

西南喀斯特小流域地表、地下河流细粒泥沙来源的¹³⁷Cs和磁化率双指纹示踪研究

程倩云^{1 2 3}, 彭韬^{1 3}, 张信宝⁴, 曹乐^{1 2 3}, 王世杰^{1 3}

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站 贵州 普定 562100; 4. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610041)

摘要: 在黔中喀斯特高原农林复合生态系统峰丛谷地小流域, 利用¹³⁷Cs和磁化率双指纹因子对碳酸盐岩表层土壤(坡地和坝地)、深层土壤(沟道和洞穴/裂隙)以及碎屑岩夹层岩屑3类来源开展指纹特征分析, 通过多元混合模型对流域暴雨过程侵蚀悬移质泥沙进行指纹复合示踪, 并计算小流域地表及地下出口输出泥沙的主要来源及相对贡献率。结果表明:¹³⁷Cs和磁化率在碳酸盐岩表层土壤、深层土壤以及碎屑岩夹层岩屑3类来源存在显著差异, 流域内表层土壤、深层土壤和碎屑岩夹层岩屑的¹³⁷Cs和磁化率平均含量分别为3.39 Bq/kg和310.07 × 10⁻⁸ m³/kg、0.50 Bq/kg和180.69 × 10⁻⁸ m³/kg、0 Bq/kg和7.02 × 10⁻⁸ m³/kg。表层土壤、深层土壤和碎屑岩夹层岩屑对流域地表出口泥沙的相对贡献分别为16.2%、4.3%和79.5%, 拟合优度为99.97%; 表层土壤、深层土壤和碎屑岩夹层岩屑对流域地下出口泥沙的相对贡献分别为<0.1%、37.9%和62.1%, 拟合优度为83.80%。喀斯特流域泥沙来源区别于其他碎屑岩流域具有的特点为:(1) 碳酸盐岩风化表层土壤来源少, 对河流泥沙贡献小, 主要贡献于地表河流。(2) 无论流域地表出口还是地下出口, 河流泥沙来源主要为流域中碳酸盐岩所夹的少量(地面物质组成<10%)的碎屑岩夹层岩屑。(3) 深层土壤略有贡献, 地下河流贡献比例高于地表河流。另外,¹³⁷Cs和磁化率可作为双指纹示踪物较好地示踪喀斯特小流域地表、地下河流泥沙来源和确定相对贡献率。

关键词: 泥沙来源; 指纹示踪; ¹³⁷Cs; 磁化率; 西南喀斯特; 小流域; 关键带

中图分类号: P333.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)02-0140-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.02.023

Tracing Fine Sediment Sources in the Surface and Subsurface Rivers of a Karst Watershed Using Compound Fingerprinting with ¹³⁷Cs and Magnetic Susceptibility in Southwest China

CHENG Qianyun^{1 2 3}, PENG Tao^{1 3}, ZHANG Xinbao⁴, CAO Le^{1 2 3}, WANG Shijie^{1 3}

(1. State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding, Guizhou 562100; 4. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Chengdu 610041)

Abstract: In a small watershed with a typical agro-forest complex ecosystem and peak-cluster valley landform of the central Guizhou, ¹³⁷Cs and magnetic susceptibility were used as compound fingerprinting factors to analyze the fingerprint characteristics of carbonate rock surface soil (from hill slopes and depressions), deep soil (from river bank or fissures and grikes), and clastic rock pieces. A multivariate mixing model was used to trace the probable sources of suspended sediment in discharge generated during rainstorm events, and calculate the main source and the relative contribution of the sediment from surface and underground outlets of small watershed. The results showed that the concentration of ¹³⁷Cs and magnetic susceptibility were significantly different in the three types of sources. The average ¹³⁷Cs and magnetic susceptibility values of surface soil, deep soil and clastic rock pieces were 3.39 Bq/kg and 310.07 × 10⁻⁸ m³/kg, 0.50 Bq/kg and 180.69 × 10⁻⁸ m³/kg, 0 Bq/kg and 7.90 × 10⁻⁸ m³/kg, respectively. The relative contributions of surface soil, deep soil and clastic rock pieces to the sediments of the surface outlet were 16.2%,

收稿日期: 2018-09-25

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502602); 国家自然科学基金项目(41571130074, U1612441, 41403112); 国际伙伴计划项目(132852KYSB20170029); 贵州省科技厅项目(黔科合人才平台[2018]5405)

第一作者: 程倩云(1993—), 女, 博士研究生, 主要从事喀斯特土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 2530250449@qq.com

通信作者: 彭韬(1984—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事喀斯特生态环境地球化学研究。E-mail: pengtao@vip.gyig.ac.cn

4.3% and 79.5% , respectively , and the goodness of model fit was 99.97% . The relative contributions of surface soil , deep soil and clastic rock pieces to the sediments of the underground outlet were less than 0.1% , 37.9% and 62.1% , respectively , and the goodness of model fit was 83.80% . The sediment sources in this karst watershed differed from those in typical non-karst terrain , the specific characteristics were: (1) The sediment from carbonate surface soil was few , and carbonate surface soil contributed mainly to the surface water system , while contributed little to river sediment; (2) Clastic rock pieces were the primary source of both surface and underground river sediments; (3) Deep soil contributed slightly , and it contributed more to underground rivers than to surface rivers. In addition , ¹³⁷Cs and magnetic susceptibility could be used as compound fingerprinting tracers to trace the sediment source of the surface and subsurface rivers in this karst area , and also could be applied to determine the relative contribution rate of sediment sources.

