

DOI: 10.5846/stxb201804220915

鄂馨卉, 汪亚峰, 王林华, 祝艳, 冯棋, 陈利顶. 黄土典型坝系流域碳沉积特征及其源解析. 生态学报, 2021, 41(2): 645-654.

E X H, Wang Y F, Wang L H, Zhu Y, Feng Q, Chen L D. Characteristics of the soil carbon content and its carbon sources in deposition area at a watershed with check-dam in Loess Plateau China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 645-654.

## 黄土典型坝系流域碳沉积特征及其源解析

鄂馨卉<sup>1,2</sup>, 汪亚峰<sup>1,\*</sup>, 王林华<sup>1</sup>, 祝艳<sup>1</sup>, 冯棋<sup>1,2</sup>, 陈利顶<sup>1,2</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 沉积物信息能够反映流域侵蚀环境变化, 研究沉积物碳赋存规律对流域侵蚀过程和生态恢复具有重要指示意义。本文选取黄土高原典型坝系流域, 通过土壤沉积剖面取样和室内测试分析, 同时利用稳定同位素技术, 分析了坝地及沟道沉积土壤剖面的碳分布特征及其来源解析。结果显示: (1) 淤地坝沉积土壤总碳含量和土壤有机碳含量变化范围分别为 12.80—14.76 g/kg 和 1.34—3.53 g/kg; 沟道沉积土壤总碳含量和土壤有机碳含量变化范围分别为 13.61—17.86 g/kg 和 1.52—5.04 g/kg。(2) 淤地坝土壤总碳含量在土壤深度 0—100 cm 和 350—500 cm 区间波动较为平缓, 100—350 cm 波动较大; 沟道 0—200 cm 土壤层总碳含量沉积变化较大, 而 200—390 cm 土壤层变化平缓。淤地坝和沟道沉积土壤有机碳含量随土壤深度增加呈现降低趋势。(3) 淤地坝有机碳同位素变化范围为 -23.96‰—-22.09‰, 整体上呈现表层土偏正, 并随土壤深度增加而呈现偏负的趋势; 沟道沉积土壤有机碳同位素变化范围为 -27.04‰—-24.58‰, 随土壤随深度增加呈现偏正的趋势。(4) 羊圈沟坝地表层土壤有机碳多来源于灌木 (占 96.80%), 沟道表层土壤有机碳则多来自于灌木和草地 (分别占 62.05%、32.4%)。

**关键词:** 黄土高原; 淤地坝; 稳定碳同位素; 碳来源

## Characteristics of the soil carbon content and its carbon sources in deposition area at a watershed with check-dam in Loess Plateau China

E Xinhui<sup>1,2</sup>, WANG Yafeng<sup>1,\*</sup>, WANG Linhua<sup>1</sup>, ZHU Yan<sup>1</sup>, FENG Qi<sup>1,2</sup>, CHEN Liding<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Sediment information can reflect the changes of the erosion environment in a watershed. In addition, studies regarding the sedimentation process have significant implications for the erosion process and ecological restoration within a watershed. Therefore, this study analyzed the distribution patterns and sources of carbon in both gullies and check dams in the Loess Plateau. Soil samples were obtained from field study and analyzed using stable isotope techniques. The results showed that: (1) the soil total carbon (STC) and the soil organic carbon (SOC) in the check dams ranged from 12.80 to 14.76 g/kg and 1.34 to 3.53 g/kg, respectively, and that of gullies ranged from 13.61 to 17.86 g/kg and 1.52 to 5.04 g/kg, respectively. (2) The fluctuation of STC in check dams was relatively less in the depth of 0—100 cm and 350—500 cm soil profile, while relatively greater in the depth of 100 to 350 cm. The fluctuation range of STC in the gullies was relatively less in the depth of 200 to 390 cm, while relatively greater in the depth of 0 to 200 cm. Besides, the SOC in the check dams and gullies decreased with the increase of soil profile. (3) The SOC isotope in the dams ranged from -23.96‰ to -22.09‰ with the higher values observed in the surface soil layer and a decline with the increasing soil depth. The SOC

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671271); 国家重点研发计划重点专项 (2016YFC0501602)

收稿日期: 2018-04-22; 网络出版日期: 2020-11-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yfwang@itpcas.ac.cn

isotope of gullies ranged from  $-27.04\%$  to  $-24.58\%$ , which showed an increasing trend with increasing soil depth. (4) The SOC in the surface soil of the dams mainly originated from the shrubland (96.80%), and that of the gullies was mostly derived from the shrubland (62.05%) and grassland (32.4%).

**Key Words:** Loess Plateau; check dam; stable carbon isotope; carbon sources

黄土高原是世界上土壤侵蚀最为严重的地区之一。为缓解土壤侵蚀情况,20世纪50年代以来我国开展一系列水土保持措施,其中淤地坝工程是小流域综合治理的一项重要措施。淤地坝截留泥沙并有效控制水土流失,截止2010年,黄土高原地区共建成10万多个淤地坝<sup>[1-3]</sup>。土壤碳库是陆地生态系统中最大的有机碳库,其中淤地坝沉积土壤的不断积累过程是土壤有机碳库储存的过程<sup>[4-5]</sup>,也是土壤有机碳的动态平衡过程<sup>[6-7]</sup>。研究流域80年代初开始实施退耕还林工程,2000年开展大规模实施<sup>[8]</sup>。淤地坝修建和植被恢复对流域景观造成的巨大改变势必会引起土壤碳侵蚀过程以及地表水文过程发生变化,因此植被恢复下的土壤沉积碳特征及碳来源问题值得探讨研究。

