DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.003
钟志强，曹文华，马波，等. 冻融条件下藻结皮覆盖对土壤结构的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):157-164.
ZHONG Zhiqiang, CAO Wenhua, MA Bo, et al. Effect of algae crusting cover on soil structure under freeze-thaw conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024, 38(2):157-164.

冻融条件下藻结皮覆盖对土壤结构的影响

钟志强[1]，曹文华[3]，马 波[1,2]，曾建辉[1]，张秀梅[1]
(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;
3.水利部水土保持监测中心,北京 100053)

摘　要:[**目的**]为研究生物结皮覆盖和冻融作用对土壤结构的影响。[**方法**]以黄土高原北部风沙土为研究对象,采用室内模拟冻融的方法,利用田口方法分析不同冻融次数、冻融前土壤初始含水量和生物结皮(藻结皮)盖度对土壤结构特征的影响。[**结果**](1)通过正交试验获取的土壤结构指数(I_{GSS})为 75.57～96.57,信噪比(S/N)为 37.55～39.70 dB,通过田口方法确定的最佳因子组合为 15 次冻融循环、15%初始含水量、80%藻结皮覆盖度,其预测结果为 I_{GSS}=98.09,S/N=39.89 dB。(2)I_{GSS}与冻融次数、初始含水量、藻结皮盖度均呈正相关关系,各因子对土壤结构指数的主效应表现为初始含水量>冻融次数>藻结皮覆盖度;各因子对土壤结构指数变化的贡献率为初始含水量(52.17%)>冻融次数(31.95%)>藻结皮覆盖度(2.12%)。(3)土壤结构指数的变化来自于冻融过程中土壤水分的散失和孔隙扩张,藻结皮覆盖可以减缓冻融过程中水分的散失,从而减缓 I_{GSS}变化。[**结论**]研究使用正交试验对冻融条件下藻结皮覆盖对土壤结构的影响进行探讨,研究结果可为复杂条件下的土壤冻融过程研究提供一定的理论参考。

关键词: 黄土高原;土壤结构;冻融模拟;生物结皮;田口方法
中图分类号:S152.4　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)02-0157-08

Effect of Algae Crusting Cover on Soil Structure Under Freeze-Thaw Conditions

ZHONG Zhiqiang[1], CAO Wenhua[3], MA Bo[1,2], ZENG Jianhui[1], ZHANG Xiumei[1]
(1.*Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
2. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Ministry of Water Resources*, *Chinese Academy of Sciences*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*; 3. *Soil and Water Conservation Monitoring Center*, *Ministry of Water Resources*, *Beijing* 100053, *China*)

Abstract:[**Objective**] To investigate the effects of biological crustal cover and freeze-thaw on soil structure. [**Methods**] The effects of different freeze-thaw times, initial soil water content before freeze-thaw and biological crusting (algae crust) cover on soil structure characteristics was employed to analyze the indoor simulated freeze-thaw method. [**Results**] (1) The soil structure index (I_{GSS}) obtained by orthogonal experiment was between 75.57～96.57, the signal-to-noise ratio (S/N) was between 37.55～39.70 dB, and the optimal factor combination ascertained by the Taguchi method was 15 freeze-thaw cycles, 15% initial water content, and 80% algal crust coverage, and the predicted results were I_{GSS}=98.09, S/N=39.89 dB. (2)A positive correlation was observed between I_{GSS} I_{GSS} was positively correlated with freeze-thaw times, initial water content and algal crusting coverage, and the primary influences on the soil structure index were ranked as initial water content > freeze-thaw times > algal crusting coverage. The contribution rates of each factor to alterations in the soil structure index were initial water content (52.17%) > freeze-thaw frequency (31.95%) > algae crusting coverage (2.12%). (3) The change of soil structure index comes from the loss of soil water and pore expansion during the freeze-thaw process, and algae crusting can slow down the loss of water during the freeze-thaw process, thereby decelerating the I_{GSS} alteration. [**Conclusion**] Orthogonal experiments in this research explored the effect of algae crusting cover on soil structure under freeze-thaw

收稿日期:2023-05-29　**修回日期:**2023-07-29　**录用日期:**2023-08-29　**网络首发日期(**www.cnki.net**):**2023-12-13
资助项目:内蒙古自治区鄂尔多斯市科技计划项目“鄂尔多斯十大孔兑综合治理拦沙换水工程生态恢复效果评估”(2022YY012)
第一作者:钟志强(1999—)男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:2366@nwafu.edu.cn
通信作者:马波(1982—),男,博士,副研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: soilcrop@163.com

conditions, and the results could provide a theoretical reference for the study of soil freeze-thaw process under complex conditions.

