

水泥、沸石和 TMT 固化污染底泥的实验研究

宋迪^{1,2}, 陶红¹, 毛凌晨¹, 闻海峰¹, 董继锋¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海市闵行区环境监测站, 上海 200240)

摘要: 为了更好地探明水泥、天然斜发沸石和 TMT 固化污染底泥的性能, 以抗压强度、浸出液 pH 值、污染物浸出毒性为指标, 探究了三者之间最优配比和最佳工艺条件。结果表明: 当底泥: 水泥: 沸石: TMT 质量比为 1: 0.42: 0.18: 0.04 时达到最优配比, 其 7、14 和 28 d 无侧限抗压强度达到了 3.07、3.92 和 6.06 MPa, 浸出液 pH 进一步降低, 重金属和 COD_{Cr} 浸出量分别减少 90% 和 50% 以上。其 7 d 抗压强度满足相应行业标准, 污染物浸出毒性符合城镇污水处理厂污染物三级排放标准, 为底泥资源化实际应用提供了研究基础。

关键词: 污染底泥; 水泥; 沸石; TMT; 抗压强度; 重金属; 浸出毒性; 水体二次污染

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)03-0060-05

Experiment on contaminated sediment solidificated by cement, zeolite and TMT

SONG Di^{1,2}, TAO Hong¹, MAO Lingchen¹, WEN Haifeng¹, DONG Jifeng¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Minhang Environmental Monitoring Station of Shanghai, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to probe the properties of contaminated sediment which is solidificated by cement, zeolite and TMT, the paper studied the optimum ratio and conditions of the three components by taking compressive strength, leachate pH and leaching toxicity as indicators. Results showed that the optimum condition is that the mass ratio of sediment, cement, zeolite and TMT is 1: 0.42: 0.18: 0.04. The compressive strengths of solidified products in 7, 14 and 28 days are 3.12, 4.07 and 6.28 MPa respectively. Leachate pH value is further reduced. In addition, the amount of heavy metals and COD_{Cr} in leachate are reduced by more than 90% and 50% respectively. The compressive strength of the solidified products after 7 days meets the industrial standard and the leaching toxicity satisfied the third grade discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant. The result provides the research foundation for the practical application of sediment resource recovery.

Key words: contaminated sediment; cement; zeolite; TMT; compressive strength; heavy metals; leaching toxicity; secondary pollution of water body

随着工业和航道运输业的发展, 河道底泥污染加重, 由底泥引起的水体二次污染风险加强, 且污染物具有隐蔽性、长期性和不可逆性等特点^[1]。目前, 关于底泥污染物固化着重点仍是重金属浸出毒性方面, 有机物污染物的稳定化研究较少, 也较难控制。因此, 控制底泥污染物的固化重金属的同时需兼顾控制有机物的二次释放^[2]。

水泥不仅能为底泥提供抗压强度, 在固化过程

中发生水化反应, 其水化产物能够将有毒、有害物质转变为低溶解性、低迁移性和低毒性的物质^[3]。但是, 单一使用水泥固化底泥不仅价格昂贵, 增容比高^[4], 且其浸出液呈强碱性, 会影响地下水或地表水水质^[5]。沸石的火山灰活性仅次于硅灰, 优于粉煤灰和矿渣, 能有效抑制碱集料反应(AAR), 提高混凝土强度和耐久性, 减少混凝土自收缩引起的开裂^[6]。活性氧化硅和氧化铝, 可与水泥水化放出的

收稿日期: 2014-10-27; 修回日期: 2015-01-06

基金项目: 上海科委重点支撑项目(13230502300); 沪江基金研究专项(D14004)

作者简介: 宋迪(1990-), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 从事环境功能材料的研制及应用研究。

通讯作者: 陶红(1967-), 女, 贵州贵阳人, 博士, 教授, 从事环境功能材料的研制及其在水处理中的应用研究。

氢氧化钙反应生成更多的水化硅酸钙和水化铝酸盐,增加水泥强度^[7]。此外,沸石对 Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} 等重金属离子和有机污染物具有较强的吸附能力^[8]。Sprynskyy 等^[9]通过添加斜发沸石稳定重金属污泥,迁移形态的 Cu、Pb 含量明显降低。另外,近年来,重金属捕捉剂有机硫化物-TMT(三巯基三嗪三钠盐)在水处理实际应用中越来越多,其化学名为 1,3,5-三嗪-2,4,6-三硫醇三钠盐,添加之后,无论什么价态的 Zn、Cd、Pb 盐会沉淀结晶或非晶态化合物^[10]。TMT 或 TMT 协同水泥、沸石等其他固化剂固化重金属污染底泥方面鲜有报道;然而,随着 TMT 添加量增多势必会增加成本,出现浸出有机物浓度升高、产生二次污染等现象。因此,选择适量的固化剂(如水泥、沸石)和稳定剂(如 TMT),对减小增容比、减少污染物浸出、降低处理成本具有重要意义。