稳定碳同位素比值分析法是评估土壤侵蚀过程中碳重新分配的有效方法,尤其在植被土地利用变化后,该示踪技术对此有很好的分辨力<sup>[9]</sup>,如 Meusburger 等<sup>[10]</sup>利用稳定碳同位素作为定性指标研究侵蚀沉积对土壤的扰动情况;张金<sup>[11]</sup>应用稳定碳值能够判断深层土壤有机碳的不同来源,并明确 C3 和 C4 植物凋落物对土壤有机碳的相对贡献。沉积物中有机质含量、碳氮比和碳同位素均可作为水土流失和土地利用变化提供重要的历史信息<sup>[12-14]</sup>,但因稳定碳同位素在示踪来源上具有不明确性以及重叠性,研究者多将稳定碳同位素与碳氮比相结合来研究沉积区域侵蚀物质来源,如 Liu 等<sup>[15]</sup>对黄土丘陵区的研究表明,乔木林地和灌木林地是表层沉积物的主要有机碳来源;McCorkle 等<sup>[16]</sup>有关坡底沉积物的研究显示,沉积有机质多来自于土壤的腐殖质并且根据侵蚀过程前后的分解作用推测土壤侵蚀在该区起到大气碳源作用;Yu 等<sup>[17]</sup>研究表明,虽然沉积过程中潜在来源的土壤碳同位素及碳氮比会发生分馏及降解作用,但变化对于沉积物碳溯源的影响较小,因此稳定碳同位素及碳氮比仍可作为碳来源示踪的有效指标。

本文研究流域为典型坝系流域,坝地沉积和沟道沉积为主要土壤沉积方式,沟道自然形成的沉积土壤碳及碳同位素特征同样能够反映一定土壤侵蚀信息。目前,已进行了大量有关淤地坝碳储存及沉积机理方面的研究<sup>[5-6,18]</sup>,但不同沉积方式下的土壤碳沉积特征、碳来源差异以及不同土地利用类型的潜在来源下的碳贡献罕有研究。此外,沉积土壤的研究多限于土壤表层,而较早期沉积的深层碳的研究对于流域的侵蚀过程及景观变化的研究具有重要意义。因沉积区土壤碳主要来自两个方面,一是原位植物的凋落物及根系分泌物等;二是土壤侵蚀带来的外部土壤碳及相关碳输入<sup>[19]</sup>。早期沉积土壤主要因坡面土壤侵蚀导致,且随研究流域植被的恢复,植被覆盖的变化在沉积土壤碳同位素数值上会有相应体现,因此选择坡面不同土地利用类型下的土壤碳同位素作为潜在来源对沉积土壤碳进行示踪具有指示意义。本研究以黄土高原典型坝系流域为研究对象,利用稳定碳同位素技术及碳氮元素比值对沉积土壤碳来源进行分析,揭示流域尺度上淤地坝及沟道沉积土壤碳沉积特征,探讨不同沉积方式下土壤碳分布及碳来源差异,以期为黄土高原植被恢复与生态建设研究提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区为羊圈沟小流域(36°42'N,109°31'E),位于延安市宝塔区(图1)。流域地处黄河中游区,为延河流域二级支沟,沟谷密度为 2.74 km/km<sup>2</sup>,流域面积为 2.02 km<sup>2</sup>。海拔在 1050—1298 m,相对高差 245 m,地形起伏较大。塬、梁和峁为基本地貌类型且属于典型黄土丘陵沟壑区。流域土壤类型主要为黄土母质上发育的黄绵土,抗蚀性差,质地均一。流域水土流失严重,并因长期掠夺式耕种导致土壤营养物质匮乏,肥力较

低<sup>[8]</sup>。该区域属于半干旱大陆性季风气候,年均气温为 10.8℃,年平均降水量为 498 mm,年际降雨变化率大,主要集中于 7—9 月。流域植被属于森林草原过渡带,流域植被受人为活动干扰较强,原有自然植被所剩无几,多数为人工种植的次生植被。乔木主要有刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、柳树 (*Salix* spp.) 和杨树 (*Populus* spp.) 等,灌木主要为沙棘 (*Hippophae rhamnoides*),草类主要有长芒草 (*Stipa bungeana*)、艾蒿 (*Artemisia argyi*) 和铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*) 等<sup>[20]</sup>;果园主要种植苹果树、核桃树、李子树和杏树。主要农作物有谷子和玉米和马铃薯等。

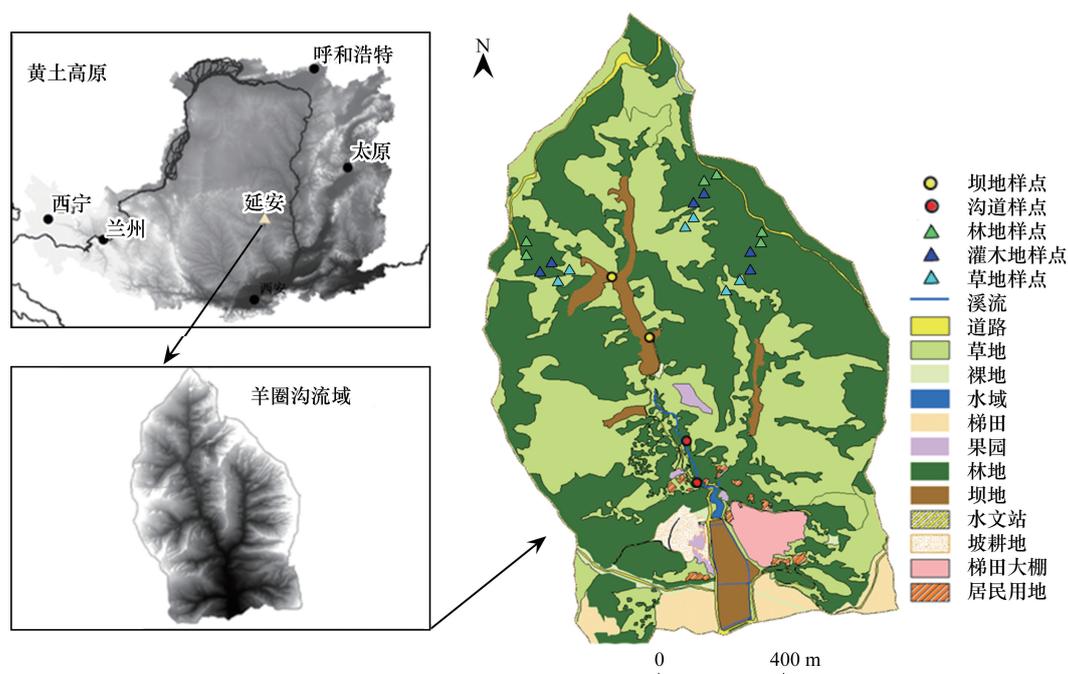


图 1 羊圈沟地理位置、土地利用方式及流域采样点分布示意

Fig.1 Sampling point distribution and different land-uses in Yangjuangou watershed

