

DOI: 10.11766/trxb202301060007

王杰, 任少聪, 魏玉杰, 黄伊静, 阳邦戈, 蔡崇法. 不同土地利用方式砖红壤团聚体水稳性及其对前期含水率的响应[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 978–988.

WANG Jie, REN Shaocong, WEI Yujie, HUANG Yijing, YANG Bangge, CAI Chongfa. Response of Water Stability of Lateritic Aggregates with Different Land Use Types Under Different Antecedent Moisture Content[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(4): 978–988.

不同土地利用方式砖红壤团聚体水稳性及其对前期含水率的响应*

王 杰, 任少聪, 魏玉杰[†], 黄伊静, 阳邦戈, 蔡崇法

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉, 430070)

摘 要: 前期含水量是影响土壤团聚体稳定性的重要因素, 而其对砖红壤结构稳定性的影响缺乏系统研究, 本文以海南地区 3 种典型利用方式 (林地、荒地、耕地) 下玄武岩发育砖红壤团聚体为研究对象, 测定其理化性质, 干、湿筛团聚体组成及不同前期含水率 (3%、5%、10%、15%、20%) 条件下 3~5 mm 粒径团聚体破碎后粒径分布状况, 采用冗余分析探究了土壤性质及前期含水率对不同土地利用方式砖红壤团聚体水稳性的影响。结果表明: (1) 不同土地利用方式下, 土壤部分性质存在显著差异, 如土壤 pH、有机碳、阳离子交换量及部分交换性盐基离子等, 其余性质差异较小。(2) 土壤水稳性团聚体组成总体呈现“单峰”或“双峰”分布, 峰值主要出现在 2~1 mm 和 0.5~0.25 mm 处, 对于表层土壤而言, 林地土壤团聚体稳定性最高, 而耕地土壤团聚体稳定性较弱, 表下层土壤稳定性显著 ($P<0.05$) 低于表层土壤。(3) 在风干条件下, 表层土壤团聚体水稳性普遍较高 (WSA>90%, MWD>1.5, GMD>1.2), 随着前期含水率的增加, 团聚体破碎后大团聚体 (>2 mm) 含量有不同程度的变化, 整体呈现水稳性大团聚体含量随前期含水率增加而增加。(4) 土壤有机碳是影响砖红壤团聚体水稳性的最主要因素, 其对团聚体水稳性差异的解释率达 80.6%。

关键词: 砖红壤; 土壤结构; 前期含水率; 团聚体水稳性

中图分类号: S154.2⁺⁷ **文献标志码:** A

Response of Water Stability of Lateritic Aggregates with Different Land Use Types under Different Antecedent Moisture Content

WANG Jie, REN Shaocong, WEI Yujie[†], HUANG Yijing, YANG Bangge, CAI Chongfa

(College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: **【Objective】** Antecedent moisture content is a critical factor affecting soil aggregate stability. However, its influence on the aggregate stability of lateritic soils developed from basalt has not been systematically investigated. To unravel the intricate interplay between soil properties, antecedent moisture content, and the water stability of lateritic soils developed from basalt, a

* 国家自然科学基金项目 (42077067, 42277329) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42077067, 42277329)

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

作者简介: 王 杰 (1992—), 男, 湖北孝感人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与面源污染。E-mail: wj6377@163.com

收稿日期: 2023-01-06; 收到修改稿日期: 2023-10-08; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-11-30

meticulous investigation was undertaken. This study delved into the diverse land use types, aiming to shed light on the intricate relationship between these factors and aggregate water stability. 【Method】 In the latosol region of Hainan, a comprehensive study was conducted to examine the influence of three prevalent land use types, forest, cropland, and wasteland, on the soil properties and aggregate size distribution. Through a preliminary investigation, the tested soils were meticulously analyzed. The LB method, specifically the Fast Wetting variant, was employed to determine the aggregate size distribution within the 3-5 mm range across the various land use types. This assessment was performed under five distinct antecedent moisture contents of 3%, 5%, 10%, 15%, and 20%. Subsequently, water stability indices, including Water Stability Index (WSA), Mean Weight Diameter (MWD), and Geometric Mean Diameter (GMD), were meticulously calculated to provide valuable insights into aggregate water stability. 【Result】 Distinctive variations in soil properties, encompassing pH, organic carbon, cation exchange capacity, and some exchangeable base cations, were prominently observed across different land use types. The distribution of water-stable aggregates in the lateritic soil exhibited either an unimodal or bimodal pattern, with peaks predominantly observed at 2-1 mm and 0.5-0.25 mm size fractions. Notably, forest soils displayed the highest aggregate stability among surface soils, while cultivated soils exhibited relatively weaker aggregate stability. Furthermore, subsurface soils demonstrated significantly lower aggregate stability ($P < 0.05$) compared to surface soils. When considering air-dry conditions, characterized by moisture content during air-drying, the water stability of surface soil aggregates consistently exhibited high values (WSA > 90%, MWD > 1.5, GMD > 1.2). As the antecedent moisture content increased, the proportion of macro aggregates (> 2 mm) following aggregate fragmentation displayed varying degrees of change, ultimately resulting in an overall increase in the content of macro aggregates (> 2 mm). It is noteworthy that the influence of land use type on aggregate water stability outweighed that of antecedent moisture content ($F > 56$, $P < 0.01$). Soil organic carbon (SOC) emerged as the primary factor explaining the variation in aggregate stability ($R^2 = 80.6\%$, $P < 0.01$), displaying a positive correlation. Non-capillary porosity followed suit, exhibiting a significant positive correlation ($R^2 = 66.0\%$, $P < 0.01$), while capillary porosity demonstrated a noteworthy negative correlation. Among the soil sesquioxides, aluminum oxides (Al_d , Al_o) exerted a considerably larger impact on aggregate stability compared to other sesquioxides. In contrast, the influence of antecedent moisture content on aggregate stability was relatively modest, displaying a significant negative correlation ($R^2 = 24.0\%$, $P < 0.01$). 【Conclusion】 The water stability of lateritic soil aggregates, which developed from basalt, exhibited pronounced sensitivity to land use, with forested areas surpassing wastelands and croplands surpassing cultivated land in terms of water stability. Additionally, the water stability of these lateritic soil aggregates showed an initial increase followed by a subsequent decrease as the antecedent moisture content increased. Notably, when compared to red soil, lateritic soil aggregates displayed a lower sensitivity to dissipative effects. The primary determinant influencing the stability of lateritic soil aggregates is the concentration of SOC. Variations in the stability of these aggregates across different land uses can be attributed to fluctuations in SOC levels.

