

许学莲,雷玉红,许圆圆,等.近 58 年柴达木盆地枸杞生长季热量资源变化及对产量的影响[J].江苏农业科学,2021,49(10):113-121.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.10.021

# 近 58 年柴达木盆地枸杞生长季热量资源变化 及对产量的影响

许学莲<sup>1,3</sup>,雷玉红<sup>1</sup>,许圆圆<sup>2</sup>,祝存兄<sup>3</sup>,祁栋林<sup>3</sup>,李存莲<sup>1</sup>,王发科<sup>1</sup>

(1. 青海省格尔木市气象局,青海格尔木 816099; 2. 青海省都兰县气象局,青海夏日哈 816100;

3. 青海省气象科学研究所/青海省防灾减灾重点实验室,青海西宁 810001)

**摘要:**利用柴达木盆地 1961—2018 年国家地面气象观测站枸杞生长季(5—10 月)的逐日平均气温、最高气温和最低气温资料,统计 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、积温日数和高(低)温日数,采用线性趋势和 M-K 突变检验法进行分析。结果表明,近 58 年来柴达木盆地枸杞生长季气温整体变暖趋势明显,且夜间增温速率高于白天增温速率,存在着非对称性变化。平均气温、最高气温、最低气温分别以  $0.37$ 、 $0.33$ 、 $0.54^{\circ}\text{C}/10$  年的速率呈显著上升趋势,气温日较差以  $-0.21^{\circ}\text{C}/10$  年的速率呈显著下降趋势。平均气温、最高气温、最低气温负异常次数均出现在 20 世纪 60 年代至 80 年代,正异常次数均出现在 21 世纪 00 年代至 01 年代。枸杞生长季高温日数整体以气候倾向率  $1.1\text{ d}/10$  年呈现显著上升趋势,而低温日数以  $1.7\text{ d}/10$  年呈显著减少趋势。枸杞生长季 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温及积温日数的增加趋势明显, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和积温日数气候倾向率分别为  $66.6^{\circ}\text{C}/10$  年和  $0.7\text{ d}/10$  年。柴达木盆地枸杞生长季平均气温、最高气温、气温日较差分别于 1994、1995、2000 年发生突变,最低气温没有发生突变。1991—2017 年柴达木盆地枸杞产量和种植面积的增加趋势明显,气候倾向率分别为  $331.5\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10\text{ 年})$  和  $12\,254.0\text{ hm}^2/10$  年,气温日较差对枸杞产量和种植面积的变化影响最大,其他气温因子对产量的影响相对较小,影响种植面积的次要因子为高温日数和 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温日数。

**关键词:**柴达木盆地;气温;枸杞;生长季

**中图分类号:** S162.5<sup>+</sup>4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)10-0113-09

据政府间气候变化专门委员会(IPCC)调查,近 50 年我国的变暖更加明显,约为  $0.62\sim 0.94^{\circ}\text{C}$ ,已

引起了全社会的高度重视<sup>[1]</sup>,全球气候变暖已成为不争的事实。屠其璞等用近 100 年的资料研究发现全国平均气温的升温趋势为  $0.76^{\circ}\text{C}/100$  年,高于全球平均状况<sup>[2]</sup>;于淑秋在对近 50 年我国日平均气温的气候变化分析中得出,近 50 年来,我国北方夏季最高日平均温度有较明显的上升趋势,而在冬季最高日平均温度和最低日平均温度变化趋势均以上升为主,尤其在北方特别明显<sup>[3]</sup>;吴成启等对近 50 年来全球变暖背景下青藏高原气温变化特征研究发现,青海高原年平均气温以  $0.02^{\circ}\text{C}/10$  年的速

收稿日期:2020-08-11

基金项目:国家自然科学基金(编号:41765008);青海省气象局科技项目;青海省海西州科技局项目。

作者简介:许学莲(1982—),女,青海乐都人,工程师,主要从事综合观测工作。E-mail:45067322@qq.com。

通信作者:祁栋林,高级工程师,主要从事气候变化和大气成分研究。E-mail:qidl007@163.com。

种抗寒性的影响[J].江苏农业科学,2019,47(8):130-134.

[15]南 铭.低温冻害对不同粒型玉米种子萌发及生理生化指标的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2010.

[16]张 丽,贾志国.低温对不同萌发状态裸燕麦种子生长生理特性的影响[J].江苏农业科学,2016,44(6):161-164.

[17]赵 慧,赵一博,郭江波,等.植物耐受低温胁迫研究进展[J].种子,2017,36(5):47-50.

[18]曾 琳,顾雅坤,吴 怡,等.超低温冷冻对羯布罗香种子结构和生理生化特性的影响[J].热带亚热带植物学报,2018,26(3):249-254.

[19]白 雪,李 兴,刘 鹏,等.低温胁迫对蓖麻种子萌发过程中

生理生化影响[J].农学学报,2017,7(3):5-8.

[20]Gong M,Chen B O,Guo L. Heat-shock induced cross adaption to heat, chilling, drought and salt stress in maize seedlings and involvement of  $\text{H}_2\text{O}_2$  [J]. Journal of Plant Physiology, 2001, 158(9):1125-1130.

[21]Yousef S,Gholamreza H,Weria W,et al. Changes of antioxidative enzymeslipid peroxidation and chlorophyll content in chickpea types colonized by different *Glomus* species under drought stress [J]. Symbiosis,2012,56(1):5-18.

[22]李 昕,高洪儒,赵北平.低温和盐复合胁迫对玉米种子生理生化指标的影响[J].黑龙江农业科学,2016(7):19-24.

