

第七届陆地生态系统青年学者学术研讨会

青藏高原地区甲烷通量对土壤升温响应的 季节差异性探究



汇报人：刘侦海

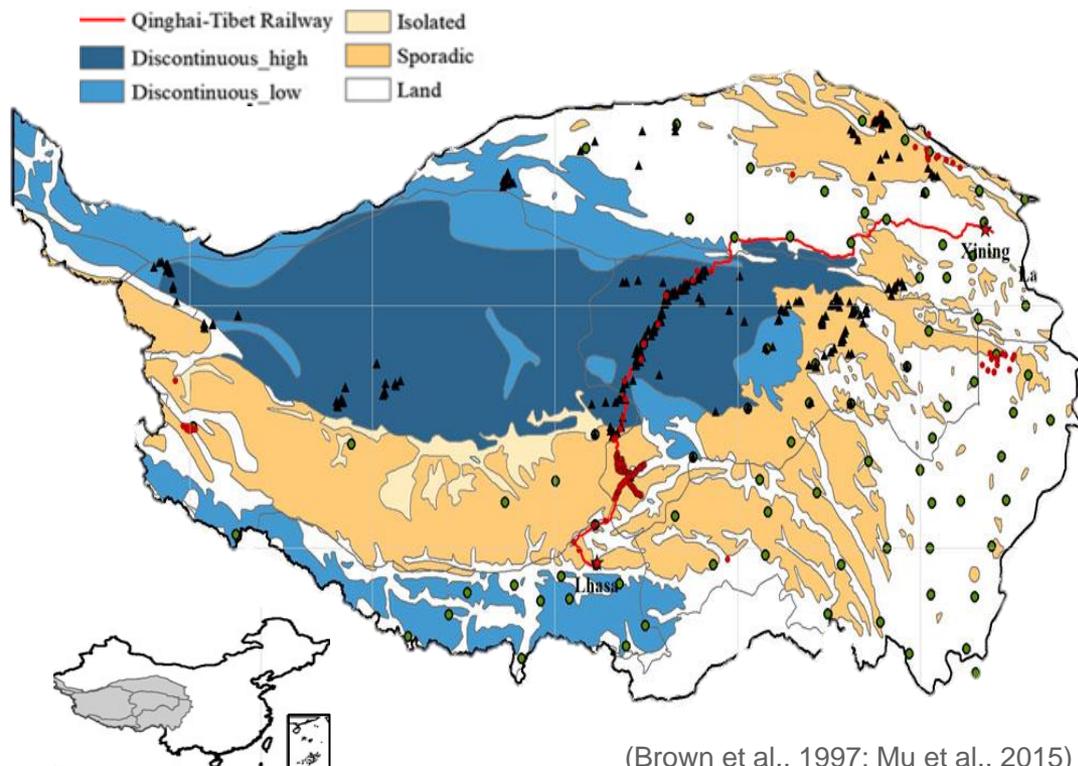
单位：中国科学院地理科学与资源研究所

2023.7.28 · 林芝

// Contents

- 1、研究背景与意义**
- 2、研究内容与方案**
- 3、数据分析与结果**
- 4、讨论与结论**

青藏高原冻土



(Brown et al., 1997; Mu et al., 2015)

青藏高原拥有世界上最大的高山冻土区，
多年冻土覆盖率约

40.2%

季节性冻土覆盖率约

56.0%



青藏高原多年冻土区2 m深SOC储量约

28 Pg C

全球多年冻土碳库约是大气碳库的

两倍

陆地植被碳库的

三倍



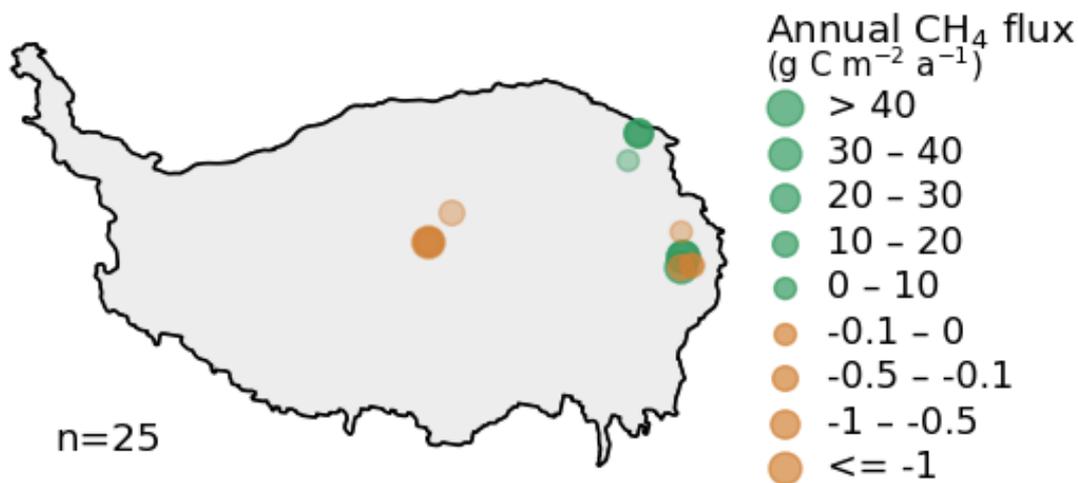
Carbon pool

青藏高原甲烷的源汇特征

CH₄在100年内的全球变暖潜力是二氧化碳的28倍

- 是第二大最重要的温室气体；
- 监测显示，2016年大气CH₄浓度已经比工业化前水平高出257%；

- 青藏高原**高寒湿地**占我国现存天然湿地的36%，是重要的**甲烷源**，CH₄交换为**0.16-2.37 Tg C yr⁻¹**
- 青藏高原**高寒草地**约占我国草地面积的40%，是重要的**甲烷汇**，CH₄交换为**-0.55-0.10 Tg C yr⁻¹**

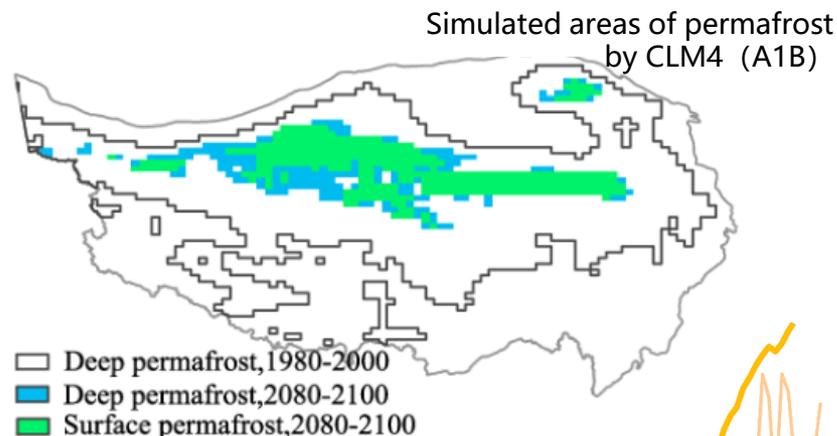


Wetlands: vegetated wetlands, marshes, and peatlands
Grassland: steppes and meadows

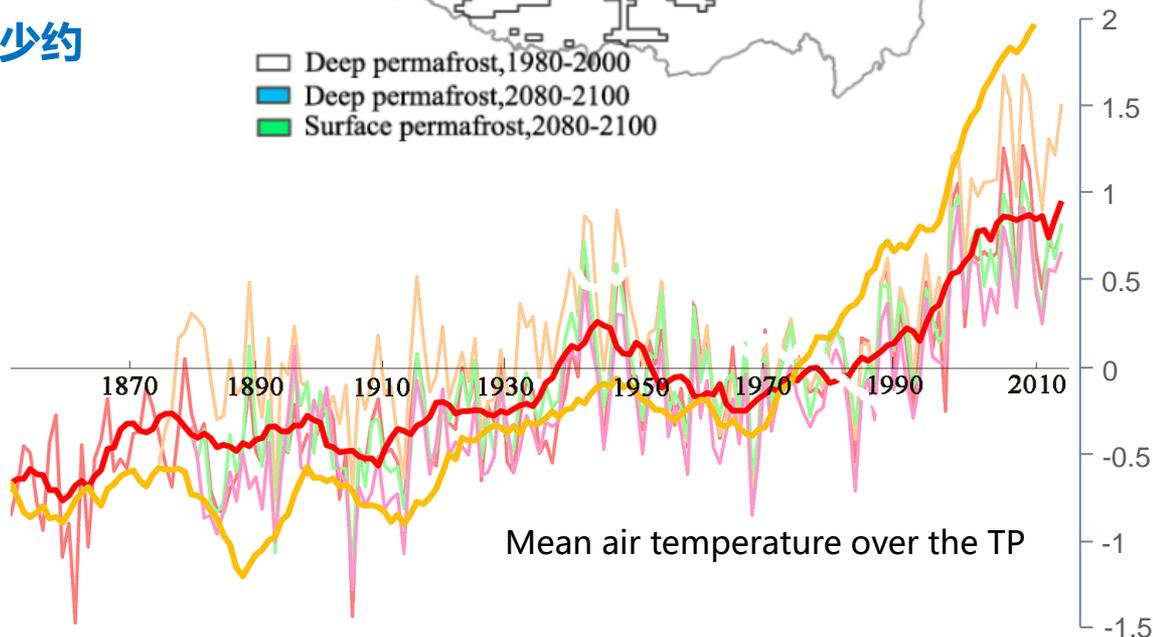
青藏高原湿地和草地的源汇特征仍存在较大不确定性。

气候变暖导致冻土持续退化

- 1960年以来, 青藏高原气温以**每10年0.2-0.3°C**的速度上升, 远高于全球平均增温幅度(每10年 0.05-0.08°C) ;
- 1980-2010年期间, 青藏高原的永久冻土的面积以**每10年 $6.6 \times 10^4 \text{ km}^2$** 的速度下降;
- 在中等排放路径 (A1B) 下, 21世纪末青藏高原多年冻土面积可能将**减少约81%**。



