

# 未来气候变化对中国东北地区水热条件影响的数值模拟研究

吴金栋<sup>1</sup> 王石立<sup>1</sup> 张建敏<sup>2</sup>

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 国家气候中心, 北京 100081)

**摘 要:**结合 DKRZ OPYC 模式在中国东北地区的模拟试验结果, 利用随机天气模式 WGEN 对该地区未来水热条件的可能变化进行数值模拟, 由此可以克服以基准气候下建立的线性统计关系, 通过大尺度平均气候要素研究气候资源变化的不足。文中不仅给出了农业气候资源基本特征量的变化, 如作物生长季、0 活动积温、10 有效积温和不同时间尺度的平均降水量等, 而且详细分析了 2 ×CO<sub>2</sub> 气候情景下, 该地区极端气候要素值的可能变化, 如生长季内极端平均最高气温、冷害低温始日、30 高温日、50mm 暴雨日和日最大降水量等。文中还针对不同作物类型, 以作物需水量和缺水量, 模拟了未来气候条件下, 该地区主要农作物春小麦、春玉米和一季稻水热条件匹配状况的可能变化。

结果表明, 未来增温有利于改善东北地区当前的热量条件, 减轻低温冷害的危害; 降水增加有利于改善干旱地区作物的供水条件, 提高作物产量。但是由于降水的增加不足以补偿增温引起蒸发蒸腾的增强, 东北地区主要作物生长发育期间水分普遍不足, 在没有灌溉条件的地区, 农业产量将受到影响。另外, 平均气候变化以后, 气候极端值的变化将更加剧烈, 因此, 异常天气灾害对农业的危害程度有可能增加。

**关键词:**气候变化; 水热; 随机天气模式

中图分类号: S162.3(31, 34, 35) 文献标识码: A 文章编号: 1007-7588(2000)06-0036-07

## A NUMERICAL SIMULATION OF THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON WATER AND THERMAL RESOURCES IN NORTHEAST CHINA

WU Jin-dong<sup>1</sup> WANG Shi-li<sup>1</sup> ZHANG Jian-min<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. National Climate Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on the output of a general circulation model, DKRZ OPYC, a stochastic weather generator WGEN was adopted to simulate the possible change of water and thermal resources in Northeast China. Therefore, the shortages of using linear statistic models and climatic averages with lower resolutions in the light of climate base were avoided in the study of the impacts of climate change on climate resources. The basic features of agroclimatic resources were described according to the experiment of WGEN, such as crop growing season, active accumulated temperature above 0, effective accumulated temperature above 10 and mean precipitation at different temporal scales, etc. Especially, possible variations of extreme climate factors in the growing season were evaluated in detail, such as maximum temperature, initial date with low temperature, the number of days with higher temperature above 30, the number of days with daily rainfall over 50mm and maximum daily precipitation, etc. Water requirement and deficit of the main staple crops (spring wheat, spring maize, middle season rice) in Northeast China were simulated to show the matching status of water and thermal resources under present and future climate.

The results indicated that thermal resources will be abundant due to rising temperature and chill injury will be alleviated under 2 ×CO<sub>2</sub> climate. Although the rainfall amount will increase under rising temperature conditions, which will provide improved moisture for crop growing and yield forming, wa-

收稿日期: 1999-10-19; 修回日期: 2000-03-20

基金项目: 国家“九五”攻关重中之重项目“我国短期气候预测系统的研究”(96-908-03-01)课题资助。

作者简介: 吴金栋(1972~), 男, 宁夏固原人, 理学硕士。主要从事气候变化对农业影响研究工作。

ter requirement and deficit of main staple crops in Northeast China will still expand as a result of enhanced evaporation and transpiration. Thus, agricultural production will be affected in non-irrigated areas. Moreover, extreme climatic factors will be in the more acute variation as climate averages change, which adds to the possibility of adverse impacts of abnormal weather events on crop growth and development.

