

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.025

引用格式:黄惠群,刘西苑,朱晓花,等.湿润区草地退化对土壤团聚体结构重组及碳库响应的结构调控机制[J].草地学报,2026,34(7):2624-2637

HUANG Hui-qun, LIU Xi-yuan, ZHU Xiao-hua, et al. Structural Regulation Mechanisms of Soil Aggregate Reorganization and Carbon Pool Responses to Grassland Degradation in Humid Regions[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7): 2624-2637

湿润区草地退化对土壤团聚体结构重组及碳库响应的结构调控机制

黄惠群¹, 刘西苑¹, 朱晓花¹, 曾和平^{2*}

(1. 邵阳市草地资源保护中心, 湖南 邵阳 422000; 2. 昆明理工大学城市学院, 云南 昆明 650500)

摘要:草地退化是影响土壤结构稳定性与碳循环过程的重要驱动因素,但湿润气候条件下其作用路径及调控机制仍缺乏定量解析。本研究以湖南南山牧场典型山地草甸为对象,基于退化梯度(ND, LD, MD, HD),系统分析了0~30 cm土层土壤团聚体结构及有机碳分布特征。结果表明,随着退化程度加剧,>5 mm大团聚体含量下降约47%,<0.25 mm微团聚体含量增加约168%,机械稳定性和水稳性团聚体的平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)分别降低约46%,53%,分形维数显著升高,表明土壤结构由稳定态向破碎态转变。大团聚体破碎释放碳,其中一部分被微团聚体吸附封存,导致碳在团聚体中的分布由“大团聚体主导”向“微团聚体主导”转变。草地退化同时引起土壤有机碳总量下降与碳结构性重组,显示土壤团聚体在碳保护和分配中的关键作用。本研究揭示了湿润区草地退化驱动的碳库变化及其结构性机制,为退化草地生态修复与碳汇管理提供了理论依据。

关键词:草地退化;土壤团聚体;土壤有机碳;湿润区

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2624-14

Structural Regulation Mechanisms of Soil Aggregate Reorganization and Carbon Pool Responses to Grassland Degradation in Humid Regions

HUANG Hui-qun¹, LIU Xi-yuan¹, ZHU Xiao-hua¹, ZENG He-ping^{2*}

(1. Shaoyang Grassland Resources Protection Center, Shaoyang, Hunan Province 422000, China; 2. City college, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan Province 650500, China)

Abstract: Grassland degradation is a major driver affecting soil structure stability and carbon cycling processes; however, its underlying pathways and regulatory mechanisms under humid climatic conditions remain insufficiently quantified. In this study, a typical montane meadow in Nanshan Pasture, Hunan Province, China, was selected to investigate the characteristics of soil aggregate structure and organic carbon distribution across a degradation gradient, including non-degraded (ND), lightly degraded (LD), moderately degraded (MD), and heavily degraded (HD) grasslands within the 0-30 cm soil layer. The results showed that, with increasing degradation intensity, the proportion of >5 mm macroaggregates decreased by approximately 47%, whereas the proportion of <0.25 mm microaggregates increased by approximately 168%. Meanwhile, the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of both mechanically stable and water-stable aggregates declined by approximately 46% and 53%, respectively, accompanied by a significant increase in fractal dimension, indicating a transition of soil structure from a stable state to a fragmented state. The breakdown of macroaggregates released organic carbon, part of which was subsequently adsorbed and stabilized by microag-

收稿日期:2026-04-09;修回日期:2026-05-11

基金项目:南山国家公园草地生态系统定位监测研究(XLK202108-10);国家自然科学基金项目(41461061)资助

作者简介:黄惠群(1989-),男,苗族,湖南邵阳人,硕士研究生,主要从事生态保护与修复、生态系统功能与生物多样性、植物-土壤-微生物互作、草种质资源收集与培育、林草技术推广等研究, E-mail: 978344016@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: dabatou@126.com

gregates, resulting in a shift in carbon distribution from a “macroaggregate-dominated” pattern to a “microaggregate-dominated” pattern. Grassland degradation also led to a decline in total soil organic carbon and induced substantial structural reorganization of soil carbon pools, highlighting the pivotal role of soil aggregates in carbon protection and redistribution. These findings elucidate the structural mechanisms underlying carbon pool dynamics driven by grassland degradation in humid regions and provide a theoretical basis for ecological restoration and carbon sequestration management of degraded grasslands.

Key words: Grassland degradation; Soil aggregates; Soil organic carbon; Humid region

草地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,在维持区域生态安全、调节水循环及参与全球碳循环中发挥着关键作用^[1]。作为草地生态系统的重要组成部分,土壤不仅为植物生长提供基质,也是陆地碳库的重要载体^[2]。土壤有机碳通过影响土壤结构稳定性、养分循环及微生物活动,对维持生态系统功能与稳定性具有重要意义^[3]。然而,在全球变化与人类干扰加剧背景下,草地退化已成为影响土壤结构与碳循环过程的核心驱动因素,其不仅改变植被组成与生物量输入,还通过扰动土壤物理结构,进而影响碳的储存与释放过程^[4]。尽管已有研究普遍认为草地退化会削弱土壤团聚体稳定性并促进有机碳流失,且部分研究已从团聚体分级或碳组分角度探讨二者关系,但整体上仍以相关性分析或现象描述为主,对草地退化-团聚体结构-碳库之间的作用路径及其调控机制缺乏系统量化解析。

土壤团聚体作为连接土壤结构与碳循环的基本单元,其在碳稳定中的作用主要体现在“物理保护机制”上^[5]。稳定的大团聚体通过包裹颗粒有机碳(POC)降低其暴露程度,而微团聚体则通过矿物结合有机碳(MAOC)提供长期稳定性^[6]。因此,土壤有机碳的稳定性不仅取决于碳含量本身,更取决于其所处的团聚体结构状态^[7]。这一认识表明,土壤结构并非碳变化的被动响应变量,而是通过调节有机碳的物理保护状态、微生物可利用性及其暴露程度,从而影响碳转化与稳定过程的重要调控界面。因此,土壤结构在草地退化过程中如何影响碳库变化路径,仍有待进一步定量解析。此外,现有研究主要集中于干旱与半干旱区草地生态系统^[8-10],普遍认为风蚀和机械扰动是驱动团聚体破碎与碳流失的主导机制^[11]。然而,不同气候区在降水条件、植被类型及土壤发育过程方面存在显著差异,这些因素可能导致土壤结构演变及碳循环过程呈现不同机制特征^[12]。相比之下,南方湿润区降水充沛、干湿交替频繁,水动力过程(如降雨冲刷、淋溶及膨胀-收缩循环)可能在团聚体结构演变中发挥

更加关键的作用。这种以水动力为主导的扰动机制,可能改变传统“退化-结构-碳”关系的作用路径,使湿润区草地退化呈现出不同于干旱区的过程特征。然而,湿润气候条件下草地退化如何通过结构路径调控土壤碳库的作用机制,尚缺乏系统研究与理论框架。湖南南山牧场位于我国南方典型山地草甸区,近年来受长期放牧利用及气候变化影响,草地退化现象较为普遍^[13]。在该区域开展草地退化对土壤团聚体结构及碳分布影响的研究,对于揭示湿润区草地生态系统土壤结构演变及碳循环机制具有重要意义。

基于上述认识,本研究提出如下理论命题(Theoretical proposition),在湿润气候条件下,草地退化通过改变土壤团聚体结构稳定性,间接而非直接调控土壤有机碳库动态,可假设其表现为一种“以结构调控为特征的碳循环作用机制”。围绕该命题,进一步提出三个可检验假设:结构响应假设(Structural response hypothesis),随着草地退化程度加剧,生物输入减少与水动力扰动增强将协同作用,导致土壤团聚体由大粒径向小粒径转化,表现为MWD和GMD降低、分形维数升高,即土壤结构由稳定态向破碎态转变。碳重组假设(Carbon reorganization hypothesis),团聚体结构变化将重塑土壤有机碳在不同粒径中的分布格局,使碳由“大团聚体主导”向“微团聚体主导”转移,表现为碳库结构性重组而非单纯总量变化。路径中介假设(Mediation hypothesis),草地退化通过改变土壤团聚体结构特征,进而影响有机碳的物理保护程度、暴露状态及微生物可利用性,从而间接调控土壤有机碳的变化过程。基于此,构建“草地退化-土壤团聚体结构-碳循环”的作用路径框架(图1)。

为验证上述假设,本研究以南方湿润区典型山地草甸——湖南南山牧场为研究对象,将草地退化程度(ND, LD, MD, HD)作为外在驱动变量,土壤团聚体结构作为中介过程,土壤有机碳库作为响应对象,构建“退化梯度下土壤团聚体结构—有机碳库的耦合系统”,通过系统分析0~30 cm土层土壤

