

人工降雨模拟试验的相似性和应用性探究

柯奇画, 张科利

(北京师范大学地理科学学部地理学院, 北京 100875)

摘要: 为了探究人工降雨模拟试验结果的相似性, 通过文献数据和观测数据, 分析了人工降雨模拟试验与天然降雨小区观测在径流、泥沙方面的差异及其原因, 从数值和规律 2 方面深入讨论了室内模拟降雨试验结果的相似性问题。结果表明: (1) 模拟降雨试验弱化了降雨因子对坡面径流和泥沙的影响, 且雨强/雨量或降雨侵蚀力越小, 模拟试验的相似性越差。(2) 模拟降雨试验中产流和产沙随坡度的变化规律明显不同于天然降雨观测情况。(3) 在坡面条件和降雨作用相同的情况下, 在黄绵土坡面上利用静止喷嘴式降雨机进行人工降雨试验观测得到的土壤侵蚀量不到天然降雨小区的 50%。因此, 模拟降雨试验结果在数量和规律上与天然降雨观测结果存在一定差异性, 二者的相似性问题需要进一步研究。

关键词: 人工降雨; 模拟试验; 坡面侵蚀; 相似性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0016-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.003

An Exploration on the Similarity and Applicability of Simulated Rainfall Experiments

KE Qihua, ZHANG Keli

(School of Geography, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: To explore the similarity of the simulated rainfall experiments, based on literature data and observation data, this paper analyzed the differences of runoff and soil yield between indoor simulated rainfall experiments and natural rainfall observations in situ. The following results were obtained: (1) Simulated rainfall experiments could weaken the effect of rainfall on runoff and soil yield; the smaller intensity, precipitation amount or erosivity was, the lower similarity was to get. (2) The changing patterns of runoff and soil yield with the changing slope degree in the simulated rainfall experiments deviated from the patterns under natural rainfall. (3) While the conditions of the slope and the rainfall were identical, the soil yield from loessal sloping land under the stationary nozzle-type rainulator was far less than 50 percent of observations from natural rainfall. Consequently, there are some differences between simulated rainfall experiments and natural rainfall observations, and similarity merits future research.

Keywords: simulated rainfall experiment; natural rainfall observation; slope erosion; similarity

降雨是引起土壤侵蚀的主要动力,也是土壤侵蚀预报模型构建的关键因子。为了评价降雨作用及其产沙贡献大小,需要获取不同降雨条件下的土壤侵蚀量。野外径流小区观测是土壤流失资料获取的主要途径。但每年产流降雨发生的次数有限,加之维护成本昂贵,观测方法费时费力,所以仅仅依靠小区观测来获取数据存在很大的局限性^[1-2]。同时,天然降雨具有很强的随机性,现实中很难获取其产流产沙的过程资料,而过程资料是深入认识侵蚀规律和构建新一代预报模型的基础。为了弥补野外小区观测方法的

不足,在 20 世纪 30 年代诞生了人工降雨试验方法。与小区观测法相比,人工降雨试验一方面便于进行控制条件下的水蚀规律研究,可以获取侵蚀过程资料,另一方面具有可大大加快研究进程,节约大量的人力物力财力的优势^[3-4]。因此,人工降雨试验已成为水土保持领域重要的研究方法^[4-5]。

许多学者利用人工降雨在坡面上进行了大量侵蚀相关研究,但坡面人工降雨试验所获得的水沙数据是一种相对值,一般用于研究不同坡面状态、不同措施、不同降雨条件下的产流产沙规律,能否直接代替

