

# 复合指纹法定量示踪西南岩溶洼地小流域泥沙来源

雷 珊<sup>1</sup>, 魏兴萍<sup>1,2</sup>

(1.重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2.三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331)

**摘 要:**岩溶洼地小流域具有岩溶地区典型流域特征,作为一个独立的侵蚀产沙单元,开展岩溶洼地小流域泥沙来源研究,对于查明洼地泥沙的来源,研究土壤侵蚀过程,发挥着重要的作用。选择重庆青木关岩溶槽谷区的典型洼地,采用复合指纹示踪技术等方法,确定岩溶洼地泥沙来源的地球化学元素指纹特征,得出了重庆岩典型岩溶洼地的沉积泥沙来源和贡献比例。结果表明:从 38 种因子中筛选,找到了最佳指纹因子组合,其中 U,  $X_{hf}$ , AP, Mn 的累积判别率分别为 63.4%, 68.3%, 73.2%, 82.9%, 总累积判别率高达 82.9%, 说明指纹法可用于岩溶洼地小流域泥沙来源研究。同时利用多元混合模型得出 3 种泥沙来源地贡献百分比均值分别为碳酸盐岩表层土壤(50.2%)、深层土壤(11.6%)、碎屑岩表层土壤(38.2%), 且多元混合模型优度拟合检验值为 0.83, 相对平均误差为 13.9%, 进一步说明岩溶洼地碳酸盐岩地区土壤流失严重, 远高于碎屑岩土壤。研究为开展岩溶洼地土壤侵蚀特征演变研究提供了基础。

**关键词:**岩溶洼地小流域; 复合指纹法; 泥沙来源

中图分类号:P964

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0044-06

## Quantitative Tracing of Sediment Sources in Small Watersheds in Southwestern Karst Depressions by Composite Fingerprinting

LEI Shan<sup>1</sup>, WEI Xingping<sup>1,2</sup>

(1.College of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2.Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** The karst depression small watershed has the characteristics of typical watershed in karst area. As an independent erosive sediment-generating unit, the study of sediment source in small karst depression watershed plays an important role in identifying the source of sediment in the depression and studying soil erosion process. The typical depression of the Qingmuguan karst trough valley in Chongqing was selected as study area. The method of composite fingerprint tracing was used to determine the geochemical element fingerprint characteristics of the sediment source in the karst depression, and the sediment source and contribution proportion of the typical karst depression in Chongqing rock were determined. The results showed that the best fingerprint factor combinations were found from 38 factors; the cumulative discrimination rates of U,  $X_{hf}$ , AP and Mn were 63.4%, 68.3%, 73.2% and 82.9%, respectively, indicating that the fingerprint method can be used for the study of sediment sources in small watersheds in karst depressions; at the same time, the multivariate mixed model was used to indentify the mean percentages of contribution of the three sediment sources were carbonate surface soil (50.2%), deep soil (11.6%), clastic surface soil (38.2%), and the multi-mix model goodness fit test value was 0.83, and the relative average error was 13.9%, which further indicated that the soil loss in the karst depression carbonate area was serious, and much higher than the clastic soil. This study can provide the basis for the study of the evolution of soil erosion characteristics in karst depressions.

**Keywords:** karst depression small watershed; composite fingerprint method; sediment source

收稿日期:2019-09-08

修回日期:2019-11-19

资助项目:重庆市自然科学基金(cstc2016jcyjA0150);重庆师范大学研究生科研创新项目(YKC19002);

