水稻与冬小麦对臭氧的反应及其敏感性试验研究*

白月明 郭建平 王春乙 温 民
(中国气象科学研究院 北京 100081)

摘 要 利用OTC-1型开顶式气室对我国主要粮食作物水稻、小麦进行不同O_3浓度的长期接触试验结果表明、O_3浓度增加可促进水稻发育,小麦前期发育缓慢,后期转老加快。水稻和小麦灌浆期缩短、株高下降;随着通气时间的延长,干物质量降低。小麦叶片含水率呈抛物线型下降、但对水稻影响不大;在同样高浓度O_3环境下水稻叶片受害较小麦晚、发展慢;O_3浓度增加,单株产量和千粒重下降,且小麦减产幅度大于水稻。小麦对O_3的反应比水稻敏感。

关键词 水稻 冬小麦 臭氧 敏感性

The reaction and sensitivity experiment of O_3 on rice and winter wheat BAI Yue-Ming, GUO Jian-Ping, WANG Chun-Yi, WEN Min (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081), *CJEA*, 2002, 10(1): 13~16

Abstract The long-term experiments of different O_3 concentrations on main food crops in China are conducted by using OTC-1 top-opened chambers. The results show that increasing O_3 concentration would promote rice development. The winter wheat development would be slow in early days, but fast in late time. The milk duration and plant height of rice and wheat would be shortened. The dry biomass would be decreased with the prolong of ventilation time. The water content in leaf of winter wheat would be decreased as parabola type, but there is small impact on rice. Under the same higher O_3 concentration environment, the beginning date of rice leaf injured by ozone was later than winter wheat, and the injury development slowl. With the O_3 concentration increasing, the yield of per plant and thousand grains weight would be decreased, and the loss scale of winter wheat yield by ozone is greater than that of rice. The reaction of winter wheat to O_3 concentration is more sensitive than that of rice.

Key words Rice, Winter wheat, Ozone, Sensitivity

水稻和小麦是我国主要粮食作物,种植面积占粮食作物总面积的56%,产量占粮食总产量的66%(1989年),O_3浓度增加对水稻和小麦作物影响较大[1~6]。因此,研究水稻和小麦对O_3的反应有重要的意义。1999年本研究利用OTC-1型农田开顶式气室对冬小麦和水稻进行了不同浓度O_3长期熏气试验,利用其中部分资料分析了水稻和小麦对O_3反应的差异,探讨二者对O_3反应的敏感性问题、估算O_3造成的损失并提供水稻和小麦作物种植面积的参考比例。

1 试验设计与方法

试验采用盆栽法,盆口直径36cm,高26cm。供试冬小麦"京冬6号"于1999年3月31日移入气室,4月3日~6月3日通气;水稻"中作97"同年6月9日移栽,每盆20株(5穴),7月11日~9月20日通气,通气时间为每天9:00~16:00。

实验O_3浓度为8.93nmol/L(处理A或a)、4.46nmol/L(处理B或b)、2.23 nmol/L(处理C或c),过滤处理(过滤掉背景环境中的O_3,其O_3浓度约相当于0.45nmol/L,为处理D或d)和对照(1.12~1.78nmol/L,处理E或e)5个处理(为叙述方便,以下用处理A、处理B、处理C、处理D、处理E表示冬小麦和用处理a、处理b、处理c、处理d、处理e表示水稻的5种浓度处理)。供试O_3用高纯度O_2经QHG-1型高频O_3发生器生成,气室内浓度用HORIBA-AMBIENT O_3监测仪监测。试验观测项目主要有作物发育期、株高、各器官生物量干(鲜)物质量、叶片伤害状况以及叶片光合、蒸腾速率、气孔阻力、气温、叶温、CO_2浓度等生理生态参数。

