

利用复合指纹法分析剑川双河水库泥沙来源

尹捷^{1,3}, 杨苑君², 喻庆国^{1,3}, 陈晨⁴,
李波^{1,3}, 罗旭⁵, 李丽萍^{1,3}, 王钧霞^{1,3}, 欧阳敏^{1,3}

(1. 西南林业大学 湿地学院, 云南 昆明 650224; 2. 云南农业大学 水利学院,
云南 昆明 650201; 3. 西南林业大学 国家高原湿地研究中心, 云南 昆明 650224;
4. 西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224; 5. 西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224)

摘要: [目的] 定量研究水库沉积泥沙的具体来源, 为中国滇西北水土流失区域泥沙来源研究和流域综合治理提供科学依据。[方法] 以滇西北剑川县双河水库流域作为研究区, 选取林地、草地、耕地及采矿用地4种土地利用类型作为潜在泥沙源头, 利用复合指纹法分析双河水库沉积泥沙潜在来源及其贡献百分比。选择27个地球化学因子, 通过守恒性检验与Kruskal-Wallis H 检验并利用逐步判别分析确定最佳指纹因子组合, 运用多元线性混合模型计算各泥沙源地贡献百分比。[结果] ①共有8个指纹因子(S, Ca, Sr, TP, Cr, Ba, K, Mg)被确认为最佳指纹因子组合, 累计贡献率达89.60%; ②总体上, 泥沙贡献百分比平均值从大到小为: 草地(37.28%) > 耕地(34.62%) > 林地(27.86%) > 采矿用地(0.24%); ③单位面积上泥沙贡献百分比为: 耕地(9.55%) > 草地(3.78%) > 采矿用地(1.24%) > 林地(0.38%)。[结论] 复合指纹法适用于双河水库流域泥沙来源判别, 耕地仍是土壤侵蚀最为严重的土地利用类型, 而草地因面积较大、地表覆盖度较低, 也是泥沙贡献较多的土地利用类型。

关键词: 水库泥沙来源; 复合指纹法; 土壤侵蚀; 滇西北

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)01-0142-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 尹捷, 杨苑君, 喻庆国, 等. 利用复合指纹法分析剑川双河水库泥沙来源[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 142-148. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.021; Yin Jie, Yang Yuanjun, Yu Qingguo, et al. Analysis of sediment sources of Shuanghe reservoir catchment using combined fingerprinting technique [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 142-148.

Analysis of Sediment Sources of Shuanghe Reservoir Catchment Using Combined Fingerprinting Technique

Yin Jie^{1,3}, Yang Yuanjun², Yu Qingguo^{1,3}, Chen Chen⁴,
Li Bo^{1,3}, Luo Xu⁵, Li Liping^{1,3}, Wang Junxia^{1,3}, Ouyang Min^{1,3}

(1. College of Wetlands, Southwest Forest University, Kunming, Yunnan 650224, China;
2. College of Water Resources and Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming,
Yunnan 650201, China; 3. National Plateau Wetlands Research Center, Southwest Forest University,
Kunming, Yunnan 650224, China; 4. College of Ecology and Environment, Southwest Forest University,
Kunming, Yunnan 650224, China; 5. College of Forestry, Southwest Forest University, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: [Objective] The specific sources of sediment in Shuanghe reservoir were quantitatively studied in order to provide scientific references for the comprehensive management and sediment source research of the river basin in the northwest of Yunnan Province. [Methods] This paper selected the Shuanghe reservoir catchment of Jianchuan County as the study area. Proposed sediment sources were woodland, grassland, farmland and coal land, which were analyzed for their respective contribution to the reservoir sediment by using a combined fingerprinting technique. Twenty-seven geochemical factors were selected, the best combination

收稿日期: 2019-07-25

修回日期: 2019-09-12

资助项目: 国家自然科学基金“滇西北高原湿地面山的根系固土机制研究”(31700635); 云南省应用基础研究计划项目“滇东南岩溶石漠化区坡面水土流失现状及土壤抗剪机制研究”(2018FD045); 云南省高校土壤侵蚀与控制重点实验室建设项目(云教科(2016)37号)

第一作者: 尹捷(1995—), 女(汉族), 四川省南充市人, 硕士研究生, 研究方向为湿地环境地理。Email: 752019335@qq.com。

通讯作者: 杨苑君(1989—), 女(白族), 云南省楚雄市人, 博士, 讲师, 主要研究为水土保持学。Email: yangyuanjunbj@163.com。

of fingerprint factors was confirmed by the conservation test and Kruskal-Wallis H test. Then, the contribution rate of each sediment source was calculated by using the multivariate linear mixing model. [Results] ① A total of 8 fingerprint factors (S, Ca, Sr, TP, Cr, Ba, K, Mg) was confirmed to be the best fingerprint factor combination, with the cumulative contribution rate of 89.60%; ② The total contribution rate of sediment was grassland (37.28%), farmland (34.62%), woodland (27.86%) and coal land (0.24%); ③ The descending order of sediment contribution rate per unit area was farmland (9.55%), grassland (3.78%), coal land (1.24%) and woodland (0.38%). [Conclusion] The combined fingerprinting method is applicable to the identification of sediment source in the Shuanghe reservoir basin. Cultivated land is still the land type with the most severe soil erosion, while grassland is the land type with the high sedimentation, due to its large area and low surface coverage.

