

# 土壤团聚体对泥沙沉降速度的影响

吴思南<sup>1</sup>, 符素华<sup>1,2†</sup>

(1. 北京师范大学地理科学学部, 100875, 北京; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所黄土高原  
土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100, 陕西杨凌)

**摘要:** 坡面侵蚀泥沙是既有单粒, 也含有团聚体颗粒的混合物, 其沉降速度是研究泥沙运移和沉积过程的重要基础。为研究团聚体对泥沙沉降速度的影响, 选用我国5种典型侵蚀土壤(黄绵土、褐土、红壤、黑土和紫色土), 每种土壤分别做分散(试验时仅单粒)和未分散(试验时含团聚体)2种处理, 用MBWT(改进底部取样)沉降管进行沉降试验测得沉速分布, 通过对比分析确定团聚体对泥沙沉降速度的影响。研究结果表明: 团聚体对泥沙的沉降速度具有显著增大作用; 对于5种试验土壤, 团聚体对泥沙沉速的增大影响均表现为, 对小粒径泥沙颗粒的影响大于大粒径; 在不同土壤类型之间, 团聚体对泥沙沉速的增大作用表现为: 紫色土 > 黑土 > 红壤 > 褐土 > 黄绵土; 土壤颗粒(包括土壤矿物质颗粒以及团聚体)性质特征不同是团聚体对沉速影响不同的主要原因。在土壤特征参数当中, 团聚体质量加权粒径与团聚度能够较好地反映团聚体对泥沙沉速的影响大小。沉速增率与团聚体质量加权粒径和团聚度有显著的线性相关关系。将团聚体的影响考虑到泥沙沉降过程中, 对了解侵蚀泥沙的运动规律, 研究土壤侵蚀过程机理, 构建土壤侵蚀过程模型具有重要意义。

**关键词:** 沉降速度; 团聚体; 土壤特性; 沉降管法

中图分类号: S157.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2019)06-0078-07

DOI: 10.16843/j.sswc.2019.06.010

## Effects of soil aggregates on settling velocity of sediment

WU Sinan<sup>1</sup>, FU Suhua<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;  
2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation,  
Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

**Abstract [Background]** Sediment eroded by water consists largely of soil aggregates. The settling velocity of such aggregates and soil primary particles is of fundamental importance to the processes of sediment transport and deposition in water. However, most currently available process-based soil erosion models are using soil texture or mineral particle distribution, and little consideration is given to aggregates, therefore which cannot fully reflect the transport behavior of sediment. **[Methods]** Five typical soils including loess soil, cinnamon soil, purple soil, black soil and red soil were used to compare the settling velocity of sediment. The settling velocity of sediment for the undispersed particles (soil particles and aggregates) and dispersed particles (soil particles) were measured using a modified bottom withdrawal tube method. By comparing the results of dispersion and indispersion, the impact of soil aggregates on settling velocity of sediment was analyzed. The data analysis process of this study was

收稿日期: 2018-10-29 修回日期: 2019-07-06

项目名称: 国家自然科学基金重点项目“退耕驱动近地表特性变化对侵蚀过程的影响及其动力机制”(41530858); 国家自然科学基金面上项目“土壤特性对坡面水流挟沙力影响”(41571259); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目“流域土壤侵蚀过程模型”

第一作者简介: 吴思南(1994—), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 土壤侵蚀机理。E-mail: sinan@mail.bnu.edu.cn

† 通信作者简介: 符素华(1973—), 女, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 土壤侵蚀机理。E-mail: suhua@bnu.edu.cn

completed by Excel 2016. The significance difference test and correlation analysis were carried out by SPSS 23. Origin 2016 was used to complete the fitting of the model and the drawing of the graphs.

**[Results]** Aggregates had a significant effect on settling velocity of sediment. For the tested soils, the aggregates resulted in the increase in settling velocity. Aggregates had more obvious effect on the settling velocity of small particles than that of the large particles. Among the different soil types, the effect of aggregates on the increasing rate in settling velocity of purple soil, black soil, red soil, loess soil and cinnamon soil decreased in turn, and the main reason was that the characteristics of soil particles (including soil primary particles and aggregates) were different. Among the soil characteristic parameters, the mean weight diameter of aggregates and aggregation degree had more important effect on sediment settling velocity. The increasing rate in settling velocity was significantly correlated to the mean weight diameter of aggregates and aggregation degree. **[Conclusions]** The results indicate that there is a great difference between the settling velocity of sediment containing aggregates and only soil particles. The mean weight diameter of aggregates or aggregation degree may be a proper parameter for reflecting the effects of aggregates on settling velocity of sediment. It is of great significance for considering the influence of aggregates in the process of sediment settling to understand the law of sediment movement, study the mechanism of erosion process and even develop the process-based soil erosion models.

