

人工模拟降雨条件下 3 种多年生 牧草水土保持能力分析*

孟广涛^{1, 2}, 方向京², 李贵祥², 和丽萍², 张正海², 柴勇², 李品荣², 李宁云²

(1. 北京师范大学, 北京 100875; 2. 云南省林业科学院, 昆明 650204)

摘要: 采用人工模拟降雨方法, 以耕地和裸地为对照, 对 3 种多年生牧草进行水土保持能力分析。结果表明: 产流时间依次为裸地> 耕地> 三叶草> 狼尾草> 狗尾草, 在 76 mm/h 雨强下径流量、1 h 径流和泥沙累积量、土壤侵蚀量依次是耕地> 裸地> 三叶草> 狼尾草> 狗尾草, 在 53 mm/h 雨强下泥沙量、1 h 径流和泥沙累积量、土壤侵蚀量依次是裸地> 耕地> 三叶草> 狼尾草> 狗尾草。3 种牧草均有很好的水土保持效果, 其中狗尾草水土保持效果最好, 三叶草相对较差。

关键词: 人工模拟降雨; 牧草; 水土保持能力; 土壤侵蚀

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)02-0049-05

Study on Soil and Water Conservation Capacity of Three Perennial Forage Grasses Under Artificial Simulated Rainfall

MENG Guang-tao^{1, 2}, FANG Xiang-jing², LI Gu-xiang², HE Li-ping²,
ZHANG Zheng-hai², CHAI Yong², LI Pin-rong², LI Ning-yun²

(1. Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650204, China)

Abstract: A study on soil and water conservation capacity of three introduced grasses under artificial simulated rainfall was conducted in contrast to the farmland and the bareland. The results showed that three grasses have good soil and water conservation capacity. The *Setaria sphacelata* cv. Narok is the best. The water movement times are successively bareland> farmland> *Trifolium repens* cv. Haifa> *Pennisetum clandestinum* cv. Whittet> *Setaria sphacelata* cv. Narok. The runoff and sediment accumulant as well as soil erosion under 76 mm/h artificial simulated rainfall are successively farmland> bareland> *Trifolium repens* cv. Haifa> *Pennisetum clandestinum* cv. Whittet> *Setaria sphacelata* cv. Narok. The runoff and sediment accumulant as well as soil erosion under 53 mm/h artificial simulated rainfall are successively bareland> farmland> *Trifolium repens* cv. Haifa> *Pennisetum clandestinum* cv. Whittet> *Setaria sphacelata* cv. Narok.

Key words: artificial simulated rainfall; forage grass; soil and water conservation capacity; soil erosion

土壤侵蚀发生、发展的动力来源是天然降雨的雨滴击溅侵蚀和由降雨转化而来的地表径流。由于天然降雨观测时间序列很长, 再加上各种客观因素的限制, 给研究工作带来很大的不便, 而利用人工模拟降雨装置, 可以对降雨进行有效控制, 模拟不同类型的各种强度的天然降雨, 在人为控制条件下从各

方面研究降雨各种特性(如降雨总量、降雨强度、雨滴大小、雨滴落速及降雨动能等)、各种边界条件(如坡度、坡长、植被、土壤类型等)和土壤侵蚀机理等, 大大加快土壤侵蚀的研究进程, 提高科研效率^[1]。

植被对人工模拟降雨条件下土壤入渗和侵蚀特性影响的研究一直是土壤侵蚀和水土保持研究中的

* 收稿日期: 2009-09-17

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAD03A10-4); 国家林业局 948 项目(2002-07)

作者简介: 孟广涛(1969-), 男, 研究员, 在读博士后, 主要从事水土保持、生态恢复等方面的研究。E-mail: Menggt2001@163.com

通信作者: 方向京(1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事林业生态工程、水土保持等方面的研究。E-mail: xjfang2005@126.com

重点问题^[2]。许多研究人员在这方面进行了大量的研究工作,为土壤侵蚀预报和水土流失的治理提供了可靠的数据基础^[3-5]。为此本文以 3 种优良牧草为研究对象,裸地和耕地为对照,利用人工模拟降雨研究不同地类的产流产沙过程,分析不同地类的水土保持效益。

