

1962—2010年潜在干旱对中国冬小麦产量影响的模拟分析

曹 阳¹, 杨 婕^{2*}, 熊 伟¹, 武永峰¹, 冯灵芝¹, 杨晓光²

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘 要: 旱灾是冬小麦生产中常见的气象灾害, 该研究旨在了解气候变化背景下中国冬小麦小麦受干旱的历史影响及变化情况, 这对合理指导冬小麦生产的减灾、防灾, 稳定冬小麦产量有重要的指导意义和作用。该研究采用 CERES-Wheat 模型, 模拟了 1962—2010 年潜在干旱对中国冬小麦产量影响的时空变化趋势, 并分析其与大气环流因子间的关系, 以期了解中国近 50a 来冬小麦受旱程度的变化情况。结果表明: 1) 1962—2010 年中国冬小麦因干旱造成的潜在产量损失总体呈上升的趋势, 但不同时期表现不同, 其中 20 世纪 60 年代、20 世纪 80 年代表现为下降趋势。2) 在过去近 50a 里, 中国冬小麦潜在旱灾产量损失中心有向西北移动的趋势, 这主要是受黄土高原和河西走廊地区受旱程度增强的影响。3) 中国冬小麦潜在旱灾产量损失中心的经纬度和影响中国降水的副热带高压、北极涡系统的部分指数具有显著的负相关关系。冬小麦生长季同期(前一年 10 月—当年 5 月)的副热带高压系列指数与中心的相关关系表现显著, 而生长季同期和生长季前期(前一年 6 月—前一年 9 月)的北极涡系列指数与中心都具有显著的相关关系。当冬小麦生长季同期北半球的西太平洋副高、印度副高和南海副高的强度偏强、范围偏大时, 潜在旱灾产量损失中心的位置将会偏西; 当北极涡在冬小麦生长季前期或同期偏大偏强时, 中国冬小麦潜在产量损失中心将偏南, 反之亦然。

关键词: 干旱; 农作物; 模型; 冬小麦; 副热带高压; 北极涡

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.07.015

中图分类号: S126; S423

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-07-0128-12

曹 阳, 杨 婕, 熊 伟, 等. 1962—2010 年潜在干旱对中国冬小麦产量影响的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 128—139.

Cao Yang, Yang Jie, Xiong Wei, et al. Simulation of winter wheat yield influenced by potential drought in China during 1962—2010[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(7): 128—139. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

受气候变化以及人类活动的综合影响, 近年来, 50a 或百年一遇的灾害发生频率和强度增加, 影响区域扩大, 造成损失加重。1950 年以来的观测证据表明, 全球尺度上某些极端事件, 尤其是日极端温度事件和热浪、强降水事件, 持续时间、发生频率和强度很可能增加^[1]。中国是世界上受各种气象灾害危害最严重的国家之一, 其中干旱是中国影响区域最广、发生最频繁、造成作物产量损失最大的气象灾害之一。据统计, 在 1950—2001 年期间,

中国平均每年的旱灾面积高达气象灾害受灾总面积的 56.2%^[2]。2011 年, 全国农作物受灾总面积合计为 32 470.5 km², 绝收总面积为 2 891.7 km², 其中旱灾面积就有 16 304.2 km², 绝收面积 1 505.4 km²^[3]。

小麦是中国主要的粮食作物, 是北方地区食用最广的细粮作物, 在中国农业生产中占有相当重要的地位^[3]。旱灾是中国麦区主要的气象灾害, 也是一直困扰冬小麦生产的重要问题。研究表明, 干旱胁迫不仅会限制冬小麦生长, 影响植株的株高、地上部干重、根干重和总生物量, 还会导致冬小麦穗数、千粒重和穗粒数的显著降低^[4-8]。因此, 研究干旱灾害对中国冬小麦生产的影响对合理指导冬小麦生产的减灾、防灾, 稳定冬小麦产量有重要的指导意义和作用。

多年以来, 前人为了客观地确定和评价干旱事件, 建立和发展了多种干旱评价指标, 如降水距平百分率^[9]、标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI)^[10]等, 这些指标能够较好

收稿日期: 2013-11-07 修订日期: 2014-02-14

基金项目: 国家 973 资助项目 (2012CB9559-04, 2010CB951599-04); 国家自然科学基金资助项目 (41171094); 国家科技支撑课题 (2012BAC19B01); 基本科研业务 (2013BH038)。

作者简介: 曹 阳 (1988—), 男, 江苏镇江人, 主要从事气候变化与极端事件的研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: jnpx314@hotmail.com

*通信作者: 杨 婕 (1975—), 女, 黑龙江抚远人, 博士后, 主要从事气候变化的影响与适应的研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100094。Email: yj4739@sina.com

地从生理、生态等角度评价干旱指标,但是还难以表达作物的不同生长阶段对水分胁迫的不同反应,而且目前关于全国尺度上干旱对冬小麦产量影响的研究还很少。作物模拟模型借助计算机,以日为时间步长模拟作物生长发育的过程和产量,能在一定程度上表达出作物在不同生长阶段对水分胁迫的反应^[11]。本研究尝试借助作物模拟模型来分析 1962—2010 年水分胁迫及早灾对中国冬小麦产量的影响,并结合大气环流指数分析大气环流因子与中国冬小麦旱灾之间的关系,以期了解近 50a 来中国冬小麦生产受干旱的影响及其变化情况,并为干旱的研究方法提供一些参考。

1 资料与方法

1.1 作物模型的选择和校准

本研究选用 DSSAT 系列作物模型中的 CERES-Wheat 小麦模型,有关文献对此进行了详细描述^[11]。为了解模型模拟效果,研究首先利用模型的 GENCL 模块,采用试错法对品种参数进行站点校准和验证。然后,研究采用均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 法对模型的品种参数进行区域校准和验证 (详见文献^[12—13])。结果表明,校准后,模型不仅对站点尺度的作物模拟效果较好,而且在区域尺度上也可以反映出产量

的时间和空间变化趋势^[12]。

1.2 1962—2010 年全国冬小麦单产的模拟

利用校准后的模型,模拟 1962—2010 年中国冬小麦单产。模拟中的天气数据来自于国家气候中心 1962 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日 50 km×50 km 网格的天气数据。每个网格的天气数据包括日最高气温、日最低温度、日平均温度、日降水量和日太阳辐射量。模型先后进行了 2 次模拟,除水分管理分别设为雨养和灌溉 (设定为自动灌溉方式,即当土壤有效含水率小于 80% 时进行灌溉,每次 20 mm) 2 种模式之外,其余输入参数均保持一致。其中雨养条件下的模拟结果表示有水分胁迫存在时的冬小麦单产,灌溉模式下的模拟结果表示无水分胁迫条件下的冬麦产量。两者之间的差值可以在一定程度上反映出因水分胁迫造成的产量损失。

土壤数据按面积权重法,由全国土壤分布图网格化而得 (网格分辨率 50 km×50 km), 每个网格作为数据收集和模型运行的最小单位^[12]。原始土壤数据来源于中国农业科学院农业资源和农业区划研究所提供的 1:1,000,000 空间数据库,借助于 GIS 选取与每个网格相一致的土种,并确定每个网格上冬小麦的种植面积^[13]。本文只研究了干旱对中国冬小麦生产的影响,只对种植了冬小麦的网格进行了模拟和分析,其区域范围见图 1。

