

近56年青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 热量资源的时空变化特征

王喆^{1,2}, 祁栋林^{1,2}, 严应存^{1,2}, 肖建设^{1,2}, 裴玉芳³

(1. 青海省气象科学研究所, 青海 西宁 810001; 2. 青海省防灾减灾重点实验室, 青海 西宁 810001;

3. 青海省民和县气象局, 青海 川口镇 810801)

摘要: 利用青海省44个气象站1960~2015年的逐日平均气温资料, 采用线性倾向估计、Mann-kendall突变检验以及反距离权重插值(IDW)方法, 对青海省近56 a日平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温、持续天数、初日、终日的时空变化规律进行了分析。结果表明: (1) 近56 a青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温和持续天数分别以 $64.38^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $3.25 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的倾向率呈显著增加趋势, 二者分别于1998年、1997年发生了突变。二者主要受初日提前和终日推迟的共同影响。(2) $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和持续天数大体上均呈现由西南向东北逐渐增加的趋势, 高值区主要分布在东部农业区和柴达木地区, 低值区主要分布在三江源区西部。(3) 与20世纪60年代相比, 21世纪青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段II(500~1 500 $^{\circ}\text{C}$)面积减小了14.06%; $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段IV(2 000~3 000 $^{\circ}\text{C}$)面积增加了16.34%。(4) 随着气候变暖, 1 500 $^{\circ}\text{C}$ 等值线呈现出整体向高海拔扩张和向低纬度南移的趋势, 且呈显著向西向南的移动趋势。

关键词: $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温; 持续天数; 时空变化; 青海省

中图分类号: S161.2 **文献标志码:** A

Spatial and temporal variation of above 0°C thermal resources in last 56 years in Qinghai Province

WANG Zhe^{1,2}, QI Dong-lin^{1,2}, YAN Ying-cun^{1,2}, XIAO Jian-she^{1,2}, PEI Yu-fang³

(1. Qinghai Meteorological Science Institute, Xining, Qinghai 810001, China; 2. Key Laboratory for Preventing and

Mitigating Disaster of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810001, China; 3. The Meteorological Administration

of Minhe County, Chuankou Town, Qinghai 810801, China)

Abstract: The daily temperature data of 1960 to 2015 from 44 meteorological stations in Qinghai Province were used to study the temporal and spatial variation of steadily accumulated temperature ($\geq 0^{\circ}\text{C}$), lasting days, the beginning and ending dates by using the methods of linear trend estimation, Mann-kendall, and Inverse Distance Weighting (IDW). The results showed: (1) In last 56 years, the accumulated temperature steadily above 0°C and its lasting days were increased at rates of $64.38^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ and $3.25 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$, and then abrupt change occurred in 1998, 1997, respectively. This phenomenon was mainly due to advanced start date and the delayed end date. Furthermore, the delaying of end date was more influential than the advanced start date. (2) The accumulated temperature steadily above 0°C and its lasting days increased gradually from the southwestern region to the northeastern region in Qinghai. The areas with high values of the accumulated temperature steadily above 0°C and the lasting days were mainly in the eastern agricultural region and Qaidam Basin, areas with low values were in the west of Three-River Headwaters Region. (3) Compared with 1960s, the areas in the section II (500~1 500 $^{\circ}\text{C}$) of accumulated temperature above 0°C decreased by 14.06% in the early 21st century while the areas in the section IV (2 000~3 000 $^{\circ}\text{C}$) increased by 16.34%. (4) Due to global warming, 1 500 $^{\circ}\text{C}$ isopleth expanded to high altitude and low latitude, and a significant shifting trend toward the south and the west.

Keywords: accumulated temperature above 0°C ; lasting days; spatial-temporal change; Qinghai Province

近年来,以全球变暖为主要特征的气候变化已经成为不争的事实。政府间气候变化委员会(IPCC)第五次综合评估第一组的报告决策者摘要提出,气候变化比原来认识的要更加严重,在过去的三十年里,每十年的地表气温要高于人类有记录以来的任何十年,且 2000 年以来的十几年气温是最高的^[1]。施雅风等^[2]和秦大河^[3]对中国西北地区的气候研究表明,西北地区的气候由之前的暖干型逐渐向暖湿型转变,逐步形成气温升高、降水增加的特征。

气候变化将改变农业气候资源,尤其是热量资源的时空分布,热量资源的变化,将会对农业结构、种植制度和农作物产量产生广泛而深刻的影响^[4]。积温是衡量作物生长发育过程中所需热量条件的一种指标,同时也是表征地区热量条件的一种重要指标^[5-7], 0°C 是大多数喜凉作物生长的下限温度^[8], $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温反映着喜凉作物所需热量资源的多寡,是鉴定一个地区总热量的指标^[9],也是农牧业生产的重要热量指标^[10-11]。

随着气候的不断变暖,青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、持续天数、初日和终日都可能发生变化,这对合理规划与开发利用当地的气候和土地资源、促进农业可持续发展具有重要影响。目前国内学者对 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 热量资源已开展了大量研究,如普宗朝等^[12]、李艳春等^[13]、郭卫东等^[14]对新疆、宁夏和青海近 50 年 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日、终日、持续天数和活动积温的变化研究均表明, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日总体呈提前趋势,终日为推迟趋势,持续天数延长,积温增加。孙兰东等^[9]基于小波分析法对西北地区 1961–2003 年 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温对气候变化的响应研究表明, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温从 1986 年开始增加,在 1996 年前后发生突变且存在准 8 a 变化周期。缪启龙等^[15]对中国 1951–2005 年 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 热量资源的研究表明: $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和持续天数的总体趋势是普遍增加的,且在东部增幅大,西部增幅小。但对于青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 热量资源变化情况的研究较少,尚未见全面系统分析青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 热量资源时空变化特征的研究。

