

黄土高原地区泥沙来源复合指纹示踪研究进展

史玮玥^{1,2}, 岳荣², 方怒放²

[1. 中国地质大学(北京) 信息工程学院, 北京 100083;

2. 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]

摘要: [目的] 为把握复合指纹示踪方法发展动态, 为黄土高原泥沙来源研究提供建议。[方法] 综述了复合指纹示踪方法的理论基础, 对各指纹因子(物理示踪剂、核素、地化元素、磁性、有机质、碳氮稳定同位素、孢粉、生物标志物)的发展进程、模型算法、不确定分析等进行了详细论述。[结果] 黄土高原地区在利用指纹因子的时空差异性来研究侵蚀区泥沙的来源, 定量描述侵蚀过程的发展等方面已取得一系列成果。[结论] 复合指纹示踪泥沙来源技术在黄土高原地区以探讨指纹因子应用研究为主, 在混合模型矫正、多方法比较、指纹因子守恒等方面还需要进一步加强研究。

关键词: 黄土高原; 复合指纹; 泥沙来源; 土壤侵蚀; 流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)03-0276-10

中图分类号: TV141. + 3

文献参数: 史玮玥, 岳荣, 方怒放. 黄土高原地区泥沙来源复合指纹示踪研究进展[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 276-285. DOI:10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 03. 045; Shi Weiyue, Yue Rong, Fang Nufang. A review of researches on sediment sources discrimination with composite fingerprinting techniques in Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 276-285.

A Review of Researches on Sediment Sources Discrimination with Composite Fingerprinting Techniques in Loess Plateau

Shi Weiyue^{1,2}, Yue Rong², Fang Nufang²

[1. School of Information Engineering, China University of Geosciences(Beijing), Beijing

100083, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China]

Abstract: [Objective] This study aims to review the development of composite fingerprinting technique and provide support for the study of sediment sources in the Loess Plateau. [Methods] The theoretical basis of composite fingerprint tracing technique was reviewed. The development process, model algorithm and uncertainty analysis of various fingerprint factors (physical tracers, radionuclides, geochemical tracers, mineral magnetics, properties of organic matter, stable isotopes of organic carbon and nitrogen, plant pollen and biomarkers) were discussed in detail. [Results] A series achievements have been made in studying the sources of sediment and quantitatively describing the development of erosion process in the Loess Plateau by using the spatial and temporal differences of fingerprint factors. [Conclusion] Most existing studies on the Loess Plateau focused on the application of sediment tracing methods. Further studies are needed in the area of mix model correction, methods comparison and fingerprint factor conservation in the future.

Keywords: the Loess Plateau; composite fingerprinting; sediment source; soil erosion; catchment

黄土高原是世界上土壤侵蚀最严重的地区之一, 强烈的土壤侵蚀引起土壤养分流失, 土地退化和生产力降低, 侵蚀所产生的泥沙涌入河道, 成为污染物迁

移转化的主要载体^[1]。流域作为黄土高原水土保持综合治理的基本单元, 蕴含了大量泥沙侵蚀特征和侵蚀环境信息。在小流域侵蚀产沙系统中, 侵蚀泥沙的

来源、类型、时空分布可以决定流域泥沙输出的属性^[2]。判别黄土高原流域泥沙来源成为流域土壤侵蚀和泥沙运移研究的重要方面,有助于为黄土高原小流域水土流失综合治理提供针对性的管理措施,为水土保持措施的实施提供理论指导。

指纹识别技术示踪泥沙始于20世纪70年代。早期使用单因子,采用大气沉降核素^[3-5]、稳定同位素^[6]、土壤矿物^[7]为指纹因子,之后随着指纹识别技术的发展,因子种类不断丰富。例如利用大气沉降核素(¹³⁷Cs, ⁷Be, ²¹⁰Pb_{ex}) 在表土中具有特殊的分布性质,在示踪坡面土壤侵蚀过程^[8-9]、估算土壤侵蚀沉积速率、土壤侵蚀量^[10-13]、反演流域侵蚀历史^[14]等研究中具有明显优势。单因子指纹识别技术虽然应用的较多,但具有不确定性:①指纹因子浓度受地貌、土壤、植被、气候、土地利用等流域环境因素的影响而具有明显的差异;②当物源数量增多时,指纹因子浓度不能在物源间表现出显著差异,即在多物源情况下,单指纹因子已经不具备判别能力;③土壤侵蚀的方式不一,泥沙输移路径方式的复杂性和不确定性,也降低了单指纹因子的识别能力;④指纹判别能力的差异以及在泥沙中保存性能的差异,使得不同元素示踪得出的结果差异较大。因而,采用复合指纹识别技术,通过因子筛选确定最优因子组,再结合多变量线性混合模型,计算各潜在源地的泥沙贡献比,可使指纹识别技术的可信度和准确度得到大幅提高。

1 理论基础

泥沙来源复合指纹示踪技术,是以地表物质内所含的各种物质指标为指纹识别因子,选择由多因子指纹组合替代单指纹因子,结合多变量线性混合模型,定量计算不同泥沙物源区输沙贡献的技术方法。流域内的土壤、植被、地质、地貌以及土地利用、农作物管理措施共同影响泥沙运移,构建流域内泥沙来源的时间、空间分布格局^[2]。在一个流域内,地质上的相异性是导致地表物质物理化学性质的内部因素,而一些外部因素如地貌变化、土地利用、地表侵蚀会直接影响含沙流的运移路径和方式,从而使地表物质的物理化学等各种性质差异进一步加强,最终在流域出口泥沙中,使得指纹因子在含量、种类上显现出差异^[15]。指纹示踪技术就是通过以上内部联系,再建立质量平衡模型,实现对泥沙来源的定量分摊。

2 各因子研究进展

应用指纹因子示踪泥沙来源包括几个前提条件^[16]:首先指纹因子要有保存性,在泥沙运移过程中

不受其他因素的影响而发生变化;其次所使用的指纹因子要有判别能力,在各泥沙来源区之间差异性显著;最后所应用的定量模型要有估算流域内各泥沙来源区对流域产沙的贡献能力。目前来说,黄土高原地区所用于示踪泥沙来源的指纹因子,按性质主要分为3大类,分别为物理性质类属性(土壤粒径分布、颗粒形态、颜色等)、化学性质类属性(放射性核素、无机元素、矿物成分、土壤磁性等)、生物性质类属性(有机组分、有机化合物、生物标志物、稳定性同位素等),表1概括了当前黄土高原地区运用复合指纹示踪技术判别泥沙来源的大概进展,同时总结了黄土高原地区所使用的各指纹因子的特性及研究进展。