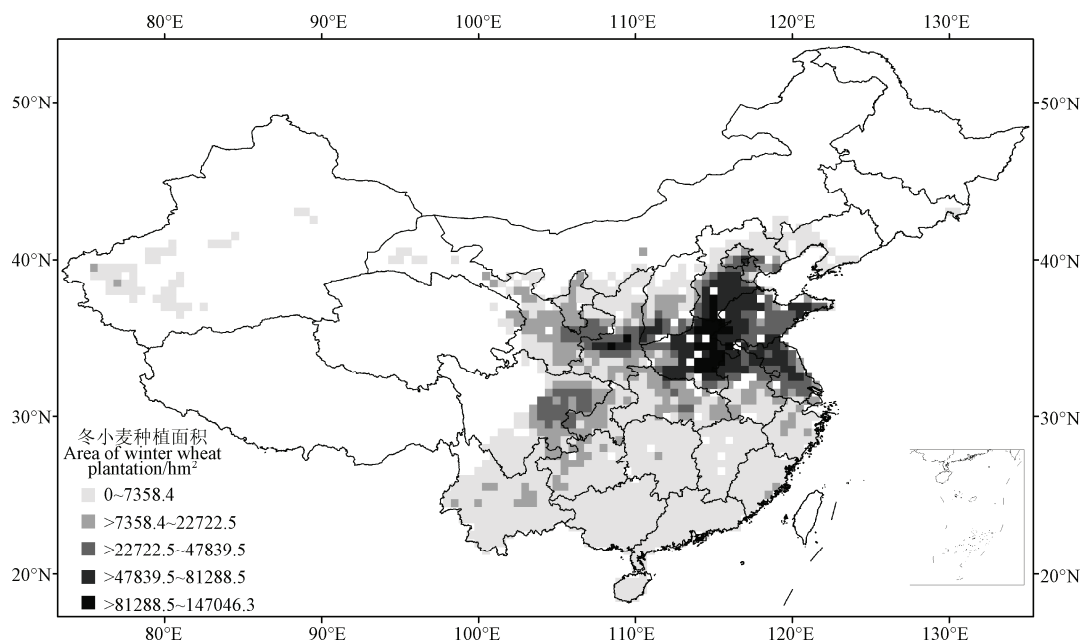


图 1 研究中冬小麦种植分布及各网格冬小麦种植面积示意图

Fig.1 Distribution of winter wheat plantation and planting area in grids

模拟中的肥料管理设为无胁迫状态,管理和品种数据由区域校准过程确定 (详见文献^[12—13])。

1.3 数据处理和分析方法

1.3.1 潜在干旱造成的损失

由于没有考虑实际灌溉的补给,因此本文将一

段时期内能对冬小麦产量造成影响的水分胁迫定义为潜在干旱,而整个冬小麦生育期内因水分胁迫导致的单产损失定义为由潜在干旱造成的单产损失 y_L (以下简称潜在单产损失), 见式 (1):

$$y_L = y_{Irr} - y_{Rain} \quad (1)$$

式中: y_L 为某网格的潜在单产损失, kg/hm^2 , y_{Irr} 为模型模拟的该网格灌溉冬麦单产, kg/hm^2 , y_{Rain} 为模型模拟的该网格雨养冬麦单产, kg/hm^2 。

而潜在干旱造成的总产量损失 (以下简称潜在产量损失) Y_L , 见式 (2):

$$Y_L = y_L \times S \quad (2)$$

式中: Y_L 为某网格的潜在产量损失, kg ; S 为该网格的冬小麦的种植面积, hm^2 。在此笔者简化了问题, 冬小麦种植面积采用 2000 年的面积数据, 而且没有考虑各网格种植面积的年际变化。

某一时间各网格单产损失与灌溉单产的比值可以反映出同一时期不同地区间受旱程度的差异, 因此笔者计算了潜在单产损失率 P , 见式 (3):

$$P = \frac{y_L}{y_{Irr}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P 为某一时间某网格的潜在单产损失率, %。

为了了解某网格潜在单产损失 y_L 与时间序列 t 的关系, 笔者构建了一次线性方程, 见式 (4):

$$y'_L = a_1 t + a_0 \quad (4)$$

式中: y'_L 为用此一次线性方程描述的某网格的潜在单产损失, kg/hm^2 ; t 为时间, a 。 a_1 即为潜在单产损失倾向率, 用于反映潜在单产损失在一定时间范围内的变化趋势。若 a_1 为正值, 表示在该时段内, 该网格潜在单产损失呈现增加的趋势, 反之亦然。 a_1 的绝对值大小反映了这种趋势的强弱程度。 a_1 和 a_0 皆为无量纲量。

1.3.2 潜在旱灾的识别

一定程度以下的水分胁迫并不一定形成旱灾, 旱灾是一定强度和持续时间下发生的偶发性自然灾害。例如中国很大一部分冬小麦种植区处于半干旱区, 生育期内的降水量并不能完全满足小麦生长发育的需求, 因此许多地区的潜在产量损失常年都很大, 但是这并不能说明当地每年都发生了旱灾。为了剥离出旱灾造成的单产损失, 笔者采用计算每个网格每年的潜在单产损失的距平百分率 D , 见式 (5):

$$D = \frac{y_L - \overline{y_L}}{\overline{y_L}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: D 为每个网格每年的潜在单产损失对应该网

格 49a 时间序列的距平百分率, %, $\overline{y_L}$ 为该格点上 49a 的平均潜在单产损失, kg/hm^2 。

当 $D > 0$ 时, 表明当年因潜在干旱造成的减产大于多年平均损失, 属欠收年份; 当 $D < 0$ 时, 表明当年因潜在干旱造成的减产少于多年平均损失, 属丰产年份。因此只有当 $D > 0$ 时, 认为该网格在该年确实受到了干旱灾害的影响, 由于没有考虑实际灌溉补给, 因此视这种单产损失为由潜在旱灾造成的潜在单产损失。当 $D < 0$ 时, 则认为该年该网格没有受旱灾影响。这种只考虑由潜在旱灾造成的潜在单产损失距平百分率可以在一定程度上反映出该网格旱灾对小麦生产的影响。

1.3.3 潜在旱灾造成的产量损失中心位置的计算

中心模型是研究区域上某要素空间变动的重要分析工具, 要素中心的移动反映了该要素变动的空间轨迹^[14]。

潜在旱灾造成的产量损失中心的位置 ($D > 0$ 时的产量损失中心位置) 不但是当年全国各地不同受旱程度的共同作用结果, 还和各网格冬小麦种植面积有关。产量损失中心年际和年代际的移动, 反映了中国冬小麦生产中旱灾发生发展的空间变化情况, 其经纬度由式 (6) 计算得出:

$$\begin{aligned} LON &= \sum \left(\frac{D_i \cdot S_i \cdot \text{lon}_i}{\sum D_i} \right) \\ LAT &= \sum \left(\frac{D_i \cdot S_i \cdot \text{lat}_i}{\sum D_i} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: LON 、 LAT 为每年潜在旱灾造成的产量损失中心的经度和纬度, ($^\circ$); i 表示各网格的序号; D_i 为旱灾的网格的距平百分率, %; $\sum D_i$ 为当年各旱灾网格距平百分率之和, %; S_i 为各网格的冬小麦种植面积, hm^2 , 在此依然简化了问题, 没有考虑各网格种植面积的年际变化; lon_i 、 lat_i 为各网格的经纬度, ($^\circ$)。

1.3.4 潜在旱灾造成的产量损失中心位置与大气环流的关系

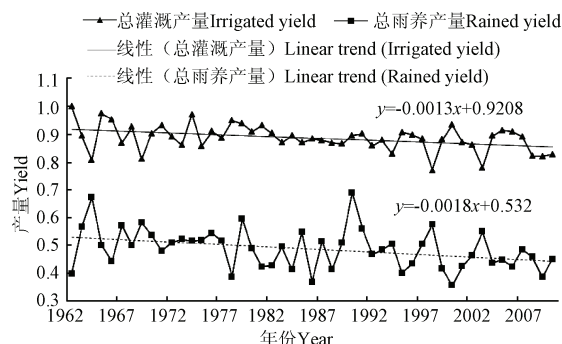
旱灾的发生与当时的气候条件密切相关, 考虑大气环流因子对中国温度、降水的影响具有 0.5~1a 的滞后效应^[15-18], 笔者分别计算了潜在产量损失中心的经度、纬度与冬小麦生长期 (前一年 10 月—当年 5 月) 和生长季前期 (前一年 6 月—前一年 9 月) 大气环流指数间的相关关系 (大气环流指数采用国家气候中心气候系统诊断预测室每月更新的 74 项环流特征量^[19])。

