

不同类型土壤团聚体斥水性及其对溅蚀的影响

倪世民¹, 杨伟², 王杰³, 王军光¹, 蔡崇法¹

(1. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070; 2. 湖北省水利水电科学研究院, 武汉 430070; 3. 广东省生态环境技术研究所, 广州 510650)

摘要: 为明确土壤的斥水性特征及其对土壤溅蚀的影响, 以 3 种不同类型及利用方式土壤为研究对象, 探究了土壤斥水性分布规律及其影响因素, 系统分析了土壤斥水性对土壤溅蚀的影响。结果表明: (1) 耕地土壤的斥水性最低, 表层土壤斥水性高于下层, 黄褐土斥水性(13.15 sec)高于其他类型土壤, 整体上看, 斥水性受到土壤机械组成和游离铁、铝氧化物的显著影响($R^2 < -0.40$, $p < 0.01$); (2) 土壤溅蚀过程呈现为倒“V”形, 即一个陡涨陡落的特点, 土壤累计溅蚀量随降雨历时变化关系用对数函数可以很好地拟合($R^2 \geq 0.90$, $p < 0.01$); (3) 在一定雨强范围内, 斥水性对土壤溅蚀有着显著影响, 斥水性越大土壤发生溅蚀的程度也越大, 对数函数模型也可以很好地表达溅蚀指标随斥水性变化趋势。研究结果能为降雨侵蚀机制研究与侵蚀过程模型提供理论参考依据。

关键词: 土壤类型; 斥水性; 土壤溅蚀; 团聚体

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0167-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.027

Soil Water Repellency of Different Types of Soils Aggregate and Its Effect on the Splash Erosion

NI Shimin¹, YANG Wei², WANG Jie³, WANG Junguang¹, CAI Chongfa¹

(1. Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 2. Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070; 3. Guangdong Institute of Eco-environment Technology, Guangzhou 510650)

Abstract: In order to explore the relationships between soil splash erosion and water repellency, three types of soils (yellow cinnamon soil, brown-red soil, latosolic red soil) under different land uses (cultivated land, forest land, waste land) were selected to investigate the variations of soil water repellency (SWR) and its effect on soil splash erosion. Main results are shown as follows: (1) The SWR was the lowest for the arable soil among the studied three land uses, and it was higher in the surface soil layers than in the subsurface. Among all test soils, the SWR was largest for the cinnamon soil (13.15 sec). The SWR was significantly affected by soil mechanical composition and free iron aluminum oxides ($R^2 < -0.40$, $p < 0.01$). (2) Soil splash erosion rate generally increased initially, and then decreased. The relationship between the cumulative splash amount and rainfall duration could be well fitted by the logarithmic function model. (3) The SWR had a significant positive effect on splash erosion under a certain range of rain intensity, also showing a logarithmic function ($R^2 \geq 0.90$, $p < 0.01$). These findings could provide theoretical reference basis for rainfall erosion mechanism research and erosion process model.

Keywords: soil type; soil water repellency; splash erosion; aggregate

土壤斥水性,也叫疏水性,是指水分不能或很难湿润土壤颗粒表面的物理现象^[1],广泛存在于各种土壤中^[2]。斥水性影响土壤中很多物理、化学和生物过程,对生态环境与经济存在着一系列的影响。当土壤表面发生斥水现象时,会严重阻碍水分下渗,增加地表径流的滞留时间和地表径流量,加剧土壤侵蚀和水

土流失;在汛期来临之前,由于土壤之前长期处于干旱、含水率较低状态,在汛期前的几场大强度降雨时,土壤斥水性对水土流失的影响更为显著^[3]。

传统观点从土壤入渗角度分析斥水性与土壤侵蚀的关系,发现斥水性显著降低土壤的入渗能力,加快地表径流的产生速度,加大地表径流流量和流速,

从而加剧土壤侵蚀风险^[4-6]。在降雨击溅侵蚀过程中,研究者观察了不同降雨强度、降雨时间和土壤坡度条件下的土壤溅蚀分离过程,发现雨滴打击在斥水性土壤上,溅起的水滴虽然数量较少,但因其体积较大,可以携带走更多的泥沙^[7],这也说明了斥水性对土壤侵蚀的促进作用。

我国中南部作为我国重要粮食产区,水土流失问题严重^[8]。由于该地区土壤受长期耕作影响,表现出有机质量含量较低,质地较黏重,土壤风化程度相对较高。目前,关于土壤斥水性方面的研究大多数集中在有机质较高、质地偏砂的土壤上,而对于质地黏重、有机质偏低的矿质土壤相对较少。国内对于这类型的土壤斥水性状况及其影响因素的研究相对不足。因此,本文以我国华中、华南地区 3 种典型的旱作耕地与周边林地、荒地土壤为研究对象,测定其土壤斥水性的同时,探究土壤斥水性分布规律及其影响因素,并通过设计土壤溅蚀的试验方法来研究土壤斥水

