

王子龙, 滕怀溟, 姜秋香, 等. 雪被去除对东北农田黑土水溶性盐分含量的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 697-707. WANG Z L, TENG H H, JIANG Q X, et al. Effects of snow removal on water-soluble salt content of farmland black soil in Northeast China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 697-707. (in Chinese)

雪被去除对东北农田黑土水溶性盐分含量的影响

王子龙, 滕怀溟, 姜秋香, 刘传兴, 王凯, 单家琦

(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探究积雪覆盖对东北地区农田黑土水溶性盐分含量的影响, 在野外人工除雪后, 对雪被去除试验组(B)与自然积雪对照组(N)0~30 cm 农田黑土的 7 种土壤水溶性盐组分(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-)的含量变化过程进行试验研究。结果表明: 覆雪期 B 组与 N 组平均盐分总量(质量分数)相较于试验期初分别增长 107.22、129.54 mg/kg。土壤温度对 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 的含量具有显著影响, B 组土壤的 4 种盐组分相比 N 组分别增加 10.47%、-5.79%、-10.29%、-7.60%。融雪期 B 组与 N 组土壤盐分总量基本持平, 该时期土壤含水率对 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 的含量具有显著影响, B 组土壤的 3 种盐组分相比 N 组分别增加 16.33%、-33.60%、-10.38%。试验期内, 雪被去除处理下土壤 HCO_3^- 和二价阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})含量显著减少, 一价阳离子(Na^+ 、 K^+)与两种酸根离子(Cl^- 、 SO_4^{2-})含量显著增加。 HCO_3^- 对盐分总量的影响程度最高, 雪被去除处理引起的 HCO_3^- 含量减少将导致覆雪期与融雪期的土壤 pH 值分别降低 0.04、0.03。总体而言, 冬季雪被去除处理使作物生长季前的东北地区农田黑土原有的盐组分含量重新分布, 引起土壤碱性的减弱。

关键词: 雪被去除; 土壤盐分; 土壤离子; 农田黑土

中图分类号: S19 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0070

全球气候变暖影响下北半球季节性雪被覆盖面积正逐步减少^[1-2], 引起冻土区土壤环境的变化^[3], 这一形势将深刻改变季节性冻土的水热状态和物质能量平衡^[4-5], 土壤现有的盐分分布格局势必受到影响^[6]。盐分的组成和分布可表征土壤的盐渍化或酸化程度, 近年来东北地区土壤盐渍化面积蔓延的趋势不容乐观^[7], 同时部分地区土壤正在遭受酸化的破坏^[8], 因而研究雪被覆盖条件改变下东北黑土区土壤盐分分布格局的变化可为判断未来的农田土壤质量状况提供一定的科学依据。

作为我国积雪分布范围最大的积雪稳定区^[9], 东北地区的雪被覆盖深度在近 20 年的时间内已减少 58%^[10]。雪被覆盖深度显著影响土壤冻融过程中的水热变化^[11-12], 有学者^[13]通过研究冻结期和融化期不同深度雪被下土壤水热的相互作用, 得出土壤水热间的关系在冻结期随着雪被量的增加逐渐加强, 而在融化期逐渐减弱的结论。土壤水热变化将

进一步影响水盐运移过程, 以往研究表明, 在降温阶段土壤水盐向上运移, 升温阶段土壤水盐则向下运移^[14], 降温期土壤盐分向上的运移量略大于升温时盐分向下的运移量^[15], 这一过程经过循环积累将导致土壤盐渍化发生。有研究^[16]发现土壤盐渍化区域的优势盐分为 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} , HCO_3^- 则在土壤背景盐度中起着主要作用。有研究^[17]发现, 不同盐渍土类型引起土壤盐储量变化的主要盐组分存在差异, 在硫酸盐-氯化盐土壤中, Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 与总盐分的含量(质量分数, 下同)变化方向在冻结期和融化期均保持一致, HCO_3^- 则与总盐分的含量变化方向相反。而且, 阳离子在冻结期的运移能力表现为 $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$, 融化期则为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, 而阴离子中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 分别表现出最强和最弱的运移能力^[18]。因此, 研究土壤不同盐组分的含量时空变化过程对预测土壤盐渍化与酸化趋势具有重要的指示作用。

收稿日期: 2023-12-27 修回日期: 2024-03-31 网络出版时间: 2024-05-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240508.1703.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179035; 51579045)

作者简介: 王子龙(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事寒区农业水土资源高效利用研究。E-mail: wangzilong@neau.edu.cn

通信作者: 姜秋香(1982—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用和管理研究。E-mail: jiangqiuxiang2017@163.com

有学者^[19]通过对东北部分地区土壤性质的时空变化研究,得出 0~50 cm 深度土壤的水盐季节性含量变化差异显著的结论。因此,本研究以中国东北松嫩平原的农田耕作层黑土为研究对象,通过有无雪被覆盖处理下土壤温度、含水率、pH 及 7 种土壤水溶性盐分含量的变化,探讨去除雪被对土壤水热和盐分的影响,以期气候变暖影响下东北季节性农田黑土高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究于黑龙江省哈尔滨市东北农业大学水利综合试验场(45°44'41"N, 126°45'32"E)内进行。试验地平均海拔 138 m,属于温带大陆性季风气候,冬季多年平均气温为-14.2℃,最冷月平均气温-19.6℃,历年雪被覆盖期为 110 d,无霜期 140 d,年土壤最大冻结深度为 180 cm,无多年冻土层,全年平均降水量约为 570 mm。黑土是该地的主要土壤,同时也是数量最多、分布最广的土壤类型^[20]。

1.2 试验设计

试验地分别设为雪被去除试验组(B)与自然积雪对照组(N),每组各划分 3 块 3 m×3 m 的重复样地,样地之间保持 1 m 的间隔。试验期每次降雪事件停止时,使用人工推雪铲清除试验组(B)样地内的积雪,保证试验组(B)土壤处于裸露状态。对照组(N)样地则不作任何人为干扰,保持自然积雪状态。两个样地均埋设土壤温度传感器。试验于 2020 年 11 月 1 日至 2021 年 4 月 3 日进行。试验地第一次有效降雪日期为 2020 年 11 月 20 日。试验取样日期为 2020 年 12 月 1 日、2021 年 1 月 1 日、2021 年 2 月 1 日、2021 年 3 月 13 日、2021 年 3 月 23 日、2021 年 4 月 3 日。设定 2020 年 12 月 1 日至 2021 年 3 月 13 日为覆雪期,2021 年 3 月 13 日至 2021

年 4 月 3 日为融雪期^[21]。

试验取 0~30 cm 深度内的耕作层土壤为研究对象,采用环刀取土器在各取样点处分别钻取表层 0~10 cm、中层 10~20 cm、底层 20~30 cm 三层土壤,并采用“五点取样法”对样地进行重复取样。取土器的环刀容量为 200 cm³,每次取样时用铁锤锤击取土器上方的击实锤,使环刀能够钻取原状的冻结土壤。旋转取土器外壳并取出钻取的土壤,将相同雪被处理方式和取样深度的土壤放置于同一采集袋内标记待用。

1.3 试验方法及内容

试验采用烘干法测定土壤含水率、离子色谱法测定土壤 Cl⁻、SO₄²⁻含量、滴定法测定土壤 HCO₃⁻含量,原子吸收光谱法测定土壤 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺含量^[22]。