本文利用青海省 44 个气象站点 1960–2015 年的逐日平均气温数据,结合 ARCGIS 的空间插值技术,统计分析了近 56 a 来 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 热量资源的时空变化特征,在此基础上,参考青海省农牧业气候资源一级区划指标^[16],研究了热量资源的年代际空间变化特征。为应对气候变化、充分合理地开发利用青海省的热量资源、优化种植业结构、采取适宜的作物品种和种植模式提供了科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文所用资料来源于青海省 52 个气象站 1960–2015 年的逐日日平均温度。剔除资料长度不满足 1960–2015 年连续性观测及资料缺失大于 5 d 的站,对缺失少于 5 d 的资料,采用前 5 日平均值取代。经过预处理得到 44 个站逐日平均温度资料。气象站点分布见图 1。

1.2 分析方法

1.2.1 界限温度起止日期的确定 采用五日滑动平均法统计日平均气温稳定通过 0°C 界限温度起止日期。即在一年中,任意连续 5 d 的日平均气温的平均值 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的最长一段时期内,于第一个五天(即上限)中挑取最先一个日平均气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的日期为起日;于最后一个五天(即下限)中挑取最末一个日平均气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的日期为止日。起止日间积温为起止日间日平均气温的累计值。按照上述方法,得到 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的起始日期和终止日期,累加此时间段内的日平均气温,得到 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温;同样累加起止日期之间的天数,获得 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的持续天数。

1.2.2 线性倾向估计 对于日平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 期间热量资源的时间变化,通过利用气候倾向率法计算各站点日平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 期间热量资源的气候倾向率来进行趋势分析^[17]。气候倾向率 ≥ 0 时表示日平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 期间热量资源的时间序列随时间递增呈上升趋势,反之呈下降趋势。

1.2.3 Mann-Kendall 趋势检验 M-K 检验是一种非参数统计检验方法,常用于水质、径流量、温度、降雨等水温时间序列变化趋势的显著性检验^[18-19]。具体计算步骤见参考文献[19]。

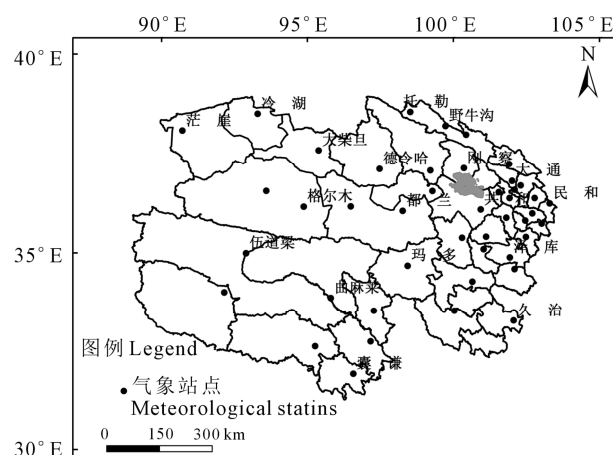


图1 研究区气象站点分布图

Fig.1 Distribution of meteorological stations in the study area

1.2.4 空间插值处理 本文采用反距离权重插值法 (inverse distance weighted interpolation, IDW) 对 44 个气象站点日平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 期间积温、持续天数、初日、终日数据进行插值,生成栅格数据,得到相应的空间分布图。

1.2.5 相似系数 采用相似系数定量地表示两幅图的相似程度,它由下式计算:

$$\cos\theta_{12} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m y_i^2}} \quad (1)$$

式中, m 为台站数 ($m = 52$), x_i, y_i 分别为第 i 个站的要素值, $\cos\theta_{12}$ 为两幅图的空间相应系数。相似系数等于 1.00 为完全相同,相似系数为 -1.00 为完全相反,为 0.0 时表示完全不相似。正值越大越相似,负值越大越相反^[20]。

2 结果与分析

2.1. 时间变化特征

2.1.1 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 由图 2(a) 可见,近 56 a 青海省日平均气温稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温呈波动上升的趋势,上升速度为 $64.38^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,接近全国的平均趋势 ($67.30^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$)^[21]。多年平均积温为 $1\,939.52^{\circ}\text{C}$,最低值出现在 1976 年,为 $1\,703.19^{\circ}\text{C}$;最高值出现在 2013 年,为 $2\,231.0^{\circ}\text{C}$,最高值与最低值相差 527.91°C ,是多年平均值的 $1/3$,说明青海省日平均气温稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温的年际变化幅度大。由年代积温曲线可知,1960 年以来积温呈不断上升趋势,由 20 世纪 60 年代的 $1\,842.0^{\circ}\text{C}$ 上升至 21 世纪以来的 $2\,103.74^{\circ}\text{C}$,其中,60 年代至 80 年代积温变幅较小,90 年代至 21 世纪初积温呈明显的波动上升趋势,且上升幅度较大。从积温的 6 阶主值函数可见,60 年代到 90 年代变化趋势不明显,90 年代到 2010 年转为明显上升趋势,到 2010 年达到波峰,2010 年后又无明显的增减变化,说明青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温从 90 年代开始发生增加的转变,2010 年后增加趋势趋于平稳。从积温距平可见,1960–1997 年积温距平以负值为主,日平均气温稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温小于其多年平均值;1997 年以后以正距平为主,日平均气温稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温大于其多年平均值。

对青海省 1960–2015 年积温序列进行 M-K 突变检验 (图 2(b))。由图可知,日平均气温稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 UF 线呈上升趋势,与 UB 线相交于 ± 2.59 临界线间,且通过 ($\alpha = 0.01$) $U_{\alpha} = 2.59$ 的置信水平检测,交点在 1998 年,说明 1998 年为积温的突变

