

DOI: 10.12357/cjea.20230323

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]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(12): 1976–1983

WANG E L, WEI C. Seasonal effects of snow cover on soil soluble carbon and nitrogen content and microbial activity[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(12): 1976–1983

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^{*}

汪恩良, 蔚昶

(东北农业大学水利与土木工程学院 哈尔滨 150030)

摘 要: 全球气候变暖问题日益严峻, 复杂的气候变化导致全球积雪格局发生明显变化。基于此, 本研究于 2020 年 11 月—2022 年 5 月采用人工控制积雪深度的方法, 将试验区样地分为 3 个处理组, 分别为增雪组 (TS)、除雪组 (TR) 和对照组 (C), 通过测定土壤环境因子、有效碳氮含量、微生物量、脲酶活性以及蔗糖酶活性, 分析各指标的季节性动态变化过程。田间野外试验表明, 除雪处理会导致土壤温湿度显著降低。此外, 除雪处理在冬季早期显著增加了土壤无机氮含量, 加雪处理与之相反。从深雪期开始, 除雪处理在一定程度上造成了土壤无机氮的流失, 但增加了可溶性有机碳和可溶性有机氮含量。除雪处理使土壤微生物活性在冬季大部分时间保持较高水平, 但进入作物生长早期后, 除雪处理的土壤微生物活性明显降低。积雪的减少显著降低了土壤脲酶和蔗糖酶的活性, 积雪的加深与之相反。本研究证明了未来积雪变化将导致土壤有效碳氮及微生物活性的动态变化特征发生转变。研究结果为进一步探究气候变暖背景下中国东北黑土区陆地生态系统的物质循环过程提供了一定理论基础和科学依据。

关键词: 气候变暖; 积雪变化; 有效碳氮; 微生物活性

中图分类号: 158.2

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Seasonal effects of snow cover on soil soluble carbon and nitrogen content and microbial activity^{*}

WANG Enliang, WEI Chang

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Global warming is becoming increasingly serious, and the complicated climate change situation has led to obvious changes in global snow cover patterns. Therefore, we explored the effects of future climate warming on the physical and chemical properties of black soil in Northeast China. This study adopted the method of artificial snow depth control from November 2020 to May 2022 and divided the plots in the test area into three treatment groups: snow increase (TS), snow removal (TR), and control (C). Soil environmental factors, available carbon and nitrogen contents, microbial biomass, urease activity, and sucrase activity were determined. The seasonal dynamic change process of each index was analyzed. Long-term field experiments showed that snow removal significantly reduced soil temperature and humidity. In addition, lower soil temperature and humidity accelerated the release of soil nutrients, and significantly increased the contents of soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in early winter, while the opposite was true

^{*} 水利部重大科技项目 (SKS-2022017) 资助

汪恩良, 主要从事灌区节水管理与应用研究。E-mail: wel@neau.edu.cn

收稿日期: 2023-06-12 接受日期: 2023-08-18

^{*} The study was supported by the Major Scientific and Technological Project of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (SKS-2022017).

Corresponding author, WANG Enliang, E-mail: wel@neau.edu.cn

Received Jun. 12, 2023; accepted Aug. 18, 2023

with snow increase treatment. However, from the beginning of the deep snow period, the snow removal treatment caused a loss of soil inorganic nitrogen to a certain extent while increased contents of soluble organic carbon and nitrogen. The snow removal treatment maintained soil microbial activity at a high level for most of the winter. However, at the end of winter, owing to the rapid release of soluble organic matter under snow treatment, soil microorganisms under snow treatment absorbed a large amount of nutrients and exist in a more suitable soil environment, which significantly increases the soil microbial activity under the snow treatment. However, owing to the loss of heat insulation from snow cover, a large number of microorganisms decomposed and died at this time, which significantly reduced soil microbial activity. Before and after the test period, snow treatment significantly increased the soil microbial activity by $23.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and snow removal treatment significantly increased the soil microbial activity by $11.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, with a difference of 93.5%. The decrease in snow cover significantly decreased the activities of soil urease and sucrase during most of the winter, and the activities of soil urease and sucrase were significantly increased by snow treatment. These results show that the activities of these two enzymes increased significantly by more than 10.5%. In summary, this study demonstrated that changes in snow cover in the future will lead to changes in the dynamic change characteristics of soil available carbon and nitrogen and microbial activity, and the influence of snow cover change on soil enzyme activity will also indirectly affect the soil nutrient cycling process and physical and chemical properties of soil. The results of this study provide a theoretical foundation and scientific basis for further research on the material cycle of terrestrial ecosystems in the black soil region of northeast China in the context of climate warming.

