

中国近 30 年农业气候资源时空变化特征

梁玉莲^{1,2,3}, 韩明臣⁴, 白 龙³, 黎美宏³

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 南宁市气象局, 广西 南宁 530028; 4. 广西壮族自治区林业勘测设计院, 广西 南宁 530011)

摘要: 基于 1950s—2010 年中国 756 个标准气象台站的地面观测数据, 以年降水量为 200、400、800 mm 为中国干旱—半干旱—半湿润—湿润地区的分界线, 选取代表农业气候资源的关键气象因子, 采用 GIS 技术揭示 1981—2010 年气候态下不同地区农业资源的分布现状; 并与 1950s—1980 年气候态相比较, 分析其时空变化特征。结果表明: 我国近 30 年的光照资源总体减小, 太阳辐射资源较前 30 年总体减小 $458.07 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 日照时数总体减小 126 h; 热量资源总体增加, 无霜期除华南地区南部减小其余地区均有不同程度的增长, $\geq 5^\circ\text{C}$ 积温较前 30 年增幅大多在 1%~2% 之间, 干旱、半干旱地区的热量资源增幅明显大于湿润和半湿润地区; 除干旱区生长季降水增加外 (+10.33%), 其余三个地区的生长季降水均呈减少趋势, 其中半湿润地区的生长季降水减少最为明显 (-3.01%)。农业生产和作物种植布局应参考不同区域的农业气候资源分布进行合理配置, 并根据其增减趋势适时开展适应性措施。

关键词: 中国; 农业气候资源; 时空变化; 特征分析

中图分类号: S162.3 **文献标志码:** A

Spatial-temporal distribution and variation characteristics of the agricultural climate resources over recent 30 years in China

LIANG Yu-lian^{1,2,3}, HAN Ming-chen⁴, BAI Long³, LI Mei-hong³

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Nanning Meteorological Service, Nanning, Guangxi 530028, China;

4. Guangxi Forest Inventory and Planning Institute, Nanning, Guangxi 530011, China)

Abstract: To evaluate the concurrent distribution status of various agricultural climatic resources between 1981—2010, a Geographic Information System (GIS) technology was employed using the key meteorological factors as the representatives, based on data from 756 surface meteorological stations between 1950s—2010 by defining three base annual precipitation lines (200 mm, 400 mm, 800 mm) as boundaries of “arid—semi—arid—semi—humid—humid” regions in China. Also, by comparing to climatology data between 1950s—1980, the spatial and temporal variation characteristics of agricultural climatic resources were analyzed. The results showed that the optical energy in recent 30 years was decreased and the sunshine hours and the solar radiation resources were reduced by $458.07 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ and 126 h respectively. The heat resources displayed an opposite change, evidenced by the increased frostless season in most areas except for the south of South China. The distribution trends of growing season precipitation rate became increased, but precipitations in most areas were decreased. Annual accumulated temperature was increased by 1%~2%, and arid region and semi-arid region showed larger increased amplitude than humid region and semi-region. Growing season precipitations in arid region were increased (+10.33%); while other three regions became decreased with the largest decrease in semi-humid region (-3.01%). In conclusion, agriculture production and crop distribution should be reasonably allocated considering distributions of agriculture climatic resources in different regions, and should also be implemented with adaptive measures according to the tendencies.

Keywords: China; Agricultural climate resources; Spatial—temporal variations; Characteristic analysis

收稿日期: 2014-05-20

基金项目: 国家重大科学研究计划项目气候变化对典型区社会经济系统影响的关键参数研究(2012CB95570003)

作者简介: 梁玉莲(1984—), 女, 壮族, 广西南宁人, 在读博士研究生, 主要从事气候变化与生态农业研究。E-mail: ratia_lian@163.com。

自然赋予的光照、水分和热量等生态因子是农作物赖以生存的条件,这些因子很大程度上都是由当地的气候因子(如日照时数、降水量、平均温度和温度极值等)所决定。随着全球温度的升高、降水变率空间分布的改变^[1-2],气候资源的变化情况及其变化所产生的影响备受关注。如何能更准确地评估气候资源现状是气候化学家们多年来致力解决的问题。多年来,国内外很多学者对农业气候资源展开了大量的研究^[3-9],旨在掌握气候资源的时空分布规律,认识和了解其未来发展趋势,为人们能够合理利用气候资源提供科学依据。

立足我国干旱、半干旱、半湿润、湿润四大区域(图 1),其自然植被类型和农业资源需求重点各不一致,对于不同的地区,主导性的气候资源指标有所差异,其增减趋势对该地区的农业生产和作物生长发育的影响也有着不同的意义。本文针对不同区域的农业气候资源的变化特征进行具体分析,与前一个气候态作对比(1950s—1980年),通过对这些地区气象因子时空分布变化的分析来揭示我国农业气候资源现状及其变化特征,为我国不同区域优化农业生产布局和开展设施农业提供科学依据。



图 1 我国干旱 - 半干旱 - 半湿润 - 湿润地区分界图(年降雨量/mm)