率增加,南部区域年平均气温较高,中部区域年平均气温较低<sup>[4]</sup>。还有很多学者对其他区域的气温气候变化特征进行了分析<sup>[5-9]</sup>。

近年来很多学者对柴达木盆地的气候变化和枸杞种植影响做了一定的研究,从已有的研究结果来看,柴达木盆地<sup>[10-15]</sup>以及周边地区<sup>[16]</sup>气温及地表温度均呈显著增温趋势且降水增加明显,表明柴达木盆地向暖湿化方向转型。近年来,随着政府的大力扶持,“柴杞”已成为柴达木盆地的一张名片,柴达木盆地枸杞产业已达规模,枸杞产业已成为柴达木盆地农业特色优势产业。柴达木盆地是枸杞主要种植区,对柴达木枸杞的研究主要集中在气象条件分析<sup>[17]</sup>、种植气候资源区划<sup>[18]</sup>和气象灾害<sup>[19]</sup>等方面,对枸杞生长季(5—10月)气温变化特征研究较少。邓振镛等对西北地区特色作物对气候变化响应进行研究,结果表明,气候暖干化使多年生特色作物返青期提早,生长发育速度提前加快<sup>[20]</sup>。在气候变暖背景下,柴达木盆地农业气候资源变化对枸杞种植布局、产量、外观品质形成和生长发育均有很大影响,因此,有必要进一步分析柴达木盆地气候变化的新特征,并研究气候变化对枸杞产量和种植面积的影响。本研究利用柴达木盆地5个国家地面气象观测站1961—2018年逐日平均气温、最高气温、最低气温及气温日较差等资料和1991—2018年柴达木盆地枸杞产量和种植面积数据,统计 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温及积温日数和高(低)温日数,运用线性倾向估计法对近58年柴达木盆地枸杞生长季的气温、枸杞产量和种植面积变化特征进行分析,采用相对贡献率分析气温因子对枸杞产量和种植面积

的影响,从而了解柴达木盆地枸杞生长季气温变化情况,为枸杞生产、种植结构、深加工和决策部门合理利用农业气候资源、制定适应气候变化的对策等提供有力的科技支撑,为开展有效的枸杞预测气象业务服务提供科学数据。

## 1 研究区与分析方法

### 1.1 研究区和资料来源

柴达木盆地是我国著名的内陆干旱盆地之一,位于青海省西北部,素有聚宝盆之称。平均海拔2 980 m,属典型的中纬度高寒、干旱大陆性气候,日照时间长,昼夜温差大,无霜期时间长达115~136 d,冬季寒冷漫长、夏季凉爽短促,终年干燥少雨,降水年际变化大,多集中在夏季且分布不均,蒸发量大,但地表及地下水资源相对比较丰富。柴达木盆地独特的沙地土壤和气候条件,特别适合枸杞的生长。柴达木盆地枸杞生长期较短,一般5月初开始发芽,8月上旬至下旬进入夏果成熟期,9—10月为秋果成熟期,柴达木盆地枸杞生长季为5—10月<sup>[17-18]</sup>。

1961—2018年逐日平均气温、最高气温、最低气温及气温日较差数据资料来源于青海省柴达木盆地的德令哈、格尔木、都兰、小灶火、诺木洪5个国家地面气象观测站(图1)。以5个气象站的算术平均值代表该地区枸杞生长季气温变化状况。以1980—2010年平均值作为气候平均值。1991—2018年枸杞产量和种植面积数据来源于青海省海西州统计局。

### 1.2 高(低)温日数统计

在农作物生长季节,生育期的重要阶段气温比

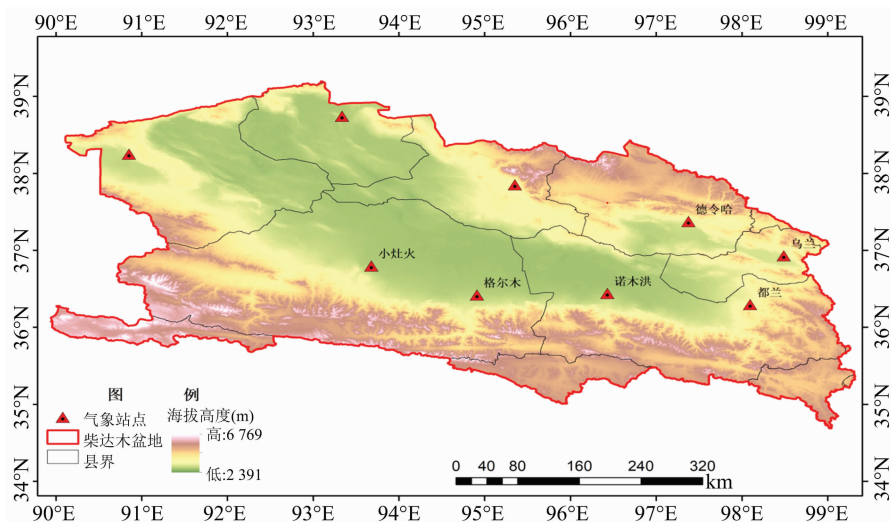


图1 柴达木盆地气象观测站点

要求的偏低(但仍在 0℃ 以上),会引起农作物生育期延迟或使生理机能受到损害,造成农业减产的低温灾害。

依据青海省地方标准《气象灾害分级指标》<sup>[21]</sup>(DB63/T 372—2018)高温热害指标,以日最高气温  $\geq 30^\circ\text{C}$  和日最低气温  $\leq -20^\circ\text{C}$  分别统计高、低温日数。

### 1.3 研究方法

采用线性倾向估计法<sup>[22]</sup>对柴达木盆地 1961—2018 年枸杞生长季(5—10 月)气温的变化趋势进行分析,当线性趋势指数为正(负)时,表示气温在统计年份内有上升(下降)趋势。线性变化趋势采用最小二乘法进行估计,其变化趋势的显著性利用相关系数  $r$  进行  $t$  检验。

采用 Mann-Kendall 突变法<sup>[22]</sup>和滑动  $t$  检验<sup>[22]</sup>相结合对气象要素序列长期变化趋势进行突变检验,M-K 检验是一种非参数统计检验方法,不受少数异常值的干扰,有着比较好的结果和适用性。当正序列(UF)的值大于 0,表示序列呈上升趋势,小于 0 表示呈下降趋势。当超过临界值线时,表示上升或下降趋势显著。如果 UF 和 UB 两曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

参照世界气象组织对气候异常的定义<sup>[22]</sup>,以距平的绝对值  $\geq$  标准差的 1.0 倍为异常来分析气温的异常特征。

采用标准化回归分析方法<sup>[23-24]</sup>分析枸杞产量和种植面积的主要影响气温因子。计算公式:

$$Y = aZ_1 + bZ_2 + cZ_3 + \dots \quad (1)$$

$$\eta = \frac{|a|}{|a| + |b| + |c| + \dots} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $Y$  为枸杞产量或种植面积的标准化值; $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$ 、 $\dots$  分别为各气温因子的标准化值; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $\dots$  为各气温因子序列标准化后对应的回归系数,标准化回归系数越大说明气温因子对枸杞产量或种植面积的影响越大; $\eta$  为  $Z_1$  气温因子变化对  $Y$  变化的相对贡献率。