Key words: Laterite soil; Soil structure; Antecedent moisture content; Aggregate water stability

团聚体是土壤结构的基本单元，是土壤中能量物质转化代谢的重要场所^[1-2]。团聚体稳定性对土壤水分、孔隙、肥力，生物活性及根系渗透等农业生产要素有着重要影响^[3-5]。此外，土壤团聚体还可通过稳定土壤结构，提高土壤抗蚀性^[6]，减少水土流失^[7]。土壤团聚体含量被视作判断土壤质量的重要指标之一^[1, 8-9]。

土壤前期含水率影响团聚体稳定性，并在农业生产及土壤侵蚀中起到了重要作用^[10-11]。研究表明，降雨条件下土壤前期含水率与土壤抗剪强度密切相

关^[12]；但也有研究认为含水率高会降低团聚体抗张强度和土壤黏聚力^[13]；马仁明等^[14]研究发现，前期含水率影响不同母质发育的红壤团聚体破碎机制，粒径分布及表土结构；Truman 等^[15]测定了不同类型土壤 3 个粒径团聚体在 3 种前期含水率下的团聚体水稳性，结果表明预湿润状态下的团聚体水稳性均高于风干状态下的团聚体水稳性，但预湿润状态下的团聚体并未都表现出含水量越高其稳定性越大^[14]。上述结果表明前期含水率与团聚体稳定性的关系受测定样品及方法的影响。

海南岛是我国为数不多的热带地区, 水热资源充沛, 同时也是水土流失的敏感地区^[16-17]。随着人口和经济的快速增长, 海南岛土地利用类型受到人为活动的强烈干扰, 自然林地面积急速减少, 取而代之的是橡胶林地和耕地的快速增长^[18]。这也导致了海南岛土壤的逐步退化与土壤侵蚀敏感性的日益提高。本文选取了海南省玄武岩发育砖红壤 3 种典型利用方式土壤并设置 5 个前期含水率梯度, 探究土地利用方式及前期含水率影响下砖红壤团聚体结构及稳定性差异, 以期为我国热带砖红壤地区土壤合理高效利用及科学灌溉提供依据。

1 材料与方法

1.1 样点基本信息

研究区位于海南省海口市美兰区三江镇(19°52'N, 110°34'E), 气候属热带季风气候, 年均降雨量 1 656 mm, 年均气温 24.5℃, 地形为玄武岩风化物形成的台地, 土壤母质为玄武岩风化物, 属于黏质高岭石高热性普通暗红湿润铁铝土^[19]。采样过程中尽可能选择剖面结构完整、地形相似的样地进行采样。本

试验选取了耕地、荒地和林地三种海南地区砖红壤最典型土地利用方式进行采样。耕地选择耕作多年的香蕉地, 林地选择未受人为扰动的自然林, 荒地选择长期抛荒的草地。其中表层土壤采样深度为 0~10 cm, 表下层土壤仅采集林地 30~40 cm 土层样品。样点基本信息详见表 1。

1.2 样品分析

土壤理化性质采用常规方法测定^[20]: pH 采用 1:2.5 土水比混合浸提, 电极法测定; 土粒密度采用比重瓶法测定; 土壤机械组成采用超声波分散吸管法测定, 质地划分根据美国农业部制 (USDA); 有机碳采用重铬酸钾外加热法测定; 土壤容重及孔隙采用环刀法测定 (100 cm³)^[21]; 阳离子交换量 (CEC) 采用乙酸铵交换法, 交换性盐基离子分别采用原子吸收光谱 (Ca²⁺、Mg²⁺) 和火焰光度计 (K⁺、Na⁺) 测定; 土壤游离态铁铝锰氧化物 (Fe_d、Al_d、Mn_d) 采用 DCB 法浸提, 非晶形铁铝锰氧化物 (Fe_o、Al_o、Mn_o) 采用草酸铵缓冲液浸提, ICP (VISTA-MPX, Varian, America) 测定; 黏土矿物类型和相对含量采用 X 射线衍射仪 (XRD) 测定。

表 1 样点基本信息

Table 1 Sampling sites information

编号 Code	土壤类型 Soil type	母质类型 Parent materials	纬度 Latitude /°	经度 Longitude /°	海拔 Altitude/m	土地利用方式 Land use
LA 林地表层 ^①	砖红壤	玄武岩	19°52'40.25"	110°33'54.14"	30	林地
LB 林地表下层 ^②	砖红壤	玄武岩	19°52'40.25"	110°33'54.14"	30	林地
HA 荒地表层 ^③	砖红壤	玄武岩	19°52'26.16"	110°33'56.35"	21	荒地
GA 耕地表层 ^④	砖红壤	玄武岩	19°52'44.26"	110°35'07.98"	13	耕地

① The surface layer of forest land, ② The subsoil layer of forest land, ③ The surface layer of wasteland, ④ The surface layer of cultivated land

1.3 团聚体前期含水率的控制

团聚体前期含水率的控制参考马仁明等^[14]。将 3~5 mm 团聚体置于烘箱内低温烘干以确定相同的含水量, 称取 50 g 3~5 mm 团聚体平置于上层垫滤纸的沙盘, 向沙盘内多次少量缓慢加入蒸馏水, 以对团聚体进行慢速湿润, 防止湿润速率过快而引起的团聚体消散作用破碎^[22]。湿润过程中保证团聚体水分均匀分布, 待团聚体充分湿润后称重计算含水率, 此时含水率即为团聚体充分湿润的最高含水率。

将团聚体转移至筛盘上均匀铺平, 于恒温 (20℃) 无风条件下静置, 通过静置不同时间获得不同质量含水率团聚体。文中设定 5 个前期含水率, 分别为风干含水率 (约 3%)、5%、10%、15% 和充分湿润 (约 20%)。

