

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.017

南方红壤区农田道路强降雨侵蚀过程试验^{*}

郑海金^{1,2} 杨洁² 张洪江¹ 汪邦稳² 肖胜生² 段剑²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 江西省水土保持科学研究所, 南昌 330029)

【摘要】 以南方红壤区江西水土保持生态科技园为研究区,通过野外调查选择4种典型农田道路(即裸露土路、碎石道路、泥结石路和植草土路)设置12个原位试验小区,采用人工模拟降雨试验研究了3.0 mm/min强降雨条件下农田道路侵蚀过程及特征。结果表明:被高度压实的农田道路产流时间短(小于2 min),并在2~6 min内径流趋于平稳,径流系数高达65%以上;农田道路产流初期侵蚀率较大,随后下降并在一段时间内趋于稳定。降雨后期,裸露土路路面出现细沟和微型切沟导致侵蚀率有所增大;与裸露土路相比,碎石道路、泥结石路和植草土路均可以改变路面径流的水力学特征,实现土质道路防护和减少侵蚀产沙的作用,减沙效益最低也可达40%左右,并以植草土路的水土保持效果最佳。

关键词: 农田道路 南方红壤区 侵蚀过程 减沙效益

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)09-0085-06

Field Simulated Experiment on Erosion Processes of Different Farm Roads under a Heavy Rain in Red Soil Region

Zheng Haijin^{1,2} Yang Jie² Zhang Hongjiang¹ Wang Bangwen² Xiao Shengsheng² Duan Jian²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China)

Abstract

Totally 4 farm roads, *i. e.* the bare unpaved road, the stone covered road, the stone and grass covered road and the grass covered road, were selected on the representative area named Jiangxi Eco-science Park of Soil and Water Conservation. Twelve rainfall simulation experiments with an intensity of 3.0 mm/min were carried out on the selected roads. The results indicated that runoff from the farm roads was recorded less than 2 min. The runoff rate increased quickly and reached steady level in the first 2~6 min. The runoff coefficient was above 65%. The erosion rate was high at the beginning of the rainfall and then decreased due to the loss of fine soil surface particles and porosity changes. At later period, the erosion rate of the bare unpaved road increased to some extent due to the appearance of rill and micro-gully. Compared with the bare unpaved road, the stone covered road, the stone and grass covered road and the grass covered road can all change the runoff hydraulic characteristics, so to protect the farm roads and decrease sediment yield. The lowest benefit of sediment reduction was up to about 40% among them, and the grassed road had the best benefit of soil and water conservation.

Key words Farm roads, Red soil region of southern China, Erosion process, Sediment reduction rate

引言

南方红壤区是一个低山丘陵地区,坡耕地面积

较大,其中6°以上坡耕地面积为3.30万km²,占旱地面积的70%以上^[1]。南方红壤区在坡耕地开发利用过程中修建了大量农田道路,受经济条件限制,

收稿日期:2012-04-26 修回日期:2012-06-02

* 水利部公益性行业科研专项经费项目(200901049,201001055)

作者简介:郑海金,博士生,江西省水土保持科学研究所高级工程师,主要从事水土保持和生态农业研究,E-mail: haijinzheng@163.com

通讯作者:杨洁,教授级高级工程师,主要从事水土保持和森林培育研究,E-mail: zljy@126.com

大部分为裸露的土质道路。由于土质道路设计标准低,加之该地区雨水充沛,暴雨集中,极易引发严重的水土流失,造成道路损毁而影响农事生产。因此,对南方红壤区农田道路土壤侵蚀的防治显得十分重要。

农田道路土壤侵蚀及其防治在世界范围内都是一个崭新的研究课题^[2-15]。综合分析国内相关研究报告,可以发现目前对北方黄土高原区研究较多,对南方红壤区研究较少;室内人工模拟降雨试验较多,野外原位自然降雨试验较少;道路植草防护研究较多,其他防护措施研究较少。

一般情况下,对一定区域内的土壤侵蚀贡献较大的是几次强降雨。因此,分析强降雨下农田道路侵蚀过程,有助于正确评价农田道路的水土保持功效。本文以南方红壤区江西水土保持生态科技园为研究区域,选择不同防护措施的农田道路,设置原位试验小区,采用野外人工模拟降雨方法,开展强降雨条件下农田道路侵蚀过程与特征研究,以期对南方红壤区农田道路基础设施配套技术的构建和水土保持规划提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

