

土壤理化性质与土壤溅蚀速率的相关性研究

孙贞婷^{1,2}, 胡霞^{1,2}, 李宗超^{1,2}, 刘勇^{1,2}

(1. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要: 土壤溅蚀是土壤侵蚀的初始阶段, 是降雨雨滴直接打击土壤表层引起的土壤颗粒分散和位移发生的过程。为研究土壤理化性质与土壤溅蚀速率的相关性, 研究通过人工模拟降雨溅蚀试验测定土壤溅蚀速率, 运用 SPSS 20.0 软件, 对土壤理化性质与土壤溅蚀速率进行了 Pearson 相关系数分析。结果表明: 土壤渗透性、分散率、团聚度和土壤粒级与土壤溅蚀速率相关性最大。土壤的渗透系数在整个降雨历时阶段对土壤的溅蚀速率一直呈现负影响。分散率在降雨历时为 15 min 时对土壤溅蚀速率呈显著负影响。团聚度对土壤溅蚀速率的影响由 $T=15$ min 时的显著正相关变成 $T=20$ min 时的极显著正相关。土壤粒级和土壤溅蚀速率相关性很大, 且关系较为复杂。相较于其他 4 种粒级中, 粒级范围在 $D<0.002$ mm 的土壤颗粒对土壤溅蚀速率影响最大, 且在降雨历时为 15~20 min 时, 对土壤溅蚀速率皆有显著正相关性。另外, 粒级范围在 $0.2\leq D<2$ mm 和 $0.02\leq D<0.2$ mm 的土壤颗粒分别在 $T=15$ min 和 $T=20$ min 时对土壤溅蚀速率有显著负相关性。土壤粒级对土壤溅蚀速率的相关性随降雨历时的变化可能与土壤结皮有关。

关键词: 土壤溅蚀; 土壤理化性质; 渗透系数; 团聚度; 土壤颗粒组成

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)03-0053-06

Correlations Between Soil Physical-Chemical Properties and Soil Splash Erosion Rate

SUN Zhenting^{1,2}, HU Xia^{1,2}, LI Zongchao^{1,2}, LIU Yong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Soil splash erosion is the beginning of soil erosion process, and results in soil particle dispersion and migration when the raindrop directly blows topsoil. To study the correlations between soil physical-chemical properties and soil splash erosion rate, we measured soil splash erosion rate based on artificial simulated rainfall splash erosion experiment, and used SPSS 20.0 software to analyze the Pearson correlation coefficient between the soil physical-chemical properties and soil splash erosion rates. The results show that soil permeability, dispersion rate, aggregation and soil particle have a great influence during the rainfall; soil permeability has negative effects on erosion rate in the whole duration of rainfall; the dispersion rate has a significant negative impact on the soil erosion rate when rainfall duration is 15 minutes; the correlation between aggregation and soil splash erosion rate changes from positive correlation when $T=15$ min to significantly positive correlation when $T=20$ min; soil particles are strongly correlated with soil splash erosion rate, and the relationship is more complex. Compared to the other four kinds of grain size, <0.002 mm soil particle has the greatest impact on soil erosion rate, and has a significant positive effect during the latest two rainfall events. $0.2\leq D<2$ mm or $0.02\leq D<0.2$ mm soil particle has a significant negative correlation on soil erosion rate when $T=15$ min and $T=20$ min, respectively. The correlation of soil erosion rate with soil particle sizes may be related to the soil crust.

Keywords: soil splash erosion; soil physical-chemical properties; soil permeability; aggregation; soil particle

土壤溅蚀是指地表土壤在雨滴动能作用下, 导致土壤结构破坏, 使表层土壤孔隙减少或者堵塞, 土壤团粒被分散、剥离, 并使部分土粒沿抛物线的运动轨

迹向四周飞溅的过程^[1], 是土壤侵蚀中极为普遍的一种侵蚀方式。Ellison 将土壤侵蚀分为四个阶段^[2], 即雨滴对土壤的溅蚀、径流的溅蚀、雨滴对溅蚀产生

