

DOI: 10.5846/stxb201606241240

王鹤龄, 张强, 王润元, 吕晓东, 王力, 张镭, 齐月. 气候变化对甘肃省农业气候资源和主要作物栽培格局的影响. 生态学报, 2017, 37(18): 6099-6110.

Wang H L, Zhang Q, Wang R Y, Lü X D, Wang L, Zhang L, Qi Y. Effects of climate change on agro climatic resources and potential primary cropping patterns in Gansu Province. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6099-6110.

气候变化对甘肃省农业气候资源和主要作物栽培格局的影响

王鹤龄^{1,2,*}, 张 强¹, 王润元¹, 吕晓东³, 王 力², 张 镭², 齐 月¹

1 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化重点开放实验室, 兰州 730020

2 兰州大学大气科学学院, 兰州 730020

3 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070

摘要: 基于甘肃省 80 个地面气象观测站 1961—2014 年气象观测资料和玉米、春小麦、冬小麦、马铃薯的区划指标, 分 1961—1986(时段 I) 和 1987—2014 年(时段 II) 2 个不同时段, 分析气候变化对甘肃省农业气候资源变化特征和主要粮食作物潜在栽培格局的影响。研究发现: 时段 II 较时段 I 平均气温、负积温、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温分别增加 0.83°C 、 $113.9^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $290^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 和 $180^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 降水量气候倾向率为 $-34-16\text{mm}/10\text{a}$, 整体表现为减少趋势。时段 II 较时段 I 春小麦不适宜种植区面积显著增加约 9%, 最适宜、适宜、次适宜种植区面积分别减少 1.4%、4.1% 和 4.8%, 其中以河西走廊和陇中黄土高原变化最为显著。冬小麦适宜和次适宜种植区面积分别增加 6% 和 3.4%, 最适宜、可种植和不适宜种植区面积分别减少 0.4%、3.5% 和 5.7%, 其中以陇中地区变化最为显著。玉米最适宜和可种植区面积分别增加 13% 和 7%。适宜、次适宜和不适宜种植区面积分别减少 11%、2% 和 7%, 其中以河西灌区变化最为显著。马铃薯最适宜和适宜种植区面积分别减少 3.8% 和 0.7%, 次适宜和可种植区面积分别增加 3.5% 和 1.3%, 其中以陇中黄土高原变化最为显著。最后提出适应气候变化调整农业结构和栽培格局的对策建议。

关键词: 气候变化; 农业气候资源; 栽培格局; 甘肃省; 对策

Effects of climate change on agro climatic resources and potential primary cropping patterns in Gansu Province

WANG Heling^{1,2,*}, ZHANG Qiang¹, WANG Runyuan¹, LV Xiaodong³, WANG Li², ZHANG Lei², QI Yue¹

1 Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province; Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China

2 College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

3 Institute of Soil, Fertilizer and Water-Saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China

Abstract: The impacts of climate change on agro climatic resources characteristics were assessed for Gansu Province in Northwest China. The analysis used data from 80 meteorological stations and the regionalization index for maize (*Zea mays*), spring wheat (*Triticumaestivum*), winter wheat (*Triticumaestivum*) and potato (*Solanum tuberosum*) for the period from 1961 to 2014. The analysis was conducted using two sub periods, 1961—1986 and 1987—2014. Results indicated that the average temperature, the negative accumulated temperature, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature, and $\geq 10^{\circ}\text{C}$ accumulated

基金项目: 国家自然科学基金项目(41305134); 国家自然科学基金重点基金(41630426); 公益性行业(气象)科研重大专项(GYHY201506001-2); 国家重大科学研究计划(2012CB955304)资助

收稿日期: 2016-06-24; **网络出版日期:** 2017-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangheliling1978@126.com

temperature in the first period increased by $0.83^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, $113.9^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, $290^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ and $180^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, respectively, compared with the second period. The Climatic tendency of rainfall was $-34-16\text{mm}/10\text{a}$ with a decreasing trend. The resulting cropping patters were mapped using a geographic information system (GIS), Comparing the first period, the unsuitable areas of spring wheat planting increased by 9%, but the optimum, suitable and less suitable areas of spring wheat planting in the second period decreased by 1.4%, 4.1% and 4.8%, respectively, with an even stronger decrease, in the Hexi corridor and the middle regions of the Loess Plateau of Gansu Province. While the suitable and less suitable areas of winter wheat planting increased by 6% and 3.4% in the second period, respectively; however the optimum, cultivable and unsuitable areas were reduced by 0.4%, 3.5% and 5.7%; with an even stronger reduction in the middle regions of the loess plateau of Gansu Province. The optimum and cultivable areas for maize increased by 13% and 7%, in the second periods, respectively; but the suitable, less suitable and unsuitable areas were reduced by 11%, 2% and 7%, with an even stronger reduction observed for the Hexi corridor of Gansu Province. The optimum and suitable areas of potato decreased by 3.8% and 0.7% in the second periods, respectively, but the less suitable and cultivable areas increased by 3.5% and 1.3%; with an even larger increase in the middle regions of the Loess Plateau of Gansu Province. The countermeasures of adjusting agricultural structure and crop patterns to adapt to climate changes.

Key Words: climate change; agro climatic resources; crop patterns; Gansu Province; countermeasures

全球气候变化正在深刻影响着人类生存和发展,气候变化对农业生产的影响关系到全球粮食安全,已成为全球气候变化研究中的热点之一^[1-5]。分析气候资源变化特点及其对农业生产的影响是开展农业生产气候应对技术研究的前提与基础。

近百年来,全球气候经历了以全球变暖为主要特征的显著变化^[1-10]。IPCC 第四次评估报告指出,近百年全球平均气温升高了 $0.56-0.92^{\circ}\text{C}$,增速为 $0.13^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[11-12]。中国地表年平均气温升高幅度约为 $0.5-0.8^{\circ}\text{C}$,增温速率为 $0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,是全球气候变暖最显著的国家之一。近 50 年的增温尤其明显,且温度升高主要发生在 20 世纪 80 年代中期。干旱半干旱区变暖强度高于全国平均值,是全球变化的脆弱区和敏感区,近 50 年西北地区气温增速为 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,显著高于全国平均水平^[13-16]。

气候变化已对我国农业生产产生了明显影响,气候变化对中国农业生产的潜在影响主要表现为中国未来农业生产不稳定性增加、产量波动大、种植熟制变化大、生长季节延长等^[17-20]。基于作物适应性的作物气候区划对科学应对气候变化有非凡的指导作用。因此,综合利用 GIS 技术、计算机技术及小网格推算技术等现代科学技术,运用气候资料及农业气候指标进行农业气候区划、农作物专题气候区划的研究工作逐渐受到重视^[21-25]。然而,先前研究中将甘肃地区作为独立区域单元研究其农业气候资源变化特征的报道较少,特别是主要作物(玉米、春小麦、冬小麦和马铃薯)生长期内的农业气候资源变化特征及其对作物生产的可能影响尚鲜有报道。本研究基于甘肃地区 80 个气象台站 1960—2014 年的地面观测资料,依据全球气候变化特征将 1960—2014 年划分为 1960—1987 年(时段 I)和 1987—2014 年(时段 II)两个时段^[1,26],比较分析热量、降水等农业气候资源的空间分布特征及时间变化趋势,重点探讨农业气候资源变化导致的主要作物(玉米、春小麦、冬小麦和马铃薯)空间分布特征及其可能影响,以期制定该地区农业气候应变生产理论与技术对策提供科学参考与依据。