**Keywords:** settling velocity; aggregates; soil characteristics; settling tube

侵蚀泥沙的运动规律对侵蚀过程研究来说至关重要,要科学地模拟土壤侵蚀过程,并准确地估算土壤流失量,就必须深入了解泥沙的运动规律。在泥沙颗粒运动规律相关研究中,特别是涉及与土壤侵蚀相关的水流挟沙力、泥沙的淤积等问题时,都必须观测泥沙的沉降速度。泥沙沉降速度是表征泥沙沉降过程的基础参数,同时也在描述土壤侵蚀分离、搬运、沉积的交互作用时作为主要参数,是构建土壤侵蚀过程模型的控制参数之一<sup>[1]</sup>;因此,开展侵蚀泥沙的沉降速度研究具有非常重要的理论意义。到目前为止,针对沉降速度的研究,相关学者已经做了大量工作,在公式计算和试验研究等方面均已取得很大成就<sup>[2-5]</sup>;然而,这些研究的试验对象却多为泥沙矿质单颗粒,在目前国际上常用的土壤侵蚀过程模型中,泥沙的沉降速度也主要考虑单粒的分布,即通过土壤质地或矿质单粒(机械组成)的大小来估算,很少考虑含有团聚体的情况<sup>[6]</sup>。事实上,侵蚀泥沙通常由单粒和团聚体组成,现阶段很多研究结果已经证实在土壤侵蚀过程中,绝大多数侵蚀泥沙颗粒是以团聚体形式被侵蚀输移的<sup>[7-9]</sup>;因此,相对于矿质单粒,以团聚体为对象的沉降速度能够更准确的反映侵蚀泥沙的运移和沉积过程<sup>[10-11]</sup>。

鉴于目前关于以团聚体为对象的泥沙沉速研究较少,团聚体是如何影响泥沙沉速这个问题并不是很清楚,但其对土壤侵蚀过程研究确有重要意义,特开展含有团聚体的混合粒径泥沙沉降速度研究。本

研究不仅对构建土壤侵蚀模型和精确预测土壤侵蚀具有指导作用,而且对土壤侵蚀过程机理和土壤侵蚀控制等也具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤性质

本研究以我国 5 种典型侵蚀土壤(黄绵土、褐土、红壤、黑土和紫色土)为研究对象,分别采集于陕西榆林、北京延庆、福建安溪、黑龙江嫩江和四川南充 5 个不同地区的典型坡地 0~20 cm 耕层,此 5 种土壤分别代表我国主要水力侵蚀区的土壤类型。相关土壤性状见表 1 和表 2。土壤机械组成采用吸管法测定,有机质采用总有机碳分析仪(Elementar vario TOC,德国)测定,土壤团聚体粒径分级采用湿筛-吸管法测定,重复试验 3 次。土壤分级标准采用美国制。

土壤团聚体也是评价土壤性质的重要指标,选用目前应用较广泛的粒径指标(中值粒径  $D_{50}$ 、质量加权粒径  $D_{MWD}$  和几何平均粒径  $D_{GMD}$ )、水稳性大团聚体含量( $>0.25$  mm 水稳性团聚体质量分数)以及微团聚体稳定性评价指标(团聚度  $A$ 、分散率  $D$  及结构系数  $K$ )。各指标的计算方法如下:

$$D_{MWD} = \sum_{i=1}^n x_i w_i, \quad (1)$$

$$D_{GMD} = \exp \left[ \left( \sum_{i=1}^n w_i \log x_i \right) / \left( \sum_{i=1}^n w_i \right) \right], \quad (2)$$

