

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.029.

焦钊栩, 侯卫亮, 李光录. 降雨条件下土壤胶结状况与团聚体分布特征研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 109-118.

Jiao Fanxu, Hou Weiliang, Li Guanglu. Study on Soil Cementation and Aggregate Distribution Characteristics Under Rainfall Conditions [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 109-118.

降雨条件下土壤胶结状况与团聚体分布特征研究

焦钊栩, 侯卫亮, 李光录

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 分析雨滴击溅对表层土壤胶结剂含量以及团聚体分布特征的影响, 揭示降雨条件下土壤胶结状况与团聚体变化的关系。[方法] 通过室内模拟降雨试验, 采用理化分析与同步辐射计算机扫描(SR- μ CT)技术, 对泥沙中团聚体胶结剂含量、表土团聚体空间分布进行了研究。[结果] (1) 泥沙中各胶结剂含量排序为碳酸钙>有机碳>游离氧化铁>游离氧化铝>六碳糖, 相同薄层径流下, 泥沙中胶结剂的含量随雨滴直径的增加不断增加; 相同雨滴直径下, 胶结剂的含量随薄层径流的增加呈先增加后减小的波动式变化。雨滴击溅和径流冲刷共同作用对 <0.053 mm 粒径下六碳糖、游离氧化铁、游离氧化铝以及 $0.25\sim 2$ mm 粒径下六碳糖、游离氧化铁、碳酸钙和有机碳含量影响显著($p<0.05$)。 (2) 相同薄层径流下, 表土团聚体总数量(A)、微团聚体(≤ 0.25 mm)数量、比表面积(SSA)随雨滴直径的增加而增加, 大团聚体体积百分比(V_{mac})、大团聚体(>0.25 mm)数量、几何平均直径(GMD)随雨滴直径的增加而减小; 相同雨滴直径下, 随着薄层径流增加, SSA 不断减小, GMD 不断增加。 (3) 泥沙中 5 种胶结剂与表土团聚体结构参数呈显著相关关系($p<0.05$), 泥沙胶结剂含量越高, A 和 SSA 越大, GMD 和 V_{mac} 越小。[结论] 雨滴击溅薄层径流增加了表土团聚体胶结剂迁移损失, 增大泥沙中胶结剂的含量。降雨侵蚀下表土团聚体胶结剂含量降低, 是导致土壤团聚体结构破坏, 稳定性降低的主要原因。

关键词: 雨滴击溅; 薄层径流; 胶结剂; 团聚体微观结构

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0109-10

Study on Soil Cementation and Aggregate Distribution Characteristics Under Rainfall Conditions

Jiao Fanxu, Hou Weiliang, Li Guanglu

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to analyze the influence of raindrop splash on the content of soil cement and the distribution characteristics of soil aggregates in the surface soil layer, and to reveal the relationship between the soil cementation status and the changes of aggregates under rainfall conditions. [Methods] Study on the content of aggregates cement in the sediment and the spatial distribution of topsoil aggregates were investigated by indoor simulated rainfall tests, physicochemical analyses and synchrotron radiation computer scanning (SR- μ CT) technology. [Results] (1) The order of the content of each cement in the sediment was calcium carbonate>organic carbon>free iron oxide>free alumina>six-carbon sugar. The content of the cement in the sediment increased with the increase of the raindrop diameter under the same thin-layer runoff. The content of the cement showed a fluctuating change of increasing and then decreasing with the increase of the thin-layer runoff under the same raindrop diameter. The combined effect of raindrop splash and runoff washout on the content of six-carbon sugar, free iron oxide, free aluminium oxide at <0.053 mm

收稿日期: 2023-10-14

修回日期: 2024-02-23

资助项目: 国家自然科学基金“黄土高原土壤侵蚀过程中团聚体循环破坏机制和微观结构”(41571262)

第一作者: 焦钊栩(1998—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: fxjiao@nwafu.edu.cn

通信作者: 李光录(1964—), 男, 甘肃永靖人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与土地利用研究。E-mail: guangluli@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

particle size and six-carbon sugar, free iron oxide, calcium carbonate and organic carbon at 0.25~2 mm particle size was significant ($p<0.05$). (2) Under the same thin-layer runoff, the total number of aggregates (A), the number of microaggregates (<0.25 mm), and the specific surface area (SSA) increased with the increase of raindrop diameter in topsoil. The volume percentage of macroaggregates (V_{mac}), the number of macroaggregates (>0.25 mm), and the geometric mean diameter (GMD) decreased with the increase of raindrop diameter. For the same raindrop diameter, with the increase of thin-layer runoff, the SSA decreased and the GMD increased. (3) The five types of binder in the sediment were significantly correlated with the structural parameters of the topsoil aggregates ($p<0.05$). The higher the content of binder in the sediment, the larger the A and SSA, and the smaller the GMD and V_{mac} . [Conclusions] Raindrop splash thin-layer runoff increases the loss of topsoil aggregate cement migration and increases the cement content in the sediment. The decrease in topsoil aggregate cement content under rainfall erosion is the main reason for the structural damage and the stability decline of soil aggregates.

Keywords: raindrop splash; thin layer runoff; cementing agents; aggregate microstructure

土壤团聚体作为土壤结构的重要组成,它们的形成与稳定离不开胶结物质的参与。胶结物质的组成特征以及作用形式对团聚体的形成和稳定起到了关键作用,胶结物质通过胶结土壤矿物颗粒使其形成微团聚体,微团聚体在生物和物理因素作用下,逐渐演变为更大的团聚体,并在这一过程中形成了更多的孔隙^[1]。

胶结物质主要可分为有机胶结物质和无机胶结物质两类^[2]。尽管微生物通过菌丝的作用也能促进团聚体的形成,但团聚体的真正形成仍然依赖于多糖等有机物质的胶结作用^[3]。此外,无机胶结物质如铁、铝氧化物、黏粒以及碳酸钙等也发挥着至关重要的作用^[4]。杨长明等^[5]的研究表明,土壤中的有机碳各组分与土壤水稳性团聚体的稳定性之间存在着显著的正相关关系。而不同种类的多糖在土壤中的作用则各有不同,一些多糖不仅加速了土壤溶液的传导率,还增强了土壤的团聚作用^[6]。碳酸钙对黄土高原地区土壤中约 99% 的团聚体形成具有重要影响^[7]。此外,章明奎等^[8]的研究发现,游离氧化铁对水稳性团聚体的形成也有较大的促进作用。铁铝氧化物通过与有机碳或分散黏粒相互作用,提高了团聚体的稳定性^[9]。目前关于团聚体胶结剂的研究多集中在不同的土地利用方式^[2],不同施肥条件^[10],土层深度^[11],区域分布等^[12]方面,关于土壤团粒结构的研究主要集中在其稳定性(水稳定性和力稳定性)、粒径等方面^[13],降雨驱动下各种胶结物质在团聚体微观结构中的作用有待进一步讨论。

