#### DOI: 10.5846/stxb202105191312

张苗苗,刘廷玺,段利民,王冠丽,杨宇晗.半干旱沙丘与草甸典型植被类型区大气-叶片-凋落物-土壤连续体碳同位素特征.生态学报,2022,42 (18):7663-7675.

Zhang M M, Liu T X, Duan L M, Wang G L, Yang Y H.Carbon isotope characteristics of atmosphere-leaf-litter-soil continuum in typical vegetation types of semi-arid sand dune and meadow. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18):7663-7675.

# 半干旱沙丘与草甸典型植被类型区大气-叶片-凋落物-土壤连续体碳同位素特征

张苗苗<sup>1</sup>,刘廷玺<sup>1,2,\*</sup>,段利民<sup>1,2</sup>,王冠丽<sup>1,2</sup>,杨宇晗<sup>1</sup> 1 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018 2 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室,呼和浩特 010018

**摘要:**稳定碳同位素技术能够指示生态系统的物质循环与能量流动,根据生态系统碳转移动态,可以探明生态系统中碳循环过 程和固碳能力。以科尔沁沙地半流动沙丘固沙植被差巴嘎蒿(Artemisia halodendron)、半流动半固定沙丘固沙植被小叶锦鸡儿 (Caragana microphylla)和黄柳(Salix gordejevii Chang),以及在草甸地广泛分布的芦苇(Phragmites australis)与玉米(Zea mays Linn)5种典型植被为研究对象,分析了各植被群落冠层处大气、叶片、凋落物、土壤连续体的δ<sup>13</sup>C 值和碳含量的分布特征及各 组分间的关系。结果表明:沙丘植被冠层处大气 CO<sub>2</sub>浓度显著低于草甸植被,受控于土壤水分特征和植物生长特性。在逆境胁 迫下,小叶锦鸡儿叶片水分利用效率最高,固碳耗水成本最低。叶片碳含量和δ<sup>13</sup>C 值均受叶片生育期的影响,新叶片潜在碳蓄 积能力更强,水分利用效率更高。叶片凋落物δ<sup>13</sup>C 值在不同植被间存在显著差异,说明了植物功能性的驱动作用。随着土壤 深度的增加,有机质分解彻底,土壤有机碳含量减小,δ<sup>13</sup>C 值呈偏正的趋势。沙丘土壤δ<sup>13</sup>C 值高于草甸,沙丘土壤有机碳周转 速率高于草甸,土壤类型对有机碳周转影响较大。有助于深入理解沙地-草甸相间地区碳循环关键过程,为荒漠化治理提供理 论依据。

关键词:半干旱地区;稳定碳同位素;碳周转;有机碳;水分利用效率

# Carbon isotope characteristics of atmosphere-leaf-litter-soil continuum in typical vegetation types of semi-arid sand dune and meadow

ZHANG Miaomiao<sup>1</sup>, LIU Tingxi<sup>1,2,\*</sup>, DUAN Limin<sup>1,2</sup>, WANG Guanli<sup>1,2</sup>, YANG Yuhan<sup>1</sup> 1 Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China 2 Inner Mongolia Water Resource Protection and Utilization Key Laboratory, Hohhot 010018, China

Abstract: Stable carbon isotope technology can indicate the material cycle and energy flow of ecosystem. According to the carbon transfer dynamics of ecosystem, the carbon cycle process and carbon fixation capacity of ecosystem can be explored. Artemisia halodendron, Caragana microphylla and Salix gordejevii Chang, as well as Phragmites australis and Zea mays Linn, which are widely distributed in the meadow, were selected as the research objects. The characteristics of atmosphere, leaves, litter and soil continuum  $\delta^{13}$ C value at the canopy of each vegetation community, the distribution characteristics of carbon content and the relationship between components were analyzed. The results showed that the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration in the canopy of dune vegetation was significantly lower than that of meadow vegetation, which was controlled by the characteristics of soil moisture and plant growth. Under stress, Caragana microphylla leaves had the highest water use

**基金项目:**国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目、地区项目(51620105003,51869017);内蒙古自然科学基金重点项目(2018ZD05); 教育部创新团队发展计划(IRT\_17R60)

收稿日期:2021-05-19; 采用日期:2022-03-28

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: txliu1966@163.com

efficiency and the lowest cost of carbon sequestration and water consumption. Leaf carbon content and  $\delta^{13}C$  value both were affected by the growth period of leaves. The potential carbon storage capacity of new leaves was stronger and the water use efficiency was higher. There were significant differences in leaf litter  $\delta^{13}C$  value among different vegetations, indicating the driving role of plant functionality. With the increase of soil depth, organic matter decomposed completely and the content of soil organic carbon decreased,  $\delta^{13}C$  value showed a positive trend. Dune soil  $\delta^{13}C$  value was higher than that of meadow, the turnover rate of soil organic carbon in dune was higher than that of meadow, and the soil type had a great impact on the turnover of organic carbon. It is helpful to deeply understand the key process of carbon cycle in sandy meadow alternating areas, and provides a theoretical basis for desertification control.

Key Words: semi-arid areas; Stable Carbon Isotope; carbon cycle; organic carbon; water use efficiency

我国沙漠化和荒漠化土地面积为总国土面积的 45.13%<sup>[1]</sup>,浩瀚荒漠下存在巨大碳汇,土壤有机碳含量非 常低,使之具有强大的碳增能力。研究表明,干旱半干旱荒漠土壤和植物能以缓慢的速度吸收空气中大量的 CO<sub>2</sub>,其碳循环过程在陆地生态系统碳循环中占有重要位置,同时在延缓全球气候变化上能发挥有效作 用<sup>[2-4]</sup>。碳循环过程受多种因素影响,主要有土壤类型<sup>[5]</sup>、土壤理化性质<sup>[6]</sup>、植被类型<sup>[7]</sup>、环境因子<sup>[8]</sup>、人为 干扰<sup>[9]</sup>等。因此,研究沙地碳同位素变化特征与碳循环规律,有助于准确评价区域生态系统固碳能力,对开 展土地荒漠化、土地利用和生态系统碳循环等研究具有重要的理论与实践意义,可为我国实现"碳达峰"与 "碳中和"提供科学支撑。

