



方解石结晶度在中亚北部黄土古气候重建中的应用

王燕萍, 宋友桂, 韩 丽, 李 越, 肖静芸

Potential of calcite crystallinity in paleoclimate reconstruction of loess in Northern Central Asia

WANG Yanping, SONG Yougui, HAN Li, LI Yue, and XIAO Jingyun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2025022802>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

临汾盆地黄土粒度分布的端元模型研究

End member model analysis of grain size for the loess in Linfen Basin, China

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 192–200

临汾盆地晚冰期至中全新世黄土-古土壤序列的风化特征及指示的气候意义

Characteristics of weathering of the loess–paleosol sequences in the Late Glacial Period to Middle Holocene in Linfen Basin and implication for climatic significance

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 181–191

阿坝盆地黄土记录的青藏高原东部末次冰期环境变化

Environmental changes during the last glacial in the Eastern Tibetan Plateau revealed by loess sediments in the Aba Basin

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(4): 168–179

福建琅岐岛表土孢粉与植硅体组合对农业活动的指示

Pollen and phytolith assemblages in topsoil as indicators of agricultural activities in Langqi Island, Fujian Province

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(1): 55–66

中国黄土磁性地层研究进展与展望

Progress and outlooks on magnetostratigraphy of Chinese loess

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(2): 1–15

铜川地区早中全新世黄土沉积特征及其古气候意义

Sedimentary characteristics of the Early and Middle Holocene loess in Tongchuan area and their implications for paleoclimate

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 160–166



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王燕萍, 宋友桂, 韩丽, 等. 方解石结晶度在中亚北部黄土古气候重建中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 144-156.

WANG Yanping, SONG Yougui, HAN Li, et al. Potential of calcite crystallinity in paleoclimate reconstruction of loess in Northern Central Asia[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 144-156.

方解石结晶度在中亚北部黄土古气候重建中的应用

王燕萍^{1,2}, 宋友桂¹, 韩丽³, 李越^{1,4}, 肖静芸^{1,2}

1. 中国科学院地球环境研究所黄土科学全国重点实验室, 西安 710061

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

3. 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008

4. 西马其顿大学化学工程系, 希腊 科扎尼 50100

摘要: 黄土碳酸盐矿物是古气候重建的重要载体, 而在中亚干旱区其与气候因子的关系尚不明确, 尤其是方解石成因的区分及其结晶度的气候指示潜力有待深入挖掘。本文以中亚北部干旱区表土和黄土为研究对象, 利用 X 射线衍射分析了方解石矿物学特征, 以方解石 (104) 晶面衍射峰的峰形参数比 (峰高/峰面积, H/A 值) 表征结晶度, 并运用广义加性模型系统评估了气候因子与方解石结晶度的关系。结果表明, 次生方解石的 H/A 值 (4.21 ± 0.62) 显著低于混合成因方解石 (6.25 ± 0.82), H/A 值与年蒸散量呈显著负相关, 可作为古蒸散强度的潜在代用指标。分析发现年蒸散量与年均温的非线性交互效应可解释 H/A 值 76% 的变异。 H/A 值在寒冷或温暖的温度背景下 ($0 \sim 2^\circ\text{C}$ 或 $6 \sim 10.5^\circ\text{C}$) 与蒸散量密切相关。而在过渡温度区间 ($2.5 \sim 5.5^\circ\text{C}$ 或 $11 \sim 12^\circ\text{C}$), H/A 值随蒸散量的变化存在阈值效应。研究表明方解石结晶度在中亚古气候重建中具有重要的应用潜力, 为解析中亚干旱区第四纪环境演变提供了新的矿物学视角和方法支持。

关键词: 方解石结晶度; 表土; 蒸散量; 黄土; 中亚干旱区

中图分类号: P532

文献标识码: A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2025022802](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2025022802)

Potential of calcite crystallinity in paleoclimate reconstruction of loess in Northern Central Asia

WANG Yanping^{1,2}, SONG Yougui¹, HAN Li³, LI Yue^{1,4}, XIAO Jingyun^{1,2}

1. State Key Laboratory of Loess Sciences, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lake, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

4. Department of Chemical Engineering, University of Western Macedonia, Kozani 50100, Greece

Abstract: In the Loess Plateau of China, carbonate minerals are important proxies for paleoclimate reconstruction. However, relationships between carbonate mineral characteristics and climatic factors remain poorly constrained in the arid region of the Central Asia, concerning particularly the discrimination between different genesis of calcites and their crystallinity as climatic proxies. This study focuses on the climatic significance of calcite crystallinity in topsoils and loess in the arid region of Central Asia, aiming to assess its potential for paleoclimatic reconstruction. A total of 48 topsoils of loess sediments and 6 samples from two loess profiles deposited since the last glacial periods were collected from northern Xinjiang, China, and southern Kazakhstan. X-ray diffraction (XRD) analysis was performed to analyze the mineralogical characteristics of calcite. The crystallinity was quantified using a peak shape parameter (height/area ratio, H/A value) of the calcite (104) diffraction peak. Generalized Additive Models were employed to systematically evaluate the relationship between various climatic factors and calcite crystallinity of topsoils. Results demonstrate that secondary calcite exhibited significantly lower H/A values (4.21 ± 0.62) compared to mixed-origin calcite (6.25 ± 0.82). The H/A values show a significant negative correlation with annual evapotranspiration, suggesting their potential as a proxy of paleo-evapotranspiration intensity. Except for winter, the separate introduction of precipitation and temperature factors in other seasons did not significantly improve the explanatory power of the model. However, non-linear interactions between annual

资助项目: 国家自然科学基金项目“新疆裕民黄土记录的中亚干旱区 MIS4-MIS5e 的气候变化研究”(42172207), “乌兹别克斯坦黄土记录的轨道尺度西风变迁”(42372220), “新疆天山黄土记录的去 80 万年西风区降水变化”(42472254)

作者简介: 王燕萍 (1995—), 女, 硕士研究生, 第四纪地质学专业, E-mail: wangyanping22@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 宋友桂 (1974—), 男, 研究员, 从事第四纪地质学研究, E-mail: ygsong@loess.llqg.ac.cn

收稿日期: 2025-02-28; **改回日期:** 2025-04-07. 文凤英编辑

evapotranspiration and mean annual temperature accounted for 76% of the variance in H/A values. The H/A values were closely related to the evapotranspiration as a single factor in the cold ($0\sim 2^{\circ}\text{C}$) or warm ($6\sim 10.5^{\circ}\text{C}$) thermal regimes; however, there was a threshold effect of the H/A value change with the evapotranspiration in the transitional thermal regimes ($2.5\sim 5.5^{\circ}\text{C}$ or $11\sim 12^{\circ}\text{C}$). This research provides critical insights into applying calcite crystallinity for paleoclimate reconstruction in the Central Asia, which deepens understanding of the paleoclimate characteristics and offers a novel mineralogical tool for deciphering Quaternary environmental evolution in arid Central Asia.

Key words: calcite crystallinity; topsoil; evapotranspiration; loess; arid Central Asia

黄土是研究全球气候变化的三大支柱之一,通过代用指标的解译能够揭示第四纪气候环境演变过程^[1]。碳酸盐因其易溶性,在土壤风化和黄土古气候研究中具有重要意义^[2-3]。黄土中的碳酸盐保存了形成时的古环境信息^[4],其中方解石的形成、分布和含量对气候因子的变化具有敏感的指示作用。大量研究表明,方解石的转变通常受到形成环境和后期水文气候变化的影响,因此具有重要的古环境指示潜力。然而,这些研究主要集中在石笋^[5-8]和湖泊碳酸盐沉积^[9-10]上,黄土研究则主要关注碳酸盐含量^[11-13]以及碳酸盐同位素指标的古环境意义^[14-18],而对其晶体矿物学的研究仍较缺乏。

在黄土沉积中,碳酸盐矿物广泛存在,来源主要包括源区碎屑碳酸盐和成壤过程中形成的次生碳酸盐^[1, 11, 19],后者是干旱和半干旱地区土壤的重要特征^[20]。方解石结晶度是区分原生和次生方解石的重要指标之一^[21]。最新研究^[22]发现在黄土高原黄土-古土壤序列中,方解石结晶度表现出冰期较高、间冰期较低的特征,可能指示东亚夏季风强度的变化。然而,在某些阶段,东亚季风区相对湿润,碳酸盐非原位淀积可能干扰古气候信息的解译^[23-24]。在中亚干旱地区,由于降水量不足,碳酸盐未能充分淋溶,溶解的碳酸钙通常在土壤层中重新沉淀,形成次生碳酸盐^[25]。这一过程中,方解石的结晶情况与环境因子密切相关,可能成为反映气候条件的重要指标,但目前对中亚表土和黄土中方解石结晶度的研究尚属空白,其与气候因子之间的关系亟待深入挖掘。