2.1 土壤物理性质

泥沙颜色、形态、粒度都可以作为指纹识别因子。在早期的研究中,Grimshaw 和 Lewin^[17]通过泥沙颜色,对沉积泥沙来源进行判别。Boer 和 Crosby^[18]利用SEM/EDS(扫描电子显微镜/能量色散光谱分析法),将黏土类的颗粒形态作为示踪因子,判別了流域两种表层土壤来源。Pulley 等^[19]利用土壤磁性和颜色作为示踪剂对沉积物来源进行比较,得出颜色适用于追踪历史沉积物来源。在黄土高原地区,王晓^[20]采用粒度分析法对小流域泥沙来源进行分析,得到了黄土高原砒砂岩区小流域泥沙主要来源是沟谷地。安正锋^[21]、弥智娟^[22]除了将所有理化属性指标作为指纹因子进行分析外,还将泥沙各个粒径区间和特征粒径作为识别因子共同进行分析,得到了砂岩是皇甫川流域典型淤地坝拦截泥沙主要贡献区。由于泥沙的输移具有颗粒的分选性,细沙又有团聚和分散作用,并且伴随土壤发生的化学变化,导致泥沙颜色具有极大的不稳定性。因而,单一物理性质因子在实际应用中受到许多限制。

2.2 核素因子

核素指纹因子主要为天然放射性核素(¹³⁷Cs, ⁷Be, ²¹⁰Pb_{ex}, ²²⁶Ra, ²³²Th 等)。20世纪60年代初,Menzel^[23]研究了放射性核素的运移和土壤侵蚀的关系,而后 Walling 和 Woodward^[24]利用¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra 这3种核素,结合有机碳氮、磁性组成复合指纹,证明了复合指纹识别在大尺度流域内确定沉积物来源的应用潜力。Schuller 等^[25]利用¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra, ⁴⁰K、土壤有机质构成复合指纹,研究了林业作业背景下细颗粒泥沙主要来源。在国内,20世纪80年代,张信宝等^[26]在羊道沟开展了黄土高原小流域泥沙来源的¹³⁷Cs法研究,判別梁峁坡和沟壑区的相对来沙量,得出了沟道区为泥沙主要来源地。杨明义等^[27]、李少龙

等^[28]以及杨明义和徐龙江^[29]在黄土高原地区用放射性核素进行了泥沙示踪研究,同时证明了复合指纹识别技术在黄土高原地区用于识别泥沙来源的可行性。

放射性核素作为识别因子,在较大尺度有较多优点,但是应用较多的核素如¹³⁷Cs(半衰期 30.1 a),它是核试验的产物,在 20 世纪 60 年代达到顶峰,之后由于禁止核试验,¹³⁷Cs 在土壤中的含量会随着时间的推移衰变或侵蚀掉,失去示踪能力^[30];而⁷Be 半衰期只有 53.3 d,只能在次降雨短期内进行示踪,受时间尺度影响很大^[31]。

2.3 地球化学性质

地球化学组成为主要元素(Na, Mg, Ca, K, Fe, Al 等)、微量元素(Ba, As, Cr, Zn, Co, Cs, Ag, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, V, Hf 等)、稀土元素(REE)(Ce, Eu, La, Lu, Sm, Tb, Yb 等),目前已广泛被用于沉积物来源示踪和重建历史沉积物来源。不同的母岩构成,则直接影响空间来源的地球化学元素含量,可以用于各类母岩发育下土壤类型区泥沙来源判别;在相同母岩类型区,成土过程由于风化作用、淋溶作用、土地利用、植被覆盖等影响,地球化学组成同样存在差异。1997 年,Collins 等^[32]利用漫滩沉积物中的地化元素作为指示剂,重建两个流域盆地沉积物来源的变化。范立杰^[33]利用地化元素研究皇甫川坝控小流域泥沙来源,得到裸岩是主要的泥沙贡献区,占到 39.7%。

Knaus 和 Gent^[34]指出最好的稳定示踪剂应该是和土壤紧密结合、对生物无害、随水迁移能力弱、背景值较低。稀土元素(REE)正是这样一种理想的示踪物质,其容易被土壤颗粒强烈吸附,与土壤有较高的亲和力,利用中子活化分析检测时,灵敏度高,简单易行^[35-37];而且 REE 间具有相似的化学性质,利用稀土元素进行研究,可以消除元素之间化学性质差异而引起的试验误差^[38]。

在黄土高原地区,石辉等^[38]通过室内模拟试验,首次将 REE 示踪法引入泥沙来源研究,表明 REE 示踪法可以得到较满意结果。薛亚洲等^[39]通过研究发现,侵蚀严重区主要集中在坡面下部的三分之一区域,产沙量几乎占到坡面产沙量的 100%。魏霞等^[40]利用 REE 示踪技术,在室内利用坡沟系统模型,对黄土高原坡沟系统侵蚀泥沙来源问题进行研究。目前黄土高原已有的 REE 示踪多数局限在室内模拟,在流域尺度上还未见报道。

2.4 土壤磁性

原生铁通过一系列生物化学作用生成次生磁矿物,性质稳定,在土壤中的保存性能强。大尺度范围

内,不同区域磁性矿物的分布具有明显的差异性,其种类、含量和赋存方式主要受到成岩过程和地质构造所影响,小尺度范围内,植被覆盖、土地利用等微地貌的差异,也使磁性矿物具有差异性^[41]。在土壤空间剖面分布上,表层土壤磁性强度高,以超顺磁性颗粒为主^[42]。沉积物磁性继承了其来源物质的属性,沉积物来源不同,其磁性矿物成分、含量、颗粒度也不同,所以他们的磁性特征如磁化率、饱和剩磁、矫顽力等就有差别,将它们和周围可能的来源区泥沙磁性作对比,就可以得出各种沉积泥沙的准确来源^[41]。土壤磁性作为示踪因子,有两大优势:一是连续性好、分辨率高、有效记录了气候、人为活动对环境的影响;二是磁参数的测量简单快速、无破坏性。经过磁参数测试后,还可以进行核素,地球化学分析,也可以迅速与其他指纹因子相结合,进行复合示踪。20 世纪 70 年代,Oldfield 等^[43]最早利用质量磁化率、饱和等温剩磁,剩磁矫顽力等磁性参数识别了河流中悬浮泥沙来源。80 年代末 90 年代初, Yu 和 Oldfield^[44]、俞立中^[45]等说明了沉积物来源组成定量分析的磁诊断模型,利用磁信息对沉积物来源组成的定量计算。董元杰和史衍玺^[46]利用磁性示踪法对坡面土壤侵蚀进行了探讨,认为其是一种行之有效的方法。贾松伟和韦方强^[47]利用土壤磁性特征在蒋家沟流域研究沉积物的来源,表明滑坡体堆积物是泥石流沉积物的主要来源。在黄土高原小流域研究中,趋磁细菌^[48]、碳酸盐淋溶^[49]、作物覆盖燃烧^[50]、有机质和土壤粒径大小^[51]对土壤磁化率的影响也不容忽视,目前在黄土高原,大多数学者如 Zhao 等^[52]、王永吉^[53]是把磁性因子和其他因子结合,采用复合指纹识别技术判别泥沙来源。

