

# 基于复合指纹法的岩溶洼地小流域泥沙来源解析

陈英, 魏兴萍, 张爱国, 雷珊

(重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331)

**摘要:** 岩溶洼地是重庆岩溶地区常见的一种地貌类型, 洼地小流域是人们从事农事活动的重要场所, 研究流域不同土地利用侵蚀产沙特征, 对认识流域侵蚀产沙规律和治理水土流失具有重要意义。选取了 1 个建有水库的岩溶洼地小流域, 分析源地和泥沙样品的 39 个地球化学特征, 利用复合指纹和多元混合模型计算各源地侵蚀泥沙贡献率。结果表明: 流域筛选出的最佳指纹因子组合为 U、 $\chi_{if}$ 、Rb、Li、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $\chi$ 、Mn, 正确判别累积率为 99.93%, 6 种泥沙源地的总正确判别率为 91.49%, 符合复合指纹法应用的条件。碳酸盐岩耕地、碳酸盐岩林地、碳酸盐岩草地、碎屑岩林地、碎屑岩草地和沟道/裂隙对流域沉积泥沙的相对贡献分别为 16.29%, 41.16%, 13.03%, 16.67%, 4.48%, 8.37%, 拟合优度为 93.57%, 相对误差平均值为 8.26%, 表明模型判别结果可信。各泥沙源地中碳酸盐岩耕地单位面积泥沙贡献值远高于其他泥沙源地, 是碳酸盐岩林地的 1.98 倍, 碳酸盐岩草地的 2.07 倍, 碎屑岩林地的 2.13 倍, 碎屑岩草地的 2.21 倍, 即单位面积碳酸盐岩耕地土壤抗蚀能力最弱。

**关键词:** 泥沙来源; 复合指纹法; 岩溶洼地; 小流域

**中图分类号:** S157.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2020)05-0131-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.019

## Analysis of Sediment Source in Small Watershed of Karst Depression Based on Composite Fingerprint Method

CHEN Ying, WEI Xingping, ZHANG Aiguo, LEI Shan

(School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331)

**Abstract:** Karst depression is a common landform type in karst areas of Chongqing. Small depression watershed is an important place for agricultural activities. Studying the characteristics of erosion and sediment yield of different land uses in the watershed is of great significance for understanding the laws of erosion and sediment production and controlling soil and water loss. A small karst depression basin with a reservoir was selected, and 39 geochemical properties of the sediment source as well as sediment samples were analyzed. The composite fingerprint and multivariate mixed model were used to calculate the erosion and sediment contribution rate of each sediment source. The results showed that the best fingerprint factor combination screened by the catchment was U,  $\chi_{if}$ , Rb, Li,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\chi$  and Mn. The cumulative rate of correct discrimination was 99.93%, and the total correct discrimination rate of the six sediment sources was 91.49%, which accorded to the application conditions of compound fingerprint method. The relative contributions to sediments in the basin of carbonate arable land, carbonate woodland, carbonate grassland, clastic rock forest, clastic grassland and trench/fissure soil were 16.29%, 41.16%, 13.03%, 16.67%, 4.48% and 8.37%, respectively, the goodness of fit of the model was 93.57%, and the average relative error was 8.26%, indicating that the model result was credible. Among all sediment source areas, the sediment contribution per unit area of carbonate rock farmland was far higher than that of other sediment source areas, which was 1.98 times that of carbonate forest land, 2.07 times that of carbonate grassland, 2.13 times that of clastic rock forest land, and 2.21 times that of clastic rock grassland. The soil corrosion resistance of carbonate rock farmland per unit area was the weakest.

**Keywords:** sediment source; composite fingerprinting; karst depression; small watershed

收稿日期: 2020-03-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(41701252); 重庆市自然科学基金项目(cstc2016jcyjA0150); 重庆师范大学研究生科研创新项目(YKC19002)

第一作者: 陈英(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态化建设研究。E-mail: yingchenczx@126.com

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

小流域常面临水文观测数据缺失的情况,选取一种快速有效的方法定量解析泥沙源,对于明确水土流失靶区、服务区域水保工作与建设和谐生态环境具有重要意义<sup>[1]</sup>。就泥沙来源问题,国内外已经进行了大量研究,早期主要利用径流小区观测、水文资料分析、大面积调查等传统方法<sup>[2]</sup>,费时费力、成本高且在空间尺度应用上尚存在不足和局限。随着研究的深入,已有学者<sup>[3]</sup>于上个世纪 70 年代开始运用单因子指纹—土壤颜色、放射性核素、矿物元素、土壤磁性等,定量示踪泥沙来源。泥沙源地多样、采样的不确定性、试验误差等因素,使得单因子指纹法的泥沙源地正确判别率低<sup>[4]</sup>,针对上述不足,Collins 等<sup>[5]</sup>提出采用数个能够有效辨别泥沙源地的指纹因子组成最佳的“复合指纹”来提高泥沙源地的正确判别率。

