

iGeoLab.LS-RAPID

产品介绍手册

版本 V1.0

中仿公司

www.igeo.cn · 400 888 5100

目　　录

前言 5

第 1 章　软件概述 6
1.1　产品定位 6
1.2　应用领域 6
1.3　功能模块一览 7
1.4　主要技术特点 7
1.5　界面组织 8
1.6　典型工作流程 8
1.7　运行环境与安装 9

第 2 章　工作环境 10
2.1　起始页与示例 10
2.2　流程条与「本步要做」 11
2.3　模型树与属性 11
2.4　绘图工具与「画成」 11
2.5　图层面板与叠放次序 12
2.6　时间轴与分割窗口 14
2.7　找功能、消息与撤销 15
2.8　工程管理 15

第 3 章　地形与坐标 17
3.1　地形栅格 17
3.2　全球地形下载 18
3.3　DXF 地形 19
3.4　倾斜摄影模型与点云 20
3.5　控制点与网格编辑 21
3.6　模拟区与坐标系 21
3.7　底图与地理配准 22
3.8　地形的显示 22

第 4 章　滑体、分区与构筑物 24
4.1　滑体的生成 24
4.2　椭球滑面 25
4.3　源区与扩展 / 侵蚀区 26
4.4　分区栅格表 27
4.5　从文件导入范围 27
4.6　挡坝、障碍物与拦挡网 28
4.7　监测与实测资料 28

第 5 章　求解器与计算模型 30
5.1　内置求解器的控制方程 30

5.2 起动与强度衰减 31
5.3 底面阻力模型 31
5.4 沿程侵蚀与密度演化 32
5.5 数值方法 32
5.6 r.avaflow 4.0 32
5.7 自定义脚本（二次开发） 34

第 **6** 章 材料与参数 **35**
6.1 土性参数 35
6.2 由指标估算残余摩擦角 36
6.3 材料与指派 36
6.4 逐网格参数与参数库 37

第 **7** 章 触发与释放 **38**
7.1 孔隙水压力 38
7.2 地震 39
7.3 由降雨推算孔压 39
7.4 入流过程线 40
7.5 降雨产流与山洪 41
7.6 溃坝与堰塞湖溃决 41
7.7 分批释放与多浪涌 42

第 **8** 章 计算控制 **43**
8.1 计算条件 43
8.2 判停 44
8.3 时间步与其他条件 45
8.4 检查算例与计算监视 45
8.5 编译内核、批量与命令行 46

第 **9** 章 结果与后处理 **47**
9.1 平面图与最大值图 48
9.2 识别一格与测点时程 50
9.3 过线流量 51
9.4 结果剖面 51
9.5 断面输出与断面安全系数 52
9.6 区域堆积统计与时程 53
9.7 三维视图与动画 53
9.8 运行摘要与 HTML 报告 54
9.9 与实测对比 55
9.10 算例对比与结果管理 55
9.11 导出 57
9.12 把堆积并入地形 57

第 **10** 章 研究工具 **58**

10.1 参数敏感性 58
10.2 参数反演与可辨识性 58
10.3 参数不确定性分析 59
第 **11** 章 数据互通与自动化 **60**
11.1 命令行 60
11.2 自定义脚本 60
第 **12** 章 应用案例 **61**
12.1 降雨型滑坡 61
12.2 地震型滑坡 62
12.3 沟道泥石流 62
12.4 弃渣场失事影响范围 63
关于与联系 **68**

前言

iGeoLab.LS-RAPID 是中仿公司开发的滑坡与泥石流运动数值模拟平台。它把「起动 — 运动 — 堆积」放在同一套流程里：从地形与滑体的建立、触发因素与工况的设定，到运动过程的计算、结果的判读与成果输出，用一个程序完成。

本手册按功能模块介绍平台的全部功能。每章先说明这个模块解决什么问题、包含哪些功能，再逐项介绍主要设定、算法与输出，并配以软件实机界面。操作步骤、对话框里每一项的含义与从头做到尾的案例教程见《iGeoLab.LS-RAPID 用户手册》。

本手册的组织

章	内容
第 1 章　软件概述	产品定位、应用领域、功能模块、技术特点与工作流程
第 2 章　工作环境	起始页、流程条、模型树、绘图工具、图层面板、时间轴与工程管理
第 3 章　地形与坐标	栅格、全球地形、DXF、倾斜摄影与点云、坐标系、底图与地理配准
第 4 章　滑体、分区与构筑物	滑体生成、椭球与 SLBL 滑面、分区栅格表、坝与拦挡网、监测与实测资料
第 5 章　求解器与计算模型	内置 LS-RAPID 求解器的方程、强度、阻力、侵蚀与数值方法，r.avaflow 4.0，自定义脚本
第 6 章　材料与参数	土性参数、经验相关、材料指派、逐网格参数与参数库
第 7 章　触发与释放	孔压、地震、降雨推算孔压、入流过程线、降雨产流、溃坝、分批释放
第 8 章　计算控制	计算条件、时间步、判停、检查、监视、并行、多浪涌与命令行
第 9 章　结果与后处理	平面图与最大值图、时程、剖面、流量、统计、三维、动画、报告、对比与导出
第 10 章　研究工具	参数敏感性、参数反演与可辨识性、参数不确定性分析
第 11 章　数据互通与自动化	LS-RAPID 与 r.avaflow 工程、GIS、Google Earth、命令行与脚本
第 12 章　应用案例	降雨型与地震型滑坡、沟道泥石流、弃渣场失事影响范围

第 1 章 软件概述

本章概括平台的定位、适用的问题、功能模块与一次分析的完整流程，便于快速了解平台能做什么、怎样做。

1.1 产品定位

平台用于模拟滑坡、碎屑流、泥石流等重力驱动物质的起动与运动，以及由此产生的影响范围、堆积厚度和冲击作用。计算在真实地形的规则格网上进行，给出每一格、每一时刻的流深、流速与派生量，直接回答工程上最关心的五个问题：滑出多少、滑多远、滑多快、堆到哪里、堆多厚。

平台面向工程设计、地质灾害评估、水土保持、应急管理与教学科研人员。界面按建模的先后次序组织，每一步都告诉使用者当前该做什么、还差什么；参数带常用范围与起算值，计算前自动检查，算完自动生成摘要与报告。

1.2 应用领域

表 **1-1** 应用领域

领域	典型问题
滑坡灾害评估	潜在滑体在降雨、地震作用下是否起动，起动后滑到哪里、速度多大、对下方设施的冲击
弃渣场与堆载体	暴雨、洪水、地下水、地震等工况下失事的滑出渣量、滑移距离、堆积范围与对下游敏感因素的影响
泥石流沟	给定一次泥石流的流量过程线，算沟道内的流深、流速、冲积扇上的堆积与防治工程的效果
山洪与产流	雨按时程落在流域，算坡面汇流、沟道洪水过程与淹没水深
堵河与溃决	滑坡堆积堵塞河道、上游壅水成湖、堵塞体溃决洪水对下游的影响
防治工程	挡坝、导流堤、拦挡网布置前后的范围与截留量对比
历史事件反演	由实测堆积与影响范围反解参数，检验模型并为同类场地提供取值依据
教学与研究	本构模型对比、参数敏感性、不确定性分析、自定义阻力与侵蚀规律

1.3 功能模块一览

表 **1-2** 功能模块一览

模块	主要内容
地形与坐标	栅格（ASC / GeoTIFF）、DXF、倾斜摄影模型与点云、全球地形下载、控制点与网格文本；UTM 坐标系、地理配准、卫星影像底图
滑体与对象	圈范围生成滑体（厚度 / 水位 / SLBL 滑面）、椭球滑面、厚度栅格；源区、扩展 / 侵蚀区、材料分区、坝与障碍物、拦挡网、测点、剖面
求解与本构	内置求解器：强度随剪切位移衰减、Voellmy、宾汉姆、曼宁、μ(I)、沿程侵蚀、密度演化；r.avaflow 4.0 单相 / 三相；编译内核
材料与参数	常用范围与起算值、由指标估算残余摩擦角、材料指派、逐网格参数、参数库
触发与释放	孔压比、地震、降雨（推算孔压）、入流过程线、分批释放、降雨产流与溃坝、多浪涌
计算控制	模拟模式、判停、时间步、边界、输出控制、检查算例、计算监视；命令行批量计算与参数扫描
结果与后处理	平面图、最大值图、剖面、断面安全系数、测点时程、过线流量、区域统计、三维与快速三维、动画、算例对比、结果管理与包络、HTML 报告
研究工具	参数敏感性、参数反演与可辨识性、参数不确定性分析（蒙特卡洛）
数据互通	LS-RAPID 与 r.avaflow 工程、Shapefile / KML / DXF、ASC 栅格、Google Earth（KMZ）、工程包、命令行与自定义脚本

1.4 主要技术特点

- 一套流程：五步卡片与「本步要做」按当前步骤和求解器列出要做的事，每条带直接去做的按钮；
- 地形来源丰富：从栅格、DXF、倾斜摄影成果、点云到全球地形下载，导入时可裁剪、重采样、补洞、转坐标系；
- 滑体生成灵活：范围加厚度、按断面通过点的椭球滑面、由范围按方量或厚度求 SLBL 滑面、直接导入滑面或厚度栅格；
- 稳定与运动相接：条分法断面安全系数判断失稳体积，求解器接着算失稳之后的运动；
- 起动有判据：源区强度随剪切位移由峰值衰减到稳态，孔压、地震、降雨作为触发因素进入方程，何时起动由力的平衡决定；
- 阻力模型齐全：LS-RAPID 强度衰减、Voellmy、屈服应力、黏性、曼宁、μ(I)，还可以用 Python 脚本写自己的阻力律与侵蚀速率；
- 两套求解器：同一份地形与滑体可用内置求解器或 r.avaflow 计算，结果在同一套后处理里查看与对比；
- 结果面向判断：最大值图、冲击压力、影响范围轮廓、敏感点时程、沟道纵剖面、危险强度分级、三维与动画，可导出 GIS、Google Earth 与 HTML 报告；

- 守恒可核：初始体积、侵蚀卷入、入流、净雨、流出、截留分别记账，逐时刻画成体积账；
- 计算快：只算有物质的区域，CPU 编译内核自动启用，蒙特卡洛按进程并行。

1.5　界面组织

主窗口由菜单栏、流程条、左栏（本步要做、模型树、属性或材料面板）、绘图工具条、图区与图层面板组成（图 1-1）。流程条的五张卡片对应建模与分析的五步；点卡片，左栏换成这一步的内容，图区始终是同一张图，所见即所算。

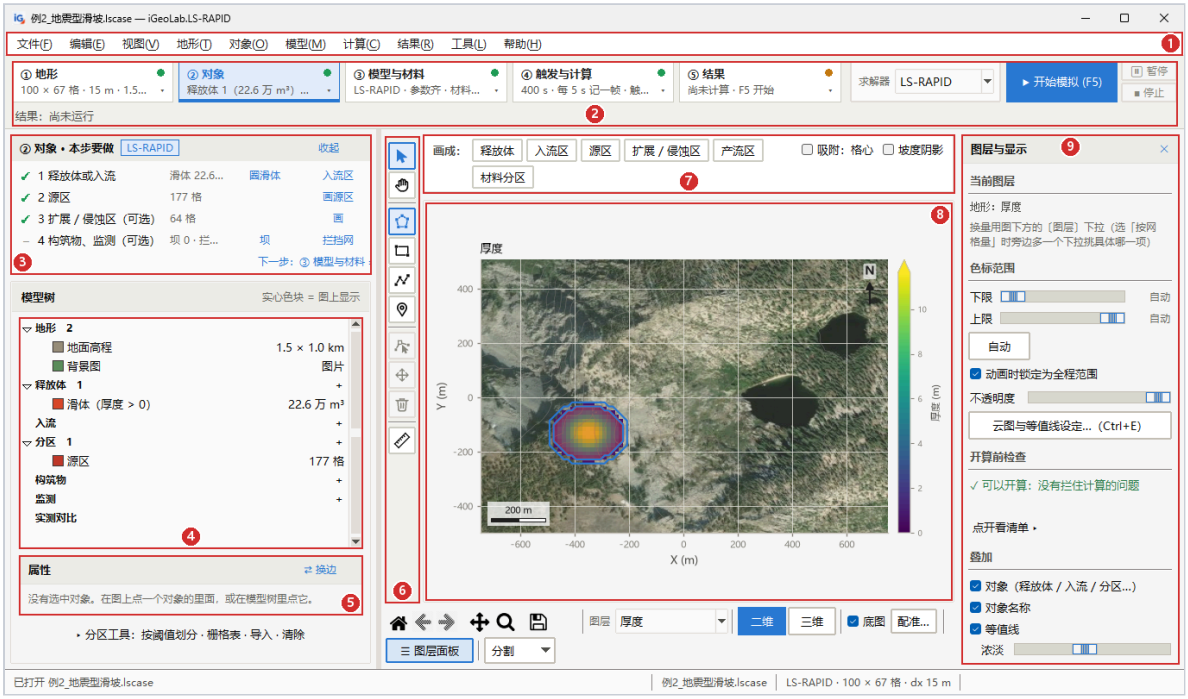

图 1-1　主窗口：1 菜单栏　2 流程条　3 本步要做　4 模型树　5 属性　6 绘图工具条　7「画成」　8 图区　9 图层面板

1.6　典型工作流程

表 1-3　五步工作流程

步骤	做什么	得到什么
① 地形	导入地形（或 DXF、倾斜摄影、全球地形下载），设坐标系与模拟区；需要时叠加卫星影像	计算格网与地面高程
② 对象	圈定滑体并生成滑动面；划源区、扩展 / 侵蚀区与材料分区；布置测点、剖面、坝与拦挡网	会动的物质、分区与监测
③ 模型与材料	选求解器与本构，填土性与材料参数；可套用推荐参数、参数库或逐格赋值	计算模型
④ 触发与计算	给孔压、地震、降雨时程或入流过程线；设时长、判停与输出；检查算例后开始模拟	逐时刻的流深、流速
⑤ 结果	看最大流深、速度、堆积、时程、剖面与对比；导出 GIS、Google Earth、影响范围与报告	成果图、表与报告



图 **1-2**　流程条：五张步骤卡片、求解器下拉与开始 / 暂停 / 停止

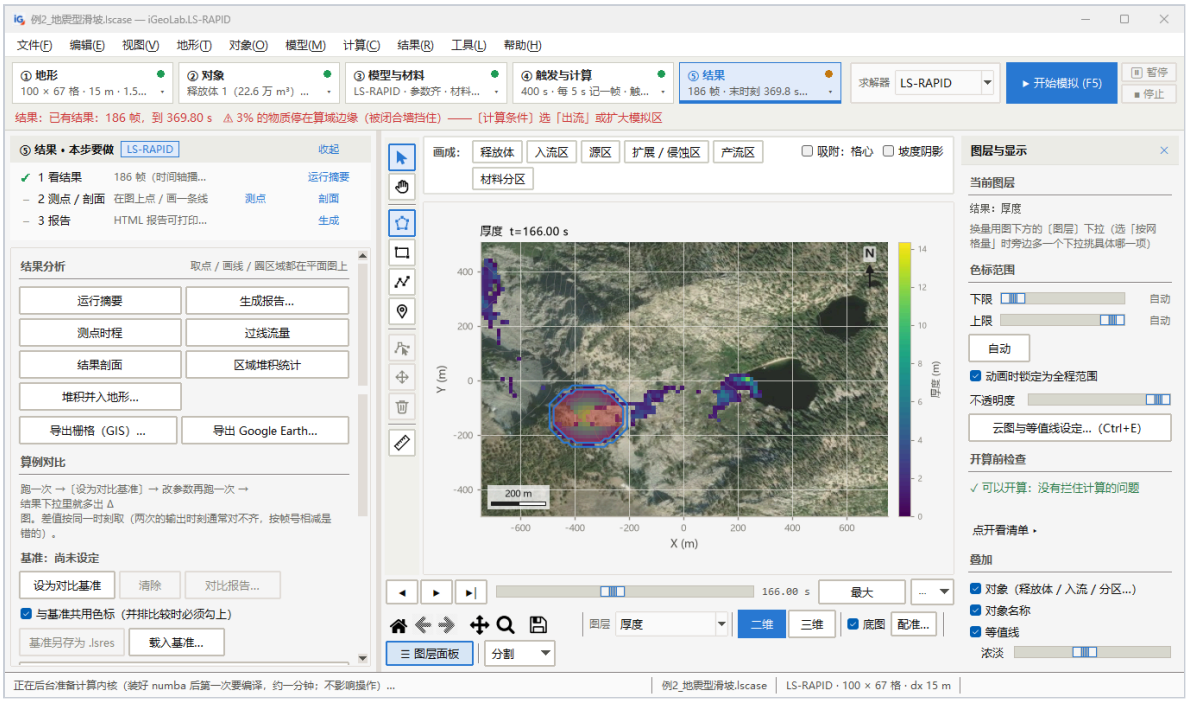

图 **1-3**　一次分析的结果：流深随时间变化，图下是时间轴

1.7　运行环境与安装

表 **1-4**　运行环境

项目	要求
操作系统	Windows 10 / 11（64 位）
内存 / 磁盘	建议 8 GB 及以上 / 约 600 MB（不含计算结果）
显示 / 显卡	1366 × 768 及以上，支持高 DPI；快速三维查看用显卡绘制，支持 OpenGL 3.2 及以上

程序以安装程序发布，运行所需的组件全部包含在内，安装后即可使用：求解器、编译内核、点云与倾斜摄影读取、快速三维查看都不需要另行安装。默认装到全机可用的位置，没有管理员权限时可选择仅为当前用户安装；安装向导建开始菜单与桌面快捷方式，并把算例文件关联到本程序。

第 2 章　工作环境

平台的界面围绕一张图展开：建模时画范围、看地形，计算时看流动，算完看结果，都在同一张图上。本章介绍界面各部分与工程管理功能。

表 2-1　工作环境功能概览

功能	说明
起始页	示例、打开算例、从不同来源的地形新建、最近文件、拖放打开
流程条与本步要做	五步卡片的状态、按步骤与求解器列出的待办
模型树与属性	算例里的全部对象，显示 / 隐藏、改名、缩放到、改参数
绘图工具条	多边形、矩形、折线、点、编辑顶点、移动、删除、测距
图层面板	图层、色标、叠加内容、叠放次序、底图、开算前检查
时间轴与分割窗口	播放、逐帧、全程最大；两格图面按同一时刻联动
找功能与消息记录	输入功能名直接跳转；本次运行的全部消息
工程管理	算例文件、工程包、设置一览、默认设置、自动保存与撤销

2.1　起始页与示例

启动后还没有算例时，图区显示起始页：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。程序附带四个示例，覆盖降雨型滑坡、地震型滑坡、沟道泥石流与弃渣场失事。

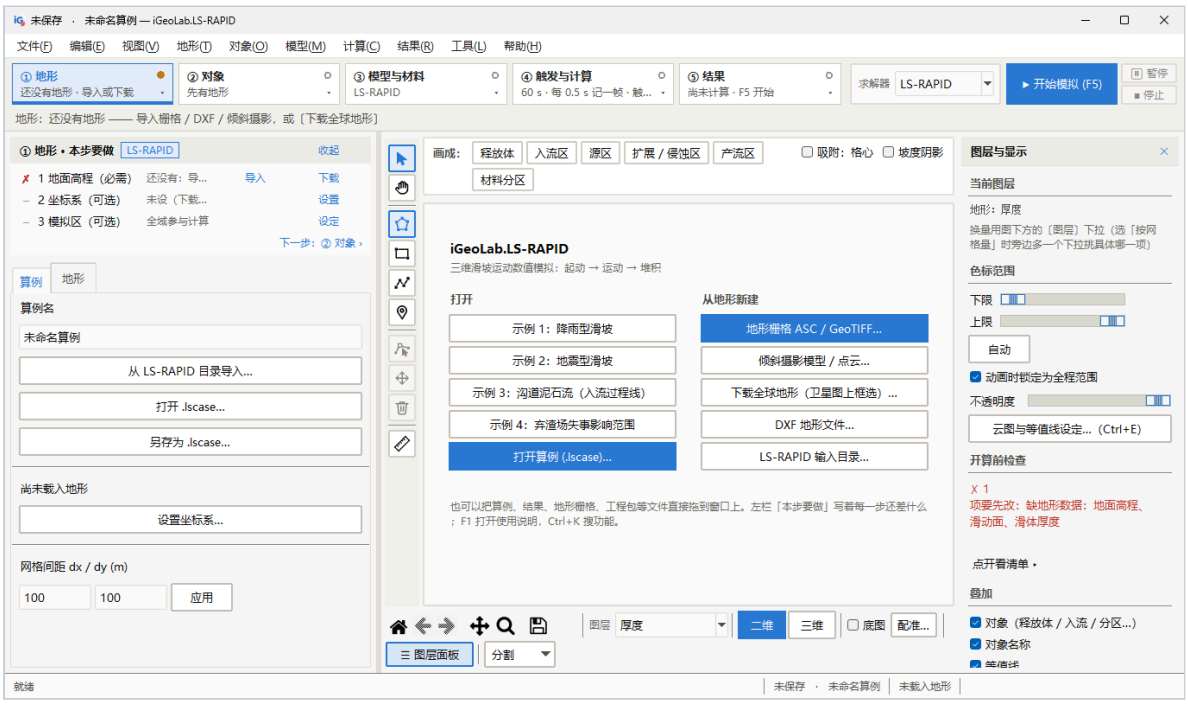

图 2-1　起始页

- 算例、结果、地形栅格、DXF、Shapefile、KML / KMZ、工程包可直接从资源管理器拖到窗口上打开；

- 双击 .lscase 文件直接启动程序并打开该算例。

2.2 流程条与「本步要做」

流程条的五张卡片写着各步的现状：地形多大、释放体多少方、用哪个求解器、触发是什么、算到哪一步。卡片右上角的点表示状态：绿点是这一步齐了，橙点是当前该做或有提醒，空心灰点是还没轮到。

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，新手照着做即可完成一次分析。



图 **2-2** （左）「本步要做」（右）模型树与选中对象的属性

2.3 模型树与属性

凡是画出来或导入的范围都成为带名字的对象，按地形、释放体、入流、分区、构筑物、监测、实测对比分类列在模型树里。

- 点名称前的色块在图上显示 / 隐藏；双击改名；右键缩放到、打开设置、隐藏、改名、删除；
- 选中后属性面板显示名称、摘要与几何，下面按求解器分节列出可直接改的参数，回车生效；
- 组名右边的「＋」新建这一类对象并直接开始画；属性面板可停靠到图的左侧或右侧。

