

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.006

王子龙, 滕怀淏, 姜秋香, 等. 积雪变化对东北农田黑土盐基离子及有效硅铝含量的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 147-156.

WANG Zilong, TENG Huaihao, JIANG Qiuxiang, et al. Effects of snow cover change on the content of base ions and available silicon and aluminum of black soil in Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 147-156.

# 积雪变化对东北农田黑土盐基离子及有效硅铝含量的影响

王子龙, 滕怀淏, 姜秋香, 刘传兴, 单家珣, 王 凯

(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘 要:** [目的] 为探究冬季积雪深度变化下东北农田黑土盐基离子及有效硅铝含量的季节性变化特征。[方法] 采用人工控制积雪深度的方法, 通过测定除雪处理组(SR)、减雪处理组(SL)、自然积雪对照组(C)、增雪处理组(SA)的东北农田黑土环境因子(温湿度、含水率、pH、总有机碳)、盐基离子、有效硅以及活性铝, 分析土壤盐基离子及有效硅铝的含量变化过程, 以及两者对土壤环境因子的响应关系。[结果] 积雪深度的降低使季节性雪被覆盖下黑土受到积雪的保温作用减弱, 0—30 cm 土壤温度及湿度(未冻水含量)显著下降, 使水盐运移过程中未冻水携带的  $\text{HCO}_3^-$  含量减少, 土壤平均 pH 受  $\text{HCO}_3^-$  含量影响分别变化  $-0.06$ ,  $-0.04$ ,  $-0.02$ ,  $0.01$ 。土壤的碱性降低, 低价阳离子对高价阳离子在土壤胶体吸附电位的置换能力增强, 使得交换态一价阳离子( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ )含量升高, 同时使交换态及碳酸盐态二价阳离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ )含量降低。碳酸盐态二价阳离子与交换态  $\text{Na}^+$  分别对 TOC 含量构成正向和负向的影响, 使土壤平均总有机碳(TOC)含量随积雪深度的降低分别增长 0.87, 1.09, 1.32, 1.48 g/kg。盐基离子与土壤 pH、TOC 的相互影响关系使在积雪深度降低的条件下土壤 pH 与 TOC 含量降低, 进而对土壤有效硅铝含量构成间接影响。TOC 含量的降低削弱了土壤对低活性腐殖酸铝(Al-HA)的固持作用, pH 的降低促进低活性铝向高活性交换态铝(Ex-Al)与单聚体羟基铝(Hy-Al)的转化, 土壤铝毒性提升, 同时促进有效硅的溶解, 造成土壤硅的流失。[结论] 气候变暖引起的中高纬度地区季节性积雪覆盖面积减少将影响冬季东北地区农田黑土的物质能量分布状态, 并由此改变生长季节农作物的生长发育环境, 研究提示为冬季东北黑土区土壤矿质元素的季节性变化过程提供了一定的科学依据。

**关键词:** 积雪变化; 农田黑土; 盐基离子; 有效硅; 活性铝

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0147-10

## Effects of Snow Cover Change on the Content of Base Ions and Available Silicon and Aluminum of Black Soil in Northeast China

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

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

**Abstract:** [Objective] In order to investigate the seasonal changes of base ions and available silicon and aluminum contents of black soil in northeast China under the change of snow depth in winter. [Methods] The environmental factors (temperature and humidity, moisture content, pH, total organic carbon), base ions, available silicon and activated aluminum of black soil in northeast China farmland were measured in snow removal group (SR), snow reduction group (SL), natural snow control group (C) and snow enhancement group (SA) were determined by artificial control of snow depth. The change process of the content of base ions and available silicon and aluminum in soil and their response to soil environmental factors were analyzed. [Results] The decrease of snow depth weakened the heat preservation effect of snow on black soil under seasonal snow cover, and the temperature and humidity (unfrozen water content) of 0—30 cm soil decreased significantly, which reduced the  $\text{HCO}_3^-$  content carried by unfrozen water during water and salt migration.

收稿日期: 2023-06-16

修回日期: 2023-07-27

录用日期: 2023-08-10

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-01-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(52179035, 51579045); 黑龙江省自然科学基金项目(YQ2019E004)

第一作者: 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

http://stbxb.alljournal.com.cn

The average pH of the soil was affected by the  $\text{HCO}_3^-$  content by the changes of  $-0.06$ ,  $-0.04$ ,  $-0.02$ , and  $0.01$ , respectively. With the decrease of soil alkalinity, the substitution ability of low-priced cations to high-priced cations in soil colloidal adsorption potential was enhanced, which increased the contents of exchange monovalent cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), and decreased the contents of exchange and carbonate bivalent cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ). Carbonate bivalent cation and exchange  $\text{Na}^+$  had positive and negative effects on TOC content, respectively, and the mean total organic carbon (TOC) content increased by  $0.87$ ,  $1.09$ ,  $1.32$  and  $1.48$  g/kg with the decrease of snow depth, respectively. The interaction between base ions and soil pH and TOC resulted in the decrease of soil pH and TOC content under the condition of reduced snow depth, which had an indirect effect on soil available silicon and aluminum content. The decrease of TOC content weakened the soil retention of low-active aluminum humate ( $\text{Al-HA}$ ), and the decrease of pH promoted the conversion of low-active aluminum to high-active exchange aluminum ( $\text{Ex-Al}$ ) and monomer hydroxyl aluminum ( $\text{Hy-Al}$ ), which increased the soil aluminum toxicity, and promoted the dissolution of available silicon, resulting in the loss of soil silicon. [Conclusion] The reduction of seasonal snow cover in the middle and high latitudes caused by climate warming will affect the material and energy distribution of the black soil in Northeast China in winter, and thus change the growth and development environment of crops in the growing season. This study provided a certain scientific basis to reveal the seasonal variation process of soil mineral elements in the black soil region in Northeast China in winter.

**Keywords:** snow cover change; farmland black soil; base cations; activated silicon; active aluminum

Received: 2023-06-16

Revised: 2023-07-27

Accepted: 2023-08-10

Online(www.cnki.net): 2024-01-15

东北地区黑土是珍贵的土地资源,近年来东北某些地区的黑土受不合理的种植制度和施肥方式影响使得土壤呈现出酸化趋势<sup>[1]</sup>,这些人类活动将削弱土壤对酸碱性环境变化的缓冲能力同时弱化土壤结构,降低土壤盐基离子与硅等营养物质的有效性并提高铝等毒性物质的活性,使作物的生长发育状态受到威胁。

土壤中铝对作物的毒害研究已被频繁报道<sup>[2]</sup>,其存在将影响作物的生长发育状态及生物可利用性。硅对于缓解土壤铝毒害方面有利<sup>[3]</sup>,且硅对水稻等东北地区主要作物的增产有积极影响<sup>[4]</sup>。盐基离子对作物而言同样是重要的有效营养物质,作为土壤质量的重要表征,交换性盐基离子对维持土壤养分与酸碱缓冲性方面的影响不容忽视<sup>[5]</sup>。相关研究<sup>[6]</sup>表明,土壤交换性盐基离子总量与有效硅铝的含量变化均受到土壤酸碱性的影响,钙镁离子在 pH 变化下可通过取代土壤胶体表面的交换态铝来改善土壤抗酸化能力<sup>[7]</sup>,同时 pH 可改变土壤胶体对硅的吸附进而影响硅的有效性<sup>[6]</sup>,并且土壤在 pH 影响下可通过对硅铝胶体的吸附沉淀等过程形成硅铝酸盐,从而减轻铝对作物的胁迫<sup>[8]</sup>。此外,有机碳、交换性离子、矿物成分间的共同作用是维持土体结构稳定的关键<sup>[8]</sup>,钙镁铝硅等离子是土壤中重要的团聚剂,通过聚合土壤微团聚体从而减少微生物对有机质的分解<sup>[9]</sup>。因此,探究盐基离子与有效硅铝对于农业生产与农田生态稳定具有现实意义。