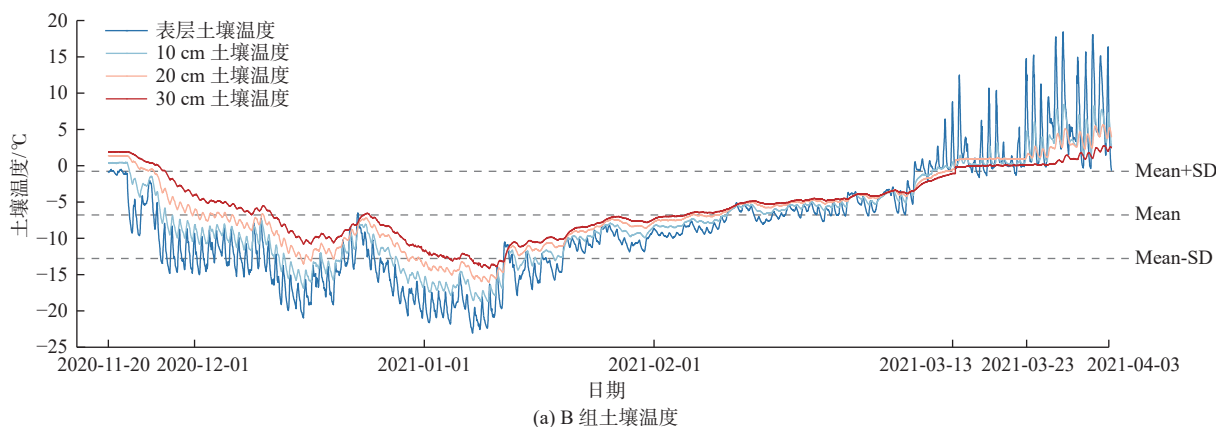
1.4 数据处理与统计分析

Shapiro-Wilk 检验结果显示试验数据不符合正态分布,因此采用非参数 Wilcoxon 秩和检验法检验各指标间的显著性,显著水平为 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤环境因子变化特征

土壤温度变化情况见图 1。覆雪期 B 组 0~30 cm 土壤完全冻结时间为 9.13 d,相比于 N 组提前了 9.29 d。B 组、N 组的 0~30 cm 土壤平均温度分别为-8.49、-3.34℃,标准差分别为 4.28、2.30℃;融雪期 B 组、N 组的 0~30 cm 土壤平均温度分别为 2.34、1.93℃,标准差分别为 2.11、2.06℃。雪被去除处理使覆雪期 0~30 cm 土壤的冻结时间缩短,雪被覆盖的缺失使土壤温度显著降低,同时土壤温度的变化幅度有所增大。融雪期两组样地土壤温度变化趋势接近,N 组受融雪的影响使其平均土壤温度低于 B 组。



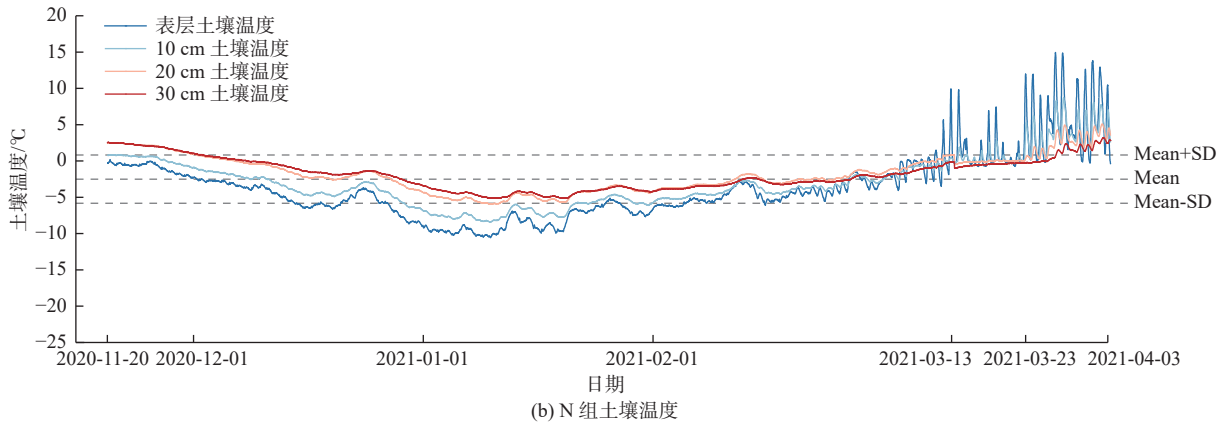


图 1 土壤温度变化

Fig. 1 Variations of soil temperature

试验期土壤含水率及 pH 变化情况见图 2, 结果表明不同时期不同雪被处理方式下土壤含水率与 pH 的变化水平均通过显著性检验。覆雪期 B 组与 N 组的平均土壤含水率分别为 18.88%、18.23%, 融雪期两组样地平均土壤含水率分别为 19.61%、20.82%。雪被去除处理使覆雪期 B 组 0~30 cm 土

壤含水率显著升高, 而融雪期 B 组土壤缺少融雪补给, 导致其土壤含水率显著低于 N 组。覆雪期 B 组、N 组的平均土壤 pH 值分别为 8.05、8.09, 融雪期两组样地平均土壤 pH 值分别为 7.99、8.02, 这表明在覆雪期与融雪期时间段内, 雪被去除处理下 0~30 cm 平均土壤 pH 值均显著低于自然积雪处理。

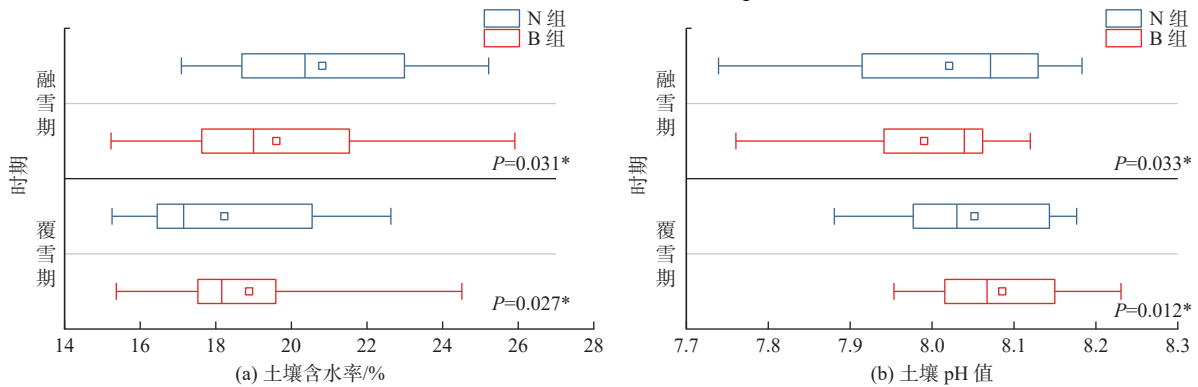


图 2 土壤含水率及 pH 变化

Fig. 2 Variations of soil moisture content and pH

2.2 土壤水溶性盐组分含量变化特征

试验期土壤水溶性盐分含量变化情况见图 3。对于一价阳离子, 覆雪期 B 组土壤 Na^+ 、 K^+ 平均含量分别高出 N 组 10.47%、16.33%, 融雪期分别高出 N 组 31.09%、16.21%。相比试验期初, 试验期末 B 组与 N 组 0~30 cm 土壤 Na^+ 平均含量分别变化 7.60、-1.93 mg/kg, K^+ 平均含量分别变化 9.08、4.39 mg/kg, 说明雪被去除显著提升了覆雪期与融雪期土壤 Na^+ 、 K^+ 的平均含量, 其中 K^+ 呈现出表聚现象, 其含量随深度降低而逐渐减小。二价阳离子的含量变化特征与 K^+ 相反, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量随土壤深度降低而逐渐增加, 呈现出底聚现象。覆雪期 B 组土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 平均含量分别低于 N 组 5.79%、10.29%, 融雪期分别低于 N 组 9.26%、33.60%。试验期末, B 组与 N 组 0~30 cm 土壤 Ca^{2+} 平均含量分别变化 -16.43、