Keywords: the Loess Plateau; soil structure; freeze-thaw simulation; biological crust; Taguchi method

Received:2023-05-29 **Revised**:2023-07-29 **Accepted**:2023-08-29 **Online**(www.cnki.net):2023-12-13

冻融侵蚀是我国仅次于水蚀和风蚀的第三大侵蚀类型[1],随着世界人口和资源需求的持续增长,人类活动范围不断向高寒地区扩展,冻融侵蚀对人类生存与发展的影响愈发明显[2]。冻融是一种周期性的风化作用,土壤作为多孔隙材料受冻融的影响更为强烈,土壤水频繁相变产生的应力改变土壤各要素相互关联和相互作用方式,如土壤固体和孔隙的大小、形状和位置等,从而对土壤结构产生较大影响[3]。土壤结构是表征土壤稳定性的重要指标[4],同时也是影响土壤可蚀性的关键因素,冻融作用可以使土壤结构稳定性发生变化,最终影响土壤侵蚀[5]。生物结皮是由藻类、真菌、苔藓等低等生物与土壤形成的有机复合体,在干旱、半干旱区和极地、亚极地区等脆弱生态区均有分布[6],我国黄土高原北部属温带大陆性季风气候,年均降水量较少,且主要集中在夏季,春、秋两季风沙较大,冬季寒冷干燥,频繁的冻融作用为土壤侵蚀提供物料来源,进一步增加土壤侵蚀风险[7];同时该地区生物结皮广泛发育[8],对该地区水土流失情况有较大影响[9]。因此,考虑冻融条件下藻结皮对土壤结构特征的影响在该地区具有重要的生态意义。

国内外学者[10]对冻融与土壤结构的研究结果表明,冻融通过改变土壤理化性质来影响土壤结构。KONRAD等[11]对冻融循环期间土壤颗粒变化的研究发现,冻融破坏土壤之间的胶结物质,导致土壤颗粒间的黏结力降低,土壤变得松散;WALDER等[12]研究指出,冻结过程土壤水分向冰透镜处迁移,并产生使孔隙扩张的应力;王恩姮等[13]研究发现,东北典型黑土区的季节性冻融加剧黑土耕作区土壤风干团聚结构的分散,降低土壤的楔入阻力,从而削弱土壤抗冲性。同时,众多学者[14-15]对生物结皮生长发育过程的研究表明,生物结皮通过影响下层土壤粒径组成、土壤导水和持水性能等理化性质,改良土壤结构,改善土壤肥力,土壤稳定性得以提高[16];其特殊的表层结构也可显著降低水蚀和风蚀对地表土壤的破坏和搬运强度[17]。

综上所述,以往的研究多针对冻融作用和生物结皮对土壤理化性质的影响,但对冻融和生物结皮覆盖复合条件下土壤理化性质的研究较少,对黄土高原北部冻融侵蚀区土壤结构变化的研究鲜有报道。因此,本研究以黄土高原北部东柳沟小流域典型生物结皮土壤为研究对象,进行室内模拟冻融试验,通过控制不同试验条件,探究冻融次数、冻融前初始含水量和藻结皮盖度对土壤结构指数的影响,分析土壤结构变化的驱动因素,以期揭示生物结皮在冻融条件下对土壤结构的影响,为黄土高原北部的冻融侵蚀过程研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样点位于内蒙古自治州达拉特旗东部的东柳沟流域(34°58′02″—40°12′50″N,101°28′47″—110°31′53″E)。流域全长75.4 km,面积达667.72 km^2。该流域是典型的风蚀、水蚀区,土壤侵蚀严重,水土流失面积可占流域面积的70%以上[18]。该地区夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,属温带大陆性气候,多年平均降水量为240~360 mm,年内降雨分布不均,主要分布在夏季。每年10月下旬至翌年的4月为封冻期,4—5月为春季解冻期,气温在0 ℃上下波动,昼夜温差大,出现明显的冻融交替现象。研究区内土壤主要为风沙土及栗钙土,植被以沙棘、沙柳、柠条等灌木居多,区内生物结皮广泛发育,其中以绿藻附着形成的藻结皮为著,藻类优势种为小席藻(*Phormidium tenue*)和具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)等,次优势种为念珠藻(*Nostocales*)。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 供试土壤取自东柳沟流域上游退耕地(38°18′47″N,108°05′50″E),选取藻结皮发育良好的区域作为样点进行采样,将土壤表面的藻结皮用刮刀刮下,收集在培养皿中用于室内培养。采集结皮下层0—10 cm层的土样用于测定土壤容重、有机质含量及机械组成等理化性质;同时,在取样点采集适量土壤供室内模拟试验,采集深度为0—10 cm,将采回来的土壤自然风干后过5 mm筛备用。结皮土壤各指标测定结果见表1。

