

全球气候变暖对中国种植制度可能影响

I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析

杨晓光¹, 刘志娟¹, 陈 阜²

(¹中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; ²中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193)

摘要:【目的】在全球气候变化背景下, 中国气温自 20 世纪 80 年代明显升高已成为共识, 这一变化对中国农业生产尤其是对种植制度的影响越来越受到中国政府和专家学者的重视。为了回答这一问题, 笔者以 1981 年为时间节点, 把从 20 世纪 50 年代至今分为 2 个时间段, 分析和比较后一时段气候变暖对全国种植制度北界、冬小麦种植北界、双季稻种植北界、雨养冬小麦-夏玉米稳产种植北界的可能影响, 以及由于种植北界的空间位移对作物产量可能的影响。【方法】依据全国种植制度气候区划指标、冬小麦和双季稻种植北界指标以及雨养冬小麦-夏玉米稳产种植北界的降水量指标, 采用公认的农业气候指标计算方法, 使用 ArcGIS 分别绘出 1950s—1980 年、1981—2007 年 2 个时段全国种植制度北界图, 以及冬小麦种植北界图、双季稻种植北界图、雨养冬小麦-夏玉米稳产的种植北界图。【结果】(1) 与 1950s—1980 年相比, 1981—2007 年一年二熟制种植北界, 空间位移变化最大的区域在陕西省、山西省、河北省、北京和辽宁省。一年三熟制种植北界, 空间位移变化最大的区域为湖南省、湖北省、安徽省、江苏省和浙江省。在不考虑品种变化、社会经济等方面因素的前提下, 这些区域由一年一熟变成一年二熟, 主体种植模式的粮食单产平均可增加 54%—106%, 由一年二熟变成一年三熟, 主体种植模式的粮食单产平均可增加 27%—58%。(2) 与 1950s—1980 年相比, 1981—2007 年辽宁省、河北省、山西省、陕西省、内蒙古、宁夏、甘肃省和青海省冬小麦的种植北界不同程度北移西扩。以河北省为例, 冬小麦种植北界的北移, 可使界限变化区域由春小麦改种冬小麦, 单产平均增加约 25%。(3) 浙江省、安徽省、湖北省和湖南省双季稻的种植北界向北移动, 单从热量资源的角度出发, 可使其粮食单产不同程度增加。(4) 雨养冬小麦-夏玉米稳产的种植北界大部分区域向东南方向移动, 这是由于近年来该区降水量减少造成的。【结论】在过去的 50 年中, 由于气候变暖造成了全国种植制度界限不同程度北移、冬小麦和双季稻种植北界北移, 熟制的变化可能使种植制度界限变化区域的粮食单产增加。然而降水量的减少造成了雨养冬小麦-夏玉米稳产北界向东南方向移动。

关键词: 气候变暖; 种植制度北界; 冬小麦种植北界; 双季稻种植北界; 作物产量

The Possible Effects of Global Warming on Cropping Systems in China I. The Possible Effects of Climate Warming on Northern Limits of Cropping Systems and Crop Yields in China

YANG Xiao-guang¹, LIU Zhi-juan¹, CHEN Fu²

(¹College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193; ²College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract: 【Objective】Increasing temperature in China significantly since the 1980s has become a consensus in the context of global climate change. How the change affected the agriculture or even the cropping system has attracted more and more attention of the government and scientists. In this study, the possible effects of climate warming on the countrywide northern limits of cropping

收稿日期: 2009-08-19; 接受日期: 2009-11-05

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项项目(200803028)

作者简介: 杨晓光, 教授, 博士。E-mail: yangxg@cau.edu.cn

systems, the northern limits of winter wheat and double rice, and the stable-yield northern limits of rainfed winter wheat - summer maize rotation in China from 1981 to 2007 were analyzed. And the possible changes of crop yield due to the changes of planting limits during the period from 1950s to 1981 and the period from 1981 to 2007 were compared and discussed. 【Method】 A recognized calculation method of agro-meteorological indicators were used in the study. The countrywide northern limits of cropping systems, the northern limits of winter wheat and double rice and the stable-yield northern limits of rainfed winter wheat–summer maize rotation were draw by ArcGis for two periods from 1950s to 1980 and 1981 to 2007, according to the indices of the climate zoning index of cropping system, winter wheat and double rice northern limits and stable-yield northern limits of rainfed winter wheat–summer maize rotaion. 【Result】 Compared with the results during the period from 1950s to 1980, the northern limits of the two-cropping system from 1981 to 2007 occurred significant spatial displacement in Shaanxi, Shanxi, Hebei, Beijing and Liaoning provinces and city. The northern limits of the three-cropping system occurred largest spatial displacement in Hunan, Hubei, Anhui, Jiangsu, and Zhejiang provinces. Without the consideration for variety and social economic changing, grain yield per hectare of main cropping pattern could increase about 54%-106% if the one-cropping system changed to two-cropping system, while increase about 27%-58% if two-cropping system is changed to three-cropping. The northern limits of winter wheat moved northwards and westwards to different degrees in Liaoning, Hebei, Shanxi, Shaanxi, Inner Mongolia, Ningxia, Gansu and Qinghai provinces, comparing with the results during the 1950s-1980 period. For example in Hebei province, northern limits of winter wheat moved north, leading to about 25% grain yield increase in the changing area if the cropping system is changed from spring wheat to winter wheat in one year. The northern limits of double rice cropping area in Zhejiang, Anhui, Hubei, and Hunan provinces moved northwards. Considering the heat resource, the change of limits can increase the grain yield. The stable-yield northern limits of rainfed winter wheat–summer maize moved southeastwards in most regions, mainly caused by the decreased rainfall during recent years in the study areas. 【Conclusion】 During the past 50 years, the climate warming caused the northwards movement of the northern limits of cropping system, and the northern limits of winter wheat and double rice. The changes may increase the unit grain yield in the changing area. However, the stable-yield northern limits of rainfed winter wheat–summer maize rotation moved southeastwards due to the decreasing rainfall.