2.4 绘图工具与「画成」

绘图工具条在图的左边：选择、平移、多边形、矩形、折线、点、编辑顶点、整体移动、删除、测距。先选画法，图上方「画成」一行列出能画成的类别，点一类即开始画。

表 2-2　画法与对象类别

画法	可以画成
多边形、矩形	释放体、入流区、源区、扩展 / 侵蚀区、产流区、材料分区
折线	坝、拦挡网、剖面、过线流量
点	测点
测距	长度、面积、高差与坡度

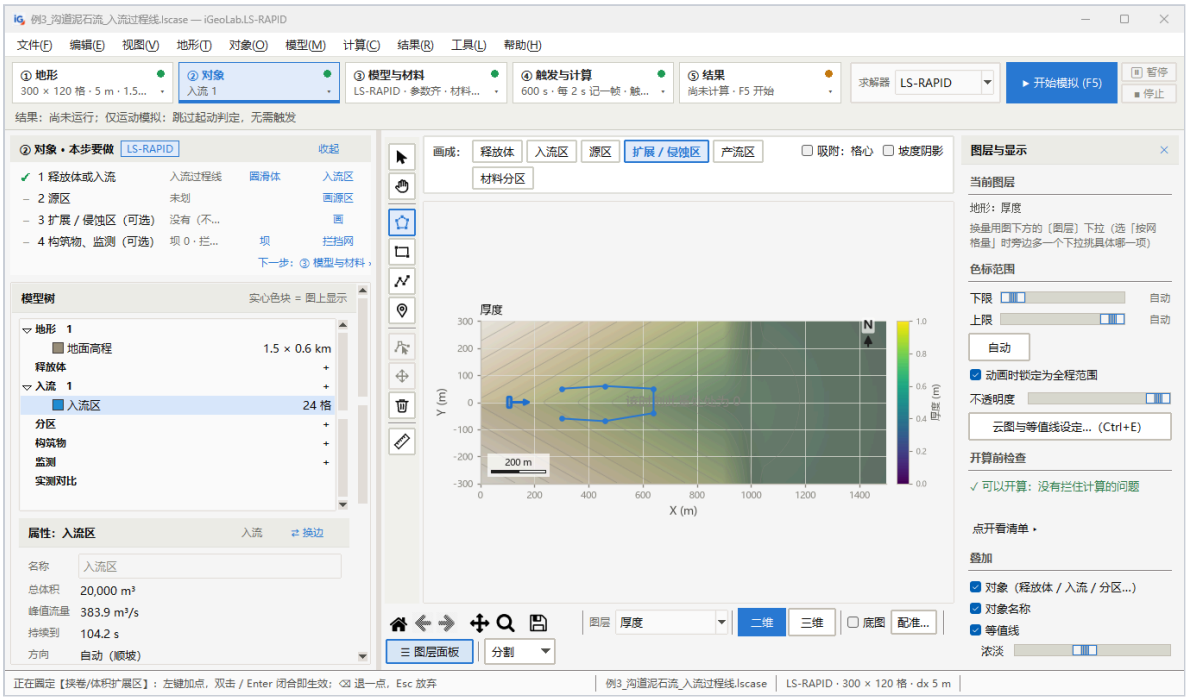

图 2-3　正在画一个扩展 / 侵蚀区：吸附格心，叠加坡度阴影

- 画的途中 Backspace 退一点、Esc 放弃、双击或 Enter 完成；可吸附到格心；
- 〔坡度阴影〕叠加在图上，便于看清沟和坡；
- 已有对象可拖顶点改形状、点边加顶点、右键删顶点、整体移动、复制、改成另一类。

2.5　图层面板与叠放次序

图层面板集中了「画什么、怎么画」：当前图层、色标上下限、不透明度、叠加内容、叠放次序、底图与开算前检查。

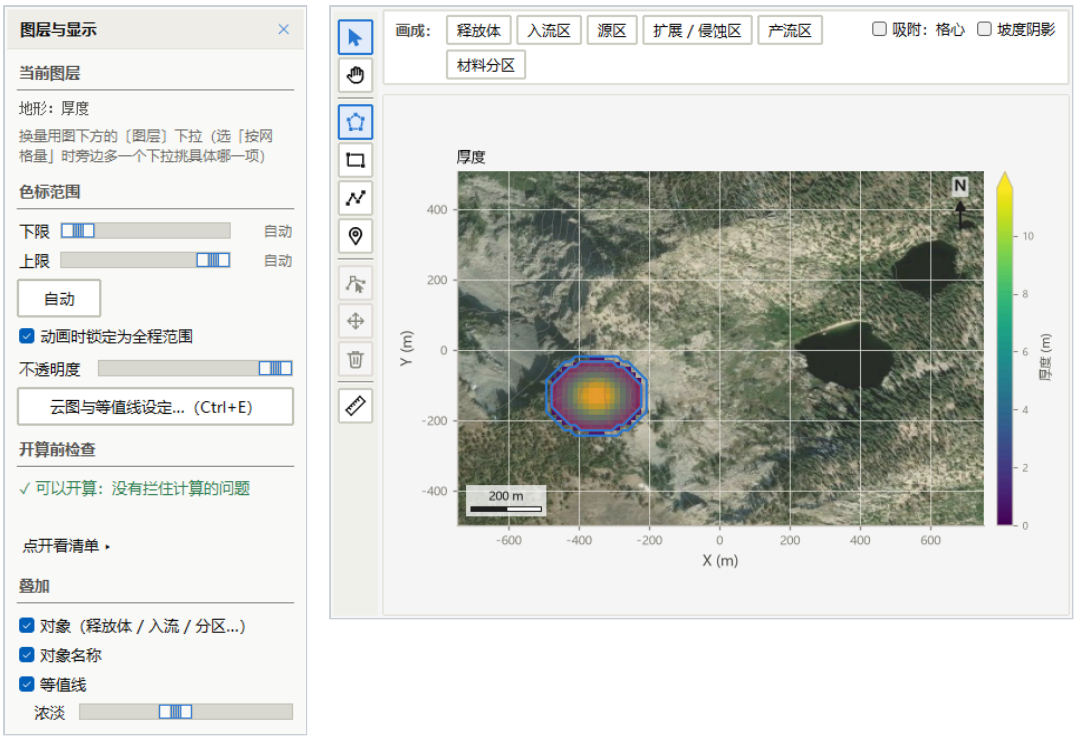

图 **2-4** （左）图层面板（右）绘图工具条与「画成」

- 叠加内容：对象与名称、等值线、坐标轴与格网、比例尺与指北针、计算网格线、控制点、源区与扩展区边界、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，可逐层上移、下移；
- 云图画法可选网格块、平滑、填充等值线；色带、分级数、色标裁剪、等值线的层级、线色与标注均可设，右侧实时预览。

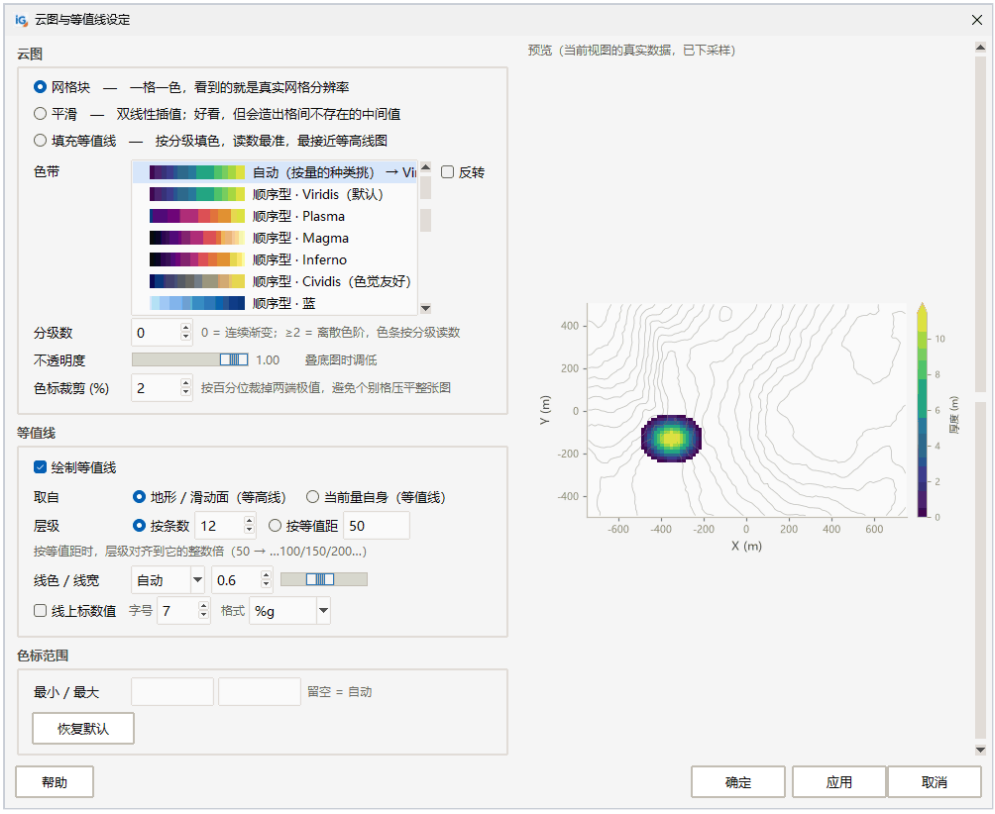

图 **2-5**　云图与等值线设定

2.6　时间轴与分割窗口

有结果时图下出现时间轴：播放、逐帧、跳到首末帧、调帧速与循环；〔全程最大〕把当前量换成每格达到过的最大值。图区可分割成左右或上下两格，各画各的量，按同一时刻联动，例如左边平面图、右边时程或纵断面。

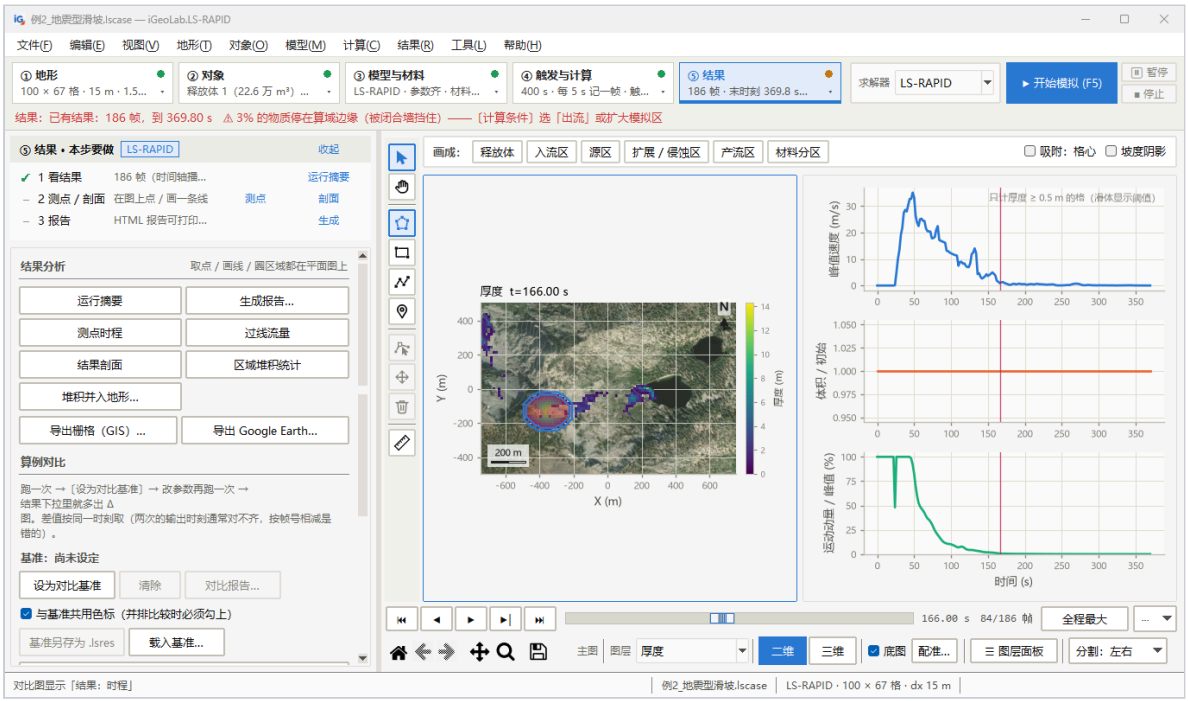

图 **2-6**　分割窗口：左边平面图，右边时程，竖线是当前时刻

2.7 找功能、消息与撤销

- 找功能（Ctrl+K）：输入功能名、参数名或英文菜单名直接跳转；
- 消息记录：本次运行说过的每一句都在，警告标红；
- 撤销 / 重做：网格数据、对象、参数与触发时程的最近 12 步改动可以退回；
- 自动保存：有未保存改动的算例定时写一份副本，打开算例时若副本更新会提议恢复；
- 界面字号：小 / 标准 / 大 / 特大，当场生效，图上的字同步放大；
- 帮助：F1 打开使用说明，在对话框里按 F1 直接跳到讲这个对话框的一节。

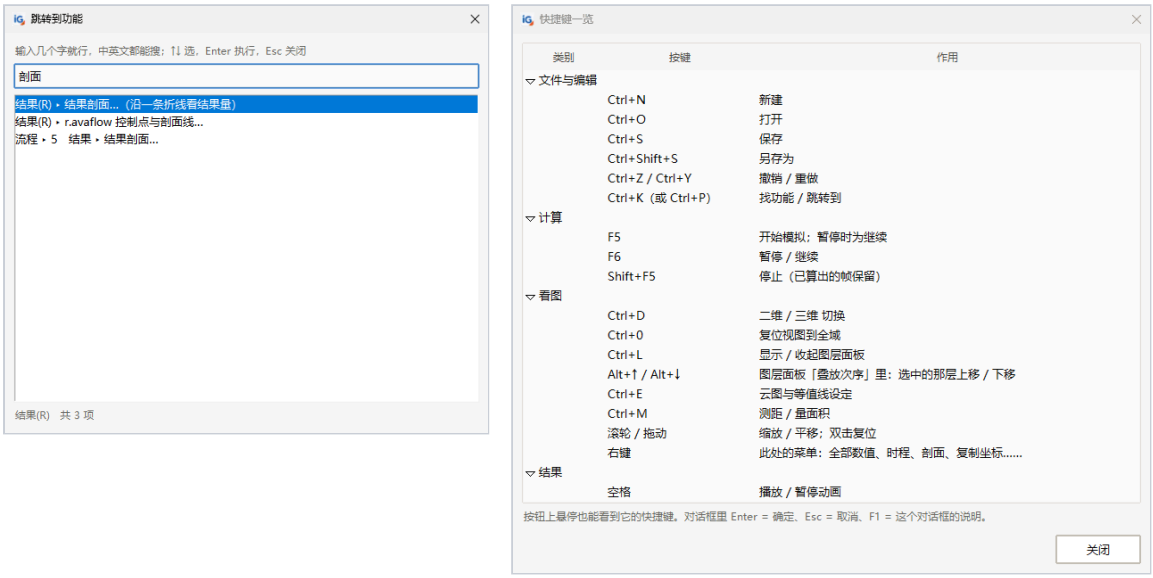

图 **2-7** （左）找功能（右）快捷键一览

2.8 工程管理

表 **2-3** 工程管理

项目	说明
算例	.lscase 与同名 _fields.npz：参数、触发、对象与全部网格数据；.lsview 记显示设置
结果	.lsres：全部输出帧与时程统计，可随时重新打开
工程包	.lsproj：算例 + 场数组 + 显示设置，可带结果与备注，一个文件便于传递与归档
算例设置一览	网格、范围、模型参数、判停、过程线、拦挡网、触发时程列成一页，可复制、另存
默认设置	由地形新建算例时套用的时长、判停、边界，泥石流起算值，自动保存间隔
使用日志	记录运行过程，便于排查



图 **2-8** （左）算例设置一览（右）默认设置

第 3 章　地形与坐标

地形是一切计算的基础。平台支持常见的地形与模型来源，导入时自动识别坐标系、投影、重采样与补洞，并给出覆盖率；同一个算例里还可以再导入滑动面或滑体厚度，按坐标对齐到计算格网。

表 **3-1**　地形与坐标功能概览

功能	说明
地形栅格	ESRI ASCII Grid（.asc）与单波段 GeoTIFF（.tif），作为地面、滑动面或滑体厚度
全球地形下载	卫星图上框选，取公开的 30 m – 500 m 高程数据，自动投影
DXF	网格面、三维面、点与多段线生成地形栅格
倾斜摄影与点云	OBJ、PLY、OSGB 三角网与 LAS / LAZ、XYZ 点云
控制点与网格文本	控制点插值成网格，逐格文本读写，表格编辑
坐标系与底图	UTM 坐标系、在线底图、自备影像、地理配准
显示	地形色带、晕渲、等高线、高程分级、水平面、视点登记

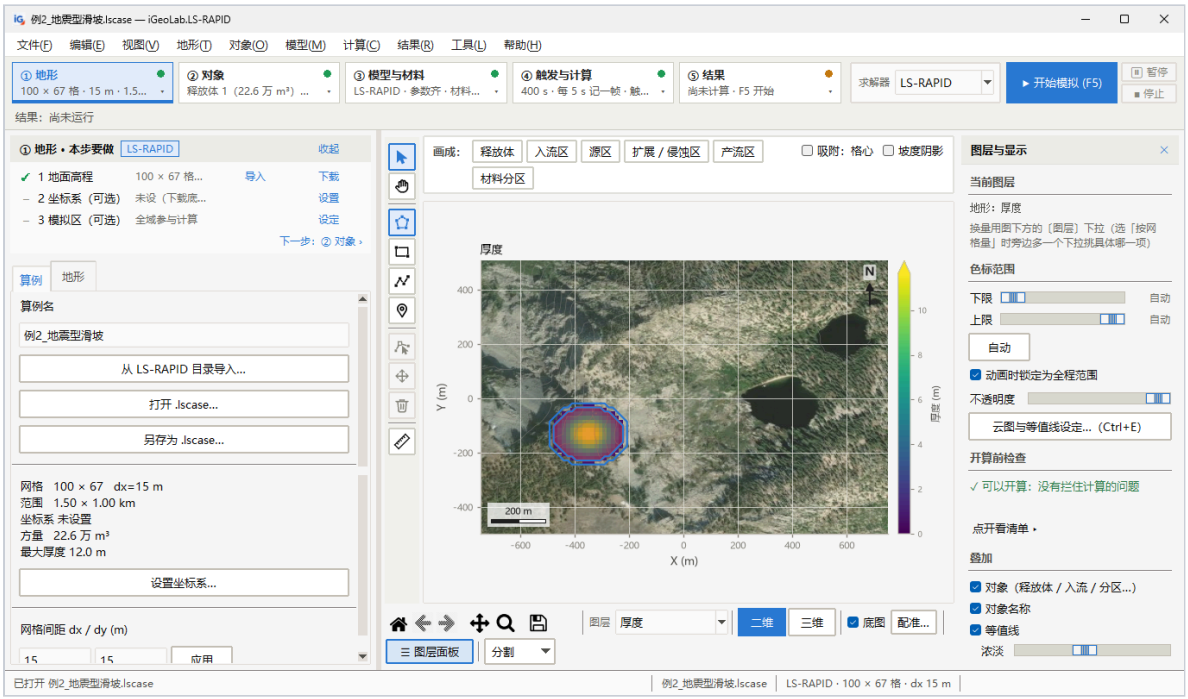

图 **3-1**　第 ① 步「地形」：左栏是算例与地形两页，图上叠加卫星影像

3.1　地形栅格

读入时列出网格数、格距、坐标系、范围与高程统计，右侧是晕渲预览。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。

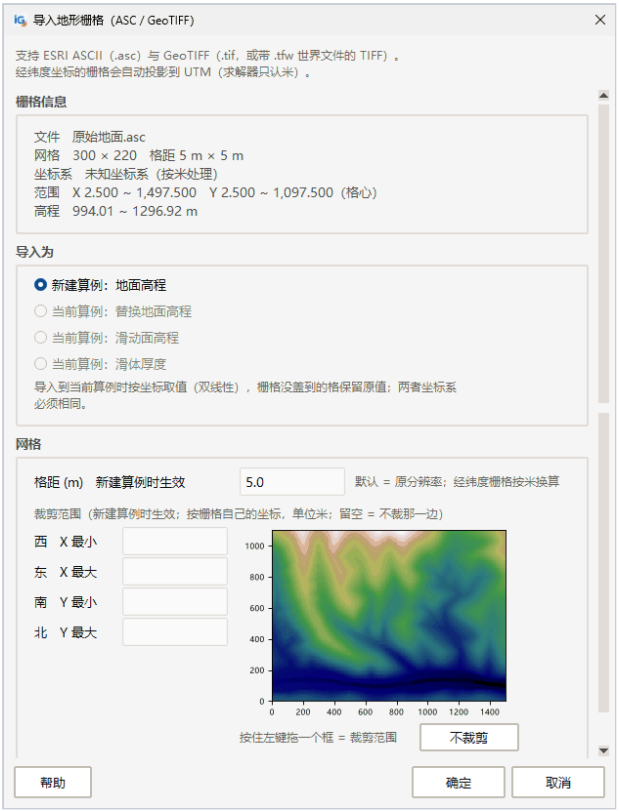

图 **3-2** 导入地形栅格：用途、格距、裁剪、补洞与预览

- 用途：新建算例的地面高程、替换地面高程、滑动面高程、滑体厚度；
- 格距：原分辨率或自定，双线性重采样；网格上限 400 万格；
- 裁剪：填范围或在预览图上拖框，先裁再重采样；
- 补洞：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；
- 导入说明写出投影、重采样、补齐与覆盖率。

3.2 全球地形下载

没有现成地形时，从公开的高程数据服务下载：搜索地名或坐标，在卫星图上框选范围，程序当即取一小块粗高程，以山体阴影与高程分色贴在框里，并报出高程范围与平均坡度，确认后下载并建立算例。

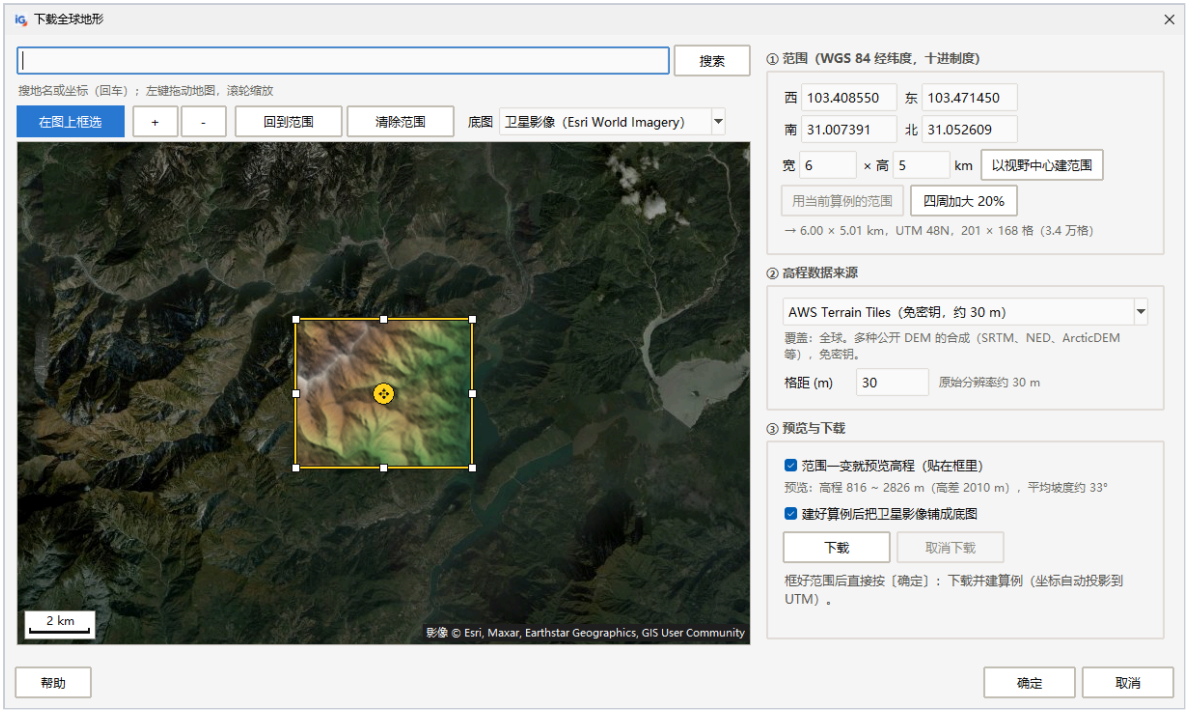

图 **3-3**　下载全球地形：左边在卫星图上框选，右边三步完成

表 **3-2**　高程数据来源

来源	分辨率
AWS Terrain Tiles（默认，不需要密钥）	约 30 m
Copernicus GLO-30 / GLO-90	30 / 90 m
NASADEM、SRTM GL1 / GL3、ALOS World 3D、SRTM15+	30 m – 500 m
Mapbox / MapTiler Terrain-RGB	约 30 m
自定义高程瓦片地址	由服务定

