

引用格式:侯晓静,段克勤,石培宏,陈荣,豆明玉. 基于 ERA5-Land 数据的 1961—2020 年喜马拉雅山地区气温变化特征[J]. 山地学报, 2024, 42(3): 320-333.

HOU Xiaojing, DUAN Keqin, SHI Peihong, CHEN Rong, DOU Mingyu. Temperature change in the Himalayas from 1961 to 2020 based on ERA5-Land data [J]. Mountain Research, 2024, 42(3): 320-333.

基于 ERA5-Land 数据的 1961—2020 年 喜马拉雅山地区气温变化特征

侯晓静,段克勤*,石培宏,陈荣,豆明玉

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘要:喜马拉雅山地区气温对全球气候变化敏感。由于海拔高、数据获取难度大,已有研究对喜马拉雅山区气候变化的认识并不充分。本研究基于高分辨率 ERA5-Land 数据,分析 1961—2020 年喜马拉雅山地区气温时空变化特征,评估其在喜马拉雅山地区的适用性。结果表明:(1)1961—2020 年喜马拉雅山整体以 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率升温,但自 1990 年后升温速率显著增大至 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,以秋冬季变暖最为显著。(2)空间上,北坡升温高于南坡,东段升温快于西段。升温导致年平均 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线上升 100 m ,且 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线季节差异显著,其中秋季升高可达 161 m ,而春季升高仅 70 m 。(3)喜马拉雅山地区气温垂直变化存在海拔依赖性特征,中、东段升温峰值区位于海拔 $4000\sim 5500\text{ m}$ 处,而西段升温峰值区位于海拔 $3000\sim 4000\text{ m}$ 处。1961—2020 年喜马拉雅山高海拔地区积雪面积快速减少,导致地表反照率降低进而地表吸收太阳辐射增加,形成气温升高—反照率降低—气温进一步升高的正反馈过程,这是高海拔升温显著的重要原因。全面认识喜马拉雅山高海拔地区气温的时空演变规律有利于应对变暖所导致的环境问题并提出相应策略。

关键词:喜马拉雅山;气温变化;ERA5-Land; $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线;海拔依赖性变暖

中图分类号: K903

文献标志码: A

喜马拉雅山冰川广布,对气候变化极其敏感。该地区的冰川融水是印度河、恒河和布拉马普特拉河等众多大河的重要补给源,也是下游重要的淡水资源^[1]。在全球变暖背景下,喜马拉雅山区气候快速变化,引发冰川和积雪的加速消融,进而引起冰湖溃决、洪水和泥石流等自然灾害,给下游生态环境安全和社会经济发展带来严重的负面影响^[2-10]。研究全球变暖背景下喜马拉雅山气温变化规律具有重要的科学价值和现实意义。

喜马拉雅山地区总体处于升温状态^[6]。20 世纪喜马拉雅山西北部年均温以 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率

升高,以冬季变暖最为显著,最高、最低和平均气温分别上升 $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[11]。自 1980 年以来,喜马拉雅山升温速率显著增加,海拔较高的北坡升温更为显著^[12-13]。近 40 年喜马拉雅山中段北坡平均气温以 $0.56\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率显著升高,高于青藏高原平均升温速率,而南坡升温速率与青藏高原较为接近,为 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[12-13]。与青藏高原最低气温变暖更快的结果不同,喜马拉雅山西部及中南部最高气温升温快于最低气温^[14-15]。然而,也有研究发现过去几十年喜马拉雅山西部在季风前以及夏季升温并不显著,部分区域呈降温趋势^[11,13,16]。

收稿日期(Received date): 2023-07-06;改回日期(Accepted date): 2024-06-24

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42371137)。[National Natural Science Foundation of China (42371137)]

作者简介(Biography): 侯晓静(1998-),女,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向:气候变化与自然灾害。[HOU Xiaojing (1998-), female, born in Qingdao, Shandong province, M. Sc. candidate, research on climate change and natural disasters] E-mail:houxj@snnu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 段克勤(1970-),男,博士,教授,主要研究方向:全球变化。[DUAN Keqin (1970-), male, Ph. D., professor, research on global change] E-mail:kqduan@snnu.edu.cn

喜马拉雅山地区存在海拔依赖性变暖现象。研究表明^[17-22],喜马拉雅山地区升温速率随海拔升高而增大,最高和最低气温在 4000~5000 m 海拔段变暖速率较快,北坡升温速率大于南坡,这与云量变化及向下长波辐射的变化紧密相关。除以上因素外,海拔依赖性变暖还受雪/冰反照率反馈、水汽以及土地利用、臭氧和植被的变化等多种因素影响,不同因素的作用机制不同,对不同地区海拔依赖性变暖的影响程度也有差异,而对于有冰川和积雪覆盖的山脉,雪/冰反照率反馈是高海拔变暖的重要驱动机制^[23-32]。

对喜马拉雅山地区气温变化的观测与分析,总体认识不足,研究覆盖面与深度不够。前期研究主要集中于喜马拉雅山西部和南部,缺乏对山脉气温变化的整体认识。其次,喜马拉雅山地形陡峭且高海拔地区站点稀少,研究所采用的数据多为观测数据或粗分辨率的格点数据,导致对高海拔地区气温变化情况认识不足,且缺少对 0℃ 等温线的变化的研究。此外,早期研究所用资料年限较早,时间尺度较短,其研究结果不能反映气温变化的最新动态。

本文利用最新高分辨率 ERA5-Land 数据,采用双线性插值、Mann-Kendall 突变检验、克里金插值及 t 检验等方法,讨论以下三个问题:(1) 1961—2020 年喜马拉雅山气温时空变化特征,特别是气温变化的垂直分布特征,是否存在海拔依赖性变暖?(2) 0℃ 等温线高度是表征高海拔地区气温变化的重要指标之一,决定了冰水相变发生的高度。1961—2020 年喜马拉雅山 0℃ 等温线高度是如何变化的?(3) 喜马拉雅山高海拔地区积雪如何变化,其与气温变化之间有什么关系? 基于对以上问题的分析全面认识喜马拉雅山气温变化的趋势和特征,可以为科学防范气候变暖带来的环境问题提供科学依据。

1 研究区概况

喜马拉雅山位于青藏高原南缘,西起克什米尔的南迦帕尔巴特峰,东至雅鲁藏布江大拐弯处的南迦巴瓦峰,全长约 2400 km,南北宽 200~350 km^[33-34],高山区发育了数量和规模庞大的现代冰川。

喜马拉雅山脉东段主要受孟加拉湾湿润季风的影响,西段主要受西风带的影响,中段兼具东西两段气候特点。根据气候的差异以及山系的分布,将喜马拉雅山分为三段^[35-36]。(1) 西段:从南迦帕尔巴特峰至纳木那尼峰;(2) 中段:从纳木那尼峰至绰莫拉日;(3) 东段:从绰莫拉日至南迦巴瓦峰。

2 数据与方法

2.1 数据

气温观测数据源于中国地面气候资料日值数据集(V3.0)(<https://data.cma.cn>)。经数据质量控制,选用聂拉木、普兰、帕里、米林、隆子、错那 6 个站点的观测数据(表 1),以验证再分析资料数据的可靠性。

ERA5-Land 数据是由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的高分辨率数据集(<https://cds.climate.copernicus.eu>),该产品是在 ERA5 再分析资料陆面部分的基础上研发的新一代再分析数据,该数据时段为 1950 年至今,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间分辨率为逐月。本文选取 ERA5-Land 数据的气温和雪覆盖率,分析 1961—2020 年喜马拉雅山的气温变化特征及海拔依赖性变暖的影响因素。

2.2 方法

首先采用双线性插值法将再分析数据插值到气

表 1 喜马拉雅山气象站站点说明
Tab. 1 Meteorological station site description of the Himalayas

站点名称	经度	纬度	海拔/m	时段	年平均气温/℃	气温倾向率/(℃/10a)
聂拉木	85.97°E	28.18°N	3810	1973—2018 年	3.84	0.23**
普兰	81.25°E	30.28°N	3900	1973—2018 年	3.90	0.40**
帕里	89.08°E	27.73°N	4300	1973—2018 年	0.50	0.27**
隆子	92.47°E	28.42°N	3860	1973—2018 年	5.59	0.20**
错那	91.95°E	27.98°N	4280	1973—2018 年	0.18	0.40**
米林	94.22°E	29.22°N	2950	2000—2018 年	9.03	0.62**