表 1 供试土壤基本理化性质

Tab. 1 Physio-chemical properties of the five soils

土壤 Soil type	机械组成 Primary particle size distribution/%			有机质 Organic matter/%
	黏粒 Clay ( <0.002 mm)	粉粒 Silt ( 0.002 ~0.05 mm)	砂粒 Sand ( 0.05 ~2.00 mm)	
黄绵土 Loess soil	14.47 ±0.37	72.66 ±1.13	12.87 ±1.49	0.34 ±0.01
褐土 Cinnamon soil	22.16 ±0.19	50.67 ±2.54	27.17 ±2.36	0.58 ±0.01
红壤 Red soil	31.70 ±0.50	26.76 ±0.30	41.54 ±0.21	0.78 ±0.01
黑土 Black soil	30.68 ±0.43	62.12 ±0.73	7.20 ±1.17	4.18 ±0.08
紫色土 Purple soil	33.66 ±1.02	53.37 ±1.92	12.96 ±1.10	0.96 ±0.01

$$A = a/b, \quad (3)$$

$$D = c/d, \quad (4)$$

$$K = (c - d) / c_0. \quad (5)$$

式中:  $x_i$  为各粒级的平均直径, mm;  $w_i$  为平均直径为  $x_i$  的水稳性团聚体质量, g;  $a$  为机械分析得到的

<0.05 mm 单粒的质量, g;  $b$  为微团聚体分析得到的 <0.05 mm 的微团聚体质量, g;  $c$  为机械分析得到的 <0.002 mm 单粒的质量, g;  $d$  为微团聚体分析得到的 <0.002 mm 微团聚体质量, g。

表 2 供试土壤团聚体评价指标

Tab. 2 Evaluation index of the five aggregates

土壤 Soil type	质量加权粒径	几何平均粒径	中值粒径	水稳性大团 Water stable aggregate	团聚度	分散系数	结构系数
	Mean weight diameter $D_{MWD}$ /mm	Geometric mean diameter $D_{CMD}$ /mm	Median diameter $D_{50}$ /mm	WSA $_{>0.25}$ /%	Aggregation degree $A$	Dispersive coefficient $D$	Structure coefficient $K$
	黄绵土 Loess soil	0.23 ±0.01	0.09 ±0.01	0.06 ±0.01	26.93 ±1.88	1.87 ±0.19	11.21 ±1.19
褐土 Cinnamon soil	0.51 ±0.02	0.18 ±0.01	0.21 ±0.04	45.22 ±2.56	3.09 ±0.17	35.57 ±6.79	0.97 ±0.01
红壤 Red soil	0.85 ±0.13	0.35 ±0.06	0.42 ±0.03	61.35 ±3.96	4.25 ±0.62	79.77 ±6.65	0.99 ±0.00
黑土 Black soil	1.15 ±0.07	0.38 ±0.02	0.44 ±0.06	62.96 ±3.59	6.42 ±0.54	131.67 ±22.54	0.99 ±0.00
紫色土 Purple soil	1.63 ±0.15	0.52 ±0.03	0.65 ±0.04	68.47 ±1.56	7.99 ±0.86	31.18 ±11.79	0.97 ±0.01

## 1.2 试验方法

1.2.1 土样前期处理 试验首先对 5 种土壤进行分散(试验时仅单粒)和未分散(试验时含团聚体)2 种不同的处理。称取 2 份 30 g 风干土(沉降浓度约为 20 g/L<sup>[12]</sup>),一份过 2 mm 筛后进行物理化学分散处理,另一份土样直接浸泡于 100 mL 去离子水中,静置 10 min,尽可能使团聚体遇水后的破裂程度一致,减少试验误差<sup>[11]</sup>。5 种土壤的每种处理均重复 4 次。

1.2.2 沉速测定方法 本研究采用 MBWT 法进行沉速测定<sup>[13]</sup>,该方法可以直接测量出混合悬浮液(不同粒径土壤团聚体及矿质单粒)中泥沙颗粒的沉速分布,与传统吸管和比重法相比,可测量的沉速范围更大并且能有效减少对团聚体的破坏。MBWT 沉降法主要通过沉降管设备实现,沉降装置如图 1 所示。

试验开始前关紧底部取样阀门,将处理好的土壤样品从顶部注入,然后用去离子水注满沉降管,同

时记录试验温度(保持在 ±0.5 °C 内)。随后开始沉降试验,上下 180° 翻转沉降管 10 次,使土壤颗粒充分混合,达到最大混合分布状态时开始进行沉降计时,本研究分别在 10、20、30、40、50、60、70、80、100 和 120 s 时打开底部开关取样,每场试验取样 10 次,记录每次取样的时间(精确到 0.01 s)以及取样后剩余液面的高度(精确到 0.1 cm)。试验结束后,将各泥沙样烘干并称量(精度 0.001 g),得到不同时间对应的沉降颗粒质量。

