

DOI: 10.11766/trxb201812100570

指纹技术识别泥沙来源：不确定性研究进展*

周慧平^{1,2} 周宏伟³ 陈玉东²

(1 常州大学环境与安全工程学院, 江苏常州 213164)

(2 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042)

(3 太湖流域管理局水利发展研究中心, 上海 200434)

摘要 泥沙指纹技术是近年来研究流域泥沙来源与动态变化的一项重要技术方法, 其主要局限性在于诸多的前提假设与实践条件的差异带入了一系列不确定性。泥沙从源到汇的迁移过程受自然环境和人为干扰的影响, 其源地特征、迁移路径以及泥沙性质的潜在变化等均是指纹技术应用的不确定性因素, 而采样方案设计、指纹选择方法、混合模型应用的一些主观因素进一步增加了不确定性的来源。不确定性分析是泥沙指纹技术的重要组成部分, 是评估泥沙来源指纹识别结果可靠性的主要依据。本文综述了泥沙指纹技术的诸多不确定性问题以及主要应对方法的研究进展, 总结了当前不确定性定量评估的研究现状并提出了未来的研究展望。

关键词 泥沙; 源解析; 指纹识别; 不确定性分析

中图分类号 S157; X14; X52 **文献标识码** A

土壤侵蚀产生的泥沙不仅增加水体悬浮物浓度, 而且细颗粒泥沙对营养盐、重金属及持久性有机污染物具有强烈的吸附作用。泥沙迁移过程中对污染物的吸附、贮存和解吸等行为对水生生态系统造成潜在的巨大危害^[1-2]。比如磷为湖泊富营养化限制因子, 它在流域内的迁移以泥沙吸附的颗粒态磷为主, 通常占到流域总磷负荷的 75%以上^[3-4], 因此对于磷的控制重点也就在于对泥沙输送量的控制。为有效削减流域下游泥沙及其携带污染物负荷, 必须首先识别流域内泥沙各种来源对下游输出负荷的相对贡献, 才能在关键源区具有针对性地实施水土流失治理工程。

泥沙指纹技术通过筛选潜在源地土壤物质组分中可区分源地类型的“指纹”, 以“指纹”对比的方法建立流域输出泥沙与潜在源地的直接对应关系, 从而实现流域泥沙来源的定量识别^[5]。历经

20 多年发展, 该技术已在农业、森林、城市、海岸带及海洋等自然环境以及考古学、法医学、人体健康等研究领域有了广泛的应用^[6], 成为流域泥沙动力学与源解析研究的重要方法。已有研究从不同角度综述了泥沙指纹技术的理论方法与应用等方面的研究进展。如 D’Haen 等^[7]针对历史时期河流冲积泥沙来源, 从不同时空尺度和沉积环境, 综述了泥沙指纹因子的选择及其影响因素等问题, 并提出了一个从定性到定量源解析研究的总体框架。Haddadchi 等^[8]总结了河流泥沙指纹识别的样品采集, 常用指纹因子类型与特点, 主要泥沙源地类型与贡献特征, 首次对比了 7 种常用的混合模型特点及其在应用上的差异。Walling^[9]综述了泥沙指纹技术 7 个方面的关键问题以及方法的演化与发展。

近年来, 泥沙指纹研究中的不确定性问题越来越

* 国家重点研发计划课题(2016YFD0801106), 国家自然科学基金项目(41101496)资助 Supported by the National Key Research and Development Program (No.2016YFD0801106), National Science Foundation of China (No.41101496)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhp@nies.org

作者简介: 周慧平(1978—), 男, 博士, 研究员, 主要从事流域非点源污染研究。

收稿日期: 2018-12-10; 收到修改稿日期: 2019-03-12; 优先出版日期(www.cnki.net): 2019-04-03

越受到关注。比如 Laceby 等^[10]探讨了统计分析和地质特征判断等复合指纹选择方法,认为指纹选择对结果具有显著影响;随后又系统阐述了泥沙粒径效应对指纹因子含量变化以及指纹识别结果的影响^[11]。Nosrati 等^[12]采用基于贝叶斯的混合模型对指纹识别结果的不确定性作了定量分析。已有研究针对个别不确定性因素或其影响程度开展了一些讨论,但目前对于泥沙指纹技术应用时产生不确定性的众多环节及复杂问题仍缺乏系统综合的探讨。本文从理论基础、技术方法与应用等多个方面综述泥沙指纹识别技术的不确定性问题以及相关研究进展。

1 理论基础与假设

泥沙指纹识别技术实质是建立在物质守恒理论基础上的一个“黑箱”模型,其主要的前提假设是:(1)泥沙的潜在源地为已知,且下游泥沙只源于这些已知类型;(2)不同源地类型可根据土壤物质特性(即“指纹”)来区分,源地土壤与下游混合泥沙的“指纹”有关联,可直接比较;(3)泥沙迁移过程中“指纹”特征守恒不变,或其变化可忽略或定量描述,下游泥沙特征能够反映它的来源信息。由以上假设可知,该方法仅关注模型的输入与输出部分,泥沙迁移的中间过程是未知且忽略的。然而实际上,土壤侵蚀发生后,泥沙在坡面运移、植被缓冲带、湿地以及水体迁移等过程中受到物理、化学及生物作用的影响,其物质组成与性质的潜在变化是十分复杂的^[13],且目前还难以完全定量描述。此外,流域尺度自然条件及局部的人为因素对泥沙源地的干扰导致源地类型的空间异质性与多变性,以及泥沙在不同景观中迁移路径与水体连通性的复杂程度等因素,进一步增加了泥沙指纹识别的不确定性。

