



# 2022级硕士答辩



## 基于卫星降水产品的黄河源区水文过程模拟研究

Runoff simulation in the source region of the Yellow River based on satellite precipitation products

**答 辩 人：朱胜利**

**专 业：自然资源学**

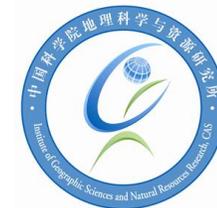
**申请学位：理学硕士**

**导 师：刘兆飞 副研究员**

**时 间：2025年05月16日**

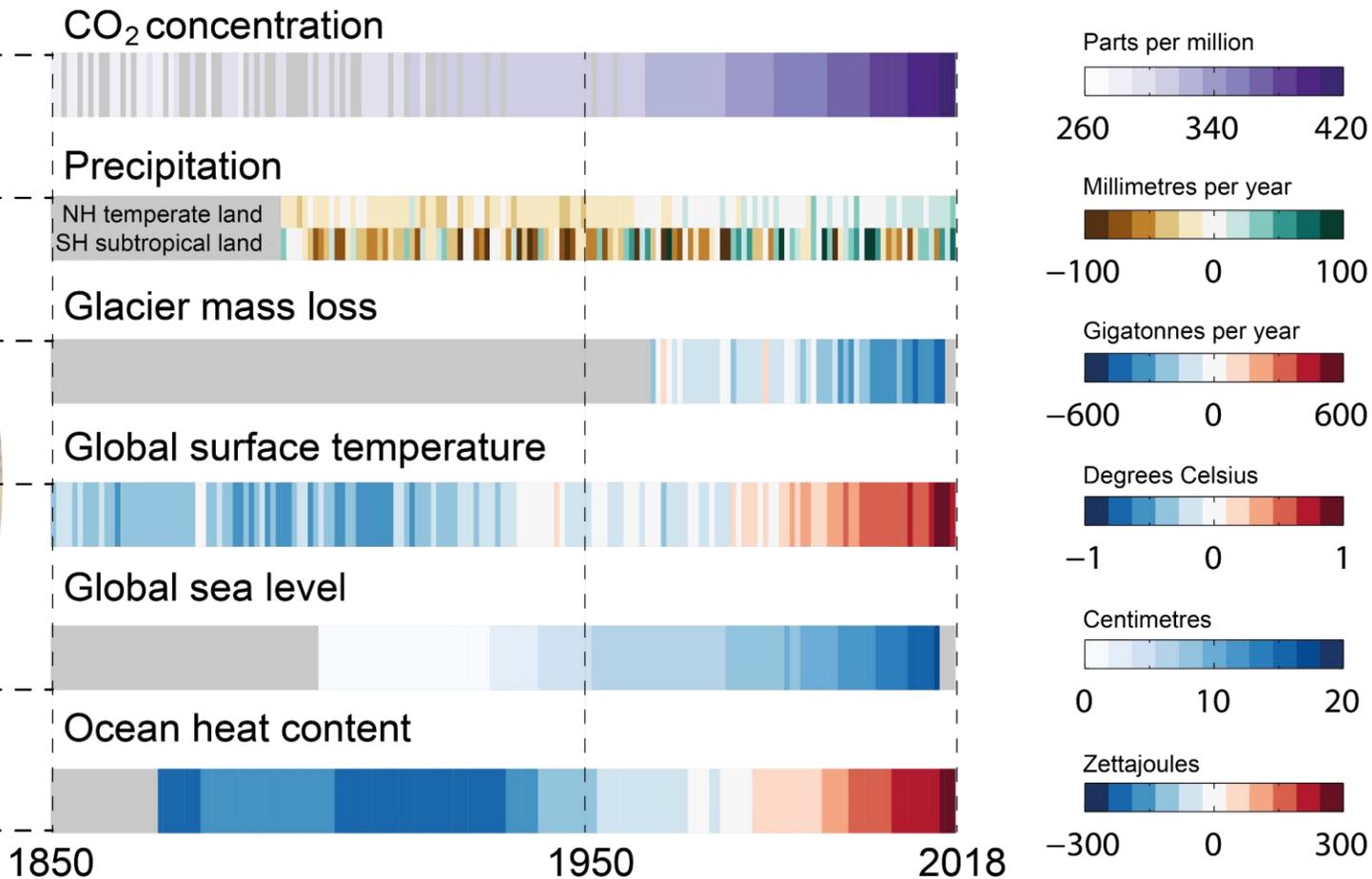
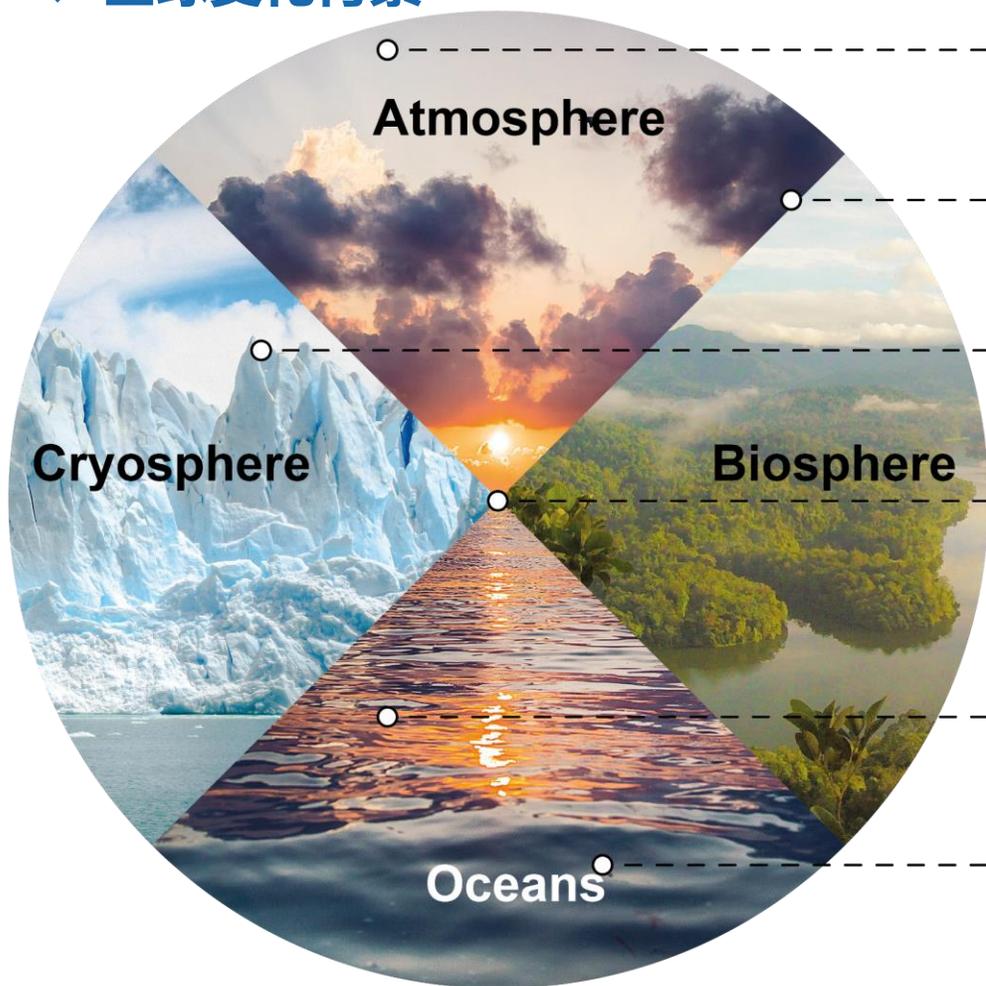
- 1 绪论
- 2 研究区概况与数据
- 3 卫星降水产品综合定量评估
- 4 基于深度学习的降水-径流模拟
- 5 基于水文模型的降水-径流模拟
- 6 基于降水分型的径流响应机制
- 7 结论与展望
- 8 盲审意见及修改情况

# 1 绪论



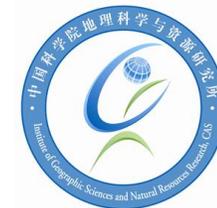
## 1.1 研究背景与意义

### ◆ 全球变化背景



Annual averages.  
Grey indicates that data are not available.

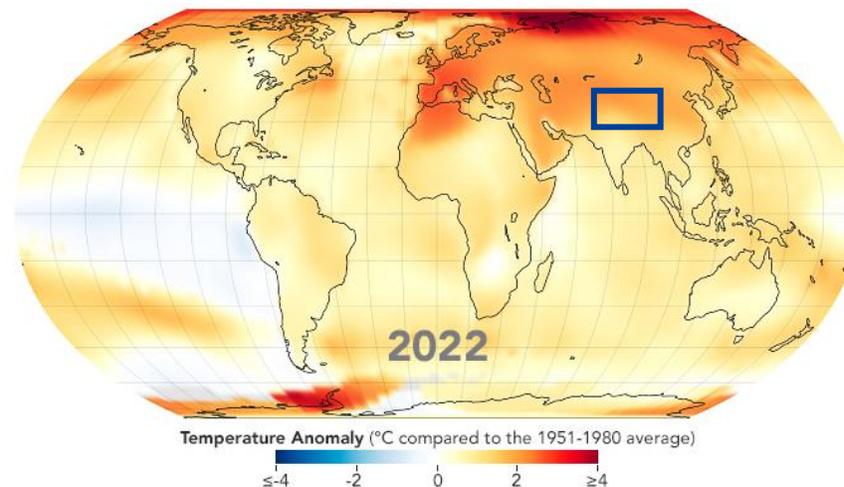
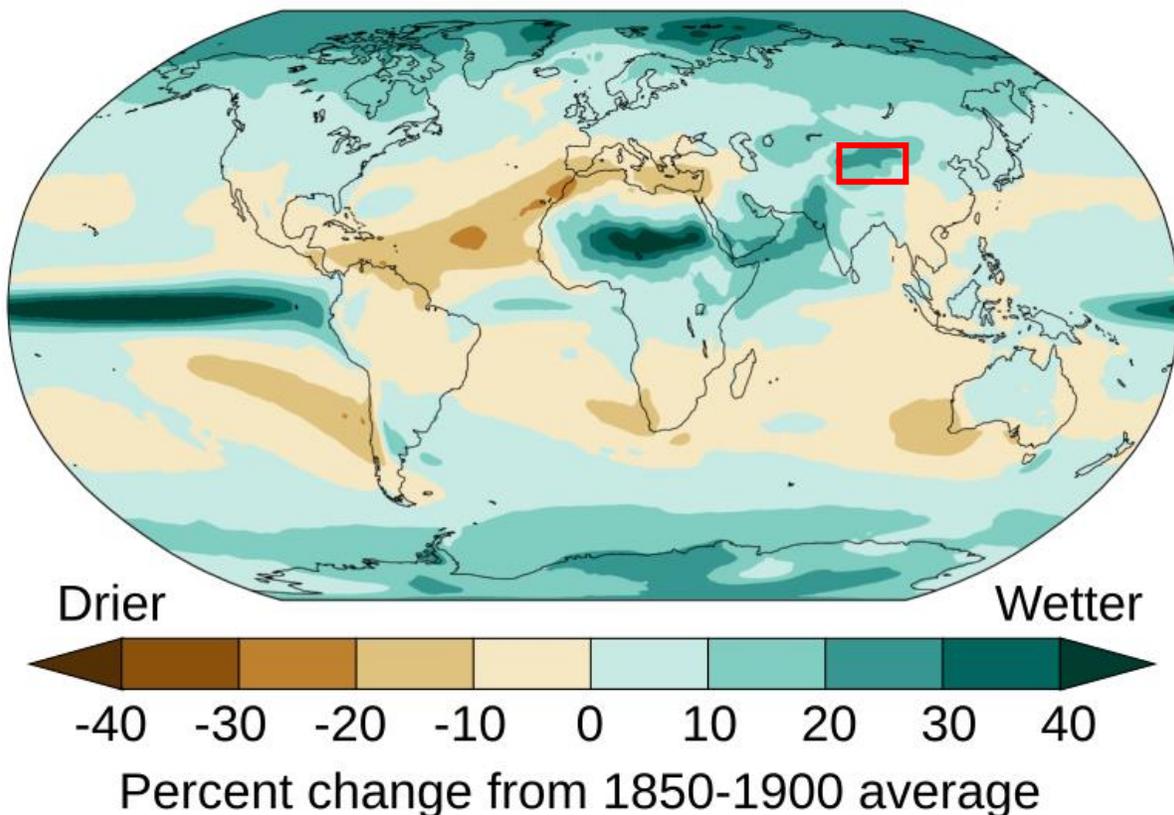
# 1 绪论



## 1.1 研究背景与意义

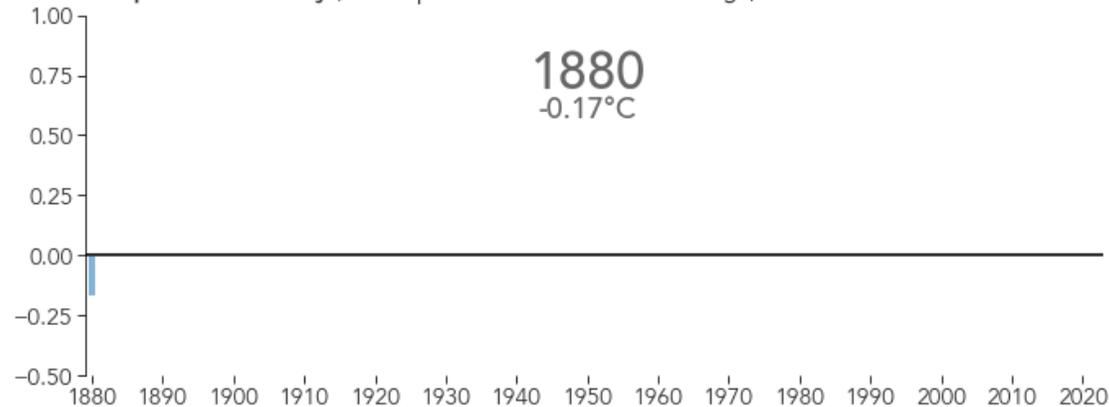
### ◆ 全球变化背景

Precipitation changes at 2.0°C (3.6°F)

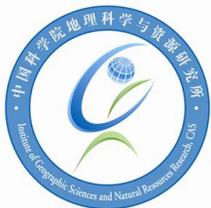


Last 9 Years Warmest on Record

Global Temperature Anomaly (°C compared to the 1951-1980 average)



# 1 绪论



## 1.1 研究背景与意义

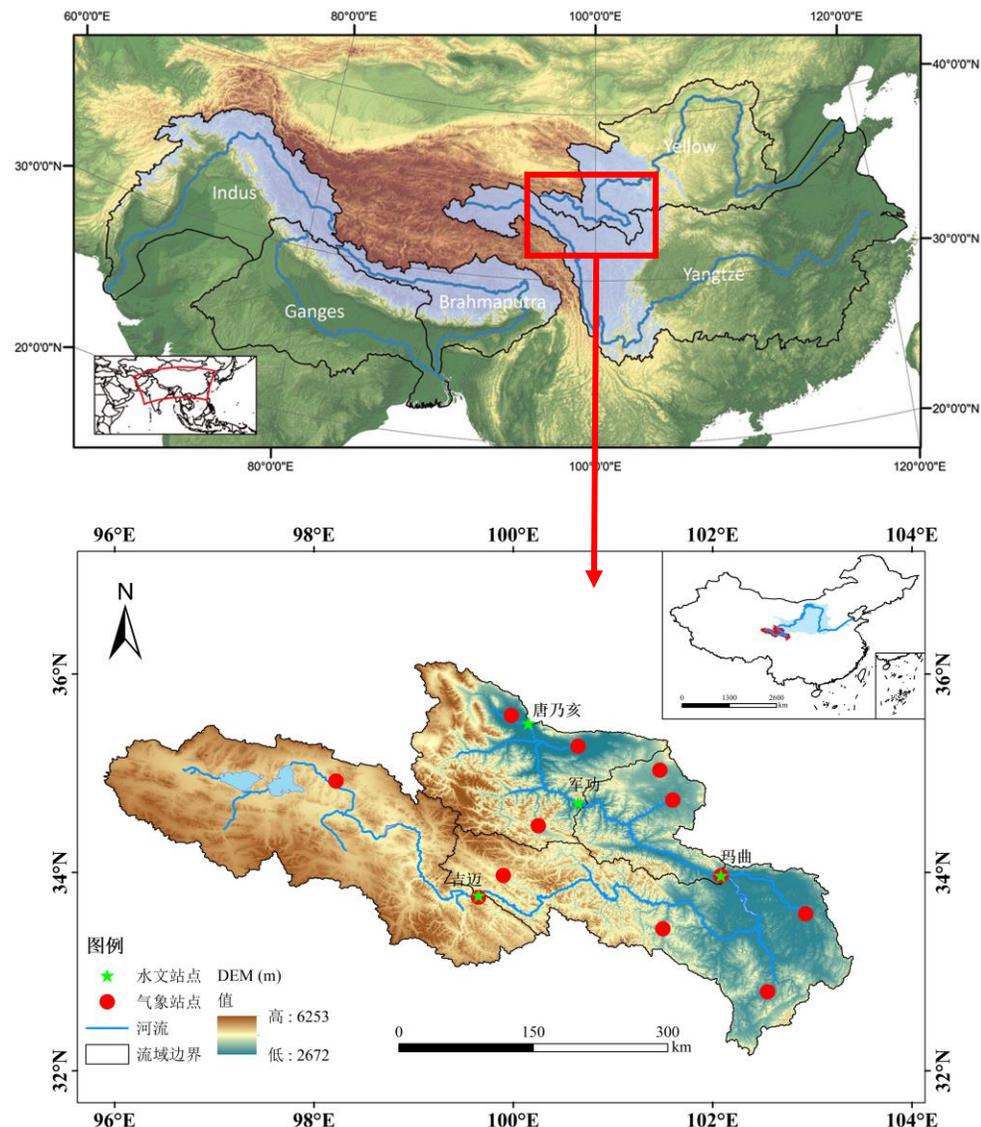
### ◆ “亚洲水塔” 和 “黄河水塔”

#### ● “亚洲水塔” —— 青藏高原

- ◆ 最高的独立地貌单元，气候变化最敏感、最脆弱的地区之一
- ◆ 全球变化的“**驱动力**”和“**放大器**”

