

DOI: 10.11766/trxb 202103020119

朱龙祥, 范昊明, 马仁明. 冻融循环和土壤含水率对棕壤崩解特性的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60 (1): 77–88.

ZHU Longxiang, FAN Haoming, MA Renming. Effects of Freeze-thaw Cycles and Soil Water Contents on Disintegration Characteristics of Brown Earth[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (1): 77–88.

冻融循环和土壤含水率对棕壤崩解特性的影响^{*}

朱龙祥, 范昊明, 马仁明[†]

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 以沈阳地区 5~7 cm 和 25~27 cm 2 个深度原状棕壤为研究对象, 分析冻融循环次数和土壤含水率对棕壤崩解特性的影响。根据气象数据结合野外观测结果, 共设计了 5 个冻融循环次数。控制土样质量含水率分别为 10%、15%、20%、25% 和 35%。采用静水崩解, 通过数显拉力计及测量软件测定崩解过程。结果表明: (1) 棕壤崩解具有阶段性, 包括快速吸水阶段、指数崩解阶段、阶跃崩解阶段和崩解完成阶段。其中指数崩解阶段是崩解过程的主要发生阶段, 土样因拉扯或失去支撑接连崩落。该阶段的崩解速率和非毛管含水率对冻融循环次数的响应规律一致。根据拟合曲面, 10%~15% 的含水率区间存在最易崩解含水率, 其最终崩解率最大。当土样含水率为 25% 和 35% 时, 土样会跳过指数崩解过程直接进入阶跃崩解阶段。含水率 35% 条件下, 5~7 cm 和 25~27 cm 土样的最终崩解率很小, 不超过 6.93% 和 11.14%。(2) 冻融作用会对含水率为 10% 和 15% 土样产生超固结效应, 加速土壤孔隙的两极化分布, 土样指数崩解阶段的崩解速率和非毛管含水率, 最终在多次冻融后增加。冻融作用也会对含水率为 25% 和 35% 土样结构产生影响, 扩张土壤孔隙造成内部沉降, 以及降低吸水能力。土样指数崩解阶段的崩解速率和非毛管含水率, 最终在多次冻融后减小。(3) 25~27 cm 土样孔隙差异性略大, 较高的黏粒含量抑制了双电层对自由水的控制能力, 最终崩解率偏高。冻融作用可将土壤抵抗由内到外发生侵蚀的能力, 转化为抵抗由外到内发生侵蚀的能力。研究结果可为棕壤侵蚀研究提供数据支撑。

关键词: 棕壤; 冻融循环; 土壤含水率; 崩解

中图分类号: S151.7 文献标志码: A

Effects of Freeze-thaw Cycles and Soil Water Contents on Disintegration Characteristics of Brown Earth

ZHU Longxiang, FAN Haoming, MA Renming[†]

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: 【Objective】 Undisturbed brown earth soils from 5~7 cm and 25~27 cm depths in the Shenyang area of China were collected for this research. The effects of freeze-thaw cycles and soil water contents on the disintegration characteristics of the soils were analyzed. 【Method】 Based on meteorological data and field observation, five freeze-thaw cycles were designed. The

^{*} 国家自然科学基金项目 (41601284)、国家重点研发计划项目 (2016YFE0202900) 和辽宁省教育厅科学研究项目 (LSNQN202023) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41601284), the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFE0202900), and the Science Research Project of Education Department of Liaoning (No. LSNQN202023)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: marenming@syau.edu.cn

作者简介: 朱龙祥 (1997—), 男, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 主要研究土壤侵蚀规律。E-mail: zhulongxiang@stu.syau.edu.cn

收稿日期: 2021-03-02; 收到修改稿日期: 2021-08-17; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-01-22

weighed water contents of the soil samples were regulated to 10%, 15%, 20%, 25% and 35%, respectively, and the disintegration process was measured. 【Result】 1) The soil disintegration had four phases, including the rapid water absorption phase, exponential disintegration phase, step disintegration phase, and disintegration completion phase. In the four phases, the exponential disintegration phase was regarded as the main disintegration process. Importantly, during the exponential disintegration phase, the soil sample collapsed continuously due to pulling or losing support. Also, the disintegration rate in the exponential disintegration phase and non-capillary water content showed similar behavior as the increasing freeze-thaw cycle. According to the two fitting surfaces, there was a most easily disintegrating soil water content in the range 10%~15% in which the total disintegration rate was largest. When the water contents were 25% and 35%, all soil samples skipped the exponential disintegration phase and directly entered the step disintegration phase. The total disintegrations of 5~7 cm and 25~27 cm soils were very small under 35% soil water content, and was no more than 6.93% and 11.14%, respectively. 2) Over-consolidation was observed on soil samples with 10% and 15% water contents, and the polarization distribution of soil pores was accelerated under the freeze-thaw cycles. The disintegration rate of the exponential disintegration phase and non-capillary water content of both soil samples was increased after continuous freeze-thaw cycles. Under the freeze-thaw cycles, the structure of soil samples with 25% and 35% water contents was destroyed, soil pores were expanded with an internal settlement, and the water absorption capacity was reduced. 3) The pore difference of 25~27 cm soil sample was slightly larger, the control ability of electric double layer to free water was inhibited by the higher clay content, which resulted in a higher total disintegration rate. 【Conclusion】 The ability of soil to resist erosion from inside to outside was transformed into the ability from outside to inside under freeze-thaw cycles. All the findings may serve as a data basis for brown earth soil erosion research.

Key words: Brown earth; Freeze-thaw cycle; Soil water content; Soil disintegration

辽河平原是我国温带农田生态系统的重要组成部分^[1]。该地区为高纬度地区，夏季较短，冬季漫长，表土层季节性冻融循环现象强烈。在冻融过程中，土壤未必全部发生冻融侵蚀，而是影响土壤属性使其成为其他侵蚀营力的物质源^[2-4]。解冻期，内部水分频繁产生冻结和融化导致土壤团聚体稳定性、土壤孔隙结构、抗剪强度和土壤崩解速率等发生不同程度变化^[5-10]，但其变化规律并不完全一致，这主要与土壤属性有关。颗粒间的胶结和孔隙是原状土体区别于重塑土的两大主要特性，原生胶结使得原状土体的物理特性与在实验室制备的重塑土有明显的差异^[11]，仍需进一步研究冻融循环过程对原状土体抗蚀性的影响。

土壤的崩解机制与土壤侵蚀的发生过程密切相关，在降雨和地表径流作用下产生的土壤侵蚀过程中，崩解是侵蚀的前提条件。自 1954 年朱显谟等^[12]提出土壤膨胀系数、净水崩解特性可作为研究土壤抗侵蚀能力的重要评价指标后，广大学者在相关领域开展了大量研究。土壤在静水中被分散、碎裂、崩落的越快，即土壤抗蚀性越小，产生土壤侵蚀的几率就越高^[13-14]。已有学者针对崩解试验装置和计算方法进行了改进^[15-16]。受成土过程和生物生长的

