

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.004

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.

WANG Xinyu, ZHOU Lin, MENG Jing, et al. Rheological evaluation of soil mechanical stability during vegetation restoration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 175-183.

基于流变学法探究植被恢复下土壤力学稳定性

王新宇^{1,3}, 周琳^{1,3}, 孟静², 胡少杰², 吕银彦², 许晨阳², 胡斐南^{1,2}

(1.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,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.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: [目的] 为探究黄土高原植被恢复过程中土壤微结构稳定性的演变规律。[方法] 选取子午岭林区 4 个不同植被演替阶段的土壤为研究对象,通过流变学方法振幅扫描测试方式测定不同基质势(0, -3, -10 kPa)下土壤抗剪切强度参数和黏弹性参数,并分析其与土壤理化性质之间的关系。[结果] (1) 土壤抗剪切强度和黏弹性随植被演替阶段的增加而增加,主要是由于植被恢复过程中土壤有机碳、交换性 Ca^{2+} 、砂粒质量分数增加和 Na^+ 下降提高土壤颗粒间的黏附力和摩擦力。(2) 土壤抗剪切强度参数随基质势的降低而增加,在低基质势条件下,土壤抗剪切强度参数(G'_{LVE} 、 τ_{LVE} 和 τ_{max})与交换性 Ca^{2+} 、砂粒质量分数相关性不显著,而在高基质势条件下,土壤抗剪切强度参数与交换性 Ca^{2+} 呈显著正相关($p < 0.05$), τ_{max} 、 G'_{LVE} 、 τ_{YP} 和 G'_{YP} 均与砂粒质量分数呈显著正相关。(3) 土壤黏弹性参数(γ_{YP} 和 I_z)随基质势的降低而降低;高基质势条件下土壤黏弹性参数与有机碳呈正相关,且随着基质势的降低,相关性逐渐减弱;不同基质势下黏弹性参数均与黏粒质量分数呈显著负相关。(4) 土壤整体力学稳定性在 0 kPa 时与土壤 Ca^{2+} 呈正相关,-3 kPa 时与土壤粉粒、 K^+ 呈负相关,-10 kPa 时与黏粒质量分数呈正相关关系。[结论] 研究结果揭示土壤在不同植被类型不同基质势下的力学稳定性变化规律及影响机制,为理解黄土高原植被恢复过程中土壤特性的演变提供重要依据,也为未来的土壤保护和生态恢复工作提供理论支撑。

关键词: 植被恢复; 微结构稳定性; 流变学; 基质势

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0175-09

Rheological Evaluation of Soil Mechanical Stability During Vegetation Restoration

WANG Xinyu^{1,3}, ZHOU Lin^{1,3}, MENG Jing², HU Shaojie², LÜ Yinyan², XU Chenyang², HU Feinan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] This study is aiming to evaluate the dynamic evolution of soil microstructure stability during vegetation restoration on the Loess Plateau. [Methods] Soil samples from four stages of vegetation succession in the Ziwuling forest region were examined. Utilizing the amplitude sweep test method, soil shear strength and viscoelastic parameters were assessed under various matric potentials (0, -3 and -10 kPa). Correlation analyses between these parameters and soil physicochemical properties were conducted. [Results] (1) Soil shear strength and viscoelasticity exhibited an increasing trend with advancing vegetation succession stages, attributed primarily to the increasing of soil organic carbon, exchangeable Ca^{2+} and sand content, along with reduced Na^+ during vegetation recovery. This augmentation contributed to enhanced interparticle adhesion and frictional forces. (2) The soil shear strength parameter increased with the decreasing of matric potential. Under low matric potential conditions, there was no significant correlation between soil shear strength parameters (G'_{LVE} , τ_{LVE} and τ_{max}) and exchangeable Ca^{2+} and sand content. Under high matric potential

收稿日期: 2024-02-29

修回日期: 2024-04-04

录用日期: 2024-04-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-06-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(42277311); 陕西省自然科学基金项目(2023-JC-YB-263); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202210712157)

第一作者: 王新宇(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: 1933566079@qq.com

通信作者: 胡斐南(1986—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤学与水土保持研究。E-mail: hufn@nwfau.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

conditions, soil shear strength parameters showed a significant positive correlation with exchangeable Ca^{2+} ($p < 0.05$), while $\tau_{\max}$, G'_{LVE} , τ_{YP} , and G'_{YP} exhibited significant positive correlations with sand content. (3) Soil viscoelastic parameters (γ_{YP} and I_z) showed a decreasing trend with declining matric potential. Particularly, under high matric potential conditions, these parameters exhibited a positive correlation with organic carbon content, which gradually attenuated with the decreasing of matrix potential. Viscoelastic parameters were negatively correlated with clay content under different matric potentials. (4) The overall mechanical stability of soil was positively correlated with soil Ca^{2+} at 0 kPa, negatively correlated with soil silt and K^+ content at -3 kPa, and positively correlated with clay content at -10 kPa. [Conclusion] The changes and influencing mechanism of soil mechanical stability under different vegetation types and different matric potentials were revealed, which provided an important basis for understanding the evolution of soil characteristics in the process of vegetation restoration on the Loess Plateau, and also provided theoretical support for soil protection and ecological restoration in the future.

Keywords: vegetation restoration; microstructure stability; rheology; matric potentials

Received: 2024-02-29

Revised: 2024-04-04

Accepted: 2024-04-25

Online(www.cnki.net): 2024-06-17

土壤力学稳定性指土壤在受到外部应力或负荷后,仍能保持其结构完整和强度的能力,是评价土壤质量的重要指标^[1]。土壤力学稳定性反映土壤在外部力作用下的变形和破坏情况,包括抗剪切强度和黏弹性等参数。土壤力学稳定性的高低直接影响土壤的质量、作物生长、可耕性及土壤侵蚀等过程^[1-2]。土壤抗剪切强度和黏弹性参数是土壤理化性质、环境因子和人为活动等多因素综合作用的结果,其内在机理十分复杂^[3-6]。因此,深入研究土壤力学稳定性的变化规律和影响因素对于准确预测土壤的力学响应及维护土壤结构的稳定性至关重要。