#### ● “黄河水塔” —— 黄河源区

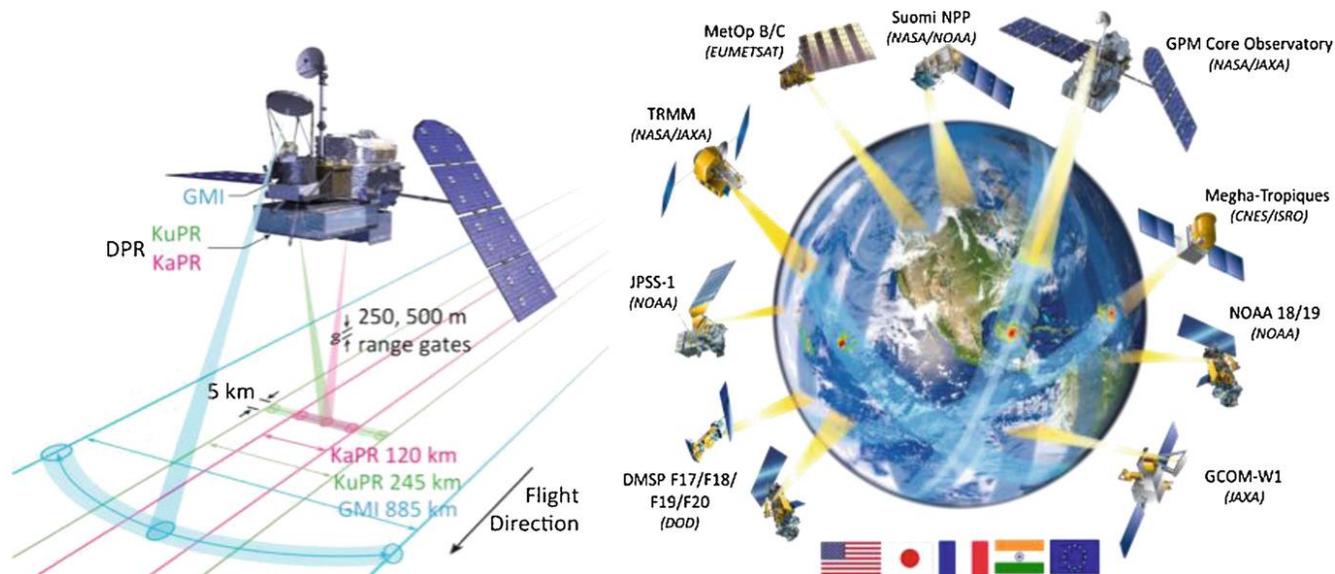
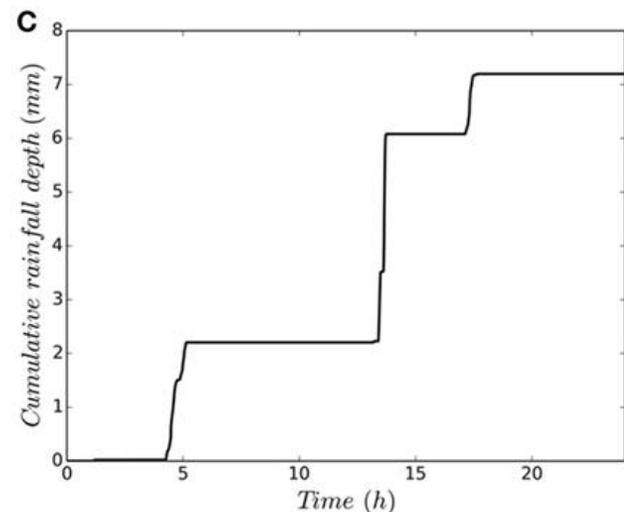
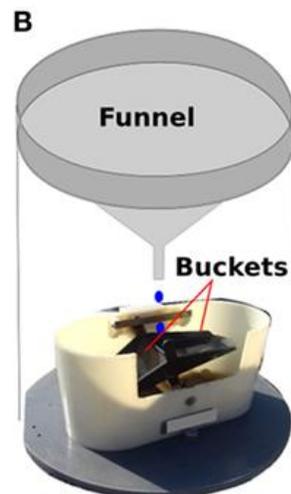
- ◆ 受西风和季风两大环流系统的影响，**气候、生态和水文要素**都发生了明显变化
- ◆ **气温**呈持续上升趋势，幅度大于全球和全国平均水平
- ◆ 年**降水量**增加明显，主要表现于春、夏、冬3个季节的降水变化
- ◆ 潜在**蒸散**和地表实际蒸散都呈上升趋势
- ◆ **径流**存在丰枯交替的年代际周期性变化，总体上呈**减少趋势**
- ◆ 季节性**积雪**面积减少，永久**冻土层**的最大厚度呈下降趋势



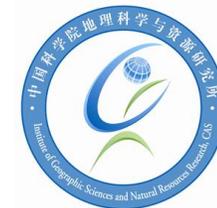
# 1 绪论

## 1.1 研究背景与意义

- ◆ **降水**
- ◆ **降水**是水循环的重要组成部分
- ◆ 准确可靠的降水记录对气候趋势和变率的研究以及水资源管理和天气、气候和**水文过程模拟**至关重要
- **降水观测**
- ◆ **雨量计**可以提供相对准确和可信的单点降水测量，但是具有区域覆盖不完整以及大多数海洋和人口稀少地区的缺陷
- ◆ **卫星**观测通过为全球广大地区提供空间更均匀和时间更完整的覆盖范围来弥补这些不足
- ◆ 已经进行了许多尝试来**合并**不同的信息来源，同时利用不同方法的各自优势，以获得具有规则网格的最佳降水分析



# 1 绪论



## 1.2.1 卫星降水产品研发进展

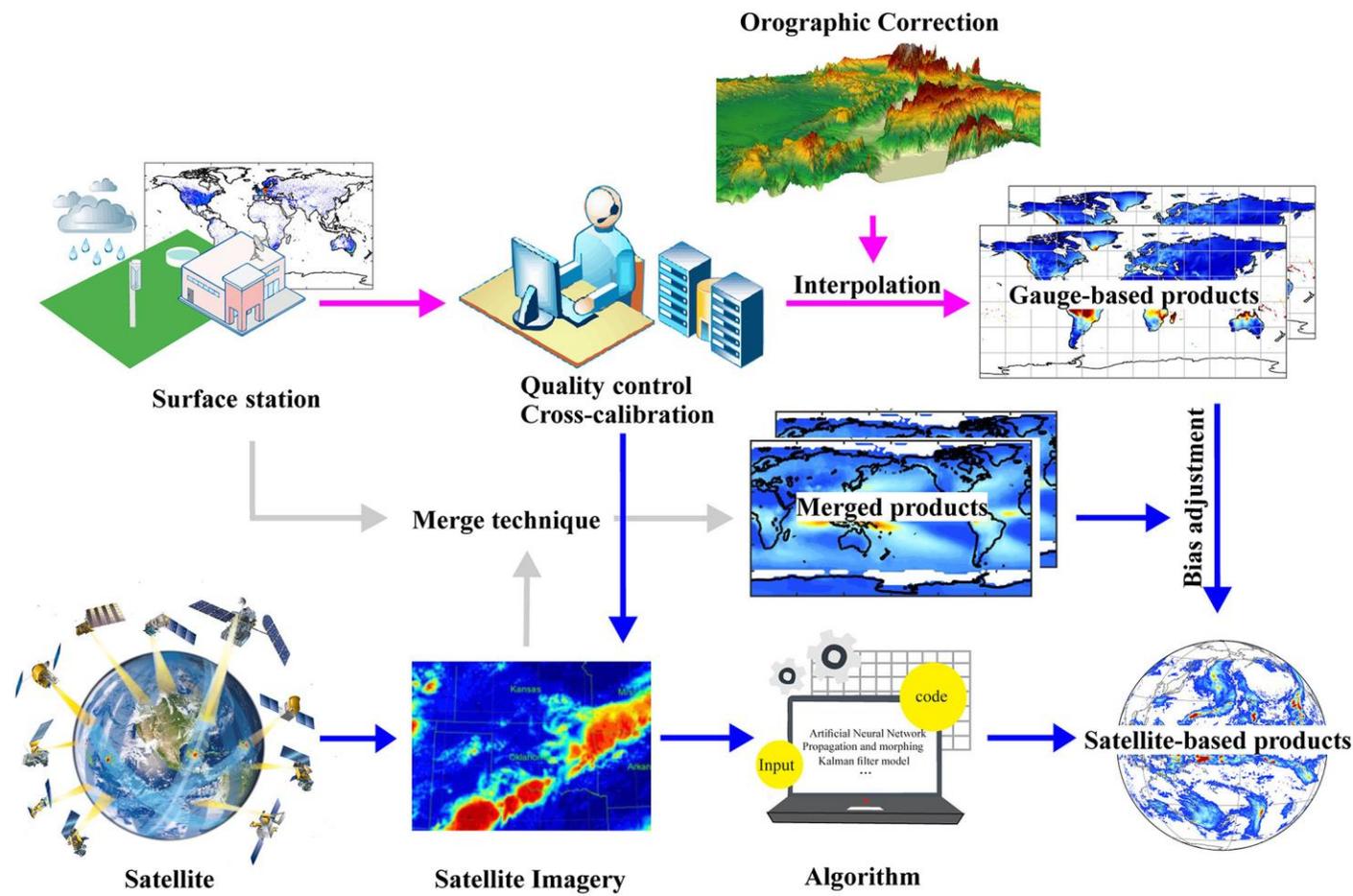
### ◆ 从TRMM → GPM



热带降水测量任务卫星 (TRMM, 1997~2015)

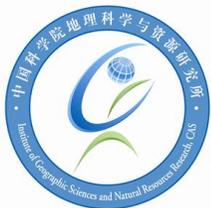


全球降水测量任务卫星 (GPM, 2014~至今)



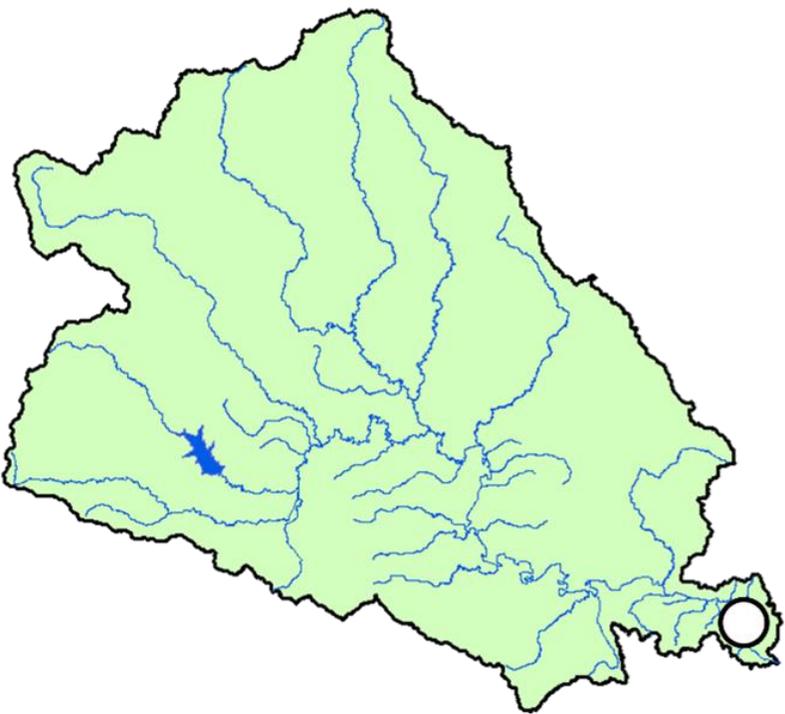


# 1 绪论

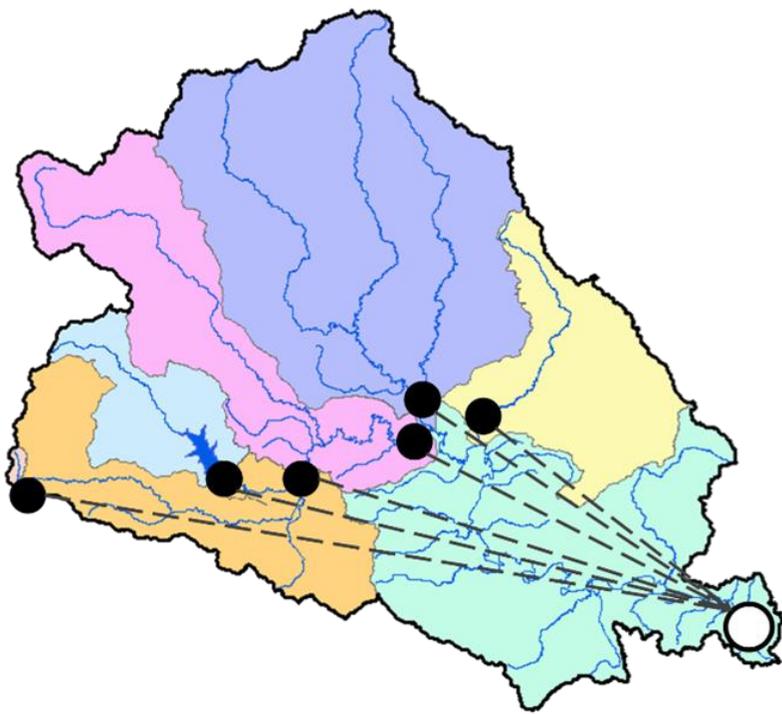


## 1.2.2 水文模型研究进展

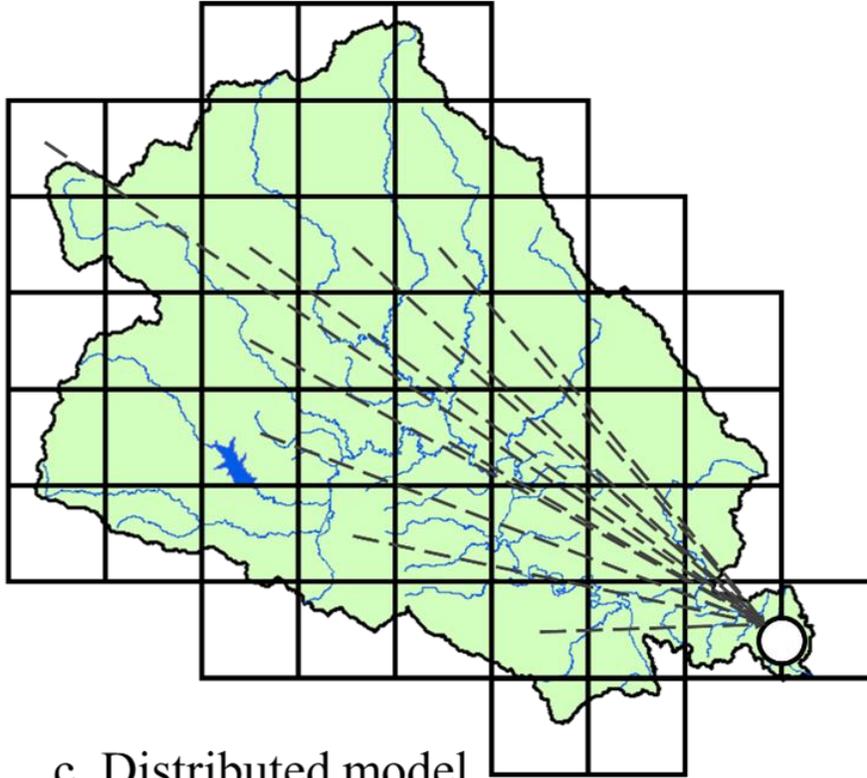
○ Routing outlet      ● Subbasin outlet      -> River routing link



a. Lumped model



b. Semi-distributed model



c. Distributed model

# 1 绪论

## 1.2.2 水文模型研究进展

### ● 集总式模型

- 结构简单、**计算效率高**、不考虑输入变量或参数的空间分布
- 代表模型：HBV、Tank、SAC-SAM、GR4J etc.

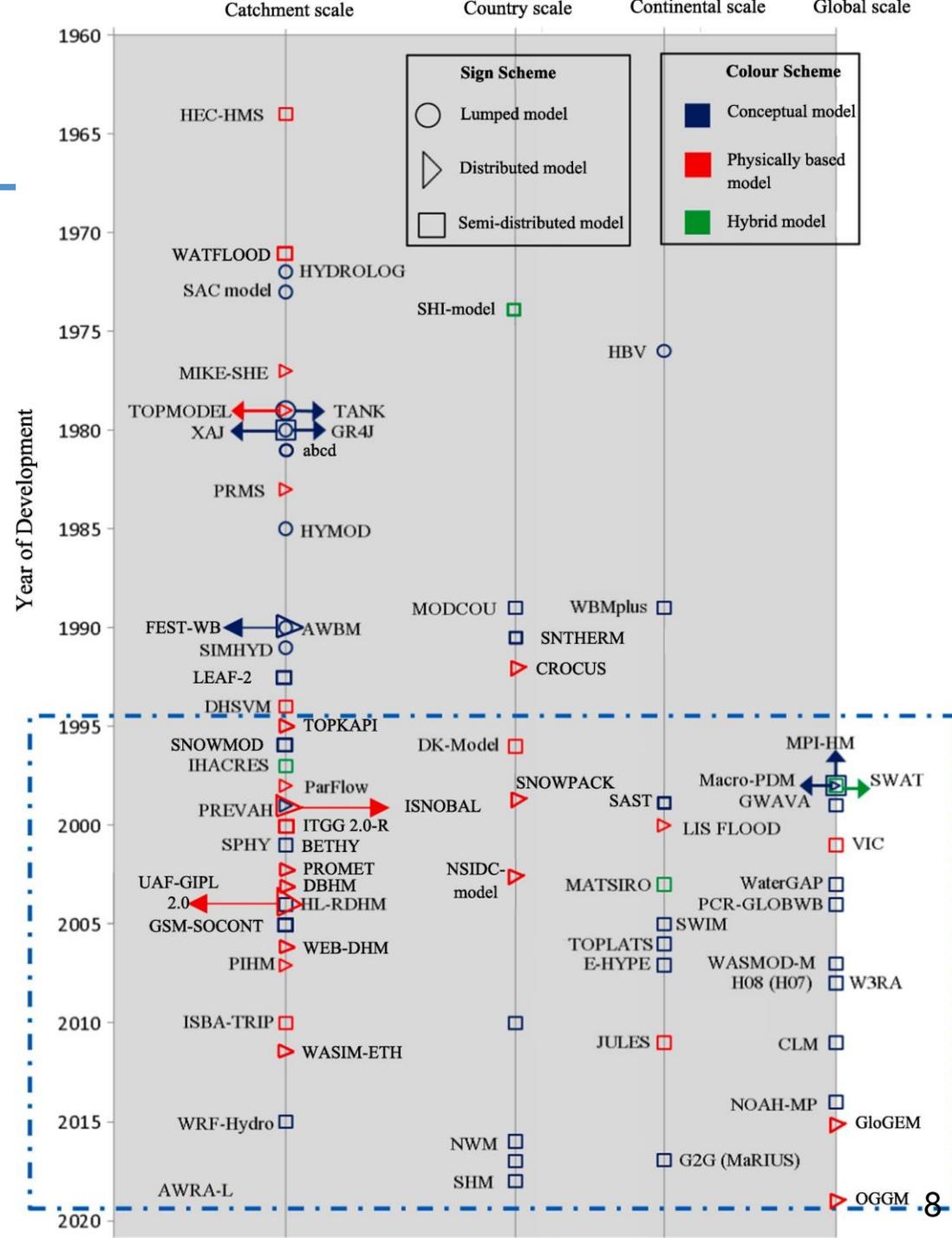
### ● 半分布式模型

- 将**流域划分**为多个具有均匀特性的子流域
- 考虑了流域内水文要素的空间差异
- 代表模型：TOPMODEL、SWAT、TOPKAPI etc.

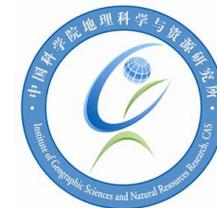
### ● 分布式模型

- 充分考虑空间异质性，通过网格单元对流域水文过程进行细化，每个网格单元有独立的水文响应
- 需要大量的空间分布数据和参数，且计算复杂度较高
- 代表模型：VIC、DHSVM、MIKE-SHE etc.