底部取样法是典型的混合沉降法,多分散悬浮液最开始时是趋向一系列单分散悬浮,但始终都是各个速度等级混合在一起下沉<sup>[1]</sup>。因此,某个时刻沉降至底部的泥沙既包括沉降速度大、从顶部下落到底部的颗粒,也包括其他下落距离较短的颗粒。所以,此方法测得的数据需进一步分析,Lovell 和 Rose 在 Oden 理论<sup>[14]</sup>的基础上,提出了 Exact 理论<sup>[15]</sup>,对沉降管中泥沙质量和沉降高度变化带来的影响进行数学分析。公式如下:

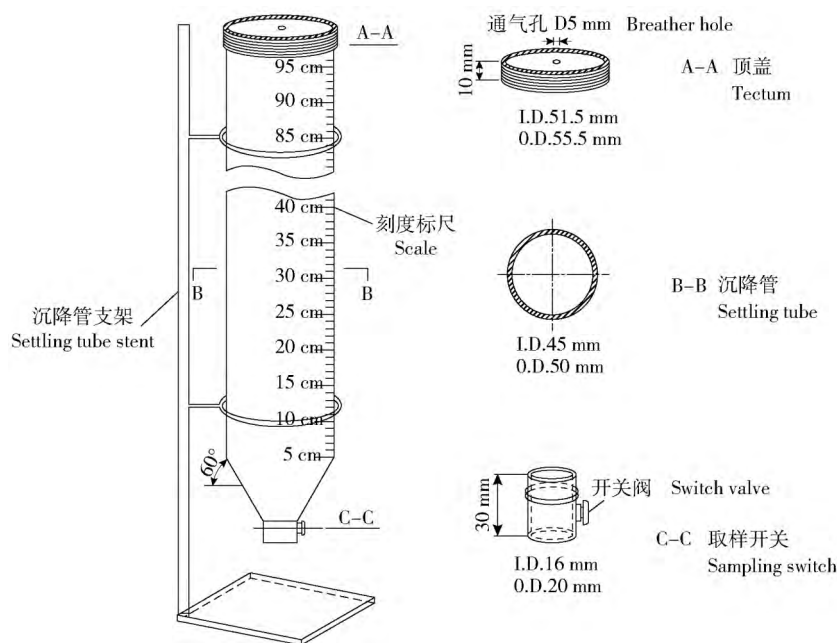


图 1 沉降试验装置示意图

Fig. 1 Settling tube apparatus

$$m_j = M \left[ (P_{j-1} - P_j) + \left( \frac{t_j}{L} \right) \left( \sum_{j=j+1}^J (P_{j-1} - P_j) v_j \right) + \left( \sum_{j=1}^j \frac{l_j}{L} \right) P_j - \left( \frac{t_{j-1}}{L} \right) \cdot \left( \sum_{j=1}^j (P_{j-1} - P_j) v_j - \left( \sum_{j=1}^{j-1} \frac{l_j}{L} \right) P_{j-1} \right) \right] \quad (6)$$

式中:  $m_j$  为第  $j$  个样品中泥沙颗粒的质量  $g$ ;  $t_j$  为取第  $j$  个样品的取样时刻  $s$ ;  $v_j$  为  $j$  时刻的颗粒沉速,  $m/s$ ;  $l_j$  为第  $j$  个样品的取样高度  $m$ ;  $P_j$  为沉降速度小于  $V_j$  的质量比例, %;  $L$  为管长  $m$ ;  $M$  为泥沙颗粒总质量  $g$ ;  $J$  为最后一个样品号。

## 2 结果与分析

### 2.1 团聚体对泥沙沉速的影响

2.1.1 泥沙沉速分布 仅有单粒的沉降速度累计曲线位于含有团聚体的上方,即同一颗粒累计比例对应的沉降速度值,单粒的沉降速度均小于团聚体(图 2)。这说明团聚体的存在增大了泥沙颗粒的沉降速度。胡亚鲜等<sup>[11]</sup>的研究也证实了团聚过程可将小颗粒汇聚成沉速较大的大团聚体,从而加速了泥沙的沉速。事实上,沉速的主要影响因素是颗粒的大小和密度,且粒径的影响更为显著<sup>[2-5]</sup>。对于含有团聚体的泥沙来说,颗粒的粒径明显大于矿质单粒(5 种土壤团聚体中值粒径是单粒的 2~39 倍),但其密度却小于单粒泥沙。由于湿密度在试验中很难准确测出,通过颗粒分布估算湿密度<sup>[13]</sup>,得出试