近 30 年来,复合指纹法在河流和小流域泥沙源解析应用方面,成效显著。Collins 等<sup>[6]</sup>采用修正的复合指纹研究方法得出英国最大湿地典型小流域 4 种不同土地利用侵蚀产沙百分比;Lamba 等<sup>[7]</sup>采用 Al、Sc、Mn、Fe、Ni 等作为指纹识别因子,分析了不同土地利用分配对河道泥沙的贡献率的影响。在中国,西南地区、黄土高原以及其他存在较大水土流失风险的地区也尝试运用复合指纹法探究泥沙来源。张信宝等<sup>[8]</sup>、郭进等<sup>[9]</sup>利用<sup>137</sup>Cs、<sup>210</sup>Pb 等组成的复合指纹示踪川中丘陵小流域及三峡库区的不同泥沙源地泥沙贡献率。汪南<sup>[10]</sup>以元江干热河谷区 4 种不同景观格局的小流域为研究对象,利用复合指纹法定量计算各个源地的泥沙贡献率。在土壤物质组成均一的黄土高原小流域<sup>[11-12]</sup>、福建花岗岩崩岗不同部位<sup>[13]</sup>和人为干扰严重的东部小流域<sup>[2,14]</sup>,复合指纹法的可行性与适用性进一步得到证实。这些研究显示出复合指纹法在小流域泥沙源解析应用上,具有一定的优越性。

重庆市碳酸盐岩出露面积占全市土地总面积的 40.02%<sup>[15]</sup>,岩溶洼地是重庆岩溶地区常见的一种地貌类型,洼地小流域是人们从事农事活动的重要场所,其坡地土层薄,土壤允许流失量小。产生的泥沙导致河道淤塞、水质恶化,威胁区域生态系统,已成为流域水环境研究的热点问题。这些泥沙来自于流域内不同土地利用方式的侵蚀泥沙,利用一种快速有效的方法定量解析流域不同土地利用侵蚀产沙特征,对认识流域侵蚀产沙规律和治理水土流失具有重要意义。重庆岩溶洼地小流域岩层主要由三叠系雷口坡组、嘉陵江组、飞仙关组碳酸盐岩和须家河组碎屑岩组成,洼地沉积泥沙主要来自 2 个侵蚀产沙区—碳酸盐岩区和碎屑岩区。目前,岩溶地区泥沙来源研究主要集中在碳酸盐岩区,碳酸盐岩和碎屑岩 2 种不同地质岩性的岩溶洼地小流域,基于复合指纹法进行流域

泥沙源解析的研究仍鲜有耳闻。因此,选择建有水库的重庆岩溶洼地小流域,应用复合指纹法,研究流域碳酸盐岩区和碎屑岩区不同土地利用方式对小流域产沙的相对贡献率。以期为岩溶地区小流域泥沙来源规律研究及小流域综合治理提供参考依据。

## 1 研究区概况

研究区为岩溶洼地小流域(29°37'37"—29°38'21"N, 106°16'08"—106°17'02"E),地处重庆市西北部青木关岩溶槽谷区,海拔 438~621 m,流域面积 93.64 hm<sup>2</sup>,其中碳酸盐岩面积约 68.67 hm<sup>2</sup>。属典型的亚热带温暖湿润季风气候,四季分明,年均降水量 1 104.88 mm,4—9 月降水集中且多暴雨,占全年降水量的 77.2%。青木关岩溶槽谷形成于川东平行岭谷缙云山温塘峡背斜南段,在水蚀作用下,形成典型岩溶槽谷景观,区内发育着大小各异的洼地。目前研究区土地利用多样,有耕地、林地、草地、建设用地、水域等,其中耕地约占流域总面积 9.42%,林地约占 61.52%,草地占 19.62%,道路、居民区、水域等其他用地占 9.44%,土地利用现状见图 1。

研究区是一个位于劳动村的封闭岩溶洼地小流域,可视为相对独立的源汇单元,是本地区典型的岩溶洼地小流域。地形四面由低山包围,中部为洼地,东侧建有一座小型水库,是流域海拔最低点。劳动水库建于 20 世纪 60 年代,90 年代开始荒废、停止开发,至今沉积有 50 年左右。水库自建库以来,未实施清淤等人为扰动工作,是泥沙源解析的天然研究场所。水库沉积泥沙主要来自 2 个侵蚀产沙区即碳酸盐岩区和碎屑岩区(图 1)。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

2019 年 4—6 月,在实地踏勘,走访当地居民的基础上完成了样品采集。研究区耕地破碎、复种指数高,其中坡耕地占比大,土壤抗蚀能力弱;坡度较大的林草地面积广布且距离水库近和沟道/裂隙受暴雨冲刷明显等都极易使地表土体被侵蚀并最终在水库中沉积。流域存在碳酸盐岩和碎屑岩 2 种地质岩性,为了定量解析上述 2 种地质岩性不同土地利用泥沙贡献率,故将流域内潜在泥沙源地按照地质岩性、不同土地利用方式与地貌,分为碳酸盐岩耕地、林地和草地,碎屑岩林地和草地 5 类,并进行泥沙源地土壤样品采集。每个样点采样利用多点混合方法,采集 0—2 cm 厚度的表土混合样,四分法取 2 kg 土样带回实验室。共计采样 48 个,碳酸盐岩耕地土壤 7 个、林地土壤 10 个和草地土壤 8 个,碎屑岩林地土壤 9 个和草地土壤 6 个,沟道/裂隙土样 8 个。在水库入库水

