青藏高原1961~2020年气温和降水变化特征 分析

刘 锐,刘 旋,刘丽婷

青海师范大学地理科学学院, 青海 西宁

收稿日期: 2025年5月20日; 录用日期: 2025年7月14日; 发布日期: 2025年7月23日

摘要

基于青藏高原1961~2020年的逐月气温和降水栅格数据,采用气候倾向率法、滑动平均法等方法,系统 分析了近60 a来青藏高原气候变化的时空分布特征。结果表明:1)1961~2023年青藏高原降水总体呈显 著增加趋势,速率为5.05 mm/10a,空间上由东南向西北递减,气候倾向率在-23.55~31.47 mm/10a 之间,同时降水量在垂直梯度上具有明显的海拔分异性。小波分析揭示降水存在36 a主周期和10~15 a 副周期,表现为典型的多尺度波动特征。2)四季降水量均呈上升趋势,以春季最为显著(2.77 mm/10a), 夏季为主要降水期(占全年58.42%),冬季最少(仅占3.95%)。季节分配不均,各季降水空间分布与年降 水一致,表现为东南高、西北低。3)年均气温显著上升,速率为0.22℃/10a,空间上东南较高、中西部 较低。气候倾向率介于0.01~0.39℃/10a之间,气温随海拔升高明显降低,<2500 m区年均气温为 17.88℃,>4500 m区降至-7.6℃,呈现典型的垂直递减特征。小波分析显示气温存在28 a主周期和8~10 a副周期,周期性升温波动明显。4)四季平均气温均升高,冬季最显著(0.32℃/10a),升温空间分布异 质性明显,东南部升幅高于中西部及西北高海拔区。

关键词

青藏高原,气温,降水,时空分布,周期特征,垂直梯度

Analysis of the Variation Characteristics of Temperature and Precipitation on the Qinghai-Xizang Plateau from 1961 to 2020

Rui Liu, Xuan Liu, Liting Liu

School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining Qinghai

Received: May 20th, 2025; accepted: Jul. 14th, 2025; published: Jul. 23rd, 2025

Abstract

Based on the monthly temperature and precipitation grid data of the Plateau from 1961 to 2020, the spatio-temporal distribution characteristics of climate change on the Qinghai-Xizang Plateau over the past 60 years were systematically analyzed using methods such as the climate trend rate method and the moving average method. The results show that: 1) From 1961 to 2023, the precipitation on the Oinghai-Xizang Plateau has generally shown a significant increasing trend, with a rate of 5.05 mm/10a. Spatially, it decreases from southeast to northwest, and the climate trend rate ranges from -23.55 to 31.47 mm/10a. Meanwhile, the precipitation shows obvious altitude differentiation in the vertical gradient. Wavelet analysis reveals that the precipitation has a main cycle of 36 years and a secondary cycle of 10 to 15 years, demonstrating typical multi-scale fluctuation characteristics. 2) The precipitation in all four seasons shows an upward trend, with the most significant increase in spring (2.77 mm/10a). Summer is the main precipitation period (accounting for 58.42% of the annual total), while winter has the least precipitation (only 3.95%). The seasonal distribution is uneven, and the spatial distribution of precipitation in each season is consistent with the annual precipitation, showing a pattern of high in the southeast and low in the northwest. 3) The annual average temperature has significantly increased, with a rate of 0.22°C/10a. Spatially, it is higher in the southeast and lower in the central and western regions and the high-altitude areas in the northwest. The climate trend rate ranges from 0.01 to 0.39°C/10a. The temperature decreases significantly with increasing altitude. The annual average temperature in the < 2500 m area is 17.88°C, while it drops to -7.6° C in the > 4500 m area, showing a typical vertical decreasing feature. Wavelet analysis indicates that the temperature has a main cycle of 28 years and a secondary cycle of 8 to 10 years, with obvious periodic warming fluctuations. 4) The average temperature in all four seasons has increased, with the most significant increase in winter (0.32°C/10a). The spatial distribution of warming is heterogeneous, with a higher increase in the southeast than in the central and western regions and the high-altitude areas in the northwest.

