

iGeoLab.LS-RAPID

用户手册

版本 V1.0

中仿公司

www.igeo.cn · 400 888 5100

目　　录

前言 5

第 1 章　安装与启动 6
1.1　系统要求 6
1.2　安装 6
1.3　启动与起始页 7
1.4　先跑一个示例 7
1.5　文件放在哪里 7

第 2 章　界面 8
2.1　主窗口 8
2.2　流程条 9
2.3　本步要做 9
2.4　模型树与属性 9
2.5　绘图工具条与「画成」 10
2.6　图层面板与叠放次序 11
2.7　图区的操作 12
2.8　状态栏、消息记录与找功能 13
2.9　撤销、自动保存与拖放 13
2.10　界面字号与窗口 14
2.11　快捷键 14

第 3 章　工程与文件 15
3.1　算例文件 15
3.2　算例设置一览 15
3.3　工程包 15
3.4　默认设置与系统环境 15
3.5　关于本程序 16

第 4 章　地形与坐标 17
4.1　导入地形栅格（ASC / GeoTIFF） 17
4.2　下载全球地形 18
4.3　DXF 地形 19
4.4　倾斜摄影模型与点云 20
4.5　控制点与网格文本 21
4.6　模拟区设定 21
4.7　算例坐标系 22
4.8　底图与地理配准 22
4.9　地形的显示 23

第 5 章　滑体与对象 25
5.1　圈范围生成滑体 25

5.2 椭球滑面 26
5.3 由栅格给滑体 27
5.4 源区与扩展 / 侵蚀区 27
5.5 分区栅格表 28
5.6 从文件导入分区多边形 28
5.7 材料分区 29
5.8 挡坝、障碍物与拦挡网 29
5.9 削填恢复地形 30
5.10 测点与剖面 30
5.11 实测对比资料 30

第 **6** 章 模型、材料与参数 **31**
6.1 选求解器 31
6.2 内置求解器的方程 31
6.3 土性参数（全域） 32
6.4 底面阻力本构 33
6.5 沿程侵蚀 34
6.6 逐网格土性 34
6.7 材料与指派 35
6.8 参数库 36
6.9 r.avaflow 的参数 36
6.10 自定义脚本（二次开发） 37

第 **7** 章 触发与释放 **39**
7.1 模拟工况 39
7.2 孔隙水压力 39
7.3 地震 40
7.4 降雨与由降雨推算孔压 40
7.5 入流过程线 41
7.6 降雨产流 42
7.7 溃坝与堰塞湖溃决 43
7.8 分批释放（r.avaflow） 43

第 **8** 章 计算 **45**
8.1 计算条件 45
8.2 时间步 46
8.3 其他条件 47
8.4 计算输出设置 48
8.5 检查算例 49
8.6 开始、暂停与监视 49
8.7 判停 50
8.8 编译内核与分块计算 50
8.9 多浪涌接续模拟 50

8.10 命令行批量计算 51
第 **9** 章 结果 **52**
9.1 选量与图面 52
9.2 播放与动画 53
9.3 此处全部数值（识别） 53
9.4 测点时程 54
9.5 过线流量 55
9.6 结果剖面 56
9.7 区域堆积统计 56
9.8 断面 56
9.9 三维视图 57
9.10 时程与纵断面视图 58
9.11 运行摘要与报告 58
9.12 与实测对比 59
9.13 算例对比 60
9.14 结果管理器 60
9.15 导出 61
9.16 把堆积并入地形 61
第 **10** 章 研究工具 **62**
10.1 参数敏感性 62
10.2 参数反演与可辨识性 62
10.3 参数不确定性分析（蒙特卡洛） 63
第 **11** 章 数据互通与自动化 **64**
11.1 LS-RAPID 工程 64
11.2 r.avaflow 工程 64
11.3 GIS 与三维展示 64
11.4 脚本与命令行 64
第 **12** 章 案例教程 **65**
12.1 案例一 降雨型滑坡 65
12.2 案例二 地震型滑坡 67
12.3 案例三 沟道泥石流（入流过程线） 68
12.4 案例四 弃渣场失事影响范围分析 71
附录 **A** 快捷键 **89**
附录 **B** 文件类型 **90**
附录 **C** 单位与坐标 **91**
附录 **D** 术语 **92**
附录 **E** 参考文献 **93**

前言

iGeoLab.LS-RAPID 用于模拟滑坡、碎屑流与泥石流的起动、运动与堆积。本手册按操作顺序说明程序的全部功能：第 1–3 章是安装、界面与文件；第 4–8 章按「地形 → 对象 → 模型与材料 → 触发与释放 → 计算」的建模次序展开；第 9–11 章是结果、研究工具与数据互通；第 12 章是四个从头做到尾的案例教程，每一步都写明点哪里、填什么、应看到什么；附录列出快捷键、文件类型、单位与术语。

阅读约定：

- 〔……〕表示界面上的菜单项、按钮、页签或对话框标题，例如〔文件 → 导入 → 地形栅格 ASC / GeoTIFF…〕；
- 操作步骤用「1．2．3．」编号，按顺序做；
- 单位一律为米、秒、kPa、kN/m³；平面坐标为以米计的投影坐标；
- 示例文件在「文档」文件夹的 **iGeoLab.LS-RAPID\examples** 里（首次启动时程序自动放好），案例教程直接用它们。

第 1 章　安装与启动

1.1　系统要求

表 **1-1**　系统要求

项目	要求
操作系统	Windows 10 / 11（64 位）
内存	建议 8 GB 及以上；网格越大、记录的时刻越多，占用越多，开算前程序会估算并提示
磁盘	程序与示例约 600 MB；计算结果按网格与帧数另计
显示	1366 × 768 及以上，支持高 DPI；界面字号可调（2.10 节）
显卡	快速三维查看用显卡绘制，支持 OpenGL 3.2 及以上

1.2　安装

程序以安装程序发布，运行所需的组件全部包含在内：求解器、编译内核、点云与倾斜摄影读取、快速三维查看，安装后即可使用。

1. 双击 **iGeoLab.LS-RAPID_Setup_V1.0.exe**。默认装到全机可用的 Program Files；没有管理员权限时，在选择安装模式的窗口点〔仅为我安装〕。
2. 选择向导的语言（简体中文 / English），按〔确定〕。
3. 选择安装位置（默认 `C:\Program Files\iGeoLab.LS-RAPID V1.0`），点〔下一步〕。
4. 选择附加任务：〔创建桌面快捷方式〕、〔双击 .lscase 算例文件时用本程序打开〕，点〔下一步〕，再点〔安装〕（图 1-1）。
5. 安装完成后可勾选〔运行 iGeoLab.LS-RAPID〕立即启动；以后从桌面快捷方式、开始菜单，或双击任意 .lscase 文件启动。

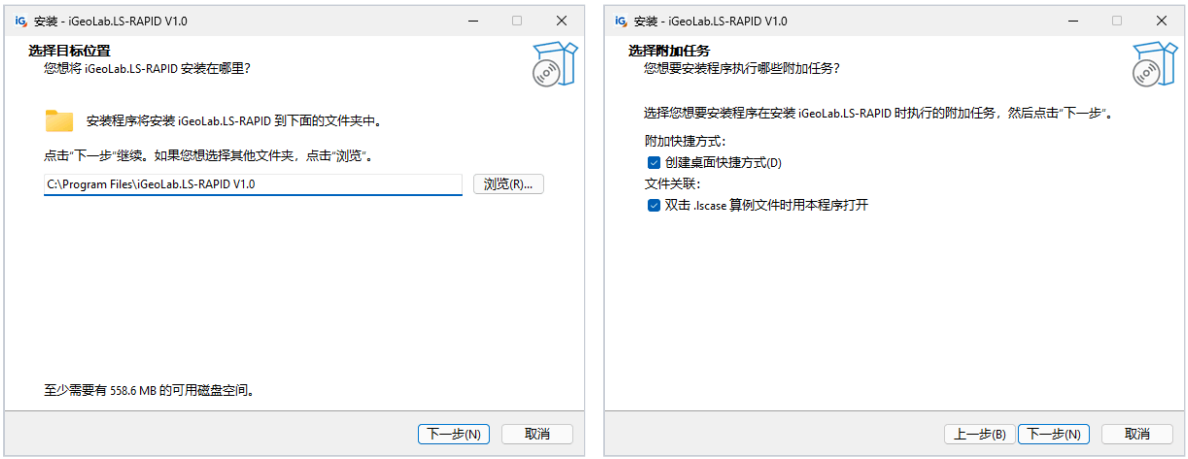

图 **1-1**　安装向导：（左）选择安装位置（右）选择附加任务

卸载：Windows〔设置 → 应用〕里选 iGeoLab.LS-RAPID V1.0，或开始菜单的〔卸载 iGeoLab.LS-RAPID V1.0〕。用户自己的算例、结果与「文档」里的示例不会被删除。

1.3　启动与起始页

启动后还没有算例时，绘图区显示起始页（图 1-2）：左列打开示例或已有算例，右列从不同来源的地形新建算例，下面是最近打开的文件。也可以把算例、结果、地形栅格或工程包直接从资源管理器拖到窗口上。

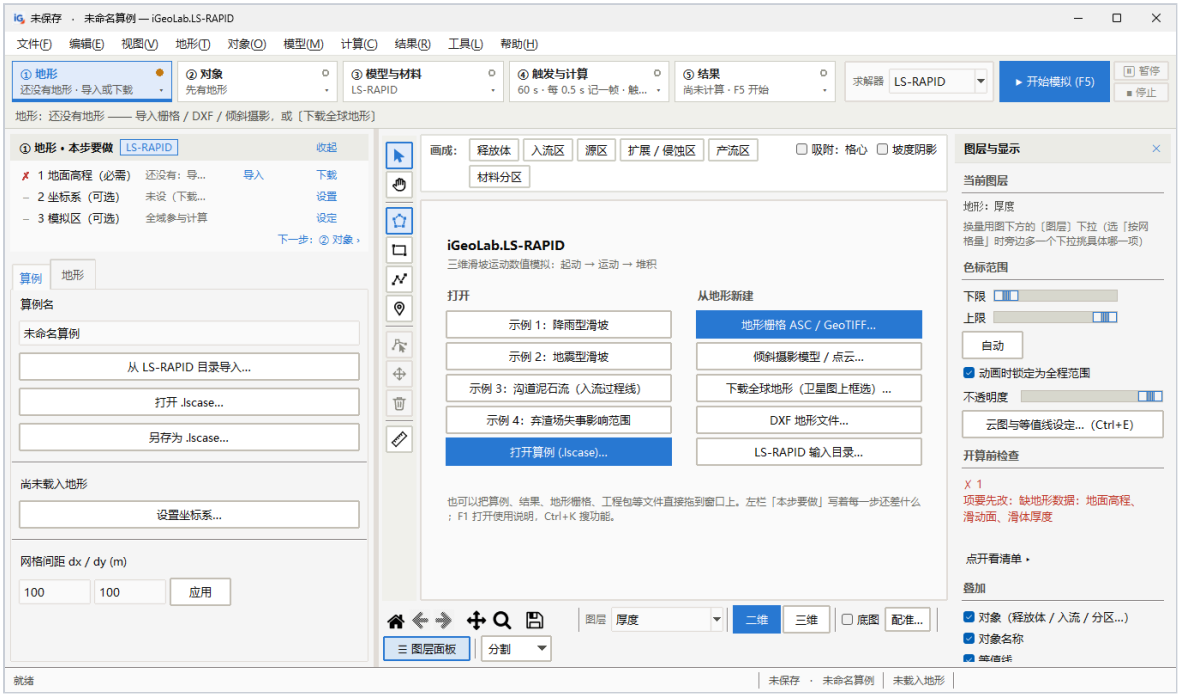

图 **1-2**　起始页：示例、打开算例、从地形新建

1.4　先跑一个示例

1. 在起始页点〔示例 1：降雨型滑坡〕。绘图区出现地形、卫星影像与滑体。
2. 点流程条右边的〔开始模拟 (F5)〕。计算过程中图面随时间更新，状态栏写着模拟时刻、已用时间与当前最大速度。
3. 算完后图下出现时间轴：拖动滑块或按空格播放；点〔全程最大〕看每格达到过的最大值。
4. 点流程条的〔⑤ 结果〕，左栏列出测点时程、过线流量、结果剖面、报告等分析工具（第 9 章）。

> 提示：第一次计算时程序会编译一次计算内核（约一分钟），编译结果存在磁盘上，之后每次启动即用。编译在后台进行，不影响操作。

1.5　文件放在哪里

- 算例、结果、导出文件：放在你指定的文件夹；
- 设置、最近打开列表、自动保存副本、在线底图与地形瓦片缓存：`%LOCALAPPDATA%\iGeoLab\LS-RAPID`；
- 日志：同一目录的 logs 文件夹，〔帮助 → 打开日志文件夹〕直接打开。

第 2 章 界面

2.1 主窗口

主窗口由九个部分组成（图 2-1）。

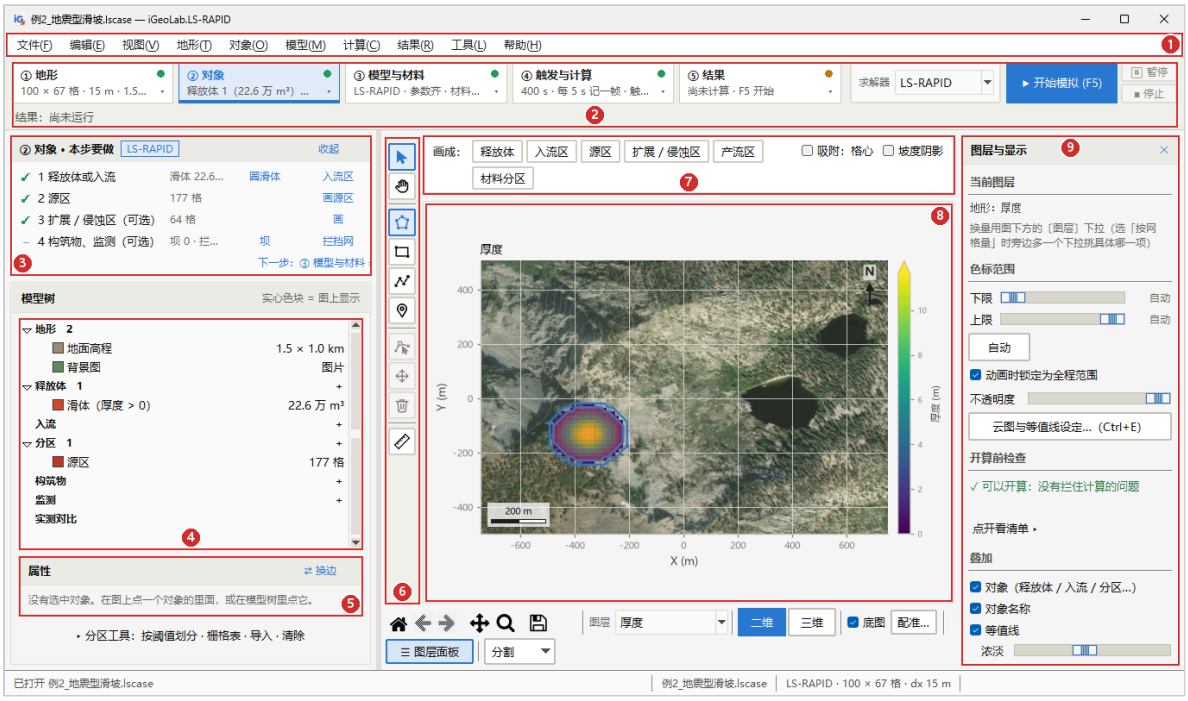

图 2-1 主窗口的组成

表 2-1 主窗口各部分

编号	名称	作用
1	菜单栏	文件、编辑、视图、地形、对象、模型、计算、结果、工具、帮助十个菜单，覆盖全部功能
2	流程条	五张步骤卡片、求解器下拉、〔开始模拟〕〔暂停〕〔停止〕；下面一行写当前还差什么或计算进度
3	本步要做	按当前步骤与求解器列出要做的事，右边的按钮直接去做
4	模型树	算例里的对象：地形、释放体、入流、分区、构筑物、监测、实测对比（第 ② 步）
5	属性	选中对象的名称、摘要与可改的参数
6	绘图工具条	选择、平移、多边形、矩形、折线、点、编辑顶点、移动、删除、测距
7	「画成」一行	选了画法之后，选要画成哪一类对象；右边是〔吸附：格心〕与〔坡度阴影〕
8	图区	平面图、剖面图、三维图与时程图；图下是时间轴与视图控件
9	图层面板	当前图层、色标范围、叠加开关、叠放次序、底图与开算前检查

2.2 流程条

五张卡片对应建模与分析的五步：① 地形、② 对象、③ 模型与材料、④ 触发与计算、⑤ 结果。卡片上写着这一步的现状，右上角的点表示状态。



图 **2-2** 流程条

- 实心绿点：这一步齐了；实心橙点：当前该做或有提醒；空心灰点：还没轮到；
- 点卡片：左栏换成这一步的内容，卡片以浅蓝高亮；图区不变；
- 卡片右下角的 ▾（或在卡片上点右键）：列出这一步的全部操作，当前求解器用不到的置灰；
- 求解器下拉：随时可换（6.1 节）；
- 计算时卡片下面一行显示模拟时刻、已用时间、预计还要多久与当前最大速度。

2.3 本步要做

左栏最上面的「本步要做」按先后列出当前这一步要做的几件事：√ 已齐、✗ 必需但还没有、！需要看一眼、– 可选；每行写着现状，右边的按钮直接打开对应的功能。当前求解器用不到的事不列出。〔收起〕可以收起面板（会记住）。



图 **2-3** 「本步要做」

2.4 模型树与属性

第 ② 步的左栏是模型树：凡是在图上画出来或导入的范围都成为带名字的对象，按类别列出。



图 **2-4**　模型树与选中对象的属性

- 点名称前的色块：在图上显示 / 隐藏这个对象；
- 组名右边的「＋」：新建这一类对象并直接开始画；双击名称：改名；
- 右键对象：缩放到它、打开它的设置、隐藏、改名、删除；
- 选中对象后，「属性」显示名称（可改）、摘要与几何；下面每个求解器一节，当前求解器那一节的数可直接改，回车生效，可撤销；
- 属性面板可停到图的另一侧：点标题右端的〔换边〕，或按住标题拖到另一侧松手。

2.5　绘图工具条与「画成」

绘图工具条在图的左边。先选一种画法，图上方「画成」一行就列出能画成的类别，点一类即开始画。

表 **2-2**　绘图工具条

按钮	作用
选择	点图上的对象以选中；选中后显示顶点
平移	按住左键拖动图面
多边形	逐点圈范围，双击或 Enter 闭合；可画成释放体、入流区、源区、扩展 / 侵蚀区、产流区、材料分区
矩形	点两个对角
折线	逐点画线，双击或 Enter 结束；可画成坝、拦挡网、剖面、过线流量
点	放一个点；可画成测点
编辑顶点	拖顶点改形状，点边加一个顶点，右键删一个顶点
整体移动	按住对象里面拖动
删除	删除选中的对象
测距	量长度、面积、高差与坡度

- 画的途中：Backspace 退一点，Esc 放弃，双击或 Enter 完成；
- 〔吸附：格心〕：画的点落在格心上；〔坡度阴影〕：在图上叠加坡度阴影，便于看沟和坡；
- 在图上右键对象：编辑顶点、整体移动、改名、复制、设为另一类、缩放到它、删除。

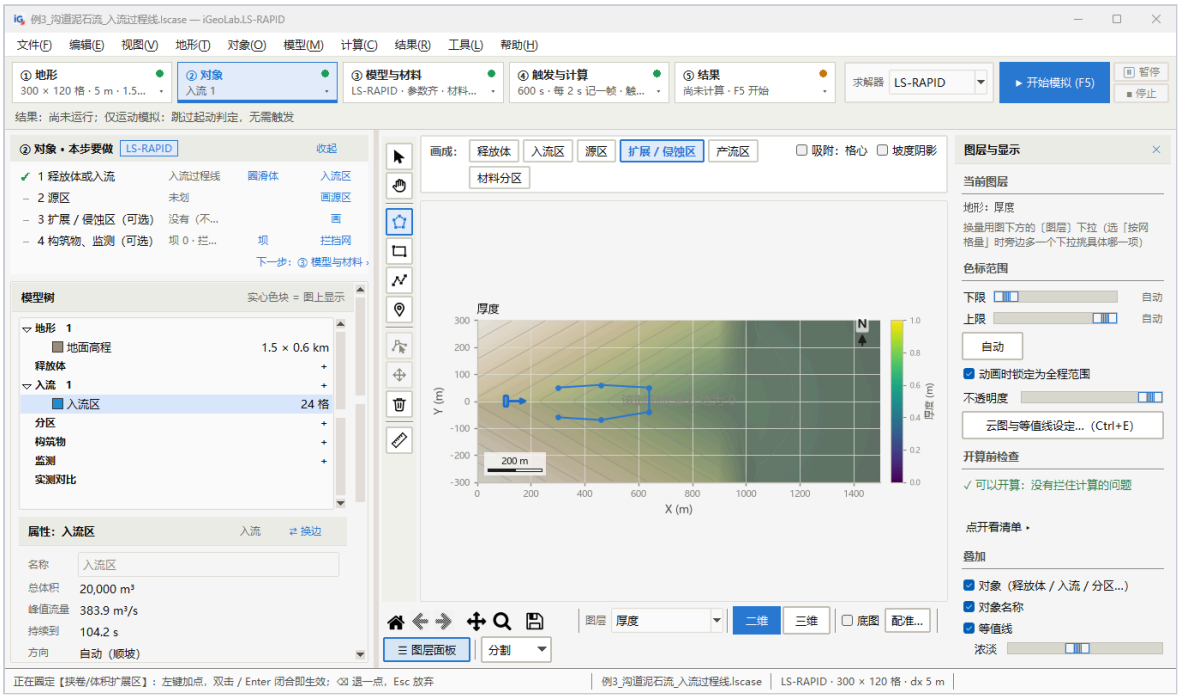

图 **2-5**　正在画一个扩展 / 侵蚀区（例 **3**）

2.6　图层面板与叠放次序

右侧的图层面板（Ctrl+L 显示 / 收起）集中了「画什么、怎么画」：

- 当前图层：正在画的量；换量用图下方的〔图层〕下拉，选了〔按网格量〕时旁边多一个下拉选具体画哪一项；
- 色标范围：上下限滑块，〔自动〕恢复按数据定标；〔动画时锁定为全程范围〕让各帧颜色可比；
- 不透明度：云图、等值线、底图各一条；〔云图与等值线设定…〕打开完整设置（Ctrl+E）；
- 叠加：对象、对象名称、等值线、坐标轴与格网、比例尺与指北针、计算网格线、滑面作底、控制点、源区 / 扩展区边界、实测范围、流速箭头；
- 叠放次序：底图、云图、等值线、分区与设施、流速箭头五层，列表上面的盖住下面的；选一层用〔↑〕〔↓〕（或 Alt+↑ / Alt+↓）挪动，〔恢复默认次序〕回到默认；
- 开算前检查：能不能开算、有几条提醒，点〔点开看清单〕看全部（8.5 节）。



图 **2-6** 图层面板

2.7 图区的操作

- 滚轮：以光标为中心缩放；左键拖动：平移；双击：复位到全域（Ctrl+0）；三维视图里左键旋转、滚轮缩放；
- 右键：弹出此处的菜单 —— 此处全部数值、此处时程、从这里画结果剖面 / 过线流量、复制坐标；点在对象上时列出对象的操作；
- Ctrl+I：识别。之后左键点哪里，就列出那一格的地形、分区、逐格参数、当前帧、全程最大与到达时刻；Esc 退出；
- 图下方的控件：工具（主页、前进后退、平移、放大、保存图片）、〔图层〕下拉、〔二维〕〔三维〕、〔底图〕〔配准...〕、〔☰ 图层面板〕、〔分割〕。

2.7.1 时间轴

有结果时图下多一条时间轴：⏮ ◀ ▶ ▶| ⏭ 与滑块。空格播放 / 暂停，← / → 逐帧，Home / End 首末帧；〔全程最大〕把当前量换成每格达到过的最大值；〔⋯〕里是播放速度、循环与导出动画。



图 **2-7** 时间轴

2.7.2 分割窗口

〔分割〕可把图区分成左右或上下两格，各画各的量：例如左边平面图、右边时程或纵断面，两边按同一时刻联动。点哪一格，下方控件就操作哪一格；〔两图对调〕互换。

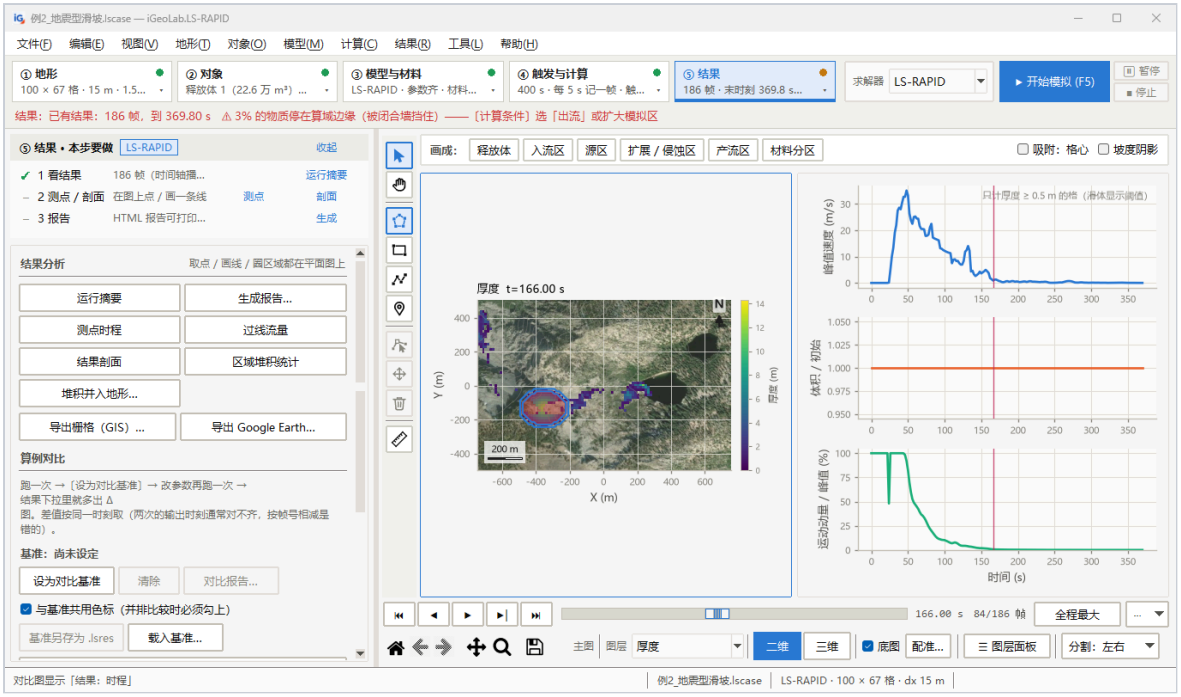

图 **2-8** 分割窗口：左边平面图，右边时程，竖线是当前时刻

2.8 状态栏、消息记录与找功能

- 状态栏左侧显示操作提示与光标处的坐标、数值；消息太长时悬停看全文，点一下打开消息记录；
- 〔帮助 → 消息记录…〕列出本次运行说过的每一句，警告标红；
- 〔帮助 → 找功能 / 跳转到…〕（Ctrl+K）：输入功能名、参数名或英文菜单名直接跳转。

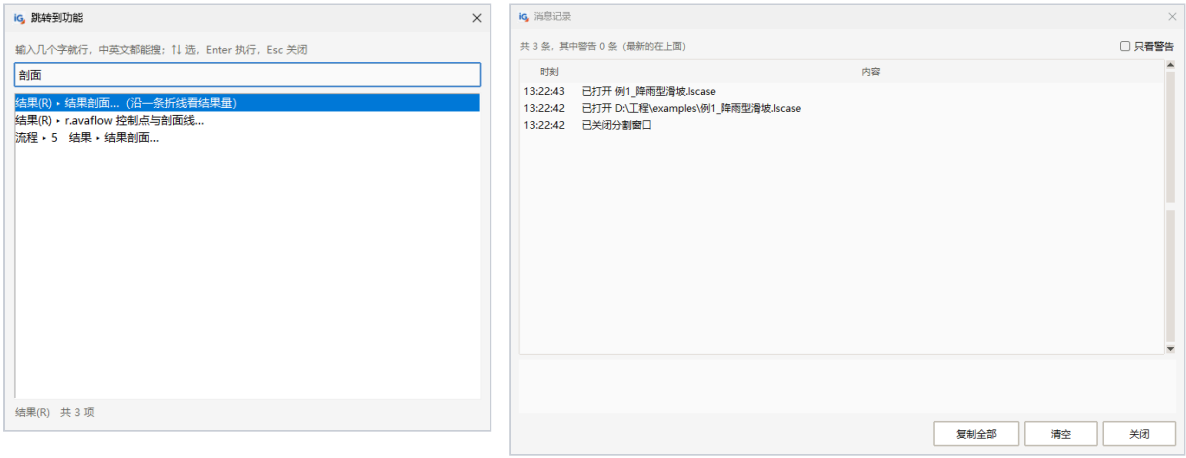

图 **2-9** （左）找功能（右）消息记录

2.9 撤销、自动保存与拖放

- 撤销 / 重做（Ctrl+Z / Ctrl+Y）：对网格数据、对象、参数与触发时程的改动最近 12 步可以退回；

- 自动保存：有未保存改动的算例每 5 分钟写一份副本到用户目录（间隔在〔模型 → 默认设置〕改）；打开算例时若副本比文件新，会提议恢复；
- 拖放：把 .lscase、.lsres、.lsproj、.asc、.tif、.dxf、.shp、.kml、.kmz、LS-RAPID 工程等直接拖到窗口上打开；
- 有未保存改动时标题栏前带「*」，新建、打开、导入与退出之前会先问。

2.10　界面字号与窗口

- 〔视图 → 界面字号〕：小 / 标准 / 大 / 特大，当场生效并记住；图上的字按同一倍数放大；
- 窗口大小、是否最大化、左栏宽度退出时记下，下次照原样打开；左栏与图之间的分隔条可拖。

2.11　快捷键

常用快捷键见附录 A　快捷键，也可在〔帮助 → 快捷键一览…〕查看。



图 **2-10**　快捷键一览

第 3 章　工程与文件

3.1　算例文件

一个算例由两个文件组成：`名称.lscase`（参数、触发、对象）与 `名称_fields.npz`（地形、滑面、厚度、分区与逐格参数）。移动或改名时两个文件一起改。同名的 `名称.lsview` 记着显示设置。

- 〔文件 → 新建〕（Ctrl+N）、〔打开…〕（Ctrl+O）、〔保存〕（Ctrl+S）、〔另存为…〕（Ctrl+Shift+S）、〔最近打开〕；
- 标识取自文件名：工况按文件名区分，例如「工况 A.lscase」「工况 B.lscase」。