Keywords: sediment sources of reservoir; combined fingerprinting; soil erosion; northwest of Yunnan Province

土壤侵蚀、泥沙输移作为全球关注的生态环境问题,会造成土壤中大量的养分损耗,不仅对工业生产、社会发展和环境响应有着严重的负面影响^[1-2],还会造成泥沙淤积,导致水库、湖泊等水量储存空间变小等问题^[3]。淤积泥沙主要来自流域中已被侵蚀的土壤,因此,解决泥沙来源问题对流域水土流失综合治理具有重要意义。

20 世纪初,国内外研究学者开始研究小流域泥沙来源监测方法^[4],其中,复合指纹法因其操作简单、适用范围广的特点而在国内外被广泛应用。如在国内,杨明义等^[5]证实了土壤物质组成均一的黄土高原小流域应用复合指纹法识别泥沙来源的可行性;郭进等^[6]运用全碳、放射性核素(^{226}Ra , ^{137}Cs)、碱金属 K 及重金属 Zn 组成的最佳指纹因子组合识别三峡水库区泥沙来源;郝福星等^[7]研究黄岗岩典型崩岗小流域内悬浮泥沙来源采用了 Ca, Li, Sn, K 和 Ba 组成的最佳指纹因子组合。在国外, Walling 等^[8]利用复合指纹识别法筛选出 N, P, Sr, Ni, ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{210}Pb ex, Fe, Al 等作为指纹因子识别了 Ouse 河及其支流 Wharfe 和悬浮泥沙来源; Collins 等^[9]利用 47 种指纹因子,分析典型小流域 4 种不同土地利用类型源地与英国最大湿地河流侵蚀泥沙之间的贡献率关系; Carter 等^[10]利用复合指纹法研究 Aire 河流经城市前后悬浮泥沙的来源及其变化。

滇西北剑湖流域,位于青藏高原东南部,处于横断山脉纵谷地段,具有褶皱断裂密布、强烈,地震活动频繁等特点,故该流域存在着大量不稳定的松散固体物质,导致坡面土壤稳定性较弱,易发生土壤侵蚀、造成水土流失^[11]。双河水库流域作为剑湖流域的上游小流域,对整个剑湖流域的生态环境有着非常重要的影响。双河水库流域内植被类型多样,但受人为影响较大,附近居民较多,主河道两侧耕地面积较广,并且常年有煤矿开采,土地利用类型丰富。但该小流域土壤侵蚀非常严重,在未修建水库之前,是剑湖淤积泥沙

的主要贡献源^[12],故探究小流域内土地利用类型的土壤侵蚀状况将对剑湖淤积泥沙的治理有很大帮助。目前尚缺乏对剑湖流域泥沙具体来源的实验研究。

因此本文选取剑川双河水库流域作为研究区,运用复合指纹法,通过采集源地和水库沉积泥沙土壤样品,分析土壤样品的化学指标,筛选能够判别泥沙来源的最佳指纹因子组合,定量研究双河水库流域不同土地利用类型对水库沉积泥沙贡献比,以期为中国滇西北水土流失区域泥沙来源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

双河水库流域位于滇西北的云南省大理白族自治州剑川县北部($26^{\circ}33'53''$ — $26^{\circ}38'55''\text{N}$, $99^{\circ}43'34''$ — $99^{\circ}54'25''\text{E}$)。该流域南北长约 9.47 km,东西宽约 18.11 km,总面积达 88 km²。流域内山地连绵起伏,地形东高西低。双河贯穿整个流域,其上游源头老君山地处横断山脉南段,下游水流汇集于双河水库。整个流域海拔最高点为 4 098 m,最低点为 2 295 m,海拔高低悬殊 1 803 m。该流域土地利用类型丰富,包括居民地、林地、耕地、草地及煤矿采集区域。其中,林地占地面积 83.85%,草地占地面积 11.22%,耕地占地面积 4.12%,煤炭采集及堆积区域占地面积 0.22%,居民地、水域等其他非泥沙来源区面积占 0.58%。该流域林地植被类型多样,优势种以栎类、云南松林为主,林下植被层丰富,但林地表层覆盖度差异较大,少则小于 10%,大则高达 80%。该流域相对大的海拔高差,多样化的土地利用类型以及长期的人为扰动,对该地区的水土流失影响较大。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 首先利用 ArcGis10.2.2 对双河水库流域进行 DEM 水文信息提取及土地利用类型大致分类(见图 1),预先确认泥沙源地大概采样点位置。