本文中的数据分析和制图主要由 Excel 2010 和 ArcGIS 10 完成。

2 结果与分析

2.1 潜在产量损失的时空变化

中国 1962—2010 年冬小麦产量的模拟结果及其变化趋势如图 2 所示。结果表明, 1962—2010 年中国冬小麦灌溉和雨养总产量随着年份波动变化, 两者的相关系数 -0.304 , 达显著水平, 说明大部分年际变化趋势相反。从两者的线性趋势来看, 灌溉和雨养总产量都呈下降趋势, 相对时间序列的斜率分别为 -1.3×10^{-3} 和 -1.8×10^{-3} , 可见 49a 间灌溉和雨养总产量之间的差距略有增加, 但增幅并不明显。



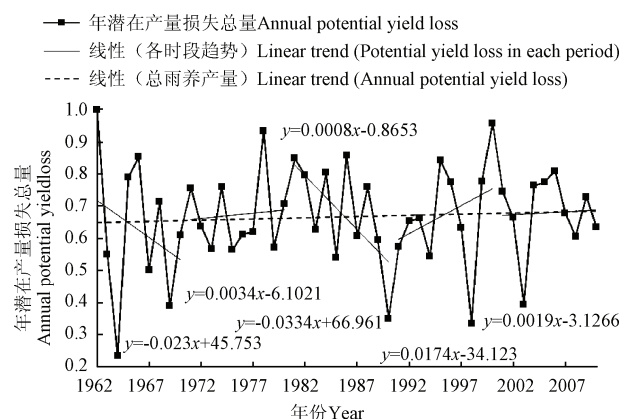
注: 产量以 1962 年全国冬小麦灌溉总产量为基准值 1。

Note: Setting the irrigated yield in 1962 as 1.

图 2 1962—2010 年中国灌溉和雨养冬小麦的相对产量的年际变化

Fig.2 Interannual variation of the sum of rained yield and irrigated yield of the China Winter Wheat during 1962 to 2010

进一步分析全国冬小麦潜在产量损失的年际变化, 见图 3。潜在干旱导致的产量损失总体上呈现略微上升的趋势(斜率: 8×10^{-4}), 但各时段变化不同, 其中在 20 世纪 60 年代、20 世纪 80 年代呈现下降趋势, 其余都是上升趋势。



注: 产量损失以 1962 年的损失量为基准值 1

Note: Setting the value in 1962 as 1

图 3 1962—2010 年中国冬小麦潜在产量损失的年际变化

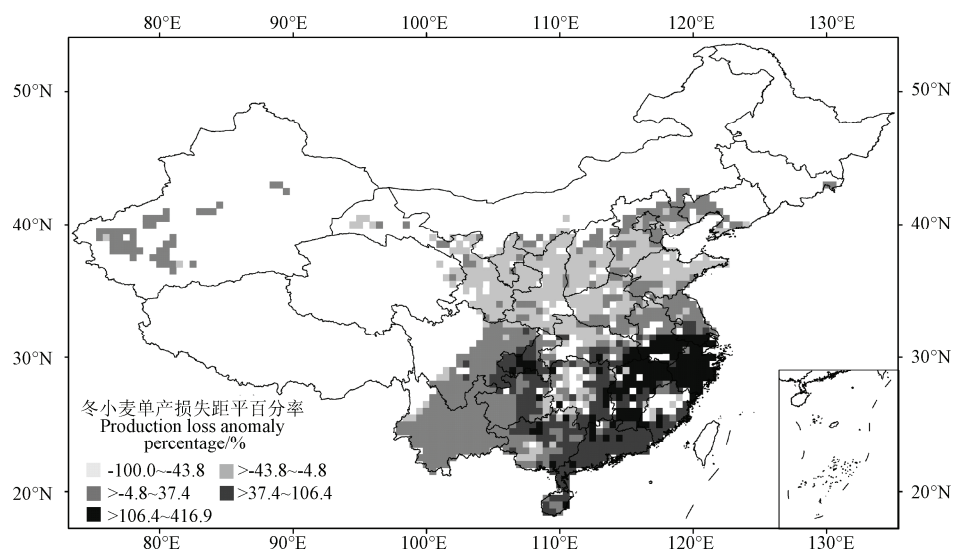
Fig.3 Interannual variations of the potential yield loss during 1962 to 2010

5 个时段, 各网格潜在单产损失距平百分率的空间分布见图 4 (图为该网格每个时段的平均值)。由图 4 可见, 在 20 世纪 60 年代, 潜在单产损失距平百分率较高的区域主要集中在长江流域及以南地区 (主要有长江中下游平原、江汉平原、华南及东南丘陵地区等)。其中 1962 年 1—3 月发生湘西北、粤北、川北、苏北、皖中的大旱造成的潜在单产损失总量居历史之最^[20], 这也是 20 世纪 60 年代潜在单产损失呈现下降趋势的主要原因。20 世纪 70 年代期间, 高值区集中在华南沿海地区及长江流域。到了 20 世纪 80 年代, 华南沿海地区有所缓和, 而长江中下游大部地区及淮河流域仍是高值区域。20 世纪 90 年代高值区域出现了向西、向北移动的趋势, 河西走廊地区出现高值区域, 而该时期高值区域的中心位于长江中游地区。在 21 世纪初, 由于西北地区的旱情进一步加剧, 高值区域扩展到黄土高原地区。20 世纪 90 年代和 21 世纪初冬小麦主产区 (主要是黄土高原和河西走廊地区) 的旱情出现了加重趋势, 使得这 2 个时段全国的潜在单产损失都呈现增加的趋势。其中 20 世纪 90 年代阶段 1991—1992 年和 1993—1994 年北方冬麦区的冬春连旱^[20], 使得这一走向更明显。

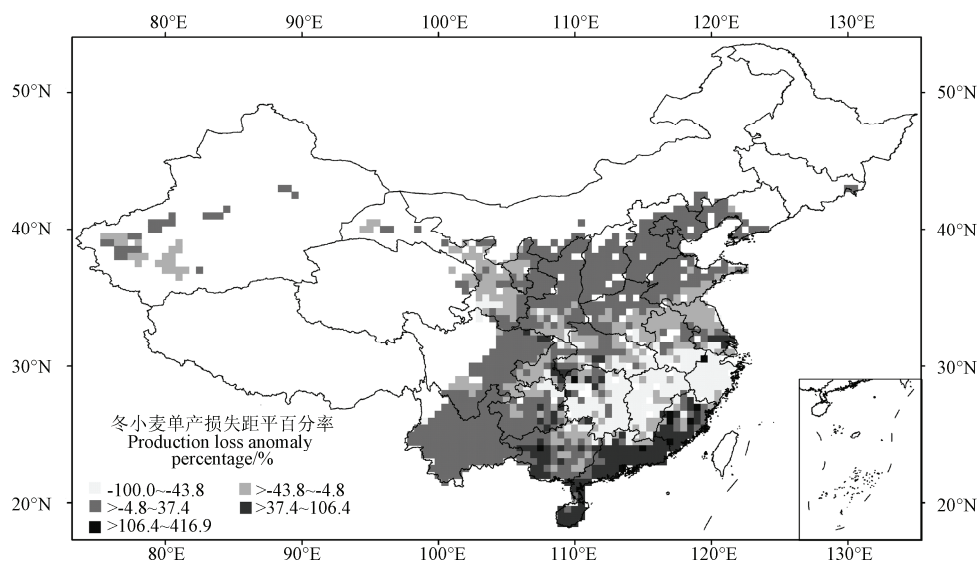
单产损失距平百分率主要是用于衡量同一地区年际间的旱情变化。20 世纪 60 年代、20 世纪 70 年代等时段高值区出现在南方湿润地区的原因, 是由于南方常年雨水充足, 多年平均潜在单产损失很小。在计算距平百分率的时候, 考虑的是当年单产损失占历史平均值的比例, 因此当某几个年份出现旱情时, 虽然并不严重, 但可能导致当年的单产损失距平百分率较高。为了更好地说明这个问题, 笔者选取 20 世纪 60 年代时期为例, 进一步分析全国冬麦单产损失率 (即单产损失占灌溉产量的百分率), 结果见图 5。从图中可以看出, 20 世纪 60 年代期间, 单产损失率较高的区域主要集中于中国的北方和西南地区, 而长江中下游、华南大部这些潜在单产损失距平百分率较高的区域, 单产损失率并不高。这是因为单产损失率反映的是同一时期各区域间的旱情程度, 而潜在单产损失距平百分率反映的是同一地区各时段的旱情变化。当某些年份出现的旱情, 由于南方雨水比北方充沛, 雨养产量与灌溉产量间的差异较小, 因此其单产损失率较小, 但与其自身的其他年份相比, 损失较重, 所以距平百分率较大。

