

增温对内蒙古大青山油松人工林土壤团聚体及有机碳分布的影响

冯辉¹, 马秀枝¹, 李长生², 李泉阳¹, 李顺顺¹, 崔昕远¹

(1. 内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区气象局, 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要: [目的] 分析土壤团聚体粒级组成和稳定性及各级团聚体有机碳含量对模拟增温的响应, 为明晰内蒙古大青山油松人工林土壤结构稳定性和碳储能力在气候变暖背景下的动态变化提供科学依据。[方法] 以内蒙古大青山油松人工林 0—40 cm 土壤为研究对象, 基于连续 4 a 的全年野外模拟增温试验, 采用湿筛法将土壤分成 >0.25 mm, 0.25~0.053 mm, <0.053 mm 这 3 个粒级, 并测量各粒级团聚体内的有机碳含量。[结果] ① 研究区土壤以微团聚体为优势粒级, 增温显著降低了各土层土壤大团聚体和微团聚体含量, 而粉黏粒团聚体含量在各土层中均表现为显著增加, 分别增加 14.92%, 14.01%, 13.84%; ② 与对照相比, 增温后土壤平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 均显著降低, MWD 在各土层分别下降了 5.93%, 3.66% 和 5.68%, GMD 在各土层分别减少 8.83%, 8.41%, 10.63%; ③ 两种处理下各土层中均是土壤粉黏粒有机碳含量最高, 增温使各土层粉黏粒团聚体内的有机碳含量升高却降低了大团聚体和微团聚体内的有机碳含量; 增温后表层土壤总有机碳含量升高, 而 10—20 cm 和 20—40 cm 土层的有机碳含量下降; ④ 在增温条件下土壤粉黏粒团聚体的有机碳贡献率最大, 与对照相比, 增温后土壤粉黏粒的有机碳贡献率各土层分别增加 44.39%, 39.60% 和 43.31%, 其次为微团聚体, 土壤大团聚体的有机碳贡献率最低。[结论] 增温导致土壤团聚体组成发生变化, 破坏了土壤团聚体的稳定性, 并且降低大团聚体和微团聚体内有机碳含量, 表明增温不利于土壤有机碳的物理保护。

关键词: 油松人工林; 模拟增温; 土壤团聚体; 稳定性; 有机碳

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0253-08

中图分类号: S152.4, S714.5

文献参数: 冯辉, 马秀枝, 李长生, 等. 增温对内蒙古大青山油松人工林土壤团聚体及有机碳分布的影响 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 253-260. Feng Hui, Ma Xiuzhi, Li Changsheng, et al. Effects of warming on soil aggregates and organic carbon distribution in *Pinus tabulaeformis* plantations, Daqingshan Mountains, Inner Mongolia [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 253-260. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.010; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.010.

Effects of warming on soil aggregates and organic carbon distribution in *Pinus tabulaeformis* plantations, Daqingshan Mountains, Inner Mongolia

Feng Hui¹, Ma Xiuzhi¹, Li Changsheng², Li Xiaoyang¹, Li Shunshun¹, Cui Xinyuan¹

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2. Meteorological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China)

Abstract: [Objective] The response of soil aggregate grain size composition and stability and the organic carbon content of all aggregate levels to simulated warming were analyzed to provide a scientific basis for the dynamic changes in soil structure stability and carbon storage capacity of the *Pinus tabulaeformis* plantation forest in Daqingshan Mountains, Inner Mongolia, in the context of climate warming. [Methods] Soil samples were collected from a depth of 0—40 cm from a *P. tabulaeformis* plantation on Daqing Mountains, Inner Mongolia. Based on a four-year field warming experiment, wet sieving was used to separate the soil into three aggregate size

收稿日期: 2024-11-10

修回日期: 2025-01-13

采用日期: 2025-01-14

资助项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目“内蒙古大青山油松人工林生态系统碳通量及响应机制研究”(2022LHMS03017); 内蒙古自治区自然科学基金项目“大青山油松人工林土壤碳循环关键过程对模拟增温的响应及机理”(2022MS03054)

第一作者: 冯辉(1999—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区锡林郭勒盟人, 硕士研究生, 研究方向为森林土壤碳循环。Email: 3119863516@qq.com。

