《有机污染场地地下水原位生物修复技术规范

生物刺激缓释药剂调配》（征求意见稿）

编制说明

《有机污染场地地下水原位生物修复技术规范 生物刺激缓释药剂调配》编制组

二〇二四年三月

目　录

一、工作概况.....1
二、编制背景.....2
三、国内外研究现状.....5
四、编制原则.....11
五、主要技术内容及说明.....12
六、对实施本标准的建议.....21

《有机污染场地地下水原位生物修复技术规范 生物刺激缓释药剂调配》（征求意见稿）编制说明

一、工作概况

（一）任务来源

依托国家重点研发计划场地土壤污染成因与治理技术专项《中低浓度典型有机污染场地生物修复关键材料与技术》项目，标准编制组承担了课题四《地下水原位生物修复调控型营养基质缓释药剂研发》的研究，通过研究具有刺激功能微生物效应的的调控型营养基质缓释修复药剂，获得针对中低浓度石油烃、氯代烃和多环芳烃污染地下水的不同种类生物刺激缓释药剂，根据生物刺激缓释药剂施用要求，建立生物刺激缓释药剂调配方法体系，形成用于有机污染场地地下水原位生物修复的生物刺激缓释药剂的调配技术规范，进一步规范和指导生物刺激缓释药剂的使用和选择。

（二）工作过程

标准编制组主要开展以下调查和研究工作

2021年3月，由课题承担单位吉林大学牵头，在课题研究基础上确定了标准的定位和内容，成立了标准编制组，明确了标准编制工作的机制、计划、时间安排和任务分工。 参编单位为北京建筑大学、南开大学、上海康恒环境股份有限公司、北京师范大学、华北水利水电大学、中国科学院生态环境研究中心、大地益源环境修复有限公司、中国石油集团安全环保技术研究院有限公司。

2021年3月至2022年10月，编制组分别调研了国内外有机污染场地地下水原位生物修复缓释药剂应用相关制度、研究进展及相关试验或工程案例，系统梳理了我国已颁布实施的相关法规和导则规范，在此基础上，结合编制组前期研发与修复工程经验，总结形成生物刺激缓释药剂的调配方法。

2022年11月–2023年7月，编制组多次召开研讨会，根据已有研究成果，充分借鉴国内外已发布的相关药剂研究文献，组织编写了《有机污染场地地下水原位生物修复技术规范 生物刺激缓释药剂调配》（草稿）。

2023年8月-10月，根据《关于开展中国环境科学学会团体标准申报工作的通知》的相关要求，经形式审查、专家论证质询等工作程序， 编制组起草了本标准初稿并经中国环境科学学会审议正式立项。

2023年10月-2024年1月，编制组多次召开研讨会，重点针对专家建议进行了进一步完善与更改，编制完成了《有机污染场地地下水原位生物修复技术规范 生物刺激缓释药剂调配》（征求意见稿）的草稿。

2024年2月，中国环境科学学会召开《有机污染场地地下水原位生物修复技术规范 生物刺激缓释药剂调配》团体标准征求意见稿技术审查会，会后编制组开展充分讨论，根据专家意见进一步修改完善，形成征求意见稿。

二、编制背景

（一）标准现行基础

随着石油化工、焦化、油气开采等行业的快速发展，各种不合理操作造成有机污染物通过多种途径进入地下环境中，导致地下水有机污染问题十分严峻，尤以石油烃、挥发性氯代烃（VCHs）和多环芳烃（PAHs）等典型有机污染较为普遍和严重。由于这些有机污染物往往具有“三致”效应，对生态环境和人类健康带来潜在风险和危害，因此，有机污染地下水修复十分迫切。

针对有机污染地下水问题，国内外学者采用抽取处理、原位化学氧化、原位化学还原、地下水曝气、表面活性剂淋洗等方法进行治理。这些方法虽然可以在修复周期内去除大部分污染物，但由于NAPL相与水的不混溶性、分散在岩性介质微区和被岩性介质吸附、岩性介质的非均质性等影响，残留在岩性介质中的污染物会持续不断的向地下水中释放，难以将地下水中污染物浓度降低到最低水平以下；而且需要较长的修复周期和修复试剂的多次投加，不仅会增加成本，在修复结束后可能还会出现污染物浓度反弹、无法控制污染羽等问题。相较于物理、化学修复技术，微生物修复作为一种集绿色、环保和成本低等优势为一体的技术，能够很好的解决中低浓度地下水中污染物反弹的问题。但受到地下水污染隐蔽性、水文地质条件复杂性、地下水环境的特殊性（如：低温、缺氧/厌氧、寡营养、生物量少）等的影响，将微生物应用于中低浓度有机污染地下水修复时存在效率低、修复周期长等瓶颈问题。因此，探索经济、高效、可持续的原位微生物修复技术是中低浓度有机污染地下水原位修复技术研究和应用的重要方向。

近年来，原位生物修复缓释药剂在地下水污染修复领域引起了广泛关注，因为它有望解决原位地下水修复的长期有效性问题。许多学者通过采取特定措施改变试剂与材料结合方式，以达到控制试剂的释放速率，使其在体系内维持一定有效浓度，提高试剂利用率，解决实际污染修复工程需求。针对氯代烃、石油烃及多环芳烃污染地下水的原位生物修复缓释药剂，在原位生物修复缓释药剂调配、调配方法与过程检测、包装与运输存储等方面，国内外均缺乏统一指导与规范，因此，结合典型污染地下水绿色可持续刺激生物修复技术需求，亟需有机污染地下水原位生物修复缓释药剂调配技术规范出台，为政府部门、场地管理者及其他参与场地修复决策者提供参考。

本文件的制定，符合新的环境标准体系要求，有利于真正规范和进一步推进我国场地修复技术工作，有利于突破污染地下水再利用发展的环境制约，推进碳达峰、碳中和目标的实现，有利于对污染地下水的有效治理和监督管理，实现经济、社会和环境效益的“三同时”，保证了政府管理的规范化及科学化。

（二）课题研究基础

依托课题研究，开展缓释修复药剂与原位生物修复技术的关键科学理论与技术研究，为有机污染地下水原位生物修复技术施用的生物刺激缓释药剂调配总体要求和方法内容提供科学依据和关键数据支撑。

