

湖南省地方标准

重金属土壤修复稳定剂技术规范
(征求意见稿)

编
制
说
明

二〇二三年一月十五日

一、工作简况

1 技术规范制订的目的与意义

1.1 标准制定的意义

随着工业生产规模的不断扩大和城市化的快速发展,大量重金属进入土壤,使得农业污染加剧,不仅会导致农作物产量和品质下降,而且会通过食物链进入人体,危害人体健康。由于土壤重金属污染具有量大面广、隐蔽性、长期性、不可逆性和富集性等特点,是我国土壤污染治理中不可忽视问题,因此,修复重金属污染土壤,恢复土壤原有功能,成为国内外的热点研究课题。目前,对重金属污染土壤修复一般采用原位修复的方式,主要修复技术包括客土和翻土法、电化学修复法、隔离包埋法、热处理法、固化/稳定化、化学淋洗、植物修复、微生物修复等。固化/稳定化技术是指向土壤中添加固化/稳定剂,通过吸附、沉淀或共沉淀、离子交换等作用改变重金属在土壤中的存在形态,降低重金属在土壤环境中的溶解迁移性、浸出毒性和生物有效性,减少由于雨水淋溶或渗滤对动植物造成危害。美国、日本以及欧洲一些国家已经对污染土壤的固化/稳定化修复技术进行了大量的研究,并制订了相应的技术导则与规范。根据场地修复技术年度报告第 12 版所示,1982~2005 年间,美国超级基金项目中有 22.2% 的受重金属的污染场地使用了固化/稳定化修复技术。国内研究 S/S 技术较多的是用水泥、粉煤灰等处理皮革、造纸等含重金属污泥,且已有较多的固化/稳定剂应用到工程实际中,而用来处理重金属污染

土壤的研究多处于实验室或者小规模田间试验阶段，还缺少大范围的工程实际应用。研究证实，一些工业副产物和一些矿物质，如石灰、粉煤灰、赤泥、沸石等，能有效稳定土壤中的 Pb、Cd、Cu、Zn、Cr 等重金属，使其浸出毒性大大降低。由于 S/S 技术具有费用低、修复时间短、可处理多种复合重金属污染、易操作等优点，所以它成为一种较成熟且经济有效的重金属污染土壤的修复治理技术。

2016 年 5 月国务院印发《土壤污染防治行动计划》，明确了“十三五”期间土壤污染防治工作的重点方向和目标任务；其中土壤重金属污染治理是其核心任务。2017 年 12 月，湖南省人民政府颁布《湖南省土壤污染防治工作方案》(湘政发〔2017〕4 号)；湖南省人民政府办公厅颁布《湖南省污染防治攻坚战三年行动计划(2018—2020 年)》(湘政发〔2018〕17 号)；湖南省生态环境厅湖南省财政厅联合颁布《湖南省土壤污染防治项目管理规程》(湘环发〔2021〕48 号)；2022 年 02 月，湖南省生态环境厅颁布《湖南省“十四五”重金属污染防治规划》(湘环发〔2022〕27 号)。然而，我国土壤重金属污染治理尚处于起步阶段，湖南省土壤重金属污染治理中使用调理剂的地方标准尚属空白。重金属污染稳定技术是土壤安全利用的关键技术，目前缺乏相应的技术指导。

基于此，2022 年 1 月湖南省市场监督管理局批准了湖南省环境治理行业协会承担的《重金属土壤修复稳定剂技术规范》湖南省地方标准的编制工作。

1.2 标准制定的目的

土壤重金属污染的危害巨大，具有毒性大、稳定、难去除的特点，如何有效修复是目前研究的难点。目前，对重金属污染土壤的修复措施主要分为三类：物理修复措施、化学修复措施、生物修复措施。重金属污染土壤的物理修复措施是指利用物理方法对受污染的土壤进行修复，物理修复的优点在于效率高、见效快、能将污染土壤彻底修复；但物理修复有工程量较大、成本昂贵、易造成土体结构的破坏、影响土壤肥力等局限性。化学修复措施是指向污染土壤施加化学试剂、改良剂，改变重金属在土壤中的存在形态和土壤氧化还原点位、 pH 等，通过分离、吸附、转化、稳定等作用降低重金属的生物有效性。化学修复简单易操作，但由于其仅改变土壤中重金属的存在形态，在特定情况下重金属可能会被再次活化，难以达到永久性修复的目的。因此，化学修复措施仅适用于重金属污染程度较低的地区。生物修复是指利用某些特定的动、植和微生物作为修复主体，吸附、稳定、固定、转化土壤中重金属，对土壤进行修复治理。操作简单、适用性广，成本低，不会造成二次污染，符合生态发展规律等优点。但由于生物的一些自身因素，例如植物根系生长范围有限，动物生长易受环境等因素影响等限制，生物修复也有一定的局限性。

