

# 自然降雨条件下结皮层团聚体稳定性变化特征研究

胡波<sup>1</sup> 王玉杰<sup>1,2</sup> 王彬<sup>1,2</sup> 王云琦<sup>1,2</sup> 刘春霞<sup>1</sup> 王晨泮<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 通过野外定位监测和室内分析相结合的方法,以三峡库区典型黄壤为研究对象,结合 Le Bissonnais(LB)法中快速湿润(FW)、慢速湿润(SW)和预湿润振荡(WS)3种处理方法定量分析结皮层与表土层团聚体稳定性的差异。研究表明:在降雨作用下土壤团聚体稳定性存在较大的动态变化,结皮层团聚体稳定性在自然降雨作用下呈现波动式上升的趋势。FW、SW、WS处理下,结皮层土壤团聚体平均质量直径变化范围分别为0.73~2.13 mm、1.70~2.90 mm和2.27~3.16 mm,下层土壤在FW处理下团聚体稳定性呈波动式上升趋势,平均质量直径变化范围为0.70~1.27 mm,在SW和WS处理下呈略微下降趋势,其变化范围分别为1.69~2.83 mm和2.53~2.95 mm。在降雨影响下,土壤结皮与下层土壤团聚体稳定性存在较大的差异,随着降雨场次的增加,结皮层团聚体稳定性逐渐高于下层土壤,且两者差值逐渐增大。在土壤有机质、阳离子交换量、pH值等理化性质基本不变的情况下,土壤团聚体稳定性在自然降雨影响下也存在较大的动态变化。

**关键词:** 团聚体稳定性; 动态变化; 土壤结皮; 影响因素; 三峡库区

**中图分类号:** S152.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0225-07

## Dynamics of Stability of Soil Crust under Natural Rainfall Event

HU Bo<sup>1</sup> WANG Yujie<sup>1,2</sup> WANG Bin<sup>1,2</sup> WANG Yunqi<sup>1,2</sup> LIU Chunxia<sup>1</sup> WANG Chenfeng<sup>1</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Soil aggregate stability is a key parameter influencing soil fertility, environmental problems, and soil sensitivity to erosion. It is well established that aggregate stability changes over time. However, there is a lack of information considering the dynamics of aggregate at a short-term step in the field. In addition, aggregate stability is usually determined by using soil samples collected from the plough layer, while soil erosion occurs in the surface soil. The difference between the soil crust and plough layer is usually ignored. The objectives were to investigate the variations in aggregate stability under rainfall event, identify the factors controlling these variations of stability, and compare the difference of aggregate stability between soil crust and subsurface soil. A field experiment was conducted on a cropland with typical yellow soil in Three Gorges Reservoir area. Sampling was performed after rainfall events. Aggregate stability was measured for both crust soil and subsurface soil by the Le Bissonnais (LB) method. Rainfall amount, rainfall intensity, air temperature, soil temperature and soil water content at the time of sampling were measured as potential explanatory factors. The results showed that aggregate stability varied significantly ( $P < 0.05$ ) under rainfall event for both the soil crust and subsurface soil. During the experiment, the mean weight diameter (MWD) obtained under fast wetting, slow wetting, and pre-wetting shaking treatments was varied between 0.73 mm and 2.13 mm, 1.70 mm and 2.90 mm, and 2.27 mm and 3.16 mm, respectively, for the soil crust. While MWD of subsurface soil was varied between 0.70 mm and 1.27 mm, 1.69 mm and 2.83 mm, and 2.53 mm and 2.95 mm, respectively. Great differences between the aggregate stability of soil crust and subsurface soil were found. And the aggregate stability of soil crust was significantly higher than that of surface soil. For the soil crust, accumulative rainfall amount, rainfall intensity, air temperature, soil temperature and soil water content

收稿日期: 2017-02-27 修回日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401299)

作者简介: 胡波(1988—),男,博士生,主要从事土壤可蚀性研究,E-mail: hubo8518@163.com

通信作者: 王玉杰(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事流域治理和土壤侵蚀研究,E-mail: wyujie@bjfu.edu.cn

at the time of sampling greatly controlled the variations of aggregate stability in fast wetting and slow wetting treatments. The large differences in aggregate stability between soil crust and the plough layer implied large differences in soil erodibility. And the soil erodibility was varied greatly in the field over several rainfall events.

