

黄土高原小流域重力侵蚀数值模拟

于国强¹, 李占斌^{1,2}, 李 鹏¹, 张 霞³, 邹兵华¹, 赵洪彬⁴

(1. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048;

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, 杨凌 712100;

3. 陕西省环境科学研究设计院, 西安 710061; 4. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 为研究黄土高原小流域重力侵蚀机理, 采用 fish 语言编写多层复杂地形建模的前处理程序, 对多层复杂地形建模进行了二次开发。从力学稳定性角度, 采用有限差分 FLAC^{3D} 软件对黄土高原小流域概化模型进行重力侵蚀机理研究, 分析了流域重力侵蚀的发育过程, 并对小流域位移场和应力场进行了数值模拟。结果表明: 建立的三维模型能真实地表现小流域地形、地貌, 仿真效果良好。小流域重力侵蚀过程分为发育期、成熟期和稳定期 3 个阶段, 沟头溯源区是小流域侵蚀最强烈的部位; 凹形的边坡整体几何形态利于边坡稳定, 减缓了重力侵蚀的发生程度。建模方法和数值模拟结果可应用到重力侵蚀研究中, 为推动流域侵蚀产沙时空规律研究的深入发展和小流域水土流失综合治理以及生态环境建设提供科学依据。

关键词: 侵蚀, 建模, 地貌, 小流域

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.013

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0074-06

于国强, 李占斌, 李 鹏, 等. 黄土高原小流域重力侵蚀数值模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 74—79.

Yu Guoqiang, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Numerical simulation on gravitational erosion of small watershed system in Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 74—79. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

重力侵蚀是指地表物质在重力作用下, 分散或成块, 急速或缓慢向下移动的过程, 主要表现为土的蠕动、松散物的滑动、松散物的流动和崩塌等^[1]。重力侵蚀直接或间接地向河道输送了大量的泥沙, 是流域土壤侵蚀和河流泥沙来源的主要物理过程之一, 并在区域地貌演化中扮演了十分活跃的角色^[2-5]。根据黄河水利委员会西峰、天水、绥德 3 个水保站在典型小流域调查, 这些地区重力侵蚀面积和侵蚀量均占很大比例, 重力侵蚀十分严重^[6]。在黄土塬区和丘陵区, 沟头前进多以土体崩塌形式进行, 沟岸扩张是崩塌与滑坡共同作用的结果^[7-9]。

重力侵蚀不同于普通工程意义上的滑坡失稳。由于其复杂性, 以及缺乏长期系统的观测资料, 对重力侵蚀的研究在土壤侵蚀领域中一直是一个较薄弱的环节。在有关重力侵蚀研究中, 大多数学者是从地形地貌出发利用 GIS 空间分析功能对重力侵蚀进行研究从而确定侵蚀模数的变化情况, 而从坡沟系统力学稳定性角度出发, 减少坡沟重力侵蚀发生的可能性, 提高坡沟系统的稳定性的根本机理性定量研究成果相对较少^[6-7]。本研究通过

对 FLAC^{3D} 软件的二次开发建立小流域概化模型, 并对小流域重力侵蚀的破坏部位、机理等方面进行研究, 为小流域水土保持工程措施的配置及生物措施的开展提供有益的参考, 为评价小流域稳定性提供可靠的依据。

1 研究区概况

本研究所选区域是陕西省绥德县韭园沟, 韭园沟是无定河中游左岸的一条支沟, 沟口距绥德县城 5 km, 位于东经 110°16', 北纬 37°33'。流域面积 70.7 km², 沟底平均比降为 1.2%, 沟长大于 300 m 的支沟有 430 条, 沟壑密度为 5.43 km/km²。海拔 820~1 180 m, 地形地貌主要由梁、峁以及分割梁峁的沟谷组成。沟间地占总面积的 56.6%, 坡度多在 10°~35°之间; 沟谷地占总面积的 43.4%, 谷坡陡峻, 一般坡度在 35°以上。地层构造表层主要是马兰黄土, 厚度 20~30 m, 梁峁顶部均有分布; 中间为离石黄土, 厚度 50~100 m, 多出露于谷坡上; 底层主要是三叠纪砂页岩, 岩层基本接近水平, 多出露于干沟、支沟的下游沟床及其两侧。

