

牛百成,刘峰贵,周强,等.水库泥沙来源定量判别方法的判别能力对比[J].中国沙漠,2022,42(2):36-43.

水库泥沙来源定量判别方法的 判别能力对比

牛百成^{1,2},刘峰贵²,周强^{1,2},陈琼^{1,2},柳本立³

(1.青海师范大学 地理科学学院,青海 西宁 810008; 2.高原科学与可持续发展研究院,青海 西宁 810008; 3.中国科学院西北生态环境资源研究院 敦煌戈壁沙漠研究站,甘肃 兰州 730000)

摘要: 水库淤积问题是干旱、半干旱沙区水库面临的主要环境问题之一。物源定量判别法是识别水库泥沙来源的新兴手段,而筛选某一区域泥沙来源的最优判别方法是精准识别物源区的重要前提。选取党河水库作为研究对象,基于野外调查、室内分析、模型模拟等手段,对比分析了多组复合指纹法、最优复合指纹法和距离法在党河水库泥沙来源判别过程中的适用性。结果表明:在该研究区多组复合指纹法和最优复合指纹法判别结果较为理想,且判别结果接近,而距离法表现不理想,有待进一步检验。增加复合指纹因子组合数(19组)能使95%的置信区间变窄,理论上具有统计意义。从统计学角度分析,多组复合指纹法表现更好一些,将在一定程度上提高定量判别结果精度。

关键词: 指纹法; 水库淤积; 物源判别; 党河水库

文章编号: 1000-694X(2022)02-036-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00110

中图分类号: P333.4

文献标志码: A

0 引言

水库作为调配水资源时空分布的重要手段,承担着拦蓄径流,维持下游工农业生产、生活和生态用水的重要功能。在极端干旱区的绿洲,水源主要依赖于区域的水利设施,水库的重要性更大。受年内不同时期的风沙、水沙物质的共同作用,干旱区河流虽然径流量相对较小,但一般含沙率更高,输沙量更大,使该区域的水库迅速淤积^[1-3],造成水库库容损失及其他方面功能效益下降等。该现象已成为中国西北干旱区水库普遍面临的突出问题,并引起一系列生态环境和社会的负面效应^[2]。

泥沙从侵蚀到搬运,再到沉积的整个过程非常复杂^[4],难以精确获得沉积区泥沙来源的相关信息。近年来,“指纹”识别技术(简称指纹法)成为研究泥沙来源的主流方法之一^[5]。该方法基于流域侵蚀产沙过程划分物源区,根据指纹因子的分布特征选取不同物源之间具有判别能力的指纹因子,建立沉积区与不同物源区之间的关系模型,并定量判别不同

物源区对沉积区泥沙的相对贡献率^[6]。该方法比传统研究泥沙来源的方法更方便、简单、直接,应用更广泛^[7-10]。

随着测试技术和分析手段的快速发展,指纹法给泥沙来源研究带来了新的突破。早期以单指纹因子法为主,常用核素^[11-12]、磁性矿物^[13]、泥沙物理性质^[14]、稀土元素^[15]、稳定同位素^[16]等作为指纹因子,结合相关泥沙来源定量判别的模型,成为研究水土流失和获取泥沙来源信息的重要方法^[17]。随着物源区数量的增多,以及受地貌、土壤、土地利用管理措施或人类活动等因素的影响,单指纹因子在区分各泥沙源区的能力受到限制^[6,18],进而提出复合指纹法,即多个单指纹因子的组合代替单指纹因子,具有更佳的泥沙源区辨别能力^[19]。其中,较为经典的是Collins等^[6]和Walling等^[20]提出的多元混合模型,简称最优复合指纹法。近些年,随着对指纹法研究深入,较多研究泥沙来源的模型相继出现,如线性混合模型(简称多组复合指纹法)^[21]和DFA模型(简称距离法, DFA, Discriminant Function

收稿日期:2021-06-28; 改回日期:2021-08-30

资助项目:中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(Y202085);国家自然科学基金项目(42107372)

作者简介:牛百成(1987—),男,甘肃会宁人,博士研究生,主要从事水土保持、物源定量判别研究。E-mail: niubch@foxmail.com

通信作者:周强(E-mail: zhouqiang729@163.com)

