

官厅水库坝前疏浚底泥的理化特征和土地利用研究

苏德纯¹, 胡育峰¹, 宋崇渭¹, 吴飞龙¹, 刘培斌²

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2. 北京市水利科学研究所, 北京 100044)

摘要: 用环保疏浚船抽取官厅水库坝前表层底泥, 在田间脱水池进行自然脱水, 研究脱水后底泥的理化性质和污染物特征, 底泥无害化处理方式和处理后底泥的土地利用效果. 结果表明, 官厅水库坝前疏浚底泥中黏粒含量高, 容重高达 $1.89 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 孔隙度只有 23.8%, 干后龟裂且非常坚硬, 植物不能在上面生长. 底泥中含有大量的还原性物质和速效性氮、磷, 但重金属和有机氯农药含量均低于二级土壤环境质量标准. 通过加入砂性土壤和作物秸秆等材料可以降低底泥容重和还原性物质含量, 提高底泥的孔隙度并固持底泥中的速效性氮、磷. 经过处理后的底泥可以成为良好的植物生长介质, 玉米、苜蓿和杏树苗在上面生长良好.

关键词: 官厅水库; 底泥; 土地利用

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)06-1319-05

Physicochemical Properties of Guanting Reservoir Sediment and Its Land Application

SU De-chun¹, HU Yu-feng¹, SONG Chong-wei¹, WU Fei-long¹, LIU Pei-bin²

(1. College of Resources & Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. Institute of Beijing Hydraulic Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Surface sediment of Guanting Reservoir was dredged up and dewatered in field, and pollutant and physicochemical characterizations were mensurated. The stabilization and agricultural land use of the sediment was also studied in the field. Results showed that the sediments have a higher clay content, bulk density ($1.89 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) and lower porosity (23.8%), higher deoxidize material and available nitrogen, phosphorus concentration. Heavy metal and organochlorinated pesticides concentration was lower than the class II of national standard for soil. Stabilized the sediment with sand soil and straw could improve the physical property and decrease the concentration of deoxidize material and available nitrogen, phosphorus. Stabilized sediment could be a suitable medium for alfalfa, tree and corn growth and used for agricultural land.

Key words: Guanting Reservoir; sediment; land application

官厅水库位于北京市西北的永定河上游, 是北京重要的水源地之一. 入库水系主要有洋河、桑干河和妫水河, 流域面积约 $4.34 \times 10^4 \text{ km}^2$, 进入 20 世纪 80 年代中期, 由于库区及其上游人类活动强度的逐步加大和气候变化的影响, 地表水入库径流量逐年减少, 水质日趋恶化, 1997 年被迫退出生活饮用水源^[1,2]. 随着首都经济和社会的快速发展, 水资源的供需矛盾越来越突出, 恢复官厅水库饮用水源水功能, 是缓解首都水资源严重短缺的重要措施之一, 为了达到上述预期的目标, 必须彻底改善官厅水库的水质^[3]. 在控制外来污染源之后, 影响水库水质的一个重要因素就是底泥释放所产生的二次污染^[4,5]. 如果不对底泥进行处置, 单纯地净化上覆水无法达到治理水库污染的目的^[6]. 目前官厅水库泥沙淤积已达 $6.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 达到水库设计泥沙淤积总量的 50% 以上. 水库水体中一些污染物跨过底泥-水体界面向下沉降并被底泥吸附, 底泥中的部分污染物成分也可解吸后向水体释放或再悬浮, 这种相互动态过程

直接影响库区水质, 对像官厅水库这样的浅水水库影响更为明显^[7,8]. 水库环境清淤是延长水库寿命, 减少环境污染和提高水库水质的重要措施^[9]. 疏浚底泥具有量大并含有各种有益和有害成分等特性, 如果把疏浚的底泥单纯堆置, 一方面会占用大量土地, 另一方面还会由于雨水的冲刷而对周围水体产生二次污染^[10], 另外底泥中有益成分也不能得到充分利用, 浪费了资源. 所以, 对水库疏浚底泥进行无害化处理和资源化利用, 是解决底泥问题出路的重要措施之一. 疏浚底泥的农业土地利用是一种经济环保的底泥处置方式, 以往疏浚底泥和污水处理厂污泥的土地利用中, 核心是依据农用污泥的国家标准控制其中的污染物含量和土地的负荷量^[11,12]. 官厅水库疏浚底泥量大、含水量高, 土地利用中底泥的运输是其土地利用的首要制约因素, 通过提高土地