影响，黄土崩解特性具有明显的地域差异^[17]，压实度大小只影响崩解的剧烈程度，并不影响黄土崩解规律曲线^[18]。以杨凌黄土^[18]、辽西褐土^[19]和三峡紫色土^[20]为研究对象，进行崩解试验后均发现含水率越小崩解性越强。张泽等^[21]对莫斯科亚黏土进行崩解试验后还发现含水率增大会导致土样的不完全崩解。借助电镜扫描、微孔结构分析仪、X 射线衍射等仪器对土壤崩解特性进行分析，结果表明孔隙分形维数、面孔隙比、平均孔隙直径与崩解量、崩解速率密切相关^[22]，岩石内部的微孔隙增生和小孔径占比增加是其崩解、软化的主要原因^[23]。可见土壤含水率是影响土体崩解特性的主要因素，且崩解特性与土壤结构密切相关。

冻融作用通过水分相变、冰晶生长和水分迁移影响土壤结构^[24]。土壤含水率是影响冻融过程中土壤体积变化的主要因素，但由于孔隙空间在一定程度上可以抵消土壤膨胀，冻融过程并不总是对土壤结构产生消极影响^[25]。多次冻融循环以后，土体中较大粒级矿物颗粒发生分裂作用，较小颗粒发生团聚作用，整个粒度成分向均一性趋势发展^[26]，土体的干容重也将趋于某一定值^[27]。顾广贺等^[8]研究表明冻融次数一定的条件下，随着土壤含水率的增加，

土样崩解速率逐渐减小；土壤含水率一定的条件下，随着冻融次数的增加，土样崩解速率变化趋势为先减小后增加。Wang 等^[9]研究表明在 24.8% 和 33.0% 初始土壤含水量下，土壤崩解速率在 5 次冻融循环后急剧升高，然而冻融循环次数对土样崩解速率的影响并无一致性规律。所以冻融作用对土壤结构的影响较为复杂，土样冻融后的崩解特性不尽相同。

棕壤是辽河平原的主要土壤类型，探究冻融作用对棕壤崩解特性的影响是必要和迫切的，对进一步了解土壤侵蚀机制从而有效遏制土地退化具有重要作用^[28]。目前，广大学者在土壤崩解特性方面已取得大量研究成果，但对原状棕壤崩解特性与冻融循环次数和土壤含水率间的定量关系仍缺乏了解。因此，本研究在前人基础上，以原状棕壤作为研究对象，模拟冻融条件下土样崩解过程，结合土壤非毛细管含水率的测定，揭示冻融作用对土壤抗崩解

能力的影响机制，以期为季节性冻融区土壤侵蚀预测和防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 土样采集与制备

供试土样采自沈阳农业大学水利学院综合实验基地，地理坐标为 41°50'N, 123°33'E，海拔 70.0 m，气候类型为温带半湿润大陆性气候。于 2020 年 10 月 2 至 4 日选取多年未利用裸地进行取样，该地块坡度为 2°~3°，土壤类型为棕壤，容重较为均匀，且无人扰动。取样地块的土壤在距地表 20 cm 左右发生明显分层，上层土壤颜色深，分层上下理化性质有差异，分别在距地表 5~7 cm 和 25~27 cm 处，用内径为 61.8 mm，高为 20 mm 环刀取样，并将与平均质量差值大于 5 g 的土样剔除。供试棕壤的基本性质如表 1 所示。

表 1 供试棕壤的基本性质

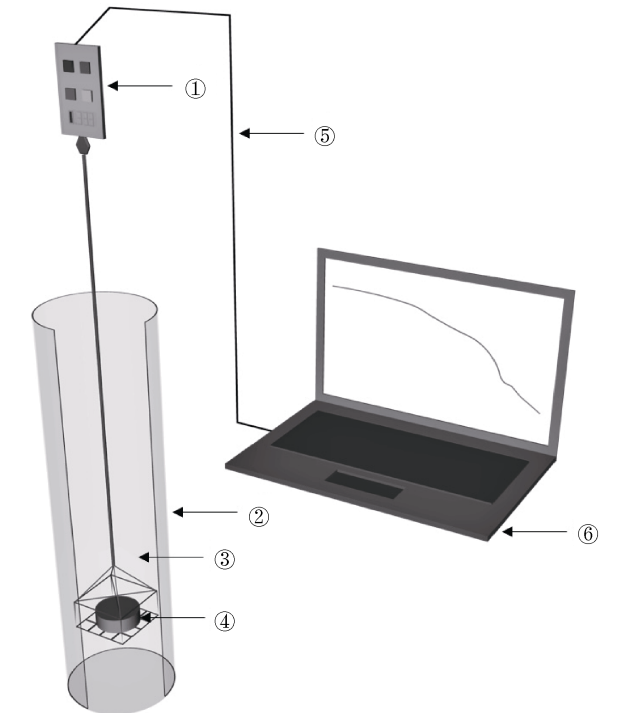
Table 1 The basic properties of tested brown earth soils

土壤深度	容重	有机质	田间持水率	饱和含水率	砂粒	粉粒	黏粒
Soil depth/cm	Bulk density/(g·cm ⁻³)	Organic matter/(g·kg ⁻¹)	Field capacity/%	Saturation moisture capacity/%	Sand/%	Silt/%	Clay/%
5~7	1.26	15.58	27.25	37.43	47.15	34.68	18.17
25~27	1.36	12.13	25.31	35.79	35.65	40.67	23.68

土样运至实验室后，统一进行慢速湿润并饱和处理，随后将土样置于室温（20±3℃）避光自然阴干，控制质量含水率分别为 10%，15%，20%，25% 和 35%。为尽可能模拟冻融交替过程，结合野外观测结果，共设计了 5 个冻融循环次数，即 0（对照组），1，5，10 和 15 次。根据沈阳市气象数据，将模拟冻结温度设为 -6℃，解冻温度设为 6℃。在模拟冻融试验中，将不同含水率的土样包裹保鲜膜放入温度可调控的冻融机（调节温度误差为 ±0.3℃）中。将冻融机温度调整为 -6℃，冻结 12 h，然后在 6℃ 恒温条件下进行 12 h 解冻，未进行冻融循环的土样在试验前置于 6℃ 恒温条件下保存。本试验的冻结和解冻时间均为 12 h，土样可以完全冻结和解冻。每个处理进行 3 次重复试验。

1.2 崩解试验

崩解试验于 2020 年 11 月 1 日至 30 日进行，供试土样完成所需冻融循环后，立即进行崩解试验。试验装置包括崩解缸（高 55 cm，直径 15 cm，注水高度 50 cm）、崩解架含崩解网（8 cm×8 cm，孔径为 4 cm²）和数显拉力计（HP-10，艾德堡公司生产），崩解装置如图 1 所示。本研究中的拉力计可对力连续测量并记录，测量精度为 0.001 N，每 0.1 s 测量一次，有置零和记忆功能。崩解前，将未装填土样的崩解架置于水中，随后置零拉力计，并将崩解架取出后擦干以备装填土样。前期预试验发现，方形土样的边角部位在取样过程中易被破坏，故采取圆形环刀取样。此外，原状棕壤的稳定性高，团粒间连结程度良好，加之土样自重较小，在使用网格结



注：①拉力计、②崩解缸、③崩解架含崩解网、④土样、⑤数据线、⑥电脑。Note: ① Tension meter, ② Disintegrating cylinder, ③ Disintegrating frame with disintegrating net, ④ Soil sample, ⑤ Data line, ⑥ Computer.