## 1.2 样点布设与采集

本研究分别在流域上游和下游选择典型淤地坝作为人工土壤沉积样点(图 1),上游坝地类型属于正沟坝,现有玉米种植,下游坝地为阶梯坝,属于荒地,现无庄稼种植。于 2016 年 10 月,使用荷兰 Eijkelkamp 公司生产的半圆凿钻式土钻(直径 6 cm,另配 4 跟扩展杆,采样深度达 5 m)进行土壤样品采集。坝地土样采集深度达 5 m,其中 0—100 cm 每隔 10 cm 进行土壤样品采集,100—200 cm 每隔 20 cm 采集,200—500 cm 每隔 30 cm 采集。其次,在流域沟道中游和下游各选择一个采样点作为自然沉积样点(图 1),沟道土壤样品采集尽可能取到所有沉积土壤(判定标准为土钻无法再进行钻取土壤),采集深度至 290 cm,土壤采集的剖面深度间隔与淤地坝土壤采集一致。

由于沟道和淤地坝沉积土壤碳的潜在来源均为坡面上的土壤碳,因此本研究采集坡面的乔木林地、灌木林地和草地(后简称林地、灌木和草地)三种典型土地利用类型下的表层土壤(0—10 cm)进行碳来源示踪分析,每种土地利用类型采集 6 个样点(图 1)。

## 1.3 样品室内分析与数据处理

土壤样品经自然风干后过 100 目筛研磨后,利用元素分析仪(德国 Vario EL III)进行土壤总碳含量 STC (Soil Total Carbon)和碳氮比(C/N)的测定,因元素分析仪可直接测得土壤总碳及总氮含量,进而得出碳氮比值。土壤有机碳含量 SOC(Soil Organic Carbon)的测定采用重铬酸钾法。土壤有机碳同位素的土壤前处理方式如下:取 1 g 样品加入 3 mol/L 盐酸去除碳酸盐,浸泡 24 h,离心洗涤至中性,然后经 60℃烘干并研磨备用,

然后将预处理后的土壤样品过稳定同位素比质谱仪(美国 DELTA V ADVANTAGE)进行有机碳同位素 SOC- $\delta^{13}\text{C}$  的测定。本文数据处理、方差分析及作图使用 SPSS19.0 和 Origin9.0 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 淤地坝和沟道沉积土壤碳变化特征

淤地坝 STC 含量的变化范围为 12.80—14.76 g/kg, 均值为 13.98 g/kg, 变异系数为 8.57% (图 2)。STC 含量最低值和最高值分别出现在 470—500 cm 和 30—40 cm 层土壤。0—100 cm 段 STC 含量波动较小, 其中 0—30 cm 层, STC 含量随着表层土壤随深度增加而降低。100—350 cm 层 STC 波动范围最大, 含量随土壤深度的增加呈现降低趋势。350—500 cm 层土壤 STC 含量变化平缓。淤地坝 SOC 含量变化范围为 1.34—3.53 g/kg, 均值为 2.06 g/kg, 变异系数为 30.04% (图 2)。SOC 含量最低值和最高值分别出现于 290—320 cm 和 0—10 cm 层土壤。在 0—30 cm 层, SOC 含量随土壤深度增加而明显下降, 在 30—100 cm 层, SOC 含量基本在 2.28 g/kg 左右反复波动, 在 350—500 cm 层, SOC 含量在 2.05 g/kg 左右波动。SOC 整体变化规律与 STC 不同, 从 10 cm 表层土壤开始就有很明显的变化, 即随深度的加深而降低, 从 350 cm 层至 500 cm 深层土壤则无明显变化。

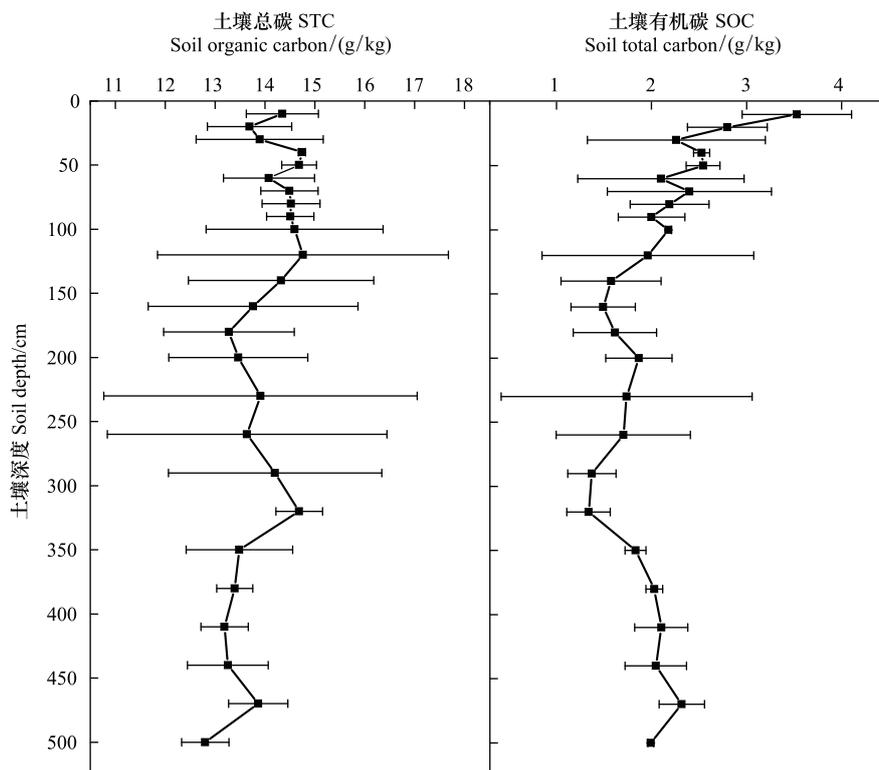


图 2 淤地坝剖面土壤碳含量变化特征

Fig. 2 The variation characteristics of soil total carbon and organic carbon in different depth at check-dam site