近些年来,X 射线计算机断层扫描(X-ray computed tomography,简称 CT)技术以其快速、无损的特点被用来对各种土壤结构进行研究,同时,它还具有成像对比度强及高分辨率的优点^[14],为定量分析团聚体微结

构提供途径。黄土高原是我国主要土壤侵蚀区,水力侵蚀是该区主要的土壤侵蚀形式之一^[15]。由于高强度的降雨,土壤结构破坏发生,随之而来的是土壤大量流失,导致农业土壤生产力下降。研究的目标是:(1) 分析降雨驱动下团聚体胶结剂含量的变化;(2) 量化雨滴击溅薄层径流下团聚体的微观结构及分布化特征;(3) 确定土壤胶结物质及其对团聚体结构的影响,建立胶结剂与团聚体特征之间的关系方程。研究为更好地理解土壤结构的形成机制,改善土壤结构、提高土壤肥力和土壤保护提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 样品采集与理化分析

采样点位于陕西省杨陵示范区(108°3'29"E, 34°18'24"N),土壤为塋土(Eum-Orthic Anthrosols, USDA)。该地属于暖温带半湿润季风气候,年平均气温 13℃,年平均降水量 660 mm,主要集中于 7—9 月。采样时,通过对角线法布设采样点,去除地表的枯枝落叶,使用上下部分开口的自制长方体取样器(长 89.8 cm 宽 9.8 cm、高 5 cm)采集表层原状土,共采集 30 个原状土样用于雨滴击溅薄层径流侵蚀试验。用环刀(直径 10 cm、高 5 cm)取 6 个土样,用于原状土 CT 扫描和胶结剂的测定,其基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计与分析

1.2.1 雨滴击溅薄层径流试验 在试验开始前,先将装有原状土的长方体取样器放入水槽中饱和 6 h,以确保样品的含水率统一。试验装置由降雨装置和径流冲刷装置组成。模拟降雨时,在水箱内保持 2 cm 高的恒定液压头。降雨装置是一个顶部开口的长方体容器(90 cm 长、10 cm 宽、10 cm 高),底部每

隔 2 cm 均匀布置有 220 个针头,使用不同型号的针头(7,12,16)来产生不同直径的雨滴(2.67,3.39,4.05 mm)。径流冲刷装置是一个上方开口的长方体水槽(110 cm 长、10 cm 宽、15 cm 高),用压力表调节水槽前入水口的放水流量,模拟径流深 3.85,4.88,7.96 mm 薄层径流,具体试验装置见参考文献^[16]。降雨与径流作用下,待产生径流时,用塑料桶接泥沙样品,连续接 1 h,每次试验重复 3 次。将试验得到的泥沙样品湿筛分级后用于团聚体胶结剂的测定,分离得到

0.25~2,0.053~0.25,<0.053 mm 3 个等级的团聚体,用蒸馏水分别冲洗到事先称好的铝盒并标记,在 105 ℃下烘干 24 h 后称重。降雨强度通过降雨量与降雨时间的比值计算,雨滴能量通过所有雨滴的动能之和表示。薄层径流深度由单位时间内径流量与过水断面宽度和流速的比值确定,流速由染色剂法测得,剪切力由水的重度、水力半径及坡度的乘积计算,功率由剪切力和流速的乘积计算,具体计算公式见参考文献^[16]。降雨和径流参数见表 2—3。

表 1 土壤理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of Lou soil

土壤 类型	容重/ (g·cm ⁻³)	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	含水率/%	土壤质地/%		
				砂粒 (2~0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
壤土	1.37	12.45	22.31	33.26	44.07	22.67

表 2 模拟降雨雨滴的主要性质
Table 2 Main properties of the raindrops from the simulated rain

降落 高度/m	雨滴 直径/mm	雨滴能量/ (J·m ⁻² ·s ⁻¹)	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)
2	2.67	2.44×10 ⁻⁵	5.76
2	3.39	5.15×10 ⁻⁵	68.61
2	4.05	8.97×10 ⁻⁵	217.26

表 3 不同薄层径流下壤土的水(动)力学参数
Table 3 Hydraulic (dynamic) parameters of Lou soil under different thin layer runoff

放水流量/ (L·h ⁻¹)	薄层径流 深度/mm	流速/ (m·s ⁻¹)	径流剪切力/ (N·m ⁻²)	径流功率/ (W·m ⁻²)
110	3.85	0.08	1.31	0.104
220	4.88	0.14	1.67	0.209
550	7.96	0.19	2.73	0.522

1.2.2 CT 扫描和图像处理 降雨结束后,将装有样品的长方体取样器放置于自然环境中进行风干处理。用小刀从土壤表层获取干燥土块,每块土的尺寸为 2 cm×2 cm×2 cm。然后,这些土块被置于铺有海绵的盒子里,尽可能保持其结构不受到破坏。每组需取得 3 个土块,共选取 30 个干土块用于进一步的 CT 扫描研究。本次试验利用上海的同步辐射设备进行了扫描,具体使用了该设备中的 BL13W1 线站,该线站专注于 X 射线成像与生物医学的应用,通过同步辐射显微计算机断层扫描技术(SR-μCT)对所选的土壤样本进行了内部结构分析。最后借助 ImagePy v0.2 软件的 Viewer 3D 功能去实现团聚体结构的三维可视化,以及 Analysis 3D 功能实现团聚体结构的量化分析。具体扫描参数与图像处理操作方法详见 Yang 等^[17]。

1.2.3 团聚体胶结物质测定 将湿筛烘干后的泥沙样品土样平铺在操作桌上,用木碾轻轻碾压,将碾碎的土壤用 0.25 mm 和 0.149 mm 筛孔的筛网过筛。通过 0.25 mm 筛孔的土壤样品可用来测定六碳糖、游离氧化铁、游离氧化铝和碳酸钙含量,通过 0.149 mm 筛孔的土壤样品可用来测定有机碳含量,每个测定重复测试三次。六碳糖用蒽酮法测定^[18];游离氧化铁(Fed)和游离氧化铝(Al d)均采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠提取法(DCB 法)测定^[19];碳酸钙采用中和滴定法测定^[20];有机碳用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[21]。

