

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.03.017

马占龙, 肖雁, 黄娟, 等. 电解质对喀斯特地区土壤团聚体稳定性的影响. 土壤, 2023, 55(3): 596–604.

电解质对喀斯特地区土壤团聚体稳定性的影响^①

马占龙¹, 肖雁¹, 黄娟¹, 韦慧¹, 杨钙仁¹, 何铁光², 邓羽松^{1,3*}

(1 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 南宁 530004; 2 广西农业科学院农业资源与环境研究所, 广西耕地保育重点实验室, 南宁 530007; 3 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125)

摘要: 为研究电解质对喀斯特地区土壤团聚体稳定性的影响, 选取广西南宁马山县 3 种土地利用石灰土作为研究对象, 分析土壤团聚体在不同浓度(0、0.05、0.10、0.20、0.50、1.00 mol/L)电解质(NaCl、KCl、MgCl₂)溶液中的稳定性和破碎过程。结果表明: ①随着电解质溶液浓度增加, 团聚体稳定性降低, 团聚体粒径分布中 3~5 mm 的粒径组分减少, <0.25 mm 粒径组分增加, 电解质浓度>0.10 mol/L 后团聚体稳定性缓慢降低, 不同电解质对团聚体稳定性的影响表现为: NaCl>KCl>MgCl₂。②在破碎试验中的第 1 min 内大部分团聚体产生破碎, 电解质溶液中的团聚体破碎速率明显快于纯水中。③基于 MWD 值引入的“团聚体动态稳定指数”研究表明, 土壤团聚体在受电解质干扰下动态稳定性高低在不同用地类型中依次表现为: 柑橘园、桉树林、坡耕地。综上, 电解质显著影响喀斯特地区土壤团聚体稳定性, 且随着电解质浓度的增加团聚体稳定性逐渐降低。该研究结果可为喀斯特地区土壤侵蚀防治提供理论依据。

关键词: 电解质; 团聚体稳定性; 石灰土; 喀斯特

中图分类号: S157 **文献标志码:** A

Effects of Electrolytes on Stability of Soil Aggregates in Karstic Limestone Areas

MA Zhanlong¹, XIAO Yan¹, HUANG Juan¹, WEI Hui¹, YANG Gairen¹, HE Tiegua², DENG Yulong^{1,3*}

(1 Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2 Guangxi Key Laboratory of Arable Land Conservation, Agricultural Resources and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 3 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: In order to explore the effects of electrolytes on the stability of soil aggregates in karst areas, limestone soils under three land-use types (citrus groves, eucalyptus plantations and sloping cultivated land) from Mashan County, Nanning, Guangxi, were selected as research objects to analyze the stability and fragmentation process of soil aggregates at various concentrations of (0, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.00 mol/L) electrolyte (NaCl, KCl, MgCl₂) solutions. The results showed that: 1) The stability of the aggregates decreased as the concentration of the electrolyte solution increased. The particle size distribution of the aggregates decreased in the range of 3–5 mm and increased in the range of <0.25 mm. The stability of the aggregates decreased slowly after the electrolyte concentration >0.10 mol/L. The influences of different electrolytes on the stability of aggregates were: NaCl>KCl>MgCl₂. 2) Most of soil aggregates in the fragmentation experiment were fragmented within the first minute, and the rate of aggregate breaking in electrolyte solutions was significantly faster than in pure water. 3) The study of the “Dynamic Stability Index of Aggregates” based on MWD values showed that the dynamic stability of soil aggregates when disturbed by electrolytes was higher or lower in the following order for different land types: citrus groves, eucalyptus forests and sloping arable land. In summary, electrolytes significantly affected the stability of karst soil aggregates, and the stability of soil aggregates gradually was decreased with the increase of electrolytes concentration. The results of the study can provide a theoretical basis for soil erosion control in karst areas.

Key words: Electrolytes; Aggregate stability; Limestone soils; Karst

①基金项目: 中央引导地方发展资金项目(桂科 ZY21195016), 中国博士后科学基金项目(2021 M703473)和国家自然科学基金项目(32160284)资助。

* 通讯作者(denny2018@gxu.edu.cn)

作者简介: 马占龙(1994—), 男, 甘肃东乡人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与生态恢复。E-mail: mind12589@163.com

西南地区是我国喀斯特分布面积最大以及生态最脆弱区之一。由于该地区位于温暖潮湿的热带、亚热带, 强烈的喀斯特作用使该地区广泛发育形成典型的峰丛、峰林等地貌^[1-3]。喀斯特地区地貌环境的崎岖破碎和土壤的浅薄且不连续等因素, 导致该地区生态环境脆弱^[4-5]。并且随着社会经济的发展, 人类对土地不合理的开发利用造成喀斯特地区人地矛盾愈发突出^[6-7], 各种不科学的耕作模式和非可持续性的经营管理方式并存, 进而使该地区产生严重的水土流失、石漠化等问题^[8]。

团聚体作为土壤的基本单元, 对于维持土壤质量、优化土壤结构等具有重要意义^[9]。团聚体稳定性作为评价土壤侵蚀的重要指标, 微观上与土壤机械组成、有机碳、土壤溶质等因素密切相关, 宏观上则受土地利用方式、植被类型、气候环境等因素的影响^[10-11]。土壤溶质组成及其浓度是对土壤团聚体稳定性产生影响的重要因素。Le Bissonais^[12]研究表明, 多价阳离子对团聚体稳定性有较强的促进作用, 单价阳离子则有很强的消散作用。电解质中阳离子浓度是控制黏粒分散或絮凝的主要因素之一^[13-14]。陈忠柳等^[15]研究发现, Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 是喀斯特地区土壤中存在的主要阳离子类型, 其中 Ca^{2+} 的含量远高于 Mg^{2+} 。石灰性土壤中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 对土壤的消散作用相近^[13]。根据电解质与团聚体相关的理论, 土壤在高浓度的 Ca^{2+} 条件下, Ca^{2+} 含量发生少量的变化不易对团聚体产生显著影响^[15]。土壤中适量 K^+ 、 Mg^{2+} 等离子的存在有助于植物生长发育和产量提升, 但过量使用各种化肥、农药和用盐碱水灌溉等, 导致的土壤电解质种类和浓度大幅增加会破坏土壤溶液中的电解质平衡, 进而影响土壤团聚体的稳定性, 甚至会造成喀斯特地区土壤侵蚀和退化的加剧^[15]。喀斯特土壤中 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 等主要电解质的类型及浓度变化, 对土壤团聚体的影响以及团聚体稳定性的具体变化规律尚不明确。由于电解质

