

引用格式: 黄馨宇, 汪亘, 赵永涛, 等. 2026. 藏东北表土甘油二烷基甘油四醚的控制因素研究: 对古温度重建指标的约束[J]. 沉积学报. doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.013
HUANG XinYu, WANG Gen, ZHAO YongTao, et al. 2026. Controlling Factors of brGDGTs in Surface Soils from the Northeastern Tibetan Plateau: Implications for Paleotemperature Reconstruction[J]. Acta Sedimentologica Sinica, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.013
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.013 CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.013

藏东北表土甘油二烷基甘油四醚的控制因素研究

——对古温度重建指标的约束

黄馨宇^{1,2}, 汪亘^{1,3}, 赵永涛⁴, 张小梅¹, 张婷¹, 马雪云¹, 魏志福¹, 王永莉⁵

- 1.中国科学院西北生态环境资源研究院甘肃省油气资源勘探与评价重点实验室, 兰州 730000
- 2.中国科学院大学, 北京 100049
- 3.中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学与冻土工程全国重点实验室, 兰州 730000
- 4.中国科学院西北生态环境资源研究院干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, 兰州 730000
- 5.中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

摘要 【目的】甘油二烷基甘油四醚(GDGTs)因其化学稳定性强、对环境条件响应敏感被用于古环境和古高度重建。青藏高原地形复杂、气候多变,有必要在青藏高原开展现代过程brGDGTs分布特征及其与温度和pH关系的研究,以构建可靠的区域校准方程。【方法】采集了藏东北玛曲、甘南、若尔盖、松潘、囊谦、类乌齐、贡觉、芒康、稻城9个盆地共56份表土样品,对其brGDGTs进行系统分析,结合气象站器测年均气温、年均降水量以及实测pH值,利用Pearson相关分析对已发表代用指标进行评估,通过逐步回归和线性拟合方法构建了区域温度与pH校准方程。【结果】研究区表土brGDGTs以Ia、IIa和IIa'为主,5-甲基brGDGTs占比最高。基于逐步回归建立的区域器测年均气温校准模型在低温区间(-2℃~3℃)内具有较高的重建精度。基于青藏高原表土样品建立的环化指数CBT"与实测pH的相关性最高。【结论】藏东北表土brGDGTs的组成与分布受温度和pH共同控制。基于表土样品brGDGTs建立区域性温度与pH校准方程在高海拔、寒冷环境下具有更好的适用性,为定量重建青藏高原古环境和古高度提供了科学约束。

关键词 青藏高原; brGDGTs; 现代过程; 温度; pH

第一作者 黄馨宇,女,2000年出生,硕士研究生,古气候重建,E-mail: huangxinyu23@mails.ucas.ac.cn

通信作者 汪亘,男,副研究员,E-mail: gwang@lzb.ac.cn

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550(2026)00-0000-00

0 引言

青藏高原隆升被认为是新生代以来亚洲大陆最强烈的构造事件之一(潘保田等,1995a;李吉均和方小敏,1998;刘东生等,1998;Molnar and Stock,2009;Ding *et al.*,2022),迅速的地壳增厚与地表抬升深刻改造了高原自身的地貌与生态格局,显著影响了亚洲季风的形成与演化、内陆干旱化过程,被视为新生代全球气候变化的重要驱动力与放大器(潘保田等,1995b,1996;An *et al.*,2001;Molnar *et al.*,2010)。在构造抬升与气候系统相互作用的背景下,厘清青藏高原气候环境在时间和空间上的演变过程及其控制机制具有重要科学意义,特别是揭示其温度变化及与风化淋溶过程密切相关的土壤化学环境(如酸碱度,pH)可为理解高原隆升背

收稿日期: 2026-01-28; **收修改稿日:** 2026-03-30

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFF0809102); 国家自然科学基金项目(42372223); 中国科学院青年创新促进会(2021425)

景下区域水热格局与地表过程提供关键依据 (Molnar *et al.*, 1993; An *et al.*, 2001; Tapponnier *et al.*, 2001; Clark *et al.*, 2006; Molnar *et al.*, 2010; Liu and Dong, 2013)。目前已有多种较为成熟的指标用于探究温度变化和土壤化学环境演变, 如孢粉和植硅体反映生物群落与植被响应 (Faegri and Iversen, 1989; Piperno, 2006), 同位素组成指示水热条件、示踪溶质迁移过程 (Rowley and Garzione, 2007; Dellinger *et al.*, 2017), 脂类生物标志物记录有机质来源与沉积环境信息 (Eglinton and Hamilton, 1967; Meyers, 1997; Pancost and Boot, 2004)。其中脂类生物标志物具有明确的生物来源, 并且对环境变化敏感, 可将沉积物或土壤中保存的分子信号转化为古环境信息 (Eglinton and Eglinton, 2008; Sachse *et al.*, 2012)。在化石保存不佳、碳酸盐缺失或同位素指标适用性受限的情况下, 脂类生物标志物仍可作为有效代用指标构建高分辨率的气候环境演化记录, 为揭示高原隆升背景下气候环境演化规律和驱动机制提供关键信息 (Eglinton and Eglinton, 2008; Sachse *et al.*, 2012)。

甘油二烷基甘油四醚 (Glycerol dialkyl glycerol tetraethers, GDGTs) 因分布广泛、化学性质稳定且对温度变化具有良好响应, 近年来已成为古温度重建的重要工具 (Schouten *et al.*, 2002; Weijers *et al.*, 2007; de Jonge *et al.*, 2014b; Naafs *et al.*, 2017; Dearing Crampton-Flood *et al.*, 2020; Martínez-Sosa *et al.*, 2021; Raberg *et al.*, 2022; Lei *et al.*, 2023)。GDGTs 主要包括支链 GDGTs (brGDGTs) 和类异戊二烯 GDGTs (iGDGTs), 其中 brGDGTs 主要由细菌产生, 广泛分布于陆地环境 (Weijers *et al.*, 2009; Sinninghe Damsté *et al.*, 2011, 2014, 2018)。brGDGTs 是由两条直链烷基通过醚键连接至甘油骨架, 其正烷基链中含有不同数量的甲基分支 (4~6 个) 和环戊烷环 (0~2 个)。大量研究表明, brGDGTs 的甲基化程度、环化程度及异构化特征对环境因子响应敏感, 其中甲基化指数 (MBT) 主要受温度控制, 环化指数 (CBT) 及异构化指数对土壤 pH 值变化敏感 (Weijers *et al.*, 2007; Peterse *et al.*, 2012; de Jonge *et al.*, 2014a; Ding *et al.*, 2015), 由此不同学者基于 brGDGTs 的 MBT 和 CBT 指数建立了全球和区域尺度的温度、土壤 pH 转换方程 (de Jonge *et al.*, 2014a; Hanna *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016; Naafs *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020a; Martínez-Sosa *et al.*, 2021; Tang *et al.*, 2024; O'Beirne *et al.*, 2025)。

在藏东北地区开展的利用 brGDGTs 重建古温度与古海拔的研究 (Yang *et al.*, 2015; Deng *et al.*, 2016; Bai *et al.*, 2018; Feng *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020b) 表明除温度和海拔影响外 (Bai *et al.*, 2018; Feng *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2022), brGDGTs 分布特征还受到土壤含水量 (Soil water content, SWC; Dang *et al.*, 2016)、植被类型 (Liang *et al.*, 2019) 以及潜在的细菌群落结构 (Wang *et al.*, 2024) 等因素的影响。然而, 现有研究多集中于单一盆地或局部样带, 缺乏多盆地、跨气候区域的系统整合, 严重制约了对藏东北 brGDGTs 分布特征及其环境响应机制的全面认识。特别是青藏高原整体处于高海拔、低温的环境背景下, 重建温度更易受到“边

缘效应”影响，即当样品所处的环境温度已经接近甚至低于现代校准数据覆盖的最低温度区间时，在低温阶段或气候变率较大的时期利用代用指标进行温度重建可能产生系统性偏差(Liang *et al.*, 2026)。为探究藏东北地区表土 brGDGTs 分布特征与环境因子的关系，准确构建区域性 brGDGTs-温度和 pH 校准方程，本研究在藏东北的玛曲、甘南、若尔盖、松潘、囊谦、类乌齐、贡觉、芒康、稻城 9 个盆地采集了 56 个表土样品，对表土样品的 brGDGTs 组成特征进行详细分析，并评估环境因子（如年均气温（MAAT）、年均降水量（MAP）和土壤 pH）的影响，进一步采用逐步回归法和线性拟合法，分别构建区域性 brGDGTs 与温度、pH 的校准方程。研究结果为认识高海拔、高寒区域表土 brGDGTs 分布及其气候环境响应奠定了数据基础，并为开发利用沉积物 brGDGTs 定量重建青藏高原古温度和古高度演化历史提供了现代过程的关键科学约束。

1 材料与方法

1.1 区域概况

研究区位于青藏高原东缘至东北缘过渡地带，地理位置大致介于 32°51′~34°19′ N、101°51′~103°39′ E（图 1），涵盖玛曲、甘南、若尔盖、松潘、囊谦、类乌齐、贡觉、芒康、稻城 9 个盆地。该区域高程变化较大，地貌分异显著，高海拔地区常年或季节性积雪，而河谷及低海拔区域相对温暖(Fielding *et al.*, 1994; Clark *et al.*, 2006)。研究区气候受高原地形效应、东亚季风与印度季风以及西伯利亚冷高压共同控制，呈现出明显的低温、强辐射、短无霜期以及显著的空间分异特征。年平均气温整体较低，多数区域介于 0 °C ~4 °C，降水量为 400~800 mm，季节分配不均，主要集中在 5—9 月的暖季。

根据年均温度、降水量及季风影响程度的差异，将研究区划分为三类主要气候区，其中年均温度与年降水量来自研究区及周边气象站多年平均资料，用于表征盆地尺度的气候背景。由于气象站多位于相对海拔较低的区域，其温度统计值可能略高于基于 ArcGIS 在采样点位置提取的年均温度，但不影响三类气候区的分类与对比（图 2）：（1）高寒湿润区域（包括若尔盖、玛曲、松潘），位于季风水汽输送的前缘，受南亚季风与东亚季风共同影响，年均温较低（1 °C~3 °C），年降水量较高（600~750 mm）且集中于暖季，区域植被以高寒草甸、沼泽草甸为主。（2）高寒相对湿润区域（包括类乌齐、甘南、稻城），处于季风过渡带，受季风影响程度中等，年均温偏低（2 °C~4 °C），年降水量相对偏高（550~680 mm），区域植被以高寒草甸和高寒草原为主，并随海拔呈灌丛、林地和草甸的垂直分异。（3）高寒相对干旱区域（包括囊谦、贡觉、芒康），位于青藏高原东部与横断山区邻近地带，受地形对水汽输送的阻挡与再分配影响，降水相对偏少，年降水量为 350~550 mm，局地河谷带受下沉气流影响，温度相对偏高（4 °C~8 °C），该区植被以高寒草原与干旱灌丛为主。

