

氟污染对玉米幼苗生长及生理特性的影响

杜海荣¹, 杨田甜², 吕荣芳², 吴林园¹, 王荣富¹

(1.安徽农业大学生命科学学院, 合肥 236000; 2.扬州大学生物科学与技术学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:为探讨氟污染对农作物的影响,以玉米为供试材料,采用砂基培养的方法,研究了不同浓度的氟(F)对玉米幼苗形态、生物量、光合参数、叶绿素含量、抗氧化酶活力以及丙二醛含量的影响。结果表明,与对照相比,低浓度 F($\leq 0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)对玉米幼苗生长无明显抑制现象;随着溶液中 F 浓度的增加,玉米幼苗生长显著受到抑制,叶长、株高生长变慢,叶面积减小;根系和地上部干物质积累下降;叶片中叶绿素合成受阻,光合速率降低;同时丙二醛(MDA)含量增加;过氧化物酶(POD)活性明显升高,而超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性均表现出一定的下降趋势。说明氟的存在不利于植物的正常生长,研究结果还为进一步揭示氟污染机理以及氟污染的综合治理提供了理论依据。

关键词:氟污染;玉米幼苗;生长;生理特性

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)02-0216-07

Effects of Fluoride Pollution on the Growth and Physiological Characteristics of Maize Seedlings

DU Hai-rong¹, YANG Tian-tian², LV Rong-fang², WU Lin-yuan¹, WANG Rong-fu¹

(1.College of Life Science, Anhui Agricultural University, Hefei 236000, China; 2.College of Technology and Biology Science, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Fluoride(F), a common phytotoxic air, water and soil pollutant is commonly released to the environment by a number of industrial processes. The maize was used as an experimental material and the effects of different concentrations of fluoride(0, 0.25, 0.5, 5, 10 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) on the growth and physiological characteristics of maize seedlings were studied using sand cultivation, the plant modality, biomass, parameters of photosynthesis, chlorophyll contents, activities of three anti-oxidative enzymes and malondialdehyde(MDA) contents were all determined. The results were as follows:contrasting to the control of maize seedlings without F, when the F concentration was lower than $0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, the growth of seedlings was stimulated. With the increase of F concentration, the seedling growth was obviously restrained, that was, the leaf length and plant height slowed down markedly, the leaf area reduced, the root/shoot dry weight accumulation decreased and the chlorophyll synthesis in leaves was inhibited and the photosynthesis rate decreased as well. On the other hand, the MDA content and the peroxidase (POD) activities increased while superoxide dismutase(SOD) and catalase(CAT) activities decreased under higher F concentration. The results indicated that the high F concentration was not conducive to the growth of maize seedlings, it also provided theoretical basis for probing into physiological mechanism of fluoride pollution and its comprehensive controlling.

Keywords: fluoride pollution; maize seedlings; growth; physiological character

随着现代工业的发展,环境污染日益严重,而氟污染是自然环境众多污染中一种常见的污染形式,因其污染面积大、毒性强而对农业生产构成了严重的危害,对农业生态系统的影响仅次于二氧化硫,它的排

放量虽然没有二氧化硫那么多,但对植物的毒害作用比二氧化硫大 20~300 倍^[1]。因此,氟污染一直是研究的热点问题,国内外学者曾进行了大量的报道。引起环境污染的氟化物,主要来自工业生产过程,有关氟污染对农作物生长的影响,已有的研究主要以大型工业企业(炼钢厂、大型铝厂等)为对象,从生化分析和生理观察的角度,研究氟污染对生物(特别是植物)的影响,并通过分析植物体内氟化物的含量和生理变化来判定植物的抗性。更有研究表明,植物从大气或土

收稿日期:2009-06-21

作者简介:杜海荣(1982—),男,甘肃礼县人,在读硕士,主要从事植物逆境生理研究。E-mail:Duhaierong224@126.com

通讯作者:王荣富 E-mail:rffwang@ahau.edu.cn

壤吸收的氟化物,可能会产生两方面的环境效应:一方面是植物对氟化物的吸收会因作物的收获而脱离大气和土壤,起到净化空气和土壤的作用,并减小对浅层地下水氟污染的可能性;另一方面,氟化物被植物吸收后能在体内转移和积累,而植物体内的氟可能会通过食物链进入人和动物体内,引起人和动物氟中毒^[2]。氟化物对植物生长的影响是多方面的,微量氟对植物生长无害,甚至有促进作用,但环境中氟含量过高,则会抑制植物生长发育^[3],使植物正常的生理代谢受到抑制,引起减产以至死亡。

以往的研究偏重于大气中氟污染对植物影响的探索,对大气中氟的含量标准,植物吸收富集氟化物的能力以及对植物伤害阈值有较多的研究,而对土壤和水体氟污染的研究不如大气氟对植物影响研究多。少数学者仅对部分指标进行了研究,不足以对植物的氟害机理进行全面理解。本试验采用砂基培养的方法,研究了不同氟浓度对玉米幼苗生长及生理特性的影响,探讨氟对玉米的伤害机理,试图阐明植物受氟污染的生理机制,为认识氟污染的机理以及氟污染的综合治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料处理

