

稳定碳同位素在草地生态系统碳循环中的应用与展望

张 昊¹, 李建平^{1,2}

(1.宁夏大学 农学院, 银川 750021; 2.西北退化生态系统恢复与重建国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

摘 要:利用稳定碳同位素来追踪生态系统物质循环和能量流动, 定量示踪生态系统中碳元素的转移, 明确生态系统碳循环及其驱动机制, 已经成为目前研究生态系统碳循环的一个重要手段。稳定碳同位素技术在草地生态系统碳循环中的应用主要包括判定生态系统中碳的来源和同化, 植物—土壤系统中碳的转移和固定, 草地深层土壤有机碳变迁过程, 不同类型草地 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布特征以及同位素模型判别生态系统碳及贡献比例。通过梳理和分析稳定碳同位素在草地生态系统中的利用方法和关键技术, 为明确生态系统碳循环的驱动机制和全球气候变化对碳流动的响应机理提供依据。稳定碳同位素技术对生态系统干扰很小, 检测快速、准确, 对研究生态系统碳素流动, 植被变迁及生态系统组分碳来源判定和贡献比例提供可靠支撑。

关键词:稳定碳同位素; $\delta^{13}\text{C}$ 值; 综述; 植被演替; 同位素模型

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0394-07

Application and Prospect of Stable Carbon Isotope to the Study of Carbon Cycle in Grassland Ecosystem

ZHANG Hao¹, LI Jianping^{1,2}

(1.School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.Breeding Base of State Key Laboratory for Preventing Land Degradation and Ecological Restoration, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Utilizing stable carbon isotopes to trace the nutrient circulation and energy flow in ecosystem, trace the dynamics of carbon transfer in ecosystem quantitatively, and clarify the ecosystem carbon cycle and its driving mechanism has become an important technique for the study of the carbon cycle of ecosystem. These studies cover carbon sources and assimilation in ecosystem determined by stable carbon isotopes, carbon transfer and fixation in plant-soil system, organic carbon transfer processes in deep soils, distribution characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ values in different types of grassland, as well as identification of carbon sources and contribution of components to ecosystem by isotope model. For providing an investigated reference for the driving mechanism of carbon cycle in ecosystem and the response mechanism of global climate change to carbon flow, we reviewed the utilization methods and key technologies of stable carbon isotopes in grassland ecosystem. Meanwhile, stable carbon isotope technique is a rapid, accurate and efficient measurement, and hardly affects the function of ecosystem. Stable carbon isotope technique can provide credible supports for studies on carbon flow in ecosystem, vegetation change, and source determination and contribution proportion of carbon in ecosystem.

Keywords: stable carbon isotope; $\delta^{13}\text{C}$ values; summary; vegetation succession; isotope model

草地生态系统是全球陆地生态系统的重要组成部分, 存储了陆地生态系统约 15.2% 的碳, 其中 89.4% 的碳存储在草地土壤中^[1]。土壤碳含量的微小变化可显著影响大气中 CO_2 含量^[2], 草地生态系统土壤碳固持对全球气候变化有着重要的影响^[3]。放牧与围封等人类活动会显著影响草地生态系统碳库, 导致碳素流

动不稳定, 年际变化影响较大^[4], 对于短期研究生态系统碳循环存在着较大的误差和不确定性。

随着同位素技术及其分析模型的发展, 稳定碳同位素技术因具有标记、整合和指示功能, 检测快速、准确^[5], 可定量即时分析生态系统中碳动态, 克服生态系统碳元素固持的时间和空间变异问题^[6], 客观地揭

收稿日期: 2020-04-17

修回日期: 2020-05-01

资助项目: 宁夏留学人员创新创业个人项目“半干旱区天然草地补播轮刈关键技术研究”(201813); 宁夏自然科学基金“黄土高原封育草地土壤干层动态特征研究”(2019AAC03042); 宁夏大学草学一流学科建设项目(NXYLXK2017A01)

第一作者: 张昊(1997—), 男, 山东临清人, 硕士研究生, 研究方向: 草地生态与模型构建。E-mail: zhanghlqq@163.com

通信作者: 李建平(1982—), 男, 陕西延安人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 草地生态与模型构建。E-mail: lijianpingsas@163.com

示生态系统中碳动态的现象和原理。目前,国内外在稳定同位素方面最新的研究方向有以下几个方面:不同土地利用类型对土壤有机碳氮循环的影响机制^[7];动物食物来源与食物网结构及动物迁徙^[8];植物碳代谢、土壤碳转化及生态系统碳循环的研究^[9];地球化学过程基于 Bigeleisen-Mayer 公式的同位素分馏机制^[10];生态系统中基于贝叶斯混合模型确定混合物组成比例^[11];稳定同位素探测技术与分子生态学研究^[12];元素添加对生态系统碳氮循环过程研究^[13];植物光合及水分利用效率^[14-15]。

