

DOI: 10. 11766/trxb201306170289

# 近地层臭氧污染对不同品种小麦钾素吸收与分配的影响\*

寇太记<sup>1,2</sup> 刘德鸿<sup>1</sup> 徐晓峰<sup>1</sup> 于伟伟<sup>1</sup> 朱新开<sup>3</sup> 朱建国<sup>2</sup>

(1 河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003)

(2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(3 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏扬州 225009)

**摘要** 近地层臭氧(O<sub>3</sub>)污染危害植物生长势必间接影响钾素吸收利用。利用中国稻—麦轮作开放式 O<sub>3</sub>FACE(Free-air O<sub>3</sub> concentration enrichment) 试验平台,研究了大气 O<sub>3</sub>浓度增加(较周围大气高 50%)对长江三角洲地区 5 个小麦(*Triticum aestivum* L.) 主栽品种(扬麦 15、扬麦 16、烟农 19、扬幅麦 2 号和嘉兴 002)的物质积累、钾素吸收与分配的影响。结果表明,O<sub>3</sub>升高对秸秆和籽粒的影响远大于根系。O<sub>3</sub>升高降低了扬麦 16、烟农 19 和嘉兴 002 的籽粒产量,但对扬麦 15 和扬幅麦 2 号几乎无影响。O<sub>3</sub>升高,扬幅麦 2 号和烟农 19 的秸秆生物量显著降低,扬麦 16 和扬麦 15、嘉兴 002 的秸秆生物量则分呈增加和降低趋势。表明 O<sub>3</sub>污染对小麦物质积累与分配的影响存在品种差异。烟农 19、扬麦 15 和嘉兴 002 小麦植株总吸钾量因 O<sub>3</sub>升高显著降低,而扬麦 16 和扬幅麦 2 号分呈降低与增加趋势。O<sub>3</sub>升高影响钾素在小麦根、秸秆和籽粒中的含量与分配趋势,但影响程度因品种而异。O<sub>3</sub>升高降低了钾素在扬麦 16、扬幅麦 2 号、烟农 19 和扬麦 15 根中分配比例,促进了其向地上部运移,而增加了钾素在嘉兴 002 根中分配比例,阻碍其向地上部的运移。表明小麦响应 O<sub>3</sub>污染对钾素吸收与分配调整机制存在品种差异。扬麦 16、烟农 19 和嘉兴 002 的钾素偏生产力因 O<sub>3</sub>升高而显著降低 13.2%~35.7%,而扬麦 15 和扬幅麦 2 号则无明显变化。嘉兴 002 的钾肥利用率因 O<sub>3</sub>污染显著降低和扬幅麦 2 号呈增加趋势,而扬麦 15、扬麦 16、烟农 19 则无明显变化。评价 O<sub>3</sub>污染对小麦物质积累分配、钾素在植物-土壤系统周转的影响应考虑品种差异。

**关键词** 臭氧浓度升高;钾素;干物质积累;偏生产力;钾利用效率

**中图分类号** S152.3;X171 **文献标识码** A

臭氧(O<sub>3</sub>)是重要的温室气体与大气污染物,近年化石燃料的大量使用与空气中氮氧化物(NO<sub>x</sub>)含量的剧增,造成近地层大气中 O<sub>3</sub>浓度迅速升高<sup>[1-2]</sup>,因其环境生态危害增大<sup>[3-4]</sup>,已成为公众密切关注的重要大气污染问题。O<sub>3</sub>污染危害粮食生产,每年世界范围内因 O<sub>3</sub>污染造成的农业损失巨大<sup>[3,5]</sup>。O<sub>3</sub>污染主要通过降低植株的光合速率<sup>[6]</sup>、影响物质积累<sup>[7]</sup>、加速植物老化<sup>[8-9]</sup>抑制植物生长与作物生产<sup>[7-9]</sup>。先前基于水稻、小麦作物的研究发现 O<sub>3</sub>胁迫可改变碳、氮、硫、磷等元素的吸收与分配<sup>[10-13]</sup>,同时也发现长期 O<sub>3</sub>污染将影响土壤的理化性状<sup>[14]</sup>,这表明臭氧污染可能影响包括钾素在内

的营养元素的地球生物化学循环。钾素作为植物生长必需的营养元素和多种酶的成分,在光合作用和光合产物运输<sup>[15]</sup>方面具有重要功能,能提高植物抗逆境胁迫能力<sup>[16]</sup>,但目前 O<sub>3</sub>污染对作物的钾素吸收与分配等代谢尚不清楚,制约了人们对钾素循环与钾素的逆境生态效应认知。小麦作为重要的粮食作物其安全生产事关我国粮食安全,本研究利用中国唯一的稻/麦轮作系统 O<sub>3</sub>FACE(Free-air O<sub>3</sub> concentration enrichment) 试验平台,研究大气臭氧增加对长三角地区 5 个主栽小麦品种钾素吸收、利用与分配的影响,阐明 O<sub>3</sub>污染下植物吸收利用钾素的特征与机制,为制定农田钾素管理措施确保小