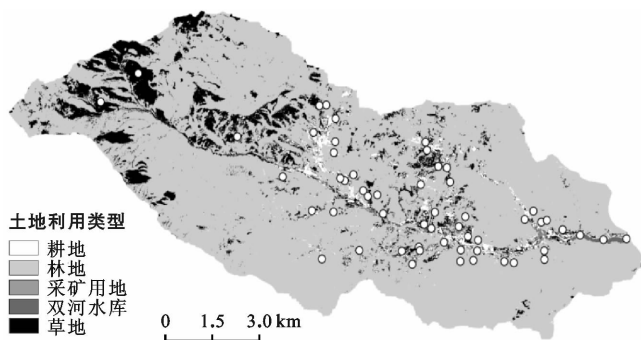


图 1 双河水库流域土地利用类型及采样点分布

据影像图和现地调查,双河水库流域土地利用类型多样,包括居民地、河流、水库、耕地、林地、草地以及煤炭采集及堆积区域,其中,林地占据面积最大,且类型多样,包括阔叶林地、针叶林地以及灌木林地,但影像图不易分辨。本研究拟将容易发生土壤侵蚀的土地利用类型作为水库沉积泥沙来源地,通过观察,可能会发生土壤侵蚀的土地利用类型有地表覆盖度较低的林地、草地、耕地和煤炭开采及堆积区域,故将泥沙源头分为林地、草地、耕地及采矿用地 4 种。其中,采矿用地主要分布于该流域中游地区,虽占据面积较小,但由于人为扰动大、地表常年裸露于表面,故我们猜测易发生泥沙输移。

2018 年 6 月进行样品采集。潜在泥沙源地样品采集时,考虑采样点在流域的位置、采样点的坡度、坡向、植被覆盖度及距河流远近等条件选取采样地,且为避免产生随机误差,对每个样地采用五点混合采样法^[6],即每点采集表层 0—2 cm 土样(去除表面的枯枝落叶层)^[13],同一样地的 5 个土样混合均匀,取 1 kg 置于自封袋中。泥沙源地采样共计 52 个样品,其中草地 18 个,林地 17 个,耕地 14 个,采矿用地 3 个(见图 1)分别标号,带回实验室。

沉积泥沙样品采集选择在双河水库入库口、水库中和水库尾分别进行,采用随机五点混合采样法^[6]采集 0—5 cm 表层沉积泥沙^[13],在每个采样地随机采 5 个沉积泥沙样并搅拌均匀,取 1 kg 置于自封袋中,分别标记为水库前、水库中和水库尾,带回实验室。

1.2.2 项目测定

(1) 样品处理。对 52 个潜在泥沙源地样品进行风干磨细,并拣除样品中的石块、枯落物及根系,过 2mm 筛。对 3 个水库沉积泥沙样品进行冷冻干燥备试,将各泥沙样品均匀混合平均分成 3 份,即作为各泥沙样点位置平行样。待需测定样品时,将所有样品处理磨细完全过 100 目筛。

(2) 样品分析。将处理好的样品进行指纹因子测定,测定因子共计 27 个。主要包括:总有机碳

(TOC),总氮(TN),总磷(TP),Ba,Cd,Cr,Cu,Mn,Pb,S,V,Zn,Al,Ca,Fe,K,Na,Sn,Ti,Be,Co,Mg,Mo,Ni,Sr,Tl,U 等。其中,TOC 经 1 mol/L 盐酸浸泡去除无机碳并烘干称后取 3~5 mg 样品用总有机碳分析仪(vario TOC,德国)测量。TN 和 TP 经过消煮,利用连续流动分析仪(SEAL Analytical AA3,德国)进行测量。Ba,Cd,Cr,Cu,Mn,Pb,S,V,Zn,Al,Ca,Fe,K,Na,Sn,Ti,Be,Co,Mg,Mo,Ni,Sr,Tl,U 等运用 HCl-HNO₃-HF 酸式消解法经微波消解仪(Multiwave PRO,奥地利)消解,并用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICPE-9820,日本)测定。

1.2.3 示踪方法

(1) 初选指纹因子。为保持泥沙指纹因子在输移过程中保持稳定状态,满足各土地利用类型之间的差异性,初选指纹因子筛选过程需要进行守恒性检验及 Kruskal-Wallis *H* 检验,即需 3 步^[13];范围限制原则:沉积泥沙指纹因子浓度不得超过泥沙源头指纹因子浓度范围^[14]。均值限制原则:即要求沉积泥沙指纹因子的均值需在泥沙源头的范围之内,且沉积泥沙指纹因子的变异程度(CV)需小于泥沙源头的变异程度^[15-17]。Kruskal-Wallis *H* 检验:通过非参数检验对一定数量样本的总体分布特征进行判断,当因子 $p < 0.05$ 时才被认为该因子具有显著性差异,指纹因子被接受^[18-19]。

(2) 最佳指纹因子组合。运用 SPSS 多元判别分析确定最佳指纹因子组合。将经过 Kruskal-Wallis *H* 检验得到的具有显著性差异($p < 0.05$)的因子进行多元逐步判别分析,筛选出一组最具有统计意义的指纹因子组合。该分析中最常用方法是 Wilks' Lambda 算法,即当 Wilks' Lambda 值最小时得到的指纹因子组合,则为筛选出的最佳指纹因子组合^[20],同时要求多元判别分析的正确判别率需达到 70%则为判别效果较好^[6]。

