

## 工程堆积体坡面砾石分布及含量概化

王森<sup>1,2</sup>, 戎玉博<sup>3</sup>, 谢永生<sup>1,3</sup>, 骆汉<sup>1,3</sup>, 王海燕<sup>4</sup>, 赵暄<sup>3,5</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 水利部水土保持监测中心,  
北京 100053; 5. 西安高科集团高科房产有限责任公司, 西安 710075)

**摘要:** 为室内试验中更好地模拟工程堆积体, 利用图像分析法和经典统计学方法对 6 大典型水蚀区的 368 座工程堆积体中粒径  $D > 1$  cm 的坡面砾石的分布和含量进行概化分析, 得到工程堆积体下垫面上中下坡位砾石含量的概化区间。结果表明: 工程堆积体坡面各粒径砾石含量大多服从正态分布, 且山区和平原丘陵地区之间的砾石总含量有显著性差异。工程堆积体坡面砾石重力分选作用明显, 且随着砾石粒径的增加, 分选程度增大。在室内进行工程堆积体下垫面设计时, 山区堆积体的砾石总含量宜设置在 50%~60%, 其中, 细粒砾石含量宜设置在 20%~30%, 中粒砾石含量宜设置在 10%~15%, 粗粒砾石和巨粒砾石含量宜设置为 10%, 堆积体上中下坡位坡面砾石含量配比宜设置为 1:1.3:1.5; 平原丘陵区的砾石总含量宜设置在 15%~20%, 其中细粒砾石、中粒砾石、粗粒砾石、巨粒砾石含量分别宜设置为 5%~10%, 3%~7%, 2%~5%, 2%~3%, 堆积体上中下坡位坡面砾石含量配比宜设置为 1:1.5:2.5。

**关键词:** 工程堆积体; 砾石; 含量与分布; 概化

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2017)05-0108-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.05.017

## Generalization Study on Distribution and Content of Gravel on Engineering Accumulation Slope

WANG Sen<sup>1,2</sup>, RONG Yubo<sup>3</sup>, XIE Yongsheng<sup>1,3</sup>, LUO Han<sup>1,3</sup>, WANG Haiyan<sup>4</sup>, ZHAO Xuan<sup>3,5</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 4. Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100053; 5. Xi'an Gaoke Group, Gaoke Real Estate Co. Ltd. Xi'an 710045)

**Abstract:** In order to get a better simulation of engineering accumulation in indoor experiment, image analysis and classical statistics methods were used to generalize the distribution and content of gravel with diameter  $> 1$  cm on 368 engineering accumulation slopes, which were located in six water erosion regions. The generalized content intervals of gravel was obtained on different slope positions. Results showed as follows: Most gravel of different particle diameters obeyed normal distribution and there was a significant difference in the contents of gravel in mountain areas and in plain-hilly areas. The gravity separation effects of gravel were obvious, and the bigger the gravel was, the greater the effects were. In mountain areas, it was appropriate to set the total amount of gravel between 50%~60% when designing the spoil underlying surface for laboratory rainfall simulation; the content of fine gravel, medium gravel, coarse and macrosome gravel were set in 20%~30%, 10%~15%, and 10% respectively; the content of gravel on top, middle and bottom slope of engineering accumulation are suggested to be 1:1.3:1.5. In hilly and plain areas, it was appropriate to set the total amount of gravel between 15%~20%, in while the fine gravel, medium gravel, coarse gravel and macrosome gravel accounted for 5%~10%, 3%~7%, 2%~5% and 2%~3% respectively. The optimized proportion of gravel on top, middle and bottom slope of engineering accumulation was 1:1.5:2.5.

**Keywords:** engineering accumulations; gravel; content and distribution; generalization

收稿日期: 2017-03-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(41601300); 西部青年学者 B 类(XAB2015B06); 西北农林科技大学基本科研业务费(2452016107)

第一作者: 王森(1992—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事水土保持工程方面研究。E-mail: wangsen215@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 谢永生(1960—), 男, 河南开封人, 博士, 研究员, 主要从事土地资源及环境评价等方面研究。E-mail: ysxie@ms.iswc.ac.cn

随着生产建设项目的增多以及人们对水土流失认识的增强,工程堆积体的水土流失得到了越来越多的关注。工程堆积体由生产建设项目建设运行过程中产生的大量弃土弃渣堆积而成,物质组成复杂、结构松散、稳定性差,是人为水土流失最为严重的地貌单元<sup>[1]</sup>。许多学者对工程堆积体的侵蚀产沙机理和规律做了大量的研究<sup>[2-5]</sup>,采用的研究方法主要为原位冲刷试验和室内模拟降雨试验,由于可重复、影响参数可控制、成本低等特点,室内模拟降雨成为了研究的主选方法。为了使室内试验下垫面设计更加科学,试验结果应用范围更加广泛,赵暄等<sup>[6]</sup>对工程堆积体形态进行了概化,并对堆置体的坡度、坡长、坡面组成物质等参数进行了统计分析<sup>[7]</sup>。然而赵暄等对坡面物质组成的统计分析中,以1 cm作为土石分界线,主要对粒径 $D \leq 1$  cm的组成物质进行了分级研究,并未具体对 $D > 1$  cm的砾石的粒径、含量以及分布位置进行统计分析。

砾石是工程堆积体的重要物质组成成分,由于密度、硬度、透水性及物质结构与土壤颗粒有较大的差异<sup>[8]</sup>,其能显著影响土壤的理化性质和下渗产流等水文过程。现有学者已经对含砾石工程堆积体的土壤侵蚀特征进行了大量的研究<sup>[9-11]</sup>,由于目前尚未见关于对堆积体坡面砾石参数的统计分析,在对工程堆积体坡面物质的仿真模拟中,主要采用将砾石和土壤按照固定比例混合的方式,从而忽略了堆积体砾石的粒径、含量以及分布位置等因素,使得试验结果不能准确反映真实工程堆积体的土壤侵蚀状况。为此,本研究在野外工程堆积体调查的基础上,对堆积体下垫面的砾石含量和分布进行统计分析,对工程堆积体下垫面仿真模拟的标准化参数进行补充和完善,以期在室内试验中更好地模拟工程堆积体提供参考依据。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 野外调查

