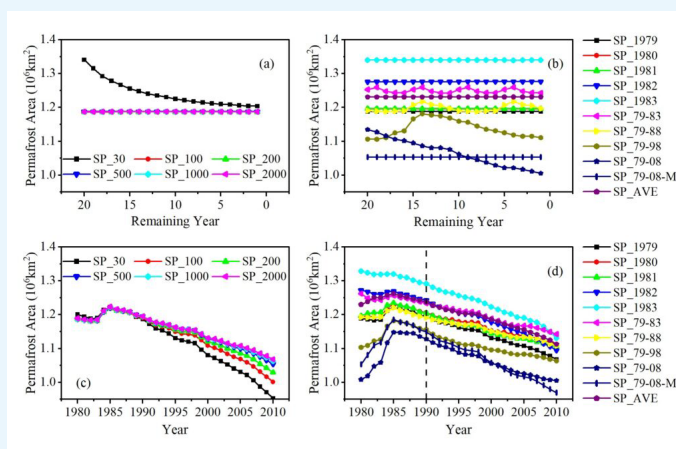


## 青藏高原冻土过程集成模拟

青藏高原是世界第三极，随着气候变暖，高原的高海拔多年冻土面临广泛退化的风险，进而影响区域水文、生态环境和全球碳收支。南卓铜团队（permalab.science）结合卫星遥感、数值模拟等手段，从方法构建和机理研究两方面，推动了对高原多年冻土变化过程机制和未来演化趋势的认识。

### 建模方法论：青藏高原多年冻土模型模拟预热方案

- 模型模拟多年冻土变化时，深层土壤的记忆性使得依赖于建模人员经验选定的预热策略为冻土建模带来很大的不确定性。
- 对比不同预热方案模拟结果，发现预热时长和循环年份，是影响模型预热后模拟结果的主要因素。
- 对于青藏高原冻土模拟，本团队建议使用驱动数据的最初5至10年进行500年的循环预热，以达到计算开销和模型收敛的平衡。

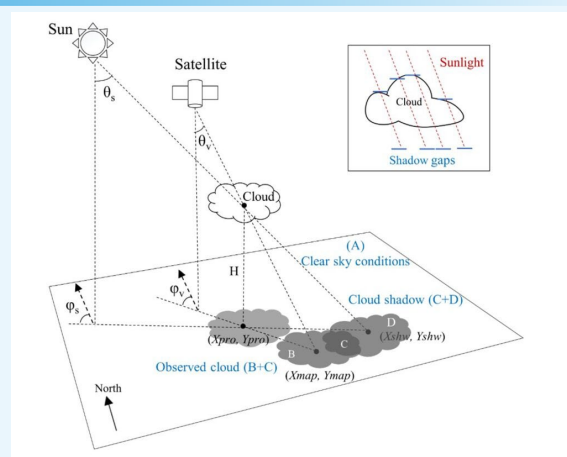


不同预热时长和循环年份对高原多年冻土面积模拟的影响

(Ji H, et al. On the Spin-up Strategy for Spatial Modeling of Permafrost Dynamics: a Case Study on the Qinghai-Tibet Plateau. JAMES, 2022)

### 模型数据：青藏高原地表温度数据产品

- 高原地表温度遥感数据产品受云层遮挡影响，存在大量缺失。本团队构建了一种基于太阳-云-卫星几何关系的新的云下地表温度插值方法，能够充分利用具备观测值的云下像元，解决大面积数据缺失的问题。
- 与实测结果和现有全天候地表温度产品相比，该方法获取的高原地表温度数据，具有较高的精度和适用性，可用于支持高原年冻土研究。

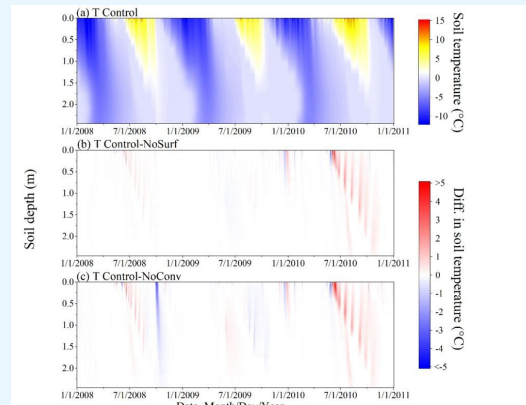


(Chen Y, et al. A stepwise framework for interpolating land surface temperature under cloudy conditions based on solar-cloud-satellite geometry. ISPRS P&RS, 2023)

基于云下遥感像元的地表温度插值方法

### 机理研究：（1）春季融水促进多年冻土活动层解冻

- 本团队利用水热耦合模型SHAW构建模拟情景，探索了液态水对流传热对活动层热状况的影响。
- 春季积雪、活动层融水是对流传热主要来源，其具有增温、降温双重热效应，其中增温占主导作用。春季地表下渗融水对流热为活动层带来平均1℃作用的增温，加速了活动层解冻。



(Zhao Y, et al. Convective heat transfer of spring meltwater accelerates active layer phase change in Tibet permafrost areas. TC, 2022)

