

附件 3

《地下水污染可渗透反应格栅技术指南（试行） （征求意见稿）》编制说明

一、任务来源

为贯彻落实《水污染防治行动计划》《全国地下水污染防治规划(2011-2020年)》《地下水污染防治实施方案》(环土壤[2019]25号),指导和规范地下水污染可渗透反应格栅技术应用,根据《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国水污染防治法》《中华人民共和国土壤污染防治法》等相关法律、法规、标准和文件,编制《地下水污染可渗透反应格栅技术指南(试行)(征求意见稿)》(以下简称指南)。

指南由生态环境部土壤生态环境司组织,生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心、生态环境部环境规划院、中国地质大学(北京)、中国科学院南京土壤研究所、华中农业大学和中国地质科学院水文地质环境地质研究所起草编制。

二、编制必要性

地下水污染可渗透反应格栅技术(Permeable Reactive Barrier, PRB)是一项成熟的地下水修复和风险管控技术,在北美和欧洲发达国家广泛应用。美国环保署、美国海军工程服务中心等机构已发布 PRB 技术指南。根据美国超级基金项目统计,2012-2014

年有 7 个项目使用了该技术，占全部修复和风险管控项目的 7%。由于 PRB 具有阻断污染羽和去除污染物的特点，适用于当前我国污染地下水修复和风险管控的现状。因此，编制《地下水污染可渗透反应格栅技术指南》，明确 PRB 适用范围、指南内容、流程和技术要求等十分必要。

三、编制过程

2015 年，依托全国地下水基础环境状况调查评估项目，组建指南编制组，多次组织召开指南编制工作会议，结合已开展的案例研究，确定了指南工作定位、适用范围和主要内容，进一步明确了指 南与其他相关规范的衔接关系和工作范畴，完成了《地下水污染可渗透反应格栅技术指南（初稿）》编制工作。

2016 年 10 月，编制组组织专家进行讨论，形成了《地下水污染可渗透反应格栅技术指南（讨论稿）》。

2018 年 11 月，编制组组织召开指南修订工作会议，根据专家意见，完善《地下水污染可渗透反应格栅技术指南（咨询稿）》。

2020 年 2-4 月，编制组组织召开指南专家咨询会，根据专家意见，完善《地下水污染可渗透反应格栅技术指南（评审稿）》。

2020 年 5 月，在生态环境部土壤生态环境司组织下，编制组召开《地下水污染可渗透反应格栅技术指南（试行）（征求意见稿）》专家论证会，与会专家充分肯定指南出台的必要性，建议尽快印发实施。

2020年6月，征求生态环境部相关司局意见，按照相关司局意见，对指南进行修改完善。

四、主要技术要点说明

（一）工作内容和流程

明确了开展PRB应用的工程内容和流程，包括技术适宜性评估、地块概念模型更新、反应介质选择、工程设计、工程施工和运行状况监测、效果评估和后期环境监管、工程关闭等。

（二）技术适宜性评估

地下水污染修复和风险管控工程是否适合采用PRB技术，需通过技术适用性分析和经济可行性分析来判断。当技术适宜性评估表示PRB不可行时，可按照《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6）重新筛选适宜技术。

1. 技术适用性分析

通过技术适用性分析判定污染地块地下水是否可以采用PRB，需要考虑的因素有污染物特征、水文地质特征和工程施工条件。污染物特征主要考虑是否有相应的反应介质可以去除或固定污染物。根据国内外研究现状，指南总结了现有的污染物和对应的反应介质类型。水文地质特征会影响PRB施工的难度和成本，PRB通常安装在污染羽垂向范围以下、含水层隔水底板上，以防止污染物以潜流方式绕过PRB，如果含水层埋深和厚度大，其隔水底板埋藏深，施工成本会增加。隔水层较薄或者不连续将

给 PRB 在隔水层上的固定带来困难，且此类隔水层在施工过程中容易受到破坏，导致污染物向下部含水层迁移。工程施工条件包括工程地质条件、地面已有建筑物分布、水电供给等，都会影响 PRB 的施工难度。

2. 经济可行性分析

PRB 的成本取决于反应介质的类型和数量、安装深度、地层岩性特征、挖出土壤处置方式等。安装深度影响 PRB 的开挖施工和反应介质注入方法等，施工成本随安装深度增加而增加。不同施工方法影响需处理土壤量，例如，使用传统的挖掘设备进行挖掘，会产生较大的土方量，而用注入方法放置颗粒铁，可减少土壤处理量。根据 PRB 相对于污染源的位置，挖掘出的土壤中污染物的浓度会有所不同，在污染源处设置 PRB，处置挖掘出的污染土壤会增加处理成本。