图 1 崩解装置图

Fig. 1 Diagram of disintegration device

构为 1 cm×1 cm 的崩解网进行试验时土样整体崩解后不发生下落，崩解缸中仅有试样入水时掉落的土壤颗粒，因此在大量测试后，将崩解网的网格调整为 2 cm×2 cm。试验开始后，将放有试样的崩解架挂在数显拉力计上，缓缓放入盛水崩解缸中，同时开启同步测量软件，记录拉力计的读数变化。在前期预实验中对拉力计读数每隔 5 min 进行一次记录，发现 15 min 后拉力计读数不再发生变化，因此设定崩解试验时间为 900 s。拉力计每隔 0.1 s 记录一次读数的变化，共计 9 000 次。

崩解率计算公式为^[29]：

$$A = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中， A 为 t_1 至 t_2 ($t_1 < t_2$) 时间内的崩解率 (%)； t_1 为 0 s， t_2 为 900 s 时， A 亦为试验完成时的最终崩解率 (%)； f_1 为 t_1 时拉力计的读数 (N)； f_2 为 t_2 时的读数 (N)； f_0 为开始试验时拉力计的读数 (N)；

t_1 为 0 s 时， f_1 等同 f_0 。

崩解速率计算公式为^[29]：

$$V = \frac{A}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中， V 为 t_1 至 t_2 ($t_1 < t_2$) 时间内的崩解速率 ($\% \cdot s^{-1}$)； A 为该时间内的崩解率 (%)。

1.3 非毛管含水率测定试验

已有研究表明，毛管水的存在使得土颗粒之间存在负压，对土体有一定的增强作用，但水分蒸发后或浸水后毛管水负压消失，对岩土的稳定性和无实质帮助^[30]，因此探究重力水与土体稳定性的关系就成为新的突破口。大孔隙和部分中孔隙是土体内部水分流动的主要孔隙（大孔隙指贮存重力水的大孔隙，中孔隙指贮存重力水的松散孔隙^[31]）。冻融作用或导致大孔隙发生“冰劈”转化为难以持水的裂隙^[32]，亦或通过冻融过程将大孔隙进行错位和重组，并改变裂隙的连通情况，从而影响非毛管水含量。因此推断，非毛管含水率可能映射土样某阶段的崩解特性，通过测定试样的饱和含水率和田间持水率，并计算二者差值，得到非毛管含水率。

首先将已经控制含水率并完成相应冻融循环次数的土样，置于平底托盘中，缓慢注水并保持水面高度与环刀上沿平齐，静置吸水 24 h 后取出，称重以计算饱和含水率^[33]，此时可以观察到土壤表面孔隙中充满水分，表面近似形成水膜；随后将环刀继续放置于铺有干石英砂的平底托盘中，前 8 h 中每 4 h 称重一次，随后每 2 h 称重一次，前后两次称重质量差小于 0.1 g 即认为此时土样已完成退水过程^[34]，将前次退水时长记作田间持水率出现的时间节点；最后烘干以供计算。

1.4 数据处理

采用 HP 系列上位机软件对拉力计进行数据读取，采用 Microsoft Excel 365, OriginPro 2021, Statistix 8, Spss 25 和 1stOpt 1.5 软件进行数据统计处理和作图，运用 LSD 法和 Pearson 法进行各指标间的显著性检验和相关性分析，运用麦夸特法 (Levenberg-Marquardt) 和通用全局优化法 (Universal Global Optimization-UGO) 通过进行多元回归分析和方程预测。装置图与示意图采用 Shapr3D 进行手绘。基于方差分析结果计算冻融次

数、含水率及其相互作用对最终崩解率的贡献，利用式(3)进行计算^[35]，计算结果如表2所示。

$$CT = (SS - MSE \times df) / SST \quad (3)$$

式中，*CT*为贡献度(%)；*SS*为平方和；*MSE*为误差均方；*df*为自由度；*SST*为总平方和。

2 结果与讨论

2.1 棕壤崩解过程

图2和图3为崩解率随时间变化的过程，表征冻融作用下土样的崩解特性。王健等^[36]在研究干湿交替对黄土崩解速度的影响时将崩解过程分为3个阶段，即吸水崩解阶段(土壤吸水增加的质量与其崩解掉的细颗粒质量基本相抵消)、指数崩解阶段(在水分作用下，土壤内聚力迅速降低，土壤迅速崩解，崩解量呈指数增加)、崩解完成阶段(土壤颗粒在残余力作用下，呈现稳定状态，崩解停止)。该试验中土壤崩解过程呈现S型曲线，第2阶段持续时间较长，在第2阶段结束后崩解接近完成。而本试验中，棕壤崩解过程呈现倒L型曲线，可将土样的崩解过程依次分为4个阶段：快速吸水阶段(0~3 s)、指数崩解阶段(3~60 s)、阶跃崩解阶段(60~150 s)和崩解完成阶段(150~900 s)。快速吸水阶段：土样吸水对质量的增大效果远超过细颗粒崩落对质量的减轻效果，崩解率常为负值。指数崩解阶

段：土样内水分达到或接近饱和含水率，不再吸水，水分和空气的置换过程基本结束，水分子进入土壤颗粒内驱除气体产生的作用力导致土颗粒间斥力和吸引力失衡，胶结效果已被严重削弱，小气泡从土样中连续冒出，土样表面出现裂缝，即将开始快速崩解。指数崩解过程中土样的掉落方式较为统一，且不受其他因素影响，具体表现为：(1)圆柱形土样的最外层下方首先开始掉落，最外层上方由于失去支撑随后立即掉落，且在掉落过程中对周围土样有拉扯作用。(2)由于崩落，圆柱形土样下方最外层范围缩小，在新的最外层开始重复过程(1)。(3)崩解缸中的水出现明显浑浊后，过程(1)与过程(2)同时发生。阶跃崩解阶段：在这一阶段土样基本完成崩解，裂缝扩张速度缓慢，但偶有土壤崩落，这一阶段崩解率图像表现阶梯形，即一段时间内崩解率不变，随后迅速升高，崩解率跃升，这一过程重复数次后进入下一阶段，当含水率高于25%时，土样可能跳过指数崩解阶段，直接进入阶跃崩解阶段。试验中观察到原状棕壤试样的原生结构具有微裂隙，含水率越低这种微裂隙越容易出现于土样表面。在土体浸水后，微裂隙间，微裂隙与裂隙附近块体间的连接处快速吸水。连接处气体不易排出，在压力作用下气体易被压缩^[37]，连接处失稳后土体呈现出块状崩落。崩解完成阶段：剩余土样呈现出稳定状态，崩解停止，拉力计读数不再变化。崩解完成阶段的棕壤土样具有“边界效应”，当发生一定量崩解后，土样趋于一个稳定形态，崩解架上部分土样

表2 冻融循环和含水率对最终崩解率的贡献度

Table 2 Contributions of freeze-thaw cycles and water contents for total disintegration

项目 Item	5~7 cm		25~27 cm	
	Sig.	贡献度 <i>CT</i> %	Sig.	贡献度 <i>CT</i> %
冻融循环 Freeze-thaw cycles	0.001	2.2	0.001	4.0
土壤含水率 Soil water contents	0	80.8	0.041	79.2
冻融循环 × 含水率 Freeze-thaw cycles × Soil water contents	0	11.7	0.001	7.3
误差 Error		5.3		9.6
主因素 Main factors		82.9		83.2

注：Sig.<0.05 表示该数据具有统计学意义。Note: Sig.<0.05 indicated that the data was statistically significant.