注: ** 表示通过 0.01 显著性检验。

象站所在格点上,通过分析再分析数据和观测值的相关性及误差指标,评价再分析数据在喜马拉雅山地区的模拟能力。

利用 ERA5-Land 数据分析喜马拉雅山春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月—次年 2 月)和年际气温变化特征,利用 Mann-Kendall(M-K)非参数统计检验法确定突变发生的时间。利用最小二乘法计算气象要素的气候倾向率,并运用 t 检验法对气候倾向率及相关系数进行显著性检验,选取信度为 0.05 和 0.01 的显著性水平,分别对应 95% 和 99% 的置信度。

为探究喜马拉雅山 0℃ 等温线及山脉垂直方向气温变化情况,运用克里金插值法并结合喜马拉雅山 DEM 数据,计算 0℃ 等温线的高度。

3 结果

3.1 ERA5-Land 数据在喜马拉雅山地区的适用性分析

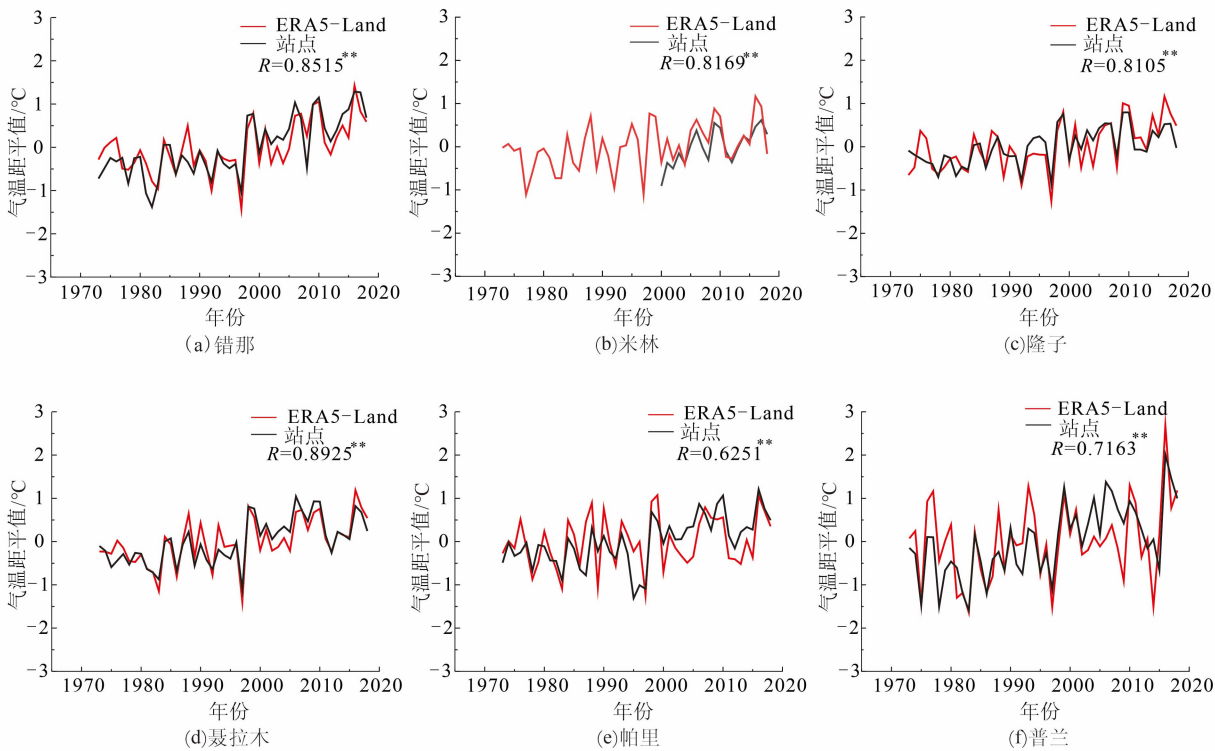
利用双线性插值法将 ERA5-Land 的数据分别

插值到错那、隆子、聂拉木、帕里、普兰和米林 6 个台站(图 1),从相关系数、标准差、平均绝对偏差和均方根误差 4 个方面比较 ERA5-Land 数据的适用性和可靠性(表 2)。整体上 ERA5-Land 数据可以重现台站的气温变化,相关性较好,但由于模式误差和复杂的地形,ERA5-Land 数据和观测值之间仍存在一定的差异。综合来看,ERA5-Land 数据在喜马拉雅山地区有较强的适用性,可以用来表征喜马拉雅山地区的气温变化。

表 2 ERA5-Land 再分析数据与气象站点年均温的误差指标

Tab.2 Error index of the annual average temperature between ERA5-Land reanalysis data and meteorological station

站点	相关系数	标准差	平均绝对偏差	均方根误差
错那	0.85	0.35	0.27	0.35
米林	0.82	0.27	0.28	0.34
隆子	0.81	0.32	0.25	0.32
聂拉木	0.89	0.25	0.19	0.24
帕里	0.63	0.5	0.41	0.49
普兰	0.72	0.65	0.51	0.65



* * 表示通过 0.01 显著性检验。

图 1 1973—2018 年观测数据和 ERA5-Land 气温数据对比

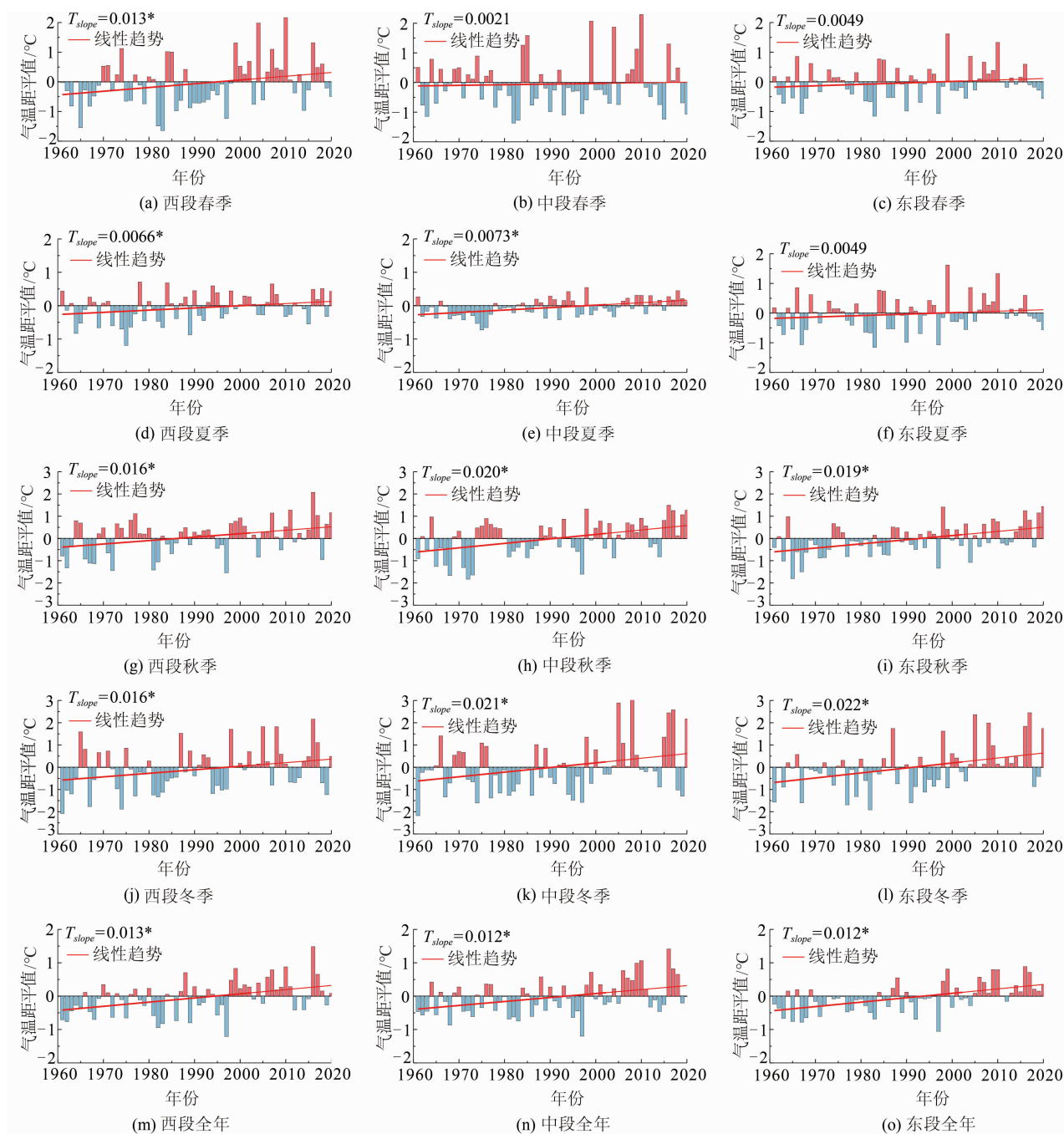
Fig.1 Comparison of the observational data and ERA5-Land temperature data from 1973 to 2018