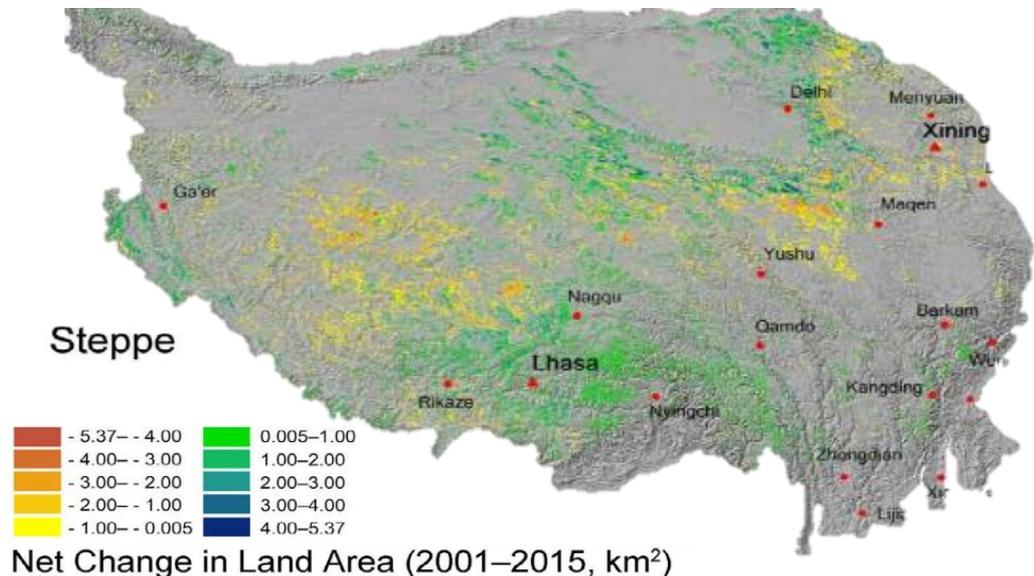
青藏高原多年冻土的剧烈退化, 将显著影响冻土区地表各生态要素间的相互作用关系!



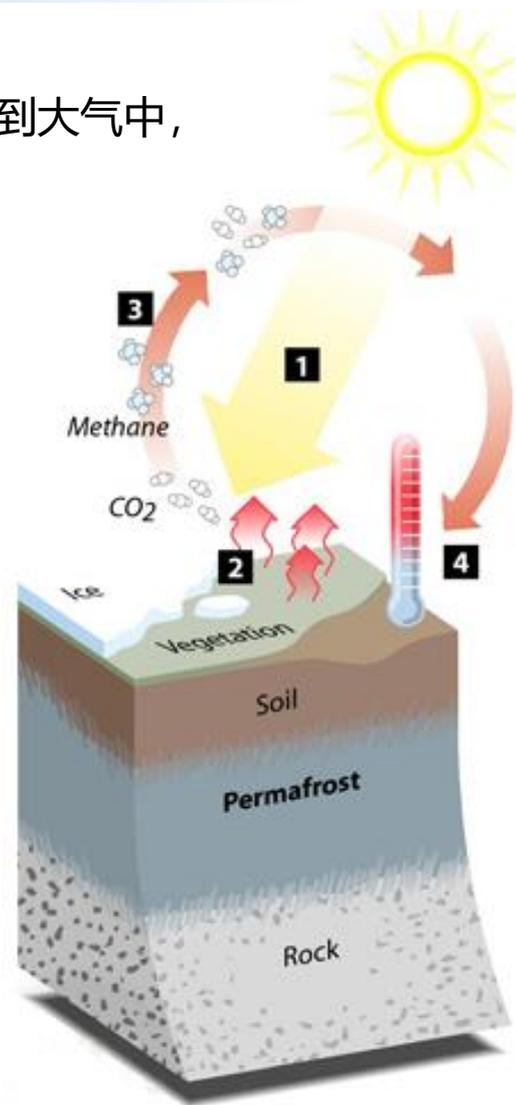
(Chen et al. 2013; Jia et al. 2020)

冻土退化影响陆地碳交换

- 气候变暖导致的多年冻土退化，会使储存在冻土中的大量碳释放到大气中，改变全球碳循环，**进一步加剧气候变暖**；
- RCP4.5和RCP8.5情景下，21世纪末青藏高原多年冻土区碳释放量分别为~**1.86±0.49 Pg**和~**3.80±0.76 Pg**；
- 冻土退化导致青藏高原湿地和草地均正在经历**显著的面积变化**，进一步改变青藏高原的碳交换特征（CO₂、CH₄）。



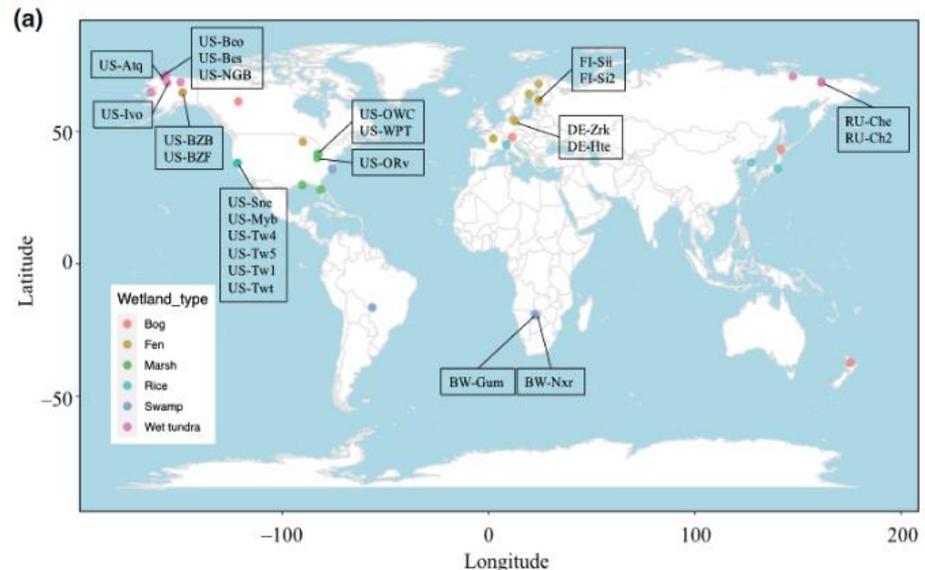
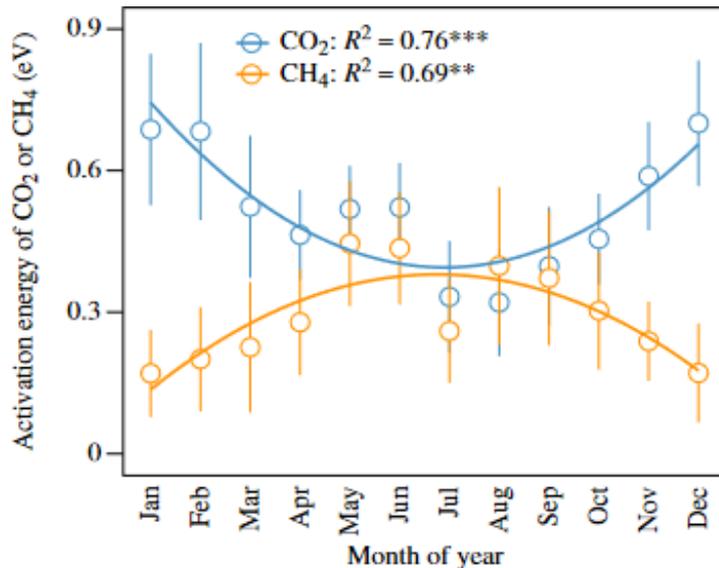
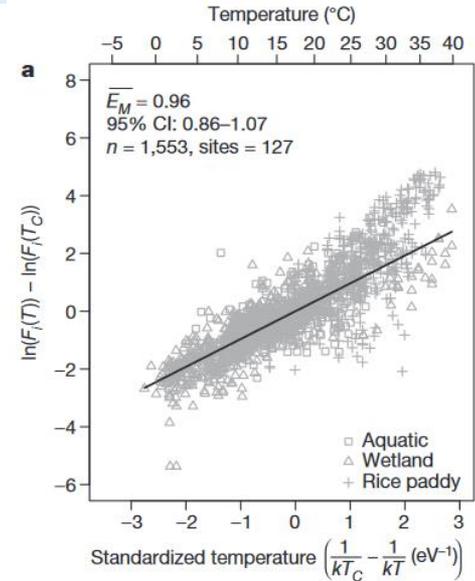
(Wang, et al., 2019, *Remote Sens.*)



(Wang, et al., 2020, *Science Advances*)

