

# 气候变化对华北地区冬小麦水分 亏缺状况及生长的影响\*

王石立 娄秀荣

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

## 提 要

根据多点多年气象资料、作物发育期资料和土壤水文资料, 计算了未来气候变化情景下华北冬小麦主产区小麦不同发育阶段和全生育期内水分亏缺量的变化. 结果表明, 气温升高时小麦水分亏缺状况变差, 亏缺量等值线南移, 引起小麦气候适宜区范围缩小, 减产额加大, 产值降低, 用于额外灌溉的生产费用增加.

**关键词:** 气候变化影响; 水分亏缺; 冬小麦.

## 引 言

近一百年来人类活动影响导致的全球气候变暖趋势将对环境和社会经济产生重大影响<sup>[1]</sup>. 其中有些影响可能是有利的, 例如气温升高后农业种植界线的北移将使一些热量条件不很充裕地区的农业产量获得提高. 然而气温上升的同时蒸发量将随之加强, 届时土壤水分是否能够满足作物的需要? 另外, 华北地区冬小麦生长季内降水较少, 水分供需矛盾突出. 未来的气候变化将对土壤水分状况和小麦生长产生什么影响? 这些都是人们十分关注的问题. 尽管已有一些相关研究<sup>[2]</sup>, 但仍不如气候变化对热量状况及作物生长影响研究得深入.

本文根据多点多年资料, 计算了未来气候变化情景下华北冬麦区小麦各发育阶段和全生育期内水分亏缺状况的可能变化, 并讨论了这些变化对冬小麦气候适宜性分区、产量、生产费用的影响, 为深入进行气候变化影响评估和对策分析提供依据.

## 1 方法和资料

(1) 蒸散是在土壤-作物-大气系统内进行的一个连续过程. 土壤水分适宜时的农田最大蒸散量( $ET_m$ )和实际水分条件下的实际蒸散量( $ET_a$ )之差(或比值), 可以较好地

\* 中国气象局部门重点课题  
1995-08-03日收到, 1995-11-12日收到修改稿.

反映作物水分亏缺程度. 本研究即以  $ET_a - ET_m$  表征小麦水分亏缺量(DEF).

(2) 潜在蒸散或参照蒸散(PET)是计算  $ET_m$  和  $ET_a$  的基础. 本文采用 R. G. Allen 等人提出<sup>[3]</sup>、FAO 推荐<sup>[4]</sup>的最新 Penman-Monteith 参照蒸散业务计算方法. 农田最大蒸散为参照蒸散和作物系数<sup>[5]</sup>相乘. 实际蒸散取决于农田最大蒸散和土壤水分状况:

$$ET_a = \begin{cases} ET_m & \text{当 } W \geq W_k \\ ET_m \times \frac{W - W_q}{W_k - W_q} & \text{当 } W < W_k \end{cases} \quad (1)$$

式中  $W_q$  为最大吸湿度, 由凋萎湿度求得<sup>[5]</sup>;  $W_k$  为土壤适宜临界水分, 因发育期而异<sup>[5]</sup>;  $W$  为土壤含水量, 依土壤水分平衡公式计算:

$$W_t = W_{t-1} + R - ET_a \quad (2)$$

式中  $W_t$  和  $W_{t-1}$  为相邻两时刻的土壤水分(mm), 初始值取田间持水量的 80%;  $R$  为降水量(mm).

假定未来小麦品种特性和发育期不变, 利用华北冬小麦主产区京、津、冀、鲁、豫及皖北、苏北 43 个站点 30 年冬小麦生长季内各旬气象资料、发育期资料和土壤水文资料, 逐旬迭代计算, 并求出各发育阶段和全生育期的实际蒸散量及相应的水分亏缺量(DEF)和相对蒸散( $ET_a/ET_m$ ).

为了分析水分亏缺量改变对灌溉制度及生产费用的影响, 还计算了考虑灌溉时的水分亏缺量. 根据生产实际和土壤水分含量确定灌溉时间, 灌溉量取土壤水分与田间持水量 80% 的差值.

(3) 考虑到未来气候变化估计的不确定性, 按增温 0.5℃、1.0℃、1.5℃、和 2.0℃ 4 种情景分别计算 DEF. 同时, 还选用了 7 个 GCMs 的合成模式模拟的中国东部地区 2050 年气候变化情景(表 1)<sup>[6]</sup>. 本文重点分析气温升高 1.5℃ 和合成模式情景对水分亏缺的影响.