本文通过查阅应用稳定碳同位素技术研究草地生态系统的相关文献,综述了大气—植被—土壤碳流动机制,阐述了碳在不同土层的动态变化和微生物参与的土壤团聚体碳固持的基本过程,总结了我国不同类型草地生态系统以及区域内草地植被变迁过程中 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小及其影响因素。以期明确草地生态系统碳固持动态、气候变化与草地生态系统协同机制,为草地资源可持续利用提供研究依据和研究方向。

1 稳定碳同位素揭示草地生态系统的碳来源

1.1 草地生态系统碳的来源判定

大气中的 CO_2 通过叶片上的气孔进入植物,并通过光合作用固定在植物中,成为草地生态系统碳的主要碳源。自然界的植物包括 C_3 植物、 C_4 植物和极少数的景天酸代谢 (Crassulacean acid metabolism, CAM) 植物,植物的不同光合作用途径是其划分的依据。具有不同光合途径的植物在光合作用中会产生 ^{13}C 丰度差异,从而使植株体内 $\delta^{13}\text{C}$ 存在差异^[16],其差异可定量反映该区域植物群体输入的光合碳量。研究表明, C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-20\text{‰} \sim -35\text{‰}$,而 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-9\text{‰} \sim -17\text{‰}$ 变化,CAM 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围介于二者之间为 $-10\text{‰} \sim -22\text{‰}$ ^[17]。植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的不同是由于光合作用对 ^{13}C 的分馏所致。光合羧化酶 (RuBP 酶和 PEP 酶) 对 CO_2 的同化过程中, C_3 和 C_4 植物对 ^{13}C 产生了判别,导致了不同光合途径的植物具有不同的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。公式 (1) 和公式 (2) 分别为 C_3 和 C_4 植物光合作用过程中的碳同位素效应方程^[18]:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{叶片}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{大气}} - a - (b-a)C_i/C_a \quad (1)$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{叶片}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{大气}} - a - (b_0 + b \times f - a)C_i/C_a \quad (2)$$

式中: $\delta^{13}\text{C}_{\text{叶片}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{大气}}$ 分别表示叶片内和叶外空气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值; $\delta^{13}\text{C}_{\text{大气}}$ 现在大约为 -8‰ ,可看作固

定值; a 为 CO_2 经由气孔的扩散过程产生的物理过程分馏,大约为 4.4‰ ; b 和 b_0 分别代表 C_3 植物的 RuBP 羧化酶和 C_4 植物的 PEP 酶羧化过程的碳同位素分馏系数,分别约为 30‰ 和 5.7‰ ; f 为 CO_2 从叶肉细胞渗漏到维管束鞘细胞的比率,通常为 $0.20 \sim 0.37$; C_i/C_a 为胞间 CO_2 浓度和空气 CO_2 浓度的比率。 C_i/C_a 是研究植物光合作用必不可少的生理生态特征值,其反映了 CO_2 需求和 CO_2 供给的相对大小。

光合途径的不同是植物稳定碳同位素组成的主要影响因素,植物对碳同位素的分馏作用同样与植物种类密切相关^[19]。另外,光照、温度、 CO_2 浓度和水分等许多环境因子也对碳同位素分馏产生影响^[20]。在一定范围内,光照强度的增加可以降低植物叶片的气孔导度,增强光合羧化酶活性; CO_2 浓度升高能够降低 C_3 植物气孔导度^[21],提高水分利用效率^[22]。环境因子可以通过影响植物光合作用进而增加或减弱植物对碳同位素的分馏程度。

1.2 $\delta^{13}\text{C}$ 可反映植被变迁

植物和土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值记录了植被的演替过程和生态系统的变化^[23]。在 C_3 和 C_4 两种类型植物的互相演替过程中,由于植物凋落物与根系分泌物直接影响表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值,而 C_4 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值较 C_3 植物相比更趋向正值,所以 C_4 植物表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值更大。有研究表明,以 C_4 植物为主的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值随着土层深度的加深而减小^[24], C_3 植物则相反^[9]。正因为 C_3 和 C_4 植物土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的表现不同,所以在植被变迁后会对表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生影响。例如吴健等在对滨岸草地土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 的研究表明,在经以 C_3 杂草为主要植被改造种植百慕大 (*Cynodon dactylon*) 和白茅 (*Imperata cylindrica*) 两种 C_4 植物后, $\delta^{13}\text{C}$ 值随土壤的加深呈现出先减小后增大的趋势,这可能是由于土壤受到先前种植的 C_3 植被与现在的 C_4 植被混合影响造成的^[24]。在草地退化的过程中, $\delta^{13}\text{C}$ 值也会发生变化。对青藏高原东部若尔盖湿地正在退化的高寒沼泽草甸的研究表明:随着草地的退化,草甸优势种发生明显变化,其草甸覆盖率和物种丰富度明显下降,并且土壤质地由淤泥壤土变成了含沙粒较多的沙壤土,表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显上升^[9]。但草地退化后植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化与土壤不同,对黄河源区典型高寒草甸的研究表明,植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的大小随着草地退化而减小,这主要是因为草地退化导致地上生物量减少,光合效率降低, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏低^[25]。

