

1980~2024年门源地区极端气温指数对青稞不同生长时期的影响

豆青芳¹, 刘金青^{2*}, 黎永鹏¹, 马晓贤¹

¹门源县气象局, 青海 门源

²果洛州气象局, 青海 果洛

收稿日期: 2026年4月23日; 录用日期: 2026年5月22日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

为揭示极端气温与青稞产量构成因子之间的动态关联机制, 同时为门源地区极端气温指数在不同生长阶段的具体阈值、作用方向及相对贡献进行定量评估, 基于门源国家基本气象站1980~2024年逐日气温数据, 使用气候诊断法、M-K突变检验等方法, 分析极端气温变化对当地青稞生长发育及产量的影响。结果表明: 霜日日数(FD)长期递减、冷夜日数(TN10P)波动减小, 突变点分别为2002年、2001年; 暖日持续指数(WSDI)振荡显著, 2011年、2013年、2020年为突变点且2020年后突变加剧; 夏日日数(SU)波动增大(2000年突变), 暖昼日数(TX90P) 1997年前波动减小、后波动增大(2001~2002年突变, 2002年后更显著); FD中位数约220, 数据分布范围最大且存在高值离群点。极端气温指数对青稞营养生长期(播种期、出苗期、三叶期)波动影响显著, 分蘖期较稳定; 生殖生长期孕穗期波动与FD变化相关, 乳熟-成熟期波动平缓, 千粒重与成穗率变化一致。FD、TN10P与多数青稞物候期呈正相关, 与结实粒数显著负相关; TX90P、SU、WSDI与各物候期呈负相关, 其中TX90P、SU与结实粒数显著正相关。

关键词

青稞, M-K检验法, 极端气温指数, 时空特征, 生长时期

The Effect of Extreme Temperature Index on Different Growth Periods of Highland Barley in Menyuan Area from 1980 to 2024

Qingfang Dou¹, Jinqing Liu^{2*}, Yongpeng Li¹, Xiaoxian Ma¹

¹Menyuan County Meteorological Bureau, Menyuan Qinghai

²Guoluo Meteorological Bureau, Guoluo Qinghai

Received: April 23, 2026; accepted: May 22, 2026; published: May 28, 2026

*通讯作者。

文章引用: 豆青芳, 刘金青, 黎永鹏, 马晓贤. 1980~2024年门源地区极端气温指数对青稞不同生长时期的影响[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(3): 616-626. DOI: 10.12677/ccrl.2026.153067

Abstract

In order to reveal the dynamic correlation mechanism between extreme temperature and yield components of highland barley, and to quantitatively evaluate the specific threshold, action direction and relative contribution of extreme temperature index at different growth stages in Menyuan area, based on the daily temperature data of Menyuan National Basic Meteorological Station from 1980 to 2024, the effects of extreme temperature changes on the growth and yield of local highland barley were analyzed by using climate diagnosis method and M-K mutation test. The results showed that the number of frost days (FD) decreased for a long time, and the fluctuation of cold night days (TN10P) decreased, and the mutation points were 2002 and 2001, respectively. The warm day duration index (WSDI) oscillates significantly, with 2011, 2013 and 2020 as the mutation points and the mutation is intensified after 2020. The fluctuation of summer days (SU) increased (abrupt change in 2000), and the fluctuation of warm days (TX90P) decreased before 1997 and increased after 1997 (abrupt change in 2001~2002, more significant after 2002). The median of FD is about 220, and the data distribution range is the largest and there are high-value outliers. The extreme temperature index had a significant effect on the fluctuation of the nutritional growth period (sowing period, seedling stage and three-leaf stage) of highland barley, and the tillering stage was relatively stable. The fluctuation of booting stage in reproductive growth period was related to the change of FD, and the fluctuation of milk maturity-maturity stage was gentle, and the change of 1000-grain weight was consistent with that of panicle rate. FD and TN10 P were positively correlated with most phenophases of highland barley, and negatively correlated with the number of grains. TX90P, SU and WSDI were negatively correlated with each phenophase, and TX90P and SU were significantly positively correlated with the number of grains.

Keywords

Highland Barley, M-K Test Method, Extreme Temperature Index, Space-Time Characteristics, Growth Period

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

在全球气候变暖背景下, 极端气温事件呈增多、增强趋势, 高寒农区对极端气温的响应尤为敏感[1]。青稞作为青藏高原特色主粮作物, 其产量稳定性直接影响区域粮食安全与农牧民生计[2]。门源县位于青海高原东北部, 平均海拔约 2850 m, 是青稞优势产区之一, 但生长季短、积温有限、霜冻和高温等极端气温事件频发, 使青稞生产面临严峻的气候风险[3] [4]。

已有研究表明, 青藏高原青稞全生育期平均气温、最低气温和 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 有效积温均呈显著上升趋势, 其中门源站最低气温升温幅度超过 $0.70^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 有效积温增加高达 $90.64^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 导致生育期整体缩短[3]。分阶段来看, 播种 - 出苗期温度升高有利于提早出苗, 但门源 4 月极端低温事件仍频繁, 霜冻灾害占当地气象灾害的 53%, 播期提前反而增加终霜冻风险[4]; 出苗 - 抽穗期是青稞对温度最敏感的阶段, 5 月平均气温每升高 1°C 产量增加 $220.72\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但 6 月极端高温会导致植株徒长、后期倒伏风险加大, 对产量形成负效应[4]; 灌浆 - 成熟期(8 月)极端高温则易诱发“高温逼熟”, 千粒重下降, 显著削弱最终产量[3] [5] [6]。此外, 极端气温指数(如 TX_x 、 TN_n 、 FD_0 、 SU_{25} 等)与青稞产量构成因子(穗粒数、千粒重)存在显著相关关系, 极端低温和极端高温均能通过影响光合作用、花粉活力和籽粒充实度而造成产量