野外试验布设在江西水土保持生态科技园内。该科技园位于东经 115°42'38" ~ 115°43'06"、北纬 29°16'37" ~ 29°17'40",属亚热带季风气候区,多年平均降雨量 1 350.9 mm,多年平均气温 16.7℃,年

日照时长 1 650 ~ 2 100 h,多年平均无霜期为 249 d;地貌为浅丘岗地,海拔高度 30 ~ 100 m,坡度 5° ~ 25°;成土母质以第四纪红色黏土为主,地带性植被为亚热带常绿阔叶林;坡耕地主要开发利用为果园和苗圃。该科技园位于我国红壤的中心区域,地形、土壤条件在江西省和南方红壤区具有代表性。

1.2 研究方法

1.2.1 径流小区设计

野外工作在 2011 年 9 ~ 10 月进行。首先,通过实地调查获取了研究区农田道路分布及其路面基本状况,发现研究区内农田道路主要有 4 种类型:裸露的土质道路;在土质道路上铺设厚度近 5 cm 的碎石,用重型车辆碾压而成的碎石道路;在土质道路上铺放卵石,然后撒播经过处理的百喜草种,称之为泥结石路;在土质道路上直接撒播经过处理的百喜草籽,形成植草农田道路。其次,在调查基础上选择 4 种代表性农田道路路段,分别为裸露土路、碎石道路、泥结石路和植草土路,依次记作 LLTL、SSDL、NJSL 和 ZCTL;在每个路段建立 3 个尺寸为 3.0 m × 1.0 m 的临时径流小区,在尽量不破坏路面的前提下,将厚度 1 cm、高度 20 cm 的钢板嵌入路面 5 cm 作为隔水墙,分隔小区内径流,小区下部设集流装置,定时采集径流。最后,详细测定这 4 种农田道路路面的物理性状。为了不破坏道路试验径流小区的完整性,测定道路物理性状采样点及试验点均选取距试验小区上坡位或者下坡位 1 m 处。采样及试验均采用 3 次平行,计算其平均值,结果如表 1 所示。

表 1 试验小区情况及其路面物理特性

Tab. 1 Characterization of the experimental plots and their soil characteristics

道路编号	坡度/(°)	植被覆盖度/%	碎石盖度/%	土壤含水率/%	土壤容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	饱和导水率/ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	土壤干密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	总空隙度/%	土壤成分质量分数/%		
									砂粒	粉粒	粘粒
LLTL	4.01	0	1.96	15.92	1.80	0.27	2.59	30.61	6.79	60.55	32.66
SSDL	3.72	0	52.39	2.21	2.06	0.56	2.72	24.37	60.14	29.88	9.98
NJSL	4.76	35	42.87	9.39	1.87	0.29	2.53	25.83	22.65	59.60	17.75
ZCTL	3.90	100	1.50	15.07	1.89	0.13	2.55	25.82	9.25	61.09	29.66

1.2.2 野外试验

人工模拟降雨设备由水土流失监测车和降雨监测系统 2 部分组成,其中降雨器型号为 QYJY-501,降雨均匀度在 0.8 以上,雨滴直径 0.5 ~ 0.58 mm,精度 7 mm/h,高度 4 m,降雨误差在 2% 以内^[16]。通过对研究区 2001—2009 年降雨资料统计,研究区共发生 0.25 mm/min 以上的强降雨 31 次,其中 0.25 ~ 0.35 mm/min 强降雨 16 次,占 0.25 mm/min 以上强降雨次数的 51.6%。因此,针对每种道路类型,设计 3.0 mm/min 降雨强度,每场降雨历时控制在

30 min。

降雨过程中,记录径流小区产流时间,每 3 min 采集 1 次径流体积,并通过干燥称重法测定径流泥沙含量(质量浓度)。产流率通过产流量、降雨时间和径流小区面积求得,径流系数通过产流率及降雨强度求得;土壤流失量通过径流量和径流泥沙含量求得,土壤侵蚀率通过土壤流失量与降雨时间求得。降雨量采用 SL3-1 型雨量计测定。