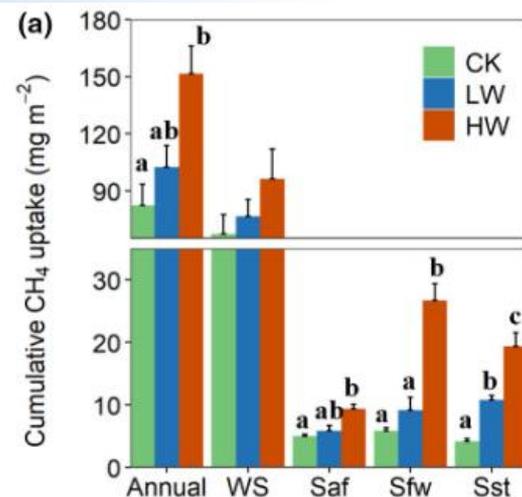
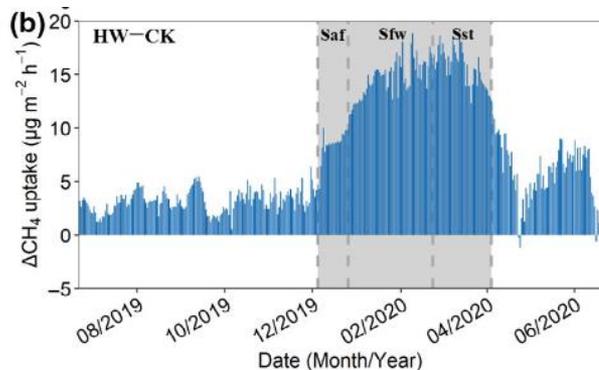
甲烷交换具有温度依赖性

- CH₄排放通量已被广泛证明具有温度依赖性，**随温度升高CH₄排放增加**；
- 基于FLUXNET的全球研究表明，**生长季CH₄的温度依赖性**强于非生长季，但该研究忽略了青藏高原这一重要高寒地区；
- 草地地区CH₄交换的温度依赖性也尚不清楚。



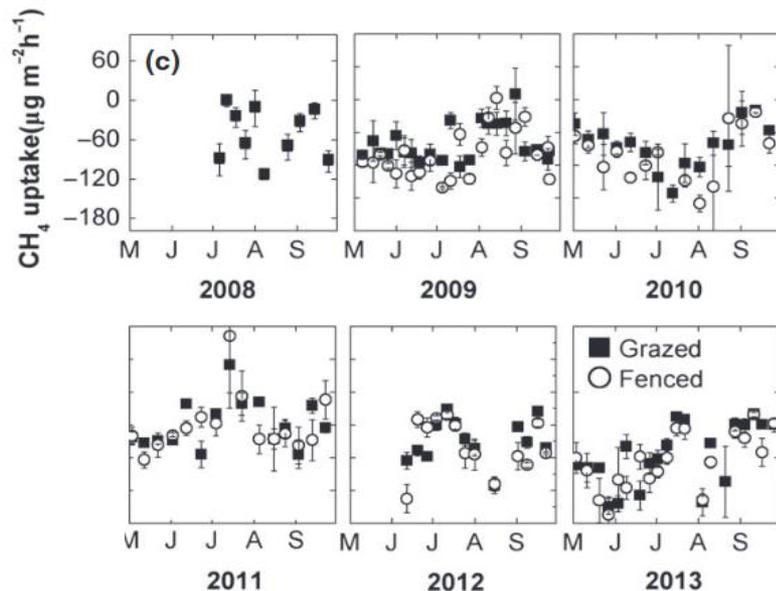
青藏高原甲烷升温响应的季节差异

- 基于红原草甸站点的控制实验表明，青藏高原草地 CH_4 交换在冬春季的增温响应大于夏秋季；



(Peiyan Wang et al., 2020, GCB)

- 但由于青藏高原恶劣的环境条件，过去多数站点的甲烷通量观测仅分布在生长季，且时间不连续；



(Wei et al., 2015, GCB)

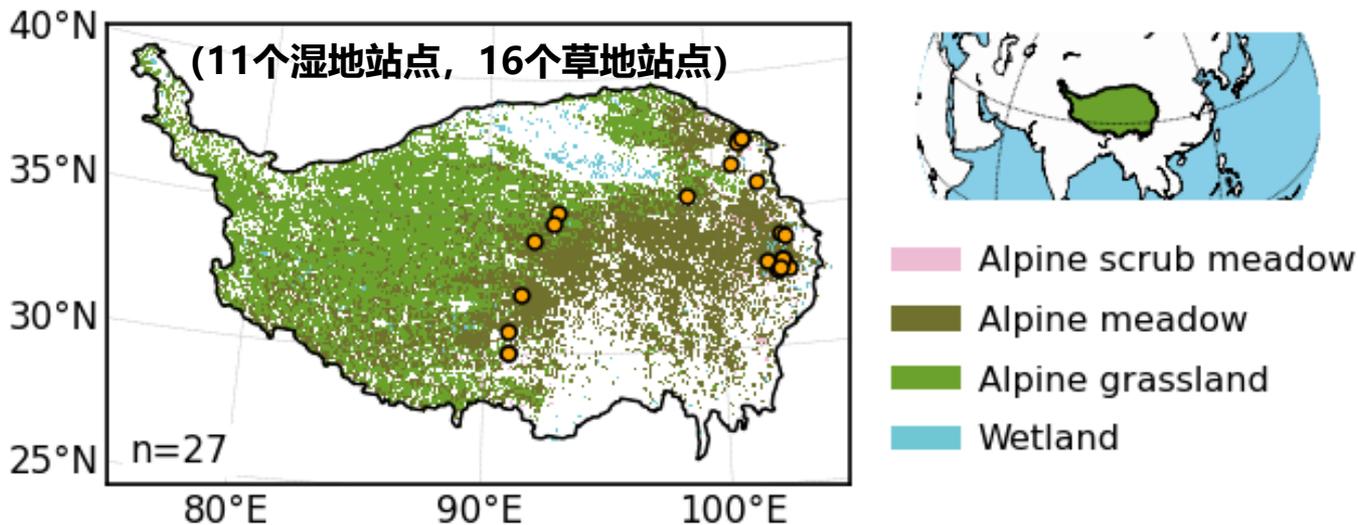
青藏高原湿地和草地甲烷交换温度敏感性的季节特征尚不清楚。

研究问题

- 青藏高原湿地和草地地区甲烷交换对土壤升温的响应具有怎样的季节特征？
- 这种季节特征在湿地和草地间是否存在差异？
- 气候变暖背景下，这种季节性将如何影响青藏高原湿地和草地甲烷交换的模拟？

