



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.017

王文江, 刘宏, 吴燕. 不同氧化预处理对疏浚底泥干燥特性的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 106-110, 136. WANG Weir jiang, LIU Hong, WU Yan. Effect of different oxidation pre treatment on the drying characteristics of dredged sediment[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 106-110, 136. (in Chinese)

# 不同氧化预处理对疏浚底泥干燥特性的影响

王文江, 刘宏, 吴燕

(天津科技大学 化工与材料学院, 天津 300457)

**摘要:** 为探究臭氧和 Fenton 试剂氧化预处理对疏浚底泥干燥特性的影响, 分别在疏浚底泥中通入臭氧和添加 Fenton 试剂进行预处理, 并进行红外干燥试验。结果表明, 臭氧预处理对疏浚底泥红外干燥过程中水分蒸发有促进作用; 随着温度的升高, 臭氧预处理对水分蒸发的促进作用逐渐增强, 最大干燥速率明显增大, 提高了约 9% ~ 36%, 且恒速干燥阶段时间较长, 是未预处理的 1.2~ 1.7 倍, 干燥速率的快速上升和下降却随着温度的升高而加快。Fenton 氧化预处理对促进干燥过程中水分蒸发的作用效果并不明显, 却可以明显增大干燥速率, 且干基含水率越高, 最大干燥速率越大。比较底泥预处理前后微观形貌, 发现不同氧化预处理后底泥颗粒分布均匀, 有利于水分蒸发。

**关键词:** 疏浚底泥; 氧化; 干燥特性; 微观结构

**中图分类号:** X705   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0106-05

## Effect of different oxidation pre treatment on the drying characteristics of dredged sediment

WANG Weir jiang, LIU Hong, WU Yan

(School of Chemical Engineering and Materials, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** This work investigated the influence of oxidation pretreatment on drying characteristics of dredged sediment, and the oxidants included ozone and Fenton's reagent. The drying experiment was carried out using an infrared constant temperature drying oven. The results showed that pretreatment with ozone could obviously promote the infrared drying behavior of dredged sediment and its facilitation on water evaporation was gradually strengthened with the rise of temperature, and the maximum drying rate was improved significantly by over 9% ~ 36%. Moreover, the constant drying phase was held for a relatively long time, which was 1.2~ 1.7 times that of without pretreatment. The rising and falling variation of the drying rate was obvious with the rise of temperature. Fenton's reagent was applied to treat the sediment resulting in the increase of the drying rate, but it was not obviously useful to water evaporation. The maximum drying rate increased with the increase of dry basis moisture content. Electron microscope scanning results indicated that the sediment particles were distributed evenly after oxidation pretreatment, which was beneficial to evaporation.

**Key words:** dredged sediment; oxidation; drying characteristics; microstructure

“十二五”期间, 长三角、珠三角、环渤海地区以及西南沿海地区的疏浚工程量各约 5~ 10 亿 m<sup>3</sup>, 国内疏浚市场保持平稳发展的趋势<sup>[1]</sup>。目前, 国内疏

浚底泥脱水工艺仍以堆场自然沉降为主。但是底泥的高有机质含量、高胞外聚合物(EPS)含量、强保水性使得传统脱水干化工艺的处理效果并不明显<sup>[2-5]</sup>,

收稿日期: 2015-12-17    修回日期: 2016-03-02    网络出版时间: 2016-08-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160819.0925.004.html>

作者简介: 王文江(1990), 男, 河北张家口人, 主要从事疏浚底泥脱水及资源化利用方面研究。E-mail: 13821146244@163.com

通讯作者: 吴燕(1976), 女, 湖南岳阳人, 教授, 主要从事污染控制化学方面研究。E-mail: wuyan@tust.edu.cn.