表1 研究区野外实测土壤性质

Table 1 Field measured soil properties in the study area

土壤层次	土壤容重/(g·cm^{-3})	有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	土壤质地/%		
				黏粒	粉粒	砂粒
结皮层	1.31±0.04	12.65±0.15	0.34±0.02	—	—	—
0—10 cm	1.51±0.03	7.13±0.05	0.16±0.08	4.57	11.06	84.37

注:表中数据为平均值±标准差。

1.2.2　试验方法与指标测定　土壤的日冻融循环过程主要发生在土壤表层，最大影响深度为 20 cm[19]，为去除边界效应，选择尺寸为长×宽×高为 40 cm×30 cm×20 cm 的保温泡沫箱作为容器模拟自然冻融，泡沫箱四周用隔热气凝胶包裹，气凝胶导热系数为 0.018 W/(m·k)。装填土壤前先测定风干后土壤实际含水量，根据实测土壤容重(1.5 g/cm^3)计算填土量，保证供试土壤容重与研究区土壤容重一致。将野外采回的藻结皮碾碎置于含 bg11 培养基的小池进行培养，待藻类萌发后进行喷洒播种，把已经萌发的藻液均匀喷洒在土壤表面，通过控制喷洒面积制备不同覆盖度的藻结皮样品。经调查，研究区生物结皮盖度为 40%～60%，因此将结皮盖度设置为 10%，30%，50%，80%。使用发光功率和色温都可调的多光谱 LED 植物生长灯给样品提供光照，设置光照强度 338.9 lx[20]，每天光照 8 h。为保持藻类生长湿度，每日 8:00 和 18:00 对样品进行微喷灌处理，培育时间共 60 天。

将培育好的藻结皮样品放入恒温冰箱中进行冻融处理，依据研究区气象资料，将冻结温度设置为 −15～−20 ℃，冻融次数设置为 0，5，10，15 次，样品在冰箱中冻结 12 h 后拿出置于室外融化 12 h 为 1 次冻融循环。有研究[21]表明，在冻融过程中土壤表层最低含水量与最高含水量的差异可达 15%，而在采样地实测最低土壤含水量为 2.31%，故将冻融前初始含水量设置为 4%，8%，12%，15%。

试验中主要涉及的指标有土壤容重、总孔隙度、土壤含水量及土壤粒径组成等。采用环刀法测定土壤容重，烘干法测定土壤含水量，以此计算土壤三相比。采用马尔文 2000 激光粒度仪测定颗粒组成。

本次试验采用正交试验设计对冻融次数、冻融前土壤初始含水量和藻结皮覆盖度 3 个因素进行设计开展[22]，其正交设计见表 2。

1.3　数据处理

(1)广义土壤结构指数(I_{GSS})是表征土壤固、液、气三相的“投入”与土壤结构的产出之间关系的生产函数，反映土壤结构特征及其动态变化。在干旱地区的土壤中，通常认为土壤三相比例为固∶气∶液为 50%∶25%∶25%时，为理想结构点，不同状态下土壤三相点到理想三相结构点的距离称为土壤三项结构距离(STPSD)[23]。土壤结构指数及土壤三相结构距离计算公式为：

$$I_{GSS} = [(X_S - 25) \cdot X_L \cdot X_G]^{0.4769}$$

$$\mathrm{STPSD} = \sqrt{(X_S - 50)^2 + (X_L - 25)^2 + (X_G - 25)^2} \tag{1}$$

式中：I_{GSS}为广义土壤结构指数；X_S为土壤固相比例；X_L为土壤液相比例；X_G为土壤气相比例(X_S、X_L、X_G均小于 1)。

表 2　正交试验设计

Table 2　Orthogonal experimental design

L16 (不同水平的组合)			冻融次数	初始含水量/%	藻结皮覆盖度/%
1	1	1	0	4	10
1	2	2	0	8	30
1	3	3	0	12	50
1	4	4	0	15	80
2	1	2	5	4	30
2	2	1	5	8	10
2	3	4	5	12	80
2	4	3	5	15	50
3	1	3	10	4	50
3	2	4	10	8	80
3	3	1	10	12	10
3	4	2	10	15	30
4	1	4	15	4	80
4	2	3	15	8	50
4	3	2	15	12	30
4	4	1	15	15	10

(2)田口方法是正交试验处理的一种方法，主要是利用正交试验结果计算信噪比，然后通过均值分析(ANOM)和信噪比(S/N)来评价试验结果，信噪比是田口设计中表示产品稳健性的指标，信噪比越大则表示在该条件下噪音因子的效应达到最小，利用这个特性可以筛选出试验的最优组合[24]。采用望大型信噪比计算公式，相关计算公式为：

$$S/N = -10 \times \log_{10}\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{Y_i^2}\right) \tag{2}$$