性对土壤溅蚀的影响作用,以期为该地区的土壤水分合理高效利用和土壤改良治理工作提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 土样采集

研究区位于我国中南部典型的旱地农业耕作区,所处气候为亚热带季风气候。试验于 2015 年 6 月至 2016 年 4 月根据研究区水热条件变化及类型土壤分布特点,选取 3 种广泛分布的第四纪沉积黏土母质发育的低丘陵地区耕地土壤及其周边对照林地、荒地土壤。供试土样基本情况及分布见表 1。采样时选取发生层完整、土壤侵蚀度低的土壤,依其纵剖面依次选取 A 层(淋溶层、表土层)、B 层(淀积层、心土层)土样和 C 层(母质层)土样,林地与荒地只选取 A、B 两个层次。为保证田间原状土壤结构不被破坏,将土样平铺进实木(厚 1.5 cm)特制木盒(长 40 cm×宽 40 cm×高 5 cm)承装运回实验室,自然风干后,储藏备用。选取部分土样过 0.25, 2 mm 筛以供理化性质分析用。

表 1 供试土样分布基本情况

研究地区	土壤类型	采样位点	土地利用	年均气温/℃	年降水量/mm
湖北襄阳	黄褐土	32°19' N, 112°09' E	旱作耕地、荒草地、林地	15.8	878.3
湖北咸宁	棕红壤	30°00' N, 114°22' E	茶园、荒草地、林地	16.8	1409.0
广东韶关	赤红壤	24°18' N, 113°56' E	旱作耕地、荒草地、林地	20.4	1763.8

1.2 试验方法

1.2.1 土壤基本理化性质测定 土壤理化性质采用常规方法测定, pH 采用电极法测定(土水比 1:2.5 混合浸提); 土壤质地(国际制)采用吸管法测定; 有机质为重铬酸钾外加热法; 阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵(pH 7.0)交换法; 游离氧化物(Fe_d 和 Al_d)采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠(DCB 法)浸提, 非晶质氧化物(Fe_o 和 Al_o)采用草酸-草酸铵缓冲液浸提, 浸提液稀释后用等离子发射光谱(ICP)测定。土壤是成土母质在一定水热条件和生物作用下, 经过一系列物理、化学和生物作用而形成的, 因而土壤性质也随这些条件的变化呈现一定的变化规律。供试土壤的基本理化性质见表 2。

供试土壤有机质含量差异较大, 赤红壤林地 A 层土壤有机质最高达 34.27 g/kg, 最低出现在赤红壤 C 层土样有机质含量仅为 2.29 g/kg。有机质与土地利用方式之间关系密切, 整体表现为荒地>林地>耕地。不同层次间有机质含量也表现出显著差异性, 表层土壤因受到地表植被等的补充, 有机质有比较丰富的来源, 所以 B、C 两层土壤有机质显著低于 A 层。供试土壤 pH 分布在 4.21~7.37。有研究^[9]表明 pH 与有机质呈显著负相关关系, 试验结果呈现与之同样的趋势。pH 与土壤层次之间关系明显, 不同土地利用方式下均表现为 A 层<B 层, 而 C

层变化规律不明显。

供试土壤 CEC 在 18.47~39.15 cmol/kg, 除赤红壤外耕地 A 层土壤的 CEC 均为最小, 这说明了长期耕作会降低土壤性能。游离态(Fe_d 、 Al_d)的相对含量取决于母质的风化程度, 风化程度愈深, 其含量愈高。赤红壤中土壤游离态 Fe、Al 含量最高, 母质风化程度最高、土壤脱硅富铝化程度较深, 游离态 Fe、Al 表现出明显的富集特征; 同时, Fe、Al 氧化物含量各土壤层次及土地利用方式间差异不明显。试验土样容重为 1.10~1.55 g/cm³, 黏土母质旱地土壤容重较大, 土体黏重, 并不利于旱地土壤耕作。总体上耕地土壤容重高于林地与荒地, 这是由于林地和荒地土壤根系穿插有机质积累, 有机质的多孔性使林地土壤疏松, 容重较低。棕红壤和赤红壤旱地土壤熟化程度深, 表层土壤容重显著小于母质层。供试土壤质地受母质影响, 土壤黏粒含量基本超过 30%, 质地较为黏重, 其中赤红壤 B 层土样质地最为黏重, 黏粒含量达 77.4%。一般而言, 具有良好结构的土壤(具有稳定性团聚体, 通气孔隙数量较多), 其通气透水性良好, 土壤入渗速度快, 能够容纳吸持较大强度的降雨。沉积黏土母质发育的土壤孔隙度一般较高, 可以达到 40%以上, 吸持贮水量大, 有利于土壤蓄水保水。

1.2.2 土壤斥水性测定 试验采用滴水穿透时间法(WDPT)测定土壤斥水性。WDPT 法是指将一

滴蒸馏水滴到土壤颗粒自然结构面,测定其完全渗入土壤里所需的时间,即斥水性存在的时间。测定时保持水滴距离土壤表面不超过 5 mm,避免水滴下落时过大的动能影响水滴入渗。试验中选取粒径 10 mm 左右的土块于室温下测定,取 20 滴水 WDPT 的算术