需要在脱水工艺前加入调质工艺<sup>[6]</sup>。

Fenton 试剂因能完全将污染物转化为环境友好的水、二氧化碳和无机盐等,因此在生活污水和特种废水处理中得到深入研究<sup>[7-9]</sup>,并被应用于污泥处理<sup>[10-13]</sup>。臭氧氧化技术近年来广泛应用于对印染废水的色度和难降解有机物的去除<sup>[14]</sup>。另外,有研究表明<sup>[15-17]</sup>,臭氧氧化处理污泥的减量化效果明显。尽管臭氧制备成本较高<sup>[18]</sup>,若其得到充分的运用,可大大改善我国疏浚底泥减量化处理的现状,因此有必须重视氧化处理技术在疏浚底泥减量化中的应用。

目前,国内少有利用臭氧和 Fenton 氧化预处理后对疏浚底泥干燥的报道。氧化预处理可以提高底泥干化速率,减少干燥能耗,从而解决底泥大量堆存和排放的问题,进而可以将干化底泥应用于园艺、种植土、免烧骨料制备等<sup>[19-20]</sup>,对底泥处理和资源化利

用具有重要推动作用。本试验以臭氧与 Fenton 试剂为氧化剂,分别对疏浚底泥进行预处理,通过红外干燥试验,探讨臭氧与 Fenton 氧化预处理对干燥过程中干基含水率和干燥速率的影响,以期臭氧和 Fenton 氧化技术在疏浚底泥干燥方面的应用提供基础数据和依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料与仪器

本试验所用疏浚底泥取自云南滇池,经过机械脱水后的含水率为 44.56%,基本物性参数见表 1。主要试剂包括质量分数为 30% 的过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、氯化亚铁(FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O),均为分析纯。采用主要仪器有远红外恒温鼓风干燥箱(10F-1BY)、恒温水浴振荡器、激光粒度仪(MS2000)、扫描电子显微镜(JSM 6380LV)。

表 1 疏浚底泥基本物

Tab. 1 Basic properties of dredged sediment

有机质含量(%)	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	容重(含水状态)/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙率(%)	pH 值	含盐量(%)
7.26	2.8	0.939	66.46	5.8~6.2	0.24

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 预处理

臭氧预处理:向含水率为 70% 底泥(由机械脱水后的底泥加湖水配制)样品通过臭氧发生器通入 O<sub>3</sub>,并不断搅拌,投加量为 0.2 g O<sub>3</sub>/g SS(固体悬浮物浓度),反应时间为 2 h。

Fenton 预处理:将底泥样品放置于 20±2 ℃ 的恒温水浴振荡器中,达到相应温度(20 ℃)后,先加入催化剂 Fe<sup>2+</sup> 溶液 6.25 mg/g DS(干泥质量),摇匀后加入氧化剂 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(质量分数 30%) 50 mg/g DS 并摇匀,处理 5 min。

#### 1.2.2 干燥试验

分别将预处理后底泥在 100 ℃、120 ℃、140 ℃、160 ℃ 下,用远红外恒温鼓风干燥箱对底泥样品进行干燥处理,测定不同干燥时间内水分损失量。

### 1.3 试验数据处理方法

(1)在工程传质学中,物料衡算常以绝对干料为基准的干基含水率来表示,表达式为:

$$X = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (1)$$

式中:  $m_0$  表示湿物料中绝对干料的质量(g);  $m$  表示湿物料的质量(g);  $X$  表示干基含水率(%)。

(2)干燥速率。

$$R_n = \frac{x_{n-1} - x_n}{\Delta t} \quad (2)$$

式中:  $R_n$  为某测量时刻的干燥速率(g/(g·min));  $x_{n-1}$  为某测量时刻前一次泥的干基含水率(%);  $x_n$  为某测量时刻泥的干基含水率(%);  $\Delta t$  为前后两次测量的时间差(min)。