3.2　算例设置一览

〔计算 → 算例设置一览…〕把网格、算域范围、模型参数、判停、入流过程线、拦挡网、触发时程列成一页，可复制、另存，便于记录与复现。



图 **3-1**　算例设置一览

3.3　工程包

〔文件 → 工程包 → 导出工程包 (.lsproj)…〕把算例、场数组、显示设置（可带当前结果与一段备注）打成一个文件，便于传递；〔打开工程包…〕解到旁边的同名文件夹并打开其中的算例。

3.4　默认设置与系统环境

〔模型 → 默认设置…〕：由地形新建算例时套用的模拟时长、记录间隔、判停、算域边界、曲率项、入流时启用的动量判停，以及泥石流起算值、自动保存间隔。〔模型 → 系统环境设定…〕：启动介绍窗口、三维视图与结果对话框的几个开关。



图 **3-2** （左）默认设置（右）系统环境设定

3.5 关于本程序

〔帮助 → 关于本程序〕显示版本号与联系方式；〔帮助 → 使用说明〕（F1）打开随程序的说明，在对话框里按 F1 直接跳到讲这个对话框的那一节。



图 **3-3** 关于本程序

第 4 章　地形与坐标

第 ① 步「地形」给出地面高程、坐标系与模拟区。地形可以来自栅格、DXF、倾斜摄影模型与点云、全球公开地形，也可以来自控制点与网格文本；同一个算例里还可以再导入滑动面或滑体厚度。

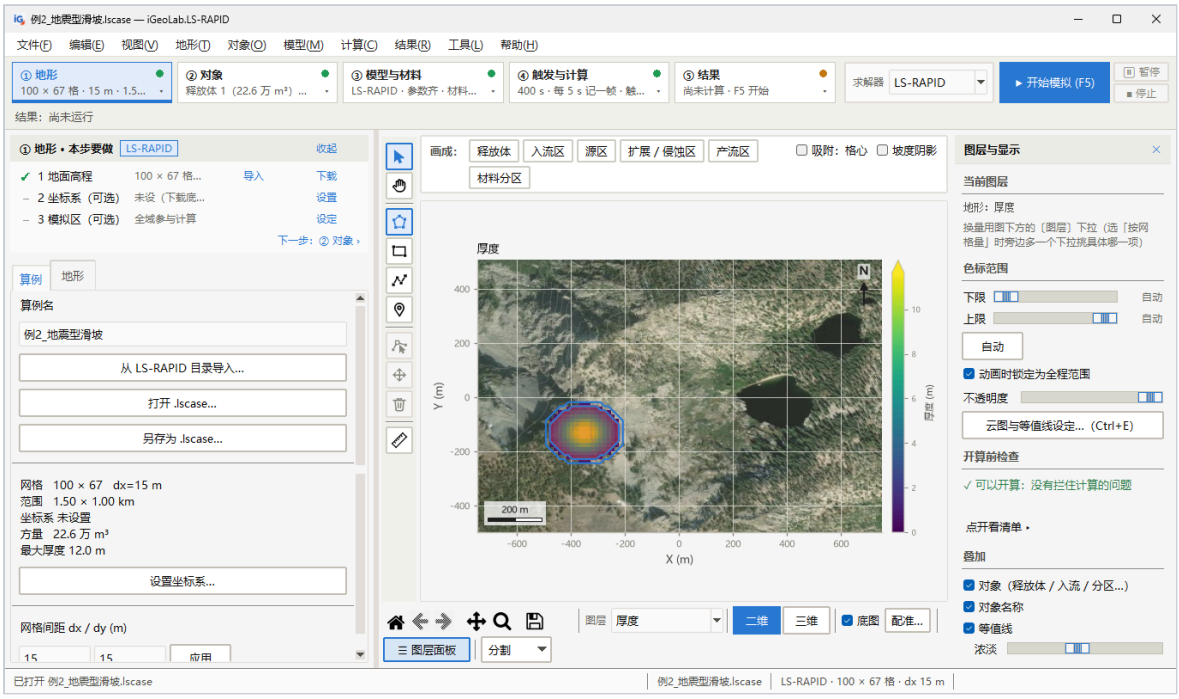

图 **4-1**　第 ① 步：左栏是算例与地形两页，图上是地形与背景影像

4.1　导入地形栅格（ASC / GeoTIFF）

〔文件 → 导入 → 地形栅格 ASC / GeoTIFF…〕（起始页与〔地形〕菜单也有），支持 ESRI ASCII Grid（.asc）与单波段 GeoTIFF（.tif，或带 .tfw 世界文件的 TIFF）。

1. 选择文件，弹出〔导入地形栅格〕：上面列出网格数、格距、坐标系、范围与高程；
2. 在「导入为」里选用途：新建算例：地面高程；已有算例时还可以选替换地面高程、滑动面高程、滑体厚度（按坐标取到当前算例的格心上）；
3. 新建算例时填格距（默认为原分辨率，改了按双线性重采样）；
4. 需要时填裁剪范围，或在右边的预览图上按住左键拖一个框；下面实时写出裁剪后的格数；
5. 有无数据的格时选择处理方式：先削去含无数据的边缘行列，内部空洞用周围的值补齐；或整片补齐；
6. 按〔确定〕。导入说明里写出投影、重采样与补齐的情况。

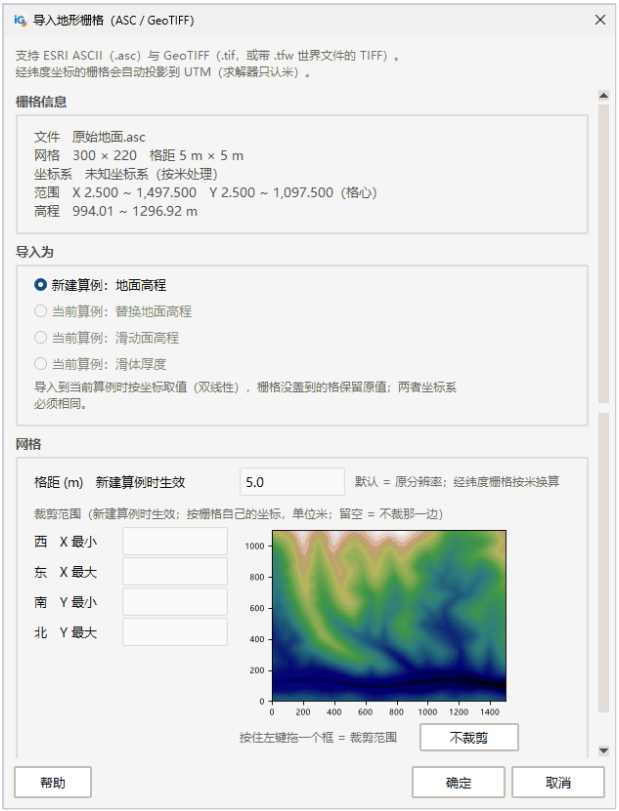

图 **4-2** 导入地形栅格

表 **4-1** 导入地形栅格的几项

项目	说明
坐标系	从 GeoTIFF 标签或同名 .prj 识别；经纬度栅格自动投影到所在的 UTM 带；识别不出时按米处理
格距	滑坡与泥石流模拟常用 2–30 m；网格上限 400 万格
裁剪	先裁再重采样，只取用得到的一块
滑动面 / 厚度	导入到当前算例：栅格没盖到的格保留原值，说明里给出覆盖率

4.2 下载全球地形

〔文件 → 导入 → 下载全球地形（卫星图上框选）…〕从公开的高程数据服务下载地形（需要联网），坐标自动投影到 UTM。

1. 找到地方：搜索框里输入地名（中文、英文、拼音）或坐标，回车，在候选里点一个；也可以直接拖动、缩放地图；
2. 框范围：点〔在图上框选〕后拖一个矩形（按住 Shift 拖或右键拖也可以）；框上有八个小方块与中心的 ✥，可改大小、整体移动；也可以直接填西东南北四个数，或填宽、高后点〔以视野中心建范围〕；
3. 范围一变，程序取一小块粗高程贴在框里（山体阴影与高程分色），并报出高程范围与平均坡度；
4. 选高程数据来源与格距；来源见 表 4-2，要密钥的来源在下面填密钥；

5．按〔确定〕：下载并建算例。勾选〔建好算例后把卫星影像铺成底图〕时自动铺上卫星影像。

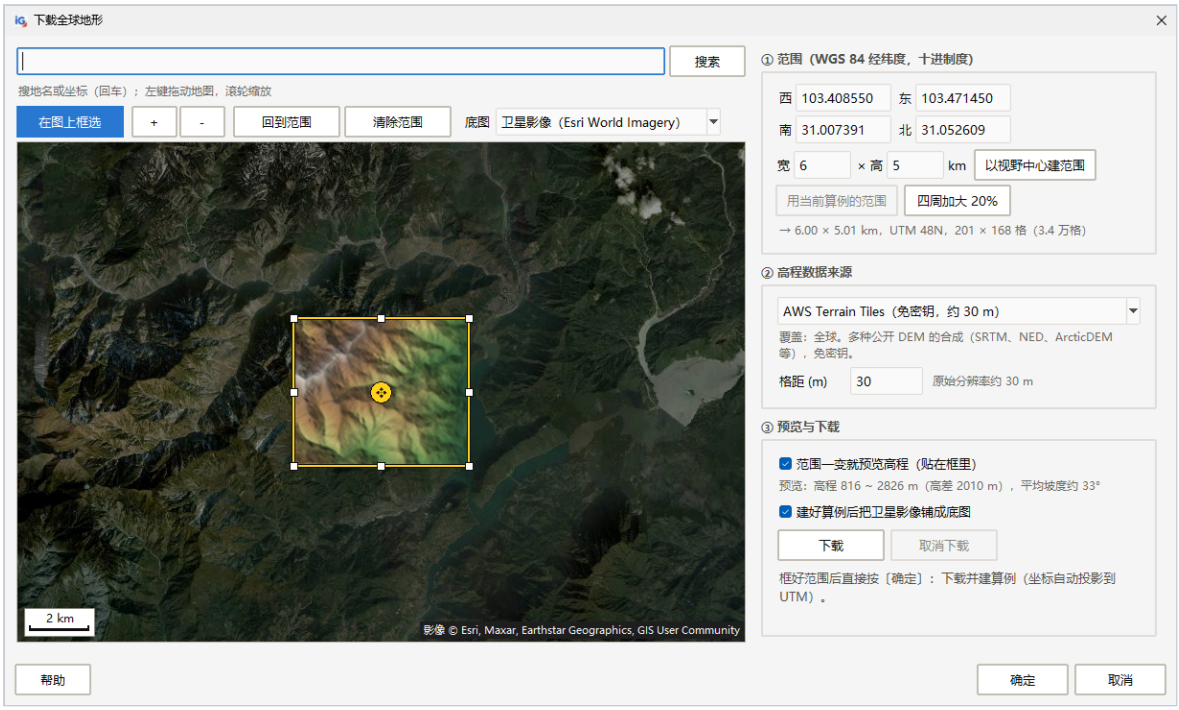

图 **4-3**　下载全球地形：左边在卫星图上框选，右边三步完成

表 **4-2**　高程数据来源

来源	分辨率	密钥
AWS Terrain Tiles（默认）	约 30 m	不需要
Copernicus GLO-30 / GLO-90	30 / 90 m	OpenTopography（免费申请）
NASADEM、SRTM GL1 / GL3、ALOS World 3D、SRTM15+	30 m – 500 m	OpenTopography（免费申请）
Mapbox / MapTiler Terrain-RGB	约 30 m	各自的密钥
自定义高程瓦片地址	由服务定	可选（地址里写 {z} {x} {y}，密钥写 {key}）

4.3　DXF 地形

〔文件 → 导入 → DXF 地形文件…〕由 DXF 里的网格面（MESH）、三维面（3DFACE）、点与多段线生成地形栅格。设 X、Y 间距与「最近点搜索距离」（格内没有点时向外回填的半径），点〔预览（生成 DEM）〕看直接覆盖率、回填格数与高程范围，满意后按〔确定〕。



图 **4-4**　由 **DXF** 生成地形

4.4　倾斜摄影模型与点云

〔文件 → 导入 → 倾斜摄影模型 / 点云…〕与〔倾斜摄影成果文件夹…〕把三角网（.obj、.ply、.osgb）或点云（.las / .laz、.ply、.xyz）从正上方取到规则网格上，作为地形。

1. 选择文件或成果文件夹。.osgb 瓦片按层级只读最细一层；文件夹里的各瓦片一起读；
2. 选朝上的轴（默认自动判断）、格距（留空 = 自动）、点云每格取平均 / 最高 / 最低；成果里有 metadata.xml 时可加回坐标原点与坐标系；
3. 点〔读取并预览〕看范围、高程与覆盖率，按〔确定〕后接着进〔导入地形栅格〕：在那里裁剪、补洞、选导入为新算例还是当前算例的地面。



图 **4-5**　导入倾斜摄影模型 / 点云

4.5　控制点与网格文本

- 〔文件 → 导入 → 地面 / 滑动面 / 滑体厚度控制点〕：每行一个点 X Y Z 的文本；〔控制点转网格…〕插值成网格；〔编辑 → 控制点编辑…〕在表格里改；
- 〔文件 → 导入 → 地面 / 滑动面 / 滑体厚度网格〕：逐格文本；〔文件 → 导出〕可把网格数据写回文本；
- 〔编辑 → 网格数据编辑〕：在表格里逐格改地面高程、滑动面高程与滑体厚度，框选一片可批量赋值，选区在图上同步高亮。

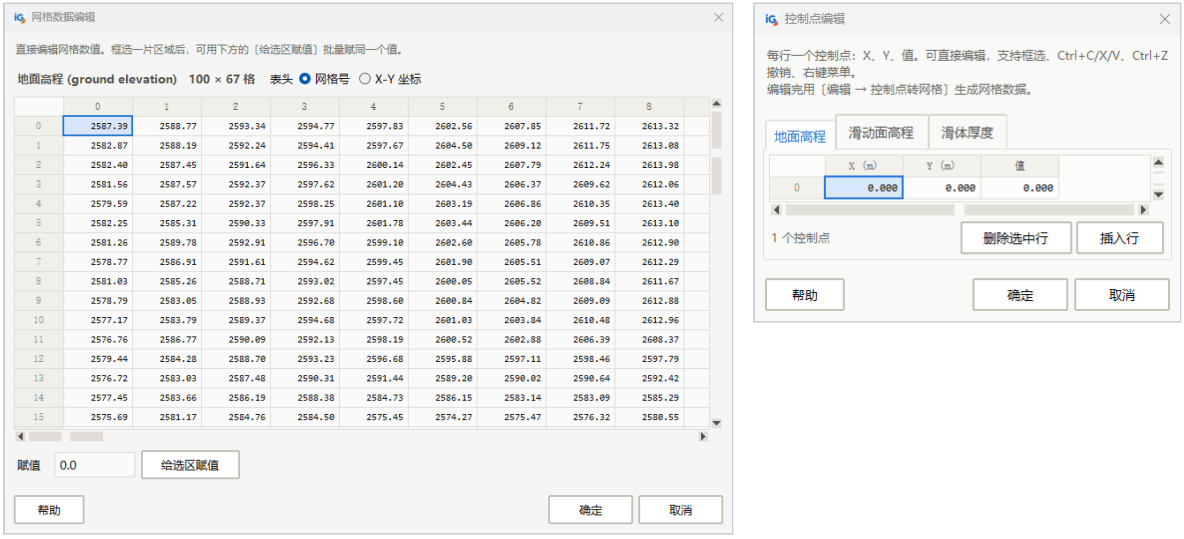

图 **4-6**　（左）网格数据编辑（右）控制点编辑

4.6　模拟区设定

〔编辑 → 模拟区设定与数据编辑…〕改模拟区的起点、间距与网格数；改网格数时地形、滑面、厚度、分区与逐格参数按坐标一起重采样。「输入数据类型」决定三个曲面（坡面、滑面、厚度）中哪一个由另外两个算出。



图 **4-7** 模拟区设定

4.7 算例坐标系

〔编辑 → 算例坐标系…〕填 UTM 带号与半球（例如东经 102°–108° 是 48 带）。导入带坐标的栅格或下载全球地形时自动记录。坐标系用于在线底图、导出到 Google Earth 与结果栅格的 .prj；填的时候会报出算例中心的经纬度，便于核对。



图 **4-8** 算例坐标系

4.8 底图与地理配准

- 在线底图（〔视图 → 在线底图〕）：卫星影像、街道图、地形图，按算例范围取瓦片铺在平面图下，三维视图里贴到地形面上；要求算例记有 UTM 坐标系；
- 自备影像（〔文件 → 背景图 / 卫星影像…〕）：带坐标的影像自动定位；普通图片填覆盖范围，或留空铺满全域；可设不透明度与在结果之下 / 之上；

- 地理配准（〔文件 → 地理配准…〕）：左边图片上点一个位置，右边地形图上点它对应的位置，成一对控制点；两对可拟合平移、旋转、缩放，三对可加不等比与剪切，四对以上可用投影变换；残差列在表里。



图 **4-9**　（左）卫星影像 / 背景图（右）地理配准

4.9　地形的显示

- 〔视图 → 地形显示设定…〕：等高线、网格线、坐标网格、滑面作底、控制点；滑体显示阈值（同时是峰值速度、冲击压力等统计的厚度门槛）、滑体放大倍数；三维里滑体画成面、球或线框；
- 〔视图 → 地形配色…〕：色带、晕渲的光源方位与高度、色标范围、自定义高程色带、水平面；
- 〔视图 → 云图与等值线设定…〕（Ctrl+E）：云图画法（网格块 / 平滑 / 填充等值线）、色带、分级数、不透明度、色标裁剪、等值线的层级、线色与标注，右边实时预览；
- 〔视图 → 视点设定…〕：平面图的视野中心与缩放、三维的俯仰 / 横滚 / 方位，可登记 5 组视点随时调用。

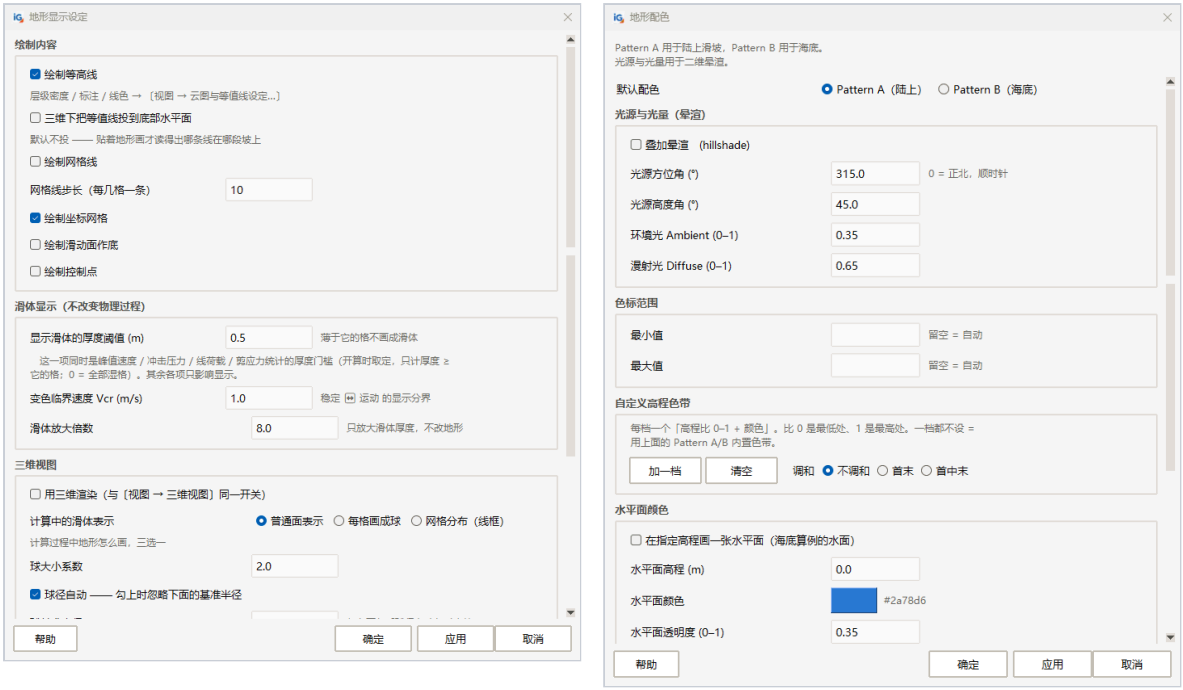

图 **4-10** （左）地形显示设定（右）地形配色

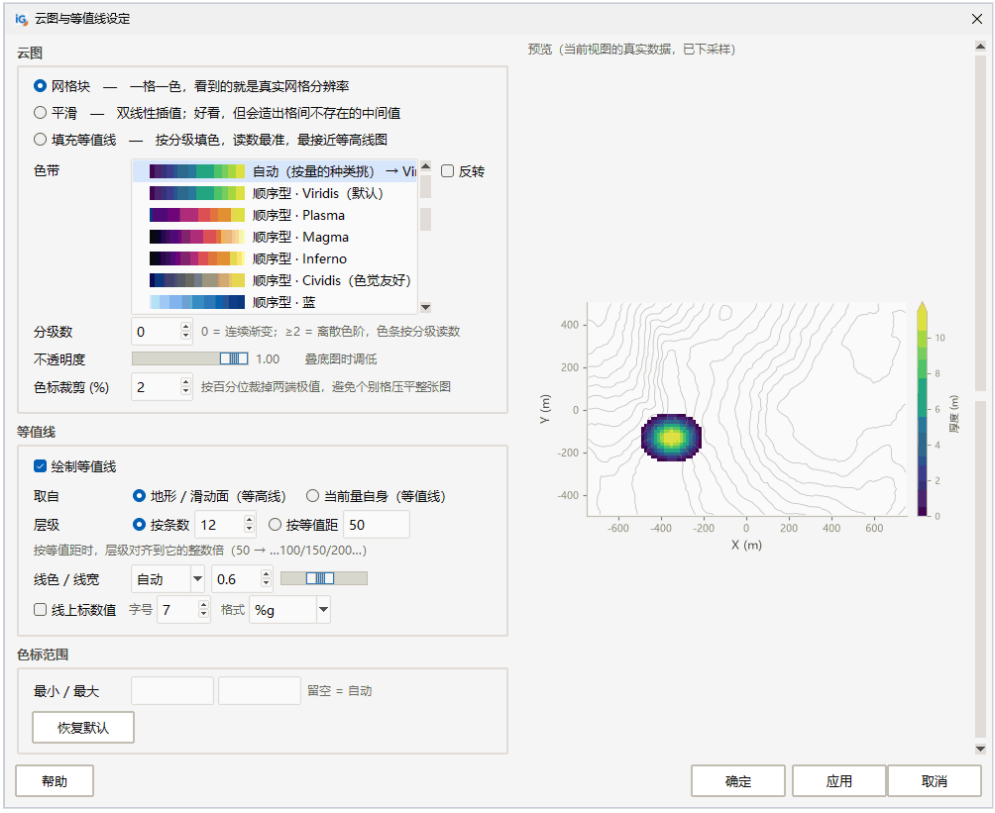

图 **4-11** 云图与等值线设定，右边是当前视图的预览

第 5 章　滑体与对象

第 ② 步「对象」给出会动的物质（释放体或入流）、分区、构筑物与监测点。画出来的、导入的范围都成为模型树里的对象（2.4 节）。

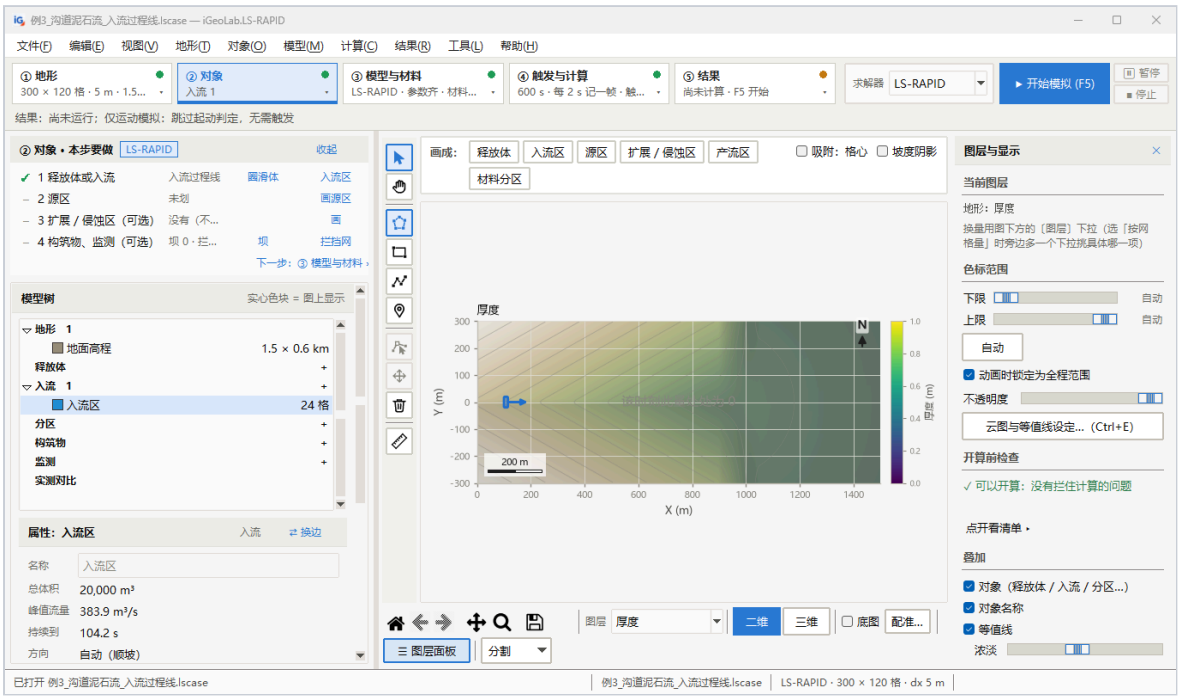

图 **5-1**　第 ② 步：模型树、属性与图上的入流区

5.1　圈范围生成滑体

1. 点绘图工具条的多边形，在「画成」一行选〔释放体〕（或〔对象 → 新建滑体…〕）；
2. 在图上沿失稳范围逐点点击，双击或 Enter 闭合；
3. 在〔由圈定范围生成滑体〕里选厚度的给法（图 5-2），填数，下面实时写出格数、最大厚度与方量；
4. 选与已有滑体的关系：替换（整个算例的厚度换成这一块）或叠加（逐格取较大者）；
5. 按〔确定〕：滑动面 = 地面 − 厚度，圈中的格同时划为源区。



图 **5-2**　由圈定范围生成滑体：**SLBL** 滑面，按方量

表 **5-1**　滑体厚度的四种给法

厚度的给法	说明
中心最厚，边缘收零	按到边界的距离平滑收口，适合只有一个最大厚度估计的情形
等厚	边缘为竖直陡坎，适合规则的开挖面
SLBL 滑面	由范围与地形迭代出一张曲率处处相同的滑面：凸出处挖得深、凹进处挖得浅；给最大厚度或给方量（万 m³），程序反算曲率
水位	填到指定高程（水库、堰塞湖的初始水体，摆在现有地面上）；默认取范围边界上最低的地面

5.2　椭球滑面

〔编辑 → 椭球滑面设定…（按断面通过点）〕：在平面图上点两下定纵断面，纵断面上点 A、B 与中心，横断面上点 C、D，程序拟合出通过这些点的滑面；高程填 * 或留空表示取该处坡面高程；可设真椭球或平滑收口，可加子断面。〔编辑 → 椭球滑面（参数式）…〕：直接给中心、长短半轴、最大深度与方位角。

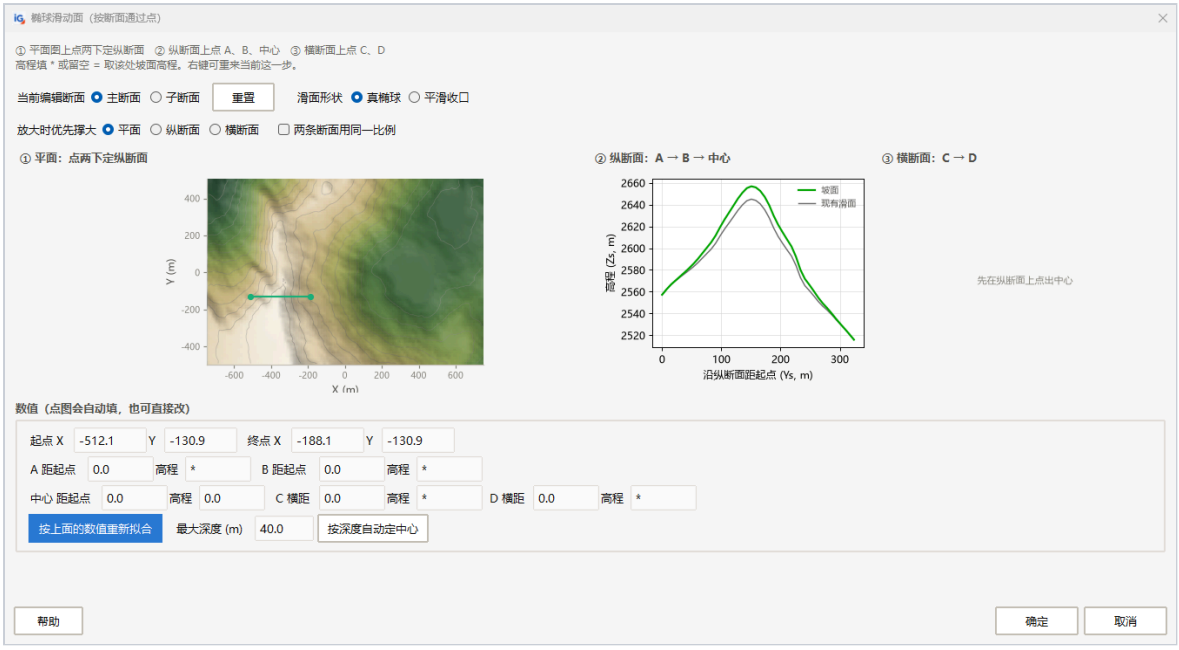

图 **5-3**　椭球滑面设定：平面、纵断面、横断面三个视图



图 **5-4**　椭球滑面（参数式）

5.3　由栅格给滑体

已有滑动面或厚度栅格时：〔导入地形栅格〕里「导入为」选当前算例：滑动面高程或当前算例：滑体厚度，按坐标落到网格上。厚度由地面与滑面算出，方量列在模型树的「释放体」下。

5.4　源区与扩展 / 侵蚀区

- 源区：强度按累计剪位移从峰值衰减到稳态（DL → DU），是起动的地方；

- 扩展 / 侵蚀区：滑体经过时按到达厚度衰减，并可铲刮床面物质；可侵蚀深度在〔分区栅格表〕的「不稳定体深度」里填，侵蚀速率与侵蚀模型在〔其他条件〕里填（8.3 节）；
- 画法：多边形 →「画成」选〔源区〕或〔扩展 / 侵蚀区〕；或在分区栅格表里点选；或从文件导入。扩展 / 侵蚀区落在没有初始滑体的沟床上时，勾选〔允许零厚度的格划为扩展区〕。

