DOI: 10.11766/trxb202502220080 CSTR: 32215.14.trxb202502220080
何冰，李江文，周琳，孙健，许晨阳，杜伟，胡斐南. 流变学方法研究生物质炭添加对土壤结构力学稳定性的影响[J]. 土壤学报，2025，
HE Bing, LI Jiangwen, ZHOU Lin, SUN Jian, XU Chenyang, DU Wei, HU Feinan. A Rheological Approach to Study the Effects of Biochar Addition on the Mechanical Stability of Soil Structures[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,

流变学方法研究生物质炭添加对土壤结构力学稳定性的影响*

何 冰[1]，李江文[1,3]，周 琳[3]，孙 健[2]，许晨阳[2]，杜 伟[2]，胡斐南[1,3†]

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院，陕西杨凌 712100; 2.西北农林科技大学资源环境学院，陕西杨凌 712100; 3.中国科学院水利部水土保持研究所，陕西杨凌 712100)

摘 要：生物质炭作为一种土壤改良剂，在改善土壤理化性质、增强土壤结构稳定性等方面扮演着重要角色。然而，较少研究从流变学方法的角度探讨生物质炭添加对土壤结构力学稳定性的影响。本研究基于两年田间试验，以不同生物质炭添加量（0%、1%、3%、5%、10%）的土壤为研究对象，测定各处理土壤的基础理化性质，并采用振幅扫描模式测定土壤在不同含水率（30%、37.5%、45%、60%）条件下的抗剪强度及黏弹性参数，分析不同含量生物质炭添加下土壤抗剪强度及黏弹性参数的变化规律。结果表明，生物质炭添加通过改善土壤基础理化性质（如提高土壤阳离子交换量和有机碳含量等），提高了土壤储能模量和剪切应力，特别是在低含水率（30%～37.5%）条件下。生物质炭扩大了土壤的线性黏弹区范围和屈服点应力，提高了土壤的结构稳定性；当生物质炭添加量达到 10%时，即使在高含水率条件下仍能表现出稳定性较强的特征。生物质炭添加通过提高土壤的抗剪强度和黏弹性进而改善了土壤结构力学稳定性，从而可为黄土区土壤结构改良措施的制定提供理论依据。

关键词：生物质炭； 土壤结构稳定性； 抗剪强度； 黏弹性参数； 振幅扫描测试
中图分类号：S157 **文献标志码**:A

A Rheological Approach to Study the Effects of Biochar Addition on the Mechanical Stability of Soil Structures

HE Bing[1]，LI jiangwen[1,3]，ZHOU Lin[3]，SUN Jian[2], XU Chenyang[2]，DU Wei[2]，HU Feinan[1,3†]

(1. *College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*; 2. *College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*; 3. *Institute of Soil and Water Conservation*, *CAS & MWR*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract：**[Objective]** Biochar plays an important role in improving soil physicochemical properties and enhancing soil structural stability. It achieves this by increasing soil organic matter content, enhancing nutrient

---

*国家自然科学基金项目（42277311）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42277311)
† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：hufn@nwafu.edu.cn
作者简介：何 冰（2002-），陕西西安人，硕士研究生，主要研究方向为土壤结构改良。E-mail:hebing1230@nwafu.edu.cn
收稿日期：2025-02-20；收到修改稿日期：2025-08-06；网络首发日期（www.cnki.net）：

retention and availability, and improving soil structure changes that further promote soil aeration, water infiltration, and root penetration, thereby strengthening soil structural stability. Soil structural stability is critical for sustainable agricultural production, as it influences soil erosion resistance, water-holding capacity, and overall soil health. However, few studies have explored the effects of biochar addition on the mechanical stability of soil structure from the perspective of rheological methods. [Methods] To address this research gap, a two - year field experiment was conducted. Soil samples with different biochar addition rates (0%, 1%, 3%, 5%, and 10%) were tested for basic physicochemical properties. Additionally, amplitude sweep tests were used to measure soil shear strength and viscoelastic parameters under varying water contents (30%, 37.5%, 45%, and 60%), aiming to analyze how biochar addition levels affect the shear strength and viscoelastic properties of the soils. The amplitude sweep mode is a robust rheological technique that allows for the assessment of soil behavior under different deformation conditions, providing valuable insights into soil mechanical stability. [Results] The results showed that biochar addition significantly improved soil structural mechanical stability by enhancing soil basic physicochemical properties, such as increasing soil cation exchange capacity and organic carbon content, which in turn increased soil energy storage modulus and shear strength This effect was particularly pronounced at lower water contents ranging from 30% to 37.5%. At these water contents, the soil structure was more stable and better able to resist external forces. Furthermore, biochar addition also resulted in an increased range of the linear viscoelastic zone and higher soil yield stress, thereby improving its structural stability. Notably, at a 10% addition rate, the soil maintained strong stability even under high water content conditions. [Conclusion] Biochar addition enhances the mechanical stability of soil structure by improving soil shear strength and viscoelasticity. These findings clarify the mechanical mechanism underlying soil structure improvement via biochar application, and thus provide a scientific basis for formulating targeted soil structure optimization measures in the Loess Plateau region.
Key words: Biochar; Soil structural stability; Shear strength; Viscoelastic parameters; Amplitude sweep test

塿土作为黄土高原地区重要的农业土壤，在区域粮食生产和生态安全中扮演着重要角色。然而，受自然因素（如风蚀、水蚀）和人类活动（如过度耕作、施肥不当）的双重影响，该区域土壤结构退化问题日益凸显，表现出土壤有机碳含量低、养分贫瘠、孔隙结构差等特征，进而造成土壤结构力学稳定性降低[1-3]。土壤结构力学稳定性作为评价土壤健康的核心指标之一，严重影响着土壤的耕作性能、水分保持、养分循环以及作物生长[4]。稳定的土壤结构能够抵抗外力作用，维持良好的孔隙结构和通气透水性，为作物根系生长和微生物活动提供适宜的环境[5]。因此，探究提升土壤结构力学稳定性的有效途径，对于改善土壤质量和提高农业生产具有重要意义。