1 研究地区及资料

1.1 研究区概况

本文研究区域为内陆省份甘肃省,介于 $32^{\circ}31'-42^{\circ}57'\text{N}$ 、 $92^{\circ}13'-108^{\circ}46'\text{E}$,总面积 $4.537 \times 10^6 \text{km}^2$ 。甘肃地貌复杂多样,有山地、高原、平川、河谷、沙漠、戈壁分布。地势自西南向东北倾斜,地形狭长,东西长 1655km,南北宽 530km。甘肃省气候干燥,气温日较差大,光照充足,太阳辐射强。年平均气温为 $0-14^{\circ}\text{C}$,由

东南向西北降低;河西走廊年平均气温为 4—9℃,祁连山区 0—6℃,陇中和陇东分别为 5—9℃和 7—10℃,甘南 1—7℃,陇南 9—15℃。年均降水量 300mm 左右,降水各地差异很大,在 42—760mm,自东南向西北减少,降水各季分配不均,主要集中在 6—9 月。甘肃省光照充足,光能资源丰富,年日照时数为 1700—3300h,自东南向西北增多。从东南到西北包括了北亚热带湿润区到高寒区、干旱区的各种气候类型。

1.2 资料来源

气象观测资料:甘肃省 80 个地面气象观测台站 1961—2014 年的日平均气温、最高气温、最低气温、日降水量资料,月日照时数资料。地理数据:中国气象局 1:50000 地形资料。

2 研究方法

依据全球气候变化特征将 1961—2014 年划分为 1961—1987 年(时段 I)和 1987—2014 年(时段 II)两个时段^[1,26],比较分析热量、降水等农业气候资源的空间分布特征及时间变化趋势,重点探讨农业气候资源变化导致的主要作物(玉米、春小麦、冬小麦和马铃薯)空间分布特征及其可能影响。

2.1 筛选栽培区划指标

结合甘肃省主要作物春小麦、冬小麦、玉米、马铃薯的生物学特性并借鉴前人的研究成果,提出栽培的气候区划指标:春小麦为年平均气候适宜度、幼穗分化期温度、灌浆期温度;冬小麦为冬季负积温、4—5 月降水、6 月日照时数和单产水平;河西玉米为 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温($^\circ\text{C}$)、抽雄—吐丝期气温($^\circ\text{C}$)、乳熟—成熟期气温($^\circ\text{C}$),河东玉米为 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温($^\circ\text{C}$)、4—9 月降水(mm)、抽雄—吐丝期气温($^\circ\text{C}$);马铃薯为海拔高度、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温、7 月气温、6—7 月降水^[18-20,27-28]。

2.3 区划指标的细网格化

依托 GIS 技术,在 1:50000 数字化地形图基础上,采用等值线插值法构建数字高程模型(DEM),应用数理统计方法建立了区划指标与经度、纬度和海拔高度的空间分析模型,模型均通过了信度为 0.01 的显著性检验。数字表达式为:

$$Z = f(x, y) = \sum_{k=1}^s C_k Q(x, y, x_k, y_k)$$

式中, $Q(x, y, x_k, y_k)$ 为简单的单值数学面; s 为简单数学面的层数, $C_k(k=1, 2, \dots, s)$ 为系数。可以通过运用 GIS 中 CREATEIN 和 TINLATTICE 命令来实现 DEM 的提取。在 DEM 的基础上,建立坡度(Slope)和坡向(Aspect)的模型,并对其进行模拟和计算,其模型的数字表达式。

$$\text{Slope} = \arctan = \sqrt{(f_x^2 + f_y^2)}$$

$$\text{Aspect} = 270^\circ + \arctan(f_y / f_x) - 90^\circ f_x / |f_x|$$

式中, f_x 为东西方向(x 方向)高程变化率; f_y 是南北方向(y 方向)高程变化率。利用空间分析模块中的 SURFACE ANALYSIS 中 SLOPE 和 ASPECT 命令从数字高程模型中提取出坡度、坡向的栅格图。综合前人对四大作物适应性的研究成果^[27-28],确定各个区划指标等级量化标准,划分为最适宜区、适宜区、次适宜区、可种植区、不适宜区 5 个等级。运用 RECLASSIFY 命令,完成综合区划指标的精细化的空间分布图。

3 结果与分析

3.1 农业气候资源变化特征

3.1.1 年平均气温变化特征

由图 1 可以看出,受地形因素控制,甘肃年平均温度大致表现为由西南向东北递增的趋势,其中敦煌和陇南大部分地区年平均气温超过 10°C ,甘南地区年平均气温约 5°C 。与时段 I 相比,时段 II 研究区年平均气温平均增加了 0.83°C ,年均气温大于 10°C 的高值区面积显著增加,温度界限由敦煌延伸至瓜州、肃北,陇南地区大于 10°C 的年平均气温向西北移动了 0.31° ,延伸了约 32km,而低于 4°C 的低值区面积有所减少。1961—

2014 年的增温率达 $0.11\text{--}0.45^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 平均为 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 表明研究时段内该区域年均气温整体呈升高趋势, 总体来看河西地区、黄土高原中部和甘南高原大部分地区增温比较明显, 平均增温率分别为 $0.36^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.38^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.42^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 陇南大部分地区为增温不显著区域, 平均增温率为 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

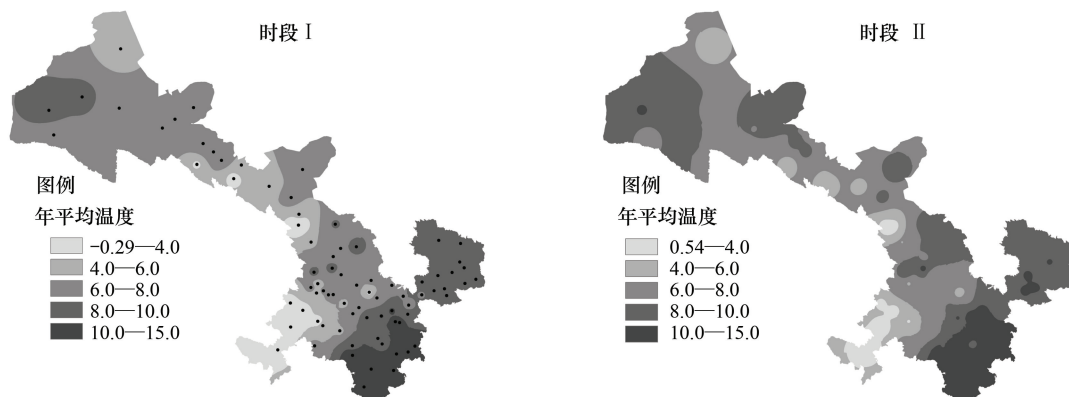


图 1 时段 I 和时段 II 甘肃年均气温的变化特征

Fig.1 Changes characteristics of annual mean air temperature in the period I and II

3.1.2 负积温的变化特征

由图 2 可以看出, 甘肃省负积温的纬向特征明显, 表现为由北向南逐渐增加。两个时段内, 河西地区的负积温均小于 -600°C , 这限制了越冬作物的种植区域。时段 I 和时段 II 负积温为 -570.71°C 和 -456.8°C , 平均增加了 113.9°C 。从增加的范围来看, 由陇南山区向黄土高原中、东部方向扩展, 大于 -600°C 的负积温带向北向西分别移动了 1.67° 和 0.87° , 分别延伸约 181km 和 88km 。