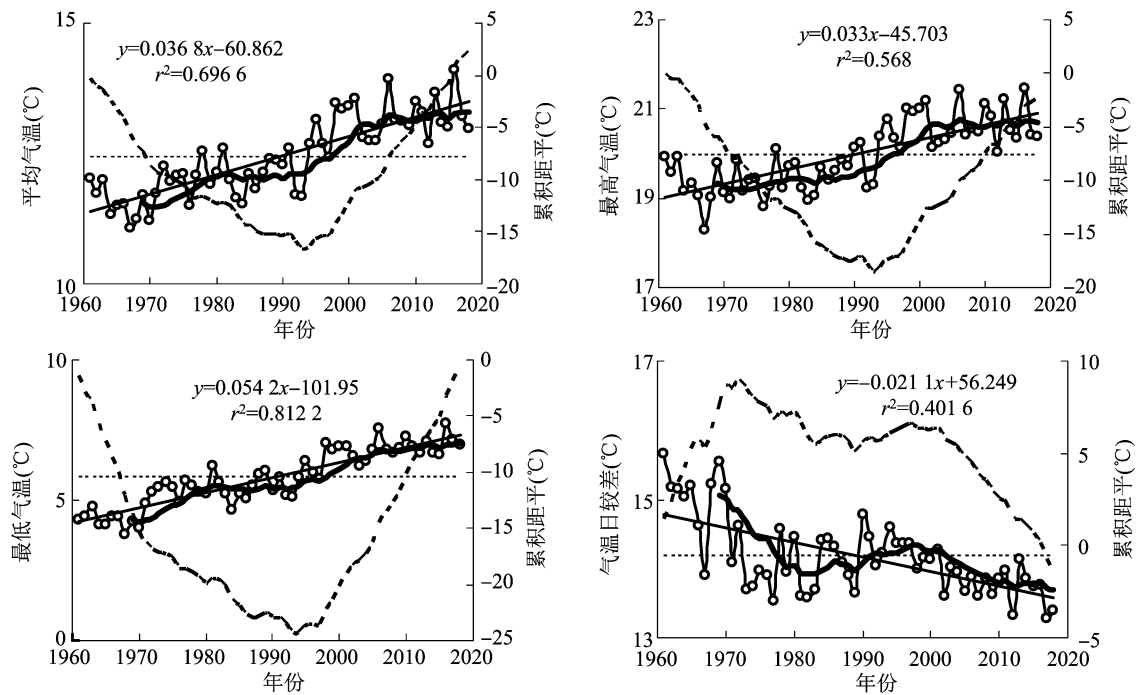
## 2 结果与分析

### 2.1 枸杞生长季气温变化趋势

从图 2 可知,在全球变暖的大背景下,近 58 年来柴达木盆地枸杞生长季平均气温、最高气温、最低气温均以气候倾向率 0.37、0.33、0.54℃/10 年

呈上升趋势,而气温日较差以 0.21℃/10 年呈下降趋势,均通过 0.01 的显著性检验,最低气温上升幅度明显高于平均气温和最高气温,即夜间温度增温强度高于白天,从而导致昼夜温差减小。说明柴达木盆地枸杞生长季平均气温、最高气温和最低气温变暖趋势极显著,气温日较差表现为极显著的降温趋势。58 年来柴达木盆地枸杞生长季平均气温、最高气温和最低气温分别增加了 2.1、1.9、3.1℃,气温日较差减小了 1.2℃。平均气温、最高气温和最低气温多年平均值分别为 12.4、20.0、5.8℃,最大值均出现在 2016 年,分别为 14.1、21.5、7.7℃,平均气温、最高气温最小值出现在 1967 年,为 11.1、18.3℃,而最低气温最小值出现在 1968 年,为 3.8℃,气温日较差多年平均值为 14.2℃,最大值出现在 1961 年,为 15.7℃,最小值出现在 2017 年和 2012 年(13.3℃)。从累积距平曲线和年代距平来看,平均气温、最高气温和最低气温累积距平曲线均在 1993 年前呈下降趋势,1994 年以后转入上升趋势,20 世纪 60 年代至 80 年代平均气温、最高气温和最低气温年代距平为负,90 年代与气候平均值基本持平,21 世纪 00 年代和 10 年代距平为正,气温日较差累积距平曲线在 1972 年前为上升趋势,以后转为下降趋势,表明柴达木盆地枸杞生长季 20 世纪 80 年代前为偏冷期,90 年代后为偏暖期。从 9 点滑动曲线来看,平均气温和最低气温阶段变化基本一致,表现为上升-下降-上升-上升趋缓 4 个阶段,最高气温和气温日较差表现为 3 个阶段变化,平均气温和最低气温在 20 世纪 60 年代到 70 年末为快速增温,进入 80 年代初转入缓慢波动降温阶段,90 年代中期进入快速增温阶段,21 世纪 00 年代开始增温趋势略有减缓。最高气温在 20 世纪 60 年代至 80 年代末呈现缓慢波动增温,90 年代为快速增温阶段,21 世纪 00 年代开始增温趋势略有减缓。气温日较差在 20 世纪 60 年代至 70 年代为快速降温阶段,80 年代至 90 年代末为缓慢上升阶段,进入 21 世纪 00 年代后再次进入快速的降温阶段。

从各站气温和变化趋势(表 1)来看,柴达木盆地枸杞生长季平均气温在 10.7~13.5℃,最高气温在 17.5~21.3℃,最低气温在 4.5~7.1℃,气温日较差在 13.1~16.4℃,而其气候倾向率在 0.19~0.59、0.14~0.52、0.15~0.72、-0.46~0.07℃/10 年,各站平均气温、最高气温和最低气温的增温趋势均通过了 0.05 以上显著性检验,平均