通信作者: 马秀枝(1974—), 女(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 主要从事陆地生态系统碳氮循环及温室气体相关研究。Email: Luckmxy@imau.edu.cn。

fractions, namely, >0.25 mm, $0.25-0.053$ mm, and <0.053 mm. The organic carbon content of each aggregate fraction was measured. [Results] Microaggregates were the dominant fraction in the study area. Warming reduced the content of macroaggregates and microaggregates in all soil layers. Meanwhile, the content of silt-clay aggregates increased significantly by 14.92%, 14.01%, and 13.84% in each layer, respectively. Compared to the control, the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates decreased significantly under warming. The MWD decreased by 5.93%, 3.66%, and 5.68% in each layer, whereas the GMD decreased by 8.83%, 8.41%, and 10.63%, respectively. Under both treatments, the organic carbon content was the highest in the silt-clay fraction. Warming increased the organic carbon content in the silt-clay fraction but decreased it in the macroaggregate and microaggregate fractions. The total organic carbon content increased in the surface soil layer but decreased in the 10—20 cm and 20—40 cm layers. Under warming conditions, the silt-clay fraction contributed the most to the SOC. Compared with the control, the contribution rate of organic carbon in the silt-clay fraction increased by 44.39%, 39.60%, and 43.31% in each layer, respectively, followed by the microaggregate fraction. The macroaggregate fraction had the lowest contribution. [Conclusion] Warming altered the composition of soil aggregates, destabilized the soil aggregate structure, and reduced the organic carbon content in macro- and microaggregates, indicating that warming was detrimental to the physical protection of soil organic carbon.

Keywords: *Pinus tabulaeformis* plantations; simulated warming; soil aggregates; stability; organic carbon

土壤是陆地最大的有机碳库,其细微变化都会影响全球碳循环的收支平衡^[1]。团聚体作为土壤结构的基本单位和固持土壤有机碳的重要场所^[2],其稳定性和有机碳含量是衡量土壤质量的重要指标,对维持土壤有机碳库稳定性有直接影响^[3]。土壤团聚体的形成和稳定与土壤有机碳之间关系密切,一方面团聚体形成是土壤固碳的重要途径之一,在土壤团聚的过程中有机碳被包裹起来或存在于团聚体空隙之间,形成对有机碳的物理保护从而降低有机碳矿化率^[4]。另一方面,土壤团聚体的形成和稳定离不开有机碳的胶结作用,有机碳会促进土壤团聚体的形成,另外有机碳含量的高低也会影响到土壤团聚体稳定性^[5-6]。不同的生态系统具有不同的土壤有机碳含量,这必然会影响到土壤团聚体的组成,进而影响不同大小团聚体中有机碳的分布^[7]。

工业革命以来,人类活动排放出的巨量二氧化碳及其他温室气体导致全球升温加剧^[8]。气候变暖对土壤有机碳库的影响是必然的,然而气候变暖对土壤团聚体内有机碳含量及团聚体稳定性的影响却备受争议。Chang Ruiying等^[9]在青藏高原开展的增温试验表明,短期增温对土壤有机碳含量影响不大,但长期增温使得土壤粉黏粒内的有机碳含量增加。对冰岛云杉林土壤进行增温 10 a 后发现,增温导致土壤团聚体稳定性下降并且降低了土壤大团聚体和微团聚体内的有机碳含量,但粉黏粒组分有机碳含量增加^[10]。与此相反的是张欣等^[11]在内蒙古荒漠草原开展的模拟增温试验发现增温显著降低了大团聚体内有机碳含量,对其他粒级无影响,且增温提高了土

壤团聚体的稳定性。因此可知,不同生境类型对气候变暖的反应和适应方式十分复杂,生态系统中植物和微生物热适应现象和资源利用策略的调整决定了土壤有机碳库对气温升高反应的方向和程度^[12]。因此有必要在不同生态系统中开展土壤团聚体对增温的响应研究,深入探讨气候变暖背景下土壤团聚体有机碳周转及团聚体稳定性的影响机制。