本文首先通过实验确立水泥配比,再逐步调整,优化沸石的渗入量,最后探究底泥、水泥、沸石和 TMT 最优配比。以固化试件无侧限抗压强度、浸出毒性为指标,对上海市黄浦江流域某受污染底泥中 Cr、Pb、 COD_{Cr} 等固定效果进行了研究,以期为该技术的实际工程应用提供理论依据。

1 材料、仪器和方法

1.1 材料和试剂

供试底泥取自黄浦江流域复兴岛运河段($31^{\circ}17'26.7''\text{N}$, $121^{\circ}33'31.9''\text{E}$),底泥呈暗黑色,流动性强。底泥基本理化性质为:pH 为 7.21,有机质含量 3.2%,含水率 46.54%,Pb 含量 101.91 mg/kg, Cu 含量 134.36 mg/kg, Cr 含量 260.23 mg/kg, Zn 含量 565.67 mg/kg, COD_{Cr} 含量 26 300 mg/kg。

普通硅酸盐水泥产于上海海螺水泥有限公司,强度等级为 42.5。沸石为天然斜发沸石粉,购于巩义市豫嵩给排水器材厂,莫氏硬度为 5.7。TMT 购于昆山剑乐环保材料有限公司,有效浓度 15%。氧化钙 AR 级,购于上海国药集团。冰醋酸为 AR 级,购于阿拉丁试剂公司。

1.2 试验方法和过程

1.2.1 水泥固化试验 采集表层污染底泥,静置 1 d 后,倾倒泥层上覆水,剔除杂质,自然风干,过筛 2 mm。设定水泥占底泥(含水率 < 5%)质量比分别为 20%、30%、40%、50%、60%、70% 和 80%,编号为 C20、C30、C40、C50、C60、C70 和 C80,充分混合,分多次填入 $70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm}$ 模具

中,设 3 个平行件,24 h 后脱模成型,恒温恒湿标准养护 7、14、28 d。

通过水泥抗折抗压试验机(无锡华锡建材实验仪器有限公司)测定无侧限抗压强度,采用《固体废物浸出毒性浸出方法翻转法》^[11]处理养护 7 d 的试件,按国家标准水质监测方法^[12]测定浸出液 COD_{Cr} 和 pH 值。同样,养护 7 d 的固化试件作重金属毒性浸出实验检测样品,采用《固体废物毒性浸出方法醋酸缓冲溶液法》进行毒性浸出实验(采用其浸提剂 2[#], $\text{pH} = 2.64 \pm 0.05$)^[13],由 NexION300X ICP-MS(PE 公司)测定浸出液中 Pb、Cu、Cr、Zn 含量,评估固化剂对底泥中重金属固化效果。

1.2.2 沸石稳定化试验 确定水泥配比后,以沸石作为吸附剂、稳定剂,取代部分水泥以降低浸出液 pH 值,增强吸附性和重金属稳定化的能力。杨旭等^[14]研究发现,沸石最佳替代量约为 10%~20%之间,因此设置掺入比分别为 0、6%、12%、18%、24%、30%、36% 寻求最佳配比,分别记做 Z0、Z6、Z12、Z18、Z24、Z30、Z36,其他试验操作同水泥固化试验。选择固化剂(水泥和沸石)最优配比,与水泥单独固化效果做对比。

1.2.3 TMT 稳定化试验 确定水泥和沸石配比后,进一步降低浸出毒性,添加 TMT 作为外加剂辅助稳定重金属。王川等^[15]采用有机硫重金属捕捉剂 DTCR(有效浓度 50%)协同水泥固化重金属污染底泥,最佳添加量为 2%。因此,本实验研究设置 TMT(有效浓度 15%)添加量为底泥质量的 0、2%、4%、6%、8%、10%、12%,分别记做 T0、T2、T4、T6、T8、T10、T12,其他试验操作同水泥固化试验。

