

# 绿豆幼苗生长状态对环境羟基自由基水平的影响

柯德森\*, 张文娟, 林海君, 王土连, 卢穗华, 朱思颖, 杨礼香

(广州大学生命科学学院, 广州 510006)

**摘要:** 为了解植物生长状态对环境羟基自由基水平的影响, 研究了相同培养条件下不同生长状态的绿豆(*Vigna radiata*)幼苗对空气中的羟基自由基水平的影响。结果表明, 正常生长的绿豆幼苗周围环境羟基自由基水平显著高于没有植物生长的环境, 失活幼苗对周围环境羟基自由基水平没有显著影响; 渗透胁迫的绿豆幼苗对环境羟基自由基水平影响极显著, 渗透胁迫程度不同其影响程度也有所不同; 绿豆幼苗对环境羟基自由基水平的影响与其呼吸速率密切相关。这证明绿豆幼苗生长对环境羟基自由基水平有影响, 且这种影响依赖于其生理代谢过程及生长状态。

**关键词:** 绿豆; 环境; 羟基自由基; 生长

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.03.004

## Effect of Growth State of Mung Bean Seedlings on the Level of Environmental Hydroxyl Radical

KE De-sen\*, ZHANG Wen-juan, LIN Hai-jun, WANG Tu-liang, LU Sui-hua, ZHU Si-yin, YANG Li-xiang

(School of Life Science, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The mung bean (*Vigna radiata*) seedlings in various states, including normal growth, inactivation and different levels of osmotic stress, were cultured under the same conditions, and the level of hydroxyl radicals in the culture environment and the respiration rate of seedlings were continuously measured. The results showed that the environmental hydroxyl radical surrounding normal growth seedlings was significantly higher than that of the environment without plant growth, however, under the same conditions, the inactivated seedlings had no significant effect on the level of surrounding environmental hydroxyl radicals. Under osmotic stress, the effect of mung bean seedling on the level of hydroxyl radical in the atmosphere was very significant, and the influences on the levels of atmosphere hydroxyl radicals were different with different degree of osmotic stress. The relationship was close between the effect of mung bean seedling on the level of environmental hydroxyl radical and its respiration rate. Therefore, it was demonstrated that the level of hydroxyl radical was affected by the growth of mung bean seedling, and as well as, the effect was depend on the metabolic processes and the growth state of seedlings.

**Key words:** Mung bean; Environment; Hydroxyl radical; Growth

羟基自由基(Hydroxyl radical, ·OH)是活性氧自由基(Reactive oxygen species, ROS)的一种, 其基团

外围有 7 个电子, 含 1 个未配对的自由电子, 故化学性质非常活泼。羟基自由基的标准电极电位为

收稿日期: 2015-09-29 接受日期: 2015-12-04

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2014A030313531); 广州市科技计划项目(201510010108); 广东省专业综合改革试点项目(生物工程, 粤教高函[2013]113号); 2014 广东省级大学生创新训练项目(201411078032)资助

This work was supported by the Natural Science Foundation of Guangdong (Grant No. 2014A030313531), the Project of Guangzhou Science and Technology (Grant No. 201510010108), the Guangdong Professional Comprehensive Reform Pilot Project (Biological engineering, Guangdong Higher Education Letter 2013/113), and the 2014 Innovation Training Project of Guangdong Provincial College Students (Grant No. 201411078032).