Keywords

Qinghai-Xizang Plateau, Temperature, Precipitation, Spatio-Temporal Distribution, Periodic Characteristics, Vertical Gradient

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC O Open Access

1. 引言

气候变化是当前全球最受关注的环境问题之一,气温与降水的变化是其最直接的表现形式[1]。IPCC 第6次评估报告显示,2011~2020年的全球表面温度比1850~1900年高1.09℃[2]。青藏高原是全球海拔 最高的地貌单元,平均海拔超过4000m,生态系统脆弱[3][4]。同时作为我国气候变化的启动区和全球 气候变化的重要指示区,气候变化特征及趋势已成为研究热点[5][6]。

近年来,国内外学者围绕气温和降水量的时空变化开展了广泛研究。在时空特征方面,基于地面观 测数据表明青藏高原呈现显著增温和降水增加趋势,气温呈"南高中低"格局,降水则表现为"东南高、 西北低"的分布特征,其中夏季为主要降水期[7]-[10]。在气候变化阶段性特征与区域差异方面,研究发 现高原气候在 20 世纪 80 年代中期发生从"暖干"向"暖湿"的跃变,东南部呈现明显的"变暖变湿"趋 势,湿度变化与海拔高度密切相关[11] [12]。

为更精确刻画气候变化特征,遥感反演、气候模型和多源数据融合等方法广泛应用于气候变化研究。 例如,TRMM数据与克里金插值法联合揭示了降水的东南-西北递减格局[13];GCM模型的应用有助于 预测未来气候变化趋势,并揭示其对区域水文循环的重要影响[14]。值得注意的是,近年来越来越关注升 温与水循环变化的耦合关系,发现气候变化对水循环系统产生深远影响[15][16]。段安民等[17]指出,高 原增温加速了积雪和冰川的消融,引发区域热源减弱和降水量增加。吴绍洪等[18]研究进一步证实,近 30 年来青藏高原整体呈现增温增湿趋势。青藏高原作为我国生态安全屏障,是冻土、冰川与雪山集中分布 的核心区域,其生态环境关系到我国乃至全球的生态系统可持续发展[19][20]。高原以农牧业结合为主导, 气候要素的波动变化,也对农牧业生产和居民生活构成挑战[21]。因此,本文基于 1961~2020 年气温与降 水栅格数据,系统分析其年及四季变化的时空分布特征,以期为高原地区应对气候变化与可持续发展提 供科学依据。

2. 数据来源和研究方法

2.1. 研究区概况

如图 1 所示,位于我国西南部的青藏高原地域广袤,面积为 2.57 × 10⁶ km²,占我国陆地总面积的四 分之一以上。其平均海拔 4000 m 以上,作为世界上平均海拔最高的高原,被称之为"世界屋脊"[3][4]。 青藏高原气候呈现低温、强辐射、降水稀少、气压低、冰冻期长,蒸发量远大于降雨量,昼夜温差大而年 际温差小、有效积温不足的特点[22][23]。作为"亚洲水塔",青藏高原是亚洲众多大江大河的发源地, 同时本身又存在着大量冰川、积雪与湖泊,承担着"存储池"的功能[24]。





Figure 1. Overview map of the study area 图 1. 研究区概况图

2.2. 数据来源及预处理

1) DEM 数据:数字高程模型数据(DEM)来源于地理空间数据云(<u>https://www.gscloud.cn/</u>)中的 SRTMDEMUTM 90 m 分辨率数字高程数据产品。

2) 气象要素数据:降水与气温数据来源于国家地球系统科学数据中心(<u>http://www.geodata.cn</u>)彭守彰 [25]发布的 1901~2023 年中国 1 km 分辨率逐月降水数据集和 1901~2023 年中国 1 km 分辨率逐月气温数 据集。本文选取的时间为 1960 年 3 月~2021 年 2 月。

3)数据的预处理:本研究基于 1961~2020 年逐月气温与降水的 NetCDF (.nc)格式栅格数据(空间分辨率 1 km),在 MATLAB 中完成数据格式转换与初步处理。具体步骤如下:首先,使用 ncread 函数提取气温(tmp)与降水(pre)变量,并构建 WGS84 (EPSG:4326)地理参考对象,利用 geotiffwrite 将每年每月的数据 保存为.tif 格式。转换过程中统一将缺失值(-32768)替换为 NaN,并调整数据维度方向以符合 GIS 规范。所有转换文件保存至指定目录。其次,在 ArcGIS Pro 中采用青藏高原矢量边界对气温、降水和 DEM 栅格进行掩膜提取,去除边缘异常区域。同时统一空间分辨率与投影,确保数据空间一致性。再次,整理 得到 1961~2020 年完整年度和季度序列数据,并划分为四个滑动时间段: 1961~1990 年、1971~2000 年、1981~2010 年、1991~2020 年,用于阶段性变化分析。最后,对处理结果进行质量控制,剔除含 NaN 的无效像元,确保参与趋势、小波等分析的数据具备时序连续性。整体处理保持了青藏高原主体区域的代表性,保证了分析结果的科学性和可靠性。

2.3. 研究方法

1) 气候倾向率法

气候要素数据与时间序列的倾向率(X),一般采用一元线性方程来表示,其公式如下:

$$X = a_0 + a_1 t \left(t = 1, 2, \dots, n \right)$$
(1)

