

工程堆积体入渗特性及持水能力对降雨条件的响应

刘志鹏¹, 蒋光毅², 史东梅¹, 常松果¹, 丁文斌¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市水土保持生态环境监测总站, 重庆 401147)

摘要: 为探讨降雨对工程堆积体入渗特性及持水能力的影响, 采用室内土壤基本物理性质分析及野外双环入渗方法, 对不同降雨条件下工程堆积体入渗特性及持水能力的变化及影响因素进行研究。结果表明: 工程堆积体土壤基本物理性质在不同降雨条件和坡位有较大差异, 不同降雨条件下工程堆积体坡下的土壤容重大小表现为干旱(Ⅰ)>小雨(Ⅱ)>中雨(Ⅲ)>大雨(Ⅳ); 不同坡位工程堆积体的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度大小表现为坡下>坡中>坡上。不同降雨条件下, 初始入渗速率大小表现为干旱(Ⅰ)>小雨(Ⅱ)>大雨(Ⅳ)>中雨(Ⅲ), 其大小依次为 8.91, 5.52, 3.96, 3.25 mm/min; 稳定入渗率大小表现为干旱(Ⅰ)>中雨(Ⅲ)>小雨(Ⅱ)>大雨(Ⅳ), 其大小依次为 4.40, 1.45, 1.32, 0.53 mm/min。不同降雨条件下工程堆积体坡下的最大有效库容大小表现为大雨(Ⅳ)>小雨(Ⅱ)>干旱(Ⅰ)>中雨(Ⅲ), 其大小依次为 469.03, 402.48, 378.11, 321.88 t/hm², 中雨(Ⅲ)条件下工程堆积体在各坡位的田间持水量最大。工程堆积体的持水能力与总孔隙度、毛管孔隙度、入渗性能呈显著正相关关系, 而与容重呈显著负相关关系。研究结果可为工程堆积体边坡水土流失防治提供重要科学依据。

关键词: 工程堆积体; 入渗特性; 持水能力; 降雨条件

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0240-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.05.040

Response of Infiltration Property and Water-holding Capacity of Engineering Accumulation to Rainfall

LIU Zhipeng¹, JIANG Guangyi², SHI Dongmei¹, CHANG Songguo¹, DING Wenbin¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715;

2. Chongqing Eco-environment Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Chongqing 401147)

Abstract: In order to explore the influence of rainfall on infiltration characteristics and water holding capacity of engineering accumulation, the laboratory basic soil physical properties analysis and field double ring infiltration methods were used to study the changes of infiltration characteristics and water holding capacity of engineering accumulation in different rainfall conditions and its influencing factors. The results showed that soil bulk density and soil porosity of engineering accumulation had significant differences in different rainfall conditions and slope positions. In different rainfall conditions, the soil bulk density of engineering accumulation of lower of slope from high to low were: Drought (Ⅰ)>light rain (Ⅱ)>moderate rain (Ⅲ)>heavy rain (Ⅳ). Total porosity, capillary porosity, non-capillary porosity in different slope positions from high to low were: Lower>middle>top. In different rainfall conditions, the initial infiltration rate from high to low were: Drought (Ⅰ)>light rain (Ⅱ)>heavy rain (Ⅳ)>moderate rain (Ⅲ), its size in order to 8.91, 5.52, 3.96, 3.25 mm/min. The stable infiltration rate from high to low were: Drought (Ⅰ)>moderate rain (Ⅲ)>light rain (Ⅱ)>heavy rain (Ⅳ), its size in order to 4.40, 1.45, 1.32, 0.53 mm/min. In different rainfall conditions, the maximal effective capacity of engineering accumulation of lower of slope from high to low were: Heavy rain (Ⅳ)>light rain (Ⅱ)>drought (Ⅰ)>moderate rain (Ⅲ), its size in order to 469.03, 402.48, 378.11, 321.88 t/hm². In different slope positions of engineering accumulation, the field capacity of moderate rain condition was largest. The water-holding capacity of engineering accumulation had a significant positive correlation with total porosity, capillary porosity, non-capillary porosity and infiltration characteristics, while it had a significant negative correlation with soil bulk density. The results could provide impor-

收稿日期: 2016-03-23

资助项目: 重庆市水利局科技项目“生产建设项目弃土弃渣水土流失规律研究”(2011); 重庆市生产建设项目水土流失危害研究(2012)

第一作者: 刘志鹏(1991—), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与流域治理研究。E-mail: 15086643684@163.com