稳定碳同位素技术已成为识别生态系统中碳循环的有效方法之一<sup>[10-11]</sup>。植物在光合作用中实现对碳的 固定,大气中的 CO<sub>2</sub>通过气孔扩散到叶片,光合作用生成的碳水化合物一部分以凋落物的形式直接进入土壤, 极大地影响了表层土壤的碳同位素特征,另外一部分经由死亡根系的残留物和植物根系的分泌物进入土壤中 转化为有机质<sup>[12]</sup>,共同构造了土壤特有的碳同位素特征。因此,生态系统各组分的稳定性碳同位素(δ<sup>13</sup>C)有 各自的分布特征,能够用其判别生态系统碳的来源和同化<sup>[13]</sup>、植物对环境的适应策略及其生理过程<sup>[14]</sup>等。 例如,利用植物叶片δ<sup>13</sup>C间接分析植物长期水分利用效率<sup>[15-17]</sup>,反映单位质量的水固定的碳量<sup>[18-19]</sup>;土壤 δ<sup>13</sup>C 记录了植被的演替及生态系统的变化<sup>[20-21]</sup>,准确识别土壤不同深度位置的δ<sup>13</sup>C 分布特征<sup>[22-24]</sup>,可以揭 示新输入碳及其周转过程等内容。就目前的研究现状而言,多选取林地、湿地、耕地等单一景观群落,主要关 注的是植被在水分利用策略的种间区别,以及环境因子对植被稳定碳同位素的影响,尚缺少不同土壤类型之 间的对比研究,而针对半干旱地区,尤其是沙地生态系统大气-叶片-凋落物-土壤连续体δ<sup>13</sup>C 分布特征的研究 还很薄弱。

本文选取半干旱沙丘差巴嘎蒿、小叶锦鸡儿、黄柳,草甸玉米、芦苇等5种典型植被作为研究对象,研究了 5种典型植被的大气、叶片、凋落物、不同深度土壤的碳含量和δ<sup>13</sup>C值统计特征,分析了5种典型植被在生长 季的叶片对不同环境因子的响应程度,以及5种典型植被类型区土壤δ<sup>13</sup>C值与土壤理化性质之间的关系,试 图阐明5种典型植被类型区碳的循环与周转特征,以及各组分的碳含量与δ<sup>13</sup>C之间的关系,可增加对该区生 态系统中碳固定与转化的认知,对后续荒漠化治理提出可行性科学参考。

## 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古通辽市科尔沁左翼后旗阿古拉生态水文试验站,地处科尔沁沙地东南缘,地理坐标范围为43°18′48″—43°21′24″N、122°33′00″—122°41′00″E,面积约55km²,海拔186—232m。该区多年平均气温6.6℃,多年平均降水量389mm,降水主要集中在6—9月,占全年降水量的70%以上,多年平均蒸发量(Φ20cm蒸发皿)1412mm<sup>[25]</sup>。研究区呈现沙丘与草甸相间的景观形态,沙地典型植被为差巴嘎蒿(Artemisia

18 期

halodendron)、小叶锦鸡儿(Caragana microphylla)、黄柳(Salix gordejevii Chang)等,草甸地主要分布着芦苇(Phragmites australis)、委陵菜(Potentilla chinensis)、车前(Plantago asiatica)等植被以及人工种植的玉米(Zea mays Linn)等。试验区位置与试验点分布见图1,试验区植物生长季降雨和气温变化见图2,5种典型植被表层土壤属性见表1。



图 1 试验区地理位置与试验点分布







Fig.2 Precipitation and air temperature changes in the plant growing season in the experimental area in 2020

Table 1 Topsoil properties under five typical vegetation types						
参数	植被类型 Vegetation type					
Parameters	差巴嘎蒿	玉米	芦苇	小叶锦鸡儿	黄柳	
pH	6.8	8.2	8.1	6.8	7.1	
电导率 Electrical conductivity/(µs/cm)	18.8	198.3	156.8	27.8	18.8	
含水量 Moisture content/%	0.05	0.40	0.40	0.04	0.04	
温度 Temperature/℃	28.8	20.8	19.2	24.8	23.0	
粘粒 Clay(<0.001 mm)/%	0.04	1.68	1.86	0.04	0.04	
粉粒 Silt(0.05—0.001 mm)/%	1.75	33.43	37.26	2.86	1.75	
砂粒 Sand(1—0.05 mm)/%	98.21	64.89	60.88	97.09	98.21	

#### 表1 5种典型植被下表层土壤属性

1.2 样品采集

2020年5月8日、6月2日、7月7日、8月8日、9月6日,选择试验区2个沙丘试验点、1个草甸试验点的5种典型植被作为试验对象:

1)半流动沙丘 A3 试验点,选择差巴嘎蒿作为研究对象。在试验点周围选取 4 颗长势良好的典型植株 (代表株所在地势相对平坦,土壤类型一致,无边界效应)。采集各植株新叶片、老叶片各 3—4 片(为区分新 叶片、老叶片,每月月初对枝条生长位置均进行标注),将同一植株同时期样品进行混合。每棵样株在正东方 向选取 3 个不同位置利用土钻取土,位置为冠幅边缘到基茎距离的 1/3、2/3、1 处,土壤取样层位分别为 0—10、1—20、20—40、40—80、80—120cm,将各植株同层位土壤进行混合。

2)草甸湿地 C3 试验点,选择芦苇、人工种植的玉米作为研究对象。在试验点周围布设 3 个 1m×1m 的芦 苇样方,选取 4 株芦苇采集新叶片、老叶片各 3—4 片。在地势平坦的玉米地布设一个 10m×10m 的样方,随机 选取大小均一的 3 株玉米采集新叶片、老叶片各 3 片(为区分芦苇和玉米的新叶片、老叶片,每月月初在其茎 干生长的顶端进行标注),将各植株同时期标记样品进行混合。芦苇土壤在样方内随机选择 3 处取样点,玉 米土壤在植株根系两侧(沟垄之间)布设 2 处取样点。芦苇、玉米土壤取样层位分别为 0—10、10—20、20— 40、40—80cm,将各植株同层位土壤进行混合。