相同天然降雨条件下野外小区的观测值,还需要开展系统研究。尽管美国学者 Young 等^[6]和 Barnett 等^[7]在 20 世纪 60 年代通过野外小区对比试验,均得出“人工降雨试验结果可反映相似天然降雨条件下的产流产沙”的结论,奠定了人工降雨可用于土壤侵蚀相关研究的理论基础,但这些结论均是基于在缓坡条件下利用 Meyer 摆动喷嘴式(槽式)降雨机^[8]在黏土或壤土坡面上得出的试验结果,在地形较陡、应用降雨装置以静止喷嘴式(侧喷式和下喷式)为主的中国是否也适用,需要进一步探讨。近年来,国内学者付兴涛^[9]和管新建等^[10]通过室内与野外人工降雨对比试验发现,室内降雨试验水沙结果明显大于野外人工降雨试验水沙结果,因此在分析人工降雨试验数据的相似性时,需区分室内试验结果和室外试验结果。关于野外小区的天然降雨与人工降雨对比试验和人工降雨的室内外对比试验均有了一定的研究基础,但室内人工降雨试验与野外天然降雨观测结果的对比研究尚处于空白状态。本文利用在黄绵土坡面开展室内人工降雨试验研究的文献数据和野外小区的天然降雨观测数据,比较了室内人工降雨试验与野外天然降雨观测在径流、泥沙方面的差异,探讨了室内人工降雨试验与野外小区观测结果在数值和规律方面的相似程度,旨在提高土壤侵蚀模拟试验结果的模拟精度和应用推广价值。

1 研究方法

本文在对人工降雨试验相关的文献资料和野外小区观测资料进行收集和筛选的基础上,经过降雨因子标准化和坡度坡长校正处理,在保证降雨特征和坡面条件基本一致的情况下比较人工降雨与天然降雨下的坡面径流或泥沙状况。

1.1 数据的搜集方法

基于知网、万方和维普等中文数据库,通过主题词检索功能搜索人工降雨黄土坡面室内试验相关的研究论文,从近百余篇文献中获取人工降雨室内试验数据,资料时间跨度为 1990—2016 年。天然降雨观测数据来自布设在陕西安塞 20 m 坡长不同坡度的黄绵土裸露小区 1985—1989 年的 39 场次降雨,共计 234 个水沙样本。

1.2 资料的选取方法

由于不同学者进行人工降雨试验的控制条件千差万别,且人工降雨与天然降雨在降雨特性方面也不尽相同,需要根据控制条件对基础数据进行筛选并进行坡长坡度修订后,才能对人工降雨与天然降雨下的坡面水沙状况进行有意义的比较。资料的选取步骤为:

(1)土壤因子。土壤以黄绵土为主,土壤前期体积含水量小于 20%或降雨前 24 h 之内未进行预降雨,土壤容重为 1.0~1.3 g/cm³。

(2)降雨因子。筛选条件为:(a)雨强指标的控制范围为 0.5~2.5 mm/min,其中天然降雨以 I_5 为雨强控制指标;(b)为同时保证降雨历时和降雨量水平的相近,天然降雨数据选择历时小于 300 min 的样本。

(3)地形因子。由于径流数据无法进行坡长校正,在分析不同坡度下的水沙结果相似性时,人工降雨样本只选择样本数最多且坡度分布与天然降雨样本相似的坡长水平(5 m)。

经过以上筛选,获得坡长 20 m 的 60 个天然降雨水沙样本和坡长 5 m 的 40 个人工降雨水沙样本^[11-20]。人工降雨样本的时间跨度为 2006—2013 年,皆是利用静止喷嘴式(侧喷式和下喷式)降雨机得到的结果。

1.3 数据处理方法

由于土壤侵蚀影响因子间存在交互作用,在分析某一因素(如降雨、地形、土质)对人工降雨试验结果相似性的影响时,需要保证其他各因素的一致性。

(1)降雨因子的一致性。坡面产流和产沙与降雨特性紧密相关,而人工降雨与天然降雨之间在降雨特性方面具有显著差异。在比较人工降雨与天然降雨下的坡面水沙特征时,为了消除降雨的复杂性,需要通过降雨因子对侵蚀和径流进行标准化处理。