1 研究方法

1.1 试验点概况

试验点位于昆明市小哨云南省肉牛和牧草研究中心示范牧场, 103° 58′ E、25° 21′ N, 海拔 1 980 m, 年均温 13.7℃, 7 月极端最高温 30.9℃, 1 月极端最低温- 7.4℃, ≥10℃年积温 4 121.1℃, 年均降雨量 990 mm, 其中 92% 集中于 5- 10 月, 年平均蒸发量 1 984.8 mm, 无霜期 224 d, 土壤为石灰岩母质的砖红壤, pH 值 5.4, 地形为缓坡地。

试验地为 1983 年建植的人工草地, 建植时采用多种牧草混播, 经多年演替, 现主要为纳罗克非洲狗尾草(*Setaria sphacelata* cv. Narok)、威提特东非狼尾草(*Pennisetum clandestinum* cv. Whittet) 和海法白三叶(*Trifolium repens* cv. Haifa) 3 种牧草, 且形成了部分单一群落, 草地地表枯落物盖度分别为 80%、90%、30%, 以耕地和裸地作为对照。

1.2 研究方法

人工模拟降雨装置采用实验室自行研制的 Kust03- 1 型人工模拟降雨装置, 采用 50 cm × 50 cm × 20 cm 的土框采集原状土放置于样品车上进行人工模拟降雨试验。由于试验条件的限制, 本次试验在 25° 的坡度条件下, 只选择 76 mm/h 和 53 mm/h 两个降雨强度模拟当地侵蚀性暴雨的土壤侵蚀过程。在实验中观测其降雨过程、径流过程、水土流失过程, 记录降雨和产生径流的时间。降雨试验过程中集水口产流后, 小雨强每 10 min 取一次水沙样, 测一次径流量, 连续 3 次测得相近的径流量, 即认为达到稳定入渗, 停止降雨。大雨强实验每 5 min 取一次水沙样, 测一次径流量, 连续 3 次测得相近的径流量, 即认为达到稳定入渗, 停止降雨。水样中泥沙量采用烘干法。根据读数绘制径流与泥沙的过程曲线, 并根据以下公式计算出草地的保水保土效益。

草地保水效益(%) = (对照总径流量- 草地总径流量) / 对照总径流量

草地保土效益(%) = (对照总泥沙量- 草地总泥沙量) / 对照总泥沙量

2 结果与分析

2.1 人工模拟降雨产流时间

表 1 人工模拟降雨试验土壤特性、盖度和产流时间

地类	有机质/%	总孔隙度/%	盖度/%	雨强/(mm·h ⁻¹)	含水率/%	产流时间/min
狼尾草	4.76	47.5	80	76	22.09	13.05
				53	19.20	24.85
狗尾草	4.58	50.6	90	76	21.91	24.95
				53	16.04	29.45
三叶草	4.09	44.9	30	76	27.0	10.70
				53	15.19	20.41
耕地	2.57	63.6	10	76	25.81	3.30
				53	28.89	12.95
裸地	0.63	42.5	0	76	21.96	2.17
				53	31.38	1.31

土壤产流时间主要受地表盖度、土壤初始含水率和降雨强度的影响^[6], 地表盖度越高, 土壤初始含水率越低, 降雨强度越小, 土壤产流时间越长。由表 1 可以看出, 裸地在 53 mm/h 雨强下产流最快, 只有 1.31 min, 主要是由于裸地地表无覆盖, 且土壤初始含水率高。而狗尾草在 53 mm/h 雨强下产流时间最长, 需要 29.45 min, 主要由于其土壤初始含水率低, 地表盖度高, 降雨强度相对小。

暴雨是引起水土流失的主要因素, 对影响降雨起始产流时间(产流历时)的因素进行研究, 可为延长降雨产流时间的到来、减轻水土流失及合理配置水土保持措施提供帮助。产流时间主要受地表盖度、降雨强度及土壤初始含水量等因子的影响^[6]。因此对产流时间(Y_1)与地表盖度(X_1)、降雨强度(X_2)及土壤初始含水量(X_3)进行多元回归分析可得到回归方程。

$$Y_1 = 0.202X_1 - 0.277X_2 - 0.361X_3$$

$$R^2 = 0.905$$

进行逐步回归分析, 可得最优方程

$$Y_1 = -0.303X_2 + 0.235X_1 + 23.278$$

$$R^2 = 0.885$$

由此可见, 产流时间(Y_1)与地表盖度(X_1)、降雨强度(X_2)有着更为密切的关系。

2.2 人工模拟降雨试验下土壤侵蚀过程研究

从图 1 可以看出, 在 76 mm/h 雨强下, 狼尾草、狗尾草和三叶草土壤侵蚀过程中泥沙量变化不大, 趋于平稳状态。而裸地和耕地的土壤侵蚀过程均可分为 4 个阶段, 侵蚀量首先递增, 到达第一个峰值, 主要是因为雨滴的击溅作用使表层土壤被分散, 易被径流冲走; 接着由于雨滴的夯实和水分下渗, 土壤颗粒填