该流域属北温带干旱大陆性气候, 年平均气温 10.2℃, 无霜期 170 d。多年平均降水量 508 mm, 降水的年际变化极不均匀, 最多的 1964 年为 753 mm, 最少的 1965 年为 231.1 mm。降雨的年内分配极不均匀, 汛期的 6—9 月份降水量占年降水总量的 72.6%, 且多以暴雨形式出现, 一次暴雨产沙量往往为全年产沙量的 60% 以上, 土壤侵蚀以水蚀及重力侵蚀为主, 治理前多年平均侵蚀模数为 18 120 t/(km²·a), 属剧烈侵蚀区, 在黄土丘陵沟壑区具有一定的代表性^[7-8]。

收稿日期: 2008-11-06 修订日期: 2009-03-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB407206); 国家科技支撑项目 (2006BAD09B02); 国家自然科学基金项目 (40771124); 西安理工大学优秀博士学位论文基金 (106—210911) 联合资助

作者简介: 于国强 (1979—), 男, 内蒙古包头人, 博士生, 研究方向: 土壤侵蚀与水土保持等方面的研究。西安 西安理工大学水利水电学院, 710048。Email: yuguoqiang23@sina.com

2 小流域重力侵蚀数值分析原理及建模方法

2.1 FLAC^{3D} 数值模拟基本原理

FLAC^{3D} (fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions) 是由美国 Itasca Consulting Group Inc 开发的三维显式有限差分程序。它可以模拟岩土或其他材料的三维力学行为。FLAC^{3D} 将计算区域划分为若干六面体单元, 每个单元在给定的边界条件下遵循指定的线性或非线性的本构关系, 如果单元应力使得材料屈服或产生塑性流动, 则单元网格可以随着材料的变形而变形, 这就是拉格朗日算法。FLAC^{3D} 采用了显式有限差分格式来求解场的控制微分方程, 并应用了混合离散单元模型, 可以准确地模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形, 尤其在材料的弹塑性分析、大变形分析以及模拟施工过程等领域具有其独到的优点。FLAC^{3D} 的求解采用如下 3 种计算方法^[10-12]:

1) 离散模型方法。连续介质被离散为若干互相连接的六面体单元, 作用力均集中在节点上。

2) 有限差分方法。变量关于空间和时间的一阶导数均用有限差分来近似。

3) 动态松弛方法。应用质点运动方程求解, 通过阻尼使系统运动衰减至平衡状态。

在 FLAC^{3D} 中采用了混合离散方法, 区域被划分为常应变六面体单元的集合体, 而在计算过程中, 程序内部又将每个六面体分为以六面体角点为角点的常应变四面体的集合体, 变量均在四面体上进行计算, 六面体单元的应力、应变取值为其内四面体的体积加权平均。如一四面体, 第 n 面表示与节点 n 相对的面, 设其内任一点的速率分量为 v_i , 则可由高斯公式得