5.5　分区栅格表

〔编辑 → 分区栅格表…〕把每格的厚度（或地面、滑面高程）与分区列成表，与二维图双向联动。



图 **5-5**　分区栅格表

- 选格：在图上点一格或拖一个框，表格选中同一片；刷分区：选画笔（源区 / 扩展区 / 擦除），在图上点或拖过的格直接设成那一类；
- 对选中的格：设为源区 / 扩展区、取消设定、批量设厚度（设为、加上、减去、清零）；
- 选择助手：全选、只选有厚度的格、跳到第一格有厚度处；按厚度阈值一键划分；
- 表格里的改动图上即时显示，按〔确定〕写回算例，〔取消〕作废。

5.6　从文件导入分区多边形

〔编辑 → 从文件导入分区多边形…〕读 Shapefile（可带洞）、KML / KMZ、DXF 闭合多段线、每行一个顶点 X, Y 的 CSV / TXT（空行分隔多个多边形），作为源区或挟卷·扩

展区。经纬度坐标按算例的 UTM 带换算。〔入流过程线〕〔降雨产流〕〔挡坝〕〔拦挡网〕对话框里的〔从文件导入…〕读同样的格式。



图 **5-6**　从文件导入分区多边形

5.7　材料分区

不同地块用不同参数时，画「材料分区」，再在第 ③ 步新建材料并指派（6.7 节）。

5.8　挡坝、障碍物与拦挡网

- 挡坝 / 导流堤（〔编辑 → 挡坝 / 障碍物…〕）：圈出范围，给相对抬高或坝顶高程；地面与滑动面一起抬，物质可以漫过坝顶；
- 不过流的障碍物：房屋、挡墙，地形不变，物质只能绕流；
- 柔性拦挡网（〔编辑 → 柔性拦挡网…〕）：横跨流路圈一道网，给网高、网宽、坡角与堆积坡角；容量自动估算，也可直接填；网把流过来的物质连同动量截留下来，装满后照常通过。



图 **5-7**　（左）挡坝 / 障碍物（右）柔性拦挡网

5.9　削填恢复地形

〔编辑 → 削填〕：〔填方恢复源区〕与〔挖方恢复堆积区〕，在圈定的范围里恢复灾前地形，用于由灾后地形反推。

5.10　测点与剖面

- 画「点」→〔测点〕：记录位置，算完后打开测点时程；
- 画「折线」→〔剖面〕：沿流路的结果剖面；→〔过线流量〕：横穿流路的断面；
- 开过的测点时程、结果剖面、过线流量自动记在模型树「监测」组里，随算例保存，双击再次打开。

5.11　实测对比资料

〔编辑 → 实测影响范围 / 堆积厚度…〕给算例配上实测资料：影响范围读栅格，或取实测堆积厚度大于门槛的范围；堆积厚度读栅格，或用灾后 DEM 减当前地面。算完后运行摘要给出命中率、误报率、CSI、HSS 等分数（9.12 节）。



图 **5-8**　实测影响范围 / 堆积厚度

第 6 章　模型、材料与参数

第 ③ 步「模型与材料」：中间整页是求解器卡片与当前求解器的参数表单，左栏是材料与指派、起算值与工具，右边列出这个求解器需要什么、给得出哪些结果。参数改完回车生效，超出常用范围的标红；鼠标停在一格上看常用范围。要回到图上点〔看图〕。

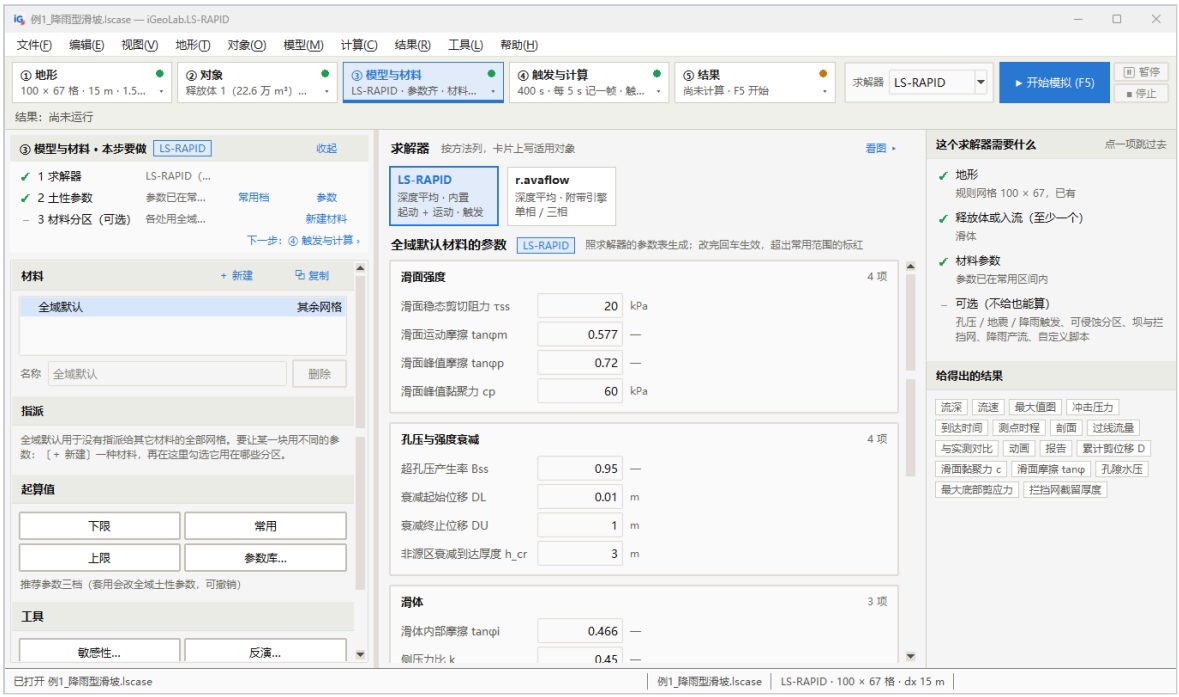

图 **6-1**　第 ③ 步：求解器卡片与参数表单（内置 **LS-RAPID**）

6.1　选求解器

点求解器卡片，或用流程条右边的求解器下拉、〔模型 → 求解器〕。两个求解器用同一份地形与滑体，结果装进同一套后处理，可以并排比较；当前求解器用不到的入口置灰，已填的值保留，换回来照样可用。

表 **6-1**　两个求解器

求解器	特点
LS-RAPID（内置）	深度平均的起动与运动：强度随剪切位移衰减、孔压 / 地震 / 降雨触发、Voellmy 与多种阻力、沿程侵蚀、入流过程线、拦挡网、降雨产流；编译内核、蒙特卡洛、反演、多浪涌
r.avaflow 4.0	单相混合物模型或三相模型（固相 / 细颗粒 / 流体，各有密度、摩擦与速度，相间有阻力与虚质量）；分批释放、渐进塌落、海啸、分层、温度与融冰等；引擎随程序附带

6.2　内置求解器的方程

内置求解器按整合滑坡模型（Sassa 等，2010）把滑体划分为竖直土柱，沿铅垂方向积分，在水平格网上求解连续方程与两个方向的动量方程：

$$\partial h/\partial t + \partial M/\partial x + \partial N/\partial y = E$$

$$\partial M/\partial t + \partial(u_0 M)/\partial x + \partial(v_0 M)/\partial y = g\cdot h\cdot[\tan\alpha\cdot(1+Kv)/(q+1) + Kx\cdot\cos^2\alpha] - (1+Kv)\cdot k\cdot g\cdot h\cdot\partial h/\partial x - g/\sqrt{(q+1)}\cdot(u_0/|V|)\cdot[hc\cdot(q+1) + (1-ru)\cdot h\cdot\tan\varphi a]$$

$$\partial N/\partial t + \partial(u_0 N)/\partial x + \partial(v_0 N)/\partial y = g\cdot h\cdot[\tan\beta\cdot(1+Kv)/(q+1) + Ky\cdot\cos^2\beta] - (1+Kv)\cdot k\cdot g\cdot h\cdot\partial h/\partial y - g/\sqrt{(q+1)}\cdot(v_0/|V|)\cdot[hc\cdot(q+1) + (1-ru)\cdot h\cdot\tan\varphi a]$$

表 **6-2** 方程中的符号

符号	含义
h	土柱高度（铅垂厚度，m）
M、N	x、y 向单宽流量，M = u₀h，N = v₀h（m²/s）
u₀、v₀、|V|	水平速度分量、总速度（m/s）
α、β、q	滑动面沿 x、y 的倾角，q = tan²α + tan²β
Kx、Ky、Kv	三个方向的地震系数
k	侧压力比
hc、ru、tanφa	黏聚力折成的高度、孔压比、滑面上发挥的视摩擦系数
E	源项：沿程侵蚀、入流、产流

方程右边三组依次是重力沿坡分量与水平地震力、侧向压力梯度、滑面阻力。选 Voellmy 本构时阻力换成 μ·N + ρg·u²/ξ，可再加屈服应力、黏性、曼宁与 μ(I) 项（6.4 节）。静止的土柱在驱动力小于阻力时保持不动；空间离散用二阶 MUSCL 或一阶迎风格式，时间积分用欧拉或二阶 SSP-RK2 格式，按 CFL 条件取步长。

6.3 土性参数（全域）

〔模型 → 土性参数设定（全域）…〕对全域给一套参数，每行右边是指南值与常用范围，越界就地标红；上面两个按钮一键套用常用起算值（泥石流起算值、清水起算值），下面〔下限〕〔可能值〕〔上限〕套用三档。

表 **6-3** 内置求解器的主要土性参数

参数	含义	常用范围
tanφp、Cp	滑面峰值摩擦系数与峰值黏聚力（kPa），决定起动	0.65–0.78；10–100 kPa
tanφm	运动中滑面摩擦系数（视摩擦）	0.46–0.70
tanφi	滑体内部摩擦，用于按 Jaky 公式算侧压力比	0.36–0.58
τss	稳态剪切阻力（kPa），主导滑距	5–50
γ	重度（kN/m³）	17–21
Bss	超孔压产生率（0 干燥，1 完全饱和）	0–1
k	侧压力比：常数、Jaky 公式（k = 1 − sinφ）、分区（源区 / 源区外各一值）	0.3–0.6
DL、DU	强度衰减的起止剪位移（mm）	5–100；100–5000
非源区衰减到达厚度	挟卷区强度衰减完成、以及「到达厚度 + 速率」侵蚀的门槛厚度（m）	按问题给



图 **6-2**　土性参数设定（全域）

手上有液限、塑性指数、黏粒含量等指标时，〔由指标估算 tanφm…〕列出各家经验相关式给出的残余摩擦角，选一个填入。

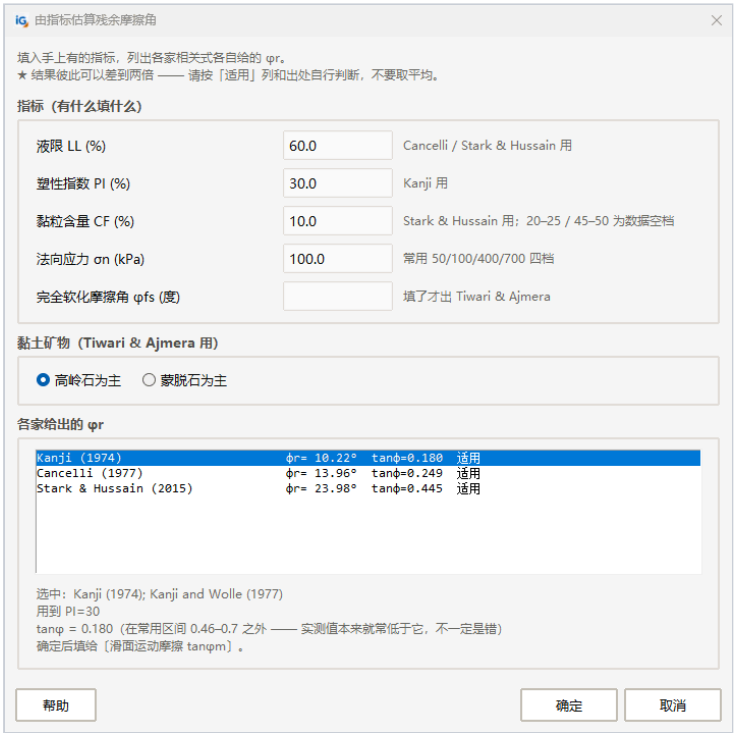

图 **6-3**　由指标估算残余摩擦角

6.4　底面阻力本构

- **LS-RAPID**（强度衰减）：滑面强度随剪切位移由峰值衰减到稳态；

- **Voellmy（μ–ξ）**：S = μ·N + ρg·u²/ξ，泥石流与长滑距事件常用；μ 常用 0.05–0.4，ξ 颗粒流 100–200、泥流 200–1000 m/s²，ξ 留空不加湍流项；
- 屈服应力、黏性与曼宁（只用于 Voellmy 这一支）：τ = τy + (K/8)·η·u/h + ρg·n²u²/h^(1/3)：宾汉姆填 τy 与 η（μ 填 0），曼宁只填 n（μ 填 0），O'Brien 三项都填，库仑模型的黏聚力填在 τy；
- 屈服应力 **N₀**：S 中再加 (1−μ)·N₀·(1 − e^(−N/N₀))，让塑性物质更早停下；
- **μ(I)** 流变：摩擦系数随惯性数 I 从 μs 升到 μ2，μ = μs + (μ2 − μs)·I/(I0 + I)，给 μ2、I0、粒径 d 与固体体积分数 Φ；
- 地形曲率（〔计算条件〕）：离心力加大法向力，弯道与坡脚处阻力变大；
- 密度演化：逐格记密度，卷吸的床面料、入流与净雨按各自的密度混合，冲击压力与底部剪应力里的密度随之变化。

6.5 沿程侵蚀

扩展 / 侵蚀区内，滑体经过时铲刮床面物质。〔模型 → 其他条件…〕里选侵蚀模型：

表 **6-4** 侵蚀模型（都受可侵蚀深度限制）

侵蚀模型	说明
到达厚度 + 速率	经过的滑体厚过「非源区衰减到达厚度」就按侵蚀速率下切
按床面强度	流体对床面的剪应力超过 c + (1 − 孔压比)·σ·tanφ 才下切，速率 (τ − τ床)/(ρu)，以侵蚀速率为上限
自定义脚本	速率由脚本的 erosion(f) 给出（6.10 节）

6.6 逐网格土性

〔模型 → 土性参数设定（逐网格）…〕按格给参数：选一项，框选一片后〔给选区赋值〕，或〔按多边形赋值：在图上圈…〕；全场同值的项自动收回成全域标量。可编辑的项目包括滑面强度、重度、侧压力比，以及 Voellmy 的 μ、ξ、N₀、屈服应力、黏度与曼宁糙率等。

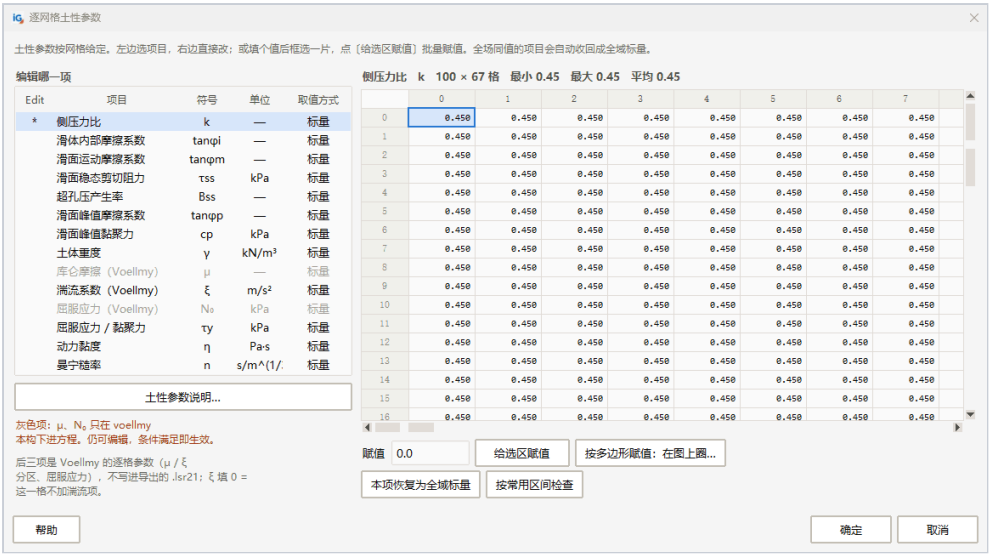

图 **6-4**　逐网格土性参数

6.7　材料与指派

不同地块用不同参数，最省事的办法是材料：

1. 在第 ② 步画出那一块（多边形 →「画成」选〔材料分区〕；已有的源区、扩展 / 侵蚀区也可以直接用）；
2. 回到第 ③ 步，左栏点〔＋ 新建〕建一种材料，起名字；
3. 在中间的表单里改它的参数；
4. 在左栏「指派」里勾它用在哪些分区。没有指派的网格用「全域默认」。

分区改了形状、换了求解器，材料的值自动重新落到网格上。

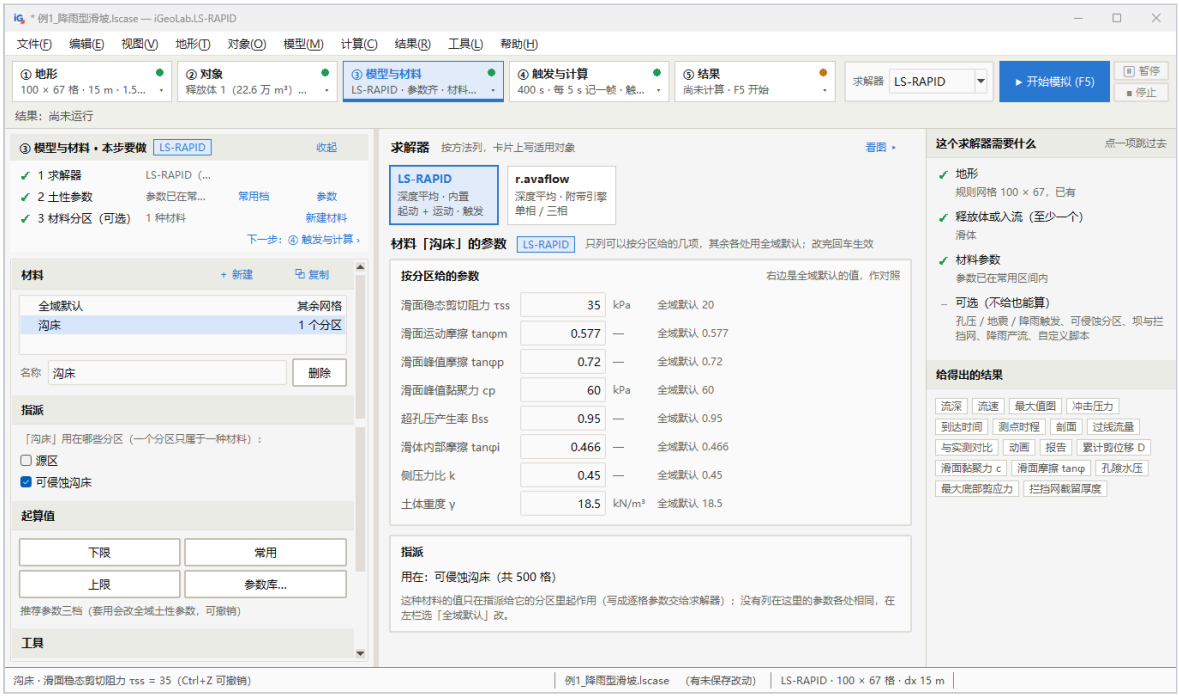

图 **6-5**　新建材料「沟床」并指派给材料分区

6.8　参数库

〔模型 → 参数库…〕：把当前的土性参数起个名字存起来，换个算例再套用；可导出给同事、导入别人的。



图 **6-6**　参数库

6.9　r.avaflow 的参数

求解器选 r.avaflow 后，表单换成它的参数；〔模型 → r.avaflow 参数…〕列出全部设定。

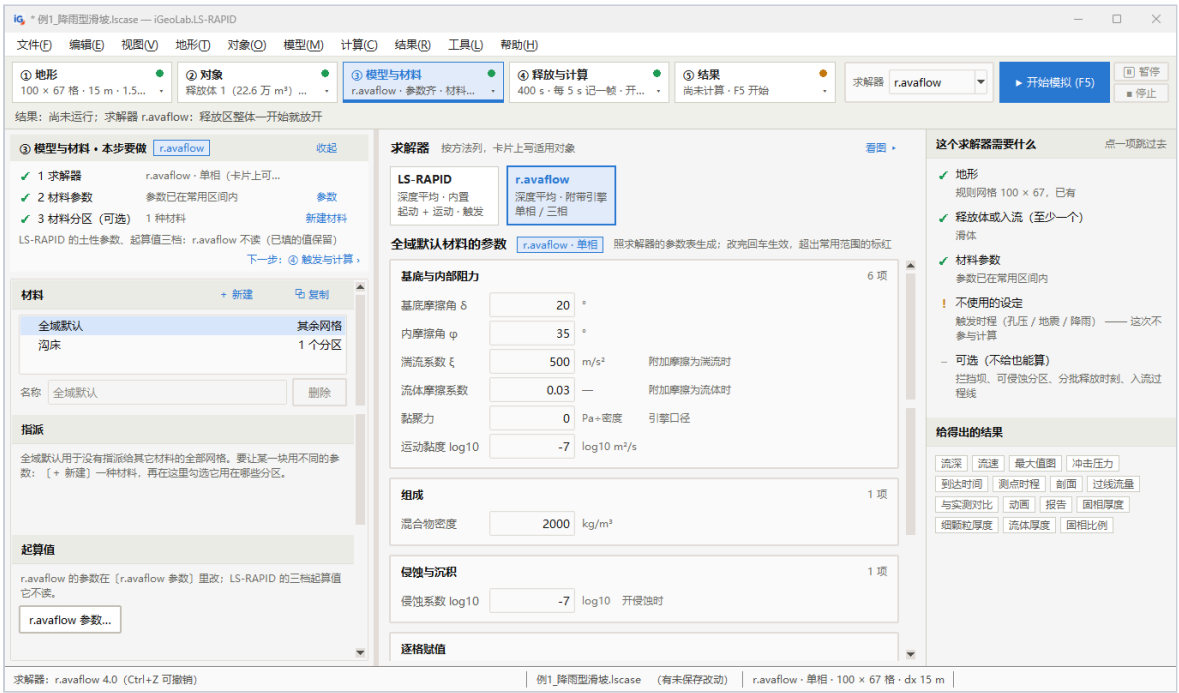

图 **6-7**　第 ③ 步：**r.avaflow** 的参数表单

- 模型：单相混合物模型，或三相模型（固相、细颗粒、流体各有密度、内外摩擦、黏聚力、黏度，释放物与可侵蚀物按组成拆分）；
- 模式开关：海啸、分层、自由表面控制、非静水效应、温度与融冰；附加摩擦：湍流（Voellmy ξ）或流体摩擦（曼宁型）；

- 侵蚀：可侵蚀厚度取〔分区〕的扩展区 × 不稳定体深度；停止控制：动能或动量降到峰值的比例、最小压力判据；
- 数值：通量限制器、CFL 数、首个时间步、参与计算的最小流深；计算网格倍率：在更粗的网格上算；
- 输入：逐格参数、控制点与剖面线；入流过程线与分批释放见第 7 章。



图 **6-8** **r.avaflow** 参数

6.10 自定义脚本（二次开发）

〔模型 → 自定义脚本（二次开发）…〕用一个 Python 脚本给内置求解器加自己的底面阻力律或侵蚀速率。〔新建模板脚本…〕给一份能直接跑的例子，〔重新载入并试算〕检查脚本。

脚本里写 `friction(f)`（返回附加阻力应力，或与速度无关和随速度增大的两部分）与 `erosion(f)`（返回侵蚀速率）；参数写在 `PARAMS` 里，对话框里可改、随算例保存。

表 **6-5** 脚本能读到的量

f 的属性	含义
f.h、f.hn	铅垂厚度、法向流深 (m)
f.u、f.v、f.speed	水平速度分量、沿坡速度 (m/s)
f.sigma、f.rho	底面有效法向应力 (Pa)、密度 (kg/m³)
f.slope、f.cos、f.zb	床面坡度 tanθ、cosθ、床面高程
f.x、f.y	格心坐标 (m)
f.tau	底部剪应力 (Pa)，在 erosion 里有
f.t、f.dt、f.dx、f.dy、f.g	时刻、步长、格距、重力加速度
f.params、f.xp	参数字典；数组库



图 **6-9** 自定义脚本

第 7 章　触发与释放

第 ④ 步「触发与计算」的〔触发〕页给出触发时程（r.avaflow 没有这一页，第 ④ 步显示为「释放与计算」）。

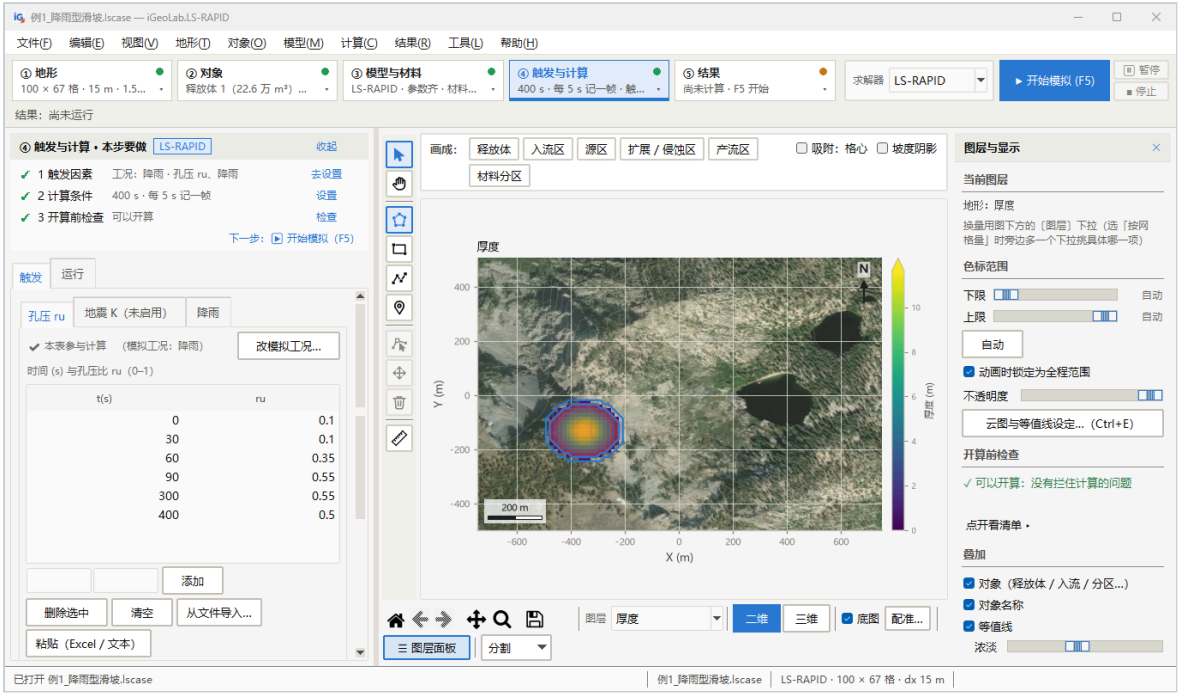

图 7-1　第 ④ 步的〔触发〕页：降雨型示例

7.1　模拟工况

〔计算条件〕里选模拟工况：无外部触发（滑体只在自重下失稳时才动）、地震（可同时计孔压）、降雨（接入由降雨换算的孔压比）。

7.2　孔隙水压力

孔压比 ru = u/(γh)，0–1。时程表里逐行填时间（s）与 ru；〔生成孔压 ru…〕给线性上升后保持的过程，或读实测孔压文本。

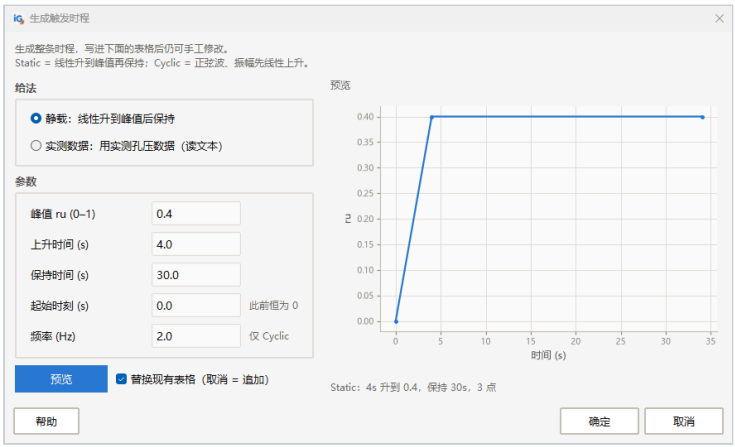

图 7-2　生成孔压 **ru**

7.3　地震

地震系数 Kx（东西）、Ky（南北）、Kv（竖向）的时程。〔生成地震荷载…〕给静载（线性升到峰值后保持）、循环（正弦波，振幅线性上升）或用已登记的实测波形；三个方向的倍率可按滑坡主断面方向分配。

