

臭氧对水稻叶片伤害、光合作用及产量的影响^①

白月明 郭建平 刘玲 温民

(中国气象科学研究院,北京,100081)

提 要

利用 OTC-1 型农田开顶式气室,对水稻进行不同臭氧浓度处理的长期接触试验,结果表明:当试验浓度超过 100×10^{-9} 时将在水稻叶片造成直接伤害,从而使水稻的光合能力和产量降低。

关键词:臭氧 水稻 叶片伤害 光合 产量

引 言

水稻是我国主要的粮食作物,人们对影响水稻产量的主要农业气象条件光、温、水的研究较早较多,而对影响产量的另外一些条件如 O_3 、紫外辐射、 CO_2 等的研究起步较晚。20 世纪 40 年代美国“洛杉矶烟雾事件”^[1]引起欧美一些发达国家的关注,并相继开展了有关的研究工作^[2~5]。尤其是 1980 年美国农业部 and 环保局联合制定了“农作物损失评价网(NCLAN)”^[6],在全国进行了粮、油、经济、蔬菜等作物的较大规模的试验研究,取得了许多有价值的资料。虽然我国在该领域的研究起步较晚,但也作了大量重要的工作^[7~10]。国内外学者在 O_3 对作物影响的研究方法、影响和危害机理、防护措施、对生长和产量影响等方面做了较多工作,而利用农田开顶式气室对水稻同时进行多个 O_3 浓度的长期接触试验,并从直接伤害入手到影响光合作用及相关的生理生态因子、产量构成要素的研究相对较少。

本文利用我国自行设计的农田开顶式气室对水稻进行不同臭氧浓度处理的长期接触试验研究,就水稻对 O_3 的某些反应进行了诊断分析。

1 试验方法与与设计

试验在相同结构的 5 个 OTC-1 型农田开顶式气室^[11](建在河北省保定市固城中国

气象局农试站)内进行。采用口径 36cm、深 26cm 的花盆栽植,底孔用沥青塞实。水稻移栽时间为 1999 年 6 月 9 日,每盆 5 穴 20 株,盆中土壤肥力均匀。试验浓度为 200×10^{-9} 、 100×10^{-9} 、 50×10^{-9} 、过滤自然大气处理(O_3 浓度约 10×10^{-9}),另设一对照 CK,只通自然大气,浓度为 $25 \times 10^{-9} \sim 40 \times 10^{-9}$ 。

供试 O_3 用高纯氧气经 QHG-1 型高频臭氧发生器生成,并用 HOIRBA-AMBIENT O_3 监测仪进行浓度监测,整个试验期间浓度控制非常稳定。试验时间为 1999 年 7 月 11 日~9 月 20 日,每天 9~16 时通气。

观测内容有:发育期、株高、各器官干(鲜)重、叶片伤害状况,并用 LI-6200 型光合作用系统进行光合作用速率、叶片蒸腾、气孔阻力、气孔传导、叶温(T_L)、气温(T_A)、二氧化碳浓度(C_A)和叶内细胞二氧化碳浓度(C_I)等参数的测定。

2 结果分析

2.1 高浓度 O_3 对叶片的直接伤害

叶片伤害是高 O_3 含量大气对水稻影响的最显著特征之一。试验表明:当 O_3 浓度达到或超过 100×10^{-9} 时,将会对水稻产生直接伤害。

2.1.1 伤害类型及症状

O_3 对水稻的直接伤害有明显的器官选择性,主要表现在叶片(叶肉部分)上。可分为

① 国家自然科学基金重大资助项目,批准号(49899270)

3种类型:

I、退绿型:水稻在 $200 \times 10^{-9} \text{O}_3$ 浓度下处理约一周,或在 100×10^{-9} 下约半个月,即可见这种伤害。主要症状是叶尖和主叶脉两侧局部退绿变为淡绿,继续发展为大部叶片由淡绿转为黄化,退绿较慢,持续时间较长。

II、褐斑型:褐斑几乎与退绿同时发生,不同的是,褐斑型开始面积很小,在主叶脉两侧出现褐色小斑点,逐渐迅速密集起来,很快与退绿部分融合在一起。

III、水锈斑:在上述两种类型伤害出现若干天之后,叶片失去正常色泽,转为棕褐树皮色。这种类型伤害为退绿型和褐斑型综合叠加并发展而成。这种伤害持续时间最长,直到

成熟,而叶片无明显失水症状。锈斑有较弱的可恢复性。

2.1.2 伤害程度和发展过程

水稻叶片直接伤害是一个由缓慢到迅速发展的过程。试验中,根据叶片个体伤害面积(用 A_d 表示)大小和对植株影响轻重将伤害程度分为4级,即轻、中、重害和未受害;用受害叶片总数占被考察叶片总数的百分率 A_{ds} 表示群体受害程度(见表1)。叶片受害程度与通气时间长短、浓度大小和器官抗 O_3 能力关系密切(见表2)。