1.3 环境因子对植被变迁的影响

$\delta^{13}\text{C}$ 值反映了目前该地区的植被状况,光照、大气 CO_2 浓度、温度和土壤水分等环境因素的变化可能对

植物碳同位素分馏产生影响,而地表凋落物被微生物分解转化为土壤有机质的过程中也会产生碳同位素的分馏,影响土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 的自然丰度^[26],因此 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化可以反映出环境因子对植被分布及变迁的影响。光照强度的减弱和大气 CO_2 浓度的降低是植物光合作用的主要限制因子,只不过较弱的光照强度会减小植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值,而低浓度的 CO_2 使植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大^[27]。

对青藏高原 C_3 和 C_4 植物分布的研究发现,高纬度高海拔的河源区高寒草甸植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围介于 $-29.50\text{‰} \sim -24.69\text{‰}$,均属于 C_3 植物^[25];纬度较低的高海拔地区发现了 8 种 C_4 植物,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围介于 $-13.69\text{‰} \sim -11.10\text{‰}$ ^[28];而在低海拔地区阳坡发现了以 C_4 植物为主的植物群落,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围介于 $-16.90\text{‰} \sim -11.20\text{‰}$ ^[29]。我们可以发现青藏高原地区 C_4 植物主要分布在气温相对较高的低纬度或低海拔地区,因此可以推测温度可能是 C_3 和 C_4 植物分布和变迁的一个重要因素。

人类活动和气候变化的综合影响降低了地下水位是草地退化的主要原因之一,地下水位的下降导致腐殖质沉积以及碳的流失^[30],并且减少了植被覆盖和生物多样性^[31]。 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化可提供环境变化的证据,降水量和环境湿度的不同会导致 C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值发生改变。研究表明,在若尔盖高原高湿沼泽草甸退化演替过程中,地下水位的下降导致环境湿度较低^[30],而低湿度和降水少的情况下会降低植物叶片的气孔导度,降低叶片胞间和周围大气 CO_2 的梯度(C_i/C_a)^[18],所以湿润生态系统中 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比干旱地区的 $\delta^{13}\text{C}$ 值要小。退化草地地下水位下降,土壤含水率低,表层土壤的微生物在相对干燥的土壤环境中降解率相对较低,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值更接近植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[32]。所以,在草地退化后环境湿度降低,植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值会增大,相应的表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值也会有相同的趋势。

2 稳定碳同位素对草地植被碳素去向的示踪

2.1 草地生态系统对土壤有机碳(SOC)的贡献

植物群落作为陆地生态系统土壤有机质的主要来源,可通过地表凋落物(枯枝落叶和死根等)分解、根系分泌物和细根周转等方式将光合作用同化的碳输入到土壤。大多数的土壤有机质是由植被根部所积累的叶类残留物经过土壤微生物的转化形成的。由于植物凋落物是土壤有机质的主要来源,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 反映了植物 $\delta^{13}\text{C}$ 特征和随后土壤微生物分馏过程的综合

影响^[33],一般来说,表层土壤中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值直接反映了当前植被凋落物的碳输入情况^[32]。

稳定碳同位素示踪技术为原位跟踪和量化陆地生态系统中的碳流动提供了一种合适的方法。从脉冲标记后的枝条到地下分配的 ^{13}C 流的速率和数量可用于量化最近固定的植物光合产物对生态系统土壤碳库的贡献,这一部分主要是植物根系及其分泌物对土壤碳库的贡献。在不同的植物和生态系统中,碳在不同碳库中的转移有很大的不同。稳定碳同位素示踪技术表明,草地植被向地下分配的同化碳的比例在 $28\% \sim 48\%$ ^[34]。Hafner 等研究发现,放牧草地 18% 的光合碳进入到地下被土壤所固定^[35]。Wu 等对高寒草甸植物的碳分配研究表明,约有 59% 的新固定碳转移至地下部分,其中 7.3% 经过转化成为新的土壤^[36];黑麦草(*Lolium perenne*)和蒺藜苜蓿(*Medicago truncatula*)分别将其新固定碳的 $56\% \sim 69\%$ 和 38.4% 转移至地下部分,其中留在土壤碳库的比例分别为 $13\% \sim 21\%$ 和 22% ^[37-38]。相比于草地植物,其他生态系统将碳固定到土壤的比例相对较小。谷类作物光合作用固定的碳约有 $20\% \sim 30\%$ 输入到地下部^[39],其中水稻(*Oryza sativa*)固定的光合碳约有 $2\% \sim 10\%$ 输入到土壤^[40];荒漠植物白刺(*Nitraria tangutorum*)将约有 16% 的碳转移到土壤碳库中^[41]。另外,吴健等根据稳定碳同位素自然丰度,使用稳定同位素混合模型,利用植物样带 $\delta^{13}\text{C}$ 值,计算了新输入有机碳转移到土壤中的比值,并发现不同植物对 SOC 的贡献率有着较大的差异^[24]。

