



碳氮同位素结合稳定同位素模型解析沉积土壤碳源

李娜^{1,3}, 孙占祥^{2✉}, 张燕卿¹, 刘恩科¹, 李凤鸣³, 李纯乾³, 李菲³

¹农业农村部旱作节水农业重点开放实验室, 北京 101010; ²辽宁省农业科学院, 沈阳 110161; ³辽宁省旱地农林研究所, 辽宁朝阳 122000

摘要:【目的】研究辽西褐土丘陵区典型小流域不同土地利用方式下经侵蚀沉积过程沉积土壤碳来源, 为合理调控小流域土壤侵蚀造成的土壤碳流失提供科学参考。【方法】通过对辽西丘陵沟壑区小流域野外取样, 研究小流域沉积土壤碳的来源并量化其贡献。通过GIS结合GPS技术对小流域4种不同土地利用类型(耕地、林地、草地、沟渠)表层土壤及小流域拦沙坝3个位点(S1坝前、S2坝中、S3坝后)0-100 cm土壤剖面进行取样, 结合碳、氮同位素混合模型对沉积土壤碳源进行解析。【结果】利用¹³C和¹⁵N同位素特征及其元素组成(土壤有机碳和全氮)对辽西丘陵沟壑区侵蚀沉积物土壤有机碳进行了定性和定量鉴定。辽西丘陵沟壑区小流域沉积物中有机碳主要来源为耕地, 其次是沟渠、草地和林地。耕地贡献平均为58.75%, 沟渠25.49%, 草地6.49%, 林地9.2%。【结论】碳氮稳定性同位素模型作为一种重要的“指纹”工具可以成功应用于辽西丘陵沟壑区小流域沉积土壤碳来源定性及定量的分析。研究成果可以为受水力侵蚀的小流域的土壤保护和养分流失控制以及维持生态系统的可持续性提供理论参考。

关键词: 有机碳; 水土流失; 拦沙坝; 沉积物; 稳定同位素模型

Contribution of Carbon Sources in Sedimentary Soils Combining Carbon and Nitrogen Isotope with Stable Isotope Model

LI Na^{1,3}, SUN ZhanXiang^{2✉}, ZHANG YanQing¹, LIU EnKe¹, LI FengMing³, LI ChunQian³, LI Fei³

¹Key Laboratory of Dryland Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 101010; ²Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161; ³Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry, Chaoyang 122000, Liaoning

Abstract: 【Objective】To study the sources of deposited soil organic carbon (SOC) under different land use patterns in a typical small watershed in the brown soil hilly area of western Liaoning through eroded sedimentation, and to provide a scientific reference for the reasonable control of soil carbon loss caused by soil erosion in the small watershed. 【Method】Through field sampling of small watersheds in the hilly and gully area of western Liaoning, the sources of deposited soil carbon in the small watersheds were studied and their contribution was quantified. Using GIS and GPS technology to analyze the surface soil of 4 different land use types (cropland, forest, grassland, gully) in the small watershed and 3 locations of the check dam in the small watershed (S1 in front of the dam, S2 in the middle of the dam, S3 behind the dam) 0-100 cm soil profile was sampled to analyze the carbon source of the sedimentary soil based on a mixed carbon and nitrogen isotope model. 【Result】Using ¹³C and ¹⁵N isotopic characteristics and their elemental composition qualitative and quantitative identification of soil organic carbon in eroded sediments in the hilly and gully area of western Liaoning was carried out. The SOC loss was primarily from cropland, accounting for 58.75%, followed by gully (25.49%), forest (9.2%), and grassland (6.49%). 【Conclusion】The stable isotope SIAR mixing model, as a reliable "fingerprint" tool, could be successfully employed to estimate the contribution of various C sources within a complex ecosystem. The research

收稿日期: 2020-12-06; 接受日期: 2021-02-19

基金项目: 农业农村部旱作节水农业重点实验室基金(2018KLDA03)、辽宁省自然科学基金指导计划(2019-ZD-0391)、辽宁省中央引导地方科技发展专项(2019JH6/10200004)

联系方式: 李娜, E-mail: caulina@outlook.com. 通信作者孙占祥, E-mail: szx67@163.com

results can provide theoretical references for soil protection and nutrient loss control in small watersheds affected by water erosion, and for maintaining the sustainability of the ecosystem.

