

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169422007788#s0005>

因此，本研究的主要目标是利用一个双向耦合的 3D 区域气候建模系统 (GLARM) 与 LBRM 和 CGLRRM 相结合，更好地解析陆地-湖泊-大气的相互作用过程，以及五大湖在气候时间尺度上的水位变化。在本研究中，基于耦合模式比较计划第五阶段 (CMIP5) 的三种 GCM，使用 GLARM 与 21 世纪初 (2000–2019 年) 和中期 (2030–2049 年) 在代表性浓度路径 (RCP) 8.5 情景下的气候变化进行了动态下调。通过模拟 21 世纪初期和中期的 NBS 组成部分变化，将其应用于观测到的 21 世纪初期 NBS，推导出未来 NBS，并利用 CGLRRM 模拟 21 世纪中期的水位变化。作者在研究中提出了一种先进的区域气候建模系统，以更准确地预测五大湖未来的水位变化。以下是模型的详细说明：

1. Great Lakes-Atmosphere Regional Model (GLARM)

GLARM 是作者构建的核心模型，用于模拟五大湖地区的区域气候和湖泊-大气相互作用。它的主要特点包括：

- **双向耦合**：将 RegCM4 (区域气候模型) 与 FVCOM (三维水动力湖泊模型) 耦合。
- **高精度模拟**：
 - **RegCM4**：一个三维的、大气水平方格点间距 18 公里的区域气候模型，主要负责模拟气流动态、辐射传输和地表过程。
 - **FVCOM**：一个基于有限体积方法的三维水动力模型，具有灵活的网格，可以高精度地模拟湖泊表面温度 (LST)、冰覆盖及湖泊环流。
 - **双向数据传递**：通过 OASIS3-MCT 耦合器，FVCOM 生成的湖面边界条件 (如水温 and 冰覆盖) 被传递给 RegCM4，而 RegCM4 生成的大气强迫条件 (如降水、风速) 反过来驱动 FVCOM。
- **优势**：
 - 能够解析湖泊-大气之间的复杂相互作用，例如湖效风暴 (lake-effect storms) 等。
 - 相较于传统的一维湖泊模型，三维湖泊模型显著提升了湖泊水动力和热力结构的模拟能力。

2. Large Basin Runoff Model - Clausius-Clapeyron (LBRM-CC)

LBRM 是一种概念性模型，用于模拟五大湖流域的径流。它的特点包括：

- **层级结构**：将流域划分成四个储层 (上层土壤、下层土壤、地下水、地表储层)，通过质量守恒方程计算径流和蒸散发。
- **数据要求低**：输入数据包括降水和温度，可适应五大湖地区稀疏的观测网络。
- **改进点**：采用了基于 Clausius-Clapeyron 关系的新公式，以更准确地表示气候变化对蒸散发的影响。

3. Coordinated Great Lakes Regulation and Routing Model (CGLRRM)

CGLRRM 是一个水文路由模型，用于根据净流域供给 (NBS) 计算五大湖的水位和湖间通道流量。其特点包括：

- **模块化设计**：

- 苏必利尔湖模块：根据历史调节规则（如 1977-A 调节计划）计算苏必利尔湖的水位和外流。
 - 中部湖泊模块：通过连续性方程和阶段-跌落流量关系，模拟密歇根-休伦湖、圣克莱尔湖和伊利湖的水位和流量。
 - 安大略湖模块：由于研究时此模块未完善，未纳入安大略湖的水位预测。
 - 综合考虑湖泊间相互作用：模型不依赖单个湖泊的 NBS，还考虑上下游湖泊的水位变化对流量的影响。
-

4. 动态下调 (Dynamical Downscaling)

为了提高预测精度，作者使用 GLARM 三种 CMIP5 全球气候模型 (GCM) 进行动态下调，具体包括：

- 时间范围：2000-2019（21 世纪初）和 2030-2049（21 世纪中期）。
 - 情景设定：采用 RCP 8.5 高排放情景，以评估气候变化的影响。
 - 方法：通过模拟历史和未来的气候数据，预测降水、蒸发和径流的变化，再将这些变化整合到 CGLRRM 中计算水位变化。
-

模型创新

- 首次使用双向耦合的三维模型：能够全面解析湖泊与大气间的复杂动态，如湖面温度变化、冰覆盖减少等。
 - 改进的径流模型：通过 LBRM-CC 的更新，提升了未来径流变化的模拟能力。
 - 精准的水位预测：结合历史数据和模型输出，减小了系统偏差对水位预测的不利影响。
-

研究意义

这套方法克服了以往一维湖泊模型的缺陷，为五大湖未来水位的精准预测奠定了基础，同时为湖泊生态系统、管理政策的制定提供了科学依据。