为了进一步了解近 50a 来, 中国冬小麦潜在旱情的空间变化, 笔者分析了 1962—2010 年中国冬小麦潜在单产损失倾向率的空间分布, 反映潜在单产损失在该时期的变化趋势, 见图 6。从图中可以

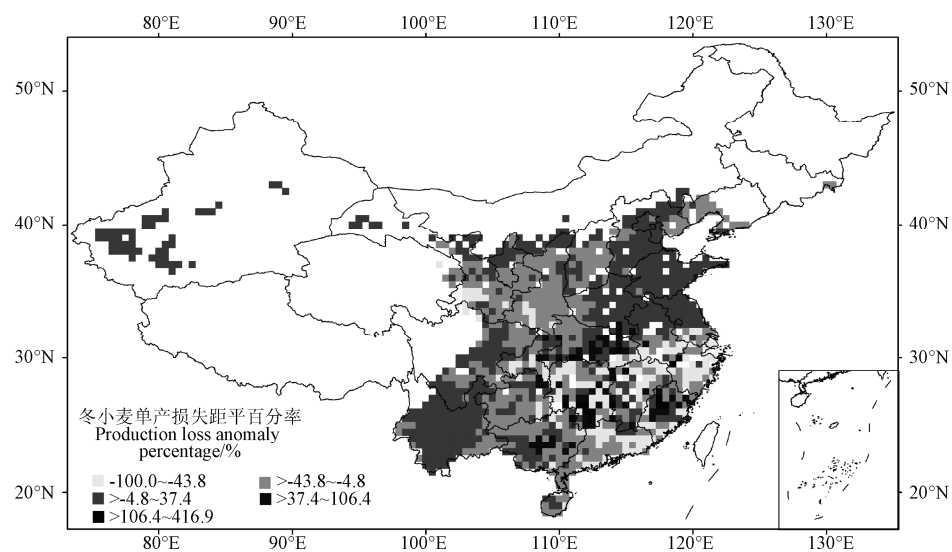
看出黄土高原与河西走廊地区是近 50a 中国冬小麦单产损失增长最显著的地区，而单产损失呈减小趋势的地区主要是南方的广大地区。



a. 20 世纪 60 年代



b. 20 世纪 70 年代



c. 20 世纪 80 年代

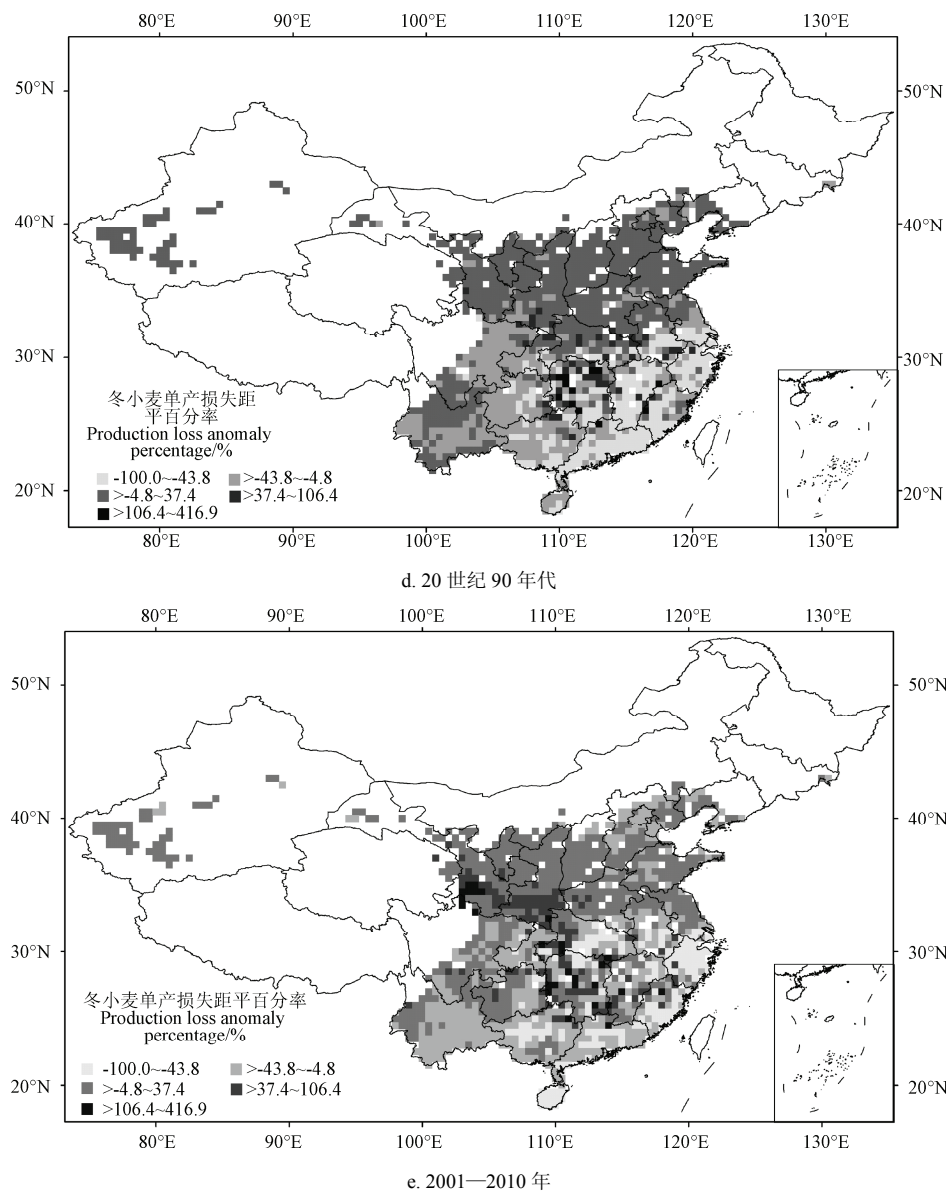


图 4 各时段冬小麦潜在单产损失距平百分率的空间分布

Fig.4 Spatial patterns of estimated production loss anomaly percentage due to drought for different decades