目前，行业内重金属修复稳定剂的制备技术已经趋于成熟，但现有的稳定土壤重金属的修复剂均不同程度的存在制备方法混乱、生产周期长、见效时间长、稳定率参差不齐等问题，因此制定土壤修复普适稳定剂技术的相关规范已迫在眉睫。

2 任务来源

本技术标准来源于《湖南省市场监督管理局关于下达 2022 年度第一批地方标准制修订项目计划的通知》。

3 主要工作过程

3.1 成立标准起草工作组

工作组由胡萧、成一知、詹鹏、王栋、陈琴、彭超、张敏杰、李永战、周柱、方迎春、邓楠、黄叶红、纪智慧、胡家锋组成。湖南省环境治理行业协会主要负责编制工作的立项、组织、技术路线与工作方案审定、编制草案与编制说明、征求意见、多方评议、送审上报等工作。成立以具备高级职称人员为主的编制工作组，人员专业涵盖农业、生态、环境、土壤、植物营养等多专业学科。

3.2 制定了标准编制工作计划

标准起草工作组制定了标准编制工作计划、编写大纲，明确了任务分工及各阶段进度安排。同时，标准起草工作组成员认真学习了 GB/T1.1—2020《标准化工作导则第一部分：标准化文件的结构和起草规则》和《地方标准管理办法》（国家市场监督管理总局令 第 26 号），结合标准制定工作程序的各个环节，进行探讨和研究。

3.3 开展了广泛调查和研究工作

①调研了湖南省污染场地重金属污染修复治理技术

②调研了污染场地重金属污染修复治理效果评价的指标、方法、程序等；

③收集调研了相关法律法规、规章制度、政策文件、管理办法，相关国际标准、其他国家标准规范，国内外相关科研成果和相关典型案例；

④收集、整理和分析了相关研究资料。

4 编制了标准草案

在整理调研资料的基础上，编制了标准草案。

5 多次召开了论证与座谈会议，优化完善了标准文件和编制说明

2022年5月25日召开了《重金属土壤修复稳定剂技术规范》标准编制工作启动大会，明确了标准编制的思路及任务分工。

项目组多次向同行企业、科研院所、高校和同行专家征求意见，通过征求意见，进一步优化完善了标准文件，增强了科学性、全面性、公正性、适用性和可行性。

6 技术规范主要起草人及分工

湖南省环境治理行业协会是该技术规范编制的承担单位，项目参加人员具有多年的事重金属土壤修复稳定剂生产、制备和加工研究工作经历。主要参加人员及分工见表1。

表1 项目主要参加单位及人员分工

序号	姓名	工作单位	专业	职称	分工
1	胡萧	湖南省环境治理行业协会	环境保护	高级工程师	主持、技术负责
2	成一知	湖南新九方科技有限公司	环境科学	高级工程师	技术支持
3	詹鹏	中南林业科技大学	环境工程	中级	标准编制、技术指导
4	王栋	湖南艾布鲁环保科技股份有限公司	环境保护	高级工程师	技术支持

序号	姓名	工作单位	专业	职称	分工
5	陈琴	湖南省环境治理行业协会	环境保护	工程师	资料收集、整理
6	彭超	湖南葆华环保科技有限公司	环境监测	高级工程师	技术支持
7	张敏杰	湖南省环境治理行业协会	环境保护	助理工程师	资料收集、整理
8	李永战	湖南福尔程环保科技有限公司	无机化工	高级工程师	技术支持
9	周柱	长沙愿君康环保科技有限公司	环境保护	工程师	技术支持
10	方迎春	湖南江山春锦科技有限公司	环境工程	工程师	技术支持
11	邓楠	湖南省环境治理行业协会	环境保护	工程师	资料收集、整理
12	黄叶红	长沙禹萧环保科技有限公司	工程施工与概预算	助理工程师	资料收集、整理
13	纪智慧	湖南新九方科技有限公司	环境科学	高级工程师	技术支持
14	胡家锋	力合科技（湖南）股份有限公司	环境保护	助理工程师	技术支持

二、文件的编制原则、主要内容及依据

（一）编制原则

本标准的制定根据科学性、综合性、公正性、实用性等基本原则，按照 GB/T1.1—2020《标准化工作导则第一部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则和《地方标准管理办法》的要求编写。

1、科学性原则

基于国家法律法规、标准规范、科学研究成果，借鉴国际标准或国外先进标准，综合考虑土壤污染风险评估情况、土壤污染治理方案、治理实施情况及效果等情况，纳入数理统计方法，坚持绿色、可持续、健康发展理念，制订全面、真实反映修复治理效果的评价指标、评价程序、评价方法。