有研究<sup>[10]</sup>指出,冻结过程将导致土壤环境酸化、碱基阳离子损失与土壤团粒结构破坏,并降低胶体态硅铝的含量<sup>[11]</sup>,进一步影响盐基离子与硅铝在土壤中的有效性。决定土壤冻结状态的主要因素是积雪,积雪自身的高反照率和低导热率等特性,将改变土壤与大气的能量交换与温度传递过程<sup>[12]</sup>,进而影响土壤的冻结状态<sup>[13]</sup>。我国南方粮食产区多处于热带、亚热带地区,全年少雪。而东北黑土区处于典型的中高纬度地区,气候变化主要体现在冬季,独特的气候环境使土壤受季节性降雪影响长时间处于冻结状态。IPCC 报告<sup>[14]</sup>中指出,自 19 世纪 80 年代以来,全球气温上升了  $0.74$  °C,导致北半球季节性雪被覆盖面积减少<sup>[15]</sup>,有专家预测<sup>[16]</sup>全球部分中纬度地区将出现全年无积雪覆盖的情况,而部分地区反而会出现积雪深度增加的情况<sup>[17]</sup>。东北地区作为我国最大的商品粮基地之一,冬季结束后农田将迅速进入耕种状态,积雪变化的不确定性将通过对土壤冻结状态的改变而影响东北地区农田黑土现有的酸碱度水平与土体稳定性,进而影响作物生长发育季节土壤营养元素的供给能力与毒性物质的活性。

作为我国积雪分布范围最大的积雪稳定区之一<sup>[18]</sup>,东北地区积雪深度和面积在近 30 年的时间内呈减少趋势<sup>[19]</sup>,研究积雪变化下东北地区农田黑土矿质元素的季节性含量变化对东北黑土区养分管理及土壤生态具有现实意义。鉴于此,本研究通过对东

北地区农田黑土的积雪覆盖深度控制,以探究:(1)积雪变化下土壤盐基离子及有效硅铝含量的含量变化特征;(2)积雪变化下土壤盐基离子及有效硅铝含量的主要影响因素;(3)土壤盐基离子与有效硅铝之间的潜在联系。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究于2021年11月至2022年3月在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天,无霜期140天,年最大冻结深度为180 cm,无多年冻土层,全年平均降水量约为570 mm。结冰期为190天,最大土壤冻结深度为1.8 m,冬季降雪主要集中在12月至翌年2月,2月积雪覆盖深度达到最大,3月开始发生融雪<sup>[20]</sup>。

### 1.2 试验设计

将试验地平均分为4个处理组,分别设为除雪处理组(SR)、减雪处理组(SL)、增雪处理组(SA)与自然积雪对照组(C)。SR组样地采用人工清雪方式处理,SL组采用降雪量减半的清雪处理,SA组采用降雪量加倍的增雪处理,C组采用无人工干扰的自然降雪处理,每组样地均埋设土壤温湿度传感器(浙江东方智感有限公司)记录土壤温湿度数据。

将试验期划分为4个时间段:2021年11月1—20日设为雪被覆盖前期(BSC),取样1次;2021年11月20日至12月20日设为早雪期(ESC),取样1次;2021年12月20日至2022年2月20日设为深雪期(DSC),取样2次;2022年2月20日至3月6日设为积雪融化前期(BSM),取样1次。

使用取土器以人工钻取方式采集土壤,采用“五点取样法”对样地进行重复取样,土壤采集深度为30 cm的农田耕作层,按每5 cm深度分层采样,并将采集的土壤分别装入采集袋内待用。

### 1.3 试验方法与内容

试验采用土壤温湿度传感器获取土壤温湿度数据、烘干法测定土壤含水率、离子色谱法测定土壤 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量<sup>[21]</sup>,电位滴定法测定土壤pH与 $\text{HCO}_3^-$ 含量<sup>[22]</sup>,原子吸收光谱法测定土壤 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 含量<sup>[22]</sup>,比色法测定土壤有效硅铝含量<sup>[22]</sup>,总有机碳分析仪测定土壤总有机碳含量<sup>[23]</sup>。

### 1.4 数据处理与统计分析

使用SPSS Statistics 22.0(International Business Machines Corporations, USA)统计分析软件对试验数据进行标准化处理,以消除不同指标间量

纲及量级差距导致的影响,并对数据进行统计分析。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 $\alpha=0.05$ 。采用Origin 2021(Originlab, USA)软件绘制图表,并使用SPSS Amos 26.0(International Business Machines Corporations, USA)软件构建环境因子与盐基离子及有效硅铝间的结构方程模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 积雪深度变化情况

不同组别土壤表层的积雪深度变化情况见图1。试验期SR、SL、C、SA 4组样地平均积雪深度分别为0,13.06,23.75,44.87 cm。自2021年11月9日初次降雪后,SL、C、SA组土壤表面积雪逐渐累积,冬季土壤积雪深度总体上呈现先增大后减小的特点。

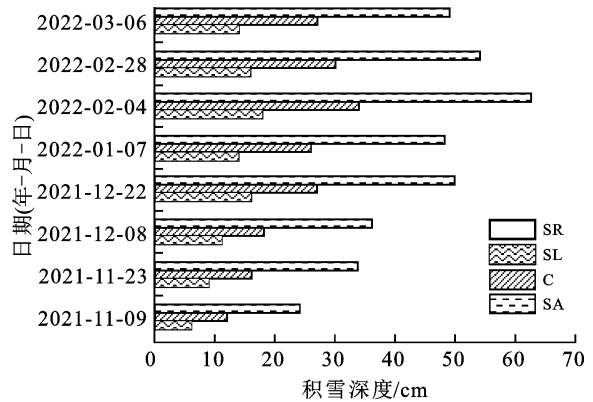


图1 积雪深度变化

Fig. 1 Variation of snow depth

### 2.2 土壤环境因子变化特征

不同积雪深度处理下土壤环境因子变化情况见表1。试验期不同积雪深度处理下土壤各层平均温度表现为 $T_{SA} > T_C > T_{SL} > T_{SR}$ ,说明积雪深度的降低使冬季土壤的整体温度显著下降。土壤平均湿度(液态体积含水率)呈现出 $\varphi_{SA} \approx \varphi_{SL} > \varphi_C > \varphi_{SR}$ 的特征,各组土壤湿度的大小关系在不同时期略有变化,总体上SL、SA组略高而SR组略低。SR、SL、C、SA 4组样地每5 cm土壤间的平均湿度差分别为0.36%,1.98%,1.48%,0.88%,平均含水率分别为21.41%,22.71%,21.99%,20.27%,这说明除去无积雪覆盖的SR组土壤外,积雪深度的降低将使每5 cm土壤间的未冻水差值以及质量含水率显著增加,且两者之间存在正相关关系。4组样地平均土壤pH较试验期初分别变化-0.06,-0.04,-0.02,0.01,同时各组土壤平均TOC含量分别增长0.87,1.09,1.32,1.48 g/kg,积雪深度的降低使平均土壤pH与TOC含量显著下降,且两者在同一处理下随时间推移均呈现先升高后降低的趋势。