1.4 团聚体水稳性分析

团聚体水稳性采用湿筛法测定, 并采用 LB 法中快速湿润法 (Fast Wetting, FW) 测定不同前期含水率条件下 3~5 mm 团聚体破碎后粒径分布特

征。首先采用干筛法在无水的条件下用筛网直接测定不同粒径土壤团聚体的含量,文中将土壤团聚体分为>5 mm、3~5 mm、2~3 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm、0.1~0.25 mm 及<0.1 mm 共 8 个粒级。将干筛分取的干风样品按比例配成 50 g 土样供湿筛用。将筛孔粒径为 5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm 的套筛固定在振荡架上,放入水桶,桶内加水至筛组上缘部分。将土样轻轻放入套筛内,开动马达,使筛子上缘任何时候均不要浸没于水中。团粒分析仪振荡 30 min,振荡频率为 30 r·min⁻¹。振荡停止后,缓慢将套筛提出水面,将各级筛子上团聚体轻轻冲洗至已知重量的铝盒中烘干称重,将水桶内<0.25 mm 的团聚体依次过 0.1 mm 和 0.05 mm 孔径筛子,并将筛上保留的团聚体转移至铝盒中烘干称重,对含<0.05 mm 团聚体水样静置,待颗粒沉降后抽出上层清水,将沉降颗粒转移至铝盒中烘干称重。每个样品重复 4 次。

采用如下指标衡量团聚体稳定性:平均质量直径(MWD, Mean Weight Diameter)、几何平均直径(GMD, Geometric Means Diameter)、水稳性团聚体含量(WSA, the percentage of Water Stable Aggregate)。

$$\text{MWD} = \sum_1^{i+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \text{EXP} \left(\sum_1^{i+1} \ln \left[\left(\frac{r_{i-1} + r_i}{2} \right) \times m_i \right] \right) \quad (2)$$

$$\text{WSA} = \frac{\sum_l^i w_l}{w} \times 100 \quad (3)$$

MWD 越大,表示团聚体稳定性越好,反之,团聚体稳定性越差。WSA 越大,表示破碎后水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量越高,水稳性越强。

式中, r_i (mm) 表示筛组中第 i 个筛的孔径, $r_0=r_1$, $r_i=r_{i+1}$; m_i 表示第 i 个筛上的破碎团聚体质量; w_i 表示水力作用破碎后> 0.25 孔径筛团聚体质量, w 表示团聚体总质量。

1.5 数据处理

数据分析采用 Microsoft Excel 2010 进行前处理,采用 SPSS 16.0 对数据进行方差分析和回归分析等,采用 Cacono 5 进行冗余分析(RDA),采用

originpro2021 进行做图。

2 结果与讨论

2.1 土壤基本理化性质

土壤基本理化性质如表 2 所示。由方差分析可知,不同利用方式土壤间的大部分基本性质存在显著差异($P<0.05$),不同层次土壤间的部分理化性质也存在显著差异($P<0.05$)。供试土壤母质为玄武岩,且土壤长期处于温暖湿润气候条件,均为酸性土壤。不同利用方式下的土粒密度(G_s)未表现出明显差异,但受耕作及植物根系等的影响,土壤孔隙(NP, CP)存在一定差异,导致 HA 容重(BD)略高于其他土壤。表层土壤能受到外界碳源(枯枝落叶、鸟畜粪便等)的补给,表层土壤有机碳(SOC)一般高于下层;而 GA 受长期耕作影响,表层土壤有机碳存在一定的耗失,因此 HA 和 LA 有机碳高于 GA。土壤机械组成存在一定差异,但质地均为粉壤土(USDA 制)。土壤阳离子交换能力随土地利用方式有显著差异,GA 显著小于 HA 和 LA。受强烈风化作用的影响,土壤黏土矿物以高岭石为主,其次为 1.4 nm 过渡矿物,未发现蛭石与水云母。整体而言土壤各形态氧化物间差异不显著。

2.2 团聚体水稳性

图 1 为不同土地利用方式下土壤干筛、湿筛后粒径分布。由图 1a 可知,风干土壤大团聚体(>0.25 mm)占土壤总质量的 83.16%~90.03%。不同土地利用方式下,风干土壤各粒径团聚体含量均存在显著差异。由图 1b 可知,湿筛后,大团聚体含量均有不同程度的下降,且>5 mm 粒径团聚体被完全破碎,水稳性大团聚体占总团聚体质量的 73.49%~77.62%,而微团聚体(<0.25 mm)含量均显著增长,占总质量的 22.38%~26.51%,这是由湿筛过程中团聚体的消散作用破碎引起的,大团聚体经消散作用破碎后形成小粒径的团聚体甚至微团聚体。与邢瑶丽等^[9]及吴新亮^[23]的研究结果类似,水稳性团聚体组成总体呈现“单峰”或“双峰”分布,峰值主要出现在 2~1 mm 和 0.5~0.25 mm 处。邢瑶丽等^[9]研究认为,2~1 mm 峰值是由于土壤大团聚的存在,而 0.5~0.25 mm 峰值是由于植物根系及土壤微生物活动影响土壤团聚作用,根系分泌的黏合物因较强的吸附能力促进了团聚体的形成。

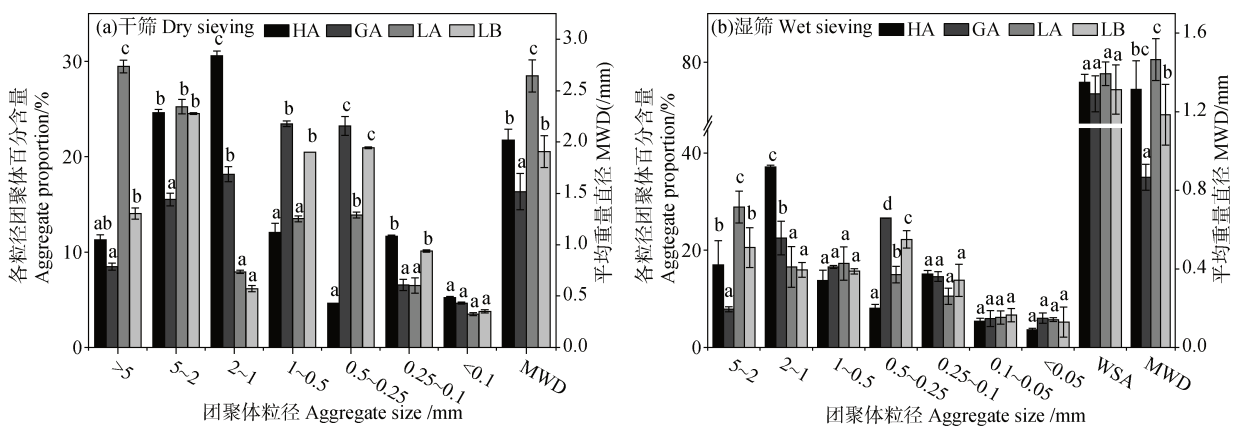
表 2 供试土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of tested soil