3)半流动半固定沙丘 G3 试验点,选择小叶锦鸡儿、黄柳作为研究对象。在试验点周围半固定沙丘丘间 洼地上,选取4株长势良好的典型小叶锦鸡儿,叶片采集同 A3 试验点的差巴嘎蒿。选取3个不同位置利用土 钻取土,位置为冠幅边缘到基茎距离的 1/3、2/3、1处,小叶锦鸡儿土壤取样层位分别为0—10、10—20、20— 40、40—80、80—120、120—160、160—200cm,将各植株同层位土壤进行混合。在试验点半流动沙丘顶部阴坡 坡面上选取4株长势良好的典型黄柳,采集新叶片、老叶片各3—4片,将各植株同时期样品进行混合。在其 主茎干下 10cm 位置向下取土壤样品,黄柳土壤取样层位分别为0—10、10—20、20—40、40—80、80—120、 120—160cm,将各植株同层位土壤进行混合(由于不同植被生长形态不同,所以土壤取样标准不同)。

分别在各植株正东方向的冠层 5—10cm 处使用 0.5L 铝箔气体采样袋采取大气样品,带回室内保存待测。 1.3 样品处理和分析

植物叶片样品选用自封袋采集后带到试验站,用蒸馏水反复冲洗直至洗去表面杂质和浮尘后将植物样品 经 60℃烘干至恒重,用研钵磨碎后过 100 目筛装入自封袋保存待测。在试验站将土壤样品于室温下自然阴 干,使用 10 目筛筛除根系及杂质,放入研钵研磨后,再过 100 目筛,称取 10g 过 100 目筛的土壤样品放入烧杯 中,加入 100 ml 盐酸(1 mol/L),反应时间 6h,为充分反应,每隔 1h 搅拌一次,以彻底清除土壤中的无机碳,静置 48h,倒掉充分反应后的上层清液,最后加入去离子水充分搅拌清洗并倒掉上层清液,重复这一步骤 4—6次,以洗涤反应剩余的盐酸,烘干备用。土壤含水率采用烘干法测定。

利用总有机碳分析仪(vario TOC select, elementar, Germany)和二氧化碳同位素分析仪(LGR 912-003, Los Gatos Research, America)联机系统测定大气、叶片、凋落物、土壤样品的碳含量(大气样品 CO<sub>2</sub>浓度)和

 $\delta^{13}$ C值(‰),稳定碳同位素计算公式如下<sup>[26]</sup>:

$$\delta^{13}$$
C =  $\left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1\right) \times 1000\%$ 

式中, $R_{sample}$ 为样品相对丰度(<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C), $R_{standard}$ 为标准样品 VPDB 的相对丰度(<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C)。仪器精度<0.2‰。 1.4 数据处理

采用单因素方差分析检验不同植被类型的新叶片、老叶片、叶片凋落物的碳含量以及δ<sup>13</sup>C的差异,利用最 小显著差异法(LSD)进行均值比较。利用线性回归分析识别土壤参数之间的相关性,采用一元回归分析研究 土壤 $\delta^{13}$ C与 log(SOC)(有机碳含量的对数)之间的线性关系。采用冗余分析解释叶片、土壤的碳含量、 $\delta^{13}$ C与 环境因子之间的关系。利用 Excel 2010、SPSS 22 软件进行统计分析,利用 Origin 2019b 软件进行绘图。

#### 2 结果与分析

2.1 大气-植物-土壤碳含量和δ<sup>13</sup>C值统计特征

4种C,植物中,植株冠层处的CO,浓度表现为:沙丘植被和草甸植被间存在显著差异。叶片碳含量在 4 种C<sub>3</sub>植物中不存在显著差异。叶片δ<sup>13</sup>C值在差巴嘎蒿、芦苇、小叶锦鸡儿间存在显著差异。叶片凋落物的 δ<sup>13</sup>C值在4种C<sub>3</sub>植物间也存在显著差异,表现为差巴嘎蒿最小,黄柳、芦苇次之,小叶锦鸡儿最大。土壤有机 碳(SOC,0-20 cm 层)和δ<sup>13</sup>C值在土壤类型不相同时存在显著差异,其中 SOC 大体表现为草甸高于沙丘,δ<sup>13</sup>C 值大体表现为沙丘比起草甸更偏正,在沙丘中,差巴嘎蒿最大,小叶锦鸡儿次之,黄柳最小(表2)。

Table 2Atmospheric vegetation soil carbon content and $\delta^{13}$ C value of five typical vegetation types							
样品类型	参数	植被类型 Vegetation type					
Sample type	Parameters	差巴嘎蒿(C <sub>3</sub> )	芦苇(C <sub>3</sub> )	小叶锦鸡儿(C <sub>3</sub> )	黄柳(C <sub>3</sub> )	玉米(C <sub>4</sub> )	
植株冠层处大气	CO2浓度/%	$4.42 \times 10^{-4} \mathrm{b}$	4.33×10− <sup>4</sup> c	$4.47 \times 10^{-4}$ ab	4.48×10− <sup>4</sup> a	4.38×10 <sup>-4</sup>	
Canopy atmosphere	$\delta^{13}$ C/‰	-12.06±0.27a	-11.87±0.08a	-12.13±0.29a	-12.15±0.26a	-11.82±0.06	
叶片	碳含量/%	42.71±1.39a	41.68±1.41a	42.60±1.25a	42.37±1.70a	$43.40 \pm 0.38$	
Leaf	$\delta^{13}$ C/‰	$-29.08{\pm}0.24{\rm c}$	$-27.94 {\pm} 0.79 {\rm b}$	-26.85±0.17a	$-27.92{\pm}0.19{\rm abc}$	$-13.40 \pm 1.33$	
凋落物	碳含量/%	$39.85 \pm 1.76a$	39.15±1.00a	39.27±1.32a	39.86±1.21a	_	
Litter	$\delta^{13}$ C/‰	$-28.88{\pm}0.83{\rm c}$	$-27.74 \pm 0.30 \mathrm{b}$	$-25.76 \pm 0.43a$	$-27.75{\pm}0.27\mathrm{b}$	_	
土壤(-20cm)	有机碳含量/%	$0.09{\pm}0.02{\rm b}$	1.22±0.25a	$0.09{\pm}0.01{\rm b}$	$0.08{\pm}0.10{\rm b}$	$1.26 \pm 0.51$	
Soil	$\delta^{13}$ C‰	-20.99±1.41a	$-27.15{\pm}0.34{\rm c}$	$-23.53{\pm}0.83\mathrm{b}$	$-23.93 \pm 0.26 \mathrm{b}$	$-27.88 \pm 0.27$	