**Key words:** aggregate stability; dynamics; soil crust; influencing factors; Three Gorges Reservoir area

## 引言

土壤侵蚀不仅造成土地资源退化,更会引起土地生产力的下降,已成为威胁农业可持续发展和食品安全的全球性环境问题之一<sup>[1]</sup>。团聚体作为土壤的基本结构单元,对土壤侵蚀过程有重要影响,是土壤可蚀性的重要评价指标<sup>[2]</sup>,有的研究甚至将团聚体稳定性作为土壤可蚀性的替代指标<sup>[3]</sup>。团聚体稳定性并非定值,存在着较大的年际变化与年内变化<sup>[4]</sup>,通常土壤团聚体稳定性在秋、冬季较低,春、夏季升高<sup>[5]</sup>。对团聚体稳定性动态变化的研究已成为土壤学、生态学及相关交叉学科领域研究的热点问题<sup>[6]</sup>。朱冰冰等<sup>[7]</sup>研究发现在土地退化和恢复过程中,土壤团聚体稳定性存在明显的动态变化。谢锦升等<sup>[8]</sup>发现植被恢复过程中,团聚体稳定性显著提高。目前,关于团聚体稳定性动态变化的研究已取得一定成果,但是以往研究多集中在长期施肥、植被恢复等土壤理化性质改变所导致的长周期变化方面<sup>[9-11]</sup>。而关于自然降雨条件下团聚体稳定性在短期内动态变化的研究较少。

土壤侵蚀主要取决于降雨侵蚀力与土壤可蚀性之间的作用关系。土壤侵蚀发生在土壤表层,受表层土壤性质的影响强烈<sup>[12]</sup>。在降雨影响下,土壤表层极易出现结皮(物理结皮)现象<sup>[13]</sup>,土壤结皮一旦形成,其表层土壤性质会在短期内发生较大的变化<sup>[14]</sup>。对于农业用地,土壤翻耕后的松散表层在降雨作用下极易形成土壤结皮<sup>[15]</sup>,从而改变结皮层的土壤性质,进而造成结皮层与耕作层土壤可蚀性的较大差异。然而以往土壤可蚀性的相关研究中,所用土壤样品通常采自耕作层土壤<sup>[16]</sup>,忽略了土壤结皮对其产生的影响,这必然会导致研究结果与实际情况之间的较大误差。因此,相比于耕作层土壤,研究结皮层的土壤可蚀性更具有实际意义。目前有关土壤物理结皮的研究多集中在对其发育过程与机理以及土壤入渗能力的影响方面<sup>[17]</sup>,关于土壤结皮对土壤可蚀性影响方面的研究较少,且存在较大争议。吴发启等<sup>[18]</sup>研究发现,土壤结皮的存在可以在一定程度上提高土壤抗蚀性,减少产沙量。BRADFORD等<sup>[19]</sup>通过对20种土壤的细沟间侵蚀研究发现,土壤结皮有助于减少土壤侵蚀量。然而,也有研究表

明结皮的存在会使土壤侵蚀加剧<sup>[20]</sup>。这些研究主要建立在模拟降雨实验的基础上,土壤结皮在模拟降雨条件下快速形成,其研究结果只符合特定模拟降雨条件下的规律,具有一定的局限性。有关在自然降雨作用下结皮层团聚体稳定性动态变化的研究报道较少。

长江上游坡耕地是长江泥沙的主要策源地,占长江上游年侵蚀总量的60%<sup>[21]</sup>,其严峻的土壤侵蚀状况严重威胁着三峡水库的安全生态运行。本文以三峡库区(重庆段)侵蚀较为严重的黄壤为研究对象,通过野外监测和室内分析相结合的方法,定量分析自然降雨条件下土壤结皮与其下层土壤团聚体稳定性的短期动态变化特征、差异性及其影响因素,以期为该地区土壤可蚀性的有效评估提供参考,为土壤侵蚀的有效治理提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区(重庆段)缙云山国家级自然保护区内(106°17'~106°24'E,29°41'~29°52'N),海拔高度350~951.5 m,总面积约76 km<sup>2</sup>。该区气候温和,年均气温13.6℃,年降水量1 611.8 mm,年均日照时数1 293.9 h,具有典型的亚热带季风湿润性气候特征。缙云山地形平缓,土地利用类型多样;土壤类型以黄壤为主,其次为棕黄壤,零星分布有水稻土。