\* 国家自然科学基金项目(41003030)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y052010030)、国家科技部国际科技合作计划项目(2009DFA31110)、中国科学院知识创新方向项目(KZCX2-EW-414)和中国科学院装备研制项目(YZ0603)联合资助

作者简介:寇太记(1975—),男,博士,副教授,主要从事碳氮物质循环与气候环境变化、逆境植物营养与农田生态研究。E-mail: tjkou@aliyun.com

收稿日期: 2013-06-17; 收到修改稿日期: 2013-09-15

麦安全生产提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于江苏省扬州市江都马陵村良种场(119°42'0"E, 32°35'5"N)。研究区年降水量 980 mm 左右, 年均蒸发量 > 1 100 mm, 年均温度 14.9 °C, 年均日照时间 > 2100 h, 年无霜期 220 d。土壤类型为下位砂姜土, 耕层土壤基础理化性状详见文献 [13], 耕作方式为水稻-冬小麦轮作。

### 1.2 试验平台简介

臭氧平台于 2007 年始运行, 设对照 (Ambient) 和臭氧污染处理 (O<sub>3</sub> FACE, 目标 O<sub>3</sub> 浓度为 150% Ambient 圈 O<sub>3</sub> 浓度) 2 个处理, 每处理各设 3 个重复圈, 每圈为直径 14 m 的正八边形, 有效实验面积 160 m<sup>2</sup>, 各圈间隔 > 70 m 以减少 O<sub>3</sub> 释放对其他圈的影响。O<sub>3</sub> FACE 处理 O<sub>3</sub> 释放通过 8 根直径 15 mm 置于冠层上方 30 ~ 60 cm 布气管进行, Ambient 圈无布气管道, 环境条件与自然状态完全一致。麦季放气期为 3 月初至小麦成熟, 每天放气时间为 09:00 至日落时间, 但在下雨、露水等造成叶片湿润时, 因高浓度 O<sub>3</sub> 会造成叶片急性损伤, 系统将暂停放气, 平台控制详情参见文献 [17]。

### 1.3 试验设计

在 O<sub>3</sub> FACE、Ambient 2 个处理共计 6 个实验区内, 采用微区 (3 m × 3 m) 试验, 种植长江三角洲农业区代表性主栽品种扬麦 15 (Y15)、扬麦 16 (Y16)、扬幅麦 2 号 (YF2)、烟农 19 (YN19) 和嘉兴 002 (JX002) 共 5 个小麦品种。播种时间为 2009 年 11 月中旬, 2010 年 6 月 1 日成熟后收获, 行距 20 cm, 小麦基本苗 180 万株 hm<sup>-2</sup> 左右。按 N 220 kg hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 各 75 kg hm<sup>-2</sup> 施用肥料, 氮肥分 3 次施用, 分别在播种前、拔节期、孕穗期按 5:1:4 的比例施用, 磷钾肥于播种前一次性施入。氮、磷、钾肥品种为尿素、过磷酸钙、氯化钾, 施用时期和其他管理均与实际生产大田同。

收获后, 各微区均采集 2 m<sup>2</sup> 地上和 0 ~ 15 cm 耕层的全部根系样品, 根系立即用自来水冲洗掉泥土后, 再用去离子水润洗干净。

室内将小麦按器官 (根、秸秆和籽粒) 分为若干组分, 各组分经 105 °C 杀青 30 min, 80 °C 连烘 48 h 后称重。其中, 秸秆特指除籽粒外的茎叶、颖壳与穗轴的总和。将样品粉碎过筛后贮存于密闭容器中。

钾素含量采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮-火焰光度计法测定<sup>[18]</sup>。

### 1.4 数据分析

某一器官的钾素积累量 ( $D$ , g m<sup>-2</sup>)、植株总钾积累量 ( $S$ , g m<sup>-2</sup>)、钾素在各器官分配比例 ( $f_i$ , %)、钾肥偏生产力 ( $P$ , kg kg<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O)、钾素利用率 ( $r$ , %) 的计算公式如下:

$$D = W \times c \div 1000 \quad (1)$$

$$S = \sum D_i \quad (2)$$

$$f_i = \frac{D_i}{S} \times 100 \quad (3)$$

$$P = \frac{Y}{N} \times 10 \quad (4)$$

$$r = \frac{E}{N} \times 1000 \quad (5)$$

式中,  $W$  为该器官的干重 (g m<sup>-2</sup>),  $c$  为该器官的钾素含量 (g kg<sup>-1</sup>),  $D_i$  为不同器官的钾积累量 (g m<sup>-2</sup>),  $Y$  为籽粒产量 (g m<sup>-2</sup>),  $N$  为纯施钾量 (kg K<sub>2</sub>O hm<sup>-2</sup>),  $E$  为籽粒中钾积累量 (g m<sup>-2</sup>)。

