

基于指纹识别技术的小流域泥沙来源研究进展

赵恬茵^{1,3}, 王志兵¹, 吴媛媛², 傅良同^{1,3}, 高礼安^{1,3}

(1.黔南民族师范学院, 贵州 都匀 558000; 2.陕西生态环境规划设计院有限公司, 西安 710000; 3.黔南景区溶洞旅游资源开发与生态环境保护工程研究中心, 贵州 都匀 558000)

摘 要:泥沙来源判别是小流域土壤侵蚀研究的重点,也是难点。复合指纹识别技术因其结果直接、准确度高、作业快等特点,在国内外泥沙来源研究中得到大量应用,并迅速发展。复合指纹识别技术是在划分潜在侵蚀区的基础上,采集侵蚀区土壤样和流域出口泥沙样,室内分析土壤样和泥沙样指纹因子,利用相关统计检验方法筛选最佳指纹因子组合,利用数值转换模型将最佳指纹因子浓度转换为各侵蚀区产沙比例。主要通过阐述指纹识别技术泥沙来源研究步骤,总结现有可靠性检验方法,归纳研究对象等方面,综述基于复合指纹识别技术的泥沙来源研究进展。重点介绍了复合指纹识别技术最佳指纹因子组合筛选和数值转换模型,并指出复合指纹识别技术存在的问题。

关键词:泥沙来源; 复合指纹识别技术; 最佳指纹因子组合; 数值转换模型

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0377-06

A Review of Studies on Sediment Sources of Small Catchments Using Composite Fingerprinting

ZHAO Tianyin^{1,3}, WANG Zhibing¹, WU Yuanyuan², FU Liangtong^{1,3}, GAO Lian^{1,3}

(1.Qiannan Normal College for Nationalities, Duyun, Guizhou 558000, China; 2.Shaanxi Ecological Environmental Planning and Design Institute, Xi'an 710000, China; 3.Qiannan Scenic Spot Cave Tourism Resources Development and Ecological Environmental Protection Engineering Research Center, Duyun, Guizhou 558000, China)

Abstract: Composite fingerprinting, one of the most important method for sediment sources, is extensively used due to its accuracy, ubiquity and simpleness. Composite fingerprinting follows three steps for study on sediment sources. The first step is to classify and identify potential sediment sources within catchment and collect soil samples from the potential sediment sources and sediment samples from catchment outlet. The second step is to screen the optimal combination of fingerprints. The third step is to calculate the relative ration of each potential source. This paper introduces the development of composite fingerprinting by analysis of the steps of sediment sources using composite fingerprinting, reviews the methods of reliability test and summary of research object, and lays the emphasis on screening the optimal combination of fingerprints and the numerical mixing model.

Keywords: sediment sources; composite fingerprinting; optimal combination of fingerprints; numerical mixing model

近年来人们广泛关注侵蚀泥沙的环境学意义。伴随土壤侵蚀发生,泥沙于原生环境中剥离,随径流搬运,最后沉积,造成土层变薄、土地质量退化等原位生态环境问题,同时造成水库河道淤积、水体面源污染等次生生态环境问题。流域产沙系统中,流域土壤侵蚀区空间分布和侵蚀区土壤特性(结构、类型、物化性质、生物特性等)直接影响径流泥沙运移、沉积过程

并决定流域输出泥沙的特性。辨别泥沙来源对探究泥沙的环境学意义、揭示流域土壤侵蚀规律、优化流域水保措施配置具有重要意义。

泥沙来源一直是流域土壤侵蚀研究的难点^[1]。早前的泥沙来源研究方法是通过模拟或监测潜在土壤侵蚀区(潜在物源)的相对产沙量确定泥沙来源。具体为通过观测潜在物源土壤侵蚀频率,监测或模拟

收稿日期:2019-04-01

修回日期:2019-05-10

资助项目:贵州省科技厅基础研究项目(黔科合基础[2018]1145);贵州省教育厅创新群体重大项目(黔教合 KY 字[2016]054,黔教合 KY 字[2016]055);黔南民族师范学院人才引进项目(qnsyrc201816);黔南民族师范学院继续教育基地项目(QNSY2018ZJ002)