1、识别了中低浓度典型有机污染地下水污染物种类类型、水文地质生境条件与土著微生物作用关系。本课题基于典型有机污染地下水生境环境特性，运用环境水文地质调查监测和微生物 16S rRNA 扩增子测序方法，结合水文地质分析方法、水环境化学因子分析方法和生物信息统计方法，联合识别了中低浓度典型有机污染地下水生境条件与土著微生物作用关系，分析了中低浓度典型有机污染场地生境环境条件，确定了典型有机污染物类别和种类、证明了存在土著功能微生物菌群与协同作用土著微生物，识别了生境条件与土著微生物内在作用关系。在跟踪我国典型有机污染工业区污染现状基础上，重点针对我国华东、华南、西北和东北等典型工业地区有机污染场地，总结分析了污染场地前期调查资料，进行了现场踏勘和监测点位布设与样品采集分析，对典型中低浓度有机污染地下水污染物种类类型、水文地质生境条件与土著微生物作用关系等进行了识别。

2、创新性的合成了降解地下水中典型有机污染物的生物质基调控型营养基质缓释药剂，系统揭示了其在地下水中的缓释刺激生物降解效应和原位缓释增

强作用机制。在中低浓度典型有机污染地下水污染物种类类型、水文地质生境条件与土著微生物作用关系识别基础上，进一步采集东北石油类污染场地地下水、华南地区某工业污染场地地下水、华东地区某工业污染场地地下水作为实验水源，以四类中低浓度典型有机污染地下水中石油烃、苯系物+萘、PAHs（蒽、芘）、VCHs（二氯乙烯、二氯甲烷、三氯甲烷、二氯乙烷）为降解对象，针对地下水缺氧/厌氧、寡营养、相对低温的环境特点，结合场地水文地质条件，以靶向刺激地下水中兼性土著微生物降解效应为目标，采用可降解的纳米生物质材料为缓释骨架，结合 DFT（密度泛函理论）分子模拟和自组装包覆/负载合成方法（乳化交联法、超声波辅助沉降法、负载法等），进行了系统的生物质基调控型营养基质缓释药剂研发，获得了 5 种具有刺激土著微生物降解效应的生物质基缓释骨架材料的调控型营养基质缓释药剂，均具有绿色环保可降解、与污染物分散状态同步、营养成分易于微生物摄取、稳定性好、缓释可控、时效性长等特点。5 种缓释药剂分别为降解石油烃包覆型壳聚糖基缓释药剂 YZ-1、降解芳香烃包覆型海藻酸盐-壳聚糖基缓释药剂 SA-H-CS、降解 PAHs 秸秆颗粒负载型缓释药剂、降解 VCHs 包覆型淀粉基缓释药剂 YZ-2 和醋糟缓释药剂，确定了有效营养基质成分、缓释药剂制备合成条件（以低成本、缓释药剂核壳比/负载率、缓释药剂粒径微观稳定性、与污染物分散状态同步、缓释时效性长为准）、缓释规律/模型与缓释生物指示物和水理影响因素等。

3、靶向揭示了其在地下水中的缓释刺激生物降解效应和原位缓释增强作用机制。结合小试试验，从水文地质、生物地球化学、分子生物学等多角度，利用微观检测和数理统计及模拟方法等，多角度阐明了生物指示物和指示生物与生物质基缓释药剂、石油烃含量削减、地下水系统的水岩界面等的响应特性，揭示了生物质基缓释药剂在污染地下水中缓释迁移与增强生物作用的内在关系。

4、运用可视化迁移转化三维模型，计算和预测了生物质基缓释修复药剂在典型中低浓度有机地下水中的的缓释行为和通量。基于生物刺激和缓/控释技术原理，运用 COMSOL 软件构建了地下水中污染物在缓释药剂刺激下迁移转化的三维模型，并将该模型应用到有机污染场地中，分析并预测其在地下水中的动态规律以及基于缓释药剂生物刺激下有机污染物的降解效率，针对存在的问题，目前正在进行不同注入情景下的缓释行为和通量计算。

5、在污染场地地下水现场示范验证，通过第三方检测公司定期采样监测，

验证了自主研发的生物质基缓释药剂能够快速刺激地下水中土著微生物，在9个月期监测内，场地地下水中典型污染物含量一直处于地下水质量标准(GB-T-14848-2017) III限值内，并且能够有效改善水质污染状况，自主研发缓释药剂一直发挥长效生物刺激修复作用。通过修复运行监测半年后的地下水土著功能菌代谢路径，发现生物质基缓释药剂投加到场地地下水中，提高了土著微生物群落系统的无机电子供/受体转换能力，增强了土著微生物菌属间的共代谢作用，其代谢通路特性，从分子生物学角度证明了氯代烃能够长期有效的被脱氯菌和相关协作菌属共同作用，其规律与室内静/动态实验结果相似，验证了自主研发缓释药剂原位修复有机污染地下水技术体系的科学性，确定了自主研发的生物质基缓释药剂的长周期作用效能和适于应用在地下水缺氧/厌氧环境特性。

6、生物质基缓释修复药剂在生物刺激修复中低浓度有机污染地下水中的应用效益潜力评价。对市售缓释药剂及实验室研发缓释药剂进行整理与分析，选取了乳化油类缓释药剂 EVO、nEVO、EPS 等比标药剂，重点开展了针对氯代烃、石油烃及多环芳烃的自主研发生物质基缓释药剂与现有生物刺激修复药剂及氧化/还原协同药剂等传统药剂进行动态对比实验，进行了多种药剂室内实验，结合数值模拟和场地应用等，采集了自主研发缓释药剂与现有缓释药剂在药剂的性能、经济性及社会影响性等多方面指标进行了包括药剂稳定性、制备成本、缓释时长、降解率等共 16 项指标进行整理分析，利用已构建的缓释药剂评价体系，对自主研发的淀粉、海藻酸钠及壳聚糖缓释药剂与现有的典型生物刺激修复药剂进行对比评价，根据分析结果初步得出自研发缓释药剂均有较高的有机污染地下水原位生物修复的潜力，并优于现有的典型修复药剂。

三、国内外研究现状

尽管生物刺激缓释技术已经被应用于有机污染土壤及地下水的修复工程，且已经形成较成熟的工艺系统，但目前该技术的专项技术规范文件并不多，各企业依照自行研发的缓释药剂及污染场地特性，对药剂的施用方式进行自主设计，而国内对此技术编制的文件几乎没有。

目前市售缓释药剂仍以传统型缓释药剂（如过氧化钙、乳化油、氧化还原成分等）为主，地下水原位生物修复缓释药剂被应用于实际有机污染地下水的案例极少，其应用比例远少于传统的修复技术，目前该技术的专项技术规范未见报道。