的土粒的搬运、径流对土粒搬运。Ellison 认为溅蚀是土壤侵蚀的第一步。溅蚀还会填塞土壤孔隙,降低土壤渗透性,阻止雨水入渗,增加地表径流,增强径流的侵蚀和搬运能力^[3],从而加剧水土流失,使土体板结,土地适耕性大大降低。因此,研究土壤溅蚀不仅可为理解土壤侵蚀机理提供理论依据,还对农业生产具有重要意义。郭耀文^[4]将土壤溅蚀过程分为三个阶段:(1)干土溅散阶段:降雨初期,雨滴降落到相对较干燥的土表,因土壤颗粒间隙有空气充填,土粒还来不及吸取雨水,细小土粒只随雨滴溅散开,但仍保持原来的结构;(2)泥浆溅散阶段:随降雨时间延长,表层土壤孔隙充填的水分逐渐增多,并继续受雨滴的冲击、震荡,引起土壤结构破坏。当其土壤表层水分增加到过于饱和状态后,土壤即成为稀泥状态,泥浆受雨滴冲击,以稀泥状态溅散;(3)层状侵蚀阶段:随降雨过程继续延长,土表的泥浆将阻塞土壤孔隙,妨碍水分继续下渗,形成泥浆状的地表浑浊径流,造成地表土粒均匀地流失。土壤溅蚀的影响因素可归结为土壤性质(土壤颗粒、土壤结皮、渗透率等)、降雨特性(雨强、降雨历时、降雨能量等)及其他因素(坡度等)^[5-6]。很多研究表明,土壤理化性质对土壤溅蚀有很大影响,胡霞等^[7]研究结果表明,土壤结皮的存在会降低土壤的溅蚀速率;尹武君等^[8]研究结果表明土壤密实度越大,土壤溅蚀量越小;Wuddivira 等^[9]研究结果表明在湿润速率较小的情况下,提高土壤含水量可有效降低土壤溅蚀率。但是,土壤理化性质中哪

种性质对土壤溅蚀影响较大,对土壤溅蚀的作用是促进还是抑制,尚不明确。

本研究通过人工模拟降雨溅蚀试验,利用溅蚀盘^[10-11]得到土壤的溅蚀速率,然后运用 SPSS 20.0 软件,分析土壤粒级、团聚度、渗透系数、水稳性团聚体平均重量直径等土壤理化性质与土壤溅蚀速率的 Pearson 相关系数,分析土壤理化性质与土壤溅蚀速率的相关性。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验在中国科学院地理科学与资源研究所坡地室人工模拟降雨大厅中进行。模拟降雨装置是由一套直立管道、调压器、压力表、向下的喷嘴装置构成,直立管道高 4.75 m,水平延伸管长 0.9 m,向下的喷头联结于水平延伸管上,喷嘴型号是美国 Spraco,其离地高度 4.75 m。

试验用溅蚀盘为直径 30 cm、高 10 cm 的圆型盘,盘中心是一直径 10 cm、高 3 cm 的圆型活动装土盘,盘底部打上小孔。外环是用来收集表面水流冲刷的泥沙,使之不与溅蚀土粒混杂。此装置是在 Morgan 溅蚀盘的基础上,对盛试验用土的内圆盘外加宽 1 cm 改进而成。

1.2 试验样品与试验设计

供试土壤采自湖北省,试验材料取自不同的地点,采样深度 0—10 cm,在野外直接挖取、装袋。取样地点、母质类型、土壤利用状况及土壤类型列于表 1 中。

表 1 供试土样来源、成土条件以及土地利用状况

土样编号	土壤类型	取样地点	地形部位	母质	土壤利用状况
1	红壤	通城五里铺	低丘顶部	花岗岩	裸露荒地
2	红壤	通城五里铺	低丘底部	花岗岩	耕地
3	红壤	通城五里铺	低丘中部	花岗岩	灌木林
4	红壤	崇阳梅冲	低丘中部	红砂岩	耕地
5	红壤	崇阳休干所	低丘顶部	第四纪红色黏土	林地
6	黄棕壤	罗田骆驼岭	低丘中部	花岗岩	菜地
7	黄棕壤	罗田骆驼岭	低丘中部	花岗岩	林地
8	黄棕壤	华农黄土坡	岗坡	下蜀黄土	草地
9	黄棕壤	华农狮子山	底丘下坡	砂岩	林地
10	红壤	咸宁贺胜桥	低丘中坡	第四纪红色黏土	耕地