表 1 中国东部地区 2050 年各季温度、降水相对于当前气候的可能变化<sup>[6]</sup>

Table 1 The potential changes of seasonal temperature and precipitation for the year 2050 in eastern China relative to present climate

	秋 季	冬 季	春 季	夏 季
温度(℃)	1.45	1.43	1.37	1.42
降水(%)	2.2	4.2	4.5	2.9

## 2 气候变化引起的小麦水分亏缺状况的改变

### 2.1 蒸散量的变化

温度升高时参照蒸散加大, 农田最大蒸散亦随之增加. 计算结果表明, 未来增温 1.5℃ 时华北各地冬小麦生长季内的参照蒸散和农田最大蒸散将分别增加 50~70 mm, 约 8%~10%. 其中冀、鲁、豫大部冬前参照蒸散每旬约增加 1.5~2.8 mm, 比当前气候

大9%~20%; 豫南、皖北、苏北地区增加2.0~3.3 mm, 大10%~25%。春季生长阶段内每旬增加2.5~4.0 mm, 约6%~12%; 豫南、皖北、苏北增加8%~18%。  $ET_m$  的变化趋势与参照蒸散十分相近。

实际蒸散的变化与土壤水分状况关系密切。小麦冬前生长阶段土壤水分状况较好, 气温升高时  $ET_a$  随  $ET_m$  的增大而增大。春季土壤水分逐渐消耗, 实际蒸散小于农田最大蒸散。未来气温升高的情况下, 土壤有效水分将进一步减少。据计算, 大部分地区多数旬实际蒸散将比当前气候下减少, 其中京、津、冀、鲁、豫北地区在返青阶段即已减少, 豫中、皖北等中部地区从拔节期开始减少, 豫南驻马店、固始和苏北沿海地区只有个别旬减少, 甚至始终在增加。总起来看, 冬前  $ET_a$  的增加幅度略大于春季的减少数量, 因此全生育期呈少量增加, 约1%~2%, 远远小于农田最大蒸散的增大幅度。即使在生育期内降水量略有增加的合成模式情景下(表1), 实际蒸散也只会比当前大2%~3%左右(表2)。另据计算, 如果气温按合成模式情景上升, 只有在降水量增加20%~30%的假设下,  $ET_a$  才有可能增大到与  $ET_m$  增大幅度大致相当的程度(表2)。

表2 气候变化时华北地区冬小麦全生育期蒸散量的变化

Table 2 The change of evapotranspiration in the whole growing season of winter wheat in North China associated with climatic variation

	$\Delta PET$		$\Delta ET_m$		$\Delta ET_a$	
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
$\Delta T=1.5^\circ\text{C}$	50~70	8~10	50~70	8~10	4~5	1~2
$\Delta T, \Delta R$ 取合成模式	50~70	8~10	50~70	8~10	5~10	2~3
$\Delta T$ 取合成模式 $\Delta R=10\%$					10~30	4~7
$\Delta T$ 取合成模式 $\Delta R=20\%$					20~45	7~12
$\Delta T$ 取合成模式 $\Delta R=30\%$					35~65	11~17

## 2.2 小麦水分亏缺量的变化

温度升高时实际蒸散的增加明显小于农田最大蒸散的增加, 因此小麦生长过程中水分亏缺量加大。增温幅度越大,  $DEF$  加大越多。

冬前生长阶段土壤水分比较适宜, 小麦需水量也较小, 因此绝大部分地区多数年份未出现水分亏缺。温度升高时这种态势亦未发生变化。

返青阶段, 小麦水分亏缺量南北差异较大。零值线在洛阳、郑州、菏泽、泰安至莱阳, 以北为水分亏缺区, 石家庄、德州以北大于20 mm。温度升高1.5℃时  $DEF$  普遍增大10~15 mm左右, 零值线南移到卢氏、许昌、西华及临沂、莒县一线, 最大南移距离为150 km。

拔节期内各地均出现水分亏缺。安阳、德州、惠民一线以北亏缺明显, 达100 mm以上。增温1.5℃时大部分地区  $DEF$  增大10~20 mm, 豫南、苏北地区增多2~10 mm。-100 mm等值线南移40~80 km。