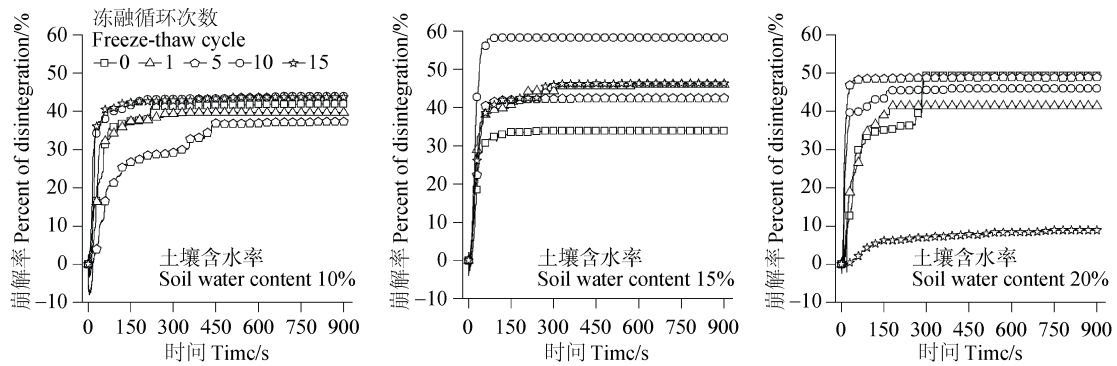


图 2 5~7 cm 土样崩解过程

Fig. 2 The disintegration process of 5~7 cm soil sample

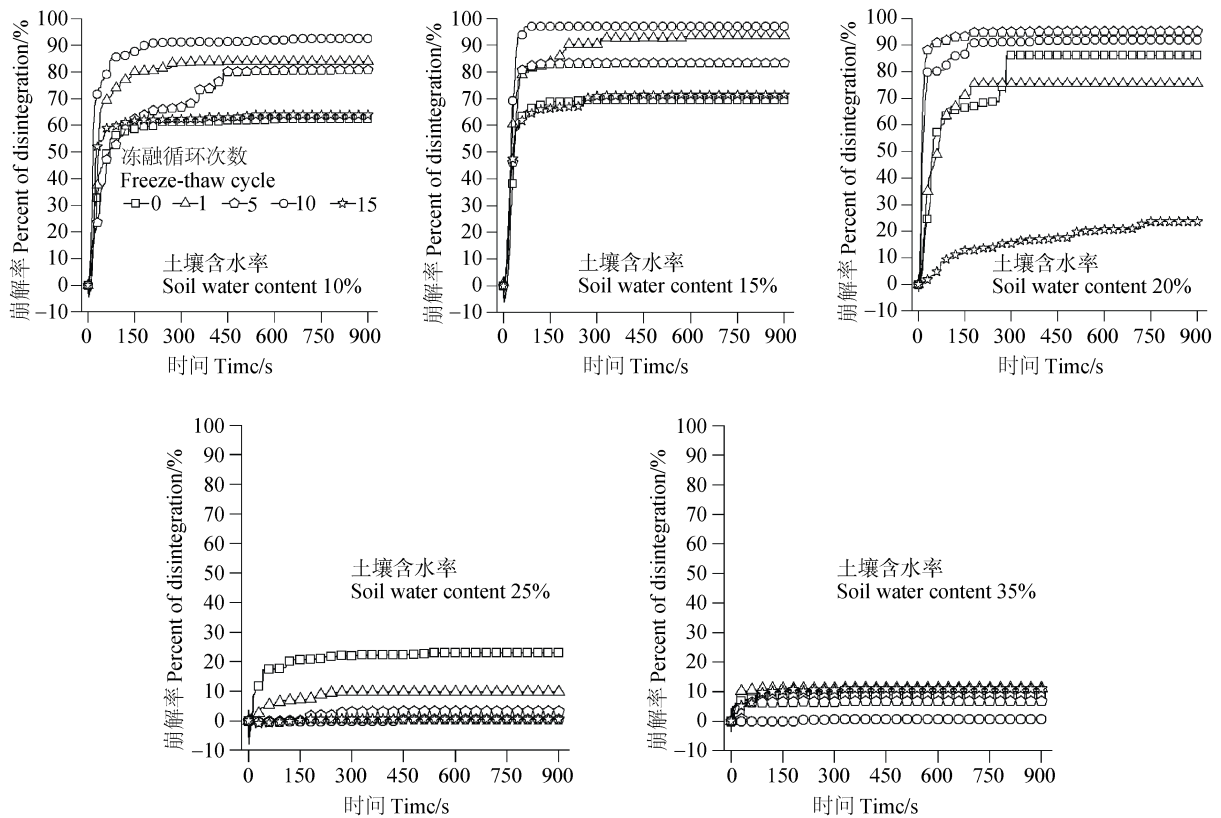


图 3 25~27 cm 土样崩解过程

Fig. 3 The disintegration process of 25~27 cm soil sample

不再发生崩解，这与黄土的边界效应类似^[38]。

2.2 冻融作用和土壤含水率对崩解速率的影响

崩解速率反映冻融作用和土壤含水率对各阶段棕壤崩解速率的影响。在快速吸水阶段，土样浸入水时迅速吸水，3 s 左右水分充满土样，达到近似饱和和状态，在这一阶段冻融作用对土样崩解速率的影响并无一致性规律，而土样含水率越低崩解速率越容易出现负值，即土样吸水增加的质量超过了崩解的细颗粒质量。相较指数崩解阶段，阶跃崩解阶段的土样崩解明显具有偶然性。而在崩解完成阶段，多数土样的质量不再变化，在水中形成稳定状态。

