

地球系统数值模拟装置项目
区域高精度长期气候变化风险模拟分系统
冰冻圈灾害风险模拟分析子系统
培训教程

张世强
2022年5月



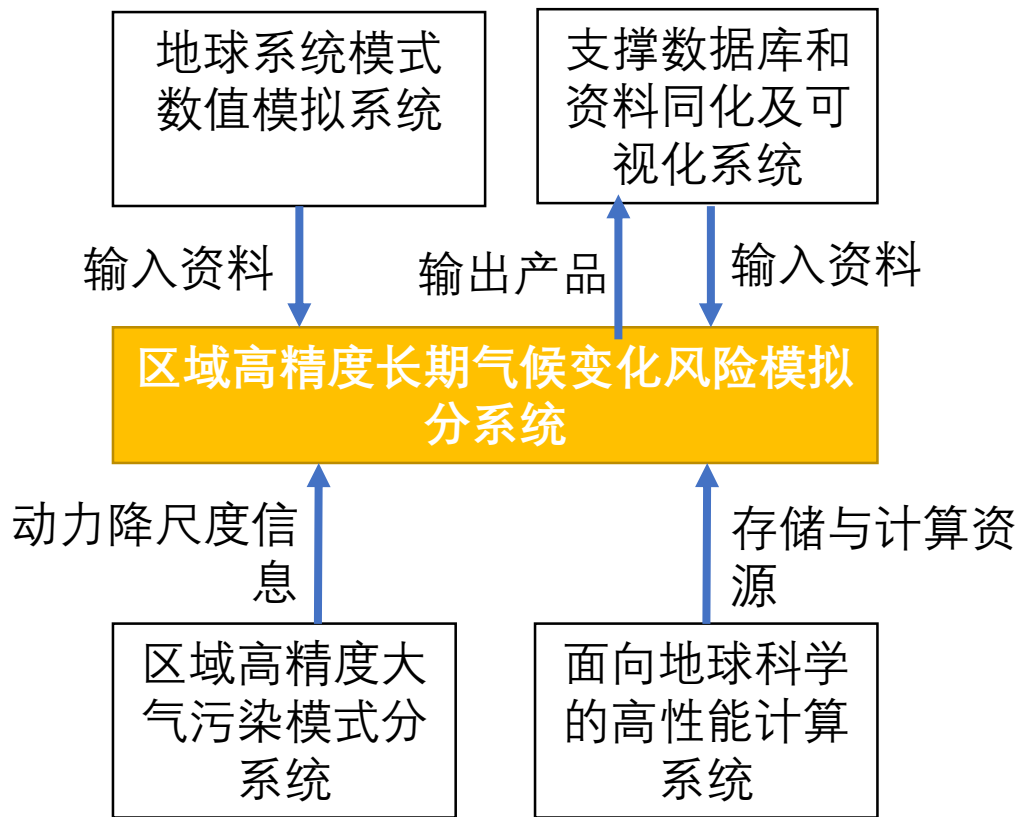
在地球系统数值模拟装置中的位置





分系统在地球系统数值模拟装置中的位置

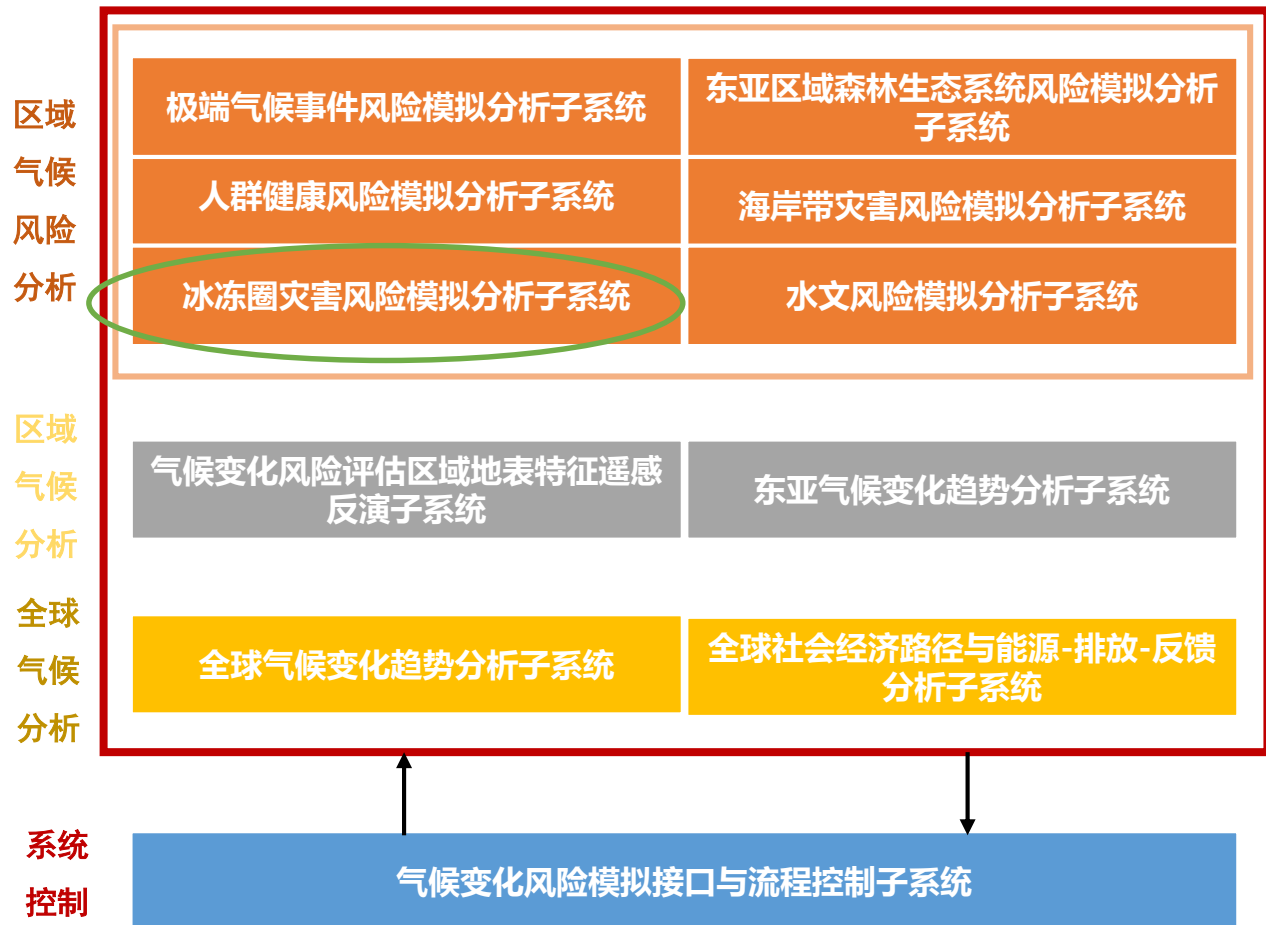
外部接口列表



发送方	接受方	交换内容
地球系统模式数值模拟系统	本分系统	输入资料
支撑数据库与资料同化及可视化系统	本分系统	输入资料
区域高精度大气污染模式分系统	本分系统	动力降尺度信息
面向地球科学的高性能计算系统	本分系统	计算和存储资源
本分系统	支撑数据库与资料同化及可视化系统	输出产品



系统架构



(1) 基础环境和系统控制：整个系统基于面向地球科学的高性能计算系统来搭建，所有子系统由接口和流程控制子系统支撑和控制。

(2) 全球气候分析：由全球气候变化趋势分析子系统和全球社会经济路径与能源-排放-反馈子系统组成

(3) 区域气候分析：由气候变化风险评估区域地表特征遥感反演子系统和东亚气候变化趋势分析子系统组成

(4) 区域气候风险分析：由极端气候事件风险、水文风险、东亚区域森林生态系统风险、海岸带灾害风险、冰冻圈灾害风险、人群健康风险模拟分析子系统组成

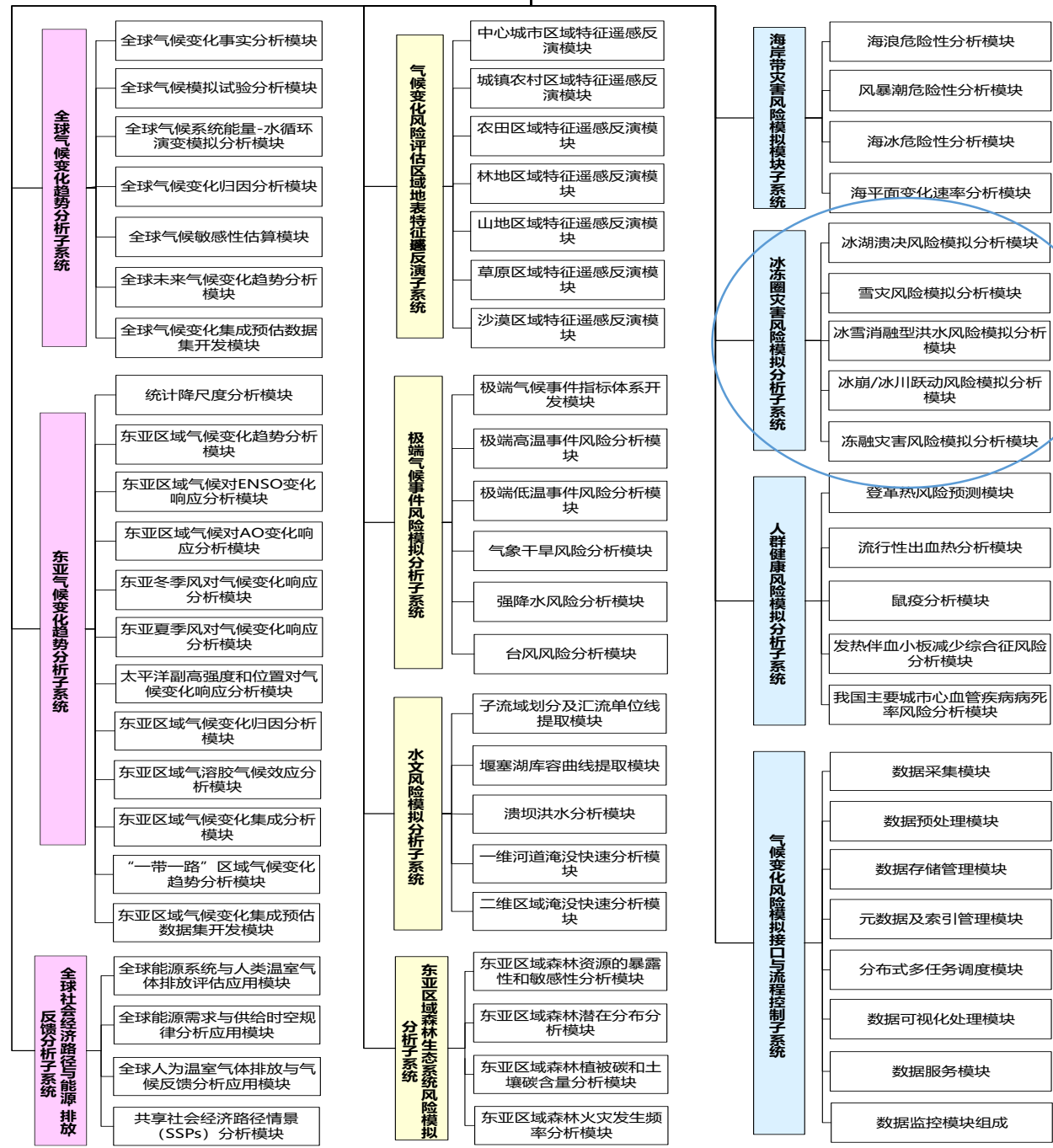


在分系统中的位置

区域高精度长期气候变化风险模拟分系统

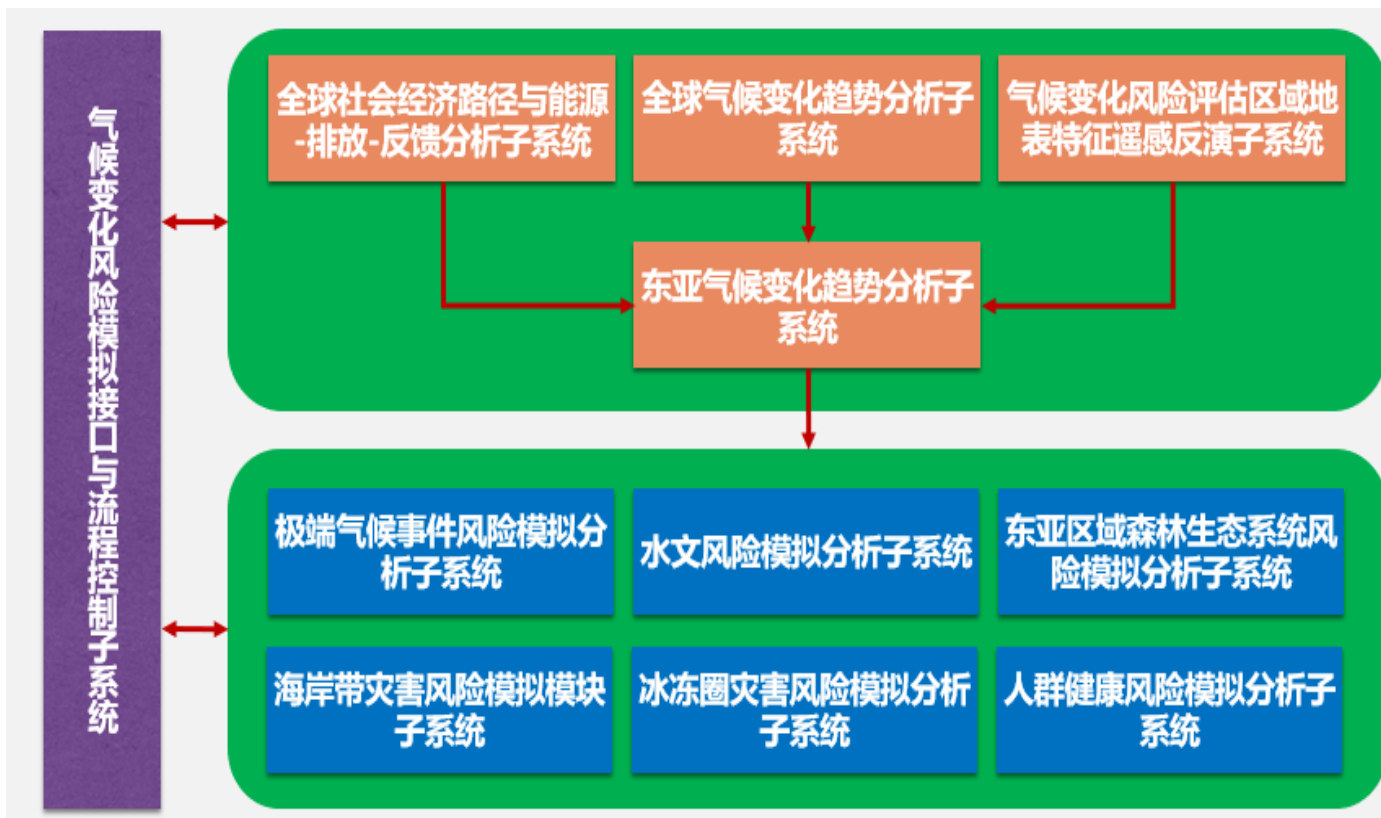
冰冻圈灾害风险模拟子系统

- 共5个模块
- 共5个功能





业务流程



根据获取的全球气候变化及东亚气候变化数据，为东亚（中国）区域**冰冻圈灾害风险**提供所需要的各类信息。



编码规范设计

- 代码管理：使用GitLab进行代码版本管理，代码维护和历史溯源，与代码同步工作。
- 协作规范：本地开发测试、线上仓库合并、同时支持角色权限管理
- 安全性：私有代码仓库、代码通过ssh加密传输。