* 国家自然科学基金重大资助项目(49899270)部分研究内容
收稿日期:2000-08-31 改回日期:2000-11-26

2 结果与分析

2.1 O_3 浓度对作物发育进程的影响

不同 O_3 浓度下水稻和冬小麦的发育期及株高见表1，由表1可知，处理a和处理b在整个试验期内各发育期平均比处理e分别提前2d和1d，处理c在试验中期（抽穗～开花）比处理e提前2～3d，处理d和处理e差异不大。处理A在开花期以前比处理E推迟1～3d进入发育期，乳熟期以后提前5～7d；处理B在抽穗前比处理E推迟约1d，开花后平均提前2d。由此可知，O_3 浓度达4.46nmol/L以上时对水稻发育有促进作用，使发育期提前；小麦则表现为前期发育缓慢，后期衰老加快。水稻和小麦在8.93nmol/L和4.46nmol/L O_3

表1 不同 O_3 浓度下水稻与冬小麦发育期及株高的变化

Tab 1 The variations of the development periods and height of rice and winter wheat in different O_3 concentrations

作物 Crop	处理 Treatments	拔节/d Jointing	株高/cm Height	孕穗/d Booting	株高/cm Height	抽穗/d Heading	株高/cm Height	开花/d Blooming	株高/cm Height	乳熟/d Milk maturity	株高/cm Height	成熟/d Maturity	开花～成熟/d Blooming-Maturity	拔节～成熟/d Jointing-Maturity
水稻	a	-3	+2.2	+1	-4.1	0	-5.8	-2	-9.0	-4	-3.4	-3	47	67
	b	-2	+4.5	-1	-3.2	+1	+10.0	-1	-2.5	-2	-0.7	-3	46	66
	c	0	+3.6	0	-4.8	-2	-4.9	-3	+2.2	0	-0.2	0	51	67
	d	0	+1.4	+1	-3.9	+1	-4.4	0	+2.4	0	+2.3	0	48	67
	e	07-29	67.0	08-08	78.1	08-14	85.4	07-17	88.8	09-24	94.2	10-04	48	67
冬小麦	A	+1	-0.6	+1	-0.8	+3	-7.7	+1	-6.6	-7	-8.1	-5	30	47
	B	0	-0.4	+1	-0.7	+1	+3.8	-2	-4.3	-1	-4.9	-3	33	49
	C	0	+0.5	0	-0.4	+1	+0.8	-1	-1.5	0	-1.1	0	35	53
	D	-1	+1.1	0	+0.1	+1	+5.5	-1	-3.7	0	-0.9	0	35	53
	E	04-13	27.5	04-16	23.8	04-28	54.9	05-05	68.9	06-02	71.5	06-08	34	53

浓度下成熟期均比对照提前，造成灌浆期缩短，是导致产量下降的原因之一。O_3 浓度增加可抑制水稻和小麦植株高度，浓度越高，通气时间越长则影响越大。处理A、处理B分别在通气约15d（拔节期）和35d（抽穗期）下降，开花期对 O_3 反应最敏感，株高分别下降9.0cm和2.5cm，2处理株高均比处理E降低，敏感期为乳熟期，分别下降8.1cm和4.9cm。

2.2 O_3 浓度对作物根重的影响

处理a和处理A的根重始终低于对照，且均在成熟期影响最显著，分别比对照下降41.5%和60.9%，小麦比水稻反应更敏感（见表2）。处理b除仅通气初期和乳熟期比处理e高外，其余均比处理e低，试验期间平均降低68%，处理B通气初的20d内高于处理E，随着通气时间延长而逐渐下降，至成熟期降到最低，下降36.1%。

表2 不同 O_3 浓度下水稻、冬小麦根重比对照相对减少率

Tab 2 The decreasing rate of the root weight of rice and winter wheat in different O_3 concentrations (compared contrast)