本身的微观性和作用的隐蔽性, 加之喀斯特石灰土地地区农林耕作作用地的碎片化, 使得该地区农林生产中电解质对土壤结构和质量的影响常被忽视, 同时该地区土壤侵蚀的防治措施也缺乏该方面的理论支持。

因此, 本研究以喀斯特地区石灰土为研究对象, 以不同浓度的 3 种电解质溶液(NaCl 、 KCl 、 MgCl_2) 处理土壤团聚体, 研究电解质类型和浓度对喀斯特土壤团聚体稳定性的影响, 以明确电解质溶液条件下喀斯特土壤团聚体稳定性的变化规律, 为喀斯特石灰土地地区农林生产和水土保持工作提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 试验土壤

供试土样于 2021 年 6 月采自广西南宁马山县典型的喀斯特地貌区($108^{\circ}27' \text{E} \sim 108^{\circ}31' \text{E}$, $23^{\circ}62' \text{N} \sim 23^{\circ}64' \text{N}$), 本研究选择县内 3 种典型的石灰土地类型(坡耕地、柑橘园、桉树林)进行采样。该县位于亚热带季风气候区, 年均气温 21.2°C , 年平均无霜期 362 d, 年均日照时长约 1 479 h, 雨热同期, 年均降水量约 1 693 mm, 降水多集中在夏季。在各样地选择有代表性的区域设置 3 个面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 样方, 采集表层土壤(0~20 cm 土层)作为样品, 每种用地类型设置 3 个重复。土样自然风干去除杂物后, 研磨过筛, 装自封袋储藏备用。同时采集原状土样用于团聚体稳定性分析, 并用塑料盒盛装运回实验室, 风干后沿自然裂缝掰开为 10 mm 左右土块, 储藏备用。

1.2 土壤基本性质测定

采用常规分析方法测定土壤基本性质^[16]。土壤机械组成采用吸管法测定, 并按美国农业部制划分标准分为砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)3 个粒级; 有机质测定采用重铬酸钾外加热法; pH 测定采用电极法, 土水质量比为 1:2.5。供试土壤的部分基本性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physiochemical properties of tested soils under three land-use types

用地类型	pH	有机质(g/kg)	土壤机械组成 (g/kg)		
			砂粒	粉粒	黏粒
坡耕地	6.64 ± 0.09 c	25.04 ± 0.47 c	295.3 ± 2.2 a	378.5 ± 38.3 a	326.1 ± 40.3 a
柑橘园	7.34 ± 0.11 b	29.60 ± 0.32 b	271.8 ± 52.4 a	413.9 ± 47.7 a	314.3 ± 8.7 a
桉树林	7.91 ± 0.04 a	34.71 ± 0.57 a	294.1 ± 69.6 a	422.7 ± 64.0 a	283.3 ± 5.2 a

注: 同列不同小写字母表示不同用地类型间差异显著($P < 0.05$), 下同。

1.3 Le Bissonais 法测定土壤团聚体稳定性

采用 Le Bissonais 法(下文中简称为 LB 法)中的

快速湿润法(FW)、慢速湿润法(SW)和预湿润振荡法(WS)测定团聚体稳定性^[12]。将掰开的原状土样进行

筛分获取粒径 3 ~ 5 mm 的团聚体并风干, 然后将团聚体置于 40 °C 的烘箱中烘 24 h 至恒重, 分别采用上述 3 种湿润方法进行处理。快速湿润法: 称取 5 g 团聚体, 在烧杯中用纯水浸没 10 min; 慢速湿润法: 称取 10 g 团聚体并均匀铺于张力 -0.3 kPa 的滤纸上静置并完全湿润 30 min; 预湿润振荡法: 称取 5 g 团聚体, 加入盛有酒精的烧杯中浸没并静置 10 min 后, 吸出酒精, 并转移至盛有纯水的锥形瓶中, 塞紧瓶塞上下颠倒 20 次后静置 30 min 并去除水。3 种处理后的团聚体用 95% 的酒精洗入 50 μm 筛孔的筛子中, 在酒精中上下均匀振荡 20 次(振幅约 2 cm), 将筛网上的团聚体颗粒用酒精冲洗至铝盒, 吸出上清液后, 在 40 °C 的烘箱中烘干至恒重, 再用 3、2、1、0.5、0.25 mm 的套筛进行干筛分筛, 称取各粒级破碎团聚体的质量, 再分别计算平均重量直径(MWD), 每个处理重复 3 个平行。通过相对消散指数(RSI)和相对机械破碎指数(RMI)^[12,17]评价土壤团聚体对消散作用和机械破碎作用的敏感程度。

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n X_i \times W_i \quad (1)$$

式中: MWD 为团聚体平均重量直径, mm; n 为筛子个数; X_i 为筛分出来第 i 级团聚体的平均直径, mm; W_i 为第 i 级粒径范围团聚体质量占土壤样品干重的百分数, %。

$$\text{RSI} = \frac{\text{MWD}_{\text{SW}} - \text{MWD}_{\text{FW}}}{\text{MWD}_{\text{SW}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{RMI} = \frac{\text{MWD}_{\text{SW}} - \text{MWD}_{\text{WS}}}{\text{MWD}_{\text{SW}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: MWD_{FW} 、 MWD_{SW} 和 MWD_{WS} 分别为快速湿润、慢速湿润和预湿润振荡 3 种处理的 MWD 值, RSI、RMI 为相对消散指数和相对机械破碎指数, %。