(3) 多元线性混合模型定量求解泥沙来源贡献比例。本次研究采样 Walling 混合模型^[21]求解泥沙来源,将最终得到的最佳指纹因子组合,利用最小二乘法原理,求得多项式混合模型的最小值,拟将其结果作为混合模型最优解,即为各泥沙来源贡献值。多元线性混合模型如下:

$$R_{\infty} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{jji} - \sum_{i=1}^m (c_{ji} P_j)}{C_{jji}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: R_{∞} 为残差平方和; C_{jji} 为沉积泥沙中指纹因子 i 的浓度; P_j 为泥沙源地 j 的泥沙贡献百分比; C_{ji} 为泥沙源地 j 中指纹因子 i 的平均浓度; m 为泥沙源地数量; n 为指纹因子的数量。在运用函数式时,必须满

足两个前提条件“泥沙源地贡献百分比总和为 1;泥沙源地贡献百分比不能小于零”,即:

$$\sum_{i=1}^m P_j=1 \quad (0\leqslant P_j\leqslant 1) \tag{2}$$

同时,为了克服 Excel 规划求解程序在最小化混合模型误差的情况下难以确定最优泥沙贡献的情况,还需采用拟合优度(GOF)分析方法检验混合模型对样品观测值的拟合程度^[14],如公式(3)所示:

$$GOF=1-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^m\frac{|c_i-(\sum_{j=1}^m P_jc_{ji})|}{c_i} \tag{3}$$

当拟合优度>0.8 时,说明多元混合模型计算结果具有合理性^[22]。

1.2.4 数据处理 本文运用 ArcGIS 进行流域水文信息及土地利用类型信息提取分析,运用 SPSS 19.0 统计软件进行数据统计分析,运用 Excel 2010 规划求解进行泥沙贡献比例计算,并运用 SigmaPlot 10.0 和 Excel 2010 进行泥沙来源贡献比例绘图。

2 结果与分析

2.1 最佳指纹因子组合筛选

2.1.1 指纹因子筛选 对 27 个指纹因子进行守恒性检验(均值限值条件、范围限制条件)和 Kruskal-Wallis H 检验,筛选出差异性显著的因子。经初选指纹因子 3 个步骤得到结果如表 1 所示。

表 1 双河水库沉积泥沙及水库泥沙源头指纹因子筛选过程

潜在指纹因子	均值限制条件 <i>a</i>	范围限制条件 <i>b</i>	<i>H</i> 值	<i>p</i> 值	潜在指纹因子	均值限制条件 <i>a</i>	范围限制条件 <i>b</i>	<i>H</i> 值	<i>p</i> 值
TN	<i>p</i>	<i>p</i>	11.29	0.010*	Sr	<i>p</i>	<i>p</i>	14.704	0.002*
TP	<i>p</i>	<i>p</i>	16.178	0.001*	Na	<i>p</i>	<i>p</i>	23.478	0.000*
Ba	<i>p</i>	<i>p</i>	12.995	0.005*	Sn	<i>p</i>	<i>p</i>	13.009	0.005*
Cd	<i>p</i>	<i>p</i>	7.95	0.047*	Ni	<i>p</i>	<i>p</i>	3.211	0.360
Cr	<i>p</i>	<i>p</i>	8.547	0.036*	Be	<i>p</i>	<i>p</i>	10.261	0.016*
Cu	<i>p</i>	<i>p</i>	8.047	0.045*	Co	<i>p</i>	<i>p</i>	4.52	0.211
Mn	<i>p</i>	<i>p</i>	7.441	0.059	Mg	<i>p</i>	<i>p</i>	32.923	0.000*
Pb	<i>p</i>	<i>p</i>	21.704	0.000*	Mo	<i>p</i>	<i>p</i>	3.042	0.385
S	<i>p</i>	<i>p</i>	17.65	0.001*	Tl	<i>p</i>	—	—	—
Al	<i>p</i>	<i>p</i>	4.93	0.177	TOC	<i>p</i>	—	—	—
Ca	<i>p</i>	<i>p</i>	25.3	0.000*	Zn	—	<i>p</i>	—	—
U	<i>p</i>	<i>p</i>	24.153	0.000*	Ti	—	<i>p</i>	—	—
Fe	<i>p</i>	<i>p</i>	4.008	0.261	V	—	<i>p</i>	—	—
K	<i>p</i>	<i>p</i>	16.221	0.001*	—	—	—	—	—

注:“*”表示在 0.05 水平上显著;*a* 表示沉积泥沙中指纹因子的平均浓度在源头泥沙指纹因子浓度范围内;*b* 表示沉积泥沙中指纹因子的上下限在源头泥沙指纹因子浓度范围内;*p* 表示分别满足均值限制条件和范围限制条件;“—”为未检验。

结果表明,差异显著的因子占大多数。在 27 个指纹因子中,首先因守恒性检验剔除的异常因子有 TOC,V,Zn,Ti,Tl 5 个指纹因子。剩余的 22 个指纹因子,大部分指纹因子呈现了显著差异性,除 Al,Fe,Co,Mo,Mn 和 Ni 6 个指纹因子外,其余 16 个指纹因子全部通过 Kruskal-Wallis H 检验(*p*<0.05),将其作为初步筛选出的指纹因子,可进入多元逐步判别分析。

2.1.2 源头泥沙判别 经多元逐步判别分析,共计 8 种因子(S, Ca, Sr, TP, Cr, Ba K, Mg)确立为最佳指纹因子,形成最佳指纹因子组合,并且 Wilks’ lambda 值由 0.097 变为 0.008,判别能力达到了 89.60%(见表 2),判别效果较好。