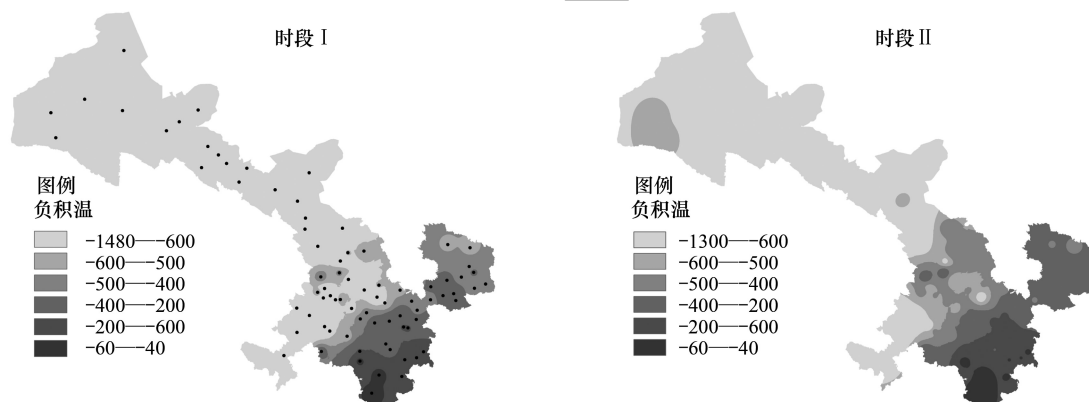


图 2 时段 I 和时段 II 甘肃负积温变化特征

Fig.2 Changes characteristics of the negative accumulated temperature in the period I and II

3.1.3 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温的变化特征

1961—2014 年, 不同时段日均气温稳定通过 0°C 期间积温空间分布趋势大致自东南向西北, 由河川、谷地向高海拔山区递减。甘南高原和祁连山区较小, 为 $1200\text{--}2400^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$; 陇南南部及河西走廊西部较大, 大部地区在 $4000\text{--}5500^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 局部在 $5500^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 以上; 其余大部(河西走廊中东部、陇中、陇东、陇南北部)多为 $2400\text{--}4000^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。时段 II 较时段 I 平均增加了 $290^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 河西地区和河东地区平均增加 $280^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 其中陇中地区和甘南高原增加 $120\text{--}260^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 陇东地区和陇南地区平均增加 $330^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。

3.1.4 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的变化特征

$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温是衡量高热量作物能否成熟的重要指标之一。从图 4 可以看到, 两个时段内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温表现为“两头高, 中间低”的分布特点, 即河西走廊西北部和陇南地区高, 河西走廊中段和甘南高原较低。时段 I

和时段Ⅱ $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温分别为 589—4780 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 和 1756—4952 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,后一时段较前一时段平均增加 180 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。与时段Ⅰ相比,时段Ⅱ河西走廊西北部 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 3100—3450 $^{\circ}\text{C}$ 量级的区域明显增加,相应 2850—3100 $^{\circ}\text{C}$ 明显减少。陇南地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 3100—3450 $^{\circ}\text{C}$ 和 2100—2650 $^{\circ}\text{C}$ 量级的区域明显减少。

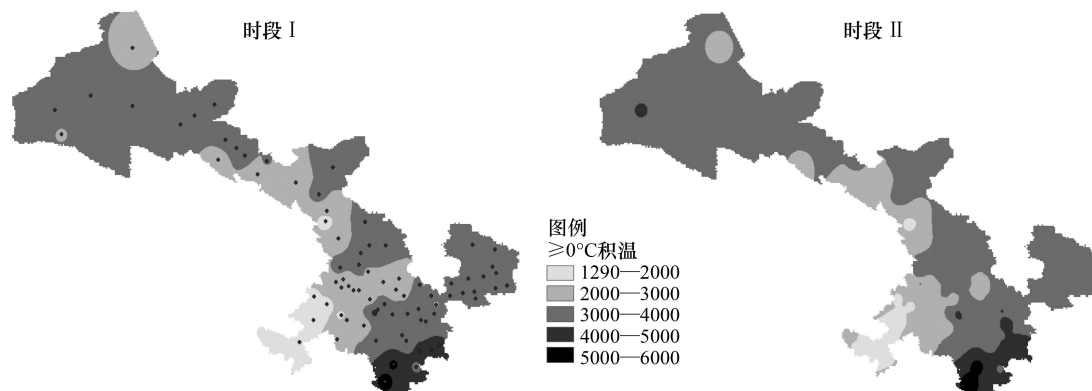


图3 时段Ⅰ和时段Ⅱ甘肃 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温的变化特征

Fig.3 Changes characteristics of the $\geq 0^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature in the period I and II

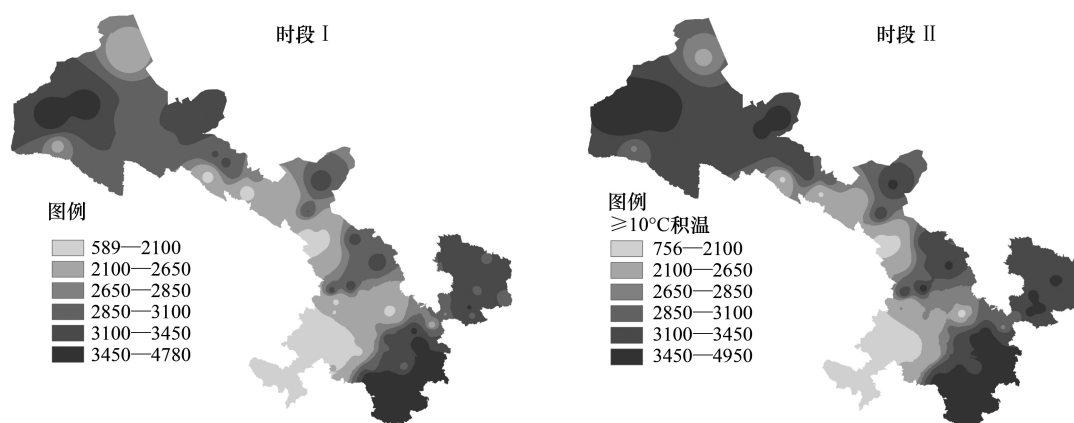


图4 时段Ⅰ和时段Ⅱ甘肃 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的变化特征

Fig.4 Changes characteristics of the $\geq 10^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature in the period I and II

3.1.5 年降水量的变化特征

由图5可以看出,甘肃年降水量总体表现为由西北向东南逐渐递增的规律,其中酒泉地区年降水量小于 100mm,形成低值区域。陇南山区和甘南高原年降水量大于 400mm,形成高值区域。1961—2014 年,甘肃年均降水量为 413mm,年降水量气候倾向率为 $-34\sim 16\text{mm}/10\text{a}$,平均为 $-6.9\text{mm}/10\text{a}$,整体表现为略减少趋势。年降水量高值区显著缩小,年降水量的气候倾向率平均为 $-12.2\text{mm}/10\text{a}$ 。与之相反,年降水量低值区表现为略微增加,年降水量的气候倾向率平均为 $4.0\text{mm}/10\text{a}$ 。研究区时段Ⅰ和时段Ⅱ的年降水量分别为 39—805mm 和 42—721mm,平均分别为 425 和 400mm。时段Ⅰ和时段Ⅱ不同量级降水量的区域分布特征基本一致,但各量级降雨区域面积有一定差异。与时段Ⅰ相比,时段Ⅱ降水量 200—400mm 的区域向南向东分别移动了 0.42° 和 0.43° ,分别延伸了约 44km 和 42km。

