

人工修复和模拟增温对高寒草地土壤团聚体稳定性及其养分分布的影响

郑晒坤¹, 夏菲², 魏巍², 王敬龙², 杨彩红^{1*}, 王军强^{2,3}, 薛云尹³, 石昊¹, 吴皓阳³,
冉林灵³, 严双³, 姜晓敏¹

(1. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 西藏自治区农牧科学院草业科学研究所, 西藏 拉萨 850000; 3. 西华师范大学生态研究院, 四川 南充 637009)

摘要:【目的】探究不同修复方式下气候变暖对高寒草地土壤团聚体稳定性及其养分分布规律的影响。【方法】在青藏高原高寒草地设置自然恢复(NR)、免耕补播(S)和翻耕补播(TS)3种修复措施, 以重度退化草地(ND)为对照, 采用被动式增温法—开顶式气室法(OTC)模拟研究增温对不同修复措施高寒草地土壤团聚体稳定性及养分分布规律的影响。【结果】修复措施对于各处理大团聚体活性有机碳(LOC)贡献率有显著影响, 模拟增温、模拟增温和的修复措施交互作用对各处理大团聚体有机碳(TOC)有显著影响。NR处理土壤团聚体几何平均直径(GMD)与平均重量直径(MWD)值最高, 分别达到了0.76 mm和1.36 mm, 显著高于其他处理; TS处理的团聚体质量分数、GMD和MWD最小; 增温显著降低了NR处理下大于0.25 mm团聚体含量($R_{0.25}$)、GMD和MWD。ND处理团聚体中TOC、全氮(TN)含量最高, NR和TS处理降低了团聚体中TOC、TN含量。【结论】自然恢复样地有利于提高团聚体的稳定性和活性有机碳富集, 但增温过程导致自然恢复样地团聚体稳定性降低, 翻耕处理不利于高寒草地土壤团聚体稳定性的提升以及团聚体中养分的固持。

关键词:高寒草地; 模拟增温; 土壤团聚体; 团聚体养分分布

中图分类号:S812.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)02-0032-11

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2025.02.004



高寒草地作为青藏高原牧区最重要、面积最大的生态系统, 在气候调节、涵养水源、改良土壤、减缓温室气体排放等方面为人类提供了重要的生态服务功能^[1]。但是由于海拔高、气温低、干旱等独特地理气候环境, 该地区草地生态系统受气候变化和人类活动的干扰^[2], 稳定性较差。随着全球气候变暖和人类活动的加剧, 高寒草地景观严重破碎, 植被覆盖度下降, 毒

杂草比例上升, 草地退化持续发生^[3]。该问题同样制约着天然草地畜牧业以及高原地区经济的可持续发展^[4], 所以西藏即便坐拥我国最大的天然草地, 多数牧区还是出现牧草供不应求的情况^[5]。人工草地的修复是缓解青藏高原地区草畜压力的重要手段之一, 同时具有巨大的土壤碳汇潜力^[6]。

人工修复是通过有目的引入特定植物, 加速生态系统的恢复^[7], 主要包括免耕补播、翻耕补播、施肥、划破草皮等方式, 不仅能够在短时间内增加草地地表粗糙度, 提高植被盖度和生产力、减缓地表侵蚀^[8-10], 而且能有效增加土壤地表凋落物和地下根系残体及分泌物的输入量, 使土壤的理化性质得到显著的改善^[11]。除此之外, 大量研究表明, 人工修复会加速土壤颗粒的胶结作用, 使不同大小的团聚体重新分布, 最终影响土壤团聚体分布特征及稳定性^[12-13]。同时,

收稿日期:2024-04-16; **修回日期:**2024-10-12

基金资助:西藏自治区重点研发与转化项目(XZ202201ZY0005N)

作者简介:郑晒坤(1997-), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生。

E-mail: zhengshaikun@163.com

*通信作者, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: yangch@gsau.edu.cn

人工修复也是促进土壤固碳、减缓全球变暖的有效措施^[14-15]。因此,通过建立人工(半人工)草地的方式能够有效促进草地生态恢复,缓解过度放牧引发的生态安全隐患^[16]。正是基于这种考虑,人工草地才得以迅速发展,特别是在青藏高原,人工草地已被认定为提高牧草产量和质量的有效措施^[17-18]。但当前西藏高寒地区退化草地人工修复技术相对较为落后,而且人工修复过程对土壤团聚体及团聚体中养分含量的影响目前在区域尚不清楚。

土壤团聚体的组成(数量和粒径分布)及稳定性是影响土壤质量高低的关键指标之一^[19]。尤其是大团聚体(>0.25 mm)在保持土壤结构稳定和保护土壤养分等方面发挥着极其重要的作用^[20]。良好的团粒结构能有效地增强土壤有机碳的物理固持,创造良好的微生物生境,同时调节土壤孔隙结构、提高土壤水分保持及抗侵蚀能力,减少养分流失,进而改善土壤功能^[21],影响土壤碳氮磷含量分布^[22]。而且团聚体稳定性及其养分变化受全球气候变化的影响,已有研究表明,增温能够降低高寒草甸土壤团聚体稳定性^[23],改变土壤含水率以及植物对营养物质的利用效率,导致植物生物量以及群落结构发生改变^[24-25],进而调控土壤有机碳及养分储量发生变化^[26]。但是目前人工修复过程中土壤团聚体稳定性变化如何影响团聚体中养分分布目前尚不明确,关于增温与人工草地修复双重作用下土壤团聚体稳定性及其养分分配规律方面的研究尚不足。因此,无法对全球气候变暖背景下,人工修复过程对高寒草地土壤团聚体稳定性以及土壤养分有效性的影响进行科学预判^[27]。基于此,以西藏那曲自然恢复和人工修复草地为研究对象,采用模拟增温(OTC)研究草地修复过程中土壤团聚体稳定性及其养分分配规律的变化,以期高寒地区人工草地的合理修复提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于西藏自治区那曲市色尼区那曲镇14村,地理坐标为N 31°26′、E 92°07′,平均海拔4 450 m,属于高原亚寒带半干旱季风气候,干燥、多风,雨热同季。年均温-2.9℃,最冷月(1月)平均气温在-20℃以下,最热月(7月)平均气温8℃左右,年均降水量约430 mm,年相对湿度约50%,降水主要集中在

6-9月,无绝对无霜期。该区植被分异明显,较高海拔区域分布着以高山嵩草为建群植物的高寒草甸(海拔4 600~5 200 m),植被覆盖度65%~80%,草层高度2~5 cm。较低海拔(4 400~4 600 m)和河漫滩生境则发育着以紫花针茅(*Stipa purpurea*)、洽草(*Koeleria macrantha*)为建群种的高寒草原,植被覆盖度30%以下;由于过度利用,基本为重度退化高寒草原。土壤类型为高寒草原土,土壤有机质含量为17.58 g/kg,土壤全氮、全磷、全钾含量分别为1.22、0.41和2.42 g/kg,土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为118.18、9.97和87.47 mg/kg,土壤pH值为8.30。