1.3 数据分析

利用 ImagePy 中的 3D 分析选项计算土壤团聚体数量、直径、表面积、体积,根据土壤团聚体的粒径大小将团聚体划分为 5 个等级:>0.5,0.5~0.25,0.25~0.106,0.106~0.053 和≤0.053 mm。对于粒径大于 0.25 mm 的团聚体,定义为大团聚体,而粒径小于或等于 0.25 mm 的团聚体则被定义为微团聚体。团聚体几何平均直径计算公式见式(1);团聚体比表面积可以较好地反映土壤团聚体的稳定性,比表面积越高,土壤质地越细,土壤分散能力越强,具体计算公式见式(2)。

$$GMD=\exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \ln x_i}{\sum_{i=1}^n P_i}\right)$$
 (1)

$$SSA=\frac{S_a}{V_a}$$
 (2)

式中: x_i 为任一粒径范围团聚体的平均直径(μm); P_i 为任一粒径范围团聚体的体积占总体积的分数(%); S_a 为破碎后团聚体颗粒的表面积(μm²); V_a 为破碎后团聚体颗粒的体积(μm³)。

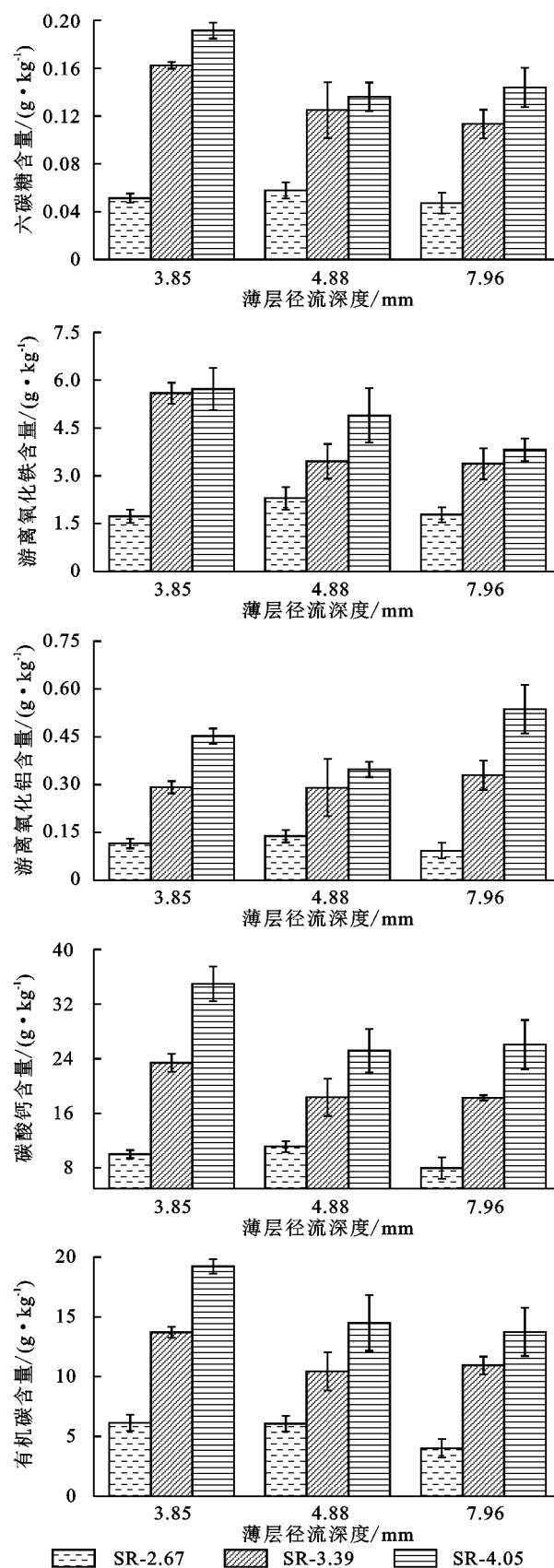
试验中分别使用 Excel 2016 和 Origin 2023 进行数据处理和图表绘制。通过 SPSS 22.0 统计分析软件进行方差分析,包括单因素(One-way ANOVA)、双因素(Two-way ANOVA)方差分析、主成分分析、相关分析和多重比较[最小显著差异法(LSD)],在 $p < 0.05$ 水平下比较显著性的差异。