表 1 土壤环境因子变化

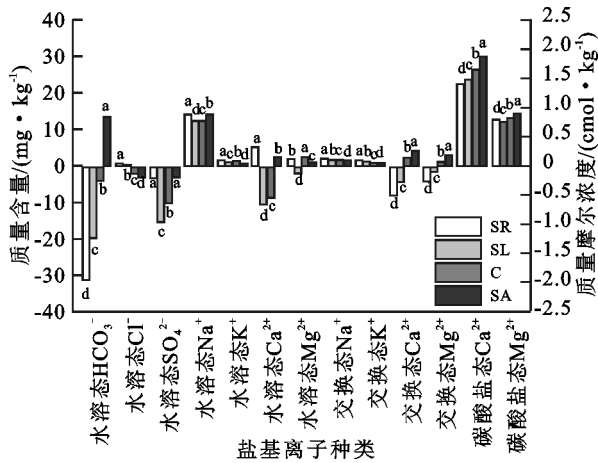
Table 1 Variation of soil environmental factors

| 处理  | 土壤温度/℃  |        |        |        | 土壤湿度/% |        |        |        | 土壤含水率/% |        |        |        | 土壤 pH |       |       |       | 土壤总有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> ) |        |        |        |
|-----|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|--------|--------|--------|
|     | SR      | SL     | C      | SA     | SR     | SL     | C      | SA     | SR      | SL     | C      | SA     | SR    | SL    | C     | SA    | SR                           | SL     | C      | SA     |
| BSC | 2.72a   | 2.95a  | 2.84a  | 2.86a  | 26.70a | 28.03a | 27.47a | 27.41a | 16.93a  | 16.72a | 16.75a | 16.63a | 7.99a | 7.99a | 7.99a | 7.98b | 21.07a                       | 20.98a | 21.01a | 21.05a |
| ESC | -3.68c  | -0.33b | -0.31b | 1.44a  | 13.61d | 24.26b | 23.61c | 27.54a | 18.89b  | 19.05a | 19.07a | 18.92b | 8.06a | 8.02b | 8.01c | 8.00d | 24.27a                       | 23.61b | 22.94c | 22.77d |
| DSC | -10.59d | -6.06c | -4.57b | -2.14a | 9.79c  | 13.32a | 12.36b | 13.16a | 20.02a  | 20.03a | 18.46b | 18.57b | 8.14a | 8.11b | 8.10c | 8.09d | 26.06a                       | 25.63b | 25.38c | 24.84d |
| BSM | -5.38d  | -3.37c | -2.73b | -1.98a | 11.20d | 14.14a | 12.82b | 12.14c | 21.41c  | 22.71a | 21.99b | 20.27d | 7.93d | 7.95c | 7.97b | 7.99a | 21.94d                       | 22.07c | 22.53b | 23.23a |

注:同列不同小写字母表示不同处理之间达到 5% 的差异显著水平。下同。

### 2.3 土壤盐基离子含量变化特征

不同积雪深度处理下土壤盐基离子各赋存形态含量变化情况见图 2。分析结果显示,水溶态离子中,Cl<sup>-</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>的变化量均低于 5 mg/kg,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与 Ca<sup>2+</sup>变化量略高,然而这 5 种水溶态组分变化量随积雪深度变化并未表现出显著的趋势特征。各组土壤 Na<sup>+</sup>变化量均高于 10 mg/kg,表明不同深度土壤的水溶态 Na<sup>+</sup>含量受到积雪深度的显著影响,然而其总含量均呈现增长趋势。各组土壤 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的变化量表现为 SR<SL<C<SA,其含量随积雪深度的降低由正向增长变为负向增长,是盐基离子中受积雪深度影响最显著的水溶态组分。



注:图中不同小写字母表示不同处理之间达到 5% 的差异显著水平。下同。

图 2 土壤盐基离子赋存形态含量变化

Fig. 2 Variation of the occurrence form content of soil base ions

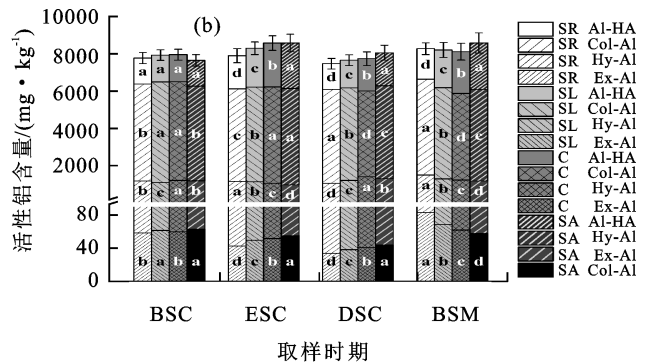
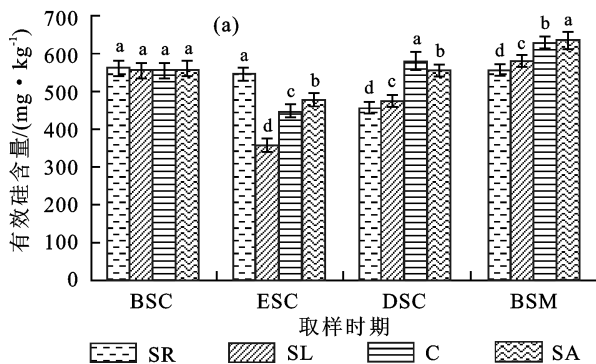


图 3 土壤有效硅铝赋存形态含量变化

Fig. 3 Variation of the occurrence form content of available silicon and aluminum in soil

交换态 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>的含量变化特点与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>相同,与碳酸盐态 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>相似。虽然 2 种形态的二价阳离子的变化量均表现出 SR<SL<C<SA 的特点,但区别在于交换态 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>的含量变化随积雪深度降低存在负向增长,而碳酸盐态 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>的含量变化随积雪深度降低始终保持正向增长,且变化量远高于交换态。交换态 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>的变化量表现为 SR<SL<C<SA,这与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>的变化趋势相反。因此,积雪深度的降低将显著增加交换态 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>的含量而减少交换态及碳酸盐态 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>的含量。

### 2.4 土壤有效硅铝含量变化特征

不同积雪深度处理下土壤有效硅铝含量变化情况见图 3。分析结果显示,试验期各组土壤有效硅含量先下降后上升,含量特征总体表现为 SR<SL<C<SA,呈现出随积雪深度降低有效硅含量下降的趋势。有效铝各赋存形态含量变化方面,各组土壤 Al-HA 含量始终表现为 SR<SL<C<SA,其含量随积雪深度的降低而显著减少。而 Col-Al 含量表现为 SR>SL>C>SA,其含量随积雪深度的降低而显著增加,这 2 种低活性铝含量随积雪深度变化呈现出相反的趋势特点。试验期 SR、SL、C、SA 4 组土壤 Ex-Al 含量变化分别为 38.07, 11.18, 3.34, -8.20 mg/kg,同时 Hy-Al 含量变化分别为 286.63, 191.00, 13.33, 2.75 mg/kg,这 2 种高活性铝含量均随积雪深度的降低而显著增加。

## 2.5 土壤水热对盐基离子及有效硅的影响

不同积雪深度处理下土壤水热与盐基离子及有效硅的拟合结果见图4。土壤水热对盐基离子及有效硅的含量变化呈现显著的负向影响。土壤含水率仅对  $\text{HCO}_3^-$  表现出小于 0.493 解释水平的负向影响。

响,交换态  $\text{Na}^+$ 、交换态  $\text{K}^+$ 、有效硅与土壤湿度的回归方程解释度较土壤温度更高,说明未冻水含量对三者的影响程度大于温度,相比之下碳酸盐态  $\text{Ca}^{2+}$ 、碳酸盐态  $\text{Mg}^{2+}$  对于土壤温湿度的响应则未表现出明显的倾向。