侵蚀标准化指标选用降雨侵蚀力 EI_{30} 。采用 Brown 等^[21]的公式(1)以及吴光艳等^[22]提出的侧喷式和下喷式组合降雨机的降雨动能公式(2),分别计算天然降雨和模拟降雨的降雨侵蚀力值,计算公式为:

$$e_N = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.05i)] \quad \text{天然降雨} \quad (1)$$

$$e_S = (0.278i + 0.094) / 100 \quad \text{人工降雨} \quad (2)$$

式中: e_N 为天然降雨下的单位降雨动能(MJ/(hm²·mm)); e_S 为人工降雨下的单位降雨动能(MJ/(hm²·mm)); i 为时段雨强(mm/h)。

径流标准化指标的确定则需通过相关分析和回归分析得到。统计结果表明,坡面径流深 r (mm)、雨强 I ((mm/min))和雨量 P (mm)的函数关系式为:

$$r_N = 6.788I_{30} + 0.568P - 7.339 \quad \text{天然降雨} \quad (3)$$

$$r_S = 19.889I + 0.784P - 41.568 \quad \text{人工降雨} \quad (4)$$

式中: r_N 为天然降雨下的坡面径流深(mm); r_S 为人工降雨下的坡面径流深(mm); I 为平均雨强(mm/min); I_{30} 为最大 30 min 雨强(mm/min); P 为降雨量(mm)。

F 检验和 t 检验结果表明,2 个回归方程及其各参数均达显著水平。将公式(3)和公式(4)中变量代数式的平均形式(即 $13.34I + 0.68P$)作为标准化径

流的降雨因子,对径流进行标准化处理,得到的单位降雨因子下的径流深能反映消除降雨影响后的坡面产流状况。

(2)地形因子的一致性。根据我国标准小区的定义^[23],本研究对我国人工降雨试验与天然降雨观测结果进行地形因子标准化时,统一将不同坡长的坡面侵蚀量(t/hm^2)订正到 20 m 坡长情况,或将不同坡度的坡面侵蚀量(t/hm^2)订正到 15° 坡度情况。其中,缓坡的坡度因子公式采用 Mc Cool 等^[24]提出的公式,陡坡($\theta \geq 10^\circ$)的坡度因子公式采用 Liu 等^[25]的成果。但这些公式均为 9° 坡度标准下的 S 因子公式,需要转换到 15° 标准。无论何种标准下,不同坡度之间坡度因子的相对关系不变。基于此原理,对 15° 标准下各坡度($0^\circ \sim 30^\circ$)的 S 因子值进行非线性拟合,得到 15° 标准下的坡度因子公式(5)~公式(7)。

$$S = 2.29 \sin \theta + 0.01 \quad \theta \leq 5^\circ \quad (5)$$

$$S = 3.59 \sin \theta - 0.11 \quad 5^\circ < \theta < 10^\circ \quad (6)$$

$$S = 4.65 \sin \theta - 0.20 \quad \theta \geq 10^\circ \quad (7)$$

坡长因子的计算采用江忠善等^[26]提出的公式(8)~公式(9)。

$$L = (\lambda/20)^m \quad (8)$$

$$m = 0.0426 \theta^{0.69} \quad (9)$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度($^\circ$); L 为坡长因子; λ 为水平投影坡长(m); m 为坡长指数。

关于径流目前没有成熟的坡长坡度修订公式,因此只能挑选坡长相同的样本进行不同坡度下的对比分析。人工降雨样本的坡长(5 m)和天然降雨样本的坡长(20 m)不同,二者在产流方面无法直接进行量的比较,在此只比较二者在径流深随坡度变化规律上的差异。

1.4 相似性指标计算方法

分析人工降雨试验结果的相似性程度采用的主要指标是相对误差(%)和比率(%),计算公式为:

$$\text{相对误差}(\%) = \frac{\text{人工模拟值} - \text{天然观测值}}{\text{天然观测值}} \times 100\% \quad (10)$$

$$\text{比率}(\%) = \frac{\text{人工模拟值}}{\text{天然观测值}} \times 100\% \quad (11)$$

其中,相对误差可用于度量人工降雨模拟试验相对于小区观测值的偏离程度。相对误差 < 0 时,表明人工降雨试验结果较天然降雨观测值低,反之则高;相对误差的绝对值越小,相似性越高。比率越接近 100%,人工降雨试验结果的相似性程度越高。