波动[2] [7]。

本文基于门源国家气象站及区域自动站长时间序列逐日气温资料, 结合田间分期播种试验与农户调查数据, 采用趋势分析、突变检验、积分回归和结构方程模型等方法, 系统分析门源地区极端气温指数的时空演变特征, 定量评估其对青稞播种-出苗、出苗-抽穗、抽穗-成熟三个关键生长阶段历时、干物质积累及产量构成因子的影响, 明确不同极端气温指数的临界阈值与风险时段, 为青海高原青稞适区种植、抗逆栽培和气候风险管理提供科学依据。

2. 资料与方法

2.1. 所用资料

收集研究区(如中国青稞主产区)气象站点的日尺度数据, 1980~2024 年的日最高温、日最低温及青稞物候期观测数据(播种/抽穗/成熟期时间)。对气象数据进行质控, 剔除缺失值(采用线性插值补充)、异常值(通过 3σ 原则识别), 确保数据完整性。

2.2. 所用方法

2.2.1. 国际气候诊断法

标准化处理极端气温指数(FD、TN10P 等), 统一数据计算口径与阈值定义(如 TN10P 为当年日最低气温低于 10% 分位数的日数占比)。依据世界气象组织(WMO)推荐的极端气候指数计算方法, 对气象站点原始数据(日最高温、日最低温)进行筛选、质控, 排除异常值后, 批量计算 5 个目标指数的年或季尺度序列, 确保数据可比性。

2.2.2. 极端气温指数计算

根据研究目的, 从气候变化监测和指标专家组推荐的极端气候指数中[8]-[10], 选取 5 个主要指数, 选取霜冻日数(FD)、冷夜日数(TN10P)、暖日持续指数(WSDI)、夏日日数(SU)、暖昼日数(TX90P)。

3. 极端气温指数时空特征分析

3.1. 极端冷指数

M-K 法是目前常用的突变监测方法[11], 对门源地区霜冻日数(FD)进行 M-K 突变检测(给定显著性水 $\alpha=0.01$, 临界值 $u_{0.01}=\pm 2$), 从青稞产区的霜冻日数(FD)的 UF 与 UB 曲线可以看出(图 1), FD 的 UF 曲线在 1990 年前呈波动式下降趋势, 1990~2000 年变化较为平稳, 2000 年之后呈下降趋势; 而 UB 曲线总体呈波动式的上升趋势, 其中 2003~2010 年变化较为平稳, 2020 年之后 UB 曲线波动较大。UF 和 UB 曲线交点位于 2002 年附近, 位置在临界线之下; 2002 年后 UB 值逐渐增大, UF 值逐渐减小, 从 UB 值和 UF 值相交后的变化趋势判断, 2002 年为突变点, 表明在 2002 年后 FD 的不稳定性增强, 出现极值的可能性增大。FD 在 1980~2024 年整体呈长期递减的变化特征, 其中 1983 年达到峰值, 约为 260, 随后波动下降, 2020 年降至约为 195 的较低水平, 在 2002~2015 年间 FD 在 200~220 间呈振荡式变化。

冷夜日数(TN10P)的 M-K 趋势检验可以发现(图 2), UF 曲线在 1983~1998 年间呈波动式的先下降后上升的变化趋势, 之后呈下降趋势, 在 2024 年达到最低值, 约为 -6; 而 UB 曲线在 1983 年处于较低水平, 在 1983~2015 年总体呈波动式的上升趋势, 在 2015~2023 年呈先减小后增大的变化趋势。UF 和 UB 曲线交点位于 2001 年附近, 位置在临界线之下; 2001 年后 UB 值呈振荡增大的变化, UF 值逐渐减小, 从 UB 值和 UF 值相交后的变化趋势判断, 2001 年为突变点, 表明在 2001 年后 TN10P 的不稳定性增强。TN10P 在 1980~2024 年整体呈波动式减小的变化特征, 在 1983 年最大, 约为 65, 2018 年达到最小, 约为 5, 期间有多次显著波动变化, 在 1986~1995 年的波动幅度较大, 在 2010~2015 年下降幅度较大, 2015

年后 TN10P 呈波动式上升变化趋势。

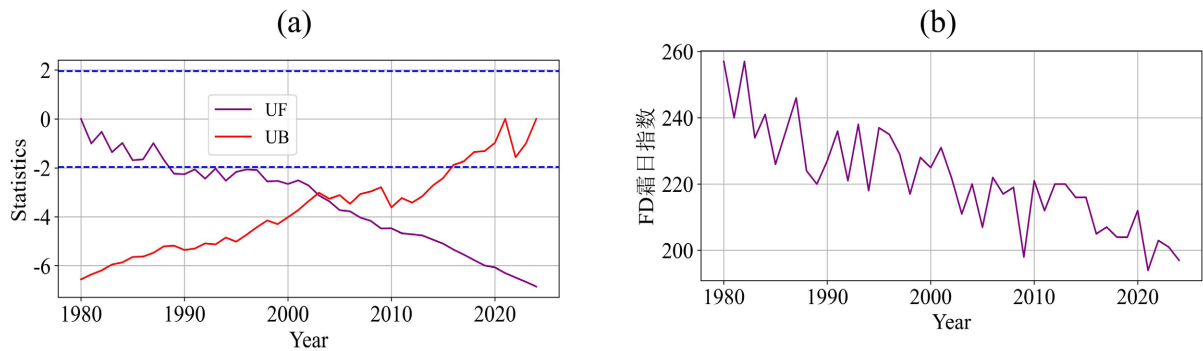


Figure 1. M-K mutation test and interdecadal variation of frost days (FD) of highland barley from 1980 to 2024