**Key words:** Climate change; Water and thermal resources; Stochastic weather generator

## 1 前言

有关未来气候变化对某一区域农业气候条件的可能影响研究已有不少<sup>[1]</sup>。大部分研究以对气温和降水的变化进行或单个或综合的不同假设为前提,给出了假设条件下农作物生长发育所要求的气候条件的可能变化。近期的研究以大气环流模式(GCM)模拟试验结果为基础,结合基准气候条件下作物的气候生态条件,得出了农业种植熟制、作物生产布局与结构、农田水分平衡等可能变化的结论<sup>[2,3]</sup>。但是限于假设分析和气候模拟均是针对长期平均气候的变化,而在一定程度上,作物布局的变化也依赖于当地的极端气候条件;加之极端气候条件对作物生产的限制并非与温度或水分变化的强度本身成正比,作物产量对极端气候条件常常表现出非线性的响应。因此,不包含气候极端变化的农业气候资源分析是不够全面的。

另外,以往研究多利用基准气候条件下建立的线性统计关系,如年平均气温与积温、无霜期的相关关系以及积温与大于某一指示温度持续日数的相关关系,来分析未来气候情景下农业气候资源的可能变化<sup>[4]</sup>。这类研究方法至少有两点不足:首先该相关关系在未来气候情景下的稳定性和可靠性是没有、目前也无法进行检验的;还有积温本来是度·日累加的概念,而以往研究一般以月或季为单位进行的积温统计分析就显得比较粗略,由此得出诸如夏季温度增高 1 使作物生长季延长 10d 左右的论断<sup>[5]</sup>也不够精确。

对农业生产而言,气候变化影响的一个重要方面决定于作物生长发育进程中热量和水分的匹配状况,而不能只强调其中任何一方。而且应该在逐日的时间尺度上讨论分析,季或年时间尺度上的分析显然是不够的。

## 2 研究方法

提取海气耦合模式 DKRZOPYC 在中国东北地区(39°N~51°N, 117°E~133°E)的模拟结果(季输出差值),与基准气候(1961年~1990年观测气候)叠加,得到未来气候平均场情景。鉴于 DKRZOPYC 模式时空分辨率的局限性,对提取的气候平均场进行时空插值和订正。时间插值方法采用光滑等距插值和 Aitken 等距逐步插值,延长结点至全周期,分别对降水量和气温(最高、最低)进行插值。空间插值采用 Kriging 插值方法,以得到该地区 24 个代表站(图略) 2×CO<sub>2</sub> 情景下的逐月气候要素值。

在改进随机天气模式 WGEN 的参数化方案及其随机试验方法的基础上<sup>[6]</sup>,以如上插值生成的逐月气候要素值为 WGEN 的输入,利用该模式,生成东北地区各代表站 2×CO<sub>2</sub> 逐日气候情景,包括逐日最高气温、最低气温和逐日降水量。考虑到气候的年际波动,以此气候情景作为未来气候的背景条件,模拟生成围绕该背景气候波动的 30a 气候资料,由此在逐日时间尺度上计算该地区当前(基准气候)和未来气候下的水热条件,包括农业气候基本特征量和农业气候极端值,如作物生长季、0 活动积温、10 有效积温、生长季内极端平均最高气温、作物生育后期低温始日、30 高温日、不同时间尺度的平均降水量、50mm 暴雨日数和最大日降水量等。另外,针对不同的作物类型,模拟该地区主要农作物春小麦、春玉米和一季稻生育期内需水量和缺水量的变化,以反映水热条件的匹配状况。全部结果都以 2×CO<sub>2</sub> 与 1×CO<sub>2</sub> 差值形式给出。

$k$  作物生育期内的需水量  $Er_k$  (mm) 以作物系数法计算<sup>[7]</sup>,  $k$  作物缺水量  $Es_k$  (mm) 通过计算生长期有效降水量  $Pe_k$  (mm) 得到。

$$Er_k = \sum_{j=1}^m kc_{k,j} EO_{k,j} \quad (1) \quad Es_k = Er_k - Pe_k \quad (2) \quad Pe_k = \sum_{j=1}^m \mu_k \sum_{i=1}^{n_j} P_i \quad (3)$$