收稿日期: 2006-07-21; 修订日期: 2006-09-27

基金项目: 北京市重大科技项目(H020620300430-1)

作者简介: 苏德纯(1962~), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为污染环境的修复, E-mail: dcsu@cau.edu.cn

底泥负荷量,或在库边农地对疏浚底泥直接脱水后农用是解决此问题的有效方法之一.但底泥使用量很大时,土地表层全部被处理后的底泥所覆盖,这种情况下底泥的理化特征和污染物均会成为底泥农用的限制因素^[13].本实验通过研究官厅水库坝前疏浚底泥的理化特征和污染物特征,找出疏浚底泥大量用于土地时的限制因子,然后通过田间试验,对疏浚底泥进行不同的无害化处理,并在不同处理后的底泥上进行不同的农业资源化利用,研究不同无害化处理和资源化利用的效果,探讨官厅水库疏浚底泥经济高效的土地利用方式.

1 材料与方法

1.1 官厅水库坝前底泥的疏浚、脱水和基本特征研究

底泥疏浚位置位于官厅水库坝前右侧,底泥用上海佛欣爱建河道治理有限公司生产的环保疏浚清淤船进行抽取,然后经过 2 级泵把泥浆输送到右岸的脱水池.脱水池总面积 1 500 m²,均匀分为 5 个面积为 300 m² 的脱水池.脱水池用地原为苗圃用地,每个脱水池四周筑起 1 m 高的土埂,土埂用塑料薄膜做防侧渗处理.环保清淤船抽取的是坝前库底 0 ~ 20 cm 层的底泥,泥浆抽取输送到脱水池后进行自然脱水,经过多次连续抽取脱水后,使每个脱水池中底泥厚度达到 20 cm.对自然脱水后的底泥进行采样,分析其理化特性和污染物特征.理化性质分析采样深度为 20 cm,采多点混合样,容重样每个脱水池采 3 个.样品分析依据文献[14]中的土壤分析方法进行.底泥中有机氯农药和重金属检测由北京谱尼理化分析测试中心完成.

1.2 疏浚底泥的无害化处理

根据疏浚底泥物理化学性质和污染物特征,采用如下 4 种底泥无害化处理方案处理脱水底泥,处理⑤为底泥不做任何处理的对照.

4 个底泥处理方案分别为(括号内数字为底泥和处理材料的体积比):

- ①底泥 + 砂质土壤(1:2)
 - ②底泥 + 秸秆 + 砂质土壤(1:0.13:2)
 - ③底泥 + 秸秆 + 石灰 + 砂质土壤(1:0.13:0.005:2)
 - ④底泥 + 秸秆 + 石灰 + 草炭 + 砂质土壤(1:0.13:0.005:0.06:2)
 - ⑤底泥自然堆放(对照)
- 处理材料加入量的依据是底泥的理化性质、处

理后要达到植物生长要求的孔隙度范围和田间处理前盆栽模拟实验结果.每种处理方式在 1 个脱水池中进行.处理中用的砂质土壤取自脱水池周围的苗圃地,土壤的基本性质:pH 8.3,有机质 3.23 g·kg⁻¹,全氮 0.27 g·kg⁻¹,Olsen-P 27.9 mg·kg⁻¹,物理性砂粒(2 ~ 0.02 mm)71%,物理性黏粒(< 0.02 mm)29%.秸秆为粉碎的当地玉米秸秆,草炭为产于辽宁锦州不添加任何肥料的商品草炭.在自然脱水后的糕状底泥未干之前,于 2004-07 按上述的 5 个处理方案分别对 5 个脱水池中底泥加入相应比例的处理材料,然后充分旋耕混合均匀.组成了 5 个田间小区,每个小区面积 300 m²,2004-10 分别对各小区处理后的底泥进行采样,化学性质分析采用混合样,每个小区采 15 个点组成 1 个混合样.容重样每个小区采 3 个,分析方法同上.

