

复合指纹法分析红壤区强度开发小流域泥沙来源

周曼, 林嘉辉, 黄炎和, 蒋芳市, 葛宏力, 张莉婷, 林金石

(福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘要: 南方红壤区人口密集, 土地资源开发利用强度大, 水土流失类型多样。为研究不同土地利用类型下红壤区强度开发小流域侵蚀泥沙来源, 选取感德镇红壤强度开发小流域为研究区, 分析了流域内潜在泥沙源地和泥沙的 41 个地球化学特征, 利用 Kruskal-Wallis H 检验及逐步判别分析确认最佳指纹因子组合, 并通过多元混合模型计算各泥沙源地泥沙贡献率。结果表明: 共有速效 P、Cu、P、Y、Ca、Ga、Sn、Nd 8 种因子通过检验被确认为最佳指纹因子组合, 累计贡献率达 90% 以上, 拟合优度均大于 0.80。多元混合模型结果显示, 锋面雨季流域泥沙主要来源于林地、茶园与矿区, 贡献率分别为 28.59%、28.20%、27.59%; 在台风雨季, 4 种土地利用类型泥沙相对贡献率为茶园 > 林地 > 矿区 > 耕地。通过对不同降雨特征下各土地利用类型泥沙贡献百分比数据进一步分析, 结果显示矿区单位面积泥沙贡献百分比均值分别是耕地、林地与茶园单位面积泥沙贡献百分比均值的 8、10、10 倍, 即单位面积下矿区土壤侵蚀强度最大。

关键词: 复合指纹法; 强度开发; 小流域; 泥沙来源

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0020-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.01.004

Using Composite Fingerprints to Qualify Sediment Source in Watershed with Intensive Exploitation on Red Soil Region

ZHOU Man, LIN Jiahui, HUANG Yanhe, JIANG Fangshi, GE Hongli, ZHANG Liting, LIN Jinshi

(College of Resource and Environment Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002)

Abstract: The southern red soil region is densely populated, with strong development and utilization of land resources and diverse types of soil erosion. In order to research the eroded sediment sources in watershed with intensive exploitation under different land use types in red soil region, this study selected a small watershed in the town of Gande as research object, and analyzed 41 geochemical properties of the potential sediment sources as well as sediment in the basin. Kruskal-Wallis H test and Stepwise discriminant analysis were used to identify the best combination of fingerprint factors and calculate the sediment contribution rates of each sediment source. The results showed that the best fingerprint combination was made up of eight factors, including A-P, Cu, P, Y, Ca, Ga, Sn, and Nd. The total cumulative contribution rate was over 90%, and the value of GOF was higher than 0.80. A multivariate mixed model was applied to identify the different sediment sources. It indicated that sediment mainly came from forest, tea plantations and mining area in the front rainy season, constituting 28.59%, 28.20%, and 27.59% respectively. The relative contribution rates of the four land use types were tea plantations > forest > mining area > farmland in the typhoon rainy season. The figures of sediment contribution percentages showed that the unit area sediment contribution rate in mining area was 8 times, 10 times and 10 times respectively of those in farmland, forest and tea plantation. That's to say, the soil erosion intensity in mining area is the highest.

Keywords: composite fingerprints; intensive exploitation; small watershed; sediment source

红壤区位于我国南方丘陵地区, 区域内降雨集中, 地势起伏不平^[1]。由于区域内人口密度大, 坡地资源开发强度高, 水土流失类型多样, 是国内仅次于黄土高原的严重水土流失区^[2]。受侵蚀土壤在径流作用下向外运移, 最终形成泥沙载体^[3]。这些泥沙由源地哪种土地

利用类型构成? 贡献数值是多少? 尚不可知。因此, 选取一种合适的方法定量研究强度开发小流域泥沙来源, 对小流域侵蚀治理具有重要指导意义。

早期泥沙来源分析主要采用径流小区观测、水文资料分析、大面积调查等方法^[4], 但由于存在源头不

收稿日期: 2018-08-21

资助项目: 福建省自然科学基金项目(2015J01156); 国家自然科学基金项目(41571272)

