

DOI: 10.5846/stxb202205141357

潘琪, 陆永兴, 张元明, 周晓兵, 庄伟伟. 荒漠冻融期积雪变化对生物结皮甲烷通量的影响. 生态学报, 2023, 43(12): 5017-5026.

Pan Q, Lu Y X, Zhang Y M, Zhou X B, Zhuang W W. Effect of snow cover variation on methane flux in biocrusts during desert freezing-thawing period. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 5017-5026.

# 荒漠冻融期积雪变化对生物结皮甲烷通量的影响

潘 琪<sup>1,2</sup>, 陆永兴<sup>2,3</sup>, 张元明<sup>2</sup>, 周晓兵<sup>2</sup>, 庄伟伟<sup>1,\*</sup>

1 新疆师范大学生命科学学院, 乌鲁木齐 830054

2 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 温带荒漠积雪覆盖是土壤含水量增加的重要方式, 在冻融期带来丰富的水分变化。全球气候变化导致温带荒漠积雪深度时空格局发生改变, 从而影响荒漠生态系统温室气体的通量。生物结皮在维持荒漠生态系统结构和功能的稳定具有非常重要的作用, 但对环境的变化较为敏感, 尤其是降水变化。然而, 目前有关冻融期不同积雪条件下生物结皮温室气体通量的研究十分匮乏。 $\text{CH}_4$  是重要的温室气体, 选择古尔班通古特沙漠藓和地衣 2 种类型生物结皮为研究对象, 以裸沙为对照, 设置增雪、自然降雪 (对照) 和除雪三种处理, 通过静态箱-气相色谱法, 探究  $\text{CH}_4$  通量在冻融期的变化特征。结果表明: 冻融期多数情况下积雪处理和结皮类型对  $\text{CH}_4$  通量影响不显著。荒漠生物结皮对  $\text{CH}_4$  整体表现为吸收作用, 是荒漠生态系统  $\text{CH}_4$  重要的“汇”。两种结皮类型及裸沙  $\text{CH}_4$  的吸收速率呈现为地衣结皮 ( $-10.12 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) > 藓结皮 ( $-1.73 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) > 裸沙 ( $-1.69 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )。  $\text{CH}_4$  通量通常与土壤 5 cm 深处的温度和水分的相关性不显著, 对其他土壤理化因子响应较弱。研究结果表明, 积雪处理不会对冻融期生物结皮  $\text{CH}_4$  通量产生显著影响, 全球变化条件下温带荒漠积雪的改变可能对土壤  $\text{CH}_4$  的产生和吸收影响较小。  
**关键词:** 温室气体; 藓结皮; 地衣结皮; 温度; 降水; 古尔班通古特沙漠

## Effect of snow cover variation on methane flux in biocrusts during desert freezing-thawing period

PAN Qi<sup>1,2</sup>, LU Yongxing<sup>2,3</sup>, ZHANG Yuanming<sup>2</sup>, ZHOU Xiaobing<sup>2</sup>, ZHUANG Weiwei<sup>1,\*</sup>

1 College of Life Sciences, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

2 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

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

**Abstract:** Snow cover is an important way to increase soil moisture content in temperate desert, which can provide abundant water during the freezing-thawing period. Changes in spatial and temporal patterns of snow depth under global changes in temperate deserts affect greenhouse gas flux in desert ecosystems. Biological soil crusts (biocrusts) play crucial role in stability of structure and function of desert ecosystem, while they are sensitive to environmental changes, especially to precipitation changes. However, few studies on greenhouse gas fluxes were found in desert biocrusts during freezing-thawing period under snow treatments.  $\text{CH}_4$  is an important greenhouse gas. In this study, two types of biocrusts, moss and lichen crusts were selected, and bare sand was as control. Three snow cover treatments, including snow addition, natural snow (control) and snow reduction were conducted. We aimed to explore the variation in  $\text{CH}_4$  flux in 2019 and 2021 during freezing-thawing period based on static chamber-gas chromatography. In general, snow treatment and crust types had no significant effects on  $\text{CH}_4$  flux. Desert biocrusts generally absorbed  $\text{CH}_4$  in this study, and were important “sinks” of  $\text{CH}_4$  in

基金项目: 新疆杰出青年科学基金 (2021D01E03); 国家自然科学基金 (41977099); 中国科学院青年创新促进会项目 (Y201976)

收稿日期: 2022-05-14; 网络出版日期: 2023-02-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zww8611@sina.com

desert ecosystems. The absorption rates of  $\text{CH}_4$  for the two types of crusts and bare sand were lichen crusts ( $-10.12 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) > bare sand ( $-1.73 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) > moss crusts ( $-1.69 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ).  $\text{CH}_4$  fluxes were generally not significantly correlated with soil temperature and water content at 5 cm depth, and had weak response to other soil physicochemical factors. The results showed that snow cover treatments had no significant effects on  $\text{CH}_4$  flux in biocrusts during freezing-thawing period, and the change in snow cover in temperate desert may have few effects on  $\text{CH}_4$  production and absorption in soil under the condition of global change.

**Key Words:** greenhouse gas flux; moss crusts; lichen crusts; temperature; precipitation; Gurbantunggut desert

甲烷( $\text{CH}_4$ )是主要的温室气体之一,其对温室效应的贡献率仅次于  $\text{CO}_2$ , 高达 22%<sup>[1-2]</sup>,但其全球增温潜能是  $\text{CO}_2$  的 27.9 倍<sup>[3]</sup>。自工业革命以来,工、农业活动、化石燃料的燃烧以及毁林开荒等人类活动均造成  $\text{CH}_4$  气体的大量排放,大气中  $\text{CH}_4$  的浓度在逐年增长。由  $\text{CH}_4$  等气体增加引发的全球变化已经成为当今人类社会面临的重要环境问题。大气  $\text{CH}_4$  来源可分为人为来源和自然来源,其中人为来源约占所有来源的 2/3<sup>[4]</sup>。在所有  $\text{CH}_4$  自然排放源中,近 70% 的  $\text{CH}_4$  来源于产甲烷菌的新陈代谢活动,而湿地为  $\text{CH}_4$  的产生提供适宜的条件,是  $\text{CH}_4$  排放最主要的自然源<sup>[5-6]</sup>。因此,水分条件的饱和或者厌氧条件的产生可能成为  $\text{CH}_4$  产生与吸收通量正负转变的重要基础。