抽穗阶段水分亏缺量的分布与拔节期相近, 但数量加大10~20 mm。南部亏缺量略

见减少，驻马店、固始、蚌埠、射阳一线以南为零值。温度升高 1.5℃时各地 DEF 增加 10~20 mm。-100 mm 等值线西段南移 60 km。

乳熟期内水分亏缺量减少，洛阳、郑州、商丘、泰安以北 50~70 mm。温度升高 1.5℃时亏缺量增大 5~10 mm，等值线位置无明显变化。

全生育期内水分亏缺量由西北向东南从-300 mm 以上递减至-10 mm，固始和苏北沿海为零值(图 1)。温度升高 1.5℃时 DEF 数值普遍增大。34°N 以北增大 50 mm；33°~34°N 地区增大 30~40 mm；32°~33°N 地区增大 1~5 mm，全部为负值。各地相对于当前气候下 DEF 的变化率约 14%~30%。-300 mm 等值线南缘从当前气候下的石家庄至德州南移到安阳、济南、惠民一线。西段南移约 190 km，东段南移 70~100 km。-250 mm 等值线从当前位置安阳、济南至淄博南移到洛阳、郑州、菏泽、泰安至烟台南部一线，其中西段将南移 140 km 左右(图 2)。从温度升高 1.5℃时全生育期水分亏缺量等值线的南移情况(图 3)可以看出，水分亏缺原本较严重的北部和西部地区在温度升高时的反应更为敏感，等值线南移明显。

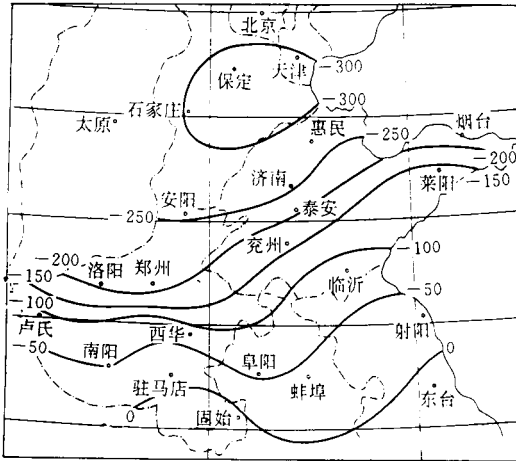


图 1 当前气候下冬小麦全生育期水分亏缺量 (mm)

Fig. 1 Water deficit status in the whole growing season of winter wheat associated with the present climate (mm)

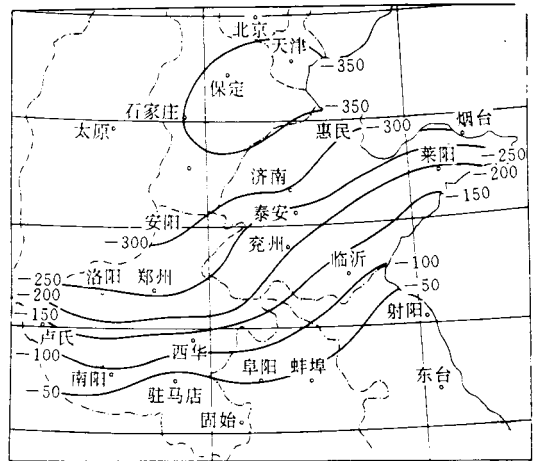


图 2 温度升高 1.5℃时冬小麦全生育期水分亏缺量 (mm)

Fig. 2 Water deficit status in the whole growing season of winter wheat when temperature increases 1.5℃ (mm)

合成模式气候变化情景下的小麦水分亏缺量计算结果与增温 1.5℃时十分相似，主要原因可能是二者温度变幅十分接近。同时，小麦生育期内降水较少，合成模式中的降水增加幅度又很小。经笔者计算，只有当生育期内降水量增加 30%左右，才可能抵消温度升高的影响，使水分亏缺量转为比当前气候下减小 1%~5%。

