

气候变化对江苏省小麦生产的可能影响[※]

郑有飞 宗雪梅 徐 云 陈万隆
(南京气象学院应用气象学系, 南京 210044)

摘 要 根据国内外研究结果综合分析, 得到 CO₂倍增时江苏省温度、降水的变化值, 初步确定了 CO₂倍增时江苏省小麦生长季内的可能气候情景。分析未来 CO₂倍增时 对小麦作物的直接影响、间接影响及紫外辐射影响。具体估算了温度升高、降水增加、CO₂浓度上升、紫外辐射增强后江苏省小麦生育期不变和生育期缩短两种情景下的气候生产潜力, 并由此分析了气候变暖对江苏省不同地区的利弊影响。结果表明: 江北大部分地区小麦产量有所增加, 江淮南 部部分地区和苏南将减产。在此基础上用模糊聚类分析方法对 CO₂倍增时江苏省小麦气候进行区划, 并对未来江苏省调整种植制度, 发展农业生产提出一些建议。

关键词 气候变化, CO₂倍增, 气候生产潜力

分类号 S162.5

近百年来全球近地面平均气温分析表明, 气温呈不断上升趋势, 平均约增高0.5℃, 北半球大陆地区增高1℃以上^[1]。如果温室气体以目前的增速继续上升, 到2025~2045年, 大气中的有效 CO₂浓度约增加一倍^[2]。CO₂的温室效应会使地表附近的气温升高, 并且大气环流的改变还将引起降水量及其分布发生显著变化。平流层的臭氧耗减使地球表面中波紫外辐射强度增加, 也是引起气候变化因素之一^[3]。气候变化将会影响和改变气候生产潜力, 从而改变生态系统的初级生产力和农业的土地承载力。小麦是江苏省仅次于水稻的主要粮食作物, 常年种植面积230万公顷左右, 亩产约260公斤。产量占全省夏粮总产的4/5, 占全年总产量的27%^[4]。因而探讨气候变化对江苏省小麦生长发育的适宜程度及产量的影响是十分必要的。近十几年来, 许多学者作了这方面的研究, 但均未考虑太阳紫外辐射强度的增加及其产生的影响。本文针对目前和未来江苏省光、温、水条件和小麦气候生产潜力, 分析未来小麦生产应采取的相应对策, 对江苏省调整农业种植制度, 合理利用气候资源, 具有一定的参考价值。

1 资料

江苏省各县市1951~1980年逐旬平均气温、降水、相对湿度、日照百分率等气象资料取自江苏省地面气候资料。1961~1980年南京地区的太阳辐射资料取自国家气象局整编资料, 其他

※ 江苏省自然科学基金资助项目 BK95128206
收稿日期: 1997-08-27; 改回日期: 1997-12-07
第一作者简介: 郑有飞, 男, 1959年7月生, 硕士, 副教授

县市因为没有地面辐射观测, 由经验公式求得。其经验系数由南京地区的辐射资料进行订正。各县市冬小麦的平均生育期及生长指标由江苏省农科院提供。

许多研究资料均表明⁵⁾, 长江中下游地区未来气候变化的趋势是温度上升、降水增加。本文主要根据1985年维拉赫国际会议上对多个大气环流模式模拟结果进行综合估计后得出的结果(GCMs), 并且考虑到深层海洋的缓冲作用, 设定 CO₂倍增时江苏省的可能气候情景⁶⁾(表1)。

表1 CO ₂ 倍增时江苏省可能气候变化					
Table 1 Climate scenario under doubled CO ₂ in Jiangsu Province					
	春 季	夏 季	秋 季	冬 季	全 年
温度增加(℃)	1.5	1.2	1.5	1.8	1.5
降水增加(%)	20	20	10	10	15