流上游、中游(即水库中心)采集 5 处沉积泥沙样品,混合为 1 个泥沙样品,水库中心因为上游不同源地来沙在此混合更为均匀,故将水库中心泥沙样品作为泥沙来

源分析计算的主要依据。水库沉积泥沙采样选择活塞式柱状底泥采样器<sup>[1]</sup>,采集水库底泥上部 2 cm 沉积泥沙。源地土壤、沉积泥沙采样点位置见图 1。

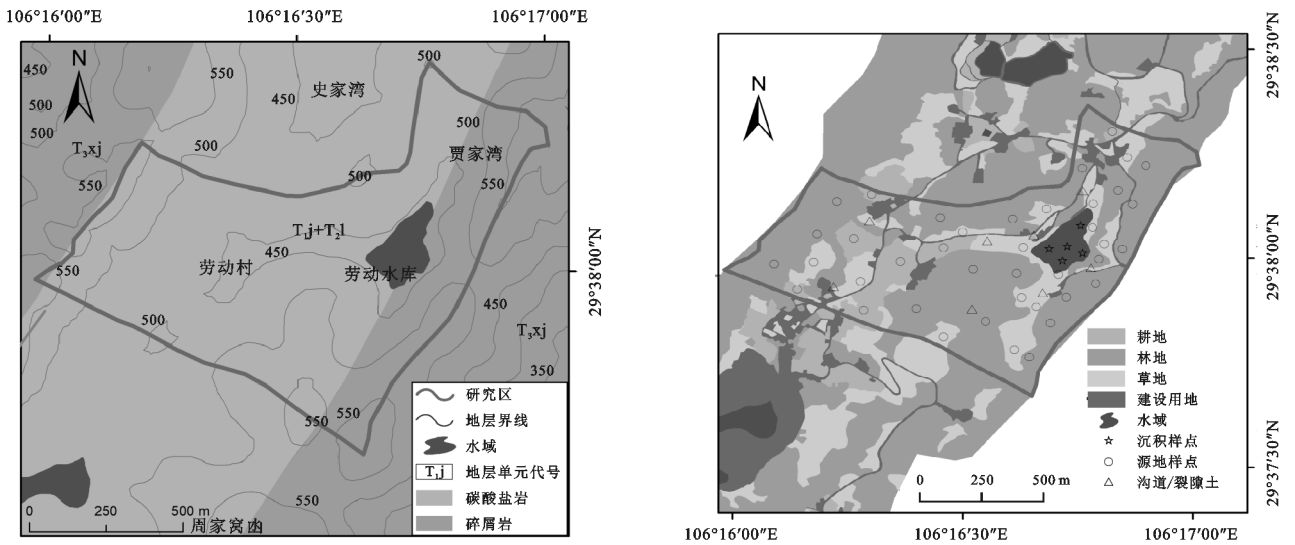


图 1 研究区域与土壤采样点

## 2.2 测定指标

将 48 个潜在源地土壤样品与沉积泥沙样品带回实验室清点后,去除杂物,自然风干,研磨过 2 mm 筛,分析测定前按待测指标的测试要求进行过筛。共检测 39 个指标,其中 Li、Be、Co、As、Rb、Ag、Cd、In、Cs、K、Na、Ca、Mg、Ba、Sr、Fe、Mn、Si、Tl、Pb、Bi、U、V、Cr、Ti、Ni、Cu、Zn、Al 采用 ICP-MS(电感耦合等离子体质谱仪)测定;土壤磁性利用英国 Bartington MS2 型双频磁化率仪测定高/低频磁化率( $\chi_{hf}$ 、 $\chi_{lf}$ ),计算得频率磁化率( $\chi_{fd}$ )<sup>[12]</sup>。土壤养分元素(SOC、TN、TP、AP、AK)含量测定参照郑必昭<sup>[16]</sup>的方法。土壤样品<sup>137</sup>Cs 含量测定采用配备 n 型高纯锗探头(LoAXHPGe)的低能量低本底  $\gamma$  能谱仪。

## 2.3 研究方法

2.3.1 指纹因子组合筛选 泥沙指纹技术通过筛选潜在源地土壤物质组分中可分辨源地类别的“指纹”,以“指纹”对比的方法,构筑流域输出泥沙与潜在源地的直接对应关系,从而实现流域泥沙来源的定量识别<sup>[17]</sup>。由于流域面积小,认为泥沙在输移过程中分选性小,因此未考虑粒径和有机质的修正等问题,而采用双边范围检验与均值检验,即若沉积泥沙中指纹因子的浓度范围、平均浓度在物源区对应指纹因子浓度范围之内,则该指纹因子可视为稳定<sup>[18]</sup>。对通过范围限制条件与均值限制条件的指纹因子,利用 SPSS 20.0 软件进行非参数 Kruskal-Wallis  $H$  检验,筛选出的各潜在泥沙源地间具有显著性差异的指标进入多元判别分析,从而得出最佳指纹因子组合。判别分析过程中输入每一步的 Wilks' lambda 概计量最小的指纹因子<sup>[19]</sup>。