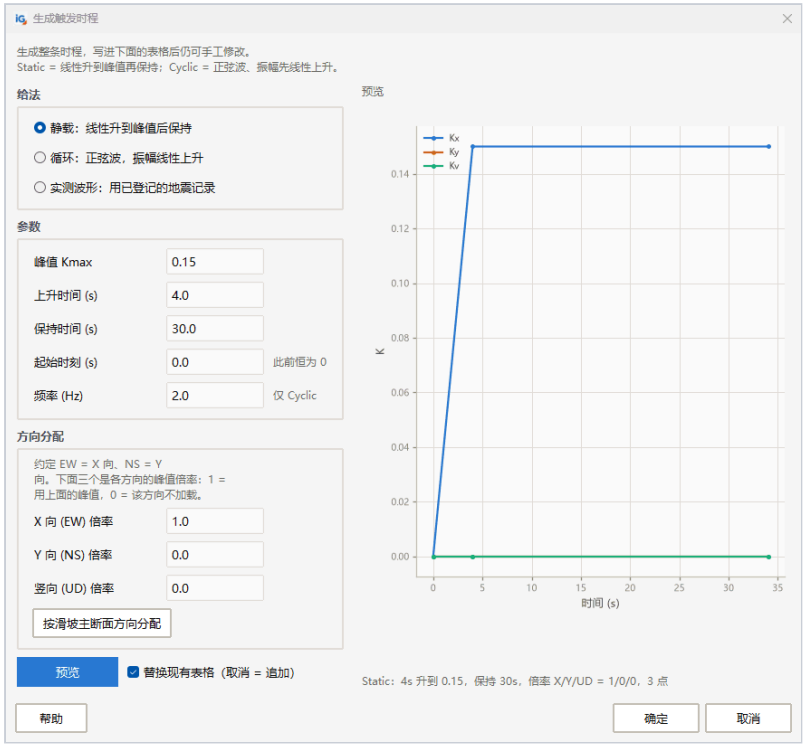

图 **7-3**　生成地震荷载

〔模型 → 地震波形登记…〕读实测加速度文本（Gal，最多 3 组）。



图 **7-4**　地震波形登记

7.4　降雨与由降雨推算孔压

降雨时程表填时间（s）与雨强（mm/10min）。雨强由 SLIDE 模型换算成孔压比 ru，方程里用的是 ru。〔由降雨推算 ru…（SLIDE 模型）〕：

1．在降雨表里填雨强时程（可粘贴、可从文件导入）；

2．点〔由降雨推算 ru…〕，填土层厚度 H、坡角、孔隙率、初始饱和度、综合排水系数与重度；

3．「换算结果」显示两个组合系数 A、B 与算出的 ru 峰值，点〔重新计算〕更新；

4．按〔确定〕：ru 时程写进〔孔压 ru〕表，模拟工况切到「降雨」。



图 **7-5**　由降雨推算 **ru**

7.5　入流过程线

沟道泥石流常用的释放方式：在上游圈一条横跨沟道的窄带作入流区，按流量过程线 Q(t) 往里注入物质（〔编辑 → 入流过程线…〕）。

1．点〔在图上圈定…〕，横跨沟道圈一条窄带，宽约沟道宽、顺沟两三格；也可从文件导入多边形；

2．方向：自动（入流区各格下坡方向的平均）或指定（自正东逆时针的角度）；

3．过程线：填总体积、峰值时刻、入流速度与峰值流量后点〔生成三点过程线 →〕（峰值流量留空时按 Rickenmann (1999)：Qmax = 0.1·V^(5/6)），或在表里逐点填（最多 10 点）、从文件导入、粘贴；

4．按〔确定〕。注入的体积严格等于过程线的积分。

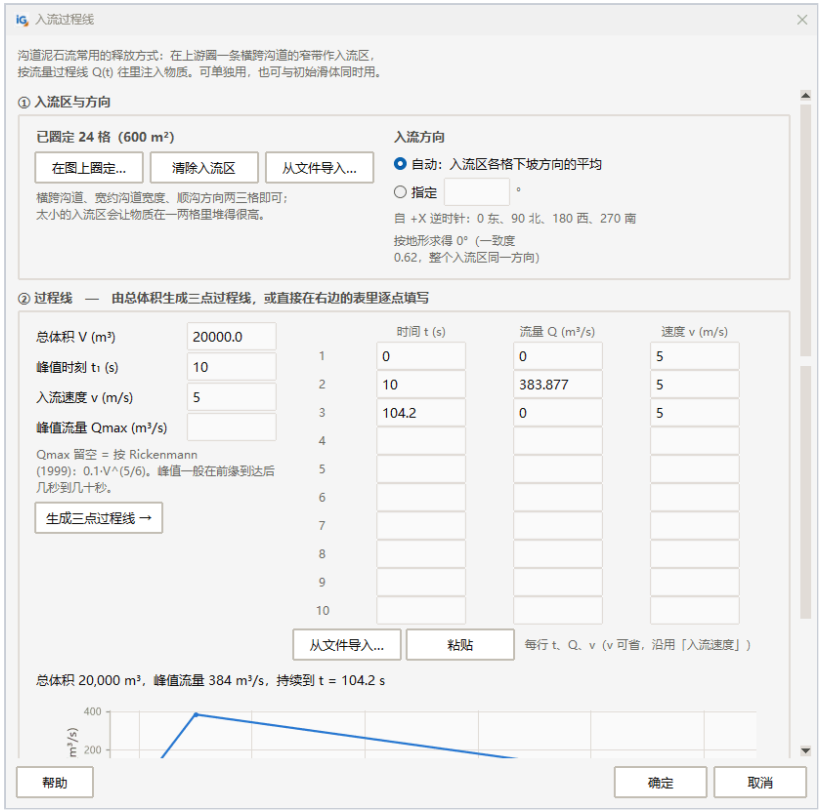

图 **7-6**　入流过程线

7.6　降雨产流

〔编辑 → 降雨产流…〕让雨按时程落在降雨区（全域，或圈定的流域），由浅水方程算汇流，用于山洪与坡面汇流。

- 雨强时程：填雨强与历时后〔生成均匀降雨 →〕，或在表里逐点填；可一键取〔触发〕页的降雨时程；
- 净雨 = max(雨强 × 径流系数 − 恒定下渗损失, 0)；
- 土性用〔土性参数〕最上面的「清水起算值」，边界选「出流」；净雨量在运行摘要与体积时程里单独记账。



图 **7-7**　降雨产流

7.7　溃坝与堰塞湖溃决

1．圈出库区，用〔由圈定范围生成滑体〕里的「水位」一档填到水面高程；

2．土性用「清水起算值」，〔计算条件〕选「仅运动模拟」，边界选「出流」；

3．上游来水用入流过程线；开始模拟。

7.8　分批释放（r.avaflow）

〔编辑 → 分批释放...〕：滑体里互不相连的每一块可以分别给释放时刻、持续时间（挤出）与初速；下面可给整个滑体的渐进塌落。


分批释放：时刻、持续时间、初速
滑体里互不相连的每一块可以分别给：
· 释放时刻：0 = 开始就放；
· 持续：> 0 = 在这段时间里匀速放出（总量不变），0 = 一次放下；
· 初速：水平 m/s；方向自正东逆时针（同入流），留空 = 下坡方向。
只有 r.avaflow 用，内置求解器会全部一起、静止地释放。
r.avaflow 的限制：不挤出时，某一步全场没有物质它就判定流动停止 ——
至少一块要在 0 s 释放（或另有入流）；用了持续时间，
不在 0 s 释放的块都要给持续时间。开头场里全空时，
它的时间步可能一下放得极大（算完摘要会点名）。
块 格数 方量 (m³) 释放时刻 (s) 持续 (s) 初速 (m/s) 方向 (°)
1 241 226,224 0 0 0
1
全部清零（一起、一次放下、静止）
方向：0 = 正东、90 = 正北（同入流）
渐进塌落（整个滑体一起，r.avaflow）
渐进塌落：从 0 s 到 10 s 放完
每步放出总量的「步长 ÷ 窗口长」，先削剩余厚度最大的格，原地地形跟着降低；
开了这项，上面的释放时刻与持续时间不用（初速照用）。大网格、小方量时引擎会算得很慢。
帮助
确定
取消

图 **7-8** 分批释放

第 8 章　计算

第 ④ 步的〔运行〕页：最上面是〔开始模拟〕〔暂停〕〔停止〕与进度，下面「这次计算的设置」列出时长、记录间隔、模式、边界、判停、时间步等，改在页里的按钮中改。

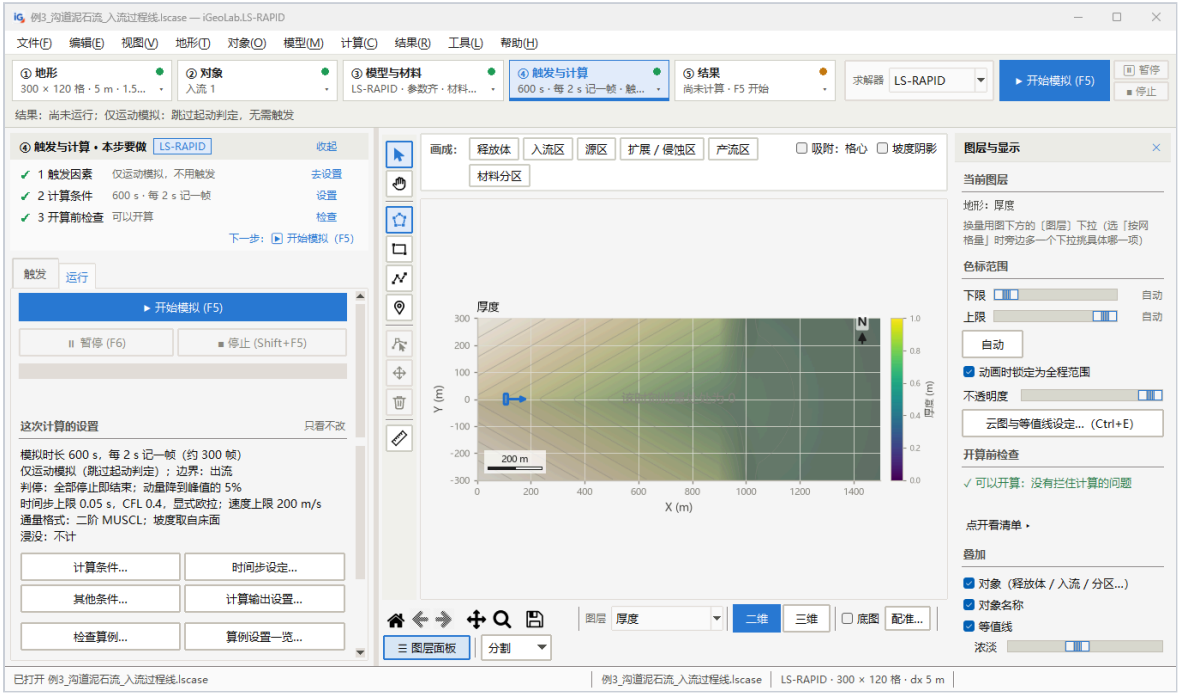

图 **8-1**　第 ④ 步的〔运行〕页

8.1　计算条件

表 **8-1**　计算条件的主要项目

项目	说明
模拟模式	全过程模拟（起动 + 运动 + 扩展）；仅运动模拟（跳过起动判定，全场直接取稳态强度）
模拟工况	无外部触发 / 地震 / 降雨；地震可同时计孔压
时长与记录	模拟时长、结果记录间隔、最小模拟时长
判停	所有物质停止后结束；运动动量降到峰值的百分比；运动质心速度（8.7 节）
浸没计算	海平面以下计浮力，水的重度可改
数值格式与边界	坡度取自床面 / 自由面，通量格式（一阶迎风 / 二阶 MUSCL），干湿判定厚度，算域边界（闭合墙 / 出流），地形曲率



图 **8-2**　计算条件

8.2　时间步

〔模型 → 时间步设定…〕：CFL 准则 + 步长上限（默认）、分阶段准则（起动 DU/M/V，之后 dx/N/V）、全程定步长；静止段可快进；时间积分可选一阶欧拉或二阶 SSP-RK2。清水或坡面汇流的算例可以把「时间步上限」放大到 1 s 左右，计算更快。



图 **8-3**　时间步设定

8.3　其他条件

〔模型 → 其他条件…〕：非摩擦能耗、流量阈值、翻越山脊、黏聚力 Ci / Cm、挟卷可侵蚀深度与速率、侵蚀模型、床面强度、停积再固结等。



图 **8-4**　其他条件

8.4　计算输出设置

〔计算 → 计算输出设置...〕：出图间隔（按时间或按步）、最大步数、文件前缀、文本输出的格式；〔计算过程中不刷新视图〕省去实时刷新的时间。



图 **8-5**　计算输出设置

8.5　检查算例

开算前把问题一次列全：错误（缺地形、没有可动的物质、触发时程无效、输入框里不是数字……）、警告（源区没划、参数越界、滑体贴着闭合墙、帧数过多……）、提示。每条右边的按钮直接去改。〔开始模拟〕时自动查一遍。



图 **8-6**　检查算例

8.6　开始、暂停与监视

- 〔开始模拟〕F5 / 继续 F5、〔暂停〕F6、〔停止〕Shift+F5；停止后已算出的帧保留；

- 计算中流程条下面一行与状态栏写着模拟时刻、已用时间、预计还要多久与当前最大速度；〔视图 → 显示计算值 → 计算监视〕列出时间步、最大厚度、峰值速度、总体积、运动动量、质心与触发因素；
- 滑体没动时，程序列出源区安全系数与实际施加的触发，说明原因。

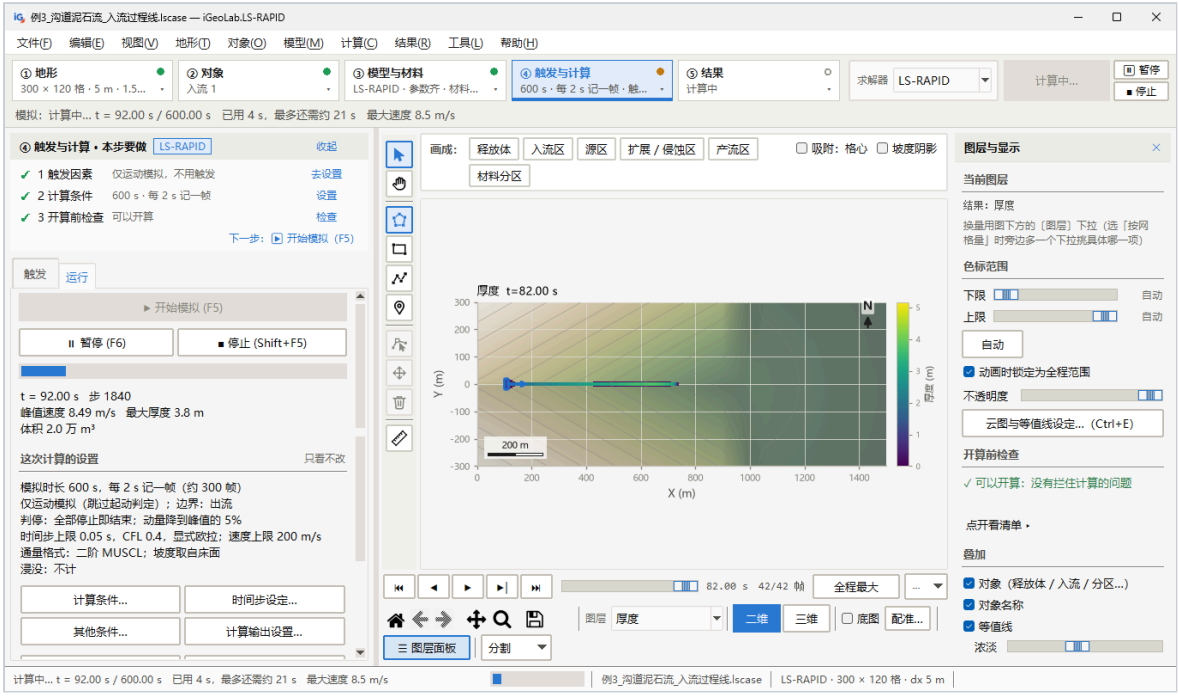

图 **8-7**　计算进行中

8.7　判停

- 全部停下：全场速度低于阈值；
- 动量判停：运动动量 Σρ·h·|u|·A 降到峰值的百分比；整体释放常取 1–3%，入流过程线约 5%；
- 质心判停：运动质心（按动量加权）的移动速度低于给定值；
- 判停在滑体速度到过 0.5 m/s、触发时程最后一次变化、入流注完之后才生效；结束原因写进运行摘要。

8.8　编译内核与分块计算

- 计算自动使用编译内核，结果与逐格计算逐字节相同；
- 第一次使用时在后台编译约一分钟，之后每次启动一两秒就绪；在〔运行〕页「这台机器」里可以关掉；
- 只计算有物质的区域及其邻近块，大网格上耗时只与被物质覆盖的范围有关。

8.9　多浪涌接续模拟

〔计算 → 多浪涌接续模拟…〕：一行一次浪涌，填体积以及峰值、速度、峰现时刻、μ、ξ、密度、判停与时长；每次都从入流区释放，算完把结束时的地表并进地形，下一次在

新地形上算。结果、摘要与汇总报告写进输出文件夹。



图 **8-8**　多浪涌接续模拟

8.10　命令行批量计算

不开界面批量算，适合参数扫描与脚本：

程序目录里的 `lsim_run.exe` 是命令行程序。在「命令提示符」里输入（路径含空格时加引号）：

```
"C:\Program Files\iGeoLab.LS-RAPID V1.0\lsim_run.exe" 算例.lscase --sweep soil.mu=0.10,0.15,0.20 --gis --report
```

表 **8-2**　**lsim_run.exe** 的常用参数

参数	作用
--set 键=值	改参数，可多个，例如 soil.mu=0.12
--sweep 键=v1,v2,…	扫一个参数，每个值算一次
--t-end、--out-every	覆盖模拟时长与记录间隔
--out 文件夹	结果写到哪里
--gis、--report	一并写结果栅格、HTML 报告
--quiet、--overwrite	安静输出；同名结果直接覆盖

每次写 .lsres 与摘要；多次时另写 batch_runs.csv（参数与关键指标一行一次）。与界面用同一条计算路径，结果逐位相同。

第 9 章　结果

算完后流程条的第 ⑤ 张卡片变绿。点它，左栏列出结果分析、算例对比与导出；图下出现时间轴。〔结果〕菜单里是全部功能，图上右键也有常用的几项。

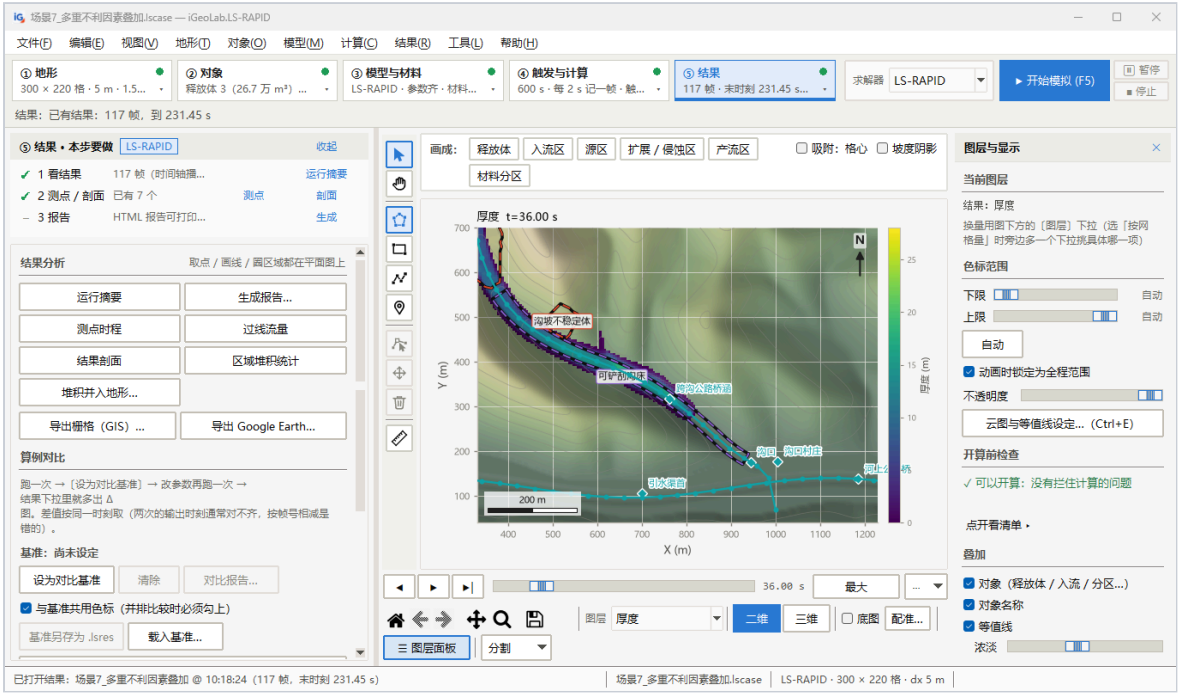

图 **9-1**　第 ⑤ 步「结果」：左栏分析工具，图上是当前时刻的流深，图下是时间轴

9.1　选量与图面

图下的〔图层〕下拉选画什么：厚度、速度、最大速度记录、按网格量、厚度变化（相对初始）、纵断面、时程。选「按网格量」时旁边多一个下拉，挑具体一项。

表 **9-1**　可以显示的量

类别	量
当前帧	滑体厚度（铅垂 / 坡面法向）、U / V 流速、平均速度、X / Y 向流量、累计剪位移、孔隙水压、滑面黏聚力与摩擦、累计侵蚀深度、密度、冲击压力（宽物体 / 细长物体）、线荷载、流动动量、拦挡网截留厚度
全程最大	最大流深、最大速度、最大冲击压力（宽 / 细长）、最大线荷载、最大流动动量、最大底部剪应力
r.avaflow 三相	固相 / 细颗粒 / 流体厚度、固相比例、水面抬升、最大水面抬升、温度

- 最大值按每个计算步取，两帧之间的峰值不会漏；不同量的最大值可能出现在不同时刻；
- 〔全程最大〕把当前量换成它的全程最大值，再点回到逐帧；
- 图层面板里可改色标范围、不透明度、叠加内容与叠放次序（2.6 节）；〔流速箭头〕叠加流向与流速。

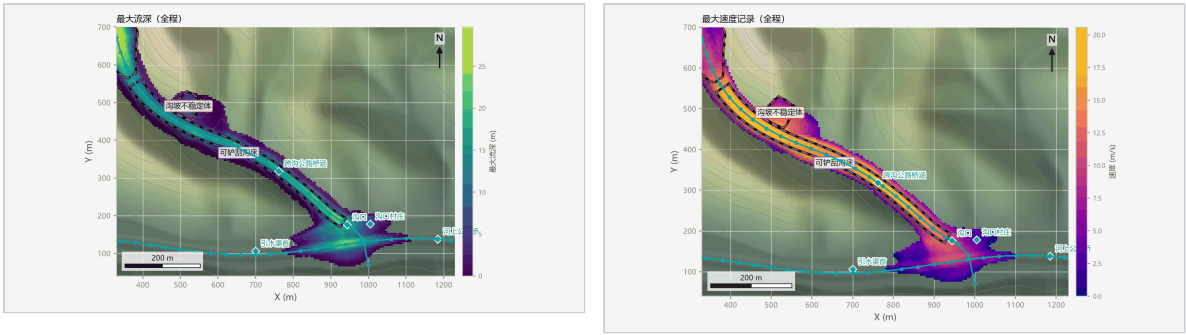

图 **9-2**　（左）全程最大流深（右）全程最大速度（弃渣场示例，多重不利因素叠加）

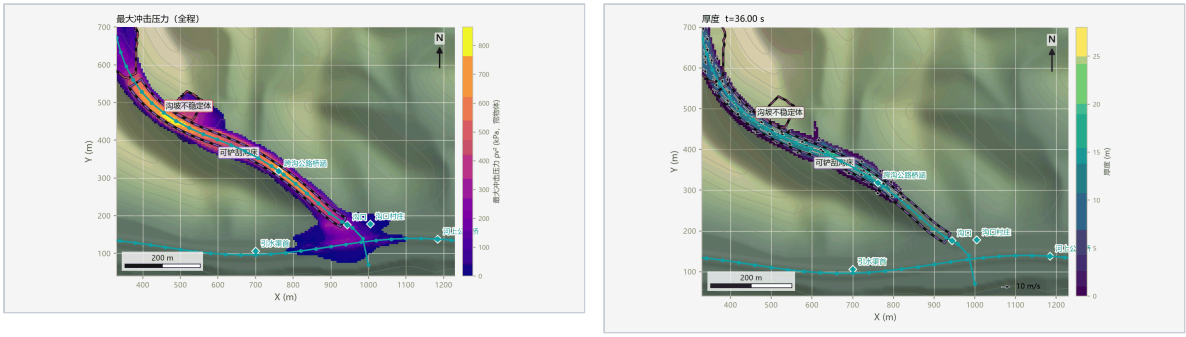

图 **9-3**　（左）最大冲击压力（右）某时刻的流深与流速箭头

9.2　播放与动画

时间轴上 ▶ / ⏸（空格）播放，〔…〕里调帧速与循环；图层面板「动画时锁定为全程范围」让各帧颜色可比。〔结果 → 导出 → 动画…〕导出未压缩 AVI、GIF 或 PNG 帧序列。

9.3　此处全部数值（识别）

〔结果 → 此处全部数值（识别）…〕或 Ctrl+I 进入，左键点一格，弹出该格的地形、分区、逐格参数、当前帧的各个量、全程最大与到达时刻（流深首次达到记录门槛的输出时刻）。



图 **9-4** 识别一格的全部数值

9.4 测点时程

〔结果 → 测点时程…〕在图上点一个位置，或输入坐标（房屋、桥墩等已知位置），得到流深、速度、冲击压力、线荷载随时间的曲线，下面列出全程最大值；可换点、导出 CSV。曲线上的竖线是主图当前时刻，点曲线上的时刻，主图跳到那一帧。

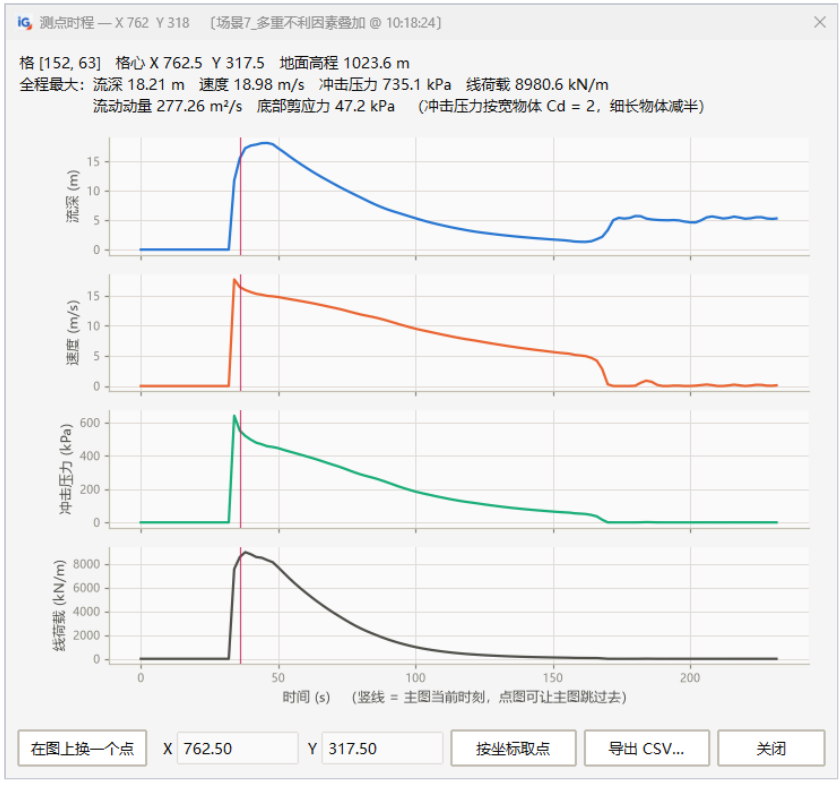

图 **9-5** 测点时程

9.5 过线流量

〔结果 → 过线流量…〕横穿流路画一条线，得流量过程 Q(t)、峰值与累计通过量。流量按穿过线的法向速度与线在每格内的精确长度计算，线画得不正也不会高估。

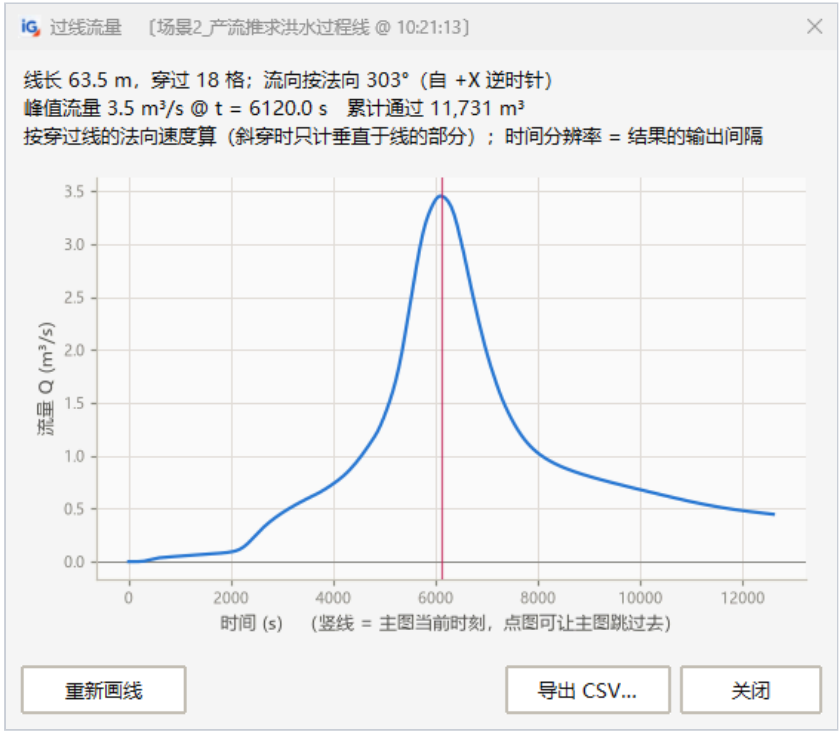

图 **9-6** 过线流量：渣场坡脚断面的洪水过程（弃渣场示例的产流场景）

9.6　结果剖面

〔结果 → 结果剖面…〕沿流路或横穿流路点一条折线（双击或 Enter 结束），上图是选中的量沿线的分布，下图是床面与床面 + 流深。可选流深、速度、冲击压力、线荷载、流动动量或它们的全程最大值；拖时刻滑块看各帧；勾〔跟随主图时刻〕与主图联动；可导出 CSV。



图 **9-7**　沿沟道的结果剖面：全程最大流深与床面

9.7　区域堆积统计

〔结果 → 区域堆积统计…〕圈一个多边形，统计当前时刻圈内的体积、面积与流深的最小 / 平均 / 中位 / 最大值。



图 **9-8**　区域堆积统计

9.8　断面

- 〔视图 → 断面输出…〕：平行 X / Y 的断面；〔视图 → 任意断面输出…〕：任意方向，给起终点或在主图上拾取，画出坡面、滑面与模拟后的坡面，导出坐标列表；
- 〔视图 → 断面安全系数…〕：二维极限平衡条分法（Fellenius、简化 Bishop、Janbu），给重度、黏聚力、内摩擦角、孔压比与水平地震系数，三种方法的安全系数