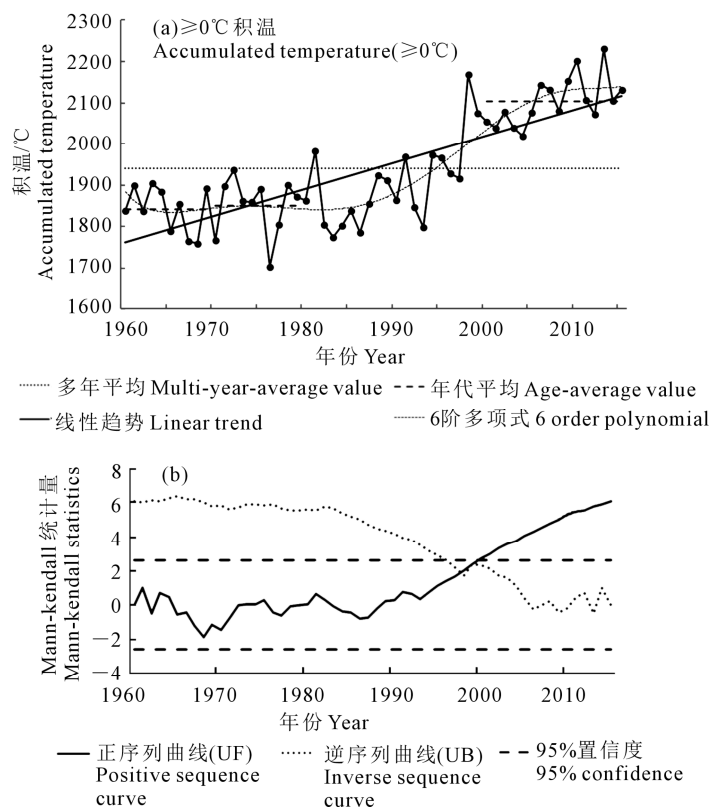


图 2 1960–2015 年青海省日均温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温的变化及突变检验

Fig.2 The trend and Mann-Kendall test of accumulated temperature ($\geq 0^{\circ}\text{C}$) in Qinghai during 1960–2015

年,积温突变后 ($2\,168.48^{\circ}\text{C}$) 较突变前 ($1\,915.60^{\circ}\text{C}$) 增加 252.88°C ,表明自 1998 年以后积温呈显著上升趋势,积温距平的年际变化也表现出与此一致的趋势。

2.1.2 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温持续天数 由图 3(a) 可见,近 56 a 青海省日平均气温稳定通过 0°C 的持续天数呈显著上升趋势,上升幅度为 $3.25\text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$,多年平均值为 204 d,最小值出现在 1970 年,仅 188 d,最大值出现在 2015 年,为 224 d,最高值与最低值相差 36 d。从年代变化来看,1960 年以来各年代 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 持续天数均不断增加,20 世纪 60 年代至 80 年代整体变化较小,在 199 d 左右,90 年代开始增加明显,较 60 年代增幅为 6 d,21 世纪以来持续天数增速更快,由 60 年代的 198 d 增至 211 d。从持续天数的 6 阶主值函数可见,从 60 年代到 70 年代中期,持续天数呈波动变化趋势,在 1965 年到达波谷,位于平均值以下;从 1976 年开始表现为上升趋势,进入 90 年代中期后,呈单调递增的上升趋势,2010 年后这种上升趋势更加明显。从持续天数距平来看,1996 年以前距平值以负值为主,而 1996 年以后距平则以正值为主,在 21 世纪初持续天数呈现持续高值。综合来看,日平均气温稳定通过 0°C 持续天数的年际变化与积温的年际变化基本同步。

对持续天数序列进行 M-K 突变检验(图 3(b))。由图可知,日平均气温稳定通过 0°C 持续天数 UF 线呈上升趋势,与 UB 线相交于 ± 2.59 临界线间,且通过 $(\alpha=0.01) U_{\alpha}=2.59$ 的置信水平检测,交点在 1997 年,说明 1997 年为持续天数的突变年,略早于积温的突变,1997 年以后的持续天数(212 d)较突变前(200 d)增加了 12 d,表明自 1997 年以后持续天数呈显著增加趋势,持续天数距平的年际变化也表现出与此一致的趋势。

2.1.3 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温初日、终日的变化趋势 对青海省日平均气温稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 期间的初、终日进行分析,由图 4(a)可见,近 56 a 来初日呈明显提前趋势,速度为 $-1.60 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。平均初日为 4 月 4 日,初日最早出现在 2002 和 2013 年的 3 月 25 日,最迟出现在 1970 年的 4 月 14 日,两者相差 20 d。从年