Keywords: Climate warming; Variation of snow cover; Available carbon and nitrogen; Microbial activity

Marchand^[1]曾在《生活在寒冷世界中的生命——冬季生态学》中写道“雪将世界分为两个部分, 我们的世界和雪下的世界”。全球有 1/3 的土地经历季节性覆盖, 2/3 的土壤经历季节性土壤冻结^[2]。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 报告^[3]中指出, 从 1880 年到 2012 年, 全球气温上升了 $0.85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。气候变暖导致全球积雪覆盖格局发生了深刻的变化, 我国长江黄河地区近 15 年降雪量显著增加^[4], 我国北方地区雪资源总量正在下降^[5]。在当今全球气候变暖背景下, 未来全球积雪格局的变化仍将继续。雪是热的不良导体, 积雪的覆盖会隔绝土壤与大气之间的热量交换, 对土壤起到良好的保温作用^[6]。因此, 积雪变化深刻影响着土壤的理化性质。

在如今气候变暖的大背景下, 大多数地区的季节性雪明显减少, 所发挥的热量缓冲库和太阳辐射反射作用有所减弱, 对全球变暖产生了正反馈效应^[7]。大部分研究已经证明积雪变化对土壤环境因子有较大的影响。有人认为季节性积雪覆盖会导致冬季平均土壤温度高于年平均土壤温度。在寒冷多雪的冬季, 雪被去除会使土壤温度降低, 而积雪覆盖下的土壤温度一直在 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 上下波动。冻融循环过程是积雪变化影响土壤的最直接表征^[8]。较早的降雪会使土壤冻融效应减弱, 积雪覆盖深度和时间的变化会使冬季土壤温度发生变化, 进而影响土壤冻融变化^[9]。积雪形成时间早且融化时间早, 土壤的冻融效应最弱, 相反, 积雪形成时间晚且融化时间晚, 会使土壤在冬季的冻融过程变得较为强烈^[10]。加深的积雪会使土壤冻融过程及冻土层位置更加稳定, 而无雪被覆盖的土壤表层温度受外界环境影响很多, 土壤温

度会发生显著变化^[11]。

土壤碳氮在陆地生态系统中扮演着重要的角色, 是影响土壤肥力的关键因素, 直接影响到作物的生长发育过程及产量^[12]。冻融过程可以使土壤结构发生一定变化, 使大团聚体破碎成小团聚体从而释放出大量养分, 这些养分可以被土壤中的微生物以及季节植物利用, 对土壤矿化、物质循环具有重要意义^[13]。冻结初期土壤中养分大量释放, 使土壤可溶性有机质含量显著增加, 增加土壤的矿化作用^[14], 铵态氮会在冻结初期显著增加, 而硝态氮在冻结初期无明显变化^[15]。还有一些研究认为积雪覆盖使土壤保持更加温暖的环境, 提高微生物活性, 进而提高土壤氮的矿化速率^[16-18]。土壤微生物在调节地下生态系统和养分循环过程中发挥着重要的作用。积雪覆盖可以增加微生物基质的有效性, 从而使微生物在冬季保持较高活性^[19]。季节性积雪的差异通常也会使土壤温湿度产生差异, 从而影响土壤微生物大小、活性、群落结构。较为频繁的冻融循环过程会导致土壤微生物的大量死亡, 微生物生物量显著降低。土壤酶活性通常用来表征土壤微生物活性, 是土壤生态系统的重要组成部分之一, 也是土壤中最活跃的有机成分之一^[20], 参与土壤中化学反应过程^[21]。气候变暖条件下冻融循环过程和水分是影响土壤酶活性的重要因素^[22]。

中国东北地区拥有大量黑土资源, 土质肥沃, 是典型的中高纬度地区, 一年中将近一半的时间都处于冻融状态^[23]。有研究表明, 东北地区积雪深度和面积在近 30 年的时间内呈减少趋势^[24], 相比于其他中高纬度地区, 东北地区的温度变化将更大, 而积雪的

变化将打破稳定的冻融格局,进而影响黑土养分动态变化。但对于气候变暖条件下东北地区的有效碳氮及微生物活性研究较少。鉴于此,我们于整个冬季在东北黑土区通过人工加雪及除雪试验控制积雪深度和积雪持续时间,以此探究全球变暖条件下东北黑土区土壤有效碳氮及微生物活性对积雪变化的季节性响应,这对深入探究气候变暖对陆地生态系统物质循环具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验于 2020 年 11 月—2021 年 4 月在黑龙江省哈尔滨市进行(45°44'41"N, 126°45'32"E)。属温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季温热多雨。历年平均气温为 3.6℃。年最低温度出现在 1 月份,平均气温为-19.2℃,极端最低气温可达-41.4℃;最高气温出现在 7 月份,平均气温为 23.2℃。近 30 年年

平均降水量为 570 mm,主要集中在夏季。无霜期为 150 d 左右;结冰期为 190 d 左右;最大土壤冻结深度为 1.8 m;冬季降雪主要集中在 12 月至次年 2 月,2 月积雪覆盖深度达最大,3 月开始发生融雪,至 4 月中旬融化完全。主要土壤类型为黑土,土壤理化性质如表 1 所示。

1.2 试验设计

试验于 2020 年 11 月—2022 年 5 月进行了人工模拟积雪深度试验。试验设 3 种处理:除雪、增雪以及正常积雪(对照),每个处理进行 3 次重复,每个重复地块为 7 m×7 m,地块间距为 5 m。本试验在每次降雪后 24 h 内,除雪处理样地采用人工铲雪的方法进行除雪操作,并将每次铲出的雪人为铲到增雪处理样地上,以达到增雪处理效果。每次降雪后选取 15 个随机位置利用水准尺测量降雪深度。试验开始前在每个样地周围挖一条 30 cm 深的沟渠,以尽量减少春季融雪的影响。

表 1 试验区不同土层的物理性质
Table 1 Physical properties of different soil layers of the test area