式中: *a*₀为一元线性方程的截距; *a*₁为斜率,即线性趋势项; *t*表示时间序列。一般将 *a*₁的值放大 10 倍 来表示气候倾向率[26]。

2) 滑动平均法

滑动平均法是指在一个长序列的逐年数据中,通过顺序逐期增减求算移动平均值。对样本量为 n 的 序列 x,其滑动平均序列的公式如下:

$$\overline{x}_{j} = \frac{1}{k} \sum_{i=j}^{j+k-1} X_{i}, (j = 1, 2, \cdots, n-k+1)$$
(2)

式中, x, 为平滑后的时间序列; X, 为原始时间序列; n 为样本总量; k 为滑动长度[27]。

3) 海拔分区统计分析法

为探讨气候要素在垂直方向的变化规律,借助 ArcGIS 对青藏高原 DEM 数据进行重分类,按海拔每500 m 为间隔划分为 8 个高程区间。在此基础上,利用 "Zonal Statistics"工具对不同海拔区间内的多年 平均气温和降水量进行统计分析,揭示气候要素在垂直梯度上的分布特征[28]。

4) Morlet 小波分析法

基于傅里叶变换原理,利用一簇具有震荡性且迅速衰减的小波函数系逼近时间序列的变量 X,以提取其小波系数和方差积分,进而放大得到气温和降水周期性规律。利用 Matlab 和 Origin 软件进行 Morlet 小波分析以诊断气温和降水的周期性。小波函数描述为:

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{\infty} \left| W_f(a,b) \right|^2 \mathrm{d}b \tag{3}$$

式中: $W_f(a,b)$ 为小波变换系数; a为尺度因子; b为平移因子; t为时间; $\overline{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的共轭 函数。将小波系数的平方值在b域上积分,就可得到小波方差,即:

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{\infty} \left| W_f(a,b) \right|^2 \mathrm{d}b \tag{4}$$

小波方差可识别各种尺度的震荡强弱和周期变化特征, 波峰对应的时间尺度为周期, 方差值越大, 表明对应尺度的周期越明显[29]。

3. 结果与分析

3.1. 青藏高原 1961~2020 年降水量的时空分布

3.1.1. 多年降水量的时空分布

对青藏高原 1961~2020 年多年平均降水的年际变化进行分析,由图 2(a)所示,多年年均降水量为 365.36 mm,最高年降水量为 1998 年的 407.2 mm,最低年降水量为 1994 年的 309.7 mm。年降水量的气



Figure 2. The temporal variation of annual precipitation on the Qinghai-Xizang Plateau (a: 60-year average annual precipitation variation time series; b: Annual average precipitation anomaly variation over 60 years **图 2.** 青藏高原年降水量时间变化情况(a: 60 a 逐年年均降水量变化时间序列; b: 60 a 年年均降水量距平变化)



Figure 3. The spatial distribution of annual precipitation and its climate tendency rate on the Qinghai-Xizang Plateau (a: Annual precipitation; b: Climate propensity rate)

图 3. 青藏高原年降水量及其气候倾向率的空间分布(a: 年降水量; b: 气候倾向率)

候倾向率为 5.05 mm/10a,呈现增加趋势。从图 2(b)年降水量距平变化来看,湿润年份居多。

如图 3(a)所示,青藏高原的年均降水呈现从东南向西北逐渐递减的空间格局。降水倾向率的范围位 于-23.55~31.47 mm/10a 之间,高原大部分区域降水量趋于增加,而横断山脉、冈底斯山及柴达木盆地西 南缘局地则呈现下降趋势,反映出区域响应的空间异质性(图 3(b))。

3.1.2. 多年降水量周期变化特征分析

图 4 利用 Morlet 小波分析,分析了青藏高原 1961~2020 年平均降水量的周期性,得出存在两个时间 尺度的周期变化规律,在 56a 尺度下,其周期为 36a,且表现为清晰的冷暖交替 5 次震荡;在 24a 尺度 下,其周期为 10~15a 之间,表现为模糊的 9 次震荡。



Figure 4. Analysis of the Periodic Variation characteristics of the Multi-year Average Precipitation on the Qinghai-Xizang Plateau from 1961 to 2020 (a: Variance graph; b: Real part diagram; c: First Time scale; d: The second time scale) **图 4.** 青藏高原 1961~2020 年多年平均降水量周期变化特征分析(a: 方差图; b: 实部图; c: 第一时间尺度; d: 第二时间尺度)

3.1.3. 四个时期多年平均降水量的时空分布

将 1961~2020 年按 30 年滑动划分为四个时期。如图 5 所示,年均降水量在各阶段均呈增加趋势,增 长幅度在 1991~2020 年最为显著,为 7.88 mm/10a,反映出近 30 年高原湿润化进程加快的特征。空间上, 如图 6 所示,各阶段高原的降水分布格局大致相同,均表现出东南高、西北低的空间格局。东南部局地 降水量超过 800 mm,藏北高原、柴达木盆地及昆仑山周边降水不足 200 mm,体现出明显的空间异质性。