团聚体结构特征及有机碳分布格局,并结合结构方程模型(SEM)定量解析草地退化、团聚体结构与土壤有机碳之间的作用路径。通过从“驱动-结构-功

能”耦合视角构建理论框架,旨在揭示湿润区草地退化背景下土壤碳循环的关键调控机制,并为退化草地生态修复与碳汇功能提升提供理论依据。

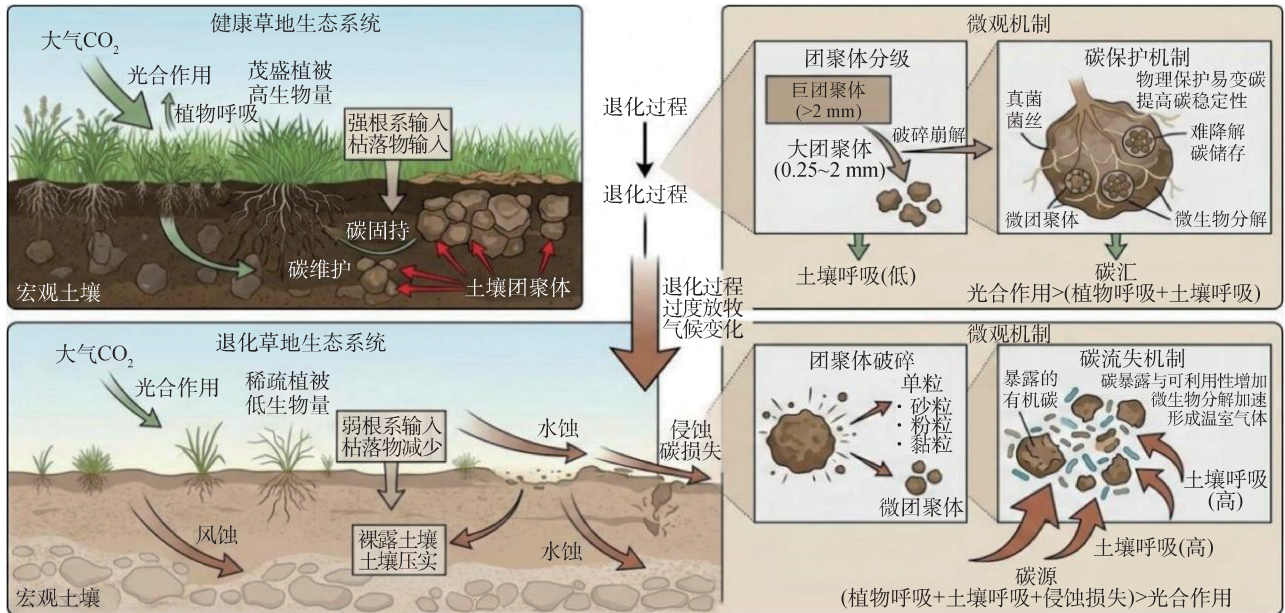


图1 草地退化—土壤团聚体结构—碳循环耦合机制示意图

Fig. 1 Conceptual diagram of the mechanisms linking grassland degradation, soil aggregate dynamics, and carbon cycling

注:箭头表示作用方向;草地退化通过减少植被输入和增强水动力扰动改变团聚体结构,使大团聚体向微团聚体转化、稳定性下降,同时有机碳暴露加速矿化,部分碳被微团聚体吸附形成稳定库,体现总量衰减与结构重组,并显示结构在退化—碳路径中的中介、级联与反馈作用

Note: Arrows indicate the direction of effects: grassland degradation alters soil aggregate structure by reducing vegetation inputs and enhancing hydrodynamic disturbances, leading to the breakdown of macroaggregates into microaggregates and a decline in structural stability. This structural change exposes organic carbon to accelerated mineralization, while part of the carbon is stabilized within microaggregates, reflecting both a decrease in total carbon and structural reorganization, and highlighting the mediating, cascading, and feedback roles of aggregate structure in the degradation-carbon pathway

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省邵阳市城步苗族自治县南山牧场(109°35′~110°05′E, 25°58′~26°12′N),地处雪峰山脉南段、南岭山脉北麓,是我国南方典型的山地草甸牧场之一。牧场总面积约152 km²,天然草山面积约23万 kg·m⁻²,平均海拔约1760 m,地形以缓坡丘陵为主,坡度多在15°以内^[14]。研究区属于中亚热带山地季风气候,受海拔影响具有明显的垂直气候分异特征。根据当地气象站2015—2024年监测资料,年平均气温为11℃,最热月(7月)平均气温19.5℃,最冷月(1月)平均气温0.8℃^[15];年降水量约1800~2000 mm,其中4—9月降水量约占全年降水量的75%,表现出明显的雨热同季特征;年平均相对湿度在85%以上,无霜期约200~220 d。研究区土壤类型以山地草甸土和山地

黄棕壤为主(分别大致对应于国际土壤分类系统WRB中的Cambisols和Acrisols类型),土壤发育良好,土层深厚,质地疏松多孔,兼具良好的通透性与保肥能力,整体肥力较高^[16]。植被类型属于亚热带山地草甸群落,优势植物主要包括绒毛草(*Holcus lanatus*)、早熟禾(*Poa annua*)、雀稗(*Paspalum thunbergii*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)和鸭茅(*Dactylis glomerata*)等禾本科植物,同时伴生白三叶(*Trifolium repens*)、红三叶(*Trifolium pratense*)等豆科牧草以及酸模(*Rumex acetosa* L.)、匍匐委陵菜(*Potentilla reptans*)等杂类草。南山牧场始建于1956年,是我国南方重要的山地奶牛养殖基地。长期放牧利用以及草种老化、过度放牧和气候变化等因素导致部分草地出现不同程度退化。近年来调查表明,全牧场约83%的草地存在不同程度退化,其中部分严重退化区域植被盖度下降至30%以下,土壤裸露明显,优良牧草比例显著降低^[17]。

1.2 样地设置与样品采集

2025 年 7—8 月在研究区开展野外采样。为降低地形因素对土壤性质的干扰,选择坡度一致、坡向相近且土壤类型一致的区域布设样地。参考已有长期监测资料^[18],并依据《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级标准》(GB19377—2003)^[19],结合郝爱华等^[20]提出的草地退化划分方法(主要依据植被盖度、地上生物量、优良牧草比例及土壤裸露率等指标),采用“以空间分布替代时间演替”的研究思路,选取区域内具有代表性的未退化草地(Non-degraded, ND)、轻度退化草地(Lightly degraded, LD)、中度退化草地(Moderately degraded, MD)和重度退化草地(Heavily degraded, HD)。各退化草地样地基本情况见表 1。

每个退化等级设置 4 个重复样地(30 m×30 m),为保证不同退化等级样地间的空间独立性,同时控

制因地形和土壤异质性带来的干扰,样地间距均保持在>300 m,且尽量选择坡度、坡向和土壤类型相近的区域布设样地。这种布设方式可在保证不同退化等级代表性的同时,减少样地之间因自然空间异质性而导致的干扰。在每个样地内按“S”形布设 8 个采样点,去除地表凋落物后,挖取 1 m²剖面,每个剖面分为 0~10 cm,10~20 cm 和 20~30 cm 三个土层,现场利用 100 cm³环刀测定土壤容重,以保证土壤压实状态和原位结构的准确反映。随后用不锈钢土钻(内径 5 cm)采集对应土层的原状土壤样品,用于团聚体分析的样品在运输过程中用硬质塑料盒盛装,尽量避免挤压,保持原状结构。样品带回实验室后,部分鲜样沿自然裂隙轻轻掰成 1 cm³左右的小块,剔除石砾和植物根系,风干后用于团聚体分级;部分风干后过 2 mm 和 0.25 mm 筛,用于有机碳等指标测定。

表 1 不同退化程度草地样地基本情况

Table 1 Basic information of grassland plots with different degradation degrees

退化程度 Degree of degradation	海拔 Altitude/m	植被盖度 Vegetation coverage/%	地上生物量 Aboveground biomass/ (g·m ⁻²)	优良牧草比例 High-quality forage ratio/%	土壤裸露率 Soil bareness rate/%	主要优势植物 Dominant plant species
未退化草地 ND	1720±35.08 ^c	98.10±1.08 ^a	1052.85±62.15 ^a	82.55±7.85 ^a	<5	绒毛草、红车轴草、狗牙根
轻度退化草地 LD	1735±40.15 ^b	90.05±1.03 ^b	850.54±65.13 ^b	72.30±6.52 ^b	8~12	绒毛草、蒲公英、雀稗、狗牙根
中度退化草地 MD	1710±30.86 ^d	81.20±1.12 ^c	650.26±52.17 ^c	48.73±5.84 ^c	25~35	绒毛草、蒲公英、雀稗、狗牙根、苔草、荩草
重度退化草地 HD	1745±25.52 ^a	61.00±2.05 ^d	420.08±48.23 ^d	31.52±4.28 ^d	45~60	红车轴草、狗牙根、酸模、匍匐委陵菜

注:各数值以平均值±标准误差表示。不同小写字母表示不同退化程度之间差异显著($P<0.05$),下同

Note: Values are expressed as mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences among degradation levels ($P<0.05$), the same as below

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤基本理化性质测定 土壤 pH 采用电位法测定(土水比 1:2.5);土壤容重同时包括野外原位测定与室内复测;现场使用 100 cm³环刀在挖剖面各层土中直接测定,以反映土壤原状压实和结构;实验室部分土样复测以保证结果重复性。土壤总有机碳采用重铬酸钾外加热法测定;全氮采用凯氏定氮法测定;土壤机械组成采用吸管法测定。分析测定方法参照鲍士旦《土壤农化分析》^[21]。为保证测定结果可靠性,每个样品至少进行 3 次重复测定,取平均值作为最终结果。

1.3.2 土壤团聚体分级 土壤团聚体稳定性通常可通过机械稳定性和水稳性两种方式进行评价。其中,机械稳定性团聚体主要反映土壤在外力振动条件下的结构组成特征,而水稳性团聚体则反映土壤在水力作用(如降雨、淋溶及干湿交替)下的结构稳定性。鉴于本研究区位于湿润气候区,降雨及水

动力过程是驱动土壤结构变化的主导因素,因此本文在团聚体稳定性评价(MWD、GMD 及分形维数)中统一采用水稳性团聚体数据进行计算,而机械稳定性团聚体主要用于辅助分析粒径组成特征。

