

# 黄土区野外模拟降雨条件下坡面径流—产沙试验研究<sup>\*</sup>

贾莲莲<sup>1</sup>, 李占斌<sup>1,2</sup>, 李 鹏<sup>1</sup>, 于国强<sup>1</sup>, 陈 磊<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**降雨及径流所引起的水力侵蚀产沙问题,是当今世界上最大的环境问题之一。通过野外模拟降雨试验,研究不同雨强下不同下垫面降雨侵蚀产流、产沙、入渗等的相关规律。研究结果表明:雨强 90 mm/h 时,原生地径流量最大,达到 28.4 L/min,林草地径流量最小,在 4.1~7.6 L/min 之间波动,雨强 120 mm/h 时规律保持一致,原生地达到 36.05 L/min,林草地为 6.85~10.88 L/min;产沙量规律为荒地最大,林草地最小,荒地在两种雨强下产沙量分别为 45.77~252.94 g 和 52.76~162.48 g,林草地分别为 2.82~6.99 g 和 7.33~40.24 g;入渗规律为林草地最大,原生地最小,其中小雨强时林草地入渗率为 1.18 mm/min 左右,原生地为 0.09 mm/min 左右,大雨强时林草地为 1.42 mm/min 左右,原生地为 0.12 mm/min 左右。这些规律之间均有很好的相关性,产沙量与径流量大时其入渗率就小。说明地表有植被覆盖时可以增大入渗率,减小径流,产沙量。雨强不同时其规律保持一致。该研究对于深入理解流域产流产沙过程具有十分重要意义,可为相关的模型研究提供可靠的试验支持,也可为今后水土保持与生态建设提供重要科学依据。

**关键词:**模拟降雨;侵蚀产沙;入渗;径流

**中图分类号:**S157.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2010)01-0001-05

## Study on Rainfall Runoff-Sediment Yield Under Modeling Rain Condition in the Loess Plateau

JIA Lian-lian<sup>1</sup>, LI Zhan-bin<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, YU Guo-qiang<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE at XAUT, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The issue of erosion and sediment yield caused by rainfall and water runoff is the world's largest environmental problems. Research on processes of rainfall, runoff and sediment yield can serve as development of process-based mode of soil erosion, soil and water conservation, and ecology construction on loess region. The rule of erosion sediment and runoff infiltration and dependency relation were studied under different surface using field simulated rainfall trails. The results show that: the greatest runoff is the original habitat, is 28.4 L/min, forest grass land is the minimum, fluctuated with 4.1~7.6 L/min when the rainfall intensity is 90 mm/h, when the rainfall intensity is 120 mm/h, the original habitat 36.05 L/min and the forest grass land is fluctuated with 6.85~10.88 L/min. The barren land is the greatest and the forest grass land is the smallest with sediment yield, the barren land fluctuated with 45.77~252.94 g and 52.76~162.48 g under the two different rainfall intensity, the forest grass land fluctuated with 2.82~6.99 g and 7.33~40.24 g. The forest grass land is the greatest and the original habitat is the smallest with the infiltration rate, the forest grass land is 1.18 mm/min and the barren land is 0.09 mm/min when the rainfall intensity is lower and the forest grass land is 1.42 mm/min, the barren land is 0.12 mm/min when the rainfall is higher. When sediment yield and runoff large that the infiltration rate is small, they have perfectly correlativity, which show that the regulation mechanism with vegetation cover have the water and soil conversation function, they can increase the infiltration rate and reduced the runoff and sediment yield.

<sup>\*</sup> 收稿日期:2009-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(40771124);教育部博士学科点专项科研基金(20060700004)

作者简介:贾莲莲(1983-),女,甘肃庆阳人,硕士研究生,从事土壤侵蚀与水土保持等方面的研究。E-mail:jlh83@163.com

通信作者:李占斌(1962-),男,河南镇平人,教授,博士生导师,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:zbli@126.com

The research are significantly understanding the process of watershed runoff and sediment yield and can provide reliable experimental support for related model research and to provide important scientific evidence and ecological construction for the soil and water conservation in the future.

