

DOI: 10.20103/j.stxb.202502110276

王彦武, 陈爱华, 郭靖, 于惠, 高金芳, 李泽霞. 河西走廊荒漠绿洲过渡带典型固沙植被区土壤碳通量特征及其影响因素. 生态学报, 2025, 45(23): 11638-11648.

Wang Y W, Chen A H, Guo J, Yu H, Gao J F, Li Z X. Characteristics and influencing factors of soil carbon flux in typical sand-fixing revegetated area in desert-oasis ecotone of the Hexi Corridor. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(23): 11638-11648.

# 河西走廊荒漠绿洲过渡带典型固沙植被区土壤碳通量特征及其影响因素

王彦武<sup>1,2,3,\*</sup>, 陈爱华<sup>1,2,3</sup>, 郭靖<sup>1,2,3</sup>, 于惠<sup>1,2,3</sup>, 高金芳<sup>1,2,3</sup>, 李泽霞<sup>1,2,3</sup>

1 甘肃省水土保持科学研究所, 兰州 730020

2 甘肃省水利厅兰州水土保持科学试验站甘肃省水土保持工程研究中心, 兰州 730020

3 甘肃省水利厅兰州水土保持科学试验站, 兰州 730020

**摘要:** 研究干旱区固沙植被区土壤的理化性质、大气/土壤温度和土壤碳通量的变化特征, 阐明土壤碳通量与水分、养分、温度等影响因子间的关系, 对科学评估人工固沙植被恢复对荒漠生态系统碳收支变化的影响有重要意义。在古浪县八步沙林场选取柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.)、白榆 (*Ulmus pumila* L.)、沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* L.)、花棒 (*Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey.) 林地为研究对象, 以裸沙地为对照, 利用 LI-8100 土壤碳通量测量系统定点观测了不同固沙植被区的土壤碳通量、地表温度和 5 cm 深度的浅层地温, 测定和分析了不同固沙植被区土壤的理化性质、大气/土壤温度和土壤碳通量的特征, 采用回归分析阐明了土壤碳通量与水分、养分、温度等影响因子间的关系。结果表明: (1) 各固沙植被区土壤碳通量日变化呈单峰曲线, 峰值出现在 12:00—14:00; 季节变化特征表现为春季>秋季>夏季>冬季, 春季土壤碳通量与夏季、秋季、冬季差异显著 ( $P<0.05$ ); (2) 不同固沙植被区日均土壤碳通量均高于裸沙地, 但夏季植被类型间差异不显著 ( $P>0.05$ ); 土壤 CO<sub>2</sub> 年排放量介于 543.92—881.30 g/m<sup>2</sup>; (3) 土壤碳通量与浅层地温 (5 cm)、地表温度、大气温度呈极显著正相关关系, 土壤碳通量温度敏感性指数介于 1.92—2.66, 对浅层地温 (5 cm) 的变化最为敏感, 浅层地温日变化滞后于大气温度和地表温度的日变化; (4) 土壤有机质和浅层地温是影响土壤碳通量的主要因素, 能够解释土壤碳通量变异的 65.4%, 而研究区表层 0—10 cm 土壤水分对土壤碳通量的影响不显著。研究表明, 固沙植被通过改善土壤有机质和浅层地温促进土壤碳循环, 利用植被重建改善土壤养分与水热条件, 为提升荒漠土壤的碳贮存能力和潜力提供了途径, 同时也为荒漠生态系统土壤碳封存研究提供了参考依据。

**关键词:** 荒漠绿洲过渡带; 固沙植被区; 土壤碳通量; 影响因素

## Characteristics and influencing factors of soil carbon flux in typical sand-fixing revegetated area in desert-oasis ecotone of the Hexi Corridor

WANG Yanwu<sup>1,2,3,\*</sup>, CHEN Aihua<sup>1,2,3</sup>, GUO Jing<sup>1,2,3</sup>, YU Hui<sup>1,2,3</sup>, GAO Jinfang<sup>1,2,3</sup>, LI Zexia<sup>1,2,3</sup>

1 Gansu Institute of Soil and Water Conservation Sciences, Lanzhou 730020, China

2 Soil and Water Conservation Engineering Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730020, China

3 Lanzhou Test Station of Soil and Water Conservation Sciences, Department of Water Resources of Gansu Province, Lanzhou 730020, China

**Abstract:** It was significant to study the variations of soil physicochemical properties, atmospheric/soil temperature and soil carbon flux in sand-fixing revegetated areas of arid regions, and to elucidate the relationship between soil carbon flux and influencing factors such as moisture, nutrients and temperature. This enabled a scientific assessment of the influence of

**基金项目:** 国家自然科学基金联合基金项目 (U23A2063); 甘肃省自然科学基金项目 (21JR7RA683); 甘肃省科技重大专项项目 (22ZD6GA055)

**收稿日期:** 2025-02-11; **网络出版日期:** 2025-08-29

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

sand-fixing revegetated restoration on desert ecosystems' carbon budget changes. In the Babusha Forest Farm of Gulang County, this study selected four revegetation types—*Caragana korshinskii* Kom., *Ulmus pumila* L., *Elaeagnus angustifolia* L., and *Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey. stands—with bare sandy land as the control. Using an LI-8100 soil carbon flux system, we conducted in situ measurements of soil carbon flux, surface temperature, and shallow soil temperature at 5 cm depth across these sand-fixing revegetation areas. Soil physicochemical properties, atmospheric/soil temperature, and soil carbon flux characteristics were determined and analyzed. Regression analysis was employed to elucidate relationships between soil carbon flux and influencing factors (moisture, nutrients, temperature). The results indicated that: (1) The diurnal variation of soil carbon flux in each sand-fixing revegetated area displayed a unimodal curve, with the peak occurring between 12:00 and 14:00. Seasonal variation showed that spring>autumn>summer>winter, and soil carbon flux in spring differed significantly from that in summer, autumn and winter ( $P<0.05$ ); (2) The daily average soil carbon flux in different sand-fixing revegetated areas was higher than that in bare sandy land, but the differences among vegetation types were not significant in summer ( $P>0.05$ ). The annual soil CO<sub>2</sub> emissions ranged from 543.92 to 881.30 g/m<sup>2</sup>; (3) Soil carbon flux was extremely significantly positively correlated with shallow soil temperature at 5 cm, surface temperature, and atmospheric temperature. The temperature sensitivity index ( $Q_{10}$ ) of soil carbon flux ranged from 1.92 to 2.66, and it was the most sensitive to variations in shallow soil temperature at 5 cm, with the diurnal variation of shallow soil temperature lagging behind that of atmospheric and surface temperatures; (4) Soil organic matter and shallow soil temperature were the primary factors influencing soil carbon flux, accounting for 65.4% of its variability, whereas the effect of soil moisture in the top 0—10 cm on soil carbon flux was not significant. This study demonstrated that sand-fixing revegetation promoted soil carbon cycling by improving soil organic matter and shallow soil temperature. The revegetation enhanced soil nutrients and hydrothermal conditions, thereby providing a pathway to increase the carbon storage capacity and potential of desert soils. These findings also provided a reference for research on soil carbon sequestration in desert ecosystems.