3.2 喜马拉雅山地区气温的季节及年际变化特征

1961—2020 年,喜马拉雅山四季及年平均气温整体上呈现显著的上升趋势(图 2),但升温速率在不同季节、不同地区有显著差异。

季节上,喜马拉雅山升温以秋冬季最快,春季和夏季升温较缓慢。西段春季平均升温速率最高为 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,通过 0.05 的显著性检验,而中段和东

段分别为 0.02 和 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,未通过 0.05 的显著性检验。夏季山脉西、中和东段的升温速率分别为 0.07 、 0.07 和 $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。秋冬季升温速率明显快于春季和夏季,秋季气温升温速率分别为 0.16 、 0.20 和 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,而冬季升温速率分别为 0.16 、 0.21 和 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。除春季以外,夏季、秋季和冬季升温速率皆有中东部快于西部的特征。



* 表示通过 0.05 显著性检验。

图 2 1961—2020 年喜马拉雅山西段、中段和东段四季及全年气温变化趋势

Fig. 2 Temperature trends for the four seasons and the whole year in the western, middle, and eastern Himalayas from 1961 to 2020

山脉西段、中段和东段的年平均升温速率分别为 0.13、0.12 和 0.12 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,空间上差距较小。同时,通过 M-K 突变检验发现,在 1990 年和 1996 年前后(图 3),喜马拉雅山年平均气温经历了突变,

1990 年后升温速率显著增加,为 0.20 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

3.3 喜马拉雅山地区气温的空间变化特征

由 1961—2020 年喜马拉雅山脉气温倾向率(图 4a~4e)及平均气温(图 4f~4j)的空间分布可知,气

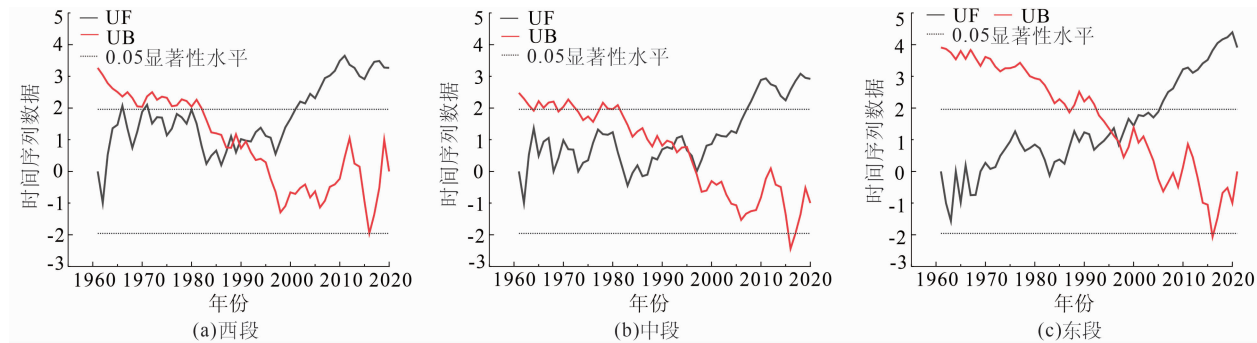


图 3 1961—2020 年喜马拉雅山西段、中段和东段年平均气温 M-K 突变检验

Fig. 3 Test for M-K mutation of the annual mean temperature in the western, middle, and eastern Himalayas from 1961 to 2020

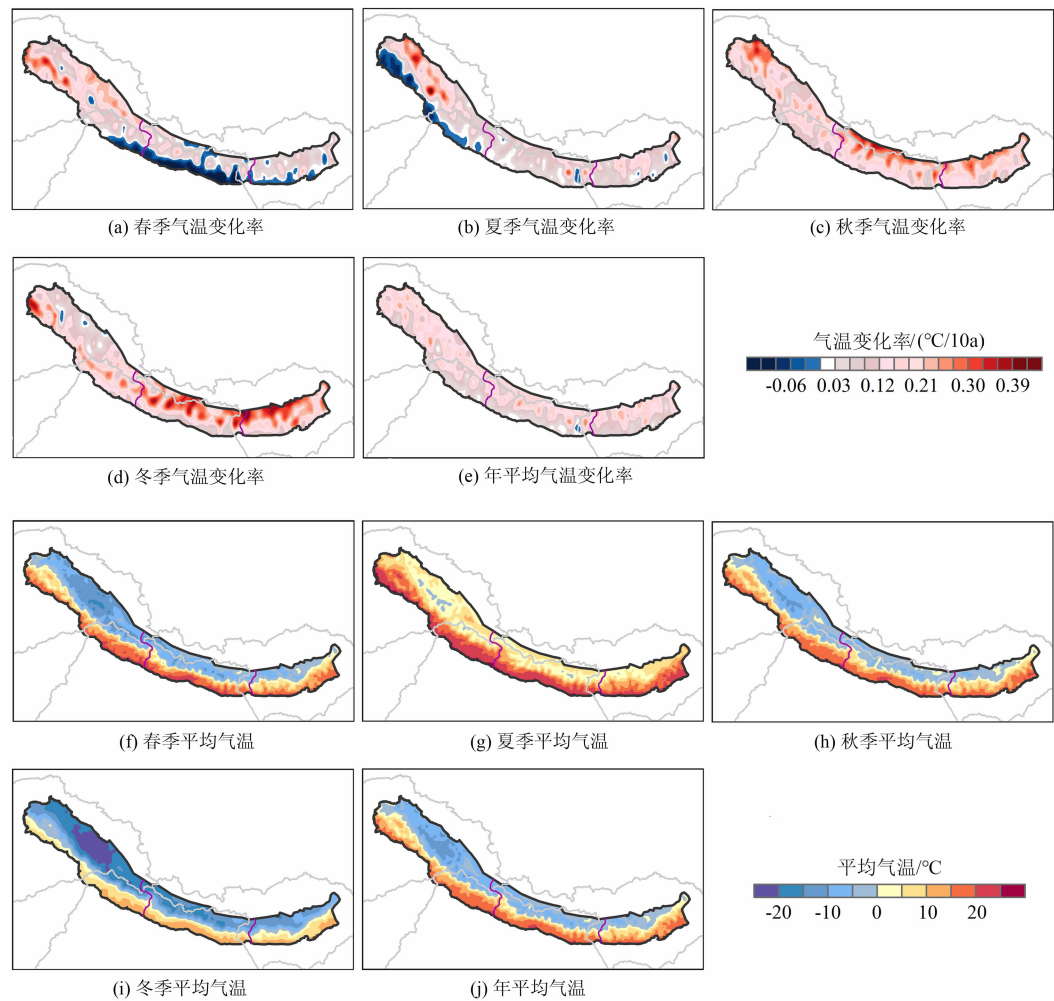


图 4 1961—2020 年喜马拉雅山四季及全年气温变化率和平均气温空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the temperature trends and mean temperature for the four seasons and the whole year in the Himalayas from 1961 to 2020