验土壤团聚体湿密度是单粒(2.65 kg/m<sup>3</sup>)的 0.6~0.72 倍。由此可以看出,团聚体由于粒径的增大对泥沙沉速的增大作用是更为显著的。

2.1.2 泥沙特征沉速 中值沉速  $v_{50}$  表示泥沙沉速的累计比例达到 50% 时所对应的沉速值,是表征泥沙沉降过程的重要特征沉速。为了更为全面地表征团聚体对沉速的影响,再增选  $v_{75}$  和  $v_{25}$  这 2 个泥沙特征沉速进行统计分析,分别统计对应于累计沉速分布比例达到 75% 和 25% 时的沉速值。由表 3 可知,单粒泥沙的特征沉速值  $v_p$  均比含有团聚体泥沙的  $v_a$  小,且二者之间均具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。这个结果说明,通过传统机械组成法所得的泥沙沉速与实际存在团聚体的泥沙沉速之间存在显著差异,团聚体对泥沙沉速具有显著增大作用。

团聚体对沉速的影响,在不同沉速范围之间存在差异,在不同土壤类型之间的差异也不尽相同(表 3)。为了能定量描述其影响大小,采用团聚体对沉速的增加率  $\eta$  来表示  $\eta = (v_a - v_p) / v_p$ 。对于 5 种试验土壤,团聚体对特征沉速的影响大小均为  $v_{25} > v_{50} > v_{75}$ (表 4)。团聚体的存在对小粒径泥沙颗粒的影响大于大粒径。这主要与不同粒径团聚体的特性有关,通常大团聚体的稳定性较差,遇水后迅速破裂,在之后的泥沙沉降过程中主要以其本粒级的单粒为主,团聚体相对较少。这个结论与郝燕芳等<sup>[9]</sup>研究所得结论相似,侵蚀泥沙中大多数黏粒均以团聚体的形式存在,尤其以粉团形式存在的最多,而粉