1.2 样地设置、样品采集和处理

模拟增温试验样地于2022年8月布设,试验采用二因素裂区随机区组设计,主因素为温室效应模拟,设增温和不增温处理。模拟增温采用国际冻原计划(International Tundra Experiment, ITEX)所用的被动式增温法—开顶式气室法(OTC)。建造开顶式增温小室,小室为正六边形圆台状结构,六面均为有机玻璃,透光率95%,小室的高度为50 cm,且上开口面积一致,圆台的斜边与地面的夹角均为60°(图1-A)。该增温室不设置增温梯度,平均增温幅度为1.4±0.5℃,全年增温。副因素为草地修复措施,包括自然恢复(NR)、免耕补播(S)和翻耕补播(TS),以重度退化草地(ND)为对照;各草地修复措施包含增温对照,共计8个处理,每个处理3组重复(图1-B)。在试验区内地形、土壤及植被等自然因子一致的地段布设试验样地,每块样地面积为10 m×10 m。ND:草地总产量下降60%以上,优势植物产量占草地总产量的20%以下,地表土壤旱化,表土坚实,出现部分裸斑(增温为WND);NR:于2019年免耕补播后开始进行自然恢复(增温为WNR);S:自2021年开始,每年采用划破草皮的方式补播垂穗披碱草(增温为WS);TS:自2021年开始,每年采用翻耕的方式补播垂穗披碱草(增温为WTS)。所有处理在每年9月底人工清除地上植被,全年禁牧,不施肥。

土壤样品于2023年的牧草生长旺季(8月)进行采集。采用挖剖面法采集0~20 cm的原状土,采集的土样用硬质塑料盒盛装,减少土壤结构在运输过程中被破坏。在土样运回实验室后,取一部分先将其风干,然后将土样沿自然裂隙掰开并过5 mm筛。过筛时将

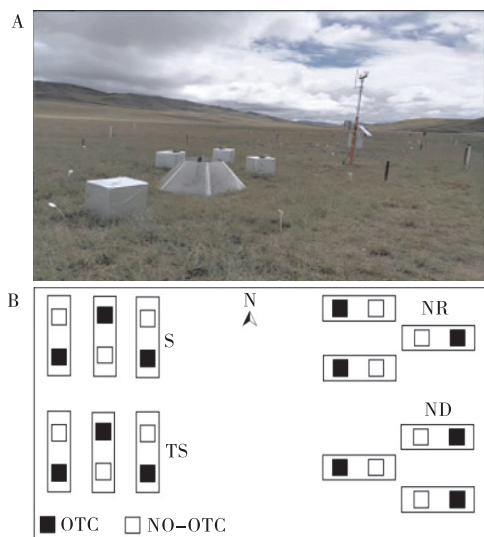


图1 增温样地照片(A)和试验区设计(B)

Fig. 1 The study area a photograph of the warming plot(A) and the design of experimental plots(B)

细根和石块等杂物挑出,用于土壤团聚体的分级。另一部分尽量保持原状土样风干后待用。

1.3 土壤团聚体分级及团聚体稳定性计算

土壤团聚体的分级采用湿筛法^[28]。称取质量约50 g的风干土样,置于套筛(从上到下孔径依次为2、0.5和0.25 mm)的最上层,用蒸馏水浸润5 min,再将套筛放入土壤团聚体分析仪(TTF-100,浙江省上虞市舜龙实验仪器厂)的水桶中,设振幅4 cm、振荡频30次/min和振荡时间5 min,筛分结束后将每层筛上的团聚体冲洗到铝盒中,获得>2.00 mm、0.50~2.00 mm、0.25~0.50 mm的水稳性团聚体,<0.25 mm的部分在桶内沉降48 h,弃去上清液后转移至铝盒中。所有粒级的团聚体于50℃烘干,称重,收集于自封袋内编号待测。

根据各粒级水稳性团聚体重量及土样总重(50 g),参考马群^[29]文献,计算土壤团聚体质量百分比、平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD);参考海龙^[30]文献,计算>0.25 mm团聚体含量($R_{0.25}$);养分总量为各粒径团聚体养分含量相加所得。

1.4 土壤养分含量测定

采用pH计(PHS-3C,雷磁,中国)测定土壤pH值,土水比为1:5。采用烘干法测定土壤含水量。采用环刀法测定土壤容重。采用重铬酸钾外加热法测定土壤团聚体有机碳(TOC)含量^[31]。采用KMnO₄氧

化—比色法测定土壤易氧化碳(ROC)含量,活性有机碳(LOC)含量为ROC含量^[32]。采用凯式定氮仪测定土壤全氮(TN)^[33]含量。采用钼锑抗比色法测定全磷(TP)含量^[34]。

1.5 数据处理与统计分析

采用Microsoft office excel 2019 软件对试验数据进行整理,使用IBM SPSS Statistics 27.0 的单因素ANOVA 检验对土壤团聚体的有机碳、全氮、全磷、活性有机碳及其贡献率(团聚体养分贡献率=该粒径团聚体中养分含量×该团聚体含量/土壤养分含量)和总量等指标进行差异显著性分析(显著性水平为 $P<0.05$)及交互效应分析。一般线性模型中构建交互模型对有机碳、全氮、全磷、活性有机碳及其贡献率等指标进行修复措施与模拟增温的双因素方差分析(显著性水平为 $P<0.05$ 、 $P<0.01$)。采用R Studio 进行相关性分析,使用Origin 作图。

2 结果与分析

2.1 修复措施和模拟增温对土壤团聚体粒径分布的影响

不增温处理中,各修复措施 $R_{0.25}$ 均大于ND,其中NR处理大团聚体(包括>2.00 mm、2.00~0.50 mm、0.50~0.25 mm)占比超过80%,S和NR处理显著高于ND($P<0.05$)。模拟增温显著降低了NR处理的大团聚体占比($P<0.05$),对其他处理则无显著影响(表1)。双因素方差分析表明,人工修复、模拟增温、人工修复与模拟增温的交互作用对于>2.00 mm和<0.25 mm 团聚体的分布影响显著($P<0.05$)(表2)。

2.2 修复措施和模拟增温对土壤团聚体稳定性的影响

不增温处理中,NR处理GMD与MWD值最大,分别达到了0.76 mm和1.36 mm,与其他处理差异显著($P<0.05$),TS最小。模拟增温使各处理土壤团聚体GMD减小,且ND和NR处理下显著减小($P<0.05$),NR处理下MWD也显著减小($P<0.05$)。双因素方差分析表明修复措施和模拟增温对于土壤团聚体GMD与MWD均有显著影响($P<0.5$),修复措施和模拟增温的交互作用对于GMD有显著影响($P<0.05$)(图2)。