1.3 不同无害化处理后底泥的土地利用

经过 4 种方式处理后的底泥均成为了质地疏松的人工土壤,没有处理的底泥(处理 5)则变得非常坚硬,表面出现龟裂裂纹.在底泥经过处理后的每个小区(处理方案 1 ~ 4)按面积再分别分成 3 个小区,每个小区面积 100 m²,分别播种苜蓿(2004-09)、杏核(2004-11)和玉米(2005-04).于 2005-05 在每个苜蓿小区内划出 1 m² 样方 3 个,收获地上部计产,每个杏苗小区选出 3 个 1 m 样段,测量各小区杏苗平均株高.2005-10 收获各小区玉米计产.评价不同处理底泥上 3 种资源化利用方式的效果.没有处理的底泥植物不能生长,作为对照区.为了了解底泥中养分对资源化利用中植物生长的贡献,在处理方案 3 和处理方案 4 小区周围分别用处理底泥同样的砂质土壤做成 50 m² 小区,小区中加入的秸秆、石灰和草炭的比例和处理方案 3、4 完全相同,种植玉米、苜蓿和杏苗方式及管理也完全相同,只是没有底泥,处理编号分别为 3-ck 和 4-ck.

2 结果与讨论

2.1 官厅水库坝前疏浚底泥的基本特性

疏浚船抽取的泥浆含水量高达 95%,呈黑色.自然脱水后成为黑色的糕状体,此时底泥含水量为 68%左右.表 1 为官厅水库坝前疏浚底泥的基本物理性质,从表 1 自然堆放条件下底泥的容重、比重和孔隙度结果可以看出,自然脱水后的底泥质地非常紧实,容重高达 1.89 g·cm⁻³,孔隙度只有 23.8%.适合植物良好生长的土壤孔隙度范围一般为 55% ~ 65%^[15].孔隙度低的土壤非常紧实坚硬,影响植物

根系的生长和呼吸.因此,如果不对疏浚底泥进行质地调节,就不能成为植物生长的介质,影响其大量用于土地.

表 1 官厅水库疏浚底泥的物理性质

Table 1 Physical properties of Guanting Reservoir sediment				
样品	容重 /g·cm ⁻³	密度 /g·cm ⁻³	孔隙度 /%	含水量 /%
底泥	1.89	2.48	23.8	68.2

表 2 官厅水库疏浚底泥颗粒粒径分析结果

Table 2 Particle size fraction of Guanting Reservoir sediment					
样品	各级颗粒含量/%				
	2~0.25 mm	0.25~0.05 mm	0.05~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm
底泥	9.79	22.03	17.36	23.92	26.90

表 3 是官厅水库疏浚底泥的基本化学性质.从表 3 可以看出,底泥中有机质含量为 21.3 g·kg⁻¹,高出周围的农田土壤,总氮、总磷含量也都较周围农田高,和当地肥沃的菜园土壤相当.由于底泥长期处在水体底部的还原状态下,黑色的底泥并不是由于其有机质含量高,而是由于底泥中含有大量的还原性物质所致,底泥中还原性物质总量高达 5.81 cmol·kg⁻¹.大量的还原性物质会对植物根系产生毒害作用,影响植物根系的呼吸和正常代谢,因此,要使底泥成为植物生长的介质,需要去除底泥中的还原性物质.另外,虽然底泥中有机质、全氮、全磷含量作为农用土壤来说都不是很高,但底泥中速效氮、磷含量较高.由于底泥长期处于水下还原状态,底泥中的无机氮主要以氨态氮形式存在,氨态氮含量高达 19.5 mg·kg⁻¹,而硝态氮则检测不到.为减少其对水库水体的潜在影响,固持底泥中的速效氮、磷也是底泥处置中的 1 个重要方面.从表 4 底泥中 As、Hg、Pb、Cr、Cd、Cu 重金属含量看,均未超过国家土壤环境质量二级标准(GB 15618-1995),这是由于表层底泥是近几年沉积的,而近年来对水库上游污染源的治理,重金属排放显著减少,因而疏浚出的表层底泥中重金属含量较低.李翠等^[16]研究结果也表明,官厅水库底泥中磷含量在 35 cm 层中含量远高于表层

从表 2 水库疏浚底泥的颗粒分析结果可以看出,底泥中 <0.002 mm 的黏粒含量为 26.9%,0.05~0.002 mm 的粉粒含量为 41.3%,黏粒和粉粒含量之和高达 68.2%,而 >0.05 mm 的砂粒含量只有 31.8%.颗粒细是底泥容重高、孔隙度小的直接原因.另外,脱水后堆放的底泥中几乎没有结构体,这也是堆放底泥非常致密坚硬的原因.因此,要使底泥成为植物生长的介质,需要对底泥进行质地调节,增加底泥中砂粒含量和土壤结构体.