2.2 土壤团聚体固碳机理研究

利用稳定碳同位素技术能够准确标识土壤中新输入碳的存在状态和周转过程,揭示微生物在土壤碳循环和周转过程的机理性问题。有研究利用稳定碳同位素的自然丰度证实了土壤最新沉积的有机质颗粒分布并非随机的,抗溶解的大团聚体在新有机质中富集^[42],新鲜大颗粒有机质可以通过土壤微生物分泌有机物、改变土壤疏水性以及物理缠绕等方式被分解,进而促进土壤团粒结构的形成和稳定。表层土壤中接近 90% 的 SOC 位于团聚体内,稳定的土壤团聚体形态可以减少 SOC 的分解,有学者利用 ^{13}C 示踪标记技术揭示新有机碳在土壤团聚体有机组分的转化情况,结果表明有机碳是首先由大团聚体转移到微团聚体内,并且随着团聚体级别的减小碳的周转速率逐渐变慢^[43]。这是因为土壤团聚体内部孔隙度低,空气和水分无法直接进入,从而大团聚体阻碍了微生物对有机碳的持续分解^[44];而微团聚体内的孔隙甚至小于细菌进入的最低限度,微生物只能通过分泌胞

外酶向团聚体内部扩散来分解有机碳,而这一过程将消耗大量能量^[45],土壤团聚体对微生物的物理隔绝降低了有机碳的分解;另外,化学稳定机制也是减少 SOC 分解的主导机制,它可以使有机碳与矿物质颗粒通过范德华力、氢键、静电引力等方式结合形成稳定状态的有机无机复合体。Angers 等采用了稳定同位素示踪标记技术,将小麦秸秆用¹³C,¹⁵N 双标记,检测了秸秆分解过程中 C 和 N 在团聚体内的存在状态,得出了在大团聚体内部形成微团聚体的结论^[46]。随后 Six 等提出了大团聚体“生命循环”的概念模型解释此结论^[47]。有机质又可以将微团聚体胶结成大团聚体,并且处于生长状态的根系和菌丝也可以增加大团聚体有机碳的含量,增强了土壤的固碳能力^[48]。关于土壤碳固定的微团聚体保护机制是目前的研究热点之一,而利用稳定同位素的相关技术可以明确这一过程。

2.3 不同类型草原稳定碳同位素分布值

我国草地类型丰富,不同草地类型具有不同同位素分布值。根据不同类型草地或草原土壤的¹³C 的自然丰度,比较其 $\delta^{13}\text{C}$ 值的大小,可以更加明确不同地理环境下环境因子对不同类型草地生态系统有机碳循环的影响。Yao 等^[49]研究表明,全国不同类型草原土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小顺序为:平原草甸>荒漠草原>典型草原>高寒草原>山地荒漠草原>高寒草甸>草甸草原。陈芄娜等研究也有相似规律,并且表明海拔 2 100m 为分水岭,高海拔和低海拔处的表层土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势不一致,高海拔处 SOC 同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现随海拔升高而增大的趋势^[50],也有学者发现了类似的规律,二者临界海拔有所不同^[51]。张月鲜等在中国西北地区不同类型草原稳定碳同位素的研究中表明土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的大小顺序荒漠草原>亚高山草原>山地荒漠草原>高山草甸和高寒草甸^[52]。荒漠草原基本处于低海拔和植被生物量低的干旱—半干旱地区,与湿润地区相比植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值要大^[9],所以对于土壤有机质来源较为单一的荒漠草原来说,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值要相对高于其他类型草原。在一定海拔高度内, $\delta^{13}\text{C}$ 值较大的 C_4 植物主要分布于低海拔地区^[29],所以影响低海拔地区不同草原类型 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小最重要因素可能是植被类型的差异,而高海拔地区不同类型草原 $\delta^{13}\text{C}$ 值的大小主要受光照,温度和土壤水分等因素影响。我国不同地理环境造成的环境因子的差异较大,通过影响有机质的分解转化,进而影响碳同位素的分馏效应,最终导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值的不同。将稳定碳同位素方法与其他物种和其他领域(森林和海洋)的 $\delta^{13}\text{C}$ 相结合,或多或少有助于在草地上建立更详细的全球同位素梯度^[49]。

