

气候变暖对西北干旱区农业热量资源变化的影响*

李 硕^{1,2} 沈彦俊^{2**}

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院 石家庄 050016;

2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022)

摘 要 气候变暖将改变农业气候资源尤其是热量资源的时空分布。本文通过分析西北干旱区 67 个气象站点的气象数据,研究了西北干旱区近 50 年气温、积温、霜冻的变化特征与规律。结果表明,西北干旱区气温呈上升趋势,上升幅度为 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$,高于全国平均水平,其中北疆增温幅度大于其他地区。年内变化上,冬季增温幅度最大。近 50 年,西北干旱区 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温变化率分别为 $67.8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $68.8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温持续的时间也呈增加趋势,其中 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温持续天数的增加主要是由于结束日期的推迟引起的,而 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温天数的增加主要是因为初始日期的提前。研究区无霜期呈增加趋势,主要表现为初霜日的延迟和终霜日的提前,其趋势分别可达 $2\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $-1.4\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$,前者贡献略大。西北干旱区初霜出现日期的年际波动小于终霜日,终霜出现日期晚于 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温开始日期约 10 d,且气温变暖的趋势并没有引起这一状况的改变,而多数站点 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温结束日期早于初霜开始日期。

关键词 西北干旱区 积温 霜冻 热量资源 起止日期 时空变化

中图分类号: P467 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2013)02-0227-09

Impact of climate warming on temperature and heat resource in arid Northwest China

LI Shuo^{1,2}, SHEN Yan-Jun²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China; 2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract Climate change has changed agro-climatic resources, especially the degree of heat and the spatio-temporal distributions of resources. Against global warming, temperature has increased in arid Northwest China. Also arid Northwest China has been most influenced by climate change. Using daily meteorological data from 67 stations in arid Northwest China, this paper analyzed change patterns and trends of temperature, accumulated temperature, frost over the period for 1961—2011. The results showed that in the arid northwest region, temperature increased at $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$, higher than the national average. The warming trend in Northern Xinjiang was larger than in other areas and winter season having the highest yearly variation in temperature. Accumulated temperature higher than $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ increased by $67.8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ and $68.8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$. Accumulated temperature duration also increased over the 1961—2011 period. The increased days with $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature were mainly caused by the delayed ending dates and the earlier initial dates, respectively. In the study area, there was delayed first frost, earlier last frost and lengthened frost free period. The rates of change in the first and last frost were $2\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ and $-1.4\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$, respectively. In the region, the longer frost-free period was mainly driven by delayed first frost. Inter-annual fluctuation in the first frost was less than that in the last frost in the arid Northwest China. The last frost date was more or less 10 days later than it used to be; even though climate warming caused no change in frost condition. Mostly, the last date of $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature occurred earlier than the first frost date.

Key words Arid Northwest China, Accumulated temperature, Frost, Heat resource, Initial and end date, Spatio-temporal variation
(Received Nov. 10, 2012; accepted Dec. 14, 2012)

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB951000)资助

** 通讯作者: 沈彦俊(1971—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为农业水文学与水资源。E-mail: yjshen@sjiam.ac.cn
李硕(1987—), 男, 硕士生, 主要从事气候变化对农业的影响与适应、GIS 应用研究。E-mail: lishuols@126.com

收稿日期: 2012-11-10 接受日期: 2012-12-14

热量资源主要包括温度水平、生长季的总热量、无霜期的长短等,与农作物的生长发育有着密切联系,是衡量一个地区农业发展条件的重要指标。确定一个地区的热量条件,一般用温度来表示。IPCC 第四次评估报告指出,过去 100 年全球地表温度上升了 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$,近 50 年的温度升高趋势为过去 100 年的 2 倍^[1]。全球气候系统的变暖已经成为一个不争的事实^[2],而农业又是对气候变化非常敏感的行业^[3]。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,对农业结构、种植制度和农作物产量都将产生广泛而深刻的影响^[4]。在全球增温的背景下,西北干旱区气温呈增加趋势^[5],同时也是受气候变化影响最为显著的地区之一。该区占我国国土面积的 1/5,是我国重要的粮棉产区,因此研究气候变化背景下该区热量资源的时空变化具有重要意义。近年来,关于西北干旱区气候变化已有许多研究,但以往的研究主要集中在单个热量资源的指标或西北干旱区的某个研究子区^[6],对西北干旱区总体热量资源的研究较少。本研究利用西北干旱区 67 个气象站点(图 1)1961—2011 年 51 年的气象观测资料,对影响西北干旱区农作物生产的重要热量指标(温度、积温和霜冻)的时空变化进行分析,为西北干旱区合理利用农业气候资源、指导农业生产提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

西北干旱区位于欧亚大陆中心地带,主要包括新疆的全部、甘肃河西走廊以及内蒙古贺兰山以西的地区。地理位置介于东经 $73^{\circ}\sim 125^{\circ}$ 和北纬 $35^{\circ}\sim$

50° ^[7],总面积约 200 万 km^2 ,占中国国土面积的 1/5。该区深居我国内陆,常年受大陆性气候的影响,全年降雨稀少,蒸发强烈。年平均降雨量仅 130 mm,且降雨分布不均匀,主要分布于受西风带影响的伊犁河谷、北冰洋水汽影响的阿尔泰山北部以及季风气候影响的河西走廊边缘地区,最高降雨量可达 500 mm 以上。西北干旱区光热资源充足,适宜喜温、喜光作物生长,是我国重要的高产优质棉花带^[4],其他作物如小麦、玉米等在我国也占有重要地位。从作物分布看,粮食作物南疆地区主要以冬小麦复播夏玉米为主,北疆阿勒泰、河西地区以一年 1 熟的春小麦、春玉米为主,天山南北坡则为过渡地带。经济作物主要以新疆的棉花和在北疆地区广泛种植的油料、甜菜等为主。