充孔隙,使土壤表层结皮,表土抗蚀性加强,故递减到第一个峰谷;然后随着土壤结皮,渗透能力下降,径流增加,冲刷能力加强,使地表结皮遭到破坏,进入细沟发育阶段,产沙量递增到第二个峰值;最后由于地表小颗粒基本都被径流冲刷掉,产沙量开始降低并趋于稳定,但不同地类每个阶段所到达的时间不一致。

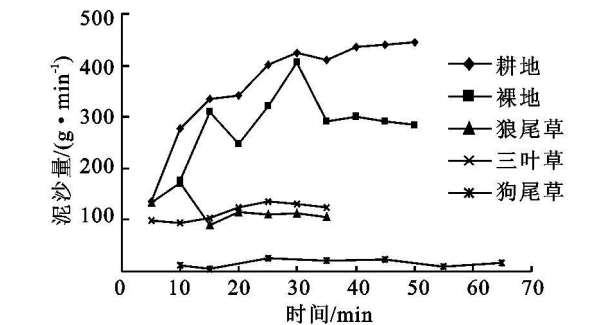


图 1 76 mm/h 雨强下不同地类土壤侵蚀过程

从图 2 可以看出在 53 mm/h 雨强下,狼尾草、狗尾草和三叶草的土壤侵蚀过程基本趋于稳定,可能是由于降雨强度相对较低,地表枯落物拦蓄、过滤和增加入渗作用较明显。耕地和裸地土壤侵蚀过程可分为 2 个阶段,刚开始显著增加,然后到达峰值后

逐渐下降趋于稳定。耕地和裸地土壤侵蚀过程第一阶段和 76 mm/h 雨强下一致,都是因为雨滴溅蚀达到峰值,但进入结皮阶段后,由于雨强小,土壤结构和入渗性能未遭到破坏,坡面径流冲刷能力弱,土壤表层不易被破坏,使泥沙量降低。

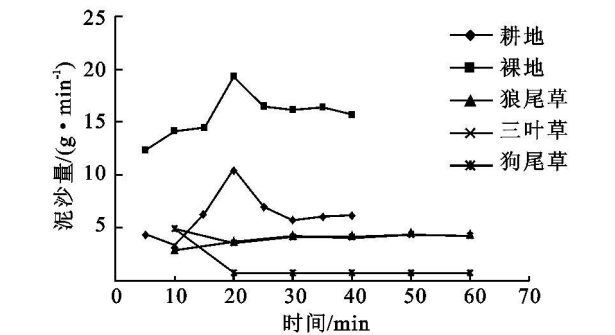


图 2 53 mm/h 雨强下不同地类土壤侵蚀过程

2.3 人工模拟降雨试验下径流累积量和泥沙累积量

从图 3- 6 可以看出,在 76 mm/h 雨强下耕地的径流累积量和泥沙累积量最高,而狗尾草最低;在 53 mm/h 下,裸地的径流累积量和泥沙累积量最高,最低依然是狗尾草。不同地类在不同雨强下的产流产沙过程均遵循指数函数分布,回归方程见表 2。

表 2 人工模拟降雨过程中产流产沙回归方程

地类	雨强/(mm·h ⁻¹)	产流回归方程	R ²	产沙回归方程	R ²
狼尾草	76	$y = 715.671e^{0.0564T}$	0.917	$y = 95.15e^{0.0601T}$	0.939
	53	$y = 930.835e^{0.0375T}$	0.934	$y = 17.0145e^{0.0447T}$	0.933
狗尾草	76	$y = 91.1973e^{0.0492T}$	0.897	$y = 25.5098e^{0.0464T}$	0.832
	53	$y = 387.738e^{0.0164T}$	0.987	$y = 41.8423e^{0.0017T}$	0.941
三叶草	76	$y = 414.069e^{0.0727T}$	0.958	$y = 106.584e^{0.0659T}$	0.935
	53	$y = 542.053e^{0.0356T}$	0.944	$y = 34.5607e^{0.0333T}$	0.979
耕地	76	$y = 1035.99e^{0.0647T}$	0.889	$y = 862.442e^{0.0592T}$	0.886
	53	$y = 237.341e^{0.0872T}$	0.877	$y = 16.3473e^{0.0745T}$	0.910
裸地	76	$y = 1512.87e^{0.0485T}$	0.928	$y = 1212.24e^{0.0455T}$	0.907
	53	$y = 728.785e^{0.0590T}$	0.956	$y = 66.5195e^{0.0622T}$	0.916