本文基于中亚北部干旱区表土和黄土样品,采用X射线衍射(XRD)技术进行矿物分析。以方解石(104)晶面衍射峰的峰形参数比(H/A 值)代表结晶度,进一步探讨方解石结晶度与气候因子的关系,为干旱区第四纪环境演变研究提供新视角和新方法。

1 研究区概况和采样

中亚干旱区位于亚欧大陆中心,是全球主要的非地带性干旱区之一^[26-27]。该区域地形以盆地和山

脉为主(图 1a),多期造山和侵蚀过程为土壤碳酸盐矿物提供了丰富的母岩^[28]。在天山造山带,岩石风化释放的碳酸盐碎屑被搬运至周围低地^[29]。由于该地区强烈的蒸发作用和有限的降水,碳酸钙在土壤中重新沉淀,形成丰富的次生碳酸盐层。此外,区域降水主要由地形抬升引起,山区降水量显著高于低海拔盆地^[30]。中亚北部(主要指东、中天山以北)的温带大陆气候与西风带的季节性移动导致了明显的降水差异^[31],例如,哈萨克斯坦北部及东部山区主要在夏季降水,而中部和南部的降水则全年分布较均匀或以冬季为主(图 1b-c)。这些降水模式的差异为研究不同水热条件下的方解石结晶度变化提供了理想的条件。

为研究中亚黄土方解石结晶度与环境因子的关系,本文在中亚干旱区北部(包括中国北疆和哈萨克斯坦南部)选择了 48 件发育于黄土序列之上的表土样品。在东部山区,样品采集的海拔范围为 638~2100 m,在西部则以 20~30 km 的间隔进行采样。根据碳酸盐溶解的 4 阶段模式理论^[23],白云石的溶解速率比方解石慢至少 15 倍^[32],当白云石完全溶解时,土壤中的碎屑碳酸盐已消失,此时土壤样品中的方解石属于次生成因。在伊犁盆地特克斯末次冰期黄土剖面 and 塔城盆地裕民黄土剖面中筛选出 6 个不含白云石但有方解石的黄土样品,用以获取研究区次生方解石的结晶度信息。

2 分析方法

2.1 矿物分析

碳酸盐矿物分析在中国科学院地球环境研究所,使用荷兰帕纳科公司的 X'Pert MPD Pro 衍射仪进行。将研磨到 200 目以下的粉末样品压平后置于衍射仪置物台上。测试条件: $\text{Cu K}\alpha$ 射线源(波长 $\lambda=1.54056\text{ \AA}$),管压和电流分别为 40 kV、40 mA。采用连续扫描模式,扫描范围(2θ)为 $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$,步长为 0.001833° ,扫描速度为 $0.11^{\circ}/\text{s}$ 。利用 MID Jade6.0 软件进行物相鉴定,通过矿物衍射峰形态特征评估

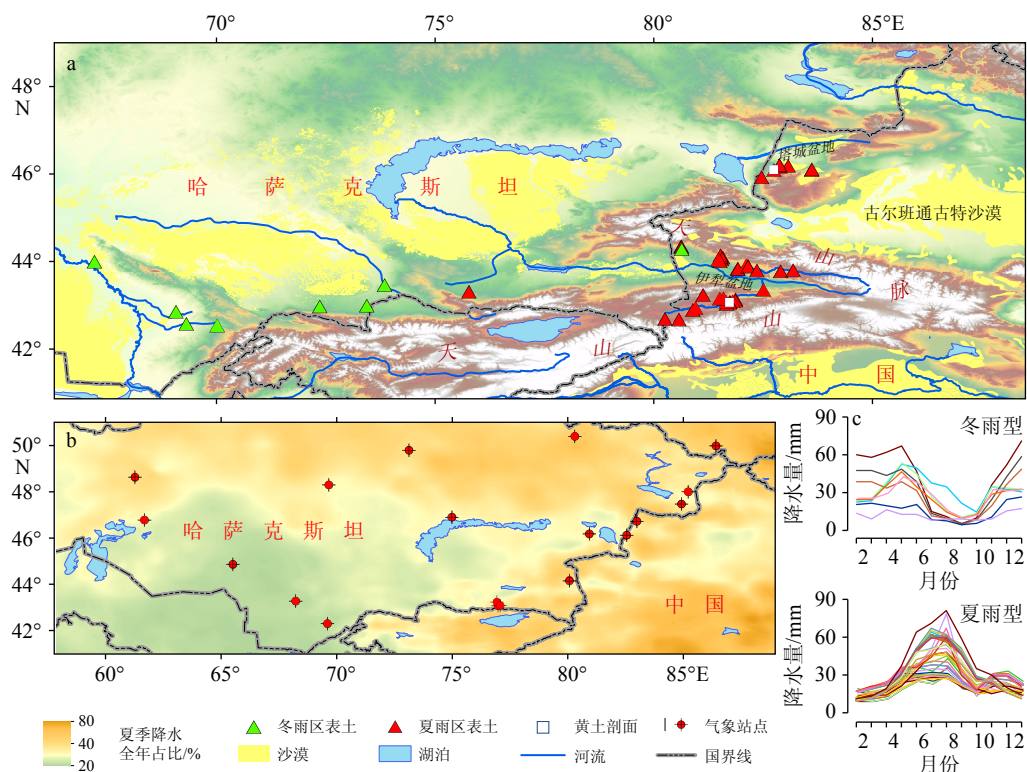


图1 研究区、表土和剖面位置(a)、气象站点分布(b)及各冬、夏型年降水量分布(c)

该图的中国和世界国家轮廓分别基于国家地理信息公共服务平台下载的审图号为GS(2024)0650号和审图号为GS(2016)1665号的标准地图制作,底图均无修改。

Fig.1 Locations of the study area, surface soil and involved loess profiles (a), distribution of meteorological stations (b), and annual precipitation patterns (c)

结晶度。通常采用半高宽或积分宽度表征结晶度。然而,当样品中高结晶度组分占比超过40%时,半高宽参数因峰宽与峰高的非线性耦合效应导致灵敏度下降。而峰高(height)与峰面积(area)比值(H/A)同步考量衍射峰形态的尖锐度和展宽特性,可更有效表征方解石结晶度^[22]。方解石(104)晶面对应的衍射峰($d=0.3034$ nm, 对应 $2\theta=29.42^\circ$)是其晶体结构中最具特征性的峰,在矿物学研究中普遍作为分析对象^[33-34]。根据XRD定量分析的主峰法原则^[35],选择该晶面主要是基于其衍射强度显著高于其他晶面,同时在含有石英、长石等常见矿物的混合样品中表现出独特的峰位特征,不易受到其他矿物衍射峰的干扰。因此,选取方解石(104)晶面对应的衍射峰作为分析对象,通过 H/A 比值定量化结晶度。 H/A 值越大表征衍射峰形越尖锐,结晶度越高。具体操作中,采用Pearson-VII函数对 $28.5^\circ\sim 32.5^\circ$ 衍射区间进行分峰拟合^[36],获得方解石(104)晶面的峰高和峰面积参数。

2.2 采样点气象数据的获取与验证

样品点的气温和降水数据来源于再分析数据

集,包括高分辨率陆地表面气温和降水的网格化再分析数据集(CHELSA)^[37]和NASA全球大气再分析数据集第2版(MERRA2)^[38],以及CHELSA温度数据集^[37]。CHELSA数据集的分辨率为1 km,而MERRA2数据集在北纬 45° 的水平空间分辨率大约为 $56\text{ km}\times 49\text{ km}$ 。地表实际蒸散发数据来源于ETmonitor全球逐日1 km分辨率地表实际蒸散发数据集^[39]。分别利用R语言的‘ncdf4’包和‘raster’包将再分析数据提取到表土点的地理坐标位置,并对数据进行单位转换,同时计算季节性和年均统计值。

为评估各再分析数据集在研究区的适用性,本文收集了哈萨克斯坦、中国北疆和俄罗斯阿尔泰地区共23个气象站的观测降水量和气温数据(图1b)。数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心^[40-41]和中国气象数据网。鉴于哈萨克斯坦观测数据的不连续性,本文选取了1985—1995年的逐月观测数据进行分析。将提取的CHELSA、MERRA2以及这两个数据集的加权平均(以下简称为合成降水量数据)与气象站点和观测数据对比,以线性回归模型的决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)作为评价指标。

2.3 数据分析

广义加性模型(GAMs)^[42]结合了广义线性模型与可加模型的优势,通过一种特殊的函数(链接函数)来建立因变量的期望值与自变量之间的关系。这种模型特别适合处理因变量和自变量之间存在非线性或非单调关系的数据,能够更灵活地捕捉变量之间的复杂关系,而不仅仅是简单的线性关系。本文采用 GAMs 系统评估气候因子对表土方解石结晶度(以 H/A 值表征)的影响。模型构建基于三类结构:单一变量模型(仅包含单个气候因子的效应)、双变量叠加模型(引入两个气候因子的加性效应)及双变量交互模型(表征两变量的非线性交互效应)。基于皮尔森相关系数($|r| > 0.7$)^[43]排除潜在的多重共线性。