建好算例后可自动把卫星影像铺成底图，并记录 UTM 坐标系，后续的 Google Earth 导出与 GIS 栅格都按它定位。

3.3　DXF 地形

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，预览直接覆盖率、回填格数与高程范围后确认。



图 **3-4** 由 **DXF** 生成地形

3.4 倾斜摄影模型与点云

把三角网或点云从正上方取到规则网格上作为地形。成果文件夹里的多块瓦片一起读，OSGB 瓦片按层级只读最细一层；有 metadata.xml 时加回坐标原点与坐标系。



图 **3-5** 导入倾斜摄影模型 / 点云

- 支持 OBJ、PLY、OSGB 三角网与 LAS / LAZ、PLY、XYZ 点云；
- 朝上的轴自动判断，格距自动或自定，点云每格取平均 / 最高 / 最低；
- 先预览范围、高程与覆盖率，再进入导入地形栅格完成裁剪与补洞。

3.5 控制点与网格编辑

- 控制点：每行一个 X Y Z 的文本插值成网格，控制点可在表格里改；
- 网格文本：地面、滑动面、滑体厚度逐格读写；
- 网格数据编辑：表格里逐格改地面、滑动面与厚度，框选一片批量赋值，选区在图上同步高亮。

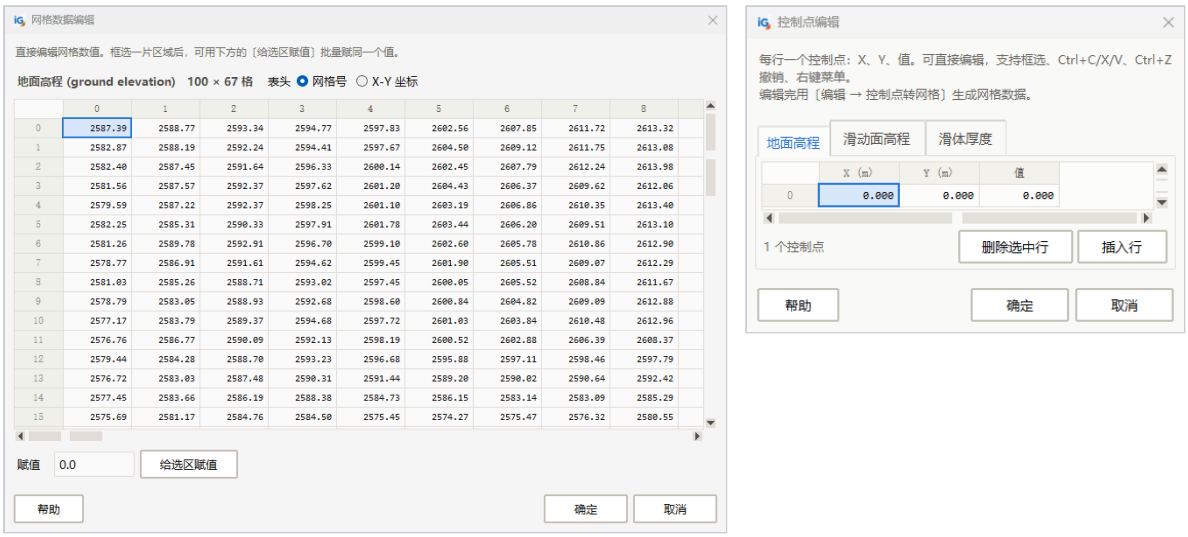

图 3-6 （左）网格数据编辑（右）控制点编辑

3.6 模拟区与坐标系

模拟区设定改起点、间距与网格数，地形、滑面、厚度、分区与逐格参数按坐标一起重采样。算例坐标系填 UTM 带号与半球，填的时候报出算例中心的经纬度，便于核对。



图 3-7 （左）模拟区设定（右）算例坐标系

3.7 底图与地理配准

- 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；
- 自备影像：带坐标的影像自动定位，普通图片填覆盖范围或铺满全域，可设不透明度与叠放位置；
- 地理配准：左边图片、右边地形图上各点一个位置成一对控制点；两对拟合平移、旋转、缩放，三对加不等比与剪切，四对以上可用投影变换，残差逐点列出。

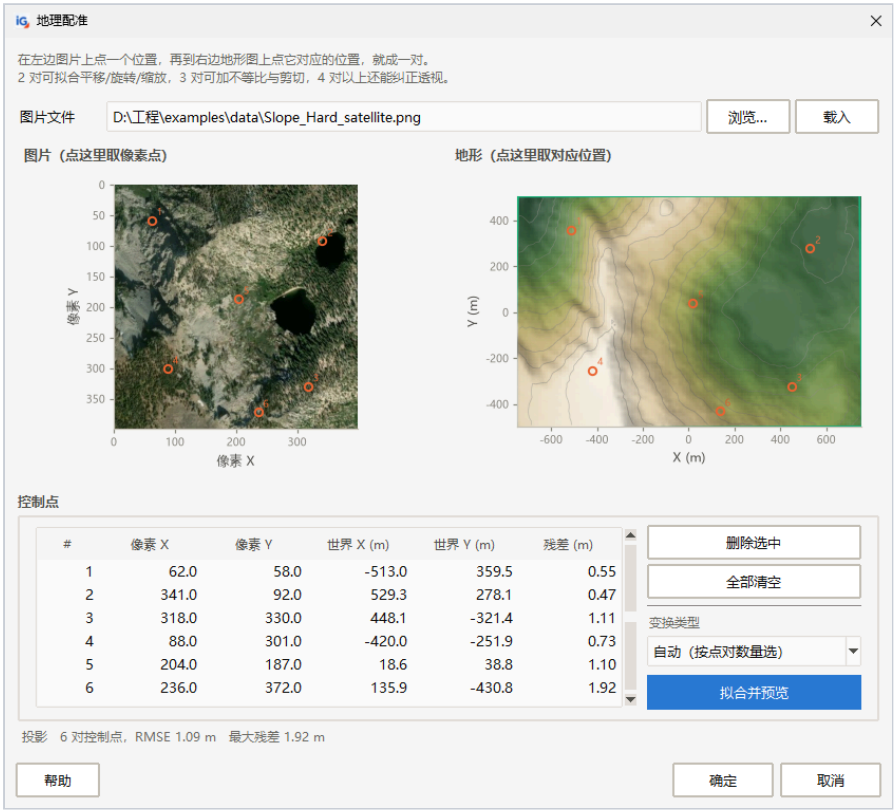

图 **3-8** 地理配准：控制点与残差

3.8 地形的显示

地形色带、晕渲的光源方位与高度、色标范围、自定义高程分级与水平面都可以设；等高线、网格线、坐标网格、控制点按需叠加；视点可登记 5 组随时调用。

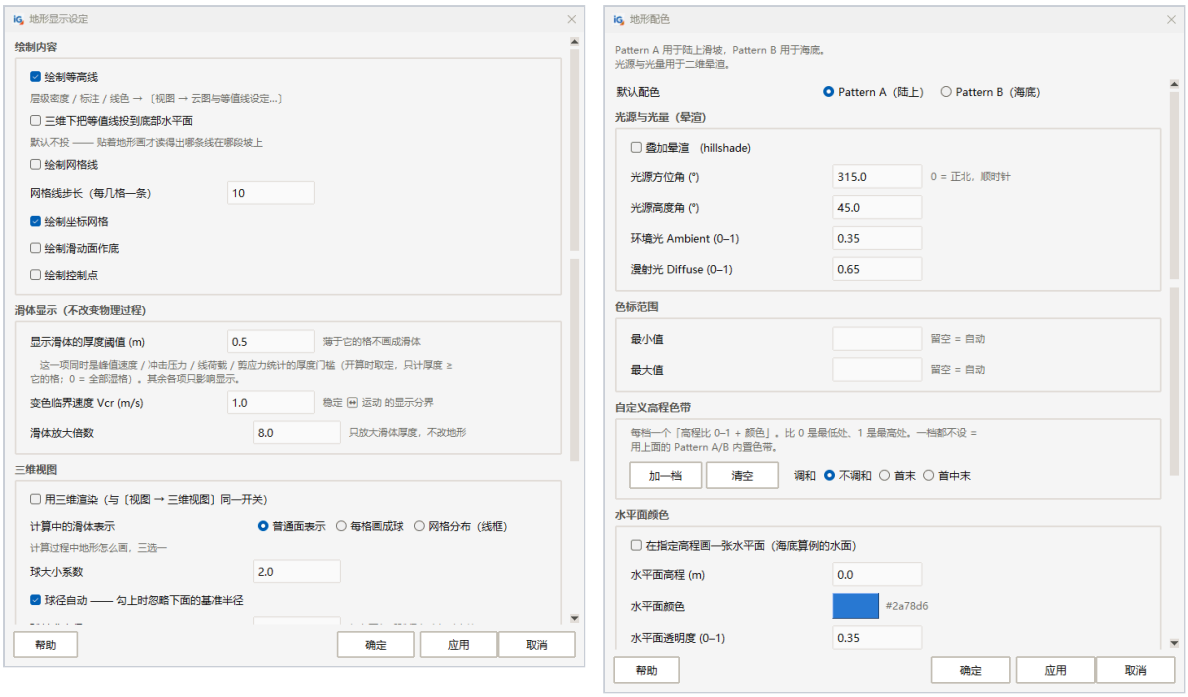

图 **3-9** （左）地形显示设定（右）地形配色

第 4 章　滑体、分区与构筑物

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。凡画出来或导入的范围都成为带名字的对象，列在模型树里，可改名、缩放、移动、增删顶点。

表 4-1　滑体与对象功能概览

功能	说明
滑体的生成	圈范围给厚度、等厚、SLBL 滑面（按方量或最大厚度）、水位
椭球滑面	按断面通过点拟合，或参数式
滑面 / 厚度栅格	由栅格按坐标导入
分区	源区、扩展 / 侵蚀区、材料分区；图上画、文件导入、栅格表点选、按阈值划分
构筑物	挡坝与导流堤、不过流障碍物、柔性拦挡网
监测	测点、剖面、过线流量
实测资料	影响范围与堆积厚度，用于对比与反演

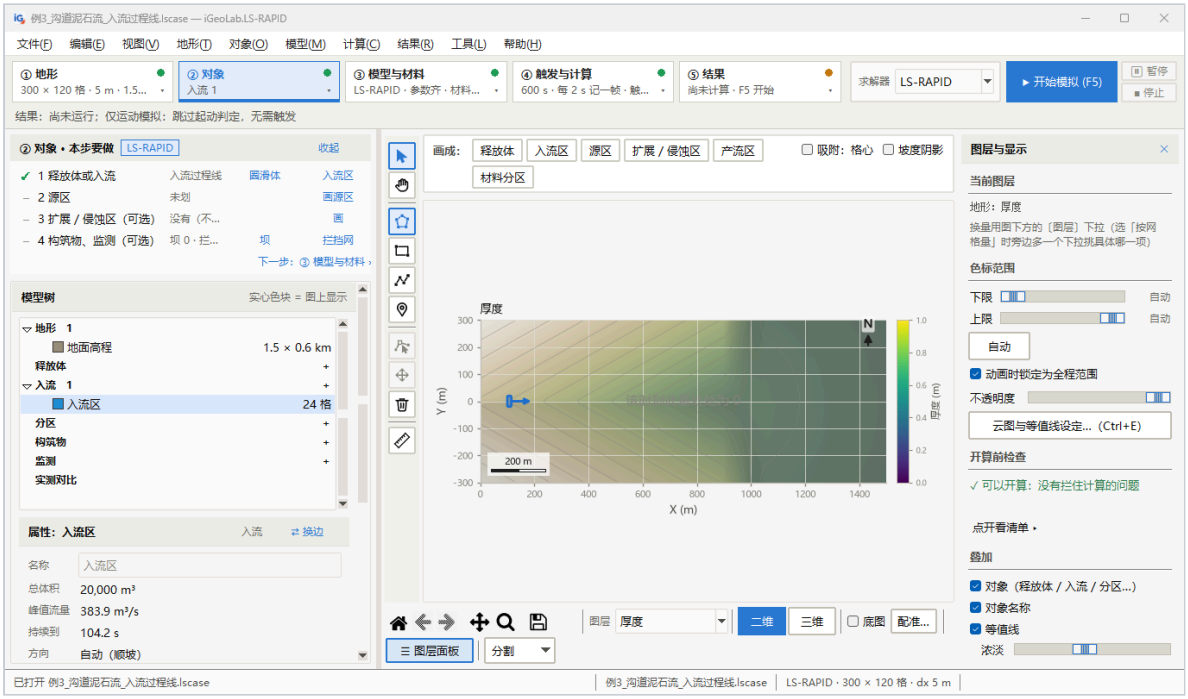

图 4-1　第 ② 步「对象」：模型树、属性面板与图上的对象

4.1　滑体的生成

在图上沿失稳范围圈一个多边形（或从文件导入），选择厚度的给法，程序实时写出格数、最大厚度与方量；滑动面 = 地面 − 厚度，圈中的格同时划为源区。

表 **4-2**　滑体厚度的四种给法

厚度的给法	适用
中心最厚，边缘收零	只有一个最大厚度估计的情形，按到边界的距离平滑收口
等厚	规则的开挖面、等厚覆盖层
SLBL 滑面	由范围与地形迭代出一张曲率处处相同的滑面，凸处挖得深、凹处挖得浅；给最大厚度或给方量，程序反算曲率
水位	填到指定高程，用于水库、堰塞湖的初始水体；默认取范围边界上最低的地面

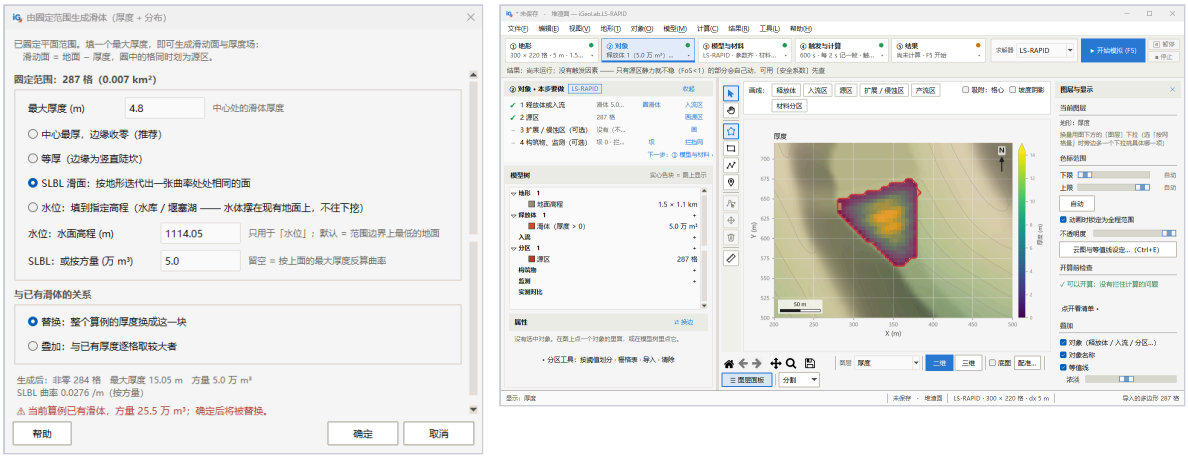

图 **4-2**　（左）**SLBL** 滑面，按方量给定（右）生成的滑体厚度

新滑体与已有滑体的关系可选替换或叠加，因此一个算例里可以有多块滑体，例如主滑体加沟坡上的次级不稳定体。

4.2　椭球滑面

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；高程可取该处坡面高程；可设真椭球或平滑收口，可加子断面。参数式：直接给中心、长短半轴、最大深度与方位角。

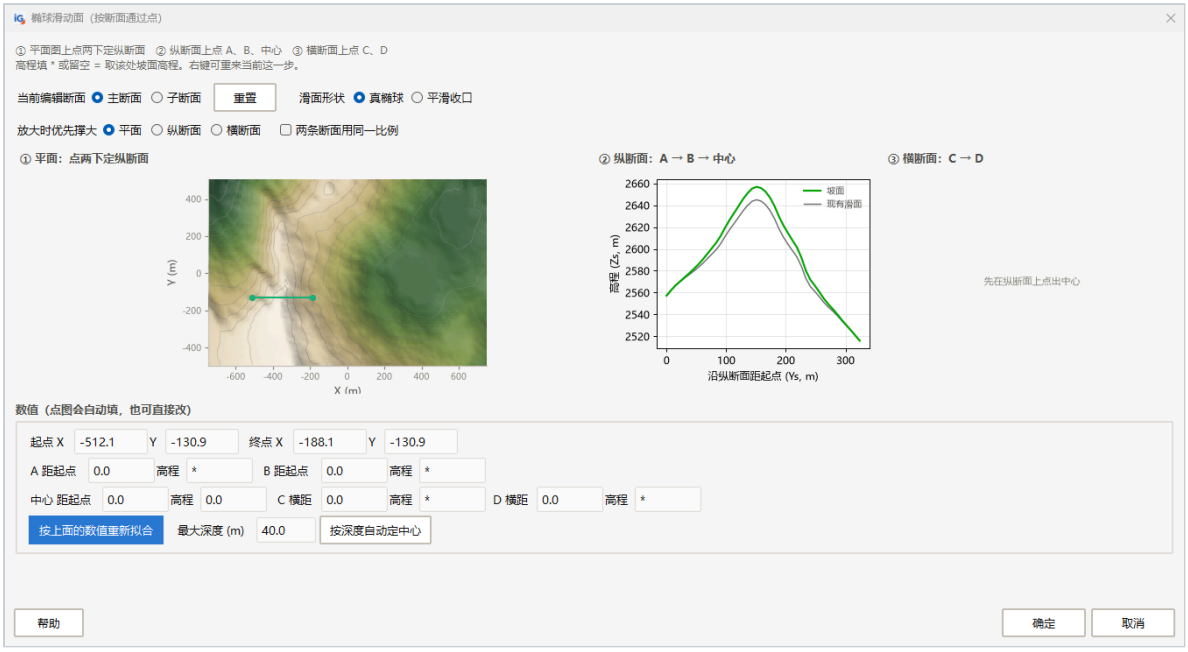

图 **4-3**　椭球滑面设定：平面、纵断面、横断面三个视图



图 **4-4**　椭球滑面（参数式）

4.3　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，给可侵蚀深度、侵蚀速率与侵蚀模型；可落在没有初始滑体的沟床上；
- 材料分区：不同地块用不同的土性参数。

4.4　分区栅格表

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：图上点一格或拖一个框，表格选中同一片；选一种画笔，图上点过的格直接设成那一类。



图 **4-5**　分区栅格表：表里选中的格与图上的选区同步

- 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，确定后写回算例。

4.5　从文件导入范围

Shapefile（可带洞）、KML / KMZ、DXF 闭合多段线与 CSV / TXT 顶点表都可以作为源区、扩展区、入流区、产流流域、坝与拦挡网的范围；经纬度坐标按算例的 UTM 带换算。



图 **4-6**　从文件导入分区多边形

4.6 挡坝、障碍物与拦挡网

表 4-3 构筑物

构筑物	说明
挡坝 / 导流堤	圈出范围，给相对抬高或坝顶高程；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	横跨流路的一道网，给网高、网宽、坡角与堆积坡角；容量自动估算，截留物质并记账，装满后照常通过



图 4-7 （左）挡坝 / 障碍物（右）柔性拦挡网

4.7 监测与实测资料

- 测点：算完后给流深、速度、冲击压力、线荷载的时程；
- 剖面：沿流路的结果剖面；过线流量：横穿流路的流量过程；
- 削填恢复地形：在圈定范围里恢复灾前地形，用于由灾后地形反推；
- 实测影响范围 / 堆积厚度：读栅格，或用灾后 DEM 减当前地面；算完给出命中率、误报率、CSI、HSS 等分数。



图 **4-8**　实测影响范围 / 堆积厚度

第 5 章　求解器与计算模型

平台提供两套求解器：内置的 LS-RAPID 深度平均求解器与随程序附带的 r.avaflow 4.0。两者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；换求解器时，各自的参数分别保留。

表 **5-1**　两套求解器

求解器	方法	特点
LS-RAPID（内置）	竖直土柱深度平均，水平格网上求解质量与动量守恒	起动判定与强度衰减，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）	各相有自己的密度、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

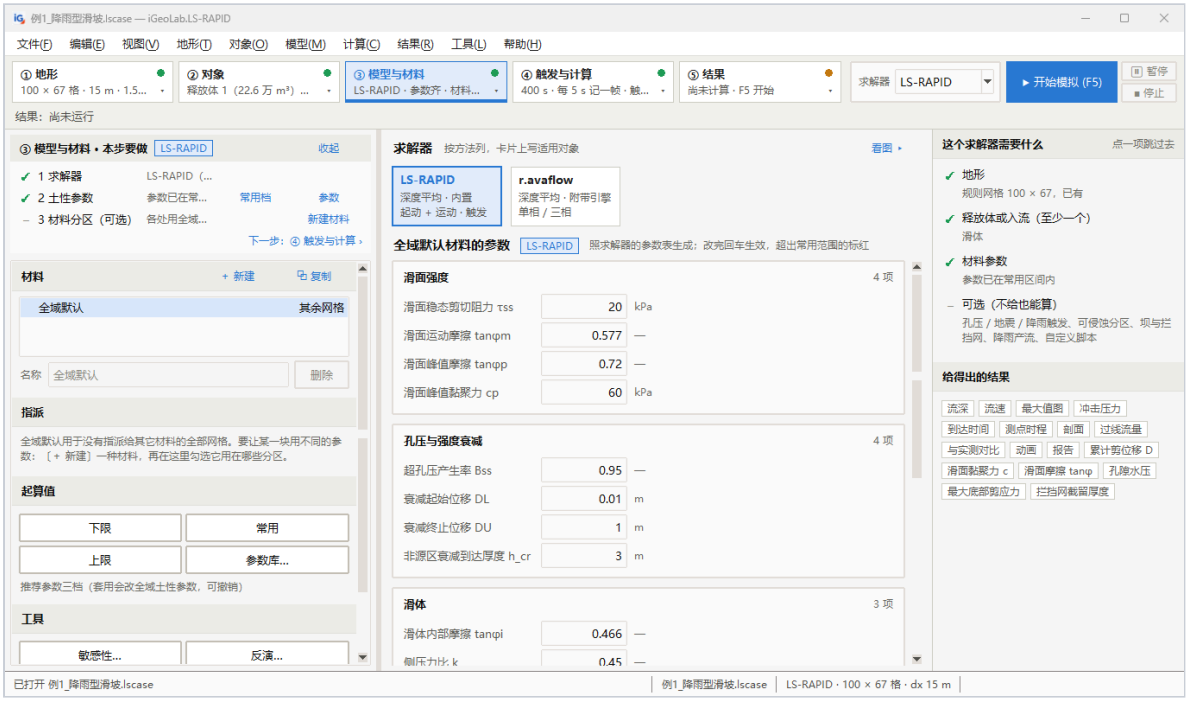

图 **5-1**　第 ③ 步「模型与材料」：求解器卡片与参数表单

5.1　内置求解器的控制方程

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 **5-2** 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 = u_0h，N = v_0h（m^2/s）
u_0、v_0、|V|	水平速度分量、总速度（m/s）
α、β、q	滑动面沿 x、y 的倾角，$q = \tan^2\alpha + \tan^2\beta$
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。静止的土柱在驱动力小于阻力时保持不动，因此何时起动、哪一块先动由力的平衡决定。

5.2 起动与强度衰减

源区滑面的强度随累计剪切位移变化：位移小于 DL 时取峰值强度（tanφp、Cp），DL 到 DU 之间按位移对数衰减，超过 DU 后取稳态。稳态阻力由稳态剪切阻力 τss 与超孔压产生率 Bss 决定：滑体越厚，稳态视摩擦系数越小，这是高速远程滑坡的主要机理。源区外的土柱按滑体到达的厚度完成衰减。