（一）缓释生物刺激药剂现状

1.技术介绍

缓释生物刺激修复技术是一种新型的、绿色环保且具有广泛应用前景的地下水修复技术。其实施过程为将具有生物刺激作用的缓释药剂通过原位注入工程模式投加到地下水污染区域，利用缓释药剂中的营养基质刺激土著微生物生长繁殖并将地下水中的有机污染物降解为二氧化碳和水。缓释药剂生物修复技术凭借其对难生物降解有机物污染的地下水治理的有效性、经济性和环境友好性，被广泛研究。

（1）作用原理

应用生物刺激修复缓释药剂的工作原理：通过将缓释药剂注入受有机污染的地下水中，药剂中的营养基质可以促进土著微生物生长繁殖、缓冲地下水pH值、为微生物提供电子受体/供体，从而刺激地下水中的微生物将目标污染物降解，由于药剂可以缓慢释放营养基质，可以延长药剂使用寿命，减少修复药剂的投加次数，进而解决修复反弹问题，实现污染羽的长效控制与修复。

（2）药剂调配流程

地下水原位生物修复缓释药剂调配过程主要包括：1）污染地下水生境条件调查；2）药剂营养基质与缓释材料的选择；3）制备方法选择与优化；4）药剂性能检测；5）药剂存储与运输要求。

（3）药剂适用性

主要适用于地下水中石油烃、多环芳烃、氯代烃等可生物降解的有机污染物，在实际工程应用前应进行小试或中试试验确认污染地下水能够满足修复要求。

2.生物刺激缓释药剂国内外研究现状

目前，国内外关于原位修复石油烃（C_{10}-C_{40}）、多环芳烃污染地下水缓释药剂研发主要集中在：释氧剂（CaO_2、MgO_2、$Na_2CO_3 \cdot H_2O_2$等）、释碳剂（乳化油、生物炭及缓释材料（硬脂酸、海藻酸盐、聚乙烯醇、石蜡等）包覆或负载含碳底物等）、缓冲pH值（磷酸、柠檬酸和硫酸铵等）及其协同复合药剂等，原位氧化还原修复技术研究多，强化原位生物修复技术（EISB）研究少，成本高，实际工程甚少，其中多环芳烃主要针对萘、菲等低环污染物研究较多，高环苯并系列难

降解污染物研究甚少，对于中低浓度总石油烃和低环多环芳烃污染地下水降解效果在1个月左右，达到30%-60%左右，在3个月以上去除效率在70%以上。

关于VCHs污染地下水缓释药剂主要集中在还原药剂和还原协同生物作用药剂方面，如EHC（纳米零价铁、豆油、脂肪酸、结合剂等）、EOS®（乳化油、营养剂、维他命B_{12}）、EVO®（乳酸钠、豆油、营养剂、维他命B12）等，国内外已报告，采用EHC氧化还原药剂的示范工程和工程应用，2个月左右时，降解效果在40%左右，且不同场地效果差异性明显。

在缓释药剂控释材料、高效刺激生物作用的有效活性成分、适应场地水文地质条件和地下水环境条件、缓释周期、迁移性能等方面，都有待于深入研究，迫切需求低成本、高效、长效、刺激功能微生物原位修复浅层有机污染地下水的缓释药剂应用。

实验室研发的缓释药剂种类众多，释氧剂、释碳剂详细配方及应用状况见表1-2。

表 1 释氧剂

释氧剂	配方	污染物及浓度	实验时长	释氧效能	降解效率	Log CFU/DNA
Al-ORABs	CaO_2+SA+AlCl$_3$	500 mg/L 1,4-二恶烷		在投加药剂后约半天内，pH 下降至约 6.0 并于 1 天内回升至 7 左右。DO 在 3 天内缓慢上升至 18 mg/L	在实验开始 10 天后，在同时含有 Al-ORABs 与微生物的溶液中，二恶英去除率高于 90%。在实验一周时，微生物对污染物仍有约 15%的去除效率。	——
Biochar-ORB	CaO_2+柠檬酸盐+聚乙烯醇+竹生物炭	120 mg/L BTEX	50 天	在投加药剂后 pH 小幅上升至 7.8 但迅速下降回 6.5。DO 在投加药剂后在 2 天内提高至 8 mg/L，后逐渐下降，在 100 天时降低至 1 mg/L	在投加药剂后，由于生物炭的吸附作用，BTEX 的去除率迅速提升，并在微生物的协同降解下与大约 50 天时完成对污染物的去除。	微生物附着在生物炭释氧剂上，促进了微生物对污染物的去除效率
Encap-ORB	CaO_2+SA+柠檬酸+PVA+生物炭+微生物	120 mg/L~480 mg/L BTEX	128 天	DO 在投加药剂后在 20 天内提高至 17 mg/L，后逐渐下降，在 128 天时降低至 6 mg/L	投加包含微生物释氧颗粒的组能够在约 10 天内去除总浓度为 120 mg/L 的污染物，并在再次投加污染物的情况下于 20 天去除总浓度为 240 mg/L 与 480 mg/L 的污染物。相比单独投加释氧颗粒与微生物而言有着更加迅速的去除效率。	——
CaO_2	CaO_2	萘	100 天	pH 在投加药剂后有明显的提升，在投加药剂的无生物部分 pH 短时间内提升至 10，有生物部分 pH 保持在 8.5-9.5 之间。DO 在投加药剂后 30 天内提升至 18.75 mg/L，在 100 天内维持在 7.73 mg/L 以上。	实验开始后 50 天，投加过氧化钙且含有微生物的实验柱对萘的去除率达到 100%，而单独投加过氧化钙的对照组去除率在 20 天左右开始下降并逐渐丧失降解能力。相较进投加微生物的对照组而言，投加过氧化钙能够快速有效地加速微生物的繁殖并促进其对萘的降解。	实验组中同时投加微生物与过氧化钙的组内 Log CFU 在 50 天后提升至 6 以上并保持着缓慢上升的趋势，未添加过氧化钙的生物组 Log CFU 保持在 5 左右。
Encaosul edMgO$_2$	MgO$_2$+SA	20 mg/L 萘；50 mg/L 甲苯	25 天	非生物柱中，pH 缓慢提升至 9 后开始下降，而生物柱 pH 峰值为 8.5。DO 浓度在生物柱中基本维持在缓慢提升至 15 mg/L 后逐渐下降，较非生物柱峰值较低。	萘的生物修复能力要高于甲苯，萘约 20 天内被去除而甲苯于 30 天左右。萘在水性条件下被微生物代谢的速度比甲苯快，	除假单胞菌外，食酸杆菌属、不动杆菌属和莱茵黑菌属物种在胶囊柱中的相对丰度分别较高。在好氧柱后，优势种群从变形杆菌改变为拟杆菌群。
CaO_2	CaO_2 +FeSO$_4$	苯	100 天	pH 相较单独投加 CaO_2 波动较大但峰值较低	污染物去除效率在 20 天左右达到峰值，但有较大幅度下降；相较 CaO_2 有更好的短期修复效果，但长	微生物浓度波动较大，生物活性较单独投加 CaO_2 组低

