

基于亚洲水塔水文卫星观测的超分辨率生态水文模型

Massimo Menenti^{1,2*}, Evan Miles^{4,7}, 任少亭¹, Pascal Buri^{4,7}, 张婧¹, Achille Jouberton^{4,5,6}, 贾珺茹¹, Thomas Shaw⁵, 刘莲³, Mike McCarthy^{4,5}, 谢秋霞¹, Stefan Fugger^{4,5,6}, Catriona Fyffe⁵, 邱玉宝¹, 贾立¹ 和 Francesca Pellicciotti^{4,5},

¹ 中国科学院空天信息创新研究院遥感与数字地球重点实验室 (中国科学院), 北京 100101; jjali@aircas.ac.cn

² Delft University of Technology, 2600 GA Delft, The Netherlands; m.menenti@tudelft.nl

³ 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; lliu@itpcas.ac.cn

⁴ Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, 8903 Birmensdorf, Switzerland; francesca.pellicciotti@wsl.ch

⁵ [Institute of Science and Technology Austria, ISTA, Klosterneuburg, Austria](#)

⁶ [Institute of Environmental Engineering, ETH Zurich, 8093 Zurich, Switzerland](#)

⁷ [Institute of Geography, University of Zurich, Zurich, Switzerland](#)

* Correspondence: m.menenti@radi.ac.cn, francesca.pellicciotti@wsl.ch

亚洲高山区 (High Mountain Asia, HMA) 是世界上除极地外冰量最大的地区。它被誉为“亚洲水塔”, 其积雪和冰川融水滋养着亚洲的主要河流, 是非常重要的淡水资源, 影响着该地区的水循环和生态系统。我们将地球观测系统 (Earth System Observations, ESOs) 与一个新颖的生态水文模型结合起来, 以期对 HMA 关键水塔的冰冻圈和水循环产生新的认识。我们关注 HMA 中蓝水 (径流) 和绿水 (蒸散发) 之间的相互作用, 特别是在干旱时期, 并将冰冻圈消融引起的水资源变化与植被的影响相结合, 以抑制或放大这些变化。我们的研究策略包括三个步骤。

第一步, 我们利用遥感观测数据在基准站点产生了冰冻圈、植被和地表变化的新数据产品。我们生产了积雪和冰川覆盖、冰川质量平衡、冰川流速、土壤湿度、雪水当量、积雪和冰川反照率、积雪和冰川辐射平衡的数据。我们利用多时相的遥感数据研究了环塔里木盆地高山区的积雪覆盖变异性及其对冰川的影响。在复杂的山区地形中, 采用归一化积雪指数方法会普遍高估积雪覆盖。因此, 我们使用支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 分类方法, 根据不同地形和阴影条件逐场景选择积雪覆盖的训练样本, 以监测 2013 年至 2022 年的雪累积量。与 Sentinel-2 相比, 我们获取的积雪覆盖结果给出了大于 0.95 的相关系数, 相对均方根误差约为 0.1%。我们应用三重协方差分析 (Triple Collocation Analysis, TCA) 和线性权重融合 (Linear Weight Fusion, LWF) 方法, 生成了 2011 年至 2018 年 25km 空间分辨率的全球日尺度土壤湿度融合数据集 (Global Daily-scale Soil Moisture Fusion Dataset, GDSMFD)。该数据集在全球 331 个站点, 包括中国的 57 个站点以及青藏高原上的所有永久观测站点进行了验证。我们利用 MODIS 数据提取了 2001 年至 2020 年念青唐古拉山西部 (Western Nyainqentanglha Mountains, WNM) 的冰川反照率, 以表征其时空变异性。冰川反照率出现了较大的年际波动, 每十年下降趋势为 0.043 ± 0.00022 。我们通过