温随海拔升高而降低,喜马拉雅山年均升温速率比较均匀,为 $0.10 \sim 0.20 \text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,且海拔较高的北坡升温较快,海拔较低的南坡升温较慢。整个山脉以秋冬季升温为主,升温中心主要位于山脉的北坡。春季和夏季升温较慢,升温速率为 $0 \sim 0.25 \text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,大部分区域升温趋势不显著。其中,喜马拉雅山西段春季升温较快于中段和东段,中段南坡区域在近几十年来气温有下降趋势。夏季升温情况与春季相似。

秋季和冬季升温速率为 $0.20 \sim 0.45 \text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。同时,无论是秋季还是冬季,山脉中段升温速率最快,其次是东段,最后是西段。中段和东段的升温均表现出较明显的南北坡差异,北坡升温速率比南坡快,而西段在冬季表现出南坡升温快于北坡的特征。

3.4 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线的变化

$0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线对山地气候变化具有重要意义,山区最大升温速率通常发生在年 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线附近^[30,37]。为了探究喜马拉雅山 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线的变化特征,对比 1961—1970 年和 2011—2020 年两个时段 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线的年平均值的位置变化(图 5),发现相比于 1961—1970 年,2011—2020 年四季以及年

$0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线均整体由低海拔向高海拔移动。

对比 2011—2020 年和 1961—1970 年四季和全年平均气温随海拔变化的趋势(图 6),发现 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线随气候变暖而向高海拔移动,2011—2020 年无论是季节还是年平均气温均高于 1961—1970 年,且秋冬季升温最明显,对应的秋季和冬季 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线平均移动幅度较大。由于夏季气温较高,山脉大部分区域气温高于 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,低于 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 区域较小,因此重点关注其他季节和年 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线的变化情况。秋季 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线在 1961—1970 年的平均高度为 $3900 \sim 4000 \text{ m}$,而 2011—2020 年则升高至 $4100 \sim 4200 \text{ m}$,平均上升高度为 $100 \sim 200 \text{ m}$ 。冬季 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线从 $2500 \sim 2600 \text{ m}$ 上升到 $2600 \sim 2700 \text{ m}$,平均上升的高度为 $100 \sim 200 \text{ m}$ 。春季和年平均气温的 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线的移动幅度较小,在两个参考时段内,春季 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线均位于海拔 $3600 \sim 3700 \text{ m}$,移动距离约为 100 m ,年 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线位于海拔 $3700 \sim 3800 \text{ m}$,移动距离约为 100 m 。结合喜马拉雅山 DEM 计算得知,秋季及冬季 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线平均上升距离分别达 161 m 、 111 m ,春季及年 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线分别上升 70 m 、 100 m 。

4 讨论

ERA5-Land 数据相比其他再分析资料及站点数据具有分辨率高、数据连续等优点,可覆盖低海拔到高海拔,能反映不同地形的变暖特征,结果更精确。通过站点数据验证发现,ERA5-Land 数据和观测数据之间由于海拔差异等存在一定误差,但整体一致性较好,能够捕捉喜马拉雅山气温变暖趋势,可以用作本文研究。图 2、图 4 和图 5 分别展示了喜马拉雅山地区气温的时空变化以及 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线的变化,喜马拉雅山地区气温整体上呈变暖趋势,且高海拔地区升温速率较快。但是,1961—2020 年喜马拉雅山年平均气温升温速率为 $0.13 \text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,低于青藏高原同期的平均升温速率 $0.3 \sim 0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[6]。其中,喜马拉雅山北坡升温较快,秋冬季可达到 $0.2 \sim 0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,南坡升温较慢甚至有降温趋势,已有研究也证实过去几十年喜马拉雅山部分区域有降温趋势^[11,13,16],这可能与喜马拉雅山复杂的地形有关。

1961—2020 年喜马拉雅山气温升温速率与海

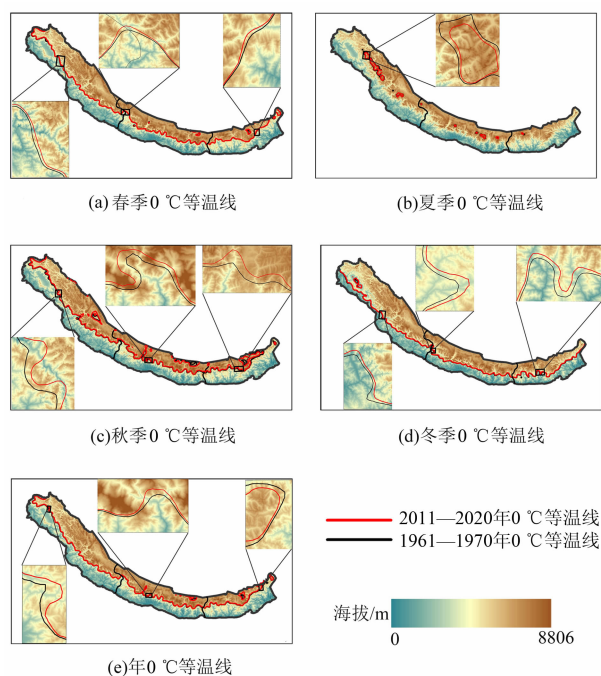


图 5 2011—2020 年和 1961—1970 年喜马拉雅山 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线

Fig. 5 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ isotherms in the Himalayas during
2011–2020 and 1961–1970

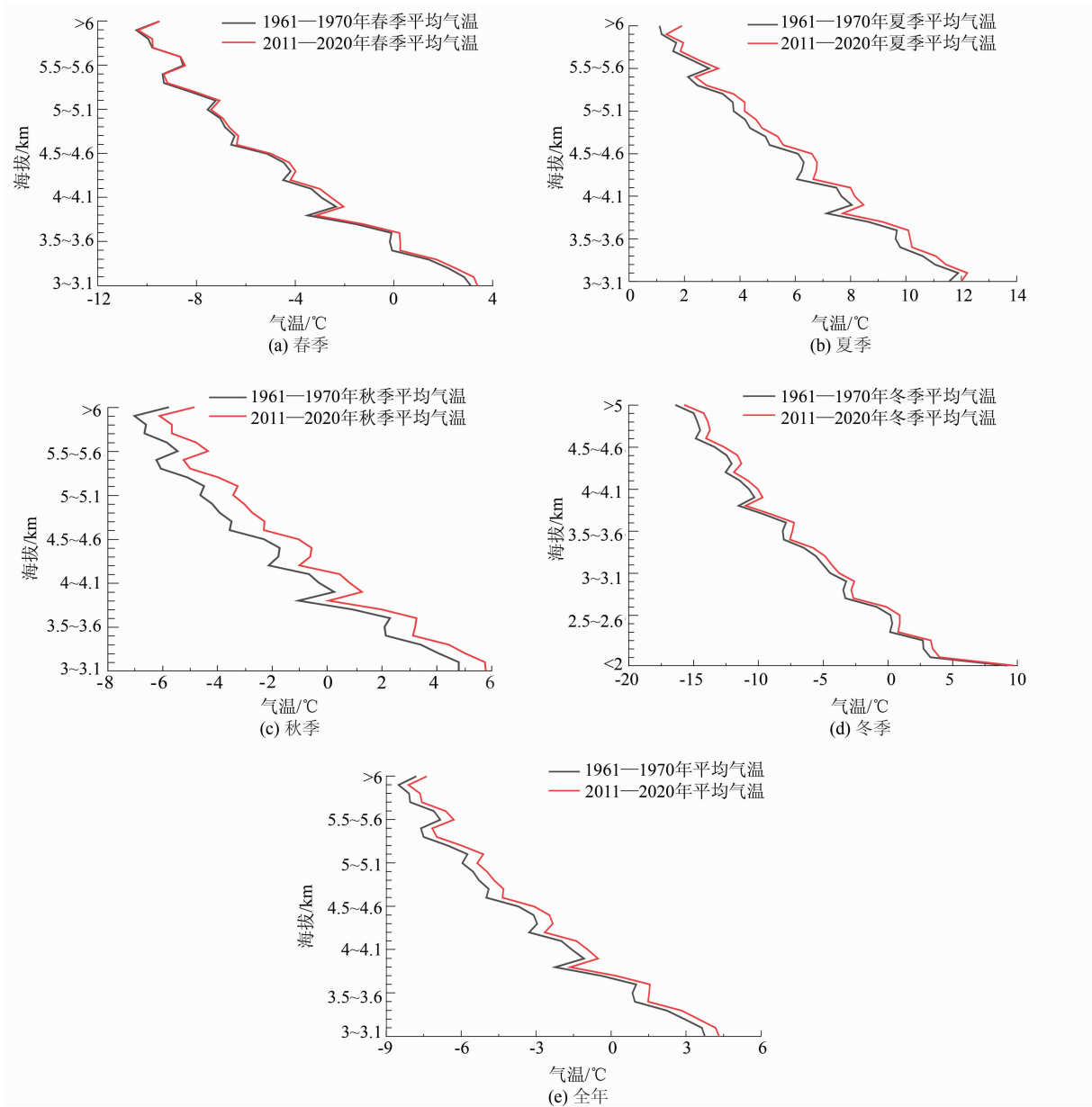


图6 1961—1970年和2011—2020年四季及年均温随海拔变化

Fig. 6 Four seasons and mean annual temperature varied with altitude during 1961 to 1970 and 2011 to 2020