### 1.2 样地布设与样品采集

于2016年5月份在三峡库区重庆缙云山国家定位研究站内选择较为平整的黄壤撂荒地作为研究对象,设立5 m×20 m的临时实验小区,对0~20 cm土层进行翻耕整平,清除杂草、石砾、大型植被根系等杂物。取0~10 cm土壤样品进行团聚体稳定性测定作为对照组(CK),同时测定土壤基本理化性质(表1)。为防止杂草、苔藓等小型地被物生长对团聚体稳定性产生影响,对样地喷洒7 g/L的草甘膦。将实验小区用尼龙绳划分1 m×1 m子区域作为取样小区,各取样小区只取样一次。样品采集在次降雨量大于5 mm的雨后12 h内进行。

采用随机取样的方法,按照结皮层和下层2个层次采集土壤样品。取样时,选择土壤结皮较为明

显的区域,用美工刀片采集地表较薄的结皮层样品,之后用刀片小心剥除较为松散土粒,采集过程中确保土壤结皮结构不被破坏。经实际测量得知,实验过程中土壤结皮厚度为3~5 mm,为便于叙述,本研

究中将结皮层定义为地表0~5 mm土层。每次取样随机采集3个取样小区的样品作为重复。将样品放入铝盒带回实验室以备测定。本研究共进行18次取样(包括CK)。

表1 实验土壤基本理化性质

Tab.1 Basic soil properties of experiment plots

参数	pH值	土壤机械组成(质量分数)/%			有机质质量比/ (g·kg <sup>-1</sup> )	阳离子交换量/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )
		砂粒(>50 μm)	粉粒(2~50 μm)	粘粒(0~2 μm)		
数值	4.78	13.7	54.2	32.1	20.78	10.58

### 1.3 测定指标

在样地布设 Decagon 微型气象监测系统和与之配套的 ECH<sub>2</sub>O 土壤温湿度传感器,在实验期间监测样地的次降雨量(*R*)、雨强(*I*)。每次取样后分别测定结皮层以及下层土壤的团聚体稳定性、pH值、阳离子交换量(CEC)、有机质含量(SOM)以及取样时土壤含水率(*W*)。SOM采用重铬酸钾外加加热法测定,CEC采用乙酸铵交换法测定<sup>[22]</sup>,土壤pH值采用pH计测定土壤的KCl浸提溶液(土与KCl溶液的质量比为1:2.5)(LY/T 1239—1999《森林土壤pH值的测定》)。土壤含水率采用干燥称量法测定。团聚体稳定性采用LB法进行测定,具体实验方法参照文献[23],该方法在系统分析团聚体稳定性物理学机制的基础上,采用3种处理方式:快速湿润处理(FW)、慢速湿润处理(SW)和预湿润振荡(WS),测定团聚体在不同破坏力下的稳定性。

团聚体稳定性采用平均质量直径(*M*)表示,即

$$M = \sum_{i=1}^n X_i M_i \quad (1)$$

式中  $X_i$ ——筛分该粒级前后2个筛子孔径的均值,mm

$n$ ——土壤筛数量,取6

$M_i$ ——第*i*个粒径团聚体质量分数,%

FW、SW、WS处理下团聚体稳定性值分别表示为 $M_{FW}$ 、 $M_{SW}$ 和 $M_{WS}$ 。根据所测*M*值和团聚体稳定性分级标准<sup>[23]</sup>,将团聚体划分为5个级别(表2)。

表2 团聚体稳定性分级

Tab.2 Aggregate stability classification

级别	平均质量直径/mm	团聚体稳定性级别
I	0~0.4	非常不稳定
II	0.4~0.8	不稳定
III	0.8~1.3	中度稳定
IV	1.3~2.0	稳定
V	>2.0	非常稳定

### 1.4 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据整理和作图,采用

SPSS 20.0 对数据进行统计分析。采用 *t* 检验对结皮层与其下层团聚体稳定性的差异进行显著性分析。采用 Pearson 相关分析法对团聚体稳定性与土壤性质的相关性进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 团聚体稳定性动态变化