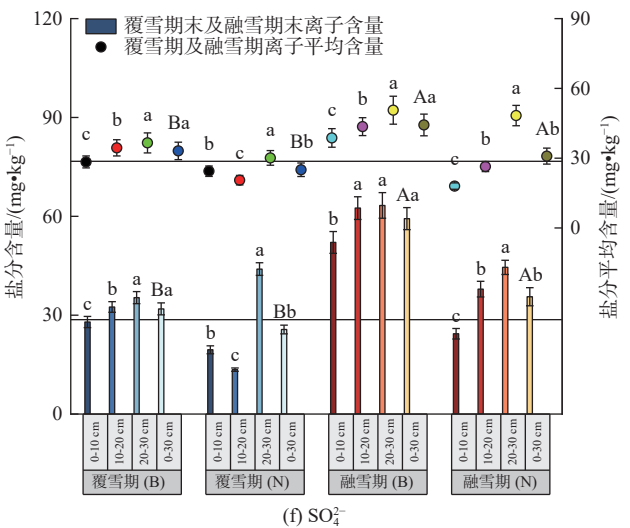
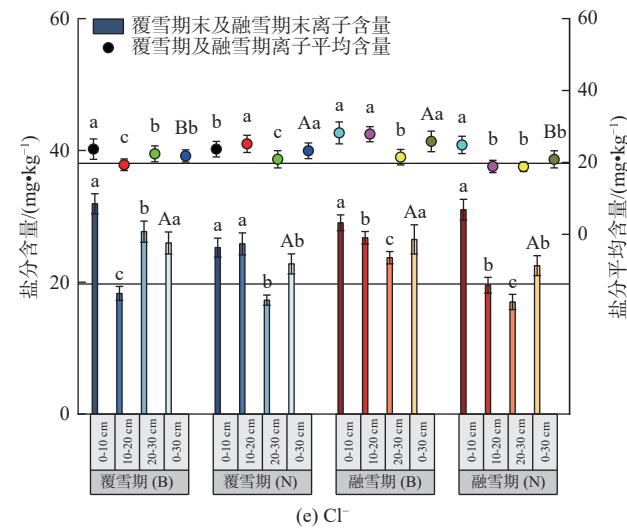
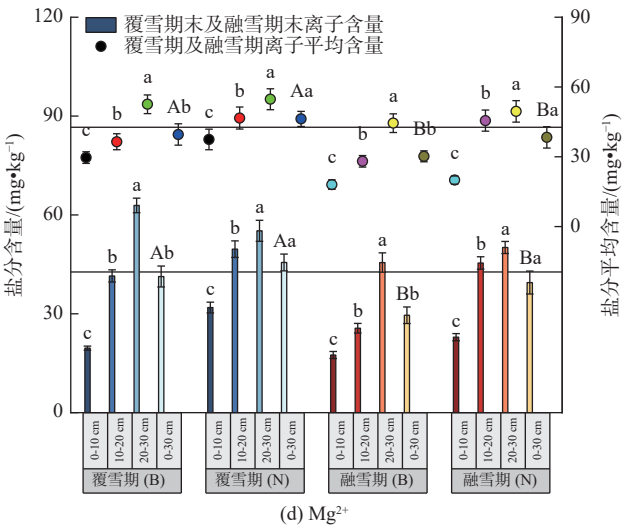
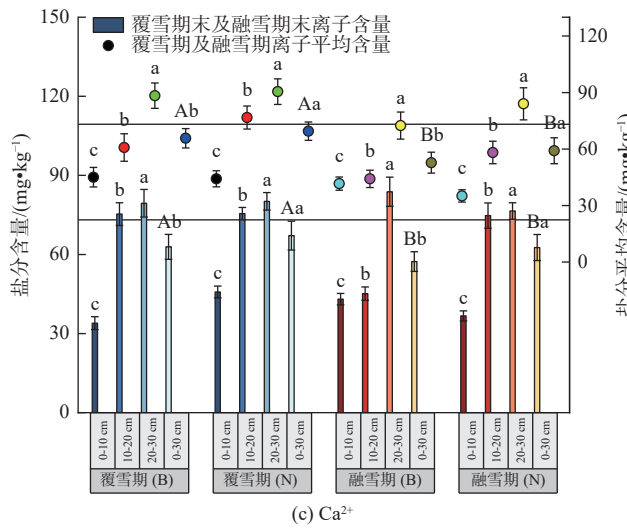
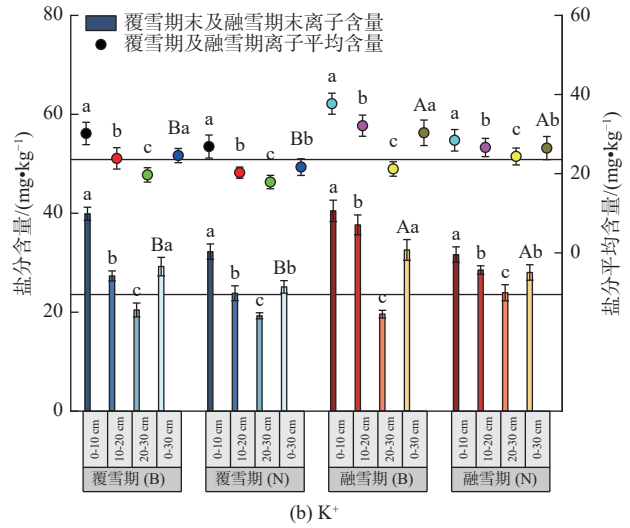
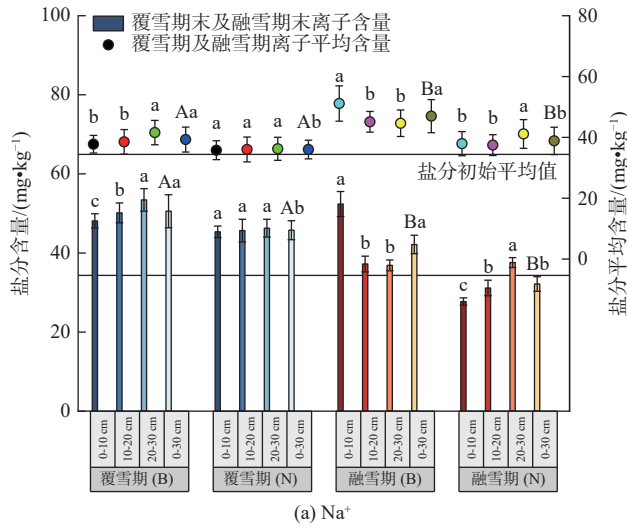
-9.89 mg/kg, Mg^{2+} 平均含量分别变化 -13.90、-2.42 mg/kg, 说明雪被去除显著减少了覆雪期与融雪期土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的平均含量。