1.4 电解质溶液条件下测定土壤团聚体稳定性

参考 LB 法中的快速湿润法, 采用不同浓度(0、0.05、0.10、0.20、0.50、1.00 mol/L)的电解质(NaCl、KCl、MgCl₂)溶液对团聚体进行处理。该试验具体操作中, 除浸泡团聚体的液体由纯水换成不同类型和不同浓度的电解质溶液外, 其他操作与 LB 法中的快速湿润法相同, 最后称取各粒级破碎团聚体的质量, 并分别计算 MWD 值。

对于团聚体随时间的破碎情况进行电解质溶液中的团聚体破碎试验。具体过程为: 取 10 粒(3 ~ 5 mm)均匀的团聚体置于 3 mm 孔径的筛子上方, 缓慢浸没于各浓度(0、0.05、0.10、0.20 mol/L)的 3 种电解质

溶液中, 根据团聚体破碎情况随时间变化记录不同时长(5、10、30 s, 1、2、5、10 min)中团聚体的破碎数量。团聚体稳定度采用指标 AS 表示, 即湿润过程中完整团聚体的个数占试验团聚体总数的比值。

1.5 基于 MWD 值的团聚体动态稳定指数计算

本研究在 MWD 值的基础上引入“团聚体动态稳定指数(dynamic stability index for aggregates, DSIA)”这一概念: 在进行基于某一影响因子的分组梯度的土壤团聚体稳定性研究时, 通过各梯度分组团聚体的 MWD 值的平均值、极值及极差之间的关系来反映其整体动态稳定性的指标, 即团聚体动态稳定指数。

$$\text{DSIA} = \frac{(M_1 + M_2 + \dots + M_n)}{\frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_{\max} + M_{\min}}} \quad (4)$$

即

$$\text{DSIA} = \frac{(M_1 + M_2 + \dots + M_n)(M_{\max} + M_{\min})}{2n(M_{\max} - M_{\min})} \quad (5)$$

式中: DSIA 为团聚体动态稳定指数; M_1 、 M_2 ... M_n 为各分组处理的 MWD 值, mm; M_{\max} 为分组处理中最大 MWD 值, mm; M_{\min} 为分组处理中最小 MWD 值, mm; n 为分组处理的组数。

1.6 数据处理

采用 Excel 2019 和 IBM SPSS Statistics 23.0 进行数据处理和统计分析, 采用 Origin 8.0 进行作图。

2 结果与分析

2.1 LB 法下团聚体稳定性特征

采用 LB 法测定的各用地类型土壤团聚体 MWD 值均表现为: $\text{MWD}_{\text{SW}} > \text{MWD}_{\text{WS}} > \text{MWD}_{\text{FW}}$, 其中 $1.05 \text{ mm} < \text{MWD}_{\text{FW}} < 2.06 \text{ mm}$, $2.92 \text{ mm} < \text{MWD}_{\text{SW}} < 3.51 \text{ mm}$, $2.21 \text{ mm} < \text{MWD}_{\text{WS}} < 3.07 \text{ mm}$ (表 2), 表明快速湿润条件下各用地类型土壤团聚体破碎程度更高, 慢速湿润条件下团聚体破碎程度最低。在快速湿润条件下, 坡耕地土壤团聚体与柑橘园和桉树林土壤团聚体稳定性存在显著差异($P < 0.05$); 柑橘园土壤团聚体在慢速湿润条件下, 其稳定性明显高于其他用地类型团聚体; 在预湿润振荡条件下 3 种用地类型团聚体稳定性存在显著差异($P < 0.05$)。各用地类型土壤团聚体 RSI 值均明显大于 RMI 值, 说明土壤团聚体对消散作用更为敏感, 而机械作用对团聚体破碎的影响相对较小。

表 2 LB 法下团聚体稳定性特征
Table 2 Stability characteristics of soil aggregates by LB treatment

用地类型	MWD _{FW} (mm)	MWD _{SW} (mm)	MWD _{WS} (mm)	RSI (%)	RMI (%)
坡耕地	1.05 ± 0.06 b	2.92 ± 0.06 b	2.21 ± 0.03 b	64.11 ± 1.10 a	24.32 ± 2.46 a
柑橘园	2.06 ± 0.10 a	3.51 ± 0.05 a	3.07 ± 0.10 a	41.37 ± 2.03 b	12.54 ± 1.77 b
桉树林	1.12 ± 0.11 a	3.09 ± 0.03 b	2.75 ± 0.15 a	63.82 ± 2.76 c	11.00 ± 5.66 b

注：表中 MWD_{FW}、MWD_{SW} 和 MWD_{WS} 分别为快速湿润法、慢速湿润法和预湿润振荡法处理条件下的团聚体平均重量直径；RSI 和 RMI 分别为相对消散指数和相对机械破碎指数。

2.2 电解质对土壤团聚体稳定性的影响

2.2.1 土壤团聚体 MWD 变化特征 如图 1 所示，坡耕地、柑橘园和桉树林 3 种石灰土用地类型的土壤团聚体 MWD 值对 3 种电解质溶液浓度变化的响应规律相似，均表现为随电解质溶液浓度的增加而减小，当电解质溶液浓度增加到一定值后 MWD 值的变化逐渐减小。其中，受电解质溶液浓度变化影响最强烈的坡耕地土壤团聚体，在 0 ~ 0.10、0.10 ~ 0.20、0.20 ~ 1.00 mol/L 的 NaCl 溶液浓度变化范围内，MWD 值随浓度的变化率分别为：2.52、0.86、0.15(MWD 的变化率：在电解质溶液某个浓度变化范围内，MWD 值在电解质的单位浓度内的变化量)。从 MWD 值在电解质溶液不同浓度范围内的变化率可以看出，土壤团聚体在 0 ~ 0.10 mol/L 的电解质溶液中 MWD 变化率是在 0.20 ~ 1.00 mol/L 的电解质