研究内容

6521 daily observations



- ① 土壤温度-CH₄拟合
- ② 土壤升温控制实验
- ③ 温度依赖性计算
- ④ 机器学习建模



草地
湿地

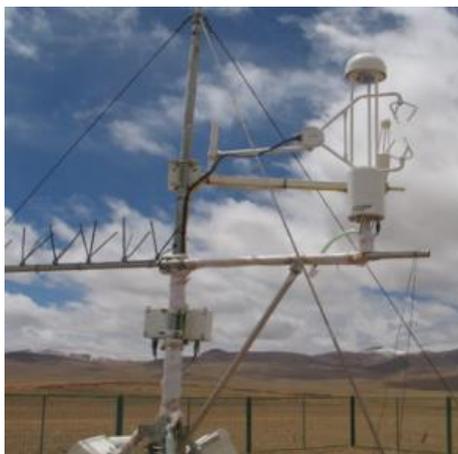
生长季 非生长季

甲烷源汇特征及其对土壤升温的响应

数据收集

开路涡度通量观测系统

8个站点
半小时、小时、天步长



自动不透明气室- 近红外激光CH₄分析仪

2个站点
半小时、小时、天步长



静态气室-气相色谱技术

17个站点
多天、周、月步长



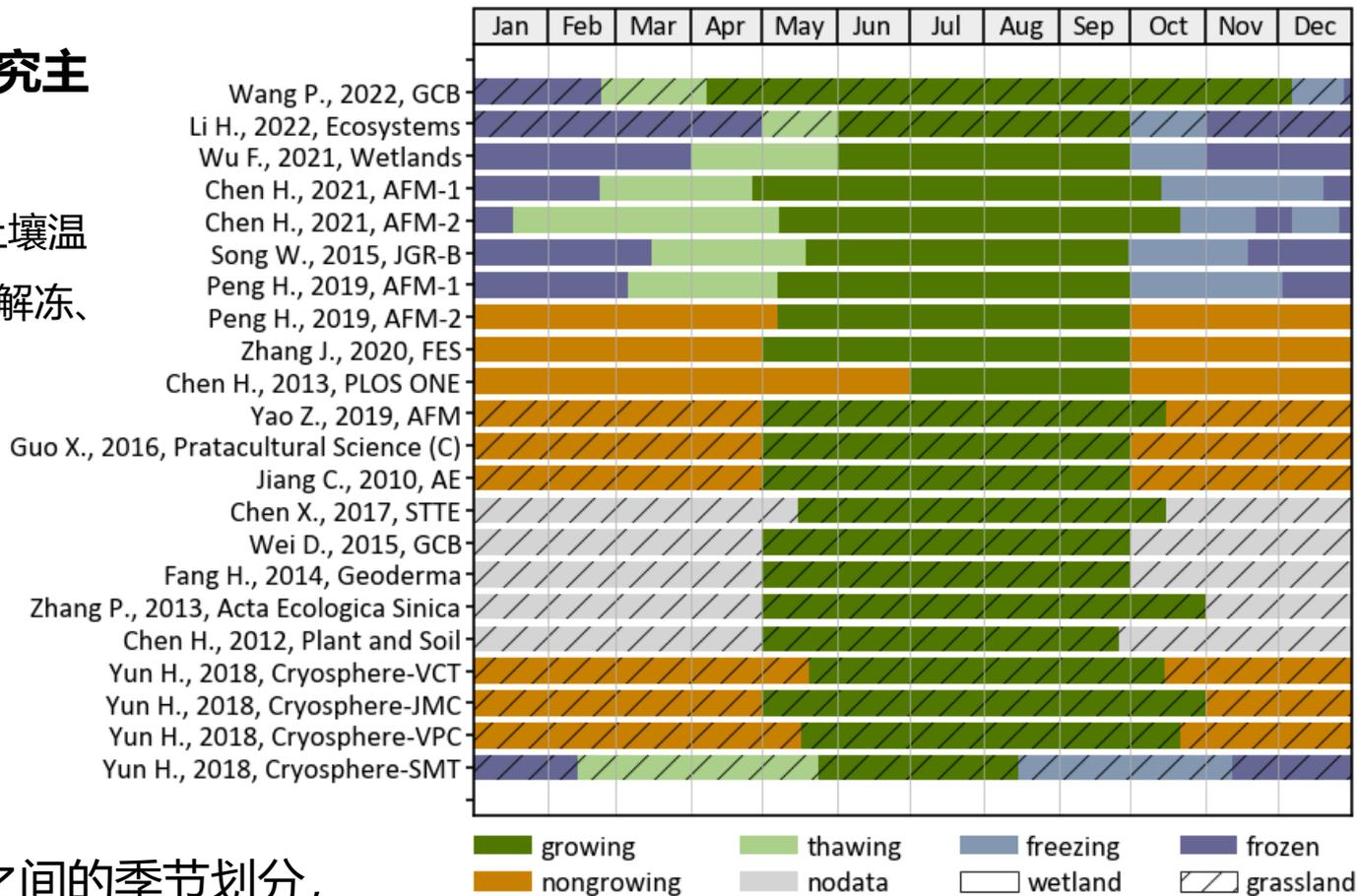
25个站点年的整年数据

季节划分

青藏高原甲烷相关研究主

要的季节划分方法:

- 土壤温度变化(根据土壤温度将一年分为冻结、解冻、解冻和冻结季节)
- Julia月
- 植被物候变化
- 微生物活性分类等

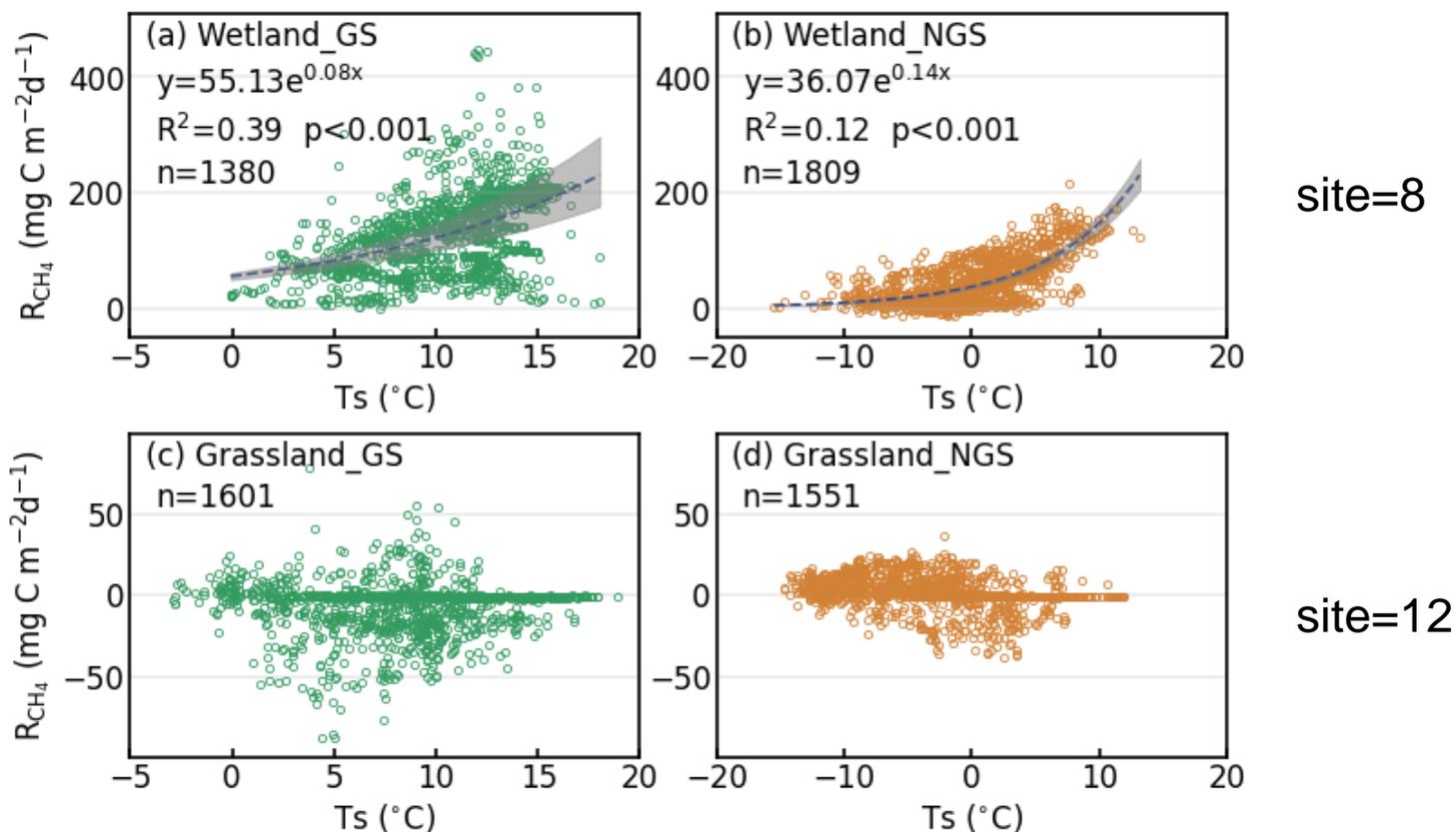


为统一站点和年份之间的季节划分，同时突出不同季节CH₄通量对土壤变暖的响应，**选择“Julia月”划分法。**

生长季（五月-九月）
非生长季（十月-次年四月）

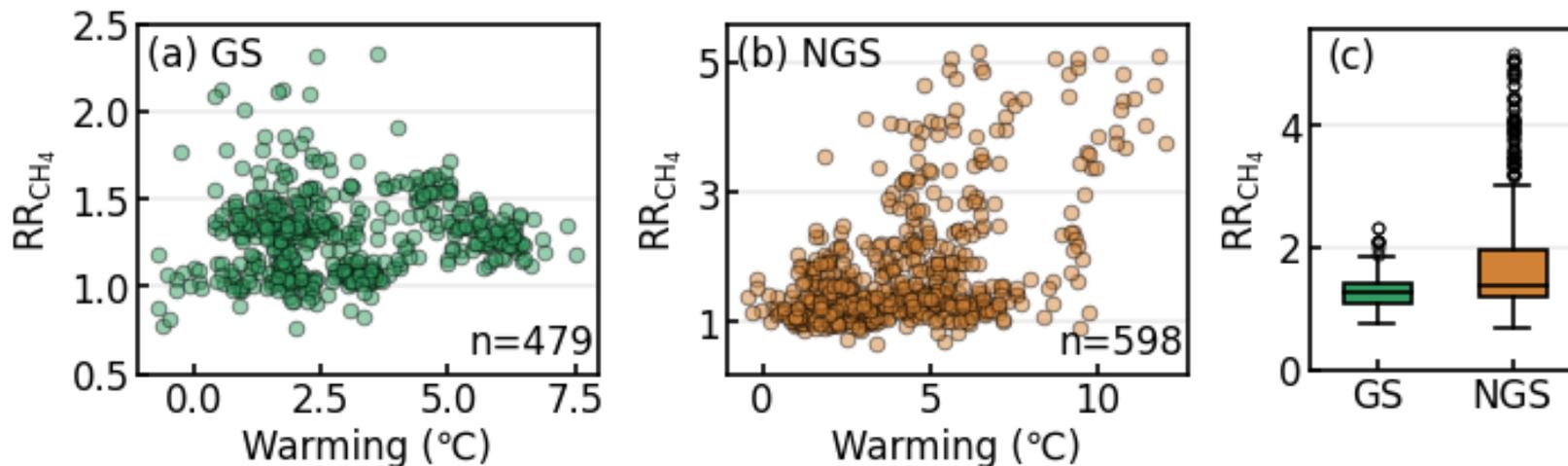
土壤温度-CH₄拟合

- **湿地站点**CH₄通量在生长季及非生长季均与土壤温度表现出**显著的非线性关系**;
- 当土壤温度大于0°C时, **非生长季CH₄通量增加更快**;
- 草地地区CH₄通量与土壤温度无显著的线性或非线形拟合关系;



土壤升温控制实验整合分析

- 对青藏高原**3个草地站点**的增温控制实验进行了整合分析；
红原 (Wang et al., 2021, AFM) (Wang et al., 2022, GCB) 青藏高原西部
Fenghuo Mountain (Chen et al., 2017, STTE) 青藏高原中部
- 控温措施相同时，生长季平均变暖 $2.90 \pm 1.78^\circ\text{C}$ ，非生长季平均变暖 $4.26 \pm 2.33^\circ\text{C}$ ；
- 生长季平均甲烷通量变化率为 1.29 ± 0.24 倍，非生长季平均甲烷通量变化率为 1.77 ± 0.93 倍；
- **非生长季土壤升温幅度及甲烷升温响应均强于生长季；**



$$RR_{CH_4} = R_{CH_4_warming} / R_{CH_4_control}$$

CH₄交换温度依赖性计算

$$\ln R_i(T) = (\bar{E} + \epsilon_E^i) \left(\frac{1}{kT_C} - \frac{1}{kT} \right) + \overline{\ln R(T_C)} + \epsilon_R^i$$

