

张加琼, 王晓彤, 杨明义, 等. 颗粒分选与有机质因子对复合指纹识别泥沙来源的影响 [J]. 地理科学, 2021, 41(3): 504-512. [Zhang Jiaqiong, Wang Xiaotong, Yang Mingyi et al. Effect of particle sorting and organic matter on sediment source study using composite fingerprints. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(3): 504-512.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2021.03.015

颗粒分选与有机质因子对复合指纹识别泥沙来源的影响

张加琼^{1,2}, 王晓彤¹, 杨明义^{1,2}, 刘颖¹, 张风宝^{1,2}, 殷敏峰¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 泥沙来源研究作为土壤侵蚀研究的关键内容之一, 对水土保持措施的科学布设具有重要意义。复合指纹识别法是目前研究泥沙来源的较先进方法之一, 在泥沙来源研究中具有较大的应用潜力。然而, 颗粒分选作用对运用复合指纹识别法判别沉积物来源的准确性有重大影响。加之, 有机质等代表的土壤属性(指纹因子)随颗粒分选在不同粒径范围发生富集或贫化也对源地的正确分类与贡献的准确估算有重要影响。因此, 本文基于前人对复合指纹识别水力侵蚀泥沙来源的相关研究, 总结侵蚀泥沙中指纹因子的富集或贫化、颗粒分选对指纹因子的颗粒粒径分布特征、指纹因子载体颗粒粒径范围选择、土壤团聚体对泥沙来源识别的影响、模型中颗粒分选和有机质因子的量化等方面的研究成果, 明确颗粒分选和有机质因子对复合指纹识别泥沙来源的影响, 有利于正确运用复合指纹识别法准确判定泥沙来源。

关键词: 复合指纹识别法; 泥沙来源; 颗粒分选; 颗粒粒径; 有机质

中图分类号: S157; TV141 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2021)03-0504-09

土壤侵蚀是全球性的重大环境问题之一, 与粮食安全、水资源危机、生物多样性丧失和生态系统崩溃等多种全球高风险事件密切相关^[1]。中国土壤侵蚀表现非常强烈, 约 1/3 的国土面积受土壤侵蚀危害, 因而土壤侵蚀防治一直是国家重视的关乎国计民生的重大问题。近几十年, 研究者对土壤侵蚀特征、过程及其驱动机制等开展了大量研究并取得了丰富的成果, 为优化水土保持措施配置提供了重要的科学依据。然而, 泥沙来源作为土壤侵蚀研究的核心内容之一, 在泥沙源地的准确识别、源地对泥沙的贡献量化、泥沙来源指示的侵蚀环境变化及其驱动机制等方面仍然有待深入。

目前, 泥沙来源研究主要通过小区法、把口站泥沙观测、大面积调查、模型模拟、元素示踪法、指纹识别等方法在小区、流域和区域尺度开展^[2,3]。其

中, 指纹识别法, 尤其是复合指纹识别法较其他方法具有操作便利、时空尺度灵活、结果丰富等特点, 在泥沙来源研究中具有很好的应用潜力。复合指纹识别法从泥沙本身入手, 基于泥沙是土壤侵蚀的产物, 也是地球化学元素、养分、污染物等迁移的载体, 其来源与数量可直接反应泥沙源地的特征这一事实, 把泥沙作为指纹因子的载体, 运用复合指纹法追溯泥沙来源^[4,5]。因此, 基于源地土壤和泥沙中的可测、稳定性质(指纹因子)能有效区分不同源地对泥沙的贡献这一基本假设, 复合指纹识别法通过源地分类、指纹因子筛选和源地贡献估算这 3 个基本步骤实现泥沙来源的定量判别^[6,7]。从而避免了对复杂的泥沙输移、沉积等过程的研究, 为获得较准确的泥沙来源量化结果提供了可能。

随着复合指纹识别法在泥沙来源定量识别、

收稿日期: 2020-09-27; **修订日期:** 2020-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077068, 41671281)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (42077068, 41671281).]

作者简介: 张加琼(1984-), 女, 四川小金人, 副研究员, 博士, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: jqzhang@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 杨明义。E-mail: ymyzly@163.com

泥沙来源对侵蚀环境演变的指示、污染物和养分元素的迁移追溯等方面的研究发展^[8-10], 复合指纹识别方法本身也不断发展进步, 其方法体系逐渐完善, 指纹因子库日渐丰富, 有效指纹因子组的筛选方法得到发展, 来源贡献估算模型多元化, 泥沙来源识别结果的不确定性及其解决方案探讨逐渐深入^[11,12]。然而, 复合指纹识别泥沙来源研究中仍然存在诸多制约其研究结果准确性的重要问题。如, 2 种指纹因子筛选方法(最佳指纹因子组和多组指纹因子组)在有效指纹因子组筛选中的合理性与可靠性, 类型繁多模型的选用, 颗粒分选和有机质因子对准确量化泥沙来源的影响^[6,13,14]。颗粒分选、有机质等关键因子是链接模型与有效指纹因子的关键环节, 二者的选用与量化对源地正确分类及贡献准确估算均有影响, 是影响方法可靠性和结果准确性的关键。本文通过回顾前人关于指纹识别水力侵蚀泥沙来源的相关研究, 探讨颗粒分选和有机质因子对采用复合指纹识别法定量判别泥沙来源的影响, 为深入研究二者作为指纹因子或模型参数的合理性与必要性, 解决二者对复合指纹识别泥沙来源准确性的影响提供依据。