全球变暖带来的严峻挑战使得人们对森林生态功能的认识不断提高,20世纪以来,许多国家都开始建立生态防护林。人工林作为陆地生态系统的重要组成部分,其碳储能力和动态变化在全球碳循环中发挥着重要作用。中国自20世纪70年代开始着手建设三北防护林,内蒙古大青山位于阴山山脉中段,地处干旱半干旱区,是三北防护林体系建设的重要地段也是内蒙古高原中部重要的森林生态系统,受“温室效应”影响较为明显^[13],该地区营造了大面积的人工油松林,通过防止水土流失、增强水源涵养,发挥着重要的生态防护功能。冯茹等^[14]在该地区进行的模拟增温试验发现,增温会降低油松人工林土壤中的有机碳含量,但土壤团聚体及其有机碳分布是否也呈现相同的变化趋势,且气候变暖对土壤团聚体的稳定性是否产生影响,均需进一步探究。因此,本研究以内蒙古大青山油松人工林土壤为研究对象,基于连续4a的全年野外模拟增温,系统研究增温对土壤团聚体有机碳分布及其稳定性的影响,有助于预测未来气候情境下内蒙古大青山油松人工林土壤碳库的动态变化,为正确认识 and 评估油松人工林土壤结构稳定性提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古大青山中段(111°46′—112°10′E, 40°51′—41°8′N),平均海拔1 211 m。土壤主要为淋溶灰褐土、灰褐土和栗钙土,土质为壤土,土层深度在30—50 cm。属大陆性半干旱季风气候,四季明显,春季多风沙;夏季气温宜人,降雨量大;秋季凉

爽,气温迅速下降,降雨稀少;冬季寒冷,雨雪稀少,但全年光照充足。年均降水量300~450 mm,年均蒸发量可达年均降水量的4倍,年均温度10℃,极端高温37℃,极端低温-20.3℃。林下草本植物包括并头黄芩(*Scutellaria scordifolia*)、羊草(*Leymus chinensis*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和裂叶荆芥(*Nepeta tenuiflora*)等。样地基本信息详见表1。

表1 试验样地基本情况

Table 1 Basic information of experimental plot

树种	树龄/a	海拔高度/m	坡度/(°)	坡向	胸径/m	树高/m	枝下高/m	郁闭度
油松林	38	1 160	13	阴坡	9.20	9.36	1.71	0.94

1.2 样地设置及土样采集

1.2.1 样地设置 试验样地位于内蒙古大青山中段的乌素图气象站东侧油松人工林区,因野外没有电力供应,本研究选择开顶式(open top chamber, OTC)增温室进行模拟增温,选用简单易行、经济实惠的聚碳酸酯(透光率90%)为材料,搭建一个顶部直径1.5 m,底部直径2.75 m,高2.42 m的八面体增温装置。OTC常年固定在样地内,避免扰动,该增温装置于2019年10月安装使用,至土壤采样时已连续全年增温4 a,年均增温1℃。在油松人工林区内选择地势平缓且立地条件相似的样地,确定3个20 m×20 m的样方,每个样方设置增温(OTC)和对照(CK)两个处理,共6个小区,每个样方间隔10 m以上,增温和对照小区间隔5 m以上。

1.2.2 土样采集 于2023年8月,在所选样地内进行土壤样品采集,采集方法为每个样方按对角线随机采集3个样点,按照0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm土层分层,同层土壤混合均匀。同时用环刀法取原状土,测定土壤含水量和容重。土样过2 mm筛后一部分于4℃冷藏保存,一部分在阴凉通风处晾干,用于土壤团聚体组成分析及土壤理化性质和有机碳含量的测定。

1.3 土壤样品测定

1.3.1 土壤理化性质测定 混合土样自然风干后过2 mm筛进行理化性质的测定。土壤有机碳含量测定采用重铬酸钾氧化外加加热法,全氮含量测定采用半微量凯氏定氮法,全磷含量测定采用钼锑抗比色法,土壤pH值采用电位法测定,土壤容重用环刀法测定,烘干法测定土壤含水量^[14]。

1.3.2 土壤团聚体分级 Six等^[15]提出根据团聚体的水稳性,利用湿筛法以0.25 mm为界筛分,>0.25 mm的为团聚体,0.25~0.053 mm的为微团聚体,<0.053 mm的为粉黏粒。湿筛方法为:称取

20 g过2 mm筛的风干土在去离子水中浸泡10 min,之后在水流的作用下依次通过不同孔径的筛子(0.25 mm,0.053 mm),湿筛后的各粒级土壤洗入已烘干编号的铝盒内,在65℃下进行烘干并称重,计算各粒级团聚体质量百分比。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 计算方法 土壤团聚体有机碳贡献率^[16]:

$$R = \frac{S_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot m_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: i 为第 i 级团聚体; n 为团聚体总级数; R 为团聚体对有机碳的贡献率; S_i 为第 i 级团聚体的有机碳含量; m_i 为第 i 级团聚体的质量(g)。

土壤稳定性指标用平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)表征^[16],计算公式为:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n (W_i X_i) \quad (2)$$

$$\text{GMD} = \exp \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \ln X_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \right\} \quad (3)$$