- 全过程模拟：起动 + 运动 + 扩展，由触发因素判断何时失稳；
- 仅运动模拟：已知失稳体，直接从稳态强度开始算运动与堆积；
- 侧压力比可取常数、按内摩擦角的 Jaky 公式，或源区 / 源区外各取一值；
- 海平面以下按浮重度计，可用于入水滑坡。

5.3 底面阻力模型

表 **5-3** 底面阻力模型

模型	表达式	适用
LS-RAPID 强度衰减	峰值 → 稳态，随剪切位移	滑坡的起动与高速滑动
Voellmy	$S = \mu \cdot N + \rho g \cdot u^2/\xi$	碎屑流、泥石流与长滑距事件
屈服应力 N_0	S 再加 $(1-\mu)\cdot N_0\cdot(1 - e^{(-N/N_0)})$	泥流、塑性物质
宾汉姆	$\tau = \tau y + (K/8)\cdot\eta\cdot u/h$	黏性泥流
曼宁	$\tau = \rho g\cdot n^2u^2/h^{(1/3)}$	清水、山洪与坡面汇流
O'Brien	屈服 + 黏性 + 曼宁三项	高含沙水流
μ(I)	$\mu = \mu s + (\mu 2 - \mu s)\cdot I/(I0 + I)$	颗粒流
自定义脚本	Python 函数 friction(f)	研究与特殊材料

地形曲率项可选：离心力加大法向力，使弯道与坡脚处的阻力变大。所有阻力参数既可全域取一个值，也可按材料分区或逐格给出。

5.4 沿程侵蚀与密度演化

扩展 / 侵蚀区内，滑体经过时铲刮床面物质，体积与动量随之变化，卷入量单独记账。

表 **5-4** 侵蚀模型

侵蚀模型	说明
到达厚度 + 速率	经过的滑体厚过门槛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 Python 函数 erosion(f) 给出

密度演化打开后逐格记密度：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。

5.5 数值方法

- 空间离散：二阶 MUSCL（minmod 限制器）或一阶迎风；坡度取自床面或自由面；
- 时间积分：一阶欧拉或二阶 SSP-RK2；步长按 CFL 条件与上限自适应，也可分阶段或定步长；
- 干湿边界：干湿判定厚度与除零护栏分开，前缘推进准确；
- 算域边界：闭合墙或出流，流出量累计记账；
- 分块计算：只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，结果与整场计算逐位相同；
- 编译内核：首次计算时自动编译并缓存，结果与逐格计算逐字节相同。

5.6 r.avaflow 4.0

r.avaflow 引擎随程序附带。本程序写它的输入、调用引擎、把逐时刻结果读回，流深、速度与派生量进入同一套后处理；已有的 r.avaflow 工程（param1.txt）可直接导入。

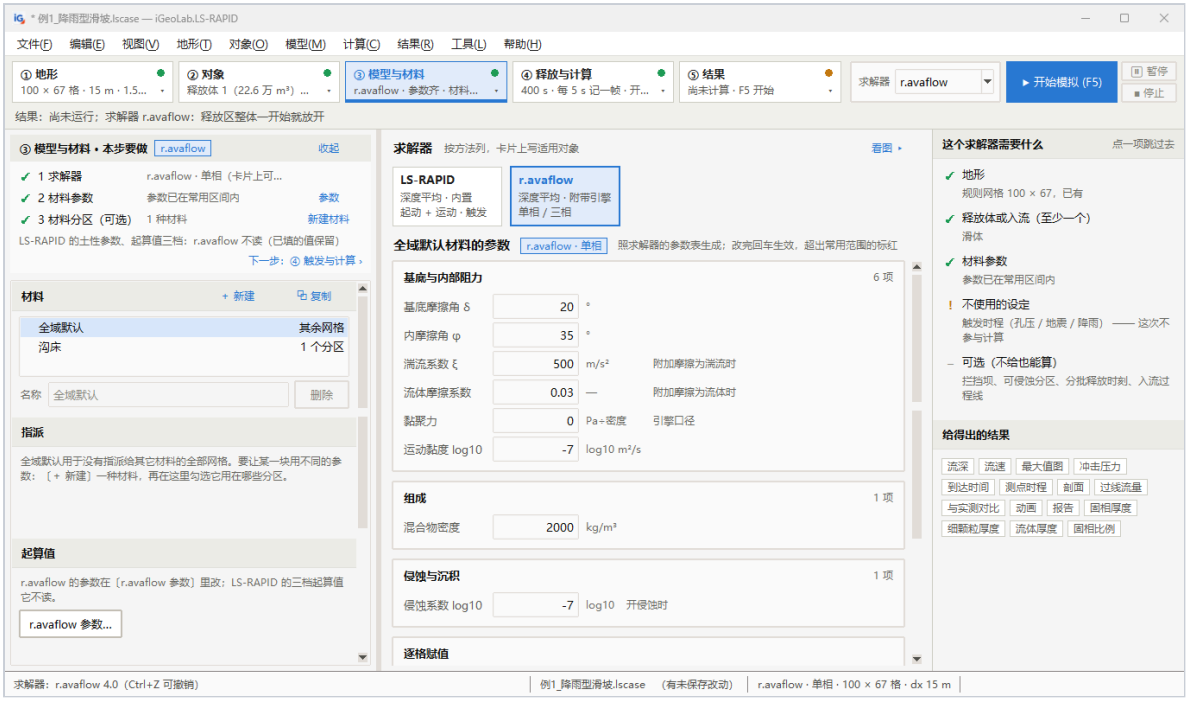

图 **5-2**　**r.avaflow** 的参数表单

- 模型：单相混合物，或固相 / 细颗粒 / 流体三相；各相密度、内外摩擦、黏聚力、黏度；释放物与可侵蚀物按组成拆分；
- 模式：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）；
- 侵蚀与停止：可侵蚀厚度取分区与不稳定体深度；动能或动量降到峰值的比例、最小压力判据；
- 释放：一次释放、分批释放、挤出、渐进塌落、初速、入流过程线；
- 计算网格倍率：在更粗的网格上快速试算。



图 **5-3** **r.avaflow** 参数

5.7 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。脚本里写 `friction(f)` 与 `erosion(f)`，参数写在 `PARAMS` 里，对话框里可改、随算例保存；〔新建模板脚本…〕给一份能直接跑的例子，〔重新载入并试算〕当场检查。



图 **5-4** 自定义脚本

第 6 章　材料与参数

参数填得对不对，决定结果能不能用。平台对每一项参数给出常用范围与起算值，越界就地标红；不同地块可以用不同材料；标定好的一组参数可以存进参数库反复使用。

表 6-1　材料与参数功能概览

功能	说明
土性参数（全域）	一套参数，带指南值、常用范围与三档起算值
起算值	泥石流起算值、清水起算值一键套用
由指标估算	由液限、塑性指数、黏粒含量等估算残余摩擦角
材料与指派	新建材料，指派给材料分区、源区或扩展区
逐网格参数	框选或圈定多边形逐格赋值
参数库	存、取、导出、导入整套参数

6.1　土性参数

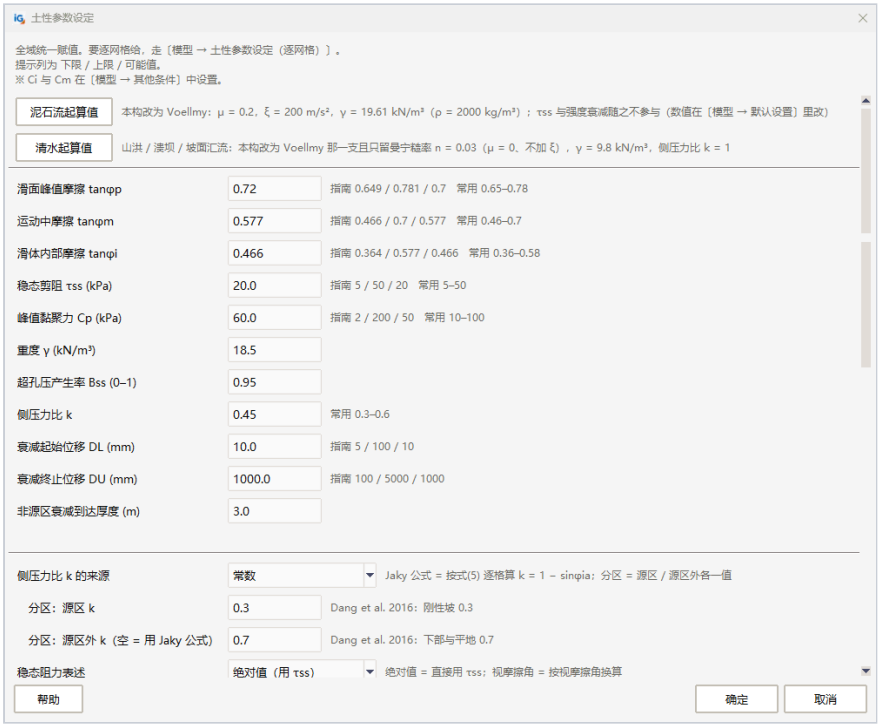

图 6-1　土性参数设定：常用范围、起算值与本构选择

表 **6-2**　主要参数与常用范围

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	0.3–0.6
DL、DU	强度衰减的起止剪位移（mm）	5–100；100–5000
μ、ξ	Voellmy 摩擦系数与湍流系数（m/s²）	0.05–0.4；100–1000

6.2　由指标估算残余摩擦角

手上有液限、塑性指数、黏粒含量等指标时，列出各家经验相关式给出的残余摩擦角，选一个填入 tanφm，结果旁注明出处，便于在报告里引用。

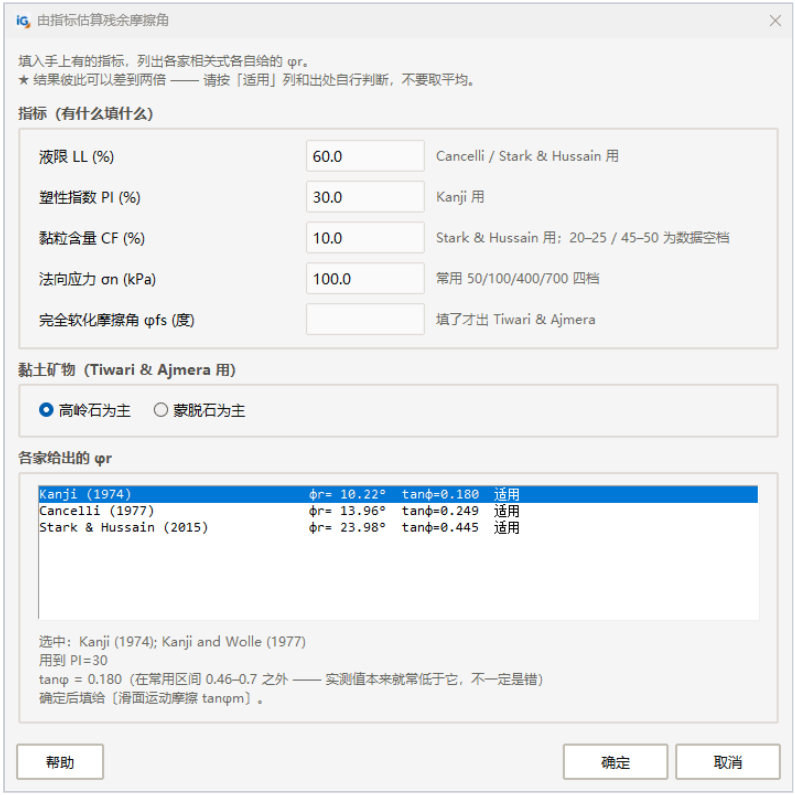

图 **6-2**　由指标估算残余摩擦角

6.3　材料与指派

不同地块用不同参数：在第 ② 步画材料分区（或直接用源区、扩展区），在第 ③ 步新建材料、改参数、勾选用在哪些分区。分区改了形状、换了求解器，材料的值自动重新落到网格上。

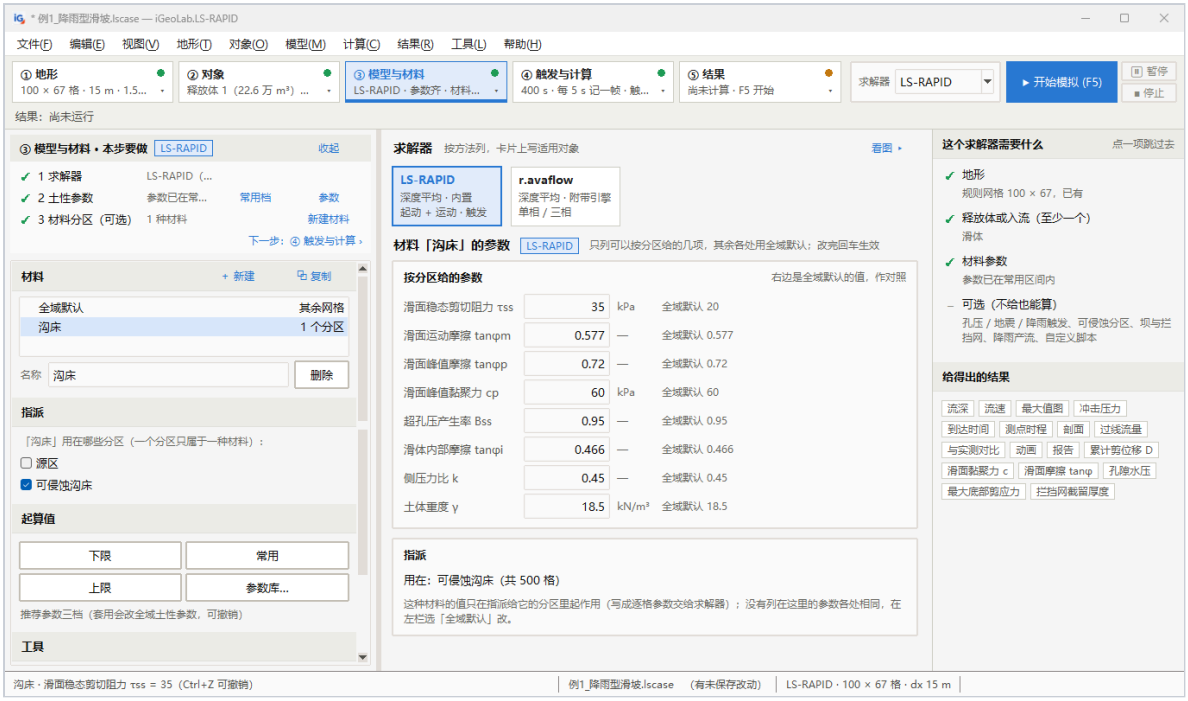

图 **6-3**　材料与指派：新建材料「沟床」并指派给材料分区

6.4　逐网格参数与参数库

逐网格土性按格给参数：框选一片赋值，或在图上圈多边形赋值，可编辑滑面强度、重度、侧压力比，以及 Voellmy 的 μ、ξ、N_0、屈服应力、黏度与曼宁糙率等。参数库把整套土性参数起个名字存起来，可导出、导入。

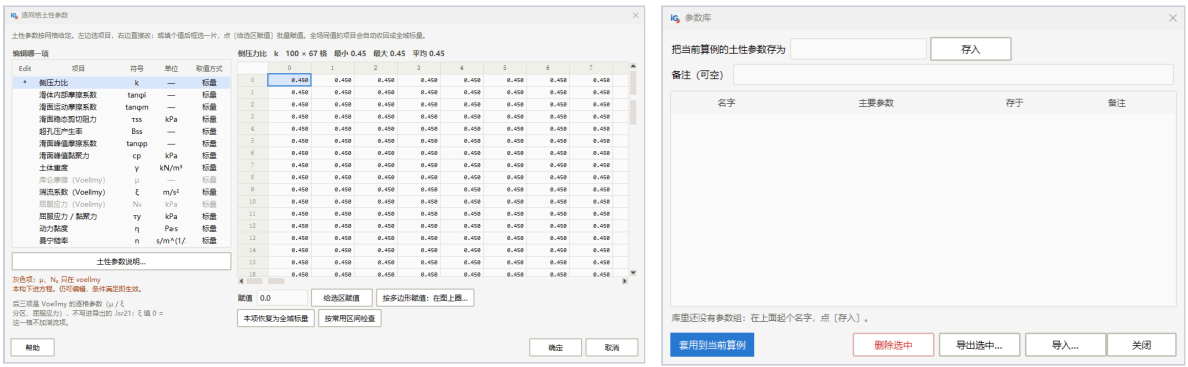

图 **6-4**　（左）逐网格土性参数（右）参数库

第 7 章　触发与释放

第 ④ 步给出让滑体失稳的因素，或者让物质进入算域的方式。触发因素以时程表给出，也可以由程序生成或由降雨推算；同一个算例可以同时接入多种因素。

表 7-1　触发与释放功能概览

方式	说明
孔隙水压力	孔压比 ru 的时程；生成线性上升过程，或由实测读入
地震	三个方向地震系数的时程；静载、循环波或实测波形
降雨	雨强时程，由 SLIDE 模型换算成孔压比
入流过程线	沟道断面按流量过程线注入物质
降雨产流	雨按时程落在流域，浅水方程汇流
溃坝 / 堰塞湖溃决	水体按水位填充，清水演算
分批释放	按块给释放时刻、持续时间与初速（r.avaflow）
多浪涌	多次释放依次计算，每次堆积并进地形

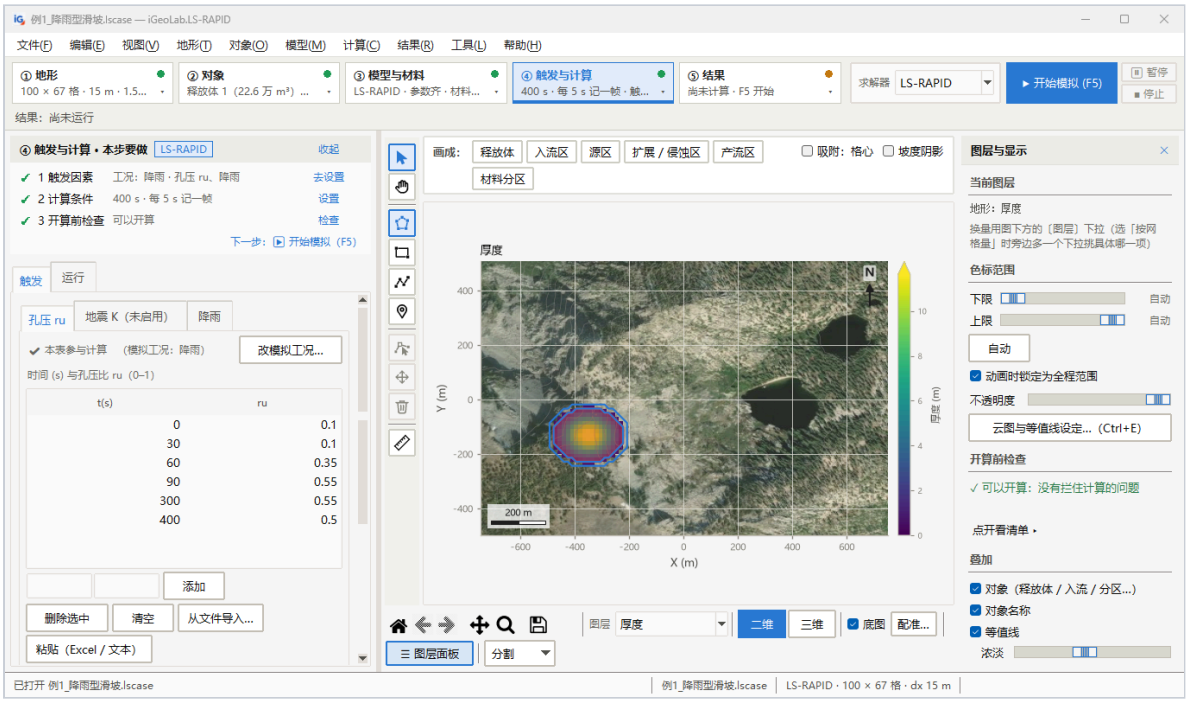

图 7-1　第 ④ 步的〔触发〕页：时程表与曲线

7.1　孔隙水压力

孔压比 ru = u/(γh)，取值 0–1。时程表里逐行填时间与 ru，也可生成线性上升后保持的过程，或读实测孔压文本。孔压比只作用在源区，随强度衰减逐步退出。

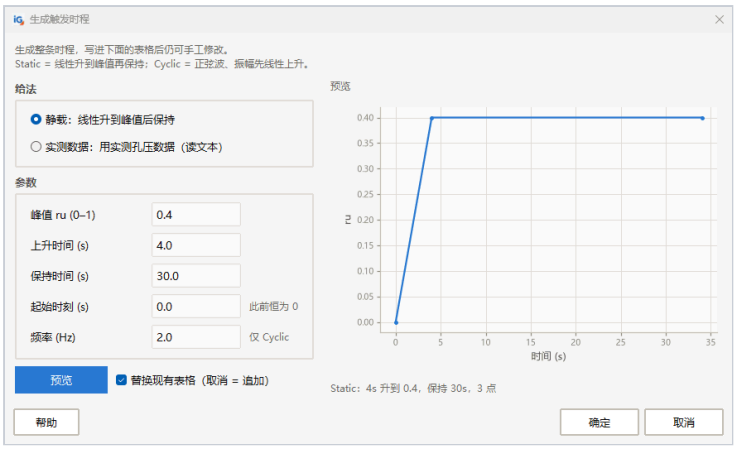

图 **7-2**　生成孔压 **ru** 时程

7.2　地震

地震系数 Kx、Ky、Kv 分别对应东西、南北与竖向。可生成静载（线性升到峰值后保持）或循环荷载（正弦波，振幅线性上升），也可登记实测加速度波形，三个方向的倍率按滑坡主断面方向分配。

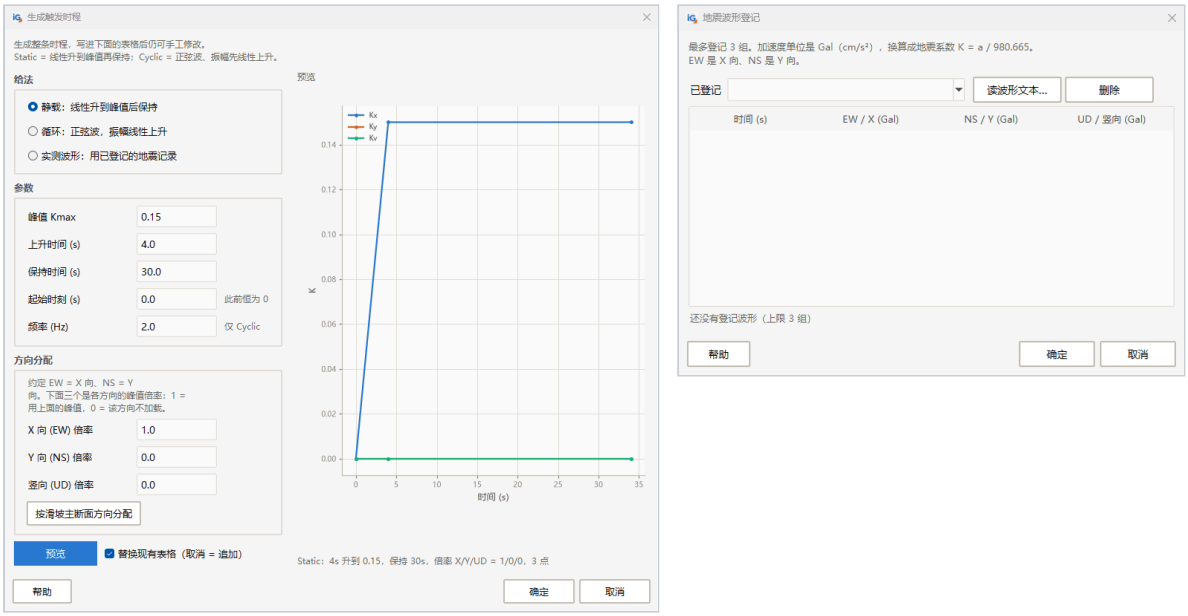

图 **7-3**　（左）生成地震荷载（右）地震波形登记

7.3　由降雨推算孔压

雨强时程由 SLIDE 模型换算成孔压比：给土层厚度、坡角、孔隙率、初始饱和度、综合排水系数与重度，程序给出两个组合系数、ru 的过程与峰值，写进孔压时程表。设计暴雨的降雨过程线因此可以直接推到失稳分析。