机械稳定性团聚体:采用干筛法^[22]。取风干原状土样 2 kg,沿自然裂隙轻轻掰成 1 cm³左右的小块,去除石砾和植物细根。用四分法称取 500 g 土样,放入套筛(孔径依次为 5,2,1,0.5,0.25 mm)顶部,盖上筛盖,用振荡筛分仪(Retsch AS200,德国)振荡 10 min,振幅 2 mm。筛分后分别收集各孔径筛子上及底盘的土壤团聚体(>5 mm,2~5 mm,1~2 mm,0.5~1 mm,0.25~0.5 mm,<0.25 mm),用电子天平称重(精确至 0.01 g),计算机械稳定性团聚体组成及百分含量。

水稳性团聚体:采用湿筛法^[5,22]。根据干筛结果,按各粒径团聚体质量比例配制 50 g 混合土样(精确至 0.01 g),放入套筛(孔径同干筛)顶部,用蒸

馏水从底部缓慢浸润 10 min(避免气泡产生),使团聚体达到饱和状态。然后将套筛放入团粒分析仪(TTF-100,浙江托普)的水桶中,以 30 次·min⁻¹的频率在水中垂直振荡 2 min,振幅 3 cm。筛分后收集各孔径筛网上的团聚体,转移至已知质量的铝盒中,60℃烘干至恒重,称重,计算水稳性团聚体组成及百分含量。

1.3.3 团聚体稳定性指标计算 平均重量直径(Mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(Geometric mean diameter, GMD)的公式计算^[23]为:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \times w_i)$$

$$\text{GMD} = \exp\left(\sum_{i=1}^n w_i \times \ln \bar{x}_i\right)$$

式中: $\bar{x}_i$ 为第*i*粒径团聚体的平均直径(mm),取相邻两筛孔径的平均值; w_i 为第*i*粒径团聚体的质量分数(%)。

分形维数(Fractal dimension, D)采用杨培岭等提出的公式计算^[24]:

$$\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}}\right)^{3-D}$$

式中: $M(r < \bar{x}_i)$ 为粒径小于 $\bar{x}_i$ 团聚体累积质量(g); M_T 为团聚体总质量(g); $\bar{x}_i$ 为第*i*粒径团聚体的平均直径(mm); $x_{\max}$ 为最大粒径团聚体的平均直径(mm)。对等式两边取对数,得到线性回归方程:

$$\lg\left(\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T}\right) = (3-D)\lg\left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}}\right)$$

以 $(\lg(\bar{x}_i/x_{\max}))$ 为横坐标, $\lg(M(r < \bar{x}_i)/M_T)$ 为纵坐标进行线性拟合,求出斜率*k*,则 $D=3-k$ 。

1.3.4 团聚体有机碳含量测定 各粒径机械稳定性团聚体有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定^[4,21]。称取过 0.25 mm 筛的各粒径团聚体样品 0.2~0.5 g(精确至 0.0001 g)放入硬质试管中,准确加入 0.8000 mol·L⁻¹ K₂Cr₂O₇标准溶液 5 mL,浓 H₂SO₄ 5 mL,摇匀,盖上弯颈漏斗。将试管放入油浴锅中,185~190℃消煮 5 min,取出冷却。将试管内容物洗入 250 mL 三角瓶中,加邻菲罗啉指示剂 3~4 滴,用 0.2 mol·L⁻¹ FeSO₄标准溶液滴定至终点。同时做空白对照。每个样品重复测定 3 次。

1.3.5 团聚体有机碳贡献率计算 各粒径团聚体对土壤总有机碳的贡献率(%)按以下公式计算^[25]:

$$\text{贡献率} = \frac{C_i \times W_i}{C_T} \times 100\%$$

式中: C_i 为第*i*粒径团聚体有机碳含量(g·kg⁻¹); W_i 为第*i*粒径团聚体的质量分数(%); C_T 为土壤总有机碳含量(g·kg⁻¹)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理,SPSS 22.0 进行统计分析。双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验退化程度和土层深度及其交互作用对团聚体组成、稳定性指标及有机碳含量的影响,LSD 法进行多重比较($\alpha=0.05$)。Pearson 相关分析探讨各指标间的相关性。采用 Origin 2021 制图。图表中数据为平均值±标准差。为定量解析草地退化、土壤团聚体结构及土壤有机碳之间的作用路径关系,本研究构建结构方程模型(Structural Equation Model, SEM)。基于理论假设与相关分析结果,选取退化程度(Degradation)、>0.25 mm 大团聚体含量(Macroaggregates)、平均重量直径(MWD)及分形维数(D)作为解释变量,土壤有机碳(SOC)作为响应变量,构建路径关系模型。模型采用 AMOS 24.0 软件进行拟合,参数估计方法为最大似然法(Maximum likelihood estimation, MLE)。模型拟合优度通过以下指标进行评价:卡方自由度比(χ^2/df)、比较拟合指数(CFI)、Tucker-Lewis 指数(TLI)及均方根误差近似(RMSEA)。当 $\chi^2/\text{df}<3$,CFI>0.90,TLI>0.90 且 RMSEA<0.08 时,认为模型拟合良好。

2 结果与分析

2.1 不同退化程度草地土壤基本理化性质

不同退化程度草地 0~30 cm 土层土壤基本理化性质见表 2。总体来看,随着退化加剧,土壤容重逐渐增加,而土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)显著下降($P<0.05$),表明退化对土壤结构和养分状况产生明显影响。表层(0~10 cm)中,ND 处理容重为 0.87 g·cm⁻³,HD 升至 1.12 g·cm⁻³,增幅 28.7%,反映土壤压实加剧。SOC 由 52.6 g·kg⁻¹降至 28.3 g·kg⁻¹,降幅 46.2%;TN 由 4.85 g·kg⁻¹降至 2.62 g·kg⁻¹,降幅 46.0%,显示退化显著削弱土壤碳氮库。从土层变化来看,各处理土壤有机碳和全氮含量均表现为:ND>LD>MD>HD。且表层降幅明显大于下层,说明草地退化对表层土壤养

分的影响更为显著。相比之下,各处理土壤 pH 值变化较小,呈微酸性至中性,C/N 差异不显著,表明不同退化程度草地土壤有机质分解程度总体相近。

表 2 不同退化程度草地土壤基本理化性质
Table 2 Basic physical and chemical properties of soils with different degradation degrees

土层 Soil depth/cm	退化程度 Degree of degradation	容重 DO/(g·cm ⁻³)	pH 值	有机碳 SOC/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	C/N
0~10	ND	0.87±0.05 ^{bc}	6.25±0.25 ^a	52.60±4.22 ^a	4.85±0.38 ^a	10.8
	LD	0.95±0.06 ^b	6.10±0.12 ^a	43.82±3.16 ^b	4.02±0.32 ^b	10.9
	MD	1.04±0.07 ^a	6.05±0.22 ^a	35.55±3.10 ^c	3.26±0.28 ^c	10.9
	HD	1.12±0.08 ^a	5.96±0.13 ^a	28.30±2.15 ^d	2.62±0.24 ^d	10.8
10~20	ND	0.98±0.06 ^{ab}	6.30±0.16 ^a	38.54±3.12 ^a	3.56±0.30 ^a	10.8
	LD	1.05±0.07 ^{ab}	6.22±0.26 ^a	32.63±2.18 ^b	3.02±0.26 ^b	10.8
	MD	1.13±0.08 ^a	6.14±0.13 ^a	26.87±2.23 ^c	2.48±0.22 ^c	10.8
	HD	1.20±0.09 ^a	6.06±0.14 ^a	21.54±1.19 ^d	2.01±0.18 ^d	10.7
20~30	ND	1.08±0.07 ^b	6.42±0.20 ^a	28.64±2.14 ^a	2.65±0.24 ^a	10.8
	LD	1.14±0.08 ^{ab}	6.36±0.21 ^a	24.26±2.21 ^b	2.25±0.20 ^b	10.8
	MD	1.21±0.09 ^a	6.28±0.16 ^a	20.35±1.18 ^c	1.89±0.17 ^c	10.7
	HD	1.27±0.10 ^a	6.16±0.18 ^a	16.82±1.15 ^d	1.58±0.15 ^d	10.6

2.2 不同退化程度草地土壤团聚体分布特征

不同退化程度下土壤团聚体组成总体表现为由大团聚体向微团聚体转化的趋势(表 3、表 4)。机械稳定性团聚体与水稳性团聚体在粒径分布变化趋势上基本一致,但水稳性团聚体对退化响应更为敏感。

2.2.1 机械稳定性团聚体组成 不同退化程度草地机械稳定性团聚体组成见表 3。从总体分布来看,各退化等级土壤以>0.25 mm 大团聚体为主,占总量 82% 以上,但粒径比例随退化程度变化显

著。表层(0~10 cm)>5 mm 大团聚体含量由 ND 的 26.80% 降至 HD 的 14.22%,降幅 47.0%,表明大团聚体明显破碎;2~5 mm 和 1~2 mm 团聚体亦呈下降趋势。相反,<0.25 mm 微团聚体含量显著增加($P<0.05$),从 ND 的 10.51% 升至 HD 的 27.65%,增幅达 167.9%,反映大团聚体向微团聚体转化。10~30 cm 土层变化趋势与表层一致,但幅度较小。总体而言,随退化加剧,大团聚体比例下降、微团聚体比例增加,且随土层加深变化幅度减小。

表 3 不同退化程度草地机械稳定性团聚体组成
Table 3 Composition of mechanically stable aggregates in grasslands with different degradation degrees 单位:%