2.4 土壤不同土层有机碳动态变化

大多数关于 SOC 分解的研究仅集中于表层土壤,而更多的研究认识到,深层土壤也含有大量的碳^[53],这些碳也可能随着时间的推移而分解或转移。对整个土壤剖面中 SOC 分解速率的综合估算可以帮助我们更好地了解 and 预测 SOC 对气候变化的响应。土壤中稳定碳同位素组成已被认为是 SOC 分解的综合指标^[54],土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 与对数转化的 SOC 浓度之间的线性回归斜率 β 值与 SOC 分解具有较强的联系, β 值越低 SOC 分解的越快^[55],因此利用稳定碳同位素技术是理解区域和全球范围土壤碳动态的一种潜在方法。有研究表明,SOC 随着土层深度和土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的增加而减小,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 SOC 随深度的变化与微生物和物理混合的过程有关^[9]。人们普遍认为,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值随深度增加是微生物分解过程中同位素分馏造成的^[26]。微生物在 SOC 分解过程中倾向于优先分解较轻的¹²C 组分^[56],因此¹³C 组分在分解的底物中积累,深层土壤中的残余有机碳就富含¹³C。然而,环境条件不同,土壤微生物种群和 SOC 分解速率也有所差异,不同微生物种群碳同位素的分馏作用导致的不同土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 SOC 分解速率的关系需要进一步研究。

3 稳定碳同位素对生态系统碳流判定方法

作为天然标记物,稳定同位素可以量化多种来源对混合物的贡献,这种量化方法越来越多的用于生态学、生物学和地球化学研究中。对于有机混合物物源的判别,可根据不同来源的有机物中稳定碳同位素丰度的明显差别这一特征来进行^[57]。生态学的研究中通常利用混合模型来定量区分有机物质来源及贡献比例,较为常用的有线性混合模型和基于贝叶斯统计方法的混合模型等^[58-64]。

土壤碳库贡献率的分析需要考虑研究区域的碳源数量和各碳源与产物的稳定同位素值是否满足模型要求两种因素^[58],线性回归方法可以定量分析各来源对混合物的贡献比例。Román 等^[59]使用 Iso source 1.3.1 软件,根据同位素线性回归混合模型,利用 $\delta^{13}\text{C}$ 值估算了陆地和海洋来源物质对西班牙西北伊比利亚半岛河口地区草甸沉积物碳的相对贡献。王丹等^[58]在研究互米花草对滨海湿地土壤碳库的贡献时分别采用二源和三源混合模型计算土壤有机碳库各来源的贡献率,根据试验结果分析后与前人^[60]单一运用二源混合模型的结论相比较,指出对土壤有机质进行定量溯源分析时,应根据研究区域可能存在的碳源数量

和植被组成来选择合适的稳定同位素混合模型,才能相对准确地进行分析。然而线性回归方法适用范围较窄,无法对多个来源的混合物进行定量区分。

目前,贝叶斯混合模型是用来确定混合物组成比例的常用模型之一^[11],该模型利用贝叶斯算法,集合可能的多种来源的同位素特征值,允许纳入信息分析前的一些条件,推出 SIAR 软件包用于计算混合物比例^[65]。使用贝叶斯混合模型计算混合物来源的方法被广泛使用,有研究运用 Ordinary Least Square(OLS)法和贝叶斯法比较分析了土壤呼吸对 C₄ 草地生态系统夜晚碳通量的贡献度,研究发现土壤呼吸对生态系统呼吸的贡献约为 80% 左右,并且贝叶斯法更能反映生态系统的真实情况,可以降低结果的标准误差^[61]。Kubo 和 Kanda 利用贝叶斯混合模型分析得出东京湾表层沉积物以海洋有机质为主,约占总有机质的 69%^[62]。Garcias-Bonet 等测定了海陆沉积物中的海草和红树林沉积物的碳同位素组成,通过贝叶斯同位素混合模型表明,海草叶片和大型藻类叶片是海草沉积物中有机物积累的主要因素,红树林叶片是红树林沉积物的主要贡献者^[63]。Yu 和 Zhang 利用双同位素 MixMIR 模型,通过测定稳定同位素组成($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$),估算了海洋、河流和大气沉降物对渤海半封闭海域有机质的相对贡献率分别为 69.0%, 9.6% 和 21.4%^[64]。

在对简单线性模型和贝叶斯混合模型评估中,认为简单线性模型方法中只使用一种同位素会导致较大的误差,而基于贝叶斯方法的混合模型可以同时使用两种同位素则可修正误差估计值,比简单线性模型方法更准确^[66]。总之,线性混合模型简单直观,易于计算,但在普适性和精度方面仍然不足,贝叶斯同位素混合模型使用了多种同位素以及参数设定,提高了模型估计的准确性。