期修复效果略差

表 2 释碳剂

释碳剂	配方	污染物及浓度	电位	粒径	环境参数变化	降解效率	Log CFU/DNA
EVO-$Mg(OH)_2$	大豆油、TW-80、酵母、$Mg(OH)_2$、十二烷基硫酸钠	40 mg/L TCE	——	0.45 μm	pH 大致稳定在 7.5，	EVO:$Mg(OH)_2$=1:1 时，TCE 的浓度在第 10 天下降到检出限以下，TCE 可完全降解为 DCE，降解初期 TOC 浓度大快速降低，后缓慢降低，TOC 降解率与 TCE 降解率成正比关系。TCE 还原速率和 DCE 生成速率随着 TCE 浓度的减少而降低；TCE 还原的同时，DCE 同步生成。	EVO-$Mg(OH)_2$ 反应带中游、下游物种总数及群落多样性先增加后减少，且中游物种演化过程较下游区缓慢；在 400 天时，反应带中游、下游物种总数降低。
EPS	去离子水、表面活性剂（卵磷脂、Simple Green™ ）大豆油、乳酸和维他命混合	18 mg/L TPH	-35.7 mv	——	第一阶段：pH 值均有轻微下降；第二、三阶段：pH 值显著下降；第四阶段：出水 pH 值有所增加，后期 pH 值达到中性	第一阶段:甲苯总去除率为 73%；第二阶段甲烷总去除率 93%；第三阶段：总甲苯的去除效率 88%；第四阶段：甲苯总去除率提高为 96%。	与 GeneBank 数据库相比，22 个显性条带的核苷酸序列在 96~99%的微生物中具有一致性。添加甲苯、EPS 和 pH 调节导致优势菌种发生变化。
SPRS	植物油、SG、SL、甘蔗糖蜜、去离子水	1.5~1.8 mg/L TCE 10 mg/L DCE	−38.1±6.70 mV	2.10 μm	DO 和 ORP 降低，TOC 增加，说明转为厌氧状态；pH 值下降。	在注射井注射后 10、20 d, TCE 浓度由 1872 μg/L 降至 35、17 μg/L。210 天内，TCE 浓度在 5-21 μg/L 之间变化。在注入 SPRS 230 天后，MW-1、MW-2 和 MW-3 中的 TCE 分别被去除了约 99%、97%和 91%。	PCR/DGGE/DNA 测序结果显示，添加底物后微生物多样性增加，共检出优势菌种 31 种。
PS	水、大豆油、SL、SG、乳酸	87 μg/L TCE	−38.1±6.70 mV	2.10 μm	添加 PS 后第 35 天，pH 值从 7.1 降为 5.8，并一直保持在 5.8 左右。	注射 PS 30 天后，注射井中 TCE 几乎降解完全，DW 中 TCE 浓度在 40d 后也明显降低。注入 PS 后 45 d DCE 浓度从 3 μg/L 增加到 61 μg/L，产生的 DCE 进一步降解，未观察到显著的 DCE 积累。在 UW 中未观察到 TCE 浓度降低和 dce(或 VC)浓度增加。PS 注射 60 d 后，注射井中 VC 浓度可达 48 μg/L。操作 75 天后，VC 有轻微积累。	注入 PS 后，现场地下水中检测到的脱卤球藻数量显著增加。但在操作后期，由于环境条件的改变(如 pH 下降)抑制了脱氟球藻的生长，导致了脱氟球藻种群的减少。脱卤球藻可以作为生物标志物来评价还原脱氯的可行性。

LECS	大豆油、SG、SL、甘蔗糖蜜、去离子水、矿物质、维生素 B 复合物、乳酸钠、nZVI	7.4 mg/L TCE 0.5 mg/L PCE	-29 mV	0.7 μm	添加 LECS 导致 DO 浓度、ORP 值下降，TOC 浓度增加，pH 保持在中性附近。	在 RW 中操作 45 天后，高达 99%的 TCE 被移除，操作约 100 天后，PCE 浓度降至检测限以下。在 MW1 和 MW2 运行 290 天后，PCE 的生物降解还原脱氯率分别为 93 和 85%（在第二次注入 LECS 后）。	18 条优势条带的核苷酸序列对 GenBank 数据库中已知的特定微生物具有 94-99%的同源性，这说明该生态系统中存在对 TCE 敏感并能合成 TCE 降解酶的新型微生物。
XG-EZVI	nZVI、TW-80、SP-80、大豆油、DI、XG	800 mg/L 硝基苯	-27mV	——	TOC 变化为 500-2000 mg/L，少部分升至 2500 mg/L	在 48h 的实验后，硝基苯浓度从约 800 mg/L 降低至 200 mg/L。在 XG 和乳化油存在下 nZVI 的稳定性和反应性得到提升。	——

3. 国内外标准研究现状

目前，国内外缺少关于生物刺激缓释药剂调配相关标准，主要是与其有一定相关性可参考的缓释肥料（GB/T 23348），与菌剂相关的农用微生物菌剂（GB 20287）、环保用微生物菌剂环境安全评价导则（HJ/T 415），与生物刺激缓释药剂调配前，关于场地的修复技术导则，如：《建设用地土壤污染状况调查技术导则》（HJ 25.1）、《建设用地土壤修复技术导则》（HJ 25.4-2019）、地下水环境状况调查评价工作指南（环办土壤函[2019]770号）、地下水污染健康风险评估工作指南（环办土壤函[2019]770号）、地下水污染模拟预测评估工作指南（环办土壤函[2019]770号）、地下水污染防治分区划分工作指南（环办土壤函[2019]770号）、污染地块地下水修复和风险管控技术导则（HJ 25.6）技术导则等。