图 1. 1980~2024 年青稞霜冻日数(FD)的 M-K 突变检验及年代际变化

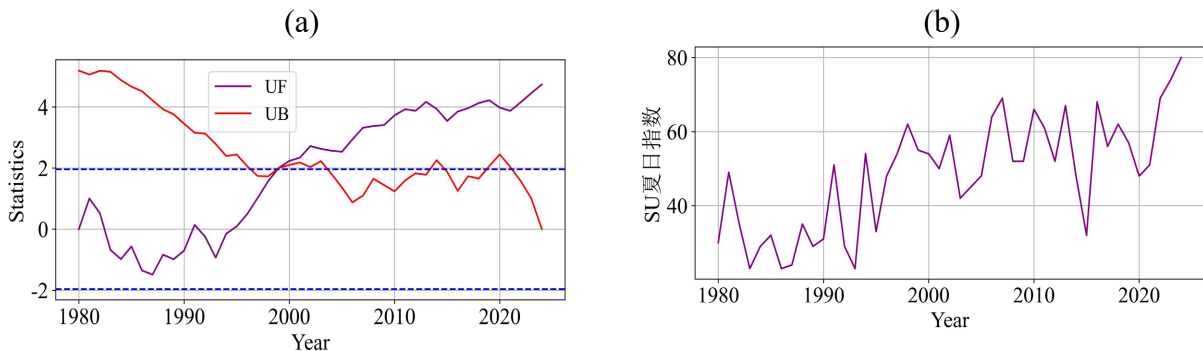


Figure 2. M-K mutation test and interdecadal variation of cold night days (TN10P) of highland barley from 1980 to 2024

图 2. 1980~2024 年青稞冷夜日数(TN10P)的 M-K 突变检验及年代际变化

3.2. 极端暖指数

暖日持续日数(WSDI)的 M-K 突变检验可知(图 3), UF 曲线在 1983~1998 年间呈波动式下降的变化趋势,之后呈波动式上升趋势,在 1998 年达到最低值,约为-1.5;而 UB 曲线在 2021 年处于较低水平,总体呈波动式下降趋势,在 1999~2010 年间变化较为平稳;UF 和 UB 曲线交点分别位于 2011 年、2013 年以及 2020 年附近,位置在临界线之间,表明在上述时间点为突变时间点。2011~2020 年间 UB 与 UF 值呈振荡式的变化,2020 年之后 UB 值逐渐减小,UF 值逐渐增大,从 UB 值和 UF 值相交后的变化趋势判断,表明在 2020 年后突变更为显著,WSDI 的不稳定性增强。WSDI 在 1980~2024 年整体呈振荡式的变化特征,且振荡幅度较大,在 2007 年最大,超过 15,在 20 世纪 90 年代、2000 年以及 2010 年前后均存在 WSDI 为 0 的时间,在 2005~2022 年间的波动幅度最大。

基于夏日指数(SU)的 M-K 突变趋势分析显示(图 4), UF 曲线在 1983~1990 年间呈波动式下降趋势,之后呈上升趋势,在 2020 年达到最大约为 4.5;而 UB 曲线在 1983 年处于较高水平,之后总体呈波动式的下降趋势,其中 2007~2020 年变化较为平稳。UF 和 UB 曲线交点位于 2000 年附近;2000 年后 UB 值呈振荡减小,UF 值逐渐增大,从 UB 值和 UF 值相交后的变化趋势判断,2000 年为突变点,表明在 2000 年后 SU 的不稳定性增强。SU 在 1980~2024 年整体呈波动式增大的变化特征,在 2024 年达到最大,约为 80,1981 年 1996 年以及 1992 年最小,期间有多次显著波动变化,在 20 世纪 90 年代以及 2000 年的波动幅度较大,在 2010 年后 SU 呈显著上升变化趋势。

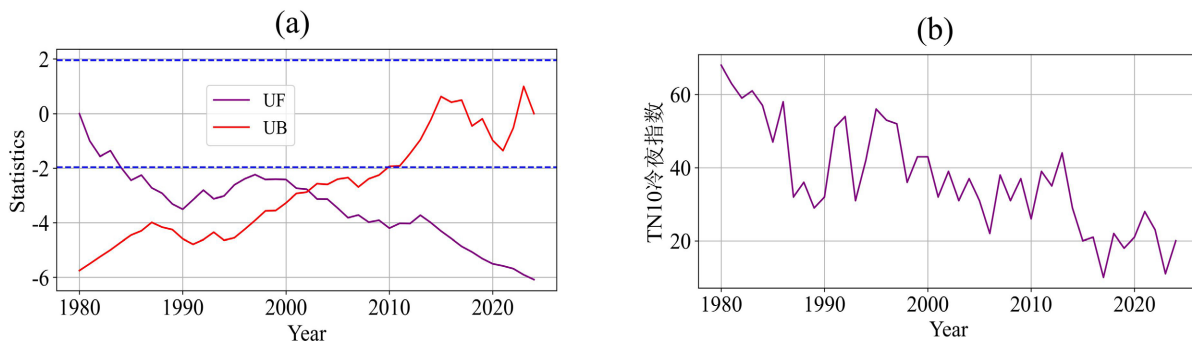


Figure 3. M-K mutation test and interdecadal variation of warm duration index (WSDI) of highland barley from 1980 to 2024
图 3. 1980~2024 年青稞暖持续指数(WSDI)的 M-K 突变检验及年代际变化