**Key words** :simulated rainfall ; erosion and sediment yield ; infiltration ; runoff

长期以来,由于人类不合理地利用自然资源,导致植被生存环境受到极大地破坏,引发了严重的土壤侵蚀<sup>[1]</sup>,也就是水土流失。土壤侵蚀与产沙,尤其是降雨径流所引起的水力侵蚀产沙问题,不少国家表现的更为严重,这也是当今世界上最大的环境问题之一。我国黄土高原地处内陆腹地,是全球黄土分布面积最广、厚度最深、地层分布最全的高地,属于黄河中游流域的一部分。黄土高原土壤侵蚀剧烈,产沙强度高,多年平均输入黄河的泥沙量约 16 亿 t,成为黄河泥沙的主要来源区。经研究发现,不同的立地条件强烈影响着流域的土壤侵蚀和产沙<sup>[2-4]</sup>。由此可以通过调整土地立地条件,以达到减少径流和保持土壤的目的<sup>[5-7]</sup>。近年来,关于侵蚀产沙影响的研究已经取得不少成果,但在野外自然状态下开展降雨试验的研究还较少。本文通过自然条件下的野外降雨试验,探讨不同下垫面下侵蚀产沙与径流规律,为推动建立黄土高原流域土壤侵蚀预报模型提供理论基础,为小流域坡沟治理措施的优化配置提供科学依据。

1 研究区概况

本次试验选择天水市北郊的罗玉沟流域,其位于甘肃省天水市北郊,系渭河支流藉河左岸的一级支沟,属黄土高原丘陵沟壑区第三副区。流域地形从西北向东南倾斜,沟系呈狭长羽状,海拔 1 165.1

~ 1 895. 6 m,主沟道长 21. 81 km,平均比降 2. 35 %,支毛沟比降一般大于 25 %,流域沟壑密度 3. 54 km/ km<sup>2</sup>,平均坡度 18 °。沟口测站控制面积 72. 79 km<sup>2</sup>,其中梁峁坡、沟坡和沟道分别占总面积的 55. 4 %、28. 4 %和 16. 2 %。流域按其土壤自然特征可以划分为 3 个类型区,即黄土区、杂土区和土石山区。

2 试验设计与方法

2.1 试验设备

试验于 2008 年 7 - 9 月在天水罗玉沟进行野外模拟降雨,试验采用自行设计研发的下喷式降雨器,有效雨滴降落高度为 6 m,雨滴雾化效果良好。选取流域内 4 个天然坡面为试验小区(具体情况见表 1),小区四周用薄钢板隔离,以防止水分侧漏,有效降雨面积皆为 2 m ×10 m。

2.2 试验方法

每个小区分别进行三次降雨试验,设计雨强大小分别为 60 mm/ h、90 mm/ h、120 mm/ h,降雨历时为 30 min,每场降雨的时间间隔为 24 h。为了保证试验的准确性,降雨在无风条件下进行,每次试验前对雨强进行率定,并对降雨均匀性进行检验。在降雨开始产流后,每分钟接取一次全部水沙样,产流 30 min 后停止降雨,记录产流停止时间,同时接取水沙样。

表 1 小区类型划分表

编号	类型	容重/ (g · cm <sup>-3</sup> )	土壤	坡度/(°)	覆盖度/ %	初始 含水率/ %	植被类型
1	荒地	1. 39	红油土	10	8	12. 8	冰草、车前
2	林草地	1. 22	黄土	20 ~ 30	78	13. 3	刺槐、冰草、二裂萎萎菜、节节草、鹤冠草
3	天然草坡	1. 45	黄土	20	52	12. 2	冰草、白蒿
4	原生地	1. 21	黄土	5	21	14. 5	紫花苜蓿、车前