3.1.4. 多年降水量的垂直梯度变化

根据海拔 500 m 的间隔将青藏高原划分为 8 个区间, 对各海拔区间的多年降水量的平均值和面积占比 进行统计分析(图 7)。结果表明, 高原降水呈现显著的海拔分异特征, 表现为低海拔地区降水显著高于高



海拔地区,呈单峰型分布,在3500~4000 m 区间达到峰值,近似正态分布。尽管海拔 < 2500 m 的区域仅 占高原总面积的 2.46%,但是降水量可达 2781.77 mm。海拔 > 4500 m 的区域面积占比达 55.69%,降水却

Figure 5. The interannual variation of the multi-year average precipitation on the Qinghai-Xizang Plateau from 1961 to 2020 in different time periods (a: 1961~1990; b: 1971-2000; c: 1981-2010; d: 1991-2020)

图 5. 青藏高原 1961~2020 年多年平均降水量在不同时段内的年际变化(a: 1961~1990 年; b: 1971~2000 年; c: 1981~2010 年; d: 1991~2020 年)



DOI: 10.12677/ag.2025.157096



Figure 6. The spatial distribution of the multi-year average precipitation on the Qinghai-Xizang Plateau from 1961 to 2020 in different time periods (a: 1961-1990; b: 1971-2000; c: 1981-2010; d: 1991-2020)

图 6. 青藏高原 1961~2020 年多年平均降水量在不同时段内的空间分布(a: 1961~1990 年; b: 1971~2000 年; c: 1981~2010 年; d: 1991~2020 年)





不足 600 mm,显示高原降水主要集中在东南部低海拔地区,而广阔的高海拔区域则普遍干旱。尤其是>5000 m 区域,占比达 24.05%,但年均降水仅为 232.74 mm,反映出强烈的"面积 - 降水"不对称特征。

3.2. 青藏高原 1961~2020 年降水量的季节分布

3.2.1. 多年降水的季节分布

从图 8 降水的季节变化上,1961~2020 年青藏高原四季平均降水量均呈现上升趋势,季节变化特征 明显,其中春季增幅最显著(2.77 mm/10a),夏季和秋季次之,分别为 1.31 mm/10a 和 0.72 mm/10a,冬季 增幅最小,仅为 0.23 mm/10a,均低于年均降水量增长速率,表明各季节降水增加幅度有限。

如图9所示,高原四季降水空间分布格局与多年平均降水一致,均呈现东南多、西北少的格局。春、夏、冬季中东部降水较多,秋季则以高原中部为主。

3.2.2. 多年降水量的四季降水比例

如图 10 所示, 1961~2020 年青藏高原季节降水分配显著不均。夏季(6~8 月)降水最为集中,占全年总 降水量的 58.42%。冬季(12~2 月)降水最少,仅占 3.95%。春季和秋季的降水较少占比分别为 16.79%和 20.84%,其中秋季略高于春季。



Figure 8. The anomaly variation trend of the average annual precipitation in each of the four seasons (a: Spring; b: Summer; c: Autumn; d: Winter)

图 8. 四季逐年平均降水量距平变化趋势(a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季)



DOI: 10.12677/ag.2025.157096



Figure 9. The spatial distribution of the average annual precipitation in the four seasons on the Qinghai-Xizang Plateau (a: Spring; b: Summer; c: Autumn; d: Winter)

图 9. 青藏高原四季年均降水量的空间分布(a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季)



Figure 10. The proportion of seasonal precipitation in the multi-year average precipitation

图 10. 多年平均降水量的四季降水比例

3.3. 青藏高原 1961~2020 年气温的时空分布

3.3.1. 多年气温的时空分布

对 1961~2020 年青藏高原多年平均气温的年际变化进行分析,图 11(a)所示,年均气温为-2.7℃。其中,1967 年最低(-3.67℃),2009 年最高(-1.69℃)。年气温的气候倾向率为 0.22℃/10a,呈显著上升趋势。 从年气温距平变化来看,如图 11(b)所示,偏暖年份居多,距平值为-0.97~1.01℃,总体呈增加趋势。

从空间分布上看(图 12(a))高原多年平均气温呈现出东南较高,中西部较低的分布格局。气温变化(图 12(b))显示,气温倾向率为 0.01~0.39℃/10a,整体呈上升趋势。升温速率较高的区域集中于冈底斯山以北、 昆仑山以北及喀喇昆仑山以北,速率最高达 0.39℃/10a;而升温较缓的区域分布在念青唐古拉山以南、横 断山脉以南、青海东部及祁连山附近。整体来看,温度较低的地区升温更快,而温度较高地区升温趋势 相对较缓。