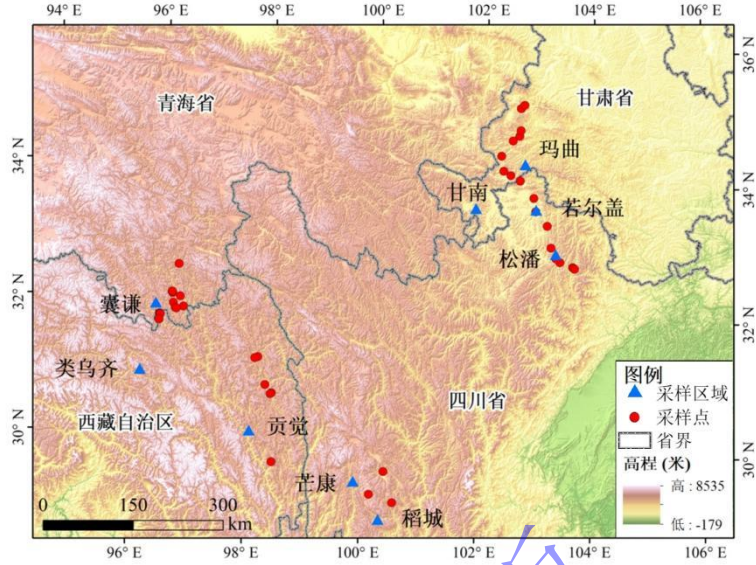


图1 藏东北采样位置

Fig.1 Sampling locations in the northeastern part of the Tibetan Plateau

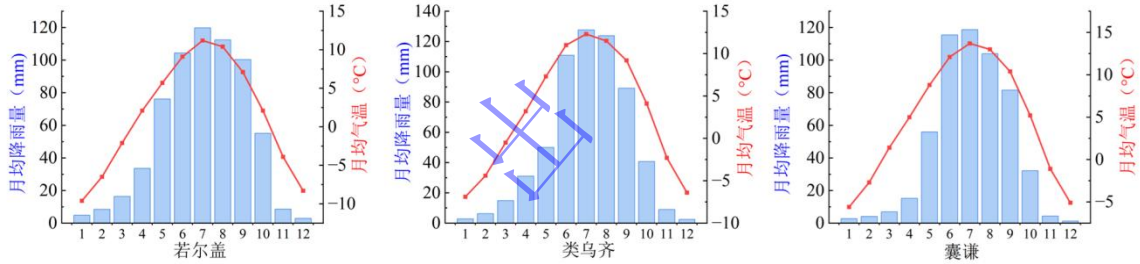


图2 不同气候区典型代表盆地(从左至右依次为若尔盖、类乌齐和囊谦)月均温度及降水量图(数据来自中国气象数据网中国地面气候标准值月值, 站点分别为若尔盖、类乌齐和囊谦; 时段为1981—2010年)

Fig.2 Monthly mean temperature and precipitation for representative basins in different climatic zones (from left to right: Zoigê, Leiwuqi and Nangqian) (data from the China Meteorological Data Service Center, monthly surface climate normals; stations: Zoigê, Leiwuqi and Nangqian; period: 1981-2010)

1.2 样品采集

2019年10—11月, 在藏东北玛曲、甘南、若尔盖、松潘、囊谦、类乌齐、贡觉、芒康、稻城等区域(28°54′~32°24′ N、90°25′~99°00′ E)采集56个表土样品, 海拔介于2 820~4 510 m, 涵盖不同气候条件(图1)。每个采样点远离公路, 尽量避免人为因素扰动, 在去除枯枝落叶层和残留根系后, 利用五点采样法在顶部0~5 cm采集多个子样品, 混合为一个复合样品以代表当地表土。使用便携式GPS记录每个采样点的海拔、纬度和经度。到达实验室后, 将样品储存在-20 °C直至分析。

1.3 气象数据预处理

本研究使用的气象数据来自中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>), 其中中国气象背景数据集基于全国1 915个气象站点(徐新良和张亚庆, 2017)。使用ArcGIS软件对下载的数据进行处理, 提取采样地点的年平均温度

和平均年降水量数据。本文所采用的年平均温度数据为 1990—2020 年的年平均气温。

1.4 土壤 pH 的测定

参照 Weijers *et al.* (2007) 的方法, 将土壤样品与去离子水按 1:2.5 (g/mL) 的比例混合, 充分振荡均匀后静置 30 min。在室温条件下用 pH 计测定混合物上层溶液的 pH。每份土壤样品重复测定 3 次后取平均值, 三次测定结果的最大标准偏差为 ± 0.03 。

1.5 土壤 brGDGTs 分析

剔除植物残体后, 将表土样品冷冻干燥并研磨过 100 目筛, 取研磨后的样品 140 g, 使用索氏抽提法提取样品中的有机质组分, 抽提时间为 72 h, 温度设定为 45 °C, 试剂为二氯甲烷和甲醇的混合溶液 (DCM: MeOH=9:1, v:v)。

根据表土样品有机质含量的不同, 另一部分样品使用加速溶剂萃取法 (ASE 150, Thermo Scientific) 进行有机质抽提, 每份 80 g 样品和 40 g 石英砂, 萃取溶剂为二氯甲烷和甲醇的混合溶液 (DCM: MeOH=9:1, v:v)。参数设置如下: 萃取温度为 100 °C, 压力为 1 500 psi (约为 10.34 MPa), 循环次数 3 次, 静态萃取时间 7 min。

晾干的萃取物通过装有活化硅胶和氧化铝 (质量比为 3:2) 的层析柱进行柱色谱分离。首先以正己烷淋洗饱和烃组分; 随后以二氯甲烷淋洗中性组分; 最后以甲醇淋洗包含 GDGTs 的极性组分。GDGTs 组分自然晾干后, 进行皂化处理去除可皂化脂类的干扰 (Schouten *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2023)。具体操作: 将 GDGTs 组分用甲醇溶解, 加入 1 M KOH 甲醇溶液, 在 60 °C 水浴中反应 1 h。反应结束后冷却, 用酸中和至 pH 介于 6.5~7.5。随后利用正己烷和去离子水收集上层有机相, 最后通过 0.22 μm PTFE 滤膜过滤, 等待测试。

GDGTs 化合物的测定在中国科学院西北生态环境资源研究院油气资源研究中心完成。所用仪器为 HPLC-Q-TOF (High Performance Liquid Chromatography-Quadrupole-Time of Flight Mass Spectrometry, Agilent 1260 HPLC-G6500 Q-TOF)。为了分离 5-甲基和 6-甲基 brGDGTs 异构体, 采用两根硅胶柱串联 (型号为 Hypersil GOLD Silica, 150 mm \times 2.1 mm \times 1.9 mm), 柱温 40 °C, 流速 0.2 mL/min, 进样量 20 μL 。流动相 A 为正己烷, B 为乙酸乙酯, 整个液相色谱分离过程的洗脱梯度为: 0~5 min, 84%的正己烷: 16%的乙酸乙酯; 5~65 min 过程中, 将 84%的正己烷: 16%的乙酸乙酯逐渐变为 82%的正己烷: 18%乙酸乙酯, 之后 21 min 内调整为 100%的乙酸乙酯, 持续 4 min, 最后调回 84%的正己烷: 16%的乙酸乙酯, 持续 30 min (Yang *et al.*, 2015)。GDGTs 化合物离子化在大气压化学离子源 (APCI) 中进行: 雾化器压力 60 psi, 雾化温度 400 °C; 干燥气流速 6 L/min, 温度 200 °C, 毛细管电压 3 500 V, 电晕电流 5 μA 。同时针对不同的 brGDGTs 化合物采用单离子扫描模式 (SIM) 进行检测, brGDGTs 各化合物分子离子 [M+H]⁺ 核质比 (m/z) 为 1 050, 1 048, 1 046, 1 036, 1 034, 1 032, 1 022, 1 020 和 1 018。样品定量采用内标法, 测试样品为 C₄₆ GDGT 标准样品 (50 ng/ μL)。

1.6 代用指标计算

目前已提出多种 brGDGTs 指数 (包括 CBT、CBT'、CBT_{5ME}、IRIIIa'、IRIIa'、CBT_{6ME}、IBT、CBT''、CBT'_{5ME}、MBT'、MBT'_{5ME}、MBT_{5/6}) 及相关温度、土壤 pH 校准方程。表 1 列出了各指数的公式, 表 2 为基于 brGDGTs 的土壤 pH 和大气温度转换方程。本研究按上述公式和转换方程进行相关代用指标的计算。

表 1 基于 brGDGTs 的相关代用指标
Table 1 Calculation of brGDGT indices

公式	参考文献
$CBT = -\log[(Ib+Ib')/(Ia+IIa)]$	Weijers <i>et al.</i> , 2007
$CBT' = -\log[(Ic+IIa'+IIb'+IIc'+IIIa'+IIIb'+IIIc')/(Ia+IIa+IIIa)]$	de Jonge <i>et al.</i> , 2014a
$CBT_{5ME} = -\log[(Ib+Ib')/(Ia+IIa)]$	de Jonge <i>et al.</i> , 2014a
$IRIIIa' = IIIa'/(IIIa'+IIIa)$	de Jonge <i>et al.</i> , 2014b
$IRIIa' = IIa'/(IIa'+IIa)$	de Jonge <i>et al.</i> , 2014b
$CBT_{6ME} = -\log[(Ib+Ib')/(Ia+IIa')]$	Yang <i>et al.</i> , 2015
$IBT = -\log[(IIa'+IIIa')/(IIa+IIIa)]$	Ding <i>et al.</i> , 2015
$CBT'' = \log[(Ib+Ic+IIb+IIc+IIIb+IIIc+IIa'+IIb'+IIc'+IIIa'+IIIb'+IIIc')/(Ia+IIa+IIIa)]$	Ding <i>et al.</i> , 2015
$CBT'_{5ME} = -\log(IIb/IIa)$	Wang <i>et al.</i> , 2016
$MBT' = (Ia+Ib+Ic)/(Ia+Ib+Ic+IIa+IIb+IIc+IIIa)$	Peterse <i>et al.</i> , 2012
$MBT'_{5ME} = (Ia+Ib+Ic)/(Ia+Ib+Ic+IIa+IIb+IIc+IIIa)$	de Jonge <i>et al.</i> , 2014a
$MBT_{5/6} = (Ia+Ib+Ic+IIa')/(Ia+Ib+Ic+IIa+IIb+IIc+IIIa+IIIa')$	Ding <i>et al.</i> , 2015

表 2 基于 brGDGTs-pH、温度转换方程
Table 2 Summary of brGDGTs-based pH and temperature conversion equations