2、综合性原则

全面调研相关法律法规、标准规范，统筹兼顾，既要符合法律、法规、规章和强制性标准的要求，又要与现行的国家标准、行业标准和地方标准相协调；广泛征求意见，包括生态环境、农业农村、自然资源等专家，省市县管理部门、环保企业、农业经营主体等部门与经营主体，兼顾多方意见、多方利益，综合研究分析，科学合理制定农用地污染修复治理效果评价标准。

3、公正性原则

以引导、规范污染场地重金属污染修复治理和促进受污染农用地安全利用为出发点，科学设置标准制定范围，合理制定标准内容制定过程多方参与、协商一致、公开透明，满足我省生态环境保护 and 土壤污染防治等工作需求，促进市场有序竞争和行业健康发展。

4、实用性原则

以服务于我省生态环境保护和土壤污染防治等工作为导向，基于国情、省情，结合当前技术水平和经济社会条件，合理制定评价指标、评价程序、评价方法，切实做到技术先进、经济合理、切实可行，适用于我省土壤污染修复稳定剂使用工作。

(二) 编制内容

本技术规范是根据湖南省重金属土壤修复稳定剂的生产工艺流程编制，是重金属土壤修复稳定剂的规范化、标准化的直接体现，主要技术内容共包括 8 章：

第 1 章 范围：规定了本文件的主要技术内容和适用范围。

第 2 章 规范性引用文件：说明了本文件引用文件的版本及规范性；规范依据的法律法规、指标体系等相关标准。

第3章 术语和定义：说明了适用于本文件的术语和定义。

第4章 要求：规范了重金属土壤修复稳定剂的理化要求。

第5章 检测方法：重金属土壤修复稳定剂试验方法均参考了各类标准、相关文献资料和企业现有产品进行测试。

第6章 检验：通过引用相关标准，对重金属土壤修复稳定剂的检测规则进行规范和要求，产品合格指标应符合各项国家标准的要求。

第7章 标识、包装、运输和贮存：通过引用相关标准，对本文件生产的重金属土壤修复稳定剂的标识、包装、运输和贮存进行了规范和要求。

第8章 使用：土壤稳定剂需严格贯彻国家有关法律法规和强制性标准，各项技术要求使用。

（三）编制依据

本技术规范中的各项指标和工艺流程均是从事我省重金属土壤调理剂研究及生产的科技人员，及企业技术人员长期实践经验和研究成果中总结出来的先进适用性技术，并借鉴利用了国家、行业、地方层面上成熟的技术，针对性强，实用性广，对规范我省重金属土壤调理剂生产具有重要意义，对提升我省重金属土壤调理剂行业整体水平具有重大的推进作用。通过加大宣传力度，普及文件实施，可极大地提高我省重金属土壤调理剂生产质量的稳定性和行业技术水平。

参考标准：

GB/T1.1—2020《标准化工作导则第一部分：标准化文件的结构和起草规则》

GB/T 191 包装储运图示标志

GB/T 2828.3 计数抽样检验程序 第3部分：跳批抽样程序

GB/T 8577 复混肥料中游离水含量的测定 卡尔·费休法

GB/T 12496.8 木质活性炭试验方法 碘吸附值的测定

GB/T 12496.10 木质活性炭试验方法 亚甲基蓝吸附值的测定

GB/T 19587 气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积

GB/T 20781 固体肥料和土壤调理剂 筛分试验

GB 38400 肥料中有毒有害物质的限量要求

HJ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则

HJ/T 166 土壤环境监测技术规范

HJ 557 固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法

HJ 962 土壤 pH 值的测定 电位法

NY 1110 水溶肥料 汞、砷、镉、铅、铬的限量要求

DB/T 1165 重金属污染场地土壤修复标准

土壤重金属污染治理是我国土壤污染攻坚战的重点与难点。由于受多界面-多过程-多重环境因素的共同制约，主控过程不清楚、机制解析不明确，使得治理难度大、效果不稳定。重金属形态与有效性受到土地利用类型、重金属种类等多重因素影响，难以确定统一有效的稳定剂，从而难以制定高效普适的土壤重金属污染控制药剂。本文件基于稳定剂特性，针对镉、铅、铬、砷、汞、锑等污染元素的地球化学行为差异，编制了《重金属土壤修复稳定剂技术规范》。