第一作者:雷珊(1994—),女,四川广安人,硕士研究生,研究方向为水土保持与生态化建设。E-mail:602047224@qq.com

通信作者:魏兴萍(1974—),女,四川广安人,教授,主要从事资源环境与地理信息系统研究。E-mail:xingpingwei@126.com

中国西南岩溶地区是我国主要的生态环境脆弱区之一,与黄土高原一样,该地区的水土流失问题十分严重。同时,岩溶洼地小流域作为一个独立的侵蚀产沙单元,开展岩溶洼地小流域泥沙来源研究,对于查明洼地泥沙的来源,研究土壤侵蚀过程,发挥着重要的作用。因此研究洼地泥沙来源,对于有针对性实施洼地水土流失治理,以及岩溶洼地小流域水环境的污染来源,有重要意义。国内外针对流域的泥沙来源研究已经有了一定的基础,从最早开始的小区观测<sup>[1-2]</sup>、资料分析<sup>[3]</sup>、遥感制图等<sup>[4]</sup>传统研究方法,到直接从泥沙入手的指纹识别技术的兴起,学者们对于流域泥沙的研究兴趣从未消失。早期的指纹识别技术主要是从地球理化属性、矿物元素、矿物磁性等作为“示踪因子”取得了较好的研究成果<sup>[5]</sup>;泥沙颗粒颜色、植物孢粉、稳定同位素、大气沉降核素等<sup>[6-8]</sup>相继被用以示踪泥沙来源,指纹识别因子种类不断丰富。20 世纪 90 年代后,Collins 等<sup>[9]</sup>提出,采用多个“示踪”因子,通过非参数检验和判别分析等方法,组合在一起形成复合指纹因子,再通过模型进行泥沙来源计算,在国内外地区都得到了较好的应用。近期,国外一些学者在研究中不断优化模型的研究方法<sup>[10-11]</sup>,在混合模型的计算中进一步考虑了泥沙粒径和有机质含量等因素的修正,并利用不同混合模型进行对比研究,优化了混合模型拟合结果。

国内关于复合指纹识别技术的研究主要集中在非岩溶地区。郭进等<sup>[12]</sup>在三峡库区开展流域(河流)泥沙来源研究,查明入塘、河、库泥沙通量,定量解析了塘库表层沉积泥沙来源;周慧平等<sup>[13]</sup>通过研究泥沙来源来探讨颗粒态磷的来源得出农田、林地、矿山及道路施工用地的泥沙贡献率和颗粒态磷的输出贡献百分比;周曼等<sup>[14]</sup>在南方红壤区利用复合指纹技术研究不同降雨特征下林地、茶园、矿区、耕地的泥沙贡献百分比。杨明义等<sup>[15]</sup>在陕北选定的汇水区内采集土壤样品中 17 种物质的分析得出,洪水携带的总泥沙有 33.7% 来自主沟道,60.0% 来自坡地果园,3.0% 来自小块的坡耕地以及 3.3% 来自支沟道。

西南岩溶地区与黄土高原一样是一个脆弱的生态环境,水土流失危害严重,危险着长江、珠江水系的防洪和水土资源的保护。岩溶地区由于立地条件独特、产流产沙特殊,不能直接引用非岩溶地区的研究成果。重庆岩溶小流域的土壤侵蚀常常伴随岩溶地区和非岩溶地区,目前,岩溶洼地泥沙来源贡献规律不清、土地利用变化对岩溶地区泥沙来源、沉积耦合响应关系认识不清,不利于岩溶地区开展水土保持工作。本研究拟在重庆选建有水库的无落水洞发育的岩溶洼地小流域,对小流域源地土壤和水库沉积物取样研究,探明岩溶洼地泥沙来源比例。为采取有效的

水土保持措施,增强岩溶地区水源涵养、水土保持等生态功能,以及小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

研究区地点位于重庆市西北部青木关岩溶槽谷区(图 1),北纬  $29^{\circ}37'37''$ — $29^{\circ}38'2''$ ,东经  $106^{\circ}16'8''$ — $106^{\circ}17'2''$ 。研究区岩溶洼地是一个位于劳动村的封闭洼地,洼地内有一座水库,洼地泥沙沉积于水库内。劳动水库建于 20 世纪 70 年代,90 年代开始荒废,水库停止开发,至今沉积有 50 a 左右。劳动水库长约 276.17 m,宽约 212.49 m,面积大约有  $0.033\text{ km}^2$ ,洼地面积约  $0.74\text{ km}^2$ 。青木关岩溶槽谷区属长江上游亚热带湿润季风气候区,四季分明,气候温和,降雨量充足,初夏多雨,常伏旱,秋多连绵阴雨,无霜期长等特点。多年平均气温为  $17.9^{\circ}\text{C}$ ,极端最高温度为  $42.2^{\circ}\text{C}$ ,极端最低温度为  $-3^{\circ}\text{C}$ 。根据气象局提供的 55 a (1959—2013 年)降雨资料统计,区域内多年平均降雨量  $1\,047.5\text{ mm}$ ,最大年降雨量  $1\,534.2\text{ mm}$ (1968 年),最小年降雨量  $625.9\text{ mm}$ (1961 年)。