3.2 主要作物潜在栽培格局时空变化特征

3.2.1 春小麦

从图6可以看出,气候变化对甘肃春小麦种植的影响主要表现为不可种植区面积显著增加,最宜种植区、可种植区面积显著减少。

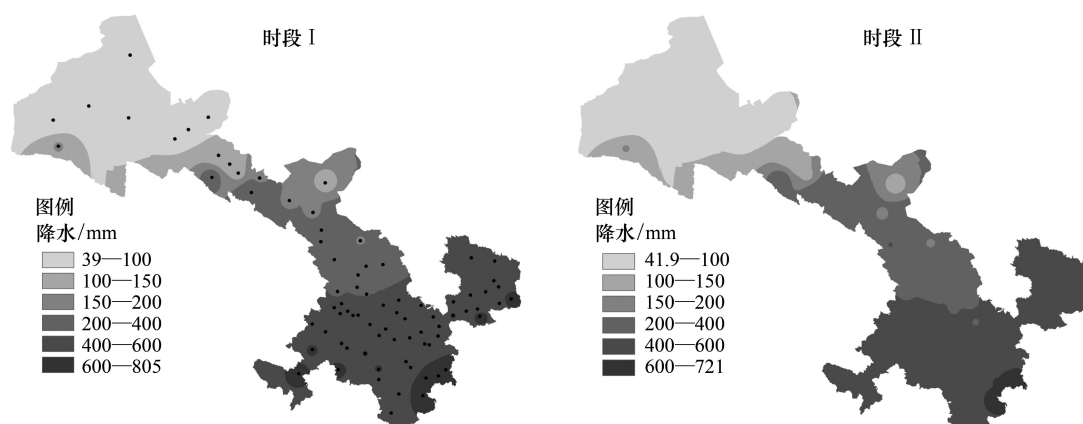


图5 时段 I 和时段 II 甘肃年降水量变化特征

Fig.5 Changes characteristics of annual mean precipitation in the period I and II

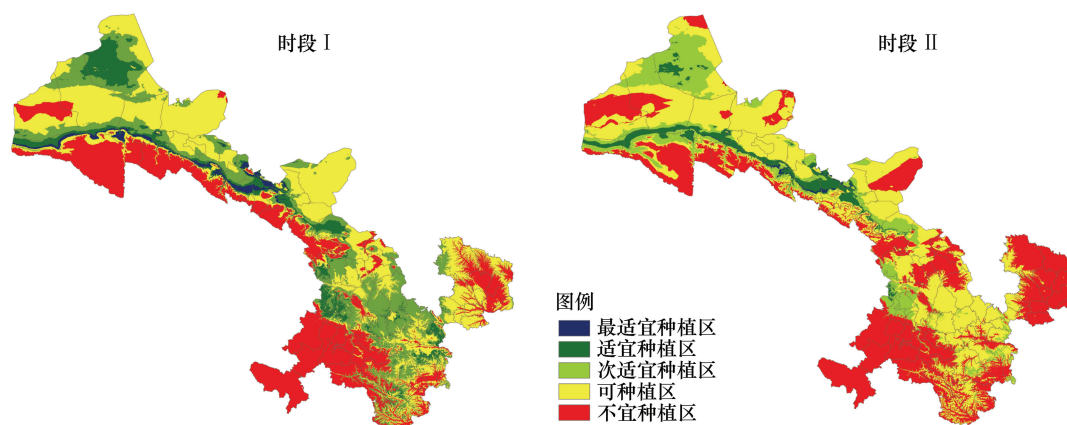


图6 时段 I 和时段 II 甘肃省春小麦种植适宜性图

Fig.6 Climate division map of spring wheat in Gansu Province in the period I and II

春小麦的最适宜区包括玉门、酒泉、高台、肃南、张掖、山丹、民乐、永昌、武威、古浪、天祝等县(市)海拔 1800—2300m 的沿山和浅山区,时段 I 和时段 II 最适宜种植区面积分别占总面积的 0.4% 和 1.7%;适宜区主要分布在河西的玉门、嘉峪关、肃州、甘州、山丹、永昌、凉州等平川绿洲灌溉区和中部的迭部、宕昌、岷县等县、漳县的西南部地区、积石山、临夏县、临夏市、和政、广河、康乐和渭源等县(市)的河谷、盆地相间的丘陵山地,海拔高度 1900—2400m,时段 I 和时段 II 适宜种植区面积分别占总面积 8.8% 和 4.7%;次适宜区主要分布在河西的敦煌、安西、玉门、甘州、临泽、高台、民勤等延沙漠绿洲灌溉区以及中部的兰州、会宁、定西、通渭,东乡和永靖海拔 1500—2450m 的地区,陇西、通渭南部、漳县北部海拔 1400—2300m 的地区,时段 I 和时段 II 次适宜种植区面积分别占总面积的 20.3% 和 15.5%;可种植区主要分布在河西的金塔、玉门、瓜州、敦煌、古浪、天柱等浅山地带和中部的景泰、靖远、白银、皋兰、永登海拔在 1400—1800m 的地区,时段 I 和时段 II 可种植区面积分别占总面积 38.8% 和 40.1%;不可种植区主要分布在肃南、民乐、天柱等祁连山区和甘南高原、临夏州和庆阳部分区域,时段 I 和时段 II 不可种植区面积分别占总面积 30.4% 和 39.4%。

3.2.2 冬小麦

从图 7 可以看出,气候变化对甘肃冬小麦种植的影响主要表现为最适宜种植区面积缩小、适宜次适宜种植区急剧扩大并且向北扩展、不适宜种植区缩小的基本特征。

时段 I 最适宜区主要分布在陇南的两当、徽县、成县、康县等县的山间盆地,该地区属于温热湿润气候区,热量富裕,降水充沛,年降雨量为 630—800mm,种植品种以半冬性为主,生产条件较好,气象灾害较轻,单产

水平较高,是冬小麦的理想种植区;时段Ⅱ除徽县以外其他地区均变为适宜区,表现为最适宜种植区面积缩小的趋势。时段Ⅰ和时段Ⅱ最适宜区面积分别占总面积 1.0%和 0.6%。两个时段相比冬小麦适宜、次适宜区面积急剧扩大,具体表现为适宜、次适宜种植带整体北移,时段Ⅰ的次适宜区在时段Ⅱ均变为适宜种植区,该区域主要包括正宁、合水、庆阳、西峰、镇远、崇信、华亭、庄浪、通渭、临洮以及沿黄灌区。时段Ⅰ和时段Ⅱ适宜区面积分别占总面积 9.6%和 15.6%,次适宜区面积分别占总面积 6.4%和 9.8%。环县及其华池北部的大部地区在时段Ⅰ为可种植区,但在时段Ⅱ期间发展为次适宜种植区;另外,景泰南部地区、靖远南部、白银、临夏、榆中、会宁南部、定西、静宁已发展成冬小麦的次适宜种植区。时段Ⅰ和时段Ⅱ可种植区面积分别占总面积 5.8%和 2.3%。随着冬小麦可种植带北界的扩展和适宜区、次适宜区的扩大,冬小麦不适宜种植区随之缩小。目前主要包括陇西、宕昌、岷县、迭部等县以西的广大区域,甘南和临夏两州,兰州、白银大部及河西 5 市的大部分地区,因冬季负积温小于 -600°C 无法安全越冬。时段Ⅰ和时段Ⅱ不可种植区面积分别占总面积 77.3%和 71.6%。