2 结果与分析

2.1 降雨驱动下泥沙团聚体胶结剂含量分布

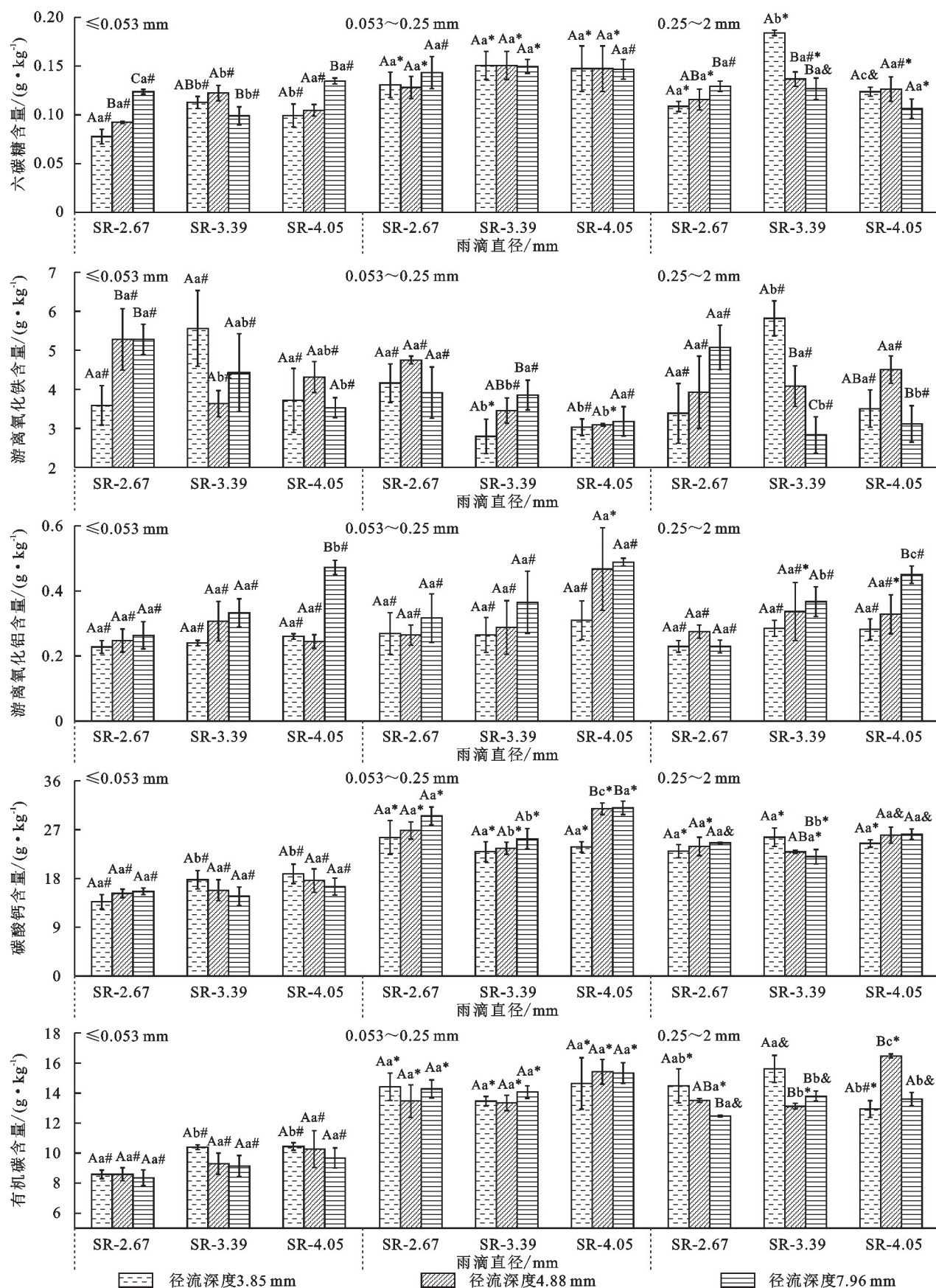
雨滴击溅薄层径流下,泥沙胶结剂含量排序为碳酸钙>有机碳>游离氧化铁>游离氧化铝>六碳糖(图 1),说明碳酸钙和有机碳是壤土的主要胶结物质,这与薛彦飞等^[10]的研究结果一致。相同薄层径流下,随着雨滴直径增加,泥沙中 5 种胶结剂含量均呈现出不断上升的趋势(图 1)。雨滴击溅造成的机械破坏是团聚体主要的破坏机制^[22],降低了团聚体颗粒之间的附着力,大团聚体在雨滴击溅下破碎成为微团聚体,团聚体胶结剂显露出来并随径流发生迁移。随着雨滴直径增加,团聚体破碎程度不断增大,表土团聚体胶结剂的迁移损失增加,从而导致泥沙胶结剂含量呈不断上升趋势。相同雨滴直径下,5 种胶结剂含量随薄层径流的增加呈现波动式减小的趋势(图 1)。径流深度的增加使得径流对雨滴打击的缓冲作用增大^[23],雨滴能量耗散增加,一定程度上减少了雨滴击溅下的机械破坏,表土团聚体胶结剂损失减少,从而导致泥沙胶结剂含量波动式降低。

从图 2 可以看出,泥沙中六碳糖、碳酸钙、有机碳在 0.053~0.25,0.25~0.2 mm 团聚体粒径中含量最高,游离氧化铁在<0.053 mm 团聚体粒径中含量最高,游离氧化铝在不同团聚体粒径中含量无显著差异($p > 0.05$)。表明游离氧化铁主要有助于<0.053 mm 的微团聚体的形成和稳定,六碳糖、碳酸钙和有机碳主要有助于 0.053~0.25,0.25~2 mm 团聚体的形成和稳定,这与陶澍等^[24]提出的有机碳主要分布在较大的微团聚体的研究结果一致。相同雨滴击溅薄层径流,泥沙中六碳糖含量在<0.053 mm 和 0.25~2 mm 团聚体粒径间存在显著差异($p < 0.05$),游离氧化铁、游离氧化铝含量在 3 个粒径间基本无显著差异($p > 0.05$),碳酸钙和有机碳在<0.053 mm 团聚体粒径的含量与 0.053~0.25,0.25~2 mm 团聚体粒径间存在显著差异($p < 0.05$)。说明雨滴击溅薄层径流作用主要影响壤土团聚体在<0.053 mm 和 0.25~2 mm 粒径内六碳糖含量以及<0.053,0.053~0.25,0.25~2 mm 粒径内碳酸钙和有机碳含量。



注:SR-2.67,SR-3.39,SR-4.05 分别代表雨滴直径为 2.67,3.39,4.05 mm,下同。

图 1 雨滴击溅薄层径流冲刷下泥沙团聚体总胶结剂含量
Fig. 1 Total binder content of sediment aggregates under raindrop splash and thin layer runoff erosion



注:不同大写字母表示相同雨滴直径和团聚体粒径,不同薄层径流下胶结剂含量差异显著, $p < 0.05$;不同小写字母表示相同薄层径流和团聚体粒径,不同雨滴直径下胶结剂含量差异显著, $p < 0.05$;不同符号表示相同雨滴直径和薄层径流下,3种不同粒径团聚体之间差异显著, $p < 0.05$ 。

图2 雨滴击溅径流冲刷下泥沙中不同粒径团聚体胶结剂含量

Fig. 2 Content of binder of aggregates with different particle sizes in sediment under raindrop splashing and thin layer runoff erosion