表1 水稻叶片个体和群体受害指标的规定

	轻害	中害	重害	未受害
单叶受害	$5\% \leq A_d < 10\%$	$10\% \leq A_d < 30\%$	$A_d \geq 30\%$	$A_d < 5\%$
群体受害	$10\% \leq A_{ds} < 30\%$	$30\% \leq A_{ds} < 50\%$	$A_{ds} \geq 50\%$	$A_{ds} < 10\%$

表2 两种高 O_3 浓度条件下水稻叶片直接伤害情况

观测时间	O_3 浓度 200×10^{-9}	O_3 浓度 100×10^{-9}
通气7天	中底部叶片叶脉两侧、叶尖开始变淡绿,所观察各叶片受害面积均小于5%,隐约可见褐色小斑点。受害叶片数达5%。	
通气8天	叶片上褐色小斑点密集成片,有的叶片伤害面积达10%,受害叶片达12%,属轻害。	
通气10天	受害面积扩大,部分叶片出现锈斑,大部分叶片受害面积大于25%,群体受害超过30%,为中等受害。	
通气15天	除顶部两叶外,其余叶片均受害(锈斑),受害面积>70%,受害叶数达80%,属重害。	1~2龄叶退绿,略有褐斑点。
通气20天	除旗叶外,其余叶片均受害(锈斑)。	受害加重,出现大面积锈斑,受害叶数>30%。
通气30~35天	全株受害,旗叶以退绿黄化为主,并有少量褐斑,其它叶均为锈斑型伤害。	中上部叶片锈斑较重,顶部两叶较轻。
通气45天		全株受害。

从表2可见,通气开始的几天, 200×10^{-9} 和 $100 \times 10^{-9} \text{O}_3$ 处理的水稻均无受害表现;通气7天后, 200×10^{-9} 叶片首先出现退绿斑;通气8天,叶片上的褐斑迅速蔓延;当通气10天后,叶片便有锈斑,叶片失去正常色泽,呈树皮色,并一直持续到成熟。而 $100 \times 10^{-9} \text{O}_3$ 处理的水稻,叶片受伤害比 200×10^{-9} 晚10天,全株完全受害时间也比 200×10^{-9} 晚大约10天。

2.2 O_3 对水稻叶片生理生态的影响

2.2.1 O_3 对水稻叶片含水率的影响

水稻叶片伤害阻碍了植株正常生长发

育,但叶片含水率无明显降低。叶脉始终保持正常颜色,从而对 O_3 的影响有一定的缓解作用。

图1为叶片含水率的变化,由图1可见,在不同浓度的 O_3 处理下,叶片含水率有与对照CK曲线相似的趋势变化。在 200×10^{-9} 下,水稻叶片含水率下降较其它处理多,降得最多时仅比对照低5%。而 50×10^{-9} 和过滤 (10×10^{-9}) 相对对照有增有减,但相差很少。总的看来,叶片含水率随通气时间延长下降不多,这主要与叶片上平行叶脉有较强的抗性和输导能力有关。叶片含水率的稳定变化

对解释水稻有较强的抗 O₃ 能力是重要的。

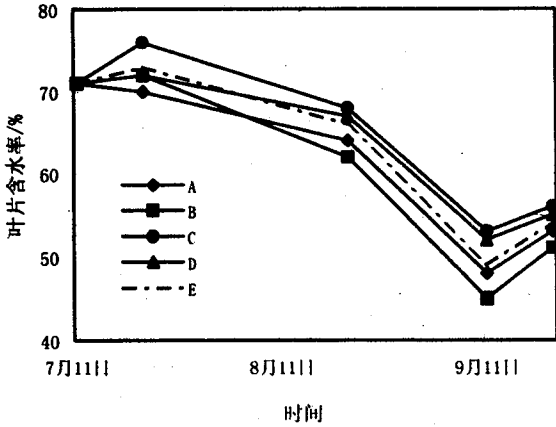


图1 水稻叶片含水率在不同 O₃ 浓度水平下随通气时间的变化曲线
A: 200 × 10⁻⁹; B: 100 × 10⁻⁹; C: 50 × 10⁻⁹;
D: 10 × 10⁻⁹; E: 对照