式中:团聚体 W_i 为 i 粒级土壤团聚体质量分数(%); X_i 为第 i 粒级土壤团聚体的平均直径(mm)。

1.4.2 数据分析 使用Excel 2019软件对数据进行整理;使用SPSS 27.0软件对土壤团聚体粒级组成和有机碳含量等进行差异性分析;使用Origin 2021软件中的Correlation Plot对土壤理化性质、团聚体粒级组成及稳定性指数和团聚体有机碳含量及分布进行相关性分析;使用Origin 2021软件绘图。

2 结果与分析

2.1 增温对土壤团聚体粒级组成的影响

由图1可以看出,内蒙古大青山中段油松人工林

土壤在增温和对照处理中,各土层均以土壤微团聚体为优势粒级。增温后各土层土壤微团聚体含量显著降低,分别下降 3.86%,5.36% 和 3.86%,土壤大团聚体含量下降且在 0—10 cm 及 20—40 cm 土层中显著下降,分别下降 6.74%,3.67% 和 6.47%,但是增温后各土层的粉黏粒团聚体含量显著增加,分别增加了 14.92%,14.01%,13.84%。随着土层深度的加深,土壤大团聚体含量在两种处理下均表现为减小趋势,且表层土壤大团聚体含量显著高于其余两层;两种处理下土壤微团聚体含量随土层加深而逐渐增加,且表层土壤微团聚体含量显著小于其余两层;两种处理下土壤粉黏粒含量随土层的变化均表现为先降后升,但变化并不显著。

2.2 增温对土壤团聚体稳定性的影响

由表 2 可知,与对照相比,增温条件下土壤 GMD, MWD 均显著降低。GMD 在各土层分别下降了 8.83%,8.41% 和 10.63%,MWD 在各土层分别下降了 5.93%,3.66%,5.68%。增温和对照条件下 MWD 随着土层深度的增加逐渐下降,增温条件下 20—40 cm 土层的 MWD 显著小于 0—20 cm 土层,对照处理中

土壤 MWD 变化显著,表现为:0—10 cm > 10—20 cm > 20—40 cm;增温处理下 GMD 随土层加深表现为先增后减,对照处理下 GMD 随土层加深而增大,但变化均不显著。

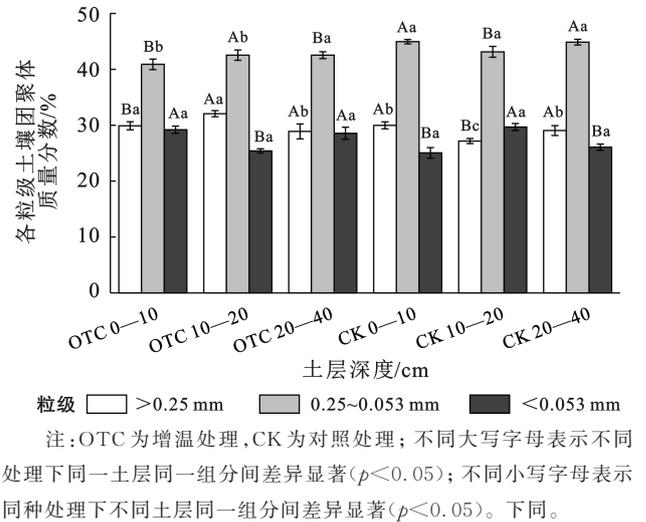


图 1 研究区土壤团聚体质量分数分布特征
Fig.1 Characteristics of soil aggregate mass fraction distribution at study area

表 2 研究区土壤团聚体稳定性指标

Table 2 Indicators of soil aggregate stability at study area

土层深度/cm	平均重量直径(MWD)		几何平均直径(GMD)	
	OTC	CK	OTC	CK
0—10	0.406 1±0.007 1 ^{Ba}	0.431 7±0.011 2 ^{Aa}	0.162 1±0.005 9 ^{Ba}	0.177 8±0.005 0 ^{Aa}
10—20	0.397 0±0.016 1 ^{Ba}	0.412 1±0.010 2 ^{Ab}	0.163 4±0.008 7 ^{Ba}	0.178 4±0.009 3 ^{Aa}
20—40	0.378 9±0.005 5 ^{Bb}	0.401 7±0.012 1 ^{Ac}	0.160 5±0.005 9 ^{Ba}	0.179 6±0.011 8 ^{Aa}