表 2 5 种典型植被大气-植物-土壤碳含量和δ<sup>13</sup>C值

同行不同小写字母表示不同植被间差异显著(P<0.05);C、:碳三植物 Carbon 3 plant;C4:碳四植物 Carbon 4 plant

#### **2.2** 植物有机碳、δ<sup>13</sup>C值统计特征

不考虑各植被类型的差异,5种典型植被新叶片、老叶片碳含量生长季均表现为:新叶片>老叶片,说明新 叶片固碳能力比老叶片更强(图3)。5种典型植物叶片碳含量在生长季变化趋势各不相同,沙丘植被在生长 季初期叶片碳含量较高,生长季中期减小,8月叶片碳含量大幅提升,生长季末期叶片碳含量逐渐下降。差巴 嘎蒿叶片碳含量生长季变化为 42.71%—44.97% 、玉米为 38.74%—43.40%、芦苇为 39.55%—47.38%、小叶锦 鸡儿为 42.60%—46.54%、黄柳为 42.37%—46.32%(尽管玉米在 5 月播种,但 5 月并没有长出完整的叶片)。 新叶片、老叶片δ<sup>13</sup>C值的表现为:新叶片>老叶片,这说明新叶片、老叶片中,新叶片的水分利用效率较高,固碳 耗水成本较低。5 种典型植物叶片δ<sup>13</sup>C值在生长季的变化趋势一致,说明各植物叶片在生长季中采取相同的 水分利用策略(图4),各植物叶片δ<sup>13</sup>C值均在8月上升,表明此时叶片水分利用效率提升。差巴嘎蒿叶片δ<sup>13</sup>C 值生长季变化为-29.08%---27.56%。、玉米为-13.82%--12.29%。、芦苇为-28.03%--26.68%。、小叶锦鸡儿 为-26.85%--25.81%-、黄柳为-27.92%--25.57%-。4种C,植物中小叶锦鸡儿的水分利用效率最高,差巴 嘎蒿的水分利用效率最低。







由植物叶片与环境因子的冗余分析(图5),将环境因子主要分为两类,一类以净辐射为主,另一类以空气 温度、水汽压、相对湿度为主。叶片δ<sup>13</sup>C值主要受净辐射影响。草甸玉米、芦苇叶片在生长季初、中期对净辐 射、空气温度、水汽压、相对湿度敏感,生长季中、后期对净辐射敏感;沙丘3种植被在生长季初、中期对空气温 度、水汽压、相对湿度敏感。结合图3、图4和图5,5种典型植物叶片碳含量和δ<sup>13</sup>C值在生长季初、中、后期对 环境要素具有明显的依赖关系。

2.3 土壤有机碳、δ<sup>13</sup>C值统计特征

由土壤与环境因子的冗余分析(图5),将土壤质地主要分为两类,一类是沙丘土壤,另一类是草甸土壤。 左边的沙丘土壤以砂粒为主,对温度变化敏感;右边的草甸土壤 pH、电导率、含水量、粉粒和粘粒的含量较高。 结合图 6 和图 5,5 种典型植被土壤碳含量和δ<sup>13</sup>C值受土壤因子影响较大。

除差巴嘎蒿以外,其他四种典型植被类型区表层土壤有机碳含量骤减,深层趋于稳定,且均随土壤深度的 增加而减小,玉米在土壤深度-20cm 处出现拐点。5种典型植被类型区土壤δ<sup>13</sup>C值与土壤有机碳含量变化趋





Fig.4 Changes of  $\delta^{13}C$  values of new and old leaves of five typical vegetation in growing season

势大体相反,由地表向下增加先急后缓,基本都随土壤深度的增加而增加,在土壤深度-40cm以下变化越来越小,黄柳和芦苇在土壤层位-20cm处出现拐点(图6)。

由图 7 可知,玉米土壤δ<sup>13</sup>C值与土壤 pH 呈显著负相关,与土壤电导率、土壤温度呈极显著负相关;小叶锦 鸡儿土壤δ<sup>13</sup>C值与土壤 pH 呈极显著正相关,与土壤电导率、土壤温度呈极显著负相关,与土壤含水量呈显著 负相关;黄柳土壤δ<sup>13</sup>C值与土壤电导率、土壤温度呈极显著负相关,与土壤含水量呈显著负相关。未标注说明 相关性不显著(*P*>0.05)。

log(SOC)能够解释土壤δ<sup>13</sup>C变异的95%以上(图8、表3),回归方程斜率K的绝对值越大,表示土壤有机碳的周转速率越快。5种典型植被参数K的绝对值从大到小依次为:黄柳(14.014)>差巴嘎蒿(9.362)>小叶锦鸡儿(8.646)>玉米(2.636)>芦苇(1.435),研究结果表明,黄柳土壤碳周转速率最快,芦苇土壤碳周转速率最慢。

18 期





#### Fig.5 Redundancy analysis of leaf, soil and environmental factors of five typical vegetation types

C:碳含量 Carbon content; Rn:净辐射 Net radiation; Ta:气温 Air Temperature; e:水汽压 Vapor pressure; RH:相对湿度 Relative humidity; Ts:土壤 温度 Soil temperature; SWC:土壤含水量 Soil water content; EC: 电导率 Electrical conductivity; SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon; Sand:砂粒; Silt 粉粒;Clay 粘粒;





Fig.6 Vertical distribution of organic carbon content and  $\delta^{13}C$  value in five typical vegetation soils

表 3 5 种典型植被土壤δ <sup>13</sup> C值与 log(SOC)值之间的回归模	輕型参数
--	------

Table 3 Regression mode	l parameters between	$\delta^{13}C$ value and log (SOC) value	e of five typical vege	etation soils
植被类型	样本数量	回归方程	<b>D</b> <sup>2</sup>	D
Vegetation type	Sample size	Regression equation	<i>K</i> -	Γ
差巴嘎蒿 Artemisia halodendron	8	<i>Y</i> =-9.362 <i>X</i> -31.299	0.483	0.038
玉米 Zea mays Linn	7	Y = -2.636X - 27.646	0.872	0.002
芦苇 Phragmites australis	7	Y = -1.435X - 27.005	0.514	0.07
小叶锦鸡儿 Caragana microphylla	12	Y = -8.646X - 33.352	0.95	< 0.0001
黄柳 Salix gordejevii Chang	10	Y = -14.014X - 38.951	0.786	0.001