2.2.2 对 CO₂ 吸收的影响

从表 3 可知, O₃ 浓度增加对 CO₂ 的吸收有较大的影响。大气中二氧化碳浓度与叶肉细胞内二氧化碳浓度之差 (C_A-C_i) 越大, 则表明吸收 CO₂ 越少。当 O₃ 浓度为 200 × 10⁻⁹ 时, (C_A-C_i) 平均值为 16.0 × 10⁻⁶, 100 × 10⁻⁹ 时为 14.8 × 10⁻⁶, 分别比 CK 高 30.1% 和 20.3%。50 × 10⁻⁹ 和过滤处理 (10 × 10⁻⁹) 比 CK 略低。表明 CO₂ 摄入量基本是随 O₃ 浓度的增加而减少。

表3 不同 O₃ 浓度条件下环境 CO₂ 与叶肉细胞内 CO₂ 浓度梯度 (C_A-C_i) / 10⁻⁶

测定次序	200 × 10 ⁻⁹	100 × 10 ⁻⁹	50 × 10 ⁻⁹	过滤	CK
1	14	14	11	10	12
2	19	16	11	14	14
3	17	17	16	12	14
4	14	12	10	10	9
平均值*	16.0	14.8	12.0	11.5	12.3

注: 4 次测定共 55 个数据平均值, 测定时间分别为 1999 年 7 月 23、23、27、28 日。

2.2.3 对蒸腾、气孔传导、气孔阻力的影响

气孔是气体和水汽扩散进入叶内(或蒸

腾)的必经通道, 气孔的张开程度对 CO₂ 吸收有一定影响。表 4 是不同 O₃ 浓度下叶片蒸腾、气孔传导和气孔阻力相对对照变化率的 4 次平均值。由表 4 可知: (1) 气孔传导随 O₃ 浓度增加而下降, 200 × 10⁻⁹ 时气孔传导比对照 CK 下降 26.7%, 100 × 10⁻⁹ 时比 CK 下降 9.1%, 50 × 10⁻⁹ 时比 CK 略高(高 1.8%), 而浓度最低的过滤 (10 × 10⁻⁹) 处理下, 气孔传导则比 CK 高 3.4%。(2) 气孔阻力随 O₃ 浓度增加而增大, 过滤 (10 × 10⁻⁹)、50 × 10⁻⁹ 时分别比 CK 低 4.4% 和 1.9%, 100 × 10⁻⁹、200 × 10⁻⁹ 下分别比 CK 高 9.8% 和 20.8%。(3) 在不考虑其它影响因素时, 蒸腾基本与气孔阻力趋势相反, 与气孔传导趋势相同, 即随着 O₃ 浓度增加, 蒸腾减弱, 过滤 (10 × 10⁻⁹)、50 × 10⁻⁹、100 × 10⁻⁹、200 × 10⁻⁹ 处理分别比 CK 低 0.1%、3.0%、8.6% 和 13.9%。

表4 不同 O₃ 浓度下水稻叶片蒸腾、气孔传导和气孔阻力相对对照的变化率/%

	200 × 10 ⁻⁹	100 × 10 ⁻⁹	50 × 10 ⁻⁹	10 × 10 ⁻⁹
气孔传导 (mol · m ⁻² · s ⁻¹)	-26.7	-9.1	1.8	3.4
气孔阻力 (s · cm ⁻¹)	20.8	9.8	-1.9	-4.4
蒸腾速率 (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	-13.9	-8.6	-3.0	-0.1

2.2.4 对叶温 (T_L) 的影响

表 5 列出了不同 O₃ 浓度下气温 (T_A)、叶面温度 T_L 及气温与叶温差 (ΔT)。可见, 随着 O₃ 浓度增加, 叶温相对升高, 气温与叶温差下降。200 × 10⁻⁹、100 × 10⁻⁹ 叶温 9 次测定平均值分别为 35.4℃ 和 34.9℃。气温与叶温之差随着 O₃ 浓度增加而下降, 最高值出现在过滤处理 (4.9℃)。200 × 10⁻⁹、100 × 10⁻⁹、50 × 10⁻⁹、10 × 10⁻⁹ 分别为 2.2℃、3.0℃、3.8℃、3.9℃, 而通风的 CK 高于 200 × 10⁻⁹、100 × 10⁻⁹ 处理, 却低于 50 × 10⁻⁹ 和 10 × 10⁻⁹ 处理。叶温升高, 将加重 O₃ 对叶片的伤害。