解决此类问题,一方面要充分分析泥沙源汇过程中潜在的不确定因素来源以及前提假设与实际情况之间的偏差,从而在研究中尽量地避免、减少这些因素的影响,使研究条件尽可能接近前提假设;另一方面,要尽可能对这些因素和影响过程进行定量化描述,从而对不确定性作出定量评估,使研究结果更具科学性与实践意义。

2 不确定性的来源及应对

2.1 源地识别与分类

泥沙指纹识别研究通常事先定义泥沙潜在源地的类型,根据研究需要以空间源(子流域或地质单元)或类型源(土地利用或土壤侵蚀类型)进行分类,或结合两者将不同源地进行叠加分组研究^[14-15]。但目前即使通过先验知识和大量的实地调查,对源地的识别和分类方式仍然具有一定的主观性。

首先,假设为已知的泥沙源地,实际可能是所有真实来源中的主要部分,而另一些源地可能未被识别,特别当空间尺度较大或源地类型空间异质性复杂时更难以全面、正确地判断出潜在源地,而下游获取的泥沙却极有可能包含了那部分未知源地的信息。其次,源地间相互干扰可影响对源地的正确分类。由于泥沙迁移不完全是一个连续的过程,易受各种景观截留,被认为是源地的某种景观或位置实际可能是另一种来源形成的汇,由此可造成重复识别且难以寻找合适的指纹将其区分;而当泥沙输送通道受阻而不能有效迁移至下游时,下游获取的泥沙实际并不能与该来源建立直接对应关系。此外,自然因素或人类活动干扰也可能使原本具有明显差异的类型出现不同程度的同质化特征,增加了源地分类的难度。源地分类数量也直接影响混合模型的计算。当源地分类数量过多时,模型计算的不确定性显著增加。Pulley 等^[15]对源地采用了 3 种不同的分类方案,指纹识别的结果及其不确定性均显示出了明显的差异。

由此可见,对于不同区域和类型的研究,源地类型的划分应注意结合管理需求,识别泥沙源汇关系及迁移路径,充分分析流域下垫面特征,包括地质地貌、土地利用的时空动态变化及人为干扰因素、景观的空间异质性、景观与水体或泥沙迁移通道的连通性、土壤侵蚀驱动因素及强度分布等信息,同时尽量合并指纹特征类似的源地^[16],从而有效减少由源地识别或分类引起的不确定性。

2.2 样品采集

如何采集具有代表性的样品,使其能够真实反映泥沙的源汇特征及其关联性,也是泥沙指纹研究关注的问题,然而对于代表性样点的选取以及采样方案的制定,目前仍缺乏较为统一的规范。源地土

壤样品大多采集表层 2 cm 土壤, 这被普遍认为是地表侵蚀后最易流失和最具代表性的部分^[17], 也有研究采用 3 cm^[18]、5 cm^[12, 15]或针对不同源地类型采用 2 cm、10 cm、30 cm 的不同方案^[14, 19]。实际上, 土壤表层易侵蚀部分也因不同区域气候条件、土壤侵蚀的主要驱动力和侵蚀强度等因素而不同, 而固定点位和深度的表层土壤并不能代表真正被侵蚀且迁移至下游的部分。为此, 在降雨期间采集某种源地边缘地表产流中的泥沙作为源地样品被认为具有更好的代表性^[20-21]。此外, 由于表层土壤侵蚀并不是流域产沙的唯一来源, 也应考虑对某些源地特定部位土壤剖面的分层取样^[22]。当研究空间源或某些面积大且较为单一的类型源时, 还可以采集流经支流中的悬浮泥沙, 以此代表源地实际产出的泥沙^[23]。由于一些指纹因子如有机质、磷以及放射性核素等容易受到农田耕作、施肥等人为干扰和季节变化的影响, 采样位置和时间偏差可能影响样品的代表性并对结果产生一定的影响^[24]。采样点数量通常以满足统计分析要求设计并与需要投入的人力和财力作出平衡, 但受到源地类型空间异质性以及指纹因子在源地内变异特征影响时, 需要增加的样点数量与位置等均由主观判断, 样点增加后对结果的影响也难以进行评估。

目标泥沙主要采用悬浮泥沙或沉积泥沙两种类型。悬浮泥沙主要用于研究短期内不同降雨事件或年内季节变化等时间尺度下的泥沙来源^[25], 而后者对于研究较长时期内流域泥沙来源变化特点具有更好的代表性^[26]。悬浮泥沙样品获取通常要采集水沙混合样品并作离心处理, 因此采集一个具有代表性且满足分析用量的样品以及需要投入的人力和时间受水体含沙量的影响较大, 而使用替代方法也可能增加样品采集的不确定性。如通过对河床泥沙的扰动采集悬浮泥沙作为替代^[27], 或者采用一种具有创新性的自动间隔采样装置^[28-29]。前者在获取悬浮泥沙时较难把握泥沙所代表的时间特征, 而后者虽然能够收集一定时间段的悬浮泥沙, 但是难以得到相同环境条件下的重复样品。对于沉积泥沙样品, 受沉积速率及其他复杂水文条件的影响, 不同深度泥沙所反映的时间尺度的代表性以及其本身性质的潜在改变等因素仍需要进行深入探讨。