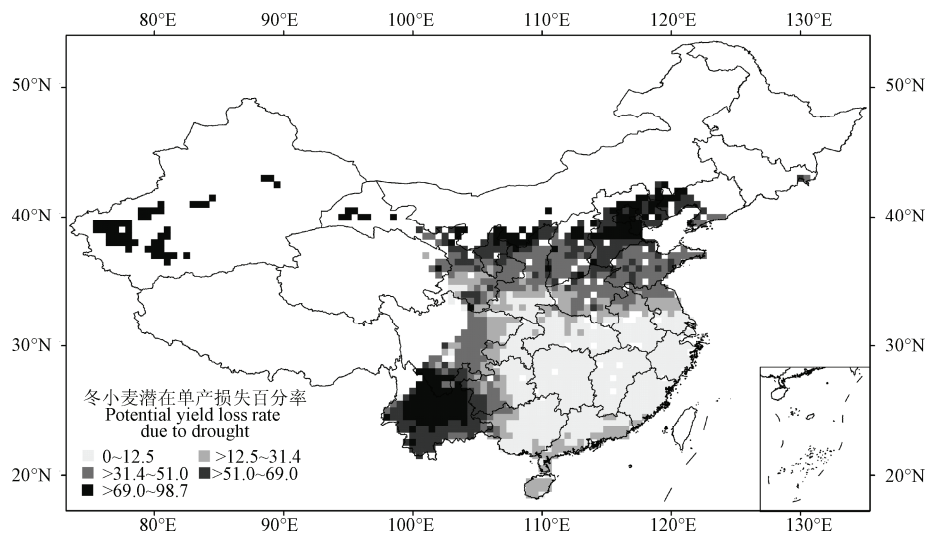


图 5 20 世纪 60 年代中国冬小麦潜在单产损失百分率的空间分布

Fig.5 Spatial patterns of potential yield loss rate due to drought, during 1962 to 1970

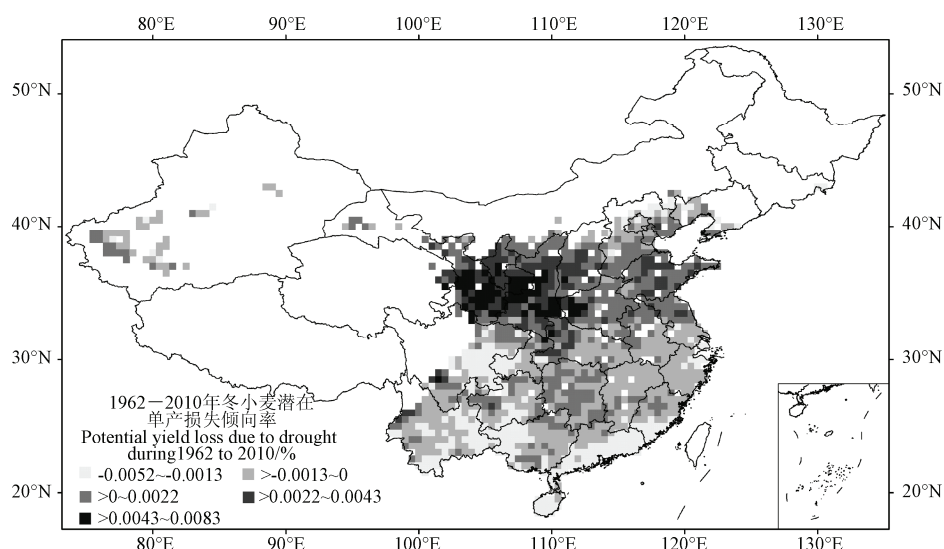


图6 1962—2010年中国冬小麦潜在单产损失倾向率的空间分布

Fig.6 Trend rate of potential yield loss due to drought during 1962 to 2010

结合图3—图6可以发现,南方地区虽然前期单产损失距平百分率较高,但后期呈现下降的趋势,同时单产损失率较低,也呈下降的趋势,近50a总体呈现出冬小麦受旱减弱的趋势,而冬小麦主产区,特别是黄土高原与河西走廊地区的旱情明显加重,这也可能是导致全国潜在单产损失在49a间呈增加趋势主要原因。冬小麦的另一主产区的华北平原,旱情没有黄土高原与河西走廊地区的加重趋势明显,这些可能与气候变化导致的降水量和温度变化的空间差异有关。

综上所述,由于雨养总产量的下降趋势大于灌溉总产量的下降趋势,中国冬小麦的潜在产量损失

在49a间总体上呈现略微增加的趋势。其中各时段表现的趋势不同,20世纪60年代、20世纪80年代呈现下降趋势,其余时段都是上升趋势。从地域上来看,黄土高原和河西走廊地区是过去近50a间中国冬小麦受旱程度增加的最为明显的地区。

2.2 潜在旱灾造成的产量损失中心位置的空间变化

潜在旱灾造成的产量损失中心的经度在1962—2010年间呈现出减小的趋势,而纬度呈现出增加的趋势(图7),49a间中心向西、向北各移了2个纬度,说明在这49a间潜在旱灾造成的产量损失中心总体上呈现向西北方向移动的趋势。

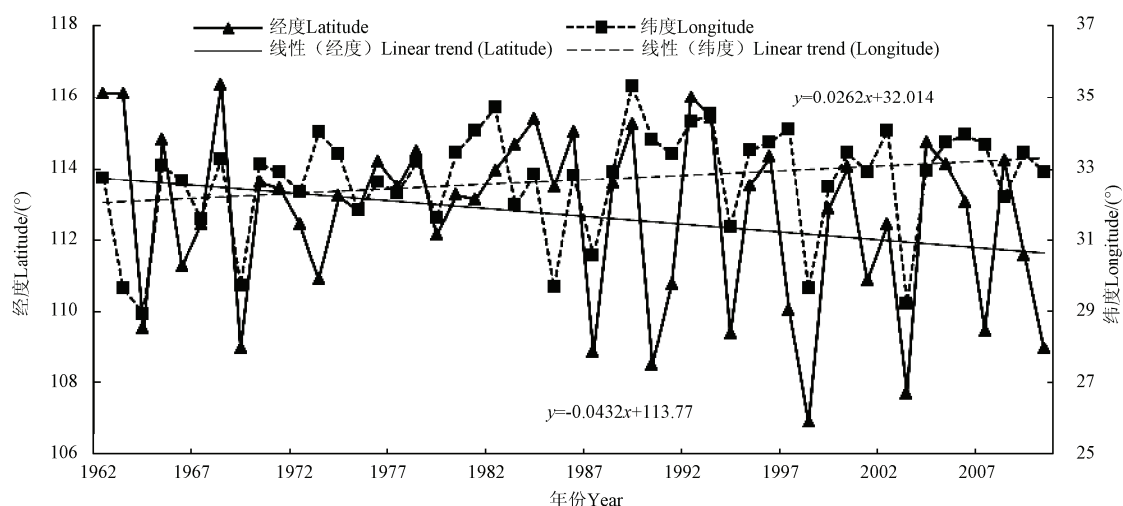


图7 潜在旱灾产量损失中心位置经度和纬度在1962—2010年的变化情况

Fig.7 Change in location (latitude and longitude) of drought affecting center from 1962 to 2010

从空间位移图(图8)上可以看出,49年间的潜在旱灾造成的产量损失中心主要集中在111°~114°E,北纬31°~34°N,地处河南南部,河南、

湖北两省交界地区。河南省位于华北冬小麦主产区南部,干旱是河南发生频率高、影响范围大、持续时间长、成灾程度重的农业气象灾害。由于河南省

年降水季节分配不均,前一年 11 月到当年 3 月降水量只占全年降水量的 14%,而春季气温回升快、大风日数多、蒸发量大,使得当地的冬麦春旱问题十分严重,给冬小麦返青和拔节造成严重影响。所以,河南有“十年九旱”、“春雨贵如油”之说^[21]。1962—2010 年间,潜在旱灾导致的产量损失中心的位置在不同时段发生变化,纬向上大致保持向西移动的趋势,其中 20 世纪 80 年代—20 世纪 90 年代和 20 世纪 90 年代—21 世纪初位移较大,分别西移了约 1 个纬度,20 世纪 60 年代—20 世纪 80 年代位移较小,中心在 113°E 附近徘徊。在经向上,20 世纪 60 年代—20 世纪 70 年代先向北移动超过 1 个纬度,20 世纪 70 年代后则一直在 33°N 附近徘徊。