1.2 资料来源与研究方法

1.2.1 资料来源

本研究所用资料为中国气象局 1961—2011 年西北干旱区气象站点的气温观测资料,并根据各个站点的时间序列、空间位置等特点进行筛选,对部分缺失资料进行插补,最终选取北疆地区、南疆地区和河西地区位于耕地附近的 67 个气象站点,以保证数据资料的准确性和连续性。

四季划分以 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季。利用连续 5 日平均气温稳定通过某界限温度方法,得到各气象站 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的年积温以及相对应的起始日期、终止日期和持续天数。本文霜冻日的定义方法为:上半年日最低气温小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的终止日期为

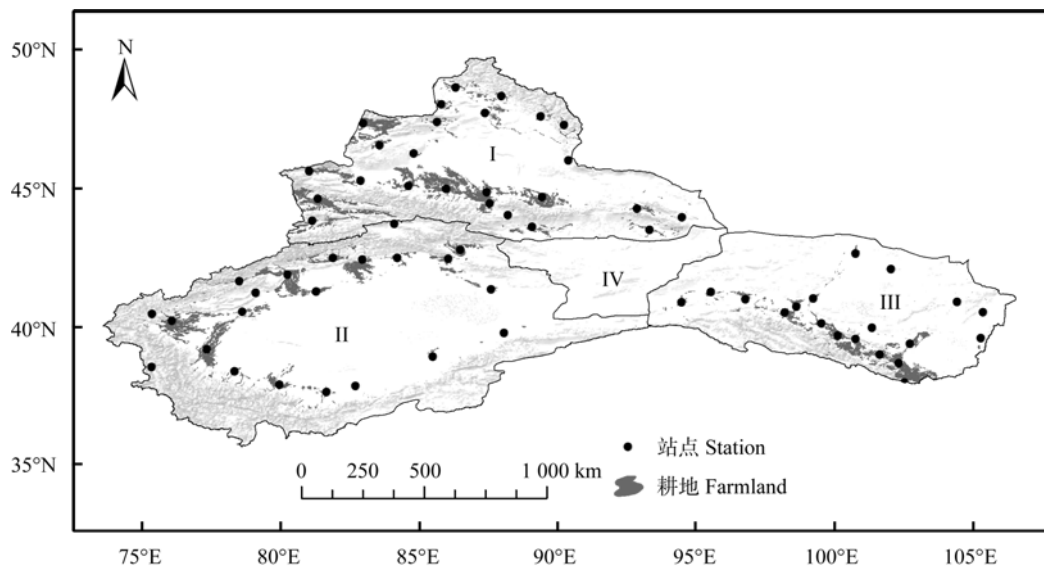


图 1 研究区地理位置及站点分布

Fig. 1 Geographical position and distributions of meteorological sites in the study region

I: 北疆地区 Northern Xinjiang (NX); II: 南疆地区 Tarim River Basin (TRB); III: 河西地区: Qilian-Hexi Region (QH); IV: 哈顺沙漠 Central Barren Region (CB).

终霜日, 下半年日最低气温小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的起始日期为初霜日。

1.2.2 研究方法

(1) 气候倾向率^[8]。利用最小二乘法拟合一元线性方程, 分析气候数据的变化趋势^[9], 其表达式如下:

$$y = at + b \quad (1)$$

式中, a 、 b 为回归系数, y 为气象要素, t 为时间(年), $10a$ 表示气象要素变化倾向率, 单位为某要素单位 $\cdot 10a^{-1}$, a 值的正负表示趋势的上升或下降^[10]。

(2) Mann-Kendal 趋势检验^[11]。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^[12]。

(3) 气象数据空间插值。采用陆面区域最佳空间插值方法, 即梯度距离平方反比法(GIDS)^[13]。它充分反映了气象要素随经纬度、海拔的变化, 为计算每个栅格值的气象要素提供了可能^[14]。

2 结果与分析

2.1 西北干旱区气温的年际和季节变化趋势

西北干旱区 1961—2011 年的年平均气温为 $7.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 高山、盆地相间分布的特殊地貌格局使其气温存在显著的空间差异, 主要表现为南疆>河西地区>北疆, 年平均气温分别为 $9.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $7.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。近 50 年该区气温整体呈波动上升趋势, 由 20 世纪 60 年代的 $7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加到 21 世纪的 $8.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 上升幅度为 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10a^{-1}$, 高于全国的升温速率 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10a^{-1}$ ^[15], 且 95% 的站点通过了置信度为 95% ($\alpha=0.05$) 的显著水平。由图 2 可知, 各地区在 20 世纪 80 年代以前气温变化不大, 从 80 年代中期开始北疆与河西地区气温出现稳定上升势头, 而南疆地区则出现的略晚。从各地区年平均气温的变化率看, 河西地区气温上升幅度大于其他地区, 为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10a^{-1}$ 。气温变化最明显站点出现在北疆的巴里坤, 年均气温变化率为 $0.67\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10a^{-1}$ 。南疆地区虽然与其他地区相比年平均气温较高, 但气温上升幅度仅为 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10a^{-1}$, 部分站点如库车气温出现下降趋势, 下降幅度达 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10a^{-1}$, 可能与降水量的增加有关, 详细原因有待深入分析。

西北干旱区为典型的温带大陆性气候, 冬寒夏热, 年温差大。春夏秋冬四季的平均气温分别为 $9.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $22.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $7.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。研究表明在气温变暖的过程中, 不同区域季节变化趋势存在差异。西北干旱区不同季节气温变化趋势见图 3。对该区主要站点 M-K 趋势检验可得: 夏、秋、冬季绝大部分站点呈显著增加趋势, 其中秋季 94% 的站点通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平。四季中冬季增温幅度最大,