生物质炭作为一种新型土壤改良剂，因其独特的物理化学性质和环境友好特性，在提升土壤结构力学稳定性方面展现出显著潜力。魏永霞等[6]研究表明，生物质炭具有比表面积大和表面电荷丰富的特征，连续施加适量的生物质炭（50 $t \cdot hm^{-2}$）可增强土壤颗粒间的黏结力，提升土壤的抗剪强度。吴媛媛等[7]研究表明，生物质炭的施入通过改变土壤颗粒组成和土壤黏结性，进而降低土壤的可蚀性。此外，生物质炭通过吸附有机分子和微生物代谢产物，可为土壤颗粒提供“胶结物质”，并通过促进微生物活性和有机碳积累，进一步改善土壤结构的力学稳定性[8]。因此，生物质炭在提升土壤结构力学稳定性方面具有广阔的应用前景。

目前，在土壤结构力学稳定性的研究中，主要利用固结仪、三轴仪和直剪仪等仪器定量表征土壤压缩-回弹特性和抗剪强度，但这些方法具有一定的局限性，例如，三轴仪主要测定土体在特定条件下的短期强度和瞬时变形，难以全面反映土壤在外力作用下的动态变化过程[9]。然而，近年来，流变学逐渐应用于土壤学领域，其可通过测定储能模量、损耗模量和剪切应变等参数，动态地反映土壤的抗剪强度和黏弹性，从而评估土壤在外力作用下的变形和恢复能力[10]。因此，采用流变学方法研究土壤结构力学稳定性，不仅可以弥补传统方法的

不足，还可为深入理解土壤力学行为提供新的视角和数据支撑。

因此，本研究假设生物质炭添加通过改善土壤理化性质，进而提高土壤结构力学稳定性。基于此，本研究以黄土高原地区典型农业土壤（塿土）为研究对象，通过田间定位试验与流变学试验相结合的方式，以不同生物质炭添加量（0%、1%、3%、5%、10%）的土壤为研究对象，测定各处理土壤的基本理化性质，并采用振幅扫描模式测定土壤在不同含水率（30%、37.5%、45%、60%）条件下的抗剪强度及黏弹性参数。研究结果将揭示生物质炭提升土壤结构力学稳定性的内在机制，从而为区域土壤结构改良与保护提供理论支撑，为生物质炭在农业中的推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

小麦秸秆生物质炭购自郑州金邦环保科技有限公司，该材料是在限氧条件下经过高温（500 ℃）热裂解所得。小麦秸秆生物质炭的理化性质如表 1 所示。

表 1 小麦秸秆生物质炭的理化性质

Table 1 The physicochemical properties of wheat straw biochar

生物质炭 Biochar	pH	C/%	H/%	O/%	N/%	H/C	O/C	(O+N)/C	比表面积 Specific surface area/($m^2 \cdot g^{-1}$)	灰分 Ash content
小麦秸秆 Wheat straw	6.08	76.10	2.18	24.21	0.67	0.03	0.32	0.33	15.17	3.52

1.2 试验设计

研究区位于陕西省杨陵区西北农林科技大学试验田（34° 27′ N，108° 08′ E），年均日照 2196 h，年均气温 11～13 ℃，年降雨量 500～700 mm。土壤类型为塿土，依据联合国粮农组织（FAO）土壤分类体系，该土壤属于钙质始成土。

田间试验布设于 2020 年 12 月，按照生物质炭与土壤质量比为 0%、1%、3%、5%、10%的比例将生物质炭与表层土壤（0～20 cm）充分混匀，分别标记为 CK、B1、B3、B5、B10，试验小区采用完全随机区组设计，每种处理重复 3 次，共 15 个样地，每个样地的面积为 2.25 m^2（1.5 m×1.5 m）。

1.3 土壤样品的采集与测定

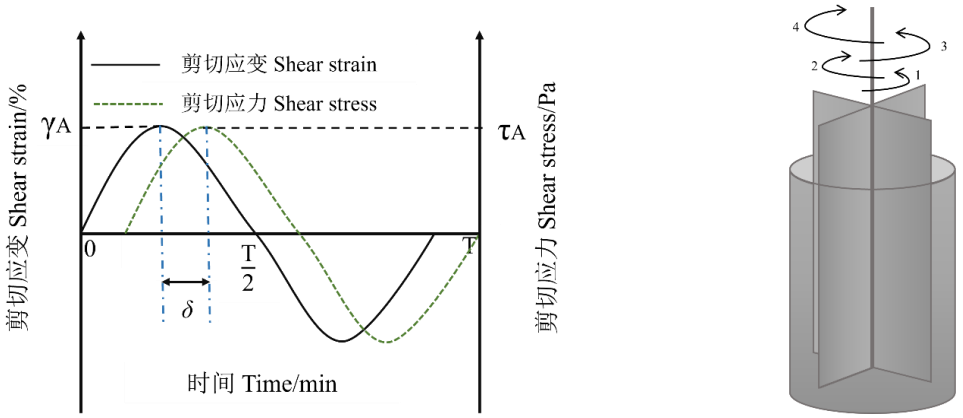
两年后采集土壤样品。在每个小区按照五点法采集表层样品（0～20 cm），并将相同处理的土壤样品均匀混合，共计 5 个土壤样品（CK、B1、B3、B5、B10）。土壤样品风干后，去除杂质（植物根、石头和碎屑），研磨过 2 mm 筛后装袋备用。

土壤样品基本理化性质采用常规土壤分析方法测定[11]。土壤 pH 采用电极法测定，土水比为 1: 2.5；有机碳采用 $K_2Cr_2O_7$ 加热法测定；碳酸钙采用气量法测定；表面电荷数量和比表面积采用联合测定法测定[12]。每组试验重复 3 次。

1.4 振幅扫描原理

振幅扫描测试通过施加正弦波规律的应变，测量样品的应力响应，以评估材料的黏弹性（图 1）。在测试过程中，样品反馈的正弦波应力曲线与输入应变曲线之间存在相位角（δ）。

理想流体的 δ 为 90°，理想固体的 δ 为 0°，而具有黏弹性的样品的 δ 为 0°～90° [13]。



注：γ_A：剪切应变的振幅；τ_A：剪切应力的振幅。Note: γ_A: the amplitude of shear strain; τ_A: the amplitude of shear stress.