拔的关系如图7所示,山脉西段随海拔升高,年均温及各季节气温变化速率均表现出先上升后下降的趋势,春季、夏季和秋季在3500~4000 m处升温速率最快,年平均气温在海拔2500~3000 m处升温速率最快,冬季则在1500~2000 m处升温最快,随后下降。山脉中段年平均气温以及夏、秋季节在海拔4000~5000 m处存在升温峰值,冬、春两季,气温在4000~4500 m处升温速率最快,更高海拔处升温速率波动变化并略微减慢。山脉东段的海拔依赖性变暖现象较西段和中段明显,年平均气温及一年四季

气温的变化速率皆随海拔升高呈现先增大后减小的趋势,在海拔4500~5500 m处升温速率最快。

因此,喜马拉雅山升温速率随海拔上升先增加后减小,在海拔5000 m以下具有比较明显的海拔依赖性变暖特征,结合0℃等温线的分布发现,山脉年0℃等温线位于升温最快的海拔区间。其中,山脉西段除冬、春两季,海拔3500~4000 m处升温最快,山脉中段和东段的海拔依赖性变暖现象较明显,海拔4000~5500 m处升温最快。

青藏高原近年的快速变暖主要是由大气中温室

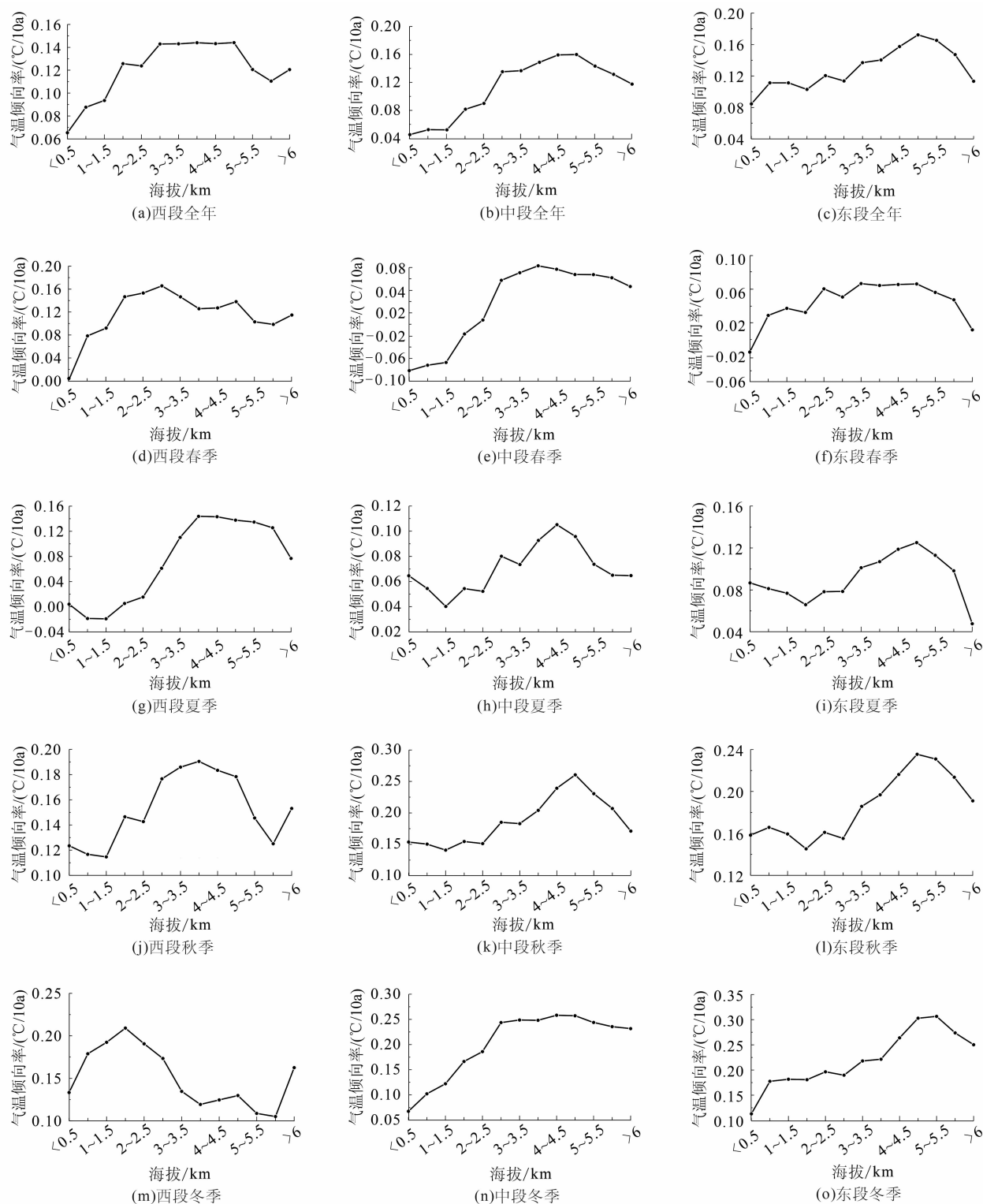


图7 1961—2020年喜马拉雅山西段、中段及东段气温倾向率随海拔变化

Fig. 7 Temperature trends in the western, middle and eastern Himalayas varies with altitude from 1961 to 2020

气体增加所致^[44],而高海拔升温更快的原因则是多方面的,对于海拔较高且有积雪覆盖的山区,冰雪反照率反馈是海拔依赖性变暖的重要驱动机制^[17],因

此选取 ERA5-Land 数据中的雪覆盖率探讨积雪变化与区域变暖的关系。

图 8a~8e 显示了 1961—2020 年四季及全年雪

覆盖率变化趋势空间分布,发现除秋、冬季山脉西北部及春季北坡雪覆盖率增加外,喜马拉雅山雪覆盖率整体呈下降趋势,且海拔较高的区域下降更明显,与气温空间变化特征有较强相关性(图 8f~8j)。从海拔梯度来看(图 9),随海拔上升,山脉西段、中段和东段雪覆盖率减少速率先快后慢,其与气温随海拔变化的相关性较强,表明二者随海拔的变化趋势较一致,积雪融化快的区域气温也剧烈上升。因此,雪覆盖率的变化是影响高海拔显著变暖的重要原因之一。高海拔地区的强烈变暖有助于加速雪的融化,雪反照率减小,地面吸收更多短波辐射,形成雪反照率正反馈,从而加速高海拔地区升温。目前已有研究发现积雪显著减少的山脉,如念青唐古拉山,

4000~5000 m 左右的变暖更加剧烈。因此,积雪变化是连接区域气候变暖和山区海拔依赖性变暖存在的桥梁^[36]。

海拔依赖性变暖是多因素综合影响的结果,各因素之间关系复杂并互相影响,除积雪变化,黑炭、云量变化、水蒸气和辐射通量等对气候变暖皆有不同程度的贡献。山区沿海拔梯度最大变暖率通常发生在年 0°C 等温线附近,0°C 等温线升高使得该海拔高度吸收太阳辐射显著增加,变暖加剧,积雪融化增强,雪线后退,雪反照率下降。除此之外,雪上沉积黑炭也可降低表面反照率,进而增加地表吸收太阳辐射。有研究指出,季风前季节,喜马拉雅山 5000 m 处发现大量黑炭,对喜马拉雅山变暖贡献巨