2 结果与分析

2.1 径流规律的相似性

2.1.1 径流随降雨变化规律的相似性 回归分析表

明,公式(1)和公式(2)的决定系数 R^2 分别为 0.68 和 0.93。说明天然降雨野外小区(坡长 20 m)情况下,最大 30 min 雨强 I_{30} 和雨量 P 能解释坡面径流深变化的 93%;而人工降雨坡面(坡长 5 m)试验条件下,雨强 I 和雨量 P 只能解释坡面径流深变化的 68%。即与天然降雨小区观测相比,人工降雨模拟试验条件下降雨因子与标准化径流深的相关性较差。

利用公式(1)和公式(2)计算雨强相同条件下不同雨量以及雨量相同条件下不同雨强人工降雨试验径流结果的相对误差。结果显示,当雨强相同(1 mm/min)或当雨量相同(60 mm)时,随着雨量或雨强的增加,人工降雨试验径流结果的偏离程度随之减小,且减小速度先快后慢(图 1)。表明雨强或雨量较大时,人工降雨模拟试验的产流更加接近天然降雨小区观测结果。

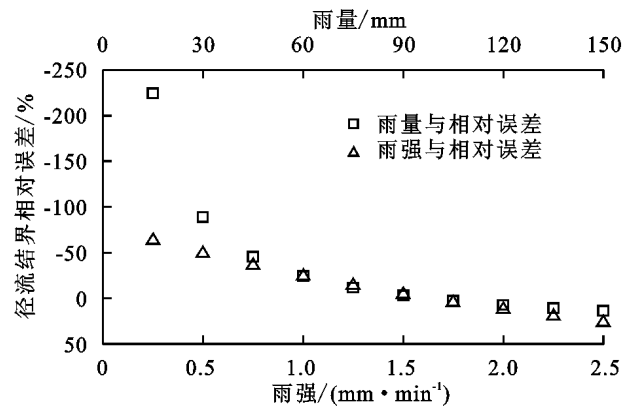


图 1 人工降雨径流结果相对误差随雨量、雨强的变化

2.1.2 径流随坡度变化规律的相似性 由图 2 可知,模拟试验结果的标准化径流深在各坡度水平下均明显高于小区观测结果。天然降雨条件下,不同坡度水平坡面标准化径流深的均值较为平稳,取值范围在 0.18~0.26。除坡度 5° 下的均值(0.18)明显较低和 30° 情况下的均值(0.24)略低之外, $10^\circ \sim 25^\circ$ 坡度范围内的标准化径流深均稳定在 0.25~0.26;其中, $10^\circ \sim 20^\circ$ 呈微弱的上升趋势, $20^\circ \sim 30^\circ$ 呈微弱的下降趋势。而人工降雨模拟试验条件下,标准化径流深随坡度的变化趋势表现为在 $5^\circ \sim 20^\circ$ 时的迅速上升和在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 时的快速下降趋势,出现 20° 的临界坡度。其中, $5^\circ \sim 20^\circ$ 的明显上升趋势可能是由于人工降雨试验透水能力有限的坡面条件放大了坡度对径流速度的影响; $20^\circ \sim 30^\circ$ 的下降趋势则可能与室内降雨试验中可变坡度土槽的坡长固定有关。不同坡度下模拟试验标准化径流深的相对误差波动范围较大(82%~171%),说明人工降雨试验条件下径流随坡度的变化规律已偏离自然状况;相对误差均值为 113%,其中在 10° 和 30° 的相对误差最低(82%~83%),在 20°