4 结论与展望

稳定碳同位素技术对研究草地生态系统碳循环具有重要意义。利用稳定碳同位素的自然丰度,可以根据植被 $\delta^{13}\text{C}$ 值了解该地区 C₃ 植物和 C₄ 植物的分布,可以很好获悉植被的短期演替过程。另外通过研究环境因子对植物中稳定碳同位素的影响,在全球气候变化大背景下,讨论环境和人为因素对草地植被的自然演替,过度放牧导致的草地退化和封育对草地植被恢复等过程中产生的作用程度是否可以用 $\delta^{13}\text{C}$ 值来反映。此外,稳定碳同位素可以揭示碳在土壤团聚体中的赋予状态和周转过程以及固碳机理。然而,考虑到草地生态系统复杂而多变,以往的研究中或多或少简化或低估了该过程的复杂程度,未来的研究中我

们需要加强以下几方面的研究。

从过去的研究中我们已经了解了土壤有机质的来源主要是地表凋落物(枯枝落叶和死根等)分解、根系分泌物和细根周转,但这些组分对土壤的贡献比例还不是很清楚。稳定同位素模型不仅可以对表层土壤有机质的来源进行判别,并且可以计算出各组分的贡献比例,更加明确草地生态系统碳循环中各组分的转移程度,对明确生态系统的碳流移动有重要意义。

深层土壤碳来源及去向的判定目前研究较少。到目前为止,大多数研究都集中在表层土壤碳动力学。与生态系统 SOC 来源相比之下,深层土壤含有全球一半以上的 SOC,使用 0—100 cm 土层碳储量来估算土壤碳储量将导致严重低估;尽管就可能的碳储量变化而言,表层土壤可能更具动态性,但不应忽略 100—500 cm 土层中的大型碳储量及其动态^[53]。与表土相比,深层土壤具有不同的有机质来源和微生物群落,其微生物活性和功能在全球变暖的背景下有更强烈的响应。

此外,我们还可以利用稳定同位素模型来计算土壤不同土层之间的动态变化,更加明确不同环境因素对深层土壤碳流的影响,深入研究土壤 SOC 的组成以及碳的来源和分配对揭示不断变化的 SOC 动态和对气候变暖的响应具有重要意义。

参考文献:

- [1] 樊江文,钟华平,梁飏,等.草地生态系统碳储量及其影响因素[J].中国草地学报,2003,25(6):52-59.
- [2] Paustian K, Lehmann J, Ogle S, et al. Climate-smart soils[J]. Nature, 2016,532(7597):49-57.
- [3] 李学斌,樊瑞霞,刘学东.中国草地生态系统碳储量及碳过程研究进展[J].生态环境学报,2014,23(11):1845-1851.
- [4] Fang J Y, Yang Y H, Ma W H, et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands[J]. Science China Life Sciences, 2010,53(7):757-765.
- [5] 林光辉.稳定同位素生态学:先进技术推动的生态学新分支[J].植物生态学报,2010,34(2):119-122.
- [6] Battle M, Bender M L, Tans P P, et al. Global carbon sinks and their variability inferred from atmospheric O₂ and $\delta^{13}\text{C}$ [J]. Science, 2000,287(5462):2467-2470.
- [7] Cheng X, Yang Y, Li M, et al. The impact of agricultural land use changes on soil organic carbon dynamics in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. Plant and Soil, 2013,366(1/2):415-424.
- [8] Sun Z L, Gao Q F, Dong S L, et al. Estimates of carbon turnover rates in the sea cucumber *Apostichopus japonicus*(Selenka) using stable isotope analysis: The role of metabolism and growth[J]. Marine Ecology Progress Series, 2012,457:101-112.
- [9] Zhao Y, Wang X, Ou Y, et al. Variations in soil $\delta^{13}\text{C}$