其中  $k=1, 2, 3$  分别表示春小麦、春玉米和一季稻;  $kc_{k,j}$  为  $k$  作物第  $j$  个发育期的作物系数,  $EO_{k,j}$  (mm) 为该作物第  $j$  个发育期内的参照蒸散,由张宝堃模型计算<sup>[8]</sup>;  $j=1, 2, \dots, m$ ,  $m$  为该作物的总发育期个数;  $\mu_k$  为  $k$  作物降水有效利用系数;  $n_j$  ( $d$ ) 为  $j$  发育期的天数<sup>[9]</sup>;  $p_i$  (mm) 为第  $i$  天降水量。

### 3 随机天气模式简介

WGEN 模式是以 Richardson(1981,1984) 等构建的气候要素时间序列的随机过程为基础而发展起来的<sup>[10]</sup>。该模式能够模拟降水量、最高气温、最低气温和太阳辐射等逐日气候要素。利用 WGEN 可以将气候模式的粗时间尺度气候要素输出解集转化为在细小时间尺度上的分布。经过大样本的模拟试验,证明模式在中国东北地区具有足够的可靠性和稳定性<sup>[6]</sup>。本文通过该模式模拟了以 DKRZ OPYC 模式输出为气候背景的相应逐日气候要素,由此分析水热条件的可能变化。

模式首先模拟晴雨序列,表示为:  $\{J_t, t=1,2,\dots\}$  (4)

其中  $J_t=1$  表示第  $t$  日为雨日,  $J_t=0$  表示第  $t$  日为晴日。采用的模型是两个状态(干、湿)的一阶马尔科夫过程(MP)。该过程由雨日频率参数  $k$  和降水持续参数  $d$  惟一确定。

$$= Pr(J_t = 1) \quad (5) \quad d = Corr(J_t, J_{t-1}) \quad (6)$$

降水量的变化以皮尔逊型曲线描述(位置参数  $\mu=0$ )。

$$f(x) = x^{-1} e^{-x/\lambda} / \lambda \quad (x > 0, 0 < \lambda < 1, \lambda > 1) \quad (7)$$

其中  $\lambda$  为形状参数,  $\lambda$  为尺度参数。月降水的年际变率与逐日降水特征(晴雨状态及降水量)有密切联系:

$$Var(P_k) = N_k k k k^2 [1 + k(1 - k) \frac{1 + d_k}{1 - d_k}] \quad (8)$$

其中  $Var(P_k)$  为  $k$  月降水量方差,  $k, d_k, k, k$  分别为  $k$  月雨日频率参数、降水持续参数、形状参数和尺度参数,  $N_k$  为序列长度。

非降水要素气温(最高、最低)和辐射  $X_t(j)$  的模拟以降水的变化特征为条件:

$$\{X_t(j) | J_t = i, t=1,2,\dots,j\} \quad (9)$$

$i=0,1$  分别表示晴雨两种状态;  $j=1,2,3$  分别表示逐日最高气温、最低气温和太阳辐射。模型采用多变量一阶自回归随机过程  $AR(1)$ 。

$$Z_t(j) = [A] Z_{t-1}(j) + [B] \epsilon_t(j) \quad (10)$$

式中  $Z_t(j)$  为标准化以后的  $X_t(j)$ ,  $\epsilon_t(j)$  为正态白噪声序列,  $[A]$ 、 $[B]$  分别为参数向量。气温年际变率与逐日变率之间的关系可近似地表示为:

$$Var(T_{j,k}) = \frac{\sigma_d^2(j,k) (1 + \rho_1(j))}{N_k (1 - \rho_1(j))} \quad (11)$$

其中  $Var(T_{j,k})$  为  $k$  月气温年际变化方差,  $\sigma_d^2(j,k)$  为逐日变化方差,  $\rho_1(j)$  为一阶自相关系数。