此外,测算路面径流水动力学参数,具体包括径流流速 v 、径流深度 h 、弗劳德数 Fr 、雷诺数 Re 、过水

断面单位能量 ε 、Darcy - Weisbach 阻力系数 f 、曼宁糙率系数 n 等,测算方法参照文献[17~20]。

1.2.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件对产流率、土壤侵蚀率进行拟合绘制图表。

2 结果与分析

2.1 产流过程

降雨-产流起始时间记录显示: NJSJ、LLTL、ZCTL 和 SSDL 路面产流滞后降雨时间依次为 22.7、36.0、110.0 和 52.5 s,可见 4 个试验路段的产流时间短(小于 2 min),产流前的累积降雨量小(小于 5.50 mm)。图 1 是 4 个典型路段强降雨下产流过程曲线。由图 1 可知,4 个试验路段的产流规律较为一致,产流后径流量快速增加,并在 2~6 min 内径流趋于平稳;稳定产流率较高,最小的 ZCTL 也高达 2.31 mm/min,而 NJSJ、LLTL 和 SSDL 的产流率稳定在 2.47~2.98 mm/min;径流系数高达 65% 以上。

表 2 是各试验点强降雨下径流特征主要参数,不同类型道路产流特征存在差异。SSDL 较其他 3 条农田道路而言,由于路面严重压实,土壤容重高达 2.06 g/cm³、土壤干密度高达 2.72 g/cm³,而总空隙

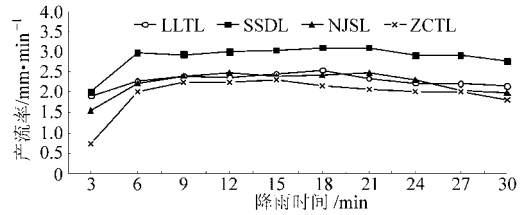


图 1 不同试验点的产流过程曲线

Fig.1 Runoff rates curves of different experimental sites under simulated rainfall

度低至 24.37% (表 1),易形成超渗产流,所以径流强度较其他农田道路都要高,其平均产流率、峰值产流率、平均径流系数和累积产流量等径流特征参数均最大,依次为 2.74 mm/min、2.98 mm/min、88.5% 和 253.4 L。此外,SSDL 较高的碎石盖度(52.39%)可能也会导致径流系数升高^[20]。ZCTL 因路面有茂密的百喜草覆盖,土壤以粉粒、粘粒为主(表 1),产流时间明显滞后于杂草覆盖较少的其他 3 条道路,长达 110 s;径流强度也最低,其平均产流率、峰值产流率、径流系数和累积产流量等径流特征参数均最小,分别为 1.96 mm/min、2.31 mm/min、65.2% 和 176.1 L。这说明百喜草对降雨有截留作用,对路面径流有阻挡作用。NJSJ、LLTL 道路由于路面特征较为一致,产流过程差异较小。总体上产流强度从大到小依次为 SSDL、LLTL、NJSJ、ZCTL。

表 2 试验小区径流特征参数

Tab.2 Runoff amount of simulated rainfall experiment under different farm roads

道路编号	产流滞后降雨时间/s	产流前累积降雨量/mm	平均产流率 /mm·min ⁻¹	峰值产流率 /mm·min ⁻¹	平均径流系数 /%	累积产流量 /L
LLTL	36.0	1.98	2.28	2.53	69.0	205.0
SSDL	52.5	2.71	2.74	2.98	88.5	253.4
NJSJ	22.7	1.17	2.22	2.47	71.7	200.1
ZCTL	110.0	5.50	1.96	2.31	65.2	176.1

2.2 产沙过程

降雨径流过程中,侵蚀产沙可集中地通过泥沙质量浓度、土壤流失率等的变化来反映^[21]。表 3 是 4 个试验路段在相同的强降雨条件下的侵蚀产沙特征。从表 3 中看出,LLTL 路段的平均泥沙质量浓度、最大泥沙质量浓度、平均土壤流失率、最大土壤流失率和泥沙流失量分别为 8.93 g/L、26.49 g/L、