四、编制原则

科学性和高效性原则：生物刺激缓释药剂是原位生物刺激修复技术应用到有机污染地下水风险管控与修复的生态安全修复药剂，其应用后不仅可以减少实际工程工序、降低成本，更避免了污染物反弹问题，为保证标准制定的科学性和准确性， 本标准的编制过程严格遵守我国相关法律、法规和标准，生物刺激缓释药剂配置和合成设计，以有机污染地下水生境条件、水环境水质状况为前提，选用方法是在充分吸纳国内外的实践经验和研究成果，结合低成本、可持续高效发挥作用的药剂原材料进行配制和合成，以刺激地下水中土著微生物为首选，当污染地下水中土著功能微生物活性很弱，很难通过生物刺激提升其功能酶活性时，生物刺激缓释药剂制备时，可以考虑与可培养土著功能菌剂或外来菌剂，以复合配方药剂或协同使用的方式，使生物刺激缓释药剂能够靶向高效发挥降解地下水中有机污染的作用。

安全性和可控性原则：药物制剂的设计以提高药物修复过程和修复后地下水环境的安全性为前提，以地下水水质使用用途为前提，监测污染物被降解的中间产物和终产物、地下水中微生物菌群结构和组成的变化，避免二次污染；缓释药剂的质量是决定药物的有效性与安全性的重要保证，其质量主要体现在结构稳定性、高效性、缓释可控性、迁移性等指标，在质量把控方面，需要严格按照缓释药剂指南进行规范，确保质量可控。

可操作性和便捷性原则：缓释药剂调配，是缓释药剂能否精准施用，起到可持续高效修复作用的关键。在重视科学性和高效性原则、安全性和可控性原则的同时，结合缓释药

剂的调配方法流程，突出调配方法流程的可操作和便捷性，保证生物刺激缓释药剂调配方法切实可行。本标准以我国地下水污染调查和风险管控与修复相关技术导则为导向，以地下水中微生物降解有机污染物原理和反应条件为根基，结合生物刺激缓释药剂作用目标和达成目的，选择和设计简便可行的药剂调配方法流程，为有机污染地下水原位生物刺激修复提供实用药剂制备方法和调配技术。

统筹性和衔接性原则：基于统筹性和衔接性原则，本标准紧密合当前我国已颁布实施的相关技术导则和国内外相关的专业技术标准， 主动与现有地下水环境管理政策法规，地下水环境质量标准和采样、调查、 风险评估等过程技术规范相协调和衔接，实现与现有地下水环境管理与修复技术体系协调配套的同时，合理规范生物刺激缓释药剂调配方法和制备过程。

五、主要技术内容及说明

（一）层次框架

本文件由 9 部分组成，包括：

1. 范围
2. 规范性引用文件
3. 术语和定义
4. 总体要求
5. 营养基质与缓释材料的选择
6. 制备方法选择与优化
7. 材料规格和装备选型
8. 性能检测
9. 包装、贮存与运输

（二）适用范围

本文件对有机污染场地地下水原位生物修复过程使用生物刺激缓释药剂的调配的总体要求和原则、主要内容、适用主体与对象，明确文件对地下水原位生物修复缓释药剂的调配方法、性能检测、运输与贮存的技术指导作用。重点对本课题研究成果相关的生物刺激缓释药剂调配方法进行了详细阐述，主要适用于针对石油烃、多环芳烃、氯代烃等中低

浓度有机污染地下水原位生物刺激修复使用的生物刺激缓释药剂调配方法措施与相关事项。

（三）规范性引用文件

本标准引用的文件为现行有效的国家标准，文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 5749	生活饮用水卫生标准
GB/T 14848	地下水质量标准
HJ 25.2	建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则
HJ 25.6	污染地块地下水修复和风险管控技术导则
HJ 164	地下水环境监测技术规范
HJ/T 415	环保用微生物菌剂环境安全评价导则
HJ 478	水质 多环芳烃的测定 液液萃取和固相萃取高效液相色谱法
HJ 620	水质 挥发性卤代烃的测定 顶空气相色谱法
HJ 682	建设用地土壤污染风险管控和修复术语
HJ 894	水质 可萃取性石油烃（C_{10}-C_{40}）的测定 气相色谱法
HJ 970	水质 石油类的测定紫外分光光度法
T/GIA 003	污染地下水原位注入修复技术指南

（四）术语和定义

标准在直接引用HJ 682-2019、HJ 164、HJ 25.6相关术语的基础上，补充与本文件相关的定义，便于标准条文的理解。

1. 地下水生境条件 groundwater habitat conditions

结合地下水中微生物赋存特征和生长代谢特性，本文件将其定义为“地下水中微生物生长代谢所处的环境条件，包括物理、化学和生物等环境要素。”

2. 原位生物修复 in-situ bioremediation

结合地下水土环境中发挥作用的生物主要为微生物，实际修复时采用微生物、非生物药剂，本文件将其定义为“不移动污染的土壤或地下水，直接在地块发生污染的位置进行生物修复，使得土壤或地下水中的目标污染物含量削减或去除。”[来源：HJ 682-2019，2.2.2、2.5.3和2.5.17，有修改]

3. 营养基质　nutrient matrix

基于微生物降解有机污染物需要的营养物质、电子受体/电子供体、生长因子、辅助代谢物质等，考虑地下水生态安全性，本文件将其定义为“营养基质主要用于提供或强化微生物生理机能、生长代谢、降解污染物所需的基础营养物质、电子受体/电子供体、生长因子、辅助代谢物质等，如无机盐、碳氮磷源、微量元素、维生素等物质，能够参与微生物降解有机污染物的基础代谢和系列反应。”

4. 生物刺激剂　biostimulant

参考农业领域和生物刺激修复技术含义，考虑地下水生态安全性，考虑使用可降解药剂材料，本文件将其定义为“能够强化或有益于微生物的生理机能、营养吸收、非生物胁迫抵抗力或去除污染物的药剂，药剂成分为单一或复合的营养基质成分，来源具有生态安全性。”

5. 缓释药剂　sustained-release agent

结合缓释材料性能含义，本文件将其定义为“能够缓慢释放有效药物成分的制剂，与不具有缓释功能的药剂相比，减少了给药频率和显著增加了药剂作用时间。”

6. 生物刺激缓释药剂　slow-releasing biostimulant

参考原位生物修复技术概念和含义，结合“术语 生物刺激剂 缓释药剂”特点，本文件将其定义为“具有缓释功能的生物刺激剂。”

7. 生物刺激缓释药剂调配 recombined of slow-releasing biostimulant

结合生物刺激缓释药剂制备过程，本文件将其定义为“根据药剂施用要求，在药剂配制或合成过程中进行成分、结构或制备方法等的合理选择和调整。”