表 2 最佳指纹因子及辨别正确率

步数	指纹因子	单因子判别率/%	Wilks’Lambda 值	累计判别率/%
1	S	56.70	0.097	56.70
2	Ca	61.20	0.045	62.70
3	Sr	46.30	0.028	73.10
4	TP	62.70	0.02	71.60
5	Cr	44.80	0.015	79.10
6	Ba	52.20	0.012	85.10
7	K	47.80	0.01	89.60
8	Mg	59.70	0.008	89.60

其中,单个源头泥沙判别中采矿用地因地类特殊,与其他土地利用类型指纹因子含量差异巨大,故判别正确率达 100%。林地、草地和耕地正确辨别率

为 95.80%，95.70%和 70%。依据组质心第一和第二函数得到的多元判别分析归类结果(见图 2)，以原点(0,0)为起始点，分别向 4 个土地利用类型组质心处做向量，向量之间夹角越小，则表明两者之间相关性越高^[23]。可以看出，采矿用地、草地和林地之间夹角较大，相关性较弱，但耕地与林地和草地之间夹角较小，且部分样点出现判别错误与其他土地利用类型交错分布的现象。其主要原因在于自 2000 年云南省开始实施退耕还林还草政策，坡度大于 25°的农耕地必须全部实施退耕^[24]，且在采集草地时已经发现，少量草地是耕地长期未种植作物而荒废形成的撂荒地，故少部分样地的指纹因子含量界限模糊，进而导致耕地、林地和草地发生了误判。

2.1.3 土地利用类型与最佳指纹因子对应分析 将泥沙源地与最佳指纹因子组合进行对应分析^[25]。通过原点(0,0)向任一土地利用类型作向量及该向量的反向延长线。过最佳指纹因子点作该向量的垂直向量，比较各指纹因子垂点，越接近向量正方向的因子即与该土地利用类型相关性越强(见图 3)。通过该分

析可得知，与草地相关性最强的因子是 Sr 和 Mg；与林地相关性最强的是 Ca；与耕地相关性最强的因子最多，有 Sr,Mg,Ca,Ba 和 K；而采矿用地与其他土地利用类型差异较大，且指纹因子相关性较其他土地利用类型都较弱，但相对来说，S 的相关性最强，其次是 TP，这与煤炭中 S 和 P 是在煤炭中的含量较多有关^[26]。