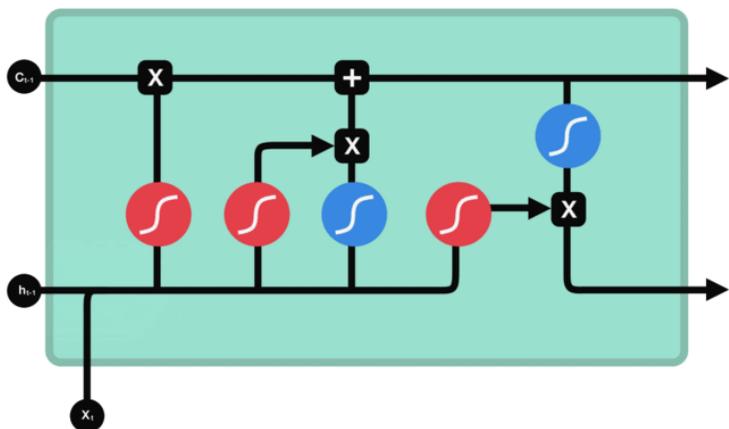
(Paul et al., 2021)



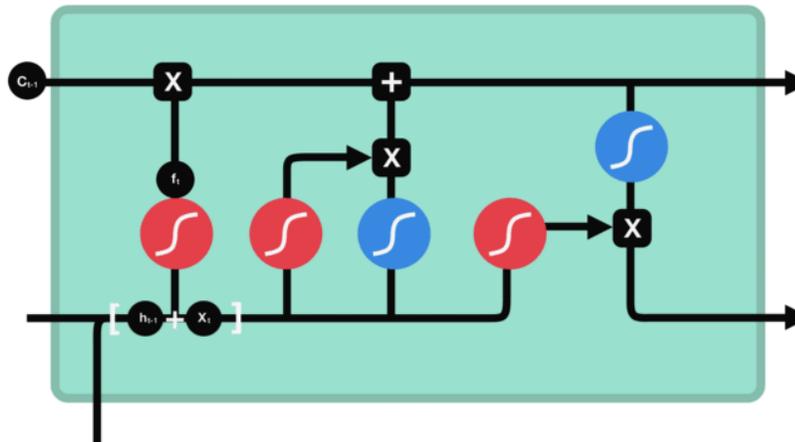
# 1 绪论



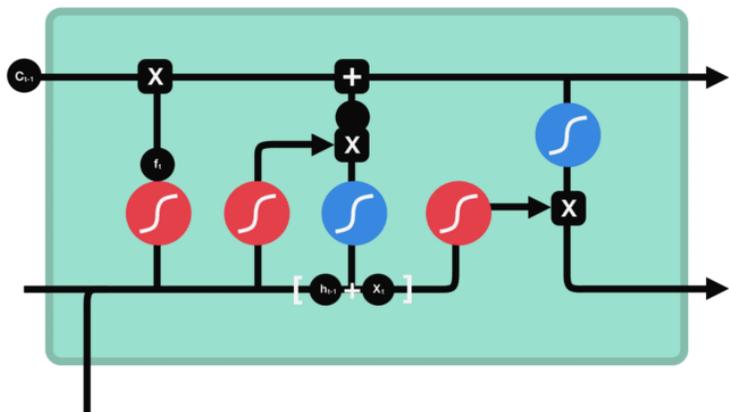
## 1.2.3 LSTM水文模拟



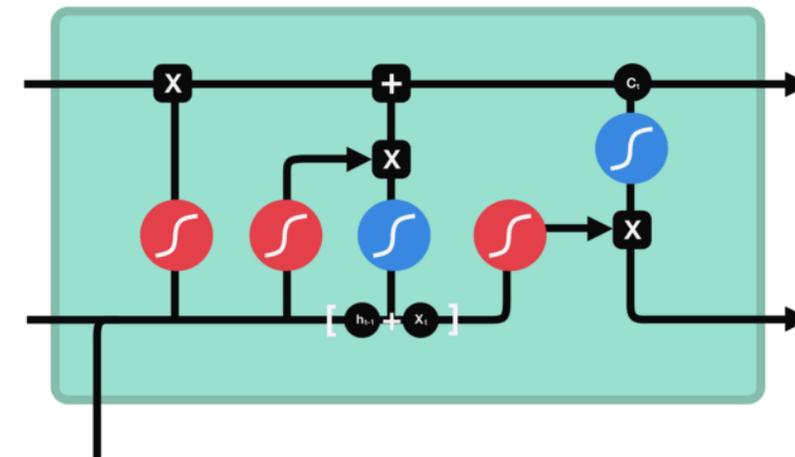
- $c_{t-1}$  previous cell state
- $f_t$  forget gate output



- $c_{t-1}$  previous cell state
- $f_t$  forget gate output
- $i_t$  input gate output
- $c_t$  candidate



- $c_{t-1}$  previous cell state
- $f_t$  forget gate output
- $i_t$  input gate output
- $c_t$  candidate
- $c_t$  new cell state

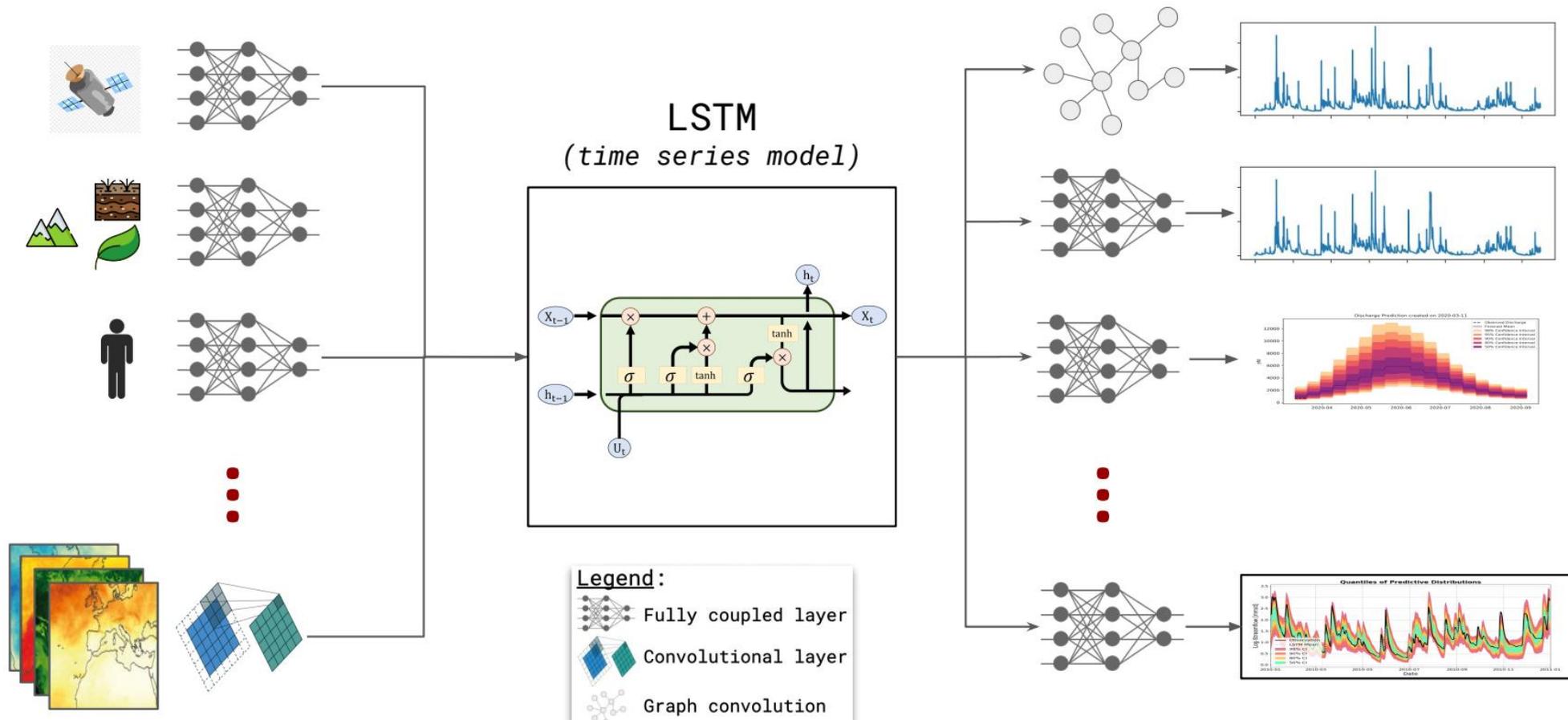


- $c_{t-1}$  previous cell state
- $f_t$  forget gate output
- $i_t$  input gate output
- $c_t$  candidate
- $c_t$  new cell state
- $o_t$  output gate output
- $h_t$  hidden state

$$c_t = f_t * c_{t-1} + i_t * c_t$$

# 1 绪论

## 1.2.3 LSTM水文模拟

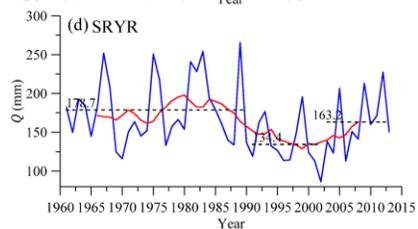


# 1 绪论

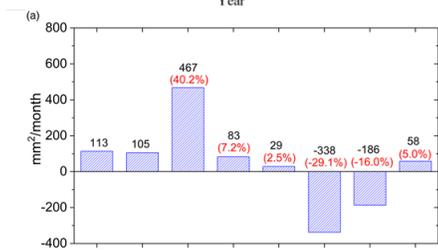
## 1.2.3 黄河源区水文模拟研究进展

黄河源区

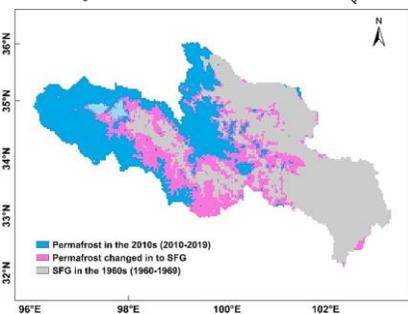
径流变化



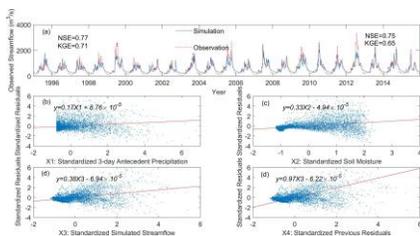
降水



冻土



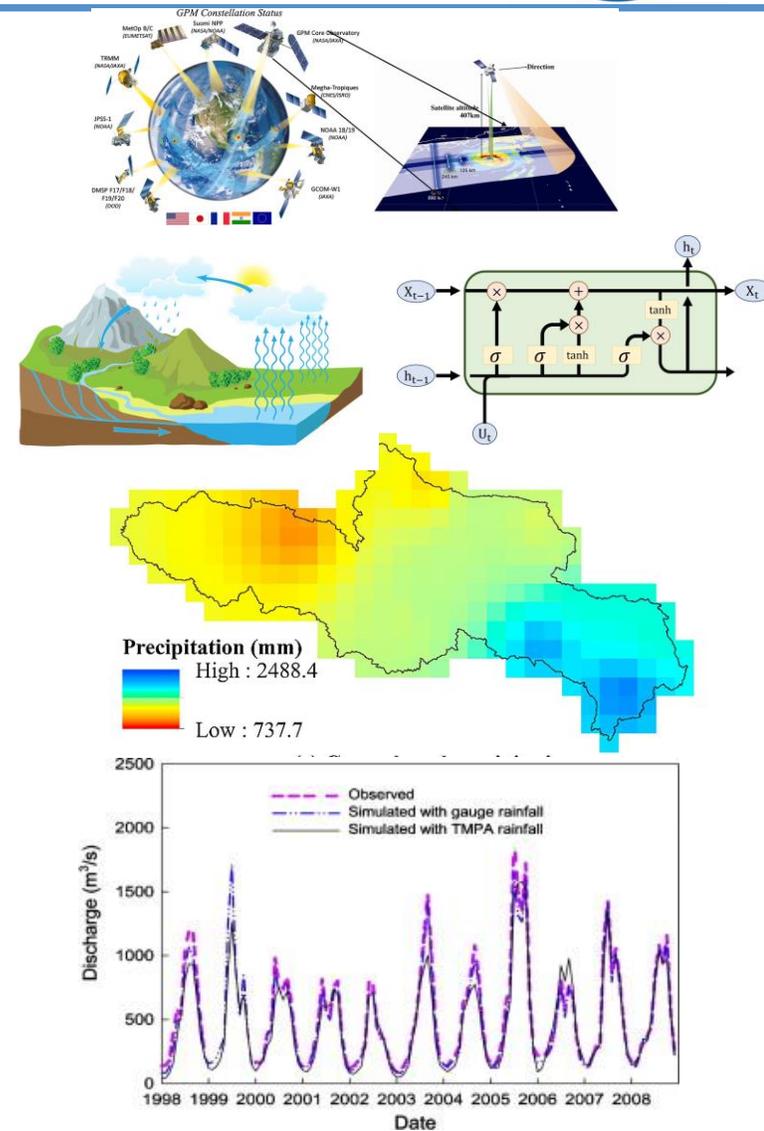
水文模拟



缺少分析降水分布对径流模拟的影响

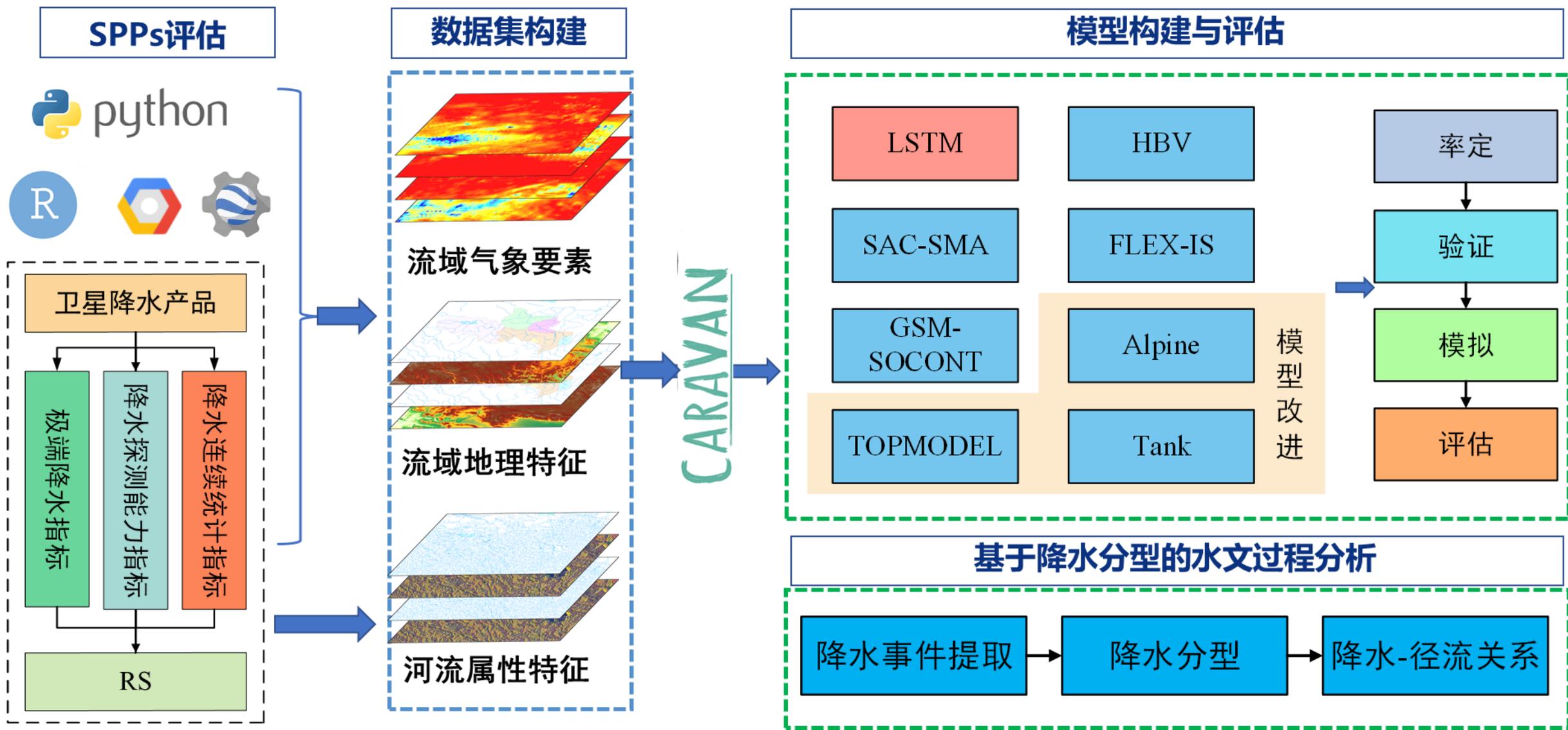
缺少最新卫星降水产品的使用

缺少传统水文模型与深度学习的模型进行水文模拟的对比



# 1 绪论

## 1.3 研究方案



- 1 绪论
- 2 研究区概况与数据
- 3 卫星降水产品综合定量评估
- 4 基于深度学习的降水-径流模拟
- 5 基于水文模型的降水-径流模拟
- 6 基于降水分型的径流响应机制
- 7 结论与展望
- 8 盲审意见及修改情况

# 2 研究区概况与数据来源

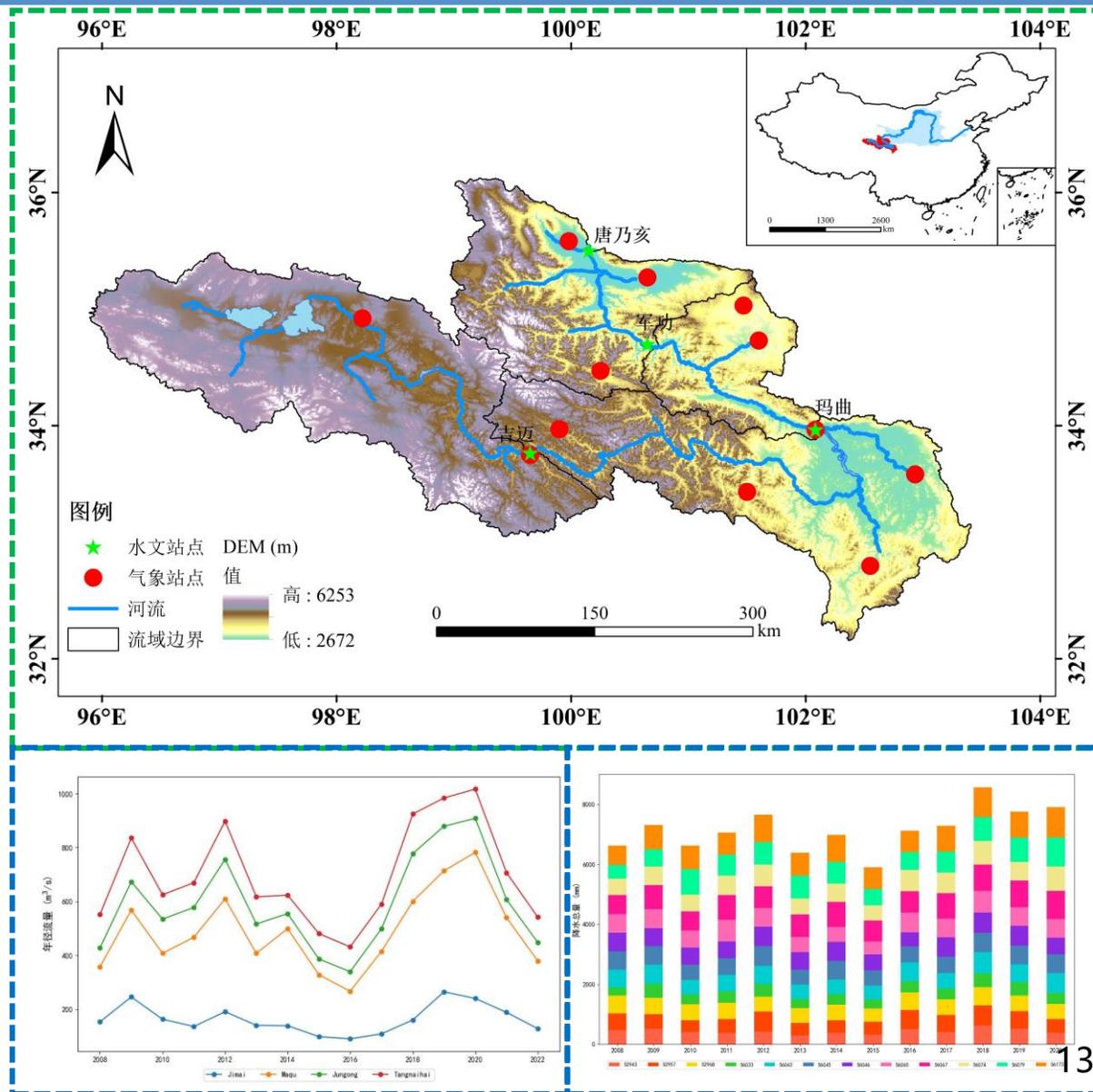
## 2.1 研究区概况

- ◆ 位于青藏高原东北部
- ◆ 地势西高东低
- ◆ 平均海拔约4000 m
- ◆ 流域面积约为 $1.22 \times 10^5 \text{km}^2$ ，约占黄河流域总面积15%

## 2.2 研究数据

### ◆ 地面站点观测数据

- 气象数据：2000-2020年，玛多、久治以及红原等12个气象站
- 径流数据：2008-2022年，吉迈、玛曲、军功和唐乃亥4个水文站



# 2 研究区概况与数据来源

## 2.2 研究数据

### ◆ 卫星降水产品

使用CHIRPS、CMORPH、GSMaP、IMERG、MSWEP、PERSIANN以及TMPA系列15种卫星降水产品，2000-2020年日降水序列数据

### ◆ 其他数据

HydroATLAS(流域属性)和ERA5-Land(气象驱动)，2008-2022年数据用于构建Caravan数据集

表2-1 卫星降水产品信息

卫星降水产品	缩写	分辨率	时间范围
CHIRPS	CHI	0.05° /1 d	1981.01~至今
CMORPH-BLD	CMD	0.25° /1 d	1998.01~至今
CMORPH-CRT	CMT	0.25° /1 d	1998.01~至今
GSMaP-Gauge	GaG	0.1° /1 d	2000.03~至今
GSMaP-MVK	GaM	0.1° /1 d	2014.03~至今
GSMaP-NRT	GaN	0.1° /1 d	2000.03~至今
IMERG-Early	IME	0.1° /1 d	2000.06~至今
IMERG-Final	IMF	0.1° /1 d	2000.06~至今
IMERG-Late	IML	0.1° /1 d	2000.06~至今
MSWEP	MSP	0.1° /1 d	1979.01~至今
PERSIANN-CCS	PCS	0.04° /1 d	2003.01~至今
PERSIANN-CDR	PDR	0.25° /1 h	1983.01~至今
PDIR-Now	PDI	0.04° /1 d	2000.03~至今
TMPA-3B42	TM	0.25° /1 d	1998.01-2019.12
TMPA-3B42RT	TMT	0.25° /1 d	2000.03-2019.12