3.1 粒度

粉状重金属土壤修复稳定剂粒度参考省内其他同行生产的重金属土壤修复稳定剂产品质量（具体参见企业生产证明，见附件 X）。

颗粒状重金属土壤修复稳定剂粒度参考《有机无机复混肥料要求》GB/T 18877，该标准规定了有机无机复混肥料的粒度范围为：1.0~4.75mm 或 3.35~5.60mm 的颗粒要占总量的 70%以上。

粒度测试按 GB/T 20781 的规定执行。

3.2 水分

本标准所生产的重金属土壤修复稳定剂水分参考《有机无机复混肥料》GB/T 18877 的标准执行，并采用《复混肥料中游离水含量的测定 卡尔·费休法》GB/T 8577 进行测定。

3.3 pH 值

本标准所生产的重金属土壤修复稳定剂 pH 值参考省内其他同行生产的重金属土壤修复稳定剂产品质量（具体参见企业生产证明，见附件 X），并采用《土壤 pH 值的测定 电位法》HJ 962 进行测定。

3.4 比表面积

本标准所生产的重金属土壤修复稳定剂比表面积参考省内其他同行生产的重金属土壤修复稳定剂产品质量（具体参见企业生产证明，见附件 X）。

3.5 碘吸附值

本标准所生产的重金属土壤修复稳定剂碘吸附值参考省内其他同行生产的重金属土壤修复稳定剂产品质量（具体参见企业生产证明，见附件 X）。

3.6 EDTA 螯合量

本标准所生产的重金属土壤修复稳定剂 EDTA 螯合量以砷的螯合实验进行测定，其标准参考省内其他同行生产的重金属土壤修复稳定剂产品质量（具体参见企业生产证明，见附件 X）。

3.7 有毒有害物质

本标准所生产的重金属土壤修复稳定剂有毒有害物质主要包括汞、砷、镉、铅、总铬，其中粉状、颗粒状稳定剂有毒有害物质标准按《肥料中有毒有害物质的限量要求》GB 38400 标准执行，其中括号外为无机重金属土壤修复稳定剂，括号内为除无机外的其他固体重金属土壤修复稳定剂；液体重金属土壤修复稳定剂有毒有害物质标准按《水溶肥料 汞、砷、镉、铅、铬的限量要求》NY 1110 标准执行；除无机重金属土壤修复稳定剂外的稳定剂，有毒有害物质含量以烘干基计。

3.8 重金属土壤修复稳定剂技术无害化指标

采用稳定效率为重金属土壤修复稳定剂处理后土壤中重金属离子的无害化指标。其中，单一重金属的稳定效率采用公式（1）进行计算：

$$\eta\% = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100 \quad (1)$$

式中， η 为稳定效率（%）； C_0 为稳定前土壤中浸出液中重金属离子的浓度（mg/L）； C_t 为稳定后土壤中浸出液中重金属离子的浓度（mg/L）。

土壤综合稳定效率为土壤中所有金属稳定效率的算术平均值。

工作小组选取了湖南省内典型的重金属土壤修复稳定剂进行了实验室小试及中试实验。主要结果如下：

土壤样品取自于浏阳市某污染场地处 0~20 cm 的表层土壤，将所取得土壤经过自然风干以及过 100 目筛，储存待用。将重金属铅（Pb）、铜（Cu）、锌（Zn）、镉（Cd）、镍（Ni）分别以分析纯重金属硝酸盐类物质溶液的形式喷洒入风干土样中，混合均匀后平衡约 45 d，得到模拟重金属复合污染土壤，其中铅（Pb）、铜（Cu）、锌（Zn）、镍（Ni）的浓度见表 1。

表 1 污染土壤的基本性质 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

重金属总量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)					浸出液重金属量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)				
Pb	Cu	Zn	Cd	Ni	Pb	Cu	Zn	Cd	Ni
2416.25	2022.5	2500	40	1023.75	442.18	1046	1897.17	41.87	421.72

本实验对选取的污染土壤加入单一的稳定剂，单一稳定剂分别为石灰石、高岭土、磷酸二氢钾和菌渣（蘑菇）4 种，并以 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度添加到污染土壤中并搅拌均匀。组配稳定剂为 4 种稳定剂两两组配，分别按总浓度不变，质量比为 1:1，1:2 和 2:1 的浓度添加，共计 18 种，见表 2。

表 2 稳定剂的组配方式和比例

组配稳定剂	组配方式	组配比例			添加浓度 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
SC	石灰石+高岭土	1:1	1:2	2:1	12
SJ	石灰石+菌渣	1:1	1:2	2:1	12
SL	石灰石+磷酸二氢钾	1:1	1:2	2:1	12
CJ	高岭土+菌渣	1:1	1:2	2:1	12
CL	高岭土+磷酸二氢钾	1:1	1:2	2:1	12