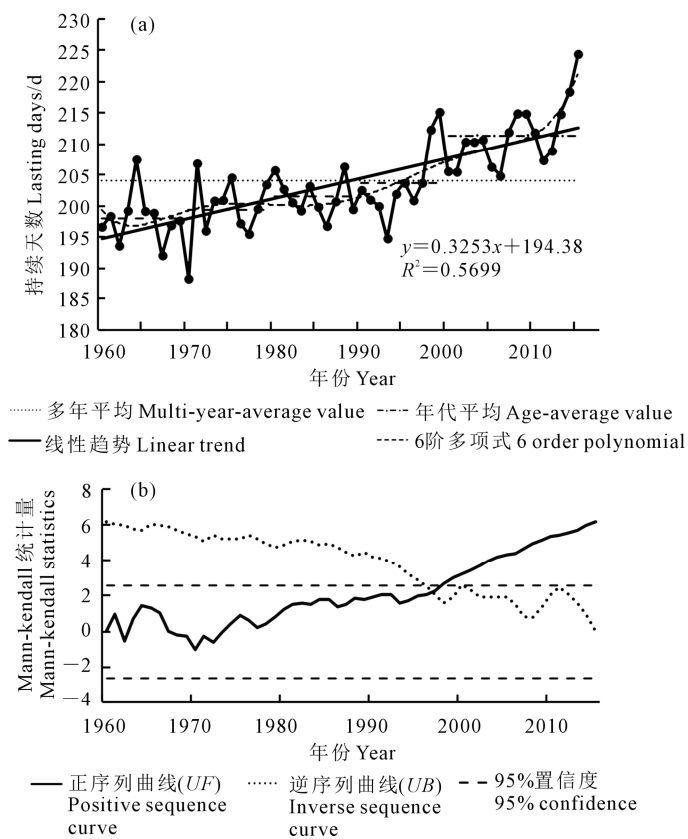


图 3 1960–2015 年青海省日均温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 持续天数的变化及突变检验

Fig.3 The trend and Mann–Kendall test of lasting days with t

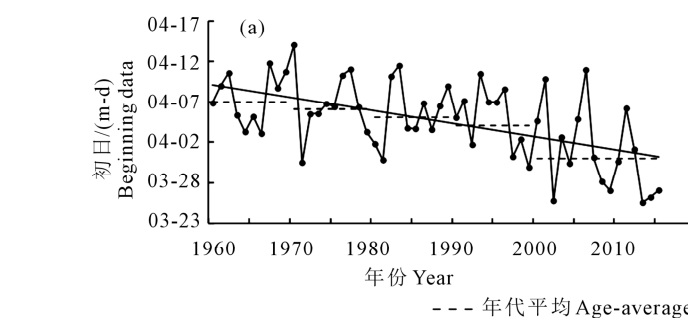


图 4 1960–2015 年青海省日均温稳定通过 0°C 的初日(a)和终日(b)变化

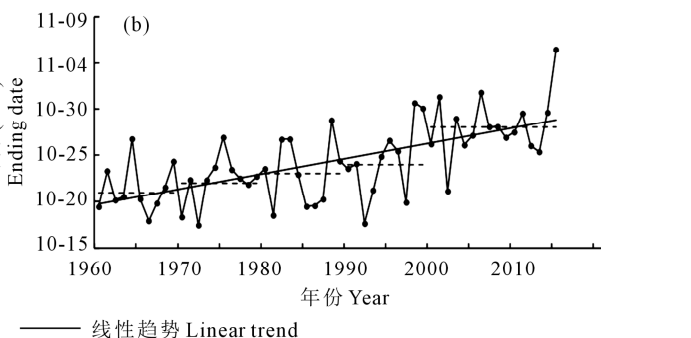
Fig.4 The annual changes of beginning (a) and ending date (b) with the average daily temperature above 0°C in Qinghai Province

代均值初日来看,初日在不断提前,从 20 世纪 60 年代的 4 月 7 日提前至 21 世纪以来的 3 月 31 日。近 56 a 来终日则呈现与初日相反的推迟趋势(图 4(b)),以 $1.64 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的趋势推迟,平均终日为 10 月 24 日,最早为 1966 年、1972 年和 1992 年的 10 月 17 日,最迟为 2015 年的 11 月 5 日,两者相差 19 d,因此,初始日期提前程度略小于终日延迟程度。从年代均值终日来看,1960 年以来终日在不断延后,从 20 世纪 60 年代的 10 月 21 日延后至 21 世纪以来的 10 月 28 日。综合来看 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温及持续天数的普遍增加,受初日提前和终日推迟的共同影响。

2.2 空间分布特征

2.2.1 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 图 5(a)是青海省 1960–2015 年稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温的空间分布图,从图中可知,青海省稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温介于 $501^{\circ}\text{C} \sim 3\,560^{\circ}\text{C}$,两者之间相差 $3\,059^{\circ}\text{C}$ 。最大值出现在东部农业区,最小值出现在三江源西部和东部地区。参考寒温区和冷温区(以 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 $1\,500^{\circ}\text{C}$ 为界)划界标准^[15],将青海省划分为南寒北冷两块区域(以下同)。由图 5(a)可以看出,在青海省北部,稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温有两个高值区,分别位于东部农业区和柴达木地区东部,二者的 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温均在 $2\,000^{\circ}\text{C}$ 以上;而三江源区大部分站点的积温都在 $1\,500^{\circ}\text{C}$ 以下。

2.2.2 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温持续天数 图 5(b)是青海省 1960–2015 年稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温持续天数的空间分布图。从图中可知,青海省稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温持续天数介于 114~268 d,两者之间相差 154 d。大部分地区稳定通过 0°C 的持续天数较长,一般在 189 d 以上,东部农业区部分地区的持续天数甚至在 239 d 以上。在青海省北部,稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温持续天数的高值区分布在东部农业区,柴达木地区也有部分站点的持续天数在 214 d 以上,而在祁连山区持续天数较短,有些站点的持续天数甚至在 164 d 以下;在三江源区,大部分地区稳定通过 0°C 的持续天数较短,一般在 189 d 以下,三江源西部有些站点的持



续天数甚至不足 139 d。通过计算,图 5(a)与图 5(b)的相似系数为 0.98,可见它们是非常相似的。这个结果是很好解释的,因为积温是某一时段内逐日平均气温的累积之和,持续天数越长,积温就应该越大,就多年平均讲,积温的空间分布应该与持续天数的空间分布较一致。