表 1 不同处理高寒草地土壤团聚体粒径分布

Table 1 Soil aggregate fraction of alpine grassland under different treatments

处理		粒径				$R_{0.25}$
		$>2.00\text{ mm}$	$2.00\sim0.50\text{ mm}$	$0.50\sim0.25\text{ mm}$	$<0.25\text{ mm}$	
不增温	S	$17.8\pm2.31^{\text{Bb}}$	$27.07\pm7.30^{\text{ABab}}$	$26.6\pm6.41^{\text{Aab}}$	$28.53\pm1.42^{\text{Ca}}$	$71.46\pm1.42^{\text{B}}$
	TS	$6.07\pm1.79^{\text{Cb}}$	$30.07\pm10.42^{\text{Aa}}$	$28.60\pm3.42^{\text{Aa}}$	$35.13\pm8.20^{\text{ABa}}$	$64.73\pm8.29^{\text{CD}}$
	ND	$14.67\pm3.07^{\text{BCc}}$	$19.33\pm5.61^{\text{ABbc}}$	$26.93\pm6.96^{\text{Ab}}$	$39.07\pm1.86^{\text{Aa}}$	$60.93\pm1.86^{\text{D}}$
	NR	$24.67\pm4.23^{\text{Aab}}$	$27.53\pm6.00^{\text{ABa}}$	$30.23\pm2.95^{\text{Aa}}$	$17.2\pm3.14^{\text{Db}}$	$82.43\pm2.62^{\text{A}}$
增温	WS	$10.73\pm4.11^{\text{BCb}}$	$27.47\pm6.65^{\text{ABa}}$	$32.40\pm1.91^{\text{Aa}}$	$29.40\pm0.72^{\text{BCa}}$	$70.60\pm0.72^{\text{B}}$
	WTS	$8.80\pm1.64^{\text{Cbc}}$	$25.33\pm5.12^{\text{ABa}}$	$27.07\pm3.44^{\text{Ab}}$	$38.80\pm1.40^{\text{Aa}}$	$61.20\pm1.40^{\text{D}}$
	WND	$15.67\pm0.90^{\text{BCc}}$	$17.23\pm2.20^{\text{Bc}}$	$26.67\pm3.91^{\text{Ab}}$	$39.93\pm1.14^{\text{Aa}}$	$60.07\pm1.14^{\text{D}}$
	WNR	$15.07\pm4.41^{\text{BCb}}$	$26.27\pm2.03^{\text{ABa}}$	$27.93\pm5.10^{\text{Aa}}$	$30.73\pm3.50^{\text{BCa}}$	$69.27\pm3.50^{\text{BC}}$

注:不同大写字母表示不同处理相同粒径差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一处理不同粒径之间差异显著($P<0.05$),下同。

表 2 人工修复、模拟增温及其交互作用对土壤团聚体粒径分布的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of artificial planting, simulated warming and their interaction on particle size

distribution of soil aggregates

团聚体粒径/mm	人工修复		模拟增温		人工修复×模拟增温	
	F	P	F	P	F	P
>2.00	16.667	$<0.01^{**}$	6.631	0.020^{*}	5.748	$<0.01^{**}$
$2.00\sim0.50$	2.997	0.062	0.504	0.488	0.178	0.909
$0.50\sim0.25$	0.434	0.732	0.052	0.822	0.975	0.429
<0.25	24.999	$<0.01^{**}$	10.899	$<0.01^{**}$	4.398	0.019^{*}

注:“*”和“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著,下同。

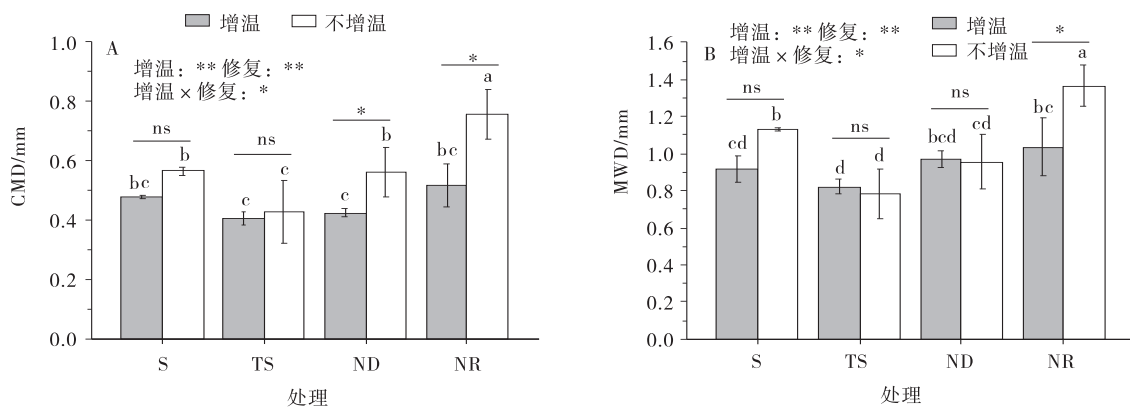


图 2 土壤团聚体 GWD 与 MWD

Fig. 2 GWD and MWD of soil aggregates

注:将增温、不增温各处理进行单因素和双因素方差分析,柱形图误差棒上表示三个重复的标准误,“*”和“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著,“ns”表示差异不显著,下同;柱形图上小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

2.3 修复措施和模拟增温对土壤团聚体中养分含量的影响

模拟增温对于大团聚体中 TN 含量有显著影响($P<0.05$);修复措施和模拟增温的交互作用对各粒径团聚体 TOC 含量有显著影响($P<0.05$)。模拟增温增加了 ND 处理中 $>2.00\text{ mm}$ 粒径中 TOC 含量,降低了该粒径中 TN 和 TP 含量,增加了 NR 处理 $<$

