

指纹技术识别泥沙来源:进展与展望

周慧平^{1,2}, 陈玉东², 常维娜³

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164;

2. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042; 3. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093)

摘要: 泥沙来源信息有助于研究流域土壤侵蚀、泥沙输移与沉积特征, 对于制定流域泥沙及非点源污染控制战略具有重要意义。泥沙指纹技术是识别泥沙来源的一个可靠方法被广泛应用于世界各地不同流域, 最近 20 多年在指纹因子选择和混合模型优化等技术方法上以及不同时空尺度和源地分类等应用类型上都得到了快速发展, 正在从一种研究工具逐步发展为一种管理工具。综述了国内外指纹技术识别泥沙来源在研究尺度、指纹因子筛选、源地贡献分配、不确定性分析等方面开展的研究, 并对泥沙指纹技术研究当前存在的问题及今后研究趋势作了分析展望。

关键词: 泥沙来源; 泥沙指纹; 源地分配; 不确定性分析

中图分类号: S157; X14; X52

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0001-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.001

Sediment Source Fingerprinting: Progresses and Prospects

ZHOU Huiping^{1,2}, CHEN Yudong², CHANG Weina³

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou,

Jiangsu 213164; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection,

Nanjing 210042; 3. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract: Sediment sources information has considerably enhanced our knowledge of patterns of soil erosion, sediment delivery and deposition in a watershed. It also has great significance for the development of effective sediment and nonpoint source pollution control strategies. Sediment fingerprinting technique has been widely used as a reasonable and reliable means for investigating sediment sources in different watersheds in the world. In recent two decades, rapid progresses have been made in methods improvement, such as fingerprints selection and unmixing model optimization, and also in application range, such as different spatial-temporal scales and different sources classifications. Even more, sediment fingerprinting technique is now transforming from a research tool to a management tool. This paper reviewed the development of fingerprinting technique in aspects of research scales, fingerprints selection, source contribution apportionment and uncertainty analysis. This review also examined the current problems associated with the methodology and identified some research needs for further investigation in the future.

Keywords: sediment sources; sediment fingerprinting; source apportionment; uncertainty analysis

水土流失影响农业可持续发展,产生的泥沙也是水体中营养盐、重金属及其他有机或无机污染物迁移和转化的重要载体,对流域下游水质和水生态系统具有潜在的巨大危害,由此引发的水污染以及人体健康风险等问题已成为流域水环境研究的热点^[1-2]。研究泥沙来源有助于更好地了解流域土壤侵蚀及泥沙迁移、分配与沉积特征,对于泥沙输移平衡以及泥沙携带养分及污染物的运移过程研究都具有重要意义。

特别是当前,以重要水源地保护为目标的水土流失治理已成为流域保护的一项紧迫性工作,而泥沙源解析研究可以为针对关键源区制定和实施流域水土保持与水污染控制战略提供科学依据和实践指导。

泥沙指纹技术是定量识别流域泥沙来源的一种重要方法,其理论基础是泥沙潜在源地类型可以根据土壤物质特性来区分,从而可筛选出具有源地识别能力的“指纹”,以“指纹”来建立流域出口泥沙与潜在源

地的直接对应关系^[3]。相比小区观测、资料分析、遥感调查制图等传统方法,指纹技术由于其在人力、财力和时间投入上的优势,在近 20 年得到迅速发展。国内外研究人员已经在英国、美国、加拿大、澳大利亚、巴西、中国等国家的各种类型流域针对河流悬浮泥沙^[4-5]以及河床^[6]、冲击平原^[7]、拦砂坝^[8]、湖泊水库^[9-10]的沉积泥沙开展了大量的应用研究,并且针对指纹技术应用的诸多问题及其局限性展开了一系列讨论。本文拟从泥沙来源指纹识别的研究尺度、潜在源地分类、指纹因子筛选、源地贡献分配计算以及不确定性问题等方面综述国内外研究进展,对泥沙指纹技术应用研究中还需要进一步解决的问题进行展望。