Analysis)^[22]。

目前关于水库或河道泥沙来源的研究主要针对水力侵蚀或降雨侵蚀,而干旱地区易受风沙、水沙共同作用影响的水库淤积问题是相关研究的空白和薄弱环节,尤其是鲜有对干旱荒漠区中小流域河流、水库多泥沙来源的判别和定量测算工作,不利于开展针对性的水土保持和风沙工程等控制措施。如果要解决好干旱区水库淤积问题,就需先精确获取水库淤积物来源信息,即采用指纹法定量判别泥沙来源。然而,即使使用相同的数据或指纹因子,在不同模型中也会得到不同的结果^[21,23],表示不同模型在定量判别泥沙来源的过程和原理上存在差异。准确获取水库淤积物来源信息,直接决定着流域防治水土流失措施布设的有效性。为此,首先要确定出最适合于该区域研究泥沙来源的方法是解决干旱区水库淤积的关键所在。

鉴于此,以河西走廊西端的党河水库流域为研究区域,对比分析多组复合指纹法、最优复合指纹法和距离法在该区域的泥沙来源定量获取泥沙来源的判别能力,并做以评价,不仅能完善指纹法的研究内容,而且对指导生产有十分重要的实践意义,还可为将来研究泥沙来源有关模型的选取提供建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

党河流域位于河西走廊的西端,发源于祁连山西段,流经甘肃省肃北蒙古族自治县和敦煌市两地,经过鸣沙山高大沙丘区的南端,也穿过大片沙漠戈壁区,曾是疏勒河的一级支流,是以冰川融水为主要补给来源的内陆型河流。党河水库位于敦煌市的西南,距敦煌市约35 km,党河水库控制流域面积约为16 970 km²(图1)。党河水库以上主要呈现两种地形,即党河上游的祁连山区、中游以沙漠戈壁为主的冲积扇和浅山区。从地貌类型来看,主要分为上游山区、戈壁和沙丘。受地形的影响,党河流域的降水量空间分布不均匀,主要降雨发生在山区;降水量在季节分配上也不均匀,一般集中在5—9月,多年降雨量86—250 mm;戈壁和沙丘降雨较少,多年降雨量维持在40 mm左右。该地区四季多风,在以沙漠戈壁为主的冲积扇区年平均风速2—3 m·s⁻¹,起沙风风向以东北风和西北风为主。

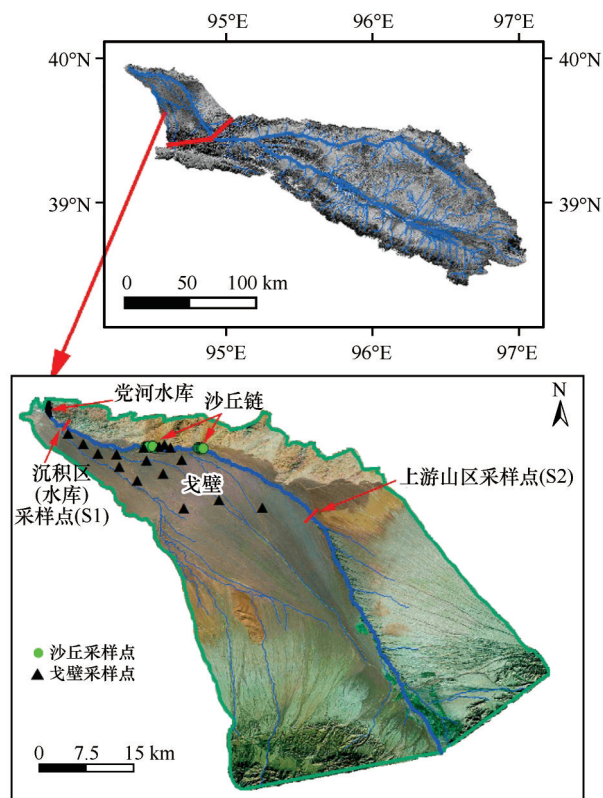


图1 研究区概况和采样点

Fig.1 Location of the study area, and sampling sites

1.2 流域采样

根据实地调查,结合地貌单元分类,确定沙丘、戈壁和上游山区,是党河水库主要泥沙来源的潜在物源区。针对每个物源区的分布以及采样的可行性确定采样方案。采用不锈钢铲在沙丘(25 m³)和戈壁(100 m³)表层约0—5 cm范围内采用多点法收集表层泥沙样品,每个样品大约由5—20个子样合成。最终,共有16个样品来自于戈壁,16个样品来自于沙丘。

对于上游山区来说,由于面积较大,地貌类型复杂且无法直接到达,因此选用一个可以囊括上游山区所有径流的河道断面作为采样点,收集上游山区下来的泥沙。鉴于此,在河道S2点适当的位置放置3个泥沙收集装置,在每次洪水事件过后,收集泥沙装置里的新鲜泥沙,同时在该装置附近,沿河道断面收集新鲜的河床表层泥沙(4 m³)。每个样品由5—10个子样混合而成。党河水库泥沙在S1点收集(距离水库大约2 km),与S2点泥沙收集的方法完全一样。S1和S2点处的泥沙分别收集于2次大洪水事件(2017-07-18和2017-08-02)和2次小洪水事件(2016-09-05和2018-03-20)。最终,在S1和S2点