供试玉米(*Zea mays*)为金海五号,由山东莱州金海种业有限责任公司提供。挑选大小均匀的种子,经 0.1% HgCl_2 消毒、25℃浸种 12 h、人工智能培养箱中催芽后挑选萌发一致的种子若干粒播种在洗净的装有石英砂的塑料盘中自然生长,待幼苗长到一叶一心时,每盘再选留长势一致的幼苗,在浇营养液之前每盘先用 100 mL 不同浓度的处理液处理 12 h,以增加玉米幼苗对氟的敏感性,然后再浇 1/2 Hoagland 营养液,幼苗长到二叶一心时,浇 Hoagland 营养液,幼苗长到三叶一心时,开始浇灌含有不同浓度氟的处理液;处理材料用日光色镝灯提供光照,苗顶光强约 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,昼夜温度 28℃/25℃,光暗周期为 12 h/12 h。共设 5 个处理,每个处理 3 次重复。

1.2 试验设计

试验设 4 个氟处理,其浓度分别为 0.25、0.5、5、10 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,同时设不加氟对照;氟以氟化钠(NaF)形态供应。各处理液用去离子水配制,用稀 NaOH 或稀 HCl 调 pH 至 6.2,为防止 F^- 和营养液中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等产生沉淀,处理时先每盘浇 100 mL 不同的处理液,12 h 后,每盘浇 100 mL 的 Hoagland 营养液,同

时对叶面同步喷施营养液。两日为一个循环,以后每次浇处理液之前用去离子水冲洗沙基,以避免盘中积累过多的盐分。10 个循环处理后,即处理第 20 d 后,开始取样测定各项生理指标。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 植株形态指标测定

植株株高用直尺直接测量,取倒数第二片完全展开叶按最长叶测定叶长和叶宽,以系数法计算叶片面积^[4](叶面积=长×宽×0.82)。

1.3.2 生物量测定

取样 4 株,分地上部和地下部,称重后 105℃杀青 30 min,80℃烘干至恒重后称干重并计算平均值。

1.3.3 光合特性和叶绿素含量测定

选新完全展开叶片用 Li-cor6400 光合仪(Li-cor, USA)测定固定光强($800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,叶室温度为 25℃)下的光合速率等光合指标。测定参数包括:光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)。叶绿素含量测定:取叶片 0.05 g 鲜重,剪碎后加入 10 mL 提取液(无水乙醇:丙酮=1:1),28℃下遮光浸泡提取至样品发白无色,然后分光光度计分别测量 OD_{663} 和 OD_{645} 值,计算叶绿素 a 和叶绿素 b 含量及 a/b。

1.3.4 抗氧化酶活力和丙二醛含量测定

取 1 g 左右的玉米幼苗叶片去叶脉剪碎,置于预冷的研钵中,加入预冷的 pH=7.8 的磷酸缓冲液 10 mL 进行冰浴研磨提取,然后转入离心管离心,匀浆液低温离心($15\,000 \text{ r} \cdot 15 \text{ min}^{-1}$),取上清液测定以下指标。SOD 活力:NBT 法,超氧化物歧化酶(SOD)活性单位以抑制 NBT 光化还原的 50%为一个酶活性单位表示;过氧化物酶(POD)活力:愈创木酚法,以每分钟内 A_{470} 变化为一个过氧化物酶活性单位(U);过氧化氢酶(CAT)活力:采用过氧化氢分解量法,以每分钟内 A_{240} 变化 0.01 为一个过氧化氢酶活性单位(U);丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法。

1.4 统计方法

数据采用 Excel 和 SPSS13.0 进行统计方差分析和 LSD 多重比较($\alpha=0.05$),判断处理之间差异的显著性。

2 结果及分析

2.1 氟污染对玉米幼苗植株形态及生物量的影响

氟化物对植物产生的毒害,直观表现为植物生物量的下降和植株形态的改变。在 F 胁迫下,玉米幼苗

受到的影响显而易见,植株表现为单株、地上部及地下部分干重均随 F 浓度的增加而下降,在低 F 浓度 ($\leq 0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 时略为升高,然后随着 F 浓度增加而降低(表 1),总体呈递减趋势;F 对玉米幼苗干重影响显著($\alpha=0.05$),与对照相比,单株干重下降更明显,浓度为 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,单株干重下降均达到 24% 以上,地上部干重和根部干重也比对照分别下降了 20.19% 和 34.89%;F 对玉米根干物质重影响大于茎叶,根冠比随着氟浓度的增加而减少^[5]。从形态上来看,随着氟处理浓度的增加,叶长、叶面积及株高显著下降,而叶宽在高浓度氟处理下 ($\geq 10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 与对照相比差异显著,主要原因是植物通过根系吸收的氟经过茎部输送,在叶组织内积累,最后集聚在叶尖和叶缘,所以叶尖和叶缘对氟的伤害最为敏感^[6],当氟累积到一定程度时,就会抑制植物的正常生长。

