

42-47

28565(11)

第17卷第4期
1997年7月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 17, No. 4
Jul., 1997大气 CO₂ 浓度增加对春小麦冠层温度、蒸发蒸腾与土壤剖面水分动态影响的试验研究康绍忠^{1,2)} 蔡焕杰¹⁾ 梁银丽²⁾
马清林¹⁾ 胡笑涛¹⁾ 张富仓¹⁾

1) 西北农业大学农业水土工程研究所, 陕西杨陵, 712100

2) 中国科学院、水利部水土保持研究所, 陕西杨陵, 712100

5512.101

A

摘要 根据 1994~1995 年在大型人工气候室内取得的试验资料, 分析了大气 CO₂ 浓度倍增条件下, 春小麦冠层温度、蒸发蒸腾和根层土壤剖面水分动态的变化状况。结果表明, 大气 CO₂ 浓度增加 1 倍, 春小麦冠层温度明显升高, 且高水分条件升高的值比低水分条件下大 0.7℃ 左右; 蒸发蒸腾减少的幅度在不同土壤水分处理间也不相同, 高水分处理的蒸发蒸腾量减少 9.88%, 低水分处理的减少 8.50%, 根层土壤剖面水分消耗减小, 高 CO₂ 浓度处理的根层土壤含水率高于低 CO₂ 浓度处理的, 特别是在底部根系密度减小, 其水分消耗明显减少。

关键词 CO₂ 浓度, 冠层温度, 蒸发蒸腾, 根系分布, 根层土壤含水率。

春小麦

EXPERIMENTAL RESEARCH ON EFFECTS OF THE ATMOSPHERIC CO₂ CONCENTRATION INCREASE ON THE CANOPY TEMPERATURE, EVAPOTRANSPIRATION AND SOIL MOISTURE DISTRIBUTION IN ROOT ZONE OF SPRING WHEAT

Kang Shaozhong^{1,2)} Cai Huanjie¹⁾ Liang Yinli²⁾
Ma Qingling¹⁾ Hu Xiaotao¹⁾ Zhang Fucang¹⁾(1) Institute of Soil and Water Engineering, Northwestern
Agricultural University, Yang Ling Shaanxi, 712100, China(2) Institute of Soil and Water Conservation Chinese Academy
of Science, Yang Ling Shaanxi, 712100, China

Abstract This paper analyses the effects of the atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentration increase on canopy temperature, evapotranspiration rate, and soil moisture distribution.

• 本研究获得霍英东基金和中国科学院“百人计划”项目的资助。

收稿时间: 1996-09-09, 修改稿收到时间: 1996-05-03。

bution in root zone of the spring wheat, based on the data measured in the artificial climate houses during 1994~1995. The results show that the canopy temperature increased by 1.4~2.7℃ with the doubling of CO₂ concentration under sufficient soil water supply, but it increased only by 0.7~2.0℃ in soil water deficit condition. The average evapotranspiration decreased by 9.88% with sufficient soil water supply, and by 8.5% under soil deficit condition. With the same water supply, the soil water content in root zone increased with the doubling of CO₂ concentration.

Key words: carbon dioxide concentration, canopy temperature, evapotranspiration, root distribution, soil moisture in root zone.

由于 CO₂ 气体是绿色植物光合作用过程中利用碳的唯一来源,因此全球大气 CO₂ 浓度的上升会明显地影响植物的生产力。大量的事实表明,大气 CO₂ 浓度增加是由于石化燃料的加速使用、工业污染和废气排放,森林退化、木材燃烧和土壤腐殖质的衰退而造成的^[1,2]。在本世纪初大气 CO₂ 的水平大约在 260~290 μmol·mol⁻¹ 的范围^[3]。到 1958 年就达到了 315 μmol·mol⁻¹, 现在已超过了 350 μmol·mol⁻¹^[4]。预计在下一世纪内大气 CO₂ 浓度将会在目前的水平下增加一倍^[5]。不管有关气候变化的争论的最终结果如何,自然的和农业生态系统中的植被都将会受到 CO₂ 浓度增加的直接影响^[6]。

近十多年,有关此方面的研究主要集中在 CO₂ 浓度增加产生的气候变化和对区域水分循环及作物生产的影响等方面。大量的研究已表明大气 CO₂ 浓度增加会增大作物水分利用效率、光合作用、生物量及产量^[7~14], 但过去的研究未能很好地把土壤-植物-大气作为一个整体来对待,在对大气 CO₂ 浓度增加对土-植-气系统中水分转化的影响方面还研究不够,在国内此方面的研究也才刚刚起步。本文将在以前研究的基础上,突出反映不同土壤水分条件下,冠层温度、作物蒸发蒸腾和根系分布及根区土壤含水率对 CO₂ 浓度增加的敏感性以及 CO₂ 浓度增加对整个土-植-气系统中水分运行的影响。这对于评价大气 CO₂ 浓度增加的农田水文效应,对农业用水效率的影响及制定相应的水分管理对策具有重要的意义。