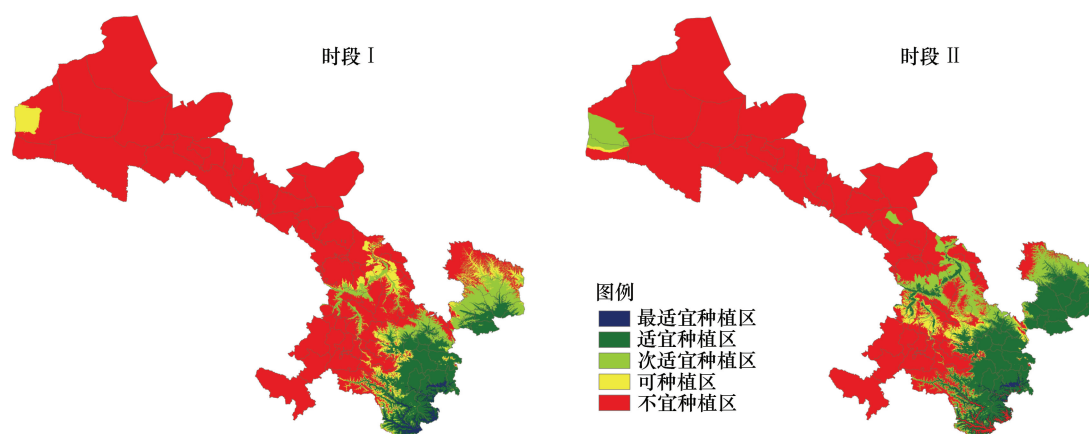


图 7 时段Ⅰ和时段Ⅱ甘肃省冬小麦种植适宜性气候区划图

Fig.7 Climate division map of winter wheat in Gansu Province in the period I and II

3.2.3 玉米

气候变化对甘肃玉米种植的影响主要表现为最适宜种植区和可种植区面积显著增加,适宜、次适宜和不适宜种植区面积显著减少,变化范围以河西灌区和陇中黄土高原地区最为显著(图 8)。表 1 面积统计结果显示,最适宜和可种植区面积分别增加 13%和 7%。适宜、次适宜和不适宜种植区面积分别减少 11%、2%和 7%。

在河西内陆河灌溉区,时段Ⅰ玉米的最适宜区分布在大致包括瓜州东部、金塔、高台、民勤、武威北部等县(市)海拔 1200—1400m 的地区。时段Ⅱ玉米最适宜种植区面积和范围扩大,包括酒泉地区、张掖地区和武威地区大部分地县。该区域光热资源丰富, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 2850—3100 $^{\circ}\text{C}$,抽雄吐丝期和灌浆后期气温适宜,籽粒灌浆速度快,灌浆充分,千粒重高,适合中晚熟品种,目前已发展成为全国重要的玉米制种基地。时段Ⅱ古浪县中北部和酒泉、张掖、山丹、永昌、武威南部沿山一带,玉米由不可种植区向可种植区转变,本区受气温升高影响,热量资源增加,满足玉米早熟品种在海拔 1700—1900m 生长的热量条件,增加了在高海拔地区种植的可能性。

在陇中黄土高原雨养农业区,两个时段相比较,景泰、靖远、白银、兰州、榆中、皋兰等县(市)的可种植区转变为次适宜种植区,在景泰和白银西部、皋兰北部、会宁、定西、榆中等县(市)以及东乡、永靖的南部海拔 1500—2450m 的地带的不适宜区变为可种植区。本带热量条件较为适宜,但气候较为干燥,玉米关键需水期降水不足,春末夏初干旱最为突出,是影响产量低而不稳的关键因素。

在陇南山区和陇东黄土高原区,两个时段相比,适宜、次适宜和可种植区之间存在相互转变,玉米适生范

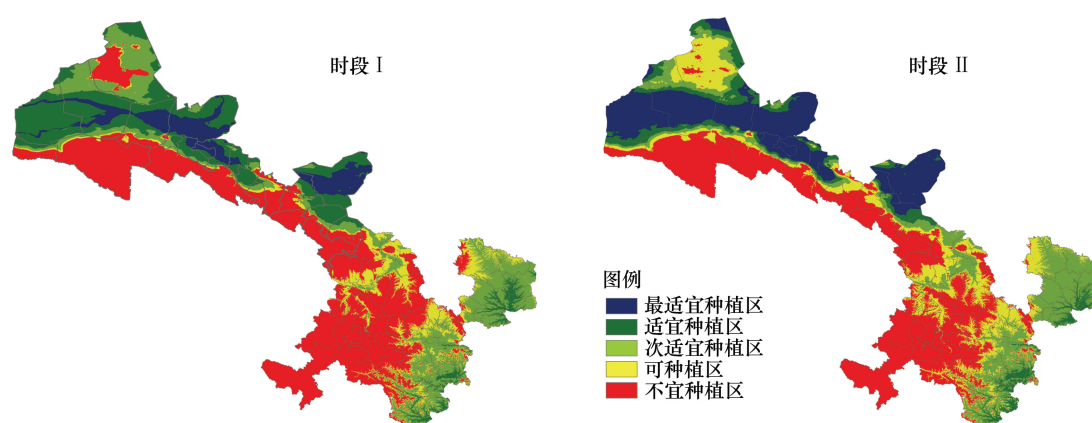


图 8 时段 I 和时段 II 甘肃省玉米种植适宜性气候区划图

Fig.8 Climate division map of corn in Gansu Province in the period I and II

围向西扩展,可种植区面积减少。

3.2.4 马铃薯

气候变化对甘肃马铃薯种植的影响主要表现为最适宜区、适宜区缩小,次适宜区和可种植区扩大,不适宜区减小(图 9)。

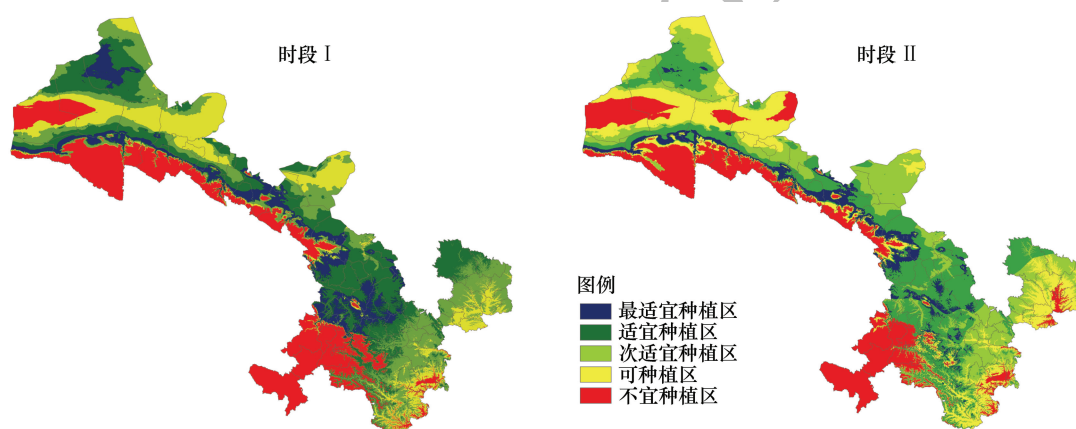


图 9 时段 I 和时段 II 甘肃省马铃薯种植适宜性气候区划图

Fig.9 Climate division map of potato in Gansu Province in the period I and II

时段 I 马铃薯最适宜区主要分布在河西的民乐、山丹、肃南、古浪、天祝、永昌、凉州等地和陇中的渭源、岷县、临夏、和政、康乐等地。时段 II 最适宜区趋于缩小,具体表现在河西的肃南最适宜区基本消失,民乐、山丹、古浪、天祝、永昌、凉州等地的最适宜区向高海拔推进且面积缩小,陇中减少的最为明显,时段 I 和时段 II 马铃薯最适宜种植区面积分别占总面积 10.3% 和 6.6%。