2 研究方法

2.1 太阳总辐射的求算

根据江苏省地理特点, 从三大农业区(徐淮区、江淮区和苏南区)中选定东海、徐州等九个站点作为气候代表点。按照王懿贤旬总辐射的计算公式⁷⁾, 计算各个站点的逐旬太阳总辐射。

$$Q_c = Q_A(a + b^{s/s'})$$

(1)

其中: Q_c 为实际总辐射, Q_A 为大气上界的太阳辐射, 由各站点纬度值算出, s 为日照时数, s' 为可照时数, a, b 为经验系数, 经订正后的值, 见表2。

表2 经验系数 a, b 值					
Table 2 Values of empirical coefficient a, b					
	春 季	夏 季	秋 季	冬 季	
a	0.131	0.192	0.177	0.159	
b	0.583	0.454	0.478	0.553	
相关系数	0.960	0.970	0.950	0.940	

2.2 气候生产潜力的估算

根据各代表站点小麦生育阶段的平均日期, 分别计算目前和 CO₂倍增时江苏省小麦气候生产潜力, 其计算模式为

光合生产潜力×温度订正×水分订正×CO₂直接效应系数 q_i + 紫外辐射修正系数 r_i = 气候生产潜力

(注: $j=1$ 和2, 分别代表目前和 CO₂倍增时, $q_1=1, r_1=0$)

2.2.1 目前气候条件下生产潜力的计算方法

(1) 光合生产潜力的计算

光合生产潜力的计算式为

$$Y_p = \sum_{i=1}^n K E Q_i k_{li}$$

(2)

其中, i 为发育期序号; K 为物能转换系数。当小麦经济系数取0.40时, K 值为163.715。 E 为有效光能利用率, 取5.5%, Q_i 为光合有效辐射(KJ cm⁻²), 约是总辐射 Q_c 的1/2; k_{li} 为叶面积订正系数

$$k_{li} = \begin{cases} l_i / L_i & (l_i \leq L_i) \\ 1 & (l_i > L_i) \end{cases} \tag{3}$$

l_i 为第 i 时段的实际叶面积系数; L_i 为最适叶面积系数(由参考文献 8)获得)。各代表站点的光合生产潜力值见表3。(以1~5分别代表苗期、越冬期、返青拔节期、抽穗开花期、灌浆成熟期。下同)。

(2) 光温生产潜力的计算

光温生产潜力计算式为

$$y^T = \sum_{i=1}^n y^{Ri} k_{ti} \tag{4}$$

式中, k_{ti} 为温度订正系数, $k_{ti} = t_i / T$, t_i 为第 i 个时段的作物生理温度, 须由实际环境温度换算求取。设 t' 为实际温度, T_m 为作物生产的最低温度, T_M 为作物生产的最高温度, T_1 为作物光合最适温度下限, T_2 为光合最适温度是上限。按作物生长对温度变化反应的抛物线关系, 分段 t_i 值选取如下⁸⁾

$$t_i = \begin{cases} 0 & (t \geq T_M \text{ 或 } t' \leq T_m) \\ t' & (T_m < t' < T_2) \\ \frac{T_M - t'}{T_M - T_2} T_2 & (T_2 \leq t' < T_M) \end{cases} \tag{5}$$

对于 T 值

$$T = \begin{cases} T_1 & (T_m < t' \leq T_1) \\ t_i & (T_1 < t' \leq T_2) \\ T_2 & (T_2 < t' < T_M) \end{cases} \tag{5'}$$

对冬小麦来说, 取 $T_m = 3\text{ }^\circ\text{C}$, $T_M = 30\text{ }^\circ\text{C}$, $T_1 = 15\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ⁹⁾。各代表站点的光温生产潜力值见表3。

(3) 气候生产潜力的计算

气候生产潜力的计算式为

$$y^c = \sum_{i=1}^n y^{Ti} k_{wi} \tag{6}$$

式中, k_{wi} 水分订正系数。由于江苏省小麦生产中的水分问题与北方不同, 必须同时考虑水分不足与水分过多的影响。因此, 本文确定 k_{wi} 的表达形式为

$$k_{wi} = \begin{cases} [(1 - c) R_i] / E_a & 0 < (1 - c) R_i < E_{ci} \\ E_a / [(1 - c) R_i] & (1 - c) R_i \geq E_a \end{cases} \tag{7}$$