1 颗粒分选对指纹因子源地判别的影响

1.1 侵蚀泥沙中指纹因子的富集或贫化

颗粒粒径是影响指纹因子源地判别力的关键因素之一, 直接影响源地分类的准确性, 进而影响泥沙的源地贡献估算。然而, 土壤颗粒在侵蚀、搬运、沉积过程中的分选作用导致部分指纹因子在某些粒径范围内出现富集或贫化, 改变指纹因子在不同颗粒粒径范围的含量、分布等特征, 从而影响指纹因子对源地的正确分类。对于某些粒径范围的颗粒, 源地土壤和沉积泥沙中的指纹因子含量及分布完全不同, 并不适宜作为指纹因子载体颗粒判定泥沙等沉积物的来源。以有机质为例, 在分选作用影响下, 有机质会选择性地吸附在细颗粒中^[15]。因此, 当土壤中的细颗粒因分选作用发生聚集性沉积时, 有机质也会随之发生富集。此时, 倘若采用人工混样(artificial mixture)的方法将源地土壤混合成“泥沙”, 该“泥沙”与经分选形成的泥沙即使有类似的颗粒组成, 有机质含量却可能相差甚远^[16]。然而, 土壤携带的许多指纹因子有类似的富集或贫化特性, 这正是依据源地土壤的指

纹因子判别泥沙来源的关键误差来源之一^[13](表 1)。现有研究表明, 不同的指纹因子经分选后可能在不同的粒径范围内发生富集或贫化。如, 黄土高原黄土及其侵蚀泥沙/沉积物中, Be-7 主要吸附在 $<1\ \mu\text{m}$ 的细颗粒内^[22], 稀土元素通常富集在 $<75\ \mu\text{m}$ 颗粒^[23], 全氮、全磷等养分元素往往在 $<1\ \mu\text{m}$ 内发生富集^[24]。可见, 选择适宜的颗粒粒径范围在复合指纹识别泥沙来源中至关重要, 如若作为指纹因子载体的颗粒粒径不具代表性, 则可能对泥沙来源判别结果造成不可预期的影响^[25,26]。

1.2 指纹因子载体颗粒粒径范围的选择

为明确指纹因子的适宜载体颗粒粒径范围, 现有研究几乎尝试了所有的土壤粒径范围, 包括 $<2\ 000\ \mu\text{m}$ 、 $<1\ 000\ \mu\text{m}$ 、 $<500\ \mu\text{m}$ 、 $<250\ \mu\text{m}$ 、 $<125\ \mu\text{m}$ 、 $<63\ \mu\text{m}$ 、 $<10\ \mu\text{m}$, 以及某些特定的粒径范围(如 $10\sim 63\ \mu\text{m}$ 、 $125\sim 250\ \mu\text{m}$), 以及同时使用不同粒径范围的指纹因子(有效指纹因子组来自不同粒径范围), 最常用的是 $<63\ \mu\text{m}$ 的颗粒(粘粒和粉粒)^[11,27,28]。究其原因, 一方面 $<63\ \mu\text{m}$ 的颗粒是河流、湖泊、三角洲等悬浮物的主体成分, 在以面蚀为主要形式的侵蚀过程会发生优先输移^[29]; 另一方面 $63\ \mu\text{m}$ 是直接采用筛分(干筛或湿筛)可以分离的最小粒径^[13]。此外, $<63\ \mu\text{m}$ 的颗粒对养分、放射性元素、有机物污染物、部分金属元素常表现出明显的吸附作用^[27,30]。目前, 有研究分析 $63\sim 125\ \mu\text{m}$ 颗粒的指纹因子, 因为 $125\ \mu\text{m}$ 是以悬移方式输移颗粒的上限, 且 $63\sim 125\ \mu\text{m}$ 的颗粒是悬移质的主要组分^[31,32]。近几年, 部分研究者建议使用 $<10\ \mu\text{m}$ 的颗粒作为指纹因子的载体颗粒, 以减小泥沙来源贡献定量的不确定性^[11]。虽然研究认为采用范围狭窄且较细的颗粒作为指纹因子载体可以降低结果的不确定性^[20,33], 但并非某一粒径范围的土壤颗粒可作为通用的指纹因子载体, 因为指纹因子筛选中采用的颗粒粒径范围还与具体的研究密切相关。若土壤较粗(如沙质土壤), 土壤中某一粒径范围的细颗粒(如 $<63\ \mu\text{m}$ 或 $<10\ \mu\text{m}$)含量很少, 一方面很难筛分获得足够量的细颗粒用于测试, 更重要的是该粒径范围的颗粒并不能良好代表土壤/泥沙的主要组分及指纹因子在土壤/泥沙主体组分中的分布^[34]。这样的颗粒作为指纹因子的载体其代表性令人质疑。可见, 在选用指纹因子的粒径范围时, 需要充分考虑指纹因子形成其特征的环境条件, 包括土壤及其母质的性质、地形地貌、侵蚀或