第一作者:赵恬茵(1988—),女,四川巴中人,博士,讲师,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:zhaotianyin1988@126.com

其侵蚀速率获取潜在物源侵蚀产沙的主次关系或相对产沙量。传统泥沙来源研究方法主要有调查法、径流小区法、水文资料法等^[2]。最早的泥沙来源研究方法是调查法,调查法是通过野外实地调查或基于遥感技术得到流域不同侵蚀源区侵蚀产沙的主次关系^[3],接着人们开始在流域内典型土壤侵蚀区建立径流小区定点监测或人工模拟各小区产沙量,得到流域各侵蚀区相对产沙量即为小区法^[4]。针对其内部分布较多水文站点流域,人们通过分析各水文站径流泥沙资料,得到各水文站间的流域段的产沙差异,结合流域土地利用类型及地貌类型空间分布特征获取流域泥沙来源特征^[5]。

传统方法在实际应用中存在一定局限性。首先,关于潜在物源的假设准确尤为重要,这给实际监测操作造成较大困扰。其次,传统方法如小区法和调查法仅关注泥沙剥离原生环境信息,漏失泥沙搬运和泥沙沉积过程信息,很大程度上降低泥沙来源判定结果的准确性。此外,由于模拟和监测手段限制以及土壤侵蚀的空间变异问题,部分传统方法只能用于研究小流域泥沙来源。针对传统方法的诸多问题,20 世纪 70 年代,指纹识别技术开始用于泥沙来源研究^[6-7]。

1 指纹识别技术

指纹识别技术同样是在划分流域潜在物源基础上,分别采集流域潜在物源土壤样和流域出口泥沙样,同时分析测定土壤样和泥沙样的潜在指纹识别因子,潜在指纹识别因子是具有保持性(不随泥沙运移和环境变化发生变化)的土壤指标(例如物理化学性质指标、生物学性质指标等),从潜在指纹识别因子中筛选出在各潜在物源间差异显著的土壤指标作为指纹识别因子,利用多元判别分析从指纹识别因子中筛选最佳指纹识别因子组合,最后利用数值转换模型将土壤样和泥沙样的最佳指纹因子组合浓度转换为各潜在物源的相对产沙比例。杨明义等^[8]将黄土高原燕沟小流域划分为果园、坡耕地、主沟道和支沟道 4 种物源地,筛选出 TN, Cu, ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra 构成最佳指纹因子组合,得到次降雨条件下各物源地产沙比例。郭进等^[9]将三峡库区菱角塘小流域划分为水田、旱地、林草地 3 类物源地,筛选出 SOC, ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra, K, Zn 构成最佳指纹因子组合,得到流域唐库表层沉泥沙各物源的产沙比例。

不难看出,指纹识别技术研究泥沙来源具体分为 3 个步骤:第 1 步,划分流域潜在物源,获取潜在物源

土壤样和流域出口泥沙样,分析土壤样潜在指纹识别因子浓度;第 2 步,从潜在指纹识别因子中筛选得到最佳指纹因子组合;第 3 步,利用数值转换模型得到潜在物源的相对产沙比例。

1.1 潜在物源划分

流域土壤、土壤覆盖物及土壤侵蚀的类型和特征决定流域物源数量和类型。物源划分基于各潜在物源土壤存在显著差异原则。主要划分方法有空间划分和类型划分^[10]。空间划分是以地理空间的水文响应单元结合土壤侵蚀空间分布为依据,将流域土壤侵蚀物源划分为坡面侵蚀物源(表层侵蚀物源)和沟道侵蚀物源(底层侵蚀物源)^[10];类型划分目的是细分表层侵蚀物源和底层侵蚀物源,通常以土地利用类型(农耕地、荒草地、林地、道路等)或地质类型(松软土、砂砾土、坚土等)细化坡面侵蚀物源,以重力地貌类型(沟壁、沟坡地等)细化沟道侵蚀物源。潜在物源的划分,是判定泥沙来源的基础,划分得当能降低采样以及指纹识别因子分析成本,提高判别准确性。因此,在考察流域侵蚀环境时,应仔细区分流域内不发生侵蚀产沙的区域。赵恬茵^[11]通过对比流域不同潜在物源划分方法下,复合指纹识别技术的正确判别率及判别结果的可靠性,提出划分潜在物源时,应尽可能包含不确定是否发生侵蚀产沙的物源类型,剔除确定不发生侵蚀产沙的物源类型。