总体而言, 样品采集的时间、频率以及空间位

置对于研究泥沙来源的时空变化特征十分重要, 不同的采样方案可能使结果具有明显的差异。Tiecher 等^[20]尝试验证 4 种不同的目标泥沙采样方案对泥沙贡献分配结果可靠性的影响, 认为只有当结果相对一致时, 才能对区域的水土保持治理工作提供有效指导。针对不同采样方案的潜在不确定性, 在制定采样计划时一方面要充分调查并结合不同源地信息, 识别泥沙的“源汇关系”以及潜在的自然与人为影响因素, 并在采样时有效避开不利因素干扰; 另一方面可采用模型模拟的方法从整体上分析流域土壤侵蚀时空特征从而指导采样工作^[30], 同时也可对指纹识别结果提供对比验证。

2.3 指纹性质的潜在变化

泥沙指纹识别研究中采用的指纹因子主要包括物理、化学和生物化学性质^[31], 并且以指纹因子在泥沙迁移过程中不发生改变为基本假设。但事实上泥沙迁移的复杂过程和环境条件, 包括泥沙颗粒分选和富集作用、离子交换、吸附与解吸、沉淀与溶解等因素将一定程度改变泥沙颗粒的地球化学性质^[33]。生物化学过程中, 有机质分解作用可能改变有机质含量及其组成, 微生物活性还能将物质的无机形态转化为有机形态, 甚至改变矿物磁性等特征^[32]。而当泥沙长期处在复杂多变的沉积环境中时, 这些变化可能更加明显^[33]。放射性核素(如 ¹³⁷Cs、²¹⁰Pb、⁷Be 等)虽然是一种非保守性物质, 但是由于其具有固定的半衰期, 仍可用于不同时间尺度的指纹研究^[34-35]。近年来发展起来的一种新型泥沙“指纹”——特定化合物稳定同位素(CSSI), 因其与泥沙能较强地结合且不易被降解的特点而被逐步应用^[36-37], 但其在输移、沉积过程中受生物与环境因素影响, 种类和含量等潜在变化产生的不确定性需要进一步深入研究^[38]。如高进长等^[39]在川中丘陵小流域的研究认为, 泥沙有机物来源和形态的复杂性使 $\delta^{13}\text{C}$ 指标在示踪泥沙来源时的可靠性受到影响。如此众多对泥沙指纹性质变化的影响因素贯穿于泥沙源汇迁移的整个过程, 而理解如此复杂的过程, 甚至对其进行定量描述具有很大的难度, 即使对某些特定过程通过室内受控实验进行定量描述, 但与流域自然环境的差异以及实验本身的误差带来的不确定性依然是一个无法避免的问题。

在目前无法忽略而又不能定量描述指纹的潜在

变化时, 指纹识别研究通常采用“阈值检验”的方法来初步筛选具备“保守性”特征的泥沙指纹^[40-41], 即比较泥沙及源地土壤样品中各指纹因子值, 当泥沙样品中某指纹因子含量超出源地土壤中该指纹含量范围时, 认为该指纹是非保守性的而被排除。Wilkinson 等^[42]建议增加指纹平均值的对比, 检验其是否同样满足上述条件可以提高筛选的可靠性。然而这种数据测试方法仍存在一定局限性, 因为泥沙样品指纹值若超出源地样品指标值范围也可能是有其他源地类型未被识别或者是由于样品的测试误差造成, 而样品中非保守性的指纹因子其含量变化也有可能并未超出范围却通过了检验。对于指纹的非保守性问题, 在研究中应尽量避免采用一些具有明显的非保守性特征的指纹, 如磷的相关指标, 同时根据研究区土壤地球化学特点以及潜在的环境变化特点, 对指纹的保守性特征进行合理分析和判断, 或当某种影响可定量描述时对有关指纹采取必要的修正。

2.4 复合指纹筛选

泥沙指纹筛选通常根据研究目标和源地分类首先确定指纹初选的主要类型, 如放射性核素可用于识别不同时间尺度表层与亚表层土壤侵蚀或者耕作与非耕作用地来源^[26, 43]; 而以土地利用分类特别是讨论不同植物覆盖类型时, CSSI 指标可作为主要指纹因子^[36, 44-45]。总体而言, 泥沙指纹初选是在综合了解研究区潜在源地类型土壤地球化学等性质特征以及泥沙迁移特点等先验知识的基础上进行的, 具有一定的主观性, 而复合指纹是在指纹初选的基础上通过统计检验等方法选出具有最佳源地识别能力的指纹组合^[46]。目前采用的统计学方法主要为 K-W (Kruskal-Wallis H) 检验和判别分析 (Discriminant Function Analysis, DFA)。除此之外, 其他类似的统计检验方法如 M-W (Mann-Whitney U)、t 检验等也各有其优势^[47-48]。Palazón 等^[49-50]在原有方法基础上加入主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 法作了对比; 类似的有 Nosrati 等^[51]采用了主成分聚类分析 PCCA (Principal Component & Classification Analysis) 法, 研究结果均证实了不同方法或组合应用产生的复合指纹及识别能力有一定差异。