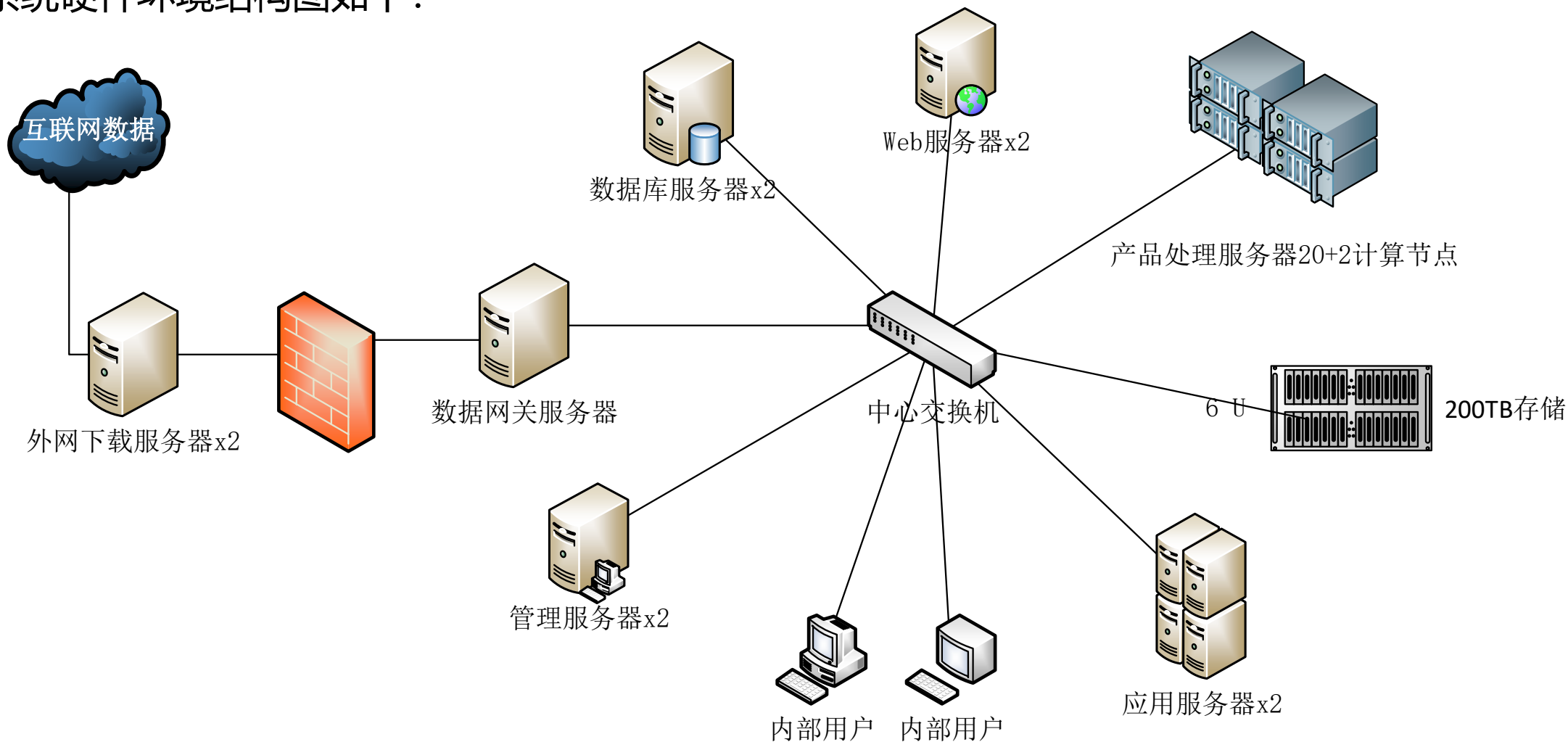


系统开发及部署环境设计

部署环境：在大装置机房开展部署、测试、试运行工作

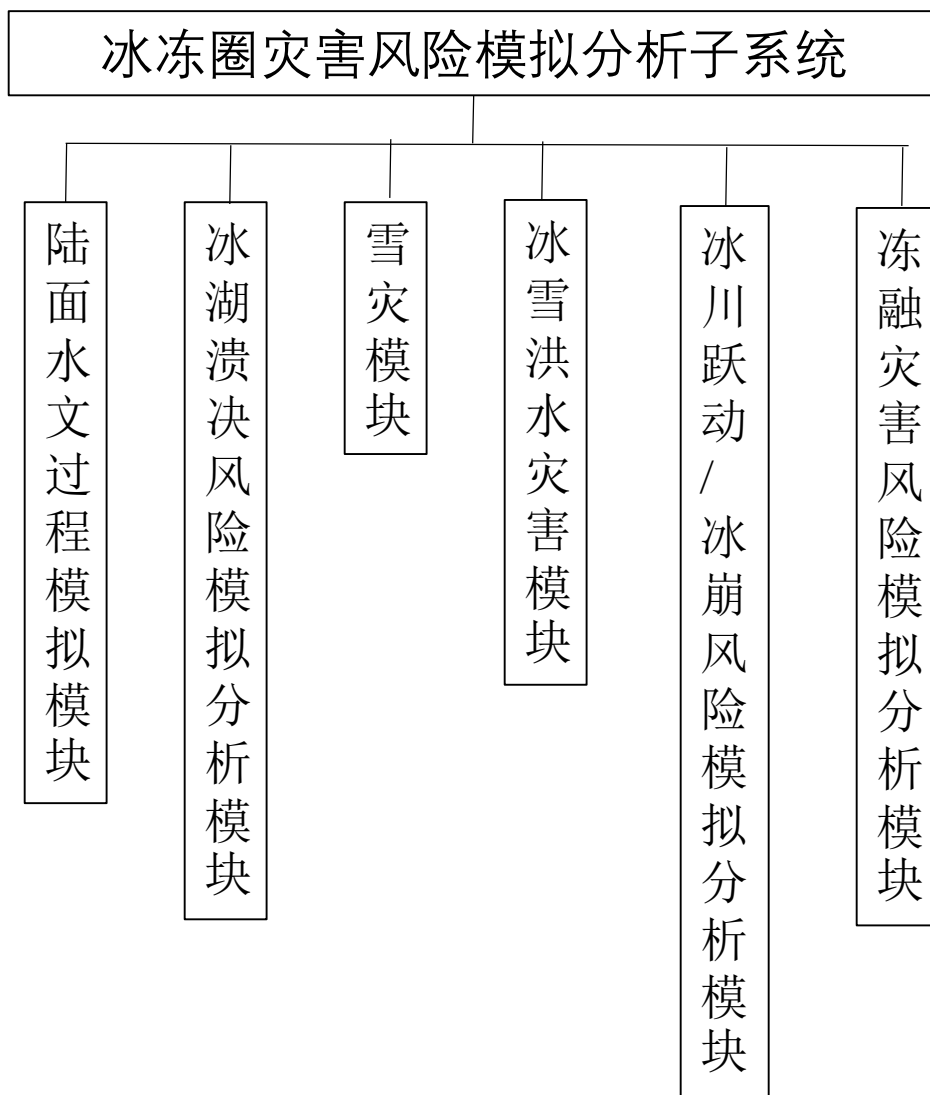
开发语言：C、C++、Fortran、Python、JAVA等

系统硬件环境结构图如下：



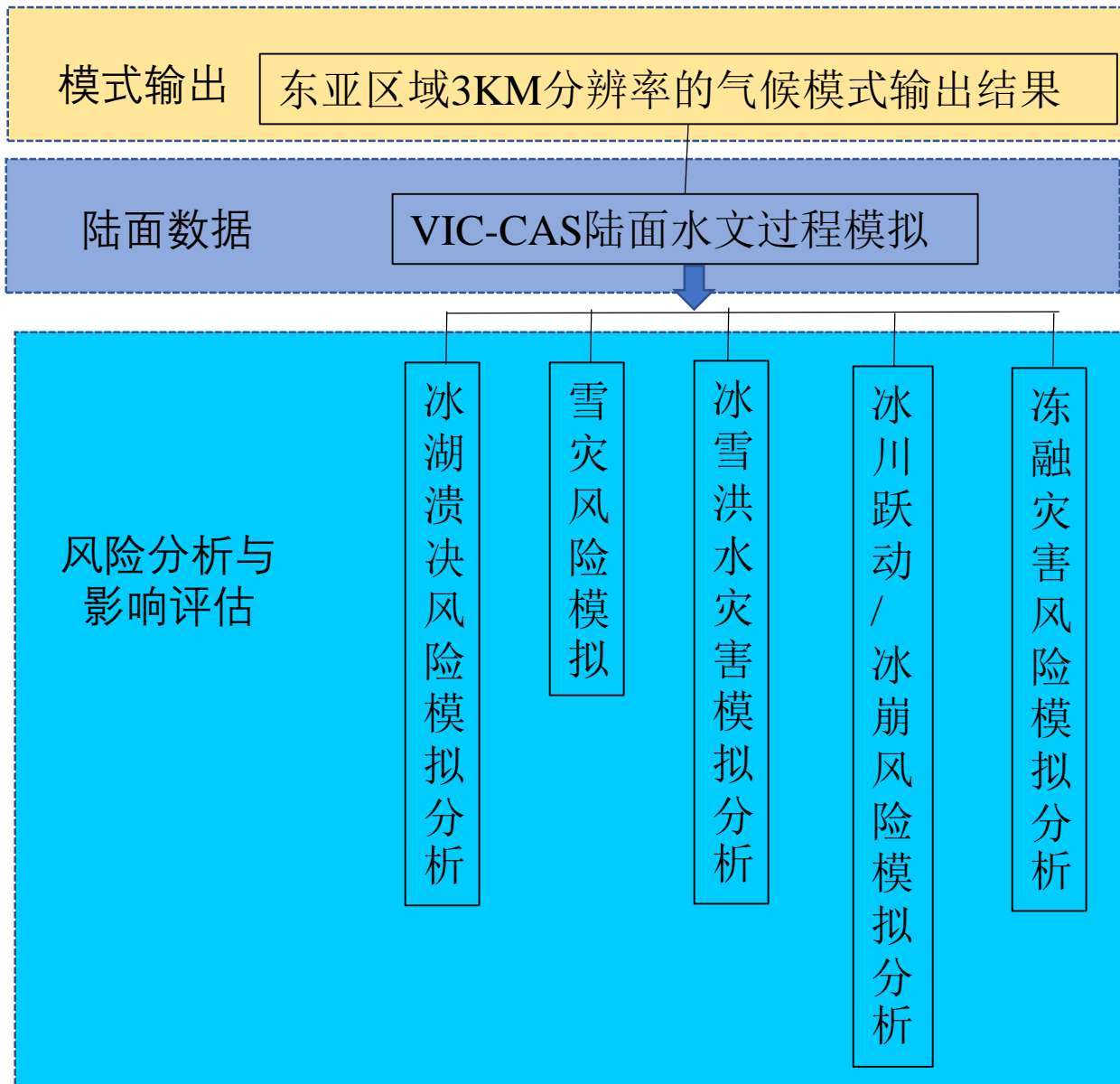


冰冻圈灾害风险模拟子系统总体构成



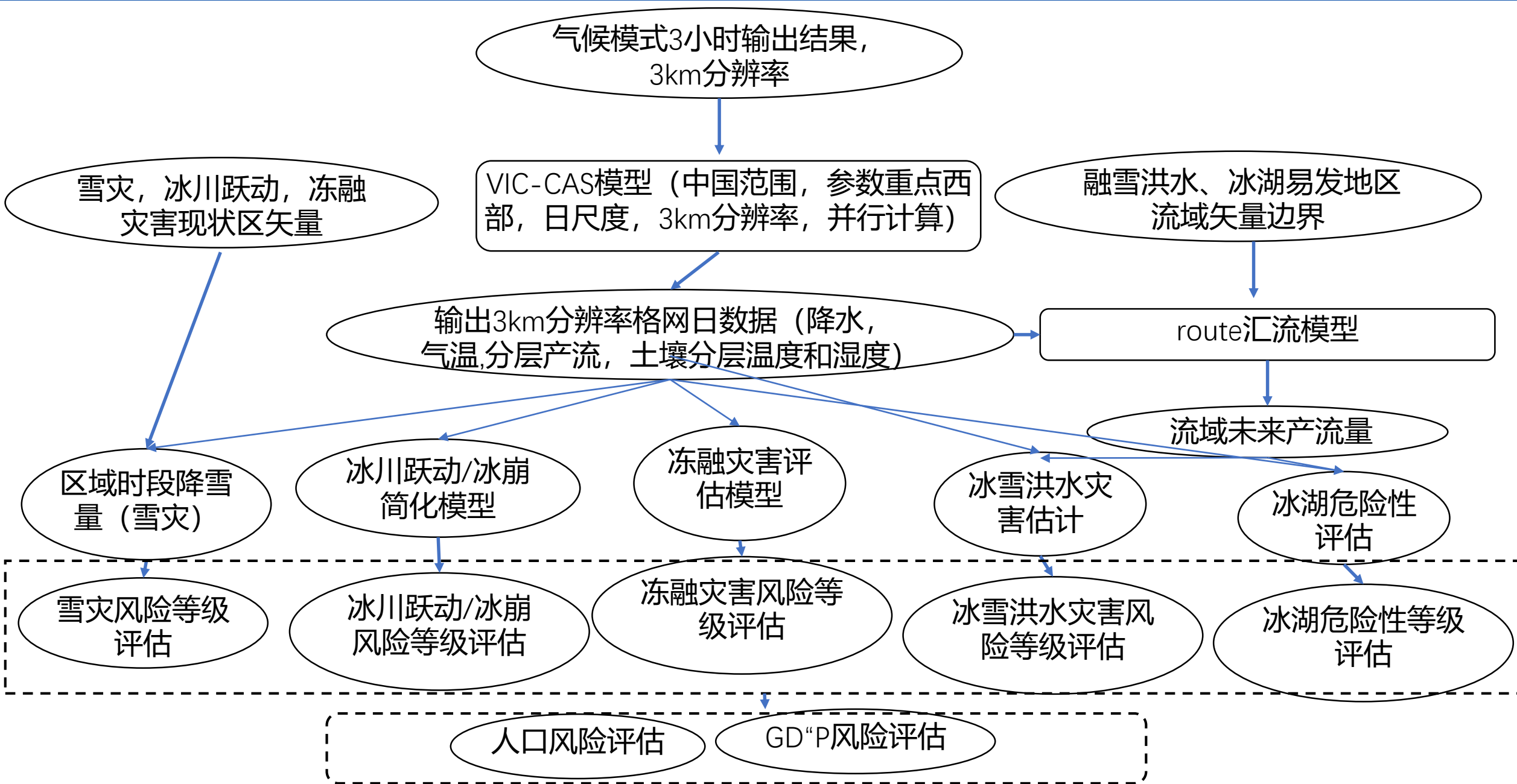


冰冻圈灾害风险模拟子系统模块运行流程示意

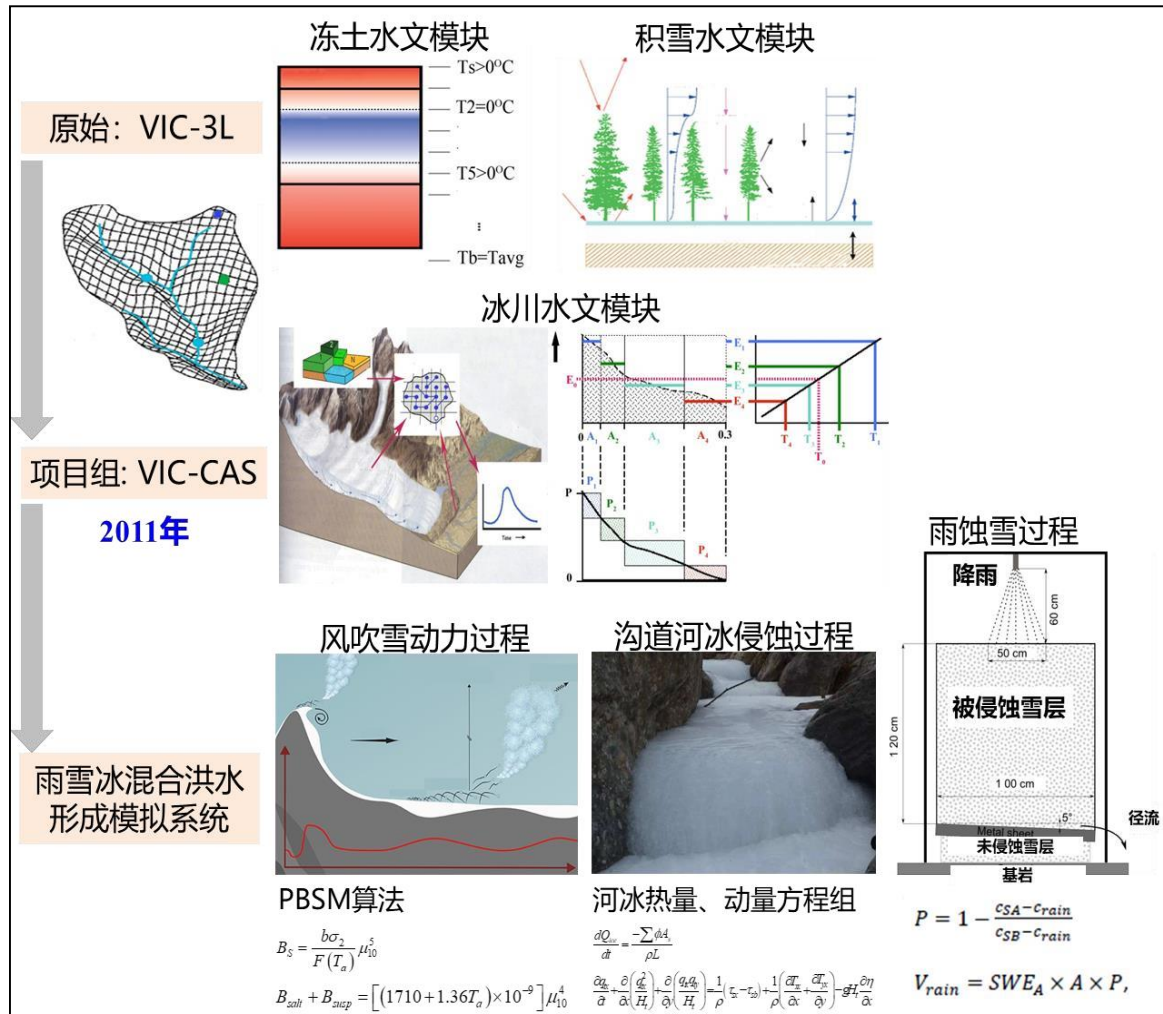




冰冻圈灾害风险模拟子系统运行流程



VIC-CAS模型

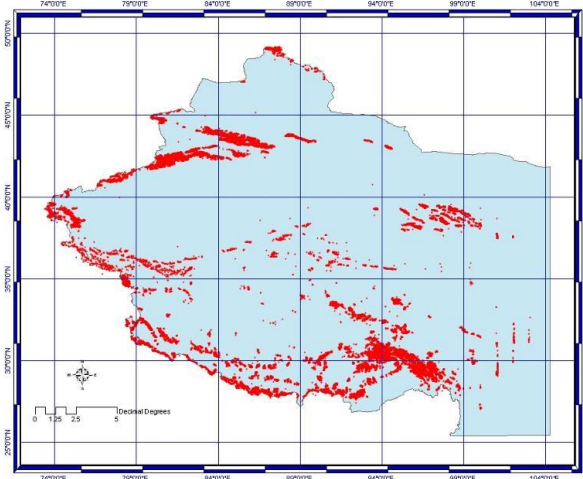


模型特征

- 能量平衡和水平衡
- 格网汇流
- 蓄满产流机制
- 增加冰川
- 改进了冻土参数化
- 没考虑风吹雪
- 不支持并行计算，考虑冻土时运行慢

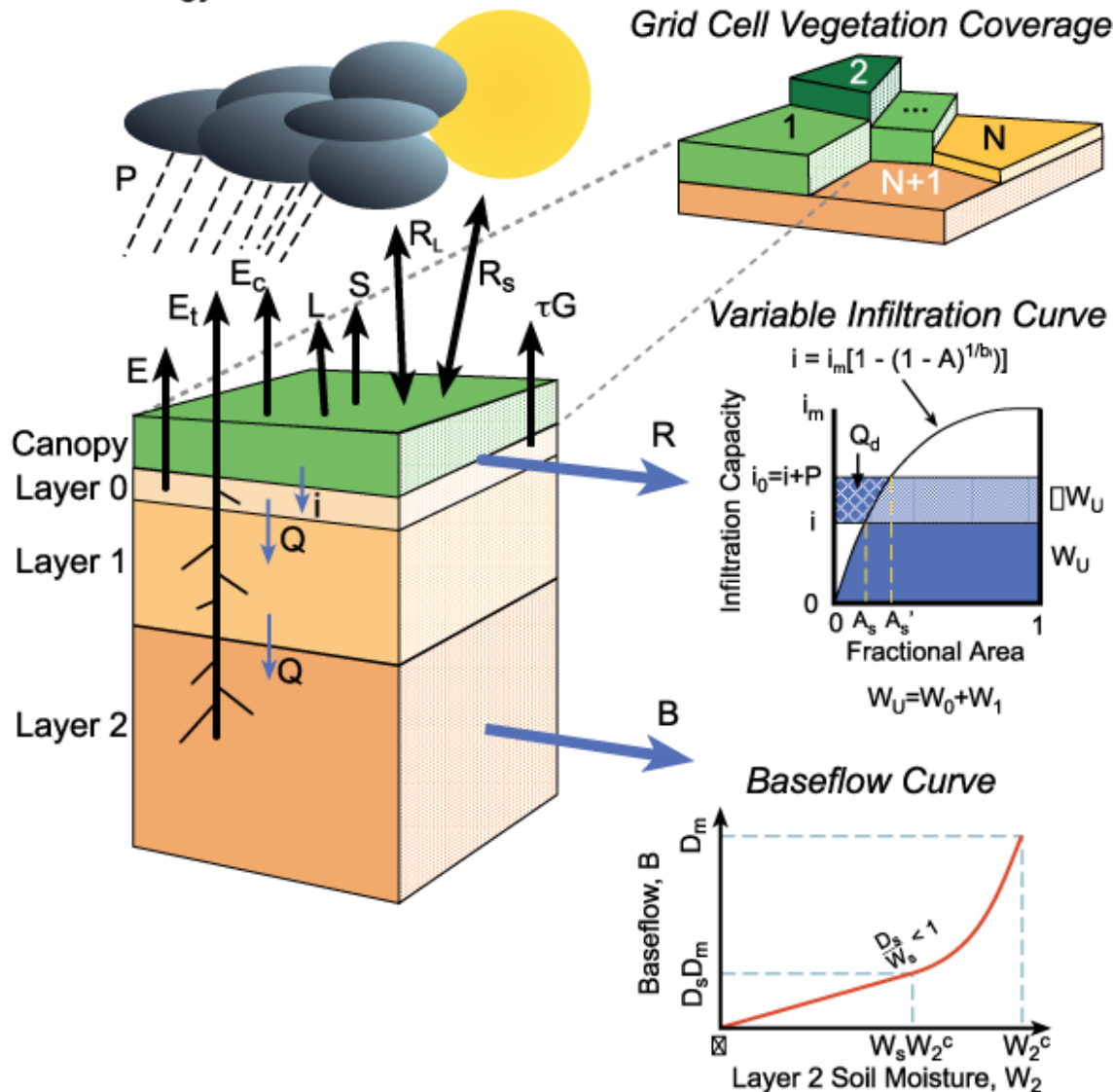
雨雪冰混合洪水形成过程模拟模型示意图

Variable Infiltration Capacity (VIC) Macroscale Hydrologic Model



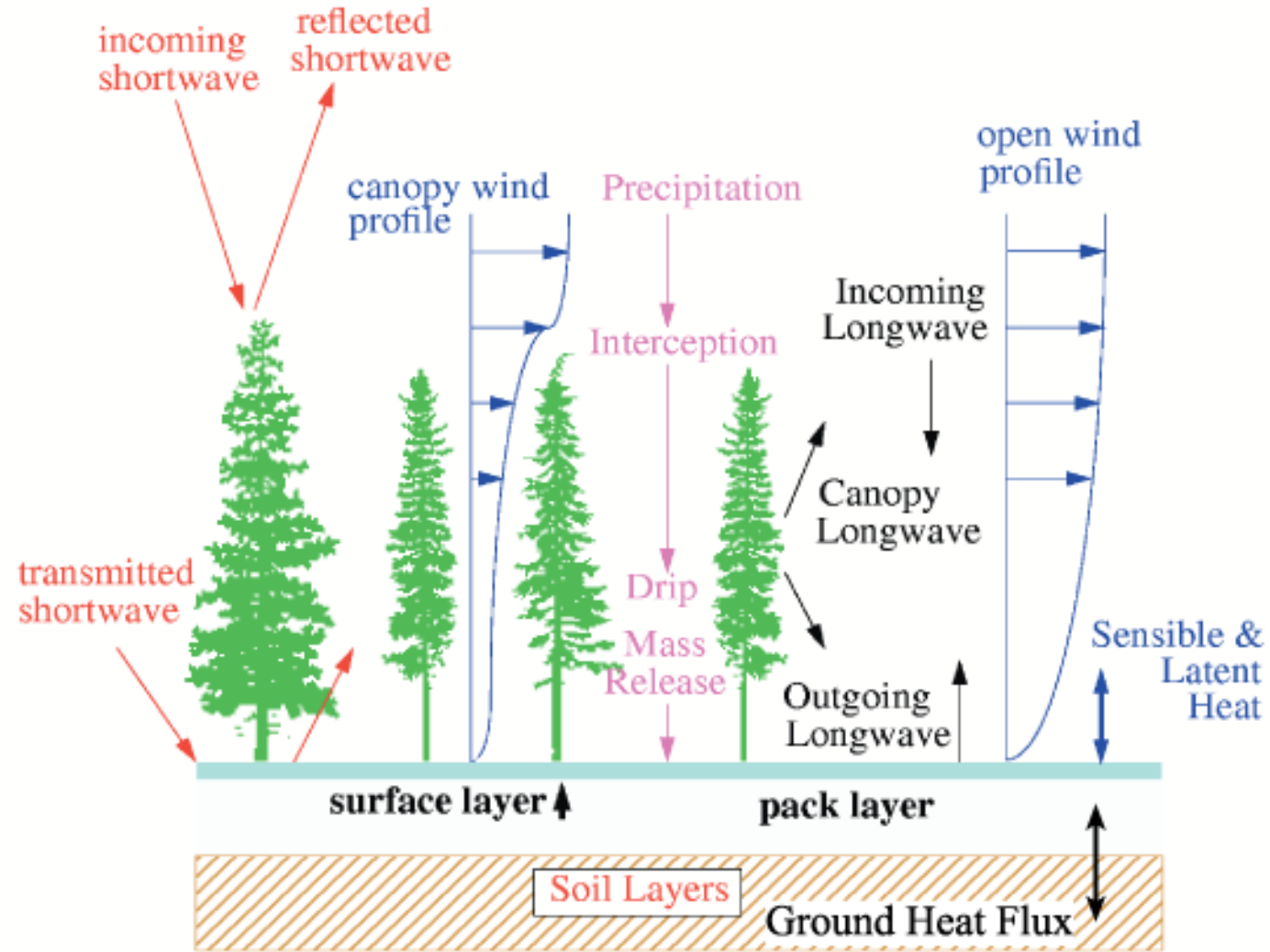
Cell Energy and Moisture Fluxes

Grid Cell Vegetation Coverage



陆面过程/大尺度水文过程模型VIC中的能水过程描述

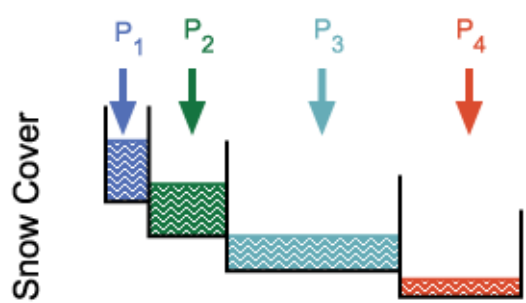
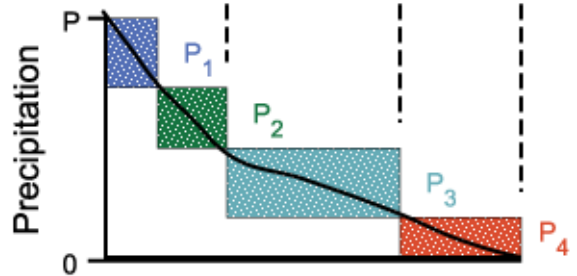
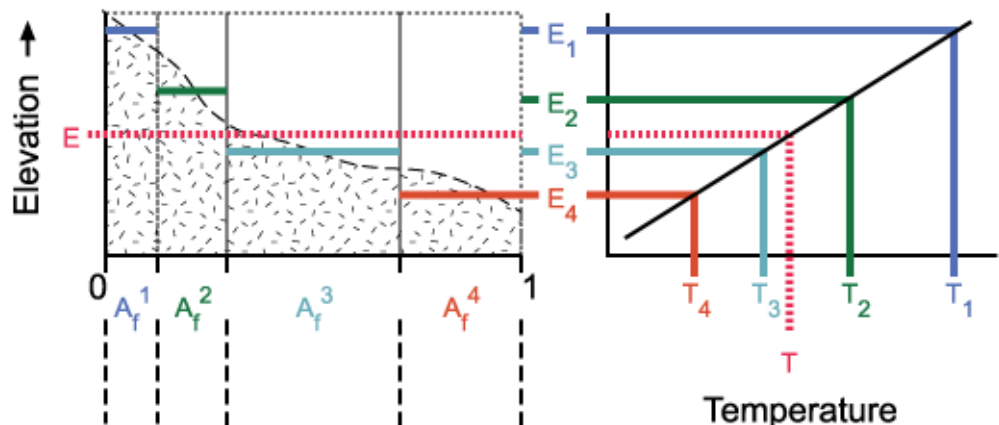
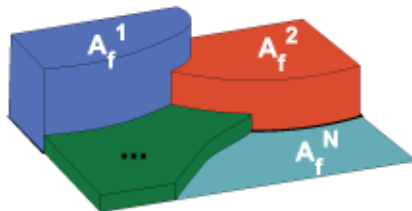
VIC Snow Algorithm



VIC中对积雪积累/消融过程描述

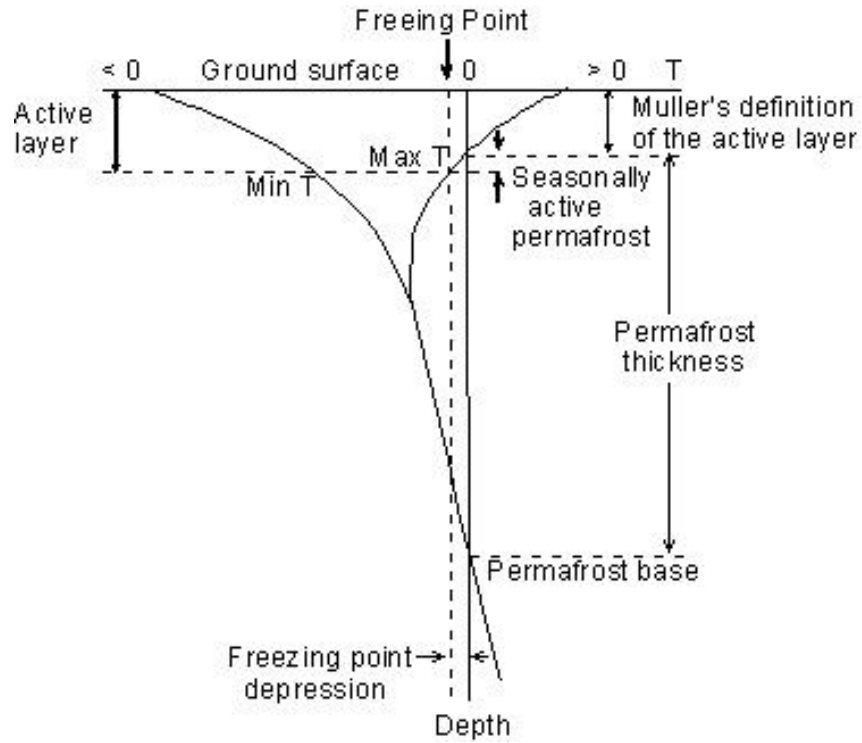
<https://vic.readthedocs.io/en/master/>

VIC Snow Elevation Bands

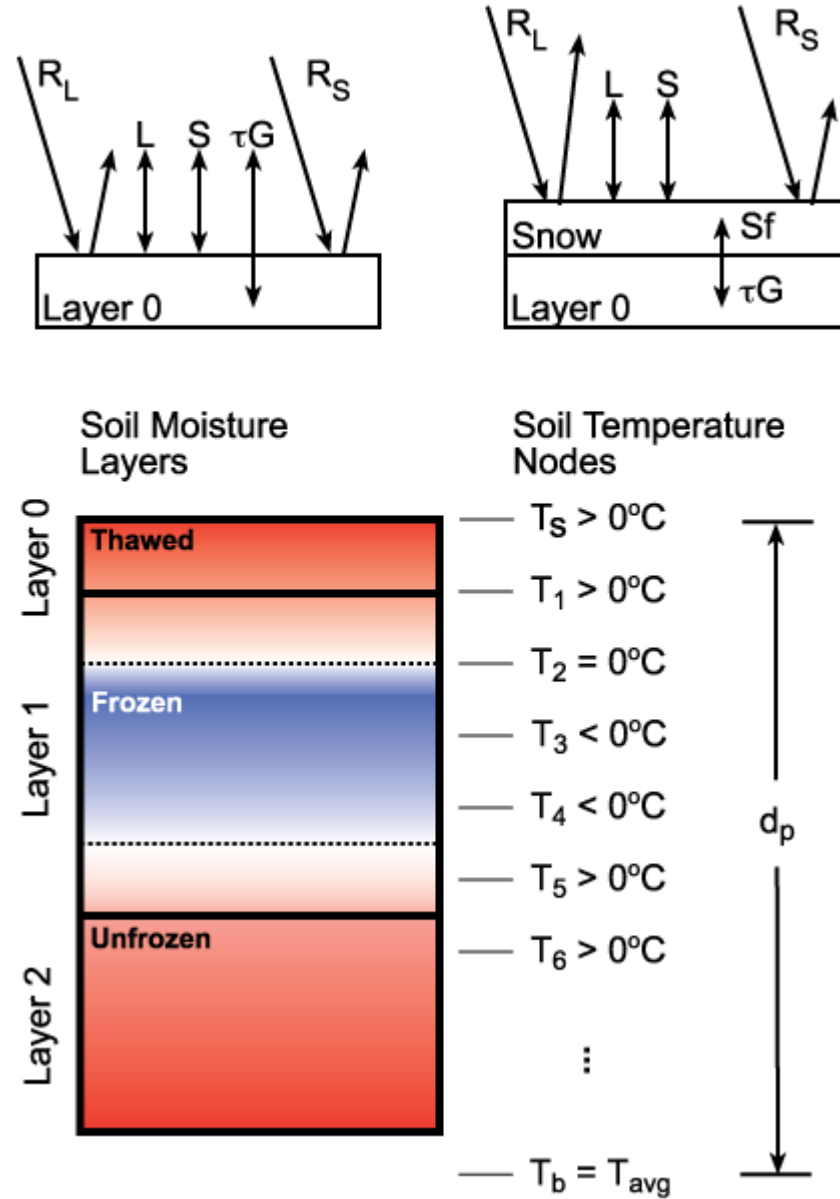


VIC中分高程带
对积雪积累/消融
过程描述

多年冻土

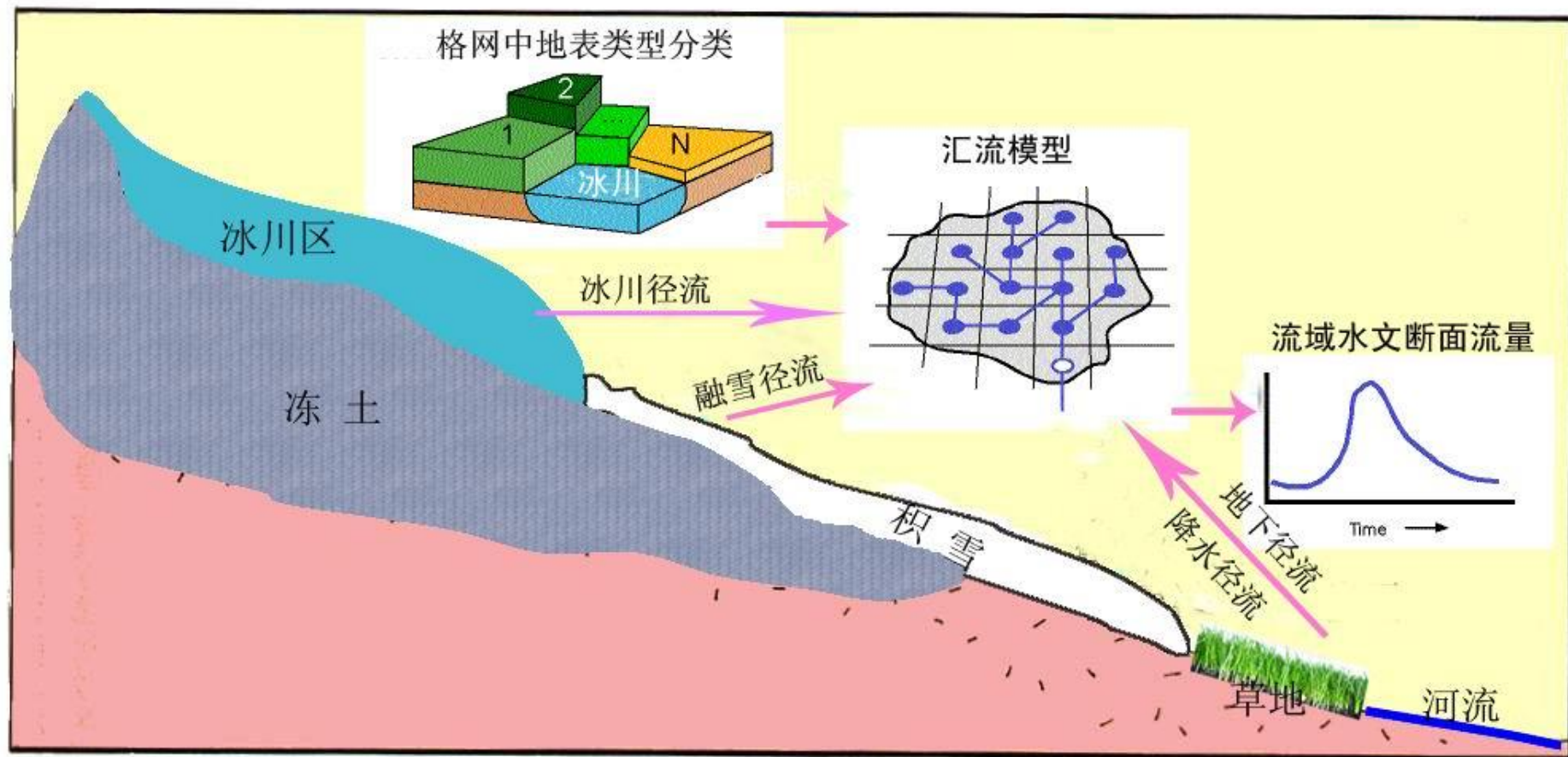


VIC Frozen Soil Algorithm

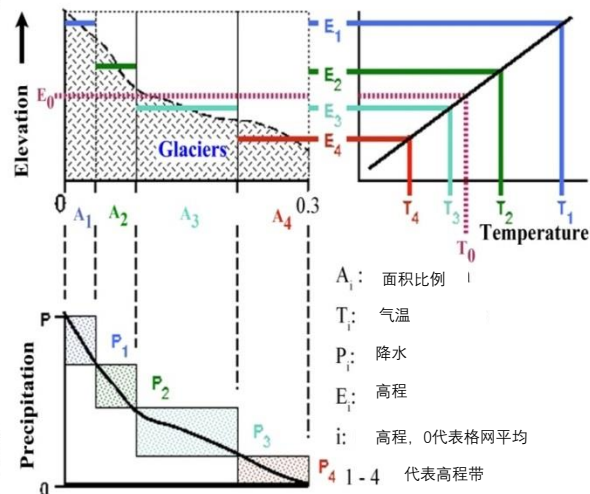
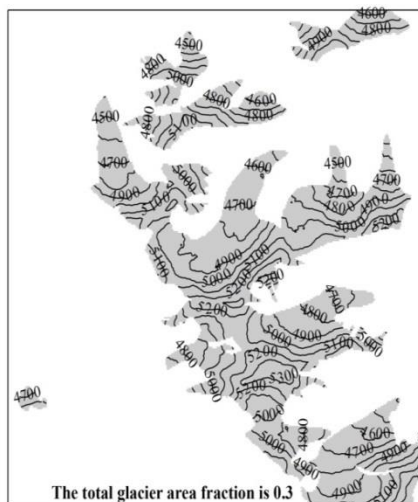