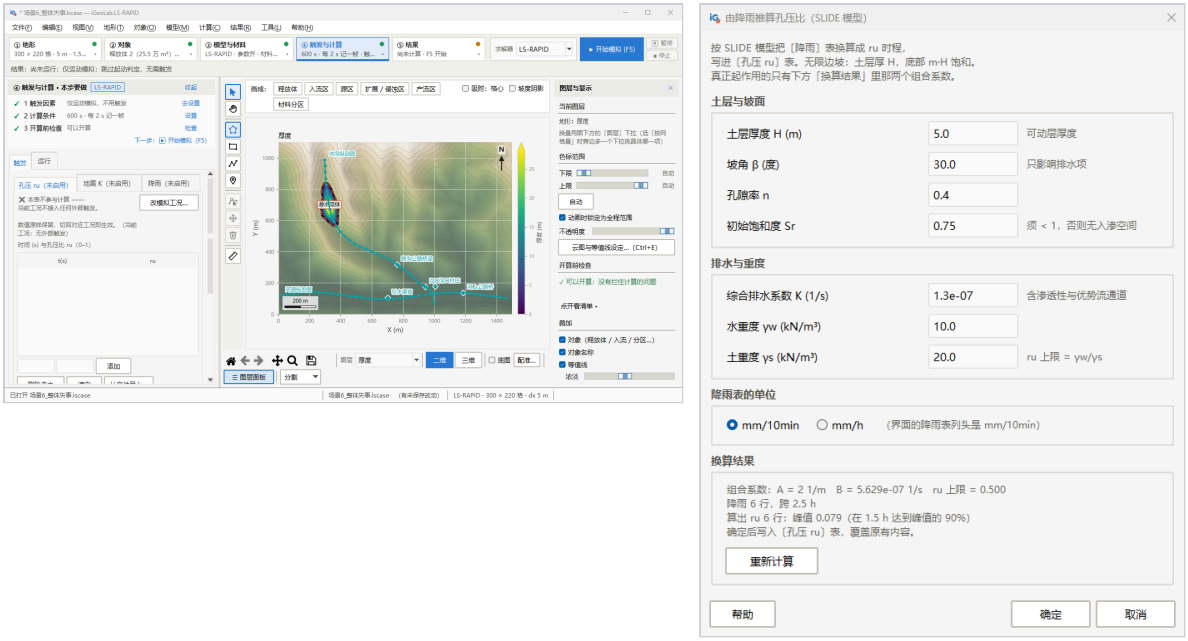

图 **7-4** （左）降雨时程（右）由降雨推算 **ru**

7.4 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) 注入物质。过程线可由总体积、峰值时刻与入流速度生成三点过程线（峰值流量可按 Rickenmann（1999）估算），也可逐点填、粘贴或从文件导入；注入的体积严格等于过程线的积分。



图 **7-5** 入流过程线

7.5 降雨产流与山洪

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：净雨 = max(雨强 × 径流系数 − 恒定下渗损失, 0)。用于山洪过程、渣场断面洪水推求与淹没水深。

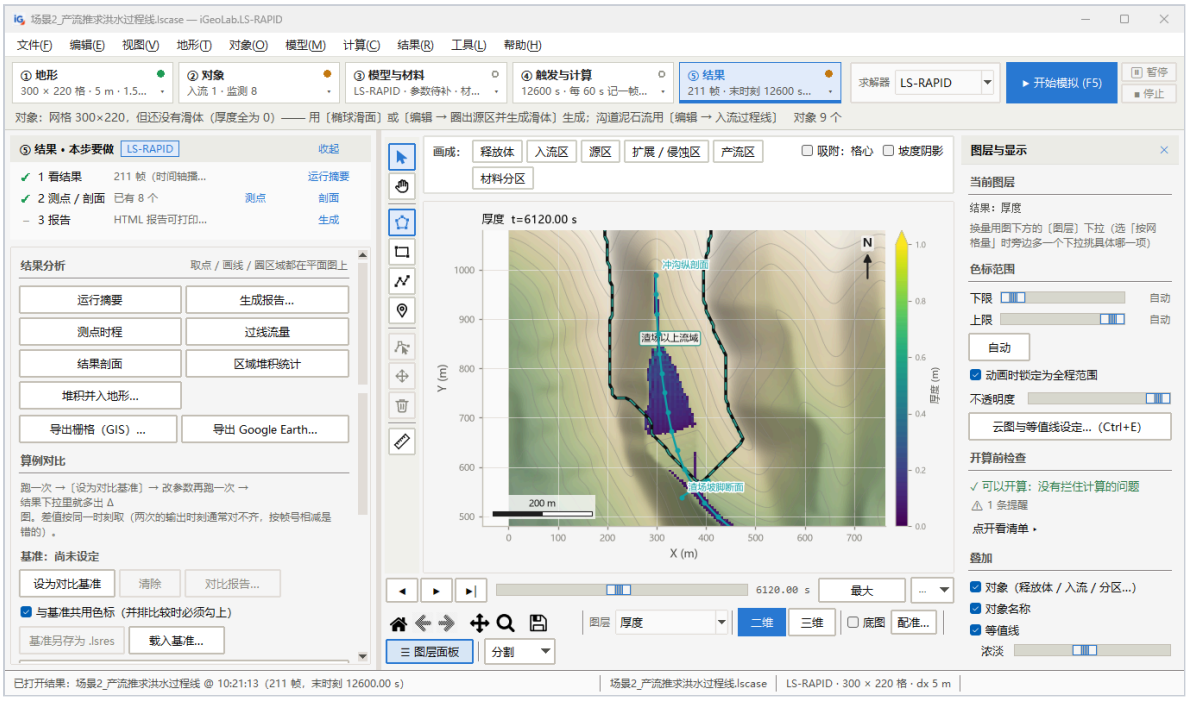

图 7-6 降雨产流：洪峰时刻的水深

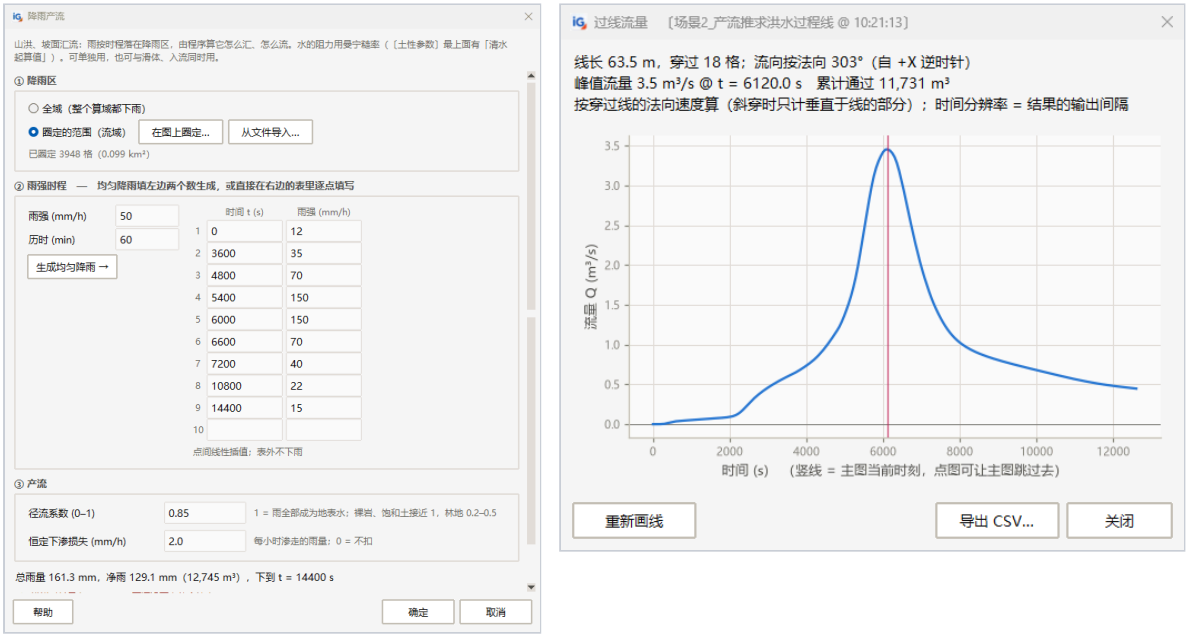

图 7-7 （左）降雨产流设置（右）断面洪水过程线

7.6 溃坝与堰塞湖溃决

圈出库区，按水位填充初始水体，用清水参数演算溃决洪水；滑坡堆积堵河后，可把堆积并入地形，读漫溢标高，填出堰塞湖，再算堵塞体溃决。

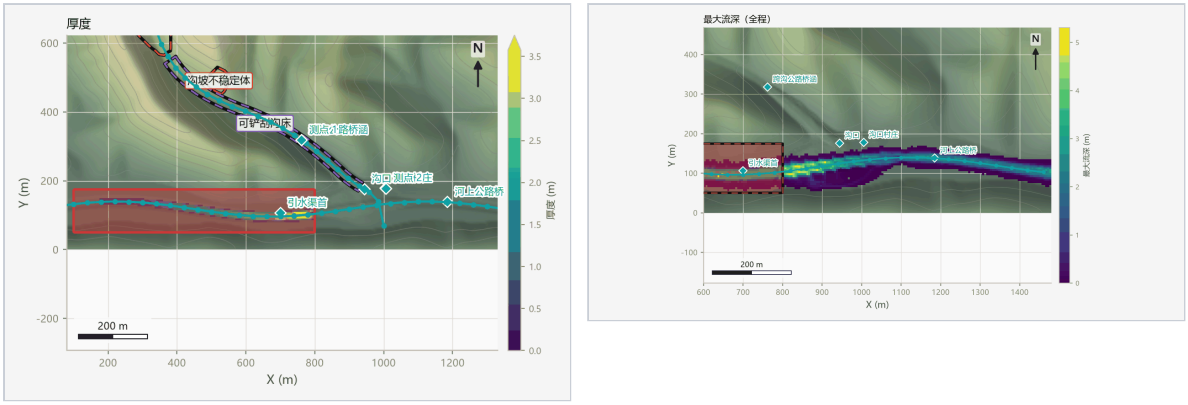

图 **7-8** （左）按水位填出的堰塞湖（右）溃决洪水的最大流深

7.7 分批释放与多浪涌

- 分批释放（r.avaflow）：滑体里互不相连的每一块分别给释放时刻、持续时间与初速，可给整个滑体的渐进塌落；
- 多浪涌接续模拟：一行一次浪涌，填体积、峰值、速度、峰现时刻、μ、ξ、密度、判停与时长；每次算完把结束时的地表并进地形，下一次在新地形上算，结果、摘要与汇总报告一并写出。



图 **7-9** （左）分批释放（右）多浪涌接续模拟

第 8 章　计算控制

计算控制回答三件事：算多久、记多密、什么时候停。开算前程序把问题一次列全，计算中随时看得到进展，算完写清结束原因与体积账。

表 **8-1**　计算控制功能概览

功能	说明
计算条件	模拟模式、工况、时长、记录间隔、判停、浸没、数值格式与边界
时间步	CFL 准则 + 上限、分阶段准则、定步长；静止段快进
其他条件	非摩擦能耗、流量阈值、翻越山脊、黏聚力、侵蚀、停积再固结
输出设置	出图间隔、最大步数、文件前缀、文本输出格式
检查算例	错误、警告、提示一次列全，每条带直接去改的按钮
计算监视	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
内核与并行	编译内核、分块计算、按进程并行的批量计算
命令行	不开界面批量计算与参数扫描

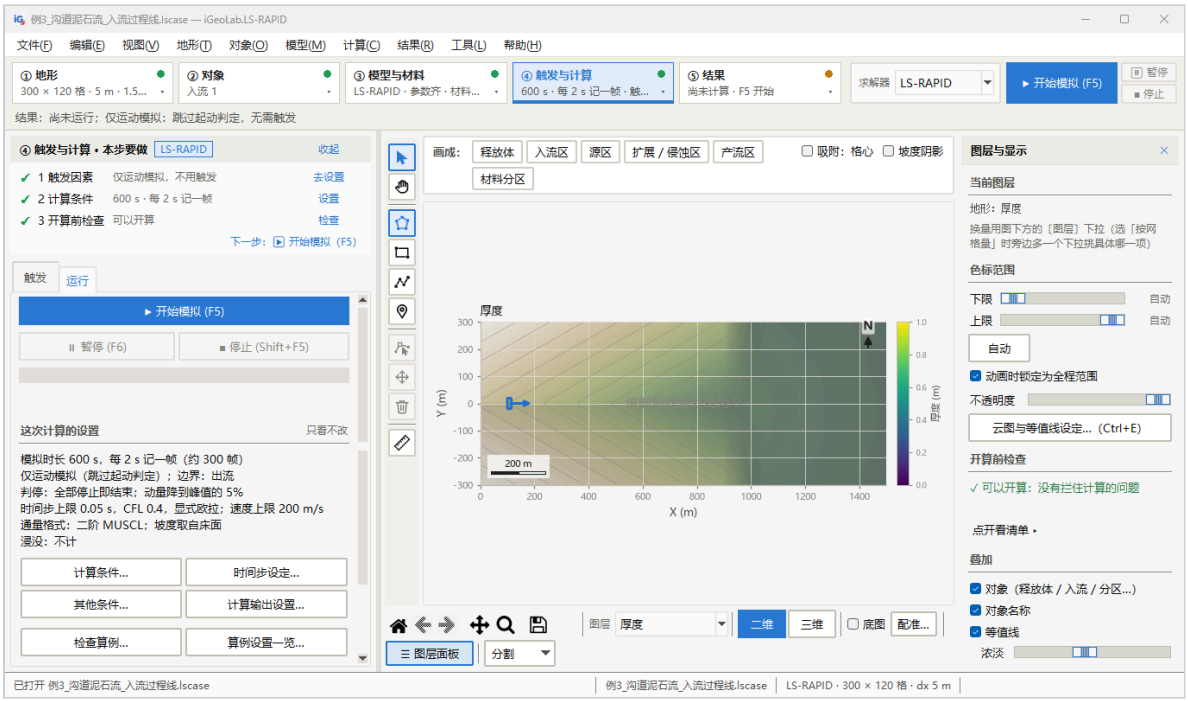

图 **8-1**　第 ④ 步的〔运行〕页

8.1　计算条件

模拟模式、工况、时长、记录间隔、判停、浸没计算、数值格式与算域边界集中在一个对话框里。



图 **8-2**　计算条件

8.2　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；
- 判停在滑体动起来、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。

8.3 时间步与其他条件



图 **8-3** （左）时间步设定（右）其他条件

8.4 检查算例与计算监视

开算前自动检查：缺地形、没有可动的物质、触发时程无效、参数越界、滑体贴着闭合墙、帧数过多等，分错误、警告与提示三级，每条右边的按钮直接去改。计算中流程条写着模拟时刻、已用时间、预计还要多久与当前最大速度，图面随时间更新；可暂停、继续、停止，停止后已算出的帧保留。

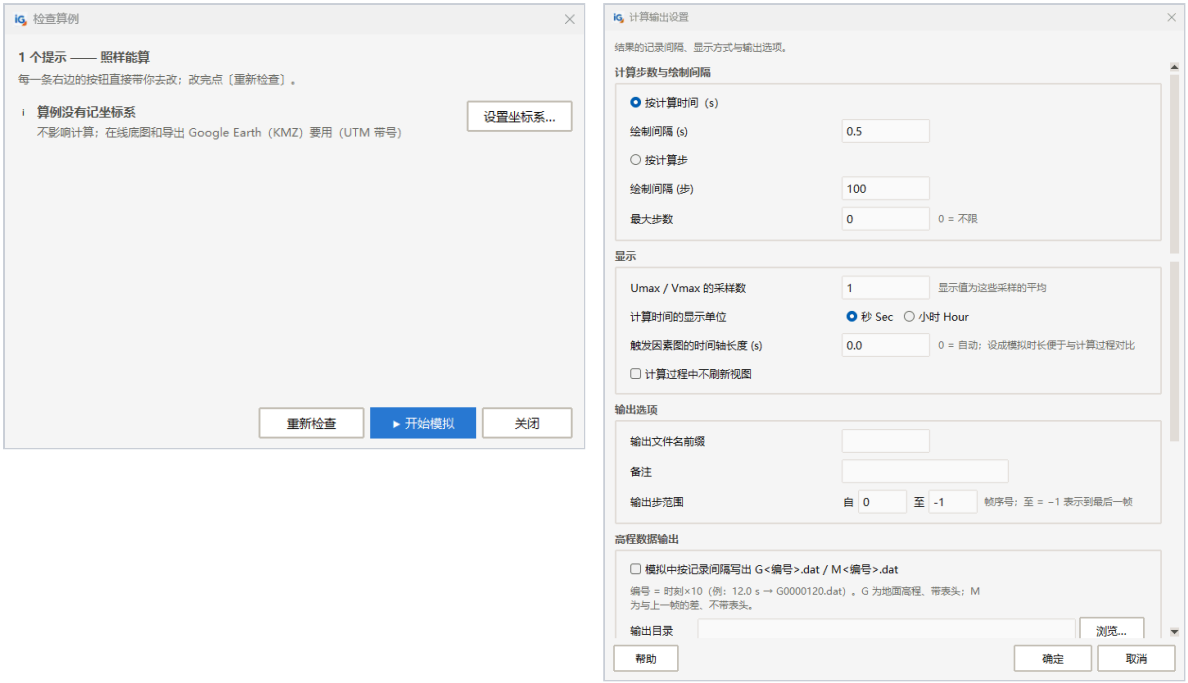

图 **8-4**　（左）检查算例（右）计算输出设置

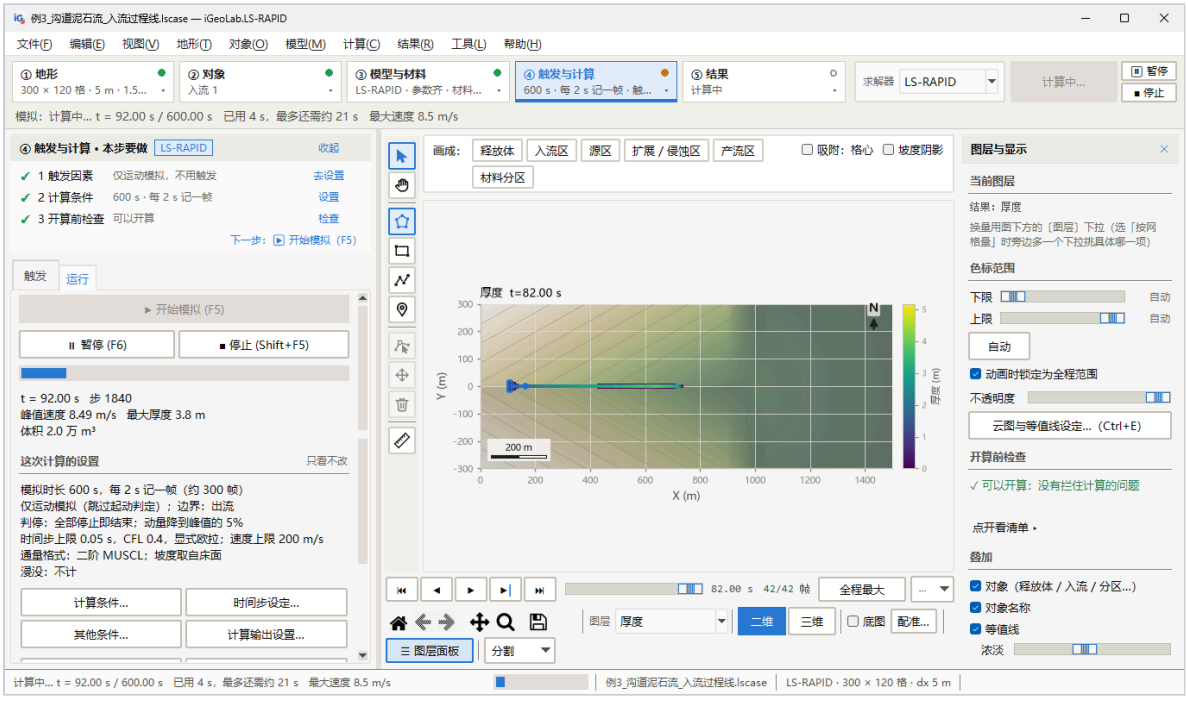

图 **8-5**　计算进行中：图面随时间更新

8.5　编译内核、批量与命令行

计算自动使用编译内核。命令行批量计算适合参数扫描与脚本：

```
lsim_run.exe 算例.lscase --sweep soil.mu=0.10,0.15,0.20 --gis --report
```

每个取值写一份结果与摘要，另汇总一张参数—指标表；可一并写出 GIS 栅格与 HTML 报告。命令行与界面用同一条计算路径，结果逐位相同。

第 9 章　结果与后处理

算完后第 ⑤ 步「结果」列出全部分析工具。结果按时刻与格网保存，所有图、表、曲线都从同一份结果取值；结果文件可以随时重新打开，无需重算。

表 **9-1**　结果与后处理功能概览

功能	说明
平面图与最大值图	逐时刻的场，与按每个计算步取最大的全程最大值
识别与测点时程	一格的全部数值；流深、速度、冲击压力、线荷载随时间的曲线
过线流量	横穿流路的流量过程、峰值与累计通过量
结果剖面与断面	沿任意折线的分布；平行或任意方向的断面；断面安全系数
区域堆积统计	圈内的体积、面积与流深统计
三维与动画	地形与滑体的三维视图、显卡绘制的快速三维、动画导出
摘要与报告	运行摘要、HTML 报告、危险强度分级
对比与管理	与基准的差值、参数差异与指标表；结果管理器与包络
导出	GIS 栅格、影响范围轮廓、Google Earth、文本、图与动画

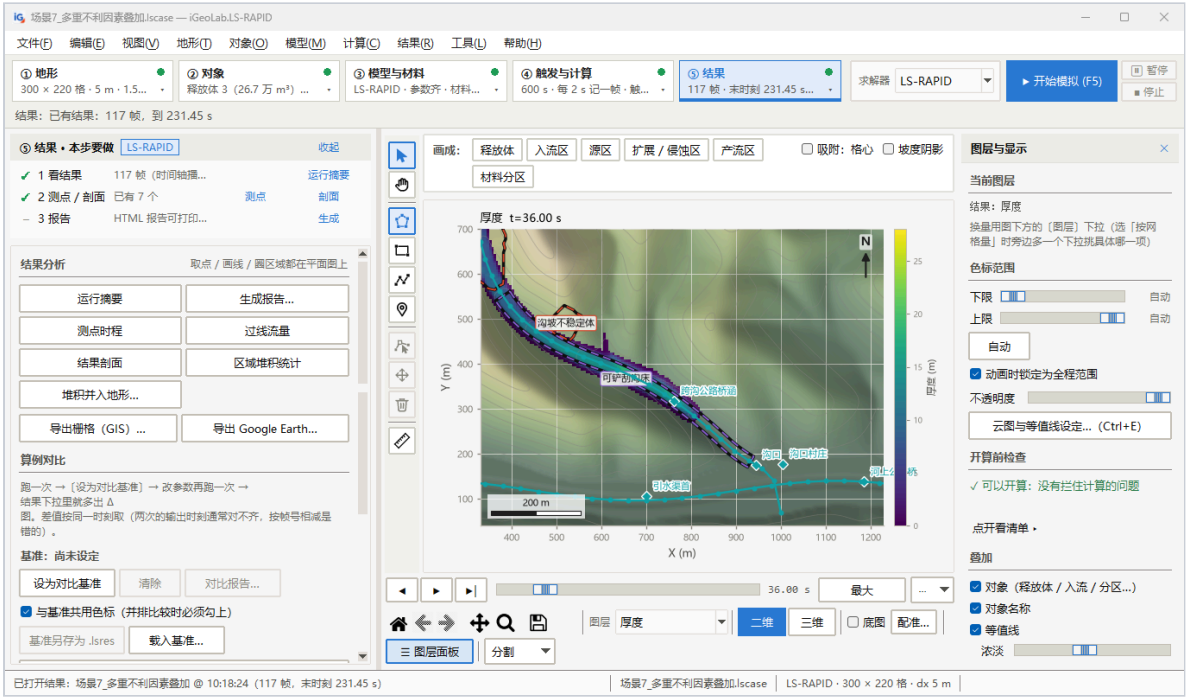

图 **9-1**　第 ⑤ 步「结果」：左栏分析工具，图上是当前时刻的流深，图下是时间轴

9.1 平面图与最大值图

表 **9-2** 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。〔全程最大〕一键切换；地形底色、云图、等值线、流速箭头、对象与叠放次序都可调，图上带坐标、比例尺与指北针，可直接用作成果图。