处各收集了9个泥沙混合样品。

1.3 元素分析

本研究将采用常用泥沙粒径小于0.063 mm部分。经过前处理后,采用粉末压片法进行压样。具体步骤为:称取4 g粒度小于200目的泥沙,105 °C下烘干后放入制样模具,用硼酸镶边垫底,在30 t的压力下压成镶边内径为32 mm的样片放入干燥器中待测。总共分析30个元素(指纹因子),主要包括常量元素、微量元素和氧化物,氧化物的浓度用百分数表示,元素的浓度用 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示。

1.4 判别泥沙来源的方法

多组复合指纹法:由多个复合指纹因子组合组成。基于质量守恒,指纹因子浓度平均值和线性混合模型被用于定量判别不同物源区对党河水库的泥沙贡献比例^[21]:

$$\sum_{s=1}^m P_s \times S_{s,i} = C_i \quad (1)$$

$$\sum_{s=1}^m P_s = 1 \text{ 并且 } 0 \leq P_s \leq 1 \quad (2)$$

式中: P_s 为某个粒径组中 s 物源区对党河水库的泥沙贡献百分数; $S_{s,i}$ 和 C_i 分别是 s 物源区和党河水库中 i 指纹因子浓度的平均值; m 为物源区的数量。线性混合方程(公式1)适用于每个指纹因子。因此,可为多个指纹因子建立多个线性方程组。该线性混合模型是基于质量守恒原理,采用解析求解法,将元素浓度数据代入线性混合模型(公式1、2)来判别不同物源区的泥沙贡献率。如对于2个潜在物源区,只需要1个指纹因子,以此类推,对于 m 个物源区,需要 $m-1$ 指纹因子。在本节中,由于物源区数量为3个,仅包含2个指纹因子的组合被用于定量判别不同物源区对党河水库的泥沙贡献率。

最优复合指纹法:由多个指纹因子组合成的复合指纹因子组合,其次满足指纹因子数量最小且判别力最大(通过逐步判别式分析得到)。如果指纹因子数量大于 $m-1$ 时(m 为物源区数量),方程往往有多个解,此方程称为超定方程,需要通过优化求解。最常用的优化求解方法是基于最小二乘法原理,将元素浓度数据代入公式(3),通过寻找一组近似解,使得该方程组两边近似相等,且满足绝对相对偏差和(A sum of the Absolute Relative Difference, AARD)最小,这组近似值就是该方程组的最

优解^[24]:

目标方程如下:

$$AARD = \sum_{i=1}^n \left| \left[C_i - \left(\sum_{s=1}^m P_s S_{s,i} \right) \right] / C_i \right| \quad (3)$$

式中: n 为最优复合指纹因子组合中指纹因子的数量。平均绝对拟合(Mean Absolute Fit, MAF)被广泛应用于评估混合模型性能和优化结果的可靠性^[25]。

$$MAF = 1 - \frac{AARD}{n} \quad (4)$$

当MAF的值越接近1,表明模拟或预测的沉积区中某指纹因子的浓度与实测浓度相吻合,则模型表现越好。

距离法:基于逐步判别式分析(DFA),选取数量最小且判别力最大的一组复合指纹因子组合;该方法基于各物源区质心点到沉积区质心点的距离长短,通过公式(5)~(8)来判别各物源区对党河水库的泥沙贡献率^[22]:

$$D_m = \sum_{i=1}^{n_f} \rho_i \left| F_i(\text{source}_m) - F_i(\text{sediment}) \right| \quad (5)$$

$$W_m = \frac{1}{D_m} \quad (6)$$

$$W_i = \sum_{m=1}^m \frac{1}{D_m} \quad (7)$$

$$P_m = \frac{W_m}{W_i} \times 100 \quad (8)$$

式中: D_m 为到潜在物源区 m 到沉积区质心的距离; ρ_i 为函数 i 的正确分类的百分比(%); W_m 为物源区 m 的权重, W 为各权重之和; P_m 为物源区 m 的泥沙贡献率, m 为物源区的数量; n_f 为判别函数的数量; $F_i(\text{source}_m)$ 为基于判别函数 i 的潜在物源区 m 的质心; $F_i(\text{sediment})$ 为基于判别函数 i 沉积区的质心(图2)。

