

基于温度场和水分场控制方程的青藏高原冻土区气候演变特征研究

陈 静¹, 黎成超¹, 白 珍², 荣 昕^{1*}

¹云南省气象服务中心, 云南 昆明

²西藏自治区气象局, 西藏 拉萨

收稿日期: 2026年6月22日; 录用日期: 2026年7月17日; 发布日期: 2026年7月28日

摘 要

青藏高原冻土区对全球气候变化具有高度敏感性, 传统分析方法常忽略冻结/融化锋面的相变过程, 直接对温度场和水分场进行简化处理, 导致对气候演变特征的模拟存在不确定性。为改进这一问题, 本文构建了考虑冻融相变的一维垂向水热耦合模型, 该方法基于温度场和水分场的控制方程, 更精确地描述青藏高原冻土区在大尺度气候变化下的不同梯度演变特征。WRF敏感性实验显示, 考虑冻融相变后, 模型在冷暖气候背景下对感热与潜热通量的响应更符合冻土-大气能量交换的物理机制, 能够更合理地反映不同气候阶段冻土区的能量分配差异。

关键词

青藏高原冻土区, 气候演变, 温度场, 水分场, 控制方程, 冻结/融化锋面相变

Research on Climate Evolution Characteristics of Frozen Soil Regions in the Qinghai-Xizang Plateau Based on Temperature Field and Water Content Field Control Equations

Jing Chen¹, Chengchao Li¹, Zhen Bai², Xin Rong^{1*}

¹Yunnan Meteorological Service Center, Kunming Yunnan

²Xizang Meteorological Bureau, Lhasa Xizang

Received: June 22, 2026; accepted: July 17, 2026; published: July 28, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陈静, 黎成超, 白珍, 荣昕. 基于温度场和水分场控制方程的青藏高原冻土区气候演变特征研究[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(4): 840-849. DOI: 10.12677/ccrl.2026.154089

Abstract

The permafrost region of the Qinghai-Xizang Plateau exhibits high sensitivity to global climate change. Traditional analytical methods often neglect the phase transition process at freezing/melting fronts and directly simplify the temperature and water content fields, leading to uncertainties in simulating climate evolution characteristics. To address this issue, this study constructs a one-dimensional vertical soil water-heat coupled model that explicitly considers freeze-thaw phase transitions. Based on the governing equations of the temperature and water content fields, the model more accurately describes the evolution characteristics of different gradients in the permafrost region under large-scale climate change. WRF-based sensitivity experiments show that, after incorporating freeze-thaw phase transitions, the model's responses of sensible and latent heat fluxes under cold and warm climatic backgrounds are more consistent with the physical mechanisms of land-atmosphere energy exchange, and can more reasonably reflect differences in energy partitioning across climatic stages.

Keywords

The Permafrost Region of the Qinghai-Xizang Plateau, Climate Evolution, Temperature Field, Water Separation Field, Governing Equation, Freezing/Melting Front Phase Transition

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

青藏高原作为地球上最高的高原，其冻土区承载着重要的生态与环境功能。然而，近年来全球气候变化的加剧对青藏高原冻土区产生了显著影响，导致了冻土稳定性的下降和生态系统的脆弱性增加[1][2]。这一变化不仅影响着当地居民的生产生活，还可能对全球气候系统产生深远的影响[3][4]。其中，传统分析方法常常由于忽略冻结/融化锋面的相变过程而引入过多的不确定性，限制了对气候演变特征的准确理解。因此，深入研究青藏高原冻土区在气候演变下的特征具有重大科学意义和实用价值[5][6]。