对照组(CK)土壤团聚体平均质量直径在WS处理下最高为2.92 mm,其次在SW处理下为2.78 mm,根据团聚体稳定性分级两者均属于非常稳定团聚体;而在FW处理下团聚体稳定性最低为1.15 mm,属于中度稳定团聚体。由此可知,FW处理是该土壤团聚体的主要破碎机制。

由图1可知,结皮层土壤团聚体平均质量直径在自然降雨作用下总体呈现出相似的波动式上升变化趋势,但是在不同处理下,其变化幅度有所差异。在前2场降雨作用下, $M_{FW}$ 、 $M_{SW}$ 、 $M_{WS}$ 分别下降了37%、19%、11%。在此期间,0~5 mm土层开始出现结皮现象,但是土壤结皮并不明显。团聚体平均质量直径下降可能是由于在降雨作用下,结皮层团聚体平均质量直径遭到破坏,但并未完全破碎<sup>[24]</sup>,从而导致团聚体平均质量直径的降低。第3次降雨后,表层土壤出现较为明显的结皮现象,团聚体平均质量直径随之上升,这是由于土壤结皮的形成改变了表层团聚体结构所导致的。本研究中,土壤团聚体平均质量直径的动态变化趋势与蔡强国等<sup>[25]</sup>研究的结皮发育过程中“形成—破坏—再形成”的动态变化趋势相吻合。陈正发等<sup>[26]</sup>的研究也得出相似的结论。由此可知,在累积降雨的作用下,土壤结皮逐步完善,提高了团聚体平均质量直径。通过方差分析可知,实验期间结皮层土壤团聚体平均质量直径动态变化显著( $P < 0.05$ )。 $M_{FW}$ 的变异性最大,从不稳定性团聚体到非常稳定性团聚体,跨越4个团聚体稳定性级别,其变化范围为0.73~2.13 mm,平均值为1.28 mm,变异系数( $C_V$ )为34%,最大值与最小值相差近3倍。该变化必然会对土壤可蚀性

产生较大影响<sup>[6,27]</sup>。 $M_{SW}$ 的变异性次之,其变化范围为1.79~2.90 mm,平均值为2.43 mm,变异系数( $C_V$ )为14%。 $M_{WS}$ 的变异性最小,其变化范围为2.27~3.16 mm,平均值为2.73 mm,变异系数( $C_V$ )为7%。

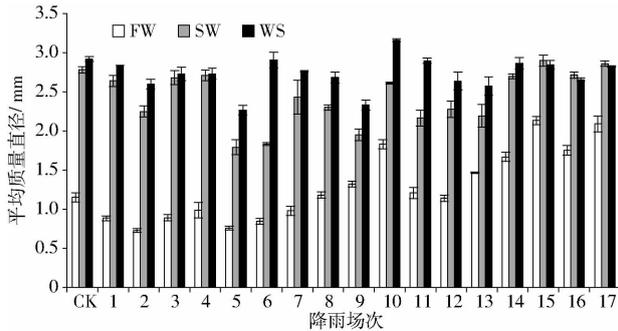


图1 结皮层团聚体平均质量直径动态变化

Fig. 1 Variations of mean weight diameter for soil crust

由图2可知,下层土壤 $M_{FW}$ 的变化趋势与结皮层相似,但相对滞后。这是由于下层土壤在结皮的保护下基本不受降雨打击作用,所以对降雨的响应较缓慢。但是,结皮层团聚体破碎所产生的细小颗粒被淋溶到下层土壤,堵塞下层团聚体孔隙,从而对团聚体崩解的消散机制产生影响。实验期间,下层土壤 $M_{FW}$ 变异性小于结皮层,其变化范围为0.70~1.27 mm,平均值为0.97 mm, $C_V$ 为16%。下层土壤 $M_{WS}$ 和 $M_{SW}$ 随降雨场次增加均呈现略微下降的趋势。实验期间,下层土壤 $M_{SW}$ 变化范围为1.69~2.83 mm,平均值为2.28 mm, $C_V$ 为14%; $M_{SW}$ 的变化范围为2.53~2.92 mm,平均值为2.78 mm, $C_V$ 为4%。