式中：S/N 为信噪比；N 为试验重复次数；Y 为试验结果。

$$(M)_{\mathrm{Factor}=f}^{\mathrm{level}=i} = \frac{1}{N_{fl}}\sum_{j=f}^{fl}[(Y)_{\mathrm{Factor}=f}^{\mathrm{level}=i}]_j \tag{3}$$

式中：($M_{\mathrm{Factor}=f}^{\mathrm{level}=i}$ 为 f 因子在水平 i 下的均值；N_{fl} 为 f 因子在 l 水平上出现的次数；Y 为试验观测值。

通过方差分析进行各因子对土壤分离能力的显著性检验和计算因子贡献率。因子贡献率计算公式为：

$$PC = \frac{SS_F - (DF \times V_{Er})}{SS_T} \times 100\% \tag{4}$$

式中：PC 为因子贡献率(%)；SS_T为总离差平方和；SS_F为各因子离差平方和；V_{Er}为误差平方和；DF 为因子的自由度。

使用 Minitab 17 软件进行正交试验设计、田口分析以及方差分析，使用 Excel 2016 软件对试验数

据进行处理，Origin 2018a 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 田口方法确定最佳因子组合

利用信噪比望大特性可以判定试验结果的最优因子组合。表3为土壤结构指数和信噪比在各因子组合下的均值响应。

在本试验中，土壤结构指数平均值为87.78，不同因子组合下 I_{GSS} 存在较大差异，介于75.47～96.57。冻融次数为0、初始含水量为4%、藻结皮覆盖度为10%时，土壤结构指数最小，为75.47；冻融次数为5次、初始含水量12%、藻结皮覆盖度80%时，土壤结构指数最大，达96.57。土壤结构指数最大和最小时的S/N分别为39.70，37.55 dB。

由各因子组合下信噪比响应表可知，S/N均值为38.84 dB，在各因素不同水平下，S/N最大值分别为39.27，39.32，38.98 dB，出现在不同因素的第4水平条件下，即当冻融次数为15次、初始含水量15%、藻结皮覆盖度80%时，各因素信噪比最大，在该因子组合条件下土壤结构指数将达到最大值，该因子组合并不在正交设计的试验中，在L16(4^3)试验确定的最大土壤结构指数试验条件的基础上，增加初始含水量可进一步提高土壤结构指数。

表3 土壤结构指数和信噪比S/N在不同因子组合下的响应

Table 3 Response of soil structure index and signal－to－noise ratio S/N under different factor combinations

因素	土壤结构指数			信噪比(S/N)/dB		
	冻融次数	初始含水量	藻结皮覆盖度	冻融次数	初始含水量	藻结皮覆盖度
水平1	83.03	82.80	86.32	38.37	38.32	38.68
水平2	85.46	83.37	88.03	38.80	38.42	38.85
水平3	90.56	92.35	87.80	39.12	39.30	38.86
水平4	92.07	92.60	88.97	39.27	39.32	38.98

2.2 主效应及因子贡献率分析

利用田口方法将正交试验获得的数据进行主效应分析可知土壤结构指数(I_{GSS})对各因子响应的主效应。由图1可知，土壤结构指数随冻融循环次数、冻融前初始含水量和藻结皮覆盖度的增加而增大，但各因子对土壤结构指数的影响程度不同。通过极差分析判断因素主效应的大小，主效应排序为初始含水量(9.80)＞冻融次数(9.04)＞藻结皮覆盖度(2.65)。说明初始含水量对土壤结构指数的主效应最大，其次为冻融次数；藻结皮覆盖度对土壤结构指数的主效应最小。同一因素下不同水平对试验结果的主效应也存在差异，在初始含水量和藻结皮盖度不变时，冻融次数从5次增加到10次时，土壤结构指数变化最为明显，即在冻融5～10次存在1个临界点使土壤结构发生剧烈变化。同理，在冻融和藻结皮覆盖条件下，初始含水量在8%～12%时，存在临界含水量使土壤结构变化最显著。

不同因素对土壤结构指数影响的贡献率不同，其中初始含水量对土壤结构指数的影响达显著水平($p<0.05$)，其余因子均未达到显著水平(表4)。各因子对土壤结构指数影响的贡献率表现为初始含水量(52.17%)＞冻融次数(31.95%)＞藻结皮覆盖度(2.12%)，与因子主效应排序一致，其中，误差项的贡献率达到13.76%，即在试验过程中，环境中的噪音因子对土壤结构指数存在一定的影响，且这种影响大于藻结皮覆盖度对土壤结构的影响。

