

# 黄土高原不同道路的水沙响应模拟试验研究

王伯勤<sup>1,2</sup> 高建恩<sup>2</sup> 李书钦<sup>2,3</sup> 韩信来<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 中科院 教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 3. 中科院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 基于降雨径流侵蚀产沙的水动力学原理和相似论所建立的比尺模型理论和技术, 以黄土高原延安燕沟康家圪崂小流域为原型建立模型, 在验证试验的基础上, 针对不同类型道路对小流域的产流产沙影响进行模拟试验。通过分析, 得出如下主要结论: 水泥路、土路和浮尘土路对流域径流有一定的调控作用, 水泥道路产流量较大, 因此小流域修建水泥道路必须考虑道路径流收集, 否则将会产生比土路更大的侵蚀量; 调控工程对修建道路的小流域径流侵蚀产沙影响较大, 同一种道路, 治理前后的水沙效应具有明显差异。结果表明, 小流域在进行治理时, 需要加强规划, 优化不同治理措施, 进行山水园林路优化配置。

**关键词:** 比尺模型; 道路侵蚀; 模拟试验; 水沙响应

**中图分类号:** S157 **文献标识码:** A

道路侵蚀是流域侵蚀的一个重要方面。随着黄土高原新农村建设的逐步推进, 在黄土高原小流域修建了大量不同类型的道路, 其产沙对小流域产流产沙的影响是一个需要研究的重要问题。

国内外学者对不同类型道路路面侵蚀进行了大量研究。Ziegler<sup>[1,2]</sup>在泰国山区流域对不同的土地利用方式进行了测定, 结果表明, 道路易于产生坡面漫流, 极易引发水力侵蚀, 并且在面积为 3.75 m × 0.85 m 小区上的人工降雨试验表明, 路面侵蚀强度是农地的 8 倍左右。Sidle 等<sup>[3]</sup>对林区小流域的调查表明, 伐木道路土壤侵蚀强度大约为 272 t/(km<sup>2</sup> · a), 道路土壤侵蚀 60% 来自路面。郑世清<sup>[4,5]</sup>对黄土高原的沟壑道路侵蚀进行了观测, 同时给出了侵蚀强度随降雨侵蚀力变化的模拟模型。随着道路侵蚀日益严重及研究的深入, 出现了一些坡面道路侵蚀预报模型, 如 Patrick 等<sup>[6]</sup>用人工降雨试验, 对 WEPP 模型中有关道路侵蚀的参数进行了量化, 但没有对模型的有效性进行验证。总体而言, 道路坡面侵蚀模型多为经验统计模型, 机理模型研究尚待深入。

对一个流域而言, 道路的线性特征使其成为汇流的重要途径, 道路本身的侵蚀产沙直接影响着流域的产流产沙, 而不同类型道路产流产沙特性不同, 对流域侵蚀产沙有不同的影响。在这方面的研究较少。其主要原因是缺乏对目前道路侵蚀产沙模型经验统计特征及侵蚀机理的研究, 特别是缺乏对流域侵蚀数学模型的研究, 而且很难利用现有数学模型来反映流域甚至是小流域某一工程措施对侵蚀产沙的影响。而与数学模型相比,

实体模型由于三维特征突出, 便于对流域不同工程措施进行模拟, 是研究不同措施对流域侵蚀产沙影响的有效手段。本文利用基于黄土高原小流域水力侵蚀产沙实体模型, 以黄土高原延安燕沟康家圪崂小流域为原型建立的模型为基础, 在验证试验的基础上, 对不同类型道路对小流域的产流产沙影响进行探讨。

## 1 试验依据的比尺关系及验证试验

### 1.1 试验小流域概况

试验原型小流域位于延安市以南 3 km, 东经 109°20' ~ 109°35', 北纬 36°21' ~ 36°32', 属于黄土高原丘陵沟壑区第 2 副区。流域面积 47 km<sup>2</sup>, 主沟长 8.6 km, 流域内梁峁起伏, 沟壑纵横, 地形复杂, 土地类型多样。流域水土流失面积 35.7 km<sup>2</sup>, 占总面积的 76.2%, 土壤侵蚀模数为 9 000 t/(km<sup>2</sup> · a), 属于强度水土流失类型区。模拟的康家圪崂沟头小流域面积为 0.341 7 km<sup>2</sup>, 沟壑密度 3 ~ 4 km/km<sup>2</sup>, 流域长度 0.903 km, 流域最大宽度 0.723 km, 平均宽度 0.52 km, 流域形状系数 0.52, 高差 189.7 m。