- 1 绪论
- 2 研究区概况与数据
- 3 卫星降水产品综合定量评估**
- 4 基于深度学习的降水-径流模拟
- 5 基于水文模型的降水-径流模拟
- 6 基于降水分型的径流响应机制
- 7 结论与展望
- 8 盲审意见及修改情况

# 3 卫星降水产品的综合定量评估

## 3.1 研究方法

Step1

### 降水连续评估指标

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$$

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{S_i - G_i}{G_i}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2}$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(1 - CC)^2 + RE^2 + (1 - \frac{SD_S}{SD_G})^2}$$

### 降水检测评估指标

$$POD = \frac{H}{H + M}$$

$$FAR = \frac{F}{H + F}$$

$$CSI = \frac{H}{H + M + F}$$

### 极端降水评估指标

- ▶ 降水总量 (PRCPTOT)
- ▶ 普通日降水强度 (SDII)
- ▶ 最大5日降水量 (RX5)
- ▶ 极端降水量 (R95)
- ▶ 极端强降水量 (R99)



$$I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N \omega_{ij} Z_i^G Z_j^S}{(N - 1) \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N \omega_{ij}}$$

Step2

$$RS_i = \begin{cases} \frac{m_i - m_{min}}{m_{max} - m_{min}}, & \text{正指数} \\ 1 - \frac{m_i - m_{min}}{m_{max} - m_{min}}, & \text{负指数} \end{cases}$$

→ CC、POD、CSI、NSE、KGE、Bivariate Moran's I

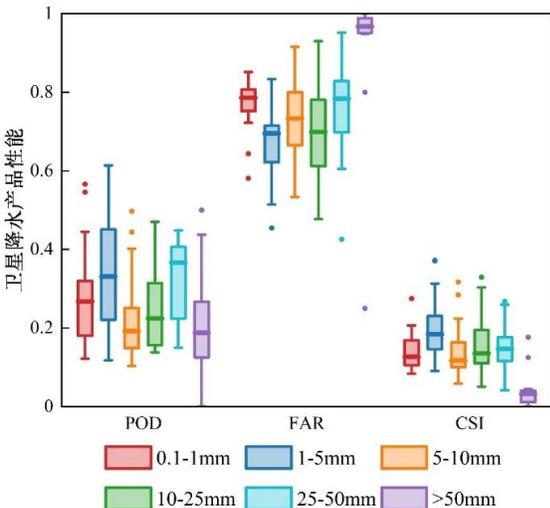
→ RMSE、FAR、RE的绝对值

# 3 卫星降水产品的综合定量评估

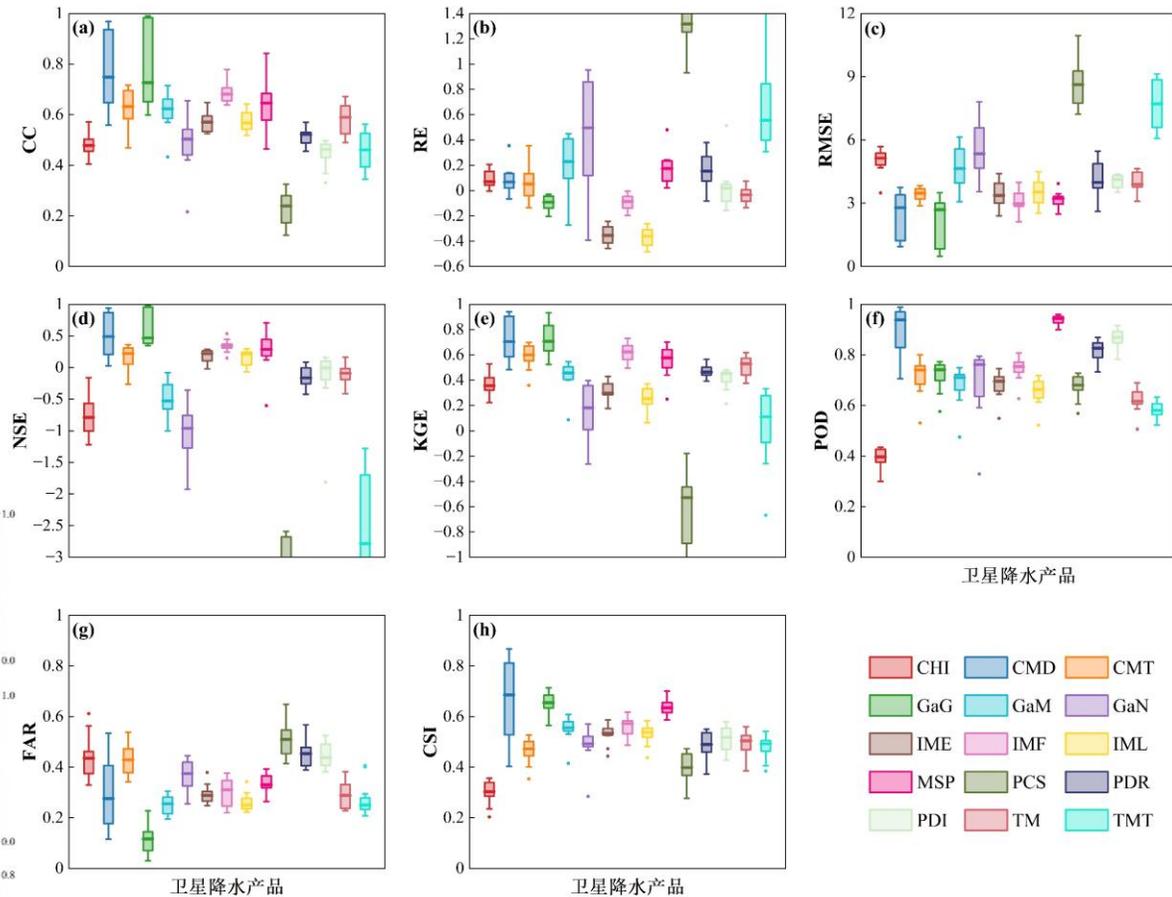
## 3.2 卫星降水产品的综合定量评估

### 统计指标评估

- **CMD**、**GaG**和**IMF**在所有连续统计指标上都明显优于其他SPPs
- **CMD**、**GaG**和**MSP**具有较优的降水探测能力
- SPPs**雨季**降水探测能力较强，而**旱季**降水探测能力较弱
- SPPs在不同降水强度表现一般



月	POD														
	CHI	CMD	CMT	GaG	GaM	GaN	IME	IMF	IML	MSP	PCS	PDR	PDI	TM	TMT
1	0.66	0.76	0.16	0.68	0.05	0.17	0.08	0.16	0.07	0.85	0.94	0.71	0.50	0.25	0.14
2	0.71	0.79	0.31	0.20	0.14	0.23	0.16	0.29	0.15	0.83	0.94	0.75	0.70	0.29	0.04
3	0.73	0.85	0.48	0.41	0.36	0.41	0.36	0.53	0.35	0.86	0.94	0.88	0.85	0.44	0.18
4	0.62	0.90	0.72	0.67	0.65	0.66	0.63	0.77	0.60	0.90	0.88	0.95	0.92	0.58	0.44
5	0.52	0.93	0.82	0.83	0.78	0.74	0.76	0.82	0.72	0.95	0.75	0.91	0.96	0.71	0.69
6	0.28	0.93	0.81	0.86	0.81	0.84	0.76	0.88	0.73	0.97	0.58	0.81	0.94	0.72	0.73
7	0.34	0.93	0.82	0.88	0.84	0.86	0.78	0.85	0.77	0.98	0.54	0.76	0.84	0.76	0.75
8	0.36	0.93	0.81	0.85	0.83	0.87	0.78	0.83	0.77	0.98	0.56	0.76	0.82	0.73	0.72
9	0.29	0.92	0.79	0.85	0.82	0.81	0.79	0.84	0.77	0.97	0.55	0.80	0.91	0.66	0.68
10	0.23	0.93	0.81	0.75	0.71	0.67	0.83	0.79	0.79	0.92	0.66	0.85	0.92	0.59	0.69
11	0.52	0.82	0.44	0.40	0.38	0.36	0.72	0.45	0.63	0.86	0.85	0.87	0.84	0.40	0.23
12	0.51	0.75	0.24	0.08	0.08	0.14	0.26	0.13	0.18	0.84	0.87	0.61	0.53	0.23	0.17
月	FAR														
	CHI	CMD	CMT	GaG	GaM	GaN	IME	IMF	IML	MSP	PCS	PDR	PDI	TM	TMT
1	0.66	0.48	0.78	0.13	0.62	0.78	0.55	0.67	0.53	0.49	0.74	0.69	0.72	0.61	0.59
2	0.68	0.48	0.78	0.13	0.62	0.78	0.55	0.67	0.53	0.49	0.74	0.69	0.72	0.61	0.59
3	0.57	0.42	0.66	0.14	0.46	0.64	0.42	0.52	0.40	0.38	0.64	0.63	0.61	0.47	0.43
4	0.45	0.36	0.52	0.14	0.32	0.47	0.33	0.38	0.30	0.35	0.52	0.55	0.55	0.37	0.38
5	0.26	0.23	0.31	0.11	0.21	0.27	0.21	0.22	0.18	0.26	0.31	0.36	0.36	0.24	0.25
6	0.13	0.17	0.20	0.09	0.15	0.18	0.17	0.20	0.15	0.24	0.20	0.24	0.26	0.16	0.17
7	0.11	0.19	0.19	0.10	0.15	0.17	0.18	0.19	0.16	0.28	0.16	0.23	0.22	0.16	0.17
8	0.13	0.21	0.22	0.12	0.18	0.19	0.19	0.20	0.17	0.31	0.18	0.25	0.25	0.19	0.20
9	0.10	0.18	0.21	0.10	0.16	0.18	0.16	0.18	0.16	0.24	0.15	0.21	0.23	0.15	0.18
10	0.31	0.38	0.49	0.16	0.31	0.41	0.40	0.34	0.37	0.35	0.39	0.44	0.45	0.35	0.40
11	0.57	0.59	0.82	0.23	0.64	0.82	0.68	0.61	0.64	0.52	0.73	0.74	0.75	0.62	0.65
12	0.72	0.63	0.90	0.30	0.88	0.92	0.74	0.81	0.74	0.65	0.85	0.78	0.80	0.74	0.71
月	CSI														
	CHI	CMD	CMT	GaG	GaM	GaN	IME	IMF	IML	MSP	PCS	PDR	PDI	TM	TMT
1	0.29	0.45	0.08	0.08	0.05	0.10	0.07	0.11	0.06	0.42	0.21	0.28	0.22	0.18	0.11
2	0.29	0.46	0.15	0.20	0.11	0.13	0.13	0.18	0.13	0.46	0.25	0.28	0.25	0.20	0.04
3	0.37	0.52	0.25	0.35	0.28	0.24	0.29	0.34	0.28	0.57	0.35	0.35	0.36	0.31	0.16
4	0.41	0.60	0.40	0.61	0.50	0.42	0.48	0.52	0.48	0.61	0.45	0.44	0.44	0.44	0.35
5	0.29	0.73	0.60	0.76	0.65	0.58	0.63	0.67	0.62	0.72	0.56	0.60	0.63	0.58	0.56
6	0.27	0.78	0.68	0.79	0.70	0.71	0.65	0.72	0.65	0.75	0.50	0.65	0.70	0.63	0.63
7	0.33	0.77	0.69	0.79	0.72	0.73	0.67	0.71	0.67	0.71	0.49	0.62	0.68	0.66	0.65
8	0.35	0.74	0.66	0.76	0.71	0.73	0.66	0.68	0.66	0.68	0.50	0.61	0.64	0.62	0.61
9	0.28	0.76	0.66	0.78	0.71	0.69	0.68	0.71	0.67	0.74	0.50	0.66	0.71	0.59	0.60
10	0.21	0.59	0.45	0.65	0.54	0.46	0.54	0.56	0.54	0.62	0.47	0.51	0.53	0.45	0.47
11	0.30	0.37	0.15	0.36	0.23	0.14	0.29	0.27	0.30	0.45	0.26	0.25	0.24	0.24	0.17
12	0.22	0.33	0.08	0.08	0.05	0.05	0.15	0.09	0.12	0.33	0.14	0.19	0.17	0.14	0.12



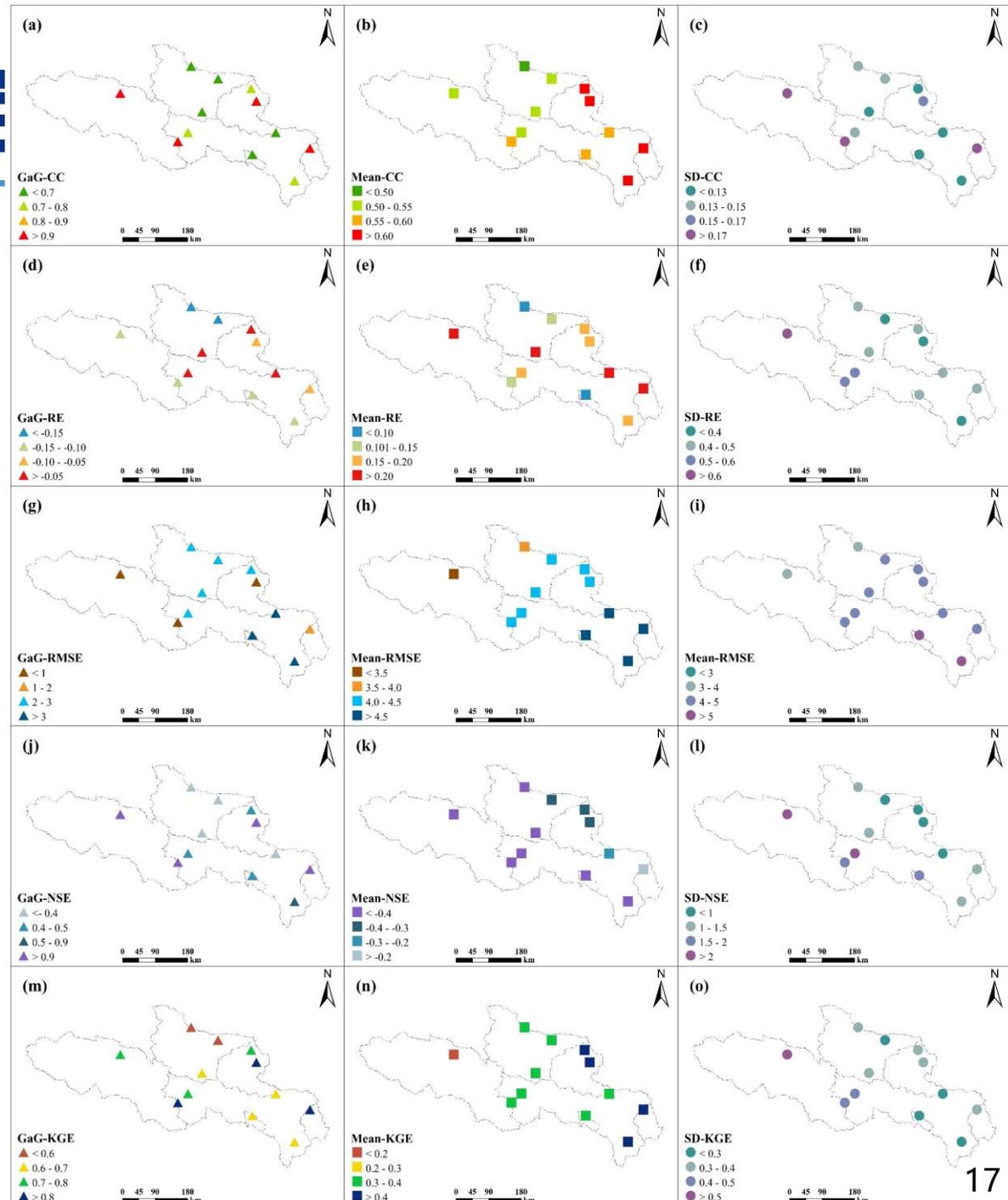
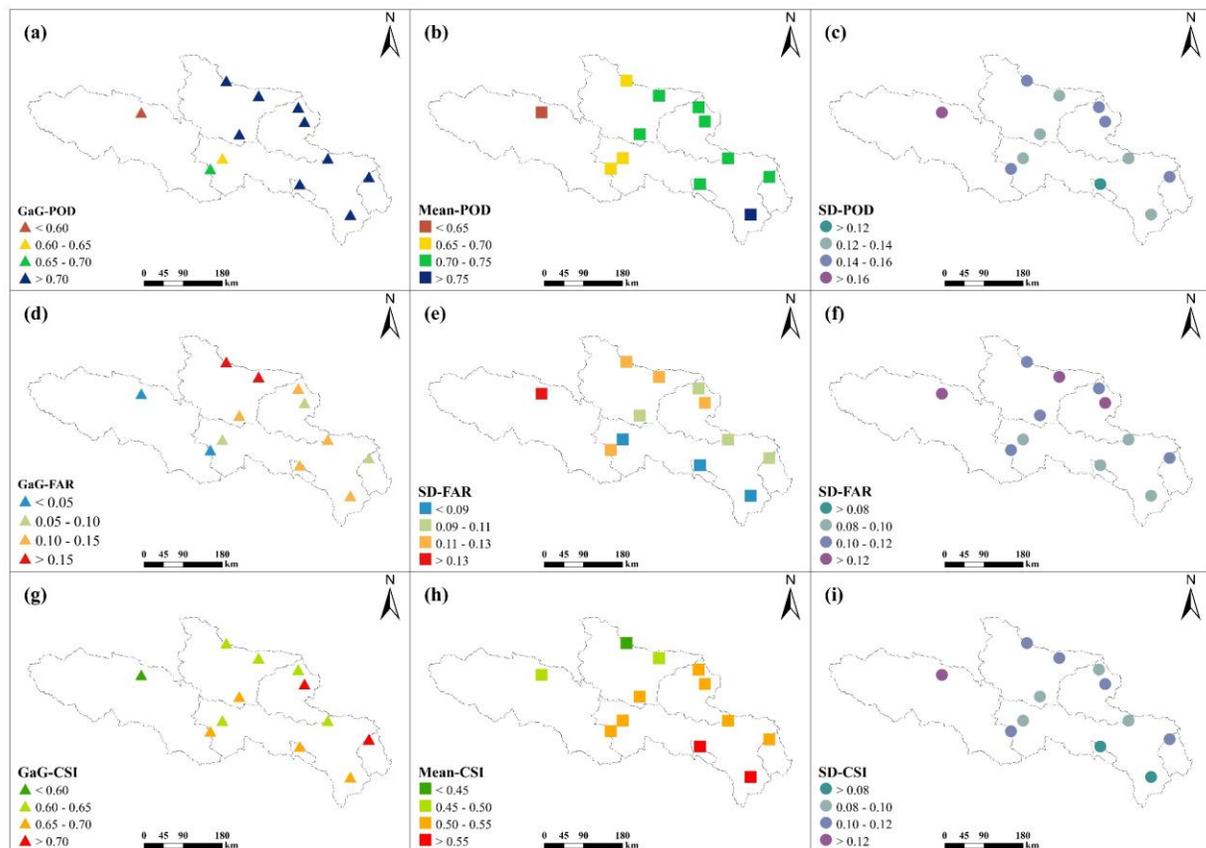
# 3 卫星降水产品的综合定

## 3.2 卫星降水产品的综合定量评估

### 统计指标表现空间分布

在黄河源区，大多数SPPs在站点分布稀疏的西部河

源区性能稍弱，在东部站点相较密集的地区性能较强



# 3 卫星降水产品的综合定量评估

## 3.2 卫星降水产品的综合定量评估

### ◆ 极端降水指标与综合定量评估

- SPPs与在空间上有较为符合地面观测极端降水的分布模式
- **IMF**的极端降水指标与地面观测的空间相关性最强
- 基于降水连续统计、降水探测和极端降水指数的双变量空间自相关综合评估显示**IMF**的表现最好，RSA值达0.85