18.23 g/(m²·min)、49.71 g/(m²·min) 和 1 640.46 g,显著高于其他 3 条路段。ZCTL 产沙特征参数最小,其产沙特征参数(平均泥沙质量浓度、最大泥沙质量浓度、平均土壤流失率、最大土壤流失率和泥沙流失量,下同)比 LLTL 减小 90% 以上,NJSJ 产沙特征参数比 LLTL 减小 81%~94%,而 SSDL 产沙特征参数比 LLTL 减小 25%~60%。

表 3 试验小区产沙特征参数对比

Tab.3 Sediment yield of simulated rainfall experiment under different farm roads

道路编号	平均泥沙质量浓度 /g·L ⁻¹	最大泥沙质量浓度 /g·L ⁻¹	平均土壤流失率 /g·m ⁻² ·min ⁻¹	最大土壤流失率 /g·m ⁻² ·min ⁻¹	泥沙流失量 /g
LLTL	8.93	26.49	18.23	49.71	1 640.46
SSDL	3.75	19.81	8.31	29.86	747.56
NJSJ	1.48	1.77	3.29	4.44	296.54
ZCTL	0.29	1.49	0.61	3.92	54.73

图2为4种农田道路典型路段强降雨下产沙变化曲线。由图2可以看出:对于LLTL和SSDL,因路面裸露无植被覆盖,产流初期路面浮土是主要的泥沙源,即使在径流量较小情况下,也能被径流侵蚀搬运,所以降雨初期土壤侵蚀率较大;随着降雨累积,径流增大,携沙能力增强,但由于路面压实严重,径流冲刷力不足以完全破坏路面结构,所以土壤侵蚀率反而变小并在一段时间内趋于稳定;在降雨后期,随着径流侵蚀下切,LLTL路面出现细沟和微型切沟,产生新的泥沙源,所以土壤侵蚀率又有所增加。对于NJSL和ZCTL,因有一定的植物覆盖,路面开始由雨滴击溅产生大量分散土粒,被刚刚形成的薄层水流搬运,从而形成了产沙的一个高峰,随后由于薄层水流的存在,致使雨滴击溅产生的土粒减少,输沙率下降并趋于稳定。比较4种农田道路,可以发现:裸露路(LLTL和SSDL)输沙率峰值较植物路(NJSL和ZCTL)高6.7~12.7倍,从产沙机理分析,这主要是由于植物路路面草皮被雨滴击打匍匐于地表减弱了雨滴的进一步击溅作用,同时由于草皮的存在降低了径流流速,从而削弱了径流冲刷能力。

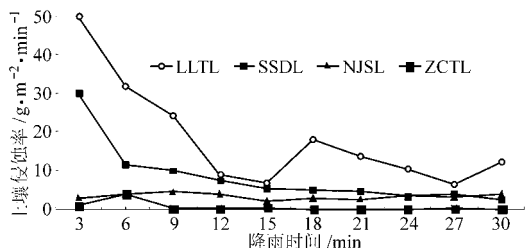


图2 不同试验点的侵蚀率过程曲线

Fig.2 Sediment rates curves of different experimental sites under simulated rainfall

道路路面特征差异对土壤侵蚀率有显著影响,LLTL饱和导水率低(0.27 mm/min),且浮土含量高,这一结构特征一方面导致了更大的路面径流量,另一方面为径流提供了更多的泥沙源,所以土壤侵蚀率明显高于其余农田道路。同时,由于LLTL路面车辙、切沟等增强了径流的汇流作用,对土壤侵蚀率也有部分增强作用。SSDL、NJSL和ZCTL之间也存在一定差异,这可能是由于地表杂草覆盖度、土壤