试验前将土壤样品风干并过土壤分析筛,利用干筛法对供试土壤进行处理,得到 10 种土壤的粒级百分含量,见表 2。

试验前通过常规土壤理化分析方法测定土壤的基本理化性质,见表 3。溅蚀盘中土壤样品容重控制在 1.30 g/cm³。雨强控制为 1.20 mm/min,降雨时间分别为 5,10,15,20 min。降雨后收集溅蚀盘中的土样分析溅蚀速率,得到表 4。每个处理采用 3 个重复。

$$\text{团聚体分散度} = \frac{>0.25 \text{ mm 团聚体含量(干筛-湿筛)}}{>0.25 \text{ mm 干筛团聚体含量}} \times 100\%$$

$$\text{分散率} = \frac{\text{微团聚体分析结果中} < 0.02 \text{ mm 颗粒含量}}{\text{机械分析结果中} < 0.02 \text{ mm 颗粒含量}} \times 100\%$$

$$\text{团聚度} = \frac{a-b}{b} \times 100\%$$

式中: a 是土壤微团聚体 $> 0.02 \text{ mm}$ 稳定性微团聚体含量; b 是土壤颗粒分析时 $> 0.02 \text{ mm}$ 粒级的颗粒含量。

1.3 数据分析方法

利用软件 Spss 20.0 分析土壤团粒结构、土壤结构特征与土壤溅蚀速率的 Pearson 相关系数,置信水平 $p=0.05$,即 $p<0.05$ 为显著相关, $p<0.01$ 为极显著相关。

表 2 10 种土壤的粒级百分含量 %

土样 编号	石砾 (>2 mm)	粗砂 (2~0.2 mm)	细砂 (0.2~0.02 mm)	粉粒 (0.02~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)	土壤 质地
1	14.62	29.02	29.73	23.32	12.12	砂质壤土
2	15.38	43.48	34.83	12.14	9.06	砂质壤土
3	16.85	19.3	15.36	22.83	42.42	壤质黏土
4	2.08	1.46	55.01	18.63	24.82	砂质黏壤土
5	16.73	6.53	25.8	14.92	52.75	黏土
6	11.92	50.35	29.99	10.48	9.18	砂质壤土
7	22.93	51.42	22.84	11	14.74	砂质壤土
8	0.44	1.43	25.69	38.39	34.39	壤质黏土
9	18.1	7.77	22.75	24.2	45.17	黏土
10	0.38	2.55	17.68	46.59	34.22	粉砂质黏土

表 3 10 种土壤的结构特征

土样 编号	水稳性团聚体 平均重量直径/mm	>0.25 mm 水稳性 团聚体/%	>0.5 mm 水稳性 团聚体/%	团聚体 分散度/%	分散率/ %	团聚度	渗透系数/ (mm·min ⁻¹)
1	0.98	44.96	38.29	48.9	15.67	62.48	0.08
2	1.06	49.6	39.81	48.43	72.79	8.27	0.23
3	4.47	90.65	87.22	7.25	46.44	110.54	0.65
4	0.78	44.66	28.36	54.32	50.46	41.46	0.71
5	4.77	94.9	92.11	3.79	44.78	127.5	1
6	1.89	65.69	56.42	32.36	70.42	8.23	2.04
7	4.25	89.21	84.6	6.59	70.09	11.54	4.63
8	3.83	82.94	78.56	16.1	58.4	124.19	0.27
9	1.58	58.25	49.02	41.33	57.9	105.61	0.16
10	0.76	43.67	30.04	55.54	67.24	148	0.44

表 4 10 种土壤不同降雨历时溅蚀速率 g/(m²·min)

时间/min	土样编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	5.35	6.24	4.53	3.06	6.11	3.18	3.18	4.97	7.51	3.57
10	7.64	11.08	3.95	7.64	6.37	5.09	6.24	7.38	6.24	4.33
15	8.15	0.51	9.93	8.15	7.13	3.57	1.78	6.88	7.89	6.88
20	0.51	0.89	4.84	0.51	4.58	0.35	1.53	1.53	2.04	5.09