Key words: soil organic carbon; soil erosion; constructed dam; sediments; stable isotope model

0 引言

【研究意义】水土流失是导致小流域土壤有机碳(SOC)流失的主要过程^[1]。土壤侵蚀伴随着水的流动和沉积物的输送,使土壤SOC从土壤生态系统中移出^[2]。由土壤侵蚀引起的碳的重新分配仍在继续^[3],但侵蚀小流域的碳输出的过程及终点却在很大程度上未知,也很少被研究。土壤侵蚀在陆地碳释放中的作用仍然是土壤调节气候变化潜力最重要的不确定因素之一^[4-5]。辽宁省西部丘陵沟壑区是中国东北地区最严重的水土流失地区之一^[6],山丘占耕地总数的70%左右。辽西丘陵区水土流失面积为209.06万hm²,总侵蚀面积为49.4%,占总面积的41.6%。土壤碳的流失不仅严重消耗了辽西地区的土地资源,导致陆地生态系统退化,而且还影响了陆地和水生生态系统中碳的生物地球化学循环^[7-9]。【前人研究进展】碳和氮稳定同位素比率($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)和元素成分是一个潜在的强大的工具用来跟踪流域沉积物来源的贡献^[10-11]。此外,稳定同位素也已用于追踪流域山坡上侵蚀物质的来源。碳、氮稳定同位素组成的成功使用是由于生态系统源之间的显著差异,这是由于碳循环过程中由于物理、化学和生物过程引起的同位素分馏^[12-13]。在定性、定量分析沉积土壤中碳来源的同时,利用基于R统计学软件的稳定同位素模型(stable isotope analysis in R, SIAR)^[14],定量研究各来源对沉积土壤SOC的贡献率。此外,稳定同位素比率($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)在推断有机碳的来源和转化过程方面应用广泛^[15-16],SIAR模型也广泛应用于食物链、水环境及土壤污染物的溯源^[17-19]。【本研究切入点】本研究以此为出发点,以辽西地区典型小流域-太平沟小流域为研究对象,基于太平沟小流域的治理现状,运用GIS技术结合同位素混合模型——SIAR模型,系统开展小流域受土壤侵蚀过程沉积区有机碳来源研究。【拟解决的关键问题】用稳定同位素技术,研究可以获取小流域尺度土壤侵蚀和环境变化的信息及沉积物中碳同位素组成特征和变化,得知土壤碳循环的重要信息,揭示流域土壤侵蚀状态和生态环境的变化,为小流域土壤碳流失调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区太平沟小流域位于辽宁省朝阳市建平县惠州乡(东经119°35'47"—119°38'18",北纬41°57'38"—41°59'38")。该地区为干旱和半干旱气候,年平均温度约为8℃,年累积温度为3847℃。平均地表温度为10.2℃。平均年降雨量为200mm。降水主要集中在6—9月,占年降水量的80%。大多数降水是强降雨和短期暴雨,年际变化较大。年蒸发量为2041mm左右,平均相对湿度约为52%。

该地属于典型的棕色土壤和丘陵地区,坡地占该区农业用地的80%左右。土壤侵蚀以水力侵蚀为主。研究区小流域面积约17.5km²。主要农作物是玉米,耕种方式是连作。小流域的土壤性质见表1。自从20世纪70年代后,国家在该流域投入了大量资金加强了水土保持措施,以进行恢复植被重建,防止水土流失。控制措施主要包括土地休耕,水坝和梯田建设,草木种植,农林造林等。该地区的主要土地利用类型有林地、耕地、草地和沟渠。在流域出口有拦沙坝储存土壤沉积物,目前有约1m厚的沉积物。研究区主要土地利用类型是耕地和林地,草地、休闲地和沟渠相对于小流域的总面积而言较小。

1.2 样品采集与测定

2018年9月进行了现场采样。试验地土壤类型为褐土。分别从具有代表性的土地利用方式耕地(45),林地(42),草地(20),沟渠(19)4个区共收集表层(0—10cm)土壤样品共129个。此外,还通过100cm³环刀收集了五份原状土样品,用于测定土壤容重(BD)和土壤含水量(SWC)。从沿拦沙坝沉积区开始到末端收集沉积物样品。使用直径7.0cm土钻收集了总共90个沉积物样品(10个深度,3个剖面 and 3个重复样品)用于理化性质分析。分别在拦沙坝的前端(S1),拦沙坝中央(S2)和拦沙坝后端(S3),垂直钻取0—1m深度的3个点,获取完整的土壤剖面。垂直取样间隔为0.1m。从保留的沉积物中提取了原始土壤样品,以进行土壤容重和土壤含水量分析。