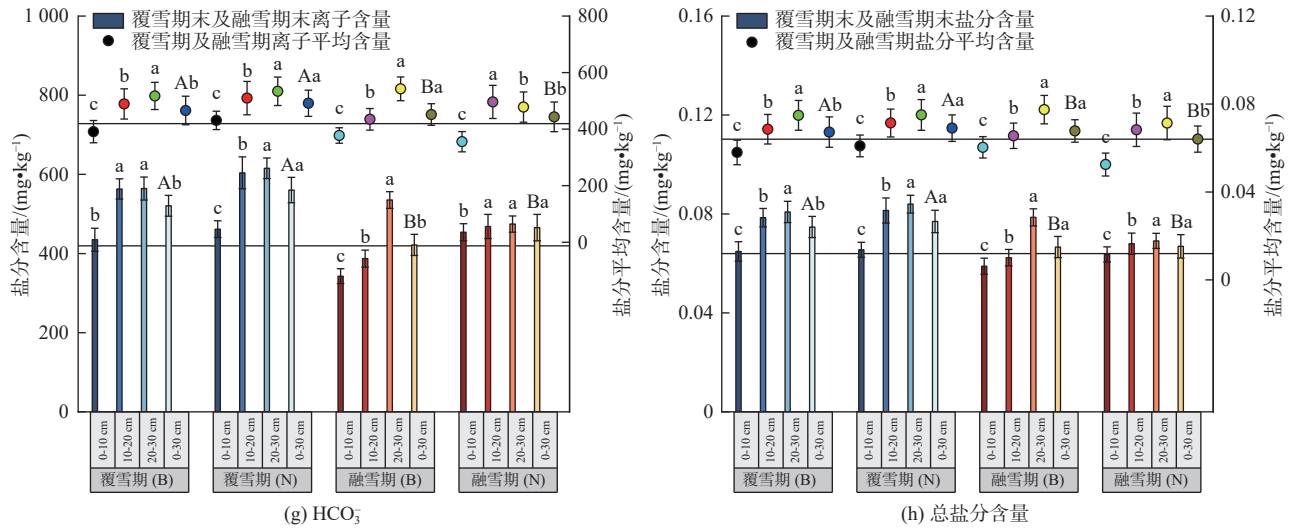
阴离子含量变化方面, 雪被去除显著增加了土壤 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的含量, 覆雪期 B 组土壤 Cl^- 、 SO_4^{2-} 平均含量分别高出 N 组 13.92%、24.38%, 融雪期分别高出 N 组 17.66%、66.53%。相比试验期初, 试验期末 B 组与 N 组 0~30 cm 土壤 Cl^- 平均含量分别变化 8.43、4.47 mg/kg, SO_4^{2-} 平均含量分别变化 30.66、6.96 mg/kg。同时 Cl^- 、 SO_4^{2-} 在融雪期的含量分布特点相反, Cl^- 呈现出表聚特征, SO_4^{2-} 呈现出底聚特征。试验期土壤 HCO_3^- 含量呈现底聚特征, 雪被去除显著增加了土壤 HCO_3^- 的含量, 覆雪期 B 组土壤 HCO_3^- 平均含量分别低于 N 组 7.60%, 融雪期分别低于 N 组 10.38%。试验期末, B 组与 N 组 0~30 cm

土壤 HCO_3^- 平均含量分别变化 3.06、45.33 mg/kg 。

试验期不同雪被处理方式下土壤盐分含量均呈现出覆雪期升高而融雪期降低的特点,雪被去除显著降低了覆雪期 0~30 cm 土壤的盐分含量,使土壤盐分含量相较自然积雪处理减少了 22.32 mg/kg 。融雪期两组土壤盐分含量未表现出差异,但各深度

下的含量分布不同,其中 B 组 20~30 cm 深度的土壤盐分高于 N 组 95.34 mg/kg ,而 0~10 cm 与 10~20 cm 深度的土壤盐分分别低于 N 组 47.45、56.58 mg/kg 。试验期两组土壤盐分含量分布均呈现底聚特征,这与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 的含量分布特征相同,与 K^+ 、 Cl^- 相反。





注: 图中不同大写字母表示同一处理下不同时期的水溶性盐组分在 0.05 水平上具有显著性差异, 不同小写字母表示同一时期不同深度以及同一时期不同处理下的水溶性盐组分在 0.05 水平上具有显著性差异。

图 3 土壤水溶性盐分含量变化

Fig. 3 Variations of water-soluble salt contents in soil

分析各盐组分含量变化对总盐分含量变化的方差解释率, 结果见表 1。试验期不同处理下土壤盐组分对盐分总量变化的方差解释率总体表现为 HCO₃⁻ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > SO₄²⁻ > Na⁺ > K⁺ > Cl⁻, HCO₃⁻ 的平均含量变化量与标准化系数最高, 这说明 HCO₃⁻ 对于水溶性盐分的运移影响程度最高, 其次为 Ca²⁺、Mg²⁺。然而, 覆雪期与融雪期 0~30 cm 土壤深度内 Ca²⁺、Mg²⁺ 的含量平均变化范围为 (5.33±6.43) mg/kg, 含量整体变化水平低于 Na⁺ [(12.43±3.58) mg/kg], 这说明 0~30 cm 土壤深度范围内 Na⁺ 在覆雪期的净增长量与融雪期的净减少量高于 Ca²⁺、Mg²⁺, 但 Ca²⁺、Mg²⁺ 在每 10 cm 土壤深度范围内的运移量高于 Na⁺。

表 1 土壤盐组方程标准化系数

Tab. 1 Equation standardization coefficient of soil salt component

组别	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
覆雪期B组	0.056	0.047	0.163	0.086	0.034	0.049	0.564
覆雪期N组	0.049	0.045	0.087	0.062	0.027	0.067	0.662
融雪期B组	0.044	0.043	0.187	0.080	0.043	0.057	0.545
融雪期N组	0.050	0.016	0.141	0.084	0.025	0.089	0.594

2.3 土壤水溶性盐分与温度的拟合关系

构建不同时期不同雪被处理方式下土壤温度与水溶性盐分含量的回归曲线, 通过 R² (方差解释率) 表示土壤温度变化对水溶性盐分含量变化的解释程度, 同时通过 P 值判断每个回归方程是否通过显著性检验, 结果见图 4。分析结果表明, 覆雪期 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻ 与温度的拟合方差解释率均高于

41%, 且拟合曲线通过显著性检验, 说明温度的降低能够显著增加这 4 种盐组分的含量, 两者呈显著负相关关系。对于融雪期, 温度仅对 B 组 Na⁺ 和 N 组 Mg²⁺、SO₄²⁻ 表现出显著的正向影响, 同时在整个试验期内 K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 与温度未表现出显著的趋势特点, 各拟合方差解释率总体低于 50%。不同时期土壤总盐分含量受温度的影响趋势与影响程度存在差异, 土壤总盐分含量在覆雪期受到温度的负向影响, 而在融雪期受到温度的正向影响, 两者在覆雪期的拟合方差解释率高于 84%, 融雪期则不足 56%, 说明冻结状态下的土壤总盐分含量受温度的负向影响程度高于其在非冻结状态下受温度的正向影响程度。

2.4 土壤水溶性盐分与含水率的拟合关系

构建不同时期不同雪被处理方式下土壤含水率与水溶性盐分含量的回归曲线, 结果见图 5。分析结果表明, 试验期内 Na⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻ 与含水率呈现出显著的负向相关关系, 其中 HCO₃⁻ 受含水率的影响程度最高, 其方差解释率在覆雪期约为 48%, 融雪期约为 83%。Na⁺、Mg²⁺ 的方差解释率为 32%~91%。同时含水率与总盐分含量的方差解释率在覆雪期约为 54%, 融雪期约为 84%, 说明冻结状态下的土壤总盐分含量受含水率的负向影响程度高于非冻结状态。含水率对 K⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 的影响并未达到显著性水平, 4 种组分总体的方差解释率均低于 53%, 说明在土壤冻结与非冻结状态下这 4 种盐组分受含水率影响的程度低。