土壤深度 Soil depth (cm)	干容重 Dry bulk density (g·cm ⁻³)	饱和含水率 Saturated moisture content (%)	砂粒 Sand (%)	黏粒 Clay (%)	粉粒 Silt (%)
0~20	1.46	43.30	46.4	37.5	16.1
20~40	1.50	42.50	45.0	40.6	14.4
40~60	1.52	40.11	47.3	38.7	14.0
60~100	1.57	40.85	42.2	40.9	16.9
100~140	1.60	40.23	36.5	48.5	15.0
140~180	1.61	40.02	42.5	43.8	13.7

1.3 土壤采集及环境因子测定

在所有样地中心位置,埋设一台温湿度传感器(ET100,北京东方生态),土壤温度测量精度为±0.5℃,土壤湿度测量精度为±2%,埋设深度为 100 cm,用以连续监测 0~100 cm 土层深度的温度和湿度。土壤温湿度数据由采集器每隔 60 min 自动收集。

于 2021 年 11 月 3 日—2022 年 4 月 23 日进行 6 次采样,在每个采样时期,使用土壤螺旋钻(深度 15 cm,直径 7 cm)在每个样地中随机采集 3 个 10~15 cm 土样,用无菌袋将 3 个土样混合成为一个土壤样本,以减少空间异质性对试验的影响。并在 24 h 内运输至实验室。新鲜土壤通过 2.0 mm 的筛子,然后保存在 4℃冰箱中一周内进行微生物和化学试验。

1.4 土壤化学分析

土壤总有机碳采用重铬酸钾外加热法进行测定;土壤硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)含量采用 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提土壤,使用连续流动分析仪(AA3,布朗卢比公司,德国)测定;土壤可溶性有机碳(DOC)和可溶性有机氮(DON)采用 Jones 等^[25]方

法提取,使用 TOC 分析仪(日本京都岛津公司)测量;土壤微生物生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN)采用重铬酸盐氧化硫酸亚铁滴定法和 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 萃取的靛蓝比色法测定;土壤脲酶和蔗糖酶活性采用比色法测定。

1.5 数据统计与分析

试验数据使用 Microsoft Excel 2019 进行初步整理,采用 SPSS 26.0、Origin 2018 进行数据处理、统计分析以及绘制图形。采用单因素方差分析(ANOVA)对不同处理各指标进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 土壤环境因子

不同处理下土壤温湿度变化特征如图 1 所示。土壤温度在不同处理下均呈先减少再增加趋势,在深雪期达到最低值,并趋于稳定。除雪处理(TR)使土壤温度显著降低,加雪处理(TS)使土壤温度在整个冬季保持在一个较高的水平,基本在 0℃上下浮动(图 1a)。而通过图 1b 发现,土壤湿度在整个冬季

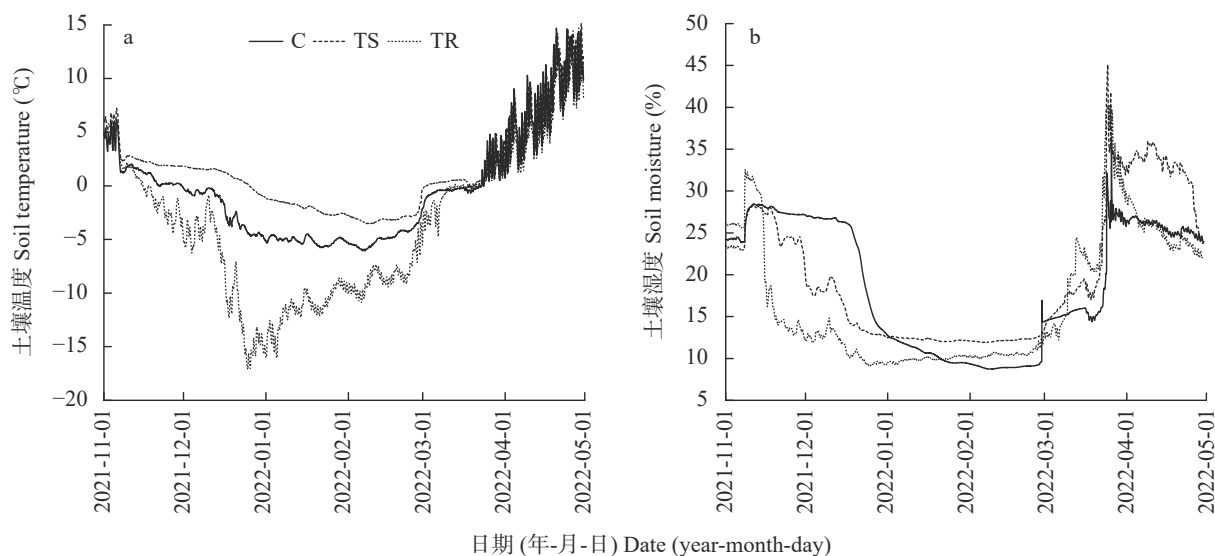


图 1 不同处理下土壤温度 (a) 和湿度 (b) 变化

Fig. 1 Changes of soil temperature (a) and humidity (b) under different treatments

C: 正常积雪对照; TS: 积雪加深处理; TR: 除雪处理。C: normal snow cover control; TS: snow deepening treatment; TR: snow removal treatment.