$$\int_V v_{i,j} dV = \int_S v_i n_j dS \quad (1)$$

式中: V ——四面体的体积; S ——四面体的外表面; n_j ——外表面的单位法向向量分量。

对于常应变单元, v_i 为线性分布; n_j 在每个面上为常量, 由式 (2) 可得

$$v_{i,j} = -\frac{1}{3V} \sum_{l=1}^4 v_l^i n_j^{(l)} S^{(l)} \quad (2)$$

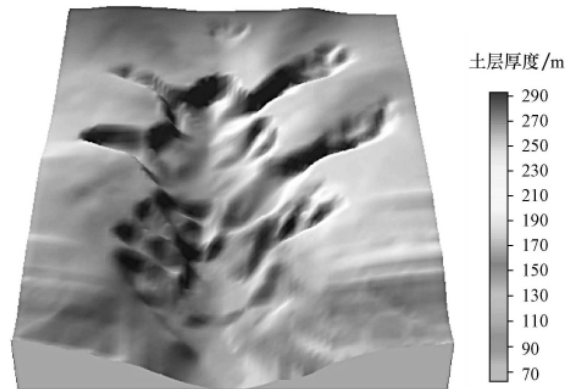
式中: l ——节点 l 的变量; (l) ——面 l 的变量。

2.2 复杂地形的 FLAC^{3D} 建模方法

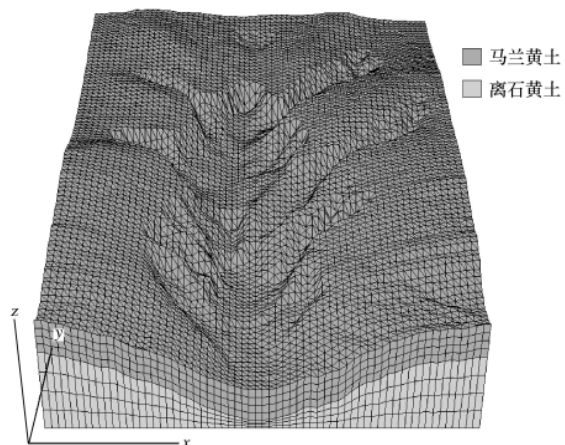
尽管 FLAC^{3D} 软件为用户提供了 12 种初始单元模型 (primitive mesh), 这些初始单元模型对于建立规整的三维工程地质体模型具有快速、方便的功效; 但由于其在建立计算模型时仍然采用键入数据、命令行文件方式, 尤其在建立复杂模型时造成了一定的困难。为此本研究将地理信息系统可视化 Surfer 软件结合 FLAC^{3D} 内置的 fish 语言在初始单元模型基础上编写了前处理程序, 实现了对复杂多层地形建模的二次开发。

首先采用 Surfer 读入原始数据, 采用克里格差值方法建立地表模型 (图 1a), 生成的 grd 文件存储了差值后网格点高程信息, Surfer 所生成的是规格网格, 在 FLAC^{3D} 中通过 fish 语言程序提取 grd 文件的高程信息, 然后分别

沿 x 、 y 方向采用楔状微模型循环累加, 将四棱柱改成三棱柱, 所以复杂的地层都可以模拟的很好, 在地形比较陡峭的情况下, 只是增加了单元数, 可以将三棱柱和四棱柱结合起来, 用 4 个顶点的相差容许度来判断是否生成四棱柱。如果地形扭曲较大, 则拆分成两个三棱柱, 便可完成对多个地层 (材料) 模型的构建, 效果良好。该处理办法较好地克服了 FLAC^{3D} 建立较复杂计算模型的困难, 成功地实现了建模过程; 建模实例表明建立的三维模型能真实地表现小流域地形、地貌, 仿真效果良好 (图 1b)。



a. 小流域地形地貌图



b. 小流域概化模型

图 1 小流域地形地貌图及概化模型

Fig.1 Graphs of geomorphology and conceptual model of small watershed

3 小流域重力侵蚀的有限元数值模拟

3.1 小流域概化模型及有限元计算模型

图 1a 为采用 Surfer 软件绘制的小流域地形地貌图, 图 1b 为 FLAC^{3D} 软件建立的小流域概化模型。计算模型除坡面设为自由边界外, 模型底部 ($z=0$) 设为固定约束边界, 模型四周设为单向边界。概化模型土层从上到下分别为马兰黄土 (Q_3^{col}) 和离石黄土 (Q_2^{col}), 其土层平均厚度分别为 50 m 和 150 m, x 方向长为 580 m, y 方向长为 760 m。坡面坡度主要在 $10^\circ \sim 35^\circ$ 之间, 该模型有限元网格共有节点 50 895 个, 单元 88 064 个, 每个单元长为 9 m。