### 4 中国东北地区水热变化的特点分析

#### 4.1 热量条件的变化特点

图 1 给出了未来气候情景下生长季相对于当前气候背景的变化。在  $2 \times CO_2$  气候条件下,中国东北地区生长季从南到北普遍延长。除黑龙江省大部地区延长 10d~15d 外,辽、吉两省的变化基本呈纬向分布,其中辽宁延长天数多于吉林,达 30d 左右。0 活动积温和 10 有效积温的变化与 DKRZ OPYC 模式模拟的增温分布一致(图 2),基本趋势是活动积温增幅大于有效积温,二者均从东南部向西北部递减,黑龙江中北部高纬地区随着纬度的增加,积温增加幅度减小。生长季内极端平均最高气温有明显升高(图 3),东北 3 省中,以黑龙江升高最为显著,升幅达 1.8~2.6,吉林东部也有一升温中心,辽宁升幅最小。各地高温日将明显增多(图 4),大于 30 高温日的变化与模式模拟的增温分布也比较一致,黑龙江中南部地区和吉林东北部地区为高温日增多高值区。

由于未来气候春季气温稳定回升,作物生长期内的阶段低温减少,危害玉米生长的延迟性冷害基本可以解除。为考虑水稻生长后期障碍性冷害的危害,以 19 始日表示这一时期热量条件的变化情况。图 5 是未来气候情景下,生长季末期 19 始日相对于当前气候的变化。可见,指标温度的出现日期普遍推迟,辽宁中部、吉林东部和西部及黑

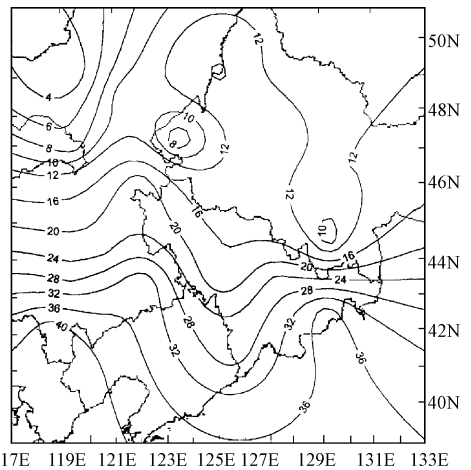


图 1 中国东北地区未来生长季的变化(d)

Fig. 1 Simulated changes of growing season in Northeast China(day)

龙江大部分地区延迟 5d 以上,有利于水稻后期孕穗开花,减轻障碍性冷害的危害。

总体来说,仅从温度方面考虑,中国东北地区受未来增温影响,热量条件将较目前充足。生长季延长,积温增加;作为限制当前作物高产、稳产的主要限制因子之一的低温冷害将随着最低气温的明显升高而缓解。但是极端最高气温升高和高温日数增多,使温度有效性降低,而且可能导致热害,使延长的生长季不能完全利用。

4.2 水分条件的变化特点

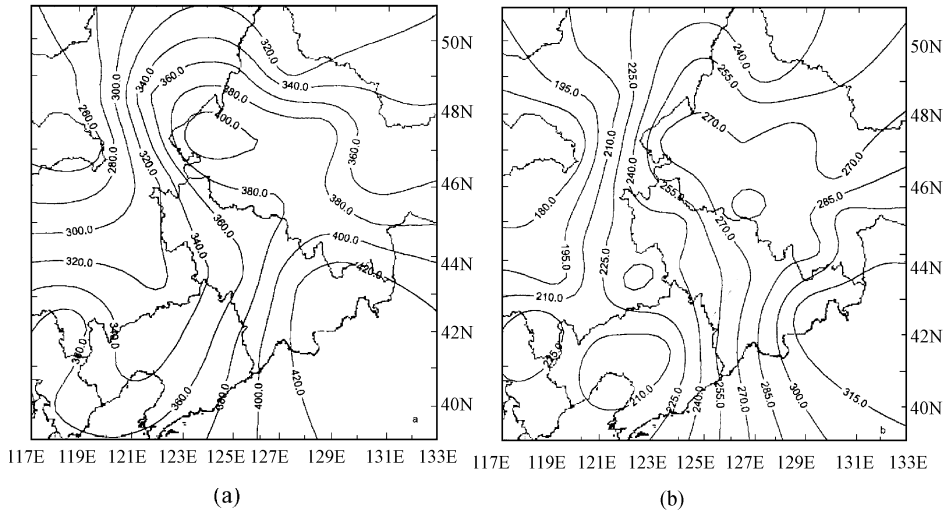


图 2 中国东北地区未来积温的增量模拟( )

(a. 大于等于 0 活动积温, b. 大于等于 10 有效积温)

