

不同透水状况对坡地土壤侵蚀和养分流失的影响

王辉^{1,2}, 王全九^{2,4†}, 邵明安^{2,3}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院; 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: 712100, 陕西杨凌; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 100101, 北京; 4. 西安理工大学水资源研究所, 710048, 西安)

摘要 为研究坡地物质迁移的重要过程, 通过室内人工降雨模拟试验, 研究不同透水状况坡地土壤侵蚀和养分流失的过程与机制。研究结果表明: 不透水坡地的初始产流时间比半透水和完全透水坡地提前 5~7 min, 且土壤侵蚀总量大于其余两者土壤侵蚀量之和; 在二次降雨条件下, 不透水坡地的土壤侵蚀剧烈, 土壤侵蚀量大于其他 2 种状况之和的 5 倍; 在首次降雨过程中 3 种不同透水状况的径流养分浓度变化表现一致, 仅在降雨 75 min 后开始呈现差异; 二次降雨过程中径流养分浓度存在显著差异。因此, 存在不透水底层或入渗速率低的犁底层坡地, 具有潜在的严重土壤侵蚀与磷钾流失趋势, 尤其在初始土壤含水量较高的情况下。为合理配置坡地水土保持管理措施和控制养分流失提供参考。

关键词 人工降雨; 地表径流; 土壤侵蚀; 养分流失; 透水状况; 物质迁移

Influence of different drainage conditions on soil erosion and nutrient loss of slope land

Wang Hui^{1,2}, Wang Quanjiu^{2,4}, Shao Ming-an^{2,3}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, CAS and MWR: 712100, Yangling, Shaanxi; 3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, 100101, Beijing; 4. Institute of Water Resource, Xi'an University of Technology, 710048, Xi'an: China)

Abstract To study mass transport from slope land, the process and mechanism of soil erosion and nutrient loss on the slope land under different drainage conditions were investigated by simulating rainfall. Results had indicated that, runoff from the impervious-base soil boxes was generated 5~7 min earlier than those from slurry and impervious-base boxes. The total amount of soil erosion from the impervious-base was much more than the sum of those of slurry and impervious-base. Especially, soil erosion of the impervious-base was extremely intensive during the second simulating rainfall, and the amount of soil loss was much 5 times than the sum. There was no significant discrepancy for chemical concentration in runoff from the three kinds of base boxes during the initial rainfall. However, during the second rainfall, there was notable discrepancy for chemical concentration in runoff from the different conditions. Therefore, the existing impervious base and low-infiltrate rate ploughed-base slope lands are the potential hazards of soil erosion and phosphorus and potassium loss, especially under initial soil water high content. The work may provide some useful information for allocating water and soil conservation management measurements and preventing nutrient loss on the slope land.

Key words rainfall simulation; surface runoff; soil erosion; nutrient loss; drainage condition; solute transfer

在我国黄土高原区, 坡地占该区耕地总面积的 70%左右^[1], 因此, 选择坡地为研究对象, 开展坡地

收稿日期: 2005-10-23 修回日期: 2006-01-02

项目名称: 中国科学院“百人计划”项目“黄土坡面人工林草地系统中水分、养分运移动力学模拟与调控”; 中国科学院水利部水土保持研究所择优资助项目; 国家自然科学基金项目“黄土坡面土壤氮素随地表径流迁移动力学模型”(50479065)

第一作者简介: 王辉(1973—), 男, 在读博士。主要研究方向: 土壤水分、溶质运移模拟。E-mail: wanghuisb@126.com

†责任作者简介: 王全九(1964—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 土壤中物质迁移。E-mail: wquanjiu@163.com