所有分析在 R 4.3.2 环境中完成,基于‘mgcv’包^[44]实现 GAM 建模。模型显著性通过平滑项 P 值(< 0.05)及 F 检验与仅含截距项模型的比较判定。通过调整决定系数(R^2)表征其对 H/A 值变异的解释程度,预测精度则采用均方根误差(RMSE)进行量化评估。在模型选择过程中,应用赤池信息准则(AIC)综合权衡模型复杂度与拟合优度。AIC 平衡模型构建中的偏差和方差,其值越小表示模型拟合效果越好^[45]。为解析气候因子的作用机制,本研究通过效应图展示单变量对 H/A 值的非线性影响,模型的形状被表达为有效自由度(edf),如果平滑项被简化为线性关系,则 edf 等于 1。在双变量交互效应模型中,鉴于不同温度区间内 H/A 值对蒸散量的效应不同。为解构温度-蒸散量双变量对 H/A 值的协同效应,将连续型年均温度按 0.5°C 步长进行等距分箱,并绘制不同温度区间内 H/A 值随蒸散量变化的曲线簇,直观比较不同温度区间内的蒸散量效应。

3 结果

3.1 再分析降水量和温度数据在研究区可靠性验证

3.1.1 降水量数据

气象观测站点与再分析降水数据的线性回归模型结果(图 2)表明,在年降水量方面,合成两套数据集的结果与观测值的模型拟合最佳, R^2 高达 0.98, RMSE 为 23.5 mm(图 2a-c),表明合成数据在研究区的多年平均降水量模拟效果优异。因此,合成降水量数据能够有效代表表土样点的多年平均降水量。在夏季降水量模拟方面, MERRA2 数据集

的表现最佳(图 2d-f),能够较好地反映样点的夏季降水情况。合成夏季降水量的 R^2 和 RMSE 与 MERRA2 数据集表现接近,但具有更高的水平分辨率,因此,采用合成夏季降水量数据代表样点的夏季降水量。CHELSA 数据集在冬季降水量模拟与观测值的拟合效果最佳(图 2g-i),适用于代表样点的冬季降水量。

3.1.2 气温数据

气象观测站点与 CHELSA 再分析温度数据的线性模型结果(图 3)显示,年平均温度和夏季温度的拟合效果良好(图 3a-b),表明 CHELSA 在研究区的年均温和夏季气温模拟效果优异。然而,冬季气温的拟合较差(图 3c)。因此,虽然本文直接采用了基于各表土点提取的 CHELSA 年均温、夏季和冬季温度数据,但在涉及冬季温度的讨论中会更加谨慎。

3.2 X 射线衍射图谱分析

XRD 分析表明样品中的方解石特征峰位与标准粉末衍射卡(PDF No. 05-0586)高度吻合,且相对强度与标准谱图一致(图 4)。特克斯黄土剖面样品以石英、方解石、石膏、半水石膏、钠长石及微斜长石为主(图 4a)。裕民黄土剖面样品矿物组成与表土一致,主要包含石英、方解石、白云母、钠长石、微斜长石和透闪石(图 4b-e)。值得注意的是,除 4 个表土样品中未检出白云石之外,其他表土样品中均含白云石(图 4c)。由于方解石的溶解速率至少是白云石的 15 倍^[46],白云石完全溶解通常指示土壤中碎屑碳酸盐的彻底消失^[23]。因此,上述 4 个未检测到白云石的样品暗示了其方解石为次生沉淀成因。据此,将无白云石的 4 个样品归类为表土 II,其余 44 个含白云石样品定义为表土 I。

3.3 H/A 值在不同样品中的分布

不同样品的统计结果(图 5)表明,表土 I 的 H/A 值为 4.61~8.10,平均值为 6.25 ± 0.82 ,表土 II 的 H/A 值为 4.56~5.01,平均值为 4.78 ± 0.24 。黄土剖面样品的 H/A 值为 3.30~4.51,平均值为 3.84 ± 0.46 ,结晶度最低。研究区含次生方解石样品(包括黄土剖面和表土 I)的 H/A 值为 3.30~5.01,平均值为 4.21 ± 0.62 ,明显低于表土 I 的样品。夏雨区与冬雨区的 H/A 值分别为 6.13 ± 0.73 和 6.17 ± 0.63 ,没有呈现显著差异。这可能暗示研究区内方解石结晶度对降水季节性的响应较弱,其变化更可能受控于其他因素。

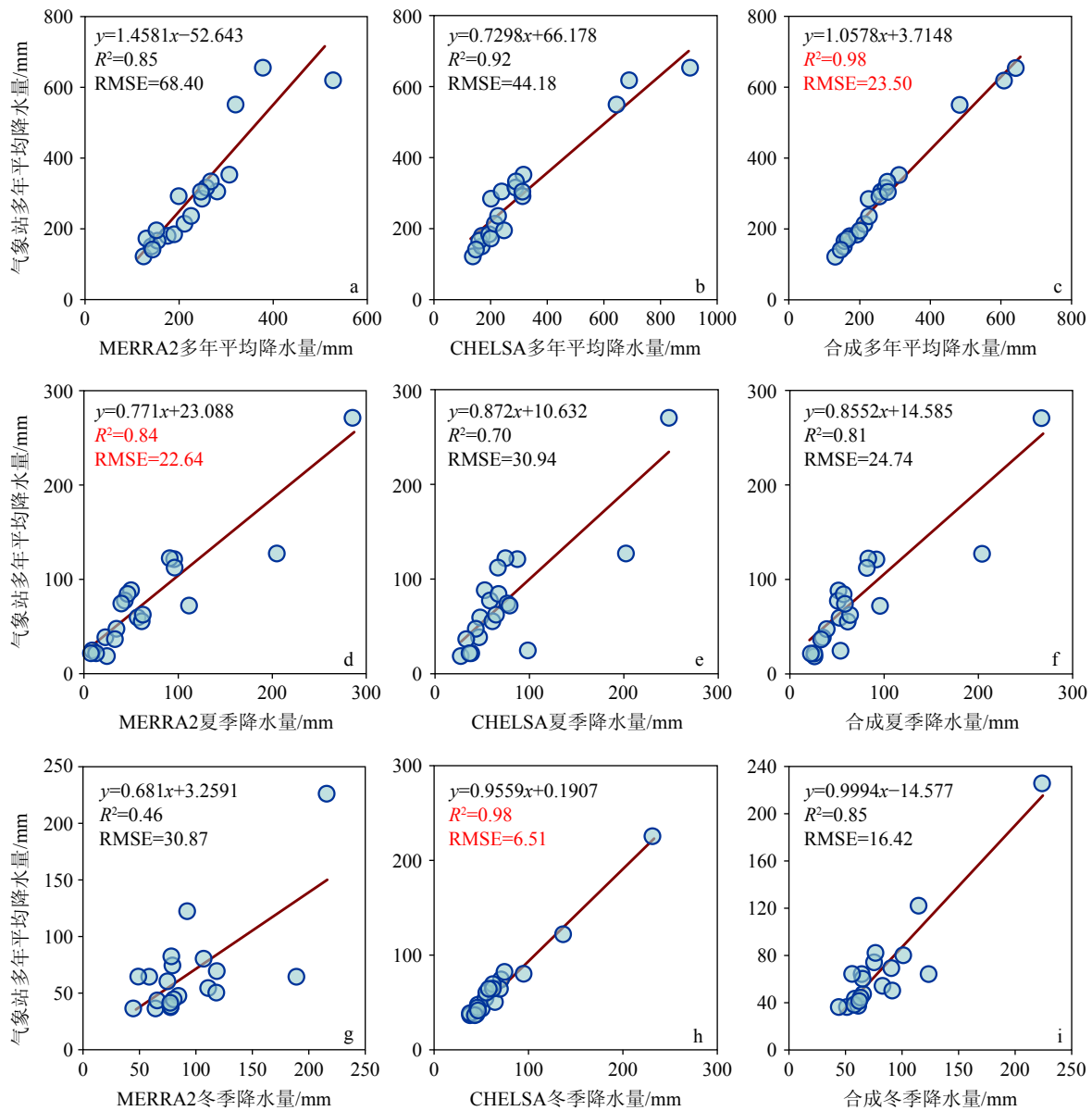


图 2 1985—1995 年站点观测降水量与再分析降水量之间的线性回归模型对比

Fig.2 Linear regression model comparison between observed precipitation data and reanalysis precipitation data at sites from 1985 to 1995