（五）总体要求

本文件的工作内容包含营养基质与缓释材料的选择、制备方法选择与优化、材料规格和设备选型、性能检测、包装、贮存与运输要求。生物刺激缓释药剂的营养基质成分，应有利于被土著微生物或外来微生物吸收或代谢，能够有效刺激微生物降解石油烃、多环芳烃和氯代烃，缓释材料成分应具有环境友好、无二次污染、可降解性。在进行药剂调配前，需要在场地中低浓度有机污染地下水生境条件、污染物种类和含量调查基础上，结合药剂施用总体要求和需要达到的修复，关注施用方法和修复周期，在此基础上进行缓释药剂的调配，设计调配方法，经济、操作程序简单、能耗低的环保优化方法，对药剂配方和合成

方法进行调整，根据药剂调配方法和使用量，科学合理的进行药剂原材料等级、器皿规格和装备选型，调配过程，检测缓释生物刺激效果、指示物缓释效率、生物量状况及降解产物，药剂保存根据实际情况，确保药剂成分不变质通过系统的的室内研发、小试试验/现场试验等方法，进行规范撰写编制，使其满足药剂调配的科学性和高效性原则、安全性和可控性原则、可操作性和便捷性原则与统筹性和衔接性原则。此外，根据生物刺激缓释药剂配方调配需求，还可添加生物表面活性剂和协同强化地下水中土著微生物作用的可培养土著菌或外来菌。

本文件按照生物刺激缓释药剂调配方法流程，在待修复中低浓度有机污染地下水调查基础上，进行生物刺激缓释药剂调配的关键流程，包括：生物刺激缓释药剂类型、生物刺激缓释药剂营养基质和缓释材料成分类型、生物刺激缓释药剂的制备方法选择与优化、材料规格和装备选型，充分结合自主研发生物刺激缓释药剂研制过程进行规范相关过程。

其中典型研究区的资料收集和调研，在初步选定的研究区，与课题组和修复公司沟通，进行资料收集和分析，确定含水层的岩性和厚度、地下水埋藏条件、地下水位动态变化规律、地下水补、径、排条件及动态规律和水文地质参数；分析含水层的岩性组成、化学成分、粒度分布、环境指标，分析污染物的种类和含量空分布特征。功能微生物的营养基质识别，主要通过Ⅰ.采集地下水样品，分析典型有机污染物种类和含量，推断降解反应途径，解析功能微生物（土著微生物和工程菌剂）作用下的有机污染物的降解机制，确定自然环境中有效营养基质种类与含量。Ⅱ.采用基因组测序方法，分析不同典有机污染地下水的功能微生物的菌群结构，揭示功能微生物的多样性、种群结构、进化关系、功能活性及环境之间的相互协作关系；Ⅲ.富集、培养并分离功能微生物，联合利用无机/有机、菌群-细胞-酶—基因、微观结构表征等现代检测分析技术，检测功能微生物的降解基因/酶活性，分析能微生物的生长特性、酶活性与地下水环境和水化学组成之间的响应关系。Ⅳ.确定功能微生物在代谢过程中所需的营养物质（碳、氮、磷、微量元素等）、电子受体（三价铁、亚硝酸盐、硝酸盐、硫酸盐等）、电子供体（二价铁离子、硫化物、有机酸/盐等）等，通过实验研究，优化生长因子和代谢调节物（维生素、小分子肽、氨基酸等）和pH调节成分（磷酸氢盐、磷酸二氢盐、乙酸盐等）等，分析营养基质成分组成和配比等与功能微生物酶活性、菌群结构及氯代烃降解效果之间的内在关系，为构建营养基质配方奠定基础。

在待修复中低浓度有机污染地下水调查基础上，进行生物刺激缓释药剂调配的关键环节，高质量获得所需要的生物刺激缓释药剂。

依据生物刺激缓释药剂营养基质差异，主要包括无机盐缓释药剂、复合营养成分缓释药剂、多种功能成分缓释药剂等，其中无机盐缓释药剂成分为无机盐，刺激地下水中微生物作用时，主要以地下水中有机污染物为唯一碳源；缓释复合营养成分药剂，主要成分包括无机盐、碳氮磷源、微量元素、维生素等物质；多种功能成分缓释药剂，主要成分包括营养物质、电子受体/供体、调节酸碱环境、快速增溶等药剂成分，根据地下水生境条件，选择不同营养基质的生物刺激缓释药剂。

根据缓释材料与生物刺激营养基质的组成结构形式，分为包覆型缓释药剂和负载型缓释药剂，其中包覆型缓释药剂由壳体（包覆材料）与包覆芯材组成部分,如：海藻酸钠、壳聚糖、淀粉等材料制作包覆材料，营养基质作为包覆芯材；负载型缓释药剂由具有吸附作用的多孔介质材料和营养基质组成，制备时充分发挥多孔介质的吸附作用，常见的可降解生物质吸附材料包括秸秆、糟料与其它农林废弃物等，如：玉米秸秆、醋糟（酒糟）、芦苇等。根据缓释药剂施用要求，进行科学合理的缓释药剂材料选择时，可以不同种类的包覆材料进行复合或包覆材料与负载材料进行复合，适应不同缓释周期需求。

（六）营养基质与缓释药剂的选择

1. 营养基质的选择

根据有机污染地下水的生境条件，选择不同营养基质类型的生物刺激缓释药剂，如无机盐缓释药剂、复合营养成分缓释药剂、多种功能成分缓释药剂等，无机营养基质和有机营养基质的选择需统筹考虑，相互补充，选择最佳营养基质比例，本文件对其相关成分进行指导推荐。可参考HJ164、HJ 25.2、HJ 25.6、T/GIA003。

（1）无机营养基质

当地下水中微生物降解目标有机污染物所需要的无机盐种类和含量缺少或不足时，首先进行以有机污染物为碳源的无机盐营养基质有效成分筛选。针对降解目标污染物——石油烃、多环芳烃、氯代烃等，选择刺激功能微生物新陈代谢和降解污染物所需的营养盐或电子受体/电子供体。硫酸根、硝酸根、三价铁离子等可以作为刺激功能微生物新陈代谢和降解污染物所需的电子受体，铵根、亚铁离子、硫离子等可以作为电子供体，磷酸氢盐和磷酸二氢盐可以作为营养源，共存时可以调节作用区的pH值；当无机盐营养基质无法达到