目前，相关领域专家已经提出了大量研究成果，结果表明青藏高原的热力、动力作用对全球大气环流存在重要的影响。向楠等人[7]使用了 Mann-Kendall 突变检验、滑动 t 检验和 EOF 等方法，分析了青藏高原东部和西南地区低温冰冻雨雪事件的气候特征和时空变化。该方法使用 EOF 分析等复杂方法时，结果解释存在主观差异，导致结果不准确。殷路辉等人[8]利用实测和 CMIP6 数据驱动模型，模拟青藏高原三个地点的多年冻土地温变化，分析不同深度地温对气候变化的响应及不同地点多年冻土对气候变化的反应差异，为研究青藏高原多年冻土热状态变化提供参考数据。该方法受限于实测数据和 CMIP6 模型的精度和覆盖范围，导致结果出现偏差。杨涵等人[9]利用多源遥感数据和地面实测数据，对青藏高原唐古拉冻土流域的表层土壤温湿度时空分布进行刻画，并分析不同深度土壤温湿度的动态变化。该方法遥感数据的解译过程可能存在主观性和误差，影响分析结果的可信度。刘广岳等人[10]利用钻探、坑探和地球物理勘探等方法，对青藏高原唐古拉山南北两侧的多年冻土进行了野外考察和样本收集，采集了大量样本用于分析多年冻土的特征和地下冰状况。该方法忽略了冻结/融化锋面的相变过程，导致分析结果存在较大的不确定性。

因此，为更准确刻画冻结/融化锋面相变对冻土水热交换的影响，本文基于温度场与水分场控制方程，

构建考虑冻融相变的一维垂向水热耦合模型，系统分析 1960~2020 年青藏高原冻土区在不同气候背景下的梯度演变特征。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

地面气象要素：中国气象局青藏高原及周边 43 个国家级气象站 1960~2020 年逐小时气温、降水、风速等观测，经质量控制与高程校正后使用。

深层地温与土壤参数：中科院寒旱所冻土工程站钻孔实测 10 m 地温及 0~10 m 分层含水率与质地，用于初始场与土壤参数设置。

WRF 驱动场：NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料，WRF 以 30 km 分辨率输出逐 3 h 气象强迫。

2.2. 控制方程与相变处理

采用一维垂向水热耦合控制方程：温度场以热传导方程为基础，引入相变占比参数，通过干土、液态水、冰组分加权计算等效热容与导热系数，隐性嵌入冻结/融化潜热；水分场基于达西定律与非饱和连续方程，以水分扩散率与导水率表征未冻水迁移，忽略气相与冰晶运移。

2.3. 边界、初始条件与数值求解

上边界温度由站点观测插值驱动，水分通量为降水入渗与蒸散发差额；下边界(10 m)设为恒温，水分通量为 0。以 1960 年实测温湿剖面为初始场，经 5 年预熟化后启动正式模拟。控制方程采用有限差分法离散，温度场显隐式混合格式，水分场全隐式求解。

2.4. 与 WRF 模式的耦合方式

采用离线单向驱动模式，WRF 模式以 30 km 水平分辨率输出逐 3 h 气温、降水、辐射等气象强迫数据，经偏差校正后作为冻土模型的输入驱动项；冻土模型输出的地表感热/潜热通量、土壤温湿度可作为陆面参数反馈至 WRF 模式，本研究仅通过替换不同气候阶段 WRF 背景场开展敏感性实验。

3. 青藏高原冻土区气候演变特征分析

3.1. 基于温度场和水分场的控制方程模拟

考虑到青藏高原冻土区作为全球气候变化的敏感区和生态环境的重要组成部分，其稳定性和演变特征对区域乃至全球气候具有重要影响。然而，在传统分析方法中，常常忽略这种相变过程，直接对整体的温度和水分场进行简化处理，导致了较大的不确定性。这种简化可能造成模型对于冰冻和融化过程的描述不够准确，进而影响了对于气候演变特征的分析 and 预测结果。同时，温度和水分时空分布的不均匀性也增加了建模和预测的挑战，需要精确捕捉局部和微尺度的变化。为更准确地描述青藏高原冻土区在大尺度气候变化下的演变特征，引入温度场和水分场控制方程进行模拟分析[11]。该方法可以更准确地描绘冻土区域冰冻和融化的相变过程，从而提高模型描述的准确性，解决传统方法简化处理所带来的不确定性问题。同时，该方法能够更好地应对温度和水分时空分布的不均匀性，使得模拟结果更具真实性和可靠性，进一步增强对青藏高原冻土区气候演变特征的理解。