平均值作为该土壤的斥水性时间。Ritsema 等^[10]、Dekker 等^[11]学者将土壤划分为 5 种斥水等级:0 级,无斥水性(WDPT<5 sec);1 级,轻微斥水性(5~60 sec);2 级,强烈斥水性(60~600 sec);3 级,严重斥水性(600~3 600 sec);4 级,极度斥水性(>3 600 sec)。

表 2 供试土壤的基本理化性质

土壤类型	层次	有机质/ (g · kg ⁻¹)	pH	CEC/ (cmol · kg ⁻¹)	容重/ (g · cm ⁻³)	含水量/ %	孔隙度/ %
黄褐土	A	9.90±0.69Bc	6.50±0.02De	28.75±0.07Da	1.40	7.66	39.82
	B	3.01±0.21Aa	7.25±0.08Dg	35.29±0.35Cd	1.51	8.19	43.14
	C	2.55±0.81Aa	7.37±0.02Dh	31.62±0.13Cb	1.51	5.62	36.07
	LA	16.25±0.25Ad	5.61±0.04Da	33.56±0.49Cc	1.30	5.23	53.45
	LB	9.30±0.31Ab	6.34±0.03Ed	34.27±0.84Dc	1.42	5.55	47.30
	HA	18.05±1.47Ae	5.79±0.06Cb	32.17±1.09Cb	1.42	5.96	51.76
	HB	10.81±0.50Bbc	6.27±0.03Dc	33.70±0.54Dc	1.55	5.87	46.80
	A	13.64±0.34Cc	4.83±0.02Ce	18.47±0.52Ba	1.34	4.90	38.22
	B	4.94±0.71Ba	5.04±0.02Ef	19.12±0.25Aa	1.50	4.78	38.17
棕红壤	C	3.58±0.27Aa	5.10±0.05Cg	18.69±0.20Aa	1.49	5.92	38.70
	LA	19.66±1.78Bd	4.21±0.01Aa	22.10±0.39Ab	1.17	5.78	48.03
	LB	11.55±0.53Bb	4.31±0.02Bb	24.91±1.04Bc	1.34	7.14	48.21
	HA	24.94±1.46Be	4.73±0.04Bd	24.51±0.56Ac	1.20	3.25	47.10
	HB	11.91±1.23Bb	4.58±0.03Bc	26.11±1.18Bd	1.28	4.75	50.44
	A	10.68±0.25Bc	4.69±0.12Bb	39.15±1.69Fd	1.25	4.33	46.03
	B	5.27±0.29Bb	4.83±0.03Bc	38.48±1.03Dc	1.27	4.57	48.60
	C	2.29±0.05Aa	4.46±0.02Aa	35.51±0.90Db	1.40	4.98	46.74
	LA	19.98±0.56Cf	4.62±0.02Cb	39.09±0.76Dd	1.24	4.12	51.91
赤红壤	LB	11.86±0.46Bd	5.03±0.04Dd	35.93±0.39Ec	1.21	4.39	51.56
	HA	34.27±1.04Dg	4.62±0.00Bb	22.51±3.46Aa	1.10	4.75	56.92
	HB	17.01±0.41Ce	4.80±0.04Cc	35.03±0.40Db	1.28	3.73	52.57

注:L代表林地土壤;H代表荒地土壤;大写字母表示不同土壤类型下差异显著性($p<0.05$);小写字母表示不同利用方式、土壤层次间差异显著性($p<0.05$)。下同。

1.2.3 室内人工模拟降雨试验 人工模拟降雨试验在华中农业大学资源与环境学院水土保持研究中心进行,采用垂直旋转下喷式自动模拟降雨系统。降雨高度为 10 m,降雨雨滴达到的终点速度满足天然降雨特性,降雨强度变化范围为 15~220 mm/h,降雨均匀度大于 90%。

试验选取了襄阳、咸宁、韶关的 A、B 两个层次土壤。试验设置雨强为 90,120 mm/h。试验装置为改进的摩根溅蚀盘,由内环溅蚀盘和外环收集盘 2 部分组成,高 30 cm 的倒圆台形装置。外环直径 30 cm,高 30 cm,内环直径 15 cm,高 10 cm,外环与内环中间用玻璃胶填充为光滑斜面,斜面最低处连接出水口;溅蚀盘为直径为 15 cm,高 1 cm,孔径为 0.25 mm 的筛盘,放于内环上;溅蚀盘与收集环中间有 0.3 cm 的缝隙用来导排表面积水。取风干土样过 3~5 mm 筛,铺满筛盘并置于溅蚀盘内环上使其与溅蚀盘内环上缘在同一水平面,用钢尺水平抹去多余土样使其与装土盘口持平。降雨时间设定为 60 min,当土壤表面出现水膜时适当缩短降雨历时,未能出现水膜的按设定时间计。降雨过程中用洗瓶随时冲洗溅在外环收集盘上的团聚体颗粒,以防雨滴二次打击造成的破