JL	菌渣+磷酸二氢钾	1:1	1:2	2:1	12
----	----------	-----	-----	-----	----

四种稳定剂中除了高岭土其余三种都减小了 Ni 的浸出浓度。单就 Ni 而言，稳定/固化效果最好的就是石灰石，其次是磷酸二氢钾，其土壤中 Ni 的浸出量分别下降了 $373.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $98.16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，分别减少了 46.98%和 12.34%。但就菌渣和高岭土而言，磷酸二氢钾对 Ni 的浸出量下降了 2.78%，高岭土对 Ni 的浸出量提高了 3.54%。对于 Cd 来说，稳定/固化效果最好的也是石灰石，其次是磷酸二氢钾，其土壤中 Cd 的浸出量分别降低了 $17.43 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $9.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，所占百分比分别减少了 41.62%和 22.56%，菌渣降低得不多，只占到 2.67%。但就 Pb 而言，稳定/固化效果最好的是磷酸二氢钾，浸出液中 Pb 的含量由空白的 $442.68 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降到了 $14.98 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，降低了 96.61%，而石灰石的稳定/固化效果跟磷酸二氢钾差不多，稳定效率也达到了 96.48%。对于 Cu 而言，石灰石的效果也是最好的，稳定效率高达 98.41%，而磷酸二氢钾和菌渣相比之下稳定效率远不及石灰石，但也都分别降低了 41.49%和 14.60%。对于 Zn 而言，稳定效果最好的还是石灰石，浸出液中 Zn 的含量降低了 $949.34 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，稳定效率为 50.03%，其次稳定效果较好的是磷酸二氢钾，稳定效率为 13.61%。对比四种稳定剂不难看出（见图 1），针对复合型的受到重金属污染的土壤，石灰石的处理效果最好，其次为磷酸二氢钾，相比之下菌渣的处理效果虽不及石灰石和磷酸二氢钾，但还是可以起到稳定/固化的作用，但高岭土作为一种稳定剂，不但没有使浸提液中重金属含量

降低，反而使重金属的含量升高了。在 pH 值大于 6 时，Cd 等重金属才可以吸附在高岭土的边缘位点上（见表 3）。

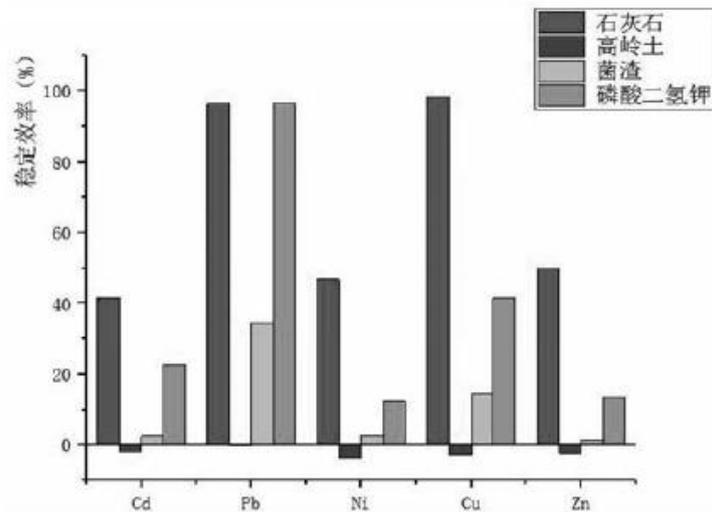


图 14 种不同稳定剂单一处理对土壤稳定效率的影响

表 3 添加不同单一稳定剂对土壤 Pb、Cd、Cu、Zn、Ni 的浸出量的影响 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

重金属	对照	石灰石	高岭土	菌渣	磷酸二氢钾
Cd	41.88	24.45	42.68	40.76	32.43
Pb	442.68	15.58	444.05	290.91	14.97
Ni	795.33	421.72	823.51	773.17	697.17
Cu	1046	16.62	1076.17	893.33	612
Zn	1897.17	947.83	1943.17	1876	1639

向供试的土壤中添加不同组配成分和不同组配比例的组配稳定剂，发现除了高岭土组配，其余组配对土壤中重金属或多或少都会有一些效果，见表 4。

表 4 添加不同组配稳定剂对土壤中 Pb、Cd、Cu、Zn、Ni 浸出量的影响 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