细虚线为多年平均值；细直线为线性趋势线；粗曲线为 9 年滑动曲线；粗虚线为累积距平线。下图同

图2 柴达木盆地 1961—2018 年枸杞生长季气温变化趋势

表 1 柴达木盆地气温、高温时间和低温时间各站变化

站点	平均气温			最高气温			最低气温			气温日较差			高温日数			低温日数		
	平均值 (℃)	气候 倾向率 (℃/10 年)	相关 系数	平均值 (℃)	气候 倾向率 (℃/10 年)	相关 系数	平均值 (℃)	气候 倾向率 (℃/10 年)	相关 系数	平均值 (℃)	气候 倾向率 (℃/10 年)	相关 系数	平均值 (℃)	气候 倾向率 (℃/10 年)	相关 系数	平均值 (℃)	气候 倾向率 (℃/10 年)	相关 系数
德令哈	12.3	0.26	0.65 **	19.3	0.14	0.33 **	6.2	0.6	0.84 **	13.1	-0.46	-0.65 **	1.7	0.5	0.33 **	7.8	-2.1	-0.61 **
格尔木	13.5	0.42	0.87 **	20.8	0.26	0.63 **	7.1	0.72	0.90 **	13.8	-0.46	-0.74 **	4.1	1.0	0.43 **	5.8	-2.6	-0.80 **
都兰	10.7	0.19	0.53 **	17.5	0.22	0.55 **	4.8	0.15	0.45 **	12.7	0.07	0.28 *	0.6	0.1	0.19	6.3	-0.3	-0.16
小灶火	12.4	0.59	0.90 **	20.9	0.5	0.83 **	4.5	0.74	0.92 **	16.4	-0.24	-0.53 **	5.0	1.6	0.57 **	16.5	-2.3	-0.76 **
诺木洪	13.2	0.38	0.82 **	21.3	0.52	0.88 **	6.3	0.49	0.87 **	15.0	0.03	0.11	6.8	2.5	0.68 **	7.2	-1.2	-0.60 **

注：\*、\*\* 分别表示通过 0.05、0.01 的显著性检验。下同。

气温和最低气温上升速率最快均在西部的小灶火站,上升速率最小在东部的都兰站,最高气温升温速率最快和最慢分别在诺木洪和德令哈,气温日较差各站变化趋势差异明显,格尔木、都兰和小灶火 3 个站呈下降趋势,均通过 0.05 以上的显著性检验,其中,格尔木下降最明显,都兰和诺木洪呈上升趋势,诺木洪站未通过 0.05 的显著性检验。

从柴达木盆地枸杞生长季各月平均气温、最高气温、最低气温和气温日较差的变化趋势(表 2)来看,各月平均气温、最高气温、最低气温均呈现显著的增温趋势,气温日较差为显著的降温趋势。各月平均气温、最高气温、最低气温最大增温速率和气温日较差最大降温速率出现月份不一致,平均气温、最高气温、最低气温最大增温速率分别出现在

10、9、8 月,气温日较差最大降温速率出现在 6 月。

正负异常次数用来判断气温偏高、偏低出现阶段。从表 3 看出,20 世纪 60 年代至 80 年代平均气温、最高气温、最低气温正异常次数偏少,20 世纪 90 年代至 21 世纪 10 年代偏多;平均气温、最高气温、最低气温负异常次数在 20 世纪 60 年代至 80 年代分别出现 12、10、11 次,其中,60 年代出现最多,分别为 8、4、10 次,气温日较差正异常次数 20 世纪 60 年代至 80 年代出现 9 次,负异常次数出现 4 次,20 世纪 90 年代至 21 世纪 10 年代没有出现正异常,负异常次数为 6 次。

综合上述,柴达木盆地枸杞生长季整体及各月气温整体变暖趋势明显,而且最高气温的增温率均低于平均最低气温的增温率,表明柴达木盆地枸杞

表 2 柴达木盆地枸杞生长季各月气温变化

月份	平均气温		最高气温		最低气温		气温日较差		高温日数		低温日数	
	气候倾向率 (℃/10 年)	相关系数	气候倾向率 (℃/10 年)	相关系数	气候倾向率 (℃/10 年)	相关系数	气候倾向率 (℃/10 年)	相关系数	气候倾向率 (℃/10 年)	相关系数	气候倾向率 (℃/10 年)	相关系数
5	0.29	0.47 **	0.26	0.40 **	0.42	0.62 **	-0.17	-0.35 **	—	—	-0.13	-0.37 **
6	0.35	0.57 **	0.31	0.46 **	0.57	0.80 **	-0.26	-0.48 **	0.07	0.25	—	—
7	0.38	0.54 **	0.35	0.44 **	0.54	0.72 **	-0.19	-0.36 **	0.68	0.52 **	—	—
8	0.39	0.61 **	0.34	0.53 **	0.59	0.70 **	-0.25	-0.46 **	0.37	0.40 **	—	—
9	0.4	0.66 **	0.37	0.54 **	0.57	0.74 **	-0.2	-0.32 *	0.02	0.19	-0.07	-0.47 **
10	0.41	0.65 **	0.35	0.56 **	0.55	0.70 **	-0.2	-0.37 **	—	—	-1.49	-0.69 **

注:— 表示未出现。

表 3 柴达木盆地枸杞生长季气温异常次数变化特征

项目	1961 — 1970 年		1971 — 1980 年		1981 — 1990 年		1991 — 2000 年		2001 — 2010 年		2011 — 2018 年	
	负异常 (次)	正异常 (次)	负异常 (次)	正异常 (次)	负异常 (次)	正异常 (次)	负异常 (次)	正异常 (次)	负异常 (次)	正异常 (次)	负异常 (次)	正异常 (次)
平均气温	8	0	2	0	2	0	2	3	0	4	0	4
最高气温	4	0	4	0	2	0	1	4	0	2	0	3
最低气温	10	0	0	0	1	0	0	3	0	6	0	5
气温日较差	0	8	1	0	3	1	0	0	3	0	3	0

生长季最高气温和最低气温存在着非对称性变化的特点<sup>[25-26]</sup>,这与全国<sup>[2-3]</sup>、青藏高原<sup>[4]</sup>和柴达木盆地及周边<sup>[9-16]</sup>的增暖现象一致,但增暖速率明显大于全国,与青藏高原和柴达木盆地及周边地区大致相同。