1 泥沙指纹识别研究的类型

1.1 研究尺度

目前,指纹技术识别泥沙来源的研究已经覆盖了多种时空尺度。在空间尺度上,研究区范围小的不足 10 km^2 ^[11],而大的有超过 $10\ 000\text{ km}^2$ ^[12],但多集中在几十至数百平方公里,因为一方面这个尺度的流域下垫面(地质、土壤、土地利用等)有相对明显的空间异质性,“指纹”特征在各潜在源地间差异较显著;另一方面该尺度与实际的流域管理实践范围也比较吻合。而在较大的尺度下($>500\text{ km}^2$),潜在源地的空间异质性加大使得样点的空间代表性不足或“指纹”的空间变异增加,而且源地土壤的“指纹”信息随泥沙迁移距离增加而变化的不确定性也增加^[13],从而导致源地识别的难度反而增大。因此,Gellis 等^[14]建议合适的研究尺度为小于 250 km^2 。相反,在几平方公里甚至更小的尺度下^[15-16],地表物质的同质化特征明显,泥沙源地可能需要更加细致或特殊的分类,指纹识别的复杂性和难度同样增加。

从时间尺度上看,大多数研究主要采用流域出口近期的沉积泥沙^[17-18]或悬浮泥沙^[19]来分析多年期(<50 年)或年内(季节性)流域泥沙来源的变化。有些研究^[15,20-21]则关注流域内次降雨过程泥沙来源的动态变化。这类研究的特点是多采用河流悬浮泥沙,且在几平方公里甚至更小的集水区内进行,因为只有在较小的尺度下才能确保潜在源地产生的泥沙能够在一次降雨中到达下游出口被获取,而流动的悬浮泥沙在一次降雨过程中具有较好的代表性。此外,也有研究采用代表不同时期的沉积泥沙来分析流域历史时期(50~100 年)甚至地质年代尺度的泥沙来源变化特征并进行情景重建^[22-23]。但事实上,降雨径流强度以及不同粒径泥沙沉积速率等因素也会影响泥沙的沉积和再悬浮。因此,采用悬浮泥沙与近期沉积泥

沙在时间尺度上的代表性问题也存在一定的不确定因素,仍然需要在具体研究中结合流域特点及研究目标来确定。

1.2 潜在源地类型

指纹技术假设泥沙的潜在来源是已知的且泥沙只属于这些源地,潜在源地类型依据先前知识或实地调查事先确定,因此该方法对于源地的识别及分类具有一定的主观性。沙源的类型一般分为空间源和类型源 2 种。空间源主要以子流域单元和地质单元进行分类。类型源以土地利用分类为主,通常分林地、牧草地、农田、建设用地等,还包括流域泥沙侵蚀的特定部位(如沟道),或依据土壤侵蚀特征分为地表侵蚀与亚表层侵蚀。一些研究^[24-26]对潜在沙源分类时综合了以上 2 种来源或进行分组叠加分析,也有研究^[27-28]讨论城市流域的泥沙来源,将城区道路及污水处理设施排放等来源类型与上述其他类型的相对贡献进行对比。

由于流域下垫面类型及空间异质性受空间尺度变化而不同,潜在沙源的分类一方面随研究尺度的变化而各有侧重;另一方面也因管理需求而有所差异。在较小的空间尺度下大多研究以类型源分类,而结合不同管理目标时,也可以合并部分特征相似的类型或者将某些类型进一步细分,如 Blake 等^[16]采用植物脂肪酸的特定化合物稳定同位素作为指纹在一个仅 1.45 km^2 的农业小流域中识别出不同种植类型来源对泥沙输出的贡献,这可能是目前沙源识别中最小的一种分类。在较大的空间尺度下,讨论泥沙来源的空间类型更具有现实和可操作性,如以子流域为空间类型,对于研究不同特征子流域的输沙贡献以及以子流域为单元的治理措施具有重要的意义^[29-30]。而地质单元虽然空间异质性相对显著,但由于地质单元分布与土地利用及管理范围并不相符,从管理角度看,地质单元分类对泥沙治理并不具有指导作用,不过地质单元特征可以为一些特殊源地的分类提供重要的指纹信息,与其他类型结合时就具有较好的应用效果^[25-26]。