Key words: climatic warming; the northern limits of cropping system; the northern limits of winter whea; the northern limits of double rice; crop yields

0 引言

【研究意义】气候变暖已成为一个全球性的问题,根据 IPCC 第四次评估报告,过去 100 年中全球地表温度上升了 0.74°C ,气温普遍升高尤以北半球高纬度地区最为明显^[1]。众多学者对中国气候变化及其影响领域进行了大量的研究,取得了诸多阶段性进展^[2-6]。研究结果显示,中国气候变暖与全球变暖有相当一致性,但也存在明显差别。在全球变暖背景下,近 100 年来中国年平均地表气温明显增加,升幅为 $0.5\text{—}0.8^{\circ}\text{C}$,近 50 年中国年平均气温以北方升幅最高,东北北部、内蒙古及西部盆地升温速率达 $0.8^{\circ}\text{C}/10$ 年以上,换言之,该区域近 50 年温度已上升了 4°C 以上,高于同期全球平均值,20 世纪 80 年代是温度明显升高的转折点。降水量增加最明显的是西部盆地,最大的每 10 年增加 $10\%\text{—}15\%$,而华北及东北南部降水量有减少趋势。对 21 世纪气候变化趋势预测表明,21 世纪中国气候将继续明显变暖,尤以北方冬半年最为明显,降水量也呈增加趋势^[7-8]。【前人研究进展】种

植制度(cropping system)指一个地区或生产单位农作物的组成、配置、熟制与种植方式(单作间混套作、轮作、连作)所组成的一套相互联系并与当地农业资源、生产条件以及养殖业生产相适应的技术体系^[9]。中国幅员辽阔,各地的气候、土壤、作物及经济条件差异显著,为了因地制宜、趋利避害,合理提高气候资源与土地利用效率,开展中国种植制度的气候区划工作尤为重要。刘巽浩和韩湘玲利用各地气象台站建立以来到 1980 年的气候资料,在考察和调研基础上,结合农学家相关研究成果,建立了种植制度区划零级带、一级区和二级区的指标体系,确定了各指标的经典农业气候学计算方法,并在 20 世纪 80 年代中期完成了中国的种植制度气候区划^[9]。目前气候变化对中国种植制度的影响已引起了国内外学者的普遍关注,并取得了有意义的进展^[10-11]。大部分的研究多限于使用模型模拟未来气候变化情景,对种植制度可能受到的影响进行分析和评价^[12-17],然而对于 1981 年以来气候变暖对中国种植制度北界的可能影响,以及种植制度北界变化对产量的可能影响方面的研究还未见报道。

【本研究切入点】依据刘巽浩和韩湘玲先生建立的种植界限指标^[9]，采用 1987 年所做全国种植制度区划计算方法，以 1981 年为分界点，比较 1981—2007 年时段相对于建站—1980 年种植制度界限的变化，为中国种植制度的调整以及保证粮食安全和稳产高产提供科学依据。【拟解决的关键问题】基于全国 666 个气象台站（台湾省除外），以 1981 年为分界点，比较由于气候变暖引起的 1981 年以来种植界限相对于建站—1980 年时段的种植界限的潜在变化。分析和评价气候变暖对种植制度界限的可能影响，以及由于熟制的潜在变化可能带来的作物产量的变化。同时分析气候变暖对冬小麦种植北界、双季稻种植北界以及雨养冬小麦-夏玉米稳产的种植北界的影响。

1 材料与方法

1.1 数据的收集

气象数据来自笔者研究组已建的全国气象资料库，剔除一些期间搬迁的台站，选取全国建站（所有站点建站时间为 20 世纪 50 年代，为方便表达，本文记为 1950s）到 2007 年 40 多年的 666 个气象台站（台湾省除外）逐日气候资料，包括逐日平均气温和降水量。研究区域及气象站点分布见图 1。