沟道沉积 STC 含量变化范围为 13.61—17.86 g/kg, 均值为 16.00 g/kg, 变异系数为 10.51% (图 3)。STC 含量最高值和最低值分别出现于 10—20 cm 和 140—160 cm 层土壤。在 0—100 cm, STC 含量表现出随深度加深而降低的趋势, 而 100—290 cm 层表现出增加趋势。沟道 SOC 整体上随着土壤深度增加呈现降低趋势, SOC 含量变化范围为 1.52—5.04 g/kg, 均值为 2.86 g/kg, 变异系数为 45.60%, 其中最低值位于 260—290 cm 层, 最高值位于 10—20 cm 层 (图 3)。

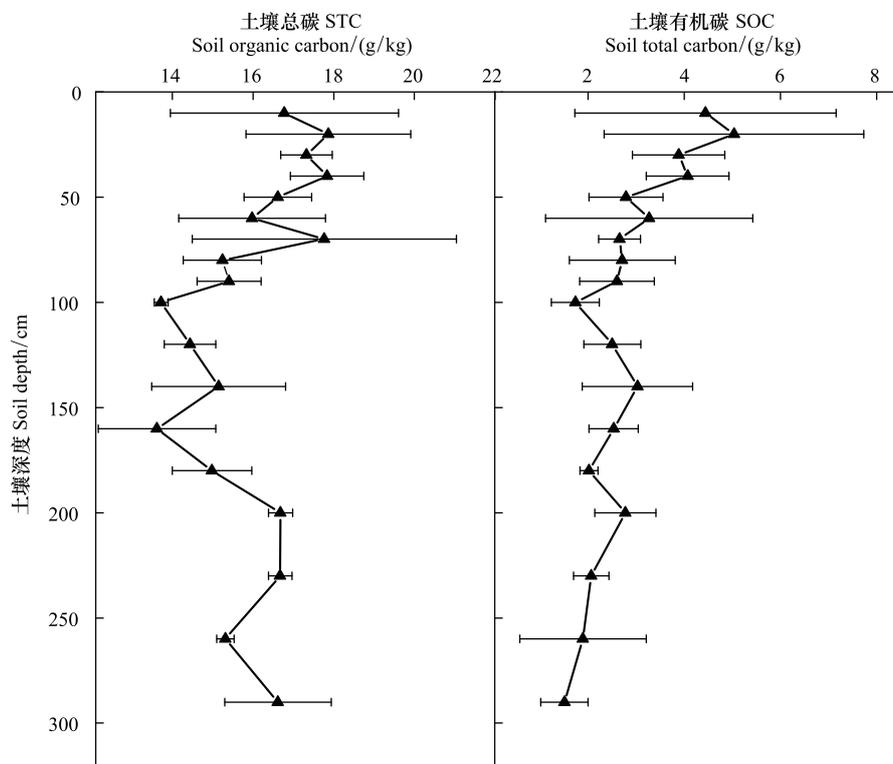


图3 流域沟道土壤剖面碳含量变化特征

Fig.3 The variation characteristics of the Profile of gully's soil carbon content

2.2 沉积土壤碳同位素及碳氮比分布特征

淤地坝碳氮比变化范围为 28.70—49.33,均值为 41.36,变异系数为 10.69%(图 4)。最大值和最小值分别出现在 290—320 cm 和 0—10 cm 层土壤。在 0—30 cm 层,坝地碳氮比随土壤深度的增加而增加,在 30—

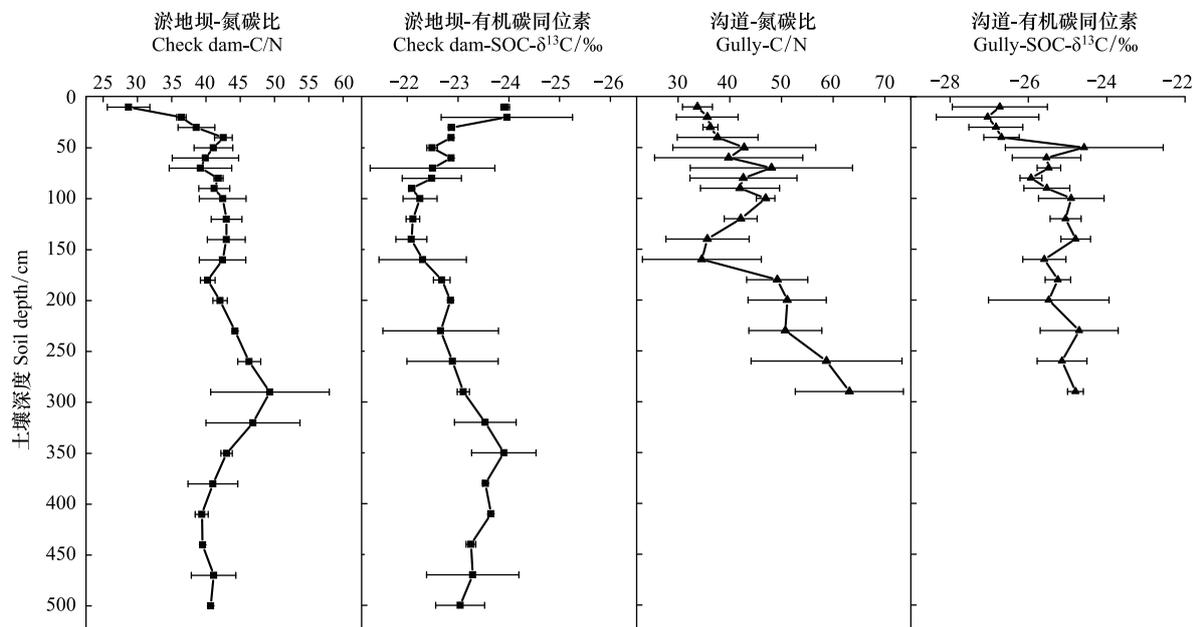


图4 淤地坝及沟道土壤有机碳同位素及碳氮比分布特征

Fig.4 The distribution characteristics of the organic carbon isotope and the C/N of check-dam and gully's soil