综上,物源划分基本原则是首先利用空间划分方法将流域物源分为坡面和沟道物源,然后结合类型划分方法,在坡面物源和沟道物源中划分出土壤具有显著差异的物源类型,并在此基础上剔除可确定不发生侵蚀产沙物源类型,得到最终物源划分类型。

1.2 最佳指纹因子组合的筛选

指纹识别技术的泥沙来源研究经历了由单因子判定两种不同物源类型的产沙比例(单因子指纹识别技术)向由多因子判定多种物源类型产沙比例(复合指纹识别技术)的发展过程^[2,10-11]。流域内,土壤侵蚀和泥沙运移过程复杂,流域侵蚀区分布交错、类型多样,在实际操作中,单指纹因子识别技术存在局限性^[12]。随着研究深入,与单因子指纹识别技术比较,多个指纹识别因子可以判定多种物源类型产沙比例,且结果更准确。严格判定 m 种不同物源类型的相对产沙比例时,至少需要 $m-1$ 个指纹识别因子^[12]。在实际运用中,在划分潜在物源时,流域具体的土壤侵蚀空间分布并不明确,研究者划分的潜在物源类型数往往大于实际物源数,相应的指纹识别因子数量增

加,对应的,供筛选的潜在指纹识别因子数增加^[11-12]。赵恬茵^[11]在研究黄土高原小流域泥沙来源时,将小流域划分为农耕地、荒草地、果园、沟坡地、沟壁 5 种物源类型判别泥沙来源,判别计算后,发现流域内实际产沙物源仅有农耕地、沟坡地和沟壁 3 种类型。

单指纹识别技术是利用一个指纹识别因子判定两种物源类型的相对产沙比例,因此,不存在指纹识别因子剔除筛选问题。当利用多指纹识别因子判定多物源类型泥沙来源时,为提高正确判别率,需要验证潜在指纹识别因子有效性,剔除无效指纹识别因子,筛选出最佳指纹因子组合,即最佳指纹识别因子组合是从众多潜在指纹识别因子中筛选出的具有最高判别正确率的指纹识别因子集合。基于此,Collins 等^[13]首先正式提出最佳指纹因子组合筛选的两步法:第一步,在潜在指纹识别因子中,利用非参数 Kruskal-Wallis H 检验筛选有效指纹因子;第二步,从有效指纹识别因子中,利用多元判别函数分析(DFA)筛选出最佳指纹因子组合。

1.3 数值转换模型

1.3.1 模型基本形式 指纹识别技术的关键是利用模型将潜在物源土壤指纹识别因子浓度转换为物源的相对产沙比例,数值转换模型的应用完美解决了该转换问题^[13-16]。数值转换模型基本形式如下所示:

$$C_{si} = \sum_{j=1}^k P_j C_{ji} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m P_j = 1 \quad 0 \leq P_j \leq 1 \quad (2)$$

式中: C_{si} 为泥沙样中指纹识别因子*i*的浓度; P_j 为潜在物源*j*的相对产沙比例; C_{ji} 为潜在物源*j*指纹识别因子*i*的平均浓度; m 为潜在物源数; k 为指纹识别因子数。

基于数值转换模型的基本形式,对于复合指纹识别技术,科研工作者^[13-14,17]针对需要多指纹识别因子问题,利用最小二乘法完善数值转换模型,提高判别正确率。原理是模型模拟的泥沙指纹识别因子浓度与其实测值的相对误差平方和(Res)最小,模型如下。

$$\text{Res} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{C_{si} - \sum_{j=1}^m P_j C_{ji}}{C_{si}} \right)^2 \quad (3)$$

式中: k 为筛选进入最佳指纹因子组合的指纹识别因子数。

1.3.2 数值转换模型的基本假设和修正 由公式(1—3)得出复合指纹识别技术数值转换模型存在两个基本假设。假设 1:流域内部各潜在物源土壤与流域出口泥沙的属性指标可以直接比较;假设 2:筛选进入最