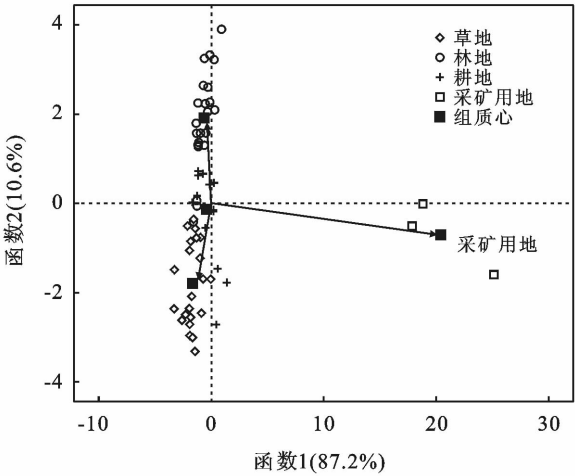


图 2 4 种土地利用类型多元判别分析归类图

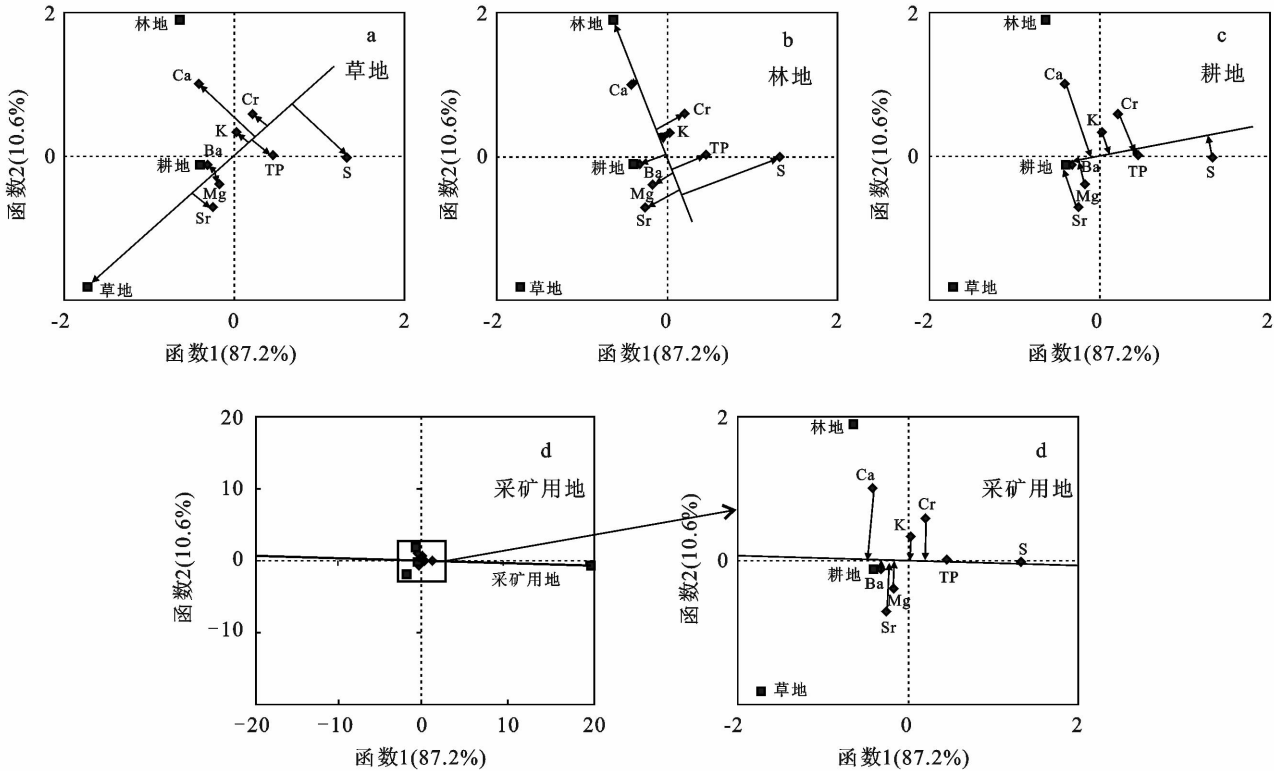


图 3 土地利用类型与最佳指纹因子对应分析

2.2 泥沙源地分析

2.2.1 总体泥沙来源贡献比 以各土地利用类型的泥沙贡献比为自变量，分别以水库前、水库中和水库尾的最佳指纹因子的浓度为约束条件，利用多元线性

混合模型求解水库沉积泥沙的来源贡献比，此时水库前、水库中和水库尾的拟合优度分别为 0.831 ± 0.001 ， 0.809 ± 0.003 和 0.806 ± 0.003 ，均大于 0.8，结果具备合理性。

模型求解结果显示,水库 3 个不同位置的沉积泥沙来源贡献百分比不同(见图 4)。水库前部:草地对沉积泥沙的泥沙贡献百分比均值达到 50.43%,耕地次之,贡献百分比均值为 28.92%,最小为采矿用地,贡献百分比均值仅有 0.53%。水库中部:泥沙贡献百分比均值草地和林地相当,均为 36%左右,而耕地稍低,仅为 27.35%,采矿用地最低,泥沙贡献百分比均值为 0.16%。水库尾部:泥沙贡献百分比大小发生变化,贡献百分比均值最大的为耕地(54.81%),超过泥沙贡献百分比半数,而草地和林地分别为 27.92%和 17.24%,均较前两个位置点减少;同时,水库尾采矿用地泥沙贡献率仅为 0.03%,趋近于零。因此,从整体看来,随着泥沙在水库沉积时间先后,耕地贡献百分比逐渐变大,而草地逐渐变小,采矿用地更是逐渐趋近于零。针对这个现象,分析其原因可能是泥沙分选导致^[24],该区域草地和采矿用地土壤粒径普遍偏大,故更容易在入库口堆积,而耕地粒径较小,容易被水流携带到水库尾部进行沉积。此外,通过水库前、中、尾 3 点进行平均值计算可得,总体上泥沙贡献百分比最大的是草地和耕地,分别为 37.28%和 34.62%,林地稍低为 27.86%,采矿用地仅为 0.24%。

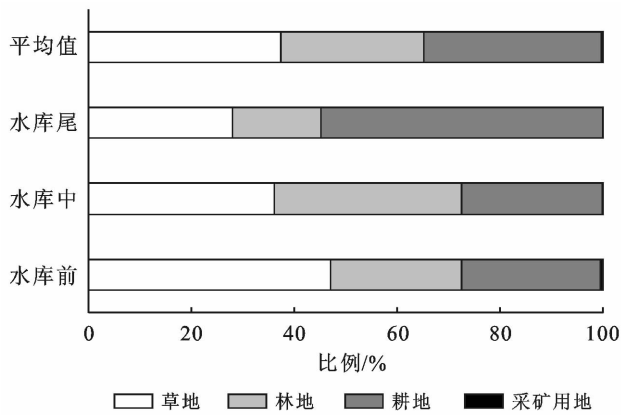


图 4 泥沙来源贡献比例

2.2.2 单位面积泥沙来源贡献比 不同土地利用类型对水库沉积泥沙的贡献还可通过单位面积泥沙来源贡献比来分析,单位面积泥沙贡献比通过泥沙来源贡献百分比和土地利用类型面积的比值得到(见图 5)。由图 5 可知,水库前、中、后 3 个位置及三者取平均值后的单位面积泥沙贡献比为:耕地(9.55%)>草地(3.87%)>采矿用地(1.24%)>林地(0.38%),不同土地利用类型的单位面积泥沙贡献百分比值差异较大。