该小流域土壤侵蚀自成系统, 主要由暴雨产生, 降雨发生雨滴击溅侵蚀, 产流以后在分水岭地区形成片流, 发生片蚀, 分水岭以下坡面片流汇集成散流, 出现细沟和浅沟侵蚀, 继而出现重力侵蚀和潜蚀 (或者称为洞穴侵蚀), 至谷底散流转变成紊流, 发生沟道侵蚀, 形成完整的水土流失过程, 从而在流域内形成完整的水土流失体系<sup>[7]</sup>。因此, 将该小流域作为模拟流域, 并于 2003 年 7 月对该流域进行了测量, 绘制了 1:1 000 地形图供模

收稿日期: 2009 - 04 - 20

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目 (2006BAD09B01, 2006BAD01B04); 国家自然科学基金项目 (50809056, 40701092)

作者简介: 王伯勤, 男, 西北农林科技大学, 硕士研究生。

型试验(图 1)。

## 1.2 当量降雨过程和雨强的选取

据研究,黄土高原中北部地区年平均可蚀性降雨为 140~150 mm,平均侵蚀次数为 5~7 次。根据燕沟近几年的观测资料,该结论符合实际情况。因此,通过综合分析,对原型年侵蚀量取 8 000~9 000 t/(km<sup>2</sup>·a),按 70% 保证率,原型 30 min 侵蚀平均雨强为 1.14 mm/min,平均侵蚀降雨时间 131.6 min,转换为模型雨强即为 0.114 mm/min,平均侵蚀时间取 40 min。

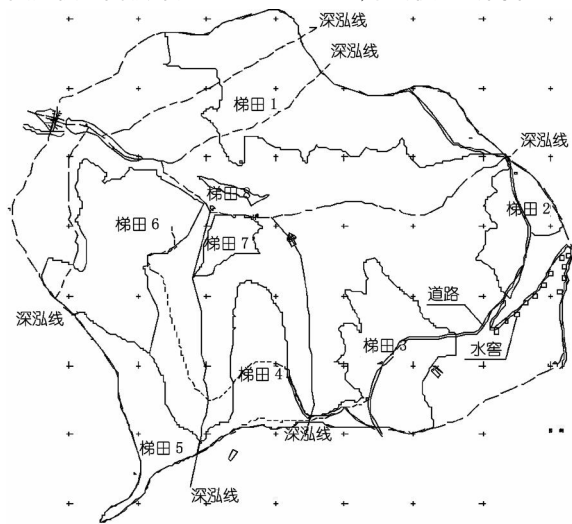


图 1 燕沟康家圪崂沟小流域地形

## 1.3 试验依据的比尺

高建恩在综合分析坡面降雨水流、侵蚀泥沙运动、入渗等水流侵蚀产沙运动规律的基础上,依据水力模型试验的相似三定律,推导了黄土高原小流域水力侵蚀模型设计的比尺关系。

## 1.4 小流域模型验证试验

在建立模型后,高建恩对模型相似性进行了验证<sup>[8]</sup>。即在正态条件下满足上述比尺关系,并在保证下垫面土壤机械组成相似的条件,采用原型 30 min 雨强 1.14 mm/min,平均侵蚀降雨时间 132 min,对应的模型雨强为 0.114 mm/min,平均试验时间约为 40 min 的当量降雨过程进行验证实验。按上述比尺进行试验,其汇流时间、平均汇流速度、最大汇流量及平均年侵蚀量与原型是接近的,模型能够反应原型的水力侵蚀情况。通过对 2003 年 7 月 13 日暴雨后康家圪崂小流域所取的不同部位淤沙级配与同降雨强度下模型侵蚀泥沙对比发现,原型暴雨最大 10 min 强度降雨 1.1 mm/min,与模型当量雨强相当,且原型产流产沙与模型产沙级配差别不大,无论在定性定量上都令人满意,可以作为对各种土地利用形式进行优化的工具。