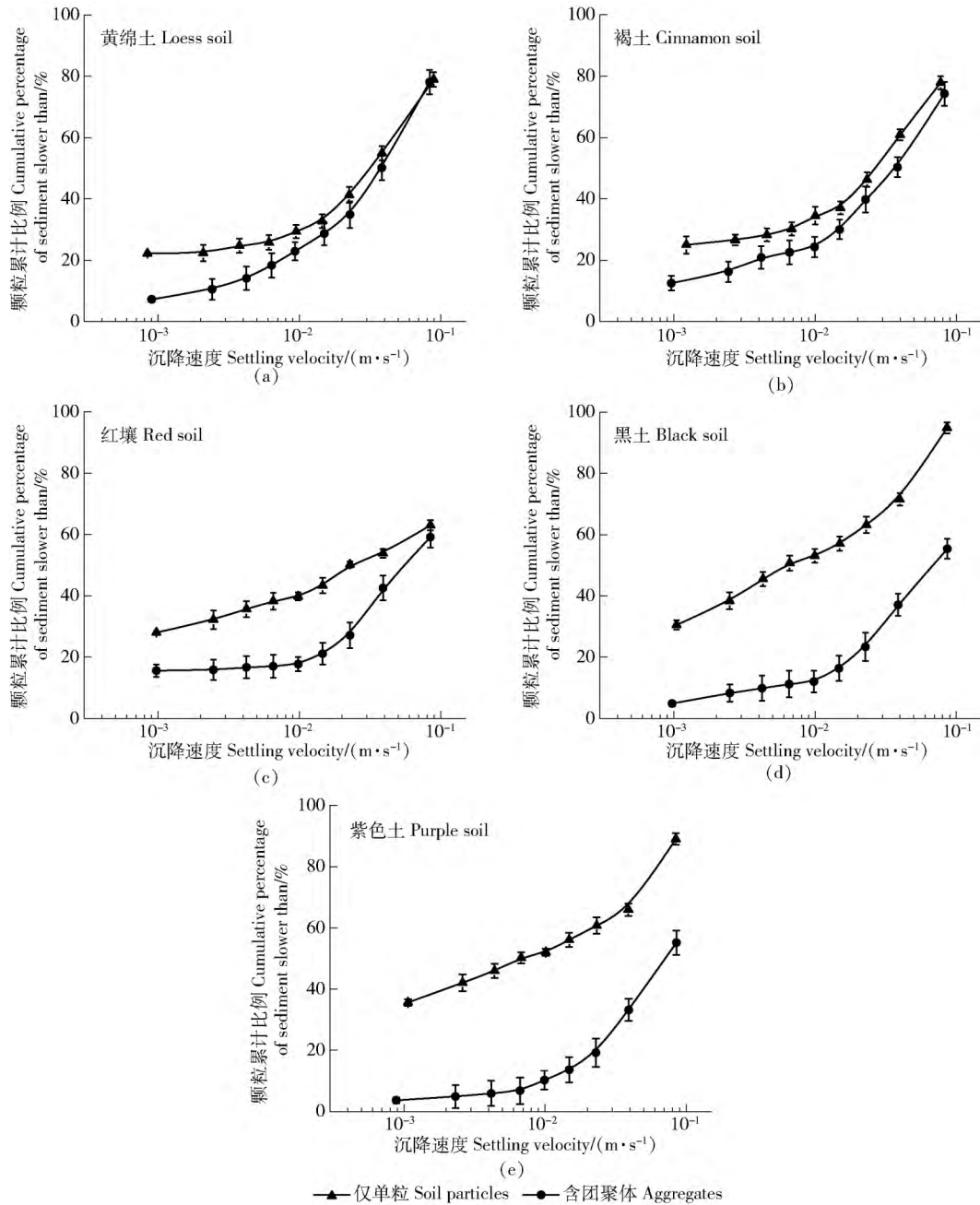


图2 泥沙沉降速度分布图

Fig. 2 Settling velocity distributions of sediment

粒与砂粒则主要以其本粒级的单粒为主。

将团聚体对不同特征沉速的增率进行平均,用来表征团聚体对这种土壤沉速的整体增大效果。5种土壤团聚体对泥沙沉速的增大率为:紫色土(16.90) > 黑土(13.60) > 红壤(7.86) > 褐土(2.33) > 黄绵土(0.62)。造成这种差异的主要原因是不同土壤以及不同粒级间团聚体不同。

## 2.2 沉速增率影响因素分析

### 2.2.1 土壤矿质颗粒特征

沉速增率与黏粒质量分数呈正相关且相关系数达0.88,与粉粒和砂粒质

量分数相关性较小(表5)。这些结果表明,团聚体对沉速的影响与土壤单粒粒径分布有一定的关系。在土壤颗粒特征中,黏粒质量分数是表征团聚体对沉速影响的较合理参数。土壤矿质颗粒 $D_{50}$ 、 $D_{MWD}$ 以及 $D_{CMD}$ 与沉速增率相关性均较小,这说明团聚体对沉速的影响与土壤单粒代表粒径的关系并不大。

### 2.2.2 土壤团聚体特征

沉速增率与团聚度极显著相关且相关系数为0.99,与团聚体3个粒径指标相关程度均较高,其中 $D_{MWD}$ 相关系数达0.98,极显著性相关。 $D_{CMD}$ 和 $D_{50}$ 呈显著相关,与分散系数和结

表 3 泥沙特征沉速值

Tab. 3 Typical settling velocities of sediment

沉速 Settling velocity	黄绵土 Loess soil	褐土 Cinnamon soil	红壤 Red soil	黑土 Black soil	紫色土 Purple soil
$v_{a75}$	0.081 ± 0.003Aa	0.088 ± 0.004Aa	0.168 ± 0.004Ab	0.180 ± 0.004Ac	0.180 ± 0.004Ac
$v_{p75}$	0.078 ± 0.003Ba	0.070 ± 0.003Bb	0.154 ± 0.003Bc	0.047 ± 0.002Bd	0.057 ± 0.002Be
$v_{a50}$	0.039 ± 0.002Aa	0.038 ± 0.003Aa	0.059 ± 0.004Ab	0.072 ± 0.004Ac	0.074 ± 0.003Ac
$v_{p50}$	0.033 ± 0.002Ba	0.028 ± 0.001Bb	0.023 ± 0.001Bc	0.006 ± 0.001Bd	0.007 ± 0.001Bd
$v_{a25}$	0.012 ± 0.001Aa	0.010 ± 0.002Aa	0.020 ± 0.003Ab	0.025 ± 0.002Ac	0.030 ± 0.002Ad
$v_{p25}$	0.004 ± 0.001Ba	0.001 ± 0.000Bb	0.001 ± 0.000Bb	0.001 ± 0.000Bb	0.001 ± 0.000Bb