编号 Code	pH	容重 BD / (g·cm ⁻³)	土粒密度 G _s / (g·cm ⁻³)	有机碳 SOC / (g·kg ⁻¹)	砂粒	粉粒	黏粒	毛管孔隙 CP / (cm ³ ·cm ⁻³)	非毛管孔隙 NP / (cm ³ ·cm ⁻³)	质地 Texture
					Sand / (g·kg ⁻¹)	Silt / (g·kg ⁻¹)	Clay / (g·kg ⁻¹)			
HA	4.94b	1.23b	2.84a	21.33c	180b	160a	660a	0.48ab	0.09b	黏土
GA	5.63c	0.99a	2.80a	16.60b	70a	170a	760b	0.55b	0.11b	黏土
LA	4.39a	1.06a	2.82a	21.80c	40a	240b	720b	0.41a	0.13b	黏土
LB	4.23a	1.11ab	2.87a	10.50a	20a	250b	730b	0.56b	0.02a	黏土

编号 Code	阳离子交换量与交换性盐基阳离子 Cation exchange capacity and exchangeable base cations / (cmol·kg ⁻¹)					黏土矿物 Clay minerals / (g·g ⁻¹)				倍半氧化物 Sesquioxides / (mg·kg ⁻¹)					
	CEC	exCa	exMg	exNa	exK	Ver	1.4 nm	Hym	Kao	Fe _d	Al _d	Mn _d	Fe _o	Al _o	Mn _o
HA	22.51c	2.02b	0.47a	0.20a	0.10a	0.00	0.05	0.00	0.61	145.09b	28.62a	2.06b	7.20b	4.52b	2.02c
GA	17.64a	3.51c	1.00b	0.27a	0.58b	0.00	0.06	0.00	0.70	141.97b	27.84a	1.17a	3.72a	3.84a	0.65a
LA	19.56b	2.20b	1.24b	0.19a	0.13a	0.00	0.05	0.00	0.67	114.06a	28.56a	1.13a	3.57a	3.59a	1.02b
LB	17.77a	1.71a	0.55a	0.18a	0.07a	0.00	0.06	0.00	0.67	121.16a	30.39b	1.27a	3.54a	3.47a	1.02b

注: HA、GA、LA、LB 分别表示荒地表层、耕地表层、林地表层、林地表层下土壤; 数字后小写字母代表不同土壤间差异 ($P<0.05$); CEC, exCa, exMg, eNa, exK 分别为阳离子交换总量和交换性盐基离子钙、镁、钠、钾; Ver, 1.4 nm, Hym, Kao 分别表示蛭石、1.4 nm 过渡矿物、水云母、高岭石; Fe_d, Al_d, Mn_d, Fe_o, Al_o, Mn_o 分别表示游离态铁、铝、锰氧化物和非晶质铁、铝、锰氧化物。Note: HA, GA, LA, and LB mean the surface layer of wasteland, the surface layer of cultivated land, the surface layer of forest land, and the subsoil layer of forest land respectively; BD, Gs, SOC, mean bulk density, soil density, and soil organic carbon; Sand, Silt, Clay mean soil Sand, Silt and Clay fraction; CP, NP mean capillary pores and non-capillary pores; CEC, exCa, exMg, eNa, and exK mean cation exchange capacity and exchangeable base cations calcium, magnesium, sodium, potassium; ver, 1.4 nm, Hym, Kao represent vermiculite, 1.4 nm transition mineral, hydromica, kaolinite, respectively. Fed, Ald, Mnd, Feo, Alo, and Mno mean free iron, aluminum, manganese oxides, and amorphous iron, aluminum, and manganese oxides, respectively. The lowercase letters after the numbers represented the difference between different soils ($P<0.05$).



注: HA、GA、LA、LB 分别表示荒地表层、耕地表层、林地表层、林地表层下土壤; 小写字母表示不同利用方式土样间差异, $P<0.05$ 。Note: HA, GA, LA, and LB mean the surface layer of wasteland, the surface layer of cultivated land, the surface layer of forest land, and the subsoil layer of forest land respectively; Different small letters indicate the difference of significance at $P<0.05$ among soils with different land use.

图 1 不同利用方式土壤干筛、湿筛后土壤团聚体分布

Fig. 1 Size distribution of soil aggregates of different land use soils after dry sieve, wet sieve

不同利用方式土壤干筛团聚体 MWD 为 1.51~2.64 mm, 其中 LA 最高为 2.64 mm, GA 最低为 1.51 mm; 湿筛团聚体 MWD 显著下降 (0.86~1.56 mm), 其中 LA 最高为 1.56 mm, GA 最低为 0.86 mm, 团聚体经过湿筛后, 土壤的孔隙结构被破坏, 微团聚体增多, 土壤结构稳定性下降。LA 和 HA 因地表有机质来源丰富, 土壤有机质含量高, 有利于大团聚体的稳定。下层土壤很少有外界碳源补充, 因此 LB 土壤的有机碳含量相对较低 (表 2), 其土壤大团聚体含量也相对较低 (图 1)。GA 土壤受长期耕作影响, 耕地土壤结构被破坏, 大团聚体及水稳性团聚体含量均显著小于其他土壤, 团聚体稳定性最差, 这与胡尧等^[7]及刘恩科等^[24]的研究结果相同。