Boltzmann-Arrhenius function
波尔兹曼-阿仑尼乌斯方程

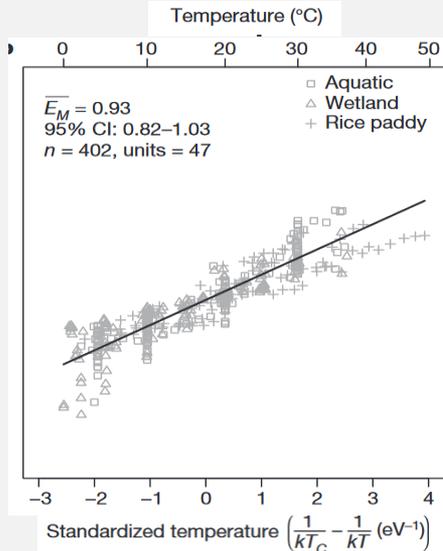
活化能是启动反应所需的最低能量，
温度依赖性可以用表观活化能来描述。

Published: 19 March 2014

Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales

Gabriel Yvon-Durocher , Andrew P. Allen, David Bastviken, Ralf Conrad, Cristian Gudasz, Annick St-Pierre, Nguyen Thanh-Duc & Paul A. del Giorgio

Nature 507, 488–491 (2014) | [Cite this article](#)



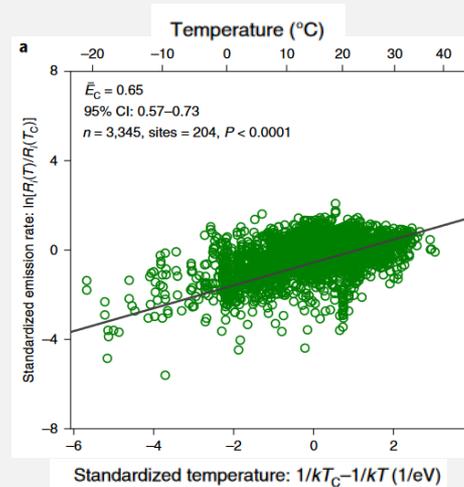
文章基于荟萃分析表明：
生态系统的CH₄排放表现出与实验室培养的产甲烷菌和厌氧微生物群落的CH₄产生相似的平均温度依赖性。

Article | Published: 09 August 2021

Differences in the temperature dependence of wetland CO₂ and CH₄ emissions vary with water table depth

Hongyang Chen, Xiao Xu, Changming Fang, Bo Li & Ming Nie 

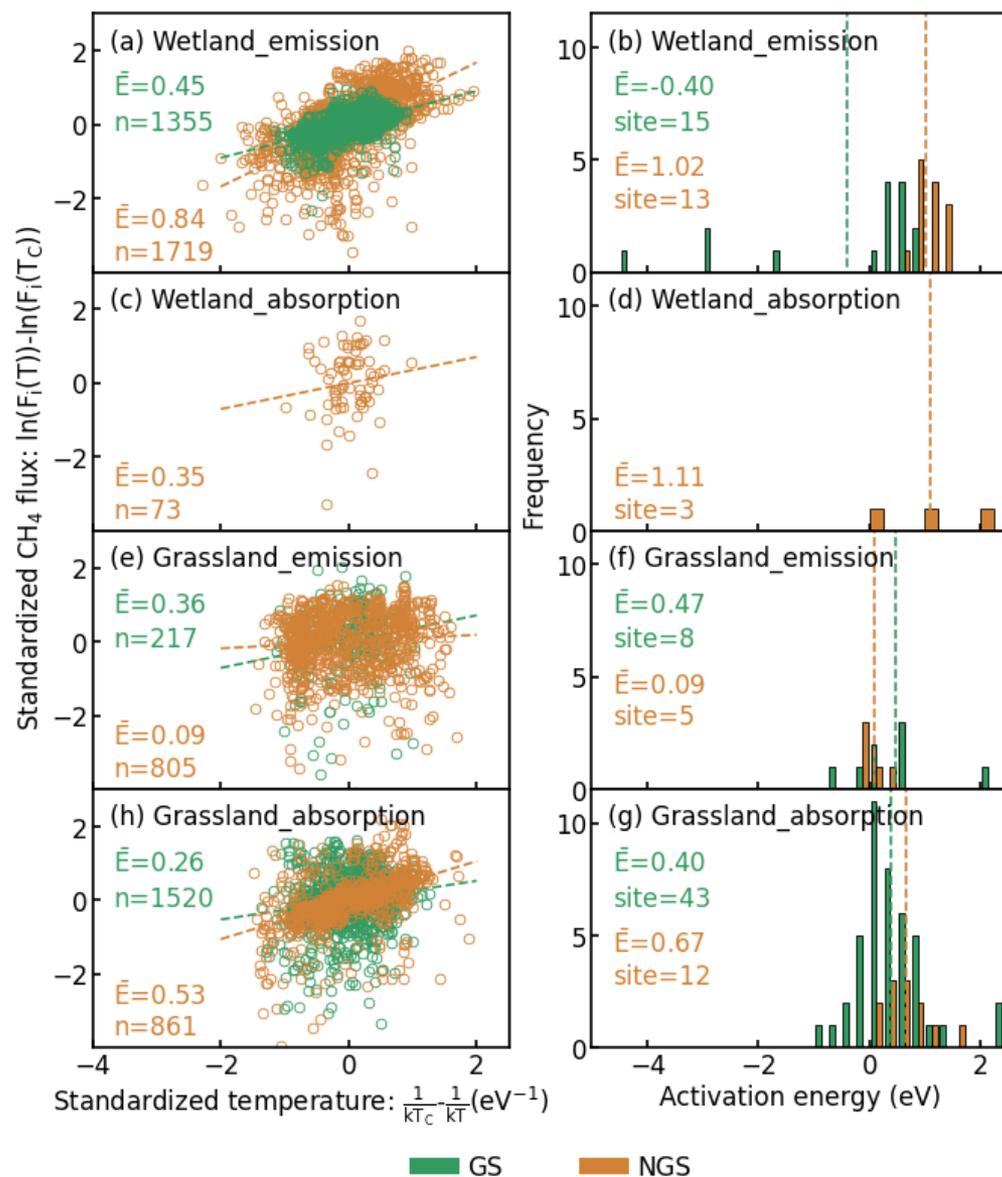
Nature Climate Change 11, 766–771 (2021) | [Cite this article](#)



文章利用全球数据库评估了CO₂和CH₄排放对地下水位深度的温度依赖性特征。

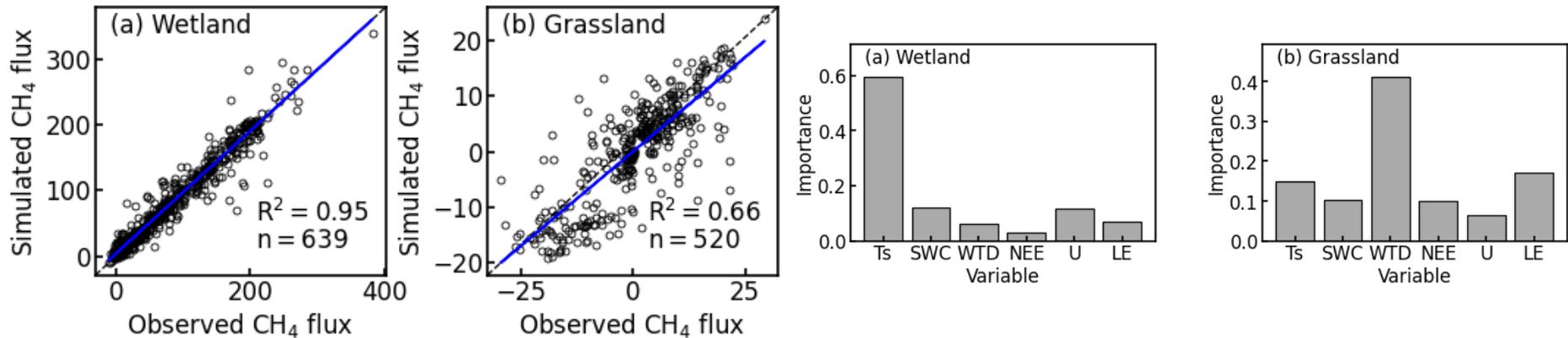
CH₄交换温度依赖性计算

- 湿地站点CH₄排放、草地站点CH₄吸收的温度依赖性均在非生长季强于生长季；
- 但草地站点CH₄排放的温度依赖性在生长季强于非生长季；
- 站点整合的温度依赖性及其站点水平的平均温度依赖性具有一致的特征；
- 湿地站点多表现为CH₄排放，生长季及非生长季甲烷吸收数据点均较少；