2.3.2 沉积泥沙来源分析 明确最佳指纹因子组合后,依据最佳指纹因子在各潜在泥沙源地和水库沉积泥沙中的浓度,应用多元混合模型定量计算出不同源地的侵蚀泥沙贡献百分比,选取拟合优度(GOF)检验(公式(2))法和人工混样相对平均误差法对判别结果进行检验。模型利用 MATLAB R2017a 软件编程计算完成。混合模型函数<sup>[21]</sup>为:

$$Res = \sum_{i=1}^n \left( (C_i - \sum_{s=1}^m P_s \cdot C_{si}) / C_i \right)^2 \quad (1)$$

$$GOF = 1 - \left( \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|C_i - \sum_{s=1}^m P_s \cdot C_{si}|}{C_i} \right) \quad (2)$$

式中:Res 为残差平方和; $n$  为指纹因子的数量; $C_i$  为研究区水库沉积泥沙中指纹因子  $i$  的浓度(mg/kg); $P_s$  是泥沙源地  $s$  的泥沙贡献百分比(%); $C_{si}$  是泥沙源地  $s$  中指纹因子  $i$  的平均浓度(mg/kg); $m$  是泥沙源地的数量。在运用函数公式(1)时,必须满足所有泥沙源地泥沙贡献率非负且其和为 1 的限制条件,当 Res 取最小值时,即可得到不同源地侵蚀泥沙贡献百分比。GOF 为拟合优度检测值,一般认为,当  $GOF > 0.8$  时,模型的计算结果可被接受<sup>[20]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 指纹因子特性及指纹因子筛选

首先删除了 1 个与碳酸盐岩林地土壤各元素含量平均值差异不明显的沟道/裂隙土壤样品。然后通过双边范围检验与均值检验剔除不具备“保守性”特征的泥沙指纹,在此筛选过程中 Ca 未能通过均值限定,Mg、Al 未能通过范围限定,余下 36 种元素全部通过了检验。

由表 1 可知,<sup>137</sup>Cs 与土壤磁化率变异系数(CV)

组内数值大、组间差异明显,为泥沙不同来源的辨别分析提供有力的依据。碳酸盐岩耕地、碳酸盐岩林地、碳酸盐岩草地、碎屑岩林地、碎屑岩草地和沟道/裂隙 6 种泥沙源地土壤中,变异系数 $<0.3$ 的元素占元素总数百分比分别为 72%, 58%, 61%, 64%, 69%, 31%。碳酸盐岩耕地中有 Be、Co、As、Si、SOC、 $\chi_{hf}$ 等 23 种元素的变异系数均最低,而沟道/裂隙土壤中有 Ag、Bi、V、K、 $\chi_{fd}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 等 17 种元素变异系数均大于其他用地类型。表明碳酸盐岩耕地土壤各元素性质相对其他 5 种泥沙源地稳定,沟道/裂隙土壤的均一性较耕地、林草地差。流域内沟道/裂隙发

育程度、土壤侵蚀强度差异大,影响了该类用地土壤性质。碳酸盐岩林地土壤变异系数仅小于沟道/裂隙土,这可能是因为其空间分布跨度大,从槽谷到两侧山顶皆有其分布,海拔、坡度、地貌部位、人为干扰等因素使其土壤流失程度各异。

剩余 47 个源地土壤样品 36 种元素经非参数 Kruskal-Wallis  $H$  检验,由表 1 可知,27 个指纹因子在 6 源地土壤中组间差异显著( $P \leq 0.05$ )。Cd、Na、Sr、Si、SOC、TN、TP、AP、AK 9 个指纹因子  $P > 0.05$ ,这些指纹因子在不同泥沙源地间属性差异小,没有通过非参数检验。