在模拟过程中，首先对冻土区环境进行了一系列假设和简化，降低模型复杂性。假设土壤分层时，每一层土体均匀连续且各向同行，骨架没有发生膨胀和收缩变形等情况；水热运动发生在垂向，以一维问题表示；水分迁移不考虑冰晶的迁移和气相的影响，符合非饱和土壤渗流条件[12][13]。这些假设降低

了模型的复杂性,使得模拟过程更易实现。

其次,针对温度场的控制方程,研究采用了热传导方程来描述土体温度随时间和空间的变化。具体的温度场控制方程为:

$$C_t \frac{\partial T}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

公式中 C_t 表示冻土区土体的比热容,单位为($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T 表示当前土体的温度, t 表示时间, ε 表示土体的导热系数,单位为($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); x 表示空间变量。

由于冻土区中的水是由液态水、冰和未冻水构成的,它与土体的导热系数和体积热动量密切相关。为了考虑水分对导热系数和热容量的影响,根据干土、水分和冰三者的比例,进行了加权计算以获得土体的热容量和导热系数[14] [15]。三者之间的关系用以下方式处理:

$$\begin{cases} p_m = 1 - p \\ p_f = p' \cdot \eta \\ p_i = p' - p_f \end{cases} \quad (2)$$

公式中 p_m 表示单位土体中干土所占的比例; p_i 表示单位土壤中冰所占的比例; p 表示孔隙度,不同的土壤类型取值不同; p' 表示含水体积比($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), p_f 表示单位土体中液态水所占的比例; η 表示参数,该参数是一个 0~1 之间的值,与土壤温度相关,随着相变过程而变化[16] [17]。

在冻土区,土体的热容量和导热系数会随着土体中水热的变化而发生改变,因此使用干土、冰、水成分的加权的和来表示冻土的热容量。具体表示为:

$$C_{eq} = p_m z_m c_m + p_f z_f \left(c_f + \frac{\partial \eta}{\partial T} G \right) + p_i z_i \left(c_i + \frac{\partial \eta}{\partial T} G \right) \quad (3)$$

公式(3)中 C_{eq} 表示等效溶剂热容量,单位为($\text{J/K} \cdot \text{m}^3$); z 表示密度(kg/m^3), z_m 、 z_f 和 z_i 分别表示干土、水、冰; c 表示热容量, c_m 、 c_f 和 c_i 分别表示干土、水和冰的热容量,单位为($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)。 G 表示冻土/融土放出与吸收的热量,取值为 33.6 kJ/kg 。冻融过程涉及冰、水相变,因此,同样以干土、水和冰各成分的加权的和来求得冻土的导热系数。计算公式为:

$$\varepsilon_{eq} = \left(p_m \sqrt{\varepsilon_m} + p_f \sqrt{\varepsilon_f} + p_i \sqrt{\varepsilon_i} \right)^2 \quad (4)$$

公式中 ε_{eq} 表示土体的等效导热系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ε_m 、 ε_f 、 ε_i 表示干土、水和冰的导热系数。

根据质量守恒原理,建立水分场控制方程,在水分迁移变化规律遵循达西定律[18]的情况下,建立一维水分连续方程。该方程涉及水分扩散率、导水率等关键参数,用于描述冻土区的水分迁移和分布规律。具体的水分场控制方程为:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[Q(p') \frac{\partial p'}{\partial x} \right] + U(p') \frac{\partial p'}{\partial x} \quad (5)$$