1 试验研究方法

试验于 1994 年 4 月~1995 年 8 月在西北农业大学灌溉试验站大型人工气候室内进行,人工气候室内的 CO₂ 浓度设置 340 μmol·mol⁻¹ 和 680 μmol·mol⁻¹ 两个处理,以研究大气 CO₂ 浓度倍增条件下作物冠层温度、蒸发蒸腾与土壤剖面水分动态的变化。供试作物为春小麦,种植在高 41cm、直径 24.5cm 的圆形测筒内,测筒底部开有通气孔。为了研究不同 CO₂ 浓度条件下的根层土壤剖面水分动态,还辅以直径 30cm、深 105cm 的圆柱形聚乙烯塑料容器,在四周对称每 10cm 深度开设一排小孔,以观测土壤水分和根系生长状况。人工气候室内除 CO₂ 浓度不同外,其温度、湿度、光照均保持相同,由人工气候室的微电脑自动监控,其控制条件与文献[8]相同。

每种 CO₂ 浓度下设高水分(土壤水分下限为 85% 田间持水量)、中水分(土壤水分下限为 65% 田间持水量)、低水分(土壤水分下限为 45% 田间持水量)3 种处理,以研究 CO₂ 浓度增加时土垫面不同土壤水分条件下作物冠层温度、蒸发蒸腾与土壤剖面水分动态的差异。每种土壤水分处理设 2 次重复。每 7d 测定 1 次测筒内土壤含水率变化和水分消耗量。用美国产 LI-6200 型便携式光合测定系统,每 7d 测定一次不同 CO₂ 浓度条件下各土壤水分处理叶片周围的环境温度、相对湿度、水汽压、光量子通量密度、CO₂ 浓度和叶面温度、叶室内的 CO₂ 浓度、CO₂ 扩散的气孔导度、水汽扩散的气孔导度与阻力、叶片光合速率与蒸腾速率等 12 个因素的日变化。用美国产 AG-42 型手持红外测温仪测定不同处理的冠层温度日变化,每 7d 测定一次。测定日变化时从 8:00~18:00 每小时测定一次,此外,还观测土柱内不同深度的土壤含水率动态变化及春小麦的株高和叶面积等生长发育状况。

2 大气 CO₂ 浓度增加对春小麦冠层温度的影响

冠层温度是环境(大气、土壤水分)和植物体内部因素共同影响冠层能量平衡的结果。作物冠层温度与能量的吸收和释放过程有关,作物冠层吸收太阳辐射能,这种能量转换成热能,作物蒸腾将会消耗一部分热能,剩余的热能会使冠层温度升高。因此,在高水分条件下的冠层温度较低,在低水分条件下,蒸腾会减少,所消耗的潜热亦会减小,感热增加,冠层温度会增加。表1中列出了春小麦生育期内3次典型的测定结果,从中可看出,在相同土壤水分条件下,大气 CO_2 浓度增加1倍,冠层温度(T_c)明显增加,冠层-空气温差(T_c-T_a)明显减小;在同一大气 CO_2 浓度条件下,高水分处理的冠层温度明显低于低水分处理的,而冠层-空气温差明显高于低水分处理的。大气 CO_2 浓度由 $340\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 增加到 $680\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时,高水分处理的冠层温度平均增加 $1.4\sim 2.7^\circ\text{C}$,低水分处理的冠层温度平均增加 $0.7\sim 2.0^\circ\text{C}$;大气 CO_2 浓度倍增后,高水分处理的冠层-空气温差平均下降 $0.8\sim 2.7^\circ\text{C}$,低水分处理的平均下降 $0.6\sim 1.8^\circ\text{C}$ 。这表明春小麦冠层温度对大气 CO_2 浓度增加的敏感性与土壤水分条件有关,在高水分条件下,气孔对 CO_2 浓度增加反应敏感,因而冠层温度增加较大;在低水分条件下,气孔主要由水分起控制作用, CO_2 浓度的影响变为次要因素,因此 CO_2 浓度倍增时,低水分处理的冠层温度增高的幅度小于高水分条件的。在 CO_2 浓度倍增时,冠层温度的变化结果与文献[8]报道的单个叶片的温度变化结果不同,冠层温度的变化更具有代表性。