坡度水平的相对误差最高(171%)。无论是天然降雨观测还是人工降雨试验,坡度与标准化径流深之间无明显相关关系。

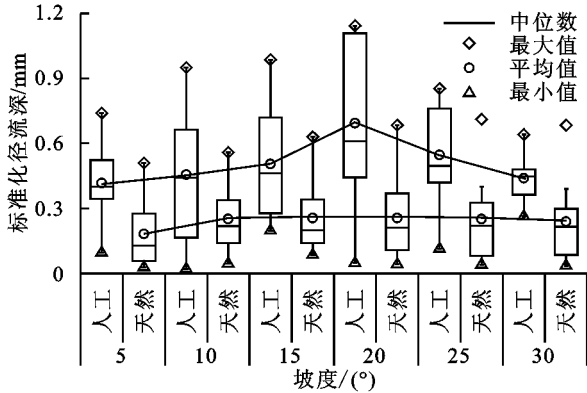


图 2 不同坡度下标准化径流深的对比

2.2 侵蚀规律的相似性

2.2.1 侵蚀随降雨变化规律的相似性 将天然降雨和人工降雨样本的坡面侵蚀量统一标准化到坡长 20 m 和坡度 15° 情况,进一步对比分析天然降雨小区观测和人工降雨模拟试验坡面侵蚀量随降雨侵蚀力的变化规律,探究模拟降雨条件下土壤侵蚀量随降雨侵蚀力变化规律的相似性。由图 3 可知,天然降雨下降雨侵蚀力可以解释 97% 的坡面侵蚀量变化,而室内模拟降雨试验条件下降雨侵蚀力只能解释坡面侵蚀量变化的 78%,即人工降雨模拟试验条件下,降雨侵蚀力与标准化侵蚀量的相关性较差。此外,在平均坡度为 17.5° 的陡坡条件下,室内模拟降雨试验的土壤侵蚀量随降雨侵蚀力的变化速率为天然降雨观测的 75%,这与 Young 等^[6]和 Barnett 等^[7]在小于 5° 的缓坡条件下的野外小区对比试验中“变率相同”的结论不同。随着降雨侵蚀力的增加,人工降雨模拟试验侵蚀结果的偏离程度不断下降,且下降速度先快后慢,表明在降雨侵蚀力较大时,人工降雨模拟试验的侵蚀结果更接近天然降雨观测值。