稳定剂	添加量(mg·kg ⁻¹)	组配比例	浸出量Pb	浸出量Cd	浸出量Cu	浸出量Ni	浸出量Zn
对照	0	0	442.68	41.88	1 046	795.33	1 897.17
SC	12	1:1	36.67	33.75	129.35	445.83	1 519.83
	12	1:2	126.6	38.71	418.9	703.83	1 763.17
	12	2:1	19.33	28.605	30.62	505.42	1 199.33
SJ	12	1:1	33.46	32.35	126.82	566	1 431.17
	12	1:2	60.72	36.13	279.75	637.67	1 616.67
	12	2:1	37.685	28.97	55.73	529.83	1 273
SL	12	1:1	13.85	29.45	221.52	652.33	1 480.33
	12	1:2	7.32	30.44	294.27	678.17	1 553.67
	12	2:1	4.095	30.1	167.8	640.17	1 476.17
CJ	12	1:1	362.18	43.55	1 006.33	767.83	1 892
	12	1:2	317	42.63	914.83	721.67	1 813.83
	12	2:1	414.62	43.37	1 048.83	797	1 931
CL	12	1:1	68.87	40.55	911.5	744.17	1 867.17
	12	1:2	40.74	38.36	805.33	704.33	1 782.83
	12	2:1	149.82	42.66	996.33	765	1 917.67
JL	12	1:1	61.02	40.645	882.33	747	1 871.83
	12	1:2	38.97	36.23	791.42	731.08	1 618
	12	2:1	67.535	39.84	874.5	705.5	1 840.83

各组配稳定剂对不同重金属浸出量对比情况见图 2，根据图 2(a) 可以看出，组配比例为 2:1 的稳定剂 SL（石灰石、磷酸二氢钾）对 Pb 的稳定效果最好，其次为组配比例 1:2 的稳定剂 SL（石灰石、磷酸二氢钾），其土壤中重金属 Pb 的浸出量分别下降了 99.07% 和 98.35%。如图 2 (b) 所示，对重金属中的 Cd 而言，添加组配比例为 2:1 的 SG（石灰石+高岭土）的稳定效果最好，稳定效率为 31.69%；其次为组配比例 2:1 的 SJ，稳定效率为 30.82%。由于土壤的 pH 呈酸性，会使一部分吸附在菌渣上的 Cd 被释放出来，对于本身处理效果就不好的高岭土来说，菌渣与其组配会使土壤中重金属的含量不降反升，从而 Cd 的含量呈现负增长的趋势。如图 2 (c) 所示，在 18 种处理中，对 Cu 处理效果最好的就是组配 2:1 的 SG，浸出量下降比例为 97.07%，其次为组配比例为 2:1 的 SJ，其稳定效率为 94.67%，但组配为 2:1 的稳定剂 GJ 甚至使土壤总 Cu 的浸出量反而增加了。像含有石灰石的组配方法，处理效果虽然不是最优，但处理效果也比较明显。对于重金属 Zn 来说，我们可以通过观察图 2 (d) 不难发现，除了组配稳定剂为 2:1 的 SG 和 2:1 的 SJ，其他处理效果都一般，稳

定效率不高。而 2:1 的 SG 处理后稳定效率为 36.78%，2:1 的 SJ 浸出液中 Zn 的浓度降低了 32.90%。而在高岭土和菌渣、高岭土和磷酸二氢钾组配为 2:1 的情况下，也都出现了浸提液中稳定后的重金属浓度高于稳定之前的浓度。如图 2 (e) 所示，Ni 的浸出量最好的效果是降低了 43.94%，其次是降低了 36.45%，其对应最好的组配分别为 1:1 的 SG 和 2:1 的 SG。虽然其他组配条件下效果不是很明显，但也可以看出组配的稳定剂起了一定的稳定/固化作用。唯独在高岭土含量较多时，稳定效果不好，甚至会使稳定后的浸提液的浓度高于稳定前的浸提液中重金属的浓度。

综合对比实验结果和数据，观察不同组配的稳定剂对土壤中重金属的浸出量可以发现，组配比例为 2:1 的稳定剂 SG（石灰石、高岭土）的综合稳定化效果最好，土壤中 Pb、Cd、Cu、Ni、Zn 的浸出量分别降低了 $423.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $13.275 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1015.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $289.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $697.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，所占百分比分别为 95.63%、31.70%、97.07%、36.45%、36.78%。其次综合效果较好的组配是 2:1 的稳定剂 SJ（石灰石、菌渣），Pb、Cd、Cu、Ni、Zn 的浸出量分别降低了 $404.995 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $12.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $990.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $265.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $624.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，稳定效率分别为 91.49%、30.82%、94.67%、33.38%、32.90%。

值得注意的是，组配比例为 1:1 的 GJ（高岭土、菌渣）、1:2 的 GJ（高岭土、菌渣）和 2:1 的 GJ（高岭土、菌渣），处理过后的土壤 Cd 浸出量相比对照实验略有增加，浸出量最大的增加了 $1.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，提高了 3.99%，而且经过组配为 2:1 的 GJ（高岭土、菌渣）稳定剂处理过后，不只是 Cd 浸出液的含量略有增加，Zn、Ni、Cu 三种浸出液的含量都有增加。单就 Zn 而言，组配比例为 2:1 的 GL（高岭土、磷酸二氢钾）也使其浸出液的浓度有所增加。