重庆岩溶地区的水土流失往往伴随着非岩溶地区水土流失,根据重庆市水文地质幅和实地考察,研究区内存在两种不同的地质岩性,岩溶洼地沉积泥沙主要来自两个侵蚀产沙区即碎屑岩区和碳酸盐岩区。

### 1.2 样品采集与处理

将劳动水库溶洼地内的土壤泥沙来源底地分为碳酸盐岩表层土壤(碳酸盐岩坡耕地、林地以及撂荒地)、深层土壤(沟道和裂隙)、碎屑岩表层土壤(林地和撂荒地),坡耕地和林地采取直线布设,以线控制面;坡耕地、林地撂荒地土样采集时,首先利用不锈钢铲去掉表土层枯枝落叶,然后使用不锈钢铲轻轻采集 2—5 cm 厚土壤表层,放置于编织袋上,去除石块等大块杂质、混匀,四分法取 1 地装入样品袋,尽量避免破坏土壤的结构。深层土壤选取碳酸盐岩汇水区岩缝裂隙剖面裂隙土以及主要沟道沟壁。根据各源面积比,研究地共取样 41 个,碳酸盐岩表层土壤 19 个,深层土壤 11 个,碎屑岩表层土壤 11 个(图 2)。

### 1.3 测定指标与试验方法

采集样品去除枯枝落叶、作物根系及粗砾石,经过自然风干,人工磨细过  $2\text{ mm}$  干筛,样品进行分装标记备试。指纹因子间属性差异越大,最佳指纹因子组合之判别能力越强,实验室分析内容包括一系列不同理化属性的指标因子:指标包括 TN, TP, AP, AK, SOM,  $\chi_{\text{fd}}$ ,  $\chi_{\text{fr}}$ ,  $\chi_{\text{hf}}$ ,  $\chi$ , K, Na, Ca, Mg, Cu, Zn, Ba, Sr, Fe, Mn, Si, Al, Li, Be, Co, As, Rb, Ag, Cd, In, Cs, Tl, Pb, Bi, U, V, Cr, Ti, Ni。