### 1.4 粒度分布测定

分别取合适质量的未处理底泥、臭氧氧化预处理底泥、Fenton 氧化预处理底泥置于烧杯,加入 50 mL 的蒸馏水,搅拌均匀后,用激光粒度分析仪测定其粒径分布。

### 1.5 SEM 测试

用电子扫描显微镜对风干后的底泥进行扫描测定。选取断面较为平整的部分固定在样板上,样品为防止电镜扫描后出现横裂,样品需在电镜扫描前风干。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同温度下臭氧预处理对底泥干燥特性的影响

向含水率为 70% 的疏浚底泥通入臭氧预处理后,分别在不同设定干燥温度下进行红外干燥试验,并与未预处理的试验结果进行了比较,分别绘制干基含水率和干燥速率随时间的变化曲线,见图 1 和

图 2。

由图 1 可知, 臭氧预处理对疏浚底泥红外干燥过程中水分蒸发有促进作用。在不同干燥设定温度下, 与未经过臭氧预处理的试验结果相比, 臭氧预处理的疏浚底泥干基含水率下降速率更快, 达到较低干基含水率(低于 5%) 的干燥时间更少。随着温度的升高, 干基含水率出现明显下降(与未经过臭氧预处理的干基含水率变化曲线开始发生分离) 的时间越短, 说明臭氧预处理对水分蒸发的促进作用逐渐增强。由图 2 不难发现, 臭氧预处理

理后, 疏浚底泥红外干燥前、中期干燥速率加速上升, 缩短了达到最大干燥速率时间, 减少了预升温阶段的能量损耗。此外, 臭氧预处理后, 最大干燥速率有增大的趋势, 提高了 9% ~ 36%; 恒速干燥阶段的干燥速率较大, 是未预处理的 1.2~ 1.7 倍; 降速干燥阶段干燥时间缩短。部分原因是臭氧的强氧化作用使得底泥中少量微生物发生分解, 生成更多的水和 CO<sub>2</sub><sup>[16]</sup>。因此, 臭氧预处理疏浚底泥可以缩短加速预干燥阶段和降速干燥阶段的时间, 提高最大干燥速率。

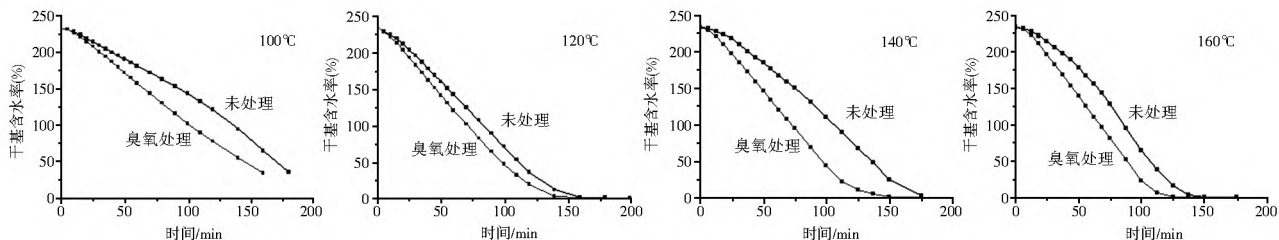


图 1 不同干燥温度下臭氧预处理对干基含水率的影响

Fig. 1 Effect of ozone treatment on dry basis moisture content at different drying temperatures

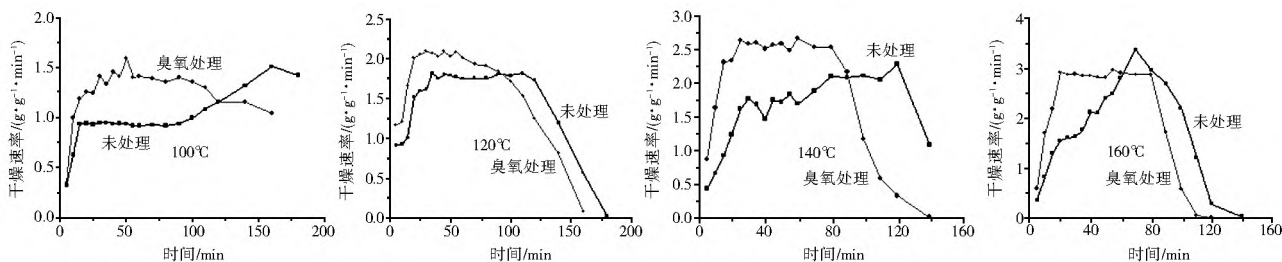


图 2 不同干燥温度下臭氧预处理对干燥速率的影响

Fig. 2 Effect of ozone treatment on the drying rate at different drying temperatures