图 1 剪切应变和剪切应力随时间的变化示意图[13]

Fig. 1 Schematic diagram of changes in shear strain and shear stress over time

振幅扫描中，储能模量（G', Pa）（式（1））表示样品的弹性分量，即可暂时储存的能量，撤除外部应力后可以完全恢复变形。损耗模量（G", Pa）（式（2））表示样品的黏性分量，即由摩擦、热量等形式损耗的能量，这部分能量不可恢复。

$$G' = \frac{\tau}{\gamma} \times \cos\delta \tag{1}$$

$$G'' = \frac{\tau}{\gamma} \times \sin\delta \tag{2}$$

通过绘制 G'、G"随剪切应变变化的曲线（图 2），可以确定材料的线性黏弹区（Linear Viscoelastic Range, LVR）（G'偏差小于 5%）。在 LVR 范围内，样品内部结构变形完全可逆。线性黏弹区的剪切应变（γ_{LVR}，%）和剪切应力（τ_{LVR}，Pa）分别表示样品在小应变下的弹性和强度特性。而当应变超过 LVR 范围后，样品的内部结构会发生不可逆破坏，表现为 G'和 G"减小。损耗因子（tan δ）是 G"和 G'的比值，用于衡量样品变形中能量损失的比例，表征弹性与黏性行为的平衡关系：当 G'＞G"（tan δ＜1）时，样品以弹性行为为主；当 G'=G"（tan δ=1）时，弹性和黏性分量相等，此时样品结构完全被破坏并开始流动，这一关键点称为屈服点（Yield Point, YP）；当 G'＜G"（tan δ＞1）时，样品以黏性行为为主。屈服点的剪切应变（γ_{YP}，%）表征样品在结构完全破坏时的形变程度；屈服点剪切应力（τ_{YP}，Pa）和储能模量（G'_{YP}，Pa）表征样品在完全破坏时的强度。在屈服点之后，样品结构的不可逆破坏导致内部摩擦和能量耗散占主导地位，样品逐渐表现出明显的流动特性[14]。

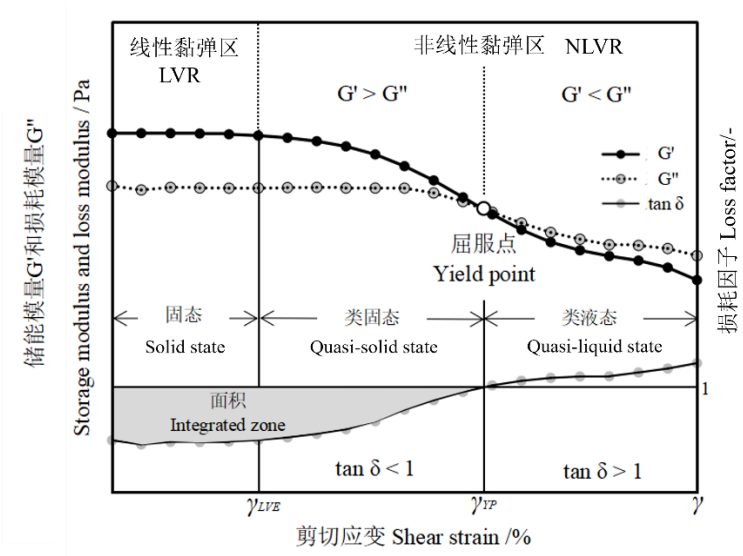


图 2 振幅扫描试验结果示意图[14]

Fig. 2 Schematic diagram of amplitude sweep test results

1.5 振幅扫描测试

流变试验采用奥地利安东帕公司生产的 MCR 302 流变仪（图 3a）。MCR 系列流变仪具有多种测量模式，可控制应变或应力，进行旋转测试、振幅扫描模式等一系列流变试验。测试过程中用十字板转子（型号为 ST22-4V-40，图 3b）进行剪切，转子沿转轴方向的长度为 40 mm，直径为 22 mm，盛放土壤浆体的外筒（图 3c）直径为 28.92 mm。试验时，通过循环水浴系统将温度控制在恒温 25℃。

在使用十字板转子时，测试的土壤粒度范围有限[15]，因此在样品制备过程中，将不同生物质炭施用量的土壤过 0.5 mm 筛。根据塿土的液限（30%）[16]，本试验分别设置塿土液限的 1 倍、1.25 倍、1.5 倍、2 倍进行水土混合配比，加入蒸馏水制备成含水率为 30%、37.5%、45%、60%的浆体。

本研究采用振幅扫描模式进行流变试验，振幅扫描测试中剪切应变 γ 范围为 0.0001%～100%，频率固定为 0.5 Hz，测试温度为 25℃，测量数据点为 30 个。每个样品至少重复 3 次。测定不同生物质炭含量下，不同含水率土壤样品的抗剪强度参数（线性黏弹区终点应力、屈服点应力、线性黏弹区终点储能模量、屈服点储能模量）和黏弹性参数（线性黏弹区终点应变、屈服点应变、损耗因子）。土壤的结构力学稳定性可通过其抗剪强度特性和黏弹性特性进行表征。抗剪强度特性反映了土体抵抗外力的能力，直接决定了其在外力作用下的抗破坏性能；而黏弹性特性与土壤行为的弹性和黏性部分相关[17]。