并列。

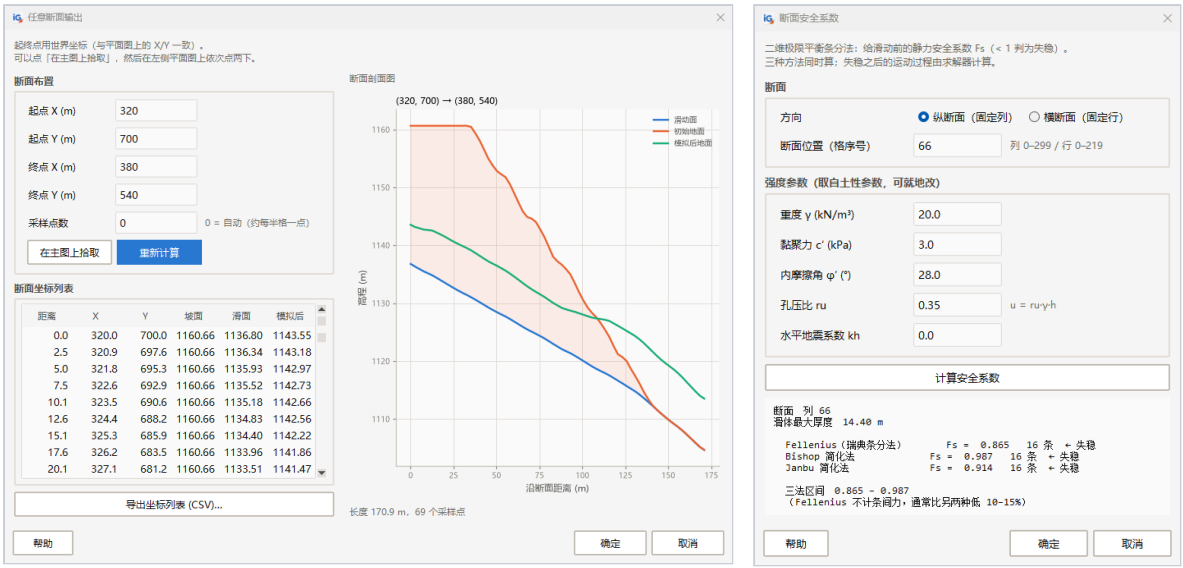

图 **9-9**　（左）任意断面输出（右）断面安全系数

9.9　三维视图

图下的〔三维〕或 Ctrl+D 切换到三维：地形与滑体随时间叠加显示，左键旋转、滚轮缩放；竖向夸大、滑体放大倍数、三维背景在〔地形显示设定〕〔地形配色〕里改，视点可登记。〔视图 → 快速三维查看…〕另开一个由显卡渲染的窗口，大网格与动画下旋转、缩放都流畅，跟着主窗口的帧与显示量。

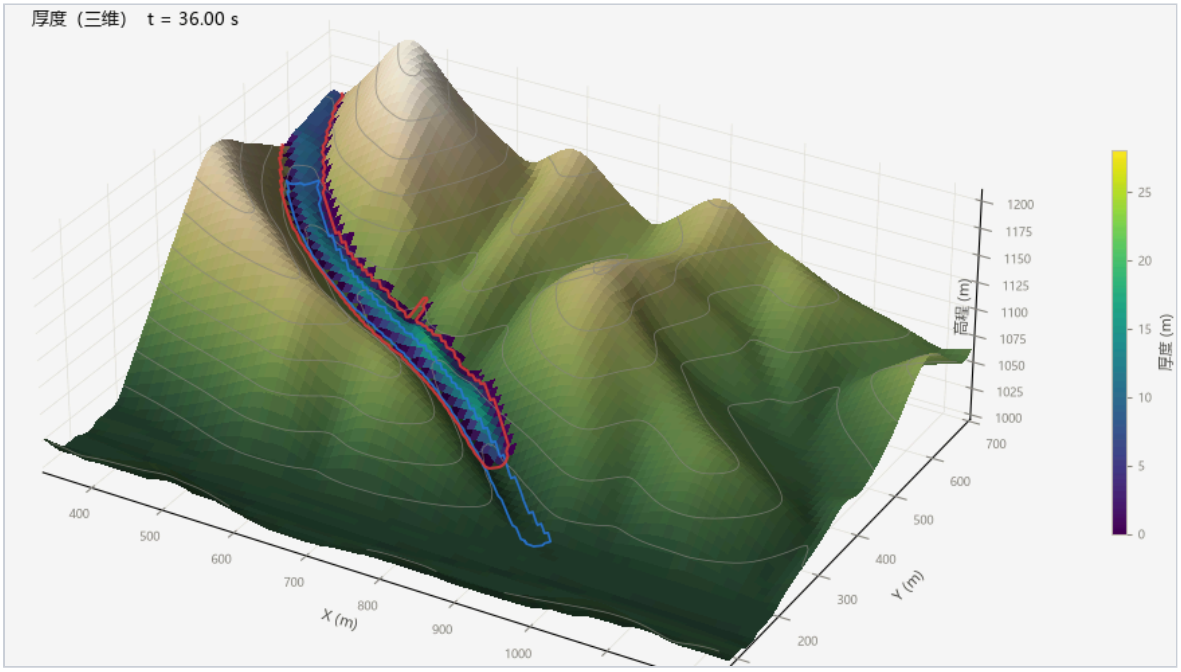

图 **9-10**　三维视图

9.10　时程与纵断面视图

〔图层〕选「时程」：峰值速度、体积账与运动动量占峰值的比例随时间；选「纵断面」：所选行 / 列的床面与流深，位置用时间轴下「断面」一行的滑块换。

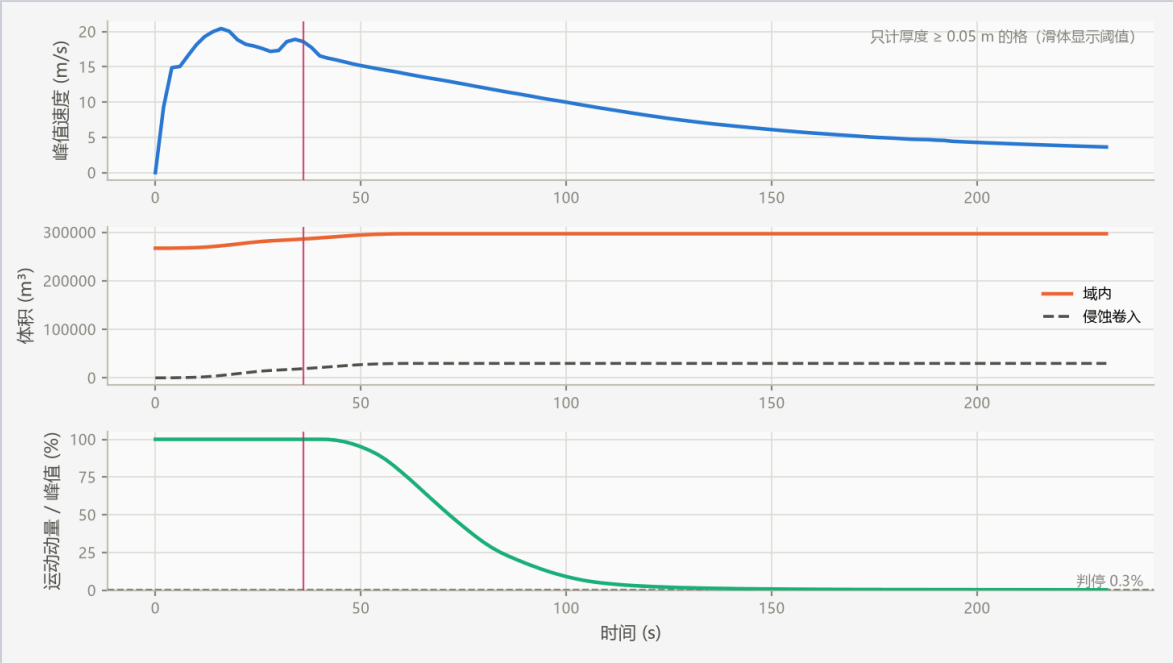

图 **9-11**　时程：峰值速度、体积账与运动动量

9.11　运行摘要与报告

- 〔结果 → 运行摘要…〕（Ctrl+R）：停止原因、用时、网格、模型参数、体积账（初始、入流、侵蚀卷入、流出、结束）、各最大值及其位置、末帧堆积，可复制、另存，随 .lsres 保存；
- 〔结果 → 生成报告（HTML）…〕：一个自包含的网页：算例与参数、关键指标、最大流深 / 速度 / 冲击压力图、时程图、危险强度分级与各级面积；在浏览器里「打印」即存成 PDF。



图 **9-12** 运行摘要

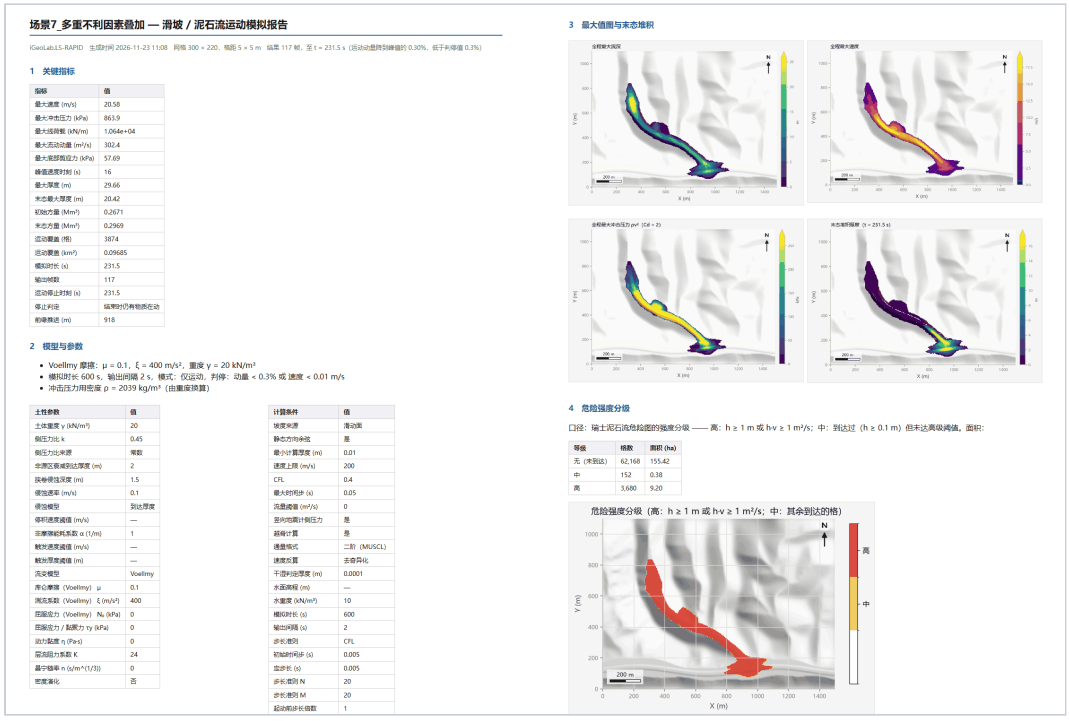

图 **9-13** **HTML** 报告

9.12 与实测对比

给了实测影响范围或实测堆积厚度的算例（5.11 节），算完后运行摘要里给出命中率、误报率、CSI、HSS、D2PC 与 FoC，堆积另给方量比与厚度均方根误差；平面图上画出实测边界。〔结果 → 与实测对比…〕按新的实测资料重新对比。

9.13　算例对比

1．跑一次，〔结果 → 设为对比基准〕（或〔载入对比基准…〕选一份 .lsres）；

2．改参数再跑一次；

3．〔图层〕下拉里多出差值图（同一时刻相减）；〔分割〕可并排看基准与当前，共用色标；

4．〔结果 → 算例对比报告…〕列出参数差异与各指标的变化。



图 **9-14**　算例对比报告

9.14　结果管理器

〔结果 → 结果管理器…〕列出算例所在文件夹及其子文件夹里的全部 .lsres：标签、帧数、到达时刻、停止原因、与当前算例的关系；选一份看参数差异，可打开为当前结果、设为对比基准、多选取包络。

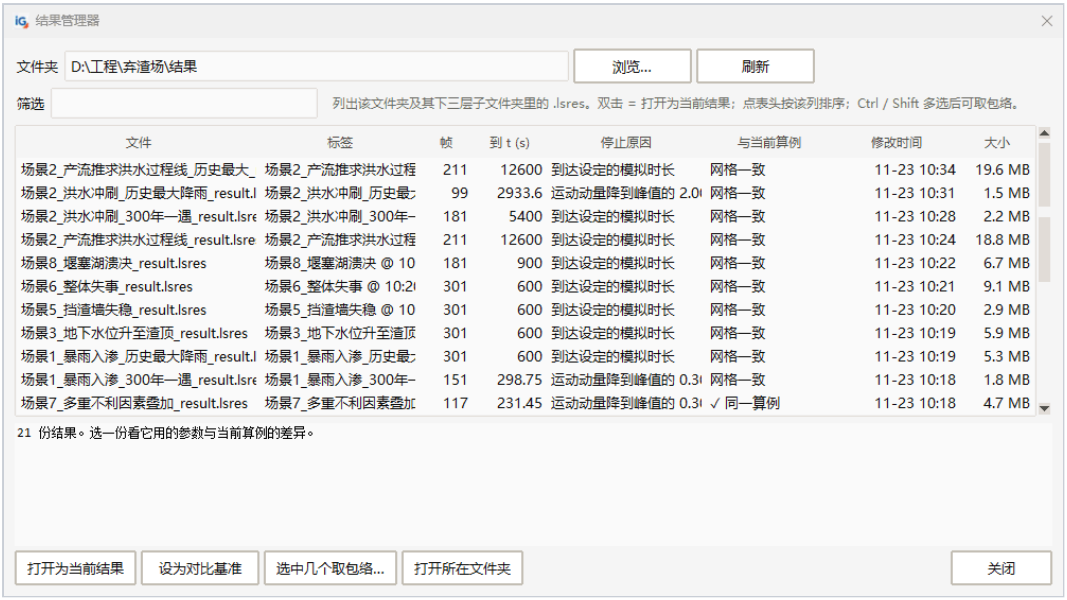

图 **9-15**　结果管理器

9.15　导出

表 **9-2**　导出功能（〔结果 → 导出〕）

功能	内容
结果栅格（GIS）	最大流深、最大速度、最大冲击压力、最大线荷载、最大流动动量、最大底部剪应力、末帧厚度、结束时的地表、侵蚀深度；ASC + PRJ
逐帧栅格	每个输出时刻一张流深、一张速度，附帧号—时刻—文件名索引表
影响范围轮廓	全程最大流深 ≥ 显示阈值的范围，Shapefile（有坐标系时带 .prj）与 DXF
多次结果的包络	选两个以上 .lsres，逐格取最大，另有一张「控制工况」栅格：每格的最大值来自第几次
Google Earth	最大流深 / 速度 / 冲击压力 / 末帧厚度四层叠加图与图例，影响范围与算域轮廓；KMZ
结果文本	VALUE / GRAPH / U / V / UV Bar、G / M .dat 高程序列、时程 CSV
图与动画	当前图 PNG / JPEG；动画 AVI / GIF / PNG 帧
保存结果	〔结果 → 保存结果为 .lsres…〕，之后〔打开结果〕直接查看，无需重算

9.16　把堆积并入地形

〔结果 → 把本次堆积并入地形…〕：结束时的地表（床面 + 堆积，开了侵蚀时含下切）成为算例的地面高程，初始滑体清空，作为下一次模拟的地形。多次泥石流、堵河后的壅水与溃决都由此接续。

第 10 章　研究工具

10.1　参数敏感性

〔模型 → 参数敏感性…〕：一次扫一个参数，给指标的响应曲线与弹性系数。可扫的参数随流变模型而变：LS-RAPID 是 τss、Bss、tanφ、DL、DU 等，Voellmy 是 μ、ξ、τy、曼宁 n 等，r.avaflow 是它自己的参数。

1. 选参数，填起点、终点与点数（或点〔按常用区间〕）；
2. 填每次的模拟时长与记录帧数；
3. 点〔▶ 开始扫描〕；
4. 下面选指标看响应曲线，表里逐次列出；〔导出为 CSV…〕；〔把选中的取值填回参数〕。



图 **10-1**　参数敏感性：摩擦系数 **μ** 对前缘推进的影响

10.2　参数反演与可辨识性

〔模型 → 参数反演与可辨识性…〕：由实测堆积反解参数。观测来源可选图上圈定的堆积轮廓、末态厚度网格、灾后 DEM、算例里的实测堆积厚度；最多反解三个参数。

1. 先选「自检」跑一遍：用当前参数造合成观测，再反解回来，看能不能解回；
2. 勾要反解的参数，给上下限；
3. 选观测来源，填堆积厚度阈值与模拟时长；
4. 填每个参数取几档、细化轮数，程序报出正演次数；点〔▶ 开始反演〕；

5．结果里看「可辨识性」一节：哪些参数组合解得开、哪些分不开；满意后〔采用最优参数〕。

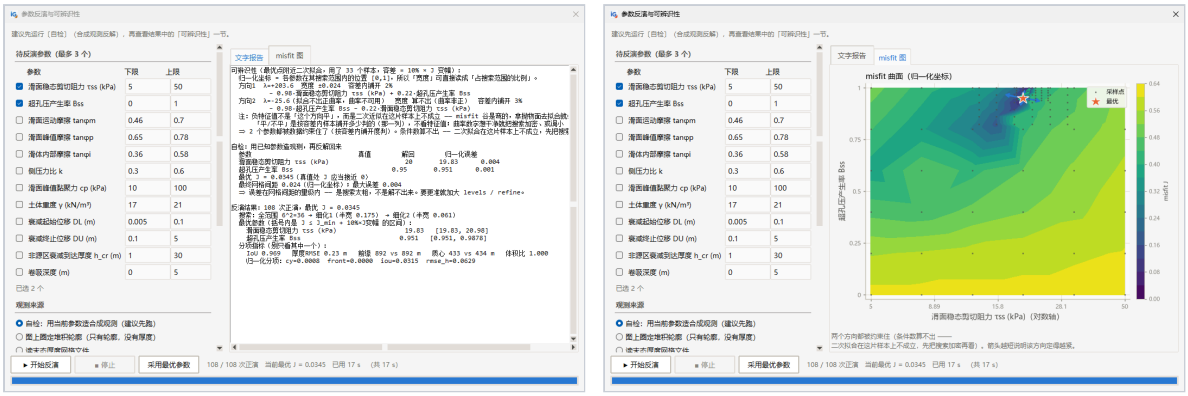

图 **10-2**　参数反演：（左）文字报告（右）目标函数图，星号为最优点

图 10-2 是案例二的自检：τss 的真值 20 kPa、Bss 的真值 0.95，每个参数取 6 档、细化 2 轮共 108 次正演，反解得 19.83 kPa 与 0.951，归一化误差不到 0.5%，两个参数都被数据约束住。

10.3　参数不确定性分析（蒙特卡洛）

〔计算 → 参数不确定性分析…〕：在给定区间里随机抽取参数，每组跑一次完整模拟，逐格统计到达概率与流深均值、包络。

1．填抽样次数 N 与随机种子（同一种子可复现）、「到达」的流深阈值、并行进程数；

2．勾要变的参数，给上下限与分布（均匀 / 正态 / 对数均匀）；

3．选输出文件夹，按〔确定〕开始；

4．跑完自动打开结果窗：到达概率图、各概率阈值的面积、逐次参数与指标；同时写出到达概率、流深均值与各包络的栅格、CSV 与摘要。

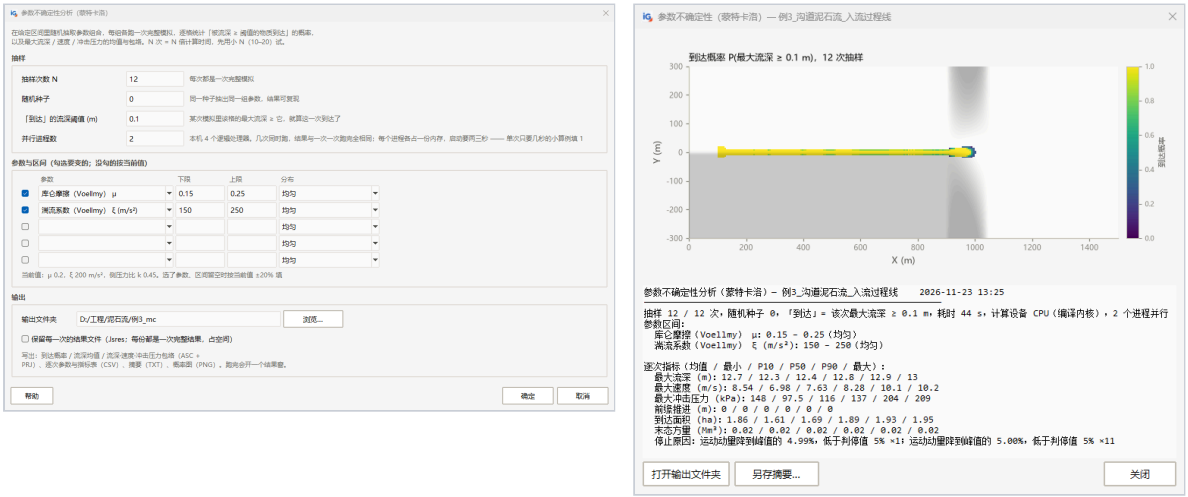

图 **10-3**　（左）参数不确定性分析的设置（右）到达概率图

第 11 章 数据互通与自动化

11.1 LS-RAPID 工程

- 读入：〔文件 → 导入 → LS-RAPID 输入目录…〕选含 G0000000.dat、Thick.dat 等的文件夹，同目录的 .lsr21 里的设置、逐格土性与触发时程一起读入；
- 写出：〔文件 → 导出为 LS-RAPID 工程 (.lsr21)…〕写 .lsr21 与同名配套文件夹，写完读回自检；
- 结果文本：可写成 VALUE / GRAPH / U / V 与 G / M .dat 格式。

11.2 r.avaflow 工程

〔文件 → 导入 → r.avaflow 工程（param1.txt）…〕：读入地形、释放厚度、参数、可侵蚀厚度、释放时刻与初速、入流过程线、实测资料、控制点与剖面线；算的时候按引擎原样写回。

11.3 GIS 与三维展示

- Shapefile、KML / KMZ、DXF、CSV 多边形可作为源区、扩展区、入流区、流域、坝与拦挡网的范围；
- 影响范围导出为 Shapefile 与 DXF；结果栅格为 ESRI ASCII + .prj；
- KMZ 可直接在 Google Earth 中打开。

11.4 脚本与命令行

命令行批量计算见8.10 节；自己的阻力律与侵蚀速率写成脚本，见6.10 节。

第 12 章　案例教程

四个案例由浅入深：案例一、二用现成的示例看清「起动 — 运动 — 堆积」的完整过程；案例三做一次沟道泥石流；案例四从地形与堆渣面开始，完整做一次弃渣场失事影响范围分析。每一步都写明点哪里、填什么、应看到什么；示例文件在「文档」文件夹的 **iGeoLab.LS-RAPID\examples** 里。

12.1　案例一　降雨型滑坡

问题：一处 15 m 格距的真实地形上，有一块约 22.6 万 m³ 的潜在滑体。一场短历时强降雨使孔隙水压升高，看它何时起动、滑到哪里、堆成什么样。

12.1.1　步骤 1　打开示例

1. 启动程序，在起始页点〔示例 1：降雨型滑坡〕（或〔文件 → 打开…〕选 `examples/例1_降雨型滑坡.lscase`）。
2. 流程条的前四张卡片都是绿点，第 ⑤ 张「结果」是「尚未计算」。图上是卫星影像与滑体（黄色圈出）。

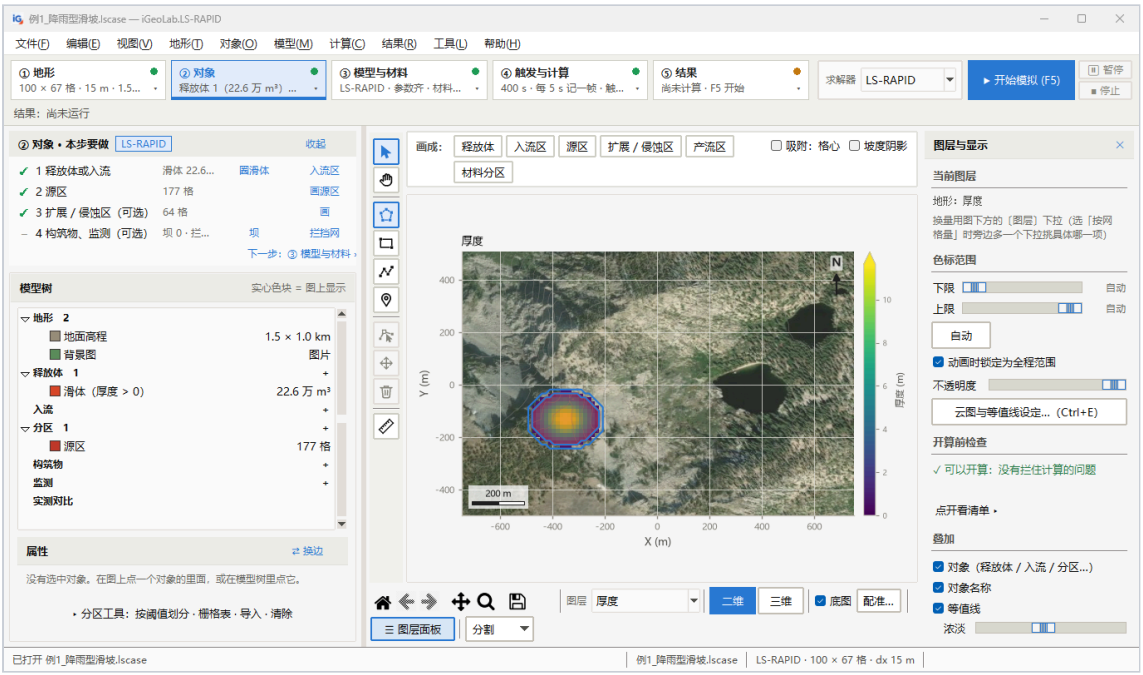

图 **12-1**　案例一：打开示例 **1**

12.1.2　步骤 2　看地形与对象

1. 点流程条〔① 地形〕：左栏写着网格 100 × 67、格距 15 m 与高程范围。
2. 点〔② 对象〕：模型树里有地面高程、背景图、滑体（22.6 万 m³）、源区（177 格）与扩展区（64 格）。点「滑体」，图上高亮，属性面板写方量与最大厚度。
3. 图下方的〔图层〕换成「地面高程」看地形，换回「厚度」。

12.1.3 步骤 3 看触发

1. 点〔④ 触发与计算〕，左栏〔触发〕页：工况是「降雨」；〔孔压 ru〕表有 6 行，孔压比在 30–90 s 由 0.10 升到 0.55，之后保持到 300 s。
2. 〔降雨〕表记着那场雨的雨强（mm/10min）。点〔由降雨推算 ru…（SLIDE 模型）〕看换算：填土层厚度、坡角、孔隙率、初始饱和度与综合排水系数，窗口里给出 ru 的过程与峰值。按〔取消〕退出，示例的孔压表保持不变。



图 **12-2** 由降雨推算 **ru** 的对话框

12.1.4 步骤 4 检查并开始模拟

1. 点〔运行〕页，确认「这次计算的设置」：模拟时长 400 s、记录间隔 5 s、判停为全部停下。
2. 点〔检查算例…〕：没有错误，关闭。
3. 点〔开始模拟 (F5)〕。图上滑体从静止逐渐起动，随后滑下山坡。计算几秒到十几秒完成。

12.1.5 步骤 5 看结果

1. 拖动时间轴：约 50 s 起动，约 78 s 达到最大速度 38 m/s，之后逐渐停下，约 220 s 全部停止；前缘推进约 720 m。
2. 〔图层〕选「速度」看流速，选「时程」看峰值速度、体积与运动动量。
3. 点〔全程最大〕看每格的最大流深；〔结果 → 运行摘要…〕（Ctrl+R）看最大速度、末态堆积等。

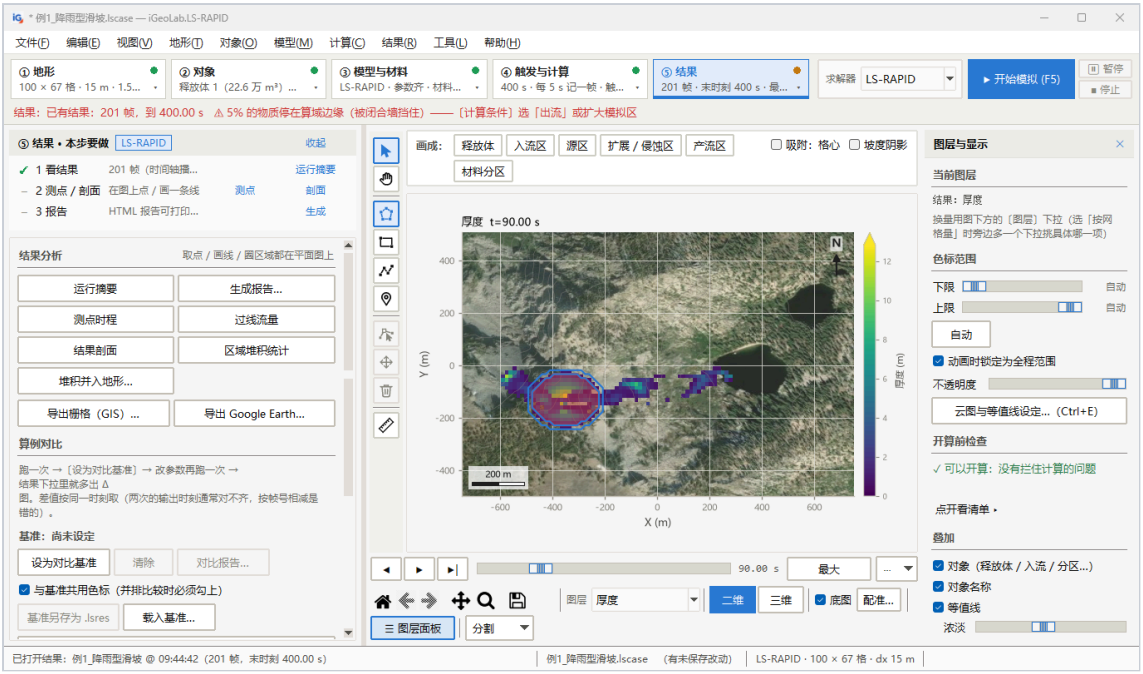

图 **12-3**　案例一：约 **120 s** 时的流深

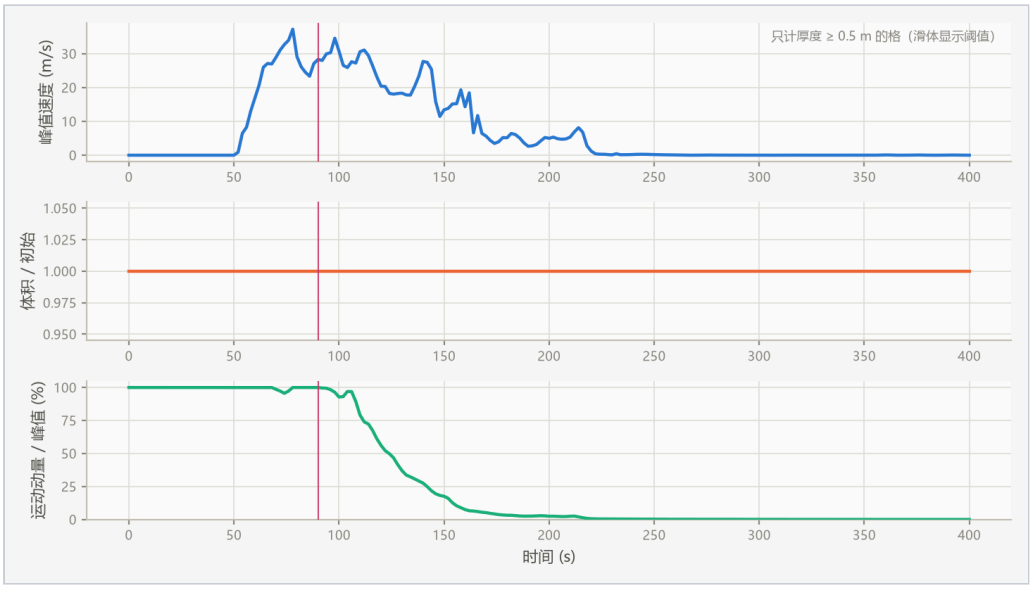

图 **12-4**　案例一：峰值速度、体积与运动动量时程

12.1.6　小结

孔压使滑面的有效应力降低，源区先起动，强度随剪切位移衰减，之后滑体快速下滑并在坡下堆积。

12.2　案例二　地震型滑坡

同一处地形，改用地震触发：看地震荷载如何使滑体起动，并用对比功能看两次的差别。

1. 〔文件 → 打开...〕选 `examples/例2_地震型滑坡.lscase`，〔④ 触发与计算〕的〔触发〕页里：工况是「地震」，地震从 20 s 开始、持续约 10 s，水平系数峰值约 0.26，表是东西、南北、竖向三个方向的时程。