## 2 试验设计

### 2.1 试验设备

本实验所采用的降雨设备是便携式降雨器,喷头个数为 5 个,降雨喷头距地面 8 m,45 仰角喷散,由于水流经喷头喷散后还要上升 1.5 m,喷头的高度满足人工模拟降雨雨滴终速的要求。经多次率定和调整降雨架,使得各个雨强下的均匀度均能够达到 70% 以上。为了保证降雨过程的稳定和降雨的均匀度,由变频器控制压力。

## 2.2 试验方案

试验小流域模型的原型流域为黄土高原延安燕沟康家圪崂沟小流域,模型面积为 34 m<sup>2</sup>。供试土壤依据起动相似选取模型下垫面土壤<sup>[7]</sup>。将供试土壤除去杂草及较大的石块后,风干过 5 mm 的筛,将土壤含水量基本控制在 18% 左右,环刀法测定土壤的容重,使其控制在 1.05~1.3 g/cm<sup>3</sup>。

### 2.2.1 不同土地利用方式的布设

(1) 不同形式道路的布设。在小流域未经治理前,道路分别按水泥路、土路和浮尘土路布设。根据 CAD 地形图测定,该流域模型道路宽 3 m,长 13.6 m,并按已有路线,将土壤夯实,道路容重基本控制在 1.8 g/cm<sup>3</sup> 左右。水泥道路则是在此路基的表面铺一层塑料硬片,以模拟其在暴雨侵蚀下无入渗情况;土路即原有路基,将路面浮土清除干净,保持无浮土,因而其容重仍应为 1.8 g/cm<sup>3</sup> 左右;浮尘土路,在已有路基的基础上铺浮土,模型上道路的浮土厚度控制在 0.5 mm 左右(相当于实际道路浮土 5 cm 厚),表层浮土的土壤含水率约为 5%,因此,该道路的容重较小,控制在 1.2~1.6 g/cm<sup>3</sup>。

(2) 梯田的布设。根据 2003 年实测地形图布设梯田在模型上的位置,并假设在与原型相应位置处径流全部收集的前提下进行试验。用塑料布收集梯田内全部雨水作为梯田拦蓄雨水量。原型梯田总面积 0.162 6 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 47.8%。

(3) 雨水集流工程的布设。在模型上采用沿路以上径流全部收集的方式进行实验,用雨量筒(直径 8.5 cm,面积 56.716 cm<sup>2</sup>)将沿路雨水收集,模型降雨径流集流路面总长 2.57 m,路面宽 3 cm,道路集流场总面积 0.077 1 m<sup>2</sup>,道路一侧共分布有 12 眼水窖,平均间距 20 cm 左右。由于原型道路按比尺转换后在模型上的宽度过窄,仅为 3 cm,实现起来有一定的难度,而作为雨水利用工程的集流面,其主要作用就在于将路面上的雨水收集起来,并蓄于水窖内,因此,只要能够采取一定的措施将沿程雨水收集起来,便可认为是道路集流的结果。

### 2.2.2 试验方法

基于上述小流域治理前试验验证,采用上述验证试验相同雨强,分别对小流域治理前水泥道路、土路、浮尘土路的产流产沙进行模拟试验;按上述土地利用方式的布设方法对小流域进行治理,在小流域治理度达到 49% 的条件下,分别布设 3 种道路进行试验。

本试验过程中,用秒表测定产流、径流停止时间;用采样法测定径流量及含沙量,即用 1 000 mL 量筒在出口处取样,前 5~6 个样,每分钟取 1 个,后面则每隔 2~3 min 取样,每个样持续时间 10 s,读出浑水体积后倒入小桶,待泥沙沉淀后倒去上层清水,移入饭盒烘干,用干土重除以浑水体积即得某时刻含沙率。

## 3 小流域不同类型道路的水沙响应

黄土高原生态脆弱,水土流失严重,不同土地开发治理必然对侵蚀产生影响。其中道路开发是最直接最现实的一种开发方式,而道路开发使地面产生了不同程度的硬化,改变了天然坡面降雨径流入渗汇流过程。目前不同道路类型侵蚀研究较多,但对流域侵蚀影响却研究很少。