## 2.2 臭氧预处理疏浚底泥干燥特征曲线

图 3 显示了不同设定干燥温度下, 臭氧预处理疏浚底泥红外干燥特征曲线。可以看出, 臭氧预处理后, 疏浚底泥干燥过程明显的分为三个阶段: 加速干燥段、恒速干燥段和降速干燥段。在不同的干燥

温度下, 温度越高, 一定干基含水率下干燥速率越高, 最大干燥速率越大。干基含水率从 200% 降到 30% 的过程均保持在最大干燥速率的恒速干燥段, 有利于实现水分的快速蒸发, 减少干燥时间, 节省干燥耗能。

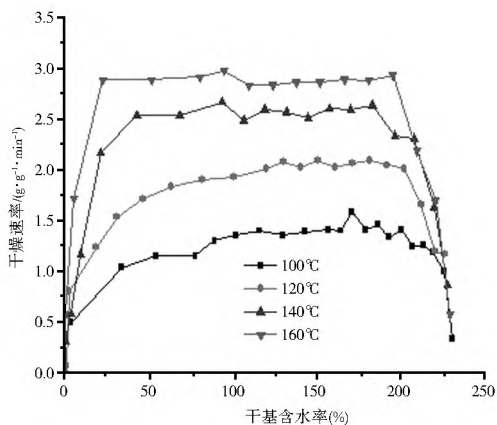


图 3 臭氧预处理疏浚底泥红外干燥特征曲线

Fig. 3 The drying characteristic curves of infrared drying of dredged sediment after pretreated by ozone

## 2.3 Fenton 氧化预处理对底泥干燥特性的影响

向含水率为 70% 的疏浚底泥添加 Fenton 试剂预处理后, 分别在干燥设定温度下进行红外干燥试验, 并与未添加 Fenton 试剂预处理的试验结果进行了比较, 得到干燥过程中底泥干基含水率和干燥速率的变化, 结果见图 4 和图 5。分别对不同温度下干基含水率进行单因素方差分析, 结果见表 2。

表 2 干基含水率方差分析

Tab. 2 The variance analysis of moisture content (d. b.)				
干燥温度( °C )	100	120	140	160
P value	0.91	0.66	0.63	0.78

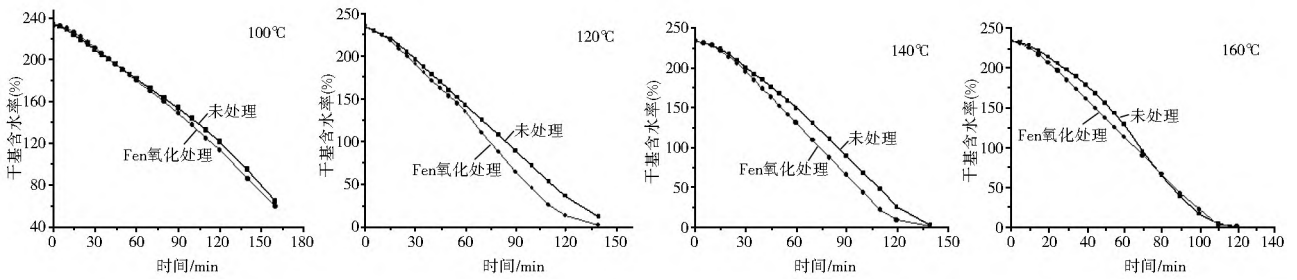


图4 不同干燥温度下 Fenton 氧化预处理对干基含水率的影响

Fig. 4 Effect of Fenton oxidation on dry basis moisture content at different drying temperatures