Figure 11. The temporal variation of annual temperature on the Qinghai-Xizang Plateau (a: 60 a annual average change time series; b: Annual average temperature anomaly variation over 60 years)
图 11. 青藏高原年气温时间变化情况(a: 60 a 逐年年均值变化时间序列; b: 60 a 年年均气温距平变化)



Figure 12. The spatial distribution of annual temperature and its climate tendency rate on the Qinghai-Xizang Plateau (a: Annual temperature; b: Climate propensity rate)

图 12. 青藏高原年气温及其气候倾向率的空间分布(a:年气温;b:气候倾向率)

3.3.2. 多年气温周期变化特征分析

图 13 利用 Morlet 小波分析,分析了青藏高原 1961~2020 年平均气温的周期性,得出存在两个时间 尺度的周期变化规律,在 44a 尺度下,其周期为 28a,且表现为清晰的冷暖交替 5 次震荡;在 13a 尺度 下,其周期为 8~10a 之间,表现为模糊的 14 次震荡。

3.3.3. 四个时期多年平均气温的时空分布

如图 14 所示,四个时期青藏高原年平均气温均呈上升趋势,1981~2010 年增幅最大,为0.40℃/10a。 从多年年均气温的变化来看,其中1991~2020 年年均气温最高(-3.02℃),1961~1990 年最低(-2.88℃),说 明高原气温整体逐年升高。 如图 15 所示,空间上各阶段格局基本一致,呈东南较高,中西部较低的特征。高原气温较高区主要 位于东南部,如念青唐古拉山东南、横断山脉附近,柴达木盆地等地。中西部为气温较低区。极低区则 集中在祁连山南侧、唐古拉山、昆仑山、冈底斯山及喀喇昆仑山等高海拔地区。整体上,气温空间分布 受地形和地理位置影响显著,东南相对温暖,高海拔中西部偏冷。



Figure 13. Analysis of the Periodic Variation characteristics of the Multi-year Average temperature on the Qinghai-Xizang Plateau from 1961 to 2020 (a: Variance graph; b: Real part diagram; c: First Time scale; d: The second time scale) 图 13. 青藏高原 1961~2020 年多年平均气温周期变化特征分析(a: 方差图; b: 实部图; c: 第一时间尺度; d: 第二时间尺度)





Figure 14. The interannual variation of the multi-year average temperature on the Qinghai-Xizang Plateau from 1961 to 2020 in different periods (a: 1961-1990; b: 1971-2000; c: 1981-2010; d: 1981-2020) **图 14.** 青藏高原 1961~2020 年多年平均气温在不同时期内的年际变化(a: 1961~1990 年; b: 1971~2000 年; c: 1981~2010



Figure 15. The spatial distribution of the multi-year average temperature on the Qinghai-Xizang Plateau from 1961 to 2020 in different periods (a: 1961-1990; b: 1971-2000; c: 1981-2010; d: 1991-2020) 图 15. 青藏高原 1961~2020 年多年平均气温在不同时期内的空间分布(a:1961~1990 年;b:1971~2000 年;c:1981~2010 年; d: 1991~2020 年)

3.3.4. 多年气温的垂直梯度变化

如图 16 所示,将青藏高原划分为 8 个海拔区间后发现,气温和面积分布随海拔变化呈现出显著的分 异特征。总体上,气温随海拔升高显著下降,符合气温垂直递减率规律。海拔 < 2500 m 的区域气温最高 (达 17.88℃),但面积仅占高原总面积的 2.46%; 3500~4000 m 区间气温接近 0℃ (-0.01℃),为气候过渡 带;海拔 >4500 m 区域占比达 55.69%,气温降至-7.6℃,寒冷严酷,生存与开发条件极差,体现出高原 "低海拔承载生物活动、高海拔为寒冷荒漠"的地理特征。



Figure 16. The temperatures within different altitude ranges and their corresponding area proportions 图 16. 不同海拔区间范围内的气温及其相应的面积占比

3.4. 青藏高原 1961~2020 年气温的季节分布

从图 17 可见,青藏高原四季平均气温均呈上升趋势,倾向率分别为春季 0.21℃/10a、夏季 0.17℃/10a、 秋季 0.20℃/10a、冬季 0.32℃/10a。其中冬季升温最显著,增速高于年均气温(0.22℃/10a);春秋两季与年 均气温增速接近;夏季增速最低,略低于年均水平。

如图 18 所示,空间上青藏高原的四季平均气温呈东南较高,中西部较低,西北部极低的格局,分布特征基本一致。气温较高区域集中在东南部,如念青唐古拉山东南,横断山脉附近,柴达木盆地及昆仑山西北部。中西部气温较低;极低气温区主要位于西北部、祁连山南侧、冈底斯山及唐古拉山周边地区。





Figure 17. The variation trend of the average temperature anomaly year by year in the four seasons (a: Spring; b: Summer; c: Autumn; d: Winter)