佳指纹因子组合的指纹识别因子判别能力相同。

数值转换模型的两个基本假设,在实际应用中存在一些问题。首先,在侵蚀过程中,泥沙输移和沉积过程复杂,径流的泥沙输移效率以及泥沙的分选搬运与沉积,直接导致泥沙部分属性指标(如氮、有机质、磷、金属元素等)与流域内部侵蚀区土壤相比存在富集或耗损现象,与假设 1 矛盾;此外,流域土壤性质的空间差异性直接导致指纹识别因子的判别能力存在差异^[12]:在不同物源地间,指纹识别因子差异越显著,其判别能力越高,相反越低;在同一物源地,指纹识别因子空间变异越大,其判别能力越低,相反越高,与假设 2 矛盾。针对模型基本假设存在的问题,人们引进校正系数修正模型。

针对假设 1,首先科研工作者引入范围检验剔除明显不具保持性指纹因子。范围检验是指泥沙指纹识别因子浓度(C_{si})介于各潜在物源土壤对应指纹识别因子浓度范围之间,形式如公式(4)所示。考虑到流域内部泥沙来源地土壤指纹识别因子变异系数远大于流域出口泥沙对应指纹识别因子变异系数,Wilkinson 等^[18]引入平均值优化范围检验:泥沙指纹识别因子浓度平均值(\bar{C}_{si})介于各潜在土壤侵蚀区土壤对应指纹识别因子浓度平均值范围内(公式 5)。且人们发现土壤的颗粒组成、有机质含量与土壤其他物理化学指标含量呈现显著相关关系。对于范围检验筛选出的指纹识别因子,人们引入颗粒校正系数(Z)和有机质校正系数(O)校正假设 1 对判别结果的影响。 Z 值取流域出口泥沙颗粒比表面积与流域内部物源地土壤颗粒比表面积平均值的比值, O 值取流域出口泥沙有机质与流域内部物源地土壤有机质平均值比值。

$$\min_{j=1}^m C_{ji} < C_{si} < \max_{j=1}^m C_{ji} \quad (4)$$

式中: C_{si} 为泥沙指纹识别因子*i*浓度; $\min_{j=1}^m C_{ji}$ 为各潜在物源土壤指纹识别因子*i*浓度最小值; $\max_{j=1}^m C_{ji}$ 为各潜在物源土壤指纹识别因子*i*浓度最大值。

$$\min_{j=1}^m \bar{C}_{ji} < \bar{C}_{si} < \max_{j=1}^m \bar{C}_{ji} \quad (5)$$

式中: \bar{C}_{si} 为泥沙中指纹识别因子*i*平均浓度; $\min_{j=1}^m \bar{C}_{ji}$ 为各潜在源地土壤指纹识别因子*i*的平均浓度最小值; $\max_{j=1}^m \bar{C}_{ji}$ 为各潜在源地土壤指纹识别因子*i*的平均浓度最大值。

针对假设 2,研究人员引入判别权重校正指纹识

别因子判别能力不同对判别结果的影响^[1,19-20]。影响指纹识别因子判别能力的两个因素分别对应指纹识别因子判别权重的两种类型:一是指纹识别因子判别正确率权重(W),二是指纹识别因子离散度权重(SV), W 用于消减指纹识别因子在不同物源地间指纹识别因子的空间差异对指纹识别因子判别能力的影响,是无量纲数值,等于该指纹识别因子判别正确率与最佳指纹因子组合中指纹识别因子判别正确率最低值比值(多元判别函数分析过程中得到), SV 用于消减指纹识别因子在同类物源地的空间变异对指纹识别因子判别能力的影响,值等于某物源地该指纹识别因子标准差的倒数。修正模型如下:

$$\text{Res} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{C_{si} - \sum_{j=1}^m SV_{ji} Z_j O_j P_j C_{ji}}{C_{si}} \right)^2 W_i \quad (6)$$

式中: Z_j 为潜在物源 j 颗粒校正系数; O_j 为潜在物源 j 的有机质校正系数; W_i 为指纹识别因子 i 的判别正确率权重。 SV_{ji} 为指纹识别因子 i 在物源 j 的离散度权重。