全球旱区约占陆地面积 45.4%<sup>[7]</sup>,其中荒漠生态系统是最脆弱的系统类型之一。荒漠本身的地被覆盖变化可能影响到  $\text{CH}_4$  气体交换。其中,生物结皮是荒漠的重要地被覆盖,其盖度在干旱区平均达 30%,甚至可达到 70% 以上<sup>[8]</sup>。生物结皮是由土壤细菌、藻类、地衣以及苔藓等孢子植物类群与土壤颗粒结合形成的十分复杂的有机复合体<sup>[9-10]</sup>。生物结皮能够有效的防止土壤水蚀和风蚀,影响沙地水分再分配,影响土壤生物地球化学循环和气体交换<sup>[11]</sup>。干旱荒漠区,生物结皮对  $\text{CH}_4$  的影响研究相对较少。有研究表明,即使在氧气充足的沙漠区域,其生物结皮中也存在活跃产甲烷菌<sup>[12]</sup>,它们在地球碳循环中扮演着重要角色。因此,沙漠中可能存在重要的产  $\text{CH}_4$  潜力。

除了生物结皮外,土壤水分等环境因子也对  $\text{CH}_4$  通量有一定的影响。Hou 等<sup>[13]</sup>对内蒙古荒漠土壤吸收  $\text{CH}_4$  的研究结果表明,生长季  $\text{CH}_4$  吸收的时空变化较大,且  $\text{CH}_4$  吸收对土壤温度和水分有较强的依赖性。冬季,降雪是温带荒漠生态系统的主要水源。近年来,受西伯利亚北部的冷空气涌动和冬季海平面压力影响,中国北方半干旱区冬季积雪的平均厚度呈现显著增加的趋势<sup>[14-16]</sup>。对于季节性积雪覆盖的地区,如温带荒漠生态系统,每年都会出现积雪覆盖、融化的交替变化。这种交替变化对覆盖区的土壤温度、水分、养分等环境因子产生较大影响,同时与  $\text{CH}_4$  的相关微生物等也可能受到较大影响,从而导致  $\text{CH}_4$  通量产生变化。对森林等生态系统的研究发现,融雪对  $\text{CH}_4$  通量有显著影响<sup>[17]</sup>,同时除雪处理也会对  $\text{CH}_4$  的吸收速率产生影响<sup>[18]</sup>。然而目前,关于温带荒漠积雪中的土壤  $\text{CH}_4$  通量研究甚少。

综上所述,对于荒漠生态系统,研究积雪变化对  $\text{CH}_4$  通量的影响以及生物结皮对通量的调节作用具有重要的意义。为此,我们选择典型温带荒漠古尔班通古特沙漠不同结皮覆盖类型,开展积雪控制实验,比较不同积雪处理后冻融期  $\text{CH}_4$  通量,并评估不同生物结皮覆盖对其影响。研究有助于评估温室气体排放通量及土壤碳收支对气候变化的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地点

研究地点位于古尔班通古特沙漠腹地(45.24°N, 87.60°E, 海拔 564 m)。古尔班通古特沙漠是我国最大的固定和半固定沙漠,沙漠多年平均气温和降水量分别为 8.3 °C 和 129 mm。沙漠每年积雪期长达 4 个月左右,降雪量最大覆盖度一般可达到 20—35 cm<sup>[19]</sup>,冬季积雪相当于 38—64 mm 的降雨量<sup>[20]</sup>。积雪期通常为

11 月至次年 2 月,3 月由于气温开始上升,沙漠进入冻融期,积雪反复冻融交替,为荒漠生命活动提供重要水源。该沙漠中生物结皮广泛分布在沙漠的沙丘斜坡和沙丘间,约占沙漠总面积的 30% 以上<sup>[21]</sup>。根据主要组成差异,沙漠生物结皮主要分为藻类、地衣和藓结皮,其中地衣结皮和藓结皮是晚演替类型<sup>[22]</sup>。

## 1.2 气体样品采集及测定

2018 年 10 月,在研究区选取分布均匀的裸沙(对照)以及藓结皮、地衣两种不同生物结皮为对象,建立 36 个 1.5 m × 1.5 m 的样方来进行实验。各样方间隔 1 m 以上,避免各处理间相互影响。裸沙及两种结皮类型的样地分别开展增雪(+S)、对照(CK)和除雪(-S)三种不同的积雪处理,所有处理重复 4 次。在除雪处理,将样方周围架设铁架,在积雪季盖有透明亚克力板。每次降雪后,收集除雪处理的积雪,均匀覆盖在增雪处理样方上,作为增雪处理(每次降雪后立即添加积雪)。利用静态箱式法采集温室气体,在每个样方安装一套静态箱底座,由一个矩形不锈钢制成(52 cm×52 cm)组成,底座插入样方 5 cm 深,并带有一个水槽用以密封。盖箱内装有空气搅拌小风扇、温度计和采气三通阀。在 2019 年和 2021 年的 2 月(冻融期开始前)至 4 月(冻融期结束后)进行采样。取样时,将盖箱盖住底箱,用水(或防冻水)密封,从上午 11:00 开始采样,分别在 0、20、40 和 60 min 进行采气,装入真空采气袋。采气之前,利用 60 mL 注射器将盖箱内气体来回抽注 4 次,将气体尽量混匀。样品带回实验室后,24 h 内使用气相色谱仪(Agilent 7890B)分析 CH<sub>4</sub> 气体浓度,计算排放速率。

## 1.3 土壤样品采集及理化性质的测定

利用 EM50(5TM, Li-COR, Lincoln, USA)实时监测土壤水分和温度。在样地采集 0—5 cm 的土壤样品,并测量样品(去除积雪)的土壤水分。分析土壤理化特征,包括硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)和全碳(TC)。

土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 测定:称取一定鲜土样,加相应的 2 mol/L KCl 溶液提取,室温下 250 r/min 震荡提取 0.2 h,提取液用滤纸过滤,用连续流动分析仪测定,二者之和为无机氮量。

TP、TN:土壤样品加入浓硫酸和浓硝酸在消解仪消解后用蒸馏水定容到 50 mL,然后用滤纸过滤,用连续流动分析仪测定 TN、TP 含量。

TN、SOC:用 TOC 分析仪(multi N / C 3100, Jena, Germany)测定土壤 TN、SOC 含量。

## 1.4 数据分析

CH<sub>4</sub> 通量为正值时 CH<sub>4</sub> 气体为排放状态,土壤是 CH<sub>4</sub> 的“源”,CH<sub>4</sub> 为负值时 CH<sub>4</sub> 气体为吸收状态,土壤是 CH<sub>4</sub> 的“汇”,通量的计算公式为:

$$F = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H^{[23]}$$

式中: $F$  为 CH<sub>4</sub> 通量( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ); $dc/dt$  为静态箱内气体浓度随时间变化的斜率; $M$  为 CH<sub>4</sub> 气体的摩尔质量; $H$  为静态箱高度(m); $T$  为箱内平均温度(°C); $P$  为大气压; $V_0$ 、 $P_0$ 、 $T_0$  分别为标准状态下的气体摩尔体积、标准大气压以及绝对温度。