土层 Soil depth/cm	退化程度 Degree of degradation	粒径 Aggregate size					
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0~10	ND	26.80±2.22 ^{aA}	19.45±1.16 ^{aB}	16.27±1.14 ^{aB}	13.45±1.12 ^{bC}	13.52±1.12 ^{aC}	10.51±0.09 ^{dD}
	LD	22.45±1.29 ^{bA}	18.22±1.15 ^{bB}	15.32±1.13 ^{aB}	15.24±1.16 ^{aB}	15.65±1.03 ^{aB}	13.12±1.11 ^{cC}
	MD	20.30±1.26 ^{cA}	17.45±1.14 ^{bB}	14.56±1.12 ^{bcC}	14.32±1.13 ^{bcC}	14.25±1.16 ^{bC}	19.12±1.85 ^{bA}
	HD	16.22±1.22 ^{dC}	15.02±1.08 ^{cB}	13.75±1.11 ^{cD}	13.86±1.11 ^{bcD}	13.50±1.80 ^{cD}	27.65±1.95 ^{aA}
10~20	ND	23.52±2.07 ^{aA}	18.36±1.15 ^{aB}	15.54±1.13 ^{aC}	14.2±1.12 ^{bD}	14.27±1.62 ^{bD}	14.11±1.12 ^{dD}
	LD	19.85±1.17 ^{bA}	17.45±1.14 ^{abB}	14.81±1.12 ^{abC}	15.80±1.16 ^{abC}	16.17±1.74 ^{aB}	15.92±1.23 ^{cBC}
	MD	16.59±1.14 ^{cB}	16.05±1.13 ^{bcB}	13.64±1.11 ^{bcD}	14.32±1.15 ^{bC}	14.80±1.12 ^{abC}	24.60±1.37 ^{bA}
	HD	15.85±1.11 ^{dB}	15.00±1.12 ^{cC}	13.50±1.08 ^{cCD}	13.46±1.11 ^{cCD}	13.26±1.15 ^{cC}	28.93±2.25 ^{aA}
20~30	ND	20.25±1.18 ^{aA}	17.82±1.15 ^{aB}	14.88±1.12 ^{aC}	14.76±1.20 ^{abC}	14.32±1.20 ^{bC}	17.97±1.25 ^{dB}
	LD	18.44±1.15 ^{bB}	16.85±1.14 ^{abB}	15.88±1.14 ^{abC}	15.25±1.21 ^{aC}	15.06±1.45 ^{aC}	18.52±1.26 ^{cA}
	MD	16.26±1.12 ^{cC}	14.57±1.21 ^{bcB}	14.22±1.12 ^{bcD}	14.28±1.17 ^{abB}	14.93±1.30 ^{bB}	25.74±1.80 ^{bA}
	HD	14.86±1.00 ^{dD}	14.25±1.12 ^{cB}	13.23±1.00 ^{cD}	13.85±1.12 ^{cC}	14.15±1.25 ^{cC}	29.66±2.20 ^{aA}

注:同列不同小写字母表示退化程度之间差异显著($P<0.05$);同行不同大写字母表示粒径之间差异显著($P<0.05$),下同
Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among degradation degrees ($P<0.05$); different-tuppercase letters within the same row indicate significant differences among particle size fractions ($P<0.05$), the same as below

2.2.2 水稳性团聚体组成 水稳性团聚体组成反映了土壤在水力作用下的结构稳定性。由表 4 可知,与机械稳定性团聚体相比,各处理水稳性团聚体中>0.25 mm 大团聚体比例明显降低,而<0.25 mm

微团聚体比例显著增加,说明部分团聚体在水中振荡作用下发生破碎。在0~10 cm表层土壤中,ND处理>0.25 mm水稳性大团聚体含量为70.18%,而HD处理降至42.75%,降幅达到27.43%。与此同时,<0.25 mm微团聚体含量由29.82%增加至

57.25%。与机械稳定性团聚体相比,各退化处理水稳性大团聚体含量下降幅度更大,说明草地退化不仅改变团聚体粒径组成,同时也降低了团聚体在水中的稳定性。频繁的降雨和干湿交替作用会增强团聚体破碎过程,从而导致土壤结构稳定性下降。

表 4 不同退化程度草地水稳性团聚体组成

Table 4 Composition of water-stable aggregates in grasslands with different degradation degrees

单位: %

土层 Soil depth/cm	退化程度 Degree of degradation	粒径 Aggregate size					
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0~10	ND	11.80±1.02 ^{aD}	14.62±1.02 ^{aC}	17.52±1.15 ^{aB}	14.10±1.02 ^{aC}	12.14±1.02 ^{aD}	29.82±2.24 ^{aA}
	LD	8.64±0.75 ^{bD}	12.25±1.08 ^{bC}	15.06±1.03 ^{bB}	14.84±1.08 ^{aB}	11.63±1.01 ^{abC}	37.58±3.15 ^{bA}
	MD	5.81±0.55 ^{cD}	9.20±0.88 ^{cC}	13.24±1.12 ^{cB}	12.65±1.10 ^{bB}	10.65±0.80 ^{bcC}	48.45±4.52 ^{cA}
	HD	3.55±0.32 ^{dD}	8.00±0.56 ^{dC}	11.22±0.82 ^{dB}	10.56±0.85 ^{cB}	9.42±0.74 ^{cB}	57.25±5.05 ^{dA}
10~20	ND	9.85±0.80 ^{aD}	12.87±1.01 ^{aC}	15.81±1.11 ^{aB}	15.24±1.13 ^{aB}	12.84±1.15 ^{aC}	33.39±2.86 ^{aA}
	LD	7.24±0.56 ^{bD}	10.63±0.90 ^{bC}	13.82±1.12 ^{bBC}	15.66±1.23 ^{aB}	12.24±1.04 ^{abBC}	40.41±3.45 ^{bA}
	MD	4.84±0.24 ^{cD}	8.24±0.72 ^{cCD}	11.01±0.95 ^{cC}	13.24±1.12 ^{bB}	10.25±0.98 ^{bcC}	52.42±4.38 ^{cA}
	HD	3.03±0.13 ^{dD}	5.65±0.58 ^{dCD}	9.30±0.76 ^{dC}	10.23±0.96 ^{cB}	9.86±0.74 ^{cC}	61.93±5.15 ^{dA}
20~30	ND	8.23±0.73 ^{aD}	11.55±1.06 ^{aCD}	14.23±1.26 ^{aBC}	15.87±1.14 ^{aB}	13.53±1.15 ^{aC}	36.59±3.58 ^{aA}
	LD	6.04±0.55 ^{bD}	9.57±0.88 ^{bCD}	12.26±1.15 ^{bC}	14.23±1.64 ^{aB}	12.84±1.18 ^{abC}	45.06±4.06 ^{bA}
	MD	4.08±0.33 ^{cD}	7.54±0.65 ^{cCD}	10.26±0.93 ^{cC}	11.84±1.25 ^{bB}	10.85±0.98 ^{bcC}	55.43±4.85 ^{cA}
	HD	2.54±0.12 ^{dD}	5.06±0.42 ^{dCD}	7.88±0.75 ^{dC}	10.85±0.92 ^{cB}	9.26±0.85 ^{cBC}	64.41±5.65 ^{dA}

2.3 不同退化程度草地土壤团聚体稳定性

2.3.1 平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD) MWD和GMD是评价土壤团聚体稳定性的重要指标。从表5和表6可以看出,随着草地退化程度加剧,各土层机械稳定性和水稳性团聚体MWD和GMD均呈显著下降趋势($P<0.05$)。以0~10 cm表层为例,机械稳定性团聚体MWD在ND处理为3.18 mm,LD,MD,HD处理依次降至2.78 mm,2.35 mm和1.72 mm,HD较ND降低45.9%;GMD由2.12 mm降至1.13 mm,降幅46.7%。水稳性团聚体MWD由ND的1.82 mm降至HD的0.85 mm,

降幅53.3%;GMD由0.92 mm降至0.42 mm,降幅54.3%。水稳性团聚体MWD和GMD的降幅均大于机械稳定性团聚体,表明退化对团聚体水稳定性的影响更为显著。10~20 cm和20~30 cm土层MWD和GMD均低于表层,变化趋势与表层一致,但幅度略小。20~30 cm土层机械稳定性团聚体MWD从ND的2.65 mm降至HD的1.42 mm,水稳性团聚体MWD从1.42 mm降至0.68 mm。双因素方差分析表明,退化程度和土层深度对MWD与GMD均有极显著影响($P<0.01$),二者交互作用不显著。

表 5 不同退化程度草地机械稳定性团聚体平均重量直径和几何平均直径

Table 5 Mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of mechanically stable aggregates in grasslands under different degradation degrees

退化程度 Degree of degradation	平均重量直径 MWD			几何平均直径 GMD		
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
ND	3.18±0.33 ^a	2.95±0.42 ^a	2.65±0.36 ^a	2.12±0.39 ^a	2.04±0.13 ^a	1.92±0.16 ^a
LD	2.78±0.14 ^{ab}	2.62±0.35 ^a	2.53±0.42 ^a	1.85±0.10 ^{ab}	1.72±0.15 ^{ab}	1.63±0.21 ^{ab}
MD	2.35±0.16 ^{ab}	2.20±0.31 ^{ab}	2.12±0.30 ^a	1.36±0.13 ^{ab}	1.25±0.12 ^{ab}	1.14±0.04 ^{ab}
HD	1.72±0.08 ^b	1.65±0.09 ^b	1.42±0.06 ^b	1.13±0.13 ^b	1.03±0.05 ^b	0.92±0.11 ^b

注:不同小写字母表示同一土层不同退化程度间差异显著($P<0.05$),下同

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different degradation degrees in the same soil layer ($P<0.05$), the same as below

2.3.2 分形维数(D) 分形维数D反映了土壤团聚体的粒径分布特征和结构的自相似性,D值越大表示细粒径团聚体含量高、结构复杂。图2显示,各

处理水稳性团聚体D值为2.48~2.67。表层(0~10 cm)中,ND处理D值最低,LD、MD、HD处理依次升高至2.52,2.59和2.65,HD较ND升高6.9%。

表 6 不同退化程度草地水稳性团聚体平均重量直径和几何平均直径

Table 6 Mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of water-stable aggregates in grasslands under different degradation degrees