1.2 指标的确定

在 20 世纪 80 年代中期，刘巽浩和韩湘玲完成了中国种植制度区划^[9]。由于受当时研究工具和数据资

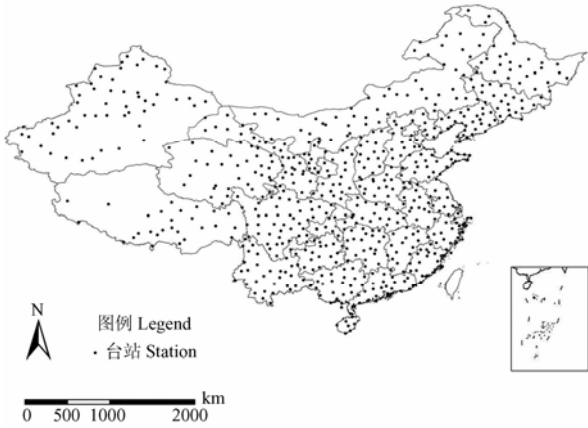


图 1 研究区域及气象台站分布图
Fig. 1 Location of the weather stations in China

料的限制，此项研究所有的资料是气象台站建站（1950s）以来到 1980 年的气候资料，为科学比较 2 个时段种植界限变化特征，本文所用的指标为刘巽浩和韩湘玲提出的种植制度区划指标体系^[9]，即零级带统一按热量划分，一级区与二级区按热量、水分、地貌与作物划分。本文重点分析与 1980 年以前相比，1981—2007 年气候变暖后所引起的零级带的改变，一级区和二级区的研究将在后续工作中完成。零级带的指标如表所示，最主要的指标是 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温，辅助指标为平均极端最低气温与 20°C 终止日。

表 零级带的划分指标

Table Indicators for the zero-grade zone

	$\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	极端最低气温 Extreme minimum temperature ($^{\circ}\text{C}$)	20°C 终止日 20°C termination date
一年一熟 One crop a year	<4000—4200	<-20	上旬/8 月—上旬/9 月 Early August—Early September
一年二熟 Two crops a year	>4000—4200	>-20	上旬/9 月—下旬初/9 月 Early September—Beginning in late September
一年三熟 Three crops a year	>5900—6100	>-20	下旬初/9 月—上旬/11 月 Beginning in late September—Early November

冬小麦种植北界的确定采用崔读昌等^[18]提出的指标，即最冷月平均最低气温 -15°C 、极端最低气温 $-22\text{—}24^{\circ}\text{C}$ 。双季稻的种植北界的确定采用全国农业区划委员会^[19]提出的双季稻安全种植北界指标，即 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温满足 $5\ 300^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ，雨养冬小麦-夏玉米稳产的种植北界是年降水量 800 mm 。

1.3 计算方法

积温的求算方法：某台站某一时间段 $\geq X^{\circ}\text{C}$ 积温的计算，选用刘巽浩和韩湘玲采用的偏差法计算积温。

首先求算 1951—2007 年每年稳定通过 $X^{\circ}\text{C}$ 的起止日期内 $\geq X^{\circ}\text{C}$ 的积温，然后采用经验频率法计算该台站不同时间段内（本文分为 2 个时间段，分别为 1950s—1980 年、1981—2007 年）80%保证率下的积温^[20]。

1.4 产量差异分析

在分析种植制度界限可能发生改变区域内粮食产量的变化情况时，笔者选择比较熟制（由一年一熟变为一年二熟，或一年二熟变为一年三熟）或作物（春小麦变为冬小麦）发生改变后主体种植模式中作物的

粮食单产变化,这里使用最能代表目前的气候条件的 2000—2007 年的各省统计年鉴的统计产量平均值,使用某省的平均产量,能代表该作物在该区域内的平均状况。且 2 种作物的产量是适应目前气候背景下实际状况,因此结果更有实际意义。

1.5 结果表达

根据上述方法计算出 666 个站点的各农业气象要素的统计量后,采用 IDW (inverse distance weighted interpolation) 插值方法对气象数据进行插值,本文所设定的 Cell size 的参数均为 0.002,生成空间栅格数据,然后根据指标要求使用空间分析中的 Contour 工具提取相应的等值线,最后生成所需的等值线图,界限空间变动使用软件中的测量工具(measure)来度量,取其平均值,最后将结果用 ArcGIS 软件表达。

2 结果

以 1981 年为时间界限,比较自建站到 1980 年以及自 1981 年到 2007 年 2 个时段种植界限零级带空间位移,冬小麦和双季稻种植北界以及雨养冬小麦-夏玉米稳产种植北界的变化特征。