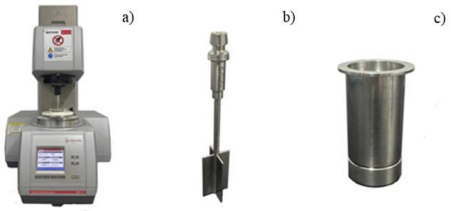


图 3 试验设备：a）流变仪；b）十字板转子；c）外筒

Fig. 3 Test equipment: a) Rheometer; b) Vane rotor; c) Cup

1.6 统计分析

利用 SPSS 26 软件进行统计分析，采用单因素方差分析（ANOVA）方法分析不同生物质炭添加处理之间土壤基本理化性质的差异。

2 结 果

2.1 添加不同生物质炭下土壤理化性质的变化

表 2 为不同生物质炭添加处理下土壤的基本理化性质。生物质炭添加显著降低了土壤的 pH 和 $CaCO_3$ 含量（$P<0.05$）。随着生物质炭施入量的增加，土壤 pH 和 $CaCO_3$ 含量呈降低趋势，与 B1 处理相比，生物质炭添加比例为 10%时，pH 降低了 0.25 个单位，$CaCO_3$ 含量降低了 20.10%。同时，生物质炭添加显著提高了土壤有机碳含量、比表面积和表面电荷数量。随着生物质炭施入量的增加，土壤有机碳含量较 CK 增加了 190.2%～1081%，比表面积增加了 26.06%～91.06%，表面电荷增加了 23.32%～42.68%。

表 2 不同小麦秸秆生物质炭添加量下土壤的基本理化性质

Table 2 Changes of basic physical and chemical properties of soil under different application amounts of wheat straw biochar

处理 Treatment	pH	$CaCO_3$ / ($g \cdot kg^{-1}$)	有机碳① / ($g \cdot kg^{-1}$)	比表面积② / ($m^2 \cdot g^{-1}$)	表面电荷数量③ / ($cmol \cdot kg^{-1}$)
CK	8.08±0.04c	68.70±1.99a	7.26±0.26d	32.23±2.42c	13.12±0.36e
B1	8.29±0.05a	62.38±0.76b	21.07±1.74c	40.63±7.67b	16.18±0.72d
B3	8.18±0.02b	52.53±3.61cd	31.27±2.19b	45.69±3.56b	17.50±0.14c
B5	8.16±0.02b	53.20±0.51cd	32.46±2.39b	49.94±0.57b	18.35±0.08b
B10	8.04±0.01cd	49.84±3.15d	85.74±2.83a	61.58±7.24a	18.72±0.03a

①Organic carbon，②Specific surface area，③Surface charges number.

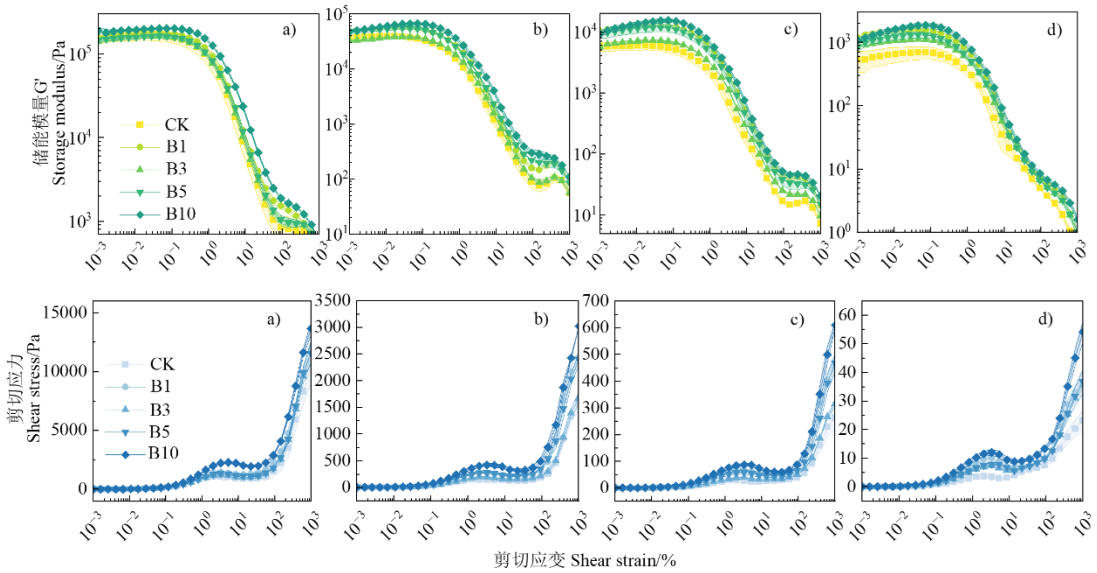
注：CK：不添加生物质炭；B1: 1%的生物质炭添加；B3: 3%的生物质炭添加；B5: 5%的生物质炭添加；B10: 10%的生物质炭添加；表中数值为平均值±标准偏差（n=3），同列不同字母表示不同生物质炭添加量下理化性质差异显著($P<0.05$)。下同。Note: CK: No biochar added; B1: Biochar application rate of 1%; B3: Biochar application rate of 3%; B5: Biochar application rate of 5%; B10: Biochar application rate of 10%; The data in the table are presented as mean ± standard deviation (n=3), different lowercase letters in the same column indicate significant differences at the 0.05 level between treatments. The same below.

2.2 添加不同生物质炭下土壤抗剪切强度的变化

储能模量、剪切应力与剪切应变的关系如图 4 所示。在扰动初期，土壤样品存在储能模量平台区，即线性黏弹区，当含水率为 30%时，模量平台区较为明显。在此阶段，土壤样品表现为固体弹性特征。随着含水率的增加，土壤储能模量平台区逐渐缩短。随着剪切应变的增加，不同含水率样品的储能模量经历平台区后逐渐减小，表现出应变变稀的特点。此外，含水率影响着土壤样品储能模量的大小，由图 4 可知，随着含水率的增加，土壤的储能模量减小，例如，当含水率为 30%时，土壤初始储能模量可超过 105 Pa，当含水率增加至 60%时，土壤初始储能模量仅为 103 Pa 左右。随着生物质炭施入量的增加，土壤的储能模量增加。B10 处理下的储能模量明显高于 CK 处理。

土壤样品在不同含水率下剪切应力随剪切应变的变化如图 4 所示。随着剪切应变的增加，剪切应力出现局部最大值，称为剪切应力最大值。最大剪切应力表示土壤样品所能承载的最大抗剪强度。当剪切应变在 0～10%范围内，土壤样品出现剪切应力最大值，此阶段是

土壤储能模量在外部扰动下急剧下降的阶段，表明此时土壤样品内部结构开始发生破坏。随着含水率的增加，各处理下土壤样品的剪切应力明显减小。具体而言，当含水率从 30%增加至 60%时，土壤样品的最大剪切应力约为 2000 Pa、500 Pa、100 Pa、10 Pa。在相同含水率下，随着生物质炭施用量的增加，土壤的剪切应力明显增加。



注：阴影区域表示每个数据点周围的误差带，表示与测量值相关的不确定度范围。Note: The shaded areas indicate the error bands around each data point, representing the range of uncertainty associated with the measured values.