机器学习建模分析

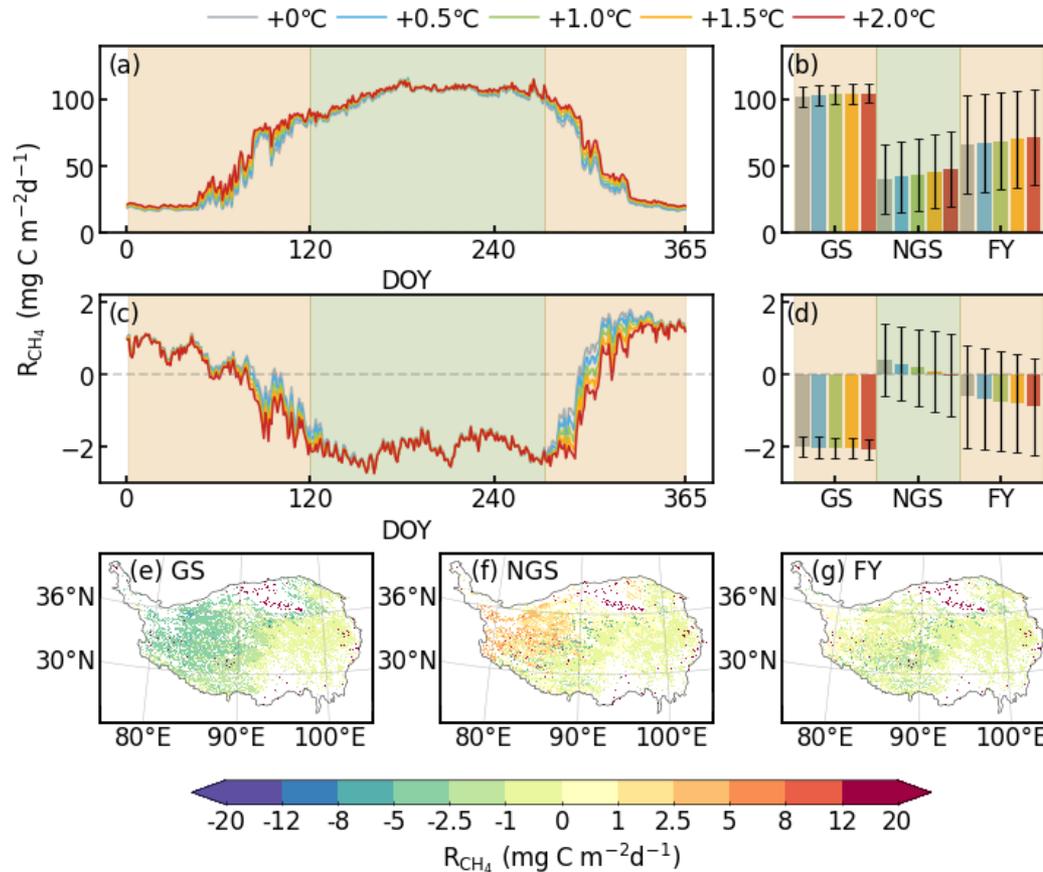
使用随机森林方法训练拟合环境影响指标(Kim et al., 2020, GCB)与甲烷通量的关系;



Variables	Mechanistic relationship	Description of regional data
NEP	Net ecosystem productivity (carbon substrates and respiration)	Net ecosystem productivity simulated by BEPS model (daily, 1981–2019; 8 km, global) (Ju and Zhou, 2021)
WTH	Water table height (anaerobic condition or barrier for the CH ₄ transport)	Groundwater table depth (monthly, single year; 1 km, global) (Fan et al., 2013)
SWC	Soil water content	ERA5-Land volumetric soil water layer 1 (hourly, 1950–2023; 0.1°, global) (Muñoz Sabater, J., 2019)
Ts	Soil temperature (enzyme kinetics)	ERA5-Land soil temperature level 1 (hourly, 1950–2023; 0.1°, global) (Muñoz Sabater, J., 2019)
U	Friction velocity (CH ₄ transport related to turbulence)	CRU-JRA v2.2 wind speed (6-hourly, 1901–2019; 0.5°, global) (Harris, 2019)
LE	Latent heat flux (plant-mediated CH ₄ transport related to transpiration)	MODIS MOD16A2 Version 6 Latent Heat Flux (8-day, 2001–2023; 500 m, global) (Running, S. et al., 2017)

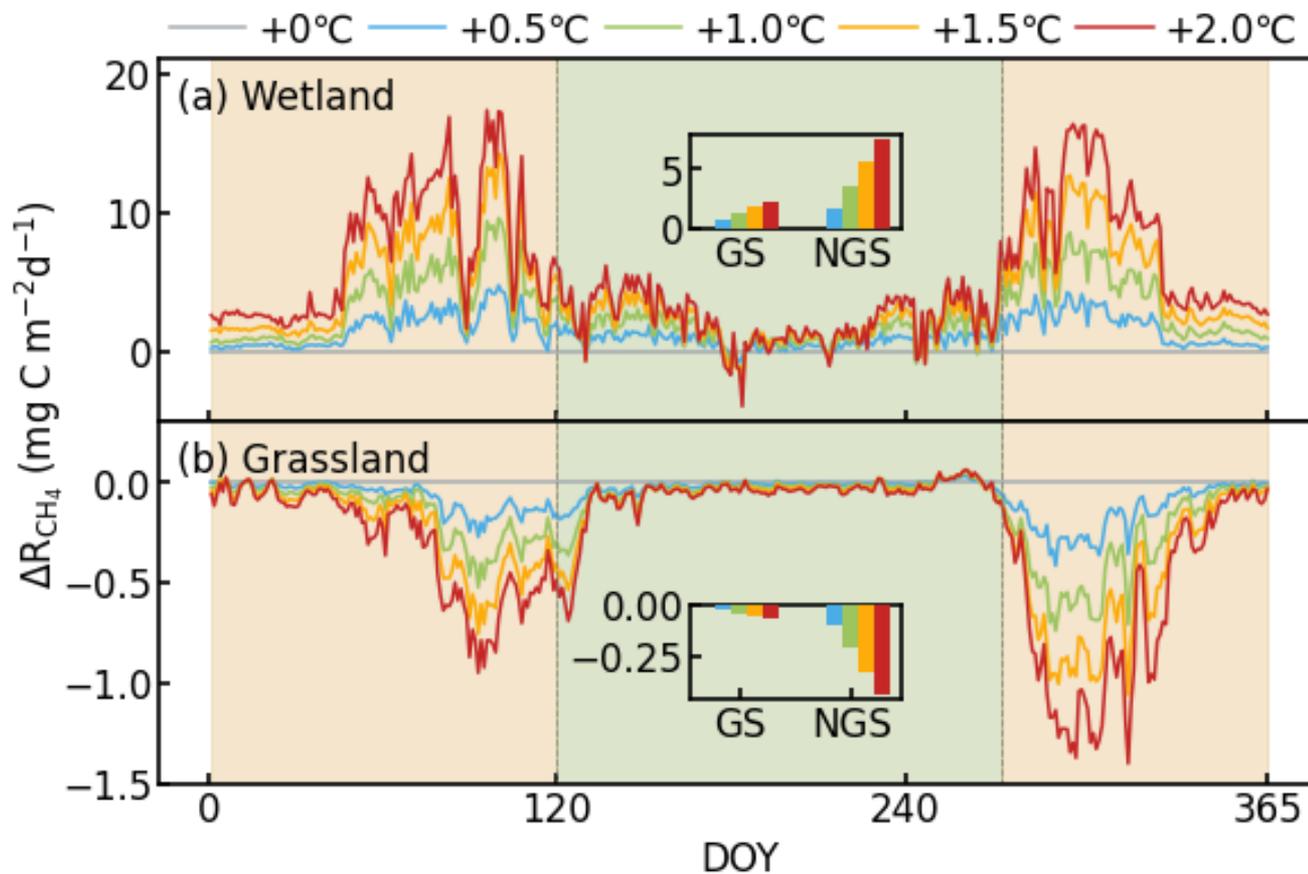
机器学习建模分析

为研究湿地和草地CH₄日交换对土壤增温响应的季节特征，设计了每日土壤温度分别升高+0°C(对照)、+0.5°C、+1.0°C、+1.5°C、+2.0°C的5个模拟方案，分别模拟青藏高原湿地和草地地区的甲烷通量时空变化。



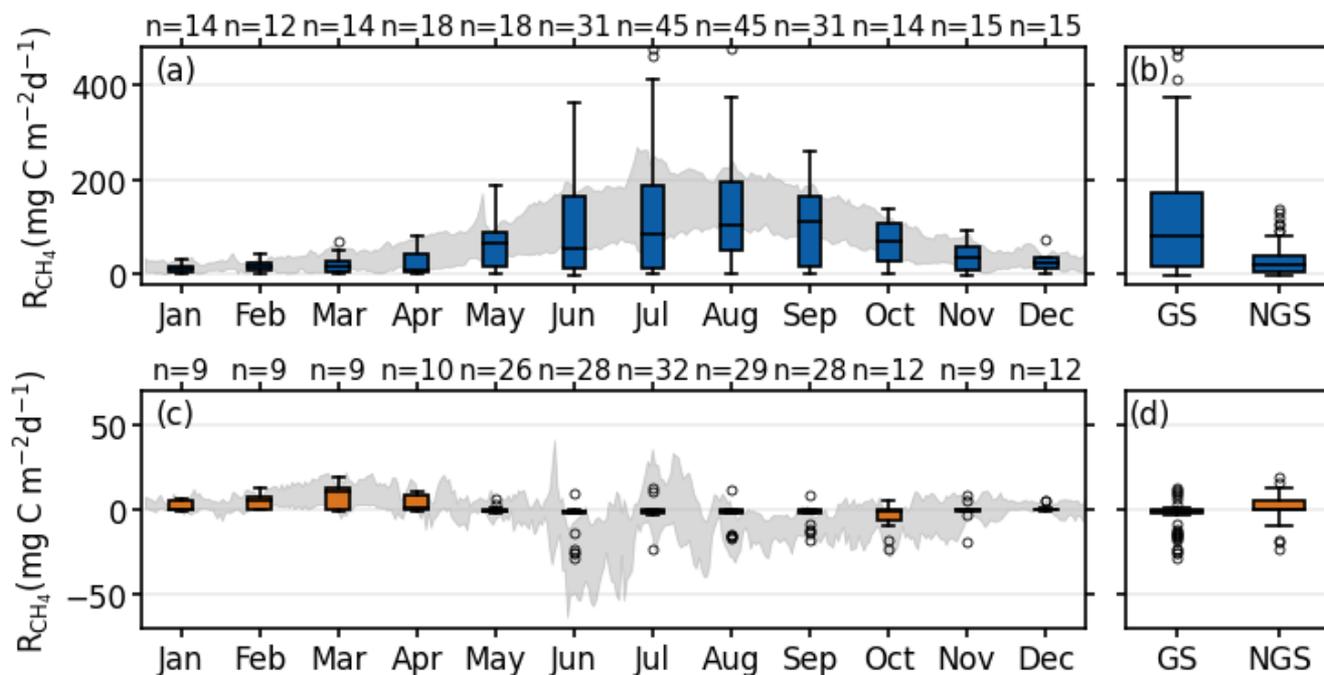
机器学习建模分析

- 湿地甲烷排放随土壤温度升高而增加，草地甲烷吸收随土壤温度升高而增加；
- 随升温的增加，生长季和非生长季的甲烷变化量差异逐渐增大；
- 非生长季特别是转换阶段(春融秋冻)， CH_4 交换受土壤增温引起的变化最大；