容重、饱和导水率等差异造成的。总体上产沙强度从大到小依次为LLTL、SSDL、NJSL、ZCTL。

2.3 路面径流水动力学特征

在本试验强降雨条件下,4种农田道路径流平均流速在3.45~12.54 cm/s之间,而裸露土路径流流速明显较其余3种农田道路路面流速大。这是由于裸露土路缺少植被、碎石的覆盖,未能加大路面粗糙度,从而减缓路面汇流流速。植草土路的水流流速最低,比裸露土路降低了72.5%。流速决定水流对泥沙的搬运强度^[17-18]。因此,植草土路能够降低水流对路面的侵蚀力,起到保持水土的作用。与流速类似,径流深度也是坡面流的基本水动力学参数之一。试验中不同农田道路的平均径流深度在0.84~3.04 mm之间,这与张光辉^[22]、潘成忠^[23]、吴希媛^[24]等的数量级类似。对比不同农田道路发现,平均径流深度随流速的增大而减小。植草土路路面径流深度最大,是其余农田道路的1.26~3.62倍。

雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 是表征水流流态的重要参数。本试验范围内的路面径流, Re 均小于500,因此4种路面上的径流均属于层流。除裸露土路路面径流 Fr 大于1,为急流外,其余3条农田道路路面径流 Fr 均小于1,为缓流。可见,植草土路、泥结石路和碎石道路的径流比裸露土路更缓慢,降低了路面径流的动能,减轻了径流冲刷路面的潜在威胁,起到了保护路面的作用。 Fr 越小表明水流越缓, Re 越小表明水流的紊动性越低。在相同降雨条件下,植草土路的 Fr 、 Re 均最小,表明植草土路路面径流夹沙能力最差,直接导致植草土路产沙量最小。可见,植草土路对保护路面的作用最强。

侵蚀是水流能量做功的结果,过水断面单位能量 ε 是从能量角度来描述水流特性的水动力学指标。一般认为随着含沙量增加,用于搬运泥沙的水流能量增加,用于转化为径流动能的能量减少^[13,25]。LLTL含沙量最高,大大消耗了路面流能量,故其 ε 最小;ZCTL的 ε 最大,比LLTL的 ε 增大了82.4%;NJSL和SSDL介于LLTL和ZCTL二者之间(表4)。

表4 不同农田道路路面径流流态

Tab.4 Hydrodynamic characteristics of runoff on the farm roads

道路编号	平均径流深度/mm	水流表面流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	平均流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	Re	Fr	ε/cm	n	f
LLTL	0.84	18.71	12.54	1.11	1.42	0.17	0.004 2	0.34
SSDL	2.42	8.75	5.86	1.53	0.38	0.26	0.017 8	4.04
NJSL	1.80	8.99	6.02	1.22	0.46	0.20	0.016 6	3.90
ZCTL	3.04	5.15	3.45	0.95	0.21	0.31	0.043 5	26.55

阻力系数 f 和曼宁糙率系数 n 反映了坡面流在流动过程中所受阻力的的大小, f 和 n 值越大, 说明水流克服坡面阻力所消耗的能量就越大, 则用于坡面侵蚀和泥沙输移的能量就越小, 坡面侵蚀产沙就越少。由表 4 可以看出, 研究区植草土路的 f 和 n 最大, 分别为 26.55 和 0.043 5; 裸露土路的 f 和 n 最小, 依次为 0.34 和 0.004 2; 碎石道路和泥结石路的 f 和 n 介于裸露土路和植草土路之间, 且二者之间相差不大。在同一雨强条件下, 植草土路的 f 值是裸露土路的 78.1 倍, 其 n 值是裸露土路的 10.4 倍。植草土路通过增大阻力降低了径流用于路面侵蚀和泥沙输移的能量, 起到了防蚀作用, 说明植被对路面径流具有明显的拦截作用。

2.4 减水减沙效益

根据表 5, 从径流量来看, 在强降雨试验条件下, 与裸露土质路面相比, 植草土路减少径流量的效益最大, 为 14.1%; 泥结石路次之, 为 2.4%; 而碎石道路径流量明显大于裸露土路。从径流系数来看, 与径流量相似, 虽然植物路 (NJSL 和 ZCTL) 具有一定的减水效果, 但并不理想, 植被覆盖度 100% 的植草土路的减水效益也仅为 5.5%。35% 植被覆盖度的泥结石路对径流量影响甚微, 而植被覆盖度 100% 的植草土路其减水效益也仅为 14.1%。可见, 强降雨条件下植物路 (NJSL 和 ZCTL) 的减水效果不理想, 这与田风霞的研究结论^[26]一致。