将收集到的所有样品立即运送到实验室进行理化分析。在进行分析之前，先将土壤可见的根部残留物和碎石清除。将所有沉积物和土壤样品风干，分成两份样品，一份样品通过 2 mm 的筛子以测定土壤质地、pH，另一份样品通过 0.15 mm 的筛子测定其土壤有机碳（SOC）和总氮（TN）含量以及碳氮同位素特征。使用 HI 3221 pH 计（Hanna Instruments Inc.，美国）以 1: 2.5 的土壤水比测定土壤 pH^[20]。用 Coulter LS200 激光颗粒分析仪在 0.02—2 000 μm 的范围内对土壤样品进行质地分析，用 H₂O₂ 去除有机物并用六偏磷酸盐进行化学分散^[21]。采用环刀法测量土壤容重和含水量，在 105℃ 下烘干 48 h^[20]。SOC 和 TN 含量以及碳氮稳定同位素组成由 IRMS（Isoprime100，Isoprime，UK）附带的元素分析仪测定，国际标准为 IAEA-N1，IAEA-N3，USGS24 和 USGS41，分析精度为 0.2‰。δ¹³C 和 δ¹⁵N 的平均分析误差通常为 0.01‰^[22]。在测定土壤元素碳和氮之前，将样品中加入 1 mol·L⁻¹ 盐酸进行酸化除去土壤无机碳，因为辽西地区 pH 为微偏碱性，去除土壤中的碳酸盐。同位素分析于 2019 年 3 月在中国农业科学院环境稳定同位素实验室进行。

1.3 据分析与 SIAR 混合同位素模型概述

1.3.1 模型概述 为了准确量化沉积区土壤 SOC 的来源，选用基于贝叶斯方程的 SIAR 混合同位素模型进行分析，该模型能够表征因为同位素分馏所引起的变异所产生的误差，并且它能够解析出的各个源的分布特征，最后得出的各源的贡献率；且当有多个源（>3）存在时，SIAR 模型同样适用，模型表达式如下：

$$X_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^k P_k q_{jk} (S_{jk} + C_{jk})}{\sum_{k=1}^k P_k q_{jk}} + \varepsilon_{ij}$$

$$S_{jk} \sim N(u_{jk}, \omega_{jk}^2)$$

$$C_{jk} \sim N(u\delta_{jk}, \tau_{jk}^2)$$

$$\varepsilon_{jk} \sim N(0, \sigma_{jk}^2)$$

式中：X_{ij} 表示不同来源的第 i 种混合物的第 j 个同位素的值；S_{jk} 表示第 k 种源的第 j 个同位素的值；P_k 表示源中第 k 个来源的贡献比例；C_{jk} 表示分馏系数；ε_{ij} 表示剩余误差，代表不同单个混合物之间能确定的变量^[17]。

1.3.2 统计分析 在本研究中，所有数据统计均使用 SPSS 18.0 版（SPSS Inc.，Chicago，IL，USA）软件。不同处理间采用多重比较方法 LSD（Least-Significant Difference）的方法。单因素方差分析采用（ANOVA，邓肯法）。数据绘图采用 origin2016 软件完成。SIAR 模型的加载在 R 语言中完成，用于量化本研究中各种潜在碳源对土壤侵蚀有机碳的来源。

SIAR 的源代码 (<https://github.com/AndrewLJackson/siar/blob/master/R/siarproportionbygroupplot.R>)

2 结果

2.1 不同土地利用类型土壤与沉积区土壤对比

表 1 列出了不同土地利用方式土壤的理化性质。表 1 为拦沙坝 3 个位点剖面的容重（BD）和 pH。耕地、林地、草地和沟渠土壤 BD 差异显著，林地土壤 BD 最高（1.38 g·cm⁻³），沟渠土壤 BD 最低（1.18 g·cm⁻³）。所有土壤均呈弱碱性，其中草地土壤 pH 最高（8.2），林地土壤 pH 最低（7.74）。流域土壤质地以粉砂壤土为主，粒径组成随土地利用和景观位置的变化而变化。林地土壤砂粒含量高于其他土壤，黏粒含量低于其他土壤，景观位置较低的土壤粉砂和黏

表 1 不同土地利用类型土壤理化性质
Table 1 Soil physical and chemical properties of different land use types

土地利用类型 Land-use type	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	pH	土壤含水量 Soil water content (%)	土壤质地 Soil texture (%)		
				黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand
林地 Forest	1.38±0.21a	7.74b	7.31±0.21ab	17.17bc	34.48c	48.1a
耕地 Cropland	1.19±0.12c	7.86b	5.21±0.21a	15.66bc	40.31a	44.03b
草地 Gralssland	1.27±0.05ab	8.2a	8.2±0.21ab	18.31b	40.63a	41.06bc
沟渠 Gully	1.18±0.15c	8.0a	12.21±0.21c	26.31a	38.56abc	35.13c