公式中 $Q(p')$ 表示水分扩散率(m^2/s), $U(p')$ 表示导水率(m/s)。模拟冻土区环境的土壤非饱和导水率 $U(p')$ 为:

$$U(p') = U_{sat} \left(\frac{p_{lip}}{p_{sat}} \right)^{2e+3} \quad (6)$$

公式中 p_{sat} 表示饱和状态下的含水体积比, U_{sat} 表示饱和状态下导水率, e 表示持水度曲线指数, p_{lip} 表

示实际含水体积比。水分扩散率 $Q(p')$ 计算公式为:

$$Q(p') = Q_{sat} \left(\frac{p_{lip}}{p_{sat}} \right)^{e+2} \tag{7}$$

公式中 Q_{sat} 表示饱和状态水分扩散率。

根据上述控制方程求解出冻土区的温度场和水分场，将解作为数值仿真的数据，建立冻土区的一维水热耦合环境，建立几何模型，将冻土区土壤分为五大层，设置每层土壤参数后，再进行网格剖分，剖分后选取合适的求解器，对多建立的环境模型进行求解，输出各层的土壤温度和水分，对青藏高原冻土区气候不同梯度演变特征进行分析。

3.2. 青藏高原冻土区气候不同梯度演变特征分析

青藏高原，作为地球“第三极”，其冻土区的气候演变与全球气候变化紧密相关。通过引入基于温度场和水分场控制方程的冻土区环境模拟方法，输出各层土壤的温度和水分数据，获得更准确和真实的冻土区环境模拟数据，包括不同土壤层的温度和水分情况。同时，采用 32~36 年的时间跨度作为参考基准，可更好地揭示出长期气候变化趋势，为研究青藏高原冻土区气候演变提供更准确的基础数据支持。

在模拟的冻土区环境中，观察到模拟积雪与观测积雪的变化趋势存在一定的差异。模拟结果显示积雪呈增加趋势，而实际观测则显示积雪呈减少趋势。尽管在早期阶段，模拟与观测的积雪演变特征较为吻合，但是在中期阶段模拟积雪增加趋势较观测积雪偏大很多，进入后期阶段后，模拟积雪和观测积雪均呈现出减小趋势，但是各个时期的减小幅度不完全一致，前半期减小幅度比较大，后半期比较小。

为更具体地了解青藏高原冻土区的气候演变特征，以十年为时间单位，分析了三十年间的冻土区变化。基于历史数据，获得了每 10 年冻土面积的变化趋势和平均积雪体积，具体内容如表 1 所示。

Table 1. Variation trend of permafrost area and average snow volume per 10 years in permafrost region
表 1. 冻土区每 10 年冻土面积变化趋势和平均积雪体积

年	冻土面积/km ²	积雪/km ³
1960	140.92	49.1
1970	134.17	51.6
1980	129.47	60.1
1990	122.98	134.2
2000	113.46	110.1
2010	106.27	101.1
2020	99.57	41.7

从表 1 中可以看出，在前 30 年冻土区平均积雪体积有明显的增加趋势，在后 30 年出现了比较大的减少趋势。同时对于冻土的观测，在三十年间，冻土面积一直是下降的趋势，并且退化速度越来越快，说明在未来几十年间，冻土不仅处于退化阶段，还会由于不同梯度的升温，加剧多年冻土的退化。

为了深入探究这种变化的原因，进一步分析了高原上层和下层的气候变化。在高原上层，温度梯度随高度的升高而逐渐减小，主要变化集中在 500 hPa 附近。春季和冬季的温度梯度自西向东递增，而夏季的温度梯度则随高度升高而升高，并自西向东递减。秋季时，以 90°E 为界，东西部上空的温度梯度变化特征存在显著差异。对于高原下层，春季和夏季的温度垂直梯度振幅相对平稳，而秋季和冬季则表现出较为剧烈的变化。特别是在冬季，高原东部和西部的下层温度垂直梯度达到最小值。这些气候特征共同

作用于冻土区，导致其出现大面积退化。

综上所述，青藏高原冻土区的气候梯度演变特征受到高原上层和下层气候变化的共同影响。为了有效应对这一挑战，需要进一步加强对青藏高原冻土区气候演变的研究和监测，以提供更加准确的科学依据和决策支持。