表 1 部分常用指纹因子在不同粒径范围的分布

Table 1 Grain size distribution for some common fingerprints

指纹因子	土壤类型	研究区域	不同粒径范围的因子分布特征
^a 低频磁化率 ^[17]	黑土	中国黑龙江	在各粒径范围团聚体内均匀分布
	紫色土	中国重庆	在各粒径范围团聚体内均匀分布
	栗钙土	中国内蒙古	<50 μm团聚体内显著增大, >2 000 μm团聚体内未检测到磁性
	红土	中国江西	<50 μm团聚体内未检测到磁性, >50 μm团聚体内几乎均匀分布
^b 稀土元素 ^[18]	迈阿密粉壤土	美国西拉斐特	粉粒团聚体内含量增大, >53 μm团聚体内均匀分布
^c 地球化学元素和稀土元素 ^[19]	黄土	中国新疆	大多元素(除Na和Ca)<20 μm团聚体颗粒元素含量显著增大;Na和Ca在20~75μm范围内增加
^d 放射性核素 ^[20]	火山灰土、淋溶土、铁铝土、灰化土、薄层土	法国Pierroton, Laqueuille等地	<2 μm颗粒内富集
	^e SOC ^[21]	粉壤土(Dystrochrept)	日本歌山县

注: ^a 测定的土壤团聚体范围为<50、50~100、100~200、200~500、500~2 000、2 000~5 000 μm 和>5 000 μm;

^b 稀土元素包括 La、Nd、Pr、Sm、Gd, 测试的土壤团聚体粒径范围分别为 <10、10~25、25~38、38~53、53~210、210~500、500~1 000、1 000~2 000、2 000~4 750 μm 和>4 750 μm;

^c 测定的地球化学元素包括常量元素氧化物(CaO、MgO、FeO、Al₂O₃、K₂O、Na₂O、MnO、TiO₂ 和 P₂O₅)和微量元素(Li、B、V、Co、Cu、Ga、Sr、Zr、Mo、Cs、Hf、Tl、Bi、Be、U、Sc、Cr、Ni、Zn、Rb、Y、Nb、Sn、Ba、Ta、Pb 和 Th), 稀土元素包括 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb 和 Lu; 测定使用 HCl 去除 CaCO₃ 后的颗粒, 粒径范围为<5 μm、5~20 μm、20~75 μm 和>75 μm;

^d 测定的放射性核素包括 Cs-137、Be-10、Be-7、Pb_{xs}-210、Pb_{ex}-210。5 种土壤测试了<2 μm 和<2 000 μm 团聚体颗粒中的 Cs-137、Be-10 和 Pb_{xs}-210 含量;

^e 测定的颗粒为使用六偏磷酸钠分散后的土壤颗粒, 粒径范围为<63 μm 和 63~2 000 μm。

沉积、植被情况等。上述因素可能导致侵蚀或沉积程度发生改变, 进而影响侵蚀泥沙不同颗粒粒径内指纹因子的含量^[35]。此外, 在源地贡献估算中要注意指纹因子颗粒粒径范围的影响。

综上所述, 由于某一粒径范围的颗粒并非通用, 有效指纹因子的筛选在考虑范围狭窄且较细的粒径范围的同时, 应结合具体研究的地质特征、环境条件等物理基础。在充分考虑选取的指纹因子载体颗粒粒径对研究土壤和泥沙主体颗粒组分的代表性基础上, 才能获得源地判别准确性较好的有效指纹因子组合。

1.3 土壤团聚体对泥沙来源识别的影响

在泥沙输移、沉积过程中, 土壤颗粒实质是团聚体和原始颗粒(primary particle)的混合物。然而, 现有的复合指纹识别泥沙来源中, 团聚体的影响研究十分薄弱。目前, 大多研究依据团聚体完全分散后的原始颗粒筛选有效指纹因子组, 而少有考虑包含团聚体的有效颗粒(effective/aggregated particle)^[36,37](表 2)。其原因主要来自以下两方面, 首先, 团聚体的影响因素复杂, 土壤质地、结构、有机质含量、土地利用类型、侵蚀动力、泥沙输移距

离、地形、植被等都会对团聚体造成影响^[43,44], 团聚体特征多变, 难以在研究中获得稳定团聚体及其特征, 也难以研究获得稳定团聚体及其与指纹因子的关系。若未明确团聚体的迁移、沉积特征及其对指纹因子的影响, 而依据该易变且难以准确量化的有效/团聚体粒径作为指纹因子载体, 会大大降低泥沙源地判别的准确性。其次, 前人研究发现分散团聚体后的原始颗粒也能良好表示指纹因子在土壤或泥沙中的特征^[45,46]。