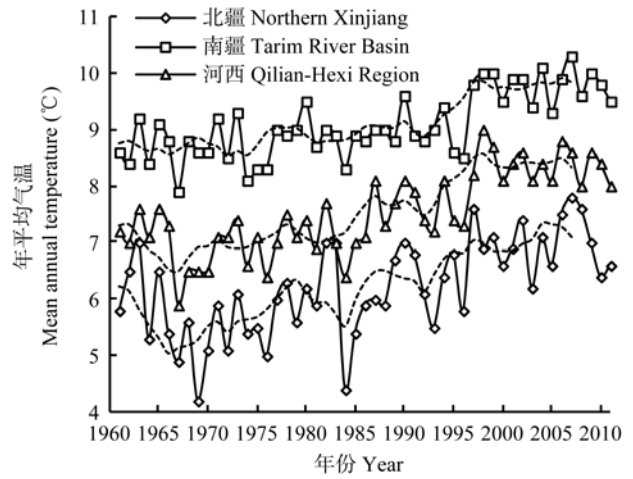


图 2 西北干旱区 1961—2011 年年平均气温的时间变化 (虚线表示 5 年滑动平均值)

Fig. 2 Variation of mean annual temperature from 1961 to 2011 in the arid region of Northwest China (dashed lines indicate 5-year moving average)

为 $0.47\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10a^{-1}$, 春季最小, 为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10a^{-1}$ 。春季显著增温的区域主要集中在河西及南疆南部, 北疆地区仅吐鲁番等部分站点增温显著。总体而言, 夏秋季节温度的增加、冬季气温的变暖使得有效积温增加, 作物生长季延长, 热量资源得到改善。

2.2 西北干旱区积温变化规律

积温是衡量一个地区农作物生长所需热量资源的重要指标, 从积温强度和作用时间两个方面影响作物的生长发育。本文选择 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温两个指标, 计算了西北干旱区各站点逐日气温数据, 得到该区各站 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温及其起止日期。 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温, 也称正积温, 是一切高等生物活动的起始温度, 日平均气温 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续日数可以用来评定一个地区农事季节的长短^[10]。 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温表示喜温作物开始播种与生长, 喜凉作物开始活跃生长; 通常 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的持续时间可表示为喜温作物的生长期, 此时发生霜冻灾害将对作物生长发育造成伤害, 严重的可引发灾害^[16]。

如表 1 所示, 西北干旱区 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温分别为 $3\ 766\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $3\ 409\text{ }^{\circ}\text{C}$, 总体呈南疆>河西>北疆的空间分布。南疆地区纬度较低, 热量资源充足, 积温总体上明显高于北疆与河西地区。北疆吐鲁番哈密等地年平均气温为 $14.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 多年平均积温可达 $5\ 722\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此成为干旱区热量资源最好的地区。南疆南部巴楚、喀什、和田等地, 积温也常年保持在 $4\ 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 优越的热量条件为该地区一年两熟的种植制度提供了便利条件, 也有利于夏玉米、棉花等喜温作物的种植。

分析发现近 50 年西北干旱区积温呈增加趋势, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的变化趋势分别为 $67.8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10a^{-1}$

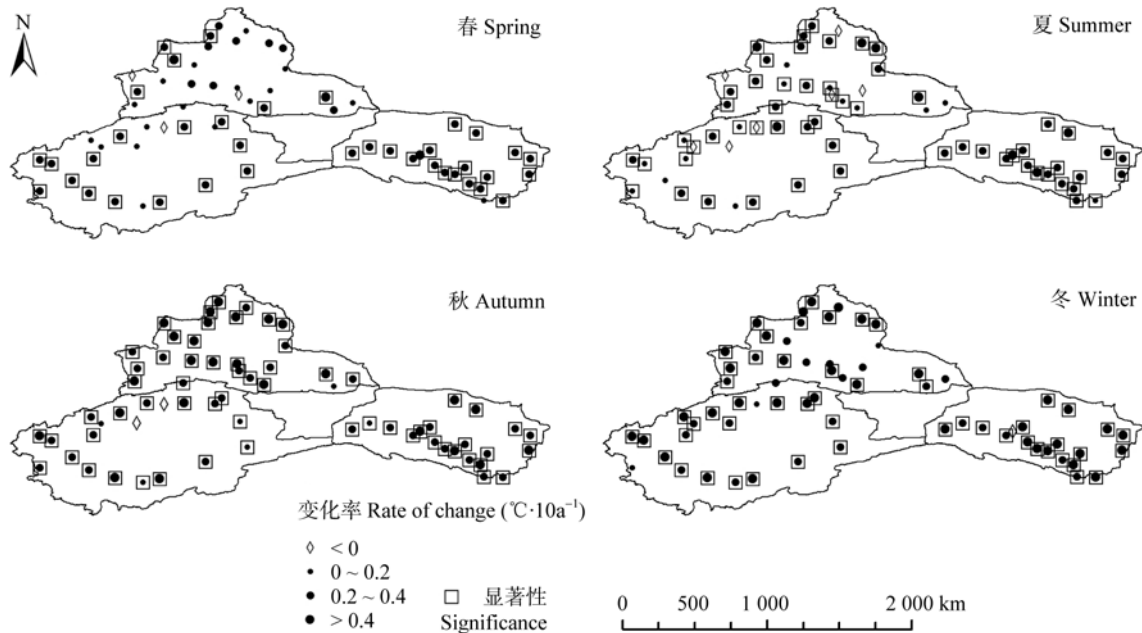


图 3 1961—2011 年西北干旱区不同季节平均气温变化趋势

Fig. 3 Changing trends of average temperature in different seasons from 1961 to 2011 in the arid region of Northwest China

表 1 1961—2011 年西北干旱区 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温变化

Table 1 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature (AT) changes from 1961 to 2011 in the arid region of Northwestern China $^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$

指标 Index	地区 Region	多年平均 Annual average	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2001—2011
$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温	北疆 Northern Xinjiang	3 489	3 395	3 410	3 434	3 523	3 665
$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ AT	南疆 Tarim River Basin	4 221	4 135	4 186	4 139	4 203	4 424
	河西地区 Qilian-Hexi Region	3 607	3 525	3 476	3 536	3 652	3 826
	西北平均 Average of the regions	3 766	3 679	3 688	3 698	3 785	3 962
$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温	北疆 Northern Xinjiang	3 153	3 048	3 082	3 092	3 189	3 336
$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ AT	南疆 Tarim River Basin	3 855	3 781	3 822	3 783	3 819	4 052
	河西地区 Qilian-Hexi Region	3 233	3 137	3 104	3 161	3 286	3 453
	西北平均 Average of the regions	3 409	3 318	3 335	3 342	3 425	3 606