R 为旬降水量, c 为径流系数, 根据研究地点不同, 取值在0.01~0.33之间。 E_c 为作物实际蒸散量, $E_c = K_c E_o$, E_o 为由彭曼公式计算的潜在蒸散量; K_c 为作物系数。小麦各发育阶段的 K_c 值为: 苗期0.76、越冬期0.91、返青拔节期1.09、抽穗开花期1.07、灌浆成熟期0.88⁸⁾。经估算后的各站点气候生产潜力值见表3。

2.2.2 CO₂倍增时气候生产潜力的计算

由于温度上升, 现有品种小麦的生育期将缩短, 但如果采用引种的方法或选育出适应未来气候条件的小麦品种, CO₂倍增时小麦的生育期可以不变。因此, 本文设定了以下两种情景。

表3 各站点 y_p 、 y_T 、 y_c 值

Table 3 Values of y_p 、 y_T and y_c in considered stations									kg hm ⁻²
	东海	徐州	淮阴	盐城	扬州	南通	南京	武进	苏州
y_p	18 816.0	18 051.0	17 035.0	17 380.5	14 616.0	14 376.0	14 170.5	13 714.5	12 525.0
y_T	10 771.5	11 445.0	10 719.0	10 753.5	8 905.5	8 895.0	8 997.0	8 716.5	8 304.0
y_c	6 469.5	6 490.5	6 664.5	6 553.5	7 662.0	8 196.0	8 289.0	8 296.5	8 229.0

(1) 不考虑温度变化对小麦生育期影响气候生产潜力及其变化率

以表1的温度、降水变化值, 结合各个站点的历史气候资料, 生成CO₂倍增时江苏省气候背景; 根据布德科的研究^[10], 平均气温升高1℃蒸散增加4%, 由此计算CO₂倍增时的蒸散量。再按照2.2所述步骤依次进行温度、降水订正。

CO₂倍增后, C₃作物的CO₂固定率提高50%左右, 干物重和产量上升10%~50%, 其中小麦为38%^[11]。考虑到CO₂效应倍增中并非CO₂倍增, 还包括一些其他温室气体作用的影响, 计算时假定: CO₂倍增后, 小麦生产潜力提高20%^[6,11], 即 $q_2=1.2$ 。

根据世界气象组织/联合国环境规划署政府间气候变化专门委员会(IPCC)第2工作组1990年报告中预测, 2045年生物型有效紫外辐射(UV-B)最大可增加20%~25%^[3]。

试验研究表明, 太阳紫外辐射增强对小麦作物的影响很大。它使植株变矮, 叶面积变小, 干物重下降, 开花出现衰退, 产量下降。当紫外辐射增加10%。江苏省小麦产量将下降750~1 200 kg hm⁻²。本文取900 kg hm⁻², 即 $r_r=-900$ kg hm⁻²来估算CO₂倍增时的小麦气候生产潜力及其变化率(表4), 并绘出江苏省气候生产潜力变化率分布图(图1)。