数据通过 SSPS 11.0 统计软件, 采用单因素方差分析、LSD 方法和相关性分析方法对不同大气 O<sub>3</sub> 浓度的效应进行统计分析, 显著水平为  $p \leq 0.05$ , 利用 Excel 制图。

## 2 结果

### 2.1 臭氧污染对不同品种小麦干物质积累及分配的影响

O<sub>3</sub> 浓度升高对不同品种小麦生物量积累及其分配的影响不同 (图 1)。相比对照处理, O<sub>3</sub> 浓度升高, Y15 和 JX002 的总生物量分别降低 5.1% 和 17.5%, 后者达到显著水平 ( $p < 0.05$ ); YF2 的总生物量增加 5.5%; 对 Y16 和 YN19 的总生物量则几乎没有影响。就各器官而言, O<sub>3</sub> 浓度升高, Y16、YN19 和 JX002 的籽粒产量降低了 13.2%、14.9% 和 35.7%, 其中 YN19 和 JX002 达到显著水平 ( $p < 0.05$ ), 但对 Y15 和 YF2 几乎无影响; O<sub>3</sub> 浓度升高, Y15 和 JX002 秸秆量分别减少 9.5% 和 10.2%, Y16 秸秆量增加 11.0%, 均未达到显著水平, 但 YN19 和 YF2 的秸秆重显著增加了 21.8% 和 20.1% ( $p < 0.05$ ); O<sub>3</sub> 浓度升高使 YN19、YF2 根生物量减少, 但对另外 3 个品种影响不明显。表明小麦的干物质积累、产量形成、物质分配对 50% 的 O<sub>3</sub> 浓度增加响应或适应存在机制差异, 可能存在基因型差异。

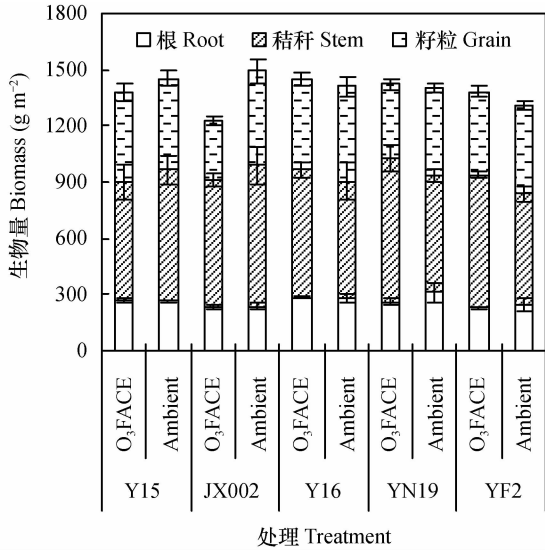


图 1 臭氧污染对不同品种小麦各器官生物量的影响  
Fig. 1 Effects of ozone pollution on biomass of different tissues of wheat relative to variety

2.2 臭氧污染对不同品种小麦钾素吸收利用的影响

与对照环境相比, O<sub>3</sub> 浓度升高使 JX002 小麦根中的钾含量显著增加 30.1% ( $p < 0.05$ ), 而其他品种根中钾含量均呈降低趋势, 其中 Y15、YF2、YN19 分别显著降低 19.6%、52.2%、41.3% ( $p < 0.05$ )

(表 1)。O<sub>3</sub> 浓度升高, Y15、Y16、YF2 和 YN19 根中钾积累量分别降低 17.9%、14.0%、51.0% 和 50.5%, 其中 YF2 和 YN19 的积累下降达显著水平 ( $p < 0.05$ ); 而 JX002 根中钾积累量则增加 24.6%。结合图 1 可知, O<sub>3</sub> 对小麦根器官中钾吸收的影响受品种制约, O<sub>3</sub> 污染对根中钾积累的影响受生物量与钾含量综合影响。

与对照环境相比, O<sub>3</sub> 浓度升高, YF2、YN19、JX002 秸秆中钾含量显著降低 22.2%、31.6%、35.4% ( $p < 0.05$ ), Y16 秸秆中钾含量显著增加 25.8% ( $p < 0.05$ ), Y15 秸秆中钾含量降低 4.4%。O<sub>3</sub> 浓度升高, Y16 秸秆中钾积累量显著增加 24.1% ( $p < 0.05$ ), Y15、YF2、YN19 和 JX002 秸秆中钾积累量降低 10.4%、6.5%、19.1% 和 48.8%, 其中 YN19、JX002 品种降低达到显著水平 ( $p < 0.05$ )。由表 1 和图 1 综合分析知, O<sub>3</sub> 污染对小麦秸秆中钾吸收与积累的影响因品种而异。