表5 不同 O₃ 浓度下气温 T_A、叶温(T_L)、气温与叶温差(ΔT) / °C

	200×10 ⁻⁹			100×10 ⁻⁹			50×10 ⁻⁹			10×10 ⁻⁹			CK		
	T _A	T _L	ΔT	T _A	T _L	ΔT	T _A	T _L	ΔT	T _A	T _L	ΔT	T _A	T _L	ΔT
1	36.2	34.9	1.3	36.7	33.9	2.8	36.6	33.8	2.8	36.7	33.7	3.0	37.5	34.3	3.2
2	39.6	37.0	2.6	39.0	36.1	2.9	39.1	35.5	3.6	39.5	34.6	4.9	39.8	35.6	4.2
3	42.8	39.8	3.0	41.7	38.3	3.4	41.1	36.2	4.9	40.9	36.0	4.9	40.8	37.1	3.7
4	36.6	35.5	1.1	38.9	36.2	2.7	39.1	35.7	3.4	39.9	36.2	3.7	40.1	37.5	2.6
5	36.3	34.6	1.7	38.1	35.0	3.1	39.2	35.0	4.2	39.6	35.4	4.2	39.8	35.4	4.4
6	36.5	34.6	1.9	38.0	34.5	3.5	38.5	34.4	4.1	38.7	34.9	3.8	39.2	36.3	2.9
7	36.1	32.9	3.2	37.7	34.1	3.6	38.1	34.3	3.8	38.5	34.0	4.5	38.5	34.0	4.5
8	34.5	32.6	1.9	35.2	32.7	2.5	35.8	32.2	3.6	36.0	33.2	2.8	36.4	33.5	2.9
9	40.2	37.0	3.2	39.5	36.3	3.2	39.2	35.0	4.2	39.1	35.8	3.3	38.9	35.9	3.0
平均	37.6	35.4	2.2	38.3	35.3	3.0	38.5	34.7	3.8	38.8	34.9	3.9	39.0	35.5	3.5

注: Δt = T_A - T_L

2.2.5 对光合作用率的影响

表6是不同 O₃ 浓度下水稻叶片光合作用率。由表6可知, O₃ 浓度增加可使光合作用率降低, O₃ 浓度从 50×10⁻⁹→100×10⁻⁹→200×10⁻⁹变化时, 光合作用速率平均比对

照分别减少 2.2%、19.2%、46.3%。过滤(10×10⁻⁹)处理的光合作用最强, 比对照平均高 12.3%, 200×10⁻⁹处理的最弱。表6还表明: 随着 O₃ 浓度增加, 光合作用速率波动变小。

表6 不同 O₃ 浓度下水稻叶片光合作用率/μmol·m⁻²·s⁻¹

测定次序	200×10 ⁻⁹	100×10 ⁻⁹	50×10 ⁻⁹	10×10 ⁻⁹	对照 CK
1	11.288	17.435	19.211	22.895	20.037
2	11.778	16.068	20.605	20.492	20.314
3	11.566	15.843	22.600	27.129	23.715
4	11.145	19.827	21.841	25.657	21.562
4次平均值*	11.444	17.293	21.064	24.043	21.407

注: 4次测定共55个数据平均值, 测定时间分别为1999年7月23、23、27、28日。

O₃ 浓度增加使光合作用率下降, 这就意味着同化 CO₂ 量减少, 干物质积累将会下降。其原因除了叶片伤害降低 CO₂ 的吸收能力外, 植物对农业气象资源光、温、水的利用也受到影响。

2.3 水稻产量构成诸因素对 O₃ 的反应

O₃ 对水稻影响的最终结果是产量下降, 品质变劣。表7是不同 O₃ 浓度对产量构成各要素的影响。由表7可知, O₃ 浓度增加对水稻有效穗数有正效应, 200×10⁻⁹和 100×10⁻⁹时分别为 2.52个/株和 2.48个/株。

试验浓度达 200×10⁻⁹时, 每穗粒数、每穗粒重、一次枝梗数量和千粒重均大幅下降, 分别比 CK 低 21.0%、32.5%、14.0%和

25.1%, 然而, 空秕率却远远高于 CK, 空壳率比 CK 高 3 倍多, 秕谷率比 CK 高 16 倍。可见, O₃ 增加对开花—灌浆期的影响是很大的, 该浓度下可减产 30.7%。