3 结果与分析

3.1 不同雨强下坡面侵蚀产流特征

为了探讨不同下垫面对坡面侵蚀产流的影响,分析雨强为 90 mm/ h 和 120 mm/ h 时 4 种下垫面径流量的变化规律(图 1 - 2)。

从图 1 中可以看出,雨强 90 mm/ h 时,林草地的径流量最小,其它 3 种下垫面情况下的径流量均大于林草地的,4 种下垫面径流量大小的顺序依次为:原生地 > 荒地 > 天然草坡 > 林草地。在整个降

雨过程中,荒地的径流过程波动最大,径流量始终不稳定;林草地基本处于稳定状态,没有起伏,维持在 4. 1 ~ 7. 6 L/ min,在整个降雨过程中始终最小;天然草坡径流量处于稳定且缓慢上升状态,当试验进行到 23 min 左右时,达到一个最大值 26. 28 L/ min,后呈缓慢下降趋势;原生地的径流过程十分平稳,始终处于最大值 28. 4 L/ min 左右。

从图 2 中可以看出,雨强 120 mm/ h 时,径流量大小顺序与雨强 90 mm/ h 时大致相同,但荒地与自然草坡波动幅度更大一些,荒地的径流量在 18. 84

~ 35.92 L/min 之间波动,天然草坡径流量在 25.37 ~ 34.54L/min 之间波动,这是因为雨强大时,径流量变大,雨滴的打击使地表情况发生改变,产生不平

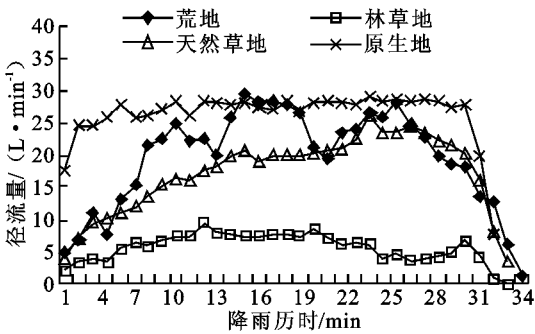


图 1 雨强 90 mm/h 时不同下垫面产流过程

这是由于原生地和荒地地表几乎没有植被覆盖,雨滴降落到地表后直接形成径流,所以处于稳定产流状态且径流量始终最大;林草地的植被覆盖率最高,当雨滴降落到地表后,地表植被对其进行拦截,形成入渗,所以径流量很小。雨强较大时,雨滴动能更大,且雨量更大,所以在 120 mm/h 的雨强下,4 种下垫面的径流量总体变大。

3.2 不同雨强下坡面侵蚀产沙特征

侵蚀产沙量在不同下垫面情况下的变化也需要进一步分析,雨强为 90 mm/h 和 120 mm/h 时 4 种下垫面产沙的变化规律如图所示(图 3 - 4)。

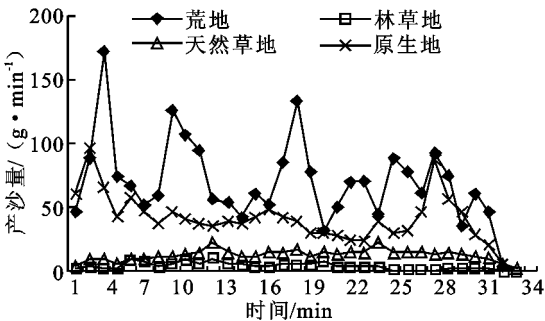


图 3 雨强 90 mm/h 时不同下垫面产沙过程

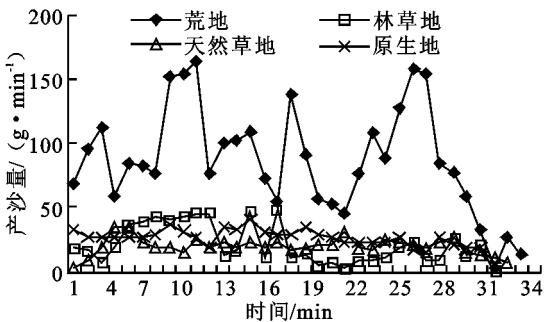


图 4 雨强 120 mm/h 时不同下垫面产沙过程

从图 3 中可以看出,荒地和原生地的产沙量要明显大于林草地和天然草坡的产沙量。荒地产沙量为 49.07 ~ 133.05 g,其波动幅度最大且产沙量始终最大,天然草坡与林草地的产沙量始终处于最小值