水稳性团聚体的数量和组成对土壤结构具有重要作用, 影响土壤的透气性、抗蚀性等, 是土壤肥力的重要指标^[14, 25], 也是土壤抗侵蚀能力的重要指标。而土壤侵蚀与粒径 3~5 mm 的团聚体联系最为紧密^[26], 因此实验中采取 LB 法中快速湿润的方法模拟测定 3~5 mm 团聚体灌溉或降雨后水稳性团聚体分布状况 (图 2)。供试土样大团聚体 (>2 mm) 含量均表现为 LB 显著低于其他土样, LB 土壤团聚体在前期含水率为 5% 时, 快速湿润破碎后大团聚体含量低至 19.58%, 含水率为 20% 时达 29.47%。LA 及 HA 土样大团聚体含量要显著高于 GA 和 LB。总体而言, 表层土壤团聚体水稳性整体表现为林地>荒地>耕地, 表层土壤明显高于表下层土壤。林地表层土壤团聚体水稳性对前期含水率变化的响应相对较弱, 随着前期含水率的减小, 大团聚体 (>2 mm) 含量有不同程度的变化, 但未达到显著性差异 ($P>0.05$)。林地表层土壤水稳性大团聚体含量显著低于其他供试土样, 这与其较低的土壤有机质含量有关^[27-28]。除林地表层外, 其他土壤团聚体快速湿润过程中水稳性大团聚体含量随前期含水率的变化表现为随含水率的降低, 水稳性大团聚体含量整体呈降低趋势。可见, 在本研究条件范围内, 提高团聚体前期含水率可增加大粒径水稳性团聚体含量。

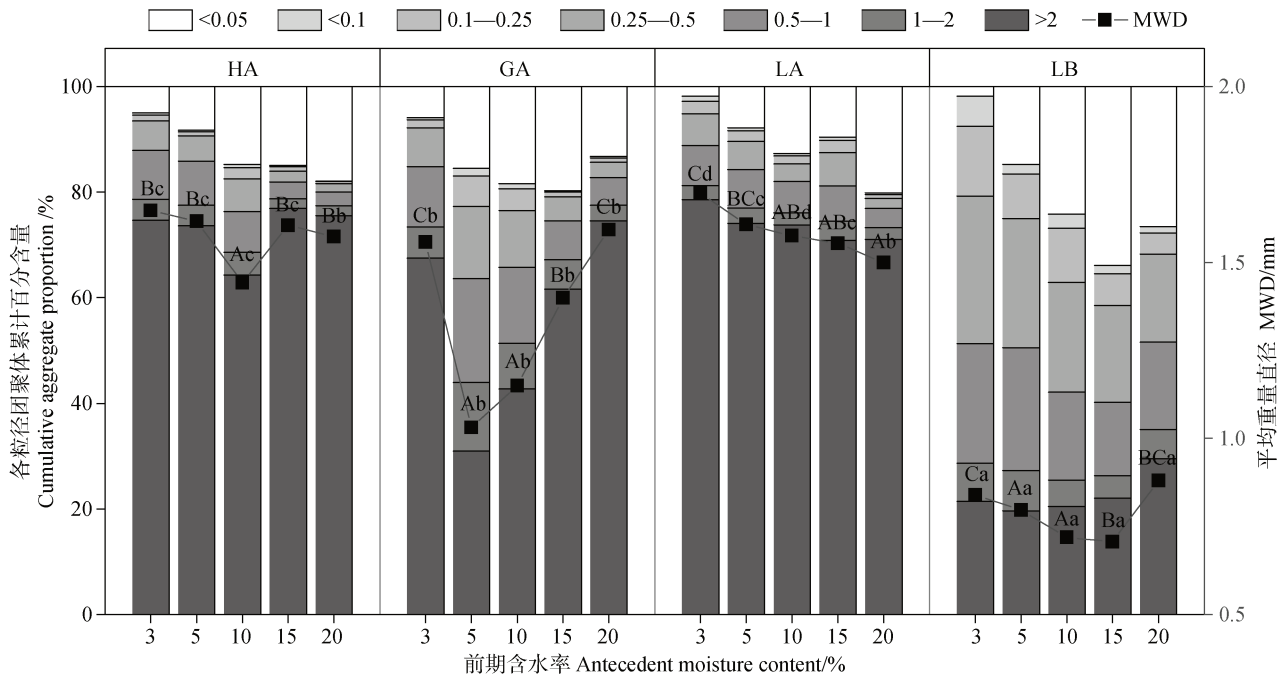
由图 2 和图 3 可知, 林地表层土壤各团聚体稳定性指标 (MWD、WSA、GMD) 均表现为随含水率降低而增加的趋势, 而其他利用方式土壤团聚体则表现为先降低后增加, 且风干条件下, 供试土样

团聚体水稳性普遍较高。这与红壤中不同, 红壤团聚体破碎机制以消散作用为主^[29], 因此, 红壤团聚体随前期含水率升高, 团聚体破碎程度逐渐降低^[14]。而砖红壤团聚体快速湿润过程中, 团聚体破碎程度随前期含水率降低整体呈先增大后减小的趋势。这可能与砖红壤较红壤而言具有更高含量的 SOC 和 exNa 有关 (红壤有机碳及交换性钠离子含量数据参考马仁明等^[14]、余洁等^[30])。SOC 是土壤中最主要的胶结物质, 而钠离子因其水合半径较大, 可减弱胶粒间引力, 破坏团聚体结构, 团聚体的稳定由 SOC 与 exNa 共同作用, 且 SOC 的团聚作用较 exNa 的分散作用更强^[30]。这二者复杂的相互作用导致了砖红壤对消散作用的响应更弱。高前期含水率条件下, 大团聚 (>2 mm) 及微团聚体 (<0.25 mm) 含量均较高。相较而言, 土地利用方式是影响砖红壤团聚体稳定性的主要因素 ($F>56, P<0.01$) (表 3)。

2.3 团聚体水稳性影响因素

通过冗余分析, 研究了土壤性质和前期含水率对团聚体稳定性的相对贡献 (图 4)。在土壤性质中, 土壤有机碳对团聚体稳定性变异的解释率最高 ($R^2=80.6\%, P<0.01$) 并且与之呈正相关关系; 其次为非毛管孔隙度 ($R^2=66.0\%, P<0.01$), 而毛管孔隙则表现为显著负相关关系; 土壤氧化物中, 铝氧化物 (Al_d, Al_o) 对团聚体稳定性的影响显著高于其他氧化物, 这与 Barthès 等^[31]对热带土壤中的研究结果一致; 土壤交换性能中, 仅 CEC 表现出显著正相关 ($R^2=15.3\%~30.8\%, P<0.01$), 交换性盐离子均未表现出显著相关性 ($R^2=1.0\%~5.5\%, P>0.01$)。土粒密度、1.4 nm 过渡矿物和土壤黏粒含量表现出显著负相关 ($R^2=12.6\%~44.1\%, P<0.01$), 土壤粉粒和砂粒则表现出显著正相关 ($R^2=11.2\%~26.8\%, P<0.01$)。与土壤性质相比, 土壤前期含水率对团聚体稳定性的影响相对较小, 并表现出显著负相关 ($R^2=24.0\%, P<0.01$)。