Keywords: sediment source; fingerprinting tracing; ¹³⁷Cs; magnetic susceptibility; Southwest Karst; small watershed; the critical zone

西南喀斯特地貌发育造就了地表、地下双重水文地质结构,土壤侵蚀机制特征及其环境效应区别于非喀斯特区域,普遍面临着因土壤侵蚀导致的“石漠化”问题。与碎屑岩区域侵蚀特点不同,在喀斯特地区,降雨并不完全以地表径流形式顺坡而下进入地表河,而是有部分通过岩石中的裂隙和管道,携带着泥沙进入洞穴或地下河系统^[1-2],对流域径流过程和水沙物质运移过程均产生了重要影响^[3-4]。前期研究^[5-7]表明,喀斯特坡面年地表径流系数低,一般 < 5% ,年土壤流失量变化范围仅为 0.01 ~ 69.00 t/km² ,说明在强烈的喀斯特作用下,基岩裂隙管道广泛发育,连通性好、导水率高,坡面入渗强烈,绝大多数的降雨通过表层岩溶带入渗到地下^[8-9]。对不同地貌部位土壤分布、土壤侵蚀和地表径流的调查监测发现,坡面上土壤流失以地下漏失为主^[10]。对喀斯特坡地风化壳的研究^[11]也发现,岩土界面和土体内部存在大量密集擦痕,有土壤蠕滑现象的发生,岩缝裂隙土的地下流失构成了喀斯特地区地表和地下“二元”水文地质结构下独特的水土流失方式。随着降雨强度的逐步增大,水土流失形式由地下漏失为主逐步转变为地表侵蚀与地下漏失相结合^[12-13]。然而,相比黄土高原地区,喀斯特地区土壤侵蚀绝对量虽小,但由于碳酸盐岩成土速率低^[14],土壤允许流失量小,因而土壤侵蚀问题仍存在较大风险,尤其在植被破坏的初期,侵蚀可达每年几千吨^[15],土壤侵蚀问题不容忽视。

河流泥沙来源研究对认识流域水土流失过程机制、明确水土流失靶区、制定水土保持规划和促进生态恢复有重要意义。国内外学者尝试利用复合指纹识别技术对泥沙来源问题进行研究,并取得一系列研究进展,如张信宝等^[16]利用¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 作为复合指纹识别因子研究川中丘陵区武家沟小流域泥沙来源,得到 3 种源地的泥沙来源比例;杨明义等^[17]采用统计分析法筛选出由全 N、低频磁化率、Cu、¹³⁷Cs 和²²⁶

Ra 等构成的复合指纹识别因子,示踪黄土高原次降雨产沙的坡地果园、坡耕地、主沟道和支沟道 4 种物源区的相对贡献;在国外,Walling 等^[18]采用 N、总 P、Sr、Ni、Zn、²²⁶Ra、¹³⁷Cs、Fe、Al、²¹⁰Pb 等作为指纹识别因子研究了河流悬浮泥沙的来源;Collins 等^[19]采用修正的复合指纹研究方法,示踪研究英国最大湿地典型小流域中的 4 种不同土地利用类型源地的相对贡献率。这些研究都显示出复合指纹识别法对分析小流域泥沙来源的优越性。在我国西南喀斯特地区,张信宝等^[20]前期开展的¹³⁷Cs 研究较好地证明该地区存在地下漏失现象,表层土壤与深层土壤之间可以用¹³⁷Cs 做示踪区分,在未受破坏的自然植被纯碳酸盐岩洼地系统,流域地下漏失相对贡献率甚至可达到 80% 以上。蒋忠诚等^[21]运用¹³⁷Cs 示踪技术研究广西岩溶峰丛水土漏失,得到水土流失主要发生在坡面,其中地下漏失量在 75% 以上,地下漏失是喀斯特流域水土流失的重要途径。然而,喀斯特地区地质背景复杂,流域地面物质组成除纯碳酸盐岩外,也存在碳酸盐岩与碎屑岩互层或碳酸盐岩含碎屑岩夹层等岩层组合类型,由于碎屑岩岩层酸不溶物含量高,有的甚至几十倍于碳酸盐岩地层^[14],因此在小流域尺度上,很有可能成为流域河流泥沙的主要来源,而以往的喀斯特地区水土流失研究均未考虑碎屑岩贡献。地质基础一致而面积较小的流域内不同来源的主微量元素之间的差异小,因此需要选择不同来源之间存在显著差异的因子作为示踪剂。