2．点〔生成地震荷载…〕看怎么生成：给峰值、上升时间、保持时间（循环波给频率），点〔预览〕看波形，按〔取消〕退出。

3．〔运行〕页〔开始模拟 (F5)〕，等结束：约 26 s 起动，约 48 s 达到最大速度 36 m/s，前缘推进约 670 m。

4．〔结果 → 设为对比基准〕，把这次结果作为基准。

5．〔模型 → 土性参数设定（全域）…〕把稳态剪阻 τss 由 20 改为 30 kPa，按〔确定〕；再〔开始模拟〕。

6．算完后，〔图层〕下拉里多出「Δ」差值图；点〔分割 → 左右分割〕，左边看当前的厚度、右边选「Δ厚度」看与基准的差；〔结果 → 算例对比报告…〕列出参数差异与各指标的变化。

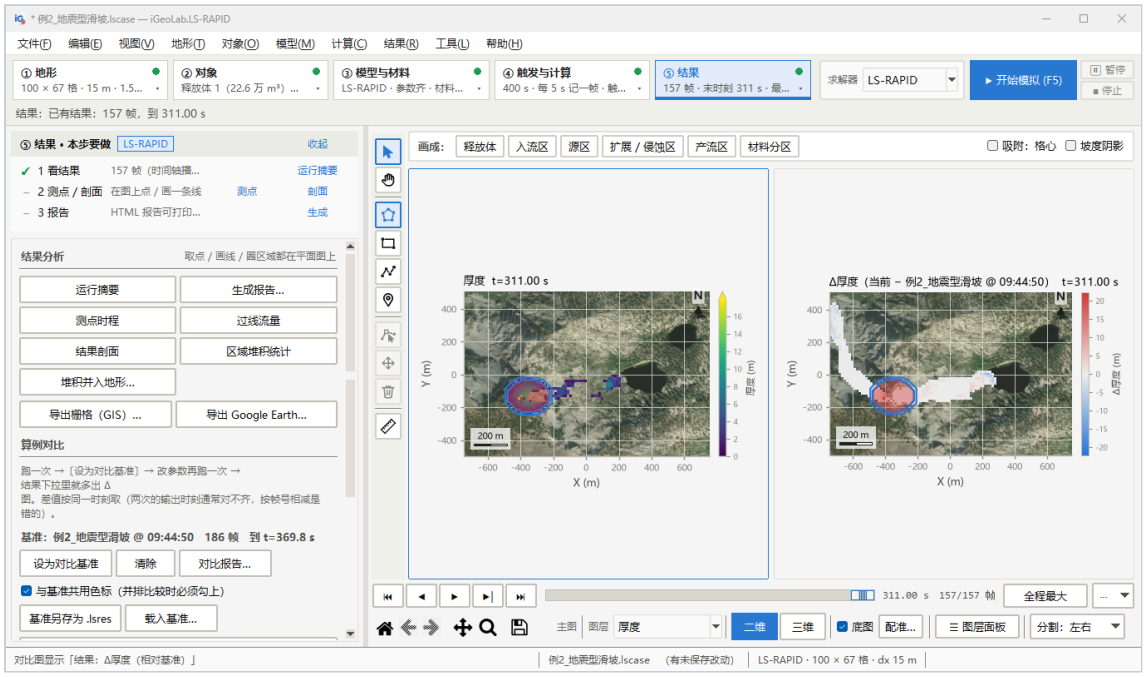

图 **12-5**　案例二：（左）**τss = 30 kPa** 的厚度（右）与基准 **τss = 20 kPa** 的厚度差

τss 越大，滑体停得越近、堆得越厚；对比报告里「前缘推进」「末态最大厚度」两行给出量化的差别。

12.3　案例三　沟道泥石流（入流过程线）

一条合成的沟道与冲积扇，没有初始滑体：泥石流由上游入流区按流量过程线注入，沿沟道下泄，在扇形地上堆积。用它看泥石流算例的全部环节，并学会把自己的过程线填进去。

12.3.1　步骤 1　打开并看入流区

1．在起始页点〔示例 3：沟道泥石流（入流过程线）〕。图上游的蓝色块是入流区，箭头是入流方向。

2．点〔② 对象〕，模型树里选中「入流区」，属性面板写总体积 20,000 m³、峰值流量 384 m³/s、持续到 104 s。

3. 〔对象 → 新建入流区…〕（或模型树里双击入流区）打开〔入流过程线〕看过程线。

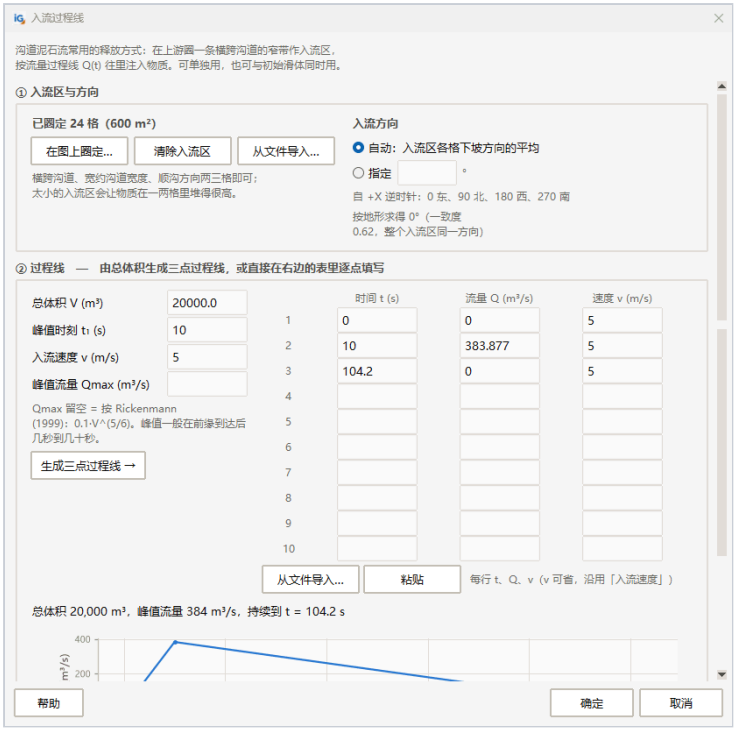

图 **12-6**　入流过程线对话框（案例三）

12.3.2　步骤 2　换成自己的过程线

1. 在〔入流过程线〕里把总体积改为 30000、峰值流量留空、峰值时刻 12 s、入流速度 5 m/s，点〔生成三点过程线 →〕：程序按 Rickenmann (1999) 给出峰值流量与历时。
2. 也可以〔粘贴〕或〔从文件导入…〕自己的时间—流量表。按〔确定〕。
3. 想恢复原样：Ctrl+Z 撤销，或重新打开示例。

12.3.3　步骤 3　计算与查看

1. 〔开始模拟 (F5)〕。物质按过程线注入，沿沟下泄，在扇形地上堆积；运动动量降到峰值的 5% 时自动结束。
2. 〔结果 → 测点时程…〕在冲积扇上点一个位置，看流深与速度的时程；
3. 〔结果 → 过线流量…〕在沟口画一条横穿流路的线，看流量过程与累计通过量；
4. 〔结果 → 结果剖面…〕沿沟道点一条折线，看流深沿程分布；
5. 〔结果 → 区域堆积统计…〕圈冲积扇，读堆积体积与平均厚度。

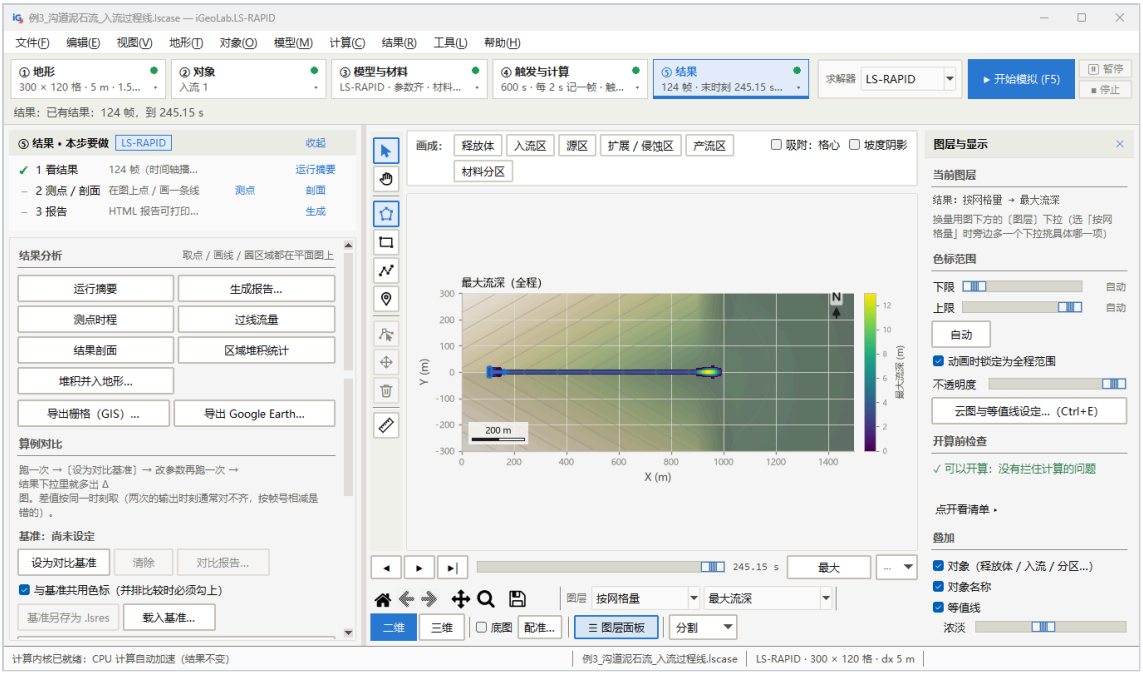

图 **12-7**　案例三：泥石流的堆积（全程最大流深）

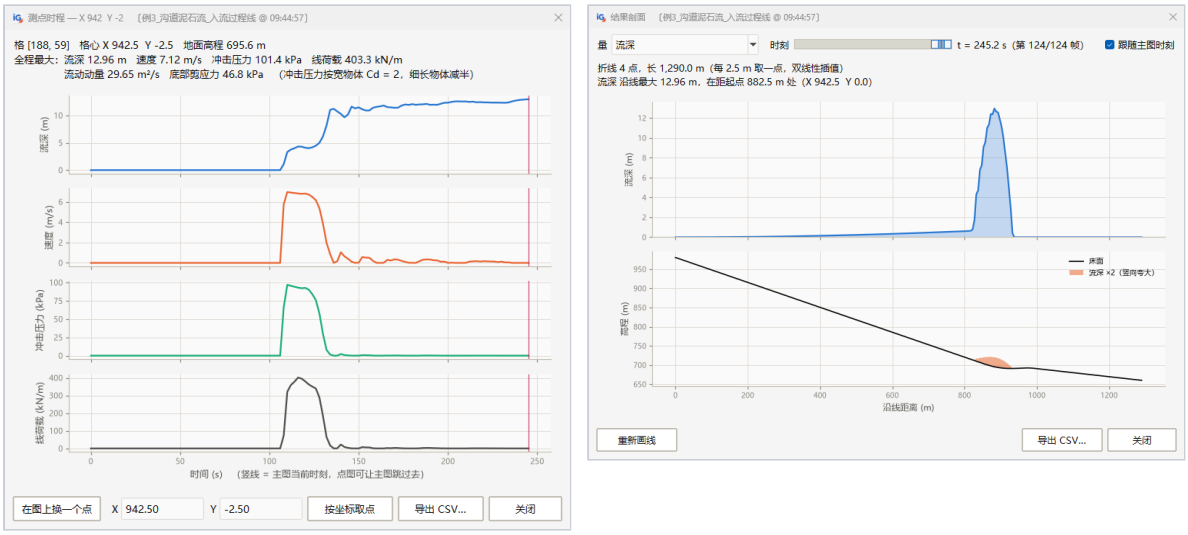

图 **12-8**　（左）扇形地上一点的时程（右）沿沟道的结果剖面

12.3.4　步骤 4　加拦挡网再算一次

1. 〔编辑 → 柔性拦挡网…〕，点〔在图上圈一道网…〕，横跨沟道圈一道网；填网高、网宽，容量自动估算，按〔确定〕。
2. 再算一次，〔运行摘要〕里看拦挡网的截留量；〔图层〕选「按网格量 → 拦挡网截留厚度」看截留位置。

12.3.5　小结

泥石流算例的关键是入流过程线与本构参数：先按起算值算一遍，再按实测堆积调整 μ、ξ，或用〔参数反演〕由实测反解。

12.4 案例四 弃渣场失事影响范围分析

12.4.1 任务与思路

水土保持方案要求对周边及下游有居民点、道路、桥涵、河道、水利设施等敏感因素的弃渣场，分析失事后的影响范围：按不同工况回答滑出多少渣、滑多远、滑多快、堆到哪里、堆多厚，再把范围叠加到敏感因素上，判断是否冲击、掩埋或堵塞行洪通道。本案例按《弃渣场（含临时堆土场）失事影响专题分析报告编制提纲（试行）》（办水保函〔2026〕232 号）的内容组织，用一座合成的沟谷型弃渣场走完全过程。

表 **12-1** 分析思路与用到的功能

环节	本案例怎么做	用到的功能
确定失事场景	暴雨入渗（推求降雨过程线 → 孔压）、洪水冲刷（产流推求渣场断面洪水过程线，排洪排水设施全部失效）、地下水位升至渣顶、地震、挡渣墙失稳、整体失事、多重不利因素叠加	由降雨推算 ru、降雨产流、过线流量
确定滑出渣量	沿沟轴线断面对一组潜在滑面做稳定性计算，安全系数小于 1 的最大一块为失稳方量	SLBL 滑面、断面安全系数
计算滑移和堆积	暴雨、地下水、地震、挡渣墙与整体失事按碎屑流，洪水冲刷按泥石流；考虑沿程铲刮与堵塞系数；先用经验公式初估滑距	Voellmy 本构、入流过程线、扩展 / 侵蚀区
划边界、判影响	最大流深范围（运动过程扫过的范围）与末态堆积范围、沟道纵剖面；逐个核对敏感点；判断堵河、上游壅水与溃决	最大值图、结果剖面、测点时程、堆积并入地形、水位填充

示例文件在 `examples/例4_弃渣场失事影响范围`：地形与渣面栅格（ASC）、各范围的多边形（CSV）、设计暴雨、敏感点坐标，以及各场景做好的算例（.lscase）。可以一步步照做，也可以直接打开做好的算例看结果。

12.4.2 基础资料

地形、渣体与参数为示例，取常见值。渣场位于一条南北向冲沟的上游，堆渣自沟底分 6 级台阶，坡脚下游约 480 m 有公路桥涵跨沟，沟口有村庄，沟口外是一条河，河上下游有公路桥与引水渠首。

表 **12-2** 弃渣场特性（示例）

项目	数值	项目	数值
类型	沟道型	堆渣量（松方）	25.5 万 m^3
最大堆渣高度	48 m（6 级台阶）	最大渣厚	29.7 m
台阶高 / 平台宽	8 m / 4 m	台阶坡比 / 综合坡度	1:1.75 / 24.8°
占地面积	2.07 ha	渣场以上汇水面积	0.10 km^2
坡脚 / 渣顶高程	1112.7 m / 1160.7 m	弃渣场级别	按 3 级（堆渣高度为 4 级，沟口有村庄、风险可能被低估，按 3 级考虑）

按提纲表 3.1，3 级弃渣场的降雨、洪水重现期取 300 年；另按自然地理条件相似地区的历史最大连续极端降雨（设计暴雨的 1.4 倍）设置场景。

表 **12-3**　渣体强度参数（示例，综合取值）

参数	天然	饱和	用在
重度 γ（kN/m³）	18.5	20.0	稳定性
黏聚力 c（kPa）	7	3	稳定性
内摩擦角 φ（°）	32	28	稳定性

表 **12-4**　敏感因素（坐标见 敏感点**.csv**）

敏感因素	X（m）	Y（m）	位置
跨沟公路桥涵	762	318	冲沟中，距渣场坡脚约 480 m
沟口村庄	1005	178	沟口左岸阶地
沟口	944	176	冲沟与阶地交接处
引水渠首	700	106	河道右侧岸边，沟口上游约 260 m
河上公路桥	1185	138	沟口下游约 200 m

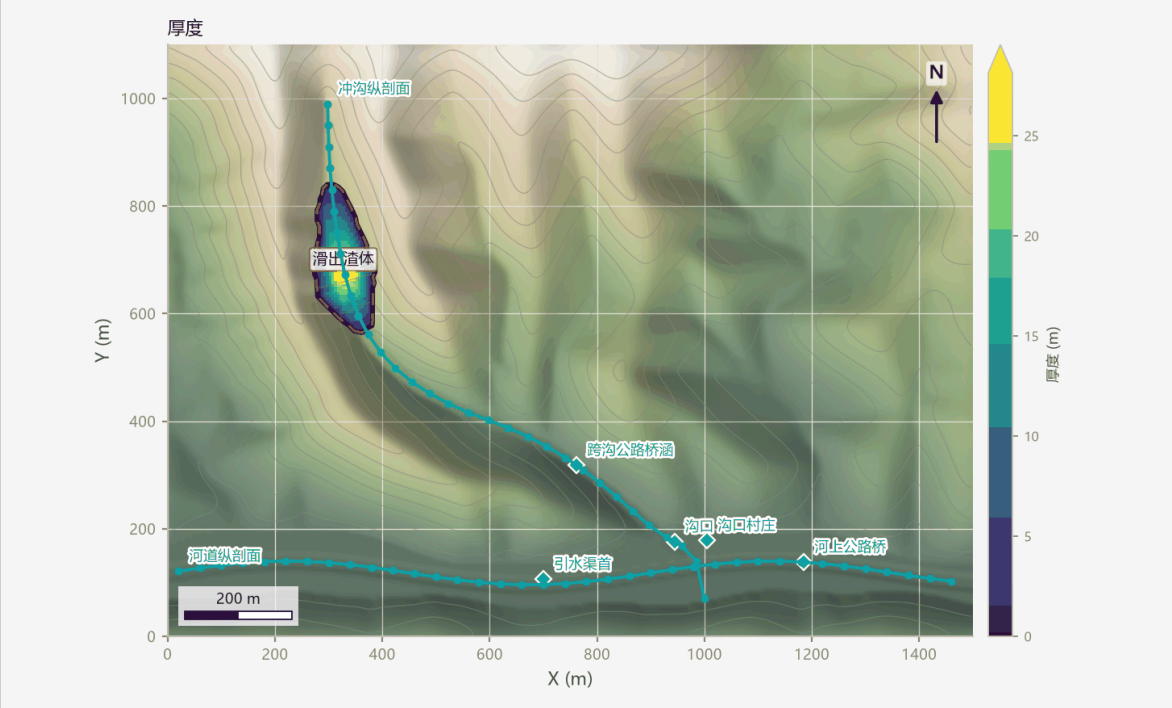

图 **12-9**　算例的地形、渣体、冲沟与敏感因素

12.4.3　步骤 1　建立地形与渣体

1. 启动程序，起始页〔从地形新建〕点〔地形栅格 ASC / GeoTIFF…〕，选示例文件夹里的 堆渣面**.asc**（堆渣后的地面）。「导入为」选新建算例：地面高程，格距 5 m，按〔确定〕（图 12-10）。
2. 图上显示渣场地形；图下〔图层〕选「地面高程」，勾选〔坡度阴影〕，能看清沟谷、台阶与河道。

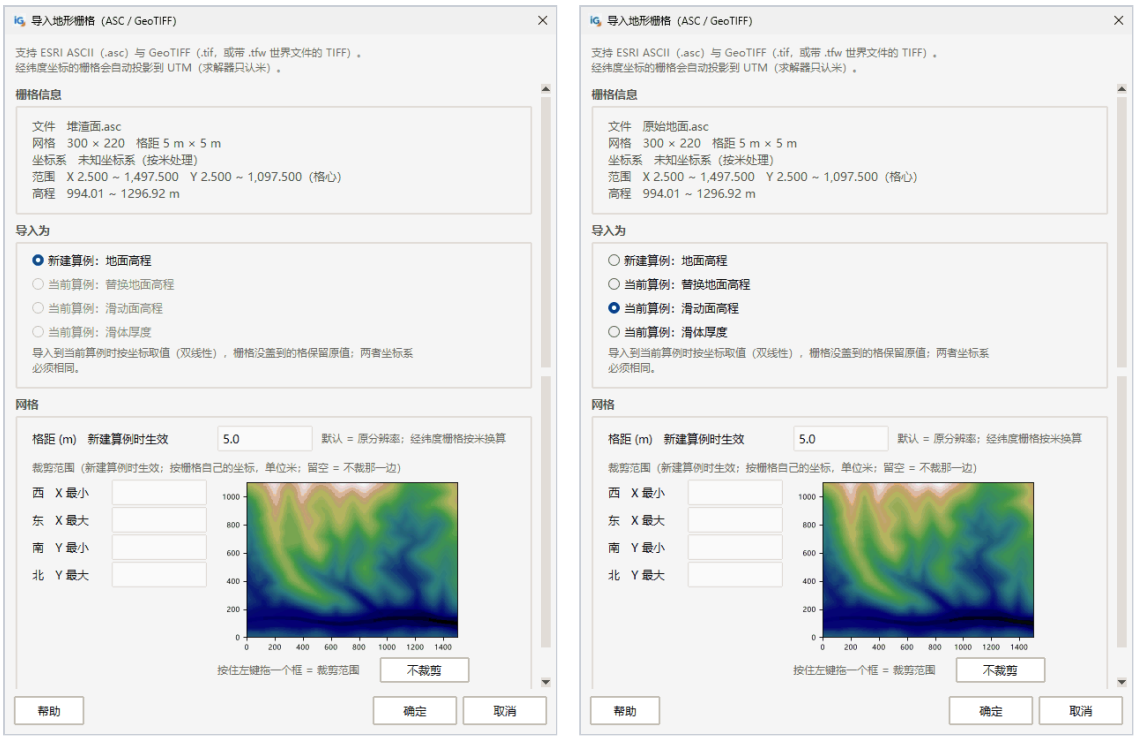

图 **12-10**　（左）导入堆渣面为地面高程（右）再导入原始地面为滑动面

3. 再点〔文件 → 导入 → 地形栅格 ASC / GeoTIFF…〕，选 原始地面**.asc**（堆渣前的地面，渣体的底面）；「导入为」选当前算例：滑动面高程，按〔确定〕。厚度 = 地面 − 滑动面，就是渣体。

4. 图下〔图层〕选「厚度」：渣体平面为南北长条形，最大厚度 29.7 m；流程条〔② 对象〕写「释放体 1（25.5 万 m³）」，与资料一致（图 12-11）。

5. 图下点〔三维〕看渣体与沟谷的位置；〔视图 → 任意断面输出…〕填起点 (332.5, 840)、终点 (332.5, 500)，点〔重新计算〕，看沿沟轴线的断面（图 12-12）。

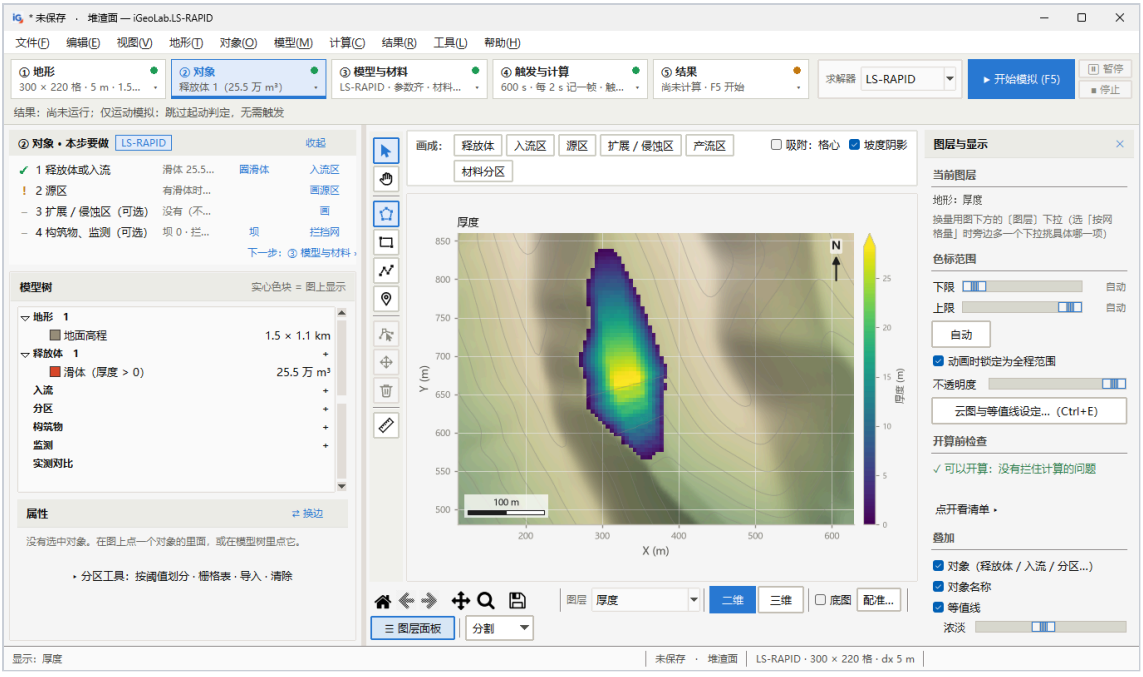

图 **12-11**　渣体的厚度分布

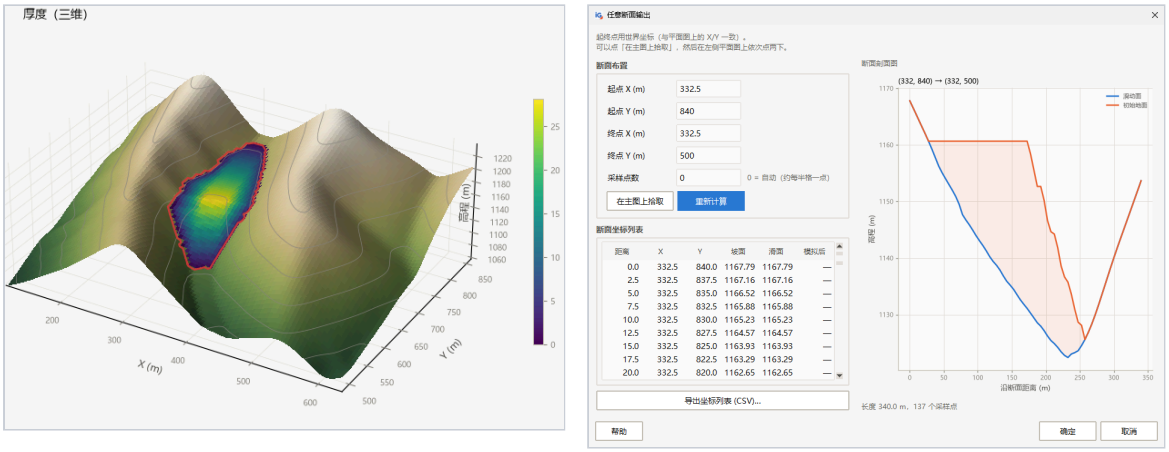

图 **12-12**　（左）三维视图（右）沿沟轴线的断面：渣面（坡面）与渣底（滑面）

6. 〔模型 → 计算条件…〕：模拟模式选「仅运动模拟」，模拟时长 600 s、记录间隔 2 s，「运动动量降到峰值的 0.3% 时结束」，算域边界选「出流」，按〔确定〕（图 12-13）。

7. 〔模型 → 土性参数设定（全域）…〕：底面阻力本构选「Voellmy（μ–ξ）」，μ、ξ 按 表 12-8 里各场景的数填，重度 20 kN/m³，按〔确定〕（图 12-13）。

8. 〔文件 → 另存为…〕存成「场景 6」（整体失事）。其余场景照同样方法，另从堆渣面新建。



图 **12-13** （左）计算条件（右）土性参数：**Voellmy**

12.4.4 步骤 2 确定失事场景

暴雨入渗：由设计暴雨过程推求孔压。

1. 打开「场景 6」。〔④ 触发与计算〕的〔触发〕页，〔降雨〕表点〔从文件导入…〕，选 设计暴雨**_300**年一遇**_72h.csv**（前 48 h 连续降雨 120 mm，24 h 设计暴雨 285 mm，主雨峰最大 1 h 约 88 mm）。
2. 点〔由降雨推算 ru…〕，填：土层厚度 H = 8 m、坡角 25°、孔隙率 0.35、初始饱和度 0.80、综合排水系数 8×10^{-8} 1/s，点〔重新计算〕（图 12-14）。
3. 「换算结果」给出 72 h 末的 ru = 0.35；把降雨放大 1.4 倍（历史最大连续极端降雨）再算，ru = 0.49。