因此，研究指数崩解阶段（3~60 s）的崩解速率变化是研究冻融作用对土样抗蚀能力影响的关键切入点。结合非毛管含水率测定（图 4），不难发现同一含水率条件下，冻融循环次数对指数阶段崩解的崩解速率和非毛管含水率的影响规律具有一致性，含水率 10%和 15%条件下，5~7 cm 和 25~27 cm 土样的崩解速率和非毛管含水率在多次冻融后震荡增加，二者最大值均出现在冻融 10 次或 15 次时。土壤在冻结过程中，冻结峰面附近会产生较大的负孔隙水压力，使有效应力增大，土被压缩；当土样融化时，有效应力减少，在整个过程中，总应力保持不变，土样产生超固结效应^[39]。土样受低温作用时，表面最先产生冰晶，内部水分会向冻结锋面迁移并冻结，土样内部气体相对封闭，气体的冷却收缩也会促进超固结。冻结作用对土样造成超固结的实质是温度变化造成的土样内外大气压强的不均，但是在经历 12 h 融化后这种情况并不能彻底改变。超固结作用会使土样内部松散孔隙发生聚集，松散孔隙重新聚集成更紧密的孔隙，未被聚集的松散孔隙由于周围的松散孔隙已完成聚集而被孤立，转化成大孔隙，孔隙的两极化分布加剧。崩解的本质是气、水交换过程对土样原有稳态造成冲击^[40]。因此，在含水率 10%和 15%条件下，冻融过程中超固结作用导致土样孔隙两极化加剧，土样与外部环境之间的气、水交换能力增强^[41]，指数崩解阶段的崩解速率和非毛管含水率也在反复冻融过程中变化，最终趋于增大。

含水率 20%条件下，两深度土样在指数崩解阶段（3~60 s）的崩解速率和非毛管含水率在多次冻融循环中呈现波动。其原因可能为土样内部团聚体破碎后堵塞孔隙和土颗粒之间发生相对错动^[42]，既

会导致非毛管含水率的增大，又可能导致非毛管含水率的减小，多次冻融循环中水分的不均衡性和相位移移动的不确定性也在其中起着重要作用。因此，该阶段崩解速率对冻融次数响应并无明显规律可循。含水率为 15%时，5~7 cm 土样的指数崩解阶段的崩解速率和非毛管含水率在 15 次冻融后显著下降的机理应与之相似。

含水率 25%条件下，两深度土样指数崩解阶段（3~60 s）的崩解速率和非毛管含水率均随着冻融次数的增加而减小。含水率 35%条件下，两种深度土样指数崩解阶段的崩解速率和非毛管含水率均因 1 次冻融作用增大，之后随冻融次数的增加而减小。含水率高的条件下，土颗粒之间的水膜厚，土体冻结时生长的冰晶破坏了颗粒间的连结，冻结时土颗粒之间冰晶体积变大，土颗粒的连结更容易破坏^[43]。除了破坏土样结构，冻融循环作用也可以使部分大团聚体破碎为细小团聚体，土粒解冻后在重力作用下发生沉陷，造成强烈的融沉降，堵塞内部的孔隙空间^[44]，冻融循环后，内部沉降处逐渐变得密实，阻碍了土样与外部进行水分交换。在测定饱和含水率时发现，部分含水率为 35%的土样甚至在冻融过程中发生了过饱和，土样浸入崩解槽后无法进行水分交换。以上现象表明：冻融作用会导致大孔隙体积和数量强烈增加^[45]，松散孔隙向大孔隙转化，大孔隙向孔隙裂隙转化，导致部分孔隙不再持水。总之，在含水率为 35%的两深度土样中，1 次冻融强烈破坏土壤结构，造成土体稳定性下降，指数崩解阶段的崩解速率增大。一是融沉降堵塞孔隙阻隔气、水交换，二是孔隙持水、吸水能力降低，两者共同导致含水率 25%和 35%的两深度土样指数崩解阶段的崩解速率在多次冻融后减小。

朱龙祥等^[10]研究冻融作用对不同含水率原状棕壤抗剪强度的影响后，发现含水率 10%土样的黏聚力随冻融次数增加呈增加趋势，含水率 25%土样的黏聚力随冻融次数增加呈减小趋势。与本试验中含水率 10%和 25%土样，指数崩解阶段的崩解速率及非毛管含水率变化趋势相同。黏聚力大表示土壤抗蚀性强，土壤抵御径流剪切能力强；但崩解速率大说明土壤抗蚀性差，土壤容易在水中发生分散。由克拉柏龙方程知，土样内压强与气、水交换量呈负相关，结合图 4 知，冻融后含水率 10%土样的内压强降低，含水率 25%土样的内压强增大。根据能量

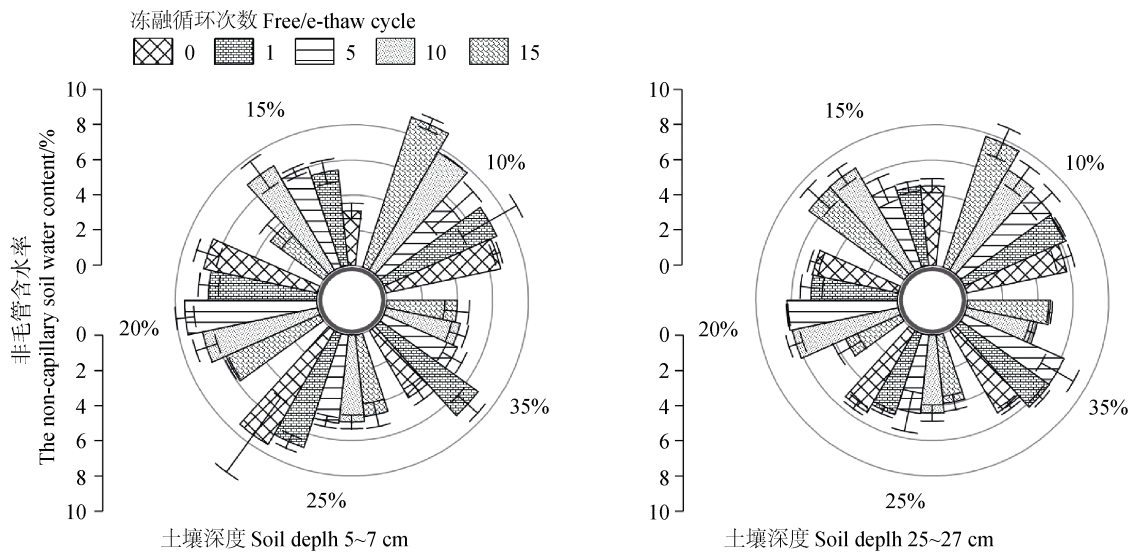


图 4 不同初始含水率棕壤冻融后的非毛细管含水率

Fig. 4 The non-capillary soil water content of brown earth soils under freeze-thaw cycles with different initial soil water content

守恒定律，冻融作用可以通过改变土体内压强，将土壤抵抗由内到外发生侵蚀的能力，转化为抵抗由外到内发生侵蚀的能力。

2.3 冻融作用和土壤含水率对最终崩解率的影响

以含水率和冻融次数为自变量，最终崩解率为

$$A_5 = \frac{31.707 - 2.184 \times \omega + 0.039 \times \omega^2 - 0.593 \times n + 0.071 \times n^2 - 0.003 \times n^3}{1 - 0.086 \times \omega + 0.002 \times \omega^2 - 0.012 \times n + 0.01 \times n^2} \quad (4)$$

式中， A_5 为 5~7 cm 土样的最终崩解率， ω 为含水率， n 为冻融循环次数， R^2 为 0.927，拟合优度(DC)为 0.927。

$$A_{25} = \frac{3687.135 - 81.364 \times n - 112.508 \times \omega}{1 - 2.112 \times n + 0.083 \times n^2 + 10.897 \times \omega - 0.994 \times \omega^2 + 0.025 \times \omega^3} \quad (5)$$