VIC中分高程带对冻土冻结/融化过程描述

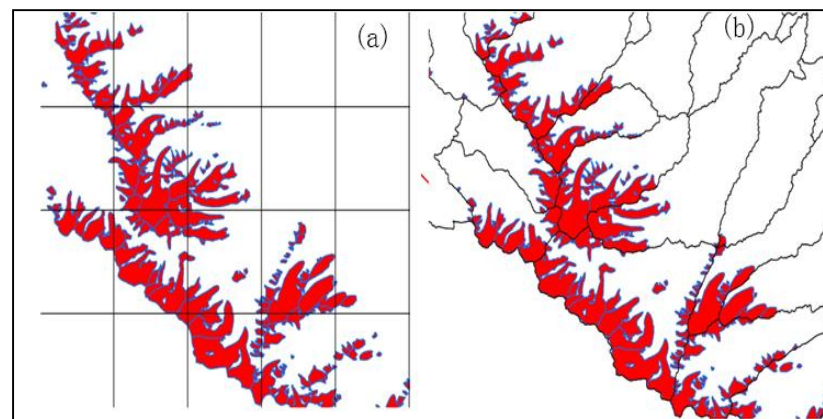
❑ VIC-CAS构建了单条冰川到流域冰川径流模拟模型，取得较好模拟结果



VIC-CAS构建了单条冰川到流域冰川径流模拟模型，取得较好模拟结果



冰川在模型中的参数化：
 网格-高程带方案
 单条冰川子流域-高程带方案



冰川消融：
 能量平衡方案
 度日因子方案

$$T_{band} = T_0 + T_{alt}(E_{band} - E_0)/100$$

$$LW_{band} = LW_0 * \left(\frac{T_{band} + 273.15}{T_0 + 273.15}\right)^4$$

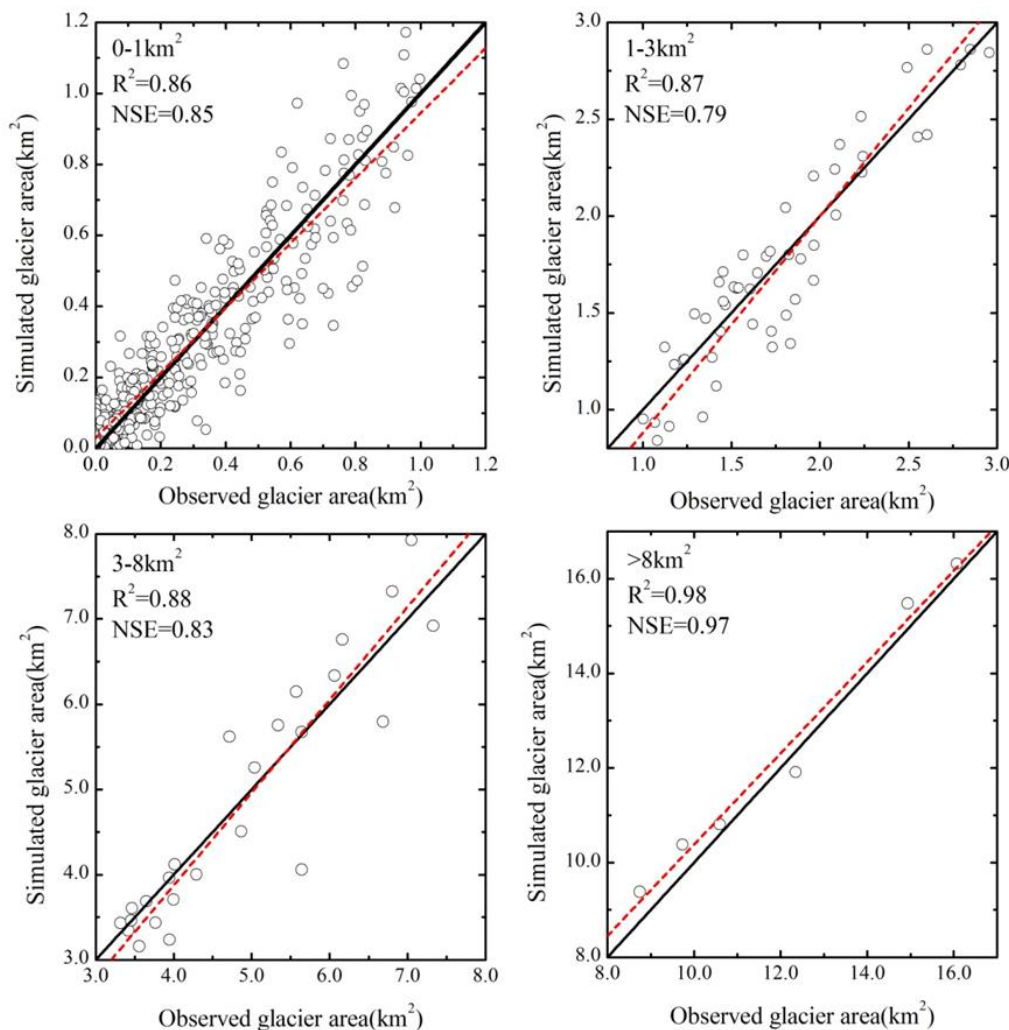
$$SW_{band} = SW_0 * \frac{G_{band}}{G_0}$$

$$P_{band} = P_0 \left[1 + \frac{P_{alt,m}(E_{band} - E_0)/100}{P_{0,m}} \right]$$

if $P_{band} < 0.0$ $P_{band} = 0.0$

考虑到单条冰川的融水模拟与VIC模型的耦合，模拟采用子流域的方式模拟了单条冰川的变化

□ VIC-CAS构建了单条冰川到流域冰川径流模拟模型，取得较好模拟结果

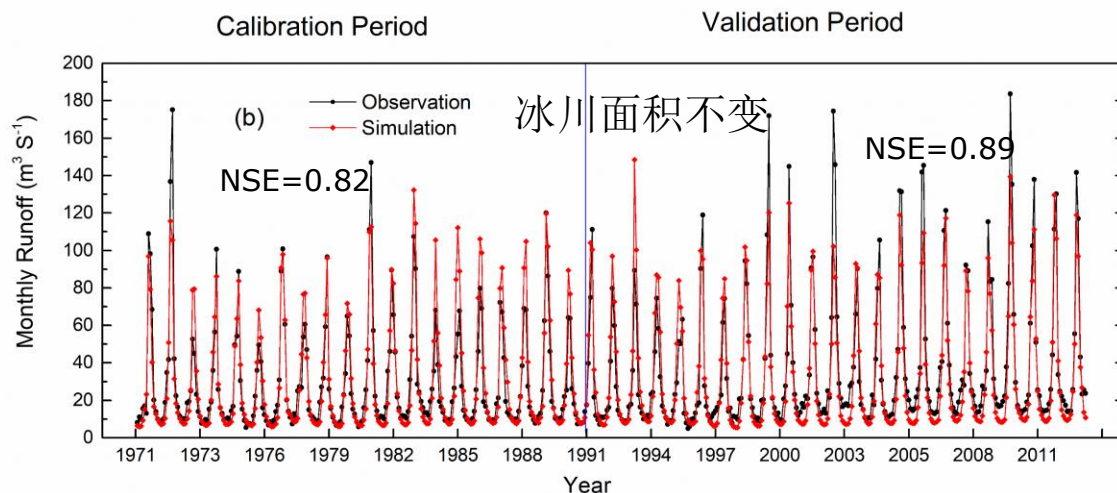
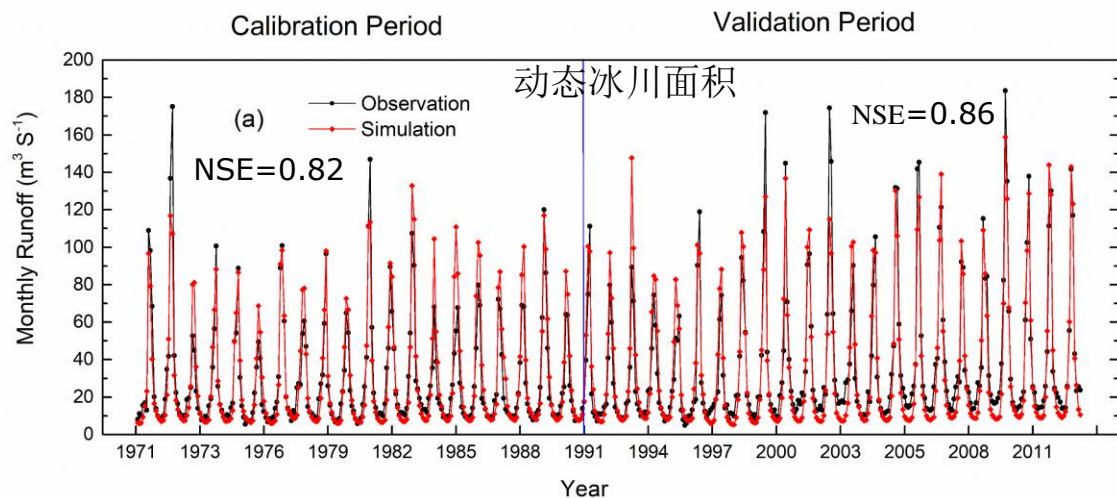


该模拟方案对不同级别的冰川具有较好的效果，对大冰川的效果更佳

疏勒河上游山区流域不同等级冰川面积观测与模拟对比

(Zhang et al, 2019)

□ VIC-CAS构建了单条冰川到流域冰川径流模拟模型，取得较好模拟结果

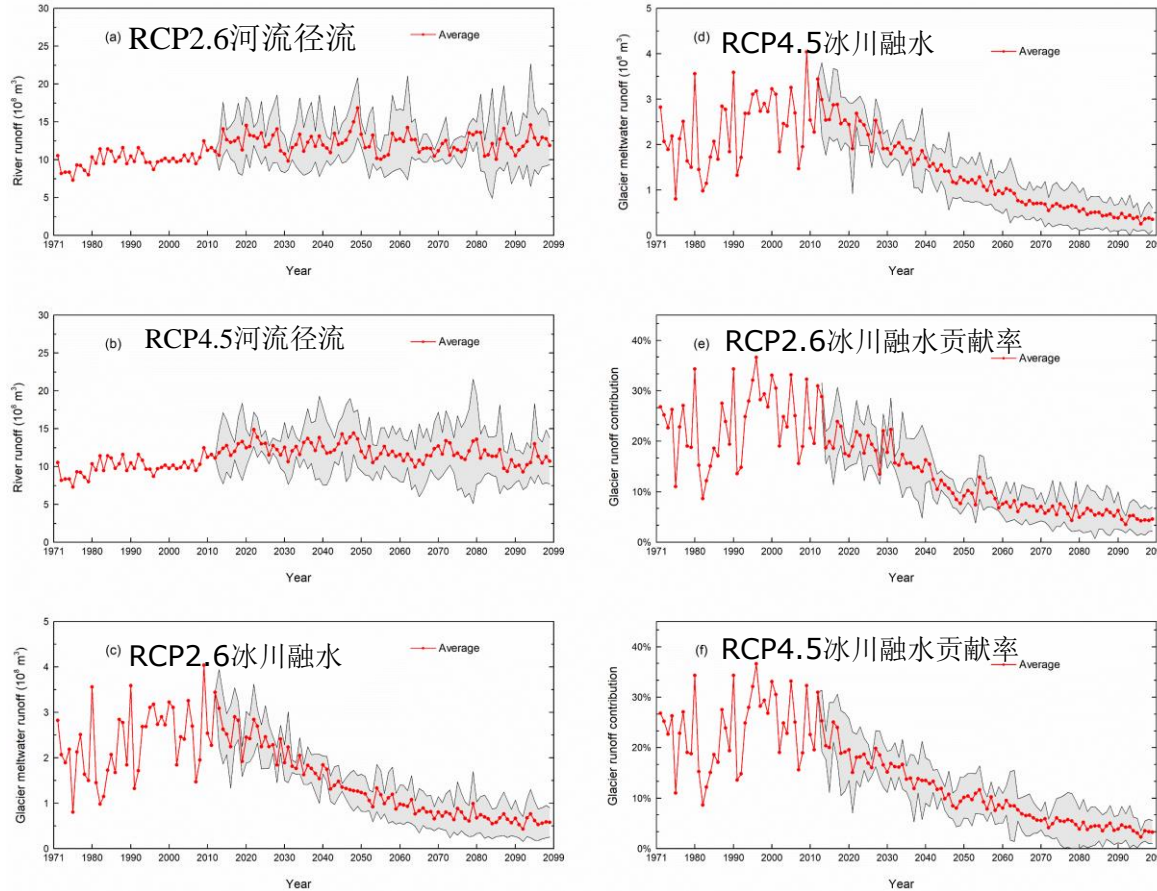


耦合了该方案的VIC-CAS模型对流域水文过程模拟取得了较好效果，可用于预估未来变化

疏勒河上游山区流域模拟与观测月径流对比

(Zhang et al, 2019)

预估未来冰川径流和径流变化



预估2050年RCP2.6和RCP4.5情景下多模式集合预报结果：
2050年河川径流相对2001-2010增加
 $2.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，
 $2.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，2100年增加
 $1.87 \times 10^8 \text{ m}^3$ ， $0.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，冰川融水的量和贡献率都将明显下降

疏勒河上游山区流域不同气候情景下BCC-CSM1.1(m), CANESM2, GFDL-CM3, IPSL-CM5A-MR GCM输入驱动预估的冰川径流和河流径流

(Zhang et al, 2019)

重点研发项目课题和本项目支持下VIC-CAS模型的进一步改进

模型产流机制：增加了超渗产流机制

模型物理过程：改进了雨雪分离；冰川消融；风吹雪；

模型汇流算法：支持小时汇流；增加了简单水库

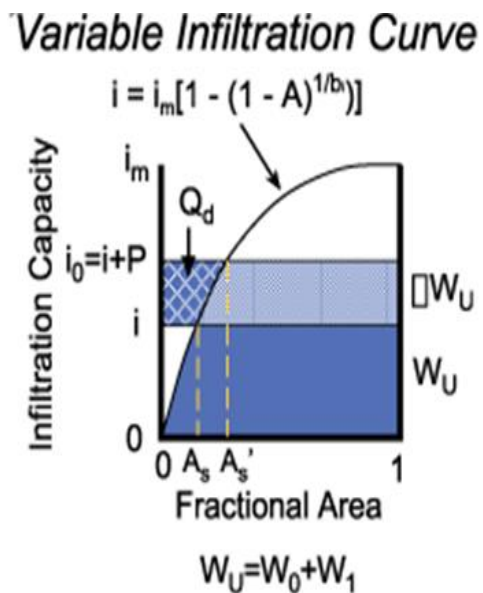
模型与遥感数据耦合：实现与遥感积雪分布和雪深同化

模型并行计算：支持并行计算

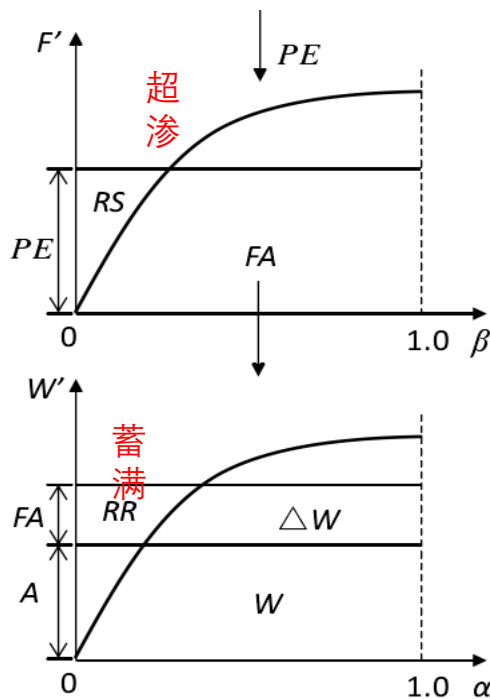
VIC-CAS模型改进

增加了超渗的混合产流机制

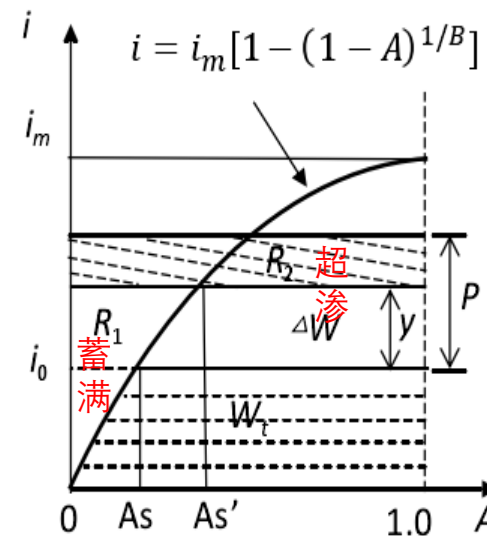
- 融合了包为民（1997）和Liang（2002）的混合产流方案



VIC 原蓄满产流方案



包为民（1997）垂向混合产流方案

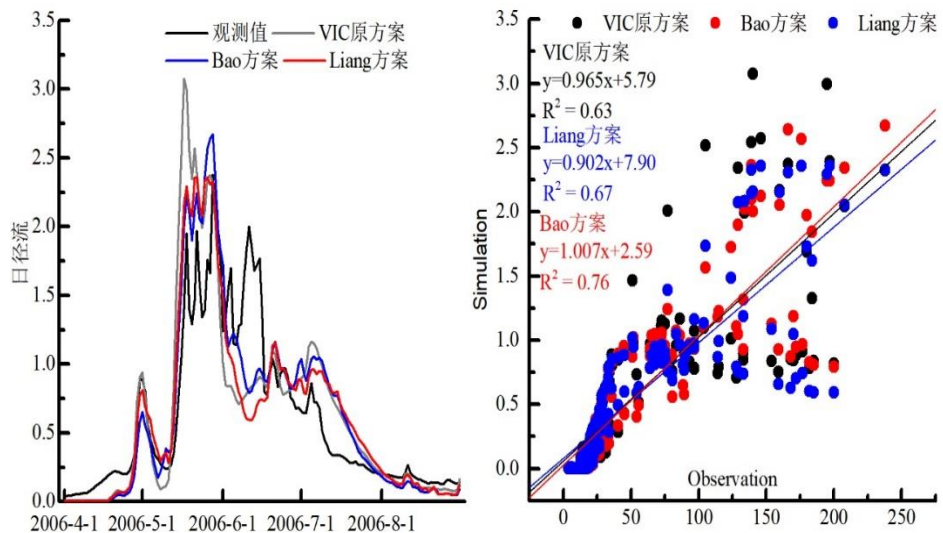


Liang（2002）垂向混合产流方案

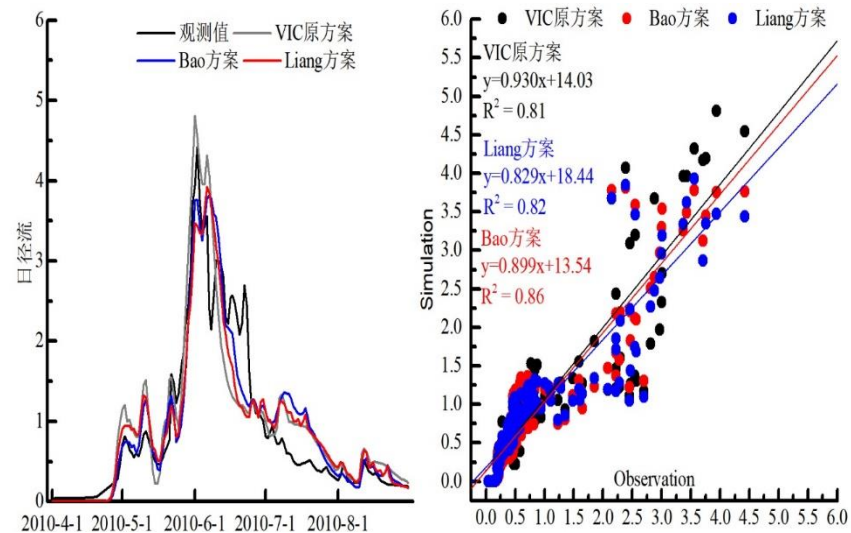
VIC-CAS模型改进

增加了超渗的混合产流机制

- 采用考虑超渗的混合产流方案，能有效地提高径流模拟的能力，洪峰的峰现事件和流量的模拟效果均有所提高，其中Bao方案最优



2006年额尔齐斯河径流模拟对比



2010年额尔齐斯河径流模拟对比

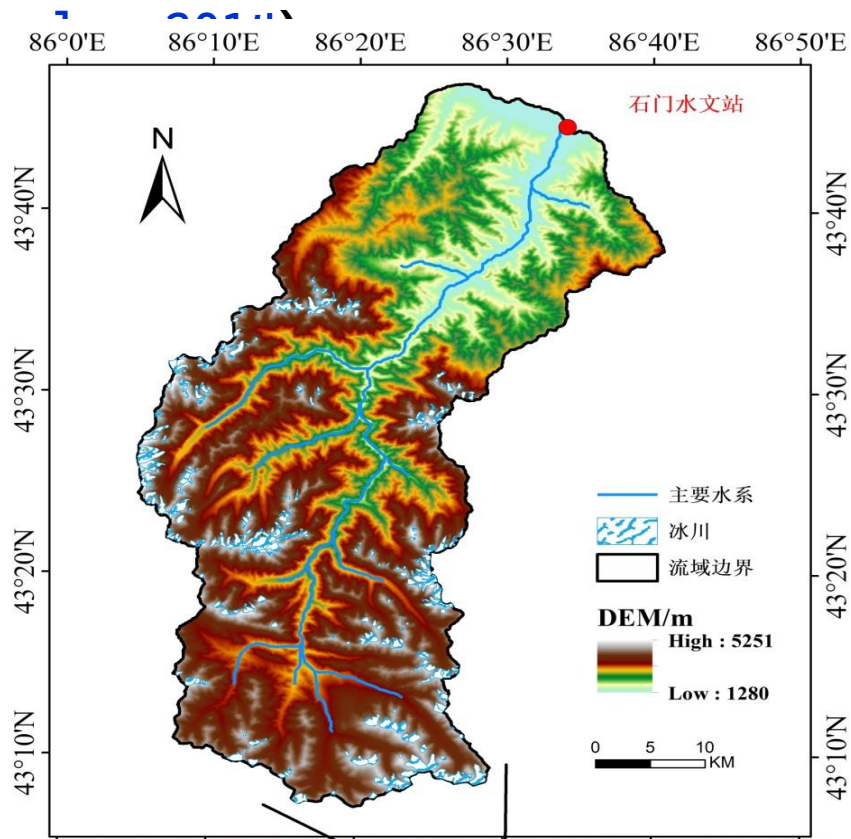
VIC-CAS模型改进

雨雪分离方案

VIC模型原方案： 双临界温度，采用逐小时步长的气温来辨别雨雪 （不合理）

日均温双临界温度： 修改模型，采用日平均气温来进行雨雪分离

湿球温度法： 修改模型，采用日均湿球温度进行雨雪分离 （Ding et



方案改进工作主要在呼图壁河进行

流域面积：1840km²

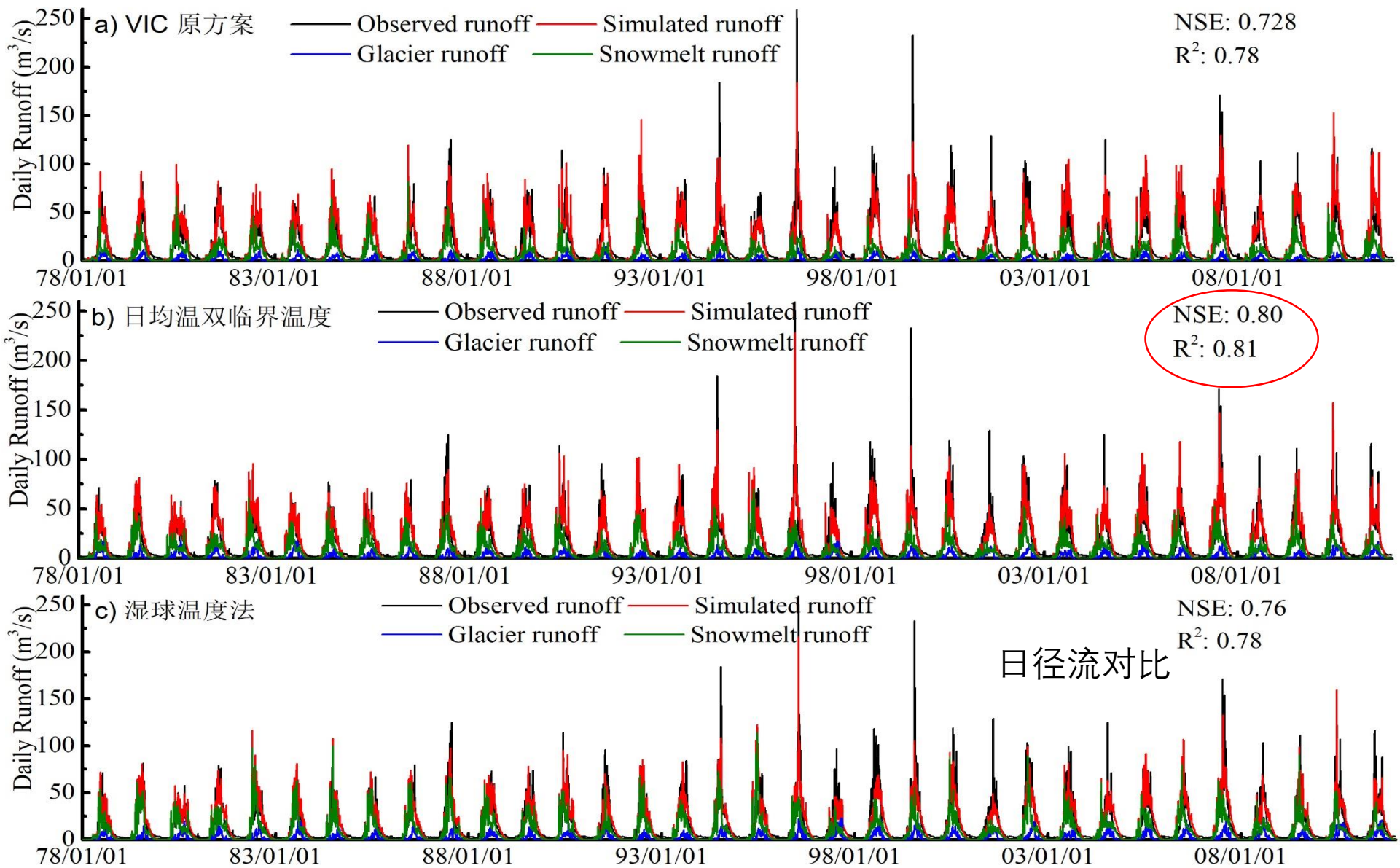
冰川条数：239条；

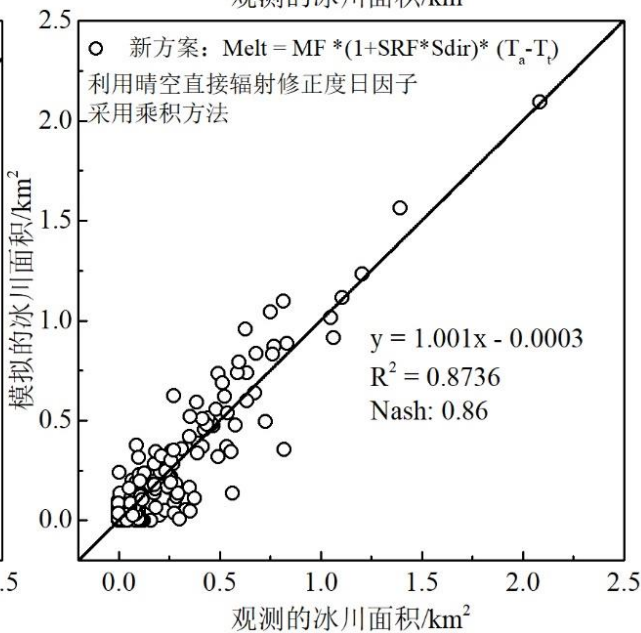
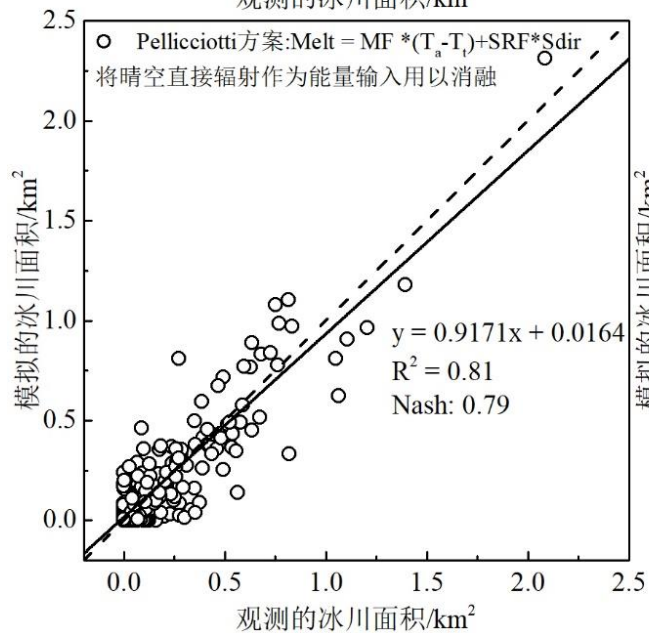
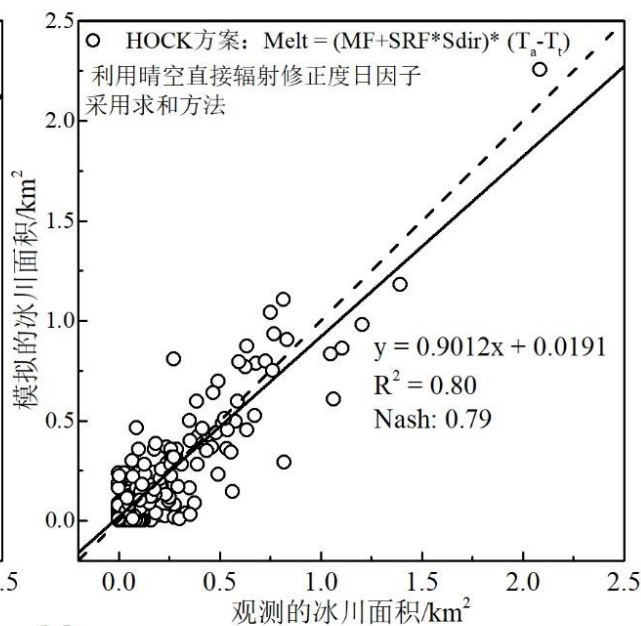
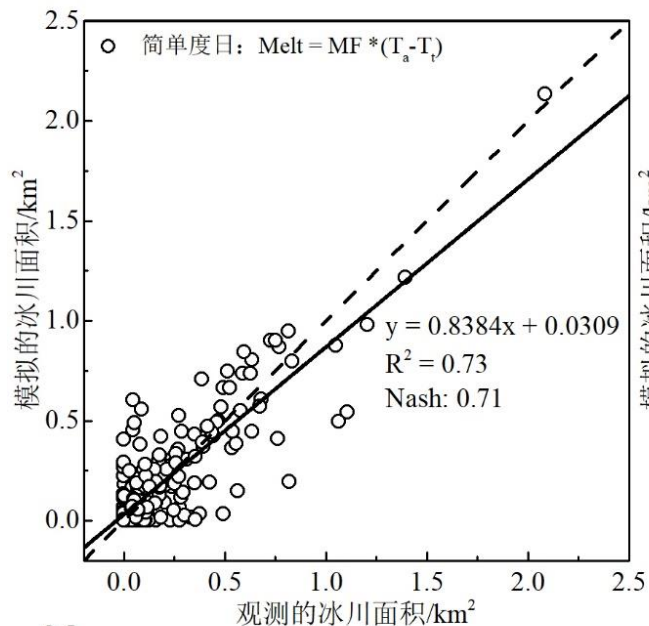
冰川面积：72.07km²；