2 指纹技术定量识别方法

2.1 指纹因子筛选

土壤中多种物质或性质特征常被作为“指纹”来区分不同的源地,包括物理性质(如泥沙粒径、颜色)、地球化学元素(如微量元素、稀土元素)、放射性核素(如 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb)、稳定同位素(如 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)、有机物质(如植物脂肪酸)、矿物磁性等,其中地球化学元素和放射性核素的使用最为普遍。泥沙指纹技术中指纹因子的选择通常与研究目标及沙源分类有关。当讨论流域泥沙的表层与亚表层土壤侵蚀或者耕作与

非耕作用地来源时, ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 等放射性核素可以作为主要的指纹因子^[17-18,31];当潜在沙源地以地质单元分类或具有特殊的地貌类型时,颜色、粒径等物理性质以及地球化学元素、矿物磁性等指标可能具有明显的识别优势^[32-34];C、N同位素以及脂肪酸等生物标记物则应作为土地利用分类特别是对植物类型细分时的重要指纹因子^[16,35-36]。虽然一些研究采用单个指纹因子已经能够较好地地区分不同的泥沙来源^[31-33],Collins等^[13]提出将多个能够有效区分泥沙不同来源的指纹因子组成最佳的“复合指纹”能够有效提高泥沙源地的识别能力。复合指纹可以是同类型多个指纹因子的组合(如放射性核素 ^{137}Cs 、 ^7Be 、 ^{210}Pb)^[37-38],也可由上述不同类型的多组指纹因子组成^[5,13]。Collins等^[5]在英国和非洲的5个流域的研究表明,由同类型指纹因子构成的复合指纹对源地的识别能力优于单个指纹,但这种优势在不同流域的表现并不稳定,而不同类别的多组指纹因子的组合具有最佳的识别能力。然而Zhang等^[39]研究认为,复合指纹的源地识别能力与用它估算来源分配的可靠性之间并无联系,识别能力很强的复合指纹可能在混合模型计算时产生较大的误差。此外,他们也认为应尽量减少复合指纹中的指纹因子的数量,以此来降低混合模型计算的不确定性。与此类似,Palazón等^[40]研究表明,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。而Sherriff等^[41]却持有相反的观点,他们认为较多个指纹因子能够“抵消”一部分由个别指纹因子引起的干扰,以此来减少不确定性,这已被很多研究所接受。

复合指纹的筛选过程广泛采用“两步法”,即K-W(Kruskal-Wallis H)检验和DFA(Discriminant Function Analysis)判别分析^[3],首先通过独立检验对各指纹因子的识别能力进行排序和筛选,然后再进入DFA分析得到一组最佳的指纹组合。近期有研究^[40,42-43]加入了PCA法并进行了对比,认为不同的筛选方法或其组合应用对复合指纹筛选以及最终结果是有一定影响的,并提出在不同的研究中,特别是当源地特征受土地利用变化干扰明显时更有必要加强指纹筛选过程的分析。由于类似的统计检验方法有很多且各有特点和优势,这也意味着复合指纹的筛选过程及其影响仍有待深入地探讨。