对于不同的统计方法得到的复合指纹所包含的

指纹因子数量及识别能力差异的问题, Sherriiff 等^[52]研究认为, 较多个指纹因子组成的复合指纹能够减少混合模型计算的不确定性, 因为由不同指纹因子引起的偏差能够部分相互“抵消”, 因而他们建议尽可能采用指纹因子较多的复合指纹。但 Zhang 和 Liu^[16]认为复合指纹对源地识别能力的强弱并不能决定混合模型精度的高低, 采用较少因子的复合指纹反而可以减少模型计算误差。Palazón 和 Navas^[49]也证实了包含较多指纹因子的复合指纹并不一定能得到最佳的结果。目前关于这个问题的争论仍在继续, 但普遍接受的一点是, 复合指纹选择应建立在对各类指纹因子环境行为特征及指示意义充分认识的基础上, 并尽可能结合多种方法 (如地质条件判别)^[10]综合分析, 而不能在缺乏先验知识的情况下仅仅依靠统计检验方法对大量指标进行筛选, 由此带来的不确定性是难以估量的。Collins 等^[24]提出的方法指南是基于一定数量研究而较为普遍的经验方法, 但对于不同的研究, 应尽量对不同方法得到的复合指纹重复试验, 并且要在包含指纹因子数量, 即复合指纹识别能力和混合模型计算误差之间寻求一个较好的平衡点。

2.5 混合模型计算

泥沙来源贡献分配计算采用的混合模型有多种结构形式, 输入数据也有多种形式或优化处理方法。最初的 Collins 模型^[53]将各指纹因子的平均值作为模型的输入数据, 其主要不足在于未能体现一些指纹值的变异特征以及由于样品数量不足而产生的代表性问题。为此, Devereux 等^[54]在混合模型计算时首先对指纹值作归一化标准差处理, Gellis 等^[55]则根据各类源地的样点数量差异修正了各指纹因子的方差值。Hughes 等^[56]在模型中应用了蒙特卡洛优化算法, 并直接采用所有样品的原始指纹数据从而将误差控制在最小范围内。Haddadchi 等^[57]选取 4 个不同结构的混合模型对比研究后发现泥沙源地分配结果存在明显的差异。因此, 如何选择合适的模型以及数据优化处理的方法也十分关键, 而将泥沙迁移过程中环境要素变化等因素纳入模型, 形成一个基于泥沙环境过程的混合模型则是未来模型优化研究的方向。

混合模型的不确定性还来源于不同模型结构中对指纹值所作的各种修正, 比较常见的有对泥沙粒

径效应以及有机质含量的影响增加修正系数^[5]。尽管经历了从线性修正到非线性修正的改进^[58]，这种方法仍有其明显的弊端。一方面，泥沙粒径组成和有机质含量在其迁移过程中是不断变化的，他们与指纹因子含量的关系也可能视不同指纹因子和研究地点的变化而不同。Smith 和 Blake^[59]认为，是否对粒径效应作修正要谨慎分析，即使要修正也要视特定的指纹与粒径组分区别对待，但并不提倡对有机质含量的影响作修正，以免引起过度校正或额外的不确定性；另一方面，为计算修正系数而对泥沙粒径及有机质参数的测试误差也可能引入新的不确定性。除了采用粒径效应修正系数，另一种解决方法是将源地和泥沙样品的分析粒径缩至更小更窄的范围分别进行对比，如分为 $<10\ \mu\text{m}$ 和 $10\sim 63\ \mu\text{m}$ ^[60]，甚至是对比 $<2\ \text{mm}$ 的部分^[61]。但需要注意的是，粒径越小可能更易受环境的影响且由此投入的工作量和难度也随之增加。实际工作应根据目标泥沙粒径分布特点选取具有代表性的分级区间。此外，采用上文提到的“支流采样”^[23]能够避免使用修正系数，从而减少由粒径效应修正带来的不确定性。除了粒径效应，考虑不同指纹因子对源地识别能力的差异以及指纹因子在源地内的空间变异带来的影响引入权重系数也是一些研究关注的重点^[40, 42]，但对于模型精度的提高以及可能引起额外不确定性仍然存在诸多争议，甚至有研究表明，引入这样的权重系数实际上会降低模型计算的精度而不应被采纳^[57]。对于上述这些引入修正系数方法的可靠性问题，应采用人工混合物等方法对不同的模型和数据反复进行验证^[62]，而 Lacey 等^[10]建议加强各土壤元素的相关性分析，从而对于指纹的潜在变化以及最终的选取和修正具有更为合理的判断。