与对照环境相比, O<sub>3</sub> 浓度升高, Y16、YF2 和 YN19 籽粒中钾含量显著增加 18.2%、12.9% 和 16.4% ( $p < 0.05$ ), JX002 增加 3.8%, 但对 Y15 几乎无影响(表 1)。O<sub>3</sub> 浓度升高, JX002 籽粒中钾积累显著降低了 33.0%, YF2 籽粒中钾积累量增加了 13.1%, 但对其他品种影响不大。

表 1 不同品种小麦各器官中钾含量与积累量

Table 1 Content and accumulation of potassium in different tissues of wheat relative to variety

品种 Variety	处理 Treatment	钾含量 Potassium content ( $\text{g kg}^{-1}$ )			钾积累量 Potassium accumulation ( $\text{g m}^{-2}$ )			
		根 Root	秸秆 Stem	籽粒 Grain	根 Root	秸秆 Stem	籽粒 Grain	总量 Total
Y15	O <sub>3</sub> FACE	10.85 ± 0.34d	8.38 ± 0.63cd	9.26 ± 0.51de	2.94 ± 0.74cd	7.17 ± 0.90cde	4.40 ± 0.46c	14.61 ± 0.64f
	Ambient	13.50 ± 0.32e	8.77 ± 0.90cd	9.38 ± 0.83de	3.58 ± 0.18d	8.00 ± 0.33de	4.56 ± 0.39c	16.14 ± 0.90g
Y16	O <sub>3</sub> FACE	6.43 ± 0.26b	6.54 ± 0.13b	9.48 ± 0.10e	1.72 ± 0.10b	5.51 ± 0.15b	4.19 ± 0.23c	11.42 ± 0.20c
	Ambient	6.93 ± 0.82b	5.20 ± 0.76a	8.02 ± 0.25ab	2.00 ± 0.41bc	4.44 ± 0.87a	4.07 ± 0.29bc	10.51 ± 0.65bc
YF2	O <sub>3</sub> FACE	4.93 ± 0.78a	7.23 ± 0.75bc	9.45 ± 0.64de	1.27 ± 0.31a	7.09 ± 0.88cd	4.48 ± 0.44c	13.61 ± 0.18e
	Ambient	10.32 ± 0.24d	9.30 ± 0.76d	8.37 ± 0.38bc	2.59 ± 0.59c	7.58 ± 0.56de	3.96 ± 0.39bc	14.13 ± 0.75ef
YN19	O <sub>3</sub> FACE	5.17 ± 0.69a	5.63 ± 0.46a	9.07 ± 0.30d	1.37 ± 0.22a	5.00 ± 0.42ab	3.59 ± 0.29b	9.96 ± 0.50b
	Ambient	8.80 ± 0.44c	8.23 ± 0.66cd	7.79 ± 0.02a	2.77 ± 0.53c	6.18 ± 0.50c	3.61 ± 0.19b	12.56 ± 0.15d
JX002	O <sub>3</sub> FACE	6.48 ± 0.46b	5.41 ± 0.54a	8.83 ± 0.36cd	1.47 ± 0.28ab	4.16 ± 0.57a	2.84 ± 0.21a	8.47 ± 0.67a
	Ambient	4.98 ± 0.09a	8.38 ± 0.77cd	8.51 ± 0.58bcd	1.18 ± 0.06a	8.53 ± 0.94e	4.24 ± 0.15c	14.28 ± 0.74ef

注: 同列不同字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ ) Note: Different letters in the same column mean significant differences at the 0.05 level

与对照环境相比, O<sub>3</sub> 浓度升高, Y15、YN19 和 JX002 小麦植株中钾总积累量显著降低 9.5%、20.7% 和 40.7% ( $p < 0.05$ ), Y16 增加 6.6%, YF2 降低 3.7%, 但均未达到显著差异水平(表 1)。O<sub>3</sub> 浓度

升高对钾素在小麦各器官中的分配产生了影响, 但不同品种钾在各器官中分配存在差异(图 2)。O<sub>3</sub> 浓度升高, Y15、Y16、YF2 和 YN19 钾素在根中分配比例降低了 9.3%~46.0%, 促进钾向其地上部转移, 但增

加了 JX002 小麦钾素在根中分配比例 105.9%, 阻碍了 JX002 钾素向其地上部的转移。 $O_3$  浓度升高, Y15 中籽粒中钾所占比例增加了 9.2%, 与根中减少的比例基本一致。Y16 中秸秆中钾所占比例 14.2%, 而籽粒中所占比例有下降趋势。 $O_3$  浓度升高促进了钾在 YF2 和 YN19 小麦的秸秆与籽粒中分配, 籽粒中钾分配比例分别提高 24.5% 和 25.3%。 $O_3$  浓度升高, JX002 小麦秸秆中钾所占比例降低 19.7%, 籽粒中钾所占比例增加 10.2%。显然,  $O_3$  浓度升高将影响小麦对钾素的吸收、转运与分配, 但不同品种受影响程度与影响特征不同。