第一作者: 周曼(1993—), 女, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: Zhman93@163.com

通信作者: 林金石(1980—), 男, 福建屏南人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: linjsh18@fafu.edu.cn

确定及泥沙输移信息缺失等问题,不能广泛地应用于流域尺度^[5]。20 世纪 70 年代,国外研究者^[4]开始利用单因子指纹—放射性核素、矿物元素、土壤磁性等定量研究泥沙来源;90 年代,有学者^[5]克服了单因子识别技术困难,利用组合因子研究 Aire 河悬浮泥沙的来源;国内研究者张信宝等^[6]运用¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 示踪武家沟小流域塘库流域产沙的主要来源是农台地,至此,指纹识别技术逐步成为泥沙来源研究的主流方法^[4]并取得诸多成果。杨明义等^[3]运用全 N、低频磁化率、Cu、¹³⁷Cs 和²²⁶Ra 5 种组合因子,分析出黄土高原坡地果园是侵蚀产沙的主要来源;Zhao 等^[7]以¹³⁷Cs、磁化率、土壤粒度及 Sr、Mo 等地化指标组合最佳指纹因子分析我国西北黄土高原淤地坝泥沙来源;Lin 等^[8]认为在活动型崩岗,崩积体中崩壁表土层泥沙贡献率高于冲积扇;Chen 等^[9]以生物标志物与地化指标作为指纹因子研究出幼龄林是黄土高原小流域主要泥沙源地;Pulley 等^[10]以土壤颜色为指纹因子分析南非台地高原泥沙来源;Lamba 等^[11-12]利用 Al、Sc、Mn、Fe、Ni、Zn 等地球化学指标为最佳指纹因子研究不同土地利用分配对河道泥沙的贡献率的影响。这些研究充分体现了指纹法在泥沙来源分析上的成熟性。我国南方红壤强度开发小流域泥沙源地类型多样—主要有林地侵蚀、茶园流失、耕地侵蚀,以及矿

区侵蚀,且相关研究较少。因此,本文选取安溪县感德镇强度开发小流域为研究区,通过采集源地和河道沉积泥沙土壤样品,分析土壤样品的地球化学指标,筛选适合判别该流域泥沙来源的最佳指纹因子组合,研究不同降雨特征下小流域泥沙来源,以期为我国南方红壤强度开发小流域泥沙来源规律性研究和流域综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省安溪县西北部(25°18' N, 117°51' E),属亚热带季风性湿润气候,年均气温 18~21 °C,光照充足,降雨充沛^[5]。该流域面积约 30.72 km²,东西约 8.20 km,南北约 6.20 km。流域境内多中山地貌,地面坡度范围 0~62.10°,其中缓坡(坡度<15°)占流域总面积 26.20%,陡坡面积 22.65 km²,占总面积的 73.70%。土地利用类型多样,主要包括:茶园、林地、耕地和矿区,其中茶园约占流域总面积 34.38%,林地约占 33.67%,耕地占 16.60%,矿区用地占 3.22%,住房、铁路公路、湖泊等其他用地占 12.14%。流域上游河段分布着潘田铁矿、新田铁矿,中下游河段以茶叶种植和农业生产为主(图 1)。矿产资源开发、以及长期地过度开垦山地用于茶叶生产,强烈扰动地表,带来了严重的水土资源流失问题。