表4 各站点生产潜力值

Table 4 Wheat climate productivity in the stations									kg hm ⁻²
情 景 I					情 景 II				
	y_T	y_w	光合、UV 效应修正后	气候生产潜力 变化率(%)	y_T	y_w	光合、UV 效应修正后	气候生产潜力 变化率(%)	
东海	13 350.0	8 833.5	8 800.5	36	12 100.5	7 905.0	7 704.0	19	
徐州	13 125.0	8 094.0	7 912.5	22	11 883.0	7 257.0	6 907.5	6	
淮阴	12 280.5	8 416.5	8 299.5	25	11 154.0	7 605.0	7 326.0	10	
盐城	12 436.5	8 565.0	8 478.0	29	1 133.7	7 801.5	7 561.5	15	
扬州	10 314.0	9 036.0	9 043.5	18	9 349.5	8 212.5	8 055.0	5	
南通	10 258.0	9 147.0	9 175.5	12	9 331.5	8 043.0	7 852.5	- 4	
南京	10 287.0	6 148.5	9 502.5	15	9 355.5	8 593.5	8 512.5	3	
武进	10 033.5	9 196.5	9 237.0	11	9 138.0	8 382.0	8 257.5	- 1	
苏州	9 207.0	7 866.0	7 638.0	- 7	8 404.5	7 174.5	6 808.5	- 17	

气候生产潜力变化率= $\frac{\text{CO}_2\text{倍增时气候生产潜力值}-\text{目前气候生产潜力值}}{\text{目前气候生产潜力值}} \times 100\%$

(2) 考虑温度变化对小麦生育期影响的小麦气候生产潜力值及其变化率

温度升高, 现有品种的小麦生育期将会缩短。根据叶龄与积温的关系, 确定CO₂倍增时江苏省小麦作物的适宜播种。在适播的情况下, 每增加一片生茎叶需要> 0℃积温85.5

$^{\circ}\text{C}$ 日^[2], 冬前再长好6片生茎叶, 则需 $> 0^{\circ}\text{C}$ 积温 513°C 日。由此推算出未来气候条件下, 冬小麦播期将推迟 $6\sim 8\text{ d}$ 。根据作物生育期内所需积温相等的原理, 经计算得出: CO_2 倍增气候条件下, 冬小麦的收获期将提前 $5\sim 8\text{ d}$ 。以此为基础按模式逐步求算 CO_2 倍增时江苏省小麦气候生产潜力及其变化率。结果见表4。绘出气候生长潜力增长率图(图2)。

3 结果分析

3.1 江苏省小麦种植的气候现状

江苏省农业气候总的特征是: 温暖湿润、光照充足, 热量条件较优越, 这些都对小麦生产较为有利。全省光能资源均比较充足, 在小麦的整个生长季内能提供充足的光能。冬季光能虽较少, 但此时小麦正处于越冬期, 光能也足够用。温度条件南北差异明显, 冬季日数自南向北增加。徐淮地区的冬冷期 90多天, 江淮之间约有80天, 苏南只有60天左右, 尤其是徐淮区, 小麦越冬期及苗期温度条件较差, 作物较易遭受冻害。因此比起光能生产潜力, 徐淮区小麦的光温生产潜力下降最多。降水南北分布也不均匀, 春季降水量北部少, 南部多, 苏南超过 200 mm , 江淮区在 $200\sim 250\text{ mm}$ 之间, 徐淮区不足 200 mm 。在小麦生长季内, 江苏省北部常会遇到干旱、干热风等的威胁, 而苏南常会遇到湿害, 因此气候生产潜力以南通、南京、武进等地最高。

3.2 气候变暖对江苏省小麦产量的可能影响

本文综合考虑了温度升高、降水增加、 CO_2 浓度倍增、紫外辐射增加对不同地区小麦作物的可能影响。若不考虑生育期的改变, CO_2 倍增时, 江苏省各地温度条件有改善, 温度订正系数增大, 各地光温生产潜力均有提高。温度升高, 弥补了因热量不足对小麦生产所造成的影响。尤其对江苏省西北地区, 温度条件是目前小麦生产限制因素之一, 温度升高后, 光温生产潜力增长幅度最大, 达 24% 。苏南地区温度不是限制因素, 光温生产潜力提高幅度最小, 只有 11% , 其余地区增长率均为 15% 左右。