3 不确定性的定量评估

定量评估不确定性是指纹识别技术的一个重要组成部分，也是研究如何减少不确定性因素，评价研究结果可靠性，从而有效指导泥沙治理决策的关键。

目前，泥沙指纹技术的不确定性研究主要针对不同模型结构和输入参数（数据预处理）、指纹筛选的统计方法、粒径与有机质影响的修正、指纹的空

间变异以及对源地识别能力的权重分析等一个或几个方面对结果产生的影响进行分析。不确定性定量评估方法以蒙特卡洛（MC）随机模拟为主，但事实上该方法并没有充分考虑采样方案以及指纹潜在变化等因素，主要反映已有数据分布下的部分随机误差以及模型计算与优化过程产生的部分不确定性。对于不同模型结构、复合指纹筛选方法以及各种修正系数等引起的不确定性的评估，主要通过对比分析不同方案（或方案组合）下源地贡献分配结果差异程度，包括对不同模型应用的拟合优度（GOF）比较、不同方案的结果与已知人工混合泥沙数据的比较等（表 1），但目前仍较难将上述各类问题纳入一个统一的模型对不确定性进行综合评估。近年来，贝叶斯混合模型逐渐受到泥沙指纹研究的关注^[26, 51, 63]，它相比基于频率理论的多元线性混合模型在不确定性分析上具有明显的优势，比如它可以最大限度地利用现有资料和已知信息，同时也考虑到参数、模型输入和资料等方面的不确定性，包括采样误差、仪器分析误差等，通过似然函数用观测资料来修正输入的参数分布，使最终的参数分布能与实际相吻合。然而贝叶斯混合模型用于泥沙指纹研究的应用相对较少，且对于其中各类不确定性信息的输入与修正以及结果的表达仍缺乏全面细致地描述和探讨。总体上看，国外对不确定性的定量研究较多，特别对于复合指纹筛选、混合模型应用以及有关指纹修正系数等影响的分析较为全面和深入，而国内已经开展的泥沙指纹研究（见周慧平等^[64]综述）大多以不同区域及环境下不同类型指纹识别泥沙来源的可行性和效果的探讨为主，对不确定性的分析总体较少或主要以定性讨论为主^[68-69]，缺乏对特定问题的定量和深入地对比研究。

4 结论与展望

泥沙指纹识别技术目前正在从一种研究工具逐步演化成为一种流域泥沙管理工具，特别是近期 Pulley 和 Collins^[70]已经开发了一套完整的指纹技术识别泥沙来源的软件系统。但是，泥沙指纹识别显著的地域性特点以及受源地类型识别及指纹选择等主观和经验性影响的特点仍是其最为主要的局限性所在，从而在应用上受到了一定程度的限制。此外，

表 1 近期有关不确定性的研究

Table 1 Recent researches on uncertainty analysis

参考文献 Reference	流域面积 Watershed area	研究关注的不确定性因素 Uncertainty factors focused	不确定性评估方法 Uncertainty assessment method
Haddadchi et al. ^[8]	182 km ² / 907 km ²	混合模型结构及优化算法 Mixing model structure and optimal algorithm	GF
Haddadchi et al. ^[57]	--	混合模型结构 Mixing model structure	MA、AM
Lacey et al. ^[61]	75 km ² / 123 km ² / 331 km ²	混合模型结构/指纹识别能力权重 Mixing model structure / Weighting for fingerprint discriminatory power	MC、AM
Palazón 和 Navas ^[49]	1 509 m ²	指纹筛选方法/指纹数量	MC、CS
Nosrati et al. ^[51]	228 m ²	Fingerprint screening method/ Number of fingerprints	BM
Collins et al. ^[40]	2 299km ²	源地内指纹变异/指纹识别能力权重/混合模型结构 Within-source variability in fingerprints/ Weighting for fingerprint discriminatory power/ Mixing model structure	MC、CS
Smith 和 Blare ^[59]	920 km ²	粒径与有机质修正/指纹非保守性 Particle size and organic matter correction / Fingerprint non- conservative behavior	MC、CS
Manjoro et al. ^[18]	90 km ²	指纹筛选方法/指纹数量/蒙特卡洛随机模拟计算次数 Fingerprint screening method/ Number of fingerprints/ Model iterations in MC simulation	MC、CS
Smith et al. ^[63]	16km ²	指纹筛选方法/指纹数量/指纹非保守性及非正态分布 Fingerprint screening method/ Number of fingerprints/	BM、AM
Sherriff et al. ^[52]	11km ²	Fingerprint non-conservative behavior and abnormal distribution	MC、AM
Zhang 和 Liu ^[16]	15.6 km ²	指纹筛选方法/指纹数量/指纹识别能力权重 Fingerprint screening method/ Number of fingerprints/	MC、CS
Zhang et al. ^[65]		源地类型/泥沙时空变异/样品数量 Source types/ Spatio-temporal variation of sediment/ Sample amount	GS、MC
Kraushaar et al. ^[66]	263.5 km ²	源地空间异质性/泥沙粒径组成 Spatial heterogeneity of sources/Sediment particle size composition	MC、CS

续表

参考文献 Reference	流域面积 Watershed area	研究关注的不确定性因素 Uncertainty factors focused	不确定性评估方法 Uncertainty assessment method
Pulley et al. ^[33]	1 634 km ²	不同指纹组/粒径与有机质修正/地球化学物质与矿物磁性等性质改变 Different fingerprint groups/ Particle size and organic matter correction/ Changes in geochemical and mineral magnetic properties	MC、CS
Pulley et al. ^[67]	1 060 km ²	不同指纹组/粒径与有机质修正/指纹源地间差异及源地内变异 Different fingerprint groups/ Particle size and organic matter correction/ Inter-source contrasts and within-source variability in fingerprint	MC、CS
Pulley et al. ^[15]	4.3 km ²	源地分类/分组方案 Source grouping/ classification scheme	MC、AM
Nosrati ^[26]	4.47 km ²	源地分类/分组方案 Source grouping/ classification scheme	BM
Zhao et al. ^[68]	0.64 km ² 0.68 km ²	产沙估算/混合模型/采样过程 Sediment yield estimation/ Mixing model/ Sampling process	QL
杨明义和徐龙江 ^[69]	1.12 km ²	未指定不确定性因素 Non-specified factors of uncertainty	GF

注：AM-人工混合数据验证，BM-贝叶斯模型，CS-不同方案结果对比，GF-拟合优度分析，GS-高斯一阶近似，MC-蒙特卡洛模拟，MA-模型精度分析，QL-定性分析 Note: AM-Artificial mixture validation, BM-Bayesian model, CS-Comparison between different schemes, GF-Goodness-of-fit (GOF) analysis, GS-Gaussian first-order approximation, MC-Monte Carlo simulation, MA-Model accuracy analysis, QL-Qualitative analysis

