

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

土壤学报

第五十二卷

第一期

二〇一五年一月

科学出版社



中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

第52卷 第1期

Vol.52 No.1

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枏生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948 年创刊)

第 52 卷 第 1 期 2015 年 1 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 1 Jan., 2015

编 辑 《土 壤 学 报》编 辑 委 员 会

地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008

电话: 025 - 86881237

E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica

Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China

Tel: 025 - 86881237

E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正

Editor-in-Chief Shi Xuezheng

主 管 中 国 科 学 院

Superintended by Chinese Academy of Sciences

主 办 中 国 土 壤 学 会

Sponsored by Soil Science Society of China

承 办 中国科学院南京土壤研究所

Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社

Published by Science Press

地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company

总 发 行 科 学 出 版 社

Distributed by Science Press

地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

电话: 010 - 64017032

Tel: 010 - 64017032

E-mail: journal@mail.sciencep.com

E-mail: journal@mail.sciencep.com

国 外 发 行 中国图书贸易总公司

Foreign China International Book Trading Corporation

地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



0 1 >

9 770564 392156

黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟^{*}

吴淑芳¹ 刘政鸿² 霍云云³ 孟庆香^{4†}

(1 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

(2 陕西省水土保持生态环境监测中心, 西安 710004)

(3 武威市水利技术综合服务中心, 甘肃武威 733000)

(4 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

摘 要 以坡面细沟侵蚀过程为研究对象, 利用人工模拟降雨试验和三维激光扫描技术, 研究了同一坡面三场间歇性降雨下细沟侵蚀发生、发展和演化的图形化过程; 同时, 采用已有细沟侵蚀过程模型(CA-Rill), 结合 NetLogo 软件, 将试验结果与模型模拟结果进行对比分析。结果表明: (1) 扫描三场降雨图形化过程显示: 侵蚀阶段呈现出溅蚀—片蚀—跌坑—断续细沟—连续细沟—细沟崩塌过程, 沟长发育迅速, 沟宽和沟深发育相对缓慢, 细沟沟网形成迅速, 降雨结束后侵蚀强度达到 22.11 kg m^{-2} , 较初期降雨侵蚀增加了 22.04 倍。(2) CA-Rill 模型模拟结果显示, 在细沟侵蚀演化图形化过程方面, 该模型可较完整地模拟细沟形态发育过程, 实现细沟侵蚀的发生、发展以及演化过程中细沟形态的可视化模拟; (3) 模型模拟三场降雨细沟侵蚀参数 t 检验结果发现: 最长平均沟深、最大沟深、最长沟平均沟宽模拟效果不好; 而细沟平面密度、最长沟长、侵蚀强度模拟效果较好。

关键词 黄土坡面; 细沟侵蚀; CA-Rill 模型; 图像; 发育过程

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

细沟侵蚀是坡面土壤侵蚀的主要方式之一, 它是指坡面上形成细小沟道情况下, 径流对细沟沟壁、沟底、沟头土壤的分散、冲刷和搬运过程^[1]。由于坡面的凹凸不平对径流的分配作用和土壤抗侵蚀力造成空间差异, 坡面径流呈不均匀分布, 径流总是沿着阻力最小的方向流动, 地表微地形起伏会伴随着整个侵蚀过程, 通过自身的消长影响径流的产生、流向、汇流以及径流量的多少, 从而影响到侵蚀类型的演变和侵蚀产沙量的大小^[2]。随着降雨历时的推移, 坡面土壤侵蚀过程伴随着 4 种侵蚀类型, 即雨滴溅蚀、片蚀、细沟侵蚀、切沟侵蚀。野外调查和实验研究表明: 细沟侵蚀不仅是坡面泥沙的重要来源, 而且对坡面地形地貌的发育、演变存在重要的潜在影响^[3]。这种影响尤其表现在非农业土地上, 降雨冲刷产生的细沟不能被人类活动及时填埋, 细沟历经多次降雨径流冲刷而不断发展, 最终导致明显的地表形态变化。

细沟侵蚀是一个非常复杂的土壤侵蚀过程^[4]。细沟侵蚀过程及其影响因素一直是土壤侵蚀研究的热点, 关于降雨强度、降雨量、坡度、坡长、坡形、土壤性质、土壤前期含水量等因素对细沟侵蚀的影响, 以及不同因素组合下细沟侵蚀过程的研究已经取得了丰硕的成果。有学者^[5-6]认为: 细沟侵蚀的发生主要是由坡面本身所具有的起伏以及浅层洞穴的崩塌, 以及降雨过程中形成的小跌坎及其受坡面径流下切影响造成的。雷廷武等^[7]、张玉斌和郑粉莉^[8]、王占礼等^[9]通过大量室内和野外模拟降雨实验, 将细沟侵蚀过程细分为 4 个阶段: 溅蚀阶段、细沟间侵蚀阶段、细沟侵蚀为主阶段和雨后径流侵蚀阶段。尽管国内外学者对细沟侵蚀形成和演化过程进行了大量的实验研究, 但笔者发现: 受以往研究条件和手段的局限, 大多研究集中于一次性降雨条件下细沟形态发育过程的主观描述, 未能充分理解和掌握细沟侵蚀形成动态过程和发育的内在

^{*} 国家自然科学基金项目(41101255)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(QN2011024)资助