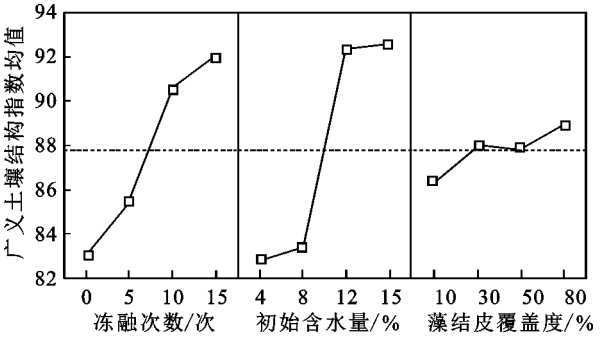

图1 不同试验条件下土壤结构特征的主效应

Fig. 1 Main effects of soil structure characteristics under different experimental conditions

表4 基于方差分析的各因子对土壤结构指标的显著性检验

Table 4 Significance test of soil structure index of each factor based on ANOVA

因子	自由度	连续平方和	均方差	F值	p值	贡献率/%
冻融次数	3	216.43	72.142	4.64	0.052	31.95
初始含水量	3	353.45	117.817	7.58	0.018	52.17
藻结皮覆盖度	3	14.38	4.795	0.31	0.819	2.12
残差误差	6	93.23	15.538	—	—	—
合计	15	677.49	—	—	—	—

2.3 模型检验与田口预测

在田口方法中，可以通过田口预测模型来对不同因子组合下土壤结构指数的响应值和信噪比进行预测。为确保预测结果的有效性，在预测前应对模型进行方差检验。图2a为使用田口预测模型对正交设计试验各因子组合的土壤结构指数响应值的预测结果与实测结果的散点图。

结果表明，田口模型预测结果较高，预测值与实测值决定系数(R^2)为 0.862($p<0.01$)。在预测过程中，所有田口预测值和实测值均分布在 1∶1 中心线附近，且中心线两侧的散点数量各占 50%，其中，仅有 3 组预测结果偏离中心线，其余均在 1∶1 中心线附近。对土壤结构指数实测值与预测值进行残差分析，图 2b 展示拟合结果的正态概率图。结果显示，拟合结果服从正态分布($p>0.05$)，且正态概率图为直线型，无偏离的异常值，表明预测模型符合原假设，预测结果较好。结合分析中确定的土壤结构指数最佳因子组合，使用田口预测模型对其进行预测，当输入冻融次数 15 次、初始含水量 15%，藻结皮覆盖度 80%时，土壤结构指数最大，其预测值为 98.09，信噪比为 39.89 dB。

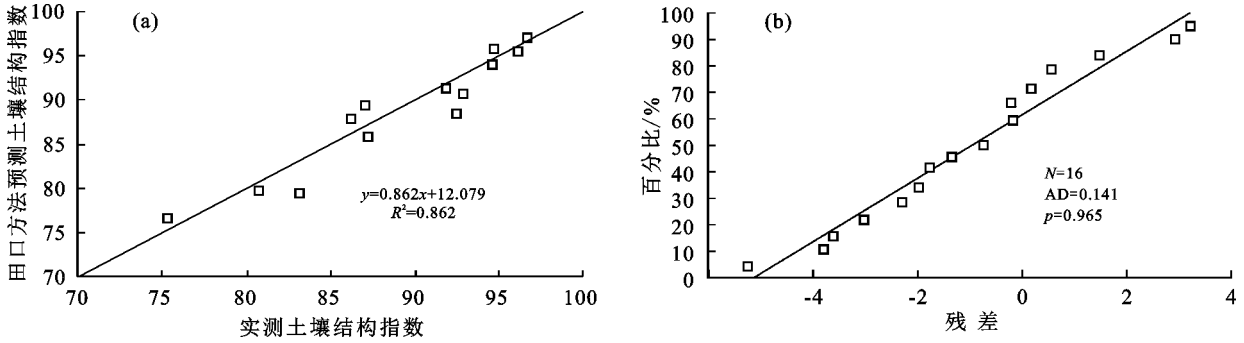

图 2　田口预测模型及残差检验

Fig. 2　Taguchi prediction model and residual test

2.4　土壤结构指数变化因素探讨

图 3 为土壤三相结构的二维三相图。结果表明，土壤三相结构距离(STPSD)随着冻融次数的增加，呈先增加后减小的趋势。当冻融次数从 0 次增加到 5 次时，STPSD 增加 18.00%，土壤液相比由 33.56%增加至 36.92%；而当冻融次数从 5 次增加到 15 次时，STPSD 则减小 35.20%，且土壤液相比减小至 31.10%。土壤液相比例变化趋势与土壤结构距离变化趋势一致。土壤气相比随冻融次数的增加则呈先减小后增加的趋势，冻融次数为 0，5，10，15 次时，其土壤气相比分别为 11.66%，9.87%，13.29%和 14.73%。土壤固相比例受冻融次数影响较小，这是因为风沙土土质松散，冻融过程中土体易发生形变，冻胀应力得到缓冲，土粒间的挤压破碎效果不明显。