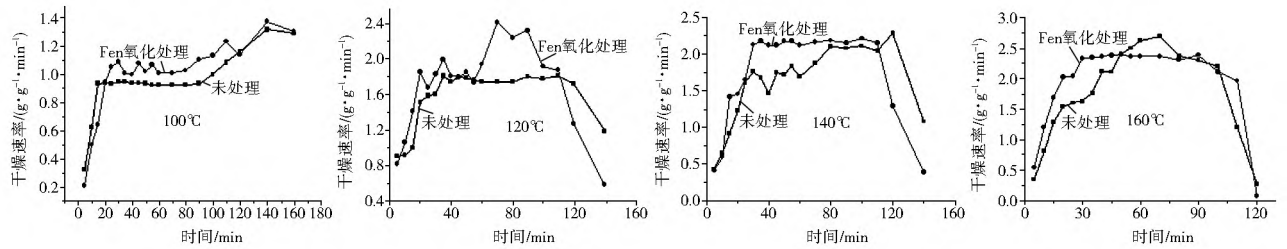


图5 不同干燥温度下 Fenton 氧化预处理对干燥速率的影响

Fig. 5 Effect of Fenton oxidation on the drying rate at different drying temperatures

由图4和图5可知, Fenton 试剂预处理后底泥在 100 °C 下干燥加速段干燥速率小于未处理底泥干燥速率; 当温度达到 120 °C 及以上时, Fenton 试剂预处理后的干燥加速段干燥速率大于未处理底泥干燥速率。添加 Fenton 试剂预处理对干燥前期有一定的促进作用, 但在干燥后期, 干燥速率反而低于未处理底泥干燥速率。对 Fenton 试剂预处理前后干基含水率变化进行方差分析, 显著性水平取 0.05, 结果见表2。可以看出处理前后干基含水率的 *P* 值均大于 0.05, 统计学差异并不显著, 促进作用不明显。

## 2.4 Fenton 氧化预处理疏浚底泥干燥特征曲线

图6和图7显示了不同含水率疏浚底泥经过 Fenton 氧化预处理后, 在 160 °C 下红外干燥过程中

干基含水率变化和干燥特征曲线。从图6可知, 干基含水率越高, 干燥过程中干基含水率下降得越快。Fenton 试剂在高含水率底泥中氧化反应更完全, 对底泥中微生物的溶解更充分, 更有利于自由水分的释放。在图7中, 随着干基含水率的增加, 最大干燥速率明显增大, 且干基含水率越大, 其增大程度越明显。

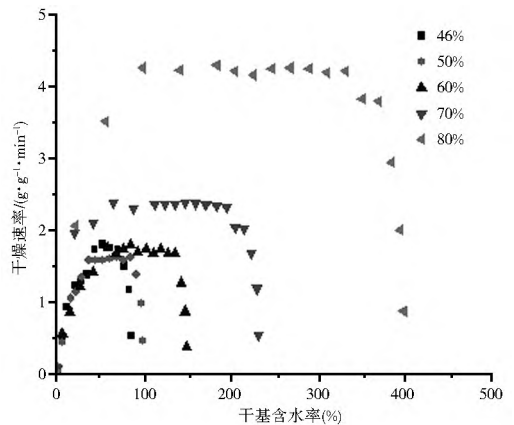


图7 Fenton 氧化预处理不同含水率底泥干燥特征曲线

Fig. 7 The drying characteristic curves of dredged sediment with different moistures after pretreated by ozone

## 2.5 微观形貌

### 2.5.1 粒径分析

从表3可以看出: 氧化处理后底泥的平均粒径和中值粒径均明显减小, 比表面积增大, 均匀性提高。这主要是由于氧化处理后, 底泥的有机质、胶团结构被破坏, 无机化程度和疏水性提高, 絮体被破碎成小颗粒, 比表面积增大, 底泥间孔隙率增大, 这都