3.2 土体物理力学指标

根据边坡工程经验、现场资料分析、现场及室内岩土物理力学试验和有限元计算的需要,流域系统模型各土层材料物理力学参数的具体特征取值见表 1。

表 1 小流域地质参数

Table 1 Geological parameters of small watershed

土层类型	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
马兰黄土	417	149	23	21.9	1.56
离石黄土	588	226	37	26.5	1.78

3.3 小流域重力侵蚀发育情况

模型在重力加载下运行 1 200 步时,最大不平衡力和平衡率均低于系统默认值,运算停止系统达到平衡状态。分别在梁峁顶和梁峁坡上部、下部及沟坡中部各典型位置选取多个监测点(图 2 中只列出代表性的 4 点),观察其位移变化规律以监测流域重力侵蚀发育情况。从图 2 各位置监测点位移变化图可以看出,各点的位移变化趋势相同,随着运算的继续,位移先快速增大至最高点,然后缓慢降低至某一值后基本维持不变。根据位移曲线变化规律,将位移从开始至最高点阶段定义为发育期,从最高点降至稳定值阶段定义为成熟期,从稳定值至平衡阶段定义为稳定期,从而将流域重力侵蚀划分为发育期、成熟期和稳定期 3 个阶段。针对流域模型不同空间

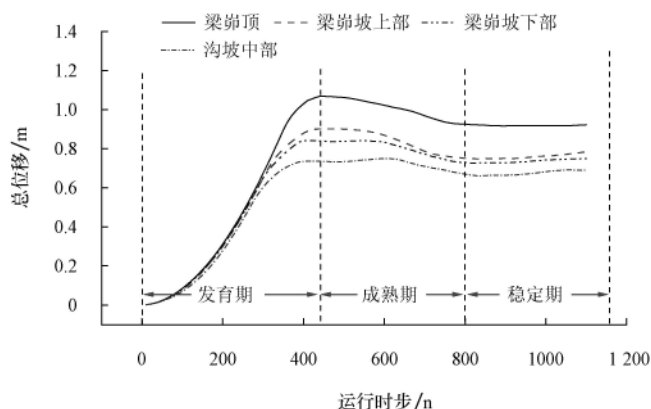


图 2 小流域监测点位移曲线

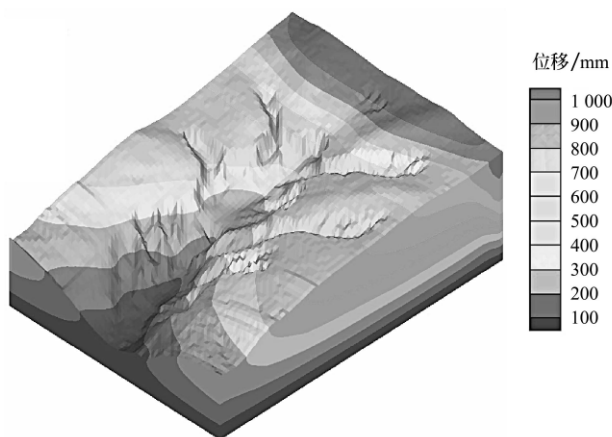
Fig.2 Displacement curves of small watershed at monitoring point

部位侵蚀强度及其与所处发育时段的关系规律,在小流域水土流失综合治理的实际工作中,可确定重点治理区域,为小流域侵蚀产沙的预报和流域各部位侵蚀强度以及发育阶段动态变化特征的研究提供一定的依据,推动流域侵蚀产沙时空规律研究的深入发展。