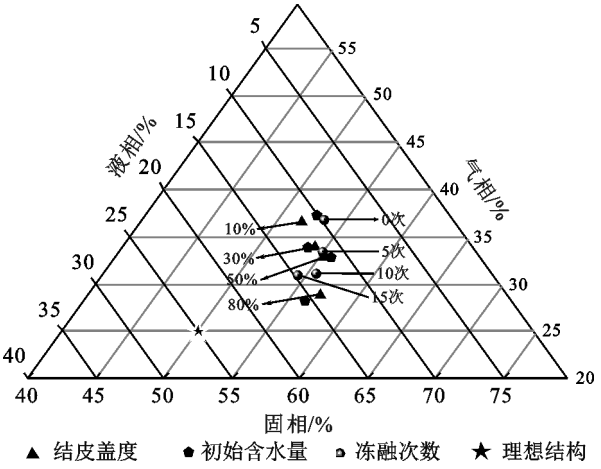

图 3　土壤三相结构

Fig. 3　Three－phase structure of soil

此外，土壤结构距离随藻结皮覆盖度的增加呈减小趋势。当藻结皮盖度为 10%时，STPSD 为 17.86，藻结皮盖度从 10%增加至 80%时，STPSD 减小 24.50%。高结皮盖度土样液相比普遍高于低覆盖度结皮土样，说明藻结皮覆盖可以降低冻融过程中土壤水分的散失，延长水分在土壤中的滞留时间。

图 4 为各因子组合条件下测得的土壤粒径组成分布图。随初始含水量的增加，土壤大颗粒(砂粒)含量呈减小的趋势，由 85.04%减小至 83.91%，小颗粒(粉粒＋黏粒)含量增加从 14.96%增加至 16.09%；土壤砂粒含量随冻融次数和藻结皮覆盖度的增加均呈减小的趋势，与之趋势相同，分别减小 2.41%和 2.04%。本试验中，各因子不同水平下土壤粒级在变化范围仅为 2%～3%，在冻融和藻结皮覆盖条件下供试土壤粒径变化并不显著，土壤结构指数的差异多源于土壤孔隙结构及含水率的变化，受土壤颗粒变化的影响不显著。

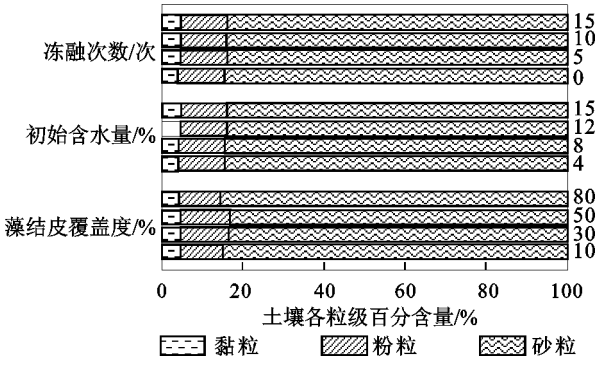

图 4　土壤粒径分布堆积

Fig. 4　Soil particle size distribution accumulation chart

3 讨论

本研究通过田口方法分析冻融次数、初始含水量及藻结皮覆盖度对土壤结构指数的影响，分别测定土壤三相结构及粒径组成，探讨冻融条件下藻结皮覆盖对土壤结构的影响。结果表明，冻融循环主要通过改变土壤气相和液相比例来影响土壤结构，随着冻融次数增多土壤液相比例逐渐减少，气相比例逐渐增加，而固相变化不大。这与王恩姮等[13]研究冻融对黑土区土壤三相结构的影响结果不一致，王恩姮等[13]认为冻融作用会增加黑土固相的比例，而液相和气相相对减小。对于黏重的黑土来说，其质地黏密，土壤颗粒间距较小，更利于土壤颗粒间应力的传导，使黑土颗粒挤压破碎，黑土大颗粒细化，随着土壤水分冻融迁移，细颗粒逐渐填充孔隙，导致土壤固相比例的增加。而对于疏松的风沙土来说，颗粒间孔隙较大，冻融作用使土壤内部压缩形变，冻胀应力得到释放，因此土壤颗粒不易破碎，粒径组成变化不明显。冻融主要改变土壤的含水量与孔隙结构，对于土壤固体颗粒的增加作用不明显。冻融次数对土壤三相结构的影响受藻结皮覆盖的制约，藻结皮覆盖度越高，冻融对土壤液相比例的影响越小。随着冻融过程的进行，土壤水分不断上下迁移，冻结时水分向冻结锋面聚集，水分汇聚于土壤表面与外界形成交换，水分容易流失。而在融化时上层水分先融化，下层未融的土壤阻碍水分的下移，从而加速土壤水分的散失[25]。而藻结皮具有较好的保水吸水能力，对于减小土壤表面的水分散失有较大的作用[26]。