0.25 mm 粒径中 TOC 和 TN 含量(图 3)。模拟增温降低了 S 处理 TOC 和 TN 总量,增加了 NR 处理 TN 总量(表 3)。

2.4 修复措施和增温对土壤团聚体中活性有机碳分布的影响

各粒径团聚体中 NR 处理 LOC 含量最低, $>2.00\text{ mm}$ 粒级中 NR 处理的 LOC 贡献率最高, $<$

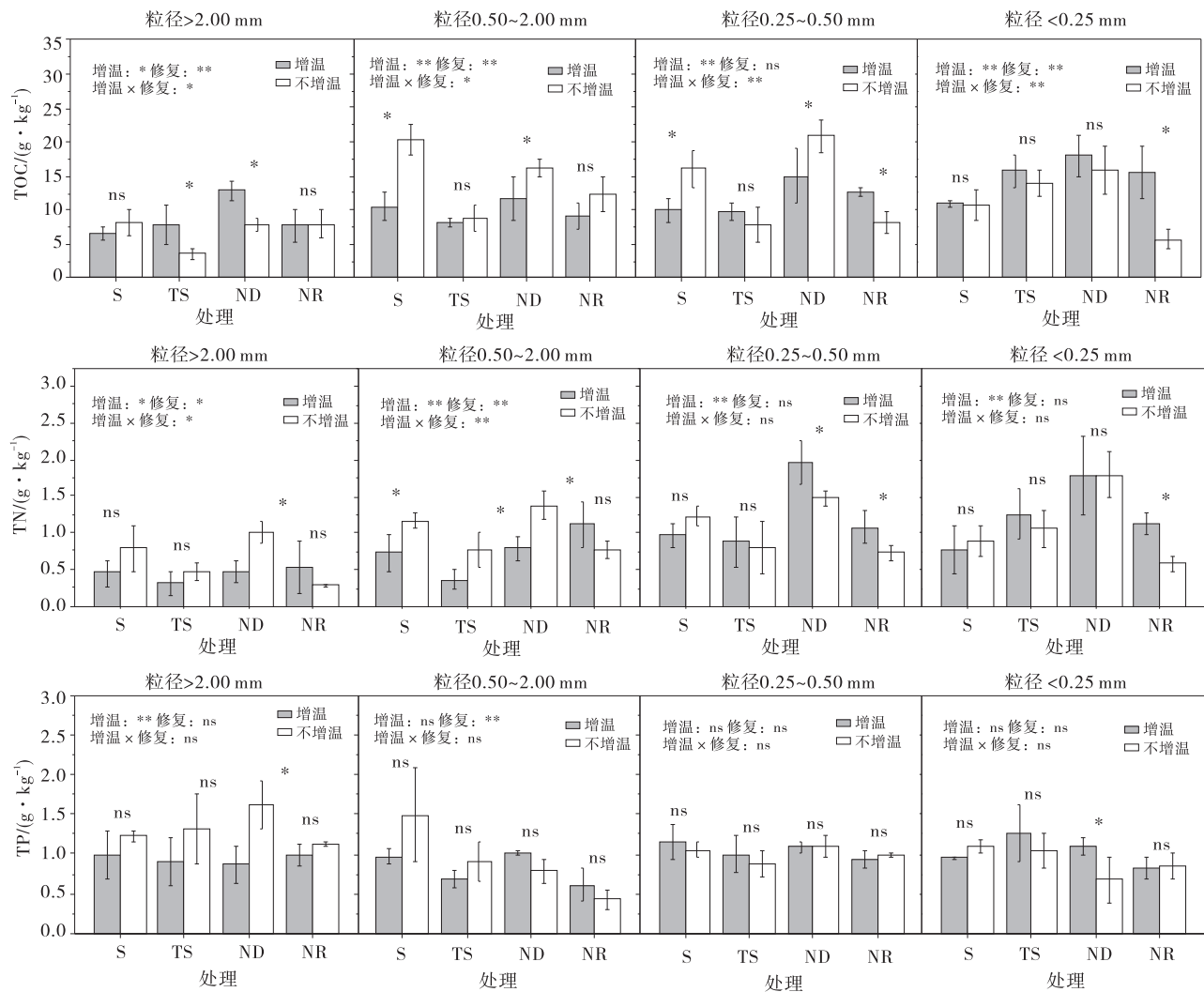


图 3 不同粒径土壤团聚体有机碳、全氮、全磷含量

Fig. 3 The contents of organic carbon ,total nitrogen and total phosphorus in soil aggregates with different particle sizes.

表 3 不同处理高寒草地土壤团聚体养分总量

Table 3 Total nutrient content of soil aggregates in alpine grassland under different treatments

处理	养分总量/(g·kg ⁻¹)		
	TOC	TN	TP
不增温	S 50.19±2.69 ^A	4.08±.057 ^{BC}	4.87±0.66 ^A
	TS 34.23±2.45 ^B	3.10±0.33 ^{CDE}	4.15±0.83 ^{AB}
	ND 60.36±6.04 ^A	5.66±0.13 ^A	4.18±0.67 ^A
	NR 34.02±6.00 ^B	2.36±0.25 ^E	3.39±0.22 ^B
增温	WS 39.86±4.21 ^B	2.93±0.84 ^{DE}	4.06±0.52 ^{AB}
	WTS 41.47±4.67 ^B	2.82±0.65 ^{DE}	3.85±0.92 ^{AB}
	WND 57.49±11.15 ^A	5.02±0.91 ^{AB}	4.07±0.39 ^{AB}
	WNR 44.87±5.29 ^B	3.87±0.39 ^{CD}	3.35±0.54 ^B

0.25 mm 粒径中 LOC 贡献率最低。模拟增温显著降低了 TS 处理中 >2.00 mm 的粒级中 LOC 含量 ($P<0.05$),对于其他粒级中 LOC 含量均无显著影响。修复措施对于大团聚体 LOC 贡献率有显著影响 ($P<$

0.05)(图 4)。

2.5 相关性分析

0.50~2.00 mm 粒径团聚体中,aLOC 与 Sad 显著正相关 ($P<0.05$)。各粒径团聚体中 Sad 与 cTOC、cTN、cTP 之间具有显著相关性 ($P<0.05$)。团聚体粒径分布对团聚体中有机碳、全氮、全磷含量无显著影响,而对于团聚体养分贡献率影响显著 ($P<0.05$)。

2.6 交互效应分析

通过不同粒径团聚体中养分含量的交互效应分析可以看出,不同粒径团聚体中养分主要受团聚体粒径大小的影响(表 2)。修复措施和增温均未对有机碳、全磷、全氮、活性碳贡献率产生显著性影响,而团聚体粒径对贡献率影响极显著 ($P<0.01$)。团聚体粒径与修复措施的交互效应以及团聚体粒径与增温的