¹³⁷Cs 是 20 世纪 50 ~ 70 年代大气层核试验产生的放射性尘埃,半衰期 30.17 年,主要随降雨沉降到地面,¹³⁷Cs 沉降到地面后,随即被表层土壤强烈吸附,基本不被淋溶和植物摄取,其后的运移主要伴随土壤或泥沙颗粒的运动,被广泛应用于土壤流失量测定、塘库沉积物断代、泥沙来源及其输移的研究^[22-24]。在黄土高原小流域研究^[25]发现,即使流域面积较小,不同地貌部位

^{137}Cs 含量上也会存在明显差异,在喀斯特地区可作为区分地表土壤和深层土壤来源差异的特征示踪指标。

磁化率因不同土壤的磁性随母质、成土特点和风化发育程度不同差异很大,不仅可以作为土壤发生、分类的指标,而且可用于确定河流泥沙来源及土壤侵蚀发生^[24]。我国、前苏联和美国西部各种土壤的磁化率测定结果表明,不同土壤的磁化率在剖面上呈现出有规律的变化,在不同生物气候和土壤水分条件下,土壤中的磁性载体在剖面中发生迁移、转化,形成不同的磁化率剖面。沉积岩风化壳土壤的磁化率表现为母质层到土壤表层磁化率增大^[25],因此土壤磁化率也可作为区分表层土壤、深层土壤以及母岩碎屑来源差异的特征示踪指标。

因此,本研究根据地面物质组成空间分布特征将该地区泥沙来源划分为 3 类:碳酸盐岩表层土壤(坡地和坝地)、深层土壤(沟道和洞穴/裂隙)以及碎屑岩夹层岩屑 3 类来源,使用 ^{137}Cs 和磁化率 2 种复合指纹示踪因子,分析对比不同源地类型和流域总出口暴雨条件下产生的地表径流和地下径流中所携带的泥沙样品的地球化学性质,使用混合模型计算不同来源类型对小流域产沙的相对贡献率,揭示典型喀斯特小流域地表和地下河流泥沙来源。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为陈旗小流域(26°15′36"—26°15′56"N, 105°43′30"—105°44′42"E),位于贵州省安顺市普定县赵家田村和陈旗堡村之间,属长江流域的乌江水系,处于后寨地下河流域,流域面积 1.3 km²(图 1)。研究区属亚热带季风性湿润气候区,温暖湿润,多年平均降水量 1 336 mm,降水时空分布不均,5—9 月为雨季,其降水量占全年总水量的 80% 以上。该流域位于黔中高原,主要土地利用类型包括林地、坡耕地和放牧坡地等,为典型农林复合生态系统。流域内喀斯特发育类型丰富,涵盖冲沟、喀斯特干谷和小型溶洞等多种喀斯特地质体,是黔中高原极具典型代表性的喀斯特峰丛谷地小流域。地形三面由峰丛包围,中部为坝地,西面为流域出口。坝地中部发育一条主沟,从东部坡地贯穿至流域出口。山体上支沟发育并与主沟相连。黑色石灰土和黄色石灰土为该地区广泛分布的土壤类型。前期地勘资料和水量平衡计算结果表明,区内地层为中三叠统关岭组,以厚层生屑灰岩为主夹少量泥质灰岩,流域基底为一套泥质灰岩隔水层,地表和地下分水岭基本吻合,坡面和沟道以及地下径流基本全部从流域出口水文站汇出,可视为相对独立的产水和产沙的单元,为示踪小流域泥沙来源提供了较好的天然研究场所。研究区内建有 6 个

不同土地利用类型的全坡面大型径流场和 1 个流域出口水文站,水文站分为 2 个出口,地下出口为流域泥岩隔水层阻隔形成的上升泉,为常流泉,地表出口为流域季节性河流,仅在暴雨过程产流。