图 17. 四季逐年平均气温距平变化趋势(a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季)



图 18. 青藏高原四季年均气温的空间分布(a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季)

4. 讨论与结论

4.1. 讨论

1) 气候变化背景下气温和降水变化的成因和特征

1961~2020 年青藏高原年均气温显著升高,升温速率达 0.22℃/10a,高于全球平均水平(0.12℃/10a), 略低于我国平均水平(0.278℃/10a) [30]。分期来看,1981~2010 年升温尤为显著,呈现出"高原增温放大 效应",且全球高山地区普遍存在随海拔升高而升温增强的趋势[31],其中青藏高原作为"世界屋脊", 大气稀薄、低气压的结构,对太阳短波和地表长波辐射响应显著(Wu et al.) [32]。此外,地表反照率变化 是另一关键驱动因素。近几十年来冰川与积雪显著退缩,导致地表反照率降低,太阳辐射吸收增加,从 而加速升温[33]。同时,在高原干燥的大气环境与低水汽背景下,温室气体的保温效应在青藏高原更为突 出,也加剧了升温(Zhao, Z., et al.) [34]。此外,气温随海拔升高而递减的垂直分异特征也得到验证。在季 节变化中,本研究发现冬季增温最显著与吴成启等[7]所示冬季增温(0.35℃/10a)高度吻合,进一步证实了 青藏高原冬季变暖尤为突出。

1961~2020年,青藏高原年均降水量呈显著增加趋势,气候倾向率为 5.05 mm/10a,与冀钦等[35]的 研究结果基本一致,尤其在 1991~2020 年增幅最显著。作为"亚洲水塔",青藏高原降水受多重水汽来 源影响,主要包括西风环流、东亚季风、南亚季风及高原内部蒸散发[36]。全球变暖背景下,高原地区气 温升高增强了水分蒸发能力,大气水汽含量上升,更有利于降水的形成。同时,作为亚洲季风系统的交 汇区,高原受印度季风和西南季风共同作用,更强的水汽输送推动降水增加[37] [38]。

2) 青藏高原暖湿化的多维度生态效应

过去 50 年,气温升高导致冰川退缩,进而使高原众多湖泊面积扩大,水位上升[39]。姚檀栋等[40]指 出,短期内冰川退缩可增强径流补给,但长期来看,可能造成以冰川融水补给为主的中小支流面临干涸 的风险。同时暖湿化显著改变了极端气候事件的发生频率与强度。一方面,极端高温事件持续增多,对 高原生态系统造成直接胁迫[41]。在生态系统层面,暖湿化显著影响区域生态系统的空间分布格局和结构 功能,随着暖湿化进程,促进了灌丛、草地及湿地的边界向高海拔及西部扩展[42]。而且有研究表明暖湿 化有利于提高草地 NEP,增强碳汇功能。但气温和降水对 NEP 影响存在区域差异,升温对草地 NEP 的 效应略强于降水,也体现了青藏高原生态系统对气候变化的敏感性响应[43]。Guo 等[44]通过实地实验发 现,青藏高原暖湿化显著提高了高寒草地的地上净初级生产力(ANPP),但早春土壤增温可能部分抵消生 长季变暖带来的正效应,表明生态响应存在季节性差异。Gao 等[45]基于模拟研究预测,至本世纪末,青 藏高原的净初级生产力(NPP)将增加 79%至 134%,但区域间存在显著差异,东南部增幅较大,西北部相 对较小,反映出暖湿化效应的空间异质性。

对于农业生产而言,青稞是青藏高原主要粮食作物,气候暖湿化趋势为青稞生长提供了更多热量和 水分资源,显著提升了生产潜力。降水是决定青稞生长期及关键生长期产量的主导因子,气温次之[46]。 然而,暖湿化也带来潜在风险。一方面,气温升高有利于病虫害越冬,增加虫害发生率;不利气象条件 如连续降水、高温与日照不足则易诱发条锈病,威胁青稞生长[47][48]。另一方面,持续升温可能缩短生 育期,推动种植界限向高纬度、高海拔地区延伸,虽拓展了潜在耕作区,但对品种选育与粮食安全提出 更高要求[49][50]。

4.2. 结论

1) 1961~2020 年青藏高原年降水显著增加,速率为 5.05 mm/10a。空间上呈东南多、西北少格局。年降水量气候倾向率在-23.55~31.47 mm/10a 之间,降水变化在高原大部分地区以增加为主,尤以 1991~2020 年的增幅最大(7.88 mm/10a),但横断山脉、冈底斯山周边及柴达木盆地西南局部降水略减。降水随海拔上升显著递减,<2500 m 区年降水高达 2781.77 mm,>4500 m 区仅 562.32 mm。多年降水在 36 年(56 a 尺度)和 10~15 年(24 a 尺度)两个时间尺度上呈现周期变化,前者表现出 5 次清晰震荡,后者为 9 次模糊震荡。