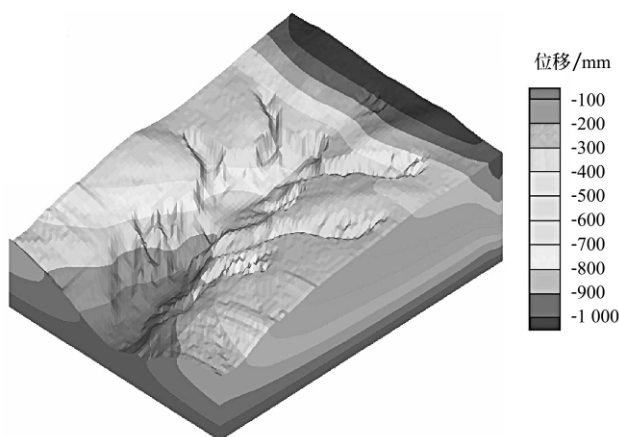
3.4 小流域位移场分布规律

系统达到平衡时,FLAC^{3D} 自动计算出处于平衡状态时模型各个方向位移的大小及其分布规律,如图 3 所示,图 3a 为小流域整体位移云图,图 3b~d 依次为竖直方向、水平方向和纵向方向位移云图。从总体位移云图来看,位移最大的部分均集中在梁峁顶和梁峁坡上部;竖直方向位移云图与总体位移云图相似,数值相近,且最大竖直位移也出现在梁峁顶和梁峁坡上部,这表明小流域位移是以“沉降”模式为主,而最大水平位移基本呈现对称状态出现在沟坡中下部的凹陷地带,并以此为中心,水平位移呈“同心圆”状逐渐减小向四周扩散。而流域其他部位的水平位移很小基本为零,这表明相对其他位置,沟坡处以水平方向变形突出,会朝沟底方向滑动,但水平方向的位移相对较小;纵向位移主要在梁峁顶和梁峁坡处较大,在坡底处位移基本为零,说明整个流域仍是以“沉降”模式为主。

从位移矢量图 4 可以看出,整个流域的位移矢量基本为垂直向下,验证了整个坡沟系统是以“沉降”模式为主的结论;并且在梁峁顶和梁峁坡处位移矢量相当密集,这表明重力侵蚀比较严重的地方多发生在梁峁顶和梁峁坡处,沟坡处的位移矢量有些呈现水平运动,表现出一些“剪切”的趋势,但幅度较小。各位移等值线形态表现为在边坡中上部呈半封闭状,都与坡面相交,且等值线拐点与坡面的距离较远;在下部则表现为与边坡底部近乎平行,在近坡面处突然上翘。这表明该流域不可能发生从其中上部剪出的浅层圆弧形破坏,而是发生从坡趾剪出的深层圆弧形破坏。依此可以确定沟头溯源区是小流域侵蚀最强烈的部位,流域上部成为主要侵蚀区,在配置坡面水土保持工程措施和生物措施的时候要有针对性的进行重点防护,使小流域土壤侵蚀降低到最低限度。