Fig. 1 Arid, semi-arid, semi-humid and humid regional divisions of China

1 数据来源与研究方法

农业气候资源是指与农业生产和农作物生长发育密切相关的气候条件,主要包括光能资源、热量资源和水分资源等^[10]。本文从作物生长需求的角度入手,分别从这 3 个方面选取代表性指标进行具体

分析。表征光能资源的指标主要有辐射和日照两方面^[10]。本文在这两方面各取一个具有代表性意义的指标进行分析。日照时数指太阳每天在垂直于其光线的平面上的辐射强度超过或等于 $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的时间长度。日照的多寡对植物的生长有着直接的影响,是限定某种植物生长范围的重要因素,是衡量该地光照资源对农作物作用有效时长的重要指标。而太阳直接辐射的年内累积趋势,与太阳总辐射累积趋势一致,利用太阳能可以发展无土栽培日光温室、太阳能生态农业温室养育与水产等阳光产业。其中日照时数可以通过观测直接获取,而太阳辐射的观测站点太少,进行全国范围内的研究多采用经验公式法,通过日照百分率计算得出。

太阳直接辐射的计算公式为:

$$Q_{real} = Q_s \times K_b \quad (1)$$

式中, Q_{real} 为实际太阳直接辐射; Q_s 为理论太阳辐射; K_b 为太阳直接透射率。每一年的总太阳直接辐射总量 Q_s 可以根据日值累加得出,每一天的理论太阳辐射值的简化公式为:

$$Q_s = \frac{T}{2\pi} \frac{I_0}{\rho^2} (\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0) \quad (2)$$

$T/2\pi = 485.4$; ω_0 为当日日落时角; $I_0 = 1370 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 为太阳常数; ρ 为日地相对距离; φ 为当地纬度; δ 为当地当日太阳赤纬。

K_b 表示的是大气对太阳总辐射的消减程度,它的取值可以通过与日照百分率(s) 建立一定的相关关系获得。本文采用王萧宇等^[11] 以全国分月的形式做集群分析,确立 K_b 与 s 之间存在二元线性回归关系:

$$K_b = a_1 s + a_2 s^2 \quad (3)$$

s 为日照百分率, a_1, a_2 为参数,参数取值参照参考文献^[11]。

热量是判断一个地方热量多寡的指标,是各种生物生长不可缺少的环境因子。表征热量作用方式的指标较多,本文从热量的积累程度和热量作用时间长度两方面入手,分别选取积温和无霜期作为表征热量的指标进行分析。其中,积温是农业气候资源中与作物生长发育有关的重要指标,本文选用 $\geq 5^\circ\text{C}$ 的活动积温,它是表征某种作物完成某一生长发育阶段或完成全部生长发育过程一个重要指标;而无霜期是指一个地区春天最后一次霜至秋季第一次霜之间的天数,通常通过日最低气温稳定在 0°C 以上的时长来表示,日最低气温稳定通过 0°C 的初日表示寒冬已过,积雪消融,土壤开始解冻,草木开

始萌动;终日则表示土壤开始冻结,越冬植物停止生长。 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温和无霜期可分别用日均温和日最低温数据计算得出,本文采用5日滑动平均法来表示温度稳定通过某一固定值。

降水量是衡量一个地区农业生产所需水分的重要指标之一。在农业领域,通常认为在生长季内的降水对作物的生长发育更为有意义。因此本文选取生长季(4—11月)降水量作为表征水分的农业气候资源指标,该指标可以由月降水量数据直接计算得出。

表1 农业气象资源的代表性因子

资源种类 Kinds of resources	代表性因子 Representative factors	单位 Unit	意义 Implication
光照 Light	太阳直接辐射 Direct solar radiation	$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	太阳光能多寡 Amount of solar energy
	日照时数 Sunshine hours	h	太阳光作用时长 Effect of sunshine time
热量 Heat	无霜期 Frost-free days	d	热量作用时长 Effect time of heat energy
	$\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature	$^{\circ}\text{C}$	热量积累程度 Amount of heat accumulation
水分 Water	生长季降水量 Growing season rainfall	mm	植物生长时期水分多寡 Amount of water during growing time of plant

表1给出了所选取的表征光照、热量和水分资源的气象因子,数据来源为国家气象信息中心提供的1950s—2010年全国756个气象站点的日照、气温以及降水数据。

采用ArcGIS自带的IDW插值法将计算得出的农业气象因子在最近一个气候态(1981—2010年)的气候值分布插值到全国 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的格点上,得出我国农业气象因子分布现状特征。

2 结果与分析

2.1 光照资源

2.1.1 太阳直接辐射 从空间分布上看(图2),1981—2010年气候态下,全国太阳直接辐射平均总量在 $2\,500\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右,各区域太阳直接辐射资源的大小顺序为干旱区>半干旱区>湿润区>半湿润区。其中太阳直接辐射最高的区域出现在西藏的西部、内蒙古以及甘肃北部区域,年太阳直接辐射量达 $3\,000\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上;相应的,低值区域以重庆为中心,年太阳直接辐射量不足 $1\,500\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,涵盖四川省东部、贵州省大部、湖南省西部及广西北部等地区。这一分布格局与有关我国太阳总辐射、直接辐射的区域性分布特征研究^[12-13]较为一致。这一格局的形成是气候形态、地理位置分布和地形分布综合作用的结果。