2.2.3 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温初日、终日期 图 5(c)是青海省稳定通过 0°C 界限温度初日的空间分布图。从图中可知, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日开始时间介于 2 月 29 日~5 月 31 日,两者相差 92 d。 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日开始时间整体上表现为自西南向东北提前的趋势,大部分地区 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日开始时间在 4 月中旬以前。在青海省北部,除祁连山区外, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日开始时间表现为自西向东逐渐提前的趋势, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日开始最早的站点虽然在柴达木地区有所分布,但大部分集中分布在东部农业区;在三江源区,大部分地区 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日开始时间介于 4 月 9 日~4 月 29 日,南部的部分站点 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日开始时间也较早,在 4 月上旬之前,而在三江源西部的有些站点, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日开始时间是全省最晚的站点,要推迟到 5 月中旬左右才通过。

图 5(d)是青海省稳定通过 0°C 界限温度终日的空间分布图。从图中可知, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 终日结束时间介于 9 月 21 日~11 月 23 日,两者相差 63 d。大部分地区 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 终日结束时间较晚,一般在 10 月下旬,东部农业区部分地区 0°C 终日结束时间最晚,一般在 11 月中旬以后。在青海省北部,柴达木盆地和东部农业区终日结束时间一般在 10 月下旬以后,而祁连山区的部分站点终日结束时间较早,10 月中旬以前就结束;在三江源区,除南部地区以外,其它地区 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 终日结束时间 10 月下旬以前就结束。通过计算,图 5(c)与图 5(d)的相似系数为-0.98,可见它们的空间分布特征相反。初日开始早的地方,终日结束的也较晚。

2.3 年代际空间分布特征

参考青海省农牧业气候资源一级区划指标^[15],将 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温划分为 5 个积温段,即 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 I (jw0d I, $\leq 500^{\circ}\text{C}$,无农牧业生产区)、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 II (jw0d II, $500 \sim 1\,500^{\circ}\text{C}$,牧业区)、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 III (jw0d III, $1\,500 \sim 2\,000^{\circ}\text{C}$,农牧业过渡区)、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 IV (jw0d IV, $2\,000 \sim 3\,000^{\circ}\text{C}$,农业区,一熟区)、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 V (jw0d V, $\geq 3\,000^{\circ}\text{C}$,农业区,两年三熟区)。

从不同年代各积温段的空间分布图(图 6)和所占面积百分比表(表 1)中可知,青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 IV、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 V 面积都在逐渐扩大; $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段

I、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 II 面积不断减小;90 年代以前 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 III 的面积在逐渐减小。从 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 各积温段所占比重可知,与 20 世纪 60 年代相比,21 世纪 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 II 与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 IV 变化明显,其中 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 II 所占的比重与 60 年代相比减小了 14.06%,减少区域主要集中在祁连山区南部和三江源区东部; $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 IV 所占的比重与 60 年代相比增加了 16.34%,增加区域主要集中在祁连山区南部和柴达木地区东部;90 年代 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 III 变化明显,所占比重从 60 年代的 29.60%减少至 24.55%,主要在柴达木地区的西部;其余积温段无明显变化。

结合 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温的 6 阶主值函数和 M-K 突变检验,将 1960-2015 年分解为时段 1960-1990 年(时段 I)和 1991-2015 年(时段 II)以及 1960-1998 年(时段 III)和 1999-2015 年(时段 IV)四个时段分析不同积温段的变化情况(表 2)。从表 2 可以看出,与时段 I 相比,时段 II 青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 IV、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 V 面积都有所增加; $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 I、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 II 和 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 III 面积有所减小,其中 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 IV 的变化最明显,与时段 I 相比增加了 12.44%;与时段 III 相比,时段 IV 青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 III、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 IV 和 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 V 面积都有所增加; $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 I 和 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 II 面积有所减小,其中 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段 II 的变化最明显,与时段 III 相比减少了 14.12%。

表 1 不同年代 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 各积温段面积百分比/%

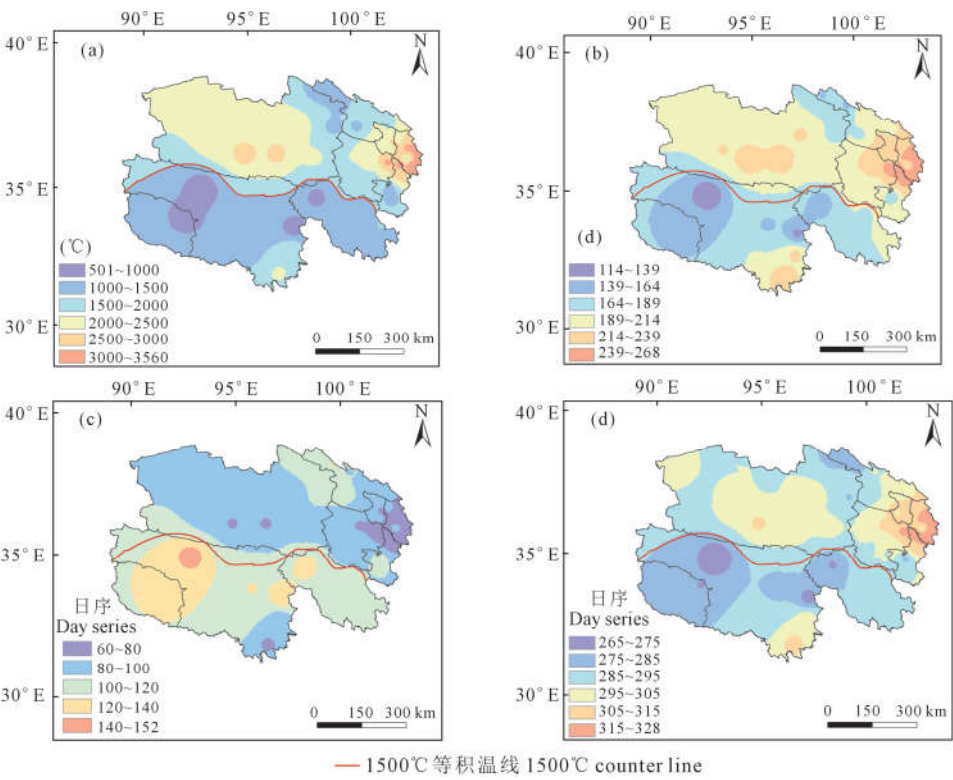
Table 1 The change of the area at the different accumulated temperature $\geq 0^{\circ}\text{C}$ section in different decades