物质的迁移及其调控理论的研究,具有广泛的代表性^[2]。近年来,众多研究者针对土壤类型、降雨因子、地形因子、不同土地利用方式等因素,通过室内模拟降雨或野外长期定位监测,研究了坡地土壤侵蚀与养分流失的基本特征^[3~14]。我国地质结构复杂,不同区域的坡地耕层以下土层透水状况均不相同。坡地透水状况是影响坡地物质迁移的关键因素之一,它直接影响到降水的转化情况,最终影响到坡地的物质迁移状况。Ahuja^[15]等人通过室内模拟试验,研究了不同透水状况下溴离子迁移特征,得出3种不同土壤类型条件下,不透水状况溴离子径流浓度比完全透水状况的高1~2个数量级的结论;然而,不同透水状况下坡地土壤侵蚀和养分流失迁移过程的相关研究未见报道。本研究通过室内人工降雨模拟试验,对这一问题作进一步的探讨,为合理配置坡耕地水土保持管理措施和控制养分流失提供参考。

1 试验材料与试验设计

1.1 试验材料

试验用土采自陕西省神木县中国科学院水土保持研究所神木野外试验站的试验小区内。土壤类型为风沙土,土壤颗粒组成:砂粒(>0.05 mm)占43.06%~35.5%,粗粉粒(0.05~0.01 mm)占32.02%~38.66%,黏粒(<0.001 mm)占3.96%~13.78%。土壤主要化学性状如表1所示。土壤经过4.0 mm孔筛网、风干、均匀混合等处理,备用。

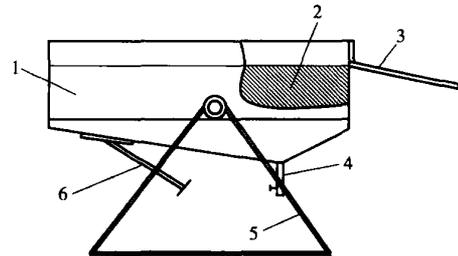
表1 供试土壤主要化学性状

Tab.1 Chemical properties of tested soil

土层 cm	全N %	全P %	全K %	有机质 %	pH
0~20	0.025	0.066	1.95	0.487	8.50
>20~50	0.018	0.055	1.74	0.282	8.70
>50	0.010	0.049	1.66	0.123	8.68

为研究不同透水状况条件下坡地土壤侵蚀和养分流失机制,设计了室内模拟降雨试验。降雨试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室降雨大厅的侧喷区内进行,其降雨高度为16 m,降雨雨滴达到的终点速度满足天然降雨特性^[16],降雨强度变化范围40~260 mm/h,降雨均匀度大于80%。本试验所用土槽为自行设计的钢制土槽(图1),其尺寸规格为:长×宽×高=100 cm×30 cm×20 cm,坡度可在0°~30°之间任意可调,在槽的径流出口处安装了V形径流导流槽,收集径流,其他3边额外

增加15 cm高度钢板,以防在雨滴打击作用下土槽内的物质溅出槽外。为了满足模拟不同透水状况坡地要求,土槽底部均匀打了排水孔,以便用于模拟天然透水底面;同时,土槽底部焊接一V形箱体与阀门连接,以便收集土槽底板渗漏水。



1. 土槽;2. 填装土层;3. 径流导流槽;

4. 渗流阀门;5. 支架;6. 坡度调节器。

图1 实验钢制土槽结构示意图

Fig.1 Diagram of experimental steel soil flume

1.2 研究方法

1.2.1 土样准备 田间土壤所含的农用无机化肥成分比较复杂,且各地含量差异较大,所含溶质的化学组成也不同,不便对某一化学组成的溶质作重点研究,同时也不便在可控条件下,对各种影响因素作比较分析。为了便于揭示坡面土壤养分随地表径流迁移的基本规律,试验采用人工配制肥土。首先,根据土壤的初始含水量和所要控制的含水量,确定所需补水量;根据所要控制肥土含氮、磷和钾的水平,确定硝酸钾和磷酸二氢钾的用量;用一定补水量溶解一定量的硝酸钾和磷酸二氢钾。然后,将前期处理好的风沙土摊开,用喷雾器将配制好的肥料水均匀喷洒在土料上,充分搅拌;然后,装入塑料大桶中,密封存放,静置24 h。通过上述方法,可以获得肥料均匀土壤,且土壤质量含水量可控制误差在±1%范围内。本试验控制土壤氮、磷和钾的含量水平分别为100、100和404 mg/kg,初始土壤质量含水量(4±0.4)%。