碎,试验中用塑料瓶每 5 min 收集 1 次溅蚀泥沙,将收集的溅蚀颗粒湿筛分级后烘干用万分之一天平称重计算溅蚀泥沙量。试验中为保证土壤斥水性与开始测定的斥水性相同所以不进行预湿润处理。

1.3 数据处理

数据分析采用 Microsoft Excel 2016 进行前处理及基本做图,采用 Originpro 8.0 进行做图,采用 SPSS 19.0 对数据进行方差分析和回归分析等。

2 结果与分析

2.1 土壤斥水性分布特征

斥水性表征了水分渗入土壤的快慢程度,斥水性越低则水分渗入土壤的速度越快。由图 1 可知,供试土样 WDPT 在 0.27~13.15 sec,根据 Dekker 等^[11]对滴水穿透时间法的分级标准,供试土样属于亲水性与轻微斥水性土壤,其中黄褐土斥水性最高,赤红壤斥水性明显低于其他土壤。

土壤斥水性与土地利用类型之间关系不明确,但除黄褐土外,其他耕地土壤的斥水性均为同一土壤类型中最低,呈现出亲水性,这样的性质有利于灌溉水分的下渗以及种子的萌发以及农业生产。对于土壤层次而言,斥水性与土壤层次间关系明显,由图 1 可

以看出,3种不同土地利用方式之下,斥水性整体表现为A层高于B层。其中,棕红壤林地A层土壤斥水性高于荒地A层,而黄褐土和赤红壤则荒地A层斥水性高于林地,这可能是由于树龄、树种存在差异,受到植被类型的影响^[12]。供试土样中最强斥水性出现在黄褐土耕地A层,WDPT达13.15 sec,土壤表面水分会表现出明显的“滞留”现象。黄褐土斥水性最高,赤红壤土壤斥水性明显低于其他土壤。

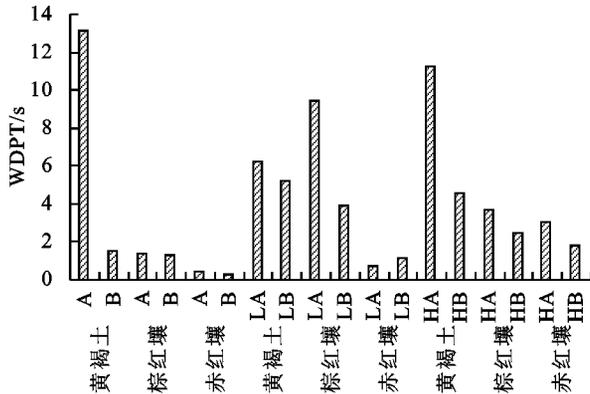


图 1 不同土地利用方式 WDPT 分布

表 3 WDPT 与理化性质相关性分析

供试土样	统计指标	有机质	pH	CEC	砂粒	粉粒	黏粒	容重	含水率	孔隙度	Fe _o	Al _o	Fe _d	Al _d
整体土样	R ²	0.29	0.13	-0.01	-0.43**	0.48**	-0.47**	-0.27	0.36*	0.16	-0.13	-0.03	-0.41*	-0.44**
	n	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
亲水土样	R ²	0.34*	-0.01	0.01	0.29	0.38*	-0.40*	-0.32	0.24	0.28	-0.12	0.06	-0.31	-0.38*
	n	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
斥水土样	R ²	0.37	0.09	-0.71	0.60	-0.71	0.83*	0.38	0.84*	-0.22	-0.31	0.20	0.54	0.54
	n	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

注:相关分析采用 spearman 非参数相关性分析,**表示在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是显著的;*表示在置信度(双侧)为 0.05 时,相关性是显著的。下同。

由表 4 可知,不同土地利用方式下斥水性影响因素基本相似,为土壤机械组成、游离铁铝氧化物等。其中,荒地土壤斥水性仅与土壤的风干含水率表现出相关性($R^2 > 0.6, p < 0.05$),耕地与林地土壤中风干

对土壤的理化性质对土壤斥水性的影响作用进行分析,发现斥水性受到多种理化性质的影响。由表 3 可知,对所有供试土壤而言,斥水性与土壤机械组成和游离氧化铁铝含量表现出极显著相关性,其中与粉粒量呈正相关($R^2 = 0.48, p < 0.01$),与砂粒量、黏粒量和游离态氧化铁铝均为负相关($R^2 < -0.40, p < 0.01$)。对表现出明显斥水性土壤而言,斥水性仅与土壤黏粒含量表现出了显著相关性,并且与整体土样相反,斥水土样与黏粒含量表现为显著正相关,这可能与黏土矿物类型有关。根据中国科学院南京土壤研究所主编《中国土壤》,表现出斥水性的黄褐土和棕红壤的黏土矿物分区均属于水云母—蛭石—高岭石区,当黏土矿物组成相似时,黏粒含量与土壤斥水性间可能表现为正相关,当黏土矿物组成不同时,可能表现为负相关。有机质仅在斥水性较低或无斥水性的土样中表现出显著的影响作用。含水率是影响斥水性的重要因素之一,在低含水率时,土壤斥水性随含水率升高而升高,并且用指数函数可以较好的拟合这种变化,这陈俊英等^[13]研究结果一致。