事实上, 团聚体作为土壤的基本结构单元, 与土壤侵蚀及泥沙搬运密切相关。侵蚀泥沙的搬运、沉积过程中, 团聚体会改变泥沙的有效颗粒粒径(包含团聚体在内)及其分选特性^[47,48], 导致沉积泥沙的颗粒粒径及其携带的指纹因子既不同于源地土壤, 也不同于完全分散的原始土壤颗粒。要依据源地土壤和沉积泥沙准确追踪泥沙来源, 考虑团聚体的影响十分重要和必要, 这是在未来的研究中需要加强的方面。

1.4 颗粒粒径作为指纹因子的可行性

泥沙颗粒在输移、沉积过程中的分选表明, 颗粒的分选十分复杂, 尤其是考虑团聚体影响的情

表 2 前人研究中测试指纹因子前常用的土壤团聚体分散方法

Table 2 Common soil aggregates dispersion methods for the testing of fingerprints in previous studies

分散方法分类及其描述			沉积物类型	研究区域	指纹因子
物理分散	超声波	土样加水制成悬浊液后超声分散	上二叠纪页岩、第四纪砂岩、三叠纪砂岩和侏罗纪白云岩	南非东开普省卡鲁中部小流域	矿物磁性 ^[37]
	加热煮沸	在蒸馏水中煮沸	上新纪沉积物、湖泥灰岩相沉积物	土耳其布格杜兹流域 (Bügdüz)	地球化学元素 ^[38]
化学分散	化学试剂分散	HCl、HNO ₃ 、HF 和 HClO ₄	晚更新世和全新世沉积物、漂石壤土和地幔壤土、冰川沉积物	俄国普罗提瓦河左岸小流域	稀土元素、地球化学元素 ^[35]
		H ₂ O ₂ 和HCl	黄土沉积物	中国伊犁盆地	地球化学元素 ^[39]
	Calgon	中新世砂质、青釉质, 始新世砂质、硅藻土沉积物	美国马里兰州罗德河流域	矿物磁性 ^[40]	
	(NaPO ₃) ₆	河流沉积物	美国上帕卢兹盆地哈佛溪流域	C、N同位素以及C/N ^[41]	
物理-化学联合分散	化学-超声分散	Calgon分散后超声	灰岩、砂岩、粉砂岩和泥岩	英国巴森怀特湖流域	地球化学元素和矿物磁性 ^[42]

况下, 若将颗粒粒径、分选系数等参数作为指纹因子, 也可能影响源地的正确识别。研究表明, 土壤颗粒分选受土壤机械组成及结构、团聚体特征、地形地貌条件、植被状况、土地利用类型、侵蚀动力、搬运距离等因素综合影响^[49-51]。因而, 部分学者认为土壤颗粒的分选性过于复杂而难以预测, 颗粒粒径、分选系数等参数易发生不可预测的改变, 不具有保守性, 不适宜作为指纹因子^[13]。另一方面, 也有研究发现粒径作为指纹因子可以指示地质特征差异显著的沉积物来源^[52,53]。颗粒粒径、分选系数等参数用作指纹因子的可行性及其对源地分类正确性和泥沙的源地贡献估算准确性的影响, 不能仅停留在经验性结果的水平, 需要通过深入的机理研究, 明确其对准确量化泥沙来源的影响。

2 有机质对指纹因子源地正确识别的影响

有机质是影响土壤团聚体形成及其特征的重要因素之一, 其主要通过以下 3 种方式影响指纹因子对源地的正确识别。首先, 有机质会影响团聚体的数量、粒径大小、稳定性等, 导致以团聚体和原始颗粒混合物形式发生搬运、沉积的侵蚀泥沙的有效颗粒粒径、分选等特征发生改变, 从而影响指纹因子的保守性^[54]。其次, 有机质可与土壤中的矿物、污染物、养分等结合, 导致土壤中的相关指纹因子在不同粒径范围颗粒中的分布发生富集或

贫化, 从而在泥沙的输移和沉积过程中改变指纹因子的粒径分布特征^[27,55]。再次, 当有机质作为指纹因子时, 其本身在迁移过程中容易因在径流和泥沙中的分配、植物拦截或吸收等因素发生改变, 也会对泥沙来源识别的准确性造成影响^[19]。然而, 也有部分研究认为, 有机质作为指纹因子可从各类源地中识别出农地, 也可有效区分来自表层和下层土壤的泥沙, 还可追踪养分迁移, 可作为指纹因子识别泥沙来源, 对面源污染物的源与汇具有良好的指示作用^[56,57]。

3 颗粒分选与有机质因子对源地贡献估算准确性的影响

源地对沉积物的贡献通过求解模型的方法估算。源地贡献即为基于筛选的有效指纹因子组求解的超定方程的最优解析解。因而, 对指纹因子组造成影响的因素也会影响模型估算的准确性。有研究认为有机质含量、颗粒分选因子是影响指纹因子浓度分布的最重要因素^[58]。目前常用的多元混合模型、贝叶斯模型、蒙特卡罗模型、广义似然不确定估计 (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation, GLUE) 等, 均基于筛选的指纹因子组估算源地对泥沙的贡献^[9,59-61]。由于以源地样品为依据开展的有效指纹因子组的筛选中, 忽略了泥沙样品的分选及其造成的指纹因子富集/贫化, 因而, 贡献估算中常用颗粒分选、有机质含量等进行