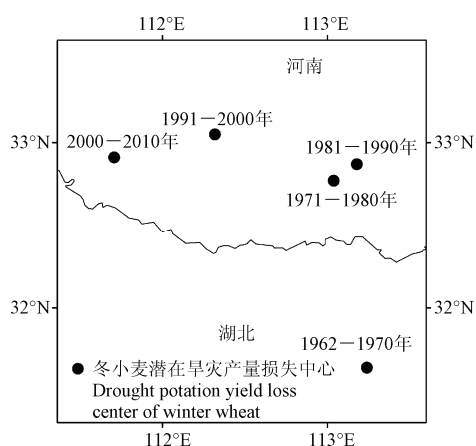


图 8 1962—2010 年中国冬小麦潜在旱灾产量损失中心位置的年代际位移情况

Fig.8 Change in location of drought potato yield loss center of winter wheat from 1962 to 2010

由图 8 可以看出 20 世纪 60 年代—20 世纪 70 年代、20 世纪 80 年代—20 世纪 90 年代和 20 世纪 90 年代—21 世纪初 3 个时段是中国冬小麦受旱灾影响空间格局变动最剧烈的时期。再结合 2.1 部分的结果可以发现,20 世纪 60 年代在南方发生的大范围严重干旱和 20 世纪 90 年代后出现的干旱向黄土高原和河西走廊等小麦主产区扩展的趋势,可能是导致潜在产量损失中心剧烈移动的主要原因。20 世纪 60 年代期间,主要是 1962 年,中国南方地区发生了历史上罕见的严重旱灾^[20],这就导致产量损失中心偏南。而后随着北方冬小麦主产区(主要是黄土高原和河西走廊地区)旱灾程度的增强,造成了潜在旱灾产量损失中心向西北方向移动。

综上所述,在过去 49a 里中国冬小麦潜在旱灾损失中心有向西北方向移动的趋势,其中 20 世纪 60 年代—20 世纪 70 年代发生的最大位移与 20 世

纪 60 年代早期南方的严重旱灾有关,20 世纪 80 年代—20 世纪 90 年代和 20 世纪 90 年代—21 世纪初发生的 2 次明显位移都与同期黄土高原和河西走廊地区受旱程度的显著增强有关。

2.3 潜在旱灾产量损失中心位置与大气环流的关系

干旱灾害的发生与气候环境密切相关。影响中国降水的大气环流因子多而复杂,其中副热带高压、北极涡是对中国降水影响较大的 2 组因子,且大气环流因子对中国温度、降水的影响具有 0.5~1a 的滞后效应^[22-25]。

笔者挑选出了对中国降水有较大影响的西太平洋副高、印度副高、南海副高、亚洲区极涡、太平洋区极涡等东亚地区相关环流因子。分别计算了潜在产量损失中心的经度、纬度与冬小麦生长季前期(前一年 6 月—前一年 9 月)和生长期(前一年 10 月—当年 5 月)的主要气象环流指数的相关关系(结果见表 1),以期了解潜在旱灾产量损失中心与大气环流的关系,为开展农业干旱预报和减灾防灾提供参考。

由表 1 可以看出潜在旱灾产量损失中心的经纬度和冬小麦生长季前期、同期的北极涡和副热带高压系统的部分指数具有显著的负相关关系。就时段而言,潜在旱灾产量损失中心的经、纬度与生长季同期大气环流指标的关系更相关,与之相关的指数比生长季前期的要多(显著指标数量多 9 个)。就经、纬度而言,大气环流指数与损失中心经度的相关关系明显强于与纬度的相关关系(显著指标多 5 个,极显著指标多 5 个)。就 2 类环流因子而言,差异也呈现出一定的规律性,北极涡系列指数只与潜在旱灾产量损失中心的纬度具有显著的相关性,而副热带高压系列指数则与产量损失中心的经度呈现显著相关。且副热带高压系列指数在生长季同期(前一年 10 月—当年 5 月)与中心的相关关系表现显著,而大部分北极涡系列指数与中心在生长季同期与生长季前期都具有显著的相关关系,其中在生长季同期的显著性更强一些(表 1)。

进一步来看,副热带高压指数仅在生长季同期与产量损失中心的经度呈显著的负相关关系,这说明在生长季同期,当北半球的西太平洋副高、印度副高和南海副高的强度偏强、范围偏大时,中国冬小麦潜在旱灾产量损失中心的位置将会偏西,反之亦然。而现有的关于副高的研究结果表明,当西太平洋、南亚的副热带高压增强时,中国华北中南部、长江流域同期的降水会增多^[26-29]。当华北中南部、长江流域降水增多时,必然导致旱灾产量损失中心向西移动,这与本文的结果相一致。

表 1 冬小麦生育前期（前一年 6 月—前一年 9 月）、同期（前一年 10 月—当年 5 月）东亚大气环流指数与潜在旱灾产量损失中心经纬度相关系数

Table 1 Correlation coefficients between atmospheric indices during the winter wheat prior growing- season (June—Sept) or growing-season (Oct—May) with the location (latitude and longitude) of drought affecting center		生长季前期（前一年 6 月—前一年 9 月） Prior Growing-Season (June. —Sept.)		生长季同期（前一年 10 月—当年 5 月） Growing-Season (Oct. —May.)	
大气环流因子 Atmospheric Indices		经度 Longitude	纬度 Latitude	经度 Longitude	纬度 Latitude
副热带高压因子 Subtropical High System Indices	北半球副高面积指数	-0.0812	0.1843	-0.4061**	-0.0173
	北半球副高强度指数	-0.0500	0.1822	-0.4222**	-0.0678
	印度副高面积指数	—	—	-0.4241**	-0.1971
	印度副高面积强度指数	—	—	-0.4685**	-0.2635
	西太平洋副高面积指数	0.0272	0.1604	-0.3793**	0.0616
	西太平洋副高强度指数	0.1360	0.2213	-0.3503*	0.0154
	南海副高面积指数	-0.0242	0.1175	-0.3726**	-0.0981
	南海副高强度指数	0.0150	0.1146	-0.3662**	-0.1298
北极涡因子 North Polar Vortex Indices	北半球极涡面积指数	0.1441	-0.2953*	-0.0278	-0.3733**
	亚洲区极涡强度指数	-0.1800	-0.2953*	-0.1880	-0.4402**
	太平洋区极涡强度指数	0.2205	-0.1796	-0.1751	-0.3428*
小计 Subtotal	达显著水平/个	0	2	8	3
	其中极显著水平/个	0	0	7	2

注：1.*代表该值通过了 0.05 的显著性检验，达显著水平，**表示该值通过了 0.01 的显著性检验，达极显著水平。2.印度副高在北半球夏季被印度低压所取代。

Note: 1.The value marked * has passed the significant test of 0.05, and the value marked ** has passed the significant test of 0.01; 2. India subtropical high was replaced by India low in summer.