根据我国水土流失类型分区及生产建设项目的分布特点,课题组于2010—2011年对我国秦巴山区、贵州土石山区、东北平原区、黄淮海平原区、关中平原区、江西红壤丘陵区这6大典型水蚀类型区的368座工程堆积体进行了典型调查。调查范围包括平原、丘陵和土石山区3大地貌类型,涵盖了黄土、黑土、褐土、棕黄壤、红壤等土壤类型。调查中详细记录每个工程堆积体的项目名称、位置以及堆置方式,并对坡面物质进行样品采集,对于粒径 $D \leq 1$  cm的砾石和土壤颗粒,采样后进行室内过筛分析,详情见赵暄等<sup>[7]</sup>文中所述;对于 $D > 1$  cm的砾石,由于在大范围调研中不便采集和携带,因此在坡面上放置刻度尺、签字笔等作为参照物,采用固定焦距,垂直拍摄的方

法对堆积体按等面积比例划分的上中下坡位分别进行拍摄,利用照相分析技术对粒径 $D > 1$  cm的砾石含量和分布进行分析。

### 1.2 研究方法

本研究参照朱元骏等<sup>[12]</sup>对黄土高原小流域坡面表土砾石空间分布的研究方法,结合工程堆积体的特点,采用数码相机对工程堆积体拍照后经软件处理,获取工程堆积体坡面的砾石含量百分比,并运用经典统计学方法,对工程堆积体的坡面砾石含量进行统计分析。

1.2.1 数据获取方法 因堆积体中土石混合程度大,使得照片中砾石和土壤背景对比度很小,用软件自动辨识较为困难且精度较低,故本文在处理照片时,采取人工识别网格的方法统计各粒径砾石的覆盖度。首先将工程堆积体的砾石分为4级:1 cm $<D < 5$  cm的细粒砾石、5 cm $<D < 10$  cm的中粒砾石、10 cm $<D < 15$  cm的粗粒砾石以及15 cm $<D < 20$  cm的巨粒砾石。在Photoshop CS5软件内载入野外拍摄的照片,对照片进行几何校正、对比度调整等预处理,以减少由于拍摄照片“镜头扭曲”而产生的形变、增加砾石的识别度,并根据照片上参照物的实际长度和像素长度的比例关系来确定图像的实际尺寸。为避免照片边缘处的变形对分析结果造成误差,将照片以拍摄焦点为中心,截取实际面积为1 m $\times$ 1 m的图像作为分析图像。新建一个透明图层,绘制边长为1 m $\times$ 1 m的正方形,在正方形内部绘制边长为1 cm $\times$ 1 cm的小方格,对绘制形成的正方形网格与分析图像进行叠加计数(图1)。对于分散分布的砾石,逐个计算其所占格网数,对于集中分布的相同粒径范围的砾石,计算他们整体所占的格网数,最后统计各粒径砾石所占的格网面积,除以总面积即为覆盖度。由此可获得所调查的368座工程堆积体上中下坡位共计1104个取样点的4种粒径范围砾石的覆盖度。砾石含量一般有砾石盖度( $R_c$ )、砾石体积含量( $R_v$ )、砾石质量含量( $R_m$ )3种表示方式,在土体的垂直剖面 and 水平剖面中,砾石面积比例与砾石体积比例在数值上是一致的<sup>[13]</sup>,因此本研究将得到的堆积体砾石覆盖度等同于堆积体的土石体积比,以此来表征各粒径砾石的相对含量。

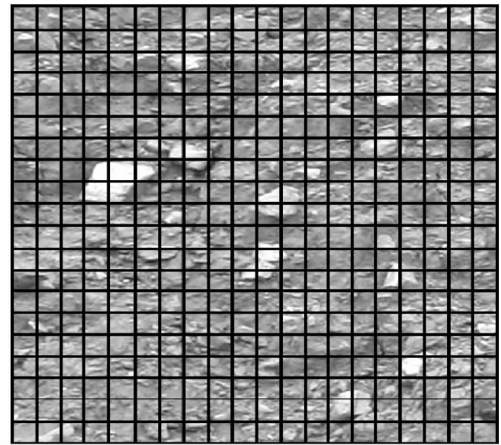
1.2.2 数据统计分析方法 对堆积体坡面各粒径砾石含量进行统计分析,其实质是根据样本的分布<sup>[14]</sup>,在一定的置信度下,计算出总体待估参数的分布范围。因此,首先应该确定坡面各粒径砾石含量数据的分布类型,Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验对样本数量 $n > 50$ 的样本,检验效果比较理想<sup>[7]</sup>,故本文使用K-S检验的方法判断工程堆积体各坡位不同粒径砾石含量数据的分布类型。对正态分布数据,采取正态

分布的置信区间作为砾石含量的概化区间,对偏态分布数据采取百分位数法对砾石含量区间进行概化。



a 典型工程堆积体

用最小显著差数法(LSD)对 6 大区域的砾石含量进行多重比较,以分析区域之间砾石含量的差异性。



b 格网计数

图 1 典型工程堆积体及格网计数

使用 SPSS 19.0 专业版软件对数据进行统计分析,K-S 检验的置信度  $\alpha$  取 0.05;LSD 分析的显著性水平  $p$  取 0.05。使用 Excel 2003 软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 堆积体坡面砾石含量统计特征分析

运用经典统计学方法计算工程堆积体的各坡位不同粒径砾石含量的平均值、中位数、标准差、偏度和峰度等,并对砾石含量做频数分布图,剔除无效数据后,发现各粒径砾石含量数据多服从正态分布。用 K-S 检验方法对 6 个水蚀类型区工程堆积体的各坡位不同粒径砾石的含量数据做置信度  $\alpha=0.05$  的正态分布检验,结果如表 1 所示,分别计算 6 大水蚀区上中下坡位各粒径砾石含量符合正态性分布的通过率,分析如下:

(1)秦巴山区 75 座堆积体的上中下坡位各粒径砾石含量数据中,上坡位所有粒径的砾石、中坡位中粒砾石和粗粒砾石以及下坡位的中粒砾石含量数据未通过置信度为 0.05 的 K-S 检验,通过率为 41.7%。将未通过正态分布的数据取对数处理后,仅上坡位巨粒砾石含量数据未通过对数正态检验,经计算其偏度值为 0.652,峰度值为 -1.102,为正偏态分布。

(2)贵州土石山区 52 座堆积体的各坡位各粒径砾石中,上坡位的细粒砾石和粗粒砾石、中坡位的巨粒砾石以及下坡位细粒砾石含量数据未通过置信度为 0.05 的 K-S 检验,通过率为 66.7%,将未通过正态分布的数据取对数处理后,发现上坡位细粒砾石含量数据亦未通过对数正态分布检验,其偏度值为 1.77,峰度值为 2.65,为正偏态分布。

(3)东北平原区 51 座堆积体的上中下坡位各粒径砾石中,仅上坡位巨粒砾石、下坡位中粒砾石这两组数据未通过置信度为 0.05 的 K-S 检验,通过率为 83.3%,将未通过正态分布的数据取对数处理

后进行 K-S 检验,发现仅下坡位中粒砾石含量数据未通过对数正态分布检验,其偏度值为 0.581,峰度值为 -0.587,为正偏态分布。

(4)黄淮海平原区 54 座堆积体的各坡位砾石中,上坡位粗粒砾石、中坡位巨粒砾石以及下坡位粗粒砾石含量数据未通过置信度为 0.05 的 K-S 检验,通过率为 75%。将未通过正态分布的数据取对数后,所有数据均通过对数正态分布检验。

(5)关中平原区 48 座堆积体的各坡位砾石中,上坡位细粒砾石、中坡位细粒砾石和下坡位细粒砾石含量数据未通过置信度为 0.05 的 K-S 检验,通过率为 75%。将未通过正态分布的数据取对数后,所有数据均通过对数正态分布检验。

(6)江西红壤丘陵区 59 座堆积体的各坡位砾石中,有上坡位中粒砾石和巨粒砾石、中坡位粗粒砾石、下坡位粗粒砾石含量数据未通过置信度  $\alpha=0.05$  的 K-S 检验,通过率为 66.7%。将未通过正态分布的数据取对数后,发现上坡位巨粒砾石和下坡位粗粒砾石含量亦未通过对数正态分布检验,其中下坡位粗粒砾石含量数据的偏度值为 0.992,峰度值 -0.533,为正偏态分布。分析 59 座堆积体的上坡位巨粒砾石,发现仅有 3 座工程堆积体上坡位分布有巨粒砾石,且含量较小,分别为 1.80%,2.25%,2.53%,故对江西红壤丘陵区的上坡位巨粒砾石含量取零。

由上述分析可得,数据的正态化变换能有效提高数据正态分布通过率,进而提高堆置体坡面物质含量概化的精确度。秦巴山区、贵州土石山区和江西红壤丘陵区堆积体上中下坡位各粒径砾石含量通过正态性检验的比率较低。这与该区域所调查的堆积体来源涉及工程类型多、范围广,导致堆置体物质组成差异较大有关。以秦巴山区工程堆积体为例说明,秦巴

山区调查的工程堆积体来源于高速公路工程、工厂学校土建工程以及村民建工程,调查范围跨越汉中、安康两市。对秦巴山区 75 座工程堆积体的坡面砾石含量做频率分布分析(图 2),发现秦巴山区工程堆积体坡面砾石含量多分布在 45%~60%,仅有来源于十天高速 G70-11 标段及安康学院土建工程的少量堆积体砾石含量在 65%~90%,而这些堆积体是造成正偏态分布的主要原因。

### 2.2 堆积体坡面砾石含量概化区间表达

由上述的统计分析结果可知,坡面各粒径砾石含量数据服从算数正态分布、对数正态分布和正偏态分布这 3 种分布类型。对于符合正态分布的数据,以置信度  $\alpha = 0.05$  条件下的数学期望区间估计的置信范围作为各粒径砾石含量的概化区间,即  $\bar{X} \pm 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ ,式中:  
 $\bar{X}$  表示砾石含量的均值; $\sigma$  表示砾石含量的标准差;  
 1.96 为正态分布的双侧临界值  $Z_{\alpha/2}$ 。对于符合对数

正态分布的数据,先按算数正态的公式计算得到置信区间,后将区间的端点值进行反对数计算,得到概化区间值。对于正偏态分布的数据,采用百分位数法来确定含量数据的置信区间<sup>[15]</sup>,为满足正偏态分布数据置信区间与正态分布数据置信区间在跨度上尽可能一致,经反复调试,确定正偏态数据的置信区间为  $[P_{35}, P_{65}]$ 。各坡位各粒径砾石含量的概化区间见表 1。