CO_2 倍增时, 江苏省各地的气候生产潜力变化有正有负, 变幅为 $-7\%\sim 36\%$, 由图1可

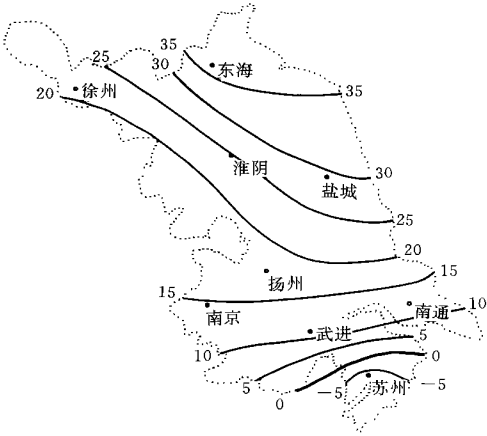


图1 情景 I CO_2 倍增后江苏省小麦气候生产潜力增长(%)
Fig. 1 Percentage increase in wheat climate productivity under doubled CO_2 with scenario I

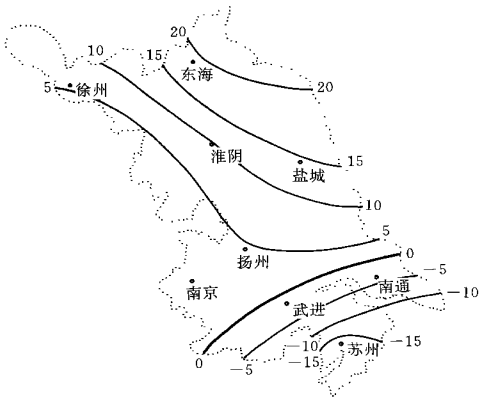


图2 情景 II CO_2 倍增后江苏省小麦气候生产潜力增长(%)
Fig. 2 Percentage increase in wheat climate productivity under doubled CO_2 with scenario II

见,等值线基本上呈东西向,其值由南向北递增,南京、南通、武进一线以北等值线较疏,以南等值线较密。高值区在最北部,增长率为36%;低值区在最南部,增长率为-7%。 CO_2 倍增时气候生产潜力增长幅度与降水变化有密切关系。徐淮地区由于春季降水较少,降水增加后,对缓解春旱,有正作用,它使水分订正系数增大,故而该区气候生产潜力增加幅度最大。苏南地区降水充沛,小麦在抽穗—成熟期常有湿害发生。降水增加后,更易形成湿害及赤霉病等的流行。因而该区气候生产潜力呈负增长。

若考虑生育期缩短的影响,气候变化对小麦产量影响的规律与情景 I 基本相似,只是增幅变小,零增长率等值线移至南京、武进、南通一带,也就是说全省气候生产潜力呈正增长的地区减少,呈负增长的地区扩大。江淮区南部部分地区及苏南的气候生产潜力均下降。且越往南,降幅越大。

综上所述, CO_2 倍增时气候变暖对江苏省小麦产量的影响,均呈正效应。较凉地区大于温暖地区;降水增多,正负效应皆有。目前雨量适中和充沛地区,呈负效应,较干旱地区则呈正效应。由于大部分地区温度订正项增加大于水分订正项的减少幅度,因此仅江淮区南部及苏南区气候生产潜力降低,其余均增加。

在分析了未来江苏省小麦的气候生产潜力的基础上,根据小麦作物生育及产量形成对气候要求的满足程度,确定江苏省小麦生育期内有利、不利的气候条件和指标,找出限制气候生产潜力变化率正负因子,对 CO_2 倍增时江苏省小麦气候进行区划。

3.3 CO_2 倍增时江苏省小麦气候区划

3.3.1 区划原则

前面已经分析了未来江苏省在整个小麦生长季内光能资源比较充足,温度、降水南北差异较大。因此,区划时着重考虑了以下三个方面:

(1) 在一个区内小麦气候适宜性基本相似,不利的气候条件的影响基本一致,湿害、干热风等不利因子的影响基本一致。

(2) 小麦品种生态类型和气候生态条件在一个区内基本一致,即冬小麦的冬、春性气候生态条件基本一致。

(3) 小麦生长发育状况及产量水平基本一致,即一个区内物候期、气候产量基本一致。

3.3.2 区划指标和方法

根据分析选定3个气象因子作为主要区划指标。

(1) 1月份平均气温值。用此指标可代表小麦越冬期受冬季低温的影响程度。

(2) 拔节、抽穗期的水分订正系数。用此指标可反映小麦供水量与实际水分需求量之间的差额,亦可反映湿害的轻重。

(3) 5月下旬最高气温及其平均值。用此指标可从气候上反映小麦干热风的轻重,又可表示灌浆期温度条件的优劣。

再以未来气候生产潜力值作为辅助区划指标,采用模糊系统聚类分析方法对江苏省未来小麦气候进行分区(λ 水平取0.768)。见图3。

3.3.3 区划系统命名

(1) 冬性半干旱冬小麦气候区。包括徐淮区和江淮区北部。本区气候条件为:气温 $0\sim 7^{\circ}\text{C}$ 的持续日数34日;小麦生育期降水量 $300\sim 400\text{ mm}$,水份差额为 $150^-\sim 200^-\text{ mm}$ (“-”表示缺水,“+”表示多出,下同),光照充足。主要问题是春季缺水,抽穗至成熟有干热风危害。可种植冬小

麦一般性品种。

(2) 弱冬性湿润冬小麦气候区。包括江淮区南部和苏南区北部。本区气候条件为: 气温 $0\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续日数 $15\sim 30$ 日; 小麦生育期降水 $400\sim 550\text{ mm}$, 水分差额为 $50^{-}\sim 100^{+}\text{ mm}$; 光照条件较优。主要问题有湿害。可种植冬小麦弱冬性品种。

(3) 春性极湿润冬小麦气候区, 包括苏南区南部。本区气候条件为: 气温 $0\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续日数 < 15 日; 小麦生育期降水量 550 mm 以上, 水分差额 $> 100^{+}\text{ mm}$, 光照条件能满足需要。主要问题是抽穗至成熟期水分和阴雨日数较多, 影响产量和品质, 可种植春性小麦品种。

3. 3. 4 分区评述

比较文献 [3] 中国小麦气候区划, CO_2 倍增后江苏省小麦气候区划线稍向北推移, 原先位于江淮区南界的一条区划线推至扬州、南通以北, 这符合目前的区划理论。而且第2及第3区分区线与气候生产潜力零增长率等值线相吻合。区划效果较为理想。

3. 4 未来江苏省小麦生产对策

(1) 根据作物对气候的适应性合理布局, 有效利用气候资源。苏南地区气候湿或过湿, 不适于小麦栽培, 一般不易获得高产, 应适当扩大油菜作物生产。因为油菜较耐湿, 而且收获期较早, 而江淮流域光热条件协调, 水分条件较适宜, 小麦生育期降水量接近需水量, 可扩大种植面积。

(2) 为了充分利用未来变暖后充沛的热量资源, 发挥 CO_2 倍增后增产潜力, 必须注重选育适应于未来高温、高湿以及生长期较长的高产品种, 或进行冬春性品种的调整, 改善目前的种植制度。另外, 生产潜力的实现与其他农业措施的实施是分不开的。为此, 培肥地力, 精耕细作, 加强病虫害防治等, 都是发挥生产潜力提高农业产量所不可缺少的有效措施。

4 结 语

(1) 目前国内普遍采用五种大气环流模式模拟 CO_2 倍增时我国的可能气候情景, 其输出结果差异很大。本文的未来气候情景设计采用的是世界上多个大气环流模式模拟结果进行综合估计后得出的结果, 较具代表性。