表3-1 极端降水指标BMI

SPPs	PRCPTOT	SDII	RX5	R95	R99
GaN	<b>0.45</b>	0.37	0.42	0.47	0.53
IME	0.44	0.52	<b>0.51</b>	0.55	0.57
IMF	0.43	0.41	0.40	<b>0.66</b>	<b>0.63</b>
IML	0.44	<b>0.52</b>	0.50	0.53	0.55

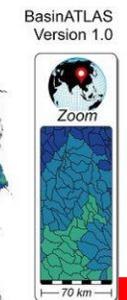
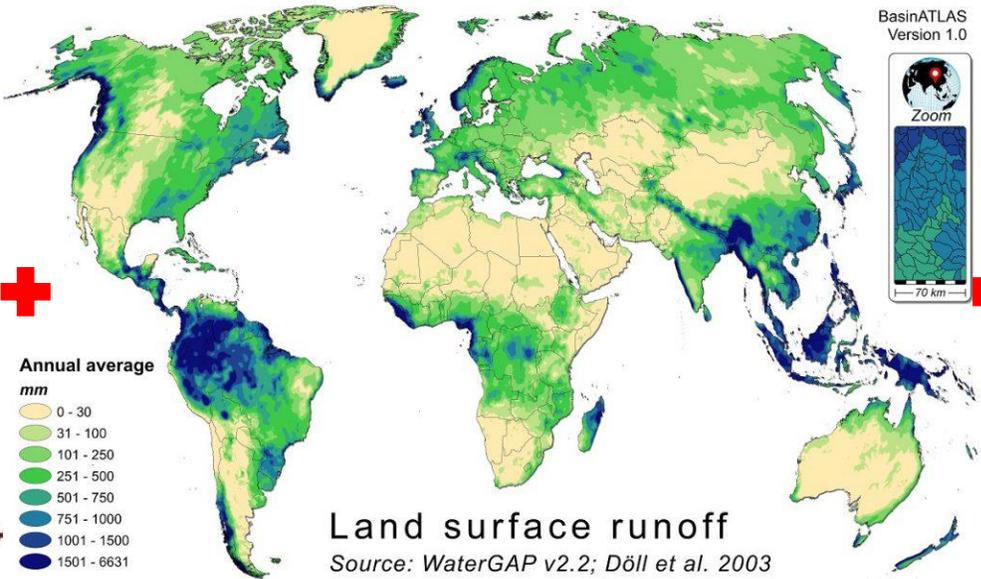
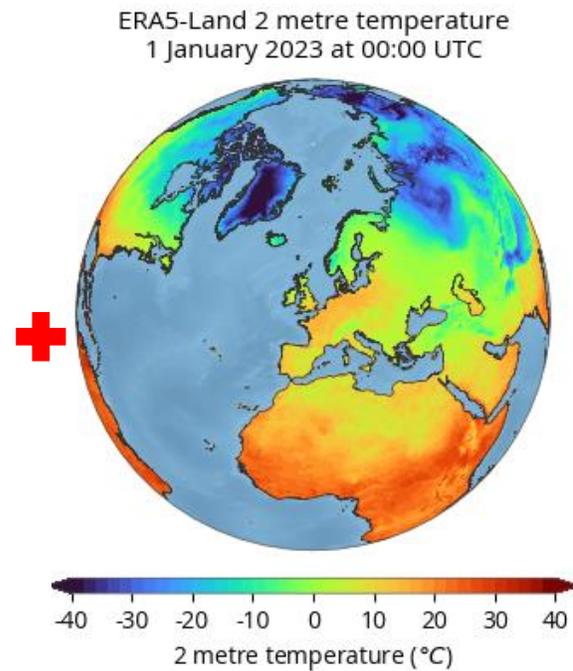
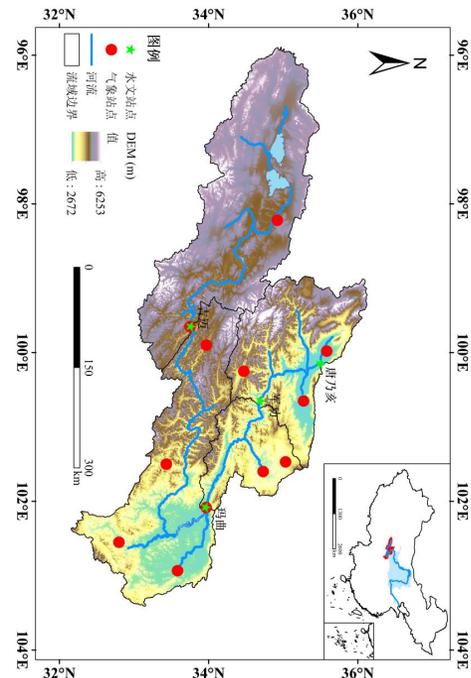
表3-2 综合定量评估结果

SPPs	RSC	RSD	RSE	RSA
CHI	0.69	0.07	0.75	0.57
CMD	0.98	0.81	0.71	0.83
CMT	0.87	0.42	0.74	0.72
GaG	<b>0.99</b>	<b>0.86</b>	0.49	0.77
GaM	0.75	0.64	0.84	0.76
GaN	0.58	0.49	0.86	0.67
IME	0.76	0.58	0.96	0.80
IMF	0.90	0.64	<b>0.93</b>	<b>0.85</b>
IML	0.75	0.59	0.95	0.79
MSP	0.86	0.80	0.16	0.58
PCS	0.00	0.26	0.35	0.19
PDR	0.76	0.48	0.75	0.69
PDI	0.75	0.54	0.21	0.49
TM	0.81	0.51	0.64	0.68
TMT	0.37	0.49	0.61	0.49

# 3 卫星降水产品的综合定量评估

## 3.3 Caravan-SRYR水文数据集构建

Caravan是一个全球性的水文大样本社区数据集，使用全球可用的ERA5-Land和HydroATLAS数据分别为Caravan数据集提供气象驱动数据和流域属性数据支持。本研究将Caravan数据集扩展到黄河源区，根据黄河源区2008-2022年径流数据，构建了Caravan-SRYR数据集，为水文建模的提供数据支持。

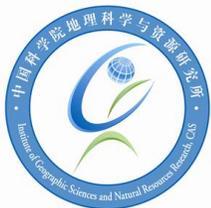


Google Earth Engine



- 1 绪论
- 2 研究区概况与数据
- 3 卫星降水产品综合定量评估
- 4 基于深度学习的降水-径流模拟**
- 5 基于水文模型的降水-径流模拟**
- 6 基于降水分型的径流响应机制**
- 7 结论与展望
- 8 盲审意见及修改情况

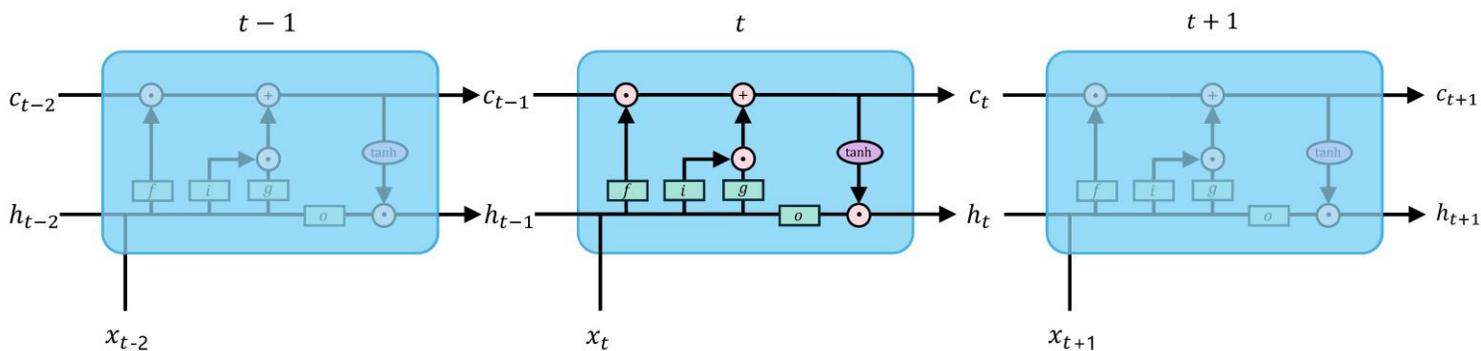
# 4 基于深度学习的黄河源区降水-径流模拟



## 4.1 研究方法

### ◆ CudaLSTM和EA-LSTM

#### CudaLSTM



$$i_t = \sigma(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i)$$

$$f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f)$$

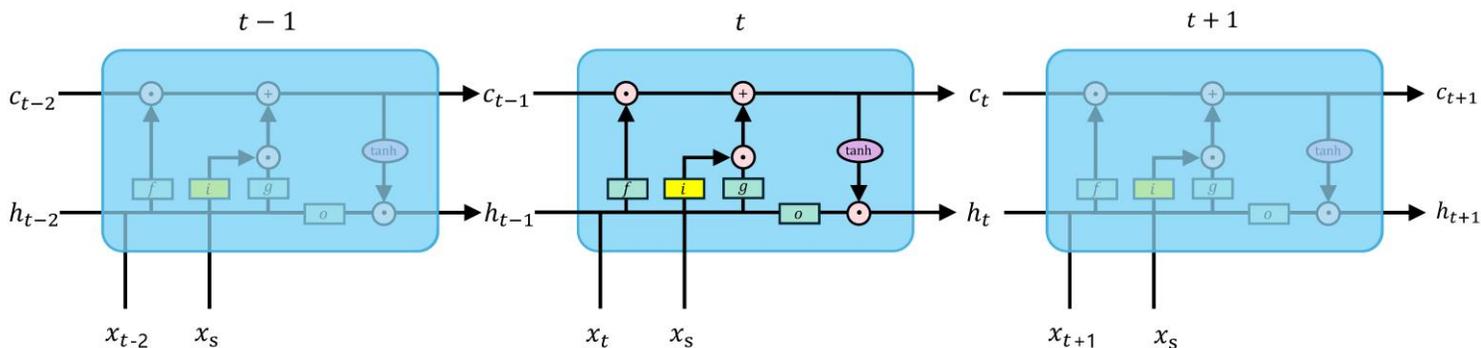
$$g_t = \tanh(W_g x_t + U_g h_{t-1} + b_g)$$

$$o_t = \sigma(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o)$$

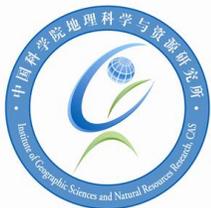
$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot g_t$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t)$$

#### EA-LSTM



$$i_t = \sigma(W_i x_s + b_i)$$



# 4 基于深度学习的黄河源区降水-径流模拟

## 4.1 研究方法

### ◆ 超参数与训练数据

根据Caravan-SRYR黄河源区四个水文站的数据，分别使用**CudaLSTM**和**EA-LSTM**模型进行训练与验证，并通过网络搜索法优化了模型的超参数。

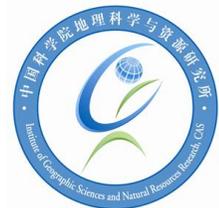
表4-1 LSTM模型在黄河源区的超参数

序号	LSTM 超参数	范围	值
1	遗忘门的初始值	-3, -1, 0, 1, 3	3
2	丢弃率	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6	0.4
3	学习率	Lr0	1e-3, 1e-2, 5e-2
		Lr30	5e-4, 1e-3, 5e-3
		Lr40	1e-4, 1e-3
4	批处理规模	32, 64, 128, 256	256
5	隐藏层数	20, 30, 40, 50	20
6	训练轮数	20, 30, 40, 50	50
7	序列长度	146, 182, 365, 730, 1095	365

表4-2 用于训练LSTM的模型的数据

数据类型	变量	描述
气象驱动数据	precipitation_IMF	日降水量 (mm)
	potential_evaporation	日潜在蒸散发 (mm)
	temperature_2m_mean	日平均温度 (°C)
	temperature_2m_max	日最高温度 (°C)
	temperature_2m_min	日最低温度 (°C)
流域属性数据	area	流域面积 (km <sup>2</sup> )
	elev_mean	平均海拔 (m)
	p_mean	日平均降水量 (mm)
	pet_mean	日平均潜在蒸发量 (mm)
	aridity	干旱指数, 即平均潜在蒸发量与平均降水量之比
	frac_snow	作为降雪的降水比例
	moisture_index	年平均湿度指数
	seasonality	湿度指数的季节性变化
	high_prec_freq	高降水天数频率, 其降水量≥日均降水量的 5 倍
	low_prec_freq	低降水事件的天数频率, 其降水量<1 mm/d
high_prec_dur	高降水事件的平均持续时间 (d)	
low_prec_dur	低降水事件的平均持续时间 (d)	

# 4 基于深度学习的黄河源区降水-径流模拟



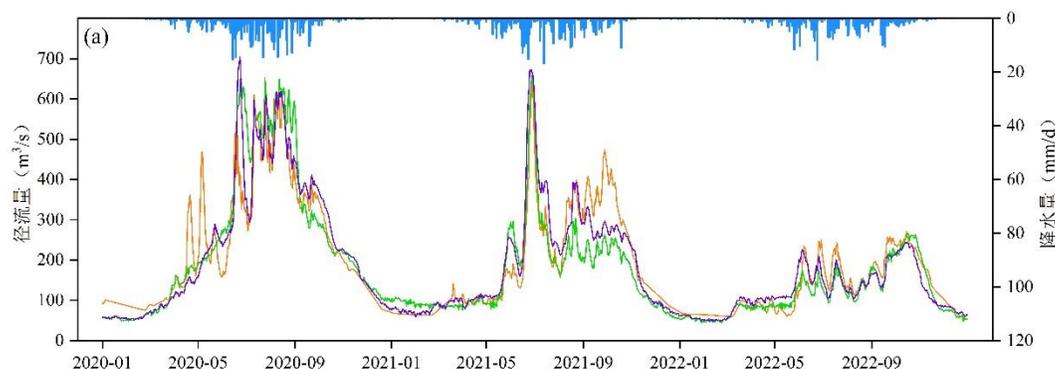
## 4.2 LSTM模型在黄河源区的降水-径流模拟

EA-LSTM能够更好地利用流域的静态属性特征，更准确地捕捉到降水对径流的响应关系。在唐乃亥水文站EA-LSTM的NSE值达到了0.92，而CudaLSTM仅为0.79

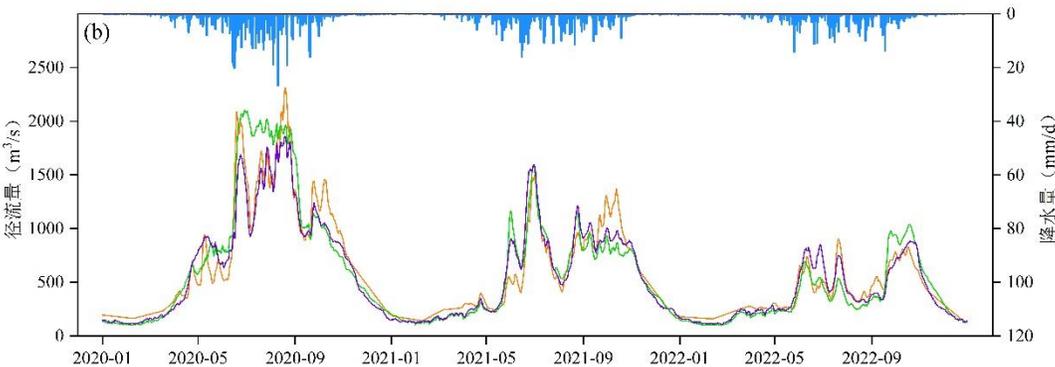
表4-3 LSTM训练的模型在黄河源区测试期的表现

水文站点	CudaLSTM	EA-LSTM
吉迈	0.77	0.85
玛曲	<b>0.84</b>	0.91
军功	0.82	0.91
唐乃亥	0.79	<b>0.92</b>

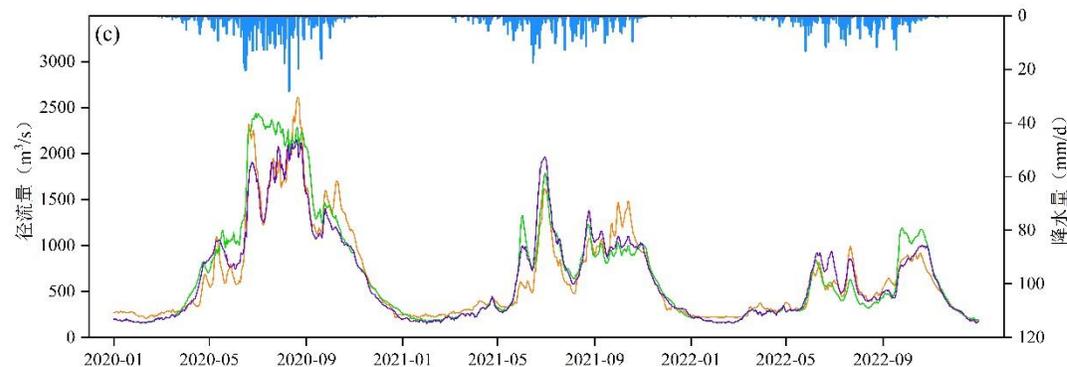
吉迈



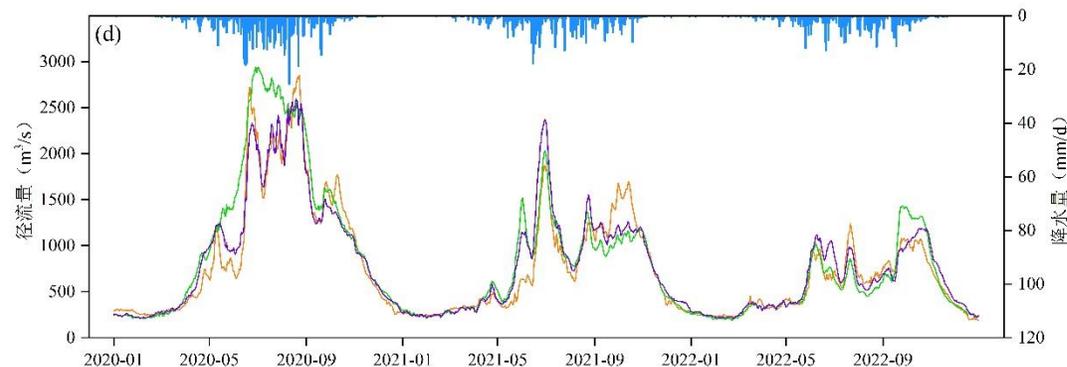
玛曲



军功

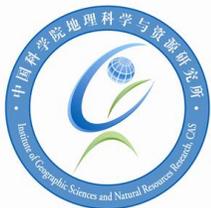


唐乃亥

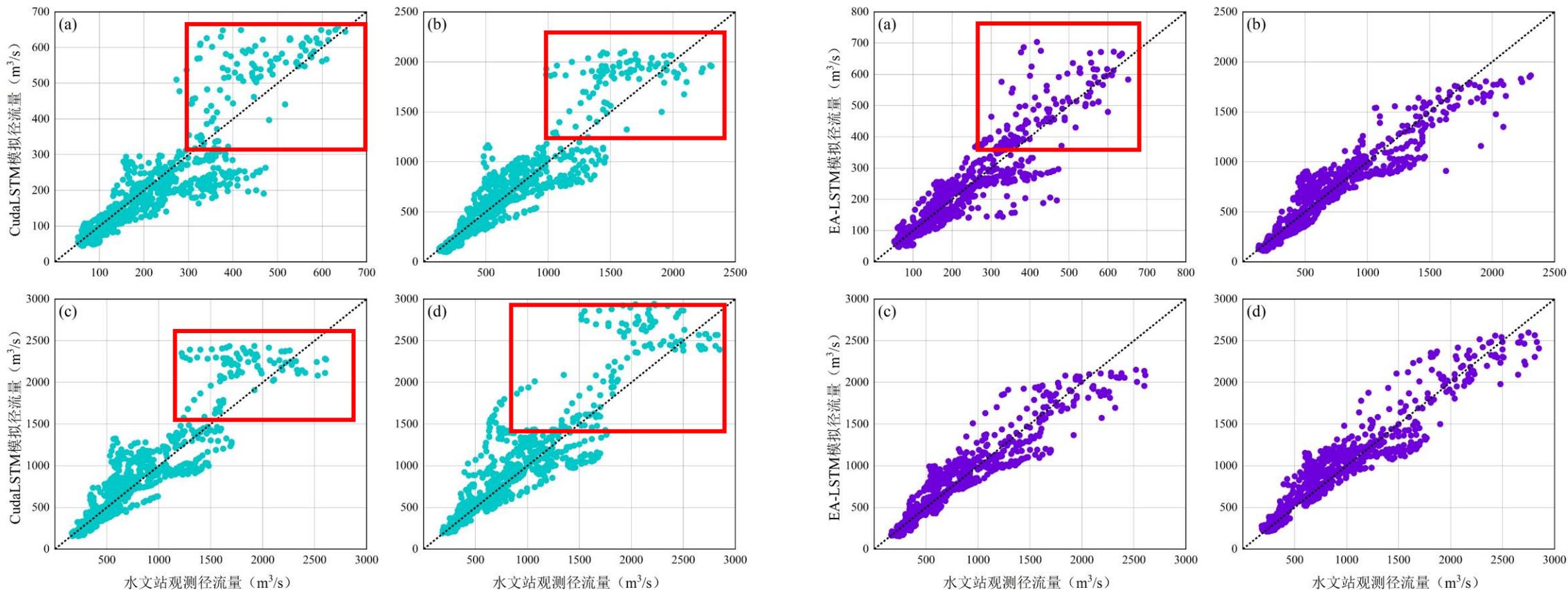


■ 降水量    — 观测    — CudaLSTM    — EA-LSTM

# 4 基于深度学习的黄河源区降水-径流模拟



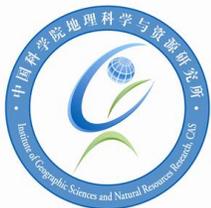
## 4.2 LSTM模型在黄河源区的降水-径流模拟



- ◆ 两种模型在径流**中低值**的模拟精度较高，能够较好地捕捉黄河源区降水与径流之间的关系
- ◆ 两种LSTM模型对径流**极端值**模拟能力仍有待提高

- 1 绪论
- 2 研究区概况与数据
- 3 卫星降水产品综合定量评估
- 4 基于深度学习的降水-径流模拟
- 5 基于水文模型的降水-径流模拟**
- 6 基于降水分型的径流响应机制**
- 7 结论与展望
- 8 盲审意见及修改情况