1.5 指纹因子筛选

为了消除非保守示踪剂,首先对所有指纹因子进行了范围检查,当水库沉积物中某个指纹因子浓度高于或低于各源区相对应指纹因子浓度时,认为这个指纹因子是不守恒的,不用于分析^[26]。接下来,使用Kruskal-Wallis H检验对其余指纹因子进行检验,以排除不能区分各物源区的指纹因子^[26]。第三,通过上述两步检验后,为了进一步选出判别力较强的指纹因子,提高定量判别结果精度,须剔除组间差异较大的指纹因子,保留组内差异较小的指

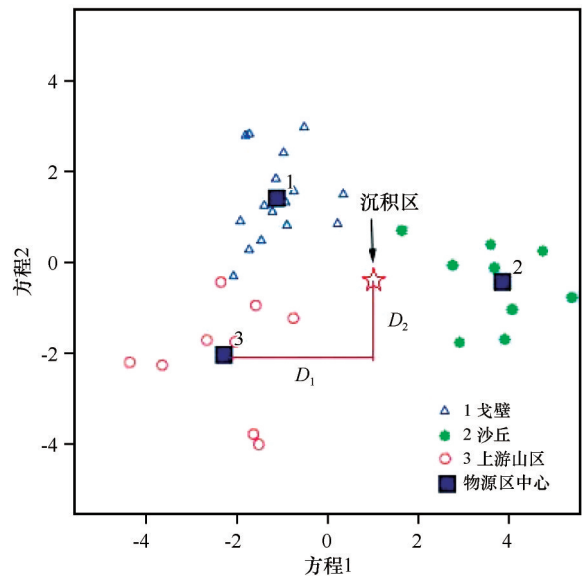


图2 基于判别式分析的距离来推断沉积物来源贡献率(D_1 为上游山区的质心到沉积区质心的绝对距离)

Fig.2 Inferring sediment source contributions using DFA and calculating distances. Here, D_1 is the absolute X-value (Function 1) of the source centroid for cultivated land to the X-value of the sediment centroid

纹因子^[27]。最后,筛选了8个指纹因子(表1)。

2 结果与分析

2.1 基于多组复合指纹法的定量判别结果

利用符合要求的8个指纹因子,共产生19组互相不冲突的复合指纹因子组合(图3)。借助指纹因子浓度的平均值,使用式(1)和(2)定量判别3个物源区对党河水库的泥沙贡献率,其频数分布和19组

的平均泥沙贡献率见图4。求出19组不同物源区对党河水库泥沙贡献率的平均值,作为3个物源区对党河水库各自的泥沙贡献率。党河水库的泥沙主要来自上游山区,约占党河水库泥沙总量的 $40.5\%\pm 3\%$ (平均值 \pm 标准误);其次为戈壁,约占党河水库泥沙总量的 $35.2\%\pm 4\%$;最少的物源区为沙丘,约占党河水库泥沙总量的 $24.3\%\pm 2\%$ 。

2.2 基于最优复合指纹法和距离法的定量判别结果

基于多重筛选出来的8个指纹因子,通过逐步判别式分析,最终选出了包含6个指纹因子的最优复合指纹因子组合,其累计判别力达到97.2%(表2)。对含有6个指纹因子的最优复合指纹因子组合进行蒙特卡洛模拟随机抽样(2 500次)后,产生2 500组复合指纹因子组合,利用目标方程(式3),对其进行优化求解,其中约有20%的结果不符合实际情况(单个物源区对沉积区的泥沙贡献率大于95%),因此被移除。求取剩余复合指纹因子组合的平均值,作为3个物源区对党河水库的泥沙贡献率。结果表明,党河水库的泥沙主要来自于上游山区,约占党河水库泥沙总量的41.3%,其次是戈壁,约占党河水库泥沙总量的38.4%,最少的是沙丘,约占党河水库泥沙总量的20.3%,MAF的值高达0.94,表明该方法适合于该研究区泥沙来源定量研究(图5A)。这个结果与多组复合指纹法定量判别的结果基本一致。

距离法筛选方法与最优复合指纹法一致。因此,也利用这6个指纹因子的各物源区指纹因子的

表1 各物源区和党河水库中指纹因子浓度的平均值、标准差和非参数检验值
Table 1 The fingerprints of average concentration, standard deviation, and the results of the Kruskal-Wallis H test in each sediment sources and Danghe Reservoir