1.2.2 填装土槽 为模拟坡地不同排水状况,试验设计3个水平:完全透水、半透水和不透水。完全透水状况是在土槽底板上仅仅铺设1层透水性很强的纱布,防止土壤渗漏,忽略纱布对入渗水流阻碍作用。然后,底层填装10 cm细砂石,在细砂石层上填装已配制好的肥土,填装厚度为10 cm,密度控制为1.38 g/cm³,土壤初始质量含水量为4%,每2.5 cm一层填装;在填装上层土之前,打毛下层土壤表面,以防土层之间出现分层现象;按照此方法填装完10 cm厚肥土。最后,用塑料薄膜覆盖土壤表层,以防人工降雨前期表层土壤含水量因蒸散而改变。半

透水状况是在土槽底板上铺设1层纱布后,填装5 cm厚细砂石,接着填装5 cm厚重壤土,随后填装肥土,方法如前所述。不透水状况是在土槽底板上用密封塑料胶布封住土槽底板的孔洞,然后按照如前所述操作程序,先填装10 cm厚底层风沙土壤,再填装10 cm厚的肥土。

1.2.3 试验过程 3种不同透水状况的土槽坡度均设为5°,每个处理做2个重复。人工降雨过程分为2次降雨进行。首场人工降雨设定降雨强度1.33 mm/min,降雨历时103 min;在首次降雨结束后,静置24 h,进行二次人工降雨,保持同等降雨强度,降雨历时62 min。在每场降雨过程中,记录初始产流时间,产流后10 min内每间隔2 min用塑料小桶承接径流样1 min,其后每间隔10 min取一次径流样,其余径流全收集在径流大桶中。量测塑料小桶中径流样,确定不同时刻的径流量;从每个塑料小桶中取出部分澄清好的水样,装入50 mL塑料瓶中;从径流大桶取1个水样作为降雨期间的平均值;最后所有径流归在一起,沉淀,风干,取出泥沙样备用。水样过滤后,冷藏在4 °C的冰柜中,以供化学分析所用。径流中水溶性磷 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 采用钼蓝比色法紫外分光光度计测定;硝态氮 $\text{NO}_3^{-}-\text{N}$ 采用德国生产的Bran+Luebbe自动分析仪测定;钾离子浓度采用原

子吸收分光光度计测定。

2 试验结果与讨论

2.1 不同透水状况对坡地径流和土壤侵蚀的影响

图2中a、b分别描述了首次和二次降雨过程中3种不同透水状况下径流变化过程。在首次降雨中,由于降雨前初始条件:土壤初始含水量、土壤表层养分含量、土壤密度以及土槽坡度均一致,而仅仅透水状况不同。在相同降雨强度条件下,不同透水状况的土槽产流变化过程显著不同;不透水状况土槽的初始产流时间比其他2种状况明显提前5~7 min,产流后10 min迅速达到较大且相对稳定的径流量,随后径流量缓慢增加,降雨历时大约90 min后径流量趋于稳定;完全透水和半透水这2种状况的初始产流时间无显著差异,产流后10 min内产流趋势与不透水状况一致,随后径流量在较短时间内迅速趋于稳定状态。然而,在二次降雨过程中,由于土槽中土壤初始含水量均很高,因此降雨后径流立即产生,初始产流时间很短,而且3种透水状况之间没有显著差异,产流8 min后均达到稳定状态,只是不透水的初始产流量比其他的大许多。这是由于不透水土槽的土壤水接近于饱和状态,而其他2种状况没有达到的缘故。