转换方程	参考文献
$pH = 7.90 - 1.97 \times CBT$ (n=176, $R^2=0.70$, RMSE=0.8)	Peterse <i>et al.</i> , 2012
$pH = 7.84 - 1.73 \times CBT_{5ME}$ (n=221, $R^2=0.60$, RMSE=0.84)	de Jonge <i>et al.</i> , 2014a
$pH = 7.15 + 1.59 \times CBT'$ (n=221, $R^2=0.85$, RMSE=0.52)	de Jonge <i>et al.</i> , 2014a
$pH = 6.93 + 1.49 \times CBT''$ (n=27, $R^2=0.80$, RMSE=0.29)	Ding <i>et al.</i> , 2015
$MAAT = 0.81 - 5.67 \times CBT + 31.0 \times MBT'$ (n=176, $R^2=0.59$, RMSE=5 °C)	Peterse <i>et al.</i> , 2012
$MAT_{5ME} = 8.75 + 31.45 \times MBT'_{5ME}$ (n=231, $R^2=0.64$, RMSE=4.9 °C)	de Jonge <i>et al.</i> , 2014b
$MAAT = 39.51 \times MBT_{5/6} - 20.14$ (n=27, $R^2=0.82$, RMSE=1.3 °C)	Ding <i>et al.</i> , 2015
$MAAT_{5/6} = 25.2 - 39.8 \times f(IIIa) - 29.8 \times f(IIIa') - 66.8 \times f(IIa) - 15.5 \times f(IIa') - 107.8 \times f(IIb) + 25.1 \times f(IIb)$ (n=149, $R^2=0.94$, RMSE=2.1 °C)	Wang <i>et al.</i> , 2020a

1.7 统计分析

采用冗余分析 (RDA) 及相关的蒙特卡罗置换检验, 分析现有环境参数约束下 brGDGTs 分布变化。选择该方法的原因是: 去趋势对应分析 (DCA) 结果显示梯度长度小于 3, 表明 brGDGTs 对环境因子呈线性响应。采用带双重终止准则的前向选择法, 筛选出最优环境变量子集。所有统计分析均使用 CANOCO 5.0 统计软件, 在所有统计分析中, brGDGTs 均以标准化相对丰度表示。

此外, 环境参数 (包括 MAAT、MAP 和 pH) 与 brGDGTs 代用指标的线性回归分析通过 Origin 软件 (2024 版本) 完成, 皮尔逊相关系数的显著性阈值设为 $p < 0.05$ 。

基于温度数据和 brGDGTs 相对丰度, 采用逐步回归方法中的逐步向前选择法对土壤数据集进行分析, 该方法已应用于先前的湖泊/土壤 brGDGT—温度校准 (Loomis *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2014; Russell *et al.*, 2018)。模型从与因变量相关性最强的自变量开始构建, 每次添加一个自变量; 通过 F 检验 (蒙特卡罗置换检验) 判断每个自变量添加的显著性; 当新变量无法显

著解释剩余方差时，变量选择和添加停止。此外，用 RMSE (Root-mean-square error) 表示校准数据集的均方根误差，用 RMSEP (Root-mean-square error of prediction) 表示测试数据集的预测均方根误差。

2 结果

藏东北 56 份表土样品中均检出 brGDGTs，其中，IIIb', Ic, IIb, Ib, IIIa, IIIa', IIb', IIa, Ia 和 IIa' 的相对丰度分别为 1.4%、1.5%、4.3%、7.7%、7.7%、11.4%、11.8%，13.5%、18.4% 和 20.2%。Ia、IIa 和 IIa' 的相对丰度较高，IIIc、IIIc'、IIIb、IIc 和 IIc' 相对丰度较低，其平均占比不超过总 brGDGTs 的 1.0%。6-甲基异构体平均占总 brGDGTs 的 46.0%，其中以 IIa' 和 IIb' 为主。5-甲基 brGDGTs (即 II 系列 brGDGTs) 占比最高，其次是四甲基 (I 系列) 和六甲基 (III 系列) brGDGTs，平均占比分别为 51.4%、27.6% 和 21.0% (图 3)。

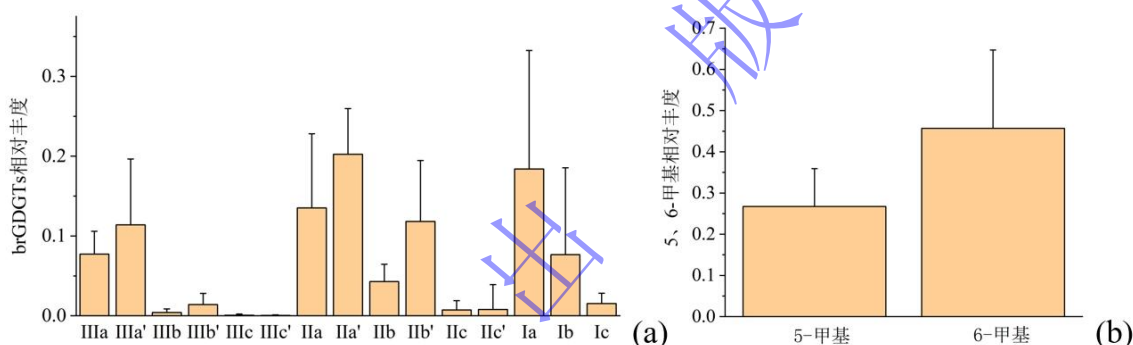


图 3 藏东北表土样品 brGDGTs 化合物的相对丰度分布图

(a) brGDGTs 各单体相对丰度; (b) 5-甲基和 6-甲基 brGDGTs 相对丰度

Fig.3 Relative abundance distribution of brGDGT compounds in surface soil samples from the northeastern part of the Tibetan Plateau

(a) relative abundances of individual brGDGTs compounds; (b) relative abundances of 5-methyl and 6-methyl brGDGTs

基于 brGDGTs 的四甲基，五甲基和六甲基三角图解，发现本研究采集的藏东北表土样品的 brGDGTs 分布模式与全球及青藏高原典型土壤特征的 brGDGTs 分布特征相似 (图 4)，表明表土样品的 brGDGTs 是由陆源土壤微生物产生。据此，可利用这些样品的 brGDGTs 数据建立针对性的温度与 pH 校准公式。

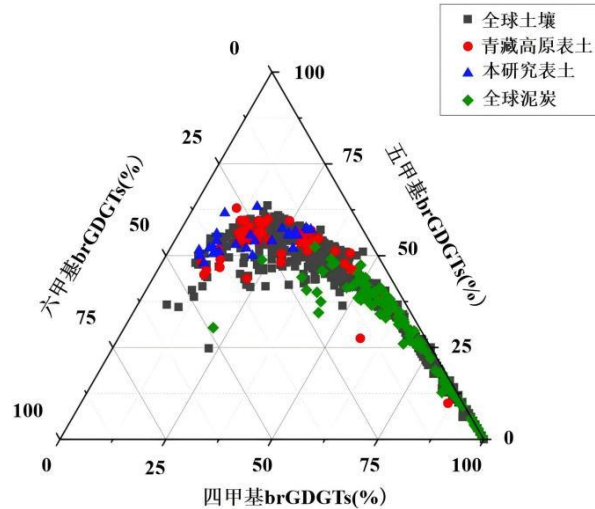


图4 藏东北表土、青藏高原土壤、全球土壤和泥炭样品中四甲基化、五甲基化和六甲基化 brGDGTs 相对丰度对比图 (数据引自 Ding *et al.*, 2015; Dearing Crampton-Flood *et al.*, 2020)

Fig.4 Comparison of the relative abundances of tetramethylated, pentamethylated, and hexamethylated brGDGTs in surface soils from the northeastern Tibetan Plateau, soils from the Tibetan Plateau, and global soil and peat samples (data are from Ding *et al.*, 2015; Dearing Crampton-Flood *et al.*, 2020)

3 讨论

3.1 有机质来源对 brGDGTs 分布的影响

总体上, 三类气候区表土 brGDGTs 均以 IIa'、Ia 与 IIa 为主, 其中 IIa' 与 Ia 的相对丰度较高 (17.7%~22.1%与 13.7%~20.8%), 表明不同气候区域 brGDGTs 的主要组分构成总体一致, 但不同区域各组分相对丰度有明显差异: 高寒相对干旱区域 brGDGTs 中 6-甲基相对丰度较高, IIIa'、IIa' 和 IIb' 相对丰度高, Ia 的相对丰度较低; 高寒相对湿润区域 IIa 和 Ia 相对丰度较高; 高寒湿润区域整体介于前两者之间, IIa' 与 Ia 相对丰度较高, IIIa' 与 IIb' 相对丰度低于高寒相对干旱区域。

藏东北地区地形起伏强烈、受季风影响程度不同, 各研究区域间的水热条件、植被类型与土壤理化性质存在明显差别, 这种区域间的差异会通过改变土壤微生物环境和土壤过程 (如分解与转化、氧化还原变化、冻融与干湿交替和淋溶与迁移等) 影响 brGDGTs 的组成和分布 (Weijers *et al.*, 2007; 党心悦等, 2016)。

高寒湿润区域以湿地草甸、沼泽植被为主, 水分充足使有机质更易累积, 并通过改变土壤通气条件与氧化还原微环境影响 brGDGTs 异构体组成 (Weijers *et al.*, 2007; Dang *et al.*, 2016)。高寒湿润区域相较于高寒相对湿润区域 6-甲基 brGDGTs 相对丰度整体更高 (图 5), 尤其是 IIa'、IIb'、IIIa'; 而 5-甲基 IIa 的相对丰度低于高寒偏湿润区域。这表明在湿地草甸、沼泽背景下, 植被输入与高含水环境共同增强了土壤微环境差异, 使 brGDGTs 的组成更容易向 6-甲基 (如 IIa'、IIb'、IIIa') 偏移, 并可能使部分环化化合物 (如 IIb、IIb'、IIc' 等) 的相对丰度发生偏移 (Weijers *et al.*, 2007; Dang *et al.*, 2016)。

al., 2014; Dang *et al.*, 2016; Naafs *et al.*, 2017), 分析了 brGDGTs 组分相对丰度与环境变量之间的关系 (图 6)。

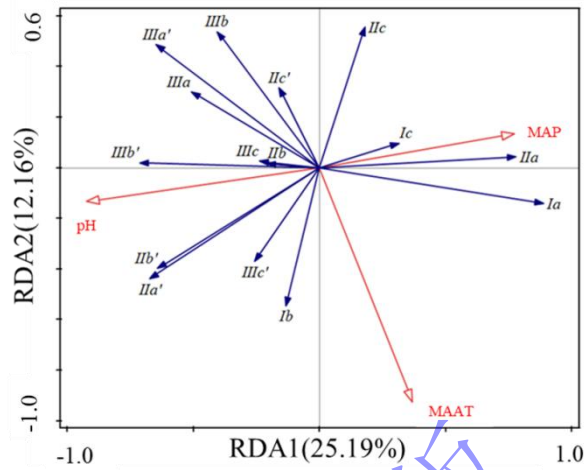


图 6 藏东北表土 brGDGTs 的相对丰度 (蓝色箭头) 以及环境变量 (红色箭头) 的 RDA 三序图
Fig.6 RDA triplot of the relative abundances of brGDGTs in surface soils from the northeastern part of the Tibetan Plateau (blue arrows) and environmental variables (red arrows)