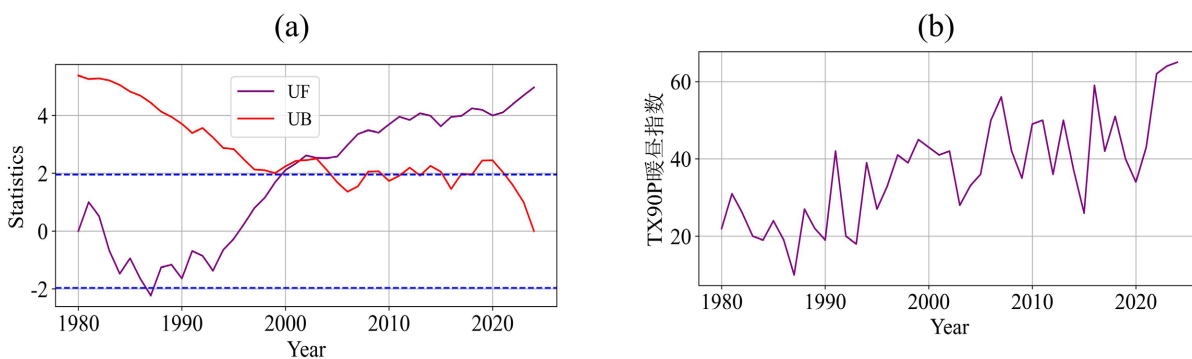


Figure 4. M-K mutation test and interdecadal variation of summer days (SU) of highland barley from 1980 to 2024
图 4. 1980~2024 年青稞夏日日数(SU)的 M-K 突变检验及年代际变化

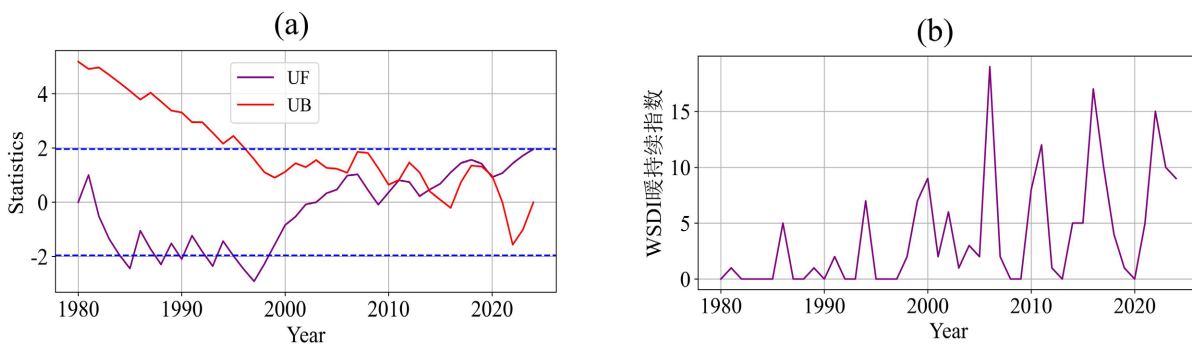


Figure 5. M-K mutation test and interdecadal variation of barley warm days (TX90P) from 1980 to 2024
图 5. 1980~2024 年青稞暖昼日数(TX90P)的 M-K 突变检验及年代际变化

基于暖昼日数(TX90P)的 M-K 趋势突变分析显示(图 5), UF 曲线在 1980~2024 年间呈波动式先下降后上升的变化趋势, 在 1997 年达到最小约为-2; 而 UB 曲线在 2024 年处于较低水平, 总体呈波动式下降的变化趋势, 在 1983~2000 年总体呈波动式的下降趋势, 在 2000~2020 年在-2 附近呈波动变化, UF 和 UB 曲线交点位于 2001 年以及 2002 年附近, 位置在临界线之上; 2001 年后 UB 值呈振荡下降的变化, UF 值逐渐增大, 从 UB 值和 UF 值相交后的变化趋势判断, 2001 年以及 2002 年为突变点, 而 2002 年后突变更为显著。TX90P 在 1983~1997 年呈波动式减小的变化特征, 在 1997 年最小, 约为 5, 之后至 2024 年呈波动式增大的变化特征, 2024 年达到最大, 约为 65, 期间有多次显著波动变化, 在 1990~1995 年、2000~2015 年的波动幅度较大。

3.3. 极端气温指数年际稳定性分析

由极端气温指数箱线图(图 6)可知, FD 中位数位于 220 附近, 数据分布范围最大, 且存在显著的高值离群点, 整体数值远高于其他 4 个指数。TN10P 中位数位于 35 附近, 数值范围较大, 存在一个较低的离群点。WSDI 中位数接近 0, 数值分布范围最小, 整体数据集中在低值区域。SU 中位数位于 45 附近, 数据分布范围较广, 存在一个显著的低值离群点。TX90P 中位数位于 30 附近, 数值分布相对集中, 有一个较低的离群点。

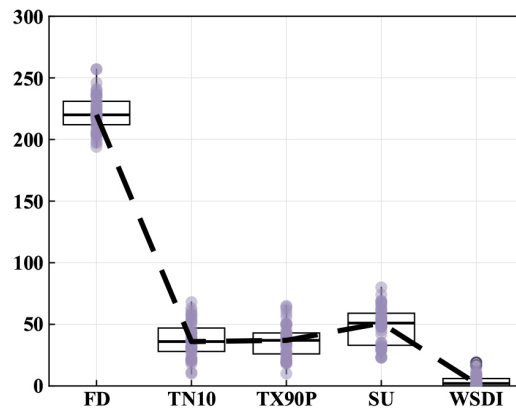


Figure 6. Boxplot of frost days (FD), summer days (SU), cold night days (TN10P), warm days (TX90P) and warm day duration index (WSDI) of hulless barley from 1980 to 2024

