

引用格式: 杜子银, 王小丹, 洪江涛, 张青松. 冻融及牲畜排泄物作用下的高寒草地土壤物理特性和氮磷变化[J]. 山地学报, 2022, 40(1): 29-42.

DU Ziyin, WANG Xiaodan, HONG Jiangtao, ZHANG Qingsong. Effects of seasonal freeze-thaw cycles and livestock excreta returning on soil physical properties, and nitrogen and phosphorus dynamics in alpine grassland [J]. Mountain Research, 2022, 40(1): 29-42.

冻融及牲畜排泄物作用下的高寒草地土壤 物理特性和氮磷变化

杜子银^{1, 2, 3}, 王小丹^{2, 3}, 洪江涛^{2, 3*}, 张青松¹

(1. 西华师范大学 地理科学学院, 四川 南充 637009; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

3. 中国科学院申扎高寒草原与湿地生态系统观测试验站, 西藏 申扎 853199)

摘 要: 在青藏高原高寒草地生态系统中, 牲畜排泄物自身冻融及其降解过程调控其养分释放及返还效率, 影响草地土壤养分平衡和植被生长的养分供应。当前关于季节性冻融区草地土壤理化特性的研究, 多通过定点监测和室内冻融模拟等方式分析冻融循环对土壤物理结构、水热变化及碳氮动态等方面的影响, 尚缺乏关于草地土壤季节性冻融与牲畜排泄物耦合效应和作用机制方面的研究报道。本文以藏北高原季节性冻土区为例, 通过开展室内冻融模拟试验, 探究牲畜排泄物添加与土壤冻融作用下的高寒草地土壤物理特性及氮磷养分变化特征。结果表明: (1) 冻融模拟试验 30 d 后显著降低了 5~10 cm 和 10~15 cm 土壤含水量 ($P < 0.05$), 频繁的冻胀融沉导致土壤团聚体破碎增加了深层土壤粉粒含量。(2) 冻融作用增强了土壤氮矿化与硝化作用, 牲畜粪尿添加使得表土铵态氮和硝态氮含量最大值分别达到 $212 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $48.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。(3) 牲畜排泄物磷的释放和冻融作用下土壤磷的深层渗透是导致不同土层有效磷含量差异的主要因素。本研究有助于认识牲畜排泄物返还与草地土壤季节性冻融的耦合效应和作用机制, 并为优化牲畜排泄物管理模式、促进草地生态系统可持续发展提供理论指导。

关键词: 冻融; 牲畜排泄物; 矿化氮; 有效磷; 高寒草地; 青藏高原

中图分类号: S154.1

文献标志码: A

冻融作用是高纬度和高海拔地区土壤随温度变化冻结—融解的自然现象。频繁的冻融过程影响土壤理化和生物学性质^[1]。一般而言, 土壤冻融过程中水分的固—液相态转变调控土壤物理结构和水热特性, 改变地气间的能量平衡和水循环^[2]。在全球变暖背景下, 高纬度和高海拔区冻土活动层厚度增加、土壤水分和温度差异性变化等将导致冻融过程

更为复杂, 且这种现象在气候变化敏感和生态环境脆弱的青藏高原更加突出^[3]。

冻融过程不仅通过土壤固—液相态转化, 破坏团聚体结构和降低其稳定性, 对土壤物理性质产生影响, 还能改变土壤 pH、氧化还原电位 (Eh) 和碳氮过程等, 进而影响土壤化学特性^[1, 4]。研究表明^[2, 5-9], 土壤含水量、冻融格局和草地类型等是冻

收稿日期 (Received date): 2021-07-16; **改回日期** (Accepted date): 2022-01-06

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划项目 (2019YFD1100504); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0404); 国家自然科学基金 (41807109); 西华师范大学博士科研启动项目 (17E042) 和一般培育项目 (18B016)。[National Key Research and Development Program of China (2019YFD1100504); The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (2019QZKK0404); National Natural Science Foundation of China (41807109); The Doctoral Research Launch Fund Project and National General Cultivation Project of China West Normal University (17E042, 18B016)]

作者简介 (Biography): 杜子银 (1988-), 男, 重庆人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 高寒草地生态学。[DU Ziyin (1988-), male, born in Chongqing, Ph. D., associate professor, research on alpine grassland ecology] E-mail: duzy@cwnu.edu.cn

* **通讯作者** (Corresponding author): 洪江涛 (1986-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 高寒草地生态环境。[HONG Jiangtao (1986-), male, Ph. D., associate professor, research on alpine grassland ecological environment] E-mail: hongjiangtao@imde.ac.cn

融过程中影响土壤固—液相态变化规律、机械组成和团聚体稳定性等的重要因素。例如,藏北高寒草地的研究发现^[2],冻结初期土壤含水量迅速降低,融解初期温度升高使得浅层土壤含水量逐渐升高;青海南部高寒草地不同冻融期表层和亚表层土壤水分波动幅度较大,下层土壤对水分因子的敏感性较小^[5];反复冻融导致天然草地和沙化草地各层土壤黏粒含量均降低,粉粒和砂粒含量增加,且沙化草地土壤各层砂粒含量高于天然草地^[6]。此外,冻融循环次数增加使得黑土风干团聚体与水稳性团聚体中较大粒径组团聚体呈逐渐减小趋势,较小颗粒粒径组团聚体则呈增加趋势^[7-8]。而且,冻融过程中适宜的土壤含水量有助于增加黑土水稳性团聚体的稳定性^[7],土壤初始含水量是水稳性大团聚体关键影响因素^[9]。藏北高原是高寒冻土分布最集中的地带,地表覆被及水分变化等将对土壤冻融格局^[10]及其理化特性产生不同程度影响。

在青藏高原高寒草地生态系统中,牲畜排泄物自身冻融及其降解过程调控其养分释放及返还效率,影响草地土壤养分平衡和植被生长的养分供应^[11]。研究表明^[12],牲畜排泄物占所取食植物养分的 60%~99%,排泄物返还使得其成为草地碳氮转化的活跃点位。牲畜排泄物沉积会增加土壤养分空间异质性,进而可能对草地土壤养分循环和植被生产力等产生重要影响^[13]。非冻融期的研究发现,牦牛和藏绵羊粪便经过 93 d 降解后全氮含量显著降低,而全磷含量变化不明显^[14]。粪便施加显著增加土壤总氮含量^[15],且在增加土壤矿化氮含量方面表现较为迅速和突出^[16-17]。在土壤冻融条件下,外源性有机物料添加增加土壤碳含量^[18],氮添加显著增加了土壤铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)含量,而氮和水分添加在整个冻融期内对土壤硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)含量无显著影响^[19]。此外,冻融主要通过改变土壤微生物量、微生物群落组成和结构等影响氮的迁移与转化^[20],牲畜排泄物氮输入与土壤冻融交互作用可能对高寒草地土壤氮素过程的影响更为复杂。而且,冻融作用较对照处理明显增加粪便磷的释放速率和累积释放量^[21],可能通过增加冻融期粪便磷的返还效率改变土壤磷的有效性和迁移变化规律。

总体而言,当前关于季节性冻融区草地土壤理化特性的研究,多通过定点监测和室内冻融模拟等方式分析冻融循环对土壤物理结构^[7, 9]、水热变

化^[2, 6]及碳氮动态^[18, 20]等方面的影响,尚缺乏关于草地土壤季节性冻融与牲畜排泄物返还耦合效应和作用机制方面的研究报道,且关于冻融作用下土壤与外源性氮磷输入对天然草地养分过程的影响效应尚不清楚。探究两者的交互效应将对厘清冻融条件下草地土壤理化特性的变化特征和响应机制等具有重要意义。因此,本研究在参考相关学者的试验方法基础上^[7-8],拟通过开展冻融及牲畜排泄物返还室内模拟试验,探究土壤冻融与牲畜排泄物耦合作用下的高寒草地土壤机械组成、团聚体及氮磷养分的响应特性及变化规律,揭示牲畜排泄物返还对冻融期高寒草地土壤理化特性和养分过程的影响效应,以为优化牲畜排泄物管理模式、提升排泄物养分返还效率和促进草地生态系统的健康和可持续发展提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托中国科学院申扎高寒草原与湿地生态系统观测试验站(30°57'N, 88°42'E, 海拔 4675 m)进行,其行政上隶属于西藏自治区那曲市申扎县。气候特征以气压低、风沙大、寒冷干燥和无霜期短为典型特点。年日照时数为 2915.5 h,霜期持续天数达 279 d,年均气温 0℃,年均降水量 300 mm,且绝大部分降水发生在生长季 5—9 月^[14]。根据中国土壤系统分类划分方法,高寒草原土壤为寒性干旱土,土壤容重为 $1.49 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,小于 2 mm 的细土容重为 $1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。土壤 pH 为 8.72,有机碳、全氮和全磷含量分别为 0.88%、0.10% 和 0.06%^[22]。