2.5 土壤有机组分、稳定同位素和孢粉因子

土壤有机组分是构成土壤有机质的基本元素,是碳、氮生物循环的重要组成物质。近年来,许多研究者将土壤有机组分作为指纹因子,在黄土高原小流域进行沉积土壤有机质,有机碳和沉积泥沙来源判别,得到了比较好的效果。Liu 等^[54]利用¹³C 和放射性同位素(¹³⁷Cs 和 ²¹⁰Pb_{ex}),以及 C/N 来定性和定量地识别有机碳来源。张玮^[55], Zhang 等^[56]将土壤有机质, TN, TP, TK 和其他指纹因子复合,得到了农耕地、裸地是主要的泥沙来源区。然而,有机碳的含量随时会受到土壤团聚体稳定性的制约^[57],种植系统和轮作次序的不同,会使土壤有机质在土壤剖面分布产生差异^[58],农作物和树种枯落物在坝地堆积以及施加氮肥、磷肥、有机肥也会加速土壤有机质的富集

和分解。所以,判别泥沙来源时,一般多是将土壤有机质、全碳、全氮等与其他因子复合,很少单独使用。

碳、氮稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)作为土壤重要组成部分,其代表碳库和氮库的土壤有机质在生态系统物质循环中扮演了重要角色。 $\delta^{13}\text{C}$ 受地面植被种类,土壤颗粒大小和土壤深度的影响而表现出差异性。 $\delta^{15}\text{N}$ 是 ^{15}N 和 ^{14}N 的比值,表面土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 来自腐烂植被和植物根部的有机物质的输送,反映了泥沙物源区的植被覆盖类别和土地管理措施的特点。Mukundan等^[59]在南皮埃蒙特流域对21种示踪剂进行测试,得出 ^{137}Cs 和 ^{15}N 是识别流域潜在沉积物来源的最佳示踪剂,并表明 $\delta^{15}\text{N}$ 作为一种独特示踪剂,可以区分不同来源地的土壤。Papanicolaou等^[60]在帕卢斯河流域利用 $\delta^{15}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 和C/N识别森林和农业用地土壤,得到了氮稳定同位素和C/N是可靠的指纹识别因子。Blake等^[61]使用单体同位素分析法在农业小流域辨别了不同泥沙来源。黄土高原地区,安正峰^[21]利用稳定碳、氮同位素作为复合指纹因子在黄土高原多沙粗沙区小流域进行产沙来源判别,得到了砂岩是主要的泥沙来源。干旱、气候变化、海拔、以及施肥会对碳氮同位素产生重大影响^[60],在利用碳氮同位素时,必须重点注意如气候条件、海拔高度、纬度等改变沉积物稳定同位素组成的因素。

孢粉是孢子植物的孢子和种子植物的花粉,质轻量大,散布极远,性质比较稳定。1985年,Brown^[62]首次论证了孢粉在判别沉积泥沙来源中的潜在用途。何永彬等^[63]利用 ^{137}Cs 示踪技术和孢粉分析法,对喀斯特峰丛草地洼地泥沙沉积进行研究。在黄土高原地区,张信宝等^[64]在陕北吴起县周湾水库利用孢粉进行示踪,得到了坡地和草地土壤不是沉积泥沙的主要来源孢粉浓度的变化受到季节、花粉生产力、花粉的耐腐蚀性以及花粉颗粒的分散度影响较大;在采样过程中,采样点和散播花粉植被的距离也会对孢粉浓度产生影响,还有关于孢粉的运输方式和储存过程还在研究中,并不成熟^[62],在黄土高原地区使用孢粉示踪的相关研究还相对较少。

2.6 生物标志物

生物标志物(由C, H及其他元素组成的复杂有机物质)存在于沉积物或岩石中,在演化过程中记载了原始生物母质碳骨架的特殊分子结构信息。目前来说研究范围主要在类脂物分子、烷烃、非烃类的酸、醇、酯等。2008年,Gibbs^[65]首次利用对植物的天然生物标志物(脂肪酸)的同位素分析,得到了不同土地

利用下的物源区对河口沉积物的贡献。陈方鑫等^[66]利用生物标志物(正构烷烃)与其他理化性质作为复合指纹因子,在黄土丘陵区判别沉积泥沙来源,得到了沟壁是主要泥沙来源区的结论。Liu等^[67]利用烷烃生物标记、碳氮同位素和有机组分对土壤有机物来源进行示踪,得到了农田是土壤有机质的主要来源。生物标志物与地质条件关系不大,与土地利用关系密切,生物标志物示踪就可应用在土壤质地较为均一的区域。

2.7 光谱法示踪

红外光谱示踪法是将红外光谱作为指纹示踪因子,借助化学计量法对红外光谱数据进行整理和特征提取,建立定量模型,对泥沙来源进行预测分析。红外光谱示踪法原理在于物质在红外光谱范围的吸收峰为基频、倍频与合频吸收,不同化合物有其特异的红外吸收光谱,其谱带的强度、位置、形状及数目均与化合物及其状态有关。Poulenard等^[68]初次尝试使用漫反射红外光谱示踪河流悬浮沉积物来源并取得了理想的结果。先后有学者利用可见光谱在卢森堡^[69]和法国^[70],紫外可见光谱^[71]和近红外光谱^[72]在巴西南部,可见近红外光谱在卢森堡^[73],中红外在法国^[74]开展泥沙来源的研究。在进行光谱法示踪研究建模时,一般选用偏最小二乘法基于不同源地配比的混合样构建模型,再把目标样品带入模型中,计算目标样品来源及比例^[68-69]。红外光谱技术具有样品预处理简单、快速、高效、等优势,受到较多关注,但是在黄土高原地区尚未见报道。