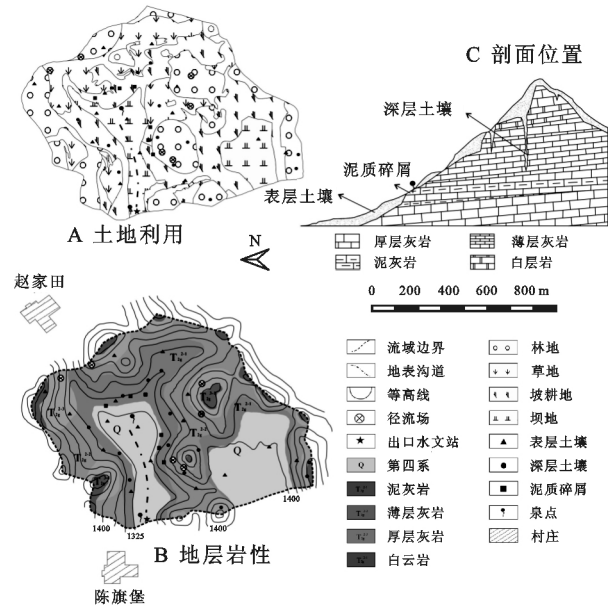


图 1 陈旗小流域采样点示意

1.2 样品采集与处理

2016 年 12 月至 2017 年 4 月,在区内采集表层土壤(坡地和坝地表层 5 cm)、深层土壤和碎屑岩夹层岩屑 3 类源地样品。表层土取样于不同土地利用类型,主要包括林地、草地、坡耕地和坝地;深层土壤(沟道和洞穴/裂隙)选取溶洞顶部汇水区岩缝裂隙剖面裂隙土以及主要沟道沟壁土作为深层土壤;在区内道路边有明显泥岩夹层出露处采集风化泥质灰岩岩屑,作为碎屑岩夹层岩屑。研究区内共采集源地样品 35 个,其中表层土壤 16 个、深层土壤 13 个和碎屑岩夹层岩屑 6 个,具体样点分布见图 1。2017 年 5—9 月雨季期间在流域地表、地下出口同时采集暴雨过程悬浮泥沙样品。期间共采集 3 次暴雨过程悬移质,具体降雨事件信息见表 1。3 场降雨的降雨强度及降雨量都中等,全年发生十多次,该类降雨对陈旗小流域产流产沙的贡献比较稳定,也是主要的侵蚀性降雨。悬浮泥沙样品的采集根据水位上涨情况和径流浑浊度,每 30~60 min 用水桶收集 200 L 水样。

将源地土壤样品风干,分散后去除枯枝落叶过 2 mm 筛,湿筛保留 <63 μm 土壤。源地表层土壤样品按照不同土地利用进行粒度分析测试。暴雨过程悬移质样品就地沉淀 24~48 h,虹吸去清液将少量沉淀泥水装入烧杯中烘干得到悬浮泥沙,称重最终得到降雨期间收集的泥沙具体重量信息见表 1。由于喀斯特地区暴雨过程迅速,含沙量低(平均值为 25 mg/L),单次暴雨过程收集悬移质泥沙无法满足 ^{137}Cs 测试要求,故将 3 次暴雨过程悬移质泥沙样品地表、地

下分别混合后测试。

表1 采样降雨事件信息

降雨时间(年-月-日)	P	I_{30}	I_{mean}	R	H
2017-05-21	23.4	34.8	11.7	39.60	39.33
2017-06-15	26.2	8.8	2.9	28.87	22.96
2017-06-30	52.0	12.0	3.1	49.09	27.68

注: P 为降雨量(mm); I_{30} 为降雨强度(mm/h); I_{mean} 为平均降雨强度(mm/h); R 为降雨侵蚀力($\text{KJ} \cdot \text{mm}/(\text{h} \cdot \text{hm}^2)$); H 为含沙量(mg/L)。

1.3 测试指标与测试方法

(1) ¹³⁷Cs 测定。取粒径 < 2 mm 样品进行测试, 采用 n 型高纯锗探头(LOAXHP Ge) 的低能量、低本底 γ 能谱仪测定核素含量。样品测重 ≥ 250 g, 测试时间 $\geq 33\ 000$ s, 测试误差为 $\pm 5\%$ (95% 置信度) 样品的 ¹³⁷Cs 含量根据 662 keV 谱峰面积推算。

(2) 磁化率测定。采用英国 Bartington MS2B 型双频磁化率仪(低频 470 Hz) 测定 本研究测的磁化率为低频磁化率 利用固定体积的容器盛放样品, 仪器所测结果为体积磁化率 测前记录样品质量 根据体积磁化率和测得样品质量换算得到质量磁化率。

(3) 粒度测定。采用美国贝克曼库尔特公司 LS13320 型激光粒度分析仪测试分析, 测试前对样品加入适量 10% 的 H_2O_2 去除样品中的有机质, 放加热板至沸腾, 加 10% 的 HCl 去除碳酸盐, 洗去过量的 H^+ ; 最后加入 0.025 mol/L 的 $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$, 进行充分分散, 之后使用激光粒度分析仪采用手动测量法(测量范围 2 ~ 2 000 μm) 获得各粒径之间的重量百分含量, 测试结果按照国际粒级标准进行划分。

1.4 研究内容与方法

(1) 指纹因子的显著差异检验。对 ¹³⁷Cs 和磁化率区分泥沙源地的能力进行检验, 利用 Kruskal-Wal-

lis 检验对 2 个因子进行非参数检验, 检验 2 个指纹因子在不同源地间是否呈显著性差异($p < 0.05$)。

(2) 悬浮泥沙来源分析。利用多元混合模型, 定量计算各源地贡献百分比。多元混合模型函数为:

$$\text{RSS} = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[C_{ssi} - \left(\sum_{s=1}^m P_s C_{si} \right) / C_{ssi} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