表 5 不同农田道路减水效益

Tab. 5 Benefits of water reduction by different farm roads

道路类型	道路编号	平均径流量/L	平均径流系数/%	减水效益/%	
				径流量	径流系数
泥结石路	NJSL	20.01 ^b	71.7 ^b	2.4	-3.9
裸露土路	LLTL	20.50 ^b	69.0 ^b	—	—
植草土路	ZCTL	17.61 ^b	65.2 ^b	14.1	5.5
碎石道路	SSDL	25.34 ^a	90.8 ^a	-23.6	-31.6

注: 同列不同字母表示显著差异, $\alpha = 0.05$, 下同。

根据表 6, 从输沙率来看, 与裸露土路相比, 植草土路减沙效益最大, 为 96.7%; 泥结石路次之, 为 82.0%; 碎石道路最小, 也达 54.4%。从泥沙质量浓度来看, 与裸露土路相比, 植草土路减沙效益最大, 为 98.8%; 泥结石路次之, 为 87.7%; 碎石道路最小, 也达 40.6%。分析中还可以发现, 植物路

(NJSL 和 ZCTL) 具有明显的减沙效益, 最低也可达 40% 左右, 这一结果与 Grace 研究结果^[27] 非常相似; 并且随着植被覆盖度的增加植物路输沙率及泥沙质量浓度均逐渐减小。碎石道路产流量虽然明显大于裸露土路, 但因其浮土含量较低, 故流失泥沙量显著低于裸露土路。

表 6 不同农田道路减沙效益

Tab. 6 Benefits of soil reduction by different farm roads

道路类型	道路编号	平均输沙率/ g·m ⁻² ·min ⁻¹	平均泥沙质量 浓度/g·L ⁻¹	减沙效益/%	
				输沙率	泥沙质量浓度
泥结石路	NJSL	3.29 ^c	0.90 ^c	82.0	87.7
裸露土路	LLTL	18.23 ^a	7.31 ^a	—	—
植草土路	ZCTL	0.61 ^d	0.09 ^d	96.7	98.8
碎石道路	SSDL	8.31 ^b	4.34 ^b	54.4	40.6

3 结论

(1) 被高度压实的农田道路产流时间短 (小于 2 min), 产流前的累积降雨量小 (小于 5.5 mm); 产流后径流量快速增加, 并在 2~6 min 内径流趋于平稳; 稳定产流率较高, 最小的植草土路也高达 2.31 mm/min; 径流系数达 65% 以上。

(2) 农田道路产流初期路面浮土是主要的泥沙源, 所以降雨初期土壤侵蚀率较大; 随着浮土层被径流冲刷殆尽和面状水流抵消了雨滴溅蚀力的冲击破坏作用, 土壤侵蚀率急剧下降并在一段时间内趋于稳定。降雨后期, 裸露土路因路面出现细沟和微型切沟, 土壤侵蚀率有所增大。

(3) 与裸露土路相比, 碎石道路、泥结石路和植草土路均可以改变路面径流的水力学特征, 使路面糙度和路面阻力增加、径流冲刷能力降低, 从而实现土质道路防护和减少流域产沙量的作用。其中: 植草土路的径流流速最小, 比裸露土路降低了 72.5%; 径流深度最大, 是裸露土路的 3.62 倍; ε 最大, 比裸露土路 ε 增大了 82.4%; f 值是裸露土路的 78.1 倍, n 值是裸露土路的 10.4 倍; Fr 、 Re 均最小, 表明土质路面种植草本植物可以有效地拦截路面径流。

(4) 在强降雨试验条件下泥结石路、碎石道路和植草土路的减水效果并不明显, 最大只有 14.1%; 但减沙效益明显, 最低也可达 40% 左右。

参 考 文 献

- 1 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全: 南方红壤区卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 128~131.