2 结果和分析

2.1 水泥添加量与固化效果的关系

2.1.1 水泥对抗压强度的影响 水泥添加量与所制备固化试件抗压强度关系如图 1 所示,随着水泥含量的增加,固化试件抗压强度不断增加;养护时间越长,固化体的抗压强度越高。城镇建设行业标准《土壤固化剂》^[16]规定水泥类固化土 7 d 抗压强度达到 3~4 MPa 可用作城市快速路和城市主干路基层,强度 > 1.5 MPa 可用作城市主干路和次干路的底基层。

经过 7 d 的湿式养护,无侧限抗压强度经历了平缓上升快速攀升又趋于平缓的阶段,在水泥添加量为底泥质量 60% 时,抗压强度增速又有所减缓。随着水泥含量增加,浸出 pH 值不断升高,主要是因为水泥本身的水溶液呈碱性,导致 pH 值上升;水泥添加

量越多,增容比也越大。权衡行业标准(主干路基层抗压强度3~4 MPa)、增容比、浸出液pH、经济成本等因素,选用60%作为水泥最佳添加量。养护7 d后,无侧限抗压强度达3.13 MPa,相比于C20的抗压强度0.48 MPa,增幅达到652.1%。经过14 d和28 d养护后,抗压性能进一步上升,28 d抗压强度更是达到了7 MPa以上,浸出液pH值为12.64。

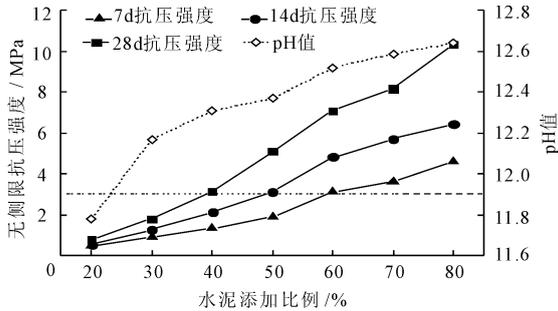


图1 水泥添加量对固化效果的影响

2.1.2 水泥对浸出毒性的影响 不同配比水泥制备的固化试件湿式养护7 d后,污染物浸出性如表1所示,随着水泥添加量增大和底泥含量减少,浸出液pH值不断爬升,单位质量的固化试件重金属浸出量逐渐下降,从C20到C80,重金属Cu和Zn浸出量下降较快,分别从15.31和51.62 mg/kg降至4.37和5.14 mg/kg,效果显著。掺入水泥后,重金属离子在碱性条件下能生成难溶于水溶液的氢氧化物或碳酸盐等而被固定^[17]。随着掺入量增加,固化试件耐酸性也逐渐增强,使得pH处于较高值,有利于重金属保持稳定态。COD_{Cr}浸出量随着水泥含量上升而下降,COD_{Cr}下降幅度较小,导致COD_{Cr}变化的原因可能有:①随着底泥含量降低,固化试件单位质量的有机质减少,导致浸出试验中COD_{Cr}释放量的变少;②加入水泥后,使原有的底泥混入了大量化学药剂,发生了大量化学反应从而产生多种化学物种,其间具有大量复杂的大分子水化产物或未被完全氧化的化合物,对COD_{Cr}测定值会有一定影响。

表1 水泥试件的污染物浸出量

系列	Cr	Pb	Cu	Zn	COD _{Cr}
原底泥	24.82	24.92	15.31	51.62	2580
C20	19.67	15.01	8.52	25.21	2430
C30	16.72	11.15	6.97	18.62	2220
C40	14.32	9.87	5.73	12.50	1930
C50	13.35	9.34	5.25	8.25	1850
C60	12.94	9.02	4.85	6.50	1760
C70	12.00	8.69	4.54	5.44	1680
C80	11.51	8.45	4.37	5.14	1610

其中,抗压强度最优配比C60与原底泥浸出性相比,Cr、Pb、Cu、Zn、COD_{Cr}浸出量分别降低47.9%、63.8%、68.3%、87.4%和31.8%。生物毒性较大的Cr和Pb的浸出率仍相对较高,需要进一步稳定化处理。