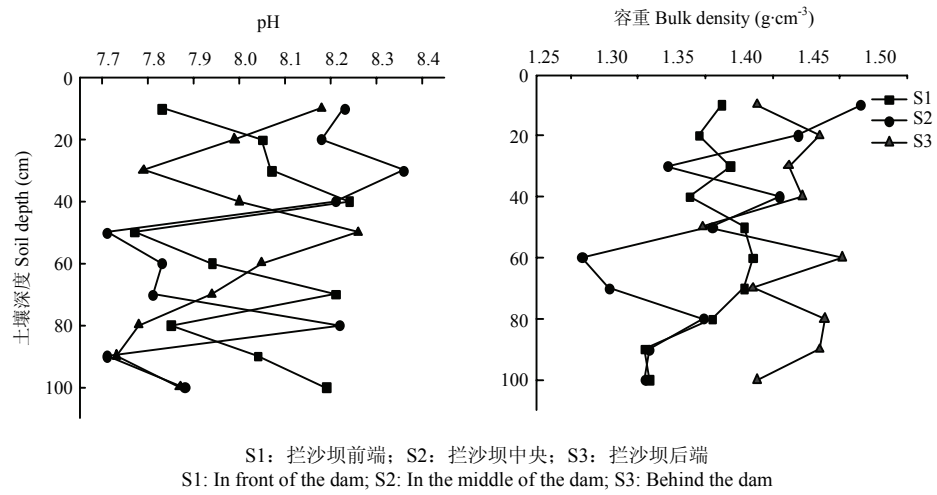


图 1 沉积土壤不同剖面的容重与 pH

Fig. 1 Bulk density and pH of different profiles of sedimentary soil

粒含量高于景观位置较高的土壤。土壤颗粒组成的测量结果与土壤 BD 数据基本一致，说明该流域土壤侵蚀后土壤细颗粒在一定程度上从上游向下游移动。与源土相比，拦沙坝附近土壤沉积物的 BD 和 pH 普遍较高，但剖面上没有明显的分布格局。

2.2 不同土地利用类型及沉积物土壤同位素特征值

表 2 所示的土壤和沉积物中 SOC 的测量结果表明，不同土地利用之间土壤和沉积物之间的 SOC 含量存在显著差异。林地土壤中 SOC (16.86 ± 0.06) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 含量最高，耕地次之 (7.35 ± 0.04) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由于有机物质或植物组织在土壤表面的残留积累，林地土壤具有最高的有机碳含量。耕地较高的碳氮比反映了农业措施的影响，可能是土壤侵蚀或植物吸收导致土壤氮流失的结果。与其他土壤相比，沉积物的 SOC 普遍较低，但碳氮比相对较高。在 1 m 剖面内，沉积物的 SOC 范围为 $2.38\text{--}7.78\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，TN 为 $0.19\text{--}0.66\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.3 源土壤与沉积土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 相关性分析

为了探讨沉积泥沙中 SOC 的来源，在建立模型之前，对被测定潜在碳源的指纹识别指数进行了统计分析。结果发现， $\delta^{13}\text{C}$ ， $\delta^{15}\text{N}$ ，SOC 和 TN 能成功区别 3 种源材料（耕地、林地和沟渠）。在我们的研究中除了耕地与沟渠土壤间的 $\delta^{15}\text{N}$ 值未存在显著差异外，其他所有不同土地利用类型土壤之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、SOC 和 TN 存在显著性差异（表 2）。因此，由于所有源材料指纹识别因子的差异性，可以定量地研究沉积泥沙有机碳来源的贡献。林地土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 较耕地和草地高出 1‰—5‰。在 4 类源土中 $\delta^{13}\text{C}$ 的范围在 $-23.99\text{‰}\text{--}28.29\text{‰}$ ，与其他类型源土相比，沉积物土壤的 SOC 及 $\delta^{13}\text{C}$ 含量相对较低。此外，源材料与泥沙样品的二元关系模型也成功应用于识别潜在碳源贡献（图 2）。由图 2 源土壤与沉积物土壤中 SOC 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的二元比可以看出在不同类型

表 2 不同土地利用类型及沉积物同位素特征值

Table 2 Different land use types and sediments of isotopic characteristic values

土地利用类型 Land use type	土壤有机碳 SOC ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤总氮 TN ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳同位素比值 $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	氮同位素比值 $\delta^{15}\text{N}$ (‰)	碳氮比 C/N ratio
林地 Forest	$16.86\pm0.06\text{a}$	$2.33\pm0.06\text{a}$	$-24.9\pm0.25\text{a}$	$1.25\pm0.06\text{d}$	7.24bc
耕地 Cropland	$7.35\pm0.04\text{b}$	$0.52\pm0.04\text{c}$	$-23.85\pm0.43\text{b}$	$3.05\pm0.05\text{ab}$	14.14a
草地 Grassland	$6.43\pm0.09\text{b}$	$0.86\pm0.09\text{bc}$	$-19.2\pm0.25\text{c}$	$2.63\pm0.03\text{c}$	7.48b
沟谷 Gully	$4.21\pm0.07\text{c}$	$0.65\pm0.02\text{c}$	$-24.9\pm0.4\text{a}$	$3.65\pm0.02\text{a}$	6.48c
沉积物 Sediments	$5.79\pm0.05\text{abc}$	$0.40\pm0.09\text{c}$	$-25.2\pm0.3\text{ab}$	$2.92\pm0.02\text{c}$	14.48a

