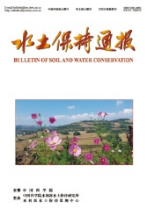


水土保持通报
Bulletin of Soil and Water Conservation
ISSN 1000-288X,CN 61-1094/X

《水土保持通报》网络首发论文

题目：　冻融期巴音布鲁克高寒湿地雪被去除对土壤有机碳库稳定性的影响
作者：　胡云鹏，陈末，杨再磊，买迪努尔·阿不来孜，田宇欣，贾宏涛，寇天乐，贾远彬
DOI：　10.13961/j.cnki.stbctb.20240607.002
收稿日期：　2023-10-19
网络首发日期：　2024-06-12
引用格式：　胡云鹏，陈末，杨再磊，买迪努尔·阿不来孜，田宇欣，贾宏涛，寇天乐，贾远彬．冻融期巴音布鲁克高寒湿地雪被去除对土壤有机碳库稳定性的影响[J/OL]．水土保持通报. https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20240607.002

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20240607.002　网络首发时间：2024-06-12 09:07:02
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1094.X.20240607.1641.004

冻融期巴音布鲁克高寒湿地雪被去除对土壤有机碳库稳定性的影响

胡云鹏[1]，陈 末[2]，杨再磊[1,3]，
买迪努尔·阿不来孜[2]，田宇欣[2]，贾宏涛[1,3,4]，寇天乐[1]，贾远彬[1]
（1.新疆农业大学 资源与环境学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2.新疆农业大学 草业学院，新疆 乌鲁木齐 830052；3.新疆土壤与植物生态过程重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830052；4.新疆农业大学 新生学院，新疆 乌鲁木齐 830006）

摘　要：［目的］分析冻融期降雪减少对巴音布鲁克高寒湿地土壤有机碳组分及碳库稳定性的影响，为高寒湿地应对未来气候变化及区域“碳中和”战略措施的制定提供科学数据。［方法］于 2022 年 9 月布设野外试验，设置 2 种处理：雪被去除与自然降雪，分别在冻融期的初冻期（11 月）、冻结期（3 月）、融冻期（7 月）进行取样，测定土壤含水量（SWC）、电导率（EC）、pH 值，有机碳含量（SOC），极不稳定有机碳组分（F_1）、不稳定有机碳组分（F_2）、稳定有机碳组分（F_3）和惰性有机碳组分（F_4）。［结果］①雪被去除后土壤有机碳含量（SOC）在初冻期、冻结期、融冻期均无显著差异，但出现了降低的趋势。雪被去除后有机碳含量在 3 时期分别降低了 2.87%，6.65%和 4.49%。②初冻期雪被去除后 F_1 和 F_2 组分有机碳含量出现了显著差异（$p<0.05$），相比于自然降雪两种组分有机碳含量分别降低了 8.72%和 12.26%，冻结期不同处理间 F_3 组分了出现显著差异（$p<0.05$），雪被去除后 F_3 组分有机碳含量降低了 25.57%，融冻期 F_1，F_2 和 F_3 出现了显著差异（$p<0.05$），其中除雪后 F_1 和 F_3 分别降低了 22.10%和 25.57%，而 F_2 组分上升了34.92%，其他组分无显著差异。③雪被去除后，相比于自然降雪处理，碳库活度在 3 个时期分别上升了5.99%，9.71%和 20.39%，雪被去除后土壤有机碳有降低的趋势，但土壤碳库稳定性有上升的趋势。而随着冻融进行，土壤有机碳含量呈现出先降低后上升的趋势，而土壤碳库稳定性呈现出先上升后下降的趋势。［结论］短期观测结果表明冻融循环和雪被去除对有机碳含量和碳库稳定性均无显著影响，但雪被去除对土壤的影响大于冻融变化，未来需进一步开展长期定位观测研究，以更好服务高寒湿地科学管理和助力区域碳中和战略实施。

关键词：高寒湿地；冻融期；雪被去除；有机碳组分；碳库稳定性
文献标识码：A　**文章编号：**1000-288X(2024)03-0000-00　**中图分类号：**S153.6

文献参数：胡云鹏，陈末，杨再磊，等.冻融期巴音布鲁克高寒湿地雪被去除对土壤有机碳库稳定性的影响[J].水土保持通报，2024，44(3)　Hu Yunpeng, Chen Mo, Yang Zailei, et al. Effect of snow removal on stability of soil organic carbon pool during freeze-thaw period in bayinbuluk alpine wetland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3)

Effect of Snow Removal on Stability of Soil Organic Carbon Pool During Freeze-Thaw Period in Bayinbuluk Alpine Wetland

Hu Yunpeng[1], Chen Mo[2], Yang Zailei[1,3],
Maidinur·Ablaizi[2], Tian Yuxin[2], Jia Hongtao[1,3,4], Kou Tianle[1], Jia Yuanbin[1]
(1.*College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*; 2.*College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*; 3.*Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*; 4.*College of First-year students, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830006, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of snow removal on soil organic carbon (SOC) compositions and carbon

收稿日期：2023-10-19　**修回日期：**2024-02-23
资助项目：新疆维吾尔自治区自然科学基金项目“高寒湿地冻融期枯落物分解的微生物机制研究”(2022D01A192)；国家自然科学基金“巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地土壤有机碳库及其稳定性研究”(31560171)。
第一作者：胡云鹏(1998—)，男(汉族)，湖北省宜昌市人，硕士研究生，从事湿地/草地碳循环相关研究。Email：732113933@qq.com。
通信作者：杨再磊(1985—)，男(汉族)，新疆维吾尔自治区昌吉市人，硕士，高级实验师，主要从事土壤污染与防治相关研究。Email：yzlzj007@163.com。