通信作者: 史东梅(1970—), 女, 甘肃灵台人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土生态工程、土壤侵蚀与流域治理、生产建设项目土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: shidm_1970@126.com

tant scientific evidence basis for the prevention and control of soil and water loss of engineering accumulation.
Keywords: engineering accumulation; infiltration property; water-holding capacity; rainfall condition

工程堆积体作为人为水土流失最为严重的地貌单元,具有透水性强、结构松散等特点。近年来,矿区开采造成的弃土弃渣无序堆积,加速矿区土壤侵蚀,经常出现滑塌、滑坡甚至泥石流等危害^[1]。研究表明,降雨是诱发松散堆积体失稳的主导因素,大量的降雨形成径流侵蚀堆积体坡面,而且水分的入渗增加了堆积体重量,破坏了土体的平衡结构,降低了堆积体稳定性^[2]。因此,研究不同降雨条件下工程堆积体的渗透性和持水能力对研究工程堆积体边坡的稳定性有重要意义。早在 20 世纪 40 年代英国就已经开始关注生产建设项目弃土弃渣和废弃地的研究,通过采取工程措施和植物措施防治水土流失,目前已取得较好效果。近年来,国内外学者对降雨条件下边坡的产流产沙规律、入渗特性以及边坡稳定性机理方面做了大量的研究工作。王文龙等^[3]采用人工模拟降雨和冲刷试验分析了神府东胜矿区不同年限的弃土弃渣的水土流失规律,认为堆积年限越长,堆积体的抗侵蚀性越好。Defersha 等^[4]分析了不同雨强和土壤类型对坡面侵蚀产沙的影响,认为雨强及坡度对侵蚀的影响受土壤类型及前期含水量的影响很大。赵暄等^[5]通过室内人工模拟降雨研究了散乱锥状堆置、分层碾压坡顶散乱堆置等下垫面的入渗产流特征,认为各类型弃土堆置体平均入渗率随降雨强度增加而增大。郭宏忠等^[6]分析了生产建设项目弃土弃渣和林地土壤的入渗特征,认为弃土弃渣的初始入渗率大于林地的初始入渗率,而林地的最大持水量大于弃土弃渣的最大持水量。到目前为止,大量研究集中在采用人工模拟降雨手段,对工程堆积体的产流产沙规律、边坡稳定性机理进行研究,而针对在自然降雨条件下,不同降雨强度下工程堆积体入渗特性和持水能力变化的研究则相对较少。本文以天府矿区

的煤矿堆积体为研究对象,研究不同降雨条件下工程堆积体的入渗特性和持水能力变化,并对其影响因素进行分析,研究结果可为工程堆积体的水源涵养功能评价、边坡水土流失防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区天府镇(29°46′34.7″N, 106°26′27.3″E),海拔 230 m,属于川东部盆地副热带湿润气候,常年降水量一般在 923.4~1 308.7 mm 之间。区域内空气湿度较大,年平均相对湿度为 81%。全年平均气温在 16.8~18.5 ℃之间,最低气温 3.1 ℃,最高气温达到 40 ℃。全年平均日照时数为 1 169.5 h,日照的百分率 27%,历年平均无霜期达 328.5 d。研究区所选取的工程堆积体为煤矿开采过程的弃土弃渣,堆置时间为 5 a,植被覆盖度为 35%,工程堆积体大于 2 mm 砾石含量为 51.68%,土壤颗粒粒径 2~1 mm,1~0.5 mm,0.5~0.25 mm,0.25~0.1 mm,0.1~0.075 mm,<0.075 mm 的含量依次为 10.48%,17.19%,6.36%,10.31%,2.12%,1.87%。工程堆积体的边坡平均坡长为 12 m,平均坡高为 6.18 m,平均坡度为 31°。

1.2 研究方法

1.2.1 样本采集及土壤基本物理性质测定 试验根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)于 2014 年 5 月进行,在研究区所选取的工程堆积体边坡上、中、下 3 个坡位和双环入渗试验点,分别采集土壤含水率、土壤容重和孔隙度样品,每个样点取表层 0—10 cm 弃渣样品。含水率采用烘干法测定,容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、田间持水量采用环刀法测定。试验期间选择Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ 4 种降雨环境进行采样,如表 1 所示。