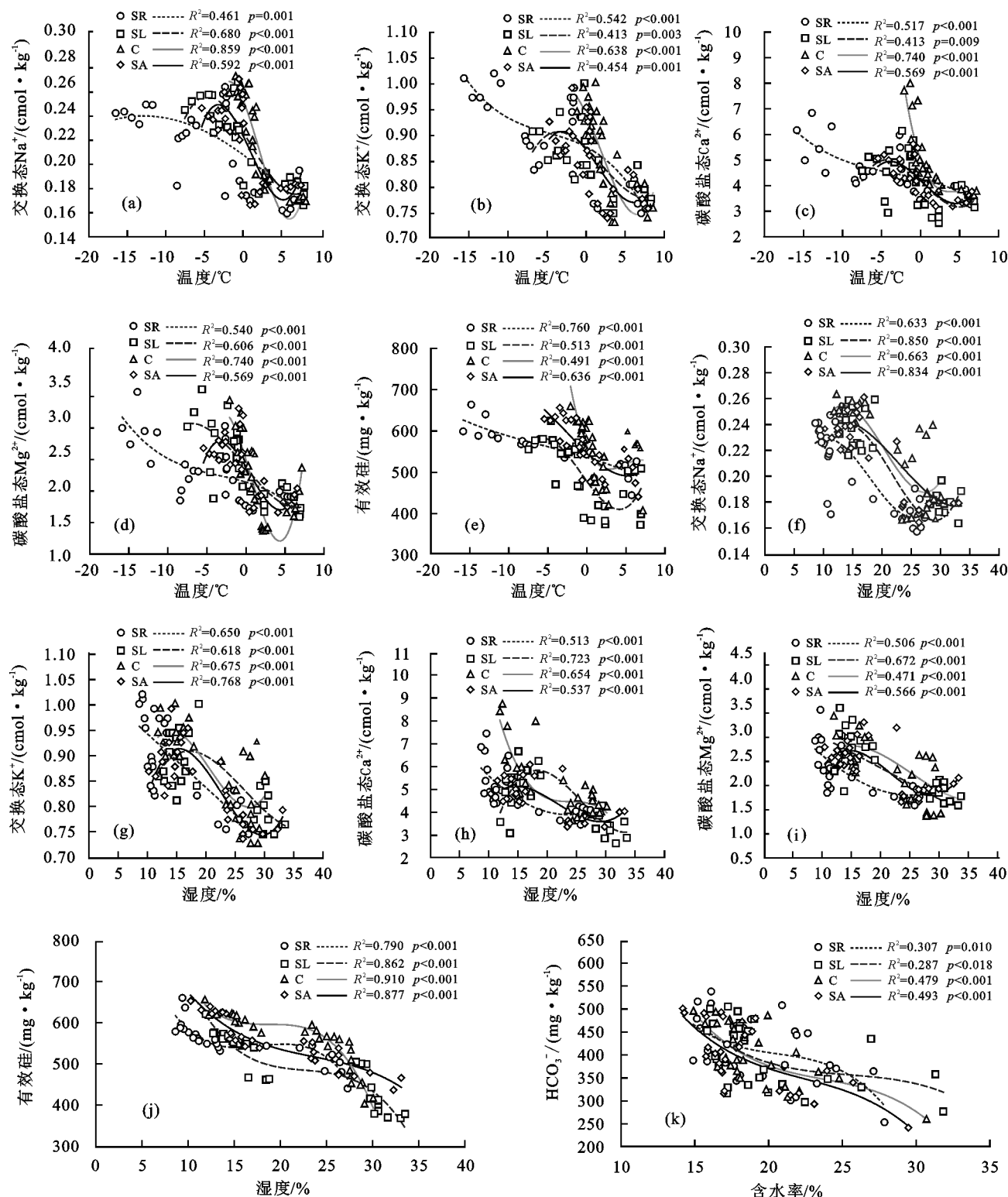


图4 土壤水热与盐基离子及有效硅的拟合结果

Fig. 4 The fitting results of soil moisture and heat with base ions and available silicon

## 2.6 土壤 pH 对盐基离子及有效硅铝的影响

不同积雪深度处理下土壤 pH 与盐基离子及有效硅的拟合结果见图 5。

土壤 pH 的增长对交换态  $\text{Na}^+$  的含量变化呈现

负向影响,回归方程解释度低于 0.362。同时交换态  $\text{Ca}^{2+}$ 、交换态  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、有效硅及  $\text{Col-Al}$  的含量变化受 pH 的正向影响,回归方程解释度均高于 0.516。

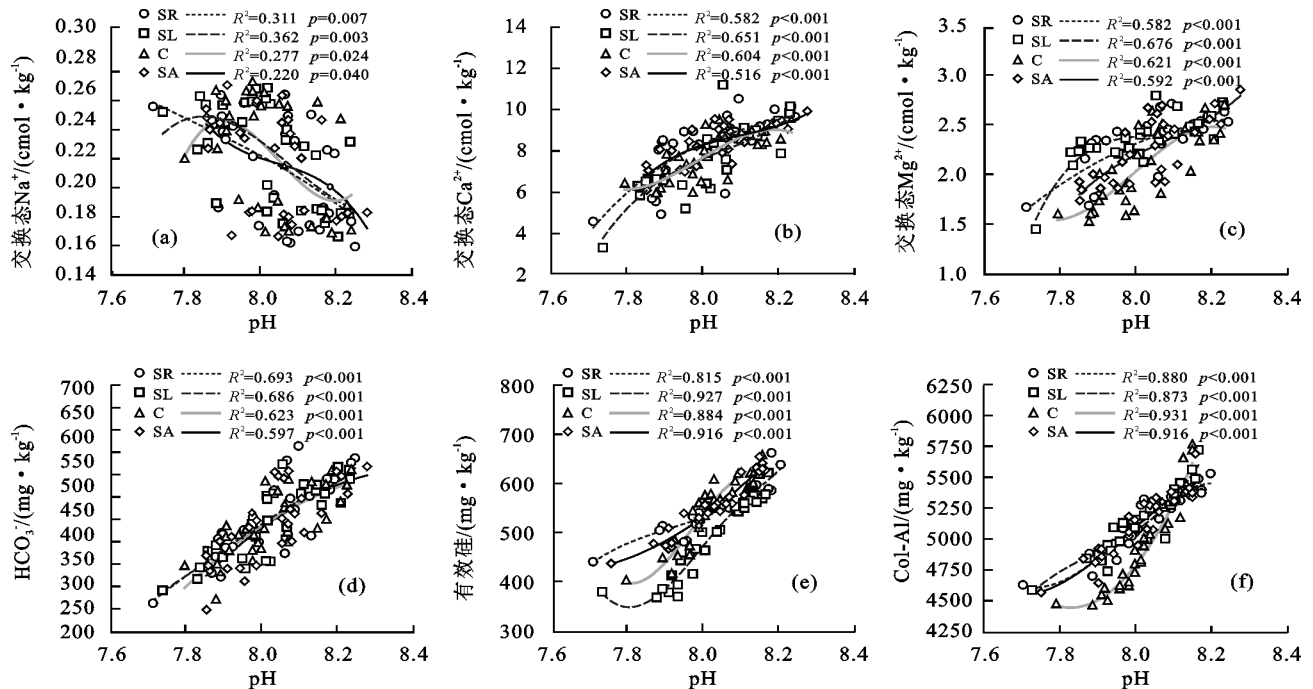


图 5 土壤 pH 与盐基离子及有效硅铝的拟合结果

Fig. 5 The fitting results of soil pH with base ions and available silicon and aluminum

## 2.7 土壤总有机碳对盐基离子及有效铝的影响

不同积雪深度处理下土壤总有机碳与盐基离子及有效硅的拟合结果见图 6。土壤总有机碳的增长对交换

态  $\text{Na}^+$  的含量变化表现为高于 0.857 解释水平的负向影响,对碳酸盐态  $\text{Ca}^{2+}$ 、碳酸盐态  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Al-HA}$  的含量变化表现为高于 0.302 解释水平的正向影响。