注: T 为产流后的时间(min)。

对累积径流量(Y₂)及其影响因子地表盖度(X₁)、降雨强度(X₂)、总孔隙度(X₃)进行多元回归分析可得回归方程:

$$Y_2 = 2594.693X_2 - 1053.83X_1 - 1418.455X_3$$
$$R^2 = 0.648$$

从而得出,累积径流量(Y₂)与地表盖度(X₁)、降雨强度(X₂)、总孔隙度(X₃)有着较为密切的关系。地表盖度大,能有效地截留降雨,调节径流;土壤孔隙度大,降雨入渗量大,可减少地表径流。对累积泥沙量(Y₃)及其影响因子地表盖度(X₁)、降雨强度(X₂)、有机质含量(X₄)进行多元回归分析可得回归方程。

$$Y_3 = 455.832X_2 - 103.834X_1 - 1052.622X_4$$

$$R^2 = 0.636$$

从而得出,累积泥沙量(Y₃)与地表盖度(X₁)、降雨强度(X₂)、有机质含量(X₄)有着较为密切的关系。地表盖度大,可以避免雨滴对地表的直接打击,还可以拦截、过滤径流中的泥沙量;土壤有机质含量大,可增强土壤的抗侵蚀能力,可有效地控制土壤侵蚀。

2.4 人工模拟降雨试验下草地水土保持效益分析

由于试验条件的限制,人工模拟降雨试验只对 5 种地类进行了坡度为 25°时 53 mm/h 和 76 mm/h 雨强下两组平行试验,因此不能定量地描绘不同地类在不同坡度和雨强下水土保持的规律,只能在试验所得基础上定性地说明确草地的水土保持效益。通