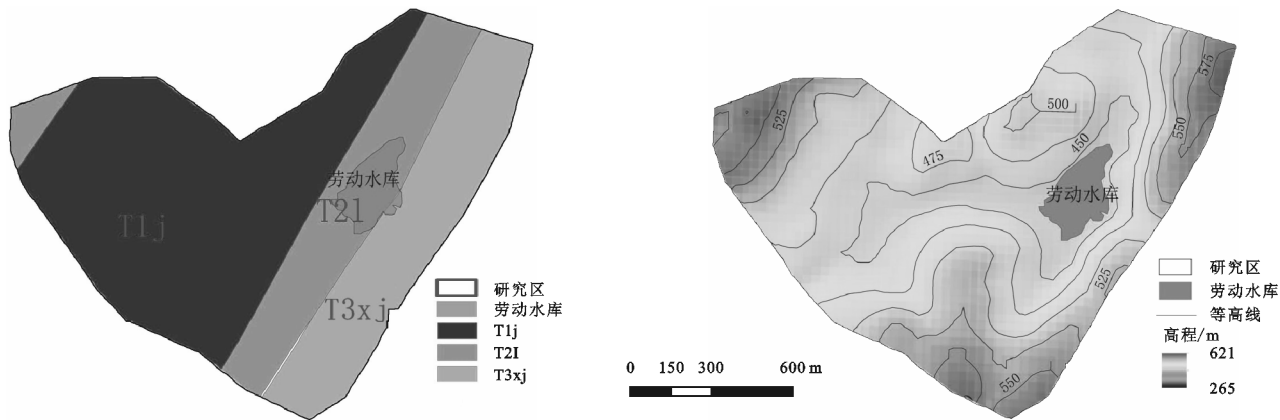


图 1 研究区地貌和地层

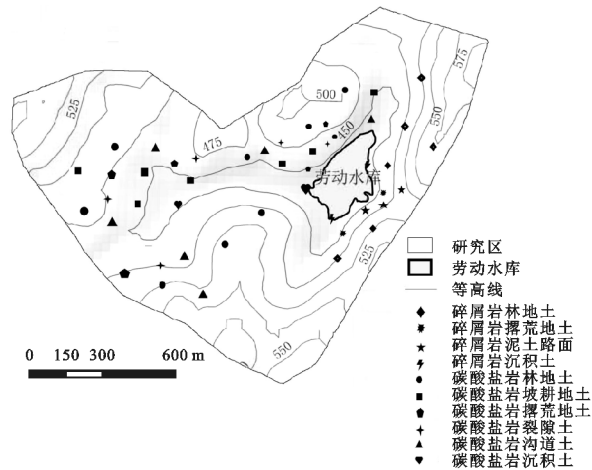


图 2 采样点分布

土壤磁化率采用 BartingtonMS2 磁化率仪仪器对土壤样品进行测试,磁化率仪的低频磁化率(0.47 kHz)和高频磁化率(4.7 kHz)进行测试,并计算结果。土壤养分元素测定指标及测定方法主要参考中国农业出版社出版的郑必昭主编的《土壤分析技术指南》。土壤地球元素采用 ICP-7700(电感耦合等离子体光谱仪)处理。

1.4 研究内容与方法

(1) 指纹因子的筛识别与筛选。首先在实验室测定各潜在泥沙来源地土壤地球化学特性,并对已测定的指标在 SPSS 数据统计分析中进行 Kruskal-Wallis H 检验,从而评价各单一指纹因子是否有区别源地的能力<sup>[16]</sup>。Kruskal-Wallis H 检验是用于推断样本来自的多个独立总体分布是否存在显著差异,其检验前提是,零假设所有泥沙来自于同一个潜在泥沙来源地,若  $p < 0.05$ ,则组间呈现显著性差异,零假设被拒绝<sup>[17]</sup>,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。其次对初选因子在 SPSS 中进行多元逐步判别分析,在基于 Wilks' Lambda 最小化的基础上,确定最佳指纹因子组合<sup>[18]</sup>。

(2) 岩溶洼地沉积泥沙来源分析。在确定最佳

指纹组合因子后,利用多元混合模型定量计算各潜在泥沙来源地沉积泥沙贡献值<sup>[19]</sup>,计算得出不同泥沙来源地的泥沙相对贡献率。多元混合模型函数表示:

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

$$0 \leq P_s \leq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^m P_s = 1 \quad (3)$$

式中: $C_i$ 是洼地泥沙指纹因子  $i$  的浓度; $P_s$ 是泥沙来源地  $s$  的泥沙贡献百分比; $S_{si}$ 是泥沙来源地中指纹识别因子  $i$  的平均浓度; $m$  是泥沙来源地的数量; $n$  是指纹识别因子的数量。在限制公式(2—3)的情况下使得公式(1)函数值为最小的情况下可得各泥沙源地对应的贡献百分比。

(3) 计算得出各源地泥沙贡献百分比后,利用拟合优度(GOF)检验)的方法对模型的准确性进行检验。

2 结果与分析

2.1 潜在泥沙来源地土壤性质及指纹因子筛选

将试验所测的指标包括 TN, TP, AP, AK, SOM,  $\chi_{fd}$ ,  $\chi_{lf}$ ,  $\chi_{hf}$ ,  $\chi$ , K, Na, Ca, Mg, Cu, Zn, Ba, Sr, Fe, Mn, Si, Al, Li, Be, Co, As, Rb, Ag, Cd, In, Cs, Tl, Pb, Bi, U, V, Cr, Ti, Ni 按表层土壤、深层土壤、碎屑岩土壤 3 种泥沙来源地进行无参数 Kruskal-Wallis H-test 统计分析检验,检验结果见表 1。