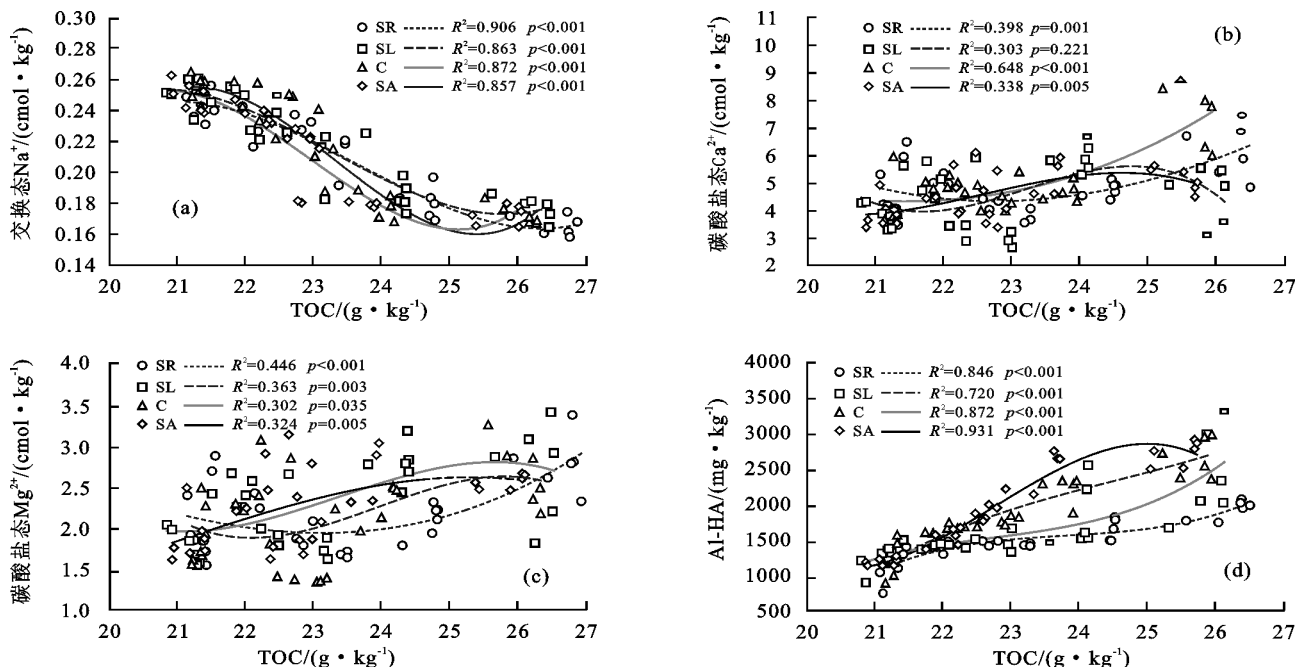


图 6 土壤总有机碳与盐基离子及有效硅铝的拟合结果

Fig. 6 The fitting results of soil total organic carbon with base ions and available silicon and aluminum

2.8 土壤盐基离子及有效硅铝对土壤环境因子的响应关系

为探究积雪深度变化下土壤环境因子、盐基离子及有效硅铝之间的影响关系及影响程度,分别对 SR、SL、C、SA 组土壤环境因子、盐基离子、有效硅铝指标构建结构方程模型。对不同组别土壤的所有试验指标进行信效度分析,分析结果通过信度检验(Cronbach 系数>0.6)与效度检验(KMO 值>0.5, Bartlett 显著水平<0.005)。经主成分分析,将具有共线性的观测变量(前变量)组成潜在变量,分别命名为 F1(土壤温湿度)、F2(碳酸盐态二价阳离子)、F3(土壤钠素)、F4(土壤钾素)、F5(水溶态二价阳离子)、F6(交换态二价阳离子)。结构方程模型与模型适配度见图 7,因子载荷量见表 2,标准化路径权重见表 3 和表 4。表 2 所示因子载荷量均高于 0.6,因此前变量通过信度检验,所有潜在变量的命题假设均成立,且潜在变量内部的 6 组前变量间具有极强的正相关水平,说明同一潜在变量内的前变量指标具有一致的变化趋势。权重(路径系数)代表指标之间变化趋势的解释占比及贡献度,结合图 7 所示模型路径与标准化权重结果,外生变量(环境因子)中 F1 与 TOC 之间表现出强负相关性,相关程度随积雪深度的降低而逐渐增强。F1 与土壤含水率之间同样表现出负相关性,但该影响程度较弱。说明随积雪深度的逐渐减少,土壤温湿度对 TOC 含量变化的影响逐渐增强,对土壤含水率变化的贡献度占比低于 40%。盐基离

子对土壤各指标的响应关系方面,土壤温湿度、TOC 对  $\text{Na}^+$  的负向影响程度最高,贡献度水平为  $-30.1\% \sim -57.4\%$ 。4 个处理组土壤  $\text{Na}^+$  对  $\text{K}^+$  的贡献度占比均高于 71.2%,一方面说明  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  离子之间运移趋势的高度一致,另一方面说明  $\text{K}^+$  对土壤环境因子的响应程度不及  $\text{Na}^+$ 。并且 F3、F4 中交换态离子的因子载荷量均高于其水溶态,这反映出交换态  $\text{Na}^+$ 、交换态  $\text{K}^+$  在土壤中的运移变化特征较水溶态而言被解释程度更高。F3 对 F6 的贡献度约为  $-39.6\% \sim -48.7\%$ ,影响程度高于  $\text{Ex-Al}$ 。说明  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ex-Al}$  与交换性  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的含量变化趋势呈负向相关。F1 对 F2 的含量变化权重为  $-65.8\% \sim -73.8\%$ ,高于 TOC(贡献度为  $37.9\% \sim 55.1\%$ )及  $\text{HCO}_3^-$ (贡献度约为  $27.1\%$ )对 F2 的正向贡献度水平。 $\text{HCO}_3^-$ 对 pH 的变化贡献度权重为  $89.7\%$ ,同时 pH 对 F5 起到中等程度的正向影响,总体贡献度小于  $44.8\%$ 。F5 对  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  的影响水平偏弱,总体解释率小于  $28.3\%$ 。

有效硅铝对土壤各指标的响应关系方面,F1(贡献度约为  $-82.6\%$ )及 pH(贡献度约为  $85.6\%$ )分别对有效硅构成相反的影响趋势,Al-HA 受到有效硅的负向影响(贡献度约为  $-40.0\%$ )并对 Col-Al 构成负向影响(贡献度约为  $-29.1\%$ ),Col-Al 同时还受到 pH(贡献度约为  $91.3\%$ )的正向影响,并对 Hy-Al(贡献度约为  $-56.0\%$ )构成负向影响,Ex-Al 的含量变化趋势与 Hy-Al 保持一致,贡献度水平高于  $92.3\%$ 。