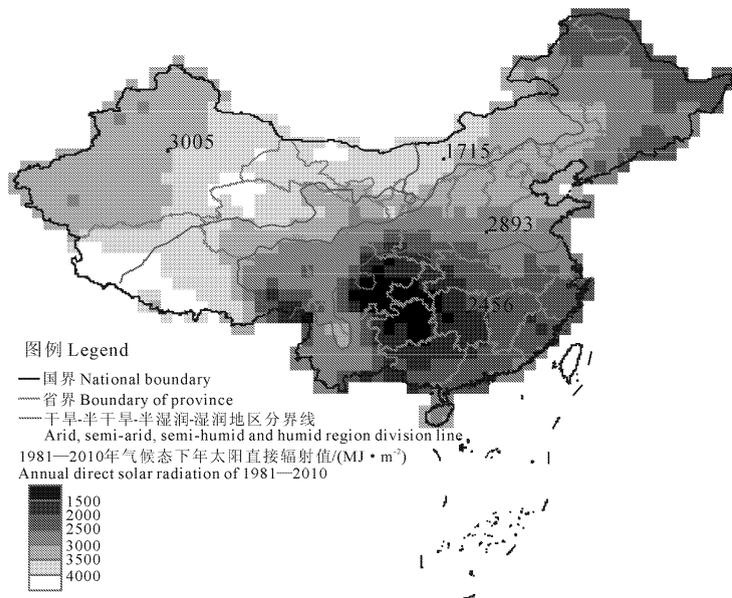


图2 1981—2010年气候态年太阳直接辐射空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual direct solar radiation between 1981—2010

从太阳直接辐射的变化上看(图3),1981—2010年气候态相较于1950s—1980年气候态,全国的太

阳直接辐射量比上一个气候态平均减少了 $469\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。各区域的表现表现为干旱区<半干旱区<湿

润区 < 半湿润区, 与其分布大小正好相反。可以认为, 我国太阳直接辐射资源的变化趋势总体表现为原太阳辐射量高的地方减少量最大。干旱地区和半干旱地区的太阳直接辐射几乎全境都呈减少趋势。减少最明显的地方在青藏高原西部, 近 30 年气候态下太阳直接辐射减少了 $800 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上。但相关研究表明青藏高原地区的总云量在减小^[14]。气溶胶的变化主要来自于对火山喷发的响应^[15], 这都不足以解释太阳直接辐射在减少。可以确定的是, 青藏高原处于高海拔区, 对气候变化的响应敏感性更大, 太阳直接辐射变化是其对气候变化响应的结果

之一。半湿润区中, 除了太阳辐射总量本身基数较小以外, 东北地区的太阳直接辐射量有所增加也是使得这一区域是太阳辐射总量减小最少的原因之一。这一结果符合我国太阳辐射总体在减少的趋势^[13-14]。相关研究指出太阳直接辐射的变化与云量、气溶胶、水汽等变化有关^[12,14]。但其影响机制不确定性很大, 并不能给出同一的定论。从图中的变化趋势上看, 东北地区的太阳直接辐射增加, 则可能是在全球气候变暖的大背景作用所致, 气候更暖更干的变化趋势^[16]有利于太阳辐射的增加。

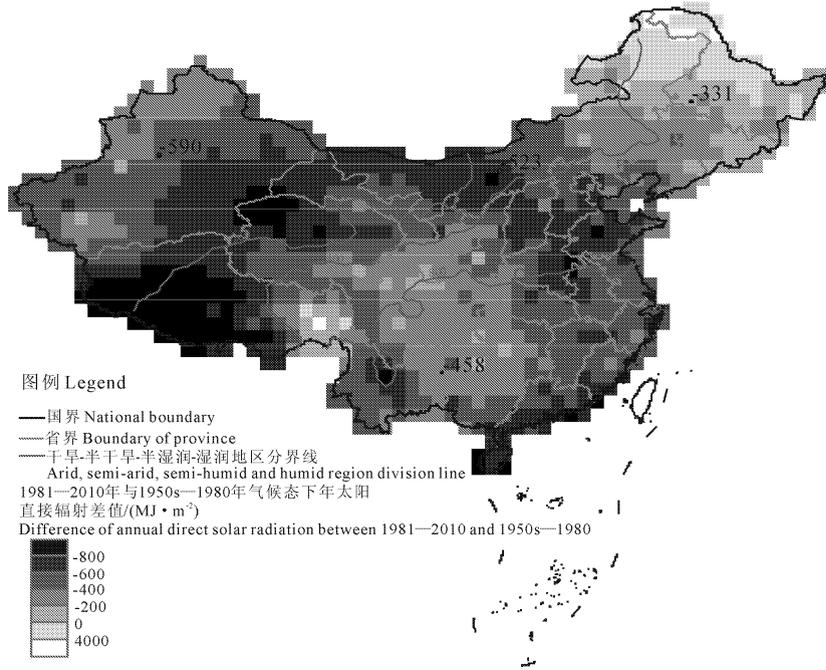


图 3 1981—2010 年与 1950s—1980 年气候态年太阳直接辐射差值

Fig. 3 Differences of annual direct solar radiations between 1981—2010 and 1950s—1980