pool stability during the freezing-thawing period in a Bayinbuluk alpine wetland were analyzed in order to provide scientific data to help the alpine wetland in coping with future climate change and to formulate a regional carbon neutrality strategy. [Methods] A field experiment was conducted in September 2022 with two treatments: snow removal and natural snowfall. Soil samples were collected during the initial freezing period (November), the freezing period (March), and the thawing period (July). Soil water content (SWC), electrical conductivity (EC), pH value, SOC content, very unstable organic carbon (F_1), unstable organic carbon (F_2), stable organic carbon (F_3), and inert organic carbon (F_4) were measured. [Results] ① There was no significant difference in SOC content after snow removal during the initial freezing, freezing, and thawing periods, but there was a decreasing trend. The SOC content after snow removal decreased by 2.87%, 6.65%, and 4.49% during the initial freezing, freezing, and thawing periods, respectively. ② There were significant differences in the SOC contents of F_1 and F_2 after snow removal in the initial freezing period ($p<0.05$), and these values were 8.72% and 12.26%, respectively, lower than with the natural snowfall treatment. There were significant differences in the F_3 contents among different treatments in the freezing period ($p<0.05$), which were reduced by 25.57% after snow removal. There were significant differences in the F_1, F_2, and F_3 contents in the thawing period ($p<0.05$), among which F_1 and F_3 were reduced by 22.10% and 25.57%, respectively, after snow removal, while F_2 was increased by 34.92%. There were no significant differences in other components. ③ The carbon pool activity in the initial freezing, freezing, and thawing periods was 5.99%, 9.71% and 20.39%, respectively, greater after snow removal than with the natural snowfall treatment. The SOC exhibited a decreasing trend after snow removal, but the stability of the soil carbon pool exhibited an increasing trend. With the freeze-thaw process, SOC content showed a trend of first decreasing and then increasing, while the stability of the soil carbon pool showed a trend of first increasing and then decreasing. [Conclusion] The short-term observation results showed that freeze-thaw cycles and snow cover removal had no significant effects on the SOC content and carbon pool stability, but the effect of snow cover removal on soil was greater than the effect of freeze-thaw cycles. Additional long-term observation studies will be needed in the future to better serve the scientific management of alpine wetlands and to help implement a regional carbon neutrality strategy.

Keywords: alpine wetland; freeze-thaw period; snow removal; organic carbon components; carbon pool stability

湿地是陆地生态系统碳循环的重要组成部分[1]。虽然湿地面积仅占陆地表面积的 10%[2],但湿地土壤碳库却占到全球陆地土壤总碳库的 1/3[3]。高寒湿地生态系统因其特殊的低温厌氧环境,其 CO_2 的同化吸收量远远超过呼吸分解作用的 CO_2 释放量,因此形成碳累积[4],且湿地碳库的微弱变化都会对全球碳循环、温室气体浓度产生影响[5]。

降雪作为高寒湿地生态系统中最重要的独立降水事件,是其湿地生物圈中最为活跃的自然因素,自然降雪不仅能形成较厚的雪被物理层,防止土壤的深层冻结,对土壤起到保温作用,而且还具有融冻作用,融化雪水能够增强土壤的反硝化和呼吸活性,从而影响土壤生物、生物化学过程以及生物地化循环[6]。冻融是高纬度、高海拔地区常见的自然现象,冻融变化对高寒地区碳氮循环和生物地球化学过程有着深刻的影响,冻融循环常发生在秋冬季降雪开始时和早春融雪时[7],北半球约 55%的陆地总面积正在经历季节性冻融循环[8]。然而,因气候变化导致目前全球的季节性降雪已经减少了 7%,预计到 21 世纪末将减少 25%[9],雪被的减少会加剧高寒地区土壤的冻融循环[10],从而对地上凋落物的分解和有机碳的周转产生影响,导致土壤冻融循环发生变化,严重威胁到土壤碳的转化和释放。

前人研究多聚焦于冻融期变化或雪被变化下土壤呼吸[11]和 CO_2 排放速率[12]的变化,以及冻融变化或雪被变化其中单一因素对土壤理化性质[8]、养分循环[13]或活性有机碳组分[14]和微生物活性[15]、酶活性等[16]变化的影响,尚缺乏雪被变化与冻融循环两者变化以及两者交互作用下对高寒湿地土壤有机碳库及其稳定性变化的影响研究,且雪被变化对土壤有机碳库的影响的结论不尽相同,如毛瑾[17]在黄土高原的减雪试验结果表明,雪被减少对土壤有机碳无显著影响但有升高的趋势,而刘谣[18]在川西亚高山地区的研究表明,雪被去除对土壤有机碳含量无显著影响

但有减少的趋势，柴春荣等[6]在三江平原湿地的研究结果表明，雪被增加导致土壤活性碳组分发生变化，杨开军[11]在川西高山地区的研究表明，一个冬季周期内雪被去除对不同土壤活性有机碳组分影响未达到显著水平，但雪被去除明显降低了大多数土壤活性有机碳之间的相关性，对其潜在耦合关系造成了显著影响。结合前人研究结果，本研究围绕不同冻融时期雪被变化对土壤碳组分及其碳库稳定性问题，开展雪被去除试验，研究巴音布鲁克高寒湿地在不同冻融期有机碳及其碳库稳定性对雪被减少的响应，研究结果有助于了解气候变暖下，高寒湿地有机碳对雪被减少及冻融循环的响应，为高寒湿地管理和区域碳中和战略的制定提供参考数据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究的试验地点位于新疆维吾尔自治区巴州和静县的巴音布鲁克天鹅湖湿地（42°75′18″—43°34′01″N，82°98′33″—83°51′66″E）。该湿地是国家级湿地自然保护区，湿地面积约为 770 km^2，海拔在 2 300～3 042 m 之间。年平均气温为－4.6 ℃，年降水量为 273 mm，年蒸发量为 1 250 mm，年平均相对湿度为 60%，地下水位埋深在 0.5～1.0 m 之间。冬季寒冷而漫长，最长无霜期仅 28 d，土壤季节性冻融从每年 11 月开始，约 6～7 个月后结束，降雪从 9 月下旬开始，雪被覆盖期延续至次年 4—5 月。该湿地主要是由针叶苔草（*Carex lanceolata*）和阿尔泰苔草（*Carex altaica*）沼泽组成，被称为中亚干旱区的“空中湿岛”，对南疆水资源平衡具有至关重要的作用[19-20]。