综合泥沙源地分析的结果可以看出:①耕地虽然不是水库最大的沉积泥沙来源,但其单位面积泥沙贡

献百分比最大,因为耕地土壤受人为干扰相对较强,且主要分布在河道两侧,导致雨水带动大量土壤发生坡面侵蚀,较其他土地利用类型而言极易发生水土流失,该结果与前人的研究相符^[6,13];②草地作为本区域最大的泥沙来源区,单位面积泥沙贡献率也居于第二,与郭进^[6]、陈方鑫等^[24]研究结果草地泥沙贡献率较低差异较大,其主要原因是前人研究区域草地的覆盖度相对较高,故起到了抑制水土流失的效果,但本区域草地地表植被覆盖度低,研究区内大部分草地植被覆盖度 $\leq 50\%$,故草地在单位面积上也发生较大的土壤侵蚀。加之草地在研究区内占地面积较大,故草地对水库泥沙的贡献率也较大;③采矿用地主要集中在中游区域,并且堆积于主河道附近,由于人类干扰导致土壤极不稳定,虽其总体泥沙贡献比较低,但因为采矿用地面积占比较小,故其沉积泥沙单位面积贡献比较大,是林地的 3 倍,与周曼等^[23]研究结果类似,这与采矿区大量松散堆积物导致地表严重压实和非均匀沉降,表层径流增加了入河泥沙量有关^[26]。但由于煤炭颗粒较大,且其流经的主干河道较缓,故泥沙容易在入库前及河道中进行沉积,导致采矿用地相比农地和草地在水库中的单位面积泥沙贡献率相对较低,与常维娜等^[13]研究结果相似;④林地作为该地区的主要土地利用类型,总体的泥沙贡献比较大。杨明义等^[5]研究结果表明,人工坡地果园林下植被少会导致土壤侵蚀严重。本研究区林地以天然林为主,占地面积大,但少部分林地地表覆盖度低,且流域内山高坡陡,地表物质松散不稳定,时而大量降水导致坡面崩塌,造成水土流失,因此导致了总体泥沙贡献比较大^[23]。但林地单位面积上的泥沙贡献率最小,证实大部分林地的土壤稳定性强,因为林木根系在土壤中既有粗壮的垂直根发挥锚固作用,也有细小根系铺于土体中形成网络包裹土壤结构,根土复合体结构使林地土壤更加稳定,从而固持水土,防止土壤侵蚀^[27]。

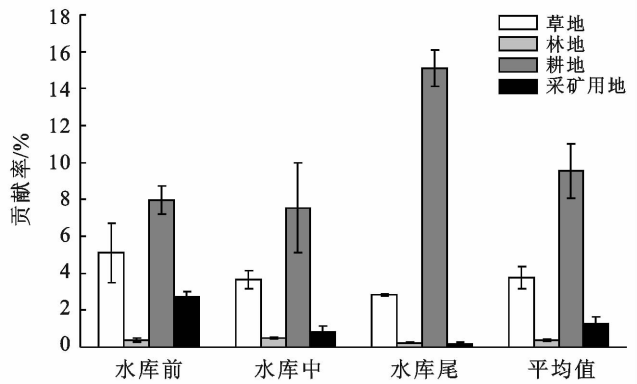


图 5 单位面积泥沙来源贡献率

3 结论

本文在滇西北剑川双河水库流域,开展复合指纹法定量示踪水库沉积泥沙来源。对流域泥沙来源进行定性划分为草地、林地、耕地和采矿用地,并且定量揭示了各泥沙来源对双河水库流域沉积泥沙来源的贡献率。筛选出了 8 个指纹因子(S, Ca, Sr, TP, Cr, Ba, K, Mg)组成最佳指纹因子组合,正确判别率达到 89.60%,具有较好的正确判别率。同时,该结果拟合优度大于 0.8,表明混合模型结果计算可靠,复合指纹法适合该类型流域研究。

通过多元线性混合模型分析得出,总体上,在水库前和水库中,泥沙总贡献率最大为草地,其次为耕地和林地,采矿用地最小。但水库尾,泥沙贡献率变为耕地最多,其次是草地和林地,最后是采矿用地。故总体上采矿用地泥沙贡献百分比最小,而草地和耕地泥沙贡献百分比均较大,林地次之。单位面积泥沙贡献百分比大小为:耕地>草地>采矿用地>林地。说明单位面积上耕地发生土壤侵蚀最为严重,而草地次之,林地最弱。采矿用地虽完全裸露于表层,但由于采矿用地粒径较大,地表径流或者河道不易将泥沙带走,故单位面积泥沙贡献率相对同是裸露地表的耕地来说较小。在水库前、水库中和水库尾,各泥沙土地利用类型的泥沙贡献随沉积时间的增加呈现不同变化趋势,草地和采矿用地的泥沙贡献率逐渐减少,其主要原因在于泥沙分选过程,草地和采矿用地由于粒径值较大,故在更靠近水库入口的位置沉积,而耕地相对粒径较小,故较容易在水库尾沉积。

总体看来,虽然耕地的泥沙贡献没有草地大,但就单位面积泥沙贡献比看,耕地的土壤侵蚀程度比其他土地利用类型严重得多,其主要原因在于耕地主要集中在河道左右,易受雨水侵蚀及河水冲蚀带走泥沙,故需要加强退耕还林力度,综合水土保持植物和工程措施,减轻耕地带来的土壤侵蚀。此外,草地和林地的单位面积泥沙贡献率虽与耕地相比较小,但由于面积较大,累积泥沙量偏大。故应该进一步增加地表覆盖度,减轻地表溅蚀,增加径流下渗,更好地发挥水土保持作用。

[参 考 文 献]

- [1] 南秋菊,华珞.国内外土壤侵蚀研究进展[J].首都师范大学学报(自然科学版),2003,24(2):86-95.
- [2] 高祥涛,李士进,陶剑.基于相关反馈的土壤侵蚀遥感图像检索技术研究[J].中国农业资源与区划,2009,30(3):56-60.
- [3] 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.