溶液中的 10 倍以上。坡耕地土壤团聚体在其他电解质溶液中也有相似的规律，表明团聚体稳定性的减弱主要发生在电解质溶液 0 ~ 0.10 mol/L 浓度范围内。总体上电解质溶液浓度小于 0.10 mol/L 时，浓度变化对团聚体稳定性影响非常显著 ($P < 0.05$)，大于 0.10 mol/L 时对团聚体稳定性的影响大幅减弱，最终随浓度增加而逐渐趋向缓慢。在各电解质溶液中，从 3 种用地类型土壤团聚体 MWD 值的下降幅度可以看出，电解质溶液的浓度变化对坡耕地土壤团聚体的作用最明显，柑橘园和桉树林土壤团聚体 MWD 值随电解质浓度变化较小，同时各用地类型土壤团聚体均在 NaCl 溶液中 MWD 值降幅最大，在 MgCl₂ 溶液中 MWD 值降幅最小。说明 3 种用地类型土壤团聚体中柑橘园和桉树林土壤团聚体稳定性较好，而坡耕地土壤团聚体的稳定性较差。

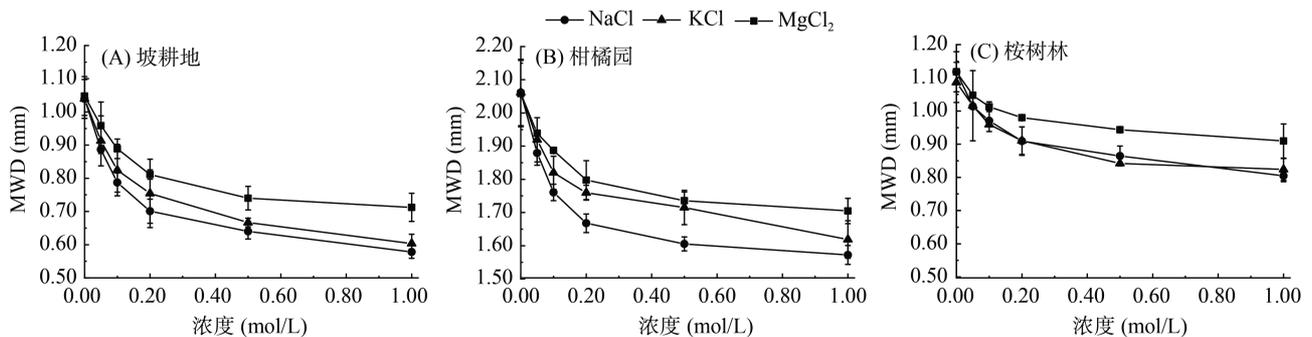


图 1 电解质溶液中团聚体稳定性
Fig. 1 Stability of soil aggregates in electrolyte solutions

2.2.2 土壤团聚体粒径分布特征 如图 2 所示，电解质溶液浓度变化对土壤团聚体破碎后的粒径分布具有显著影响。在 0 ~ 0.10 mol/L 的浓度变化范围内，经过不同电解质处理，各用地类型土壤团聚体的粒径分布随浓度的变化最为剧烈；在 0.10 ~ 0.20 mol/L 的浓度变化范围内，团聚体粒径分布的变化趋于缓慢；而在大于 0.20 mol/L 的浓度变化范围内团聚体粒径分布趋向稳定。不同电解质对同一用地类型团聚体粒径分布的作用大致相似，同一电解质对不同用地类型的土壤团聚体粒径分布的作用差异较大。

坡耕地土壤团聚体破碎后，在不同浓度的各电解质中表现为，0.5 ~ 5 mm 粒径组分整体上随电解质浓度的增加而减小，而 <0.5 mm 粒径组分随电解质浓度的增加而增加，其中 3 ~ 5、2 ~ 3 mm 粒径组分含量显著低于其他粒径组分 ($P < 0.05$)，0.25 ~ 0.5、<0.25 mm 粒径组分含量在电解质浓度 >0.10 mol/L 时明显高于其他粒径组分，<0.25 mm 微团聚体组分含量随电解质浓度变化最显著；当各电解质浓度从 0 增加到 1.00 mol/L 时，<0.25、0.25 ~ 0.5 mm 粒径组分含量显著增加 ($P < 0.05$)，可见坡耕地土壤团聚体对