采用 SPSS 23.0 软件进行重复测量方差分析,确定积雪处理、生物结皮类型、采样时间及其交互作用对 CH<sub>4</sub> 通量的影响。利用 R(4.1.2) 软件进行随机森林的分析和各因子之间相关性分析。最后利用 Origin 2018 软件对分析的结果进行作图。

## 2 结果

### 2.1 冻融期及其前后 CH<sub>4</sub> 通量的变化特征

2019 年冻融期(3 月)及冻融期前后(2 月和 4 月)裸沙和两种结皮类型下 CH<sub>4</sub> 通量绝大多数情况下为负值,CH<sub>4</sub> 气体处于吸收的状态。但在除雪处理下的藓结皮和裸沙 CH<sub>4</sub> 气体大多呈现为排放的状态。在冻融期初期 CH<sub>4</sub> 通量波动较大,后期趋于稳定。藓、地衣两种结皮类型及裸沙在冻融期 CH<sub>4</sub> 平均通量分别为  $-2.61 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、 $-7.05 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、和  $-2.8 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (图 1)。

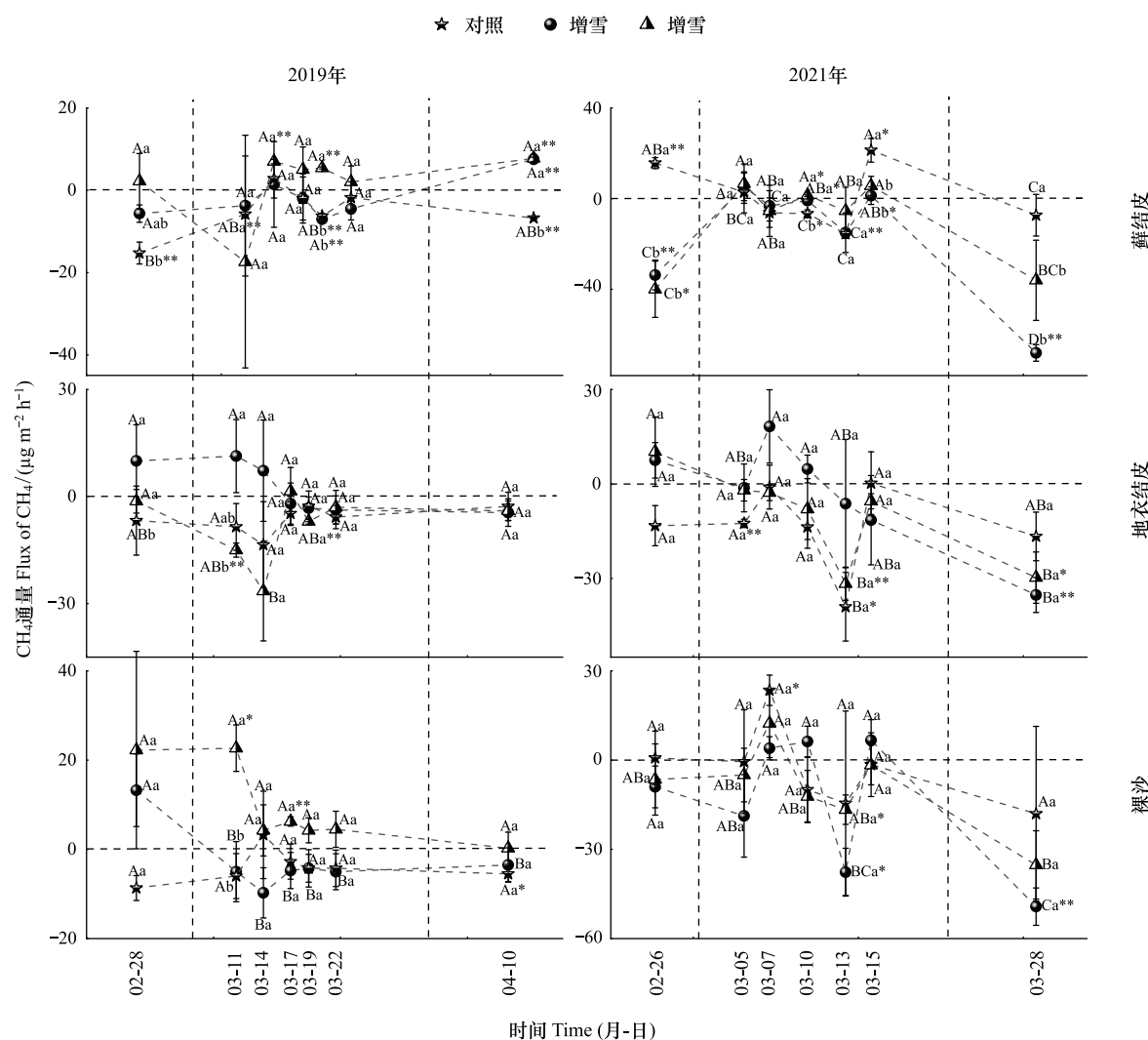


图1 三种积雪处理下不同生物结皮类型的  $\text{CH}_4$  通量变化 (平均值 $\pm$ 标准误差)

Fig.1 Variation of  $\text{CH}_4$  fluxes in different biocrust types under three snow treatments (mean $\pm$ standard error)

相同字母表示处理间差异不显著 ( $P>0.05$ ); \* 表示  $\text{CH}_4$  通量为显著排放或吸收 (\* $P<0.05$ ; \*\* $P<0.01$ ); A、B 表示组间差异; a、b 表示组内差异

藓结皮在除雪处理下  $\text{CH}_4$  气体在 3 月 11 日出现一个吸收的峰值, 增雪和对照处理分别在 2 月 28 日和 3 月 19 日表现为吸收最大值。地衣结皮下对照和除雪处理都在 3 月 14 日出现吸收的峰值, 而增雪处理没有明显的吸收最值。对于裸沙来说, 2 月 28 日和 3 月 14 日分别为对照和增雪处理的吸收峰值, 除雪处理吸收值趋于稳定, 没有明显的峰值 (图 1)。