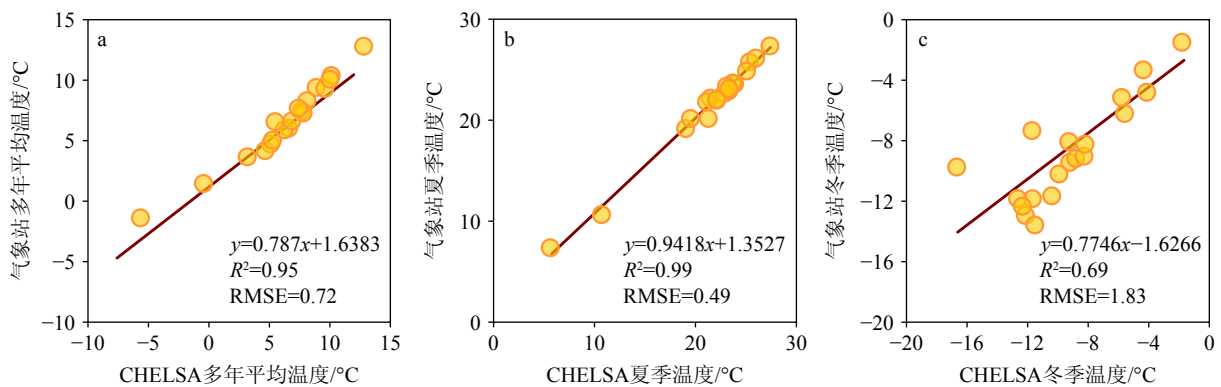


图 3 1985—1995 年站点观测与 CHELSA 再分析气温数据的线性回归模型对比

Fig.3 Linear regression model comparison between observed temperature data at sites and CHELSA reanalysis temperature data from 1985 to 1995

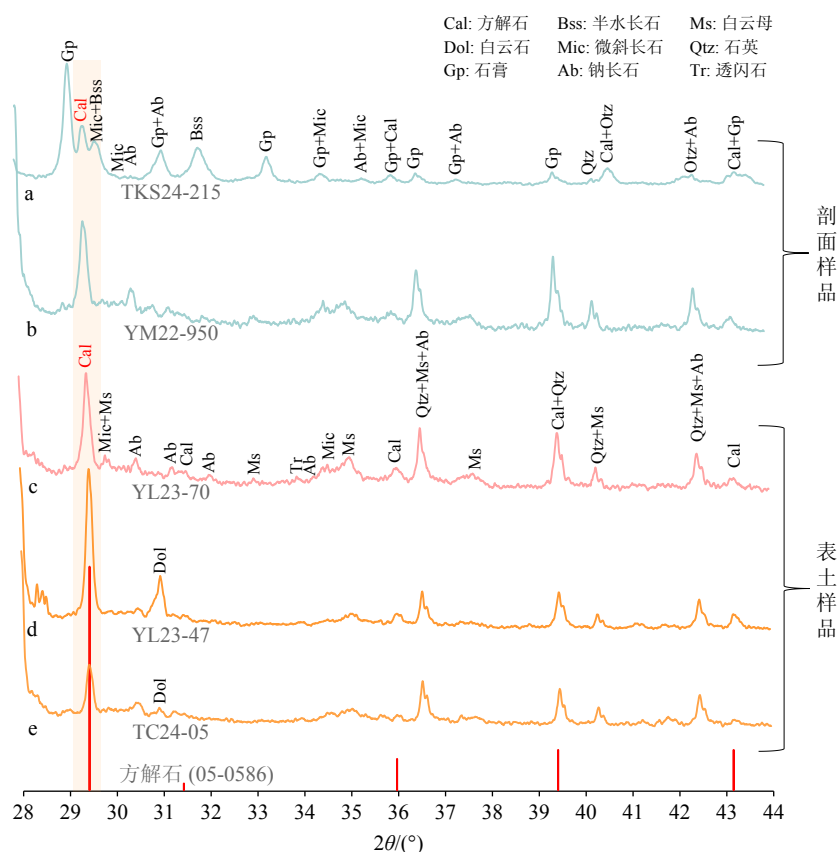


图 4 代表性样品的 X 射线衍射图谱

Fig.4 The X-ray diffraction spectra of representative samples

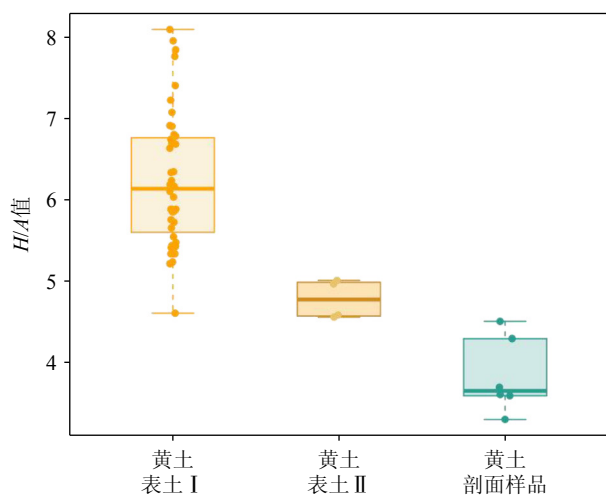


图 5 不同样品中方解石 (104) 晶面衍射峰高度与面积比值 (H/A 值) 分布箱线图

表土 I 含白云石, 表土 II 不含白云石。

Fig.5 Box plot of the distribution of H/A value (height-to-area ratio) for calcite (104) diffraction peaks in different samples

Topsoil I: samples with dolomite, Topsoil II: dolomite-free samples.

3.4 单预测变量广义加性模型

单因子模型结果(表 1)表明 12 个气候要素在

$P < 0.05$ 水平上显著影响 H/A 值变异, 包括年蒸散量、季节蒸散量、年降水量、春夏和冬季降水量、年均温度和夏秋季节温度。其中年蒸散量、春季蒸散量和降水量与 H/A 值呈线性关系(图 6a-b, f), 其余变量则表现出非线性耦合特征。

蒸散量相关因子(年/春/夏/秋季)均与 H/A 值呈显著负相关(图 6a-d), 但冬季蒸散量表现出差异性响应, 数据比较分散(图 6e)。年蒸散量具有最高的解释效力, 其单因子模型即可解释 H/A 值 59% 的变异。因此, 蒸散量对 H/A 值差异有显著的影响。降水因子的响应模式呈现季节分异: 年降水量与 H/A 值负相关, 春季降水呈“U 型”响应(图 6g), 冬季降水则表现为倒“U 型”关系(图 6i)。当夏季降水低于 60 mm 时 H/A 值保持稳定, 超过此阈值后呈现下降趋势。夏秋季温度参数与 H/A 值呈现复杂的非线性响应, 表明温度对其影响需通过灵活的非线性模型捕捉, 可能反映阈值或分段效应(图 6j-l)。

3.5 双预测变量广义加性模型

年蒸散量作为核心驱动因子被作为基础模型。通过皮尔森相关性分析($|r| > 0.7$), 剔除与其存在显著共线性的季节蒸散量(春季和夏季蒸散量)

表 1 H/A 值与单影响因素的 GAMs 模型结果
Table 1 Results of single-factor Generalized Additive Models (GAMs) for H/A values

模型因子	有效自由度	参考自由度	P	方差解释率/%	调整决定系数 R^2
年蒸散量	1.00	1.00	<0.000 1***	59.54	0.59
春季蒸散量	1.00	1.00	<0.000 1***	43.21	0.42
夏季蒸散量	1.66	2.08	<0.000 1***	52.54	0.51
秋季蒸散量	2.04	2.57	<0.000 1***	57.62	0.56
冬季蒸散量	1.97	2.48	0.006 1**	24.17	0.21
年降水量	1.00	1.00	0.003 7**	16.93	0.15
春季降水量	2.06	2.56	0.047 3 *	17.21	0.13
夏季降水量	2.92	3.64	0.000 3***	38.85	0.35
秋季降水量	1.40	1.71	0.808 2	2.08	-0.01
冬季降水量	2.39	2.92	0.012 8 *	24.03	0.20
年均温度	3.01	3.74	0.026 8 *	23.42	0.18
春季温度	5.43	6.54	0.067 9	28.21	0.19
夏季温度	1.58	1.82	<0.000 1***	29.70	0.27
秋季温度	5.85	6.99	0.045 8 *	31.22	0.21
冬季温度	3.74	4.66	0.409 1	13.34	0.06

注：“*”、“**”和“***”分别表示在0.05、0.01和0.001水平下变量是显著的。

和夏季降水量等参数^[43],以控制多元共线性($VIF<3.0$)。温度变量的筛选显示,年均温与各季节温度参数存在强耦合关系($r=0.85\sim 0.95$,图 7),鉴于年均温能综合表征热力背景,将其作为温度维度的唯一变量。最终保留冬季蒸散量、年降水量、春季降水量、秋季降水量、冬季降水量和年均温度与年蒸散量构建双变量模型。