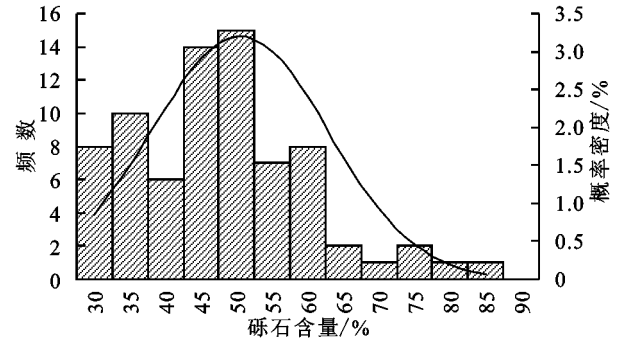


图 2 秦巴山区工程堆积体砾石含量频率分布

表 1 6 大水蚀区工程堆积体坡面砾石含量统计特征及概化区间

坡面物质组成	统计模型	秦巴山区		贵州土石山区		江西红壤丘陵区		东北平原区		关中平原区		黄淮海平原区	
		K-S 检验	概化 区间/%	K-S 检验	概化 区间/%	K-S 检验	概化 区间/%	K-S 检验	概化 区间/%	K-S 检验	概化 区间/%	K-S 检验	概化 区间/%
上坡位	细粒砾石	算数正态 ×	20.99~28.70	对数正态 √	8.35~21.88	算数正态 √	5.75~11.19	对数正态 √	3.18~4.67	算数正态 ×	1.32~2.40	对数正态 ×	1.71~3.08
	中粒砾石	算数正态 ×	8.22~13.76	对数正态 √	8.56~17.24	算数正态 ×	1.60~2.72	对数正态 √	4.89~6.25	算数正态 √	2.76~3.62	对数正态 √	1.65~4.71
		对数正态 √		对数正态 √		对数正态 √		对数正态 ×		对数正态 √		对数正态 √	
	粗粒砾石	算数正态 ×	3.29~5.04	对数正态 √	1.84~4.31	算数正态 √	0.64~1.28	对数正态 √	2.49~3.65	算数正态 √	1.88~2.64	对数正态 ×	2.25~5.11
		对数正态 √		对数正态 √		对数正态 ×		对数正态 √		对数正态 √		对数正态 √	
	巨粒砾石	算数正态 ×	6.22~9.35	对数正态 √	3.93~7.51	算数正态 ×	0	对数正态 ×	1.37~1.92	算数正态 √	1.00~1.80	对数正态 √	0.87~4.11
对数正态 ×			对数正态 √		对数正态 ×		对数正态 √		对数正态 ×		对数正态 √		
中坡位	细粒砾石	算数正态 √	30.29~41.95	对数正态 √	10.64~22.58	算数正态 √	7.23~16.59	对数正态 √	6.84~8.66	算数正态 ×	1.72~3.34	对数正态 √	3.38~5.68
	中粒砾石	算数正态 ×	8.41~13.03	对数正态 √	9.90~19.24	算数正态 √	2.00~3.56	对数正态 √	6.70~8.20	算数正态 √	4.42~5.80	对数正态 ×	3.35~6.83
		对数正态 √		对数正态 ×		对数正态 √		对数正态 √		对数正态 √		对数正态 √	
	粗粒砾石	算数正态 ×	3.71~7.77	对数正态 √	7.37~17.59	算数正态 ×	1.34~2.47	对数正态 √	2.56~4.10	算数正态 √	2.58~3.82	对数正态 √	2.26~8.08
		对数正态 √		对数正态 √		对数正态 ×		对数正态 ×		对数正态 √		对数正态 √	
	巨粒砾石	算数正态 √	7.54~10.34	对数正态 ×	5.74~14.49	算数正态 √	0.64~1.40	对数正态 √	1.73~2.93	算数正态 √	1.65~2.73	对数正态 ×	2.12~3.26
对数正态 ×			对数正态 √		对数正态 ×		对数正态 √		对数正态 √		对数正态 √		
下坡位	细粒砾石	算数正态 √	24.45~37.05	对数正态 √	10.40~29.03	算数正态 √	8.05~18.41	对数正态 √	9.19~12.01	算数正态 ×	1.91~3.80	对数正态 ×	3.77~10.57
	中粒砾石	算数正态 ×	8.41~13.03	对数正态 √	12.16~25.68	算数正态 √	2.89~5.31	对数正态 ×	6.41~10.28	算数正态 √	8.44~10.80	对数正态 √	5.87~9.37
		对数正态 √		对数正态 √		对数正态 √		对数正态 ×		对数正态 √		对数正态 √	
	粗粒砾石	算数正态 √	9.42~14.60	对数正态 √	8.98~18.28	算数正态 ×	1.60~2.98	对数正态 √	5.12~7.74	算数正态 √	6.48~8.36	对数正态 ×	4.61~13.08
		对数正态 √		对数正态 ×		对数正态 ×		对数正态 √		对数正态 √		对数正态 √	
	巨粒砾石	算数正态 √	8.07~13.11	对数正态 √	9.64~21.34	算数正态 √	2.24~4.52	对数正态 √	3.01~4.57	算数正态 √	4.88~6.50	对数正态 √	1.33~9.59
对数正态 ×			对数正态 √		对数正态 √		对数正态 √		对数正态 ×		对数正态 √		

注:√表示通过 K-S 检验;×表示未通过 K-S 检验。

### 2.3 堆积体坡面砾石分布与含量特征分析

2.3.1 坡面砾石分布特征分析 砾石在坡面的空间分布状况对坡面水文过程、土壤侵蚀过程有很大的影响<sup>[16]</sup>,对于松散的工程堆积体来说,砾石尤其是大粒径砾石在堆积体下垫面的分布对于堆积体的稳定性和径流的冲刷起重要作用,因而在进行下垫面砾石含量分析时,应该考虑砾石在坡面的分布状况。根据表

1 中 6 大类型区的坡面砾石含量的概化结果,将各粒径砾石在不同坡位的概化区间取均值,得到坡面不同位置不同粒径砾石含量的变化曲线(图 3)。由图 3 可知,除了秦巴山区内工程堆积体坡面的细粒砾石和中粒砾石外,其余各类型区的堆积体中各粒径砾石含量均符合下坡位>中坡位>上坡位的规律,有明显的重力分选作用。秦巴山区的细粒砾石含量为中坡

位>下坡位>上坡位,中粒砾石含量为上坡位>中坡位>下坡位,这可能是细粒和中粒砾石体积较小,质量较轻,在堆积体堆筑过程中重力分选作用较弱所致。对粒径范围在 1~5 cm 的细粒砾石而言,东北平原区和黄淮海平原区的重力分选作用最明显,2 区域堆积体的下坡位细粒砾石含量分别为上坡位细粒砾石含量的 2.67 倍和 3 倍,其余区域重力分选作用较弱,下坡位细粒砾石含量是上坡位的 1.2~1.5 倍;对粒径范围在 5~10 cm 的中粒砾石而言,黄淮海平原区重力分选作用最明显,下坡位中粒砾石含量为上坡位含量的 3 倍,其余区域下坡位细粒砾石含量是上坡位的 1~2 倍;对于粒径范围在 10~15 cm 的粗粒砾石,重力分选作用均较为明显,各区域下坡位粗粒砾石含量是上坡位的 2~4.43 倍,其中贵州土石山区粗粒砾石的重力分选作用最强,下坡位的砾石含量是上坡位的 4.43 倍;粒径范围在 15~20 cm 的巨粒砾石中,关中平原区和江西红壤丘陵区重力分选作用最明显,其下坡位巨粒砾石含量分别是上坡位含量的 4.06 倍和 3 倍,其余区域下坡位巨粒砾石含量是上坡位的 1.3~2.5 倍。