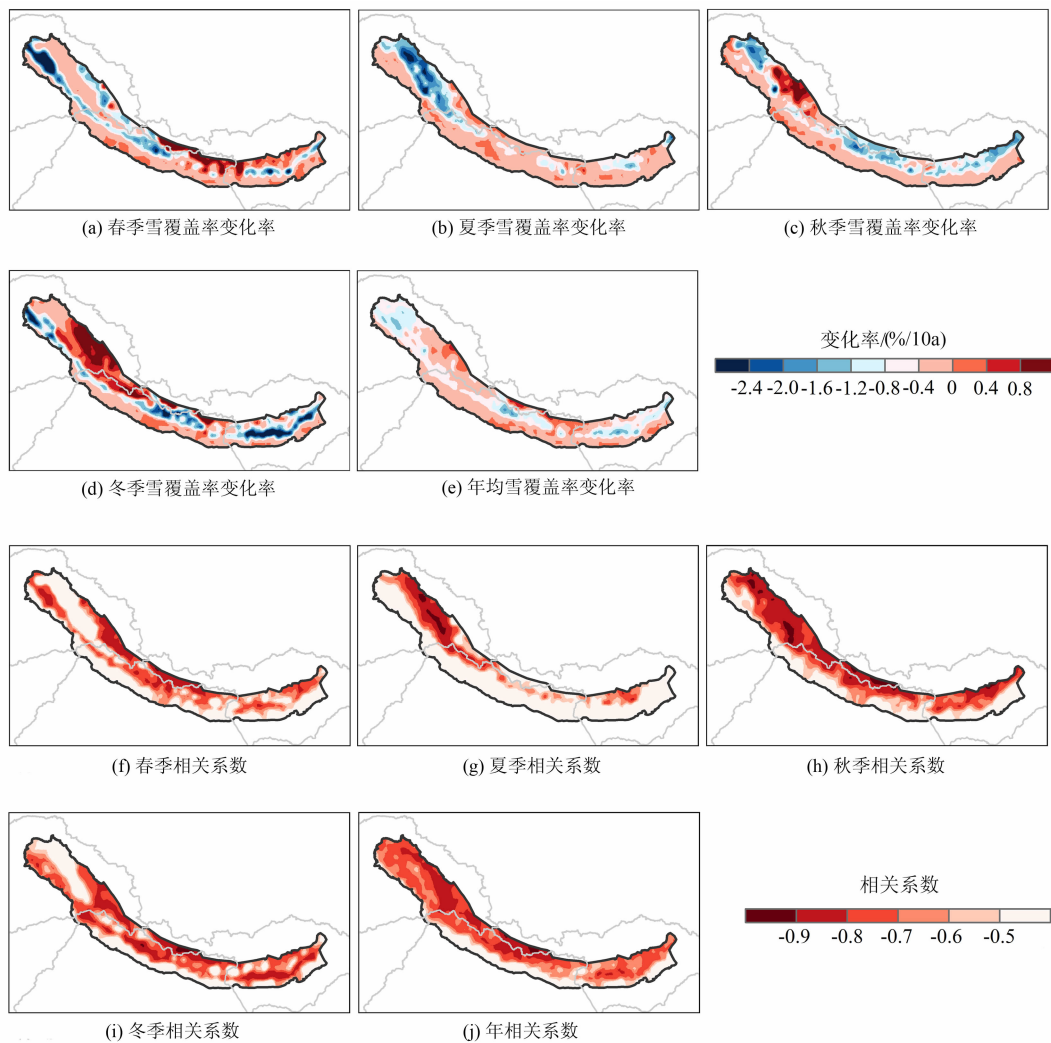
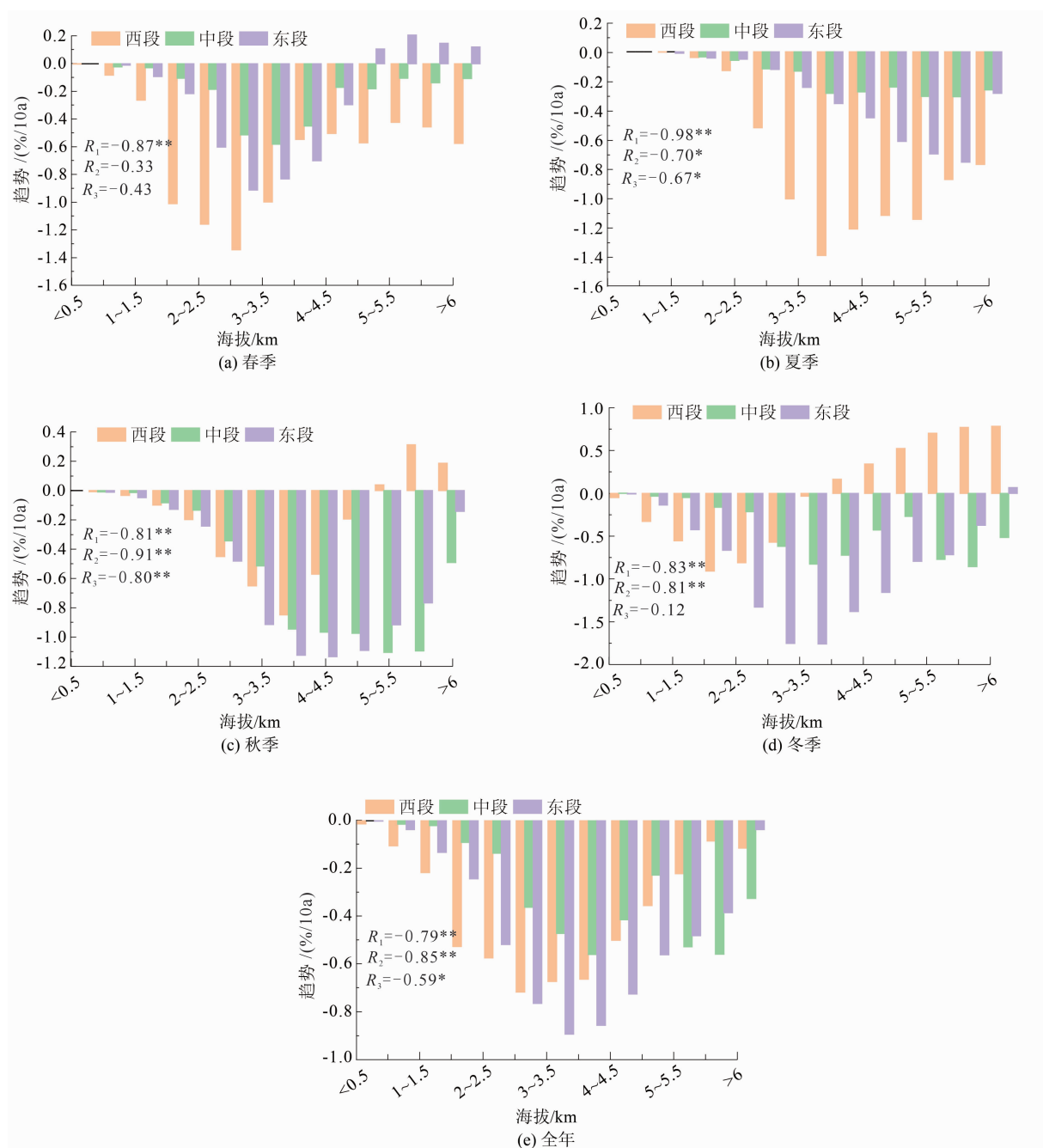


图 8 1961—2020 年喜马拉雅山四季及全年雪覆盖率变化率空间分布及其与气温倾向率相关性空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the seasonal and annual snow cover trends over the Himalayas from 1961 to 2020 and its correlation with temperature trends



R_1 、 R_2 、 R_3 分别表示山脉西段、中段和东段雪覆盖率随海拔变化趋势与气温随海拔变化趋势的相关系数。

** 表示相关系数通过 0.01 显著性检验, * 表示相关系数通过 0.05 显著性检验。

图9 1961—2020 年四季及全年雪覆盖率变化率随海拔变化

Fig. 9 Trends of snow cover vary with elevation for four seasons and year from 1961 to 2020