图 6. 1980~2024 年青稞霜冻日数(FD)、夏日日数(SU)、冷夜日数(TN10P)、暖昼日数(TX90P)以及暖日持续指数(WSDI)的箱线图

4. 极端气温指数对青稞不同物候期的影响

4.1. 各个物候期年际变化

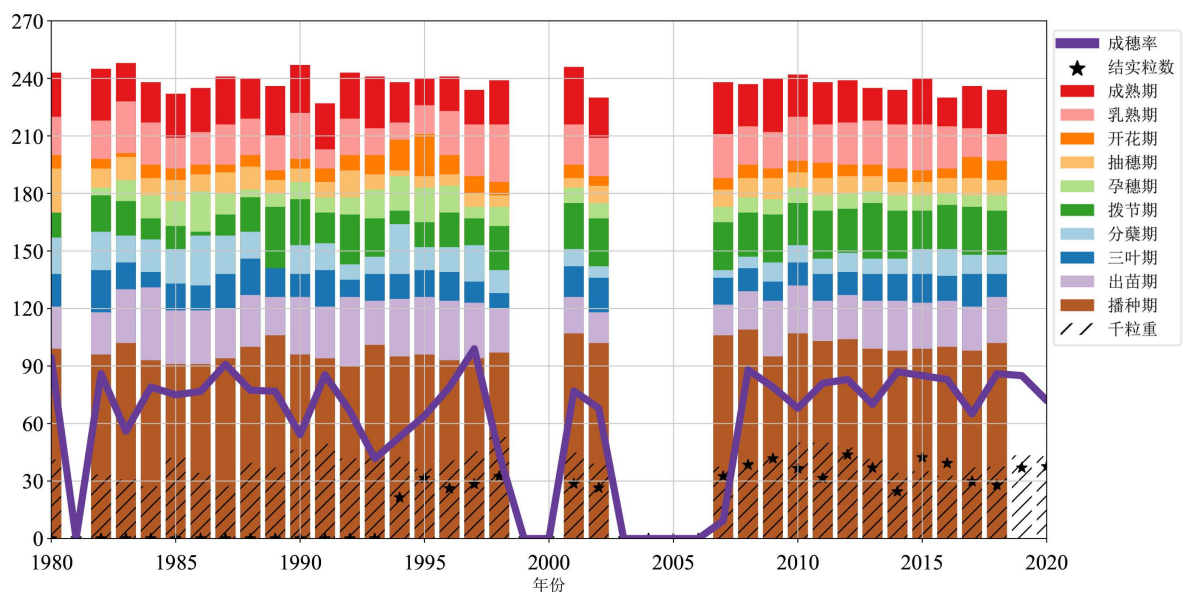


Figure 7. Inter-decadal changes of annual sequence days of each phenological period and yield indexes of highland barley from 1980 to 2024, such as ear setting rate (unit: %), number of filled grains and 1000-grain weight (unit: g)

图 7. 1980~2024 年青稞生长各个物候期年序日及产量指标结实率(单位: %)、结实粒数和千粒重(单位: 克)年际变化

青稞成穗率基本维持在 60%~90%之间, 呈波动式变化(图 7), 其中 2006 年最低, 小于 10%, 1997 年最高, 超过 90%。结实粒数在 1994~2003 年之间维持在 30 左右, 2007 年之后结实粒数基本均高于 30。成熟期、乳熟期、拔节期与出苗期基本也维持在 30 左右, 呈波动式变化。开花期、抽穗期、孕穗期、分蘖期以及三叶期维持在 10~20 左右, 也呈波动式变化。播种期年序日均维持在 90 日附近, 其中 2001 年最早, 超过 100 日, 1992 年最低, 约为 90 日。千粒重基本维持在 30~50 克之间, 其中 1998 年最高, 接近 60 克, 1984 年以及 1988 年最低, 均小于 30 克。