图 4 不同含水率下不同生物质炭添加量的土壤的储能模量与剪切应力（a、b、c、d 分别为含水率为 30%、37.5%、45%、60%的土壤）

Fig. 4 Storage modulus and shear stress of soil with different biochar application amounts under different water content ((a, b, c, and d represent moisture contents of 30%, 37.5%, 45%, and 60%, respectively)

不同生物质炭添加下土壤抗剪强度参数随含水率的变化如图 5 所示。从图 5a 可以看出，随着含水率的增加，线性黏弹区应力呈减小趋势，以含水率 37.5%为转折点，当含水率大于 37.5%时，土壤抗剪强度几乎为零。当含水率小于 37.5%时，不同生物质炭添加量下的土壤抗剪强度依次为：B5 > CK > B10 > B1 > B3，即添加 5%的生物质炭时，土壤可达到最大的抗剪强度。

图 5b 中可看出，随着含水率的增加，线性黏弹区终点的储能模量呈现降低趋势。当含水率为 30%时，不同生物质炭添加量下的土壤线性黏弹区储能模量依次为：B10 > B1 > CK > B5 > B3。然而，随着含水率的进一步增加，特别是超过 37.5%时，施用生物质炭处理的线性黏弹区储能模量显著高于 CK，且随着生物质炭施用量的增加，储能模量呈现出增加的趋势。当含水率为 60%时，各处理组线性黏弹区的储能模量差异减小。

图 5c 表明不同处理下土壤屈服点的剪切应力变化趋势。屈服点应力反映了土壤样品完全破坏时的抗剪强度，随着含水率的增加，屈服点应力先骤然减小后趋于稳定，含水率 37.5%是较为明显的屈服点应力变化转折点。当含水率<37.5%时，B10 处理下的屈服点应力最大，其次分别为 B1、B5、B3、CK 处理。

图 5d 所示，随着含水率的增加，屈服点的储能模量呈减小趋势，以 37.5%为临界点，当含水率大于 37.5%时，土壤抵抗破坏储存弹性能量的能力接近 0 Pa，即土壤发生破坏。当含水率小于 37.5%时，不同生物质炭添加量下的土壤抵抗破坏储能模量的能力依次为：B10 和 B1> CK > B5 和 B3。

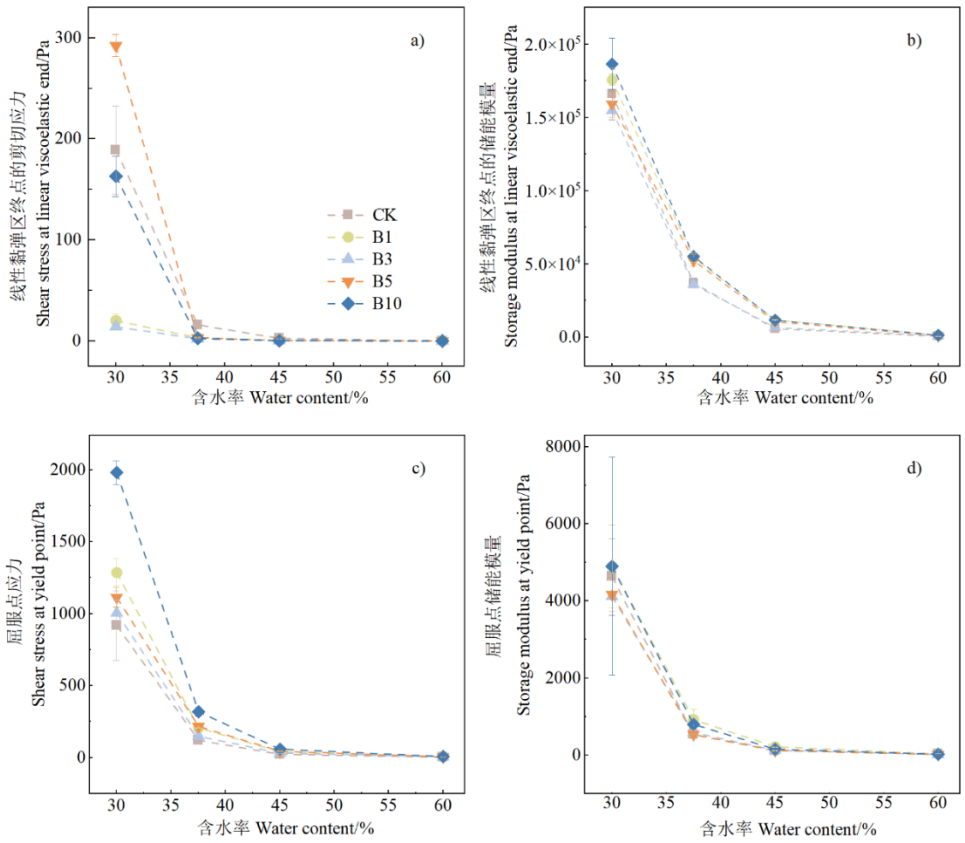


图 5 不同含水率下不同生物质炭添加量的土壤抗剪强度参数

Fig. 5 Soil shear strength parameters of different biochar application amounts under different water content

2.3 添加不同生物质炭下土壤黏弹性的变化

不同生物质炭添加下土壤黏弹性随含水率的变化如图 6 所示。线性黏弹区应变反映了土壤在可逆变形过程中产生的相对变形。与 CK 相比，B10、B5 可增加土壤样品线性黏弹区的应变，B1、B3 土壤样品线性黏弹区的应变较低，随着含水率的增加，线性黏弹区应变呈减小趋势；生物质炭添加后土壤线性黏弹区的剪切应变在含水率为 37.5%时趋近于零，未表现出弹性，且不同生物质炭添加量下土壤线性黏弹区应变大小关系表现为：B10＞B5＞CK＞B1~B3。