4. WRF 敏感性实验

为验证青藏高原冻土区气候变化的分析结果，设计了实验方案进行对比研究。实验旨在比较不同气候变化阶段下的大尺度气候变化演变特征，并继续探讨温度梯度垂直方向变化特征。具体方案如下。

4.1. 实验方案设计

为验证青藏高原冻土区气候变化的分析结果，设计了两组实验方案，并充分利用高性能计算机环境(拥有数百个节点，每个节点配备 Intel Xeon Gold 6252 处理器、1TB RAM 和 NVMe SSD 存储系统)和先进的气候模拟软件 WRF 进行操作。在实验中，配置了 WRF 模型，使用 30 km × 30 km 的网格分辨率，并集成了多源数据，经过同化处理后，为模型提供了准确且一致的输入。

实验一：敏感性对比实验

本实验采用不同气候变化阶段的平均背景场作为控制变量，通过替换控制实验的背景场来探究冻土区气候变化的敏感性。具体而言，实验选择了两个次级阶段：一个是冻土区气候偏低的阶段，另一个是气候偏高的阶段。

对于气候偏低的阶段，选取背景气温偏低的次级阶段平均背景场，旨在模拟一个相对寒冷的环境。

对于气候偏高的阶段，则选择气温偏高的次级阶段平均背景场，以模拟一个相对温暖的环境。

在实验中，保持控制实验得到的初始时刻模拟初始场不变，将两个次级阶段的相应时刻平均背景场分别代入模拟模式中进行模拟。通过对模拟结果的分析诊断，可以揭示冻土区大尺度气候变化空间不同梯度的演变特征。

实验二：分析方法对比实验

为了增加实验的可靠性，设计了第二组对比实验，专注于温度梯度在垂直方向上的变化特征。将采用不同的分析方法对目标进行模拟，并计算模拟偏差，将其与实际特征变化情况进行比较，以评估方法的准确性。

Table 2. Experimental parameterization scheme

表 2. 实验参数化方案

名称	AK (备选方案 K)	GFC (地面通量计算方案)	MIT (水汽 - 冰相传输方案)
物理框架	MM5	MM5	MM5
地图投影方式	Lambert	Lambert	Lambert
辐射	CCM3	CCM3	CCM3
陆地参数化	BATS	BATS	BATS
侧边界	Relaxation	Relaxation	Relaxation
行星边界层方案	Holslag	Holslag	Holslag
大尺度降水	SUBEX	SUBEX	SUBEX
压力梯度方案	Normal way	Normal way	Normal way

注：表中 AK、GFC、MIT 为本文设置的三种参数化组合方案，均采用 MM5 物理框架，区别主要在于陆面水热过程与冻融相变表征方式的差异，用于对比不同参数设置对冻土区气候梯度演变模拟的影响。

考虑到青藏高原的地形和区域特征，实验中模拟区域包括青藏高原及其周边地区。实验的参数化方案设计如表 2 所示，表中的方案为 WRF 模式中可选择各参数化方案的简写。

在实验方案设计完成后，分别进行两组实验，实验分别选择向楠等方法方法和殷路辉等方法作为对比方法进行实验分析，根据两组实验结果对比分析不同的气候变化空间不同梯度演变特征分析方法的渐变性。

为了更加直观地展示研究的核心内容，即青藏高原冻土区的气候变化情况，特别采用了 WRF 模型进行模拟，青藏高原冻土区气候变化的结果如图 1 所示。

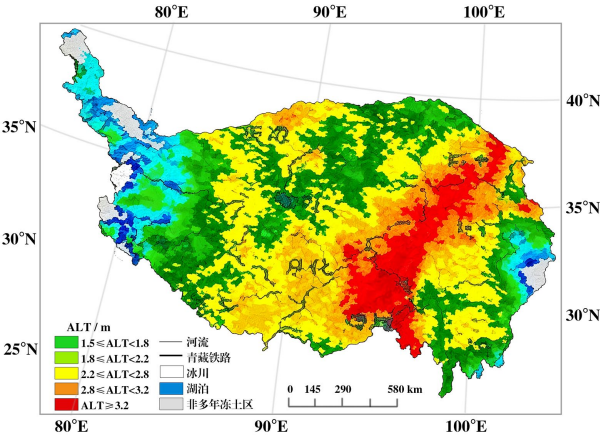


Figure 1. The evolutionary trend of the frozen soil region of the Qinghai-Xizang Plateau
图 1. 青藏高原冻土区演变趋势