年代 A decade of acentury	jw0d I	jw0d II	jw0d III	jw0d IV	jw0d V
1960s	0.14	47.48	29.60	22.13	0.66
1970s	0.11	46.60	28.04	24.75	0.51
1980s	0.11	46.89	26.72	25.79	0.50
1990s	0.00	41.67	24.55	32.98	0.80
2000s	0.00	33.41	26.75	38.47	1.36

表 2 不同时段 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 各积温段面积百分比/%

Table 2 The change of the area at the different accumulated temperature $\geq 0^{\circ}\text{C}$ section in different time frame

时段 Period of time	jw0d I	jw0d II	jw0d III	jw0d IV	jw0d V
时段 I	0.11	47.07	27.75	24.50	0.56
时段 II	0.00	35.09	26.72	36.94	1.25
时段 III	0.08	46.02	26.49	26.81	0.59
时段 IV	0.00	31.90	27.72	38.90	1.48



(a) $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温; (b) $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温持续天数; (c) $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温开始日序; (d) $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温结束日序
图 5 1960–2015 年青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution of the accumulated temperature $\geq 0^{\circ}\text{C}$ (a) , lasting days (b) beginning day series (c) and ending day series (d) in Qinghai Province

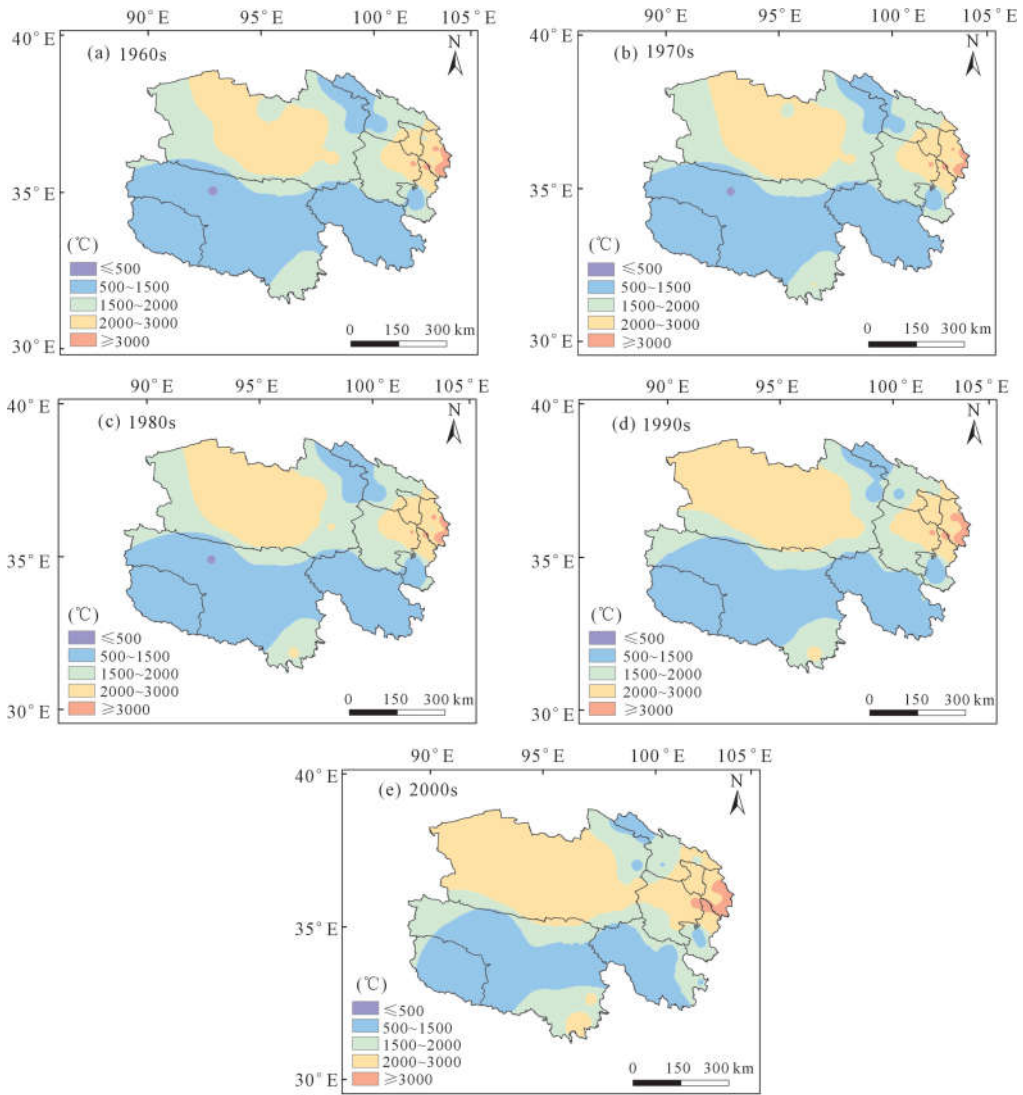


图 6 青海省不同年代 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 各积温段空间分布图

Fig.6 The decadal spatial distribution of different accumulated temperature $\geq 0^{\circ}\text{C}$ section in Qinghai Province