土壤流变学是研究物质在外力作用下流动和变形的科学,现已成为评价土壤结构力稳定性的重要方法^[7]。基于流变仪获得的流变学参数具有高度的敏感性^[8-9],能够研究土壤结构强度对基质势、质地、黏土矿物组成、有机质和离子组成等土壤性质的响应。PÉRTILE 等^[10]通过流变学方法评估不同矿物学、物理和化学成分下水张力对土壤流变参数的影响发现,土壤能承受的最大剪切应力和积分在水张力达到 6 kPa 时增加,在 10 kPa 时下降,表明土壤结构强度随着水张力的增加呈先增加后降低的趋势;JAVA-HERI 等^[11]利用流变学方法评价植被恢复下 4 种土壤的微结构稳定性发现,发育程度低土壤各项流变参数值最低,力学稳定性较差,发育程度较老、较发达土壤力学稳定性较好。可见,基于流变仪获得的流变学参数可以反映土壤性质的微小变化,可用于土壤力学稳定性的表征和评价。

不同植被恢复阶段土壤力学性质发生不同变化^[12];同时,基质势的变化也对土壤力学性质产生重要影响。目前,植被恢复过程中土壤力学稳定性研究

主要集中在土壤的团聚体稳定性^[13]、抗侵蚀性^[14]、抗剪强度^[15]和抗拉强度等宏观性质方面,而微观结构决定宏观性质,因此研究土壤颗粒间相互作用尤为重要。流变学方法通过定量参数反映土壤颗粒间接触的数量和强度^[16],可以揭示土壤微观结构与土壤的宏观性质之间的关系,有助于深入理解土壤的力学行为。因此,本研究旨在探讨子午岭地区不同植被恢复阶段土壤力学稳定性的变化规律,探讨不同基质势对土壤抗剪切强度和黏弹性的影响机制,为生态恢复下土壤质量的评价与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究以黄土高原中部地区的子午岭北部林区($108^{\circ}10' - 108^{\circ}08'E$, $35^{\circ}03' - 36^{\circ}37'N$)为研究区,该区是农田弃耕后恢复而成的天然次生林,目前仍保存有空间上完整的植被正向演替序列^[17]。基于前人^[18]的调查,本研究以农田、草地、灌丛、森林 4 个次生植被演替序列的表层土壤为研究对象,每个演替阶段在同一植物群落下选 3 个相似的样地,每个样地在 0—20 cm 土层随机取 10 个样点,将取到的土样混合,共计 12 个土样,采样点基本信息见表 1。样品采集后带回室内混匀后自然风干,剔除植物残根和石砾,过 2 mm 筛装袋备用。供试土壤的物理性质和化学性质见表 2 和表 3。

1.2 流变学试验方法

1.2.1 样品制备 为研究子午岭林区植被恢复过程中土壤微结构稳定性对土壤基质势的响应,本试验设计 3 个土壤基质势梯度:0, -3 , -10 kPa。首先,称取一定量充分混匀的 2 mm 土壤样品平铺于瓷盘内,

使用去离子水湿润混合样品以保持土粒处于均匀分散的状态,并放入冰箱(冷藏 4 ℃)平衡 24 h;随后,依据预设的体积质量(1.27 g/cm³)计算土壤装填量,再将平衡后的样品装入直径为 33.8 mm、高为 10 mm 的硬质塑料环中,制备成流变测试试件。最后,将制备好的测试试件放入纯水中浸泡至饱和 24 h,得到基质势为 0 kPa 的试件^[19]。将水分饱和的试件转移到沙箱中,通过调节沙箱的基质势,并经过平衡 48 h 后可得到-3,-10 kPa 的流变测试试件。每个试件重复

3~6 次。不同基质势下土壤样品的含水率见表 4。

表 1 供试土壤采样点地理特征

Table 1 Geographical characteristics of soil sampling sites for test

植被类型	经度(E)	纬度(N)	海拔/m	植被恢复年限/a	主要植被
农田	108°32′01″	36°04′37″	1 021	0	玉米
草地	108°31′37″	36°05′10″	1 340	50	苔草,梭草
灌木	108°31′38″	36°04′59″	1 310	70	狼牙刺
森林	108°32′14″	36°02′54″	1 450	110	辽东栎

表 2 供试土壤物理性质

Table 2 Physical properties of soil tested

植被类型	体积质量/(g·cm ⁻³)	颗粒组成/%			黏土矿物含量/%						
		砂粒	粉粒	黏粒	蒙脱石	蛭石	水云母	高岭石	绿泥石	石英	长石
农田	1.48±0.05a	38.81±0.12d	36.36±0.03d	24.84±0.09a	6	6	36	19	30	2	1
草地	1.27±0.05b	39.92±2.20c	40.14±1.29a	19.95±1.18b	3	6	32	24	31	3	1
灌木	1.18±0.02c	41.42±5.83b	39.44±3.30b	19.14±2.55c	5	5	28	31	27	3	1
森林	1.16±0.01c	42.15±6.82a	38.6±2.88c	19.25±3.95c	3	6	34	22	31	3	1

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理之间差异显著($p<0.05$)。下同。

表 3 供试土壤化学性质

Table 3 Chemical properties of the soil tested

植被类型	pH	CaCO ₃ /(g·kg ⁻¹)	有机碳/(g·kg ⁻¹)	电导率/(μS·cm ⁻¹)	交换性阳离子/(cmol·kg ⁻¹)			
		(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(μS·cm ⁻¹)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
农田	8.01±0.03b	61.75±1.60d	8.65±0.35c	147.80±1.31a	7.07±0.31d	0.45±0.03c	0.40±0.06b	0.15±0.04b
草地	8.16±0.02a	121.55±2.72a	18.36±0.25b	107.52±0.40c	10.64±0.22c	0.45±0.06c	0.63±0.04a	0.34±0.08a
灌木	8.17±0.01a	111.04±2.92b	18.14±0.55b	114.78±0.39b	11.27±0.15b	0.54±0.05b	0.75±0.10a	0.21±0.07b
森林	8.19±0.01a	97.95±0.88c	21.04±0.32a	85.00±2.43d	17.62±1.32a	1.09±0.08a	0.41±0.05b	0.04±0.01c