大^[26,34,38-42]。云量变化则可以通过影响短波和长波辐射,从而加剧高海拔地区升温^[24]。喜马拉雅山 3000 m 以上云量减少导致地表吸收太阳辐射增强,将进一步增加雪的融化^[27]。向下长波辐射是高海拔地区的主要能量来源,空气干燥时对比湿极其敏感。因此,比湿的增加将优先增加高海拔地区向

下长波辐射,从而促进变暖^[19]。地表增温加热大气,二者形成正反馈,当大气受辐射增加影响升温时,为使温度达到新平衡而不是持续升温,向外长波辐射增强,对于温度较低的高海拔地区需要更高的增温达到向外辐射能量平衡^[42]。以上因素互相影响,通过各种耦合反馈机制在海拔依赖性变

暖中发挥重要作用。

5 结论

本文基于最新高分辨率 ERA5-Land 数据,通过站点观测数据进行评估发现 ERA5-Land 数据在喜马拉雅山地区有较强的适用性,利用 ERA5-Land 数据对 1961—2020 年喜马拉雅山地区气温变化特征进行分析,得出主要结论如下。

(1) 1961—2020 年喜马拉雅山整体以 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率持续升温,升温中心主要位于北坡海拔较高的区域,且秋冬季节升温速率为 $0.20\sim0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,快于春夏季节。

(2) 根据近 60 年来喜马拉雅山持续变暖以及山脉升温速率存在空间差异的现象,讨论 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线的变化幅度以及气温垂直方向变化规律。 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线上升,年 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线升高 100 m ,秋、冬季 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线平均上升的高度为 $100\sim200\text{ m}$,春季约 70 m ;同时,升温速率沿海拔梯度先增大后减小,海拔依赖性变暖较突出,中段和东段在 $4000\sim5500\text{ m}$ 处升温最快,西段海拔依赖性变暖有明显的季节差异,山脉年 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线位于升温最快的海拔区间。

(3) 雪覆盖率随海拔升高减小速率加快,与气温升温速率随海拔变化趋势表现出较强的相关性,表明积雪变化引发的雪反照率反馈是导致高海拔升温快的主要因素之一。

参考文献 (References)

- [1] KUMAR P, SAHARWARDI M S, BANERJEE A, et al. Snowfall variability dictates glacier mass balance variability in Himalaya-Karakoram [J]. Scientific Reports, 2019, **9**: 1–9. DOI: 10.1038/s41598-019-54553-9
- [2] YAO Tandong, XUE Yongkang, CHEN Deliang, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multi-disciplinary approach with observation, modeling and analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, **100**(3): 423–444. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0057.1
- [3] KANDEL S, KHADKA N, TIWARI D, et al. Evolution and bathymetry of glacial lake at the lowest elevation in Nepal Himalaya [J]. Journal of Mountain Science, 2023, **20**(1): 141–144. DOI: 10.1007/s11629-022-7615-z
- [4] 姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, **34**(11): 1203–1209. [YAO Tandong, WU Guangjian, XU Baiqing, et al. Asian Water Tower change and its impacts [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, **34**(11): 1203–1209] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.003
- [5] 底阳平, 张扬建, 曾辉, 等. “亚洲水塔”变化对青藏高原生态系统的影 响[J]. 中国科学院院刊, 2019, **34**(11): 1322–1331. [DI Yangping, ZHANG Yangjian, ZENG Hui, et al. Effects of changed Asian Water Tower on Tibetan Plateau ecosystem: A review [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, **34**(11): 1322–1331] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.015
- [6] 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来[J]. 科学通报, 2015, **60**(32): 3025–3035+1–2. [CHEN Deliang, XU Baiqing, YAO Tandong, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(32): 3025–3035] DOI: 10.1360/N972014-01370
- [7] 王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, **34**(11): 1220–1232. [WANG Ninglian, YAO Tandong, XU Baiqing, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, **34**(11): 1220–1232] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.005
- [8] 陈涛, 智海, 边多. 青藏高原观测地表温度与 ERA-Interim 再分析资料的差异及归因分析[J]. 山地学报, 2019, **37**(1): 1–8. [CHEN Tao, ZHI Hai, BIAN Duo. Investigation on the discrepancy between observed surface temperature and ERA-Interim over the Qinghai-Tibet Plateau and its attribution [J]. Mountain Research, 2019, **37**(1): 1–8] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000393
- [9] INGTY T, ERB A, ZHANG Xiaoyang, et al. Climate change is leading to rapid shifts in seasonality in the Himalaya [J]. International Journal of Biometeorology, 2023, **67**: 913–925. DOI: 10.1007/s00484-023-02465-9
- [10] CHEN Rong, DUAN Keqin, SHANG Wei, et al. Increase in seasonal precipitation over the Tibetan Plateau in the 21st century projected using CMIP6 models [J]. Atmospheric Research, 2022, **277**: 106306. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106306
- [11] SHEKHAR M S, CHAND H, KUMAR S, et al. Climate change studies in the western Himalaya [J]. Annals of Glaciology, 2010, **51**(54): 105–112. DOI: 10.3189/172756410791386508
- [12] HAN Yizhe, MA Yaoming, WANG Zhongyan, et al. Variation characteristics of temperature and precipitation on the northern slopes of the Himalaya region from 1979 to 2018 [J]. Atmospheric