4.2. 各物候期极端气温指数比较

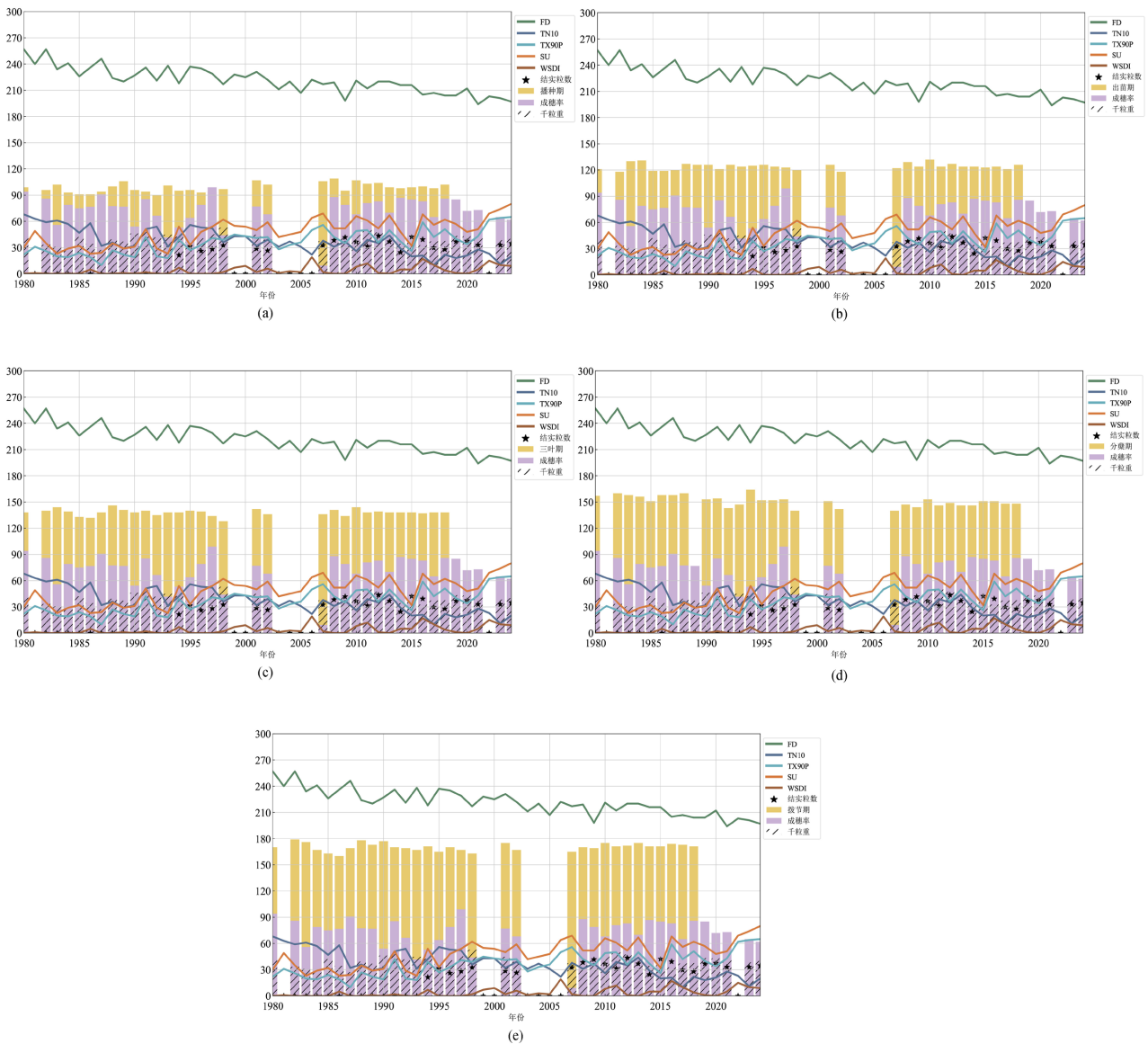


Figure 8. The sowing date during the vegetative growth period (a) of highland barley from 1980 to 2024; (b) Emergence stage; (c) Three-leaf stage; (d) Tillingering stage; (e) Interdecadal variation of jointing stage, yield index, ear ingrate (unit: %), filled grain number, 1000-grain weight (unit: g) and extreme temperature index

图 8. 1980~2024 年青稞营养生长期(a) 播种期; (b) 出苗期; (c) 三叶期; (d) 分蘖期; (e) 拔节期以及产量指标结穗率(单位: %)、结实粒数和千粒重(单位: 克)与极端气温指数的年际变化

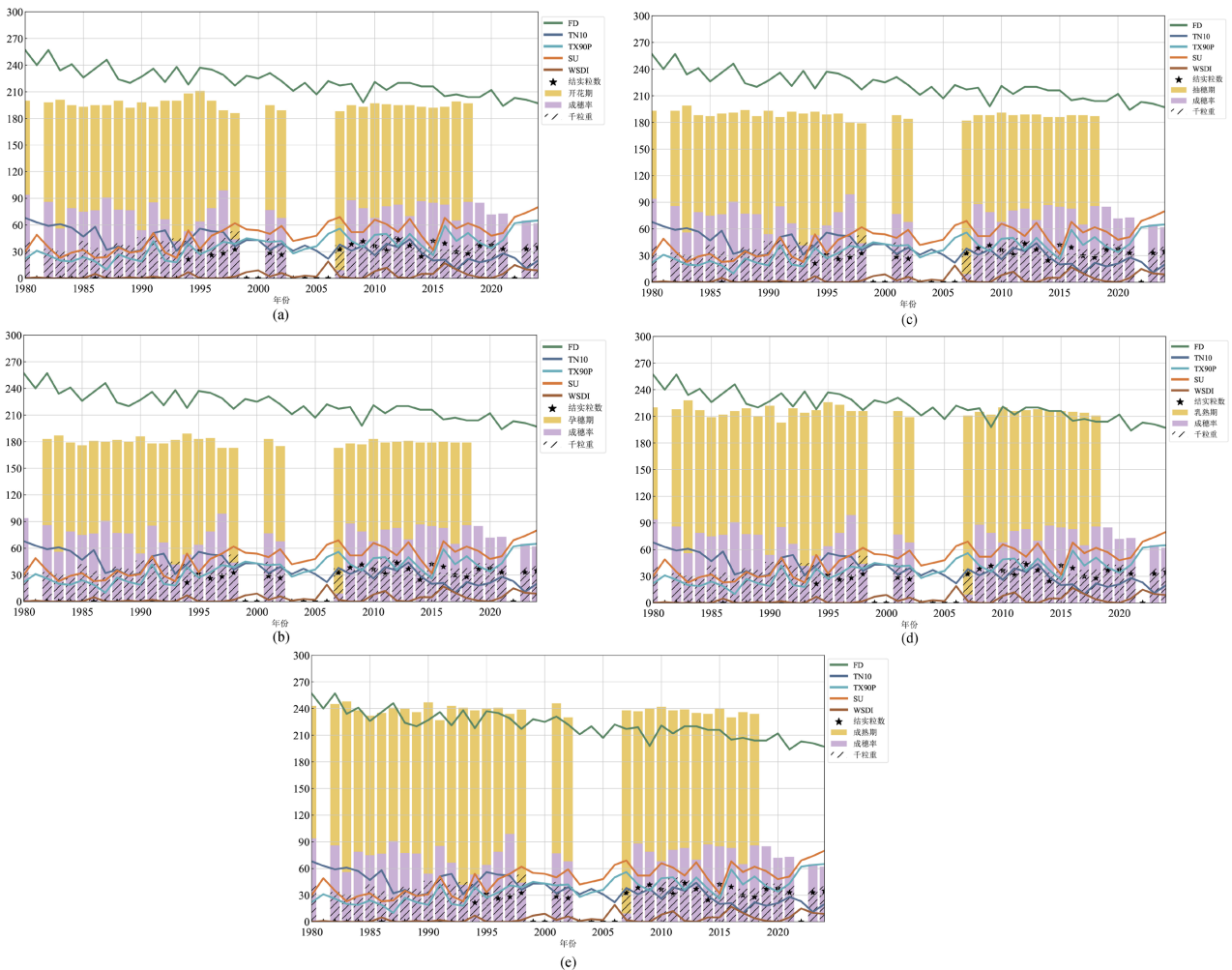


Figure 9. During there productive growth period of highland barley from 1980 to 2024 (a) Booting stage; (b) Heading date; (c) Flowering period; (d) Ripening period; (e) Interdecadal variation of maturity and extreme temperature index