2.2 沸石添加量对固化效果的影响

2.2.1 沸石对抗压强度的影响 选定水泥最佳添加量为60%,沸石粉依照上述设定的质量比取代水泥制备固化试件组,无侧限抗压强度变化如图2。沸石本身不能与水发生固化反应,不能直接增强抗压强度。因此,随着沸石渗入量的增多和水泥含量的降低,抗压强度先是经过了缓慢下降再骤降的过程,例如,28 d无侧限抗压强度从Z0的7.21 MPa,降低至Z6组的2.11 MPa,降幅达到70.7%。其中,固化试件Z18表现出了较强的抗压强度,其7、14、28 d抗压强度分别是3.12、4.07和6.28 MPa,分别降低了17.2%、15.6%、12.9%,可知:随着养护周期的增长,强度降低程度越来越小。此外,Z18(水泥含量27.0%)与C50(水泥含量33.3%)的7、14、28 d抗压强度1.89、3.12和5.12 MPa相比,抗压性能优于C50组。

产生这一结果的原因在于:

(1)随着水泥水化反应产生大量Ca(OH)₂,碱性条件下,沸石中活性的SiO₂和Al₂O₃更容易从多孔道结构中溶出,发生二次水化反应,生成胶凝物质^[18]。

(2)沸石一般内部布满大小均匀的孔穴或通道,开放性大,能从外部环境吸附大量水分子,并与大气相对湿度保持平衡。固化试件在硬化固化过程中,内部水化反应需要持续供给自由水,被吸附的水又能逐渐的释放出来,起到自养护作用

(3)沸石吸附作用使浆体内部产生自真空作用使浆体和骨料产生紧密的包裹,最终凝结成为致密的整体,使混凝土的后期抗压强度有较大增长^[19]。

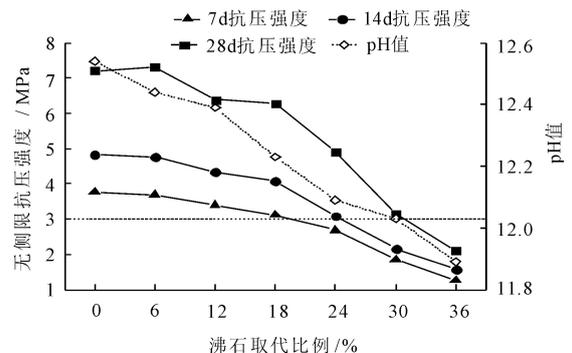


图2 沸石添加量对固化效果的影响

(4) 由于供试沸石粉的莫氏硬度为 5.7, 粒径 0.05 ~ 1 mm, 沸石粉在其中可能起到了细骨料的作用, 增强了固化试件的抗压强度。

2.2.2 沸石对浸出毒性的影响 由表 2 可知, 沸石取代部分水泥对 Pb 稳定化效果较明显, Z36 组与 Z0 组相比, Pb 浸出量减少了 77.9%, 是因为沸石对重金属离子的吸附与该离子水化热密切相关。在四种重金属离子中, Pb^{2+} 的水化热最小^[20]; 而且, 重金属离子只有脱去大部分水膜之后才能够进入沸石孔穴内部, 因此 Pb^{2+} 最易脱去配位体水而被吸附和固定^[21]。同时, Pb^{2+} 与 K^+ 离子半径大小相似, 更容易被沸石离子交换, Pb^{2+} 更易达到稳定化。Cu 和 Zn 的释放经历了先降低后上升的过程, 刚掺入沸石时, 由于其具有的离子交换能力和吸附性能, 使得 Cu 和 Zn 释放量进一步降低, 综合离子的水合能、水化热、离子半径等因素可知, 沸石对 Cu 和 Zn 稳定化能力有限; 但是掺入量增大, pH 逐渐下降, 固化试件抵御醋酸浸出能力降低, 使得浸出量变大。固化试件 COD_{Cr} 浸出量逐渐下降, 沸石添加越多浸出量越少。刘远金等^[22] 发现: 在水溶液中天然沸石对 COD_{Cr} 具有吸附作用, 且随着沸石用量的增加, COD_{Cr} 降低越明显。

抗压性能最优配比的 Z18 与 Z0 (C6) 相比, Cr 浸出量降低 6.2%, Pb 浸出量降低 50.4%, Cu 浸出量降低 30.4%, Zn 浸出量降低 16.0%, COD_{Cr} 浸出量降低 39.4%。