在青海省农牧业气候资源一级区划指标^[16]中, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 $1\,500^{\circ}\text{C}$ 等值线是青海省农业区和牧业区的分界线,为了研究在气候变暖的影响下,该分界线以及可能种植区的变化情况,分析了该等值线 1960–2015 年间每十年际的波动变化趋势。根据图 7 分析可知,该等值线的整体变化比较简单。变化幅度较大的时间段基本上是从 20 世纪 90 年代到现在,变化幅度较大的地域基本上在三江源西部附近的区域,变化呈现出整体向高海拔扩张和向低纬度南移的趋势。

为了定量表征该等值线的位置变化,本文采用等值线的加权平均位置来表征其整体位移,即在对等值线离散化的基础上,求得这些离散点的经纬度坐标的加权平均值^[22],以年际间等值线的加权平均位置(中心点坐标)的变化来反映等值线的空间整体位移特征。根据统计的青海省 44 个站点的多年平均日均温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温,利用 IDW 插值法,得到青海省多年平均日均温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温的空间分布图,并将插值结果转为矢量图,并对其进行二次处理,删除无法表征等积温线的较短的弧段,选取纬向展布范围最大、弧段最为连续的等积温线为最终结果。对处理完的图进行栅格化处理,然后将栅格的等值线进行矢量点的处理,最终得到和等值线空间分布完全重合的矢量点,并以统计得到的矢量点经纬度的平均值作为所需要的等值线的中心。通过对等积温线

中心(X,Y)的变化的研究,得到等积温线的空间变化规律。

图 8 表示青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 累积积温为 $1\,500^{\circ}\text{C}$ 等值线的空间变化规律。从经度上看, $1\,500^{\circ}\text{C}$ 等积温线中心点经向变化率为 $-0.1^{\circ} \cdot 10\text{a}^{-1}$,在 $\alpha=0.05$ 时,经度减少的趋势显著,即 $1\,500^{\circ}\text{C}$ 等积温线向西移动趋势明显;从纬度上看, $1\,500^{\circ}\text{C}$ 等积温线中心点纬向变化率为 $-0.1^{\circ} \cdot 10\text{a}^{-1}$,在 $\alpha=0.05$ 时,纬度减少的趋势显著。所以结合经纬度共同来看,1960–2015 年, $1\,500^{\circ}\text{C}$ 等积温线呈显著向西向南的移动趋势。

3 讨论与结论

1) 近 56 a 青海省日平均气温稳定通过 0°C 积温及持续天数呈显著增加趋势($P<0.05$),其变化率分别为 $64.38^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $3.25\text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$,二者分别于 1998 年、1997 年发生了突变,其中积温的增加速率接近全国的增加速率($67.30^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$)。积温和持续天数的增加主要受初日提前和终日推迟的共同影响。

2) 青海省日平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和持续天数大体上均呈现由西南向东北逐渐增加的趋势,稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温介于 $501^{\circ}\text{C} \sim 3\,560^{\circ}\text{C}$,稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温持续天数介于 $114 \sim 268\text{ d}$, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和持续天数的高值区主要分布在东部农业区和柴达木地

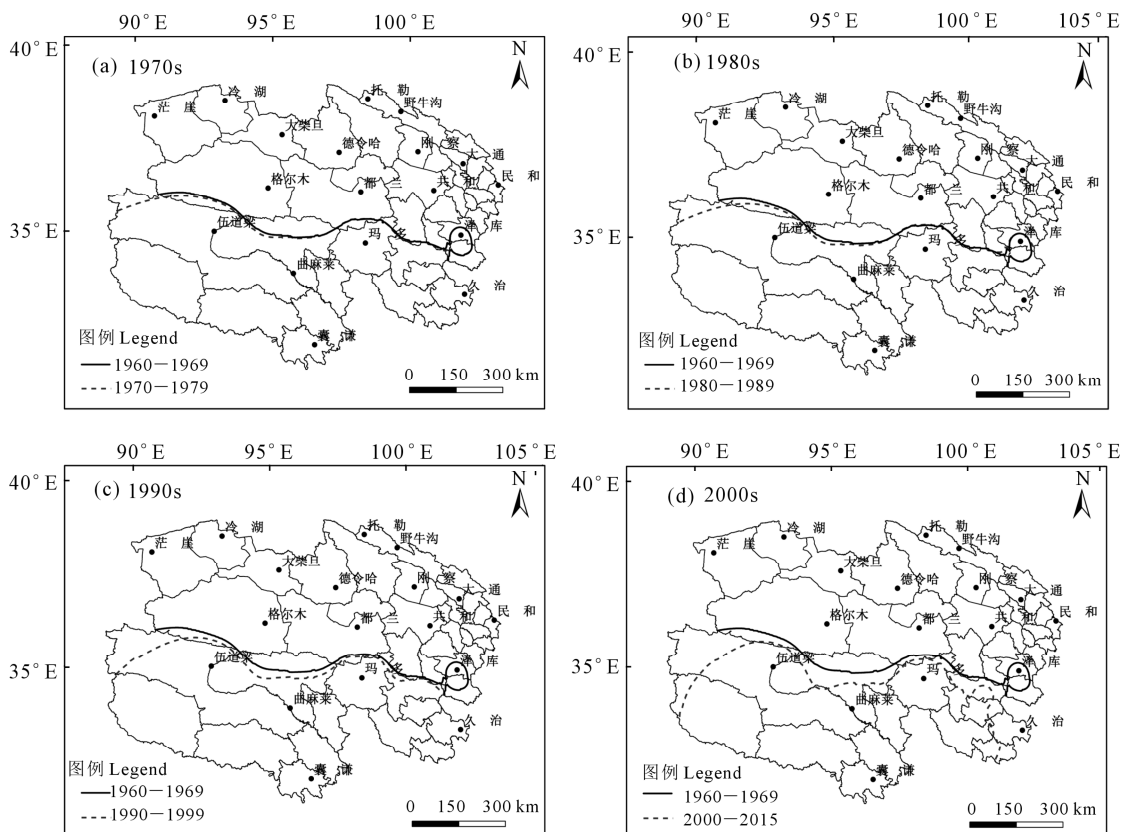


图 7 青海省不同年代 $1\,500^{\circ}\text{C}$ 等积温线位置变化

Fig.7 The decadal spatial shift of $1\,500^{\circ}\text{C}$ isopleth in Qinghai Province