Fig. 2 Simulated changes of accumulated temperature above 0 (a) and effective accumulated temperature above 10 (b) in Northeast China( )

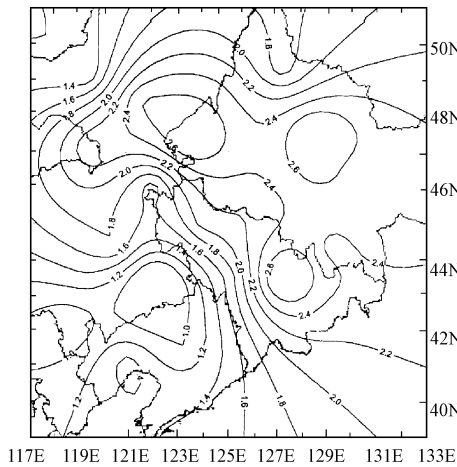


图 3 中国东北地区作物生长季内极端平均最高气温增量的模拟( )

Fig. 3 Simulated changes of extreme maximum temperature in growing season in Northeast China( )

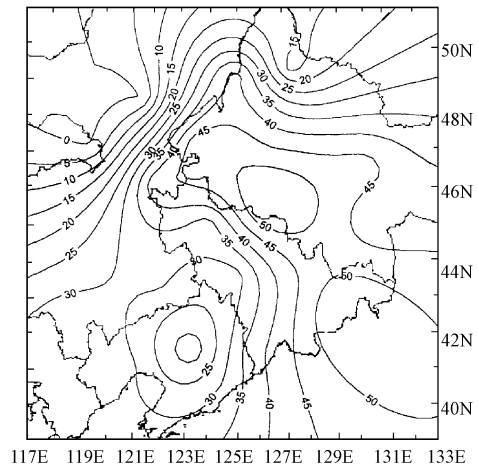


图 4 中国东北地区大于 30 高温日数增量的模拟(d)

Fig. 4 Simulated change of the number of days with higher temperature above 30 in Northeast China(day)

根据 DKRZ OPYC 模式的季降水模拟增量和由此插值得到的月降水增量以及 WGEN 生成的未来逐日降水量的平均值(图略),中国东北地区未来降水量将有不同程度的增加,但是降水增量的时空分布是不均匀的。高值中心在黑龙江中部、吉林和辽宁东部地区,夏季降水增加最为强烈,冬季部分地区降水甚至减少。逐日降水增量的变化是非线性的,有些时段或时次甚至表现为减少,而且其变幅也不均匀。东北 3 省东部地区日降水量大于 50mm 暴雨日明显增多(图 6),

日最大降水量增多 14mm~17mm 左右(图 7);西部地区暴雨日和日最大降水量也有增加,增幅小于东部地区。

由此可见,未来中国东北地区降水量增加,作物供水条件较当前气候有一定改善,有利于作物提高产量。然而,东部地区降水增加较多,尤其是夏季降水将更为集中,暴雨增多,容易引发洪涝,也不利于作物生长后期的灌浆成熟。

### 4.3 水热条件匹配状况的变化特点

考虑到不同作物生长发育对热量和水分条件的要求不同,不同作物对上述水热条件变化的响应是不同的。因此,将作物生长季分为各自不同的若干作物发育期,通过计算各发育期内不同作物的需水量和缺水量,分析水热条件的匹配状况。

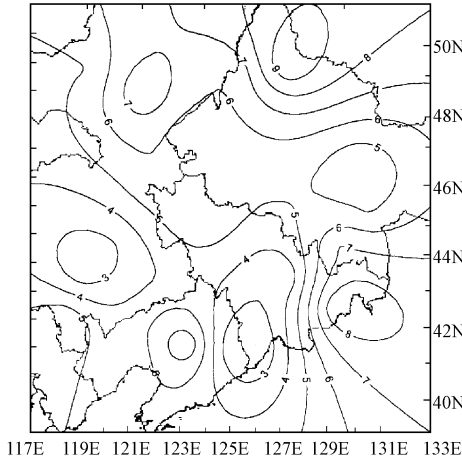


图 5 未来气候情景下中国东北地区 19 始日相对当前气候的变化(d)  
 Fig. 5 Delayed days of the initial date with 19 over climate base in Northeast China(day)