由上述分析可得,各区域堆积体坡面砾石分布分选程度均较为明显,平原、丘陵区的堆积体中坡面砾石的分选程度比山区更大,这与该区域内砾石含量较少有关。因此在室内布置堆积体进行模拟试验时,应

充分考虑砾石的重力分选作用,以及由于重力分选作用所导致的不同坡位砾石含量的差异。用最小显著差数法(LSD)对 6 大区域上中下坡位砾石含量做多重比较(表 2),发现秦巴山区和贵州土石山区之间仅中坡位砾石含量有显著性差异,其余坡位砾石含量差异不明显;关中平原区、江西红壤丘陵区、东北平原区、黄淮海平原区之间上中下坡位砾石含量均无显著性差异,而 2 个山区和 4 个平原、丘陵区之间各坡位砾石含量均有显著性差异。因而在室内布设堆积体坡面砾石分布时,可按山区、平原丘陵区 2 大类型进行设计。砾石在坡面的分布可根据表 1 中各区域砾石含量的概化结果,对于山区,堆积体坡面砾石上中下坡位配比宜设置为 1 : 1.3 : 1.5,对于平原丘陵区,堆积体坡面砾石上中下坡位配比宜设置为 1 : 1.5 : 2.5。

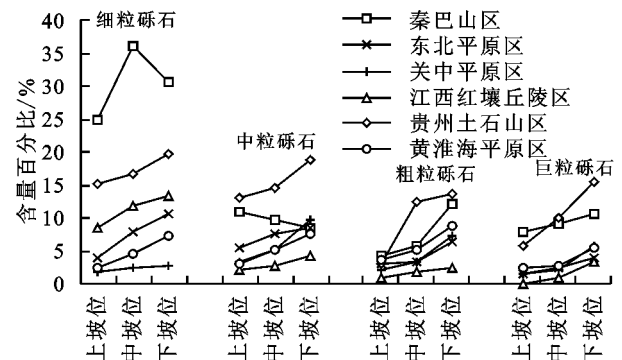


图 3 6 大区域上中下坡位各粒径砾石含量变化曲线

表 2 6 大区域间上中下坡位砾石含量显著性差异分析

区域 分组(I)	区域 分组(J)	上坡位 均值差 (I-J)	中坡位 均值差 (I-J)	下坡位 均值差 (I-J)	区域 分组(I)	区域 分组(J)	上坡位 均值差 (I-J)	中坡位 均值差 (I-J)	下坡位 均值差 (I-J)
秦巴 山区	贵州土石山区	3.22 <sup>aa</sup>	10.29 <sup>ab</sup>	2.38 <sup>aa</sup>	江西红壤 丘陵区	秦巴山区	-33.99 <sup>ab</sup>	-45.20 <sup>ab</sup>	-43.44 <sup>ab</sup>
	关中平原区	37.19 <sup>ab</sup>	50.80 <sup>ab</sup>	39.21 <sup>ab</sup>		贵州土石山区	-30.77 <sup>ab</sup>	-34.91 <sup>ab</sup>	-41.06 <sup>ab</sup>
	江西红壤丘陵区	33.99 <sup>ab</sup>	45.20 <sup>ab</sup>	43.44 <sup>ab</sup>		关中平原区	3.20 <sup>aa</sup>	5.60 <sup>aa</sup>	-4.23 <sup>aa</sup>
	东北平原区	32.73 <sup>ab</sup>	45.06 <sup>ab</sup>	38.31 <sup>ab</sup>		东北平原区	-1.26 <sup>aa</sup>	-0.14 <sup>aa</sup>	-5.13 <sup>aa</sup>
	黄淮海平原区	34.10 <sup>ab</sup>	47.72 <sup>ab</sup>	38.56 <sup>ab</sup>		黄淮海平原区	0.11 <sup>aa</sup>	2.52 <sup>aa</sup>	-4.88 <sup>aa</sup>
贵州 土石山区	秦巴山区	-3.22 <sup>aa</sup>	-10.29 <sup>ab</sup>	-2.38 <sup>aa</sup>	东北平原区	秦巴山区	-32.73 <sup>ab</sup>	-45.06 <sup>ab</sup>	-38.31 <sup>ab</sup>
	关中平原区	33.97 <sup>ab</sup>	40.51 <sup>ab</sup>	36.83 <sup>ab</sup>		贵州土石山区	-29.51 <sup>ab</sup>	-34.77 <sup>ab</sup>	-35.93 <sup>ab</sup>
	江西红壤丘陵区	30.77 <sup>ab</sup>	34.91 <sup>ab</sup>	41.06 <sup>ab</sup>		关中平原区	4.46 <sup>aa</sup>	5.74 <sup>aa</sup>	0.90 <sup>aa</sup>
	东北平原区	29.51 <sup>ab</sup>	34.77 <sup>ab</sup>	35.93 <sup>ab</sup>		江西红壤丘陵区	1.26 <sup>aa</sup>	0.14 <sup>aa</sup>	5.13 <sup>aa</sup>
	黄淮海平原区	30.88 <sup>ab</sup>	37.43 <sup>ab</sup>	36.18 <sup>ab</sup>		黄淮海平原区	1.37 <sup>aa</sup>	2.66 <sup>aa</sup>	0.25 <sup>aa</sup>
关中 平原区	秦巴山区	-37.19 <sup>ab</sup>	-50.80 <sup>ab</sup>	-39.21 <sup>ab</sup>	黄淮海 平原区	秦巴山区	-34.10 <sup>ab</sup>	-47.72 <sup>ab</sup>	-38.56 <sup>ab</sup>
	贵州土石山区	-33.97 <sup>ab</sup>	-40.51 <sup>ab</sup>	-36.83 <sup>ab</sup>		贵州土石山区	-30.88 <sup>ab</sup>	-37.43 <sup>ab</sup>	-36.18 <sup>ab</sup>
	江西红壤丘陵区	-3.20 <sup>aa</sup>	-5.60 <sup>aa</sup>	4.23 <sup>aa</sup>		关中平原区	3.09 <sup>aa</sup>	3.08 <sup>aa</sup>	0.65 <sup>aa</sup>
	东北平原区	-4.46 <sup>aa</sup>	-5.74 <sup>aa</sup>	-0.90 <sup>aa</sup>		江西红壤丘陵区	-0.11 <sup>aa</sup>	-2.52 <sup>aa</sup>	4.88 <sup>aa</sup>
	黄淮海平原区	-3.09 <sup>aa</sup>	-3.08 <sup>aa</sup>	-0.65 <sup>aa</sup>		东北平原区	-1.37 <sup>aa</sup>	-2.66 <sup>aa</sup>	-0.25 <sup>aa</sup>