1.2 试验设计

室内冻融模拟试验开始于 2020-10-10,结束于 2020-11-08。试验开始前,随机选取位于试验站附近放牧牦牛和藏绵羊宿营地的 10 头牦牛和 10 只藏绵羊,于次日清晨分别跟踪收集牛羊排泄的粪便和尿液样品,按照牲畜和粪尿类型分别将牛粪、牛尿、羊粪、羊尿放置于不同的干净塑料桶内,低温储存备用,收集直至试验所需的粪便或尿液样品量。同时,采集高寒草原样地表层原状土柱(直径 10 cm,深度 15 cm)置于定制的亚克力管状土柱中,作为室内冻融模拟的试验土体。

室内冻融模拟试验共设置 5 个处理,包括对照

(CK,无牲畜粪尿添加),添加牛粪(YD,Yak Dung),添加羊粪(SD,Sheep Dung),添加牛尿(YU,Yak Urine),添加羊尿(SU,Sheep Urine),每个处理设置3次重复(图1)。其中,粪便处理的土柱所添加的新鲜牛羊粪分别为300 g和21.4 g,尿液处理的土柱所添加的新鲜牛尿和羊尿分别为62.5 ml和17.2 ml。该添加量以野外牛羊粪尿实际氮返还量为参考进行测算^[23-25],本研究牛羊粪氮返还量分别为1549 kg·ha⁻¹和294 kg·ha⁻¹,牛羊尿氮返还量分别为237 kg·ha⁻¹和166 kg·ha⁻¹(表1)。各处理所添加的牛羊粪尿均通过人工模拟方式均匀铺设于各试验土柱表面。在该冻融模拟试验中,共设置3个相同批次的试验土柱分别用于不同冻融循环频次后牲畜粪便和土壤取样。模拟的冻融温度范围为-15℃~5℃,每日2次冻融循环,冻融时间30 d(该冻融温度主要以藏北高原冻融期实际冻融温度范围为参考值进行设定)。

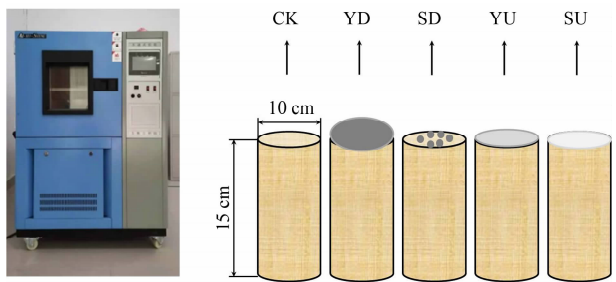


图1 冻融试验箱及土柱试验处理示意图

Fig.1 Freeze-thaw experiment chamber and the schematic diagram of soil column experimental treatments

表1 牦牛和藏绵羊粪尿初始理化指标特性

Tab.1 Initial physicochemical indexes in dung and urine of yak and Tibetan sheep

类别	含水量/%	全氮*	全磷*	NH ₄ ⁺ -N*	NO ₃ ⁻ -N*	有效磷/(mg·kg ⁻¹)
牛粪	70.2	13.6	1.87	315	29.9	248
羊粪	52.1	22.5	3.53	967	4.98	342
牛尿	—	2.98	6.60	788	—	—
羊尿	—	7.58	3.32	3508	—	—

注:全氮和全磷单位为g·kg⁻¹(牛粪和羊粪)或g·L⁻¹(牛尿和羊尿);NH₄⁺-N和NO₃⁻-N单位为mg·kg⁻¹(牛粪和羊粪)或mg·L⁻¹(牛尿和羊尿)。

1.3 取样与指标测定

室内冻融模拟试验分别设置降温冻结阶段、恒温稳定冻结阶段、升温融化阶段和恒温完全融化阶段各3 h,每12 h完成1次冻融循环,每日2次冻融循环。试验前通过参数设定合理调控冻融试验箱的降温 and 升温速率以确保各冻融阶段的实现。分别在模拟冻融5 d、15 d和30 d后采集经过10次、30次和60次冻融循环后的牛羊粪便以及0~5 cm、5~10 cm和10~15 cm土壤样品。牛羊粪尿全氮测定采用自动定氮仪法,全磷测定采用微波消解法,NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、有效磷测定采用连续流动分析仪法^[22,26-27];土壤含水量、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N测定分别采用烘干法和分光光度法^[26];土壤机械组成、全氮、有效磷测定分别采用比重计法、分光光度法、滴定法^[28-29];水稳性团聚体测定采用湿筛法^[30]。牦牛和藏绵羊粪尿初始理化性状具有较大差异(表1)。

1.4 数据处理与分析

试验数据用Origin 8.0绘图(Origin Lab Corp., Northampton, MA, USA),数据分析采用统计分析软件SPSS 18.0进行(v18.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)。采用LSD单因素方差分析对同一处理在不同冻融时间或同一冻融时间的不同处理间差异进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 土壤物理特性变化

对照(CK)处理含水量随土壤深度增加逐渐增大,试验初期0~5 cm、5~10 cm和10~15 cm土层含水量分别约为2.0%、3.0%和4.0%(图2)。在30 d冻融期内,CK处理0~5 cm土壤含水量无显著变化($P>0.05$)(图2a),但5~10 cm和10~15 cm土层含水量随冻融时间的延长逐渐降低($P<0.05$)(图2b、2c)。添加牛尿和羊尿在试验初期(5 d)显著增加0~5 cm和5~10 cm的土壤含水量($P<0.05$)(图2a、2b)。随着冻融作用的持续进行,YU和SU处理下所有层次土壤含水量均显著降低($P<0.05$)。与之不同的是,YD处理在5 d时仅表现为显著增加0~5 cm土壤含水量,但在冻融模拟试验的中后期显著增加所有层次的土壤含水量($P<0.05$)。相比之下,自身含水量相对较低的SD

处理在试验初期对土壤含水量无显著影响 ($P > 0.05$),而在经过 15 d 和 30 d 冻融后显著增加中下层的土壤含水量(图 2)。

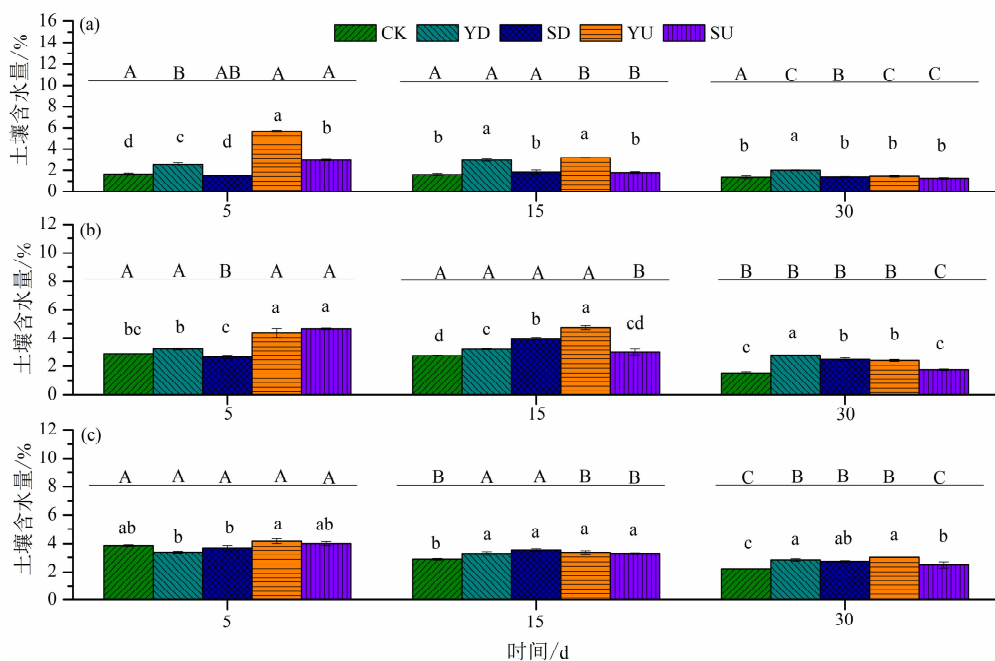
从土壤机械组成来看,各处理 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 土壤砂粒 (2 ~ 0.02 mm)、黏粒 (< 0.002 mm)、粉粒 (0.02 ~ 0.002 mm) 含量分别约占 70%、20%、10%,且随土壤深度增加砂粒含量逐渐增大(表 2)。在 30 d 冻融期内,CK 处理 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土壤砂粒、粉粒和黏粒含量均无显著变化 ($P > 0.05$) (表 2),但到试验期末 (30 d), 10 ~ 15 cm 土壤粉粒含量显著高于试验初期 (5 d) ($P < 0.05$) (表 2)。YU 处理使得试验前 5 d 中 0 ~ 5 cm 和 10 ~ 15 cm 土壤粉粒含量增加,但随着冻融循环次数的增加,促进效应有所减弱(表 2)。相比之下,添加牛粪对 5 ~ 10 cm 土壤砂粒、粉粒和黏粒含量的影响较为突出(表 2)。