校正。

研究者们一直致力于探究颗粒分选和有机质因子在模型中的使用和表达,前人尝试了使用二者之一、同时使用、同时忽略等情形,却存在不校正可能导致估算的贡献结果不确定过大、同时校正可能存在过度校正、二者选一则无法确定何者更优等争议^[21,58,62]。对2个因子的校正表达方式也有多种,如颗粒分选性用比表面积、分选系数等表示,有机质因子多用粘粒、粉粒等不同粒径范围土壤中的有机质含量表示^[15,63,64](表3)。此外,研究者们虽然认同颗粒分选与有机质因子之间存在关

联,现有研究却一直把两个因子独立对待,少有模型考虑二者之间的相关性,统一量化这2个因子对源地贡献的共同影响。此外,研究者在量化有效指纹因子组中各指纹因子对源地识别能力的差异及其浓度量级差异等对源地贡献造成的影响时,也需要考虑颗粒分选与有机质因子与指纹因子富集/贫化的关系,以避免过度校正的风险^[70]。可见,明确颗粒分选对指纹因子的影响,是准确量化模型中参数选用与量化的关键。未来的研究应在明确颗粒分选与有机质内在关系的基础上,采用考虑二者相关性的校正参数对模型进行校正。

表3 指纹因子的颗粒与有机质校正

Table 3 Particle and organic matter content corrections of fingerprints

校正方法	沉积物类型	指纹因子	粒径范围/ μm	校正系数
粒径校正	砂壤土 ^[65]	地球化学元素、放射性核素	<2、2~20、20~40、40~63	富集率
	砂质壤土 ^[27]	Be-7、Pb _{ex} -210、Cs-137	8个不同粒径范围*	富集率
	棕壤 ^[66] , 岩石质土壤 ^[67]	地球化学元素、磁性、放射性核素	<63	SSA
	淋溶土 ^[56]	地球化学元素、放射性核素、C、N、 $\delta^{13}\text{C}$	<2 000	D ₅₀
	粘土、第四纪黄土 ^[68]	地球化学元素	<2 000	Th(钍)
粒径和有机质校正	重粘土、粘土壤土、壤土泥炭 ^[65]	地球化学元素、C、N	<63	SSA、SOC
	壤土、粉砂壤土和砾质壤土 ^[69]	地球化学元素、稳定同位素	<63	SSA、SOC
	壤土、泥炭土 ^[21]	地球化学元素、Pb _{ex} -210、Cs-137	<63	SSA、STC
	黑钙土 ^[64]	地球化学元素	<63	SSA、SOC

注: *测试的粒径范围包括:<10、10~20、20~40、40~63、63~125、125~250、250~500、500~2 000 μm 。

4 结论与展望

在复合指纹识别泥沙来源研究中,颗粒分选和有机质因子对结果的准确性有重要影响,其不仅影响源地的正确分类,也影响源地对泥沙贡献估算的准确性。明确二者的选用与在模型中的量化,是提高复合指纹识别泥沙来源结果准确性的关键问题之一。未来的研究中,首先要重视对方法本身的研究,在采用科学的试验方法获取可靠数据的基础上,深入探讨颗粒分选和有机质因子对复合指纹识别泥沙来源准确性的影响。其次,由于颗粒分选与有机质之间存在密切关联,颗粒分选会造成有机质及其他指纹因子在某些颗粒粒径范围的富集或贫化,有机质又会通过影响土壤团聚体的特征改变土壤的颗粒粒径及其分选。加强颗粒分选与有机质因子间的定量关系研究,才能保障有效判别指纹因子的准确识别,为准确识别泥

沙源地奠定基础。再次,由于颗粒分选是导致有机质及其他指纹因子在源地土壤和泥沙中,尤其是不同粒径范围的源地土壤与泥沙中分布特征发生改变的根本原因,必须明确颗粒分选对指纹因子的影响,同时综合考虑颗粒分选和有机质因子对整个方法体系的影响。不仅需要明确二者是否可作为指纹因子判别泥沙源地,也需要明确二者在模型中的选用与量化,更需要明确二者入选有效指纹因子组的情况下,应如何考虑二者在模型中的选用及量化。总之,颗粒分选与有机质因子作为影响复合指纹识别泥沙来源结果准确性的关键因子,明确二者对复合指纹识别泥沙来源准确性的影响,才能建立可靠的复合指纹识别方法,为不同尺度的泥沙来源准确定量提供可靠的方法支撑。

参考文献(References):