表 2 列出了模型效果明显提升的双变量模型($\Delta R^2\geq 1$, $\Delta AIC\geq 2$)。降水因子的引入对模型解释力提升有限,暗示其调控路径可能已被年蒸散量整合。年蒸散量与冬季蒸散量的加性模型(模型 2)优于基础模型,暗示寒冷季节的蒸散过程对 H/A 值具有独立调控作用。年均温度与年蒸散量的交互作用(模型 3)表现出最高的解释能力,其调整 R^2 提升至 0.76, RMSE 降低 34%。同时,该模型的 AIC 值减少 18%,显示出最优的模型性能。

4 讨论

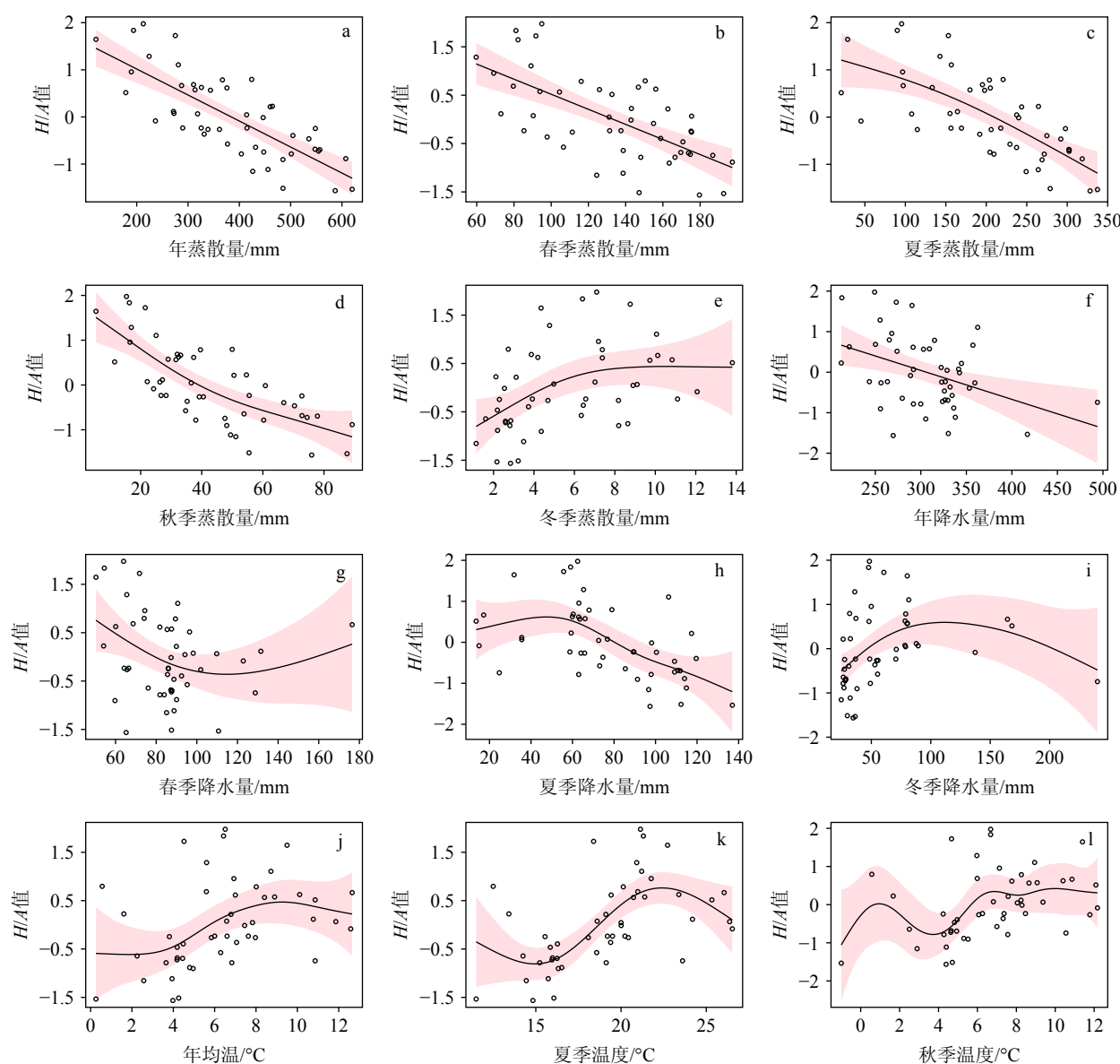
4.1 H/A 值在中亚北部黄土中的指示意义

H/A 值作为表征矿物结晶度的重要参数^[22],展现出显著的成因指示意义。研究区次生方解石的

H/A 值(4.21 ± 0.62)明显低于典型表土环境(6.25 ± 0.82)。在这些典型表土中,方解石和白云石并存,指示了淋溶作用并不彻底^[13]。混合实验证据表明, H/A 值的变化主要受控于不同成因方解石组分的比例变化^[22]。中亚黄土中的碳酸盐矿物按成因可分为原生和次生碳酸盐矿物^[1-2]。原生碳酸盐矿物是从黄土源区搬运而来的碎屑碳酸盐,主要指原生方解石和白云石;次生碳酸盐矿物则是沉积后在黄土风化成壤过程中形成的,主要是次生方解石^[19]。鉴于方解石是半干旱-干旱区黄土成壤作用的关键指示矿物^[46],且在中亚干旱地区,由于降水量不足碳酸盐未能充分淋溶,溶解的碳酸盐通常在土壤层中重新沉淀,形成次生碳酸盐^[25], H/A 值的波动可有效指示成壤过程中碎屑来源与次生成因碳酸盐的相对比例变化。方解石结晶度的降低可能源于成壤过程中的杂质混入^[47],或与生物成因碳酸盐(通常具有较低结晶度^[48])的富集相关^[49-50]。因此, H/A 值的降低可定量表征次生方解石的富集程度,该参数可反映成壤碳酸盐的动态变化。

4.2 H/A 值在中亚北部的气候指示意义

降水量与温度数据集在研究区表现出良好的性能。夏季气温和多年平均气温数据与实际观测

图 6 广义加性模型中各气候变量对 H/A 值影响的效应图

实线为估计的平滑效应曲线, 粉色区域表示 95% 置信区间。

Fig.6 Effect plots of climate variables on H/A values in the GAMs

Solid line: Estimated smooth effect curve, pink band: 95% confidence interval.

值表现出优异的拟合性能, R^2 分别达到 0.95 和 0.99, 同时 RMSE 分别低至 0.72 °C 和 0.49 °C。夏季降水数据同样显示出良好的拟合效果 ($R^2=0.84$, RMSE=22.64 mm), 表明该数据集能够有效表征研究区的降水特征。ETMonitor 数据集与地面实测数据对比验证分析表明, 该数据集在干旱区的估算精度具有显著优势, 逐日蒸散量验证 RMSE 控制在 1 mm/d 以内^[39]。总之, 本文构建的气象要素数据集(气温、降水及蒸散量)在精度控制方面满足研究需求, 为后续分析提供了可靠的数据基础。

广义加性模型在解析环境因子对地理要素分布的影响效应方面具有独特优势和广泛应用^[43, 51-53]。

该模型通过非参数平滑函数揭示自变量与因变量间的复杂响应关系^[42, 54], 其可视化效应图直观展示了自变量变化时因变量的变化趋势。年蒸散量作为关键预测因子表现出显著的解释力, 其单因子模型可解释 H/A 值 59% 的变异 (调整 $R^2=0.59$, RMSE=0.56)。该参数的平滑项自由度为 1 (图 6a), 印证了蒸散量与 H/A 值间存在显著的线性响应关系。ETMonitor 数据集通过融合植被蒸腾、土壤蒸发、冠层截留蒸发、水面蒸发及冰雪升华等多组分过程, 构建了基于多源数据同化的区域蒸散量估算体系^[39]。小区域实际蒸散量可能由不同气象因素主导, 包括降水量、气温、风速、太阳辐射^[55] 和植被^[57]