× 差巴嘎蒿 + 玉米 ▷ 芦苇 ○ 小叶锦鸡儿 △ 黄柳





### 3 讨论

**3.1** 大气-植物-土壤碳含量和δ<sup>13</sup>C值的分布特征与生态学意义

大气-植物-土壤连续体稳定碳同位素的分布特征 记录了碳循环在生态系统中的关键信息。草甸玉米和 芦苇冠层处大气 CO<sub>2</sub>浓度较沙丘的差巴嘎蒿、小叶锦鸡 儿和黄柳的偏低,是受土壤水分特征和植物生长特性等 共同影响<sup>[27]</sup>。植物在生态系统和大气 CO<sub>2</sub>交换的过程 中起关键性作用<sup>[28]</sup>。植物通过叶片进行光合作用固定 大气中的 CO<sub>2</sub>,这些碳有的用于植物自身生长发育,有 的由植物自养呼吸返回大气,剩余的随凋落物、根系等 进入土壤<sup>[22]</sup>,这些过程涉及一系列的生化和物理过程, 随之相关的同位素分馏和同位素判别效应显著改变生 态系统各组分的<sup>13</sup>C 丰度<sup>[29]</sup>。植物叶片在光合固碳中





对<sup>13</sup>C的分馏由两部分组成<sup>[29]</sup>:一部分是由于<sup>12</sup>C、<sup>13</sup>C在质量上的微小区别,使大气中<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>较<sup>12</sup>CO<sub>2</sub>在植物叶

http://www.ecologica.cn

片的气孔向叶片扩散速度更慢,导致植物优先吸收<sup>12</sup>CO<sub>2</sub>排斥<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>;另一部分是 CO<sub>2</sub>在同化过程中,细胞质中 溶解的<sup>12</sup>CO<sub>2</sub>优先通过酶的作用合成磷酸甘油酸,所以,植物在光合作用时合成的含碳化合物会贫化<sup>13</sup>C<sup>[15]</sup>,使 其<sup>13</sup>C 丰度低于大气。受植物功能属性的影响,相同气候条件下小叶锦鸡儿和黄柳叶片δ<sup>13</sup>C值较高,说明这两 种植被的水分利用效率更高,且固碳耗水成本更低。叶片凋落物的分解和土壤质地等的差异,导致叶片凋落 物δ<sup>13</sup>C值在不同植物间存在显著差异。土壤有机碳主要来源于叶片凋落物、植物根系等,土壤呼吸作用、叶片 凋落物碳输入、土壤碳分解共同构造土壤δ<sup>13</sup>C值分布特征<sup>[7]</sup>,<sup>12</sup>C 含量高的叶片凋落物和土壤组分更容易分 解,剩余部分的<sup>13</sup>C 富集起来,使土壤δ<sup>13</sup>C值比植物叶片更偏正。

3.2 植物碳含量和δ<sup>13</sup>C值的分布特征与生态学意义

碳是植物有机体最重要的生命元素之一,不同植物类型、生长季不同阶段的植物叶片碳含量会表现出一定的差异<sup>[30]</sup>,该差异是植物生长规律、光合作用、水分温度等因子共同作用的结果<sup>[31]</sup>。生长季初期各植物叶 片碳含量较高,可能是由于生长季初期植物需要大量有机物支持植物自身的生长发育<sup>[30]</sup>。差巴嘎蒿和黄柳 叶片碳含量在生长季初期(5月—6月)增加,由于植物的生长,叶片作为光合作用的主要场所,这里的糖类得 到有效累积,致使叶片碳含量上升<sup>[32]</sup>。在生长季中期(7月),由于植物叶片快速生长,使叶片出现稀释效应, 导致叶片碳含量下降<sup>[31]</sup>。而在生长季中期,且降雨量较少的时期(8月),沙丘植物叶片碳含量均提升,可能 是各植被为应对干旱,通过减小叶片面积、增加叶片厚度、降低蒸腾速率、减小水分散失,从而使叶片碳含量增 加<sup>[33]</sup>,表明叶片碳含量的变化是对环境水分利用策略的响应。生长季末期叶片碳含量均下降,可能是植物叶 片衰老,叶绿素含量降低、光合速率下降等因素导致碳含量减小。5种典型植物叶片碳含量均为新叶片较高、 老叶片较低,本研究认为叶片碳含量受叶片不同生育阶段的影响,与老叶片相比,新叶片叶绿素含量多且新陈 代谢能力较强,暗示其潜在的碳蓄积能力更强。

在半干旱地区,植物生长受到水分限制,因此高水分利用效率是该区域植物长期生长和生存的重要特 性[34]。植物叶片在光合作用过程中存在碳同位素分馏,故可以利用植物叶片813C值表征植物长期的水分利 用效率<sup>[35]</sup>。本研究结果表明沙丘差巴嘎蒿、沙丘小叶锦鸡儿、沙丘黄柳、草甸芦苇、草甸玉米叶片δ<sup>13</sup>C的平均 值分别为-28.5%,、-26.4%,、-26.6%,、-27.5%,、-13.0%。该结果低于宁夏沙坡头油蒿-24.4%<sup>[36]</sup>,高于我国东 西部山区柠条-28.4‰<sup>[8]</sup>,低于毛乌素沙地东北缘沙柳δ<sup>13</sup>C值<sup>[37]</sup>。进一步分析发现,研究区降雨量(389mm) 高于宁夏沙坡头(218mm)、低于我国东西部山区(413mm)、高于毛乌素沙地东北缘(350mm),降雨量相对较 少的地区,植物叶片δ<sup>13</sup>C值则更偏正,表现出较高的水分利用效率,这是植物适应环境变化的表现。结合生长 季各植物叶片δ<sup>13</sup>C值和降雨情况,发现叶片δ<sup>13</sup>C值和降雨情况具有相反的变化趋势。尤其 8 月叶片δ<sup>13</sup>C值相 比7月明显上升,是受取样前降雨量小的影响,植物为应对干旱,从而提升叶片水分利用效率。Farquhar 等<sup>[38]</sup>研究表明,随 C<sub>3</sub>植物叶片的气孔开度减小,将降低 CO<sub>2</sub>从大气进入细胞间隙的速率,原来优先利用<sup>12</sup>CO<sub>2</sub> 的光合酶,此时则会提升对<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>的利用,当气孔导度越来越低,就有更多的<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>被羧化<sup>[15]</sup>。所以,叶片δ<sup>13</sup>C 值能够反应光合作用过程中气孔导度的变化,水分胁迫会使气孔导度下降,随气孔导度降低植物水分消耗也 减小,光合作用却依旧持续进行,说明在水分胁迫条件下叶片的水分利用效率更高,进一步说明在缺水的干旱 和半干旱地区,植物会提高叶片水分利用效率来提升对干旱的适应性。根据稳定碳同位素的自然丰度,植物 δ<sup>13</sup>C值能判明研究区  $C_3$ 植物和  $C_4$ 植物的分布<sup>[39]</sup>,研究区玉米是  $C_4$ 植物,其余植物均为  $C_3$ 植物。植物δ<sup>13</sup>C值 主要受其光合作用类型驱动,但气候和环境对其的影响不容忽视<sup>[34]</sup>。一般情况,植物叶片δ<sup>13</sup>C值越高则其水 分利用效率越高[40],在逆境中的适应能力也越强[41],本研究中沙丘植被小叶锦鸡儿的水分利用效率最高,逆 境适应能力最强。在干旱胁迫下,C₄植物比C₃植物通过光合途径更容易获取碳,对应其水分利用效率就更 高,所以在干旱半干旱区种植玉米能发挥其水分利用优势。研究结果显示,在干旱缺水条件下,新叶片水分利 用效率比起老叶片更高,这与刘莹等<sup>[42]</sup>对白羊草在重度干旱胁迫下的研究结果一致。