气候突变是普遍存在于气候变化中的一个重要现象,是气候预测与模拟要考虑的重要因素。图 3 为 1961 — 2018 年柴达木盆地枸杞生长季平均气温、最高气温、最低气温和气温日较差 M-K 突变检验曲线。由图 3 可知,柴达木盆地平均温度从 1970 年后持续上升,1972 年之后气温均在 0℃ 以上,1961 — 1970 年呈减—增—减—增的趋势,1989 年开始 UF 超过 3.29(0.001 信度检验)临界值,表明 1989 年之后柴达木盆地气温呈明显上升趋势,UF 和 UB 曲线交点位于 1986 — 1987 年(图 3-a)。最高气温呈减—增—减—增的趋势,1986 年开始上升趋势,1994 年开始 UF 超过 1.96(0.05 信度检验)临界值,表明 1994 年开始气温呈明显上升趋势,UF 和 UB 曲线在 1990 — 1991 年相交,表明最高气温在 1991 年发生了突变现象(图 3-b),平均气温和最高气温发生了由冷向暖的突变。最低气温在 1970 年前大多数年份在 0℃ 以下,1974 年开始 UF 大于 3.29,超过了临界值,气温呈明显上升趋势,UF 和

UB 曲线交点均位于临界线范围外,利用滑动  $t$  检验再次进行突变检测(图略),没有检测到突变点,表明最低气温没有发生突变,表明近 58 年来枸杞生长季最低气温上升趋势显著,但没有出现突变(图 3-c)。气温日较差 UF 线基本上呈下降趋势,1976 年 UF 超过 -2.58(0.01 信度检验)临界值,UF 和 UB 曲线在 2003 和 2004 年相交,表明最低气温在 2003 — 2004 年发生了由高到低的突变现象(图 3-d)。

## 2.2 高温和低温日数变化趋势

夏季高温天气增多,果实生长与高温相伴,加速了夏果发育,在一定程度上延长了夏眠期,对果实产量形成不利,早期低温日数对枸杞发芽有延缓,后期低温日数造成果实提前脱落,影响产量<sup>[27]</sup>。图 4 给出了柴达木盆地枸杞生长季高温日数和低温日数的变化。从图 4、表 1 和表 4 可以看出,柴达木盆地枸杞生长季高温日数整体均呈现增多趋势,而低温日数呈减少趋势,气候倾向率分别为 1.1、-1.7 d/10 年,均通过信度 0.01 显著性检验,低温日数变化速率是高温日数的 1.5 倍,表明柴达木盆地枸杞生长季高温日数极显著增多趋势,低温日数极显著减小趋势。58 年来柴达木盆地枸杞生长季高温日数增加近 7 d、低温日数减少了近 10 d。高温日数多年平均值为 3.6 d,最大值出现在 2010 年