### 3.1 3 种道路产流产沙情况与小流域治理前对比

基于上述小流域治理前试验验证,为了研究不同土地利用方式特别是不同类型道路对小流域侵蚀输沙影响,对不同类型

道路产流产沙情况与小流域治理前进行了对比。表 1 为小流域治理前修建 3 种不同道路的相关参数对比。与对照试验相比,表 1 中参数表明,在原型小流域条件下布设道路长 1.36 km,路面面积为 0.004 1 km<sup>2</sup>,占流域面积为 1.2% 的 3 种不同道路径流侵蚀产沙对没有治理的小流域产流产沙产生较大影响:3 种道路的汇流时间略有增加,水泥路、土路及浮尘土路汇流时间分别延长 17%,40%及 73%,与之相对应的水泥道路最大汇流量、平均流量、平均含沙量以及总侵蚀量都比对照试验大,其它两种道路除了浮尘土路总侵蚀量和土路的平均流量与对照试验持平以外,土路和浮尘土路的最大汇流量、平均含沙量、总径流量均有不同程度减少。这也说明,不经治理的黄土高原小流域,由于坡陡坑深,侵蚀量很大,修建的 3 种不同道路,在一定程度上都削平了坡度,延缓了汇流时间,提高了流域入渗能力。随着 3 种道路入渗强度增加,径流量减小,对流域径流会产生一定的调控作用。

表 1 小流域治理前 3 种原型道路径流调控实验结果比较

道路类型	汇流时间/h	最大汇流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	平均流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	平均含沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )	最大含沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )	总侵蚀量/(t·a <sup>-1</sup> )
对照	0.30	6.4	4.64	105	115	2900
水泥路	0.35	6.7	5.60	115	138	4929
土路	0.42	5.6	4.60	80	173	2488
浮尘土路	0.52	5.3	4.30	100	146	2980

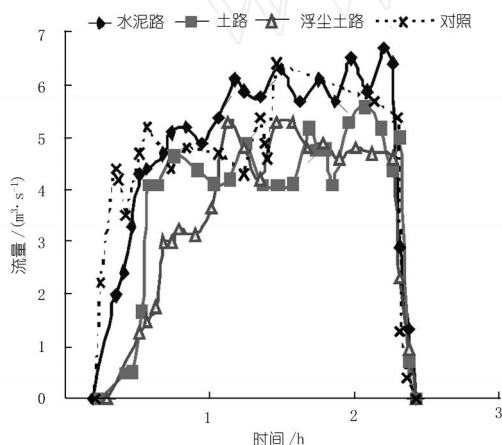


图 2 治理前流域不同道路产流对比

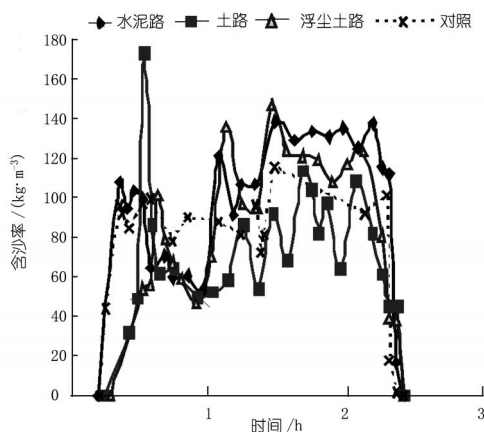


图 3 治理前流域不同道路产沙对比

试验表明,不同类型道路的产流量不同,对小流域的产沙响

应过程也不同。图 2、3 分别是布设 3 种道路时流域的产流产沙与没采取任何治理工程措施的流域原型流量、含沙率对比图。从图 2、3 和表 1 的对比数据可以看出:

(1) 水泥路的径流量和含沙量最大。与治理前无道路时对照试验相比,其最大汇流量、平均径流量、最大侵蚀含沙量以及总侵蚀量都明显增大。通过比尺换算到原型,出口与收集水量总和为 42 862 m<sup>3</sup>,即增加了 3 525 m<sup>3</sup> 水量,这是由于水泥道路入渗小,必然导致产流增大,因此,对流域的冲刷侵蚀更加强烈,也是侵蚀量增加的重要原因,其总侵蚀量达到 4 929 t/a,约为对照试验侵蚀量的 1.7 倍。说明在小流域修建水泥道路时,必须考虑径流收集,否则,将增加小流域的产流产沙。