- Research, 2021, **253**: 105481. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105481
- [13] YADAY R R, PARK W K, SINGH J, et al. Do the western Himalaya defy global warming? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(17): L17201. DOI: 10.1029/2004GL020201
- [14] DUAN Anmin, WU Guoxiong, ZHANG Qiong, et al. New proofs of the recent climate warming over the Tibetan Plateau as a result of the increasing greenhouse gases emissions [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(11): 1396–1400. DOI: 10.1007/s11434-006-1396-6
- [15] LIU Xiaodong, YIN Zhiyong, SHAO Xuemei, et al. Temporal trends and variability of daily maximum and minimum extreme temperature events, and growing season length over the eastern and central Tibetan Plateau during 1961–2003 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, **111**: D19109. DOI: 10.1029/2005JD006915
- [16] SHARMA K P, MOORE B, VOROSMARTY C J. Anthropogenic, climatic, and hydrologic trends in the Kosi Basin, Himalaya [J]. *Climate Change*, 2000, **47**(1–2): 141–165. DOI: 10.1023/A:100569680895
- [17] GIORGI F, HURRELL J W, MARINUCCI M R, et al. Elevation dependency of the surface climate change signal: A model study [J]. *Journal of Climate*, 1997, **10**: 288–296. DOI: 10.1175/1520-0442(1997)010%3c0288
- [18] DIMRI A P, PALAZZI E, DALOZ A S. Elevation dependent precipitation and temperature changes over Indian Himalayan region [J]. *Climate Dynamics*, 2022, **59**(1–2): 1–21. DOI: 10.1007/s00382-021-06113-z
- [19] THAKURI S, DAHAL S, SHRESTHA D, et al. Elevation-dependent warming of maximum air temperature in Nepal during 1976–2015 [J]. *Atmospheric Research*, 2019, **228**: 261–269. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.06.006
- [20] JAIN S K, KUMAR V, SAHARIA M. Analysis of rainfall and temperature trends in northeast India [J]. *International Journal of Climatology*, 2013, **33**(4): 968–978. DOI: 10.1002/joc.3483
- [21] SALERNO F, GUYENNON N, THAKURI S, et al. Weak precipitation, warm winters and springs impact glaciers of south slopes of Mt. Everest (central Himalaya) in the last 2 decades (1994–2013) [J]. *The Cryosphere*, 2015, **9**(3): 1229–1247. DOI: 10.5194/tc-9-1229-2015
- [22] SHAFIQ M U, RASOOL R, AHMED P, et al. Temperature and precipitation trends in Kashmir valley, north western Himalayas [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, **135**(1–2): 293–304. DOI: 10.1007/s00704-018-2377-9
- [23] SNYDER M A, BELL J L, SLOAN L C, et al. Climate responses to a doubling of atmospheric carbon dioxide for a climatically vulnerable region [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(11): 1514. DOI: 10.1029/2001gl014431
- [24] PEPIN N, BRADLEY R S, DIAZ H F, et al. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world [J]. *Nature Climate Change*, 2015, **5**(5): 424–430. DOI: 10.1038/NCLIMATE2563
- [25] PALAZZI E, MORTARINI L, TERZAGO S, et al. Elevation-dependent warming in global climate model simulations at high spatial resolution [J]. *Climate Dynamics*, 2018, **52**(5–6): 2685–2702. DOI: 10.1007/s00382-018-4287-z
- [26] ZHANG Hongbo, IMMERZEEL W W, ZHANG Fan, et al. Snow cover persistence reverses the altitudinal patterns of warming above and below 5000m on the Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **803**: 149889. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149889
- [27] YAN Libin, LIU Zhengyu, CHEN Guangshan, et al. Mechanisms of elevation-dependent warming over the Tibetan plateau in quadrupled CO₂ experiments [J]. *Climate Change*, 2016, **135**(3–4): 509–519. DOI: 10.1007/s10584-016-1599-z
- [28] LAU W K M, KIM M K, KIM K M, et al. Enhanced surface warming and accelerated snow melt in the Himalayas and Tibetan Plateau induced by absorbing aerosols [J]. *Environmental Research Letters*, 2010, **5**(2): 025204. DOI: 10.1088/1748-9326/5/2/025204
- [29] YOU Qinglong, CHEN Deliang, WU Fangying, et al. Elevation dependent warming over the Tibetan Plateau: Patterns, mechanisms and perspectives [J]. *Earth Science Reviews*, 2020, **210**: 103349. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103349
- [30] GUO Donglin, PEPIN N, YANG Kun, et al. Local changes in snow depth dominate the evolving pattern of elevation-dependent warming on the Tibetan Plateau [J]. *Science Bulletin*, 2021, **66**(11): 1146–1150. DOI: 10.1016/j.scib.2021.02.013
- [31] RANGWALA I, MILLER J R, RUSSELL G L, et al. Using a global climate model to evaluate the influences of water vapor, snow cover and atmospheric aerosol on warming in the Tibetan Plateau during the twenty-first century [J]. *Climate Dynamics*, 2010, **34**(6): 859–872. DOI: 10.1007/s00382-009-0564-1
- [32] PEPIN N C, LUNDQUIST J D. Temperature trends at high elevations: Patterns across the globe [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(14): L14701. DOI: 10.1029/2008GL034026
- [33] 冀琴, 董军, 刘睿, 等. 1990—2015 年喜马拉雅山冰川变化的遥感监测及动因分析 [J]. *地理科学*, 2020, **40**(3): 486–496. [JI Qin, DONG Jun, LIU Rui, et al. Glacier changes in response to climate change in the Himalayas in 1990–2015 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40**(3): 486–496] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.03.017
- [34] 张东启, 效存德, 秦大河. 近几十年来喜马拉雅山冰川变化及其对水资源的影响 [J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(5): 885–895. [ZHANG Dongqi, XIAO Cunde, QIN Dahe. Himalayan glaciers fluctuation over the latest decades and its impact on water resources [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(5): 885–

- 895] DOI: 1000-0240(2009)05-0885-11
- [35] 施雅风, 黄茂桓, 姚檀栋, 等. 中国冰川与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 408-410. [SHI Yafeng, HUANG Maohuan, YAO Tandong, et al. Glaciers and their environments in China [M]. Beijing: Science Press, 2000: 408-410]
- [36] WANG Xin, LIU Shiyin, GUO Wanqin, et al. Using remote sensing data to quantify changes in glacial lakes in the Chinese Himalaya [J]. Mountain Research and Development, 2012, **32**(2): 203-212. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-11-00044.1
- [37] CEPII P, SCHERRER S C, FISCHER A M, et al. Revisiting Swiss temperature trends 1959-2008 [J]. International Journal of Climatology, 2010, **32**(2): 203-213. DOI: 10.1002/joc.2260
- [38] 游庆龙, 康世昌, 李剑东, 等. 青藏高原气候变化若干前沿科学问题[J]. 冰川冻土, 2021, **43**(3): 885-901. [YOU Qinglong, KANG Shichang, LI Jiandong, et al. Several research frontiers of climate change over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, **43**(3): 885-901] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0029
- [39] BARNETT T P, PIERCE D W, HIDALGO H G, et al. Human-induced changes in the hydrology of the western United States [J]. Science, 2008, **319**: 1080-1083. DOI: 10.1126/science.1152538
- [40] RAMANATHAN V, CARMICHAEL G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. Nature Geoscience, 2008, **1**: 221-227. DOI: 10.1038/ngeo156
- [41] BONASONI P, LAJ P, MARINONI A, et al. Atmospheric brown clouds in the Himalayas: First two years of continuous observations at the Nepal-Climate Observatory-Pyramid (5079 m) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**: 7515-7531. DOI: 10.5194/acp-10-7515-2010
- [42] 武丰民, 李文钊, 李伟. 北极放大效应原因的研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, **34**(3): 232-242. [WU Fengmin, LI Wenkai, LI Wei. Causes of Arctic amplification: A review [J]. Advances in Earth Science, 2019, **34**(3): 232-242] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2019.03.0232

Temperature Change in the Himalayas from 1961 to 2020 Based on ERA5-Land Data

HOU Xiaojing, DUAN Keqin*, SHI Peihong, CHEN Rong, DOU Mingyu

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: The Himalayas is sensitive to global climate change. Poor traffic accessibility in the Himalayas with unavailability in long-term field meteorological record in the region led to inadequacy in the scientific understanding of local climate change.

Based on high-resolution ERA5-Land data, this study examined its applicability in the Himalayas and analyzed temp-spatial variation of local temperature from 1961 to 2020.

(1) From 1961 to 2020, the overall temperature in the Himalayas increased at a rate of 0.13 °C/10a, since 1990, the warming rate had increased significantly to 0.20 °C/10a, with the most significant warming in autumn and winter.

(2) Spatially, the temperature rise on the northern slope of the Himalayas was higher than that on the southern slope, and the temperature rise in the eastern section of the Himalayas was faster than that in the western section. Warming caused the annual average 0 °C isotherm to rise by 100 m. The seasonal fluctuation of the 0 °C isotherm was distinct, with an increase of up to 161 m in autumn but only 70 m in spring.

(3) The vertical variation of temperature in the Himalayas was elevation-dependent, with the peak warming area in the middle and eastern sections arranged at an altitude of 4000 to 5500 m, while the peak warming area in the western section at an altitude of 3000 to 4000 m.

(4) From 1961 to 2020, the rapid reduction of snow cover area at the high-altitude sites in the Himalayas led

to a decrease in surface albedo and an increase in surface absorption of solar radiation, forming a positive feedback process of temperature increasing – albedo decreasing – temperature further increasing, which was an important reason for the significant warming at high-altitudes.

A comprehensive understanding of the temporal and spatial evolution of temperature in the high-altitude Himalayas is conducive to dealing with environmental problems caused by global warming and policy making.

Key words: Himalayas; temperature changes; ERA5-Land; 0 °C isotherm; elevation-dependent warming

(责任编辑 李嵘)

“1·22”镇雄滑坡：云南省镇雄县 2024 年 1 月 22 日发生的冬季灾难性滑坡

(陈宁生, 长江大学)

镇雄位于云南省东北部、云贵高原乌蒙山北麓, 云、贵、川三省交接处, 历史悠久, 被称为“大雄古邦”。境内群山起伏, 沟壑纵横, 道路崎岖, 灾害频繁, 是云南省受冰冻灾害最重的地区之一。“1·22”滑坡造成了 44 人死亡的重大生命财产损失, 是近年来镇雄县在冬季发生的第三起灾难性滑坡, 这引发了我们对该地区冬季灾难性滑坡频发的思考, 冻胀效应是否可能成为冬季滑坡触发的“最后一根稻草”? 在现场应急调查的基础上, 我们探讨了镇雄滑坡的特点和成因, 以期实现对冬季滑坡发育的新认识。

详见本期《云南镇雄“1·22”山体滑坡灾害调查》一文。