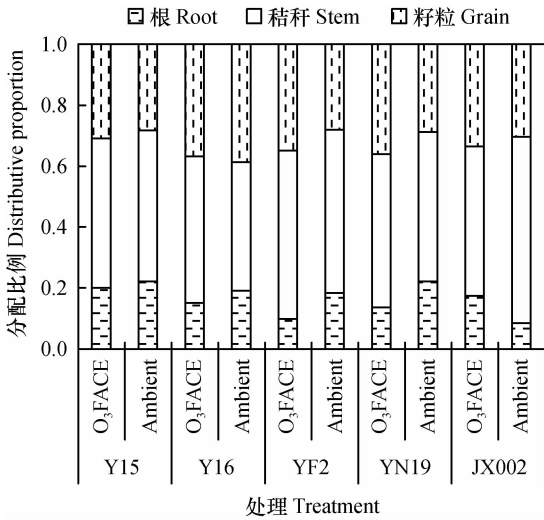
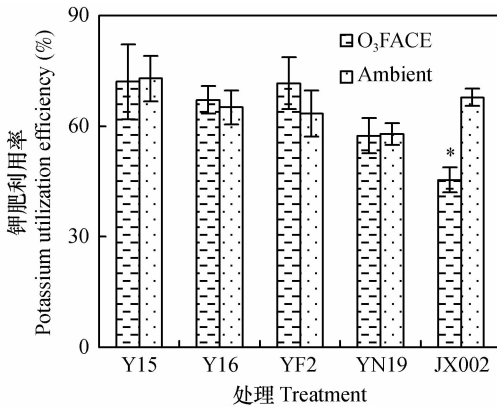


图 2 钾在小麦各器官中分配比例

Fig. 2 Distribution of potassium in different tissues of wheat

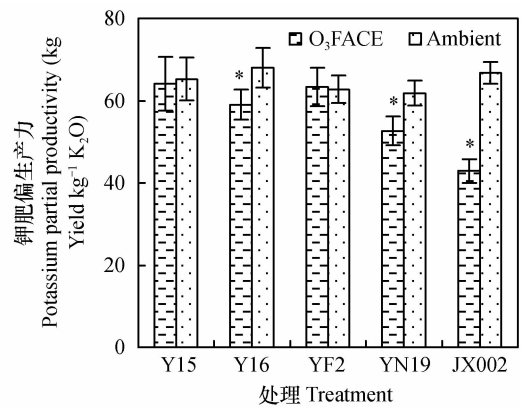


## 2.3 臭氧污染对钾素肥料利用率和偏生产力的影响

相比对照环境,  $O_3$  浓度升高, JX002 的钾肥利用率显著降低了 33.0% ( $p < 0.05$ ), YF2 的钾肥利用率增加了 12.9%, 但未达到显著水平, 对 Y15、Y16 和 YN19 几乎没有影响 (图 3)。 $O_3$  浓度升高, Y16、YN19 和 JX002 的钾肥偏生产力分别显著降低了 13.2%、14.9% 和 35.7% ( $p < 0.05$ ), 但对 Y15 和 YF2 则几乎无影响。

## 3 讨论

通常  $O_3$  污染将降低植物光合速率<sup>[6, 19-20]</sup> 减少同化物合成, 增强呼吸作用<sup>[21]</sup> 加大碳水化合物的损耗、阻碍同化物外运<sup>[21-23]</sup>, 影响干物质生产。本研究发现,  $O_3$  污染对 5 个长江三角洲地区主栽品种总生物量影响趋势不一致, 2 个品种的生物量下降其中仅 1 个品种达显著降低, 1 个品种具有增加趋势, 2 个品种的生物量无变化。以往研究也曾发现  $O_3$  污染对某些小麦总干重的影响没有显著性差异<sup>[23]</sup>。这表明  $O_3$  污染下小麦物质积累改变程度存在品种类型差异, JX002 品种对  $O_3$  污染的抵御能力远低于其他品种。本研究结果不同于气室实验条件下  $O_3$  浓度增加将降低植物的生物量及产量<sup>[6, 22]</sup> 的结果, 产生原因可能与植物品种类型、实验环境条件差异有关。



注: \*, 表示在不同  $O_3$  浓度环境处理差异显著 ( $p < 0.05$ ) Note: \* indicates significant difference at the 0.05 level between treatment different in  $O_3$  concentration

图 3 不同品种小麦的钾肥利用率和偏生产力

Fig. 3 Utilization efficiency and partial productivity of fertilizer potassium of wheat relative to variety

$O_3$  污染不仅影响干物质生产, 也可改变其在不同器官中的分配, 尤其对植物地上部生长影响明显<sup>[23]</sup>。本研究发现,  $O_3$  污染显著降低了 YN19 和