表 1 采样期间降雨情况

编号	采样日期(月—日)	前期降雨情况	降雨类型
Ⅰ	5 月 25 日	5 月 25 日之前干旱 6 d,基本无降雨。	—
Ⅱ	6 月 5 日	6 月 4 日为一场小雨,降雨量为 4.1 mm,最大降雨强度为 0.27 mm/h,前期无降雨,干旱 8 d。	一次性降雨
Ⅲ	6 月 9 日	6 月 8 日为一场中雨,降雨量为 10.9 mm,最大降雨强度为 1.80 mm/h,前期无降雨,干旱 3 d。	一次性降雨
Ⅳ	6 月 14 日	6 月 13 日为一场大雨,降雨量为 27.7 mm,最大降雨强度为 4.00 mm/h,前期无降雨,干旱 4 d。	一次性降雨

1.2.2 土壤入渗测定 采用野外双环入渗法测定不同堆积体边坡入渗过程。双环入渗仪的内环直径为 15 cm,外环直径为 30 cm,高度为 20 cm。在工程堆积体边缘选择较为平坦的地面作为边坡入渗试验点,将双环入渗仪垂直打入地表 10 cm 深,向内、外环同时加水,水头高为 5 cm。计时开始后,不断向外环加水以保持水头恒定,每隔一定时间向内环加水并记录内环加水量,记录时间为前 10 min 的 1,2,4,6,8,10

min 时记录 1 次,10 min 后每隔 5 min 记录 1 次,试验时间为 60 min。由于各工程堆积体入渗试验并未在同一时间进行,在计算入渗速率时需要对水温进行校正。每个工程堆积体同时进行 3 个试验。工程堆积体边坡入渗率按公式(1)计算:

$$V=\frac{10Q_n}{ST_n}$$

(1)

式中:V 为工程堆积体边坡在某一时刻的土壤入渗速率

(mm/min); Q_n 为第 n 次测定时间内的加水量,(ml); S 为内环横截面积(cm^2); T_n 为第 n 次测定时间间隔(min)。

- 工程堆积体边坡入渗性能各项指标计算方法为:
- (1)初始入渗率为最初渗透量与最初入渗时间的比值(mm/min);
 - (2)稳定入渗率为单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率(mm/min);
 - (3)平均入渗率为达稳渗时的渗透总量与达稳渗时间的比值(mm/min);
 - (4)渗透总量为 60 min 内的人渗量与内环横截面积的比值(mm)。

1.2.3 土壤水库计算 采用环刀法^[7]测定土壤水库,计算方法如下式:

$$Q=R\times h\times S$$

(2)

式中: Q 为土壤水库库容(t/hm^2); R 为土壤容重(g/cm^3); h 为计算土层厚度(mm); S 为土层含水百分率。其中,当 S 为土壤饱和含水量时, Q 为土壤总库容; S 为凋萎含水量时, Q 为土壤死库容; S 为田间持水量与凋萎含水量之差时, Q 为兴利库容;当 S 等于饱和含水率与田间持水量之差时, Q 为滞洪库容。

表 2 工程堆积体土壤容重和孔隙特征

编号	坡位	容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
I	上	1.07±0.08cC	47.61±2.53aA	42.08±2.69bB	5.53±1.83cC
	中	1.30±0.06bB	36.06±3.27cC	34.55±3.27cC	1.51±2.14bB
	下	1.28±0.04bB	33.21±3.16bB	30.66±2.14aA	2.55±1.89aA
II	上	1.17±0.17aA	36.56±3.64cC	34.29±3.12cC	2.27±3.19aA
	中	1.09±0.13cC	43.64±3.62aA	37.97±2.36aA	5.67±5.09cC
	下	1.25±0.06bB	33.59±3.15bB	30.40±3.27cC	3.19±2.06bB
III	上	1.03±0.16cC	47.79±3.21aA	40.98±3.45bB	6.81±5.08aAB
	中	1.25±0.04bAB	43.95±1.87bA	41.51±4.15bB	2.44±4.03bB
	下	1.17±0.06aA	46.12±2.38cC	42.33±3.29aAB	3.79±3.06cC
IV	上	1.21±0.07bB	34.03±4.07bB	30.98±3.10aA	3.05±2.46bB
	中	1.18±0.07aA	35.89±2.78bAB	32.35±3.55aAB	3.54±4.34aAB
	下	1.09±0.14cC	42.52±4.40aA	37.28±4.06bB	5.24±2.87cAB