表 1 泥沙源地指纹因子的 Kruskal-Wallis  $H$  检验结果

元素	碳酸盐岩耕地		碳酸盐岩林地		碳酸盐岩草地		碎屑岩林地		碎屑岩草地		沟道/裂隙		$H$ 值	$P$ 值
	平均值	CV	平均值	CV	平均值	CV	平均值	CV	平均值	CV	平均值	CV		
Li	64.11	0.14	65.95	0.25	77.84	0.16	50.40	0.21	62.05	0.11	80.29	0.19	22.36	0*
Be	1.61	0.12	1.70	0.23	1.98	0.19	1.41	0.27	1.60	0.22	1.85	0.26	15.91	0.007*
Co	11.78	0.09	11.96	0.10	13.25	0.12	6.52	0.08	9.27	0.09	11.75	0.18	21.75	0.001*
As	2.54	0.13	2.90	0.19	3.43	0.17	2.51	0.26	2.91	0.19	3.52	0.44	17.14	0.004*
Rb	81.51	0.07	85.86	0.14	103.24	0.09	95.66	0.18	88.02	0.04	98.38	0.17	11.42	0.044*
Ag	0.32	0.07	0.33	0.17	0.40	0.12	0.31	0.11	0.33	0.09	0.41	0.35	18.95	0.002*
Cd	0.37	0.15	0.41	0.42	0.37	0.31	0.32	0.46	0.22	0.35	0.32	0.53	9.87	0.079
In	0.05	0.11	0.06	0.26	0.06	0.13	0.05	0.17	0.03	0.16	0.07	0.24	23.86	0*
Cs	0.59	0.09	0.65	0.13	0.85	0.23	0.68	0.31	0.60	0.25	0.78	0.28	18.43	0.002*
Tl	0.46	0.12	0.54	0.18	0.65	0.15	0.52	0.29	0.42	0.12	0.64	0.28	27.18	0*
Pb	23.19	0.08	24.07	0.26	28.01	0.32	17.67	0.20	13.61	0.30	22.86	0.26	22.51	0*
Bi	0.3	0.08	0.34	0.27	0.36	0.11	0.24	0.26	0.19	0.25	0.35	0.38	20.90	0.001*
U	5.99	0.13	7.52	0.28	10.40	0.26	5.24	0.23	4.36	0.04	10.29	0.39	30.61	0*
V	86.85	0.09	85.17	0.25	106.09	0.15	71.28	0.40	72.01	0.20	104.93	0.35	20.08	0.001*
Cr	43.04	0.11	42.88	0.23	48.17	0.21	39.01	0.35	36.00	0.19	48.07	0.33	12.80	0.025*
Ti	1.36	0.15	1.15	0.30	1.53	0.12	0.87	0.15	0.95	0.18	1.21	0.23	13.51	0.019*
Ni	22.84	0.11	21.88	0.25	27.76	0.36	15.33	0.28	18.88	0.16	29.29	0.35	18.44	0.002*
Cu	16.72	0.07	13.85	0.28	17.18	0.32	10.03	0.36	10.39	0.34	16.87	0.34	20.45	0.001*
Zn	73.16	0.09	71.31	0.26	83.77	0.34	46.88	0.48	43.59	0.22	67.74	0.35	16.34	0.006*
K	0.85	0.08	0.91	0.08	0.98	0.13	1.01	0.08	0.95	0.18	1.04	0.24	11.21	0.047*
Na	0.18	0.16	0.20	0.31	0.21	0.24	0.18	0.11	0.17	0.22	0.18	0.38	3.25	0.661
Ba	215.97	0.11	244.29	0.21	244.38	0.16	310.34	0.18	262.66	0.27	229.70	0.37	12.28	0.031*
Sr	31.87	0.35	33.65	0.35	33.73	0.20	36.98	0.24	45.28	0.29	27.78	0.41	9.79	0.082
Fe	1.75	0.08	1.78	0.25	2.18	0.12	1.42	0.45	1.31	0.30	2.16	0.30	22.51	0*
Mn	356.21	0.31	358.98	0.34	390.94	0.33	206.05	0.18	138.2	0.26	325.61	0.28	19.26	0.002*
Si	27.22	0.33	29.38	0.51	26.24	0.58	38.47	0.51	38.16	0.47	28.52	0.61	6.54	0.257
SOC	11.76	0.09	15.56	0.42	14.55	0.44	19.04	0.11	16.67	0.19	14.81	0.39	9.39	0.094
TN	0.49	0.37	1.56	0.56	1.50	0.41	0.63	0.20	0.68	0.35	1.08	0.58	9.69	0.084
TP	0.13	0.27	0.16	0.32	0.16	0.16	0.19	0.12	0.14	0.05	0.18	0.35	8.78	0.118
AP	15.89	0.42	18.36	0.22	17.13	0.18	13.14	0.05	16.73	0.04	21.9	0.40	4.35	0.500
AK	60.72	0.37	72.8	0.53	119.11	0.27	67.76	0.32	63.38	0.31	80.19	0.52	9.52	0.077
$\chi_{hf}$	126.85	0.36	79.95	0.82	117.59	0.66	40.91	0.69	41.37	0.49	40.72	0.93	17.72	0.003*
$\chi_{lf}$	138.08	0.37	87.22	0.84	128.17	0.65	43.61	0.69	44.15	0.48	44.63	0.95	17.91	0.003*
$\chi$	106.01	0.35	67.64	0.92	93.63	0.67	34.62	0.70	33.74	0.50	32.22	0.98	17.84	0.003*
$\chi_{fd}$	7.81	0.18	7.49	0.33	8.49	0.40	5.43	0.27	5.77	0.15	7.28	0.40	11.81	0.038*
$^{137}\text{Cs}$	3.10	0.54	4.66	1.18	3.16	0.99	2.06	0.84	1.22	0.53	0.94	1.50	15.55	0.008*