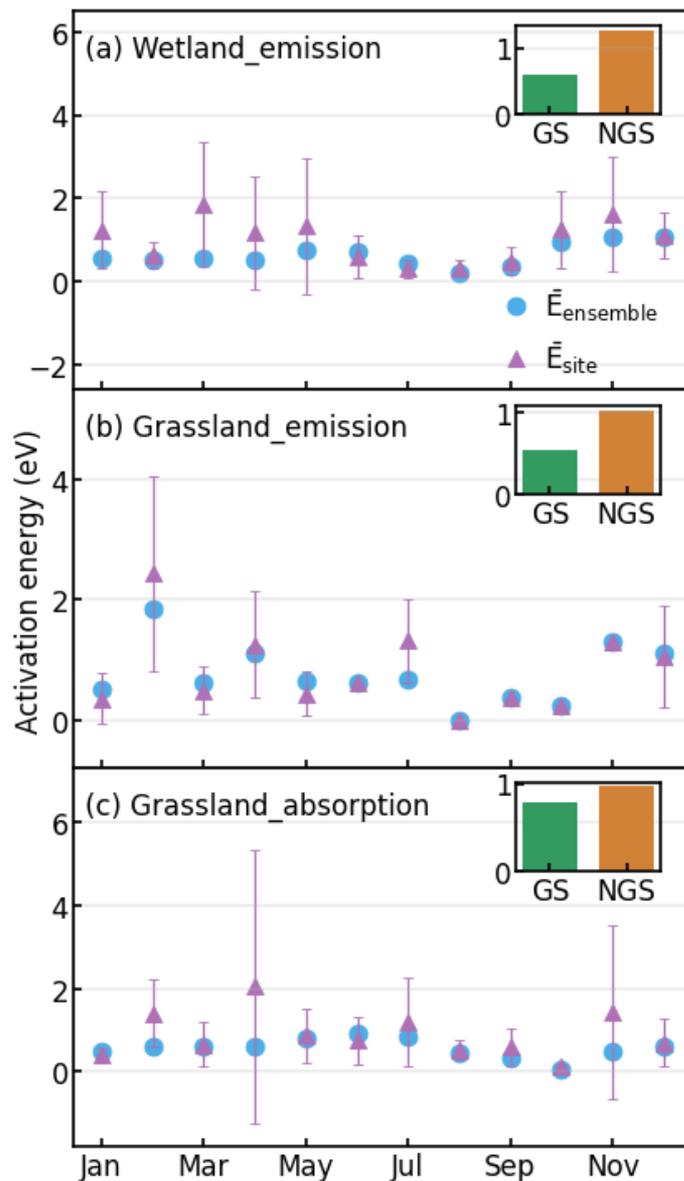
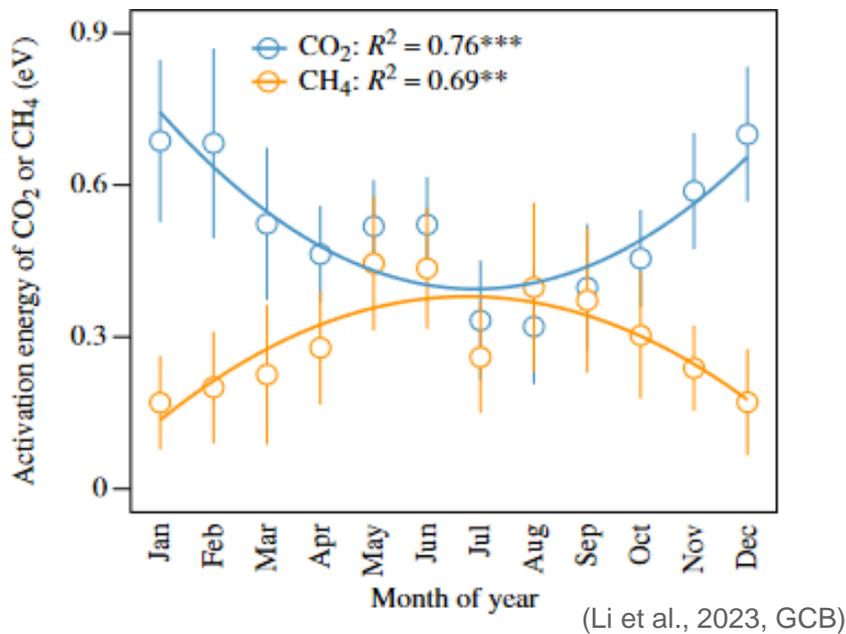
青藏高原甲烷的源汇变化

- 根据站点观测，湿地表现为甲烷源，草地生长季为甲烷汇，非生长季为甲烷源；
- 湿地甲烷排放在非生长季具有更强的升温响应，土壤升温将导致**非生长季湿地甲烷排放增加**；
- 草地甲烷吸收在非生长季具有更强的升温响应，土壤升温将导致**非生长季草地甲烷排放减少，吸收增加**；



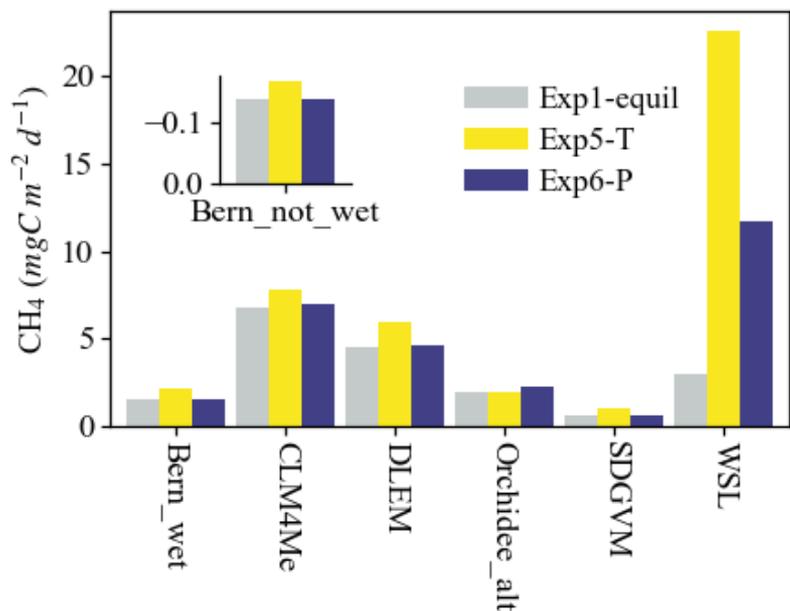
青藏高原甲烷温度依赖性季节特征与全球的差异

- 基于FLUXNET的全球研究表明，**生长季CH₄的温度依赖性强于非生长季**，但该研究忽略了青藏高原这一重要高寒地区；
- **青藏高原湿地和草地的CH₄温度依赖性均为非生长季强于生长季**；