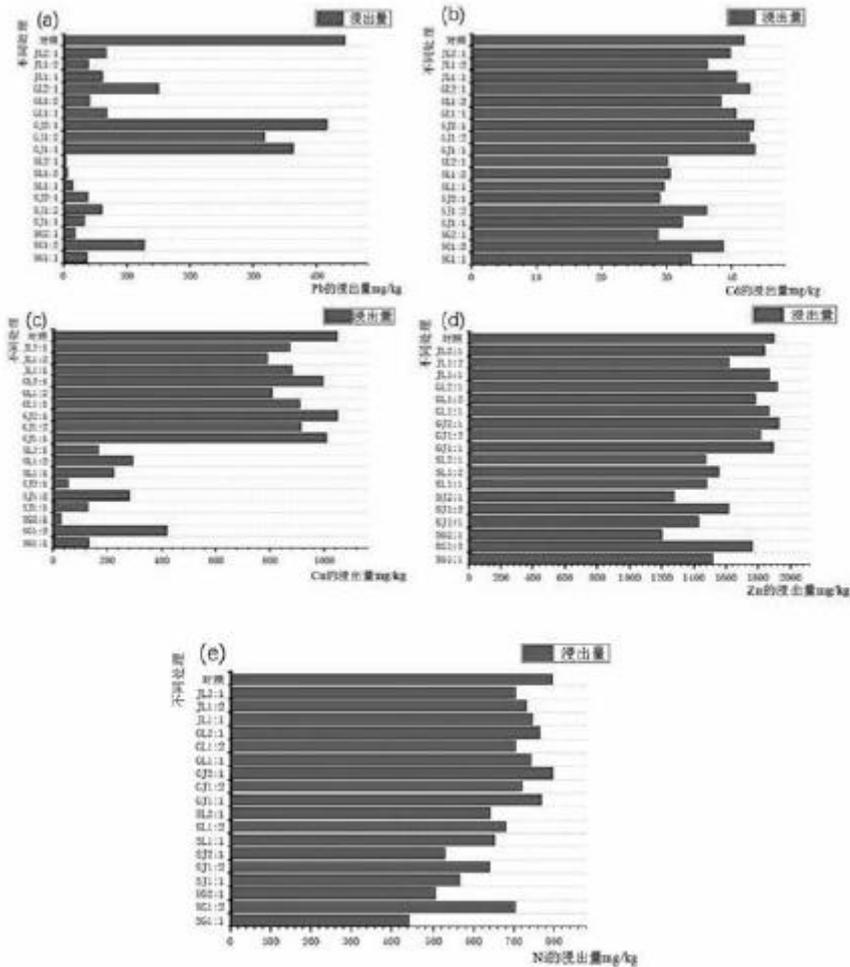


图2 (a) (b) (c) (d) (e) 分别为添加不同组配稳定剂对土壤中 Pb、Cd、Cu、Zn、Ni 浸出量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的影响

通过对比表3和表4可以看出,不同组配的稳定剂对重金属土壤的稳定/固化效果不一样,有的效果比较明显,有的效果微乎其微,综合来看稳定/固化效果最好的是2:1的SG(石灰石、高岭土)。除了重金属Pb,单一稳定剂石灰石的处理效果要好于其他任何组配和单一稳定剂,而组配稳定剂2:1的SG(石灰石、高岭土)综合处理效果仅次于石灰石。再对比其他数据可以看出,若高岭土含量多时,处理效果不理想,甚至起到了反作用。