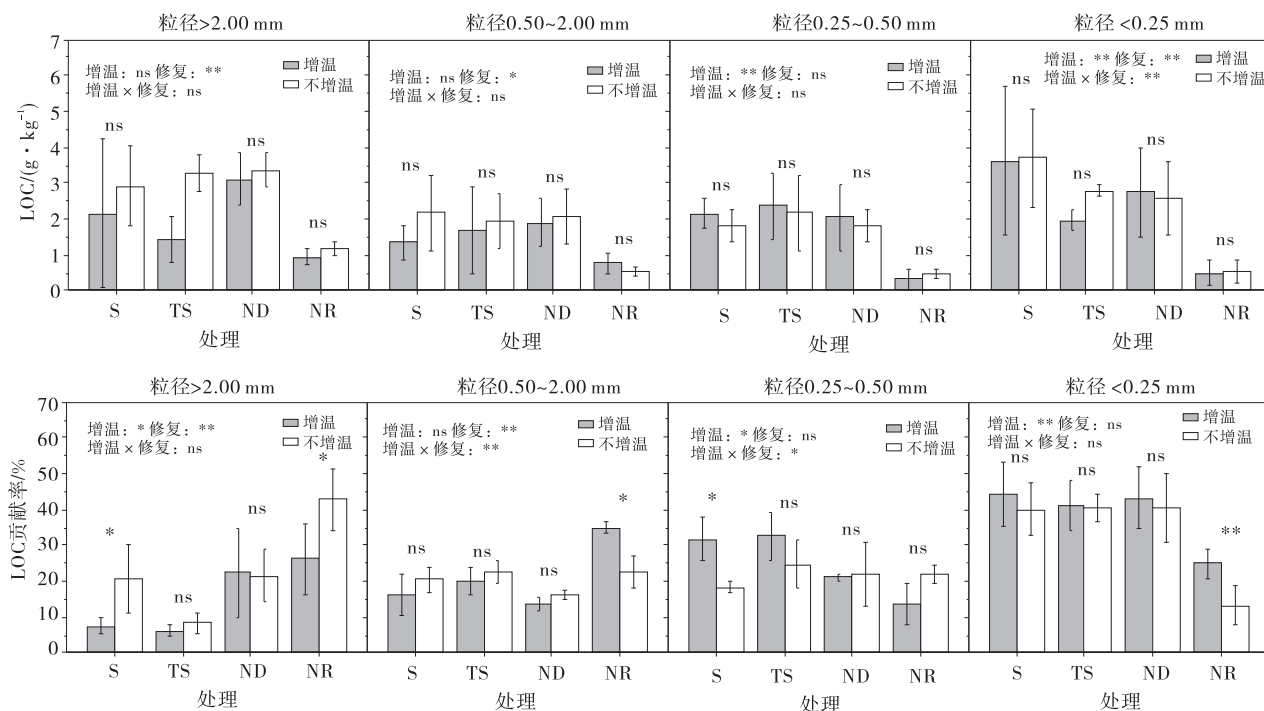


图4 不同粒径土壤团聚体活性碳分布

Fig. 4 Distribution of active carbon in soil aggregates with different particle sizes

交互效应对有机碳、全磷以及活性碳贡献率的影响均

3 讨论

3.1 修复措施和模拟增温对高寒草地土壤团聚体稳定性的影响

本研究的结果显示各处理大团聚体质量分数占比均超过60%，表明其土壤水稳性团聚体主要由大团聚体组成，这与其他学者针对高寒牧区的研究结果基本一致。例如，孙羽等^[35]的研究结果显示，西藏高寒草甸0~20 cm土层中大团聚体的质量分数高达75%以上。大团聚体是土壤理想结构体，其含量越多，说明土壤团聚性较好，土壤结构的稳定性越强^[36]。由此可见，高寒草地的土壤团聚体稳定性总体上处于一个较高水平。在本研究中，自然恢复(NR)和免耕补播(S)样地土壤大团聚体质量分数显著高于天然退化(ND)，表明自然恢复和免耕补播处理草地土壤团聚体的稳定性较强，可能是因为草地恢复过程促进了植被覆盖度和表层凋落物增加，增加外源有机质输入的同时，有机质的胶结物质促进更多的水稳性微团聚体聚集成大团聚体^[37-38]。相对于免耕补播(S)，翻耕补播(TS)会对土壤结构产生一定的破坏，使团聚体的稳定性降低^[39]，因此翻耕补播大团聚体的占比低于免耕补播。天然退化(ND)由于草地逆向演替，较低的物

达到了极显著水平($P<0.01$)。

种丰富度以及不稳定的土壤结构造成了土壤大团聚体质量分数较低^[40]。

除了土壤中大团聚体的质量分数以外，通常采用MWD和GMD来定量评价土壤团聚体稳定性的变化，二者的值越大，表明团聚体的平均粒径团聚度越高，稳定性越强^[41]。在本研究中自然恢复(NR)处理的MWD及GMD数值最大，翻耕补播(TS)最小。这也再次印证上述结论，即土壤团聚性越好、土壤结构稳定性越高的处理相对应的土壤MWD和GMD数值会更大。免耕补播(S)处理 $R_{0.25}$ 和MWD显著高于天然退化，也表明适度的人工干扰(免耕补播)一定程度上能提升高寒牧区草地土壤团聚体稳定性，主要原因可能是适度人工干扰增加了表层土壤养分在土壤整个剖面的运移，同时提高了根系的生长，有助于团聚体稳定性的提高，但能否达到自然恢复草地的效果还有待长期试验进行验证。

已有研究发现增温能够降低土壤团聚体的稳定性^[42]，例如王茹等^[43]研究发现增温降低了西藏高寒草甸土壤团聚体的稳定性，不利于有机碳的物理保护。本研究发现，增温降低了自然恢复(NR)处理土壤MWD和GMD以及大团聚体质量分数占比，导致