2.1.2 日照时数 日照时数在近 30 年气候态下的空间分布与太阳直接辐射大致相同(图略), 从时间变化趋势上, 日照时数与太阳直接辐射有着明显的区别, 各区域的表现干旱区 < 半干旱区 < 半湿润区 < 湿润区(图 4), 除了西藏西部和内蒙古西部的部分区域的日照时数有小幅增加外, 其余地区的日照时长表现出减少的趋势。其中华北和华东地区的减少最为明显。减小幅度最大的地区出现在河南省, 达 300 h 以上。可以看到, 日照时数减少的地方主要是在我国近几十年来东部发达区域及工业发展较快的区域。这些区域城市分布相对密集, 而人为作用如气溶胶排放、热岛效应、土地利用的变化等在城市区域易于造成雾霾天气, 因而对日照时数的影响相对较大, 也可能是造成这些区域日照时数下降

的原因之一。日照时数与太阳直接分布的相似性共同表征了我国光能资源在空间分布特征。光能资源对不同自然和人为因素影响的响应不一, 则可能是造成两者空间变化不一致的重要因素。

2.2 热量资源

2.2.1 无霜期 1981—2010 年间, 我国平均无霜期时长 229 d, 4 个区域的无霜期长短分布表现为半干旱区 < 干旱区 < 半湿润区 < 湿润区, 热量分布型主要受纬度和海拔高度控制(图 5)。

从变化上看(图 6), 1981—2010 年气候态下我国平均无霜期时长比上一个气候态平均增长了 9 d。除华南地区广西、广东、海南三个省份的无霜期天数在减少以外, 其余地区均有不同程度的增加, 各区域的增加幅度为半干旱区 > 干旱区 > 半湿润区 > 湿润

区。无霜期增长的幅度与其基本分布型正好相反,即原无霜期较短的区域增加时长更为明显。这一变化趋势与徐铭志等^[16]对我国 1961—2000 年中国气候生长期的变化研究结论相似。在气候变暖的大背景下,1981—2010 年气候态下无霜期变长的总体趋