为了更好的研究冻融期及其前后  $\text{CH}_4$  通量的变化, 我们在 2021 年也做了同样的处理, 与 2019 年相同的是, 2021 年的  $\text{CH}_4$  气体大多也处于吸收状态, 说明大多数冻融季节下荒漠生态系统是  $\text{CH}_4$  的“汇”。藓、地衣两种结皮类型及裸沙的  $\text{CH}_4$  平均通量分别为  $-0.85 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、 $-13.18 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、和  $-0.59 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。藓结皮下, 三种处理的峰值存在一定的差异, 增雪处理的吸收峰值出现在 3 月 28 日, 除雪处理和对照处理的吸收峰值分别在 2 月 26 日和 3 月 13 日。在地衣结皮下, 除雪和对照处理的吸收峰值都出现在 3 月 13 日, 而增雪处理在 3 月 28 日出现吸收的峰值。在裸沙下, 增雪、对照处理的吸收峰值都出现在 3 月 28 日, 除雪处理在 3 月 15 日出现吸收峰值 (图 1)。

通过对 2019 年冻融期  $\text{CH}_4$  通量的重复测量方差分析, 我们发现积雪变化、结皮类型对  $\text{CH}_4$  通量的影响都不显著, 但是它们的交互作用对  $\text{CH}_4$  通量的影响显著, 此外采样日期和结皮类型、采样日期和积雪变化以及它

们三者间的交互作用对  $\text{CH}_4$  通量的影响不显著。与 2019 年结果不同的是, 2021 年冻融期采样日期对  $\text{CH}_4$  通量的影响极显著, 但结皮类型、积雪变化及两者间的交互作用对  $\text{CH}_4$  通量的影响并不显著(表 1)。

表 1 冻融期  $\text{CH}_4$  通量的重复测量方差分析

Table 1 Repeated measurement variance analysis of  $\text{CH}_4$  flux during freeze-thaw period

| 因素<br>Factor                 | 2019  |         | 2021  |          |
|------------------------------|-------|---------|-------|----------|
|                              | F     | P       | F     | P        |
| 积雪变化 Snow(S)                 | 0.826 | 0.447   | 0.153 | 0.859    |
| 生物结皮类型 Type of biocrusts(TB) | 1.415 | 0.259   | 2.039 | 0.148    |
| 采样日期 Date of sampling(D)     | 0.141 | 0.966   | 9.409 | 0.000 ** |
| D×TB                         | 0.941 | 0.486   | 1.719 | 0.101    |
| D×S                          | 0.499 | 0.855   | 1.711 | 0.682    |
| TB×S                         | 3.206 | 0.026 * | 1.945 | 0.129    |
| D×TB×S                       | 0.888 | 0.585   | 0.877 | 0.597    |

从整体上看, 冻融期  $\text{CH}_4$  通量以吸收为主, 总体表现为大气  $\text{CH}_4$  的“汇”, 并在冻融期整体呈现出一个减弱的趋势, 即吸收增加。冻融期前后也没有明显的差异。

## 2.2 $\text{CH}_4$ 通量与土壤温度和土壤水分的关系

### 2.2.1 $\text{CH}_4$ 通量与土壤温度的关系

两种结皮类型及裸沙土壤 5 cm 处温度与  $\text{CH}_4$  通量进行相关性研究, 发现除藓结皮下的对照处理与  $\text{CH}_4$  通量呈显著的正相关关系( $P < 0.05$ )外, 其余处理与土壤温度没有显著的相关性(图 2)。

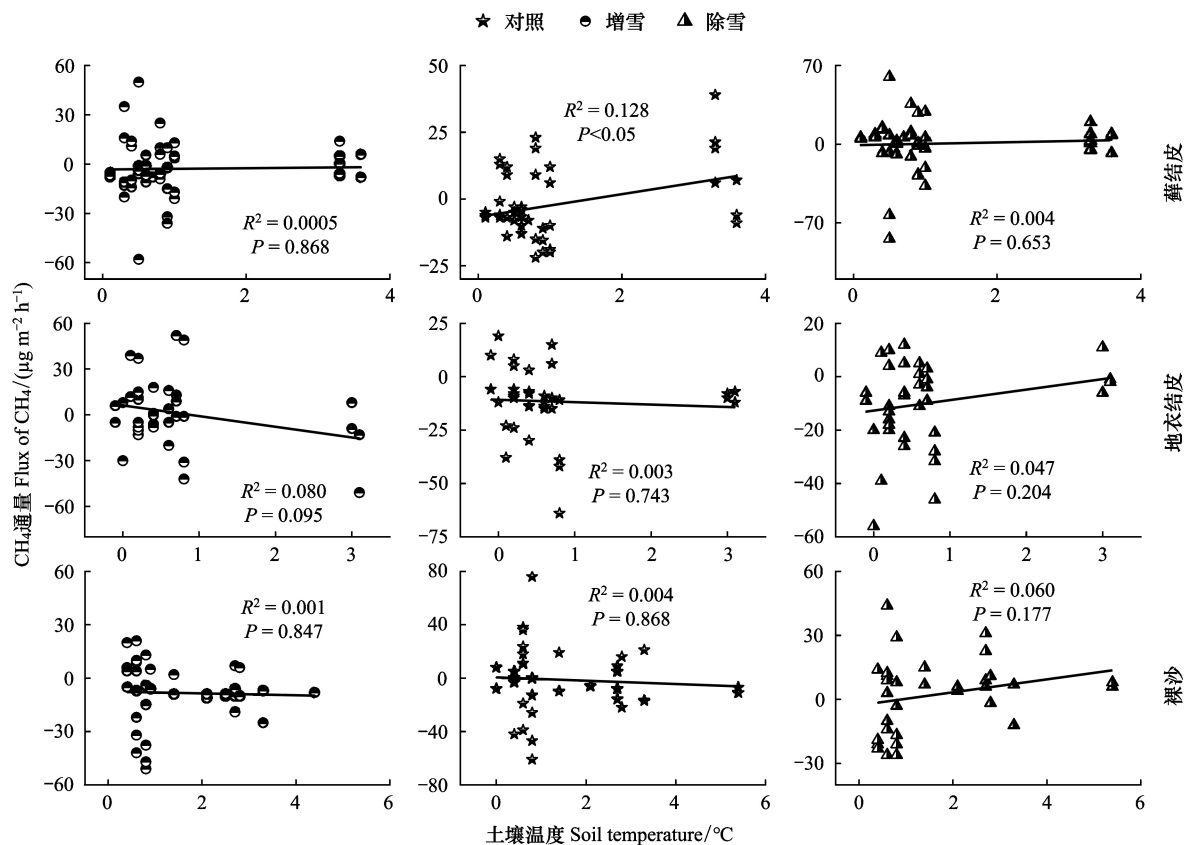


图 2  $\text{CH}_4$  通量与 5 cm 深处土壤温度的关系

Fig.2 Relationship between  $\text{CH}_4$  flux and soil temperature at depth of 5 cm