波动较大, 在早雪期 (11 月至次年 2 月初) 不同处理下的土壤湿度无明显规律, 从深雪期 (2 月初至 3 月初) 开始加雪处理显著增加了土壤湿度, 而在融雪期 (3 月初至 4 月中旬), 不同处理下的土壤湿度均达最大值, 除雪处理下的土壤由于失去了雪被的保温作用, 最先融化, 短期土壤湿度会高于对照组, 但随着时间的推移, 由于融雪径流的影响, 大量融雪水渗入土壤中, 使对照组的土壤湿度逐渐增加。加雪处理下土壤湿度显著高于其他两组处理。

2.2 土壤有效碳氮

从图 2A 可知, 不同处理下土壤总有机碳均呈先增加后减少的趋势。与对照相比, 除雪处理显著增加了早雪期、深雪期和融雪期的土壤总有机碳含量 ($P<0.05$), 显著降低了作物生长早期的土壤总有机碳含量 ($P<0.05$); 加雪处理与之相反。从图 2B、2C 可以看出, 土壤无机氮含量在不同处理下均呈先减少后增加再减少的趋势; 与对照相比, 在深雪期、融雪期和作物生长早期加雪处理显著增加了土壤无机氮含量 ($P<0.05$), 除雪处理显著降低了土壤无机氮含量 ($P<0.05$); 仅在早雪期 (ESC), 加雪处理使土壤硝态氮和铵态氮含量分别显著降低 $1.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.05$), 而除雪处理下土壤硝态氮和铵态氮含量分别显著增加 $2.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.05$)。从图 2D、2E 可知, 与对照相比, 加雪处理使土壤可溶性有机碳和可溶性有机氮在早雪期显著增加 ($P<0.05$), 从深雪期开始除雪处理显著增加了土壤可溶性有机碳氮含量 ($P<0.05$), 加雪处理显著降低了可溶

性有机碳氮含量 ($P<0.05$)。

2.3 土壤微生物量碳氮

由图 3A 可知, 土壤微生物量碳在不同处理下均呈先减少后增加再减少的趋势, 总体呈增加趋势, 对照、加雪处理和除雪处理的土壤微生物量碳分别增加 $72.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $87.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $34.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由图 3B 可知, 土壤微生物量氮在不同处理下均呈先减少再增加的趋势, 对照、加雪处理和除雪处理土壤微生物量氮分别增加 $18.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $23.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $11.92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。加雪处理与除雪处理对土壤微生物量碳氮的影响截然不同: 在早雪期, 加雪处理显著增加了土壤微生物量碳氮含量 ($P<0.05$), 而在深雪期以及融雪期加雪处理显著降低了土壤微生物量碳氮含量 ($P<0.05$), 除雪处理与之相反。作物生长早期, 经历了冬季的冻结脉冲之后, 不同处理的土壤微生物量碳氮含量均明显增加, 但此时加雪处理的土壤微生物量碳氮含量显著高于其他两组处理 ($P<0.05$), 除雪处理下的土壤微生物碳氮含量在此时最低 ($P<0.05$)。土壤微生物量碳氮比在不同处理下在积雪形成后显著增加, 在作物生长早期明显减少 (图 3C)。

2.4 土壤酶活性

由图 4A 可知, 不同处理下土壤脲酶活性均呈先增加后减少再增加的趋势。由图 4B 可知, 不同处理下土壤蔗糖酶活性均呈现“W”型变化。本研究中, 除雪处理在冬季的大部分时间显著降低了土壤脲酶活性以及蔗糖酶活性, 加雪处理显著增加了这两种土壤酶活性。加雪处理使土壤脲酶活性增加 16.5% 以

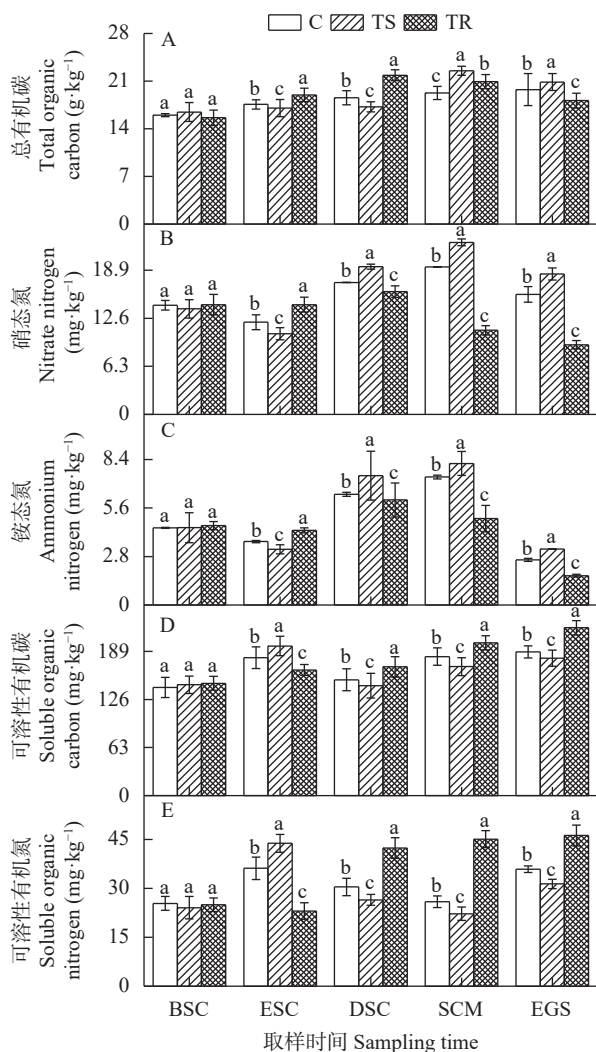


图 2 不同处理下不同时期土壤有效碳氮含量变化

Fig. 2 Changes of soil available carbon and nitrogen under different treatments at different periods