2 结果与分析

2.1 土壤的溅蚀速率特征

图 1 是 10 种土壤在不同降雨历时条件下的溅蚀速率变化曲线。在降雨过程中,雨滴击打土壤表面,使其表面条件不断发生变化,溅蚀速率不断改变。

在 5~10 min 内,除了 3 号和 9 号土壤的溅蚀速率缓慢减小外,其余 8 种土壤的溅蚀速率随降雨历时的延长而增大;在 10~15 min 内,2 号、6 号和 7 号土壤溅蚀速率随降雨历时而减小,8 号土壤溅蚀速率较为稳定,其余土壤的溅蚀速率随降雨历时的延长而增大。在 15~20 min 内,2 号和 7 号土壤溅蚀速率稍有回升,其余土壤的溅蚀速率随降雨历时的延长而减小。在 5~20 min 内,10 种土壤的溅蚀速率随降雨历时延长而发生升降波动,是由于表土结皮发育不完善,且形成与破坏交替进行^[12](表土结皮发育过程见

图 2—6)。雨滴的下落过程是重力势能转化为动能的过程。当雨滴降落到地表时,雨滴击打表土,其动能损耗在击溅土壤颗粒。当雨滴动能克服土粒间的黏结作用及土粒的重力势能时,就会使土粒发生分散和位移。土壤被溅蚀的量取决于土壤的抗蚀能力^[13],而表土结皮愈厚抗溅蚀力愈强^[14]。未降雨前土壤表面基本上都为大团聚体,不易被雨滴击溅而发生位移。随降雨历时的延长,雨滴打击破坏表层土壤的结构,使得团聚体被破坏为细小颗粒或微团聚体,土壤颗粒分散并堵塞土壤孔隙,同时雨滴对于表土的打击和压实作用,还会导致某些土壤上形成薄的致密层,即表土结皮^[15]。当土壤结皮发育不断完善时,土壤表面抗溅蚀能力也不断增强,且结皮愈厚抗溅蚀力愈强,从而土壤溅蚀速率减小^[14,16-17]。

2.2 土壤理化性质对土壤溅蚀速率的影响

对 10 种土壤不同降雨历时下的溅蚀速率与相应

的水稳性团聚体平均重量直径、 >0.25 mm 水稳性团聚体、 >0.5 mm 水稳性团聚体、团聚体分散度、分散率、团聚度、渗透系数等结构特征和粒级百分含量进行皮尔森(Pearson)相关分析,得到土壤溅蚀速率和土壤主要理化指标之间的相关性见表5。

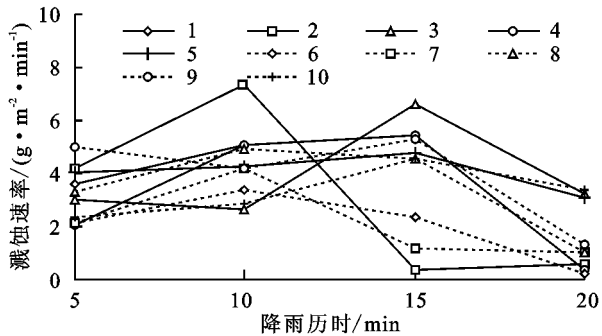


图1 10种土壤在不同降雨历时条件下的溅蚀速率变化曲线

当降雨历时为5 min时,土壤的渗透系数和土壤的溅蚀速率相关性较大,且呈负相关关系。在降雨初期,土壤溅蚀处于干土溅散阶段,土壤表面较干燥,雨滴动能主要用来湿润土壤,细小土粒随雨滴溅散开,溅蚀量较少。因此,土壤的渗透系数越大,雨滴溅散干土量越少,土壤溅蚀速率越小。

随着降雨历时的延长,当 $T=10$ min 时,土壤溅蚀速率与土壤中 $0.02 \leq D < 0.2$ mm 的颗粒含量的相关性最大,且为正相关性;其次是土壤的团聚度与土壤溅蚀速率的相关性相对较大,且为负相关。在降雨初期,土壤表面的细颗粒在雨滴的动能打击作用下大部分被溅蚀,随着雨滴的继续打击,雨滴的动能一部分被土壤吸收,另外未被吸收的“剩余能量”中,一部分被用来溅散较大颗粒^[18]。因此,土壤中 $0.02 \leq D < 0.2$ mm 的颗粒含量越多,溅蚀速率越大。在降雨历时10 min 时,雨滴动能不断耗散在分散大的团聚体上,从而为表土结皮的发育提供物质,此时用来溅蚀土壤