稳的状态;林草地径流量依然最小,处于 6.85 ~ 10.88 L/min,原生地一直处于最大值的平稳状态,大致为 36.05 ~ 37.54 L/min。

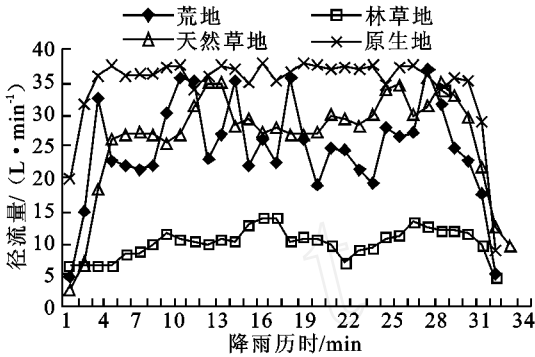


图 2 雨强 120 mm/h 时不同下垫面产流过程

且几乎没有波动,林草地产沙量保持为 2.82 ~ 6.99 g。图 4 中荒地和原生地的产沙量依然最大,这与雨强 90 mm/h 时一致,其中荒地产沙量为 52.76 ~ 162.48 g,林草地产沙量为 7.33 ~ 40.24 g。

这是由于雨滴降落产生径流后,首先选择搬运细颗粒,随着径流时间的延长可被径流带走的细颗粒土壤变得越来越少,这时雨滴就会剥离分散大的土壤颗粒,土壤颗粒被剥离开的一瞬间会有相对较多的泥沙随径流流失,此即图中数据线有波动的主要原因。荒地的土壤结构较为松散,当雨滴打击地表时,其土壤性质更容易发生改变,更易被剥离带走,原生地土壤质地较坚硬,且地表结皮更多,雨滴对其的打击影响力较之荒地会小一点。当雨强为 120 mm/h 时,4 种立地条件下的产沙量波动均较大,这也是由于雨强较大时,雨滴降落到地表时的动能较大,大块土粒被击溅分离的可能性更大,此时径流量也更大,大块土粒也在瞬间被径流运移带走,所以产沙量较小雨强时大些。这些可以说明,覆盖度越大地表其水土保持功效越明显,越能减少坡面的土壤侵蚀,能有效延缓坡面侵蚀明显增强发生的时间。

3.3 不同雨强下坡面累积产流产沙特征

在分析不同下垫面径流、产沙规律的基础上,进一步分析累计径流量与累计产沙量的变化规律及其相关关系。由此可以看出 4 种下垫面条件下,随着降雨历时的增加,不同雨强下累计径流量和累计产沙量均呈现逐渐增大趋势,对于同一下垫面,雨强不同时,产流量及产沙量两者增加的速率和幅度均有所差别。

从图 5 - 6 可以看出,在降雨过程中,林草地累计径流量的增长趋势最为平稳,增长幅度最小,原生地的累计径流量增长趋势和增长幅度最大。其中,雨强 90 mm/h 时,林草地累计最大产流量达到 187.33 L,原生地累计最大产流量达到 841.44 L;

雨强 120 mm/h 时,林草地累计最大产流量达到 318.63 L,原生地累计最大产流量达到 1 109.68 L。显然,植被覆盖能有效延缓产流,并显著减少产流