通过分析不同冻融时间下原状土柱 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 土层不同粒径 (> 5 mm、3 ~ 5 mm、2 ~ 3 mm、1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm、0.25 ~ 0.5 mm 和 < 0.25 mm) 土壤水稳性团聚体含量发

现,冻融循环对各土层不同粒径土壤水稳性团聚体含量影响差异较大。在 30 d 冻融期内,各粒径土壤水稳性团聚体含量随冻融时间延长其含量及其在不同土层的变化发生分异(图 3a、3b、3c)。其中, > 5 mm 土壤水稳性团聚体含量在所有土层中均逐渐增加,粒径较小的 0.5 ~ 1.0 mm 和 0.25 ~ 0.5 mm 水稳性团聚体在表层土壤中逐渐增加(图 3a),而在 5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 土层却随冻融时间延长而降低(图 3b、3c)。相比之下,中等粒径 (1 ~ 2 mm、2 ~ 3 mm 和 3 ~ 5 mm) 土壤水稳性团聚体含量在各土层的变化比粒径较小的团聚体变化较弱。

2.2 土壤氮素动态

CK 处理表层 0 ~ 5 cm 土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且其含量随土壤深度增加而显著降低。随着冻融时间延长,0 ~ 5 cm 和 10 ~ 15 cm 土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量逐渐增加,至试验期末 (30 d) 土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量显著高于试验前期 (5 d) 和中期 (15 d) (图 4a、4c)。与 CK 相比,YU 处理下试验初期 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量显著增



注:CK = 对照,YD = 添加牛粪,SD = 添加羊粪,YU = 添加牛尿,SU = 添加羊尿。同一取样时间的不同小写字母表示各试验处理间具有显著性差异,同一处理的不同大写字母表示在不同取样时间点之间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

图 2 不同冻融模拟时间下的土壤含水量特征:(a) 土壤深度 0 ~ 5 cm;
(b) 土壤深度 5 ~ 10 cm;(c) 土壤深度 10 ~ 15 cm

Fig. 2 Temporal variation of soil moisture under the effects of freeze-thaw cycles:(a) 0 ~ 5 cm soil depth;
(b) 5 ~ 10 cm soil depth; (c) 10 ~ 15 cm soil depth

表2 土壤机械组成及其随冻融模拟时间的变化

Tab.2 Soil mechanical composition and its temporal variation under the effects of freeze-thaw cycles

(单位: %)

土壤深度/ cm	试验 处理	5 d			15 d			30 d		
		砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量	砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量	砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量
0~5	CK	70.3±5.42 a, A	9.09±0.67 ab, A	20.6±5.33 a, A	71.5±1.82 a, A	8.34±2.05 a, A	20.2±0.41 a, A	74.0±1.69 ab, A	9.88±0.50 a, A	16.1±1.20 a, A
	YD	75.0±1.31 a, A	8.63±0.76 b, A	16.3±1.12 a, A	71.0±2.66 a, A	9.20±1.08 a, A	19.8±1.81 a, A	71.6±2.67 ab, A	10.7±0.97 a, A	17.7±1.87 a, A
	SD	70.4±0.69 a, A	9.71±0.68 ab, A	19.8±0.73 a, A	71.6±1.27 a, A	9.58±0.87 a, A	18.8±2.00 a, A	73.2±1.77 ab, A	10.2±1.03 a, A	16.7±0.76 a, A
	YU	67.4±2.08 a, A	11.2±0.60 a, A	21.4±1.48 a, A	70.4±3.04 a, A	8.48±1.79 a, A	21.2±1.81 a, A	68.8±1.92 b, A	10.5±0.89 a, A	20.7±2.61 a, A
	SU	73.2±2.34 a, A	8.58±0.88 b, A	18.3±2.54 a, A	71.5±3.06 a, A	9.73±1.07 a, A	18.7±2.00 a, A	74.8±0.48 a, A	9.55±0.82 a, A	15.6±1.29 a, A
5~10	CK	74.9±2.21 a, A	7.49±1.42 a, A	17.6±2.99 a, A	77.5±0.85 a, A	7.22±1.12 a, A	15.3±1.36 a, A	78.9±2.88 a, A	8.91±1.37 a, A	12.2±2.12 a, A
	YD	79.1±1.41 a, A	8.49±0.35 a, B	12.4±1.19 a, B	72.4±1.04 a, B	8.46±0.34 a, B	19.2±1.35 a, A	74.7±2.16 a, AB	11.3±0.82 a, A	14.0±1.35 a, B
	SD	78.3±2.90 a, A	8.86±0.81 a, A	12.8±2.15 a, A	76.3±0.76 a, A	7.47±0.11 a, A	16.2±0.87 a, A	75.1±2.36 a, A	10.3±1.78 a, A	14.6±0.67 a, A
	YU	73.0±2.26 a, A	9.96±0.62 a, A	17.0±1.89 a, A	73.5±1.68 a, A	8.52±0.44 a, A	18.0±1.54 a, A	74.9±1.72 a, A	8.53±1.17 a, A	16.6±2.43 a, A
	SU	76.2±1.35 a, A	8.85±0.82 a, A	15.0±1.10 a, A	76.7±3.05 a, A	7.75±1.57 a, A	15.6±1.85 a, A	79.6±1.47 a, A	8.81±1.65 a, A	11.6±1.81 a, A
10~15	CK	78.5±2.18 a, A	7.20±0.18 b, B	14.3±2.37 a, A	79.1±0.33 a, A	6.72±1.07 a, B	14.1±0.76 a, A	80.7±0.78 ab, A	9.62±0.42 a, A	9.64±0.83 b, A
	YD	79.3±1.56 a, A	8.36±0.74 ab, A	12.3±1.09 a, A	76.4±1.63 a, A	8.01±0.55 a, A	15.6±1.47 a, A	77.7±1.54 ab, A	8.07±1.66 a, A	14.2±0.13 a, A
	SD	79.5±2.91 a, A	8.37±1.19 ab, A	12.2±1.74 a, A	75.9±0.45 a, A	8.82±0.58 a, A	15.3±0.58 a, A	75.3±0.92 b, A	10.9±1.38 a, A	13.8±0.74 a, A
	YU	75.5±0.45 a, B	10.5±0.81 a, A	14.0±0.42 a, A	78.2±0.67 a, A	6.97±0.68 a, A	14.8±0.03 a, A	76.5±0.43 b, AB	9.13±1.49 a, A	14.3±1.74 a, A
	SU	77.4±1.01 a, A	9.23±1.11 ab, A	13.4±0.52 a, A	77.7±1.42 a, A	8.27±0.65 a, A	14.1±0.77 a, A	82.2±2.77 a, A	7.82±2.17 a, A	10.0±1.09 b, B

注: CK = 对照, YD = 添加牛粪, SD = 添加羊粪, YU = 添加牛尿, SU = 添加羊尿; 相同取样时间内同一列中同一土层深度的不同小写字母表示各试验处理间具有显著性差异 ($P < 0.05$), 相同处理的同一行中同一组分的不同大写字母表示在不同取样时间点间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