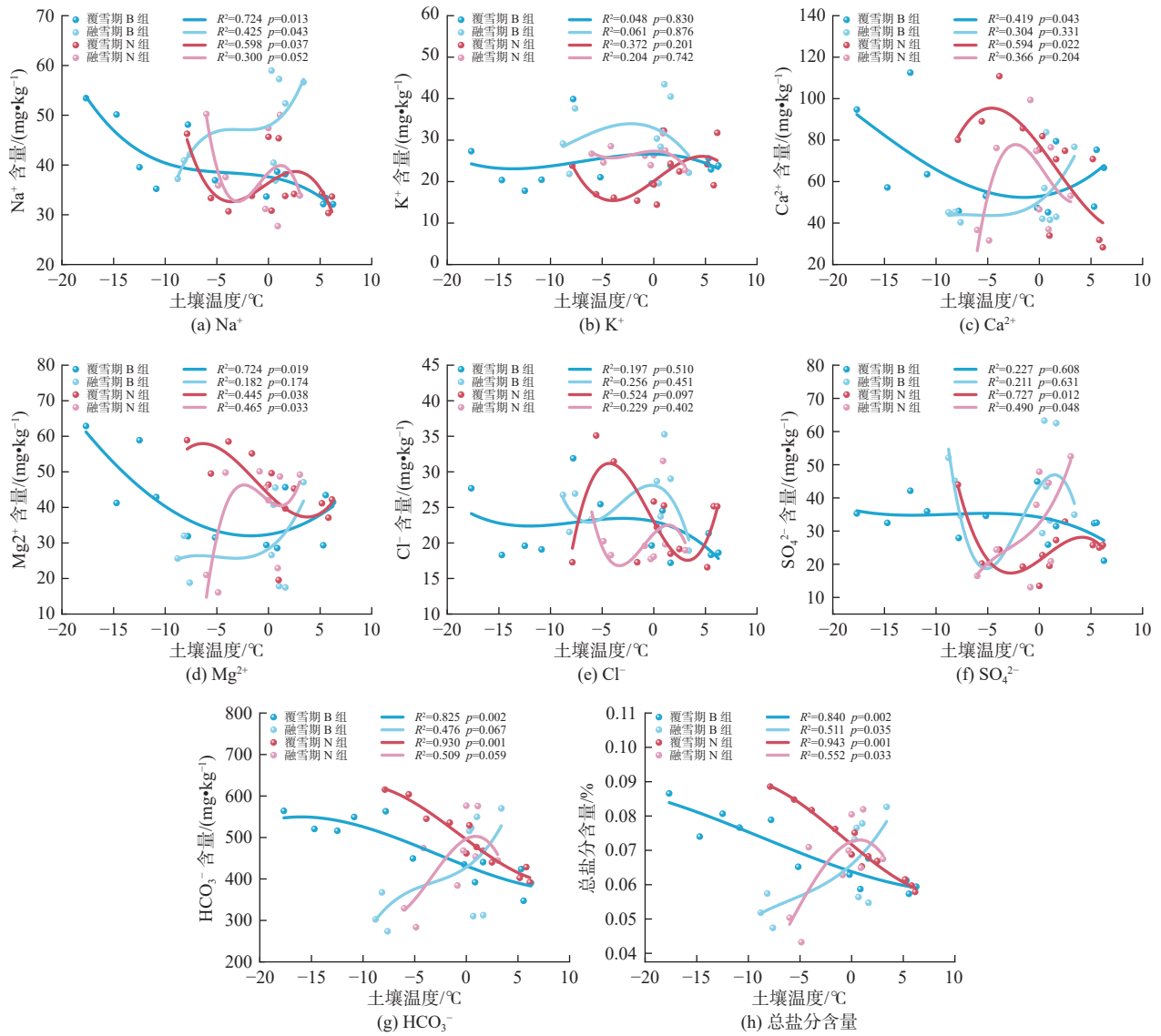
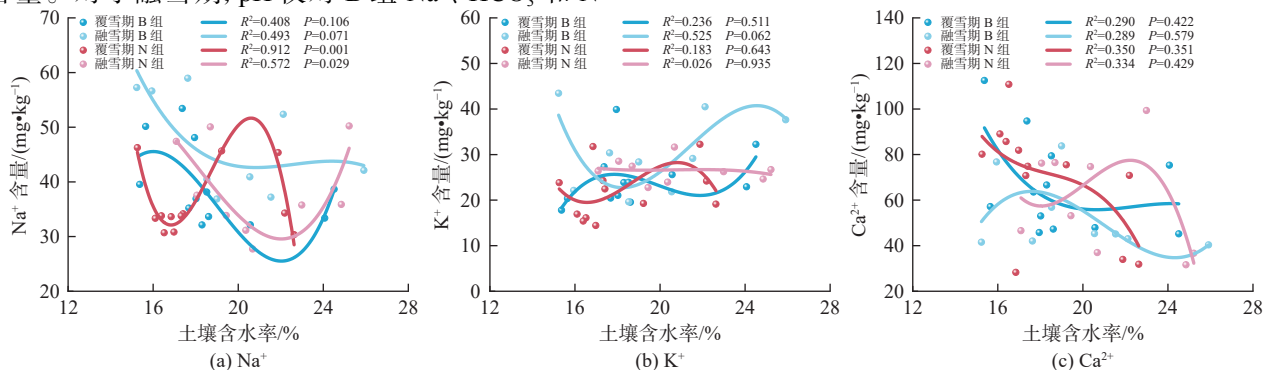


图 4 水溶性盐分与温度拟合结果
Fig. 4 Fitting results of water-soluble salt and temperature

2.5 土壤水溶性盐分与 pH 的拟合关系

构建不同时期不同雪被处理方式下土壤 pH 与水溶性盐分含量的回归曲线, 结果见图 6。分析结果表明, 覆雪期 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 与 pH 的拟合方差解释率均高于 44%, 说明 pH 的降低能够显著增加 Na^+ 的含量, 并显著降低其余 3 种盐组分的含量。对于融雪期, pH 仅对 B 组 Na^+ 、 HCO_3^- 和 N

组 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 表现出显著的正向影响, 同时在整个试验期内 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 与 pH 未表现出显著的趋势特点, 各拟合方差解释率总体低于 32%。试验期土壤 pH 和总盐分含量、 HCO_3^- 含量的方差解释率均高于 67%, 说明 pH 对于总盐分含量尤其是 HCO_3^- 含量的变化起到显著的正向影响作用。