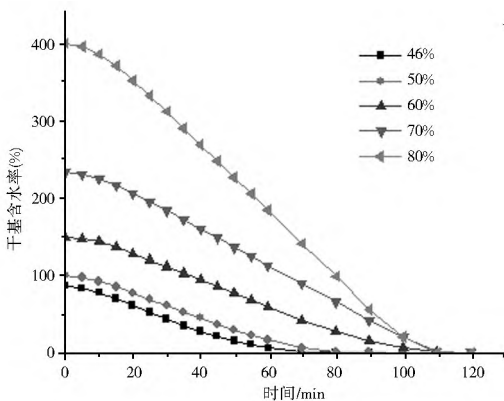


图6 Fenton 氧化预处理不同含水率底泥干基含水率变化曲线

Fig. 6 Variation curves of dry basis moisture content for Fenton oxidation on dredged sediment with different moistures

将有利于底泥中水分的脱除, 加速干燥进程。

表 3 不同处理条件下底泥粒度分布

Tab. 3 Sediment particle size distribution under different treatment conditions

样品	体积平均 粒径/ $\mu\text{m}$	中值粒 径/ $\mu\text{m}$	比表面积 $/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	均匀性
原泥	27.916	13.480	0.91	0.35
臭氧氧化预 处理底泥	17.976	9.090	1.30	0.58
Fenton 氧化预 处理底泥	18.921	9.715	1.21	0.50

## 2.5.2 电镜分析

臭氧和 Fenton 试剂氧化预处理后的疏浚底泥和原泥的微观结构见图 8。可以看出, 处理后中的底泥颗粒尺寸分布较均匀, 断面凹凸不平, 小部分呈片状。对比处理前后污泥微观结构特征可以认为, 氧化处理后有机质部分氧化分解, 底泥无机化程度和疏水性提高, 有利于干燥速率加快; 其结合水释放, 这样就形成更多的孔隙, 更有利于水分蒸发。

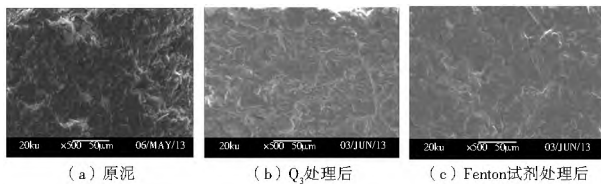


图 8 不同处理条件下底泥扫描电镜

Fig. 8 SEM of dredged sediments with different treatments

## 3 结论

面对疏浚底泥处理的急迫现状, 氧化预处理技术在底泥干燥方面的应用, 将是今后疏浚底泥减量化处理方面的一个热点。本文通过臭氧和 Fenton 氧化预处理疏浚底泥的干燥试验, 得到以下结论:

臭氧和 Fenton 试剂预处理疏浚底泥, 均有助于干燥过程中水分蒸发和提高干燥速率; 随着温度的升高, 臭氧预处理对水分蒸发的促进作用逐渐增强。在一定臭氧通入量下, 臭氧预处理底泥可提高其在红外干燥过程中的最大干燥速率和增大恒速干燥阶段的持续时间, 最大干燥速率可提高 9%~36%, 且恒速干燥阶段持续时间是未预处理的 1.2~1.7 倍, 有利于水分快速蒸发和节约成本。试验中, Fenton 氧化对提高干燥效果影响不明显; 但初始干基含水率的越高, Fenton 试剂氧化反应越完全, 最大干燥速率越大。微观结构分析表明: 氧化预处理有利于加速干燥进程, 实现底泥减量化处理。