式中: RSS 为残差平方和; C_{ssi} 为悬浮泥沙中指纹识别因子 i 的浓度; P_s 为泥沙源地 s 的泥沙贡献百分比; C_{si} 为泥沙源地 s 中指纹识别因子 i 的平均浓度; m 为泥沙源地的数量; n 为指纹识别因子的数量。在运用函数式时, 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, 当函数式取最小值时, 即可得到各泥沙源地泥沙贡献百分比。

(3) 拟合优度检验(GOF) 不确定性。拟合优度检验的计算公式为:

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

2 结果与分析

2.1 源地物质和出口泥沙的粒度与 2 种示踪剂含量

从表 2 可以看出, 不同土地利用类型表层土壤各粒级含量不同, 林地土壤粒度偏粗, 黏粒含量少于 10%, 砂粒含量达到 18.98%; 草地土壤和坡耕地土壤粒度分布相近, 黏粒含量超过 60%, 砂粒含量少于 10%, 坡耕地土壤较草地土壤更细, 与长期的人为耕作干扰有关; 坝地土壤粉砂含量超过 50%, 黏粒含量略低于粉砂含量, 土壤粒度介于林地与坡耕地之间。不同土地利用土壤的 ¹³⁷Cs 与磁化率的含量与粒度之间没有明显的线性关系, 原因可能是流域面积较小, 不同土地利用类型的土壤差别不明显。出口泥沙的粒度较源地偏粗, 粉砂含量超过 75%, 黏粒含量不足 10%。

表2 源地土壤和河流泥沙的粒度与¹³⁷Cs和磁化率含量

源地土壤与 河流泥沙	黏粒 (< 0.002 mm) /%	粉砂 (0.02 ~ 0.002 mm) /%	砂粒 (2 ~ 0.02 mm) /%	¹³⁷ Cs 浓度变幅(平均值) / ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)	磁化率变幅(平均值) / ($10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)
林地土壤	7.80	73.22	18.98	2.20 ~ 3.77 (3.06)	205.11 ~ 370.14 (283.30)
草地土壤	62.43	32.42	5.15	2.17 ~ 4.77 (3.91)	186.11 ~ 328.23 (203.34)
坡耕地土壤	86.93	13.07	0	2.28 ~ 4.01 (2.96)	297.98 ~ 336.42 (313.26)
坝地土壤	40.91	54.65	4.44	2.11 ~ 3.01 (2.45)	173.30 ~ 356.77 (253.61)
深层土壤	19.54	54.36	26.10	0 ~ 0.65 (0.50)	145.28 ~ 198.50 (180.69)
地表出口泥沙	7.73	82.85	9.42	(0.57)	(63.59)
地下出口泥沙	6.74	77.87	15.39	(0)	(90.46)

注: 碎屑岩夹层岩屑为大颗粒物, 故不参与粒度分析讨论; 出口泥沙为 3 次暴雨过程泥沙混合结果, 故不存在变化范围。

2.2 源地¹³⁷Cs含量

由表 3 可知, ¹³⁷Cs 在区内的分布特点为表层土壤 ¹³⁷Cs 含量高, 为 2.28 ~ 4.77 Bq/kg, 平均值为 3.39 Bq/kg; 深层土壤 ¹³⁷Cs 含量低, 为 0.00 ~ 0.65 Bq/kg, 平均值为 0.50 Bq/kg; 碎屑岩夹层岩屑不含 ¹³⁷Cs。经过

Kruskal-Wallis 检验得到 p 值为 0, $p < 0.05$, 故 ¹³⁷Cs 为在 3 类源地间呈现显著差异的指纹因子。

区内土壤分布情况具有典型的喀斯特坡地土壤分布特点, 因喀斯特坡地土层薄、土壤少, 表层 ¹³⁷Cs 普遍含量高, 坡地剖面向下含量逐渐降低, 不同土地

利用表土之间¹³⁷Cs 含量没有明显差异,耕地表土与坡地表土之间的差别小;岩缝裂隙土和沟道沟壁土土

壤埋藏较深,¹³⁷Cs 含量低,深层土壤¹³⁷Cs 含量整体偏低;碎屑岩夹层碎屑物质不含¹³⁷Cs。

表 3 不同源地¹³⁷Cs 和磁化率含量及 Kruskal-Wallis 的检验

指纹因子	表层土壤	深层土壤	泥质灰岩碎屑	H 值	P 值	地表出口泥沙	地下出口泥沙
¹³⁷ Cs 浓度/ (Bq · kg ⁻¹) (平均值)	2.28 ~ 4.77 (3.39)	0 ~ 0.65 (0.50)	0 (0)	16.677	0	(0.57)	(0)
磁化率/ (10 ⁻⁸ m ³ · kg ⁻¹) (平均值)	205.11 ~ 370.13 (310.07)	145.28 ~ 198.50 (180.69)	5.50 ~ 9.90 (7.02)	17.075	0	(63.59)	(90.46)