# 5 基于水文模型的黄河源区降水-径流模拟

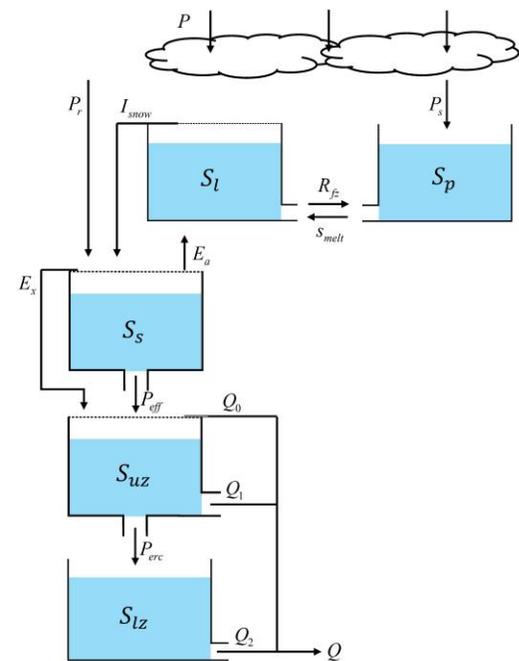


## 5.1 水文模型

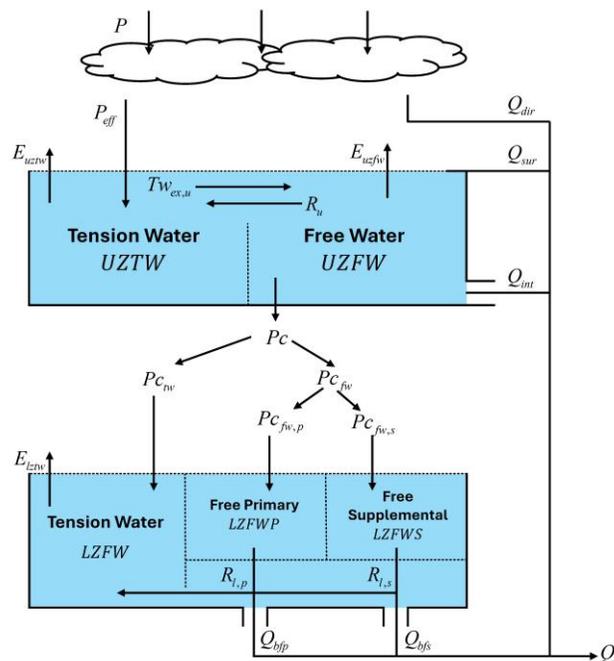
### ◆ 水文模型结构



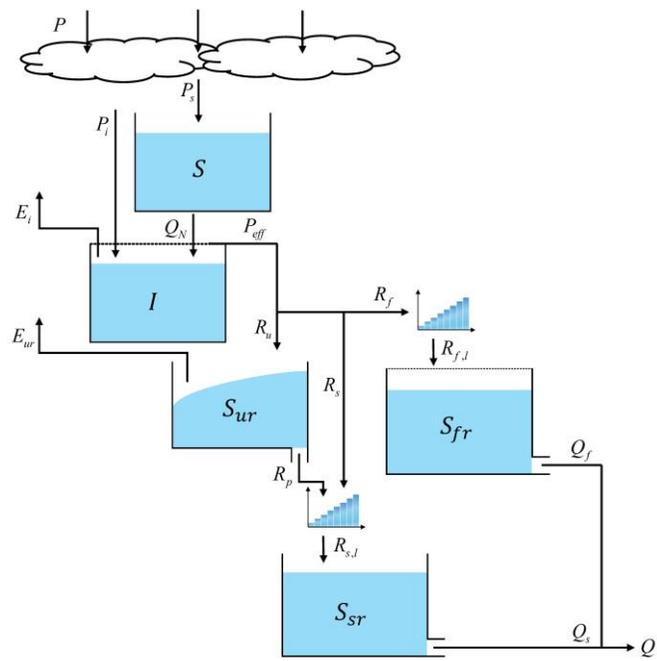
HBV



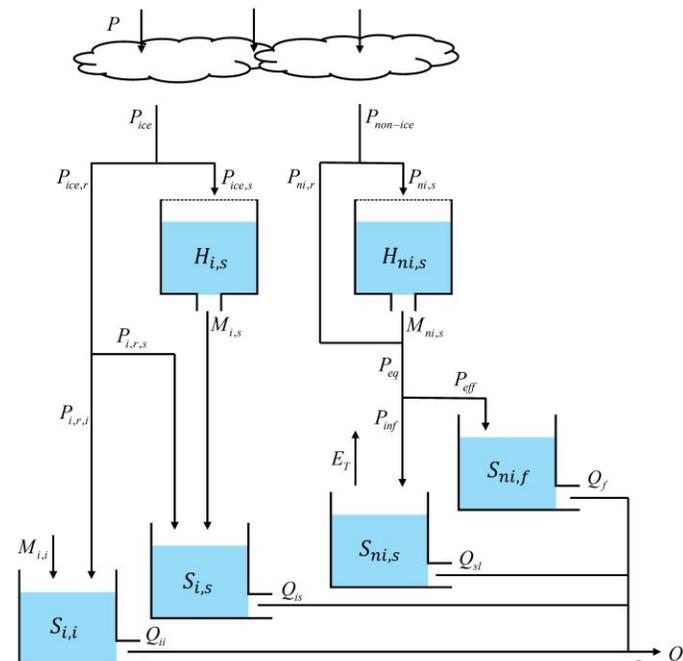
SAC-SMA



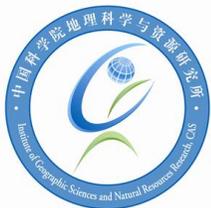
FLEX-IS



GSM-SOCONT

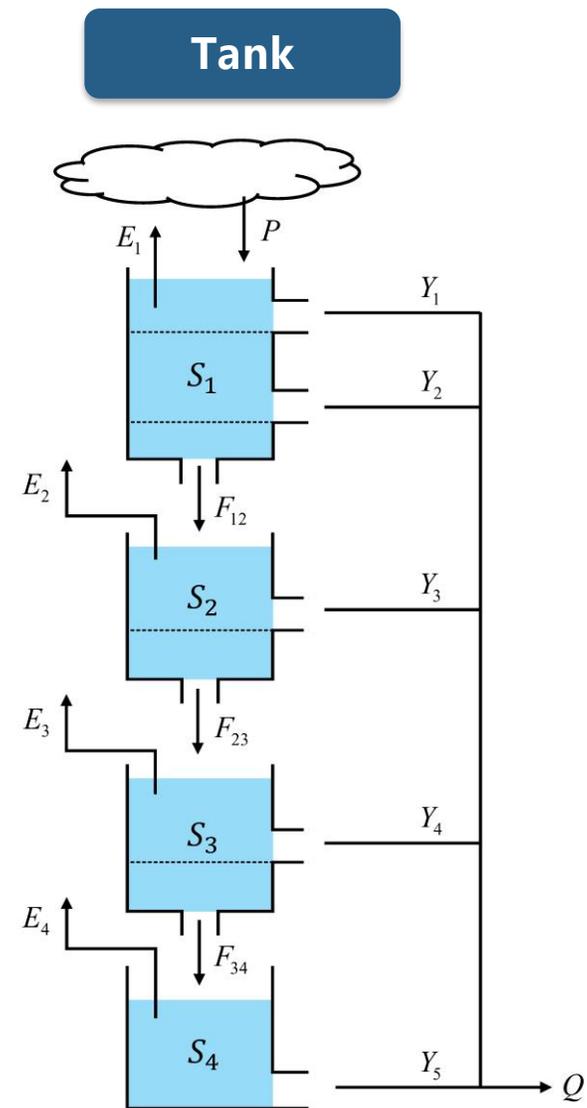
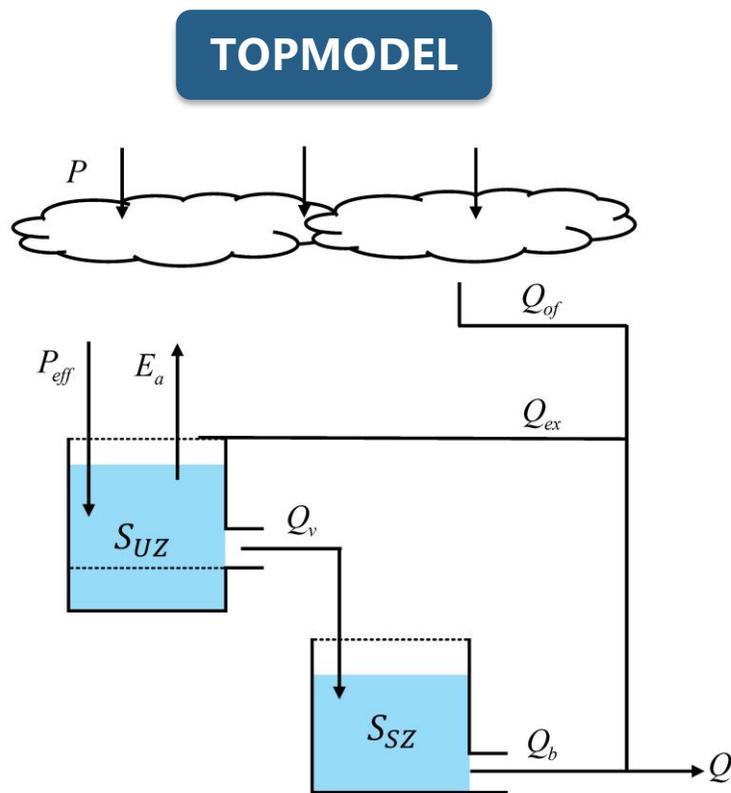
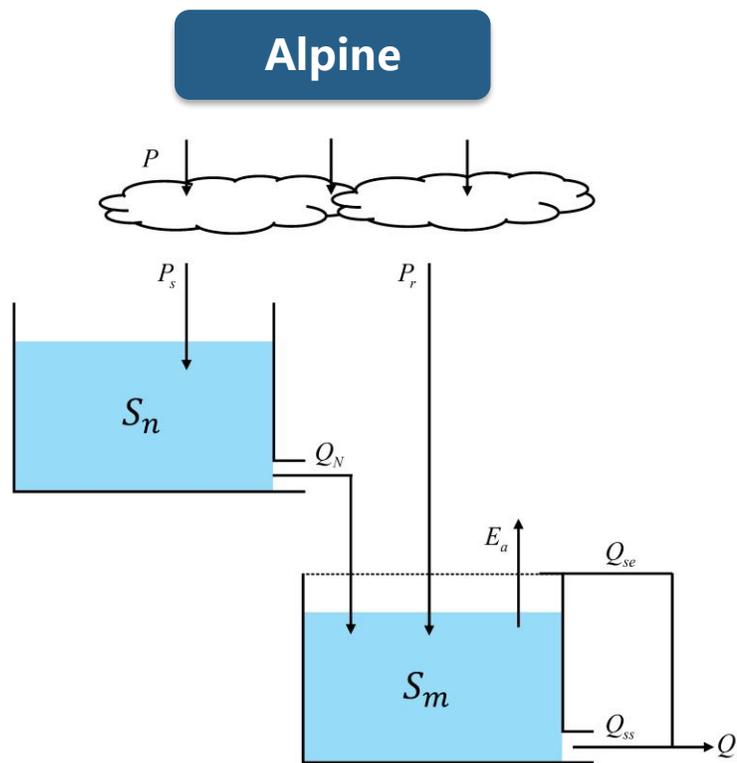


# 5 基于水文模型的黄河源区降水-径流模拟

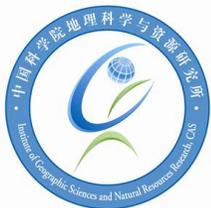


## 5.1 水文模型

### ◆ 水文模型结构



# 5 基于水文模型的黄河源区降水-径流模拟

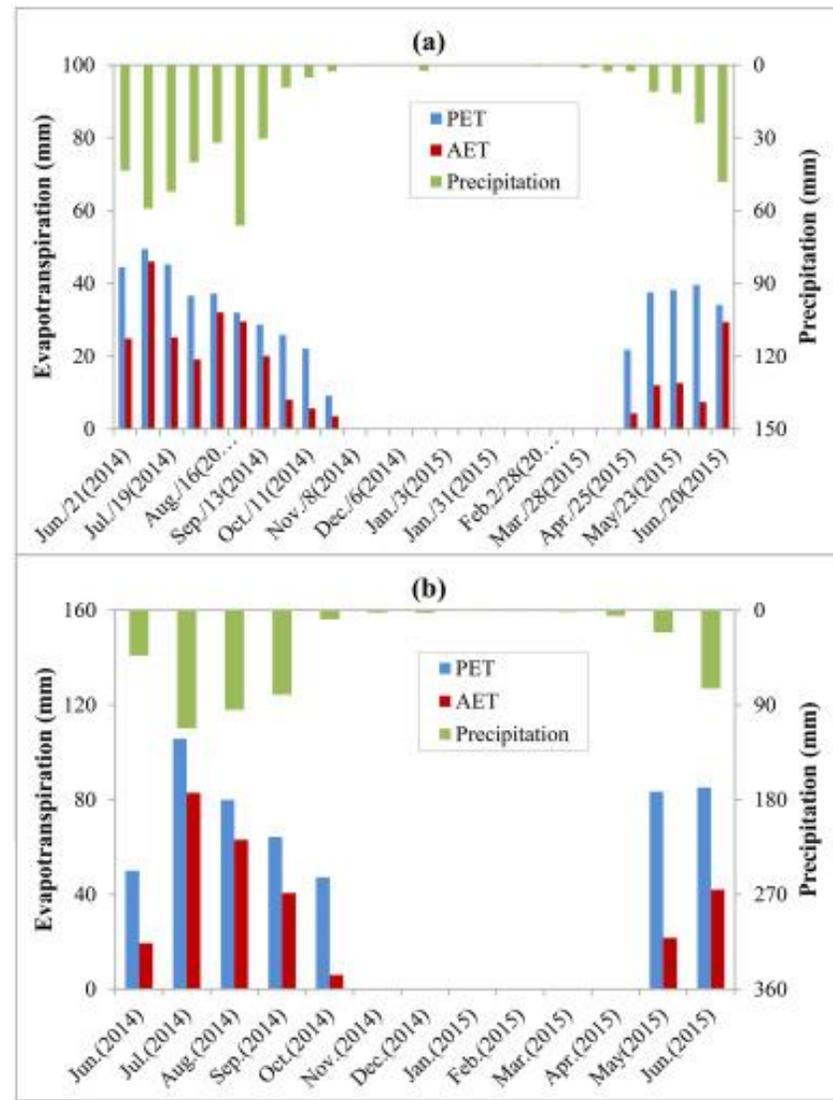


## 5.1 水文模型

### ◆ 模型改进

- 干旱半干旱地区蒸散发对降水的比重远高于径流
- 水文模型其对实际蒸散发的模拟往往利用**潜在蒸散发**进行计算，即在模拟降水-径流过程中通常将实际蒸散发假定为潜在蒸散发的一个函数
- 原始的Alpine、TOPMODEL和Tank模型将潜在蒸散发等同于实际蒸散发进行计算，忽略了土壤水分约束的影响。通过引入**非线性土壤水分约束因子**，对Alpine、TOPMODEL和Tank模型的实际蒸散发计算进行改进：

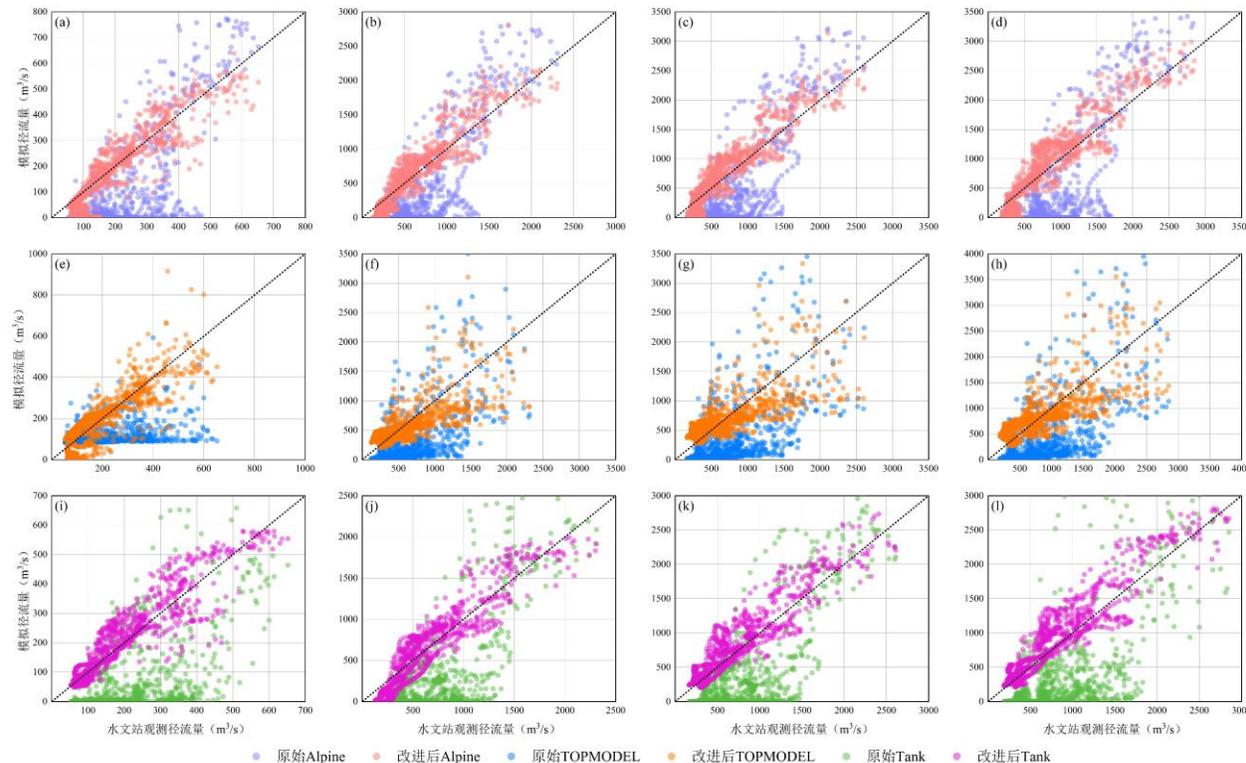
$$E_a = \begin{cases} E_p, & \text{if } S_m > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \rightarrow E_a = \alpha_e^{(SWI-1)} E_p, \alpha_e \in [1,10]$$