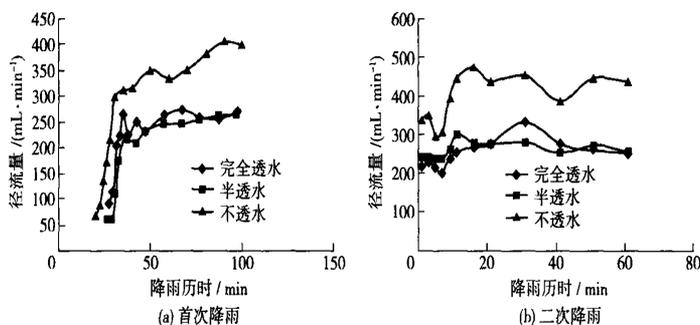


图2 不同透水状况下径流量变化过程

Fig. 2 Runoff discharge with time under different drainage conditions

坡地不同排水条件直接影响地表径流的产生时间以及径流量的大小,而径流是土壤侵蚀的主要驱动力。从图3可以看出,无论是首次降雨,还是二次降雨,不透水状况的径流总量比其他2种状况均大48%左右。由图4所示,不同透水状况的土壤流失总量存在明显差异,在首次降雨和二次降雨过程中,不透水坡地的土壤流失量分别为1.73和2.68 kg/m²,完全透水坡地的土壤流失量分别为0.87和0.28 kg/m²,半透水坡地的土壤流失量分别为0.58和0.29 kg/m²;显然,在首次降雨结束后24 h

所进行的二次降雨,不透水状况的土壤侵蚀十分剧烈,土壤侵蚀量是其他2种状况之和的5倍之多。这是由于首次降雨前土壤含水量和土壤密度均保持一致,但二次降雨前土壤初始含水量很高,不透水坡地土壤已经达到了饱和状态,土壤的抗蚀性和抗冲性大大减弱,在强降雨条件下,立即产生大量径流,很容易产生面蚀以及沟蚀,携带大量泥沙流出坡面。

2.2 不同透水状况对坡地土壤养分迁移的影响

在研究坡地不同透水状况下养分迁移过程中,选择随径流迁移的 $\text{NO}_3^{-}-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 K^+ 离子为

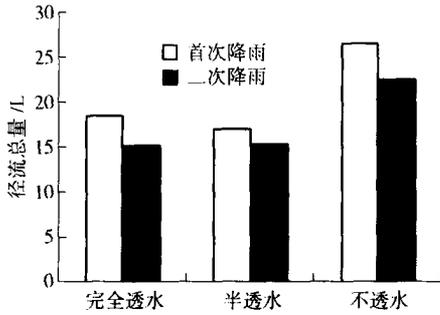


图3 不同透水状况下径流总量比较

Fig.3 Comparison of total runoff discharge under different drainage conditions

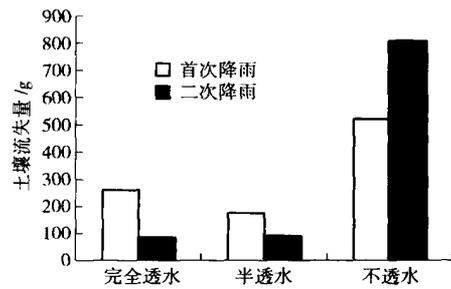
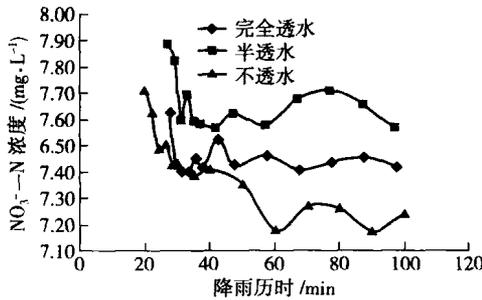


图4 不同透水状况下土壤流失量比较

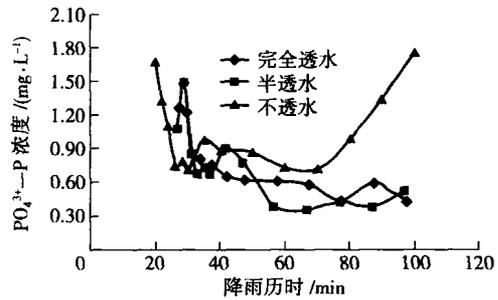
Fig.4 Comparison of the amounts of soil loss under different drainage conditions

研究内容。图5中a、b、c分别描述了首次降雨中径流 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 K^+ 离子的浓度变化过程，图5中d、e、f分别描述了二次降雨径流 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 K^+ 离子的浓度变化过程。在首次降雨中，3种透水状况下的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 K^+ 离子随径流迁移的变化趋势基本一致。由于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$