式中， A_{25} 为 25~27 cm 土样的最终崩解率， ω 为含水率， n 为冻融循环次数， R^2 为 0.942，拟合优度(DC)为 0.933。

如图 5 所示， H_5 和 H_{25} 土样的变化趋势具有高度的相似性。由表 2 可知，含水率对两深度土样最终崩解率具有重要影响。两深度土样最终崩解率随冻融次数和含水率变化呈如下趋势：由在 0 次冻融条件下，随含水率先增大后减小，逐渐变为 15 次冻融条件下先增大后减小再增大，10%~15% 为最易崩解含水率，这一发现与顾广贺等^[8]研究重塑棕壤得到的结果有所不同，其认为土壤颗粒间黏结力的增强、土壤颗粒体积增大对于崩解速率的影响尤为显著，所以随着土壤含水率的增加，棕壤崩解速率逐

渐减小。相较重塑土样，原状土样的团聚体颗粒更大，稳定性更好，抵抗气、水冲击的能力更强，土样由外到内发生崩解同时也会吸收外界水分，内部水分升高后，抗崩解能力随之增强。受到阶跃崩解阶段不确定性的影响，这一趋势与指数崩解阶段的崩解速率对冻融次数和含水率的响应趋势也具有一定差异。

含水率 25% 和 35% 条件下，两深度土样最终崩解率均随冻融次数的增加而减小，响应曲面在该含水率附近也呈现出由外向内收缩，由上向下凹陷的特性。含水率 35% 条件下，两深度土样的最终崩解率，在融沉降堵塞与吸收外界水分能力降低的共同作用下减小。含水率 35% 条件下，两深度土样的最

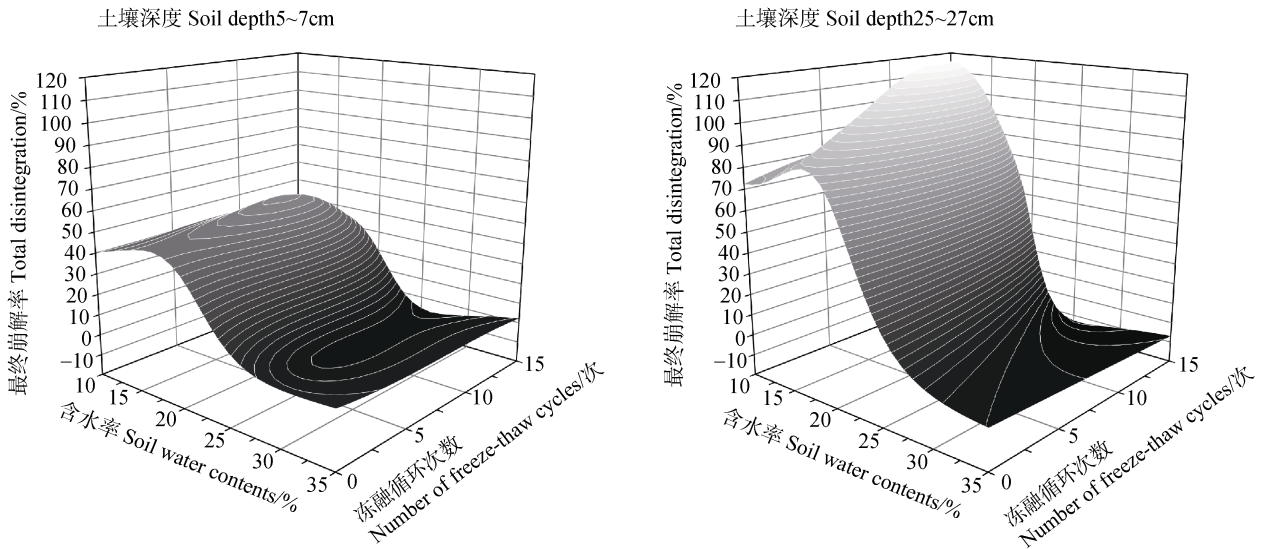
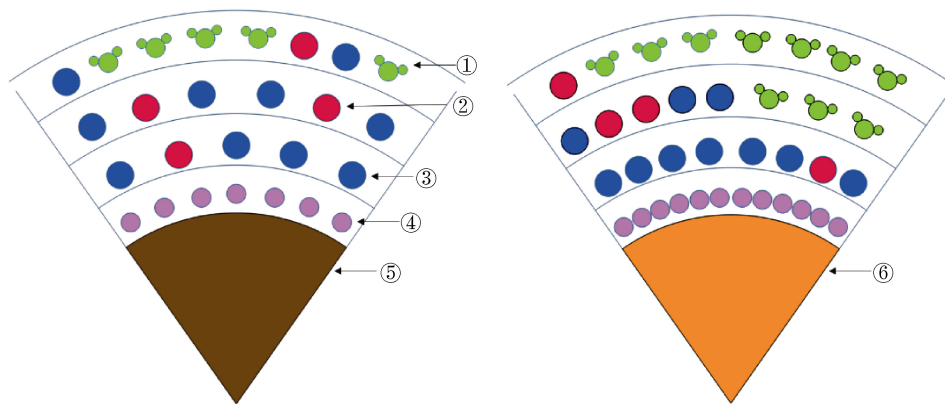


图 5 冻融条件下棕壤最终崩解率
 Fig. 5 The total disintegration of brown earth under freeze-thaw cycles

最终崩解率很小，最多崩解 6.93%和 11.14%。该含水率条件下，土壤含水率非常接近饱和状态，土粒周围的分子膜引力较大，对土粒的牵引作用有所增强^[46]。土样内部气体含量极低，外部水分难以进入土壤孔隙中，土样的抗蚀能力极强。

对比两深度土样，25~27 cm 土样的最终崩解率整体高于 5~7 cm 土样，当容重较低时，土体内架空孔隙数量多^[47]，容重较大时，一部分架空孔隙会被细小颗粒填充，从而增加了孔隙差异性。25~

27 cm 土样容重较大，浸水后不同孔隙进入的水分量不同，土颗粒间结合水膜增厚的速率不相等，颗粒间斥力和吸引力不平衡容易造成土体崩落^[48]。25~27 cm 土样黏粒含量较高，黏粒含量愈高，比表面积愈大，土壤质地愈黏重，土壤表面电荷数量越多^[49]。黏粒表面具有较高的亲水性，内部电荷能够吸附并形成水膜及反离子层，其表面的负电子来源由内到外分别为强键水、弱键水和自由水，最终在土颗粒表面形成双电层。如图 6 所示，电荷数量



注：①双电层附近自由水，②负电性粒子，③正电性粒子，④土颗粒表面电子，⑤5~7 cm 土样，⑥25~27 cm 土样。 Note:
 ① Free water near the electric double layer, ② Negatively charged particles, ③ Positively charged particles, ④ Surface electrons of soil particles, ⑤ 5~7 cm soil sample, ⑥ 25~27 cm soil sample.