- 2 曹世雄,陈莉,高旺盛. 在黄土丘陵区土质路面种草[J]. 生态学报,2005,25(7):1754~1763.
Cao Shixiong, Chen Li, Gao Wangsheng. Planting grass on rural roads in loess hilly-gully[J]. Acta Ecologica Sinica,2005, 25(7):1754~1763. (in Chinese)
- 3 Batra P C. Comparison of ipomoea and grass for checking erosion on road embankments[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1968,16(3):152~155.
- 4 Carr W W, Ballard T M. Hydroseeding forest roadsides in British Columbia for erosion control[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1980, 35(1): 33~35.
- 5 Ziegler A D, Giambelluca T W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand [J]. Journal of Hydrology, 1997, 196(1~4): 204~229.
- 6 Ama'eza J, Larrea V, Ortigosa L. Surface runoff and soil erosion on unpaved forest roads from rainfall simulation tests in northeastern Spain[J]. Catena, 2004, 57(1): 1~14.
- 7 MacDonald L H, Sampson R W, Anderson D M. Runoff and road erosion at the plot and road segment scales, US Virgin Islands[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(3): 251~272.
- 8 Ziegler A D, Sutherland R A, Giambelluca T W. Runoff generation and sediment production on unpaved roads, footpaths and agricultural land surfaces in Northern Thailand[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(5): 519~534.
- 9 Jordan A, Martinez-Zavala L. Soil loss and runoff rates on unpaved forest roads in southern Spain after simulated rainfall[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(3~4): 913~919.
- 10 Kolka R K, Smidt M F. Effects of forest road amelioration techniques on soil bulk density, surface runoff, sediment transport, soil moisture and seedling growth[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 202(1~3): 313~323.
- 11 郑世清,周保林,赵克信. 长武王东沟试验区沟坡道路侵蚀及其防蚀措施[J]. 水土保持学报,1994,8(3): 29~35.
Zheng Shiqing, Zhou Baolin, Zhao Kexin. Valley-slope road erosion and its control measures in wangdong gully experimental area located in Changwu county[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994,8(3): 29~35. (in Chinese)
- 12 姚文波. 硬化地面与黄土高原水土流失[J]. 地理研究, 2007, 26(6): 1097~1108.
Yao Wenbo. The harden ground and soil and water loss on the loess plateau[J]. Geographical Research, 2007, 26(6): 1097~1108. (in Chinese)
- 13 李占斌,鲁克新,丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. 水土保持学报,2002,16(2):5~7,49.
Li Zhanbin, Lu Kexin, Ding Wenfeng. Experimentalstudy on dynamic processes of soil erosion on loess slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2002,16(2):5~7,49. (in Chinese)
- 14 李毅,邵明安. 草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验[J]. 农业工程学报,2008,24(10):1~5.
Li Yi, Shao Ming'an. Hydro-dynamic parameters of overland flow during laboratory rainfall experiments under grass coverage [J]. Transactions of the CSAE,2008,24(10):1~5. (in Chinese)
- 15 史志华,陈利顶,杨长春,等. 三峡库区土质道路侵蚀产沙过程的模拟降雨试验[J]. 生态学报,2009,29(12):6785~6792.
Shi Zhihua, Chen Liding, Yang Changchun, et al. Soil loss and runoff processes on unpaved road from rainfall simulation tests in the Three Gorges Area, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009,29(12):6785~6792. (in Chinese)
- 16 汪邦稳,肖胜生,张光辉,等. 南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究[J]. 农业工程学报,2012,28(2): 239~242.
Wang Bangwen, Xiao Shengsheng, Zhang Guanghui, et al. Study on runoff and sediment yield characteristics under different land uses in red soil area of Southern China[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(2):239~242. (in Chinese)
- 17 田风霞,刘刚,郑世清,等. 草本植物对土质路面径流水动力学特征及水沙过程的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(10):25~29.
Tian Fengxia, Liu Gang, Zheng Shiqing, et al. Influence of herbaceous plants on runoff hydraulic characteristics and sediment generation on terrene roads[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(10):25~29. (in Chinese)
- 18 张强,郑世清,田风霞,等. 黄土区被草土质路面产流产沙过程及防蚀效果[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1785~1791.
Zhang Qiang, Zheng Shiqing, Tian Fengxia, et al. Runoff and sediment processes and anti-erosion effects of grass-covered earth road in loess hilly region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010,21(7): 1785~1791. (in Chinese)
- 19 苏涛,张兴昌. EN-1 对砷砂岩固化土坡面径流水动力学特征的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(11):68~75.
Su Tao, Zhang Xingchang. Effects of EN-1 soil stabilizer on slope runoff hydraulic characteristics of pisha sandstone stabilized soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(11):68~75. (in Chinese)