**Key Words:** desert-oasis ecotone; sand-fixing revegetated area; soil carbon flux; influencing factors

在荒漠生态系统中,植被重建对土壤环境变化有重要的影响。固沙植被作为荒漠生态系统的重要部分,随着植被恢复土壤有机质、理化性质和生物学性质均得到明显改善。土壤微生境的改善为植被根系生长创造了有利条件,同时通过有机质、微生物、养分的耦合效应,进一步增强了土壤生态功能。土壤呼吸作为土壤中碳排放的主要方式,其速率变化直接影响着大气中 CO<sub>2</sub>的浓度和土壤碳的积累速率<sup>[1]</sup>。尤其在占全球土壤圈碳储量 9.5%的荒漠区<sup>[2]</sup>,固沙植被通过调控土壤呼吸速率,影响着陆地生态系统碳循环过程,进而对全球碳平衡产生影响<sup>[3]</sup>。河西走廊荒漠绿洲过渡带固沙林作为防治土地沙漠化最持久、有效和经济的措施,其固碳潜力与效能显著,研究不同固沙植被的土壤呼吸对评估荒漠生态系统碳收支具有重要意义<sup>[4]</sup>。土壤呼吸受到多种生物、非生物因素的共同作用,各因子对土壤呼吸的影响效应因区域和植被类型而异。目前,学者们对荒漠生态系统土壤呼吸的研究相对较少,现有研究主要集中在两个方面:一是裸沙地与不同固沙植被区土壤呼吸的对比研究<sup>[5]</sup>;二是从植被类型<sup>[6]</sup>、降雨<sup>[7]</sup>、土壤理化性质<sup>[8]</sup>、水分<sup>[9]</sup>、温度<sup>[10]</sup>等生物和非生物因子的单一角度,分析其对土壤呼吸的影响。然而,对于固沙植被区非生长季的土壤呼吸特征,以及土壤水、肥、热等多因子耦合对土壤呼吸的综合效应,尚未开展深入研究,尤其是有关河西荒漠绿洲过渡带不同固沙植被区土壤碳通量特征及其影响因子间相关关系方面的研究,目前还未见报道。

固沙植被区的土壤呼吸在荒漠生态系统碳循环过程中占有关键性的地位。面对大气二氧化碳升高导致的气候变暖问题,采用植被重建做好碳封存,减少二氧化碳排放量,成为今后完成碳达峰、碳中和任务的重要手段。然而,河西走廊主要固沙植被不同季节土壤呼吸动态变化规律如何?土壤水、肥、热等因子对土壤呼吸的影响及协同作用如何?土壤呼吸及其影响因子间的相关关系如何?上述问题的研究将对进一步分析河西荒漠绿洲过渡带固沙植被的土壤碳排放和碳循环状况奠定基础。基于此,本研究以河西荒漠绿洲过渡带主要

固沙植被为研究对象,在不同季节利用 LI-8100 土壤碳通量测量系统进行定位试验,分析典型固沙植被区土壤的理化性质、温度和土壤碳通量的演变规律,估算土壤 CO<sub>2</sub>年排放量,阐明土壤碳通量与水、肥、热等影响因子间的关系,为准确评价荒漠生态系统对全球气候变化的贡献提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省河西走廊东端的古浪县土门镇八步沙林场,与腾格里沙漠南缘相接,地理坐标介于东经 103°6′—103°8′,北纬 37°36′—37°38′之间,海拔为 1700—1721 m,属温带大陆干旱荒漠气候,年均降水量 207.7 mm,年均蒸发量 2807.4 mm 以上,多年平均风速为 3.8 m/s,多年平均气温 6.6 °C,极端最高温为 37.2 °C,极端最低温为-26.4 °C,沙尘暴日数 30.5 d,无霜期约 153 d,土壤以风沙土和灰钙土为主。八步沙林场是全国主体功能区规划“三区四带”中北方防沙带的重要组成部分,固沙植被主要有柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、白榆(*Ulmus pumila* L.)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)、花棒(*Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey.)等,草本植物主要有蓝刺头(*Echinops latifolius* Tausch.)、沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng.)、沙蓬(*Agriophyllum arenarium* Bieb.)等。

### 1.2 样地设置

在研究区以立地条件类型基本一致为原则,采用典型抽样的方法,选取 20 世纪 80 年代种植的白榆、沙枣、花棒、柠条人工林为研究对象,以人为扰动退化的裸沙地作为对照,每种植被类型设置 3 个 30 m×30 m 的样地,样地基本信息见表 1。为了不同固沙植被区间有可比性,所选样地的生境条件基本相同,抚育管理措施一致,无施肥、灌溉等人为措施影响。样地内随机选择一株固沙植被为中心布置 1 个 5 m×5 m 的试验小区,在每个小区中提前预埋 1 个测量环(直径 20 cm,高 10 cm 的 PVC 环),测量环露出地表 5 cm,长期固定不动。测量环与固沙植被树干的距离在 0.5—1.5 m,均位于几种固沙植被根系分泌物和凋落物主要富集的“肥岛效应”核心区,林木之间的株行距均在 3 m 以上,测量环周围无其他植被和蚁穴、鼠洞等的影响,观测数据可以反映各固沙植被灌丛下的土壤碳通量特征。在每次测定前一天,将测量环内固沙植被地表残留物剪除并清理干净,尽量不破坏土壤,以减少土壤扰动及根系损伤对测定结果的影响。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the sample plot

| 林地类型<br>Forest types | 株高<br>Height/m | 冠幅<br>Crown width/m | 林地盖度<br>Coverage<br>degree/% | 密度<br>density/<br>(株/hm <sup>2</sup> ) | 海拔<br>Altitude/m | 经纬度<br>Latitude and longitude |
|----------------------|----------------|---------------------|------------------------------|--|------------------|-------------------------------|
| CK                   | —              | —                   | 0                            | —                                      | 1705             | 37°37′48.16″N 103°7′0.63″E    |
| I                    | 4.88±0.51      | 4.00±0.72           | 63.90±6.91                   | 882±18.33                              | 1702             | 37°37′48.51″N 103°6′57.07″E   |
| II                   | 3.50±0.70      | 3.03±0.64           | 24.38±6.05                   | 668±15.52                              | 1707             | 37°37′48.10″N 103°6′59.98″E   |
| III                  | 1.80±0.32      | 2.03±0.51           | 16.27±4.10                   | 382±22.07                              | 1704             | 37°37′48.17″N 103°7′0.64″E    |
| IV                   | 2.63±0.60      | 4.25±1.83           | 64.85±7.88                   | 1233±24.64                             | 1706             | 37°37′49.06″N 103°7′0.23″E    |

CK:裸沙地 Bare sandy land; I:白榆 *Ulmus pumila* L.; II:沙枣 *Elaeagnus angustifolia* L.; III:花棒 *Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey.; IV:柠条 *Caragana korshinskii* Kom.;表中数据为平均值±标准差

### 1.3 土壤碳通量测定

土壤碳通量采用 LI-8100 土壤碳通量测量系统测定,数据采集每个季度连续测定三天,采集时间为春季(2023 年 5 月底)、夏季(2023 年 8 月下旬)、秋季(2023 年 10 月中旬)、冬季(2024 年 1 月上旬)。每天测定 10 h,从早晨 8:00 开始,至 18:00 结束,每 2 h 循环测量 1 轮,测定时每个测量环分别测量 3 次,每次测量 3 min,每次间隔观测记录时间设置为 90 s。每个环 3 次测量值取平均值计为测量时间点该环的土壤碳通量,3 个测量环测量结果的平均值记为测量时间点该植被区的土壤碳通量。测定土壤碳通量的同时由 LI-8100 自动测量环内测量室的地表温度,用 LI-8100 附带的温度探针同步测定观测点处 5 cm 深度的土壤浅层地温,利

用气温计每 1 h 观测记录观测点处 1.5 m 高度的大气温度。

利用各固沙植被区土壤碳通量的测量值换算出不同季度固沙植被区日均土壤碳通量,再根据各季度的天数估算出全年的土壤 CO<sub>2</sub>排放量。计算公式为:

$$G_C = \sum_{i=1}^4 F_{ci} \times 44 \times n_i \quad (1)$$

式中, $G_C$ 为土壤 CO<sub>2</sub>年排放量( $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ); $F_{ci}$ 为不同季度日均土壤碳通量( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ); $i$ 为春、夏、秋、冬四季;44为 CO<sub>2</sub>的摩尔质量( $\text{g/mol}$ ); $n_i$ 为春、夏、秋、冬四季中的自然天数(d)。