屈服点应变反映土壤从固相变为液相时的相对变形。从整体看，B10 的屈服点应变普遍高于其他处理，其次是 B5，而 B1 和 B3 的应变较低。B10 屈服点应变在含水率较低时较高，随着含水率的增加，屈服点应变逐渐减小。相反，B5 屈服点应变随着含水率的增加，屈服点应变逐渐增加，在含水率为 60%时，B5 ＞ B10。而 B1 和 B3 的屈服点应变在整个含水率范围内相对较低，且变化不大。

图 7 展示了土壤样品在不同小麦秸秆生物质炭添加量和不同含水率条件下，损耗因子随剪切应变变化趋势。由图可知，随着剪切应变的增加，损耗因子呈现出逐渐增加的趋势。生物质炭的添加对土壤的损耗因子有着较大的影响。在剪切应变较小的范围内，与 CK 相比，生物质炭的添加量越大，损耗因子的值也越大。然而，在剪切应变为 0～10%的区间内，出现了一种相反的趋势，即生物质炭添加量越大，损耗因子的值越小。

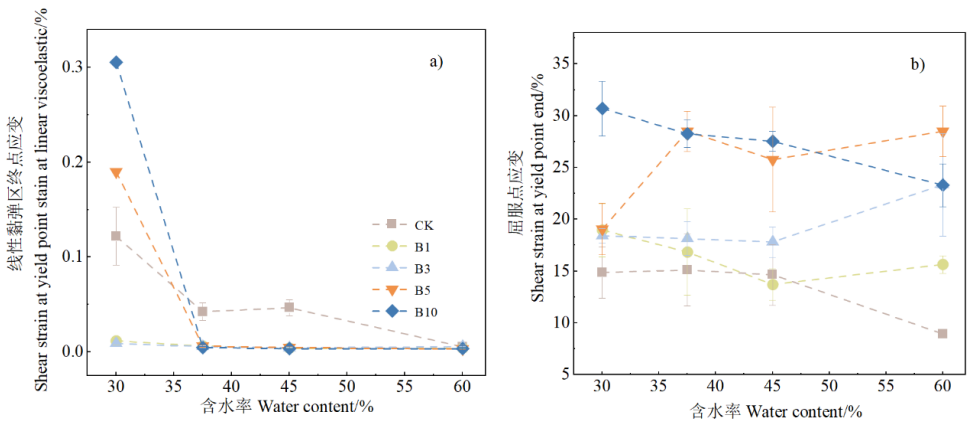


图 6 不同含水率下不同生物质炭添加量的土壤黏弹性参数

Fig. 6 Soil viscoelastic parameters of different biochar application amounts under different water content

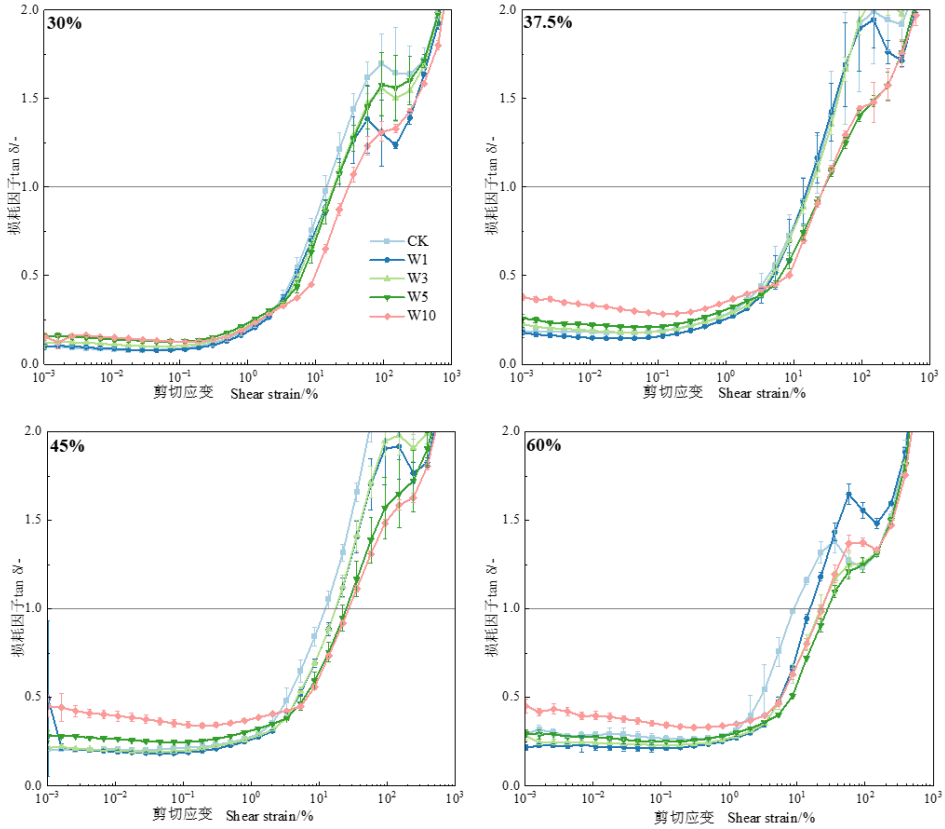


图 7 不同含水率下不同生物质炭添加量的损耗因子

Fig. 7 Loss factor under different water content levels with various biochar application rates