表 4 不同基质势下土壤样品的含水率

Table 4 Moisture content of soil samples under different matrix potential %

植被类型	0 kPa	3 kPa	10 kPa
农田	36.14±2.81c	31.11±1.52c	24.12±0.42c
草地	41.18±1.40b	38.67±1.32b	33.95±2.16b
灌木	43.73±0.58b	41.11±0.19a	35.44±1.41ab
森林	48.34±1.14a	42.77±0.44a	37.03±1.06a

1.2.2 流变学方法 流变学试验采用 MCR 302 流变仪(安东帕,奥地利),在振荡模式下采用振幅扫描测试(AST)进行测试。将上述制备的流变学测试试件放置在流变仪双平行系统的下板(6 cm),采用测试转子(PP25)进行测试^[19]。转子下降至刮样位置时,将土壤样品处理成直径为 2.5 cm、高为 0.4 cm 的待测试件^[20]。每个待测样品在测试前等待结构恢复的时间为 1 min,测试过程由软件 RheoCompass 1.24(安东帕,奥地利)执行完成,测试过程中 AST 的参数设置为间距 4 mm,剪切应变 0.000 1%~100%,频率 0.5 Hz,温度 20 ℃,测量点数 30,测量时间 15 min,测试结果示意图 1。根据测试结果可获得参数有:

储能模量(G'),是剪切过程中储存变形能力的度量,表征样品的弹性大小;损耗模量(G''),指由热量、摩擦和其他形式损耗能量,表征样品的塑性大小;损耗因子($\tan \delta$),为 G'' 和 G' 的比值,表示物质变形所损失能量的比例,描述弹性与黏性比的行为;最大剪切应力($\tau_{\max}$),代表土壤所能承受的最大剪切强度;积分 $\varepsilon(I_z)$,代表总体黏弹性和土壤刚度。当剪切应变在线性黏弹区(LVE)时, G' 和 G'' 相对恒定,表示在较小的剪切荷载下,土壤结构键合的稳定性。当 $\gamma_{\text{LVE}} < \gamma < \gamma_{\text{YP}}$ 时, G' 和 G'' 显著降低,土壤颗粒重新定向排列,发生塑性变形,此时土壤既存在弹性可恢复变形,也存在塑性不可逆变形,土壤结构稳定性降低。当 $G'=G''$ 时,土壤结构被完全破坏。振幅扫描测试获得的流变参数可以分为 2 组,包括抗剪强度参数和黏弹性参数,相关应力和储能模量(G'_{LVE} 、 τ_{LVE} 、 G'_{YP} 、 τ_{YP} 、 $\tau_{\max}$)归于抗剪强度参数,而相应应变参数(γ_{LVE} 、 γ_{YP} 和 I_z)被认为是黏弹性参数。详细测试原理及参数计算参考已有研究^[9,20]。

1.3 数据处理

试验数据在 Excel 2019 软件中进行处理及计

算,采用 SPSS 26 软件进行显著性分析和逐步回归分析,采用 OriginPro 2022 软件进行数据绘图和主成分分析,使用 R 语言进行相关性分析。

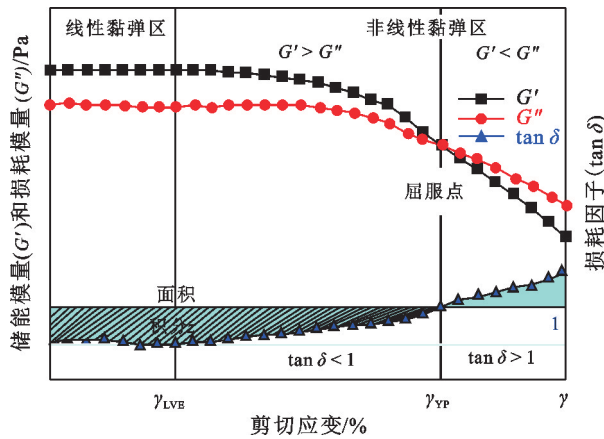


图 1 振幅扫描测试结果示意

Fig. 1 Schematic of results from an amplitude sweep test

2 结果与分析

2.1 基质势对土壤抗剪切强度的影响

由振幅扫描模式得到 G' 、 τ 与 γ 的关系见图 2。总体来看,随着基质势的降低,森林、灌木和草地土壤储能模量的差异逐渐减小。除农田外,草地、灌木、森林的 G' 随基质势的降低而增加,且增加的幅度越来越小。在 0 kPa 时, G' 随植被演替阶段的增加而增加,表现为森林 > 灌木 > 草地 > 农田;而在 -3, -10 kPa 基质势下,农田的储能模量高于其他植被类型土壤,表现为农田 > 森林 > 灌木 > 草地。随着基质势的下降,4 种植被演替阶段土壤均出现 $\tau_{\max}$, 草地、灌木、森林土壤的 τ 达到峰值后持续下降;而农田土壤的 τ 达到峰值后,先出现小幅度下降后呈上升趋势。从 0 ~ -10 kPa, 4 种植被类型土壤的 $\tau_{\max}$ 表现出先增加再降低的趋势。在 0 kPa 时, $\tau_{\max}$ 随植被演替阶段的增加而增加,且大小关系表现为森林 > 灌木 > 草地 > 农田;而在较低基质势下,农田土壤的 $\tau_{\max}$ 迅速增加,大小关系表现为森林 > 农田 > 灌木 > 草地。

由不同基质势下抗剪强度参数变化(图 3)可知,农田、草地、灌木的 τ_{LVE} 、 G'_{LVE} 、 τ_{YP} 和 G'_{YP} 均随基质势的降低而增加,表明土壤抗剪能力随基质势降低而增强;而从 0 ~ -10 kPa, 森林的 τ_{LVE} 、 G'_{LVE} 、 τ_{YP} 和 G'_{YP} 表现出先增加再降低的趋势,表明森林土壤抗剪能力在 -3 kPa 时最强。在 0 kPa 时,剪切强度参数均随植被恢复进程的增加而增加,其大小排序为森林 > 灌木 > 草地 > 农田,表明抗剪能力在植被恢复过程中逐渐增加;随基质势降低, -3 kPa 时农田抗剪强度参数均迅速增加,显著高于草地、灌木和部分森林相应值;在 -10 kPa 时,农田抗剪强度参数值均最高。