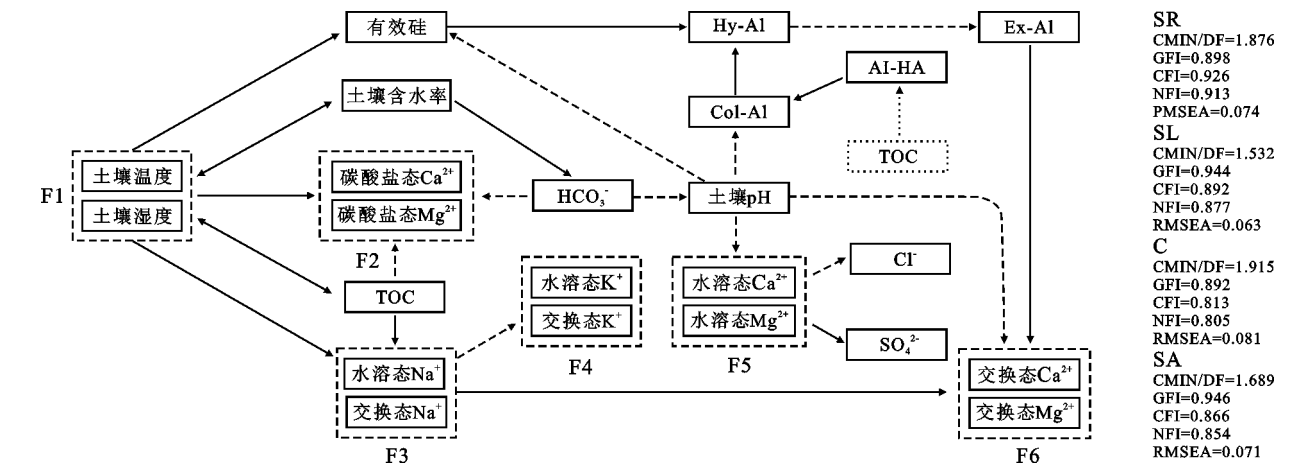


图 7 结构方程模型及模型适配度

Fig. 7 Structural equation model and model fit

表 2 模型因子载荷量

| 处理 | F1    |       | F2                    |                       | F3                |                   | F4               |                  | F5                   |                      | F6                   |                      |
|----|-------|-------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|    | 土壤温度  | 土壤湿度  | 碳酸盐态 $\text{Ca}^{2+}$ | 碳酸盐态 $\text{Mg}^{2+}$ | 水溶态 $\text{Na}^+$ | 交换态 $\text{Na}^+$ | 水溶态 $\text{K}^+$ | 交换态 $\text{K}^+$ | 水溶态 $\text{Ca}^{2+}$ | 水溶态 $\text{Mg}^{2+}$ | 交换态 $\text{Ca}^{2+}$ | 交换态 $\text{Mg}^{2+}$ |
| SR | 0.967 | 0.863 | 0.988                 | 0.984                 | 0.879             | 0.959             | 0.803            | 0.983            | 0.992                | 0.937                | 0.998                | 0.956                |
| SL | 0.930 | 0.897 | 0.728                 | 0.976                 | 0.738             | 0.992             | 0.622            | 0.981            | 0.986                | 0.928                | 0.991                | 0.569                |
| C  | 0.926 | 0.751 | 0.916                 | 0.781                 | 0.919             | 0.985             | 0.628            | 0.850            | 0.776                | 0.895                | 0.536                | 0.886                |
| SA | 0.738 | 0.691 | 0.925                 | 0.984                 | 0.771             | 0.962             | 0.761            | 0.868            | 0.673                | 0.911                | 0.841                | 0.970                |

表 3 环境因子标准化路径权重

Table 3 Standardized path weights of environmental factor

| 处理 | F1     |        |        |        | 土壤含水率  |       |                               | 土壤 pH |       |        |       | TOC   |        |       |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
|    | TOC    | F2     | F3     | 有效硅    | F1     | TOC   | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | F5    | F6    | Col-Al | 有效硅   | F2    | F3     | Al-HA |
| SR | -0.781 | -0.684 | -0.301 | -0.818 | -0.324 | 0.253 | -0.532                        | 0.448 | 0.828 | 0.945  | 0.864 | 0.402 | -0.574 | 0.945 |
| SL | -0.694 | -0.738 | -0.384 | -0.823 | -0.348 | 0.263 | -0.489                        | 0.331 | 0.865 | 0.921  | 0.874 | 0.385 | -0.492 | 0.921 |
| C  | -0.617 | -0.658 | -0.321 | -0.848 | -0.368 | 0.144 | -0.669                        | 0.365 | 0.857 | 0.876  | 0.805 | 0.551 | -0.553 | 0.876 |
| SA | -0.487 | -0.702 | -0.381 | -0.815 | -0.371 | 0.239 | -0.688                        | 0.411 | 0.821 | 0.908  | 0.879 | 0.379 | -0.494 | 0.908 |

表 4 盐基离子及有效硅铝标准化路径权重

Table 4 Standardized path weights of base ions and available silicon and aluminum

| 处理 | F3    |        | F5              |                               | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |       | Ex-Al  | Hy-Al | Col-Al | Al-HA  | 有效硅    |
|----|-------|--------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
|    | F4    | F6     | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | F2                            | 土壤 pH | F6     | Ex-Al | Hy-Al  | Col-Al | Hy-Al  |
| SR | 0.712 | -0.396 | 0.276           | 0.177                         | 0.284                         | 0.894 | -0.291 | 0.964 | -0.530 | -0.354 | -0.425 |
| SL | 0.824 | -0.427 | 0.245           | -0.112                        | 0.278                         | 0.907 | -0.323 | 0.948 | -0.537 | -0.327 | -0.408 |
| C  | 0.914 | -0.487 | 0.034           | -0.283                        | 0.258                         | 0.873 | -0.383 | 0.944 | -0.577 | -0.237 | -0.370 |
| SA | 0.882 | -0.402 | -0.140          | -0.212                        | 0.262                         | 0.914 | -0.268 | 0.923 | -0.595 | -0.246 | -0.396 |

### 3 讨论

#### 3.1 积雪变化对土壤盐基离子含量变化的影响

试验期各组土壤含水率均呈持续上升趋势,盐随水走,然而 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量受到含水率的负向影响。实际土壤分层测量发现,上层土壤含水率高于下层,而上层土壤 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量低于下层,说明冬季土壤水盐运移过程并不同步,盐分运移滞后于水分运移。积雪深度的降低使土壤温湿度显著下降,湿度下降即土壤未冻水含量下降,将减少未冻水中携带的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量。研究发现 Na<sup>+</sup> 对交换态 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 的含量变化起到中等程度的负向影响,这可能是土壤胶体表面离子交换吸附过程与冻结土壤水盐迁移过程共同作用的结果。东北黑土胶体表面呈电负性,高价态离子因其电负性大或水合半径小的特点可与土壤胶体形成更强的共价键,相较于低价态离子更易被土壤胶体吸附<sup>[24]</sup>。土壤水分迁移过程引起的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量减小将导致土壤整体 pH 降低, Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 在土壤胶体双电层内的吸附位置将被 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 所取代。同时在土体冻结过程中,未冻水受基质势的驱动将携带着大量盐基离子向上运移<sup>[25]</sup>,因此土壤阳离子间具有共同向上的运移趋势。有学者<sup>[26]</sup>发现,不同离子其自身的水化半径及水化自由能不同,与水分子间的结合能力差异导致其在冻结土壤中的扩散能力不同,冻结初期一价阳离子从冰相排出的时间早于二价阳离子。因此,Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 的含量变化趋势在多种因素的作用下表现出差异。

土壤 TOC 中的有机质可水解出大量负电荷官能团,对于阳离子的吸附起到积极作用,而本试验中 TOC 并未对交换性 Na<sup>+</sup> 的运移过程起正向影响。有学者<sup>[27]</sup>认为,Na<sup>+</sup> 含量的增加将导致土壤团聚体分散,释放出被团聚体物理保护的有机碳,从而使有机

碳的矿化作用增强<sup>[28]</sup>。同时有学者<sup>[29]</sup>表示,土壤中游离 CaCO<sub>3</sub> 的存在将形成 Ca<sup>2+</sup> 与有机质之间的共价键,从而抑制有机质的分解。对比本试验结果,碳酸盐态二价阳离子的含量变化过程受 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 及 TOC 的正向影响, Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 在土壤碱性环境下与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、TOC 形成碳酸盐沉淀或有机络合物<sup>[5]</sup>,而 Na<sup>+</sup> 通过对土体的分散机制以及与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 竞争有机质表面吸附电位的过程使两者与 TOC 含量变化的拟合趋势相反。