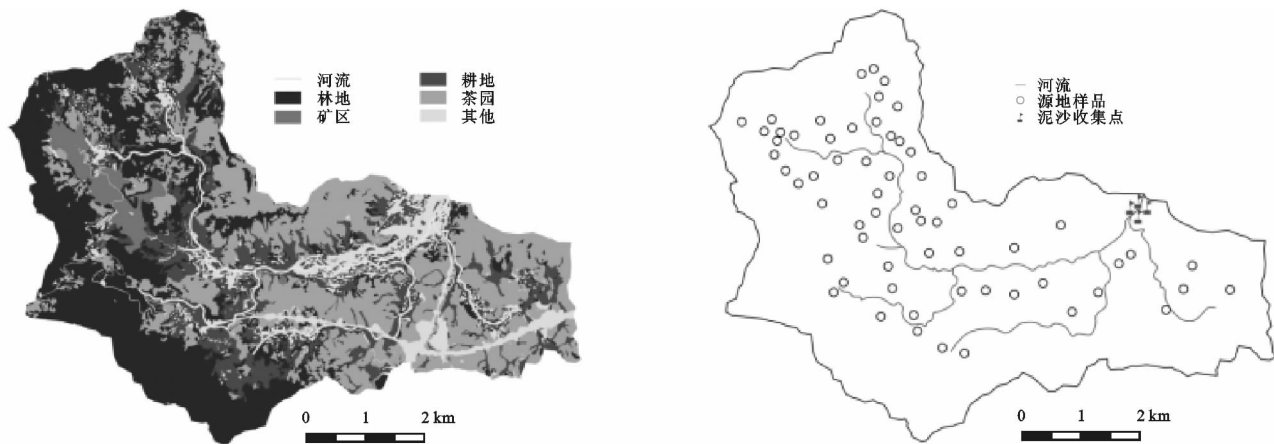


图 1 流域土地利用类型和采样点分布

1.2 材料与方法

1.2.1 样品采集 2017 年 3 月利用 Arc GIS 10.2 对研究区进行 DEM 水文信息提取及土地利用类型分析。

由图 1 可知,该流域附近土地利用分布主要由茶园、林地、采矿用地、耕地组成。由于当地种茶历史悠久,茶园长期受人为耕作、施肥扰动,林地面积广布,矿区人为地下采掘和地表植被破坏,耕地季节性耕作等都极易造成地表土体侵蚀,故将茶园、林地、矿区及耕地 4 种土地利用类型设为潜在泥沙源,并进行泥沙源地土壤样品采集。采集过程中主要采用多点混合方法^[7],首先利用不锈钢铲去掉表土层枯枝落叶,并

采集 0—2 cm 土样放置于编织袋^[5],去除石块等大块杂质、混匀,四分法取 1 kg 装入样品袋。共计采样 62 个,其中耕地 13 个、林地 21 个、矿区 8 个、茶园 20 个。泥沙样品采集主要选择在降雨后 2 天进行,其包括利用小平铲采集拦水坝附近 3 处平缓河段表层 2 cm 泥沙样和利用活塞式柱状底泥采样器^[13]采集拦水坝河床顶层 2 cm 沉积物^[12],混合为 1 个泥沙样品。由于该区降雨以锋面雨和台风雨为主,其中锋面降雨持续时间长、降雨量小,而台风雨呈现降雨强度大、且多大暴雨特点,具体降雨情况见表 1,故本研究泥沙采集时间定为 2017 年锋面雨季(4—6, 10—12 月)和台风雨季(7—9 月),泥沙采集点位置见图 1。

表 1 研究区次降雨特征

次降雨	降雨量/ mm	历时/ min	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	I ₃₀ / (mm·h ⁻¹)
1	9.25	1085.0	0.55	3.50
2	8.25	762.5	0.65	2.34
3	10.33	1010.0	0.57	2.69
4	16.50	29.0	34.10	27.50
5	34.75	91.5	22.90	28.10
6	21.25	70.0	23.60	28.64

1.2.2 试验分析

(1) 样品处理。对潜在泥沙源地 62 个土壤样品进行编号、风干、研磨过 2 mm 筛,分析测定前过 63 μm 筛^[8];泥沙样品处理主要是对泥沙样编号、冷冻干燥,处理至小于 63 μm。