颗粒的雨滴动能很少^[18]。土壤团聚度是土壤中 0.02 mm 稳定性微团聚体含量,因此土壤团聚度越大,土壤溅蚀速率越小。

当降雨历时为15 min 时,土壤的溅蚀速率与土壤的 $0.2 \leq D < 2$ mm 的颗粒含量、分散率呈显著负相关,与土壤中 $D < 0.002$ mm 的颗粒含量、团聚度呈显著正相关。降雨初期由于细颗粒被雨滴溅散,随降雨历时的延长,表土大颗粒相对含量增大,而大的土壤颗粒($D > 0.2$ mm)不易被溅蚀。故而,当降雨历时为15 min 时,溅蚀速率减小,即土壤溅蚀速率与 $0.2 \leq D < 2$ mm 的土壤颗粒含量呈显著负相关。分散率是表示土壤可蚀性的指标,分散率愈大,土壤抗冲性越小,土粒越容易被分散冲刷,其大小取决于土粒与水的亲和力和胶结力^[19]。从图2—6中土壤结皮发育过程可以看出,当降雨历时为15 min 时,表土结皮的发育趋向完整^[15],表土上层颗粒逐渐变得越来越紧实,土壤的抗溅蚀能力增强,因此溅蚀速率越小。团聚度越大的土壤,其稳定性团聚体含量越多,越不容易形成表土结皮^[19],所以其土壤的抗溅蚀能力越小。此外,分散率与团聚度呈负相关(表5),所以团聚度越大,分散率越小,抗溅蚀能力越小,故而土壤溅蚀速率越大。

随着降雨历时的继续延长,当 $T=20$ min 时,土壤中团聚度与土壤的溅蚀速率呈极显著正相关,团聚度是影响溅蚀速率的最大因素。团聚度越大的土壤,越不容易形成表土结皮^[20],土壤的抗溅蚀能力越小,溅蚀速率越大。而此时土壤中 $0.02 \leq D < 0.2$ mm 的大颗粒和 $D < 0.002$ mm 的小颗粒不易被溅蚀^[21],所以与土壤的溅蚀速率呈显著负相关。

在 $T=0 \sim 20$ min 整个降雨历时过程中,土壤溅蚀速率与渗透系数都呈负相关,即在不同降雨历时过程中,都有渗透系数越大,土壤溅蚀速率越小的规律。

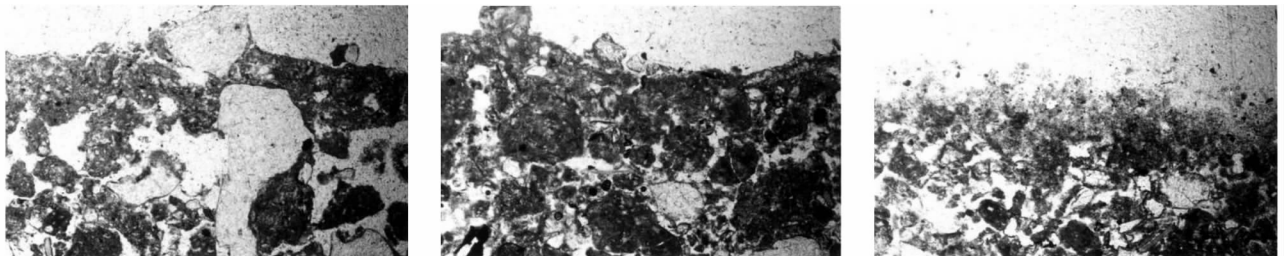


图2 3号土壤, $T=5, 10, 15$ 分钟(单偏光, 4×3.3)