注:数据后不同大小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平上显著。

土壤总孔隙度由土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度组成,毛管孔隙度反映了土壤的保水能力,非毛管孔隙度反映了土壤的透水能力^[10]。由表 2 可知,不同坡位工程堆积体的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度差异显著,不同降雨条件下工程堆积体总孔隙度在 33.21%~47.61%之间变化,毛管孔隙度在 30.40%~42.28%之间变化,非毛管孔隙度在 1.51%~6.81%之间变化。中雨(III)条件下工程堆积体的总孔隙度和毛管孔隙度分别是小雨(II)条件下工程堆积体的 1.01~1.10 倍和 1.08~1.11 倍,是大雨(IV)条件下工程堆积体的 1.03~1.12 倍和 1.10~1.37 倍。大雨(IV)条件下不同坡位工程堆积体的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度大小表现为坡下>坡中>坡上,这与容重的变化趋势相反,说明大雨条件下,坡下的堆积体孔隙状况得到了改善。当在工程堆积体坡下

2 结果与分析

2.1 工程堆积体基本物理性质变化

工程堆积体是一种典型的非均质多孔介质,其内部碎石含量影响堆积体土壤容重和孔隙特征等物理性质指标^[8]。土壤容重反映了土壤的松紧程度,其数值大小直接影响着土壤通气性、透水性和持水性^[9]。由表 2 可知,相同降雨条件下不同坡位工程堆积体土壤容重差异显著,相同坡位条件下不同降雨条件之间工程堆积体土壤容重也差异显著。工程堆积体土壤容重在 1.03~1.30 g/cm^3 之间变化,平均值为 1.17 g/cm^3 ,工程堆积体土壤容重总体偏小,说明工程堆积体颗粒较细,这是由于堆积体坡面植被的根系穿插作用降低堆积体了内部碎石的粒径和含量,改善了堆积体土壤结构。当在工程堆积体坡下时,不同降雨条件下工程堆积体的土壤容重大小表现为干旱(I)>小雨(II)>中雨(III)>大雨(IV),其平均值依次为 1.28,1.25,1.17,1.09 g/cm^3 。当降雨条件为大雨(IV)时,不同坡位下工程堆积体的土壤容重大小表现为坡上>坡中>坡下,其平均值依次为 1.21,1.18,1.09 g/cm^3 。

时,不同降雨条件下的非毛管孔隙度大小表现为大雨(IV)>中雨(III)>小雨(II)>干旱(I),其平均值依次为 5.24%,3.79%,3.19%,2.55%。

2.2 工程堆积体土壤入渗能力变化

土壤渗透性是描述土壤入渗快慢的重要指标之一,土壤渗透性越好,地表径流就越少,土壤流失量就相应减少^[11]。土壤入渗特征受到土壤孔隙结构、质地、降雨等方面的影响,与地表径流和土壤蓄水有密切联系,同时也是土壤水库的主要来水方式^[12-13]。根据不同降雨条件下工程堆积体入渗过程(图 1)可知,工程堆积体入渗速率随时间的增加而逐渐减小,最终趋于一个稳定值,表明了在不同含水量条件下土壤导水能力的差异。不同降雨条件下土壤入渗初期(0~2 min),入渗速率最大,但下降明显,与降雨条件下工程堆积体的初始入渗速率相比,干旱(I)条件下工程堆积

体的初始入渗速率明显最大(8.91 mm/min)。随着时间的增加,土壤水分含量增加,入渗速率依然呈下降趋势,而下降趋势明显变缓。30 min 后,土壤水分达到饱和状态,入渗基本保持稳定,即达到了稳定入渗。