3 混合模型

数值混合模型的应用,使得各潜在泥沙源地泥沙贡献率得到量化^[75]。1986年,Thompson^[76]在研究如何通过找到最佳的原样组合来解释所调查沉积物的磁特性时,通过建立 m 个线性方程组来求解这类混合问题。之后在1989年,Yu和Oldfield^[44]采用多元回归分析法对各种磁参数建立的回归方程进行分析,通过得到的线性规划数学模式,对沉积物来源组成进行定量分析。1993年,Walling等^[77]提出了一种更为简单的方法,避免了建立经验混合模型方程,其混合模型的基本表述为:

$$C_i = \sum_{j=1}^m X_j S_{ji} \quad (0 < X_j < 1, \sum_{j=1}^m X_j = 1) \quad (1)$$

式中: C_i ——泥沙样指纹因子的浓度; X_j ——泥沙源地 j 的泥沙贡献率; S_{ji} ——源地 j 中指纹因子 i 的平均浓度; m ——潜在泥沙源地数量。下同。

表 1 黄土高原地区复合指纹示踪研究概况

研究者	土壤物理性质	地球化学性质	其他指纹因子	最终指纹因子组合	贡献率
安正峰 ^[21]	土壤粒径		^{137}Cs , Total ^{210}Pb , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, χ_{bf} , χ_{tf} , χ_{fd} , TN, TOC, C/N, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$	^{137}Cs , TN, χ_{bf}	砂岩 73.4%, 农地 15.3%, 草地 11.3%
张智娟 ^[22]	泥沙粒径区间, 特征粒径	28 种地化元素, 金属氧化物	χ_{tf} , χ_{bf} , χ_{fd}	Nb, Sb, U, χ_{fd}	砂岩 61.7%, 草地 6.0%, 裸地 32.3%
杨明义, 徐龙江 ^[29]	水稳性团聚体	7 种金属元素	^{137}Cs , ^{210}Pb , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{226}Ra , χ_{tf} , χ_{bf} , TN, 有机质	Cu, ^{137}Cs , ^{226}Ra , TN, χ_{tf}	沟道 33.7%, 果园 60.0%, 坡耕地 3.0%, 支沟 3.3%
范立杰 ^[33]		54 种地化元素, 金属氧化物		Cu, Pb, La, W, P, Er, Cs	坡耕地 35.6%, 草地 24.7%, 裸岩地 39.7%
薛亚洲等 ^[39]		7 种稀土元素氧化物		Eu, Yb, Tb, Sm, Nd, Ce, La	坡面下 1/3 区域为主要侵蚀泥沙贡献地, 约 100%
魏霞等 ^[40]		7 种稀土元素氧化物		Eu, Yb, Tb, Sm, Dy, Ce, La	坡面侵蚀产沙量占总侵蚀产沙量的 57%~74%
Zhao 等 ^[52]		34 种地化元素	χ_{tf} , χ_{bf} , χ_{fd}	小石拉塔: Nb, Sr, W, Mo, χ_{bf} 杨家沟: Cu, Pb, P, La, W, Si, Cs	小石拉塔: 砂岩 61.52%, 裸地 32.54%, 草地 5.94% 杨家沟: 砂岩 66.8%, 裸地 17.5%, 草地 15.7%
王永吉 ^[53]		45 种地化元素	^{137}Cs , χ_{fd} , χ_{bf} , χ_{tf} , TN, 有机碳	Mg, Ba, Na, Y, Cr, TN	红泥沟壁 79.7%, 片沙覆盖区 12.9%, 黄土沟壁 5.4%, 退耕地 2.1%
张玮 ^[55]		7 种金属元素	χ_{tf} , χ_{bf} , χ_{fd} , TN, TP, TK, SOM	Ca, TN, Zn, Mg	沟间地为 40.7%, 沟谷地 59.3%
Zhang 等 ^[56]		7 种金属元素	χ_{tf} , χ_{bf} , χ_{fd} , TP, TN, TK, SOM	TP, TN, Ca, Fe	裸地 44.1%, 农地 37.7%, 草地 9.0%, 林地 9.2%
陈方鑫等 ^[66]		8 种金属元素	χ_{bf} , χ_{tf} , χ_{fd} , TN, TP, TOC, $C_{20}-C_{33}$, OEP _L , OEP _M , CPI, ACL, HVI, C_{31}/C_{29} , C_{31}/C_{27} , C_{33}/C_{29} , C_{33}/C_{27}	CPI, TP, Ca, C_{20} , C_{29} , Fe	沟道 60.8%, 农地 20.7%, 林地 11.3%, 草地 7.2%
Wang 等 ^[78]		23 种地化元素		Mg, Al, Co, Bi	沟渠 71%, 坡地 29%
Liu 等 ^[67]			$\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $C_{27}-C_{33}$, ACL ₂₇₋₃₃ , CPI ₂₇₋₃₃ , OEP, P _{aq} , P _{wax} , HVI, C_{31}/C_{27} , C_{31}/C_{29} , LSR, TAR _{HC} , TOC, TN	$\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, TOC, TN	农田 29.05%, 森林 12.17%, 草地 15.39%, 休耕地 21.53%, 沟壑 21.85%
赵恬茵 ^[79]		7 种金属元素	^{137}Cs , TN, TP, TK, SOM, χ_{fd} , χ_{bf} , χ_{tf}	桥子西沟: TN, SOM, Mg, Na, Ca, Mn, TP, χ_{bf} 王茂沟: SOM, TP, Mg, χ_{fd}	桥子西沟: 沟壁 63%, 沟坡 13%, 农耕地 24% 王茂沟: 沟壁 69%, 农耕地 21%, 沟坡 10%
徐龙江 ^[80]	土壤团聚体, 平均重量直径	7 种金属元素	^{137}Cs , ^{210}Pb , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, χ_{bf} , χ_{tf} , χ_{fd} , SOM, TN	TN, Mg, Ca, ^{137}Cs , χ_{tf}	主沟道沟壁 26.4%, 果园 65.5%, 农地 4.8%, 支沟道 3.3%
薛凯 ^[81]		7 种金属元素	^{137}Cs , TN, TP, TK, SOM, χ_{bf} , χ_{tf} , χ_{fd}	SOM, TP, Mg, χ_{fd}	沟壁 68.52%, 沟坡 5.03%, 坡耕地 26.45%
Chen 等 ^[82-83]		45 种地化元素	$C_{18}-C_{35}$, CPI, OEP _M , OEP _L , ACL, P _{aq} , HVI, P _{wax} , C_{31}/C_{27} , C_{31}/C_{29}	CPI, OEP _M , C_{28} , C_{21} , C_{24} , C_{26}	幼林地 50.5%, 坡耕地 25.65%, 草地 14.4%, 沟壁 9.5%
		45 种地化元素	$C_{27}-C_{33}$, HVI, C_{31}/C_{29} , C_{31}/C_{27} , ACL _{27-33}}	C_{27} , C_{29} , C_{31}	沟壁为 45%, 陡坡 16.8%, 农田地 38.2%