和 $68.8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$, 21 世纪初期 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温分别为 $3\ 962\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $3\ 606\text{ }^{\circ}\text{C}$, 较 20 世纪 60 年代分别增加 $283\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $288\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表 1)。河西地区由于年和季平均气温增加显著, 积温变化率高于其他地区, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温增加幅度分别达到 $78\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $82.6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。

近 50 年西北干旱区积温呈由南向北、低海拔向高海拔递增的变化规律。就积温的空间分布来看, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的增加主要以 $>4\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区域为主 (图 4), 其所占比例由 20 世纪 60 年代的 30.8% 增加到 21 世纪初的 40.9%, $>5\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温区域也由 20 世纪 60 年代的吐鲁番盆地扩展到南疆的和田等地。积温段 $<3\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $3\ 000\sim 4\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温面积也由 34.7% 和 34.6% 减少到 29.2% 和 29.3%。 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温中, $3\ 000\sim 4\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及 $>5\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温范围变化不大; 积温增加主要以 $4\ 000\sim 5\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为主, 其区域面积由 22.5% 增加到 29.7%; $<3\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温面积由 20 世纪

60 年代的 45.1% 减少到 21 世纪初的 36.6%。就积温增加区域的空间分布来看, 新疆农田所在区域积温都有显著增加, 尤其以天山南北坡最为明显, $4\ 000\sim 5\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温增加的区域覆盖了绝大部分耕地, 为农作物种植结构的调整提供了有利条件。河西地区虽然积温增幅最大, 但耕地集中的河西走廊一带积温仍以 $<3\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为主, 热量资源并没有得到有效改善。

西北干旱区农业积温的增加一方面是由于年均温的增加, 另一方面则是由于满足积温条件的日数增加所致。如图 5 所示, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温持续的时间呈增加趋势, 分别为 251 d 和 184 d。积温开始日也有显著提前趋势, 提前趋势分别为 $1.5\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $1.3\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$, 积温结束日的延后趋势分别为 $1.6\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $1.1\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。说明区域平均而言, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温持续天数的增加中, 由初始日提前和终止日推迟引起的贡献大致相当。然而, 不同区域间存在较大差异 (图 5), 北疆地区 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的增加主

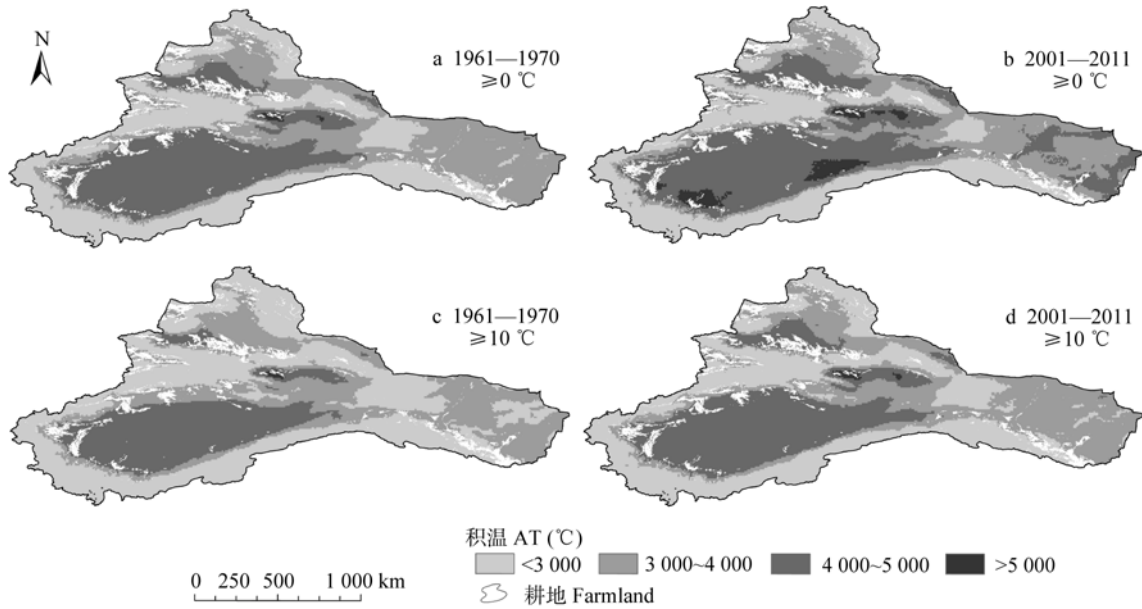


图 4 不同年代西北干旱区积温的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution patterns of accumulated temperature (AT) in 1960s and 2000s in the arid region of Northwestern China