大量研究[27]表明，冻融作用改变土壤粒径组成。在冻融过程中，按有无生物的参与可将冻融对土壤颗粒组成的影响分为2类：一是在无生物的参与下，冻融破坏土壤团粒结构，破碎土壤颗粒，冻融交替过程中土壤大颗粒相互挤压、破碎，使土壤大粒径物质向小粒径转化。田俊峰等[28]就冻融对黄土压缩特性的影响进行研究，测定冻融前后的土壤粒级的变化发现，冻融作用可以破坏土壤颗粒间的胶结物质，并且在持续的冻融后土壤粗颗粒含量减小，细颗粒增加。二是在微生物及植物的作用下，土壤本身性质会因生物活动而受到影响，在冻融的作用下这种影响被放大或者抑制。郭冬楠等[29]对冻融交替下土壤微生物活性及有机碳密度的研究中发现，冻融作用可以改变土壤气体交换和溶质的运移以及微生物活性，从而影响土壤结构。本研究中涉及冻融作用对土壤粒径的影响的关系属于后者，生物结皮在生长发育过程中由于藻或真菌假根对土壤进行缠绕、胶结同时分泌有机酸等物质，并且随着生物结皮的生长发育土壤颗粒不断细化[30]。藻结皮发育过程中细化土壤的同时使其胶结形成团聚体，改善土壤结构，但在冻融环境下，温度降低使藻类细胞的生命活动减弱，细胞进入休眠甚至处于假死状态，故在冻融循环过程中藻结皮覆盖对土壤结构的作用小于冻融本身。

4 结论

(1)冻融条件下，土壤结构指数随冻融次数、初始含水量和藻结皮覆盖度的增加而增加，各因子对土壤结构指数的主效应存在差异，表现为初始含水量＞冻融次数＞藻结皮覆盖度；不同因素对土壤结构指数变化的贡献率分别为初始含水量(52.17%)＞冻融次数(31.95%)＞藻结皮覆盖度(2.12%)。

(2)正交试验和田口分析可以确定最佳试验组合，并预测试验结果，具有较高的预测精度，通过对冻融次数、初始含水量、藻结皮盖度3个因素4个水平设计L6(4^3)正交试验，测定并计算土壤结构指数，结果表明最佳试验组合为15次冻融循环、15%初始含水量和80%藻结皮覆盖，田口预测结果为I_{GSS}＝98.09，信噪比为39.89 dB。

(3)供试土壤的三相结构在冻融过程中表现为土壤液相比例减少、气相比例增加、固相比例无显著差异，说明土壤结构指数的变化主要来自于土壤水分的散失以及孔隙的扩张。藻结皮覆盖可以减缓土壤水分的散失，在一定程度上减缓土壤结构的变化。

参考文献：

[1] 李智广，刘淑珍，张建国，等.我国冻融侵蚀的调查方法[J].中国水土保持科学，2012，10(4)：1-5.
LI Z G, LIU S Z, ZHANG J G, et al. Survey method of freeze－thaw erosion in China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(4): 1-5.

[2] 范昊明，蔡强国.冻融侵蚀研究进展[J].中国水土保持科学，2003，1(4)：50-55.
FAN H M, CAI Q G. Research progress on freeze-thaw erosion[J]. Science of Soil and Water Conservation 2003, 1(4): 50-55.

[3] LAL R. Soil structure and sustainability[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 1991, 1(4): 67-92.

[4] 彭新华，张斌，赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J].土壤学报，2004，41(4)：618-623.
PENG X H, ZHANG B, ZHAO Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618-623.

[5] 姜宇，刘博，范昊明，等.冻融条件下黑土大孔隙结构特征研究[J].土壤学报，2019，56(2)：340-349.
JIANG Y, LIU B, FAN H M, et al. Macropore structure characteristics of black soil under freeze-thaw con-

dition[J].Acta Pedologica Sinica,2019,56(2):340-349.

[6] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):115-120.
GAO G L, DING G D, ZHAO Y Y, et al. Effects of biological soil crusts on soil particle size characteristics in Mu Us Sandland[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):115-120.