图 9. 1980~2024 年青稞生殖生长期内 (a) 孕穗期; (b) 抽穗期; (c) 开花期; (d) 乳熟期; (e) 成熟期与极端气温指数的年际变化

在营养生长期内(图 8), 播种期的 FD 在 1983~2000 年较高, 之后整体呈下降趋势(图 8(a)), 播种期的波动与 FD 下降阶段初步来看有显著对应关系。TN10P 整体平稳, 2000 年后略有波动, 播种期调整与 TN10P 的波动存在一定同步性。TX90P 整体平稳, 2000 年后略有上升, 播种期波动与 TX90P 的上升阶段有一定关联。SU 整体平稳, 2000 年后略有波动, 播种期波动与 SU 指数的波动存在一定对应关系。WSDI 整体变化平稳, 2000 年后略有波动, 播种期与 WSDI 的波动存在一定同步性。出苗期(图 8(b)), FD 在 1983~2000 年间保持较高水平, 之后整体呈下降趋势。出苗期的波动与 FD 的变化趋势有一定的相关性, 其中在 FD 下降阶段, 出苗期出现了显著的波动。若遭遇土壤低温会延迟种子萌发, 降低出苗率, 尤其高海拔青稞种植区(如西藏)春播后霜冻风险高。TN10P、TX90P、SU 以及 WSDI 指数的变化趋势相对平缓, 但在 2000 年后出现了一定的上升或波动。出苗期的波动与这些指数的变化也存在一定的相关性, 尤其是在指数波动较大的时期, 出苗期也出现了相应的波动。总体来看, 出苗期与 5 个指数之间存在一定的相关性。出苗期的波动会影响 5 个指数的变化, 而五个指数的变化也会反过来影响出苗期。三叶期(图 8(c)), 三叶期的波动与 FD 的变化趋势有一定的相关性, 在 FD 下降阶段, 三叶期也出现了显著的波

动。三叶期的波动与 TN10P、TX90P、SU 以及 WSDI 指数的变化也存在一定的相关性,尤其是在指数波动较大的时期。分蘖期(图 8(d)),在 1983~1990 年,分蘖期时间整体较为稳定,波动幅度较小。1990~2000 年,分蘖期时间出现显著波动,其中 1995 年左右达到峰值,之后有所下降。2000~2010 年,分蘖期时间再次出现波动,2005 年左右达到最低,之后逐渐回升。2010~2020 年,分蘖期时间相对稳定,波动幅度较小。分蘖期与 5 个指数之间存在一定的相关性,5 个指数的变化会影响分蘖期的波动。拔节期在 1980~2024 年期间呈现出波动变化的趋势(图 8(e)),其中在 1990~2010 年期间的波动幅度较大,而其他时间段的波动幅度相对较小。分蘖-拔节期,夜间低温,即 TN10P 高,会抑制青稞根系吸收养分,减缓植株生长,导致分蘖数减少,群体密度下降,而过多 SU,即高温日数多会抑制青稞分蘖,导致有效分蘖减少,植株易出现“徒长”,抗倒伏能力下降。同样拔节期与 5 个指数之间也存在一定对应关系,同时,成穗率和千粒重的变化也与分蘖期和 5 个指数的变化密切相关。

在生殖生长期(图 9),孕穗期的波动与 FD 的变化趋势有一定的相关性(图 9(a)),在 FD 数下降阶段,孕穗期出现了显著的波动。TN10P、TX90P、SU 以及 WSDI 指数的变化趋势相对平缓,但在 2000 年后出现了一定的上升或波动,孕穗期的波动与这些指数的变化也存在一定的相关性,在指数波动较大的时期,孕穗期也出现了相应的波动。抽穗期的变化与孕穗期类似(图 9(b))。开花期(图 9(c)),霜冻会冻伤穗部和花粉,导致授粉失败,直接减少结实率,是青稞减产的关键风险因子,持续暖期,即 WSDI 高,会加速植株蒸腾,若水分供应不足,易导致穗部脱水,花粉活力下降,结实率降低。暖昼频次,即 TX90P 高,会使开花时间缩短,花粉寿命降低,授粉效率下降,结实率显著减少。乳熟-成熟期(图 9(d)、图 9(e)),整体波动相对平缓,但在 1990~2000 年期间出现了较为明显的波动,之后逐渐趋于稳定。成穗率在 1983~2000 年期间波动较大,2000 年后逐渐趋于稳定;千粒重的变化趋势与成穗率的变化基本一致。TN10P 在灌浆-成熟期的影响为,冷夜会降低光合产物向籽粒的转运效率,导致千粒重降低,影响青稞品质(如蛋白质含量)。WSDI 在灌浆-成熟期的影响为,长期高温会缩短灌浆期,导致籽粒灌浆不充分,千粒重下降,且可能引发青稞倒伏(高温使茎秆韧性降低)。SU 在灌浆-成熟期的影响为,高温会加速籽粒水分蒸发,导致灌浆提前结束,籽粒饱满度差,同时可能增加青稞病虫害(如蚜虫)发生风险。TX90P 的影响为,白天极端高温会破坏青稞光合系统,降低光合速率,减少干物质积累,最终导致产量下降,且影响籽粒品质(如淀粉含量降低)。

4.3. 各物候期极端气温指数相关性

FD 与青稞孕穗期呈负相关(表 1),与其他时期呈正相关,其中与分蘖期正相关系数最大为 0.16,与孕穗期相关性较低,为 0.051,表明 FD 对分蘖期的正向影响最大,TN10P 与播种期以及孕穗期呈负相关,与其他时期呈正相关,其中与开花期以及乳熟期正相关系数最大均为 0.053,表明 TN10P 对开花期与乳熟期的正向影响最大,而 TX90P、SU 以及 WSDI 与青稞生长各时期均呈负相关,其中 TX90P 与抽穗期负相关系数最大为-0.156,表明其对抽穗期的影响最大,SU 与抽穗期负相关系数最大为-0.188,WSDI 与成熟期负相关系数最大为-0.278,表明 WSDI 对青稞的成熟影响最大,且为负相关。总体来看,FD 和 TN10P 指数与多数物候期呈正相关,而 TX90P、SU 以及 WSDI 指数与各物候期均呈负相关,其中 WSDI 指数与各物候期的负相关性相对较大。