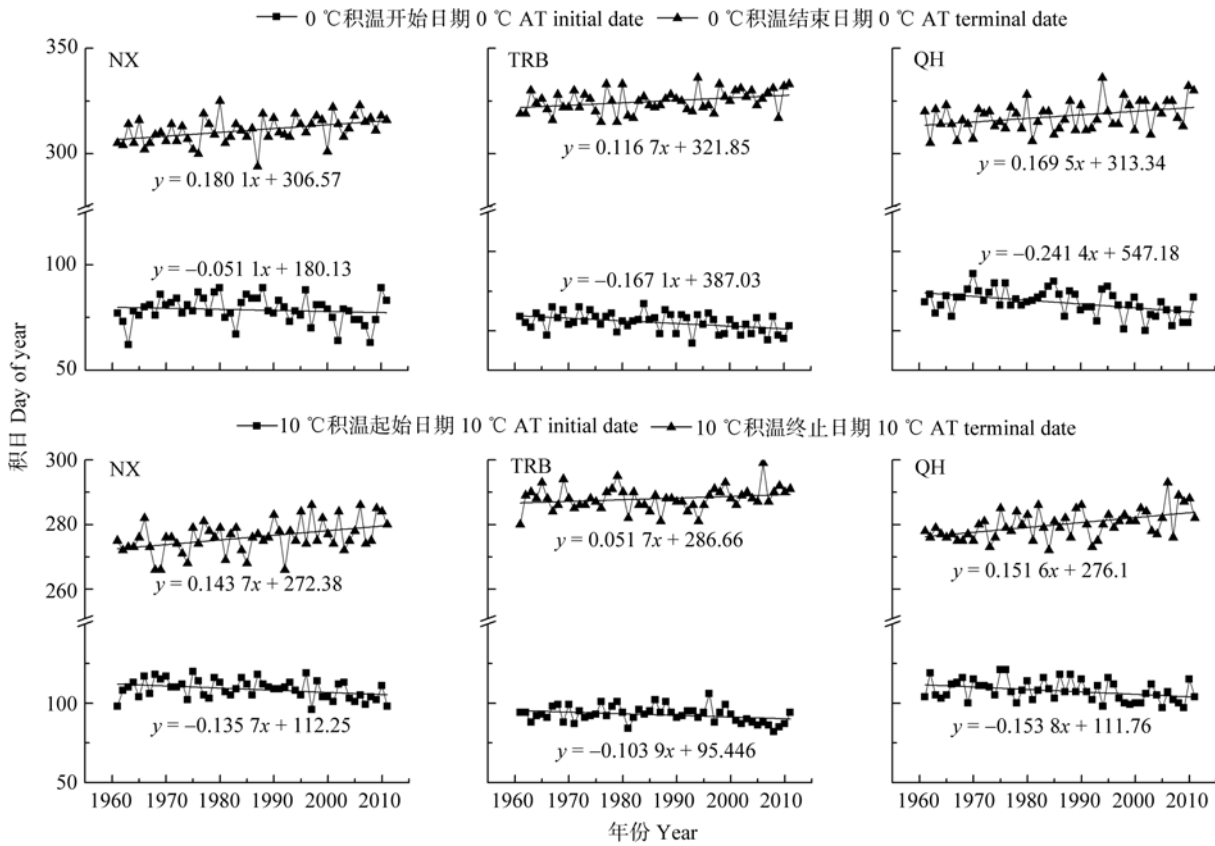


图 5 西北干旱区积温起止日期年际变化

Fig. 5 Inter-annual variations of the initial and terminal dates of accumulated temperatures (AT) in the arid region of Northwestern China

NX: 北疆地区 Northern Xinjiang; TRB: 南疆地区 Tarim River Basin; QH: 河西地区 Qilian-Hexi Region. 下同 The same below.

要以结束日延迟为主, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的开始日提前和结束日延迟大致相当; 南疆地区各积温段开始日提前的变化率略大于积温结束日推迟的变化率, 其中

$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的结束日几乎没有显著变化; 河西地区各积温段起止日期的提前和延迟均对积温增加产生显著影响, 且变化率均大于北疆与南疆, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积

温开始日提前趋势最大, 达到 $2.4 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。从总体来看, 随着气温的增高, 西北干旱区农作物适宜生长期显著延长。

2.3 西北干旱区霜冻日的变化

初终霜日出现的日期对农作物产量的影响较大^[17], 西北干旱区初霜出现较早, 此时秋收作物玉米、棉花等往往又尚未成熟, 此时发生霜冻将造成作物减产。而终霜日出现日期又往往在播种期以后, 终霜日出现的越晚, 作物的抗寒能力也就越低, 受灾风险也越大^[18]。分析发现, 西北干旱区呈现初霜推迟、终霜日提前、无霜期增加的变化规律, 且存在显著的空间差异。

从区域平均来看, 近 50 年西北干旱区初霜出现在 10 月 10 日, 终霜出现在 4 月 19 日, 无霜期约 173 d。就研究区内 3 个地区而言, 如图 6 所示, 南疆地区热量资源充足, 无霜期约 196 d, 初霜日出现在 10 月 18 日, 终霜日 4 月 5 日, 比北疆和河西地区的 161 d 和 165 d 长 1 个月多。北疆地区初霜日比河西地区早 5 d 左右, 二者终霜日差异不大, 大约出现在 4 月 26 日前后。南疆巴音布鲁克站因地处天山, 海拔较高, 平均气温较低, 无霜期最短, 霜冻从 8 月中下旬一直持续到次年 7 月上旬左右, 无霜期仅 30 d 左右。北疆吐鲁番无霜期最长, 从 3 月 15 日一直持续到 11 月 5 日, 约为 236 d, 较长的无霜期为该地区农业发展提供了良好的热量资源条件。

近 50 年, 研究区初霜推迟、终霜提前、无霜期显著增加(图 6), 21 世纪以来北疆、南疆、河西地区较 20 世纪 60 年代分别增加 15 d、13 d 和 14 d。就空间分布而言(图 7), 多数站点初霜日都有推迟趋势, 且通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。北疆初霜日的变化率最高, 约为 $2.4 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 变化率最高的地区主要位于天山北坡以及伊犁河谷等地。南疆地区变化率较小, 平均延迟速率为 $1.3 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 也有个别站点出现初霜日提前的情况, 如库车、于田、莎车等, 其中库

车初霜日提前速率甚至达到 $10 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。与初霜日的变化相比, 各地区终霜日提前的趋势小于初霜日推迟的趋势, 各地区终霜日提前的平均速率分别为北疆 $1.3 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、南疆 $1.4 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和河西 $1.5 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 显著提前的站点仅占 33%。总体来看, 研究区终霜日的变化率为 $-1.4 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 初霜日为 $2 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 说明西北干旱区无霜期的延长主要由于初霜日的推迟引起。需要指出的是库车站点初霜日提前、终霜日推迟, 这与研究区总体霜冻变化趋势正好相反, 其深层次原因有待深入研究, 可能与该站点所处位置有关。