作者简介: 柯德森(1966-), 教授, 博士, 主要从事植物生理生态领域的研究

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 270820679@qq.com

2.80  $\Phi^\circ \text{V}^{-1}$ , 明显高于其他常见氧化剂( $\text{O}_3$  为  $2.08 \Phi^\circ \text{V}^{-1}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  为  $1.77 \Phi^\circ \text{V}^{-1}$ ,  $\text{O}_2$  为  $1.23 \Phi^\circ \text{V}^{-1}$ ), 因此具有更高的氧化能力<sup>[1-5]</sup>。大气对流层中存在着平均浓度为  $10^6 \sim 10^7 \text{ radicals cm}^{-3}$  的羟基自由基, 它是大气中最重要的氧化剂和“清洁剂”之一, 能把多数造成大气污染的痕量物质( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  及  $\text{SO}_x$  等)氧化成其他形式而清除出大气<sup>[5-9]</sup>。目前每年通过羟基自由基氧化作用而清除出大气的一氧化碳( $\text{CO}$ )约占其全年总排放量的 85%; 甲烷( $\text{CH}_4$ )、乙烷( $\text{C}_2\text{H}_6$ )和异戊二烯(Iso-prene)的清除量均占其全年总排放量的 90%以上; 每年羟基自由基清除的二氧化氮( $\text{NO}_2$ )也达到了 50%以上, 二氧化硫  $\text{SO}_2$  则在 30%左右<sup>[4-7, 10]</sup>。甲烷、乙烷和异戊二烯均为重要的温室气体(Greenhouse gases, GHGs), 特别是甲烷, 是被京都协议书明确禁止排放的三种主要温室气体之一,  $\text{SO}_2$  则是酸雨的主要因素。可以想象, 如果没有羟基自由基的氧化清除作用, 地球大气的化学成分与目前的状况相比将发生根本性的变化, 温室气体和其它有害气体的含量将大大提高<sup>[4-5]</sup>。因此大气中羟基自由基的浓度与大气环境的质量密切相关, 在目前全球气候变暖、环境恶化的背景下研究大气中的羟基自由基浓度的变化及其影响因素有着非常重要的意义。

目前关于大气中羟基自由基水平的影响因素的研究主要集中在物理化学的研究领域, 包括大气对流层中的光强、温度、湿度、紫外光强度等物理因素的影响。研究者已建立了一些比较有价值的关于环境羟基自由基水平变化的动力学模型, 并在研究大气羟基自由基水平变迁中得到了一定程度的验证<sup>[4-5]</sup>。但是, 已建立的动力学模型在解释工业革命前后大气羟基自由基水平变化, 以及根据现有环境变化数据推测一定区域羟基自由基水平变迁的时候表现出明显的不确定性<sup>[11-12]</sup>, 推测动力学模型中没有引入地球上庞大植物群体的影响这一变量可能是重要原因。但是, 植物对环境羟基自由基水平的影响以及影响机制目前缺乏充分的证据支持, 本文旨在通过测量绿豆幼苗生长对其周围大气羟基自由基水平的影响, 对比不同生长状态下绿豆幼苗的影响程度, 为证明植物对大气羟基自由基的影响提供证据, 同时初步明确植物对大气羟基自由基水平的影响与其生命活动过程及生长不同状态的关系。

## 1 材料和方法

### 1.1 植物材料

挑选培养 5 d、生长一致的绿豆(*Vigna radiatus* L.)幼苗为实验材料, 250 株为一组。以不经处理的幼苗为正常生长组; 将经过  $100^\circ\text{C}$  处理 5 min 的幼苗为失活组; 以 10% (W/V) 聚乙二醇分别处理 10、20 和 30 min 为渗透胁迫组; 以  $1 \text{ mmol L}^{-1}$  氰化钾培养 30 min 的幼苗为氰化钾抑制呼吸处理组。

### 1.2 实验设计

从每组中选取 50 株幼苗测量呼吸速率, 同时, 准备型号一致的光照培养箱(GXZ-500B, 宁波东南仪器有限公司) 7 个, 将每组的另外 200 株苗放入其中培养, 以不放入任何植物的为空白组, 培养条件均为  $25^\circ\text{C}$ 、 $500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  光强下光照 12 h, 培养 24 h 后测量环境空气中的羟基自由基水平。

### 1.3 环境空气羟基自由基水平的测量

利用浸渍膜上固定的水杨酸与大气羟基自由基发生快速反应, 将极不稳定的羟基自由基转化成同摩尔数的荧光产物 1,5-二羟基苯甲酸(2,5-Dihydroxybenzoic acid, 2,5-DHBA), 2,5-DHBA 可由 HPLC 分离测定(Shimadzu CBM-20A, 日本岛津公司), 通过计算得到大气羟基自由基的浓度。具体实验过程, 包括气相标准羟基自由基发生源的制作、水杨酸采样膜的制备、大气羟基自由基采样装置以及 HPLC 的操作过程均参照任信荣的方法<sup>[13]</sup>, 但将采样装置的采样头作了改进, 主要是调整其大小和形状, 使其能与本实验的可控小环境的气体出口相吻合。环境羟基自由基水平用  $\mu\text{mol min}^{-1}$  表示。