- [4] 刘志强,王烈恩,李翠翠,等.库区泥沙来源研究进展[J].浙江水利科技,2016,44(4):1-4.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Walling D E, Collins A L, Stroud R W. Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments[J]. Journal of Hydrology, 2008, 350(3/4): 274-289.
- [9] 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.
- [10] Carter J, Owens P, Walling D, et al. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system[J]. The Science of the Total Environment, 2003, 314/315/316:513-534.
- [11] 万晔,司徒群,李子海.滇西北地理环境特征与区域水土流失相互作用机制研究[J].水土保持通报,2003,23(5):1-5,57.
- [12] 喻庆国,李昊民,董跃宇,等.1957—2012年滇西北剑湖景观演变特征及驱动因子研究[J].西部林业科学,2014,43(2):1-12.
- [13] 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.
- [14] Zhang Jiaqiong, Yang Mingyi, Zhang Fengbao, et al. Fingerprinting sediment sources in the water-wind erosion crisscross region on the Chinese Loess Plateau[J]. Geoderma, 2019,337:649-663.
- [15] 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,2017:37-46.
- [16] 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.
- [17] 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,2013,125:24-42.

(下转第 156 页)

- [23] 张文彤, 董伟. SPSS 统计分析高级教程[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [24] Rudel T K, Coomes O T, Moran E, et al. Forest transitions: Towards a global understanding of land use change[J]. *Global Environmental Change*, 2005, 15(1):23-31.
- [25] Rey Benayas J. Abandonment of agricultural land: An overview of drivers and consequences [J]. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 2007, 57(2):1-12.
- [26] Strijker D. Marginal lands in Europe: Causes of decline [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2005, 6(2):99-106.
- [27] 李升发, 李秀彬. 耕地撂荒研究进展与展望[J]. *地理学报*, 2016, 71(3):370-389.
- [28] 张永涛, 王洪刚, 李增印, 等. 坡改梯的水土保持效益研究[J]. *水土保持研究*, 2001, 8(3):9-11, 21.
- [29] 黄河河, 刘黎, 吴长辉, 等. 贵州黄壤地区坡改梯水土保持效果研究: 以贵州松桃牛郎监测点为例[J]. *中国水土保持*, 2014(8):55-57.
- [30] 杨敏, 陈国建, 韦杰, 等. 坡改梯地区不同土地利用方式对土壤养分的影响: 以重庆市巫山县为例[J]. *重庆师*
- 范大学学报(自然科学版), 2012, 29(6):43-46.
- [31] 代光银, 王珊, 雷明容, 等. 川南丘陵地区坡改梯项目建设存在问题及建议[J]. *内江师范学院学报*, 2016, 31(2):26-29.
- [32] 陈新军, 刘青松, 王明利, 等. 沂蒙山区土坎梯田田坎防护补偿评价体系研究[J]. *中国水土保持*, 2013(1):19-21.
- [33] 李建华, 张建生, 李成学, 等. 西南山丘区土地整治中典型梯田样区的田坎响应研究[J]. *云南农业大学学报: 自然科学*, 2015, 30(6):924-931.
- [34] 杨文赞, 张可荣, 李萍, 等. 防治大型野生动物危害技术研究[J]. *林业实用技术*, 2007(5):28-30.
- [35] Zhang Ying, Li Xiubin, Song Wei. Determinants of cropland abandonment at the parcel, household and village levels in mountain areas of China: A multi-level analysis[J]. *Land Use Policy*, 2014, 41:186-192.
- [36] 张慧. 甘肃黄土高原区梯田建设成效及存在问题分析[J]. *甘肃科技*, 2015, 31(4):7-9.
- [37] 新华网. 习近平: 决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利: 在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告[EB/OL], (2017-10-27) [2019-08-21].

(上接第 148 页)

- [18] Poleto C, Merten G H, Minella J P. The identification of sediment sources in a small urban watershed in southern Brazil: An application of sediment fingerprinting [J]. *Environmental Technology*, 2009, 30(11):1145-1153.
- [19] 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.
- [20] Franz C, Makeschin F, Wei B H, et al. Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasília DF, Brazil: Using the fingerprint approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 466/467:513-523.
- [21] Walling D E, Owens P N, Leeks G J L. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK[J]. *Hydrological Processes*, 1999, 13(7):955-975.
- [22] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique [J]. *Catena*, 1997, 29(1):1-27.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Chen Fangxin, Zhang Fengbao, Fang Nufang, et al. Sediment source analysis using the fingerprinting method in a small catchment of the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(5):1655-1669.
- [26] 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.
- [27] 杨苑君. 华北典型乔木根系抗拉及土壤抗剪性能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016:2-26.