2.2 源地贡献分配

泥沙各潜在源地的相对贡献是通过一个多元混合模型计算得到的,计算目标是当采用的各源地相对贡献为某个比例时实现模型误差最小^[3]。近20年

来,混合模型得到了不断改进和发展。首先是对模型中指纹因子所作的各种修正,如Collins等^[44]在混合模型中对指纹因子增加了粒径大小和有机质含量影响的修正系数,但最初是把这种影响建立在简单的线性关系之上。因此,有研究^[45]并不建议采取这种修正方法,认为:(1)粒径或有机质对各个指纹因子含量的影响程度并不是相同或是线性的,且这种方法对所有指纹因子采用统一修正可能会带来新的误差;(2)由于粒径和有机质对指纹因子含量的影响有重叠之处,在对粒径影响做修正的时候已经同时修正了部分有机质的影响,若再作有机质修正可能会引起“过校”。Russell等^[15]则考虑了物质含量与颗粒比表面积之间的非线性关系,从而提高了对粒径影响修正的合理性。但需要注意的是,比表面积等粒径参数测试的误差也可能引入新的不确定性。关于指纹技术中泥沙粒径影响的问题,近期Lacey等^[46]作了较为详细的讨论,但针对粒径影响的过程机理以及需要解决的问题仍有待于深入研究。除粒径和有机质修正外,一些研究对于指纹因子在各类源地内的空间变异,以及复合指纹中各因子对源地识别能力的差异也增加了相应的权重系数^[47-48],但对于模型精度的提高以及可能引起的不确定性仍然存在一定的争议。

针对混合模型计算的最优化过程,Hughes等^[49]采用了所有样品的各指纹因子数据直接参与计算,并通过蒙特卡罗算法得到了最小的误差,这不同于Collins模型^[44,47]使用的是各指纹因子的平均值。另有研究^[50]在混合模型中对各指纹值采用归一化标准差进行计算或是根据不同类型源地的样点数量对指纹因子方差进行修正^[51]。Haddadchi等^[52]比较了4个不同结构的混合模型,发现不同混合模型使用同样的数据得到的源地贡献分配结果是不同的,但这种差异仍在可接受范围内。

2.3 不确定性分析

近年来,泥沙指纹技术应用中的不确定性已经成为研究关注的热点。不确定性主要来源于几个方面:一是源地与目标泥沙指纹因子间的可比性,这里涉及源地与泥沙样品的代表性、仪器分析误差、泥沙迁移中指纹因子的潜在转化等诸多问题;二是指纹因子筛选过程,主要关注不同的统计方法对指纹因子筛选及复合指纹组成的影响;三是混合模型的选择与优化。由于不同的混合模型,包括数据预处理方式、粒径与有机质影响的修正以及指纹因子空间变异程度的修正等参数的使用,模型的优化算法等对结果都有一定影响,这些都成为不确定性研究关注的问题。Pulley

等^[6]分析了 9 种不同指纹组合情形对源地识别能力以及模型计算结果的差异,预测结果的最大差异达 24%;而对两种源地样品与泥沙样品的粒径与有机质特征对比分析表明,其微小的差异(小于 5%~8%)并不是产生不确定性的主要因素。对于不确定性的量化分析,基于贝叶斯的混合模型由于其在利用先验信息以及捕获不确定性来源方面具有更为明显的优势而被一些研究^[42,53-54]关注和采用。

3 国内研究现状特点

国内应用泥沙指纹技术的代表性研究主要集中在长江上游地区、三峡库区、黄土高原、福建崩岗区等,这些地区是水土流失的重点区域,流域输沙量较大,地质条件复杂多样,指纹技术研究泥沙来源具有一定优势。文安邦等^[31]用¹³⁷Cs 作为指纹因子识别了裸坡地侵蚀和沟道重力侵蚀是云贵高原区坝库淤积泥沙的主要来源。张信宝等^[37]在川中丘陵小流域的研究中采用了¹³⁷Cs、²¹⁰Pb 双同位素法,结果表明,泥沙的主要来源为农台地和裸坡地(含沟岸),并由此推算出了两者的平均侵蚀速率。郭进等^[55]在三峡库区的研究中构建了土壤全碳、¹³⁷Cs、²²⁶Ra、K 及 Zn 等组成的最优复合指纹。在黄土高原小流域开展的研究相对较多,前人^[21,35,56-58]都尝试用复合指纹技术研究了拦砂坝径流泥沙或沉积泥沙的来源,并分别探讨了不同复合指纹的应用效果。林金石等^[59]研究了福建崩岗侵蚀区崩岗剖面不同土层对泥沙输出的贡献。周慧平等^[60]、常维娜等^[61]在长三角地区受人为干扰较多的农业小流域,研究了复合指纹定量识别泥沙来源的可行性,并以泥沙指纹识别为基础,尝试识别泥沙吸附颗粒态磷的来源。此外,还对泥沙潜在源地分类和样品采集的不确定性影响进行了探讨^[62-63]。近来有一些研究^[64-66]采用生物标记物、C/N 稳定同位素等复合指纹开始探讨泥沙结合有机质(碳)的来源。