2.3 磁化率

与¹³⁷Cs 不同,土壤磁化率是成土因素和成土过程的综合反映^[26]。表层土壤、深层土壤以及碎屑岩夹层反映土壤形成的不同阶段,所以磁化率可作为区分源地的示踪因子。区内采集代表样品测得的磁化率结果与前人^[27]所做的贵州碳酸盐岩发育土壤剖面磁学参数测定结果的规律一致,表层土壤因其风化程度高而有着较高的磁化率,深层土壤低于表层土壤,而基底碳酸盐岩的磁化率最低。流域内表层土壤风化成熟度高,磁化率高(表 3),介于(205.11 ~ 370.13) × 10⁻⁸ m³/kg,平均值为 310.07 × 10⁻⁸ m³/kg;深层土壤磁化率稍低,介于(145.28 ~ 198.50) × 10⁻⁸ m³/kg,平均值为 180.69 × 10⁻⁸ m³/kg;碎屑岩夹层岩屑磁化率极低,介于(5.50 ~ 9.90) × 10⁻⁸ m³/kg,平均值为 7.02 × 10⁻⁸ m³/kg。经过 Kruskal-Wallis 检验得到 p 值为 0,小于 0.05,故磁化率在 3 类源地间呈现显著差异的指纹因子。3 类源地磁化率的特征说明磁化率与其所处的成土地球化学阶段、风化强度和成土环境联系密切。

2.4 混合模型计算相对贡献率

因流域面积小,在不考虑长距离输移颗粒分选作用下,3 类不同源地土壤对流域地表、地下出口泥沙的相对贡献,可根据出口悬移质泥沙和源地中的 2 种示踪因子的含量利用多元混合模型求得。定量计算出不同泥沙源地对小流域悬浮泥沙的贡献率(图 2)。暴雨洪水期间收集到的地表出口和地下出口悬移质泥沙的¹³⁷Cs 和磁化率平均含量分别为 0.57 Bq/kg 和 63.59 × 10⁻⁸ m³/kg、0 Bq/kg 和 90.46 × 10⁻⁸ m³/kg。各泥沙源地的产沙贡献率结果见图 2。流域地表出口泥沙源中碎屑岩夹层岩屑是主要贡献部分,达到 79.5%,而表层土壤(坡地和坝地)和深层土壤仅分别贡献了 16.2% 和 4.3%;在地下出口泥沙来源中,碎屑岩夹层岩屑同样是主要贡献源,达到 62.1%,但深层土壤来源比例有所增加,达到 37.9%。表层土壤对地下出口基本没有贡献。对混合模型计算结果进行拟合优度检验,得到地表出口泥沙 GOF 为 99.97%,地下出口泥沙 GOF 为 83.80%,拟合优度均大于 80%,模型结果

可信。但因此次研究是首次在喀斯特小流域尝试开展的指纹示踪研究,收集径流泥沙样本量有限,相关结论仍有待进一步验证。

2.5 喀斯特小流域河流泥沙来源特征

喀斯特小流域河流泥沙来源特征有别于非喀斯特区域,呈现出的特征为:

无论坡地还是坝地,表层土壤迁移性差,对流域河流泥沙来源贡献率低。表层土壤对地表出口的贡献仅为 16.2%,对地下出口无贡献,与野外径流场观测结果一致,在未超过 60 mm 的降雨很难产生大量地表径流和土壤流失,坡地土壤可能只存在微地貌搬运^[7],很难迁移到流域之外,故表层土壤的输移比小。

深层土壤对流域河流泥沙来源略有贡献,对地表出口的贡献为 4.3%,对地下出口的贡献为 37.9%,主要与流失途径有关。深层土壤在地表出口贡献的主要来源为洪水过程产生的沟壁侵蚀,而对地下出口贡献的来源主要为裂隙土通过溶蚀裂隙随地下径流进入地下河系统,为喀斯特地区地下土壤漏失的结果。

碎屑岩出露面积小于总流域面积的 5%,但其对流域出口悬浮物的贡献大,对地下出口的贡献为 62.1%,对地表出口的贡献高达近 80%(图 2),表明喀斯特小流域泥沙来源主要与地层岩性有密切关系。关岭组中段中薄层碳酸盐岩所含的泥岩夹层作为区内阻隔裂隙水下渗的不透水层,在暴雨期间,降水随坡面岩缝裂隙进入表层岩溶带遇到不透水层阻隔后,泥质夹层碎屑物质被带出,进入河流系统。

喀斯特区域侵蚀特征不同于非喀斯特区域,土壤侵蚀来源与途径与非喀斯特区相比均有较大差异。黄土高原地区由于黄土层厚而疏松、抗蚀抗冲性差,遇暴雨后,面蚀、细沟侵蚀广泛产生,汇流后易发育形成冲沟和切沟造成沟壁侵蚀,其河流泥沙主要来源于表层土壤和沟壁土壤^[28]。喀斯特地区表层土壤流失量小,对河流泥沙贡献量低,泥沙来源除了表层土壤和沟壁侵蚀外,还存在地下土壤的贡献。由于表层岩溶带岩缝裂隙和地下管道的发育,岩缝裂隙土易随径流渗漏到地下,因此深层土壤在地下河泥沙输移上占