退化程度 Degree of degradation	平均重量直径 MWD			几何平均直径 GMD		
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
ND	1.82±0.23 ^a	1.70±0.18 ^a	1.42±0.20 ^a	0.92±0.06 ^a	0.82±0.07 ^a	0.75±0.06 ^a
LD	1.55±0.18 ^{ab}	1.42±0.14 ^{ab}	1.30±0.15 ^a	0.75±0.04 ^a	0.65±0.05 ^a	0.56±0.06 ^a
MD	1.18±0.15 ^b	1.05±0.10 ^b	0.90±0.09 ^{ab}	0.56±0.03 ^a	0.45±0.06 ^a	0.37±0.06 ^a
HD	0.85±0.05 ^{bc}	0.72±0.06 ^{bc}	0.68±0.02 ^b	0.42±0.05 ^{ab}	0.35±0.02 ^{ab}	0.28±0.06 ^{ab}

10~20 cm 和 20~30 cm 土层 D 值变化趋势与表层一致,但略高于表层,20~30 cm ND 为 2.51,HD 升至 2.67,升幅 6.4%。相关性分析见表 7 可知,D 值与 MWD、GMD 呈极显著负相关($r=-0.885$, $r=-0.872$, $P<0.01$),与 <0.25 mm 微团聚体含量显著正相关($r=0.918$, $P<0.01$),表明分形维数能有效反映团聚体稳定性变化,可作为退化草地土壤结构评价指标。

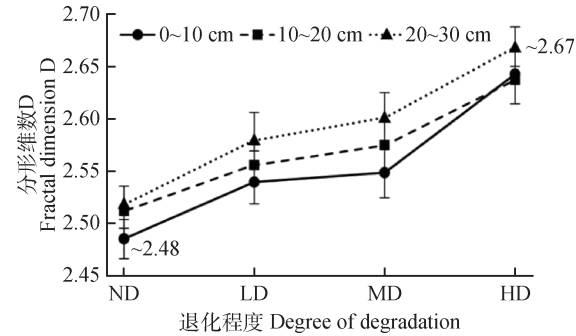


图 2 不同退化程度草地土壤水稳性团聚体分形维数 D 变化特征

Fig. 2 Variation of fractal dimension D of soil water-stable aggregates in grasslands with different degradation degrees

2.4 不同退化程度草地土壤团聚体有机碳分布特征

2.4.1 各粒径团聚体有机碳含量 不同退化程度

草地各粒径团聚体有机碳含量如表 8 所示。总体来看,团聚体有机碳含量随粒径减小呈先增后降趋势,0.5~2 mm 粒径(包括 0.5~1 mm 和 1~2 mm)含量最高, <0.25 mm 微团聚体含量最低。以 0~10 cm 土层 ND 处理为例,1~2 mm 粒径团聚体有机碳含量最高($58.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),其次为 0.5~1 mm ($56.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和 2~5 mm($53.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), >5 mm 为 $50.65\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, <0.25 mm 最低($38.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。随着退化程度加剧,各粒径团聚体有机碳含量均呈下降趋势,但降幅存在差异。在 0~10 cm 土层,与 ND 相比,HD 处理 >5 mm,2~5 mm,1~2 mm,0.5~1 mm,0.25~0.5 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量分别降低 22.50%,21.44%,21.32%,21.65%,20.7%和 13.36%,大粒径团聚体(>5 mm)的降幅最大,微团聚体(<0.25 mm)降幅相对较小。这一趋势在 10~20 cm 和 20~30 cm 层表现一致,但各粒径团聚体有机碳含量低于表层,且随退化的降幅也小于表层。20~30 cm 土层,HD 处理较 ND 各粒径团聚体有机碳含量降幅为 7.54%~11.56%。双因素方差分析表明,退化程度、土层深度及二者的交互作用对各粒径团聚体有机碳含量均有显著影响($P<0.05$)。

表 7 退化程度和土层深度对团聚体稳定性指标的双因素方差分析(F 值)

Table 7 Two-way ANOVA of degradation degree and soil depth on aggregate stability indices (F value)

变异来源 source of variation	机械稳定性 MWD mechanical stability MWD	机械稳定性 GMD mechanical stability GMD	水稳性 MWD water stability MWD	水稳性 GMD water stability GMD	分形维数 D Fractal dimension D
退化程度(D)	156.8 ^{**}	142.3 ^{**}	178.5 ^{**}	165.2 ^{**}	112.6 ^{**}
土层深度(S)	38.5 ^{**}	35.2 ^{**}	42.6 ^{**}	40.1 ^{**}	28.3 ^{**}
D×S	2.3 ^{ns}	1.9 ^{ns}	2.5 ^{ns}	2.1 ^{ns}	1.8 ^{ns}

注:**表示 $P<0.01$;ns表示 $P>0.05$

Note: ** indicates $P<0.01$; ns indicates $P>0.05$

表 8 不同退化程度草地各粒径团聚体有机碳含量

Table 8 Organic carbon content of aggregates with different particle sizes in grasslands with different degradation degrees

单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

土层 Soil depth/cm	退化程度 Degree of degradation	粒径 Aggregate size					
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0~10	ND	50.65±4.25 ^{abC}	53.52± 4.46 ^{ab}	58.20±4.80 ^{aA}	56.80±4.62 ^{aAB}	48.55±4.05 ^{aC}	38.26±3.26 ^{aD}
	LD	42.35±3.50 ^{bC}	45.62±3.82 ^{bb}	50.55±4.22 ^{bA}	49.20±4.14 ^{bA}	41.20±3.44 ^{bc}	32.52±2.80 ^{bD}
	MD	34.56±2.80 ^{cC}	38.26±3.22 ^{cB}	42.85±3.68 ^{cA}	41.56±3.50 ^{cAB}	33.80±2.84 ^{cC}	27.68±2.35 ^{cD}
	HD	28.15±2.30 ^{dBC}	32.08±2.76 ^{dB}	36.88±3.10 ^{dA}	35.15±2.96 ^{dA}	27.85±2.38 ^{dB}	24.90±2.16 ^{dC}
10~20	ND	38.53±3.25 ^{aC}	41.25±3.42 ^{aB}	44.82±3.85 ^{aA}	43.22±3.65 ^{aA}	37.22±3.15 ^{aC}	30.52±2.62 ^{aD}
	LD	32.66±2.76 ^{bC}	35.58±3.02 ^{bb}	39.25±3.30 ^{bA}	37.82±3.26 ^{bAB}	32.05±2.78 ^{bc}	26.30±2.25 ^{bD}
	MD	26.86±2.25 ^{cC}	30.22±2.53 ^{cB}	33.80±2.88 ^{cA}	32.54±2.76 ^{cAB}	26.85±2.27 ^{cC}	22.56±1.90 ^{cD}
	HD	22.27±1.96 ^{dC}	25.60±2.15 ^{dBC}	29.24±2.58 ^{dA}	27.84±2.36 ^{dB}	22.54±1.97 ^{dC}	20.25±1.70 ^{dD}
20~30	ND	29.64±2.56 ^{aC}	32.54±2.76 ^{aB}	35.84±3.05 ^{aA}	34.24±2.96 ^{aA}	29.53±2.54 ^{aC}	24.82±2.15 ^{aD}
	LD	25.24±2.12 ^{bC}	28.20±2.44 ^{bb}	31.52±2.74 ^{bA}	30.26±2.65 ^{bA}	25.64±2.25 ^{bc}	21.80±1.94 ^{bD}
	MD	21.26±1.80 ^{cC}	24.54±2.13 ^{cB}	27.58±2.32 ^{cA}	26.57±2.25 ^{cAB}	22.01±1.90 ^{cC}	19.20±1.61 ^{bcD}
	HD	18.25±1.15 ^{dCD}	21.26±1.87 ^{dB}	24.28±2.18 ^{dA}	23.26±2.08 ^{dAB}	19.26±1.67 ^{dC}	17.28±1.55 ^{cD}

注:同列不同小写字母表示退化程度之间差异显著($P<0.05$);同行不同大写字母表示粒径之间差异显著($P<0.05$),下同Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among degradation degrees ($P<0.05$); different uppercase letters within the same row indicate significant differences among particle size fractions ($P<0.05$), the same as below

2.4.2 团聚体有机碳储量贡献率 各粒径团聚体对土壤总有机碳的贡献率取决于团聚体含量和有机碳含量两个因素,反映了不同粒径团聚体在土壤有机碳储存中的相对重要性。从表 9 可以看出,不同退化程度草地各粒径团聚体对有机碳的贡献率存在明显差异。在 ND 处理 0~10 cm 土层,>5 mm 和 2~5 mm 大团聚体对有机碳的贡献率最高,分别为 25.66% 和 23.82%,合计占 49.48%;1~2 mm 和 0.5~1 mm 贡献率分别为 18.25% 和 14.86%;<0.25 mm 微团聚体贡献率最低,仅 7.77%。随着退化加剧,>2 mm 大团聚体贡献率显著下降,HD 处理>5 mm 和 2~5 mm 贡献率分别降至 12.55% 和

14.24%,合计仅 26.79%;而<0.25 mm 微团聚体贡献率显著升高,HD 处理达到 28.20%,成为贡献率最高的粒径组。0.5~1 mm 和 1~2 mm 粒径贡献率在 LD 和 MD 处理略有升高后下降,但在各处理中仍保持较高比例。10~20 cm 和 20~30 cm 土层变化趋势与表层一致,但微团聚体贡献率略高于表层。20~30 cm 土层,HD 处理<0.25 mm 微团聚体贡献率达到 32.42%,>5 mm 大团聚体贡献率降至 8.65%。这一结果表明,未退化草地有机碳主要储存在大团聚体中,而退化草地有机碳的载体则转变为微团聚体,反映了退化过程中大团聚体破碎导致有机碳释放,部分有机碳被微团聚体吸附保护的过程。