势仍在维持。无霜期延长,更为稳定的生物气候条件使得作物的生长期延长和种植北界的南扩,对提高作物的单产和扩大作物可种植面积均有促进作用。

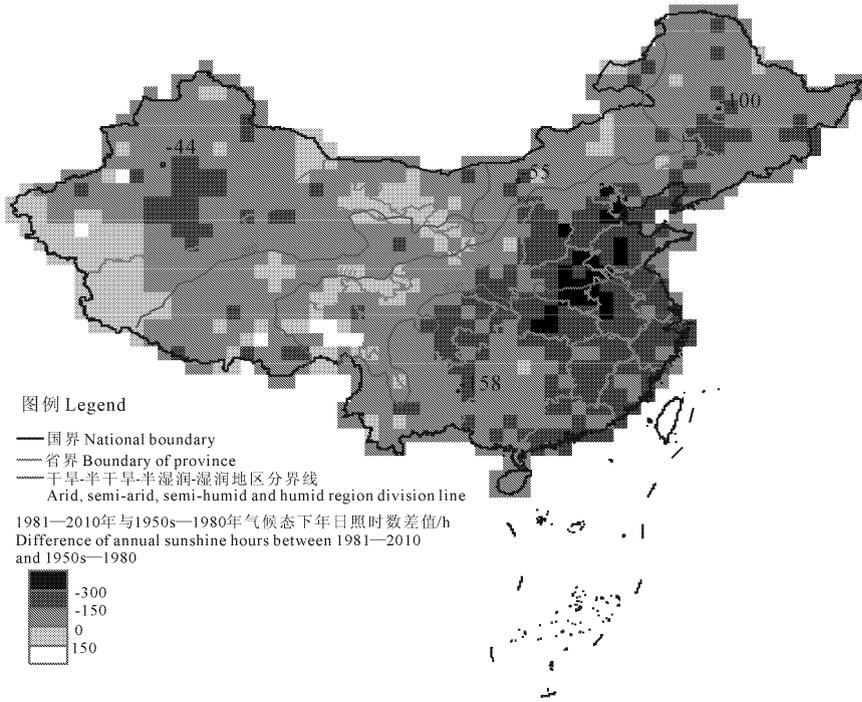


图 4 1981—2010 年与 1950s—1980 年气候态下日照时数差值

Fig. 4 Differences of annual sunshine hours between 1981—2010 and 1950s—1980

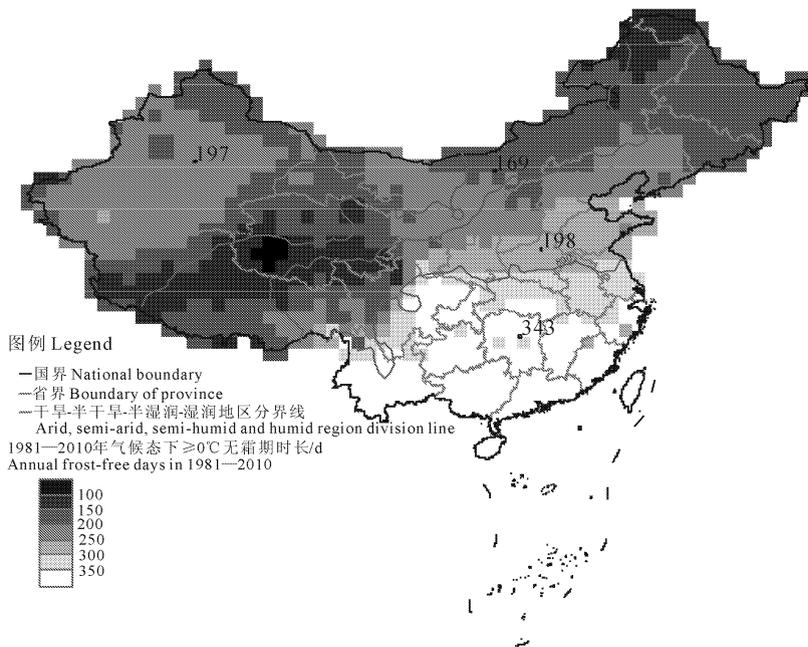


图 5 1981—2010 年气候态下 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 无霜期空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual frost-free days between 1981—2010

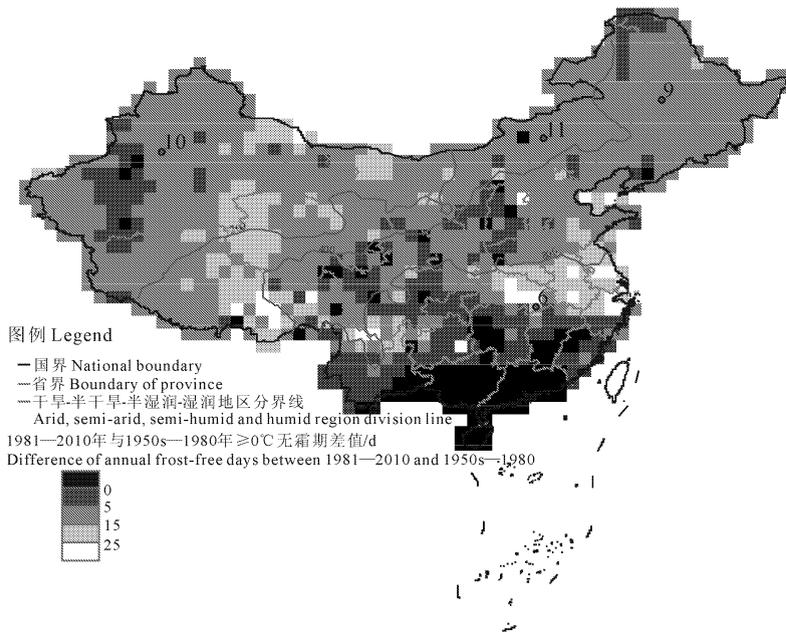


图 6 1981—2010 年与 1950s—1980 年 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 无霜期差值

Fig.6 Differences of annual frost-free days between 1981—2010 and 1950s—1980

2.2.2 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 我国各省市 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温的空间分布与无霜期长短的空间分布大致相同(图略),同为表征我国热量资源分布的指标。受气候变暖大背景影响,全国的 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温在 1981—2010 年气候态下比上一个气候态增加了 2.15%(图 7)。各区域变化幅度大小为半干旱区 > 干旱区 > 半湿润区 > 湿润区,与无霜期变化量的大小分布趋势一致。除青藏

高原地区(增幅在 2.5% 以上)以外,我国的大部分区域的 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温增幅在 1% ~ 2% 之间。其中增幅较大的地方处于东北和内蒙古区域,增幅在 1.5% 到 2% 之间;新疆地区和南方地区增幅较小,在 1% 到 1.5% 之间。这一结果与高纬度地区和高海拔地区对全球变暖的响应更为剧烈^[18-21]的研究结论相符。