Walling 等通过引入数据分析优化模型使得各源地的泥沙贡献率更接近实际情况, 通过找到各源地的泥沙贡献率, 使模拟的指纹因子属性值和实际属性值的相对误差平方和最小, 模型如下:

$$\text{Res} = \sum_{i=1}^n [C_i - (\sum_{j=1}^m X_j S_{ji}) / C_i]^2 \quad (2)$$

1997 年, Collins 等^[84] 在模型中加入有机质和土壤粒径校正因子, 后来在 Collins^[85] 的修正模型中, 还加入了指纹因子判别权重。2006 年, Landwehr 和 Gellis^[86] 在确定源地对河流样品相对来源贡献时, 通过潜在来源地中示踪因子浓度的方差的均方根使模型数值结果最小化。2009 年, Gellis 等^[87] 将 Landwehr 模型进行改良。Landwehr 模型的独特之处在于该模型公式使一个标准偏差, 并不受示踪因子浓度直接影响,

所以, 当示踪因子的浓度非常小或者接近于 0 时, 这个模型就显得特别有用^[88]。Huges 等^[89] 采用蒙特卡罗混合模型来预测各个来源对河道和漫滩沉积泥沙的相对贡献, Huges 模型是对 Olley 和 Caitcheon^[90] 所概述的方法进行修改, 模拟蒙特卡罗随机抽样对数据进行处理, 通过随机迭代程序, 从而将模型的结果失误最小化。Huges 模型与 Collins 模型最大的不同之处在于 Huges 模型是直接用来源地收集的土壤样的测量值进行分析计算, 而 Collins 模型则是使用每个特定来源类型的示踪因子的平均值^[91]。Motha 等^[92] 提出的模型是基于模型与沉积泥沙中指纹因子浓度之间相对误差的均方根。而 Walden 等^[93] 所提出的模型是在 Thompson 基本模式下演变而来。表 2 列出了几

种模型及其修正结构。

沙中较低的有机质含量,目前运用最多的是 Walling 的

在黄土高原地区,由于黄土质地较为均一和侵蚀泥 模型。

表 2 几种混合模型及其修正形式

模型类型	模型结构	年份	文献来源
Walling 模型	$\sum_{i=1}^n [C_i - (\sum_{j=1}^m X_j S_{ji}) / C_i]^2$	1993 年	D. E. Walling 等 ^[83]
Collins 模型	$\sum_{i=1}^n \{ [C_i - (\sum_{j=1}^m X_j S_{ji} O_j Z_j) / C_i] \}^2 W_i$	1997 年	A. L. Collins 等 ^[84]
修正后的 Collins 模型	$\sum_{i=1}^n [C_i - (\sum_{j=1}^m X_j S_{ji} O_j Z_j S V_{ji}) / C_i]^2 W_i$	2010 年	A. L. Collins 等 ^[85]
Landwehr 模型	$\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n \frac{ C_i - \sum_{j=1}^m X_j S_{ji} }{\sqrt{\sum_{j=1}^m X_j^2 \text{VAR}_{ji}}}$	2006 年	J. M. Landwehr 和 A. C. Gellis ^[86]
修正后的 Landwehr 模型	$\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n \frac{ C_i - \sum_{j=1}^m X_j S_{ji} }{\sqrt{\sum_{j=1}^m X_j^2 (\text{VAR}_{ji} / n_i)}}$	2009 年	A. C. Gellis 等 ^[87]
Huges 模型	$\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{1000} \sum_{l=1}^m X_{j,i,k,l}}{1000} - C_i \right) / C_i \right]^2$	2009 年	A. O. Huges 等 ^[89]
Motha 模型	$\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i - \sum_{j=1}^m X_j S_{ji})^2 / n}$	2003 年	J. A. Motha 等 ^[89]
Walden 模型	$\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m X_j S_{ji} - C_i)^2$	1997 年	J. Walden 等 ^[93]

注:式中: C_i 为泥沙中指纹因子*i*的浓度; X_j 为源地*j*的相对产沙率; l 为蒙特卡罗迭代次数; S_{ji} 为源地*j*中指纹因子*i*的平均浓度; VAR_{ji} 为源地*j*指纹因子*i*的方差; m 为泥沙潜在源地数; n 为指纹因子数。下同。

4 算法运用

目前在黄土高原地区,研究者在利用混合模型求解时,大多用到的算法有两种,一是最小二乘法,二是遗传算法^[94]。在泥沙沉积物来源判别中,1999年,Owens等^[95]使用最小二乘法在英国约克郡河湾流域判别成沉积物来源及其历史变化。在黄土高原地区,赵恬茵^[70]、薛凯^[72]、王永吉^[53]研究人员在求解多元混合模型时大多都使用最小二乘法,取得了较满意的研究结果。首次将遗传算法运用在泥沙示踪方面是Collins等^[96]在英格兰南部的皮德尔河上游利用地球化学元素并结合遗传算法研究农田侵蚀沉积物来源,同时将传统的优化算法和遗传算法作了比较。在黄土高原地区研究中,Chen等^[79-80]利用遗传算法来预测泥沙来源贡献,取得了较好的研究成果。

5 不确定性分析

混合模型是基于两个基本的假设,即源示踪指纹因子的时空同质性,土壤属性和泥沙属性两者可以相互比较;沉积物在输移过程中,指纹因子具有保守性。

这样的假设,使得这种方法具有内在的不确定性^[97]。Martínezcarreras等^[98]指出,导致这种不确定性的原因可有:①泥沙潜在来源的数量和性质通常是假定的,用于示踪来源的指纹因子可能在时间和空间上发生变异;②同时在泥沙输移过程中进行转换,发生沿程形态转变;③物源区和河道之间联系并不明确;④不同来源的泥沙是否混合均匀;⑤线性叠加关系假设不一定都满足。所以在对泥沙来源复合指纹示踪研究时,需要进行不确定性分析。