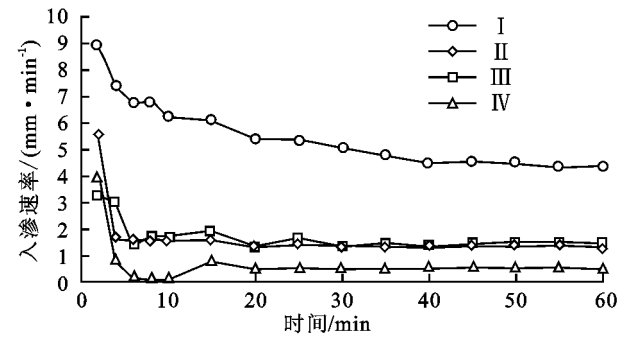


图 1 不同降雨条件下工程堆积体入渗过程

土壤渗透性大小通常用土壤初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和渗透总量来评价。由表 3 可知,工程堆积体的入渗速率在降雨条件下变小,且不同降雨强度对工程堆积体的入渗速率影响不同。不同降雨条件下初始入渗速率大小表现为干旱(I)>小雨(II)>大雨(IV)>中雨(III),其大小依次为 8.91,5.52,3.96,3.25 mm/min。不同降雨条件下稳定入渗率、平均入渗率、渗透总量大小表现为干旱(I)>中雨(III)>小雨(II)>大雨(IV),干旱(I)条件下的稳定入渗率、平均入渗率、渗透总量分别为 4.40,5.66 mm/min 和 298.23 mm,大雨(IV)条件下的稳定入渗率、平均入渗率、渗透总量分别为 0.53,0.71 mm/min 和 38.20 mm,二者的稳定入渗率、平均入渗率、渗透总量倍数为 8.30,7.83,7.81 倍。中雨(III)条件下的稳定入渗率、平均入渗率、渗透总量分别为 1.45,1.73 mm/min 和 96.15 mm,与大雨(IV)条件下的倍数关系为 2.74,2.44,2.52 倍。小雨(II)条件下的稳定入渗率、平均

入渗率、渗透总量分别为 1.32,1.70 mm/min 和 90.88 mm,与大雨(IV)条件下的倍数关系为 2.49,2.39,2.38 倍。

表 3 不同降雨条件下工程堆积体入渗特征值

编号	初始入渗率/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗率/ (mm·min ⁻¹)	渗透 总量/mm
I	8.91	4.40	5.66	298.23
II	5.52	1.32	1.70	90.88
III	3.25	1.45	1.73	96.15
IV	3.96	0.53	0.71	38.20

2.3 工程堆积体土壤持水能力变化

土壤水库指土壤作为一个充满大小空隙的疏松多孔体,具有明显的存贮水分的功能,可用来分析土壤容纳和转移水分的能力,评价土壤持水特性^[7,9]。由表 4 和图 2 可知,不同降雨条件下工程堆积体各坡位土壤总库容、死库容、兴利库容、滞洪库容和最大有效库容差异明显。不同坡位土壤总库容在 411.76~549.37 t/hm² 之间变化,平均值为 462.58 t/hm²,其中中雨(III)条件下工程堆积体在各坡位的土壤总库容最大,这与不同降雨条件下土壤毛管孔隙度大小相一致。不同坡位土壤滞洪库容在 50.19~94.66 t/hm² 之间变化,平均值为 66.93 t/hm²,其中大雨(IV)条件下工程堆积体在各坡位的土壤滞洪库容大小表现为坡下(85.57 t/hm²)>坡中(74.93 t/hm²)>坡上(68.85 t/hm²),整体上,降雨条件下的土壤滞洪库容要大于干旱(I)条件下工程堆积体的滞洪库容,可能由于降雨增加了土体含水率,使工程堆积体的滞洪库容变大。不同坡位土壤死库容在 43.66~98.62 t/hm² 之间变化,平均值为 64.26 t/hm²,降雨条件下的土壤死库容是干旱(I)条件下工程堆积体的死库容的 1.04~2.26 倍,说明降雨增加了土壤水库的无效水分,减少了土壤水分循环效率。

表 4 不同降雨条件下工程堆积体土壤水库特征

编号	坡位	土壤总库容/ (t·hm ⁻²)	死库容/ (t·hm ⁻²)	滞洪库容/ (t·hm ⁻²)	兴利库容/ (t·hm ⁻²)	最大有效库容/ (t·hm ⁻²)	田间持 水量/%
I	坡上	477.22±40.98	43.66±2.13	51.57±2.98	381.99±12.37	433.56±44.60	39.78±9.45
	坡中	468.78±39.06	46.15±2.43	51.74±3.43	370.89±13.45	422.63±36.06	32.08±7.38
	坡下	424.96±30.71	46.85±8.64	53.63±3.83	324.48±13.96	378.11±33.20	29.01±4.99
II	坡上	427.75±46.31	61.19±8.03	50.19±3.74	316.37±24.93	366.56±43.37	32.27±3.66
	坡中	475.68±36.59	48.83±8.57	82.30±7.03	344.55±35.33	426.86±46.21	36.09±5.65
	坡下	419.88±34.33	98.00±6.46	68.25±9.15	253.63±31.14	321.88±37.31	28.13±3.44
III	坡上	486.06±29.93	53.87±7.42	94.66±8.06	337.53±20.50	432.19±47.71	38.00±2.00
	坡中	549.37±25.65	98.62±11.21	62.62±9.14	388.12±26.02	450.74±42.88	38.94±1.91
	坡下	481.10±13.91	78.62±14.68	58.85±7.23	343.63±16.11	402.48±41.88	36.09±1.45
IV	坡上	411.76±21.98	82.04±16.94	68.85±14.58	260.88±38.23	329.73±37.09	28.34±4.48
	坡中	423.50±25.05	64.31±11.66	74.93±8.11	284.26±27.02	359.19±38.96	29.54±2.48
	坡下	517.97±36.07	48.94±9.27	85.57±2.72	383.46±34.78	469.03±43.79	39.67±2.89