泥沙迁移路径的连通性即源汇的关联性、环境要素变化对有关参数的影响等方面仍然缺少科学的定量评估方法，特别是当各种不确定性因素对结果影响的方向、程度不同时，如何将众多不确定性因素量化分析并统一纳入到模型进行综合评估仍是需要关注的重点和难点。最大程度地识别并减少泥沙指纹识别的不确定性因素，并对主要的不确定性进行综合定量评估，从而使泥沙指纹技术真正成为兼具流域泥沙源解析研究和泥沙管理的实用工具，仍亟待深入研究。

参 考 文 献

- [1] Bilotta G S, Brazier R E. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research*, 2008, 42 (12): 2849—2861
- [2] Owens P N. Sediment behaviour, function and management in river basins//Owens P N. Sustainable management of sediment resources: Sediment management at the river basin scale. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2008: 1—29
- [3] Foster I D L, Chapman A S, Hodgkinson R M, et al. Changing suspended sediment and particulate phosphorus loads and pathways in under drained lowland agricultural catchments; Herefordshire and Worcestershire, U.K. *Hydrobiologia*, 2003, 494 (1/3): 119—126
- [4] Walling D E, Webb B W, Russell M A. Sediment-associated nutrient transport in UK rivers//Freshwater Contamination, Proceedings of Rabat Symposium. IAHS Publ. No.243, Wallingford, UK: IAHS Press, 1997: 69—81
- [5] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Sediment sources in the Upper Severn catchment: A fingerprinting approach. *Hydrology & Earth System Sciences*, 1997, 1 (3): 509—521
- [6] Owens P N, Blake W H, Gaspar L, et al. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean sciences, geoarchaeological, forensic, and human

- health applications. *Earth-Science Reviews*, 2016, 162: 1—23
- [7] D'Haen K, Verstraeten G, Degryse P. Fingerprinting historical fluvial sediment fluxes. *Progress in Physical Geography*, 2012, 36 (2): 154—186
- [8] Haddadchi A, Ryder D S, Evrard O, et al. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28 (4): 560—578
- [9] Walling D E. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. *Journal of Soils & Sediments*, 2013, 13 (10): 1658—1675
- [10] Lacey J P, McMahon J, Evrard O, et al. A comparison of geological and statistical approaches to element selection for sediment fingerprinting. *Journal of Soils & Sediments*, 2015, 15: 2117—2131
- [11] Lacey J P, Evrard O, Smith H G, et al. The challenges and opportunities of addressing particle size effects in sediment source fingerprinting: A review. *Earth—Science Reviews*, 2017, 169: 85—103
- [12] Nosrati K, Govers G, Semmens B X, et al. A mixing model to incorporate uncertainty in sediment fingerprinting. *Geoderma*, 2014, 217/218: 173—180
- [13] Koiter A J, Owens P N, Petticrew E L, et al. The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins. *Earth-Science Reviews*, 2013, 125 (5): 24—42
- [14] Sadeghi S H, Najafi S, Bakhtiari A R. Sediment contribution from different geologic formations and land uses in an Iranian small watershed, case study. *International Journal of Sediment Research*, 2017, 32 (2): 210—220
- [15] Pulley S, Foster I D L, Collins A L. The impact of catchment source group classification on the accuracy of sediment fingerprinting outputs. *Journal of Environmental Management*, 2017, 194: 16—26
- [16] Zhang X C, Liu B L. Using multiple composite fingerprints to quantify fine sediment source contributions: A new direction. *Geoderma*, 2016, 268: 108—118
- [17] Walling D E, Woodward J C. Tracing sources of suspended sediment in river basins: A case study of the River Culm, Devon, UK. *Marine & Freshwater Research*, 1995, 46 (1): 327—336
- [18] Manjoro M, Rowntree K, Kakembo V, et al. Use of sediment source fingerprinting to assess the role of subsurface erosion in the supply of fine sediment in a degraded catchment in the Eastern Cape, South Africa. *Journal of Environmental Management*, 2017, 194: 27—41
- [19] Slimane A B, Raclot D, Evrard O, et al. Fingerprinting sediment sources in the outlet reservoir of a hilly cultivated catchment in Tunisia. *Journal of Soils & Sediments*, 2013, 13 (4): 801—815
- [20] Tiecher T, Minella J P G, Caner L, et al. Quantifying land use contributions to suspended sediment in a large cultivated catchment of Southern Brazil (Guaporé River, Rio Grande do Sul). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 237: 95—108
- [21] Evrard O, Lacey J P, Huon S, et al. Combining multiple fallout radionuclides (^{137}Cs , ^7Be , $^{210}\text{Pbxs}$) to investigate temporal sediment source dynamics in tropical, ephemeral riverine systems. *Journal of Soils & Sediments*, 2016, 16 (3): 1130—1144
- [22] 林金石, 黄炎和, 张旭斌, 等. 南方花岗岩区典型崩岗侵蚀产沙来源分析. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 53—57
- Lin J S, Huang Y H, Zhang X B, et al. Apportioning typical collapsing hill's erosion sediment sources of granite region in southern China(In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (3): 53—57
- [23] Walling D E, Owens P N, Leeks G J L. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Hydrological Processes*, 1999, 13: 955—975
- [24] Collins A L, Pulley S, Foster I D L, et al. Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: a review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for end-users. *Journal of Environmental Management*, 2017, 194: 86—108
- [25] Walling D E, Collins A L, Stroud R W. Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments. *Journal of Hydrology*, 2008, 350 (3): 274—289
- [26] Nosrati K. Ascribing soil erosion of hillslope components to river sediment yield. *Journal of Environmental Management*, 2017, 194: 63—72
- [27] Duerdoth C P, Arnold A, Murphy J F, et al. Assessment of a rapid method for quantitative reach-scale estimates of deposited fine sediment in rivers. *Geomorphology*, 2015, 230: 37—50
- [28] Phillips J M, Russell M A, Walling D E. Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: A simple methodology for small catchments. *Hydrological Processes*, 2015, 14: 2589—2602
- [29] Collins A L, Walling D E, Stroud R W, et al. Assessing damaged road verges as a suspended sediment source in the Hampshire Avon catchment, southern United Kingdom. *Hydrological Processes*, 2010, 24 (9): 1106—1122
- [30] Wilkinson S N, Olley J M, Furuichi T, et al. Sediment source tracing with stratified sampling and weightings based on spatial gradients in soil erosion. *Journal of Soils & Sediments*, 2015, 15 (10): 2038—2051
- [31] Foster I D L, Lees J A. Tracers in geomorphology:

- Theory and applications in tracing fine particulate sediments//Foster I D L. *Racers in Geomorphology*. Wiley: Chichester, 2000: 3—20
- [32] Foster I D L, Oldfield F, Flower R J, et al. Mineral magnetic signatures in a long core from Lake Qarun, Middle Egypt. *Journal of Paleolimnology*, 2008, 40(3): 835—849
- [33] Pulley S, Foster I, Antunes P. The application of sediment fingerprinting to floodplain and lake sediment cores: assumptions and uncertainties evaluated through case studies in the Nene Basin, UK. *Journal of Soils & Sediments*, 2015, 15(10): 2132—2154
- [34] Motha J A, Wallbrink P J, Hairsine P B, et al. Tracer properties of eroded sediment and source material. *Hydrological Processes*, 2002, 16: 1983—2000
- [35] Evrard O, Némery J, Gratiot N, et al. Sediment dynamics during the rainy season in tropical highland catchments of central Mexico using fallout radionuclides. *Geomorphology*, 2010, 124(1): 42—54
- [36] Blake W H, Ficken K J, Taylor P, et al. Tracing crop-specific sediment sources in agricultural catchments. *Geomorphology*, 2012, 140: 322—329
- [37] Cooper R J, Pedentchouk N, Hiscock K M, et al. Apportioning sources of organic matter in streambed sediments: An integrated molecular and compound-specific stable isotope approach. *Science of the Total Environment*, 2015, 520: 187—197
- [38] Reiffarth D G, Petticrew E L, Owens P N, et al. Sources of variability in fatty acid (FA) biomarkers in the application of compound-specific stable isotopes (CSSIs) to soil and sediment fingerprinting and tracing: A review. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 8—27
- [39] 高进长, 朱虹, 龙翼, 等. 川中丘陵区小流域土地利用变化和泥沙来源示踪的 $\delta^{13}\text{C}$ 技术. *山地学报*, 2015, 33(5): 521—527
Gao J C, Zhu H, Long Y, et al. A case study on land use changes and sediment sources by the $\delta^{13}\text{C}$ technique in the hilly Sichuan basin, the upper reaches of Yangtze River, China (In Chinese). *Mountain Research*, 2015, 33(5): 521—527
- [40] Collins A L, Walling D E, Webb L, et al. Apportioning catchment scale sediment source using a modified composite fingerprinting technique incorporating property weightings and prior information. *Geoderma*, 2010, 155(3/4): 249—261
- [41] Collins A L, Zhang Y, Hickinbotham R, et al. Contemporary fine-grained bed sediment sources across the River Wensum Demonstration Test Catchment, UK. *Hydrological Processes*, 2013, 27: 857—884
- [42] Wilkinson S, Hancock G, Bartley R, et al. Using sediment tracing to assess processes and spatial patterns of erosion in grazed rangelands, Burdekin River basin, Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 180: 90—102
- [43] 张信宝, 贺秀斌, 文安邦, 等. 川中丘陵区小流域泥沙来源的 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 双同位素法研究. *科学通报*, 2004, 49(15): 1537—1541
- [44] Chen F X, Fang N F, Shi Z H. Using biomarkers as fingerprint properties to identify sediment sources in a small catchment. *Science of the Total Environment*, 2016, 557/558: 123—133
- [45] Mabit L, Gibbs M, Mbaye M, et al. Novel application of Compound Specific Stable Isotope (CSSI) techniques to investigate on-site sediment origins across arable fields. *Geoderma*, 2018, 316: 19—26
- [46] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Use of composite fingerprints to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers. *Earth Surface Processes & Landforms*, 1998, 23: 31—52
- [47] Carter J, Owens P N, Walling D E, et al. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system. *Science of the Total Environment*, 2003, 314(314/316): 513—534
- [48] Hancock G J, Revill A T. Erosion source discrimination in a rural Australian catchment using compound-specific isotope analysis (CSIA). *Hydrological Processes*, 2013, 27(6): 923—932
- [49] Palazón L, Navas A. Variability in source sediment contributions by applying different statistic test for a Pyrenean catchment. *Journal of Environmental Management*, 2017, 194: 42—53
- [50] Palazón L, Latorre B, Gaspar L, et al. Comparing catchment sediment fingerprinting procedures using an auto evaluation approach with virtual sample mixtures. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 456—466
- [51] Nosrati K, Collins A L, Madankan M. Fingerprinting sub-basin spatial sediment sources using different multivariate statistical techniques and the Modified MixSIR model. *Catena*, 2018, 164: 32—43
- [52] Sherriff S C, Franks S W, Rowan J S, et al. Uncertainty based assessment of tracer selection, tracer non-conservativeness and multiple solutions in sediment fingerprinting using synthetic and field data. *Journal of Soils & Sediments*, 2015, 15(10): 2101—2116
- [53] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique. *Catena*, 1997, 29(1): 1—27
- [54] Devereux O H, Prestegard K L, Needelman B A, et al. Suspended-sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland. *Hydrological Processes*, 2010, 24(11): 1391—1403