将 WRF 模型对积雪深度和年龄的估计与基于 MODIS 获取的积雪反照率相结合，开发了一套新的积雪反照率参数化方案。与 WRF 模型中默认的积雪反照率参数相比，新的参数化方案使得 WRF 模型对气温、反照率、感热通量和积雪深度预测的相对均方根误差显著减小，相关系数显著增加。

我们开发了两种先进的算法来反演地表反照率以及气溶胶的含量和性质，以改善：a) 在气溶胶反演中分离地表和大气信号的地表背景特征，以及 b) 在地表反照率反演中分离直接和漫射辐照度。通过比较中国科学院青藏高原研究所纳木错观测站的气溶胶光学深度（Aerosol Optical Depth, AOD）与 WNM 冰川反照率的演变，获得了 2009 年至 2018 年雪和冰反照率与气溶胶负荷的相关性。我们优化了从资源三号（ZY-3）三线阵（Three-Line-Array, TLA）立体像对中提取数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）的过程，并利用 ZY-3 DEM 和 C 波段航天雷达地形测量任务（Shuttle Radar Topography Mission, SRTM）DEM 估算了念青唐古拉山（Nyainqentanglha Mountains, NM）两个区域的冰川质量平衡，时间段分别为 2000 年至 2013 年、2013 年至 2017 年和 2000 年至 2017 年。

利用 Sentinel 2（S2）MSI 和 Landsat-8（L8）OLI 影像数据，应用归一化图像互相关方法生成了从 2013 年至 2020 年藏东南帕隆藏布江地区的冰川表面速度时间序列。我们利用改进分辨率的 passiv microwave（PMW）卫星数据研究了 HMA 的湖冰物候（Lake Ice Phenology, LIP）。我们计算了 109 个湖泊开始结冰（The Freeze Onset, FO）、完全结冰（Complete Ice Cover, CIC）、开始融化（Melt Onset, MO）和完全无冰（Complete Ice Free, CIF）的日期，其中包括 1978 年至 2022 年的 22 个湖泊和 2002 年至 2022 年的 87 个湖泊。对 LIP 长时间序列的分析表明，湖泊结冰和融化的时间分别趋于较晚和较早，尤其是在 2000 年之后。

第二步的研究重点是生成冰川特定海拔高度的表面质量平衡剖面，以提供课题研究区冰川质量平衡变化的模式。我们的方法基于高质量的数字高程变化和冰川表面速度数据集，应用连续方程估算冰厚变化。我们得出了 HMA 5000 多个冰川数十年的海拔质量平衡剖面，并量化了平衡线高度和积累区面积比。我们应用 Pleiades、Deimos 和无人机高分辨率数据集，获取了课题所选流域准确的冰川消融和流速数据集。这些结果为验证生态水文地表模型及其冰川组分提供了重要的数据集。

在第三个综合步骤中，我们模拟了所选研究流域的冰冻圈、水圈和生物圈之间的地表相互作用。我们使用 Tethys-Chloris 地表模型，该模型描述了植被生物物理学以及雪与冰的融化、雪的重力重新分布和积雪过程等冰冻圈过程。目前，我们已经为五个不同的研究流域建立了模型，并以逐小时 100m 网格的统计降尺度 ERA5/Land 数据作为强迫驱动模型。我们通过与第一步和第二步获得的多个数据集仔细验证了模型模拟结果。尼泊尔喜马拉雅山脉的模型结果特别表明，通过积雪升华和蒸散发，潜热通量导致的水分损失与冰川融化提供的水分输入在数量上相当。

综合本项目的经验可得：1) 跨学科评估可模拟高山区流域冰冻圈-水圈-生物圈连续体及其相互作用的模型；2) 讨论使用高分辨率地球观测数据来限制气象强迫的不确定性并验证地表模型，以更好地了解 HMA 的蓝水-绿水-白水通量。

关键词：亚洲高山区；冰川质量平衡；地表模型；冰川径流；多光谱遥感；气溶胶；地表反照率；雪和冰；冰川表面流动；大气边界层