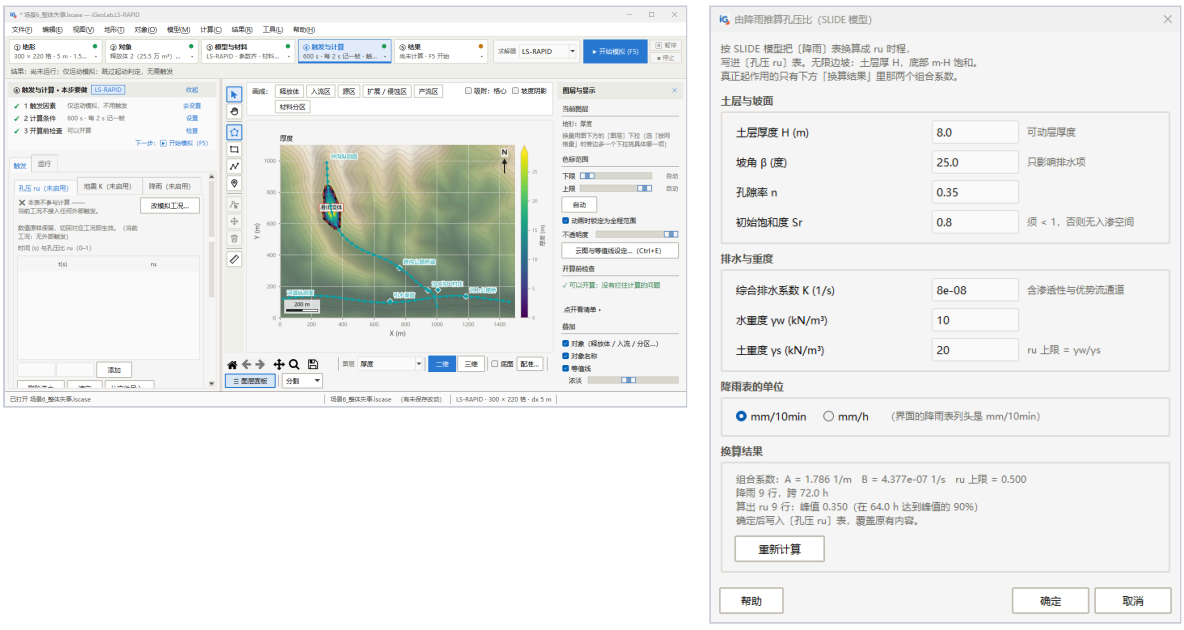

图 **12-14** （左）触发页的降雨时程（右）由降雨推算 **ru**

地下水位升至渣顶：孔隙水压比取 ru = γw/γsat = 10/20 = 0.50。地震：地震基本烈度VII度（0.10 g）按提高 1 级考虑VIII度（0.20 g），拟静力水平地震系数 kh = 0.25 × 0.20 = 0.05。洪水冲刷：推求渣场坡脚断面的洪水过程线，排洪排水设施全部失效，洪水漫过渣面。

1. 〔文件 → 新建〕，再导入堆渣面.asc（只要地面）。〔编辑 → 降雨产流…〕：选「圈定的范围（流域）」，点〔从文件导入…〕选 多边形 / 渣场以上流域**.csv**；雨强时程按 主雨峰_产流用**.csv** 填入（最大 10 min 雨强 150 mm/h），径流系数 0.85、下渗损失 2 mm/h（图 12-15）。
2. 〔模型 → 土性参数设定（全域）…〕点〔清水起算值〕；〔计算条件〕：仅运动模拟、出流、时长 12600 s、记录间隔 60 s；〔时间步设定〕时间步上限 1 s。
3. 按〔开始模拟〕（约 3.5 分钟）。
4. 〔结果 → 过线流量…〕在渣场坡脚横穿沟道画一条线（(350, 539) → (403, 574)），得洪水过程与洪峰（图 12-16）。

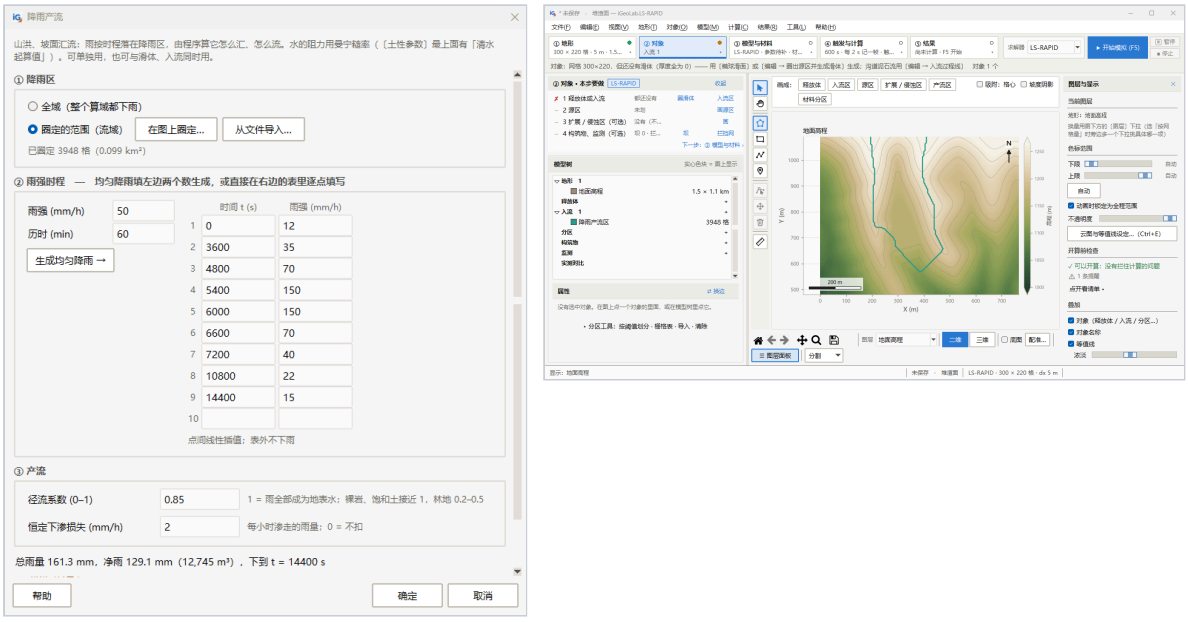

图 **12-15**　（左）降雨产流设置（右）渣场以上流域（产流区）

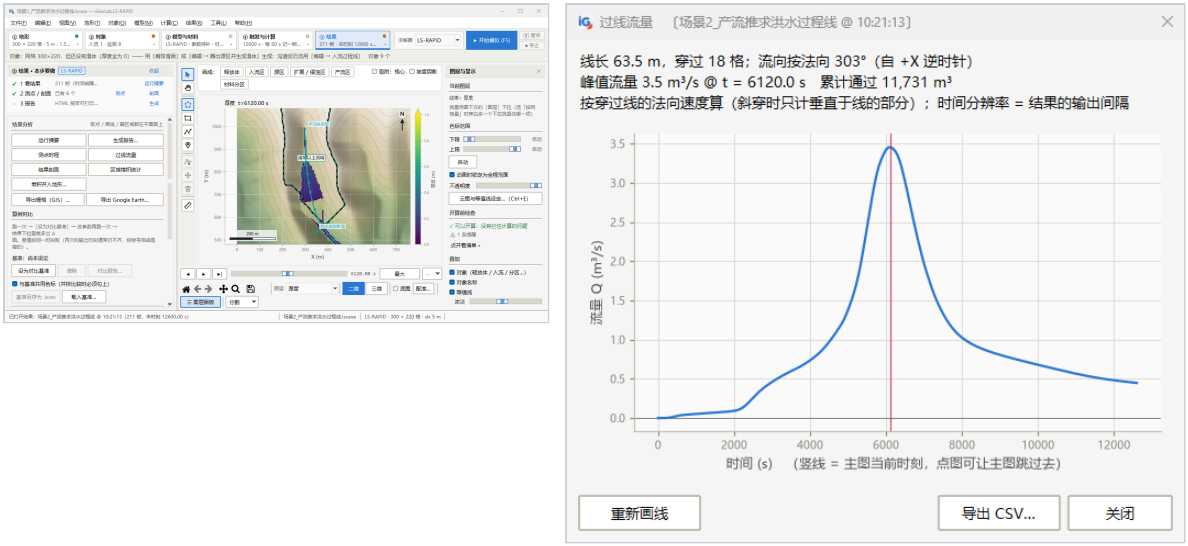

图 **12-16** （左）洪峰时刻的水深（右）渣场坡脚断面的洪水过程线

得 300 年一遇洪峰 Q_p = 3.46 m³/s，历史最大降雨 4.94 m³/s（峰现于主雨峰后约 10 分钟）。由清水洪峰换算成泥石流过程线，考虑渣体堵沟的堵塞系数 Dc：

$$Qc = (1+\varphi)\cdot Qp\cdot Dc,\quad \varphi = (\gamma c-\gamma w)/(\gamma s-\gamma c)$$

$$W = 19\cdot T\cdot Qc/72,\quad Ws = W\cdot(\gamma c-\gamma w)/(\gamma s-\gamma w)$$

表 **12-5** 由洪峰换算泥石流过程线（**γw = 1.0，γs = 2.65 t/m³**）

项目	300 年一遇	历史最大降雨
清水洪峰 Qp（m³/s）	3.46	4.94
泥石流容重 γc（t/m³）	1.80	1.80
增加系数 φ	0.94	0.94
堵塞系数 Dc	2.5	2.5
泥石流峰值 Qc（m³/s）	16.8	24.0
历时 T（s）	3600	3600
一次泥石流总量 W（m³）	15,931	22,763
冲出固体物质 Ws（m³）	7,724	11,036

> 说明：泥石流过程线的换算公式、堵塞系数的分级（正常堵塞 1.5–1.9、严重堵塞 2.0–2.5）见《泥石流灾害防治工程勘查规范》（DZ/T 0220—2006）；本例按严重堵塞取上限。

12.4.5 步骤 3 确定滑出渣量

沿冲沟轴线（第 66 列）取一组由浅到深的潜在滑面（SLBL），用〔断面安全系数〕（简化 Bishop 法）算各场景的安全系数，取安全系数小于 1 的最大一块为滑出渣量。

1. 新建算例（导入堆渣面.asc，不带滑动面）。〔编辑 → 从文件导入分区多边形…〕，选 多边形 / 滑出范围_前坡**.csv**，划为选「源区」，按〔确定〕（图 12-17）。
2. 弹出「这一片还没有滑体」，选按深度生成滑体（推荐），按〔确定〕。

3. 〔由圈定范围生成滑体〕里选「SLBL 滑面」，按方量填 **5.0**（万 m³），按〔确定〕（图 12-18）。

4. 〔视图 → 断面安全系数…〕：方向选「纵断面（固定列）」、断面位置 **66**；重度 20、黏聚力 3、内摩擦角 28、孔压比 **0.35**、水平地震系数 0，点〔计算安全系数〕，读简化 Bishop 的 Fs = 0.99（图 12-19）。

5. 改孔压比、强度与地震系数，或换滑出范围与方量（多边形 前坡与渣顶前缘 / 前坡与渣顶中部 / 坡脚）重复第 1–4 步，得到 表 12-6。

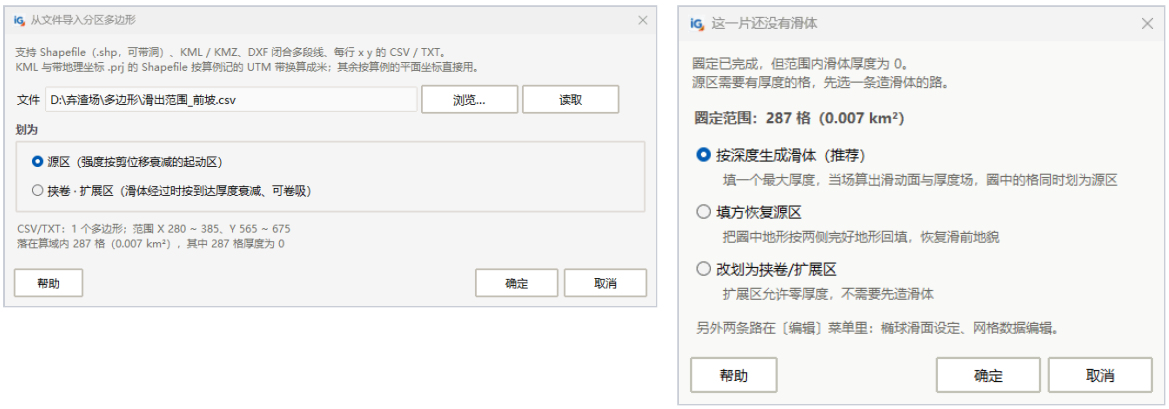

图 **12-17**　（左）导入滑出范围多边形（右）按深度生成滑体

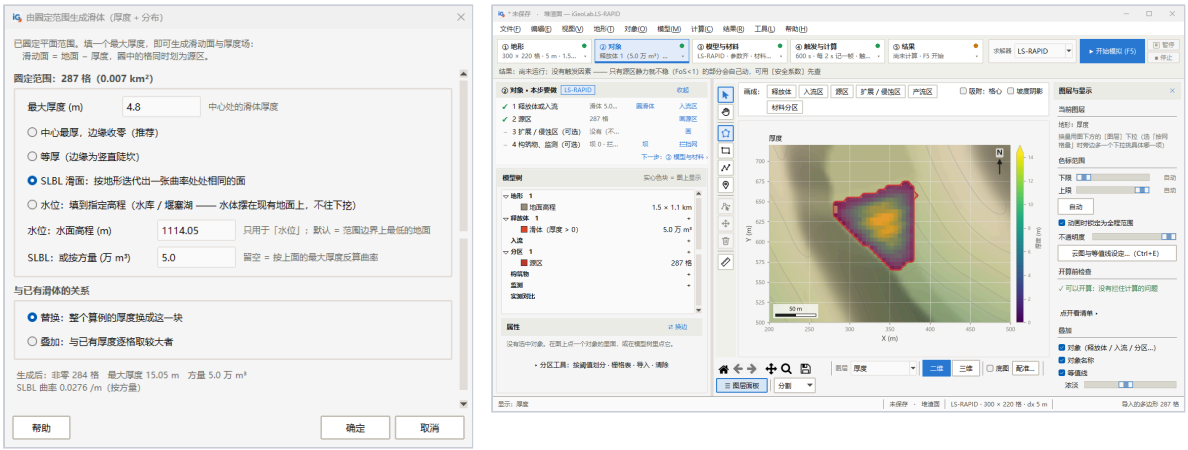

图 **12-18**　（左）**SLBL** 滑面，按方量 **5.0** 万 **m³**（右）生成的滑体厚度

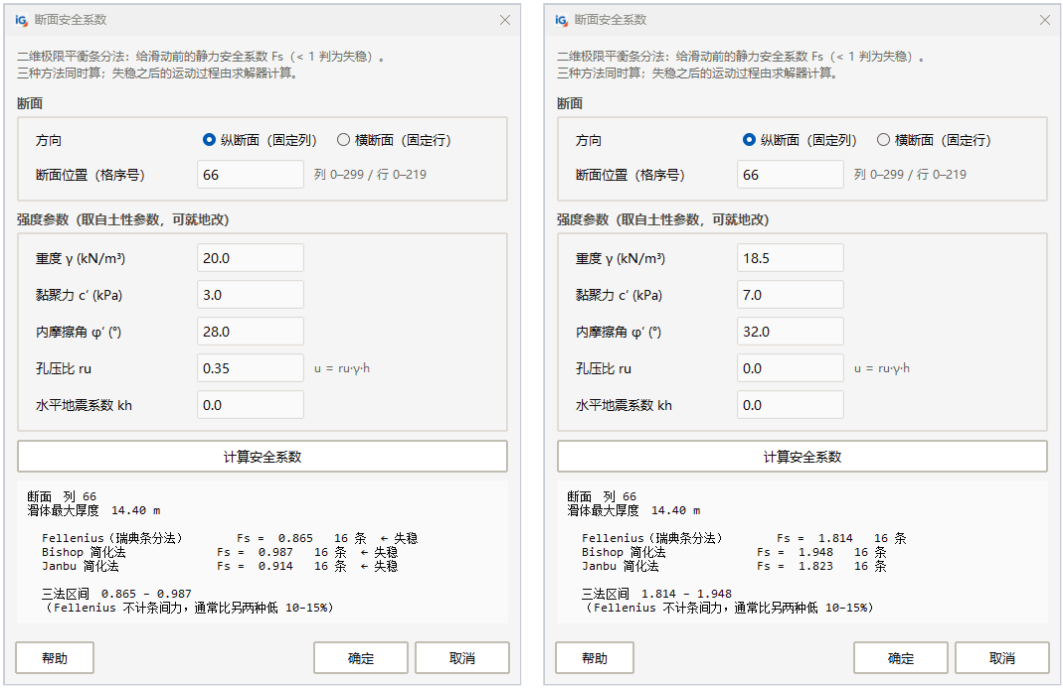

图 **12-19**　（左）暴雨（**ru = 0.35**）与（右）天然状态的断面安全系数

表 **12-6**　各场景、各潜在滑面的安全系数（简化 **Bishop**；加粗为小于 **1**）

潜在滑面	方量（万 m³）	最大厚（m）	天然	暴雨（300 年一遇）	历史最大降雨	地下水位至渣顶	地震（Ⅷ度）	暴雨＋地震
坡脚	2.5	11	2.02	1.01	**0.77**	**0.76**	1.75	**0.87**
前坡下部	3.0	10	1.86	**0.92**	**0.70**	**0.68**	1.62	**0.80**
前坡	5.0	15	1.95	**0.99**	**0.75**	**0.73**	1.69	**0.85**
前坡（深）	7.0	20	2.15	1.11	**0.85**	**0.83**	1.86	**0.95**
前坡＋渣顶前缘	8.0	17	2.09	1.08	**0.82**	**0.80**	1.79	**0.91**
前坡＋渣顶前缘（深）	10.0	20	2.12	1.10	**0.84**	**0.82**	1.81	**0.93**
前坡＋渣顶中部	12.0	23	2.49	1.31	1.00	**0.98**	2.07	1.08
前坡＋渣顶后部	15.0	21	3.82	2.05	1.61	1.57	2.94	1.57
近整体	22.0	27	3.99	2.15	1.68	1.65	3.04	1.63

由此确定滑出渣量：暴雨（300 年一遇）为前坡 5.0 万 m³；历史最大降雨为前坡与渣顶前缘 10.0 万 m³（ru = 0.49）；地下水位升至渣顶为前坡与渣顶中部 12.0 万 m³；地震（Ⅷ度）各滑面安全系数都大于 1.6，单独地震不失稳，只在与暴雨或地下水叠加时才失稳；挡渣墙失稳按墙后坡脚渣体 2.5 万 m³ 计；整体失事取全部渣体。

12.4.6　步骤 4　计算滑移与堆积

先用经验公式初估滑距（提纲允许经验公式或数值模拟），再做数值模拟。碎屑流用 Zhan 等（2017）的沟谷型岩屑滑动式，泥石流用 Rickenmann（1999）式：

$$\text{Zhan 等（2017）：}\ L = 2.630 \cdot V^{0.079} \cdot H^{0.718} \cdot (\tan\beta)^{(-0.365)}$$

Rickenmann（1999）：$L = 1.9 \cdot V^{0.16} \cdot H^{0.83}$

表 **12-7** 经验公式初估滑距与数值模拟对照（**L** 为滑源后缘到堆积前缘的水平距离）

场景	V（万 m³）	H（m）	tanβ	Zhan（2017）	Rickenmann（1999）	数值模拟
暴雨 300 年一遇	5.0	107	0.187	326 m	518 m	389 m
历史最大降雨	10.0	152	0.176	453 m	775 m	701 m
地下水至渣顶	12.0	156	0.171	474 m	815 m	729 m
挡渣墙失稳	2.5	95	0.188	283 m	420 m	361 m
整体失事	25.5	160	0.160	526 m	942 m	937 m
多重不利因素叠加	29.7	160	0.160	533 m	966 m	944 m

数值模拟与经验式量级一致，流体化程度越高（μ 越小）越接近 Rickenmann 的泥石流式。数值模拟还给出流速、流深与堆积边界。各场景的参数：

表 **12-8** 各场景的滑出渣量与参数（**Voellmy**，重度碎屑流 **20**、泥石流 **18 kN/m³**）

场景	滑出渣量	μ	ξ（m/s²）	说明
暴雨 300 年一遇	5.0 万 m³	0.20	250	碎屑流
历史最大降雨	10.0 万 m³	0.18	250	碎屑流
地下水至渣顶	12.0 万 m³	0.17	250	碎屑流
挡渣墙失稳	2.5 万 m³	0.20	250	碎屑流
整体失事	25.5 万 m³	0.15	300	碎屑流
洪水冲刷 300 年一遇	1.6 万 m³（过程线）	0.08	400	泥石流，沿程铲刮 1 m
洪水冲刷 历史最大	2.3 万 m³（过程线）	0.08	400	泥石流，沿程铲刮 1 m
多重不利因素叠加	26.7 万 m³	0.10	400	整体＋沟坡 1.2 万 m³＋铲刮 1.5 m

> 说明：有效摩擦系数 μ、湍流系数 ξ 取常用区间内的值：含水越多 μ 越小，与「不同饱和状态参数取不同幅度的折减」一致。正式分析宜按现场与试验资料确定，并做敏感性分析（步骤 7）。

碎屑流场景（暴雨、历史最大降雨、地下水、挡渣墙）：

1. 照步骤 3 的前三步生成滑体（多边形与方量见上表）；
2. 〔计算条件〕：仅运动、出流、时长 600 s、记录间隔 2 s、判停 0.3%；〔土性参数〕：Voellmy，填 μ、ξ，重度 20；
3. 〔计算 → 检查算例〕无错误后〔开始模拟 (F5)〕；〔结果 → 保存结果为 .lsres…〕。整体失事直接用步骤 1 的算例。

洪水冲刷场景：

1. 新建算例（导入堆渣面.asc）。〔编辑 → 入流过程线…〕：〔从文件导入…〕选 多边形 / 渣场坡脚断面_入流区**.csv**；总体积 16000 m³、峰值时刻 600 s、入流速度 3

m/s、峰值流量 16.8 m³/s，点〔生成三点过程线 →〕；取消「同时启用动量判停」，按〔确定〕（图 12-20）。

2. 〔编辑 → 从文件导入分区多边形…〕选 可铲刮沟床**.csv**，划为「挟卷 · 扩展区」，按〔确定〕；

3. 〔编辑 → 分区栅格表…〕勾选「允许零厚度的格划为扩展区」，「不稳定体深度」填 1，按〔确定〕（图 12-21）；

4. 〔模型 → 土性参数〕：Voellmy，μ 0.08、ξ 400、重度 18，「非源区衰减到达厚度」填 0.5；〔其他条件〕：挟卷可侵蚀深度 1 m、侵蚀速率 0.02 m/s；〔计算条件〕：仅运动、出流、时长 5400 s、记录间隔 30 s、判停 2%；

5. 〔开始模拟〕。

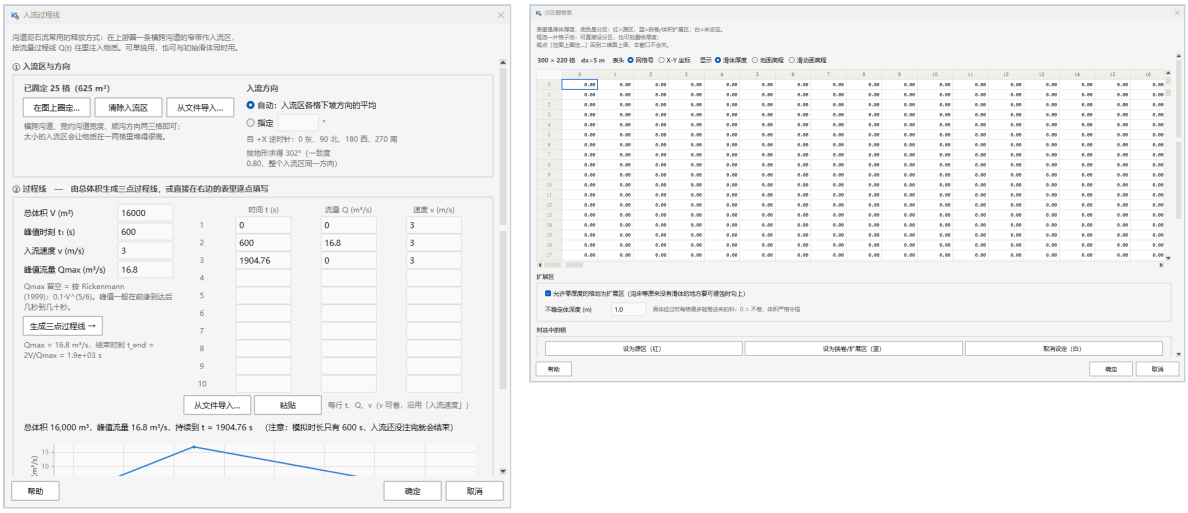

图 **12-20** （左）泥石流入流过程线（右）分区栅格表：允许零厚度区、不稳定体深度

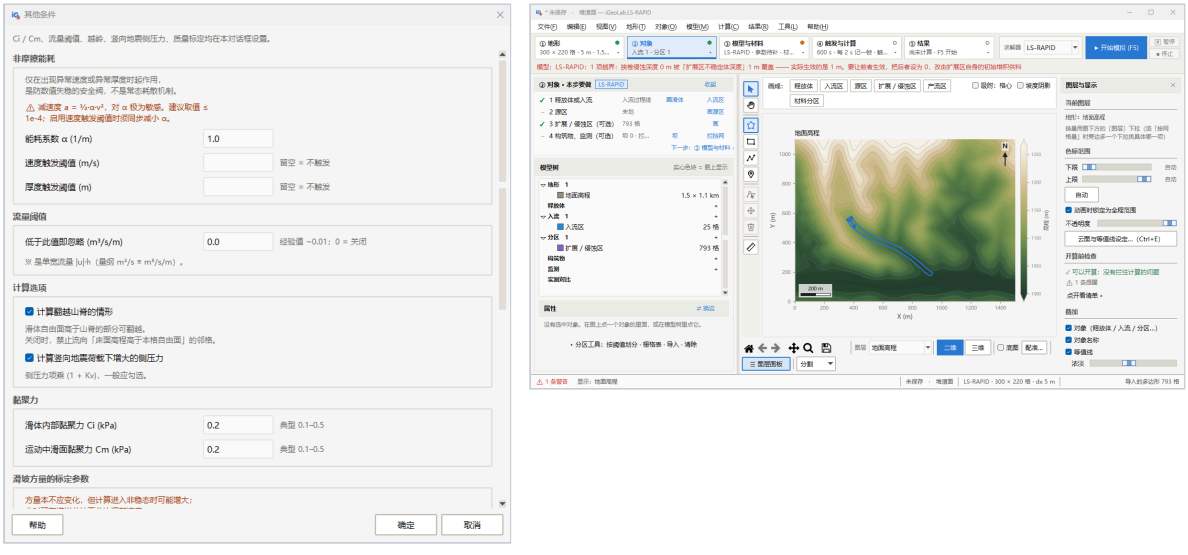

图 **12-21** （左）其他条件：侵蚀（右）入流区与可铲刮沟床

多重不利因素叠加：整体失事 + 沟坡不稳定体 + 沿程铲刮。

1. 按步骤 1 建整体失事算例；〔编辑 → 从文件导入分区多边形…〕选 沟坡不稳定体**.csv** → 源区 → 按深度生成滑体 → SLBL，按方量 1.2 万 m³，「与已有滑体的关

系」选叠加（图 12-22）；

2．导入 可铲刮沟床**.csv** 为扩展区；〔分区栅格表〕勾允许零厚度、不稳定体深度填 1.5；〔其他条件〕侵蚀深度 1.5 m、速率 0.10 m/s；非源区到达厚度 2 m；

3．〔土性参数〕μ 0.10、ξ 400，重度 20；开始模拟。

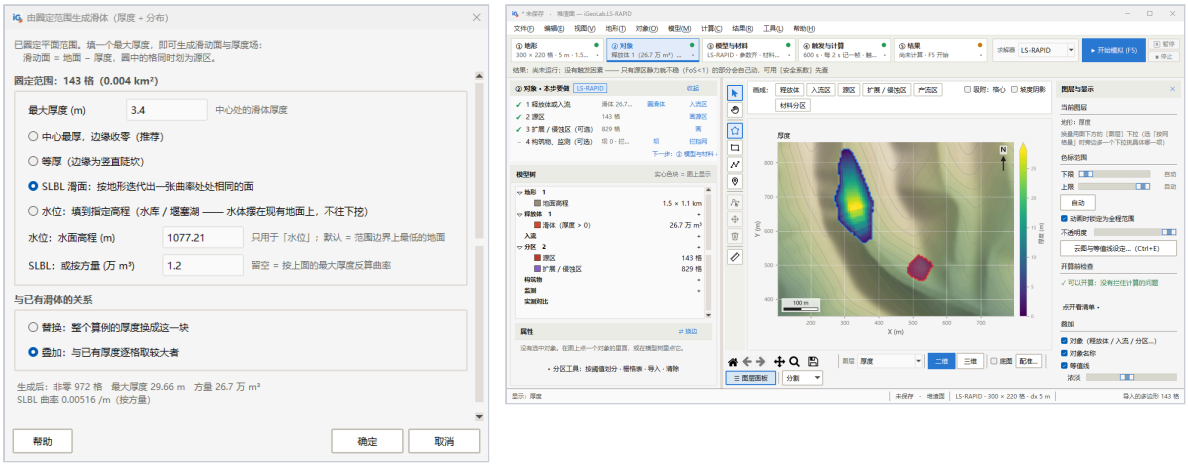

图 **12-22**　（左）沟坡不稳定体：**SLBL 1.2** 万 **m³**，与已有滑体叠加（右）叠加后的厚度

12.4.7　步骤 5　结果

打开各场景的算例（或结果 .lsres），第 ⑤ 步「结果」：〔图层〕选「按网格量 → 最大流深」即运动过程扫过的范围，选时间轴最后一帧的「厚度」即最终堆积范围。〔结果 → 导出 → 当前图〕存图，〔结果 → 导出 → 导出影响范围轮廓〕导出 Shapefile / DXF 叠加到 GIS 与 CAD。