综合国内外研究进展可以看出,国内虽然在指纹技术定量识别泥沙来源方面已经开展了较多的工作,但大多以指纹技术在不同区域及环境下应用的可行性探讨为主,并尝试检验不同类型指纹或者复合指纹识别泥沙来源的效果,对于方法本身的改进以及所涉及各类不确定性问题少有深入研究。而国外的研究针对指纹因子的选择、物质含量的修正、混合模型结构及优化等方面开展了较多讨论,特别是近年来把研究聚焦于方法的不确定性及其局限性分析,从而使泥沙指纹识别技术从理论和实践上都得到了进一步的发展。这些研究同时也表明,指纹识别技术的具体方法具有较明显的地域性特点,研究结果也受到潜在源

地以及指纹因子选择等诸多不确定性因素的影响而具有多变性。因此,到目前为止指纹识别技术较多地被作为一种研究手段。然而 Mukundan 等^[67]认为,基于泥沙来源信息对于流域泥沙管理的重要性以及指纹技术在泥沙源解析中的优势,有必要将指纹技术进行标准化处理,尝试将其转变成为一种管理工具并纳入泥沙的 TMDL 计划体系。最近,Collins 等^[68]针对泥沙来源指纹识别技术应用的过程总结并提出了一整套决策树模型,为其作为流域泥沙的管理工具又迈出了重要一步。

4 结论与展望

泥沙指纹识别技术经过多年的发展,在技术方法上日趋完善,引入了更多的新型指纹、新的统计方法和混合模型;在应用类型上日趋丰富,实现了对多种时空尺度下各种类型源地的识别;并且正在逐步从一种研究工具转变为可以模块化应用的管理工具。然而由于其作为“黑箱”模型所具有的局限性以及方法本身较强的地域性特征,今后仍需要在以下几个方面进一步深入研究。

(1)源地分类与样品采集的客观性与代表性。当前大多研究对潜在源地分类具有明显的主观性,缺乏对流域下垫面信息特征及变化的分析与描述,当流域土地利用等空间信息变化较快或复杂时,容易造成分类过细而加大识别难度和增加不确定性,或者分类与实际管理需求不匹配,使结果缺乏对泥沙治理的指导意义。因此,需要结合管理目标来研究客观的源地分类方法,并在分类数量与不确定性之间寻找合适的平衡点。

(2)指纹值修正的必要性与方法。粒径和有机质对指纹值的影响以及指纹值的空间变异的影响是否需要修正应视研究区特点“因地制宜”,而如何改进修正的方法以及寻找修正后提高精度与产生更多的不确定性之间的平衡点是需要进一步研究的问题。

(3)不确定性的定量评估。目前对不确定性的研究主要集中在混合模型应用上,包括对采用不同的模型结构、参数修正、数据预处理及算法等对结果的影响进行评估,虽然通过一些算法优化已经可以得到很小的误差范围,但是对于源地分类及样品采集、泥沙输移过程的连通性以及潜在的物质转化等问题产生的不确定性仍然缺乏可行的定量评估方法,仍需要通过大量的对比研究或采用已知的人工混合物模拟试验进行深入探讨。