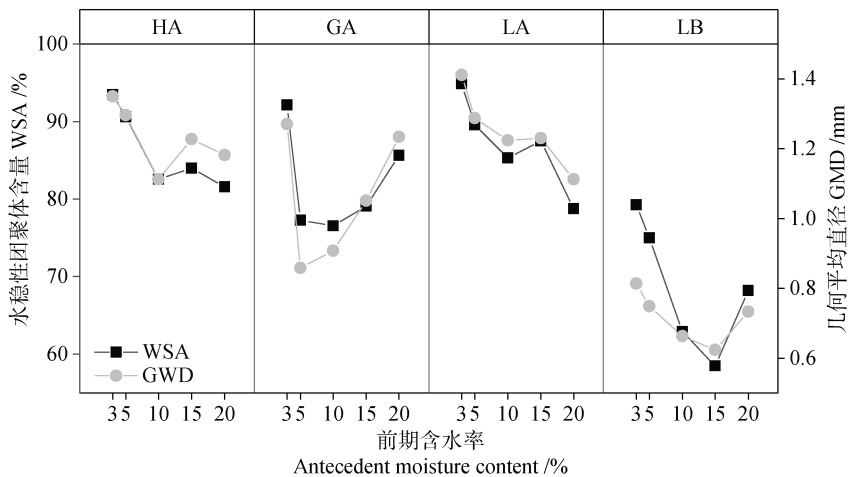
冗余分析筛选出 4 个性质对团聚体稳定性变异的解释率为 77.62%, 其中, SOC 对团聚体稳定性的影响较其他性质更显著 (图 5)。一方面, SOC 与其他离子形成有机无机复合体, 与土壤颗粒结合形成稳定的团聚体^[32]; 另一方面, SOC 通过疏水基团在团聚体周围形成疏水表面层, 减缓润湿速率, 从而提高团聚体的水稳性^[33]。供试土壤黏土矿物中, 高岭石占绝大部分, 而研究表明, 高岭石为非膨胀



注：HA、GA、LA、LB 分别表示荒地表层、耕地表层、林地表层、林地表层下层土壤；大写字母表示相同土样在不同含水率条件下平均质量直径差异，小写字母表示相同含水率条件下不同利用方式土样间平均质量直径差异， $P<0.05$ ；图中含水率 0% 为风干含水率。Note: HA, GA, LA, and LB mean the surface layer of wasteland, the surface layer of cultivated land, the surface layer of forest land, and the subsoil layer of forest land respectively; different capital letters indicate the difference of significance at $P<0.05$ in mean weight diameter for the same soil at different antecedent moisture content and different small letters indicate the difference of significance at $P<0.05$ in mean weight diameter among soils at the same antecedent moisture content; Antecedent moisture content of 0% in the graph refers to air-drying moisture content.

图 2 LB 法团聚体快速湿润破碎后粒径分布及团聚体平均重量直径

Fig. 2 Mean weight diameter of water-stable aggregate at different antecedent moisture content of different Land use Soils



注：HA、GA、LA、LB 分别表示荒地表层、耕地表层、林地表层、林地表层下层土壤；图中前期含水率 0% 指风干含水率。Note: HA, GA, LA, and LB mean the surface layer of wasteland, the surface layer of cultivated land, the surface layer of forest land, and the subsoil layer of forest land respectively; Antecedent moisture content of 0% in the graph refers to air-drying moisture content.

Fig. 3 团聚体稳定性指标分布

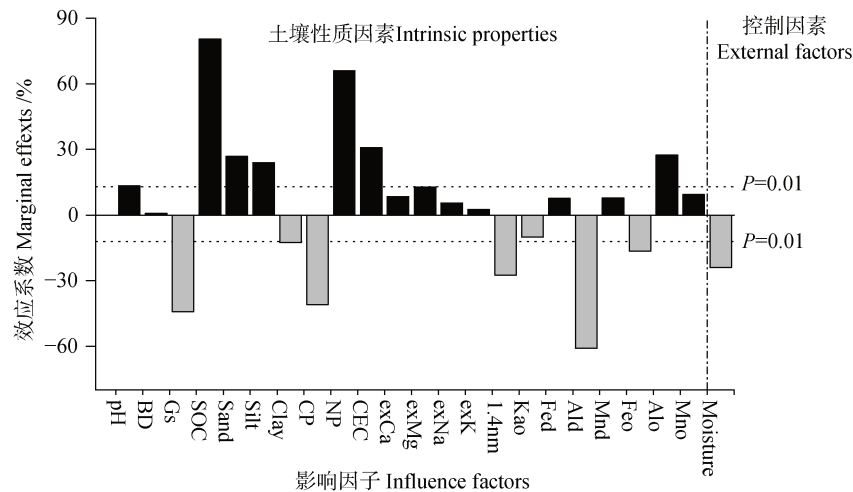
Fig. 3 Distribution of aggregate stability indexes

表 3 土地利用方式及前期含水率对团聚体稳定性影响方差分析

Table 3 ANOVA results of the effects of land use (LU), Antecedent moisture content (M), and their interactions on aggregate stability

因素 Source	df	MWD _{wet}		WSA _{wet}		MWD _{FW}		GMD _{FW}		WSA _{FW}	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
土地利用 Land use	3	14.11	<0.01	0.76	0.55	441.86	<0.001	132.33	<0.001	56.12	<0.001
前期含水率 Antecedent moisture	4					22.5	<0.001	11.31	<0.001	12.52	<0.001
交互效应 LU × M	10					15.15	<0.001	6.77	<0.001	4.01	<0.01

注：MWD_{wet}, WSA_{wet} 分别表示湿筛后团聚体平均重量直径和水稳性>0.25 mm 团聚体含量；MWD_{FW}, GMD_{FW}, WSA_{FW} 分别表示 LB 法快速湿润后团聚体平均重量直径，几何平均直径和>0.25 mm 水稳性团聚体含量。Note: MWD_{wet}, WSA_{wet}, mean weight diameter of aggregates and >0.25 mm aggregates content under wet sieving, respectively; MWD_{FW}, GMD_{FW}, WSA_{FW}, mean weight diameter of aggregates, geometric mean diameter, and >0.25 mm aggregates content under fast wetting by LB method, respectively.