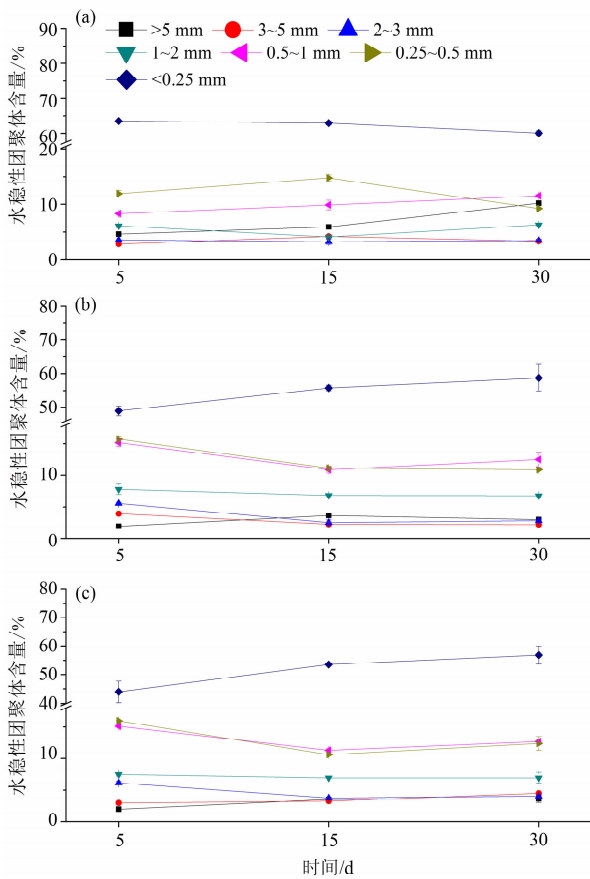


图 3 不同粒径水稳性团聚体含量随冻融模拟时间的变化: (a) 土壤深度 0~5 cm; (b) 土壤深度 5~10 cm; (c) 土壤深度 10~15 cm

Fig. 3 Temporal variation of water-stable aggregates with different particle sizes under the effects of freeze-thaw cycles: (a) 0~5 cm soil depth; (b) 5~10 cm soil depth; (c) 10~15 cm soil depth

加,分别达到 212 和 13.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($P < 0.05$) (图 4a、4b),但对 10~15 cm 土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量无显著影响 (图 4c)。随着冻融作用的持续进行,YU 处理对增加 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的作用分别表现为显著减弱和显著增强 ($P < 0.05$) (图 4a、4b)。相比之下,体积含量较小的羊尿添加 (SU) 显著增加 0~5 cm 土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量 ($P < 0.05$),而其对 5~10 cm 土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的增加仅到试验期末才表现出来 (图 4a、4b)。与牛羊尿处理的影响不同,在前 15 d 冻融期内,YD 处理较 CK 显著降低表层土壤的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量 ($P < 0.05$) (图 4a),但对中下土层的土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量无显著影响。在试验后期,YD 处理下土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量逐步恢复至与 CK 相当的水平。与之类似的,SD

处理在试验前期显著降低 0~5 cm 土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量,但到试验期末显著增加 10~15 cm 土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量 ($P < 0.05$) (图 4a、4c)。总体而言,牛羊尿添加较相应的粪便处理对表层土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量具有更突出的影响。

与土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 不同,试验初期 CK 处理表层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量低于深层土壤,且其含量在不同冻融时间和不同土层均呈现差异性变化。CK 处理 0~5 cm 土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量在前 15 d 显著增加,之后显著下降 ($P < 0.05$) (图 5a)。而 5~10 cm 土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量变化趋势与表层土壤相反,即在前 15 d 冻融中含量显著降低,而后显著增加 ($P < 0.05$) (图 5b),至试验期末较 5 d 时的含量增加 2.4 倍。不同冻融时间未对深层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量产生显著影响 ($P > 0.05$) (图 5c)。总体而言,YD 和 SD 处理在前 15 d 冻融中未对土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量产生显著影响,但 YD 处理在试验期末较 CK 显著增加所有土层土壤的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量 ($P < 0.05$)。与之不同的是,YU 和 SU 处理显著增加 0~5 cm 土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量 ($P < 0.05$) (图 5a)。相较于 SU,YU 处理下表层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量增幅更大 ($P < 0.05$) (图 5a、5b),而 10~15 cm 土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的提升仅在前 5 d 冻融中表现突出 (图 5c)。在整个试验期内,牛羊尿添加主要对表层 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量产生较为显著的影响,而牛羊粪处理主要在试验后期显著增加 5~10 cm 和 10~15 cm 土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量。

2.3 土壤磷动态

整个试验期内,CK 处理 0~5 cm、5~10 cm 和 10~15 cm 土壤有效磷含量分别介于 3.58~4.33、1.29~2.36 和 0.79~1.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其含量随土层加深而逐渐降低。在前 15 d 冻融过程中,CK 处理 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤有效磷含量显著降低,10~15 cm 土壤有效磷含量显著增加。试验后期,中上层土壤 (0~5 cm、5~10 cm) 有效磷含量无显著变化,但下层土壤有效磷含量 (10~15 cm) 显著降低 ($P < 0.05$) (图 6)。

YD 处理在前 5 d 冻融中显著降低 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤有效磷含量,而 SD 处理显著降低 5~10 cm 土壤有效磷含量 ($P < 0.05$) (图 6a、6b)。试验后期,YD 和 SD 处理主要对中下层土壤有效磷

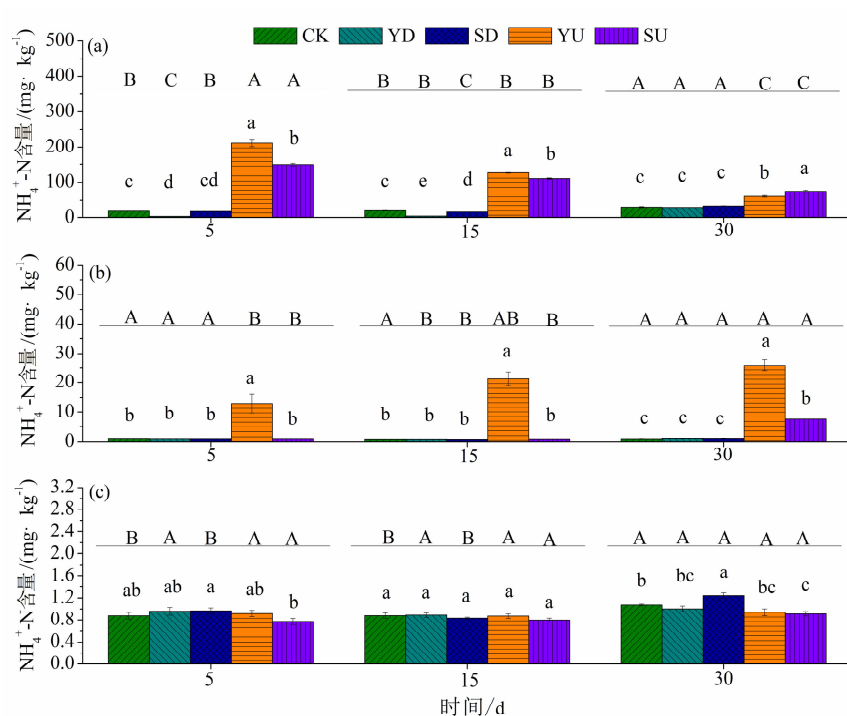


图4 不同冻融模拟时间下土壤 NH_4^+-N 含量变化:

(a) 土壤深度 0~5 cm; (b) 土壤深度 5~10 cm; (c) 土壤深度 10~15 cm

Fig.4 Temporal variation of soil NH_4^+-N concentrations under the influence of freeze-thaw cycles

(a) 0~5 cm soil depth; (b) 5~10 cm soil depth; (c) 10~15 cm soil depth

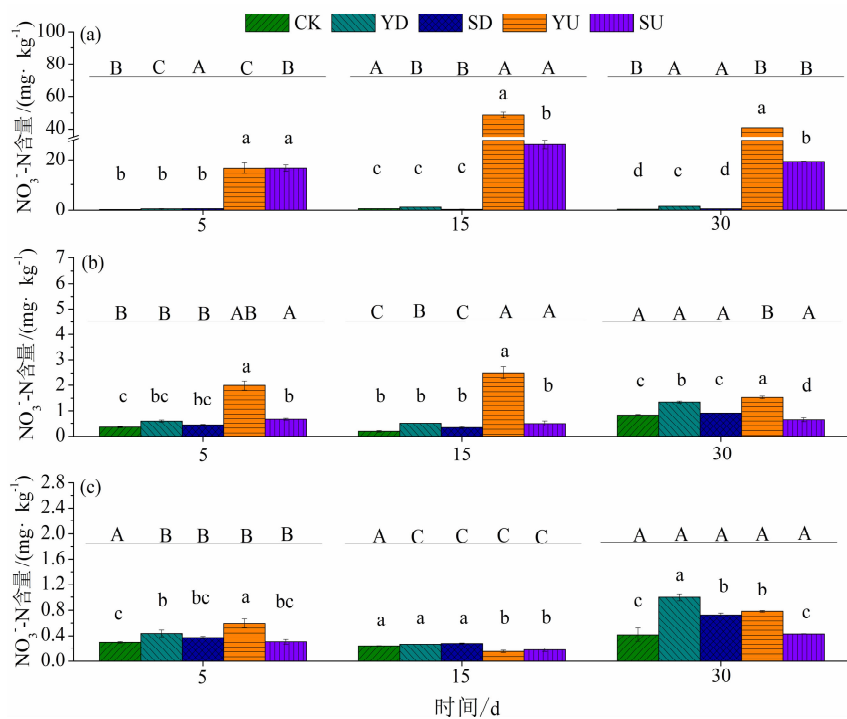


图5 不同冻融模拟时间下土壤 NO_3^--N 含量变化:

(a) 土壤深度 0~5 cm; (b) 土壤深度 5~10 cm; (c) 土壤深度 10~15 cm

Fig.5 Temporal variation of soil NO_3^--N concentrations under the influence of freeze-thaw cycles

(a) 0~5 cm soil depth; (b) 5~10 cm soil depth; (c) 10~15 cm soil depth

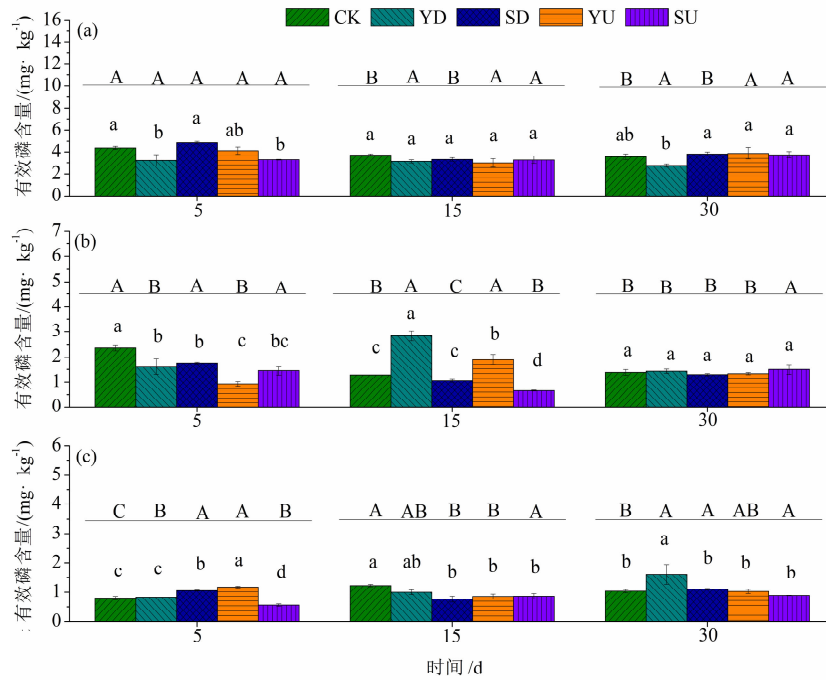


图 6 不同冻融模拟时间下土壤有效磷含量变化:

(a) 土壤深度 0 ~ 5 cm; (b) 土壤深度 5 ~ 10 cm; (c) 土壤深度 10 ~ 15 cm

Fig. 6 Temporal variation of soil available phosphorus under the influence of different freeze-thaw cycles

(a) 0 ~ 5 cm soil depth; (b) 5 ~ 10 cm soil depth; (c) 10 ~ 15 cm soil depth

含量产生波动性影响,而对表层土壤含量影响不突出。与之部分类似的是,YU 处理在前 5 d 冻融过程中显著降低 5 ~ 10 cm 土壤有效磷含量,而 SU 处理则显著降低所有土层的土壤有效磷含量(图 6)。在之后的冻融过程中,牛羊尿添加主要影响 5 ~ 10 cm 土层有效磷含量,而牛粪处理则影响 5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 土壤有效磷含量。总体而言,冻融时间延长主要导致牛羊粪尿处理下 5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 土壤有效磷含量产生波动性变化。

3 讨论

3.1 冻融及牲畜排泄物添加改变土壤水分特征和深层土壤机械组成

冻融作为非生物应力对土壤物理性质的影响主要表现为土壤固-液相态转变及其体积胀缩导致的团聚体结构破坏和稳定性降低^[31-32],且作用程度大小受土壤含水量、团聚体大小、冻融温度和冻融时间等的复杂影响^[33]。研究表明^[34],冻融会改变土壤渗透性和传导性,从而导致水分在土壤剖面上的重新分布。本研究发现,冻融循环对未添加牲畜粪尿

的 0 ~ 5 cm 表层土壤含水量无显著影响,而使得 5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 土壤含水量随冻融频次的增加而显著降低(图 2)。结果表明含水量相对较高的土层更易受到冻融循环的影响,且下层土壤含水量降低可能与冻结过程中土壤水分向表层冻结土体迁移有密切关系^[2, 32]。此外,冻融过程的温度梯度是影响水分动态的重要因素,温度梯度越大土壤含水量变化越剧烈,水分迁移量越大^[35]。试验土柱在 -15 °C ~ 5 °C 的冻结和融化温度范围反复冻融导致的水分频繁迁移和表面蒸发等可能是导致土壤含水量降低的主要原因。牛羊尿添加初期较为迅速地增加了表层土壤含水量,但经过 30 d 冻融循环后,其对表层土壤水分的影响减弱而对深层土壤水分影响增强。这可能是由于土壤反复冻融增加了土壤孔隙度和渗透性^[31],从而使得牛羊尿液补充的土壤水分随土壤融化而进一步向深层土体迁移所导致的。相比之下,牛羊粪便对土壤水分补给具有作用缓慢和持续时间长的特点,从而导致牛粪添加不仅持续增加表层土壤含水量,而且到试验后期也会不断增加深层土壤含水量,这与 Cai 等^[22]在藏北高寒草原的前期研究结果部分一致。总体而言,牲畜粪尿处

理在增加土壤含水量上具有其自身特性所产生的差异,而在不同冻融时间影响下,土壤自身含水量及源自牲畜粪尿的水分补充的共同作用是导致各处理土壤水分特性呈现时空差异性和复杂变化特性的关键原因。

反复冻融循环易通过改变土壤团聚体大小和打破颗粒间的联结而影响土壤质地状况^[36]。在本研究中,不同冻融时间未对对照试验土柱表层土壤质地产生显著影响,而仅在试验期末表现为增加深层土壤粉粒含量(表2),与川西北高寒草地冻融导致各层土壤黏粒含量降低,粉粒和砂粒含量增加的结果相似^[6]。这可能与土壤水分相变产生的胀缩拉力对团聚体的机械扰动关系密切。研究发现^[7, 9],土壤初始水分含量是影响土壤水稳性团聚体的重要因素,适宜的含水量有助于增强土壤水稳性团聚体的稳定性。非生长季高寒草原表层土壤含水量低,反复冻融循环对土壤团聚体的破坏作用相对有限。这与本研究发现的表层土壤粒径较大的水稳性团聚体含量随冻融时间延长而增加,而粒径较小的土壤水稳性团聚体在含水量相对较高的5~10 cm和10~15 cm土层中含量逐渐增加的变化特性部分一致。另外,牛粪和牛尿含水量较高,短期内能够迅速增加表层土壤含水量,且牛粪自身反复冻融产生的水分入渗以及牛尿添加导致的土壤水分逐渐向深层土壤迁移将进一步改变土壤剖面水分特性,从而影响土壤团聚体稳定性及其冻胀作用下的土壤机械组成。牦牛粪尿作用下深层土壤含水量增加及其液态水冻胀对不同粒径团聚体的破坏可能是导致土壤黏粒和粉粒含量逐渐增加的主要原因(图2、表2)。

3.2 牲畜排泄物添加促进冻融作用下的深层土壤氮磷迁移转化过程

氮素主要通过生态系统的输入输出等外循环过程,以及土壤内部系统的氮矿化、固持、硝化与反硝化作用等内循环过程进行迁移和转化^[37-38]。冻融循环会改变土壤理化和微生物等特性进而影响氮素在土壤中的迁移转化^[20]。源自牲畜排泄物的外源性氮素输入可能使氮素匮乏的高寒草地土壤氮素动态及过程更为复杂多变。通过冻融模拟试验发现,高寒草原土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量随冻融时间延长而增加,而表层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量呈先增加后降低的变化趋势(图4、图5),表明冻融循环促进土壤氮矿化和硝化作用,与学者针对青藏高原东缘高寒草甸