含水率对斥水性的影响不明显。容重仅对耕地土壤的斥水性有显著影响,这可能是由于耕地土壤受耕作影响,土壤被压实,容重较大,所以耕地土壤斥水性对容重的响应较为敏感^[14]。

表 4 不同利用方式下 WDPT 与理化性质相关性分析

土地利用方式	统计指标	有机质	pH	CEC	砂粒	粉粒	黏粒	容重	含水率	孔隙度	Fe _o	Al _o	Fe _d	Al _d
耕地	R ²	-0.02	0.43	-0.20	-0.65**	0.41	-0.41	0.49*	0.20	-0.38	-0.09	-0.09	-0.52*	-0.54*
	n	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
林地	R ²	-0.35	0.28	-0.24	-0.52	0.78**	-0.79**	0.50	0.41	-0.58*	-0.25	-0.23	-0.77**	-0.80**
	n	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
荒地	R ²	0.29	0.09	0.16	-0.23	0.36	-0.41	0.08	0.64*	-0.13	-0.01	0.00	-0.32	-0.30
	n	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

综合分析上述结果认为,斥水性与土壤机械组成和游离氧化铁铝表现出显著相关性,与其他性质未能发现明显相关性,其中机械组成中的砂粒量与黏粒量与斥水性表现为极显著负相关($R^2 < -0.4, p < 0.01$),与粉粒量表现为极显著正相关($R^2 > 0.4, p < 0.01$),其

原因可能是粉粒具有更大的比表面积,可以吸附一些斥水性物质并形成有机—无机复合胶体,提高土壤斥水性^[15]。斥水性与游离氧化铁、铝均表现为显著负相关($R^2 < -0.4, p < 0.01$)。不同土地利用方式下,土壤斥水性的主要影响因素也会有所差别。

2.2 土壤溅蚀变化过程

由于溅蚀过程中土壤表面条件不断发生变化,因而随着降雨历时的不断增加,土壤溅蚀过程也随之不断变化^[16],图 2 分别为 90,120 mm/h 雨强下溅蚀率(D_r)随降雨历时变化过程。从图 2 可以看出,黄褐土和棕红壤的土壤溅蚀率随降雨历时变化过程均表现为开始阶段逐渐增大,到某一时刻后逐渐减小的趋势,即陡涨陡落的特点。赤红壤 A、B 两层土壤在不同雨强下溅蚀率均处于非常低的水平($D_r < 0.03 \text{ g/min}$),并且雨强对其影响较小,这是由于一方面赤红壤黏粒含量较高,土壤颗粒的胶结作用强,雨滴的打击能力很难分散破坏土粒;另一方面是土粒难被分散破坏,大团聚体土粒间间隙未能被分散的小颗粒填充,间隙较大,雨水很容易从间隙流走,导

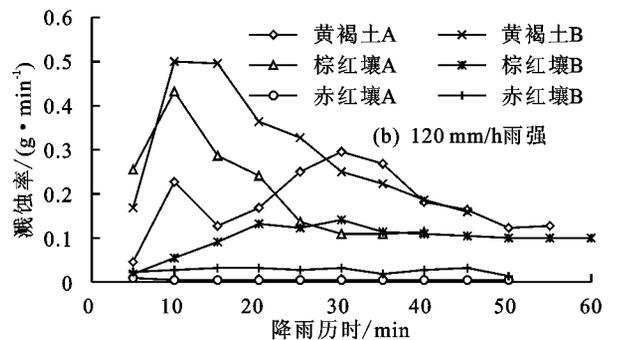
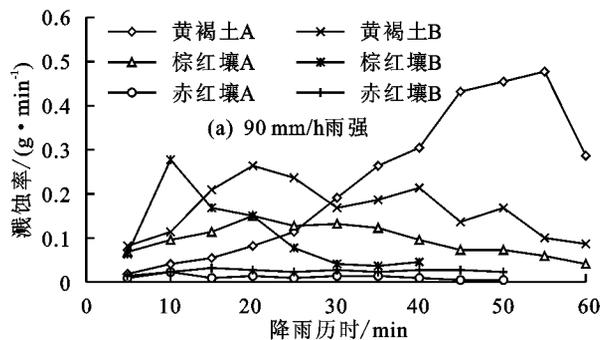
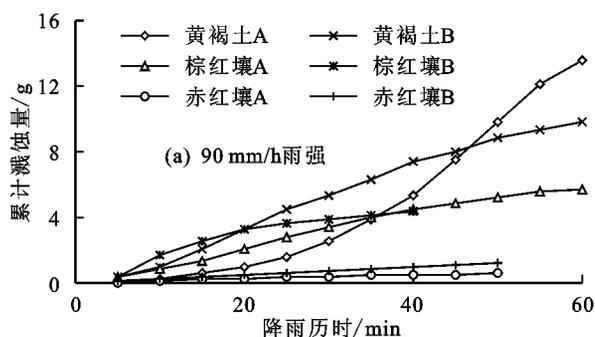