指纹因子	沙丘		戈壁		上游山区		党河水库		H值	P值
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差		
Ti	5 391.6	864.2	5 457.7	743.0	4 215.1	412.0	5 112.7	538.5	14.24	0.001
Mn	657.0	67.6	681.5	50.7	613.2	30.8	638.6	33.7	10.75	0.005
Co	74.4	30.6	39.1	7.1	33.7	4.1	44.2	23.6	23.21	0.000
Cu	18.9	1.2	22.0	2.4	24.3	1.6	22.9	1.0	20.59	0.000
Zn	28.7	6.0	42.8	3.8	46.3	4.6	39.5	8.8	21.79	0.000
Sr	212.4	1.9	239.8	33.1	218.0	7.0	222.1	5.4	18.50	0.000
Nd	34.0	7.0	38.1	8.7	24.4	4.1	35.4	7.2	16.74	0.000
Al ₂ O ₃	8.0	0.5	8.7	0.4	9.5	0.4	8.9	0.5	24.31	0.000

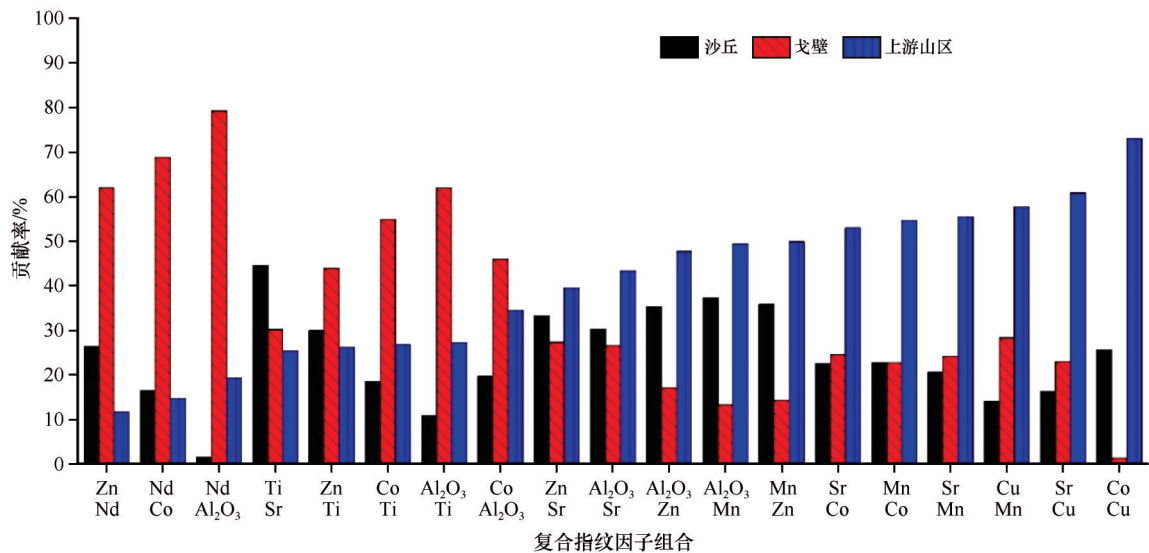


图 3 19 组复合指纹因子组合的泥沙贡献率

Fig.3 The estimated proportions of 19 composite fingerprints

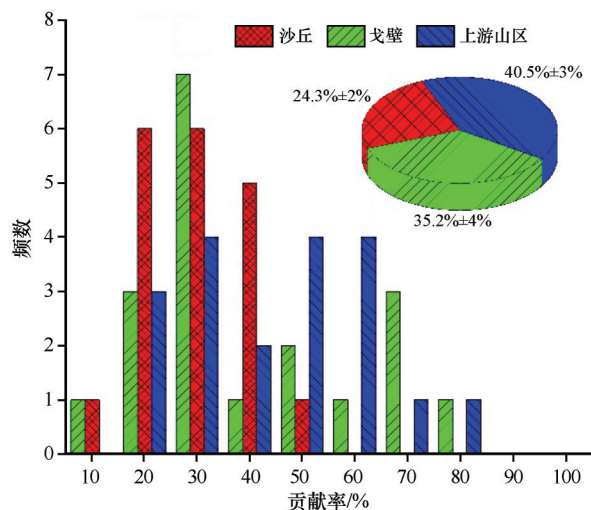


图 4 各物源区对党河水库泥沙贡献率的频数分布图和平均泥沙贡献率

Fig.4 Relative frequency distributions of the contributions of each sediment source and their average proportion

表 2 通过逐步判别式分析为最优复合指纹法选取最佳指纹因子组合

Table 2 Using stepwise discriminant function analysis to select fingerprints for optimum composite fingerprint