注:数据为平均值±标准误。

2.3 增温对土壤团聚体有机碳含量分布及贡献率的影响

2.3.1 增温对土壤团聚体有机碳含量的影响 由图 2 可知,两种处理下不同土层土壤团聚体有机碳均以粉黏粒组分最高,其次为土壤大团聚体,土壤微团聚体的有机碳含量最低。增温后土壤粉黏粒组分的有机碳含量升高,但变化并不显著;土壤大团聚体有机碳含量增温后下降,在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层显著下降,各土层分别下降了 16.13%,31.63%,33.15%;与 CK 相比,增温后微团聚体有机碳含量下降,在 0—10 cm 土层下降显著,各土层分别下降了 36.81%,15.94%,17.61%。土壤粉黏粒有机碳含量在两种处理下随着土层深度的增加均呈下降趋势;不同处理下大团聚体有机碳含量随土层深度的增加而减小,且在增温条件下 10—20 cm 和 20—40 cm 土层大团聚体有机碳含量下降显著;随着土层深度的

增加,微团聚体有机碳含量逐渐减小,其中对照处理下 10—20 cm 和 20—40 cm 土层下降显著。

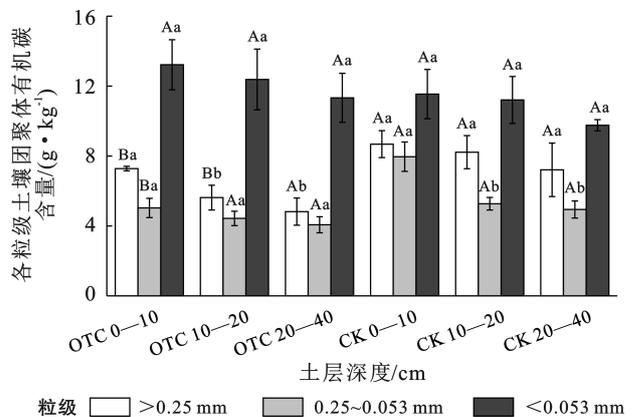


图 2 研究区土壤团聚体在不同土层的有机碳含量
Fig.2 Organic carbon content of soil aggregates in different soil layers at study area

2.3.2 增温对土壤团聚体有机碳贡献率的影响 如图3所示,增温条件下土壤粉黏粒团聚体的有机碳贡献率最高,在各土层有机碳贡献率依次为48.01%,50.20%和51.59%,与CK相比,增温后土壤粉黏粒团聚体有机碳贡献率显著增加,在各土层分别增加44.39%,39.60%,43.31%;土壤微团聚体有机碳贡献率受增温影响在各土层分别下降31.70%,9.93%和17.68%,在0—10 cm和20—40 cm土层中显著降低;增温使土壤大团聚体的有机碳贡献率减小,且在10—20 cm和20—40 cm土层中显著降低,各土层分别减小了10.59%,32.45%,30.72%。两种处理下土壤粉黏粒团聚体有机碳贡献率均随着土层加深而逐渐增加;增温下不同土层的微团聚体有机碳贡献率无显著变化,对照处理下的表层土壤微团聚体有机碳贡献率显著高于其余土层;增温条件下,土壤大团聚体有机碳贡献率随土壤加深逐渐减小,CK处理下土壤大团聚体有机碳贡献率随土层加深表现为先增后降。

2.4 增温对土壤理化性质的影响

由表3可知,增温后土壤pH值升高但并不显著,土壤容重增加且在20—40 cm土层达到显著水平,土壤含水量显著降低,土壤孔隙度下降但并不显著。增温后全土SOC含量在0—10 cm土层中增加,但在10—20 cm以及20—40 cm土层下降,增温与CK处

理下全土SOC含量变化无显著差异;增温条件下,土壤SOC含量随着土层加深而减小,并且表层土壤SOC含量显著高于其余土层,CK处理下土壤SOC含量随着土层加深而减小并且20—40 cm土壤SOC含量显著低于其余土层。土壤全氮(TN)含量在增温后下降,不同处理下土壤TN含量均随着土层变化而逐渐减小,且增温处理下各土层TN含量下降具有显著差异,CK处理下表层土壤的TN含量显著高于其余土层。增温后土壤C:N在0—10 cm和20—40 cm土层升高但10—20 cm土层降低,并且随着土层加深而升高,CK处理下C:N表现为先升后降。