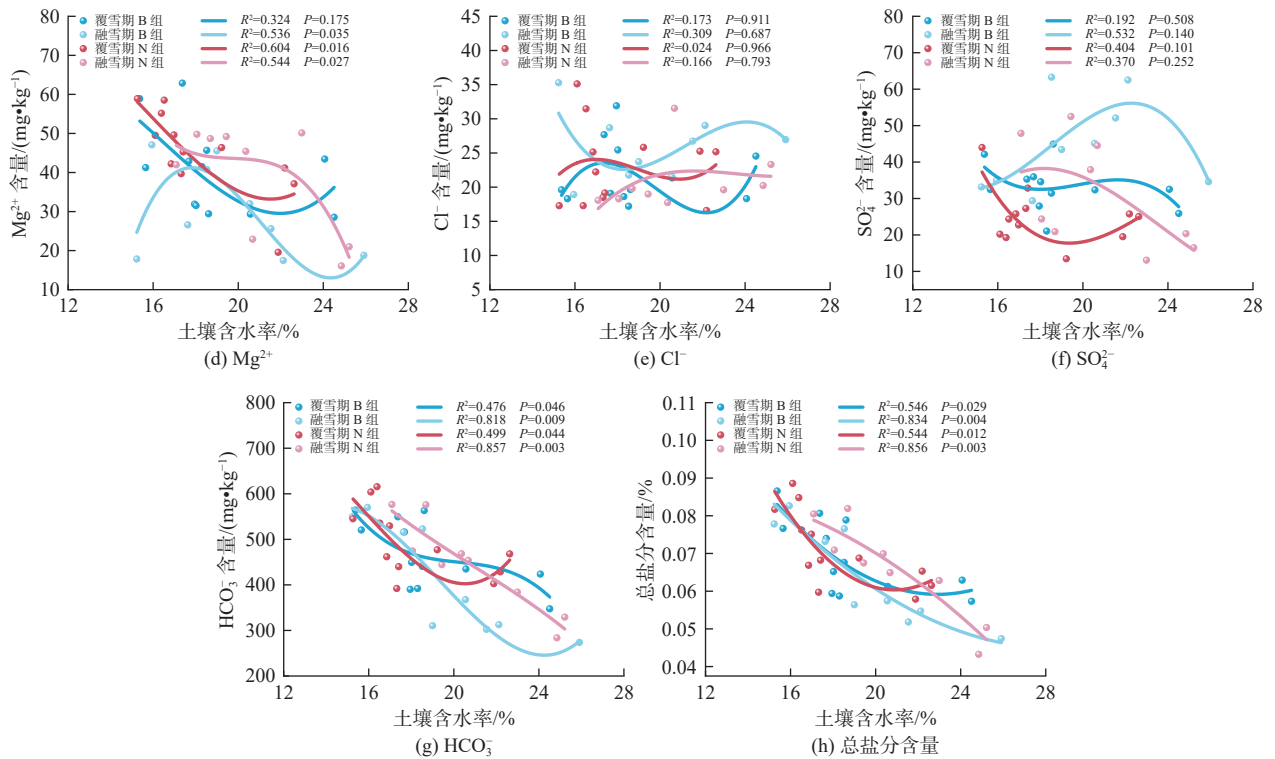


图5 水溶性盐分与含水率拟合结果

Fig. 5 Fitting results of water-soluble salt and moisture content

3 讨论

3.1 覆雪期雪被去除处理对水溶性盐分运移的影响

本试验发现,雪被去除处理将显著降低覆雪期土壤的盐分总量,且覆雪期内不同雪被处理方式下温度对盐分总量的影响均高于含水率。以往土壤单向冻结试验表明,当冻土中存在温度差,未冻水有向低温区域运移的趋势^[23],上层冻结土壤的水分将受到下层土壤水分的补给,使得上层土壤含水率不断上升^[24]。雪被去除处理使土壤失去积雪的保温效果,土壤温度显著降低,进而使覆雪期土壤水分运移更加活跃。未冻水向土壤上层运移的过程同时会携带盐分,盐分向上运移并在冻结层积累^[25],然而本试验中雪被去除组土壤更低的温度以及更高的含水率水平并未显著促进盐分向土壤表层的运移,这是由于土壤未冻水与土壤温度之间保持着动态的平衡关系^[26],冻结状态下的土壤未冻水含量将随温度的降低而减少^[27],虽然不同雪被覆盖条件下土壤盐分总量随覆雪期土壤温度逐渐降低的趋势下均呈现增长态势,但雪被去除处理下土壤更低的温度即更低的未冻水含量将减少盐分的运移总量,对盐分运移过程构成阻碍。并且雪被去除组土壤孔隙成冰量高,毛细管被更多的冰晶堵塞,减少了

盐分的运移通道,进一步限制了土壤盐分的运移。对于含水率而言,雪被去除处理显著提升了土壤的温度势,加速了未冻水向表层土壤运移并变成冰的速率,但这一结果并不能充分的反映出各盐组分含量与含水率的必然联系。有研究^[28]表明,在冻结状态下溶质将逐渐从冰相中排出,说明盐组分在含水率所代表的土壤冰相中的赋存含量有限,不同雪被处理方式引起的土壤含水率差异并不是水溶性盐分的主要影响因素。试验区土壤水溶性盐分含量随土壤深度降低而逐渐升高,土壤含水率则与之相反,这说明冻结状态下的黑土水盐运移进程并不同步,盐分的运移滞后于水分的运移,有学者则认为这种水盐不同步现象是由盐向下的扩散与水盐向上运动形成的对流作用共同引起的^[17]。

雪被去除处理对覆雪期土壤盐组分中的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 含量影响最为显著。试验发现 HCO_3^- 对于水溶性盐分总量变化的贡献程度最高,这是由于松嫩平原是世界三大苏打盐碱土分布区之一^[29], HCO_3^- 相较于其他水溶性盐组分在含量上占有优势,同时其在阴离子负吸附的作用下运移过程受限制程度低所导致的。雪被去除处理显著降低了覆雪期土壤的 HCO_3^- 含量,引起土壤 pH 降低,土壤负电荷的减少将进一步引起土壤胶体表面双电

层内正电荷的减少,使得双电层内距离黏土矿物表面更近且吸附能力更强的二价阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})含量降低,其部分吸附点位被一价阳离子(Na^+ 、 K^+)所替代^[30],使得 Na^+ 、 K^+ 含量升高。试验中发现, Na^+ 在不同深度下的含量分布较为均衡,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 则多集中于中底层土壤,同时 Na^+ 在耕作层土壤内的净增长量高于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,但其对于盐分总量的影响程度反而低于后者,这说明 Na^+ 在覆雪期土壤内的运移速率高于二价阳离子,即土壤胶体对 Na^+ 的吸附能力弱于二价阳离子。雪被去除处理导致土壤 K^+ 含量显著增加,然而 K^+ 并未对土壤环境因子表现出显著的响应关系,这可能是由于土壤对 K^+

的专性吸附导致的。有研究^[31]表明, K^+ 对黑土动电电位的影响程度大于 Ca^{2+} , 其被黑土吸附的能力高于二价阳离子。因此在覆雪期内,相比于受到环境因子的影响, K^+ 的含量更倾向于受到土壤胶体表面阳离子置换的影响。同 K^+ 一样, Cl^- 、 SO_4^{2-} 的含量也未对环境因子表现出显著的响应关系,这两种阴离子在土壤中受到阴离子负吸附的影响,对于土壤胶体表面的吸附及交换过程参与度低,更多起到维持土壤未冻水中电荷平衡的作用。 SO_4^{2-} 所受阴离子负吸附的强度高于 Cl^- , 因此雪被去除处理导致的土壤 pH 降低将减弱土壤胶体对于 SO_4^{2-} 的阴离子负吸附强度,使其含量提升。