RDA 分析结果表明, pH、MAAT 和 MAP 共同解释了 39.1% 的 brGDGTs 分布变化。其中第一主轴 (RDA1) 解释了 25.2% 的 brGDGTs 分布变化, 主要反映土壤 pH 和 MAP 的影响, 土壤 pH 与 RDA1 负相关, MAP 与 RDA1 正相关。第二轴 (RDA2) 解释 12.2% 的 brGDGTs 分布变化, 主要反映温度的影响, MAAT 与 RDA2 负相关。前向选择与置换检验结果显示, 土壤 pH (解释度为 21.9%, $p=0.002$, 表 3) 和 MAAT (解释度为 12.4%, $p=0.002$, 表 3) 对 brGDGTs 分布具有显著独立影响, 而 MAP (解释度为 4.8%, $p=0.094$, 表 3) 的解释力较弱且不显著, 表明降水对 brGDGTs 分布变化的影响可能体现为通过水热条件或土壤 pH 共同变化的间接调控, 而不是独立驱动。总体而言, 控制藏东北表土 brGDGTs 分布的主导因素为土壤 pH, 其次为年均气温。此外, 本研究采用年均降水量而非土壤含水量开展分析, 是因为前者更能代表平均土壤水分状况, 而后者更易受短期局地降雨事件影响 (Wang *et al.*, 2014)。

表 3 藏东北表土 RDA 及前选分析结果

Table 3 Results of RDA and forward selection analysis for surface soils from the northeastern part of the Tibetan Plateau

环境因子	解释度/%	贡献率/%	p 值
pH	21.9	56.1	0.002
MAAT	12.4	31.6	0.002
MAP	4.8	12.3	0.094

3.3 影响 brGDGTs 温度指示意义的因子及启示

MBT/CBT 古温度代用指标 (Weijers *et al.*, 2007) 及其改进形式 MBT'/CBT (Peterse *et al.*, 2012) 已被广泛应用于古气候重建 (Schouten *et al.*, 2013)。然而, 本研究中基于 MBT'/CBT 重建的 MAAT 与气象站实测 MAAT 相关性较弱 ($R^2=0.23$, 图 7a), MBT' 与观测值之间的相关

性也较弱 ($R^2=0.20$, 图 8a), 表明该指数在研究区内无法有效追踪温度变化。其主要原因可能在于本研究区土壤中 6-甲基 brGDGTs (IIa'、IIb'、IIIa'、IIIb') 相对丰度显著增加, 这类甲基化程度较高的异构体会降低 MBT' (或 MBT) 值 (de Jonge *et al.*, 2014b), 进而导致 MBT'/CBT 与气温之间的线性关系被削弱。

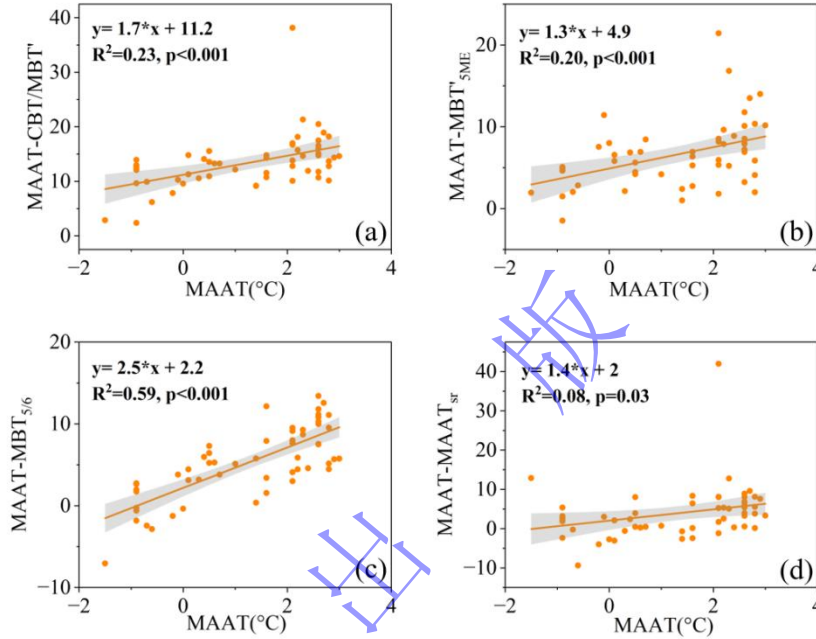


图 7 不同 brGDGTs 温度代用指标重建 MAAT 与实测 MAAT 的相关性散点图

(a) 基于 MBT'重建 MAAT 与实测 MAAT 的相关性; (b) 基于 MBT'_{5ME}重建 MAAT 与实测 MAAT 的相关性; (c) 基于 MBT'_{5/6}重建 MAAT 与实测 MAAT 的相关性; (d) MBT'_{Sr}重建 MAAT 与实测 MAAT 的相关性

Fig.7 Scatter plots showing the relationships between reconstructed MAAT and observed MAAT using different brGDGTs-based temperature proxies

(a) correlation between MAAT reconstructed using MBT' and observed MAAT; (b) correlation between MAAT reconstructed using MBT'_{5ME} and observed MAAT; (c) correlation between MAAT reconstructed using MBT'_{5/6} and observed MAAT; (d) correlation between MAAT reconstructed using MBT'_{Sr} and observed MAAT

针对 6-甲基 brGDGTs 对该指标的干扰, de Jonge *et al.* (2014b) 提出剔除 6-甲基 brGDGTs 的 MBT'_{5ME} 指数。全球土壤数据集验证显示, MBT'_{5ME} 与 MAAT 的相关性显著改善, 同时校准模型 RMSE 降低, 使其成为更可靠的陆地古温度计 (de Jonge *et al.*, 2014a)。后续多项现代过程研究确认了 MBT'_{5ME} 定量重建古温度的优越性, 如 Naafs *et al.* (2017) 在扩展后的全球土壤—泥炭数据库中证实 MBT'_{5ME} 在不同气候带和水分条件下均能较为准确地响应温度。基于独立数据集的交叉验证和机器学习方法的结果进一步验证 MBT'_{5ME} 在温度重建中的适用性和准确性 (Dearing Crampton-Flood *et al.*, 2020; Martínez-Sosa *et al.*, 2021)。然而, 在藏东北表土样品中, MBT'_{5ME} 与年均气温的相关性较弱 ($R^2=0.20$, 图 8c)。该结果与一些环境极端区域的研究相一致: 在高海拔冷湿环境、极端干旱或强碱性土壤、高盐度干旱区中, 低降水和低土壤含水量以及土壤盐度均会干扰 MBT'_{5ME} 对温度响应 (Li *et al.*, 2018; Zang *et al.*, 2018)。

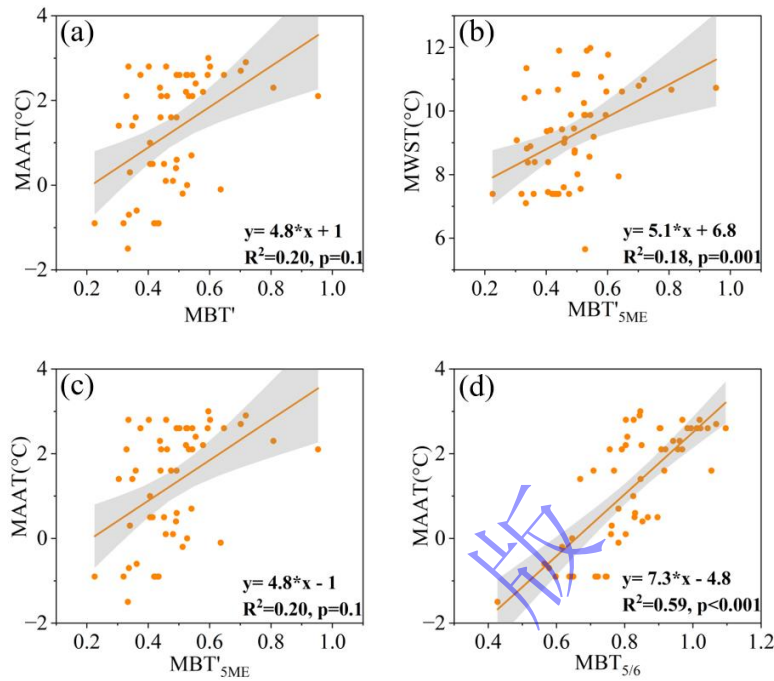


图 8 不同 brGDGTs 温度代用指标与实测 MAAT 的相关性散点图和 MBT'_{5ME} 与暖季温度相关性散点图
(a) MBT'与实测 MAAT 的相关性; (b) MBT'_{5ME}与实测 MAAT 的相关性; (c) MBT'_{5/6}重建 MAAT 与实测 MAAT 的相关性; (d) MBT'_{5ME}与实测 MWST 的相关性

Fig.8 Scatter plots showing the relationships between different brGDGTs-based temperature proxies and observed MAAT and between MBT'_{5ME} and warm-season temperature
(a) correlation between MBT' and observed MAAT; (b) correlation between MBT'_{5ME} and observed MAAT; (c) correlation between MAAT reconstructed using MBT'_{5/6} and observed MAAT; (d) correlation between MBT'_{5ME} and observed MWST

基于 MBT'_{5ME} 的全球校准方程 (de Jonge *et al.*, 2014b), 藏东北表土重建的 MAAT 被显著高估 (图 7b), 本研究中观测温度介于 -2 °C~3 °C, 而重建温度介于 -2 °C~22 °C, 这种高估现象与高海拔低温干旱地区的研究结果一致 (Ding *et al.*, 2015; Naafs *et al.*, 2017)。大量证据表明, MBT'_{5ME} 通常与暖季平均温度 (MWST) 具有更高的相关性, 其温度残差也和温度季节变化相关, 尤其在高纬度或高海拔地区 (Deng *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016; Naafs *et al.*, 2017)。为探究季节性差异对 brGDGTs 生成的潜在影响, 本研究进一步分析了 MBT'_{5ME} 与 MWST 的相关性。结果显示 (图 8d), 即便采用 MWST 替代 MAAT, MBT'_{5ME} 对温度的响应仍不显著 ($R^2=0.18$), 说明温度的季节性差异并不是控制 MBT'_{5ME} 变化的主要因素。另一种观点认为, MBT'_{5ME} 更直接响应微生物生境的土壤温度 (Wang *et al.*, 2020a), 在干旱或高海拔地区, 植被及积雪可能导致空气—土壤温度解耦 (Dearing Crampton-Flood *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020a)。由于缺乏土壤温度监测数据, 将在后续工作中进一步完善讨论土壤温度变化对 MBT'_{5ME} 指数的影响。除季节性和土壤温度外, pH 及其伴随的土壤过程 (如分解与转化、氧化还原条件变化、冻融与干湿交替和淋溶与迁移等) 也可能是导致拟合较为离散和出现系统偏差的重要原因。已有研究指出, 土壤 pH 可直接调节 brGDGTs 组成 (Duan *et al.*, 2020; de Jonge *et al.*, 2021; Halfman

et al., 2022; Véquaud *et al.*, 2022), 并可能使温度重建偏差呈现非线性特征 (Duan *et al.*, 2025)。在本研究中, 土壤 pH 偏离较大或土壤性质差异显著的样品, 其 brGDGTs 组成对温度的一元线性响应更易被温度以外的环境因子影响, 从而表现为偏离回归线的点, 并降低总体的拟合度。另外, 研究区样品温度较低且范围较窄 ($-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$), 在校准范围的端点附近更容易出现放大低温端误差并造成端点附近样品系统性偏离回归线的现象。这也解释了尽管 MBT'_{5ME} 降低了 6-甲基影响, 但在本区仍然难以准确重建温度的原因。鉴于利用 MBT'_{5ME} 的温度定量重建结果的准确性在中高纬度地区受限 (Dearing Crampton-Flood *et al.*, 2020; Véquaud *et al.*, 2022), 学界提出多种替代指标与统计方法来提高 brGDGTs 在局部地区重建温度的可靠性。MBT_{5/6} 是一种基于青藏高原表土数据、通过整合 6-甲基 brGDGTs (IIa' 和 IIIa') 构建的温度指标。研究表明, 在青藏高原干旱偏碱性环境中, MBT_{5/6} 对温度变化的响应好于 MBT'_{5ME}, 其与观测温度的相关性更高 (R^2 分别为 0.82 和 0.65) (Ding *et al.*, 2015)。在本研究中, 基于 MBT_{5/6} 重建 MAAT 与实测 MAAT 的相关性显著 (图 7c, $R^2=0.59$), 但其预测均方根误差 (RMSEP) 高达 $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明 MBT_{5/6} 能在一定程度上反映温度变化趋势, 但难以精确重建研究区 MAAT。