- 15 孙传范,戴廷波,荆奇,等. 小麦品种氮利用效率的评价指标及其氮营养特性研究[J]. 应用生态学报,2004,15(6): 983~987.
Sun Chuanfan, Dai Tingbo, Jing Qi, et al. Nitrogen use efficiency and its relationship with nitrogen nutrition characteristic of wheat varieties [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6): 983~987. (in Chinese)
- 16 童依平,李继云,李振声. 不同小麦品种吸收利用氮素效率的差异及有关机理研究. I. 吸收和利用效率对产量的影响[J]. 西北植物学报,1999,19(2):270~277.
Tong Yiping, Li Jiyun, Li Zhensheng. Genotypic variations for nitrogen use efficiency in winter wheat I. Effects of N uptake and utilization efficiency on grain yields[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1999,19(2): 270~277. (in Chinese)
- 17 May L, Van Sanford D A, Mackown C T, et al. Genetic variation for nitrogen use in soft red-hard red winter wheat populations [J]. Crop Sci.,1991,31(3):626~630.
- 18 张定一,张永清,杨武德,等. 不同基因型小麦对低氮胁迫的生物学响应[J]. 作物学报,2006,27(1):1~9.
Zhang Dingyi, Zhang Yongqing, Yang Wude, et al. Biological response of roots in different spring wheat genotypes to low nitrogen stress[J]. Acta Agronomica Sinica,2006,27(1):1~9. (in Chinese)
- 19 刘芳,于振文,亓新华. 应用¹⁵N示踪法对旱地冬小麦施肥与氮素吸收利用的研究[J]. 土壤肥料,1997(2):30~32.
- 20 刘立军,桑大志,刘翠莲,等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学,2003,36(12): 1456~1461.
Liu Lijun, Sang Dazhi, Liu Cuilian, et al. Effects of realtime and site specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(12):1456~1461. (in Chinese)
- 21 江立庚,曹卫星,甘秀琴,等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004,37(4):490~496.
Jiang Ligeng, Cao Weixing, Gan Xiuqin, et al. Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(4):490~496. (in Chinese)

~~~~~

(上接第90页)

- 20 Poesen J, Ingelmo S F, Mucher H. The hydrological response of soil surface to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(7): 653~671.
- 21 原翠萍,雷廷武,张满良,等. 黄土丘陵沟壑区小流域治理对侵蚀产沙特征的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(3): 36~43.  
Yuan Cuiping, Lei Tingwu, Zhang Manliang, et al. Sediment yields from the parallel watersheds in the hilly-gully regions of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(3):36~43. (in Chinese)
- 22 张光辉. 坡面薄层流动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展,2002,13(2):159~165.  
Zhang Guanghui. Study on hydraulic properties of shallow flow[J]. Advances in Water Science,2002,13(2):159~165. (in Chinese)
- 23 潘成忠,上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水利学报,2005,36(3):371~377.  
Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. Influence of forage grass on hydrodynamic characteristics of slope erosion [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2005,36(3):1~8. (in Chinese)
- 24 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.  
Wu Xiyuan, Zhang Liping. Research on effecting factors of precipitation s redistribution of rainfall intensity, gradient and cover ratio[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2006,20(4):28~30. (in Chinese)
- 25 李勉,姚文艺,陈江南,等. 草被覆盖下坡沟系统坡面流能量变化特征试验研究[J]. 水土保持学报,2005,19(5):13~17.  
Li Mian, Yao Wenyi, Chen Jiangnan, et al. Experimental study on changeable characteristics of runoff energy in hillslope-gully slope erosion system with different grass coverage[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2005,19(5):13~17. (in Chinese)
- 26 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.  
Tian Fengxia, Wang Zhanli, Zheng Shiqing, et al. Experiment modeling of soil erosion processes on loess roads based on simulated experiment[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2007,27(2):1~4. (in Chinese)
- 27 Grace J M. Forest road side slopes and soil conservation techniques [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2000, 55(1):96~101.