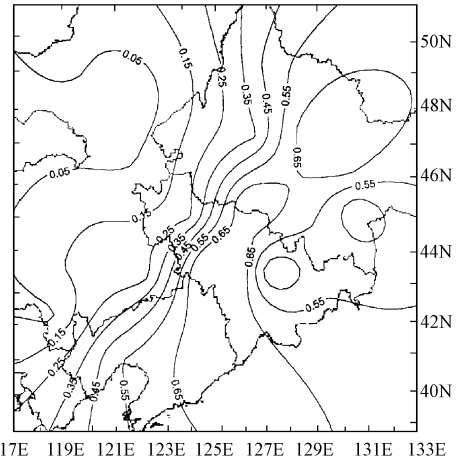


图 6 中国东北地区日降水量大于 50mm 年暴雨日数的增量模拟(d)  
 Fig. 6 Simulated change of the number of days with daily rainfall more than 50mm in Northeast China (day)

就全生育期而言,随着气温的升高,农田蒸散量增加,中国东北地区未来作物需水量将有一定程度的增加(图 8),春小麦、春玉米和一季稻全生育期需水量增幅从西南到东北呈递增趋势,黑龙江作物需水量增幅最大,3 种作物分别达 45mm 以上、50mm 以上和 65mm 以上。同期降水量虽有增加,但是由于土壤蒸发和作物蒸腾都大大加强,降水的增加不足以补偿蒸发蒸腾消耗,作物缺水较当前也有一定增加(图 9),水热条件的匹配状况没有得到改善。作物缺水量的变化趋势基本呈东西向,其中东部地区 3 种作物全生育期缺水量的增量普遍大于西部地区。可见,东部地区降水虽然增加较多,但是对于作物生产仍显不足;西部地区,特别是辽、吉西部地区,水分条件将进一步恶化,现有的干旱危害仍然可能维持。

### 5 小结与讨论

文中以数值模拟的方法,详细讨论了未来气候变化对中国东北地区水热条件的可能影响。结果表明,如果仅从气温或降水的单个变化分析,未来增温有利于改善当前的热量条件,减轻低温冷害的危害;降水增加有利于缓解吉林西部和辽宁西部地区的旱情,提高作物产量。但是若考虑水热条件的匹配,则由于降水的增加不足以补偿增温引起蒸发蒸腾的增强,东北地区主要作物生长发育期间普遍水分不足,在

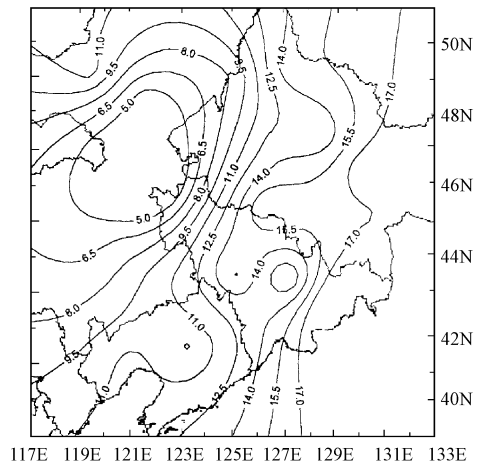


图 7 中国东北地区日最大降水量的增量模拟(mm)  
 Fig. 7 Simulated change of maximum daily precipitation in Northeast China (mm)

没有灌溉条件的地区,农业产量将受到影响。从极端气候要素的变化来看,平均气候变化以后,气候极端值的变化将更加剧烈,因此,异常天气灾害对农业的危害程度有可能增加。但是需要说明的是:文中分析均针对当前生产水平,如未来作物的生育期直接引用了当前气候下的常年值,没有考虑由于增温而使作物发育加快,致使生育期缩短的效应。因此未来实际的作物需水量和缺水水量要小于本文的计算值。精确的估计应该以作物动力模式模拟得到。限于大气环流模式对降水的模拟误差较大,DKRZ OPYC 模式虽然有降水量的输出,但是也没有提供详细的有关降水变化的信息,因此本文更重要的是为相关研究提供了思路,文中对未来水热条件可能变化的模拟还存在一定的不确定性,须进一步修正。