- with alpine meadow degradation on the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geoderma*, 2019, 338:178-186.
- [10] Liu Q, Tossell J A, Liu Y. On the proper use of the Bigeleisen-Mayer equation and corrections to it in the calculation of isotopic fractionation equilibrium constants[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(24):6965-6983.
- [11] Smith J A, Mazumder D, Suthers I M, et al. To fit or not to fit: evaluating stable isotope mixing models using simulated mixing polygons[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2013, 4(7):612-618.
- [12] Liu Y, Ge T, Zhu Z, et al. Carbon input and allocation by rice into paddy soils: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 133:97-107.
- [13] Fang Y T, Koba K, Makabe A, et al. Microbial denitrification dominates nitrate losses from forest ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(5):1470-1474.
- [14] 张蕊, 赵钰, 何红波, 等. 基于稳定碳同位素技术研究大气 CO₂ 浓度升高对植物—土壤系统碳循环的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7):2379-2388.
- [15] Cook G D, Williams R J, Hutley L B, et al. Variation in vegetative water use in the savannas of the North Australian Tropical Transect[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2002, 13(3):413-418.
- [16] 郑兴波, 张岩, 顾广虹. 碳同位素技术在森林生态系统碳循环研究中的应用[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(11):84-88.
- [17] 袁红朝, 李春勇, 简燕, 等. 稳定同位素分析技术在农田生态系统土壤碳循环中的应用[J]. *同位素*, 2014, 27(3):170-178.
- [18] Farquhar G D, O'leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves[J]. *Functional Plant Biology*, 1982, 9(2):121-137.
- [19] 刘贤赵, 宿庆, 李嘉竹, 等. 控温条件下 C₃, C₄ 草本植物碳同位素组成对温度的响应[J]. *生态学报*, 2015, 35(10):3278-3287.
- [20] Wang S, Fan J, Song M, et al. Patterns of SOC and soil ¹³C and their relations to climatic factors and soil characteristics on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plant and Soil*, 2013, 363(1/2):243-255.
- [21] Aranjuelo I, Erice G, Sanzsaez A, et al. Differential CO₂ effect on primary carbon metabolism of flag leaves in durum wheat (*Triticum durum* Desf)[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2015, 38(12):2780-2794.
- [22] Qiao Y Z, Zhang H Z, Dong B D, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on growth and water use efficiency of winter wheat under two soil water regimes [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(11):1742-1748.
- [23] Freitas H A D, Pessenda L C R, Aravena R, et al. Late Quaternary vegetation dynamics in the southern Amazon Basin inferred from carbon isotopes in soil organic matter[J]. *Quaternary Research*, 2001, 55(1):39-46.
- [24] 吴健, 黄沈发, 肖绍贻, 等. 基于碳稳定同位素的滨岸草地生态系统土壤有机碳贡献研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(7):1584-1592.
- [25] 全小龙, 乔有明, 段中华, 等. 高寒草甸植物碳氮组成及其稳定同位素特征[J]. *西北植物学报*, 2015, 35(8):1650-1656.
- [26] Liu W, Xing M. Isotopic indicators of carbon and nitrogen cycles in river catchments during soil erosion in the arid Loess Plateau of China[J]. *Chemical Geology*, 2012, 296:66-72.
- [27] 冯虎元, 安黎哲, 王勋陵. 环境条件对植物稳定碳同位素组成的影响[J]. *植物学通报*, 2000, 17(4):312-318.
- [28] 旺罗, 吕厚远, 吴乃琴, 等. 青藏高原高海拔地区 C₄ 植物的发现[J]. *科学通报*, 2004, 49(13):1290-1293.
- [29] 李明财, 易现峰, 张晓爱, 等. 青海高原高寒地区 C₄ 植物名录[J]. *西北植物学报*, 2005, 25(5):1046-1050.
- [30] Huo L, Chen Z, Zou Y, et al. Effect of Zoige alpine wetland degradation on the density and fractions of soil organic carbon [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 51(1):287-295. DOI:10.1016/j. ecoleng. 2012.12.020.
- [31] Pan T, Hou S, Wu S H, et al. Variation of soil hydraulic properties with alpine grassland degradation in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(4):2249-2261.
- [32] Bird M I, Veenendaal E M, Lloyd J J. Soil carbon inventories and $\delta^{13}\text{C}$ along a moisture gradient in Botswana[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(3):342-349.
- [33] Ehleringer J R, Buchmann N, Flanagan L B. Carbon isotope ratios in belowground carbon cycle processes [J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2):412-422.
- [34] Domanski G, Kuzyakov Y, Siniakina S V, et al. Carbon flows in the rhizosphere of ryegrass[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2001, 164(4):381-387.
- [35] Hafner S, Unteregelsbacher S, Seiber E, et al. Effect of grazing on carbon stocks and assimilate partitioning in a Tibetan montane pasture revealed by ¹³CO₂ pulse labeling[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(2):528-538.
- [36] Wu Y B, Tan H C, Deng Y C, et al. Partitioning pattern of carbon flux in a Kobresia grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau revealed by field ¹³C pulse-labeling [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(8):2322-2333.
- [37] Butler J L, Bottomley P J, Griffith S M, et al. Distribution and turnover of recently fixed photosynthate in ryegrass rhizospheres[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(2):371-382.
- [38] Crawford M C, Grace P R, Oades J M. Allocation of carbon

