为12%[18]),这可能是运河疏浚底泥中存在较高的活性P,可以有效地将疏浚底泥中活性Pb转化为活性极低的氯磷铅矿等物质[19],而大大降低底泥中Pb对环境的危害。底泥中Cd主要以碳酸盐态和Fe/Mn氧化物态存在,残渣态Cd的含量和比例很低。说明底泥中Cd的活动性较强,容易发生再迁移过程,在利用底泥时要特别注意Cd对生态环境的影响。

表 5　疏浚底泥中重金属的形态特征

Table 5　Fractionation characteristic of heavy metals in dredged sludge

形态 Foms	可交换态 Exchangeable (mg/kg)	碳酸盐态 Carbonate (mg/kg)	Fe/Mn 氧化物态 Fe/Mn oxide (mg/kg)	有机态 Organic (mg/kg)	残渣态 Residual (mg/kg)
Zn 含量范围 Range	2.35～13.99	98.09～143.27	88.60～138.46	24.59～86.02	187.26～1030.52
均值 Mean	7.03	120.70	117.12	44.52	504.95
所占分数 Fraction	0.89	15.20	14.74	5.60	63.57
Cu 含量范围 Range	9.92～19.84	18.23～72.65	10.28～26.60	65.79～185.13	22.41～792.17
均值 Mean	12.97	48.99	14.95	123.20	306.56
所占分数 Fraction	2.56	9.67	2.95	24.32	60.50
Cd 含量范围 Range	0.06～0.16	0.30～1.16	0.34～1.36	0.01～0.85	0～0.50
均值 Mean	0.10	0.62	0.80	0.22	0.18
所占分数 Fraction	5.21	32.29	41.67	11.46	9.38
Pb 含量范围 Range	0～2.37	10.66～15.41	25.66～45.60	3.48～13.49	11.74～91.29
均值 Mean	0.90	12.69	34.22	6.71	40.71
所占分数 Fraction	0.95	13.33	35.93	7.05	42.75

2.5　疏浚底泥的生物毒性

由表 6 可知,随着底泥用量的增加,羊茅草、三叶草的发芽率下降,而芽高则随底泥用量的增加出现先升后降现象,说明未进行消化的底泥存在着抑制种子发芽的物质。试验发现,底泥的颗粒比土壤细,易发生板结,不利于土壤通风,所以底泥对种子发芽率的影响可能是使土壤过于致密而影响种子呼吸所致。种子发芽后的芽高等发芽势指标主要受土壤养分及有毒化学物质的影响,城市废弃物中常见的种子发芽抑制物质有重金属[20]、NH_4^+ 等盐离子、有毒有机化合物及低分子有机酸等[21]。运河底泥中含有较高的重金属及易矿化的有机质,推测底泥中的发芽抑制物质可能是有机质矿化过程中产生的低分子有机酸及 Zn^{2+} Cu^{2+}、Cd^{2+} 等重金属离子。

表 6　疏浚底泥对种子发芽的影响

Table 6　Effect on germination indices of dredged sludge

底泥用量 Sludge rate (t/hm^2)	青菜 Pakchoi		羊茅草 Alpine fescue		三叶草 Clover	
	发芽率 GR (%)	芽高 HS (cm)	发芽率 GR (%)	芽高 HS (cm)	发芽率 GR (%)	芽高 HS (cm)
0	57.3±5.2	2.1±0.5	66.7±3.1	4.7±0.7	88.7±1.2	3.1±0.4
270	72.7±1.5	2.5±0.5	61.3±2.5	5.3±0.9	88.0±1.8	3.3±0.4
540	72.0±1.5	2.4±0.4	67.3±2.0	5.3±0.9	82.7±2.5	3.4±0.3
810	74.3±2.1	2.9±0.2	68.4±1.4	4.5±0.4	81.3±2.6	3.5±0.5
1080	77.3±2.3	2.8±0.7	71.1±2.2	3.1±0.6	80.0±1.5	3.2±0.4
1350	78.7±2.3	2.8±0.4	64.0±4.4	3.4±0.6	79.3±2.0	3.2±0.4

注:GR 为发芽率,统计量为 6;HS 为芽高,统计量为 86～133.

Note: GR means germination rate, the statistic number of is 6; HS means height of sprout, the statistic number of is 86～133.

对比青菜、羊茅草和三叶草种子的发芽受抑制程度可以看出,3种种子对底泥用量的反应不同。在施用底泥的情况下,青菜种子的发芽率有较大的增加;三叶草种子发芽率略有下降,最大下降达22.2%;羊茅草的发芽率变化没有一定规律。说明不同种子对疏浚底泥中抑制发芽物质的抗性差异较大。莫测辉等人[22]在研究广州、深圳、佛山等地城市污泥对作物种子发芽率的影响时发现,不同作物种子在污泥中发芽率变化很大。对于大多数污泥,通菜种子表现出发芽受抑制,而同样的污泥对菜心种子的发芽则大多具有促进作用。Roe[23]在研究各类城市固体废物堆肥对西红柿、辣椒和黄瓜发芽率的影响时也发现类似结果。另外在光照充足、温度适宜、水分充足的外界条件影响下,种子的活性会大大增加,也能克服底泥中抑制发芽的物质的影响。因此在底泥直接应用时选择适宜的作物,既可充分利用底泥肥效,又能较大程度地降低底泥的生态危害,从而降低底泥的处置费用。

3 结论

3.1 作为一种特殊的城市固体废弃物,疏浚底泥具有较高的养分含量,但其含量并不平衡。其中有机质、P、K的含量较高,N的含量相对偏低,在应用中需结合其他肥料使用。底泥施入土壤后有机质较易分解,而P的供应持久性强。

3.2 疏浚底泥中重金属的含量较一般城市污泥低,且低于污泥农用中污染物控制标准,可以直接进行农田投放以节约处置费用。底泥中重金属的有效态含量都很低,相对活性顺序为Cd >Cu >Pb >Zn。

3.3 疏浚底泥在直接大量施入土壤后会对植物种子的发芽产生一定的毒害,但不同植物种子对底泥毒害作用的反应差别很大,实际应用时应选取合适的植物类型以降低其毒害作用。

参考文献:

[1] 周立祥,等. 城市污泥土地利用研究[J]. 生态学报,1999,19(2):185-193.