(2) 样品分析。2017 年 8 月对处理后小于 63 μm 土样进行分析,共计测定指标 41 个。主要包括:Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As、Pb、Li、V、Sr、Sn、Sb、Ba、Bi、Be、Ga、Cd、Tl、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Y、La、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、In、P、速效 P 及磁化率等。其中化学指标 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As、Pb、Li、V、Sr、Sn、Sb、Ba、Bi、Be、Ga、Cd、Tl、Y、La、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、In 主要通过 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮,ICP-MS 测定^[5];K 经过消煮,使用火焰光度计测定;Ca、Mg、Fe 及 Mn 经消煮,原子吸收光谱仪测定;P 通过硫酸、高氯酸消解,采用钼蓝比色法、分光光度计测定;速效 P 采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提法,分光光度计测定;土壤磁性利用英国 Bartington 公司 MS3 型磁化率仪测定^[5]。

1.2.3 研究内容和方法

(1) 指纹因子的筛选与组合。指纹因子的筛选:测定潜在泥沙源地土壤地球化学特性,对已测定指标进行 Kruskal-Wallis *H* 检验,评价各单一指纹因子区别源地能力^[9]。该检验前提是零假设所有泥沙来自于同一个潜在泥沙源,若 $P < 0.05$,则组间呈现显著性差异,零假设被拒绝^[4],表明该因子可用于区别泥沙来源,从而依次逐步确定初选指纹因子。

表 2 泥沙源地土壤指纹因子 Kruskal-Wallis *H* 检验分析

因子	<i>H</i>	<i>P</i>	因子	<i>H</i>	<i>P</i>	因子	<i>H</i>	<i>P</i>
Ca	22.52	0.000*	Sr	17.78	0.000*	Pr	15.37	0.002*
Mg	3.36	0.339	Sn	22.46	0.000*	Nd	12.56	0.006*
Fe	15.77	0.001*	Ba	10.97	0.012*	Sm	15.61	0.001*
Mn	19.85	0.000*	Bi	19.40	0.000*	Eu	15.85	0.001*
K	8.23	0.042*	Ga	8.66	0.034*	Gd	15.33	0.002*
P	23.40	0.000*	Cd	13.09	0.004*	Tb	14.83	0.002*
速效 P	38.00	0.000*	磁化率	18.63	0.000*	Dy	14.38	0.002*
Cr	8.93	0.030*	As	4.37	0.224	Ho	14.41	0.002*
Co	3.73	0.292	Li	13.86	0.003*	Er	12.88	0.005*
Ni	7.09	0.069	Sb	2.99	0.393	Tm	11.79	0.008*
Cu	18.05	0.000*	Be	8.67	0.034*	Yb	10.94	0.012*
Zn	21.76	0.000*	Tl	9.80	0.020*	Lu	10.09	0.018*
Pb	18.78	0.000*	Y	14.70	0.002*	In	35.68	0.000*
V	7.76	0.051	La	15.46	0.001*			

注: * 表示 $P \leq 0.05$ 时呈现显著性差异。

最佳指纹因子组合;应用多元判别分析,从初选指纹因子中确定最佳指纹因子组合。

(2) 泥沙来源分析与不确定性分析。根据采集泥沙的指纹因子浓度,应用 Collins 等^[14] 研究中使用的多元混合模型,利用 MATLAB 软件编程计算,得出不同泥沙源地的泥沙相对贡献率,并进行拟合优度(GOF)检验(公式(2))。多元混合模型函数为^[14]:

$$\sum_{i=1}^n \{ [C_i - (\sum_{s=1}^m P_s S_{si})] / C_i \} \quad (1)$$

式中: C_i 为悬浮泥沙指纹因子 i 的浓度(mg/kg); P_s 为源地 S 的悬浮泥沙贡献百分比(%); S_{si} 为源地中指纹识别因子 i 的平均浓度(mg/kg); m 为源地的数量; n 为最佳指纹因子的数量。其前提是: $0 \leq P_s \leq 1$,且 $\sum_{s=1}^m P_s = 1$ 。

拟合优度检验^[8] 主要计算公式:

$$GOF = 1 - \left\{ \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |C_i - \sum_{j=1}^m S_{ij} P_j| / C_i \right\} \quad (2)$$