1981—2007 年气候背景下各界限的空间位移是指由气候变暖引起的潜在可能,即热量资源为种植界限改变提供了气候资源的保障,这种可能性是否成为现实同时受社会、经济因素影响,是笔者下一步研究的重点。

2.1 种植制度北界的可能变化

图 2 为 1950s—1980 年(时段 I,下同)、1981—2007(时段 II,下同)年全国种植制度零级带的可能变化分布图,由图可以看出:(1)随着温度升高,积温增加,与时段 I 相比,时段 II 的一年一熟带、一年两熟带、一年三熟带都不同程度向北移动。(2)与时段 I 相比,基于时段 II 气候资料所确定的一年一熟区和一年二熟区分界线,空间位移最大的省(市)为陕西东部、山西、河北、北京和辽宁。其中在山西省、陕西省、河北省境内平均向北移动了 26 km。辽宁省南部地区,由原来的 40°1'N—40°5'N 之间的小片区域可一年两熟,变化到辽宁省绥中、鞍山、营口、大连一线。(3)与时段 I 相比,由时段 II 气候资料确定的一年二熟区和一年三熟区分界线,空间位移最大的区域在湖南省、湖北省、安徽省、江苏省和浙江省境内。在浙江省内,分界线由杭州一线跨越到江苏吴县东山一线,向北移动了约 103 km;安徽巢湖和芜湖附近向北移动了 127 km,安徽其它地区平均向北移动了 29

km;湖北省钟祥以东地区向北移动了 35 km;湖南沅陵附近向北移动了 28 km。

可以说,由于种植制度的变化和复种指数的增加,气候变暖对中国的农业生产将是有利的。尤其是处在寒温带的东北地区,低温冷害经常影响作物成熟,早霜冻的发生也常导致作物减产或绝收^[21]。从 1980 年以后,东北地区经历了最明显的变暖过程,与 1960—1970 年相比,年平均气温上升了 1.0—2.5℃,日最低气温比最高气温上升幅度大,以至于温度日差明显缩小^[22]。由图还可以看出,1981—2007 年一年一熟区的种植北界可北移到辽宁省绥中、鞍山、营口、大连一线,这意味着过去近 30 年内,由于气候变暖,使辽宁一年二熟区的面积由原来的几乎为零逐步扩大到辽宁南部的大部分地区。温度升高延长了该地区作物的生长季,复种指数将会随之提高。金之庆等^[23]认为,未来冬小麦的安全种植北界将移至东北平原及其毗邻地区,考虑到冬小麦产量通常要比春小麦产量高,加上夏半年生长季还可以种植大豆、玉米、水稻或高粱等其它喜温作物,因此该区的粮食产量可望大幅度增加。

由于各地种植模式复杂多样,在此选择当地有代表性的种植模式说明种植制度北界的变化对产量的可能影响。参考刘巽浩和韩湘玲先生 1987 年完成种植制度区划中各零级带主体种植模式,在分析由一年一熟变化为一年二熟后对产量的影响时,选择春玉米为一年一熟区的代表种植模式,冬小麦-夏玉米为一年二熟区的代表性种植模式;在分析由一年二熟变化为一年三熟后对产量的影响时,以冬小麦-中稻作为一年二熟区的代表性种植模式,冬小麦-早稻-晚稻为一年三熟区的代表性种植模式,结果见图 2。由图 2 可以得出,在种植制度界限变动的区域,不考虑品种变化、社会经济等因素的前提下,将使粮食单产获得不同程度的增加。这里选择最能代表目前气候条件的 2000—2007 年的各省统计产量平均值,分析气候变暖带来的种植制度北界移动可能造成的粮食单产的变化。因变化区域各省产量水平不同,笔者选择实际产量数据进行比较,结果由一年一熟变成一年二熟,陕西省、山西省、河北省、北京和辽宁省粮食单产分别可增加 82%、64%、106%、99%和 54%;由一年二熟变成一年三熟,湖南省、湖北省、安徽省、浙江省粮食单产分别可增加 52%、27%、58%和 45%。目前在江苏省当地没有种植双季稻,但由于气候变暖的原因,可使一年三熟种植制度北界北移,如果在当地种植冬小麦-早稻-晚

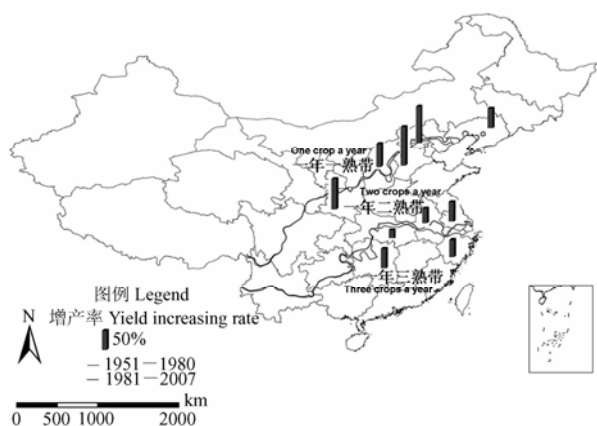


图 2 全国种植制度零级带北界的可能变化及增产率

Fig. 2 The change of northern limits of zero-grade zone and yield increase rate in China