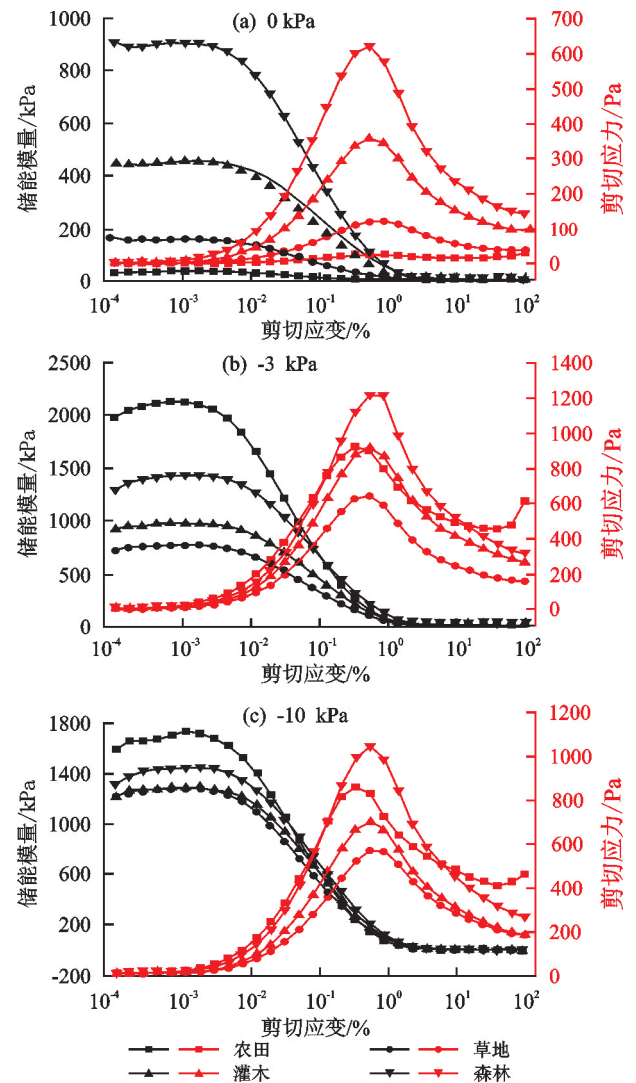


图 2 不同基质势下 4 种植被类型土壤的储能模量、剪切应力与剪切应变

Fig. 2 The storage modulus, shear stress and shear strain of 4 vegetation types soil under different matrix potential

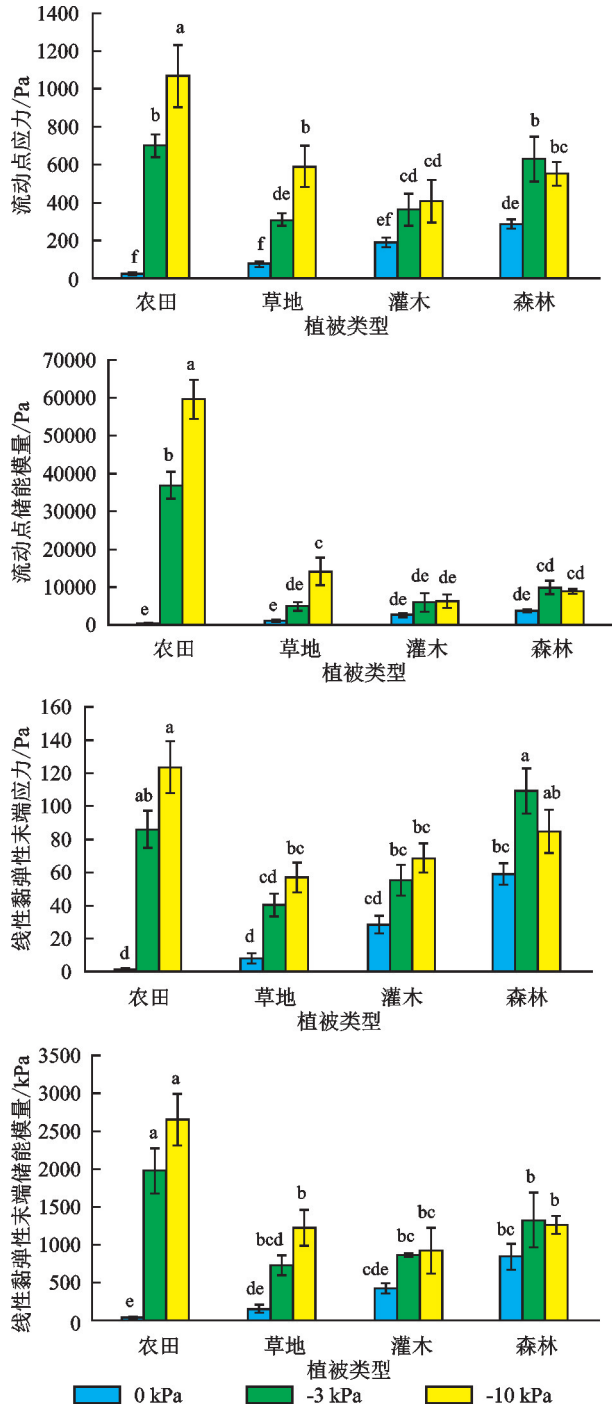
2.2 基质势对土壤黏弹性的影响

由不同基质势下土壤黏弹性参数变化(图 4)可知, γ_{YP} 和 I_z 均随基质势的降低而降低。而 γ_{LVE} 在不同植被类型表现为不同的变化趋势。在不同基质势下, γ_{LVE} 、 γ_{YP} 和 I_z 值均随植被演替阶段的增加而增加,且农田 γ_{YP} 和 I_z 值显著低于其他植被类型土壤。

2.3 土壤理化性质对土壤流变特性的影响

由图 5 可知,不同基质势下基本理化性质对抗剪强度参数的影响不同。在 0 kPa 时,交换性 Ca^{2+} 与抗剪强度参数 G'_{LVE} 、 τ_{LVE} 和 $\tau_{\max}$ 之间存在显著正相关,砂粒与 $\tau_{\max}$ 、 G'_{LVE} 、 τ_{YP} 和 G'_{YP} 呈显著正相关,然而随着基质势的降低,相关性不再显著。当基质势降低到 -3 kPa 时,交换性 Na^+ 与 τ_{LVE} 和 $\tau_{\max}$ 呈显著负相关,粉粒、碳酸钙与 G'_{LVE} 和 G'_{YP} 呈显著负相关。当基质势从 -3 kPa 降低到 -10 kPa 时,粉粒、碳酸钙仍与 τ_{LVE} 呈显著负相关,然而黏粒与 G'_{LVE} 呈显著正相