有一定比例。喀斯特流域河流的主要泥沙来源为区内少量分布的碎屑岩岩屑及其风化物,虽分布比例低,但贡献量大。这与黄土高原砒砂岩地区的皇甫川流域相似,泥沙来源主要为成岩性差、节理或裂隙发育的砒砂岩,产沙量可占总输沙量的1/2以上^[29-30]。因此,喀斯特地区的土壤地质背景强烈控制土壤侵蚀,在该区域开展土壤侵蚀与水土保持工作时,除了考虑降雨强度以及土地利用方式影响外,还应充分关注区域地层岩性特点和岩层空间分布特征。

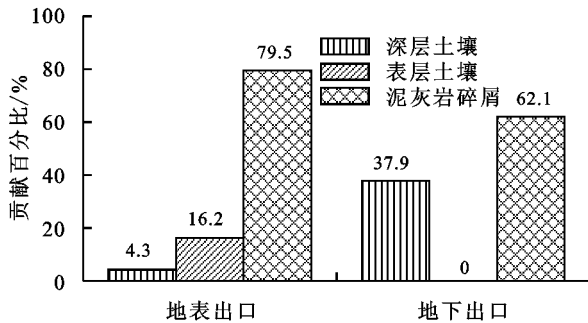


图2 泥沙来源贡献百分比

3 结论

喀斯特地区土壤侵蚀特征和河流泥沙来源有别于非喀斯特地区,除了表土侵蚀、沟壁侵蚀外,还存在地下漏失现象。表层土壤很难迁移出流域,对泥沙来源贡献比例低。河流泥沙主要来源为碎屑岩夹层所含岩屑。此外,¹³⁷Cs和磁化率相结合的双指纹因子复合示踪方法可用于开展喀斯特小流域河流泥沙来源研究,为今后研究喀斯特地区土壤侵蚀与泥沙来源问题提供新思路。

参考文献:

- [1] 蒋忠诚,曹建华,杨德生,等.西南岩溶石漠化区水土流失现状与综合防治对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):37-42.
- [2] 王腊春,蒙海花,张兆干,等.贵州典型岩溶小流域水文水资源研究[M].北京:科学出版社,2010:65-68.
- [3] 袁道先,刘再华,蒋忠诚,等.碳循环与岩溶地质环境[M].北京:科学出版社,2003.
- [4] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation[J]. Land Degradation and Development, 2004, 15(2): 115-121.
- [5] 彭韬,王世杰,张信宝,等.喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J].地球与环境,2008,36(2):125-129.
- [6] 彭韬,杨涛,王世杰,等.喀斯特坡地土壤流失监测结果简报[J].地球与环境,2009,37(2):126-130.
- [7] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regime on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. Catena, 2012, 90: 53-62.
- [8] Chen H S, Liu J W, Zhang W, et al. Soil hydraulic properties on the steep karst hillslopes in northwest Guangxi,

China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(1): 371-379.

- [9] 方胜,彭韬,王世杰,等.喀斯特坡地土壤稳渗率空间分布变化特征研究[J].地球与环境,2014,42(1):1-10.
- [10] 罗为群,蒋忠诚,欧阳然,等.典型岩溶峰丛洼地水土保持技术研究[J].中国水土保持,2013(1):37-41.
- [11] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等.碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J].地球与环境,2007,35(3):202-206.
- [12] 彭旭东,戴全厚,杨智,等.喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J].土壤学报,2016,53(5):1237-1248.
- [13] 伏文兵,戴全厚,严友进.喀斯特坡耕地及其浅层孔隙(裂隙)土壤侵蚀响应试验研究[J].水土保持学报,2015,29(2):11-16.
- [14] 王世杰,季宏兵,欧阳自远,等.碳酸盐岩风化土作用的初步研究[J].中国科学(D辑:地球科学),1999(5):441-449.
- [15] 张信宝,白晓永,刘秀明.洼地沉积的¹³⁷Cs法断代测定森林砍伐后的喀斯特小流域土壤流失量[J].中国科学(地球科学),2011,41(2):265-271.
- [16] 张信宝,贺秀斌,文安邦,等.川中丘陵区小流域泥沙来源¹³⁷Cs和²¹⁰Pb双同位素法研究[J].科学通报,2004,49(15):1537-1541.
- [17] 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.
- [18] Walling D E, Owens P H, Leeks J L. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River use, Yorkshire, UK [J]. Hydrological Processes, 1999, 13: 955-975.
- [19] Collins A L, Naden P S, Sear D A. Sediment targets for informing river catchment management: International experience and prospects [J]. Hydrological Processes, 2011, 25(13): 2112-2129.
- [20] 张信宝,王世杰,曹建华.西南喀斯特山地的土壤硅酸盐矿物物质平衡与土壤流失[J].地球与环境,2009,37(2):97-102.
- [21] 蒋忠诚,罗为群,邓艳,等.岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J].地球学报,2014,35(5):535-542.
- [22] Bai X Y, Zhang X B, Chen H. Using ¹³⁷Cs fingerprint technique to estimate sediment deposition and erosion rates from Yongkangdepression in karst region of Southwest China [J]. Land Degrad Dev, 2010, 21: 1-6.
- [23] Diazasencio M, Corchoalvarado J A, Cartasaguila H, et al. ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs as tracers of recent sedimentary processes in two water reservoirs in Cuba [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2017, 177: 290-304.
- [24] 俱战省,严冬春,文安邦,等.塘库沉积的¹³⁷Cs法断代测定三峡库区小流域产沙量[J].地球与环境,2018,46(1):76-81.