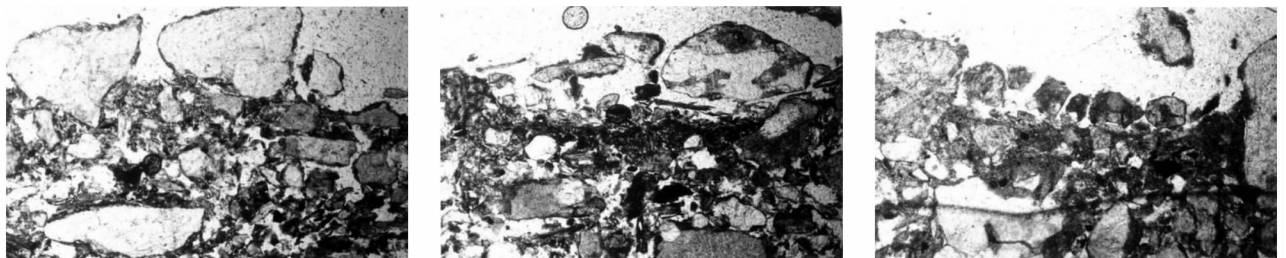


图3 6号土壤, $T=5, 10, 15$ 分钟(单偏光, 4×3.3)

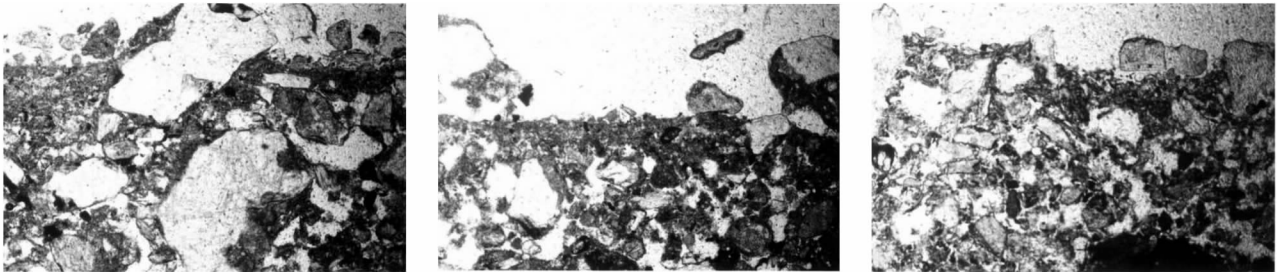


图 4 7 号土壤,T=5,10,15 分钟(单偏光,4×3.3)

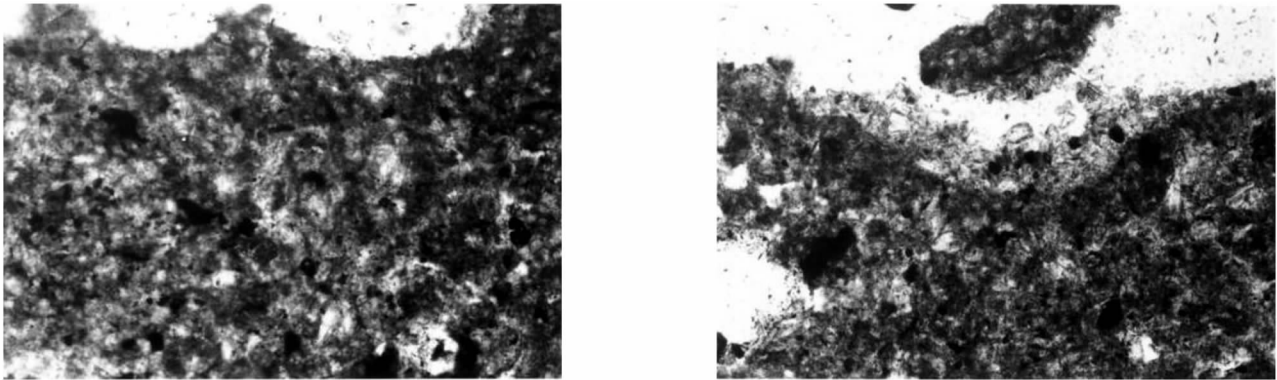


图 5 8 号土壤,T=15 分钟(单偏光,10×3.3)、T=20 分钟(单偏光,4×3.3)