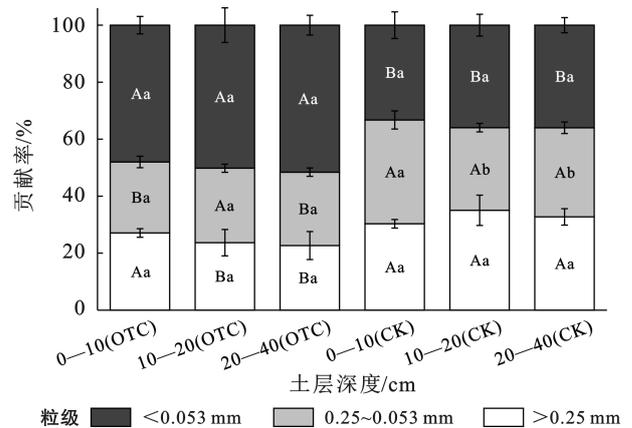


图3 研究区土壤团聚体在不同土层的有机碳贡献率
Fig.3 Organic carbon contribution of soil aggregates in different soil layers at study area

表3 研究区增温对土壤理化性质的影响
Table 3 Effect of warming on soil physicochemical properties at study area

指标	土层深度					
	0—10 cm		10—20 cm		20—40 cm	
	OTC	CK	OTC	CK	OTC	CK
pH值	8.29±0.02 ^{Aa}	8.26±0.02 ^{Aa}	8.31±0.02 ^{Aa}	8.29±0.03 ^{Aa}	8.32±0.02 ^{Aa}	8.30±0.02 ^{Aa}
容重/(g·cm ⁻³)	1.29±0.03 ^{Aa}	1.24±0.03 ^{Aa}	1.34±0.03 ^{Ab}	1.27±0.04 ^{Ab}	1.41±0.01 ^{Ac}	1.32±0.03 ^{Bb}
含水量/%	8.57±0.38 ^{Ba}	10.50±0.68 ^{Aa}	7.58±0.34 ^{Bb}	9.59±0.75 ^{Aa}	6.44±0.30 ^{Bc}	9.46±0.46 ^{Aa}
孔隙度/%	48.23±1.17 ^{Aa}	50.07±1.11 ^{Aa}	46.64±2.41 ^{Aa}	48.76±1.65 ^{Aa}	45.78±2.70 ^{Aa}	48.17±1.81 ^{Aa}
SOC/(g·kg ⁻¹)	9.01±0.52 ^{Aa}	8.89±0.40 ^{Aa}	7.09±0.39 ^{Ab}	7.86±0.89 ^{Aa}	5.84±0.88 ^{Ab}	6.38±0.62 ^{Ab}
TN/(g·kg ⁻¹)	0.69±0.02 ^{Aa}	0.72±0.02 ^{Aa}	0.53±0.02 ^{Ab}	0.58±0.05 ^{Ab}	0.43±0.04 ^{Ac}	0.52±0.05 ^{Ab}
C:N	13.14±1.13 ^{Aa}	12.30±0.61 ^{Aa}	13.32±1.08 ^{Aa}	13.62±0.70 ^{Aa}	13.52±1.93 ^{Aa}	12.28±1.96 ^{Aa}

注:SOC为总有机碳;TN为全氮。

2.5 土壤理化性质与土壤团聚体相关特征的相关性分析

由图4可知,土壤容重与土壤含水量、MWD、大团聚体含量、大团聚体有机碳含量呈极显著负相关,与SOC, TN、微团聚体有机碳含量呈显著负相关;土壤含水量与粉黏粒团聚体的有机碳贡献率呈极显著负相关,与粉黏粒团聚体含量呈显著负相关,与MWD、大团聚体有机碳含量呈极显著正相关关系,与GMD、大团聚体含量、大团聚体有机碳贡献率呈

显著正相关;土壤pH值与SOC, TN、大团聚体有机碳含量呈显著负相关,与MWD、大团聚体含量、微团聚体有机碳含量呈极显著负相关;SOC与TN呈极显著正相关,与大团聚体含量呈显著正相关;TN与MWD、大团聚体含量呈显著正相关;MWD与大团聚体含量、大团聚体有机碳含量、微团聚体有机碳含量呈极显著正相关;GMD与粉黏粒团聚体含量、粉黏粒团聚体有机碳贡献率呈极显著负相关,与大团聚体有机碳贡献率呈显著正相关;大团聚体含量与