注: \* 表示在显著水平  $P < 0.05$  下差异显著; Ti、K、Na、Fe、Si、 $\chi_{fd}$  单位为%; SOC、TN、TP 单位为 g/kg;  $\chi_{hf}$ 、 $\chi_{lf}$ 、 $\chi$  单位为  $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ;  $^{137}\text{Cs}$  单位为 mBq/g; 其他指标单位均为 mg/kg。



### 3.2 最佳指纹因子组合确定

由表 2 可知,通过对该岩溶洼地小流域 Li、Be、Co、As、Rb 等 27 个初选指纹因子逐步判别分析,筛选出能够识别碳酸盐岩区和碎屑岩区不同土地利用侵蚀泥沙最佳指纹因子组合(U、 $\chi_{lf}$ 、Rb、Li、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $\chi$ 、Mn)。当被选指纹因子从 U 到 Mn,其 lambda 值由 0.325 下降到 0.017,由 U、 $\chi_{lf}$ 、Rb、Li、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $\chi$ 、Mn 构成的指纹组合的正确判别累积率高达 99.93%,正确判别累积率 >80%,符合复合指纹法应用的要求<sup>[14]</sup>。土壤磁化率是成土因素和成土过程的综合反映<sup>[22]</sup>,当潜在泥沙源地以地质单元分类时,矿物磁性可能具有明显的识别优势。程倩云等<sup>[23]</sup>证实了运用 $^{137}\text{Cs}$ 和磁化率双指纹示踪西南喀斯特小流域泥沙来源的可行性表明, $^{137}\text{Cs}$ 和磁化率可作为开展岩溶地区泥沙来源研究的重要指纹因子。

### 3.3 判别结果分析

由表 3 可知,在 U、 $\chi_{lf}$ 、Rb、Li、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $\chi$ 、Mn 7 种指纹因子组合下,碳酸盐岩耕地、碳酸盐岩林地、碳酸盐岩

草地、碎屑岩林地、碎屑岩草地和沟道/裂隙 6 种源地土壤样品正确判别率分别为 85.7%,90.0%,100%,100%,83.3%,85.7%,总正确判别率达到 91.49%。总正确判别率高于 70%,各潜在泥沙源地错误判别率皆低于 30%,符合复合指纹法应用的要求<sup>[2]</sup>。因此,U、 $\chi_{lf}$ 、Rb、Li、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $\chi$ 、Mn 7 种指纹因子组合能够作为识别该区泥沙来源的最佳指纹因子组合。

表 2 最佳指纹因子组合

步骤	最佳指纹因子	Wilks 的 Lambda	累计判别率/%
1	U	0.325	34.00
2	$\chi_{lf}$	0.167	66.00
3	Rb	0.102	81.03
4	Li	0.062	90.73
5	$^{137}\text{Cs}$	0.038	95.07
6	$\chi$	0.025	98.87
7	Mn	0.017	99.93

注:步骤的最大数目是 54。

表 3 最佳指纹因子组合判别结果

指标	泥沙来源地类型	预测组成员信息						合计
		碳酸盐岩耕地	碳酸盐岩林地	碳酸盐岩草地	碎屑岩林地	碎屑岩草地	沟道/裂隙	
采样 点数/个	碳酸盐岩耕地	6	0	1	0	0	0	7
	碳酸盐岩林地	1	9	0	0	0	0	10
	碳酸盐岩草地	0	0	8	0	0	0	8
	碎屑岩林地	0	0	0	9	0	0	9
	碎屑岩草地	0	0	1	0	5	0	6
	沟道/裂隙	0	0	0	0	1	6	7
正确 判别率/%	碳酸盐岩耕地	85.7	0	14.3	0	0	0	100
	碳酸盐岩林地	10.0	90	0	0	0	0	100
	碳酸盐岩草地	0	0	100.0	0	0	0	100
	碎屑岩林地	0	0	0	100.0	0	0	100
	碎屑岩草地	0	0	16.7	0	83.3	0	100
	沟道/裂隙	0	0	0	0	14.3	85.7	100

注:已对初始分组案例中的 91.49%个进行了正确分类。

### 3.4 泥沙来源贡献率分析

水库沉积泥沙的最佳指纹因子组合 U、 $\chi_{lf}$ 、Rb、Li、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $\chi$ 、Mn 平均值分别为 7.92 mg/kg,66.57 × 10<sup>-8</sup> m<sup>3</sup>/kg,94.73 mg/kg,73.43 mg/kg,2.41 mBq/g,50.73 × 10<sup>-8</sup> m<sup>3</sup>/kg,349.07 mg/kg。运用公式(1)计算同时通过 GOF 检验与相对平均误差分析,不同泥沙源地的侵蚀泥沙贡献百分比如表 4 所示。碳酸盐岩耕地、碳酸盐岩林地、碳酸盐岩草地、碎屑岩林地、碎屑岩草地和沟道/裂隙对流域沉积泥沙的相对贡献分别为 16.29%,41.16%,13.03%,16.67%,4.48%,8.37%。碳酸盐岩区是流域主要侵蚀产沙区,这主要是因为流域碳酸盐岩区占地面积较大,同