时段 I 马铃薯适宜区包括陇中大部分及河西走廊海拔 1700—2000 m 的地区,主要分布在河西的玉门、肃州、甘州、民乐、山丹、肃南、凉州、古浪、天祝、永昌等地;陇东南的礼县、西和、武山、宕昌等地;陇中的定西、陇西、通渭、漳县、临洮、迭部、东乡、永登、广河、榆中、会宁等地。时段 II 马铃薯适宜区趋于缩小,具体表现在河西的肃南、民乐、山丹、古浪、天祝、永昌、凉州等地的适宜区向高海拔推进且面积缩小;陇中减少的不明显。时段 I 和时段 II 马铃薯适宜种植区面积分别占总面积 26.5% 和 25.8%。

时段 I 马铃薯次适宜区包括平凉、庆阳市和天水市大部分以及河西走廊海拔 1300—1700 m 的地区,主要分布在陇东南的北道、秦城、清水、庄浪、华亭、秦安、张家川、甘谷、武山的大部分地区;陇东的庆阳、平凉的大部分县市;陇中的景泰等地;河西的玉门、酒泉、张掖、高台、临泽、武威、民勤、古浪等地。时段 II 马铃薯次适宜

区趋于扩大,具体表现在河西的肃南、民勤等地的次适宜区面积增加,其他地方变化不大。时段 I 和时段 II 马铃薯次适宜种植区面积分别占总面积 20.0% 和 23.5%。

时段 I 马铃薯可种植区包括陇南大部分、天水部分地区、河西的安敦盆地海拔小于 1300 m 的地区以及祁连山区和甘南高原海拔 2600—2900 m 地区,主要分布在陇东南的北道、文县、康县、武都、徽县、两当、成县等部分地区;河西的敦煌、安西、金塔、玉门、民勤等地;时段 II 马铃薯可种植区总体扩大,时段 I 和时段 II 马铃薯可种植区面积分别占总面积 20.0% 和 21.3%。

时段 I 马铃薯不适宜区主要分布在海拔大于 2900 m 的甘南高原的大部分和祁连山的中高区,该区域海拔高、气温低、无霜期短,马铃薯无法正常生长。但是随着气候变暖,高海拔区逐渐由不适宜区变为可种植区。

表 1 时段 I 和时段 II 不同作物适宜种植面积比例变化/%

Table 1 Changes in the proportion of different crops in the period I and II

作物 Crop	时 段 Time	最适宜区 Optimal regions	适宜区 Fitting regions	次适宜区 Sub-Fitting regions	可种植区 Planting regions	不适宜区 Unfit regions
春小麦 Spring wheat	时段 I	1.7	8.8	20.3	38.8	30.4
	时段 II	0.4	4.7	15.5	40.1	39.4
冬小麦 Winter wheat	时段 I	1.0	9.6	6.4	5.8	77.3
	时段 II	0.6	15.6	9.8	2.3	71.6
春玉米 Spring corn	时段 I	7.7	20.3	21.1	9.8	41.1
	时段 II	20.5	9.0	18.7	17.2	34.5
马铃薯 Potato	时段 I	10.3	26.5	20.0	20.0	23.2
	时段 II	6.6	25.8	23.5	21.3	22.8

3.3 不同气候区域作物种植格局

河西内陆河灌溉区受气候变化影响和水资源因素制约,春小麦在绿洲区生长受到影响,增加了在高海拔地区种植的可能性。玉米为喜温作物,气候变暖背景下河西内陆河灌溉区热量资源增加,玉米籽粒灌浆速度快,千粒重高。包括酒泉地区、张掖地区和武威地区玉米最适宜种植区面积和范围扩大,增加了在高海拔(1700—1900 m)地区种植的可能性。马铃薯为喜凉作物,气候变暖对马铃薯产生不利影响,河西内陆河灌溉马铃薯种植区最适宜和适宜种植区范围均缩小,表现为海拔 1700—2000 m 的平原种植区几乎消失,海拔 2000—2600 m 的冷凉浅山种植带幅宽缩小,但适宜种植高度向高海拔地区移动。河西灌区在保证粮食安全的前提下,适当减少春小麦面积,增加玉米面积,稳定马铃薯面积,扩大经济作物面积。

陇中、陇东黄土高原区是典型的雨养农业区,干旱是农业生产最突出的问题,气候变化导致春小麦最适宜、适宜和次适宜种植区面积分别减少 1.4%、4.1% 和 4.8%,可种植和不适宜种植区面积分别增加 1.3% 和 9%,因此应控制春小麦种植面积。陇中、陇东黄土高原区冬小麦适生边界向西向北移动。时段 I 甘肃冬小麦种植北界在合水-庆阳-镇原-平凉崆峒-华亭-庄浪-静宁-通渭-陇西-武山-礼县-宕昌-舟曲一带,而时段 II 这一界限已经扩展到环县、白银、靖远、会宁、定西、兰州、榆中、皋兰、广河、临夏和永靖等县。气候变化导致冬小麦适宜和次适宜种植区面积分别增加 6% 和 3.4%,最适宜、可种植和不适宜种植区面积分别减少 0.4%、3.5% 和 5.7%。玉米生长期内陇中、陇东黄土高原区热量条件较为适宜,玉米关键需水期降水不足,产量低而不稳。气候变化对玉米种植的影响主要表现最适宜和可种植区面积分别增加 13% 和 7%,适宜、次适宜和不适宜种植区面积分别减少 11%、2% 和 7%。陇中黄土高原是马铃薯最适宜和适宜种植的主要区域,气候变化对甘肃马铃薯种植的影响主要表现为最适宜和适宜种植区面积分别减少 3.8% 和 0.7%。次适宜和可种植区面积分别增加 3.5% 和 1.3%。陇中和陇东黄土高原地区稳定冬小麦面积,扩大地膜玉米种植面积面积,发展豆类、马铃薯等抗旱性强的作物,大力发展地方特色作物。

陇南山区属于半湿润-湿润气候区,以雨养农业为主。在秦岭以南的白龙江等长江流域区域,增大林业的比重,稳定冬小麦、扩大玉米和马铃薯种植比重,扩大茶叶、桔子、花椒、油橄榄、板栗等特色作物种植面积。在

陇上、西秦岭之间河谷区以粮食作物为主,稳定冬小麦、扩大玉米和冬油菜面积,适当发展蔬菜和经济林木。山区要农林牧并重,建立饲草基地,发展畜牧业,积极发展经济林木和地方特色作物。