青稞产量指标(成穗率、千粒重、结实粒数)与 5 个指数的相关性存在差异(表 2),其中 FD 与成穗率呈正相关,相关系数为 0.124,与千粒重呈弱负相关,与结实粒数呈显著负相关,相关系数为-0.529。TN10P 与成穗率呈弱正相关,与千粒重呈弱负相关,与结实粒数呈显著负相关,相关系数为-0.438。TX90P 与成穗率呈负相关,相关系数为-0.191,与千粒重呈弱负相关,与结实粒数呈显著正相关,相关系数为 0.509。SU 与成穗率以及千粒重呈负相关,与结实粒数呈显著正相关,相关系数为 0.557。WSDI 与成穗率以及

千粒重呈负相关，与结实粒数呈弱正相关。总体来看，FD 和 TN10P 与结实粒数呈显著负相关，而 TX90P 和 SU 与结实粒数呈显著正相关，这表明结实粒数受不同指数的影响较大，成穗率和千粒重与各指数的相关性相对较弱，说明这两个指标可能受其他因素的影响可能更大。

Table 1. Correlation coefficient between each phenological period of highland barley and extreme temperature index in Menyuan area from 1980 to 2024

表 1. 1980~2024 年门源地区青稞各个物候期与极端气温指数的相关系数

	播种	出苗	三叶	分蘖	拔节	孕穗	抽穗	开花	乳熟	成熟
FD	0.066	0.086	0.108	0.160	0.096	-0.051	0.114	0.113	0.111	0.113
TN10P	-0.014	0.031	0.034	0.115	0.024	-0.093	0.051	0.053	0.053	0.047
TX90P	-0.080	-0.131	-0.135	-0.096	-0.127	-0.073	-0.156	-0.151	-0.148	-0.155
SU	-0.117	-0.162	-0.170	-0.119	-0.158	-0.098	-0.188	-0.183	-0.176	-0.182
WSDI	-0.242	-0.267*	-0.266*	-0.224	-0.258*	-0.204	-0.269*	-0.267*	-0.271*	-0.278*

注：*表示通过 0.1 显著性水平检验。

Table 2. Correlation coefficient between yield index and extreme temperature index of highland barley in Menyuan area from 1980 to 2024

表 2. 1980~2024 年门源地区青稞产量指标和极端气温指数的相关系数

	成穗率	千粒重	结实粒数
FD	0.124	-0.008	-0.529*
TN10P	0.051	-0.018	-0.438*
TX90P	-0.191	-0.049	0.509*
SU	-0.204	-0.28*	0.557*
WSDI	-0.288*	-0.230	0.118

注：*表示通过 0.1 显著性水平检验。

5. 结论与讨论

本文利用门源国家基本气象站 1980~2024 年逐日平均、最高、最低气温数据，研究分析极端气温变化对门源地区青稞生长发育及产量形成影响，结论如下：

(1) 1980~2024 年门源地区 5 个极端气温指数变化特征有明显区别，FD 长期递减(2002 年突变)、TN10P 波动减小(2001 年突变)，WSDI 振荡显著(2011 年、2013 年、2020 年突变，2020 年后加剧)，SU 波动增大(2000 年突变，1990~2000 年波动明显)，TX90P 1997 年前波动减小、后波动增大(2001~2002 年突变，2002 年后更显著)；离散程度上，FD 中位数约 220、分布范围最大且有高值离群点，WSDI 中位数接近 0、分布最集中。

(2) 青稞各物候期呈年代际波动特征：成穗率维持 60%~90%，结实粒数及成熟期、乳熟期等部分物候期数值约 30，开花期、抽穗期等其余物候期数值 10~20，均呈波动变化。

(3) 极端气温指数对青稞生长影响显著：营养生长期中，播种期、出苗期、三叶期波动与 FD 下降及各指数波动密切相关，分蘖期、拔节期相对稳定但受指数变化影响，成穗率和千粒重与分蘖期及指数变化关联紧密；生殖生长期中，孕穗期、抽穗期波动与指数波动相关，开花期易受霜冻、持续暖期、高暖昼频次危害，乳熟 - 成熟期后期趋于稳定，千粒重与成穗率变化一致。

(4) 极端气温指数与青稞物候期、产量构成要素存在明确相关性: FD、TN10P 与多数物候期正相关、与结实粒数显著负相关; TX90P、SU、WSDI 与各物候期负相关(WSDI 负相关性较强), 其中 TX90P、SU 与结实粒数显著正相关。

基金项目

海北州气象局自筹项目纳入省局管理“极端气温变化对门源地区青稞生长发育及产量形成影响研究”。

参考文献

- [1] 徐雨晴, 苗秋菊, 沈永平. 2008 年: 气候持续变暖, 极端事件频发[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(1): 56-60.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 严应存, 豆青芳, 高贵生, 等. 青海高原青稞农艺性状变化特征及产量形成主要影响因素[J]. 气象科技进展, 2023, 13(4): 80-86.
- [5] 李璠, 校瑞香, 严应存, 等. 气候变化对青海省青稞物候期的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(6): 755-763.
- [6] 金萍, 蒋礼玲, 侯万伟, 等. 青海高原农作物种质资源保护利用现状与发展趋势分析[J]. 种子, 2025, 44(3): 247-252.
- [7] 严应存, 赵全宁, 王喆, 等. 青海省门源县 1980-2015 年青稞物候期变化趋势及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1264-1271.
- [8] 白爱娟, 黄融, 程志刚. 气候变暖情景下的青海湖水位变化[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 792-797.
- [9] 赵金鹏. 1961-2016 年青藏高原极端气候事件变化特征研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [10] 吴萍. 青海省东部农业区气象干旱规律分析[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- [11] 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.