[†] 通讯作者, E-mail: qxmeng@126.com

作者简介: 吴淑芳(1977—), 女, 宁夏吴忠人, 博士, 副研究员, 主要从事坡面土壤侵蚀过程研究。E-mail: wsfsj@163.com

收稿日期: 2014-03-04; 收到修改稿日期: 2014-09-25

机理,尤其缺乏对细沟侵蚀的动态过程的可视化模拟。

随着计算机技术的发展以及对坡面细沟侵蚀过程理解的深化,利用数值模拟来完成传统模拟试验难以控制的条件和过程,将理论与实践相结合来建立坡面细沟侵蚀模型,研究侵蚀产沙过程的发生、发展规律和细沟微地表形态发育过程,已成为国际土壤侵蚀学领域的热点和前沿问题^[9-10]。然而,坡面侵蚀产沙系统是一个典型的非线性动力系统^[11],系统内部的侵蚀发育及演化过程是非常复杂的现象,具有极大的不确定性和混沌特征,虽然其中存在一定的规律,但要精确的预测其发展变化规律则是非常困难的。元胞自动机(Cellular Automata,CA)作为研究空间复杂现象的一个方法工具,已得到科研工作者的普遍重视和应用^[12-13]。它“自下而上”的研究思路,强大的复杂计算功能和鲜明的时空耦合特征,使得它特别适合于地理空间系统的动态模拟研究,利用CA研究土壤侵蚀过程,可谓是一个全新有益的思路。已有研究者将基本的CA原理引入到土壤侵蚀的研究中,成功地对土壤侵蚀过程进行了模拟^[14-15]。Puigdefabregas等^[16]在西班牙东南部通过连续六年的野外人工模拟降雨实验对坡面降雨的径流泥沙进行了观测,并利用CA模型建立了坡面侵蚀过程中径流泥沙输移规律的模型,对比发现模型能较好地表达坡面土壤侵蚀过程中径流泥沙的变化规律。Ma等^[17]建立了可以模拟不同植物篱影响下的坡面土壤侵蚀过程CA模型,对比分析试验与模拟数据,发现该模型可以很好地模拟不同植物篱影响下的坡面累积产流和产沙强度。陈建平等^[18]还结合GIS技术将元胞自动机模型应用到了荒漠化演化预测预报模型上。基于此,本研究选取黄土高原侵蚀最为严重的土壤类型——黄土,将元胞自动机(CA)的理论与方法和土壤侵蚀学相结合,在坡面裸地上通过人工模拟降雨实验、三维激光扫描、可视化和ArcGIS等多种技术手段集成,分析细沟发育过程中不同阶段产流产沙特征和形态变化过程,并利用基于元胞自动机的细沟侵蚀模型(CA-Rill)模拟了同等坡面条件下的侵蚀产沙动态过程和形态发育特征,同时对模型准确性及可靠性进行了评价,以期为深入认识土壤侵蚀机理、发展土壤侵蚀学科基础理论和预测侵蚀发展状况等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究采用人工模拟降雨试验,在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行。采用侧喷式自动模拟降雨系统,喷头高度16 m,雨滴降落终速可达到自然雨滴降落速度的98%以上,降雨均匀度大于85%。为准确模拟黄土高原陡坡地土壤侵蚀过程,室内实验尽可能选取坡度较大、坡长足够长的实验土槽。本试验土槽:坡长5 m、宽1 m、高0.5 m,坡度为20°。为了详细观测土壤侵蚀的演变过程以及获取侵蚀过程中诸多参数,本实验采用三场间歇性降雨(表1),每场降雨初始雨强设定为90 mm h⁻¹;降雨历时不等,主要依据地表微地形的变化而定,地表出现小细沟,跌坎,沟头下切等现象终止第一场降雨;地表出现断续细沟,流路明显,沟壁有崩塌等现象终止第二场降雨;地表出现明显细沟沟网现象终止第三场降雨。

所用土壤是取自陕西杨凌荒坡地,土壤类型属于壤土,砂粒含量为57.64%,黏粒含量为18.01%,为砂质黏壤土,田间持水量为19.2%。将土样晾干后过1 cm孔径筛去除杂质,填土时边填边压实,分层装土,并考虑一定的地表糙度。土壤容重控制在1.1~1.3 g cm⁻³,初始土壤含水量控制在8%左右,填土深度为40 cm,坡面初始处理为平整裸坡。

表1 试验设计

处理 Treatment	降雨强度 Rainfall intensity R(mm h ⁻¹)	坡长 Slope length L(m)	降雨历时 Duration of rainfall D(min)
T01	88.6	5	28.5
T02	87.1	5	18.3
T03	89.3	5	17.8

每场降雨坡面产流起,每隔2 min收集径流泥沙样,取样时间为30 s,计算瞬时径流量、径流含沙量。除第一场降雨外,第二、第三场降雨初始地形均为前一场降雨的终极地形。每场降雨前、后,采用三维激光扫描仪对地表进行地形扫描,总共扫描四次,该DEM数据记作D0,D1,D2,D3。扫描仪的水平和垂直(高程)方向测得的最小间距可小于1 mm,

扫描速度最高达 5 万点 s^{-1} , 扫描光斑直径为 4.5 mm。本实验设定的水平与垂直扫描精度为 1 mm, 获得高程点数据 400 多万个。

1.2 数据处理

采用 Cyclone 软件对扫描所得坡面 DEM 数据进行去噪、拼接等初始处理, 去除无效点后获得同一坐标系下完整的坡面 DEM; 之后借助 ArcGIS 软



图 1 细沟沟网提取

Fig. 1 Rill networks extraction

件将降雨后扫描结果与初始扫描结果 A0 对比, 获取坡面各点坐标的高程差 DEM 数据; 同时借助 ArcGIS 软件提取细沟沟网 (图 1), 导出各细沟沟长数据; 提取细沟平面 (图 2) (以沟深 ≥ 1 cm 侵蚀深度作为确定侵蚀沟的标准), 导出每条细沟的平面面积, 量取各细沟的多组沟宽值, 求其平均值^[19]。

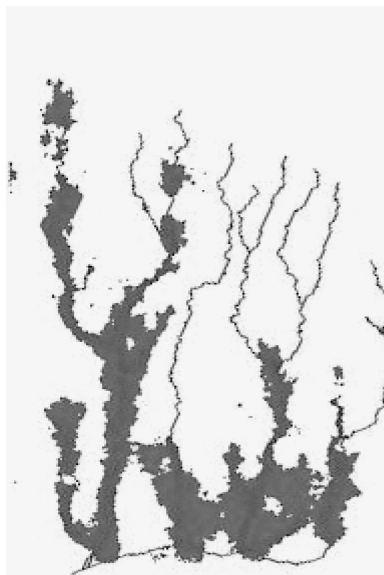


图 2 细沟平面提取

Fig. 2 Plane extraction of rills

细沟平面密度、细沟平均深度、最长沟长、最大沟宽等细沟侵蚀参数是直接反映坡面细沟发育大小和深浅的重要指标, 它们可以定量地呈现细沟从起始发育到沟网形成过程中对沟头、沟壁、沟底的分散、冲刷、搬运作用。利用上述输出数据可准确计算出细沟侵蚀参数, 误差范围为 ± 2 mm。计算方法为:

细沟平面密度 μ 为坡面所有细沟平面面积之和与坡面总面积的比值:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A_0} \quad (1)$$

式中, A_0 为坡面总面积, m^2 ; A_i 为坡面每条细沟的平面面积, m^2 。

细沟平均深度 $\bar{H}$ 为坡面所有细沟侵蚀深度的加权平均值:

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2)$$

式中, h_i 为坡面每条细沟的沟深, m。

最长沟长是指坡面所有细沟中沟长最大值, m; 最大沟深是指坡面所有细沟中沟深最大值, m; 最长沟平均沟宽是坡面最长沟所对应的沟宽平均值, m。

1.3 细沟侵蚀 CA-Rill 模型

本研究采用的黄土坡面细沟侵蚀过程模型——CA-Rill 模型, 是由原立峰等^[20]基于元胞自动机地学虚拟环境, 利用 NetLogo4. 1. 1 软件开发构建的。首先通过三维激光扫描仪获取地表的高程数据, 利用 Cyclone 软件将三维激光扫描仪获取的点云数据转换成栅格 DEM, 得到初始地表 DEM, 利用 GIS 将 DEM 转换为 ASCII 码格式; 采用 IDL 编程语言实现侵蚀元胞体数据结构设计; 对元胞间转换规则进行算法及程序设计; 利用 L'Ecuyer 随机数生成器模拟降雨随机分布; 按照算法设计流程运行 CA-Rill 模型; 利用 GIS 将 CA-Rill 模型模拟结果转为栅格 DEM; 调用 OpenGL 函数库中的编程接口, 进行纹理映射、添加光照模型, 绘制场景, 对次降雨影响下的坡面细沟发育过程进行可视化情景模拟。

在利用 CA-Rill 模型模拟中,其核心是降雨入渗、坡面流的形成以及土壤颗粒的分离、输移和沉积关键过程,每个关键过程和环节的运行必须遵循相应的规则,这样才能使模型实现由无序输入到有序输出。模型运行规则包括:土壤水下渗规则、水流和泥沙运移方向规则、元胞上水量分配规则、元胞上流速计算规则、元胞上泥沙输移规则。模型设置区域大小与前期降雨试验设计相一致,即长×宽(5 m×1 m),坡度为 20°的矩形坡面。

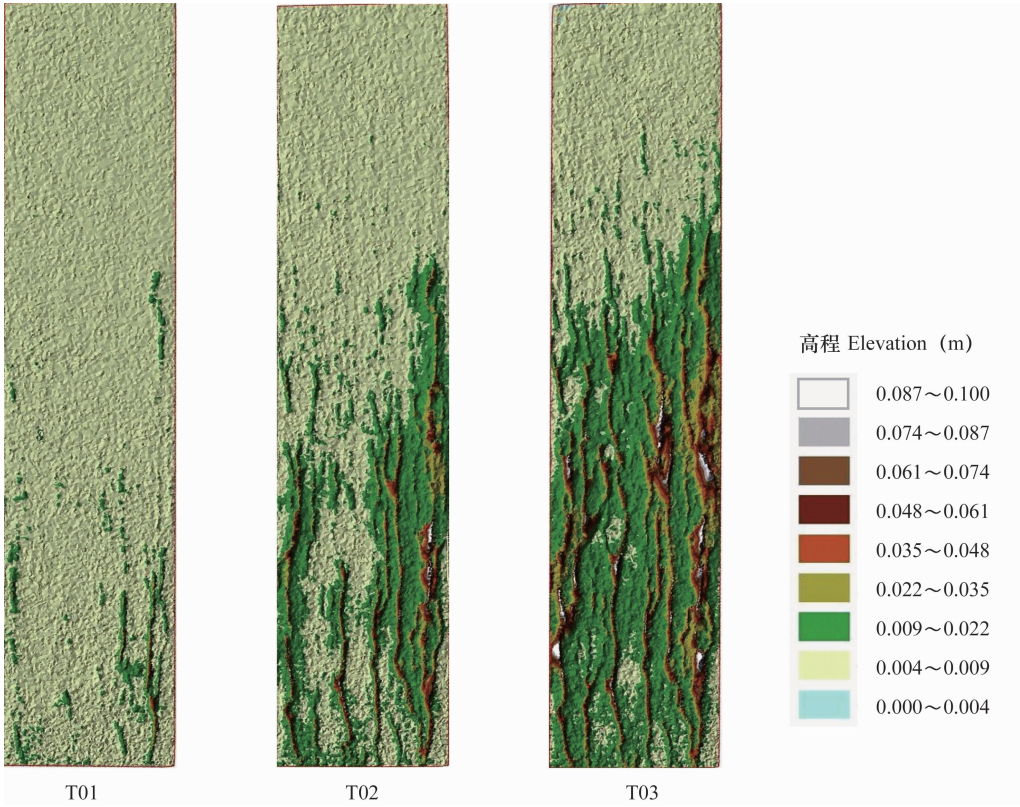
模型中用到的基本参数地表糙度,其测定是根据三维激光扫描仪获取高程数据,利用绝对平均高差法,并借助 MatLab 和 Excel 软件测算雨前、雨后地表糙度。初始土壤入渗率、稳渗率、土壤初始含水率等基本参数均采用常规方法测定^[20]。

2 结果与讨论

2.1 坡面细沟侵蚀发育过程特征

前期作者采用三维激光扫描仪在坡面 1 m×2 m 坡面上对七场降雨侵蚀沟发育过程进行了动态过程研究,发现由于坡长较短,细沟形态发育过程并不完整^[21]。故本研究选取了较长坡长 5 m 土槽,开展了 20°陡坡降雨的侵蚀细沟演化过程研究,试图增加坡长,全面展示细沟的完整发育过程。