JX002 的籽粒产量, 增加了 YN19 和 YF2 的秸秆量, Y16 具有籽粒产量降低而秸秆量增加趋势; Y15、JX002 的秸秆量明显降低, 但对地下根系影响较小。

表明  $O_3$  污染可影响生物量在地上、地下不同器官分配,但存在明显的品种差异,与前人<sup>[24-25]</sup>研究结果部分一致。由于本研究基于大田开放式  $O_3$  浓度升高平台,与盆栽、OTC<sup>[24-25]</sup>等相对限制环境不同,此外品种自身存在耐  $O_3$  性状差异<sup>[19]</sup>, $O_3$  对不同品种小麦造成的光合损伤存在差异<sup>[9]</sup>,以上诸因素均会造成不同研究结果间的差异。YN19 和 JX002 在  $O_3$  污染区域易造成粮食减产,应该减少或限制在污染区域的推广,今后选育抗  $O_3$  逆境高产品种必需考虑遗传性状与抗逆表现。

钾素对植物生长有重要的营养和生理作用<sup>[15-16]</sup>。以往研究发现  $O_3$  污染可影响植物体内营养元素的含量<sup>[10-13]</sup>。本研究中绝大部分小麦吸收钾总量下降,这可能导致小麦抗  $O_3$  胁迫能力下降、病虫害危害的风险增大。陈娟等<sup>[11]</sup>在成熟期也发现 Y16 中钾总积累量减少,与本研究结果一致。 $O_3$  污染加速了小麦衰老造成成熟提前<sup>[7,11]</sup>,造成小麦吸钾能力后期快速降低及生长时间缩短均会降低钾素总积累量。本研究发现  $O_3$  污染可影响大部分供试小麦品种的根、秸秆与籽粒中的钾含量与积累量,但不同品种间与不同部位间分配存在明显差异,表明品种特性影响小麦响应  $O_3$  污染的生理生态表现<sup>[9]</sup>与营养元素的吸收利用<sup>[11-13]</sup>。Nie 等<sup>[26]</sup>认为植物在逆境中主要通过调整各器官中的营养物质来保证正常生长和生命延续。本研究中  $O_3$  污染降低了绝大多数品种小麦钾素在根中分配比例,促进钾素向地上部和籽粒的转移。由于钾素有增加植物抗逆境胁迫能力<sup>[16]</sup>,钾素向地上部与籽粒的转移有利于小麦在  $O_3$  胁迫逆境中抵抗逆境、确保生长与生命延续,符合 Nie 等的猜想。然而, $O_3$  污染下 JX002 小麦增加了钾素在根中滞留比例,减少了其在地上部的分配,虽然籽粒中分配比例显著提高,但地上部分分配总量的减少势必降低其抗逆生长, $O_3$  污染下其生物量显著减少。本研究中  $O_3$  污染下绝大部分小麦总吸收钾量下降,势必降低钾肥利用率而增加钾在土壤中的残留。由于钾素化肥多为植物易吸收的速效钾,尽管稻-麦轮作区土壤干湿交替可使钾离子进入黏土矿物晶格得以保护,但有效钾库容量增大和游离态钾离子易随水迁移特点,势必增加  $O_3$  污染土壤钾素随水淋失或流失的风险;本研究平台亦发现  $O_3$  污染环境土壤速效钾含量下降<sup>[14]</sup>。由于  $O_3$  污染也能导致土壤物理性状与营养状况<sup>[14]</sup>、微生物及酶活性<sup>[21,27]</sup>等因素发生改变,

势必影响钾素的地球生物化学循环,这对钾素循环及农田钾素管理的潜在影响仍有待深入研究。

## 4 结 论

小麦地下根系生物量受臭氧污染影响较小而地上部易受影响,但品种差异明显。小麦改变了钾素的吸收与分配态势来响应或适应臭氧污染,因品种而异,但大部分小麦品种增加了籽粒钾含量及其在植物体内的所占比重。近地层臭氧污染潜在地影响小麦的钾肥偏生产力和利用效率,故钾肥的合理施用应综合考虑不同品种响应臭氧污染的趋势与程度,减少钾素不足或过量造成的生产风险或潜在损失风险。