稻来替换冬小麦-中稻模式, 可以使产量增加 37%。

2.2 冬小麦种植北界变化

由于气候变暖, 冬季温度升高, 使冬小麦的种植北界不同程度北移西扩。本文基于崔读昌等^[18]提出的指标, 比较 2 个时间段的冬小麦种植北界的空间地理位移。由图 3 可以看出: 辽宁省东部平均向北移动 120 km, 西部平均向北移动 80 km; 河北省平均向北移动 50 km; 山西省平均向北移动 40 km; 陕西省东部变化较小, 西部平均向北移动 47 km; 内蒙古、宁夏一线平均向北移动 200 km; 甘肃西扩 20 km; 青海西扩 120 km。冬小麦产量通常要比春小麦高, 因此该区域的粮

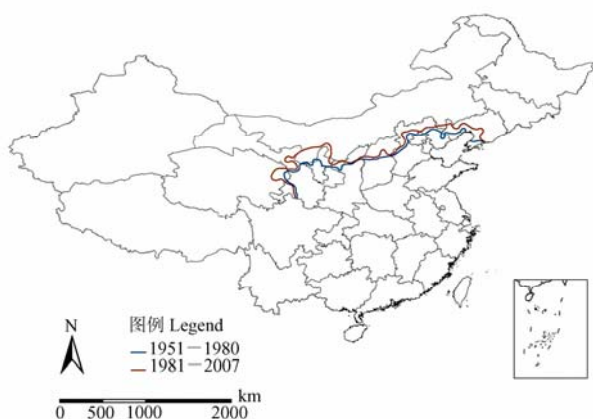


图 3 冬小麦种植北界空间移动

Fig. 3 The change of northern limits of winter wheat in China

食产量可望大幅度增加。现以河北省为例, 分析冬小麦种植北界的变动可能对产量造成的影响。由河北省 1981—2007 年冬小麦和春小麦平均产量数据可以看出, 历年冬小麦的产量均高于春小麦的产量, 从 27 年平均状况得出, 冬小麦产量比春小麦产量平均高出 25%。由此笔者认为河北省冬小麦种植北界的北移, 可使界限变化区域的小麦单产平均增加约 25%。

2.3 双季稻种植北界变化

双季稻三熟制是以双季稻为基础和一季旱作物(包含冬绿肥)的一年三熟制。世界上主要分布在北纬 20°—32°雨热同季的东南亚稻区。中国长江以南的亚热带, 正好处在这一地区的中心地带, 是双季稻三熟制的主要分布地区。近年来由于气候变暖, 积温增加, 如果仅考虑气候要素的影响, 使双季稻的适种范围发生了变化(图 4)。主要表现在: 浙江省境内平均向北移动 47 km; 安徽省境内平均向北移动 34 km; 湖北省和湖南省境内平均向北移动 60 km。

界限的移动使得原有的稻-麦两熟区变成可以种植双季稻的区域。由于越冬作物的种类性质不同, 双季稻可以归纳为 3 个类型和多种种植模式: 冬绿肥-双季稻三熟制、喜凉越冬作物-双季稻三熟制、喜温越冬作物-双季稻三熟制。根据不同种植模式对环境条件的要求不同, 其适宜地区和在各地的发展比例存在较大差异。在现有三熟制模式中, 以肥-稻-稻种植模式适应性最大, 广泛分布于长江中下游直至华南各省。因此在分析双季稻种植北界的变动对产量的影响时, 笔者选取由麦-稻种植模式变化为肥-稻-稻种植模式进行比较。目前部分地区农民因双季稻费工、投入高等原因, 并没有实际种植双季稻。但从气候条件分析, 这些地区是能够满足种植双季稻的条件, 如果在浙江省、安徽省、湖北省、湖南省由麦-稻模式改为肥-稻-稻模式, 以早稻和晚稻替换小麦和中稻, 粮食单产分别可增加 13.8%、12.2%、1.8%和 29.9%。未来气候变暖使这些地区的热量资源更为丰富, 如果水资源满足, 从热量资源角度分析, 该区域可以种植越冬作物-双季稻三熟制。

2.4 雨养冬小麦-夏玉米稳产种植北界的变化

在热量能够满足多熟种植的地区, 多熟种植能否成功, 水分往往是关键因素。前人研究表明, 冬小麦-夏玉米一年两熟种植模式的需(耗)水量为 800 mm^[9], 因此雨养冬小麦-夏玉米种植模式稳产的降水量指标界限为 800 mm。