### 2.2.2 CH<sub>4</sub>通量与土壤水分的关系

对两种结皮类型及裸沙土壤 5 cm 深处的水分进行研究,结果表明土壤水分对 CH<sub>4</sub>通量没有显著的影响。

冻融期,每种结皮类型的三种处理水分差异相对较大,除雪处理的土壤水分显著低于增雪处理和对照处理,但研究结果表明除雪对照处理下土壤水分对 CH<sub>4</sub>通量呈显著正相关外( $P < 0.01$ )外,其余两种处理以及地衣结皮类型下的 CH<sub>4</sub>通量与土壤水分都不相关( $P > 0.05$ )(图 3)。

在裸沙样地中,三种处理下 CH<sub>4</sub>通量与土壤水分之间均不存在显著关系( $P > 0.05$ )(图 3)。

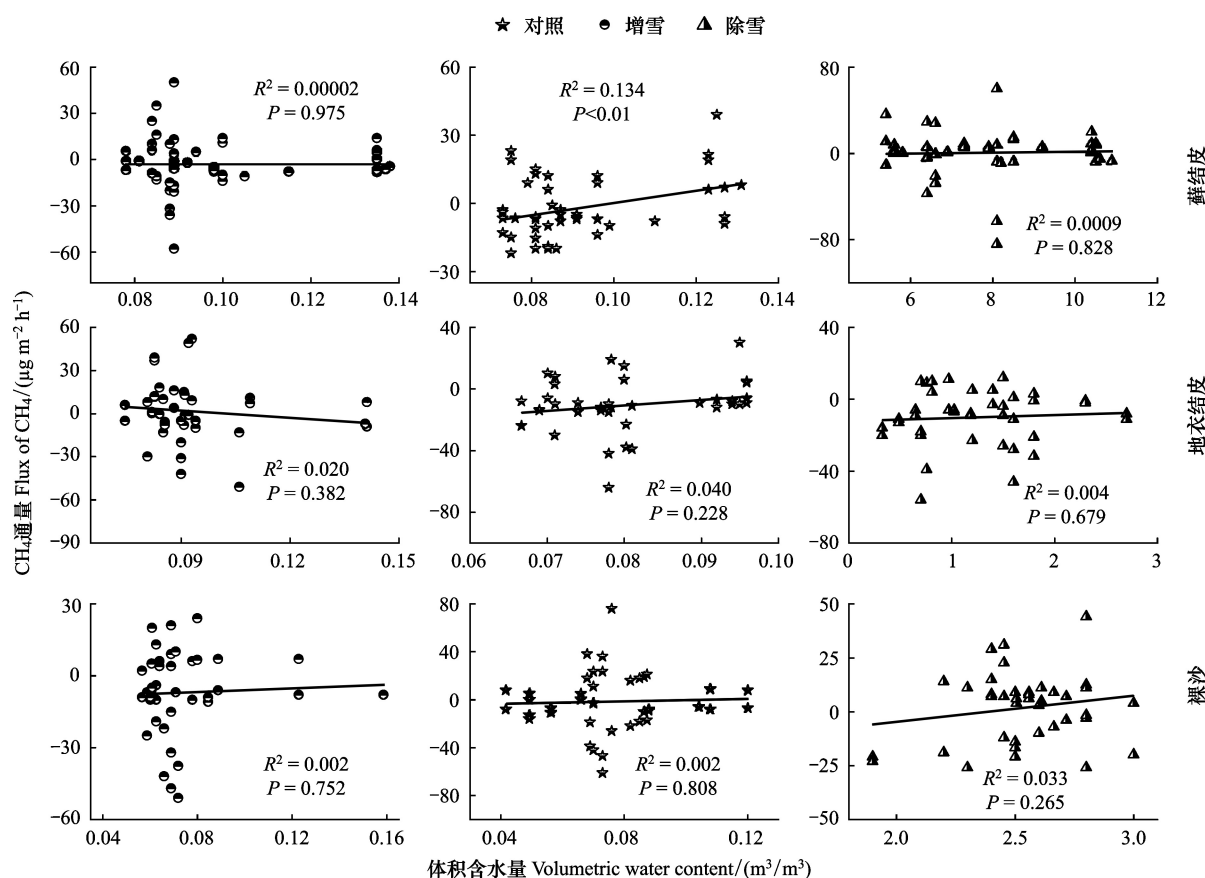


图3 CH<sub>4</sub>通量与 5 cm 深处土壤水分的关系

Fig.3 Relationship between CH<sub>4</sub> flux and soil moisture at depth of 5 cm

### 2.2.3 CH<sub>4</sub>通量与其他土壤理化性质的关系

对过分析 CH<sub>4</sub>通量与土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、SOC、TN、TP、TC 相关关系发现,各土壤理化因子与土壤 CH<sub>4</sub>通量的相关性不显著(图 4)。

### 2.2.4 随机森林分析验证各因子对 CH<sub>4</sub>通量的影响

与上述结果相似,随机森林分析结果表明,积雪处理、结皮类型以及各土壤理化因子间与 CH<sub>4</sub>通量的相关性均不显著(表 2)。

## 3 讨论

### 3.1 冻融期不同积雪处理对生物结皮 CH<sub>4</sub>通量的影响

本研究所述的 CH<sub>4</sub>通量是土壤 CH<sub>4</sub>产生和吸收的综合表现<sup>[24]</sup>。通过分析古尔班通古特沙漠不同结皮类型中,增雪、对照和除雪对冻融期 CH<sub>4</sub>通量的影响研究,发现荒漠大都表现为 CH<sub>4</sub>的吸收,不同结皮是 CH<sub>4</sub>的“汇”。这与王博等<sup>[25]</sup>在库布齐沙漠对不同生物结皮土壤温室气体的研究和滕佳玲等<sup>[26]</sup>在腾格里沙漠沙土

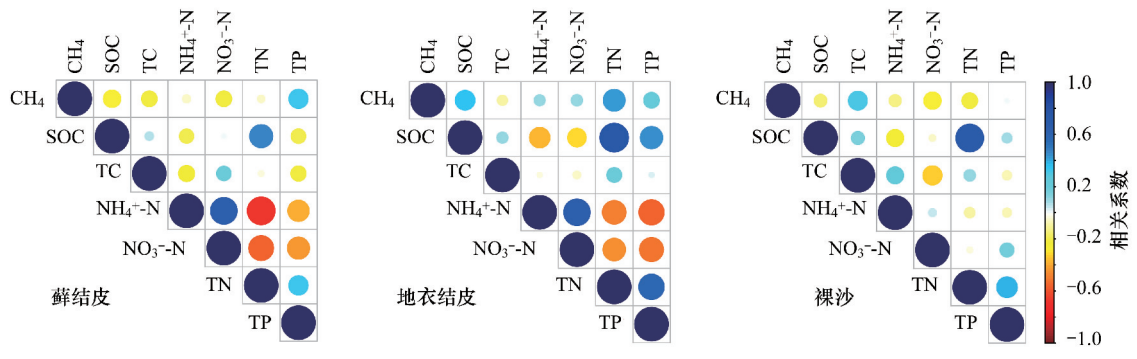


图 4 冻融期不同生物结皮类型下 CH<sub>4</sub>通量与土壤各理化因子的关系

Fig.4 Relationship between CH<sub>4</sub> flux and soil physicochemical factors under different biocrusts during freezing-thawing period