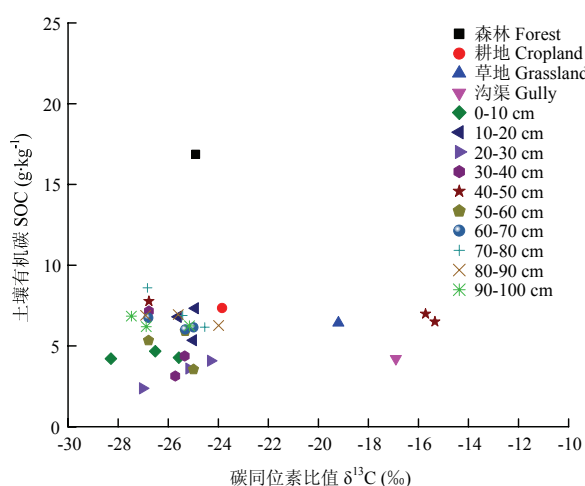


图 2 不同深度 (0—100 cm) 沉积物和潜在来源之间的 SOC、 $\delta^{13}\text{C}$ 均值

Fig. 2 Mean SOC and $\delta^{13}\text{C}$ for sediments at different depths (0–100 cm) and potential sources for the studied catchment

土壤中与沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 的同位素特征值是不同的。图 3 的 TOC 与 $\delta^{13}\text{C}$ 的二元比可以看出, 耕地土壤可能

是沉积物中碳的主要贡献者或潜在来源, 即沉积在沉积物中的碳主要来自于流域的耕地。

2.4 不同土地利用类型对沉积物表层土壤有机碳的贡献率

通过将源土的 $\delta^{13}\text{C}$ 及其方差数据输入 SIAR 模型, 如图 3 所示, 由模型得出沉积物土壤 SOC 的贡献主要来源于耕地, 接下来依次是沟渠、草地、林地。这也说明耕地作为沉积物碳的主要来源与 SIAR 混合模型的计算相一致。此外, SIAR 模型还提供了每个来源的定性贡献的详细数值。图 3 给出了 4 种源土对沉积区泥沙剖面 (0—100 cm) 有机碳含量的定量贡献。说明了 SIAR 模型在小流域中预测 SOC 来源是成功适用的。耕地贡献平均为 58.75%, 其次是沟渠 25.49%, 草地 6.49%, 林地 9.2%。90%以上的沉积物有机碳来自耕地、沟渠。林地和草地对研究流域沉积物中有机碳的贡献较小。由剖面不同源对沉积区的 SOC 贡献率可以看出在小流域尺度上, 随着侵蚀事件的增加, 流域尺度上耕地对沉积土壤有机碳的贡献率是增加的, 流域尺度上农田对沉积土壤有机碳的贡献率是增加的, 沉积区剖面中各源 SOC 贡献的垂直变化也可以反映土壤侵蚀和土地利用的时间异质性。

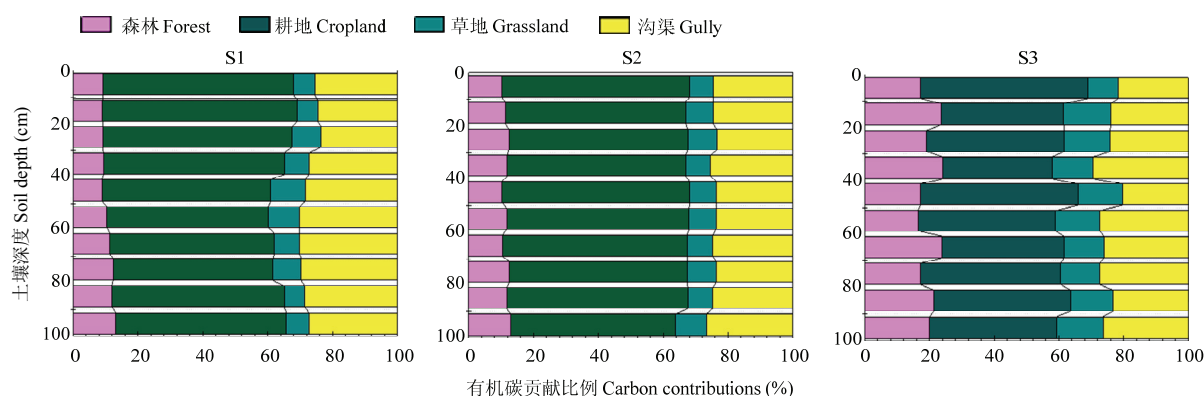


图 3 沉积区 0–100 cm 土壤剖面有机碳的来源及贡献比

Fig. 3 Source and contribution ratio of organic carbon in 0–100 cm soil profile in sedimentary area