取样日期（月-日） Date of sample (month-day)	水稻 Rice 处理a/% Treatment a	处理b/% Treatment b	处理c/% Treatment c	处理d/% Treatment d	处理e/% Treatment e	取样日期（月-日） Date of sample (month-day)	冬小麦 Winter wheat 处理A/% Treatment A	处理B/% Treatment B	处理C/% Treatment C	处理D/% Treatment D	处理E/% Treatment E
07-21	-0.4	11.3	25.6	0.7	1.046	04-11	-3.3	19.9	18.5	-15.3	0.953
08-01	-11.5	-0.5	15.4	29.3	1.373	04-21	-5.8	2.5	14.9	3.4	1.318
08-11	-21.3	-5.8	2.1	8.1	2.139	05-01	-10.4	-7.2	3.1	5.1	1.695
08-21	-30.3	-14.0	-0.3	20.5	2.479	05-11	-31.2	-30.3	-24.4	-16.4	2.318
09-01	-24.1	-22.0	0.6	18.1	2.199	05-21	-34.0	-27.4	-12.1	9.2	2.140
09-11	-22.5	-11.4	-6.5	7.8	2.619	06-01	-60.9	-31.6	-1.6	20.3	2.138
09-21	-30.5	-4.5	-6.3	5.1	2.361	06-05	-57.2	-36.1	59.0	22.6	1.819
10-01	-41.5	-16.1	14.3	12.6	1.975	平均	-29.0	-15.7	8.2	4.1	-
平均	-23.2	-6.8	5.6	11.8	-						

2.3 O_3 浓度对作物地上生物量的影响

水稻和小麦在不同 O_3 浓度下地上部分干物质量变化曲线见图 1。由图 1(a)可知，当水稻受 8.93 nmol/L和 4.46nmol/L O_3 浓度影响时，整个试验期内地上部分干物质量明显比处理 e 下降、下降最多时则分别低 40.1% 和 13.7%。图 1(b)表明，小麦在 O_3 浓度≤2.23nmol/L 时各处理地上部分干物质量曲线与处理 E 相似；处理 B 和处理 A 呈抛物线形下降，浓度越大则下降越多。处理 A 和处理 B 在收获时与处理 E 相差最多，分别下降 68.4% 和 43.5%。由此可知，O_3 对小麦地上部分干物质量的影响比水稻大。

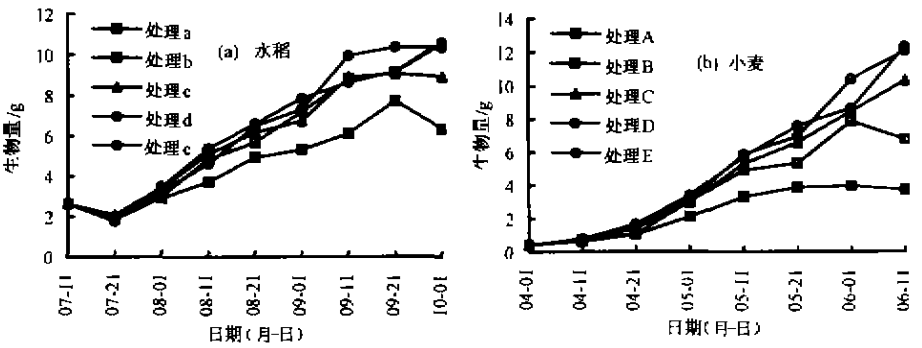

图 1　不同 O_3 浓度下水稻与小麦地上部分生物量差异

Fig.1　The variations of ground-biomass of rice and winter wheat in different O_3 concentrations

2.4 O_3 浓度对作物叶片含水率的影响

在低 O_3 的条件下水稻与小麦叶片含水率变化呈相同趋势，但水稻比小麦均低 14%(见图 2)。当 O_3 浓度达 8.93nmol/L 和4.46nmol/L时，随通气时间的延长作物叶片含水率下降，处理 A 下降较多，下降最大值比处理 E 低 40%；而水稻在此浓度下基本呈平行于处理 e 且与之变化趋势相似；含水率虽比处理 e 低，但最多时仅相差 5%，这表明水稻叶片含水率对 O_3 浓度大小和通气时间延长的反应不如小麦敏感。