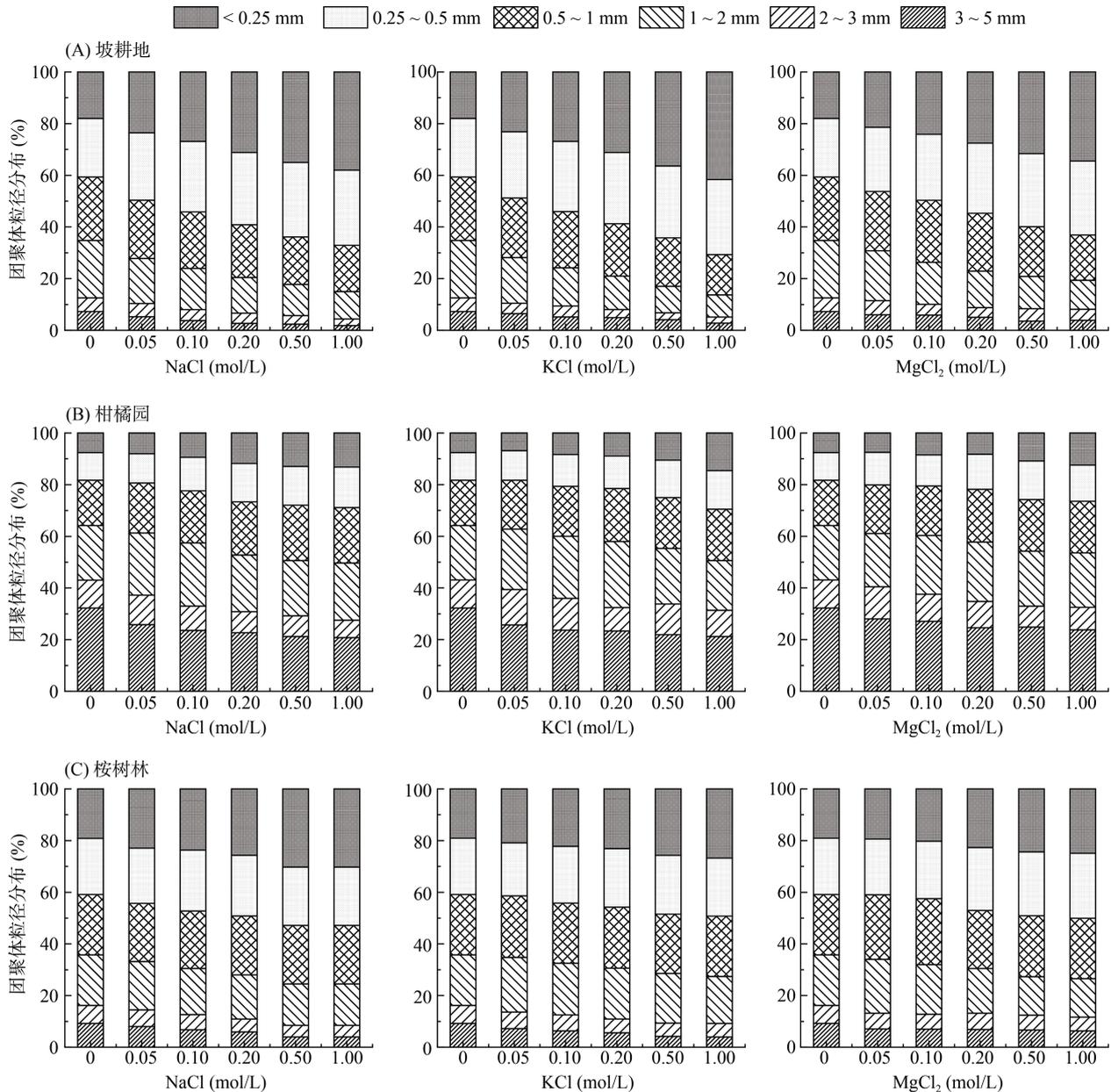


图 2 土壤团聚体破碎粒径分布

Fig. 2 Fragmentation particle-size distribution of soil aggregates

电解质浓度变化非常敏感。柑橘园和桉树林土壤团聚体破碎后, 3~5 mm 粒径组分随电解质浓度的增加而减少, 0.25~0.5、<0.25 mm 粒径组分随电解质浓度的增加而增加。其中, 柑橘园土壤团聚体 3~5 mm 粒径组分在各电解质浓度<0.10 mol/L 时含量最大, 且在该浓度范围内该粒径组分随着电解质浓度的增加而减少, <0.25 mm 的微团聚体含量随电解质浓度的增加而增加, 但整体上均处于较低水平; 桉树林土壤团聚体 3~5、2~3 mm 粒径组分含量显著低于其他粒径组分($P<0.05$), 可见桉树林土壤大团聚体含量相对较少。总体上, 随着电解质浓度的增大, 3 种用

地类型中 3~5 mm 粒径组分的大团聚体含量均显著降低($P<0.05$), 而<0.25 mm 的微团聚体组分含量均显著增加($P<0.05$)。

2.2.3 电解质对土壤团聚体破碎过程的影响 电解质不仅影响土壤团聚体 MWD 和粒径分布, 同时对团聚体的破碎过程也存在显著影响。土壤团聚体在电解质溶液中的破碎量及破碎速率均显著大于纯水中(图 3), 如桉树林土壤团聚体浸润于纯水和 3 种浓度(0.05、0.10 和 0.20 mol/L)的 KCl 溶液中, 在试验开始后的 1 min 内团聚体稳定度分别下降到 73.3%、53.3%、60.0% 和 60.0%, 从第 2 min 开始团聚体的