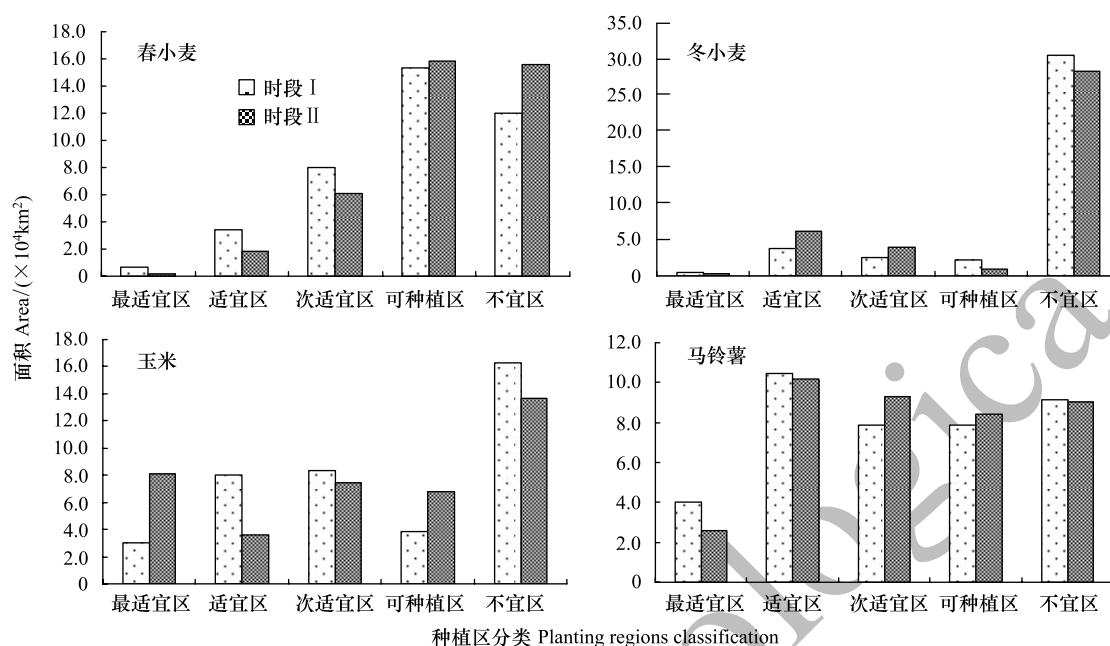


图 10 不同时段春小麦、冬小麦、玉米和马铃薯种植面积图

Fig.10 Planting area map of spring wheat, winter wheat, corn and potato in the period I and II

4 结论与讨论

分析气候资源变化特点及其对作物栽培格局的潜在影响是开展农业生产应对气候变化技术研究的前提与基础。本文的研究结果显示,时段 II 较时段 I 平均气温增加 0.83°C , 平均增温率达 $0.33^\circ\text{C}/10\text{a}$, 表明研究时段内年均气温整体呈升高趋势。时段 I 和时段 II 平均负积温分别为 -570.71°C 和 -456.8°C , 平均增加 113.9°C 。降水量气候倾向率为 $-34-16\text{mm}/10\text{a}$, 整体表现为略减少趋势。时段 I 和时段 II 的年平均降水量分别为 425mm 和 400mm 。因此, 该地区农业气候资源的变化总体表现为积温增加、降水量减少、干燥度增加的趋势。相关研究表明温度升高会导致发育速度加快、生育期缩短、产量下降, 气温每升高 1°C , 春小麦、冬小麦、玉米和马铃薯产量将分别减少 $10\%-17\%$ [29-30]。气候变暖将使病虫害发生期提前、害虫死亡率降低、繁殖代数增加, 从而使农作物病虫害危害加重 [30]。气候变暖将改变作物的营养品质, 导致小麦籽粒中淀粉含量下降、蛋白质含量上升 [31]。日照时数的减少也可能会进一步影响光合作用与产量。因此, 甘肃省近 50a 来作物生长期农业气候资源的变化对冬、春小麦和马铃薯的生产总体来说是不利的, 会导致品种生育期缩短、生长期间病虫害危害加剧、产量潜力与产量下降。应当采取逐步推广应用生育期稍长、抗病虫、抗高温能力更强的品种, 加强田间栽培管理、构建健康群体等有针对性的适应性措施, 以保证产量潜力。而对玉米的生产将产生有利的影响, 受气候变暖影响, 热量资源增加, 满足玉米品种在较高海拔生长的热量条件, 增加了在高海拔地区种植的可能性。

气候变化背景下甘肃省农业气候资源在空间上具有较大差异性。一些地区表现为热量、光照和雨量均同步增加, 一些地区表现为热量、雨量及光照变化不同步。总体来看河西地区、黄土高原中部和甘南高原大部分地区增温比较明显, 平均增温率分别为 $0.36^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.38^\circ\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.42^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。大于 -600°C 的负积温带向北、向西分别移动了 1.67° 和 0.87° , 分别延伸约 181km 和 88km , 河西地区的负积温均小于 -600°C , 这限制了越冬作物的种植区域。与时段 I 相比, 时段 II 年降水量 $200-400\text{mm}$ 的区域向南、向东分别移动了 0.42° 、 0.43° , 分别延伸约 44km 和 42km 。

因气候变化对农业气候资源影响的差别,对作物生产的可能影响以及采取的应对措施也将有所不同,比如河西内陆河灌区受气温升高影响和河西水资源因素制约,春小麦在绿洲区生长受到影响,增加了在高海拔地区种植的可能性。陇中、陇东黄土高原区是典型的雨养农业区,气候变化导致春小麦最适宜、适宜和次适宜种植区面积分别减少 1.4%、4.1% 和 4.8%,可种植和不适宜种植区面积分别增加 1.3% 和 9%。该区域降水显著减少,干燥度增加,干旱是农业生产最突出的问题,因此应控制春小麦种植面积。

气候变化引起的热量资源的变化导致冬小麦适生边界向西向北移动。时段 I 甘肃冬小麦种植北界在合水-庆阳-镇原-平凉崆峒-华亭-庄浪-静宁-通渭-陇西-武山-礼县-宕昌-舟曲一带,而时段 II 这一界限已经扩展到环县、白银、靖远、会宁、定西、兰州、榆中、皋兰、广河、临夏和永靖等县。冬小麦适宜和次适宜种植区面积分别增加 6% 和 3.4%,最适宜、可种植和不适宜种植区面积分别减少 0.4%、3.5% 和 5.7%。

玉米为喜温作物,气候变暖背景下河西内陆河灌区热量资源增加,玉米籽粒灌浆速度快,千粒重高。包括酒泉地区、张掖地区和武威地区玉米最适宜种植区面积和范围扩大,同时由于受气温升高,增加了在高海拔(1700—1900m)地区种植的可能性。黄土高原区热量条件较为适宜,但气候干燥,玉米关键需水期降水不足,产量低而不稳。气候变化对玉米种植的影响主要表现最适宜和可种植区面积分别增加 13% 和 7%,适宜、次适宜和不适宜种植区面积分别减少 11%、2% 和 7%,变化范围以河西灌区和陇中黄土高原地区最为显著。