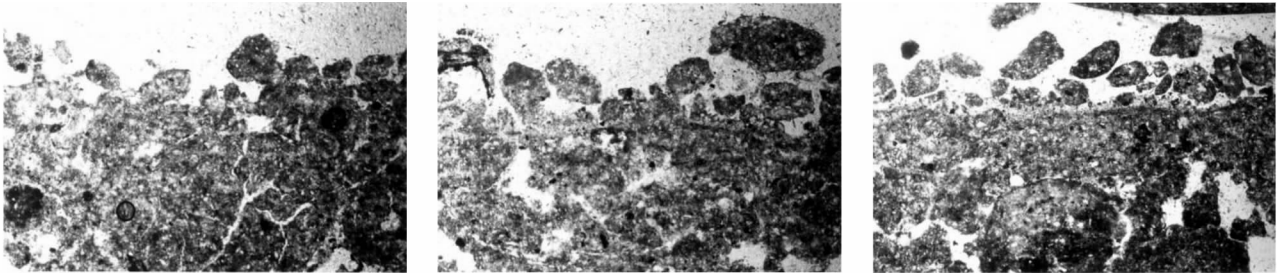


图 6 10 号土壤,T=5,15,20 分钟(单偏光,4×3.3)

表 5 土壤理化性质与土壤溅蚀速率的 Pearson 相关系数

项目	T=5	T=10	T=15	T=20	d	d_1	d_2	团聚体分散度	分散率	团聚度	渗透系数	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
d	0.023	-0.322	0.071	0.421												0.457
d_1	0.019	-0.337	0.020	0.380	0.992 **											0.431
d_2	0.071	-0.310	0.022	0.368	0.991 **	0.995 **										0.413
团聚体分散度	-0.007	0.325	-0.007	-0.350	-0.992 **	-0.996 **	-0.997 **									-0.382
分散率	-0.230	0.013	-0.668 *	-0.007	-0.001	0.071	0.017	-0.027								-0.166
团聚度	0.300	-0.465	0.703 *	0.770 * *	0.244	0.191	0.195	-0.155	-0.261							0.852 * *
渗透系数	-0.533	-0.221	-0.528	-0.135	0.419	0.455	0.427	-0.481	0.395	-0.499						-0.322
D_1	0.355	0.033	-0.289	-0.015	0.384	0.410	0.445	-0.447	-0.070	-0.358	0.450					-0.061
D_2	-0.213	0.191	-0.752 *	-0.455	0.021	0.076	0.100	-0.124	0.284	-0.822 * *	0.610	0.601				-0.764 *
D_3	-0.211	0.571	-0.104	-0.648 *	-0.472	-0.469	-0.502	0.472	-0.078	-0.508	-0.108	-0.314	-0.049			-0.382
D_4	-0.012	-0.315	0.481	0.438	-0.174	-0.229	-0.227	0.255	-0.069	0.771 * *	-0.483	-0.696 *	-0.682 *	-0.350		0.386
D_5	0.402	-0.440	0.657 *	0.753 *	0.457	0.431	0.413	-0.382	-0.166	0.852 * *	-0.322	-0.061	-0.764 *	-0.382	0.386	1

注: d 表示水稳性团聚体平均重量直径, $d>0.25\text{ mm}$, $d_2>0.05\text{ mm}$; D_1,D_2,D_3,D_4 和 D_5 分别表示土壤粒级为 $D>2\text{ mm}$, $0.2\leq D<2\text{ mm}$, $0.02\leq D<0.2\text{ mm}$, $0.002\leq D<0.02\text{ mm}$ 和 $D<0.002\text{ mm}$; *表示在 $p<0.05$ 水平上显著; * *在 $p<0.01$ 水平上极显著。

3 结 论

本文运用 SPSS 20.0 软件对 10 种不同土壤在不同降雨历时条件下的溅蚀速率和土壤理化性质进行 Pearson 相关系数分析,结果得出分散率、团聚度和

土壤粒级与土壤溅蚀速率相关性最大。在降雨初期,土壤的渗透系数对土壤的溅蚀速率影响较大,且渗透系数越大,土壤的溅蚀速率越小;随着降雨历时的延长($T=10\text{ min}$),溅蚀速率与团聚度呈负相关,即团聚度越大,土壤的溅蚀速率越小;之后,随着降雨历时