- to shoots, roots, soil and rhizosphere respiration by barrel medic(*Medicago truncatula*) before and after defoliation[J]. *Plant and Soil*, 2000,227(1/2):67-75.
- [39] Ge T D, Yuan H Z, Zhu H H, et al. Biological carbon assimilation and dynamics in a flooded rice-soil system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012,48(4):39-46.
- [40] 王群艳,祝贞科,袁红朝,等.不同生育期光合碳在水稻—土壤系统中的分配及输入效率[J].*环境科学研究*,2016,29(10):1471-1478.
- [41] 李新乐,鲍芳,吴波,等.荒漠植物白刺新固定碳在植物—土壤系统中的分配[J].*草业学报*,2019,28(2):33-40.
- [42] Angers D A, Giroux M. Recently deposited organic matter in soil water-stable aggregates [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996,60(5):1547-1551.
- [43] Li S, Gu X, Zhuang J, et al. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016,155(S1):199-206. DOI:10.1016/j. still. 2015. 08.009.
- [44] O'Brien S L, Jastrow J D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013,61:1-13.
- [45] 邱晓蕾.不同种植模式下土壤有机碳特性研究[D].南京:南京农业大学,2015.
- [46] Angers D A, Recous S, Aita C. Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of ^{13}C ^{15}N -labelled wheat straw in situ[J]. *European Journal of Soil Science*, 1997,48(2):295-300.
- [47] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004,79(1):7-31.
- [48] O'rourke S M, Angers D A, Holden N M, et al. Soil organic carbon across scales[J]. *Global Change Biology*, 2015,21(10):3561-3574.
- [49] Yao H, Wilkes A, Zhu G, et al. Stable carbon isotope as a signal index for monitoring grassland degradation [J]. *Scientific Reports*, 2016,6:31399.
- [50] 陈芃娜,王国安,韩家懋,等.贡嘎山东坡植物和土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异[J].*科学通报*,2009,54(22):3512-3520.
- [51] 姚鸿云,李小雁,郭娜,等.多年放牧对不同类型草原植被及土壤碳同位素的影响[J].*应用生态学报*,2019,30(2):553-562.
- [52] 张月鲜,孙向阳,张林,等.我国西北地区不同类型草原土壤有机质的稳定碳同位素特征研究[J].*土壤通报*, 2013,44(2):348-354.
- [53] Li J P, Ma H B, Xie Y Z, et al. Deep soil C and N pools in long-term fenced and overgrazed temperate grasslands in northwest china[J]. *Scientific Reports*, 2019,9:16088.
- [54] Bird M I, Chivas A R, Head J. A latitudinal gradient in carbon turnover times in forest soils[J]. *Nature*, 1996,381(6578):143-146.
- [55] Wang C, Wei H, Liu D, et al. Depth profiles of soil carbon isotopes along a semi-arid grassland transect in northern China[J]. *Plant and Soil*, 2017,417(1/2):43-52.
- [56] Diochon A, Kellman L. Natural abundance measurements of ^{13}C indicate increased deep soil carbon mineralization after forest disturbance [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008,35(14):L14402.
- [57] Sachs J P, Repeta D J, Goericke R. Nitrogen and carbon isotopic ratios of chlorophyll from marine phytoplankton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999,63(9):1431-1441.
- [58] 王丹,张荣,熊俊,等.互花米草入侵对滨海湿地土壤碳库的贡献—基于稳定同位素的研究[J].*植物生态学报*,2015,39(10):941-949.
- [59] Román M, Fernández E, Zamborain-Mason J, et al. Anthropogenic impact on *Zostera noltei* seagrass meadows(NW Iberian Peninsula) assessed by carbon and nitrogen stable isotopic signatures [J]. *Estuaries and Coasts*, 2019,42(4):987-1000.
- [60] Zhang Y H, Ding W X, Luo J F, et al. Changes in soil organic carbon dynamics in an Eastern Chinese coastal wetland following invasion by a C_4 plant *Spartina alterniflora*[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10):1712-1720.
- [61] 孙伟, David W.利用稳定性同位素区分河岸 C_4 草地生态系统夜晚碳通量[J].*湿地科学*,2008,6(2):271-277.
- [62] Kubo A, Kanda J. Seasonal variations and sources of sedimentary organic carbon in Tokyo Bay[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017,114(2):637-643.
- [63] Garcias-Bonet N, Delgado-Huertas A, Carrillo-de-Albornoz P, et al. Carbon and nitrogen concentrations, stocks, and isotopic compositions in Red Sea seagrass and mangrove sediments[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019,6:267. DOI:10.3389/fmars.2019.00267.
- [64] Yu J, Zhang H. Source apportionment of sediment organic material in a semi-enclosed sea using Bayesian isotopic mixing model[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017,119(1):365-371.
- [65] Moore J W, Semmens B X. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models [J]. *Ecology Letters*, 2008,11(5):470-480.
- [66] Evaristo J, McDonnell J J, Clemens J. Plant source water apportionment using stable isotopes: A comparison of simple linear, two-compartment mixing model approaches[J]. *Hydrological Processes*, 2017,31(21): 3750-3758.