500 cm层,变化趋近缓和,碳氮比在 42.29 左右波动。坝地有机碳同位素范围为 $-23.96\%$ — $-22.09\%$ ,均值为 $-22.93\%$ ,变异系数为 3.11%(图 4),整体上呈现表层土数值偏正,随深度增加有偏负的趋势。分段来看,0—100 cm 层,有机碳同位素随深度增加呈现偏正趋势,100—350 cm 层,呈现偏负趋势,而到 350 cm 至更深层土壤则呈现偏正趋势。

沟道沉积土壤碳氮比变化范围为 33.77—63.12,均值为 43.94,变异系数为 24.23%(图 4)。最大值和最小值分别出现在 0—10 cm 和 260—290 cm 层土壤。表层土随深度增加,碳氮比随土壤深度增加呈现增加趋势,100—160 cm 层碳氮比随土壤深度加深而呈现降低趋势,160 cm 至最深层土壤碳氮比呈现增加趋势。沟道沉积土壤有机碳同位素变化范围为 $-27.04\%$ — $-24.58\%$ ,均值为 $-25.56\%$ ,变异系数为 3.93%。最大值和最小值分别出现于 10—20 cm 和 40—50 cm 层土壤。其中,0—100 cm 层土壤碳同位素变化较强烈,深层变化较为平稳。整体上呈现有机碳同位素随土壤深度增加而偏正的变化趋势。

### 2.3 潜在碳来源的土壤碳同位素及碳氮比分布特征

坡面的主要土地利用类型为草地、林地、灌木,均为沉积土壤碳的主要潜在来源,因此为研究沉积土壤碳来源,选取坡面典型土地利用类型的表层土壤(0—10 cm)进行碳稳定同位素测试。如图 5 所示依次为草地、林地、灌木地的碳氮比数值及有机碳同位素的箱式图。

图 5-a 为坡面不同土地利用方式下表层土壤碳氮比数值的分布情况,林地、灌木和草地表层土壤碳氮比分别为 $37.95\pm 9.89$ (范围 26.82—52.42)、 $35.23\pm 7.56$ (范围 22.66—47.32)和 $26.37\pm 4.77$ (范围 21.39—36.18)。单因素方差分析结果表明林地及灌木的碳氮比数值显著高于草地,而草地与灌木间无显著性( $df=2, F=4.819, P<0.05$ )。

图 5-b 为坡面土壤有机碳同位素的分布图,灌木土壤有机碳同位素的变化范围较小( $-25.23\%$ — $-23.98\%$ ),且呈现偏正的趋势,而草地( $-27.58\%$ — $-24.95\%$ )和林地( $-26.51\%$ — $-24.87\%$ )中土壤有机碳同位素的变化范围较大。林地、灌木林地和草地土壤有机碳同位素分别为 $-26.02\%\pm 1.13\%$ 、 $-24.57\%\pm 0.61\%$ 和 $-26.47\%\pm 1.02\%$ 。方差分析结果表明灌木有机碳同位素值显著高于林地及草地,其他两者间未为出现显著差异( $df=2, F=4.905, P<0.05$ )。

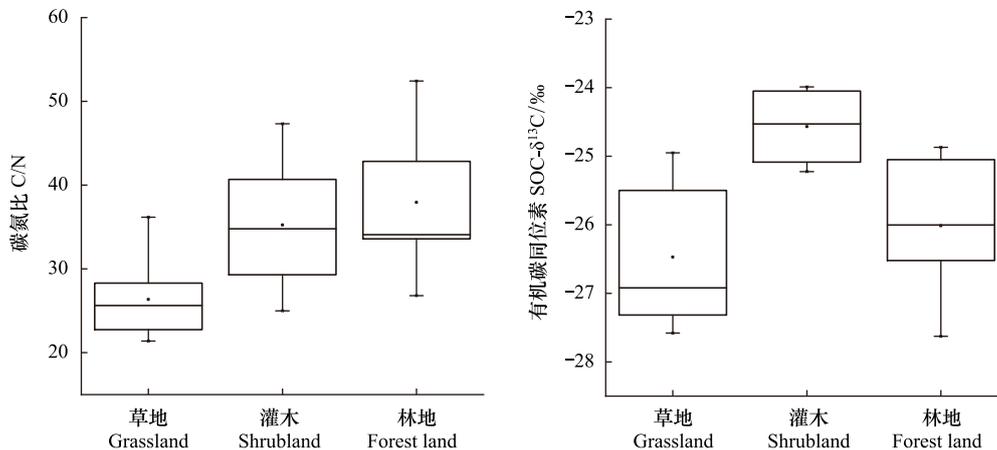


图 5 沉积土壤潜在碳来源碳同位素及碳氮比分布特征

Fig.5 The distribution characteristics of the C isotope and C/N of the potential carbon source

## 3 讨论

### 3.1 流域沉积土壤碳变化情况的影响因素

土壤碳沉积是碳与生物圈连接紧密的活性库进入更加稳定的惰性碳库的过程<sup>[21]</sup>。受人类活动的影响,淤地坝土壤的形成过程与自然土壤不同,土壤性质在不同深度土层上的变化亦有所差异,其土壤碳变化具体原因与坝地区域的气候状况、坝地土壤的成土过程、淤地坝地形特征相关<sup>[5]</sup>。由图 2 所示 STC 的整体波动情