C: 正常积雪对照; TS: 积雪加深处理; TR: 除雪处理; BSC: 积雪形成前; ESC: 早雪期; DSC: 深雪期; SCM: 融雪期; EGS: 作物生长早期。同一时期不同小写字母表示不同处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著。C: normal snow cover control; TS: snow deepening treatment; TR: snow removal treatment; BSC: before snow formation; ESC: early snow period; DSC: deep snow period; SCM: snowmelt period; EGS: early stage of crop growth. Different lowercase letters in the same period indicate significant differences at $P < 0.05$ level among different treatments.

上,使土壤蔗糖酶活性增加 10.5% 以上。

3 讨论

3.1 积雪变化对土壤水土环境的影响

雪被具有较强的反射效应,会导致太阳辐射的热量不能直接到达地面,而无雪被覆盖的土壤由于失去了雪的隔热保温作用,受大气环境影响较大^[26]。本研究结果表明,除雪处理显著降低了土壤温度,加雪处理显著增加了土壤温度,对照、加雪处理、除雪处理下土壤温度最小值分别为 -6.06°C 、 -3.56°C 、

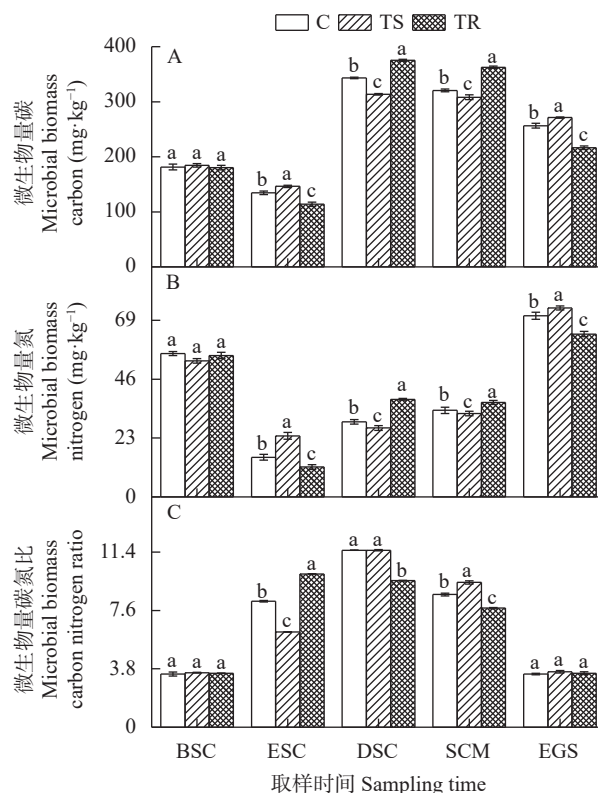


图 3 不同处理下不同时期土壤微生物量碳氮含量变化

Fig. 3 Changes of soil microbial biomass carbon and nitrogen contents under different treatments at different periods

C: 正常积雪对照; TS: 积雪加深处理; TR: 除雪处理; BSC: 积雪形成前; ESC: 早雪期; DSC: 深雪期; SCM: 融雪期; EGS: 作物生长早期。同一时期不同小写字母表示不同处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著。C: normal snow cover control; TS: snow deepening treatment; TR: snow removal treatment; BSC: before snow formation; ESC: early snow period; DSC: deep snow period; SCM: snowmelt period; EGS: early stage of crop growth. Different lowercase letters in the same period indicate significant differences at $P < 0.05$ level among different treatments.

-17.26°C 。积雪量的增加可以使土壤温度保持在一个较为稳定的范围,即 $-5\sim-2^{\circ}\text{C}$ 。而 0°C 左右的温度波动会使土壤中动植物、微生物的活动和养分流失产生累积效应^[27],这表明频繁波动的土壤温度会使土壤在冻融期较不稳定,并且会更频繁地进行生化反应,造成养分流失。本试验结果还表明,除雪处理与对照相比,在深雪期土壤湿度无明显差异,而加雪处理下的土壤湿度明显高于其他两处理,加雪处理的土壤湿度比对照提高 1.37% 以上,这可能是因为过深的积雪覆盖,会造成广泛的融雪入渗,使土壤湿度明显增加^[28],而土壤水分的变化可能会对地下生态过程产生深远的影响,土壤中的动植物与微生物的活性以及相关溶质的释放也与土壤水分有着密不可分的关系^[29]。