$Q_{10}$ 是表示土壤碳通量对温度变化敏感程度的一个重要指标,根据各固沙植被区土壤碳通量与大气温度、地表温度和浅层地温(5 cm)拟合的指数方程,利用以下公式计算<sup>[11]</sup>:

$$F_c = ae^{bt} \quad (2)$$

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (3)$$

式中, $F_c$ 为土壤碳通量( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), $t$ 为温度( $^{\circ}\text{C}$ ), $a$ 、 $b$ 为待定参数, $Q_{10}$ 是温度敏感性指数,表示土壤碳通量对温度的敏感性。

#### 1.4 土壤样品采集与分析

2023年10月,在每个测量环附近地表除去表层石块、植物残根等杂物后用环刀取表层0—10 cm土样,带回实验室测定土壤的容重和孔隙度;在紧临环刀采样处,用铝盒采土样,带回实验室烘干后测定土壤含水量。土壤化学性质取样时,在每个测量环附近采集表层0—10 cm土样,用四分法取混合土样装入事先准备的无菌塑料袋,带回实验室风干后粉碎,用以测定土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾、pH值等土壤化学性质。土壤理化性质的测定采用《土壤农化分析》中的方法进行<sup>[12]</sup>。

#### 1.5 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 19.0 进行数据统计分析,利用 Origin 2019 进行制图。其中,基本数据分析和指数回归方程拟合采用 Microsoft Excel 2016 软件,线性相关性分析(Pearson)采用 Origin 2019 软件,单因素方差分析(One-Way ANOVA)、双因素方差分析(Two-Way ANOVA)、多重比较(Duncan)、多元线性回归分析(逐步回归法)等采用 SPSS 19.0 软件。其中,单因素方差分析用于分析植被类型对土壤理化性质的显著性影响;双因素方差分析用于分析植被类型与季节变化及其交互作用对土壤碳通量的显著性影响;逐步回归法用于筛选影响土壤碳通量的主要因素。若方差分析结果显示存在显著差异,则进一步采用 Duncan 法进行多重比较,明确组间具体差异情况。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同固沙植被区土壤水、肥主控因子特征

由表 2 可以看出,研究区各固沙植被区表层土壤有机质、全量养分、速效养分与裸沙地相比均有所增加,表现为白榆>柠条>沙枣>花棒>裸沙地。各固沙植被区表层土壤有机质含量在 6.21—13.53 g/kg,以白榆最大,是裸沙地的 2.18 倍,且与其他固沙植被有显著差异( $P < 0.05$ )。全氮、全磷含量分别比裸沙地高 186.67%—554.67% 和 31.59%—192.11%;碱解氮、有效磷、速效钾分别比裸沙地高 80.75%—219.11%、11.07%—102.44%、51.88%—108.52%,其中碱解氮增幅最大。各固沙植被区表层土壤含水量均高于裸沙地,变化范围在 3.77%—4.32%,但与裸沙地差异不显著( $P > 0.05$ )。土壤 pH 值变化不大,白榆最低,裸沙地最高,各固沙植被区比裸沙地低 7.91%—8.92%。裸沙地建立植被后,表层土壤容重均有不同程度减小,变化范围在 1.43—1.58 g/cm<sup>3</sup>,表现为裸沙地>花棒>沙枣>柠条>白榆;土壤孔隙度随植被的建立而增大,变化范围在 40.25%—46.16%,表现趋势与容重相反。

### 2.2 不同固沙植被区土壤碳通量变化规律

双因素方差分析可知(表 3),各固沙植被区土壤碳通量均表现出明显的季节变化特征,依次为春季>秋季

>夏季>冬季,春季与其他三个季度差异显著( $P<0.05$ )。白榆、沙枣、花棒、柠条和裸沙地春季土壤碳通量分别是冬季的 6.04、8.89、10.50、6.55、9.10 倍。通过计算各季度土壤碳通量来估算土壤  $\text{CO}_2$  年排放量可知,各固沙植被区土壤  $\text{CO}_2$  年排放量依次为:白榆( $881.30 \text{ g/m}^2$ )>沙枣( $831.66 \text{ g/m}^2$ )>花棒( $775.40 \text{ g/m}^2$ )>柠条( $744.04 \text{ g/m}^2$ )>裸沙地( $543.92 \text{ g/m}^2$ )。

表 2 不同固沙植被区土壤水肥特征

Table 2 Soil water and fertilizer characteristics of different sand-fixing revegetated areas

| 土壤质量<br>Soil quality                     | 林地类型 Forest types |               |               |              |               |
|--|-------------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
|  | CK                | I             | II            | III          | IV            |
| 有机质 Organic matter/(g/kg)                | 6.21±0.73a        | 13.53±0.83d   | 9.14±1.76b    | 7.38±0.80ab  | 11.09±1.03c   |
| 全氮 Total nitrogen/(g/kg)                 | 0.25±0.08a        | 1.64±0.31d    | 1.15±0.17c    | 0.72±0.21b   | 1.43±0.09cd   |
| 全磷 Total phosphorus/(g/kg)               | 0.34±0.02a        | 1.01±0.44b    | 0.67±0.05ab   | 0.45±0.10a   | 0.86±0.07b    |
| 碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen/(mg/kg) | 23.20±2.83a       | 74.03±6.79c   | 69.47±5.01c   | 41.93±9.18b  | 71.43±2.05c   |
| 有效磷 Available phosphorus/(mg/kg)         | 7.37±1.07a        | 14.91±3.77b   | 11.21±1.45ab  | 8.18±1.92a   | 13.46±0.42b   |
| 速效钾 Rapidly available potassium/(mg/kg)  | 66.50±0.71a       | 138.67±14.98d | 116.33±8.62bc | 101.00±5.00b | 130.89±8.60cd |
| pH                                       | 9.16±0.07b        | 8.34±0.40a    | 8.52±0.18a    | 8.61±0.17a   | 8.44±0.05a    |
| 含水量 Soil moisture content/%              | 3.77±0.46a        | 4.14±0.27ab   | 4.12±0.10ab   | 4.32±0.38b   | 4.22±0.16ab   |
| 容重 Bulk density/(g/cm <sup>3</sup> )     | 1.58±0.02d        | 1.43±0.01a    | 1.51±0.02c    | 1.56±0.01d   | 1.46±0.01b    |
| 孔隙度 Porosity/%                           | 40.25±0.59a       | 46.16±0.37d   | 42.88±0.52b   | 41.13±0.26a  | 44.82±0.26c   |

同一指标同行数据后标不同字母表示不同固沙植被差异显著( $P<0.05$ )

表 3 不同季度固沙植被区日均土壤碳通量

Table 3 The daily average soil carbon flux of sand-fixing revegetated areas in different quarters

| 季度<br>Quarter | 土壤碳通量 Soil carbon flux/( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) |             |              |              |             |
|---------------|--|-------------|--------------|--------------|-------------|
|               | CK   | I           | II           | III          | IV          |
| 春季 Spring     | 0.91±0.17Ab  | 1.11±0.27Ab | 1.38±0.19Aa  | 1.41±0.28Aa  | 1.07±0.11Ab |
| 夏季 Summer     | 0.25±0.07Ba  | 0.31±0.06Ba | 0.32±0.06Ca  | 0.26±0.06BCa | 0.28±0.05Ca |
| 秋季 Autumn     | 0.31±0.09Bc  | 0.92±0.30Aa | 0.53±0.12Bb  | 0.42±0.10Bbc | 0.63±0.17Bb |
| 冬季 Winter     | 0.10±0.05Cb  | 0.18±0.04Ba | 0.16±0.05Dab | 0.13±0.05Cab | 0.16±0.03Ca |