冰川覆盖率：3.9%；

VIC-CAS模型改进

模型发展：雨雪分离方案

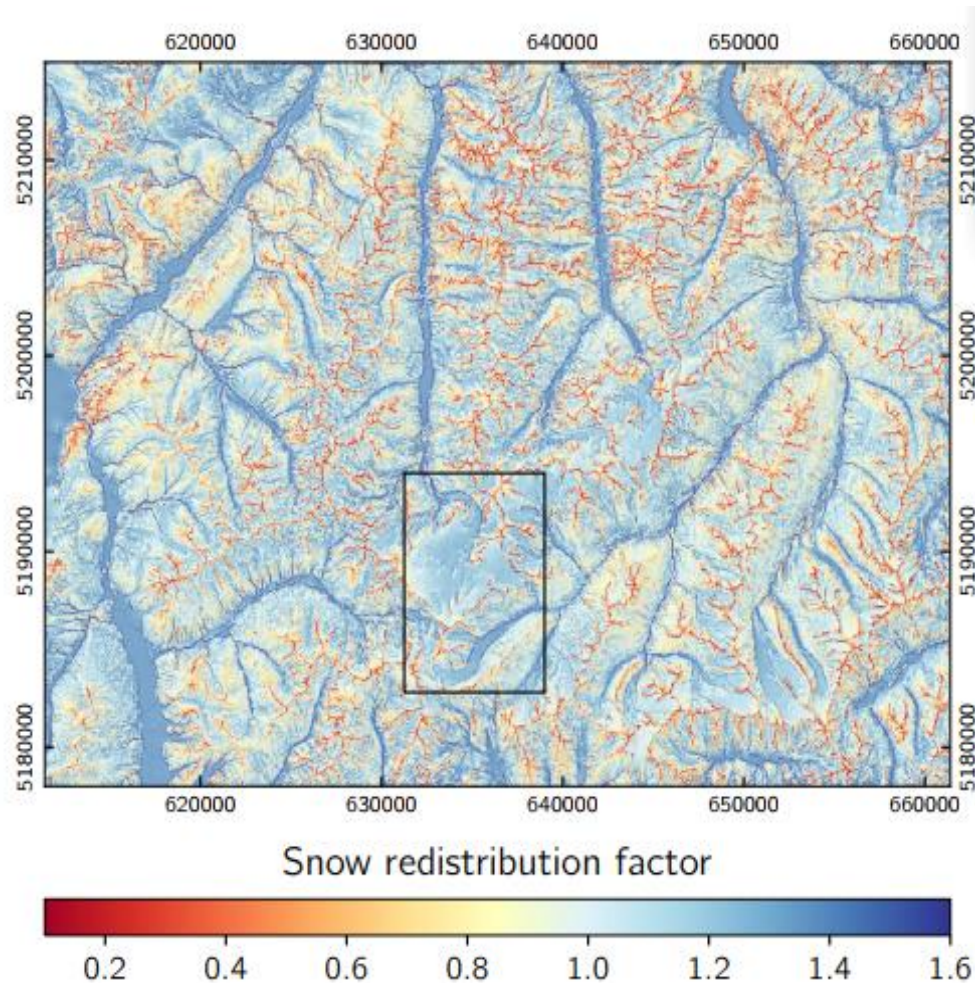




引入冰川区的晴空直接辐射（考虑坡度、坡向山地因子）的增强型度日因子方法，提出了引入直接辐射的度日因子新方法，模拟的呼图壁河流域逐条冰川面积的Nash效率达到0.86

提出考虑冰川晴空直接辐射的新的度日冰川消融方案，明显提高模拟的效果

- 通过调整降雪的分布，来考虑降雪在不同高程带的差异



参数化1-地形开阔度法

利用高分辨的DEM分别计算长度因子L为50m 和5km情况下的负的开阔度 (openness: $\tilde{\Psi}_{50}$, $\tilde{\Psi}_{5000}$) , 然后采用下面的公式计算雪分布校正因子 (SRF) :

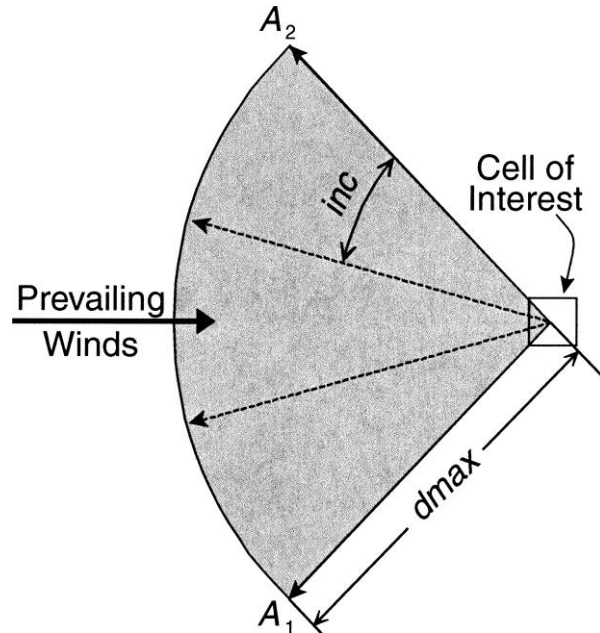
$$\tilde{\Psi}_{50} = 3 \times (\Psi_{50} - 1.2)$$

$$\tilde{\Psi}_{5000} = 3 \times (\Psi_{5000} - 1.0)$$

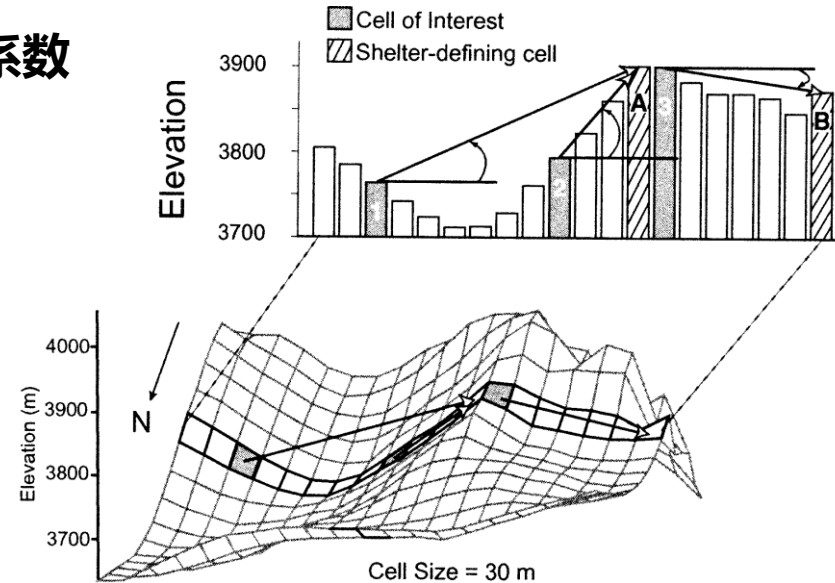
$$SRF = 0.5 \times \left(\frac{1.6}{1.0} \tilde{\Psi}_{50} + \frac{1.6}{1.0} \tilde{\Psi}_{5000} \right)$$

(Hanzer et al.,TC, 2016)

- 通过调整降雪的分布，来考虑降雪在不同高程带的差异



参数化2-风遮蔽系数



利用高分辨的DEM结合盛行风向计算出风遮蔽系数 (S_x) 和堆雪区 (D_0) , 然后利用统计关系, 线性合成积雪再分布因子:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon,$$

where

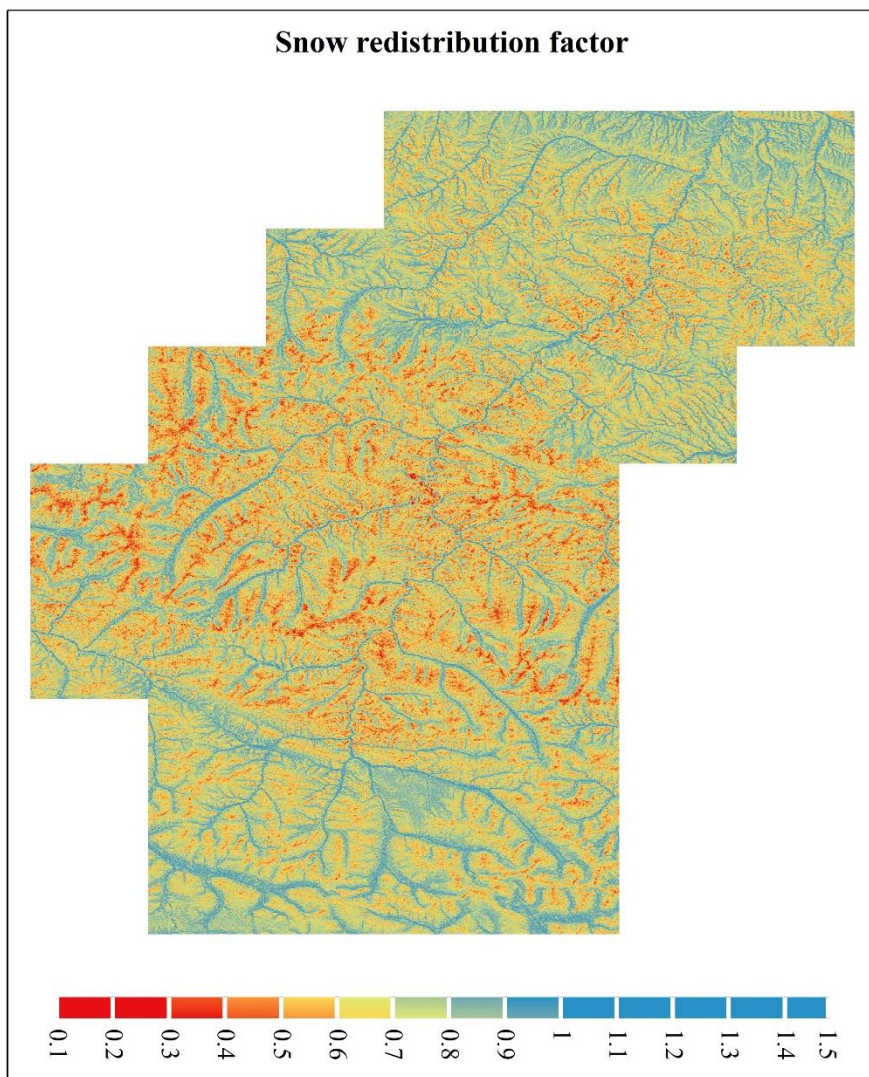
$$Y = \sqrt{\text{depth}}, \quad x_1 = \overline{Sx}_{100}, \quad \text{and}$$

$$x_2 = D_0 = \begin{cases} 0 & \text{for } \overline{Sb}_{300} \leq 7^\circ \quad \text{or} \quad \overline{Sx}_o \geq 5^\circ \\ 1 & \text{for } \overline{Sb}_{300} > 7^\circ \quad \text{and} \quad \overline{Sx}_o < 5^\circ \end{cases}$$

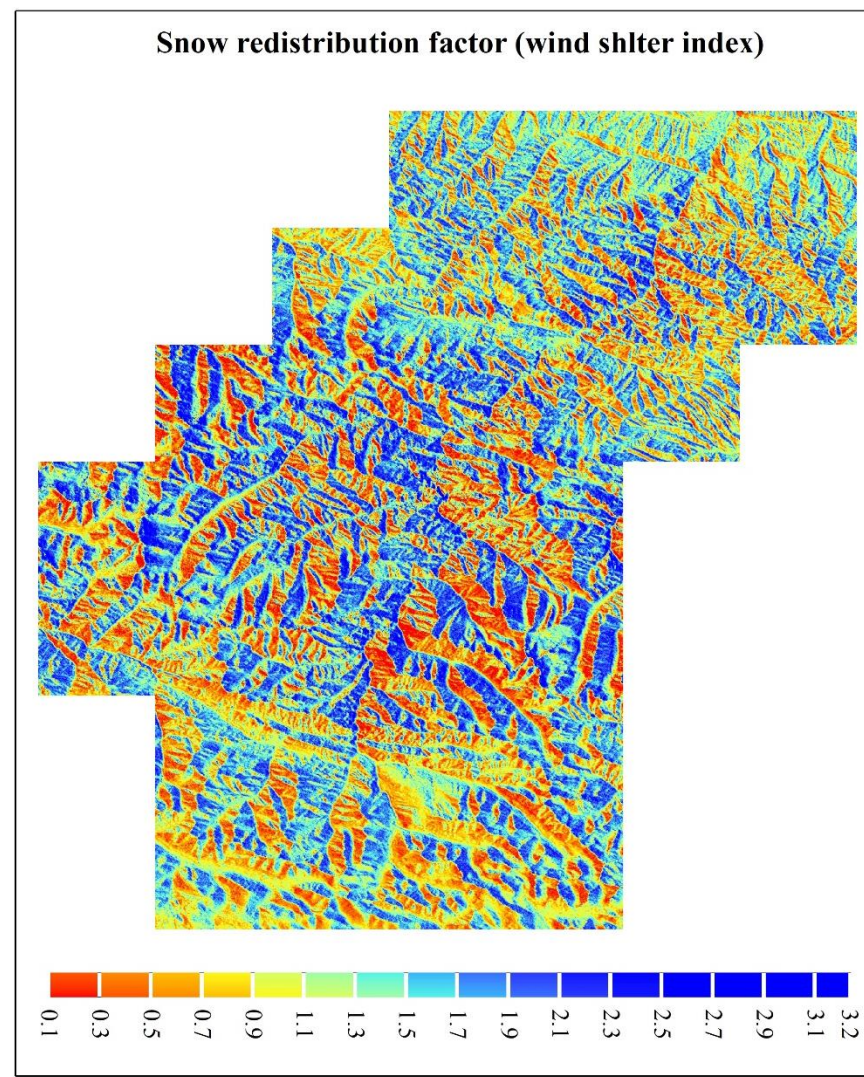
(Winstal et al., JHM, 2002)

风吹雪算法 两种方案的风吹雪调整系数对比

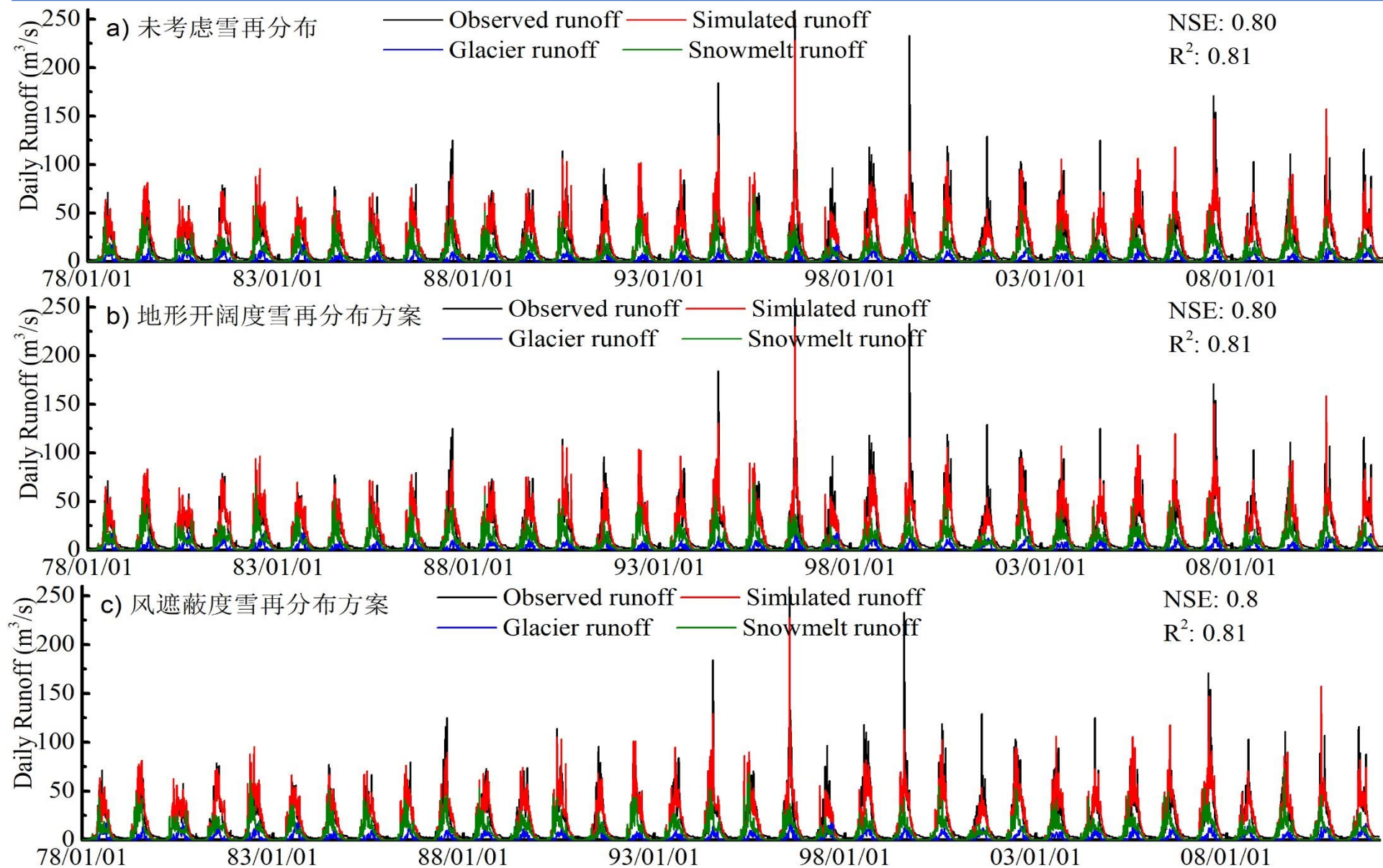
地形开阔度法



风遮蔽系数法

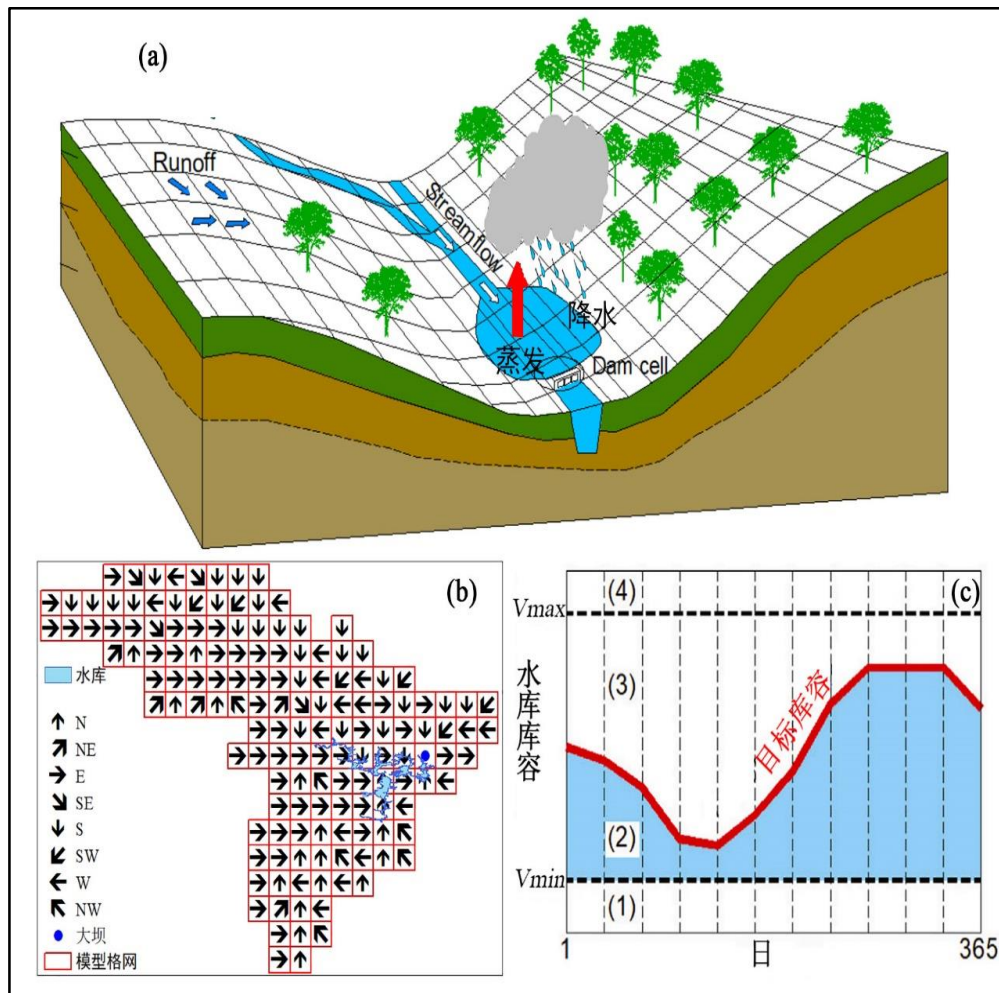


风吹雪算法 两种方案的日径流对比



VIC-CAS模型改进

水库模块



1) 水库的水体蒸散发 E_t 采用Hamon公式计算获得:

$$E_t = 0.55 \left(\frac{D}{12} \right)^2 \left(\frac{SVD}{100} \right)$$

2) 计算水库的水量:

$$V_0 = V_t + 86.4 \times Q_t + (Area \times P_t) / 10^6 - (Area \times E_t) / 10^6$$

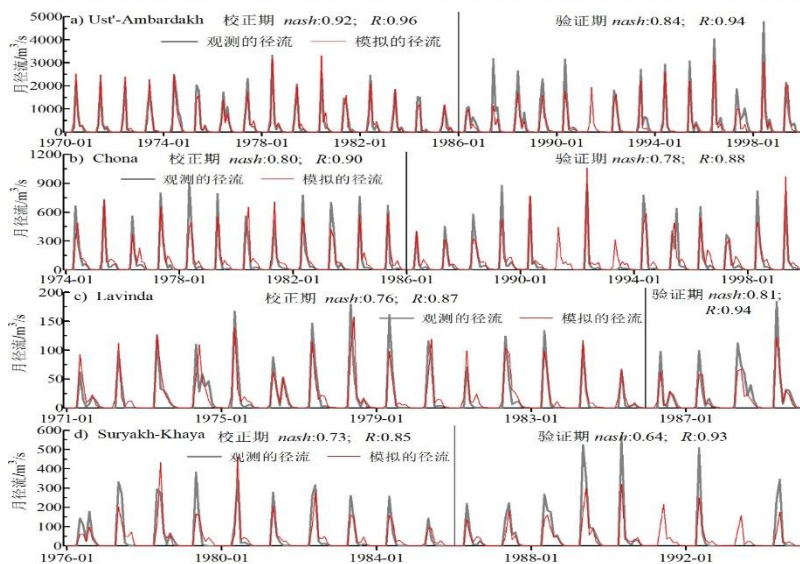
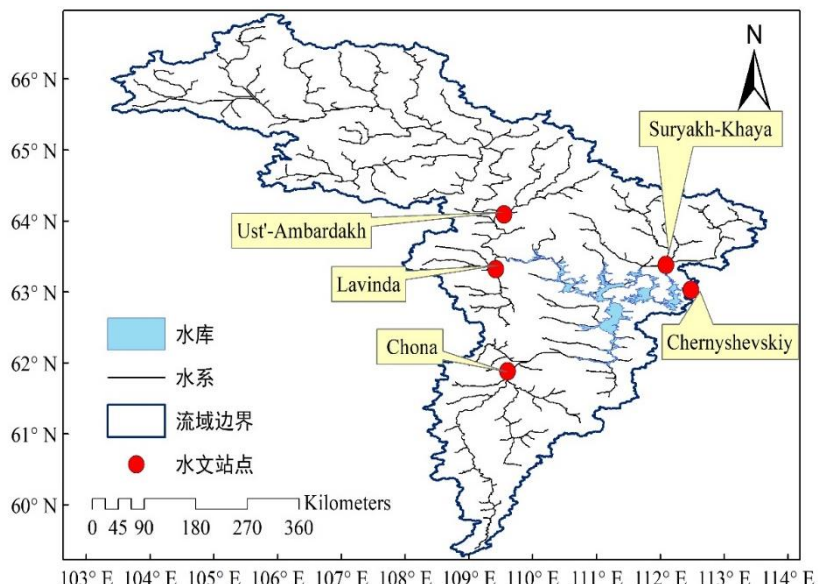
3) 根据水库调度规则曲线, 计算出库水量:

$$R_t = \begin{cases} 0 & V_0 \leq V_{min} \\ (V_0 - V_{min}) / 86.4 & V_{min} < V_0 < V_{rule,m} \& (V_0 - 86.4R_{min}) \leq V_{min} \\ R_{min,m} & V_{min} < V_0 < V_{rule,m} \& (V_0 - 86.4R_{min}) > V_{min} \\ R_{min,m} + (V_0 - V_{rule,m}) / 86.4 & V_{rule,m} \leq V_0 \& [R_{min} + (V_0 - V_{rule,m}) / 86.4] \leq R_{max,m} \\ R_{max,m} & V_{rule,m} \leq V_0 \& [R_{min} + (V_0 - V_{rule,m}) / 86.4] > R_{max,m} \end{cases}$$

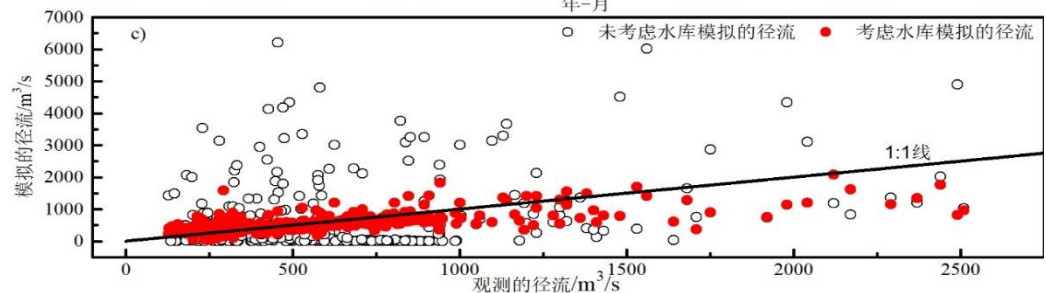
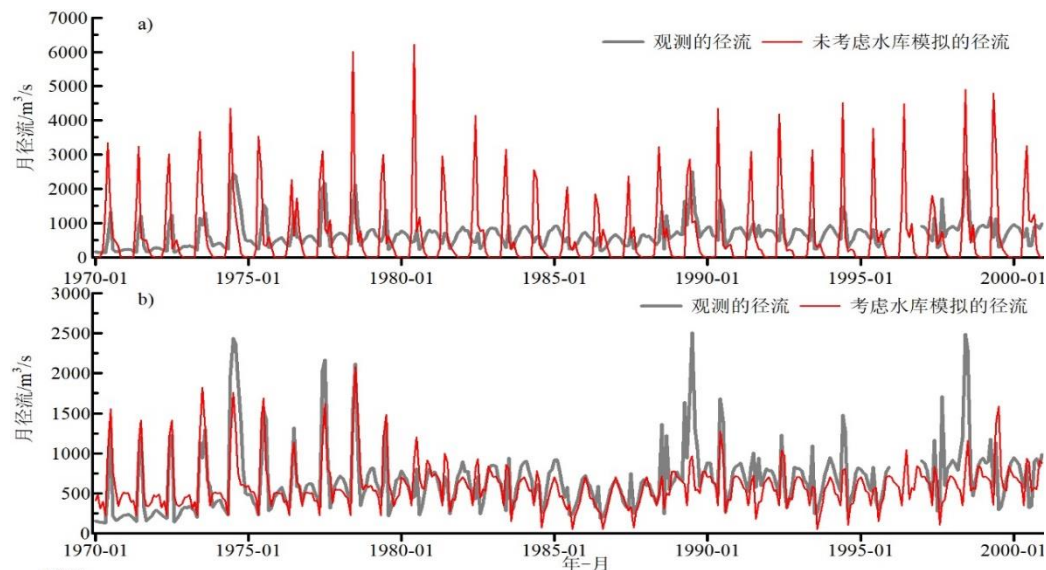
4) 基于观测的径流优化水库调度参数