Wang *et al.* (2020a) 基于覆盖广泛环境梯度的 149 个中国土壤样本构建了逐步回归 MAAT 模型 ($R^2=0.94$, RMSE= $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$)。将其应用于本研究数据集 ($n=56$) 时, 模型性能显著下降 ($R^2=0.08$, RMSEP= $5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 图 7d), 说明全国尺度土壤样品的温度回归模型应用于本研究区会存在显著偏差。

综上所述, 全球或区域已发表的 brGDGTs-温度转换方程在高海拔、寒冷环境中可能受到“边缘效应”的影响 (Liang *et al.*, 2026), 不能直接应用于本研究区域。为进一步提高温度重建精度, 本研究基于 MAAT 和 brGDGTs 各组分的相对丰度, 对数据集采用逐步回归方法进行分析。回归分析以 f (IIc) 作为初始变量, 因为其与 MAAT 的相关性最强。当引入新的变量不再显著降低校准误差时, 回归过程即停止, 最终建立了 MAAT 的校准方程。

$$\text{MAAT}=2.8-51.4\times\text{IIc}-12.5\times\text{IIIa}'-8.7\times\text{IIa}+9.4\times\text{IIa}'-66.9\times\text{IIIb}-340.5\times\text{IIIc}'$$

$$(n=56, R^2=0.64, \text{RMSE}=0.8\text{ }^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

基于该方程重建的 MAAT 与实测 MAAT 之间表现出较好的相关性 ($R^2=0.64$, 图 9a), 显著优于基于上文中所提到的现有温度转换方程所得重建 MAAT 与实测 MAAT 的相关性。

该方程中不同化合物系数的正负号可理解为对不同环境因子响应的加权组合: 例如 IIa' 为正而 IIIa'、IIa、IIIb 与 IIIc' 为负, 体现了模型在 pH 为主控环境因子的背景下, 通过正负项互补提取温度信号并降低 pH 与 MAP 的干扰, 而回归系数大小的环境意义需结合化合物在 RDA 空间中的指向关系与变量变化幅度进行探讨, 不代表其贡献大小。

为了验证基于本研究样品建立的 brGDGTs-温度校准方程的适用性, 利用 Duan *et al.* (2025) 发布的青藏高原表土数据 (共 68 份) 进行检验。对全部样品进行预测时, 重建温度与实测温度

之间相关性较弱且偏差较大 ($n=68$, $R^2=0.04$, $RMSE=2.97\text{ }^{\circ}\text{C}$, 图 9b), 表明该方程在较大的温度范围区间里重建温度的准确度较低。由于本研究采集的样品温度分布较窄 ($-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$), 进一步选取该温度区间的样品进行检验表明, 筛选后的样品重建温度与实测温度呈显著线性相关 ($n=22$, $R^2=0.64$, 图 9c), $RMSE$ 为 $1.04\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明此方程在低温区间有良好的温度重建能力。

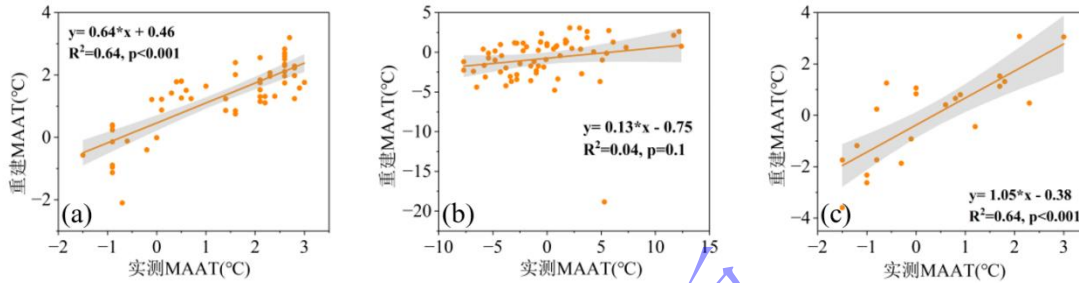


图 9 本研究公式重建 MAAT 与实测 MAAT 的相关性散点图

(a) 本研究数据重建 MAAT 与实测 MAAT 的相关性; (b) 全部样品重建 MAAT 与实测 MAAT 的相关性 (数据引自 Duan *et al.*, 2025); (c) 温度在约 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的样品重建 MAAT 与实测 MAAT 的相关性 (数据引自 Duan *et al.*, 2025)

Fig.9 Scatter plots showing the relationships between MAAT reconstructed using the calibration developed in this study and observed MAAT

(a) correlation between reconstructed and observed MAAT in our dataset; (b) correlation between reconstructed and observed MAAT for all samples (data are from Duan *et al.*, 2025); (c) correlation between reconstructed and observed MAAT for samples with temperatures of approximately $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (data are from Duan *et al.*, 2025)

需要说明的是, 基于本研究数据重建的 MAAT 与实测 MAAT 的关系进行的非线性敏感性检验 (包括二次多项式与 LOESS 平滑) 揭示出不同拟合方法的拟合度与误差仅有小幅度变化, 总体趋势与线性拟合一致。此外, 现有 brGDGTs-温度校准与检验研究通常以线性回归作为评估重建温度与实测温度一致性的基础方法 (Peterse *et al.*, 2012; de Jonge *et al.*, 2014b; Zhu *et al.*, 2025), 为了方便与前人结果对比, 本文也采用线性趋势线概括总体变化方向 (表 4、图 10)。综合来看, 受限于采集的表土样品温度分布范围, 本研究建立的逐步回归转换方程更适用于高海拔、寒冷的环境。

表 4 实测 MAAT 与 brGDGTs 重建 MAAT 的回归模型评估指标

Table 4 Model evaluation metrics for regression between observed MAAT and brGDGTs-reconstructed MAAT		
模型	R^2	RMSE
线性回归	0.639	0.653
二次多项式	0.673	0.621
LOESS(span=0.5)	0.677	0.617

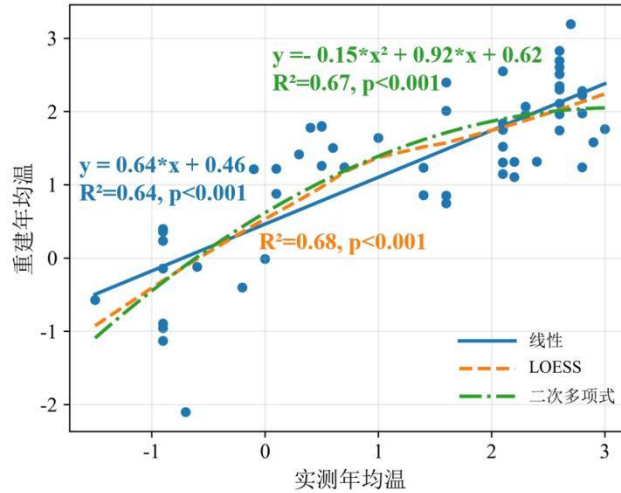


图 10 实测 MAAT 与 brGDGTs 指标重建 MAAT 的散点关系 (线性、LOESS 和二次多项式拟合)
 Fig.10 Scatterplot of observed MAAT versus brGDGTs-based reconstructed MAAT (linear, LOESS, and quadratic fits)

3.4 基于 brGDGTs 的 pH 指标的适用性及区域校准

Weijers *et al.* (2007) 在全球土壤样品中首次提出了基于 brGDGTs 环化程度的 CBT 指数, 并揭示了其与土壤 pH 之间的显著负相关关系, 后续在多种地理环境中的研究均验证了这一点 (Peterse *et al.*, 2010, 2012; Yang *et al.*, 2014)。然而, Yang *et al.* (2014) 的研究表明, 碱性土壤中 CBT 对 pH 的指示能力明显减弱, 与水分受限条件下 brGDGTs 的环化比例受土壤湿度影响有关。

de Jonge *et al.* (2014b) 指出, 虽然 6-甲基 brGDGTs 与 pH 密切相关, 但其丰度和环化特征对环境的响应方式与 5-甲基 brGDGTs 不一致, 将二者共同纳入 CBT 指标中计算可能导致不同异构体的环境信号叠加, 影响 pH 重建精度。因此剔除了 6-甲基异构体, 仅利用 5-甲基 brGDGTs 构建 CBT_{5ME} 指标, 与 CBT 相比 CBT_{5ME} 与 pH 的相关性略有改善。CBT_{6ME} 是将 CBT_{5ME} 公式中的 IIb 和 IIa 分别替换为 IIb' 和 IIa' 得到的环化指数, 神农架区域表土的研究指出其与 pH 显著负相关 (Yang *et al.*, 2015), 但在全球已发表的土壤数据中, CBT_{6ME} 与 pH 相关性明显弱于 CBT_{5ME} 与 pH 之间的关系 (黄钰莹等, 2021)。总体而言, 在半干旱—干旱地区 CBT 及 CBT_{5ME}、CBT_{6ME} 都明显受到水分胁迫的影响, 导致 pH 指示能力下降。

本研究区土壤 pH 分布范围较宽且多为碱性, 在测定的 28 个表土样品 pH 中, 有 25 个样品的 pH 值大于 7。尽管研究区年均降雨量大多介于 500~600 mm, 但基于 Peterse *et al.* (2012) 提出的 CBT 指标重建得到的 pH 值总体低于实测值 (图 11a), 这一现象与碱性及水分受限环境中 CBT 类指标会低估 pH 的结果一致 (Zheng *et al.*, 2016; 黄钰莹等, 2021)。在本数据集中, CBT_{6ME} 的表现仅略优于 CBT_{5ME} 和 CBT (R² 分别为 0.67、0.63 与 0.61, 图 12a~c), 表明在水分受限环境中其改进作用有限。