水溶态阳离子的含量仅占各阳离子总含量的少数,水溶态 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 含量变化与交换态 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 含量变化呈显著正相关趋势,说明水溶态一价阳离子含量始终与交换态一价阳离子总含量变化保持一致,两者保持着动态平衡。试验地黑土所含丰富的钙质使土壤 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 的含量具有一定差距,但两者在土壤中相同的赋存形态下有着密切的运移关系。水溶态阴离子中仅 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量变化受积雪深度影响显著,而 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 与 Cl<sup>-</sup> 的含量变化则未表现出明显趋势,这可能是两者在碱性土壤中受到阴离子负吸附的影响,在土壤胶体双电层内的吸附与解吸过程参与程度低所导致的。

#### 3.2 积雪变化对土壤有效硅铝含量变化的影响

试验结果表明,积雪深度变化引起的环境因子变化显著影响土壤有效硅铝的含量变化趋势,这一过程既依靠土壤酸性引起的土壤胶体及有机质对有效硅铝的吸附与解吸附过程实现,又依靠土壤碱性变化引起的铝形态转化过程实现。研究发现,土壤未冻水与有效硅的含量呈负相关,这是由于有效硅在土体中具有很强的流动性,未冻水的含量越低,有效硅在冻结土壤水分迁移过程中受到的影响越小,其含量可以得到有效的保留。土壤硅含量的增加通常伴随着

作物硅含量的增加<sup>[30]</sup>,积雪深度降低导致的土壤 pH 减小将促进土壤有效硅的溶解,不利于土壤胶体对硅的吸附,造成土壤硅素的浸出损失,从长远来看这将削弱硅的有效性。Hy—Al 的主要成分如  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  或被胶体牢固吸附的聚合态铝,以侧链的形式与有效硅中的 Si—O 键连接生成硅铝酸盐单体<sup>[31]</sup>,因而硅含量的降低将导致高活性的 Hy—Al 从硅铝酸盐中释放。有试验<sup>[32]</sup>表明,土壤中羟基铝离子与有机碳的含量呈正相关,本试验中积雪深度降低导致的土壤 TOC 含量下降将使有机质含量减少,整合在有机质表面的低活性 Al—HA 被释放,同时积雪深度降低引起的土壤 pH 降低过程将促使低活性的 Col—Al、Al—HA 向高活性的 Hy—Al、Ex—Al 转化<sup>[33]</sup>,使得土壤固持铝的能力削弱<sup>[34]</sup>。

### 3.3 积雪变化下土壤盐基离子与有效硅铝的影响关系

本试验中 Ex—Al 对交换态  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的含量运移趋势贡献度为负,这可能是  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{Al}^{3+}$  对土壤胶体表面吸附电位的竞争过程所致。除此以外,土壤盐基离子与土壤有效硅铝间再未表现出直接影响关系。而冻结土壤水分运移过程中携带的  $\text{HCO}_3^-$  将改变土壤 pH,进而间接影响土壤对硅的吸附与铝的形态转化,同时碳酸盐态二价阳离子和  $\text{Na}^+$  对 TOC 的结合也将间接影响土壤有效硅铝的含量。有研究<sup>[4]</sup>表明,钙、镁、硅元素的添加均利于缓解土壤铝对作物的胁迫效应,这是由于阳离子及氧化物(如活性  $\text{SiO}_2$ )含量的上升增加次生碳酸盐的形成与聚集,这些碳酸盐在  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  的作用下形成沉淀并充当土壤团聚体的初级黏合剂<sup>[7]</sup>,对土壤有机碳的封存有积极意义,而积雪深度的降低导致的  $\text{Na}^+$  含量上升则破坏这一过程<sup>[35]</sup>。

综上所述,全球变暖背景下积雪深度的降低导致的土壤环境因素变化将深刻影响土壤盐基离子的季节性含量变化特征,盐基离子通过对土壤酸碱度水平与土壤团粒结构稳定性的改变间接影响土壤有效硅铝的运移特征。

## 4 结论

(1)积雪深度的降低使东北农田黑土未冻水含量下降,导致水盐运移过程中  $\text{HCO}_3^-$  的携带量减少,土壤 pH 降低。土壤碱性削弱,引起交换态及碳酸盐态  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量的减少与交换态  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  含量的增加,破坏土壤团聚体稳定性进而降低土壤 TOC 含量。

(2)盐基离子通过对土壤 pH 与 TOC 含量的影响间接改变土壤有效硅铝的含量,TOC 含量的降低削弱土壤对铝的固持能力,使低活性的 Al—HA 含量下降。土壤 pH 的降低促进低活性的 Al—HA 向高活性的 Ex—Al、Hy—Al 转化,同时增加硅的溶解

流失而降低土壤对有效硅的吸附。

### 参考文献:

- [1] 梅楠,谷岩,李德忠,等.基于最小数据集的吉林省黑土耕层土壤质量评价[J].农业工程学报,2021,37(12):91-98.  
MEI N, GU Y, LI D Z, et al. Soil quality evaluation in topsoil layer of black soil in Jilin Province based on minimum data set[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 91-98.
- [2] SHETTY R, VIDYA C S N, PRAKASH N B, et al. Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review[J]. Science of the Total Environment, 2021, 765: e142744.
- [3] HODSON M J, EVANS D E. Aluminium-silicon interactions in higher plants: An update[J]. Journal of Experimental Botany, 2020, 71(21): 6719-6729.
- [4] 娄金华,陈猛猛,张士荣,等.磷硅肥配施对盐渍土壤水稻生长及养分吸收的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):263-269,369.  
LOU J H, CHEN M M, ZHANG S R, et al. Effects of phosphate and silicon fertilizer on rice growth and nutrient absorption in saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 263-269, 369.
- [5] HAILEGNAW N S, MERCL F, PRACKE K, et al. Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(5): 2405-2416.
- [6] HAYNES R J. What effect does liming have on silicon availability in agricultural soils? [J]. Geoderma, 2019, 337: 375-383.
- [7] 韩科峰,陈余平,胡铁军,等.硅钙钾镁肥对浙江省酸性水稻土壤的改良效果[J].浙江农业学报,2018,30(1): 117-122.  
HAN K F, CHEN Y P, HU T J, et al. Effects of silicon, calcium, potassium and magnesium fertilizer on acid paddy soil improvement in Zhejiang Province[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30(1): 117-122.
- [8] BRONICK C J, LAI R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [9] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [10] FITZHUGH R D, DRISCOLL C T, GROFFMAN P M, et al. Effects of soil freezing disturbance on soil solution nitrogen, phosphorus, and carbon chemistry in a northern hardwood ecosystem [J]. Biogeochemistry, 2001, 56(2): 215-238.
- [11] KIM E A, CHOI J H. Changes in the mineral element compositions of soil colloidal matter caused by a controlled freeze-thaw event[J]. Geoderma, 2018, 318: 160-166.
- [12] 蒋玲梅,崔慧珍,王功雪,等.积雪、土壤冻融与土壤水分