3.2 积雪变化对土壤有效碳氮的影响

雪被的变化会通过影响土壤冻融循环过程进而

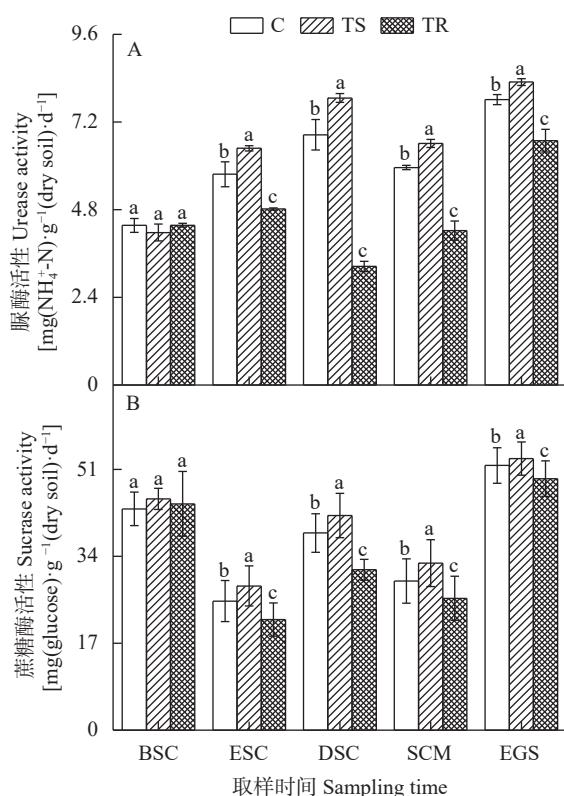


图 4 不同处理下不同时期土壤酶活性变化

Fig. 4 Changes of soil enzymes activities under different treatments at different periods

C: 正常积雪对照; TS: 积雪加深处理; TR: 除雪处理; BSC: 积雪形成前; ESC: 早雪期; DSC: 深雪期; SCM: 融雪期; EGS: 作物生长早期。同一时期不同小写字母表示不同处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著。C: normal snow cover control; TS: snow deepening treatment; TR: snow removal treatment; BSC: before snow formation; ESC: early snow period; DSC: deep snow period; SCM: snowmelt period; EGS: early stage of crop growth. Different lowercase letters in the same period indicate significant differences at $P < 0.05$ level among different treatments.

影响土壤有效养分的释放与积累^[30]。本研究中,在早雪期,除雪处理显著增加了土壤总有机碳和无机氮含量,其中土壤总有机碳含量增加 $2.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总无机氮含量增加 $2.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。主要的原因可能有: 1) 积雪的减少增加了土壤冻融循环频率,破坏了土壤的稳定结构,使土壤中大团聚体破碎成了小团聚体,同时大量的微生物没有适应冰晶的冻胀作用而出现大量裂胀死亡,释放出大量氨基酸、小分子糖等物质,大量有效养分在此过程中释放^[31]; 2) 冻融循环次数的增加,加速了凋落物以及植物根系的降解与死亡,进而释放出大量有机质^[32]。而从融雪期开始,加雪处理显著增加了土壤总有机碳以及无机氮含量,除雪处理显著降低了二者含量,这与 Liang 等^[33]研究结果一致,主要原因可能有以下 3 个方面: 1) 相较于除雪处理,加雪处理的土壤环境更为温暖舒适,可以使微生物保持较高的活性,进而加速土壤氮的

矿化作用^[34]; 2) 除雪处理使土壤融化时间提前,早春植物在此时提前萌发,在这个过程中,需要一定的养分底料才可进行,所以除雪处理下的早春植物可能在此时吸收一定的养分来满足自身的生长发育^[35]; 3) 由于积雪的富集作用,雪中存储的无机氮可能在融雪期随雪融水渗入到土壤中,激活土壤微生物,加速土壤中的养分释放^[36]。从试验结果可以发现,积雪的减少短期内会加速土壤的冻融循环频率,使土壤总有机碳以及无机氮在冬季前期快速释放,但从长期角度来看,积雪减少条件下的土壤因为失去了积雪的保温作用而会遭受更恶劣的冻结过程,进而破坏自身的稳定结构,影响养分的积累与释放。本研究还发现,早雪期除雪处理显著降低了土壤可溶性有机碳氮含量,主要有 3 种原因: 首先,土壤可溶性有机质作为土壤中较为活跃的组分之一,受冻融影响较大,而更频繁的冻融对微生物以及植物细根会造成更大伤害,从而提供更多不稳定的溶解性有机物^[37]; 其次,土壤可溶性有机碳氮的主要来源为微生物分解的有机质,从深雪期开始,由于失去了积雪的保温作用,导致大量土壤微生物裂解死亡,切断了土壤可溶性有机质的来源; 最后,进入融雪期后,加雪处理下的融雪水淋溶作用较强,加速了土壤可溶性有机质的流失^[38]。

3.3 积雪变化对土壤微生物量碳氮的影响

土壤微生物的变化可能影响土壤有机质分解、养分矿化和肥力过程^[39]。微生物活性也常常被看作土壤对全球气候变化响应研究的传感器^[40]。在本研究中,不同处理对土壤微生物有不同影响。在早雪期,加雪处理显著增加了土壤微生物量碳氮含量,除雪处理显著降低了土壤微生物量碳氮含量,造成这一结果的主要原因可能是在早雪期冻融循环次数的增加会对土壤微生物造成伤害,使大量土壤微生物裂解死亡,从而使土壤微生物量降低。而深雪期以及融雪期不同处理下的土壤微生物量变化与早雪期相反,主要原因可能是: 1) 在深雪期积雪量的增加会抑制土壤可溶性有机碳和可溶性有机氮的释放,而积雪量的减少会由于频繁的冻融过程使除雪处理下的微生物大量死亡,从而向土壤中释放了大量可溶性养分,这一部分养分为土壤中嗜冷微生物提供了基质,被其充分利用以此满足自身的繁殖及生长^[41]; 2) 融雪过程中,加雪处理下大量融雪水渗入到土壤中,使土壤中存在大量无氧条件,这种无氧条件会使土壤中大量好氧微生物死亡^[42]。不同处理下的土壤微生物量碳氮比在积雪形成后显著增加,说明真菌