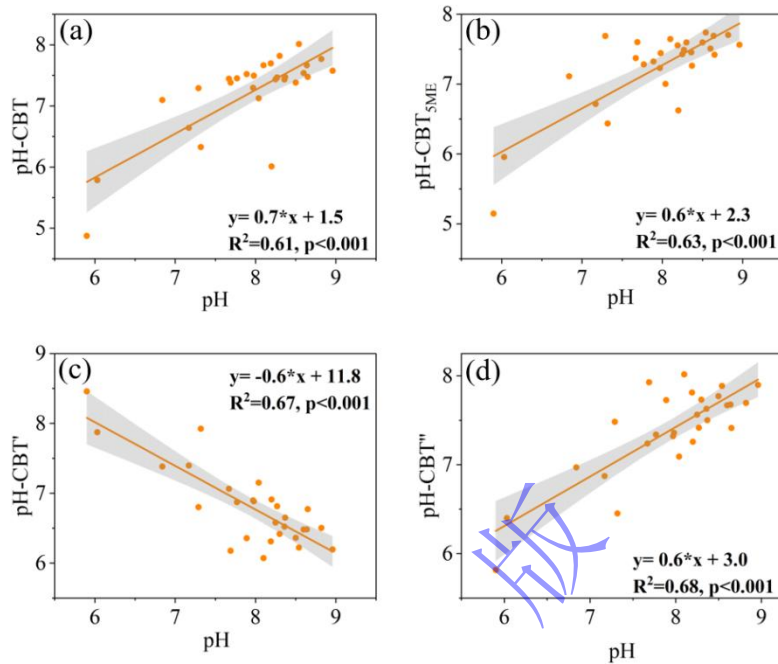


图 11 不同 brGDGTs pH 代用指标重建 pH 值与实际 pH 值的相关性散点图

(a) 基于 CBT 重建 pH 值与实测 pH 值的相关性; (b) 基于 CBT_{5ME} 重建 pH 值与实测 pH 值的相关性; (c) 基于 CBT' 重建 pH 值与实测 pH 值的相关性; (d) CBT'' 重建 pH 值与实测 pH 值的相关性

Fig.11 Scatter plots showing the relationships between different brGDGT-based pH proxies and measured soil pH values

(a) correlation between pH values reconstructed using CBT and measured pH values; (b) correlation between pH values reconstructed using CBT_{5ME} and measured pH values; (c) correlation between pH values reconstructed using CBT' and measured pH values; (d) correlation between pH values reconstructed using CBT'' and measured pH values

新型 pH 指标, 如 CBT', IBT、IR6ME, 是基于 5-甲基和 6-甲基 brGDGTs 相对丰度对 pH 的显著敏感性所构建 (de Jonge *et al.*, 2014a; Xiao *et al.*, 2015), 该类指标在碱性环境下仍能较好地重建出土壤 pH 值及其变化趋势 (Tang *et al.*, 2017)。在本研究的表土样品中 (pH 5.9~8.8), 基于 CBT' 和 CBT'' 重建的 pH 值与实测值之间的相关性较高 ($R^2=0.67$ 、 0.68 , 图 11c、d) 优于 CBT 和 CBT_{5ME} ($R^2=0.61$ 、 0.63 , 图 11a、b), 且 RMSEP 均较低 (0.3、0.3), 说明包含甲基位置差异信息的环化指标可以提高 pH 重建的准确度。

对于本研究的表土样品, 所有基于 brGDGTs 分布特征的 pH 代用指标 (主要包括 CBT、CBT_{5ME}、CBT'_{5ME}、CBT'_{6ME}、CBT'、CBT''、IRIIIa'、IRIIa'和 IBT) 均与实测土壤 pH 值呈显著相关关系 ($p<0.01$)。在这些指标中, 基于 6-甲基异构体构建的 IBT、IRIIIa'和 IRIIa'指数对 pH 的指示能力相对较弱 ($R^2=0.55$ 、 0.33 、 0.58 , RMSE 分别为 0.5、0.6、0.5, 图 12g~i), 而 CBT、CBT_{5ME} 和 CBT'_{5ME} 与 pH 值的相关性稍强 (R^2 分别为 0.61、0.63 和 0.62, 图 12a, b, e)。CBT'_{6ME}、CBT'和 CBT'' 指标与 pH 值的相关性最为显著 (R^2 分别达 0.67、0.67 和 0.68, 图 10c, d, f)。其中, CBT'' 与实测 pH 的相关性最高 ($R^2=0.68$, RMSE=0.4, 图 12f), 因此本研究区选择该指标建立研究区的区域 pH 校准方程:

$$\text{pH} = -1.8 \times \text{CBT}'' + 7.4 \quad (2)$$

同样地，利用 Duan *et al.* (2025) 发表的青藏高原表土数据对本研究提出的 brGDGTs-pH 校准方程进行验证。将该方程应用于全部样品时，重建 pH 值与实测 pH 值之间的 R^2 为 0.62 (图 13a)，RMSE 为 0.5。当仅选用温度分布范围在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的样品进行验证时，重建 pH 值的准确度显著提高 ($n=22$, $R^2=0.79$, $\text{RMSEP}=0.4$, 图 13b)。因此，可以认为本研究建立的 brGDGTs-pH 校准方程更适用于高海拔、寒冷环境。

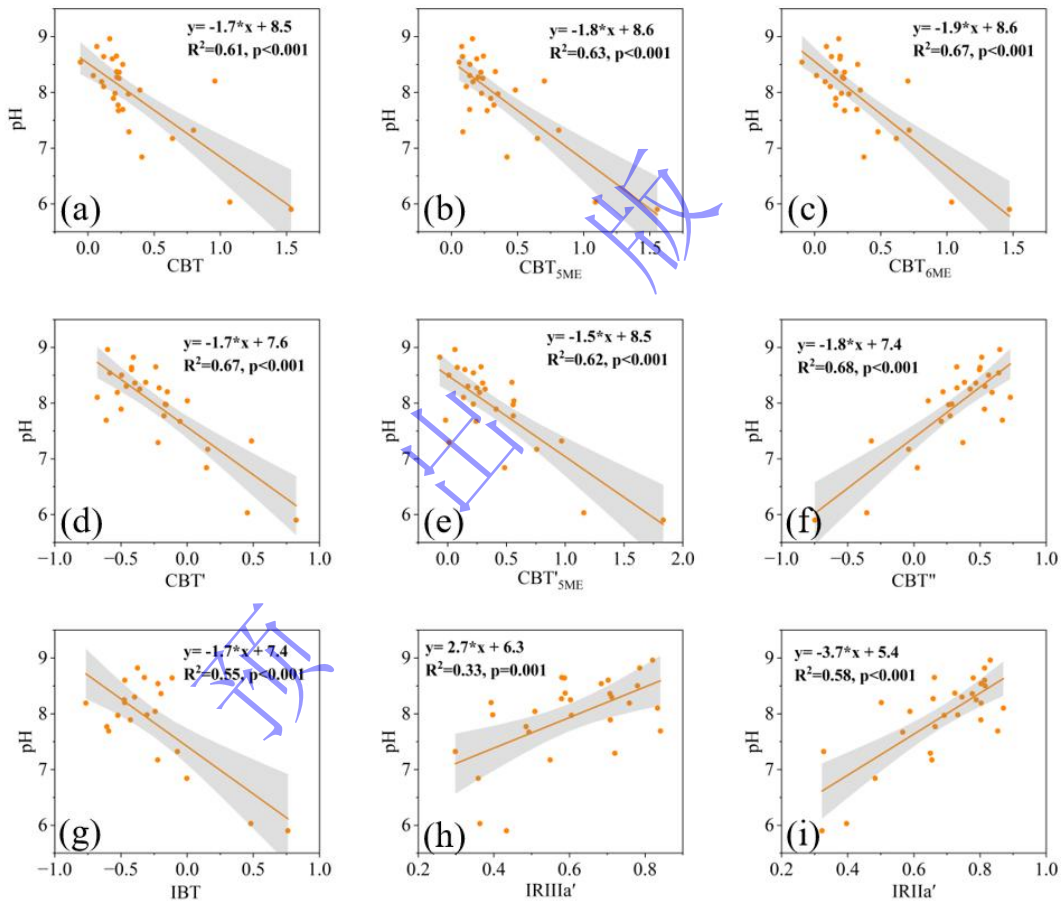


图 12 不同 brGDGTs pH 代用指标与实测 pH 值的相关性散点图

(a) CBT 与实测 pH 值的相关性；(b) CBT_{SME} 与实测 pH 值的相关性；(c) CBT_{6ME} 与实测 pH 值的相关性；(d) CBT' 与实测 pH 值的相关性；(e) CBT'_{SME} 与实测 pH 值的相关性；(f) CBT'' 与实测 pH 值的相关性；(g) IBT 与实测 pH 值的相关性；(h) IRIIIa' 与实测 pH 值的相关性；(i) IRIIa' 与实测 pH 值的相关性

Fig.12 Scatter plots showing the relationships between different brGDGTs-based pH proxies and measured soil pH values

(a) correlation between CBT versus measured pH values; (b) correlation between CBT_{SME} versus measured pH values; (c) correlation between CBT_{6ME} versus measured pH values; (d) correlation between CBT' versus measured pH values; (e) correlation between CBT'_{SME} versus measured pH values; (f) correlation between CBT'' versus measured pH values; (g) correlation between IBT versus measured pH values; (h) correlation between IRIIIa' versus measured pH values; (i) correlation between IRIIa' versus measured pH values

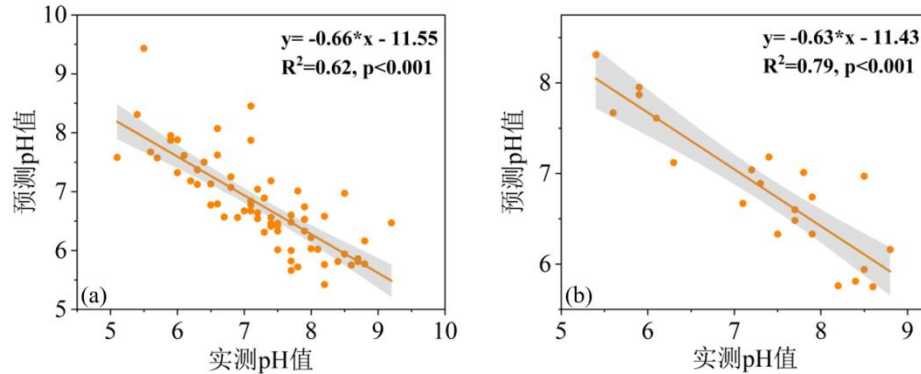


图 13 本研究公式重建 pH 值与实测 pH 值的相关性散点图 (数据引自 Duan *et al.*, 2025)

(a) 全部样品重建 pH 值与实测 pH 值的相关性; (b) 温度在约 -2°C ~ 3°C 的样品重建 pH 值与实测 pH 值的相关性

Fig.13 Scatter plots showing the correlation between pH values reconstructed using the equation developed in this study and measured pH values (data are from Duan *et al.*, 2025)

(a) correlation between reconstructed and measured pH values for all samples reported; (b) correlation between reconstructed and measured pH values for samples with temperatures of approximately -2°C to 3°C reported