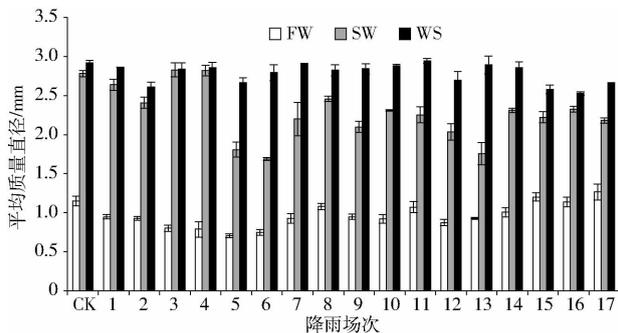


图2 下层土壤团聚体平均质量直径动态变化

Fig. 2 Variations of mean weight diameter for subsurface soil

无论是结皮层还是下层土壤,在自然降雨影响下 $M_{FW}$ 变异性最大, $M_{WS}$ 变异性最小。这是由团聚体的不同破碎机制所导致的。FW处理主要模拟了团聚体在暴雨、灌溉等快速湿润的条件下,团聚体内部闭蓄空气压缩产生“气爆”从而对团聚体造成破坏,反映了团聚体破碎的消散机制。此过程主要受团聚体内部的微观结构、孔隙状况影响<sup>[23]</sup>。而在结皮的动态发育过程中,团聚体微结构、孔隙状况发生较大

改变<sup>[23]</sup>,雨滴打击夯实和细小颗粒对孔隙的堵塞,使得孔隙度降低,团聚体内部闭蓄空气减少,从而提高团聚体在消散机制下的稳定性。而SW处理和WS处理分别模拟土壤粘粒的非均匀膨胀和雨滴打击对团聚体的破坏作用,主要受土壤粘粒、有机质含量等因素影响<sup>[23]</sup>,而这些因素不会因为土壤结皮的形成而发生明显的变化<sup>[12]</sup>。因此, $M_{SW}$ 和 $M_{WS}$ 在结皮发育过程中的变异性较小。

## 2.2 结皮层与下层土壤团聚体稳定性的差异

土壤侵蚀通常发生在土壤表层,因此,结皮层对土壤可蚀性的影响至关重要。在以往的相关研究中,所试土壤样品通常取自耕作层,因此会对土壤可蚀性的研究带来较大误差<sup>[12]</sup>。目前关于结皮层和耕作层土壤团聚体稳定性差异的相关研究十分匮乏。了解结皮层和耕作层团聚体稳定性的差异,对于精确评估土壤可蚀性和制定相关的土壤侵蚀治理措施具有十分重要的意义。

结皮层与下层土壤团聚体平均质量直径的比值如图3所示。比值大于1说明结皮层团聚体稳定性大于下层,比值越大表明两者间差异性越大;比值小于1说明结皮层土壤团聚体稳定性小于下层,比值越小表明两者间差异性越大。结皮层土壤与下层土壤团聚体平均质量直径的差异随降雨场次和测定方式的不同而有所差异。FW处理下,对于大多数所取土样,结皮层 $M_{FW}$ 大于下层土壤,且随着降雨场次的增加,两者间差值逐渐增大。通过方差分析可知,第9次降雨后,两者之间差异性显著。这是因为在降雨打击夯实作用下,土壤结皮的动态发育过程中改变了团聚体微观结构,提高了团聚体在FW处理下的平均质量直径。而下层土壤基本不受降雨打击夯实作用,因此随着降雨场次的增加,表土结皮发育更加完善,两者之间差值逐渐扩大。值得注意的是,对于第1次和第2次降雨后,下层土壤团聚体平均质量直径高于结皮层。这与ALGAYER等<sup>[16]</sup>的研究结果不同,其原因可能是由于实验样地和取样时间差异造成的。ALGAYER等<sup>[16]</sup>的研究中实验样地并未经过翻耕,取样时,结皮发育已然较为完善,因此在其所有样品中,结皮层团聚体平均质量直径均大于下层土壤。而本研究中,实验样地经过翻耕,土壤结皮是在实验期间逐渐形成的,第3次降雨之后,样地表面才能观测到明显结皮。SW处理下,第12次降雨之后结皮层团聚体平均质量直径开始显著高于下层土壤,且两者之间的差值有增大趋势。WS处理下,第15次降雨后结皮层团聚体平均质量直径开始显著高于下层土壤,但是没有明显变化趋势。