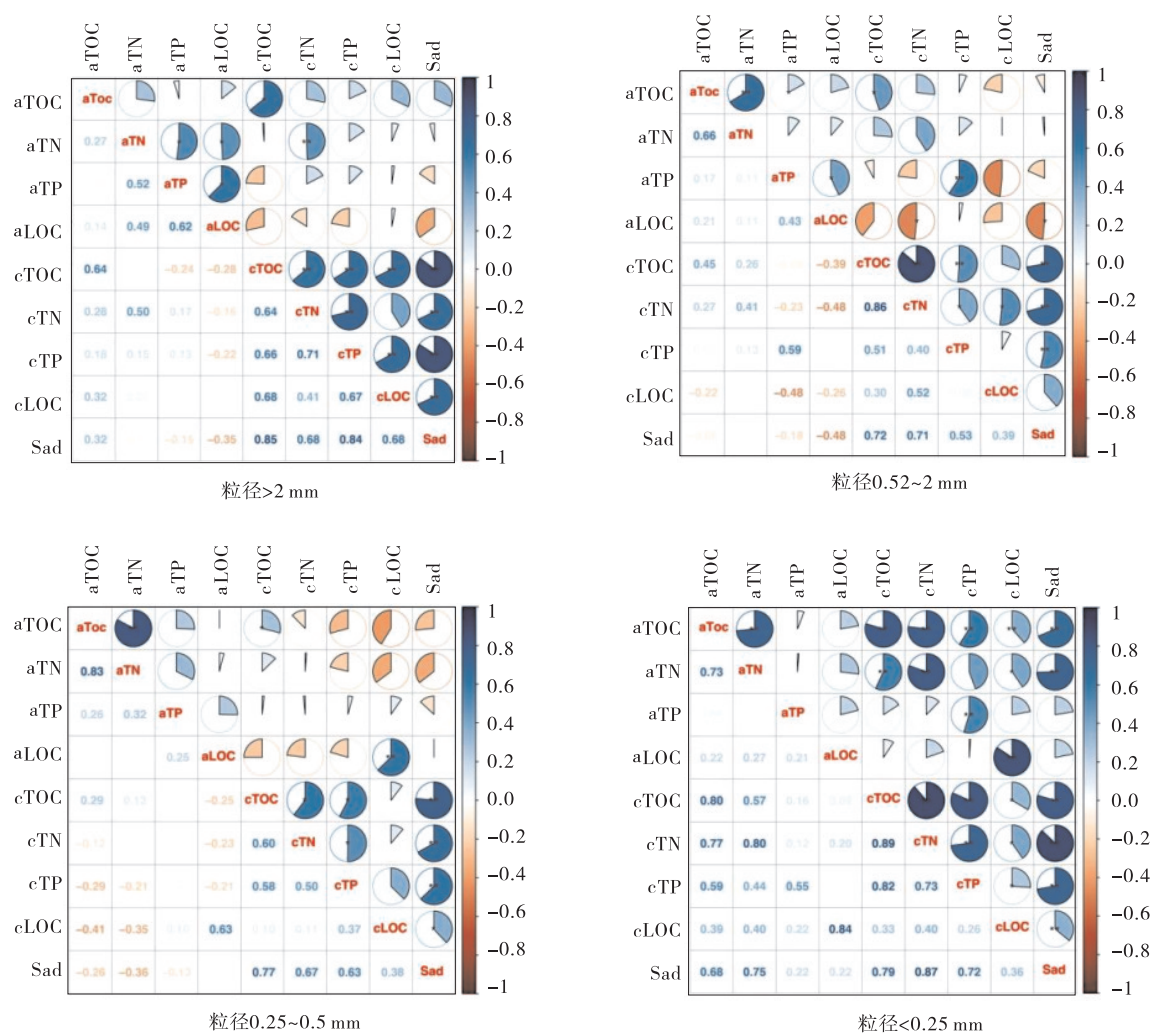


图 5 相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis

注:aTOC、aTN、aTP、aLOC代表不同粒径团聚体中有机碳、全氮、全磷及活性有机碳含量,cTOC、cTN、cTP、cLOC和cLOC代表不同粒径团聚体中有机碳、全氮、全磷及活性有机碳贡献率,Sad代表不同粒径团聚体的质量占比,“*”和“**”分别表示在0.05和0.01水平显著。

表 2 修复措施和增温对不同粒径团聚体有机碳、全氮、全磷、活性碳以及惰性碳贡献率交互效应分析

Table 2 Analysis of synergistic effects of restoration measures and warming on SOC ,TN,TP,activated organic carbon and stable organic carbon contribution in different aggregates sizes						
因变量	F 值					
	修复措施	增温	团聚体粒径	修复措施×增温	修复措施×粒径	增温×粒径
有机碳贡献率	0.006	0.000	70.430**	0.008	11.640**	13.820**
全氮贡献率	0.00	0.003	94.070**	0.003	12.440**	8.920**
全磷贡献率	0.007	0.002	65.190**	0.008	16.930**	18.920**
活性碳贡献率	0.043	0.019	35.670**	0.036	16.580**	4.830**

注:F代表方差分析中的统计量,*和**分别代表在0.05和0.01水平上显著相关。

土壤团聚体稳定性降低,其中可能的原因是增温加快了大团聚体周转速率并减少了大团聚体数量,间接降低了其抗侵蚀能力,从而导致土壤团聚体稳定性下降^[44]。

3.2 修复模式和模拟增温对团聚体中养分分配规律的影响

土壤养分不仅可作为草地退化的指标性特征,而且是维持土壤结构稳定和微环境养分周转的关键核

心^[45]。本研究发现,团聚体中 TOC、TN 总量,均以自然恢复(NR)和翻耕补播(TS)最低,这可能是由于自然恢复措施依靠草地的自愈能力进行恢复,有利于提高草地生物多样性和生态完整性^[46],而植物的生长会对土壤中的养分进行一定的吸收,从而使得碳氮含量较低。翻耕对土壤较大的扰动导致土壤团聚体稳定性变差,导致大团聚体内养分含量下降,并使得养分向小团聚体内迁移聚集^[47]。同时,本研究结果显示天然退化(ND)土壤团聚体内 TOC、TN 含量最高,可能的原因是由于退化后地上凋落物和死亡的植物根系等进入土壤形成腐殖质,短时间输入了大量的有机碳^[48],土壤有机碳含量的增加会在一定程度上改善土壤结构并提高土壤的固氮能力,从而促进表层土壤团聚体全氮含量上升^[49];另一方面土壤养分含量与退化阶段和程度有关^[50],本文中草地退化与否的判定依据主要源于植物群落相关指标,土壤结构可能并未完全退化,土壤团聚体中还富集着大量的 TOC 和 TN。

根据土壤有机碳的周转率,可把碳库分为活性有机碳和惰性有机碳,其组成、动态及作用一直是国际研究的热点问题^[23]。土壤有机碳的短暂波动也主要发生在一些活性有机碳部分^[51]。土壤活性有机碳是土壤碳库中最活跃的组成部分,虽然只占土壤有机碳总量的较小部分,却直接参与土壤生物化学转化过程^[52]。本研究中修复措施对大团聚体中活性有机碳(LOC)贡献率产生显著影响,自然恢复(NR)处理中大团聚体中 LOC 含量最低,但大团聚体 LOC 贡献率最高。其中可能的原因是在自然恢复的初期阶段,植被覆盖度不高,生物量相对较低,导致输入土壤的有机物质较少,而随着植被的逐渐恢复,伴随大团聚体的数量的增加,其活性有机碳逐步向大团聚体中富集^[53]。此外,土壤中的微生物活动也会影响有机碳的分解和转化,初期阶段微生物活动较为剧烈,导致有机碳迅速分解^[54],致使活性有机碳含量较低。而植被恢复过程中丰富的植被类型会使土壤表层形成的残体或分泌物增多,地表枯落物的分解以及更多的根系分泌物增加了土壤中的微生物残体碳,从而提高了大团聚体中活性有机碳占比^[55];其次,土壤团聚体的稳定性也是影响活性有机碳贡献率的重要因素,生态恢复措施显著提高了土壤团聚体的数量和稳定性,团聚体对保护和稳定土壤有机碳具有重要作用,从而提高

了活性有机碳的贡献率^[56]。

目前有学者探究了增温对草地生态系统土壤有机碳的影响情况,但研究结果并不一致。例如,有研究发现增温条件下土壤有机碳含量显著增加^[57],相反,有研究发现,短期增温会促进微生物对有机质的分解,导致土壤有机碳含量减少^[58-59];也有研究发现增温对土壤有机碳含量没有显著影响^[60-61],主要原因可能是增温虽然会使植物和地下微生物生长繁殖受限,植物凋落物增多,最终导致土壤表层有机碳氮含量增加^[62],但就整个土壤剖面而言,变化不显著。目前关于增温过程中土壤有效磷或总磷含量变化规律还缺乏研究^[62-63]。在本研究中增温对于土壤团聚体有机碳、全氮、活性有机碳含量显著影响,对于各粒径全磷、活性有机碳及其贡献率影响不显著。可见增温对于土壤团聚体养分分布的影响较为复杂。本研究中模拟增温进行时间较短无法对其内部机制及其动态过程进行系统阐述,需进行长期增温实验进行系统阐述。