3 讨 论

3.1 生物质炭添加对土壤抗剪强度的影响

抗剪强度作为衡量土壤结构稳定性的重要指标，直接影响土壤的耕作性能和抗机械扰动

能力。本研究表明，随生物质炭含量的增加，土壤在线性黏弹区终点处和屈服点的储能模量和剪切应力均呈增加趋势，特别是在 10%添加量的条件下达到最大值（图 4），表明生物质炭能够有效增强土壤的抗剪强度，这与 Awe 等[18]研究一致。这与生物质炭自身的理化特性有关[19-21]。一方面，生物质炭可以填充土壤颗粒间的孔隙，增强颗粒的机械嵌合作用，从而提高土壤颗粒间摩擦力和结构稳定性[11]。同时，生物质炭的高比表面积和多孔结构有助于增加土壤颗粒间的摩擦和交错效应[22-24]。在应力作用下，这种摩擦效应减少了颗粒间的位移，提高了土壤的抗剪强度[20]。另一方面，生物质炭的多孔结构及高比表面积特性可为土壤提供更多的结合位点，增强了土壤在线性黏弹区的响应能力，使土壤在弹性变形范围内表现出更强的抗破坏能力[25]。

土壤有机碳也是影响土壤抗剪强度的关键因素。本研究表明，土壤有机碳含量随生物质炭施用量的增加而增加，相应地土壤抗剪强度呈现出增加的趋势（表 2）。这主要是有机碳在土壤中具有胶结作用，有助于稳定土壤团聚体的形成，从而增强土壤的抗剪强度[25]。这与 Markgraf 等[24]的研究结果基本一致，他们发现有机碳含量较高的土壤在破碎前具有较高的剪切应力。此外，有机碳含量的增加亦可增加土壤表面电荷的数量。通常，土壤颗粒表面带有负电荷，带负电荷的土壤颗粒在阳离子作用下发生颗粒间的凝聚，进而促进土壤团聚体的形成，最终提高土壤的结构力学稳定性[26]。因此，施用生物质炭可有效提高土壤的抗剪强度。

3.2 生物质炭添加对土壤黏弹性的影响

线性黏弹区终点和屈服点的应变共同反映了土壤在不同应力水平下的变形特性和结构稳定性。在线性黏弹区终点，土壤表现出较强的弹性响应，结构仍能维持完整性，而屈服点则标志着土壤结构完全被破坏。本研究发现，当生物质炭添加量超过 5%时，随着生物质炭添加量的增加，土壤在线性黏弹区终点处的剪切应变和屈服点剪切应变均呈增加趋势（图 7），这与 Alves 等[27]研究一致，表明生物质炭提高了土壤的抗变形能力。当生物质炭添加量超过 5%时，土壤的表面电荷数量显著增加（表 2），这增加了土壤颗粒间的相互作用，导致土壤在弹性变形阶段能够承受更大的应变[28]。此外，本研究发现生物质炭添加促进土壤有机碳积累（表 2），有机碳中的链状分子能够有效与土壤颗粒相互结合，增强土壤凝聚力，有效抵抗外界应力，从而提高弹性[29]。然而，随着含水率的增加，土壤的黏弹性呈现下降趋势，这与 zhou 等[10]的研究一致，主要原因是水分增加导致土壤颗粒间的间隙增大，减小了颗粒间的黏附力，使土壤更加分散[30]。因此，高生物质炭添加量不仅提升了土壤的线性黏弹区应变，还能延缓土壤结构破坏的进程，从而显著增强土壤在各种应力条件下的抗变形能力。

损耗因子反映了土壤在不同剪切应变下的能量耗散特性。在小剪切应变区，各处理的损耗因子变化较小，此时处于线性黏弹区，土壤以弹性行为为主；而在高剪切应变区，损耗因子迅速增加，此时储能模量和损耗模量减小，这反映了颗粒间滑移和能量耗散的增强[31]。生物质炭的加入显著降低了高应变区的损耗因子值，这表明其通过增强颗粒间的连接性和力学耦合，提高了土壤的黏弹性，从而减少了能量损失。值得注意的是，水分的调控作用在损耗因子中表现更加明显，较高含水率下的润滑效应导致颗粒滑移更易发生。

4 结 论

（1）生物质炭添加显著降低了土壤的 pH 和碳酸钙含量，提高了土壤有机碳含量、比表面积和表面电荷数量。与 CK 相比，随着生物质炭添加量的增加，土壤有机碳含量增加了 190.2%～1081%，比表面积增加了 26.06～91.06%，表面电荷增加了 23.32～42.68%。（2）随

着生物质炭添加量的增加，土壤的储能模量和剪切应力呈增加趋势。当生物质炭添加量为 10%时，可达到最大的线性黏弹区储能模量、屈服点的储能模量和剪切应力；当添加 5%的生物质炭时，土壤可达到最大的线性黏弹区剪切应力。随着含水率增加，土壤的储能模量和剪切应力呈减小趋势，以 37.5%含水率为转折点，当含水率高于 37.5%时，土壤抗剪强度几乎为零。（3）与 CK 相比，5%和 10%生物质炭添加量可增加土壤线性黏弹区和屈服点处的剪切应变。随着含水率增加，线性黏弹区和屈服点剪切应变呈减小趋势，在含水率为 37.5%时趋近于零。

参考文献（References）

[1]Zhou Y C, Shao M A, Wei X R, et al. Response of soil qrganic carbon pool to vegetation restoration and its influencing factors in Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 395-405. [周也琛，邵明安，魏孝荣，等. 黄土高原土壤有机碳库对植被恢复的响应及其影响因素研究进展[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6) : 395-405.]

[2]Yang Y, Liu L X, Tong Y P, et al. Advances and driving factors in soil organic carbon storage during vegetation restoration in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Earth Environment, 2023, 14(6): 649-662. [杨阳，刘良旭，童永平，等. 黄土高原植被恢复过程中土壤碳储量及影响因素研究进展[J]. 地球环境学报, 2023, 14(6) : 649-662.]

[3]Xu C, Su C C, Chen Y P, et al. Structure and functional heterogeneity of soil microbial communities in different farmland types on the Loess Plateau[J]. Journal of Earth Environment, 2023, 15(4): 653-664. [徐晨，苏翠翠，陈怡平，等. 黄土高原不同耕地类型土壤微生物群落结构与功能异质性[J]. 地球环境学报, 2024, 15(4) : 653-664.]

[4] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22.

[5] Ball B C, Bingham I, Rees R M, et al. The role of crop rotations in determining soil structure and crop growth conditions[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2005, 85(5): 557-577.