表 2 含沸石固化试件污染物质浸出量 mg/kg

系列	Cr	Pb	Cu	Zn	COD_{Cr}
Z0	13.01	8.65	4.27	6.35	1750
Z6	12.32	6.84	3.97	5.69	1610
Z12	11.60	5.60	3.30	4.91	1290
Z18	11.21	4.29	2.97	5.33	1060
Z24	10.94	3.27	3.53	5.91	1000
Z30	10.87	2.17	4.05	6.53	960
Z36	10.69	1.91	5.01	8.34	910

2.3 TMT 添加量对固化效果的影响

2.3.1 TMT 对抗压强度的影响 在底泥: 固化剂 (水泥-沸石) 质量比为 1: 0.6 的条件下, 按照实验设定添加 TMT 后形成“底泥-水泥-沸石-TMT”固化体, 抗压强度如图 3 所示。T 系列固化试件抗压强度逐步减小, 并且变化趋势逐渐增强; 养护时间越短, 差异性越大, 例如 T12 (TMT 添加比例为

0.12) 与 T0 (不添加 TMT) 相比, 7、14、28 d 抗压强度分别下降和 35.9%、26.6% 和 22.3%。随着 TMT 增加, 使得固化试件中有机质含量上升, 范昭平等^[23] 研究表明, 有机物会对底泥固化效果产生影响, 使得水泥的水化产物难以形成连续的网络状骨架结构, 从而降低固化试件抗压强度。随着时间推移, 水泥的水化反应逐步加深, 有机质对固化效果的影响程度也不断削弱。总体而言, 添加 TMT 含量小于 6% 时, 抗压强度大于 3.0MPa 且符合《土壤固化剂》行业标准, 判断最优 TMT 添加量还应综合浸出毒性、经济性等考虑。

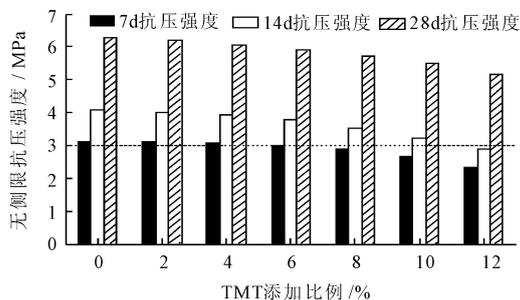


图 3 TMT 添加量对固化效果的影响

2.3.2 TMT 对浸出毒性的影响 TMT 能在常温下与多种重金属离子 (铅、铜、锌、铬等) 迅速反应, 生成不溶于水, 且具有良好的化学稳定性的螯合物, 由图 4 可得, TMT 对底泥中 4 种重金属均表现出较强的稳定化能力, 尤其是浸出液 Cr 也得到了稳定螯合, 当添加比例为 0.04 时, 重金属浸出量逐渐趋于平缓; 与此同时, COD_{Cr} 却因为有机硫-重金属捕捉剂 (TMT) 添加而不断攀升, 长时间翻转震荡使得有机物更容易释放, 当添加量超过 4% 时, COD_{Cr} 浸出量增加趋势更为明显。

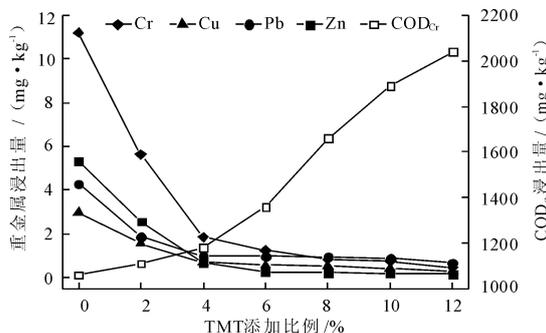


图 4 TMT 对污染物质浸出量的影响

结合污染物浸出量、抗压强度和经济成本, 当 TMT: 底泥质量比为 0.4: 1, 固化效果最好。7、14、28 d 抗压强度为 3.07、3.92 和 6.06 MPa 与 T0 组相差较小, 保持了较好的抗压性能; 单位质量 (kg) 固

化试件浸出毒性 Cr 为 1.86 mg、Pb 为 1.00 mg、Cu 为 0.70 mg、Zn 为 0.69 mg、COD_{Cr} 为 1 180 mg, 与原底泥浸出毒性相比分别减少 92.5%、96.0%、95.4%、98.7% 和 54.3%。