在 <0.053 mm 团聚体粒径中,2.67 mm 雨滴击溅下六碳糖和游离氧化铁含量随薄层径流的增加显著增加($p<0.05$);3.85 mm 薄层径流下,3.39,4.05 mm 雨滴直径下六碳糖、碳酸钙和有机碳含量显著高于 2.67 mm 雨滴直径($p<0.05$),7.96 mm 薄层径流下,4.05 mm 雨滴直径下游离氧化铝含量显著高于 2.67,3.39 mm 雨滴直径($p<0.05$)。0.053~0.25 mm 粒径中,相同雨滴直径,泥沙中 5 种胶结剂含量随径流深度增加不断增大的情况占 73.33%;薄层径流深 4.88 mm 时,4.05 mm 雨滴直径下碳酸钙含量显著高于 2.67,3.39 mm 雨滴下含量($p<0.05$)。0.25~2 mm 粒径中,4.05 mm 雨滴直径下游离氧化铁、碳酸钙在 4.88 mm 薄层径流下的含量显著高于其他两种径流深度($p<0.05$),说明在 4.05 mm 雨滴直径+4.88 mm 径流深度的组合条件下,雨滴的打击作用以及径流的冲刷作用均达到最大,侵蚀最严重;相同薄层径流,泥沙中 5 种胶结剂含量随雨滴直径增加不断增大的情况占 80%(图 2)。从表 4 可以发现,雨滴击溅薄层径流冲刷的共同作用对 <0.053 mm 粒径下六碳糖、游离氧化铁、游离氧化铝以及 0.25~2 mm 粒径下六碳糖、游离氧化铁、碳酸钙和有机碳含量影响显著($p<0.05$),但对 0.053~0.25 mm 粒径下 5 种胶结剂影响不显著($p>0.05$)。

2.2 降雨驱动下表土团聚体结构特征

数量上,土壤表层团聚体主要由微团聚体组成,微团聚体(≤ 0.25 mm)主要由 0.106~0.25 mm 的团聚体组成,大团聚体(>0.25 mm)主要由 0.25~0.5 mm 的团聚体组成。相同薄层径流下,土壤微团聚体的相对数量百分比随雨滴直径的增加波动式增加,3.85,4.88,7.96 mm 薄层径流下团聚体数量百分比分别为 79.55%~88.49%,75.29%~88.80% 和 73.75%~77.33%,大团聚体的趋势则相反;相同雨滴直径,微团聚体数量百分比随薄层径流的增加不断减小(图 3A)。体积上,主要由大团聚体组成,相同薄层径流下,塋土大团聚体的相对体积百分比随雨滴直径的增加而减小,3 种薄层径流下对应的体积百分比分别为 59.77%~67.68%,61.90%~70.67% 和 64.42%~74.40%;相同雨滴直径,大团聚体体积百分比随薄层径流的增加不断增加(图 3B)。薄层径流泥沙侵蚀的主要动力是雨滴击溅,雨滴击打在地表会引起土壤分散和跃移^[25]。塋土中大团聚体(>0.25 mm)的数量随着雨滴直径的增加而减少,微团聚体则与之相反。这表明随着降雨侵蚀力的增强,大团聚体破碎分解为微团聚体的程度也增强,且更大的雨滴导致更高的分解程度,这一结论与 Fu 等^[26]的研究结果一致。这可

能是因为雨滴直径越大,雨滴动能和降雨强度越大(表 2),对击溅侵蚀的影响越大。

表 4 不同团聚体粒径下雨滴直径(d)和薄层径流(f)对泥沙胶结剂的双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA of effect of raindrop diameter (d) and thin layer runoff (f) on sediment binder in aggregate fragments distribution

胶结剂类型	团聚体粒径/mm	固定因素	均方	F	Sig.
六碳糖	<0.053	d	0.001	8.574	0.002
		f	0.001	16.112	0.000
		$d * f$	0.001	14.051	0.000
	0.053~0.25	d	0.001	2.860	0.083
		f	5.448E-5	0.175	0.841
		$d * f$	0.000	0.404	0.803
	0.25~2	d	0.003	26.808	0.000
		f	0.001	7.230	0.005
		$d * f$	0.001	12.878	0.000
游离氧化铁	<0.053	d	1.862	2.811	0.087
		f	0.044	0.066	0.936
		$d * f$	3.065	4.629	0.010
	0.053~0.25	d	3.417	15.536	0.000
		f	0.463	2.106	0.151
		$d * f$	0.483	2.195	0.111
	0.25~2	d	0.712	1.414	0.269
		f	0.858	1.704	0.210
		$d * f$	4.837	9.610	0.000
游离氧化铝	<0.053	d	0.014	8.533	0.002
		f	0.032	19.285	0.000
		$d * f$	0.012	7.203	0.001
	0.053~0.25	d	0.050	6.080	0.010
		f	0.027	3.259	0.062
		$d * f$	0.006	0.765	0.562
	0.25~2	d	0.029	10.337	0.001
		f	0.016	5.514	0.014
		$d * f$	0.007	2.478	0.081
碳酸钙	<0.053	d	17.768	4.742	0.022
		f	3.065	0.818	0.457
		$d * f$	5.698	1.521	0.238
	0.053~0.25	d	48.580	11.598	0.001
		f	44.787	10.692	0.001
		$d * f$	9.532	2.276	0.101
	0.25~2	d	10.141	5.099	0.018
		f	0.039	0.019	0.981
		$d * f$	7.024	3.531	0.027
有机碳	<0.053	d	6.159	10.312	0.001
		f	1.269	2.125	0.148
		$d * f$	0.336	0.562	0.693
	0.053~0.25	d	4.644	4.674	0.023
		f	0.504	0.507	0.610
		$d * f$	0.516	0.520	0.722
	0.25~2	d	1.561	3.926	0.038
		f	2.889	7.267	0.005
		$d * f$	6.477	16.294	0.000

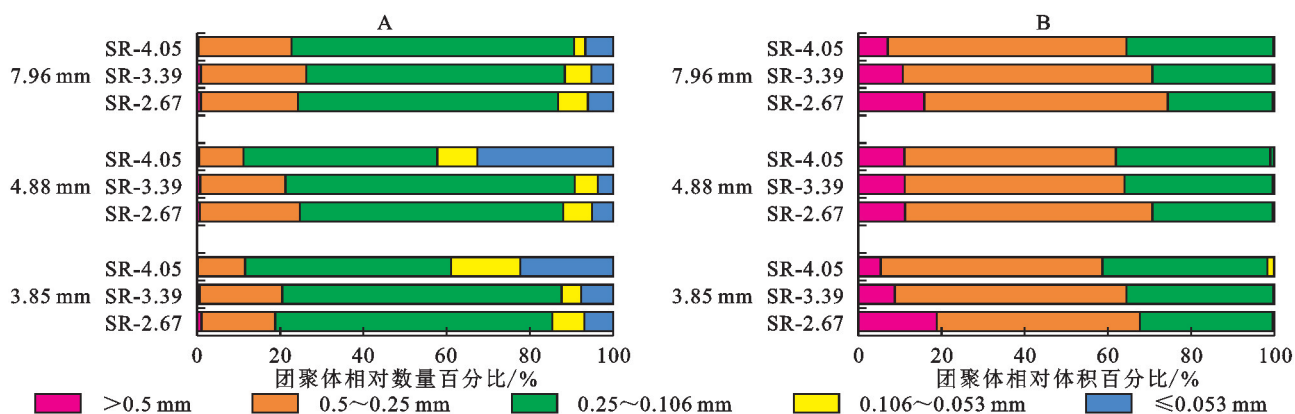


图 3 雨滴击溅径流冲刷下表土团聚体粒径相对数量百分比(A)与相对体积百分比(B)
Fig. 3 Relative quantity percentage (A) and relative volume percentage (B) of each particle size of topsoil aggregates under raindrop splashing and thin layer runoff erosion