利用 ArcGIS 软件提取细沟沟网,结合式(1)和式(2)对细沟平均坡面密度及沟深等进行计算,结果见表 2。图 3 呈现了同一坡面三场间歇性降雨细沟形态发育过程 T01、T02、T03,其中坡面高程变化程度用不同颜色区分。



注:以原坡面为基准面 Note: Using the original slope as benchmark plane

图 3 细沟形态发育过程
Fig. 3 Rill morphological development process

结合图 2 与表 2 可知,第一场降雨结束,坡面中、下部逐渐产生小跌水进而发展为下切沟头以及部分断续细沟,标志着细沟侵蚀开始有所发展;至第一场降雨结束,细沟最长沟长为 2.017 m,最大沟

深可达 0.062 m,最长沟平均沟宽为 0.035 m;细沟侵蚀强度和细沟平面密度相对较小,分别为 1.003 和 0.0239 kg m⁻²。

细沟侵蚀发展至第二场降雨结束,由图 4 中

表 2 坡面细沟侵蚀参数
Table 2 Parameters of rill erosion

场次 Session	降雨历时 Rainfall duration T (min)	细沟平面密度 Horizontal rill density μ	平均沟深 Mean rill depth $\bar{H}$ (m)	侵蚀强度 Erosion intensity EI (kg m^{-2})	最长沟长 Length of the longest rill $L_{\max}$ (m)	最大沟深 Depth of the deepest rill $H_{\max}$ (m)	最长沟平均沟宽 Mean width of the longest rill D (m)
T01	28.5	0.023 9	0.035	1.003	2.017	0.062	0.035
T02	18.3	0.089 3	0.075	7.994	4.032	0.117	0.040
T03	17.8	0.219 0	0.084	22.11	4.591	0.147	0.050

ET1 可知,第一场降雨产生的下切沟头不断溯源向上延伸,同一流路上的断续细沟连接成为连续细沟,细沟侵蚀进入稳定发展阶段。侵蚀强度增大至 7.994 kg m^{-2} ;细沟沟长、沟深均发展迅速,降雨发展至 T02,最长沟长、最大沟深分别为 4.032 m、0.117 m,较 T01 分别增长 2.015 m、0.055 m;细沟沟宽发展相对缓慢,T02 最长沟平均沟宽较 E01 仅增加 0.005 m。降雨发展至 T03,细沟沟网已经形成;在该场降雨过程中,细沟沟头不断向上侵蚀延伸、沟壁坍塌,致使沟长、沟宽相应有所发展,但发展程度不大,较 T02 最长沟长以及最长沟平均沟宽分别增加 0.559 m、0.010 m;细沟在本场降雨中主要呈现细沟的分叉和合并现象,细沟沟网逐渐密集,至第三场降雨结束,细沟平面密度达到 0.2190,为 T02 的 2.45 倍、T01 的 9.16 倍;侵蚀强度亦迅速增大为 22.11 kg m^{-2} ,分别为 T02、T01 的 2.78 倍、22.04 倍。

上述结果表明,本研究试验处理下坡面细沟侵蚀演化过程体现完整,所产生细沟沟长发育迅速,沟宽及沟深发育相对缓慢,细沟沟网迅速形成,且侵蚀强度大。

2.2 坡面侵蚀细沟发育过程模拟

将降雨试验结果实测值输入 CA-Rill 模型,并借助 NetLogo4.1.1 软件,得出三场降雨实验实测的坡面细沟形态发育过程结果,如图 4 ET1、ET2、ET3 所示。从图中可以看出,ET1、ET2、ET3 形态上呈现出与利用 ArcGIS 软件和三维激光扫描仪绘制出的图形形态 T01、T02、T03 (图 3) 基本一致,侵蚀发育过程可利用此模型和软件实现此过程的动态可视化。但由于此模型是二维结构,细沟深度在输出图中无法显示。

在同等条件下,利用基于元胞自动机 CA-Rill 模型的 NetLogo4.1.1 软件,建立地学虚拟环境,利用三维激光扫描仪获取的初始地表高程数据导入

到 NetLogo 软件中形成初始地形,将其降雨强度、历时和土壤质地、平均坡度($^{\circ}$)、地表粗糙度、初始土壤入渗率、土壤稳渗率、土壤容重等参数输入到模型中,模型输出了坡面细沟侵蚀形态演变模拟结果,如图 5 所示。

基于模型输出图形模拟结果,利用 ArcGIS 软件对图形提取细沟沟网,结合式(1)、式(2)对细沟坡面密度及沟深等参数进行计算,结果见表 3。

结合图 5 及表 3 分析可知:CA-Rill 模型可以完整地模拟细沟形态发育过程,并且非常具有代表性。模拟中第一场降雨结束后,坡面形成若干形态细长的细沟,最长细沟沟长为 1.900 m,其对应平均沟宽仅为 0.020 m。至第二场降雨结束,细沟沟网初步形成,细沟沟长以及沟深均有很大发展,最长细沟沟长为 2.833 m,最大沟深为 0.103 m;沟宽发展相对较小,仅为 0.035 m;细沟平面密度、侵蚀强度分别为 0.0796 、 6.781 kg m^{-2} ,较第一场降雨分别增大 4.10 倍、7.99 倍。经历第三场降雨后,细沟沟网发育成熟,断续细沟连续成为连续细沟,最长沟长、细沟平面密度、侵蚀强度迅速增大为 4.233 m、0.2035、 18.85 kg m^{-2} 。细沟平均沟深亦由第一场降雨的 0.036 m 发展至第三场降雨的 0.077 m;细沟平面密度和侵蚀强度分别较第二场降雨增大 2.56 倍、2.78 倍。总体而言,基于 CA-Rill 模型进行坡面细沟形态发育过程模拟,其形态模拟结果与实测结果中形态发育图相吻合,表明该模型可以完整地模拟细沟形态发育过程。对比图 4 和图 5 中实测图形 ET1、ET2、ET3 和模型模拟结果图形 ST1、ST2、ST3,同时分析表 2 和表 3 数据可知:3 场降雨细沟平面密度相对误差分别为 19%、11%、7%;侵蚀强度相对误差分别为 15%、15%、14%;细沟平均沟深相对误差分别为 3%、5%、8%;最大沟深相对误差分别为 11%、12%、14%;最长细沟沟长相对误差分别为 6%、30%、8%;最长沟平均沟宽相对误差分别