T: 温度 Temperature; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N: 硝态氮 Nitrate nitrogen; W: 水分 Water; S: 积雪 Snow; TB: 生物结皮 Type of biocrusts; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 铵态氮 Ammonium nitrogen; TN: 全氮 Total nitrogen; SOC: 有机碳 Organic carbon; TP: 全磷 Total phosphorus; TC: 全碳 Total carbon

对生物结皮温室气体通量的研究结果是相似的。CH<sub>4</sub>是产甲烷菌在厌氧条件下产生的<sup>[27—28]</sup>,在有氧条件下,甲烷氧化菌又会将 CH<sub>4</sub>彻底氧化为 CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>O<sup>[29]</sup>。积雪处理对 CH<sub>4</sub>通量的影响,具有正效应、负效应和无效应等不同结果。对美国白山国家森林的研究结果表明,CH<sub>4</sub>通量在除雪处理和对照处理下没有明显的差异,但在冰雪融化前后的冬春过度时期,除雪处理显著降低了 CH<sub>4</sub>的吸收<sup>[17]</sup>。在对温带森林中的研究中发现除雪处理增加了森林土壤 CH<sub>4</sub>的吸收速率<sup>[18]</sup>。然而,在芬兰东部草甸的研究结果表明除雪处理和不除雪处理间的 CH<sub>4</sub>通量没有明显差异,但是在融雪前后 CH<sub>4</sub>通量有一定的变化,这可能是因为除雪处理对低 CH<sub>4</sub>通量的影响很小有关<sup>[30]</sup>。本实验的结果显示,增雪和除雪处理对荒漠生物结皮 CH<sub>4</sub>通量的影响不显著。

表 2 积雪处理、结皮类型及各土壤理化性质对土壤 CH<sub>4</sub> 通量的随机森林分析

Table 2 Random forest analysis of CH<sub>4</sub> fluxes in soil by snow cover treatment, crusts type and soil physicochemical properties

| 因素 Factor                                             | 解释率/%   | P     | 因素 Factor                                              | 解释率/%   | P     |
|-------------------------------------------------------|---------|-------|--------------------------------------------------------|---------|-------|
| 温度 Temperature(T)                                     | 7.50065 | 0.178 | 铵态氮 Ammonium nitrogen(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N) | 2.53768 | 0.752 |
| 硝态氮 Nitrate nitrogen(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N) | 8.79623 | 0.188 | 全氮 Total nitrogen(TN)                                  | 0.24407 | 0.990 |
| 水分 Water(W)                                           | 8.37224 | 0.614 | 有机碳 Organic carbon(SOC)                                | 5.38459 | 0.603 |
| 积雪 Snow(S)                                            | 1.88438 | 0.743 | 全磷 Total phosphorus(TP)                                | 4.47475 | 0.495 |
| 生物结皮 Type of biocrusts(TB)                            | 5.82386 | 0.099 | 全碳 Total carbon(TC)                                    | 2.99397 | 0.644 |

徐冰鑫等<sup>[31]</sup>在腾格里沙漠对生物结皮 CH<sub>4</sub>通量的研究中发现,荒漠地区藓结皮的 CH<sub>4</sub>吸收通量显著高于藻类结皮。王博等<sup>[25]</sup>在库布齐沙漠的研究中发现 CH<sub>4</sub>吸收通量大小为地衣结皮>藻结皮>流动沙地。这与本研究的结果是相似的,本研究发现生物结皮 CH<sub>4</sub>吸收通量的相对大小为地衣结皮>藓结皮>裸沙。但生物结皮对 CH<sub>4</sub>通量的影响并不显著。

在冬季,如果存在足够的自由水和碳基质,积雪下的微生物生物量将会增加<sup>[32]</sup>,并且积雪对土壤有保温作用,可以提高土壤中微生物的活性,从而促进 CH<sub>4</sub>排放<sup>[33]</sup>。但也有研究表明,即使被雪覆盖,生物结皮在冬季也会通过光合作用吸收碳<sup>[34—35]</sup>。Starr 和 Oberbauer<sup>[36]</sup>发现,在积雪仍然存在的春季,由于雪下环境的有利条件,包括充足的光照、适当的温度以及可用的融水,生物结皮的碳吸收能力也会增强。本研究主要集中于冻融期,温度、水分和光照等条件变化剧烈,可能各因子的复合作用对 CH<sub>4</sub>产生关键影响,而积雪变化或结皮类型这样的单一因子的作用被掩盖,对 CH<sub>4</sub>通量难以表现出显著影响。

### 3.2 CH<sub>4</sub>通量与土壤理化因子的关系

土壤温度主要有有机质的分解速度和土壤中与 CH<sub>4</sub>相关微生物的活性产生影响,从而进一步影响土壤

CH<sub>4</sub>的产生。土壤温度对 CH<sub>4</sub>氧化的影响主要是影响 CH<sub>4</sub>在土壤中的扩散和甲烷氧化菌的活性<sup>[37]</sup>。在森林生态系统和对中亚热带天然林土壤 CH<sub>4</sub>的研究结果表明,土壤温度与 CH<sub>4</sub>通量的相关性并不明显<sup>[38]</sup>,但张宇鸿等<sup>[39]</sup>在对不同层次土壤温度的研究中发现土壤 5 cm 深处的土壤温度对 CH<sub>4</sub>通量影响显著。本研究发现在大多情况下土壤 5 cm 深处的温度与 CH<sub>4</sub>通量无显著的相关关系。有研究表明,产甲烷菌成长繁衍的最佳温度是 30—40℃<sup>[27]</sup>,也有研究表明 25℃是产甲烷菌的活性最佳<sup>[40]</sup>,但在冻融期及其前后土壤温度很难达到这一高度,并且甲烷氧化菌对土壤温度变化不敏感<sup>[41]</sup>。因此,温度的影响未达到 CH<sub>4</sub>通量变化的响应区间,从而限制了 CH<sub>4</sub>通量对土壤温度的响应。