注: 表中同列不同大写字母表示团聚体与单粒之间差异显著, 同行不同小写字母表示不同土壤之间差异显著(最小显著差异法进行均值检验,  $P < 0.05$ )。Notes: The different capital letters within the column mean significantly different between soil particles and aggregates. The different small letters within the row mean significantly different between different soils. (mean value test by LSD,  $P < 0.05$ ).  $v_{a75}$ ,  $v_{a50}$ ,  $v_{a25}$  refer to the typical settling velocities of sediment containing aggregates where the corresponding cumulative percentage is 75%, 50% and 25%, respectively, and  $v_{p75}$ ,  $v_{p50}$ ,  $v_{p25}$  refer to the typical settling velocities of sediment only soil particles where the corresponding cumulative percentage is 75%, 50% and 25%, respectively.

表 4 泥沙特征沉速增大率

Tab. 4 Increasing rate of typical settling velocities

沉速 Settling velocity	黄绵土 Loess soil	褐土 Cinnamon soil	红壤 Red soil	黑土 Black soil	紫色土 Purple soil
$v_{75}$	0.04	0.26	0.09	2.89	2.17
$v_{50}$	0.18	0.37	1.59	10.26	10.06
$v_{25}$	1.63	6.37	21.91	27.67	38.46
$v_{mean}$	0.62	2.33	7.86	13.60	16.90

Notes:  $v_{75}$ ,  $v_{50}$ ,  $v_{25}$  are the settling velocities where the corresponding cumulative percentage is 75%, 50% and 25%, respectively.  $v_{mean}$  is the average of the typical setting velocities.

表 5 土壤矿质颗粒特征与泥沙沉速增大率的相关系数

Tab. 5 Correlation between soil characteristics and the increasing rate of settling velocity

指标 Index	相关关系 Correlation
黏粒 Clay	0.88*
粉粒 Silt	-0.16
砂粒 Sand	-0.32
$D_{50}$	-0.06
$D_{MWD}$	-0.24
$D_{CMD}$	-0.61

注: \* 表示显著相关 ( $P < 0.05$ )。Notes: \* indicates significant correlation ( $P < 0.05$ ).

构系数的关系不大(表 6)。这个结果表明,在评价土壤团聚体特征的各种指标中,团聚体  $D_{MWD}$  和团聚度用来表征团聚体对沉速的影响是较为合理的。 $D_{MWD}$  作为重要参数已在许多研究中都得以证实,闫峰陵等<sup>[16]</sup>在红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响研究中得出,湿筛团聚体  $D_{MWD}$  和  $WSA_{>0.25}$  对泥

沙粒径影响最大;陈正发等<sup>[17]</sup>在关于紫色土旱坡的侵蚀过程研究中发现,  $D_{MWD}$  能更好反映土壤团聚体与侵蚀产沙和产流间的关系。团聚度在土壤侵蚀颗粒特征研究中应用较少,但因为其反映的是团聚体与相应单粒质量的比值,用来评价未分散与分散泥沙的差异是较为合理的参数,其相关关系最好也充分得以证明。

表 6 土壤团聚体特征与泥沙沉速增大率的相关系数

Tab. 6 Correlation between aggregate characteristics and the increasing rate of settling velocity

指标 Index	相关关系 Correlation
$D_{MWD}$	0.98**
$D_{CMD}$	0.97*
$D_{50}$	0.96*
$WSA_{>0.25}$	0.90*
团聚度 Aggregation degree	0.99**
分散系数 Dispersive coefficient	0.47
结构系数 Structure coefficient	0.60

注: \*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。Notes: \*\* indicates highly significant correlation ( $P < 0.01$ ).