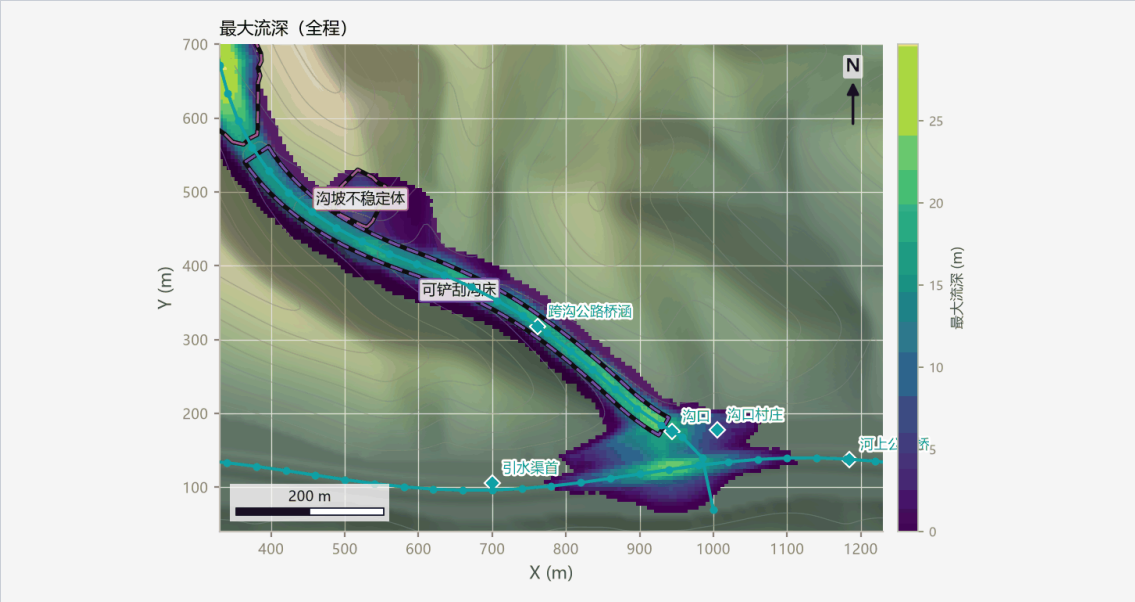

图 **9-2** 全程最大流深：运动过程扫过的范围

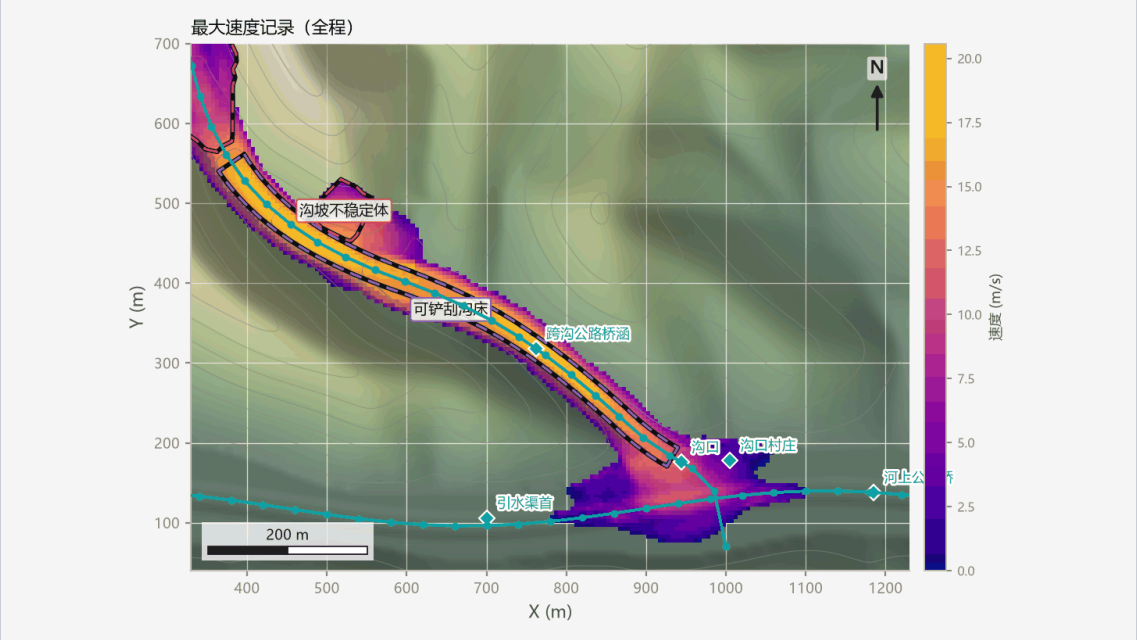

图 **9-3**　全程最大速度

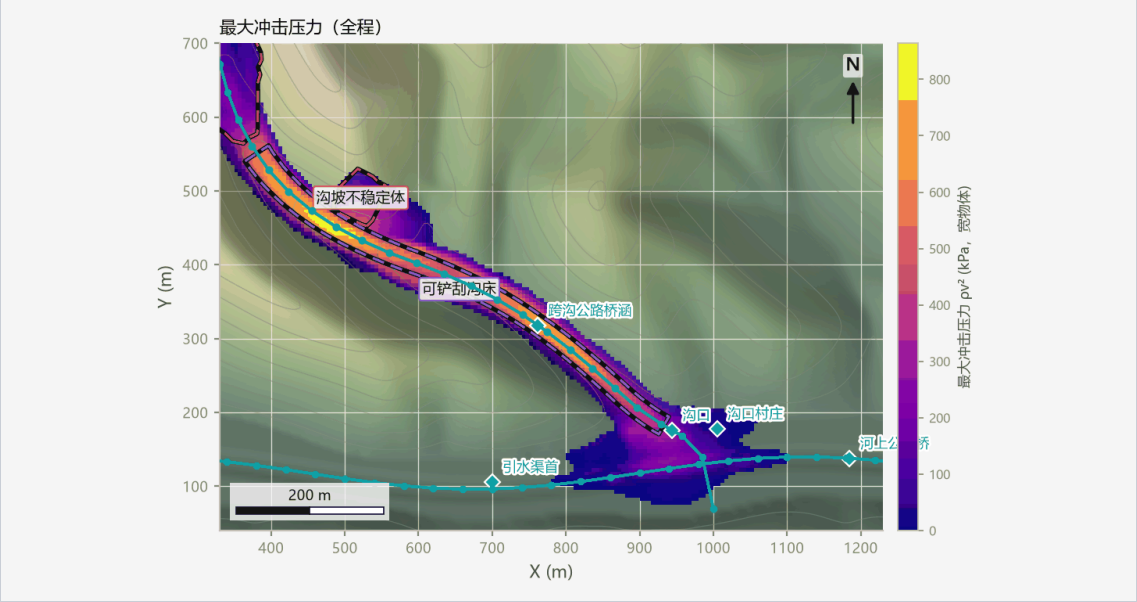

图 **9-4**　全程最大冲击压力

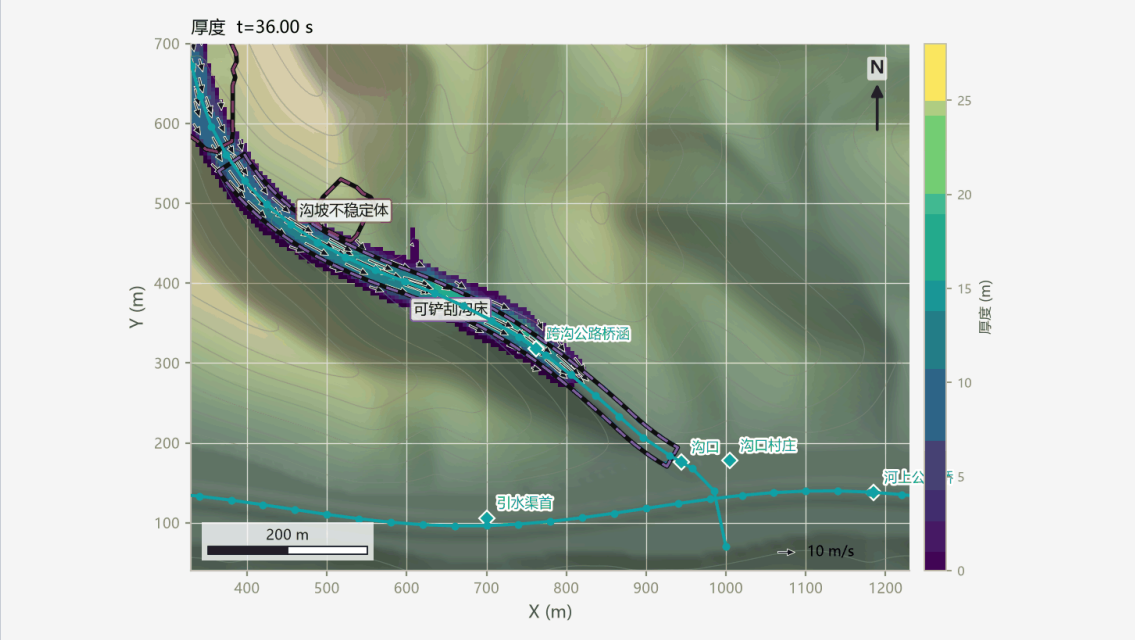

图 **9-5** 某时刻的流深与流速箭头

9.2 识别一格与测点时程

识别（Ctrl+I）：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。测点时程：在图上点位置或输入坐标（房屋、桥墩等），得到流深、速度、冲击压力、线荷载随时间的曲线与全程最大值；曲线上的竖线与主图的当前时刻联动。

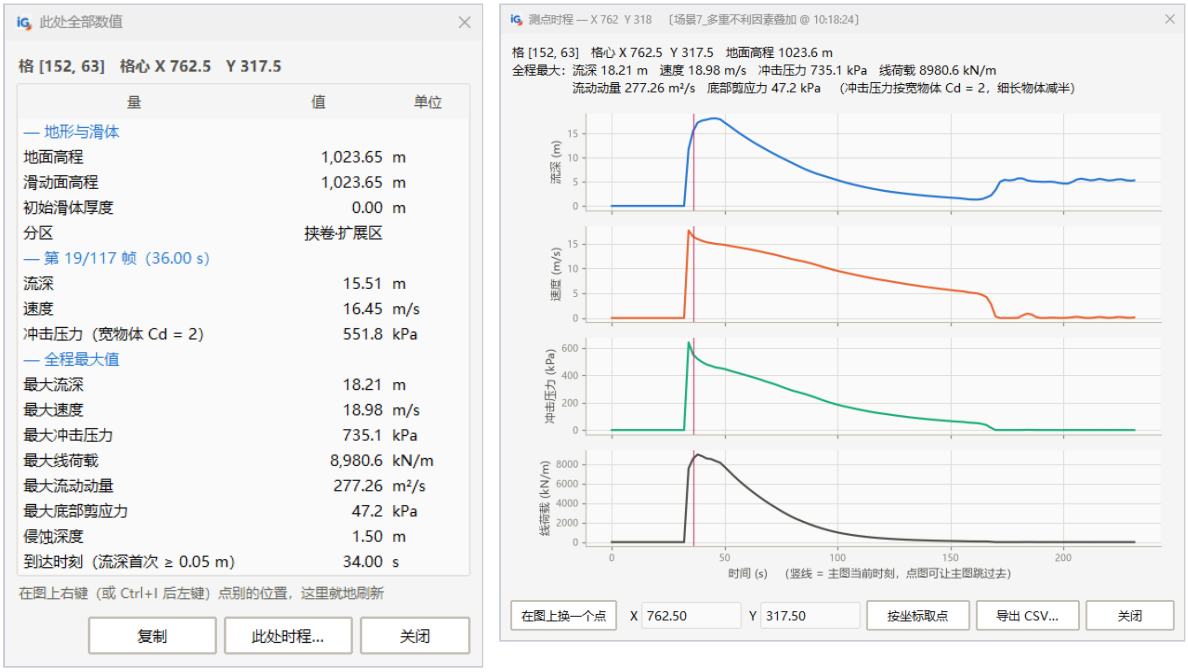

图 **9-6** （左）识别一格的全部数值（右）测点时程

9.3 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。

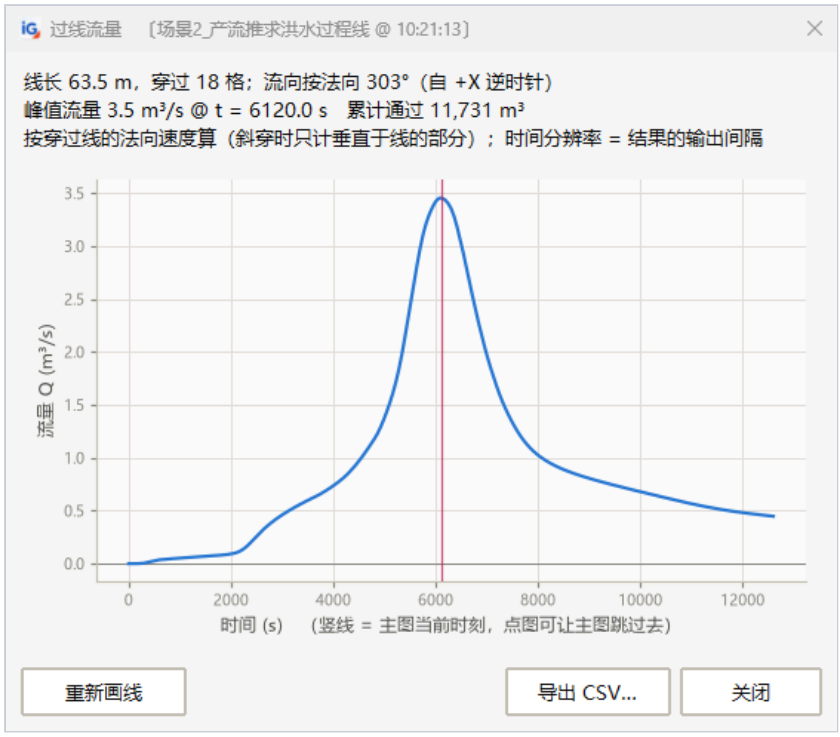

图 **9-7** 过线流量：断面洪水过程与洪峰

9.4 结果剖面

沿流路或横穿流路点一条折线，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，可与主图时刻联动并导出 CSV。



图 **9-8**　沿沟道的结果剖面：全程最大流深与床面

9.5　断面输出与断面安全系数

断面输出画出坡面、滑面与模拟后的坡面，可取平行 X / Y 或任意方向，导出坐标列表。断面安全系数用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，用于判断潜在滑面是否失稳、确定滑出方量。

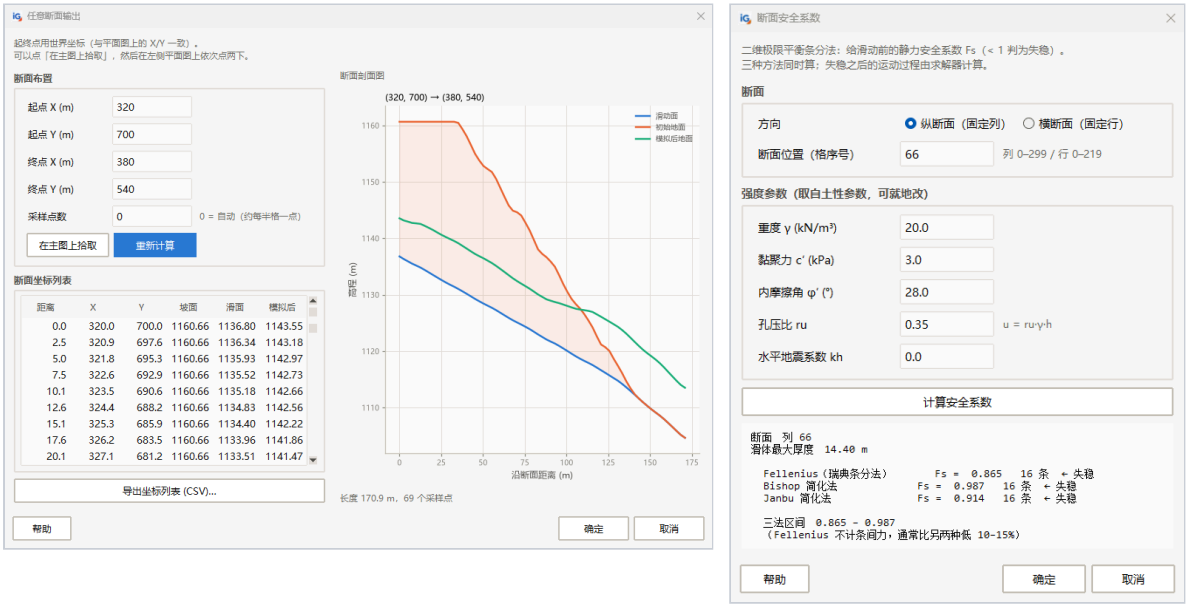

图 **9-9**　（左）任意断面输出（右）断面安全系数

9.6 区域堆积统计与时程

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。时程图给出峰值速度、体积账（初始、侵蚀、入流、流出、截留）与运动动量占峰值的比例随时间的变化。



图 **9-10** 区域堆积统计

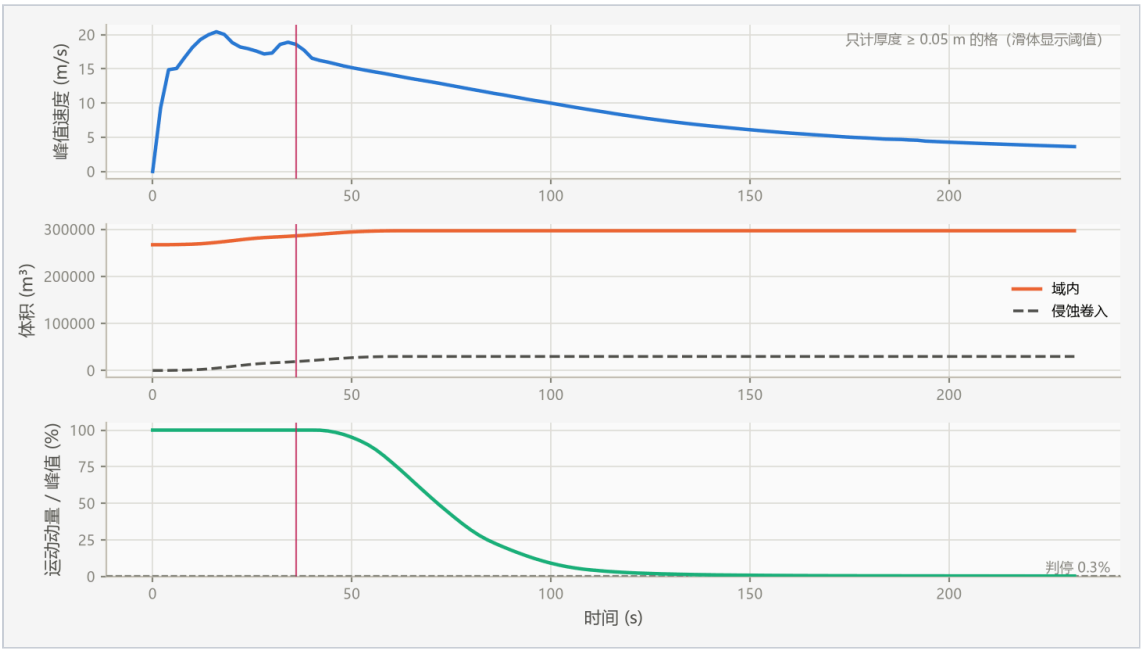

图 **9-11** 时程：峰值速度、体积账与运动动量

9.7 三维视图与动画

三维视图把地形与滑体随时间叠加显示，竖向夸大、滑体放大、背景与视点可设，卫星影像可贴到地形面上；快速三维查看由显卡渲染，大网格与动画下旋转、缩放流畅。动画可导出 AVI、GIF 或 PNG 帧序列，色标可锁定为全程范围，各帧颜色可比。

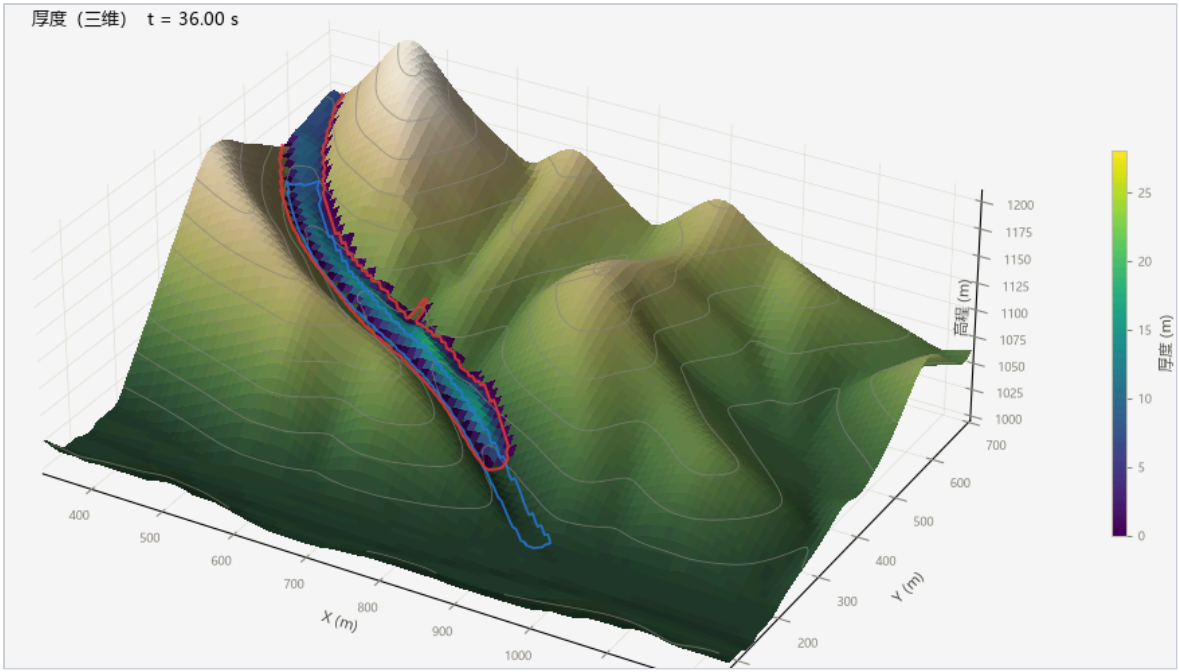

图 **9-12**　三维视图：地形与滑体

9.8　运行摘要与 HTML 报告

运行摘要列出停止原因、用时、网格、模型参数、体积账、各最大值及其位置、末帧堆积。HTML 报告是一个自包含的网页：算例与参数、关键指标、最大流深 / 速度 / 冲击压力图、末态堆积、时程图、危险强度分级与各级面积；在浏览器里打印即得 PDF。