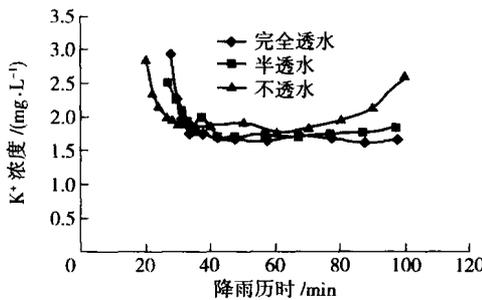
是非吸附性的，极易随水流失，因而在不透水条件下，表层土壤的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 随大量径流水迅速流失，所以径流硝态氮浓度表现出快速衰减的趋势；然而，对于吸附性较强的磷和钾来说，在首次降雨70 min内，径流浓度变化一致。随后，不透水条件的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 K^+ 离子径流浓度迅速提高，尤其是



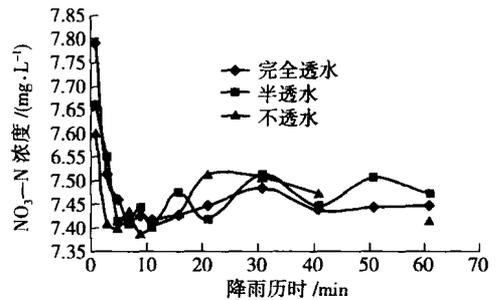
(a) 首次降雨硝态氮流失过程



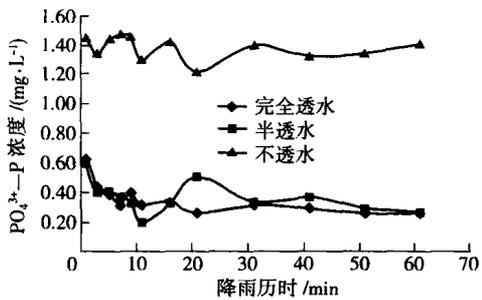
(b) 首次降雨水溶性磷流失过程



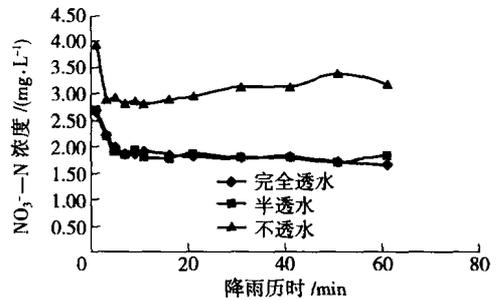
(c) 首次降雨钾离子流失过程



(d) 二次降雨硝态氮流失过程



(e) 二次降雨水溶性磷流失过程



(f) 二次降雨钾离子流失过程

图5 首次降雨和二次降雨径流溶质浓度变化过程

Fig.5 Different solute concentration in runoff with time for the first and second rainfall event

PO_4^{3-} —P 径流浓度。其主要原因是不透水条件下的坡面此刻开始发生了细沟侵蚀,表层底下的土壤暴露在雨点打击和径流冲刷作用下,为径流水提供了新的养分源,可见土壤侵蚀促使土壤养分进一步流失。从二次降雨的径流溶质浓度变化过程来看,坡地透水状况对硝态氮没有影响,硝态氮径流浓度变化趋势没有差异;但是不透水条件的 PO_4^{3-} —P 和 K^+ 离子径流浓度在整个二次降雨期间保持很高的水平,其径流溶质浓度分别是完全透水和半透水的 3.7 倍和 1.6 倍;而径流溶质流失量分别达到完全透水和半透水的 5.8 倍和 2.4 倍。