过对人工模拟降雨试验中径流累积量和泥沙累积量 (Y) 与时间(T) 的关系通过其关系折算出在单位时

间内的径流量与土壤侵蚀量, 以裸地为对照, 从而得出不同地类的水土保持效益, 具体见表 3。

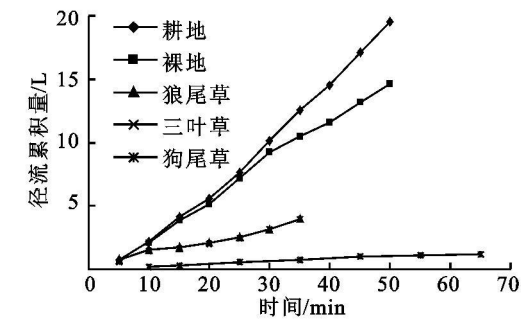


图 3 76 mm/h 下不同地类径流累积量与时间的关系

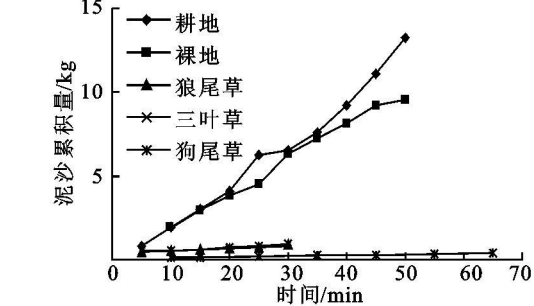


图 4 76 mm/h 下不同地类泥沙累积量与时间的关系

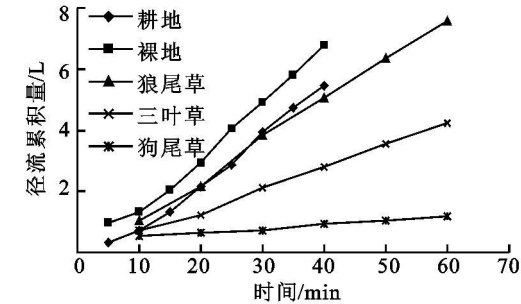


图 5 53 mm/h 下不同地类径流累积量与降雨时间的关系

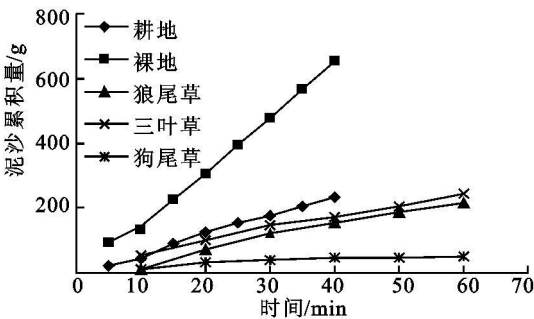


图 6 53 mm/h 下不同地类泥沙累积量与降雨时间的关系

表 3 不同地类水土保持能力

地类	雨强 76 mm/h				雨强 53 mm/h			
	径流量/ (mm·h ⁻¹)	保水效益/ %	侵蚀量/ (t·hm ⁻² ·h ⁻¹)	保土效益/ %	径流量/ (mm·h ⁻¹)	保水效益/ %	侵蚀量/ (t·hm ⁻² ·h ⁻¹)	保土效益/ %
狼尾草	8.44	24.01	140.05	81.15	3.53	64.84	9.94	91.05
狗尾草	0.70	93.71	16.495	97.78	0.415	95.87	1.86	98.33
三叶草	12.99	- 16.91	183.45	75.31	2.22	77.87	10.19	90.83
耕地	20.11	- 81.00	1202.6	- 61.86	17.77	- 76.85	57.13	48.59
裸地	11.11	0	743.0	0	10.05	0	111.12	0

从表 3 可以看出,在 76 mm/h 雨强下,狗尾草的水土保持效果最为突出,径流量仅为 0.70 mm/h,土壤侵蚀量为 16.495 t/(hm²·h),保水保土效益分别达到 93.71%和 97.78%,主要因为其地表有一层厚厚的枯落物,拦蓄和过滤径流能力强,加之其对土壤特性的改善,增强了土壤的渗透能力和抗侵蚀能力。狼尾草由于地表枯落物量不如狗尾草,保水保土效益不如狗尾草。而耕地由于在暴雨过程中,雨滴打击地表破坏土壤结构后,雨水将表层散碎的土粒淋洗到土内,并填充到土壤的孔隙中,使地表结皮,降低土壤渗透性,并且耕地由于人为因素的影响,表层土壤过于疏松,有机质含量低,抗侵蚀能力弱,极易被径流冲刷搬运走,故水土流失最为严重,径流量为 20.11 mm/h,土壤侵蚀量为 1 202.6 t/(hm²·h),比裸地分别高出 81.00%和 61.86%。三叶草地由于地表枯落物少,盖度低,地表径流反而比裸地高,但由于其土壤中有机质含量高,土壤团粒

结构稳定,抗侵蚀能力强,保土效益达到 75.31%。而在 53 mm/h 下,狼尾草、狗尾草和三叶草水土保持作用都很突出,保土效益都高达 90% 以上,主要是由于雨强相对较小,草地地表枯落物有一定的拦截作用,土壤中有有机质含量高,土壤饱和含水量高,降水主要被土壤吸收,土壤抗侵蚀能力增强,不易发生水土流失。而耕地径流量大于裸地,可能是由于耕地土壤在雨滴的击打下易结皮,使土壤渗透性能大大降低,而雨强相对较低,不能破坏地表结皮层,故径流量大于裸地,而土壤侵蚀量低于裸地。

3 结 论

(1)在 76 mm/h 和 53 mm/h 雨强下,狼尾草、狗尾草和三叶草土壤侵蚀过程中泥沙量变化不大,趋于平稳状态。而在 76 mm/h 雨强下,裸地和耕地的土壤侵蚀过程均可分为 4 个阶段,首先由于雨滴的击溅作用到达第一个峰值;接着由于土壤表层结皮,表土

抗蚀性加强,故递减到第一个峰谷;然后随着径流冲刷能力加强,使结皮遭到破坏,产沙量递增到第二个峰值;最后产沙量降低并趋于稳定。在 53 mm/h 雨强下,耕地和裸地土壤侵蚀过程可分为 2 个阶段,刚开始由于雨滴溅蚀达到峰值,然后土壤表层结皮不易被破坏,土壤侵蚀量逐渐下降并趋于稳定。

(2) 在 76 mm/h 雨强下,狗尾草径流量仅为 0.70 mm/h,土壤侵蚀量为 16.495 t/(hm²·h),保水保土效益最为突出,比裸地分别减少了 93.71% 和 97.78%,耕地水土流失最为严重,径流量为 20.11 mm/h,土壤侵蚀量为 1202.6 t/(hm²·h),比裸地分别高出 81.00% 和 61.86%;而在 53 mm/h 下,狼尾草、狗尾草和三叶草水土保持作用都很突出,保土效益都高达 90% 以上,裸地水土流失最为严重。

参考文献:

[1] 王礼先. 水土保持学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.