CH<sub>4</sub>的产生一般是厌氧环境,土壤水分不同导致土壤甲烷氧化菌在不同的条件下活性不同,CH<sub>4</sub>的氧化速率也不同。土壤水分主要从影响 CH<sub>4</sub>在土壤的扩散速度和土壤微生物的活性两个方面来影响土壤对 CH<sub>4</sub>的氧化吸收<sup>[42]</sup>。在内蒙古典典型草原生态系统<sup>[43]</sup>和森林生态系统<sup>[44]</sup>的研究结果显示土壤水分与 CH<sub>4</sub>通量显著负相关。但本研究的研究结果表明土壤水分与 CH<sub>4</sub>通量的相关性通常并不显著,这与王博等<sup>[25]</sup>和 Wang 等<sup>[45]</sup>的研究结果一致。这可能归因于荒漠地区不同生物结皮下的土壤持水能力不同。有研究表明藓结皮的持水能力高于裸沙<sup>[46]</sup>,这导致有结皮的土壤含水量比裸沙地的土壤含水量更高。一般情况下,CH<sub>4</sub>氧化有最适水分范围,在最适范围内,CH<sub>4</sub>氧化速率与土壤含水量呈正相关关系,但在不同的土壤环境中,CH<sub>4</sub>氧化的最适土壤含水量有一定的差别<sup>[47]</sup>。冻融期土壤经历反复冻融,水分含量过高,从而减少了生物结皮 CH<sub>4</sub>的吸收,甚至可能由 CH<sub>4</sub>氧化转变为 CH<sub>4</sub>的排放<sup>[48]</sup>。因此 CH<sub>4</sub>通量对冻融期土壤水分的响应并不显著。

有研究发现,土壤有机碳(SOC)是造成“温室效应”的主要因素,CH<sub>4</sub>产生量对 SOC 的含量响应显著<sup>[49—50]</sup>。但也有研究发现 SOC 和 CH<sub>4</sub>的并不相关。而氮素对 CH<sub>4</sub>的影响,常见抑制作用<sup>[51—52]</sup>。在对 CH<sub>4</sub>响应外源氮素的研究结果中发现,CH<sub>4</sub>排放与外源氮素的输入有显著的相关性<sup>[53—54]</sup>。然而,本研究结果表明,冻融期土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 等含量,土壤 SOC、TC 等含量,以及土壤 TP,与 CH<sub>4</sub>通量间的关系并不显著,具体原因仍需要进一步深入分析。研究也表明,荒漠生态系统中 CH<sub>4</sub>通量,可能受到多土壤环境因子共同作用,单一的环境因子对 CH<sub>4</sub>的影响较小。

#### 4 结论

古尔班通古特沙漠是 CH<sub>4</sub>的吸收“汇”。不同生物结皮间 CH<sub>4</sub>气体通量有一定的差异,吸收大小为地衣结皮(-10.12 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)>藓结皮(-1.73 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)>裸沙(-1.69 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)。积雪处理和结皮类型对 CH<sub>4</sub>通量没有显著的影响,但两种因素的相互作用对 CH<sub>4</sub>通量影响显著。冻融期及其前后 CH<sub>4</sub>通量没有明显的变化。土壤 5 cm 深处的温度和水分在多数情况下对 CH<sub>4</sub>通量无显著影响,土壤理化因子对土壤 CH<sub>4</sub>通量的影响也并不显著。因此,冻融期 CH<sub>4</sub>通量可能受多方面因素的影响,而对单一因子的响应不显著。研究结果表明荒漠生态系统 CH<sub>4</sub>通量的影响因子及影响机制具有复杂性,对冻融期的 CH<sub>4</sub>通量的研究还需进一步深入。

#### 参考文献(References):

- [1] Swart N C, Gille S T, Fyfe J C, Gillett N P. Recent Southern Ocean warming and freshening driven by greenhouse gas emissions and ozone depletion. *Nature Geoscience*, 2018, 11(11): 836-841.
- [2] Knittel K, Boetius A. Anaerobic oxidation of methane: progress with an unknown process. *Annual Review of Microbiology*, 2009, 63: 311-334.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.
- [4] Feldman D R, Collins W D, Biraud S C, Risser M D, Turner D D, Gero P J, Tadić J, Helmig D, Xie S, Mlawer E J, Shippert T R, Torn M S. Observationally derived rise in methane surface forcing mediated by water vapour trends. *Nature Geoscience*, 2018, 11(4): 238-243.
- [5] Conrad R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved. *Environmental Microbiology Reports*, 2009, 1(5): 285-292.
- [6] 张坚超, 徐德钦, 陆雅海. 陆地生态系统甲烷产生和氧化过程的微生物机理. *生态学报*, 2015, 35(20): 6592-6603.