（三）地块概念模型更新

当技术适宜性评估结果为适用时，从地质及水文地质特征、污染物分布特征和水文地球化学特征三个方面，对地块特征进行详细调查，建立精准可靠的地块概念模型，为开展 PRB 工程设计和施工提供依据。地质及水文地质特征包括地层岩样物理性质和水文地质参数等，可通过资料收集、钻孔、物探等方式获取，地下水实际流速可通过达西定律推算。准确刻画污染物分布特征，可确定污染羽的分布范围、迁移速度和浓度，有助于 PRB 反应

格栅的设计。水文地球化学特征包括地下水的 pH、DO、Eh 以及可能对 PRB 反应介质产生影响的地下水组分等，由于 pH 和 Eh 的变化或反应介质与天然地下水化学组分的相互反应可能造成无机化合物（CaCO₃、MgCO₃、FeS、硅酸等）的沉淀，阻碍反应进行。依据概念模型进行合理的反应介质筛选和工程设计，可更好地维持 PRB 的性能和寿命。推荐采用文字、图、表等方式，尽可能对地块概念模型进行充分的、客观的、形象的表达。

（四）反应介质选择

反应介质选择是 PRB 技术的关键步骤，包括反应介质筛选、反应动力学和停留时间测定、反应介质的水力性质测定、反应介质寿命评估等。反应介质的筛选基于高效性、导水适宜性、安全稳定性等原则，筛选方法可通过已有案例或研制新型材料进行初步筛选，然后通过批实验和柱实验确定反应介质。指南参考 2011 年美国 ITRC 编制的《可渗透反应格栅：技术更新》，按污染物类型，总结了常见的适用的反应介质及去除机理，具体见指南正文的表 5-1。

PRB 处理污染物的适宜浓度与材料的种类和活性、地下水流速、地下水水文地质情况和场地气候等有关，可通过实验室小试和中试来确定。污染物的浓度太高会导致 PRB 材料迅速失活，导致 PRB 装置过早关闭，一般要求 PRB 能够至少平稳运行 10 年。

柱实验中反应物的半衰期可用于指示反应介质在特定地块地下水修复过程的时效性。在柱实验期间测定污染物的同时，可以获得无机参数以及污染物的浓度分布特征曲线（如 pH-停留时间或 ORP-停留时间曲线）。通过比较流入与流出时水中的无机参数，可为反应介质的寿命评价提供较全面的参考。反应介质寿命评价可通过柱实验加速水流的方法获得，这为加快反应介质老化提供了途径，在短时间内让更多的水流过反应介质，以达到模拟 PRB 运行若干年后的效果。

（五）工程设计

PRB 工程设计的目标包括：（1）确保污染羽被拦截，并且污染物不会在处理系统的下方、周围或上方绕流；（2）确保 PRB 的尺寸，使污染物和反应介质接触时间足够长，能将污染物浓度降低到可接受的水平。PRB 设计关键步骤包括地下水数值模拟、反应格栅厚度设计和地球化学特征评估等。

1. 地下水数值模拟

地下水数值模拟可根据地下水流、污染羽运移及地块特征（例如场地边界、建筑物地基和埋地设施）确定 PRB 的合适位置和结构形式；估计 PRB 中地下水的流速；确定 PRB 系统运行性能监测的合适点位；评价运行性能影响因素。指南列出了开展地下水数值模拟的步骤，包括建立概念模型、确定模型范围与边界条件、设置参数、明确初始条件、模型计算和模型结果及不确

定性评估等。

2. 反应格栅厚度设计

(1) PRB 厚度

PRB 厚度是指在反应介质中为污染物提供足够的停留(持续)时间,使其降解到目标水平的介质长度。PRB 的厚度为反应格栅中沿水流方向的流速与所需停留时间的乘积,该停留时间应综合考虑目标污染物及其副产物反应所需的时间。可采用水力模型来确定通过 PRB 的地下水流速。对于温度和容重,需要在模型中进行系数校正。考虑到水流的季节性变化、反应活性随时间的潜在损失以及其他不确定因素,在计算厚度时,需乘以安全系数。