研究中增温降低了MWD和GMD,表明增温处理会降低大青山油松人工林土壤团聚体稳定性。乔磊磊^[28]通过长期增温试验也发现增温会降低灌丛样地土壤团聚体稳定性。通常土壤大团聚体比例越高土壤就越稳定,土壤MWD就越大^[15]。由图4也可以看出土壤MWD与大团聚体含量呈极显著正相关关系,土壤GMD与粉黏粒团聚体含量之间呈极显著负相关。由于土壤大团聚体含量下降,因此土壤MWD下降。而土壤粉黏粒团聚体含量的增加导致土壤GMD显著下降。由表2可以看出,随土层深度的增加MWD值也随之减小,3种不同深度土层的团聚体稳定性为:表层>中层>深层,同时随深度的增加大团聚体含量逐渐减少,土壤微团聚体含量增加。这与唐晓红等^[29]研究结果一致。土壤养分受垂直分布规律的制约,随着土层加深,有机质、植物根系和菌丝含量随之降低,而土壤团聚体的形成和稳定离不开有机质、植物根系和菌丝之间的缠绕^[30],因此导致团聚体稳定性也随土层深度增加而降低。

团聚体对有机碳的贡献率由团聚体质量分数和团聚体有机碳含量共同决定。本研究发现土壤粉黏粒团聚体的有机碳贡献率最高,并且增温后粉黏粒有机碳贡献率升高而土壤微团聚体和土壤大团聚体的有机碳贡献率降低,这是由于增温后土壤大团聚体和微团聚体质量分数及有机碳含量下降而粉黏粒组分含量和有机碳含量均升高,粉黏粒的有机碳含量最高因此其有机碳贡献率最高。

4 结论

内蒙古大青山中段油松人工林土壤以微团聚体为主要组成部分,本研究中增温处理使土壤大团聚体和土壤微团聚体破碎成粉黏粒,并且土壤MWD和GMD下降,说明增温会影响土壤团聚体的形成且降低土壤团聚体稳定性;增温条件下土壤大团聚体和微团聚体有机碳含量的降低会影响到土壤碳储能力,尽管土壤粉黏粒有机碳含量增加,但其中包括大团聚体和微团聚体内原本含有的一部分有机碳,若是短期内没有其他形式的碳补充势必会降低碳储量,进而影响到土壤有机碳的动态平衡。综上表明,气候变暖可能会对内蒙古大青山油松人工林土壤结构及土壤碳库产生消极影响。

参考文献(References)

[1] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. *Nature*, 2011,478(7367):49-56.

[2] 李可依,愚广灵,陈末,等.不同利用方式对高寒草地土壤团聚体稳定性及其有机碳含量分布的影响[J].*水土*

保持通报,2023,43(1):332-340.

Li Keyi, Yu Guangling, Chen Mo, et al. Effects of different land utilization methods on soil aggregate stability and organic carbon content in alpine grassland [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):332-340.

[3] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004,79(1):7-31.

[4] 朱锷恒,段良霞,李元辰,等.土壤团聚体有机碳研究进展[J].*中国农学通报*,2021,37(21):86-90.

Zhu Kunheng, Duan Liangxia, Li Yuanchen, et al. Research progress of organic carbon in soil aggregates [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021,37(21):86-90.

[5] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998,62(5):1367-1377.

[6] 刘哲,张扬,雷娜,等.优化施肥方式对黄土高原新增耕地土壤有机质含量和团聚体特性的影响[J].*水土保持通报*,2021,41(5):99-106.

Liu Zhe, Zhang Yang, Lei Na, et al. Effects of optimized fertilization treatments on soil aggregate characteristics and organic matter content of newly reclaimed cultivated land in Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(5):99-106.

[7] 王茹,张永清,宗宁,等.长期增温对西藏高寒草甸土壤团聚体周转和稳定性影响[J].*土壤通报*,2023,54(3):596-605.

Wang Ru, Zhang Yongqing, Zong Ning, et al. Effects of long-term warming on turnover and stability of soil aggregates in Tibetan alpine meadow [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023,54(3):596-605.

[8] Dillon M E, Wang G, Huey R B. Global metabolic impacts of recent climate warming [J]. *Nature*, 2010,467(7316):704-706.

[9] Chang Ruiying, Liu Shuguang, Chen Leiyi, et al. Soil organic carbon becomes newer under warming at a permafrost site on the Tibetan Plateau [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021,152:108074.

[10] Poeplau C, Sigrösson P, Sigurdsson B D. Depletion of soil carbon and aggregation after strong warming of a subarctic andosol under forest and grassland cover [J]. *SOIL*, 2020,6(1):115-129.

[11] 张欣,任海燕,韩国栋.增温和施氮对内蒙古荒漠草原土壤团聚体稳定性及碳含量的影响[J].*草原与草业*, 2020,32(2):22-26.