- [1] World Economic Forum. The global risks report 2018, 13th edi-

- tion[R]. Switzerland, Geneva, 2018. <http://reports.weforum.org/global-risks-2018/>.
- [2] 蒋德麒, 赵诚信, 陈章霖. 黄河小流域径流泥沙来源初步分析[J]. 地理学报, 1966, 32(1): 20-36. [Jiang Deqi, Zhao Chengxin, Chen Zhanglin. Preliminary analysis on source of runoff sediment in small watershed of the Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 1966, 32(1): 20-36.]
- [3] 李振山, 付慧真, 张红武, 等. 泥沙来源确定方法述评[J]. 人民黄河, 2010, 32(4): 46-52. [Li Zhenshan, Fu Huizhen, Zhang Hongwu et al. Review of the methods for determining the source of sediment. *Yellow River*, 2010, 32(4): 46-52.]
- [4] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. GIS支持下三峡库区典型小流域土壤养分流失量预测[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 9-12. [Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua et al. Prediction on soil nutrients losses at typical small watershed of Three Gorges Area with GIS. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1): 9-12.]
- [5] 王靖宇, 方红卫, 黄磊, 等. 重金属随泥沙迁移过程的数学模型[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 225-232. [Wang Jingyu, Fang Hongwei, Huang Lei et al. A transport model for heavy metals in sediments. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 225-232.]
- [6] Koiter A J, Owens P N, Peticrew E et al. The behavioral characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins[J]. *Earth Science Reviews*, 2013, 125: 24-42.
- [7] Walling D E. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems[J]. *Journal of Soil and Sediments*, 2013, 13(10): 1658-1675.
- [8] Collins A L, Zhang Y, Walling D E et al. Quantifying fine-grained sediment sources in the River Axe catchment, southwest England: Application of a Monte Carlo numerical modeling framework incorporating local and genetic algorithm optimization[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(13): 1962-1983.
- [9] 张宁宁, 刘普灵. 黄土丘陵区近10年典型小流域对侵蚀环境演变的泥沙响应[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 106-117. [Zhang Ningning, Liu Puling. Sediment response to erosion environment evolution of a typical watershed in the Loess Hilly region in the past 10 years. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 106-117.]
- [10] 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. [Zhou Huiping, Chang Weina, Zhang Longjiang. Particulate phosphorus sources apportionment in small watershed based on sediment fingerprinting. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(13): 251-256.]
- [11] 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.
- [12] Tang Q, Fu B J, Wen A B et al. Fingerprinting the sources of water-mobilized sediment threatening agricultural and water resource sustainability: Progress, challenges and prospects in China[J]. *Science China Earth Science*, 2019, 62: 2017-2030.
- [13] 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[J]. *Earth Science Review*, 2017, 169: 85-103.
- [14] 柳本立, Zhang X C, 牛百成, 等. 多组复合指纹示踪法及其应用[J]. 地球科学进展, 2019, 34(10): 1092-1098. [Liu Benli, Zhang X C, Niu Baicheng et al. A multiple composite fingerprinting method and its application. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(10): 1092-1098.]
- [15] Nie X D, Li Z W, He J J et al. Enrichment of organic carbon in sediment under field simulated rainfall experiments[J]. *Environmental Earth Science*, 2015, 74(6): 5417-5425.
- [16] Gaspar L, Blake W H, Smith H G et al. Testing the sensitivity of a multivariate mixing model using geochemical fingerprints with artificial mixtures[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 498-510.
- [17] Liu L, Liu H Y, Fu S H et al. Feasibility of magnetite powder as an erosion tracer for main soils across China[J]. *Journal of Soil and Sediments*, 2020, 20: 2207-2216.
- [18] Zhang X C, Friedrich J M, Nearing M A et al. Potential use of Rare Earth Oxides as tracers for soil erosion and aggregation studies[J]. *Soil science Society of America Journal*, 2001, 65(5): 1508-1515.
- [19] Li X J, Zan J B, Yang R S et al. Grain-size-dependent geochemical characteristics of middle and upper Pleistocene loess sequences from the Junggar Basin: Implications for the provenance of Chinese eolian deposits[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 538: 109458.
- [20] Tombeur F, Cornu S, Bourlès D et al. Retention of ^{10}Be , ^{137}Cs and ^{210}Pb in soils: Impact of physico-chemical characteristics[J]. *Geoderma*, 2020, 367: 114242.
- [21] Arai H, Tokuchi N. Soil organic carbon accumulation following afforestation in a Japanese coniferous plantation based on particle-size fractionation and stable isotope analysis[J]. *Geoderma*, 2010, 159: 425-430.
- [22] 张风宝. ^7Be 沉降在地表分配规律及在示踪坡面侵蚀过程中的应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008. [Zhang Fengbao. The redistribution of ^7Be deposition to the land surface and its application on the soil erosion processes of the slopes. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2008.]
- [23] Liu G, Xiao H, Liu P L et al. An improved method for tracing soil erosion using rare earth elements[J]. *Journal of Soils Sediments*, 2016, 16: 1670-1679.
- [24] 张兴昌, 邵明安. 侵蚀泥沙、有机质和全氮富集规律研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 541-544. [Zhang Xingchang, Shao Ming'an. Enrichment of organic matter and nitrogen in eroded