[2] Cripps R W, Winfree S K, Reagan J L. Effects of sewage sludge application method on corn production[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1992, 23(15&16): 1705-1715.

[3] McGrath S P *et al*. Land application of sewage sludge: scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and the United States[J]. Environ. Rev., 1994, 2: 108-118.

[4] Korentajer L. A review of the agricultural use of sewage sludge: benefits and potential hazards[J]. Water, 1991, 17(3): 189-196.

[5] Lutrick M C *et al*. Soil and slash pine response to sludge application in Florida[J]. Soil Sci. Soc. Am J., 1986, 50(2): 447-451.

[6] 周立祥,胡霭堂,胡忠明. 厌氧消化污泥化学组成及其环境化学性质[J]. 植物营养与肥料学报, 1997,3(2):176-181.

[7] de Miguel E *et al*. The overlooked contribution of compost application to the trace element load in the urban soil of Madrid (Spain) [J]. Sci. Total Environ., 1998, 215: 113-122.

[8] Moolenaar S W, Beltrami P. Heavy metal balances of an Italian soil as affected by sewage sludge and bordeaux mixture applications[J]. J. Environ. Qual., 1998, 27:828-835.

[9] Wang P X *et al*. Fractions and availability of nickel in loessial soil amended with sewage or sewage sludge[J]. J. Environ. Qual., 1997, 26: 795-801.

[10] Richards B K *et al*. Metal mobility at an old, heavily loaded sludge application site[J]. Environ. Pollut.,1998, 99:365-361.

[11] Holm P E *et al* Measured soil water concentrations of cadmium and zinc in plant pots and estimated leaching outflows from

contaminated soils[J]. Water, Air & soil Pollut., 1998, 102: 105-115.

[12] Eghball B *et al*. Diffusion adsorption and predicted longevity of banded phosphorus fertilizer in three soils[J]. Soil Sci. Soc. Am J., 1990, 54: 1161-1165.

[13] 谢正苗, 等. 镉铅锌污染对红壤中微生物生物量碳氮磷的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 69-74.

[14] Knight B P *et al*. Determination of chemical availability of cadmium and zinc in soils using inert soil moisture samplers [J]. Environ. Pollut., 1998,99: 293.

[15] 运河(杭州段)课题协作组,浙江省环境保护科学研究所. 运河(杭州段)污染综合防治技术研究[R]. 1985.

[16] Fernandes H M. Heavy metal distribution in sediments and ecological risk assessment: the role of diagenetic processes in reducing metal toxicity in bottom sediments[J]. Environ. Pollut., 1997, 97(3): 317-325.

[17] Kunito T *et al*. Influences of copper forms on the toxicity to microorganisms in soils[J]. Ecotoxicol. and Environ. Safety, 1999, 44: 174-181.

[18] 刘文新,栾兆坤,汤鸿霄. 乐安江沉积物中金属污染的潜在生态风险评价[J]. 生态学报,1999,19(2): 206-211.

[19] Ruby M V *et al*. In situ formation of lead phosphates in soils as a method to immobilize lead[J]. Environ. Sci. Technol., 1994, 28(4): 646-654.

[20] Chugh L K, Sawhney S K. Effect of cadmium on germination, amylases and rate of respiration of germinating pea seeds [J]. Environ. Pollut., 1996, 92(1): 1-5.

[21] Carcía C *et al*. Phytotoxicity due to the agricultural use of urban wastes. Germination experiments[J]. J. Sci. Food Agric., 1992, 59: 313-319.

[22] 莫测辉,等. 城市污泥对作物种子发芽及幼苗生长的初步研究[J]. 应用生态学报,1997, 8(6): 645-649.

[23] Roe N E *et al*. Composts from various municipal solid waste feedstocks affect vegetable crops. I. Emergence and seedling growth[J]. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 1997, 122(3): 427-432.

Characteristic of nutrients and polluting chemistry in dredged sludge

ZHU Guang-wei[1], CHEN Ying-xu[1], ZHOU Gen-di[2], WANG Feng-ping[1]

(1 Dept. of Environ. Eng., Zhejiang Univ., Hangzhou 310029, China;

2 Institute of Envir. Protection Sci. of Hangzhou, Hangzhou 310005, China)

Abstract: Characteristic of nutrients and polluting chemistry of dredged sludge from the Grand Canal were studied. The result showed that the contents of nutrients were high in dredged sludge, but it was unbalance. Contents of organic matter, phosphorus and potassium were high in dredged sludge, while that of nitrogen was low. Decompose of organic matter was rapid when the dredged sludge applied to soil, while available phosphorus providing was permanent. Contents of heavy metals in dredged sludge were significantly lower than sewage sludge and most of them lower than Agricultural Application Standard, so it is more economical to apply dredged sludge to land directly. The available heavy metals in dredged sludge were low, relative active order was: Cd > Cu > Pb > Zn. Dredged sludge have harmful effect on seed germination when applied to soil by large amount, while the reaction of different kind of seed was significantly different. It could be conclude that dredged sludge can be used as fertilizer or amendment to reclaim land when the species of plant and application rate are properly selected.

Key words: dredged sludge; nutrient; pollutant