## 参考文献(References):

- [1] 中国疏浚协会. 中国疏浚行业市场分析[EB/OL]. <http://www.chida.org/news/View.asp>, 2012-03-15. (China Dredging Association China's dredging industry market analysis[EB/OL]. <http://www.chida.org/news/View.asp>, 2012-03-15. (in Chinese))
- [2] 朱伟, 曾科林, 张春雷. 淤泥固化处理中有机成分的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 33-36. (ZHU Wei, ZENG Ke-lin, ZHANG Chun-lei. Influence of organic matter component on solidification of dredged sediment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 33-36. (in Chinese))
- [3] 韩久春, 方申柱, 王文江, 等. 疏浚底泥微波干燥特性及能耗分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, (03): 493-496. (HAN Jiuchun, FANG Shen-zhu, WANG Wen-jiang, et al. Microwave drying characteristics and energy consumption analysis of dredged sediment[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, (03): 493-496. (in Chinese))
- [4] 刘禹杨, 吴燕, 胡保安, 等. 太湖疏浚底泥的脱水技术研究[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 72-75. (LIU Yuyang, WU Yan, HU Baosan, et al. Study on dehydration technology of dredged sludge in Tai Lake[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 72-75. (in Chinese))
- [5] 田宇, 周兰, 吴燕. 改良 Fenton 体系对疏浚底泥脱水性能的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 502-505. (TIAN Yu, ZHOU Lan, WU Yan. Effects of improved Fenton system on dredged sludge dehydration[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 502-505. (in Chinese))
- [6] 张铮, 吴燕, 刘禹杨, 等. 生物淋滤法对疏浚淤泥中镉去除率及性质的影响[J]. 中国环境科学, 2013(4): 685-690. (ZHANG Zheng, WU Yan, LIU Yuyang, et al. Effects of bioleaching on removal rate of cadmium and dewatering property from dredged sludge[J]. China Environmental Science, 2013, 33(4): 685-690. (in Chinese))
- [7] Prez M, Torrades F, Domnech X, et al. Fenton and photo-Fenton oxidation of textile effluents[J]. Water Research, 2002, 9(36): 2703-2710.
- [8] Martinez N S, Fernandez J F, Segura X F, et al. Pre-oxidation of an extremely polluted industrial wastewater by the Fenton's reagent[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 101B: 315-322.
- [9] 柴朝晖, 杨国录, 刘林双, 等. 污泥机械脱水前处理方法研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2010(5): 157-161. (CHAI Zhao-hui, YANG Guo-lu, LIU Lin-shuang, et al. Advances in the pretreatment methods for sludge mechanical dewatering[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010(5): 157-161. (in Chinese))
- [10] Buyukkamaci N. Biological sludge conditioning by Fenton's reagent[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(11): 1503-1506.
- [11] Pere J, Alen R, Viikari L, et al. Characterisation and dewatering of activated sludge from the pulp and paper industry[J]. Water Science Technology, 1993, 28(1): 193-201.

(下转第 136 页)