从上面因子中,可以看出除:Co, Rb, Ti, Na, Si, Al, SOM, TP 对应的  $p$  值大于显示水平 0.05,其他因子的  $p$  值均小于 0.05,故拒绝因子来自同一泥沙来源地的原假设,即这些因子在不同泥沙来源地间具有显著性差异。

2.2 最佳指纹因子组合确定

2.2.1 最佳指纹因子的构建 首先对 3 种泥沙来源地中的 30 种显著差异性指纹因子进行组间均值的均等性检验,根据表 2 结果显示:显著性差异的因子在均值的均等检验中,除 Bi, Ca, Mg, Ak 的 Sig 值大于显著水平



0.05,其他因子均小于 0.05,共计 26 种指纹因子均等性检验  $\text{Sig}<0.05$ ,其中 Li,Ag,In,Cs,Tl,U,V,Cr,Ni,Cu,Zn,Fe,Mn, $\chi_{\text{hf}}$ , $\chi_{\text{id}}$ , $\chi$  共 16 种因子  $\text{Sig}<0.010$  具体结果见表 2。由此可知,3 种泥沙来源地中,表层土壤、深层土壤、碎屑岩土壤 Li,Be,As,Pb,Ag,Cd,In,Cs,Tl,U,V,Cr,Ni,Cu,Zn,K,Ba,Sr,Fe,Mn,TN,AP, $\chi_{\text{hf}}$ , $\chi_{\text{id}}$ , $\chi$ , $\chi_{\text{id}}$  等因子具有显著性差异特征,故说明这些显著性因子可以进行多元判别分析。

表 1 泥沙来源地指纹识别因子的 Kruskal-Wallis H-test 统计分析检验结果

因子	H 值	p 值	因子	H 值	p 值
Li	9.303	0.010*	K	6.323	0.042*
Be	6.164	0.046*	Na	1.729	0.421
Co	3.854	0.146	Ca	6.284	0.043*
As	7.715	0.021*	Mg	7.114	0.029*
Rb	2.832	0.243	Ba	7.296	0.026*
Ag	8.088	0.018*	Sr	6.345	0.042*
Cd	7.226	0.027*	Fe	11.590	0.003*
In	10.845	0.004*	Mn	9.677	0.008*
Cs	6.564	0.038*	Si	2.768	0.251
Tl	12.302	0.002*	Al	2.233	0.327
Pb	9.245	0.010*	SOM	2.289	0.318
Bi	8.159	0.017*	TN	7.189	0.027*
U	16.499	0.000*	TP	1.433	0.488
V	10.010	0.007*	AP	7.609	0.022*
Cr	7.514	0.023*	AK	6.203	0.045*
Ti	3.936	0.140	$\chi_{\text{hf}}$	13.049	0.001*
Ni	8.996	0.011*	$\chi_{\text{if}}$	12.829	0.002*
Cu	11.654	0.003*	$\chi$	13.063	0.001*
Zn	7.880	0.019*	$\chi_{\text{id}}$	8.292	0.016*

注: \* 表示在显著水平  $p\leqslant 0.05$  下具有显著性差异。

表 2 泥沙来源地初筛因子组均值的均等性的检验

因子	Wilks'	Lambda	Sig.	因子	Wilks'	Lambda	Sig.
Li	0.733	0.003		Zn	0.760	0.005	
Be	0.806	0.016		K	0.840	0.036	
As	0.807	0.017		Ca	0.934	0.275	
Pb	0.792	0.012		Mg	0.934	0.274	
Ag	0.762	0.006		Ba	0.871	0.072	
Cd	0.828	0.028		Sr	0.845	0.041	
In	0.759	0.005		Fe	0.689	0.001	
Cs	0.750	0.004		Mn	0.753	0.005	
Tl	0.683	0.001		TN	0.792	0.012	
Bi	0.868	0.068		AP	0.821	0.024	
U	0.611	0.000		AK	0.861	0.058	
V	0.735	0.003		$\chi_{\text{hf}}$	0.623	0.000	
Cr	0.773	0.008		$\chi_{\text{id}}$	0.639	0.000	
Ni	0.736	0.003		$\chi$	0.637	0.000	
Cu	0.704	0.001		$\chi_{\text{id}}$	0.820	0.023	