马铃薯为喜凉作物,气候变暖对马铃薯产生不利影响,河西内陆河灌区马铃薯种植区最适宜和适宜种植区范围均缩小,表现为海拔 1700—2000m 的平原种植区几乎消失,海拔 2000—2600m 的冷凉浅山种植带幅宽缩小,但适宜种植高度向高海拔地区移动。陇中黄土高原是马铃薯最适宜和适宜种植的主要区域,受气候变暖影响,马铃薯最适宜和适宜种植区范围均显著缩小。总体来看,气候变化对甘肃马铃薯种植的影响主要表现为最适宜和适宜种植区面积分别减少 3.8% 和 0.7%。次适宜和可种植区面积分别增加 3.5% 和 1.3%。

适应气候变化,科学调整作物布局,因地制宜地分区提出适合不同气候区域适宜发展的优势作物和特色作物,是农业布局规划应对未来气候变化重要适应对策之一。河西灌区在保证粮食安全的前提下,适当减少春小麦面积,增加玉米面积,稳定马铃薯面积,扩大经济作物面积。陇中和陇东黄土高原地区稳定冬小麦面积,扩大地膜玉米种植面积,发展豆类、马铃薯等抗旱性强的作物,大力发展地方特色作物。陇南河谷川坝区以粮食为主,适当发展蔬菜和经济林木,山区要农林牧并重,建立饲草基地,发展畜牧业,积极发展经济林木和地方特色作物。

水资源是制约河西灌区农业发展的瓶颈因素,因此,加强高效节水灌溉技术应用,发展高效综合生产配套技术,提高水、肥资源利用率。黄土高原雨养农业地区要创新现代旱作农业发展模式,以提高作物抗旱性和水分利用效率为方向,加强主要旱地作物抗旱栽培与耕作技术、抗旱节水型农作制度、覆盖栽培、保护性耕作、作物生理生态、水肥调控、作物抗旱机理及其改善途径、农田微集水等方面的研究。积极推广雨养农业集雨补灌技术,以积极应对气候变化给农业带来的负面影响。

参考文献(References):

- [1] 施雅风,沈永平,李栋梁,张国威,丁永建,胡汝骥,康尔泗.中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨.第四纪研究,2003,23(2): 152-164.
- [2] 叶笃正,符淙斌,董文杰.全球变化科学进展与未来趋势.地球科学进展,2002,17(4):467-469.
- [3] 秦大河.气候变化的事实与影响及对策.中国科学基金,2003,17(1):1-3.
- [4] 林而达,许吟隆,蒋金荷,李玉娥,杨修,张建云,李从先,吴绍洪,赵宗群,吴建国,居辉,严昌荣,王守荣,刘允芬,杜碧兰,赵成义,秦保芳,刘春葵,黄朝迎,张小全,马世铭.气候变化国家评估报告(II):气候变化的影响与适应.气候变化研究进展,2006,2(2):51-56.
- [5] 黄建平,李明霞,刘玉芝,张镭,龚道溢.干旱半干旱区气候变化研究综述.气候变化研究进展,2013,9(1):9-14.
- [6] 秦大河.气候变化的事实、影响及我国的对策.外交学院学报,2004(3):14-22.
- [7] 赵锦,杨晓光,刘志娟,成迪芳,王文峰,陈阜.全球气候变暖对中国种植制度可能影响 II.南方地区气候要素变化特征及对种植制度界限可能影响.中国农业科学,2010,43(9):1860-1867.
- [8] Huang J, Guan X, Ji F. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(12): 5391-5398.

- [9] 齐月,陈海燕,房世波,余卫国.1961—2010年西北地区极端气候事件变化特征.干旱气象,2015,33(6):963-969.
- [10] 徐栋,孔莹,王澄海.西北干旱区水汽收支变化及其与降水的关系.干旱气象,2016,34(3):431-439.
- [11] IPCC. Climate change 2014:mitigation of climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 5-5, 21-24, 29-31, 33-33, 60-60.
- [12] 代姝玮,杨晓光,赵孟,李勇,王文峰,刘志娟.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.应用生态学报,2011,22(2):442-452.
- [13] 秦大河,丁一汇,苏纪兰,任贾文,王绍武,伍荣生,杨修群,王苏民,刘时银,董光荣,卢琦,黄镇国,杜碧兰,罗勇.中国气候与环境演变评估(I):中国气候与环境变化及未来趋势.气候变化研究进展,2005,1(1):4-9.
- [14] 唐国利,任国玉.近百年中国地表气温变化趋势的再分析.气候与环境研究,2005,10(4):791-798.
- [15] 丁一汇,任国玉,石广玉,宫鹏,郑循华,翟盘茂,张德二,赵宗慈,王绍武,王会军,罗勇,陈德亮,高学杰,戴晓苏.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势.气候变化研究进展,2006,2(1):3-8.
- [16] 赵宗慈,王绍武,罗勇.IPCC 成立以来对温度升高的评估与预估.气候变化研究进展,2007,3(3):183-184.
- [17] Tao F L, Yokozawa M, Xu Y L, Hayashi Y, Zhang Z. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China,1981—2000. Agricultural and Forest Meteorology, 2006,138:82-92.
- [18] Wang R Y, Zhang Q, Wang Y L, Yang X G, Han Y X, Yang Q G. Response of Corn to Climate Warming in Arid Areas in Northwest China. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(12):1387-1392.
- [19] Wang H L, Gan Y T, Wang R Y, Niu J Y, Zhao H, Yang Q G, Li G C. Phenological trends in winter wheat and spring cotton in response to climate changes in northwest China. Agricultural and Forest Meteorology. 2008,148:1242-1251.
- [20] 李奎清,张季惠,杨一鸣,乌兰,王鹤龄,李裕.论农业的变迁与发展对全球环境变化的驱动作用.干旱气象,2013,31(2):406-411.
- [21] 张晓煜,韩颖娟,张磊,卫建国,曹宁,亢艳莉.基于 GIS 的宁夏酿酒葡萄种植区划.农业工程学报,2007,23(10):275-278.
- [22] 苏永秀,李政,丁美花,孙涵.基于 GIS 的广西沙田柚种植气候区划研究.果树学报,2005,22(5):500-504.
- [23] 金志凤,邓睿,黄敬峰.基于 GIS 的浙江杨梅种植区划.农业工程学报,2008,24(8):214-218.
- [24] 陈思宁,申双和,刘敏.湖北省茶树气象灾害模糊综合评价及区划.农业工程学报,2010,26(12):298-303.
- [25] 唐红艳,牛宝亮.基于 GIS 技术的内蒙古兴安盟春玉米种植气候区划.中国农学通报,2009,25(23):447-450.
- [26] 任国玉,郭军,徐铭志,初子莹,张莉,邹旭凯,李庆祥,刘小宁.近 50 年中国地面气候变化基本特征.气象学报,2005,63(6):942-956.
- [27] 邓振镛.高原干旱气候作物生态适应性研究.北京:气象出版社,2005:25-38.
- [28] 王鹤龄,王润元,张强,吕晓东,牛俊义,赵鸿.甘肃马铃薯种植布局对区域气候变化的响应.生态学杂志,2012,31(5):1111-1116.
- [29] 李伟君,王春乙.气候变化对我国农作物种植结构的影响.气候变化研究进展,2010,6(2):123-129.
- [30] 孙智辉,王春乙.气候变化对中国农业的影响.科技导报,2010,28(4):110-117.
- [31] 王鹤龄,张强,王润元,甘延泰,牛俊义,张凯,赵福年,赵鸿.增温和降水变化对西北半干旱区春小麦产量和品质的影响.应用生态学报,2015,26(1):67-75.