3 讨论

本研究采用野外取样和示踪的方法, 探讨了辽西丘陵沟壑区土壤侵蚀沉积物 SOC 分布规律及来源。利用 ^{13}C 和 ^{15}N 同位素特征及其元素组成 (SOC 和 TN) 对辽西丘陵沟壑区侵蚀沉积物 SOC 进行了定性和定量鉴定。利用稳定同位素特征识别侵蚀沉积物 SOC 的

来源应该考虑几个在其他研究中不能满足的假设。一方面, 所选潜在源的 ^{13}C 和 ^{15}N 组成在流域内应表现出显著差异, 沉积物的 ^{13}C 和 ^{15}N 同位素特征应处于不同潜在源的变化范围内。另一方面, 自然丰度稳定同位素特征的应用还应考虑土壤侵蚀、泥沙运移和沉积后过程中凋落物同位素的分馏效应。但是, 很难评估侵蚀和沉积过程对示踪剂的改变程度。为了减少由

某些过程(例如矿化过程)引起源物质特征值(包括 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、SOC 和 TN)的变化,源样品进行元素和同位素分析时采用模拟流迁移的方法。此外,采样过程还可能产生不确定性,这不仅是由于沉积区独特的沉积物来源和地貌特征,而且从沟渠到沉积区的土壤颗粒变化有很大不同。

在 20 世纪 70 年代后期,对于小流域治理投入的加大,开垦梯田的面积增加,造成后期农田对有机碳的贡献率越来越大。从 1978 年至今,由于降雨和人类活动的影响,坡耕地的土壤侵蚀和土壤 SOC 的流失增加,农业土壤中不稳定或活性 SOC 可能由于侵蚀而优先转移,造成了在拦沙坝区沉积^[23-24]。每年在辽西丘陵沟壑区由土壤侵蚀造成的大量 SOC 流失和重新分配,严重影响该地区生态可持续性和生物地球化学循环^[25]。土壤侵蚀通常有 3 个步骤:分离、迁移和沉积^[26]。分离过程首先暴露有机物保护的土壤团聚体和黏土矿物^[18];随后,与 SOC 相关的细土颗粒优先从侵蚀地迁移到沉积地点并沉积下,这对已建拦沙坝附近的土壤沉积和养分沉积有很大的影响。此外,当大量沉积物随水流移动时,沟渠的土壤侵蚀量通常会增加。

3 个沉积物剖面中有机碳含量的变化与径流路径一致,也能反映流域土壤侵蚀或土地利用变化。林地有机碳的贡献从坝后(S3)到坝前(S1)的位置有所下降,这可能的原因是由于水流减缓,拦沙坝保留了更多来自林地的碳。此外,在通过对小流域几十年的治理中,由于改变了土地利用方式,流域林地面积增加,可减少水土流失或减少已建拦沙坝附近的有机碳沉积。在坝前(S1)和坝中(S2),耕地对沉积物的贡献大于坝后(S3),这反映了农业作业的影响,例如肥料和粪肥的施用,或者严重的土壤侵蚀或养分流失。草地对拦沙坝沉积物有机碳贡献的减少可能是由于草地利用率增加或土壤养分流失的减少。在已建的拦沙坝附近,沟渠沉积较多碳。

沉积区剖面中各位点 SOC 贡献的垂直变化也可以反映土壤侵蚀和土地利用的时间异质性。我们的结果与 WANG 等^[26]的研究一致。同时本研究表明,尽管这是由集约化种植方式及坡地主导的小流域地形,但是大部分沉积区的碳主要来自于耕地。这种结果主要是由于耕地地表破碎,当遭遇强降雨事件时,表土流失,产生大量沉积物。此外,当河道内的泥沙量很大时,沟渠的侵蚀通常会减少。由于地表径流携带了大量来自耕地的沉积物,因此在沟渠系

统中的侵蚀减少了^[27-30]。同时也说明在流域出口修拦沙坝将是一种有效的工程方法,其可以控制土壤侵蚀,并保留由侵蚀过程输送的大量 SOC。

稳定性同位素混合模型作为一种可靠的“指纹”工具,适用于估算辽西丘陵沟壑区小流域中不同土地利用类型对沉积物中 SOC 的贡献率,这是质量平衡混合模型无法实现的^[31-33]。在研究的小流域中,利用 SIAR 混合模型对 4 种潜在土地利用(林地、耕地、草地和沟渠)类型表层土壤进行了收集和分析。尽管流域主要是沟渠和陡坡景观,但沉积物中的 SOC 主要来源于耕地的流失,其次是沟渠、草地和林地。