- bedloads. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(4): 541-544.]
- [25] Batista P V G, Lacey J P, Silva M L N et al. Using pedological knowledge to improve sediment source apportionment in tropical environments[J]. *Journal of Soil and Sediments*, 2019, 19: 3274-3289.
- [26] 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: 177-191.
- [27] Blake W H, Wallbrink P J, Wilkinson S N et al. Deriving hillslope sediment budgets in wild fire-affected forests using fallout radionuclide tracers[J]. *Geomorphology*, 2009, 104(3-4): 105-116.
- [28] 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. [Lin Jinshi, Huang Yanhe, Zhang Xubin et al. Apportioning typical collapsing hill's erosion sediment sources of granite region in southern China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3): 53-57.]
- [29] Sutherland R A, Wan Y, Lee C T et al. Aggregate enrichment ratios for splash and wash transported sediment from an Oxisol[J]. *Catena*, 1996, 26(3-4): 187-208.
- [30] Zheng Y, Luo X, Zhang W et al. Enrichment behavior and transport mechanism of soil-bound PAHs during rainfall-runoff events[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 171: 85-92.
- [31] Belmont P, Willenbring J K, Schottler S P et al. Toward generalizable sediment fingerprinting with tracers that are conservative and nonconservative over sediment routing timescales[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(8): 1479-1492.
- [32] 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: 2101-2116.
- [33] Haddadchi A, Olley J, Pietsch T. Quantifying sources of suspended sediment in three size fractions[J]. *Journal of Soil and Sediments*, 2015, 15(10): 2086-2100.
- [34] Gholami H, TakhtiNaja E J, Collins A L et al. Monte Carlo fingerprinting of the terrestrial sources of different particle size fractions of coastal sediment deposits using geochemical tracers: some lessons for the user community[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 13560-13579.
- [35] Samonova O A, Aseyeva E N, Chernitsova O V. Data on rare earth elements in different particle size fractions of topsoil for two small erosional landforms in central European Russia[J]. *Data in Brief*, 2020, 30: 105450.
- [36] Droppo I, Nackaerts K, Walling D et al. Can flocs and water stable soil aggregates be differentiated within fluvial systems[J]. *Catena*, 2005, 60: 1-18.
- [37] Pulley S, Rowntree K, Foster I. Conservatism of mineral magnetic signatures in farm dam sediments in the South African Karoo: The potential effects of particle size and post-depositional diagenesis[J]. *Journal of soil and sediments*, 2015, 15: 2387-2397.
- [38] 王玲. 陡坡地水蚀过程与泥沙搬运机制[D]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2016. [Wang Ling. Water erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. Yangling: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, the University of Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, 2016.]
- [39] D'Haen K, Verstraeten G, Duser B et al. Unravelling changing sediment sources in a Mediterranean mountain catchment: A Bayesian fingerprinting approach[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(6): 896-910.
- [40] Li Y, Gholami H, Song Y G, Fathabadi A et al. Source fingerprinting loess deposits in Central Asia using elemental geochemistry with Bayesian and GLUE models[J]. *Catena*, 2020, 194: 104808.
- [41] Oldfield F, Maher B A, Donoghue J et al. Particle-size related, mineral magnetic source sediment linkages in the Rhode River catchment, Maryland, USA[J]. *Journal of the Geological Society*, 1985, 142(6): 1035-1046.
- [42] Fox J F, Papanicolaou A N. The Use of Carbon and Nitrogen Isotopes to Study Watershed Erosion Processes[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 43(4): 1047-1064.
- [43] Hatfield R G, Maher B A. Suspended sediment characterization and tracing using a magnetic fingerprinting technique: Bassenthwaite Lake, Cumbria, U K[J]. *Holocene*, 2008, 18(1): 105-115.
- [44] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 415-421. [Wang Qingkui, Wang Silong. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 415-421.]
- [45] 叶露萍, 谭文峰, 方临川, 等. 基于地统计学的土壤团聚体空间变异研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(2): 146-153. [Ye Luping, Tan Wenfeng, Fang Linchuan et al. Research advances in spatial variability of soil aggregate by using geostatistics. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(2): 146-153.]
- [46] Bouchez J, Gaillardet J, France-Lanord C et al. Grain size control of river suspended sediment geochemistry: Clues from Amazon River depth profiles[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2011, 12: 1-24.
- [47] Lacey J P, Olley J, Pietsch T J et al. Identifying subsoil sediment sources with carbon and nitrogen stable isotope ratios[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29: 1956-1971.
- [48] 钱婧, 张丽萍, 王文艳. 红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1590-1599. [Qian Jing, Zhang Liping, Wang Wenyan. The relationship between soil ag-