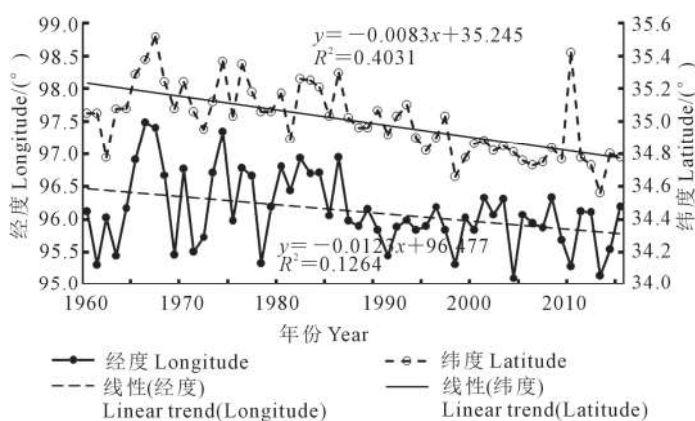


图8 1960–2015年青海省1500℃等积温线
中心点年际空间位移

Fig.8 Annual spatial shift of the centers of the 1500°C
isopleths during 1960–2015 in Qinghai Province

区,低值区主要分布在三江源区西部。 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日开始时间表现为自西向东逐渐提前的趋势,开始时间介于2月29日~5月31日,终日结束时间介于9月21日~11月23日,初日开始时间较早和终日结束时间较晚的地区均分布在东部农业区。

3)较20世纪60年代,21世纪青海省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段Ⅱ(500~1500℃)面积减小了14.06%; $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温段Ⅳ(2000~3000℃)面积增加了16.34%。

4)从年代变化来看,20世纪60年代到80年代1500℃的等值线变化不明显,90年代以后变化趋势明显,呈现出整体向高海拔扩张和向低纬度南移的趋势,即呈显著向西向南的移动趋势。

参考文献:

- [1] 沈永平,王国亚.IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J].冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.
- [2] 施雅风,沈永平,胡汝骥.西北气候由暖干向暖湿转型的信号影响和前景初步探讨[J].冰川冻土,2002,24(3):219-226.
- [3] 秦大河,罗勇,陈振林.气候变化科学的最新进展.IPCC第四次评估综合及报告解析[J].气候变化研究进展,2007,3(6):311-314.

- [4] 赵俊芳,郭建平,马玉平,等.气候变化背景下我国农业热量资源的变化趋势及适应对策[J].应用生态学报,2010,21(11):2922-2930.
- [5] 李元华,刘学锋,刘莉,等.河北省近50年0℃界限温度积温变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2006,20(4):12-15.
- [6] 王锡稳,王毅荣.黄土高原积温变化的敏感性研究[J].干旱区地理,2006,29(6):817-822.
- [7] 毛恒青,万晖.华北、东北地区积温的变化[J].中国农业气象,2008,29(3):1-6.
- [8] 胡琦,潘学标,邵长秀,等.1961–2010年中国农业热量资源分布和变化特征[J].中国农业气象,2014,35(2):119-127.
- [9] 孙兰东,刘德祥.西北地区热量资源对气候变化的响应特征[J].干旱气象,2008,26(1):8-11.
- [10] 徐德源.新疆农业气候资源及区划[M].北京:气象出版社,1989:15-38.
- [11] 杨晓光,于沪宁.中国气候资源与农业[M].北京:气象出版社,2006:97-100.
- [12] 普宗朝,张山清,李景林,等.近50a新疆 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 持续日数和积温时空变化[J].干旱区研究,2013,30(5):781-788.
- [13] 李艳春,冯建民,杨建玲,等.宁夏0℃积温时空演变特征分析[J].干旱区地理,2012,35(5):732-737.
- [14] 郭卫东,汪青春.青海省积温变化特征分析[J].安徽农业科学,2013,41(26):10736-10739.
- [15] 缪启龙,丁园圆,王勇,等.气候变暖对中国热量资源分布的影响分析[J].自然资源学报,2009,24(5):934-944.
- [16] 周秉荣,胡爱军,陈国茜,等.青海省农牧业气候资源综合区划及评价[J].资源科学,2013,(1):191-198.
- [17] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术(第二版)[M].北京:气象出版社,2007.
- [18] 施能,陈家其,屠其璞.中国近100年来4个年代际的气候变化特征[J].气象学报,1995,53(4):431-439.
- [19] 刘敏,沈彦俊,曾燕,等.近50年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J].地理学报,2009,64(3):259-269.
- [20] 顾骏强,施能,薛根元.近40年浙江省降水量、雨日的气候变化[J].应用气象学报,2002,13(3):322-329.
- [21] 杨晓光,李勇,代姝玮,等.气候变化背景下中国农业气候资源变化IX.中国农业气候资源时空变化特征[J].应用生态学报,2011,22(12):3177-3188.
- [22] 王浩,严登华,秦大庸,等.近50年来黄河流域400mm等雨量线空间变化研究[J].地球科学进展,2005,20(6):649-655.