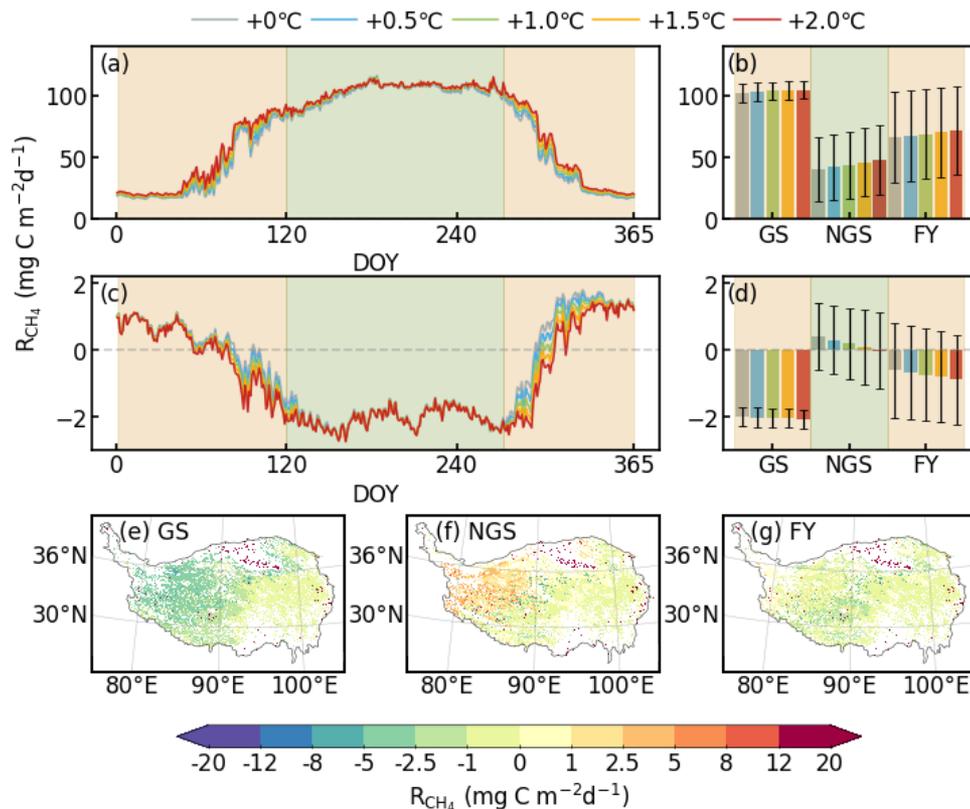
温度依赖性的季节差异影响区域甲烷模拟

- 当前模型多关注湿地甲烷的排放，但缺少甲烷吸收的模拟，同时甲烷排放量被低估；
- 升温情景下青藏高原甲烷交换不确定性增加，特别是在非生长季；



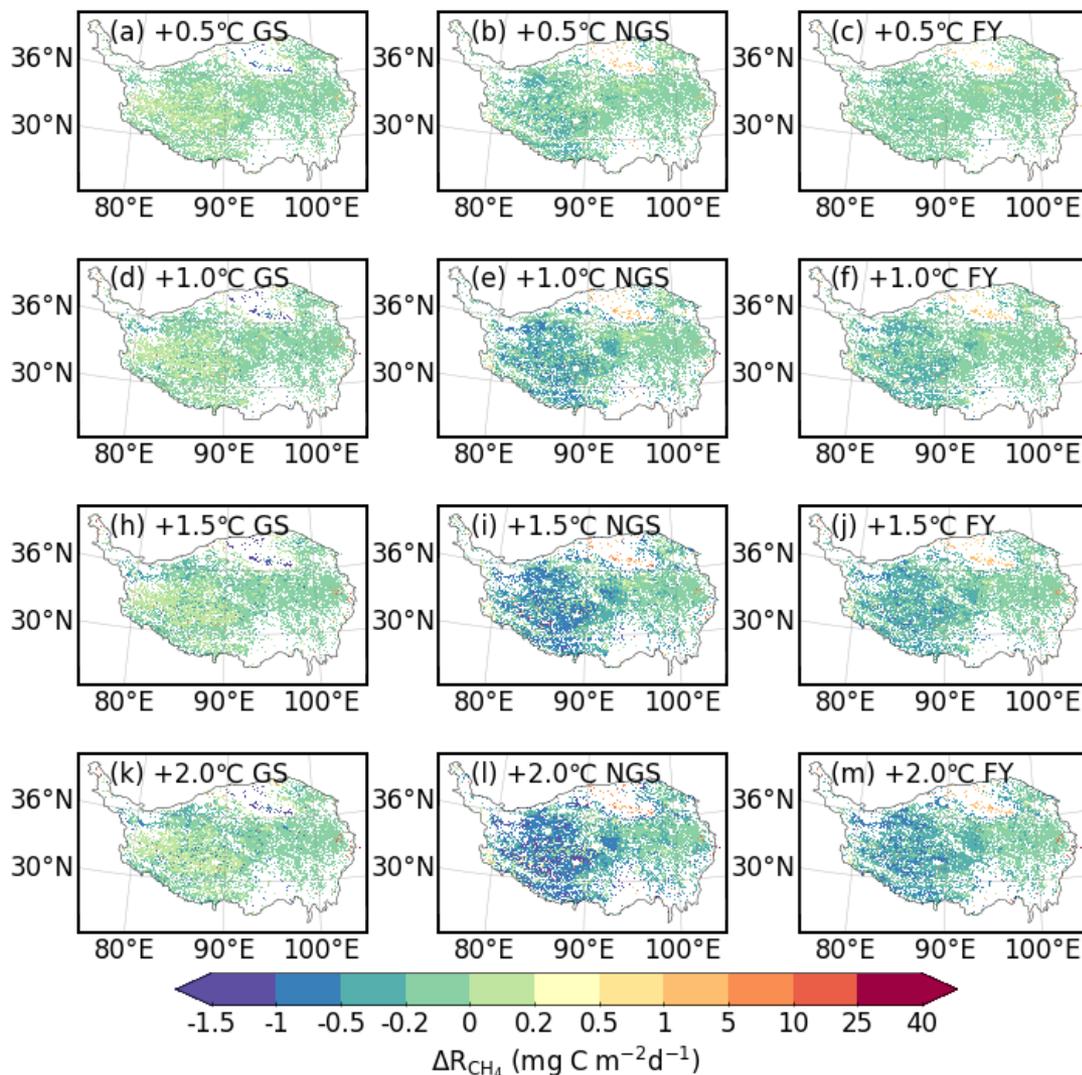
基于模型的甲烷模拟 (WETCHIMP)

青藏高原区域



温度依赖性的季节差异影响区域甲烷模拟

- 非生长季的甲烷通量变化主导了全年的变化;
- 青藏高原中西部草地甲烷通量对土壤升温的响应更强;
- 但随机森林模型的主要训练数据位于青藏高原中东部, 当前模拟结果仍存在较大不确定性, 更详细的分析还需要更多的数据支撑;



主要结论

- 研究强调了在青藏高原的湿地和草地站点，**相比生长季，非生长季的CH₄交换具有更强的升温响应**，特别是在转换阶段(春融秋冻)；
- 随着气候变暖，**青藏高原湿地的CH₄排放预计将增加，而草地的CH₄吸收预计将增加**；
- 青藏高原CH₄交换在非生长季变化更大，特别是在中西部草原地区。忽略季节和植被类型对CH₄交换增温响应的差异，将导致气候变暖条件下青藏高原CH₄交换的模拟出现严重误差；
- 青藏高原冬季升温速度是年平均速度的两倍，**青藏高原显著且季节不平衡的增温将进一步增加CH₄源汇预算的不确定性**，要求在模式模拟中需要更细致地考虑CH₄交换增温响应的季节特征。

敬请各位老师批评指导!

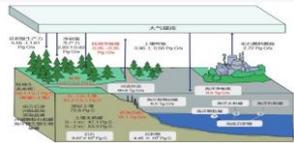
汇报人：刘侦海

单位：中国科学院地理科学与资源研究所

liuzhenhai5436@igsnr.ac.cn

1. 课题目标与内容

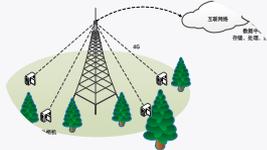
研究目标：基于生态系统过程模型和遥感反演数据，模拟并分析青藏高原冻土区冻土冻融变化对陆地生态系统碳汇资源的影响。



模型模拟

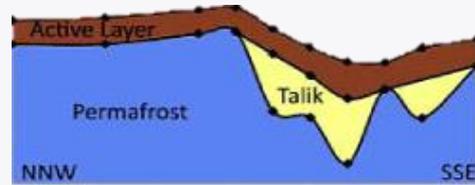


遥感反演



站点观测

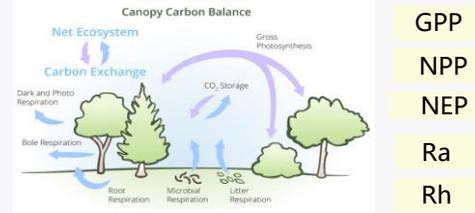
内容一：青藏高原冻土区土壤冻融时空变化



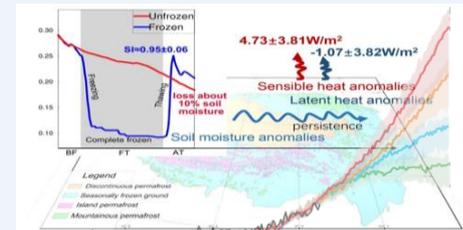
土壤温度

土壤冻融过程
活动层厚度

内容二：土壤冻融变化对青藏高原冻土区碳源汇的影响



碳汇资源的时空变化



未来冻土退化对青藏高原冻区陆地生态系统碳汇潜力的影响

内容三：未来青藏高原冻土退化影响下的陆地生态系统碳汇潜力预测



生态系统碳汇功能对冻土退化响应的脆弱性空间分布

青藏高原冻土区碳汇资源的估算仍存在很大争议

- 2000~2010年代的重复抽样调查表明，冻土融化导致植物增加进而促进土壤碳**积累**；↑ (Ding et al, 2017, Nature Geoscience)
- 基于32个通量站点观测数据，2002~2020年间青藏高原表现为**净碳汇**；↑ (Wei et al, 2021, PNAS)
- 基于遥感观测发现，随着气候的暖湿化和放牧强度下降，青藏高原正在变绿，更多的**植物碳**可能将**输入**到土壤中；↑ (Zhang et al, 2013, PNAS)
- 根据模型预测，到本世纪末，青藏高原多年冻土中的碳将**减少**约8%；↓ (Wang et al, 2020, Science Advances)
- 青藏高原冻土地区气候变暖导致氮限制增加，可能会限制气候变暖和CO₂富集对植被生产力的促进作用，使青藏高原冻土区由**碳汇转变为碳源**；↓ (Kou et al, 2020, Nat. Commun.)

我们对气候变化如何改变青藏高原的碳汇资源的理解，还有很大的不确定性，青藏高原冻土区陆地生态系统的碳循环过程及其对气候变化的响应机制仍需进一步研究。