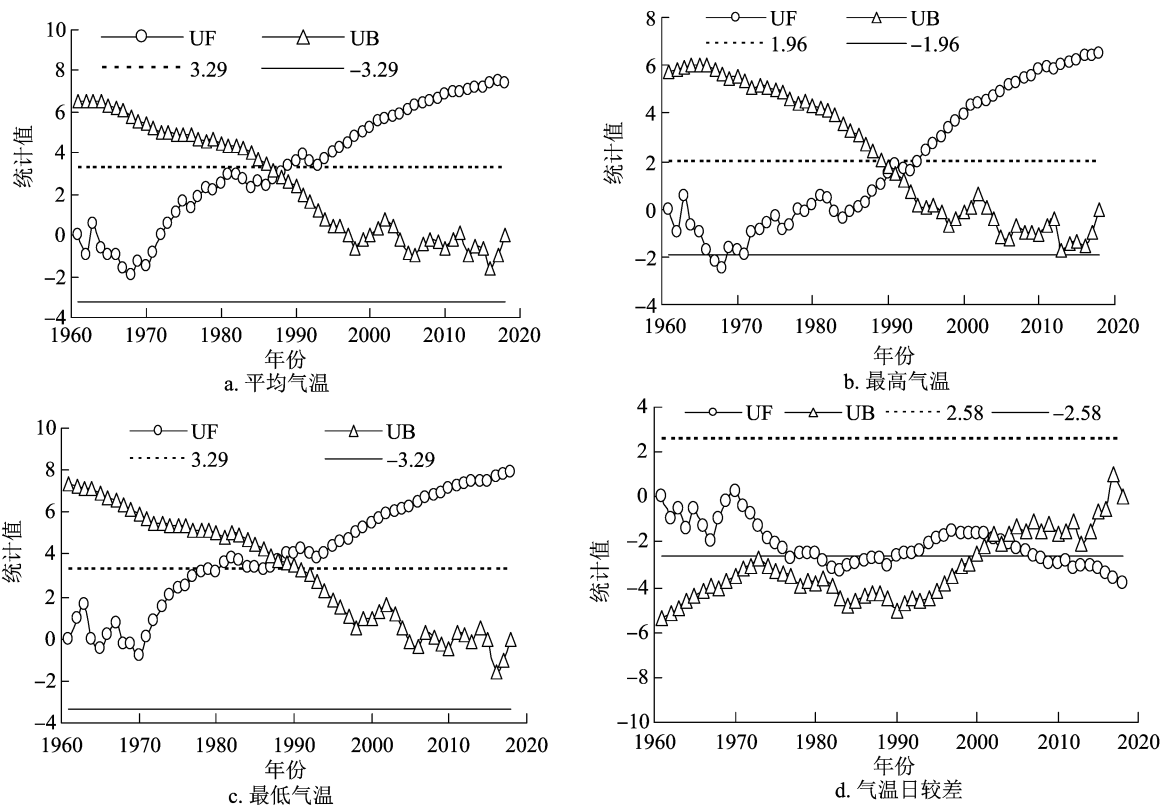


图3 柴达木盆地 1961—2018 年气温突变分析

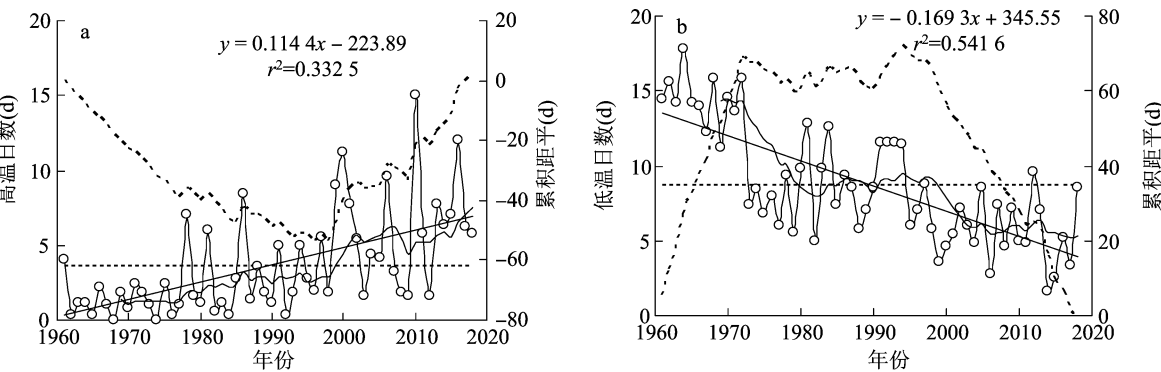


图4 柴达木盆地 1961—2018 年枸杞生长季高温日数(a)和低温日数(b)变化趋势

表 4 柴达木盆地气温年代距平变化

年份	平均气温 (℃)	最高气温 (℃)	最低气温 (℃)	气温日较差 (℃)	高温日数 (d)	低温日数 (d)	≥ 0℃ 积温(℃)	≥ 0℃积温 日数(d)
1961 — 1970	-1.2	-0.9	-1.8	1.1	-2.9	6.8	-203.4	-1.6
1971 — 1980	-0.7	-0.8	-0.8	0.1	-2.3	1.5	-115.4	-0.4
1981 — 1990	-0.6	-0.7	-0.6	0.0	-1.5	1.1	-100.7	-1.1
1991 — 2000	0.0	0.1	0.0	0.3	0.3	0.6	9.5	0.0
2001 — 2010	0.5	0.4	0.7	-0.2	1.3	-1.7	91.1	1.0
2011 — 2018	0.6	0.5	0.9	-0.3	2.4	-2.3	107.4	1.5

(15 d),1968、1974 年未出现高温日数,低温日数多年平均值为 8.7 d,最大值出现在 1967 年(17.8 d),最小值出现在 2014 年(1.6 d)。从 9 点滑动曲线来

看,高温日数在 20 世纪 60 年代至 90 年代中期缓慢上升,90 年代末呈现快速增多趋势,而低温日数在 20 世纪 60 年代至 80 年代呈现快速减少,80 年代至

90 年代在多年平均值附近缓慢波动,进入 21 世纪 00 年代后低温日数再次呈现下降趋势。从累积距平曲线来看,高温日数累积距平曲线在 20 世纪 60 年代至 90 年代末呈下降趋势,为高温日数偏少期,之后转入上升趋势,为高温日数偏多期,低温日数累积距平曲线在 20 世纪 60 年代至 70 年代初呈上升趋势,为低温日数偏多期,70 年代中期到 90 年代初期为缓慢波动阶段,为低温日数持续期,进入 90 年代中期进入下降趋势,为低温日数偏少期。从高温日数和低温日数的距平(表 4)来看,高温日数和低温日数距平 20 世纪 90 年代比 60 年代分别偏多 2.2 d 和偏少 6.2 d,高温日数和低温日数 21 世纪 10 年代比 00 年代偏多 2.1 d 和偏少 1.7 d,整体表现出高温日数(低温日数)逐渐增多(减少)趋势。

从柴达木盆地枸杞生长季各月高温日数和低温日数来看,高温日数出现在 6—9 月,主要为 7 月(2.1 d),而低温日数出现在 5、9、10 月,主要在 10 月(8.3 d),高低温日数变化最明显的月份与出现月份相一致,分别为 0.68 d/10 年和 -1.49 d/10 年。

从柴达木盆地枸杞生长季各站高温日数在 0.6~6.8 d,气候倾向率在 0.14~2.5 d/10 年,最多和增多最明显均为诺木洪站,最少和减少不明显出现在都兰。低温日数在 5.8~16.5 d,最多出现在小灶火站,最少出现在格尔木站,气候倾向率在 -0.3~-2.6 d/10 年,低温日数减少最多和最小分别为格尔木站和都兰站。

### 2.3 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温及积温日数变化

图 5 给出了柴达木盆地枸杞生长季  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温及积温日数变化趋势。表 5 给出了各站  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温及积温日数变化趋势。可以看出,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温及积温日数均呈现增加趋势,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温、积温日数气候倾向率分别为  $66.6^{\circ}\text{C}/10$  年和  $0.7\text{ d}/10$  年,均通过信度 0.01 显著性检验,表明柴达木盆地枸杞生长

季  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温及积温日数增加趋势明显。 $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温多年平均值为  $2\,292.7^{\circ}\text{C}$ ,最大值均出现在 2016 年( $2\,598.0^{\circ}\text{C}$ ),最小值均出现在 1967 年( $2\,041.7^{\circ}\text{C}$ ),  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温日数多年平均值为 180 d,最大值分别出现在 1979 年(184 d),最小值分别出现在 1972 年(174 d),从 9 点滑动曲线来看,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温及积温日数的阶段变化基本一致,在 20 世纪 60 年代至 70 年代快速上升,80 年代缓慢下降,90 年代后再次进入快速上升阶段,21 世纪 00 年代上升趋势有所减缓。从累积距平曲线来看,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温和积温日数累积距平曲线在 20 世纪 60 年代至 90 年代初期呈下降趋势,90 年代中期累积距平曲线转入上升趋势,表明  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温和积温日数在 80 年代以前为偏冷偏少期,90 年代后为偏暖偏多期。从  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温及积温日数的距平(表 4)来看,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温及积温日数随年代增加而增加,特别是 20 世纪 90 年代增加明显,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温比 80 年代增加了  $110.2^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温日数增加了 1.1 d。

从各站(表 5)来看,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温多年平均在  $1975.4\sim 2492.8^{\circ}\text{C}$ ,气候倾向率在  $34.3\sim 106.6^{\circ}\text{C}/10$  年,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温最多均在格尔木站,最少在都兰站,积温增多最明显均为小灶火站,增多最少在都兰,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温日数多年平均在  $178.2\sim 182.2\text{ d}$ ,气候倾向率在  $0.3\sim 1.4\text{ d}/10$  年,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温日数最多均在格尔木站,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温日数最少在小灶火站,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温日数增多最明显均为小灶火站,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温日数增多最少在都兰站。