表1 大气 CO_2 浓度增加春小麦冠层温度的变化(1995)

Table 1 Effect of the atmospheric carbon dioxide (CO_2) increase on spring wheat canopy temperature

日期 Date	大气 CO ₂ 浓度	土壤水分处理	温度 ° (C) Temperature	测定时间(h)						
	(μmol · mol ⁻¹)	Soil water		The time when measuring						
	Carbon dioxide	Treatment		8 : 00	10 : 00	12 : 00	14 : 00	16 : 00	18 : 00	
4 月 17 日	340	高水分	T_c	9.3	6.4	9.9	12.7	12.1	12.6	
			T_c-T_a	-3.5	-6.0	-4.4	-4.7	-4.2	-4.3	
		低水分	T_c	10.4	8.2	10.6	14.1	14.3	14.8	
			T_c-T_a	-2.3	-2.8	-2.0	-2.1	-1.5	-1.8	
	680	高水分	T_c	8.2	8.8	12.0	14.2	16.2	17.7	
			T_c-T_a	-5.4	-4.3	-3.4	-2.7	-0.3	0.2	
4 月 24 日		340	低水分	T_c	8.4	9.9	14.0	16.5	18.1	19.3
				T_c-T_a	-4.2	-2.2	-0.9	0	1.2	1.7
	高水分		T_c	10.3	9.0	11.4	14.3	16.0	16.4	
			T_c-T_a	-3.6	-5.3	-7.5	-6.2	-3.7	-3.5	
	680	低水分	T_c	10.5	11.0	11.5	15.4	17.2	17.6	
			T_c-T_a	-3.6	-3.5	-5.7	-5.0	-1.7	-2.3	
5 月 15 日		340	高水分	T_c	9.8	10.7	11.8	15.1	15.5	17.5
				T_c-T_a	-5.4	-5.2	-5.4	-6.7	-3.2	-2.9
	低水分		T_c	9.9	11.3	12.5	16.4	15.9	18.1	
			T_c-T_a	-4.7	-3.5	-3.8	-4.7	-2.6	-1.7	
	680	高水分	T_c	8.8	11.6	14.9	17.4	18.1	18.2	
			T_c-T_a	-11.0	-8.2	-6.8	-6.3	-6.6	-6.3	
5 月 15 日		340	低水分	T_c	9.8	12.3	15.2	19.7	18.3	18.6
				T_c-T_a	-8.5	-6.5	-5.3	-4.7	-4.8	-4.5
	高水分		T_c	10.0	13.1	16.9	19.3	20.9	20.0	
			T_c-T_a	-12.8	-8.3	-6.7	-5.4	-5.1	-3.4	
	680	低水分	T_c	9.3	12.3	16.3	18.7	20.1	19.5	
			T_c-T_a	-10.9	-7.8	-5.3	-5.2	-4.6	-3.3	

* T_c 是冠层温度, T_c-T_a 是冠层与大气的温差。

3 大气 CO_2 浓度增加对春小麦蒸发蒸腾的影响

CO_2 浓度对蒸发蒸腾的影响主要是通过气孔运动的影响来实现的。大气 CO_2 浓度增大,使气孔开度减小,相应的作物蒸腾减小,从而使作物总蒸发蒸腾也减小。但另一方面,大气 CO_2 浓度增加,作物水分利

用效率增大,叶面积明显增加,使蒸腾的面积增大。实验结果(表 2)表明,大气 CO₂ 浓度倍增所诱发的气孔开度减小和叶面积增大,对春小麦蒸发蒸腾的影响,是使蒸发蒸腾减小。其减小的幅度在不同阶段和不同土壤水分条件间有所差异。前期减小的幅度比后期大;高水分条件减小的幅度比低水分条件的要大。如 1994 年当大气 CO₂ 浓度倍增时,其生育期内的总蒸发蒸腾量在高水分条件下减小 10.61%,在低水分条件下减小 9.30%;1995 年高水分条件下减小 9.15%,低水分条件下减小 7.70%。两年的结果基本一致。

表 2 大气 CO₂ 浓度增加对春小麦蒸发蒸腾的影响Table 2 Effect of the atmospheric carbon dioxide (CO₂) increase on spring wheat evapotranspiration