Motha等^[92],Collins和Walling^[99]都使用模拟蒙特卡罗随机抽样法,根据每个源类型的每个指纹属性的平均值和标准偏差来构建累积正态分布,从而确定示踪剂属性的平均值范围来描述一个特定的来源,在置信限度内估计每一种源类型对每个泥沙样品的相对贡献。Chen等^[80]在黄土高原塬堰沟流域内进行泥沙来源判别时,通过模拟5000次蒙特卡罗抽样结合遗传算法,在95%的置信区间内,用每个数据集的均值表示贡献率。

拟合优度最初由Motha提出,用悬浮沉积物的每一种示踪物的计算值和实际值之间的相对差异来衡

量^[92],一般当拟合优度值大于 0.8 时,其结果精确度才会被接受^[99]。具体的计算方法如下:

$$GOF = \left\{ 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_i - (\sum_{j=1}^m Z_j S_{ji})| / C_i \right\} \times 100\% \quad (6)$$

式中: n ——指纹识别因子数量。

6 关于复合指纹技术在黄土高原地区使用的一些建议

选用不同指纹因子时,首先要注重流域尺度问题。因黄土质地较为均一,在较小尺度,地球化学元素差异可能较小,不适宜做示踪研究。但是黄土有垂直分布,马兰黄土、离石黄土、午城黄土组成差异明显,假如侵蚀泥沙来源于不同黄土,则地球化学元素又可以作为指纹因子。放射性核素适用于耕作侵蚀/坡面侵蚀研究,而对于沟蚀下切较深部位,放射性核素是不能用来计算泥沙来源的,故而在黄土高原小流域/流域尺度不建议使用放射性核素进行泥沙来源研究,但是在沉积物断代、区分沟蚀/面蚀等非定量研究上,可以使用放射性核素作为参考。生物标志物作为指纹因子可以表征土地利用,结合同位素技术具有较大应用前景,但是黄土高原大规模的生态恢复过程使得土地利用发生较大变化,在选用指纹因子和确定泥沙源地时,应考虑植被变化对生物标志物的影响,且对有机质在土壤中的分解、输移、物质守恒需要有一定的理解。总体来说指纹因子的选择取决于研究地点、研究尺度、研究目的以及对各类示踪剂理化性质的了解上,好的指纹因子保守性要强,在各潜在来源之间可以明显区别、性质稳定,在水沙输移过程中,变异程度小或者在可接受范围内。此外还应该考虑时间、价格、试验难易程度等。例如稀土元素 REE、生物标志物因子测定价格较高,¹³⁷Cs 示踪测试耗时较长等,都是需要考虑的因素。

近 20 a 来,复合指纹识别泥沙来源技术在黄土高原地区发展迅速,目前黄土高原地区还是以探讨指纹因子应用研究为主,在混合模型矫正,多方法比较,指纹因子守恒,泥沙颗粒和有机质影响等方面的研究还有所欠缺。为更好地应用复合指纹示踪技术,从采样到数据处理,从因子选择到模型验证,应当通过大量的研究形成一套规范标准程序,确保其对泥沙来源研究能提供可靠的数据支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 唐洪武,袁赛瑜,肖洋. 河流水沙运动对污染物迁移转化效应研究进展[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 139-147.
- [2] 唐强,贺秀斌,鲍玉海,等. 泥沙来源“指纹”示踪技术研究综述[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(3): 109-117.
- [3] 文安邦,张信宝, Walling D E. 黄土丘陵区小流域泥沙来源及其动态变化的¹³⁷Cs 法研究[J]. 地理学报, 1998, 53(S1): 124-133.
- [4] 文安邦,张信宝,张一云,等. 云南东川泥石流沟与非泥石流沟¹³⁷Cs 示踪法物源研究[J]. 泥沙研究, 2003, (4): 52-56.
- [5] 李勉,李占斌,刘普灵,等. 紫色丘陵区小流域侵蚀产沙空间分布的¹³⁷Cs 示踪研究[C]//全国水土流失与江河泥沙灾害及其防治对策学术研讨会会议文摘. 2003: 98.
- [6] Fox J F, Papanicolaou A N. Application of the spatial distribution of nitrogen stable isotopes for sediment tracing at the watershed scale [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2008, 358(1/2): 46-55.
- [7] Wall G J, Wilding L P. Mineralogy and Related Parameters of Fluvial Suspended Sediments in Northwestern Ohio 1 [J]. Journal of Environmental Quality, 1976, 5(2): 168-173.
- [8] Jong E D E, Begg C B M, Kachanoski R G. Estimates of soil erosion and deposition for some Saskatchewan soils [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1983, 63(3): 607-617.
- [9] Campbell B L, Loughran R J, Elliott G L. Caesium-137 as an indicator of geomorphic processes in a drainage basin system [J]. Geographical Research, 2010, 20(1): 49-64.
- [10] 白占国. 宇宙线散落核素⁷Be 在山区表土层中的分布和特征及侵蚀示踪原理[J]. 土壤学报, 1998(2): 266-275.
- [11] 刘刚,杨明义,刘普灵,等. ⁷Be 示踪坡耕地次降雨细沟与细沟间侵蚀[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 47-53.
- [12] Yang Mingyi, Walling D E, Tian Junliang, et al. Partitioning the contributions of sheet and rill erosion using Beryllium-7 and Cesium-137 [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1579-1590.
- [13] Wilson C G, Matisoff G, Whiting P J. Short-term erosion rates from a ⁷Be inventory balance [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(9): 967-977.
- [14] 薛凯,杨明义,张凤宝,等. 利用淤地坝泥沙沉积旋迥反演小流域侵蚀历史[J]. 核农学报, 2011, 25(1): 115-120.
- [15] 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.
- [16] Walling D E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems [J]. Science of the Total Environment, 2005, 344(1/2/3): 159-184.
- [17] Grimshaw D L, Lewin J. Source identification for suspended sediments [J]. Journal of Hydrology, 1980, 47(1): 151-162.
- [18] Boer D H D, Crosby G. Evaluating the potential of SEM/EDS analysis for fingerprinting suspended sedi-