步骤	选入的指纹因子变量	Wilks' lambda	累计判别力/%
1	Zn	0.290	66.7
2	Al ₂ O ₃	0.116	86.1
3	Co	0.087	88.9
4	Cu	0.068	94.4
5	Mn	0.052	97.2
6	Ti	0.040	97.2

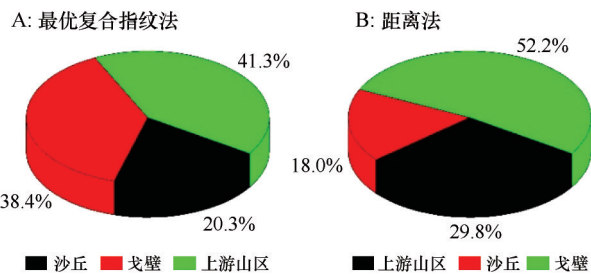


图 5 最优复合指纹法和距离法定量判别不同物源区对党河水库的泥沙贡献率

Fig.5 Quantitative identification the contributions of the three potential sediment sources using composite fingerprints and the distance weighting method

浓度值和党河水库对应指纹因子的浓度平均值,基于方程(5)―(8),定量判别上游山区、沙丘和戈壁对党河水库的泥沙贡献率。结果表明,党河水库的泥沙主要来源于戈壁,约占党河水库泥沙总量的 52.2%;其次是上游山区,约占党河水库泥沙总量的 29.8%;对党河水库泥沙贡献最少的物源区为沙丘,约占党河水库泥沙总量的 18.0%(图 5B)。距离法定量判别上游山区、沙丘和戈壁对党河水库的泥沙贡献率与上述多组复合指纹法和最优复合指纹法模型定量判别的结果出入较大。

3 讨论

多组复合指纹法和最优复合指纹法定量判别的结果变化趋势基本一致,即上游山区对党河水库的泥沙贡献率最大,戈壁泥沙贡献率居中,而沙丘

泥沙贡献率最小。上游区对于党河水库的泥沙贡献率最大的原因,可能由以下两方面因素决定。首先,与戈壁和沙丘相比,上游区的面积是最大的,约是戈壁的10倍,约是沙丘的310倍,这说明上游区有着更多泥沙来源区域,如各类岩石表层的风化物,以及面积较大的山前冲积扇区(表层细物质较多)等;其次,上游区的降水量远大于戈壁和沙丘的降水量(该地区的降水特性为海拔每增高100 m,降水量约增加8—12 mm),更多的降水更容易形成径流事件,特别是暴雨事件后,更容易形成破坏力巨大的山洪,把上游区表层各类风化物搬运到下游河道甚至水库,同时也会对河道产生一定的下切。因此,充足的泥沙源和集中性降水造成的山洪,致使上游区成为党河水库泥沙的主要源区。

然而,距离法的结果显示,戈壁对党河水库的泥沙贡献率最大,上游山区的居中,而沙丘的最小。可能原因是多组复合指纹法和最优复合指纹法,直接利用指纹因子的浓度结合模型值进行定量判别不同物源区对党河水库的泥沙贡献率,而距离法属于“间接”法,是半定量,与Du等^[28]的研

究结论相似。在后期研究中,应给距离法更多的检验和矫正,明确其定量判别过程及不确定性的来源。

在多组复合指纹法19组结果中,各物源区对党河水库的泥沙贡献率变化范围较大(图3)。与最优复合指纹法一样,理论上19组中的任何一组获得的结果都是合理的,都可以单独作为各物源区对党河水库的泥沙贡献率,但从统计学观点来看,这19组值中各物源区对党河水库的泥沙贡献率相对应的95%置信区间的上限和下限较大,统计意义不显著(图6)。因此,19组值中任意选取一组的结果可信度不高;其次,较大的95%置信区间说明可能是各样品之间存在较大的组内差异^[21, 29]。

为解决上述问题,采用平均值法,即增加样本数量法(19组复合指纹因子组合);结果显示,95%置信区间的上限和下限之间变得较窄,如沙丘贡献率19组的95%置信区间为20%—29%,戈壁贡献率19组的95%置信区间为33%—48%,上游山区19组贡献率的95%置信区间为26%—45%,具有统计学意义。从理论角度看,多组复合指纹法可以提高不