为 43%、13%、4% ;所有参数中相对误差 < 10% 的参数占 39% ;相对误差在 10%~20% 范围内的参数占 50% ;相对误差 > 20% 的参数仅为 11% 。表明实测值与模拟值误差大多在 20% 范围内。

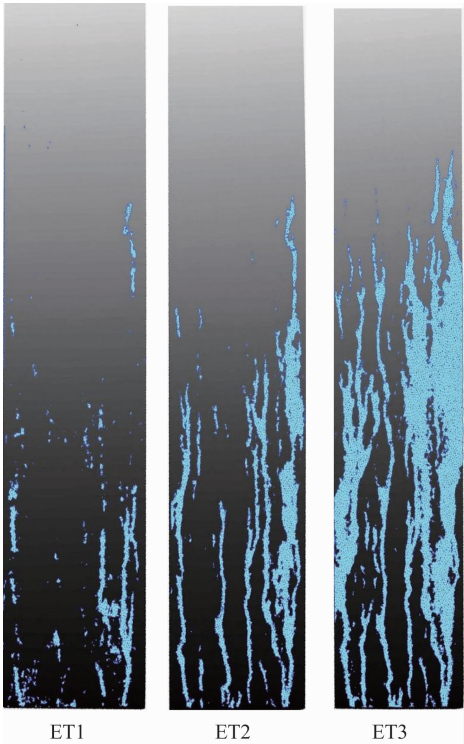


图 4 坡面细沟形态发育过程的实验值

Fig. 4 Rill morphological development processes on a slope recorded in the experiment

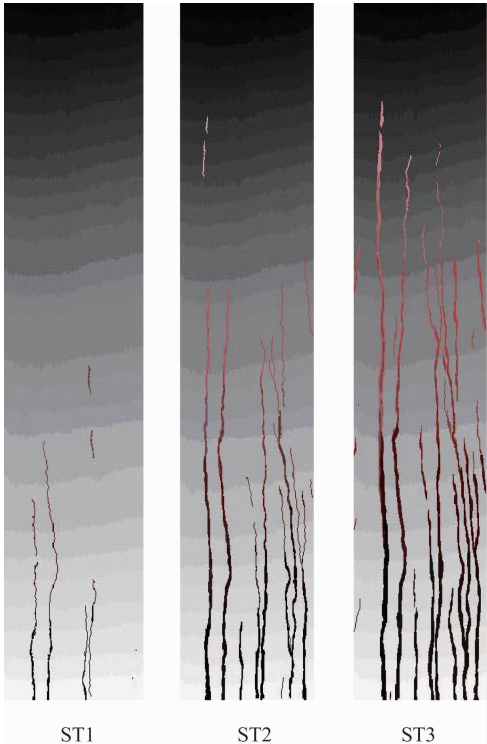


图 5 坡面细沟形态发育过程的模拟值

Fig. 5 Simulation of rill morphological development processes

表 3 细沟侵蚀参数的模拟值

Table 3 Simulated parameters of rill erosion

场次 Session	降雨历时 Rainfall duration T (min)	细沟平面密度 Horizontal rill density μ	平均沟深 Mean rill depth $\bar{H}$ (m)	侵蚀强度 Erosion intensity (kg m^{-2})	最长沟长 Length of the longest rill L_{max} (m)	最大沟深 Depth of the deepest rill H_{max} (m)	最长沟平均沟宽 Mean width of the longest rill D (m)
T01	28. 5	0. 019 4	0. 036	0. 849	1. 900	0. 055	0. 020
T02	18. 3	0. 079 6	0. 071	6. 781	2. 833	0. 103	0. 035
T03	17. 8	0. 203 5	0. 077	18. 85	4. 233	0. 127	0. 048

但细沟侵蚀参数模拟值与实验值的独立样本 t 检验结果(表 4)表明:模型模拟的三场降雨细沟侵蚀参数中最长平均沟深、最大沟深、最长沟平均沟宽均为 $p < 0.05$,说明模拟值与实测值差异显著,模拟效果不好;而细沟平面密度、最长沟长、侵蚀强度均为 $p > 0.05$,说明模拟值与实测值差异不显著,模拟效果好。其主要原因是在模拟细沟侵蚀形态发育过程时,无法模拟重力作用下细沟沟宽及沟深方

向上的土壤塌陷现象。CA 模型模拟细沟形态发育过程时,对细沟沟宽以及沟深、侵蚀强度的模拟值偏小,其原因可能是:(1)模型无法模拟重力作用下细沟宽、深方向上的土壤塌陷;(2)模型采用单流向法确定元胞水流方向本身具有一定的局限性,侧向侵蚀较小,纵向流聚集多;(3)由于多场人工模拟降雨实验过程中,饱和土壤由于重力作用会产生微小量的整体沉陷,而利用 GIS 处理三维激光仪扫描结

果时无法去除整体沉陷产生的误差,致使实验结果存在一定的误差。
中细沟面积的提取会产生偏大现象,实验结果本身

表 4 细沟侵蚀参数模拟值与实验值独立样本 t 检验
Table 4 Validation of simulated rill erosion parameters with the results of the experiment on Independent sample t

统计指标 Statistical indicator	F-检验 F-test		t-检验 t-test	
	F	<i>p</i> (<i>F</i> ≤ <i>f</i>)	<i>t</i>	<i>p</i> (<i>T</i> ≤ <i>t</i>)
细沟平面密度 Horizontal rill density	1. 826	0. 241	0. 042	0. 967
平均沟深 Mean rill depth	2. 547	0. 140	− 4. 487	0. 001
最长沟长 Length of the longest rill	0. 652	0. 308	1. 922	0. 079
最大沟深 Depth of the deepest rill	1. 163	0. 429	− 3. 610	0. 004
侵蚀强度 Erosion intensity	1. 078	0. 117	1. 321	0. 106
最长沟平均沟宽 Mean width of the longest rill	0. 218	0. 043	− 2. 772	0. 024