量。在两种不同雨强下,4 种下垫面的累计产流量趋势大致相同,只是雨强越大时产流越快,产流量也越大,符合降雨与径流的正比关系。

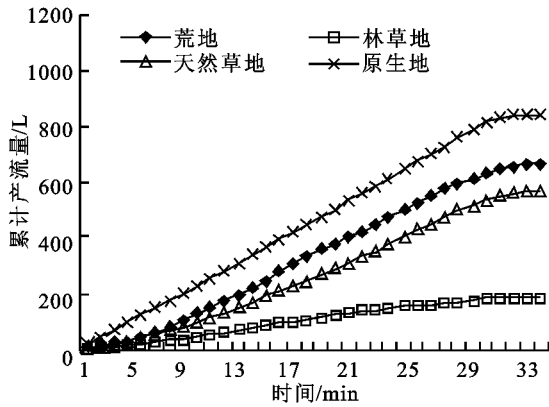


图 5 雨强 90 mm/h 时不同下垫面累计产流量变化

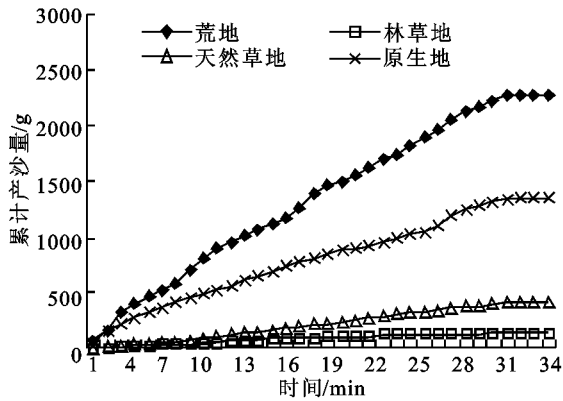


图 7 雨强 90 mm/h 时不同下垫面累计产沙量变化

从图 7 - 8 可以看出,在降雨过程中,两种雨强不同时,4 种下垫面的累计产沙量趋势大致相同,依然是林草地累计产沙量的增长趋势最为平稳,增长幅度最小,但荒地的累计产沙量增长趋势最大,原生地与天然草坡次之。当雨强为 90 mm/h 时,林草地产沙量累计最大值达到 139.95 g,而荒地的累计产沙量累计最大值达到 2 276.43 g;雨强 120 mm/h 时,林草地产沙量累计最大值达到 673.7 g,荒地的累计产沙量达到 2 925.35 g。雨强为 120 mm/h 时,雨滴的动能比较大,打击地表后土粒被溅散,同时随着径流被带出,所以雨强大时,产沙量也大。

以上结果说明坡面有植被覆盖时其具有较强的拦截泥沙和径流的功效,覆盖度越大时产流量与产沙量越小,因为此时地被物能阻延地表径流,减少地表径流平均流速、防止土壤溅蚀,并且土壤表层植被根系的存在,可以提高土壤对径流侵蚀的抵抗力。荒地与原生地在缺少植被覆盖或覆盖度很小的情况下,地表结皮较多,不能增加土壤入渗,导致径流最大,产沙最多。当然雨强越大时产流产沙量也就越大。