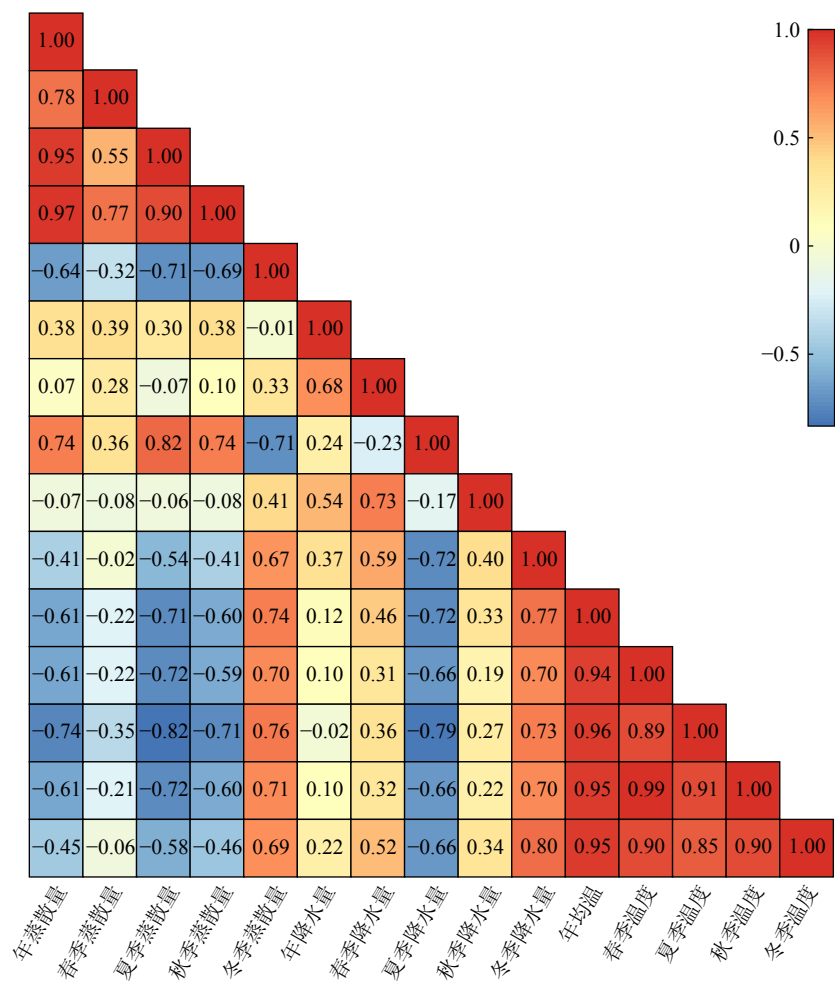


图 7 变量间的皮尔森相关系数热图

Fig.7 Heatmap of the Pearson correlation coefficients between various variables

表 2 双预测变量广义加性模型

Table 2 Two-predictor generalized additive models

模型	组合及组合模式	调整 R^2	RMSE	AIC	增加项/交互项 P 值
模型1	年蒸散量	0.59	0.56	86.129	
模型2	年蒸散量—冬季蒸散量, 可加	0.70	0.44	77.804	0.037*
模型3	年蒸散量—年均温度, 交互	0.76	0.37	70.531	$<2\times10^{-16}$ ***

等。在中亚干旱区,蒸散过程主要是由水分和能量决定,地表土壤的湿度和温度状况会对小区域的蒸散量产生显著影响^[55]。大量研究表明,中亚干旱区北部土地的水分可利用性越高,蒸散量越大^[55-57],而蒸散量在贫水地区则呈现温度驱动特征^[58]。因此,低蒸散量表征的水热限制条件^[59]显著抑制了化学风化进程,导致土壤碳酸盐矿物以原生碎屑为主,进而产生高 H/A 值。 H/A 值随着年蒸散量的增加而降低,这是由于在干旱区蒸发作用主导碳酸钙的沉淀^[24, 60-61],蒸散量增加暗示的水热条件的优化一方面增强化学风化作用,使土壤溶液 Ca^{2+} 浓度提升;

另一方面,同时增加的高温促进蒸发,促进次生碳酸盐形成,共同导致 H/A 值降低。综上所述,黄土方解石(104)晶面峰的 H/A 值在中亚干旱区北部展现出作为古蒸散强度代用指标的潜力,为干旱区古环境重建提供了新的示踪方法。

降水因子的引入并未显著提升模型解释力,这可能源于年蒸散量作为综合水热指标已整合了降水的调控效应^[39, 59, 62],从而削弱了降水量的独立贡献度。然而,年蒸散量与冬季蒸散量的加性模型(模型1)较基础模型的解释力显著提升($\Delta R^2=0.11$),表明寒冷季节的蒸散过程对 H/A 值具有独立调控

作用。具体而言, 冬季蒸散量与 H/A 值大致呈正相关(图 6e), 即冬季蒸散量越大, 表土中次生碳酸盐比例越小。在 ETMonitor 数据集中, 冬季蒸散量主要为冰雪升华组分^[39]。一方面升华需要吸收潜热, 可能降低地表温度。另一方面, 升华导致积雪量减少, 不利于化学风化的进行, 导致土壤中的次生碳酸盐比例小。当年蒸散量与年均温以交互项形式引入时, 模型展现出最优的性能(调整 $R^2=0.76$, RMSE=0.37), 表明 H/A 值 76% 的变异源于蒸散发与温度的耦合效应。 H/A 值随蒸散量与温度协同增加呈系统性降低趋势: 高值区集中分布于高温-高蒸散环境; 而低值区则对应寒冷-低蒸散组合区(图 8)。高蒸散量代表高的水分可利用性^[55-57], 在这种背景下, 高温一方面有利于化学风化的进行, 另一方面通过加速蒸发促进次生碳酸盐的形成, 导致 H/A 值降低。反之, 低蒸散量代表低的水分可利用性, 这种状况不利于化学风化的进行。同时, 低温抑制蒸发, 不利于次生碳酸盐的形成^[24, 60-61], 因此 H/A 值在低温-低蒸散的背景下最高。

值得注意的是, 在不同温度区间内, 方解石结晶度对年蒸散量变化的响应不同(图 8)。在 $0.5\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及 $6\sim 10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 方解石结晶度随着年蒸散量的增加而减小。然而, 在 $2.5\sim 5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 当年蒸散量超

过 400 mm 时, 方解石结晶度随着蒸散量的增加没有明显变化。类似地, 在 $11\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 当年蒸散量低于 350 mm 时, 方解石结晶度并未随着蒸散量的增加发生明显变化。寒冷的气候(年均温 $0.5\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$)下, 微弱的淋溶作用使钙质优先通过蒸发-结晶过程在表层富集。在亚低温背景(年均温 $2.5\sim 5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)下, 当年蒸散量超过一定阈值(约 400 mm)时, H/A 值对蒸散量变化的敏感性降低, 意味着随着蒸散量的增加, 土壤中成壤碳酸盐的含量并没有增加, 暗示了次生碳酸盐的生成-淋失过程达到动态平衡。干旱区降水量和蒸散量通常是耦合的^[39], 蒸散量增加意味着水分补给增加, 强降雨可能导致快速径流^[63]。同时, 低温条件既不足以维持强蒸发, 又允许一定强度的淋溶作用, 从而抵消次生碳酸盐的净积累。在温暖条件(年均温 $6\sim 10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)下, 蒸发主导机制重新建立, 促使次生碳酸盐在表层富集。在超高温(年均温 $11\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$)背景下, H/A 值在低蒸散量区域不响应蒸散量的变化, 这是由于低蒸散量背景下水分限制, 同时过高的温度使土壤干燥, 严重制约化学风化。只有当蒸散量达到一定阈值(350 mm), 才有足够的水分保证化学风化的进行, 使次生碳酸盐的生成由蒸散发主导, 进而改变 H/A 值。综上所述, H/A 值在寒冷或温暖的温度背景下($0.5\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $6\sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$)主要受蒸散量单因素控制, 而在过渡温度区间($2.5\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $11\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$), H/A 值随蒸散量的变化存在阈值效应。需要指出的是, 草本植被覆盖下黄土表土微生物量可达 84.55 mg/kg ^[64]。微生物活动通过分泌有机成分可促进较大晶粒的方解石晶体形成^[65], 这可能是影响表土样品中方解石结晶度的因素之一。

此外, 在冰期-间冰期旋回中, 显著的温度波动^[66-67]可能导致低温阶段 H/A 值序列无法完全归因于蒸散量变化, 因此该指标在长时间尺度连续重建中需结合其他代用指标进行验证。此外, 研究采用的气候数据时序覆盖较短, 尽管能有效表征当前气候背景下的水热关系, 但在中亚干旱区百年尺度气候震荡的背景下^[68], 本文提出的气候参数临界值应视为动态参考框架。

5 结论

基于 X 射线衍射方法分析了中亚北部表土和黄土碳酸盐矿物学特征, 揭示方解石(104)晶面衍射峰高度和面积的比值(H/A 值)具有显著成因分异特征: 次生方解石的 H/A 值(4.21 ± 0.62)显著低于混