时其土层薄、地表裸露面积大,一旦降雨,易产流产沙。各潜在泥沙源地中,耕地单位面积泥沙贡献值远高于其他泥沙源地,是碳酸盐岩林地的 1.98 倍,碳酸盐岩草地的 2.07 倍,碎屑岩林地的 2.13 倍,碎屑岩草地的 2.21 倍。松土、除草、翻耕等耕作措施与作物收割后地表无植被覆盖,加速了耕地土壤侵蚀活动,且耕地主要分布在洼地及山麓区域,泥沙被阻挡截留较少,导致侵蚀泥沙对水库沉积泥沙的贡献大。单位面积泥沙贡献值大小依次为耕地 > 草地 > 林地,说明植被恢复能有效减少流域产沙<sup>[4]</sup>。草地生长周期短,细根数量较多,植被覆盖良好,延缓产流作用明显,同时受人活动扰动小,水土流失量较小。并且流域草地

中,葛藤类草质藤本植物广泛生长,根茎发达,是良好的覆被植物,可防治水土流失,改良土壤<sup>[24]</sup>。因此,草地侵蚀泥沙对流域沉积泥沙的贡献小。流域内现有森林以马尾松、毛竹为主,马尾松产生的枯枝落叶较少,且林下活地被物不发达,入渗速率慢,降雨产流多;毛竹林分密度很大,物种单一且竹林中人为活动较多。这些因素导致林地侵蚀风险增加,与周曼等<sup>[2]</sup>研究结果大致相吻合。单位面积泥沙贡献值越大,在水土保持工作中越应该重点关注。拟合优度检验得到岩

表 4 泥沙源地侵蚀泥沙贡献百分比和其与面积百分比的比值

泥沙源地	碳酸盐岩 耕地	碳酸盐岩 林地	碳酸盐岩 草地	碎屑岩 林地	碎屑岩 草地	沟道/ 裂隙
泥沙贡献率/%	16.29	41.16	13.03	16.67	4.48	8.37
源地面积百分比/%	9.58	47.86	15.89	20.86	5.81	—
单位面积泥沙贡献值	1.70	0.86	0.82	0.80	0.77	—

## 4 结论

研究区为重庆岩溶槽谷区典型岩溶洼地小流域,人为干扰明显且复杂,是生态环境脆弱区。通过对该岩溶洼地小流域 Li、Be、Co、As、Rb、Ag 等 36 种元素非参数检验和判别分析,筛选出能够识别 6 种潜在泥沙源地的最佳指纹因子组合(U、 $\chi_{lf}$ 、Rb、Li、<sup>137</sup>Cs、 $\chi$ 、Mn),指纹因子组合的正确判别累积率为 99.93%,6 种泥沙源地的总正确判别率达 91.49%,符合复合指纹法应用的条件。

利用多元混合模型定量计算出碳酸盐岩耕地、碳酸盐岩林地、碳酸盐岩草地、碎屑岩林地、碎屑岩草地和沟道/裂隙对流域沉积泥沙的相对贡献分别为 16.29%, 41.16%, 13.03%, 16.67%, 4.48%, 8.37%, 拟合优度为 93.57%, 相对误差平均值为 8.26%, 表明混合模型判别结果可靠,因此可以将复合指纹法应用于岩溶洼地小流域侵蚀产沙来源的研究。耕地单位面积的泥沙贡献率是流域 6 种泥沙源地中最高的,其值是碳酸盐岩林地、碳酸盐岩草地、碎屑岩林地与碎屑岩草地的 1.98, 2.10, 2.13, 2.21 倍,研究区同一土类而不同土地利用单位面积的泥沙贡献率呈现异质性特征,受人类活动影响强烈的耕地是地区主要的泥沙策源地。

岩溶区地上地下双层空间结构导致水土流失除了表土侵蚀、沟壁侵蚀外,还存在地下漏失现象的情况。在今后的研究中将采用亮蓝染色示踪法和 Matlab 数字图像技术,对岩溶裂隙几何特征、优先流特征进行获取,测定裂隙赋存土壤机械组成、有机质、水稳性团聚体、饱和导水率等土壤属性及分析土壤属性随土层深度变化特征,对研究区实现土壤漏失的量化研究。本文由于沟道/裂隙土与周边其他用地土壤存在混合,对流域侵蚀泥沙的源解析结果将产生一定的不确定性。此外,在今后的研究中需测定 C、N 同位

溶洼地小流域的 GOF 为 93.57%, 拟合优度 > 80%, 证明混合模型得出的结果符合要求。按判别的泥沙来源贡献率混合流域各源地土壤样,将试验测定混合泥沙样中的元素浓度和实际样品中的元素浓度相比得出相对平均误差。结果表明,指纹因子相对平均误差范围为 4.80%~15.87%, 平均值为 8.26%, 一般相对误差平均值在 10% 以下,表明混合模型得出的结果比较精确<sup>[6]</sup>。因此,利用复合指纹法研究岩溶洼地小流域侵蚀产沙来源是确切可行的。