同列不同大写字母表示同一树种不同季度土壤碳通量差异显著( $P<0.05$ );同行不同小写字母表示同一季度不同树种土壤碳通量差异显著( $P<0.05$ )

各固沙植被区土壤碳通量日变化规律基本一致(图 1),都表现为单峰型曲线。从上午 8:00 开始,土壤碳通量逐渐增大,12:00—14:00 达到最大值,之后土壤碳通量逐渐减小。由表 3 可知,各固沙植被区春、夏、秋、冬四季日均土壤碳通量变化范围分别为 0.91—1.41、0.25—0.32、0.31—0.92、0.10—0.18  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。可以看出,各固沙植被区日均土壤碳通量春季和秋季明显高于裸沙地,夏季和冬季略高于裸沙地。各固沙植被区夏季土壤碳通量差异均不显著( $P>0.05$ ),春季(沙枣、花棒)、秋季(沙枣、花棒、柠条)、冬季(白榆、沙枣、柠条)土壤碳通量与裸沙地差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.3 不同固沙植被区土壤碳通量影响因素

各固沙植被区温度日变化特征与土壤碳通量日变化特征基本一致(图 1),也呈单峰曲线,其中大气温度、地表温度日变化趋势基本一致,在 14:00—15:00 达到最高值,浅层地温(5 cm)日变化显著滞后,在 17:00—18:00 左右达到最高值,说明浅层地温变化与太阳辐射和地表覆被有密切关系。春季和冬季 9:00—18:00,各时段土壤温度均表现为:地表温度>大气温度>浅层地温(5 cm),夏季和秋季 9:00—17:00,各时段土壤温度均表现为:地表温度>浅层地温(5 cm)>大气温度,说明大气温度、地表温度、浅层地温(5 cm)受多种因素的影响导致不同季节温度大小变化趋势不一。

根据各固沙植被区水肥条件和土壤碳通量变化特征,对各影响因子进行相关性分析(图 2)。结果表明,固沙植被区土壤碳通量与浅层地温(5 cm)、地表温度、大气温度呈极显著正相关关系,相关系数达到 58.0%以

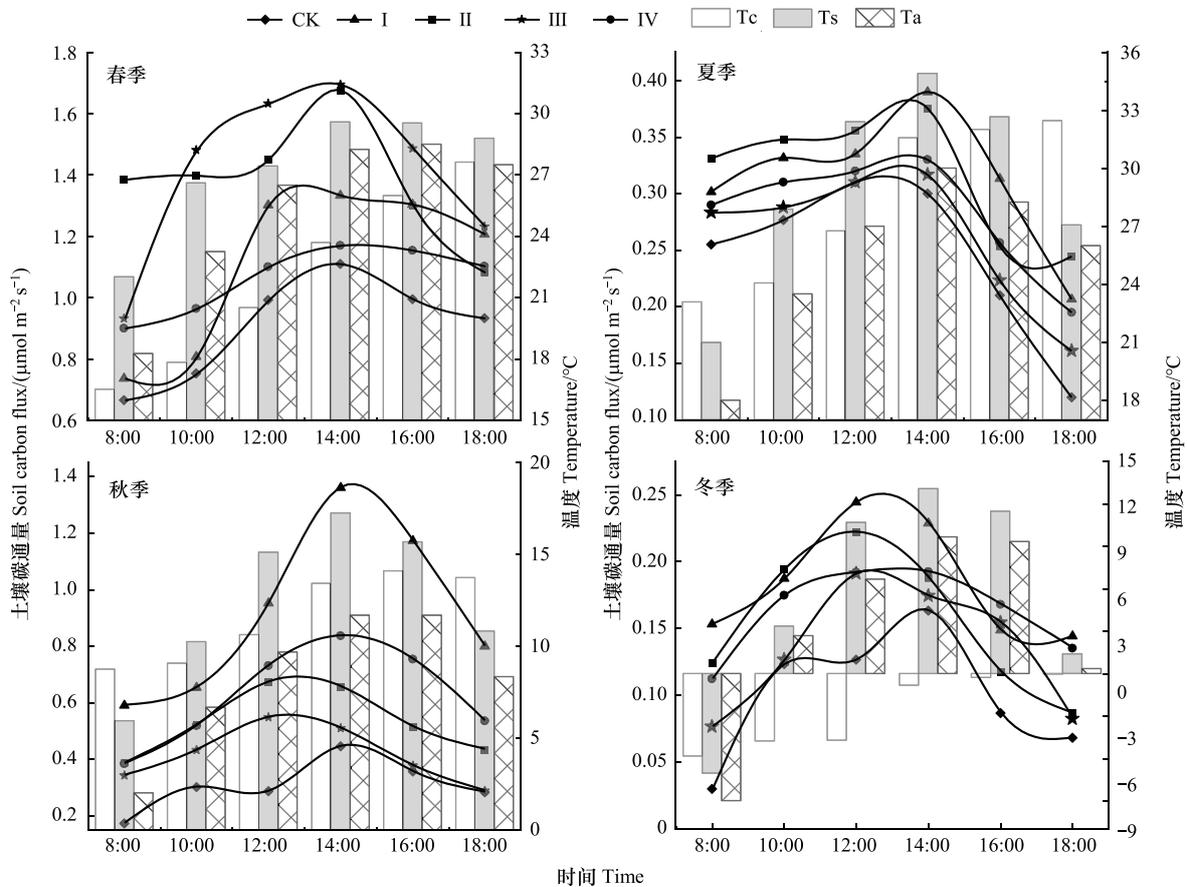


图 1 不同季度土壤碳通量、温度日变化动态

Fig.1 Diurnal dynamics of soil carbon flux and temperature in different quarters

Tc: 浅层地温(5 cm); Ts: 地表温度; Ta: 大气温度; CK: 裸沙地; I: 白榆 *Ulmus pumila* L.; II: 沙枣 *Elaeagnus angustifolia* L.; III: 花棒 *Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey.; IV: 柠条 *Caragana korshinskii* Kom.

上,说明在植物生长适宜温度范围内,浅层地温(5 cm)、地表温度、大气温度越高,土壤生物活性和根系生长越好,土壤碳通量越大。地表温度与浅层地温(5 cm)和大气温度均呈极显著正相关关系,而浅层地温(5 cm)与大气温度相关性不显著。土壤碳通量与土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾呈极显著正相关关系,相关系数达到 58.0%以上,与土壤容重、pH 值呈极显著负相关关系,相关系数达到 60.0%,与表层土壤含水量相关性不显著。

依据相关分析结果,对固沙植被区土壤碳通量与大气温度、地表温度和浅层地温(5 cm)进行回归分析发现(表 4),夏季土壤碳通量与温度间线性关系不显著,而春季、秋季、冬季土壤碳通量与大气温度、地表温度和浅层地温(5 cm)之间均具有显著的指数相关关系( $P < 0.05$ ),土壤碳通量与大气温度、地表温度的  $R^2$  依次为白榆<沙枣<柠条<花棒<裸沙地,且均大于 0.5517,与浅层地温(5 cm)的  $R^2$  依次为沙枣<花棒<白榆<柠条<裸沙地,介于 0.5634—0.8457。

不同固沙植被区土壤碳通量温度敏感性指数结果显示(表 4),各固沙植被区和裸沙地土壤碳通量对大气温度的  $Q_{10}$  表现为:柠条<白榆<沙枣<裸沙地<花棒;对地表温度的  $Q_{10}$  表现为:沙枣<柠条<白榆<花棒<裸沙地;对土壤浅层地温(5 cm)的  $Q_{10}$  表现为:柠条<裸沙地<花棒<白榆<沙枣。白榆、沙枣、柠条土壤碳通量对浅层地温(5 cm)的  $Q_{10}$  值均大于对地表温度和大气温度的  $Q_{10}$  值,说明土壤碳通量对浅层地温(5 cm)的变化最为敏感。