当 $GOF > 0.8$ 时,即表明多元混合模型计算结果具有合理性。

1.2.4 数据处理 运用 Arc GIS 10.2 软件提取流域内水文信息及土地利用类型分析,SPSS 18.0 统计软件进行数据统计分析,MATLAB 8.0 软件编程进行泥沙贡献百分比的计算。

2 结果与分析

2.1 指纹因子特性

首先对 41 个指标进行 Kruskal-Wallis *H* 检验,筛选出在不同泥沙源地中具有显著差异、且能判别不同泥沙来源的指纹因子。由表 2 可知,该流域中共计 35 种因子通过 Kruskal-Wallis *H* 检验,分别为 Ca、Fe、Mn、K、P、速效 P、Cr、Cu、Zn、Pb、Sr、Sn、Ba、Bi、Ga、Cd、磁化率、Li、Be、Tl、Y、La、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 及 In。其中除 K、Cr、Ba、Ga、Be、Tl、Yb、Lu 8 个因子 P 为 0.01~0.05,其他 27 种因子 $P < 0.010$,呈极显著的特征;Mg、Co、Ni、V、As、Sb 等 6 个因子 $P > 0.05$,未能通过检验。

2.2 确定最佳指纹因子组合

通过对该流域 35 个初选因子逐步判别分析,共计 8 种因子:速效 P、Cu、P、Y、Ca、Ga、Sn、Nd 被确立为最佳指纹因子。当选因子从速效 P 到 Nd,其 lambda 值由 0.154 下降到 0.012,正确判别能力由 39.28% 逐步增加至 100.00% (表 3)。同时,由表 2 可知,该 8 种因子 $P < 0.01$,呈极显著性差异,入选最佳指纹因子合理。

表 3 逐步判别分析所得最佳指纹因子组合

步骤	最佳指纹因子	Wilks' lambda	累计贡献率/%
1	速效 P	0.154	39.28
2	Cu	0.054	65.82
3	P	0.040	79.79
4	Y	0.033	89.60
5	Ca	0.024	94.54
6	Ga	0.018	98.29
7	Sn	0.015	99.52
8	Nd	0.012	100.00

注:在每个步骤中,输入了最小化整体 Wilks' lambda 的变量;步骤最大数目是 70。

同时将泥沙源地与最佳组合指纹因子进行对应分析^[15]。对比分析图中以原点(0,0)为中心,分别向 2 种土地利用类型作向量,向量夹角越小,表明 2 种土地利用类型相似程度越高;另一方面,通过原点向任意土地利用类型作向量及向量反向延长线,同时各最佳指纹因子同该向量及其反向延长线作垂线,垂点越靠近向量正向,则二者相关性越强。分析结果(图 2)显示,土地利用类型中茶园偏好于稀土元素 Nd、Y,耕地偏好最佳指纹因子中的速 P、全 P,而矿区更偏好于指纹因子 Cu、Sn、Ca,这与茶树对稀土元素的富集作用^[16]、铁矿资源多伴生铜^[17]息息相关;就土地利用类型之间关系来看,茶园与矿区之间向量夹角几近平角,而与林地、耕地向量夹角