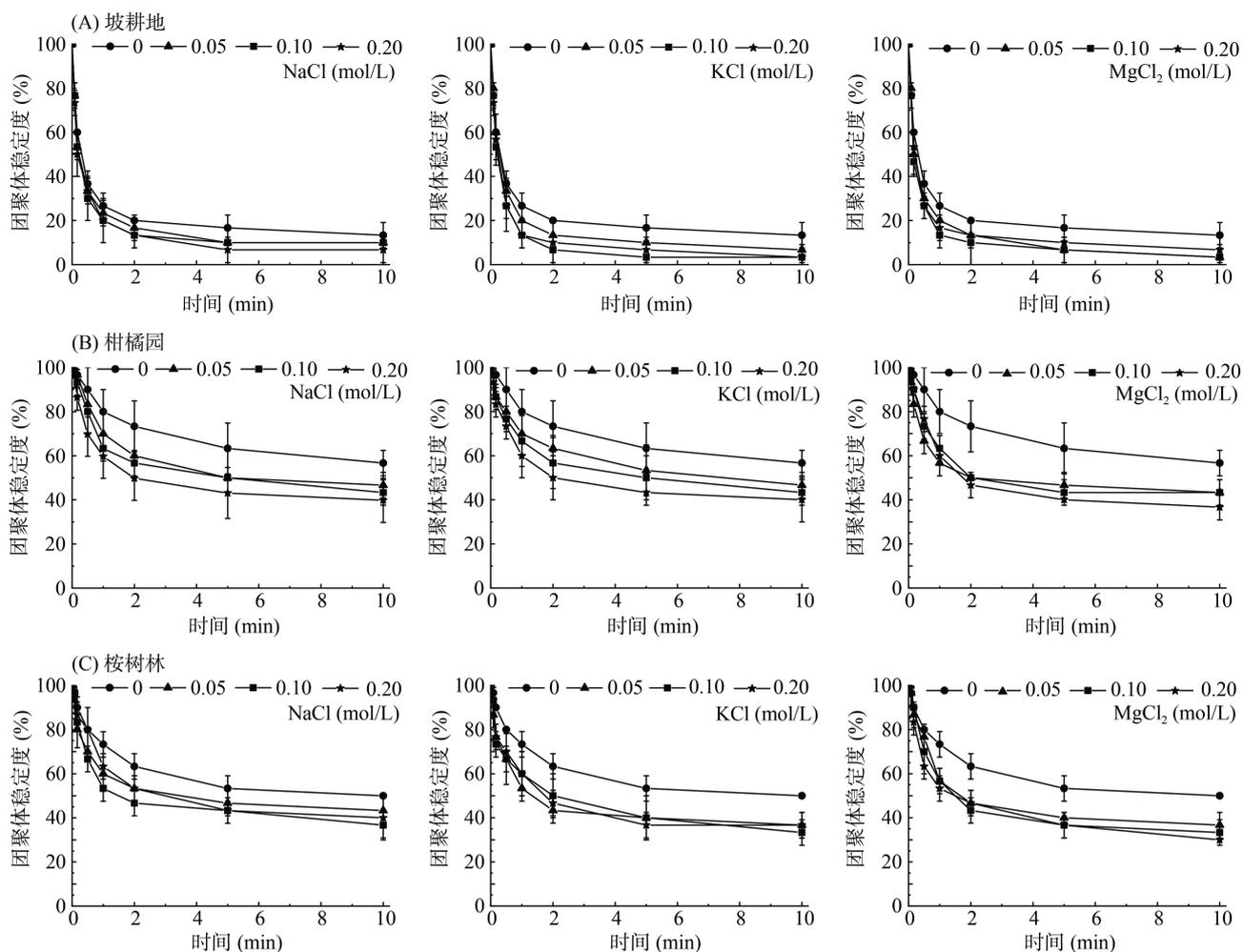


图3 团聚体稳定度随时间变化规律

Fig. 3 Changes of soil aggregate stability over time

破碎量逐渐趋缓, 10 min 后团聚体稳定度最终分别保持在 50.0%、37.7%、33.3% 和 37.7%。土壤团聚体在纯水中的破碎速率明显慢于电解质溶液中, 且稳定度也高于电解质溶液中。柑橘园土壤团聚体浸润于纯水和不同浓度电解质溶液后, 团聚体的稳定性和破碎速率与桉树林土壤团聚体规律相近。坡耕地土壤团聚体浸润于各电解质溶液后, 在浸润前期团聚体稳定度随浸润时间迅速降低, 在浸润于纯水、KCl、NaCl 和 $MgCl_2$ 各浓度溶液的 1 min 内团聚体稳定度平均值分别下降到 26.7%、12.2%、21.1% 和 16.5%, 可见坡耕地土壤团聚体的破碎量绝大部分基本在浸润后的第 1 min 内发生, 从第 2 min 开始团聚体稳定度基本不再发生明显变化, 10 min 后团聚体稳定度分别保持在 13.3%、4.4%、8.8% 和 4.4%。总体而言, 加入电解质溶液的各用地类型土壤团聚体基本均在第 1 min 内完成大部分团聚体的破碎, 而纯水中的团聚体破碎速率明显慢于电解质溶液, 且达到稳定后的破

碎量也明显小于电解质溶液中的团聚体, 但在本研究涵盖的 0.05 ~ 1.00 mol/L 电解质溶液浓度范围内, 电解质浓度的变化对团聚体的破碎量和破碎速率的作用不明显。

2.2.4 基于 MWD 值的团聚体动态稳定性评价 在研究团聚体稳定性中, 通过对团聚体进行同一方法的不同分组处理, 可以得到在不同处理条件下的团聚体稳定性和变化趋势, 如随着电解质溶液浓度的增大或减小, 团聚体 MWD 值也表现出相应的变化趋势^[14-15], 从而反映出团聚体稳定性的变化规律。但目前的研究团聚体稳定性随某个影响因素的变化而动态变化过程中的稳定性时, 并没有一个可以量化的评判指标, 同时对不同土壤团聚体采取相同分组处理时, 不同土壤团聚体之间整体动态稳定性优劣也缺乏用以定量评判的指标。团聚体分组处理后, 对于该土壤团聚体在不同处理下的整体动态稳定性, 各分组处理条件下的 MWD 值可以很好地反映团聚体动

态稳定性的优劣和抗干扰能力。在分组处理条件下的 MWD 值其平均值越大,则团聚体在该分组处理条件下的整体动态稳定性越好。本研究中,柑橘园土壤团聚体各分组 MWD 值的平均值高于其他两种土壤,则表明柑橘园土壤团聚体稳定性也相对较高(图 4)。同时各分组处理之间 MWD 值的极差值与团聚体的整体动态稳定性呈负相关(在纯水中同一土壤团聚体的 MWD 值相同,因此本研究中极差的相关计算从除去纯水外的最低浓度,即 0.05 mol/L 的浓度开始算起),两个极值的平均值与团聚体的整体稳定性呈正相关。

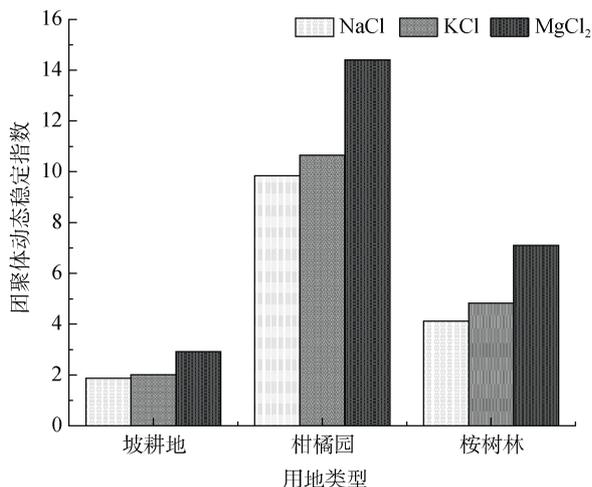


图 4 各用地类型土壤团聚体动态稳定指数

Fig. 4 Dynamic stability indexes of soil aggregates under different land-use types