当试验浓度为 100×10⁻⁹时, 尽管其有效穗数比 CK 高, 但其它要素(空秕率除外)均比 CK 低, 其总效果是产量比 CK 略有减少。

50×10⁻⁹时减产约 15%, 这主要是由于有效穗数最少, 而且千粒重又很低的缘故。

此外, 水稻收获指数(籽粒产量与总生物量之比)也与 O₃ 浓度有关, 其由大到小排列次序为: 过滤(10×10⁻⁹)→50×10⁻⁹→100×10⁻⁹→200×10⁻⁹→CK, 表明: 除 CK 外, 随

着 O₃ 浓度增加,籽粒产量比总生物量减少 响更显著。
的更多,即 O₃ 对籽粒影响比对总生物量影

表7 不同 O₃ 浓度对水稻产量构成各要素的影响

	200×10 ⁻⁹	100×10 ⁻⁹	50×10 ⁻⁹	10×10 ⁻⁹	对照 CK
有效穗数/个	2.52	2.48	2.21	2.41	2.45
一次枝梗数/个	9.2	10.0	9.9	9.6	10.7
每穗粒数/粒	73.2	83.7	91.6	90.0	92.6
每穗粒重/g	1.507	2.084	2.104	2.081	2.232
千粒重/g	19.035	25.108	24.315	25.505	25.414
空壳率/%	11.0	3.2	2.6	2.4	3.4
秕谷率/%	3.2	0.6	0.5	0.7	0.2
单株产量/g	3.794	5.171	4.644	5.018	5.472
减产率/%	30.7	5.5	15.1	8.3	—
收获指数	0.19	0.24	0.26	0.28	0.18

3 结 语

综上所述,可得到以下几点结论:

(1)叶片直接影响是高浓度 O₃ 下水稻受害的主要特征之一,并且伤害有明显的器官选择性;受害叶片无明显的失水症状,叶脉对 O₃ 有较强的抗性;

(2)O₃ 增加,可减弱叶片对 CO₂ 的吸收,使气孔阻力增加,传导降低,蒸腾减弱,并且, O₃ 增加还可使叶温上升;

(3)叶片光合速率及其变幅随 O₃ 增加而降低;

(4)O₃ 浓度增加越多,对产量影响越大,主要对有效穗数、穗粒数、穗粒重、空秕率有较大影响,200×10⁻⁹、100×10⁻⁹、50×10⁻⁹ 分别比 CK 减产 30.7%、5.5%、15.1%。而低浓度的过滤处理(10×10⁻⁹)也呈减产趋势,减产率为 8.3%。

参考文献

1 MiddletonJT. Effectofairpollutantsonplant. PlantDisease Pepr. , 1950, 34: 245—252.

2 ToddJG. Responsesofplantstoairpollution. PlantPhysiol. , 1958,27:435—459.

3 Sagar V K. Plant injury induced by ozone. Environmental Pollution, 1988,50:101—137.

4 Altshuller A P. Estimation of natural background of ozone present at surface rural locations. JAPCA,1986, 26:1409—1417.

5 Rich S. Ozone damage to plants. Am. Rev. Phytopathology. 1964,2:253—366.

6 Welter W H. Assessment of crop loss ozone. JAPCA, 1982,32:353—361.

7 王勋陵. 臭氧对植物的影响及防护. 环境科学,1983, 4:67~70.

8 唐孝炎. 大气环境质量标准中的光化学氧化剂. 中国环境科学,1984,4:68~72.

9 沈英娃. 臭氧对植物的影响. 生态学进展,5(4),1988.

10 王勋陵等. 臭氧引起植物落叶及生长物质防护效应的初步研究. 环境科学学报,2(3),1982.

11 王春乙. OTC-1 型开顶式的臭氧发生、控制与测量系统及物理性能评价. 应用气象学报,2000,8(3).

12 丁一汇,高素华. 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年,413~423.

13 王春乙,郭建平,郑有飞. 二氧化碳、臭氧、紫外辐射与农作物生产. 北京:气象出版社,1997年:101~120.

Influences of O₃ on the Leaf Injury Photosynthesis and Yield of Rice

Bai Yueming Guo Jianping Liu Ling Wen Min

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Using farmland open top chamber OTC-1, A long-time touch experiment with different O₃ concentrations was made. The results show that when the concentration of O₃ are higher than 100×10^{-9} , the leaf of rice would suffer direct injury, thereby reducing the photosynthetic capacity and yield.

Key Words: O₃ rice leaf injury photosynthesis yield