- [55] Gellis A C, Hupp C R, Pavich M J, et al. Sources, transport, and storage of sediment in the Chesapeake Bay Watershed. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008—5186, 2009: 95
- [56] Hughes A O, Olley J M, Croke J C, et al. Sediment source changes over the last 250 years in a dry-tropical catchment, central Queensland, Australia. *Geomorphology*, 2009, 104 (3/4): 262—275
- [57] Haddadchi A, Olley J, Lacey P. Accuracy of mixing models in predicting sediment source contributions. *Science of the Total Environment*, 2014, 497/498: 139—152
- [58] Russell M A, Walling D E, Hodgkinson R A. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. *Journal of Hydrology*, 2001, 252 (1/4): 1—24
- [59] Smith H G, Blake W H. Sediment fingerprinting in agricultural catchments: A critical re-examination of source discrimination and data corrections. *Geomorphology*, 2014, 204 (1): 177—191
- [60] Haddadchi A, Olley J, Pietsch T. Quantifying sources of suspended sediment in three size fractions. *Journal of Soils & Sediments*, 2015, 15 (10): 2086—2100
- [61] Lacey J P, Huon S, Onda Y, et al. Do forests represent a long-term source of contaminated particulate matter in the Fukushima Prefecture? *Journal of Environmental Management*, 2016, 183 (3): 742—753
- [62] Lacey J P, Olley J. An examination of geochemical modelling approaches to tracing sediment sources incorporating distribution mixing and elemental correlations. *Hydrological Processes*, 2015, 29 (6): 1669—1685
- [63] Smith H G, Karam D S, Lennard A T. Evaluating tracer selection for catchment sediment fingerprinting. *Journal of Soils & Sediments*, 2018, 18 (9): 3005—3019
- [64] 周慧平, 陈玉东, 常维娜. 指纹技术识别泥沙来源: 进展与展望. *水土保持学报*, 2018, 32 (5): 1—7
Zhou H P, Chen Y D, Chang W N. Sediment source fingerprinting: Progresses and prospects (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (5): 1—7
- [65] Zhang X C, Zhang G H, Liu B L, et al. Using cesium-137 to quantify sediment source contribution and uncertainty in a small watershed. *Catena*, 2016, 140: 116—124
- [66] Kraushaar S, Schumann T, Ollesch G, et al. Sediment fingerprinting in northern Jordan: Element specific correction factors in a carbonatic setting. *Journal of Soils & Sediments*, 2015, 15: 2155—2173
- [67] Pulley S, Foster I, Antunes P. The uncertainties associated with sediment fingerprinting suspended and recently deposited fluvial sediment in the Nene river basin. *Geomorphology*, 2015, 228: 303—319
- [68] Zhao G, Mu X, Han M, et al. Sediment yield and sources in dam-controlled watersheds on the northern Loess Plateau. *Catena*, 2017, 149: 110—119
- [69] 杨明义, 徐龙江. 黄土高原小流域泥沙来源的复合指纹识别法分析. *水土保持学报*, 2010, 24 (2): 30—34
Yang M Y, Xu L J. Fingerprinting suspended sediment sources in a small catchment on the Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (2): 30—34
- [70] Pulley S, Collins A L. Tracing catchment fine sediment sources using the new SIFT (Sediment Fingerprinting Tool) open source software. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 838—858

Sediment Source Fingerprinting: Progress in Uncertainty Analysis

ZHOU Huiping^{1,2} ZHOU Hongwei³ CHEN Yudong²

(1 *School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China*)

(2 *Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China*)

(3 *The Water Resources Development Research Center of Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China*)

Abstract Sediment fingerprinting is a technique critical to researches on sources and dynamics of sediment in recent years. However, the technique does have certain limitations, for instance, its multiple assumptions often differ from practical conditions, thus bringing about a series of uncertainties. The process of sediment transportation from source to sink is subject to the interference of natural environment and anthropic activities, so potential variations of source characteristics, migration path, and properties of sediment are all factors of uncertainty in fingerprinting procedure. Moreover, sampling designing, fingerprint selection method, and use of mixing models are subjective factors that further expand sources of uncertainty. Uncertainty analysis is a significant component of the sediment fingerprinting technique, and it is also an important basis for assessing reliability of fingerprinting to identify sources of sediment. This paper reviewed the series of issues of uncertainty in sediment fingerprinting, and progresses in researches addressing these problems and described status quo of the research on quantitative assessment of the uncertainties in an attempt to provide certain recommendations for further investigation.

Key words Sediment; Source apportionment; Fingerprinting; Uncertainty analysis

(责任编辑：檀满枝)