将 Kruskal-Wallis 检验中刷选出的不同泥沙来

源地间具有显著性差异的指标,进入多元判别分析,找出最佳复合指纹组合,采用逐步多元判别分析法,其最终得到最佳因子结果见表 3。

表 3 泥沙来源地最佳组合指纹因子

步骤	最佳指纹因子	Wilks 的 Lambda	累积贡献率/%
1	U	0.611	63.4
2	$\chi_{\text{hf}}$	0.382	68.3
3	AP	0.328	73.2
4	Mn	0.29	82.9

从表 3 可知:最终从这 30 种因子中筛选,找到了最佳因子组合,其中 U, $\chi_{\text{hf}}$ ,AP,Mn 的累积判别率分别为 63.4%,68.3%,73.2%,82.9%,总累积判别率高达 82.9%,累积判别率大于 80%,属于可接受范围。

2.2.2 判别函数的建立 表 4 是 3 种泥沙来源地逐步判别分析后的最佳指纹因子 Fisher 判别函数系数表,该函数以判别函数值最大的一组进行归类为中心思想,给出了碳酸盐岩表层土壤、深层土壤、碎屑岩表层土壤 3 个线性分类函数的系数,从而构成 3 种泥沙来源地的判别函数。

表 4 泥沙来源地 Fisher 判别函数系数

最佳因子	碎屑岩表层土壤	碳酸盐岩表层土壤	深层土壤
U	0.042	0.061	0.105
Mn	0.581	1.345	0.797
AP	0.312	0.482	0.484
$\chi_{\text{hf}}$	0.025	0.058	0.027
(常量)	-5.379	-14.245	-14.31

把潜在泥沙来源地样品值代入 3 个判别方程,即可对该样品进行判断。其中哪个潜在泥沙源地的 Y 值最大,该样品判别分组就是其对应的分组。下为判别函数:

$$Y_{\text{碎屑岩表层土壤}} = -5.379 + 0.042U + 0.581Mn + 0.312AP + 0.025\chi_{\text{hf}}$$

$$Y_{\text{碳酸盐岩表层土壤}} = -14.245 + 0.061U + 1.345Mn + 0.482AP + 0.058\chi_{\text{hf}}$$

$$Y_{\text{深层土壤}} = -14.31 + 0.105U + 0.797Mn + 0.484AP + 0.027\chi_{\text{hf}}$$

2.2.3 判别结果与分析 通过对劳动水库洼地小流域所采集的泥沙来源地土壤样品进行分类,初始分组中的样本量进行预测分组,对比分析预测组 and 实际组之间的差异,从而得出不同分组样本回归类判别正确率,若正确判别率高于 70%,则具有较好判别效果<sup>[20]</sup>。当有 3 种泥沙来源地的多元判别分析时,共有 U,Mn,AP, $\chi_{\text{hf}}$ ,4 种单一指纹因子组成最佳指纹因子组合。同时,在这 4 种最佳因子组合下,3 种来源地的预测组与实际组的判别结果如下。由表 5 复