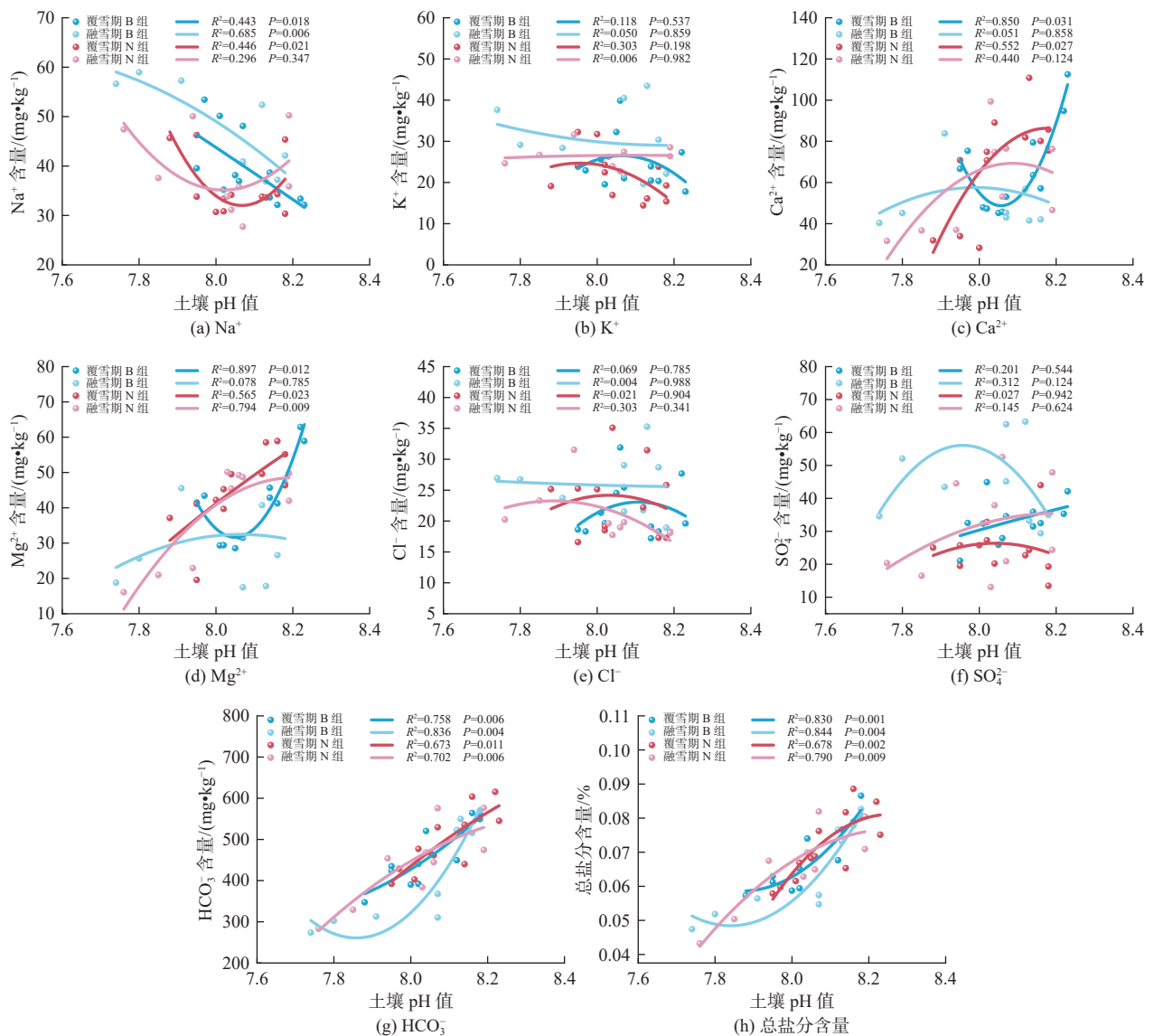


图 6 水溶性盐分与 pH 拟合结果

Fig. 6 Fitting results of water-soluble salt and pH

3.2 融雪期雪被去除处理对水溶性盐分运移的影响

本试验发现,融雪期土壤的盐分总量受雪被去

除处理影响不显著,但各盐组分的含量分布呈现出差异,且融雪期内不同雪被处理方式下含水率对盐分总量的影响均高于温度。雪被去除处理使土壤

在融雪期缺少水分补给^[32],土壤融化过程中重力水入渗所携带的盐分含量少于自然积雪处理,因此两种处理下土壤盐分总量基本持平。在覆雪期过渡至融雪期时间内,土壤中携带盐分的液态水含量由受冻结状态土壤温度的影响逐渐转变至受融化状态土壤含水率的影响。试验观察到,融雪期末不同雪被处理方式下土壤盐分总量随深度降低而逐渐升高,且雪被去除处理下的不同深度土壤盐分总量分布更加不均。这说明水盐运移在融雪期仍然不同步,盐分运移滞后于水分运移,携带盐分的土壤毛细水在未上升至土壤表层时就在蒸发作用下以气体形式消失,导致盐分在土壤底层滞留。

融雪期土壤蒸发过程降低了土壤水分,促使盐分随水分向表层土壤迁移并积累^[33],而且不同盐组分自身运移速率的差异导致其被保留在不同深度的土层中^[33]。有学者通过土柱淋滤试验发现,Na⁺和Cl⁻的淋失量均高于Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻^[34],并且浸出过程中盐组分容量的递减顺序为Na⁺>K⁺>Ca²⁺>Mg²⁺^[35],野外试验也表明融雪期阳离子的迁移能力为Na⁺>Mg²⁺>Ca²⁺^[18]。本试验也得出类似的结论,对比覆雪期末,融雪期末雪被去除组土壤Na⁺、K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻含量仍然高于自然积雪组,且Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻含量低于自然积雪组,说明运移速率更高的Na⁺、Cl⁻在蒸发强度更大的雪被去除组土壤中的表聚现象显著。由于受到离子电荷、水化半径等特征影响,Ca²⁺、Mg²⁺在盐分运移过程中通常表现出相似的特性^[36-37],因此两者的迁移速率均弱于Na⁺、Cl⁻,在土层中呈现出底聚特性。有研究表明,盐分向土壤表层聚集的过程中,Na⁺的水解过程产生的OH⁻将与HCO₃⁻结合生成CO₃²⁻,进而与Ca²⁺形成CaCO₃沉淀^[38],导致表层土壤中HCO₃⁻含量的降低^[39]。对比本试验结果,雪被去除组土壤的Na⁺含量显著高于自然积雪组,以沉淀形式停留在运移过程中的碳酸盐沉淀含量相应增加,使得运移至耕作层的HCO₃⁻含量减少。加之雪被去除处理下土壤毛细水无法充分地将盐分运移至上层土壤,即使自然积雪组土壤有充足的融雪补给且重力水入渗的过程中流失了大量的盐分,雪被去除组土壤的HCO₃⁻含量依旧少于自然积雪组。这一结果将引起土壤碱性的降低,使得土壤胶体双电层内电荷密度降低,促进了Na⁺、K⁺对土壤胶体Ca²⁺、Mg²⁺吸附点位的阳离子交换过程,使Ca²⁺、Mg²⁺含量下降,同时降低了土壤对Cl⁻、SO₄²⁻的阴离子负吸附强度,使两者的含量上升。

最终导致相邻土壤胶体间的公共双电层距离增加并破坏土壤颗粒的絮凝状态^[40],土壤的持水能力因此被削弱。总体而言,冬季土壤雪被覆盖的消失并未显著改变作物生长季前的土壤盐分总量,但显著改变了各盐组分的含量分布占比,这将对土壤原有的弱碱性水平以及土壤结构稳定性构成负面影响。

4 结论

冬季东北地区农田黑土有无雪被覆盖处理条件下水溶性盐分总量均在覆雪期呈现升高趋势,在融雪期呈现降低趋势。覆雪期温度对土壤盐分总量及Na⁺、K⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻含量的影响大于含水率,融雪期含水率对土壤盐分总量及Na⁺、K⁺、HCO₃⁻含量的影响大于温度。雪被去除处理使冬季东北地区农田黑土Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻含量显著降低,Na⁺、K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻含量显著上升,引起土壤正常范围内的碱性降低。

参考文献:

- [1] GAO L, EBTEHAJ A, COHEN J, et al. Variability and changes of unfrozen soils below snowpack[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(4): e2021GL095354. DOI: 10.1029/2021GL095354.
- [2] LOPEZ-MORENO J I, POMEROY J W, ALONSO-GONZALEZ E, et al. Decoupling of warming mountain snowpacks from hydrological regimes[J]. *Environment Research Letters*, 2020, 15: 114006. DOI: 10.1088/1748-9326/abb55f.
- [3] 盛乃宁, 鞠琴, 顿珠加措, 等. 黄河源区冻土变化特征及其与温度的关系[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(5): 843-852. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2021.0088.
- [4] LUO D L, JIN H J, BENSE V F, et al. Hydrothermal processes of near-surface warm permafrost in response to strong precipitations events in the headwater area of the Yellow River, Tibetan Plateau[J]. *Geoderma*, 2020, 376: 114531. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114531.
- [5] KROPP H, LORANTY M M, NATALI S M, et al. Shallow soils are warmer under trees and tall shrubs across Arctic and Boreal ecosystems[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16: 015001. DOI: 10.1088/1748-9326/abc994.
- [6] FU Q, HOU R J, LI T X, et al. The functions of soil water and heat transfer to the environment and associated response mechanisms under different snow cover conditions[J]. *Geoderma*, 2018, 340: 259-268. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.03.022.
- [7] 李娟, 韩霁昌, 张扬, 等. 盐碱地综合治理的工程模