注: F-检验($p < 0.05$), 方差不齐性, 用双样本异方差假设进行独立样本 t 检验; F-检验($p > 0.05$), 方差齐性, 则用双样本等方差假设进行独立样本 t 检验; 若 t-检验($p > 0.05$), 则可以认为模拟值与实验值差异不显著; 反之, 则差异显著 Note: If it is $p < 0.05$ in F-test, the variance is not homogeneous, where double sample heteroscedasticity hypothesis was used in the independent sample t-test. If it is $p < 0.05$ in F-test, the variance is homogeneous, where double sample variance assumption was used in the independent sample t-test. If it is $p > 0.05$ in t-test, it is advisable to hold that the difference between the simulation and experiment is not significant, otherwise, the difference is significant

3 结 论

在形态发育过程上,CA-Rill 模型可较完整、较好地模拟细沟侵蚀演化过程,实现了细沟侵蚀可视化模拟;侵蚀参数模拟方面,大多数参数模拟值与实测值的相对误差在 20% 以内。最长平均沟深、最大沟深、最长沟平均沟宽模拟效果不好;然而细沟平面密度、最长沟长、侵蚀强度模拟效果较好。尽管 CA-Rill 模型对每场降雨后侵蚀形态发育模拟基本可靠,但在人工模拟降雨实验过程中受人为因素影响较大,其细沟形态变化具有很大的随机性和不可重复性,所以想要利用模型实现对坡面细沟发育过程中每条细沟的对应追踪模拟有些困难。CA-Rill 模型在初步实现细沟侵蚀发育过程的可视化模拟基础上,仍然有很多细微之处需要改进与考虑,今后还需进一步开展此方面的相关研究。

参 考 文 献

[1] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究. 土壤学报,1998,35(1):95—103. Zheng F L. Study in interrill erosion and rill erosion on slope farmland of Loess area (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1998,35(1):95—103

[2] 杨丽娜,范昊明,郭成久. 不同坡形坡面侵蚀规律试验研究. 水土保持研究,2007,14(4):237—239. Yang L N,Fan H M,Guo C J. Experimental study of soil erosion in different slopes (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(4):237—239

[3] 郑粉莉,高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟. 西安:陕西人民出版社,2000. Zheng F L, Gao X T. Soil erosion process and modeling at loessial hillslope (In Chinese). Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 2000

[4] 原立峰,周启刚. 流域侵蚀产沙系统的复杂性. 重庆工学院学报:自然科学版,2008,22(4):112—116. Yuan L F, Zhou Q G. Complexity of soil erosion and sediment yielding system in catchments (In Chinese). Journal of Chongqing Institute of Technology:Natural Science, 2008,22(4):112—116

[5] 蔡强国,朱远达,王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素. 水科学进展,2004,15(1):12—17. Cai Q G, Zhu Y

- D, Wang S Y. Research on processes and factors of rill erosion (In Chinese). *Advance in Water Science*, 2004, 15(1):12—17
- [6] Bryan R B, Poesen J. Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1989, 14(3):211—231
- [7] 雷廷武,姚春梅,张晴雯. 细沟侵蚀动态过程模拟数学模型和有限元计算方法. *农业工程学报*, 2004, 20(4):7—13. Lei T W, Yao C M, Zhang Q W. Simulation study on dynamic rill erosion processes: Mathematical models and FEM formulation (In Chinese). *Transaction of the CSAE*, 2004, 20(4):7—13
- [8] 张玉斌,郑粉莉. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响. *中国水土保持科学*, 2007, 5(2):5—10. Zhang Y B, Zheng F L. Effects of near-surface soil water conditions on soil erosion process (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(2):5—10
- [9] 王占礼,王亚云,黄新会. 黄土裸坡土壤侵蚀过程研究. *水土保持研究*, 2004, 11(4):84—87. Wang Z L, Wang Y Y, Huang X H. Soil erosion process research of the loess bare slope (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4):84—87
- [10] Murray A B, Paola C. A cellular model of braided rivers. *Nature*, 1994, 371:54—57
- [11] 周成虎,孙战利,谢一春. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社, 1999. Zhou C H, Sun Z L, Xie Y C. Geographical cellular automata (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999
- [12] Heung B, Bakker L, Schmidt M, et al. Modelling the dynamics of soil redistribution induced by sheet erosion using the Universal Soil Loss Equation and cellular automata. *Geoderma*, 2013, 203(3):112—125
- [13] 原立峰,常春平. 坡面细沟自组织形成过程的 CA 模型. *水土保持研究*, 2008, 15(3):7—10. Yuan L F, Chang C P. A cellular automation approach to the simulation of rill self-organizing development process on hillslope (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(3):7—10
- [14] Cooper J R, Wainwright J, Parsons A J. A new approach for simulating the redistribution of soil particles by water erosion: A marker-in-cell model. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2012, 117(4):1203—1207
- [15] 原立峰,刘星飞,吴淑芳,等. 元胞大小选择对坡面细沟侵蚀过程 CA 模拟的影响. *武汉大学学报:信息科学版*, 2014, 39(3):311—316. Yuan L F, Liu X F, Wu S F, et al. Effect of cellular size selection on process simulation of rill erosion on Loess hillslopes using CA method (In Chinese). *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(3):311—316
- [16] Puigdefabregas J, Sole A, Gutierrez L, et al. Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: Results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain. *Earth-Science Reviews*, 1999, 48(1/2):39—70
- [17] Ma T, Zhou C H, Cai Q G. Modeling of hillslope runoff and soil erosion at rainfall events using cellular automata approach. *Pedosphere*, 2009, 19(6):711—718
- [18] 陈建平,丁火平,王功文. 基于 GIS 和元胞自动机的荒漠化演化预测模型. *遥感学报*, 2004, 8(3):254—260. Chen J P, Ding H P, Wang G W. Desertification evolution modeling through the integration of GIS and cellular automata (In Chinese). *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(3):254—260
- [19] 赵龙山,梁心蓝,张青峰,等. 基于微尺度下 DEM 的黄土坡耕地地表坑洼特征研究. *土壤学报*, 2012, 49(1):179—183. Zhao L S, Liang X L, Zhang Q F, et al. Study of characteristics of surface depressions in farmland on loess slope based on micro-DEM (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1):179—183
- [20] 原立峰,吴淑芳,刘星飞,等. 基于元胞自动机的黄土坡面细沟侵蚀模型研究. *土壤学报*, 2012, 49(5):1043—1049. Yuan L F, Wu S F, Liu X F, et al. Study on loess hillslopes rill erosion model based on cellular automata (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5):1043—1049
- [21] 霍云云,吴淑芳,冯浩,等. 基于三维激光扫描仪的坡面细沟侵蚀动态过程研究. *中国水土保持科学*, 2011, 9(2):32—37. Huo Y Y, Wu S F, Feng H, et al. Dynamic process of slope rill erosion based on three dimensional laser scanners (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(2):32—37