### 3 结论与讨论

含有团聚体的泥沙沉速与仅单颗粒泥沙差别较大,土壤团聚体对泥沙沉速有显著的增大作用。对于 5 种试验土壤,团聚体对泥沙特征沉速的增大影响均表现对小粒径泥沙颗粒的影响大于大粒径。不同土壤类型间,团聚体对沉速的增大不同,表现为紫色土 > 黑土 > 红壤 > 褐土 > 黄绵土。

土壤颗粒(包括土壤矿质颗粒以及团聚体)性

质特征不同是团聚体对沉速影响不同的主要原因。在土壤特征参数当中,团聚体  $D_{MWD}$  与团聚度能够较好地反映团聚体对泥沙沉速的影响大小,沉速增率与团聚体  $D_{MWD}$  和团聚度有显著的线性相关关系。

#### 4 参考文献

- [1] 庞玲,张科利,朱明,等. 泥沙沉降速度实验研究方法回顾与评述[J]. 人民黄河,2006,28(5): 50.  
PANG Ling, ZHANG Keli, ZHU Ming, et al. Review of experimental research method on settling velocity of sediment[J]. Yellow River, 2006, 28(5): 50.
- [2] STOKES G G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums [M]. Cambridge: Pitt Press, 1851: 86.
- [3] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社,1983: 129.  
QIAN Ning, WAN Zhaohui, Sediment movement mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1983: 129.
- [4] CHENG Niansheng. Simplified settling velocity formula for sediment particle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(2): 149.
- [5] 李铭志,何炎平,诸葛玮,等. 泥沙颗粒沉降速度计算方法比较分析[J]. 水运工程,2014(6): 6.  
LI Mingzhi, HE Yanping, ZHUGE Wei, et al. Comparative analysis of settling velocity for sand. [J]. Port & Waterway Engineering, 2014(6): 6.
- [6] AKSOY H, KAVVAS M L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models [J]. Catena, 2005, 64(2/3): 247.
- [7] WALLING D E. Erosion and sediment yield research—some recent perspectives [J]. Journal of Hydrology, 1988, 100(1/3): 113.
- [8] BEUSELINCK L, STEEGEN A, GOVERS G, et al. Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt [J]. Geomorphology, 2000, 32(1/2): 69.
- [9] 郝燕芳,刘宝元,杨扬,等. 中国5种典型土壤的侵蚀泥沙粒径分布特征[J]. 水土保持学报,2018,32(2): 150.  
HAO Yanfang, LIU Baoyuan, YANG Yang, et al. Size distribution characteristics of sediments eroded from five typical soil in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 150.
- [10] HU Y, KUHN N J. Aggregates reduce transport distance of soil organic carbon: are our balances correct? [J]. Biogeosciences Discussions, 2014, 11(6): 6209.
- [11] 胡亚鲜, KUHN N J. 利用土壤颗粒的沉降粒级研究泥沙的迁移与分布规律[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1115.  
HU Yaxian, KUHN N J. Using settling velocity to investigate the patterns of sediment transport and deposition [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(5): 1115.
- [12] LOVELL C J, ROSE C W. The effects of sediment concentration and tube-diameter on particle settling velocity measured beyond Stokes' range; experiment and theory [J]. Journal of Sedimentary Research, 1991, 61(4): 583.
- [13] LOCH R J, SLATER B K, DEVOIL C. Soil erodibility ( $K_m$ ) values for some Australian soils [J]. Australian Journal of Soil Research, 1998, 36(6): 1045.
- [14] SVEN O. The size distribution of particles in soils and the experimental methods of methods of obtaining them [J]. Soil Science, 1925, 19(1): 1.
- [15] LOVELL C J, ROSE C W. Measurement of soil aggregate settling velocities. 1. A modified bottom withdrawal tube method [J]. Australian Journal of Soil Research, 1988: 26(1): 55.
- [16] 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.  
YAN Fengling, SHI Zhihua, CAI Chongfa, et al. Effects of topsoil aggregate stability on soil erosion at hillslope on ultisoils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4): 577.
- [17] 陈正发,史东梅,谢均强,等. 紫色土旱坡耕地土壤团聚体稳定性特征对侵蚀过程的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(13): 2721.  
CHEN Zhengfa, SHI Dongmei, XIE Junqiang, et al. Aggregate stability of purple soil and its impacts on soil erosion of slope dry land [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(13): 2721.