(4)泥沙指纹识别技术的规范化。虽然国外研究人员已在尝试制定泥沙指纹识别技术标准化的技术框架,但是由于流域系统的复杂性和多变性以及该方

法显著的地域性特点,这种标准化只能是相对的,且仍需要通过大量的系统性对比研究来得到相对规范的技术流程及每一步的选择依据。同样,如何平衡指纹识别技术作为研究手段与管理工具之间的关系是需要国内外研究人员继续深入研究的方向。

参考文献:

- [1] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.
- [2] Yi Y, Yang Z, Zhang S. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(10): 2575-2585.
- [3] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Sediment sources in the Upper Severn catchment: A fingerprinting approach [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 1997, 1(3): 509-521.
- [4] Walling D E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems [J]. Science of the Total Environment, 2005, 344(1/3): 159-184.
- [5] Collins A L, Walling D E. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins [J]. Journal of Hydrology, 2002, 261(1): 218-244.
- [6] Pulley S, Foster I, Antunes P. The uncertainties associated with sediment fingerprinting suspended and recently deposited fluvial sediment in the Nene river basin [J]. Geomorphology, 2015, 228: 303-319.
- [7] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Use of the geochemical record preserved in floodplain deposits to reconstruct recent changes in river basin sediment sources [J]. Geomorphology, 1997, 19 (1/2): 151-167.
- [8] Chen F, Zhang F, Fang N, et al. Sediment source analysis using the fingerprinting method in a small catchment of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(5): 1655-1669.
- [9] Pulley S, Foster I, Antunes P. The application of sediment fingerprinting to flood-plain and lake sediment cores: assumptions and uncertainties evaluated through case studies in the Nene Basin, UK [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(10): 2132-2154.
- [10] Slimane A B, Raclot D, Evrard O, et al. Fingerprinting sediment sources in the outlet reservoir of a hilly cultivated catchment in Tunisia [J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(4): 801-815.
- [11] Russell M A, Walling D E, Hodgkinson R A. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK [J]. Journal of Hydrology, 2001, 252(1/4): 1-24.
- [12] Wang Y, Yu Z, Li G, et al. Discrimination in magnetic properties of different-sized sediments from the Changjiang and Huanghe Estuaries of China and its implication for provenance of sediment on the shelf [J]. Marine Geology, 2009, 260(1/4): 121-129.
- [13] 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 [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 1998, 23(1): 31-52.
- [14] Gellis A C, Walling D E. Sediment source fingerprinting (tracing) and sediment budgets as tools in targeting river and watershed restoration programs [J]. Journal of Endovascular Therapy An Official Journal of the International Society of Endovascular Specialists, 2011, 194(3): 263-291.
- [15] Russell M A, Walling D E, Hodgkinson R A. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK [J]. Journal of Hydrology, 2001, 252(1/4): 1-24.
- [16] Blake W H, Ficken K J, Taylor P, et al. Tracing crop-specific sediment sources in agricultural catchments [J]. Geomorphology, 2012, 139(4): 322-329.
- [17] Collins A L, Zhang Y, Mc Chesney D, et al. Sediment source tracing in a lowland agricultural catchment in southern England using a modified procedure combining statistical analysis and numerical modelling [J]. Science of the Total Environment, 2012, 414(1): 301-317.
- [18] Nosrati K. Ascribing soil erosion of hillslope components to river sediment yield [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 194: 63-72.
- [19] Walling D E, Collins A L, Stroud R W. Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments [J]. Journal of Hydrology, 2008, 350(3): 274-289.
- [20] Martínez-Carreras N, Krein A, Udelhoven T, et al. A rapid spectral-reflectance-based fingerprinting approach for documenting suspended sediment sources during storm runoff events [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(3): 400-413.
- [21] 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[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 30-34.
- [22] Walling D E, Owens P N, Foster I D L, et al. Changes in the fine sediment dynamics of the Ouse and Tweed basins in the UK, over the last 100~150 years [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(16): 3245-3269.
- [23] Yang S, Li C, Yokoyama K. Elemental compositions