此时, 浸出液污染物对应的浓度分别为 Cr: 0.093 mg/L、Pb: 0.050 mg/L、Cu: 0.035 mg/L、Zn: 0.035 mg/L、COD_{Cr}: 118 mg/L, 与表 3 相应国家标准相比, 可知浸出毒性符合危险废物鉴别标准^[24], 浸出液毒性较低; 同时满足城镇污水处理厂污染物排放标准^[25]三级标准, 可见此固化试件在一般实际应用中, 遭遇酸雨侵蚀后产生的污水无需进一步处理, 所造成的污染物释放对原有环境影响较小, “底泥-水泥-沸石-TMT” 固化试件体现出良好的固化和稳定化效果。

表 3 相应国家三级标准 mg/L

评价标准名称	Cu	Cr	Pb	Zn	COD _{Cr}
危险废物鉴别标准	100	1	5	100	
污水处理厂污染物排放标准	0.5	0.1	0.1	1.0	120

3 结 语

(1) 水泥固化能有效增强底泥抗压强度, 水泥添加量越多, 无侧限抗压强度越高, 重金属浸出量越低, pH 值越高, COD_{Cr} 也逐渐降低。以 7、14 和 28 d 无侧限抗压强度为参考, 底泥和水泥最佳配比为 1: 0.6。

(2) 渗入沸石以改变理化性质, 取代水泥的量越大, 抗压强度下降越快, 沸石最佳替代水泥量为 18%。7、14 和 28 d 抗压强度达到了 3.12、4.07 和 6.28 MPa; 对污染物浸出而言, Pb 和 COD_{Cr} 随着沸石取代量增大而增大, 与不添加沸石相比, 分别降低 50.4% 和 39.4%; Cr、Cu、Zn 稳定化效果不够理想。

(3) TMT 加入后, 底泥: 水泥: 沸石: TMT 最优配比为 1: 0.42: 0.18: 0.04, “底泥-水泥-沸石-TMT” 固化试件 7、14 和 28 d 抗压强度 3.07、3.92 和 6.06 MPa, 符合城市快速路、城市主干路基层和城市主干路、次干路的底基层的抗压标准。

Cr、Pb、Cu 和 Zn 浸出量分别为 1.86、1.00、0.70、0.69 mg/kg, COD_{Cr} 浸出量为 1180 mg/kg, 污染物浸出量对环境影响较小; 浸出毒性浓度符合城镇污水处理厂污染物排放三级标准, 无需再进一步处理, 稳定化效果好。

参考文献:

- [1] Qiu Hao, Gu Haihong, He Erkai, et al. Attenuation of metal bioavailability in acidic multi-metal contaminated soil treated with fly ash and steel slag [J]. *Pedosphere*, 2012, 22(4): 544 - 553.
- [2] Gredilla A, Fdez-Ortiz de Vallejuelo S, Arana G, et al. Long-term monitoring of metal pollution in sediments from the estuary of the Nerbioi-Ibaizabal River (2005 - 2010) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 131: 129 - 139.
- [3] Malviya R, Chaudhary R. Leaching behavior and immobilization of heavy metals in solidified/stabilized products [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(1): 207 - 217.
- [4] 朱伟, 林城, 李磊, 等. 以膨润土为辅助添加剂固化/稳定化污泥的试验研究 [J]. *环境科学*, 2007, 28(5): 1020 - 1025.
- [5] Jeoung J H. Solidification/stabilization of dredged sludge with low alkalinity additives and geo-environmental [D]. Kyoto: Kyoto University, 2003.
- [6] Feng Naiqian, Peng Gaifeng. Applications of natural zeolite to construction and building materials in China [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(8): 579 - 84.
- [7] Ortega E A, Cheeseman C, Knight J, et al. Properties of alkali-activated clinoptilolite [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(10): 1641 - 1646.
- [8] Mozgawa W, Krol M, Pichor W. Use of clinoptilolite for the immobilization of heavy metal ions and preparation of autoclaved building composites [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168(2-3): 1482 - 1489.
- [9] Sprynskyy M, Kosobucki P, Kowalkowski T, et al. Influence of clinoptilolite rock on chemical speciation of selected heavy metals in sewage sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 149(2): 310 - 316.
- [10] Matlock M M, Henke K R, Atwood D A, et al. Aqueous leaching properties and environmental implications of cadmium, lead and zinc trimercaptotriazine (TMT) compounds [J]. *Water Research*, 2001, 35(15): 3649 - 3655.
- [11] 国家环境保护总局. GB 5086.1 - 1997 固体废物浸出毒性浸出方法翻转法 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [12] 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 [M]. (第 3 版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [13] 国家环境保护总局. HJ/T 300 - 2007 固体废物浸出毒性浸出方法醋酸缓冲溶液法 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