最大有效库容由兴利库容和滞洪库容组成,最大有效库容越大,土壤的蓄水能力就越强^[14]。田间持水量是在地下水位较深情况下,土壤所能保持的毛管悬着水的最大量,是评价土壤持水能力的标志,其数值取决于土壤质地、孔隙结构及密实度等^[15]。由表 4 可知,不同坡

位最大有效库容在 321.88~469.03 t/hm² 之间变化,平均值为 399.41 t/hm²,当在工程堆积体坡下时,不同降雨条件下的最大有效库容大小表现为大雨(IV)>小雨(II)>干旱(I)>中雨(III),其大小依次为 469.03,402.48,378.11,321.88 t/hm²。大雨(IV)条件下工程堆积体不同

坡位的最大有效库容大小表现为坡下(469.03 t/hm^2) $>$ 坡中(359.19 t/hm^2) $>$ 坡上(329.73 t/hm^2)。不同坡位土壤田间持水量在 $28.13\% \sim 39.78\%$ 之间变化,平均值为 33.99% ,其中中雨(III)条件下工程堆积体在各坡位的田间持水量最大。当在工程堆积体坡上和坡中时,大雨(IV)条件下的土壤田间持水量最小,而在工程堆积体坡下时,大雨(IV)条件下的土壤田间持水量最大。