## 参 考 文 献

- [1] Luo C, John J C, Zhou X, et al. A nonurban ozone air pollution episode over Eastern China: Observation and model simulations. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (D2): 1889—1908
- [2] 王效科, 庄亚辉, 李长生. 中国农田土壤  $N_2O$  排放通量分布格局研究. *生态学报*, 2001, 21 (8): 10—17. Wang X K, Zhuang Y H, Li C S. The distribution pattern of  $N_2O$  emission from agricultural soil in China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (8): 10—17
- [3] Hertstein U, Grunhage L, Jager H J. Assessment of past, present, and future impacts of ozone and carbon dioxide on crop yields. *Atmospheric Environment*, 1995, 29 (16): 2031—2039
- [4] Hough A M, Derwent R G. Changes in the global concentration of tropospheric ozone due to human activities. *Nature*, 1990, 344 (6267): 645—648
- [5] Adams R M, Horst R L. Future directions in air quality research: economic issues. *Environment International*, 2003, 29 (2/3): 289—302
- [6] Meyer U, Kollner B, Willenbrn J, et al. Effects of different ozone exposure regimes on photosynthesis, assimilates and thousand grain weight in spring wheat. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 78 (1): 49—55
- [7] 寇太记, 常会庆, 张联合, 等. 近地层  $O_3$  污染对陆地生态系统的影响. *生态环境学报*, 2009, 18 (2): 704—710. Kou T J, Chang H Q, Zhang L H, et al. Effect of near-surface  $O_3$  pollution on terrestrial ecosystems (In Chinese). *Ecology and Environmental Science*, 2009, 18 (2): 704—710
- [8] Keller F, Bassin S, Ammann C, et al. High-resolution modeling of AOT<sub>40</sub> and stomatal ozone uptake in wheat and grassland: A comparison between 2000 and the hot summer of 2003 in Switzerland. *Environmental Pollution*, 2007, 146 (3): 671—677
- [9] 王亮, 曾青, 冯兆忠, 等. 开放式臭氧浓度升高对 2 个冬小麦品种光合损伤的研究. *环境科学*, 2009, 30 (2): 527—534. Wang L, Zeng Q, Feng Z Z, et al. Photosynthetic damage in-

- duced by elevated O<sub>3</sub> in two varieties of winter wheat with free air controlled enrichment approach (In Chinese). *Environmental Science*, 2009, 30(2): 527—534
- [10] 郑飞翔, 王效科, 侯培强, 等. 臭氧胁迫对水稻生长以及 C、N、S 元素分配的影响. *生态学报*, 2011, 31(6): 1479—1486. Zheng F X, Wang X K, Hou P Q, et al. Influences of elevated ozone on growth and C, N, S allocations of rice (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1479—1486
- [11] 陈娟, 曾青, 朱建国, 等. 臭氧和氮肥交互对小麦干物质生产、N、P、K 含量及积累量的影响. *生态环境学报*, 2011, 20(4): 616—622. Chen J, Zeng Q, Zhu J G, et al. Interactive effects of elevated ozone and nitrogen on dry matter production, concentration and accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in winter wheat (In Chinese). *Ecology and Environment Science*, 2011, 20(4): 616—622
- [12] 刘德鸿, 寇太记, 徐晓峰, 等. 臭氧污染对不同品种小麦磷素吸收与分配的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1319—1325. Liu D H, Kou T J, Xu X F, et al. Effects of pollution on phosphorus absorption and distribution in different varieties of wheat (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6): 1319—1325
- [13] 寇太记, 于伟伟, 刘德鸿, 等. 臭氧污染对不同品种小麦养分吸收与分配的影响. *环境科学学报*, 2013, 33(2): 644—649. Kou T J, Yu W W, Liu D H, et al. Effects of elevated ozone on absorption and distribution of nutrients in different cultivars of wheat (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(2): 644—649
- [14] 寇太记, 刘德鸿, 徐晓峰, 等. 长期臭氧污染对水稻土物理结构和氮磷钾含量的影响. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1163—1168. Kou T J, Liu D H, Xu X F, et al. Effect of ozone pollution on physical structure and contents of nitrogen, phosphorus and potassium of paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1163—1168
- [15] 彭海欢, 翁晓燕, 徐红霞, 等. 缺钾胁迫对水稻光合特性及光合防御机制的影响. *中国水稻科学*, 2006, 20(6): 621—625. Peng H H, Weng X Y, Xu H X, et al. Effects of potassium deficiency on photosynthesis and photo-protection mechanisms in rice plants (In Chinese). *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(6): 621—625
- [16] 张福锁. 环境胁迫与植物营养. 北京: 北京农业大学出版社, 1993: 148—170. Zhang F S. *Environmental stress and plant nutrition* (In Chinese). Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1993: 148—170
- [17] 唐昊治, 刘钢, 韩勇, 等. 农田开放体系中调控臭氧浓度装置平台 (O<sub>3</sub>-FACE) 研究. *土壤*, 2010, 42(5): 833—841. Tang H Y, Liu G, Han Y, et al. Ozone concentration enrichment system under fully free-air condition in agricultural field (O<sub>3</sub>-FACE) (In Chinese). *Soils*, 2010, 42(5): 833—841
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146—271. Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 146—271
- [19] 曹际玲, 王亮, 曾青, 等. 开放式臭氧浓度升高条件下不同敏感型小麦品种的光合特性. *作物学报*, 2009, 35(8): 1500—1507. Cao J L, Wang L, Zeng Q, et al. Characteristics of photosynthesis in wheat cultivars with different sensitivities to ozone under O<sub>3</sub>-free air concentration enrichment conditions (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(8): 1500—1507
- [20] Weber J A, Scott C C, Hogsett W E. Analysis of the relationships among O<sub>3</sub> uptake, conductance, and photosynthesis in needles of *Pinus ponderosa*. *Tree Physiology*, 1993, 13(2): 157—172
- [21] Glick R E, Schlagnhauser C D, Arteca R N, et al. Ozone-induced ethylene emission accelerates the loss of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and nuclear-encoded mRNAs in senescing potato leaves. *Plant Physiology*, 1995, 109(3): 891—898
- [22] Felzer B, Kicklighter D, Melillo J, et al. Effect of ozone on net primary production and carbon sequestration in the conterminous United States using a biogeochemistry model. *Tellus B*, 2004, 56(3): 230—248
- [23] Andersen C P. Source-sink balance and carbon allocation below ground in plants exposed to ozone. *New Phytologist*, 2003, 157(2): 213—228
- [24] 陈展, 王效科, 段晓男, 等. 臭氧浓度升高对盆栽小麦根系和土壤微生物功能的影响. *生态学报*, 2007, 27(5): 1803—1808. Chen Z, Wang X K, Duan X N, et al. Ozone effects on wheat root and soil microbial biomass and diversity (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1803—1808
- [25] Landolt W, Buhlmann U, Bleuler P, et al. Ozone exposure-response relationships for biomass and root/shoot ratio of beech (*Fagus sylvatica*), ash (*Fraxinus Excelsior*), Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus Sylvestris*). *Environmental Pollution*, 2000, 109(3): 473—478
- [26] Nie G Y, Tomasevic M, Baker N R, et al. Effects of ozone on the photosynthetic apparatus and leaf proteins during leaf development in plants. *Plant, Cell and Environment*, 1993, 16(6): 643—651
- [27] Chen Z, Wang X K, Yao F F, et al. Elevated ozone changed soil microbial community in a rice paddy. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 74(3): 829—837