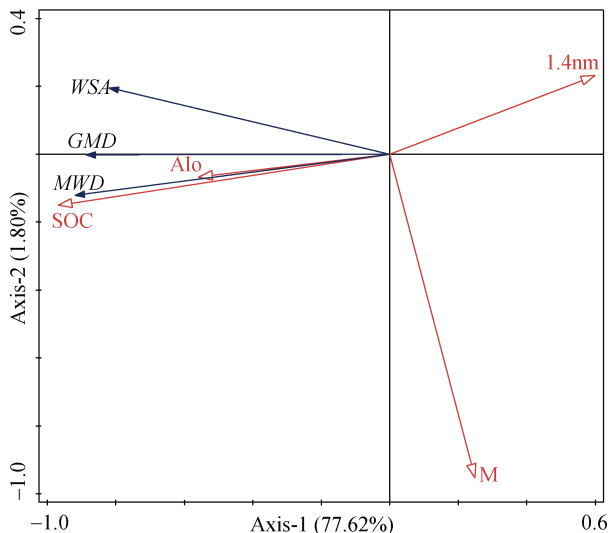
注：BD, 容重；Gs, 土粒密度；1.4 nm, 1.4 nm 过渡矿物；SOC, 土壤有机碳；Sand, Silt, Clay, 砂粒、粉粒和黏粒；CP 和 NP, 毛管和非毛管孔隙度；CEC, 阳离子交换量；exCa、exMg、exNa 和 exK, 交换性钙、镁、钠和钾离子；Fed、Ald 和 Mnd, 游离态铁、铝、锰氧化物；Feo、Alo 和 Mno, 非晶形态铁、铝、锰氧化物；Moisture, 前期含水率。Note: BD, bulk density; GS, Soil grain density; 1.4 nm, 1.4 nm intergrade mineral; SOC, soil organic carbon; CP and NP, capillary and non-capillary porosity; CEC, cation exchange capacity; Fe_d, Al_d and Mn_d, free iron, aluminum, and manganese oxides; exCa, exMg, exNa and exK exchangeable calcium, magnesium, sodium, and potassium ions; Fe_d, Al_d and Mn_d, Free iron, aluminum, manganese oxides; Feo, Alo, and Mno, amorphous iron, aluminum, and manganese oxides; Moisture, soil antecedent moisture content.

图 4 冗余分析中土壤性质与前期含水率对团聚体稳定性的贡献率

Fig. 4 The relative contribution of soil properties and antecedent moisture to aggregate stability by redundancy analysis

性黏土矿物，具有较小的比表面积，其阳离子交换量也小，导致其团聚作用相对较弱；1.4 nm 过渡矿物由 2:1 型黏土矿物发育而来，2:1 型膨胀性黏土矿物较非膨胀性黏土矿物而言，其团聚作用更强^[11]。但本文中，1.4 nm 过渡矿物与团聚体稳定性呈负相关关系，这与其含量及发育 2:1 型

黏土矿物的类型有关^[34]。Regelink 等^[35]研究认为，尽管非晶质氧化物含量较低，但其对于团聚体稳定效果更好，这与本文研究结果类似。不同利用方式下的土壤团聚体稳定性对土壤前期含水率的响应不同，这可能受到有机质的类型与数量的影响较大。



注: SOC, Alo, 1.4 nm, M 分别为土壤有机碳, 非晶形氧化铝, 1.4 nm 过渡矿物和团聚体前期含水率; MWD, GMD, WSA 分别为快速湿润后团聚体平均重量直径, 几何平均直径和 >0.25 mm 团聚体百分含量。Note: SOC, Alo, 1.4 nm, and M mean soil organic carbon, free aluminum oxides, 1.4 nm intergrade mineral, and antecedent moisture; MWD, GMD, WSA, mean weight diameter of aggregates, geometric mean diameter, and >0.25 mm aggregates content under fast wetting by LB method, respectively.

图5 土壤性质与团聚体水稳性指标冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of soil properties and aggregate water stability indexes

3 结论

玄武岩母质发育的砖红壤中, 团聚体稳定性表现为林地表层>荒地表层>耕地表层>林地表下层, 表明土地利用方式及土壤层次会显著影响玄武岩母质砖红壤团聚体的稳定性。整体而言, 团聚体水稳性随着前期含水量的增加呈现先增加后降低趋势, 与红壤不同, 砖红壤团聚体对于消散作用反应不敏感。土壤有机碳是影响团聚体稳定性的最主要因素, 不同土地利用方式下, 土壤团聚体稳定性的变化主要是土壤有机碳的变化导致的。本文结果可为该区域的土地合理利用及科学灌溉提供一定的参考。

参考文献 (References)

[1] Ye L P, Tan W F, Fang L C, et al. Spatial analysis of soil aggregate stability in a small catchment of the Loess Plateau, China: I. Spatial variability[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 179: 71—81.

[2] Li Y J, Zhang R, Wang Q, et al. Effects of slope aspect

and position on soil aggregates stability of shrub communities in Jiajin Mountains[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2022, 44 (3): 522—532. [李禹江, 张荣, 王琴, 等. 坡向和坡位对夹金山灌丛土壤团聚体稳定性的影响[J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2022, 44 (3): 522—532.]