图 2 溅蚀率随降雨历时变化

由图 3 可知,赤红壤 A、B 层土壤在 90,120 mm/h 雨强下的累计溅蚀量随降雨历时均为线性相关性($R^2 > 0.99, p < 0.01$)。除黄褐土 A 层土壤外,其他土壤累计溅蚀量随降雨历时的变化关系用对数函数



模型可以很好地表示($R^2 > 0.97, p < 0.01$),黄褐土 A 土壤的累计溅蚀量随降雨历时变化表现为“S”形曲线。赤红壤的溅蚀量为相同雨强下最低,不超过 1.5 g。不同雨强间土壤的累计溅蚀量差异不大。

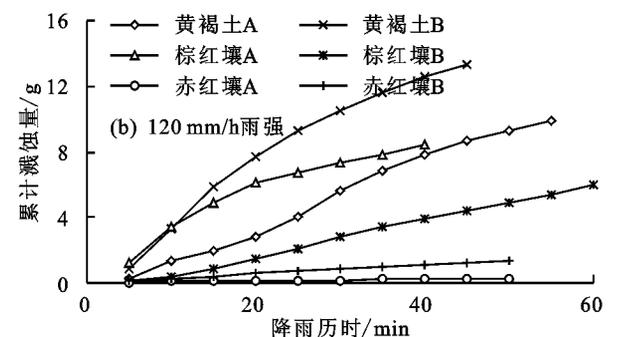


图 3 累计溅蚀量随降雨历时变化

2.3 斥水性对土壤溅蚀的影响

结合试验结果从团聚体角度分析,斥水性的存在影响了团聚体的稳定性进而影响到了土壤的溅蚀过程。从图 2 可以看出,在中等雨强(90 mm/h)时黄褐土 A 层土壤的最大溅蚀率最大达到 0.48 g/min,远高于其他土壤,并且出现时间明显滞后于其他土样,这是由于其斥水性较高的缘故。一方面较强的斥水性会使水分很慢渗入团聚体^[18],此时团聚体依然有较高的稳定性,而雨滴的打击能力不足以完全使团聚体分散,所以黄褐土 A 层土壤的溅蚀率会呈现出一

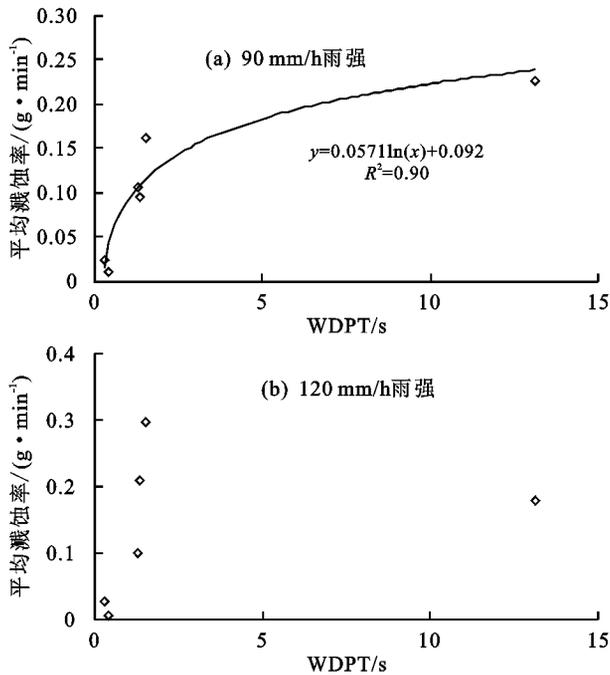
致团聚体受到的消散破坏作用也大大减小,团聚体更难被破碎。

雨强对溅蚀过程影响明显,在中等雨强时(90 mm/h),大部分土壤 20 min 左右溅蚀率达到最大,而大雨强时(120 mm/h)10 min 左右溅蚀率就达到最大,大雨强对团聚体的破坏作用明显。从图 2 可以看出,溅蚀率随降雨历时呈现的陡涨陡落的特点更为明显,这是由于在雨滴的打击下,土壤颗粒被迅速破坏分散,小颗粒进入大颗粒间隙,并随着降雨的进行团聚体吸收水分使团聚体间黏结力增加。表层空隙被小颗粒堵塞,团聚体间黏结力增加导致了土壤表层很快形成水膜,水膜厚度在达到雨滴直径后具有明显的消能作用^[17],抑制溅蚀的发生,致使其表现为明显的陡涨陡落特点并很快趋于稳定的趋势。