- ment derived from two contrasting topsoils[J]. *Catena*, 1995,24(4):243-258.
- [19] Pulley S, Bennie V D W, Rowntree K, et al. Colour as reliable tracer to identify the sources of historically deposited flood bench sediment in the Transkei, South Africa: A comparison with mineral magnetic tracers before and after hydrogen peroxide pre-treatment [J]. *Catena*, 2018,160:242-251.
- [20] 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):22-24.
- [21] 安正峰. 多沙粗沙区小流域侵蚀产沙来源与模拟[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [22] 弥智娟. 黄土高原坝控流域泥沙来源及产沙强度研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- [23] Menzel R G. Transport of Strontium-90 in Runoff[J]. *Science*, 1960,131(3399):499-500.
- [24] Walling D E, Woodward J C. Tracing sources of suspended sediment in river basins: A case study of the River Culm, Devon, UK [J]. *Marine & Freshwater Research*, 1995,46(1):327-336.
- [25] Schuller P, Walling D E, Iroum A, et al. Using ^{137}Cs and ^{210}Pb and other sediment source fingerprints to document suspended sediment sources in small forested catchments in south-central Chile[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013,124:147-159.
- [26] 张信宝, 李少龙, 王成华, 等. 黄土高原小流域泥沙来源的 ^{137}Cs 法研究[J]. *科学通报*, 1989(3):210-213.
- [27] 杨明义, 田均良, 刘普灵. 应用 ^{137}Cs 研究小流域泥沙来源[J]. *水土保持学报*, 1999,5(3):49-53.
- [28] 李少龙, 苏春江, 白立新, 等. 小流域泥沙来源的 ^{226}Ra 分析法[J]. *山地研究*, 1995,13(3):199-202.
- [29] 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.
- [30] 王向荣, 华璐, 何婷婷. 基于 ^{137}Cs 示踪技术的土壤侵蚀研究进展[J]. *首都师范大学学报:自然科学版*, 2006,27(6):86-91.
- [31] 张凤宝, 杨明义, 王光谦. ^7Be 示踪土壤侵蚀研究现状及存在问题探讨[J]. *核技术*, 2009,32(8):596-600.
- [32] 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.
- [33] 范利杰. 皇甫川坝控小流域侵蚀产沙强度与泥沙来源研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2013.
- [34] Knaus R M, Gent D L V. Accretion and canal impacts in a rapidly subsiding wetland(III): A new soil horizon marker method for measuring recent accretion [J]. *Estuaries*, 1989,12(4):269-283.
- [35] 关天霞, 何红波, 张旭东, 等. 土壤中重金属元素形态分析方法及形态分布的影响因素[J]. *土壤通报*, 2011,42(2):503-512.
- [36] 杨守业, 李从先. REE示踪沉积物物源研究进展[J]. *地球科学进展*, 1999,14(2):164-167.
- [37] 尚佰晓, 王瑄, 王莉. 利用REE示踪技术研究土壤侵蚀的进展[J]. *核农学报*, 2008,22(1):111-115.
- [38] 石辉, 田均良, 刘普灵, 等. 利用REE示踪法研究小流域泥沙来源[J]. *中国科学:技术科学*, 1996,26(5):474-480.
- [39] 薛亚洲, 刘普灵, 杨明义, 等. 黄土坡面侵蚀产沙时空演变的REE示踪技术研究[J]. *水科学进展*, 2005,16(2):174-179.
- [40] 魏霞, 李勋贵, 李占斌, 等. 黄土高原坡沟系统侵蚀泥沙来源模拟实验[J]. *农业工程学报*, 2009,25(11):91-96.
- [41] 鲍玉海, 贾松伟, 贺秀斌. 土壤侵蚀磁性示踪技术[J]. *水土保持研究*, 2017,14(6):5-9.
- [42] Dearin J A, Hannam J A, Anderson A S, et al. Magnetic, geochemical and DNA properties of highly magnetic soils in England[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2001,144(1):183-196.
- [43] Oldfield F, Rummery T A, Thompson R, et al. Identification of suspended sediment sources by means of magnetic measurements: Some preliminary results[J]. *Water Resources Research*, 1979,15(2):211-218.
- [44] Yu Lizhong, Oldfield F. A multivariate mixing model for identifying sediment source from magnetic measurements[J]. *Quaternary Research*, 1989,32:168-181.
- [45] 俞立中. 利用磁信息追踪沉积物物质来源的定量方法[J]. *铁道师院学报*, 1992,9(1):55-68.
- [46] 董元杰, 史衍玺. 坡面侵蚀土壤磁化率及磁性示踪试验研究[J]. *水土保持学报*, 2004,18(6):21-26.
- [47] 贾松伟, 韦方强. 利用磁性参数诊断泥石流沟道沉积物来源:以云南蒋家沟为例[J]. *泥沙研究*, 2009(1):54-59.
- [48] Jia Rongfen, Yan Beizhan, Li Rongsen, et al. Characteristics of magnetotactic bacteria in Duanjiapo loess section, Shaanxi Province and their environment significance[J]. *Science China Earth Sciences*, 1996,39(5):478-485.
- [49] 李志文, 李保生, 孙丽, 等. 影响中国黄土磁化率差异的多因素评述[J]. *中国沙漠*, 2008,28(2):231-237.
- [50] Lü Houyuan, Li Dongsheng, Liu Tungsheng. The effect of C_3 and C_4 plants for the magnetic susceptibility signal in soils[J]. *Science in China*, 2001,44(4):318-326.
- [51] 张博, 刘卫国. 黄土高原及周边地区土壤有机质对现代土壤磁化率的影响[J]. *地球环境学报*, 2016,7(2):153-162.
- [52] Zhao Guangju, Mu Xingmin, Han Mengwei, et al. Sediment yield and sources in dam-controlled water-