DEVELOPMENT OF RILL EROSION ON LOESS SLOPE AND ITS SIMULATION

Wu Shufang¹ Liu Zhenghong² Huo Yunyun³ Meng Qingxiang^{4†}

(1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Soil and Water Conservation Ecological Environment Monitoring Center in Shaanxi Province, Xi'an 710004, China)

(3 Water Conservancy Technology Comprehensive Service Center, Wuwei, Gansu 733000, China)

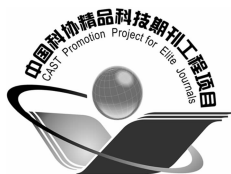
(4 College of Resources and Environment, Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract It is of great significance to dynamically simulate development and evolution of soil erosion for the purpose of erosion forecast. Traditionally, most soil erosion models are basically steady-state models that have limitations in real-time simulation of initiation and development of soil erosion. Cellular Automata (CA), with a “from bottom to top” dynamic modeling framework, is capable of simulating spatial-temporal evolutionary processes of the complex geographical

system. So, in this paper, rill erosion on loess slope was studied. By means of artificial simulated rainfall and three dimensional laser scanning, how rill erosion started, developed and evolved on a loess slope, 15° in gradient, under three intermittent artificial rainfall events were investigated and visualized in graphics. At the same time, the CA-Rill model, already available for simulation of rill erosion process, was used in couple with the NetLogo software, to analyze and compare results of the experiment and the results of model simulation. Results show: (1) The scanning images of the rill erosion processes under the three events of rainfall reveal that the entire course of rill erosion consisted of the following phases in sequence, splash erosion, sheet erosion, drop pit, intermittent rill, continuous rill and rill collapse. Rills developed very rapidly in length, and relatively slowly in width and depth, and soon connected with each other to form a rill network. At the end of the third rainfall event, erosion intensity reached as high as 22.107 kg m^{-2} , 22.04 times that at the initial stage of rainfall. (2) Results of the CA-Rill simulation indicate that in visualizing evolution of the rill erosion, the model could quite perfectly simulate the entire morphological development of rills and realize visualization of the simulation. (3) Validation of parameter t of the simulated rill erosion under three artificial rainfall events demonstrates that the simulation of mean rill depth of the longest rill, depth of the deepest rill and mean width of the longest rill is not so ideal. However, the effect of the simulation of horizontal rill intensity, length of the longest rill and erosion intensity is quite good.

Key words Loess slope; Rill erosion; CA-Rill model; Images; The development process

(责任编辑:檀满枝)



综述与评论

农业土壤学研究:侯光炯学术思想形成之考察——纪念侯光炯先生诞辰 110 周年..... 申丽娟 丁恩俊 陈绍兰等(1)

土壤多样性研究趋势与未来挑战 任圆圆 张学雷(9)

土壤磷酸盐氧同位素分析方法和应用研究进展 张 晗 王佳妮 郭庆军等(19)

研究论文

土壤制图多等级代表性采样与分层随机采样的对比研究 杨 琳 朱阿兴 张淑杰等(28)

河南省典型淋溶土土系划分研究 鞠 兵 吴克宁 李 玲等(38)

黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟 吴淑芳 刘政鸿 霍云云等(48)

黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征 高晓东 吴普特 张宝庆等(57)

科尔沁沙丘-草甸相间地区表土饱和和导水率的土壤传递函数研究 孙 丽 刘廷玺 段利民等(68)

砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响 张 磊 齐瑞鹏 张应龙等(77)

稳定同位素²⁰²Hg 稀释技术测定土壤汞有效性——与化学提取方法比较 郑顺安 徐志宇 王 飞等(87)

土壤提取液中酰基高丝氨酸内酯的气相色谱-质谱检测方法优化 生弘杰 宋 洋 卞永荣等(95)

复合污染土壤中土霉素的吸附行为及其对土壤重金属解吸影响的研究 陈励科 马婷婷 潘 霞等(104)

污染区千金子和酢浆草根际土壤中 PAHs 结合态残留的梯度分布 王意泽 高彦征 彭安萍等(112)

土壤磷解吸特性对菜稻轮作田间渗漏水总磷浓度的影响 章明清 李 娟 孔庆波(120)

湖区小麦-玉米轮作模式下不同施肥措施调控氮磷养分流失研究 谭德水 江丽华 谭淑樱等(128)

鄱阳湖洲滩湿地土壤-水-植物系统中磷的静态迁移研究 徐 进 徐力刚 丁克强等(138)

菇菜套作对土壤微生物群落的影响 陈 敏 王军涛 冯有智等(145)

黄土高原油松根际土壤酶活性及真菌群落多样性研究——以黄龙山林场为例 褚洪龙 李 莎 唐 明(154)

硅介导番茄青枯病抗性的土壤定量蛋白质组学研究 陈玉婷 林威鹏 范雪滢等(162)