个滞后的效应;另一方面,高斥水性导致其土壤表面快速形成一层很薄的水膜,而水膜厚度又不足以保护下方的干燥土壤,一旦团聚体因被水分湿润而导致稳定性大大降低,溅蚀率开始显著上升并且溅蚀颗粒以大颗粒为主,导致黄褐土 A 层的最大溅蚀率远高于其他土壤,这与 Terry 等^[7]的研究结果类似。

对土壤溅蚀指标与 WDPT 做相关分析,结果表明斥水性会显著影响到土壤的溅蚀过程($R^2 \geq 0.82, p < 0.01$)。图 4 中分别为 6 种土样在 90 mm/h 雨强时平均溅蚀率、最大溅蚀率与斥水性回归分析图,从

图 4 可以看出,二者随斥水性增加均表现为开始阶段快速增加后增加速率逐渐减慢的变化趋势,这说明在斥水性处于较低水平时,溅蚀率对斥水性变化反应敏感,对数函数模型可以很好的拟合这种变化趋势



($R^2 \geq 0.90, p < 0.01$)。而在大雨强时这种拟合关系则不明显,这可能是由于在大雨强时,雨滴的打击作用较强远远超过了斥水性对团聚体稳定性的影响。累计溅蚀量与 WDPT 函数拟合关系不明显。

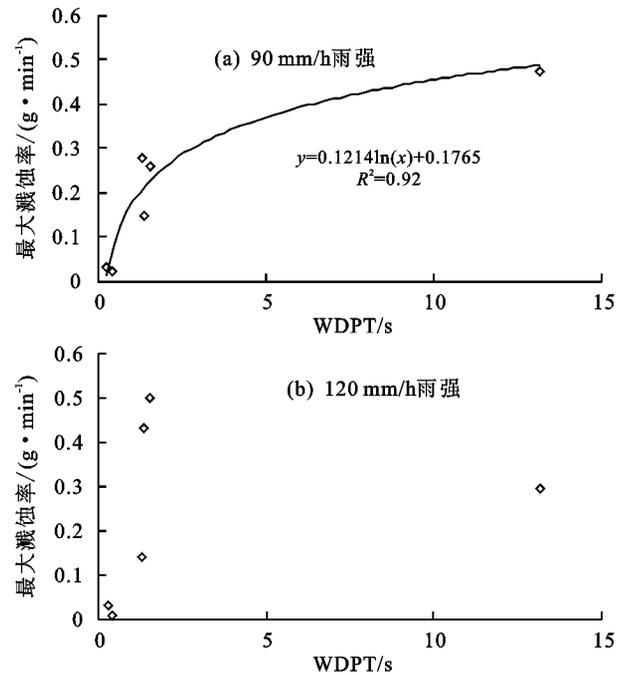


图 4 不同雨强下溅蚀率与斥水性回归分析

对土壤理化性质和斥水性溅蚀指标做相关分析。由表 5 可知,90 mm/h 雨强时,pH 对溅蚀有显著正相关关系;土壤前期含水量对溅蚀也有着显著影响;土壤机械组成中,仅砂粒含量对土壤溅蚀有着显著影响,这可能是由于砂粒含量越高,土壤颗粒在溅蚀盘里越是松散,雨水会很快下渗,很难使土壤颗粒破碎,而大颗粒较难被雨滴打碎并溅出;铁、铝氧化物作为土壤的胶结物质,其含量越高,土壤团聚体稳定性越

强,而溅蚀过程中,土壤破碎以雨滴打击作用为主,溅蚀过程中的土壤分离是雨滴作用力和表土之间的响应过程^[19],致使铁、铝氧化物对溅蚀量及溅蚀率等表现出显著负相关。

在 120 mm/h 雨强的情况下,各理化性质(包括 WDPT)较 90 mm/h 雨强对土壤溅蚀的影响不显著。综合比较认为,斥水性在一定雨强范围内会对土壤溅蚀产生影响。

表 5 溅蚀影响因素相关分析

雨强/(mm·h ⁻¹)	指标	WDPT	pH	砂粒	Fe _d	Al _d	含水量	CEC
90	累计溅蚀量	0.89**	0.90*	-0.94*	-0.89*	0.94**	1.00**	-0.49
	最大溅蚀率	0.78	0.81*	-0.60	-0.71	-0.83*	0.71	-0.60
	平均溅蚀率	0.54	0.55	-0.83*	-0.54	-0.60	0.89	-0.83
120	累计溅蚀量	0.77	0.75	-0.83*	-0.77	-0.83	0.94**	-0.60
	最大溅蚀率	0.77	0.75	-0.83*	-0.77	-0.83*	0.94**	-0.60
	平均溅蚀率	0.54	0.55	-0.60	-0.54	-0.60	0.49	-0.83*