(下转第154页)

年春播土壤供肥能力最高,为了农业持续发展,推荐该地区玉米生育期内施氮肥量为 225 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 石元亮,王玲莉,刘世彬,等. 中国化学肥料发展及其对农业的作用[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 852-864.
- [2] 黄小红,张磷,肖妙玲. 施肥制度对土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 200-206.
- [3] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 2009, 106: 3041-3046.
- [4] 郭富强. 内蒙古河套灌区农田退水氮磷迁移特征及最优施肥模式研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- [5] 郭鹏飞,张筱茜,韩文,等. 滴灌频率和施氮量对温室西葫芦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 109-114.
- [6] Li J M, Inanaga S, Li Z H, et al. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2005, 76(1): 8-23.
- [7] 袁嫚嫚, 邱刚, 孙义祥, 等. 缓释尿素对两种土壤小麦氮素运转、产量和土壤无机氮的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 233-239.
- [8] 肖新, 储祥林, 邓艳萍. 江淮丘陵季节性干旱区灌溉与施氮量对土壤肥力和水稻水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 84-88.
- [9] Gouranga K, Verma H N, Ravender S. Effects of winter crop and supplemental irrigation on crop yield, water use efficiency and profitability in rain fed rice based cropping system of eastern India[J]. Agricultural Water Management, 2006, 79(3): 280-292.
- [10] Zhang B C, Huang G B, Li F M. Effect of limited single irrigation on yield of winter wheat and spring maize relay intercropping[J]. Pedosphere, 2007, 17(4): 529-537.
- [11] 陈欢, 曹承富, 张存岭. 基于主成分—聚类分析评价长期施肥对砂姜黑土肥力的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 609-617.
- [12] 张瑞芳, 王瑄, 范昊明. 我国冻融区划分与分区侵蚀特征研究[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 24-28.
- [13] 罗亚晨, 吕瑜良, 杨浩. 冻融作用下寒温带针叶林土壤碳氮矿化过程研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1769-1775.
- [14] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4197-4204.
- [15] 吴玉红, 田霄鸿, 同延安. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 173-180.
- [16] 王增丽, 冯浩, 余坤. 基于主成分分析的不同预处理麦秸改良土壤效果评价[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 150-155.
- [17] Henry H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39: 977-986.
- [18] 刘建鹏. 台安县稻田养分含量现状及改良建议[J]. 现代农业, 2010(4): 42-43.
- [19] 齐智娟. 河套灌区盐碱地玉米膜下滴灌土壤水盐热运移规律及模拟研究[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2016.
- [20] 王伦平, 陈亚新, 曹国芳, 等. 内蒙古河套灌区灌溉排水与盐渍化防治[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [21] 郝慧, 马巍. 盐渍土冻结温度的试验研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1106-1113.
- [22] 梁建财, 史海滨, 李瑞平. 秸秆覆盖秋浇后盐渍土壤冻融过程及水盐运移特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 145-151.
- [23] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫. 基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水热盐运移规律研究[J]. 水利学报, 2009, 40(4): 403-412.
- [24] 梁建财, 李瑞平, 史海滨. 河套灌区覆盖对盐渍土壤养分迁移与分布的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 113-121.
- [25] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝. 主成分分析方法在长期施肥土壤质量评价中的应用[J]. 土壤, 2010, 42(3): 415-420.
- [26] 孙刘平, 钱吴永. 基于主成分分析法的综合评价方法的改进[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(18): 15-20.
- [27] 杨明义, 田均良, 刘普灵. 应用¹³⁷Cs 研究小流域泥沙来源[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 49-53.
- [28] 俞劲炎, 卢升高. 土壤磁学[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1990: 52-62.
- [29] 卢升高. 中国土壤磁性与环境[M]. 1版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 48-56.
- [30] 周佩华, 李银锄, 黄义端, 等. 2000年中国水土流失趋势预测及其防治对策[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(1): 57-71.
- [31] 张平仓, 唐克丽, 郑粉丽, 等. 皇甫川流域泥沙来源及其数量分析[J]. 水土保持学报, 1990, 4(4): 29-36.
- [32] 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.

(上接第 145 页)