### 2.4 柴达木盆地枸杞产量和面积变化

图 6 给出了柴达木盆地 1991—2017 年枸杞产量和种植面积的变化趋势。1991—2018 年柴达木盆地枸杞产量和种植面积均呈增加趋势,产量变化在  $1\,492.5\sim 2\,244.4\text{ kg}/\text{hm}^2$ ,种植面积变化在  $80.0\sim 34\,398.6\text{ hm}^2$ ,产量和种植面积气候倾向率

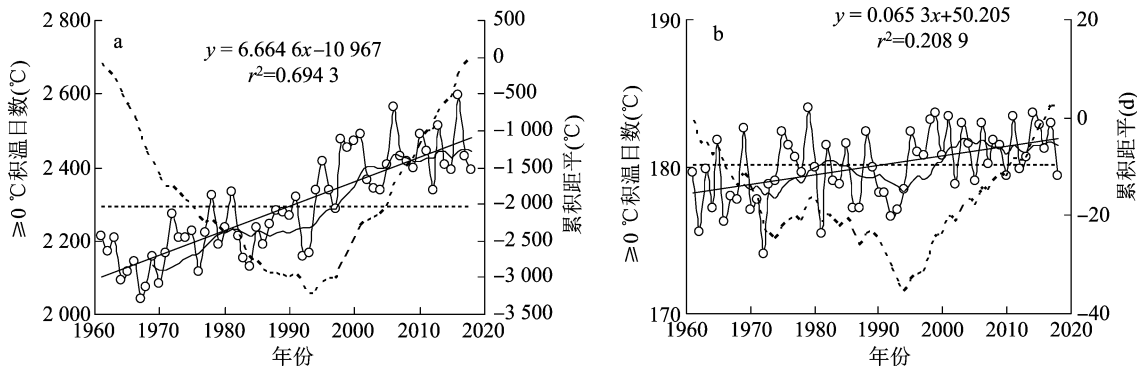


图5 柴达木盆地枸杞生长季  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温(a)及积温日数(b)变化趋势

表 5 枸杞生长季各站  $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温及积温日数变化

要素	$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温			$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温日数		
	平均值 ( $^{\circ}\text{C}$ )	气候倾向率 ( $^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ )	相关系数	平均值 (d)	气候倾向率 ( $\text{d}/10\text{ 年}$ )	相关系数
德令哈	2269.2	46.2	0.65 **	179.7	0.4	0.26 *
格尔木	2492.8	76.6	0.87 **	182.2	0.7	0.53 **
都兰	1975.4	34.3	0.53 **	178.3	0.3	0.18
小灶火	2289.6	106.6	0.90 **	178.2	1.4	0.63 **
诺木洪	2436.7	69.4	0.82 **	181.7	0.4	0.28 **

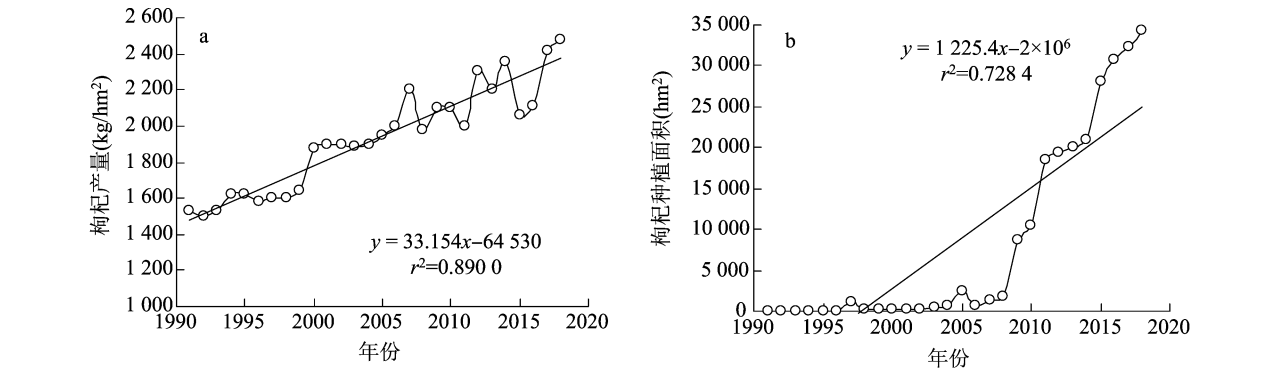


图6 柴达木盆地枸杞产量(a)和种植面积(b)变化趋势

分别为  $331.5\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10\text{ 年})$ 、 $12\,254.0\text{ hm}^2/10\text{ 年}$ ,通过 0.01 的显著性检验,增加趋势明显。

2.5 枸杞产业对气温变化的响应

为了分析气温对柴达木盆地枸杞产量和种植面积变化的成因,同时考虑气温因子之间存在共线性,主要选择了气温日较差、高温日数、低温日数、 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温和积温日数 5 个气温因子,根据相对贡献率公式计算出柴达木盆地各气温因子对枸杞产量和种植面积的相对贡献率(表 6),结果表明柴达木盆地枸杞产量复相关系数较大(0.86),其贡献率

在 73% 以上,枸杞种植面积复相关系数较大(0.677),其贡献率在 46% 以上,这主要是产量受气象因子的影响为主,而种植面积不仅受气象因子的影响,而且受市场行情的调节。气温日较差对枸杞产量和种植面积的变化影响最大,贡献率分别为 57.6% 和 26.4%,其他气温因子对产量的影响相对较小,影响种植面积的次要因子为高温日数(23.1%)和 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温日数(24.4%),表明柴达木盆地受气温升高影响,区域内宜增加农地,在一定程度上有利于枸杞面积的增加和产量的提高。

表 6 柴达木盆地气温因子对枸杞产量和种植面积的相对贡献率

项目	相对贡献率(%)				
	气温日较差	高温日数	低温日数	$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温	$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温日数
枸杞产量	57.6	14.8	1.6	12.9	13.1
枸杞种植面积	26.4	23.1	17.2	9.0	24.4

3 结论和讨论

通过对 1961 — 2018 年柴达木盆地枸杞生长季平均气温、最高气温、最低气温、气温日较差、高低温日数、 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温及积温日数进行分析得出结论:(1)近 58 年来柴达木盆地枸杞生长季气温整体变暖趋势明显,而且夜间增温速率高于白天的增温速率,存在着非对称性变化。平均气温、最高气