VIC-CAS模型改进

风吹雪的积雪再分布



入库水量模拟



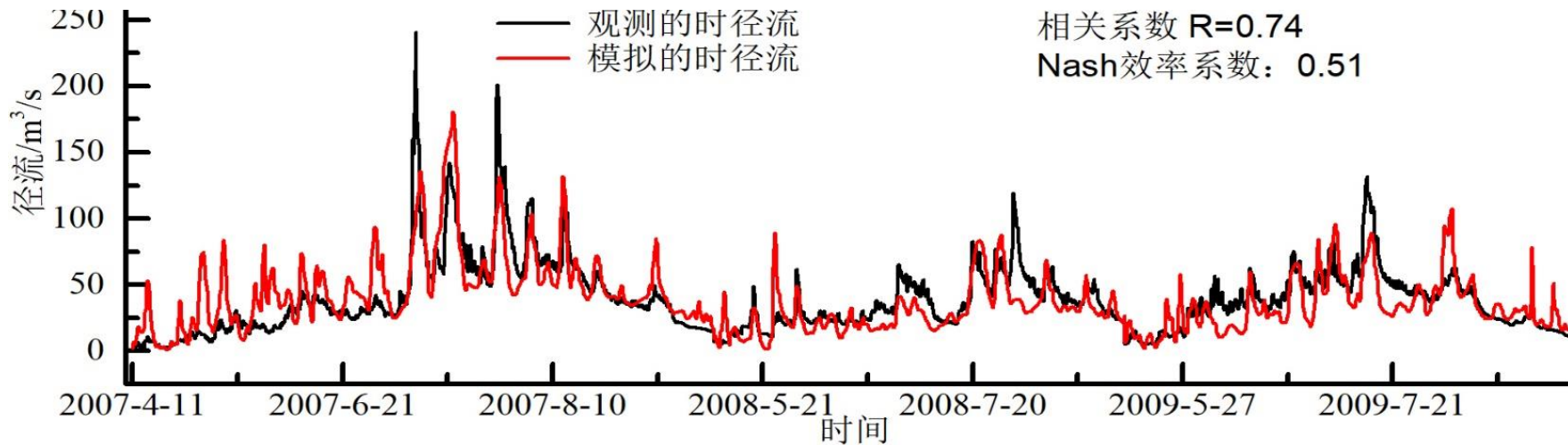
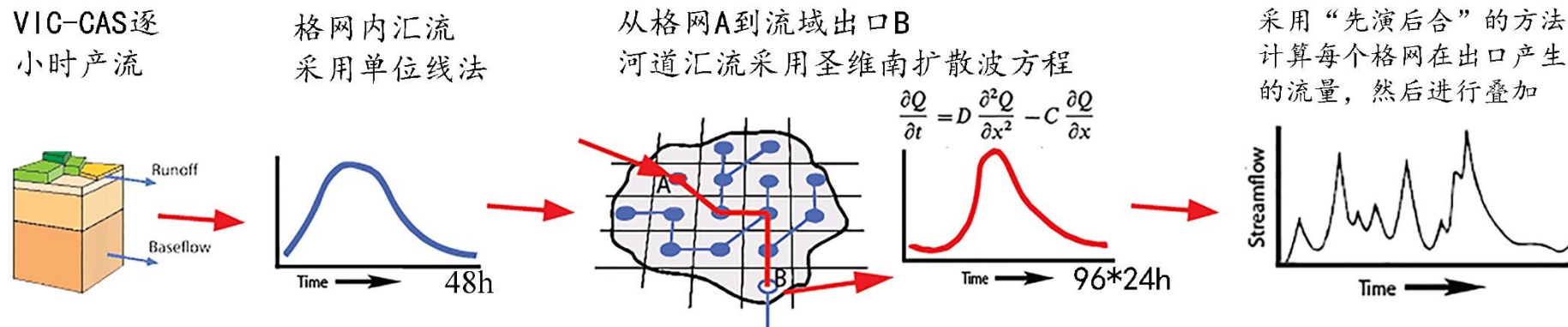
出库水量模拟

不考虑水库的效应，模型无法有效模拟出库的径流过程；
采用开发的水库模块后，模型基本可以模拟径流的季节
过程，径流模拟效果有了极大的提高

VIC-CAS模型改进

小时汇流方案

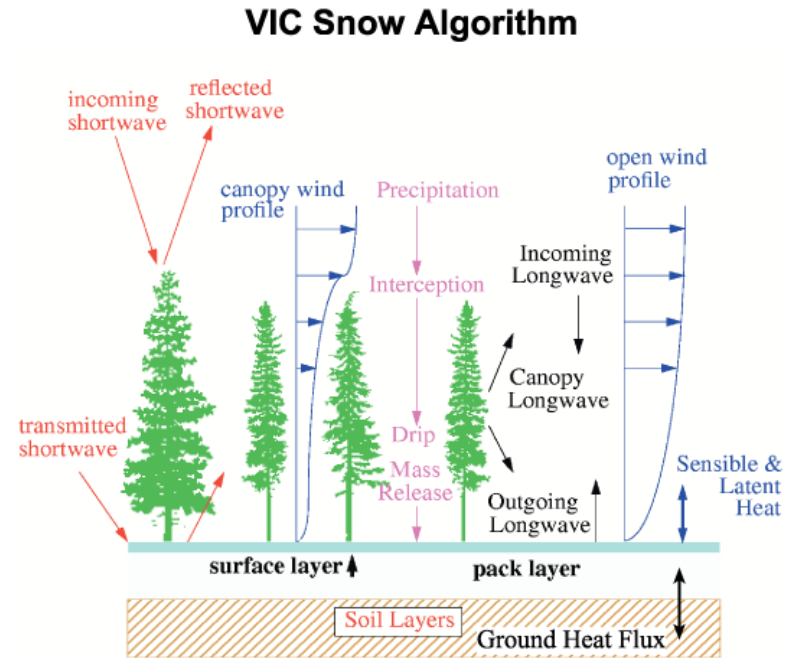
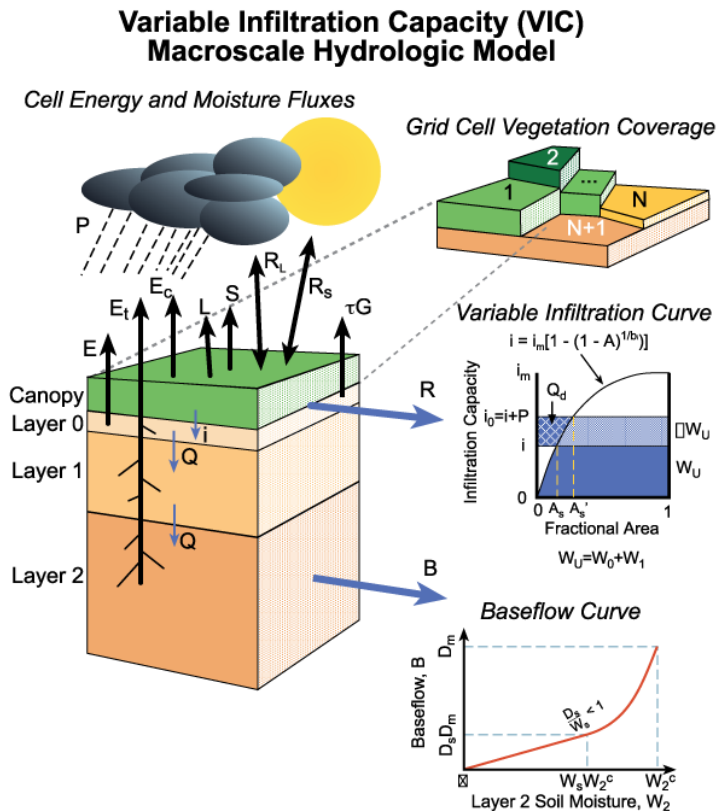
- 在Lohmann和RVIC的算法基础上，提出了一个改进的Lohmann小时汇流方案



VIC模型原Lohmann汇流方法主要针对日尺度，不能满足洪水模拟和需求；
VIC汇流方案忽略流域边界栅格的面积比例，对中小流域存在径流高估现象

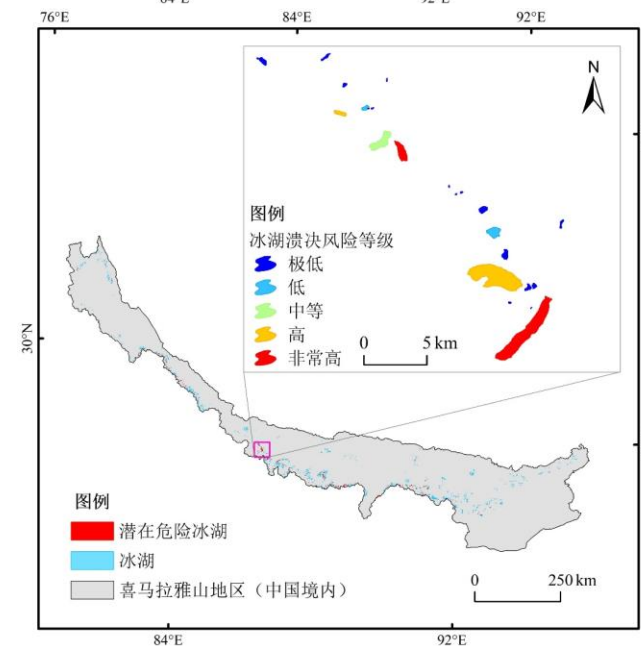
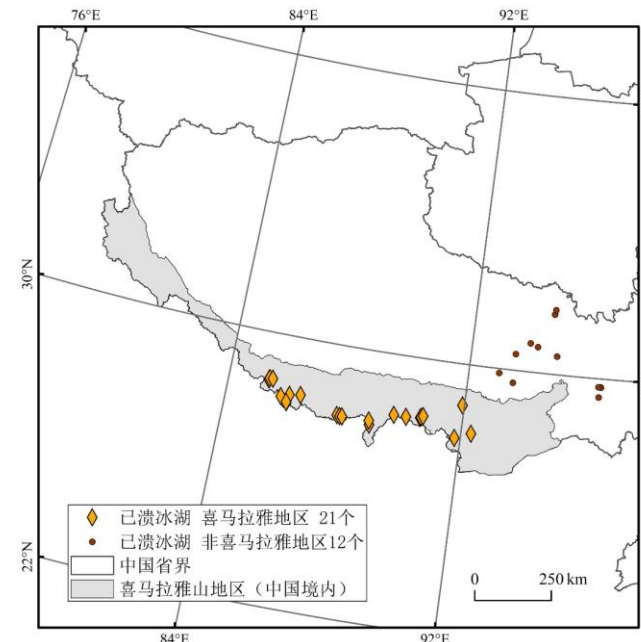
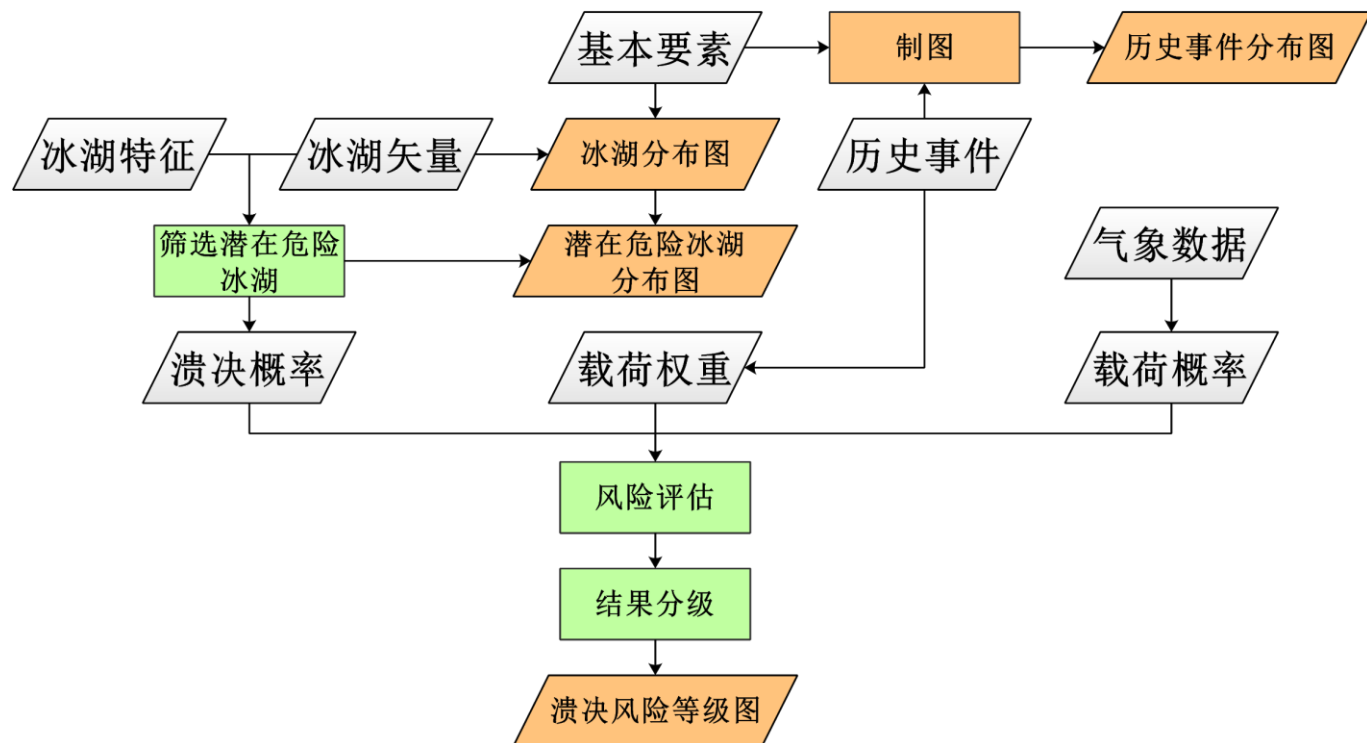
VIC-CAS模型改进

- 将VIC-CAS升级到5.0版本，代码分别修改为支持MPI和OPENMP并行算法版本，利用nc格式驱动，在项目前期山西服务器集群上并行计算，MPI版本试验了20节点*64核=1280线程



冰湖溃决风险模拟分析模块

算法流程图



冰湖溃决风险模拟分析模块

- 冰湖类型
冰碛湖
- 冰湖面积
大于10⁵ m²
- 冰湖面积变化率
明显扩张(扩大20%以上)
- 冰湖与母冰川距离
小于500 m

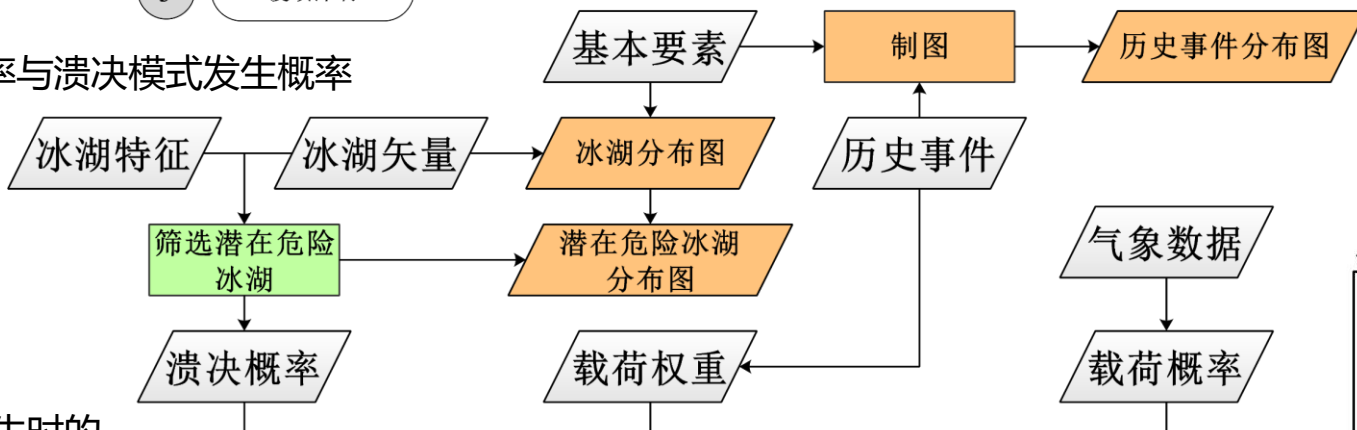
专家经验
层次分析法(AHP)

- 1 冰崩
- 2 冰滑坡
- 3 管涌
- 4 岩/雪崩
- 5 漫顶冲刷

3 载荷概率与气象数据

“暖湿” “暖湿” 频次 / 总年份
 “暖干” “暖干” 频次 / 总年份
 “冷湿” “冷湿” 频次 / 总年份
 “正常” “正常” 频次 / 总年份

1 潜在危险冰湖、冰湖溃决概率与溃决模式发生概率



2 载荷权重—基于历史事件发生时的

气象条件 (存在的已溃条件: 暖湿、暖干、冷湿、正常)

“湿” 年降水量 ≥ (多年平均 + 多年平均*10%)
 “干” 年降水量 ≤ (多年平均 - 多年平均*10%)
 “暖” 夏季(6月-9月)日均温 ≥ (多年日均温+0.1℃) 超过61天
 “冷” 夏季(6月-9月)日均温 ≤ (多年日均温-0.1℃) 超过61天
 “正常” 年降水量介于“湿”“干”之间, “暖”且“冷”介于50-61天之间

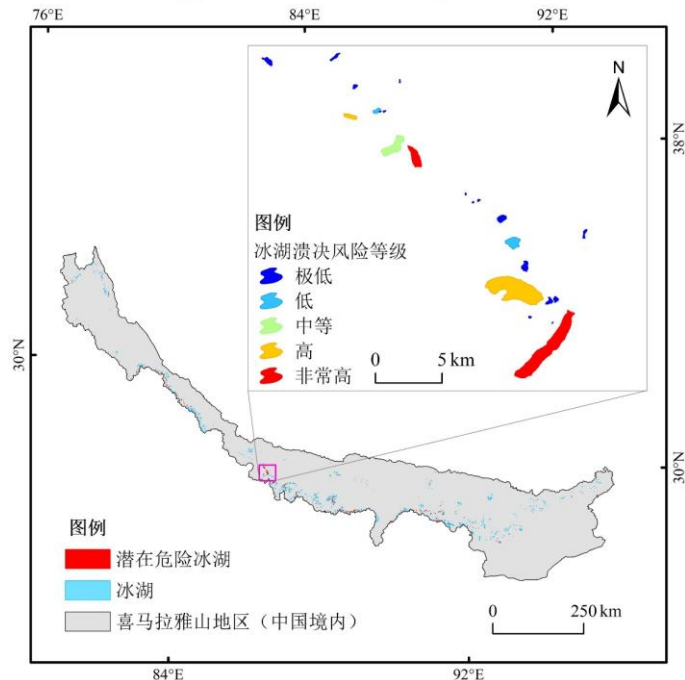
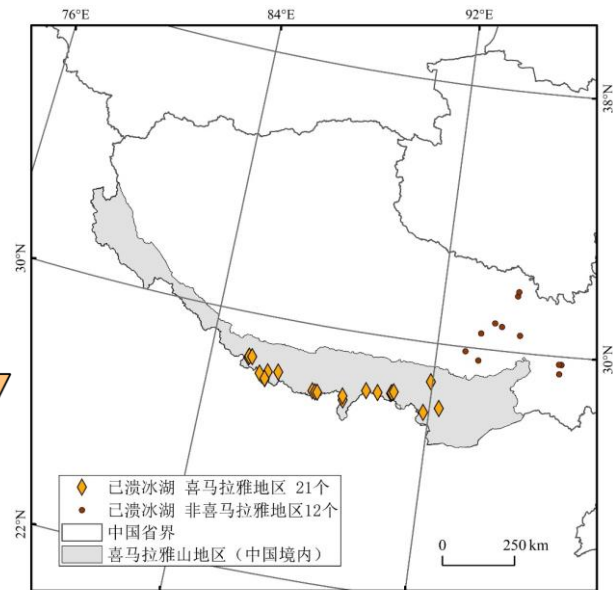
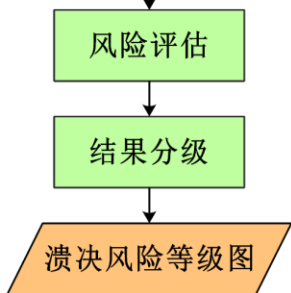
4 溃决风险评估与分级

$$P = \sum (P_i * \sum (W_j * P_j)) + E$$

P_i 表示溃决模式*i*发生的概率
 W_j *i*模式载荷成员*j*的载荷权重
 P_j *i*模式载荷成员*j*的载荷概率
 E 地震概率

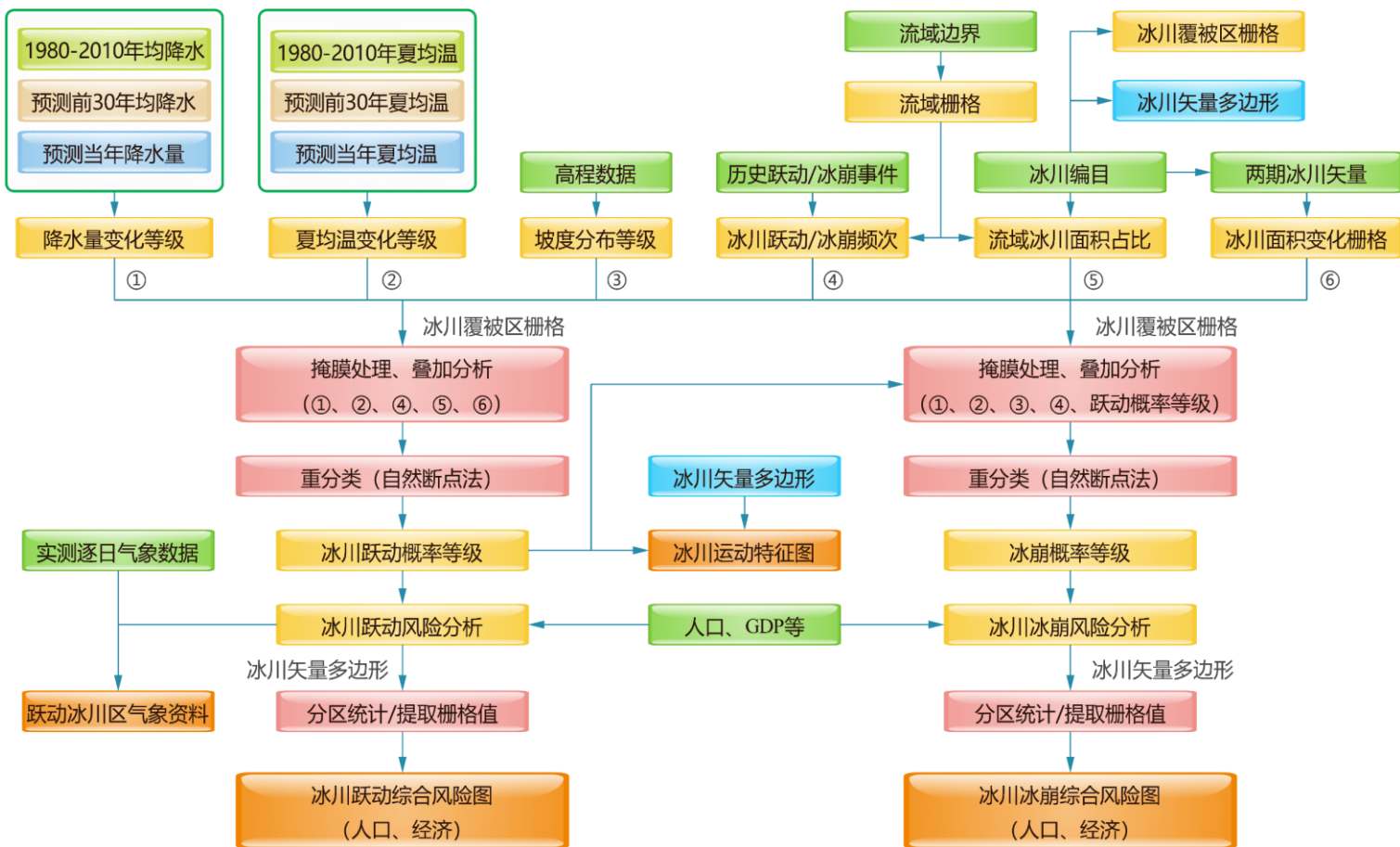
结果采用自然断点法分五级

算法流程图

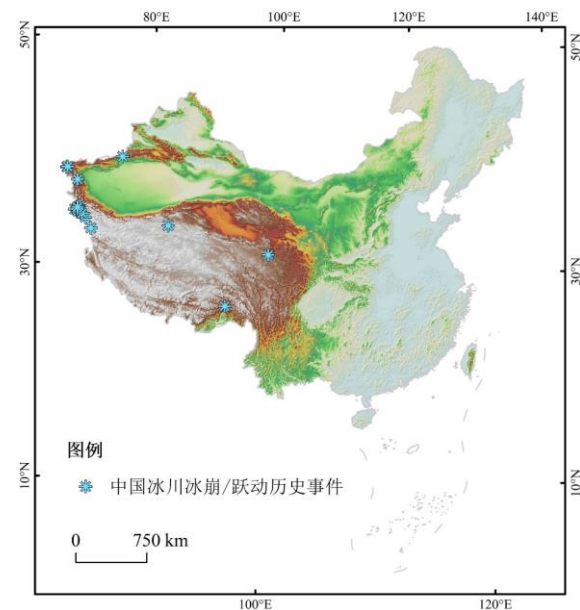


冰崩/冰川跃动风险模拟分析模块

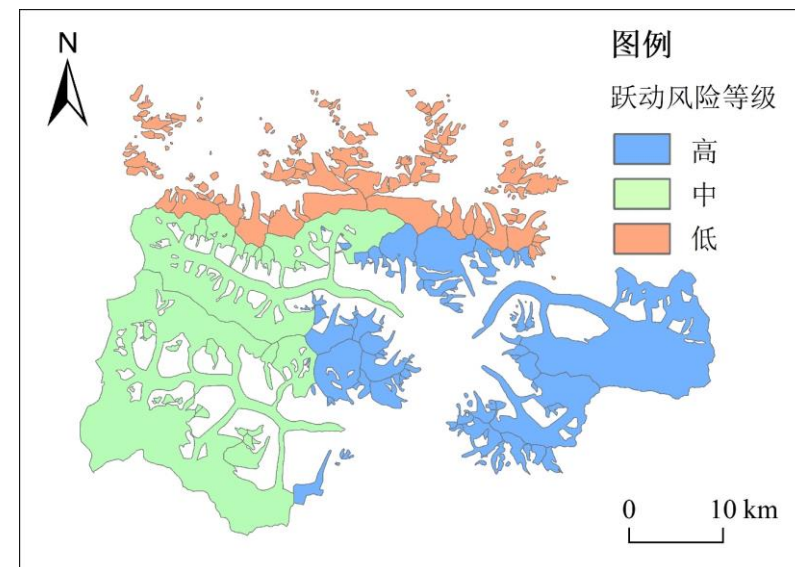
算法流程图



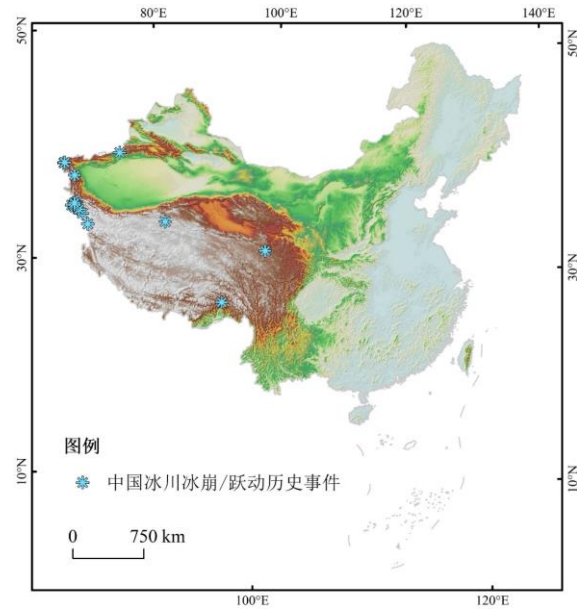
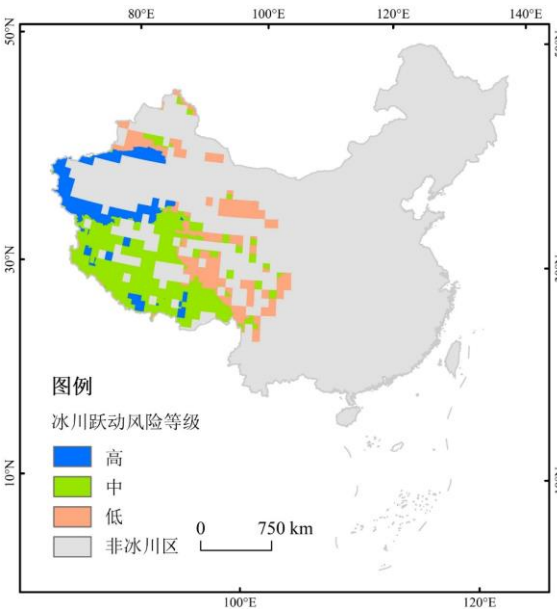
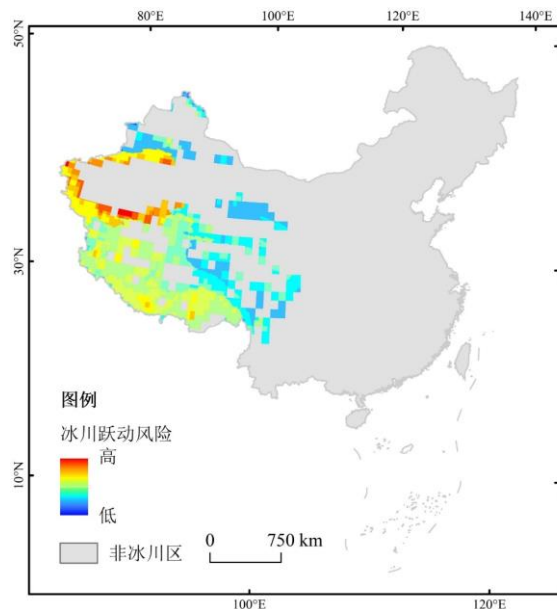
区域冰川跃动风险等级评价结果示例 (土各别里齐冰川周边地区)