图 **9-13**　运行摘要

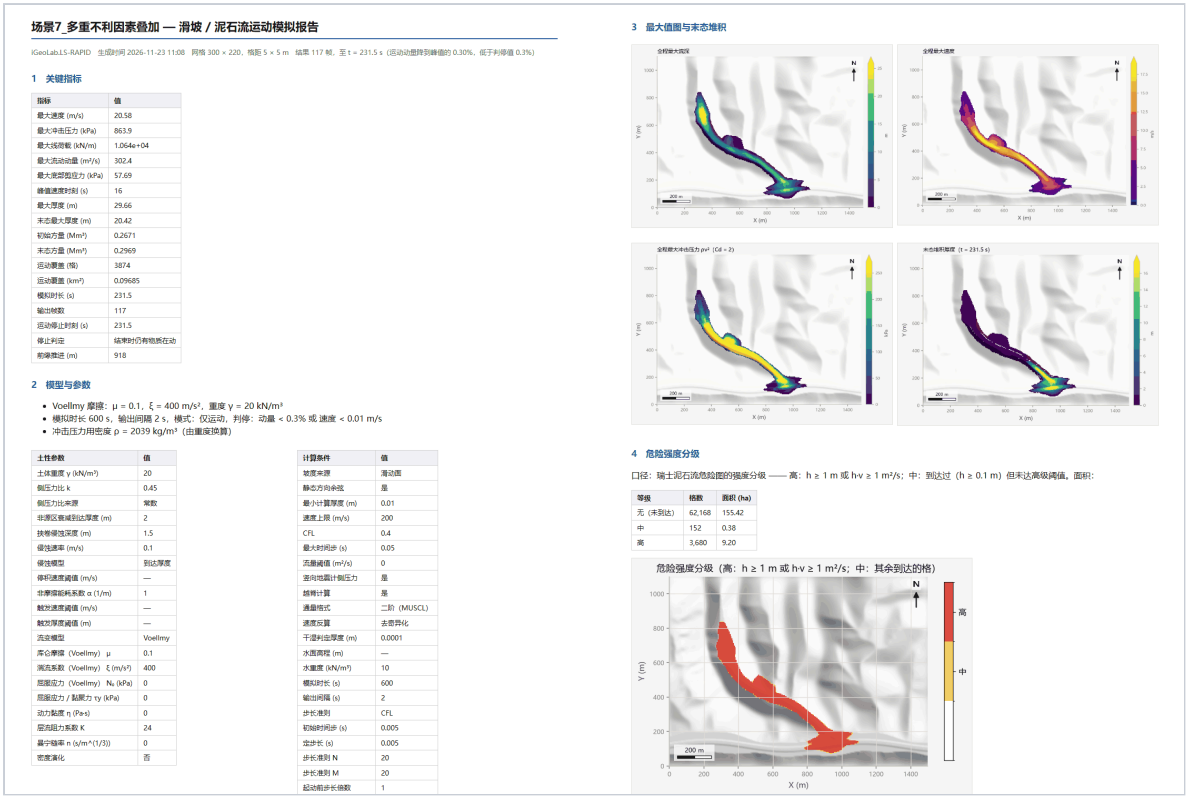

图 **9-14** **HTML** 报告：（左）关键指标与参数（右）最大值图、末态堆积与危险强度分级

9.9 与实测对比

给了实测影响范围或实测堆积厚度的算例，算完后运行摘要里给出命中率、误报率、CSI、HSS、D2PC 与 FoC 等分数，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。

9.10 算例对比与结果管理

把一次结果设为基准，改参数再算，图层里多出差值图（同一时刻相减），分割窗口可并排看基准与当前、共用色标；对比报告列出参数差异与各指标的变化。结果管理器列出文件夹里的全部结果，可打开、设为基准、看参数差异、多选取包络，得到各工况的最大影响范围与控制工况。

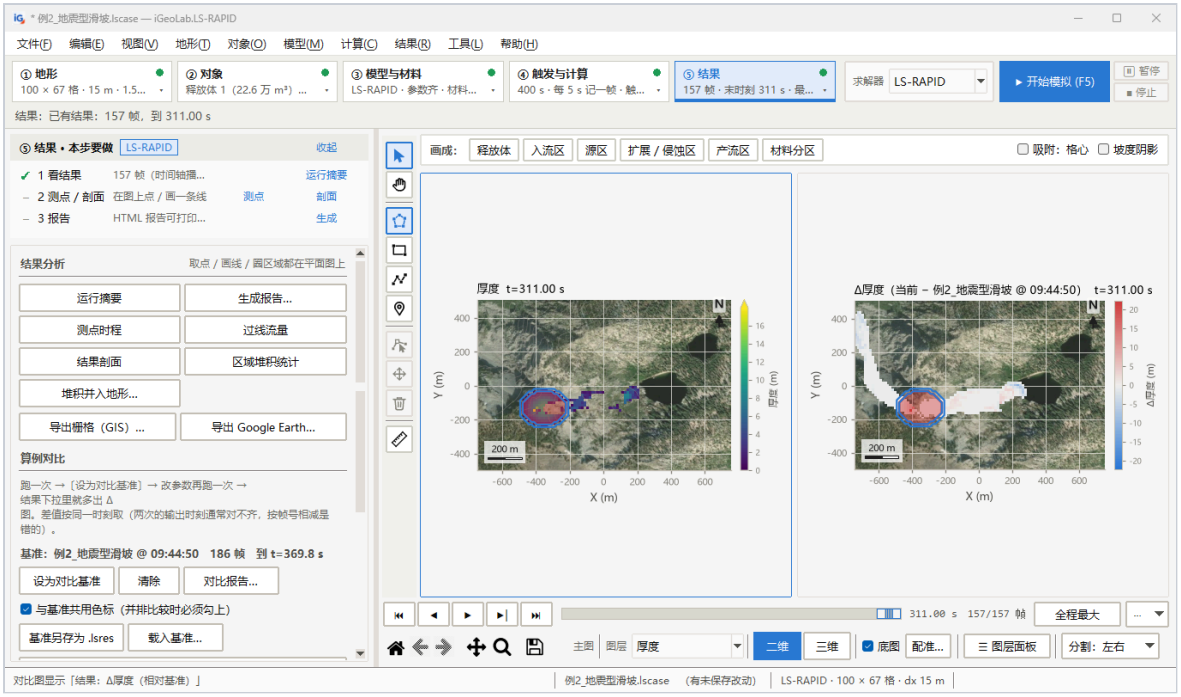

图 **9-15**　分割对比：（左）当前的厚度（右）与基准的厚度差

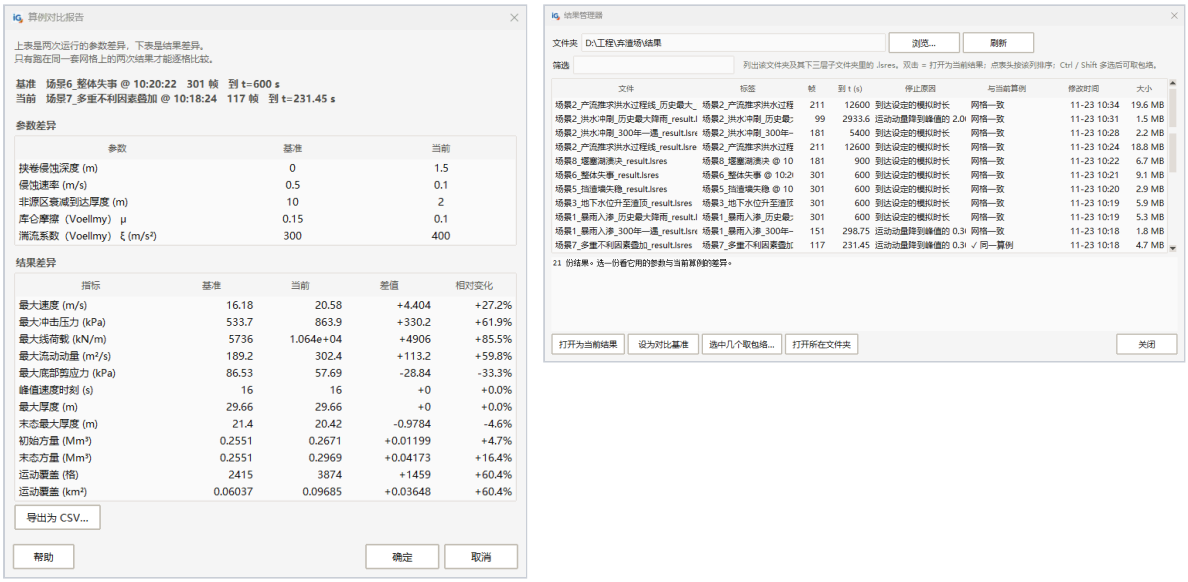

图 **9-16**　（左）算例对比报告（右）结果管理器

9.11 导出

表 **9-3** 导出功能

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 ≥ 阈值的范围，Shapefile 与 DXF，可叠加到 GIS 与 CAD
多次结果的包络	逐格取最大，另有一张「控制工况」栅格
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
文本与表	VALUE / GRAPH / U / V、G / M .dat 高程序列、时程与剖面 CSV
图与动画	当前图 PNG / JPEG；动画 AVI / GIF / PNG 帧

9.12 把堆积并入地形

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，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，形成完整的灾害链推演。

第 10 章 研究工具

参数取多少、结果对参数有多敏感、由实测能反解出什么、结果有多大把握 —— 三个研究工具分别回答这些问题，扫描与抽样都在后台进行，不影响主窗口操作。

10.1 参数敏感性

对一个参数扫若干取值，逐次完整模拟，给出滑距、速度、流深、体积、面积等指标的响应曲线与弹性系数（指标相对变化与参数相对变化之比，无量纲，不同参数之间可以直接比较）。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。



图 **10-1** 参数敏感性：**Voellmy** 摩擦系数 **μ** 对前缘推进的影响

10.2 参数反演与可辨识性

由实测堆积反解参数：观测可以是图上圈定的堆积轮廓、末态厚度网格、灾后 DEM，或算例里的实测堆积厚度；最多同时反解三个参数。程序给出最优参数、目标函数图与可辨识性分析 —— 哪些参数组合由这份观测解得开；自检功能用合成观测检验反演流程本身。

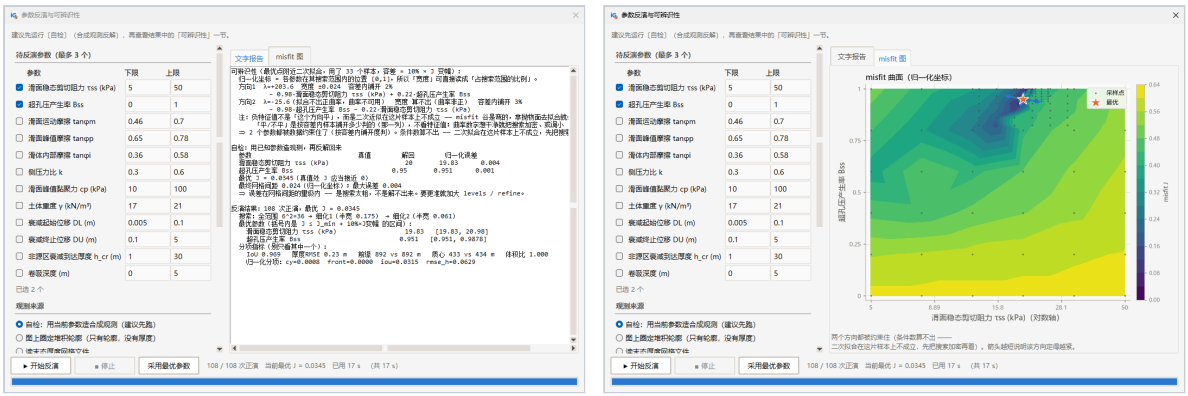

图 **10-2** 参数反演与可辨识性：（左）文字报告，**τss** 的真值 **20 kPa** 反解得 **19.8 kPa**（右）目标函数图，星号为最优点

10.3 参数不确定性分析

在给定区间里随机抽取参数组合（均匀、正态、对数均匀分布），每组各跑一次完整模拟，按进程并行；逐格统计「流深达到阈值」的概率、流深均值与流深、速度、冲击压力的包络。输出到达概率、均值与包络栅格、逐次参数与指标表、摘要与概率图，同一随机种子可复现。

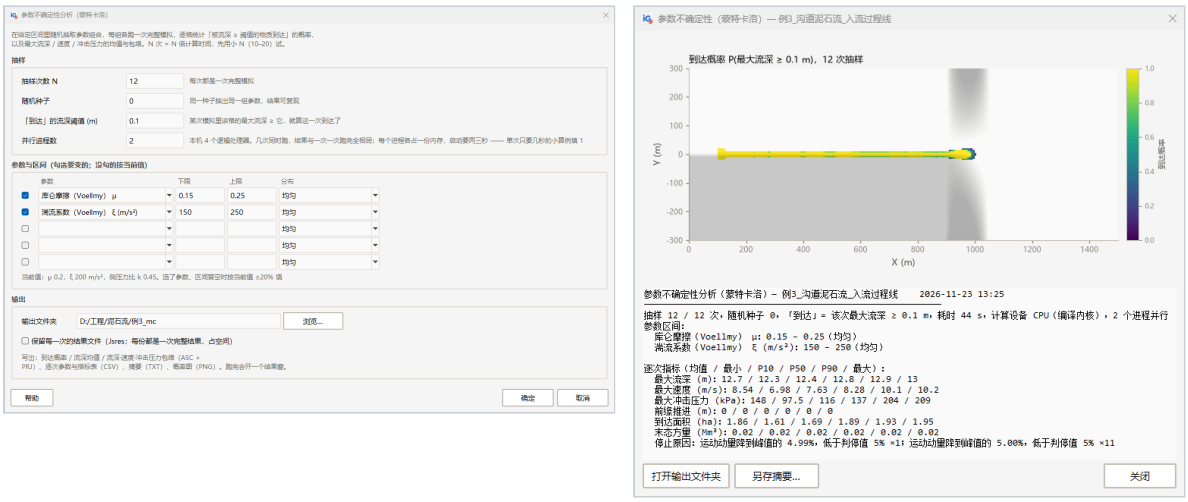

图 **10-3** （左）参数不确定性分析的设置（右）到达概率与逐次指标

第 11 章　数据互通与自动化

平台与常用的地形、矢量、GIS 与三维展示数据互通，也可以脱离界面批量运行。

表 **11-1**　数据互通一览

数据	说明
LS-RAPID 工程	读取工程目录（地形、滑动面、厚度、分区、土性、触发时程与设置），写出 .lsr21 工程与文本结果，写完读回自检
r.avaflow 工程	导入 param1.txt 工程：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
地形与模型	ESRI ASCII、GeoTIFF、DXF、OBJ / OSGB / PLY、LAS / LAZ、XYZ
矢量	Shapefile、KML / KMZ、DXF、CSV 多边形；影响范围导出 Shapefile 与 DXF
结果	GIS 栅格、Google Earth KMZ、HTML 报告、CSV、动画；工程包（单个文件便于传递）
命令行与脚本	批量计算、参数扫描；自定义阻力与侵蚀脚本

11.1　命令行

表 **11-2**　命令行的常用参数

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

11.2　自定义脚本

自己的底面阻力律与侵蚀速率写成一个 Python 脚本，随算例保存、由内置求解器逐步调用，不需要另装 Python 环境。

第 12 章　应用案例

以下案例都随程序提供算例文件，完整的逐步操作见《用户手册》第 12 章。

12.1　降雨型滑坡

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压比在 30–90 s 由 0.10 升到 0.55：约 52 s 起动，78 s 达到最大速度 38 m/s，220 s 全部停止，前缘推进约 720 m。

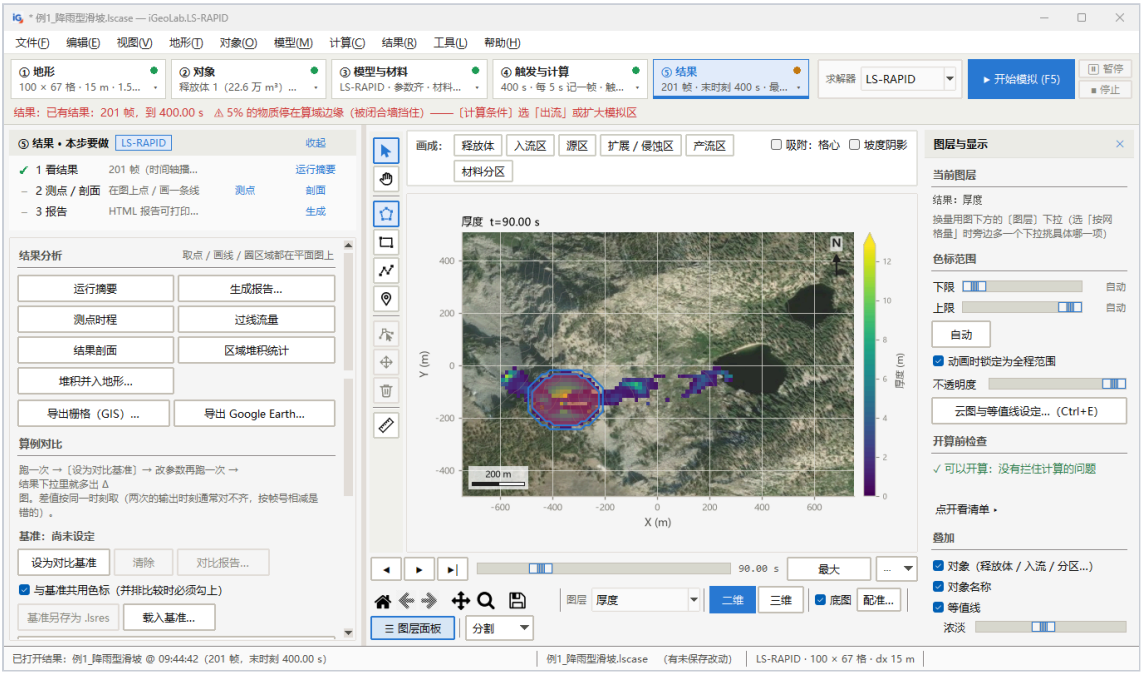

图 **12-1**　降雨型滑坡：约 **120 s** 时的流深，底图为卫星影像

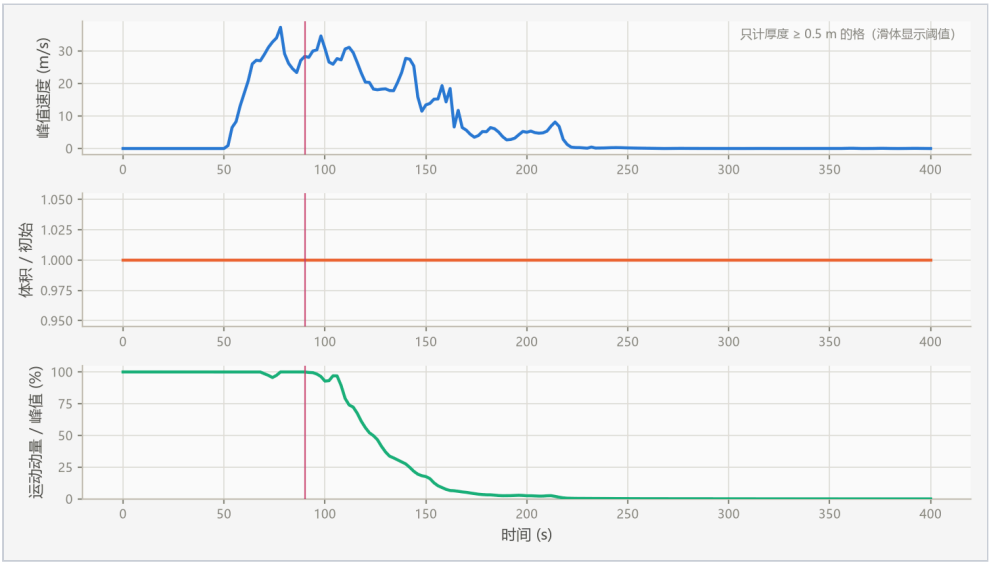

图 **12-2**　峰值速度、体积与运动动量时程

12.2 地震型滑坡

同一处滑体改用地震触发：20 s 起震、持续约 10 s，水平系数峰值约 0.26；约 26 s 起动，48 s 达到最大速度 36 m/s，前缘推进约 670 m。用对比功能看稳态剪切阻力 τss 由 20 改为 30 kPa 的影响：滑体停得更近、堆得更厚。

12.3 沟道泥石流

2 万 m³ 的泥石流由上游入流区按流量过程线注入，峰值流量 384 m³/s，沿沟道下泄，在冲积扇上堆积；运动动量降到峰值的 5% 时自动结束。可加拦挡网、算过线流量与危险强度。

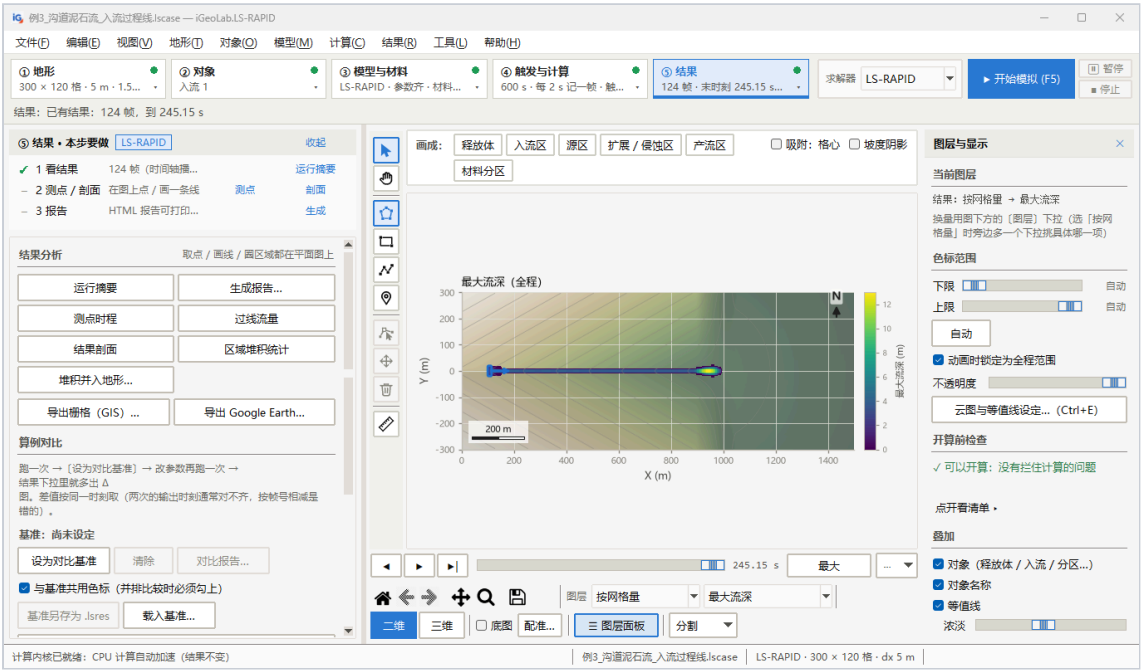

图 **12-3**　沟道泥石流：全程最大流深

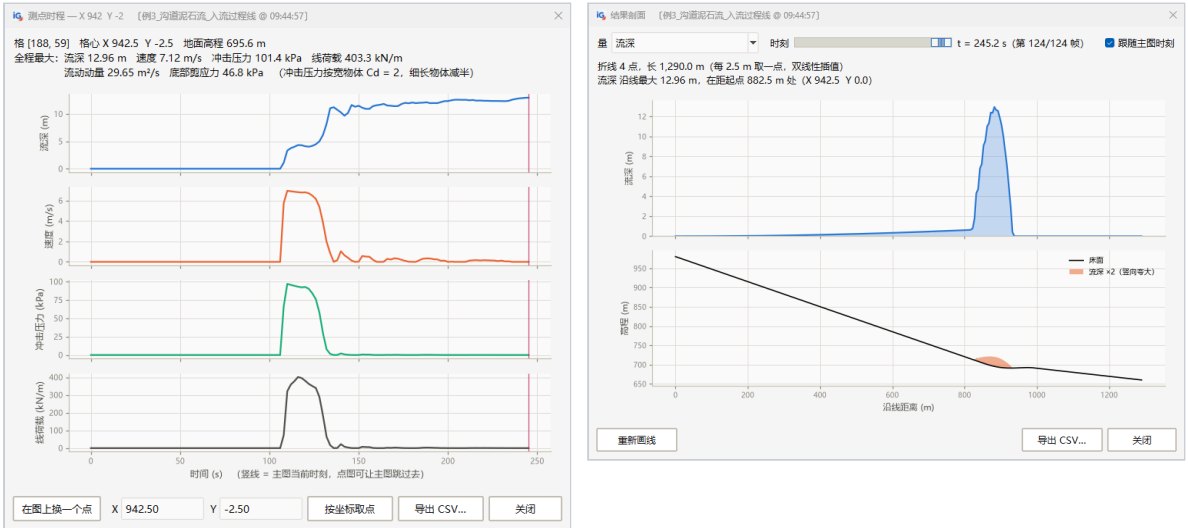

图 **12-4**　（左）冲积扇上一点的时程（右）沿沟道的结果剖面

12.4 弃渣场失事影响范围

一座沟谷型弃渣场（堆渣 25.5 万 m³，最大堆渣高度 48 m，六级台阶），沟口有村庄、公路桥涵与河道。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）组织分析，完整覆盖四个环节：