### 1.4 呼吸速率的测定

每次取 50 株绿豆幼苗, 称重, 装入标定体积的三角瓶中, 密闭瓶口,  $25^\circ\text{C}$  遮光培养 1 h, 用 25 mL 干燥的注射器抽取 10 mL 气样, 注入气体分析仪(奥氏气体分析仪 ZJ13-1902, 北京中西远大科技有限公司)中, 测量  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  含量的变化, 呼吸速率以  $\mu\text{mol O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ FW h}^{-1}$  表示。

### 1.5 数据统计和分析

每组实验均 5 次重复, 每个重复实验均进行 8 次测量, 共 40 次平行实验, 以平均值表示测量结

果, 并计算标准偏差。数据间的相关性及差异性分析均采用 IBM SPSS 21 统计软件进行。

## 2 结果分析

### 2.1 绿豆幼苗生长对环境羟基自由基水平的影响

从图 1 可以看出, 空白培养箱中的羟基自由基水平较低, 平均为  $82.155 \mu\text{mol min}^{-1}$ , 培养绿豆幼苗的培养箱中羟基自由基水平比较高, 平均为  $131.772 \mu\text{mol min}^{-1}$ ; 失活绿豆幼苗的环境羟基自由基水平与空白组相似, 平均为  $81.833 \mu\text{mol min}^{-1}$ 。单因素方差分析表明, 植物生长状态对环境羟基自由基水平的影响达极显著水平(表 1,  $P < 0.01$ )。单因素多重比较(LSD 分析)表明(表 2): 绿豆幼苗正常生长环境和空白组间的羟基自由基水平达极显著差异( $P < 0.01$ ), 其与失活绿豆的环境羟基自由基水平的差异也达极显著( $P < 0.01$ ), 而失活绿豆幼苗与空白组的环境羟基自由基水平没有差异( $P > 0.05$ )。由此可见, 绿豆幼苗生长对周围环境中羟基自由基水

平具有极显著的影响, 失活将导致绿豆幼苗对环境羟基自由基水平的影响被消除, 表明绿豆幼苗对环境羟基自由基的影响明显依赖于其生命代谢过程。

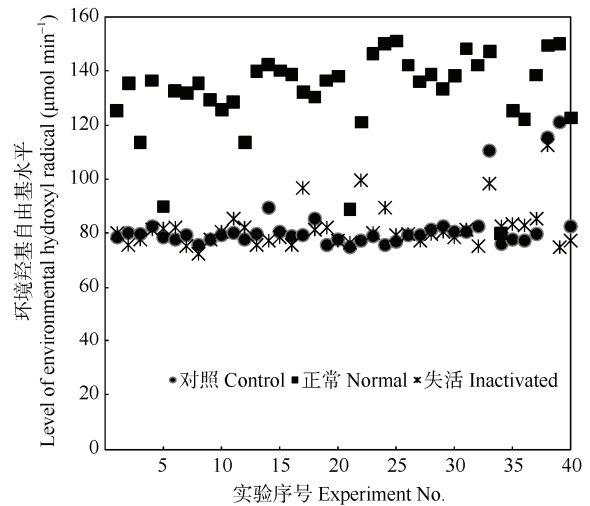


图 1 绿豆幼苗生长对环境羟基自由基水平的影响

Fig. 1 Effect of growth state of mung bean seedlings on the level of environmental hydroxyl radical

表 1 绿豆幼苗生长状态对环境羟基自由基水平影响的单因素方差分析

Table 1 Single factor analysis of the effect of growth state of mung bean seedling on the level of environment hydroxyl radicals

生长状态 Growth state	N	均值 Mean	标准差 Standard deviation	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
空白 Control	40	82.155	10.14912	组间 Between group	33040.02	232.04	0.000
正常 Normal	40	131.7725	16.22066				
失活 Inactivated	40	81.8325	7.81318				
总数 Total	120	98.5867	26.36832	组内 Within group	117	142.387	
				总数 Total	119		

表 2 植物生长状态对环境羟基自由基水平影响的多重分析(LSD)

Table 2 Multiple analysis of the effect of plant growth state on the level of environmental hydroxyl radicals by LSD