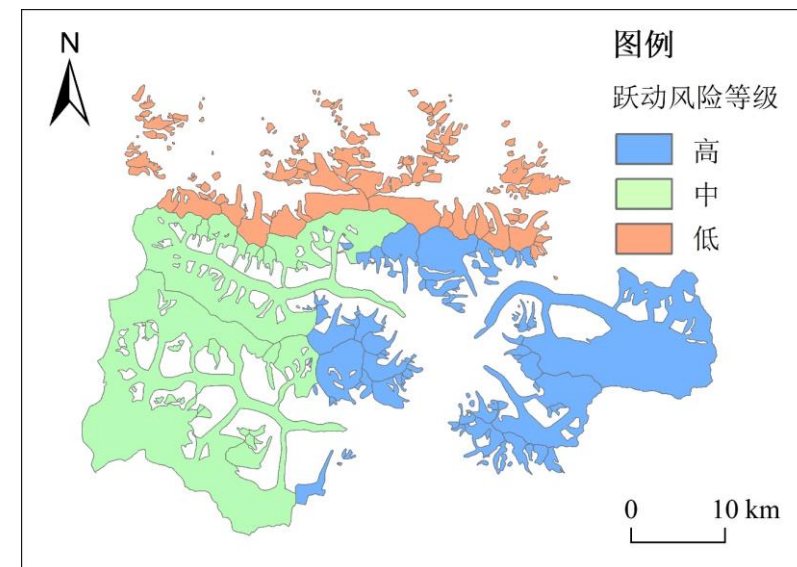
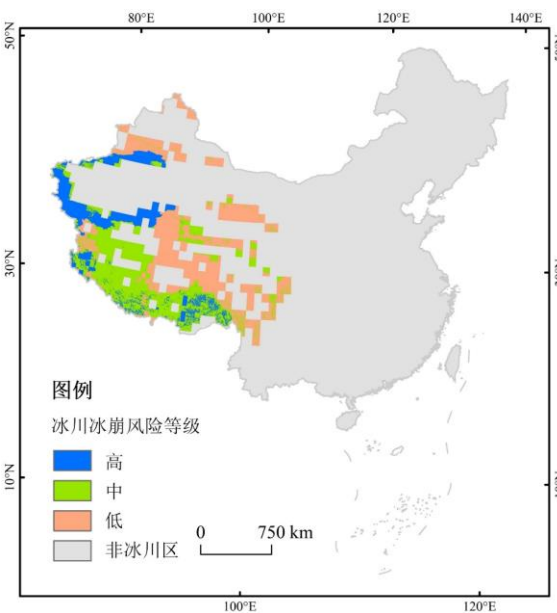
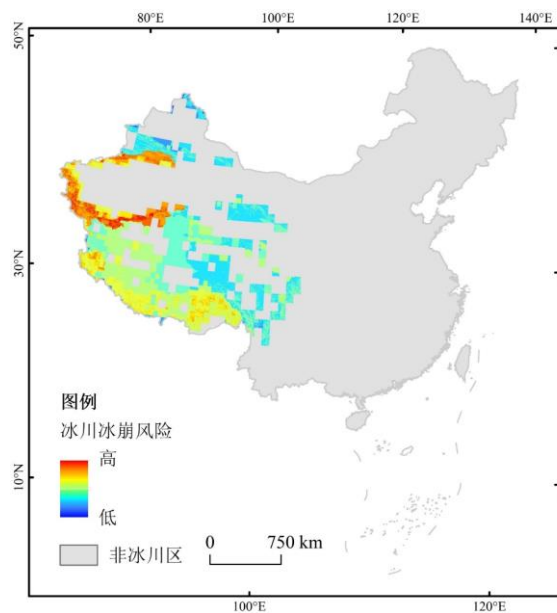
据RGI v6.0数据统计：
中国境内共有20个有记录的冰川跃动事件。



冰崩/冰川跃动风险模拟分析模块

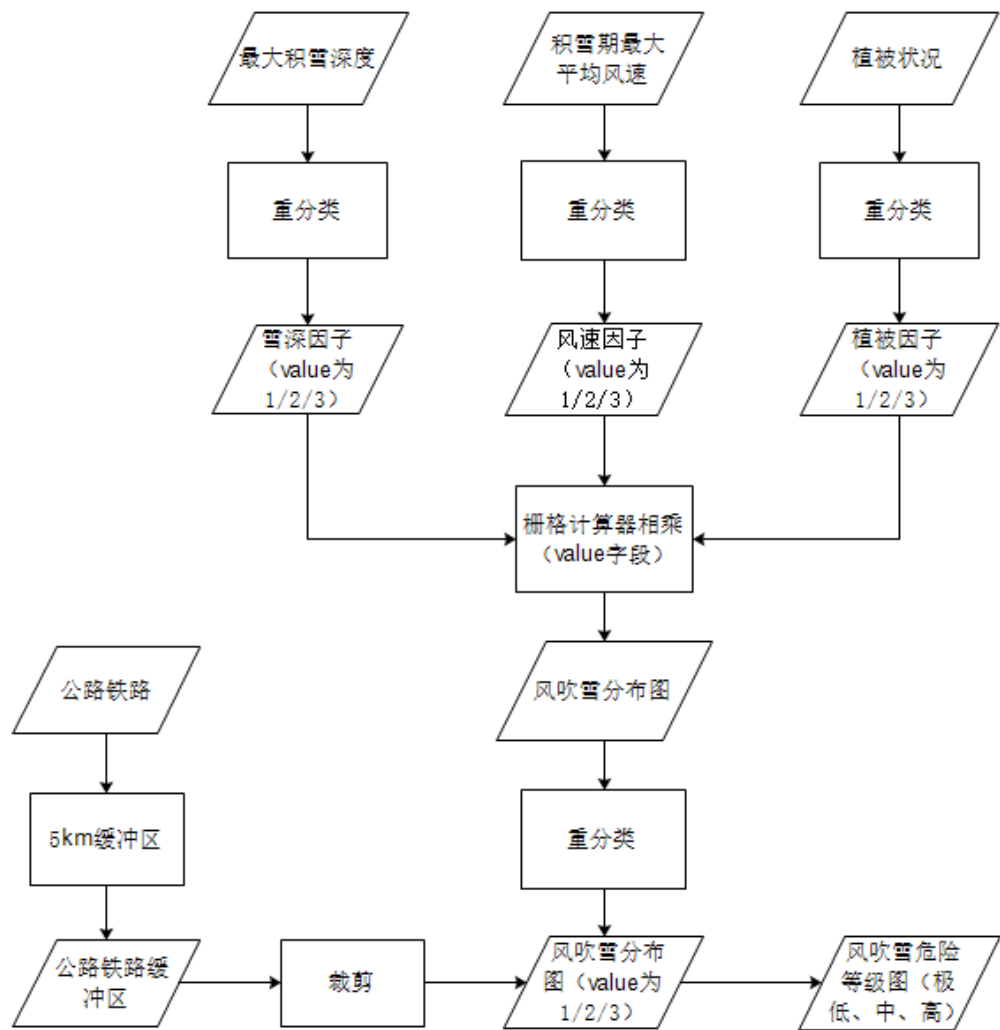


据RGI v6.0数据统计：
中国境内共有20个有记录的冰川跃动事件。





风吹雪评估模型



2010年2月28日风吹雪危险等级分布图

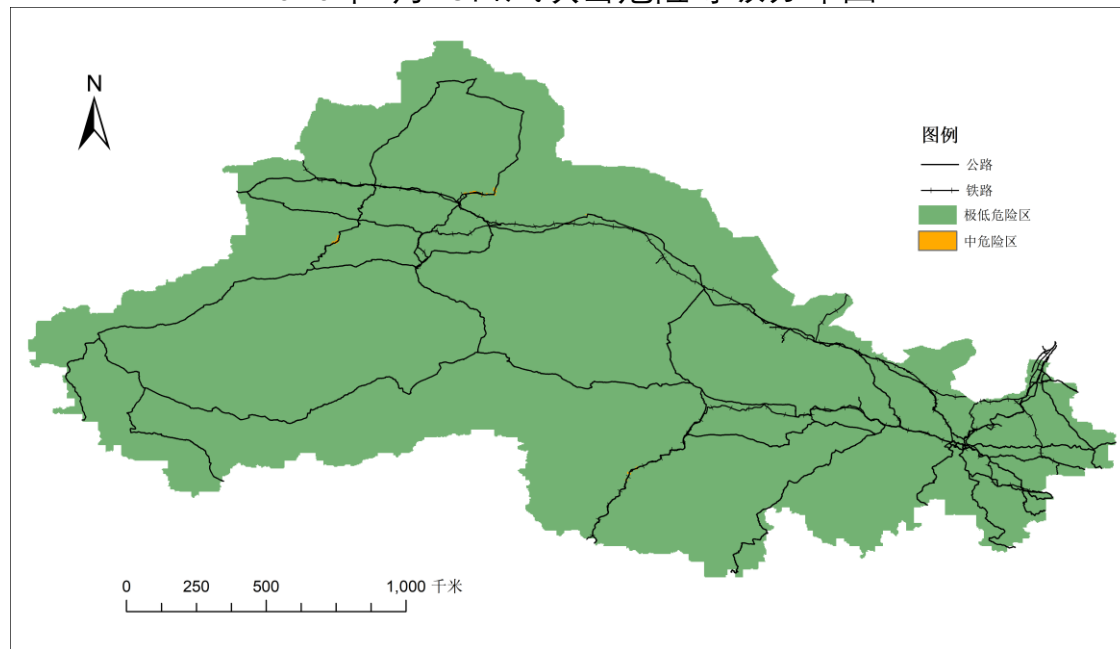


表1 致灾因子等级划分指标

致灾因子	等级	划分指标	发生难易度
最大积雪深度 (H, cm)	1	$H < 10$	小
	2	$10 \leq H < 20$	↑↓
	3	$H \geq 20$	大
积雪期最大风速 (V, m/s)	1	微风及以下: $V < 5.5$	小
	2	和风: $5.5 \leq V < 8.0$	↑↓
	3	清劲风或强风: $V \geq 8.0$	大
植被状况	1	森林	小
	2	灌木	↑↓
	3	草地、裸地	大

表2 风吹雪危险度等级划分

危险度等级	风吹雪致灾因子各自评级的积I
高	$I \geq 18 (3 \times 3 \times 3)$
中	$8 (2 \times 2 \times 2) \leq I < 18$
低	$I < 8$

牧区雪灾风险划分总结

雪灾等级	积雪状态（冬季）		积雪状态（春季）	
	积雪深度/cm	积雪持续时间/d	积雪深度/cm	积雪持续时间/d
轻灾	2~5	11~20	2~5	6~10
	5~10	5~10	5~10	3~5
中灾	2~5	21~40	2~5	11~20
	5~10	11~20	5~10	6~10
	11~20	5~10	11~20	3~5
重灾	2~5	>40	2~5	>20
	5~10	21~40	5~10	11~20
	11~20	11~20	11~20	6~10
特大灾	5~10	>40	5~10	>20
	11~20	>20	11~20	>10
	>20	>15	>20	>8

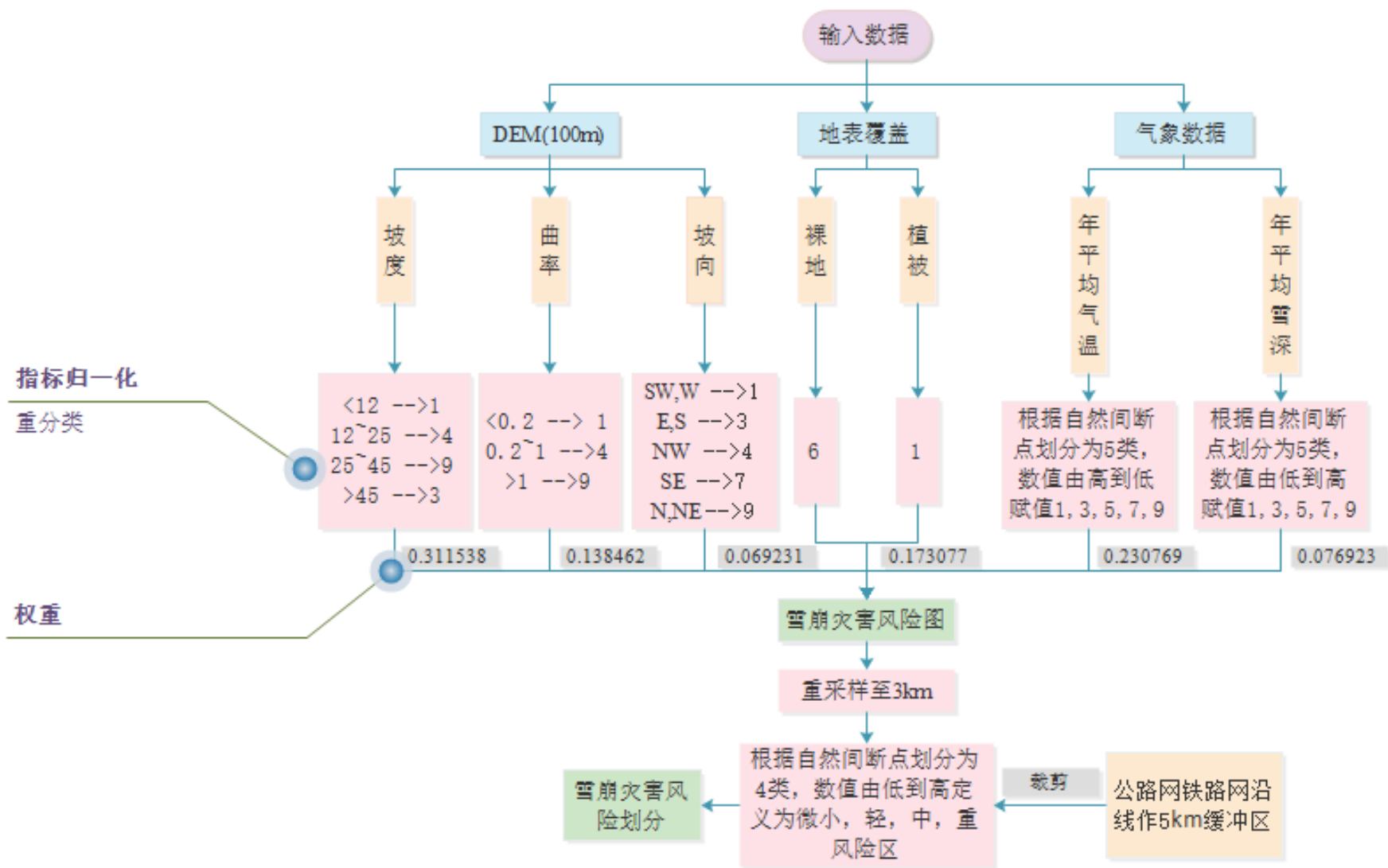
冬季（10.15-次年2.28） 春季（3.15-5.31）

雪崩灾害风险划分改进

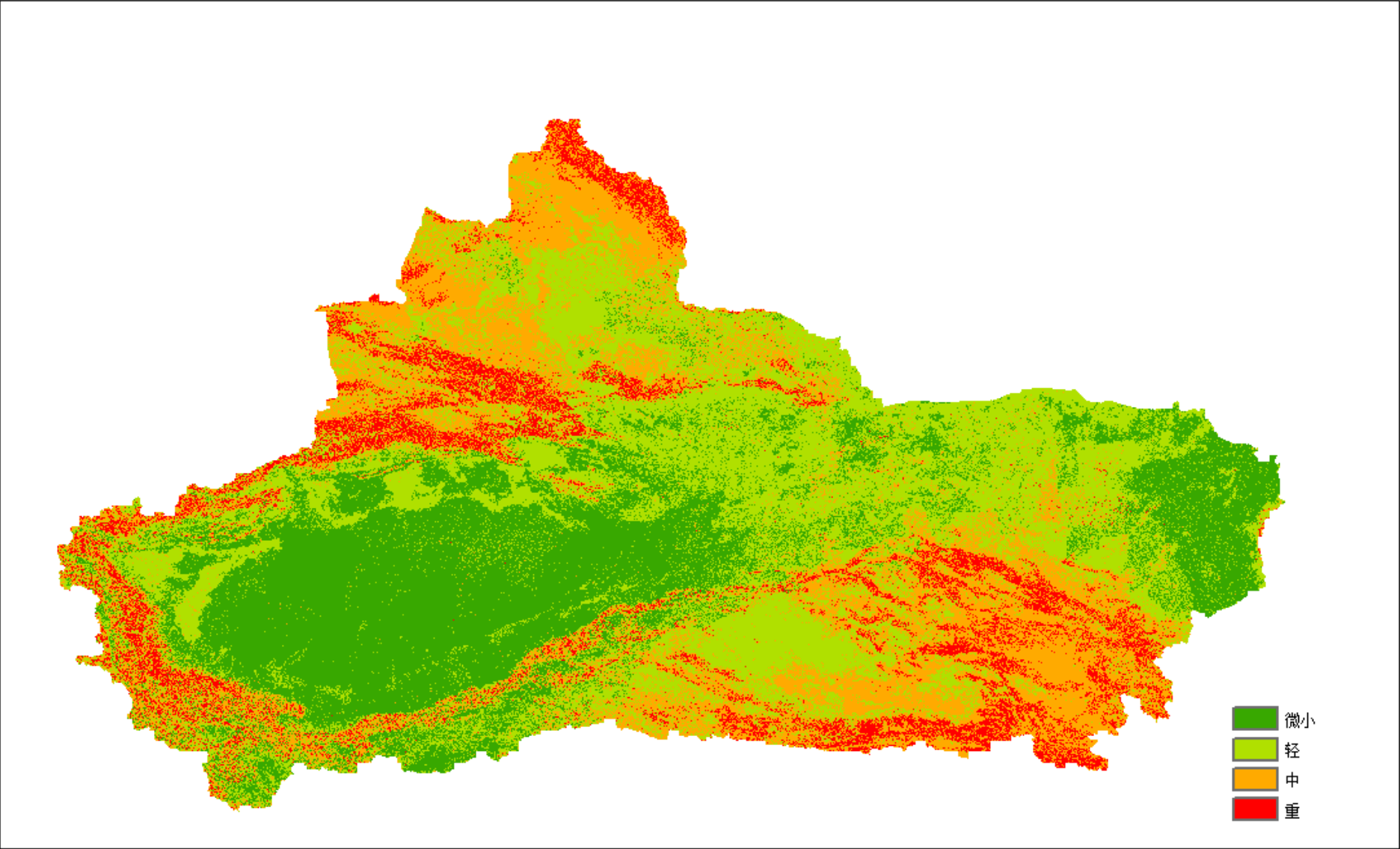
地形因子9(0.692308)				气象因子4(0.307692)					
Thematic layers	Categories	Weights	Ratings	Thematic layers	Weights	Ratings			
Slope	<12	9(0.311538)	1	air temperature	4(0.230769)	根据自然间断点法划分为5类，依次赋值1,3,5,7,9			
	12~25		4						
	25~45		9						
	>45		3						
Curvature	<0.2	4(0.138462)	1	Snow depth	1(0.076923)				
	0.2~1		4						
	>1		9						
Aspect	SW, W	2(0.069231)	1				Snow depth	1(0.076923)	
	E, S		3						
	NW		4						
	SE		7						
	N, NE		9						
Ground Cover	Barren/Rokey	5(0.173077)	6			Snow depth			1(0.076923)
	Vegetation		1						

再依据自然间断点方法将雪崩灾害风险划分为4个等级，微小、轻、中、重灾

雪崩风险区划分总结框图

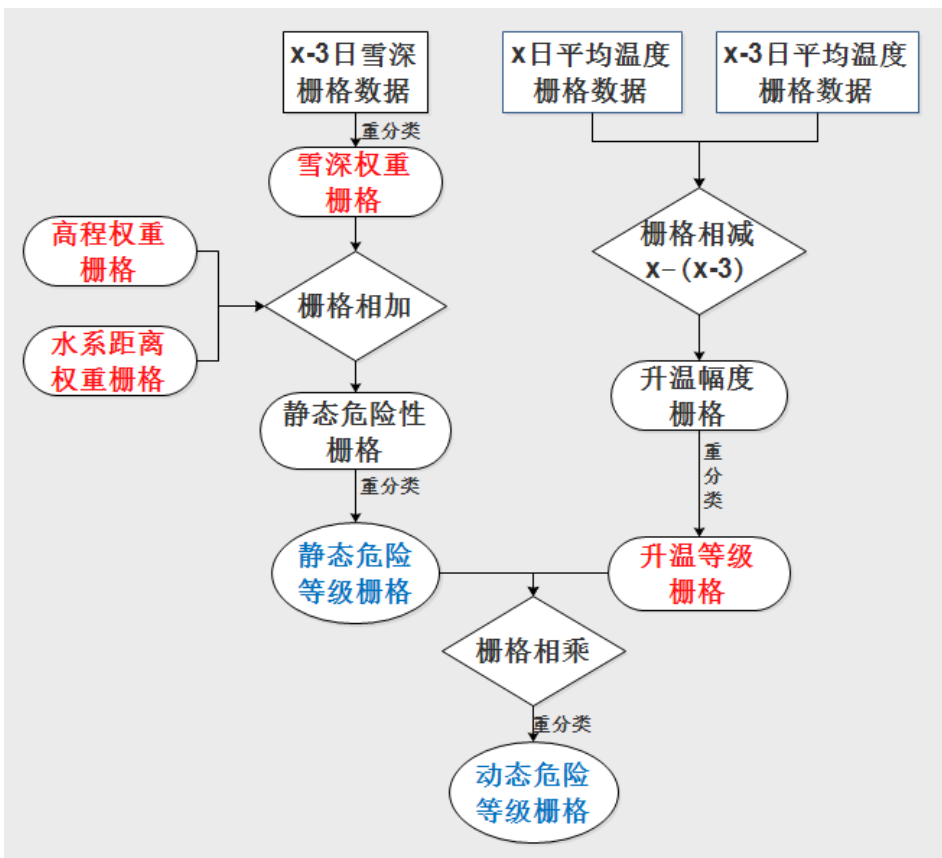


100米DEM尺度下雪崩风险区划分

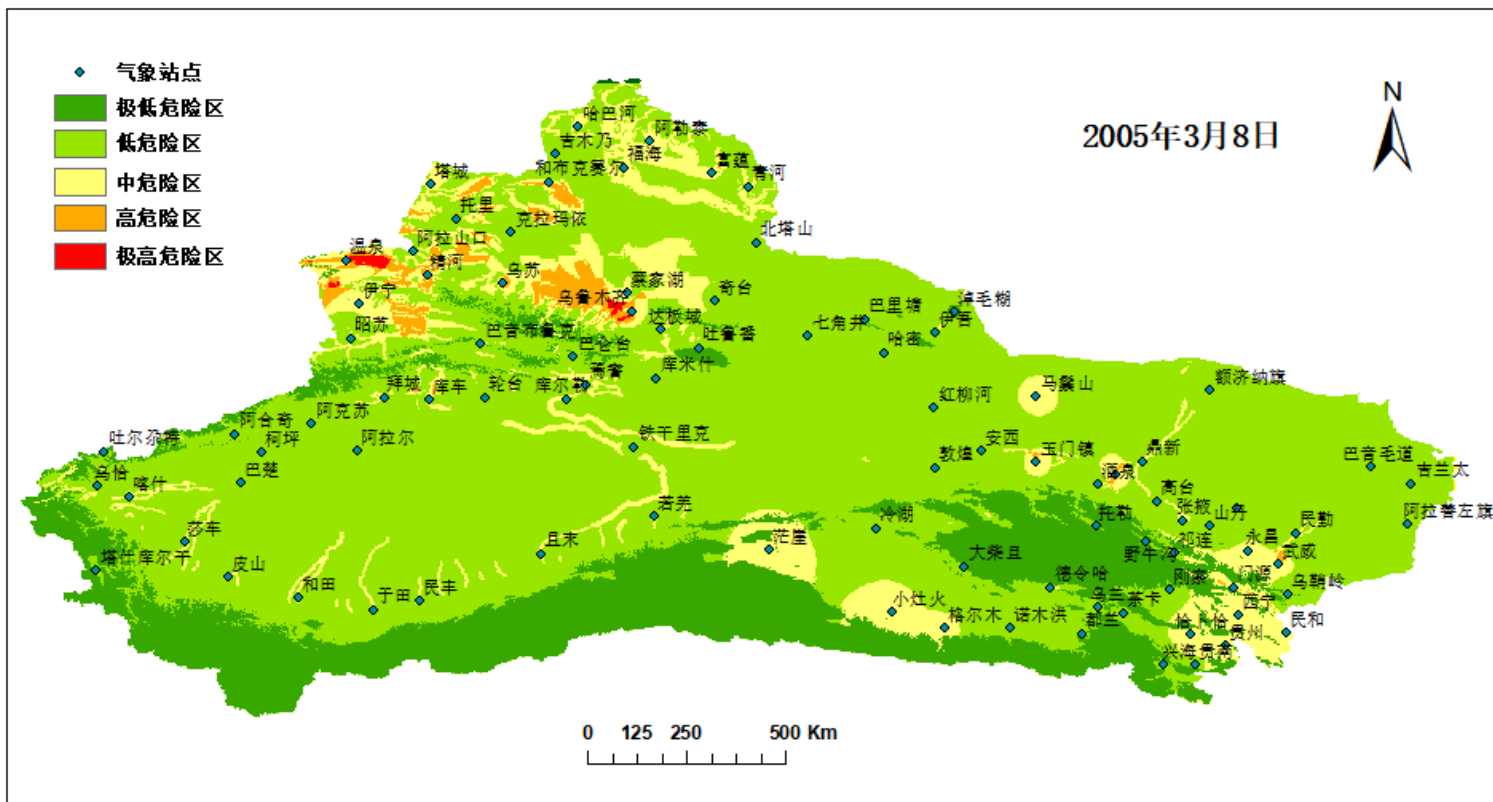




冰雪洪水灾害风险评估模型



冰雪洪水灾害危险等级模拟技术流程图



2005年3月8日西北地区冰雪洪水危险等级模拟结果

表 新疆春季融雪洪水危险性动态评价指标

条件1 (静态危险区化)	条件2 (动态致灾因子)	危险等级	
高危险区 (静态)	5级升温伴随大雨	极高危险区 (雨雪混合)	
	5级升温	极高危险区 (升温)	
	4级升温伴随大雨	极高危险区 (雨雪混合)	
	4级升温	极高危险区 (升温)	
	3级升温	高危险区 (升温)	
	2级升温	中危险区	
	1级升温	低危险区	
中危险区 (静态)	5级升温伴随大雨	高危险区 (雨雪混合)	
	5级升温	高危险区 (升温)	
	4级升温伴随大雨	高危险区 (雨雪混合)	
	4级升温	高危险区 (升温)	
	3级升温	中危险区	
	2级升温	中危险区	
	1级升温	低危险区	
低危险区 (静态)	5级升温	中危险区	
	4级升温	中危险区	
	3级升温	极低危险区	
	2级升温	极低危险区	
	1级升温	极低危险区	
	极低危险区 (静态)	5级升温	极低危险区
		4级升温	极低危险区
3级升温		极低危险区	
2级升温		极低危险区	
1级升温		极低危险区	