关,与 τ_{yp} 和 G'_{yp} 呈显著正相关。总体来看,0 kPa 时交换性 Ca^{2+} 、砂粒对土壤抗剪强度的影响最大,-3 kPa 时交换性 Na^{+} 、粉粒、碳酸钙是主要影响因素,-10 kPa 时黏粒对影响抗剪强度的影响最为显著。



注:不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

图3 不同基质势下土壤剪切强度参数变化

Fig. 3 Changes of soil shear strength parameters under different matrix potential

在不同基质势下,基本理化性质对黏弹性参数的影响表现出差异。当基质势从0逐渐降低到-3 kPa 和 -10 kPa, γ_{yp} 和 I_z 与SOC、黏粒的相关性逐渐减弱,从显著正相关和显著负相关变为不显著。而当基质势降

低到-10 kPa 时, γ_{yp} 和 I_z 与砂粒呈显著正相关。

总体来看,基质势为0,-3 kPa 时,SOC、黏粒是影响黏弹性的关键,而基质势为-10 kPa 时砂粒对影响黏弹性参数的影响最大。

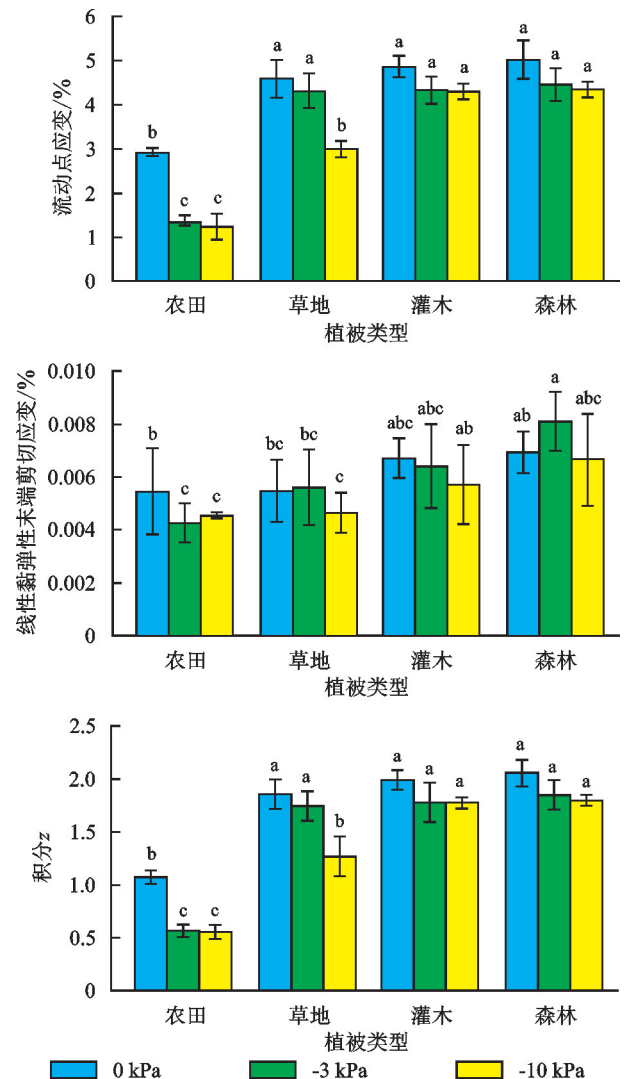


图4 不同基质势下黏弹性参数变化

Fig. 4 Changes of soil viscoelastic parameters under different matrix potential

对不同基质势下土壤的流变参数进行主成分分析,确定评价因子的权重,定量计算土壤力学稳定性综合得分。

由表5可知,子午岭地区0时土壤流变成分前3个主成分特征值均 >0.5 ,累积方差贡献率达到97.90%,因此,前3个主成分构成的信息能够反映原来变量的大部分信息;-3 kPa 时前2个主成分特征值均 >0.5 ,累积方差贡献率达到94.43%,因此前2个主成分构成的信息能够反映原来变量的大部分信息;-10 kPa 时前3个主成分特征值均 >0.5 ,累积方差贡献率达到92.92%,因此前3个主成分构成的信息能够反映原来变量的大部分信息。