基于上述分析,本研究在 MWD 值的基础上引入“团聚体动态稳定指数”(DSIA)来反映其整体动态稳定性。通过对不同用地类型团聚体动态稳定指数计算可以得出,电解质溶液对不同土壤团聚体稳定性的影响存在显著差异,各土壤团聚体的整体动态稳定指数表现为:柑橘园>桉树林>坡耕地,各土壤团聚体对 NaCl 及其浓度变化敏感性最强,对 KCl 敏感性次之,对 MgCl₂ 及其浓度变化的敏感性最弱。

3 讨论

农业生产生活中的施肥和灌溉等活动,会直接或间接改变土壤中的电解质种类和浓度,进而改变团聚体稳定性^[14]。Le Bissonais^[12]在有关团聚体崩解理论中认为,团聚体在溶液中的破坏形式主要有 4 种:消散作用、机械外力作用、土壤矿物湿润后非均匀膨胀作用和物理化学驱散作用。土壤团聚体快速湿润时的消散作用,比慢速湿润的膨胀作用对土壤团聚体的破坏作用更强^[18],消散作用产生的破碎颗粒粒径相对较小,破碎粒径的尺寸随着黏粒含量减少而减小^[12]。

本研究中,石灰土团聚体进行快速湿润时,在无外力作用下,团聚体在溶液中产生的破坏形式主要为消散作用,即在湿润过程中,团聚体内的闭蓄空气被压缩并爆破外逸而导致团聚体的分解^[19-20]。研究表明,NaCl 等无机盐溶液随浓度增加其表面张力也会随之增大^[21],说明溶液表面张力对溶液浸入团聚体的动力特征产生重要影响。随着电解质溶液浓度增大,溶液浸入团聚体的速率也加快^[22],并在团聚体内的闭蓄空气被压缩而爆破的作用下使团聚体快速破碎,所以快速湿润时电解质溶液浓度的增加,会从溶液入渗速率和团聚体内闭蓄空气的压缩爆破等方面加剧团聚体的消散作用,并使团聚体破碎为更小粒径的团聚体^[22],从而降低团聚体稳定性。但从 MWD 值的变化中可以发现,破碎团聚体的粒径并不会无限制地减小,在电解质溶液浓度增加到 0.10 mol/L 后破碎团聚体的粒径变化逐渐减弱,这可能是由于大团聚体局部相对松散、凝聚不紧密,破碎后的微小团聚体颗粒内的闭蓄空气占比减小,微小团聚体内的有机质、黏粒含量等因子对团聚体的保护作用减弱或抵消了消散作用,从而使团聚体不再继续破碎。电解质溶液对团聚体稳定性的作用存在一个临界点,有研究认为该临界点浓度为 0.10 mol/L^[12],本研究结果与该结论基本相似。众多研究表明,pH 和有机质含量同样是影响团聚体稳定性的重要因素^[23-25],土壤 pH 过高或过低均对团聚体的稳定性产生不利影响^[23]。本研究中,在相同处理条件下,有机质含量高的土壤,其团聚体 MWD 值也越高;土壤 pH 呈弱碱性的柑橘园和桉树林团聚体 MWD 值高于 pH 值呈弱酸性的坡耕地土壤团聚体。桉树林土壤有机质含量略高于柑橘园土壤,但桉树林土壤团聚体 MWD 值小于柑橘园土壤团聚体,这可能是由于桉树林土壤 pH 偏高,同时土壤黏粒含量偏低所导致。总体上,在其他条件或因素相同或相近的情况下,有机质含量高的土壤团聚体,其在电解质溶液中的消散作用相对较弱,团聚体的稳定性也较高,如柑橘园和桉树林土壤有机质含量明显高于坡耕地,在相同电解质溶液浓度条件下其 MWD 值也大于坡耕地。

研究表明,电解质溶液对坡耕地土壤团聚体稳定性的影响最为显著,对柑橘园土壤团聚体稳定性的作用最微弱,产生这种结果主要在于柑橘园土壤受干扰相对较少,枯枝落叶等有机物的大量存在和微生物活动改善了土壤质量,因为有机碳和黏粒等可以显著提高团聚体稳定性^[24]。有研究表明,桉树对土壤养分

的吸收明显大于其他树种,并随着树龄增长其对土壤有机碳等的消耗也越大^[25],造成桉树林地力减退,从而使团聚体稳定性也受到影响;而喀斯特地区的坡耕地由于土壤自身抗干扰能力弱等特性,和过度开发利用等因素使土壤越发贫瘠^[2],使其团聚体更为脆弱和不稳定,这种脆弱性导致坡耕地土壤团聚体对各种电解质的敏感度也远高于其他用地类型。