- 研究[J]. 工程地质学报, 2013, 22(1): 106-111. (CHEN Wei, LI Werrping, LIU Qiang qiang et al. Experimental research on permeability characteristics of unsaturated and remolded laterite in northern Shaanxi province[J]. Journal of Engineering Geology. 2013, 22(1): 106-111. (in Chinese))
- [14] 刘小龙. 土的不同渗透试验方法应用与研究[J]. 勘察科学技术, 2011(3): 36-39. (LIU Xiaolong. Application and study on different permeability test method of soil[J]. Editorial Office of Site Investigation Science and Technology. 2011(3): 36-39. (in Chinese))
- [15] Zhang S, Grip H, Lvdahl L. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 90(1): 117 - 125.
- [16] Alakukku L. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic: I. Short term effects on the properties of clay and organic soils[J]. Soil & Tillage Research, 1996, 37: 211 - 222.
- [17] Li X, Zhang L M.. Characterization of dual structure pore size distribution of soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(2), 129-141.
- [18] 吴勇, 王伟, 王琛, 等. 干密度随粉煤灰力学性质的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(4): 247-249. (WU Yong, WANG Wei, WANG Chen et al. Effect of dry bulk density on mechanical properties of fly ash[J]. Sichuan Building Science. 2014, 40(4): 247-249. (in Chinese))
- [19] 李云峰. 孔隙是影响黄土层导水性的主导因素[J]. 勘察科学技术, 1991, (1): 25-28. (LI Yurfeng. Porosity is the chief influence factor of the water conductivity of loess soils[J]. Site Investigation Science and Technology, 1991(1): 25-28. (in Chinese))
- [20] 孙建中. 黄土学[M]. 香港: 香港考古学会出版, 2005: 142-148, 197-206. (SUN Jiannzhong. Loessology [M]. Hong Kong: Hong Kong archaeological society, 2005: 142-148, 197-206. (in Chinese))
- [21] 郑红韩, 顾雄飞, 韩家懋, 等. 中国黄土中的粘土矿物及其在剖面中的变化趋势——洛川和陇西黄土剖面的初步研究[J]. 中国第四纪研究, 1985(1): 158-165. (ZHENG Honghan, GU Xiongfei, HAN Jiamao et al. Clay minerals in loess of China and their tendency in loess section[J]. Quaternary Sciences, 1985(1): 158-165. (in Chinese))

## (上接第 110 页)

- [12] Sanin F D, Vesilinen P A. Effect of centrifugation on the removal of extracellular polymers and physical properties of activated sludge[J]. Water Science Technology, 1994, 30(8): 117-127.
- [13] 宋相国, 张盼月, 张光明, 等. Fenton 氧化处理剩余污泥的作用机制[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(7): 64-67. (SONG Xiangguo, ZHANG Pan Yue, ZHANG Guangming, et al. Mechanism of municipal sludge disposal by fenton oxidation [J]. Environmental Science and Technology, 2009, 32(7): 64-67. (in Chinese))
- [14] 高蓉菁, 夏明芳, 尹协东, 等. 臭氧氧化法处理印染废水[J]. 污染防治技术, 2003, 16(4): 68-70. (GAO Rongjing, XIA Mingfang, YIN Xiedong, et al. Treatment of printing and dyeing wastewater by ozone oxidation[J]. Pollution Control Technology, 2003, 16(4): 68-70. (in Chinese))
- [15] 何楚茵, 金辉, 淳炜, 等. 臭氧处理剩余污泥的减量化实验研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 4228-4234. (HE Chuyin, JIN Hui, BU Churhui, et al. Experimental study on performance of ozonation disintegration for excess sludge reduction [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(11): 4228-4234. (in Chinese))
- [16] Yan S T, Zheng H, Li A, et al. Systematic analysis of biochemical performance and the microbial community of an activated sludge process using ozone treated sludge for sludge reduction[J]. Bioresource technology, 2009, 100(21): 5002-5009.
- [17] 王正. 污泥臭氧氧化影响因素及组合工艺污泥减量化效果研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. (WANG Zheng. Studied on influence factors for sludge ozonation and sludge reduction performance of combined processes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese))
- [18] 汪鲁, 强志民, 董慧峪, 等. 城市污水处理厂污泥臭氧减量技术研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 363-369. (WANG Lu, QIANG Zhiming, DONG Huiyu, et al. Sludge reduction by ozone in municipal wastewater treatment plants[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(2): 363-369. (in Chinese))
- [19] 王海燕, 鲁智礼, 庞朝辉, 等. 原位臭氧氧化污泥减量工艺的运行效能[J]. 环境工程学报, 2012(3): 779-786. (WANG Haiyan, LU Zhili, PANG Zhao hui, et al. Performance of in situ ozonation sludge reduction process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012(3): 779-786. (in Chinese))
- [20] Bunning G, Hempel D C. Vital Fluorochromization of microorganisms using 3, 6-diacetylfluorescein to determine damages of cell membranes and loss of metabolic activity by ozonation [J]. Ozone Science Engineering, 1996, 18: 173-181.