Zhang Xin, Ren Haiyan, Han Guodong. Effects of warming and nitrogen application on soil aggregate stability and carbon content in the desert grassland of Inner

- Mongolia [J]. Grassland and Prataculture, 2020, 32(2):22-26.
- [12] Guo Xue, Gao Qun, Yuan Mengting, et al. Gene-informed decomposition model predicts lower soil carbon loss due to persistent microbial adaptation to warming [J]. Nature Communications, 2020, 11(1):4897.
- [13] 张华, 张志杰, 塞丫. 呼和浩特市近61年气温年际变化特征分析[J]. 内蒙古林业科技, 2016, 42(2):35-36.
Zhang Hua, Zhang Zhijie, Sai Ya. Analysis on characteristics of annual variation of temperature in recent 61 years in Hohhot [J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2016, 42(2):35-36.
- [14] 冯茹, 郝晨阳, 马秀枝, 等. 短期模拟增温对大青山油松人工林土壤理化性质的影响[J]. 林业资源管理, 2022(2):141-148.
Feng Ru, Hao Chenyang, Ma Xiuzhi, et al. Effects of short-term simulated warming on soil physical and chemical properties of *Pinus tabulaeformis* plantations in Daqing Mountain [J]. Forest Resources Management, 2022(2):141-148.
- [15] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3):1042-1049.
- [16] 马佳鑫, 夏栋, 刘芳, 等. 向家坝水电站生态修复边坡土壤团聚体及有机碳含量特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5):404-410.
Ma Jiaxin, Xia Dong, Liu Fang, et al. Characteristics of soil aggregates and organic carbon content for ecological restoration slopes at Xiangjiaba Hydropower Station [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5):404-410.
- [17] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(3):627-643.
Liu Yalong, Wang Ping, Wang Jingkuan. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3):627-643.
- [18] Gonzalez J M, Laird D A. Carbon sequestration in clay mineral fractions from ¹⁴C-labeled plant residues [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(6):1715-1720.
- [19] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review [J]. Geoderma, 2005, 124(1/2):3-22.
- [20] García-Palacios P, Crowther T W, Dacal M, et al. Evidence for large microbial-mediated losses of soil carbon under anthropogenic warming [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(7):507-517.
- [21] O'Brien S L, Jastrow J D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 61:1-13.
- [22] 周家昊, 褚军杰, 孙万春, 等. 有机碳对土壤团聚体形成的影响研究进展[J]. 河南农业科学, 2023, 52(11):10-20.
Zhou Jiahao, Chu Junjie, Sun Wanchun, et al. Research progress on the effect of organic carbon on the formation of soil aggregates [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(11):10-20.
- [23] Mao Hairuo, Cotrufo M F, Hart S C, et al. Dual role of silt and clay in the formation and accrual of stabilized soil organic carbon [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2024, 192:109390.
- [24] 徐嘉晖, 孙颖, 高雷, 等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2):222-230.
Xu Jiahui, Sun Ying, Gao Lei, et al. A review of the factors influencing soil organic carbon stability [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2):222-230.
- [25] Souza L F T, Hirmas D R, Sullivan P L, et al. Root distributions, precipitation, and soil structure converge to govern soil organic carbon depth distributions [J]. Geoderma, 2023, 437:116569.
- [26] 陈雪, 刘佳庆, 李敏, 等. 荒漠地区土地开垦对土壤团聚体稳定性及碳固定的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3):398-405.
Chen Xue, Liu Jiaqing, Li Min, et al. Effects of desert land cultivation on soil aggregate stability and carbon fixation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3):398-405.
- [27] 苏静, 赵世伟. 土壤团聚体稳定性评价方法比较[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5):114-117.
Su Jing, Zhao Shiwei. Comparison of the analysis methods for soil aggregate stability [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(5):114-117.
- [28] 乔磊磊. 长期增温和施肥对高寒草地土壤团聚体稳定性及养分积累的作用机制[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
Qiao Leilei. Effects of long-term warming and fertilization on soil aggregate stability and nutrient accumulation mechanism in alpine meadow [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2020.
- [29] 唐晓红, 邵景安, 高明, 等. 保护性耕作对紫色水稻土团聚体组成和有机碳储量的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5):1029-1034.
Tang Xiaohong, Shao Jing'an, Gao Ming, et al. Effects of conservational tillage on aggregate composition and organic carbon storage in purple paddy soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5):1029-1034.
- [30] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2):141-163.