通过上述分析,有以下两点值得讨论: 气候要素有不同的时间尺度,在研究气候变化对农业生态系统的影响

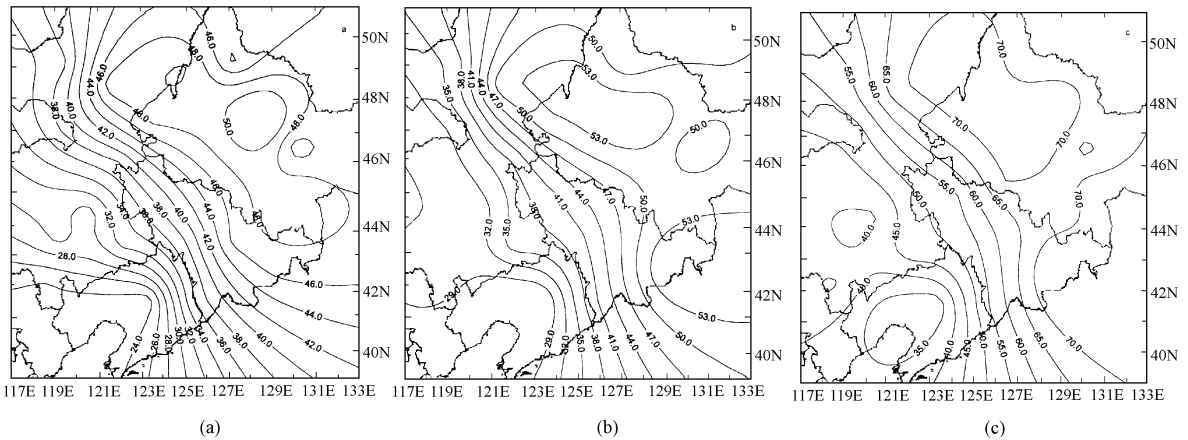


图 8 中国东北地区作物需水量的模拟变化(mm)  
(a. 春小麦, b. 春玉米, c. 一季稻)

Fig. 8 Simulated changes of water requirement of the main staple crops  
(a. spring wheat, b. spring maize, c. middle season rice) in Northeast China (mm)

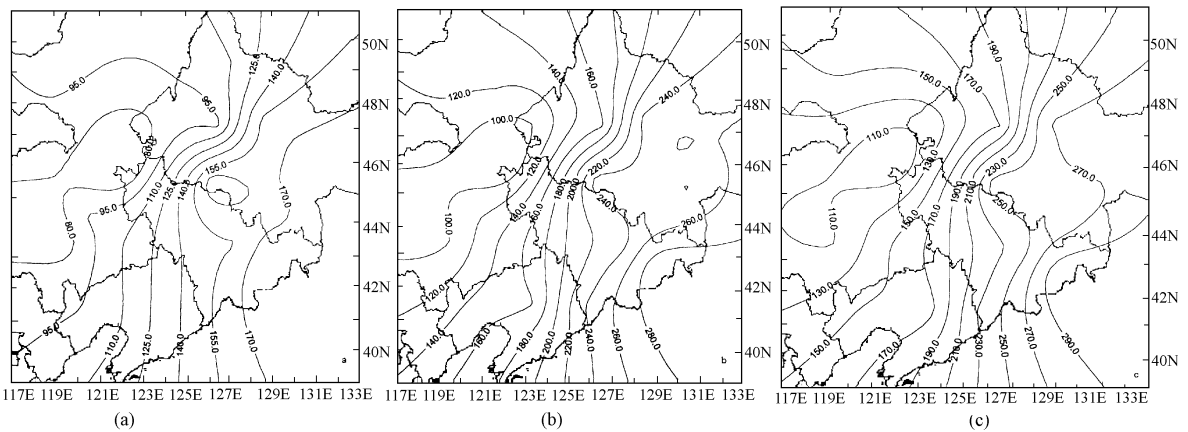


图 9 中国东北地区作物缺水量的模拟变化(mm)  
(a. 春小麦, b. 春玉米, c. 一季稻)