根据图 1 的实验结果可知，所提方法清晰地展示了青藏高原冻土区在不同气候变化梯度下的空间分布及演变趋势，该方法在刻画气候变化的空间分布和梯度演变上具有较高的精确度，能够捕捉到较为细致的气候变化特征。

4.2. 敏感性实验结果与分析

敏感性实验均以 5 年数据为依据，根据气旋特征对阶段平均气候冷暖变化的响应来判断分析方法的敏感性。具体实验结果如表 3 所示。

Table 3. Sensitivity test results of different analysis methods
表 3. 不同分析方法的敏感性实验结果

阶段	要素	向楠等方法	殷路辉等方法	提出的分析方法
气候偏低的次级阶段	风速(m/s)	25.5~28.0	23.7~30.5	22.0~31.2
	下垫面感热通量/(W·m ⁻²)	161.5~404.6	164.4~361.9	159.5~439.5
	下垫面潜热通量/(W·m ⁻²)	263~573	282~515	259~621
气候偏高的次级阶段	风速(m/s)	26.5~30.4	26.8~31.3	24.3~34.4
	下垫面感热通量/(W·m ⁻²)	143.6~426.5	147.2~382.6	132.3~479.2
	下垫面潜热通量/(W·m ⁻²)	235~667	240~670	220~690

表 3 给出的风速、感热通量、潜热通量变化范围，反映的是不同分析方法对冷、暖气候背景的响应幅度差异，不能简单以数值区间宽度判断优劣，而应结合冻土区水热交换的物理过程进行解释。

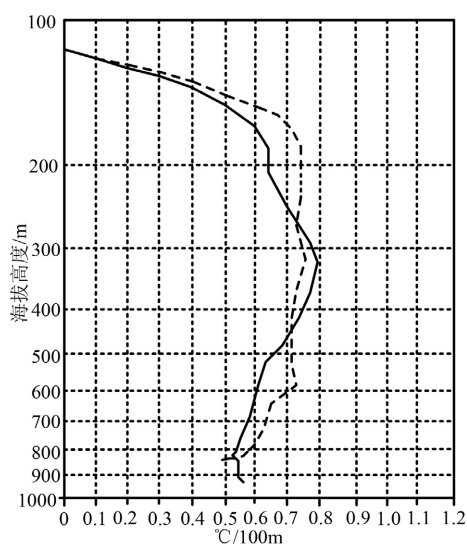
在气候偏低的次级阶段，提出的分析方法得到的感热通量下限更低(159.5 W·m⁻²)、潜热通量下限也更

低($259 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), 这与低温条件下土壤冻结程度更高、地表反照率增大、可利用能量更多以感热形式释放的物理机制相符; 而在气候偏高的次级阶段, 该方法感热通量上限更高($479.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)、潜热通量上限更高($690 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), 则与增温背景下活动层加深、未冻水含量增加、地表蒸发与解冻过程增强的能量分配特征一致。