3.3 土壤有机碳含量和δ<sup>13</sup>C值的分布特征与生态学意义

土壤碳的主要来源是植被群落,通过地表凋落物的分解、细根周转以及根系分泌物的方式将光合作用同

化的碳固定在土壤中,同时受植被结构、气候、水分等影响<sup>[43]</sup>。草甸土壤有机碳含量显著高于沙丘,这是因为 草甸土壤中存在大量腐殖质将有利于有机碳积累,同时地上植物有机物输入量大。由于人类活动的影响,草 甸玉米消耗土壤有机物,导致土壤有机碳含量降低,致使草甸芦苇土壤有机碳含量高于玉米,研究结果表明草 甸开垦为玉米地后,土壤粉粒含量降低、砂粒含量增加,土壤有机质降解加快。沙丘小叶锦鸡儿、黄柳、草甸玉 米、芦苇土壤有机碳含量均随土层加深而呈减小的趋势,这与司高月等<sup>[22]</sup>的研究结果一致。由于植被凋落物 和动物、微生物残体首先在土壤表层汇集,其次随其他介质向土壤深层转移扩散,形成了土壤有机碳随深度而 减小的分布格局。草甸玉米在-20cm 处土壤有机碳含量出现转折,推断是玉米在播种前期的翻耕造成的,差 巴嘎蒿土壤有机碳含量表层低于深层,推断本试验点的半流动沙丘是在原固定沙丘上层覆盖流沙后形成的, 而土壤深处的有机碳含量高,说明沙丘底部过去植被丰富,有机碳蓄积多。

本研究中的5种典型类型区深层土壤δ<sup>13</sup>C值富集作用最明显,与很多研究结果一致<sup>[22,27]</sup>。土壤δ<sup>13</sup>C值垂 直分布模式和微生物的偏好有关,因为微生物降解12C比13C更容易[44];还和土壤有机碳滞留时间有关,大 气<sup>13</sup>CO,在工业革命后不断降低,表层土壤δ<sup>13</sup>C值直接反映了地表生物碳的输入特征,土壤由浅到深δ<sup>13</sup>C逐渐 富集则反映的是微生物的分解与不同年有机碳混合的多重作用过程<sup>[43]</sup>。土壤δ<sup>13</sup>C值能表明有机碳的来源及 其动态变化过程,土壤δ<sup>13</sup>C值的垂直分布特征能反映新老碳的混合程度<sup>[27]</sup>。该草甸尽管主要生长着芦苇,但 还生长着白羊草等一小部分 C<sub>4</sub>植物,与 Liu 等<sup>[39]</sup>的研究结果一致,当 C<sub>3</sub>植物群落中出现 C<sub>4</sub>植物时,将影响 0—10cm 深度的土壤δ<sup>13</sup>C值。这反映出,土壤稳定碳同位素组成受 C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>植物分配组成的影响,造成土壤不同 深度碳来源的差异<sup>[45]</sup>。土壤δ<sup>13</sup>C值的垂直分布还受土壤因子,如土壤质地、pH、电导率、含水量、温度等影 响<sup>[34,45]</sup>。有研究表明土壤δ<sup>13</sup>C值随粒径减小而减小<sup>[46]</sup>,较大的土壤粒径不利于微生物分解,微生物将吸收富 含δ<sup>13</sup>C的有机碳,减少<sup>13</sup>C 转移到更小的颗粒中去。土壤 pH 是影响δ<sup>13</sup>C值的主要因素之一,通过影响微生物 的呼吸和活性进一步影响δ<sup>13</sup>C值,本研究结果显示,只有小叶锦鸡儿土壤δ<sup>13</sup>C与 pH 呈极显著正相关关系,可 能是小叶锦鸡儿根部具有根瘤菌导致的。有研究指出,土壤电导率通过影响植被根系生产力进一步影响土壤 有机碳循环,微生物的分解在某种程度会使电导率增加,但研究结果存在矛盾[45,47],这些矛盾的结果值得今 后更深入的研究。水分在土壤碳循环中占据重要位置<sup>[48]</sup>,过低的土壤水分会使微生物分解有机碳受到抑制。 目前的研究结果表明,土壤有机碳δ<sup>13</sup>C值和土壤水分大多存在着负相关关系<sup>[44,49]</sup>。温度通过影响土壤中的微 生物和酶活性以及基质的有效性来直接或者间接影响土壤中碳的分解过程[50],改变土壤中有机碳的输入量, 进一步影响土壤有机碳δ<sup>13</sup>C值。不少国内外学者还利用稳定碳同位素技术研究了土壤有机碳分解和转化速 率<sup>[22,43,44]</sup>,基于 log(SOC)和土壤δ<sup>13</sup>C值的回归模型发现半干旱沙丘的黄柳、差巴嘎蒿、小叶锦鸡儿植被类型 区回归方程斜率 K 较大,其次是玉米植被类型区,而芦苇植被类型区最低,表明沙丘土壤周转速率和有机质 分解速率高于草甸,这是因为与草甸相比,沙丘土壤植被覆盖小、干旱严重、阳光直射、温度变化剧烈,使沙丘 土壤有机碳矿化速率较快[42]。