注:aa 表示无显著性差异;ab 表示有显著性差异;显著性水平  $p < 0.05$ 。下同。

2.3.2 区域间砾石含量特征分析 将 6 大区域各粒径砾石在不同坡位的概化含量取均值,得到 6 大区域堆积体砾石含量百分比。由图 4 可知,秦巴山区、东北平原区、关中平原区、江西红壤丘陵区、贵州土石山区、黄淮海平原区的砾石平均总含量分别为 56.76%, 21.43%, 15.77%, 17.40%, 52.78%, 19.44%。对 6 大区

域的各粒径砾石含量进行多重比较,结果如表 3 所示。可以看到秦巴山区及贵州土石山区的砾石总含量显著大于其他 4 个平原、丘陵区,这是由山区的地质环境所决定的。而 2 个山区之间以及 4 个平原、丘陵区之间砾石总含量无明显差异。6 大研究区域中,对细粒砾石而言,秦巴山区的细粒砾石含量比例最

高,达到了 30%以上,关中平原区最低,仅为 2.41%,其余区域细粒砾石含量为 5%~20%,各区域含量的均值差最大,且除了关中平原与黄淮海平原区、江西红壤丘陵区与东北平原区以及东北平原区与黄淮海平原区外,其余各区域之间细粒砾石含量均有显著性差异;对于中粒砾石而言,贵州土石山区的含量最大,为 15.46%,且贵州土石山区中粒砾石含量与其他区域均有显著性差异,江西红壤丘陵区的含量最小,为 3.01%,4 个平原、丘陵区之间均无显著性差异;各区域的粗粒砾石含量差异最小,除江西红壤区含量仅为 1.72%外,其余区域的粗粒砾石含量均为 5%~10%;对于巨粒砾石而言,秦岭山区和贵州土石山区含量较大,分别占比 9.11%和 10.44%,且 2 个山区巨粒砾石含量均与其他平原、丘陵区含量有显著性差异,平原、丘陵区域的巨粒砾石含量较小,为 1.5%~3.5%,且 4 个平原、丘陵区域间无显著性差异。

因此,在室内进行工程堆积体坡面砾石含量设计时,宜将山区与平原丘陵区区分考虑,且应着重考虑区域间细粒砾石含量的差异。山区堆积体的砾石总

含量宜设置为 50%~60%,其中,细粒砾石含量宜设置为 20%~30%,中粒砾石含量宜设置为 10%~15%,粗粒砾石和巨粒砾石含量宜设置为 10%。平原丘陵区的砾石总含量宜设置为 15%~20%,其中细粒砾石含量宜设置为 5%~10%,中粒砾石含量宜设置为 3%~7%,粗粒砾石含量宜设置为 2%~5%,巨粒砾石含量宜设置为 2%~3%。