研究显示^[21-23],土壤颗粒及有机质与土壤其他属性指标关系的复杂性,仅仅用泥沙与物源土壤颗粒大小和有机质含量均值比值校正土壤属性指标在土壤侵蚀过程中的变化,并不准确。因此,在实际应用中一般不加入有机质及颗粒校正系数。现阶段,泥沙来源复合指纹识别技术研究中,Collions 修正模型应用最广(公式 7):

$$\text{Res} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{C_{si} - \sum_{j=1}^m SV_{ji} P_j C_{ji}}{C_{si}} \right)^2 W_i \quad (7)$$

1.3.3 数值转换模型的变型 随着数值转换模型相关研究深入,数值转换模型基本形式演化出一系列变异模型。应用较广的有 Huges 模型^[24]、Landwehr 模型^[25]。Huges 模型引进了“蒙特卡洛算法”处理数据,直接将流域内部土壤样的指纹识别因子的测量值带入模型分析计算,消减原模型(公式 3,6,7)运用物源地土壤样指纹识别因子平均值对判别结果的影响。形式如下:

$$\text{Res} = \sum_{i=1}^k \left[\left(\frac{\sum_{l=1}^{1000} \sum_{j=1}^m P_j C_{jin} / 1000 - C_{si}}{C_{si}} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式中: n 为各物源地采集土壤样数; l 为迭代次数。

Landwehr 模型基于泥沙与土壤样指纹因子差异最小化进行计算分析。Landwehr 模型引进土壤样指纹因子在各源地间方差,在一定程度上消减指纹因子空间变异对判别结果的影响。形式如下:

$$\text{Res} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left| \sum_{j=1}^m P_j C_{ji} - C_{si} \right| / \sqrt{\sum_{j=1}^m P_j^2 (\text{VAR}_{ij} / n_j)} \quad (9)$$

式中: VAR_{ij} 为物源 j 指纹识别因子 i 的方差; n_j 为物源 j 采集土壤样数。

1.3.4 可靠性检验 复合指纹识别技术是通过比较流域内各潜在源地土壤样和侵蚀泥沙样的各指纹识别因子,得到各源地产沙比例。因此从物源划分、样品采集、指纹因子浓度测定、最佳指纹因子判别到数值转换各环节均存在不确定性因素,直接影响判别结果。需要引入可靠性检验,检验判别结果。复合指纹识别技术泥沙来源判别结果的可靠性检验方法主要有拟合优度法(GOF)和人工混样平均绝对误差法(MAE)。拟合优度法原理是比较实际测得泥沙指纹识别因子属性指标浓度与模型判定浓度的相对差异,计算方法如下:

$$\text{GOF} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \frac{C_{si} - \sum_{j=1}^m P_j C_{ji}}{C_{si}} \quad (10)$$

当 $\text{GOF} > 0.8$ 时,模型拟合结果可靠。

人工混样平均绝对误差法原理是比较两次判定的物源产沙比例差异,具体为:将基于流域土壤样和流域出口泥沙样的指纹识别因子,计算得出的各物源地的相对产沙比例,作为基础值(Y_j),并以该比例均匀混合各物源地土壤样作为泥沙样,测定混合样的指纹识别因子浓度,利用数值转换模型基于流域土壤样和人工混合而成的泥沙样的指纹识别因子,计算各物源的相对产沙比例,作为对比值(X_j)。最后计算各物源地相对产沙比例的基础值与对比值的平均绝对误差(MAE)。MAE 计算方法如下:

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{j=1}^m |X_j - Y_j|}{m} \quad (11)$$

式中: m 为潜在物源数。

当 $\text{MAE} < 0.2$ 时,模型判定结果可靠。

2 指纹识别技术的泥沙来源研究应用

近半世纪以来,泥沙来源研究的指纹识别技术飞速发展。从识别因子种类、识别对象、物源类型到研究尺度范围不断扩展深化。识别因子种类方面,研究显示^[12]指纹识别因子种类越多,判别结果越准确。早前指纹识别因子多为常见的土壤物理化学指标如微量元素、颗粒组成、土壤养分等,随后人们开始应用土壤放射性核素^[26]、稳定同位素^[27]等新型化学指标以及植物花粉^[28]、酯类化合物^[29]、生物酶^[30]等土壤生物学指标作为指纹识别因子研究泥沙来源。研究对象方面,随着指纹识别技术的发展,也由最早的研