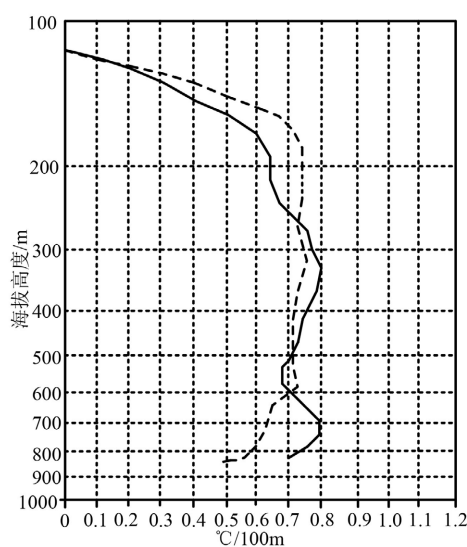
相比之下, 向楠等方法和殷路辉等方法的参数变化范围相对偏窄, 且在冷暖阶段的极值未能充分体现冻土区能量分配的季节性差异, 说明其在刻画冻结/融化锋面相变对地表能量平衡的影响时存在一定平滑效应。因此, 本文方法并非单纯“变化范围更大”, 而是能够更准确地反映不同气候背景下冻土-大气间能量交换的物理差异, 对冻融过程的响应更符合实际机理。

4.3. 温度梯度垂直廓线变化特征模拟偏差实验结果及分析

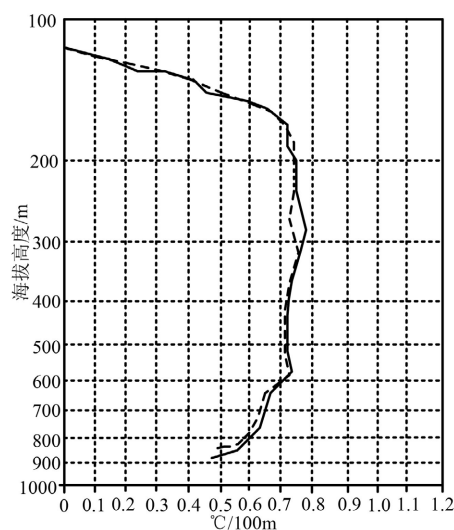
在特征模拟偏差实验中, 选择三个代表研究区域的温度垂直梯度做了各季节的区域平均, 以平均变化作为实验结果, 用于对比分析不同的特征分析方法。具体结果如图 2 所示, 图中的虚线数值来源于中国气象局那曲探空站观测资料数据。



(a) 向楠等方法实验结果



(b) 殷路辉等方法实验结果



(c) 提出的分析方法实验结果

Figure 2. Comparison of simulated and observed vertical temperature gradient profiles using different analysis methods**图 2.** 不同分析方法模拟的温度梯度垂直廓线与实测对比

图 2 中的曲线表示的实验区域的温度垂直梯度随高度升高的变化特征，虚线表示实际温度梯度垂直廓线分布特征变化，实线表示不同特征分析方法模拟出的特征变化。对比观察图中结果可知，与实际特征变化相比，向楠等[7]方法和殷路辉等[8]方法模拟的特征变化曲线均存在一定的误差，不同的是前者误差变化比较均匀，后者在梯度比较高的位置，误差比较大，最为明显。而提出的特征分析方法模拟出的特征变化曲线与实际特征变化曲线基本一致。结合敏感性实验结果可知，提出的青藏高原冻土区大尺度气候空间不同梯度演变特征分析方法对各项参数更为敏感，演变特征模拟误差小，渐变的可能性比较低，适合应用在实际分析中。

5. 结论

本文针对传统分析方法忽略冻结/融化锋面相变过程的问题，构建了考虑冻融相变的一维垂向水热耦合模型，基于温度场与水分场控制方程，对 1960~2020 年青藏高原那曲地区冻土区气候梯度演变特征进行了模拟与分析，并结合 WRF 敏感性实验对方法性能进行了验证，主要得出以下结论。

通过引入相变占比参数，基于温度场、水分场控制方程，所构建模型对土壤温湿度季节与年际变化的刻画优于传统简化方法，显著改善了冻结/融化过渡带的模拟能力。

在冷暖气候背景下，考虑冻融相变后，模型对感热与潜热通量的响应更符合冻土 - 大气能量交换的物理机制：冷期土壤冻结程度高、反照率增大，可利用能量更多以感热形式释放；暖期活动层加深、未冻水含量增加，潜热通量明显上升。相比之下，传统方法对相变过程存在平滑效应，未能充分体现冻土区能量分配的季节性差异。