各用地类型土壤团聚体对 NaCl 的敏感度最强,其次对 KCl 敏感度相对较强,而对 MgCl₂ 敏感度最弱。Na⁺、K⁺、Mg²⁺ 等阳离子在灌溉、施肥等生产活动中被大量引入土壤中,使土壤中的电解质溶液浓度被改变,从而对团聚体以及土壤质量产生影响^[23,26]。土壤中的电解质浓度增加而引起的团聚体稳定性的降低和黏粒分散性的增加,容易造成土壤有机质含量降低^[26-28],同时也会使土壤孔隙度和土壤持水能力受不良影响^[29],进而降低土壤质量和生产力。随着电解质浓度升高,团聚体破碎为更小粒径的颗粒,在坡耕地等石灰土地表上,灌溉或降雨使大团聚体破碎为更细小的颗粒,并导致地表渗透率降低形成径流而增加土壤侵蚀^[30],所以 Na⁺ 等阳离子的富集会促进或加剧土壤侵蚀的发生,尤其在生态脆弱的喀斯特石灰土地区,电解质对土壤团聚体的影响更应该引起高度重视。在农林生产中,首先应科学合理且有节制地使用化肥、农药等物品,避免滥用引起的各类电解质在土壤中过度富集造成土壤结构的破坏,同时应提高灌溉水的水质,减少甚至避免使用盐碱水或受污染的水源,减轻土地盐碱化的风险,以实现土壤结构与作物收获的平衡与可持续。

4 结论

电解质溶液浓度显著影响石灰土团聚体稳定性,随着电解质溶液浓度增加,团聚体 MWD 值先快速减小,电解质溶液浓度大于 0.10 mol/L 后, MWD 值缓慢减小。随着电解质溶液浓度的增大,3 种用地类型的团聚体粒径分布中,3~5 mm 粒径组分的大团聚体含量均显著降低,<0.25 mm 粒径组分的微团聚体含量均显著增加。加入电解质溶液的各用地类型土壤团聚体基本在第 1 min 内完成大部分团聚体的破碎,纯水中的团聚体破碎速率明显慢于电解质溶液中,达到稳定后的破碎量也明显少于电解质溶液中。在一定浓度范围内,电解质溶液浓度的变化对团聚体的破碎量和破碎速率的作用不明显。控制电解质在土壤中的过量富集,可以促进喀斯特地区农林发展和生态环境的协调与可持续。

参考文献:

- [1] 赵筱青,李思楠,普军伟,等. 云南喀斯特山区国土空间优化分区与管控[J]. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2339-2357.
- [2] 马芊红,张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(11): 1130-1141.
- [3] 周春衡,付智勇,吴丽萍,等. 喀斯特坡地土层厚度及养分含量空间分布特征[J]. 农业现代化研究, 2020, 41(3): 539-548.
- [4] 张兴,王克林,付智勇,等. 桂西北白云岩坡地典型土体构型石灰土水文特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2186-2196.
- [5] 许胜兵,彭旭东,戴全厚,等. 喀斯特高原石漠化区露石岩-土界面与非岩-土界面土壤入渗特性差异[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 136-143.
- [6] 陈洪松,冯腾,李成志,等. 西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 10-16.
- [7] 曹建华,蒋忠诚,袁道先,等. 岩溶动力系统与全球变化研究进展[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 874-900.
- [8] 宋同清,彭晚霞,杜虎,等. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [9] An S S, Mentler A, Mayer H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2010, 81(3): 226-233.
- [10] Tang Y Q, Li J, Zhang X H, et al. Fractal characteristics and stability of soil aggregates in Karst rocky desertification areas[J]. Natural Hazards, 2013, 65(1): 563-579.
- [11] 刘艳,马茂华,吴胜军,等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望[J]. 土壤, 2018, 50(5): 853-865.
- [12] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(4): 425-437.
- [13] Amezketa E, Lafarga R A. Flocculation-dispersion behaviour of arid-zone soil clays as affected by electrolyte concentration and composition[J]. Geology, 1995, 10: 101-112.
- [14] 邵婷婷. 第四纪粘土红壤团聚体在不同 pH 值和电解质条件下的破碎特征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [15] 陈忠柳,舒英格,周鹏鹏. 喀斯特山区不同生态恢复模式土壤盐基离子的交换及分布特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 304-311, 319.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 266-289.
- [17] Lin L W, Deng Y S, Yang G R, et al. Using Le Bissonnais method to study the stability of soil aggregates in plantations and its influence mechanism[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2022, 68(2): 209-225.
- [18] 范云涛,雷廷武,蔡强国. 湿润速度对土壤表面强度和土壤团聚体结构的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5):

- 46–50.
- [19] Quirk J P, Panbokke C R. Incipient failure of soil aggregates[J]. *Journal of Soil Science*, 1962, 13(1): 60–70.
- [20] 肖海, 刘刚, 赵金凡, 等. 雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4): 827–835.
- [21] 葛勇, 常传利, 杨文萃, 等. 常用无机盐对溶液表面张力及混凝土性能的影响[J]. *混凝土*, 2007(6): 7–9.
- [22] 胡节, 吴新亮, 蔡崇法. 快速湿润过程中钾和钙离子浓度对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 175–182.
- [23] 王轶浩, 陈展, 周建岗, 等. 重庆酸雨区马尾松纯林改造对土壤酸化特征及团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(13): 5184–5194.
- [24] 林哲, 黄智刚, 邓羽松, 等. 花岗岩侵蚀劣地不同种植年限果园土壤团聚体的稳定性[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4): 69–76.
- [25] Wang J Y, Deng Y S, Li D Y, et al. Soil aggregate stability and its response to overland flow in successive *Eucalyptus* plantations in subtropical China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 151000.
- [26] 邢旭光, 马孝义, 康端刚. 盐阳离子类型及浓度对土壤持水及干缩开裂的作用效果[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 115–122.
- [27] 杨宇琼, 戴全厚, 严友进, 等. 黔中喀斯特坡地浅层裂隙土壤机械组成对降雨的响应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 545–552.
- [28] 杨志花, 胡斐南, 刘婧芳, 等. 土壤表面电场对黄土母质发育土壤水分入渗特性的影响及模拟[J]. *土壤学报*, 2019, 56(6): 1359–1369.
- [29] 郭全恩, 王益权, 南丽丽, 等. 溶质类型与矿化度对半干旱盐渍化地区果园土壤水分有效性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(8): 973–978.
- [30] AL-Kayssi A W, Mustafa S H. Modeling gypsiferous soil infiltration rate under different sprinkler application rates and successive irrigation events[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 163: 66–74.