- [3] Algayer B, Le Bissonnais Y, Darboux F. Short-term dynamics of soil aggregate stability in the field[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78 (4): 1168—1176.
- [4] Deng C, Teng X L, Peng X H, et al. Effects of simulated puddling intensity and pre-drying on shrinkage capacity of a paddy soil under long-term fertilization[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 140: 135—143.
- [5] O'Brien S L, Jastrow J D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 61: 1—13.
- [6] Yan F L, Shi Z H, Cai C F, et al. Effects of topsoil aggregate stability on soil erosion at hillslope on ultisols[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (4): 577—583. [闫峰陵, 史志华, 蔡崇法, 等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44 (4): 577—583.]
- [7] Hu Y, Li Y, Hou Y L. Effects of land use types on stability and organic carbon of soil aggregates in Minjiang River valley[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25 (4): 22—29. [胡尧, 李懿, 侯雨乐. 不同土地利用方式对岷江流域土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25 (4): 22—29.]
- [8] Wu X L, Wei Y J, Wang J G, et al. Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient[J]. Catena, 2017, 156: 205—215.
- [9] Xing Y L, Zhao Z Z, Li Y, et al. Organic carbon change and distribution of soil aggregates under different land use—Taking example of Dingan County, Hainan Province[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2018, 45 (10): 74—81. [邢瑶丽, 赵志忠, 李燕, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体有机碳分布特征——以海南省定安县为例[J]. 广东农业科学, 2018, 45 (10): 74—81.]
- [10] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124 (1/2): 3—22.
- [11] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79 (1): 7—31.
- [12] Lu J, Zheng F L, Li G F, et al. The effects of raindrop

- impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 161: 79—85.
- [13] Wang Y L, Wang Y, Li L Y, et al. Composition characteristic of soil aggregates and their stability in red soils as affected by the soil parent materials and land use types[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44 (4): 776—785. [王艳玲, 王燕, 李凌宇, 等. 成土母质与利用方式双重影响下红壤团聚体的组成特征与稳定性研究[J]. *土壤通报*, 2013, 44 (4): 776—785.]
- [14] Ma R M, Cai C F, Li Z X, et al. Effect of antecedent soil moisture on aggregate stability and splash erosion of krasnozems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (3): 95—103. [马仁明, 蔡崇法, 李朝霞, 等. 前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30 (3): 95—103.]
- [15] Truman C C, Bradford J M, Ferris J E. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54 (5): 1385—1392.
- [16] Zhao Z Z, Li Y, Zhao Z Y, et al. Effects of land use patterns on soil organic carbon and easily oxidized organic carbon in the eastern part of Hainan Island[J]. *Tropical Geography*, 2019, 39 (1): 144—152. [赵志忠, 李燕, 赵泽阳, 等. 海南岛东部地区土地利用方式对土壤有机碳与易氧化有机碳的影响[J]. *热带地理*, 2019, 39 (1): 144—152.]
- [17] Li X. Analysis on the relationship between soil shear strength and influencing factors in different land use types[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. [李想. 不同土地利用类型土壤抗剪强度与影响因素关系分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.]
- [18] Dong H, Cha Z Z, Zhang X, et al. Effects of successive multi-generation planting of rubber trees on soil aggregates and soil organic carbon in rubber plantations[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42 (12): 3664—3670. [董豪, 茶正早, 张翔, 等. 连续多代次种植橡胶树对土壤团聚体及土壤有机碳的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42 (12): 3664—3670.]
- [19] Qi Z P, Wang D F, Wei Z Y. Soil Series of China (Volume of Hainan) [M]. Beijing: Science Press, 2018: 146—156. [漆智平, 王登峰, 魏志远. 中国土系志 (海南卷) [M]. 北京: 科学出版社, 2018: 146—156.]
- [20] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [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.]
- [21] Department of Soil Physics, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences.. Determination of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1978. [中国科学院南京土壤研究所物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.]
- [22] Han X S, Ma F, Guo Y Z, et al. Effects of surface-layer soil water-stable aggregates under land use patterns[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32 (2): 114—120. [韩新生, 马璠, 郭永忠, 等. 土地利用方式对表层土壤水稳性团聚体的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32 (2): 114—120.]
- [23] Wu X L. Stability mechanism and slope erosion response of several typical zonal soil aggregates[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. [吴新亮. 几种典型地带性土壤团聚体稳定机制及坡面侵蚀响应[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.]
- [24] Liu E K, Zhao B Q, Mei X R, et al. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (4): 1035—1041. [刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30 (4): 1035—1041.]
- [25] Chen A Q, Zhang D, Xiong D H, et al. Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti-scourability in Yuanmou dry-hot valley[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (5): 108—113. [陈安强, 张丹, 熊东红, 等. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28 (5): 108—113.]
- [26] Wu L L, Wang Y J, Wang B, et al. Influence of dry-wet cycles on aggregate stability of yellow soil in southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (3): 317—321, 329. [邬铃莉, 王玉杰, 王彬, 等. 干湿交替作用对西南地区黄壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31 (3): 317—321, 329.]
- [27] Cheng L, Qin J H, Zhang L C, et al. Application of le bissonnais method to study soil aggregate stability in red soils under different types of vegetation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (4): 855—866. [程凉, 秦嘉惠, 张利超, 等. 应用 Le Bissonnais 法研究不同植被类型下红壤团聚体稳定性[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (4): 855—866.]
- [28] Wang D. Relationship between organic matter composition and structural stability of several zonal soils[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. [王迪. 几种地带性土壤有机质组成与结构稳定性的关系[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.]
- [29] Wang J G, Li Z X, Cai C F, et al. Research of red soil

- aggregate abrasion degree of different layers in overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (19): 78—84. [王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 坡面水流中不同层次红壤团聚体剥蚀程度研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 78—84.]
- [30] Yu J, Miao S J, Qiao Y F. The stabilization mechanism of different types of soil aggregates[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38 (14): 89—95. [余洁, 苗淑杰, 乔云发. 不同类型土壤团聚体稳定机制的研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38 (14): 89—95.]
- [31] Barthès B G, Kouakoua E T, Larré-Larrouy M C, et al. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils[J]. Geoderma, 2008, 143 (1/2): 14-25.
- [32] Chenu C, Le Bissonnais Y, Arrouays D. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64 (4): 1479—1486.
- [33] Goebel M O, Woche S K, Bachmann J. Quantitative analysis of liquid penetration kinetics and slaking of aggregates as related to solid-liquid interfacial properties[J]. Journal of Hydrology, 2012, 442/443: 63—74.
- [34] He J Z, Li X Y, Xu F L, et al. 1.4 nm transition mineral formed by montmorillonite in soil [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38 (22): 2096—2098. [贺纪正, 李学垣, 徐凤琳, 等. 土壤中蒙脱石形成的 1.4 nm 过渡矿物[J]. 科学通报, 1993, 38 (22): 2096—2098.]
- [35] Regelink I C, Stoof C R, Rousseva S, et al. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties[J]. Geoderma, 2015, 247/248: 24—37.

(责任编辑: 檀满枝)