4 结 论

4.1 探讨了侵蚀土壤有机碳来源及其影响因素,明确了稳定碳氮同位素作为指示各潜在来源在辽西丘陵沟壑区的适用性。

4.2 辽西丘陵沟壑区小流域沉积物中的有机碳主要来源为耕地,其次是沟渠、草地和林地,其平均贡献率分别为 58.75%、25.49%、6.49%、9.2%。

参考文献 References

- [1] 陆银梅,李忠武,聂小东,黄斌,马文明,肖海兵.红壤缓坡地径流与土壤可蚀性对土壤有机碳流失的影响.农业工程学报,2015,31(19):135-141. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.19.019.
LU Y M, LI Z W, NIE X D, HUANG B, MA W M, XIAO H B. Effects of overland flow and soil erodibility on soil organic carbon loss in red soil sloping land. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19): 135-141. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819. 2015.19.019. (in Chinese)
- [2] SEBASTIAN D, ASMERETA B, ELISABET N, ZHENGANG W, MICAAEL S, PETER F. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. Earth-Science Reviews, 2016, 154: 102-122. DOI:10.1016/j.earscirev.2015.12.005.
- [3] LI Q, YU P J, LI G D, ZHOU D W, CHEN X Y. Overlooking soil erosion induces underestimation of the soil C loss in degraded land. Quaternary International, 2014, 349: 287-290. DOI:10.1016/j.quaint. 2014.05.034.
- [4] SINGH P, DINESH K, BEN B. Soil organic carbon pool changes in relation to slope position and land-use in Indian lower Himalayas. Catena, 2018, 166: 171-180. DOI:10.1016/j.catena.2018.04.006.
- [5] LIU C, LI Z W, CHANG X F, HE J J, NIE X D, LIU L, XIAO H B,

- WANG D Y, PENG H, GUANG M. Soil carbon and nitrogen sources and redistribution as affected by erosion and deposition processes: A case study in a loess hilly-gully catchment, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 253: 11-22. DOI:10.1016/j.agee.2017.10.028.
- [6] 王玉生. 太平沟小流域综合治理措施综述. *水土保持应用技术*, 2018, 1(1): 42-44.
- WANG Y S. Summary of comprehensive management measures of Taipinggou small watershed. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2018, 1(1): 42-44. (in Chinese)
- [7] 张帅, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 陈盖. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤有机碳储量的影响. *环境科学学报* 2014, 34(12): 3094-3101. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2014.0777.
- ZHANG S, XU M X, ZHANG Y F, WANG C H, CHEN G. Effects of land use change on storage of soil organic carbon in deep soil layers in the hilly Loess Plateau region, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(12): 3094-3101. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2014.0777. (in Chinese)
- [8] 刘琳. 黄土坡面有机碳迁移流失机制及模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2018.
- LIU L. The mechanisms of soil organic carbon (SOC) loss and its modeling[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, the University of Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education), 2018. (in Chinese)
- [9] 姚毓菲. 黄土高原小流域侵蚀区和沉积区土壤碳氮分布与矿化特征[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2020.
- YAO Y F. Distribution and mineralization of soil carbon and nitrogen in the erosion and deposition sites of small watersheds across China's Loess Plateau[D]. University of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education), 2020. (in Chinese)
- [10] YAN C, HUANG F, MICHAEL E E, SHANG A H, FORBES R W, ALICE C L. Testing the sediment fingerprinting technique using the SIAR model with artificial sediment mixtures. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(3): 1771-1781. DOI:10.1007/s11368-019-02545-7.
- [11] STEVENSON B A, KELLY E F, MCDONALD E V, BUSACCA A J. The stable carbon isotope composition of soil organic carbon and pedogenic carbonates along a bioclimatic gradient in the Palouse region, Washington State, USA. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 37-47. DOI:10.1016/j.geoderma.2004.03.006.
- [12] NORRA S, HANDLEY L L, BERNER A, STUBEN D. C^{13} and N^{15} natural abundances of urban soils and herbaceous vegetation in Karlsruhe, Germany. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(5): 607-620. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2005.00701.x.
- [13] GARZON-GARCIA A, LACEBY P J, OLLEY M J, BUNNT S. Differentiating the sources of fine sediment, organic matter and nitrogen in a subtropical Australian catchment, *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 37-47. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.09.219.
- [14] NORRA S, HANDLEY L L, BERNER Z, STUBEN D. C^{13} and N^{15} natural abundances of urban soils and herbaceous vegetation in Karlsruhe, Germany. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(5): 607-620. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2005.00701.x.
- [15] HILTON R G, GALY A, HOYIUS N, KAO S J, HORNG M J, CHEN J. Climatic and geomorphic controls on the erosion of terrestrial biomass from subtropical mountain forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(3): 1693-1705. DOI: 10.1029/2012GB004314.
- [16] MEUSBURGER K, MABIT L, PARK J H, SANDOR T, ALEWELL C. Combined use of stable isotopes and fallout radionuclides as soil erosion indicators in a forested mountain site, South Korea. *Biogeosciences*, 2013, 10(8): 5627-5638. DOI: 10.5194/bg-10-5627-2013.
- [17] PARNELL A C, INGER R, BEARHOP S, JACKSON A L, RANDS S. Partitioning using stable isotopes: Coping with too much variation. *PloS ONE*, 2010, 3(5): e5672. DOI: 10.1371/journal.pone.0009672.
- [18] YANG L, HAN J, XUE J, ZENG L, JIANG Y. Nitrate source apportionment in a subtropical watershed using Bayesian model. *Science of the Total Environment*, 2013(463/464): 340-347. DOI:10.1016/j.scitotenv.2013.06.021.
- [19] CRAVEN K F, EDWARDS R J, FLOOD R P. Source organic matter analysis of saltmarsh sediments using SIAR and its application in relative sea-level studies in regions of C4 plant invasion. *Boreas*, 2017, 46(4): 642-654. DOI:10.1111/bor.12245.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- BAO S D. Soil and Agrochemical Analysis. Beijing: China Agricultural Press, 1999. (in Chinese)
- [21] 弥智娟. 黄土高原坝控流域泥沙来源及产沙强度研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- NI Z J. Sediment source and sediment yield intensity in check dam controlled watershed of loess plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [22] LU L, CHENG H G, PU X, WANG J T, CHENG Q D, LIU X L.