- sheds on the northern Loess Plateau[J]. *Catena*, 2017, 149:110-119.
- [53] 王永吉. 基于淤地坝沉积解译水蚀风蚀交错带小流域侵蚀特征演变[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [54] Liu Chun, Dong Yuting, Li Zhongwu, et al. Tracing the source of sedimentary organic carbon in the Loess Plateau of China: An integrated elemental ratio, stable carbon signatures, and radioactive isotopes approach [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, 167:201-210.
- [55] 张玮. 利用近 40 年来坝地沉积旋回研究黄土丘陵区小流域侵蚀变化特征[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [56] Zhang Joan, Yang Mingyi, Zhang Fengbao, et al. Fingerprinting sediment sources after an extreme rainstorm event in a small catchment on the Loess Plateau, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(8): 2527-2539.
- [57] 王百群. 黄土区侵蚀与干旱环境中土壤有机碳氮的变化与迁移[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [58] 李龙, 魏孝荣, 郝明德. 黄土高原不同轮作次序对土壤有机质和有效态微量元素分布的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 96-101.
- [59] Mukundan R, Radcliffe D E, Ritchie J C, et al. Sediment fingerprinting to determine the source of suspended sediment in a southern piedmont stream[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4):1328-1337.
- [60] Papanicolaou A N, Fox J F, Marshall J. Soil fingerprinting in the Palouse basin, USA using stable carbon and nitrogen isotopes[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2003, 18(2): 278-284.
- [61] 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.
- [62] Brown A G. The potential use of pollen in the identification of suspended sediment sources[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2010, 10(1):27-32.
- [63] 何永彬, 张信宝, 贺秀斌. 利用¹³⁷Cs 示踪和孢粉分析法对喀斯特峰丛草地洼地泥沙沉积及侵蚀环境的研究[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(1):246-250.
- [64] 张信宝, Walling D E, 贺秀斌, 等. 黄土高原小流域植被变化和侵蚀产沙的孢粉示踪研究初探[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(6):722-728.
- [65] Gibbs M M. Identifying source soils in contemporary estuarine sediments: A new compound-specific isotope method[J]. *Estuaries and Coasts*, 2008, 31(2): 344-359.
- [66] 陈方鑫, 张含玉, 方怒放, 等. 利用两种指纹因子判别小流域泥沙来源[J]. *水科学进展*, 2016, 27(6):867-875.
- [67] Liu Chun, Li Zhouwu, Chang Xiaofeng, 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*, 2017, 621: 1310-1319.
- [68] Poulénard J, Perrette Y, Fanget B, et al. Infrared spectroscopy tracing of sediment sources in a small rural watershed (French Alps) [J]. *Science of The Total Environment*, 2009, 407(8):2808-2819.
- [69] 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.
- [70] Legout C, Poulénard J, Nemery J, et al. Quantifying suspended sediment sources during runoff events in headwater catchments using spectrophotometry [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(8): 1478-1492.
- [71] Tiecher T, Caner L, Minella J P G, et al. Combining visible-based-color parameters and geochemical tracers to improve sediment source discrimination and apportionment[J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 527/528:135-149.
- [72] Tiecher T, Caner L, Minella J P G, et al. Tracing sediment sources in a subtropical rural catchment of Southern Brazil by using geochemical tracers and near-infrared spectroscopy [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155:478-491.
- [73] 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.
- [74] Poulénard J, Legout C, Némery J, et al. Tracing sediment sources during floods using Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectrometry (DRIFTS): A case study in a highly erosive mountainous catchment (Southern French Alps) [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 414/415:452-462.
- [75] Walling D E. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2013, 13(10):1658-1675.
- [76] Thompson R. Modelling magnetization data using SIMPLEX [J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 1986, 42(1/2):113-127.
- [77] Walling D E, Woodward J C, Nicholas A P. A multi-

- parameter approach to fingerprint suspended-sediment sources[C]. *Tracers in Hydrology*, 1993, 215:329-338.
- [78] Wang Wendi, Fang Nufang, Shi Zhihua, et al. Prevalent sediment source shift after revegetation in the Loess Plateau of China: Implications from sediment fingerprinting in a small catchment[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29:3963-3973.
- [79] 赵恬茵. 复合指纹识别法研究黄土高原小流域泥沙来源[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [80] 徐龙江. 黄土高原小流域洪水泥沙来源的复合指纹分析法研究[D]. 陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2008.
- [81] 薛凯. 利用坝地沉积旋廻研究黄土高原小流域泥沙来源演变规律[D]. 陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2011.
- [82] Chen Fangxin, Fang Nufang, Shi Zhihua. Using biomarkers as fingerprint properties to identify sediment sources in a small catchment[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557/558:123-133.
- [83] Chen Fangxin, Fang Nufang, Wang Yixia, et al. Biomarkers in sedimentary sequences: Indicators to track sediment sources over decadal timescales[J]. *Geomorphology*, 2017, 278:1-11.
- [84] Collins A L, Walling D E, Leeks G. Source Type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique[J]. *Catena*, 1997, 29(1):1-27.
- [85] 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(3):249-261.
- [86] Gellis A C, Landwehr J M. Identifying sources of fine-grained suspended-sediment for the pocomoke river, an eastern shore tributary to the Chesapeake Bay [C] // *Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference*. 2006:369-377.
- [87] Gellis A C, Hupp C R, Pavich M J, et al. Sources, transport, and storage of sediment in the Chesapeake Bay Watershed[C] // *U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report*, 2006:86-95.
- [88] Devereux O H, Prestegard K L, Needelman B A, et al. Suspended-sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(11):1391-1403.
- [89] Huges 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):262-275.
- [90] Olley J, Caitcheon G. Major element chemistry of sediments from the Darling-Barwon River and its tributaries: Implications for sediment and phosphorus sources. [J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(7):1159-1175.
- [91] 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 of Sediment Research*, 2013, 28(4):560-578.
- [92] Motha J A, Wallbrink P J, Hairsine P B, et al. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(3):53-62.
- [93] Walden J, Slattery M C, Burt T P. Use of mineral magnetic measurements to fingerprint suspended sediment sources: Approaches and techniques for data analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 202(1/2/3/4):353-372.
- [94] 贾小勇,徐传胜,白欣. 最小二乘法的创立及其思想方法[J]. *西北大学学报:自然科学版*, 2006, 36(3):507-511.
- [95] Owens P N, Walling D E, Leeks G J L. Use of floodplain sediment cores to investigate recent historical changes in overbank sedimentation rates and sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK[J]. *Catena*, 1999, 36:21-47.
- [96] Collins A L, Zhang Y, Walling D E, et al. Tracing sediment loss from eroding farm tracks using a geochemical fingerprinting procedure combining local and genetic algorithm optimisation[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(22):5461-5471.
- [97] Joerin C, Beven K J, Iorgulescu I, et al. Uncertainty in hydrograph separations based on geochemical mixing models[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 255(1):90-106.
- [98] Martínezcarreras N, Gallart F, Iffly J F, et al. Uncertainty assessment in suspended sediment fingerprinting based on tracer mixing models: A case study from Luxembourg[C] // *Conference Sediment Dynamics in Changing Environments*. 2008:94-105.
- [99] Collins A L, Walling D E. Sources of fine sediment recovered from the channel bed of lowland groundwater-fed catchments in the UK[J]. *Geomorphology*, 2007, 88(1):120-138.