1.2　试验设计与样品采集

于 2022 年 9 月在巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地选取一处人为干扰较少的区域建立了一个围栏试验区，该区域面积为 30 m×40 m，在此基础上，选取样方 2 m×2 m 的样方进行雪被去除试验。为了隔离土壤和雪层，对除雪样方使用透光率 90%的无色聚乙烯薄膜进行覆盖。考虑冻融变化与雪被去除两种因素，设置除雪与雪被覆盖两个处理，以自然降雪为对照，每个处理设 3 个重复（图 1）。

样品采集分别在当年初冻期（11 月），次年冻结期（3 月），融冻期（7 月）进行，分别在样地内采用“五点法”布点并利用环形取样器采集 0—30 cm 土壤表层样品。采集的土壤样品立即放入车载冰箱（温度为－4 ℃），然后带回实验室加以密封并冷冻保存在－4 ℃的环境下进行后续处理和分析测试。

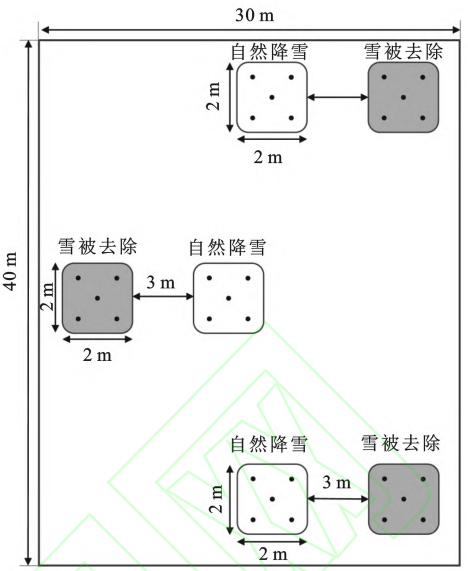


图 1　试验设计示意图

Fig.1　Schematic diagram of test design

1.3　测定指标与方法

1.3.1　土壤 pH 值、容重和含水量的测定　pH 值以水土比 5∶1 浸提后使用 pH 计（METTLER TOLEDO FE28，China）测定，土壤容重采用环刀法测定，土壤电导率采用电导率仪（DDSJ-308 F，上海仪电科学仪器股份有限公司）测定（水土比 5∶1），土壤溶液震荡时间为 5 min。土壤含水量（SWC）用烘干法测定[21]。

1.3.2　土壤碳组分的测定　土壤有机碳（SOC）采用重铬酸钾—浓硫酸外加热法来测定[21]。土壤有机碳组分根据不同氧化条件梯度下的 SOC 分级，通过如 Chan 等[22]人定义的改进的 Walkley-Black[23]方法测量。具体方法如下：

将 10 ml 的 1 N 重铬酸钾溶液分别与 2.5，5，10 ml 的 36 N 硫酸混合，得到 3 种比例为 0.25∶1，0.5∶1，1∶1的混合溶液（分别对应于 6.0 N，12.0 N 和 18.0 N 的硫酸）。由于温度更高更多的有机碳可以被氧化，使得 SOC 按氧化性递减顺序分为 4 个不同的组分，即：F_1（极不稳定有机碳组分）、F_2（不稳定有机碳组分）、F_3（稳有机碳组分）和 F_4（惰性有机碳组分）。

1.4　数据分析

1.4.1　土壤有机碳库稳定性指标评估方法　参考 Yu Pujia 等[24]和 Liu Xiang 等[25]的方法，以不稳定碳与稳定碳（SOC-不稳定有机碳组分）的比值代表碳库活度。采用公式（1）计算碳库活度，以表征土壤碳库稳定性，公式如下：

$$碳库活度 = F_1/(总有机碳含量 - F_1) \times 100\% \quad (1)$$

式中：F_1 为极不稳定有机碳组分。

采用 IBM SPSS Statistics 23.0 进行双因素方差分析，分析各个指标对冻融期变化和雪被去除及两者交

互作用的响应，同时在 5%显著水平下以 Duncan 法进行单因素方差分析，使用 R 4.3.0 中 corrplot，Hmisc，ggrepel，plyr，decorana，vegan，ggplot2 等数据包进行相关性分析、冗余分析并作图，使用 Origin 2018 绘制有机碳组分和理化性质等指标变化的柱状图。

2 结果与分析

2.1 冻融期雪被去除对土壤有机碳及其组分的影响

由表 1 可知，雪被去除后有机碳含量(SOC)以及 F_4 组分在初冻期、冻结期、融冻期均无显著差异，但出现了降低的趋势，SOC 在 3 个时期分别降低了 2.87%，6.65%和 4.49%。

初冻期 F_1 和 F_2 组分在雪被去除后出现了显著差异($p<0.05$)，相较自然降雪其含量分别降低了 8.72%和 12.26%。冻结期不同处理间 F_3 组分出现显著差异($p<0.05$)，雪被去除后其有机碳含量降低了 25.57%。融冻期不同处理间 F_1，F_2 和 F_3 出现显著差异($p<0.05$)，除雪后 F_1 和 F_3 分别降低了 22.10%和 25.57%，而 F_2 组分上升了 34.92%。

表 1 冻融期雪被去除对土壤有机碳及其组分的影响

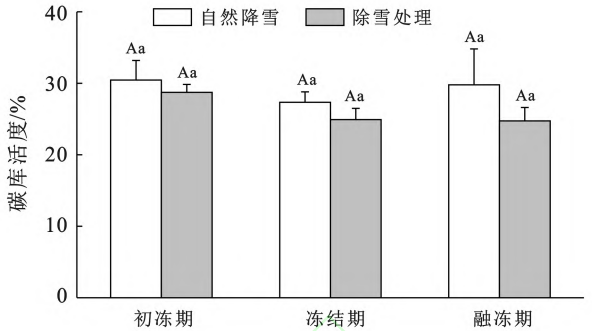
Table 1 Effects of snow removal during freeze-thaw period on soil organic carbon and its components