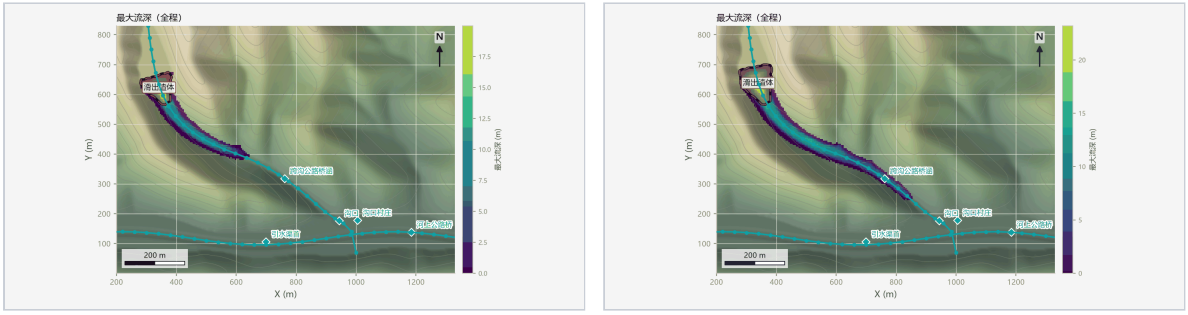

图 **12-23**　最大流深：（左）暴雨 **300** 年一遇（右）历史最大降雨

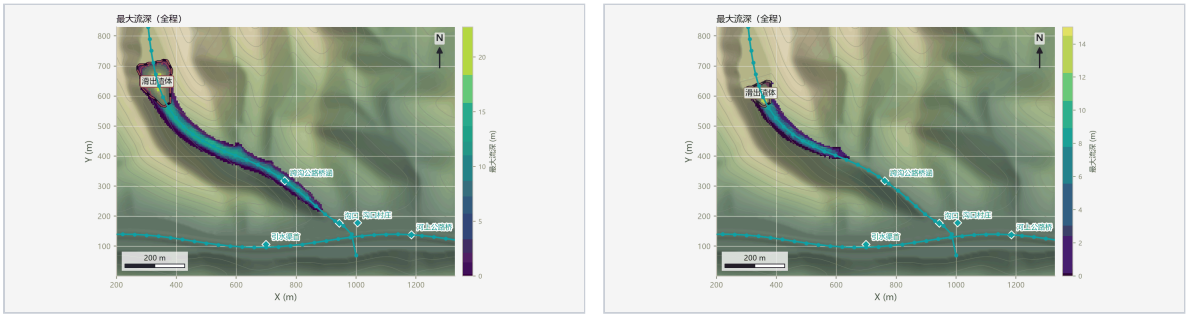

图 **12-24**　最大流深：（左）地下水位升至渣顶（右）挡渣墙失稳

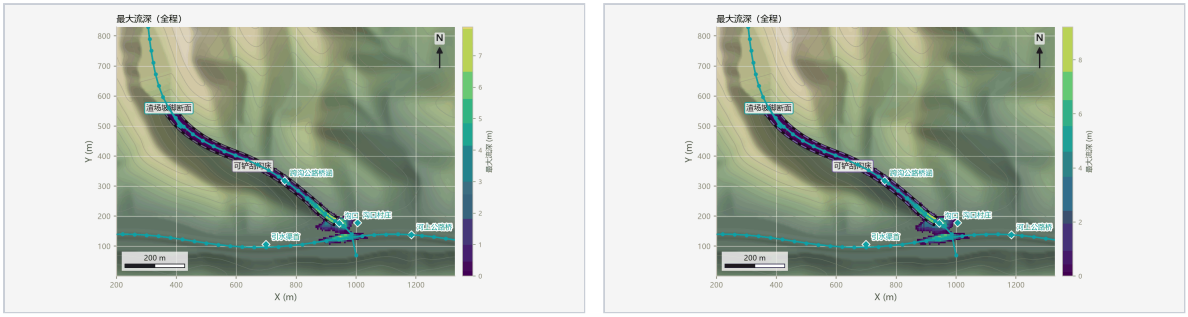

图 **12-25**　最大流深：（左）洪水冲刷 **300** 年一遇（右）洪水冲刷 历史最大降雨

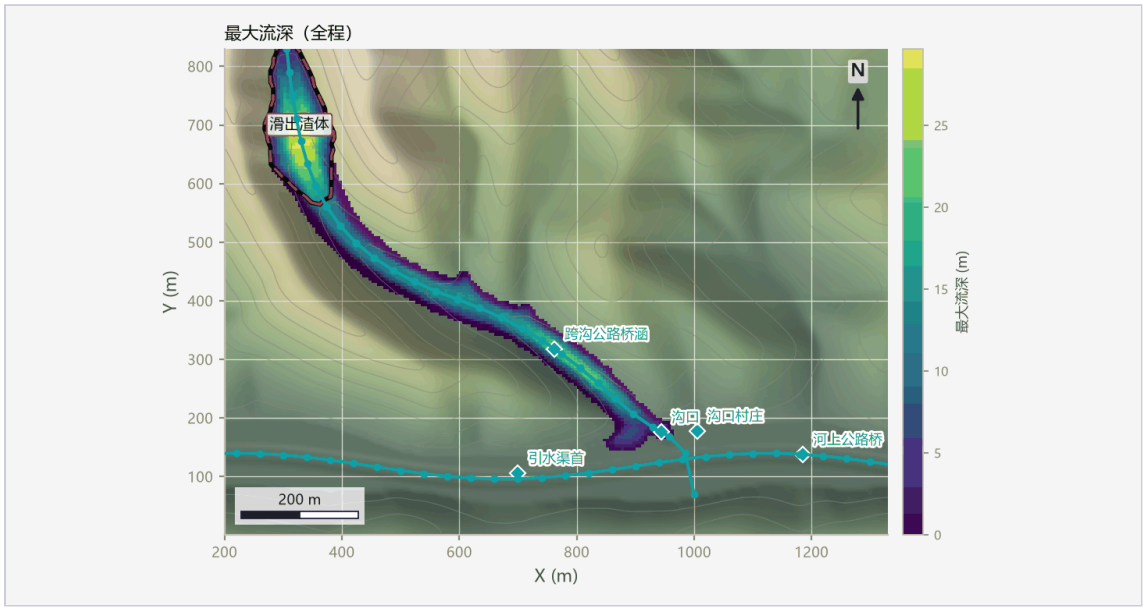

图 **12-26**　最大流深：整体失事

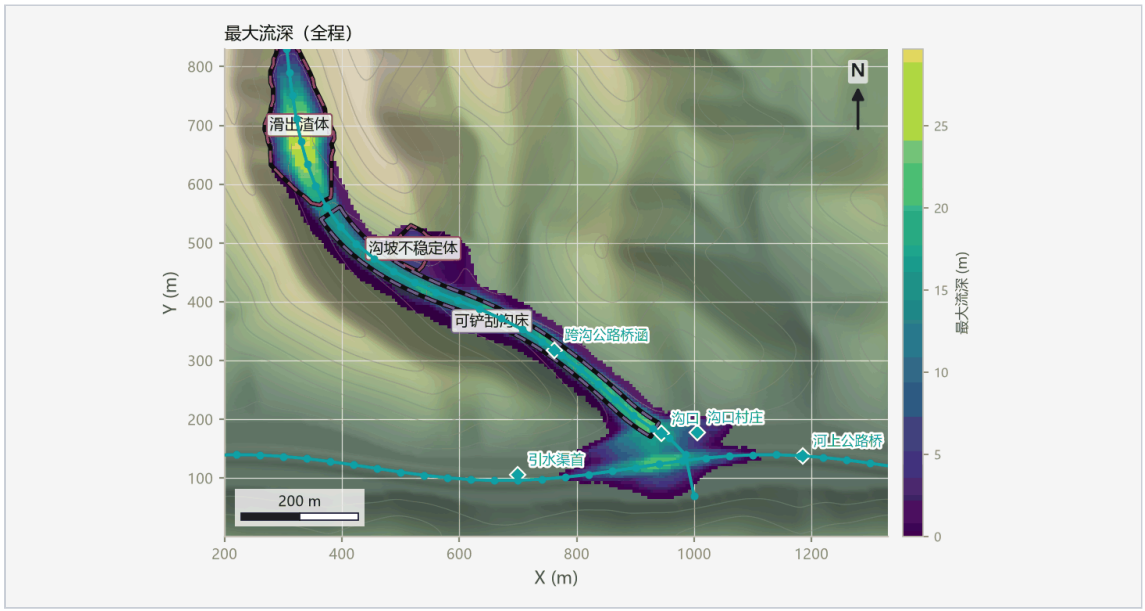

图 **12-27**　最大流深：多重不利因素叠加，渣体涌入河道

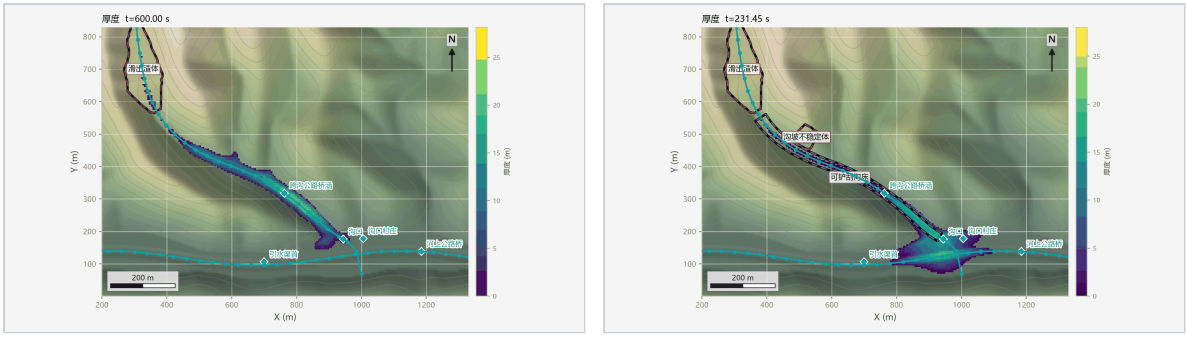

图 **12-28**　末态堆积厚度：（左）整体失事（右）多重不利因素叠加

表 **12-9**　各场景的滑出渣量、滑移距离、速度与堆积（滑移距离自渣场坡脚沿沟道量到最大流深 **0.1 m** 的最前端）

场景	滑出渣量	滑移距离（m）	最大速度（m/s）	扫过面积（ha）	堆积面积（ha）	最大堆积厚（m）	平均堆积厚（m）
暴雨入渗（300 年一遇）	5.0 万 m³	317	12.7	1.32	0.94	10.9	5.2
暴雨入渗（历史最大连续极端降雨）	10.0 万 m³	587	14.8	2.44	1.69	13.9	5.9
洪水冲刷（300 年一遇，泥石流）	1.6 万 m³（过程线）＋铲刮 0.7 万	781	5.9	2.02	0.81	6.6	2.8
洪水冲刷（历史最大连续极端降雨，泥石流）	2.3 万 m³（过程线）＋铲刮 0.7 万	781	5.9	2.15	0.94	7.9	3.1
地下水位升至渣顶	12.0 万 m³	632	14.9	2.77	1.83	13.0	6.5
挡渣墙失稳（坡脚渣体溃出）	2.5 万 m³	310	11.0	1.16	0.68	8.5	3.6
整体失事	25.5 万 m³	725	16.2	3.81	2.81	21.4	9.1
多重不利因素叠加（整体失事＋沟坡失稳＋沿程铲刮）	26.7 万 m³＋铲刮 3.0 万	811	20.6	7.35	3.79	20.4	7.8

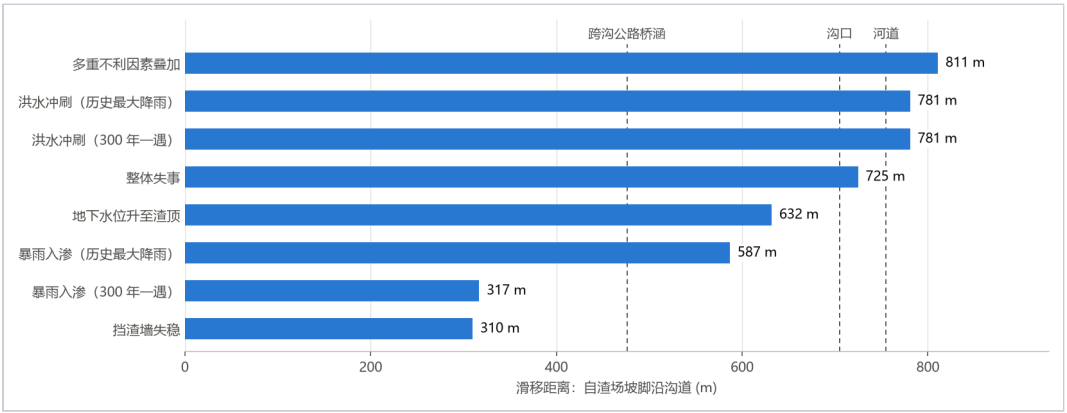

图 **12-29**　各场景的滑移距离与沿程敏感因素的位置

对照五个问题：滑出多少渣看滑出渣量与铲刮量两列；滑多远看滑移距离（图 12-29）；滑多快看最大速度；堆到哪里看最大流深图与末态堆积图；堆多厚看最大、平均堆积厚两列。

沟道纵剖面：沿冲沟中线的折线作结果剖面（〔结果 → 结果剖面…〕，量选全程最大流深），导出 CSV 后按横纵坐标等比例绘制，标上渣场、分水岭与敏感因素：

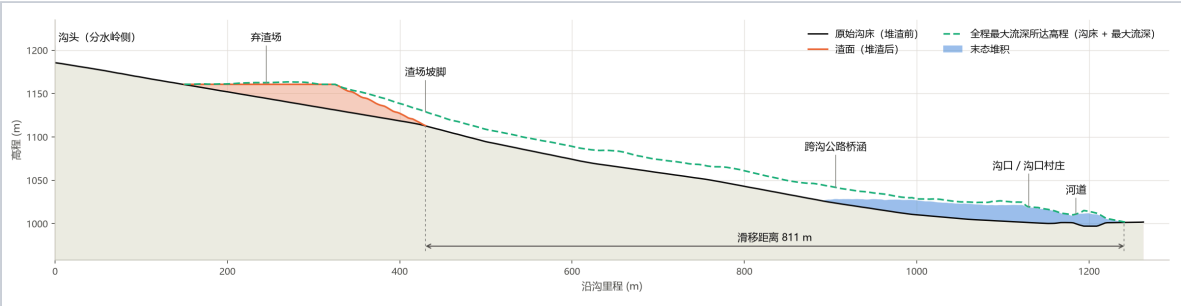

图 **12-30**　多因素叠加场景的沟道纵剖面图（等比例）：沟床、最大流深、末态堆积与敏感因素位置

12.4.8　步骤 6　判影响：敏感点、堵河与溃决

逐个核对敏感点：〔结果 → 测点时程（输入坐标）〕填坐标，读最大流深、速度、冲击压力；Ctrl+I 识别读到达时刻与末态堆积厚度。

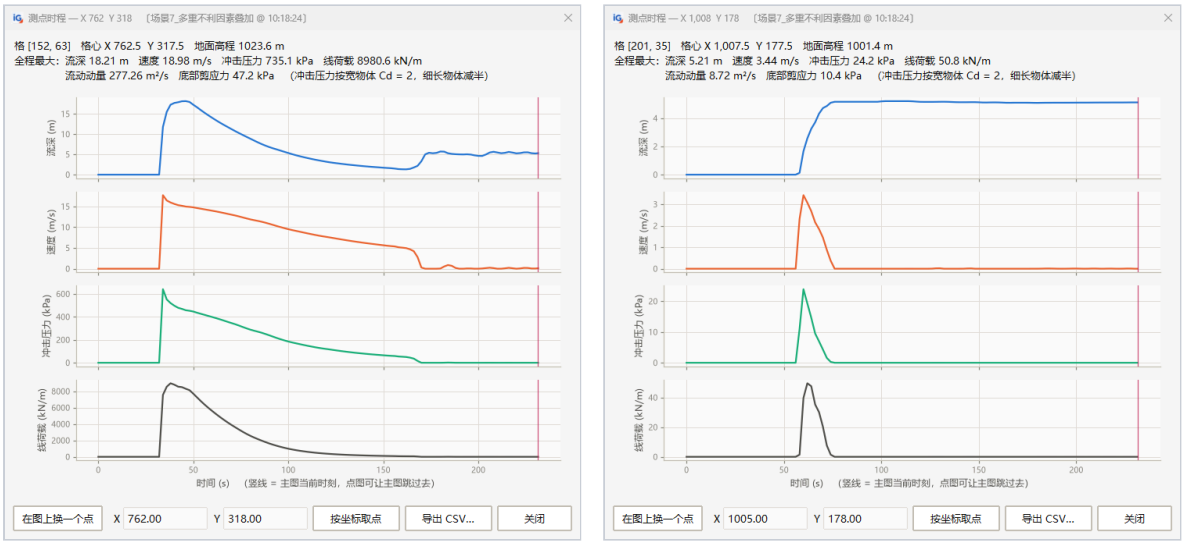

图 **12-31**　多因素叠加：（左）跨沟公路桥涵（右）沟口村庄的时程

表 **12-10**　敏感点受影响情况（未列出的场景不到达；地震场景未失稳）

场景	敏感因素	最大流深（m）	最大速度（m/s）	冲击压力（kPa）	末态堆积厚（m）	到达时刻
历史最大降雨	跨沟公路桥涵	7.5	5.2	55	7.5	56 s
洪水 300 年一遇	跨沟公路桥涵	1.6	5.6	57	0.0	330 s
洪水 300 年一遇	沟口	6.8	0.8	1	6.6	780 s
洪水 历史最大降雨	跨沟公路桥涵	1.6	5.5	56	0.0	300 s
洪水 历史最大降雨	沟口	6.8	0.6	1	6.2	630 s

场景	敏感因素	最大流深（m）	最大速度（m/s）	冲击压力（kPa）	末态堆积厚（m）	到达时刻
地下水至渣顶	跨沟公路桥涵	11.8	7.6	117	11.6	52 s
整体失事	跨沟公路桥涵	21.5	10.3	217	20.4	44 s
整体失事	沟口	4.4	0.3	0	4.4	142 s
多重不利因素叠加	跨沟公路桥涵	18.2	19.0	735	5.3	34 s
多重不利因素叠加	沟口村庄	5.2	3.4	24	5.1	58 s
多重不利因素叠加	沟口	17.9	11.7	279	17.6	48 s

堵河：多重不利因素叠加时渣体涌入河道，入河方量约 9.5 万 m³，在沟口形成堵塞体，堰顶（河道中线）高程约 1016.6 m，比原河床高约 19 m，完全截断行洪通道。洪水冲刷场景入河方量约 0.9–1.1 万 m³，局部淤塞河道。

上游壅水：在堵河后的地形上读漫溢标高，再按水位填出堰塞湖。

1. 打开多重不利因素叠加的结果，〔结果 → 把本次堆积并入地形…〕，确认；另存为新算例（堵河后的地形）。
2. 〔视图 → 任意断面输出…〕作跨堵塞体的横断面，起点 (925, 30)、终点 (925, 200)：河道中线处堵塞体高出原河床约 19 m，南侧与南岸坡之间的地面最低处约 1002.0 m —— 漫溢标高，水位超过它便从南侧绕过堵塞体下泄（图 12-32）；
3. 〔编辑 → 从文件导入分区多边形…〕选 多边形 / 堰塞湖库区**.csv** 为源区 → 按深度生成滑体 → 厚度选「水位」，填 1002.0，按〔确定〕。预览里写出水量约 2.9 万 m³、最大水深 3.7 m；回水区自堵塞体向上游约 730 m。

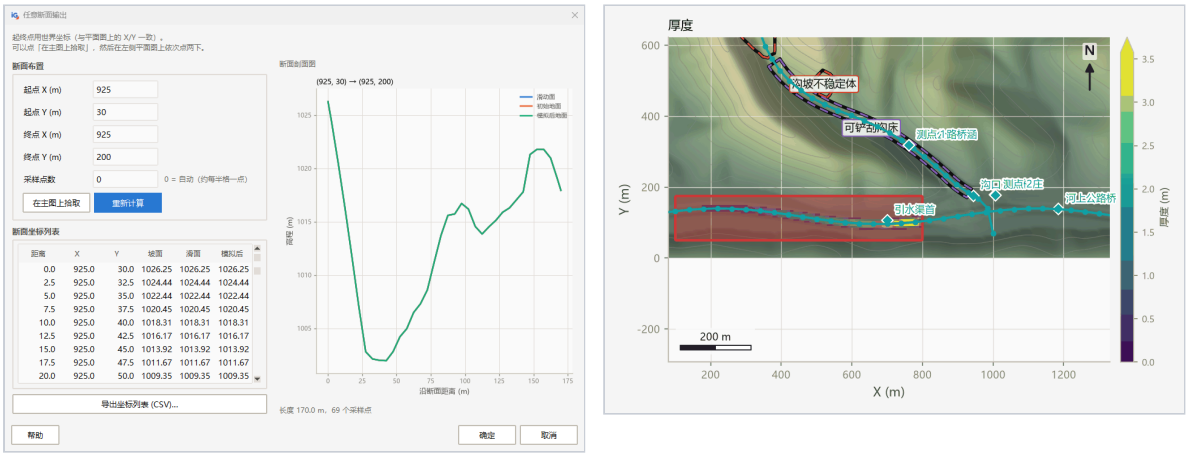

图 **12-32**　（左）跨堵塞体的横断面，南侧最低处为漫溢标高（右）按水位填出的堰塞湖

引水渠首处水深约 2.3 m，取水口被淹；河上公路桥在堵塞体下游，不受壅水影响。

堵塞体溃决：按瞬间溃决（河道内的堵塞体全部溃开）作最不利估算，直接打开 场景**8_**堰塞湖溃决**.lscase** 即可；从头做的步骤是：

1. 在堵河后的地形上，〔① 地形〕的〔地形〕页「削填」：基准面选「水平面」、基准高程填 998（堵塞体下的河床高程），点〔挖方（削至基准）〕，沿河道圈出堵塞体

所在的河段（x 790–1110 m、宽约 32 m），双击闭合：堵塞体在河道范围内挖到 998 m；

2. 按上面的办法再填一次水位 1002.0 的堰塞湖；〔土性参数〕点〔清水起算值〕（曼宁 0.03）；〔计算条件〕仅运动、出流、时长 900 s、记录间隔 5 s、动量判停 0；〔时间步设定〕上限 0.2 s；
3. 〔开始模拟〕，算完用〔结果 → 测点时程（输入坐标）〕看下游公路桥的流深与流速，用〔过线流量〕横穿河谷画线（(1175, 70) → (1175, 210)）看溃决洪峰。

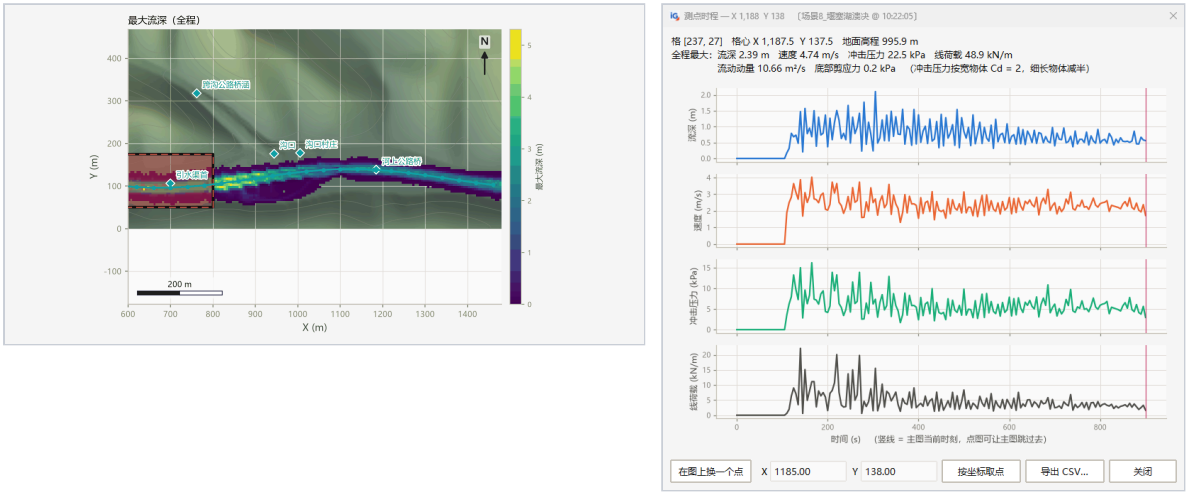

图 **12-33**　（左）溃决洪水全程最大流深（右）下游公路桥的流深、流速时程

溃决约 110 s 后洪水到达下游公路桥，最大流深约 2.4 m、最大流速约 4.7 m/s、冲击压力约 22 kPa；该断面洪峰约 65 m³/s（195 s）。

12.4.9　步骤 7　敏感性与成果

对影响成果的关键参数做敏感性分析：打开整体失事算例，〔模型 → 参数敏感性…〕，参数选摩擦系数 μ，从 0.10 到 0.20 取 5 点，每次 200 s，〔开始扫描〕，指标选「前缘推进」（源区中心到最远到达处的距离）看 μ 的影响（图 12-34）：μ 由 0.10 增到 0.20，前缘推进由 929 m 减到 544 m，弹性系数 −0.77，即 μ 每增大 1%，推进距离约减小 0.8%。成果说明里据此给出参数取值的依据与影响范围的变化幅度。



图 **12-34**　摩擦系数 **μ** 对前缘推进的敏感性（整体失事）

各场景分析完成后：〔结果 → 生成报告〕逐场景出 HTML 报告；〔结果 → 结果管理器〕多选各场景的 .lsres 取包络，得到各工况最大影响范围与控制工况；〔结果 → 导出〕输出 GIS 栅格、影响范围轮廓与 KMZ。

12.4.10　小结

表 **12-11**　敏感因素影响程度评价（示例）

敏感因素	**影响情况（最不利为多重不利因素叠加）**	**影响程度等级（表 4.1）**
跨沟公路桥涵	历史最大降雨起即被淹埋；叠加场景最大流深 18 m、流速 19 m/s，桥涵被冲毁掩埋	危害严重
沟口村庄	仅叠加场景到达：最大流深 5.2 m、流速 3.4 m/s，房屋遭冲击掩埋	危害严重
河道	叠加场景完全堵塞、洪水场景局部淤塞，堵塞行洪通道	危害严重
引水渠首	堵河后壅水淹没取水口	危害较严重
河上公路桥	堵塞体溃决洪水冲击	危害较严重

据影响程度提出对策：危害严重的应优化弃渣场选址或消除敏感因素；可采取减少堆渣量、降低堆渣高度、提高拦挡与排水标准、开展稳定监测等措施。本案例演示了从地形与堆渣面出发，完成失事场景、滑出渣量、滑移堆积与影响判断全过程的方法，可按自己的弃渣场替换地形、渣面与参数直接套用。

附录 A 快捷键

表 **A-1** 快捷键

分类	按键	作用
文件与编辑	Ctrl+N / Ctrl+O / Ctrl+S / Ctrl+Shift+S	新建 / 打开 / 保存 / 另存为
	Ctrl+Z / Ctrl+Y	撤销 / 重做
	Ctrl+K（或 Ctrl+P）	找功能 / 跳转到
计算	F5 / F6 / Shift+F5	开始（暂停时为继续）/ 暂停 / 停止
看图	Ctrl+D	二维 / 三维切换
	Ctrl+0	复位视图到全域
	Ctrl+L	显示 / 收起图层面板
	Alt+↑ / Alt+↓	叠放次序里选中的那层上移 / 下移
	Ctrl+E / Ctrl+M	云图与等值线设定 / 测距、量面积
	滚轮 / 左键拖动 / 双击	缩放 / 平移 / 复位
	右键	此处的菜单
结果	空格、← / →、Home / End	播放 / 暂停、上一帧 / 下一帧、首帧 / 末帧
	Ctrl+I / Ctrl+R	此处全部数值（识别）/ 运行摘要
界面	Ctrl+1 … Ctrl+7	切到左侧第 1–7 页
	F1	使用说明；在对话框里按，跳到讲这个对话框的那一节
	Enter / Esc	圈定区域时闭合 / 放弃；对话框里确定 / 取消

附录 B 文件类型

表 **B-1** 文件类型

扩展名	内容
.lscase + _fields.npz	算例：参数、触发、对象与全部网格数据（两者一起移动、改名）
.lsview	算例的显示设置与计算输出设置
.lsres	模拟结果：全部输出帧与时程统计
.lsproj	工程包：算例 + 场数组 + 显示设置，可带结果与备注
.lsr21 + 同名文件夹	LS-RAPID 工程
.asc .tif（+ .tfw .prj）	地形栅格（读入）；结果栅格（导出）
.dxf	网格面 / 三维点地形；影响范围轮廓（导出）
.obj .ply .osgb .las .laz .xyz	倾斜摄影模型与点云
.shp .kml .kmz .csv	多边形范围（导入）；影响范围（Shapefile）与 Google Earth（KMZ）导出
_report.html	自包含的 HTML 报告
_mc 文件夹	参数不确定性分析的输出
batch_report.txt、batch_runs.csv	多浪涌与命令行批跑的汇总
.avi .gif .png .jpg	动画与图片导出

附录 C 单位与坐标

- 长度 m、时间 s、应力与压力 kPa、重度 kN/m³、密度 kg/m³、流量 m³/s、雨强 mm/h（触发页的降雨表用 mm/10 min）；
- 厚度为铅垂厚度，速度为水平分量；需要坡面法向厚度时选结果量「滑体厚度（坡面法向）」；
- 平面坐标须为以米计的投影坐标；第 0 行在南、第 0 列在西，数值取在格心；
- 方位：入流方向、初速方向自正东（+X）起逆时针量，0 东、90 北；地形光源方位 0 正北、顺时针。

附录 D 术语

表 **D-1** 术语

术语	含义
滑体、释放体	会动的物质；由地面与滑动面之间的厚度给出
源区	滑体中首先起动、强度按剪切位移衰减的区域
扩展 / 侵蚀区	滑体经过时可铲刮床面、使体积增大的区域
孔压比 ru	孔隙水压力与上覆土重之比，u/(γh)
剪切位移	沿滑面累计的滑动距离，用于强度衰减
流深	物质在某格的铅垂厚度
冲击压力	ρv²（宽物体，Cd = 2），细长物体取一半
线荷载	ρhv²，单位宽度上的荷载（kN/m）
流动动量	h·v（m²/s）
判停	结束计算的判据：速度、动量或质心
SLBL	Sloping Local Base Level：由范围与地形迭代的、曲率处处相同的滑面
帧	按记录间隔存下的一个输出时刻
包络	多次计算逐格取最大

附录 E 参考文献

- Sassa K, Nagai O, Solidum R, Yamazaki Y, Ohta H. An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide. Landslides, 2010, 7: 219–236.
- Voellmy A. Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizerische Bauzeitung, 1955, 73: 159–165, 212–217, 246–249, 280–285.
- Rickenmann D. Empirical relationships for debris flows. Natural Hazards, 1999, 19: 47–77.
- Montrasio L, Valentino R. A model for triggering mechanisms of shallow landslides. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, 8: 1149–1159.
- Jaboyedoff M, Carrea D, Derron M H, Oppikofer T, Penna I M, Rudaz B. A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes. Engineering Geology, 2020, 267: 105478.
- Mergili M, Fischer J T, Krenn J, Pudasaini S P. r.avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows. Geoscientific Model Development, 2017, 10: 553–569.
- Zhan W, Fan X, Huang R, Pei X, Xu Q, Li W. Empirical prediction for travel distance of channelized rock avalanches in the Wenchuan earthquake area. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2017, 17: 833–844.
- 水利部水土保持司等：《弃渣场（含临时堆土场）失事影响专题分析报告编制提纲（试行）》（办水保函〔2026〕232 号附件）。
- 中华人民共和国国家标准：《水土保持工程设计规范》（GB 51018—2014）。
- 中华人民共和国地质矿产行业标准：《泥石流灾害防治工程勘查规范》（DZ/T 0220—2006）。