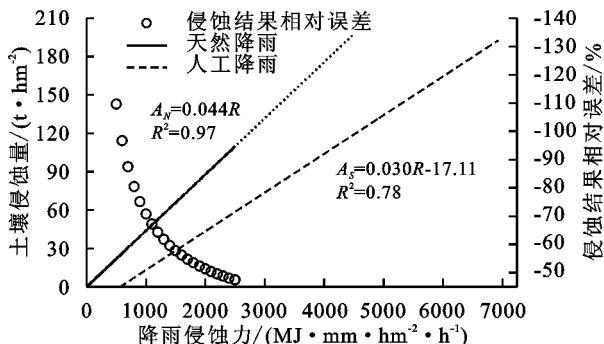


图 3 人工降雨侵蚀结果相对误差随降雨侵蚀力的变化

2.2.2 侵蚀随坡度变化规律的相似性 为了分析地形因子对模拟降雨结果相似性的影响,需要保证降雨因子的一致性,选用降雨侵蚀力 EI_{30} 对不同降雨条

件下的侵蚀结果进行了标准化处理。然后将所有侵蚀样本标准化到坡长 20 m 情况,再对比分析天然降雨和模拟降雨条件下单位降雨侵蚀力所引起的侵蚀量随坡度的变化规律。

坡面侵蚀的最主要动力源于雨滴的打击和径流的冲刷,而坡度通过改变雨滴打击和径流冲刷强度来影响坡面侵蚀程度。由图 4 可知,在天然降雨情况下,随着坡度的增加,单位降雨侵蚀力下的土壤侵蚀量逐渐增加,增加的速度先快后慢。而在室内模拟降雨条件下,单位降雨侵蚀力下的土壤侵蚀量在 5°~20° 内随坡度的上升而上升,在 20°~30° 内随坡度的上升而下降,出现 20° 临界坡度,这与模拟降雨情况下标准化径流深随坡度的变化规律一致。究其原因,室内模拟降雨试验中,除影响实际受雨量外,坡度大小还对单位降雨侵蚀力有影响:随着坡度增大,坡面增高,即雨滴降落高度总体变小,导致单位降雨动能和单位降雨侵蚀力也减小^[27]。陡坡情况下偏小的单位降雨侵蚀力和实际受雨量决定了偏小的实际总降雨侵蚀力,从而导致设定降雨侵蚀力下土壤侵蚀量偏小,这也是陡坡情况下人工降雨单位降雨侵蚀力所产生的侵蚀量随坡度的上升而下降的原因之一。不同坡度下人工降雨模拟试验标准化侵蚀量的相对误差波动范围较大(-30%~-75%),说明人工降雨试验条件下侵蚀随坡度的变化规律偏离自然情况;相对误差均值为-63%,其中在坡度 20° 处最低,在坡度 15° 处最高。

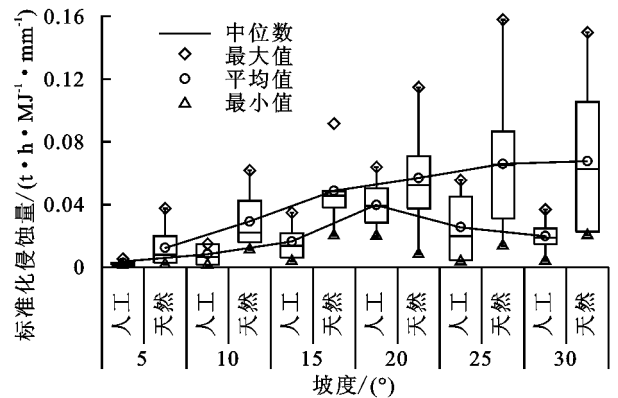


图 4 不同坡度下标准化侵蚀量的对比及其均值相对误差

2.3 侵蚀结果的整体相似性

经过地形因子的校正,在坡长(20 m)、坡度(15°)、土壤容重、前期含水量和质地等坡面条件一致的情况下,天然降雨野外小区的标准化侵蚀量范围为 0.006~0.182 t/hm²,平均值为 0.045 t/hm²;人工降雨模拟试验中的标准化侵蚀量范围为 0~0.046 t/hm²,平均值为 0.017 t/hm²(图 5)。模拟试验中单位降雨侵蚀力所产生的侵蚀量的平均状况只能模拟天然降雨的 38%。综上所述

述,目前利用静止喷嘴式降雨机在黄绵土坡面上进行的室内降雨模拟试验,在坡面条件和降雨作用相同的情况下,土壤侵蚀量的模拟程度不到 50%。

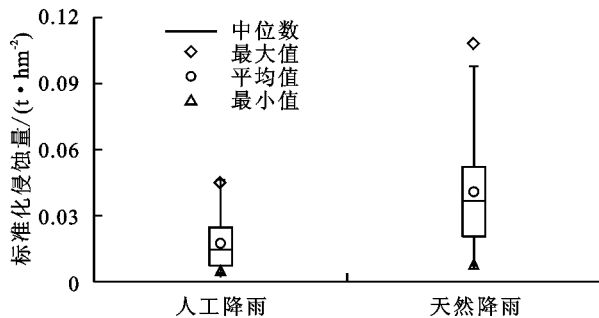


图 5 人工降雨试验和天然降雨观测的黄绵土坡面侵蚀结果的整体相似性

3 结论

(1)人工降雨模拟试验条件弱化了坡面径流对雨强和雨量的响应,也弱化了坡面侵蚀对降雨侵蚀力的响应;当雨强/雨量或降雨侵蚀力较小时,人工降雨模拟试验的水沙结果相似性较差。

(2)人工降雨试验条件下,径流和侵蚀随坡度的变化规律偏离野外小区观测情况,出现 20°的临界坡度。因此,在运用人工降雨试验进行规律研究时,需要注意二者的相似性问题。

(3)目前利用静止喷嘴式降雨机在黄绵土坡面上进行的人工降雨模拟试验,在坡面条件和降雨作用相同的情况下,土壤侵蚀量的整体模拟程度不到 50%。

参考文献:

[1] 张光辉,刘宝元,李平康.槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J].水土保持通报,2007,27(6):56-60.