相同薄层径流下,团聚体总数量和比表面积随着雨滴直径的增加逐渐增大,径流深 3.85,7.96 mm 时,雨滴直径 4.05 mm 击溅后团聚体总数量和比表面积显著高于 2.67,3.39 mm 雨滴直径($p<0.05$);相同雨滴直径,团聚体总数量和比表面积随薄层径流增加呈现波动式减小的趋势。雨滴直径 2.67 mm,薄层径流 7.96 mm 处几何平均直径有最大值,雨滴直径 4.05 mm,薄层径

流 3.85 mm 处几何平均直径有最小值(表 5)。几何平均直径反应团聚体大小及稳定性,值越小,表明微团聚体越多,土壤结构越不稳定。表土团聚体几何平均直径随雨滴直径的增加逐渐减小,且不同雨滴直径间差异显著($p<0.05$)。相同雨滴直径下,随着薄层径流的增加,团聚体几何平均直径不断增加(表 5),说明径流减缓了雨滴击溅对团聚体的打击破坏^[23]。

表 5 表土团聚体结构参数

Table 5 Structural parameters of topsoil aggregates

参数	处理	径流深度 3.85 mm	径流深度 4.88 mm	径流深度 7.96 mm
总数量(A)/个	SR-2.67	528.330±37.24Aa	515.330±31.67Aa	475.000±21.60Aa
	SR-3.39	565.670±46.91Aa	568.670±107.01Aa	486.330±13.60Aa
	SR-4.05	1030.670±287.70Ab	872.000±358.06Aa	566.000±30.41Ab
几何平均直径(GMD)/μm	SR-2.67	291.390±4.34ABc	280.920±6.11Aa	302.060±2.76Bc
	SR-3.39	268.330±1.98Ab	268.940±13.29Aa	279.340±1.36Ab
	SR-4.05	238.230±10.43Aa	263.930±6.14Ba	265.780±1.03Ba
比表面积(SSA)/μm ⁻¹	SR-2.67	0.040±0.001Aa	0.039±0.001Aa	0.037±0.001Aa
	SR-3.39	0.041±0.002Aa	0.042±0.004Aa	0.038±0.001Aa
	SR-4.05	0.055±0.005Bb	0.047±0.005ABa	0.041±0.001Ab

注:不同大写字母表示相同雨滴直径,不同薄层径流下团聚体结构参数差异显著, $p<0.05$;不同小写字母表示相同薄层径流,不同雨滴直径下差异显著, $p<0.05$ 。

随着雨滴直径增加,土壤团聚体开始有破碎的趋势,尤其在较大的团聚体中,这种趋势更加明显。雨滴直径的增加使微团聚体数量不断增大,小团聚体聚集到大团聚体周围,团聚体与团聚体间出现了更多的小孔隙结构。相同雨滴击溅下,随着薄层径流的增加,微团聚体数量没有明显增加(图 4)。Hu 等^[27]关于降雨物理参数(降雨强度、雨滴动能和雨滴直径)对中国软土区溅蚀特征的方向性成分的影响的研究,发现坡面溅蚀强度随雨滴动能和降雨强度的增加而显著增加($p<0.05$)。在 2.67,3.39,4.05 mm 直径雨滴击溅下,微团聚体数量有所增加,此外,可以观察到更多形状规则的小孔隙(图 4),这表明雨滴击溅后土壤的微观结构更多孔^[17]。

2.3 泥沙胶结剂与表土团聚体结构特征的关系

表 6 可以直观地看出泥沙胶结剂含量与表土团聚体结构参数之间的相关关系,5 种胶结剂与团聚体几何平均直径和大团聚体体积百分比显著负相关($p<0.05$),除游离氧化铝之外的其他 4 种胶结剂与团聚体总数量和比表面积显著正相关($p<0.05$);泥沙胶结剂对表土团聚体结构参数的相关性排序为碳酸钙、有机碳>六碳糖、游离氧化铁>游离氧化铝。为避免变量之间的多重共线性对回归结果的干扰,同时保留原始数据中的大部分信息,提高回归模型的解释能力和预测精度,采用主成分回归方法建立自变量(5 种胶结剂)与因变量(表土团聚体结构参数)的回

归模型。对 5 个自变量进行主成分分析,KMO 检验统计量的数值为 $0.788>0.7$,Bartlett 检验的 p 值为 $0.000<0.05$,满足效度检验条件,适合进行因子分析。根据主成分分析结果,提取了一个主成分 Prin_1,累积贡献率达到 92.924(表 7),对原始数据方差的解释程度较好。建立因变量与主成分的线性回归方程,并且将主成分与自变量进行多元线性回归,计算得到主成分与 5 个原始自变量的表达式:

$$\text{Prin}_1=-4.888+8.852x_1+0.286x_2+2.752x_3+0.052x_4+0.094x_5 \quad (3)$$

将式(3)分别代入主成分与 $A, \text{GMD}, V_{\text{mac}}, \text{SSA}$ 的回归方程,得到泥沙胶结剂与表土团聚体结构参数的关系模型:

$$A=304.14+577.646x_1+18.663x_2+179.585x_3+3.393x_4+6.134x_5 \quad (4)$$

$$\text{GMD}=311.911-70.081x_1-2.264x_2-21.788x_3-0.412x_4-0.744x_5 \quad (5)$$

$$V_{\text{mac}}=76.323-18.076x_1-0.584x_2-5.620x_3-0.106x_4-0.192x_5 \quad (6)$$

$$\text{SSA}=0.032+0.018x_1+0.001x_2+0.006x_3 \quad (7)$$

表 6 降雨条件下泥沙胶结剂与表土团聚体结构特征的相关分析

Table 6 Correlation analysis between sediment binder and topsoil aggregate structure characteristics under raindrop splashing