生长状态 Growth state	生长状态 Growth state	均方差 Mean square error	P	95% 置信区间 95% Confidence interval	
				下限 Minimum	上限 Maximum
空白 Control	正常 Normal	-49.617	0.000	-54.9017	-44.3333
	失活 Inactivated	0.322	0.904	-4.9617	5.6067
正常 Normal	空白 Control	49.617	0.000	44.3333	54.9017
	失活 Inactivated	49.940	0.000	44.6558	55.2202
失活 Inactivated	空白 Control	-0.322	0.904	-5.6067	4.9617
	正常 Normal	-49.940	0.000	-55.2242	-44.6558

n=39

### 2.2 渗透胁迫下绿豆幼苗对环境羟基自由基水平的影响

采用 10% (W/V)聚乙二醇处理绿豆幼苗不同时间以诱导不同程度的渗透胁迫。从图 2 可见, 不同程度渗透胁迫的绿豆幼苗对环境羟基自由基水平均

有一定的影响, 羟基自由基水平均上升(表 3)。单因素方差分析表明, 受渗透胁迫的绿豆幼苗对环境羟基自由基水平的影响极显著(表 3,  $P < 0.01$ )。多重比较分析表明(表 4, LSD 分析), 渗透胁迫 10 min 和 20 min 的绿豆幼苗对环境羟基自由基水平有极显著影响

( $P < 0.01$ ), 但渗透胁迫 20 min 与正常生长幼苗、渗透胁迫 10 min 与 30 min 的幼苗间的差异不显著( $P = 0.409 > 0.05$ )。这表明渗透胁迫能够明显促进绿豆幼苗对环境羟基自由基水平的影响, 但渗透胁迫需要在一定的程度上才能体现出明显的效果(表 4)。

### 2.3 绿豆幼苗呼吸速率与环境羟基自由基水平的关系分析

从图 3 可见, 随着绿豆呼吸速率升高, 对应环境中的羟基自由基水平呈现上升趋势, 相关系数为  $R^2 = 0.8068$ , 表明绿豆幼苗对环境羟基自由基水平的影响与其呼吸作用具有一定的相关关系。正常生长的绿豆幼苗的呼吸速率为  $(26.5282 \pm 7.91959) \mu\text{mol O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ FW h}^{-1}$ , 环境羟基自由基水平为  $(102.8128 \pm 24.05277) \mu\text{mol min}^{-1}$ ; 氰化钾可明显抑制绿豆的呼吸速率, 氰化钾处理的环境羟基自由基水平低于正常绿豆幼苗(表 6), 氰化钾处理的绿豆幼苗呼吸速率为  $(13.9846 \pm 4.02300) \mu\text{mol O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ FW h}^{-1}$ , 环境羟基自由基水平为  $(76.5436 \pm 8.75631) \mu\text{mol min}^{-1}$ , 二者差异极显

显著( $P < 0.01$ , 表 5), 这进一步证明绿豆幼苗对环境羟基自由基水平的影响与呼吸作用相关。

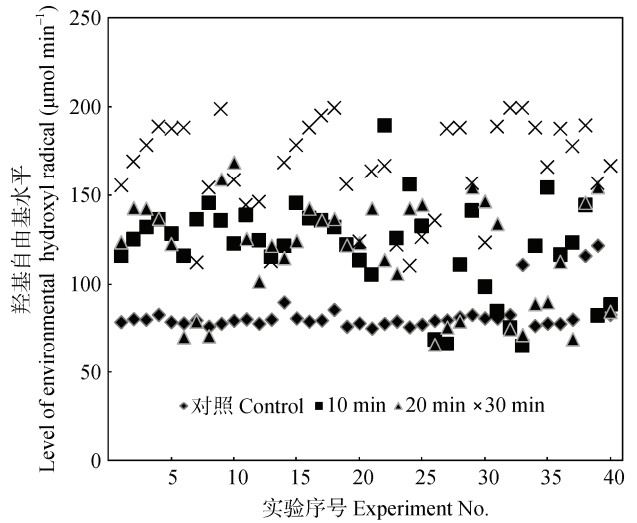


图 2 渗透胁迫绿豆幼苗对环境羟基自由基水平的影响

Fig. 2 Effect of mung bean seedlings under osmotic stress on the level of environmental hydroxyl radical

表 3 渗透胁迫对环境羟基自由基水平影响的单因素分析

Table 3 Single factor analysis of the effect of osmotic stress on the level of environment hydroxyl radicals