合指纹因子判别结果可知,碳酸盐岩表层土壤、深层土壤和碎屑岩表层土壤 3 个初始分组,并建立了具有这 3 种分类的 41 个样本总体。其中第一组碳酸盐岩表层土壤共有样本量 19 个,第二组深层土壤样本量 11 个,第三组碎屑岩表层土壤样本量 11 个。在 SPSS 分析过程中,泥沙来源地表层土壤的 19 个样本量,共计有 16 个预测组的样本量与实际组一致,即碳酸盐岩表层土壤样品有 84.2% 的正确判别率;深层土壤中 11 个样本量,共计有 8 个预测组的样本量与实际组一致,其中有 1 组误判为碎屑岩表层土壤,2 组误判为碳酸盐岩表层土壤,即深层土壤样品有 72.7% 的正确判别率;在深层土壤的误判率要高于其他源地,最主要的原因深层土壤是沟道、裂隙土,成土木质跟碳酸盐岩和碎屑岩有非常大的关联性。而在碎屑岩表层土壤的分析过程中,11 个样本中有 10 个实现了正确分类,1 组误判为深层土壤,也就是说,碎屑岩土壤的正确判别率为 90.9%。总体上而言,在 U, Mn, AP,  $\chi_{\text{hf}}$  4 种指纹因子组合下,3 种泥沙源地的正确判别率达 82.6%。完全符合组合指纹法应用的要求。因此这 4 种因子可以作为判别该区泥沙来源的最佳指纹因子组合。3 种泥沙源地分类判别中,碳酸盐岩表层土壤、深层土壤、碎屑岩表层土壤分别产生 15.8%, 27.3%, 9.1% 的错误判别率,这也完全符合组合指纹法应用要求,错误判别率低于 30%,因此 U, Mn, AP,  $\chi_{\text{hf}}$  4 种因子可以作为判别该区泥沙来源的最佳指纹因子组合。

表 5 泥沙来源地复合指纹因子判别结果 %			
泥沙来源 地类型	预测组成员		
	碎屑岩	碳酸盐岩	深层
	表层土壤	表层土壤	土壤
碎屑岩表层土壤	90.9	0	9.1
碳酸盐岩表层土壤	0	84.2	15.8
深层土壤	9.1	18.2	72.7

注:已对初始分组案例中的 82.9% 个进行了正确分类。

### 2.3 岩溶洼地小流域泥沙来源分析

根据最佳指纹组合在沉积泥沙样品和泥沙来源地中的浓度,在符合公式(2—3)的条件下,使公式(1)最小时得到劳动水库洼地的沉积泥沙,来自不同源地的侵蚀泥沙贡献比。

由表 6 可以看出,3 种泥沙来源地贡献百分比均值分别为:碳酸盐岩表层土壤(50.2%)、深层土壤(11.6%)、碎屑岩表层土壤(38.2%)。各潜在泥沙源地中表层土壤的泥沙贡献率最高,碎屑岩表层土壤、深层土壤次之。其中碳酸盐岩表层土壤的泥沙贡献

百分比是深层土壤的 4.3 倍、碎屑岩表层土壤的 1.3 倍,主要是因为碳酸盐岩区中表层土壤占地面积较大,土层薄,植物根系不发达,地表裸露面积大,一旦降雨,极易产生径流,土壤侵蚀极其严重。同时,由表可知,深层土壤的泥沙贡献率是 3 种来源地最小的,主要是因为岩溶洼地裂隙的发育,一部分土壤通过地下裂隙漏失,最终到达洼地底部的土壤较少,并且由于洼地面积较小,降雨季节分配差异较大,沟道发育不完全,携带的泥沙流入洼地底部沉积较少,因此在 3 种潜在泥沙来源地中,深层土壤贡献较少。碎屑岩表层土壤由于土层深厚,植被覆盖率高,而植被有拦蓄水源的功能,因此碎屑岩表层土壤的泥沙贡献率低于碳酸盐岩的表层土壤。

表 6 3 种泥沙来源地泥沙贡献百分比			
泥沙 来源地	碎屑岩 表层土壤	碳酸盐岩 表层土壤	深层 土壤
泥沙贡献率/%	38.2	50.2	11.6

### 2.4 可信度检验

为了验证复合指纹识别技术探讨泥沙来源结果的可靠性,可信度检验采用拟合优度检验和相对平均误差分析两种计算方式来进行模型验证。

(1) 拟合优度检验主要是通过下式计算:

$$GOF=1-\left\{\frac{1}{n}\times\sum_{i=1}^n\left|C_i-\sum_{j=1}^m(S_{i,z}-P_z)\right|C_i\right\}\quad(4)$$