(2) 土路的流域汇流时间增大,平均流量、最大汇流量、平均含沙量、总侵蚀量以及径流总量都明显降低。产生这一现象的可能原因是土路路面在降雨初期有较强入渗,减少了径流,降低了流速,导致径流量减小。径流总量比裸地减少了 8 232 m<sup>3</sup>,侵蚀量约为流域治理前的 86%。

(3) 浮尘土路的汇流时间比对照延长了 0.22 h,除了汇流时间增大以外,总侵蚀量略有增加,为 2 980 t/a。平均流量、最大汇流量、平均含沙量以及径流总量都明显降低,径流总量比对照试验减少了 9 534 m<sup>3</sup>。

### 3.2 不同道路对治理后小流域水沙响应关系

小流域 20 世纪 70 年特别是 90 年代后相继修建了各种径流调控工程,梯田、雨水集流工程和道路等工程措施。其中梯田占流域面积 47.8%,道路集流工程和鸡蛋卵集流场为流域面积的 0.58%,将以上 3 部分雨水全部收集。在治理度达到 49% 的情况下,3 种道路产流产沙特征值如表 2。

表 2 小流域治理后 3 种原型道路径流调控实验结果比较

道路类型	汇流时间/h	最大汇流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	平均流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	平均含沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )	最大含沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )	总侵蚀量/(t·a <sup>-1</sup> )
水泥路	0.5	3.2	2.7	70	136	1561
土路	0.8	2.9	2.4	54	134	1165
浮尘土路	0.9	2.6	1.9	50	74	1209

表 2 为小流域治理后修建 3 种不同道路的相关参数对比,试验结果表明:在小流域治理度达到 49% 的情况下,水泥路、土路、浮尘土路的汇流时间分别为 0.5、0.8、0.9 h;平均流量和总径流量不同程度减小;虽然浮尘土路的流量最小,但其总侵蚀量略大于土路。这也再次说明,小流域治理后修建不同类型的道路,硬化了一定面积的土壤,在不同工程措施的影响下,一定程度上减小了产流量。

图 4、5 分别对流域治理后 3 种道路产流产沙原型流量、含沙量进行了对比。从图 4、5 以及表 2 中可以看出:

(1) 由于水泥路面入渗小,因而产流和汇流时间较短,流量的迅速增大,使得沙峰也很快达到了最大值 136 kg/m<sup>3</sup>,随后有所回落,但在平均含沙量 67 kg/m<sup>3</sup> 左右波动,水泥路时的流域产流产沙量在 3 种道路中表现为最大。

(2) 因入渗强度增大,土路和浮尘土路的汇流时间均比水泥路大很多,这也导致其最大汇流量和平均流量不同程度减小。

(3) 与浮尘土路相比,土路时的总径流量大于浮尘土路,而流域产沙量略小,这是由于浮尘土路的容重相对较小,降雨过程中有较长时间的入渗过程,因而浮尘土路在降雨过程中的平均流量略小,仅为 1.8 m<sup>3</sup>/s,总径流量为 17 149 m<sup>3</sup>,但由于浮尘土路表层有浮土,尽管理论要求将模型道路浮土控制在 0.5 mm

厚度左右,但其仍具有很强的泥沙搬运能力。因此,虽然浮尘土路的总径流量减少了,在平均流量、平均含沙量差异不大的情况下,最终侵蚀总量为 1 209 m<sup>3</sup>,仍大于小流域治理后的土路产沙量。