从西北干旱区初终霜日 51 年标准差分布(图 7)来看, 各地区终霜日标准差大于初霜日, 说明西北干旱区终霜出现日期年度波动性较大, 而初霜日则相对稳定。空间分布上, 初终霜日年际变化较大的地区主要位于天山北坡、伊犁河谷以及石羊河流域等地, 其中昭苏初霜日年际变化最大, 可达 15 d 以上。南疆初、终霜日年际波动较小, 标准差分别为 7.8 d 和 10.2 d, 其中巴音布鲁克与塔什库尔干终霜日年际波动较大, 标准差在 15 d 以上。

$\geq 10^\circ\text{C}$ 积温段是喜温作物开始播种与生长、喜凉作物开始迅速增长的基准时段^[19], 但由于霜冻期与 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温日期的一致性使得在作物生长阶段仍存在发生霜冻的可能性。本文在研究 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温起止日期的基础上进一步探讨了西北干旱区霜冻日的变化规律。

对比西北干旱区 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温与霜冻起止日期(图 8)可得, 多数站点终霜出现的日期要晚于 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温开始日期, 可引致春夏的霜冻灾害, 其中北疆北部阿勒泰地区最大, 约为 10 d 以上, 北塔山等地平均要晚 39 d。而多数站点 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温结束日期早于初霜开始日期, 霜冻风险较小, 且大部分站点初霜日与 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温结束日之间的间隔呈显著增加趋势(图 8 中白色的站点), 说明随着气温的变化, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温结束后, 初霜出现的日期将逐渐推迟。就各

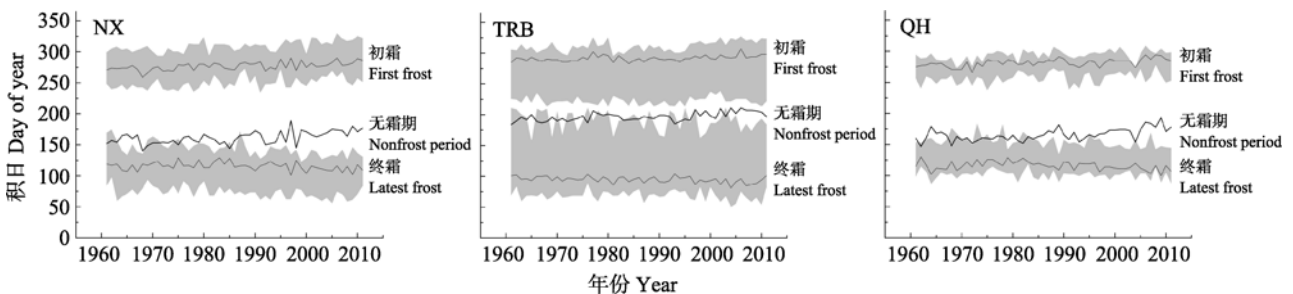


图 6 西北干旱区终、初霜日和无霜期的历年变化(灰色表示不同站点间的变化幅度, 其中的浅色细线表示各站点平均值, 黑色细线表示无霜期日数。)

Fig. 6 Inter-annual variations of the first and last dates of frost emergency in the arid region of Northwestern China (shaded gray areas indicate the ranges of different stations, light colour lines show averages of all sites; black lines show lengths of non-frost period)

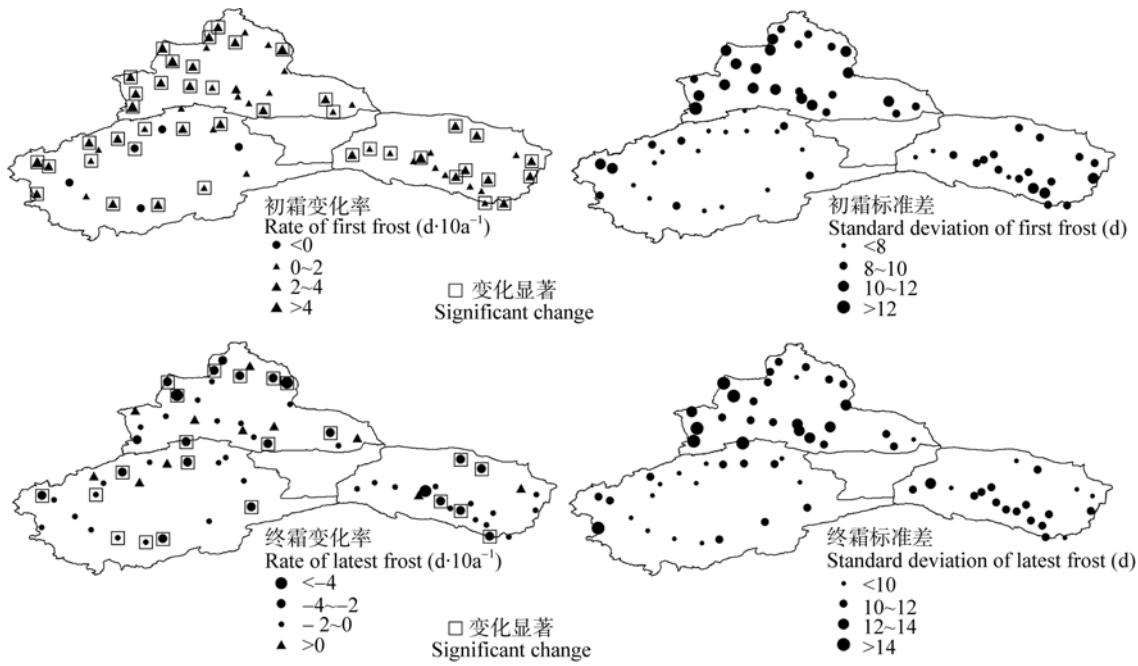


图 7 1961—2011 年西北干旱区初终霜日变化规律及标准差分布

Fig. 7 Spatial distribution of the trends of first and last frost emergency dates and the standard deviations from 1961 to 2011 in the arid region of Northwestern China (sites boxed indicate significant at level of $P < 0.05$)