渗透胁迫时间 Osmotic stress time (min)	N	均值 Mean	标准差 Standard deviation	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P	
空白 Control	40	82.1550	10.14912					
10	40	120.7750	26.23477					
20	40	116.2025	30.10724					
30	120	165.0700	27.24070					
				组间 Between group	3	46322.07	75.945	0.000
				组内 Within group	156	609.94		
				总数 Total	159			

表 4 渗透胁迫对环境羟基自由基水平的影响单因素多重分析(LSD)

Table 4 Multiple analysis of effect of osmotic stress on level of environmental hydroxyl radicals (LSD analysis)

渗透胁迫时间 Osmotic stress time (min)	均方差 Mean square error	P	95% 置信区间 Confidence interval		
			下限 Minimum	上限 Maximum	
空白 Control	10	-38.620	0.000	-4.5284	-27.7116
10	20	-34.047	0.000	-44.9559	-23.1391
20	30	-82.915	0.000	-93.8234	-72.0066
30	空白 Control	38.620	0.000	27.7116	49.5284
空白 Control	20	4.572	0.409	-6.3359	15.4809
10	30	-44.295	0.000	-55.2034	-33.3866
20	空白 Control	34.047	0.000	23.131	44.9559
30	10	-4.572	0.409	-15.4809	6.3359
空白 Control	30	-48.867	0.000	-59.7759	-37.9591
10	空白 Control	82.915	0.000	72.0066	93.8234
20	10	44.295	0.000	33.3866	55.2034
30	20	48.867	0.000	37.9591	59.7759

表6 氰化钾处理对如绿豆环境羟基自由基水平影响的独立因素 *t* 检验Table 6 *t*-Test of independent factors for environmental hydroxyl radical level induced by mung bean seedlings after KCN treatment

	<i>F</i>	方差显著性 Significant of variance	<i>t</i>	df	显著性 Significant	均值差 Mean square error	标准误差 Standard error
假设方差相等 For homogeneous variance	45.655	0.000	6.409	76	0.000	26.26923	4.09881
假设方差不相等 For not homogeneous variance			6.409	47.898	0.000	26.26923	4.09881

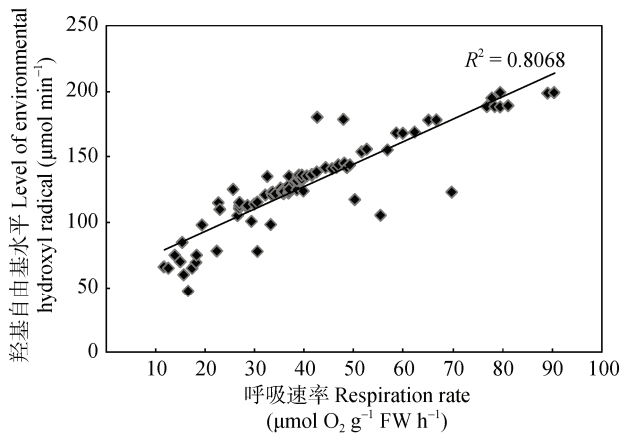


图3 绿豆幼苗呼吸速率与环境羟基自由基水平的关系分析

Fig. 3 Relationship between the respiration rate of mung bean seedling and the level of free radical in the environment

### 3 讨论

本研究结果分析表明, 绿豆幼苗生长的环境中羟基自由基水平明显高于没有植物生长的环境, 且二者的差异达极显著水平, 表明绿豆幼苗生长对环境羟基自由基水平具有显著提高作用。失活的绿豆幼苗对环境羟基自由基水平的影响不明显, 表明绿豆对环境羟基自由基水平的影响与其生命活动密切相关。绿豆幼苗的呼吸速率与环境羟基自由基水平的相关系数约为 0.8, 利用呼吸抑制剂降低绿豆幼苗的呼吸速率的同时也降低了环境羟基自由基的水平, 这与失活绿豆幼苗对环境羟基自由基水平的影响一致。由于呼吸速率与环境羟基自由基水平的相关性分析并没有考虑造成呼吸速率变化的原因, 因此可以推测呼吸速率与环境羟基自由基水平的相关性具有一定的普遍性。

植物对大气羟基自由基水平的影响虽然还缺乏直接的证据, 但根据现有的关于大气羟基自由基水平的影响因素分析可以推测, 植物对大气羟基自由基浓度的影响可能体现在以下几个方面: ① 植物光合作用消耗  $\text{CO}_2$ , 释放  $\text{O}_2$ , 从而有利于大气羟基自由基的形成<sup>[4,14-15]</sup>, 植物呼吸作用则由于消耗