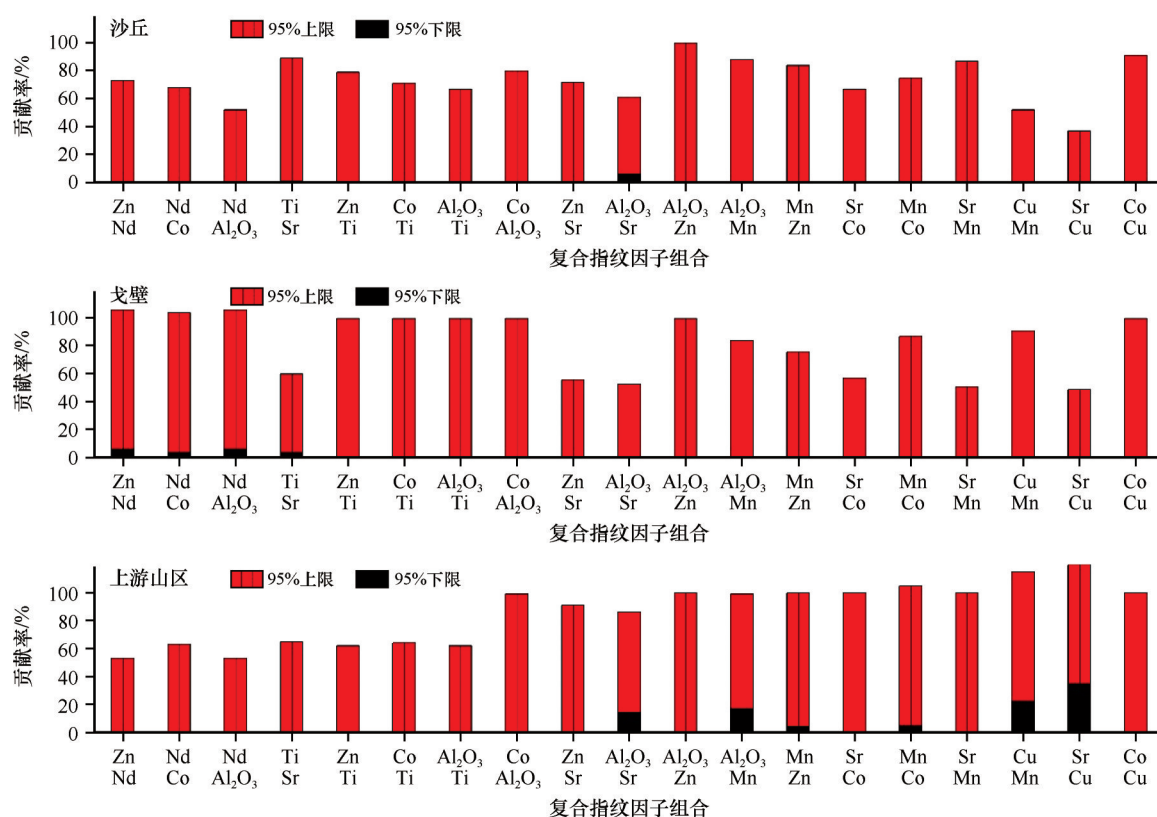


图6 19组沙丘、戈壁和上游山区对党河水库泥沙贡献率的95%置信区间

Fig.6 95% confidence interval of 19 groups of dunes, gobi and upstream mountains to the sediment contribution of danghe reservoir

同物源区对党河水库泥沙贡献率的精度,同时也能降低不同物源区对党河水库泥沙贡献率的误差。

4 结论

在该研究区,多组复合指纹法和最优复合指纹法可获得理想的结果,且较为接近,均可以用在该研究区定量判别泥沙来源,而距离法在该研究区表现不理想,有待进一步检验。虽然多组复合指纹法和最优复合指纹法都适合该区域的风水侵蚀类型的物源定量判别研究,但多组复合指纹法使用了较多的复合指纹因子组合,使得95%的置信区间变得更窄,从统计学角度出发,将能在一定程度上提高定量判别结果的精度。

参考文献:

- [1] 田海涛,张振克,李彦明,等.中国内地水库淤积的差异性分析[J].水利水电科技进展,2006(6):28-33.
- [2] 韩其为,杨小庆.我国水库泥沙淤积研究综述[J].中国水利水电科学研究院学报,2003(3):5-14.
- [3] 王海兵,贾晓鹏.大型水库运行下内蒙古河道泥沙侵蚀淤积过程[J].中国沙漠,2009,29(1):189-192.
- [4] 杨根生,拓万全,戴丰年,等.风沙对黄河内蒙古河段河道泥沙淤积的影响[J].中国沙漠,2003,23(2):54-61.
- [5] Collins A L, Pulley S, Foster I D L, et al. Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: a review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for end-users[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 194, 86-108.
- [6] Collins A L, Walling D E, Leeks G. Use of composite fingerprints to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23, 31-52.
- [7] 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.
- [8] Li Y, Gholami H, Song Y G, et al. Source fingerprinting loess deposits in Central Asia using elemental geochemistry with Bayesian and GLUE models[J]. Catena, 2020, 194, 104808.
- [9] Collins A L, Blackwell M, Boeckx P, et al. Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(12): 4160-4193.
- [10] 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.
- [11] 文安邦,张信宝,张一云,等.云南东川泥石流沟与非泥石流沟~(137)Cs示踪法物源研究[J].泥沙研究,2003(4):52-56.
- [12] 张信宝,李少龙,王成华,等.黄土高原小流域泥沙来源的~(137)Cs法研究[J].科学通报,1989(3):210-213.
- [13] Hatfield R G, Maher B A. Fingerprinting upland sediment sources: particle size-specific magnetic linkages between soils, lake sediments and suspended sediments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34(10): 1359-1373.
- [14] 王晓.用粒度分析法计算砒砂岩区小流域泥沙来源的探讨[J].中国水土保持,2001(1):25-27.
- [15] 肖海,刘刚,许文年,等.利用稀土元素示踪三峡库区小流域模型泥沙来源[J].水土保持学报,2014,28(1):47-52.
- [16] Tian Y Z, Li W H, Shi G L, et al. Relationships between PAHs and PCBs, and quantitative source apportionment of PAHs toxicity in sediments from Fenhe reservoir and watershed[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 248/249: 89-96.
- [17] 徐龙江,杨明义,刘普灵,等.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.
- [18] Zhou H, Chang W, Zhang L. Sediment sources in a small agricultural catchment: a composite fingerprinting approach based on the selection of potential sources[J]. Geomorphology, 2016, 266: 11-19.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Zhang X C, Liu B L. Using multiple composite fingerprints to quantify fine sediment source contributions: a new direction[J]. Geoderma, 2016, 268: 108-118.
- [22] Liu B, Storm D E, Zhang X C, et al. A new method for fingerprinting sediment source contributions using distances from discriminant function analysis[J]. Catena, 2016, 147: 32-39.
- [23] Haddadchi A, Olley J, Laceby P. Accuracy of mixing models in predicting sediment source contributions[J]. Science of the Total Environment, 2014, 497/498: 139-152.
- [24] Laceby J P, Olley J. An examination of geochemical modelling approaches to tracing sediment sources incorporating distribution mixing and elemental correlations[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(6): 1669-1685.
- [25] Motha J A, Wallbrink P J, Hairsine P B, et al. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in south-eastern Australia[J]. Water Resources Research, 2003, 39(3): WR000794.
- [26] 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.
- [27] Pulley S, Foster I, Antunes P. The uncertainties associated with sediment fingerprinting suspended and recently deposited fluvial sediment in the Nene river basin[J]. Geomorphology, 2015, 228: 303-319.
- [28] Du P F, Huang D H, Ning D H, et al. Application of Bayesian model and discriminant function analysis to the estimation of sediment source contributions[J]. International Journal of Sedi-

ment Research, 2019, 34(6): 73–86.

用[J]. 地球科学进展, 2019, 34(10): 1092–1098.

[29] 柳本立, Zhang X J, 牛百成, 等. 多组复合指纹示踪法及其应

Comparative analysis of discriminant ability of quantitative discriminant models for reservoir sediment sources

Niu Baicheng^{1,2}, Liu Fenggui², Zhou Qiang^{1,2}, Chen Qiong^{1,2}, Liu Benli³

(1. College of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810008, China; 3. Dunhuang Gobi Desert Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Reservoir siltation is one of the main environmental problems in arid and semi-arid sandy areas. The sediment source fingerprinting is a new method to identify reservoir sediment sources, and screening an optimal discriminant model for sediment sources in a certain area is an important prerequisite for accurate identification of sediment source. In this study, Danghe Reservoir was selected as the research object. Based on field investigation, indoor analysis, model simulation and other means, the applicability of multiple composite fingerprints, optimal composite fingerprint, and distance weight method in the identification process of sediment source were compared and analyzed. The results showed that both multiple composite fingerprints and optimal composite fingerprint could obtain reasonable contributions and were relatively close, which were suitable for the quantitative identification of sediment sources in this watershed. However, the distance weighting method was not satisfactory and needed to be further tested. Increasing the number of composite fingerprints (19) could narrow the 95% confidence interval, which has statistical significance. From a statistical point of view. Theoretically the multiple composite fingerprints perform better, which will improve the accuracy of quantitative discrimination results to a certain extent.

Key words: fingerprinting method; reservoir sedimentation; provenance identification; Danghe Reservoir