2) 四季降水均上升,以春季最显著(2.77 mm/10a),但季节间分布不均,夏季占全年 58.42%,冬季仅 3.95%。空间格局仍为东南高、西北低。

3) 1961~2020 年青藏高原年均气温显著升高, 气候倾向率为 0.22℃/10a。气温倾向率为 0.01℃~0.39℃/10a, 冈底斯山、昆仑山及喀喇昆仑山以北增速最快(最高 0.39℃/10a)。整体呈东南较高, 中西部较低的格局。四个阶段中 1981~2010 年升温最显著(0.40℃/10a)。气温随海拔升高递减, <2500 m 区最高(17.88℃), >4500 m 区最低(-7.6℃)。多年气温在 28 年(44 a 尺度)和 8~10 年(13 a 尺度)两个时间尺度上亦呈现周期性波动,分别对应 5 次明显和 14 次较弱震荡。

4) 四季平均气温均呈升高趋势,以冬季最显著(0.32℃/10a)。升温空间分布呈明显异质性,春季在西 北,夏季在北部,秋季集中于中部与西北局地,冬季以中部封闭区域最明显。整体升温幅度东南部高于 中西部和西北部高海拔区。

参考文献

- [1] 赵传成, 王雁, 丁永建, 等. 西北地区近 50 年气温及降水的时空变化[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 385-390.
- [2] 樊星,秦圆圆,高翔. IPCC 第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护, 2021, 49(Z2): 44-48.
- [3] 张镱锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. 地理研究, 2002(1): 1-8.
- [4] 李文华,赵新全,张宪洲,等. 青藏高原主要生态系统变化及其碳源/碳汇功能作用[J]. 自然杂志, 2013, 35(3): 172-178.
- [5] 龚成麒. 青藏高原分区式气候时空演变特征及未来多情景植被覆盖预测[D]: [硕士学位论文]. 宜昌: 三峡大学, 2023.
- [6] 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报, 1998(6): 633-636.
- [7] 吴成启, 唐登勇. 近 50 年来全球变暖背景下青藏高原气温变化特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 262-266, 272.
- [8] 王闯, 戴长雷, 宋成杰. 青藏高原气候变化的时空分布特征分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(9): 76-82.
- [9] 郝爱华, 薛娴, 尤全刚, 等. 青藏高原近 60 年降水变化研究进展[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2): 43-52.
- [10] 黄鹏, 胡洁, 边琼, 等. 1980-2019 年青藏高原降水时空变化特征分析[J]. 农业灾害研究, 2022, 12(8): 66-69.
- [11] Niu, T., Chen, L. and Zhou, Z. (2004) The Characteristics of Climate Change over the Tibetan Plateau in the Last 40 Years and the Detection of Climatic Jumps. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21, 193-203. <u>https://doi.org/10.1007/bf02915705</u>
- [12] 王朋岭, 唐国利, 曹丽娟, 等. 1981-2010 年青藏高原地区气温变化与高程及纬度的关系[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 4-10.
- [13] 齐文文, 张百平, 庞宇, 等. 基于 TRMM 数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征[J]. 地理科学, 2013, 33(8): 999-1005.
- [14] Bouregaa, T. and Fenni, M. (2014) Assessment of Inter-Seasonal Temperature and Precipitation Changes under Global Warming over Setif High Plains Region, Vulnerability and Adaptation. World Journal of Science, Technology and Sustainable Development, 11, 304-314. <u>https://doi.org/10.1108/wjstsd-05-2014-0005</u>
- [15] 柏玲. 气候变化对天山南坡典型流域径流过程的影响[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [16] 刘少华. 怒江上游流域水循环演变规律及其对气候变化的响应[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- [17] 段安民,肖志祥,吴国雄. 1979-2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 374-381.
- [18] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势[J]. 地理学报, 2005(1): 3-11.
- [19] 秦大河,周波涛,效存德.冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 869-879.
- [20] 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.
- [21] 韩国军, 王玉兰, 房世波. 近 50 年青藏高原气候变化及其对农牧业的影响[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1969-1975.
- [22] Xie, H. and Zhu, X. (2012) Reference Evapotranspiration Trends and Their Sensitivity to Climatic Change on the Tibetan

Plateau (1970-2009). Hydrological Processes, 27, 3685-3693. https://doi.org/10.1002/hyp.9487