均小于 90°,因此,茶园与矿区差异性极大,而与林地、耕地相关性较好。

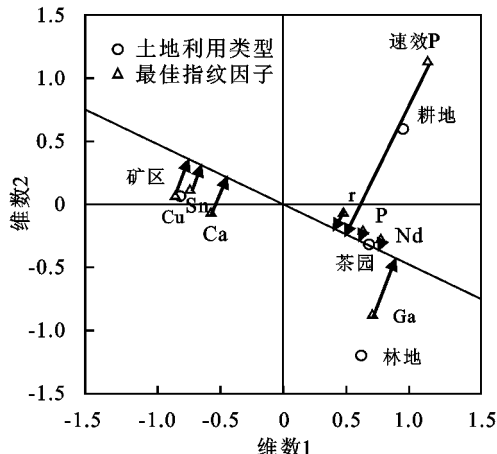


图 2 最佳指纹因子与 4 种土地利用类型的对比分析

2.3 泥沙源地分析

通过对台风雨季和锋面雨季泥沙收集点泥沙样品最佳指纹因子浓度测定,利用多元混合模型计算出不同土地利用类型对该流域泥沙贡献百分比。由图 3 可知,在锋面雨季,3 次降雨后泥沙贡献率均值林地最高(28.59%),茶园贡献率次之(28.20%),耕地最小(15.61%);而在台风雨季,3 次降雨条件下流域泥沙源地贡献率均值从茶园、林地、矿区、耕地依次减小,其中茶园贡献率均值最高(29.05%),耕地最低(19.54%)。2 种降雨特征下,相对泥沙贡献百分比主要源地均以茶园、林地为主,这与当地自然、人为影响因素息息相关。就茶园而言,茶叶种植是当地最主要的经济来源,其种植面积庞大,陡坡开荒现象普遍^[18],且常年受人为扰动—清耕、清园及人为刮锄,导致地表裸露,水土流失居高不下^[19];就林地来看,一方面流域内山高坡陡,地表破碎,崩塌时有发生^[1];另一方面自然林、竹林地面积广,林下灌草覆被稀少,人为挖笋活动频繁^[18],表土流失严重。

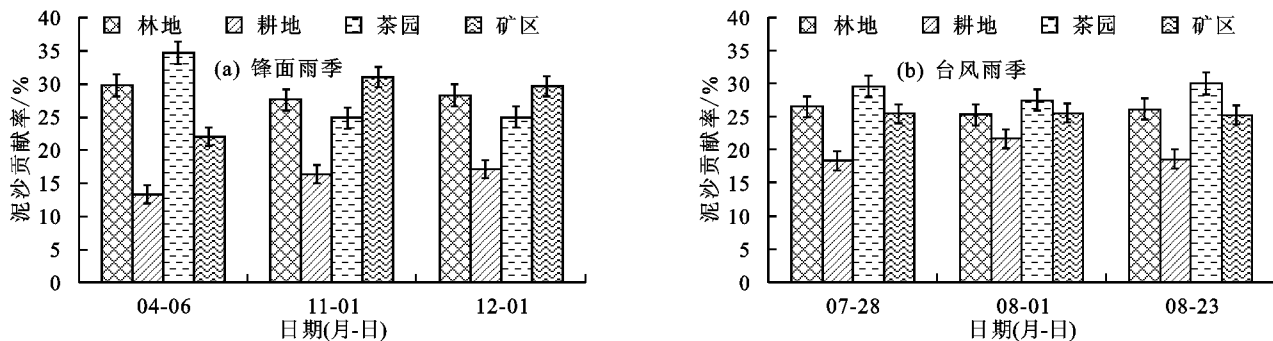


图 3 锋面雨季与台风雨季源地平均泥沙贡献百分比

由图 4 可知,2 种降雨特征下,单位面积泥沙贡献百分比均值呈现出矿区 > 耕地 > 茶园 > 林地,其中耕地、茶园与林地单位面积泥沙贡献均值相差不大,分别为 3.06%~3.83%,2.67%~2.75%,2.51%~

2.76%;矿区单位面积泥沙贡献百分比最高,分别是耕地、林地与茶园单位面积泥沙贡献百分比均值 8, 10, 10 倍。该地茶园、林地占总面积的 68.04%,矿区面积为 0.99 km²,仅为茶园、林地面积的 1/10,即表

明在同样的降雨条件下,矿区单位面积土壤侵蚀程度最高,强度最大。这与矿区缺乏水土保持措施和人为矿区开采带来的地面塌陷、大量疏松物堆积、地表非均匀压实加大径流汇集等强烈扰动分不开^[20]。