- Identifying organic matter sources using isotopic ratios in a watershed impacted by intensive agricultural activities in Northeast China. *Agricultural Ecosystem and Environment*, 2016, 222: 48-59. DOI:10.1016/j.agee.2015.12.033.
- [23] 李忠武, 陆银梅, 聂小东, 马文明, 肖海兵. 基于坡面径流输沙模型的湘中红壤丘陵区土壤有机碳流失模拟研究. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(12): 115-124.
- LI Z W, LU Y M, NIE X D, MA W M, XIAO H B. Simulating study of the loss of soil organic carbon based on the modal of sediment transport by slope runoff in the hilly red soil region of central Human Province. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(12): 115-124. (in Chinese)
- [24] 张雪, 李忠武, 申卫平, 郭旺, 陈晓琳, 张越男, 黄金权. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流失量的定量关系. *土壤学报*, 2012, 49(3): 465-473.
- ZHANG X, LI Z W, SHEN W P, GUO W, CHEN X L, ZHANG Y N, HUANG J Q. Characteristics of loss of organic carbon in red soil and their quantitative relationships with sediment and runoff generation. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 465-473. (in Chinese)
- [25] KUMAR, MUKESH, KUNDU K, GHORAI A K, MITRA S. Carbon and nitrogen mineralization kinetics as influenced by diversified cropping systems and residue incorporation in Inceptisols of eastern Indo-Gangetic Plain. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 108-117. DOI: 10.1016/j.still.2017.12.025.
- [26] WANG Y X, FANG N F, TONG L S, SHI Z H. Source identification and budget evaluation of eroded organic carbon in an intensive agricultural catchment, *Agricultural. Ecosystem and Environment*, 2017, 247: 290-297. DOI: 10.1016/j.agee.2017.07.011.
- [27] BWEHE A A, MARGRET T. Erosional redistribution of topsoil controls soil nitrogen dynamics. *Biogeochemistry*, 2016, 132(1/2): 37-54. DOI: 10.1007/s10533-016-0286-5.
- [28] EBABU K, TSUNEKAWA A, HAREGEWEYN N, ADGO E, MESHESHA D T, AKLOG D, MASUNAGA T 6, TSUBO M, SULTAN D, FENTA A A, YIBELTAL M. Effects of land use and sustainable land management practices on runoff and soil loss in the Upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 1462-1475. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.273.
- [29] WHITEHEAD D, SCHIPPER L A, PRONGER J, MOINET GABRIEL Y K, MUDGE P L, CALVELO P R, KRISCHBAUM M U F, MCNALLY S R, BRARE M H, CAMPS A M. Management practices to reduce losses or increase soil carbon stocks in temperate grazed grasslands: New Zealand as a case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 265: 432-443. DOI: 10.1016/j.agee.2018.06.022.
- [30] NIE X D, LI Z W, HUANG J Q, LIU L, XIAO H B, LIU C, ZENG G M. Thermal stability of organic carbon in soil aggregates as affected by soil erosion and deposition. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 82-90. DOI: 10.1016/j.still.2017.08.010.
- [31] KRUSEKOPF C C. Diversity in land-tenure arrangements under the household responsibility system in China, *China Economic Review*, 2002, 13: 297-312. DOI: 10.1016/S1043-951X(02)00071-8.
- [32] World Reference Base for Soil Resources 2014: International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps, *World Soil Resources Reports 106*. 2014, FAO, Rome, Italy.
- [33] FU B, LIU Y, LU Y H, HE C S, ZENG Y, WU B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complex*, 2011, 8: 284-293. DOI: 10.1016/j.ecocom.2011.07.003.

(责任编辑 李云霞)