# 5 基于水文模型的黄河

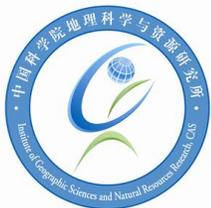
## 5.2 水文模型改进结果

- 改进后的Alpine模型在玛曲、军功和唐乃亥水文站的NSE值从负值跃升至**0.75**以上
- **TOPMODEL**经过改进后，在玛曲、军功和唐乃亥水文站的径流中低值模拟结果改善明显，然而在**径流高值**的模拟结果与实测数据仍存在一定误差
- **Tank**模型的改进效果尤为突出，在所有水文站的径流高值和径流低值区间均表现出非常好的拟合度，尤其在唐乃亥水文站，NSE值达到**0.83**



模型类别		水文站点			
		吉迈	玛曲	军功	唐乃亥
原始模型	Alpine	-0.29	0.03	-0.05	-0.02
	TOPMODEL	-0.08	-0.20	-0.30	-0.28
	Tank	-0.47	-0.15	-0.21	-0.25
改进模型	Alpine	0.68	0.78	0.75	0.77
	TOPMODEL	0.59	0.46	0.44	0.48
	Tank	0.77	0.80	0.79	0.83

# 5 基于水文模型的黄河源区降水-径流模拟



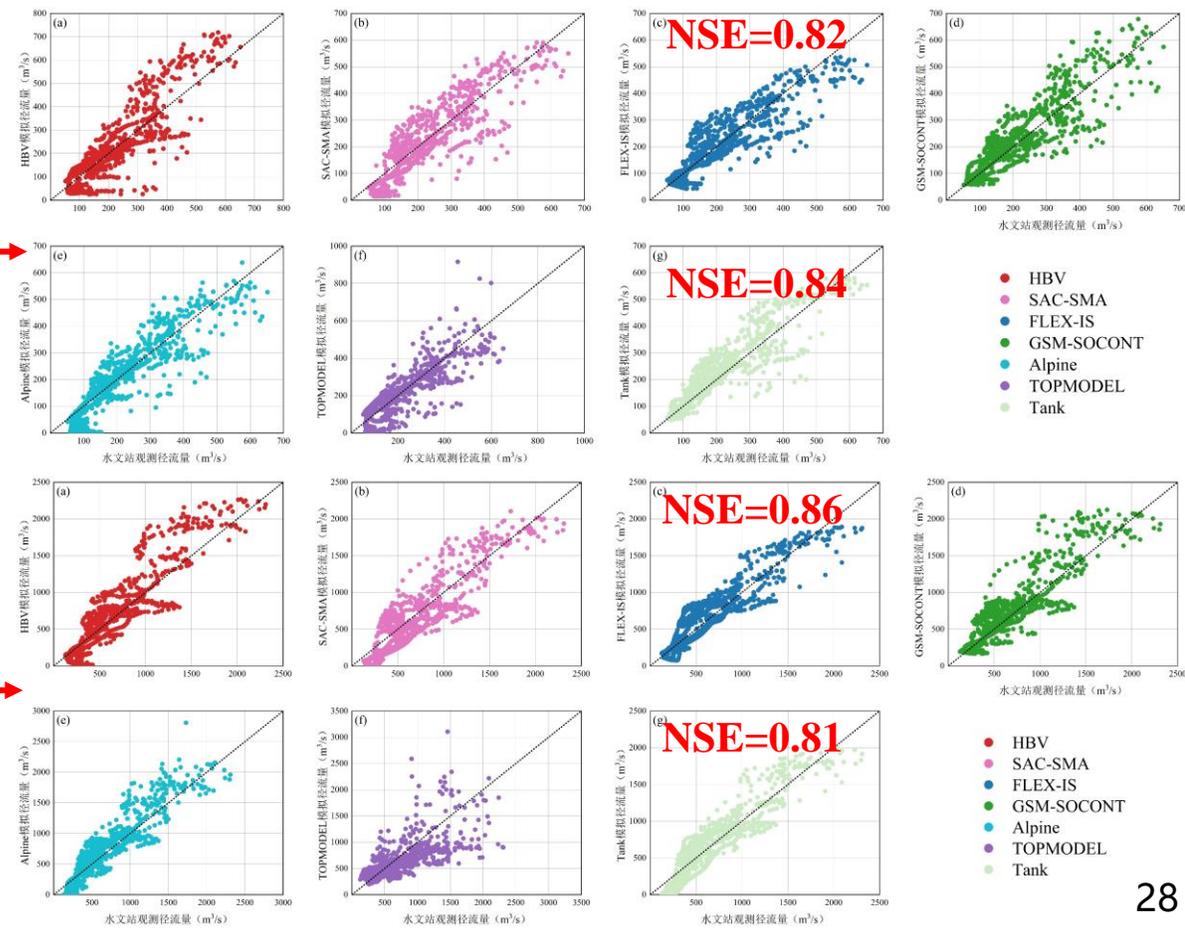
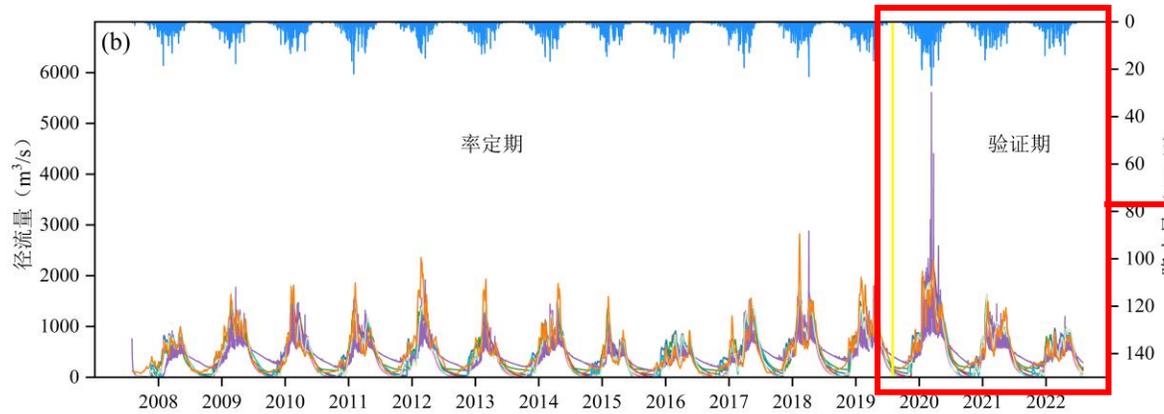
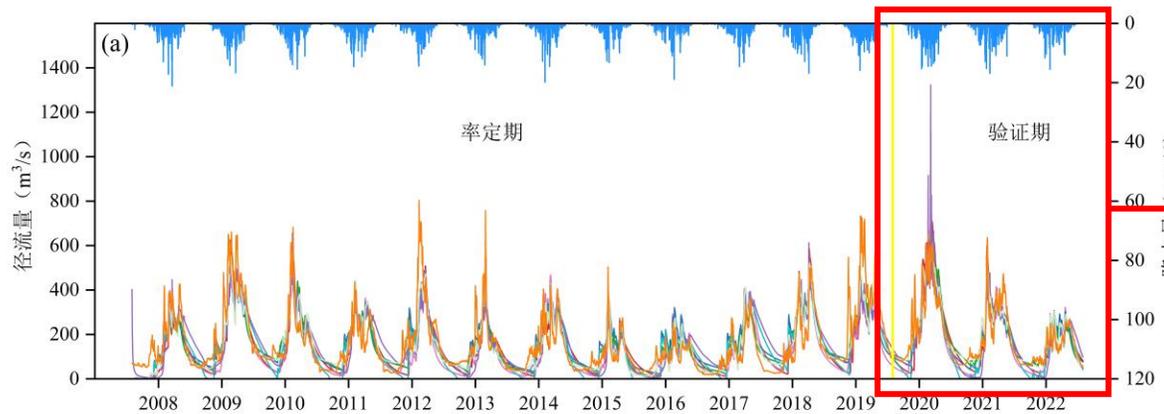
## 5.2 水文模型在黄河源区的降水-径流模拟

◆ **FLEX-IS**和**改进后Tank**模型在吉迈和玛曲站模拟径流在验证期NSE均超过0.80

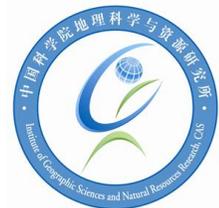
◆ **TOPMODEL**模型的表现较弱 (NSE<0.70)

吉迈

玛曲



# 5 基于水文模型的黄河源区降水-径流模拟

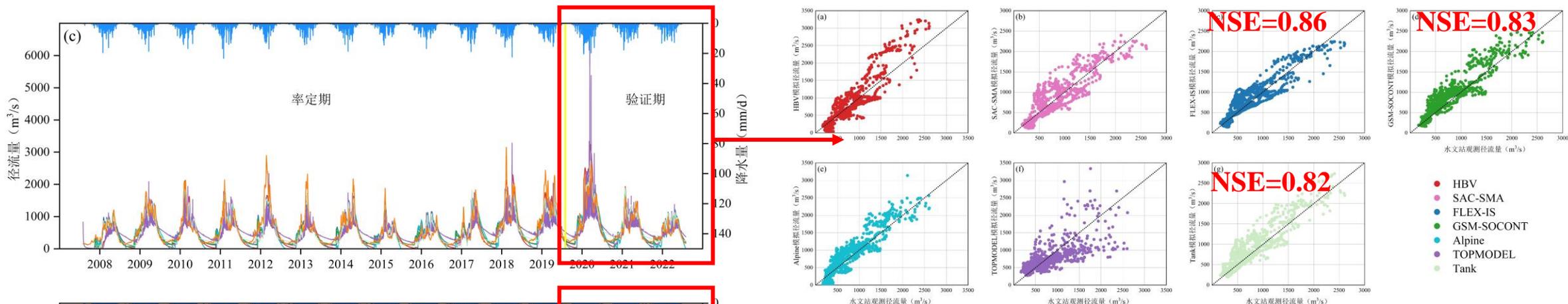


## 5.2 水文模型在黄河源区的降水-径流模拟

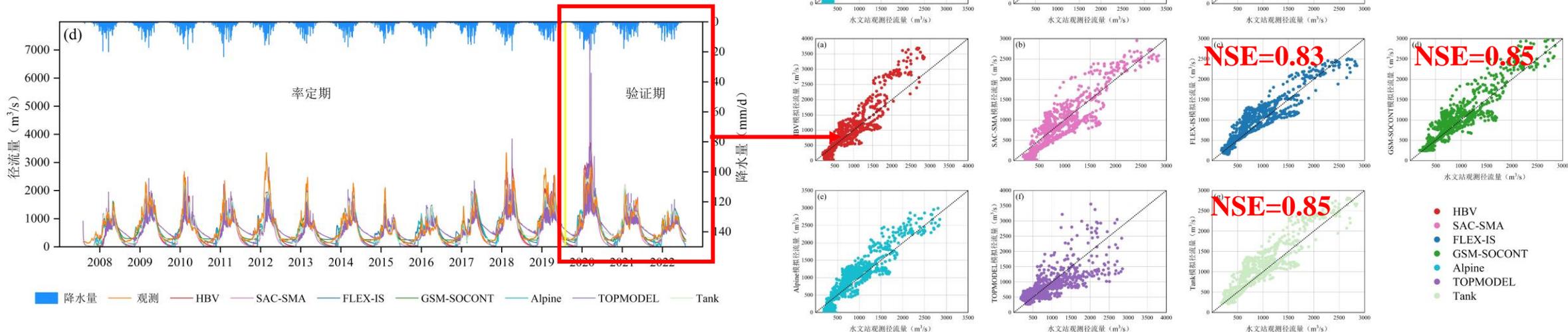
◆ **FLEX-IS**、**GSM-SOCONT**和**改进后Tank**模型在军功和唐乃亥站模拟径流在验证期NSE均超过0.80

◆ **TOPMODEL**模型的表现较弱 (NSE<0.50)

军功



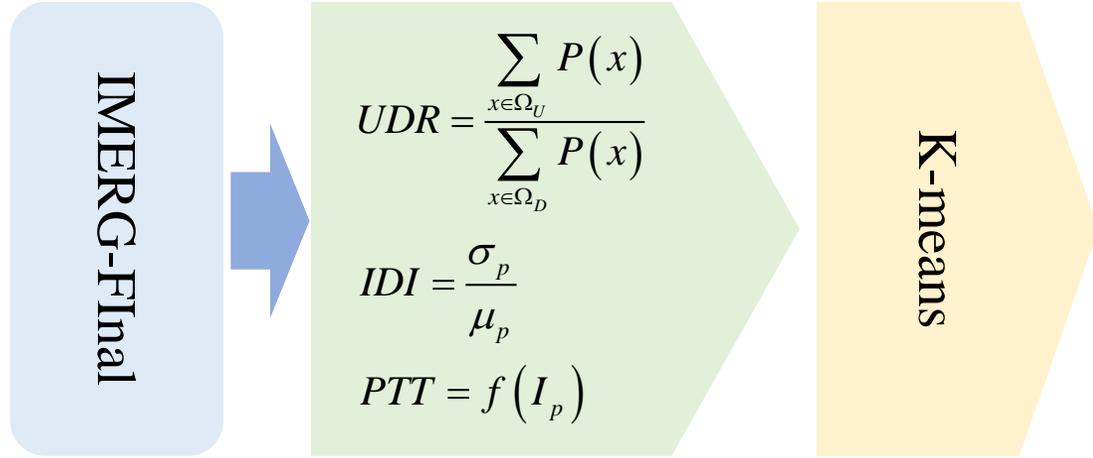
唐乃亥



- 1 绪论
- 2 研究区概况与数据
- 3 卫星降水产品综合定量评估
- 4 基于深度学习的降水-径流模拟
- 5 基于水文模型的降水-径流模拟
- 6 基于降水分型的径流响应机制**
- 7 结论与展望
- 8 盲审意见及修改情况

# 6 基于降水分型的黄河源区径流响应机制

## 6.1 黄河源区降水分型

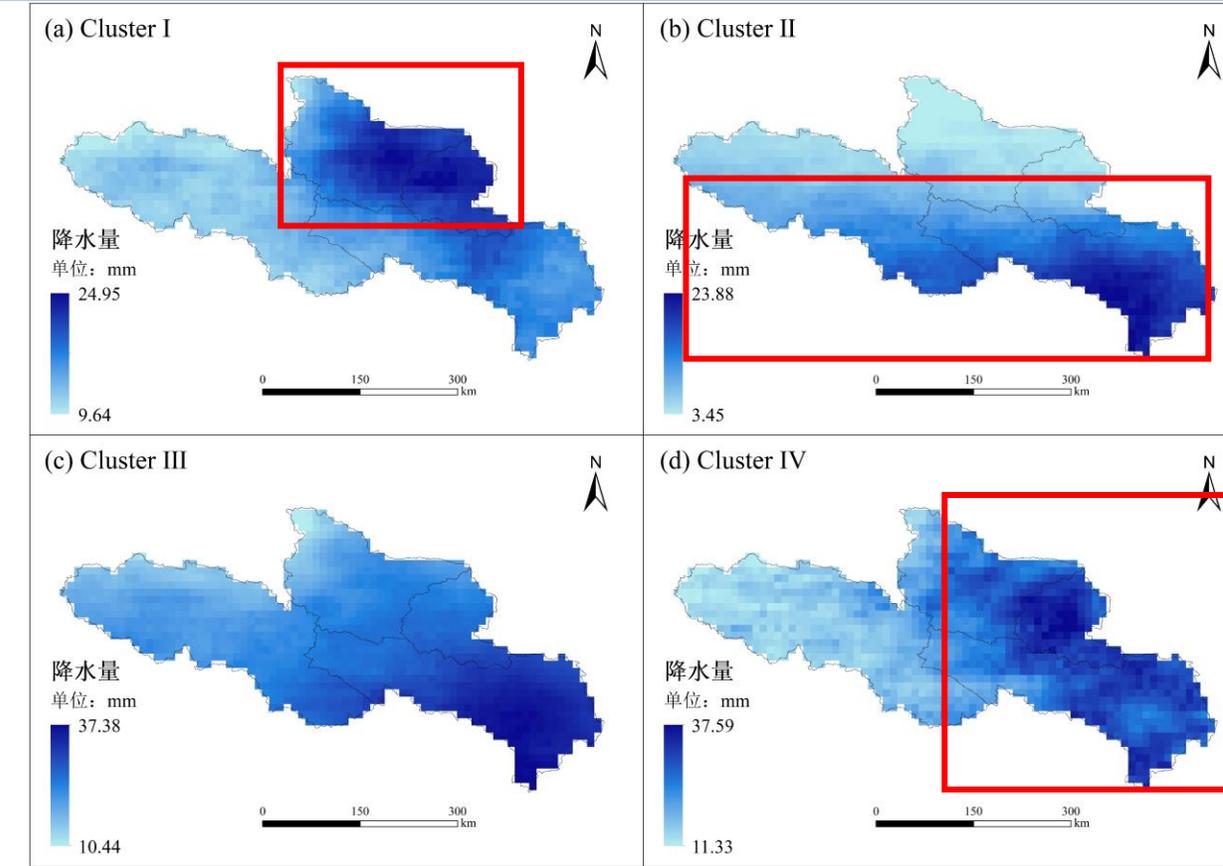


**Cluster I**  
北部局地降水事件

**Cluster II**  
南部弱降水事件

**Cluster III**  
全域强降水事件

**Cluster IV**  
东部强降水事件



降水类型	平均降水量 (mm)	平均降水历时 (d)	平均降水强度 (mm/d)
Cluster I	15.9	3.9	3.7
Cluster II	11.4	3.6	2.8
Cluster III	23.1	5.0	4.1
Cluster IV	22.7	5.1	3.8

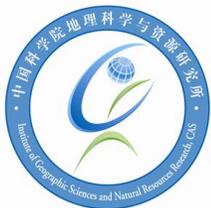
# 6 基于降水分型的黄河源区径流响应机制

## 6.2 不同分型降水-径流过程

- ◆ Cluster I降水量小且集中分布于流域北部，其对径流的整体影响**较弱**，但由降水峰值至形成**唐乃亥**站流量峰值的滞时较短（3.9天）
- ◆ Cluster II降水量较小但集中分布在流域南部，**吉迈**站的流量峰值对降水峰值的响应较为明显，相应的降水-径流滞时较短（2.7天）
- ◆ Cluster III降水量大且分布广泛，对应水文站平均和峰值径流量最高，但是**降水-径流滞时较长**（吉迈站4.5天，唐乃亥站6.0天）
- ◆ Cluster IV降水量也较高，但降水强度呈现**逐渐减弱**的趋势，对应径流滞时与Cluster III相比较短

水文站点	降水类型	平均径流量 (m <sup>3</sup> /s)	峰值径流量 (m <sup>3</sup> /s)	降水-径流滞时 (d)
吉迈	Cluster I	207	238	3.4
	Cluster II	251	286	2.7
	Cluster III	256	316	4.5
	Cluster IV	238	284	4.1
唐乃亥	Cluster I	933	1056	3.9
	Cluster II	1022	1153	5.2
	Cluster III	1117	1308	6.0
	Cluster IV	1103	1261	5.1

# 6 基于降水分型的黄河源区径流响应机制



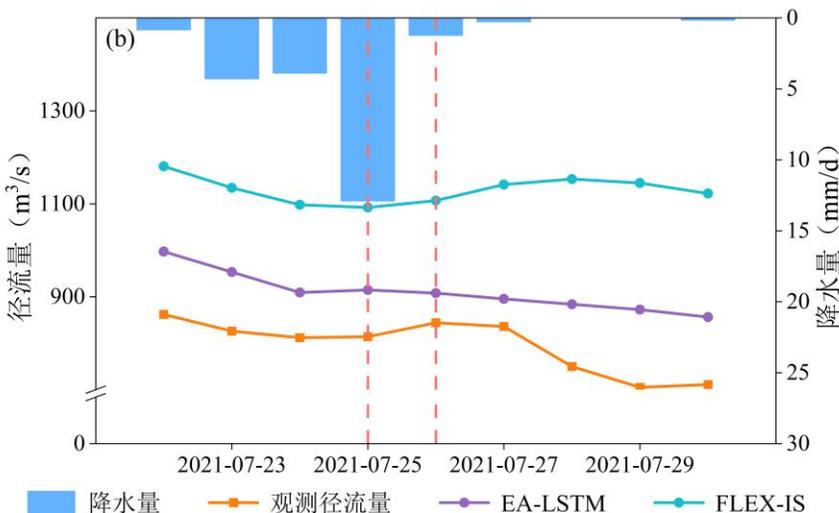
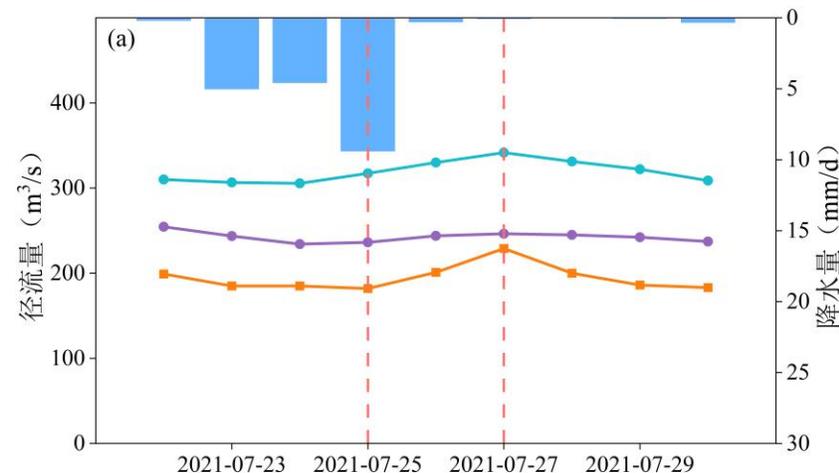
## 6.2 不同分型降水-径流过程