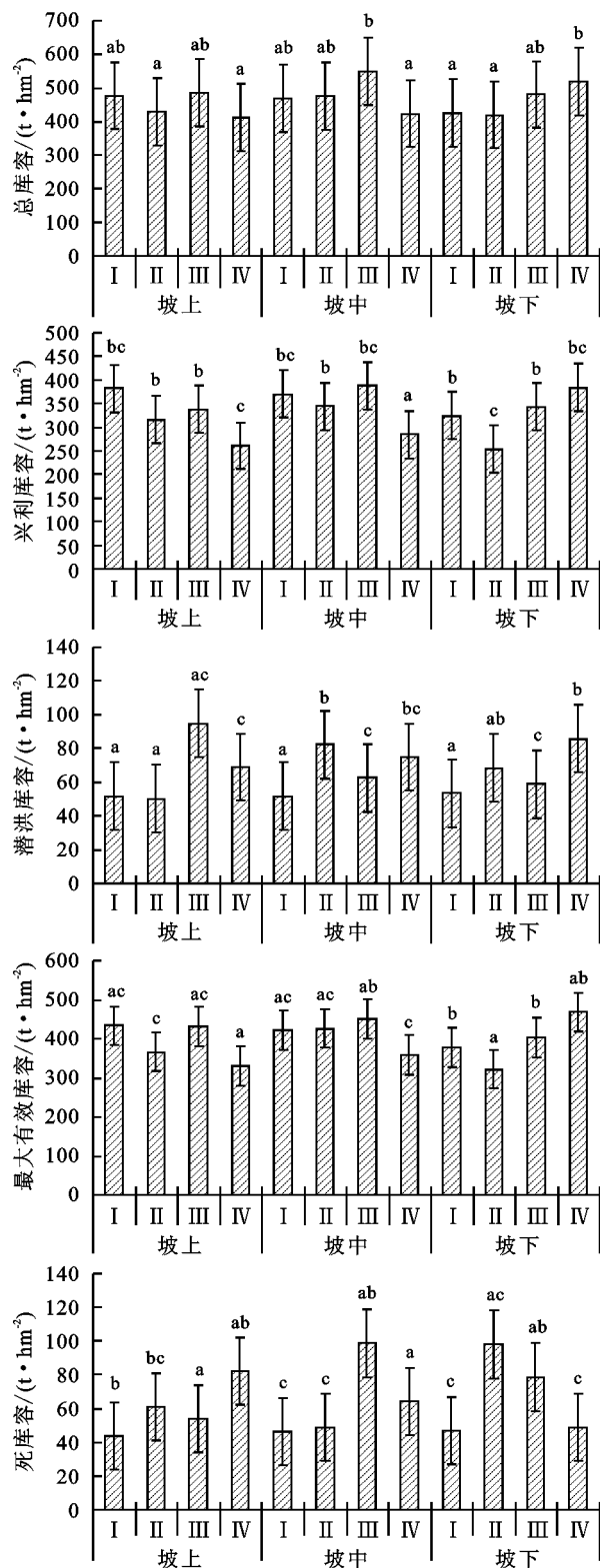


图 2 不同降雨条件下工程堆积体土壤水库特征

2.4 工程堆积体土壤入渗及持水能力影响因素

降雨入渗过程是土壤水库库容的主要来水方式,而土壤水库蓄水过程与土壤孔隙特征关系密切。由表 5 可知,不同降雨条件下工程堆积体总库容、最大有效库容、田间持水量与总孔隙度、毛管孔隙度及入渗性能呈极显著或显著正相关,而与容重呈显著负相关。滞洪库容与非毛管孔隙度和入渗性能呈显著正相关,与容重呈显著负相关。兴利库容与总孔隙度和毛管孔隙度呈显著正相关,与容重和入渗性能呈显著负相关。死库容与入渗性能呈显著负相关,与容重和孔隙特征的关系不显著。由此表明,工程堆积体的持水能力不仅受降雨条件有关,还与土壤的孔隙特征和入渗性能有关。在工程堆积体土壤水库蓄水过程中,土壤非毛管孔隙度和总孔隙度越大,则土壤入渗性能越好,土壤田间持水量和有效库容越大,持水能力就越好;而土壤容重越大,则土壤渗透性和通透性越差,导致土壤田间持水量越小,土壤无效库容越大,持水能力就越差。

3 讨论

土壤容重和孔隙度是反映土壤物理性状的重要指标,直接影响到土壤的蓄水性能和通气状况^[6]。土壤入渗特性是土壤重要的水分物理性质,是评价土壤水源涵养作用和抗侵蚀能力的重要指标^[16]。刘建伟等^[17]研究认为在降雨和重力作用下,弃渣坡面土体中的细粒成份向坡下发生位移,导致坡下土体粗颗粒间的孔隙逐渐被堵塞,土体较坡中和坡上密实,坡面土体容重大小表现为坡下 $>$ 坡中 $>$ 坡上。而在本研究中,大雨(IV)条件下,不同坡位工程堆积体的土壤容重大小却表现为坡上 $>$ 坡中 $>$ 坡下,总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度大小表现为坡下 $>$ 坡中 $>$ 坡上,这是由于堆积体在自然恢复过程中,其植被主要分布于坡下,植被根系的穿插作用,使土体变得疏松,从而改善了土体的结构。说明植被是影响堆积体坡面物理性质的一个重要因素。高鹏等^[18]研究认为在降雨作用下,裸露的农地表面容易形成细沟,降低了土壤水分的入渗速率,因此随着雨强的增大,土壤水分入渗速率反而有降低的趋势。在本研究中也得到相似结论,干旱(I)条件下工程堆积体的初始入渗速率、稳定入渗率、渗透总量最大,大雨(IV)条件下工程堆积体的稳定入渗率与渗透总量最小,说明工程堆积体的入渗速率在降雨条件下变小。这是由于在一定的雨滴击溅作用下,土壤表面会发生板结,堵塞土壤孔隙,从而阻碍水分下渗,导致入渗速率变小,并且降雨强度越大,阻碍水分下渗的作用就越明显。

表 5 工程堆积体土壤水库与土壤物理性质相关分析

指标	容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	初始入渗率	稳定入渗率	平均入渗率
总库容	−0.353*	0.813**	0.878**	0.378	0.669*	0.678*	0.690*
滞洪库容	−0.595*	0.434	0.287	0.712**	0.910**	0.754**	0.775**
兴利库容	−0.395*	0.734**	0.836**	0.216	−0.712**	−0.670*	−0.686*
死库容	0.401	−0.293	−0.237	−0.358	−0.989**	−0.891**	−0.903**
最大有效库容	−0.440	0.852**	0.907**	0.433	0.780**	0.729**	0.745**
田间持水量	−0.650*	0.970**	0.995**	0.598*	0.789**	0.704**	0.722**