处 理	有机碳组分	初冻期/($g\cdot kg^{-1}$)	冻结期/($g\cdot kg^{-1}$)	融冻期/($g\cdot kg^{-1}$)
除雪处理	SOC	101.16 ± 3.36^{Aa}	93.30 ± 3.51^{Aa}	97.68 ± 2.54^{Aa}
	F_4	65.81 ± 0.83^{ABa}	67.58 ± 1.02^{Aa}	63.38 ± 0.82^{Ba}
	F_3	3.89 ± 0.36^{Ba}	3.66 ± 0.19^{Bb}	6.36 ± 0.26^{Aa}
	F_2	8.11 ± 0.30^{Bb}	8.49 ± 0.30^{Ba}	11.09 ± 0.89^{Aa}
	F_1	22.18 ± 0.65^{Ab}	20.27 ± 0.86^{ABa}	19.16 ± 0.81^{Bb}
自然降雪	SOC	104.15 ± 5.86^{Aa}	99.95 ± 2.68^{Aa}	102.27 ± 5.46^{Aa}
	F_4	62.64 ± 1.17^{Aa}	64.95 ± 1.48^{Aa}	63.58 ± 0.96^{Aa}
	F_3	3.81 ± 0.17^{Aa}	4.93 ± 0.22^{Aa}	3.59 ± 0.61^{Ab}
	F_2	9.24 ± 0.96^{Aa}	8.93 ± 0.41^{Aa}	8.22 ± 1.03^{Ab}
	F_1	24.31 ± 0.63^{ABa}	21.19 ± 0.85^{Ba}	24.60 ± 1.33^{Aa}

注：①SOC 为有机碳含量；F_1 为极不稳定有机碳组分；F_2 为不稳定有机碳组分；F_3 为稳定有机碳组分；F_4 为惰性有机碳组分，下同；②不同大写字母表示指标在同处理不同冻融时期存在显著差异($p<0.05$)，不同小写字母表示指标在同冻融时期不同处理存在显著差异($p<0.05$)，下同。

2.2 冻融期雪被去除对土壤有机碳库稳定性系数的影响

碳库活度的下降表征着土壤碳库稳定性的上升，由图 2 可知，雪被去除后碳库活度在各时期与自然降雪相比均未出现显著差异，但呈现出上升的趋势。碳库活度在初冻期、冻结期和融冻期，除雪处理相比于自然降雪处理碳库活度分别上升了 5.99%，9.71%和 20.39%。



注：不同大写字母表示指标在同处理不同冻融时期存在显著差异($p<0.05$)，不同小写字母表示指标在同冻融时期不同处理存在显著差异($p<0.05$)，下同。

图 2 冻融期雪被去除对土壤碳库活度的影响

Fig.2 Effect of snow removal on stability coefficient of soil carbon pool during freeze-thaw period

2.3 冻融期雪被去除对土壤有机碳及部分理化性质的影响

不同冻融期雪被去除与自然降雪各指标间均未出现显著差异($p>0.05$)，但在不同时期的变化趋势各不相同(图 3)。除雪处理土壤有机碳(SOC)在各冻融期均低于自然降雪土壤(图 3a)，两种处理随冻融期的进行呈现出先下降后上升的趋势，且冻融结束后两种处理 SOC 均略低于初冻期，相比于自然降雪处理，雪被去除后 SOC 在初冻期、冻结期、融冻期分别降低了2.87%，6.65%和 4.49%。

除雪处理电导率(EC)在各冻融期均高于自然降雪处理(图 3b)，两种处理均随冻融期的进行呈现出先上升后下降的趋势，相比于自然降雪处理，雪被去除后 EC 在初冻期、冻结期、融冻期分别上升了 4.65%，13.89%和 10.94%。

除雪处理在初冻期土壤含水量(SWC)高于自然降雪区，而冻结期和融冻期低于自然降雪区(图 3c)，两种处理 SWC 随冻融期进行先下降后上升，变化趋势与 SOC 一致，相比于自然降雪处理，雪被去除后初冻期 SWC 提高了 3.08%，而在冻结期和融冻期分别降低了7.04%和 2.47%。

土壤 pH 值变化较小(图 3d)，除雪处理相比于自然降雪区初冻期和冻结期土壤 pH 值略有下降，而融冻期 pH 值略微上升。

2.4 冻融期雪被去除对土壤理化性质的双因素方差分析

如表 2 所示，F_3 组分在雪被去除与冻融变化的交互影响下出现了显著差异($p<0.05$)，而其他指标未出现显著差异。雪被去除导致 F_1 组分出现了显著变化，而不同冻融期之间 SWC 出现了显著差异。于 SOC，F_4，F_1，EC 而言，雪被去除对其的影响大于冻融期变化，而冻融期变化对 F_3，F_2，SWC 和 pH 值的影响大于雪被去除。