三、采标情况说明

本技术规范是专门针对湖南省重金属土壤修复稳定剂生产技术的企业规范，也是首个符合从事重金属土壤修复稳定剂生产的文件，规范性引用文件如下：

GB/T 191 包装储运图示标志

GB/T 2828.3 计数抽样检验程序 第3部分：跳批抽样程序

GB/T 8577 复混肥料中游离水含量的测定 卡尔·费休法

GB/T 12496.8 木质活性炭试验方法 碘吸附值的测定

GB/T 12496.10 木质活性炭试验方法 亚甲基蓝吸附值的测定

GB/T 19587 气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积

GB/T 20781 固体肥料和土壤调理剂 筛分试验

GB 38400 肥料中有毒有害物质的限量要求

HJ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则

HJ/T 166 土壤环境监测技术规范

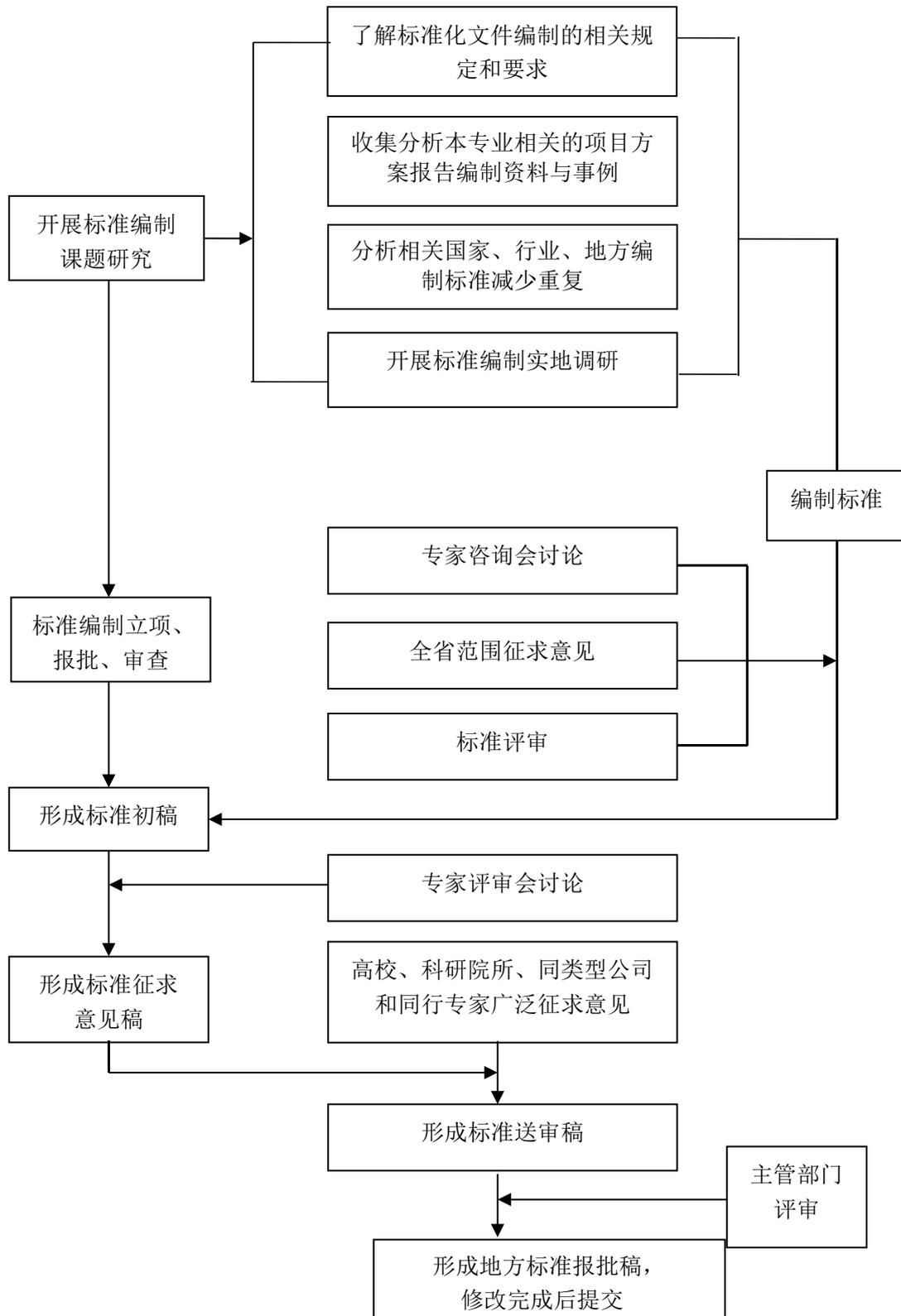
HJ 557 固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法

HJ 962 土壤 pH 值的测定 电位法

NY 1110 水溶肥料 汞、砷、镉、铅、铬的限量要求

DB/T 1165 重金属污染场地土壤修复标准

采标技术路线如下：



四、与有关现行法律、法规的关系

本技术规范与有关现行法律、法规没有冲突。

五、重大分歧意见的处理经过和依据

本技术规范在编写过程中没有重大意见分歧。

六、措施和建议

(一) 组织措施

建议该技术规范正式发布实施时，及时组织有关单位宣传、推荐该文件。

(二) 技术措施

1、建议举办由管理部门、设计单位、智能生产企业技术人员参加的培训班。

2、建议由技术规范编写单位专家负责编写实施该文件的宣传学习材料。

七、废止现行有关标准的建议

无。

八、其他应予说明的事项

无。