4 结论

(1) 已发表的温度转换方程在藏东北地区表现出明显的“边缘效应”，本研究通过逐步回归方法建立了新的基于 brGDGTs-MAAT 的转换方程， $\text{MAAT}=2.8-51.4\times\text{IIc}-12.5\times\text{IIIa}'-8.7\times\text{IIa}+9.4\times\text{IIa}''-66.9\times\text{IIIb}-340.5\times\text{IIIc}'$ ($R^2=0.64$, $\text{RMSE}=0.8^{\circ}\text{C}$)，独立数据集验证结果表明该模型在年均温 -2°C 至 3°C 的低温区间内具有较好的适用性和重建精度。

(2) 区别于已发表的 CBT 和 CBT_{SME} 指标，基于 5-甲基与 6-甲基异构体的 CBT'' 指标与土壤实测 pH 相关性最高，据此建立了区域土壤 pH 校准方程， $\text{pH}=-1.8\times\text{CBT}''+7.4$ ($R^2=0.68$, $\text{RMSE}=0.4$)，提高了 pH 重建的可靠性与准确性。

(3) 本研究结果深化了对藏东北表土 brGDGTs 分布特征及其环境控制机制的认识，为该区域乃至相似高原环境下的古气候环境和古海拔重建提供了新的数据基础和现代过程约束。

参考文献 (References)

- 党心悦, 薛建涛, 杨欢, 等. 2016. 中国酸碱度不同湖泊四醚脂类分布影响因素及对湖泊古环境重建的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 46(2): 141-155. [Dang Xinyue, Xue Jiantao, Yang Huan, et al. 2016. Environmental impacts on the distribution of microbial tetraether lipids in Chinese lakes with contrasting pH: Implications for lacustrine paleoenvironmental reconstructions[J]. Science China Earth Sciences, 46(2): 141-155.]
- 黄钰莹, 裴宏业, 李婧婧, 等. 2021. 基于脂类的环境 pH 代用指标: 进展与思考[J]. 第四纪研究, 41(4): 1094-1114. [Huang Yuying, Pei Hongye, Li Jingjing, et al. 2021. Lipid-based pH proxies and their applications: Progress and perspectives[J]. Quaternary Sciences, 41(4): 1094-1114.]
- 李吉均, 方小敏. 1998. 青藏高原隆起与环境变化研究[J]. 科学通报, 43(15): 1569-1574. [Li Jijun, Fang Xiaomin. 1998. Study on the uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau and environmental changes[J]. Chinese Science Bulletin, 43(15): 1569-1574.]
- 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 1998. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性[J]. 第四纪研究, 18(3): 194-204. [Liu Tungsheng, Zheng Mianping, Guo Zhengtang. 1998. Initiation and evolution of the Asian monsoon system timely coupled with ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia[J]. Quaternary Sciences, 18(3): 194-204.]
- 潘保田, 李吉均, 陈发虎. 1995a. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器: I 新生代气候变化的基本特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 31(3): 120-128. [Pan Baotian, Li Jijun, Chen Fahu. 1995a. Qinghai-Tibetan Plateau: A driver and amplifier of global climatic changes: I Basic characteristics of climatic changes in Cenozoic era[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 31(3): 120-128.]

- 潘保田, 李吉均, 陈发虎. 1995b. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器: II. 青藏高原隆起的基本过程[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 31(4): 160-167. [Pan Baotian, Li Jijun, Chen Fahu. 1995b. Qinghai-Xizang(Tibetan) Plateau: A driver and amplifier of global climatic changes II. uplift processes of the Qinghai-Xizang(Tibetan)Plateau[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 31(4): 160-167.]
- 潘保田, 李吉均, 陈发虎. 1996. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器: III. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 32(1): 108-115. [Pan Baotian, Li Jijun, Chen Fahu. 1996. Qinghai-Tibetan Plateau: A driver and amplifier of the global climatic change: III. The effects of the uplift of Qinghai-Tibetan Plateau on climatic changes[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 32(1): 108-115.]
- 徐新良, 张亚庆. 2017. 中国气象背景数据集[DB]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统. [Xu Xinliang, Zhang Yaqing. 2017. China meteorological background dataset[DB]. Data Registration and Publishing System in Science Data Center of Resource and Environmental, Chinese Academy of Sciences.]
- 尹学明, 赵芳, 伍杰, 等. 2013. 四川稻城亚丁自然保护区主要植被类型[J]. 四川林业科技, 34(4): 50-54. [Yin Xueming, Zhao Fang, Wu Jie, et al. 2013. Main vegetation types in Sichuan Yading Nature Reserve[J]. Sichuan Forestry Science and Technology, 34(4): 50-54.]
- 张国娟. 甘南高寒草甸海拔梯度上生物多样性与生态系统多功能的关系[D]. 甘肃: 西北师范大学, 2022. Zhang Guojuan. 2022. Relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality along an altitude gradient in alpine meadows of Gannan[D]. Gansu: Northwest Normal University.
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times[J]. Nature, 411(6833): 62-66.
- Bai Y, Chen C H, Xu Q, et al. 2018. Paleoaltimetry potentiality of branched GDGTs from southern Tibet[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 19(2): 551-564.
- Clark M K, Royden L H, Whipple K X, et al. 2006. Use of a regional, relict landscape to measure vertical deformation of the eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 111(F3): F03002.
- Dang X Y, Yang H, Naafs B D A, et al. 2016. Evidence of moisture control on the methylation of branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers in semi-arid and arid soils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 189: 24-36.
- de Jonge C, Hopmans E C, Zell C I, et al. 2014a. Occurrence and abundance of 6-methyl branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers in soils: Implications for palaeoclimate reconstruction[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 141: 97-112.
- de Jonge C, Kuramae E E, Radujković D, et al. 2021. The influence of soil chemistry on branched tetraether lipids in mid- and high latitude soils: Implications for brGDGT-based paleothermometry[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 310: 95-112.
- de Jonge C, Stadnitskaia A, Hopmans E C, et al. 2014b. In situ produced branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers in suspended particulate matter from the Yenisei River, eastern Siberia[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 125: 476-491.
- Dearing Crampton-Flood E, Tierney J E, Peterse F, et al. 2020. BayMBT: A Bayesian calibration model for branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers in soils and peats[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 268: 142-159.
- Dellinger M, Bouchez J, Gaillardet J, et al. 2017. Tracing weathering regimes using the lithium isotope composition of detrital sediments[J]. Geology, 45(5): 411-414.
- Deng L H, Jia G D, Jin C F, et al. 2016. Warm season bias of branched GDGT temperature estimates causes underestimation of altitudinal lapse rate[J]. Organic Geochemistry, 96: 11-17.
- Ding L, Kapp P, Cai F L, et al. 2022. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 3(10): 652-667.
- Ding S, Xu Y, Wang Y, et al. 2015. Distribution of branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers in surface soils of the Qinghai-Tibetan Plateau: Implications of brGDGTs-based proxies in cold and dry regions[J]. Biogeosciences, 12(11): 3141-3151.
- Dirghangi S S, Pagani M, Hren M T, et al. 2013. Distribution of glycerol dialkyl glycerol tetraethers in soils from two environmental transects in the USA[J]. Organic Geochemistry, 59: 49-60.
- Duan Y W, Sun Q, Werne J P, et al. 2020. Soil pH dominates the distributions of both 5- and 6-methyl branched tetraethers in arid regions[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 125(10): e2019JG005356.
- Duan Y W, Zhou Y L, Hao S, et al. 2025. Divergent environmental controls on branched tetraethers along precipitation gradients in soils of the Tibetan Plateau[J]. Chemical Geology, 698: 123128.
- Eglinton G, Hamilton R J. 1967. Leaf epicuticular waxes[J]. Science, 156(3780): 1322-1335.
- Eglinton T I, Eglinton G. 2008. Molecular proxies for paleoclimatology[J]. Earth and Planetary Science Letters, 275(1/2): 1-16.
- Fægri K, Iversen J. 1989. Textbook of pollen analysis[M]. 4th ed. New York: Wiley.
- Feng X P, D'Andrea W J, Zhao C, et al. 2019. Evaluation of leaf wax δD and soil brGDGTs as tools for paleoaltimetry on the southeastern Tibetan Plateau[J]. Chemical Geology, 523: 95-106.
- Fielding E, Isacks B, Barazangi M, et al. 1994. How flat is Tibet?[J]. Geology, 22(2): 163-167.
- Halfman R, Lembrechts J, Radujković D, et al. 2022. Soil chemistry, temperature and bacterial community composition drive brGDGT distributions along a subarctic elevation gradient[J]. Organic Geochemistry, 163: 104346.
- Hanna A J M, Shanahan T M, Allison M A. 2016. Distribution of branched GDGTs in surface sediments from the Colville River, Alaska: Implications for the MBT/CBT paleothermometer in Arctic marine sediments[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 121(7): 1762-1780.
- Kallenbach C M, Frey S D, Grandy A S. 2016. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls[J]. Nature Communications, 7(1): 13630.
- Lei Y Y, Strong D J, Caballero M, et al. 2023. Regional vs. global temperature calibrations for lacustrine brGDGTs in the North American (sub)tropics: Implications for their application in paleotemperature reconstructions[J]. Organic Geochemistry, 184: 104660.
- Li Y, Zhao S J, Pei H Y, et al. 2018. Distribution of glycerol dialkyl glycerol tetraethers in surface soils along an altitudinal transect at cold and humid Mountain Changbai: Implications for the reconstruction of paleoaltimetry and paleoclimate[J]. Science China Earth Sciences, 61(7): 925-939.
- Liang J, Liu X W, Perfumo A, et al. 2026. Mitigating edge effects in paleoclimate reconstructions: A comprehensive review and bias assessment of soil brGDGT-based temperature reconstructions[J]. Earth-Science Reviews, 274: 105393.
- Liang J, Russell J M, Xie H C, et al. 2019. Vegetation effects on temperature calibrations of branched glycerol dialkyl glycerol tetraether (brGDGTs) in soils[J]. Organic Geochemistry, 127: 1-11.
- Liu R J, Han Z B, Zhao J, et al. 2020. Distribution and source of glycerol dialkyl glycerol tetraethers (GDGTs) and the applicability of GDGT-based temperature proxies in surface sediments of Prydz Bay, East Antarctica[J]. Polar Research, 39: 3557.
- Liu X D, Dong B W. 2013. Influence of the Tibetan Plateau uplift on the Asian monsoon-arid environment evolution[J]. Chinese Science Bulletin, 58(34): 4277-4291.
- Loomis S E, Russell J M, Ladd B, et al. 2012. Calibration and application of the branched GDGT temperature proxy on East African lake sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 357/358: 277-288.