### ➤ Cluster I

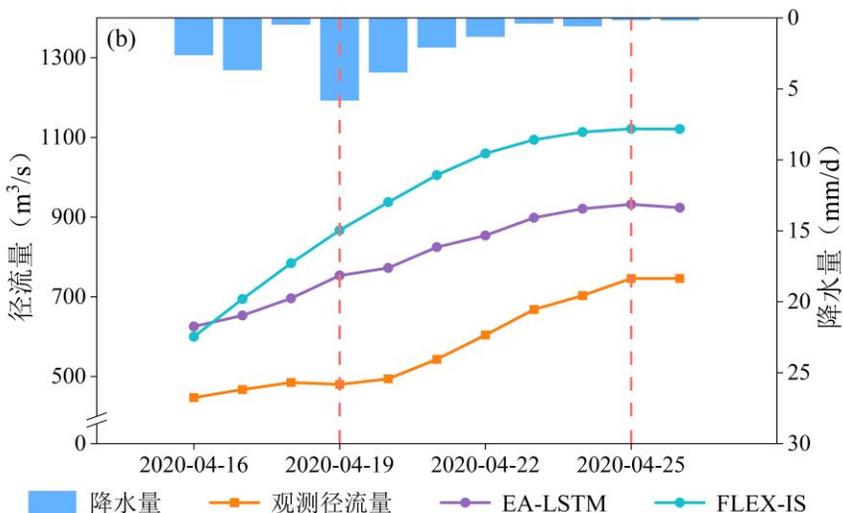
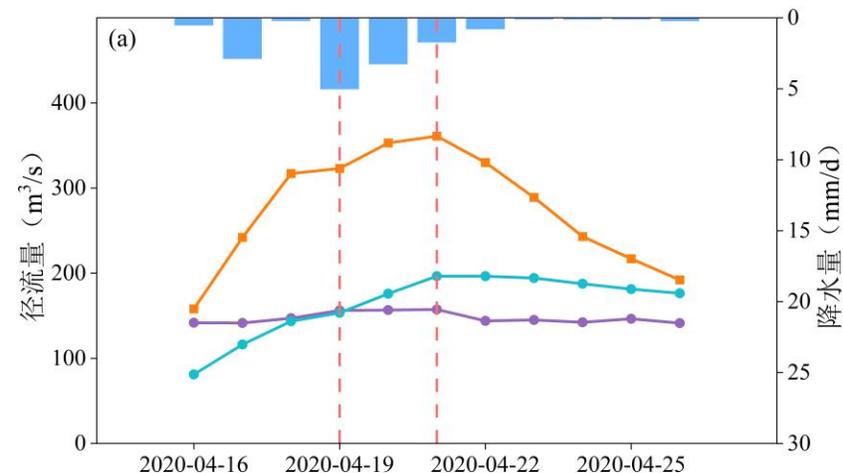
- 北部局地降水事件期间流域降水强度逐渐增强
- 降水分布在流域北部
- 在**唐乃亥**站，降水-径流滞时仅为1天

### ➤ Cluster II

- 南部弱降水事件期间降水主要分布在流域南部
- 在**吉迈**站，径流对降水的响应较为显著，观测到的径流量从158 m<sup>3</sup>/s迅速上升至361 m<sup>3</sup>/s，降水-径流滞时为2天

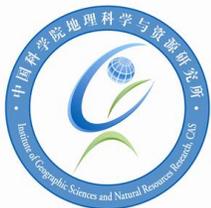


典型北部局地降水事件 (Cluster I)  
2021-07-23~2021-07-26



典型南部弱降水事件 (Cluster II)  
2020-04-16~2020-04-22

# 6 基于降水分型的黄河源区径流响应机制



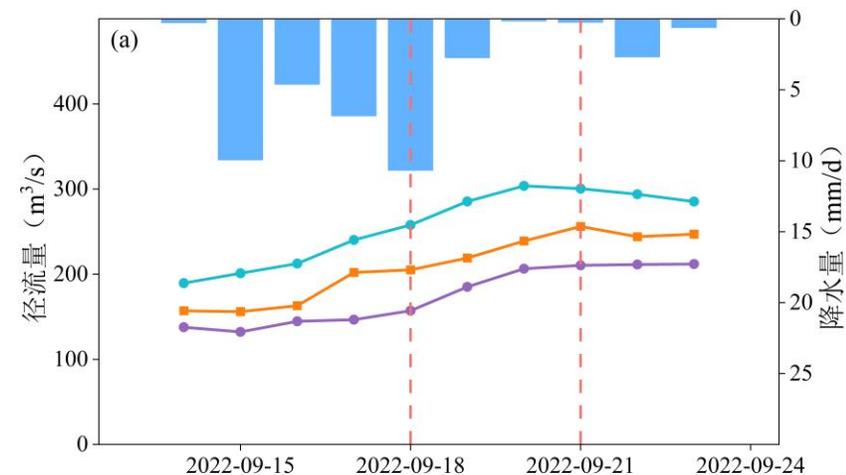
## 6.2 不同分型降水-径流过程

### ➤ Cluster III

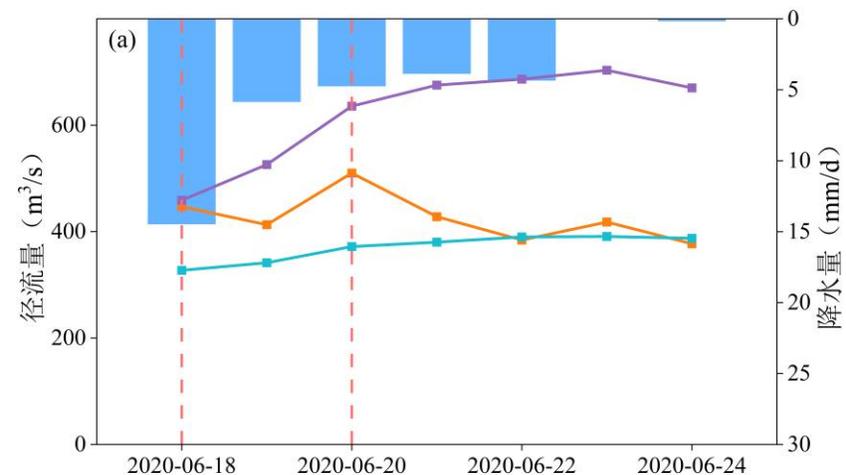
- 全域强降水事件，该期间流域降水量高，降水强度大
- 该期间降水空间分布均匀，**降水-径流滞时较长**

### ➤ Cluster IV

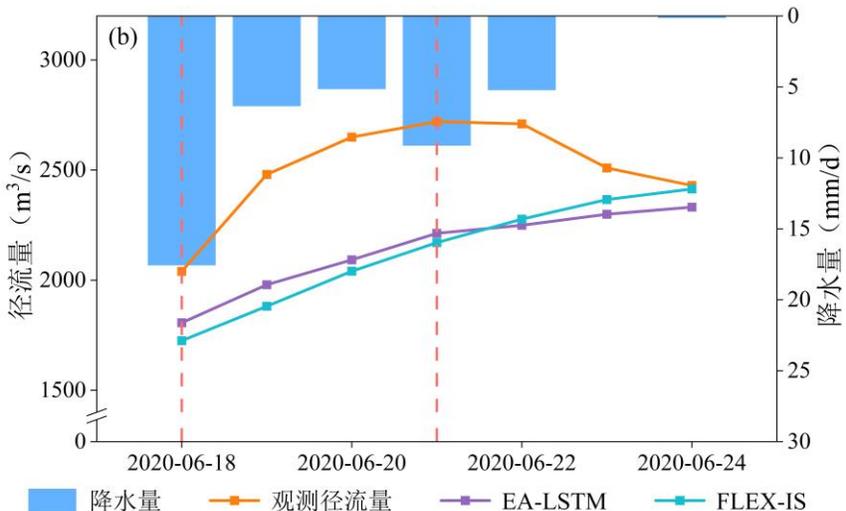
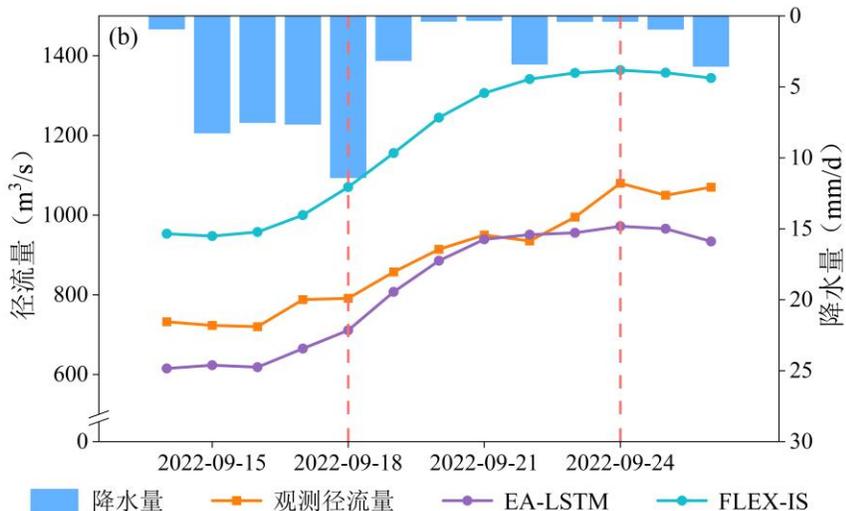
- 东部强降水事件，流域的降水强度呈现逐渐减少
- 由于该事件降水主要分布在流域东部**唐乃亥**站径流响应显著，径流量从2040 m<sup>3</sup>/s 迅速涨至2720 m<sup>3</sup>/s，降水-径流滞时也比较短（3天）



典型全域强降水事件 (Cluster III)  
2022-09-14~2022-09-19



典型东部强降水事件 (Cluster IV)  
2020-06-18~2020-06-22



- 1 绪论
- 2 研究区概况与数据
- 3 卫星降水产品综合定量评估
- 4 基于深度学习的降水-径流模拟
- 5 基于水文模型的降水-径流模拟
- 6 基于降水分型的径流响应机制
- 7 结论与展望
- 8 盲审意见及修改情况

# 7 结论与展望

## 7.1 主要结论

- (1) **IMF**产品在综合评估中表现最优，尤其在极端降水事件的检测能力上，IMF产品的综合得分 (RSA) 为0.85，显著高于其他产品。本研究以该产品为降水数据源，构建了黄河源区 Caravan-SRYR水文数据集
- (2) 利用深度学习与传统水文模型对黄河源区水文过程进行了模拟，各个模型**平均NSE>0.70**，基于深度学习的**EA-LSTM**模型在降水-径流过程模拟中表现出了显著优势，其NSE值均超过0.85
- (3) 引入了考虑土壤水分约束因子的**实际蒸散发**计算模块，对传统的Alpine、TOPMODEL和Tank水文模型进行了**改进**，提高了模型对黄河源区复杂水文过程的模拟能力

# 7 结论与展望

## 7.1 主要结论

(4) 不同类型的降水事件的径流响应特征具有显著差异:

- ◆ Cluster I降水量小且集中分布于流域北部, 其对径流的整体影响较弱, 但由降水峰值至形成**唐乃亥站**流量峰值的滞时较短 (3.89天)
- ◆ Cluster II降水量较小但集中分布在流域南部, **吉迈站**的流量峰值对降水峰值的响应较为明显, 相应的降水-径流滞时较短 (2.67天)
- ◆ Cluster III降水量大且分布广泛, 对应水文站平均和峰值径流量最高, 但是**降水-径流滞时较长** (吉迈站4.46天, 唐乃亥站5.96天), 并且模型对这类事件的降水-径流关系捕捉最精确
- ◆ Cluster IV降水量也较高, 但降水强度呈现逐渐减弱的趋势, 对应径流**滞时**与Cluster III**相比较短**

# 7 结论与展望

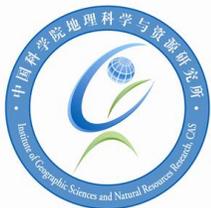
## 7.2 论文创新点

- 本研究基于卫星降水产品的**多维综合定量评估**结果，构建了Caravan-SRYR水文建模数据集
- 使用**深度学习**和**传统水文模型**对黄河源区降水-径流过程进行模拟
- 引入**土壤水分约束因子**，对Alpine、TOPMODEL和Tank模型的实际蒸散发计算模块进行改进
- 通过K-means聚类算法对降水事件进行分类，揭示了**径流**对不同类型降水的**响应特征**

## 7.3 不足与展望

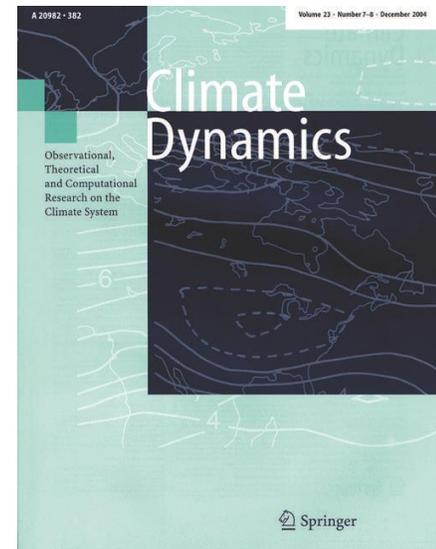
- 精度较高的卫星降水产品均经过地面雨量计校正的产品，数据发布时间延迟较长，可以探索**近实时卫星降水产品**在水文预报中的应用的潜力
- EA-LSTM训练样本较少，模型解释能力较弱，可以融合物理和深度学习模型，提高深度学习模型的对流域水文过程的**解释能力**
- 集总式水文模型对**极端径流事件**的模拟精度受其简化假设的局限，可以进一步对比不同卫星降水产品在分布式水文模型中的应用效果，以验证各种降水数据在高精度水文模型中的表现

# 硕士期间主要成果



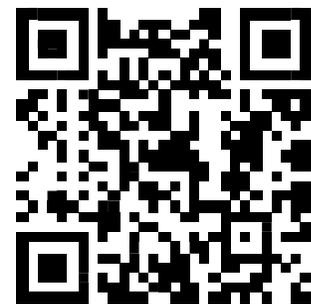
## ◆ 已发表论文

Zhu Shengli, Liu Zhaofei. Comprehensive quantitative assessment of the performance of fourteen satellite precipitation products over Chinese mainland[J]. *Climate Dynamics*, 2024, 62(7): 6799-6818.



## ◆ 参与项目

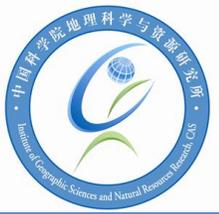
- 国家自然科学基金面上项目“高寒河湖连通流域水文过程研究”，2022-2025，参加
- 第二次青藏高原综合科学考察研究，子专题“南亚通道水资源环境承载力基础考察与综合评价”，2019-2024，参加
- 中国科学院战略性先导科技专项“美丽中国生态文明建设科技工程”，子课题“气候变化条件下山地生态水文变化致灾风险评估”，2019-2023，参加



<https://shengli-zhu.github.io/>



# Github repositories



## ◆ 参与项目本研究所使用Github repositories

- MARRMoT: <https://github.com/wknoben/MARRMoT>
- Caravan : <https://github.com/kratzert/Caravan>
- Spotpy : <https://github.com/thouska/spotpy>
- NeuralHydrology : <https://github.com/neuralhydrology/neuralhydrology>

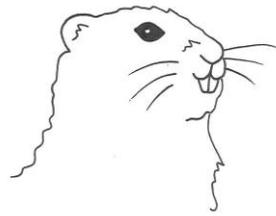
Master Thesis  
the repositories used in my Master thesis  
4 repositories

wknoben / MARRMoT  
Modular Assessment of Rainfall-Runoff Models Toolbox - Matlab code for 47 conceptual hydrologic models  
MATLAB 120 56 Updated on Oct 3, 2024

kratzert / Caravan  
A global community dataset for large-sample hydrology  
Jupyter Notebook 208 42 Updated last month

thouska / spotpy  
A Statistical Parameter Optimization Tool  
Python 261 157 Updated on Feb 21

neuralhydrology / neuralhydrology  
Python library to train neural networks with a strong focus on hydrological applications.  
Python 418 215 Updated 3 days ago



## Modular Assessment of Rainfall-Runoff Models Toolbox (MARRMoT) v2.1: an object-oriented implementation of 47 established hydrological models for improved speed and readability

Luca Trotter<sup>1</sup>, Wouter J. M. Knoben<sup>2</sup>, Keirnan J. A. Fowler<sup>1</sup>, Margarita Saft<sup>1</sup>, and Murray C. Peel<sup>1</sup>

Data Descriptor | [Open access](#) | Published: 31 January 2023

Caravan - A global community dataset for large-sample hydrology

Download PDF

Sections Figures References

## SPOTting Model Parameters Using a Ready-Made Python Package

The Journal of Open Source Software  
About Papers Docs Blog Submit Log in with ORCID

NeuralHydrology --- A Python library for Deep Learning research in hydrology  
56  
Submitted 21 December 2021 • Published 04 March 2022

SPOTPY



- 1 绪论
- 2 研究区概况与数据
- 3 卫星降水产品综合定量评估
- 4 基于深度学习的降水-径流模拟
- 5 基于水文模型的降水-径流模拟
- 6 基于降水分型的径流响应机制
- 7 结论与展望
- 8 盲审意见及修改情况**

# 8 盲审意见及修改情况

## ◆ 8.1 论文盲审总体情况

- ▶ 审稿人1：论文以黄河源区水文过程为题开展研究，选题面向理论前沿与实际应用，较为恰当，具有针对性和现实性。论文在综述国内外研究现状的基础上，采用多种指标定量评估了卫星降水产品；结合流域水文数据集和实测资料，构建了基于深度学习的黄河源区降水-径流模型，并进行了案例分析与综合验证，进而探讨了基于降水分型的黄河源区径流响应机制。论文研究成果具有一定的理论与应用价值，可为流域水文过程响应研究提供理论与方法借鉴。论文研究思路清晰，研究方案合理，技术路线可行，案例数据详实具体。研究工作表明作者在水文过程建模模拟领域具备扎实而丰富的知识积累，科研实践工作能力较强。论文写作条理清晰，重点突出，结构严谨，图表较为规范，达到硕士学位论文要求。
- ▶ 审稿人2：黄河源区的水文模拟对于黄河流域水资源安全意义重大。鉴于源区降水数据获得较为困难，采用卫星降水产品在黄河源区水文模拟是一个好的选题。论文对于卫星数据的应用、多种水文模型的比选、水文参数的优化率定进行了较为完备的研究。论文写作行文规范严谨，是一篇较为优秀的硕士学位论文。
- ▶ 审稿人3：该论文选题具有重要的理论意义和应用价值，研究填补了高寒地区卫星降水产品综合评估的研究空白，为该地区水文模拟和预测提供了科学依据。论文作者对国内外相关研究文献有较为全面的掌握，引用了大量最新研究成果，表明作者对研究领域的前沿动态有较深入的了解。论文取得的成果及水平较高。论文整体结构较为清晰，但各章节之间的逻辑关系需要进一步凝练。

**谢谢！ 恳请各位老师批评指正！**

**Thank you for your criticism and corrections!**