年份 Year	日期 Date	CO ₂ 浓度 Carbon dioxide concentration			
		340 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$		680 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	
		高水分 High soil moisture	低水分 Low soil moisture	高水分 High soil moisture	低水分 Low soil moisture
1994	4 月 30 日~5 月 8 日	37.30	31.20	32.79	29.07
	5 月 8 日~5 月 19 日	37.33	32.88	32.45	29.12
	5 月 19 日~5 月 25 日	39.92	33.42	35.88	28.16
	5 月 25 日~5 月 31 日	39.52	28.82	36.59	28.22
	合计 Total	154.07	126.32	137.71	114.57
1995	4 月 22 日~4 月 30 日	42.63	33.24	38.27	31.03
	4 月 30 日~5 月 8 日	43.28	36.03	38.13	31.84
	5 月 8 日~5 月 19 日	46.17	40.62	43.13	36.04
	5 月 19 日~5 月 26 日	47.28	40.11	42.26	37.89
	5 月 26 日~6 月 1 日	49.36	37.34	46.01	36.11
	合计 Total	228.72	187.34	207.80	172.91

* 表中数据单位为 mm。

出现这一现象的原因是由高水分过渡到低水分,气孔开度的控制因素逐渐由大气 CO₂ 浓度转变为土壤水分条件,所以低水分条件下,CO₂ 浓度倍增,蒸发蒸腾减小的幅度低于高水分条件的。

4 大气 CO₂ 浓度增加对根层土壤水分动态的影响

根层土壤水分动态变化可用如下数学模型描述:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial Z} - S_r(Z, t) \quad (1)$$

定解条件为:

$$\theta(Z, t)|_{t=0} = \theta(Z, 0) \quad (2)$$

$$-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial Z} + K(\theta)|_{Z=0} = -E_s(t) \quad (3)$$

$$\theta(Z, t)|_{Z=d} = \theta(d, 0) \quad (4)$$

作物根系吸水速率 $S_r(Z, t)$ 与蒸腾具有如下关系:

$$T(t) = \int_0^{Z_r} S_r(Z, t) dz \quad (5)$$

式中, θ 是容积含水率 (cm^3/cm^3), Z 是深度坐标 (cm), t 是时间 (h), $D(\theta)$ 是土壤水分扩散率 (cm^2/h), $K(\theta)$ 是导水率 (cm/h), $S_r(Z, t)$ 是根系吸水速率 (h^{-1}), $E_s(t)$ 是棵间土壤蒸发速率 (cm/h), $T(t)$ 是蒸腾速率 (cm/h), Z_r 是根系层深度 (cm), d 是下边界距地表的距离 (cm)。

只要给定大气 CO₂ 浓度增加时 $T(t)$ 的变化,即可由以上方程模拟大气 CO₂ 浓度增加时的土壤水分变化状况。

从式(5)可知, t 时段内根系从土壤中吸收的总水量等于蒸腾量。因为大气 CO₂ 浓度增加,使蒸发蒸腾减小,根系吸水减小。因此,从式(1)可知,土壤水分变化减慢,即大气 CO₂ 浓度增加时,根系层剖面的土壤含水率在相同水分处理(即外界降水和灌水相同)时略有增大。图 1 给出 1995 年春小麦生育期内不同 CO₂ 浓度条件下实测的土壤水分动态,从中可以看出,CO₂ 浓度为 680 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的比 340 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的根

层土壤水分消耗变小,而且 $340\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的春小麦吸收底部的土壤水分数量明显高于 $680\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的,这主要是因为在大气 CO_2 浓度增加时,相同土壤水分处理条件下,春小麦根系分布明显不同;低 CO_2 浓度时,春小麦根系密度分布在底部较大(表 3),因此,根区土壤水分在底部消耗较多。

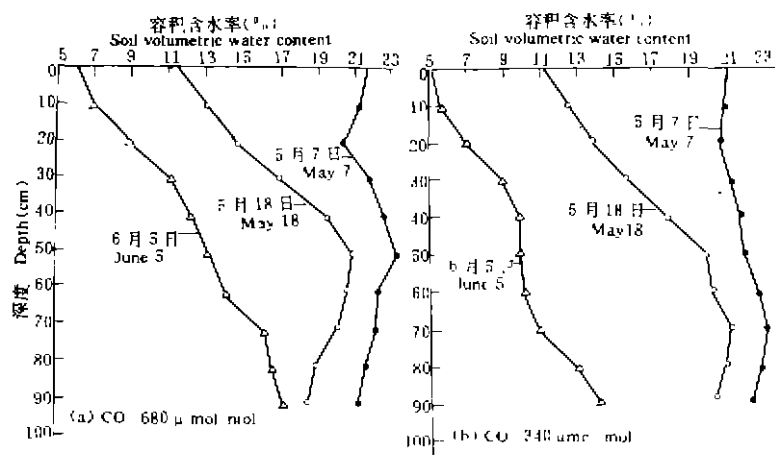


图 1 不同 CO_2 浓度条件下春小麦根层土壤水分动态变化(1995)