a. 总体位移云图



b. 竖直方向位移云图

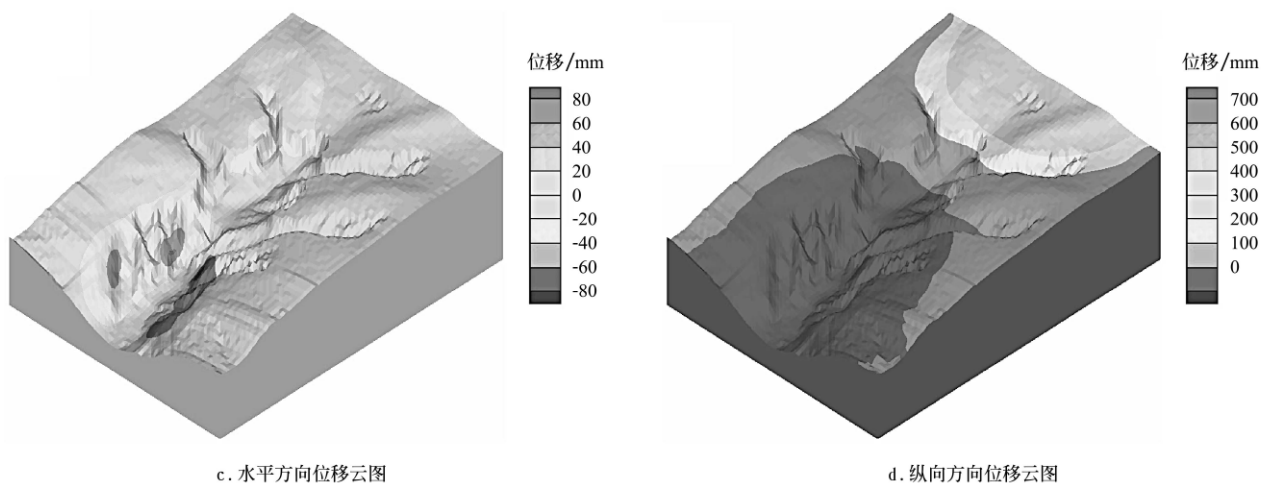


图 3 小流域各方向位移云图

Fig.3 Displacement nephograms of small watershed for each direction

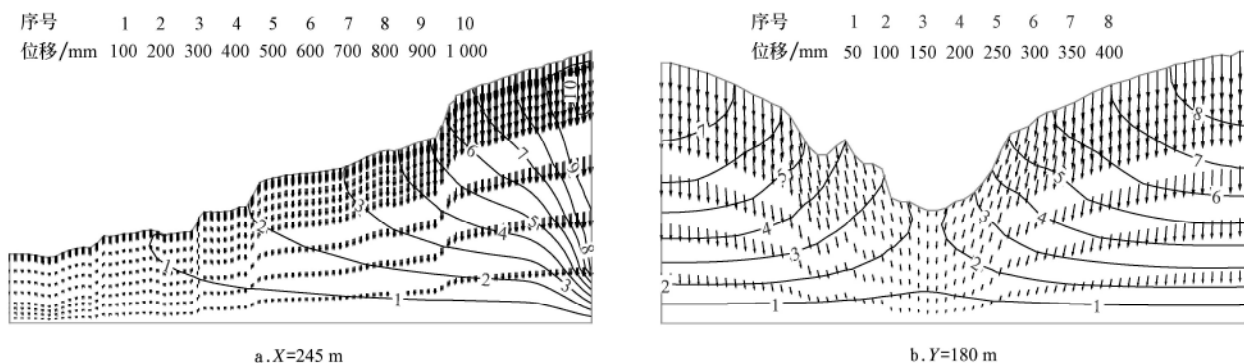


图 4 小流域各剖面位移矢量及等值线图

Fig.4 Displacement vector graph and contour map of each section of mall watershed

3.5 小流域应力场分布规律

采用 $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 软件计算出流域模型达到平衡状态时的应力的大小及其分布规律, 如图 5 所示。图 5a 和 b 分别为小流域第一主应力和第三主应力云图 ($\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 中以拉应力为正, 压应力为负, 故以绝对值的大小判定第一主应力和第三主应力)。从边坡主应力云图来看, 未出现拉应力区, 基本上以压应力为主, 即若发生破坏, 是以“压—

剪”破坏模式为主。最大主应力(压应力), 基本顺着坡面方向, 并一直延伸到坡脚, 这对坡沟稳定性不利。主应力等值线平滑, 几乎相互平行, 很少出现突变, 仅在土体分界面附近区域和凹形处产生不甚明显的应力集中效应, 这些都表明边坡深部土体主要受竖直方向的压应力作用, 体现为受压屈服; 凹形边坡总体几何形态能够有效降低小流域的应力集中, 从而减缓了重力侵蚀的发生程度。