表 **12-1** 弃渣场失事影响分析的环节

环节	做法	用到的功能
确定失事场景	暴雨入渗、洪水冲刷（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；由设计暴雨推求降雨过程线与渣场断面洪水过程线	由降雨推算孔压、降雨产流、过线流量
确定滑出渣量	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
计算滑移与堆积	碎屑流与泥石流分别给参数，考虑沿程铲刮与堵塞系数，并与经验公式对照	Voellmy 本构、入流过程线、侵蚀区
划边界、判影响	运动扫过的范围与最终堆积范围、沟道纵剖面、敏感点的流深与流速、堵河、壅水与溃决	最大值图、剖面、测点时程、堆积并入地形、水位填充

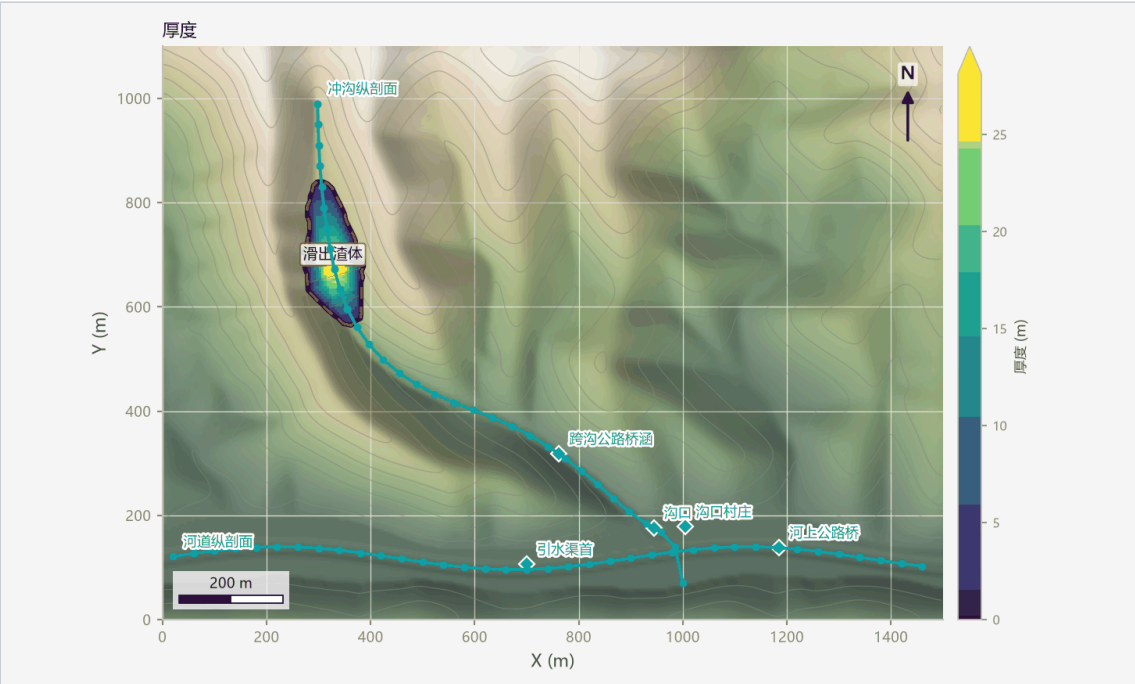

图 **12-5** 弃渣场示例的地形、渣体、冲沟与敏感因素

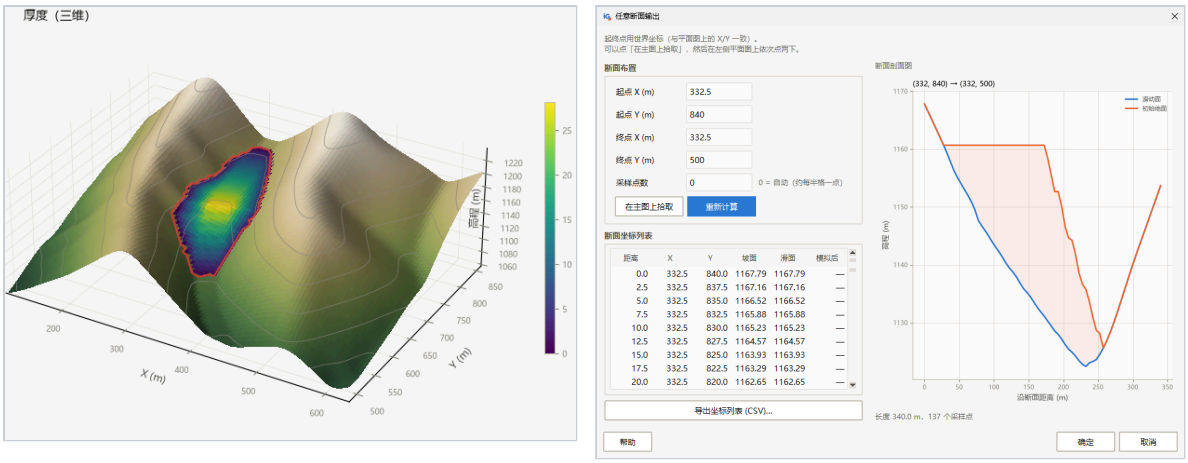

图 **12-6**　（左）渣体与沟谷的三维视图（右）沿沟轴线的断面

表 **12-2**　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）	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	2.02	1.01	**0.77**	**0.76**	1.75	**0.87**
前坡下部	3.0	1.86	**0.92**	**0.70**	**0.68**	1.62	**0.80**
前坡	5.0	1.95	**0.99**	**0.75**	**0.73**	1.69	**0.85**
前坡（深）	7.0	2.15	1.11	**0.85**	**0.83**	1.86	**0.95**
前坡＋渣顶前缘	8.0	2.09	1.08	**0.82**	**0.80**	1.79	**0.91**
前坡＋渣顶前缘（深）	10.0	2.12	1.10	**0.84**	**0.82**	1.81	**0.93**
前坡＋渣顶中部	12.0	2.49	1.31	1.00	**0.98**	2.07	1.08
前坡＋渣顶后部	15.0	3.82	2.05	1.61	1.57	2.94	1.57
近整体	22.0	3.99	2.15	1.68	1.65	3.04	1.63

暴雨的渣场断面洪水由降雨产流算出：300 年一遇洪峰 3.46 m³/s，历史最大降雨 4.94 m³/s，再按堵塞系数换算成泥石流过程线。

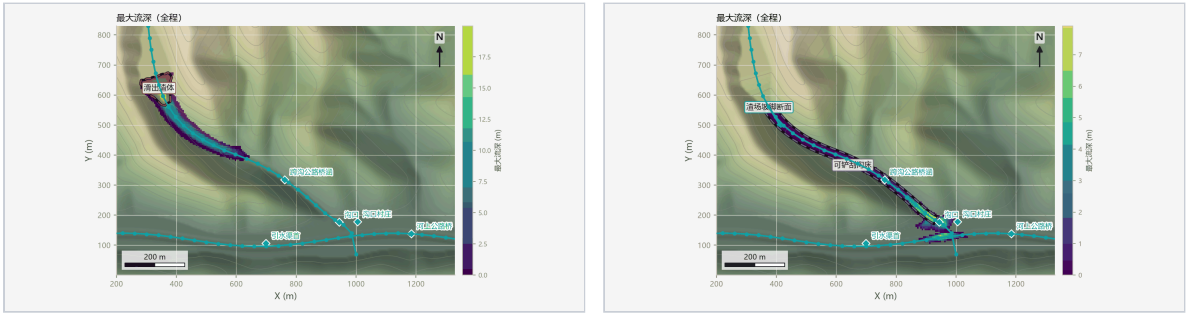

图 **12-7**　最大流深：（左）暴雨入渗 **300** 年一遇（右）洪水冲刷 **300** 年一遇

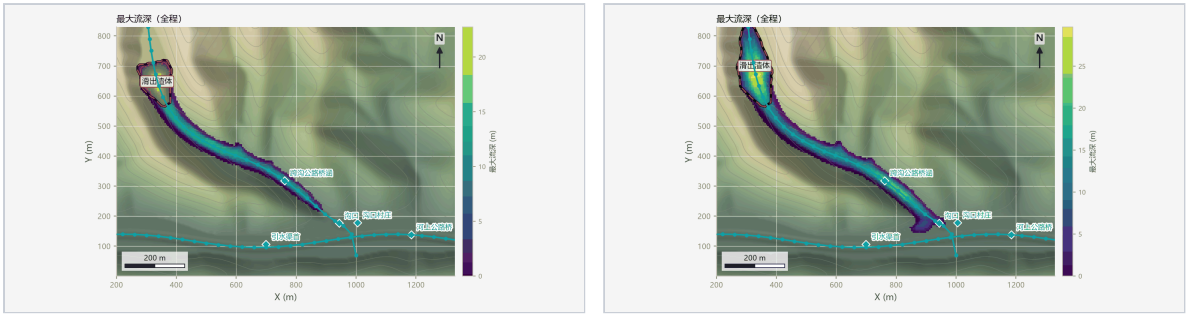

图 **12-8**　最大流深：（左）地下水位升至渣顶（右）整体失事

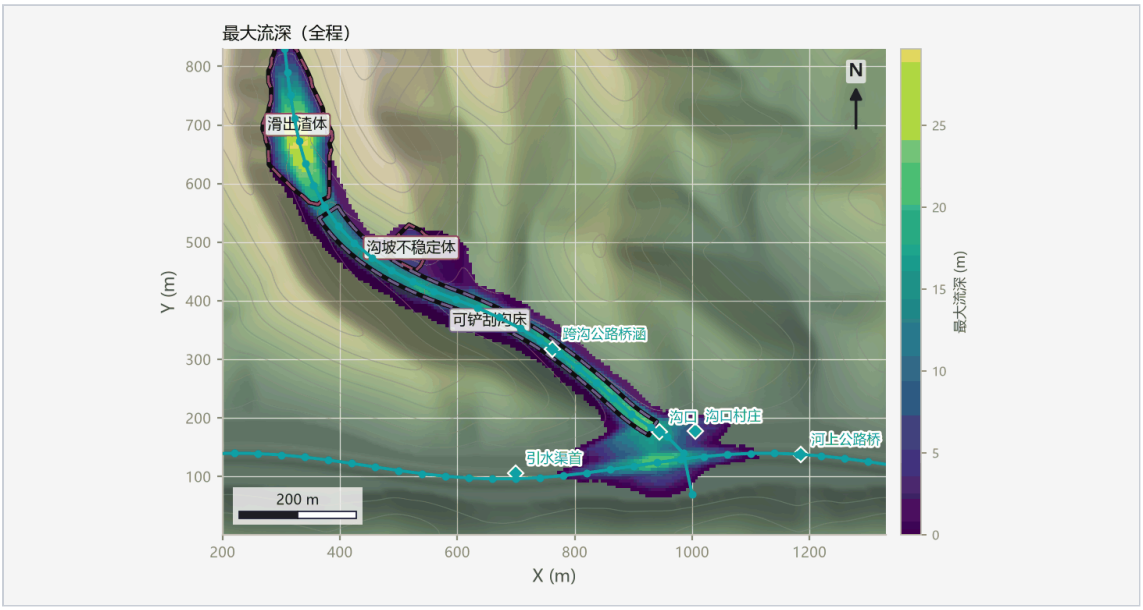

图 **12-9**　多重不利因素叠加：渣体涌入河道，堵塞行洪通道

表 **12-3**　各场景的主要结果

场景	滑出渣量	滑移距离（m）	最大速度（m/s）	堆积面积（ha）	最大堆积厚（m）
暴雨入渗（300 年一遇）	5.0 万 m³	317	12.7	0.9	10.9
暴雨入渗（历史最大连续极端降雨）	10.0 万 m³	587	14.8	1.7	13.9
洪水冲刷（300 年一遇）	1.6 万 m³（过程线）	781	5.9	0.8	6.6
洪水冲刷（历史最大连续极端降雨）	2.3 万 m³（过程线）	781	5.9	0.9	7.9
地下水位升至渣顶	12.0 万 m³	632	14.9	1.8	13.0
挡渣墙失稳（坡脚渣体溃出）	2.5 万 m³	310	11.0	0.7	8.5
整体失事	25.5 万 m³	725	16.2	2.8	21.4
多重不利因素叠加	26.7 万 m³	811	20.6	3.8	20.4

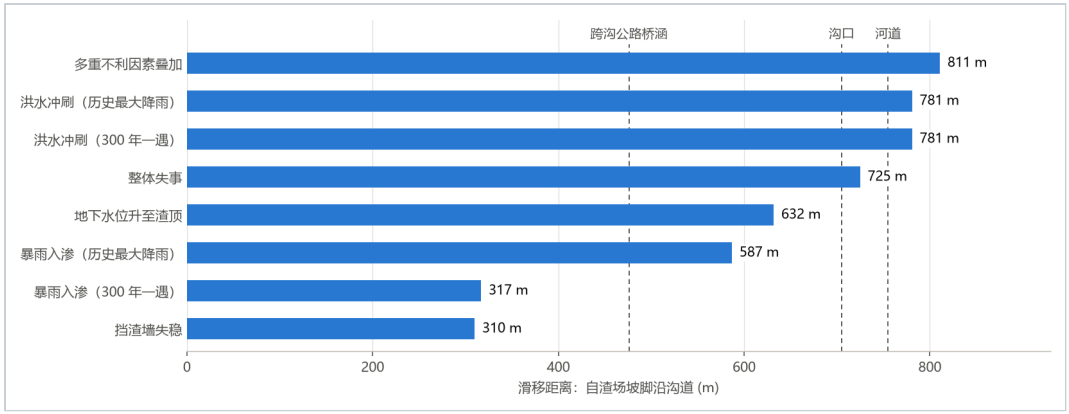

图 **12-10**　各场景的滑移距离（自渣场坡脚沿沟道）与沿程敏感因素

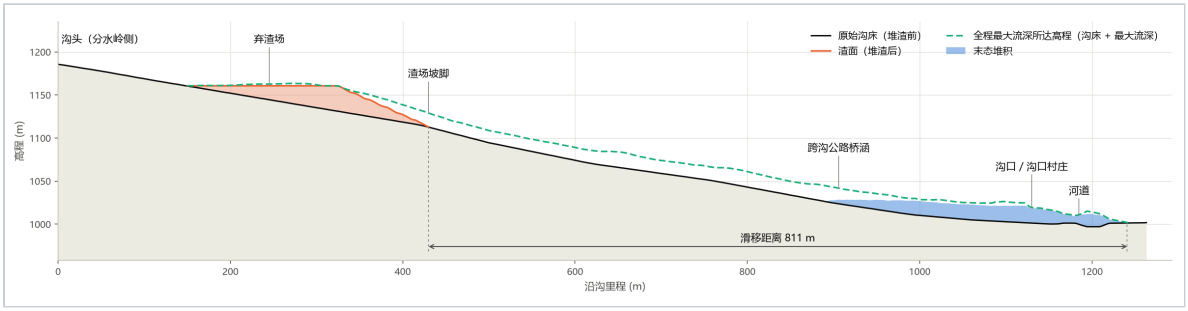

图 **12-11**　多重不利因素叠加的沟道纵剖面（横纵等比例）

敏感点上的过程由测点时程给出：叠加场景下跨沟公路桥涵最大流深 18.2 m、流速 19.0 m/s；沟口村庄最大流深 5.2 m、流速 3.4 m/s，58 s 后到达。渣体入河约 9.5 万 m³，堵塞体高出原河床约 19 m；上游壅水到漫溢标高 1002.0 m 时水量约 2.9 万 m³，溃决洪水约 110 s 到达下游公路桥，最大流深 2.4 m、流速 4.7 m/s。

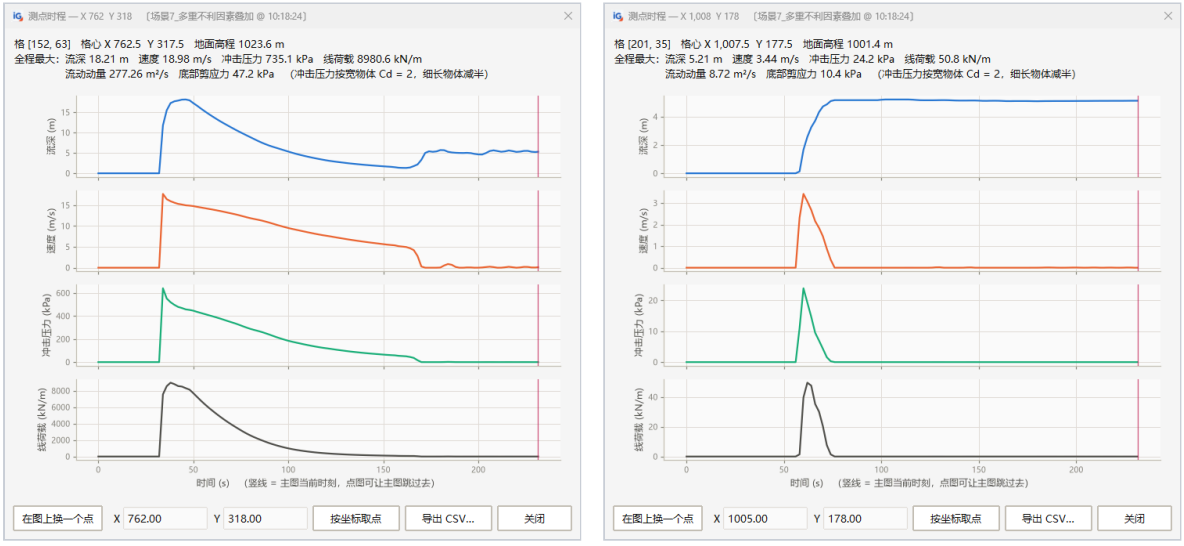

图 **12-12**　多因素叠加：（左）跨沟公路桥涵（右）沟口村庄的时程

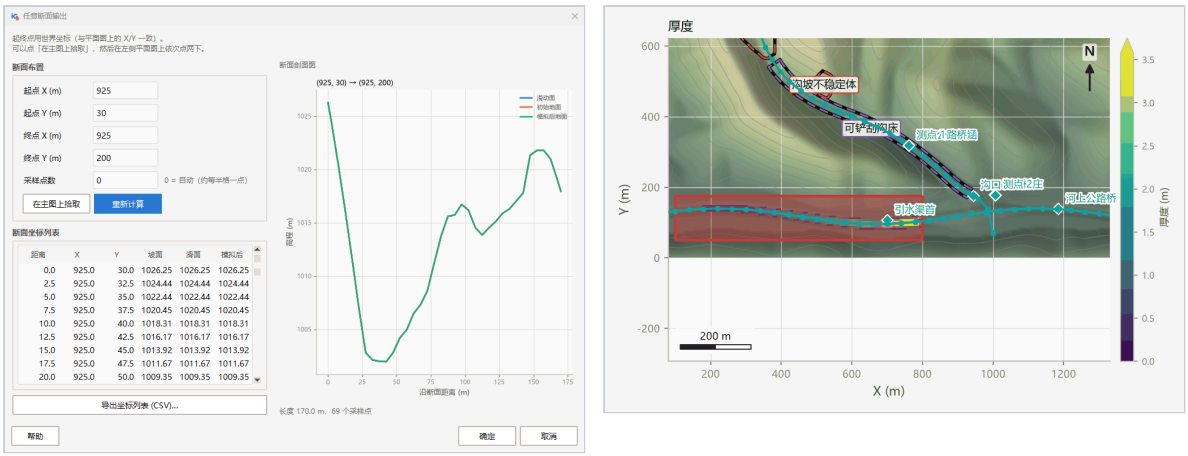

图 **12-13** （左）跨堵塞体的横断面（右）堰塞湖

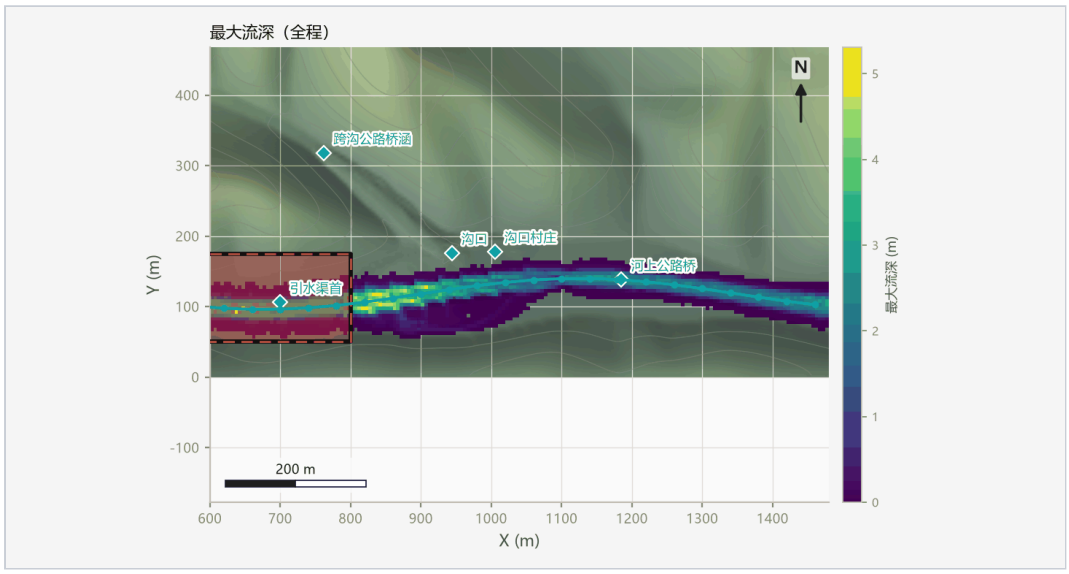

图 **12-14** 堵塞体溃决洪水的最大流深

关于与联系

iGeoLab.LS-RAPID 由中仿公司开发与维护，是 iGeoLab 系列产品之一。产品咨询、试用、培训与技术支持请通过下面的方式联系。

- 公司：中仿公司
- 网址：www.igeo.cn
- 客服热线：400 888 5100