

# 冰冻圈湖中甲烷排放的温度依赖性

## Temperature dependences of methane emissions in cryosphere lakes

数据来源：Cryosphere Lake Greenhouse Gases Database 2025：  
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.29146295>

### 一、研究背景与科学问题

在全球气候变化研究中，高纬度寒区被认为是未来气候正反馈最不确定、也最具潜在风险的区域之一。寒区分布着数量庞大的湖泊，这些湖泊底部普遍存在丰富的有机质和长期厌氧环境，是甲烷这一强温室气体的重要自然源。随着全球变暖，冰封期缩短、水温升高以及多年冻土融化，这些湖泊极有可能释放更多甲烷，从而形成显著的气候正反馈。

当前的关键不确定性在于，寒区湖泊甲烷排放对温度变化究竟有多敏感，这种温度敏感性在不同湖泊之间是否相同，以及是否存在某些湖泊类型在变暖条件下反应尤为剧烈。正是在这一背景下，本研究系统整合冰冻圈湖泊温室气体数据，试图从定量角度回答寒区湖泊甲烷排放的温度敏感性及其尺度依赖特征。

### 二、温度敏感性与表观活化能 $E_a$

为了量化温度变化对甲烷通量的影响强度，本研究采用了生物地球化学中广泛使用的阿伦尼乌斯公式（Arrhenius equation）。许多生物化学过程可以表示为通量随温度呈指数关系，其中表观活化能  $E_a$  用来刻画过程对温度变化的敏感程度。通过将通量取对数，并以  $1/kT$  作为自变量进行线性回归，回归斜率即可直接解释为表观活化能  $E_a$ 。

$$\text{flux} \propto \exp(-E_a/(kT))$$

其中，flux 表示甲烷通量，A 为与体系性质相关的比例常数， $E_a$  为表观活化能（单位为 eV），用于刻画该过程对温度变化的敏感程度，k 为玻尔兹曼常数，

T 为绝对温度（单位为 K）。取对数后：

$$E_a = \partial \log(\text{flux}) / \partial (1/(kT))$$

其中， $E_a$  表示表观活化能，定义为通量对 Arrhenius 温度变量  $1/(kT)$  的偏导数，用于刻画甲烷通量随温度变化的瞬时响应强度， $k$  为玻尔兹曼常数， $T$  为绝对温度。

这一概念具有清晰的物理意义。 $E_a$  越大，意味着通量对温度越敏感，变暖一点便会带来显著增加； $E_a$  越小，则表明过程对温度变化的响应较弱。因此，整篇研究的核心目标之一，就是系统估计寒区湖泊甲烷排放的  $E_a$ ，并理解  $E_a$  在不同湖泊之间为何存在巨大差异。

### 三、三种甲烷排放路径

研究严格区分了寒区湖泊中三类不同的甲烷排放路径。第一类是扩散通量（Diffusive  $\text{CH}_4$ ,  $d\text{CH}_4$ ），即甲烷从水体中缓慢扩散进入大气，这一过程不仅受产甲烷控制，还受到水体传输、氧化和边界层过程的影响。第二类是鼓泡通量（Ebullitive  $\text{CH}_4$ ,  $e\text{CH}_4$ ），即甲烷以气泡形式直接从沉积物逸出，更直接反映厌氧产甲烷过程。第三类是总通量（Total  $\text{CH}_4$ ,  $t\text{CH}_4$ ），即扩散与鼓泡的合成结果。

区分这三类路径的意义在于，不同过程受温度控制的机制可能完全不同，从而导致温度敏感性存在本质差异。本研究的重要问题之一正是，总通量的温度响应究竟由哪一类过程主导。

### 四、冰冻圈湖泊综合数据库

本研究的一个重要基础性贡献是系统构建了覆盖冰冻圈的湖泊温室气体综合数据库。数据来源包括同行评议论文、学位论文以及多个公共数据平台（Arctic Data Center、Zenodo、EDI、PANGAEA 等），检索范围覆盖北极地区、青藏高原、格陵兰、南极边缘以及多年冻土区。最终形成的数据集不仅包含站点地理信息和湖泊尺度属性，还系统整合了水温、水质指标以及三类甲烷通量。

这一综合数据库为开展跨区域、跨尺度的温度敏感性分析提供了前所未有的数据基础，使得从宏观角度系统刻画寒区湖泊甲烷反馈成为可能。

## 五、研究的总体逻辑主线

整篇研究围绕温度敏感性这一核心问题，形成了一条清晰的递进式分析逻辑。首先，在总体层面检验寒区湖泊甲烷排放是否呈现 Arrhenius 型温度响应。结果表明，无论是扩散、鼓泡还是总通量，均呈显著正的温度依赖关系，其中鼓泡过程的表观活化能显著高于扩散过程。

其次，研究进一步考察不同湖泊之间温度敏感性的空间异质性。通过对每一个站点单独拟合回归，发现站点级  $E_a$  分布极为宽广，尤其鼓泡过程表现出显著长尾分布，表明不同湖泊对变暖的响应强度差异巨大。

第三步，引入湖泊尺度作为解释变量。研究提出，湖泊的面积与最大水深可能系统性调制温度敏感性，因为尺度会影响水体分层、厌氧区形成以及产甲烷微环境。通过按深度和面积分组的可视化分析，结果显示不同尺度组之间的回归斜率明显不同。

第四步，也是方法上的创新点，研究采用滑动阈值方法遍历不同面积和深度阈值，将湖泊划分为小于阈值和大于等于阈值两组，分别估计两组的  $E_a$ ，并考察两组  $E_a$  何时开始明显分离。由此识别潜在的关键尺度或临界点，表明温度敏感性并非随尺度连续变化，而可能在某些尺度上发生跃迁。

## 六、核心科学结论

综合上述分析，本研究得到几条具有高度概括性的结论。寒区湖泊甲烷排放整体对温度高度敏感，并呈典型 Arrhenius 型响应。

不同排放路径的温度敏感性差异显著，鼓泡过程远高于扩散过程，并在很大程度上主导总通量的温度反馈。

不同湖泊之间的温度敏感性高度异质，不能用单一参数刻画。

湖泊尺度是解释这种异质性的关键物理因子，面积和深度均可系统性调制温度响应强度。

存在关键尺度阈值，使得大湖泊和深湖泊在未来变暖条件下成为更强的甲烷正反馈源。

## 七、在气候变化研究中的意义

从更宏观的角度看，这项研究为寒区甲烷气候反馈提供了系统的定量约束。它表明，未来变暖风险并非由平均湖泊决定，而可能由具有特定尺度特征的一部分湖泊主导。这一认识对地球系统模型中甲烷参数化、高纬度碳反馈评估以及未来重点监测对象的筛选具有重要意义。