素以及脂肪酸等生物指纹因子,进而更加准确地获得不同利用方式对侵蚀泥沙的贡献率。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 宓莹.云南大石坝水库流域土壤侵蚀与沉积泥沙来源的关系研究[D].南京:南京师范大学,2015.
- [4] 陈方鑫.利用生物标志物和复合指纹分析法识别小流域泥沙来源[D].武汉:华中农业大学,2017.
- [5] Collins A, Walling D, Leeks G J L. Composite fingerprinting of the spatial source of fluvial suspended sediment: A case study of the Exe and Severn River basins, United Kingdom[J]. Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement, 1996, 2(2): 41-53.
- [6] Collins A L, Naden P S, Sear D A, et al. Sediment targets for informing river catchment management: International experience and prospects [J]. Hydrological Processes, 2011, 25(13): 2112-2129.
- [7] 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(1): 44-53.
- [8] 张信宝,贺秀斌,文安邦,等.川中丘陵区小流域泥沙来源的<sup>137</sup>Cs 和<sup>210</sup>Pb 双同位素法研究[J].科学通报,2004(15):1537-1541.
- [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] 汪南.基于复合指纹分析法的元江干热河谷区小流域泥沙来源研究[D].昆明:云南大学,2018.

- 团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2014,35(12):4695-4704.
- [11] 赵汝东,樊剑波,何园球,等.坡位对马尾松林下土壤理化性质、酶活性及微生物特性影响[J].生态环境学报,2010,19(12):2857-2862.
- [12] 廖义善,孔朝晖,卓慕宁,等.华南红壤区坡面产流产沙对植被的响应[J].水利学报,2017,48(5):613-622.
- [13] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [14] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J].Soil Biology and Biochemistry,2006,38(5):991-999.
- [15] 吴新亮.几种典型地带性土壤团聚体稳定机制及坡面侵蚀响应[D].武汉:华中农业大学,2018.
- [16] Ostrowska A, Porębska G. Assessment of the C/N ratio as an indicator of the decomposability of organic matter in forest soils[J].Ecological Indicators,2015,49:104-109.
- [17] 王明慧,王国兵,阮宏华,等.苏北沿海不同土地利用方式土壤水溶性有机碳含量特征[J].生态学杂志,2012,31(5):1165-1170.
- [18] 耿玉清,余新晓,岳永杰,等.北京山地森林的土壤养分状况[J].林业科学,2010,46(5):169-175.
- [19] Chandler K R, Stevens C J, Binley A, et al. Influence of tree species and forest land use on soil hydraulic conductivity and implications for surface runoff generation[J].Geoderma,2018,310:120-127.
- [20] 王义祥,翁伯琦,黄毅斌,等.生草栽培对果园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].热带亚热带植物学报,2012,20(4):349-355.
- [21] Ramesh T, Bolan N S, Kirkham M B, et al. Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review[M]. Advances in Agronomy: Academic Press,2019.
- [22] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J].Soil Science,2000,165(4):277-304.
- [23] 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.
- [24] Nie M, Pendall E, Bell C, et al. Soil aggregate size distribution mediates microbial climate change feedbacks[J].Soil Biology and Biochemistry,2014,68:357-365.
- [25] 左继超,胡建民,王凌云,等.侵蚀程度对红壤团聚体分布及养分含量的影响[J].水土保持通报,2017,37(1):112-117.
- (上接第136页)
- [11] 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.
- [12] 赵括茵.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.
- [13] 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.
- [14] 常维娜,周慧平,高燕.基于复合指纹法的九乡河小流域泥沙来源解析[J].水土保持学报,2014,28(6):106-110,154.
- [15] 郑红雷.重庆南川石漠化地区可持续发展模式研究[D].重庆:西南大学,2010.
- [16] 郑必昭.土壤分析技术指南[M].北京:中国农业出版社,2013.
- [17] 周慧平,陈玉东,常维娜.指纹技术识别泥沙来源:进展与展望[J].水土保持学报,2018,32(5):1-7.
- [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,2013,180:90-102.
- [19] Franz C, Makeschin F, Weiß H, et al. Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasilia DF, Brazil-using the fingerprint approach[J].Science of the Total Environment,2014,466:513-523.
- [20] 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):1056-1069.
- [21] Walling D E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems[J].Science of the Total Environment,2005,344(1/3):159-184.
- [22] 张果,胡雪峰,吴小红,等.上海城市土壤磁化率的垂向分布特征及环境指示意义[J].土壤学报,2011,48(2):429-434.
- [23] 程倩云,彭韬,张信宝,等.西南喀斯特小流域地表、地下河流细粒泥沙来源的<sup>137</sup>Cs和磁化率双指纹示踪研究[J].水土保持学报,2019,33(2):140-145,154.
- [24] 李安定,李苇洁,彭熙,等.贵州喀斯特区野生葛藤群落主要种群生态位[J].浙江农林大学学报,2012,29(4):491-497.