和落基山脉高山草甸^[39-40]的研究结果一致。这主要是由于频繁冻融不仅破坏土壤团聚体结构,导致无机氮释放量增加,还会通过为微生物提供营养物质从而增强微生物矿化作用^[41-42]。表层0~5 cm土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量在冻融过程中先增加后降低,而5~10 cm土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量却先降低后显著增加。一方面是由于冻融增强了表土的硝化作用,使得一部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 被氧化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,另一方面可能与土壤融化导致 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 随渗滤液向深层土壤迁移有关。这与农田黑土的土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量随冻融频次增加而显著降低的结果具有一定差异^[34]。

牦牛和藏绵羊尿液添加显著增加高寒草原表层土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量,且0~5 cm和5~10 cm土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量随着冻融作用持续进行分别呈显著降低和显著增加的变化趋势(图4、图5),表明尿液氮输入迅速增加了表土无机氮供应。土壤反复冻融过程中表层土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 随尿液和土壤渗滤液向深层土体迁移,以及土壤氮矿化作用增强可能是导致深层土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量持续增加的主要原因。尿液氮输入增加土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量可能对冻融作用下土壤氮矿化具有一定程度的激发效应。另外,冻融循环中表层土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 硝化作用增强导致土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量持续增加也是其 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量持续降低的途径之一,这与本研究发现的表层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量随冻融时间延长而逐渐增加的结果较为一致(图4、图5)。在后15 d冻融过程中,牛尿处理的0~5 cm和5~10 cm土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量显著降低,10~15 cm土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量呈显著增加的结果,进一步表明冻融循环增强土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋溶量^[38, 43]使得浅层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在土壤融化过程中呈现随土壤溶液向深层迁移的规律。这可能是由于土壤在经过反复冻融后其孔隙度不断增大,渗透性增强^[31],从而促使表层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 向深层迁移。另一方面,土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 作为反硝化作用的重要底物,冻融过程中土壤物理结构破碎、可溶性碳扩散以及反硝化速率增强^[44]可能也会导致 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量降低。相比之下,牛羊粪覆盖对冻融期土壤矿化氮的影响具有一定的滞后性和剖面差异性。牛粪添加在前15 d冻融循环中显著降低0~5 cm土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量($P < 0.05$),但浅

层和深层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量未发生显著变化,这可能与牛粪覆盖和冻融循环释放了大量营养物质,激活部分酶的活性,从而促进了氮固持作用有关^[45]。随着冻融过程持续进行,粪便氮输入对土壤自身氮素作用的逐渐减弱使得土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 受到固持作用的影响减小,并导致土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量持续增加。总体而言,牛羊粪添加对不同冻融阶段土壤矿化氮的影响主要表现为不断增加 5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量(图 5b、图 5c),且促进作用主要表现在冻融循环试验后期,表明牛羊粪处理下冻融循环增加深层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量具有滞后性。

磷是生物体的必需元素,土壤磷的迁移变化与循环主要受地球化学和生物过程的控制^[46]。冻融过程无磷的固定作用发生^[47],但土壤磷矿化作用因冻融对土壤团聚体和微生物生物量等的物理破坏而增强,从而改变磷的形态及含量比例^[48-49]。本研究发现,0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土壤有效磷含量随冻融循环频次增加而显著降低,但 10 ~ 15 cm 土壤有效磷含量在前 15 d 冻融过程中显著增加(图 6),这与多次冻融提高了黑土和水稻土有效磷含量的结果类似^[50]。冻融过程中有效磷向深层土壤迁移以及部分磷的净固定可能是导致表层土壤有效磷含量降低而深层土壤有效磷增加的主要原因。牛粪处理仅在冻融模拟试验期末显著提升深层土壤有效磷含量,表明牛粪磷的释放及其对土壤的补充具有一定滞后性。而且,经冻融处理的粪便磷的释放速率和累积释放量明显大于未冻融的粪便^[21],但关于不同冻融时间与粪便磷释放对土壤磷素动态和淋溶损失风险等的影响效应则需进一步探究加以明晰。相比之下,细小颗粒状的羊粪含水量低,降解过程缓慢,磷素释放及其对土壤磷动态的作用相对较弱。牛羊尿处理使得 5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 土壤有效磷含量在前 15 d 的冻融循环中呈较强的波动性变化特征。总体而言,不同类型牲畜排泄物磷含量及其释放特性差异较大,频繁冻融导致的土壤团聚体破碎,孔隙度增大以及土壤对磷的吸附解析作用的改变将使得不同土壤深度有效磷含量、形态及迁移变化机制具有复杂多变的特性。在全球气候变化背景下,高寒草地土壤冻融格局改变与外源性磷输入对草地生态系统磷的有效性和循环效应的影响等需要被给予更多研究和关注,进而有助于为科学评估季节性冻融区生态系统磷的淋溶损失风险和促进草地生态系统

的健康发展等提供理论指导。

4 结 论

冻融作为非生物应力主要通过改变土壤物理结构、化学和微生物特性等对土壤生态环境产生一系列直接或间接影响。牲畜排泄物返还和氮磷输入将导致高寒草地季节性冻融区土壤冻融格局发生改变,并使得土壤物理特性和氮磷养分迁移转化等呈复杂变化特征。通过开展 30 d 冻融模拟试验,本文主要研究结论如下:

(1) 土壤含水量是影响冻融作用下高寒草原土壤机械组成和团聚体特性的重要因素,频繁冻融加剧了 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 土壤水分再分布,并通过水分固—液相态转变、冻胀融沉和团聚体破碎等增加 10 ~ 15 cm 土壤粉粒含量。

(2) 牲畜粪尿添加不同程度地增加土壤含水量和氮磷养分,使得表土 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量分别达到 $212 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $48.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,并通过改变土壤剖面水分条件和冻融格局等影响土壤氮矿化、硝化和反硝化过程。冻融时间、土壤理化和微生物特性改变、以及土壤对氮磷养分的吸附解析性能等因素的复合影响使得土壤氮磷迁移转化具有时空差异性和复杂多变性。

参考文献 (References)

- [1] 杜子银. 冻融作用对高寒草地土壤理化和生物学性质的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 1054 - 1061. [DU Ziyin. Effects of freeze-thaw action on soil physicochemical and biological properties in the alpine grasslands [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(5): 1054 - 1061] DOI: 10.16258/j.cnki.1674 - 5906.2020.05.023
- [2] 范继辉, 鲁旭阳, 王小丹. 藏北高寒草地土壤冻融循环过程及水热分布特征[J]. 山地学报, 2014, 32(4): 385 - 392. [FAN Jihui, LU Xuyang, WANG Xiaodan. The freezing-thawing processes and soil moisture-energy distribution in permafrost active layer, northern Tibet [J]. Mountain Research, 2014, 32(4): 385 - 392] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.2014.04.012
- [3] 魏卫东, 刘育红, 马辉, 等. 退化高寒草原浅层土壤冻融作用特征分析[J]. 西北农业学报, 2018, 27(9): 1358 - 1366. [WEI Weidong, LIU Yuhong, MA Hui, et al. Analysis of freeze-thaw action characteristics in shallow layer soil of degraded alpine steppe [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018, 27(9): 1358 - 1366] DOI: 10.7606/j.issn.1004 - 1389.2018.09.017