## EFFECTS OF TROPOSPHERIC OZONE POLLUTION ON ABSORPTION AND DISTRIBUTION OF POTASSIUM IN WHEAT RELATIVE TO VARIETY

Kou Taiji<sup>1,2</sup> Liu Dehong<sup>1</sup> Xu Xiaofeng<sup>1</sup> Yu Weiwei<sup>1</sup> Zhu Xinkai<sup>3</sup> Zhu Jianguo<sup>2</sup>

(1 College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

(2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 Yangzhou University/Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology, Jiangsu Province, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

**Abstract** Tropospheric ozone ( $O_3$ ) pollution affects plant growth and indirectly plant potassium (K) uptake. Effects of elevated atmospheric ozone ( $pO_3$ ) (50% higher than the ambient  $pO_3$ ) on biomass and K uptake and distribution of five modern cultivars of wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Yangmai 15 (Y15), Yangmai 16 (Y16), Yannong 19 (YN19), Yangfumai 2 (YF2) and Jiaxing 002 (JX002)) were investigated in fully open-air field in the Yangtze River delta. Results show that straw and grain responded more than root to elevated  $pO_3$ . Y16, YN19 and JX002 decreased in yield, while Y15 and YF2 as not affected did not show any change. Under elevated  $pO_3$ , YF2 and JX002 decreased significantly in straw biomass, Y16 displayed a rising trend while Y15 and JX002 declining ones, indicating that the effect of elevated  $pO_3$  on accumulation and distribution of biomass of wheat varied with wheat cultivar. Simultaneously, YN19, Y15 and JX002 decreased significantly in total plant potassium uptake, while Y16 displayed a declining trend and YF2 a rising one. Elevated  $pO_3$  also affected content and distribution of potassium in the plant and the effect varied with cultivar, too. Y16, YF2, YN19 and Y15 declined in K distribution ratio in root, which suggested that elevated  $pO_3$  promoted potassium transfer from root to shoot, but JX002 increased, which meant elevated  $pO_3$  retarded potassium transfer to shoot. Obviously, mechanism of the response to elevated  $pO_3$  of wheat in absorption and distribution of potassium varied with cultivar. Elevated  $pO_3$  significantly decreased the partial productivity of potassium fertilizer in Y16, YN19 and JX002 by 13.2% ~ 35.7%, but did not have such effect in Y15 and YF2, while it decreased K fertilizer utilization rate of JX002 and increased that of YF2, while it did not affect much that of Y15, Y16 and YN19. Therefore, it is advisable to take into account the factor of variety in evaluating  $O_3$  effects on accumulation and distribution of biomass in wheat and potassium turnover in the plant-soil system.

**Key words** Elevated ozone; Potassium; Dry matter accumulation; Partial productivity; Potassium utilization efficiency

(责任编辑:卢萍)