生物刺激效果时，选择加入其他类型营养基质成分进行配制，此外也要注意地下水高盐、酸性或碱性较强等极端环境条件，进行配方成分调整和优化。

（2）有机营养基质

当无机盐营养基质难以刺激地下水中微生物降解目标污染物或达不到刺激效果时，可以选择微生物易于吸收利用的有机的碳、氮、磷和维生素等，提升地下水中功能微生物量和降解效率。有机碳源以小分子的糖或有机酸（醇、脂）或高分子的糖类或有机盐类等组成，其中小分子的糖包括葡萄糖、乳糖、半乳糖、木糖和蔗糖等，有机酸（醇、脂）包括甲酸（醇、脂）、乙酸（醇、脂）、柠檬酸等，有机碳类或者有机盐类，如：淀粉、壳聚糖、海藻酸盐等，能够作为缓释材料用于生物刺激缓释药剂复合或合成，部分有机碳源，如乙酸可以作为降解氯代烃的电子供体辅助功能微生物共代谢。有机碳源宜选择糖、有机酸（醇、脂）或有机盐类等一种或多种。除了无机盐中的氮磷源以外，一定量的有机氮磷成分可以作为营养基质营养基质刺激地下水中微生物生长代谢和降解有机污染物，有机氮源宜选择小分子肽（小麦肽，玉米肽，豌豆肽等），大豆卵磷脂、甘油磷酸二钠和磷酸三乙脂等。提供微生物生长因子的维生素物质宜选择VB族的B2、B6、B12和VH等，通过添加微量的维生素，达到协助提升前述营养物质刺激微生物降解有机污染物的效果。

（3）通用营养基质

除以上营养基质成分，还可添加植物果实浆液、微生物发酵液、微量元素、生物表面活性剂等，其中常用植物果实浆液如玉米浆液，微生物发酵液如：酒糟和醋糟发酵液、玉米发酵液等，微量元素如：铁、钴、镍等。根据有机污染场地地下水生境条件和配方调配需求进行选择和添加；此外，对于购置的营养药剂，要对其成分说明进行梳理，根据应用条件药剂，在配方调配时注意以上事项。

2.缓释材料类型的选择

缓释碳类药剂能通过提供碳源和电子供体刺激微生物生长，增加其酶活性，进而增强其对污染物的生物降解效果。缓释营养基质类药剂应用范围较广，能够应用于大多数污染场所，是目前强化生物原位修复药剂的主要研究方向，已成为强化微生物原位修复不可缺少的一部分。主要缓释营养碳源、缓释复合营养物质以及掺杂改变地下水氧化还原环境和pH值组分等的营养基质缓释药剂。

可通过控制核壳结构和类型，以及调配缓释药剂粒径（10 nm~5 cm不等），根据不同地下水渗透性能，调控其缓释性能。

表3为目前归纳整理的不同实验室研发及市售缓释药剂的种类及其目标污染物，其中释氧剂多以固体颗粒或固体粉末形式而释碳剂多以液体形式存在。不同药剂拥有不同的目标污染物。

表 3 缓释药剂大致特征及目标污染物

缓释药剂名称	药剂种类	目标污染物	来源	形态
Al-ORABs	缓释氧剂	1,4-二恶烷	研发	固体颗粒
Biochar-ORB	缓释氧剂	苯系物	研发	固体颗粒
Encap-ORB	缓释氧剂	苯系物	研发	固体颗粒
CaO_2	缓释氧剂	多环芳烃	研发	固体粉末
EncaosuledMgO_2	缓释氧剂	石油类、多环芳烃	研发	固体颗粒
Nano CaO_2	缓释氧剂	苯系物	研发	固体粉末
EOx®	缓释氧剂	石油类、多环芳烃、氯乙烯	市售	固体粉末
ORC®	缓释氧剂	石油类、多环芳烃、氯代烃	市售	固体粉末
Provectus ORS®	缓释氧剂	石油类、多环芳烃、氯代烃	市售	固体粉末
CPO®	缓释氧剂	石油类、多环芳	市售	固体粉末
EVO-$Mg(OH)_2$	缓释碳剂	三氯乙烯	研发	液体
EPS	缓释碳剂	石油烃	研发	液体
SPRS	缓释碳剂	三氯乙烯、二氯乙烯	研发	液体
PS	缓释碳剂	三氯乙烯	研发	液体
LECS	缓释碳剂	四氯乙烯、三氯乙烯	研发	液体
XG-EZVI	缓释碳剂	硝基苯	研发	液体
玉米芯粉	缓释碳剂	三氯乙烯	研发	固体粉末
花生壳粉	缓释碳剂	三氯乙烯	研发	固体粉末
小麦秸秆粉	缓释碳剂	三氯乙烯	研发	固体粉末
ST-1	缓释碳剂	氯乙烯	研发	固体粉末
SA-1	缓释碳剂	多环芳烃	研发	固体粉末
CS-1	缓释碳剂	石油烃	研发	固体粉末
EOS PRO®	缓释碳剂	氯乙烯、硝酸盐	市售	液体
HRC®	缓释碳剂	氯乙烯、硝酸盐	市售	液体
Provect-ERD™	缓释碳剂	氯乙烯、硝酸盐	市售	液体
SRS®-SD	缓释碳剂	氯乙烯、硝酸盐	市售	液体

根据中低浓度有机污染地下水生物刺激修复生态安全型药剂需求，结合自主研发生物刺激缓释药剂，在释放有效药剂成分过程中，要求能够被微生物直接摄取利用、缓释材料具有可降解性，药剂能够高效持续降解、缓释可控同时，在一定条件下具有迁移性。结合

经济、安全、缓释可控的原则和缓释药剂的施用要求，科学合理的选择缓释药剂。缓释材料在缓释药剂中的结构形式宜采用包覆型和负载型，根据缓释营养基质有效成分和缓释周期需求，选择单一种类的缓释材料或复合缓释材料。

（1）单一缓释材料的选择

调配前根据中低浓度有机污染地下水生境条件、污染物种类和含量、施用方法和修复周期，结合经济、安全、缓释可控的原则，进行单一缓释材料的筛选，其中包覆型缓释材料宜选择海藻酸钠、壳聚糖、淀粉、乳化油、玉米发酵液等，负载型缓释材料宜选择秸秆、糟料（醋糟、酒糟、酶渣等）及其它农林可降解废弃物等。根据缓释药剂在地下水中施用要求，如：地层松散岩石渗透系数、原位注入工程模式或可渗透反应格栅活性介质模式等进行缓释材料的选择和加工，对缓释材料和营养基质组合的结构形式、配比和药剂粒径等方面进行调配。