### 3 小麦水分亏缺状况变化的影响

文献[7]曾以降水供需差为主要指标进行小麦气候适宜性分区。对照文献[7]和本文

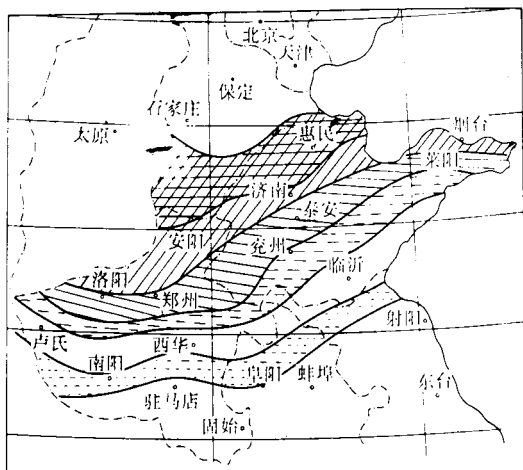


图3 温度升高 1.5℃时冬小麦全生育期水分亏缺量等值线南移

- (# -300 mm 等值线的南移
- // -250 mm 等值线的南移
- = -200 mm 等值线的南移
- == -150 mm 等值线的南移
- -50 mm 等值线的南移)

Fig. 3 As in Fig. 2, but for southward shift status of water deficit isolines

物缺水反应系数。

返青期间新乡、济南、淄博一线以北水分亏缺引起的减产额为 2%~7%，以南为零。气温升高 1.5℃时，产量下降值比当前气候大 3%左右，等值线明显南移。拔节期内大部分地区当前气候下缺水减产额为 10%~16%，豫中、皖北和山东东南部为 5%~10%，豫南、皖北不到 5%。温度升高 1.5℃时减产值比当前大 1%~3%。抽穗阶段缺水反应系数大，产量下降值明显加大，南阳、西华、徐州至莱阳一线以北为 10%~35%，驻马店、固始、蚌埠、射阳一线以南为零。温度升高 1.5℃时，大部分地区减产值比当前气候下大 2%~3%，驻马店、蚌埠也出现水分亏缺的不利影响。乳熟期的影响比抽穗期略小，气温升高 1.5℃，减产额增大 2%左右。从全生育期的水分亏缺减产值来看，当前气候下新乡、济南、淄博一线以北大于 40%，卢氏、许昌、临沂北至莒县以南小于 20%，驻马店、固始、合肥、东台一线以南为零(图 4)。气温升高 1.5℃时大部分地区的减产值比当前大 5%左右，增加百分比为 8%~20%。石家庄、德州、天津、北京范围内产量下降 50%或更多。南端的驻马店、固始、合肥也有轻微减产(1%~3%)。减产值 45%和 40%等值线明显南移(图 5)。

$$\text{产量下降导致产值减少。根据减产额的变化率 } A = \frac{(1 - Y_{a1}/Y_m) - (1 - Y_{a0}/Y_m)}{1 - Y_{a0}/Y_m}$$

整理得到：

图 1 发现，降水供需差最大值 -200 mm 等值线的南界与本文全生育期 DEF 的 -300 mm 南界几乎完全相当，降水供需差 -150 mm 等值线与 DEF 的 -150 mm 线基本接近。相应地，非灌溉小麦不适宜气候区和次适宜气候区的分界线与本文 DEF -150 mm 线大致相当，次适宜区和适宜气候区的分界线与 DEF -50 mm 线相近。因此，温度升高 1.5℃时，水分供需矛盾最严重的地区将南移 70~190 km，较严重地区也向南有所扩大。同时，气候(水分条件)不适宜区范围向南扩大，次适宜区范围变大，适宜区范围有所缩小。

水分亏缺加大将引起小麦产量降低。根据 FAO 相对蒸散差额与产量下降比的关系<sup>[8]</sup>，分别估算了当前气候和增温 1.5℃时的产量下降值：

$$1 - Y_a/Y_m = k_y \times (1 - ET_a/ET_m) \tag{3}$$

式中  $Y_m$  为水分适宜条件下由辐射和温度决定的最高产量， $Y_a$  为实际产量， $k_y$  为作物

$$A = \frac{Y_{a0} - Y_{a1}}{Y_m - Y_{a0}} \quad (4)$$

式中  $Y_{a0}$  为当前气候产量,  $Y_{a1}$  为气候变化后的产量. 取水分适宜、较高生产水平下的最大产量  $6000 \text{ kg/hm}^2$  为  $Y_m$  [8], 当前华北地区大范围平均单产  $3750 \text{ kg/hm}^2$  为  $Y_{a0}$ , 温度升高  $1.5^\circ\text{C}$  时的水分亏缺减产额比当前气候下平均增大  $10\%$  以上(前述  $8\% \sim 20\%$ ), 可以得到  $Y_{a0} - Y_{a1} = 225 \text{ kg/hm}^2$ , 即相对于  $Y_m - Y_{a0}$  减产  $225 \text{ kg/hm}^2$ . 若以当前小麦价格  $1.4 \text{ 元/kg}$  计, 减产额的加大将导致每公顷麦田减少产值  $315 \text{ 元}$ .