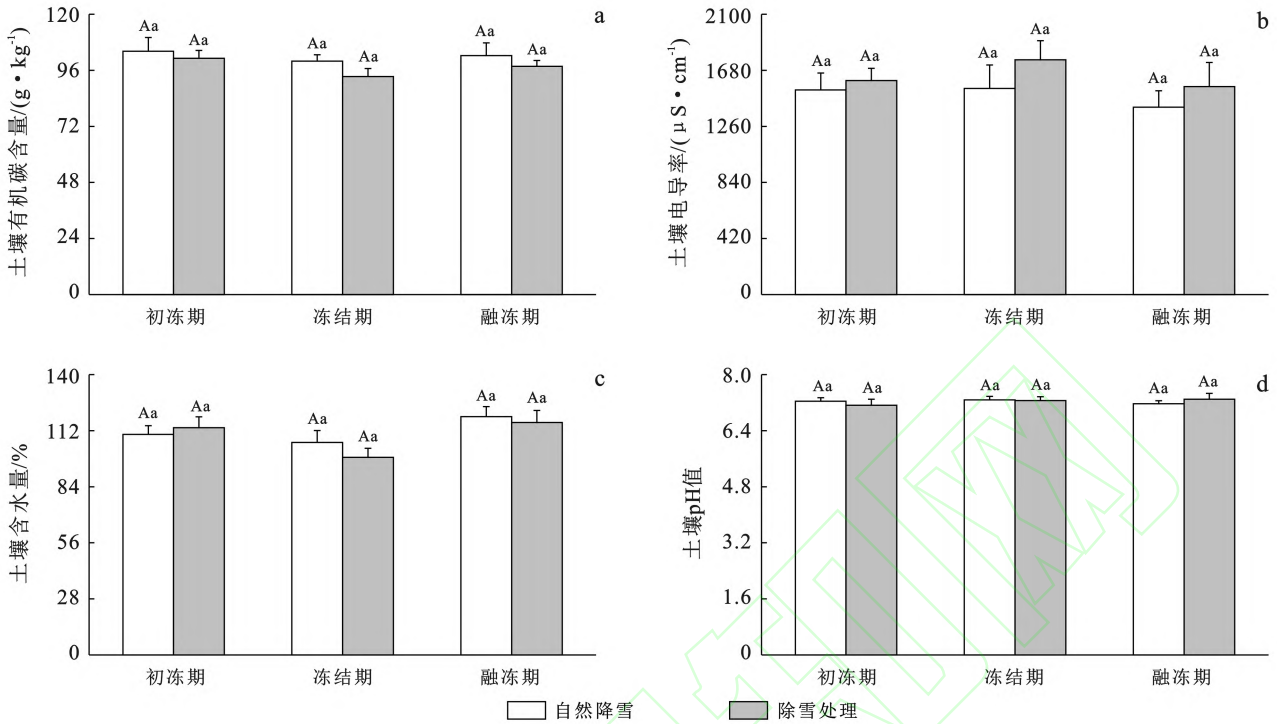


图 3　冻融期雪被去除对土壤有机碳、电导率、含水量和 pH 值的影响

Fig.3　Effects of snow removal on soil organic carbon, electrical conductivity, water content and pH value during freeze-thaw period

表 2　冻融期雪被去除对土壤部分理化性质的双因素方差分析

Table 2　Two factor analysis of variance on the physical and chemical properties of soil affected by snow removal during freeze-thaw period

指标	雪被去除		冻融期变化		雪被去除×冻融期变化	
	F	*p*	*F*	*p*	*F*	*p*
SOC	2.00	0.18	1.08	0.37	0.10	0.91
F_4	0.76	0.40	0.23	0.80	0.17	0.84
F_3	1.49	0.25	1.77	0.21	6.40	0.01
F_2	0.98	0.34	1.99	0.18	2.77	0.10
F_1	6.45	0.03	3.49	0.06	0.32	0.73
SWC	0.30	0.60	4.26	0.04	0.54	0.60
EC	1.57	0.23	0.71	0.51	0.13	0.88
pH 值	0.001	0.99	0.24	0.79	0.47	0.64

注:SWC 为土壤含水量 ;EC 为电导率。$p<0.05$ 表示在该因素下有显著变化,$p<0.01$ 表示在该因素下有极显著变化。

2.5　冻融期雪被去除对土壤有机碳及其组分与部分理化性质的相关性分析

为揭示除雪后土壤部分理化性质与土壤碳组分之间的关系,两种处理分别选用 SOC,pH 值,SWC 和 EC 与 4 种碳组分进行相关性分析和冗余分析(结果见表 3,表 4 及图 4)。由表 3 可知,自然降雪处理下 pH 值与 F_3 组分有显著正相关关系,与 SWC 有显著负相关关系,SOC 与 F_4 组分有显著正相关关系,而对土壤进行雪被去除之后,F_2 和 F_3 组分出现了极显著正相关关系,SOC 与 F_4 的相关系数也出现了下降。

通过冗余分析可知:自然降雪处理(图 4a)SOC 与 F_4 组分,pH 值和 EC 与 F_3 和 F_1 组分、SWC 与 F_2 组分表现为正相关关系;而除雪处理(图 4b)SOC 和 SWC 与 F_4,F_3,F_2 和 F_1 组分均呈现正相关关系。

表 3　自然降雪处理下土壤理化与碳组分的相关性分析

Table 3　Correlation analysis between soil physicochemical properties and carbon components under natural snowfall treatment

项 目	F_1	F_2	F_3	F_4	SWC	EC	pH 值
F_2	−0.48						
F_3	−0.26	−0.24					
F_4	−0.42	−0.35	0.44				
SWC	−0.15	0.33	−0.29	−0.04			
EC	0.34	0.30	−0.29	−0.42	−0.36		
pH 值	0.15	−0.61	0.65*	0.53	−0.72*	0.13	
SOC	−0.26	−0.39	0.49	0.98**	−0.07	−0.34	0.62

注:* 表示该指标在 0.05 水平下存在显著差异,** 表示该指标在 0.01 水平下存在显著差异,下同。

表 4 雪被去除处理下土壤理化与碳组分的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between soil physicochemical properties and carbon components under snow removal treatment

项 目	F_1	F_2	F_3	F_4	SWC	EC	pH 值
F_2	−0.04						
F_3	−0.10	0.83**					
F_4	0.28	−0.53	−0.47				
SWC	0.32	0.11	0.27	0.42			
EC	−0.57	−0.35	−0.26	0.12	−0.17		
pH 值	−0.25	−0.13	0.11	−0.39	0.04	0.28	
SOC	0.63	0.03	0.05	0.76*	0.63*	−0.31	−0.49