况,可将淤地坝剖面碳变化特征整体划分为三个阶段依次为 0—100 cm、100—350 cm、350—500 cm:第一阶段,坝地波动范围较小,0—50 cm 层随土壤深度加深而 STC 降低,因为随着距地表距离增加土壤越贫瘠,无植物腐殖质及根部提供有机质;50—100 cm 无明显波动,主要因为该土壤层碳还未进行分解;第二阶段 100—350 cm 坝地碳含量波动情况最大,此处碳在进行一系列的复杂变化如土壤碳的淋溶、化学、生物等作用;第三阶段 350—500 cm 沉积碳波动稳定且波动范围最小,可能由于土壤碳已经历过上述复杂过程后在该层趋于稳定平衡。土壤有机碳含量较高的土壤层含有大量植物碎屑,表明该层发生了有机残体的腐烂降解,这导致该层土壤有机碳含量和储量增大,该现象多发生于土壤表层。此外,对于坝地深层沉积碳而言,因坝地存在土壤压实作用,进而通过限制土壤有机碳活性和限制异养微生物对碳的消耗,从而减小土壤有机碳的矿化速率<sup>[22-24]</sup>。此外坝地由于其透气性差,外源有机残体在水分作用下易于腐烂降解成有机物质,土壤有机碳含量随深度变化无明显下降趋势,有利于底层 SOC 含量波动较为稳定,进而表明坝地先前大量埋藏的土壤有机碳没有完全矿化<sup>[25-26]</sup>。坝地及沟道表层沉积土壤随深度加深有机碳含量减少的幅度比总碳含量增加的幅度快速,主要因为土壤碳空间变化主要受土壤母质碳含量影响,该流域土壤母质是相对均质的黄土母质,母质中碳酸盐碳含量明显高于有机碳,进而有机碳的波动对总碳含量不会造成太大影响<sup>[27]</sup>。

沟道沉积土壤从不同层的碳变化上来看与坝地的碳含量有很大不同。沟道与坝地相比较,总碳、有机碳含量高于坝地沉积土壤,因沟道位于流域下游并且附近植物生长茂盛,有较高比例未分解的有机质,地表凋落物和输入土层凋落物较坝地多<sup>[28-29]</sup>。坝地沉积土壤来源于随径流携带土壤,土壤迁移中碳会发生流失及矿化,并且坝地土壤沉积过程中还会受施肥、阳光暴晒等影响,导致其沉积土壤碳含量及其分布形式与一般土地的土壤有很大差异<sup>[12]</sup>。而沟道土壤沉积过程中,因受周围植物及水流的影响,会携带较多凋落物在下游进行堆积,因此在相同深度下,沟道沉积总碳含量及有机碳含量高于坝地沉积碳含量。此外,土地利用类型对于碳氮比含量有较大影响<sup>[30]</sup>,坝地因农作物的种植而存在施肥的影响,是其表层土壤碳氮比低于沟道土壤碳氮比的主要因素。坝地 200 cm 至更深层的土壤碳氮比较沟道碳氮比值要低,原因其一在于深层坝地土壤的沉积发生较为早期,植被还未进行大规模恢复,进而无法提供一定的碳含量;其二在于沟道所处地理位置及周围植被的生长情况,与沟道碳含量高于坝地原因相同。

### 3.2 沉积土壤同位素碳来源解析

坝地与沟道表层土壤碳同位素呈现随深度增加而呈现偏正的趋势,这与 McCorkle 等对沉积土壤同位素的研究及李龙波等对于黄壤土的同位素研究一致,可能由于微生物的分解过程中优先分解<sup>12</sup>C 造成<sup>13</sup>C 富集,并且难降解物质会富集<sup>13</sup>C,因此随土层深度增加而增加<sup>[16,31]</sup>。但是以上研究土壤深度限于 100 cm 左右。本研究深度达 500 cm 的深层土壤,在淤地坝 100—350 cm 层有机碳同位素出现偏负的变化趋势,与其特殊的沉积过程及较长沉积时间而发生的一些列变化相关。沟道与坝地相较而言,因沟道受雨季水流、降雨冲刷径流等影响也会使得沉积土壤的碳氮比及同位素的分布情况随土壤深度的波动较大。C3、C4 植物具有显著不同且互不重叠的碳同位素分布区间,依次为 $-22‰$ — $-30‰$ 、 $-10‰$ — $-14‰$ <sup>[32-33]</sup>,本研究中坝地有玉米 C4 植物种植,但沟道、坡面植被主要为 C3 植物,印证了坝地土壤碳同位素较沟道碳同位素值偏正的原因。而坝地表层较深层碳同位素值偏负,除上述<sup>12</sup>C 分解及<sup>13</sup>C 富集作用外,早年坝地还未淤满时附近土壤生长植物已 C3 为主,而淤满后因庄稼种植的更替变化从而导致土壤碳同位素值随深度增加。

坝地及沟道沉积土壤潜在来源均为坡面土壤的拦截及堆积,因碳氮比及稳定碳同位素可共同判定土壤碳来源,进而依据研究地区典型草地、林地、灌木土地利用方式的碳氮比及稳定碳同位素范围评估坝地、沟道侵蚀沉积土壤碳来源。如图 6 所示,羊圈沟淤地坝表层土壤有机碳来源多来自于灌木,而深层有机碳难以示踪其来源。沟道表层土壤有机碳多来自于林地及灌木,沟道的碳来源较为复杂,这与沟道附近植被分布格局复杂关系密切。虽然沟道在较为深层的 200—290 cm 土壤层依旧难以溯源,但是沟道沉积土壤相较于淤地坝更易追溯其碳来源,因为自然沉积过程对于潜在来源的 SOC 破坏较少,并且水流、地势等原因使其更易发生迁移作用<sup>[28]</sup>。利用稳定性同位素分析软件 IsoSource 对坝地及沟道土壤有机碳来源百分比进行分析,如图 7 所

示,计算得到林地、灌木、草地对坝地 0—20 cm 表层土壤有机碳的贡献依次为 2.05%、96.80%和 1.15%;对沟道沉积土壤进行分析,0—20 cm 土壤表层土壤有机碳来自灌木 62.05%、草地 32.4%和林地 5.55%,从整体上分析,灌木贡献最多为 58.72%,草地、林地贡献依次为 22.41%、18.87%。