4 结论

自然恢复和免耕补播样地土壤大团聚体质量分数显著高于天然退化样地,自然恢复样地土壤的 MWD 及 GMD 数值最大,团聚体稳定性最高,翻耕补播样地土壤团聚体稳定性最差。增温降低了自然恢复处理土壤 MWD 和 GMD 以及大团聚体质量分数占比,导致土壤团聚体稳定性降低。团聚体中 TOC、TN 总量,均以自然恢复和翻耕补播最低,自然恢复样地大团聚体 LOC 含量最低,贡献率最高。综上,自然恢复样地有利于提高团聚体的稳定性和活性有机碳富集;增温过程导致自然恢复样地团聚体稳定性降低,翻耕处理不利于高寒草地土壤团聚体稳定性的提升以及团聚体中养分的固持。

参考文献:

- [1] 苏小桐,李亚娟,韩玉春,等. 化肥与菌肥配施对高寒退化草地土壤养分与土壤微生物量的影响[J]. 草原与坪, 2024,6(12):1-12.
- [2] 李晴婉,李庆琳,陈俊松,等. 西藏草地退化界定及其原因分析[J]. 世界林业研究,2023,36(6):71-77.
- [3] 杜志勇,丛楠. 植被与土壤特征对青藏高原不同程度退化草地的响应研究[J]. 生态学报,2024,15(6):1-14

- [4] 牛书丽,蒋高明. 人工草地在退化草地恢复中的作用及其研究现状[J]. 应用生态学报,2004,15(9):1662—1666.
- [5] 贺金生,刘志鹏,姚拓,等. 青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术[J]. 科技导报,2020,38(17):66—80.
- [6] 李娜,赵娜,王娅琳,等. 高寒人工草地不同植被类型下表层土壤有机碳和无机碳变化及土壤理化因子[J]. 草地学报,2023,31(8):2361—2368.
- [7] 贺金生,卜海燕,胡小文,等. 退化高寒草地的近自然恢复:理论基础与技术途径[J]. 科学通报,2020,65(34):3898—3908.
- [8] 李裕元,邵明安,陈洪松等. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 生态学报,2010,30(16):4306—4316.
- [9] 郝爱华,薛炯,彭飞,等. 青藏高原典型草地植被退化与土壤退化研究[J]. 生态学报. 2020,40(3):964—975.
- [10] Chen D D, Zhang S H, Dong S K, *et al.* Effect of land-use on soil nutrients and microbial biomass of an alpine region on the northeastern Tibetan Plateau, China[J]. Land Degradation and Development, 2010, 21(5):446—452.
- [11] 何金红,谭向平,熊鑫,等. 森林土壤有机碳分解对模拟增温的响应[J]. 生态学报,2023,43(22):9539—9554.
- [12] Qiu L P, Wei X R, Gao J L, *et al.* Dynamics soil aggregate-associated organic carbon along an afforestation chronosequence[J]. Plant and Soil, 2015, 391(1/2):237—251.
- [13] 林培松,高全洲. 不同土地利用方式下紫色土结构特性变化研究[J]. 水土保持研究,2010,17(4):134—138.
- [14] Lal R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect [J]. Journal of Social & Personatl Relationships, 1999, 12(4):553—558.
- [15] Yu Z C, Zhang W, Liu Y S, *et al.* Dynamics of SOC density and driving factors during the restoration of artificial grassland and abandoned farmland in Mu Us Desert, China[J]. Catena, 2023, 224:106991.
- [16] 白永飞,玉柱,杨青川,等. 人工草地生产力和稳定性的调控机理研究:问题、进展与展望[J]. 科学通报,2018,63(Z1):511—520.
- [17] 王乐,朱求安,杜灵通. 草地碳循环主要影响因素及研究方法进展[J]. 草原与草坪,2023,43(4):144—156.
- [18] 刘永杰,杨琴. 青藏高原退化草地修复研究进展及展望[J]. 中国草地学报,2023,45(10):131—143.
- [19] 张玉铭,胡春胜,陈素英,等. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(9):1558—1570.
- [20] Cates A M, Ruark M D, Hedtcke J L, *et al.* Long term tillage, rotation and peerennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155:371—380.
- [21] 童晨晖,王辉,谭帅,等. 亚热带丘岗区经果林种植对红壤团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报,2022,33(4):1012—1020.
- [22] 杨月娟,周华坤,姚步青,等. 长期模拟增温对矮嵩草草甸土壤理化性质与植物化学成分的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(3):781—789.
- [23] Guan S, AnN, ZongN, *et al.* Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 116:224—236.
- [24] 解雪峰,项琦,吴涛,等. 滨海湿地生态系统土壤微生物及其影响因素研究综述[J]. 生态学报,2021,41(1):1—12.
- [25] 李娜,王根绪,高永恒,等. 模拟增温对长江源区高寒草甸土壤养分状况和生物学特性的影响研究[J]. 土壤学报,2010,47(6):1214—1224.
- [26] 林丽,张德罡,曹广民,等. 高寒嵩草草甸植物群落数量特征对不同利用强度的短期响应[J]. 生态学报,2016. 36(24):1—10.
- [27] 刘威,张国英,张静,等. 2种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(3):117—122.
- [28] 郑楠,邵阳,罗敏,等. 土壤团聚体制备方法对其稳定性及固碳潜力评价的影响研究[J]. 中国环境科学,2022,42(6):2821—2827.
- [29] 马群,白炜,牟国旭,等. 增温对高寒沼泽草甸土壤团聚体稳定性及碳氮含量的影响[J]. 草地学报,2025,33(02):547—555.
- [30] 海龙,姚拓,张文明,等. 黄土丘陵沟壑区不同种植年限紫花苜蓿草地土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 草原与草坪,2020,40(4):16—21.
- [31] 宋娴,柴瑜,徐文印,等. 黄河源区高寒湿地土壤团聚体有机碳矿化特征及其温度敏感性[J]. 草地学报,2024,32(7):2205—2213.
- [32] 蔡华,舒英格,王昌敏,等. 喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征[J]. 环境科学,2023,44(12):6880—6893.
- [33] 杨军,刘秋蓉,王向涛. 青藏高原高山嵩草高寒草甸不同退化阶段植物群落与土壤养分[J]. 应用生态学报,