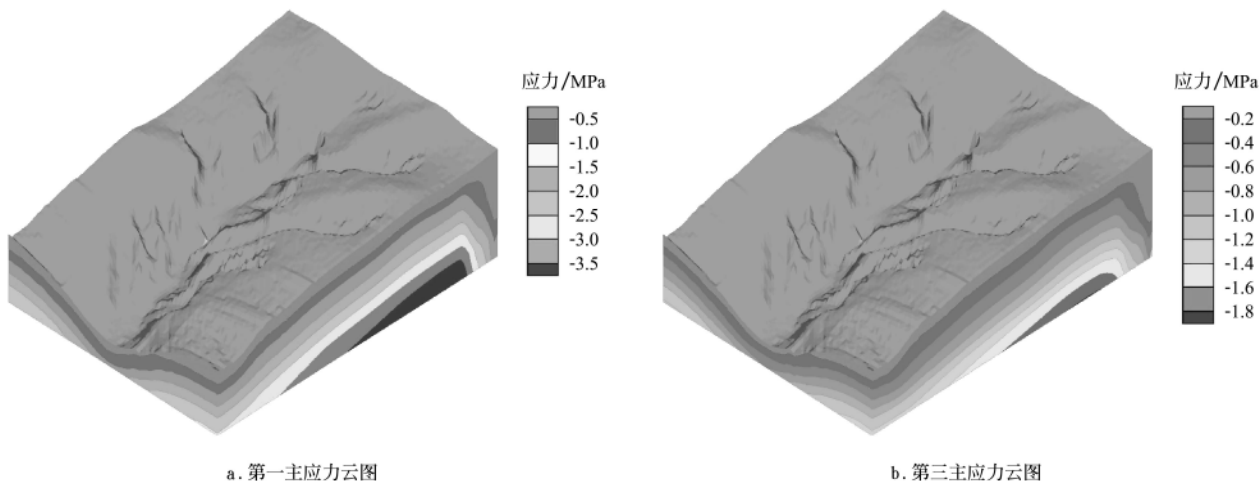


图 5 小流域第一主应力和第三主应力云图

Fig.5 First and third main stress nephograms of small watershed

4 结 论

重力侵蚀是黄土沟壑区土壤侵蚀的重要组成部分,其发生条件及侵蚀量受多种因素制约且具有一定随机性。本研究以土壤侵蚀学、土力学等学科为基础,采用有限差分 FLAC^{3D} 数值模拟软件对黄土高原小流域重力侵蚀机理进行探索,得出以下结论:

1) 将地理信息系统可视化 Surfer 软件结合 FLAC^{3D} 内置的 fish 语言在初始单元模型基础上编写了前处理程序,实现了对多层复杂地形建模的二次开发。该处理方法较好地克服了 FLAC^{3D} 建立较复杂计算模型的困难,成功地实现了建模过程,建模实例表明建立的三维模型能真实地表现小流域地形、地貌,仿真效果良好。

2) 以监测点位移变化趋势观测流域重力侵蚀发育情况,将小流域重力侵蚀划分为发育期、成熟期和稳定期 3 个阶段。针对流域模型不同空间部位侵蚀强度及其与所处发育时段的关系规律,在小流域水土流失综合治理的实际工作中确定重点治理区域;可对小流域侵蚀产沙预报提供一定的依据,为研究流域各侵蚀部位侵蚀强度及其随流域所处发育阶段的动态变化特征提供科学依据。

3) 整个流域位移是以“沉降”模式为主,最大位移出现在梁峁顶和梁峁坡上部;最大水平位移基本呈现对称状态出现在沟坡中下部的凹陷地带,相对其他位置,沟坡处以水平方向变形为主,会朝沟底方向滑动,但位移相对较小。

4) 重力侵蚀比较严重的地方多发生在梁峁顶和梁峁坡处,沟坡处的位移矢量有些呈现水平运动,表现出一些“剪切”的趋势,但幅度较小;流域不可能发生从其中上部剪出的浅层圆弧形破坏,而是发生从坡趾剪出的深层圆弧形破坏。沟头溯源区是小流域侵蚀最强烈的部位,流域上部是整个流域的主要侵蚀部位。

5) 小流域应力场规律分析表明,边坡内部应力主要是由边坡岩土体自重产生,内部土体的屈服以“压—剪”屈服模式为主;凹形的边坡总体几何形态有助于降低坡底应力集中,利于边坡稳定,从而减缓了重力侵蚀的发生程度。

建立复杂地形的小流域概化模型,从数值模拟的定量角度出发,将流域重力侵蚀发育情况进行划分,进行位移场和应力场分析,对重力侵蚀发育规律产开机理性研究,为小流域水土保持工程措施配置及生物措施的开展提供有益的参考,为推动流域侵蚀产沙时空规律研究的深入发展以及小流域水土流失综合治理和生态环境建设提供科学依据。

[参 考 文 献]