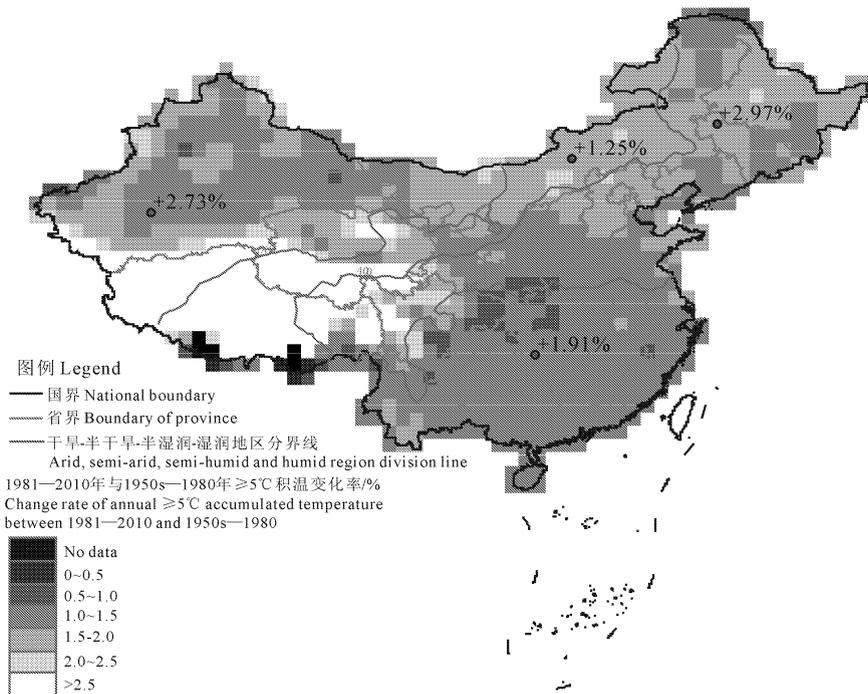


图 7 1981—2010 年与 1950s—1980 年 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温变化率空间分布

Fig.7 The changing rates of annual $\geq 5^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature between 1981—2010 and 1950s—1980

2.3 水分资源

生长季降水的空间分布与我国干旱-半干旱-半湿润-湿润区的划分基本一致。主要是由各地所处气候类型所决定。总体呈现南方大于北方,东部

大于西部的趋势(图8)。生长季水资源最匮乏的区域处于新疆及内蒙西部,年生长季内降水不足300 mm;而水资源最丰富的区域处于长江中下游地区及南方沿海区域,年生长季内降水达1 000 mm以上。

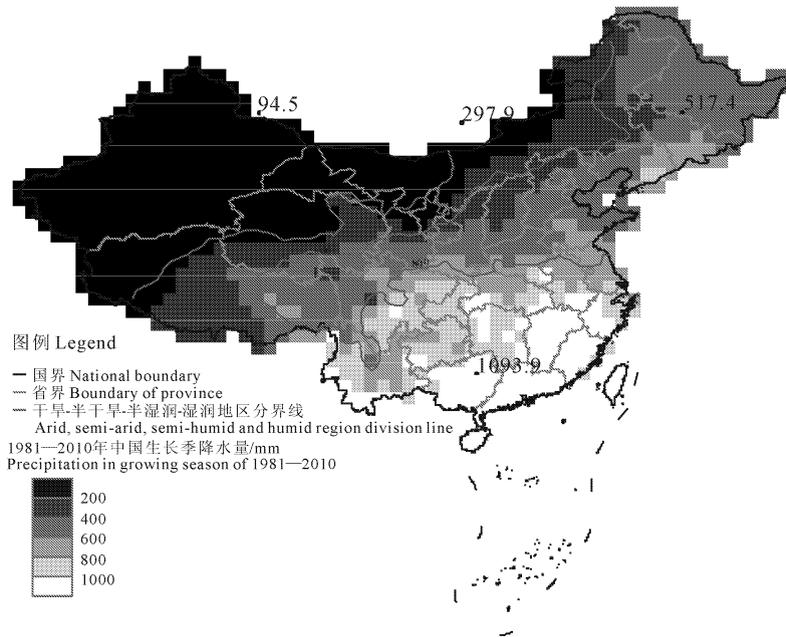


图8 1981—2010年中国生长季降水空间分布

Fig.8 Spatial distribution of precipitation in growing season between 1981—2010

从生长季降水变化率的表现上看,1981—2010气候态相较于1950s—1980年气候态下,全国的降水变化整体表现为增加(+1.71%),但是从其变化的空间分布看,中国4大分区仅有干旱地区的降水明显增加(+10.33%);半干旱(-1.38%)、半湿润(-3.01%)以及湿润地区(-1.34%)均呈降水减少的趋势,且区域内不同地方的降水变化趋势也不一致(图9)。影响降水的因素十分复杂,除了受气候变化因素影响外,还一定程度上与下垫面变化特征、气溶胶排放等因素相关,目前对于降水变化的规律性分析仍较少,很多分析表明我国降水年代际变化存在很大的不确定性。比较一致的观点是,全球变化导致我国西部干旱区域降水增加,对缓和西部干旱现状有利^[22-23]。

在西北干旱区,新疆西南部的降水增加最为明显,降水增率达20%以上,而在新疆东部、甘肃北部、内蒙西部交接一带降水减少明显,降水减少率达10%以上;在半干旱地区,降水也明显呈西增东减的趋势,西藏和青海以及三江源地区的降水增加,内蒙中部和东部的降水则减少。在农业上,干旱以及半干旱地区降水增加对缓和西部干旱现状,促进草地

生长,发展该区域的农牧业生产有利。而在其降水减少区域,则要提高水资源利用率,兴修水利工程和搞好农田基本设施来保证该区域的用水补给,同时通过培育耐旱高产作物品种和推行旱作技术提高该地区对干旱天气的适应能力^[24]。