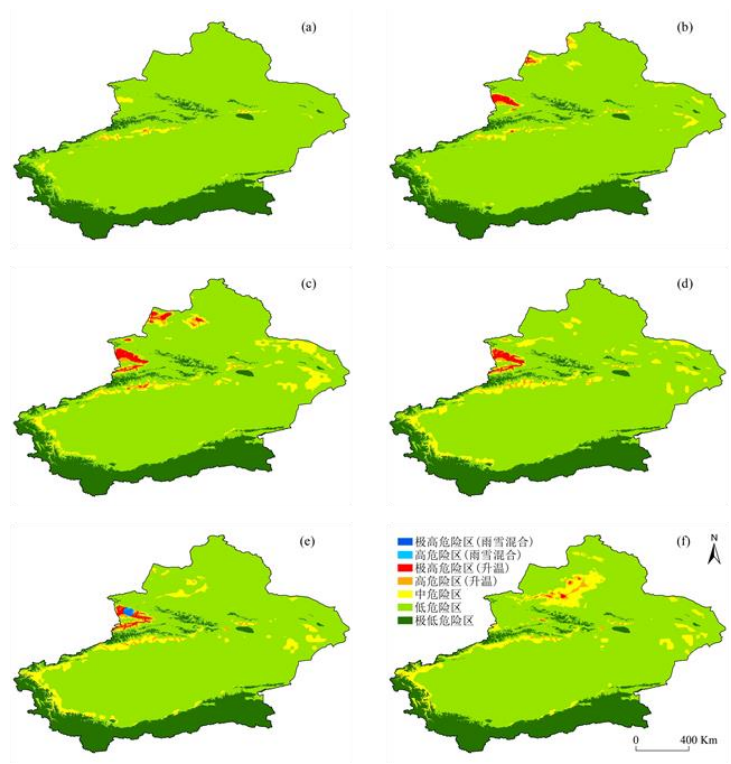
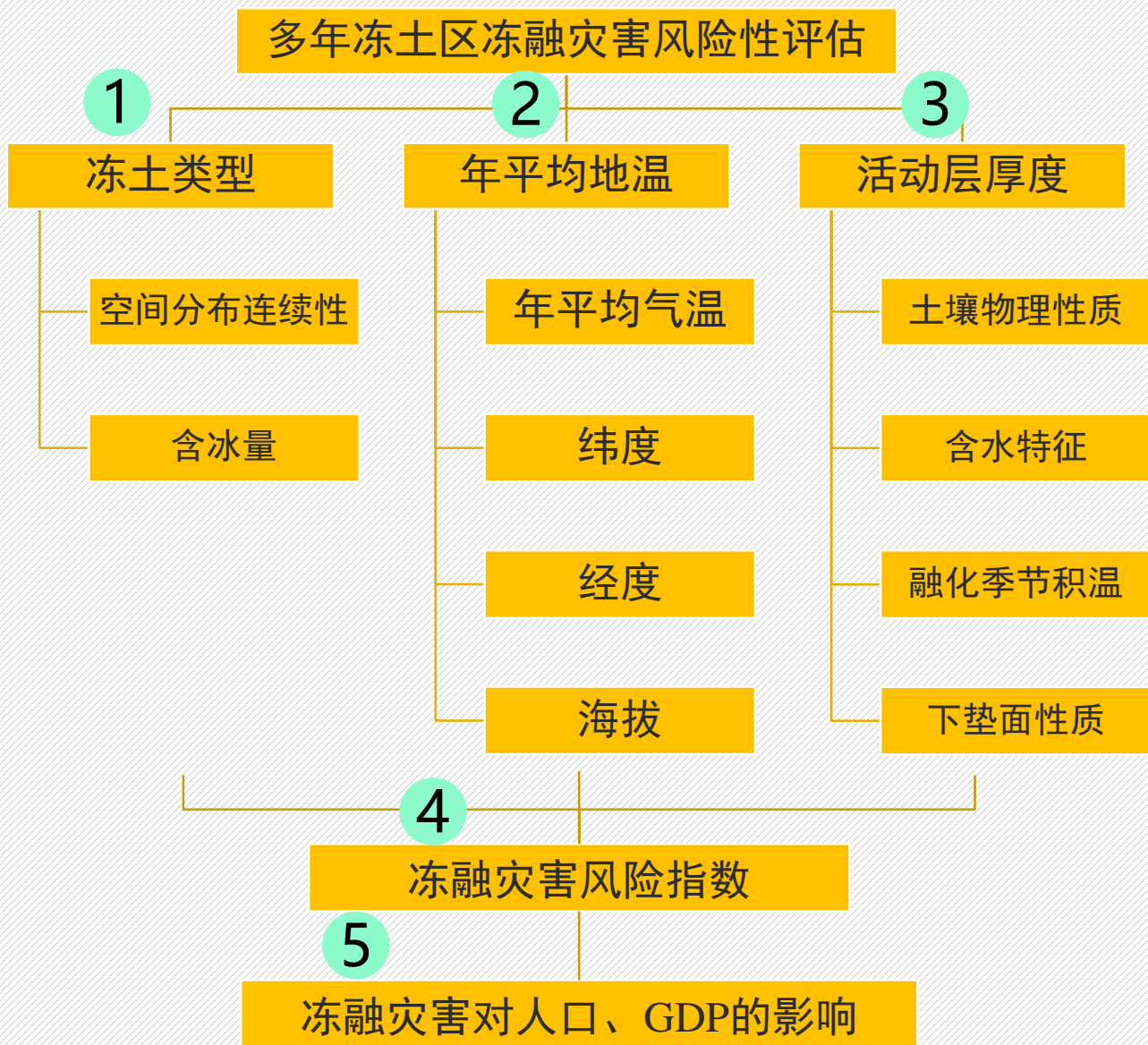


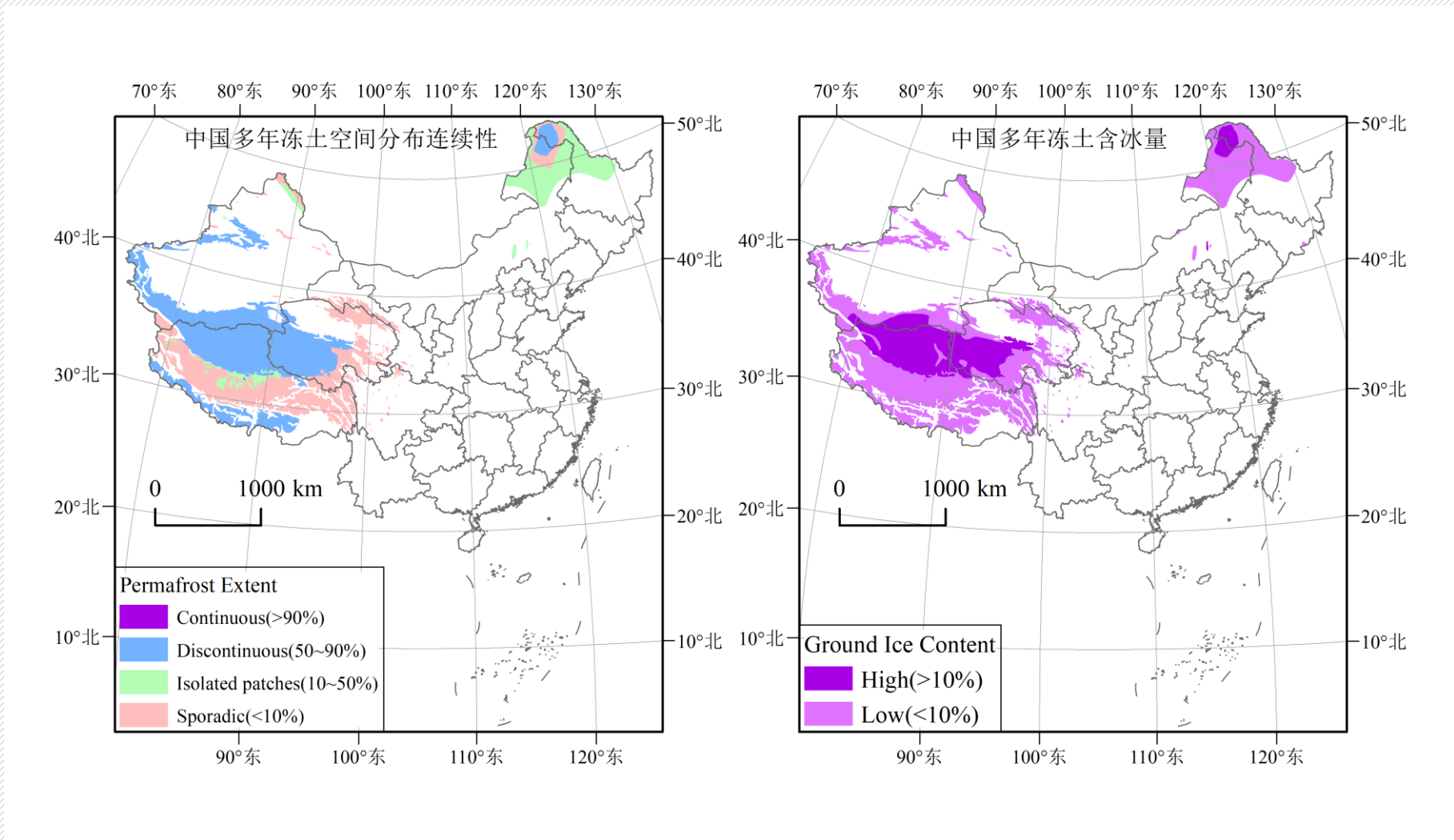
图 2005年3月2日 (a)、2005年3月5日 (b)、2005年3月8日 (c)、2005年3月10日 (d)、2005年3月12日 (e)、2005年3月14日 (f) 新疆春季融雪洪水危险性区划



冻融灾害风险评估模型



1 冻土类型



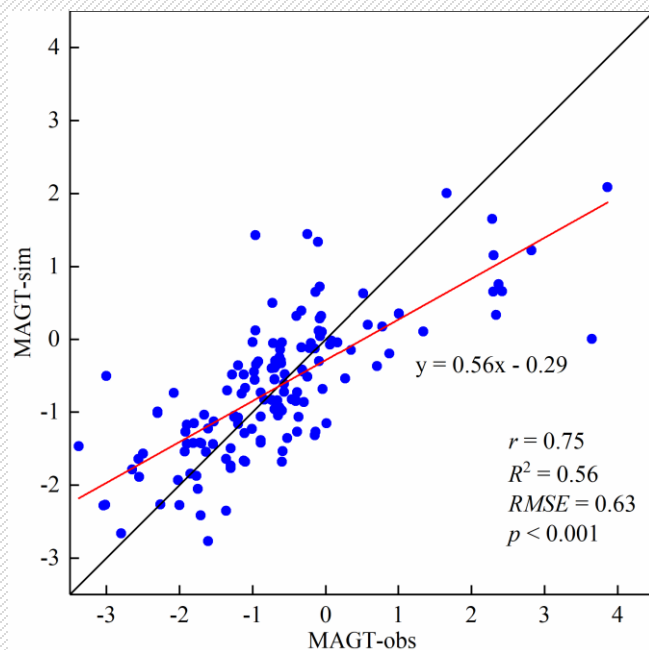
2 年平均地温

利用青藏高原143个实测年平均地温^①与纬度、经度、海拔和年平均气温建立线性回归模型，模拟青藏高原年平均地温。

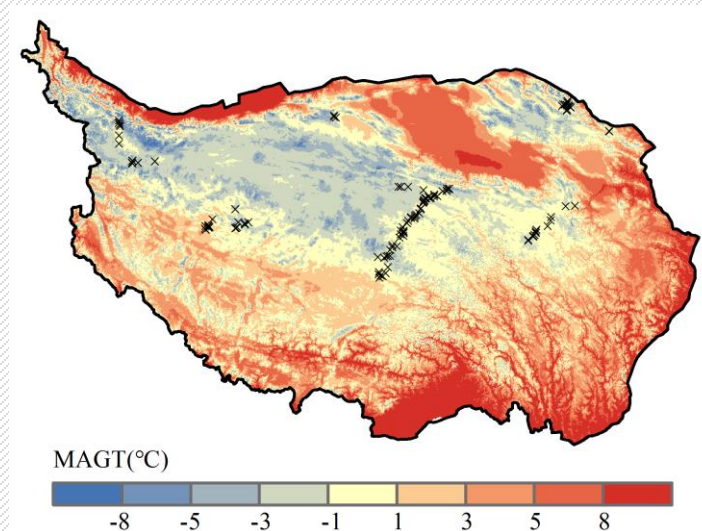
$$\begin{cases} MAGT = 59.887 - 0.708 \times Lati. - 0.143 \times Long. - 0.005 \times Alti. + 0.139 \times MAAT \\ R^2 = 0.56, p < 0.001 \end{cases}$$

$MAGT$ ——年平均地温($^{\circ}C$)， $MAAT$ ——年平均气温($^{\circ}C$)

$Lati.$ ——纬度($^{\circ}$)， $Long.$ ——经度($^{\circ}$)， $Alti.$ ——海拔(m)



年平均地温模拟值与观测值对比



年平均地温空间分布

^① 143个实测年平均地温数据来源于已有文献

2 活动层厚度——Stefan方程

$$H = \sqrt{\frac{2\lambda n \bar{T}_a t}{L\gamma_{ck}(W - W_u)}}$$

H ——活动层厚度(m)

λ ——土的导热系数($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)

γ_{ck} ——土的干容重($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

W ——冻土融化时的总含水量(%)

W_u ——冻土中的未冻水含量(%)

\bar{T}_a ——融化季节平均气温(°C)

t ——融化季节持续时间(d)

$\bar{T}_a t$ ——融化季节的积温($\text{°C}\cdot\text{d}$)

n —— n 因子(融化季节地面温度与气温的比值)

L ——冰的融化潜热, 取值为 $3.3 \times 10^5 \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$

不同土质物理参数

土类	λ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$	γ_{ck} $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	W %	W_u %
粉质亚黏土	1.57	1500	17	5
亚黏土	1.58	1300	15	5
黏土	0.53	900	15	5
砂土	1.42	1800	6	5

5~9月融化季节(陈艾姣)

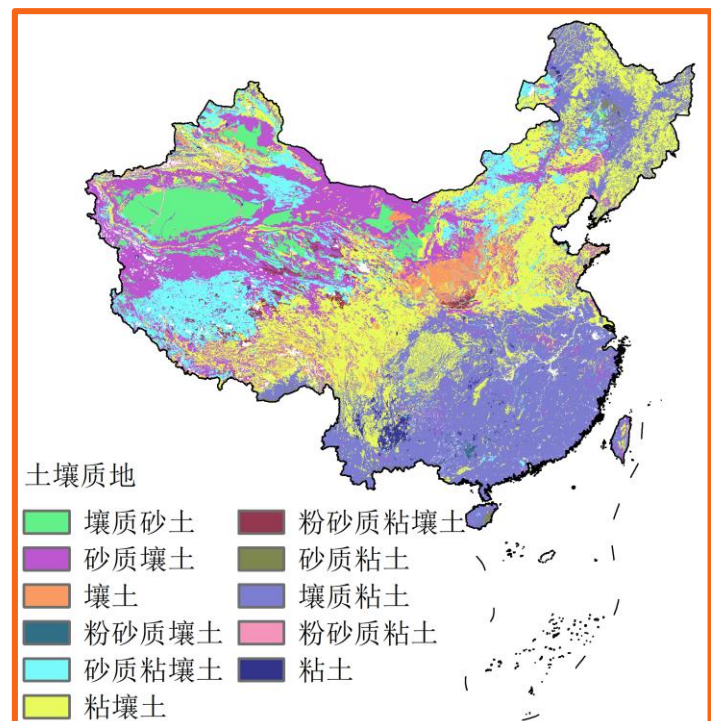
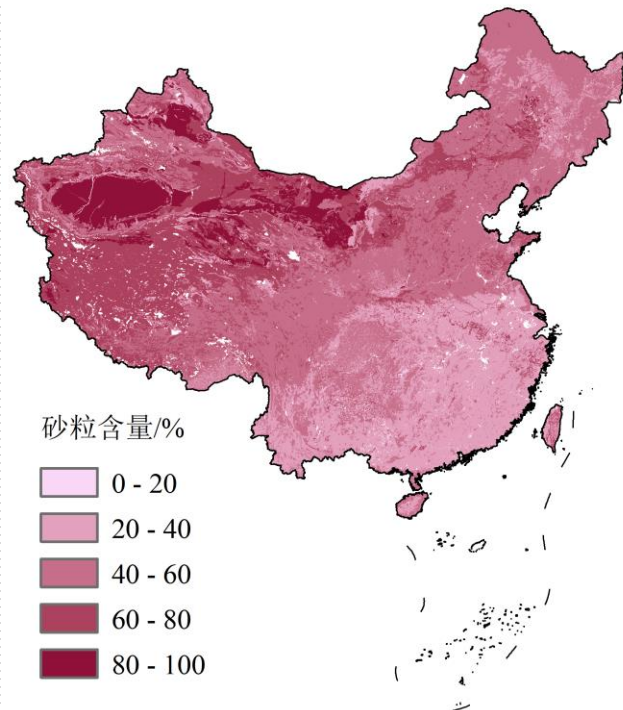
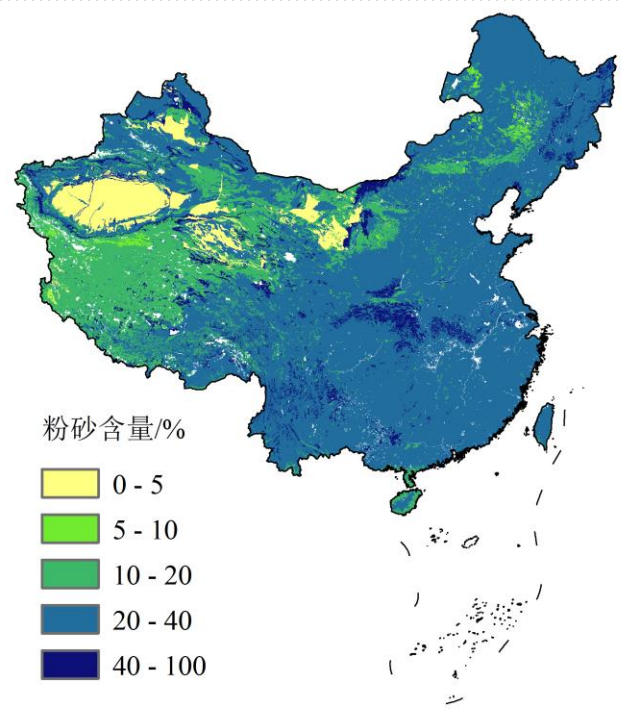
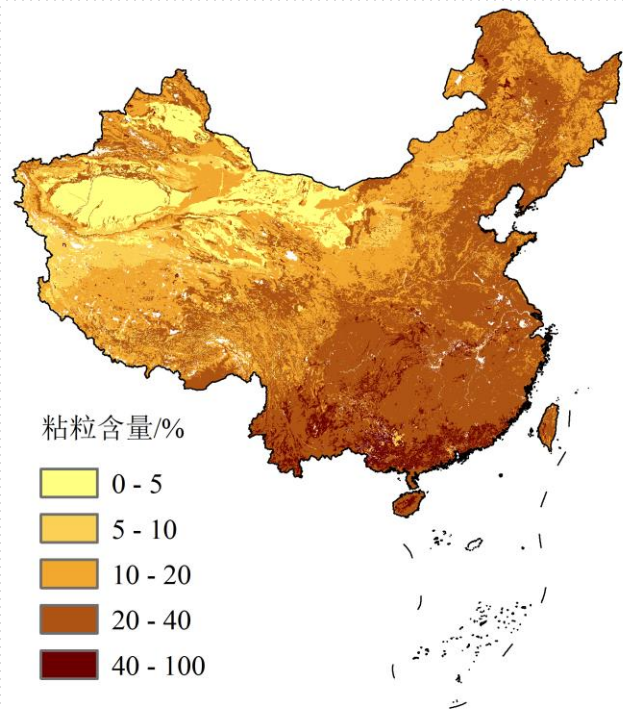
积温 = 平均气温 × 天数

植被类型	n 因子
林地	2.30
草地灌丛	1.89
草原	1.39
草甸及草原草甸混合区	1.60
无植被区	2.55

3 活动层厚度——土壤质地划分

国际制土壤质地分级标准

质地名称	粘粒 ($<0.002\text{mm}$,%)	粉砂 ($0.002-0.02\text{mm}$,%)	砂粒 ($0.02-2\text{mm}$,%)
壤质砂土	0-15	0-15	85-100
砂质壤土	0-15	0-45	55-85
壤土	0-15	30-45	40-55
粉砂质壤土	0-15	45-100	0-55
砂质粘壤土	15-25	0-30	55-85
粘壤土	15-25	20-45	30-55
粉砂质粘壤土	15-25	45-85	0-40
砂质粘土	25-45	0-20	55-75
壤质粘土	25-45	0-45	10-55
粉砂质粘土	25-45	45-75	0-30
粘土	45-65	0-55	0-55

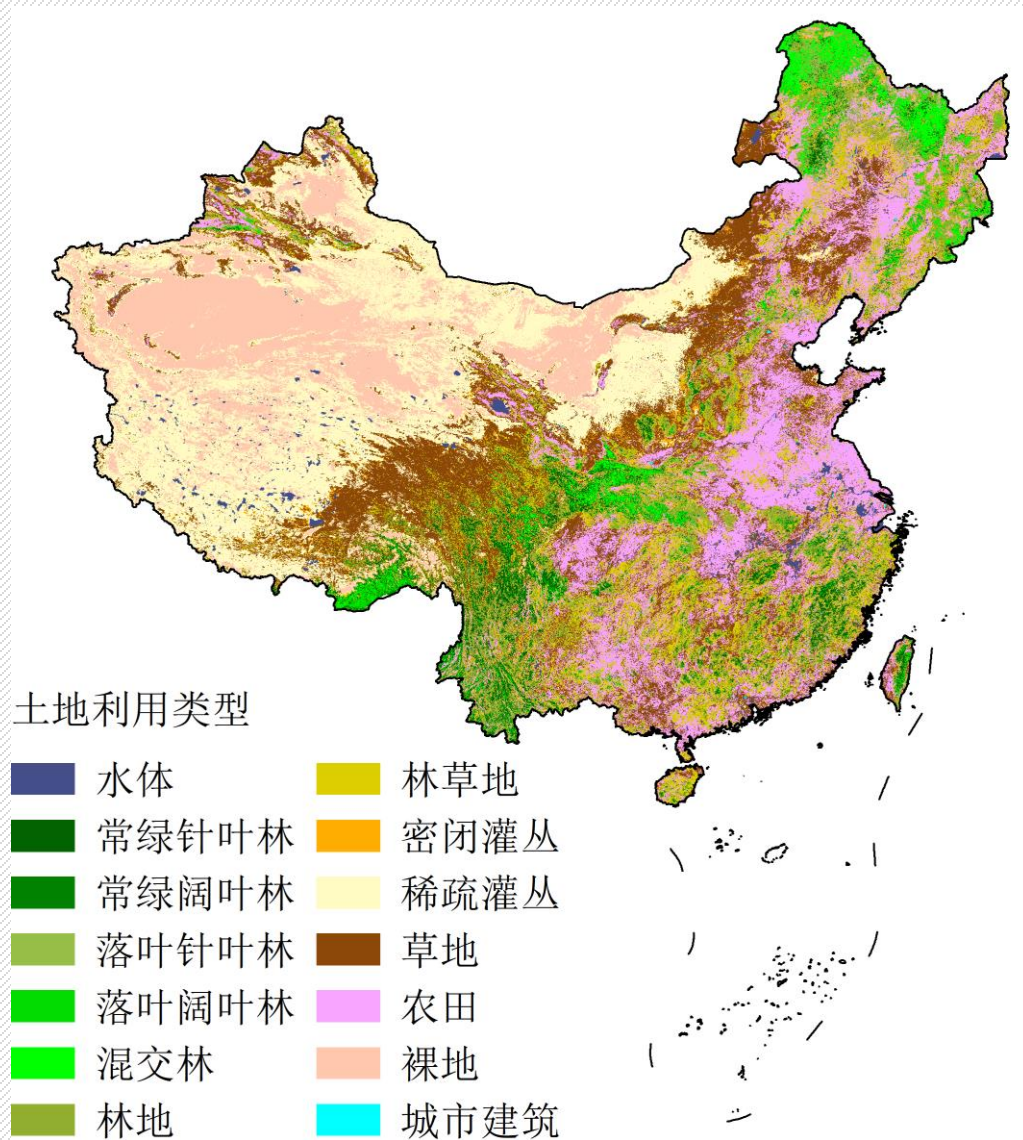


3 活动层厚度——土壤质地划分

不同质地土壤物理参数

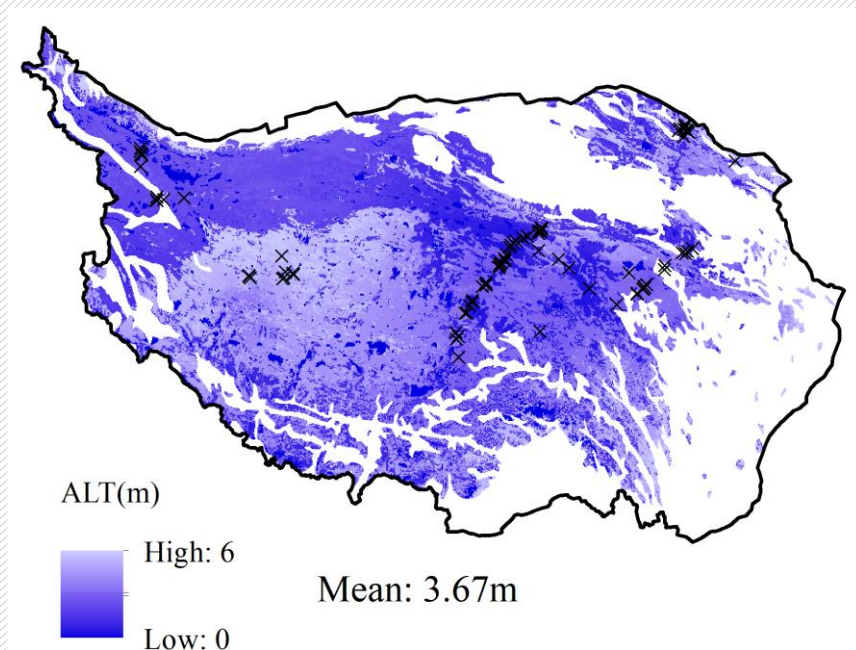
质地名称	λ $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	γ_{ck} $kg \cdot m^{-3}$	W %	W_u %
壤质砂土	1.42	1800	6	5
砂质壤土	1.42	1800	6	5
壤土	1.42	1800	6	5
粉砂质壤土	1.58	1300	15	5
砂质粘壤土	1.58	1300	15	5
粘壤土	1.58	1300	15	5
粉砂质粘壤土	1.58	1300	15	5
砂质粘土	1.57	1500	17	5
壤质粘土	1.57	1500	17	5
粉砂质粘土	0.53	900	15	5
粘土	0.53	900	15	5

3 活动层厚度—— n 因子(融化季节地面温度与气温的比值)

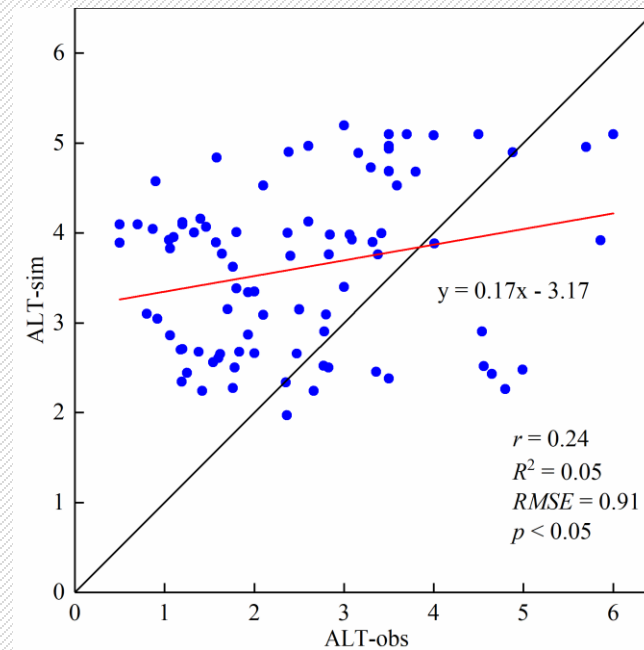


植被类型	n 因子
水体	1
常绿针叶林	2.3
常绿阔叶林	2.3
落叶针叶林	2.3
落叶阔叶林	2.3
混交林	2.3
林地	2.3
林草地	1.6
密闭灌丛	1.89
稀疏灌丛	1.89
草地	1.39
裸地	2.55