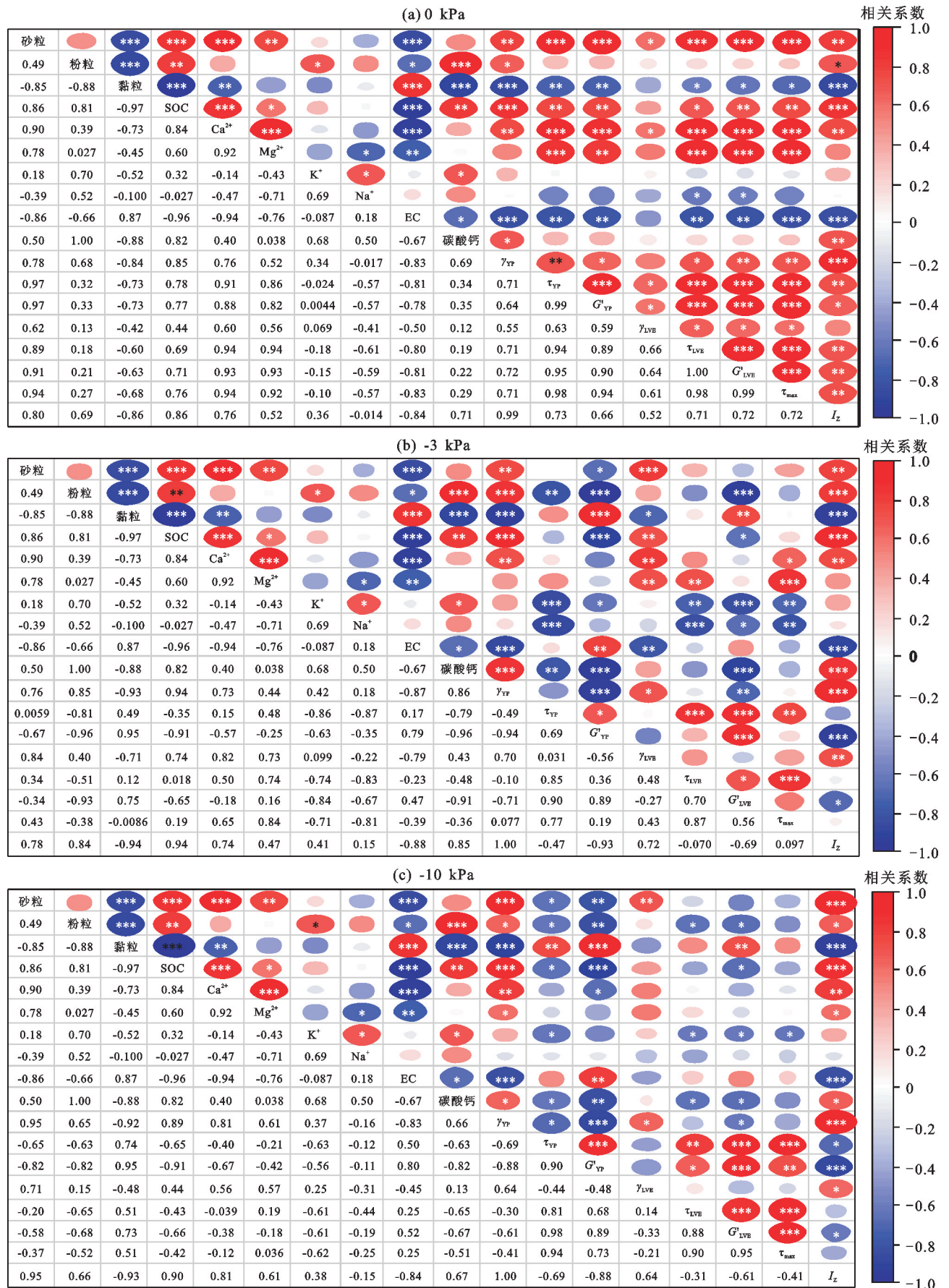


图 5 不同基质势下各参数的相关性

Fig. 5 Correlation of parameters under different matrix potential

表 5 土壤流变参数主成分分析特征值和累计贡献率

Table 5 Characteristic value and cumulative contribution rate of principal component analysis of soil rheological parameters									
主成分	0 kPa			-3 kPa			-10 kPa		
因子	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
F1	6.51	81.38	81.38	4.69	58.61	58.61	5.67	70.92	70.92
F2	0.78	9.71	91.09	2.87	35.83	94.43	1.76	22.00	92.92
F3	0.54	6.81	97.90				0.50	6.24	99.16

根据不同基质势下主成分的贡献率,生成0 kPa时主成分的综合得分为: $F(0\text{ kPa})=(0.813\ 8\ F1+0.097\ 1\ F2+0.005\ 4\ F3)/0.979$; -3 kPa 时主成分的综合得分为: $F(-3\text{ kPa})=(0.586\ 1\ F1+0.358\ 3\ F2)/0.944\ 3$; -10 kPa 时主成分的综合得分为: $F(-10\text{ kPa})=(0.709\ 2\ F1+0.220\ 0\ F2+0.062\ 4\ F3)/0.991\ 6$ 。以主成分综合得分为新因变量、土壤理化性质为自变量,建立逐步回归方程。由表 6 可知,回归模型中 p 值均 <0.05 ,方差膨胀系数(VIF)值均 <5 ,残差均符合正态分布,说明模型有效。土壤力学稳定性在 0 kPa 时与土壤 Ca^{2+} 呈正相关, -3 kPa 时与土壤粉粒、 K^+ 呈负相关, -10 kPa 时与黏粒呈正相关。

表 6 土壤力学稳定性与理化性质的逐步回归分析

Table 6 Stepwise regression analysis of soil mechanical stability and physicochemical properties

基质势/ kPa	回归模型	R^2	调整 R^2	p 值
0	$S=-57\ 922+7\ 965\ \text{Ca}^{2+}$	0.873	0.860	0
-3	$S=1\ 785\ 605-38\ 314\ F-184\ 428\ \text{K}^+$	0.932	0.917	0
-10	$S=-718\ 316+45\ 967\ N$	0.534	0.488	0.007

注: S 表示力学稳定性; F 表示粉粒; N 表示黏粒。

3 讨论

3.1 植被恢复下土壤抗剪切强度对基质势的响应

土壤抗剪切强度参数反映土壤抵抗剪切力的强度,其值越大表示土体的稳定性越强,与土壤基质势、质地、矿物组成和化学成分有关^[20-21]。本研究发现,土壤结构强度随基质势的降低而增加,主要归因于土壤含水率与颗粒间摩擦力和毛细管力之间的关系。当土壤基质势较低时,土壤颗粒间水膜厚度的降低,导致颗粒间弯液面的数量和张力增加,且颗粒间摩擦力增强,使土壤颗粒间黏结力随之增加^[22]。从 0~ -10 kPa,森林土壤的 τ_{LVE} 、 G'_{LVE} 、 τ_{YP} 、 G'_{YP} 表现出先增加再降低的趋势,表明 -3 kPa 时土壤颗粒之间的水膜厚度达到最佳,颗粒间作用力最强,之后随着基质势的持续降低,土壤颗粒之间水膜逐渐变薄,弯液面的数量和张力降低,导致土壤黏聚力下降。

受基质势的影响,土壤理化性质参数与土壤抗剪强度之间相关性存在差异。本研究发现,在高基质势时,土壤抗剪切强度参数主要与交换性 Ca^{2+} 、砂粒质

量分数呈正相关,这与 BATISTAO 等^[22]研究结果一致,当土壤含水率较高时,交换性 Ca^{2+} 通过电荷吸附和盐桥效应的方式形成胶结,促使土壤微结构的稳定及抗剪强度的提高^[23]。同时,砂粒与土壤抗剪强度呈正相关,与孙术发等^[24]的研究结果一致,归因于高基质势下土壤砂粒增加颗粒间摩擦力^[25]。而在低基质势条件下,交换性 Ca^{2+} 的活性下降,不足以激发 Ca^{2+} 与土壤颗粒之间的显著相互作用,降低其对土壤抗剪切强度的影响。低基质势条件下,土壤颗粒间的水膜变薄或消失,减弱砂粒之间的相互作用。因此,在干燥条件(低基质势)下,砂粒质量分数增加未必直接提高抗剪强度。