的继续延长($T=15\sim 20$ min),溅蚀速率与团聚度由显著正相关变化到极显著正相关,两者之间相关性的动态变化可能是与表土结皮的发育有关。在降雨后期($T=15\sim 20$ min),土壤的颗粒组成对土壤的溅蚀速率影响也较大,当 $T=10$ min时,土壤颗粒粒径在 $0.02\leq D<0.2$ mm范围内的颗粒与土壤溅蚀速率相关性最大;随降雨历时延长($T=15$ min)时,土壤的溅蚀速率与土壤的 $0.2\leq D<2$ mm的颗粒含量呈显著负相关,与 $D<0.002$ mm的颗粒含量呈显著正相关;当降雨历时继续延长($T=20$ min),土壤中 $0.02\leq D<0.2$ mm的大颗粒和 $D<0.002$ mm的小颗粒与土壤的溅蚀速率呈显著负相关。

参考文献:

- [1] 张洪江. 土壤侵蚀原理[M]. 2版. 北京:中国林业出版社,2006:41-52.
- [2] Ellison W D. Soil Erosion Studies(Part I)[J]. Applied Engineering in Agriculture,1944,25:53-55.
- [3] 刘秉正,吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安:陕西人民出版社,1997:37-38.
- [4] 郭耀文. 雨滴侵蚀特征分析[J]. 中国水土保持,1997(4):15-17.
- [5] 高学田,包忠谟. 降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响[J]. 水土保持学报,2001,15(3):24-26.
- [6] 范荣生,李占斌. 坡地降雨溅蚀及输沙模型[J]. 水利学报,1993(6):24-29.
- [7] 胡霞. 红壤结皮发育特征及其与土壤溅蚀的关系[J]. 中国农学通报,2015,31(26):139-144.
- [8] 尹武君,王健,孟秦倩,等. 地表压实对雨滴溅蚀量的影响[J]. 节水灌溉,2010(10):26-28.
- [9] Wuddivira M N, Stone R J, Ekwue E I. Clay, organic matter, and wetting effects on splash detachment and aggregate breakdown under intense rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009,73(1):226-232.
- [10] Savat J, Poesen J, Leuven. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Part I: The calculation of absolute data on detachability and transportability[J]. Catena, 1981(8):1-17.
- [11] Wan Y, El-Swaify S A, Sutherland R A. Partitioning inter-rill splash and wash dynamics: A novel laboratory approach [J]. Soil Technology, 1996(9):55-69.
- [12] 程琴娟,蔡强国. 我国水土流失典型区土壤溅蚀特征研究[J]. 水土保持通报,2010,30(1):17-21.
- [13] 胡伟,郑粉莉,边锋. 降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响[J]. 生态学报,2016,36(15):4708-4717.
- [14] 宋维秀,樊萍,魏国良. 单雨滴降雨对结皮土壤溅蚀的影响[J]. 青海大学学报:自然科学版,2005,23(1):59-61.
- [15] 胡霞. 表土结皮形成过程特征以及与土壤溅蚀的关系[D]. 武汉:华中农业大学,2003.
- [16] 胡霞,严平,李顺江,等. 人工降雨条件下土壤结皮的形成以及与土壤溅蚀的关系[J]. 水土保持学报,2005,19(2):13-16.
- [17] 韩学坤,吴伯志,安瞳昕,贺佳. 溅蚀研究进展[J]. 水土保持研究,2010,17(4):46-51.
- [18] 胡霞. 团粒结构对黄绵土溅蚀速率和结皮形成的影响研究[J]. 中国农学通报,2015,31(27):229-235.
- [19] 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.
- [20] 邓银霞. 湖北省几种母质发育的红壤、黄棕壤的可蚀性研究[D]. 武汉:华中农业大学,1991.
- [21] Middleton H E. Properties of Soil Which Influence Soil Erosion[M]. USA:RareBooksClub, 2012:16.

(上接第52页)

- [24] Abbaspour K C, Vejdani M, Haghighat S. SWAT -CUP calibration and uncertainty programs for SWAT [J]. Modsim International Congress on Modelling & Simulation Land Water & Environmental Management Integrated Systems for Sustainability, 2007,364(3):1603-1609.
- [25] 左德鹏,徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布式模拟[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2012,48(5):490-496.
- [26] 杨才敏. 土壤有机质与水土流失的关系定量研究[J]. 水土保持研究,2008,15(5):177-179.
- [27] 王辉,王全九,邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(3):10-13.