(3)对于干旱强度大、时间跨度长的连续性干旱,短期综合干旱指数和长期综合干旱指数同时运用的监测效果比单一综合干旱指数效果好,评价更准确更全面。

(4)资水流域综合干旱指数的构建对其他地区或流域具有很好的借鉴作用,该综合干旱指数可在全国范围内推广使用。本文的研究结果可为长江流域及其他流域建立和健全干旱监测与预警系统提供重要参考。

参考文献:

[1] Yu Meixiu., Li Qiongfang, Hayes M J, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: 1951 - 2010? [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3):545 - 558.

[2] Wu Zhiyong, Lu Guihua, Wen L, et al. Reconstructing and analyzing China's fifty - nine year (1951 - 2009) drought history using hydrological model simulation [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2011, 8(1):1861 - 1893.

[3] Zou Xukai, Zhai Panmao, Zhang Qiang. Variations in droughts over China: 1951 - 2003 [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32:L04707.

[4] 李昊洋, 李琼芳, 李鹏程. 华北历史干旱的社会影响分

析[J]. 河海大学学报:哲学社会科学版, 2011, 13(4): 63 - 66.

[5] 侯威, 杨萍, 封国林. 中国极端干旱事件的年代际变化及其成因[J]. 物理学报, 2008, 57(6):3932 - 3940.

[6] 苏宏新, 李广起. 基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系[J]. 生态学报, 2012, 32(17):5467 - 5475.

[7] Heim R R. A review of twentieth - century drought indices used in the United States [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8):1149 - 1165.

[8] Wells N, Goddard S, Hayes M J. A self - calibrating palmer drought severity index [J]. Journal of Climate, 2010, 17(12):2335 - 2351.

[9] Vicente - Serrano S M, Beguería S, López - Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696 - 1718.

[10] Vicente - Serrano S M, López - Moreno J I, Beguería S, et al. Accurate computation of a streamflow drought index [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(2): 318 - 332.

[11] 王春娟, 冯利华, 罗伟. 基于主成分分析的 BP 神经网络对南京市水资源需求量预测[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6):6 - 9.

[12] 张世法. 中国历史干旱 1949 - 2000[M]. 南京: 河海大学出版社, 2008.

(上接第 64 页)

[14] 杨旭, 金萍, 黄智山. 掺用沸石岩矿粉混凝土及建筑砂浆的试验研究[J]. 混凝土, 2000(6):14 - 17.

[15] 王川, 杨朝晖, 曾光明, 等. DTICR 协同水泥固化/稳定化重金属污染底泥的研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11):2060 - 2066.

[16] 中华人民共和国建设部. CJ/T 3073 - 1998 土壤固化剂[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

[17] 杨国清, 刘康怀, 王敦球, 等. 固体废物处理工程[M]. (第二版)北京: 科学出版社, 2007.

[18] 李寿冬, 吴伟豪, 蔡建军, 等. 天然沸石粉作为混凝土辅助性胶凝材料的研究[J]. 建筑监督检测与造价, 2010, 3(5):16 - 21.

[19] 牛全林, 冯乃谦, 张新国. 改性沸石对可溶性碱的吸附性能及其对碱硅酸反应的抑制效果[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(4):515 - 519.

[20] 胡克伟, 贾冬艳, 查春梅, 等. 天然沸石对重金属离子的

竞争性吸附研究[J]. 中国土壤与肥料, 2008(3):66 - 69.

[21] 李玉萍. 徐州和苏州土壤中铅铜锌镉的吸附解吸特性研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2007.

[22] 刘远金, 卢维盛, 李华兴, 等. 沸石对污水中 BOD₅ 和 COD_{Cr} 净化效果的研究[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 323 - 324

[23] 范昭平, 朱伟, 张春雷. 有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8):1327 - 1330 + 1334.

[24] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 5085.3 - 2007 危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

[25] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB18918 - 2002 城镇污水处理厂污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.