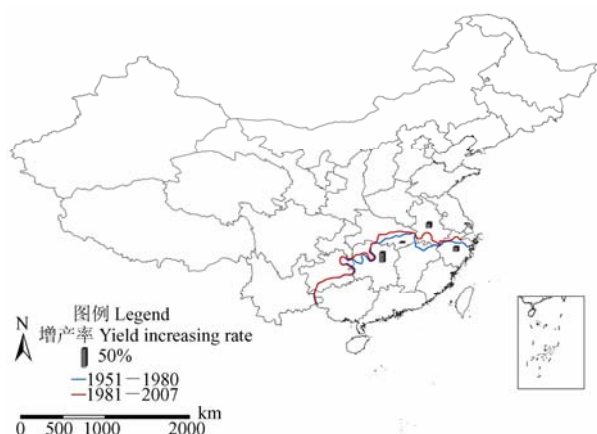


图 4 双季稻种植北界的变动及增产率

Fig. 4 The change of northern limits of double rice and yield increase rate in China

本文比较了各气象台站自 1950s—1980 年、1981—2007 年 2 个时间段的 800 mm 降水量等值线的空间位移,由此分析降水量的变化对中国雨养冬小麦-夏玉米种植模式稳产的种植北界的可能影响。各时段的降水量使用该时段年降水量的平均值来表示。

从图 5 看出,与 1950s—1980 年相比,1981—2007 年的降水量等值线在山东省、河南省和四川省空间位移比较明显。从东北到西南可以分成三段:(1)在山东省(青岛-莒县-砀山-亳州一线)降水量等值线向东南方向移动,说明该线以西附近地区年降水量有减少的趋势。(2)在河南省中东部(亳州-西华-南阳一线)降水量等值线向西北方向移动,表明该线附近地区年降水量有略微增加的趋势。(3)在河南省西部、陕

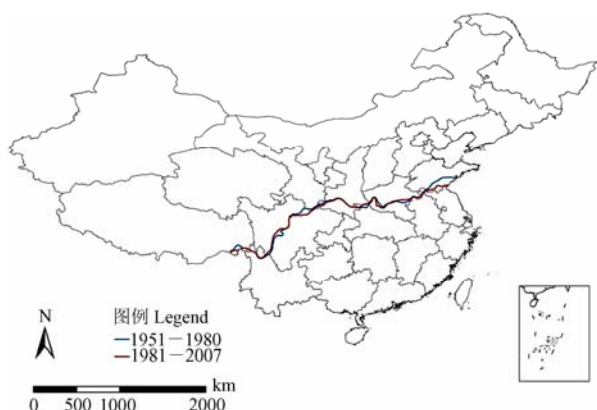


图 5 中国 800 mm 降水量等值线的变化趋势

Fig. 5 Isogram of 800 mm annual precipitation in China

西省西部和四川省东部(佛坪-汉中-平武-小金一线)降水量等值线向东南方向移动,即该线附近年降水量有减少的趋势。

尽管中纬度个别地区降水量有所增加,但由于温度升高引起蒸散量加大,很大程度上抵消降水的增加,甚至超过降水量增加值,因此应加强冬小麦-夏玉米复种模式作物水分利用效率研究,为筛选未来气候背景下适宜的品种提供依据。

3 讨论

本文讨论的前提是,气候变暖的影响使种植界限的空间位移成为现实,在 21 世纪前几年气候背景下,种植的作物改变后,粮食产量可能的增幅。至于伴随气候变暖发生的其它环境要素的变化及其对产量的协同影响则是笔者今后研究的重点。

尽管全球气候变暖是总趋势,但气候变化背景下,极端气象事件发生频率亦相应增加^[24-26],干旱、洪涝、高温和低温冷害等农业气象灾害的发生频率增大。气温升高增加了北方地区的热量资源,但季风雨带的南移可能加重那里的干旱危害,造成北方变干变热;气候的冷暖、干湿变率可能增大,特别是降水变率的不确定性,是种植制度界限变化必须考虑的因素之一^[14]。

未来不断变暖的气候将加剧水分蒸发,干旱与半干旱地区干旱胁迫的程度可能会增大。良好的灌溉条件可以一定程度地缓解或补偿气候变暖造成的不利影响。在气候变暖,种植制度变化敏感带,加强农田基本建设非常必要。种植制度的改变同时需要与其相适应的作物新品种,以充分利用自然资源,趋利避害,保证作物产量的稳定性^[27]。例如在东北平原选育或引进一些生育期相对较长的中、晚熟品种,逐步取代目前生育期短、产量相对较低的早熟品种。这样做将有利于充分利用当地气候资源,提高作物产量^[23]。

一个地区实际的种植制度不仅取决于气候资源,同时受土壤条件、品种特性、生产水平、经济环境、市场需求、劳动力资源及技术水平等因素综合影响。可见,种植制度变革是十分复杂的问题。本文涉及气候变化背景下气候变暖对种植制度带来的可能影响,这为种植制度实现变革提供前提和资源保障,但气候变暖带来种植制度的可能变化能否成为现实,仍需与经济效益、社会效益等诸多因素结合考虑。