温、最低气温分别以  $0.37$ 、 $0.33$ 、 $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$  的速率呈显著上升趋势,气温日较差以  $-0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$  的速率呈显著下降趋势。平均气温、最高气温、最低气温负异常次数均出现在 20 世纪 60 年代至 80 年代,正异常次数均出现在 21 世纪 00 年代至 10 年代。(2)柴达木盆地枸杞生长季高温日数整体以气候倾向率  $1.1\text{ d}/10\text{ 年}$  呈现增多趋势,而低温日数以  $1.7\text{ d}/10\text{ 年}$  呈减少趋势。生长季 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温、积温



日数的增加趋势明显,气候倾向率分别为  $66.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$  和  $0.7\text{ d}/10\text{ 年}$ 。(3)柴达木盆地枸杞生长季平均气温、最高气温和气温日较差分别于 1994、1995、2000 年发生突变。最低气温没有发生突变。(4)柴达木盆地 1991—2017 年枸杞产量和种植面积的 增加 趋 势 明 显, 气 候 倾 向 率 分 别 为  $331.5\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10\text{ 年})$  和  $12\text{ }254.0\text{ hm}^2/10\text{ 年}$ , 气温日较差对枸杞产量和种植面积的变化影响最大,其他气温因子对产量的影响相对较小,影响种植面积的次要因子为高温日数和  $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温日数。(5)气候变暖提高了柴达木盆地的农业气候资源与优势。光照资源十分丰富,为枸杞的生长发育提供充足的条件,气温的升高对枸杞生长发育十分有利,使枸杞顺利开花,为结果期提供充足的热量。但降水偏少,且相对集中,枸杞果熟期降水会对产量影响较大。本研究仅对柴达木盆地枸杞生长季的气温、积温及积温日数和高(低)温日数的特征及长期变化趋势进行了初步分析,这对于指导柴达木盆地生态特色农业发展规划布局,合理开发和利用当地气温资源具有一定的参考作用。气温升高,蒸腾量加大,气候变化导致农业生产不稳定性增加,引起农业生产布局及结构发生变动,使种植制度发生改变,成为枸杞特色农业生产的主要威胁。因此,在农业生产中应采取节水措施,兴修水利,合理开发及使用水资源,保证特色枸杞农业可持续发展。气候变化因子包括的气象要素很多,为彻底了解该研究区域的气候变化特点,今后还需要在气候因子(如日照、风速、蒸发等)、极端气候事件(如高温、暴雨、干旱)对枸杞生长发育和产量的影响等方面进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 秦大河, Stocker T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [2] 屠其璞, 邓自旺, 周晓兰. 中国近 117 年年平均气温变化的区域特征研究[J]. 应用气象学报, 1999, 10(增刊 1): 34-42.
- [3] 于淑秋. 近 50 年我国日平均气温的气候变化[J]. 应用气象学报, 2005, 16(6): 787-793.
- [4] 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.
- [5] 裴玉芳, 祁栋林, 张启发, 等. 近 55 年来青海省海东市气候变化特征及影响因子分析[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 275-282.
- [6] 张永领, 何 桐. 海口市气温非对称变化的气候特征[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版), 2005, 26(4): 50-58.
- [7] 朱大运, 熊康宁, 董晓超. 贵州 1960—2016 年气温时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 168-173, 180.
- [8] 阴秀霞, 王洪丽, 王彦平, 等. 呼伦贝尔市 1961—2013 年气温变化特征[J]. 内蒙古农业科技, 2014(5): 68-71.
- [9] 刘纹瑕, 陈 辉, 巩国丽, 等. 51 年来柴达木盆地东部地区气候特征分析[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(8): 1806-1810.
- [10] 沈 菊, 张彩岳, 许显花, 等. 1980—2015 年柴达木盆地地表温度变化特征[J]. 中国农学通报, 2016, 32(35): 58-64.
- [11] 韩廷芳, 祁栋林, 相守桂, 等. 柴达木盆地东西部气候差异分析[J]. 青海环境, 2019, 29(2): 61-66, 79.
- [12] 王发科, 都占良, 雷玉红, 等. 柴达木盆地南缘农业气候资源变化特征分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(23): 91-96.
- [13] 戴 升, 申红艳, 李 林, 等. 柴达木盆地气候由暖干向暖湿转型的变化特征分析[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 211-220.
- [14] 李 林, 申红艳, 李红梅, 等. 柴达木盆地气候变化的区域显著性及其成因研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 641-650.
- [15] 陆广彦, 马 军, 李广文. 1961—2016 年柴达木盆地东南部气温变化趋势[J]. 中国农学通报, 2019, 35(23): 97-102.
- [16] 肖莲桂, 石明章, 祁栋林, 等. 1961—2014 年青海湖上游气温变化趋势分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(11): 95-100.
- [17] 雷玉红, 梁志勇, 李存莲, 等. 柴达木枸杞发育期监测及其相关气象条件分析[J]. 青海农林科技, 2015(2): 32-36.
- [18] 李海凤, 祁贵明, 郭晓宇. 柴达木盆地枸杞种植气候资源区划[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(19): 201-203, 256.
- [19] 雷玉红, 梁志勇, 颜亮东. 柴达木地区枸杞气象服务指标研究[J]. 青海农技推广, 2019(1): 38-44.
- [20] 邓振镛, 张 强, 王润元, 等. 西北地区特色作物对气候变化响应及应对技术的研究进展[J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 855-862.
- [21] 青海省气象局. 气象灾害分级指标: DB63/T 372 — 2018[S]. 青海: 青海省市场监督管理局, 2018.
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [23] 方精云. 地理要素对我国温度分布影响的数量评价[J]. 生态学报, 1992, 12(2): 97-104.
- [24] 祁栋林, 李晓东, 苏文将, 等. 近 50 年青海省风蚀气候侵蚀力时空演变趋势[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 234-239.
- [25] 唐红玉, 翟盘茂, 王振宇. 1951—2002 年中国平均最高、最低气温及日较差变化[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 728-735.
- [26] 马晓波. 中国西北地区最高、最低气温的非对称变化[J]. 气象学报, 1999, 57(5): 613-621.
- [27] 李香芳, 李栋梁, 段晓凤, 等. 宁夏枸杞生长季气候变化特征及其影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1789-1798.