- [23] 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.
- [24] 徐祥德, 董李丽, 赵阳, 等. 青藏高原"亚洲水塔"效应和大气水分循环特征[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2830-2841.
- [25] Peng, S., Ding, Y., Liu, W. and Li, Z. (2019) 1 km Monthly Temperature and Precipitation Dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, **11**, 1931-1946. <u>https://doi.org/10.5194/essd-11-1931-2019</u>
- [26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 37-39.
- [27] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001(1): 21-23.
- [28] 方修琦, 刘纪远. 地理信息系统原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [29] 张睿, 王乐扬, 曾春芬, 等. 1960-2022 年洞庭湖流域气温和降水时空演变特征[J/OL]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版): 1-11. <u>http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20241015.1502.002.html</u>, 2025-05-31.
- [30] 赵东升, 高璇, 吴绍洪, 等. 基于自然分区的 1960-2018 年中国气候变化特征[J]. 地球科学进展, 2020, 35(7): 750-760.
- [31] Pepin, N.C., Bradley, R.S., Diaz, H.F., et al. (2015) Elevation-Dependent Warming in Mountain Regions of the World. Nature Climate Change, 5, 424-430. <u>https://doi.org/10.1038/nclimate2563</u>
- [32] Wu, G., Duan, A. and Liu, Y. (2019) Atmospheric Heating Source Over the Tibetan Plateau and Its Regional Climate Impact. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science. <u>https://oxfordre.com/climatescience/view/10.1093/acrefore/9780190228620.001.0001/acrefore-9780190228620-e-588</u>
- [33] 郭辉. 第三极地区积雪反照率变化及其对近地表气温的影响[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [34] Zhao, Z., Li, X. and Liu, J. (2021) Elevation-Dependent Warming and the Role of Water Vapor on the Tibetan Plateau. Environmental Research Letters, 16, Article ID: 054021.
- [35] 冀钦,杨建平,陈虹举. 1961-2015 年青藏高原降水量变化综合分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1090-1099.
- [36] 叶立娟, 王文, 胡彦君, 等. 青藏高原水汽来源及其对降水变化的贡献[J]. 水科学进展, 2024, 35(6): 890-899.
- [37] Guo, W., Ma, Y., Liu, Y., et al. (2024) Quantitative Identification of Moisture Sources over the Tibetan Plateau: Spatial Distributions and Temporal Variabilities. *Journal of Climate*, 38, 263-276.
- [38] 郁万鑫. 青藏高原东北部大气降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源研究[D]: [硕士学位论文]. 烟台: 鲁东大学, 2023.
- [39] 李治国. 近 50a 气候变化背景下青藏高原冰川和湖泊变化[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1431-1443.
- [40] 姚檀栋,姚治君.青藏高原冰川退缩对河水径流的影响[J].自然杂志,2010,32(1):4-8.
- [41] 吴国雄,段安民,张雪芹,等. 青藏高原极端天气气候变化及其环境效应[J]. 自然杂志, 2013, 35(3): 167-171.
- [42] 欧阳志云, 张观石, 应凌霄. 气候变化对青藏高原生态系统分布范围和生态功能的影响研究进展[J]. 气候变化 研究进展, 2024, 20(6): 699-710.
- [43] 耿垭鑫,易桂花,张廷斌,等.青藏高原气候变化对草地碳汇/源格局的影响[J]. 自然资源学报, 2024, 39(5): 1208-1221.
- [44] Guo, L., Chen, J., Luedeling, E., He, J., Cheng, J., Wen, Z., et al. (2018) Early-Spring Soil Warming Partially Offsets the Enhancement of Alpine Grassland Aboveground Productivity Induced by Warmer Growing Seasons on the Qinghai-Tibetan Plateau. Plant and Soil, 425, 177-188. <u>https://doi.org/10.1007/s11104-018-3582-0</u>
- [45] Gao, Q., Guo, Y., Xu, H., Ganjurjav, H., Li, Y., Wan, Y., et al. (2016) Climate Change and Its Impacts on Vegetation Distribution and Net Primary Productivity of the Alpine Ecosystem in the Qinghai-Tibetan Plateau. Science of the Total Environment, 554, 34-41. <u>https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.131</u>
- [46] 赵雪雁, 王伟军, 万文玉, 等. 近 50 年气候变化对青藏高原青稞气候生产潜力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1329-1338.
- [47] 张戈丽, 欧阳华, 周才平, 等. 近 50 年来气候变化对西藏"一江两河"地区农业气候热量资源的影响[J]. 资源科 学, 2010, 32(10): 1943-1954.
- [48] 袁雷, 刘依兰. 基于 GIS 和气候-土地利用信息的西藏青稞种植适宜性区划[J]. 中国农学通报, 2017, 33(17): 92-97.
- [49] 马伟东. 气候变化对青藏高原青稞种植的影响评估[D]: [博士学位论文]. 西宁: 青海师范大学, 2022.
- [50] 郝帅, 宋艳玲, 孙爽, 等. 气候变化对青藏高原青稞生产影响的研究综述[J]. 中国农业气象, 2023, 44(5): 398-409.