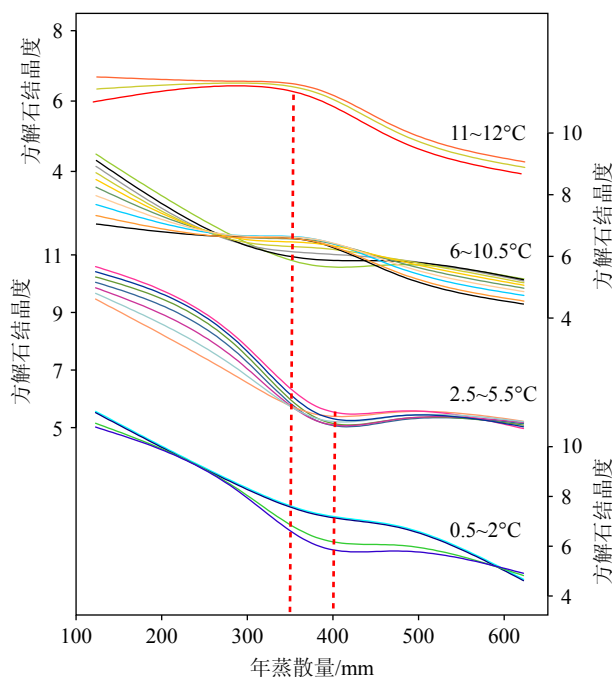


图 8 方解石结晶度在不同温度背景下对年蒸散量变化的响应

Fig.8 The response of calcite crystallinity to annual evapotranspiration variations under different temperature conditions

合成因方解石(6.25 ± 0.82)。H/A 值与年蒸散量呈显著负相关($R^2=0.59$), 在中亚干旱区北部具有作为古蒸散强度代用指标的潜力。降水和温度因子的单独引入并未显著提升模型的解释力。广义加性模型解析表明年蒸散量与年均温的非线性交互效应可解释 H/A 值 76% 的变异, H/A 值在寒冷或温暖的温度背景下($0.5\sim 2^\circ\text{C}$ 或 $6\sim 10.5^\circ\text{C}$) 与蒸散量呈显著负相关, 而在过渡温度区间($2.5\sim 5^\circ\text{C}$ 或 $11\sim 12^\circ\text{C}$), H/A 值随蒸散量的变化存在阈值效应。本文为解析中亚干旱区第四纪环境演变提供了新的矿物学视角和方法支撑, 但仍需要对更多的样品进行验证及更深入的矿物地球化学工作。

参考文献 (References)

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [LIU Tungsheng. Loess and Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [2] 卢演侑. 黄土地层中 CaCO_3 含量变化与更新世气候旋迴[J]. 地质科学, 1981(02): 122-131. [LU Yanchou. Pleistocene climatic cycles and variation of CaCO_3 contents in a loess profile[J]. Scientia Geologica Sinica, 1981(02): 122-131.]
- [3] 赵景波. 黄土形成与演变模式[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 459-466. [ZHAO Jingbo. Pattern of loess Formation and evolution[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 459-466.]
- [4] Cerling T E. The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 71(2): 229-240.
- [5] Zhang H W, Cai Y J, Tan L C, et al. Stable isotope composition alteration produced by the aragonite-to-calcite transformation in speleothems and implications for paleoclimate reconstructions[J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 309: 1-14.
- [6] Tremaine D M, Froelich P N, Wang Y. Speleothem calcite formed in situ: modern calibration of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ paleoclimate proxies in a continuously-monitored natural cave system[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(17): 4929-4950.
- [7] Rinderknecht C J, Hasiuk F J, Oborny S C. Mg zonation and heterogeneity in low-Mg calcite microcrystals of a depositional chalk[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2021, 91(8): 795-811.
- [8] Zhang R, Zhang H, Spötl C, et al. Dual pathways of aragonite-to-calcite transformation in stalagmites: implications for paleoclimate reconstructions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2024, 378: 45-57.
- [9] Solotchina E P, Sklyarov E V, Solotchin P A, et al. Authigenic carbonate sedimentation in Eravnoe group lakes (western Transbaikalia): response to Holocene climate change[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, 58(11): 1390-1400.
- [10] Fan J W, Xiao J L, Wen R L, et al. Mineralogy and carbonate geochemistry of the Dali Lake sediments: implications for paleohydrological changes in the East Asian summer monsoon margin during the Holocene[J]. *Quaternary International*, 2019, 527: 103-112.
- [11] 梁莲姬, 孙有斌, Beets C J, 等. 黄土中的碳酸盐矿物特征与化学风化[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(3): 645-653. [LIANG Lianji, SUN Youbin, Beets C J, et al. Characteristics of carbonate minerals in loess and its implication for chemical weathering[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(3): 645-653.]
- [12] 张文翔, 史正涛, 刘勇, 等. 西风区黄土-古土壤的碳酸盐含量对磁化率影响研究[J]. *地球环境学报*, 2014, 5(2): 155-162. [ZHANG Wenxiang, SHI Zhengtao, LIU Yong, et al. Study on the influence of carbonate content on magnetic susceptibility of Taledo loess-paleosol sequences in westerly area of China[J]. *Journal of Earth Environment*, 2014, 5(2): 155-162.]
- [13] 孟先强. 中国北方黄土中碳酸盐矿物的来源、分布与古季风变迁[D]. 南京大学博士学位论文, 2018. [MENG Xianqiang. The origin and distribution of carbonates in the loess deposits from northern China: implications for palaeomonsoon changes[D]. Doctor Dissertation of Nanjing University, 2018.]
- [14] Liu W G, Yang H, Sun Y B, et al. $\delta^{13}\text{C}$ values of loess total carbonate: a sensitive proxy for Asian summer monsoon in arid northwestern margin of the Chinese loess Plateau[J]. *Chemical Geology*, 2011, 284(3-4): 317-322.
- [15] Sun Y B, Kutzbach J, An Z S, et al. Astronomical and glacial forcing of East Asian summer monsoon variability[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 115: 132-142.
- [16] 董吉宝, Eiler J. 黄土高原全新世土壤碳酸盐团簇同位素的温度重建[J]. *第四纪研究*, 2024, 44(5): 1411-1420. [DONG Jibao, Eiler J. Temperature reconstruction using the clumped isotope for the Holocene soil carbonates on the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2024, 44(5): 1411-1420.]
- [17] Yang J D, Chen J, Tao X C, et al. Sr isotope ratios of acid-leached loess residues from Luochuan, China: a tracer of continental weathering intensity over the past 2.5 Ma[J]. *Geochemical Journal*, 2001, 35(6): 403-412.
- [18] Álvarez D, Torres-Guerrero C A, Travé A, et al. Biogenic carbonates (queras) in loess-paleosol sequences of the Ebro Basin and their potential use as a palaeoenvironmental proxy[J]. *CATENA*, 2024, 240: 107969.
- [19] 曾蒙秀, 宋友桂. 西风区昭苏黄土剖面中碳酸盐矿物组成及其古环境意义辨识[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(3): 424-436. [ZENG Mengxiu, SONG Yougui. Carbonate minerals of Zhaosu loess section in westerly area and their paleoenvironmental significance[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(3): 424-436.]
- [20] Versteegen A. Biotic and abiotic controls on calcium carbonate Formation in soils[D]. Doctor Dissertation of Cranfield University, 2010.
- [21] He M, Cai Y J, Zhao X N, et al. Calcite recrystallization and its impact on speleothem geochemistry[J]. *Sedimentary Geology*, 2024, 470: 106725.
- [22] Zhao Y, Huang K J, Guo Y Q, et al. Primary and secondary calcite in Chinese loess distinguished by crystallinity and implications for illuviation depth and East Asian summer monsoon intensity[J/OL]. *Journal of Earth Science*. <https://link.cnki.net/urlid/42.1788.P.20240108.1022.002>. (2025-02-24).
- [23] Meng X Q, Liu L W, Balsam W, et al. Dolomite abundance in Chinese loess deposits: a new proxy of monsoon precipitation intensity[J]. *Geo-*