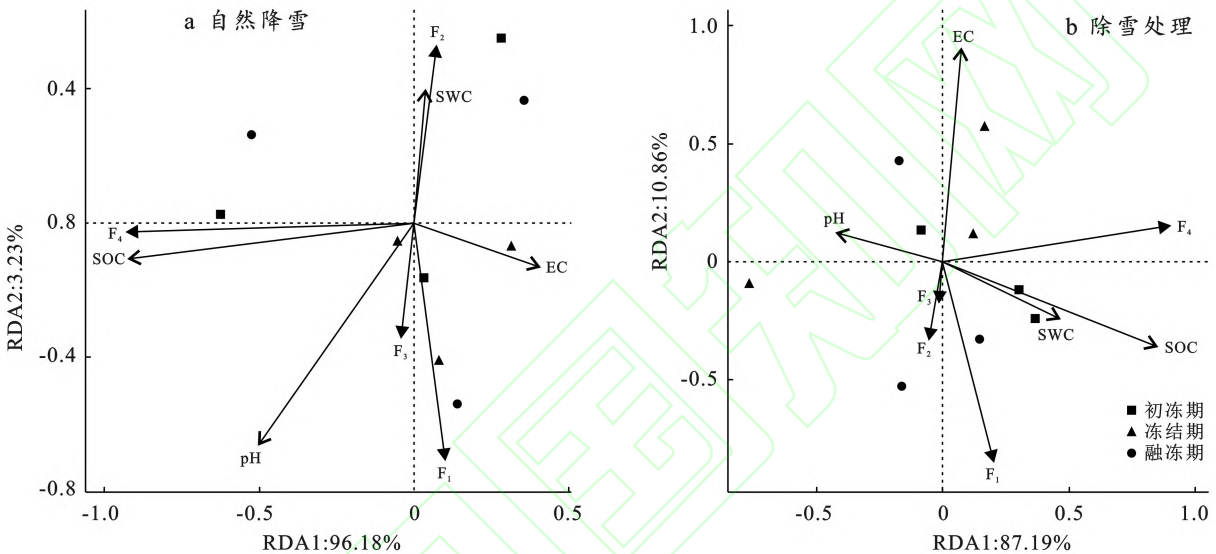


图 4 自然降雪与除雪处理下部分土壤理化性质与碳组分的冗余分析

Fig.4 Redundancy analysis of physical and chemical properties and carbon components of some soils under natural snowfall and snow removal

3 讨 论

3.1 冻融期雪被去除对土壤有机碳及其组分的影响

本研究中雪被去除对 SOC 没有显著影响，但出现了降低的趋势，且主要是通过 F_1 和 F_2 的变化而降低有机碳的含量。这可能是因为雪被去除后土壤失去了地表积雪这一地上水源输入，且积雪减少使得土壤与空气间失去了缓冲层，表层土壤直接与空气接触，且土壤温湿度发生变化使得高寒湿地土壤表层累积的凋落物和植物残体分解速率更为缓慢，活性有机碳源减少，导致土壤有机碳和活性有机碳减少。前人研究表明，土壤温度的降低会导致团聚体破碎、微生物死亡和有机碳的矿化，多重因素综合影响下导致 SOC 降低[26]。张仲胜等[27]研究发现，气候变化会通过调控微生物活动影响湿地土壤碳库的稳定性。而随着冻融进行，不同处理间有机碳及组分也有不同的变化，进入冻结期后土壤中微生物逐渐适应低温，团聚体和含水量等指标也趋于稳定，死亡的微生物残体释放出的小分子糖和氨基酸等物质刺激剩余微生物生长和活性碳组分的释放[28]，而除雪处理因其相较于自然降雪处理，其微生物的生活环境更为恶劣，而随着时间推移气温上升，进入融冻期后，自然降雪处理的高含水量，更稳定的土壤温湿度使得微生物活动变得更加活跃[29]，微生物群落发展更加迅速，会加速了土壤中死亡微生物残体、凋落物和腐殖质的分解利用[20]和有机碳的转化进程，这也是融冻期两处理中活性较高的碳组分（F_1，F_2 和 F_3）含量与占比均上升的原因。而融冻期两处理 SOC 含量均略低于前一年的初冻期，这可能是融冻期地下冻土解冻后土壤含水量上升，大量水分迁移导致有机碳和其他养分随水迁移、流失，这一研究结果与娄云[26]的研究结论一致。F_4 组分是各组分中最为稳定的组分，是有机碳的主体部分，巴音布鲁克高寒湿地不同处理间土壤 F_4 含量在 SOC 中的占比均在 60%以上，F_4 在有机碳组分中最为稳定，不易分解，变化趋势与 SOC 基本一致，因此其变化趋势可以直接反映有机碳的流失情况。本

研究中雪被去除对土壤有机碳没有显著影响，这与前人研究结果相同[6,11,17-18]，但雪被减少后有机碳出现了减少的趋势，这一结论与其他学者出现差异。这可能是因为不同地区冻融期时间上有所差异，且冻融循环过程、次数也有差别，且不同生态系统环境因素有差异，雪被减少后对土壤温湿度和土壤腐殖质分解速率等因素的影响不同，多重因素导致土壤有机碳变化情况出现差别。本试验仅探讨了单次冻融循环的结果，雪被减少是否引起土壤冻结经历多次不同幅度冻融循环未加以研究，且未对影响土壤环境变化的因素进一步进行控制试验，如土壤温度和腐殖质分解速率这两个关键因子对有机碳库变化的影响，因此对多次冻融循环下雪被减少与土壤有机碳库的稳定关系及其驱动机制进行长期定位试验是下一步的研究方向。