图 6 土颗粒表面双电层示意图
 Fig. 6 Schematic diagram of electric double layer on the surface of soil particles

增多,对双电层内电子吸附能力增强,双电层电子活动能力减弱,土壤对自由水的控制能力减弱,从而导致土壤水稳定性下降。25~27 cm 土样有机质含量较低,凝聚胶结能力较弱。综上,25~27 cm 土样最终崩解率偏大。

3 结 论

棕壤崩解具有阶段性,其中指数崩解阶段是土粒崩落的主要过程,土样因拉扯或失去支撑接连崩落。该阶段冻融循环次数对崩解速率和非毛管含水率的影响规律一致,气、水交换能力增大则崩解速率增大。由于崩解过程复杂以及崩解的边界效应,可用指数崩解阶段衡量土壤可蚀性。冻融次数相同时,10%~15%为最易崩解含水率。当含水率高于25%时,土样会跳过指数崩解过程直接进入匀速崩解阶段。含水率35%条件下,5~7 cm 和25~27 cm 土样的最终崩解率很小,最多崩解6.93%和11.14%。冻融作用对不同含水率土样抗蚀能力的影响有差异。冻融循环作用对低含水率土样产生超固结效应,从而加剧孔隙的两极分化,含水率10%和15%条件下,两深度土样指数崩解阶段的崩解速率和非毛管含水率,最终在多次冻融作用后增加。冻融循环作用也会破坏高含水率土样结构造成内部沉降,并降低吸水能力和水分交换能力,含水率25%和35%条件下,两深度土样指数崩解阶段的崩解速率和非毛管含水率,最终在多次冻融作用后减小。25~27 cm 土样的最终崩解率显著高于5~7 cm 土样,其主要原因为25~27 cm 土样孔隙差异性略大,更容易发生引力斥力失衡,同时较高的黏粒含量抑制了双电层对自由水的控制能力,对土样抗崩解能力起弱化作用。

参考文献 (References)

[1] Chen X, Zhang X D, Yu W T, et al. Efficient management on soil and fertilizer to promote sustainable development of local agro-ecosystems in Liaohe plain, China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(9): 992-999. [陈欣, 张旭东, 宇万太, 等. 坚持土肥高效管理 促进区域农田生态系统可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(9): 992—999.]

[2] Sun B Y, Wu Z G, Li Z B, et al. Effects of freeze-thaw on soil detachment capacity and erosion resistance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

Engineering, 2020, 36(11): 57—65. [孙宝洋, 吴志广, 李占斌, 等. 冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 57—65.]

[3] Liu B Y, Zhang G L, Xie Y, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of northeastern China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(1): 96—106. [刘宝元, 张甘霖, 谢云, 等. 东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J]. 科学通报, 2021, 66(1): 96—106.]

[4] Chen T D, Jiao J Y, Wang H L, et al. Progress in research on soil erosion in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 547—564. [陈同德, 焦菊英, 王颢霖, 等. 青藏高原土壤侵蚀研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 547—564.]

[5] Jin W P, Fan H M, Liu B, et al. Effects of freeze-thaw cycles on aggregate stability of black soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4195—4201. [金万鹏, 范昊明, 刘博, 等. 冻融交替对黑土团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4195—4201.]

[6] Jiang Y, Liu B, Fan H M, et al. Macropore structure characteristics of black soil under freeze-thaw condition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(2): 340—349. [姜宇, 刘博, 范昊明, 等. 冻融条件下黑土大孔隙结构特征研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(2): 340—349.]

[7] Liu J, Fan H M, Zhou L L, et al. Study on effects of freeze-thaw cycle on bulk density and porosity of black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 186—189. [刘佳, 范昊明, 周丽丽, 等. 冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 186—189.]

[8] Gu G H, Fan H M, Jia Y F, et al. Study on disintegration of brown soil in spring thawing period [J]. Soil and Water Conservation in China, 2014(12): 45—48. [顾广贺, 范昊明, 贾燕锋, 等. 春季解冻期棕壤崩解性研究[J]. 中国水土保持, 2014(12): 45—48.]

[9] Wang L, Zuo X F, Zheng F L, et al. The effects of freeze-thaw cycles at different initial soil water contents on soil erodibility in Chinese Mollisol region[J]. Catena, 2020, 193: 104615.

[10] Zhu L X, Fan H M, Guo C J, et al. Effect of freeze-thaw cycles on shear strength of undisturbed brown soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 55—60, 67. [朱龙祥, 范昊明, 郭成久, 等. 冻融作用对原状棕壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 55—60, 67.]

[11] Li J H, Zhang Q G, Sun X, et al. Effect of bonding and void ratio on the mechanical behavior of structured soil[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48(9): 1431—1435. [李建红, 张其光, 孙逊, 等. 胶结和孔隙比对结构性土力学特性