- and monazite age patterns of core sediments in the Changjiang Delta; Implications for sediment provenance and development history of the Changjiang River [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 245 (3/4): 762-776.
- [24] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Fingerprinting the origin of fluvial suspended sediment in larger river basins: Combining assessment of spatial provenance and source type [J]. *Geografiska Annaler*, 1997, 79(4): 239-254.
- [25] Sadeghi S H, Najafi S, Bakhtiari A R. Sediment contribution from different geologic formations and land uses in an Iranian small watershed, case study [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2017, 32 (2): 210-220.
- [26] Pulley S, Foster I D L, Collins A L. The impact of catchment source group classification on the accuracy of sediment fingerprinting outputs [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 194: 16-26.
- [27] Cater J, Owens P N, Walling D E, et al. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system [J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 314/316: 513-534.
- [28] Franz C, Makeschin F, Weiß H, et al. Sediment in urban river basins: Identification of sediment sources with the Lago Paranoá catchment, Brasília DF, Brazil using the fingerprint approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 466/467(1): 513-523.
- [29] Nosrati K, Collins A L, Madankan M. Fingerprinting sub-basin spatial sediment sources using different multivariate statistical techniques and the Modified MixSIR model [J]. *Catena*, 2018, 164: 32-43.
- [30] Vale S, Fuller I, Procter J, et al. Characterization and quantification of suspended sediment sources to the Manawatu River, New Zealand [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 543(A): 171-186.
- [31] 文安邦, 张信宝, 王玉宽, 等. 长江上游云贵高原区泥沙来源的¹³⁷Cs 法研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 25-27.
- [32] Martínez-Carreras N, Krein A, Gallart F, et al. Assessment of different colour parameters for discriminating potential suspended sediment sources and provenance: A multi-scale study in Luxembourg [J]. *Geomorphology*, 2010, 118(1/2): 118-129.
- [33] 王晓. 用粒度分析法计算砒砂岩区小流域泥沙来源的探讨[J]. *中国水土保持*, 2001, 1(1): 22-241.
- [34] Hatfield R G, Maher B A. Fingerprinting upland sediment sources: Particle sizes specific magnetic linkages between soils, lake sediments and suspended sediments [J]. *Earth Surface Processes and Landforms* 2009, 34 (10): 1359-1373.
- [35] Chen F X, Fang N F, Shi Z H. Using biomarkers as fingerprint properties to identify sediment sources in a small catchment [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557/558: 123-133.
- [36] 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 [J]. *Geoderma*, 2018, 316: 19-26.
- [37] 张信宝, 贺秀斌, 文安邦, 等. 川中丘陵区小流域泥沙来源的¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 双同位素法研究[J]. *科学通报*, 2004, 49(15): 1537-1541.
- [38] Evrard O, Laceby P J, Huon S, et al. Combining multiple fallout radionuclides (¹³⁷Cs, ⁷Be, ²¹⁰Pb_{ex}) to investigate temporal sediment source dynamics in tropical ephemeral river systems [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 16(3): 1130-1144.
- [39] Zhang X C, Liu B L. Using multiple composite fingerprints to quantify fine sediment source contributions: A new direction [J]. *Geoderma*, 2016, 268: 108-118.
- [40] Palazón L, Navas A. Variability in source sediment contributions by applying different statistic test for a Pyrenean catchment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 194: 42-53.
- [41] 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 [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(10): 2101-2116.
- [42] Nosrati K, Collins A L, Madankan M. Fingerprinting sub-basin spatial sediment sources using different multivariate statistical techniques and the Modified MixSIR model [J]. *Catena*, 2018, 164: 32-43.
- [43] Palazón L, Latorre B, Gaspar L, et al. Comparing catchment sediment fingerprinting procedures using an auto evaluation approach with virtual sample mixtures [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 456-466.
- [44] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique [J]. *Catena*, 1997, 29 (1): 1-27.
- [45] Smith H G, Blake W H. Sediment fingerprinting in agricultural catchments: A critical re-examination of source discrimination and data corrections [J]. *Geomorphology*, 2014, 204(1): 177-191.
- [46] Laceby J P, Evrard O, Smith H G, et al. The challenges and opportunities of addressing particle size effects