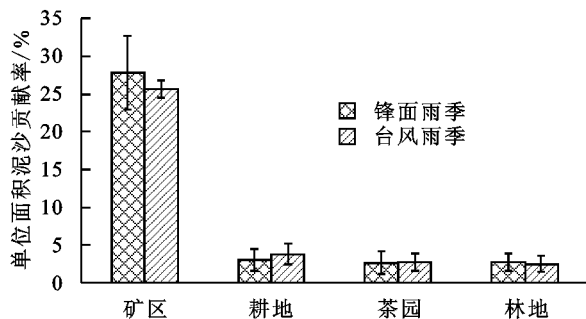


图 4 锋面雨季与台风雨季单位面积泥沙贡献百分比

3 结论

复合指纹法研究南方红壤区强度人为开发小流域泥沙来源结果表明,共计 8 种因子可作为识别茶园、林地、耕地及矿区侵蚀泥沙的最佳指纹因子。通过对检验模型与样本观测值的拟合度检验,拟合优度值分别为 0.85 ± 0.04 与 0.85 ± 0.02 ,表明复合指纹法适用于定量研究感德小流域泥沙来源。同时,应用多元混合模型计算出了 2 种降雨特征下 4 种土地利用类型的相对泥沙贡献率。研究表明,2 种降雨特征下茶园、林地与矿区对泥沙的贡献率相差不大,而耕地的土壤侵蚀程度随雨强的增大明显提高;从 4 种土地利用类型单位面积泥沙贡献率来看,不同降雨强度下矿区的单位面积的泥沙贡献率总是居首,分别是耕地、林地与茶园单位面积泥沙贡献百分比均值的 8, 10, 10 倍,这说明在我国南方红壤区,人为扰动下的工业生产带来的水土流失是远远高于人为扰动下的农业生产。

由于不同土地利用类型下土壤类脂物—生物标志物具有显著性差异,因此,在今后的研究中可以考虑利用不同土地利用类型下的土壤生物标志物与土壤理化指标结合的方法,进一步探索南方红壤区强度开发小流域的泥沙来源。

参考文献:

[1] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7615-7622.

[2] 梁志权,张思毅,卓慕宁,等. 不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 1-6.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 郝福星,黄炎和,林金石,等. 指纹法研究花岗岩区典型崩岗小流域悬浮泥沙来源[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 45-49.

[6] 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.

[7] Zhao G, Mu X, Han M, et al. Sediment yield and sources in dam-controlled watersheds on the northern Loess Plateau [J]. Catena, 2017, 149: 110-119.

[8] Lin J, Huang Y, Wang M K, et al. Assessing the sources of sediment transported in gully systems using a fingerprinting approach: An example from South-east China [J]. Catena, 2015, 129: 9-17.

[9] Chen F, 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, S557/558: 123-133.

[10] Pulley S, Rowntree K. The use of an ordinary colour scanner to fingerprint sediment sources in the South African Karoo [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 165: 253-262.

[11] Lamba J, Thompson A M, Karthikeyan K G, et al. Sources of fine sediment stored in agricultural lowland streams, Midwest, USA [J]. Geomorphology, 2015, 236: 44-53.

[12] Lamba J, Karthikeyan K G, Thompson A M. Apportionment of suspended sediment sources in an agricultural watershed using sediment fingerprinting [J]. Geoderma, 2015, S239/240: 25-33.

[13] 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.

[14] 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.

[15] Chen F, Zhang F B, Fang N F, et al. Sediment source analysis using the fingerprinting method in a small catchment of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Soils & Sediments, 2016, 16(5): 1655-1669.

[16] 任道援,罗砚文,周绍均,等. 贵州典型土壤—茶树系统中稀土元素含量特征[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(21): 5395-5398.

[17] 魏远,顾红波,薛亮,等. 矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 107-114.

[18] 朱颂茜,龚洁,林恩标,等. 南方丘陵区林下水土流失特点及防治措施探讨[J]. 亚热带水土保持, 2013, 25(3): 24-30.

[19] 陈小英,查轩,陈世发. 山地茶园水土流失及生态调控措施研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 51-54.

[20] 李海东,沈渭寿,司万童,等. 中国矿区土地退化因素调查: 概念、类型与方法[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 445-451.