胶结剂 类型	相关性	团聚体 总数量(A)	几何平均 直径(GMD)	大团聚体 体积百分比(V_{mac})	比表面积 (SSA)
六碳糖	Pearson 相关	0.675 *	-0.917 **	-0.850 **	0.721 *
	显著性水平	0.046	0.001	0.004	0.028
游离氧化铁	Pearson 相关	0.712 *	-0.871 **	-0.819 **	0.726 *
	显著性水平	0.031	0.002	0.007	0.027
游离氧化铝	Pearson 相关	0.524	-0.805 **	-0.713 *	0.568
	显著性水平	0.147	0.009	0.031	0.110
碳酸钙	Pearson 相关	0.794 *	-0.955 **	-0.887 **	0.830 **
	显著性水平	0.011	0.000	0.001	0.006
有机碳	Pearson 相关	0.789 *	-0.950 **	-0.893 **	0.821 **
	显著性水平	0.011	0.000	0.001	0.007

表 7 总方差解释

Table 7 Total variance explanation

成分	特征根	方差百分比/%	累积贡献率/%
1	4.646	92.924	92.924
2	0.286	5.727	98.651
3	0.047	0.934	99.585
4	0.016	0.329	99.915
5	0.004	0.085	100.000

通过主成分分析进一步研究了泥沙中胶结物质与表土团聚体特征之间的关系,结果表明,胶结剂含量与 $\text{GMD}, V_{\text{mac}}$ 正相关,与 A, SSA 负相关,降雨条件下泥沙胶结剂的增加降低了表土团聚体稳定性(表 6)。主要是因为大颗粒团聚体是由微团聚体颗粒经

式中: x_1 为六碳糖(g); x_2 为游离氧化铁(g); x_3 为游离氧化铝(g); x_4 为碳酸钙(g); x_5 为有机碳(g); A 为团聚体总数量; GMD 为几何平均直径(μm); V_{mac} 为大团聚体体积百分比(%); SSA 为比表面积(μm^{-1})。

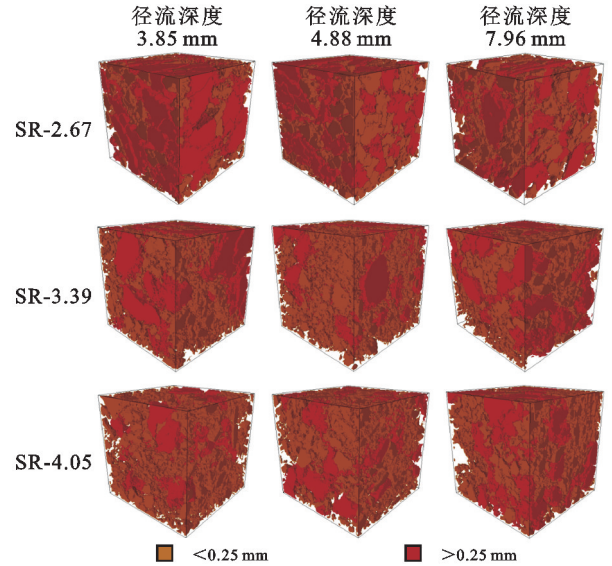


图 4 雨滴击溅下表土团聚体三维分布特征

Fig. 4 Three-dimensional distribution characteristics of topsoil aggregates under raindrop splashing

胶结物质胶结所形成,内聚黏结力比较低,在雨滴击溅和径流冲刷下,微团聚体之间的胶结剂显露出来并随径流迁移。随着雨滴直径增加,雨滴能量和降雨强度不断增加(表 2),能够提供的土壤破碎和搬运能量也越大,土壤快速湿润导致的熟化加剧了团聚体流失,表土团聚体胶结剂的迁移损失不断增大,团聚体稳定性降低。胶结剂含量的变化是团聚体破碎分解的内在原因,雨滴击溅增加了表土团聚体胶结剂的迁移损失,增加了泥沙中胶结剂含量。有机碳可以胶结微团聚体,促进土壤团聚,显著改善土壤结构^[28]。同样,团聚体内部结构的形成在很大程度上受到土壤 Fe-Al 氧化物变化的影响^[29-30]。雨滴击溅薄层径流

下泥沙中碳酸钙含量与团聚体4种结构参数均存在显著相关关系($p < 0.05$),进一步确认了碳酸钙在黄土中的重要作用,作为团粒结构的主要胶结剂,其含量的高低对团聚体的稳定性具有重要的影响^[7,22]。

3 结论

(1) 泥沙中胶结剂含量排序为碳酸钙>有机碳>游离氧化铁>游离氧化铝>六碳糖,相同薄层径流下,泥沙中胶结剂的含量随雨滴直径、雨滴能量、降雨强度的增加不断增加;相同雨滴直径下,胶结剂的含量随薄层径流的增加基本呈先增加后减小的波动式变化。六碳糖、碳酸钙、有机碳在0.053~0.25,0.25~0.2 mm团聚体粒径中含量最高,游离氧化铁在<0.053 mm团聚体粒径中含量最高。雨滴和径流共同作用对<0.053 mm粒径下六碳糖、游离氧化铁、游离氧化铝以及0.25~2 mm粒径下六碳糖、游离氧化铁、碳酸钙和有机碳含量影响显著($p < 0.05$)。

(2) 相同薄层径流,表土团聚体总数量、微团聚体数量、团聚体比表面积随雨滴直径的增加而增加,大团聚体体积百分比、大团聚体数量、几何平均直径随雨滴直径的增加而减小。相同雨滴直径,随着薄层径流增加,比表面积不断减小,几何平均直径不断增加。说明随着雨滴直径增加,表土团聚体稳定性降低,团聚体结构破碎分散,同时,薄层径流深度的增加可以减弱降雨对团聚体的打击能力。

(3) 泥沙中5种胶结剂与表土团聚体几何平均直径和大团聚体体积百分比显著负相关($p < 0.05$),除游离氧化铝之外的其他4种胶结剂与表土团聚体总数量和比表面积显著正相关($p < 0.05$)。雨滴击溅和径流影响下表土胶结剂含量的减少,加剧了土壤团聚体结构的塌陷,使得团聚体的完整性受到破坏,增加了泥沙中胶结剂含量,也加大了微团聚体在总团聚体体积的百分含量。

参考文献(References):