3.2　冻融期雪被去除对土壤碳库稳定性的影响

碳库活度系数作为 F_1 组分与 $F_2+F_3+F_4$ 3 种组分的比值，其大小可以表征碳库稳定性的变化，数值越大表明碳库稳定性越差，越低表明碳库稳定性越好。冻融影响着湿地表层土壤有机碳的变化[30]，冻结期—融冻期活性碳组分的加速释放导致活性碳组分占比的增加，惰性碳组分占比的减少，导致土壤碳库稳定性下降，而雪被去除打破了原有的土壤环境平衡，本研究中雪被去除降低了土壤有机碳含量，却提高了土壤碳库稳定性，有机碳含量变化与碳库稳定性变化呈不同结果这一研究结论与 Hu Yang 等[31]在高寒地区土壤利用方式扰动对碳库稳定性的影响结论相似。这可能是失去了雪被这一“天然保护层”后裸露的表层土壤活性碳组分在团聚体破碎、土壤呼吸等土壤活动中发生了流失，活性碳组分的减少导致土壤碳库稳定性的增加，也可能是因为相较于自然降雪处理，除雪处理土壤更低的温度和更低的含水量导致土壤活性碳库周转速率降低，冻土中微生物活性降低，凋落物向腐殖质的转化周期也更长，其 SOC 总量降低，活性有机碳组分的活动受到抑制，因而碳库稳定性相对增加。而通过冗余分析可知，雪被去除在一定程度上增强了不同碳组分之间的相关性。这表明雪被去除后各活性有机碳（F_1 和 F_2）的相关性增强，这一研究结果与杨开军[11]的研究结论相反，这可能是因为不同的研究区环境不同，因而雪被厚度、土壤温湿度、微生物活性等等因素均存在差异，对试验结果产生影响。F_1 与 F_2 作为活性较高的碳组分，其相关性的变化表征着除雪处理未来活性碳库的变化趋势，F_3 和 F_2 组分相较于 F_1 组分不易被氧化，除雪处理中 F_3 和 F_2 组分与 F_1 呈正相关关系，与 F_4 和 SOC 呈负相关关系，这表明不稳定的碳组分与极不稳定的碳组分的变化出现交集，雪被去除对碳库稳定性的提升可能只是短期效应，本研究只探究了单次冻融循环，而在多次冻融循环后碳库的稳定关系可能会更加脆弱，试验结果可能会发生改变，这一观点还需要进行长期定位试验验证。因此研究高寒湿地土壤活性碳库与惰性碳库的相关关系时，需要进行长期试验，且不应片面考虑活性碳组分如轻组分有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳和微生物生物量有机碳等各组分与总有机碳的占比，更应关注各活性碳组分之间以及活性碳组分与惰性碳组分之间的相关关系和变化趋势。

4　结 论

（1）相较于自然降雪区，雪被去除对土壤有机碳含量和碳库稳定性没有显著影响，但有机碳含量出现了降低的趋势，碳库稳定性出现了上升的趋势。雪被去除影响了原本高寒湿地碳组分之间的稳定关系，提高了活性较高的碳组分之间的相关性。

（2）冻融循环对有机碳含量无显著影响，但呈现出先下降后上升的趋势，且融冻期有机碳含量相较于初冻期略有下降，而多次冻融循环可能会对土壤碳库有不同影响。

（3）短期观测表明冻融循环和雪被去除对巴音布鲁克高寒湿地土壤有机碳含量和碳库稳定性均无显著影响。雪被去除后土壤有机碳含量出现下降的趋势，碳库稳定性呈上升的趋势，且雪被去除比冻融变化对土壤有机碳库的影响更大。

未来研究中，须着重关注雪被变化，进一步开展长期定位观测研究，以更好服务高寒湿地科学管理和区域碳中和战略实施。

参考文献（References）

[1]　Keddy P A. Wetland ecology：principles and conservation[M]. 2nd ed. Cambridge：Cambridge University Press，2010.

[2]　Rasmussen C，Southard R J，Horwath W R. Mineral control of organic carbon mineralization in a range of temperate conifer forest soils [J]. Global Change Biology，2006，12(5)：834-847.

[3]　Post W M，Emanuel W R，Zinke P J，et al. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature，1982，298：156-159.

[4]　王平，盛连喜，燕红，等.植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能[J].生态学报，2010，30(24)：6990-7000.
Wang Ping，Sheng Lianxi，Yan Hong，et al. Plant functional traits influence soil carbon sequestration in wetland ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica，2010，30(24)：6990-7000.

[5] 张荣涛,付晓宇,王康,等.三江平原小叶章湿地碳排放对雪被变化的短期响应[J].应用生态学报,2020,31(4):1314-1322.
Zhang Rongtao, Fu Xiaoyu, Wang Kang, et al. Short-term response of carbon emission to snow cover change in Calamagrostis angustifolia wetlands of Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(4):1314-1322.

[6] 柴春荣,倪红伟,刘赢男,等.模拟雪被变化下三江平原湿地土壤理化性质的动态响应[J].中国农学通报,2021,37(5):31-37.
Chai Chunrong, Ni Hongwei, Liu Yingnan, et al. Dynamic response of the soil physical and chemical properties under simulated snow cover in the Sanjiang Plain [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021,37(5):31-37.

[7] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, et al. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004,36:641-654.

[8] Kreyling J, Beierkuhnlein C, Pritsch K, et al. Recurrent soil freeze-thaw cycles enhance grassland productivity [J]. The New Phytologist, 2008,177(4):938-945.

[9] Group I , Averyt M , Solomon S ,et al. IPCC, Climate Change : The Physical Science Basis.[J].South African Geographical Journal Being A Record of the Proceedings of the South African Geographical Society, 2007, 92(1):86-87.

[10] Edwards A C, Scalenghe R, Freppaz M. Changes in the seasonal snow cover of alpine regions and its effect on soil processes: A review [J]. Quaternary International, 2007,162/163:172-181.

[11] 杨开军.川西亚高山云杉林冬季土壤呼吸对雪被去除的短期响应[D].四川 雅安:四川农业大学,2018.
Yang Kaijun. Short-term response of winter soil respiration to snow removal in a Picea asperata forest of western Sichuan [D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2018.

[12] 陶国启,陈之光,张立锋,等.三江源高寒草甸冻融循环期CO_2通量变化特征[J].生态学报,2023,43(21):9010-9023.
Tao Guoqi, Chen Zhiguang, Zhang Lifeng, et al. Variation characteristics of CO_2 flux during the freeze-thaw cycle period in an alpine meadow in the three-river source region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21):9010-9023.