表 9 不同退化程度草地各粒径团聚体有机碳储量贡献率

Table 9 Contribution rate of organic carbon storage in aggregates of different sizes in grasslands with different degradation degrees

单位: %

土层 Soil depth/cm	退化程度 Degree of degradation	粒径 Aggregate size					
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0~10	ND	25.66±4.05 ^{aA}	23.82±3.85 ^{aAB}	18.25±2.55 ^{bB}	14.86±1.46 ^{abC}	9.82±1.25 ^{dCD}	7.77±1.05 ^{dD}
	LD	22.25±3.76 ^{bA}	21.56±3.46 ^{bAB}	19.54±2.20 ^{aB}	15.53±1.52 ^{aC}	10.58±1.06 ^{cD}	10.54±1.15 ^{cD}
	MD	18.05±2.46 ^{cA}	18.56±2.42 ^{cA}	18.82±2.31 ^{bA}	15.54±1.63 ^{aB}	11.06±1.32 ^{bc}	17.97±1.86 ^{bAB}
	HD	12.55±1.55 ^{dD}	14.24±1.86 ^{dC}	17.05±1.96 ^{cB}	13.14±1.25 ^{bcD}	14.82±1.18 ^{aC}	28.20±3.86 ^{aA}
10~20	ND	23.54±3.85 ^{aA}	21.20±3.21 ^{aAB}	17.58±1.90 ^{aB}	13.81±1.85 ^{cC}	12.55±1.20 ^{dCD}	11.32±1.46 ^{dD}
	LD	21.65±3.44 ^{bA}	19.80±3.05 ^{bAB}	16.81±1.83 ^{bB}	14.53±1.40 ^{bc}	13.65±1.27 ^{cD}	13.56±1.75 ^{cD}
	MD	17.55±2.15 ^{cB}	16.52±2.65 ^{cBC}	16.28±1.90 ^{bcBC}	15.49±1.55 ^{aC}	14.33±1.36 ^{bd}	19.83±2.25 ^{bA}
	HD	10.52±1.35 ^{dD}	13.26±1.42 ^{dC}	15.21±1.37 ^{cB}	12.53±1.36 ^{dC}	15.87±1.48 ^{aB}	32.61±3.98 ^{aA}
20~30	ND	21.62±2.62 ^{aA}	19.37±2.08 ^{aAB}	16.52±2.01 ^{aC}	12.45±1.32 ^{cD}	13.63±1.18 ^{bd}	16.41±1.67 ^{dC}
	LD	19.56±1.98 ^{bAB}	18.45±1.63 ^{bb}	15.32±1.52 ^{bc}	13.28±1.44 ^{bd}	12.87±1.10 ^{bcD}	20.52±2.05 ^{cA}
	MD	16.23±1.25 ^{cB}	14.47±1.82 ^{cC}	15.52±2.46 ^{bcB}	14.24±1.32 ^{bc}	13.28±1.26 ^{bd}	26.26±2.66 ^{bA}
	HD	8.65±1.25 ^{dD}	11.86±1.34 ^{dC}	13.54±2.46 ^{cC}	10.63±1.02 ^{dCD}	22.90±3.55 ^{aB}	32.42±4.26 ^{aA}

2.5 团聚体稳定性与有机碳的相关性分析

为进一步揭示团聚体稳定性与有机碳之间的关系,对主要指标进行 Pearson 相关分析,结果见图 3。由图 3 可知, >0.25 mm 团聚体含量与 MWD、GMD 呈极显著正相关 ($r=0.862, 0.838, P<0.01$), 与分形维数 D 呈极显著负相关 ($r=-0.915, P<0.01$), 表明大团聚体含量越高, 团聚体稳定性越强。总有机碳含量与 >0.25 mm 团聚体含量、MWD、GMD 呈极显著正相关 ($r=0.782, 0.796, 0.768, P<0.01$), 与分形维数 D 呈极显著负相关 ($r=-0.826, P<0.01$), 表明有机碳含量越高, 团聚体稳定性越强。团聚体平均有机碳含量与各稳定性指标的相关性与总有机碳基本一致。进一步分析表明, 各粒径团聚体有机碳含量与 MWD 的相关性存在差异, >5 mm, $2\sim 5$ mm 大粒径团聚体有机碳含量与 MWD 的相关系数 ($r=0.725, 0.708, P<0.01$) 高于 <0.25 mm 微团聚体 ($r=0.512, P<0.05$), 表明大团聚体中有机碳对稳定性的贡献更为关键。

2.6 结构方程模型分析

为进一步揭示草地退化对土壤有机碳的影响路径, 本研究构建了结构方程模型(图 4)。模型拟合结果表明, 各项拟合指标均达到理想水平 ($\chi^2/df=1.87, CFI=0.94, TLI=0.92, RMSEA=0.056$), 说明模型具有良好的解释能力。路径分析结果显示: 草地退化对大团聚体含量具有显著负向影响 (标准化路径系数 $\beta=-0.72, P<0.001$); 草地退化对分形维数 D 具有显著正向影响 ($\beta=0.68, P<0.001$); 大团聚体含量对 MWD 具有显著正向影响 ($\beta=0.81, P<0.001$); MWD 对土壤有机碳(SOC) 具有显著正向影响 ($\beta=0.63, P<0.01$); 分形维数 D 对 SOC 具有显著负向影响 ($\beta=-0.59, P<0.01$)。通过 Pearson 相关分析和多元回归检验, 土壤理化属性对 SOC 的直接作用不显著, 因此 SEM 中以团聚体结构为主要中介变量构建路径关系, 体现结构调控机制的主导作用。此外, 草地退化对 SOC 的直接路径不显著, 表明其主要通过影响团聚体结构间接调控土壤有机碳。

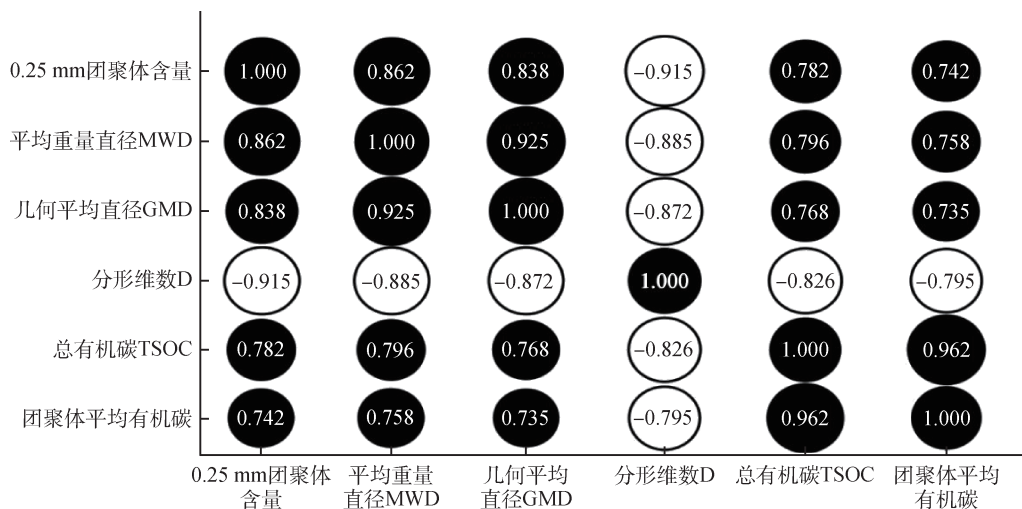


图3 团聚体稳定性指标与有机碳相关性矩阵图

Fig. 3 Correlation matrix of aggregate stability indicators and organic carbon

3 讨论

3.1 草地退化驱动的团聚体结构演变: 水动力—生物输入耦合的层级破坏机制

本研究表明, 随着草地退化程度加剧, 土壤团聚体由大团聚体向微团聚体转化, 表现为 MWD 和 GMD 显著降低而分形维数显著升高。这一变化不仅反映了结构稳定性的下降, 更揭示了土壤结构在退化过程中经历了由“有机质驱动的层级构建”向“物理扰动主导的结构破碎”转变的过程机制^[26]。

从形成机制来看, 稳定大团聚体依赖根系缠绕、有机胶结物黏结及微生物代谢产物桥联。未退化草地中, 持续的植物凋落物输入和根系更新为这些过程提供物质基础^[27]。然而, 退化背景下, 植被覆盖和生物量下降削弱有机质输入, 导致胶结不足, 层级结构松散^[28]。与此同时, 湿润区高频降雨与干湿交替增强外源物理扰动^[29]。本研究中水稳性团聚体稳定性下降幅度显著高于机械稳定性团聚体, 表明水动力作用成为主要破碎驱动^[30]。这种过程通过以下路径发挥作用: 水分入渗引起毛管压