底泥.对表层疏浚底泥中有机氯农药六六六 4 种异构体总量和 DDT 4 种衍生物总量检测结果表明,其含量均低于土壤环境质量二级标准的允许值 0.05 mg·kg⁻¹.黄圣彪等^[17]研究结果也表明,官厅水库底泥中有机氯农药含量高的是在 20~50 cm 层中.因此,对疏浚出的不同层底泥要根据其污染特征进行不同的处理.从表 3 中还可以看出,虽然底泥中总铜含量不高,但可提取态铜(DTPA-Cu)占到总铜的 50%以上.另外,如果底泥土地利用是在水库周围,对饮用水源地周围土壤应达到一级土壤质量标准^[15],而疏浚底泥直接堆放时重金属 Cd、Hg、Pb 含量均超过了一级土壤质量标准的允许值.综上所述,虽然官厅水库过去经历了几个污染比较严重的阶段,但由于近几年上游污染源的治理效果明显,因而坝前表层底泥重金属和有机氯农药污染并不明显,影响水质的主要是底泥中的总氮和总磷.疏浚出的表层底泥土地利用的限制因子主要是质地太细和大量的还原性物质,当底泥土地利用量很大甚至土壤表层全部是底泥时,首先应满足植物生长的基本要求.因此,要使疏浚出的水库底泥能成为适合植物生长的介质且不对水库水体构成潜在污染,需要对底泥进行质地调节、去除还原性物质并固持底泥中的速效氮、磷.

表 3 官厅水库疏浚底泥的化学性质

Table 3 Chemical properties of Guanting Reservoir sediment								
样品	pH (2.5:1)	有机质 /g•kg ⁻¹	TP /g•kg ⁻¹	Olsen-P /mg•kg ⁻¹	TN /g•kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg•kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg•kg ⁻¹	还原性物质总量 /cmol•kg ⁻¹
底泥	8.08	21.3	0.841	32.6	1.20	19.5	低于检测限	5.81

表 4 官厅水库疏浚底泥中重金属含量

Table 4 Heavy metal concentration of Guanting Reservoir sediment

元素	As	Hg	Pb	Cd	Cr	Cu	DTPA-Cu	DTPA-Pb	DTPA-Cd
含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	14.0	0.24	35.4	0.54	47.1	23.2	12.1	4.8	0.05

2.2 官厅水库坝前疏浚底泥的无害化处理

针对官厅水库坝前疏浚底泥土地利用的限制因素是容重高、孔隙度低,有大量还原性物质和含有较高的速效态氮、磷和铜的特点.对初步脱水的疏浚底泥进行 4 种无害化处理田间试验,详细处理方案见 1.2 节.底泥中加入砂质土壤的目的是调节底泥质地,增加砂粒比例,从而提高孔隙度.孔隙度的提高能增加底泥的通气性,从而使底泥中还原性物质被氧化,降低底泥中还原性物质的含量.底泥中加入秸秆的目的是提高底泥的 C/N,固持底泥中的无机氮,减少底泥中无机氮对周围水体的潜在影响.另外,加入粉碎的秸秆也能提高底泥的孔隙度.底泥中加入石灰的目的是通过形成难溶性的化合物来钝化底泥中速效性磷和重金属^[18],加入草炭的目的一方面吸附可提取态铜,同时也可以提高底泥的 C/N,固持底泥中的无机氮.

表 5 是经过 4 种无害化方式处理后底泥的基本物理性质.从表 5 可以看出,与没有经过处理直接堆放的底泥相比(表 1),经过处理后底泥的容重均明显降低,降低幅度为 29% ~ 42%.孔隙度均增加到了植物生长要求的 50% 以上,与没有经过处理的底泥相比,孔隙度增加了 114% ~ 149%.由于加入了砂质土壤,底泥的密度提高了 8% ~ 11%,4 种无害化处理后的底泥之间容重和孔隙度差异不大.当底泥土地利用量较小时,底泥不会成为影响土壤质地的关键因素.但当底泥土地利用量很大甚至土壤表层全部被底泥覆盖时,底泥的质地是否适合植物生长则成了底泥土地利用的关键因素之一.