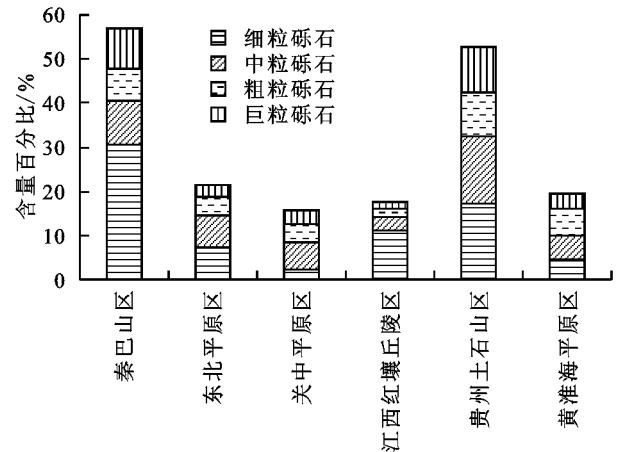


图 4 6 大区域坡面砾石含量百分比

表 3 6 大区域间砾石含量显著性差异分析

区域 分组(I)	区域 分组(J)	砾石					域 分组(I)	区域 分组(J)	砾石				
		总含量 均值差 (I-J)	细粒砾 石含量 均值差 (I-J)	中粒砾 石含量 均值差 (I-J)	粗粒砾 石含量 均值差 (I-J)	巨粒砾 石含量 均值差 (I-J)			总含量 均值差 (I-J)	细粒砾 石含量 均值差 (I-J)	中粒砾 石含量 均值差 (I-J)	粗粒砾 石含量 均值差 (I-J)	巨粒砾 石含量 均值差 (I-J)
秦巴山区	贵州土石山区	4.00 <sup>na</sup>	13.39 <sup>ab</sup>	-4.93 <sup>ab</sup>	-2.42 <sup>na</sup>	-0.93 <sup>na</sup>	江西红壤 丘陵区	秦巴山区	-39.42 <sup>ab</sup>	-20.37 <sup>ab</sup>	-7.21 <sup>ab</sup>	-5.59 <sup>ab</sup>	-7.52 <sup>ab</sup>
	关中平原区	40.94 <sup>ab</sup>	28.09 <sup>ab</sup>	4.56 <sup>ab</sup>	3.01 <sup>ab</sup>	6.04 <sup>ab</sup>		贵州土石山区	-35.41 <sup>ab</sup>	-6.99 <sup>ab</sup>	-12.14 <sup>ab</sup>	-8.01 <sup>ab</sup>	-8.46 <sup>ab</sup>
	江西红壤丘陵区	39.42 <sup>ab</sup>	20.37 <sup>ab</sup>	7.21 <sup>ab</sup>	5.59 <sup>ab</sup>	7.52 <sup>ab</sup>		关中平原区	1.52 <sup>na</sup>	7.72 <sup>ab</sup>	-2.65 <sup>na</sup>	-2.57 <sup>na</sup>	-1.49 <sup>na</sup>
	东北平原区	36.47 <sup>ab</sup>	22.10 <sup>ab</sup>	3.30 <sup>na</sup>	3.03 <sup>ab</sup>	6.56 <sup>ab</sup>		东北平原区	-2.95 <sup>na</sup>	1.73 <sup>na</sup>	-3.91 <sup>na</sup>	-2.56 <sup>na</sup>	-0.97 <sup>na</sup>
	黄淮海平原区	40.13 <sup>ab</sup>	26.01 <sup>ab</sup>	5.23 <sup>ab</sup>	1.41 <sup>na</sup>	5.58 <sup>ab</sup>		黄淮海平原区	-0.75 <sup>na</sup>	5.63 <sup>ab</sup>	-1.97 <sup>na</sup>	-4.18 <sup>ab</sup>	-1.94 <sup>na</sup>
贵州土石山区	秦巴山区	-4.00 <sup>na</sup>	-13.39 <sup>ab</sup>	4.93 <sup>ab</sup>	2.42 <sup>na</sup>	0.93 <sup>na</sup>	东北平原区	秦巴山区	-36.47 <sup>ab</sup>	-22.10 <sup>ab</sup>	-3.30 <sup>ab</sup>	-3.03 <sup>ab</sup>	-6.56 <sup>ab</sup>
	关中平原区	36.94 <sup>ab</sup>	14.70 <sup>ab</sup>	9.49 <sup>ab</sup>	5.44 <sup>ab</sup>	6.97 <sup>ab</sup>		贵州土石山区	-32.46 <sup>ab</sup>	-8.72 <sup>ab</sup>	-8.23 <sup>ab</sup>	-5.45 <sup>ab</sup>	-7.49 <sup>ab</sup>
	江西红壤丘陵区	35.41 <sup>ab</sup>	6.99 <sup>ab</sup>	12.14 <sup>ab</sup>	8.01 <sup>ab</sup>	8.46 <sup>ab</sup>		关中平原区	4.47 <sup>na</sup>	5.99 <sup>ab</sup>	1.26 <sup>na</sup>	-0.02 <sup>na</sup>	-0.52 <sup>na</sup>
	东北平原区	32.46 <sup>ab</sup>	8.72 <sup>ab</sup>	8.23 <sup>ab</sup>	5.45 <sup>ab</sup>	7.49 <sup>ab</sup>		江西红壤丘陵区	2.95 <sup>na</sup>	-1.73 <sup>na</sup>	3.91 <sup>na</sup>	2.56 <sup>na</sup>	0.97 <sup>na</sup>
	黄淮海平原区	34.83 <sup>ab</sup>	12.62 <sup>ab</sup>	10.16 <sup>ab</sup>	3.83 <sup>ab</sup>	6.51 <sup>ab</sup>		黄淮海平原区	1.43 <sup>na</sup>	3.90 <sup>na</sup>	1.93 <sup>na</sup>	-1.62 <sup>na</sup>	-0.98 <sup>na</sup>
关中平原区	秦巴山区	-40.94 <sup>ab</sup>	-28.09 <sup>ab</sup>	-4.56 <sup>ab</sup>	-3.01 <sup>ab</sup>	-6.04 <sup>ab</sup>	黄淮海平原区	秦巴山区	-40.13 <sup>ab</sup>	-26.01 <sup>ab</sup>	-5.23 <sup>ab</sup>	-1.41 <sup>na</sup>	-5.58 <sup>ab</sup>
	贵州土石山区	-36.94 <sup>ab</sup>	-14.70 <sup>ab</sup>	-9.49 <sup>ab</sup>	-5.44 <sup>ab</sup>	-6.97 <sup>ab</sup>		贵州土石山区	-34.83 <sup>ab</sup>	-12.62 <sup>ab</sup>	-10.16 <sup>ab</sup>	-3.83 <sup>ab</sup>	-6.51 <sup>ab</sup>
	江西红壤丘陵区	-1.52 <sup>na</sup>	-7.72 <sup>ab</sup>	2.65 <sup>na</sup>	2.57 <sup>na</sup>	1.49 <sup>na</sup>		关中平原区	2.27 <sup>na</sup>	2.08 <sup>na</sup>	-0.68 <sup>na</sup>	1.60 <sup>na</sup>	0.45 <sup>na</sup>
	东北平原区	-4.47 <sup>na</sup>	-5.99 <sup>ab</sup>	-1.26 <sup>na</sup>	0.02 <sup>na</sup>	0.52 <sup>na</sup>		江西红壤丘陵区	0.75 <sup>na</sup>	-5.63 <sup>ab</sup>	1.97 <sup>na</sup>	4.18 <sup>ab</sup>	1.94 <sup>na</sup>
	黄淮海平原区	-2.27 <sup>na</sup>	-2.08 <sup>na</sup>	0.68 <sup>na</sup>	-1.60 <sup>na</sup>	-0.45 <sup>na</sup>		东北平原区	-1.43 <sup>na</sup>	-3.90 <sup>na</sup>	-1.93 <sup>na</sup>	1.62 <sup>na</sup>	0.98 <sup>na</sup>

### 3 结论

(1)工程堆积体坡面各粒径砾石含量数据大多符合正态分布,其中山区和丘陵区各组数据通过正态分布的比率较低。对未通过正态分布检验的数据进行对数变换后,可以有效提高数据的正态性通过率,进而提升砾石含量概化的精度。