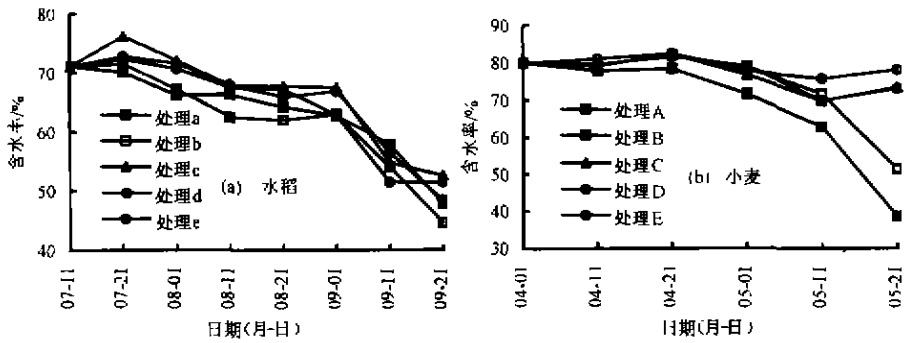

图 2　不同 O_3 浓度处理下水稻与小麦叶片含水率曲线

Fig.2　Water Content ratio of leaf of rice and wheat in different O_3 concentrations

2.5 高浓度 O_3 对作物叶片的伤害

大气中 O_3 浓度升高对作物叶片将产生伤害(见表 3)，由表 3 可知，在相同高浓度时小麦比水稻早出现可见症状，叶片首先退绿并伴随出现褐色斑点、斑块。8.93nmol/L O_3 浓度时小麦比水稻早 4～5d 受害，4.46nmol/L O_3 浓度时早2d；8.93nmol/L O_3 浓度时小麦比水稻早约 10d 达中等伤害，小麦受重害时间比水稻早 15～20d，随着伤害加重，小麦重害叶片出现严重失水干枯；而水稻则先退绿，继而出现大面积锈斑，但主叶脉和小叶脉不易受伤害，既使到生长后期其叶脉仍保持正常颜色，并无干枯现象。受害植株脱离 O_3 环境后，小麦黄化叶片可以恢复，而水稻锈斑叶片略有恢复。

表 3　高浓度 O_3 下冬小麦与水稻叶片受害情况

Tab.3　The change of rice and winter wheat leaf injurted by O_3 under different O_3 concentrations

作　物 Crop	O_3 浓度/nmol·L^{-1} Concentration	轻害(10%≤面积≤30%) Light injury	中害(30%≤面积≤50%) Middle injury	重害(>50%) Serious injury
冬小麦	8.93	通气后 5～6d，春生分蘖和底叶退绿，春生蘖叶尖干枯	通气 10d，3 龄叶退绿，且出现棕褐斑点	通气 15d，4 龄叶出现褐斑，部分叶片严重失水
	4.46	通气 15d，1～2 龄叶片退绿	通气 20d，3 龄叶退绿，出现少量褐斑	通气 28d，4 龄以下叶黄化，失水，干枯
水　稻	8.93	通气 10d，退绿，并出现大面积锈斑	通气 20d，5 龄叶有锈斑	通气 35d，整株受害，除旗叶退绿外，其余各叶均为锈斑
	4.46	通气 17d，1～2 龄退绿	通气 30d，4～5 龄叶出现锈斑，5 龄叶受害略轻	通气 45d，全株受害(旗叶及下一叶为退绿)