(2) 安全系数

一般通过对地块详细调查,将设计参数的不确定性降低到可接受的范围内,确保 PRB 的位置、宽度、深度和厚度满足最低要求。在大多数污染地块,当计算的单元厚度超出试验确定厚度 2-3 倍时,需要应用安全系数。合适的地块安全系数,取决于设计者对设计中输入参数(如地下水流速)的不确定性及其特定地块风险需求所作出的判断。

3. 地球化学特征评估

反应介质与天然地下水化学组分(如溶解氧、钙、溶解性二氧化硅和碳酸盐)之间的相互作用可能导致反应介质表面形成沉淀。沉淀物的积累会导致 PRB 的反应性和(或)水力传导性减

弱。因此，需要对地块特有的地球化学参数及其对反应介质寿命的潜在影响进行评估。鉴于这些地球化学因素以及与之有关的不确定性，在 PRB 设计过程中，可以通过现场地下水化学参数测量、地球化学模型方法来评价 PRB 的寿命。

（六）工程施工和运行状况监测

1. 工程施工

PRB 的施工一般包括土体的挖掘和反应材料的回填两大部分。其中土体的挖掘是 PRB 系统施工的重点，施工方法要综合考虑污染区域的污染状况、水文地质特征、周围建筑情况、施工过程中产生的废弃物的处置、施工过程对人员健康与安全的影响等方面的因素。在施工深度不高时，通常选用履带式连续挖掘或挖掘机施工等方法。当挖掘深度较高时，可采用水力压裂、深层搅拌、连续打桩、高压喷射、泥浆墙法等施工技术来降低成本，替代费用较高的挖掘技术。

2. 运行状况监测

PRB 的运行状况监测可评价工程效能、优化技术设计、维护相应设施。监测对象主要包括污染物处理效果、水力性能、地球化学及微生物环境条件变化和下游地下水水质。

通过水力性能监测可评价 PRB 对上游污染羽的捕获性能以及污染物在反应格栅中的停留时间。导致 PRB 无法完全截获污染羽的原因既有可能是工程建设的原因，也可能是场地条件的限

制；可能由于含水层或反应介质颗粒较细、过于紧密，在反应介质表面残留一些施工材料和（或）在反应介质周围出现固体压密现象，导致地下水绕过反应区；也可能包括非稳定水流流向变换，或受潮汐影响，使得地下水流向产生较大变化，未能穿过反应区。此外，地下水流速和流向的季节性变化，也会影响 PRB 水力捕获能力，使得捕获区宽度小于设计宽度。

通过收集地块原位参数和地下水无机化学组分等地球化学信息，判定 PRB 反应介质能否维持其对目标污染物降解或吸附的活性。地块原位参数包括对 DO、ORP、pH、电导率以及温度等。

（七）效果评估和后期环境监管

由于 PRB 的运行时间较长，难以在短期内实现修复目标，在实际使用过程中多应用于对地下水污染的风险管控。由于风险管控技术是对污染物迁移途径的限制或切断，因此其短期效果评估的指标主要为工程性能指标和地下水污染浓度。对于工程性能的评判要求一般须达到设计要求，若实施过程中与设计有所不同，也应不影响预期效果。除工程性能指标外，对于风险管控措施的考核最终应为其去除效果，对地下水污染可渗透反应格栅技术，其下游的污染物浓度应持续下降。按照 HJ 25.6 中对于工程措施的要求，若确认工程措施的性能及其风险管控效果不能达到预期目标，须对工程措施进行维护与优化。指南规定了 PRB 技术效

果评估的采样频次、布点数量与位置、检测指标等内容。

(八) 工程关闭

由于 PRB 运行是一个长期过程，国内外 PRB 的工程关闭和拆除案例较少，基于工作流程的完整性和技术发展现状，指南仅对 PRB 的工程关闭提出原则性要求，后续将根据技术的发展和实际案例的应用情况修订本部分内容。指南提出了可关闭 PRB 的 3 种情景，一是 PRB 上下游的污染物浓度已达到修复和风险管控目标，污染源已完全去除或通过其他手段控制，风险已经可控；二是使用其他修复和风险管控技术，不再需要采用 PRB 进行修复和风险管控；三是工程达到使用寿命。指南同时提出了 PRB 关停时，选择保留 PRB 组件需要考虑的因素，重点是考虑 PRB 中的反应介质及吸附的污染物是否会成为二次污染源。