表 6 为经过 4 种无害化处理后底泥的基本化学性质,从表 6 可以看出,经过 4 种无害化处理后,底

表 5 官厅水库疏浚底泥不同无害化处理后物理性质的变化

Table 5 Physical properties of Guanting Reservoir sediment after various treatments

处理 方案	容重 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	孔隙度 $/\%$
①	1.13 ± 0.09	2.68 ± 0.03	57.6
②	1.19 ± 0.10	2.74 ± 0.02	56.5
③	1.35 ± 0.03	2.76 ± 0.06	51.0
④	1.09 ± 0.02	2.69 ± 0.05	59.3

泥的有机质、全氮含量均明显下降,各处理之间差异不明显.处理后底泥有机质含量范围为 4.6 ~ 7.2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量范围为 0.36 ~ 0.45 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别为处理前 21.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 30% 左右.由于经过 4 种处理后底泥的容重和孔隙度明显增加,底泥中的还原性物质和氨态氮被氧化,还原性物质总量下降到 1.5 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,为处理前 5.81 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 25%.处理后底泥氨氮含量均小于 0.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,仅为处理前 19.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 2% 左右.硝态氮含量虽然有所增加,但均小于 0.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.各处理无机氮总量处于很低水平.底泥经过处理后 DTPA 提取的铜含量均降到了 3.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,和处理前的 12.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 相比下降明显. DTPA 提取的铜含量下降,表明底泥中铜的生物有效性下降^[19].由于处理底泥的砂质土壤施过磷肥,土壤 Olsen-P 含量较高,因而经过方案①和②处理后的底泥 Olsen-P 含量变化不大,处理方案③和④由于处理材料中有碱性材料石灰,因而方案③和④处理后的底泥中 Olsen-P 含量下降明显.磷是水体富营养化的关键因子,底泥有效磷含量降低则表明其对周围水体的潜在影响降低^[20].

表 6 官厅水库疏浚底泥不同无害化处理后化学性质的变化

Table 6 Chemical properties of Guanting Reservoir sediment after various treatments

处理 方案	有机质 $/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	TN $/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Olsen-P $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$ $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	DTPA-Cu $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	还原性物质总量 $/\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$
①	5.58	0.429	36.5	0.33	0.37	3.35	1.47
②	4.59	0.451	33.8	0.28	0.47	3.08	1.40
③	4.98	0.365	21.9	0.20	0.35	2.34	1.56
④	7.18	0.384	22.7	0.22	0.59	2.50	1.22

2.3 不同无害化处理后底泥的土地利用效果

表 7 是官厅水库坝前疏浚底泥经过不同无害化

处理后分别种植牧草、玉米和树苗后各自的产量或生长状况.试验结果表明,底泥经过4种无害化处理后均能成为植物生长的良好介质,上面种植的苜蓿、玉米和杏树苗均能良好生长.2005-05春季第1次收获苜蓿的产量达到 $2.5\sim 3.6\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,秋天玉米产量达到 $5\sim 6.6\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,杏苗株高当年也均达到60 cm以上.比较和处理方案③、④完全相同但没有底泥的处理3-ck和4-ck上苜蓿、玉米和杏树苗的生长状况可以看出,有底泥的处理玉米产量和杏苗的株高均明显高于没有底泥的处理,而苜蓿的产量则差异不明显.这表明水库疏浚底泥中的有机质、养分对植物生长起到了促进作用,底泥对苜蓿生长影响不明显的原因是由于苜蓿耐贫瘠且本身能够固氮,因而对底泥中养分不敏感.综合底泥不同无害化处理的效果,处理后不同植物的生长状况和处理材料的成本,底泥加入砂质土壤和粉碎的玉米秸秆(处理方案②)是经济有效的底泥处理方式.处理后的底泥可以成为良好的植物生长介质并进行土地利用.这种处理方式进行土地利用时,土地的底泥负荷很高,适合污染程度较轻但量很大的水库疏浚底泥的无害化处理和资源化利用.