- [4] 高敏, 李艳霞, 张雪莲, 等. 冻融过程对土壤物理化学及生物学性质的影响研究及展望 [J]. 农业环境科学学报, 2016, **35** (12): 2269 – 2274. [GAO Min, LI Yanxia, ZHANG Xuelian et al. Influence of freeze-thaw process on soil physical, chemical and biological properties: A review [J]. Journal of Agro – Environment Science, 2016, **35** (12): 2269 – 2274] DOI: 10.11654/jaes.2016 – 1087
- [5] 韩炳宏, 周秉荣, 吴让, 等. 青海南部高寒草地土壤冻融交替期水热特征分析 [J]. 气象科技, 2018, **46** (2): 361 – 368. [HAN Binghong, ZHOU Bingrong, WU Rang, et al. Characteristics of hydrothermal factors in soil freezing and thawing alternation over southern alpine grasslands in Qinghai province [J]. Meteorological Science and Technology, 2018, **46** (2): 361 – 368] DOI: 10.19517/j.1671 – 6345.20170231
- [6] 李晓宁. 川西北高寒区冻融交替作用下土壤水—热运移研究 [D]. 绵阳:西南科技大学, 2018:1 – 109. [LI Xiaoning. Study on movement mechanisms of water and heat under freeze-thaw cycles in northwest Sichuan Plateau [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018:1 – 109]
- [7] 牛浩, 罗万清, 王晋峰, 等. 冻融对东北黑土风干团聚体与水稳性团聚体组成及稳定性的影响 [J]. 土壤通报, 2020, **51** (4): 841 – 847. [NIU Hao, LUO Wanqing, WANG Jinfeng, et al. Effects of freeze-thaw on the composition and stability of air-dried and water-stable aggregates of black soil in northeast China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, **51** (4): 841 – 847] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2020.04.11
- [8] 金万鹏, 范昊明, 刘博, 等. 冻融交替对黑土团聚体稳定性的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, **30** (12): 4195 – 4201. [JIN Wanpeng, FAN Haoming, LIU Bo, et al. Effects of freeze-thaw cycles on aggregate stability of black soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30** (12): 4195 – 4201] DOI: 10.13287/j.1001 – 9332.201912.025
- [9] 徐俏, 崔东, 王兴磊, 等. 冻融对伊犁草地土壤水稳性大团聚体的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2017, **35** (6): 244 – 251. [XU Qiao, CUI Dong, WANG Xinglei, et al. Effects of freezing and thawing on soil water stable aggregates in Yili grassland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, **35** (6): 244 – 251] DOI: 10.7606/j.issn.1000 – 7601.2017.06.35
- [10] WANG Genxu, WANG Yibo, LI Yuanshou, et al. Influences of alpine ecosystem responses to climatic change on soil properties on the Qinghai – Tibet Plateau, China [J]. Catena, 2007, **70** (3): 506 – 514. DOI: 10.1016/j.catena.2007.01.001
- [11] 杜子银, 蔡延江, 王小丹, 等. 放牧牲畜粪便降解及其对草地土壤养分动态的影响研究进展 [J]. 生态学报, 2019, **39** (13): 4627 – 4637. [DU Ziyin, CAI Yanjiang, WANG Xiaodan, et al. Research progress on grazing livestock dung decomposition and its influence on the dynamics of grassland soil nutrients [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39** (13): 4627 – 4637] DOI: 10.5846/stxb201806211368
- [12] HAYNES R J, WILLIAMS P H. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem [M]//SPARKS D L. Advances in Agronomy. New York: Academic Press. 1993: 119 – 199.
- [13] STIEHL-BRAUN P A, HARTMANN A A, KANDELER E, et al. Interactive effects of drought and N fertilization on the spatial distribution of methane assimilation in grassland soils [J]. Global Change Biology, 2011, **17** (8): 2629 – 2639. DOI: 10.1111/j.1365 – 2486.2011.02410.x
- [14] 杜子银, 蔡延江, 王小丹, 等. 牦牛和藏绵羊粪便降解过程中的养分动态变化 [J]. 山地学报, 2014, **32** (4): 423 – 430. [DU Ziyin, CAI Yanjiang, WANG Xiaodan, et al. Temporal variation of yak and Tibetan sheep dung nutrients from an alpine steppe in northern Tibet, China [J]. Mountain Research, 2014, **32** (4): 423 – 430] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.2014.04.015
- [15] DURING C, WEEDA W C, DOROFARFF F D. Some effects of cattle dung on soil properties, pasture production, and nutrient uptake [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1973, **16** (3): 431 – 438. DOI: 10.1080/00288233.1973.10421126
- [16] 戎郁萍, 韩建国, 王培, 等. 放牧强度对草地土壤理化性质的影响 [J]. 中国草地, 2001, **23** (4): 42 – 48. [RONG Yuping, HAN Jianguo, WANG Pei, et al. The effects of grazing intensity on soil physics and chemical properties [J]. Grassland of China, 2001, **23** (4): 42 – 48]
- [17] 孙翼飞, 沈菊培, 张翠景, 等. 不同放牧强度下土壤氨氧化和反硝化微生物的变化特征 [J]. 生态学报, 2018, **38** (8): 2874 – 2883. [SUN Yifei, SHEN Jupei, ZHANG Cuijing, et al. Responses of soil ammonia oxidizers and denitrifiers to different grazing intensities [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38** (8): 2874 – 2883] DOI: 10.5846/stxb201704270772
- [18] 李传松, 张亦婷, 赵兴敏, 等. 冻融及有机物料添加对黑钙土有机、无机碳的影响 [J]. 江苏农业科学, 2019, **47** (10): 272 – 277. [LI Chuansong, ZHANG Yiting, ZHAO Xingmin, et al. Effect of freeze-thaw and addition of organic materials on organic and inorganic carbon of chernozem [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, **47** (10): 272 – 277] DOI: 10.15889/j.issn.1002 – 1302.2019.10.060
- [19] 郭晓丽, 何朋, 戴闪闪, 等. 冻融循环条件下水分和氮添加对黑土有机碳矿化的影响 [J]. 土壤与作物, 2020, **9** (2): 141 – 149. [GUO Xiaoli, HE Peng, DAI Shanshan, et al. Effects of water and nitrogen additions on soil organic carbon mineralization in Mollisols under freezing-thawing cycles [J]. Soils and Crops, 2020, **9** (2): 141 – 149] DOI: 10.11689/j.issn.2095 – 2961.2020.02.005
- [20] 徐欢, 王芳芳, 李婷, 等. 冻融交替对土壤氮素循环关键过程的影响与机制研究进展 [J]. 生态学报, 2020, **40** (10): 3168 – 3182. [XU Huan, WANG Fangfang, LI Ting, et al. A review of freezing-thawing cycle effects on key processes of soil nitrogen cycling and the underlying mechanisms [J]. Acta

- Ecologica Sinica, 2020, **40**(10): 3168–3182] DOI: 10.5846/stxb201903310619
- [21] 陈兴财, 张丰松, 童心, 等. 畜禽粪便冻融作用后磷形态分布及其释放特征[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(5): 1617–1625. [CHEN Xingcai, ZHANG Fengsong, TONG Xin, et al. Form distribution of Phosphorus and its release after freeze-thaw process of animal manure [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(5): 1617–1625] DOI: 10.13671/j. hjkxxb. 2018. 0470
- [22] CAI Yanjiang, WANG Xiaodan, DING Weixin, et al. Potential short-term effects of yak and Tibetan sheep dung on greenhouse gas emissions in two alpine grassland soils under laboratory conditions [J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, **49**(8): 1215–1226. DOI: 10.1007/s00374–013–0821–7
- [23] 蔡延江, 杜子银, 王小丹, 等. 牲畜排泄物返还对藏北高寒草原土壤 CH₄ 排放的影响[J]. 山地学报, 2014, **32**(4): 393–400. [CAI Yanjiang, DU Ziyin, WANG Xiaodan, et al. Effects of excretal returns on CH₄ emissions from an alpine steppe soil in northern Tibet, China [J]. Mountain Research, 2014, **32**(4): 393–400] DOI: 10.16089/j. cnki. 1008–2786. 2014. 04. 006
- [24] MA Xiuzhi, WANG Shiping, WANG Yanfen, et al. Short-term effects of sheep excrement on carbon dioxide, nitrous oxide and methane fluxes in typical grassland of Inner Mongolia [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2006, **49**(3): 285–297. DOI: 10.1080/00288233. 2006. 9513719
- [25] LIN Xingwu, WANG Shiping, MA Xiuzhi, et al. Fluxes of CO₂, CH₄, and N₂O in an alpine meadow affected by yak excreta on the Qinghai–Tibetan plateau during summer grazing periods [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(4): 718–725. DOI: 10.1016/j. soilbio. 2009. 01. 007
- [26] DIAZ D A R, SAWYER J E, MALLARINO A P. Poultry manure supply of potentially available nitrogen with soil incubation [J]. Agronomy Journal, 2008, **100**(5): 1310–1317. DOI: 10.2134/agronj2007. 0371
- [27] DU Ziyin, WANG Xiaodan, XIANG Jian, et al. Yak dung pat fragmentation affects its carbon and nitrogen leaching in northern Tibet, China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2021, **310**: 107301. DOI: 10.1016/j. agee. 2021. 107301
- [28] CARTER M R, GREGORICH E G. Soil sampling and methods of analysis [M] (2nd Edition). Boca Raton: Lewis Publishers, 1993: 1–1208.
- [29] O'HALLORAN I P, CADE-MENUN B J. Total and organic phosphorus [M]. CARTER M R, GREGORICH E G. Soil sampling and methods of analysis. Boca Raton: Lewis Publishers, 2006: 265–292.
- [30] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, **58**(1): 123–130. DOI: 10.2136/sssaj1994. 03615995005800010017x
- [31] 魏丽红. 冻融作用对土壤理化及生物学性质的影响综述[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(11): 5054–5057. [WEI Lihong. Review on the effects of freezing and thawing on the physiochemical and biological properties of soil [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, **37**(11): 5054–5057] DOI: 10.13989/j. cnki. 0517–6611. 2009. 11. 054
- [32] 王洋, 刘景双, 王国平, 等. 冻融作用与土壤理化效应的关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, **23**(2): 91–96. [WANG Yang, LIU Jingshuang, WANG Guoping, et al. Study on the effect of freezing and thawing action to soil physical and chemical characteristics [J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, **23**(2): 91–96]
- [33] OZTAS T, FAYETORBAY F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability [J]. Catena, 2003, **52**(1): 1–8. DOI: 10.1016/S0341–8162(02)00177–7
- [34] 王连峰, 蔡延江, 解宏图. 冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放的关系[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(10): 2361–2366. [WANG Lianfeng, CAI Yanjiang, XIE Hongtu. Relationships of soil physical and microbial properties with nitrous oxide emission under effects of freezing-thawing cycles [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, **18**(10): 2361–2366] DOI: 10.13287/j. 1001–9332. 2007. 0393
- [35] 王永琦, 苏小四, 吕航, 等. 冻融作用对土壤水分迁移和地下水位波动影响的实验研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, **56**(2): 204–209. [WANG Yongqi, SU Xiaosi, LYU Hang, et al. Freeze-thaw effect on soil water migration and groundwater level fluctuation [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, **56**(2): 204–209] DOI: 10.12202/j. 0476–0301. 2020059
- [36] LEHRSCHE G A, SOJKA R E, CARTER D L, et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, **55**(5): 1401–1406. DOI: 10.2136/sssaj1991. 03615995005500050033x
- [37] 蔡延江, 王小丹, 丁维新, 等. 冻融对土壤氮素转化和 N₂O 排放的影响研究进展[J]. 土壤学报, 2013, **50**(5): 1032–1042. [CAI Yanjiang, WANG Xiaodan, DING Weixin, et al. Effects of freeze-thaw on soil nitrogen transformation and N₂O emission: A review [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(5): 1032–1042] DOI: 10.11766/trxb201301130028
- [38] 王丽芹, 齐玉春, 董云社, 等. 冻融作用对陆地生态系统氮循环关键过程的影响效应及其机制[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(11): 3532–3544. [WANG Liqin, QI Yuchun, DONG Yunshe, et al. Effects and mechanism of freeze-thawing cycles on key processes of nitrogen cycle in terrestrial ecosystem [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(11): 3532–3544] DOI: 10.13287/j. 1001–9332. 20150812. 011
- [39] 徐俊俊, 吴彦, 张新全, 等. 冻融交替对高寒草甸土壤微生物量氮和有机氮组分的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011,