（2）复合缓释材料的组合方式优化

当单一缓释材料制备的生物刺激缓释药剂达不到施用效果和降低成本时，宜选择复合缓释材料，根据复合调配目的，可以采用同一类型不同缓释材料或不同类型缓释材料进行复配与合成。不同包覆型缓释材料混合复配或多层合成叠加、与负载型缓释材料混合复配或合成、不同负载型缓释材料复配或合成等方式，以满足生物刺激缓释药剂施用要求，如：增加缓释周期、调节不同阶段微生物降解有机污染物需要的物质成分、增加微生物量等。

3.粒径的选择

纳米、微米、毫米级别及以上粒径的缓释药剂，根据水文地质条件如地下水埋藏、分布、补给、径流和排泄条件，水质和水量及其形成地质条件，并结合工程应用技术模式选择不同粒径生物刺激缓释药剂，其中采用原位注入修复工程模式时，当松散岩石粒径小于细砂粒径时，生物刺激缓释药剂粒径控制在纳米粒径范围，当松散岩石粒径中砂-粗砂粒径时，生物刺激缓释药剂粒径控制在微米级别以内，当松散岩石粒径为卵砾石粒径时，生物刺激缓释药剂粒径可以控制在纳米、微米、毫米、厘米级别，根据实际工程施用形式进行缓释药剂粒径选择。

（七）制备方法选择与优化

1. 制备方法选择

根据操作程序简单、成本低、能耗低的原则，结合编制组自主研发经验，指定了包覆型缓释药剂的制备方法，如：超声波辅助沉降法、油相相分离法、乳化交联法等；负载型缓释药剂制备方法，如：选择浸渍法、碾磨法、液相分离法等。两类缓释药剂制定过程均在常压条件，除了部分乳化方法需要温度在50-100℃条件，均在常温条件，需要的交联剂和相转变溶剂，根据药剂制定需求，进行选择，药剂可以是液态，也可以固态，或者固液态混合形态。

2. 制备条件优化

在制备过程中，对比考察缓释药剂结构、形状、粒径大小和在水相中的分散的稳定性等，根据缓释药剂施用时对药剂结构、外形和缓释周期和阶段释放药剂营养基质变化的需求，进行制备方法条件，如：温度、搅拌速度、交联剂、离心速率等制备工艺参数的优化，包括制备过程辅助相转变或合成的药剂选择。

（八）材料规格和装备选型

用药量在1-10 kg以内时，药剂原材料可以购置分析纯、生物制药等类型用药，制药过程装备选型选择烧杯、分析天平、磁力搅拌器（小型机械搅拌机）、单孔水浴锅、小的离心机和超声器等。用药量在10-100 kg以内时，化学纯或工业级别与农业植物或加工后原材料，药剂桶选择防泄漏、密封强、耐腐蚀、耐酸碱、食品级加厚聚四氟容器或钢制容器，称量装备可以根据药剂组分的用量大小，选择万分之一分析天平、千分之一天平、电子秤等装备，搅拌器采用机械搅拌机，控温系统采用大型控温水浴锅、大离心机和超声器等。用药量在1吨以上时，药剂原材料适宜从厂家直接购置，购置化学纯或工业级别与农业植物或加工后原材料，药剂桶选择防泄漏、密封强、耐腐蚀、耐酸碱、食品级加厚聚四氟容器或钢制容器等大型装备，以便于运输为准，称量装备选择电子秤或台秤等装备，搅拌器采用大型机械搅拌机，控温系统采用大型控温水浴锅、大离心机和大的超声器等，根据需要一定情况下定制相关装备。

（九）性能检测

本文件对缓释药剂的性能及评价指标进行归纳总结及量化分析，提出缓释药剂使用效果的性能检测方法，为缓释药剂在实际场地的应用提供参考。

指标参数中，药剂制备成本和工程运维成本依据材料价格、消耗资源、时间成本和和人工成本等进行估算，药剂制备过程的可操作性通过分析药剂的制备方法和过程，依照药

剂合成材料是否易于获取、具有危险性；其制备过程是否应用到特种设备或复杂的制备流程得到；药剂粒径及药剂形貌通过光学显微镜、纳米粒度仪和扫描电子显微镜测定；药剂分散程度（与水体中污染物的分散程度相一致，有利于药剂与污染物的接触和反应）通过投入水中目测观察和采用分光光度计进行测试；污染物降解率、二次污染、长期降解稳定性、药剂缓释时间、缓释稳定性、功能微生物菌群增加量、DNA增加量通过实验室实验或现场试验获得。其中，检测药剂对功能微生物降解有机污染物能力的提升效率，以检测有机污染物含量削减情况来衡量，石油类的检测方法参考HJ 970，石油烃（C10-C40）的检测方法参考HJ894，多环芳烃的检测方法参考HJ 478，氯代烃的检测方法参考HJ 620，目标污染物限值可参照 GB/T 14848、GB 5749-2022、环办土壤函〔2019〕770号、沪环土〔2020〕等。药剂刺激生物降解过程中，通过检测地下水中微生物的生长密度吸光度值或DNA含量来衡量。

测试缓释药剂在地下水中的缓释速率，以7 d~30 d区间检测缓释药剂缓释指示指标的控释效率，指示指标的检测方法参照GB/T 14848，通过缓释控释方程进行拟合推算缓释周期，有条件时在室内试验时进行长周期监测或在场地进行示范应用确定。通过柱实验或槽试验，结合原位注入工艺，进行缓释药剂迁移影响速率和范围、生物刺激降解效率、缓释周期等监测，采用缓释迁移生物刺激模拟软件，进行缓释作用范围、缓释通量和缓释生物刺激作用趋势预测。

（十）包装、贮存与运输

根据不同产品剂型选择适当的包装材料、容器、形式和方法，以满足缓释药剂产品包装的基本要求，包装应完整、安全、牢固、适合储存。产品包装中应有产品合格证和使用说明书，在使用说明书中标明使用范围、方法、用量及注意事项等内容。产品应贮存在阴凉干燥条件下，如有条件可在4℃冰箱中贮存。严禁与有毒、有害、具有腐蚀性物质共同贮存。运输过程中应有遮盖物，防止雨淋、日晒及高温。运输工具清洁无污染，以保证产品质量，轻装轻卸，避免包装破损。严禁与对菌剂有毒、有害的其他物品混装、混运。

六、对实施本标准的建议

本文件为现阶段指导性标准，建议标准发布实施后，加强相关基础科学研究，并根据标准实施情况适时对本文件进行完善、修订与补充。