究河流悬浮泥沙来源^[13,15]延伸到研究湖泊及坝库沉积泥沙^[31]以及诸如次降雨径流泥沙来源^[32]。在物源类型方面,也从土地利用类型、地貌类型,发展到大气粉尘^[33]、人工道路^[34]以及不同植被覆盖土地^[35]等多元化、精细化的物源类型。尺度范围方面,随着沉积泥沙来源的研究深入,科研工作者不仅仅局限于研究泥沙来源在流域空间尺度上的变化特征,开始不断尝试研究泥沙来源在时间尺度上的变化特征,为重建流域侵蚀历史提供数据支撑,取得大量成果^[11,17,19,36]。该类研究基于土壤放射性核素¹³⁷Cs及²¹⁰Pb的时间标记功能,结合降雨数据资料,重建不同沉积深度泥沙沉积时间,结合时间尺度上的泥沙来源的判别结果,解译流域土壤侵蚀历史变化特征及其对环境变化的响应关系。赵恬茵^[11]基于¹³⁷Cs时间标志功能,利用复合指纹识别技术在时间和空间尺度上,分析黄土高原小流域坝库泥沙来源变化特征,得出流域人类活动(水土保持、陡坡开垦等)显著影响坝库泥沙来源。

3 不足与展望

泥沙来源的指纹识别技术发展至今仍然存在一定局限性。首先,指纹识别技术应用的基础是假设指纹识别因子具有保持性,据前文分析,土壤部分属性指标在径流搬运、沉积过程中,存在明显富集或耗损现象,即土壤部分属性指标不具保持性,需要引进保持性校正体系修正模型,现有的相关保持性校正体系(颗粒校正和有机质校正)并不准确,新的校正体系亟待引入。其次,现阶段可供选择的潜在指纹识别因子种类繁多,但是一些指纹识别因子具有地域限制(颗粒颜色)、一些具有时间限制(花粉、核素等)、一些具有成本限制(生物酶、酯类化合物等),而指纹识别因子种类变化直接影响判别正确率,因此需要进一步探讨怎样组合各类指纹识别因子使得泥沙来源判别成本更低而结果更准确。再次,现阶段涌现较多数值转换模型,不同数值转换模型的泥沙来源判别结果对比研究较少,模型的可靠性检验体系亟待完善。现有的可靠性检验主要通过数学计算得到相关拟合优度或者平均相对误差,缺乏直观对比源地实际产沙和判别出的源地产沙的检验方法。因此,在条件许可情况下,可以通过对比直接获取小流域内某一侵蚀源地侵蚀产沙量(小区法或三维激光扫描技术等)与利用复合指纹识别技术判定该侵蚀源地侵蚀产沙量,直观判定复合指纹识别技术可靠性。此外,目前复合指纹识别技术广泛运用于流域时空尺度泥沙来源研究,较长

时间尺度范围内,流域内部土地利用和地貌类型可能发生变化,因此在时间尺度上判别流域泥沙来源时,特别注意结合流域土地利用变化和地貌变化特征,实时获取有代表性的流域土壤样。

随着复合指纹识别技术深入发展,指纹识别因子筛选体系、数值转换模型校正体系、可靠性检验体系以及模型选择体系得到优化完善,越来越多的土壤及土壤相关的各类指标经过校正可以作为指纹识别因子,进而有利于在时空尺度上,拓宽复合指纹识别技术泥沙来源研究范围,深化认识流域土壤侵蚀规律。

参考文献:

- [1] 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(1/2): 120-138.
- [2] 徐龙江,杨明义,刘普灵.指纹识别技术在泥沙来源研究中的应用进展[J].*水土保持学报*, 2007, 21(6): 197-200.
- [3] 谷国传,胡方西,张正惕.浙东淤泥质海岸的泥沙来源和塑造机理[J].*东海海洋*, 1997, 15(3): 2-13
- [4] 张治国,王贵平,贾志军.浅析晋西王家沟流域较高治理度情况下的泥沙来源[J].*山西水土保持科技*, 1995(2): 6-8.
- [5] 冯光扬.嘉陵江泥沙来源与特性研究[J].*四川水利*, 1993, 14(5): 1-5.
- [6] Klages M G, Hsieh Y P. Suspended solids carried by the Gallatin River of southwestern Montana: II. Using mineralogy for inferring sources[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1975, 4(1): 68-73.
- [7] Walling D, Peart M, Oldfield F, et al. Suspended sediment sources identified by magnetic measurements[J]. *Nature*, 1979, 281(5727): 110-113.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 唐强,贺秀斌,鲍玉海.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.
- [11] 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.
- [12] Walling D E. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems[J]. *Soils Sediments*, 2013, 13(10): 1658-1675.
- [13] Collins A L, Walling D E, Leeks J L. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique[J]. *Catena*, 1997, 29(1): 1-27.

- [14] Yu L, Oldfield F. A multivariate mixing model for identifying sediment sources from magnetic measurements[J]. *Quaternary Res*, 1989,32(2):168-181.
- [15] Walling D E, Woodward J C, Nicholas A P. A multi-parameter approach to fingerprinting suspended sediment sources[C]//Peters Ne, Hoehn E, Leibundgut Ch, et al. *Tracers in Hydrology*. Iahs Publication, 1993.
- [16] 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 and Freshwater Research*, 1995,46(1):327-336.
- [17] Collins A L, Walling D E, Leeks 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.
- [18] Wilkinson S N, Hancock G J, 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(1):90-102.
- [19] 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(3/4):249-261.
- [20] Collins A L, Zhang Y, Mcchesney 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.
- [21] Nie X, Yuan Z, Huang B, et al. Effects of water erosion on soil organic carbon stability in the subtropical China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019,19(10):3564-3575
- [22] Walling D E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2005,344(1/3):159-184.
- [23] 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 [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013,125(5):24-42.
- [24] 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.
- [25] Gellis A C, Landwehr J M, Pavich M, et al. *Sediment Sources and Storage in the Chesapeake Bay Watershed*[C]. Washington D C: AGU Spring Meeting Abstracts,2006.
- [26] 杨明义,田均良,刘普灵.应用¹³⁷Cs 研究小流域泥沙来源[J].*水土保持学报*,1999,5(3):49-53.
- [27] 田均良,周佩华.土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报[J].*水土保持学报*,1992,6(4):23-27.
- [28] Brown A G, Carpenter R G, Walling D E. Monitoring the fluvial palynomorph load in a lowland temperate catchment and its relationship to suspended sediment and discharge[J]. *Hydrobiologia*, 2008,607(1):27-40.
- [29] Brandt C, Cadisch G, Nguyen L T, et al. Compound-specific $\delta^{13}\text{C}$ isotopes and Bayesian inference for erosion estimates under different land use in Vietnam[J]. *Geoderma Regional*, 2016,7(3):311-322.
- [30] Nosrati K, Govers G, Ahmadi H, et al. An exploratory study on the use of enzyme activities as sediment tracers: biochemical fingerprints[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2011,26(2):136-151.
- [31] 张风宝,杨明义,张加琼,等.黄土高原淤地坝沉积泥沙在小流域土壤侵蚀研究中的应用[J].*水土保持通报*, 2018,38(6):365-371.
- [32] Zhang J, Yang M, Zhang F, et al. Fingerprinting sediment sources after an extreme rainstorm event in a small catchment on the Loess Plateau, PR China[J]. *Land Degradation & Development*, 2017,28(8):2527-2539.
- [33] Carter J, Owens P N, Walling D E, et al. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system[J]. *Science of the Total Environment*, 2003,314/316(10):513-534.
- [34] Kumar M, Furumai H, Kurisu F, et al. Tracing source and distribution of heavy metals in road dust, soil and soakaway sediment through speciation and isotopic fingerprinting[J]. *Geoderma*, 2013,211/212(6):8-17.
- [35] Alewell C, Birkholz A, Meusburger K, et al. Quantitative sediment source attribution with compound-specific isotope analysis in a C3 plant-dominated catchment(central Switzerland) [J]. *Biogeosciences*, 2016,13(5):1587-1596.
- [36] 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:教育部水土保持与生态环境研究中心,2011.