### 3.4 不同雨强下坡面入渗特征

入渗率能反映土壤水源涵养作用和抗侵蚀能

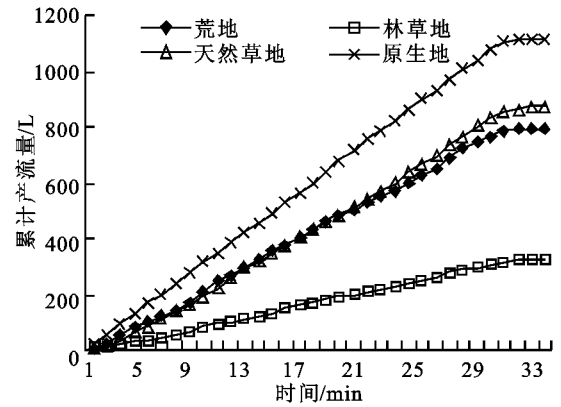


图 6 雨强 120mm/h 时不同下垫面累计产流量变化

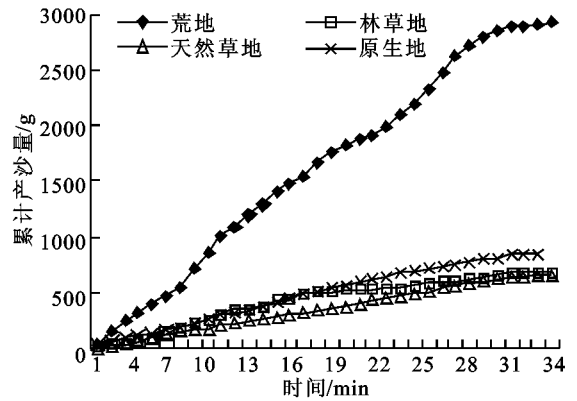


图 8 雨强 120 mm/h 时不同下垫面累计产沙量变化

力,其对侵蚀产沙也有一定的影响,图 9 - 10 是雨强分别为 90 mm/h 和 120 mm/h 时 4 种下垫面降雨入渗的变化规律。

图 9 可以看出,4 种下垫面的降雨入渗过程有所不同。入渗率均随着降雨历时的增加逐渐降低最后趋于平稳,但林草地的入渗率明显高于其它 3 种下垫面情况下的入渗率,且入渗过程最为平稳,波动很小,基本维持在 1.007 ~ 1.394 mm/min,入渗量和截流量达到最大;天然草坡的降雨入渗过程基本处于稳定下降状态;荒地的降雨入渗过程也在逐渐下降,但是其波动程度最大,而原生地的入渗过程在初始阶段就降到最低,然后保持在此最低点状态,波动很小,基本维持在 0.179 ~ 0.043mm/min。从图 10 中看出,入渗规律也是林草地最大,原生地最小,只是在此雨强下,每种下垫面的入渗波动比较大,尤其是天然草坡与荒地的入渗规律波动最大,其中荒地的波动范围在 0.192 ~ 1.028 mm/min,天然草坡的波动范围在 0.224 ~ 0.624 mm/min。总的来说,雨强小时,入渗率较小,小雨强时林草地最大入渗率为 1.5 mm/min 左右,大雨强时,林草地入渗率达到 1.8 mm/min 左右。

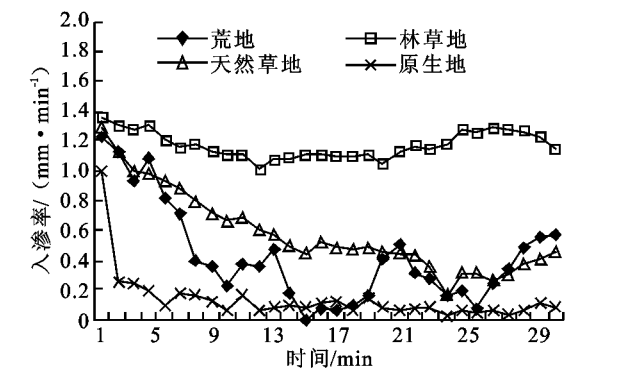


图 9 雨强 90 mm/h 时不同下垫面入渗率变化

由此可知,与裸地相比,地表有植被覆盖时能延缓产流,并有效拦蓄径流;裸地形成地表结皮后,产流提前,平均入渗率降低。所以林草地在有枯枝落叶层及腐殖质层覆盖的作用下能够有效增加土壤入渗,在很大程度上减少了径流量和泥沙量;天然草坡在有植物根系的作用下,也可以在一定程度上增加降雨入渗;荒地植被覆盖度较低,地表结皮较多,因而入渗率较小,径流量和产沙量较大;原生地地表结皮最多,地表结构无破坏,所以入渗率最小,径流量和产沙量最大。

4 结论

通过在野外条件下模拟降雨试验,从径流量、侵蚀产沙量与入渗率的变化规律及彼此之间的关系讨论了黄土区不同下垫面情况下的侵蚀产沙特性,得出以下结论:

4 种下垫面情况下,产流量的顺序依次为原生地最大,荒地与天然草坡次之,林草地产流量最小;产沙量的顺序依次为荒地最大,原生地与天然草坡次之,林草地最小;入渗率的顺序依次为林草地最大,天然草坡和荒地次之,原生地最小。当雨强增大时,4 种下垫面的产流,产沙,入渗顺序不变,只是相对小雨强时波动更大,产流、产沙和入渗的量更大。

这些都与径流产沙以及入渗规律相符合:由于林草地地表有枯枝落叶物和腐殖质等地被物层的覆盖,除了与林冠层一样能截持降水外,同时削弱雨滴动能,有效防止土壤溅蚀,而且延长汇流,使地表径流速率及径流量减小且地表径流的侵蚀能量减少,增加了径流下渗的时间,从本质上削弱了径流冲刷挟沙的能力。草地由于植物根系等的作用,改良了土壤结构,提高了土壤的抗冲和抗蚀性,更能有效增加降雨入渗,所以能够吸收和阻延地表径流、减少地表径流平均流速。荒地和原生地在缺少植被覆盖或覆盖度很小的情况下,地表结皮较多,不能增加土壤入渗,导致径流最大,产沙最多。说明植被具有保持

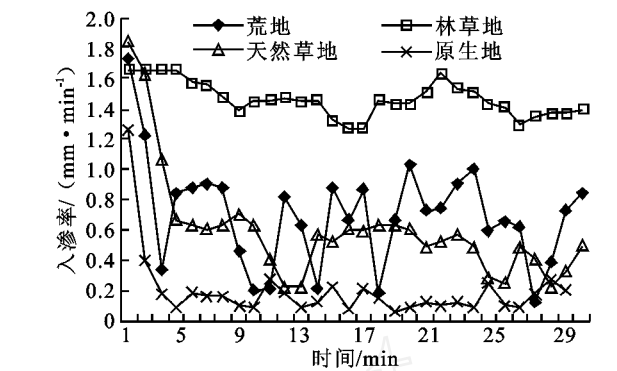


图 10 雨强 120 mm/h 时不同下垫面入渗率变化

水土的功能,可以发挥其涵养水源,改善生态环境的作用。

参考文献:

[1] 余新晓,秦富仓,李建牢,等. 流域侵蚀动力学[M]. 北京:科学出版社,2007.

[2] Fu B J, Chen L, Ma K, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shanxi, China [J]. Catena, 2000, 39(1): 69-78.

[3] Kusumandari A, Mitchell B. Soil erosion and sediment yield in forest agro-forestry areas in West Java, Indonesia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 40(2): 289-297.

[4] Sanchez L A, Ataroff M, Lopez R. Soil erosion under different vegetation covers in the Venezuelan Andes [J]. Environmentalist, 2002, 22(1): 161-172.

[5] 卢金发,黄秀花. 黄河中游土地利用变化对输沙的影响 [J]. 地理研究, 2003, 22(5): 571-578.

[6] 代俊峰,陈家宙,崔远来,等. 不同林草系统对集水区水量平衡的影响研究 [J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 435-443.

[7] 吴希媛,张丽萍. 降水再分配受雨强、坡度、覆盖度影响的机理研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 28-30.

[8] 余新晓,张学霞,李建牢,等. 黄土地区小流域植被覆盖和降水对侵蚀产沙过程的影响 [J]. 生态学报, 2006, 26(1): 1-8.

[9] 余新晓,张晓明,武思宏,等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响 [J]. 山地学报, 2006, 24(1): 19-26.

[10] 张晓明,余新晓,武思宏,等. 黄土区森林植被对坡面径流和侵蚀产沙的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1613-1617.

[11] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 5-8.

[12] 秦富仓,余新晓,张满良,等. 植被对小流域汇流及侵蚀产沙影响研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(5): 165-168.