通过上述分析得出,土壤溅蚀过程表现为陡涨陡落的特点,大部分土壤累计溅蚀量随降雨历时变化关系用对数函数可以很好地拟合;土壤斥水性在一定雨强范围内对溅蚀有着显著影响,WDPT 是预测土壤溅蚀变化的良好指标,斥水性越高,土壤的最大溅蚀率、平均溅蚀率和溅蚀量也越大,对数函数模型也可以很好地表达溅蚀指标随斥水性变化趋势。

3 结论

(1)6 种不同类型土壤、3 种土地利用方式及不同

土壤层次间土壤的 pH、CEC 等性质受土壤发育程度、淋溶淀积作用影响,而土壤有机质含量主要受利用方式及耕作施肥条件的影响。

(2)土壤斥水性与土壤层次相关,表层土壤的斥水性高于其他层次,还受到土地利用方式的影响,耕地土壤斥水性显著较低,有利于农业生产与灌溉。不同利用方式下的土壤间斥水性影响因素不太一致,整体上与土壤机械组成及游离铁、铝氧化物表现出显著相关性,其相关指标可以较良好的判断预测土壤的斥水性。

(3)土壤溅蚀过程表现为陡涨陡落的特点,大部

分土壤累计溅蚀量随降雨历时变化关系用对数函数可以很好地拟合。土壤斥水性在一定雨强范围内对溅蚀有着显著影响,斥水性越高,土壤的最大溅蚀率、平均溅蚀率和溅蚀量也越大,对数函数模型也可以很好地表达溅蚀指标随斥水性变化趋势。

参考文献:

- [1] 杨邦杰, Blackwell P S. 土壤斥水性引起的土地退化、调查方法与改良措施研究[J]. 环境科学, 1994, 15(4): 88-90.
- [2] Peng X, Zhang B, Zhao Q, et al. Influence of types of restorative vegetation on the wetting properties of aggregates in a severely degraded clayey Ultisol in subtropical China [J]. Geoderma, 2003, 115(3/4): 313-324.
- [3] 闵雷雷, 于静洁. 土壤斥水性及其对坡面产流的影响研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(7): 855-860.
- [4] Cerda A, Susanne S, Antonio C, et al. Soil hydrological response under simulated rainfall in the Dehesa land system (Extremadura, SW Spain) under drought conditions [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 23(3): 195-209.
- [5] Ferreira A J D, Coelho C O A, Boulet A K, et al. Influence of burning intensity on water repellency and hydrological processes at forest and shrub sites in Portugal, Australian [J]. Journal of Soil Research, 2005, 43(3): 327-336.
- [6] Doerr S H, Shakesby R A, Walsh R P D. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance [J]. Earth-Science Reviews, 2000, 51(1/4): 33-65.
- [7] Terry J P, Shakesby R A. Soil hydrophobicity effects on rainsplash: Simulated rainfall and photographic evidence [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 18(6): 519-525.
- [8] 李朝霞, 王天巍, 史志华, 等. 降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀产沙关系[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 1-4.
- [9] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 851-860.
- [10] Ritsema C J, Dekker L W. How water moves in a water repellent sandy soil 2 Dynamics of fingered flow [J]. Water Resources Research, 1994, 30(9): 2519-2532.
- [11] Dekker L W, Doerr S H, Olstindie K, et al. Water repellency and critical soil water content in a dune sand [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(6): 1667-1674.
- [12] 赵利坤, 秦纪洪, 孙辉. 土壤疏水性研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2011, 33(1): 58-64.
- [13] 陈俊英, 张智韬, 杨飞, 等. 土壤的斥水性和含水量变化关系的数学模型[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 35-38.
- [14] Rulli M C, Bozzi S, Spada M, et al. Rainfall simulations on a fire disturbed mediterranean area [J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(3/4): 323-338.
- [15] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 土壤细颗粒对有机质的保护能力研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 748-752.
- [16] 刘和平, 符素华, 王秀颖, 等. 坡度对降雨溅蚀影响的研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 479-486.
- [17] 郑腾辉, 邢媛媛, 何凯旋, 等. 雨滴击溅与薄层水流混合侵蚀的输沙机理[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 211-218.
- [18] 任鑫. 斥水性层状土壤水分运动试验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [19] 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.
- [17] 惠锦卓, 张爱平, 刘汝亮, 等. 添加生物炭对灌淤土土壤养分含量和氮素淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 156-161.
- [18] 刘营营, 余冬立, 刘冬冬, 等. 土地利用与土壤容重双因子对土壤水分入渗过程的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 84-88.
- [19] 李志明, 周清, 王辉, 等. 土壤容重对红壤水分溶质运移特征影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 101-103.
- [20] 李潮海, 梅沛沛, 王群, 等. 下层土壤容重对玉米植株养分吸收和分配的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1371-1378.
- [21] 罗洋, 郑金玉, 郑洪兵, 等. 不同耕层结构对玉米生长发育的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(2): 113-116.
- [22] 聂影. 土壤耕层构建技术及其机具研究[J]. 农业科技与装备, 2013(8): 34-35.

(上接第166页)