- in sediment source fingerprinting: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 169: 85-103.
- [47] 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 [J]. *Geoderma*, 2010, 155(3/4): 249-261.
- [48] 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 [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 180: 90-102.
- [49] 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 [J]. *Geomorphology*, 2009, 104(3/4): 262-275.
- [50] Devereux O H, Prestegard K L, Needelman B A, et al. Suspended-sediment sources in an urban watershed, North-east Branch Anacostia River, Maryland [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(11): 1391-1403.
- [51] Gellis A C, Hupp C R, Pavich M J, et al. Sources, transport, and storage of sediment at selected sites in the Chesapeake Bay Watershed [R]. U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5186, 2009.
- [52] Haddadchi A, Olley J, Laceby P. Accuracy of mixing models in predicting sediment source contributions [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 497/498: 139-152.
- [53] Nosrati K, Govers G, Semmens B X, et al. A mixing model to incorporate uncertainty in sediment fingerprinting [J]. *Geoderma*, 2014, 217/218(3): 173-180.
- [54] Cooper R J, Krueger T, Hiscock K M, et al. High temporal resolution fluvial sediment source fingerprinting with uncertainty: A bayesian approach [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2015, 40(1): 78-92.
- [55] 郭进,文安邦,严冬春,等.复合指纹识别技术定量示踪流域泥沙来源[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(2): 94-104.
- [56] 冯明义, Walling D E, 张信宝,等.黄土丘陵区小流域侵蚀产沙对坡耕地退耕响应的¹³⁷Cs法[J]. *科学通报*, 2003, 48(13): 1452-1457.
- [57] Chen F, Zhang F, Fang N, et al. Sediment source analysis using the fingerprinting method in a small catchment of the loess plateau, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(5): 1655-1669.
- [58] Zhao G J, Mu X M, Han M W, et al. Sediment yield and sources in dam-controlled watersheds on the northern Loess Plateau [J]. *Catena*, 2017, 149: 110-119.
- [59] 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[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 53-57.
- [60] 周慧平,常维娜,张龙江.基于泥沙指纹识别的小流域颗粒态磷来源解析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 251-256.
- [61] 常维娜,周慧平,高燕.基于复合指纹法的九乡河小流域泥沙来源解析[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 106-110, 154.
- [62] 常维娜,周慧平,高燕.复合指纹识别泥沙来源:潜在泥沙源地的选择[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(6): 717-723.
- [63] Zhou H P, Chang W N, Zhang L J. Sediment sources in a small agricultural catchment: A composite fingerprinting approach based on the selection of potential sources [J]. *Geomorphology*, 2016, 266: 11-19.
- [64] Liu C, Li Z W, Chang X F, et al. Apportioning source of erosion-induced organic matter in the hilly-gully region of loess plateau in China: Insight from lipid biomarker and isotopic signature analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 1310-1319.
- [65] Lu L, Cheng H G, Pu X, et al. Identifying organic matter sources using isotopic ratios in a watershed impacted by intensive agricultural activities in Northeast China [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 222: 48-59.
- [66] Wang Y H, Yang H, Chen X, et al. Molecular biomarkers for sources of organic matter in lacustrine sediments in a subtropical lake in China [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 176(5): 284-291.
- [67] Mukundan R, Walling D E, Gellis A C, et al. Sediment source fingerprinting: Transforming from a research tool to a management tool [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2012, 48(6): 1241-1257.
- [68] 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 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 194: 86-108.