对土壤微生物量的贡献最大,而在积雪形成前相对较低,说明细菌对土壤微生物量的贡献发生了潜在变化。这也说明积雪变化对土壤微生物群落结构的影响较为复杂,这对土壤碳氮矿化作用具有重要意义。

4 结论

积雪变化可以有效改变大气与地面之间的热量交换过程,导致土壤的水土环境发生变化,积雪深度的增加可以使土壤保持较为适宜的土壤温度和较高的土壤湿度,增加冬季末期(融雪期)土壤中有有机碳和无机氮含量;而在冬季早期,加雪作用会使土壤总有机碳、有效氮含量和微生物活性显著降低,从深雪期到融雪期,加雪处理使土壤微生物量显著降低,除雪处理使土壤微生物量显著增加,进而影响土壤微生物群落结构分布情况。此外,在冬季大部分时间里,除雪处理显著降低了土壤酶活性,加雪处理显著增加了土壤酶活性。综上所述,本试验在理论上进一步探究了气候变暖条件下土壤物质循环过程,以期对未来全球气候变暖和土地开发利用对黑土养分的影响预测提供理论依据。

参考文献 References

- [1] MARCHAND P J. An Introduction to Winter Ecology[M]. 3rd. Hanover, NH: University Press of New England, 1996
- [2] 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
- [3] PACHAURI R K, MEYER L A. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. IPCC, 2014
- [4] 丁永建, 王建, 刘时银. 近15年来长江黄河源区的土地覆被变化与演变格局分析[C]//三江源区生态保护与可持续发展高级学术研讨会论文摘要汇编. 西宁, 2005: 15
- [5] DING Y J, WANG J, LIU S Y. Analysis of land cover change and evolution pattern in the source region of the Yangtze River and the Yellow River in the past 15 years[C]//Compilation of abstracts of papers of High-Level Symposium on Ecological Protection and Sustainable Development of Sanjiangyuan Region. Xining, 2005: 15
- [6] 李培基. 青藏高原积雪对全球变暖的响应[J]. *地理学报*, 1996, 51(3): 260–265
- [7] LI P J. Response of Tibetan snow cover to global warming[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(3): 260–265
- [8] 魏天锋, 刘志辉, 王元. 积雪覆盖下的季节性冻土对融雪水出流的影响[J]. *干旱区研究*, 2015, 32(3): 435–441
- [9] WEI T F, LIU Z H, WANG Y. Effect on snowmelt water outflow of snow-covered seasonal frozen soil[J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32(3): 435–441
- [10] KAPNICK S B, DELWORTH T L. Controls of global snow under a changed climate[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(15): 5537–5562
- [11] 郑思嘉, 于晓菲, 栾金花, 等. 季节性冻土区积雪的生态效应[J]. *土壤与作物*, 2018, 7(4): 389–398
- [12] ZHENG S J, YU X F, LUAN J H, et al. Ecological effects of snow in seasonal frozen soil region[J]. *Soils and Crops*, 2018, 7(4): 389–398
- [13] 胡霞, 尹鹏, 王智勇, 等. 雪被厚度和积雪周期对土壤氮素动态影响的初步研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 593–597
- [14] HU X, YIN P, WANG Z Y, et al. Preliminary study on the effect of snow depth and snow duration on soil N dynamics[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(4): 593–597
- [15] BRANDT A C, ZHANG Q Q, CACERES M L L, et al. Soil temperature and soil moisture dynamics in winter and spring under heavy snowfall conditions in North-Eastern Japan[J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(15): 3235–3251
- [16] 古力米热·哈那提, 张音, 苏里坦, 等. 季节性冻土水热对融雪及气温的响应[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(4): 889–896
- [17] GULIMIRE HANATI, ZHANG Y, SU L T, et al. Response of water and heat of seasonal frozen soil to snow melting and air temperature[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(4): 889–896
- [18] ADELISARDOU F, JAFARI H R, MALEKMOHAMMADI B, et al. Impacts of land use and land cover change on the interactions among multiple soil-dependent ecosystem services (case study: Jiroft Plain, Iran)[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, 43(10): 3977–3996
- [19] MA R M, JIANG Y, LIU B, et al. Effects of pore structure characterized by synchrotron-based micro-computed tomography on aggregate stability of black soil under freeze-thaw cycles[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 207: 104855
- [20] UEDA M U, MULLER O, NAKAMURA M, et al. Soil warming decreases inorganic and dissolved organic nitrogen pools by preventing the soil from freezing in a cool temperate forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 61: 105–108
- [21] 谭波, 吴福忠, 杨万勤, 等. 冻融末期川西亚高山/高山森林土壤水解酶活性特征[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(5): 1162–1168
- [22] TAN B, WU F Z, YANG W Q, et al. Soil hydrolase characteristics in late soil-thawing period in subalpine/alpine forests of West Sichuan[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(5): 1162–1168
- [23] MATZNER E, BORKEN W. Do freeze-thaw events enhance C and N losses from soils of different ecosystems? A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(2): 274–284
- [24] SULKAVA P, HUHTA V. Effects of hard frost and freeze-thaw cycles on decomposer communities and N mineralisation in boreal forest soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22(3): 225–239
- [25] HENTSCHEL K, BORKEN W, MATZNER E. Repeated freeze-thaw events affect leaching losses of nitrogen and dissolved organic matter in a forest soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(5): 699–706
- [26] FREPPAZ M, VIGLIETTI D, BALESTRINI R, et al. Climatic and pedoclimatic factors driving C and N dynamics in soil and surface water in the alpine tundra (NW-Italian Alps)[J]. *Nature Conservation*, 2019, 34: 67–90
- [27] SARDANS J, PEÑUELAS J, ESTIARTE M. Changes in soil

- enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(2): 223–235
- [21] GROFFMAN P M, DRISCOLL C T, FAHEY T J, et al. Effects of mild winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in a northern hardwood forest[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2): 191–213
- [22] CHEN Y M, LIU Y, ZHANG J, et al. Microclimate exerts greater control over litter decomposition and enzyme activity than litter quality in an alpine forest-tundra ecotone[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 14998
- [23] 敖曼, 张旭东, 关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1203–1215
AO M, ZHANG X D, GUAN Y X. Research and practice of conservation tillage in black soil region of northeast China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10): 1203–1215
- [24] 王梅, 葛磊, 吴威. 大兴安岭地区近30a积雪及冻土变化特征分析[C]//第26届中国气象学会年会气候变化分会场论文集. 杭州, 2009: 616–621
WANG M, GE L, WU W. Variation of the snow and frozen soil over Daxing'anling area and their relations to climatic change[C]// *Proceedings of the 26th Annual Conference of the Chinese Meteorological Society on Climate Change*. Hangzhou, 2009: 616–621
- [25] JONES D L, WILLETT V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5): 991–999
- [26] 常娟, 王根绪, 高永恒, 等. 青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(23): 7289–7301
CHANG J, WANG G X, GAO Y H, et al. Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in permafrost region, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(23): 7289–7301
- [27] CUSACK D F, SILVER W L, TORN M S, et al. Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests[J]. *Ecology*, 2011, 92(3): 621–632
- [28] 伯玥, 李小兰, 王澄海. 青藏高原地区积雪年际变化异常中心的季节变化特征[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(6): 1353–1362
BO Y, LI X L, WANG C H. Seasonal characteristics of the interannual variations centre of the Tibetan Plateau snow cover[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(6): 1353–1362
- [29] MUHAMMAD I, YANG L, AHMAD S, et al. Nitrogen fertilizer modulates plant growth, chlorophyll pigments and enzymatic activities under different irrigation regimes[J]. *Agronomy*, 2022, 12(4): 845
- [30] 刘帅, 于贵瑞, 浅沼顺, 等. 蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布[J]. *土壤学报*, 2009, 46(1): 46–51
LIU S, YU G R, QIAN Z S, et al. The thawing-freezing processes and soil moisture distribution of the steppe in central Mongolian Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 46–51
- [31] NIELSEN C B, GROFFMAN P M, HAMBURG S P, et al. Freezing effects on carbon and nitrogen cycling in northern hardwood forest soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(6): 1723–1730
- [32] EDWARDS K A, MCCULLOCH J, KERSHAW G P, et al. Soil microbialand nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 2843–2851
- [33] LIANG Y J, DENG X, SONG T, et al. Influences of seasonal freezing and thawing on soil water-stable aggregates in orchard in high cold region, northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2021, 31(2): 234–247
- [34] 朱国君, 尹航, 吴明根, 等. 春季解冻过程对2种温带森林土壤微生物量碳氮和可溶性有机碳氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 204–209
ZHU G J, YI H, WU M G, et al. Effects of spring thawing process on soil microbial biomass carbon and nitrogen and soluble organic carbon and nitrogen in two temperate forests[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 204–209
- [35] ZOU W J, SHA L Q, SCHAEFER D, et al. Direct effects of litter decomposition on soil dissolved organic carbon and nitrogen in a tropical rainforest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 255–258
- [36] ALTOMARE D F, DE FAZIO M, GIULIANI R T, et al. Sphincteroplasty for fecal incontinence in the era of sacral nerve modulation[J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2010, 16(42): 5267–5271
- [37] TIERNEY G L, FAHEY T J, GROFFMAN P M, et al. Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2): 175–190
- [38] GOLDBERG S D, MUHR J, BORKEN W, et al. Fluxes of climate-relevant trace gases between a Norway spruce forest soil and atmosphere during repeated freeze-thaw cycles in mesocosms[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(5): 729–739
- [39] LARSEN K S, JONASSON S, MICHELSEN A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two Arctic ecosystem types[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21(3): 187–195
- [40] XIAO W, CHEN X, JING X, et al. A meta-analysis of soil extracellular enzyme activities in response to global change[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 123: 21–32
- [41] 杨玉莲, 吴福忠, 何振华, 等. 雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤微生物生物量碳氮和可培养微生物数量的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1809–1816
YANG Y L, WU F Z, HE Z H, et al. Effects of snow pack removal on soil microbial biomass carbon and nitrogen and the number of soil culturable microorganisms during wintertime in alpine *Abies faxoniana* forest of western Sichuan, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1809–1816
- [42] DERAOKSHANI M, LUKOW T, LIESACK W. Novel bacterial lineages at the (sub) division level as detected by signature nucleotide-targeted recovery of 16S rRNA genes from bulk soil and rice roots of flooded rice microcosms[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(2): 623–631