[2] 水利部水土保持监测中心. 水土保持监测技术[S]. 2003.

[3] 温光远, 刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降雨截流规律的数量分析[J]. 林业科学, 1995, 31(4): 289-298.

(上接第 48 页)

[4] Hoover M D. Water and timbermanagement[J]. Journal Soil and water Conservation, 1952, 7(4): 75-78.

[5] Smith R E, Goodrich D C, Quinton J N. Dynamic distributed simulation of watershed erosion: the KINEROS2 and EUROSEM models [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50(5): 517-520.

[6] Ziegler A D, Thomas W G. Hydrologic change and accelerated erosion in northern Thailand[EB/OL]. <http://www2.hawaii.edu/seassa/explorations/v1n1/art3/v1n1-art3.html>, 2006-3-9.

[7] Ziegler A D, Thomas W G, Ross A. Sutherland Estimation of basin sediment flux in the Pang Khum Experimental Watershed in Northern Thailand: the contributions of roads and agricultural lands [R]. Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2000.

[8] Chamnonk, Pransutjarit. Impacts of Land Use Evolution on Stream-flow and Suspended Sediment in Mae Taeng Watershed [D]. Hengmai: Kasetsart University, 1983.

[9] Rijsdijk A, Bruijnzeel L A. Erosion Sediment Yield

[4] 刘向东, 吴钦孝, 赵鸿雁. 森林植被垂直截留作用与水土保持[J]. 水土保持研究, 1994, 1(3): 8-13.

[5] 韦红波, 李锐, 杨勤科. 我国植被水土保持功能研究进展[J]. 植物生态学报, 2002, 26(4): 489-496.

[6] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-20.

[7] 于冬升, 史学正, 王宁. 用人工模拟降雨研究亚热带坡耕地土壤的沟蚀和沟间侵蚀[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 160-166.

[8] 陈奇伯, 王克勤, 李金洪, 等. 元谋干热河谷坡耕地土壤侵蚀造成的土地退化[J]. 山地学报, 2004, 22(5): 528-532.

[9] 何炳辉, 缪驰远, 吴咏, 等. 遂宁组紫色土坡耕地土壤侵蚀规律研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 9-12.

[10] 高军侠, 党宏斌, 刘作新, 等. 黄土高原南部裸露坡耕地产流产沙试验研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 138-140.

[11] 汪有科, 吴钦孝, 韩冰, 等. 森林植被水土保持功能评价[J]. 水土保持研究, 1994, 1(3): 24-30.

[12] 鲍文, 包维楷, 何炳辉, 等. 森林生态系统对降水的分配与拦截作用[J]. 山地学报, 2004, 22(4): 483-491.

[13] 刘向东, 吴钦孝, 施立明, 等. 对六盘山森林截留降水作用的研究[J]. 林业科技通讯, 1982(3): 18-21.

and Land Use Patterns in the Upper Konto Watershed, East Java, Indonesia, Part III: Results of the 1989-1990 Measuring Campaign [Z]. Project Communication No. 18, Konto River Project, Kingdom of the Netherlands, Ministry of Foreign Affairs, Director General of International Cooperation, 1991.

[10] Dunne T, Dietrich W. Sediment Sources in Tropical Drainage Basins in Soil Erosion and Conservation in the Tropics [J]. ASAE Special Publication, 1982, 43: 368-385.

[11] Harden C P. Incorporation Roads and Footpaths in Watershed-scale Hydrologic and Soil Erosion Models [J]. Physical Geography, 1992, 13: 378-392.

[12] 郑世清, 郑科. 延安黄土区植物路植物根系与水土保持功能评价研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 174-176.

[13] 曹世雄, 陈莉, 高旺盛. 山区农田道路路面种草生长发育与通行能力观测[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 69-72.

[14] 田风霞, 王占礼, 郑世清, 等. 黄土道路侵蚀过程模拟试验研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 1-4, 9.