当计算结果  $GOF>0.8$  时,即表明多元混合模型计算结果具有合理性。根据上式计算可得,岩溶洼地小流域的 GOF 值为 0.83, GOF 值均大于 0.80。因此,该多元混合模型拟合是有效的。

(2) 相对平均误差。相对平均误差是按判定的泥沙贡献率混合流域各源地土壤样,充分混合均匀后,用最优化混合模型计算出的单个洼地沉积泥沙样中的元素浓度和实际样品中的元素浓度相比的平均误差。误差小于 20%,基本上可以判断结果可信。表中 3 种来源地的误差值为 13.9%,其结果小于 20%,因此认定结果是可信的。

表 7 相对平均误差统计		
验证项目	范围/%	平均值/%
3 种源地	6.8~23.7	13.9

## 3 结论

(1) 从 38 种因子中初步筛选出 30 种因子复合判别条件,通过多元逐步判别分析,基于 Wilks' Lambda 最小化的基础上,找到了最佳指纹因子组合,其中 U,  $\chi_{\text{hf}}$ , AP, Mn 的累积判别率分别为 63.4%, 68.3%, 73.2%,

82.9%,总累积判别率高达 82.9%,说明指纹法可用于岩溶洼地小流域泥沙来源研究。

(2) 利用多元混合模型得出泥沙来源地贡献百分比均值分别为:碳酸盐岩表层土壤(50.2%)、深层土壤(11.6%)、碎屑岩表层土壤(38.2%),其中碳酸盐岩表层土壤的泥沙贡献百分比是深层土壤的 4.3 倍、碎屑岩表层土壤的 1.3 倍,且多元混合模型优度拟合检验值为 0.83,相对平均误差 13.9%,进一步说明岩溶洼地碳酸盐岩地区土壤流失严重,远高于碎屑岩表层土壤。

复合指纹法在岩溶洼地小流域的成功应用,为研究岩溶洼地小流域水土流失过程提供了新的手段。但是本研究仅对典型沉积洼地进行研究,在今后的研究中,需进一步丰富研究类型,以期建立岩溶洼地小流域水土流失研究的理论体系。

#### 参考文献:

- [1] 张治国,王贵平,贾志军,等.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.
- [2] 魏天兴,黄土区小流域侵蚀泥沙来源与植被防止侵蚀作用研究[J].北京林业大学学报,2002,24(5):19-24.
- [3] 石伟,王光谦,邵学军.不同来源区洪水对黄河下游流量—含沙量关系的影响[J].水科学进展,2003,14(2):147-151.
- [4] 熊道光.鄱阳湖泥沙来源及湖盆近期沉积规律探讨[J].海洋与湖沼,1990,21(4):374-385.
- [5] Peart M R. Techniques for establishing suspended sediment sources in two drainage basins in Devon, UK: a comparative assessment. *Sediment Budgets* [J]. Iahs Publ.,1986,174:269-279.
- [6] Walling D E, Peart M R, Oldfield F, et al. Suspended sediment sources identified by magnetic measurements [J]. *Nature*, 1979,281(5727):110-113.
- [7] 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.
- [8] Wallbrink P J, Murray A S. Use of fallout radionuclides as indicators of erosion processes [J]. *Hydrological*

*Processes*, 1993,7(3):297-304.

- [9] Collins A L, Walling D E, Sichingabula H M, et al. Suspended sediment source fingerprinting in a small tropical catchment and some management implications [J]. *Applied Geography*, 2001,21(4):387-412.
- [10] 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.
- [11] 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*, 2013,15(28):560-578.
- [12] 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):94-106.
- [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] 周曼,林嘉辉,黄炎和,等.复合指纹法分析红壤区强度开发小流域泥沙来源[J].水土保持学报,2019,33(1):20-24.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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):45-49,102.
- [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):249-261.
- [20] 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.