半湿润地区的生长季降水则是中国近30年来降水减少最多的地区,除东北地区的降水表现为增加趋势外,其余均为减小,整个黄河流域地带的降水均有不同程度的减小,降水减小最为显著的山东、河北、河南、山西、四川等地都是我国的农业大省,农业需水量大,干旱的趋势加剧了该区域的水资源供需不平衡。除了大力发展引水工程,增加灌溉可利用水量以外,发展节水农业,根据水资源的丰枯期来优化种植结构等高效利用水资源的技术和管理措施对该区域农业的发展尤为重要。湿润地区的生长季降水同样呈现减少趋势,贵州、广西、云南东部以及湖南西部等地区的降水减少明显,这些地区主要以山区为主,西南地区的干旱导致作物减产和绝收等问题严重影响了该地区农民的生产生活,发展和升级该地区陈旧的农田水利设施,科学管理和合理用水是解决该区域农业干旱问题的关键。

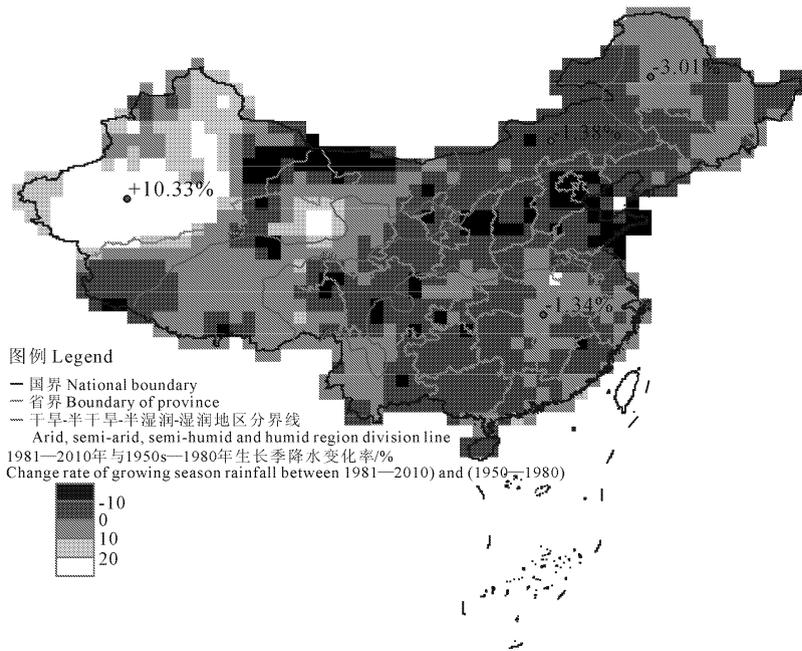


图 9 1981—2010 年与 1950s—1980 年生长季降水变化空间分布

Fig.9 Changing rates of growing season precipitation between 1981—2010 and 1950s—1980

3 结论与讨论

1) 我国光能资源呈现减少趋势,近 30 年平均太阳直接辐射量为 $2\,233.36\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。比上一个气候态总体减少 $458.07\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$; 平均日照时数为 $1\,534\text{ h}$,比上一个气候态总体减少 126 h 。东北地区的光照资源增加明显,且作为我国粮食供应的大区之一,这一趋势对该地区的粮食作物增产有利;相反,光能资源减少最多的地方主要是在我国近十年来东部发达区域及工业发展较快的区域,光照资源的减少对该区域的农业生产有着不利的影响,而这些地区人口密集,对粮食、蔬菜、水果等农作物的需求量大,农作物的减产会影响该地区对农产品需求的供需平衡。在农业上,需通过优化种植结构,改进生产技术等措施,提高该区域的光能资源利用效率,同时注意阴雨寡照天气增多对作物造成的不利影响。

2) 全球气候变暖背景下,我国的热量资源增加明显。无霜期除在华南地区略有减小外,其余地区大范围内增长,华南地区南部减小。而近 30 年积温增幅则在青藏高原和东北地区幅度最大。从热量资源的角度上看,北方地区热量资源的增加对农作物的生长有积极作用。而南方地区对于总体气候变暖的响应并不明显,而对于气候变化的极端温度不稳定更为敏感。在对农业的影响上,更应关注极端天气气候事件对其产生的不利作用。

3) 近 30 年的生长季降水量分布相较于前 30 年气候态下,我国生长季降水百分率总量增加,但大部分面积的降水呈减少趋势。就空间分布而言,干旱地区降水百分率增加 10% 以上,这对缓和西部干旱现状,促进草地生长,发展畜牧业生产有利,农业发展的重点应放在加强种草养畜,优化牧草结构,以及如何减少草场退化、水土流失和土地沙漠化等生态环境问题上。半干旱、半湿润地区和湿润地区的生长季降水均呈减少趋势,减少趋势多在 1% ~ 3% 之间。其中黄河流域的农业核心区降水减少最为显著,其次为我国中南地区和西南一带。加强农业水利建设,优化种植结构,提高水资源利用效率等措施是保证这些地区农作物种植生产和农业发展的主要途径。