[13] 王子龙,王凯,姜秋香,等.黑土表层有效养分含量和酶活性对雪被去除的季节性响应[J].农业工程学报,2022,38(2):111-118.
Wang Zilong, Wang Kai, Jiang Qiuxiang, et al. Seasonal response of available nutrient content and enzyme activity in black soil surface to snow removal [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(2):111-118.

[14] 赖硕钿,吴福忠,吴秋霞,等.雪被去除减缓岷江冷杉凋落叶易分解碳释放[J].植物生态学报,2023,47(5):672-686.
Lai Shuotian, Wu Fuzhong, Wu Qiuxia, et al. Reduced release of labile carbon from Abies fargesii var. faxoniana needle litter after snow removal in an alpine forest [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023,47(5):672-686.

[15] 汪恩良,蔚昶.积雪变化对土壤可溶性碳氮含量及微生物活性的季节性影响[J/OL].中国生态农业学报(中英文),2023:1-10.(2023-08-29).https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1432.S.20230828.1425.001.html.
Wang Enliang, Wei Chang. Seasonal effects of snow cover on soil soluble carbon and nitrogen content and microbial activity[J/OL].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2023:1-10.(2023-08-29).https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1432. S.20230828.1425.001.html.

[16] 王凯.积雪变化下黑土有效碳氮与酶活性的互馈作用机制研究[D].黑龙江 哈尔滨:东北农业大学,2023.
Wang Kai. Study on the Interaction Mechanism between Available Carbon and Nitrogen and Enzyme Activity in Black Soil under Snow Cover Change [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Agricultural University, 2023.

[17] 毛瑾.休眠期增温、减雪对黄土高原典型草原土壤理化性质及细菌群落的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
Mao Jin. The Influence of Warming or Snow Reduction During the Dormancy Period on Soil Physicochemical Properties and Bacterial Communities in Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.

[18] 刘谣.雪被减少对川西亚高山森林土壤腐殖质含量的影响[D].四川 雅安:四川农业大学,2023.
Liu Yao. Effect of snow cover reduction on extractable humus content of subalpine forest soils in western Sichuan [D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2023

[19] 买迪努尔·阿不来孜,陈末,杨再磊,等.巴音布鲁克高寒湿地土壤真菌群落对不同程度退化的响应[J].农业环境科学学报,2022,41(8):1778-1787.
Maidinuer·Abulaizi, Chen Mo, Yang Zailei, et al. Responses of soil fungal communities to different degrees of degradation in Bayinbuluk alpine wetland, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(8):1778-1787.

[20] 陈末,买迪努尔·阿不来孜,蒋靖佰伦,等.冻融期巴音

布鲁克高寒湿地土壤真菌群落变化[J].新疆农业大学学报,2020,43(1):72-78.
Chen Mo, Maidinuer Abulaizi, Jiang J, et al. Changes of soil fungal community in bayinbuluk alpine wetland during freeze-thaw period [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2020,43(1):72-78.

[21] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
Lu Rukun. Soil Agrochemical Analysis Methods [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[22] Chan K Y, Bowman A, Oates A. Oxidizible organic carbon fractions and soil quality changes in AN oxic paleustalf under different pasture leys [J]. Soil Science, 2001,166(1):61-67.

[23] Walkley A, Black I A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method [J]. Soil Science, 1934,37(1):29-38.

[24] Yu Pujia, Li Yixuan, Liu Shiwei, et al. The quantity and stability of soil organic carbon following vegetation degradation in a salt-affected region of Northeastern China [J]. Catena, 2022,211:105984.

[25] Liu Xiang, Chen Ditao, Yang Tao, et al. Changes in soil labile and recalcitrant carbon pools after land-use change in a semi-arid agro-pastoral ecotone in Central Asia [J]. Ecological Indicators, 2020,110:105925.

[26] 娄云.吉林前郭冻融期盐碱水田土壤碳变化及储量研究[D].吉林 长春:吉林大学,2014.
Lou Yun. The Study on the Variation and Storage of soil carbon of sline-alkaline Paddy in Qianguo Countyr of Jilin province during Freezing-thawing Period [D]. Changchun, Jilin: Jilin University, 2014

[27] 张仲胜,李敏,宋晓林,等.气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展[J].土壤学报,2018,55(2):273-282.
Zhang Zhongsheng, Li Min, Song Xiaolin, et al. Effects of climate change on molecular structure and stability of soil carbon pool: A general review [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018,55(2):273-282.

[28] 郭冬楠.冻融作用下森林沼泽湿地土壤有机碳组分及微生物活性特征研究[D].黑龙江 哈尔滨:哈尔滨师范大学,2017.
Guo Dongna. Pcharacteristic research of soil organic carbon composition and Microbaal activity on forest swamp wetland under the Freeze-thaw action [D]. Harbin, Heilongjiang: Harbin Normal University, 2017.

[29] 倪祥银,杨万勤,徐李亚,等.雪被斑块对高山森林凋落叶腐殖化过程中胡敏酸和富里酸累积的影响[J].土壤学报,2014,51(5):1138-1152.
Ni Xiangyin, Yang Wanqin, Xu Liya, et al. Effects of winter snowpack on accumulation of humic acid and fulvic acid during humification of foliar litters in an alpine forest [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014,51(5):1138-1152.

[30] 王娇月.冻融作用对大兴安岭多年冻土区泥炭地土壤有机碳的影响研究[D].北京:中国科学院大学,2014.
Wang Jiaoyue. Effects of freezing-thawing cycles on soil organic carbon dynamics in the peatland ecosystems from continuous permafrost zone, Great Hinggan Mountains [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.

[31] Hu Yang, Yu Guangling, Zhou Jianqin, et al. Grazing and reclamation-induced microbiome alterations drive organic carbon stability within soil aggregates in alpine steppes [J]. Catena, 2023,231:107306.