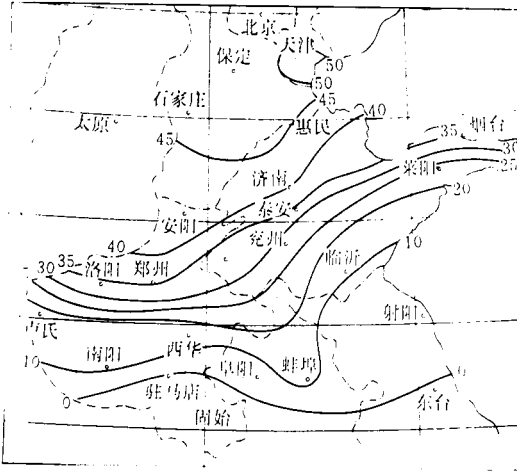


图4 当前气候下冬小麦全生育期水分不足引起的减产额(%)

Fig. 4 The yield decrease induced by water deficit in the whole growing season of winter wheat under conditions of present climate (%)

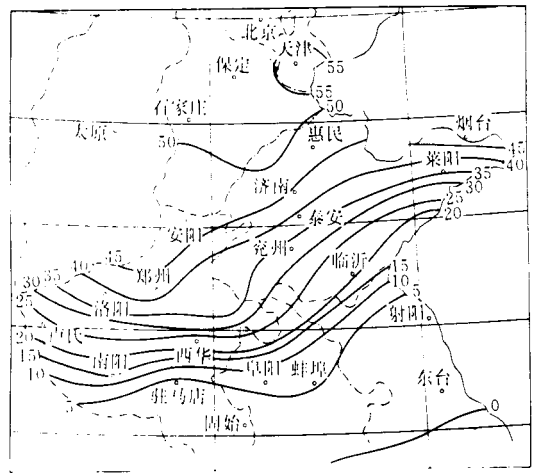


图5 温度升高  $1.5^\circ\text{C}$  时冬小麦全生育期水分不足引起的减产额(%)

Fig. 5 As in Fig. 4, but when temperature increases  $1.5^\circ\text{C}$

在有灌溉条件的地区, 水分亏缺加大引起的额外灌溉将使生产费用增加. 考虑灌溉时的水分亏缺量计算结果表明, 在合成模式情景下, 一部分地区土壤水分明显减少, 需要额外增加 1 次灌溉, 灌溉量为每公顷  $600 \sim 750 \text{ m}^3$ . 按目前大田小麦一生灌水  $3 \sim 4$  次, 每次  $600 \sim 750 \text{ m}^3$  每公顷估计, 灌溉额将增加  $25\% \sim 33\%$  左右, 其所需水费、电费、劳力及维修等生产费用势必随之增加. 另一部分地区虽未达到需要额外增加 1 次灌溉的程度, 但春季生长阶段平均土壤水分将比当前气候降低  $4\% \sim 13\%$ , 对产量的不利影响加大.

#### 4 结语和讨论

(1) 气温升高时蒸发过程将加剧. 华北冬麦区小麦全生育期内农田最大蒸散将增加  $50 \sim 70 \text{ mm}$ , 比当前气候下大  $8\% \sim 12\%$  左右; 实际蒸散可能增加  $1\% \sim 2\%$ . 其结果将

导致小麦水分亏缺程度加剧。这种响应以华北冬麦区北部和西部尤为明显,时间上则以小麦拔节、抽穗阶段更为突出。气温升高 $1.5^{\circ}\text{C}$ 时各地全生育期水分亏缺量将比当前气候增加 $30\sim 50\text{ mm}$ ,约 $14\%\sim 30\%$ ,亏缺量 $-300\text{ mm}$ 和 $-250\text{ mm}$ 等值线明显南移,西段南移达 $140\sim 190\text{ km}$ 。7个GCMs的合成模式气候变化情景下小麦水分亏缺量的变化与温度升高 $1.5^{\circ}\text{C}$ 时相近。