4) 从农业气候资源整体分布趋势上看,我国干旱、半干旱地区的光照资源占优,而湿润、半湿润地区的水热资源占优。在农业种植结构上,要根据气候资源的优势进行合理布局。在干旱地区,水热资源均呈增加趋势,对该地区的绿洲农业发展有着积极的作用,在气候变化大背景下,应加强干旱区水资源的利用效率和沙漠化的防治;在半干旱和半湿润地区,热量资源增加而降水资源减少,势必要加剧该区域的干旱趋势,作为我国的重点牧区,兴修水利,实施草田轮作制和林网化建设治理等措施是保护该地区可利用耕地,提升该区域农牧业可持续性发展的有效途径。

参考文献:

- [1] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[R]. 北京: 科学出版社, 2011: 36-41.
- [2] 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 中国近50年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 238-244.
- [3] 阮德语, 阮重校. 越南气候资源[M]. 河内: 科学出版社, 1986: 68-69. (越文本)
- [4] Trnka M, Eitzinger J, Semerádová D, et al. Expected changes in agroclimatic conditions in Central Europe[J]. Climate change, 2011, 108(1-2): 261-289.
- [5] Williams V. Agroclimatic resource analysis—an example using an index derived and applied for Canada[J]. Agricultural meteorology, 1984, 28(1): 31-47.
- [6] Shen S P, Yin H, Cannon K, et al. Temporal and Spatial Changes of the Agroclimate in Alberta, Canada, from 1901 to 2002[J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44(7): 1090-1105.
- [7] 李勇, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 I. 华南地区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2605-2614.
- [8] 马洁华, 刘元, 杨晓光, 等. 全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势[J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3817-3827.
- [9] 代姝玮, 杨晓光, 赵孟, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 II. 西南地区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 442-452.
- [10] 郭建平. 中国农业气候资源演变趋势[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [11] 王潇宇, 邱新法, 曾燕. 地形起伏下我国太阳直接辐射的分布式模拟[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 297-301.
- [12] 文小航, 尚可政, 王式功, 等. 1961—2000年中国太阳辐射区域特征初步研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(3): 554-561.
- [13] 马金玉, 梁宏, 罗勇, 等. 中国近50年太阳直接辐射和散射辐射变化趋势特征[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 853-866.
- [14] 申彦波, 赵宗慈, 石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 915-923.
- [15] 余光明, 徐建中, 任贾文. 青藏高原大气气溶胶研究进展[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 609-617.
- [16] 徐铭志, 任国玉. 近40年中国气候生长期的变化[J]. 应用气象学报, 2004, 15(3): 306-312.
- [17] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956.
- [18] 谢安, 孙永罡, 白人海. 中国东北近50年干旱发展及对全球气候变暖的响应[J]. 地理学报, 2003, 58(增): 75-82.
- [19] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis[M]. Cambridge, UK: The Press Syndicate of Cambridge University, 2001.
- [20] Jones P D, Moberg A. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001[J]. Journal of Climate, 2003, 16: 206-223.
- [21] Zhao Z C, Xu Y. Detection and projection of temperature change in East Asia for the 20th and 21st centuries[J]. Review of World Resources (USA), 2003, 9: 223-234.
- [22] 叶柏生, 李翀, 杨大庆, 等. 我国过去50年来降水变化趋势及其对水资源的影响(i): 年系列[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 587-594.
- [23] 范泽孟, 岳天祥, 陈传法, 等. 中国气温与降水时空变化趋势分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 526-533.
- [24] 余优森. 我国西部干旱气候与农业对策[J]. 干旱地区农业研究, 1992, 10(1): 1-8.

(上接第258页)

- [11] 胡洵瑀, 王靖, 冯利平. 华北平原冬小麦各生育阶段农业气候要素变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2013, 34(3): 317-323.
- [12] 陈超. 华北平原作物水分生产力—农田水平衡—气候波动/变化的系统分析[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2009.
- [13] 高永刚, 顾红, 姬菊枝, 等. 近43年来黑龙江气候变化对农作物产量影响的模拟研究[J]. 应用气象学报, 2007, 18(4): 532-537.
- [14] Earl H J, Liu W, Bowley S R, et al. Effects of abiotic stress on respiratory carbon loss of two maize (*Zea mays* L.) inbred lines and their hybrid during silking and grain-filling[J]. Crop Science, 2012, 52: 1795-1802.
- [15] Xiong W, Holman I P, You L Z, et al. Impacts of observed growing-season warming trends since 1980 on crop yield in China[J]. Regional Environmental Change, 2014, 14: 7-16.
- [16] Sánchez B, Rasmussen A, Porter J R. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review[J]. Global Change Biology, 2014, 20: 408-417.
- [17] 魏湜. 玉米生态基础[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [18] Schoper J B, Lambert R J, Vasilas B L. Pollen variability, pollen shedding, and combining ability for tassel heat tolerance in maize[J]. Crop Science, 1987, 27: 27-37.
- [19] 代立芹, 李春强, 魏瑞江, 等. 河北省夏玉米气候适宜度及其变化特征分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(6): 1031-1036.
- [20] Cheng Y B, Zhang Q Y, Lyapustin A I, et al. Impacts of light use efficiency and fPAR parameterization on gross primary production modeling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 187-197.