- [1] 韩鹏,倪晋仁,王兴奎. 黄土坡面细沟发育过程中的重力侵蚀实验研究[J]. 水利学报, 2003, (1): 51—55.
Han Peng, Ni Jinren, Wang Xingui. Experimental study on gravitational erosion process[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, (1): 51—55. (in Chinese with English

abstract)

- [2] 高佩玲,雷廷武,邵明安,等. 小流域土壤侵蚀及径流过程自动测量系统的实验应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 164—166.
Gao Peiling, Lei Tingwu, Shao Ming'an, et al. Laboratory applications of an automated measuring system for soil erosion and runoff processes in small watershed[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 164—166. (in Chinese with English abstract)
- [3] 焦菊英,王万忠,李靖,等. 黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的淤地拦沙效益分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 302—306.
Jiao Juying, Wang Wanzhong, Li Jing, et al. Silting land and sediment blocking benefit of check dam in hilly and gully region on the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 302—306. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王光谦,薛海,李铁键. 黄土高原沟坡重力侵蚀的理论模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(4): 335—344.
Wang Guangqian, Xue Hai, Li Tiejian. Mechanical model for gravitational erosion in gully area[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(4): 335—344. (in Chinese with English abstract)
- [5] Bagnold R A. An approach to the sediment-transport problem from general physics[R]. Washington: U S Govt Print Off, 1966: 422—437.
- [6] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology[J]. Transaction of the ASAE, 1977, 20(6): 1100—1104.
- [7] 崔灵周,李占斌,朱永清,等. 流域侵蚀强度空间分异及动态变化模拟研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 17—22.
Cui Lingzhou, Li Zhanbin, Zhu Yongqing, et al. Simulation of the spatial differentiation and dynamic variation of watershed erosion intensity[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 17—22. (in Chinese with English abstract)
- [8] 高鹏,刘作新,邹桂霞. 丘陵半干旱区小流域土地资源定量评价研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 298—301.
Gao Peng, Liu Zuoxin, Zou Guixia. Quantitative evaluation of land resources of small watershed in hilly semi-arid area of China[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 298—301. (in Chinese with English abstract)
- [9] Nachtergaele J, Poesen J, Vandekerck hove L, et al. Testing the ephemeral gully erosion model (CEGEM) for two mediterranean environment[J]. Earth Surface Process and Landforms, 2001, 26: 17—30.
- [10] Mellah R, Auvinet G, Masrouri F. Stochastic finite element method applied to non-linear analysis of embankments[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2001, 15(3): 251—259.
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC^{3D}(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-Dimensions), Version 3.0, User's Manual[M]. USA: Itasca Consulting Group, Inc. 2005.
- [12] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835—840.

Numerical simulation on gravitational erosion of small watershed system in Loess Plateau

Yu Guoqiang¹, Li Zhanbin^{1,2}, Li Peng¹, Zhang Xia³, Zhou Binghua¹, Zhao Hongbin⁴

(1. Northwest Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

3. Research and Design Institute of Environmental Science of Shaanxi Province, Xi'an 710061, China;

4. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To study the mechanism of gravitational erosion, pre-treatment program for modeling of complex multilayered terrain using fish language was compiled and the modeling was developed secondly. The finite difference software Flac^{3D} was used to study the mechanism of gravitational erosion, to analyze the development process of gravitational erosion, and to numerical simulate on displacement field and stress field of small watershed in Loess Plateau concerning on the mechanical stabilization. The results showed that the three-dimensional model established could factually demonstrate topography and geomorphology of the small watershed and had good simulation effectiveness. The process of gravitational erosion was divided into three stages, the development stage, maturity stage and stable stage. Gravitational erosion of the traceability area was the most serious; the geometric shape of concave slope conducted to the stability that slowing down the occurrence degree of gravitational erosion. The modeling method and numerical simulation results could be applied to study gravitational erosion that offer scientific basis for the deeply promoting the development of erosion and sediment yield time-space law and comprehensive controlling soil erosion of small watershed and constructing the ecological environment.

Key words: erosion, modeling, geomorphology, small watershed