Fig. 1 Effect of the atmospheric carbon dioxide (CO_2) increase on soil moisture distribution in spring wheat root zone(1995)

5 结论

5.1 大气 CO_2 浓度倍增条件下,春小麦冠层温度明显升高,其中高水分处理的升高 $1.4 \sim 2.7^\circ\text{C}$,低水分处理的升高 $0.7 \sim 2.0^\circ\text{C}$ 。因此,从农田能量平衡状况看,大气 CO_2 浓度增加,感热所占的比例明显增大。

5.2 大气 CO_2 浓度倍增条件下,蒸发蒸腾减小的幅度在不同土壤水分处理也不同,高水分处理的减小 9.88% ,低水分处理的减小 8.50% 。另外,对于同一水分处理,前期减小的幅度略大于后期减小的幅度。不同年份的试验结果基本一致。

5.3 大气 CO_2 浓度倍增条件下,当外界降水和灌水总量相同时,根系层土壤含水率有所增加,对 80cm 以下深层土壤水分的利用量有所下降。在低 CO_2 浓度时,作物根系分布密度在 40cm 以下的底部较大,而高 CO_2 浓度时,在上部 40cm 土层较大。

表 3 大气 CO_2 浓度增加对春小麦根系密度分布的影响

Table 3 Effect of the atmospheric carbon dioxide (CO_2) increase on spring wheat root density distribution

深度 Depth (cm)	不同 CO_2 浓度时的根系密度 Root density distribution of different CO_2 concentration ($\text{t} \cdot \text{t}^{-1} \text{g}/\text{cm}^3$)	
	$340\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	$680\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$
0~10	14.85	16.09
10~20	6.38	6.97
20~40	3.03	3.22
40~60	4.61	3.74
60~80	2.59	2.03
80~100	2.36	1.10

* 成熟时的干密度,指单位体积土壤的根干重

参 考 文 献

- 1 Pearman G I. The global carbon cycle and increasing levels of atmospheric carbon dioxide. In: Pearman G. I. (Editor), *Carbon Dioxide and Climate: Australia Research*. Aust. Acad. Sci. Canberra, ACT. 1980, 11~20
- 2 Keeling C D, Bacastow R B, Carter A F, et al. A three dimensional model of atmospheric CO_2 transport based on observed winds: observational data and preliminary analysis. In: *Aspects of climate variability in the Pacific and the*

- Western Americas. *Geophys. Monogr.*, 1989, **55**:165~235
- 3 Bolin B D, Doos B R, Jager J. *Scope 29—The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems*. Wiley, Chichester, 1986, 541
 - 4 Bacastow R B, Keeling C D and whorf T P. Seasonal amplitude increase in atmospheric CO₂ concentration at Maunaloa, Hawaii, 1959~1982. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**:10529~10540
 - 5 Gribbin J. The politics of carbon dioxide. *New Sci.*, 1981, **90**:82~84
 - 6 Idso S B. *Carbon Dioxide and Global change, Earth in Transition*. IBR Press, Tempe, AZ, 1989, 292
 - 7 Aston A R. The effect of doubling atmospheric CO₂ on streamflow. *Journal of Hydrology*, 1984, **67**: 273~280
 - 8 康绍忠等. 大气 CO₂ 浓度增加对春小麦水分利用与蒸发蒸腾的影响. *西北农业大学学报*, 1995, **23**(3):1~5
 - 9 Keith E I, Sherwood B I. Plant responses to atmosphere CO₂ enrichment in the face of environmental constraints, a review of the past 10 years research. *Journal of Agric. and Forest Meteorology*, 1994, **69**:153~203
 - 10 Hunsaker D J, Hendray G R, Kimball B A, et al. Cotton evapotranspiration under field conditions with CO₂ enrichment and variable soil moisture regimes. *Journal of Agric. and Forest Meteorology*, 1994, **70**:247~258
 - 11 Chaudhuri U N, Kirkham M B and Kanemasu E T. Carbon dioxide and water level effects on yield and water use of winter wheat. *Agron. J.*, 1990, **82**: 637~641
 - 12 Allen Jr L H. Plant responses to rising carbon dioxide and potential interactions with air pollutants. *J. Environ. Qual.*, 1990, **19**:15~34
 - 13 Allen R G, Gichuki F N and Rosenzweig C. CO₂-induced climatic changes and irrigation water requirements. *J. Water Res. Plann. Manage.*, ASCE, 1991, **117**(2):157~178
 - 14 Dahlman R C. CO₂ and plants; revisited. *Vegetatio*, 1992, **104**: 1~17