3 活动层厚度



多年冻土活动层厚度空间分布

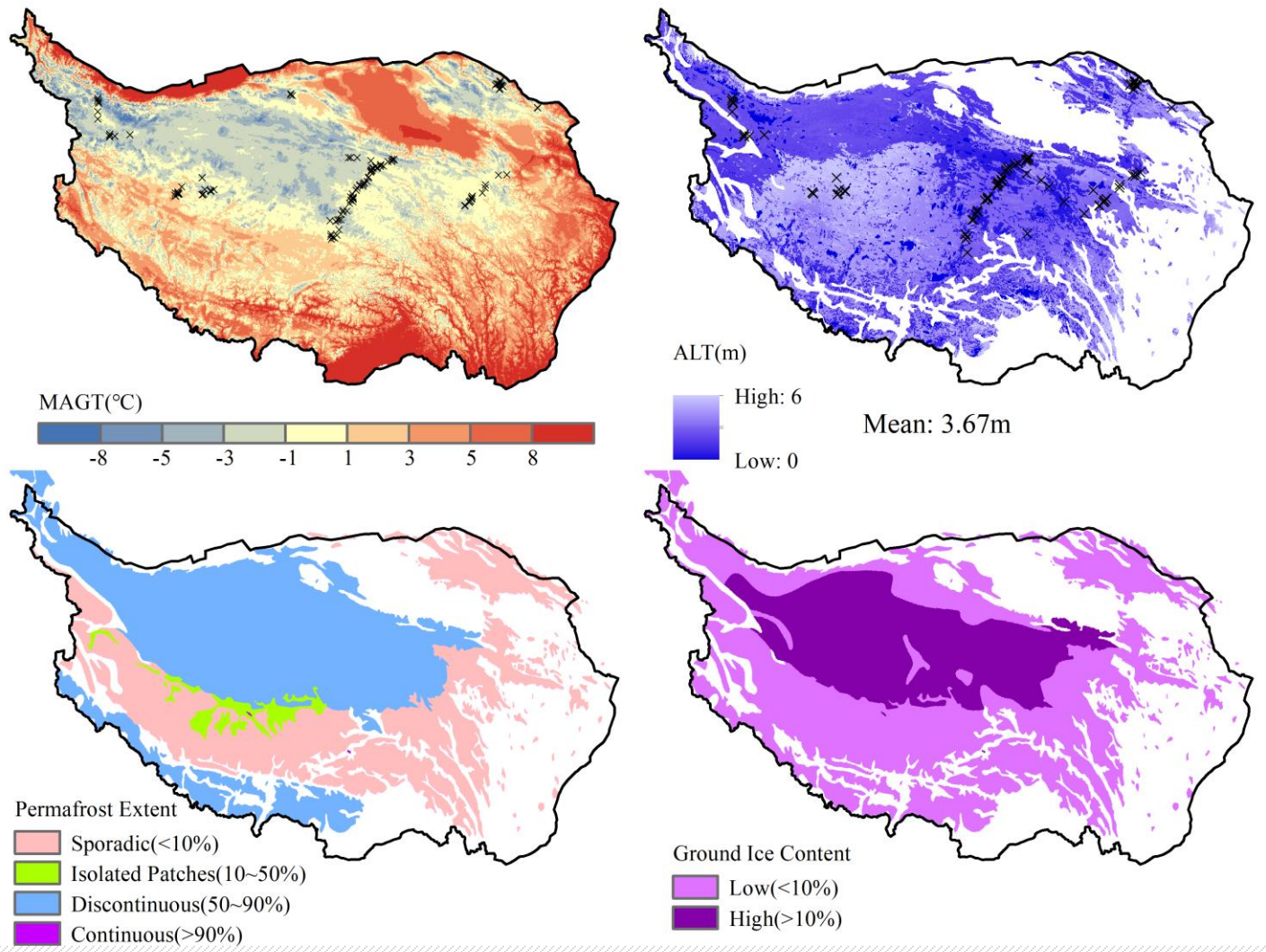


活动层厚度模拟值与观测值对比

已有研究^[1, 2]结果表明：青藏高原多年冻土活动层厚度平均值约为2.35m
本模拟结果为3.67m，与已有研究差异较大，故本模拟结果的正确性还有待验证。

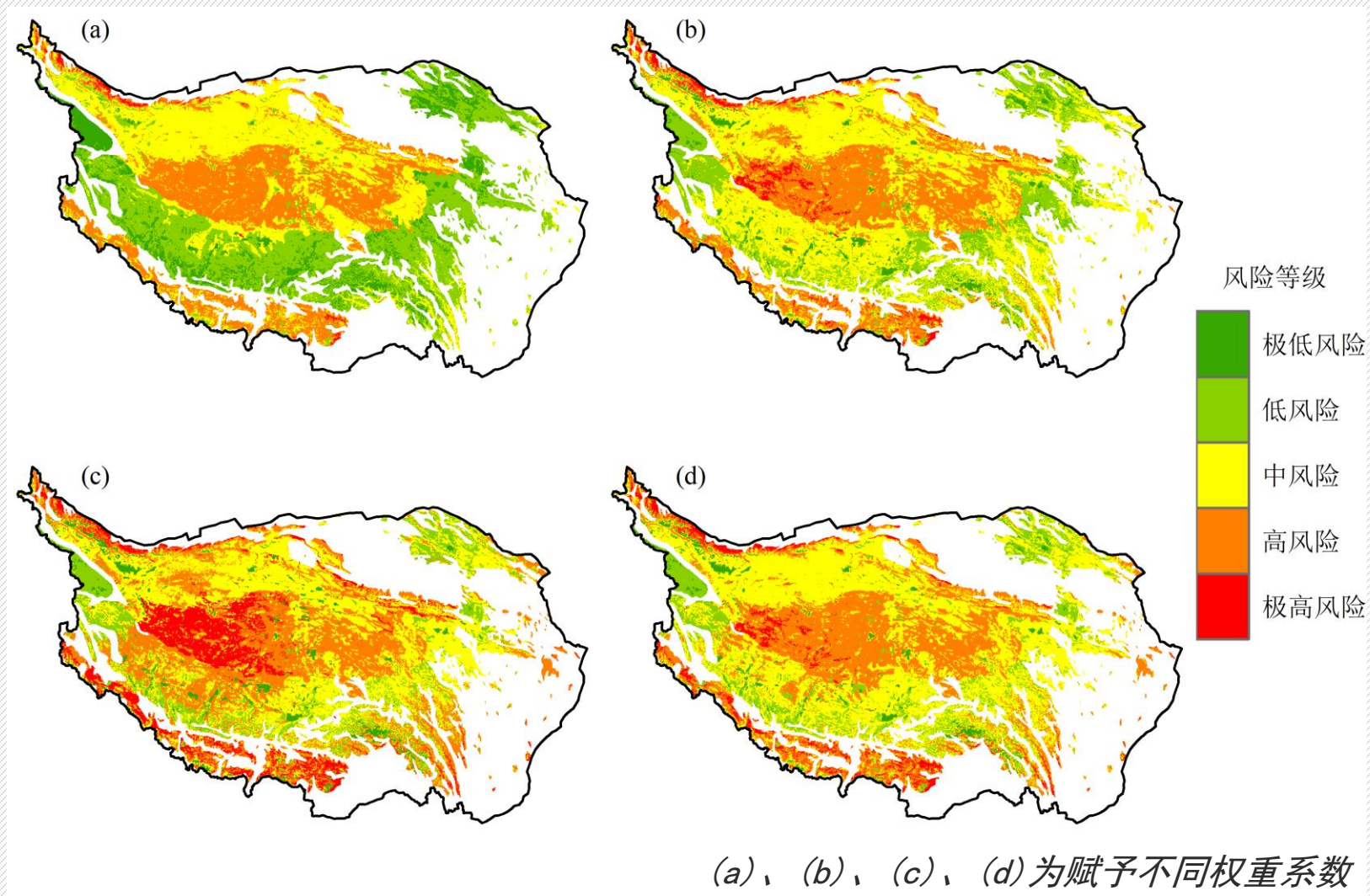
[1] Taihua Wang, Dawen Yang, Yuting Yang, et al. Permafrost Thawing Puts the Frozen Carbon at Risk Over the Tibetan Plateau[J]. Science Advances, 2020.

[2] 徐晓明,吴青柏,张中琼. 青藏高原多年冻土活动层厚度对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2017.



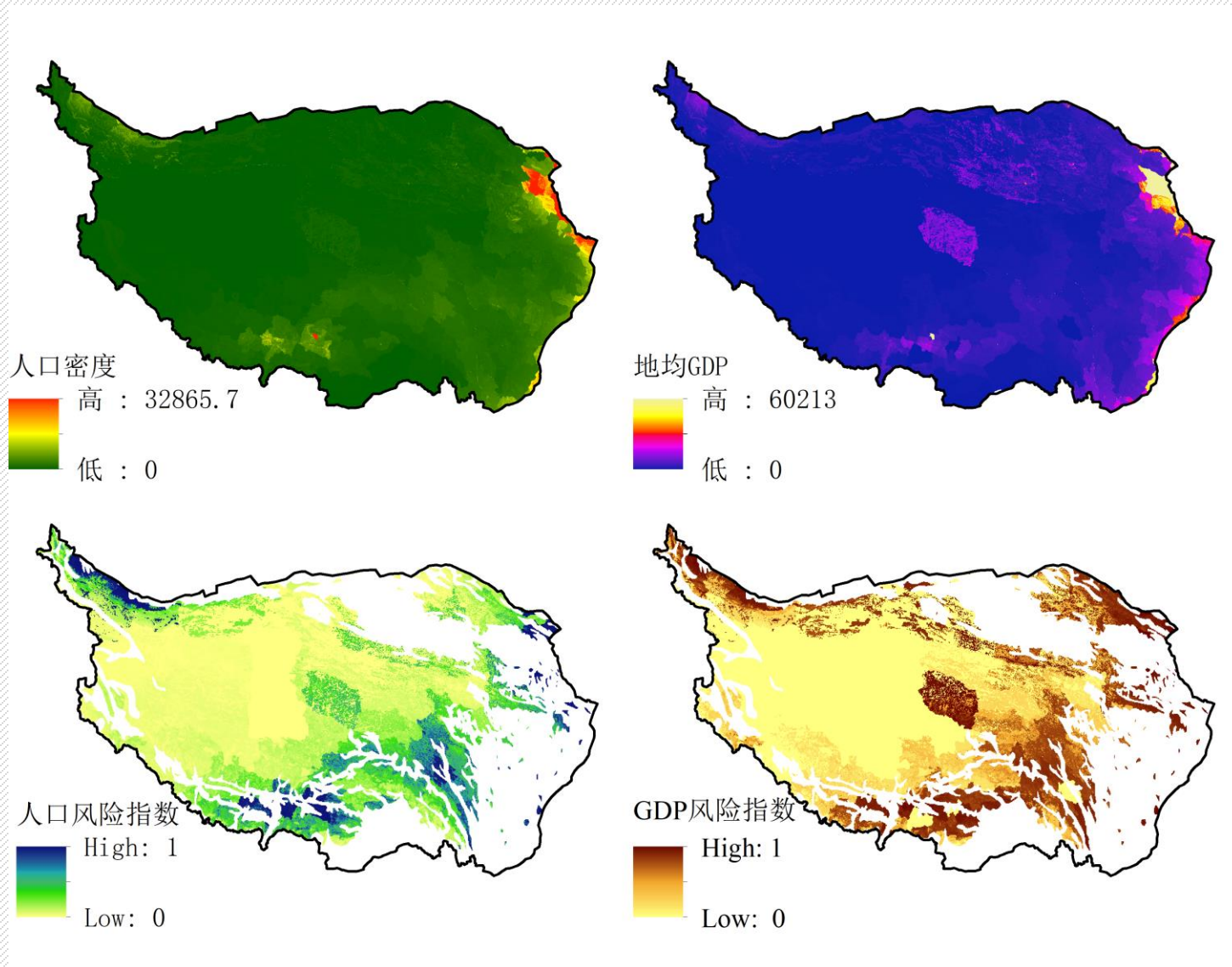
冻土风险指标	权重a	权重b	权重c	权重d
年平均地温	0.3	0.3	0.3	0.4
活动层厚度	0.2	0.3	0.4	0.3
空间连续性	0.25	0.2	0.15	0.15
含冰量	0.25	0.2	0.15	0.15

4 风险等级划分



风险指数	< 0.25	0.25 ~ 0.35	0.35 ~ 0.45	0.45 ~ 0.55	> 0.55
风险等级	极低风险	低风险	中风险	高风险	极高风险

5 冻融灾害对人口、GDP的影响



运算参数配置

```
{  
  "input_path": "D:\\dili\\binghu\\input",  
  "output_path": "D:\\dili\\binghu\\output",  
  "file": "D:\\dili\\fluxes.1961-01-01.nc",  
  "status": "1"  
}
```

通过json文件进行设置常量的位置、输出文件的位置和气象nc文件的读取路径。

冰冻圈灾害风险模拟分析子系统代码示例

总的风险等级栅格图和经济人口的叠加图，并将数据存到.nc文件中。

```
ncoutpathFXDJ = outpath + '/FXDJ_NC' + str(ftyear) + '.nc'
ncoutpathJJFX = outpathJJFX + '/JJFX_NC' + str(ftyear) + '.nc'
ncoutpathRKFX = outpathRKFX + '/RKFX_NC' + str(ftyear) + '.nc'
daFXDJ = Creat_netcdf4(latS, lonS, col_land, row_land, ncoutpathFXDJ, 'Avalanche')
daJJFX = Creat_netcdf4(latS, lonS, col_land, row_land, ncoutpathJJFX, 'Avalanche')
daRKFX = Creat_netcdf4(latS, lonS, col_land, row_land, ncoutpathRKFX, 'Avalanche')
daFXDJ.createVariable('DQFXDJ', 'f8', ("lats", "lons")) # 创建变量, shape=(,) 'f'为数据类型, 不可或缺
daFXDJ.variables['DQFXDJ'][:] = r_data_ava # 填充数据
daFXDJ.variables['DQFXDJ'].description = 'Avalanche disaster rating map'
daFXDJ.close()
daJJFX.createVariable('DQJJFX', 'f8', ("lats", "lons")) # 创建变量, shape=(,) 'f'为数据类型, 不可或缺
daJJFX.variables['DQJJFX'][:] = newgdp # 填充数据
daJJFX.variables['DQJJFX'].description = 'Economic risk rating map'
daJJFX.close()
daRKFX.createVariable('DQRKFX', 'f8', ("lats", "lons")) # 创建变量, shape=(,) 'f'为数据类型, 不可或缺
daRKFX.variables['DQRKFX'][:] = newpop # 填充数据
daRKFX.variables['DQRKFX'].description = 'Population risk rating map'
daRKFX.close()
```

➤ VIC-CAS运行状态

```
----- VIC TIMING PROFILE -----  
  
Date                : Sat Jan  9 11:40:36 2021  
Compiler            : gcc (4.8.5)  
Machine             : node522  
VIC User            : qhbh03  
VIC Version         :  
VIC GIT Version     : 5.0.1 February 1, 2017  
VIC_DRIVER          : Image  
  
Global Param File   : global.txt  
Domain File         : ../../inputdata/BDFX/domain.nc  
Start Date          : 1961-01-01-00000  
Stop Date           : 1961-01-10  
Nrecs               : 80  
Model Timestep (secs) : 10800  
Snow Timestep (secs) : 10800  
Runoff Timestep (secs) : 3600  
Atmos Timestep (secs) : 10800  
  
MPI Processes       : 960  
OPENMP Threads     : 1  
Total pes active   : 960  
pes per node       : 64  
  
Overall Metrics  
-----  
Model Cost          : 12919.2 pe-hrs/simulated_year  
Model Throughput    : 1.78339 simulated_years/day  
  
Timing Table:  
-----  
| Timer          | Wall Time (secs) | CPU Time (secs) | Wall Time (secs/day) | CPU Time (secs/day) |  
-----  
| Init Time     | 151.68           | 107.38           | 15.168                | 10.738               |  
| Run Time      | 1175.25          | 1127.59          | 117.525                | 112.759              |  
| Final Time    | 0.39057         | 0.36             | 0.039057              | 0.036                |  
| Total Time    | 1327.32         | 1235.33         | 132.732                | 123.533              |  
-----  
| Force Time    | 139.072         | 111.71           | 13.9072               | 11.171               |  
| Write Time    | 208.216         | 195.82           | 20.8216               | 19.582               |  
-----  
----- END VIC TIMING PROFILE -----
```

命令行操作流程

冰冻圈灾害风险模拟分析子系统

分系统目录: /data/luoyong/H03

子系统目录:

算法脚本目录: /data/luoyong/H03/algorithm/BDFX

输入数据目录: /data/luoyong/H03/inputdata/BDFX

输出结果目录: /data/luoyong/H03/product/BDFX

模块目录:

算法脚本目录: /data/luoyong/H03/algorithm/BDFX/\${模块缩写}

输入数据目录: /data/luoyong/H03/inputdata/BDFX/\${模块缩写}

输出结果目录: /data/luoyong/H03/product/BDFX/\${模块缩写}

目录结构

脚本文件

参数设置

命令提交

运行过程

结果查看

模块	缩写
冰湖溃决风险模拟分析模块	BHKJ
雪灾风险模拟分析模块	SNOW
冰雪消融型洪水风险模拟分析模块	BXHS
冰崩/冰川跃动风险模拟分析模块	BCYD
冻融灾害风险模拟分析模块	DRZH

冰冻圈灾害风险模拟分析子系统

模式运行脚本：Runmodel.py

目录结构

脚本文件

参数设置

命令提交

运行过程

结果查看

```
import shutil,os,sys,json
import numpy as np
import time
import datetime as dt

#####
# Simulation Parameters
#####
#N_proc    = 128    # number of processors to be used

def main(jsonin):

    nowtime = (dt.datetime.utcnow() + dt.timedelta(hours=8)).strftime("%Y%
m%d%H%M%S")

    with open(jsonin, 'r', encoding='utf-8') as f:
        info = json.load(f)

        sYear = info.get("analyseStrtYear")
        eYear = info.get("analyseEndYear")
        srcDir = info.get("algorithmDir")
        inputDir = info.get("modelDataDir")
        outputDir = info.get("productDir")+ "/" +nowtime+ "/"
        if not os.path.exists(outputDir):
            os.makedirs(outputDir)

        STARTYEAR = int(sYear/10000)
        STARTMONTH = int(sYear/100) - STARTYEAR*100

"Runmodel.py" [dos] 90L, 3326C
```

```
my_csv.write("FORCING1      \t%s\n"%forcing_data)
elif(i==150):
    my_csv.write("PARAMETERS  \t%s\n"%para_data)
elif(i==170):
    my_csv.write("LOG_DIR     \t%s\n"%outputDir)
elif(i==171):
    my_csv.write("RESULT_DIR  \t%s\n"%outputDir)
else:
    my_csv.write("%s\n"%(lines[i]))

time.sleep(1)
##### Comile VIC MODEL #####
#####
os.chdir(srcDir)
os.system('rm -f vic_image.exe')
os.chdir(srcDir+'./vic5.1_cas/drivers/image')
#os.system('module load mpi/hpcx/2.7.4/intel-2017.5.239')
os.system('make')
shutil.move('vic_image.exe', srcDir)
##### Start Run VIC Model#####
#####
os.chdir(srcDir)
#os.system('ls')
#os.environ['OMP_NUM_THREADS']=str(N_proc)
#os.system('env')
#os.system('./vic_image.exe -g global.txt')
os.system('sbatch vic.pbs')
#time.sleep(600)
```


冰冻圈灾害风险模拟分析子系统

各模块运行脚本：

提交脚本：run_\${模块缩写}.sh

主程序脚本：main_\${模块缩写}.py

目录结构

脚本文件

参数设置

命令提交

运行过程

结果查看

```
#!/bin/bash
source ~/.bashrc
conda activate bdfx
# 判断是否传递用户配置参数文件,不存在则终止程序
if [ -z $1 ];then
    echo "未输入参数配置文件userconfig.json"
    exit 1
fi
# 程序记录开始时间
starttime=$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S')
MODULE="BCYD"
MODULENAME="冰崩/冰川跃动风险模拟分析"
#接收日志文件输出路径
log_file=$(cat $1 | jq .algorithmLogFile -r)
json_file=$(cat $1 | jq .resultJsonFile -r)
flow_file=$(cat $1 | jq .algorithmFlowFile -r)
userconfig=$1
#检查日志和json文件是否已经存在,存在则删除
if [ -f $log_file ];then
    rm $log_file
fi
if [ -f $json_file ];then
    rm $json_file
fi
if [ -f $flow_file ];then
    rm $flow_file
fi
#日志输出脚本函数
```

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-
import os
import sys
import time
import json
import datetime
from osgeo import gdal, osr, gdal_array, gdalconst
import numpy as np
import netCDF4 as nc
import matplotlib
matplotlib.rcParams['font.sans-serif']=['SimHei'] #显示中文标签
matplotlib.rcParams['axes.unicode_minus']=False #这两行需要手动设置
import shutil
from numba import jit
import logging
#将栅格进行重采样,变成和给的栅格,行列数一致,方便进行数组运算
def ReprojectImages(inputfilePath, referencefilePath, outputfilePath,
ne):#重采样
    # 获取输出影像信息
    inputrasfile = gdal.Open(inputfilePath, gdal.GA_ReadOnly)
    inputProj = inputrasfile.GetProjection()
    # 获取参考影像信息
    referencefile = gdal.Open(referencefilePath, gdal.GA_ReadOnly)
    referencefileProj = referencefile.GetProjection()
    referencefileTrans = referencefile.GetGeoTransform()
    bandreferencefile = referencefile.GetRasterBand(1)
    inputreferencefile = inputrasfile.GetRasterBand(1) # 输入文件的波段
    Width= referencefile.RasterXSize
    Height = referencefile.RasterYSize
```

冰冻圈灾害风险模拟分析子系统

参数文件: useconfig.json

目录结构

脚本文件

参数设置

命令提交

运行过程

结果查看

```
{  
  "analyseStrtYear": 19610101,  
  "analyseEndYear": 19610115,  
  "modelName": "CAS-ESM2-0",  
  "modelProject": "CMIP6",  
  "modelMip": "Amon",  
  "modelExp": "ssp370",  
  "modelEnsemble": "r1i1p1f1",  
  "modelGrid": "gn",  
  "algorithmDir": "/data/luoyong/H03/algorithm/BDFX/",  
  "obsDataDir": "/data/luoyong/H03/inputdata/BDFX/",  
  "modelDataDir": "/data/luoyong/H03/inputdata/BDFX/",  
  "productDir": "/data/luoyong/H03/product/BDFX/",  
  "resultJsonFile": "/data/luoyong/H03/product/BDFX/output.json",  
  "algorithmLogFile": "/data/luoyong/H03/product/BDFX/output.log",  
  "algorithmFlowFile": "/data/luoyong/H03/product/BDFX/outputFlow.json"  
}
```

参数名称	参数描述
analyseStrtYear	分析起始年
analyseEndYear	分析终止年
modelName	输入模式数据集名
modelProject	耦合模式计划类型
modelMip	模式时间频率
modelExp	耦合模式比较计划试验
modelEnsemble	耦合模式比较计划集合
modelGrid	耦合模式比较格点标签
algorithmDir	算法目录
obsDataDir	观测数据目录
modelDataDir	模式数据目录
productDir	输出目录
resultJsonFile	输出结果json
algorithmLogFile	输出日志json
algorithmFlowFile	输出流程json

冰冻圈灾害风险模拟分析子系统

目录结构

脚本文件

参数设置

命令提交

运行过程

结果查看

模式运行提交：

```
python Runmodel.py useconfig.json
```

分析模块运行提交：

```
bash run_${模块缩写}.sh useconfig.json
```

冰冻圈灾害风险模拟分析子系统

目录结构

脚本文件

参数设置

命令提交

运行过程

结果查看

模式运行：

作业查看： `queue`

日志文件查看： `cat vic.log` `cat vic.err`

分析模块运行：

屏幕实时打印结果

```
(bdfx) [luoyong@login01 BXHS]$ bash run_BXHS.sh /data/luoyong/H03/algorithm/BDFX/BXHS/useconfig.json
2022-05-25 13:40:02 : 主程序初始化
2022-05-25 13:40:02 : 完成参数解析
2022-05-25 13:40:02 : 执行主程序算法 main_BXHS.py
2022-05-25 13:40:46 : 主程序算法 main_BXHS.py 执行完毕,耗时0m43.599s
2022-05-25 13:40:46 : 执行主程序绘图算法 BXHS_plot.sh
2022-05-25 13:41:10 : 主程序算法 BXHS_plot.sh 执行完毕,耗时0m23.990s
2022-05-25 13:41:10 : 输出产品路径 /data/luoyong/H03/product/BDFX/BXHS
2022-05-25 13:41:10 : 输出json路径 /data/luoyong/H03/product/JDQH/TCFX/output.json
2022-05-25 13:41:10 : 输出日志路径 /data/luoyong/H03/product/JDQH/TCFX/output.log
2022-05-25 13:41:10 : 输出算法执行流程路径 /data/luoyong/H03/product/JDQH/TCFX/outputFlow.json
```

```
(bdfx) [luoyong@login01 BCYD]$ bash run_BCYD.sh useconfig.json
2022-05-25 13:19:44 : 主程序初始化
2022-05-25 13:19:44 : 完成参数解析
2022-05-25 13:19:44 : 执行主程序算法 main_BCYD.py
2022-05-25 13:38:33 : 主程序算法 main_BCYD.py 执行完毕,耗时18m49.032s
2022-05-25 13:38:33 : 执行主程序绘图算法 BCYD_plot.sh
2022-05-25 13:38:38 : 主程序算法 BCYD_plot.sh 执行失败,错误详见/data/luoyong/H03/algorithm/BDFX/BCYD/QGIS_MappingV3.0/code/BCYD_plot.log
```

冰冻圈灾害风险模拟分析子系统

模式运行结果：

- (1) 系统四 VirealQuick 工具
- (2) ncvview 或者其他NetCDF格式文件查看工具

目录结构

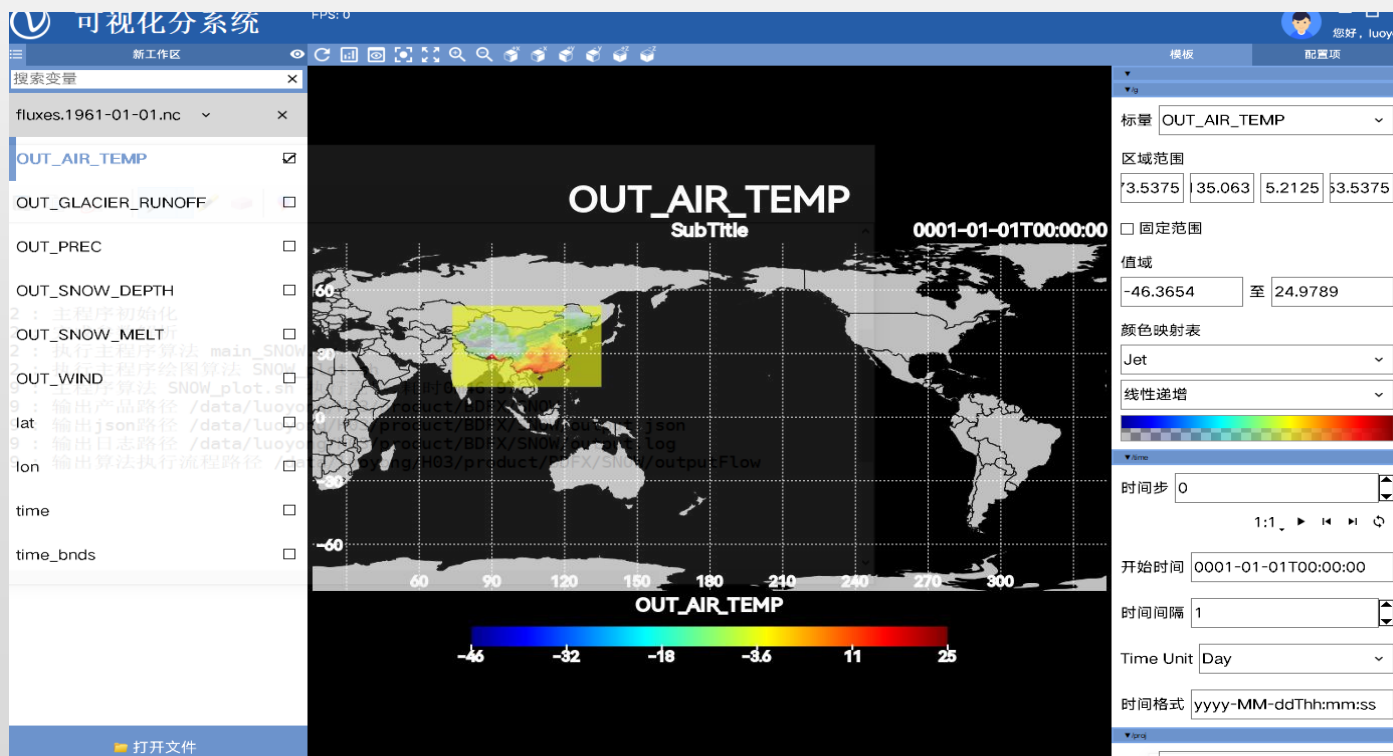
脚本文件

参数设置

命令提交

运行过程

结果查看



冰冻圈灾害风险模拟分析子系统

分析模块运行结果：

- (1) 系统四 VirealQuick 工具
- (2) 专题图直接查看

目录结构

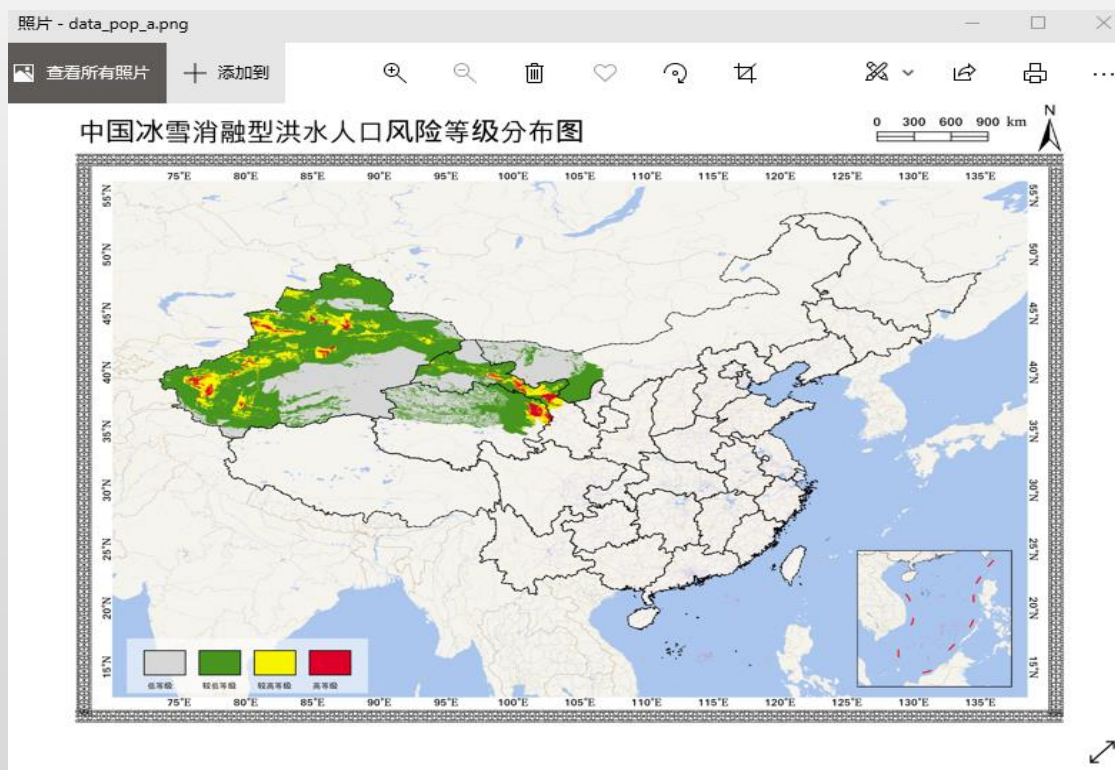
脚本文件

参数设置

命令提交

运行过程

结果查看





谢谢!