- gregates and eroded sediments from sloping vegetated red soils of South China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1590-1599.]
- [49] 汤珊珊, 高海东, 李占斌, 等. 坡面覆沙后侵蚀泥沙颗粒分选特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 125-130. [Tang Shanshan, Gao Haidong, Li Zhanbin et al. Characteristics of particle separation of erosion sediment in slop surface covered with sand. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(2): 125-130.]
- [50] 王则宇, 崔向新, 蒙仲举, 等. 风水复合侵蚀下锡林河流域不同管理方式草地表土粒度特征[J]. 土壤, 2018, 50(4): 819-825. [Wang Zeyu, Cui Xiangxin, Meng Zhongju et al. Soil particle size distributions of different management styles under complex wind and water erosion in Xilin River basin. *Soils*, 2018, 50(4): 819-825.]
- [51] 阳辉, 师长兴, 姚海芳. 黄河上游毛不拉孔兑表层沉积物粒度分布特征及影响因素[J]. 干旱区地理, 2016, 39(2): 353-360. [Yang Hui, Shi Changxing, Yao Haifang. Grain size distribution characteristics of fluvial deposits and influence factors in the Maobula River of the Upper Yellow River. *Arid Land Geography*, 2016, 39(2): 353-360.]
- [52] Charron A, Birmili W, Harrison R M. Fingerprinting particle origins according to their size distribution at a UK rural site[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: D07202.
- [53] Zhang J Q, Yang M Y, Zhang F B et al. Fingerprinting sediment sources in the water-wind erosion crisscross region on the Chinese Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 649-663.
- [54] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412-418. [Dou Sen, Li Kai, Guan Song. A review on organic matter in soil aggregates. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 412-418.]
- [55] 郝燕芳, 佟帆. 侵蚀泥沙颗粒特征研究进展[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 1-7. [Hao Yanfang, Tong Fan. Research progress of the particle-size characteristics of eroded sediments. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 1-7.]
- [56] Evrard O, Poulencard J, Némery J et al. Tracing sediment sources in a tropical highland catchment of central Mexico by using conventional and alternative fingerprinting methods[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27: 911-922.
- [57] Tiecher T, Ramon R, Laceby J P et al. Potential of phosphorus fractions to trace sediment sources in a rural catchment of Southern Brazil: Comparison with the conventional approach based on elemental geochemistry[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 1067-1076.
- [58] 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: 263-291.
- [59] Behrooz R D, Gholami H, Telfer M W et al. Using GLUE to pull apart the provenance of atmospheric dust[J]. *Aeolian Research*, 2019, 37: 1-13.
- [60] Huangfu Y C, Essington M E, Hawkins S A et al. Testing the sediment fingerprinting technique using the SIAR model with artificial sediment mixtures[J]. *Journal of Soil and Sediments*, 2020, 20: 1771-1781.
- [61] 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: 262-275.
- [62] Walling D E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 344: 159-184.
- [63] Haddadchi A, Ryder D S, Evrard O et al. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models[J]. *International Journal Sediment Research*, 2013, 28(4): 560-578.
- [64] Koiter A J, Owens P N, Petticrew E L et al. Assessment of particle size and organic matter correction factors in sediment source fingerprinting investigations: An example of two contrasting watersheds in Canada[J]. *Geoderma*, 2018, 325: 195-207.
- [65] Motha J A, Wallbrink P J, Hairsine P B et al. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in south-eastern Australia[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(3): 53-62.
- [66] Blake W H, Ficken K J, Taylor P. Tracing crop specific sediment sources in agricultural catchments[J]. *Geomorphology*, 2012, 139-140: 322-329.
- [67] 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[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 194: 27-41.
- [68] Gall M L, Evrard O, Foucher A et al. Quantifying sediment sources in a lowland agricultural catchment pond using ^{137}Cs activities and radiogenic $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566-567: 968-980.
- [69] Collins A L, Walling D E, Webb L et al. Apportioning catchment scale sediment sources using a modified composite fingerprinting technique incorporating property weightings and prior information[J]. *Geoderma*, 2010, 155: 249-261.
- [70] Gellis A C, Noe G B. Sediment source analysis in the Linganore Creek watershed, Maryland, USA, using the sediment fingerprinting approach: 2008 to 2010[J]. *Journal of Soils Sediments*, 2013, 13: 1735-1753.

Effect of Particle Sorting and Organic Matter on Sediment Source Study Using Composite Fingerprints

Zhang Jiaqiong^{1,2}, Wang Xiaotong¹, Yang Mingyi^{1,2}, Liu Ying¹, Zhang Fengbao^{1,2}, Yin Minfeng¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Sediment source study is one of the key aspects of soil erosion research, which is significant for the implementation of erosion control measures. The composite fingerprints, which has good utilization potentiality, is one of the most advanced approaches for sediment source study to data. However, particles sorting has significant influence on accuracy of sediment source discriminant based on the composite fingerprints. Additionally, the properties of soil (such as organic matter), using as fingerprints enrich or deplete in some grain size ranges, which further affect the correctness of sediment source classification and the discriminating accuracy of sediment sources. Thus, this study focused on sediment formed by water erosion, summarized the enriching or depleting characteristics of fingerprints, distribution of fingerprints in different grain size ranges, selection of particles size ranges for fingerprints, influence of aggregates on sediment source discrimination, and correction of particle sorting and organic matter content in the estimation models for sediment sources. This review is helpful for insightful understanding to the effect of particle sorting and organic matter on sediment source study using the composite fingerprints.

Key words: composite fingerprints; sediment source; particle sorting; grain size; organic matter