- 的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(9): 1431—1435.]
- [12] Zhu X M, Zhang X L, Lei W J. Phenomenon and evolution of soil erosion in Jinghe river basin [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1954, 2 (4): 209—222. [朱显谟, 张相麟, 雷文进. 泾河流域土壤侵蚀现象及其演变[J]. 土壤学报, 1954, 2 (4): 209—222.]
- [13] Li Q, Zhang Z, Sun H, et al. A new modified method for calculation of soil disintegration rate[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22 (6): 344—348. [李强, 张正, 孙会, 等. 土壤崩解速率的一种修正方法[J]. 水土保持研究, 2015, 22 (6): 344—348.]
- [14] Zhang Z, Vadim P, Svetlana N, et al. Disintegration characteristics of a cryolithogenic clay loam with different water content: Moscow covering loam(prQIII), case study[J]. *Engineering Geology*, 2019, 258: 105159.
- [15] Wang N Q, Xue Y Q, Wei J R. Development and application of loessal disintegrating instrument in steady flow[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2015(1): 55—57, 69. [王念秦, 薛瑶琼, 魏精瑞. 黄土体稳流崩解仪的研制与应用[J]. 中国水土保持, 2015 (1): 55—57, 69.]
- [16] Yang X F. Growth characteristics of sloping grop roots and its effects on runoff and sediments[D]. Yangling, China: Northwest A & F University, 2012. [杨晓芬. 坡耕地玉米作物根系对土壤侵蚀的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.]
- [17] Jiang D S, Li X H, Fan X K, et al. Research on the law of soil disintegration rate change and its effect factors on the loess plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1995, 15 (3): 20—27. [蒋定生, 李新华, 范兴科, 等. 黄土高原土壤崩解速率变化规律及影响因素研究[J]. 水土保持通报, 1995, 15(3): 20—27.]
- [18] Yuan K K, Dang J Q, Wang Z K, et al. Experimental study on hydraulic properties of compacted loess[J]. *Yangtze River*, 2009, 40 (20): 34—37. [袁克阔, 党进谦, 王自奎, 等. 压实黄土水理特性试验研究[J]. 人民长江, 2009, 40 (20): 34—37.]
- [19] Zhang X Y, Fan H M, Yang X Z, et al. Effects of soil bulk density and water content on hydrostatic disintegration rate of sandy clay loam[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (1): 214—218. [张晓媛, 范昊明, 杨晓珍, 等. 容重与含水率对砂质黏壤土静水崩解速率影响研究[J]. 土壤学报, 2013, 50 (1): 214—218.]
- [20] Li J W, Chen L, Shi D M, et al. Response characteristics of purple soil disintegrating characteristics to bulk densities and water contents[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (2): 68—72, 78. [李敬王, 陈林, 史东梅, 等. 紫色土崩解特性对容重和含水率的响应特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (2): 68—72, 78.]
- [21] Zhang Z, Ma W, Pendin V V, et al. Experimental study of the disintegration characteristics of loam with different moisture content[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41 (4): 104—107, 124. [张泽, 马巍, PENDIN Vadim V, 等. 不同含水量亚黏土的崩解特性实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41 (4): 104—107, 124.]
- [22] Liu Z F. Study on disintegration mechanism of variegated clay[D]. Xi'an: Northwest University, 2020. [刘战峰. 杂色粘土崩解机理研究[D]. 西安: 西北大学, 2020.]
- [23] Liu C W, Lu S L. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21 (1): 28—31. [刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究[J]. 岩土力学, 2000, 21 (1): 28—31.]
- [24] Zheng Y, Ma W, Bing H. Impact of freezing and thawing cycles on the structures of soil and a quantitative approach[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37 (1): 132—137. [郑郢, 马巍, 郗慧. 冻融循环对土结构性影响的机理与定量研究方法[J]. 冰川冻土, 2015, 37 (1): 132—137.]
- [25] Dagesse D F. Freezing-induced bulk soil volume changes[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, 90 (3): 389—401.
- [26] Zhang Z, Ma W, Qi J L. Structure evolution and mechanism of engineering properties change of soils under effect of freeze-thaw cycle[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2013, 43 (6): 1904—1914. [张泽, 马巍, 齐吉琳. 冻融循环作用下土体结构演化规律及其工程性质改变机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43 (6): 1904—1914.]
- [27] Yang C S, He P, Cheng G D, et al. Testing study on influence of freezing and thawing on dry density and water content of soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(S2): 2695—2699. [杨成松, 何平, 程国栋, 等. 冻融作用对土体干容重和含水量影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (S2): 2695—2699.]
- [28] Shen R F, Yan X Y, Zhang G L, et al. Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1051—1059. [沈仁芳, 颜晓元, 张甘霖, 等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1051—1059.]
- [29] Li C S, An R, Shu R J, et al. Initial-disintegration analysis of granite residual soil and approximate simulation of mathematical morphology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39 (4): 845—854. [黎澄生, 安然, 舒荣军, 等. 花岗岩残积土初期崩解规律与数学形态学方法近似模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39 (4): 845—854.]
- [30] Liu W C, Yang G Q, Xiong B L, et al. Research on the water-physical property of the low liquid limit silt[J].

- Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11 (4): 926—932. [刘伟超, 杨广庆, 熊保林, 等. 低液限粉土水理特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11 (4): 926—932.]
- [31] Wu C W, Wang L X. The analysis on the water storage properties of soil pore in forested land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1995, 2 (1): 76—79. [吴长文, 王礼先. 林地土壤孔隙的贮水性能分析[J]. 水土保持研究, 1995, 2 (1): 76—79.]
- [32] Qiao G W, Wang Y S, Chu F, et al. Failure mechanism of slope rock mass due to freeze-thaw weathering[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(3): 469—476. [乔国文, 王运生, 储飞, 等. 冻融风化边坡岩体破坏机理研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23 (3): 469—476.]
- [33] Gan M. The heterogeneity of soil water retention capacity and its controlling mechanism across A slope-gully system[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019. [甘森. 坡沟系统土壤持水特性分异机制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.]
- [34] Xu J. Comparative study on the field capacity based on different test methods[D]. Changchun: Jilin University, 2018. [许静. 不同试验方法测定田间持水量的对比研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.]
- [35] Liu Q J, An J, Zhang G H, et al. The effect of row grade and length on soil erosion from concentrated flow in furrows of contouring ridge systems[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 160: 92—100.
- [36] Wang J, Ma F, Zhang P H, et al. Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (6): 1273—1279. [王健, 马璠, 张鹏辉, 等. 干湿交替对黄土崩解速度的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52 (6): 1273—1279.]
- [37] Zhang S, Tang H M. Experimental study of disintegration mechanism for unsaturated granite residual soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (6): 1668—1674. [张抒, 唐辉明. 非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34 (6): 1668—1674.]
- [38] Li X A, Huang R Q, Peng J B. Experimental research on disintegration of loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3207—3213. [李喜安, 黄润秋, 彭建兵. 黄土崩解性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (S1): 3207—3213.]
- [39] Su Q, Tang D J, Liu S. Test on physico-mechanical properties of Qinghai—Tibet slope clay under freezing-thawing cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2990—2994. [苏谦, 唐第甲, 刘深. 青藏斜坡黏土冻融循环物理力学性质试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (S1): 2990—2994.]
- [40] Carroll C, Merton L, Burger P. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines[J]. Soil Research, 2000, 38 (2): 313—327.
- [41] Liu B, Ma R M, Fan H M. Evaluation of the impact of freeze-thaw cycles on pore structure characteristics of black soil using X-ray computed tomography[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 206: 104810.
- [42] Qi J L, Ma W, Song C X. Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53 (3): 397—404.
- [43] Dong X H, Zhang A J, Lian J B, et al. Laboratory study on shear strength deterioration of loess with long-term freezing-thawing cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18 (6): 887—893. [董晓宏, 张爱军, 连江波, 等. 长期冻融循环引起黄土强度劣化的试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18 (6): 887—893.]
- [44] Fan H M, Li G Y, Zhou L L, et al. Effect of freeze-thaw on physical and mechanical properties of meadow soil[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42 (1): 114—117. [范昊明, 李贵圆, 周丽丽, 等. 冻融作用对草甸土物理力学性质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42 (1): 114—117.]
- [45] Ma R M, Jiang Y, Liu B, et al. Effects of pore structure characterized by synchrotron-based micro-computed tomography on aggregate stability of black soil under freeze-thaw cycles[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 207: 104855.
- [46] Zhao X G, Shi H. Prescription of soil anti-erosion capability under water erosion[J]. Arid Land Geography, 2003, 26(1): 12—16. [赵晓光, 石辉. 水蚀作用下土壤抗蚀能力的表征[J]. 干旱区地理, 2003, 26 (1): 12—16.]
- [47] Ferrero A, Lipiec J, Turski M, et al. Stability and sorptivity of soil aggregates in grassed and cultivated sloping vineyards[J]. Polish Journal of Soil Science, 2007, 40 (1): 1—8.
- [48] Tang D X, Liu Y R, Zhang W S, et al. Engineering geotechnical[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. [唐大雄, 刘佑荣, 张文殊, 等. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1999.]
- [49] Ma R T, Hu F N, Liu J F, et al. Evolution of soil surface electrochemical characteristics with vegetation restoration on loess plateau in Ziwuling area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (2): 392—402. [马任甜, 胡斐南, 刘婧芳, 等. 黄土高原植被恢复过程中土壤表面电化学性质演变特征[J]. 土壤学报, 2020, 57 (2): 392—402.]

(责任编辑: 檀满枝)