- 17(1): 57 – 62. [XU Junjun, WU Yan, ZHANG Xinquan, et al. Effects of freezing and thawing cycles on microbial biomass nitrogen and organic nitrogen in alpine meadow soil [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, 17(1): 57 – 62] DOI: 10.3724/SP.J.1145.2011.00057
- [40] BROOKS P D, WILLIAMS M W, SCHMIDT S K. Inorganic nitrogen and microbial biomass dynamics before and during spring snowmelt [J]. Biogeochemistry, 1998, 43(1): 1 – 15. DOI: 10.1023/A:1005947511910
- [41] 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 and Biochemistry, 2004, 36(4): 641 – 654. DOI: 10.1016/j.soilbio.2003.12.007
- [42] KOPONEN H T, JAAKKOLA T, KEINANEN-TOIVOLA M M, et al. Microbial communities, biomass, and activities in soils as affected by freeze thaw cycles [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(7): 1861 – 1871. DOI: 10.1016/j.soilbio.2005.12.010
- [43] JOSEPH G, HENRY H A L. Soil nitrogen leaching losses in response to freeze – thaw cycles and pulsed warming in a temperate old field [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(7): 1947 – 1953. DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.04.007
- [44] VAN BOCHOVE E, PREVOST D, PELLETIER F. Effects of freeze-thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1638 – 1643. DOI: 10.2136/sssaj2000.6451638x
- [45] CHRISTENSEN S, CHRISTENSEN B T. Organic matter available for denitrification in different soil fractions: Effect of freeze/thaw cycles and straw disposal [J]. Journal of Soil Science, 1991, 42(4): 637 – 647. DOI: 10.1111/j.1365 – 2389.1991.tb00110.x
- [46] 吴金凤, 刘鞠善, 李梓萌, 等. 草地土壤磷循环及其对全球变化的响应[J]. 中国草地学报, 2021, 43(6): 102 – 111. [WU Jinfeng, LIU Jushan, LI Zimeng, et al. Grassland soil phosphorus cycle and its response to global change [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(6): 102 – 111] DOI: 10.16742/j.zgdx.20200326
- [47] YEVDOKIMOV I, LARIONOVA A, BLAGODATSKAYA E. Microbial immobilisation of phosphorus in soils exposed to drying-rewetting and freeze-thawing cycles [J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52(5): 685 – 696. DOI: 10.1007/s00374 – 016 – 1112 – x
- [48] FREPPAZ M, WILLIAMS B L, EDWARDS A C, et al. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: Implications for N and P availability [J]. Applied Soil Ecology, 2007, 35(1): 247 – 255. DOI: 10.1016/j.apsoil.2006.03.012
- [49] LIU J, ULEN B, BERGKVIST G, et al. Freezing – thawing effects on phosphorus leaching from catch crops [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2014, 99(1): 17 – 30. DOI: 10.1007/s10705 – 014 – 9615 – z
- [50] 胡钰, 香宝, 刘玉萍, 等. 交替冻融对东北地区典型土壤氮磷浓度的影响[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(4): 333 – 338. [HU Yu, XIANG Bao, LIU Yuping, et al. Freeze-thaw cycle effects on nitrogen and phosphorus content in typical soils of northeast China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012, 2(4): 333 – 338] DOI: 10.3969/j.issn.1674 – 991X.2012.04.052

Effects of Seasonal Freeze-Thaw Cycles and Livestock Excreta Returning on Soil Physical Properties, and Nitrogen and Phosphorus Dynamics in Alpine Grassland

DU Ziyin^{1, 2, 3}, WANG Xiaodan^{2, 3}, HONG Jiangtao^{2, 3*}, ZHANG Qingsong¹

(1. School of Geographical Sciences, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3. Xainza Alpine Steppe and Wetland Ecosystem Observation Station, Chinese Academy of Sciences, Shenzha 853199, Tibet, China)

Abstract: In the alpine grassland ecosystem of the Tibetan Plateau, the degradation process of livestock excreta in freeze-thaw circumstance regulates its nutrient release and return efficiency, which affects the nutrient balance of grassland soil and the nutrient supply of vegetation growth. Research on the physical and chemical properties of grassland soil in seasonal freeze-thaw circumstances mostly analyzed the effects of freeze-thaw cycles on soil physical

structure, hydrothermal changes and carbon and nitrogen dynamics through fixed-point monitoring and indoor freeze-thaw simulation. There was still a lack of research reports on the coupling effect and mechanism of seasonal freeze-thaw of grassland soil with livestock excreta.

In this paper, taking the seasonal permafrost region of northern Tibet Plateau as an example, the indoor freeze-thaw simulation experiment was carried out to explore the soil physical characteristics and nitrogen and phosphorus nutrient changes of alpine grassland under the action of livestock excreta and soil freezing and thawing.

The results showed that: (1) Soil moisture content in 5 ~ 10 cm and 10 ~ 15 cm depth significantly decreased ($P < 0.05$) after 30 days of experiment, and frequent freeze-thaw settlement resulted in the fragmentation of soil aggregates and increased silt content in deep soil layer. (2) Freeze-thaw cycles enhanced soil nitrogen mineralization and nitrification, and the peaked values of soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen respectively reached 212 and 48.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ followed by the addition of livestock excreta during the freeze-thaw period. (3) Combined effects of the phosphorus released from livestock excreta and the deep infiltration of soil phosphorus under freeze-thaw circumstance were considered to be the main causes for the dynamics of soil available phosphorus concentration at different soil depths. The conclusions of this study provide scientific guidances for optimizing livestock excreta management and promoting the sustainable development of grassland ecosystem.

Key words: freeze-thaw; livestock excreta; mineralized nitrogen; available phosphorus; alpine grassland; the Tibetan Plateau