(2) 采用气候生产潜力来研究气候变化对小麦产量的影响, 方法较简单, 但能很好地反映气候变化对农作物的影响。若能将方法和气候模式及作物模式嵌套计算结果进行比较使用, 更能说明问题。因此, 本文对 CO_2 倍增时江苏省的小麦产量预测可能较为理想。

(3) 影响气候变化的因素是多方面的, 有自然因素也有人为因素。我们应该在了解气候变化及其对农业生产影响的基础上, 呼吁减少 CO_2 排放量, 抑制温室效应, 减少气候变化对农业生产的影响。

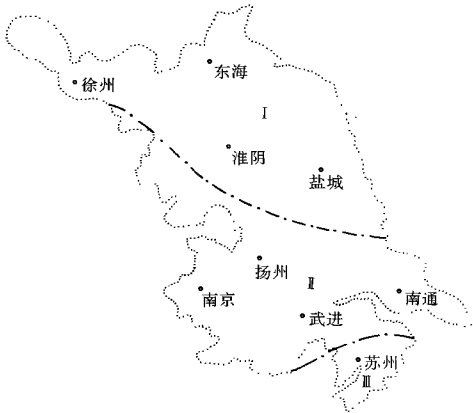


图3 CO_2 倍增后江苏省小麦气候区划

Fig. 3 Climatic regionalization of wheat under doubled CO_2 in Jiangsu Province

参 考 文 献

1 气候异常对农业影响的试验研究课题组. 中国气候变化对农业影响的试验与研究. 北京: 气象出版社, 1991

2 世界气象组织/联合国环境规划署政府间气候变化专门委员会(IPCC). 气候变化IPCC 1990年和1992年的评估. 加拿大, 1992

3 洪佳华. 中波紫外辐射强度对作物影响的研究动态. 中国农业气象, 1994, 15(3): 49~50

4 曹广才, 王绍中主编. 小麦品质生态. 北京: 中国科学技术出版社, 1994

5 倪海曙. 气候变化与作物产量波动. 上海: 知识出版社, 1990

6 张厚. 水稻气候生产力对气候变暖响应问题的模拟计算. 中国农业气象, 1993, 14(1): 35~40

7 王懿贤, 赵名茶. 中国旬总辐射的空间分布特征与光合潜力. 自然资源, 1981, (3): 32~41

8 刘笃慧, 李登科, 刘耀武, 等. 冬小麦气候生产力的宏观动态模拟模型. 中国农业气象, 1993, 14(6): 16~20

9 黄祥辉, 胡茂兴主编. 小麦栽培生理. 上海: 上海科技出版社, 1984

10 高素华, 潘亚茹. 温室效应对未来农业气候资源的影响问题. 中国农业气象, 1991, 12(4): 1~5

11 李玉娥, 张厚. 温室效应对我国北方冬麦区粮食作物生产潜力的影响. 中国农业气象, 1992, 13(4): 37~39

12 张定琪. 小麦泗阳936播期的气象条件研究. 农业气象, 1985, 6(3): 24~26

13 《中国的气候与农业》编辑委员会编. 中国的气候与农业. 北京: 气象出版社, 1992

POSSIBLE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE
ON WHEAT PRODUCTION IN JIANGSU

Zheng Youfei Zong Xuemei Xu Yun Chen Wanlong
(Department of Applied Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

Abstract A climate scenario of temperature and rainfall under doubled CO₂ was derived from synthetic studics of home and abroad for Jiangsu Province. Based on the scenario, effects on winter wheat production were studied of increased CO₂ and enhanced solar U V radiation and the crop climate productivity were estimated under two hypotheses of invariable and variable crop growing period respectively. Results showed that wheat output would rise in most part of the province to north of the Yangtze River and go down either in part of southern valley between the Huaihe River and the Yangtze River or in the south of the province. Furthermore, wheat growing was climatically regionalized over the province by fuzzy classification method and finally a number of suggestions were put forward for adjustment of planting system and development of agricultural production.

Keywords climate change, CO₂ doubling, climatic productivity