有机无机肥配施对红壤旱地花生生理特性、产量及品质的影响 许小伟 樊剑波 陈 晏等(174)

氮素富集对青藏高原高寒草甸土壤有机碳迁移和累积过程的影响 李林森 程淑兰 方华军等(183)

长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究 何翠翠 王立刚 王迎春等(194)

火烧和保留采伐剩余物对土壤有机碳矿化的影响 吴君君 杨智杰 刘小飞等(203)

研究简报

碳氮稳定同位素检测能力的验证——2013 年实验室间比对分析结果的汇总 曹亚澄 韩 勇 唐昊冶等(212)

土壤厚度的划分标准与案例研究 易 晨 李德成 张甘霖等(220)

积盐条件下土壤酸化过程的特异性研究 王媛华 段增强 赵 宇等(228)

四川省不同区域水稻氮肥施用效果研究 张 智 王伟妮 李 昆等(234)

小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响 李宗超 胡 霞(242)

信息

《土壤学报》2013 年度优秀论文评选揭晓 (241)

封面图片:黄土坡面细沟形态发育过程(由吴淑芳提供)

CONTENTS

Reviews and Comments

Agricultural soil science research: Formation of Hou Kuangchun's academic thought—Celebrate 110th anniversary of Mr Hou Kuangchun's birth	Shen Lijuan, Ding Enjun, Chen Shaolan, et al. (8)
Study on pedodiversity: Status quo and future challenges	Ren Yuanyuan, Zhang Xuelei(17)
Advance in study on method for oxygen isotopic analysis of phosphate in soil and its application	Zhang Han, Wang Jiani, Guo Qingjun, et al. (26)

Research Articles

A comparative study of multi-grade representative sampling and stratified random sampling for soil mapping	Yang Lin, Zhu A-xing, Zhang Shujie, et al. (37)
Classification of Typical Argosols of Henan Province at soil series level of Chinese Soil Taxonomy	Ju Bing, Wu Kening, Li Ling, et al. (47)
Development of rill erosion on loess slope and its simulation	Wu Shufang, Liu Zhenghong, Huo Yunyun, et al. (55)
Spatial variability of available soil moisture and its seasonality in a small watershed in the hilly region of the Loess Plateau	Gao Xiaodong, Wu Pute, Zhang Baoqing, et al. (66)
Prediction of saturated hydraulic conductivity of surface soil in sand-dune-and-meadow interlaced region of Horqin with pedo-transfer functions method	Sun Li, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. (75)
Effects of amendment of aeolian sandy soil and loess with soft sandstone on soil water retention curve and evaporation	Zhang Lei, Qi Ruipeng, Zhang Yinglong, et al. (85)
Comparison between stale isotope ²⁰² Hg dilution technique and chemical extraction in determining Hg availability in two typical soils of China	Zheng Shunan, Xu Zhiyu, Wang Fei, et al. (94)
Optimization of determination of N-acyl-homoserine lactones in soil solution with Gas-Chromatography-Mass Spectrometry	Sheng Hongjie, Song Yang, Bian Yongrong, et al. (102)
Sorption behavior of oxytetracycline in complex contaminated soil and its effects on desorption of heavy metals in the soil	Chen Like, Ma Tingting, Pan Xia, et al. (111)
Gradient distribution of bound-PAH residues in different layers of rhizosphere soils of moleplant and wood sorrel growing in polluted regions	Wang Yize, Gao Yanzheng, Peng Anping, et al. (118)
Soil P desorption characteristics and their effects on total P concentration in percolating water in fields under vegetable-rice rotation system	Zhang Mingqing, Li Juan, Kong Qingbo(127)
Effects of fertilization controlling nitrogen and phosphorus loss from farmland under wheat-maize rotation in Nansi Lake region	Tan Deshui, Jiang Lihua, Tan Shuying, et al. (137)
Static transfer of phosphorus in the soil-water-plant system of beach wetlands in Poyang Lake	Xu Jin, Xu Ligang, Ding Keqiang, et al. (144)
Changes in soil microbial community in response to tomato- <i>Agaricus bisporus</i> interplanting	Chen Min, Wang Juntao, Feng Youzhi, et al. (152)
Soil enzyme activity and fungal community diversity in rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr. growing on Loess Plateau— A case study of Huanglongshan forest farm	Chu Honglong, Li Sha, Tang Ming(161)
Soil quantitative proteomic analysis of silicon-mediated resistance of tomato (<i>Solanum lycopersicum</i>) to <i>Ralstonia solanacearum</i>	Chen Yuting, Lin Weipeng, Fan Xueying, et al. (172)
Effect of manure combined with chemical fertilizer application on yield, kernel quality and physiological characteristics of peanut to red soil in subtropical China	Xu Xiaowei, Fan Jianbo, Chen Yan, et al. (181)
Effects of nitrogen enrichment on transfer and accumulation of soil organic carbon in alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau	Li Linsen, Cheng Shulan, Fang Huajun, et al. (192)
Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil	He Cuicui, Wang Ligang, Wang Yingchun, et al. (202)
Effect of prescribed burning and reservation of logging residues on soil organic carbon mineralization	Wu Junjun, Yang Zhijie, Liu Xiaofei, et al. (210)

Research Notes

Testing of proficiency for measurement of carbon and nitrogen stable isotopes ...	Cao Yacheng, Han Yong, Tang Haoye, et al. (218)
Criteria for partition of soil thickness and case studies	Yi Chen, Li Decheng, Zhang Ganlin, et al. (227)
Specificity of soil acidification affected by salt accumulation	Wang Aihua, Duan Zengqiang, Zhao Yu, et al. (233)
Effects of nitrogen fertilization on rice in different regions of Sichuan Province	Zhang Zhi, Wang Weini, Li Kun, et al. (240)
Effects of shrub (<i>Caragana microphylla</i> Lam) encroachment on soil porosity of degraded sandy grassland	Li Zongchao, Hu Xia(248)

Cover Picture: Rill morphological development process on loess slope (by Wu Shufang)