- Martínez-Sosa P, Tierney J E, Stefanescu I C, et al. 2021. A global Bayesian temperature calibration for lacustrine brGDGTs[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 305: 87-105.
- Menges J, Huguet C, Alcañiz J M, et al. 2014. Influence of water availability in the distributions of branched glycerol dialkyl glycerol tetraether in soils of the Iberian Peninsula[J]. *Biogeosciences*, 11(10): 2571-2581.
- Meyers P A. 1997. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 27(5/6): 213-250.
- Molnar P, Boos W R, Battisti D S. 2010. Orographic controls on climate and paleoclimate of Asia: Thermal and mechanical roles for the Tibetan Plateau[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38(1): 77-102.
- Molnar P, England P, Martinod J. 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon[J]. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 357-396.
- Molnar P, Stock J M. 2009. Slowing of India's convergence with Eurasia since 20 Ma and its implications for Tibetan mantle dynamics[J]. *Tectonics*, 28(3): TC3001.
- Naafs B D A, Gallego-Sala A V, Inglis G N, et al. 2017. Refining the global branched glycerol dialkyl glycerol tetraether (brGDGT) soil temperature calibration[J]. *Organic Geochemistry*, 106: 48-56.
- O'Beirne M D, Vormlocher J R, Lopera-Congote L, et al. 2025. Exploring the influence of temperature on brGDGT distributions in Chilean lakes and soils: A comparative analysis of in situ measured and modeled temperature data[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 130(7): e2024JG008506.
- Pancost R D, Boot C S. 2004. The palaeoclimatic utility of terrestrial biomarkers in marine sediments[J]. *Marine Chemistry*, 92(1/2/3/4): 239-261.
- Peterse F, Nicol G W, Schouten S, et al. 2010. Influence of soil pH on the abundance and distribution of core and intact polar lipid-derived branched GDGTs in soil[J]. *Organic Geochemistry*, 41(10): 1171-1175.
- Peterse F, van der Meer J, Schouten S, et al. 2012. Revised calibration of the MBT-CBT paleotemperature proxy based on branched tetraether membrane lipids in surface soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 96: 215-229.
- Piperno D R. 2006. *Phytoliths: A comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists*[M]. Lanham: Altamira Press.
- Prescott C E. 2010. Litter decomposition: What controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils?[J]. *Biogeochemistry*, 101(1): 133-149.
- Raberg J H, Miller G H, Geirsdóttir Á, et al. 2022. Near-universal trends in brGDGT lipid distributions in nature[J]. *Science Advances*, 8(20): eabm7625.
- Rasse D P, Rumpel C, Dignac M F. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation[J]. *Plant and Soil*, 269: 341-356.
- Rowley D B, Garzione C N. 2007. Stable isotope-based paleoaltimetry[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35: 463-508.
- Russell J M, Hopmans E C, Loomis S E, et al. 2018. Distributions of 5- and 6-methyl branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers (brGDGTs) in East African lake sediment: Effects of temperature, pH, and new lacustrine paleotemperature calibrations[J]. *Organic Geochemistry*, 117: 56-69.
- Sachse D, Billault I, Bowen G J, et al. 2012. Molecular paleohydrology: Interpreting the hydrogen-isotopic composition of lipid biomarkers from photosynthesizing organisms[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40: 221-249.
- Schouten S, Baas M, Hopmans E C, et al. 2008. Tetraether membrane lipids of *Candidatus "Aciduliprofundum boonei"*, a cultivated obligate thermoacidophilic euryarchaeote from deep-sea hydrothermal vents[J]. *Extremophiles*, 12(1): 119-124.
- Schouten S, Hopmans E C, Schefuß E, et al. 2002. Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: A new tool for reconstructing ancient sea water temperatures?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 204(1/2): 265-274.
- Schouten S, Hopmans E C, Sinninghe Damsté J S. 2013. The organic geochemistry of glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids: A review[J]. *Organic Geochemistry*, 54: 19-61.
- Sinninghe Damsté J S, Rijpstra W I C, Foesel B U, et al. 2018. An overview of the occurrence of ether- and ester-linked *iso*-diabolic acid membrane lipids in microbial cultures of the Acidobacteria: Implications for brGDGT paleoproxies for temperature and pH[J]. *Organic Geochemistry*, 124: 63-76.
- Sinninghe Damsté J S, Rijpstra W I C, Hopmans E C, et al. 2011. 13, 16-Dimethyl octacosanedioic acid (*iso*-diabolic acid), a common membrane-spanning lipid of *Acidobacteria* subdivisions 1 and 3[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(12): 4147-4154.
- Sinninghe Damsté J S, Rijpstra W I C, Hopmans E C, et al. 2014. Ether- and ester-bound *iso*-diabolic acid and other lipids in members of *Acidobacteria* subdivision 4[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(17): 5207-5218.
- Sokol N W, Bradford M A. 2019. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input[J]. *Nature Geoscience*, 12(1): 46-53.
- Tang C Y, Yang H, Dang X Y, et al. 2017. Comparison of paleotemperature reconstructions using microbial tetraether thermometers of the Chinese loess-paleosol sequence for the past 350000 years[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(6): 1159-1170.
- Tang X T, Zhang W, Chen Y F, et al. 2024. Distributions of bacterial branched tetraether lipids associated with bacterial communities in hummock and hollow soils from southern Tibetan peatland[J]. *Chemical Geology*, 660: 122170.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- Véquaud P, Thibault A, Derenne S, et al. 2022. FROG: A global machine-learning temperature calibration for branched GDGTs in soils and peats[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 318: 468-494.
- Wang H Y, An Z S, Lu H X, et al. 2020a. Calibrating bacterial tetraether distributions towards in situ soil temperature and application to a loess-paleosol sequence[J]. *Quaternary Science Reviews*, 231: 106172.
- Wang H Y, Liu W G, Lu H X. 2016. Appraisal of branched glycerol dialkyl glycerol tetraether-based indices for North China[J]. *Organic Geochemistry*, 98: 118-130.
- Wang H Y, Liu Z H, Zhao H, et al. 2024. New calibration of terrestrial brGDGT paleothermometer deconvolves distinct temperature responses of two isomer sets[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 626: 118497.
- Wang H, Liu W, Zhang C L. 2014. Dependence of the cyclization of branched tetraethers on soil moisture in alkaline soils from arid-subhumid China: Implications for palaeorainfall reconstructions on the Chinese Loess Plateau[J]. *Biogeosciences*, 11(23): 6755-6768.
- Wang M Y, Yang H, Zheng Z, et al. 2020b. Altitudinal climatic index changes in subtropical China indicated from branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers proxies[J]. *Chemical Geology*, 541: 119579.
- Wang H, Gao P, Yang R, et al. 2022. Correlation Between brGDGTs Distribution and Elevation From the Eastern Qilian Shan. *Front. Earth Sci.* 10:844026.
- Weijers J W H, Panoto E, van Bleijswijk J, et al. 2009. Constraints on the biological source(s) of the orphan branched tetraether membrane lipids[J]. *Geomicrobiology Journal*, 26(6): 402-414.
- Weijers J W H, Schouten S, van den Donker J C, et al. 2007. Environmental controls on bacterial tetraether membrane lipid distribution in soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(3): 703-713.
- Wu J, Yang H, Shen C M, et al. 2023. BrGDGT-based quantitative reconstructions of paleotemperature in lakes: Regional vs. site-specific

- calibrations[J]. *Quaternary Science Reviews*, 322: 108416.
- Xiao W J, Xu Y P, Ding S, et al. 2015. Global calibration of a novel, branched GDGT-based soil pH proxy[J]. *Organic Geochemistry*, 89/90: 56-60.
- Yang H, Lü X X, Ding W H, et al. 2015. The 6-methyl branched tetraethers significantly affect the performance of the methylation index (MBT) in soils from an altitudinal transect at Mount Shennongjia[J]. *Organic Geochemistry*, 82: 42-53.
- Yang H, Pancost R D, Dang X Y, et al. 2014. Correlations between microbial tetraether lipids and environmental variables in Chinese soils: Optimizing the paleo-reconstructions in semi-arid and arid regions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 126: 49-69.
- Zang J J, Lei Y Y, Yang H. 2018. Distribution of glycerol ethers in Turpan soils: Implications for use of GDGT-based proxies in hot and dry regions[J]. *Frontiers of Earth Science*, 12(4): 862-876.
- Zheng F F, Zhang C L, Chen Y F, et al. 2016. Branched tetraether lipids in Chinese soils: Evaluating the fidelity of MBT/CBT proxies as paleoenvironmental proxies[J]. *Science China Earth Sciences*, 59(7): 1353-1367.
- Zhu Z Y, Wu J, Chu G Q, et al. 2025. New global lacustrine brGDGTs temperature calibrations based on machine learning[J]. *Quaternary Science Reviews*, 357: 109319.

Controlling Factors of brGDGTs in Surface Soils from the Northeastern Tibetan Plateau: Implications for paleotemperature reconstruction

HUANG XinYu^{1,2}, WANG Gen^{1,3}, ZHAO YongTao⁴, ZHANG XiaoMei¹, ZHANG Ting¹, MA XueYun¹, WEI ZhiFu¹, WANG YongLi⁵

1. Key Laboratory of Petroleum Resources Exploration and Evaluation, Gansu Province, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. State Key Laboratory of Cryospheric Science and Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

4. State Key Laboratory of Ecological Security and Sustainable Development in Arid Regions, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

5. State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: [Objective] Glycerol dialkyl glycerol tetraethers (GDGTs), owing to their high chemical stability and sensitivity to environmental conditions, have been widely used in paleoenvironmental and paleoelevation reconstructions. Given the complex topography and variable climate of the Tibetan Plateau, it is necessary to investigate the distribution characteristics of branched GDGTs (brGDGTs) and their relationships with temperature and pH in modern environments across the Tibetan Plateau to establish reliable regional calibration equations. [Methods] In this study, a total of 56 surface soil samples were collected from nine basins on the northeastern margin of the Tibetan Plateau, including Maqu, Gannan, Zoigê, Songpan, Nangqian, Leiwuqi, Gonjo, Markam and Daocheng. brGDGTs were systematically analyzed in conjunction with instrumentally measured mean annual air temperature (MAAT), mean annual precipitation (MAP), and measured pH values. Published proxy indices were evaluated using Pearson correlation analysis, and regional calibration equations for temperature and pH were established through stepwise regression and linear fitting methods. [Results] brGDGTs in the surface soils of the study area are dominated by Ia, Iia, and Iia', with 5-methyl brGDGTs accounting for the highest proportion. The regional MAAT calibration model established by stepwise regression shows relatively high reconstruction accuracy within the low-temperature range (-2 °C to 3 °C). Among the cyclization indices established from surface soil samples on the Tibetan Plateau,

Foundation: National Key Research and Development Project, No. 2024YFF0809102; National Natural Science Foundation of China, No. 42372223; Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences, 2021425

Corresponding author: WANG Gen, E-mail: gwang@lzb.ac.cn

CBT" shows the strongest correlation with measured pH values. **[Conclusions]** The composition and distribution of brGDGTs in surface soils from the northeastern margin of the Tibetan Plateau are jointly controlled by temperature and pH. The newly established regional temperature and pH calibration equations based on sedimentary brGDGTs show better applicability in high-altitude, cold environments, providing scientific constraints for the quantitative reconstruction of paleoenvironment and paleoelevation on the Tibetan Plateau.

Key words: Tibetan Plateau; brGDGTs; modern processes; temperature; pH