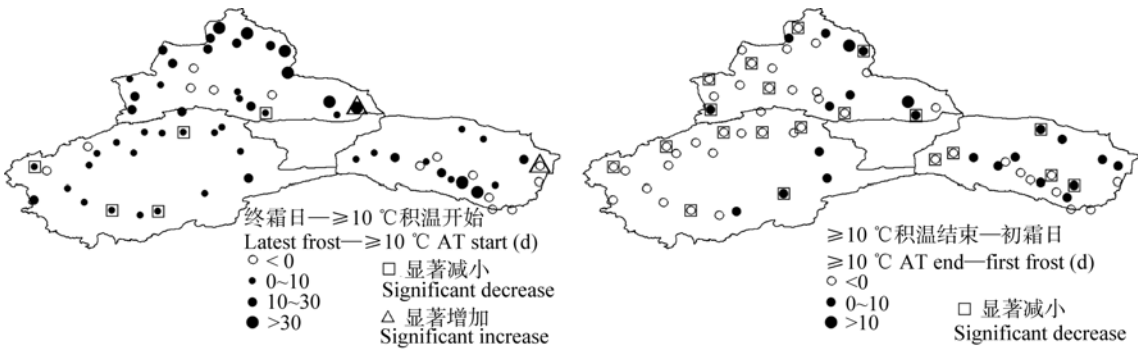


图 8 西北干旱区初终霜日与 10 °C 积温起止日对比

Fig. 8 Contrast of the first and last frost date to ≥ 10 °C accumulated temperature (AT) start-end dates in the arid region of Northwestern China

地区的年代变化而言,除 20 世纪 80 年代中后期终霜日与 ≥ 10 °C 积温开始日相差不大以外,其他年份各地区终霜出现的日期晚于 ≥ 10 °C 积温开始日期,即使在热量条件优越的南疆,多数年份在 ≥ 10 °C 积温开始后仍会出现霜冻。从初霜出现日期距离 ≥ 10 °C 积温结束日来看,南疆地区初霜往往发生在 ≥ 10 °C 积温结束以后,而北疆与河西地区终霜出现日期推迟速率大于 ≥ 10 °C 积温结束的速率,尤其自 21 世纪以来,即使在 ≥ 10 °C 积温段内出现霜冻,相距天数也不大。

3 讨论与结论

本文利用西北干旱区 67 个气象站数据,从温度、积温、霜冻等方面对西北干旱区的农业热量资源进行分析,结果表明:西北干旱区年平均气温呈

波动上升趋势,由 20 世纪 60 年代平均 7.1 °C 增加到 21 世纪初的 8.4 °C,平均上升幅度为 0.33 °C·10a⁻¹,增温幅度的空间差异性主要表现为南疆>河西地区>北疆。气温的年内变化上,冬季增温幅度最大,为 0.47 °C·10a⁻¹,春季最小,为 0.23 °C·10a⁻¹,春季显著增温的区域主要集中在河西及南疆南部。近 50 年西北干旱区积温呈增加趋势。21 世纪初期较 20 世纪 60 年代 ≥ 0 °C 和 ≥ 10 °C 积温分别增加 283 °C 和 288 °C。 ≥ 0 °C 积温的增加主要以 $>4\ 000$ °C 的区域为主,所占面积由 20 世纪 60 年代的 30.8% 增加到 21 世纪初的 40.9%。 ≥ 10 °C 积温的增加主要以 4 000~5 000 °C 区域为主,面积由 22.5% 增加到 29.7%。北疆 ≥ 0 °C 积温持续天数的增加主要是由于结束日期的推迟引起的,南疆以及河西地区主要是因为初始

日期的提前。 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温天数的增加南疆主要是因为初始日期的提前,北疆以及河西地区二者的贡献大致相当。研究区终霜变化率为 $-1.4\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$,初霜 $2\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$,无霜期的延长主要由于初霜的推迟引起。西北干旱区初霜出现日期的年际波动小于终霜日,南疆初终霜年际波动较小,标准差分别为 7.8 d 和 10.2 d 。对比 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温与霜冻起止日期,终霜出现日期晚于 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温开始日期约 10 d ,且气温变暖的趋势并没有引起这一状况的改变,而多数站点 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温结束日期早于初霜开始日期。