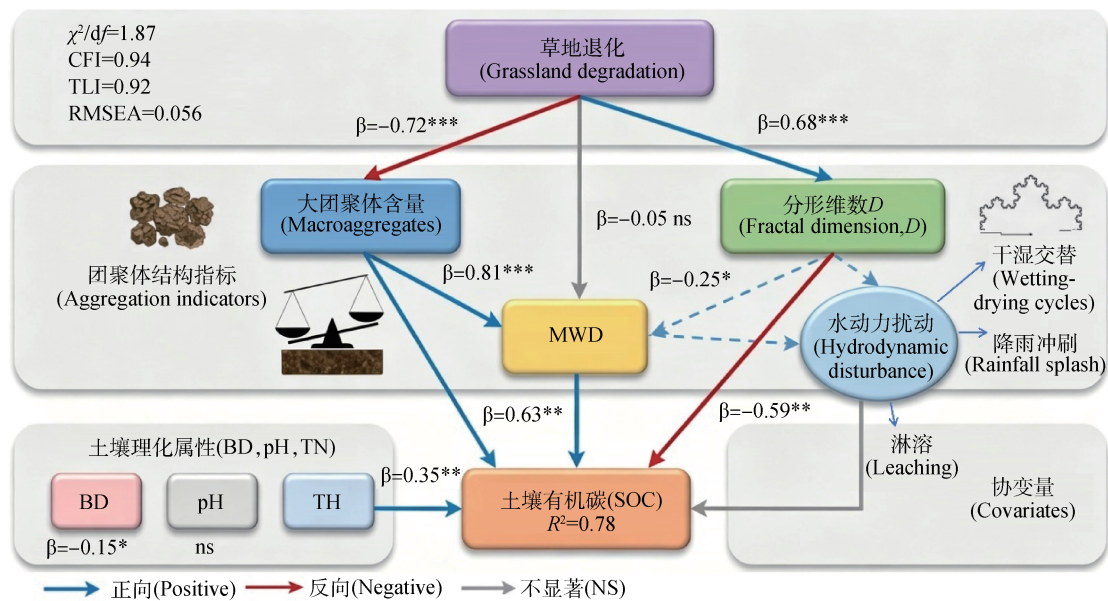


图4 草地退化—团聚体结构—土壤有机碳的结构方程模型

Fig. 4 Structural equation model of grassland degradation, aggregate structure, and soil organic carbon

力变化,破坏团聚体内部结构^[31];干湿交替导致收缩—膨胀循环,诱发结构疲劳破裂^[32];降雨冲刷增强颗粒迁移,促使大团聚体解体为细粒级单元^[33]。因此,湿润区草地退化下团聚体演变可概括为“生物输入衰减—胶结减弱—水动力破坏增强”的协同过程,与干旱区以风蚀和物理崩解为主的结构演变存在明显差异^[34]。

3.2 土壤碳库重组机制:物理保护单元转移与碳稳定性重构

本研究发现,随着退化加剧,土壤有机碳在不同粒径团聚体中的分布由“大团聚体主导”向“微团聚体主导”转变。这一现象表明,草地退化不仅导致碳储量下降,更引发了碳在不同物理保护单元之间的重新分配过程^[35]。从碳稳定机制角度分析,大团聚体中的有机碳主要以新鲜植物残体和颗粒有机碳(POC)形式存在,其稳定性依赖于团聚体的物理包裹作用^[36]。一旦团聚体破碎,这部分有机碳将暴露于微生物作用之下,加速矿化分解^[37]。而微团聚体则主要通过矿物—有机结合(MAOC)提供较强的化学保护,其碳周转速率较低^[38]。在退化过程中,大团聚体破碎导致原有被物理保护的有机碳释放,其中一部分被微生物分解为 CO_2 ^[39],另一部分则通过再吸附或再团聚进入微团聚体结构中,从而形成新的碳稳定单元。因此,本研究所观察到的“微团聚体碳占比增加”并不代表碳积累,而是反映了碳在不同保护机制之间的转移与再分配过程。这

一过程可被概括为:“大团聚体破碎→活性碳释放→部分矿化损失+部分再封存于微团聚体”。因此,草地退化对碳库的影响具有“双重效应”:总量效应,SOC整体下降(碳汇功能减弱);结构效应,碳由“活性库”向“相对稳定库”转移。这种“结构性重组”机制拓展了传统仅关注碳含量变化的研究视角,强调了碳稳定性取决于其所在的物理保护单元。

3.3 团聚体—有机碳耦合关系:正反馈驱动的系统退化路径

相关分析表明,MWD,GMD与土壤有机碳呈显著正相关,而分形维数D与有机碳呈显著负相关,说明土壤结构稳定性与碳库稳定性之间存在显著耦合关系^[40]。这种关系可从“结构保护理论”进行解释,即稳定的团聚体通过物理包裹作用降低有机碳暴露程度,从而抑制其矿化过程^[41];反之,结构破坏则会加速有机碳分解。在草地退化背景下,这一耦合关系进一步演变为正反馈过程:草地退化→有机碳输入减少→团聚体稳定性下降→有机碳暴露与矿化增强→SOC下降→结构进一步退化,该反馈回路的关键在于,土壤结构既是碳稳定的结果,也是其调控因子^[42]。当系统进入该反馈路径后,将表现出明显的“不可逆退化趋势”,即使外界扰动减弱,系统恢复仍然受限。因此,从系统角度来看,土壤团聚体结构可被视为连接“植被—土壤—碳循环”的核心枢纽,其稳定性决定了生态系统碳汇功能的维

持能力。

3.4 基于SEM的系统路径解析:结构调控作用与级联效应机制

结构方程模型(SEM)结果显示,草地退化对土壤有机碳(SOC)的影响主要通过团聚体结构间接实现,而非直接作用,统计上支持“结构调控机制”的存在。路径分析表明:草地退化通过减少植被覆盖和根系输入降低大团聚体形成能力($\beta = -0.72$);大团聚体减少削弱团聚体层级结构,反映为整体稳定性下降(MWD, $\beta = 0.81$);结构稳定性下降使有机碳暴露并加速分解($\beta = 0.63$);退化同时增强结构破碎(分形维数升高, $\beta = 0.68$),进一步促进碳流失($\beta = -0.59$)。该过程形成典型的“级联效应”:退化驱动→结构重组→碳库响应。值得注意的是,“退化→SOC”的直接路径不显著,凸显团聚体结构在连接地上植被变化与地下碳库响应中的关键间接作用^[43]。从机制上看,团聚体结构虽属于物理属性,但可通过调节有机碳空间分布、矿物结合状态及微生物作用环境,间接影响碳的暴露与转化过程。因此,本文提出的“结构调控作用”本质上是一种“结构约束下的环境调控过程”,而非物理过程对化学过程的直接驱动。此外,SEM属于基于观测数据的因果推断方法,其结果受理论假设和变量设定影响,相关机制仍需结合降雨模拟、根系输入调控等控制实验进一步验证。

3.5 机制整合与理论框架:湿润区草地退化的结构调控型碳循环模型

本研究提出湿润区草地退化的“结构调控型碳循环模型”,以土壤团聚体结构为核心中介,连接退化驱动与碳库响应。草地退化通过降低植被覆盖和有机质输入,削弱团聚体生物胶结,同时湿润区高频降雨和干湿交替增强水动力扰动,共同形成“生物输入衰减-水动力扰动增强”的双重驱动格局,改变团聚体维持机制。在结构响应上,大团聚体持续破碎并向微团聚体转化,MWD和GMD下降、分形维数升高,显示结构由有机质主导构建向物理扰动主导破碎转变,稳定性由正向维持向负向破坏转换。在功能响应上,团聚体解体暴露活性有机碳,加速矿化,同时部分有机碳进入微团聚体形成稳定碳库,导致碳库呈“总量衰减与结构重组并存”。该模型揭示三个关键特征:中介性(结构是退化-碳路

径的核心);级联性(退化驱动→结构解体→碳保护失效→碳库响应);反馈性(碳库下降反过来削弱团聚体稳定,形成“结构退化-碳流失”的正反馈回路)。与干旱半干旱区不同,湿润区退化以水动力扰动为主,通过降雨冲刷与干湿交替强化结构破碎,显示气候条件决定“结构-碳”耦合路径。由此,土壤团聚体结构可视为陆地生态系统中碳稳定性的关键物理调控界面,其稳定性决定碳库对扰动的响应和恢复潜力,并为不同气候区土壤碳循环的统一分析提供了理论框架。

4 结论

本研究基于湖南南山牧场退化梯度(ND-HD),系统分析了土壤团聚体结构演变及其对有机碳库的影响,主要结论如下:

(1)草地退化显著改变土壤团聚体粒径组成与稳定性。随着退化程度加剧, >5 mm大团聚体含量下降约47%, <0.25 mm微团聚体含量增加约168%,同时机械稳定性和水稳性团聚体的MWD和GMD分别降低约46%,53%,分形维数D提高约6%~7%,表明土壤结构由稳定态向破碎态转变。

(2)草地退化导致土壤有机碳含量显著下降,并伴随碳在团聚体中的分布格局重组。0~10 cm土层SOC含量由ND的 $52.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至HD的 $28.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (降幅约46%);大团聚体中有机碳损失幅度高于微团聚体,而微团聚体对碳库的贡献率由约7.8%升高至28%以上,表明碳载体由“大团聚体主导”向“微团聚体主导”转变。

(3)土壤团聚体结构与有机碳之间存在显著耦合关系。MWD和GMD与SOC呈显著正相关($r \approx 0.77 \sim 0.80$),分形维数D与SOC呈显著负相关($r \approx -0.83$),说明团聚体稳定性是控制有机碳保存的重要结构性约束。

(4)结构方程模型结果表明,草地退化对SOC的影响主要通过团聚体结构间接实现。退化显著降低大团聚体含量($\beta = -0.72$)并提高分形维数($\beta = 0.68$),进而通过降低MWD($\beta = 0.81$)影响SOC($\beta = 0.63$),而“退化→SOC”的直接路径不显著,证实了“结构调控路径”的主导作用。