- 2020,31(12):4067—4072.
- [34] 林伟山,德科加,钱诗祎,等. 高寒草甸植被—土壤养分含量与气象因子相关关系研究[J]. 草原与草坪,2023,43(6):109—120.
- [35] 孙羽,李晓燕,陈杰,等. 不同恢复措施对退化高寒草甸土壤团聚体稳定性及其有机碳分布的影响[J]. 中国草地学报,2023,45(3):60—67.
- [36] 苟天雄,刘韩,帅伟,等. 川西高寒山地不同海拔高度土壤团聚体特征[J]. 水土保持研究,2020,27(1):47—53.
- [37] Zeng Q C, Darboux F, Man C, *et al.* Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China) [J]. *Catena*, 2018, 167:276—283.
- [38] 向蕊,伊文博,赵薇,等. 间作对土壤团聚体有机碳储量的影响及其氮调控效应[J]. 水土保持学报,2019,33(5):303—308.
- [39] 李爽,李文娜,关皓月,等. 耕作方式对豫西旱地麦—豆轮作田土壤理化特性和酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2023,41(6):168—178.
- [40] 第19届国际土壤学大会组委会. 第19届国际土壤学大会重点论文摘要选译[C]. 北京:中国农业出版社,2010.
- [41] 罗娜娜,盛茂银,王霖娇,等. 长期植被恢复对中国西南喀斯特石漠化土壤活性有机碳组分含量和酶活性的影响[J]. 植物生态学报,2023,47(6):867—881.
- [42] Wang Y, Gao S, Li C, *et al.* Effects of temperature on soil organic carbon fractions contents, aggregate stability and structural characteristics of humic substances in a Mollisol [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16: 1849—1857.
- [43] 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.
- [44] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, *et al.* Aggregate sizes and stability in cultivated south dakota prairie ustolls and usterts [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68:1360—1365.
- [45] Dou Y, Yang Y, An S, *et al.* Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2020, 185:104294.
- [46] 刘俊国,崔文惠,田展,等. 渐进式生态修复理论[J]. 科学通报,2021,66(9):1014—1025.
- [47] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 环境科学,2019,40(8):3816—3824.
- [48] 刘育红,魏卫东,温小成,等. 三江源退化高寒草原土壤有机碳组分分布研究[J]. 土壤通报,2014,45(6):1370—1376.
- [49] 蔡晓布,彭岳林,于宝政. 西藏高寒草原土壤团聚体有机碳变化及其影响因素分析[J]. 农业工程学报,2013,29(11):92—99.
- [50] 蔺芳,刘晓静,张家洋. 人工草地种植模式对沙化土壤团聚体及有机质含量的影响[J]. 中国沙漠,2018,38(6):1219—1229.
- [51] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, *et al.* Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an environment [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(12):1647—1656.
- [52] 魏早强,罗珠珠,牛伊宁,等. 土壤有机碳组分对土地利用方式响应的Meta分析[J]. 草业科学,2022,39(6):1115—1128.
- [53] 华娟,赵世伟,张扬,等. 云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤团聚体活性有机碳分布特征[J]. 生态学报,2009,29(9):4613—4619.
- [54] 许冬梅,许新忠,王国会,等. 宁夏荒漠草原自然恢复演替过程中土壤有机碳及其分布的变化[J]. 草业学报,2017,26(8):35—42.
- [55] 龙启霞,蓝家程,姜勇祥. 生态恢复对石漠化地区土壤有机碳累积特征及其机制的影响[J]. 生态学报,2022,42(18):7390—7402.
- [56] 赵冬,许明祥,刘国彬,等. 用显微CT研究不同植被恢复模式的土壤团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报,2016,32(9):123—129.
- [57] Li N, Wang G, Gao Y, *et al.* Warming effects on plant growth, soil nutrients, microbial biomass and soil enzymes activities of two alpine meadows in Tibetan Plateau [J]. *Polish Journal of Ecology*, 2011, 59(1):25—35.
- [58] 江肖洁,胡艳玲,韩建秋,等. 增温对苔原土壤和典型植物叶片碳、氮、磷化学计量学特征的影响[J]. 植物生态学报,2014,38(9):941—948.
- [59] 赵晶,刘美英,郝孟婕,等. 植被恢复对干旱区生态光伏电站土壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. 水土保持研究,2022,29(5):137—143.
- [60] Wang J, Song C, Zhang J, *et al.* Temperature sensitivity of soil carbon mineralization and nitrous oxide emission in different ecosystems along a mountain wetland—forest ecotone in the continuous permafrost of Northeast China

- [J]. *Catena*, 2014, 121: 110—118.
- [61] Zhang X, Shen Z, Fu G. A meta-analysis of the effects of experimental warming on soil carbon and nitrogen dynamics on the Tibetan Plateau [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 87: 32—38.
- [62] Xu M H, Peng F, You Q G, *et al.* Year-round warming and autumnal clipping lead to downward transport of root biomass, carbon and total nitrogen in soil of an alpine meadow [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 109: 54—62.
- [63] 林丽, 张德罡, 曹广民, 等. 高寒嵩草草甸植物群落数量特征对不同利用强度的短期响应 [J]. *生态学报*, 2016, 36 (24): 1—10.

Effects of artificial restoration and simulated warming on soil aggregate stability and nutrient distribution of artificial grassland in alpine grassland area

ZHENG Shai-kun¹, XIA Fei², WEI Wei², WANG Jing-long², YANG Cai-hong^{1*},
WANG Jun-qiang^{2,3}, XUE Yun-yin³, SHI Hao¹, WU Hao-yang³, RAN Lin-ling³,
YAN Shuang³, JIANG Xiao-min¹

(1. *College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China*; 2. *Institute of Pratacultural Science, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850000, China*; 3. *Institute of Ecology, West China Normal University, Nanchong 637000*)

Abstract: 【Objective】 To explore the effects of climate warming on soil aggregate stability and nutrient distribution in alpine grassland under different restoration methods. 【Method】 Three restoration measures including natural restoration (NR), no-tillage reseeding (S) and tillage reseeding (TS) were set up in the alpine grassland of the Qinghai-Tibetan Plateau, and the severely degraded grassland (ND) was used as the control. The effects of warming on the stability of soil aggregates and nutrient distribution in alpine grassland with different restoration measures were studied by passive warming—open-top chamber (OTC) simulation. 【Result】 Remediation measures had a significant effect on the contribution rate of LOC to macroaggregates in each treatment. The interaction of simulated warming, simulated warming and remediation measures had a significant effect on the organic carbon (TOC) of macroaggregates in each treatment. The geometric mean diameter (GMD) and mean weight diameter (MWD) of soil aggregates in NR treatment were the highest, reaching 0.76 mm and 1.36 mm, respectively, which were significantly higher than those in other treatments, and the mass fraction, GMD and MWD of aggregates in TS treatment were the lowest. Warming significantly reduced $R_{0.25}$, GMD and MWD in NR treatment. The contents of TOC and TN in aggregates were the highest in ND treatment, and the contents of TOC and TN in aggregates were reduced by NR and TS treatments. 【Conclusion】 The natural restoration plot is beneficial to improve the stability of aggregates and the enrichment of active organic carbon, but the warming process leads to the decrease of aggregate stability in the natural restoration plot. Tillage treatment is not conducive to the improvement of soil aggregate stability and the fixation of nutrients in aggregates in alpine grassland.

Key words: alpine grassland; simulated warming; soil aggregates; aggregates nutrient distribution

(责任编辑:康宇坤)