- [ 7 ] Pr  v  lie R, Bandoc G, Patriche C, Sternberg T. Recent changes in global drylands; evidences from two major aridity databases. *CATENA*, 2019, 178: 209-231.
- [ 8 ] Belnap J. The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(4): 181-189.
- [ 9 ] Belnap J, Gillette D A. Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance. *Journal of Arid Environments*, 1998, 39(2): 133-142.
- [ 10 ] 张元明. 荒漠地表生物土壤结皮的微结构及其早期发育特征. *科学通报*, 2005, 50(1): 42-47.
- [ 11 ] 黄磊, 张志山, 胡宜刚, 张鹏, 赵洋. 固沙植被区典型生物土壤结皮类型下土壤 CO<sub>2</sub> 浓度变化特征及其驱动因子研究. *中国沙漠*, 2012, 32(6): 1583-1589.
- [ 12 ] Angel R, Matthies D, Conrad R. Activation of methanogenesis in arid biological soil crusts despite the presence of oxygen. *PLoS One*, 2011, 6(5): e20453.
- [ 13 ] Hou L Y, Wang Z P, Wang J M, Wang B, Zhou S B, Li L H. Growing season in situ uptake of atmospheric methane by desert soils in a semiarid region of northern China. *Geoderma*, 2012, 189-190: 415-422.
- [ 14 ] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Fang J Y, Wang X H. Change in winter snow depth and its impacts on vegetation in China. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 3004-3013.
- [ 15 ] Tsunematsu N, Kuze H, Sato T, Hayasaki M, Cui F F, Kondoh A. Potential impact of spatial patterns of future atmospheric warming on Asian dust emission. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(37): 6682-6695.
- [ 16 ] Huang G, Su Y G, Zhu L, Li Y. The role of spring ephemerals and soil microbes in soil nutrient retention in a temperate desert. *Plant and Soil*, 2016, 406(1/2): 43-54.
- [ 17 ] Groffman P M, Hardy J P, Driscoll C T, Fahey T J. Snow depth, soil freezing, and fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in a northern hardwood forest. *Global Change Biology*, 2006, 12(9): 1748-1760.
- [ 18 ] Borken W, Davidson E A, Savage K, Sundquist E T, Steudler P. Effect of summer throughfall exclusion, summer drought, and winter snow cover on methane fluxes in a temperate forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(6): 1388-1395.
- [ 19 ] 李江风. 新疆气候. 北京: 气象出版社, 1991.
- [ 20 ] Huang G, Li Y. Phenological transition dictates the seasonal dynamics of ecosystem carbon exchange in a desert steppe. *Journal of Vegetation Science*, 2015, 26(2): 337-347.
- [ 21 ] Zhang Y M, Chen J, Wang L, Wang X Q, Gu Z H. The spatial distribution patterns of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Northern Xinjiang, China. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(4): 599-610.
- [ 22 ] Zhang Y M, Wu N, Zhang B C, Zhang J. Species composition, distribution patterns and ecological functions of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert. *Journal of Arid Land*, 2010, 2(3): 180-189.
- [ 23 ] 孙景鑫, 刘东, 秦璐, 张雪妮, 何学敏, 吕光辉. 艾比湖地区棉田、撂荒地土壤 CH<sub>4</sub> 排放通量日变化规律研究. *新疆农业科学*, 2012, 49(8): 1489-1489.
- [ 24 ] Kammann C, Hepp S, Lenhart K, M  ller C. Stimulation of methane consumption by endogenous CH<sub>4</sub> production in aerobic grassland soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 622-629.
- [ 25 ] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 刘宗奇, 李晓晶, 刘源, 李少博, 郝雯. 库布齐沙漠东部不同生物结皮发育阶段土壤温室气体通量. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 857-866.
- [ 26 ] 滕嘉玲, 贾荣亮, 胡宜刚, 徐冰鑫, 陈孟晨, 赵芸. 沙埋对于干旱沙区生物结皮覆盖土壤温室气体通量的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 723-734.
- [ 27 ] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(1): 25-50.
- [ 28 ] Chaban B, Ng S Y M, Jarrell K F. Archaeal habitats-from the extreme to the ordinary. *Canadian Journal of Microbiology*, 2006, 52(2): 73-116.
- [ 29 ] Dala R C, Allen D E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56(5): 369-407.
- [ 30 ] Maljanen M, Kohonen A R, Virk  j  rvi P, Martikainen P J. Fluxes and production of N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in boreal agricultural soil during winter as affected by snow cover. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2007, 59(5): 853-859.
- [ 31 ] 徐冰鑫, 胡宜刚, 张志山, 陈永乐, 张鹏, 李刚. 模拟增温对荒漠生物土壤结皮-土壤系统 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(8): 809-820.
- [ 32 ] Schaefer K, Jafarov E. A parameterization of respiration in frozen soils based on substrate availability. *Biogeosciences*, 2016, 13(7): 1991-2001.
- [ 33 ] 张荣涛, 付晓宇, 王康, 刘赢男, 付晓玲, 倪红伟. 三江平原小叶章湿地碳排放对雪被变化的短期响应. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1314-1322.
- [ 34 ] Kappen L, Schroeter B, Hestmark G, Winkler J B. Field measurements of photosynthesis of umbilicarius lichens in winter. *Botanica Acta*, 1996,

- 109(4): 292-298.
- [35] Tieszen L L. Photosynthetic competence of the subnivean vegetation of an arctic tundra. *Arctic and Alpine Research*, 1974, 6(3): 253-256.
- [36] Starr G, Oberbauer S F. Photosynthesis of arctic evergreens under snow: implications for tundra ecosystem carbon balance. *Ecology*, 2003, 84(6): 1415-1420.
- [37] Mohanty S R, Bodelier P L E, Conrad R. Effect of temperature on composition of the methanotrophic community in rice field and forest soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, 62(1): 24-31.
- [38] Rustad L E, Fernandez I J. Experimental soil warming effects on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> flux from a low elevation spruce-fir forest soil in Maine, USA. *Global Change Biology*, 1998, 4(6): 597-605.
- [39] 张宇鸿, 沈燕, 黄志宏, 张强, 王瑶. 亚热带三种林型甲烷通量及其影响因子. *湖南林业科技*, 2016, 43(1): 26-32.
- [40] Dunfield P, Knowles R, Dumont R, Moore T R. Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: response to temperature and pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(3): 321-326.
- [41] Schipper L A, Hobbs J K, Rutledge S, Arcus V L. Thermodynamic theory explains the temperature optima of soil microbial processes and high Q<sub>10</sub> values at low temperatures. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3578-3586.
- [42] 蔡元锋, 贾仲君. 土壤大气甲烷氧化菌研究进展. *微生物学报*, 2014, 54(8): 841-853.
- [43] Wang Y S, Xue M, Zheng X H, Ji B M, Du R, Wang Y F. Effects of environmental factors on N<sub>2</sub>O emission from and CH<sub>4</sub> uptake by the typical grasslands in the Inner Mongolia. *Chemosphere*, 2005, 58(2): 205-215.
- [44] Fang H J, Yu G R, Cheng S L, Zhu T H, Wang Y S, Yan J H, Wang M, Cao M, Zhou M. Effects of multiple environmental factors on CO<sub>2</sub> emission and CH<sub>4</sub> uptake from old-growth forest soils. *Biogeosciences*, 2010, 7(1): 395-407.
- [45] Wang B, Liu J, Zhang X, Wang C L. Changes in soil carbon sequestration and emission in different succession stages of biological soil crusts in a sand-binding area. *Carbon Balance and Management*, 2021, 16(1): 27.
- [46] 李新荣. 荒漠生物土壤结皮生态与水文学研究. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [47] 贾高辉, 许全, 杨怀, 杨秋, 李意德, 刘文杰. 尖峰岭热带山地雨林林窗土壤甲烷通量研究. *森林与环境学报*, 2020, 40(2): 126-132.
- [48] Semrau J D, DiSpirito A A, Yoon S. Methanotrophs and copper. *FEMS Microbiology Reviews*, 2010, 34(4): 496-531.
- [49] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 土壤溶解有机碳的研究进展. *土壤与环境*, 2002, 11(4): 422-429.
- [50] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1/3): 217-232.
- [51] Steudler P A, Bowden R D, Melillo J M, Aber J D. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. *Nature*, 1989, 341(6240): 314-316.
- [52] Mosier A R, Schimel D, Valentine D W, Bronson K, Parton W J. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature*, 1991, 350(6316): 330-332.
- [53] 李文军, 彭保发, 杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响. *中国农业科学*, 2015, 48(3): 488-500.
- [54] 胡敏杰, 仝川, 邹芳芳. 氮输入对土壤甲烷产生、氧化和传输过程的影响及其机制. *草业学报*, 2015, 24(6): 204-212.