由以上分析可知,在降雨打击夯实作用下,结皮

层团聚体平均质量直径与下层土壤之间存在明显的差异,且随着降雨场次的增加,差异性逐渐增大。DARBOUX 等<sup>[12]</sup>基于模拟降雨实验研究了土壤结皮与苗床(松散团聚体)的团聚体平均质量直径,发现两者之间基本无差异。这 2 种不同的实验结果可能是由不同的实验条件引起的。DARBOUX 等<sup>[12]</sup>

的研究中,土壤结皮是在模拟降雨 6 min 后取得的,其结皮的平均质量直径较小。此外,研究表明,干湿交替是团聚体平均质量直径的重要影响因素<sup>[28]</sup>。本研究中,土壤结皮是在自然降雨条件下逐渐形成的,次降雨间的干湿交替过程可能加大了结皮层和下层土壤团聚体平均质量直径的差异。

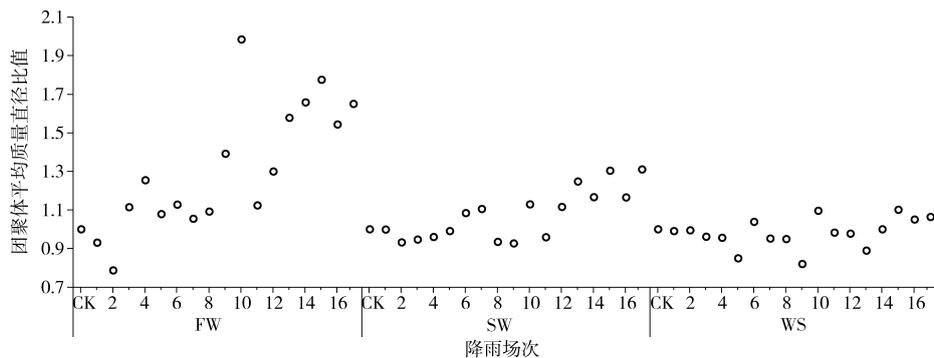


图 3 结皮层与下层团聚体平均质量直径比值

Fig. 3 Ratio of mean weight diameter of soil crust to subsurface soil

### 2.3 团聚体动态变化的影响因素

由相关性分析可知(表 3),取样时含水率( $W$ )与团聚体平均质量直径呈显著负相关关系。这与 CARON 等<sup>[29]</sup>的研究结果一致,即使团聚体平均质量直径是在风干情况下测定的,其取样时含水率也会对测定结果有影响。CEC、pH 值与结皮层  $M_{FW}$  呈极显著负相关关系,但是由于结皮层 CEC、pH 值的降低可能是因为酸雨淋溶导致的,因此并不能说明 CEC、pH 值对团聚体平均质量直径的动态变化有显著影响。本研究中 SOM 与团聚体平均质量直径相关性未达到显著水平,这与 ALGAYER 等的<sup>[16]</sup>研究结果相同,而与 ZHAO 等<sup>[30]</sup>的研究结果不同。其原因可能是实验设计所造成的。ZHAO 等<sup>[30]</sup>的实验中,土壤样品取自不同土地利用类型,不同样品之间有机质含量和团聚体平均质量直径差异较大,而本研究中所有样品取自同一样地,且实验期间结皮层和下层土壤有机质含量的变异系数(结皮层和下层分别为 3% 和 4%)均小于团聚体平均质量直径的变异系数,未能体现出 SOM 与团聚体平均质量直径之

间的关系。因此 SOM 与团聚体平均质量直径相关性不显著,并不能说明 SOM 对团聚体平均质量直径没有影响,只能说明实验期间团聚体平均质量直径的动态变化不是 SOM 的变化所导致。

本研究中,累积降雨量和结皮层团聚体平均质量直径均呈显著正相关。这可能是在降雨的不断打击夯实作用下,结皮层动态发育过程中团聚体微观结构发生极大改变所导致的。而下层土壤仅  $M_{FW}$  与累积降雨量相关性达到显著水平,这可能是由于下层土壤团聚体结构改变较小,且 SW、WS 处理下团聚体平均质量直径受土壤结构影响较小。 $R$ 、 $I$  与团聚体平均质量直径相关性不显著,可能是由自然条件下复杂的降雨过程导致。土壤结皮的发育是“形成—破坏—再形成”的动态过程,蔡强国等<sup>[25]</sup>研究表明,土壤结皮在 72 mm/h 降雨条件下,30 min 内即可经历 2 个完整的发育过程。研究区内的自然降雨大多历时较长,降雨期间的雨强变化较为复杂频繁,因此,本研究未能很好地确定导致土壤结皮破坏和形成的临界降雨情况。