(2)工程堆积体坡面砾石重力分选作用明显,且随着砾石粒径的增加,分选程度增大,因此在室内模拟工程堆积体时,应根据工程堆积体的堆积方式和砾石粒径的大小考虑砾石含量的位置差异。对于山区,堆

积体坡面砾石上中下坡位配比宜设置为 1 : 1.3 : 1.5,对于平原丘陵区,堆积体坡面砾石上中下坡位配比宜设置为 1 : 1.5 : 2.5。

(3)在室内进行工程堆积体下垫面设计时,山区堆积体的砾石总含量宜设置为 50%~60%,其中,细粒砾石含量宜设置为 20%~30%,中粒砾石含量宜设置为 10%~15%,粗粒砾石和巨粒砾石含量宜设置为 10%。平原丘陵区的砾石总含量宜设置为 15%~20%,其中细粒砾石、中粒砾石、粗粒砾石、巨粒砾石含量分别宜设置为 5%~10%,3%~7%,2%~5%,2%~3%。

(下转第 119 页)

形;顺垄产流峰值是横垄的2.4~5.5倍,产沙峰值是横垄的5.5~12.5倍;顺垄产流产沙量与雨强错峰现象不明显,而横垄产流量与雨强存在明显错峰现象,即延后1 min。此外,还发现前期降雨是影响坡面产流时间长度的主要原因之一,横垄对延缓产沙时间长度和减少径流总量和泥沙总量方面作用显著。

间歇型降雨顺垄产流和产沙总量分别是横垄的1.83倍和2.32倍,首次产流占总量的70%以上,产沙占总量的94%~100%;产流形态为倒“V”形,产沙形态呈倒“V”形或“M”形;顺垄产流产沙量与雨强存在明显错峰现象,较雨强延后1~4 min,主要受前期降雨与雨强影响;横垄产流和产沙量较雨强延后1 min;除首次产流产沙外,其余次产流产沙过程无错峰现象,同时存在产流不产沙和雨强较小而产沙的情况。

#### 参考文献:

- [1] 雷孝章,彭清娥,曹叔尤,等.顺坡垄作改横坡垄作的水土保持神经网络模型[J].水土保持学报,2002,16(5):50-53.
- [2] 沈昌蒲,龚振平,温锦涛.横坡垄与顺坡垄的水土流失对比研究[J].水土保持通报,2005,25(4):48-49,80.
- [3] 边锋,郑粉莉,徐锡蒙,等.东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J].水土保持通报,2016,36(1):11-16.
- [4] 罗键,郑子成,李廷轩,等.横垄坡面地表微地形多重分形特征及其对侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):66-72.

(上接第113页)

#### 参考文献:

- [1] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等.不同土石比的工程堆积体边坡径流侵蚀过程[J].农业工程学报,2015,31(17):152-161.
- [2] 彭旭东.生产建设项目工程堆积体边坡土壤侵蚀过程[D].重庆:西南大学,2015.
- [3] 李建明.生产建设项目工程堆积体水土流失规律及测算模型研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [4] 王雪松,谢永生.模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水动力特征[J].农业工程学报,2015,31(1):117-124.
- [5] 李宏伟,牛俊文,宋立旺,等.工程堆积体水动力学参数及其产沙效应[J].水土保持学报,2013,27(5):63-67.
- [6] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体的类型与特征[J].中国水土保持科学,2013,11(1):88-94.
- [7] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体下垫面仿真模拟标准化参数[J].水土保持学报,2012,26(5):229-234.
- [8] 吴冰,邵明安,毛天旭,等.模拟降雨下坡度对含砾石土壤径流和产沙过程的影响[J].水土保持研究,2010,17

- [5] 李毅,邵明安.间歇降雨和多场次降雨条件下黄土坡面土壤水分入渗特性[J].应用生态学报,2008,19(7):1511-1516.
  - [6] 傅斌,王玉宽,王道杰.变雨强连续降雨坡地侵蚀特征[J].水土保持学报,2009,23(2):25-27,56.
  - [7] 张亚丽,李怀恩,张兴昌,等.间歇降雨条件下黄土坡面土壤溶质的迁移特征[J].中国农业科学,2009,42(4):1299-1305.
  - [8] 张辉,李鹏,汤珊珊,等.多场次降雨条件下覆沙坡面的径流产沙特性试验研究[J].泥沙研究,2016(6):59-65.
  - [9] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.多场次降雨对崩岗崩积体细沟侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2014,12(6):1-7.
  - [10] 宋玥,张忠学.不同耕作措施对黑土坡耕地土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2011,18(2):14-16,25.
  - [11] 杨帅,尹忠,郑子成,等.四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析[J].水土保持学报,2016,30(4):7-12.
  - [12] 霍贵中.野外模拟降雨下扰动坡面径流产沙规律研究[J].山西水土保持科技,2013(3):15-18.
  - [13] Darboux F, Huang C. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers? [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(3): 748-756.
  - [14] 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.
  - [15] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):90-97.
- [5] 史倩华,王文龙,郭明明,等.模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J].应用生态学报,2015,26(9):2673-2680.
  - [10] 王雪松,谢永生,陈曦,等.砾石对赣北红土工程锥状堆积体侵蚀规律的影响[J].泥沙研究,2015(1):67-74.
  - [11] 王雪松,谢永生,景民晓,等.不同砾石类型对工程堆积体侵蚀规律的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):21-25.
  - [12] 朱元骏,邵明安.黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面表土砾石空间分布[J].中国科学(D辑:地球科学),2008,38(3):375-383.
  - [13] 王小燕.紫色土碎石分布及其对坡面土壤侵蚀的影响[D].武汉:华中农业大学,2012.
  - [14] 梁建英.参数区间估计时置信区间的优选法[J].高等数学研究,2006,9(4):118,124.
  - [15] 方积乾,徐勇勇.卫生统计学[M].第7版.北京:人民卫生出版社,2012.
  - [16] 张志蓉.桂西北石质土壤中砾石的分布规律及其对水分性质的影响[D].武汉:华中农业大学,2008.