[6] Wei Y X, Zhu T Y, Liu H. Effects of successive application of biochar on soil improvement and maize yield of black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 291-301. [魏永霞, 朱烟豫, 刘慧. 连年施加生物炭对黑土区土壤改良与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 291-301.]

[7] Wu Y Y, Yang M Y, Zhang F B, et al. Effect of biochar application on erodibility of plow layer soil on loess slopes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 81-92. [吴媛媛, 杨明义, 张风宝, 等. 添加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 81-92.]

[8] Tan C L, Liu Y, Huang X G, et al. Effect of biochar on soil microbial metabolic activities[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(3): 333-342. [谭春玲, 刘洋, 黄雪刚, 等. 生物炭对土壤微生物代谢活动的影响[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(3): 333-342.]

[9] Gao X Y, Zhang Q M, Wu B, et al. Experimental study on dynamic performances of soil under high strain rates[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(6): 551-555. [高兴勇, 张庆明, 吴碧, 等. 土壤动态冲击压缩性能实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(6): 551-555.]

[10] Zhou L, Li J W, Xu C Y, et al. Effects of Pisha sandstone additions on microstructural stability of sandy soil in Mu Us Sandy Land, China[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 248: 106437.

[11] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]

[12] Li H, Hou J, Liu X M, et al. Combined determination of specific surface area and surface charge properties of charged particles from a single experiment[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(6): 2128-2135.

[13] Wang J X, Hu F N, Xu C Y, et al. Effects of soil bulk density and water content on the mechanical stability of

soil structure using rheological method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(19): 147-155. [王金晓，胡斐南，许晨阳，等. 基于流变学法研究容重和含水率对土壤结构力学稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 147-155.]

[14]Zhou L, Hu F N, Xu C Y, et al. Study of the rheological behavior of pisha sandstone slurry based on dynamic oscillatory shear[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 45-53. [周琳，胡斐南，许晨阳，等. 基于动态振荡剪切的砒砂岩浆体流变行为研究[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3) : 45-53.]

[15] Nguyen V B Q, Kang H S, Kim Y T. Effect of clay fraction and water content on rheological properties of sand–clay mixtures[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(16): 576.

[16] Hong B. Research on water, air and heat conduction characteristics and its heat-moisture transfer of loess[D]. Xi'an: Changan University, 2020. [洪勃. 黄土水气热传导特性及其热湿运移规律试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.]

[17] Holthusen D, Pértile P, Reichert J M, et al. Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 282-293.

[18] Awe G O, Reichert J M, Holthusen D, et al. Characterization of microstructural stability of biochar-amended Planosol under conventional tillage for irrigated lowland rice ecosystem[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: 105051.

[19] Qi W L, Yang Y, Xu Y, et al. Synergistic effects of unmodified tea leaves and tea biochar application on remediation of Cr-contaminated soil[J]. Toxics, 2024, 12(12): 888.

[20] Konduri A, Bharti V S, Kumar S, et al. Paddy straw biochar amended sediment enhances pond productivity, growth and physiological profile of *Penaeus vannamei* cultured in inland saline nursery ponds[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(52): 61711-61729.

[21] Uwingabire S, Chamshama S A O, Nduwamungu J, et al. French bean production as influenced by biochar and biochar blended manure application in two agro-ecological zones of Rwanda[J]. Agronomy, 2024, 14(9): 2020.

[22] Li M Y. Hydro-mechanical properties of biochar-clay mixture[D]. Shanghai: Shanghai University, 2021. [李明玉. 生物炭-黏土混合土的水-力特性[D]. 上海: 上海大学, 2021.]

[23] Sun Y D, Wang X T, Wu Q, et al. Use of rice straw nano-biochar to slow down water infiltration and reduce nitrogen leaching in a clayey soil[J]. Science of the Total Environment, 2024, 948: 174956.

[24] Markgraf W, Watts C W, Whalley W R, et al. Influence of organic matter on rheological properties of soil[J]. Applied Clay Science, 2012, 64: 25-33.

[25] Chen H, Ma W M, Wang C T, et al. Effects of shrub-encroached grassland on the stability of soil aggregates and cementing materials in alpine grassland of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(1): 151-163. [陈红，马文明，王长庭，等. 高寒草地灌丛化对土壤团聚体稳定性及其胶结物质的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 151-163.]

[26]Ao H, Chen C, Zhou H. Effect and mechanism of food waste compost on the stability of paddy soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(3):716-728.[敖晖，陈冲，周虎. 餐厨垃圾堆肥对水稻土团聚体稳定性的影响及机制[J]. 土壤学报, 2025, 62(3) : 716-728.]

[27] Alves A R, Holthusen D, Sarfaraz Q, et al. Short-term biochar effects on microstructure viscoelasticity, shear resistance, and resilience of a weathered soil[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24(2): 2138-2151.

[28] Holthusen D, Batistão A C, Reichert J M. Amplitude sweep tests to comprehensively characterize soil micromechanics: Brittle and elastic interparticle bonds and their interference with major soil aggregation factors organic matter and water content[J]. Rheologica Acta, 2020, 59(8): 545-563.

[29] Sun A B, An J, Yu N, et al. Effects of iron tailings combined with organic materials on compression and rebound characteristics of cinnamon soil[J]. Soils, 2022, 54(6): 1300-1306. [孙奥博，安晶，虞娜，等. 铁矿尾砂配施有机物料对褐土压缩及回弹特性的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1300-1306.]

[30]Wang X Y, Zhou L, Meng J, et al. Rheological evaluation of soil mechanical stability during vegetation restoration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38 (5): 175-183. [王新宇,周琳,孟静,等. 基于流变学法探究植被恢复下土壤力学稳定性[J]. 水土保持学报, 2024, 38 (5) : 175-183.]

[31] Jeong S W, Urgeles R, Bahk J J, et al. Rheological characteristics of marine sediments from the Ulleung Basin, East Sea to estimate the mobility of submarine landslides[J]. Marine Geophysical Research, 2022, 43(2): 16.

（责任编辑：檀满枝）