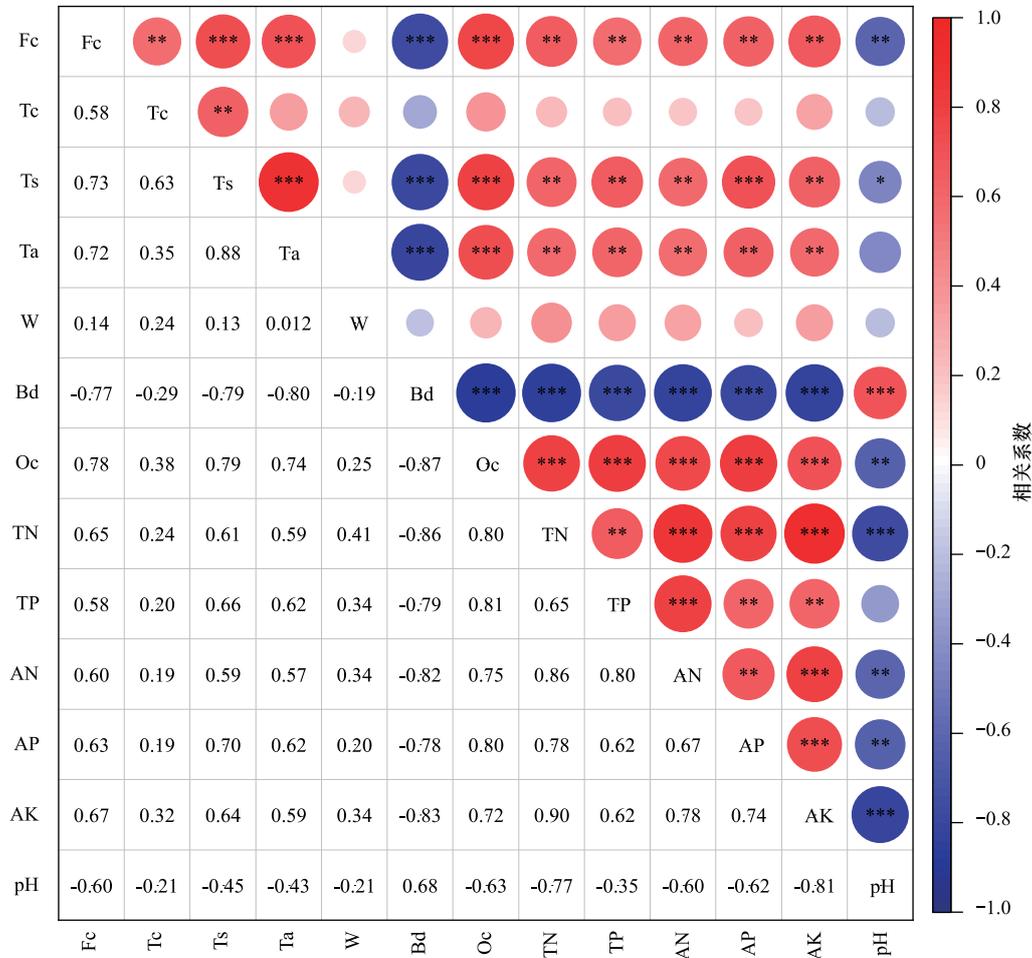


图 2 土壤碳通量与温度、土壤水分及理化性质的相关系数矩阵

Fig.2 The correlation coefficient matrix of soil carbon flux with temperature, soil moisture, and physicochemical properties

Fc: 土壤碳通量; W: 土壤含水量; Bd: 土壤容重; Oc: 土壤有机质; TN: 全氮; TP: 全磷; AN: 碱解氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾; 红色代表正相关, 蓝色代表负相关; \* :  $P \leq 0.05$ , \*\* :  $P \leq 0.01$ , \*\*\* :  $P \leq 0.001$

表 4 土壤碳通量与温度的拟合方程

Table 4 The fitting equation of soil carbon flux and temperature

| 样地<br>Sample | 地表温度 Surface temperature          |        |          | 大气温度 Atmospheric temperature      |        |          | 浅层地温 Shallow ground temperature (5 cm) |        |          |
|--------------|-----------------------------------|--------|----------|-----------------------------------|--------|----------|--|--------|----------|
|              | 拟合方程                              | $R^2$  | $Q_{10}$ | 拟合方程                              | $R^2$  | $Q_{10}$ | 拟合方程                                   | $R^2$  | $Q_{10}$ |
| CK           | $y_1 = 0.0775e^{0.0803x}, n = 18$ | 0.9265 | 2.23     | $y_1 = 0.094e^{0.0901x}, n = 18$  | 0.9332 | 2.46     | $y_1 = 0.1376e^{0.074x}, n = 18$       | 0.8457 | 2.10     |
|              | $y_2 = 0.1246e^{0.0221x}, n = 6$  | 0.1253 |          | $y_2 = 0.2239e^{0.0013x}, n = 6$  | 0.0054 |          | $y_2 = 0.5174e^{-0.029x}, n = 6$       | 0.126  |          |
| I            | $y_1 = 0.2328e^{0.078x}, n = 18$  | 0.5948 | 2.18     | $y_1 = 0.2905e^{0.0796x}, n = 18$ | 0.5517 | 2.22     | $y_1 = 0.238e^{0.0895x}, n = 18$       | 0.7948 | 2.45     |
|              | $y_2 = 0.1957e^{0.0148x}, n = 6$  | 0.2002 |          | $y_2 = 0.2383e^{0.0095x}, n = 6$  | 0.0704 |          | $y_2 = 0.5277e^{-0.02x}, n = 6$        | 0.0729 |          |
| II           | $y_1 = 0.1596e^{0.0684x}, n = 18$ | 0.7316 | 1.98     | $y_1 = 0.1836e^{0.0829x}, n = 18$ | 0.767  | 2.29     | $y_1 = 0.1651e^{0.0937x}, n = 18$      | 0.5634 | 2.55     |
|              | $y_2 = 0.2227e^{0.0123x}, n = 6$  | 0.1291 |          | $y_2 = 0.2949e^{0.0025x}, n = 6$  | 0.0091 |          | $y_2 = 0.5856e^{-0.022x}, n = 6$       | 0.1993 |          |
| III          | $y_1 = 0.1216e^{0.0788x}, n = 18$ | 0.8361 | 2.20     | $y_1 = 0.1362e^{0.0977x}, n = 18$ | 0.8901 | 2.66     | $y_1 = 0.1826e^{0.0838x}, n = 18$      | 0.6641 | 2.31     |
|              | $y_2 = 0.1635e^{0.0159x}, n = 6$  | 0.1453 |          | $y_2 = 0.2558e^{0.0002x}, n = 6$  | 0.0019 |          | $y_2 = 0.6326e^{-0.032x}, n = 6$       | 0.2446 |          |
| IV           | $y_1 = 0.1642e^{0.0693x}, n = 18$ | 0.8322 | 2.00     | $y_1 = 0.2096e^{0.0651x}, n = 18$ | 0.7754 | 1.92     | $y_1 = 0.2194e^{0.0736x}, n = 18$      | 0.822  | 2.09     |
|              | $y_2 = 0.2411e^{0.0048x}, n = 6$  | 0.0222 |          | $y_2 = 0.3111e^{-0.004x}, n = 6$  | 0.0073 |          | $y_2 = 0.5812e^{-0.024x}, n = 6$       | 0.3538 |          |

$y_1$ : 春季、秋季和冬季土壤碳通量 Soil carbon flux in spring, autumn and winter;  $y_2$ : 夏季土壤碳通量 Soil carbon flux in summer;  $x$ : 温度 Temperature;  $n$ : 样本数量