对流传热对冻土活动层的热效应  
红色为增温，蓝色为降温



## 青藏高原冻土过程集成模拟

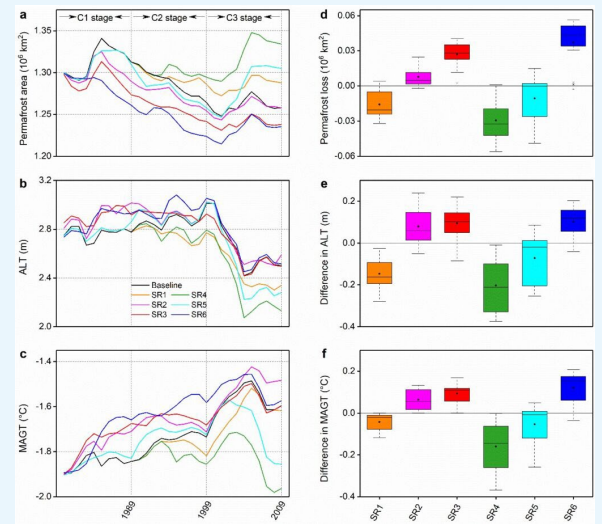
### 机理研究：（2）青藏高原冬季变暖主导冻土热退化

■ 近30年高原变暖速率显著增加，且冬季气温以 $0.66\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速度升高，是夏季增温 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的两倍多，本团队使用Noah陆面模型分别评估冬季和夏季变暖对青藏高原多年冻土的影响。

■ 结果表明，多年冻土热状态对冬季温度变化高度敏感。夏季气温每升高一度，活动层厚度（ALT）平均增加 $0.35\text{ m}$ ，年平均地温平均增加 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而冬季 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温，活动层增厚 $0.16\text{ m}$ ，年平均地温增加 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于冬季升温速率高于夏季，因此冬季变暖对高原冻土退化的贡献更大。

(Zhang G, et al. Isolating the contributions of seasonal climate warming to permafrost thermal responses over the Qinghai-Tibet Plateau. JGR-Atm, 2021.)

Zhang G, et al. The role of winter warming in permafrost change over the Qinghai-Tibet Plateau. GRL. 2019.)



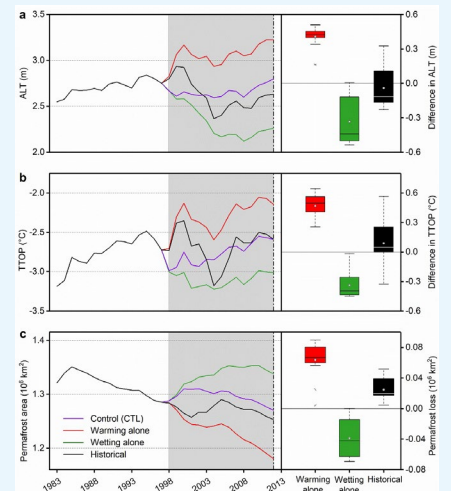
六个假设情景和基线下多年冻土指标变化  
SR1-3: 夏季变暖情景; SR4-6冬季变暖情景

### 机理研究：（3）气候增湿减缓了增温的冻土热效应

■ 近30年青藏高原（QTP）经历了明显的变暖和变湿，这影响了多年冻土区的热状态。这项工作采用Noah模型进行数值实验，定量研究气候变暖和润湿对永久冻土热状况的影响。

■ 气候润湿降低了多年冻土对变暖的热响应。QTP多年冻土区气温升高一度导致ALT增厚 $0.46\text{ m}$ ，TTOP升高 $0.53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。夏季降水增加 $100\text{ mm}$ 变湿导致ALT平均减薄 $0.35\text{ m}$ ，TTOP平均降低 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(Zhang G, et al. Qinghai-Tibet Plateau wetting reduces permafrost thermal responses to climate warming. EPSL. 2021)



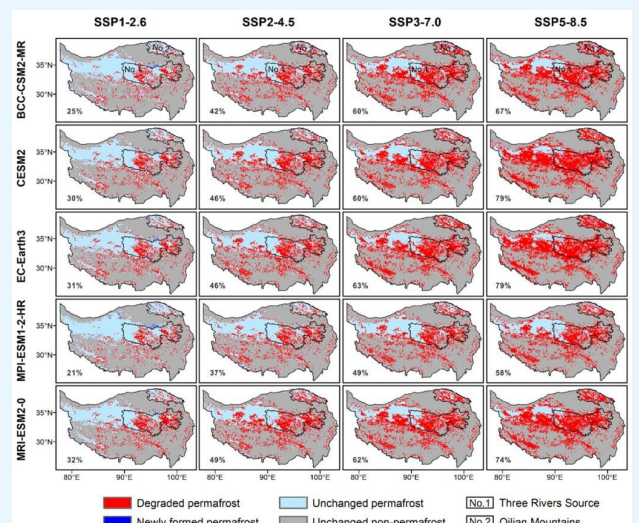
不同变暖变湿情景下多年冻土指标的变化

### 高原冻土变化预估：未来百年严重退化，三江源或为最早退化的区域

■ 本团队团队基于CMIP6未来气象数据，使用改进的Noah LSM预报不同SSP情景下21世纪青藏高原多年冻土分布及热状况的变化。

■ 在SSP2-4.5, SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下，21世纪末多年冻土面积将分别减少 $44\pm 4\%$ ,  $59\pm 5\%$ 和 $71\pm 7\%$ ，多年冻土年平均地温将分别上升 $0.8\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $2.0\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.6\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，活动层厚度分别增加 $0.7\pm 0.1\text{ m}$ ,  $1.5\pm 0.3\text{ m}$ ,  $3.0\pm 1.0\text{ m}$ 。

(Zhang G, et al. Qinghai-Tibet Plateau permafrost at risk in the late 21st century. Earth's Future. 2022)



不同SSP-RCPs情景下高原多年冻土退化趋势