在全球增温的大背景下,西北干旱区积温增加,无霜期延长,农业热量资源得到改善。为适应气候变化对农业生产的影响,应因地制宜地适时调整作物类型和品种,提高对有效热量资源的利用效率,同时充分考虑各个地区气候热量资源的年际波动和极端气候事件,采取相应的措施,提高应对气象灾害的能力,特别是调整作物品种、播期后的避灾措施。西北干旱区地理条件复杂,部分地区出现温度下降,霜冻日增加,因此对各地区热量资源的变化及其成因、规律还需进一步分析和讨论。气候变化对农业系统的影响比较复杂,本文仅从热量资源的变化进行分析和讨论,在气候变化对农业生产的影响方面还存在不足。与此同时,水是该地区农业发展的主要限制因素,气候变暖会使作物水分利用效率降低,需水量增加,导致干旱程度上升^[20],气候变化也会直接影响到河川径流量的年和季节分配的变化,可能成为农业需水的限制因素。因此,气候变化对水资源形成的影响也是进一步影响农业生产的主要因素,是今后研究农业应对气候变化的重要方面之一。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, UK and New York, USA: IPCC, 2007
- [2] 秦大河, 罗勇, 陈振林, 等. 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 311-314
Qin D H, Luo Y, Chen Z L, et al. Latest advances in climate change sciences: Interpretation of the synthesis report of the IPCC fourth assessment report[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(6): 311-314
- [3] 肖风劲, 张海东, 王春乙, 等. 气候变化对我国农业的可能影响及适应性对策[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 327-331
Xiao F J, Zhang H D, Wang C Y, et al. Impact of climatic change on agriculture and its adaptation countermeasures in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(6): 327-331
- [4] 徐超, 杨晓光, 李勇, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 III. 西北干旱区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 763-772
Xu C, Yang X G, Li Y, et al. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change. . Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in Northwest Arid Area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 763-772
- [5] 王鹏祥, 杨金虎, 张强, 等. 近半个世纪来中国西北地面气候变化基本特征[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 649-656
Wang P X, Yang J H, Zhang Q, et al. Climate change characteristic of Northwest China in recent half century[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(6): 649-656
- [6] 刘德祥, 董安祥, 陆登荣. 中国西北地区近 43 年气候变化及其对农业生产的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 195-201
Liu D X, Dong A X, Lu D R. Climatic change of northwest China and its influence on agricultural production in recent 43 years[J]. Agricultural Research in the Arid, 2005, 23(2): 195-201
- [7] 罗先香, 杨建强. 中国西北干旱区水资源可持续利用对策研究[J]. 地域研究与开发, 2003, 22(1): 73-76
Luo X X, Yang J Q. Researches on the questions and countermeasures of sustainable utilization of water resources in the Northwest Area of China[J]. Areal Research and Development, 2003, 22(1): 73-76
- [8] 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
Shi N, Chen J Q, Tu Q P. 4-phase climate change features in the last 100 years over China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995, 53(4): 431-439
- [9] 周浩, 杨宝钢, 程炳岩. 重庆近 46 年气候变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2008, 29(1): 23-27
Zhou H, Yang B G, Cheng B Y. Analysis of characteristics of climate change over last 46 years in Chongqing[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(1): 23-27
- [10] 谭方颖, 王建林, 宋迎波, 等. 华北平原近 45 年农业气候资源变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 19-24
Tan F Y, Wang J L, Song Y B, et al. Analysis of changing characteristics of agricultural climate resources over last 45 years in North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(1): 19-24
- [11] 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
Liu M, Shen Y J, Zeng Y, et al. Changing trend of pan evaporation and its cause over the past 50 years in China[J]. Geographica Sinica, 2009, 64(3): 259-269
- [12] 徐丽梅, 郭英, 刘敏, 等. 1957 年至 2008 年海河流域气温变化趋势和突变分析[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 995-1001
Xu L M, Guo Y, Liu M, et al. Analysis of temperature trends and change points in the Haihe River Basin over the last 50 years[J]. Resources Science, 2011, 33(5): 995-1001
- [13] 周义, 覃志豪, 包刚. GIDS 空间插值法估算云下地表温度[J]. 遥感学报, 2012, 16(3): 492-504

- Zhou Y, Qin Z H, Bao G. Land surface temperature estimation under cloud cover with GIDS[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(3): 492–504
- [14] 李飞, 王春, 赵军, 等. 中国陆地多年平均积温空间化研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(5): 778–784
- Li F, Wang C, Zhao J, et al. The spatialization of multi-year average accumulated temperature in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(5): 778–784
- [15] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 701–716
- Ren G Y, Chu Z Y, Zhou Y Q, et al. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(4): 701–716
- [16] 肖金香, 穆彪, 胡飞. 农业气象学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 82–90
- Xiao J X, Mu B, Hu F. *Agricultural meteorology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 82–90
- [17] 韩荣青, 李维京, 艾婉秀, 等. 中国北方初霜冻日期变化及其对农业的影响[J]. *地理学报*, 2010, 65(5): 525–532
- Han R Q, Li W J, Ai W X, et al. The climatic variability and influence of first frost dates in Northern China[J]. *Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 525–532
- [18] 王润元. 中国西北地区农作物对气候变化的响应[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 23–27
- Wang R Y. *Response of crops to climate change in Northwest China*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009: 23–27
- [19] 刘实, 王勇, 缪启龙, 等. 近 50 年东北地区热量资源变化特征[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(3): 266–278
- Liu S, Wang Y, Miao Q L, et al. Variation characteristics of thermal resources in Northeast China in recent 50 years[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21(3): 266–278
- [20] 刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 905–910
- Liu Y S, Liu Y, Guo L Y. Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 905–910

Faculty positions: Center for Agricultural Resource Research, Chinese Academy of Sciences

The Center for Agricultural Resource Research (CARR), the Institute of Genetics and Developmental Biology (IGDB), Chinese Academy of Sciences, invites applicants for several research group leader positions.

CARR is one of the research organizations in Chinese Academy of Sciences (CAS). We seek nominations and applications from individuals who have expertise and a record of accomplishment in research areas related to ecology, agro-hydrology, agro-biology, crop genetics and breeding, and agro-informatics. The successful candidates for the research group leader positions will be expected particularly to farmland water transfer and development of water saving technologies, farmland related groundwater management and hydrochemistry, hydrology, agricultural water resource management, remote sensing application in agriculture, soil microbiology, agro-ecosystems, plant physiology of drought tolerance, and molecular genetics and breeding to address fundamental and application agricultural questions.

The appointment of all positions will be at Principal Investigator (full professor) level. Candidates are expected to hold a Ph.D. degree and postdoctoral experience. Start-up package will be accompanied by either the “One-Hundred Talents Program of CAS” (minimal four-year postdoctoral required.) or the “One-Thousand Youth Talents Program of China” (three-year postdoctoral required.). Very compatible Salary, benefits, and research funding will be provided based on the qualifications of selected candidates. More information about CARR can be found at <http://www.sjziam.cas.cn>.

Interested candidates should submit a cover letter, curriculum vitae, representative publications, a statement of research experiences and interests as well as the names and contact information of two referees to:

Dr. Yibo Han, or Chunsheng Hu, Co-Chair of the Research Committee
Center for Agricultural Resource Research
Institute of Genetics and Developmental Biology
Chinese Academy of Sciences
Shijiazhuang, Hebei 050022, China
E-mail: ybhan@genetics.ac.cn or cshu@sjziam.ac.cn