基于上述结果,湿润区草地退化过程可概括为“生物输入减少-团聚体结构解体-碳保护失效-碳库重组”的级联过程,其中土壤团聚体结构是连接地

上植被退化与地下碳库响应的关键控制界面。该过程同时表现为SOC总量下降与碳分布向微团聚体转移的双重效应。

参考文献

- [1] YAHDJIAN L, CAMPANA S, TOGNETTI P M, et al. Insights on global rangeland ecosystem services shaped by grazing and fertilization[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2026, 24(3): e70022
- [2] WAHEED A, QIAO X, MUHAMMAD M, et al. Plant root-mediated carbon sequestration and nutrient cycling in grassland ecosystems under land use and climate change[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025, 393: 109865
- [3] GUO H N, XIN X P, CHEN J Q, et al. Divergent responses of particulate and mineral-associated organic carbon stock to grazing in a Eurasian temperate meadow steppe [J]. *Geoderma*, 2025, 462: 117516
- [4] LI H N, MENG R B, MENG Z J, et al. Influence of grazing patterns on the stability of soil aggregates in semi-arid grasslands[J]. *Journal of Arid Land*, 2026, 18(2): 322-338
- [5] VAN DAEL T, VERWERFT Q, SMOLDERS E. The soil structural stability determined by the QuantiSlakeTest: Linkage with soil porosity, water-stable aggregate fractions and soil chemical properties[J]. *Geoderma*, 2025, 457: 117281
- [6] HU P L, ZHANG W, NOTTINGHAM A T, et al. Lithological controls on soil aggregates and minerals regulate microbial carbon use efficiency and necromass stability[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(48): 21186-21199
- [7] 秦文萍, 袁晖, 孙铭阳, 等. 围栏封育对退化高寒草甸土壤团聚体组成及稳定性的影响[J/OL]. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0554>, 2025-10-29/2026-04-09
- [8] QIN W P, YUAN H, SUN M Y, et al. Effects of Grazing Exclusion on Soil Aggregate Composition and Stability in Degraded Alpine Meadows [J/OL]. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0554>, 2025-10-29/2026-04-09
- [9] DU Z Y, CONG N, ZHAO G, et al. Divergent responses of vegetation and soil characteristics to grassland degradation in the Qinghai-Tibet and Inner Mongolia plateaus [J]. *Catena*, 2025, 257: 109146
- [10] LIN X, ZHANG S W, HUETE A, et al. Global-to-regional variations in the effects of grassland management on soil carbon[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2026, 400: 110251
- [11] 周铃, 苏正安, 杨静, 等. 祁连山农牧交错带典型草地和梯田土壤侵蚀对团聚体有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(4): 198-207
- [12] ZHOU L, SU Z A, YANG J, et al. Effects of soil erosion on aggregate-associated organic carbon in typical grassland and terraced fields of the agro-pastoral ecotone of Qilian Mountains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(4): 198-207
- [13] 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(2): 547-555
- [14] MA Q, BAI W, MOU G X, et al. Effects of warming on soil Aggregate stability and contents of carbon and nitrogen in Alpine swamp meadow [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(2): 547-555
- [15] MI J, WANG F, SHI J, et al. Contrasting trends in plant diversity and soil carbon mineralization under precipitation-driven vegetation and soil carbon dynamics in the Mongolian Plateau[J]. *Ecology and Evolution*, 2025, 15(7): e71806
- [16] 罗俊毅. 生物炭联合围封对南山牧场退化草地生态系统多功能恢复的驱动机制[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2025:11
- [17] LUO J Y. Driving mechanism of biochar combined enclosure on multifunctional restoration of degraded grassland ecosystem in Nanshan pasture[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2025:11
- [18] 张伟. 老山界所在地——南山草原[N]. *中国文物报*, 2023-02-21(1)
- [19] ZHANG W. Nanshan Grassland, where Laoshan jie is located[N]. *China Cultural Relics News*, 2023-02-21(1)
- [20] 游兰韶, 刘寿明, 肖铁光, 等. 湖南省南山牧场植物和昆虫种类调查及区系分析[J]. *湖南农业大学学报*, 1999, 25(1): 47-51
- [21] YOU L S, LIU S M, XIAO T G, et al. Investigation on plant and insect species in Nanshan pasture farm, Hunan Province and insect fauna analysis[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 1999, 25(1): 47-51
- [22] 张宇. 湖南南山不同草地类型土壤C:N:P变化及其影响因素研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2023:9
- [23] ZHANG Y. Study on the changes and influencing factors of soil C:N:P in different grassland types in Nanshan, Hunan Province[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2023:9
- [24] 李佑江. 湖南南山牧场草相呈现近10年最好景况[N]. *中国绿色时报*, 2022-11-02(2)
- [25] LI Y J. The grassland condition of Nanshan Ranch in Hunan has reached its best state in nearly a decade[N]. *China Green Times*, 2022-11-02(2)
- [26] 吴沈萍. 湖南南山不同退化草地生物多样性与生态系统多功能性的关系[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2025:9-54
- [27] WU S P. Relationship between biodiversity and ecosystem versatility of different degraded grasslands in Nanshan, Hunan Province[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2025:9-54
- [28] 国家质量监督检验检疫总局. GB 19377-2003天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标:GB 19377—2003[S]. 北京:中国标准出版社, 2004: 1-5
- [29] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 19377-2003 Classification Indicators for Degradation, Desertification, and Salinization of Natural Grasslands: GB 19377-2003 [S]. Beijing: China Standards Press, 2004: 1-5
- [30] 郝爱华, 薛娴, 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

- HAO A H, XUE X, PENG F, et al. Different vegetation and soil degradation characteristics of a typical grassland in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 964-975
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-48
- BAO S D. Soil agro-chemistry analysis [M]. 3rd. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-48
- [22] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 514-518
- INSTITUTE OF SOIL SCIENCE, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES. Soil physical and chemical analysis [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978: 514-518
- [23] 于文竹, 魏霞, 赵恒策, 等. 青藏高原高寒草原草甸土壤团聚体及养分因子变化特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 301-308, 317
- YU W Z, WEI X, ZHAO H C, et al. Changes of Soil Aggregates and Nutrient Factors in Alpine Grassland and Alpine meadow of Qinghai Tibet Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 301-308, 317
- [24] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899
- YANG P L, LUO Y P, SHI Y C. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20): 1896-1899
- [25] 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
- HAI L, YAO T, ZHANG W M, et al. Distribution characteristics of soil aggregates and its organic carbon of alfalfa grassland with different growth years in Loess Hilly-gully region[J]. *Grassland and Turf*, 2020, 40(4): 16-21
- [26] HAMZA A, KARČAUSKIENĖ D, MOCKEVIČIENĖ I, et al. Soil Aggregate Dynamics and Stability: Natural and Anthropogenic Drivers[J]. *Agriculture*, 2025, 15(23): 2500
- [27] TOU C Y, LIU X, GAN J J, et al. Plant residue quality regulates its incorporation into soil aggregates and organic carbon stabilisation[J]. *Geoderma*, 2025, 460: 117407
- [28] LU Z J, WANG H S, LIU J Z, et al. From waste to soil: The pivotal role of organic matter in soil aggregate formation under dry and wet conditions [J]. *Plant and Soil*, 2025, 514(1): 1543-1559
- [29] VINDUŠKOVÁ O, DECKMYN G, REYNAERT S, et al. More persistent precipitation regimes induce soil degradation[J]. *Geoderma*, 2025, 455: 117230
- [30] LI H R, LIU G, LIU Y, et al. Variability of soil aggregate disintegration during splash erosion under different circumstances[J]. *Land Degradation & Development*, 2025, 36(2): 454-465
- [31] AL-JEZNAWI D, AL-JANABI M A Q, ALMEIDA BERNARDO L F, et al. Modeling and mechanisms of desiccation-induced cracking and curling in clay soils: a state-of-the-art review[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2025, 43(7): 342
- [32] TONG K W, PEREIRA J M, HUANG K, et al. Experimental study on the microscopic swelling - shrinking mechanisms of clay-sand mixtures from wetting to drying [J]. *Acta Geotechnica*, 2025, 20(7): 3477-3500
- [33] CHEN Y, LV X F, CAO L T, et al. Rainfall-and leakage-induced soil erosion and debonding - migration effects[J]. *Journal of Mountain Science*, 2025, 22(9): 3200-3213
- [34] PAN Z D, CAI X M, BO Y M, et al. Response of soil organic carbon and soil aggregate stability to changes in land use patterns on the Loess Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 31775
- [35] LIU X, MA Z W, QIN W P, et al. Enhanced unprotected organic carbon in macroaggregates facilitates soil organic carbon accumulation following grazing removal in Tibetan Alpine meadows[J]. *Plant and Soil*, 2025: 1-19
- [36] CHEN Y L, KUZYAKOV Y, MA Q W, et al. Aggregate size mediates the stability and temperature sensitivity of soil organic carbon in response to decadal biochar and straw amendments[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 211: 109969
- [37] CHEN W J, CHEN K L, WU F Z. Macroaggregate disintegration mediates forest gap impacts on MAOC decrease in karst ecosystems[J]. *Geoderma*, 2026, 465: 117661
- [38] SUN H, KUMAR A, VAN ZWIETEN L, et al. Soil aggregates mediate the thermal response of soil carbon mineralization and microbial enzyme activity[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2025, 19(4): 106
- [39] BAI L L, DUAN J X, SHI P, et al. Erosion-deposition processes drive soil organic carbon mineralization through aggregate breakdown and buildup[J]. *Catena*, 2025, 260: 109432
- [40] ALI ABDELRHMAN A, SAYED Y A, FADL M E, et al. Impact of aggregate-associated carbon on soil mechanical properties: stability and compaction indices in pomegranate orchards of different ages[J]. *Soil Systems*, 2025, 9(1): 20
- [41] HAN Z X, WU X P, GAO H Z, et al. Long-term conservation tillage increases soil organic carbon stability by modulating microbial nutrient limitations and aggregate protection [J]. *Agronomy*, 2025, 15(7): 1571
- [42] WANG G Y, LI J Y, MAO J F, et al. Multiscale drivers and tipping points regulating particulate and mineral-associated organic carbon across Central Asian grasslands[J]. *Geoderma*, 2025, 464: 117610
- [43] HU M G, YAO Z Y, SHI L N, et al. Patchy degradation-induced changes in soil aggregates and organic carbon in an alpine swamp meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(16): 4713-4725

(责任编辑 刘婷婷)