#### 4 结论

针对半干旱沙丘-草甸相间地区3个类型区的5种典型植被,采用稳定碳同位素技术对各典型植被植株 冠层处大气-植物-土壤系统碳含量和8<sup>13</sup>C值的分布特征进行试验研究。结果表明:3个类型区植株冠层处大 气 CO<sub>2</sub>浓度存在显著差异,表明植物功能属性和土壤类型对其影响大;气候环境等因素会影响植物叶片水分 利用效率,植被通过提升水分利用效率应对干旱;沙丘上,小叶锦鸡儿叶片平均8<sup>13</sup>C值(-26.4‰)和黄柳叶片 平均8<sup>13</sup>C值(-26.6‰)较高,说明其水分利用效率较高,这2种植被是荒漠化治理的先锋物种;植物叶片的碳 含量与8<sup>13</sup>C值均在生长季对环境因子的依赖关系有所不同,表明叶片受生育阶段的影响。除差巴嘎蒿,其他 4种典型植被类型区土壤有机碳含量大体上均随土壤深度的增加而逐渐下降,土壤8<sup>13</sup>C值大体上均随土壤深 度的增加而逐渐偏正,体现了由浅至深土壤有机碳来源和微生物分解作用等方面是不同的;草甸土壤有机碳 含量显著高于沙丘,沙丘土壤<sup>13</sup>C值显著高于草甸,沙丘土壤有机碳周转速率比草甸快,体现了地上植物、土 壤因子共同影响土壤碳循环;5种典型植被类型区土壤δ<sup>13</sup>C值和土壤理化参数之间的相关关系各不相同,造 就了不同植被和土壤组合类型下土壤独特的δ<sup>13</sup>C值。总的来说,半干旱沙丘和草甸梯级生态带不同组分δ<sup>13</sup>C 分馏效应共同影响该生态系统的碳循环过程。未来应当对该生态系统中各典型植被的不同部位、不同组分进 行更加细致的测试分析,探明地表植被凋落物、根系分泌物以及细根周转等对土壤碳含量影响的贡献比例,以 便进行深入的探究论证。

#### 参考文献(References):

- [1] 苏凯,孙小婷,王茵然,陈龙,岳德鹏.基于 GIS 与 RS 的北方防沙屏障带生态系统格局演变.农业机械学报,2020,51(9):226-236.
- [2] Wang W F, Chen X, Luo G P, Li L H. Modeling the contribution of abiotic exchange to CO<sub>2</sub> flux in alkaline soils of arid areas. Journal of Arid Land, 2014, 6(1): 27-36.
- [3] Li Y, Wang Y G, Houghton R A, Tang L S. Hidden carbon sink beneath desert. Geophysical Research Letters, 2015, 42(14): 5880-5887.
- [4] Fa K Y, Zhang Y Q, Wu B, Qin S G, Liu Z, She W W. Patterns and possible mechanisms of soil CO<sub>2</sub> uptake in sandy soil. Science of the Total Environment, 2016, 544: 587-594.
- [5] 李毳, 乔沙沙, 刘晋仙, 柴宝峰. 温带亚高山针叶林土壤碳循环微生物群落的时空动态. 中国环境科学, 2020, 40(10): 4540-4548.
- [6] Bernoux M, Cerri C C, Neill C, de Moraes J F L. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. Geoderma, 1998, 82(1/2/3): 43-58.
- [7] 刁浩宇,王安志,袁凤辉,关德新,尹航,吴家兵.长白山阔叶红松林演替序列植物-凋落物-土壤碳同位素特征.应用生态学报,2019, 30(5):1435-1444.
- [8] 艾喆,徐婷婷,李媛媛,马飞.鬼箭锦鸡儿叶片和土壤碳稳定同位素特征及其影响因素.应用生态学报,2021,32(5):1744-1752.
- [9] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [10] 李新乐,鲍芳,吴波,曹艳丽,刘明虎,段瑞兵. 荒漠植物白刺新固定碳在植物-土壤系统中的分配. 草业学报, 2019, 28(2): 33-40.
- [11] Yuan Z Y, Chen H Y H. Decoupling of nitrogen and phosphorus in terrestrial plants associated with global changes. Nature Climate Change, 2015, 5(5): 465-469.
- [12] O' Rourke S M, Angers D A, Holden N M, McBratney A B. Soil organic carbon across scales. Global Change Biology, 2015, 21(10): 3561-3574.
- [13] 张蕊,赵钰,何红波,张旭东.基于稳定碳同位素技术研究大气 CO<sub>2</sub>浓度升高对植物-土壤系统碳循环的影响.应用生态学报,2017,28 (7):2379-2388.
- [14] 刘旻霞,赵瑞东,张灿,李瑞,邵鹏.亚高寒草甸植物叶片生理指标对坡向的响应.应用生态学报,2017,28(9):2863-2869.
- [15] 朱林,高雪,张会丽,许兴. 苜蓿叶片碳同位素分辨率与水分利用效率的关系. 中国草地学报, 2018, 40(1): 17-23.
- [16] 张忠学,陈帅宏,陈鹏,郑恩楠,刘明.基于稳定碳同位素的寒地黑土区玉米水分利用效率研究.农业机械学报,2018,49(8):265-274.
- [17] 刘旻霞, 刘洋洋, 陈世伟, 王振乾. 高寒草甸不同坡向条件下植物叶片 δ13C 及水分利用效率的变化. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3816-3822.
- [18] Fang H J, Yu G R, Cheng S L, Mo J M, Yan J H, Li S G. <sup>13</sup>C abundance, water-soluble and microbial biomass carbon as potential indicators of soil organic carbon dynamics in subtropical forests at different successional stages and subject to different nitrogen loads. Plant and Soil, 2009, 320 (1/2): 243-254.
- [19] Twohey R J 3rd, Roberts L M, Studer A J. Leaf stable carbon isotope composition reflects transpiration efficiency in Zea mays. The Plant Journal: for Cell and Molecular Biology, 2019, 97(3): 475-484.
- [20] de Freitas H A, Pessenda L C R, Aravena R, Gouveia S E M, de Souza Ribeiro A, Boulet R. Late quaternary vegetation dynamics in the southern Amazon Basin inferred from carbon isotopes in soil organic matter. Quaternary Research, 2001, 55(1): 39-46.
- [21] Luo X Z, Hou E Q, Zhang L L, Wen D Z. Soil carbon dynamics in different types of subtropical forests as determined by density fractionation and stable isotope analysis. Forest Ecology and Management, 2020, 475: 118401.
- [22] 司高月,李晓玉,程淑兰,方华军,于贵瑞,耿静,何舜,于光夏.长白山垂直带森林叶片-凋落物-土壤连续体有机碳动态——基于稳定性碳同位素分析.生态学报,2017,37(16):5285-5293.
- [23] Thinh N T H, Hoai V, Anh H L, Anh V T, Chau T V, Giap T V, Tien T M. Study the changes in soil organic carbon of rice-maize cropping system in the top layer of alluvisol soil in Dan phuong: a study of C-13 stable isotope composition (δ<sup>13</sup>C). Journal of Environmental Protection, 2019, 10(10): 1361-1372.
- [24] Lins S R M, Coletta L D, Campos Ravagnani E, Gragnani J G, Mazzi E A, Martinelli L A. Stable carbon composition of vegetation and soils across an altitudinal range in the coastal Atlantic Forest of Brazil. Trees, 2016, 30(4): 1315-1329.
- [25] Duan L M, Liu T X, Ma L Q, Lei H M, Singh V P. Analysis of soil respiration and influencing factors in a semiarid dune-meadow cascade ecosystem. Science of the Total Environment, 2021, 796; 148993.
- [26] Farquhar G D, O' Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide

7675

concentration in leaves. Functional Plant Biology, 1982, 9(2): 121.

- [27] Werner C, Gessler A. Diel variations in the carbon isotope composition of respired CO<sub>2</sub> and associated carbon sources: a review of dynamics and mechanisms. Biogeosciences, 2011, 8(9): 2437-2459.
- [28] Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, Ciais P, Jung M, Carvalhais N, Rödenbeck C, Arain M A, Baldocchi D, Bonan G B, Bondeau A, Cescatti A, Lasslop G, Lindroth A, Lomas M, Luyssaert S, Margolis H, Oleson K W, Roupsard O, Veenendaal E, Viovy N, Williams C, Woodward F I, Papale D. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. Science, 2010, 329(5993): 834-838.
- [29] 柴华,钟尚志,崔海莹,李杰,孙伟. 植物呼吸释放 CO2碳同位素变化研究进展. 生态学报, 2018, 38(8): 2616-2624.
- [30] 赵丽,马骁,刘宏强,熊银洪,郭雪莲,李丽萍,董李勤,张昆.若尔盖高寒草本沼泽木里薹草叶片碳氮磷化学计量特征对水位下降的响应.应用生态学报,2021,32(7):2426-2432.
- [31] 白秀玲,周云凯,王杰华,李文丽. 鄱阳湖湿地灰化苔草生长季氮磷含量与储量的变化. 生态学报, 2018, 38(13): 4752-4760.
- [32] 刘万德,苏建荣,李帅锋,郎学东,张志钧,黄小波.云南普洱季风常绿阔叶林优势物种不同生长阶段叶片碳、氮、磷化学计量特征.植物 生态学报,2015,39(1):52-62.
- [33] 王凯, 沈潮, 孙冰, 王潇楠, 魏东, 吕林有. 干旱胁迫对科尔沁沙地榆树幼苗 C、N、P 化学计量特征的影响. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2286-2294.
- [34] 赵丹, 程军回, 刘耘华, 刘利利, 李瑞霞, 盛建东. 荒漠植物梭梭稳定碳同位素组成与环境因子的关系. 生态学报, 2017, 37(8): 2743-2752.
- [35] Maier, Burley, Cook, Ghezehei, Hazel, Nichols. Tree water use, water use efficiency, and carbon isotope discrimination in relation to growth potential in *Populus deltoides* and hybrids under field conditions. Forests, 2019, 10(11): 993.
- [36] 赵良菊,肖洪浪,刘晓宏,罗芳,李守中,陆明峰.沙坡头不同微生境下油蒿和柠条叶片δ<sup>13</sup>C的季节变化及其对气候因子的响应.冰川冻 土,2005,27(5):747-754.
- [37] 朱雅娟, 崔清国, 杜娟, 许素寒, 刘志兰. 毛乌素沙地三种灌木群落的水分利用过程. 生态学报, 2020, 40(13): 4470-4478.
- [38] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1989, 40: 503-537.
- [39] 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.
- [40] Driscoll A W, Bitter N Q, Sandquist D R, Ehleringer J R. Multidecadal records of intrinsic water-use efficiency in the desert shrubEncelia farinosareveal strong responses to climate change. PNAS, 2020, 117(31): 18161-18168.
- [41] Hussain M I, Al-Dakheel A J. Effect of salinity stress on phenotypic plasticity, yield stability, and signature of stable isotopes of carbon and nitrogen in safflower. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(24): 23685-23694.
- [42] 刘莹,李鹏,沈冰,冯朝红,刘琦,张祎.采用稳定碳同位素法分析白羊草在不同干旱胁迫下的水分利用效率. 生态学报, 2017, 37(9): 3055-3064.
- [43] 赵云飞, 汪霞, 欧延升, 洪苗苗, 黄政, 李佳, 贾海霞. 若尔盖草甸退化对土壤碳、氮和碳稳定同位素的影响. 应用生态学报, 2018, 29 (5): 1405-1411.
- [44] Zhao Y F, Wang X, Ou Y S, Jia H X, Li J, Shi C M, Liu Y. Variations in soil δ<sup>13</sup>C with alpine meadow degradation on the eastern Qinghai–Tibet Plateau. Geoderma, 2019, 338: 178-186.
- [45] Shtangeeva I, Buša L, Viksna A. Carbon and nitrogen stable isotope ratios of soils and grasses as indicators of soil characteristics and biological taxa. Applied Geochemistry, 2019, 104: 19-24.
- [46] Bird M I, Veenendaal E M, Lloyd J J. Soil carbon inventories and 8 13 C along a moisture gradient in Botswana. Global Change Biology, 2004, 10 (3): 342-349.
- [47] Deng L, Wang K B, Tang Z S, Shangguan Z P. Soil organic carbon dynamics following natural vegetation restoration: evidence from stable carbon isotopes (δ<sup>13</sup>C). Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 221: 235-244.
- [48] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. Global Change Biology, 2005, 11(6): 945-958.
- [49] Gao Y, Zhou J, Wang L M, Guo J M, Feng J X, Wu H, Lin G H. Distribution patterns and controlling factors for the soil organic carbon in four mangrove forests of China. Global Ecology and Conservation, 2019, 17: e00575.
- [50] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature, 2006, 440(7081): 165-173.