[2] 谢云,林小鹃,刘英娜,等.槽式摆喷头下喷式人工模拟降雨机的雨强及其空间分布率定[J].水土保持通报,2008,28(4):1-6.

[3] 陈文亮,王占礼.国内外人工模拟降雨装置综述[J].水土保持学报,1990,4(1):61-65.

[4] 王洁,胡少伟,周跃.人工模拟降雨装置在水土保持方面的应用[J].水土保持研究,2005,12(4):188-190,194.

[5] 赵志进,李桂英.人工模拟降雨机具和方法的发展研究与展望[J].中国水土保持,1989(5):30-33.

[6] Young R A, Burwell R E. Prediction of runoff and erosion from natural rainfall using a rainfall simulator [J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1972, 36(5): 827-830.

[7] Barnett A P, Dooley A E. Erosion potential of natural and simulated rainfall compared [J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(6): 1112-1114.

[8] Meyer L D, McCune D L. Rainfall simulator for runoff plots [J]. Agricultural Engineering, 1958, 39(10): 644-648.

[9] 付兴涛.坡面径流侵蚀产沙及动力学过程的坡长效应研究[D].杭州:浙江大学,2012.

[10] 管新建,姚文艺,李勉,等.坡面水蚀比尺模型室内外相似性试验研究[J].水土保持学报,2007,21(6):43-46.

[11] 刘力.紫色土和黄土坡耕地土壤侵蚀过程对比研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.

[12] 陈俊杰.不同土壤坡面细沟侵蚀影响试验研究[D].武汉:华中农业大学,2012.

[13] 吴凤至,史志华,岳本江,等.坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J].土壤学报,2012,49(6):1235-1240.

[14] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等.降雨强度对黄绵土坡地磷流失特征影响试验研究[J].农业工程学报,2007,23(4):39-46.

[15] 刘俊体,孙莉英,张学培,等.2次降雨条件下不同土壤细沟侵蚀分析[J].中国水土保持科学,2013,11(4):22-29.

[16] 陈见影,来风兵,常占怀.渭北旱塬垃圾堆积降雨侵蚀试验研究[J].水土保持通报,2016,36(4):216-219.

[17] 刘刚,杨明义,刘普灵,等.7Be示踪坡耕地次降雨细沟与细沟间侵蚀[J].农业工程学报,2009,25(5):47-53.

[18] 据彤军,刘普灵,王栓全,等.黄土区不同地类坡面水沙动态过程及其发生机理的模拟实验研究[J].农业环境科学学报,2007,26(5):1942-1947.

[19] 张亚丽.黄土坡面土壤氮磷等化学物质径流迁移与混合层深度研究[D].西安:西安理工大学,2007.

[20] 张永东.不同地表细沟侵蚀演化过程及其水流水力学特性研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.

[21] Brown L C, Foster G R. Storm erosivity using idealized intensity distribution [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30: 379-386.

[22] 吴光艳,郝民利,刘超群,等.天然降雨与人工降雨特性的研究[J].人民珠江,2013(2):5-7.

[23] 张科利,刘宝元,蔡永明.土壤侵蚀预报研究中的标准小区问题论证[J].地理研究,2000,19(3):297-302.

[24] Mc Cool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1387-1396.

[25] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.

[26] 江忠善,郑粉莉,武敏.中国坡面水蚀预报模型研究[J].泥沙研究,2005(4):1-6.

[27] 郑粉莉.模拟降雨中地面坡度对雨滴动能影响的研究[J].中国水土保持,1987(11):38-39.