3 结论

通过室内人工降雨模拟试验,研究了坡地不同透水状况对坡地土壤侵蚀和养分流失过程的影响。研究表明:在初始条件相同情况下,不透水比半透水和完全透水的初始产流时间提前 5~7 min,而后两者的径流量首先达到稳定;不透水状况的土壤侵蚀总量比其余两者土壤侵蚀量之和还多;在初次降雨后 24 h 进行二次降雨条件下,不透水状况的土壤侵蚀甚是剧烈,土壤侵蚀量是其他 2 种状况之和的 5 倍之多;在初次 90 多 min 降雨过程中 3 种不同透水状况的径流养分浓度没有显著差异,仅在降雨 70~80 min 后开始出现差异。然而,二次降雨过程中径流养分浓度存在显著差异: NO_3^- —N 径流浓度三者变化均趋于一致,但不透水的 PO_4^{3-} —P 和 K^+ 离子径流浓度比其他的高 1~2 倍。由于土壤表层硝态氮往往被淋溶到下层土壤,径流硝态氮浓度较低,而吸附性强的磷和钾随着土壤侵蚀加剧径流浓度增加。

总之,对于底层不透水或入渗能力很低的犁底层的坡耕地,由于其排水能力差,坡地表层土壤很容易达到饱和状态。大多数降雨直接转换为地表径流或次地表径流,形成较大径流量。地表土壤和养分以及地表底下的土壤和养分受到径流强烈地冲刷、侵蚀和浸提,泥沙和土壤养分随径流大量流出坡地;然而,对于有较好透水能力的坡耕地,显然其排水能力强,坡地降雨除了小部分存储在地表土壤中外,其余通过 2 个途径转换:入渗水和径流水。地表径流量较小,其冲刷能力弱,土壤侵蚀和养分流失量也相应少许多,因此,存在不透水底层或入渗低犁底层的坡耕地,具有潜在的严重土壤侵蚀与磷钾流失趋势,尤其在初始土壤含水量较高的情况下(二次降

雨)。坡耕地入渗能力究竟为多大时,以满足既可存储大量土壤水以供植物生长所需,又能满足降低径流冲刷,减少土壤侵蚀和养分流失的要求。关于这一问题还有待进一步研究。

4 参考文献

- [1] 上官周平,彭珂珊,彭琳,等. 黄土高原粮食生产与持续发展研究. 西安:陕西人民出版社,1999:81
- [2] 邵明安,上官周平,康绍忠,等. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业. 西安:陕西科技出版社,1999:3~9
- [3] 水建国,柴锡周,张如良. 红壤坡地不同生态模式水土流失规律的研究. 水土保持学报,2001,15(2):33~36
- [4] 谢小立,王凯荣. 湘北红壤坡地雨水过程的水土流失及其影响. 山地学报,2003,21(4):466~472
- [5] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 雨强对三峡库区黄色石灰土养分流失的影响. 水土保持学报,2002,16(2):33~35,38
- [6] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究. 植物营养与肥料学报,2003,9(1):71~74
- [7] 阮伏水. 福建省花岗岩坡地沟谷侵蚀试验研究初报. 中国水土保持科学,2003,1(1):25~29
- [8] 张金池,庄家尧,林杰. 不同土地利用类型土壤侵蚀量的坡度效应. 中国水土保持科学,2004,2(3):6~9
- [9] 高中琪,张洪江,史玉虎. 长江三峡花岗岩区不同地类土壤流失量研究. 中国水土保持科学,2004,2(4):26~29
- [10] 吕万民,程庆杏,吴百林. 防治陡坡桑园严重水土流失的种植模式探讨. 中国水土保持科学,2004,2(3):93~95
- [11] 左长清,马良. 天然降雨对红壤坡地侵蚀的影响. 水土保持学报,2005,19(2):1~4,32
- [12] 谢庭生,何英豪. 湘中紫色土丘岗区水土流失规律及土壤允许侵蚀量的研究. 水土保持研究,2005,12(1):87~90
- [13] 卢喜平,史东梅一,吕刚,等. 紫色土坡地果草种植模式的水土流失特征研究. 水土保持学报,2005,19(2):21~25
- [14] 唐克丽,史立人,史明德,等. 中国水土保持. 北京:科学出版社,2004:202~216
- [15] Ahuja L R, Lehman O R. The extent and nature of rainfall-soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff. J. Environ. Qual, 1983,12(1):34~40
- [16] 周佩华,张学栋,唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置. 水土保持通报,2000,20(4):27~30