Sample size;  $R^2$ : 决定系数 Coefficient of determination;  $Q_{10}$ : 温度敏感性指数 Temperature sensitivity index

土壤碳通量受土壤温度、水分和肥力等因素相互作用的影响,它们之间存在着复杂的生物化学过程。野外条件下测定的土壤碳通量,反映的是多因子联合效应的结果,每个因子都以独特的方式影响固沙植被区的土壤呼吸速率。为了研究土壤温度、水分和肥力等因子对土壤碳通量的影响过程和它们之间的耦合关系,对其进行多元线性回归分析,并通过逐步回归筛选影响土壤碳通量的因素可知(表5),土壤有机质和浅层地温(5 cm)能够显著影响土壤碳通量,最终建立多元回归方程如下:

$$Y = 0.048X_1 + 0.056X_2 - 0.498 \quad (4)$$

式中:Y为土壤碳通量, $X_1$ 为浅层地温(5 cm), $X_2$ 为土壤有机质。

可以看出,固沙植被区土壤有机质和浅层地温(5 cm)是影响土壤碳通量的主要因素,能够解释土壤碳通量变异的65.4%。土壤有机质和浅层地温(5 cm)共同影响着固沙植被区土壤的呼吸速率,而表层土壤水分对固沙植被区土壤碳通量的影响不显著。

表5 土壤碳通量影响因素的变量筛选结果

Table 5 Variable screening results of influencing factors in soil carbon flux

| 变量<br>Variable                            | 偏回归系数<br>Partial regression<br>coefficient | 标准误<br>Standard error | 标准化偏回归系数<br>Standardized partial<br>regression coefficient | t      | P     | R <sup>2</sup> |
|---|--|-----------------------|--|--------|-------|----------------|
| 截距 Intercept                              | -0.498                                     | 0.222                 |  | -2.240 | 0.039 | 0.654          |
| 有机质 Organic matter                        | 0.056                                      | 0.013                 | 0.652  | 4.470  | 0.000 |                |
| 浅层地温<br>Shallow ground temperature (5 cm) | 0.048                                      | 0.021                 | 0.324  | 2.221  | 0.040 |                |

### 3 讨论

#### 3.1 不同固沙植被区土壤碳通量变化特征

土壤碳通量在复杂的时间、空间、环境和人为干扰因素作用下,表现出显著的日变化、季节变化和年际变化特征<sup>[13]</sup>。张冬梅等<sup>[14]</sup>对阿拉善六种荒漠植物区的土壤呼吸速率的观测结果表明,土壤呼吸速率日变化和月变化动态均呈单峰型曲线特征。本研究发现,各固沙植被区土壤碳通量日变化(8:00—18:00)都表现为单峰型曲线,峰值出现在12:00—14:00,最低值出现在8:00或18:00,这与王新友等<sup>[15]</sup>关于石羊河下游梭梭林土壤呼吸速率日变化峰值和最低值出现时间基本一致。王博等<sup>[16]</sup>的研究发现,生长季荒漠土壤碳通量时空变化明显,不同季节间土壤碳通量具有显著差异( $P < 0.05$ )。本研究中,土壤碳通量季节变化特征表现为春季>秋季>夏季>冬季,主要是因为春秋季节土壤水热条件优越,土壤微生物活动剧烈,植物根系处于快速生长期,促使土壤以较快的速度排放CO<sub>2</sub>;夏季气候干燥,温度较高,植物光合作用受损并遭受水分不足的胁迫,土壤微生物为适应干旱环境进入休眠或代谢缓慢阶段<sup>[17]</sup>,从而导致植物为维持基本的生理功能和生长发育而调整其自养呼吸速率,土壤微生物为适应干旱胁迫而减少微生物数量和降低呼吸速率<sup>[18]</sup>,造成夏季土壤碳通量较低的现象;冬季土壤碳通量最小的原因是由于植物在寒冷的冬季处于休眠期,其生长缓慢或停止生长,影响了土壤生物的活动,制约了土壤CO<sub>2</sub>排放。不同类型植被对土壤呼吸的影响不同<sup>[19]</sup>,本研究中,不同固沙植被区土壤碳通量存在差异,但均高于裸沙地,导致这种差异的原因可能是不同固沙植被对土壤特性和地表覆盖的影响不同,促使植物根系生长、凋落物量以及土壤生物活性发生不同变化,进而影响土壤呼吸速率<sup>[20]</sup>。本研究由于条件限制仅测定了土壤碳通量的日变化,对夜间变化没有同步观测,按照白天土壤呼吸值估算的土壤CO<sub>2</sub>年排放量介于543.92—881.30 g/m<sup>2</sup>。根据Parkin等<sup>[21]</sup>的研究结果,夜间测定土壤呼吸平均低估土壤CO<sub>2</sub>通量的20%—30%,故本研究各固沙植被区土壤CO<sub>2</sub>年排放量可能被高估。

#### 3.2 不同固沙植被区土壤碳通量影响因素

土壤碳通量不仅受土壤温度、含水量、肥力等非生物因子的影响,还受植物根系、凋落物等生物因子和土地利用及干扰方式等人类活动的影响<sup>[22]</sup>。这些因素中,温度变化可以解释土壤碳通量大部分日变化和季节

性变化<sup>[23]</sup>。有研究表明,干旱区不同土地利用下的土壤呼吸速率日变化与地表温度和大气温度显著相关<sup>[24]</sup>。本研究中,固沙植被区温度日变化特征与土壤碳通量日变化特征显著相关,其中浅层地温(5 cm)日变化滞后于大气温度和地表温度的日变化,主要是由于热量在土壤中的传导速度较慢导致,这与韩乐等<sup>[25]</sup>关于土壤温度变化对土壤呼吸速率日变化的影响存在滞后性的研究结论基本一致。固沙植被区各时段地表温度、大气温度、浅层地温(5 cm)大小各异,其中浅层地温(5 cm)与地表温度呈极显著正相关关系,与大气温度相关性不显著,主要是受到季节、太阳辐射、天气状况和地表覆被等多种因素的影响所致。许多学者认为,在一定温度范围内,随环境温度的升高,土壤呼吸速率显著增加<sup>[11,26]</sup>。本研究通过 Pearson 相关性分析显示,土壤碳通量与浅层地温(5 cm)、地表温度、大气温度呈极显著正相关关系,与同类研究得出的结论相似<sup>[13]</sup>;采用指数函数模拟土壤碳通量与温度之间的关系,发现夏季土壤碳通量与温度间线性关系不显著,究其原因可能是夏季温度高,植被长时间受干旱缺水影响光合作用受损,土壤微生物为适应干旱胁迫而减缓代谢,导致夏季土壤碳通量与温度间呈非线性关系。土壤温度能够影响植物根系生长和土壤微生物结构与数量,在温度的阈值范围内表现为促进作用,反之则抑制生长<sup>[27]</sup>。本研究测得的土壤碳通量主要是由异养呼吸和自养呼吸组成,浅层地温(5 cm)对土壤碳通量影响最直接,主要源于浅层地温对生物和非生物因子的影响差异导致土壤呼吸组分对温度敏感性的差异<sup>[28]</sup>。研究区土壤碳通量对浅层地温(5 cm)的变化最为敏感,主要是因为有一定温度范围内土壤微生物活性和根系呼吸作用受浅层地温影响较大,导致土壤呼吸作用随浅层地温的升高而显著加强<sup>[18]</sup>。 $Q_{10}$ 是指温度每升高 10℃ 土壤呼吸增加的倍数<sup>[29]</sup>,表示土壤碳通量对温度变化的敏感程度。 $Q_{10}$ 值受植被变化、环境水热条件、土壤理化性质等多种因素的综合影响,存在一定的不确定性<sup>[11]</sup>。本研究中,各固沙植被区土壤碳通量对温度的  $Q_{10}$  值大小各异,变化范围介于 1.92—2.66,相比于中国不同生态系统的平均  $Q_{10}$  值(1.80—3.05)<sup>[30]</sup>,符合脆弱荒漠生态系统的土壤呼吸对温度的敏感性较高<sup>[31]</sup>这一结论。