温度梯度垂直廓线模拟结果表明，本文方法在边界层内与那曲探空观测更为接近，能够更合理地反映不同气候阶段冻土区温度梯度的演变特征。需要说明的是，本研究采用一维均质假设与离线单向驱动方式，虽可满足大尺度气候梯度演变分析需求，但在复杂地形区与多年冻土热状态精细模拟方面仍存在局限，后续可结合双向耦合与多参数优化进一步提升适用性。

基金项目

1. 中国气象局创新发展专项《基于多源资料的云南避暑避寒资源精细化评估及应用》(编号：

CXFZ2025Q011);

2. 云南省气象局科研项目《基于多源数据云量预报在光伏电厂的检评估及其与发电量的关系研究》(编号: YZ202509)。

参考文献

- [1] 谢梅珍, 赵林, 吴晓东, 等. 青藏高原多年冻土区两种高寒草地生态系统土壤氮季节变化及其与环境因子的关系[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5): 1631-1639.
- [2] 张越, 许向科, 孙雅晴. 青藏高原东南巴松措流域和派山谷末次冰盛期冰川与气候重建[J]. 冰川冻土, 2022, 44(4): 1248-1259.
- [3] 罗京, 牛富俊, 林战举, 等. 青藏高原多年冻土区热融滑塌发育特征及规律[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 96-105.
- [4] 杨耀先, 胡泽勇, 路富全, 等. 青藏高原近 60 年来气候变化及其环境影响研究进展[J]. 高原气象, 2022, 41(1): 1-10.
- [5] 柯贤敏, 欧安锋, 王玮, 等. 青藏高原热喀斯特湖与多年冻土的相互作用[J]. 水科学进展, 2022, 33(4): 542-552.
- [6] 伏薇, 李茂善, 阴蜀城, 等. 西风南支与高原季风环流场下青藏高原大气边界层结构研究[J]. 高原气象, 2022, 41(1): 190-203.
- [7] 向楠, 巩远发, 李卓敏. 青藏高原东部和西南地区低温冰冻雨雪事件的时空变化特征[J]. 高原气象, 2023, 42(1): 13-24.
- [8] 殷路辉, 赵林, 胡国杰, 等. 青藏高原工程走廊 3 个监测点多年冻土温度序列重建[J]. 科学通报, 2023, 68(15): 1985-2000.
- [9] 杨涵, 徐平, 常福宣, 等. 基于遥感与地面实测的青藏高原冻土流域土壤温湿度变化分析[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(4): 177-184.
- [10] 刘广岳, 邹德富, 杨斌, 等. 青藏高原腹地各拉丹冬南北坡多年冻土考察初步结果[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 83-95.
- [11] 姚明星, 赵锐, 杨林川, 等. 基于 GWRRK 的多年冻土地温空间分布模拟研究——以青藏铁路昆仑山至尺曲谷地段为例[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5): 1570-1580.
- [12] 曾照军, 唐朝生, 程青, 等. 非饱和土水热耦合模型中水分相变/迁移因素影响分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S1): 40-45.
- [13] 薛珂, 郑涛, 张明礼, 等. 寒区非饱和土体混合态水分迁移研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 39-46+103.
- [14] 王才进, 蔡国军, 武猛, 等. 基于人工智能算法预测土体导热系数[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1899-1907.
- [15] 于建游, 姜逸帆, 林铭, 等. 考虑渗流与裂隙作用的寒区隧道保温层厚度计算方法[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 108-117.
- [16] 肖泽岸, 朱霖泽, 侯振荣, 等. 盐渍土二次相变温度变化规律[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 64-71.
- [17] 黄葭悦, 赵传燕, 臧飞, 等. 不同海拔下青海云杉林土壤冻融期水热变化特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(6): 711-719.
- [18] 鲁舒心, 万愉快, 孙伯颜, 等. 基于全耦合的地表水土壤水运动与溶质运移数值模拟[J]. 节水灌溉, 2023(8): 102-109+128.