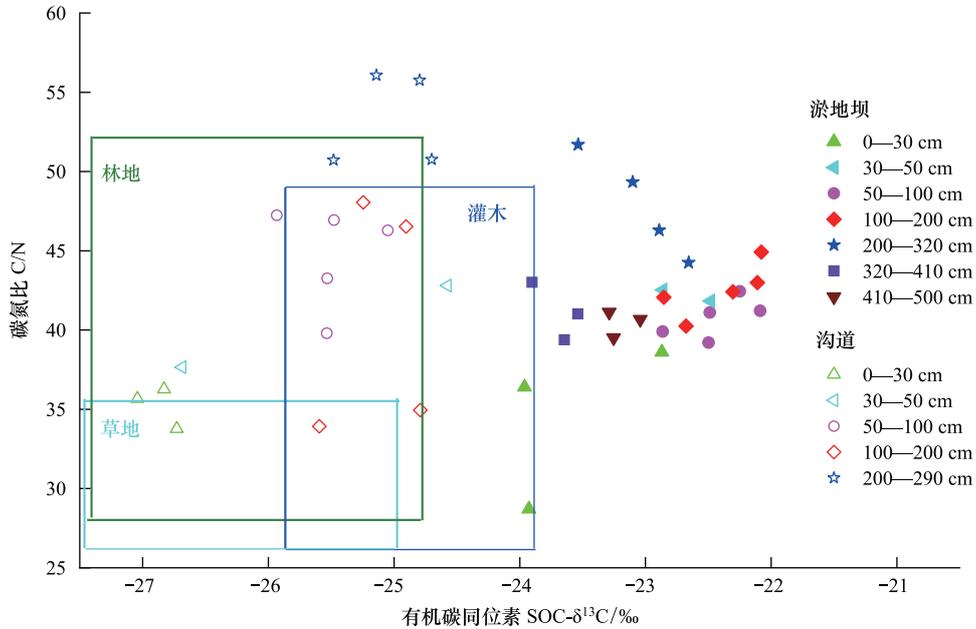


图 6 沉积土壤的有机碳来源

Fig.6 The SOC source of the sedimentary soil

沉积土壤碳的变化及来源与不同类型植被覆盖的土壤固定情况及周围土地利用方式极为相关,沉积不同深度的土壤代表了不同阶段下不同土地利用条件的侵蚀情况<sup>[34]</sup>。土壤深度越深,代表淤积土壤侵蚀发生于早期,随着退耕还林工程推进,土地利用发生着变化,进而淤积土壤的来源也相应发生改变。黄土高原不同恢复植被下的减流、减沙效应依次为灌木地、草地、乔木林地<sup>[35]</sup>。本研究的淤地坝及沟道表层沉积碳来源中,灌木均占最大比例,并且在沟道深层沉积碳中,灌木贡献所占百分比依旧最高。进而印证了在流域现阶段及植被恢复期间灌木为流域主要植被类型,并且其植被恢复前期属于幼年灌木,其生长还未达一定防御密度,因此受土壤侵蚀影响较为严重<sup>[8]</sup>。

降雨径流是淤地坝沉积土壤来源的动力,土壤碳在迁移沉积后会经历暴晒、雨水浸泡的反复过程,进而发生一系列复杂的变化,如矿化、淋溶、分解等,并且因淤地坝建设年代较久,深层土壤碳受同位素分馏影响也较为严重<sup>[28]</sup>。降雨事件的发生、土壤碳搬运、沉积及储存过程均为相互联系、相互制约,具有时间和空间变异性,这些过程的综合作用导致深层土壤碳同位素偏离初始值,经多年沉积后难以示踪其碳来源<sup>[36]</sup>。此外,由于淤地坝和沟道深层土壤淤积时间较早,至少为退耕之前,因此深层沉积土壤还可能来源于坡耕地碳,而本文的研究主要针对不同恢复植被类型碳来源的解析。尽管深层土壤中有机碳的来源存在不确定性,但因表层土可表征近期沉积情况,稳定碳同位素碳和 C/N 的示踪技术

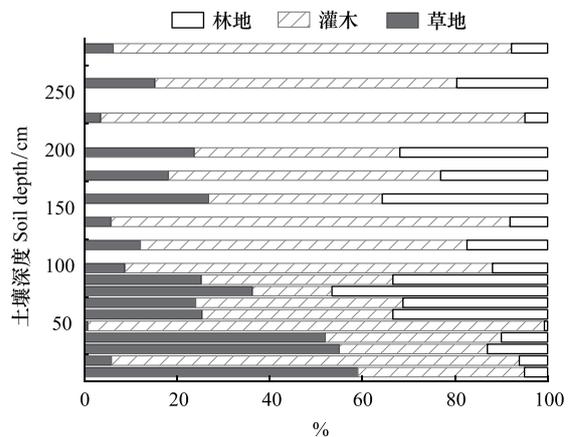


图 7 沟道沉积土壤有机碳来源百分比

Fig.7 Percentage of gully-deposited soil organic carbon sources

仍然是短期内追溯沉积有机碳来源的有效手段。

#### 4 结论

(1)淤地坝 STC 含量的变化范围为 12.80—14.76 g/kg,其中土壤层 0—100 cm、350—500 cm,STC 波动较为平缓,中间 100—350 cm 波动较大;沟道变化范围为 13.61—17.86 g/kg,其中 0—200 cm 土壤层沉积总碳变化较大,200—390 cm 土层变化平缓。坝地及沟道 SOC 变化范围分别为 1.34—3.53 g/kg 和 1.52—5.04 g/kg,坝地及沟道土壤有机碳随深度增加呈现降低趋势,此外坝地沉积在相同深度下碳含量要低于沟道沉积碳含量。

(2)淤地坝有机碳同位素变化范围为 $-23.96‰$ — $-22.09‰$ ,其中 0—100 cm 土层的有机碳同位素存在偏正趋势,但随深度加深呈现偏负趋势。沟道沉积土壤有机碳同位素随着深度增加呈现偏正的趋势,波动范围为 $-27.04‰$ — $-24.58‰$ 。