荒漠区土壤含水量对植被光合作用、根系生长发育和土壤微生物活性等影响土壤碳通量的因子起调控作用,是影响土壤碳通量变化的重要环境要素<sup>[32]</sup>。荒漠区土壤含水量对土壤碳通量的影响具有复杂性与不确定性,王新友等<sup>[15]</sup>研究表明荒漠区梭梭林生长季和非生长季土壤呼吸均与表层 0—5 cm 土壤水分显著正相关,而王博等<sup>[16]</sup>发现在生长季内半固定沙地和结皮固定沙地表层 0—10 cm 土壤含水量与土壤碳通量显著负相关。本研究相关分析结果显示,土壤含水量与土壤碳通量相关性不显著,可能是由于在荒漠干旱条件下,表层土壤长期处于缺水状态,土壤中有机质的分解扩散受到限制,影响了植物根系生长和土壤微生物的活动<sup>[33]</sup>,导致土壤含水量对土壤碳通量的影响较弱。在水分匮乏的荒漠区,植物和土壤微生物为了保持正常生理生态功能已经对干旱胁迫形成了适应性机制<sup>[34]</sup>,从而出现土壤碳通量受土壤水分影响较小,而受降雨影响较大的现象。有学者认为影响土壤碳通量的土壤含水量也存在一个阈值,在阈值范围内随土壤含水量的增加而增加,超过阈值范围则相反<sup>[35]</sup>。当土壤含水量低于微生物活动的临界阈值(沙土类通常为 4%—5%)时,微生物活性、矿化作用和根系呼吸均会受到显著抑制<sup>[36]</sup>,此时水分对碳通量的调控作用被“下限效应”削弱。本研究中,试验期间表层土壤含水量缺少有效降雨的补充,0—10 cm 土壤含水量始终处于极低水平(3.77%—4.32%),微生物和根系代谢处于“休眠状态”,导致水分变化难以激活显著的生物响应,其对碳通量的敏感性下降。另外,在极端干旱条件下,土壤含水量对碳通量的影响也可能被温度等其他因子的影响所掩盖,很难明显地测出水分对土壤碳通量的影响<sup>[37]</sup>。本研究显示,土壤碳通量与浅层地温呈显著正相关( $R^2 = 0.58, P < 0.01$ ),而温度敏感性( $Q_{10}$ 值)达到 2.09 以上,这种高温敏感性可能通过增强酶活性加速残余有机质分解,从而削弱水分变化的相对贡献。

土壤理化性质也是影响土壤碳通量的重要因素,植被在生长过程中并非只是单向地从土壤中获取资源,它们也在通过凋落物分解和根系分泌物等方式不断地向土壤回馈养分和有机质,向土壤输入的有机质和碳是整个陆地生态系统碳循环的关键变量<sup>[22]</sup>。土壤有机质、全氮、碱解氮、土壤容重等理化性质影响植被根系和微生物的数量和分布<sup>[24]</sup>,与土壤呼吸显著相关,其中土壤有机质和碳、氮、钾元素是影响土壤呼吸的主要因子<sup>[8]</sup>。研究区各固沙植被区与裸沙地相比,表层 0—10 cm 土壤质量明显改善,碱解氮含量增加最多,主要是

由于碱解氮与植物生长关系密切,土壤表层动植物残体分解的归还量较高所致。土壤有机质是有机残体经微生物作用形成的富含碳的有机化合物,土壤有机质和氮的积累能够有效提升土壤肥力、有机碳含量、微生物数量和酶活性,进而增加土壤呼吸作用底物,对于作物生长和土壤呼吸有重要的影响<sup>[26]</sup>。本研究相关分析结果显示,固沙植被区土壤碳通量、土壤养分含量之间的相关性较好,有机质对土壤中各养分元素的含量均有明显的促进作用,使得土壤的肥力质量改善,植被能够健康成长,进而增加了固沙植被区的土壤碳通量。

土壤碳通量受多种生物、非生物因素的共同作用<sup>[22]</sup>,其中,土壤温度、含水量、肥力等非生物因子是引起荒漠土壤碳通量变化的主要因素<sup>[8]</sup>,它们之间存在着复杂的生物化学过程,本研究野外原位测量的土壤碳通量反映的是多因子耦合的结果,要进一步探求其作用机理,还有待从以下几方面开展深入研究。一是增加样地布设数量,通过定点连续长期观测各固沙植被区土壤碳通量的昼夜变化,以便更加准确的估算土壤 CO<sub>2</sub>年排放量,为精确评价荒漠生态系统对全球气候变化的贡献提供可靠的数据支撑与参考依据;二是固沙植被区在干旱胁迫影响下,土壤温度、水分和土壤碳通量间的作用机制尚未完全明晰,后续研究需开展针对性实验,通过多变量同步监测与综合分析,厘清三者间的内在联系,揭示干旱胁迫下土壤碳通量变化的本质规律;三是目前在野外原位测量土壤碳通量时很难对生物和非生物因子的影响进行精细区分<sup>[18]</sup>,本研究没有将植物根系、凋落物等生物因子指标纳入土壤碳通量影响因素的多元回归分析中,研究结论暂不能精确解释生物和非生物因素对土壤碳通量影响程度的大小,制约了固沙植被区土壤呼吸影响机制的深入研究,后续研究应注重生物因素和微生境的影响,构建更为全面、完善的多元回归分析模型,准确地评估各因素在土壤碳通量变化过程中的作用。

#### 4 结论

本研究表明,固沙植被的建立显著改善了研究区表层 0—10 cm 土壤的水、肥、热条件,通过提升土壤有机质含量、养分水平和孔隙度等理化特性,有效促进了固沙植被区的土壤呼吸速率。尽管不同固沙植被区的土壤碳通量存在差异,但均呈现典型的单峰日变化格局(峰值出现在 12:00—14:00)和“春>秋>夏>冬”的季节变化特征,其中春季土壤碳通量最高,且与其他三个季度差异显著( $P<0.05$ ),夏季因高温干旱抑制植物光合与土壤微生物代谢导致碳通量异常偏低,各植被区夏季土壤碳通量差异也不显著( $P>0.05$ )。值得注意的是,固沙植被区土壤碳通量与浅层地温(5 cm)、地表温度、大气温度的变化呈极显著正相关关系,特别是对浅层地温(5 cm)表现出高度敏感性。通过研究区关键因子解析发现,土壤有机质积累与浅层地温(5 cm)变化的协同作用可解释 65%以上的碳通量变异,而表层 0—10 cm 土壤水分条件对土壤碳通量未表现出显著调控作用。总体而言,研究区几种典型固沙植被区土壤 CO<sub>2</sub>年排放量介于 543.92—881.30 g/m<sup>2</sup>,土壤有机质和浅层地温是影响土壤碳通量的主要因素。研究结果揭示了固沙植被通过改善土壤有机质和浅层地温促进碳循环的生态机制,未来可持续开展植被重建做好碳封存,提升荒漠土壤的碳贮存能力和潜力。

#### 参考文献(References):

- [1] 左继超,胡建民,郑海金,张英虎,万佳蕾. 水土保持措施对红壤坡地柑橘林土壤呼吸及其水热因子的影响. 水土保持通报, 2016, 36(4): 124-128, 132.
- [2] Poulter B, Frank D, Ciais P, Myeni R B, Andela N, Bi J, Broquet G, Canadell J G, Chevallier F, Liu Y Y, Running S W, Sitch S, van der Werf G R. Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. *Nature*, 2014, 509(7502): 600-603.
- [3] 李新荣,周海燕,王新平,刘立超,张景光,陈国雄,张志山,刘玉冰,谭会娟,高艳红. 中国干旱沙区的生态重建与恢复:沙坡头站 60 年重要研究进展综述. 中国沙漠, 2016, 36(2): 247-264.
- [4] 常宗强,冯起,司建华,李建林,苏永红. 祁连山不同植被类型土壤碳贮量和碳通量. 生态学杂志, 2008, 27(5): 681-688.
- [5] 阿斯嘎,高丽,朴顺姬,闫志坚,马阔东. 库布齐沙地土壤呼吸及其影响因素分析. 草业科学, 2009, 26(9): 99-104.
- [6] 戴雅婷,闫志坚,吴洪新,解继红,侯向阳,高丽. 库布齐沙地四种植被类型土壤呼吸的昼夜变化及其影响因素. 中国草地学报, 2018, 40(2): 102-108.
- [7] 李冰,朱湾湾,韩翠,余海龙,黄菊莹. 降水量变化下荒漠草原土壤呼吸及其影响因素. 植物生态学报, 2023, 47(9): 1310-1321.