表 3 团聚体平均质量直径与各参数的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient between mean weight diameter and influencing factors

土层	平均质量直径	SOM	CEC	pH 值	$W$	$R$	累积降水量	$I$
结皮层	$M_{FW}$	-0.12	-0.60 **	-0.80 **	-0.84 **	0.02	0.84 **	-0.11
	$M_{SW}$	-0.11	-0.27	-0.19	-0.56 *	-0.25	0.22	-0.49
	$M_{WS}$	0.38	-0.06	-0.06	-0.53 *	-0.32	0.14	0.06
下层	$M_{FW}$	-0.22	-0.23	-0.23	-0.49 *	-0.22	0.70 **	<0.01
	$M_{SW}$	0.10	-0.28	0.07	-0.13	-0.47	-0.46	-0.23
	$M_{WS}$	0.31	0.14	0.18	-0.08	-0.43	-0.32	0.42

注: \* 表示在  $P < 0.05$  水平显著相关; \*\* 表示在  $P < 0.01$  水平显著相关。

### 3 结论

(1) 结皮层团聚体稳定性在次降雨作用下动态变化显著。随着累积降雨量的增加,  $M_{FW}$  呈现出明显的上升趋势, 而  $M_{sw}$ 、 $M_{ws}$  上升幅度较小。

(2) 在自然降雨的影响下, 结皮层和下层土壤团聚体稳定性存在较大差异, 一般表现为结皮层团聚体稳定性高于下层土壤, 且随着降雨场次的增加, 两者之间差异逐渐增大。因此, 在利用团聚体稳定

性做土壤可蚀性评价等研究或者制定相关土壤侵蚀治理措施时应充分考虑表土结皮的影响。

(3) 取样时土壤含水率、累积降雨量对结皮层团聚体稳定性有较显著的影响。而有机质含量、阳离子交换量等土壤理化性质对团聚体动态变化的影响较小。因此, 即使在土壤理化性质基本变的情况下, 土壤团聚体稳定性在自然降雨影响下也存在较大的变化, 进而对土壤可蚀性产生较大影响。

### 参 考 文 献

- 1 LEH M, BAJWA S, CHAUBEY I. Impact of land use change on erosion risk: an integrated remote sensing, geographic information system and modeling methodology[J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(5): 409–421.
- 2 BARTHES B, ROOSE E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels [J]. *CATENA*, 2002, 47(2): 133–149.
- 3 GUMIERE S J, BISSONNAIS LE Y, RACLOT D. Soil resistance to interrill erosion: model parameterization and sensitivity[J]. *CATENA*, 2009, 77(3): 274–284.
- 4 SANCHIS M P, TORRI D, BORSELLI L, et al. Climate effects on soil erodibility[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(7): 1082–1097.
- 5 DIMOYIANNIS D. Seasonal soil aggregate stability variation in relation to rainfall and temperature under Mediterranean conditions [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(6): 860–866.
- 6 WANG B, ZHENG F, RÖMKENS M J, et al. Soil erodibility for water erosion: a perspective and Chinese experiences [J]. *Geomorphology*, 2013, 187: 1–10.
- 7 朱冰冰, 李鹏, 李占斌, 等. 子午岭林区土地退化/恢复过程中土壤水稳性团聚体的动态变化[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(3): 124–128.  
ZHU Bingbing, LI Peng, LI Zhanbin, et al. Dynamics of water stable aggregate in land degradation/restoration process of Ziuling forest farm [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2008, 36(3): 124–128. (in Chinese)
- 8 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 702–709.  
XIE Jinsheng, YANG Yusheng, CHEN Guangshui, et al. Effects of vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 702–709. (in Chinese)
- 9 安婉丽, 高灯州, 潘婷, 等. 水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(5): 1833–1840.  
AN Wanli, GAO Dengzhou, PAN Ting, et al. Effect of rice straw returning on paddy soil water stable aggregate distribution and stability in the paddy field of Fuzhou plain [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(5): 1833–1840. (in Chinese)
- 10 花可可, 朱波, 杨小林, 等. 长期施肥对紫色土旱坡地团聚体与有机碳组分的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 167–173. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20141026&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141026&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.026.  
HUA Keke, ZHU Bo, YANG Xiaolin, et al. Effects of long-term different fertilization on soil aggregates and organic carbon fractions on sloping upland of purple soil [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 167–173. (in Chinese)
- 11 王亮, 孙向阳, 刘克峰. 不同施肥条件下微生物对棕壤团聚体和碳分布的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(3): 57–61. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20120311&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120311&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.011.  
WANG Liang, SUN Xiangyang, LIU Kefeng. Effect of microbial on carbon distribution in brown soil aggregates under different fertilization [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3): 57–61. (in Chinese)
- 12 DARBOUX F, BISSONNAIS L Y. Changes in structural stability with soil surface crusting: consequences for erodibility estimation [J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(5): 1107–1114.
- 13 CHAMIZO S, RODRÍGUEZ-CABALLERO E, CANTÓN Y, et al. Penetration resistance of biological soil crusts and its dynamics after crust removal: relationships with runoff and soil detachment [J]. *CATENA*, 2015, 126(2): 164–172.
- 14 YAN Y, WU L, XIN X, et al. How rain-formed soil crust affects wind erosion in a semi-arid steppe in Northern China [J]. *Geoderma*, 2015, 249(3): 79–86.
- 15 BRESSON L, BOIFFIN J. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field [J].