- 式[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(3): 188-193. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.03.032.
- [8] 杨帆, 贾伟, 杨宁, 等. 近30年我国不同地区农田耕层土壤的pH变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(7): 1213-1227.
- [9] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [10] ZOU Y, SUN P, MA Z, et al. Snow cover in the three stable snow cover areas of China and spatio-temporal patterns of the future[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3098. DOI: 10.3390/rs14133098.
- [11] MAURER G E, BOWLING D R. Seasonal snow-pack characteristics influence soil temperature and water content at multiple scales in interior western US mountain ecosystems[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(6): 5216-5234. DOI: 10.1002/2013WR014452.
- [12] ROUT S, RAVI P M, KUMAR A, et al. Study on speciations and salinity-induced mobility of uranium from soil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(3): 2273-2281. DOI: 10.1007/s12665-015-4218-9.
- [13] HEIJMANS MMPD, MAGNUSSON R I, LARA M J, et al. Tundra vegetation change and impacts on permafrost[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(1): 68-84. DOI: 10.1038/s43017-021-00233-0.
- [14] 吴道勇, 赖远明, 马勤国, 等. 季节冻土区水盐迁移及土体变形特性模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(2): 465-476. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.02.020.
- [15] WU D Y, ZHOU X Y, JIANG X Y. Water and salt migrations with phase change in saline soil during freezing and thawing processes[J]. *Groundwater*, 2017, 56(5): 742-752. DOI: 10.1111/gwat.12605.
- [16] ZHANG Y T, HOU K, QIAN H, et al. Characterization of soil salinization and its driving factors in a typical irrigation area of Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 837: 155808. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155808.
- [17] WANG M Q, ZHU Y, ZHAO T X, et al. Chemical characteristics of salt migration in frozen soils during the freezing-thawing period[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 606: 127403. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127403.
- [18] LIU Y W, WU J W, ZHAO H, et al. Ions transport in seasonal frozen farmland soil and its effect on soil salinization chemical properties[J]. *Agronomy-Basel*, 2023, 13(3): 660. DOI: 10.3390/agronomy13030660.
- [19] SHEN J J, CHEN Y T, WANG Q, et al. Spatiotemporal variation in saline soil properties in the seasonal frozen area of Northeast China: A case study in Western Jilin province[J]. *Water*, 2023, 15(10): 1812. DOI: 10.3390/w15101812.
- [20] 王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 等. 气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 1967-1978. DOI: 10.13227/j.hjcx.202007204.
- [21] 王晓巍. 北方季节性冻土的冻融规律分析及水文特性模拟[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.
- [22] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 北京: 2版. 中国农业出版社, 2006.
- [23] 赵林, 胡国杰, 邹德富, 等. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1233-1246. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.006.
- [24] LI S T, CHEN H E, CHEN Z F. Water and salt migration characterization in NaHCO₃ saline soils during unidirectional freezing conditions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, 213: 103940. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103940.
- [25] WAN X S, GONG F M, QU M F, et al. Experimental study of the salt transfer in a cold sodium sulfate soil[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(4): 1573-1585. DOI: 10.1007/s12205-019-0905-5.
- [26] WANG Y B, LIU X, LV M X, et al. Mechanisms and influencing factors of hydrothermal processes in active layer soils on the Qinghai-Tibet Plateau under freeze-thaw action[J]. *Catena*, 2023, 220: 106694. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106694.
- [27] 郑丽萍, 甘永德, 魏加华, 等. 基于 SHAW 模型高寒区冻融土壤水热耦合过程数值模拟[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(6): 194-204. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.06.018.
- [28] WANG R Q, HU Y X, YUAN X H, et al. Unsynchronized migrations of different salt ions and ice microstructure development during unidirectional freeze-thaw[J]. *Desalination*, 2022, 549: 116326. DOI: 10.1016/j.desal.2022.116326.
- [29] LI Z Y, CAO Y D, TANG J, et al. Relationships between temporal and spatial changes in lakes and climate change in the saline-alkali concentrated distribution area in the southwest of Songnen Plain, Northeast China, from 1985 to 2015[J]. *Water*, 2020, 12(12): 3557. DOI: 10.3390/w12123557.
- [30] 侯晨悦, 王勇, 李凡, 等. 冻结状态下盐渍化土壤中水溶性盐基离子含量高光谱反演[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(1): 100-107.
- [31] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [32] 王子龙, 付强, 孟军, 等. 松嫩平原冰雪融化期黑土水分变化规律[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(1): 173-175. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.01.039.
- [33] 戴长雷, 于淼, 宋成杰, 等. 冻土水文地质学研究进展[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(4): 782-801. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0080.
- [34] ZHAO X M, XIA J B, CHEN W F, et al. Transport characteristics of salt ions in soil columns planted

- with *Tamarix chinensis* under different groundwater levels[J]. *Plos One*, 2019, 14(4): e0215138. DOI: 10.1371/journal.pone.0215138.
- [35] KONG X F, JIANG X X, XUE S G, et al. Migration and distribution of saline ions in bauxite residue during water leaching[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(3): 534-541. DOI: 10.1016/S1003-6326(18)64686-2.
- [36] XING X G, KANG D G, MA X Y. Differences in loam water retention and shrinkage behavior: Effects of various types and concentrations of salt ions[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 167: 61-72. DOI: 10.1016/j.still.2016.11.005.
- [37] BORBA R P, RIBEIRINHO V S, DECAMARGO O A, et al. Ion leaching and soil solution acidification in a vadose zone under soil treated with sewage sludge for agriculture[J]. *Chemosphere*, 2018, 192: 81-89. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.112.
- [38] 张宁霞, 张爱花, 刘彦辉. 松嫩平原碳酸盐渍土的膨胀特性研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(5): 111-114.
- [39] 王玉龙, 常立君, 李舒洁. 冻融循环作用下上覆荷载对盐渍土水盐迁移及变形规律的影响研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(2): 142-153. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.02.014.
- [40] 许端平, 刘渚白, 谷长建, 等. 不同离子对黑土胶体在土壤中运移的影响[J]. *地球与环境*, 2014, 42(3): 333-339. DOI: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2014.03.019.

Effects of snow removal on water-soluble salt content of farmland black soil in Northeast China

WANG Zilong, TENG Huaihao, JIANG Qiuxiang, LIU Chuanxing, WANG Kai, SHAN Jiaxun

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

Abstract: Global warming has profoundly changed the pattern of snow cover in the middle latitudes. In order to explore the effect of snow cover change on the water-soluble salinity of farmland black soil in the northeast black soil region, the method of artificial snow removal was adopted in the field, and the snow removal test group (Bare Ground) and the natural snow control group (Normal Ground) respectively were set up. The content changes of 7 kinds of water-soluble salt components (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) in two groups of 0-30 cm farmland black soil were studied.

The test results showed that the total salt content of soil was significantly reduced by snow removal during the snow cover period, and the average salt content of group B and group N increased by 107.22 and 129.54 mg/kg, respectively, compared with the beginning of the test period. The contents of Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and HCO_3^- were significantly affected by the temperature during the snow cover period, and the four salt components in group B were increased by 10.47%, -5.79%, -10.29% and -7.60%, respectively, compared with group N. The total amount of soil salt in group B and group N was basically the same during the snowmelt period, and the moisture content in this period had a significant impact on the contents of Na^+ , Mg^{2+} and HCO_3^- . The three salt components in group B soil increased by 16.33%, -33.60% and -10.38%, respectively, compared with group N. During the experiment period, the contents of HCO_3^- and bivalent cations (Ca^{2+} and Mg^{2+}) in the soil were significantly reduced, while the contents of monovalent cations (Na^+ , K^+) and two acid ions (Cl^- and SO_4^{2-}) were significantly increased under the snow removal treatment. HCO_3^- has the highest effect on the total salt content, and the decrease of HCO_3^- content caused by snow removal will lead to the decrease of soil pH value by 0.04 and 0.03 in the snow cover period and the snow melt period, respectively.

In general, the removal of snow in winter redistributed the salt content of the farmland black soil before the crop growing season in Northeast China, which caused the decrease of soil alkalinity and adversely affected the flocculation state of soil particles. Through studying the effect of snow removal on the water-soluble salt content of farmland black soil in the northeast black soil region, a scientific basis is provided for exploring the change of black soil salt dynamics and environmental stability under the influence of climate warming.

Key words: snow removal; soil salinity; soil ion; farmland black soil