- [ 8 ] 陈仕阳, 杨荣, 苏永中, 杜泽玉. 河西绿洲农田土壤呼吸特征及其对长期施肥的响应. 中国沙漠, 2022, 42(3): 178-186.
- [ 9 ] 温超, 单玉梅, 晔霄罕, 张璞进, 木兰, 常虹, 任婷婷, 陈世莘, 白永飞, 黄建辉, 孙海莲. 氮和水分添加对内蒙古荒漠草原放牧生态系统土壤呼吸的影响. 植物生态学报, 2020, 44(1): 80-92.
- [ 10 ] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 刘宗奇, 李晓晶, 刘源. 库布齐东缘沙漠化逆转过程中土壤呼吸及其温度敏感性变化. 应用生态学报, 2020, 31(1): 104-112.
- [ 11 ] 海龙, 周梅, 张嘉开, 洪光宇, 李凤滋, 费菲. 毛乌素沙地不同林龄杨柴灌木林土壤呼吸及其影响因素. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1107-1116.
- [ 12 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114.
- [ 13 ] 董彦丽, 王彦武, 张峰, 马涛, 高金芳. 兰州市城郊林草地土壤碳通量特征及其影响因素. 土壤通报, 2024, 55(1): 76-83.
- [ 14 ] 张冬梅, 王美莲, 张鸿翎, 高润宏. 阿拉善荒漠功能灌木群的土壤呼吸动态研究. 干旱区资源与环境, 2013, 27(6): 116-122.
- [ 15 ] 王新友, 马全林, 靳虎甲, 樊宝丽, 张进虎, 林慧龙. 石羊河下游人工梭梭林土壤呼吸变化特征及其与水热因子的关系. 干旱区地理, 2019, 42(3): 570-580.
- [ 16 ] 王博, 包玉海, 刘静, 李雨薇, 王成龙. 库布齐沙漠植被恢复对风沙土壤碳通量与碳储量的影响. 土壤, 2022, 54(3): 539-546.
- [ 17 ] Wang G S, Jagadamma S, Mayes M A, Schadt C W, Megan Steinweg J, Gu L H, Post W M. Microbial dormancy improves development and experimental validation of ecosystem model. The ISME Journal, 2014, 9(1): 226-237.
- [ 18 ] 冉漫雪, 丁军军, 孙东宝, 顾峰雪. 全球气候变化下土壤呼吸对温度和水分变化的响应特征综述. 中国农业气象, 2024, 45(1): 1-11.
- [ 19 ] 王嘉慧, 方圆, 王妮, 张馨月, 杨艳. 土壤呼吸日动态同温度的关系以及最适测定时间. 北京大学学报: 自然科学版, 2015, 51(1): 159-170.
- [ 20 ] 王忆慧, 龚吉蕊, 刘敏, 黄永梅, 晏欣, 张梓瑜, 徐沙, 罗亲普. 草地利用方式对土壤呼吸和凋落物分解的影响. 植物生态学报, 2015, 39(3): 239-248.
- [ 21 ] Parkin T B, Kaspar T C. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(6): 1763-1772.
- [ 22 ] 鲍青松, 海龙, 王冰, 李白. 沙地生态系统土壤呼吸研究进展. 北方园艺, 2023(22): 125-131.
- [ 23 ] 陈彦硕, 王红梅, 郭天斗, 马彦平. 荒漠草原灌丛转变过程土壤呼吸动态变化及其影响因素研究. 草地学报, 2022, 30(10): 2663-2674.
- [ 24 ] 周洪华, 李卫红, 杨余辉, 曹志超, 李稚. 干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素. 地理科学, 2011, 31(2): 190-196.
- [ 25 ] 韩乐, 苏永红, 王尚涛, 马婷. 敦煌葡萄园地土壤呼吸特征及其与水热因子的关系. 干旱区资源与环境, 2020, 34(7): 185-193.
- [ 26 ] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 杨扬, 刘景利, 史奎桥. 玉米地土壤呼吸作用对土壤温度和生物因子协同作用的响应. 植物生态学报, 2007, 31(3): 363-371.
- [ 27 ] 李晓菡, 邹俊亮, 武菊英, 阚海明, 庞卓, 张国芳, 胡恭任. 土壤呼吸和有机碳对增温的响应及其影响因素分析. 地球与环境, 2022, 50(1): 73-82.
- [ 28 ] Zhang Y, Zhu G F, Yin L, Ma L, Xu C, Chen H L, Ma T, Su Y H, Zhu Y T, He L Y, Han L. Optimal soil water content and temperature sensitivity differ among heterotrophic and autotrophic respiration from oasis agroecosystems. Geoderma, 2022, 425: 116071.
- [ 29 ] Karhu K, Auffret M D, Dungait J A J, Hopkins D W, Prosser J I, Singh B K, Subke J A, Wookey P A, Ågren G I, Sebastià M T, Gouriveau F, Bergkvist G, Meir P, Nottingham A T, Salinas N, Hartley I P. Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. Nature, 2014, 513(7516): 81-84.
- [ 30 ] 盛浩, 杨玉盛, 陈光水, 高人, 曾宏达, 杜紫贤, 张静. 土壤异养呼吸温度敏感性( $Q_{10}$ )的影响因子. 亚热带资源与环境学报, 2006, 1(3): 74-83.
- [ 31 ] 王陈里, 张利杰, 张仲富, 崔婉哲, 王好才, 王行. 基于室内试验的土壤呼吸温度敏感性影响因素整合分析. 西南林业大学学报: 自然科学, 2022, 42(3): 128-137.
- [ 32 ] 牛瑞雪, 刘继亮, 胡彦萍, 付英. 黑河中游不同土地覆被类型土壤呼吸及对水热因子的响应. 中国沙漠, 2017, 37(5): 961-969.
- [ 33 ] 王忠武, 宋晓辉, 王悦骅, 王占文, 闫宝龙, 韩国栋. 模拟降水对短花针茅荒漠草原土壤呼吸的影响. 中国草地学报, 2020, 42(1): 111-116.
- [ 34 ] Perera R S, Cullen B R, Eckard R J. Growth and physiological responses of temperate pasture species to consecutive heat and drought stresses. Plants, 2019, 8(7): 227.
- [ 35 ] 靳虎甲, 马全林, 张有佳, 曾新德. 石羊河下游白刺灌丛演替发育过程的土壤呼吸及其影响因素分析. 中国沙漠, 2012, 32(1): 140-147.
- [ 36 ] 张丽华, 陈亚宁, 赵锐锋, 李卫红. 温带荒漠中温度和土壤水分对土壤呼吸的影响. 植物生态学报, 2009, 33(5): 936-949.
- [ 37 ] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. 生态学报, 2003, 23(5): 972-978.