- physical Research Letters, 2015, 42(23): 10391-10398.
- [24] 隋玉柱. 从彭阳剖面看黄土成壤模式及气候变化 [D]. 兰州大学博士学位论文, 2007. [SUI Yuzhu. The soil-forming mode and paleoclimatic changes of Pengyang loess section[D]. Doctor Dissertation of Lanzhou University, 2007.]
- [25] 周杰, 沈吉. 中国西部环境演变过程研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 4-5. [ZHOU Jie, SHEN Ji. Study on Environmental Evolution in Western China[M]. Beijing: Science Press, 2007: 4-5.]
- [26] Li Y, Song Y G, Kaskaoutis D G, et al. Atmospheric dust dynamics in southern Central Asia: Implications for buildup of Tajikistan loess sediments[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 229: 74-85.
- [27] Chen F H, Chen J H, Huang W, et al. Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 337-354.
- [28] Zhang L C, Qin K Z, Xiao W J. Multiple mineralization events in the eastern Tianshan district, NW China: Isotopic geochronology and geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2-4): 236-246.
- [29] Zhang M Y, Song Y G, Shukurov S, et al. Provenance and fluvial - aeolian process of Kyzylkum desert: constrained by detrital zircon U-Pb dating[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(13): e2024GL108951.
- [30] Song Y G, Chen X L, Qian L B, et al. Distribution and composition of loess sediments in the Ili Basin, Central Asia[J]. *Quaternary International*, 2014, 334-335: 61-73.
- [31] Gessner U, Naeimi V, Klein I, et al. The relationship between precipitation anomalies and satellite-derived vegetation activity in Central Asia[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 74-87.
- [32] Yang J D, Chen J, An Z S, et al. Variations in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of calcites in Chinese loess: a proxy for chemical weathering associated with the East Asian summer monsoon[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 157(1-2): 151-159.
- [33] Sulimai N H, Rani R A, Khusaimi Z, et al. Facile synthesis of CaCO_3 and investigation on structural and optical properties of high purity crystalline calcite[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2019, 243: 78-85.
- [34] Li Y, Song Y G, Xiao J Y, et al. Precipitation changes during the last glacial Period in the Ili Basin, northern Central Asia, as inferred from the records of loess dolomite[J]. *Global and Planetary Change*, 2024, 242: 104599.
- [35] 曾蒙秀, 宋友桂. 基于麦夸特算法的 X 射线衍射物相定量分析的影响因素研究 [J]. 岩矿测试, 2012, 31(5): 798-806. [ZENG Mengxiu, SONG Yougui. Study on the influencing factors of the Levenberg-Marquardt algorithm for X-ray diffraction quantitative phase analysis[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(5): 798-806.]
- [36] Solotchina E P, Sklyarov E V, Solotchin P A, et al. Reconstruction of the Holocene climate based on a carbonate sedimentary record from shallow saline Lake Verkhnee Beloe (western Transbaikalia)[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, 53(12): 1351-1365.
- [37] Karger D N, Conrad O, Böhrner J, et al. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas[J]. *Scientific Data*, 2017, 4(1): 170122.
- [38] Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R, et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(14): 3624-3648.
- [39] Zheng C L, Jia L, Hu G C. Global land surface evapotranspiration monitoring by ETMonitor model driven by multi-source satellite earth observations[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: 128444.
- [40] 沈永平. 1879-2003 年 (部分年份) 中亚地区哈萨克斯坦逐月平均降水量数据 [DB/OL]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2019. (2025-01-02). <https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/e7692dfc-645f-4fe9-82c1-d106ff3ab829>. [SHEN Yongping. Monthly average precipitation data of Kazakhstan in Central Asia from 1879 to 2003 (partial years)[DB/OL]. National Cryosphere Desert Data Center, 2019. (2025-01-02). <https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/e7692dfc-645f-4fe9-82c1-d106ff3ab829>.]
- [41] 沈永平. 1848-2003 年 (部分年份) 中亚地区哈萨克斯坦逐月平均气温数据 [DB/OL]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2019. (2025-01-02). <https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/6aab912b-5809-4fab-a381-e4dd9887c4c8>. [SHEN Yongping. Monthly average temperature data of Kazakhstan in Central Asia from 1848 to 2003 (partial years)[DB/OL]. National Cryosphere Desert Data Center, 2019. (2025-01-02). <https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/6aab912b-5809-4fab-a381-e4dd9887c4c8>.]
- [42] Hastie T J. Generalized Additive Models[M]. New York: Routledge, 2017.
- [43] 贺祥, 林振山. 基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的影响 [J]. 环境科学, 2017, 38(1): 22-32. [HE Xiang, LIN Zhenshan. Interactive effects of the influencing factors on the changes of $\text{PM}_{2.5}$ concentration based on GAM model[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(1): 22-32.]
- [44] Wood S N. Generalized Additive Models: An Introduction with R[M]. 2nd ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2017.
- [45] Dziak J J, Coffman D L, Lanza S T, et al. Sensitivity and specificity of information criteria[J]. *Briefings in Bioinformatics*, 2020, 21(2): 553-565.
- [46] 盛雪芬. 黄土碳酸盐的环境地球化学研究 [D]. 南京大学博士学位论文, 2004. [SHENG Xuefeng. Environmental geochemistry of loess carbonates[D]. Doctor Dissertation of Nanjing University, 2004.]
- [47] Lu J S, Li Q H, Song W F, et al. The influence of crystal modifiers on the crystallinity, particle morphology and brightness of precipitated calcite powders hydrothermally prepared from black marble waste[J]. *Powder Technology*, 2020, 373: 535-542.
- [48] Jaillard B, Guyon A, Maurin A F. Structure and composition of calcified roots, and their identification in calcareous soils[J]. *Geoderma*, 1991, 50(3): 197-210.
- [49] Barta G. Secondary carbonates in loess-paleosol sequences: a general review[J]. *Open Geosciences*, 2011, 3(2): 129-146.
- [50] Bolan N, Srivastava P, Rao C S, et al. Distribution, characteristics and management of calcareous soils[J]. *Advances in Agronomy*, 2023, 182: 81-130.
- [51] Yu W J, Weintraub S R, Hall S J. Climatic and geochemical controls on soil carbon at the continental scale: interactions and thresholds[J].

- Global Biogeochemical Cycles*, 2021, 35(3): e2020GB006781.
- [52] Zhang J P, Zhi M M, Zhang Y. Combined generalized additive model and random forest to evaluate the influence of environmental factors on phytoplankton biomass in a large eutrophic lake[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108082.
- [53] Ye Z X, Hong S, He C, et al. Evaluation of different factors on metal leaching from nickel tailings using generalized additive model (GAM)[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 236: 113488.
- [54] Liu H X, Jiang M D, Yu Z C, et al. Contrasting north-south pattern in Holocene lacustrine carbon accumulation in China: summer monsoon dynamics and human disturbance[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2024, 324: 108465.
- [55] 代鹏超, 牛苏娟, 毋兆鹏, 等. 新疆精河流域实际蒸散发时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(7): 600-606. [DAI Pengchao, NIU Sujuan, WU Zhaopeng, et al. Temporal and spatial characteristics of actual evapotranspiration in Jinghe watershed, Xinjiang[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(7): 600-606.]
- [56] 郑倩倩, 代鹏超, 张金燕, 等. 基于 SEBS 模型的精河流域蒸散发研究[J]. 干旱区地理, 2021, 37(6): 1378-1387. [ZHENG Qianqian, DAI Pengchao, ZHANG Jinyan, et al. Evapotranspiration in the Jinghe River Basin based on the surface energy balance system[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(6): 1378-1387.]
- [57] 阿迪来·乌甫, 玉素甫江·如素力, 热伊莱·卡得尔, 等. 基于 MODIS 数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析[J]. 地理研究, 2017, 36(7): 1245-1256. [ADILAI Wufu, YUSUFUJIANG Rusuli, REYILAI Kadeer, et al. Spatio-temporal distribution and evolution trend of evapotranspiration in Xinjiang based on MOD16 data[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(7): 1245-1256.]
- [58] Farooq I, Shah A R, Sahana M, et al. Assessment of drought conditions over different climate zones of Kazakhstan using standardised precipitation evapotranspiration index[J]. *Earth Systems and Environment*, 2023, 7(1): 283-296.
- [59] Wang S J, Zhang M J, Che Y J, et al. Contribution of recycled moisture to precipitation in oases of arid central Asia: a stable isotope approach[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(4): 3246-3257.
- [60] Bower C A, Wilcox L V. Precipitation and solution of calcium carbonate in irrigation operations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1965, 29(1): 93-94.
- [61] Bellanca A, Neri R. Dissolution and precipitation of gypsum and carbonate minerals in soils on evaporite deposits, central Sicily - isotope geochemistry and microfabric analysis[J]. *Geoderma*, 1993, 59(1-4): 263-277.
- [62] Li Q L, Shi G S, Shangguan W, et al. A 1 km daily soil moisture dataset over China using in situ measurement and machine learning[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(12): 5267-5286.
- [63] Oberhänsli H, Novotná K, Pišková A, et al. Variability in precipitation, temperature and river runoff in W Central Asia during the past ~2000 yrs[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 76(1-2): 95-104.
- [64] 赵彤, 蒋跃利, 闫浩, 等. 黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3223-3230. [ZHAO Tong, JIANG Yueli, YAN Hao, et al. Effects of different aspects on soil microbial biomass and dissolved organic carbon of the loess hilly area[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(8): 3223-3230.]
- [65] 荣辉, 钱春香, 李龙志. 微生物水泥胶结机理[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(3): 314-319. [RONG Hui, QIAN Chunxiang, LI Longzhi, et al. Cementation mechanism of microbe cement[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41(3): 314-319.]
- [66] Fuchs L, Zhou B, Magill C, et al. Multiproxy records of temperature, precipitation and vegetation on the central Chinese Loess Plateau over the past 200, 000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 288: 107579.
- [67] Lu H X, Liu W G, Yang H, et al. 800-kyr land temperature variations modulated by vegetation changes on Chinese Loess Plateau[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1958.
- [68] Hua L J, Zhao T B, Zhong L H. Future changes in drought over Central Asia under CMIP6 forcing scenarios[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 43: 101191.