(3)羊圈沟坝地表层土壤有机碳来源多来自于灌木(占 96.80%),沟道表层土壤有机碳则多来自于灌木及草地(分别占 62.05%、32.4%)。坝地深层沉积土壤碳难以示踪其源,而沟道沉积碳较易追溯其来源。在沟道整体沉积土壤碳来源中,灌木占 58.72%,草地、林地依次占 22.41%、18.87%。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Fu B J, Liu Y, Lü 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 Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [ 2 ] Yu Y, Ni J R, Ciais P, Piao S L, Wang T, Huang M T, Borthwick listair G L, Li T H, Wang Y C, Chappell A, Van Oost K. Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO<sub>2</sub> flux induced by water erosion in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(24): 6617-6622.
- [ 3 ] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [ 4 ] 李玉进. 黄土丘陵区植被恢复和淤地坝对小流域土壤有机碳储量的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.
- [ 5 ] Lü Y H, Sun R H, Fu B J, Wang Y F. Carbon retention by check dams: regional scale estimation. *Ecological Engineering*, 2012, 44: 139-146.
- [ 6 ] Wang Y F, Fu B J, Chen L D, Lü Y H, Gao Y. Check dam in the loess Plateau of China: engineering for environmental services and food security. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(24): 10298-10299.
- [ 7 ] Wang Y F, Fu B J, Lü Y H, Chen L D. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China. *CATENA*, 2011, 85(1): 58-66.
- [ 8 ] 汪亚峰, 傅伯杰, 陈利顶, 吕一河, 罗春燕. 黄土丘陵小流域土地利用变化的土壤侵蚀效应: 基于<sup>137</sup>Cs 示踪的定量评价. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1571-1576.
- [ 9 ] Liu C, Li Z W, Dong Y T, Chang X F, Nie X D, Liu L, Xiao H B, Wang D Y, Peng H. Response of sedimentary organic matter source to rainfall events using stable carbon and nitrogen isotopes in a typical loess hilly-gully catchment of China. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 376-386.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 张金. 黄土丘陵区深层土壤有机碳的储量及来源[D]. 咸阳: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.
- [ 12 ] Wang Y F, Chen L D, Fu B J, Lü Y H. Check dam sediments: an important indicator of the effects of environmental changes on soil erosion in the Loess Plateau in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(7): 4275-4287.
- [ 13 ] Zhao G J, Kondolf G M, Mu X M, Han M W, He Z, Rubin Z, Wang F, Gao P, Sun W Y. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China. *CATENA*, 2017, 148: 126-137.
- [ 14 ] Chen F X, Fang N F, Shi Z H. Using biomarkers as fingerprint properties to identify sediment sources in a small catchment. *Science of the Total Environment*, 2016, 557-558: 123-133.
- [ 15 ] Liu C, Dong Y T, Li Z W, Chang X F, Nie X D, Liu L, Xiao H B, Bashir H. Tracing the source of sedimentary organic carbon in the Loess Plateau of China: an integrated elemental ratio, stable carbon signatures, and radioactive isotopes approach. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, 167: 201-210.
- [ 16 ] McCorkle E P, Berhe A A, Hunsaker C T, Johnson D W, McFarlane K J, Fogel M L, Hart S C. Tracing the source of soil organic matter eroded

- from temperate forest catchments using carbon and nitrogen isotopes. *Chemical Geology*, 2016, 445: 172-184.
- [17] Yu F L, Zong Y Q, Lloyd J M, Huang G Q, Leng M J, Kendrick C, Lamb A L, Yim W W S. Bulk organic  $\delta^{13}\text{C}$  and C/N as indicators for sediment sources in the Pearl River delta and estuary, southern China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 87(4): 618-630.
- [18] 李勉, 杨二, 李平, 鲍宏喆, 李莉, 申震洲, 焦鹏. 黄土丘陵区小流域淤地坝泥沙沉积特征. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 161-167.
- [19] Zhang X, Li Z W, Tang Z H, Zeng G M, Huang J Q, Guo W, Chen X L, Hirsh A. Effects of water erosion on the redistribution of soil organic carbon in the hilly red soil region of southern China. *Geomorphology*, 2013, 197: 137-144.
- [20] 文雯, 周宝同, 汪亚峰, 梁地. 黄土高原羊圈沟小流域土地利用时空变化的土壤有机碳效应. *生态学报*, 2015, 35(18): 6060-6069.
- [21] McCarty G W, Ritchie J C. Impact of soil movement on carbon sequestration in agricultural ecosystems. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 423-430.
- [22] Salomé C, Nunan N, Pouteau V, Lerch T Z, Chenu C. Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 416-426.
- [23] Hopkins III J B, Ferguson J M. Estimating the diets of animals using stable isotopes and a comprehensive bayesian mixing model. *PLoS One*, 2012, 7(1): e28478.
- [24] VandenBygaart A J, Gregorich E G, Helgason B L. Cropland C erosion and burial: is buried soil organic matter biodegradable? *Geoderma*, 2015, 239-240: 240-249.
- [25] 文雯. 黄土高原羊圈沟小流域土地利用时空变化的土壤有机碳效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [26] Jobbágy E G, Jackson R B. The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 2001, 53(1): 51-77.
- [27] 陈忠, 马海州, 曹广超, 周笃珺, 张西营, 谭红兵, 姚远. 黄土碳酸盐的研究. *盐湖研究*, 2006, 14(4): 66-72.
- [28] Liu C, Li Z W, Chang X F, He J J, Nie X D, Liu L, Xiao H B, Wang D Y, Peng H, Zeng G 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 & Environment*, 2018, 253: 11-22.
- [29] Wang Z G, Govers G, Steegen A, Clymans W, Van Den Putte A, Langhans C, Merckx R, Van Oost K. Catchment-scale carbon redistribution and delivery by water erosion in an intensively cultivated area. *Geomorphology*, 2010, 124(1/2): 65-74.
- [30] 罗由林, 李启权, 王昌全, 张维, 张浩, 李林鲜, 陈俊伟, 马煜. 川中丘陵县域土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 177-185.
- [31] 李龙波, 刘涛泽, 李晓东, 刘文景, 刘从强. 贵州喀斯特地区典型土壤有机碳垂直分布特征及其同位素组成. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 241-247.
- [32] 饶志国, 朱照宇, 陈发虎, 张家武. 黄土有机质稳定碳同位素研究进展. *地球科学进展*, 2006, 21(1): 62-69.
- [33] 张晓. 陇西黄土高原和新疆伊犁盆地黄土有机碳同位素的变化及其古环境意义[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [34] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 刘宇, 王帅, 周继. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(1): 12-22.
- [35] 黄志霖, 傅伯杰, 陈利顶, 黄奕龙, 吴祥林. 黄土丘陵沟壑区不同退耕类型径流、侵蚀效应及其时间变化特征. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 37-41.
- [36] 王云强, 张兴昌, 韩凤朋. 黄土高原淤地坝土壤性质剖面变化规律及其功能探讨. *环境科学*, 2008, 29(4): 1020-1026.