不同基质势下影响土壤抗剪切强度参数的土壤性质存在差异。当基质势从 0 降至 -3 kPa 时,土壤抗剪切强度参数与 Na^+ 、 K^+ 、粉粒、 CaCO_3 呈显著负相关。 Na^+ 、 K^+ 等一价离子的存在可能通过促进土壤颗粒间的排斥作用,进一步引发土壤颗粒重排和变形,最终导致土壤抗剪切强度的降低,以及土壤结构的破坏^[26]。粉粒、 CaCO_3 与土壤抗剪强度呈显著负相关,与土壤颗粒间摩擦力下降有关,粉粒增加导致土粒间的摩擦力下降^[27],而 CaCO_3 相互接触产生的摩擦力较小,导致土壤颗粒间的内摩擦角变小^[28],因而抗剪强度下降。

当基质势从 -3 kPa 降至 -10 kPa 时,土壤的抗剪强度不仅与粉粒和 CaCO_3 呈显著负相关,还与 SOC 呈显著负相关,与黏粒呈显著正相关。一方面与 SOC 的强吸湿性有关;另一方面,与土壤颗粒表面水膜厚度有关。由于 SOC 具有较强的吸湿性,导致相同基质势下有机碳质量分数高的土壤具有相对较高的饱和含水量^[10],可能降低土壤的剪切应力强度。当土壤饱和时,土壤颗粒表面较厚的水膜导致黏粒之间的吸附力和黏附力减弱^[29],而随着基质势的降低,土壤黏粒之间的吸附力和黏附力逐渐增强,因而提高土壤的抗剪强度。

3.2 植被恢复下土壤黏弹性对基质势的响应

黏弹性参数反映土壤在受到外部应力作用时表现出的黏性和弹性特性,主要受土壤质地、含水率和有机碳等因素影响^[11]。本研究发现,土壤黏弹性参数总体上随基质势的降低而降低,与 HOLTHUSEN

等^[30]的研究结果一致,可能是由于在较高的基质势下,土壤颗粒之间的摩擦阻力较小,其更容易恢复到最初的位置和状态^[14]。本研究发现,饱和土壤黏弹性参数主要与有机碳呈显著正相关,是由于有机碳的分解产物可以形成有机胶体,可增加饱和条件下土壤颗粒和团聚体之间接触,进而增加土壤黏度,使土壤结构更稳定更有弹性^[3,31]。由图 4 可知,随着基质势的降低,土壤有机碳与黏弹性参数的相关性逐渐减弱甚至不显著,与 HOLTHUSEN 等^[32]的研究结果类似。由于水分减少导致土壤颗粒之间的间隙增大,有机碳与其他土壤颗粒的有效连接变少,因此,土壤有机碳与黏弹性参数之间的相关性减弱。

不同基质势下土壤质地对黏弹性参数的影响存在差异。不同基质势下黏粒质量分数均与土壤黏弹性参数呈显著负相关,与 JAVAHERI 等^[11]的研究结果类似,可能与土壤黏土矿物组成有关。MARKGRAF 等^[8]的研究表明,黏土矿物组成中高岭石含量较高的土壤往往回弹性小。PERTILE 等^[31]研究发现,蒙脱石含量较高的土壤回弹性较高。由表 3 可知,供试土壤在植被恢复过程中,高岭石的质量分数增加,蒙脱石的质量分数呈逐渐减小趋势,故而黏粒质量分数与黏弹性参数呈负相关。低基质势条件下砂粒质量分数与黏弹性参数呈正相关,这可能是由于低基质势时砂粒质量分数高的土壤压缩性较小^[33]。

4 结 论

(1)土壤抗剪切强度和黏弹性随植被演替阶段的增加而增加,主要归因于植被恢复过程中土壤有机碳、交换性 Ca^{2+} 、砂粒质量分数增加和 Na^{+} 下降提高土壤颗粒间的黏附力和摩擦力。

(2)土壤抗剪切强度参数随基质势的降低而增加,但不同基质势下影响土壤抗剪切强度参数的土壤性质存在差异。在高基质势条件下,土壤抗剪切强度参数(G'_{LVE} 、 τ_{LVE} 和 τ_{max})与交换性 Ca^{2+} 呈显著正相关, τ_{max} 、 G'_{LVE} 、 τ_{YP} 和 G'_{YP} 均与砂粒质量分数呈显著正相关,而在低基质势条件下,相关关系不显著。

(3)土壤黏弹性参数随基质势的降低而降低,但不同基质势下影响土壤黏弹性参数的土壤性质存在差异。高基质势条件下土壤黏弹性参数(γ_{YP} 和 I_z)与有机碳体积质量呈正相关,而其相关性随基质势的降低逐渐减弱;不同基质势下黏弹性参数均与黏粒质量分数呈显著负相关。

(4)土壤整体力学稳定性在基质势为 0 时与土壤 Ca^{2+} 呈正相关关系,基质势为 -3 kPa 时与土壤粉粒、 K^{+} 呈负相关关系,基质势为 -10 kPa 时与黏粒质量分数呈正相关关系。

参考文献:

- [1] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
HUANG C Y. Pedology[M].Beijing: China Agriculture Publishing House,2000.
- [2] BAVEYE P. Comment on "Soil structure and management: A review" by C. J. Bronick and R. Lal[J].Geoderma,2006,134(1/2):231-232.
- [3] HOLTHUSEN D, REEB D, HORN R. Influence of potassium fertilization, water and salt stress, and their interference on rheological soil parameters in planted containers[J]. Soil and Tillage Research,2012,125:72-79.
- [4] AJAYI A E, HOLTHUSEN D, HORN R. Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils [J]. Soil and Tillage Research, 2016,155:166-175.
- [5] AJAYI A E, HORN R. Biochar-induced changes in soil resilience:Effects of soil texture and biochar dosage[J]. Pedosphere,2017,27(2):236-247.
- [6] KAMEDA J, MORISAKI T. Rheological properties of concentrated allophane,halloysite, and kaolinite suspensions[J].Applied Clay Science,2022,226:e106557.
- [7] BAUMGARTEN W, NEUGEBAUER T, FUCHS E, et al. Structural stability of Marshland soils of the riparian zone of the Tidal Elbe River [J]. Soil and Tillage Research,2012,125:80-88.
- [8] MARKGRAF W, HORN R, PETH S. An approach to rheometry in soil mechanics: Structural changes in bentonite, clayey and silty soils [J]. Soil and Tillage Research,2006,91(1/2):1-14.
- [9] KHITROV N B, KHAYDAPOVA D D. Viscoelastic behavior of vertic solonetz in the Kamennaya Steppe[J]. Eurasian Soil Sciency,2019,52(7):808-821.
- [10] PÉRTILE P, REICHERT J M, GUBIANI P I, et al. Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils[J/OL].Revista Brasileira De Ciência Do Solo,2016,40. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150286>.
- [11] JAVAHERI F, ESFANDIARPOUR-BOROUJENI I, KOURKI H, et al. Rheological evaluation of soil aggregate microstructure and stability across a forested catena [J].Geoderma,2021,403:e115196.
- [12] JIA Y L, CHEN S Y, WU M H, et al. Improved permafrost stability by revegetation in extremely degraded grassland of the Qinghai-Tibetan Plateau[J].Geoderma, 2023,430:e116350.
- [13] 董天富,邓志豪,杨静,等.喀斯特退耕地不同植被恢复阶段土壤团聚体稳定性特征[J].水土保持研究,2024,31(2):33-42.
DONG T F, DENG Z H, YANG J, et al. Characteristics of stability of soil aggregates at different vegetation restoration stages in karst reclaimed land[J].Research of Soil and Water Conservation,2024,31(2):33-42.
- [14] 史秀红.皇甫川流域不同植被群落特征与土壤抗蚀性研

- 究:以阳泉沟和五分地沟为例[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
- SHI X H. Study on the characteristics of different vegetation communities and soil erosion resistance in Huang-fu-Chuan Watershed[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [15] 洪苗苗,汪霞,赵云飞,等.浅层滑坡多发区典型植被恢复树种根系对土壤抗剪强度影响[J].山地学报,2018,36(1):107-115.
- HONG M M, WANG X, ZHAO Y F, et al. Effect of ecological restoration plants root on slope reinforcement in shallow landslide prone region[J]. Mountain Research, 2018,36(1):107-115.
- [16] VU E, ELLEN S G, BUCHMANN C. The contribution of microbial activity to soil-water interactions and soil microstructural stability of a silty loam soil under moisture dynamics[J]. Geoderma, 2022, 417: e115822.
- [17] DENG L, WANG K B, CHEN M L, et al. Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2013, 110: 1-7.
- [18] ZHAO Y G, LIU X F, WANG Z L, et al. Soil organic carbon fractions and sequestration across a 150-yr secondary forest chronosequence on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2015, 133: 303-308.
- [19] HOLTHUSEN D, PÉRTILE P, REICHERT J M, et al. Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses [J]. Geoderma, 2017, 295: 129-141.
- [20] MARKGRAF W, HORN R. Scanning electron microscopy-energy dispersive scan analyses and rheological investigations of south-Brazilian soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(3): 851-859.
- [21] GALLIPOLI D, GENS A, SHARMA R, et al. An elastoplastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour [J]. Géotechnique, 2003, 53(1): 123-136.
- [22] BATISTÃO A C, HOLTHUSEN D, REICHERT J M, et al. Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil[J]. Geoderma, 2020, 363: e114130.
- [23] SAFAR F, WHALEN J K. Mechanical stability of newly-formed soil macroaggregates influenced by calcium concentration and the calcium counter-anion[J]. Geoderma, 2023, 430: e116333.
- [24] 孙术发,王敬凯,赵浩然,等.大兴安岭土壤抗剪强度及影响因素研究[J].森林工程,2022,38(6):104-114.
- SUN S F, WANG J K, ZHAO H R, et al. Study on soil shear strength and influencing factors in Daxing'an Mountains[J]. Forest Engineering, 2022, 38(6): 104-114.
- [25] 张勇,姚赫,李仁华,等.花岗岩残积土垂直层次抗剪强度差异性研究[J].人民长江,2016,47(23):91-96.
- ZHANG Y, YAO H, LI R H, et al. Study on spatial variability of shear strength in different vertical layers of granite residual soil[J]. Yangtze River, 2016, 47(23): 91-96.
- [26] 依文莲,邵光成,吴世清,等.咸水灌溉下施加生物炭对土壤盐分分布及团粒结构的影响[J].中国农村水利水电,2022(6):154-161.
- NONG W L, SHAO G C, WU S Q, et al. Effects of biochar on soil salt distribution and aggregate structure under brackish water irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(6): 154-161.
- [27] 胡淑旗.干湿循环条件下不同粉粒含量高吸力非饱和土的力学特性研究[D].河北 张家口:河北建筑工程学院,2023.
- HU S Q. Study on mechanical characteristics of high suction unsaturated soil with different silt content under dry and wet cycle conditions [D]. Zhangjiakou, Hebei: Hebei University of Architecture, 2023.
- [28] 秦爱芳,傅贤雷,阮坤林,等.膨润土-碳酸钙混合物的力学特性[J].上海大学学报(自然科学版),2020,26(4): 628-639.
- QIN A F, FU X L, RUAN K L, et al. Mechanical properties of bentonite-calcium carbonate mixture [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2020, 26(4): 628-639.
- [29] 赵宁.粘粒组分对黄土力学性质的影响及其微观机理试验研究[D].西安:长安大学,2017.
- ZHAO N. Experimental study on influence of clay fraction on mechanical properties of loess and its microscopic mechanism [D]. Xi'an: Changan University, 2017.
- [30] HOLTHUSEN D, PETH S, HORN R. Impact of potassium concentration and matric potential on soil stability derived from rheological parameters[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 111(1): 75-85.
- [31] PÉRTILE P, HOLTHUSEN D, GUBIANI P I, et al. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: Properties, difficulties and opportunities[J]. Scientia Agricola, 2018, 75(2): 154-162.
- [32] 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.
- [33] 叶永.沥青混合料粘弹塑性本构模型的实验研究[D].武汉:华中科技大学,2009.
- YE Y. Experimental researches on visco-elastoplastic constitutive model of asphalt mixture [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.