Fig. 9 Simulated changes of water deficit of the main staple crops  
(a. spring wheat, b. spring maize, c. middle season rice) in Northeast China (mm)

时,不能忽视细小尺度上气候要素量值的变化。实际气候要素的变化并不是线性的,高温热害等使温度的有效性降低,使增温延长的生长季不能利用;灾害的发生频率、强度和持续时间变化显然十分重要。农业产量的稳定性取决于气候要素极值和气候异常现象的变化,农业影响评估不仅要以宏观的平均气候变化情景为背景,更要深入考虑各种异常事件与极端现象可能产生的严重后果,重视农业灾害所导致的不利影响。

#### 参考文献:

- [1] 崔读昌. 气候变暖对我国农业生产的影响与对策[J]. 中国农业气象, 1992, 13(2): 16~23.
- [2] Hulme M, Rik L, Zhao Zongci *et al.* Climate Change Due to the Greenhouse Effect and Its Implication for China[M]. London: Banson Production. CRU/ WWF/ SMA. 1992. 57.
- [3] Newman J.E. Climate Change Impact on the Growing Season of the North American Corn Belt[J]. Biometeorology. 1980, 7(2): 128~142.
- [4] 张厚喧, 张翼. 中国活动积温对气候变暖的响应[J]. 地理学报. 1994, 49(1): 27~35.
- [5] 郑斯中, 等. 气候影响评价[M]. 北京: 气象出版社, 1989. 281.
- [6] 吴金栋, 王馥棠. 随机天气模型参数化方案的研究及其模拟能力评估[J]. 气象学报. 2000, 58(1): 49~59.
- [7] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993. 69.
- [8] 欧阳海, 等. 农业气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 534.
- [9] 崔读昌, 等. 中国主要农作物气候资源图集[M]. 北京: 气象出版社, 1984. 177.
- [10] Richardson C. W., and Wright D. A. WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables[M]. Washington: U. S. Dept. of Agriculture, Agricultural Res. Service. 1984. ARS-8, 83.

## 《地理学报》启事

为了进一步加强中外地理学界的学术交流,扩大中国地理学研究成果的国际影响,提高中国地理学者的国际知名度,《中国地理杂志》英文版(The Journal of Chinese Geography)将从 2001 年起更名为《地理学报》英文版(Journal of Geographical Sciences)。

《地理学报》英文版是面向国外读者的自然科学期刊。刊登的论文主要研究领域包括:自然资源与环境的区域分异规律、形成原因和演化特征;自然地理诸要素的相互影响和自然地理过程;资源环境对社会资源的影响;人类活动与自然环境的关系;遥感、地理信息系统在地理研究中的应用等方面的内容。

从 2001 年起,《地理学报》中文版的作者中文来稿经审查通过后,由编委会决定是否再另外译成英文在英文版上发表。同时,《地理学报》英文版接受国内外作者的英文直接投稿。欢迎广大作者特别是从事国际合作研究项目、国家重大科研项目的作者踊跃来稿。

此外,《地理学报》英文版还将刊登有关基金批准项目表、国际会议通知和报道、英文版新书书评、地理学英文网站广告、专业招聘招生通知、对外开放实验室介绍、英文版专业软件介绍等内容,使《地理学报》英文版成为汇集中外地理学综合信息的媒介。需要刊登上述信息的单位和个人,请将文稿及时通过电子邮件传到《地理学报》编辑部(E-mail: acta@dls.iog.ac.cn)。

《地理学报》英文版将积极争取本刊的论文被国际主要检索系统、文摘和期刊引用。使《地理学报》成为具有广泛国际影响的高水平科技期刊。

《地理学报》中文版今后仍然是综合性的学术刊物,办刊方向不变。发表的论文仍然有英文题名、英文摘要。

《地理学报》英文版为季刊,每期 128 面,16 开,附有彩色插图。《地理学报》英文版将在国内外公开发行。国际刊号 1009-637X,国内刊号 CN11-4546/P。每期定价国内 50 元,国外 30 美元。读者可直接向《地理学报》编辑部订阅 2001 年的《地理学报》英文版。

《地理学报》编辑部