(2) 水分亏缺量加大使华北地区冬小麦水分胁迫严重的地区扩大,水分不适宜区范围向南扩大,适宜区缩小。全生育期水分亏缺加剧引起的小麦减产值比当前气候下大 $8\%\sim 20\%$ ,导致产值下降。灌溉额将增加 $25\%\sim 33\%$ ,使生产费用提高。

(3) 气候变暖可能使农业热量资源增加,种植界限北移。但华北地区温度升高后水分亏缺程度可能加重。在有灌溉条件的地区,冬小麦可能增产,但灌溉增加将使生产成本提高。在没有灌溉条件的地区,水分胁迫加剧则将导致减产。这些变化对华北地区目前的两熟制农业持续发展十分不利,更对三熟制的北移构成极大限制。因此分析气候变化对农业影响时,应综合考虑热量资源和水资源的匹配组合情况以及生产费用的变化。

(4) 作为一种宏观分析,本文假定作物品种特性和生育期不变,从蒸散角度考虑气候变化引起的作物水分亏缺状况改变及其对产量的影响。事实上,水分亏缺的影响十分复杂,如能结合机理性强的作物生长模式将会更好地揭示这一影响过程。另外,温度升高也会引起作物生育期的改变。笔者利用冬小麦生长模拟模式,根据河北固城、山东泰安两个年度小麦生育期内逐日温度资料,按照合成模式情景,进行了发育期变化的试验。结果显示播种期平均推迟7天,停止生长期少变,返青期将提前9天,成熟期提前5天。全生育期天数将主要由于播种推迟,越冬期缩短而缩短约12天。以改变后的发育期重新计算水分平衡,发现播种期推迟后冬前水分亏缺状况没有变化;返青至拔节期的提前使 $ET_m$ 略减, $ET_s$ 略增,水分亏缺较发育期不变时稍小;抽穗以后水分亏缺将比原发育期的结果大;全生育期水分亏缺量与温度升高、发育期不变时相比基本相同或略有减少。这两个点的计算说明在发育期改变的情况下,气候变暖引起的水分亏缺加剧仍然存在,只是过程和程度可能稍有变化。但是,确定大范围作物发育期的改变需要有多点多年逐日气象资料和具有良好普适性的作物生长模式,目前还存在一定难度。另外,冬季温度升高后土壤冻结情况的变化可能将对春季土壤水分状况有所影响。这些都将有待于今后进一步讨论和研究。

## 参考文献

- 1 Tegart W J McG. et al (eds.). Climate Change: The IPCC Impact Assessment. Canberra: Australian Government Publishing Service, 1990. 1~45.
- 2 冷石林. 温室效应对黄淮海地区农田水分平衡的可能影响. 中国农业气象, 1992, 13(6): 20~23.
- 3 Richard G Allen, Marvin E Jensen, James L Wright and Robert D Burman. Operational estimations of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 1989, 8(July-August): 653~661.
- 4 Martin Smith. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 46, FAO, Rome. 1992.
- 5 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算. 北京: 气象出版社, 1989.
- 6 Wang Futang and Zhao Zongci. Climate change and natural vegetation in China. *ACTA Meteorologica Sinica*, 1994, 8

(1): 1~8.

7 崔读昌. 小麦, 中国农林作物气候区划. 北京: 气象出版社, 1987. 4~35.

8 Doorenbos J and Kassam A H. Yield response to water, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33, FAO, Rome. 1970.

## IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON THE WATER DEFICIT STATUS AND GROWTH OF WINTER WHEAT IN NORTH CHINA

Wang Shili    Lou Xiurong

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

### Abstract

The water deficits in various development stages and the whole growing season of winter wheat in North China under climate change scenarios are calculated based on the meteorological data, crop development period and soil hydrological data at 43 stations. The results show that when temperature rises, the water deficit status would deteriorate, the isolines of deficit might shift southward, the climate suitable areas of wheat would contract, the yield-reduction would become serious and the output values would lose, and also the production cost resulting from additional irrigation might increase.

**Key words:** Climate change impacts; Water deficit; Winter wheat.