- 遥感监测研究进展[J].遥感技术与应用,2020,35(6):1237-1262.
- JIANG L M, CUI H Z, WANG G X, et al. Progress on remote sensing of snow, surface soil frozen-thaw state and soil moisture[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(6): 1237-1262.
- [13] 张小磊,周志民,刘继亮.季节性积雪消融对浅层土壤热状况的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):91-95.
- ZHANG X L, ZHOU Z M, LIU J L. Melting of seasonal snow cover and its influence on soil temperature conditions of shallow layer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 91-95.
- [14] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [15] GAO L, EBTEHAJ A, COHEN J, et al. Variability and changes of unfrozen soils below snowpack[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(4): e2021GL095354.
- [16] 尹家波,郭生练,顾磊,等.中国极端降水对气候变化的热力学响应机理及洪水效应[J].科学通报,2021,66(33):4315-4325.
- YIN J B, GUO S L, GU L, et al. Thermodynamic response of precipitation extremes to climate change and its impacts on floods over China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(33): 4315-4325.
- [17] BENISTON M, KELLER F, KOFFI B, et al. Estimates of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2003, 76(3): 125-140.
- [18] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2015.
- National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [19] 王付华,王梅,葛磊,等.大兴安岭地区近 31 年积雪与冻土变化分析[J].安徽农业科学,2010,38(28):15757-15759.
- WANG F H, WANG M, GE L, et al. Variation analysis of the snow and frozen soil in Daxinganling Area during 31 years[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(28): 15757-15759.
- [20] 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.
- WANG X W. Study of soil freezing and thawing law and simulation of hydrologic properties in the northern seasonally frozen soil area[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010.
- [21] 马兵兵,姜滢,罗燕,等.超声提取-离子色谱法测定土壤中 10 种水溶性阴离子[J].土壤,2019,51(6):1253-1256.
- MA B B, JIANG Y, LUO Y, et al. Determination of ten water-soluble anions in soil by ion chromatography with ultrasonic extraction [J]. Soils, 2019, 51(6): 1253-1256.
- [22] 全国农业技术推广服务中心.土壤分析技术规范[M].2 版.北京:中国农业出版社,2006.
- National Agricultural Technology Extension Service Center. Technical specification for soil analysis[M]. 2nd edition. Beijing: China Agricultural Press, 2006.
- [23] 何海龙,君珊,张学宽.总有机碳(TOC)分析仪测定土壤中 TOC 的研究[J].分析仪器,2014(5):59-61.
- HE H L, JUN S, ZHANG X K. Analysis of total organic carbon in soil by TOC analyzer[J]. Analytical Instruments, 2014(5): 59-61.
- [24] MAHANTA K K, MISHRA G C, KANSAL M L. Estimation of the electric double layer thickness in the presence of two types of ions in soil water[J]. Applied Clay Science, 2014, 87: 212-218.
- [25] 郝可心,肖辉杰,辛智鸣,等.河套灌区农田防护林网内土壤季节性冻融过程及水盐运移[J].水土保持学报,2022,36(1):231-237.
- HAO K X, XIAO H J, XIN Z M, et al. The seasonal freezing and thawing process of the soil and the characteristics of water and salt transport in the farmland shelter forest net in the Hetao irrigation district[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 231-237.
- [26] 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 SSRN Electronic Journal, 2022, 549: e116326.
- [27] 曾路生,高岩,李俊良,等.寿光大棚土壤团聚体中交换性盐基离子组成与土壤团聚性关系[J].水土保持学报,2011,25(5):224-228,233.
- ZENG L S, GAO Y, LI J L, et al. Relationship between the composing of exchangeable base cation in soil aggregate and soil glomeration of greenhouse in Shouguang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 224-228, 233.
- [28] 毛霞丽,邱志腾,张爽,等.不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系[J].环境科学,2020,41(6):2842-2851.
- MAO X L, QIU Z T, ZHANG S. Response of aggregate distribution to input straw and their linkages to organic carbon mineralization in soils developed from five different parent materials [J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2842-2851.

(下转第 164 页)

- [23] 张兴义,隋跃宇.农田土壤机械压实研究进展[J].农业机械学报,2005,36(6):122-125.  
ZHANG X Y, SUI Y Y. International research trends of soil compaction induced by moving machine during field operations[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(6):122-125.
- [24] 田口玄一,魏锡禄.信噪比(SN比)与动态特性[J].数理统计与管理,1983,2(4):21-24.  
TAGUCHI G T, WEI X L. Signal to noise ratio (SN ratio) and dynamic characteristics [J]. Mathematical Statistics and Management,1983,2(4):21-24.
- [25] 付强,侯仁杰,李天霄,等.冻融土壤水热迁移与作用机理研究[J].农业机械学报,2016,47(12):99-110.  
FU Q, HOU R J, LI T X, et al. Soil moisture-heat transfer and its action mechanism of freezing and thawing soil[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(12):99-110.
- [26] 龚萍,党晓宏,蒙仲举,等.生物结皮对沙质土壤水含量和水分入渗的影响[J].干旱区资源与环境,2022,36(9):120-125.  
GONG P, DANG X H, MENG Z J, et al. Effect of biological crusts on soil water infiltration in coal mining subsided sandy land [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2022,36(9):120-125.
- [27] ZHANG Z, MA W, FENG W J, et al. Reconstruction of soil particle composition during freeze-thaw cycling: A review[J].Pedosphere,2016,26(2):167-179.
- [28] 田俊峰,叶万军,杨更社.含水量及冻融循环对阳曲黄土压缩特性的影响分析[J].地下空间与工程学报,2015,11(4):933-939.  
TIAN J F, YE W J, YANG G S. Analysis on influence of moisture content and freeze-thaw cycle on compression characteristics of loess in Yangqu Region, Shanxi Province[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2015,11(4):933-939.
- [29] 郭冬楠,臧淑英,赵光影.冻融交替对不同年代排水造林湿地土壤微生物活性及有机碳密度的影响[J].冰川冻土,2017,39(1):175-184.  
GUO D N, ZANG S Y, ZHAO G Y. Effect of freezing and thawing cycles on soil microbial activity and organic carbon density in forest swamp wetland with various drainage afforestation years[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2017,39(1):175-184.
- [30] 高丽倩,赵允格,秦宁强,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响[J].自然资源学报,2012,27(8):1316-1326.  
GAO L Q, ZHAO Y G, QIN N Q, et al. Impact of biological soil crust on soil physical properties in the hilly Loess Plateau Region, China[J]. Journal of Natural Resources,2012,27(8):1316-1326.
- (上接第 156 页)
- [29] CLOUGH A, SKJEMSTAD J O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate[J].Soil Research,2000,38(5):1005-1016.
- [30] MA J F, NISHIMURA K, TAKAHASHI E. Effect of silicon on the growth of rice plant at different growth stages[J].Soil Science and Plant Nutrition, 1989,35(3):347-356.
- [31] 张艳萍,宗良纲,史艳芙.茶园土壤 pH 变化对土壤中铝特性的影响[J].土壤,2019,51(4):746-751.  
ZHANG Y P, ZONG L G, SHI Y F. Effects of soil pH on characteristics of soil Al in tea plantations[J]. Soils,2019,51(4):746-751.
- [32] 刘翔毓,王丽群,王鸿斌,等.硫酸铝和有机物料对盐碱土有机碳组成及复合体的影响[J].水土保持学报, 2022,36(5):387-392.  
LIU X Y, WANG L Q, WANG H B, et al. Effects of aluminum sulfate and organic materials on organic carbon composition and complex in saline-alkali soils [J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(5):387-392.
- [33] TEJNECKY V, DRABEK O, BORUVKA L, et al. Seasonal variation of water extractable aluminium forms in acidified forest organic soils under different vegetation cover[J].Biogeochemistry, 2010, 101 (1/3):151-163.
- [34] XU R K, QAFOKU N P, VAN RANST E, et al. Adsorption properties of subtropical and tropical variable charge soils: Implications from climate change and biochar amendment[J].Advances in Agronomy, 2016,135:1-58.
- [35] ZHANG J, WANG Q, WANG W H, et al. The dispersion mechanism of dispersive seasonally frozen soil in western Jilin Province[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2021,80(7): 5493-5503.