- Geoderma, 1990, 47(3-4): 301-325.
- 16 ALGAYER B, WANG B, BOURENNANE H, et al. Aggregate stability of a crusted soil: differences between crust and sub-crust material, and consequences for interrill erodibility assessment. An example from the Loess Plateau of China[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(3): 325-335.
- 17 BU C, WU S, YANG K. Effects of physical soil crusts on infiltration and splash erosion in three typical Chinese soils[J]. International Journal of Sediment Research, 2014, 29(4): 491-501.
- 18 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 97-101.  
WU Faqi, FAN Wenbo. Effects of soil encrustation on rainfall infiltration, runoff and sediment generation [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(2): 97-101. (in Chinese)
- 19 BRADFORD J M, REMLEY P A, FERRIS J E, et al. Effect of soil surface sealing on splash from a single waterdrop[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(6): 1547-1552.
- 20 程琴娟, 蔡强国. 模拟降雨下黄土表土结皮的侵蚀响应[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 73-77.  
CHENG Qinjuan, CAI Qiangguo. Response of soil surface crust on soil erosion in loess under simulated rainfalls [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 73-77. (in Chinese)
- 21 崔鹏, 王道杰, 范建容, 等. 长江上游及西南诸河区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 43-50.  
CUI Peng, WANG Daojie, FAN Jianrong, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for the upper Yangtze and other rivers in the Southwestern China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 43-50. (in Chinese)
- 22 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 23 BISSONNAIS L 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.
- 24 LEGOUT C, LEGUÉDOIS S, BISSONNAIS L Y. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements[J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56(2): 225-238.
- 25 蔡强国, 陆兆熊. 黄土发育表土结皮过程和微结构分析的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 1996, 4(4): 363-370.  
CAI Qiangguo, LU Zhaoxiong. Experimental study of surface crust process and microfabric analysis on Loess Soil [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1996, 4(4): 363-370. (in Chinese)
- 26 陈正发, 夏清, 史东梅, 等. 基于模拟降雨的土壤表土结皮特征及坡面侵蚀响应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 6-11.  
CHEN Zhengfa, XIA Qing, SHI Dongmei, et al. Soil surface crust characteristic and response feature to slope erosion base on simulation rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 6-11. (in Chinese)
- 27 GALLARDO-CARRERA A, LÉONARD J, DUVAL Y, et al. Effects of seedbed structure and water content at sowing on the development of soil surface crusting under rainfall[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 95(1): 207-217.
- 28 MA R, CAI C, LI Z, et al. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 149(2): 1-11.
- 29 CARON J, KAY B D, KACHANOSKI R G, et al. Modeling temporal changes in structural stability of a clay loam soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(5): 1597-1604.
- 30 ZHAO J, CHEN S, HU R, et al. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 167(4): 73-79.