本文仅对气候要素(温度)的变化对中国的种植制度界限的影响进行了研究,仍然运用刘巽浩和韩湘

玲先生^[9]对零级带划分的气候指标进行划分, 由于在零级带的划分中, 仅仅考虑了热量资源的限制, 而没有太多考虑水分资源的限制, 同时未能考虑品种改变、经济社会、政策等方面因素的影响, 因此尚有待于进一步改进和完善。由于缺乏种植北界变动区域内各县的粮食单产及总产的数据, 要进一步研究气候变化带来的种植制度的变化如何影响各区的粮食产量, 还需要更精细的数据, 进行更加深入的研究。

4 结论

随着温度的升高, 积温的增加, 1981—2007 年间中国一年两熟制、一年三熟制的种植北界都较之 1950s—1980 年有不同程度北移。一年二熟制种植界限北移幅度最大的区域是陕西、山西、河北、北京和辽宁四省一市。一年三熟制种植北界空间位移最大的区域为湖南、湖北、安徽、江苏和浙江五省。在不考虑品种变化、社会经济等因素的前提下, 基于目前各作物实际产量水平, 由一年一熟变成一年二熟, 粮食单产平均可增加 54%—106%, 由一年二熟变成一年三熟, 粮食单产平均可增加 27%—58%; 气候变暖使辽宁省、河北省、山西省、陕西省、内蒙古、宁夏、甘肃省和青海省冬小麦的种植北界不同程度北移西扩。以河北省为例, 如仅考虑热量资源增加带来的影响, 冬小麦种植北界的北移, 可使界限变化区域的小麦单产平均增加 25%左右; 气候变暖也使双季稻的种植北界不同程度北移, 变化区域主要在浙江省、安徽省、湖北省和湖南省。若将稻-麦两熟种植模式替换成双季稻种植模式, 单从热量资源的角度出发, 这种变化可能会使江苏省、安徽省、湖北省和湖南省粮食单产分别增加 13.8%、12.2%、1.8%和 29.9%; 雨养冬小麦-夏玉米稳产的种植北界大部分区域向东南方向移动, 则是由于最近 20 多年来该区域降水量减少造成的。

致谢: 本研究得到中国农业大学刘巽浩先生和韩湘玲先生的悉心指导, 在此表示诚挚的谢意。同时感谢本研究组参与此工作的研究生李克南、成迪芳、赵锦、王文峰、曲辉辉、刘园、朱俊奇等同学。

References

- [1] IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 秦大河, 孙鸿烈, 孙 枢, 刘英金. 中国气象事业发展战略研究

(总论卷). 北京: 气象出版社, 2004.

- Qin D H, Sun H L, Sun S, Liu Y Q. *Meteorological Undertakings Development Strategy Research in China*. Beijing: Meteorological Press, 2004. (in Chinese)
- [3] Houghton J T, Ding Y H, Griggs D G. Climate change 2001: The scientific basis//*Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [4] 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化. 气象, 1994, 20(12): 19-26.
Ding Y H, Dai X S. Temperature variation in China during the last 100 years. *Meteorology Monthly*, 1994, 20 (12): 19-26. (in Chinese)
- [5] 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, 1994, 20 (12): 19-26.
Ren G Y, Guo J, Xu M Z, Chu Z Y, Zhang L, Zou X K, Li Q X, Liu X N. Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942-956. (in Chinese)
- [6] 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 中国近百年温度序列. 大气科学, 1995, 19(5): 525-534.
Lin X C, Yu S Q, Tang G L. Series of average air temperature over China for the last 100-year period. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1995, 19(5): 525-534. (in Chinese)
- [7] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 官 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.
Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, Guan P, Zheng X H, Zhai P M, Zhang D E, Zhao Z C, Wang S W, Wang H J, Luo Y, Chen D L, Gao X J, Dai X S. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8. (in Chinese)
- [8] 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.
Qin D H, Ding Y H, Su J L, Ren J W, Wang S W, Ren R S, Yang X Q, Wang S M, Liu S Y, Dong G R, Lu Q, Huang Z G, Du B L, Luo Y. Assessment of climate change and environment changed in China (I): Climate and environment changes in China and their projection. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(1): 4-9. (in Chinese)
- [9] 刘巽浩, 韩湘玲. 中国的多熟种植. 北京: 北京农业大学出版社, 1987.