北极涡相关的系列指数与潜在旱灾产量损失中心在生长季前期和同期的纬度都呈负相关关系。这表明北极涡在冬小麦生长季前期或同期偏大偏强时，中国冬小麦潜在产量损失中心偏南；反之北极涡在生长季前期或同期偏小偏弱时，中国冬小麦潜在产量损失中心偏北。结合前面的结果，若中国北方地区冬小麦受旱严重时，潜在产量损失中心将偏北，其原因可能与北极涡影响中国降雨有关。已有的研究指出，当北极涡收缩时，中国华北地区气温偏高，降水偏少，反之亦然^[30]，这也与本文结果一致。

3 讨论和结论

3.1 讨 论

研究尝试借助作物模拟模型来分析干旱对作物产量的影响，这种方法利用了作物模型能以日为步长模拟作物生长发育过程和产量的优势，以尝试表达作物在不同生长阶段对水分胁迫的不同反应。但是由于在模型模拟的设置中，只考虑了水分的差异（只设置雨养和充分灌溉 2 种情况），且没有考虑实际灌溉补给，因此本研究的结果也只是针对干旱可能造成的潜在影响而言。如研究中显示淮河流域的潜在产量损失一直较高，而实际中由于淮河流域的灌溉条件相对较好，旱情并不严重。

在研究过程中作了一些简化问题的处理，如冬

小麦的种植面积假定在研究时段内保持不变，没有考虑面积的年际变化，肥料设为全生育期能充分满足作物需要的状态，管理和品种数据由 1998 年试验数据进行区域校准过程确定，忽略了作物参数的动态变化等，这些简化处理会导致研究还存在一定的不确定性，研究结果还比较初步。因此本研究结果主要是用于反映干旱可能造成影响的趋势变化，而与实际生产的旱情发生还需要进一步吻合。

本研究中采用的潜在产量损失距平百分率，能够较好地反映出同一地区年际间的旱情变化，但不能用于衡量各区域间的旱情状况，例如南方湿润地区，由于常年雨水充足，平均潜在产量损失很小，当某年份出现旱情时，可能并不严重，但也会导致当年的产量损失距平百分率很高，这也是研究中南方地区潜在产量损失距平百分率一直较高的原因。

因此本文主要是一种研究干旱的方法探讨和尝试，希望能对已有的研究结果作已补充，为今后的研究提供参考。

3.2 结 论

1) 由于冬小麦雨养总产量的下降趋势略大于灌溉总产量的下降趋势，造成 1962—2010 年中国冬小麦的潜在产量损失呈现增加的趋势。时间上，近 50a 里，中国冬小麦的潜在产量损失在 20 世纪 60 年代、20 世纪 80 年代呈现下降趋势，而其余时段则是上升趋势。空间上，北方地区尤其是黄土高

原和河西走廊地区受旱程度呈现显著加重的趋势,而南方大部分地区呈现减弱的趋势。

2) 在 49a 间,中国冬麦的潜在旱灾损失中心主要集中在河南南部(111°~114°E, 31°~34°N 范围), 20 世纪 60 年代—20 世纪 70 年代、20 世纪 80 年代—20 世纪 90 年代和 20 世纪 90 年代—21 世纪初 3 个时段里,中国冬小麦受旱灾影响的空间格局发生了剧烈变动,有向西北移动的趋势,而黄土高原和河西走廊地区受旱程度的增强是造成这种移动的主要原因。

3) 潜在旱灾产量损失中心的经、纬度和影响中国降水的北极涡、副热带高压系统的部分指数具有显著的负相关关系。其中,潜在旱灾产量损失中心的经、纬度与生长季同期大气环流指标的关系更相关,且北极涡系列指数只与潜在旱灾产量损失中心的纬度具有显著的相关性,而副热带高压系列指数则与产量损失中心的经度呈现显著相关。当冬小麦生长季同期北半球的西太平洋副高、印度副高和南海副高的强度偏强、范围偏大时,潜在旱灾产量损失中心的位置将会偏西;当北极涡在冬小麦生长季前期或同期偏大偏强时,中国冬小麦潜在产量损失中心将偏南,反之亦然。

[参 考 文 献]

- [1] 政府间气候变化专门委员会第一、第二工作组.管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应[EB/OL]. [2011-11-18]. (<http://ipcc-wg2.gov/SREX/>). IPCC Working Groups I & II. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX) [EB/OL]. [2011-11-18]. <http://ipcc-wg2.gov/SREX/>. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王春乙. 重大农业气象灾害研究进展[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
Wang Chunyi. Research Progress of Major Agricultural Meteorological Disasters[M]. Beijing: Chinese Meteorological Press, 2007.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2012[M/OL]. [2013-02-20]. (<http://www.stats.gov.cn>). National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2012[M/OL]. [2013-02-20]. <http://www.stats.gov.cn>. (in Chinese with English abstract)
- [4] 单长卷, 田雪亮. 冬小麦水分生理特性对水分胁迫的响应[J]. 吉林农业科学, 2007, 32(6): 16—21.
Shan Changjuan, Tian Xueliang. Response of Physiological Characteristics of Winter Wheat to Water Stress[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2007, 32(6): 16—21. (in Chinese with English abstract)
- [5] 於琰, 于强, 罗毅, 等. 水分胁迫对冬小麦物质分配及产量构成的影响[J]. 地理科学进展, 2004, 23(1): 105—112.
Yu Li, Yu Qiang, Luo Yi, et al. Effect of water stress on dry-matter partition and yield constitution of winter wheat[J]. Progress in Geography, 2004, 23(1): 105—112. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈晓远, 高志红, 刘晓英, 等. 水分胁迫对冬小麦根、冠生长关系及产量的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(7): 723—728.
Chen Xiaoyuan, Gao Zhihong, Liu Xiaoying, et al. Effects of water stress on root shoot relation and grain yield in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(7): 723—728. (in Chinese with English abstract)
- [7] 盖江南, 毕建杰, 刘建栋, 等. 水分胁迫对冬小麦干物质分配的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(增刊 2): 5—9.
Gai Jiangnan, Bi Jianjie, Liu Jiandong, et al. Effect of water stress on dry-matter partition of winter wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(Supp.2): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [8] 单长卷, 吴雪平, 刘遵春. 水分胁迫对冬小麦水分生理特性和产量构成三因素的影响[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(1): 11—16.
Shan Changjuan, Wu Xueping, Liu Zunchun. Effect of water stress on water physiology and three components of yield of winter wheat[J]. Jiangsu Journal of Agriculture Sciences, 2008, 24(1): 11—16. (in Chinese with English abstract)
- [9] 吴荣军, 史继清, 关福来, 等. 干旱综合风险指标的构建及风险区划——以河北省冬麦区为例[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(1): 145—152.
Wu Rongjun, Shi Jiqing, Guan Fulai, et al. Integrated index construction and zoning of drought risk: A case study of winter wheat area in Hebei Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(1): 145—152. (in Chinese with English abstract)
- [10] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales[J]. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim: American Meteorological Society, 1993: 179—184.
- [11] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 235—265.
- [12] 熊伟. CERES-Wheat 模型在中国小麦区的应用效果及误差来源[J]. 应用气象学报, 2009, 20(1): 88—94.
Xiong Wei. Performance of CERES-Maize in Regional Application[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 20(1): 88—94. (in Chinese with English abstract)
- [13] 熊伟, 林而达, 杨婕, 等. 作物模型区域应用两种参数校准方法的比较[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2140—2147.
Xiong Wei, Lin Erda, Yang Jie, et al. Comparison of Two Calibration Approaches for Regional Simulation of Crop Model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2140—2147. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王介勇, 刘彦随. 1990 年至 2005 年中国粮食产量重心演进格局及其驱动机制[J]. 资源科学, 2009, 31(7): 1188—1194.
Wang Jieyong, Liu Yansui. The changes of grain output center of gravity and its driving forces in China since 1990[J]. Resources Science, 2009, 31(7): 1188—1194. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张恒德, 陆维松, 高守亨, 等. 北极涡活动对我国同期及后期气温的影响[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(4): 507—516.