[7] 桑琦明,郑粉莉,王一菲,等.东北黑土区冻融、风力、水力交互作用对坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):87-95.
SANG Q M, ZHENG F L, WANG Y F, et al. An experimental study on freeze-thaw, wind and water agents impacts on hillslope soil erosion in Chinese Mollisol region[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(2):87-95.

[8] 朱丽琴,曹文华,马波,等.冻融条件下藻结皮对土壤分离能力的影响[J].水土保持学报,2023,37(1):71-76.
ZHU L Q, CAO W H, MA B, et al. Effects of algal crusts on soil detachment capacity under freeze-thaw conditions[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(1):71-76.

[9] GAO L Q, BOWKER M A, XU M X, et al. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China[J]. Soil Biology and Biochemistry,2017,105:49-58.

[10] 孙宝洋,李占斌,肖俊波,等.冻融作用对土壤理化性质及风水蚀影响研究进展[J].应用生态学报,2019,30(1):337-347.
SUN B Y, LI Z B, XIAO J B, et al. Research progress on the effects of freeze-thaw on soil physical and chemical properties and wind and water erosion[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(1):337-347.

[11] KONRAD J M. Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts[J]. Cold Regions Science and Technology,1989,16(3):291-303.

[12] WALDER J S, HALLET B. The physical basis of frost weathering: Toward a more fundamental and unified perspective[J].Arctic and Alpine Research,1986,18(1):27-32.

[13] 王恩姮,赵雨森,陈祥伟.典型黑土耕作区土壤结构对季节性冻融的响应[J].应用生态学报,2010,21(7):1744-1750.
WANG E H, ZHAO Y S, CHEN X W. Responses of soil structure to seasonal freezing-thawing in a typical black soil cultivated region[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(7):1744-1750.

[14] 明姣,盛煜,金会军,等.高寒冻土区生物结皮对土壤理化属性的影响[J].冰川冻土,2021,43(2):601-609.
MING J, SHENG Y, JIN H J, et al. The impact of the biological soil crusts on the frozen soil properties in the frozen ground region[J].Journal of Glacology and Gcocryology,2021,43(2):601-609.

[15] 孙福海,肖波,李胜龙,等.黄土高原不同发育阶段生物结皮的导水和持水特征[J].草业学报,2021,30(6):54-63.
SUN F H, XIAO B, LI S L, et al. Effects of biological soil crusts in different developmental stages on soil water permeability and water holding capacity in the Chinese Loess Plateau[J].Acta Prataculturae Sinica,2021,30(6):54-63.

[16] DE SILVA A P, BABUJIA L C, FRANCHINI J C, et al. Soil structure and its influence on microbial biomass in different soil and crop management systems[J].Soil and Tillage Research,2014,142:42-53.

[17] 许欢欢,张宝琦,汪建芳,等.黄土高原典型生物结皮对坡面产流产沙过程的影响[J].水土保持通报,2020,40(6):8-13.
XU H H, ZHANG B Q, WANG J F, et al. Effects of typical biological crusts on slope runoff and sediment load in Loess Plateau region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2020,40(6):8-13.

[18] 张洋,李占斌,牛雯,等.模拟径流条件下覆沙黄土坡面产流产沙过程[J].水土保持学报,2017,31(4):6-10.
ZHANG Y, LI Z B, NIU W, et al. Runoff and sediment yield process on the sand-covered loess slopes under simulated runoff conditions[J].Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(4):6-10.

[19] 焦永亮,李韧,赵林,等.多年冻土区活动层冻融状况及土壤水分运移特征[J].冰川冻土,2014,36(2):237-247.
JIAO Y L, LI R, ZHAO L, et al. Processes of soil thawing-freezing and features of soil moisture migration in the permafrost active layer[J].Journal of Glacology and Gcocryology,2014,36(2):237-247.

[20] 杜宇,李钢铁,安小亮,等.藻类生物结皮人工促进技术的研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2009,30(3):20-23.
DU Y, LI G T, AN X L, et al. The research on artificial promoting technology in algaein[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition),2009,30(3):20-23.

[21] 彭振阳,黄介生,曾文治,等.季节性冻融土壤水分运动规律[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(6):696-700.
PENG Z Y, HUANG J S, ZENG W Z, et al. Water movement regularities of seasonal freezing-thawing soil[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition),2011,44(6):696-700.

[22] SADEGHI S H, MOOSAVI V, KARAMI A, et al. Soil erosion assessment and prioritization of affecting factors at plot scale using the Taguchi method[J].Journal of Hydrology,2012,448/449:174-180.

[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 Glacology and Gcocryology,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.