2.6 O_3 浓度对作物产量的影响

大气中 O_3 浓度增加，水稻和小麦产量及其构成各要素指标均有不同程度的下降(见表4)。由表4可知，在8.93nmol/L O_3 浓度下水稻单株产量各要素均明显降低，穗粒重下降最大，比处理e低32.5%，其次为产量；小麦单株产量下降最大，比处理E下降81%，为水稻的2倍，其次是千粒重，为处理E的59.9%。在4.46nmol/L O_3 浓度时小麦产量下降很大，比处理E低60.5%，是水稻的几十倍，此浓度对水稻影响不大。小麦在2.23nmol/L O_3 浓度时千粒重最高，比处理E高10.5%。并非浓度越低小麦产量越高，当 O_3 浓度<0.45nmol/L时水稻和小麦单株产量反而下降，水稻比小麦对低浓度 O_3 反应更敏感些。从灌浆情况看，高浓度 O_3 对小麦和水稻均有不利影响，8.93nmol/L 和4.46nmol/L O_3 浓度下水稻非正常灌浆率为11.7%和5.7%，小麦为100%和96.0%，而2.23nmol/L O_3 浓度下小麦灌浆最佳，水稻比过滤处理和4.46nmol/L O_3 浓度时表现差。根据以上试验分析，当 O_3 浓度为2.23nmol/L时即对水稻和小麦单株产量造成较大影响；当 O_3 浓度增加到8.93nmol/L时水稻减产近1/3，小麦减产4/5以上。由此可以推算，在8.93nmol/L O_3 浓度下小麦和水稻可减产4875kg/hm^2 和1800kg/hm^2，在4.46nmol/L O_3 浓度下则分别减产3600kg/hm^2 和150 kg/hm^2，因此从 O_3 对我国主要粮食作物影响角度出发，建议对水稻和小麦粮食作物播种面积调整为 O_3 浓度在2.23nmol/L时水稻和小麦大致可等量播种；O_3 浓度在4.46nmol/L以上时可大力增加水稻面积，减少小麦的播种面积。

表4 不同 O_3 浓度处理下水稻与小麦产量及其有关因素

Tab 4 The yields and it's factors of rice and wheat in different O_3 concentrations

作物 Crop	项目 Items	O_3 浓度/nmol·L^{-1} Concentration 8.93	4.46	2.23	0.45	1.12~1.78	作物 Crop	项目 Items	O_3 浓度/nmol·L^{-1} Concentration 8.93	4.46	2.23	0.45	1.12~1.78
水稻	单株产量/g	3.794	5.771	4.644	5.018	5.472	冬小麦	单株产量/g	1.198	2.526	5.467	6.108	6.397
	千粒重/g	19.035	25.108	24.305	25.505	25.414		千粒重/g	19.797	26.358	55.046	49.972	49.826
	穗粒数/粒	73.20	83.70	91.60	90.00	92.60		穗粒数/粒	18.80	24.10	24.20	28.90	26.00
	穗粒重/g	1.507	2.084	2.104	2.081	2.23		穗粒重/g	0.399	0.669	1.425	1.388	1.383
	1次枝梗数	9.20	10.00	9.90	9.60	10.70		小穗数/个	12.00	14.20	13.30	15.70	13.60
	空秕谷率/%	11.70	5.70	4.60	5.10	4.30		结实粒数/穗	0.00	4.00	99.00	89.00	94.30

参 考 文 献

1 王春乙等 臭氧浓度变化对我国主要作物产量的可能影响. 应用气象学报，1995，5(增刊)：69~74

2 王春乙等 二氧化碳、臭氧、紫外辐射与农作物生产 北京：气象出版社，1997，101~120

3 丁一汇等 痕量气体对我国农业和生态系统影响研究 北京：中国科学技术出版社，1995

4 齐玉春，董云社，章 申 农业微环境对土壤温室气体排放的影响 生态农业研究，2000，8(1)：45~48

5 沈 宏，曹志洪 温室气体及其生态效应，生态农业研究，1998，6(3)：21~24

6 Olszyk D. M Effects of sulfur dioxide and ambient ozone on winter wheat and lettuce J Environ. Qual 1986，15：363~369