$\text{O}_2$ , 释放  $\text{CO}_2$ , 可能起到相反的作用。植物蒸腾作用使周边大气水蒸汽浓度上升, 可能促进羟基自由基的原初产生过程<sup>[5,15-16]</sup>。② 有研究认为, 森林是大气对流层  $\text{O}_3$  的主要吸收者, 可能通过影响对流层中的  $\text{O}_3$  浓度从而间接影响大气羟基自由基的浓度<sup>[4-5,17]</sup>。③ 植物是释放到大气中 BVOCs (生物释放的气态有机化合物的主要来源, 其中最重要的是异戊二烯(Isoprene)和单萜化合物(Monoterpenes)<sup>[17-18]</sup>, 其浓度的升高将消耗更多的羟基自由基; Harrison 等<sup>[19]</sup>对比了不同树种组成的植物群落的 BVOCs 释放, 结果表明 92%冷杉构成的群落的异戊二烯释放量明显高于其他树种构成的群落, 说明植被释放的 BVOCs 与植被自身的结构有着密切的关系, 所以植被类型及其结构的变迁将可能引起周围大气羟基自由基浓度的变化。④ 植物凋落物在微生物作用下分解(反硝化等)产生或森林燃烧释放的  $\text{NO}_x$  对大气羟基自由基的水平造成非常复杂的影响<sup>[17,20]</sup>; 而森林燃烧引起的  $\text{CO}_2$  的释放则可能导致大气羟基自由基浓度的下降。⑤ 植物对大气污染物的吸收净化作用, 植物可吸收  $\text{SO}_x$  和一些工业排放的 VOCs, 降低其在大气中的浓度, 从而减少羟基自由基损耗。由此可见, 植物对大气羟基自由基浓度的影响非常复杂, 其综合影响将取决于植被的类型和结构, 具体到植物的种类及其生长状况、植物生长的地理、地质及气候因子等等。全面评价植物界对整个地球大气中羟基自由基浓度的影响是一项非常巨大的工程, 涉及非常广泛的领域, 必须经过多领域长期的研究才能阐明。本研究证明了绿豆幼苗的生长是可以影响环境羟基自由基水平的, 而且这种影响与绿豆生长状态有关, 这将对进一步证明植物对大气对流层羟基自由基水平存在影响提供重要的证据。

### 参考文献

- [1] SUN C P, ZHANG J Z, DUAN S J. Introduction to Free Radical Biology [M]. Hefei: University of Science & Technology China Press, 1999: 1-10.