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

土壤持水能力直接影响土壤抗水蚀能力,因而是反映土壤生态功能的一个重要指标。柴亚凡等^[19]研究认为土壤持水能力高低取决于土壤容重和孔隙大小。刘尧让等^[20]研究认为在土壤表层,降雨条件下土壤持水能力与毛管孔隙度呈显著正相关,并与非毛管孔隙度呈显著负相关,除了土壤孔隙状况和土壤厚度外,土壤持水能力还受到土壤坡度、植物结构等因素的影响。本研究也表明,在不同降雨条件下工程堆积体持水能力与土壤渗透性、土壤孔隙结构呈显著正相关,与土壤容重呈显著负相关,并且土壤持水能力还与降雨、坡位有关,当在工程堆积体坡下时,不同降雨条件下的最大有效库容大小表现为大雨(Ⅳ)>小雨(Ⅱ)>干旱(Ⅰ)>中雨(Ⅲ)。当在工程堆积体坡上和坡中时,大雨(Ⅳ)条件下的土壤田间持水量最小,而在工程堆积体坡下时,大雨(Ⅳ)条件下的土壤田间持水量最大。从以上研究可以看出,土壤蓄持水分能力受土壤自身条件及气候条件等多方面影响,但土壤自身条件才是主要因素^[21]。在本研究中,降雨与坡位是影响土壤持水能力的间接因素,降雨改变了堆积体的土壤容重和孔隙特征,从而改变土壤持水能力,并且不同降雨强度对土壤容重和孔隙的影响不同。不同的坡位,受重力作用和坡面径流的冲刷,堆积体的土壤颗粒组成也不同,从而导致不同坡位土壤持水能力不同。

4 结 论

(1)工程堆积体土壤基本物理性质在不同雨强和坡位有较大差异。不同降雨条件下工程堆积体坡下的土壤容重大小表现为干旱(Ⅰ)>小雨(Ⅱ)>中雨(Ⅲ)>大雨(Ⅳ)。大雨(Ⅳ)条件下,不同坡位工程堆积体的土壤容重大小表现为坡上>坡中>坡下。不同坡位工程堆积体的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度大小表现为坡下>坡中>坡上,中雨(Ⅲ)条件下工程堆积体在不同坡位的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度最大。

(2)工程堆积体的入渗速率在降雨条件下变小,且不同降雨强度对工程堆积体的入渗速率影响不同。不同降雨条件下,初始入渗速率大小表现为干旱(Ⅰ)>小雨(Ⅱ)>大雨(Ⅳ)>中雨(Ⅲ),其大小依次为 8.91,5.52,3.96,3.25 mm/min。稳定入渗率与渗透

总量大小表现为干旱(Ⅰ)>中雨(Ⅲ)>小雨(Ⅱ)>大雨(Ⅳ),其大小依次为 4.40,1.45,1.32,0.53 mm/min 与 298.23,96.15,90.88,38.20 mm。

(3)不同降雨条件下工程堆积体坡下的最大有效库容大小表现为大雨(Ⅳ)>小雨(Ⅱ)>干旱(Ⅰ)>中雨(Ⅲ),其大小依次为 469.03,402.48,378.11,321.88 t/hm²。当在工程堆积体坡上和坡中时,大雨(Ⅳ)条件下的土壤田间持水量最小,而在工程堆积体坡下时,大雨(Ⅳ)条件下的土壤田间持水量最大。

(4)工程堆积体的持水能力受多方面因素影响,不同降雨条件下工程堆积体的持水能力与总孔隙度、毛管孔隙度、入渗性能呈显著正相关关系,而与容重呈显著负相关关系。另外,工程堆积体的持水能力还与降雨、坡位、植被等因素有关。

参考文献:

[1] 李建明,王文龙,王贞,等. 神府煤田废弃堆积体新增水土流失研究[J]. 自然灾害学报,2014,32(2):239-250.

[2] 许建聪,尚岳全. 降雨作用下碎石土滑坡解体变形破坏机制研究[J]. 岩土力学,2008,29(1):109-113.

[3] 王文龙,李占斌,李鹏,等. 神府东胜煤田开发建设弃土弃渣冲刷试验研究[J]. 水土保持学报,2004,18(5):68-71.

[4] Defersha M B, Melesse A M. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio[J]. Catena, 2012,90(3):47-52.

[5] 赵暄,谢永生,王允怡,等. 模拟降雨条件下弃土堆置体侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报,2013,27(3):1-8.

[6] 郭宏忠,蒋光毅,江东,等. 生产建设项目弃土弃渣与林地土壤入渗特征分析[J]. 中国水土保持科学,2014,12(7):51-54.

[7] 孟秦倩,王健,吴发启. 延安丘陵沟壑区坡面果园土壤水库特征[J]. 灌溉排水学报,2008,27(1):93-95.

[8] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(11):1748.

[9] 刘洁,李贤伟,纪中华,等. 元谋干热河谷 3 种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. 生态学报,2011,31(8):2331-2340.

[10] 胡建朋,杨吉华,罗明达,等. 山东石灰岩山地不同林分类型土壤入渗特征研究[J]. 水土保持学报,2011,25(3):54-58.