- [1] 彭新华,张斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J].土壤学报,2004,41(4):618-623.
Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004,41(4):618-623.
- [2] 黄传琴,周琴,谭文峰.不同农业利用条件对黄土胶结物质组成与团聚特征的影响[J].华中农业大学学报,2017,36(4):43-49.
Huang C Q, Zhou Q, Tan W F. Effects of agricultural utilization on composition of binding agents and cementation characteristics of loess[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017,36(4):43-49.
- [3] Bond R D, Harris J R. The influence of the microflora on the physical properties of soils. I. Effects associated with filamentous algae and fungi[J]. Australian Journal of Soil Research, 1964,2(1):111-122.
- [4] Barral M T, Arias M, Guérif J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates[J]. Soil and Tillage Research, 1998,46(3/4):261-272.
- [5] 杨长明,欧阳竹,董玉红.不同施肥模式对潮土有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J].生态学杂志,2005,24(8):887-892.
Yang C M, Ouyang Z, Dong Y H. Organic carbon fractions and aggregate stability in aquatic soil under different fertilization[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005,24(8):887-892.
- [6] Martin J P, Richards S J. Decomposition and binding action of a polysaccharide from chromobacterium violacium in soil[J]. Journal of Bacteriology, 1963,85(6):1288-1294.
- [7] 郭玉文,加藤诚,宋菲,等.黄土高原黄土团粒组成及其与碳酸钙关系的研究[J].土壤学报,2004,41(3):362-368,493-494.
Guo Y W, Kato M, Song F, et al. Composition of loess aggregate and its relationship with CaCO_3 on the Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004,41(3):362-368,493-494.
- [8] 章明奎,何振立.成土母质对土壤团聚体形成的影响[J].热带亚热带土壤科学,1997,6(3):198-202.
Zhang M K, He Z L. Effect of parent materials on formation of soil aggregates[J]. Tropical and Subtropical Soil Sciences, 1997,6(3):198-202.
- [9] Molina N C, Caceres M R, Pietroboni A M. Factors affecting aggregate stability and water dispersible clay of recently cultivated semiarid soils of Argentina[J]. Arid Land Research and Management, 2001,15(1):77-87.
- [10] 薛彦飞,薛文,张树兰,等.长期不同施肥对黄土团聚体胶结剂的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1622-1632.
Xue Y F, Xue W, Zhang S L, et al. Effects of long-term fertilization regimes on changes of aggregate cementing agent of Lou Soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015,21(6):1622-1632.
- [11] 王子龙,胡斐南,赵勇钢,等.土壤胶结物质分布特征及其对黄土大团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):331-336.
Wang Z L, Hu F N, Zhao Y G, et al. Distribution characteristics of soil cementing material and its effect on loess macro-aggregate stability[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(5):331-336.

- [12] 张耀方,赵世伟,王子龙,等.黄土高原土壤团聚体胶结物质的分布及作用综述[J].中国水土保持科学,2015,13(5):145-150.
Zhang Y F, Zhao S W, Wang Z L, et al. Distribution and function of cementing materials of soil aggregates on the Loess Plateau, Western China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015,13(5):145-150.
- [13] 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.
- [14] Hu X, Li Z C, Li X Y, et al. Quantification of soil macropores under alpine vegetation using computed tomography in the Qinghai Lake Watershed, NE Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geoderma, 2016,264:244-251.
- [15] Fu Y, Yang M X, Li G L, et al. Selectivity of aggregate fractions for loess soils under different raindrop diameters[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021,21(1):189-202.
- [16] 付玉.黄土高原水蚀过程中土壤团聚体破碎迁移机制研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
Fu Y. Study on the Mechanism of Breakdown and Transportation of Soil Aggregates in the Process of Water Erosion on the Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [17] Yang M X, Fu Y, Li G L, et al. Microcharacteristics of soil pores after raindrop action[J]. Soil Science Society of America Journal, 2020,84(5):1693-1704.
- [18] 文启孝.土壤有机质研究法[M].北京:农业出版社,1984.
Wen Q X. Soil Organic Matter Research Method[M]. Beijing: Agriculture Press, 1984.
- [19] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,2000.
Lu R K. Soil Agrochemical Analysis Methods[M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000.
- [20] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1983.
Agricultural Chemistry Professional Committee of the Chinese Soil Society. Conventional Analysis Methods for Soil Agricultural Chemistry [M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [22] Shi Z H, Yan F L, Li L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China [J]. Catena, 2010,81(3):240-248.
- [23] Wu B, Wang Z L, Zhang Q W, et al. Distinguishing transport-limited and detachment-limited processes of interrill erosion on steep slopes in the Chinese loessial region[J]. Soil and Tillage Research, 2018,177:88-96.
- [24] 陶澹,马东豪,张丛志,等.石灰性土壤团聚体中钙形态特征及其与有机碳含量的关系[J].土壤,2021,53(4):715-722.
Tao L, Ma D H, Zhang C Z, et al. Distribution characteristics of calcium forms and their relations with organic carbon content in calcareous soil aggregates[J]. Soils, 2021,53(4):715-722.
- [25] 吴普特,周佩华.地表坡度对雨滴溅蚀的影响[J].水土保持通报,1991,11(3):8-13,28.
Wu P T, Zhou P H. The effect of land slope upon raindrop splash erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991,11(3):8-13,28.
- [26] Fu Y, Li G L, Zheng T H, et al. Impact of raindrop characteristics on the selective detachment and transport of aggregate fragments in the Loess Plateau of China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016,80(4):1071-1077.
- [27] Hu W, Zheng F L, Bian F. The directional components of splash erosion at different raindrop kinetic energy in the Chinese mollisol region [J]. Soil Science Society of America Journal, 2016,80(5):1329-1340.
- [28] 张迪,姜佰文,梁世鹏,等.草甸黑土团聚体稳定性对耕作与炭基肥施用的响应[J].农业工程学报,2019,35(14):125-132.
Zhang D, Jiang B W, Liang S P, et al. Responsive of aggregate stability of meadow black soil to different tillage practices and carbon-based fertilizers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(14):125-132.
- [29] Yu X, Fu Y, Lu S. Characterization of the pore structure and cementing substances of soil aggregates by a combination of synchrotron radiation X-ray micro-computed tomography and scanning electron microscopy [J]. European Journal of Soil Science, 2017,68(1):66-79.
- [30] Zhao J S, Chen S, Hu R G, 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, 2017,167:73-79.