- 孙存普, 张建中, 段绍瑾. 自由基生物学导论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 1-10.
- [2] YANG M, JONSSON M. Surface reactivity of hydroxyl radicals formed upon catalytic decomposition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> on ZrO<sub>2</sub> [J]. *J Mol Catal A: Chem*, 2015, 400: 49-55. doi: 10.1016/j.molcata.2015.02.002.
- [3] FANG G D, ZHU C Y, DIONYSIOU D D, et al. Mechanism of hydroxyl radical generation from biochar suspensions: Implications to diethyl phthalate degradation [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 176: 210-217. doi: 10.1016/j.biortech.2014.11.032.
- [4] KE D S, WU J X, WANG Z X. Effect of banana seedlings on hydroxyl radical content in ambient air under different environmental conditions [J]. *Plant Sci J*, 2011, 29(5): 625-630. doi: 10.3724/SP.J.1142.2011.50625.
- 柯德森, 巫锦雄, 王正询. 不同条件下香蕉幼苗对环境羟自由基水平的影响 [J]. *植物科学学报*, 2011, 29(5): 625-630. doi: 10.3724/SP.J.1142.2011.50625.
- [5] KE D S, YANG L X, WU J X. Effects of light intensity on the photosynthetic characteristics of maize seedlings and the content of atmosphere hydroxyl radical [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, 19(3): 404-409. doi: 10.3724/SP.J.1145.2013.00404.
- 柯德森, 杨礼香, 巫锦雄. 光强对玉米幼苗光合特性及环境羟自由基水平的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(3): 404-409. doi: 10.3724/SP.J.1145.2013.00404.
- [6] BIARD P F, COUVERT A, RENNER C, et al. Intensification of volatile organic compounds mass transfer in a compact scrubber using the O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation process: Kinetic study and hydroxyl radical tracking [J]. *Chemosphere*, 2012, 85(7): 1122-1129. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.07.050.
- [7] MAEZONO T, TOKUMURA M, SEKINE M, et al. Hydroxyl radical concentration profile in photo-Fenton oxidation process: Generation and consumption of hydroxyl radicals during the discoloration of azo-dye Orange II [J]. *Chemosphere*, 2011, 82(10): 1422-1430. doi: 10.1016/j.chemosphere.2010.11.052.
- [8] LAI C Y, LIU Y C, MA J Z, et al. Degradation kinetics of levoglucosan initiated by hydroxyl radical under different environmental conditions [J]. *Atmos Environ*, 2014, 91: 32-39. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.03.054.
- [9] HELLACK B, QUASS U, BEUCK H, et al. Elemental composition and radical formation potency of PM<sub>10</sub> at an urban background station in Germany in relation to origin of air masses [J]. *Atmos Environ*, 2015, 105: 1-6. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.01.033.
- [10] PRICE D J, CLARK C H, TANG X C, et al. Proposed chemical mechanisms leading to secondary organic aerosol in the reactions of aliphatic amines with hydroxyl and nitrate radicals [J]. *Atmos Environ*, 2014, 96: 135-144. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.07.035.
- [11] LI C, YANG X H, LI X H, et al. Development of a model for predicting hydroxyl radical reaction rate constants of organic chemicals at different temperatures [J]. *Chemosphere*, 2014, 95: 613-618. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.020.
- [12] CHIWA M, HIGASHI N, OTSUKI K, et al. Sources of hydroxyl radical in headwater streams from nitrogen-saturated forest [J]. *Chemosphere*, 2015, 119: 1386-1390. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.02.046.
- [13] REN X R, SHAO K S, MIAO G F, et al. Determination of hydroxyl radical concentration in atmosphere concentration in atmosphere [J]. *China Environ Sci*, 2001, 21(2): 115-118. doi: 10.3321/j.issn:1000-6923.2001.02.006.
- 任信荣, 邵可声, 缪国芳, 等. 大气 OH 自由基浓度的测定 [J]. *中国环境科学*, 2001, 21(2): 115-118. doi: 10.3321/j.issn:1000-6923.2001.02.006.
- [14] FLEXAS J, BADGER M, CHOW W S, et al. Analysis of the relative increase in photosynthetic O<sub>2</sub> uptake when photosynthesis in grapevine leaves is inhibited following low night temperatures and/or water stress [J]. *Plant Physiol*, 1999, 121(2): 675-684. doi: 10.1104/pp.121.2.675.
- [15] RAY P Z, TARR M A. Petroleum films exposed to sunlight produce hydroxyl radical [J]. *Chemosphere*, 2014, 103: 220-227. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.12.005.
- [16] HANSEL A K, EHRENHAUSER F S, Richards-Henderson N K, et al. Aqueous-phase oxidation of green leaf volatiles by hydroxyl radical as a source of SOA: Product identification from methyl jasmonate and methyl salicylate oxidation [J]. *Atmos Environ*, 2015, 102: 43-51. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.11.055.
- [17] ATKINSON R, AREY J. Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: A review [J]. *Atmos Environ*, 2003, 37(S2): 197-219. doi: 10.1016/S1352-2310(03)00391-1.
- [18] ADAMS J M, CONSTABLE J V H, GUENTHER A B, et al. An estimate of natural volatile organic compound emissions from vegetation since the last glacial maximum [J]. *Chemos-Glob Chang Sci*, 2001, 3(1): 73-91. doi: 10.1016/S1465-9972(00)00023-4.
- [19] HARRISON D, HUNTER M C, LEWIS A C, et al. Isoprene and monoterpene emission from the coniferous species *Abies borisii-regis*: Implications for regional air chemistry in Greece [J]. *Atmos Environ*, 2001, 35(27): 4687-4698. doi: 10.1016/S1352-2310(01)00092-9.
- [20] HOUGH A M, JOHNSON C E. Modelling the role of nitrogen oxides, hydrocarbons and carbon monoxide in the global formation of tropospheric oxidants [J]. *Atmos Environ*, 1991, 25(9): 1819-1835. doi: 10.1016/0960-1686(91)90266-A.