表7 官厅水库疏浚底泥不同无害化处理后种植植物的生长状况
Table 7 Plant growth on Guanting Reservoir sediment after various treatments

处理方案	苜蓿产量 / $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	玉米产量 / $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	杏树苗株高 /cm
①	3.60 ± 0.16	6.63 ± 0.9	70 ± 7.6
②	3.59 ± 0.58	5.71 ± 1.2	67 ± 0.4
③	2.81 ± 0.24	5.04 ± 1.3	64 ± 8.2
3-ck	2.96 ± 0.14	4.67 ± 0.7	42 ± 5.8
④	2.53 ± 0.21	5.87 ± 0.7	68 ± 6.9
4-ck	2.79 ± 0.16	5.01 ± 1.1	40 ± 3.1

3 结论

- (1)官厅水库坝前疏浚表层底泥黏粒含量高,颗粒细是底泥容重高、孔隙度小的直接原因.底泥中含有高量的还原性物质和速效氮、磷,重金属和有机氯农药含量低于国家土壤二级环境质量标准.
- (2)疏浚底泥经过加入砂质土壤、玉米秸秆处理材料后容重降低,孔隙度提高到50%以上,成为了适合植物生长的介质.经过处理后底泥中的速效性氮、磷和还原性物质下降了70%以上,去除了有害物质,减少了对周围水体的潜在污染.
- (3)在经过处理后的疏浚底泥上种植的苜蓿、玉米和杏树生长良好,并能获得较高的产量.

参考文献:

[1] 刘培斌,张凤君,孟庆义,等.官厅水库底泥污染物的分布与释放预测研究[J].云南地理环境研究,2002,14(2):61~64.

[2] 胡治飞,张振兴,郭怀成,等.北京市官厅水库水质预报系统[J].中国环境科学,2001,21(3):274~278.

[3] 梁涛,王浩,丁士明,等.官厅水库近三十年的水质演变时序特征[J].地理科学进展,2003,22(1):38~44.

[4] 陈华林,陈英旭.污染底泥修复技术进展[J].农业环境保护,2002,21(2):179~182.

[5] 李文红,陈英旭,孙建平.不同溶解氧水平对控制底泥向上覆水体释放污染物的影响研究[J].农业环境科学学报,2003,22(2):170~173.

[6] Carpenter B, Haltmeier R, Wilde C. Dredged sediments disposal[J]. Wat Environ Tech, 1997, 9(11): 47~50.

[7] 马登军,张凤娥,高云霞,等.官厅水库富营养化的评价[J].中国环境监测,2002,18(1):41~44.

[8] 孙青,黄怀曾,何红蓼,等.北京官厅水库沉积物-水界面磷的分布和迁移特征[J].矿物岩石地球化学通报,2003,22(2):137~139.

[9] Kim L H, Euiso C, Michael K, Stenstrom. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments[J]. Chemosphere, 2003, 50: 53~61.

[10] 秦峰,陈善平,吴志超.苏州河疏浚污泥作填埋场封场覆土的实验研究[J].上海环境科学,2002,21(3):163~167.

[11] 朱广伟,陈英旭,周根娣.疏浚底泥的养分特征及污染化学性质研究[J].植物营养与肥科学报,2001,7(3):311~317.

[12] 朱本岳,朱荫渭.西湖底泥加工复合肥的研究[J].农业环境保护,2001,20(3):175~176.

[13] Logen T J, Harrison B J. Physical characteristics of alkaline stabilized sewage sludge (N-Viro soil) and their effects on soil physical properties[J]. J Environ Qual, 1995, 24: 153~164.

[14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.106~282.

[15] 陈怀满.环境土壤学[M].北京:科学出版社,2005.84~87.

[16] 李翠,袁红莉,黄怀曾.官厅水库沉积物中解磷细菌垂直分布特征[J].中国科学(D辑)地球科学,2005,35(增刊I):241~248.

[17] 黄圣彪,王子健,康跃惠,等.官厅水库沉积物柱状样中有机氯农药的垂直分布特征[J].环境科学研究,2004,17(6):19~21.

[18] Su D C, Wong J W C. The growth of corn seedling in alkaline coal fly ash stabilized sewage sludge[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2002, 133:1~13.

[19] Su D C, Wong J W C. Chemical speciation and phytoavailability of Zn, Cu, Ni and Cd in soil amended with fly ash-stabilized sewage sludge[J]. Environmental International, 2003, 29: 895~900.

[20] Wauer G, Gonsiorczyk T, Kretschmer K, et al. Sediment treatment with a nitrate storing compound to reduce phosphorus release[J]. Water Research, 2005, 39(3):494~500.