- Liu X H, Han X L. *China's Multi-cropping*. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1987. (in Chinese)
- [10] 纪瑞鹏, 班显秀, 张淑杰. 辽宁冬小麦北移热量资源分析及区划. 农业现代化研究, 2003, 24(4): 264-266.
- Ji R P, Ban X X, Zhang S J. Analysis of thermal resources and zoning of winter wheat' northing in Liaoning. *Research of Agricultural Modernization*, 2003, 24(4): 264-266. (in Chinese)
- [11] 郝志新, 郑景云, 陶向新. 气候增暖背景下的冬小麦种植北界研究——以辽宁省为例. 地理科学进展, 2001, 20(3): 254-261.
- Hao Z X, Zheng J Y, Tao X X. A study on northern boundary of winter wheat during climate warming: A case study in Liaoning Province. *Progress in Geography*, 2001, 20(3): 254-261. (in Chinese)
- [12] Wang F T. Impact of climate change on cropping system and its implication for agriculture in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 11(4): 407-415.
- [13] Francesco N T, Marcello D, Rosenzweig C, Claudio O S. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: Model predictions at two Italian locations. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13: 179-189.
- [14] 张厚琯. 中国种植制度对全球气候变化响应的有关问题 I. 气候变化对我国种植制度的影响. 中国农业气象, 2000, 21(1): 9-13.
- Zhang H X. The Problems concerning the response of China's cropping systems to global climatic changes I. The effect of climatic changes on cropping systems in China. *China Journal of Agrometeorology*, 2000, 21(1): 9-13. (in Chinese)
- [15] 金之庆, 方 绢, 葛道阔, 郑喜莲, 陈 华. 全球气候变暖影响我国冬小麦生产之前瞻. 作物学报, 1994, 20(2): 186-197.
- Jin Z Q, Fang J, Ge D K, Zheng X L, Chen H. Prospect to the impacts of climate change on winter wheat production in China. *Acta Agronomica Sinica*, 1994, 20(2): 186-197. (in Chinese)
- [16] Reyenga P J, Howden S M, Meinke H, Hall W B. Global change impacts on wheat production along an environmental gradient in south Australia. *Environment International*, 2001, 27: 195-200.
- [17] Axel T. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China. *Global and Planetary Change*, 2008, 60: 306-326.
- [18] 崔读昌, 曹广才, 张 文, 张成琦. 中国小麦气候生态区划. 贵州: 贵州科技出版社, 1991.
- Cui D C, Cao G C, Zhang W, Zhang C Q. *Climatical Ecological Divisions of Wheat in China*. Guizhou: Guizhou Science and Technology Press, 1991. (in Chinese)
- [19] 全国农业区划委员会. 中国农业自然资源与农业区划. 北京: 农业出版社, 1991.
- National Agricultural Zoning Committee. *Agricultural Resources and Regional Planning in China*. Beijing: Agriculture Press, 1991. (in Chinese)
- [20] 曲曼丽. 农业气候实习指导. 北京: 北京农业大学出版社, 1990.
- Qu M L. *Agro-climatic Internship Guide*. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1991. (in Chinese)
- [21] 王馥棠. 近十年来我国气候变暖影响研究的若干进展. 应用气象学报, 2002, 13(6): 754-766.
- Wang F T. Advances in climate warming impact research in China in recent ten years. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(6): 754-766. (in Chinese)
- [22] Yang X, Lin E D, Ma S M, Ju H, Guo L P, Xiong W, Li Y, Xu Y L. Adaptation of agriculture to warming in Northeast China. *Climatic Change*, 2007, 84: 45-58.
- [23] 金之庆, 葛道阔, 石春林, 高亮之. 东北平原适应全球气候变化的若干粮食生产对策的模拟研究. 作物学报. 2002, 28(1): 24-31.
- Jin Z Q, Ge D K, Shi C L, Gao L Z. Several strategies of food crop production in the Northeast China Plain for adaptation to global climate change—A modeling study. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1): 24-31. (in Chinese)
- [24] 朱大威, 金之庆. 气候及其变率变化对东北地区粮食生产的影响. 作物学报, 2008, 34(9): 1588-1597.
- Zhu D W, Jin Z Q. Impacts of changes in both climate and its variability on food production in Northeast China. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(9): 1588-1597. (in Chinese)
- [25] 王绍武. 近百年气候变化与变率的诊断研究. 气象学报, 1994, 52(3): 261-273.
- Wang S W. Diagnostic studies on the climate change and variability for the period of 1880-1990. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 52(3): 261-273. (in Chinese)
- [26] 王绍武. 气候系统引论. 北京: 中国气象出版社, 1994.
- Wang S W. *Introduction to Climatic System*. Beijing: China Meteorological Press, 1994. (in Chinese)
- [27] 张厚琯. 中国种植制度对全球气候变化响应的有关问题 II. 我国种植制度对气候变化响应的主要问题. 中国农业气象. 2000, 21(2): 10-13.
- Zhang H X. Response of cropping system in China to global climatic changes II. Effect of cropping system in China to global climatic changes. *China Journal of Agrometeorology*, 2000, 21(2): 10-13. (in Chinese)