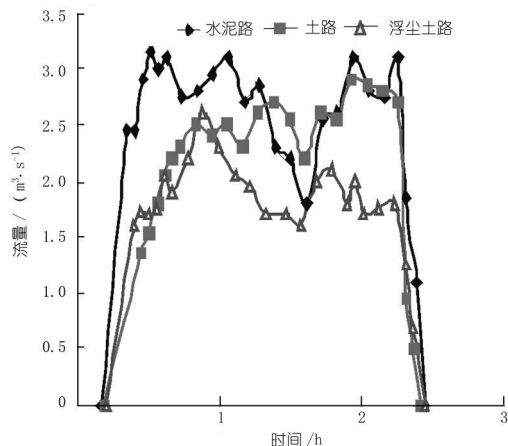


图 4 治理后流域不同道路产流对比

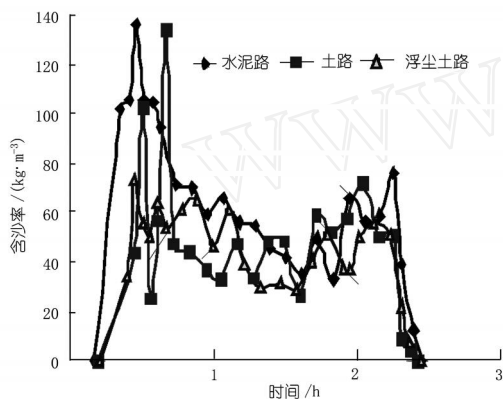


图 5 治理后流域不同道路产沙对比

#### 4 结论

本试验基于前人小流域模型试验研究的成果,对不同形式道路的产流产沙进行了初步研究,试验研究结果表明:

(1) 燕沟小流域道路侵蚀过程中,流域上仅仅布设道路,与治理前对照试验相比,道路对流域的产流产沙影响比较明显,水泥路、土路及浮尘土路汇流时间分别延长 17%、40%及 73%,总径流量分别是流域治理前的 1.09、0.79、0.76倍,而总侵蚀量是治理前的 1.7、0.86和 1倍。这说明,修建 3种不同的道路,对

流域径流有一定的调控作用。

(2) 在燕沟小流域治理度为 49%的条件下,水泥路、土路、浮尘土路的汇流时间分别为 0.5、0.8、0.9 h;平均流量和总径流量均有不同程度减小。虽然浮尘土路的流量最小,但其总侵蚀量略大于土路,说明道路浮尘对产沙影响较大。水泥路、土路和浮尘土路的总径流量和总侵蚀量的比值分别为 1.097、0.87及 1.075、0.77。这也说明,径流量的减小,对侵蚀量影响巨大。

(3) 小流域治理后,梯田与道路重合较多,梯田有效地拦截了道路上径流和产沙,且雨水集流工程布置在流域上游,有效降低了道路的产流产沙,未重合部分的道路约有 70%受到了雨水集流调控的影响,因而,治理后的小流域在梯田和雨水集流工程的共同作用下弱化了道路对流域产流产沙的影响,因此 3种道路对治理后小流域的产流产沙的影响相对变弱。

(4) 不同类型道路对治理前后小流域侵蚀产沙变化试验研究表明,在黄土高原丘岭沟壑区,径流是产生侵蚀的主要动力,对侵蚀量贡献较大。水泥道路产流量较大,因此在修建水泥道路时必须考虑道路径流收集,否则将会产生比土路更大的侵蚀量。

#### 参考文献:

- [1] Ziegler A D, Giambellucaand T W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand Journal of hydrology, 1997, (196): 204 - 229.
- [2] Ziegler A D, Sutherland R A, Giambelluca T W. Runoff generation and sediment transport on unpaved roads, agricultural land surfaces in northern Thailand Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25 (5): 519 - 534.
- [3] Sidle R C, Sasaki S, Otsuki M, Noguchi S, et al Sediment pathways in a tropical forest: effects of logging roads and skidtrails Hydrological Processes, 2004, (18): 703 - 720.
- [4] 郑世清等.长武王东沟试验区沟坡道路侵蚀及其防治措施.水土保持学报, 1994, 8(30): 29 - 35.
- [5] 徐学选等.黄土丘陵区植物道路的产流产沙试验研究.农业环境科学学报, 2007, 26(3): 934 - 938
- [6] Patrick N J L, Sheridan G J. Impact of an unsealed forest road stream crossing: water quality and sediment sources Hydrol Process, 2002, (16): 2599 - 2612.
- [7] 吴普特,高建恩.黄土高原水土保持新论.郑州:黄河水利出版社, 2006.
- [8] 高建恩等.黄土高原小流域水力侵蚀模拟实验设计与验证.农业工程学报, 2005, (10).

(编辑:朱晓红)

实施科学发展新战略 开创治江事业新局面