- Zhang Hengde, Lu Weisong, Gao Shouting, et al. Influence of the North Polar Vortex Activity on the Contemporaneous and Subsequent Air Temperature in China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology. 2006, 29(4): 507—516. (in Chinese with English abstract)
- [16] 郭玲, 何金海, 祝从文. 影响长江中下游夏季降水的前期潜在预报因子评估[J]. 大气科学, 2012, 36(2): 337—349.
- Guo Ling, He Jinhai, Zhu Congwen. Evaluations of prior potential predictors for the summer rainfall in the middle and lower reaches of the yangtze river[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences. 2012, 36(2): 337—349. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘屹岷, 吴国雄. 副高研究回顾及对几个基本问题的再认识[J]. 气象学报, 2000, 58(4): 500—512.
- Liu Yimin, Wu Guoxiong. Reviews on the study of the subtropical anticyclone and new insights on some fundamental problems[J]. Acta Meteorologica Sinica. 2000, 58(4): 500—512. (in Chinese with English abstract)
- [18] 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 770—787.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Zhou Liantong, et al. Studies on the Relationship between the severe climatic disasters in china and the east asia climate system[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences. 2003, 27(4): 770—787. (in Chinese with English abstract)
- [19] 国家气候中心气候系统诊断预测室. 74 项环流特征量 [DB/OL]. [2013-02-21]. <http://cmdp.ncc.cma.gov.cn/cn/download.htm>.
- The Office of Climate System Diagnostics and Prediction, National Climate Centre. 74 Circulation Characteristics [DB/OL]. [2013-02-21]. <http://cmdp.ncc.cma.gov.cn/cn/download.htm>. (in Chinese with English abstract)
- [20] 中国人民共和国统计局, 中华人民共和国民政部. 中国灾情报告 1949—1995[M]. 北京: 中国统计出版社, 1995.
- China Bureau of statistics of China, Ministry of Civil Affairs of the People's Republic of China. The Disaster Report of China During 1949—1995[M]. Beijing: China Statistics Press, 1995.
- [21] 刘荣花. 河南冬小麦干旱风险分析与评估技术研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- Liu Ronghua. Research of Drought Risk Analysis and Assessment Technology for Winter Wheat in Henan[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [22] 黄嘉佑, 刘舸, 赵昕奕. 副高、极涡因子对我国中国夏季降水的影响[J]. 大气科学, 2004, 28(4): 517—526.
- Huang Jiayou, Liu Ge, Zhao Xinyi. The Influence of subtropical high indexes and polar vortex indexes on the summertime precipitation in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2004, 28(4): 517—526. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张恒德, 高守亭, 刘毅. 极涡研究进展[J]. 高原气象, 2008, 27(2): 452—461.
- Zhang Hengde, Gao Shouting, Liu Yi. Advances of Rresearch on polar vortex[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(2): 452—461. (in Chinese with English abstract)
- [24] 顾思南, 杨修群. 北半球绕极涡的变异及其与中国气候异常的关系[J]. 气象科学, 2006, 26(2): 135—142.
- Gu Sinan, Yang Xiuqun. Variability of the northern circumpolar vortex and Its Association with climate Anomaly in China[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2006, 26(2): 135—142. (in Chinese with English abstract)
- [25] 祝从文, 何金海, 吴国雄. 东亚季风指数及其与大尺度热力环流年际变化关系[J]. 气象学报, 2000, 58(4): 391—402.
- Zhu Congwen, He Jinhai, Wu Guoxiong. East asian monsoon index and its interannual relationg ship with largescale thermal dynamic circulation[J]. Acta Meteorologica Sinica. 2000, 58(4): 391—402. (in Chinese with English abstract)
- [26] 孙卫国, 程炳岩, 郭渠. 华北地区降水蒸发差与西太平洋副热带高压的关系[J]. 中国农业气象, 2010, 31(1): 41—47.
- Sun Weiguo, Cheng Bingyan, Guo Qu. Correlations between the precipitation evaporation difference in northern China and the subtropical high over the western pacific[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(1): 41—47. (in Chinese with English abstract)
- [27] 龚道溢, 何学兆. 西太平洋副热带高压的年代际变化及其气候影响[J]. 地理学报, 2002, 57(2): 185—193.
- Gong Daoyi, He Xuezhao. Interdecadal Change in Western Pacific Subtropical High and Climatic Effects[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(2): 185—193. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈永仁, 李跃清, 齐冬梅. 南亚高压和西太平洋副热带高压的变化及其与降水的联系[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1148—1157.
- Chen Yongren, Li Yueqing, Qi Dongmei. Variations of south asia high and west pacific subtropical high and their relationships with precipitation[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(5): 1148—1157. (in Chinese with English abstract)
- [29] 魏凤英, 黄嘉佑. 大气环流降尺度因子在中国东部夏季降水预测中的作用[J]. 大气科学, 2010, 34(1): 202—212.
- Wei Fengying, Huang Jiayou. A study of downscaling factors of atmospheric circulations in the prediction model of summer precipitation in eastern China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences. 2010, 34(1): 202—212. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张恒德, 金荣花, 张友妹. 夏季北极涡与副热带高压的联系及对华北降水的影响[J]. 热带气象学报, 2008, 24(4): 417—422.
- Zhang Hengde, Jin Ronghua, Zhang Youshu. Relationships between summer northern polar vortex with subtropical high and their influence on precipitation in north China[J]. Journal of Tropical Meteorology. 2008, 24(4): 417—422. (in Chinese with English abstract)

Simulation of winter wheat yield influenced by potential drought in China during 1962-2010

Cao Yang¹, Yang Jie^{2*}, Xiong Wei¹, Wu Yongfeng¹, Feng Lingzhi¹, Yang Xiaoguang²

(1. *Institute of Environment and Sustainable Development for Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;* 2. *College of Resources and Environment Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China*)

Abstract: Frequency of extreme weathers is projected to increase under the scenario of climate change, which can cause extensive damages on crop production. Wheat is one of the most important staple crops in China, and drought is the main climate disaster affecting its yield, particularly in northern parts of the country. The temporal and spatial changes of drought impacts under climate change on wheat are therefore a great concern. Most previous studies investigated the drought impacts through the use of climate indices, such as SPI. The climate indices usually neglect the diverse responses of different crop growth stages to a certain degree of drought shock, and they also disregard the contrasting characteristics in terms of the drought resistance between crop genotypes. This study assessed the potential yield impacts of past drought anomaly (1962-2010) on winter wheat, by using a process-based crop model CERES-Wheat. The model was driven by daily weather data and soil data at a grid scale of 50 km × 50 km. The output of rainfed and fully irrigated yields were retrieved for further analysis. We used the difference between simulated irrigated and rainfed wheat yields to define a potential yield loss caused by drought. The anomaly percentage of the potential yield loss was employed to reflect the interannual and interdecadal variation of estimated impact of drought on winter wheat. We investigated the moving of drought susceptible regions by calculating a geographically drought-affecting center for each 10-year period from 1962 to 2010 (1960s: 1962-1970, 1970s: 1971-1980, 1980s: 1981-1990, 1990s: 1991-2000, 2000s: 2001-2010). Finally, the relationships between estimated yield impacts and recorded indices of atmosphere circulation was examined to understand the underlying mechanisms of past drought risks. The indices were averaged over the prior to winter wheat growing-season (June-Sept.) and the whole growing-season (Oct.-May), respectively. Our results demonstrated that simulated winter wheat yield exhibited a fast decreasing rate under the rainfed environment than that under the full irrigated condition, resulting in a slight increase of estimated potential yield loss from 1962 to 2010. These suggest that overall past climate change has caused increased drought risks for winter wheat production in China. Northwest China, especially the Loess Plain and Hexi Corridor showed the fastest increase of the drought risks among all winter wheat growing regions of China. However, the potential yield loss experienced a decrease in a few simulated time periods, such as the 1960s and the 1980s, suggesting obvious temporal fluctuation and variability of the drought risks under climate change. Furthermore, the inferred primary drought susceptible areas moved toward northwest during the past 50 years, indicated by the drift of the geographically drought-affecting centers. This moving is interpreted by the increased yield loss due to drought in northwest China, especially in the Loess Plain and Hexi Corridor. The moving of the drought susceptible areas was fast in the periods of 1960s-1970s and 1980s-1990s, probably caused by the associated changes in precipitation and temperature patterns. In addition, the estimated yield loss and the moving of the drought-affecting center demonstrated significant ($P < 0.05$) correlations to a number of atmosphere indices (i.e. North Pole Vortex, subtropical high system). A stronger subtropical high system during the winter wheat growing season associated with a west moving of the drought-affecting center. A stronger North Pole Vortex before or during the winter wheat growing season associated with a south moving of the drought-affecting center.

Key words: drought; crops; models; winter wheat; subtropical high system; north pole vortex

(责任编辑: 曾懿婷)