2.2 氟污染对玉米幼苗叶绿素含量的影响

植物叶片对氟的吸收能力很强,而叶绿体是氟化物积累的主要场所^[7]。氟化物对叶绿素的影响与其浓度大小有关,如图 1 所示。氟浓度为 $0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,玉米幼苗叶绿素受到轻微的刺激而有所上升,随着氟浓度的升高,然后又显著下降,浓度为 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,与对照相比,叶绿素总量下降了 21.84%,叶绿素 a、b 也随氟浓度的增加而减少;不同氟浓度处理的 a/b 值较对照要高,且氟浓度越高,a/b 值也越高,说明氟化物对叶绿素 b 的影响要大于叶绿素 a,叶绿素 b 是捕光色素的重要组成成分,它的减少影响了其对光的吸收,从而不利于对光能的捕获;当氟浓度 $\geq 5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,a/b 值上升幅度开始变得平缓。造成这种变化形式的原因主要是 F 与叶绿素卟啉环中的 Mg^{2+} 络合,形成难溶性的 MgF_2 沉淀,破坏了叶绿体的结

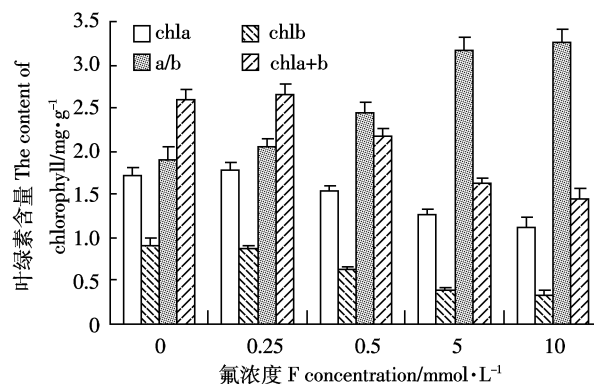


图 1 氟污染对玉米幼苗叶绿素含量的影响

Figure 1 Effect of fluoride pollution on chlorophyll content of maize seedlings

构,促进叶绿素分解,即当 F 浓度大于 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, Mg^{2+} 几乎完全被络合,故叶绿素不再发生显著变化。

2.3 氟污染对玉米幼苗固定光强下光合参数的影响

植物受氟化物污染后,其光合作用受到抑制,氟化物对植物光合作用效应有两个突出特点^[8],即高浓度下氟对光合速率产生一定的抑制作用,且浓度越高,受抑越明显,低浓度氟对光合速率产生一定的刺激作用。如表 2 所示,氟浓度为 $0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, P_n 、 G_s 和 T_r 分别与对照相比上升了 6.42%、9.40%、10.34%;随氟浓度的增加,各参数又表现出一定的下降趋势;相反, C_i 却随氟浓度的增加而上升。产生该结果的主要原因是随着 F 处理浓度的升高,引起细胞抗氧化酶活性的变化,导致酶结构变化,活性丧失,最终使 P_n 逐步下降,从而光合作用同化 CO_2 量减少^[9],导致 CO_2 在叶肉细胞间累积,使 C_i 升高;氟浓度 $\geq 0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,上升幅度显著($\alpha=0.05$),高浓度氟使叶肉细胞消耗 CO_2 的能力降低。表明在氟污染条件下,玉米 P_n 随着污染浓

表 1 氟对玉米幼苗生物量和叶片形态指标的影响

Table 1 Effects of fluoride pollution on biomass and modality indexes of maize seedlings

氟浓度/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	0	0.25	0.5	5	10
单株干重/ $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$	1.216±0.009a	1.219±0.018a	1.153±0.009b	0.914±0.026c	0.466±0.021d
地上部干重/ $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$	0.832±0.005a	0.841±0.024a	0.822±0.008a	0.664±0.024b	0.351±0.015c
根部干重/ $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$	0.384±0.012a	0.378±0.008a	0.331±0.002b	0.250±0.005c	0.115±0.007d
根冠比	0.461±0.016b	0.449±0.009b	0.403±0.004c	0.376±0.017b	0.328±0.012a
叶长/cm	44.975±0.15a	45.30±0.43a	44.575±0.23a	41.800±0.23b	33.65±0.21c
叶宽/cm	3.425±0.048a	3.475±0.085a	3.525±0.125a	3.200±0.091a	2.650±0.171b
叶面积/ cm^2	126.33±2.17a	129.115±3.87a	128.778±3.96a	109.713±3.50b	73.17±5.02c
株高/cm	15.125±0.149a	15.226±0.131a	15.250±0.318a	13.800±0.129b	10.50±0.255c

注:表中同一行数据后标不同字母者为差异显著($\alpha=0.05$)。

Note: Different lower case letters beside the data in the same row denote significant difference at 5% level.

度的提高而下降主要由非气孔限制所致。同时,植物叶片受到氟害后,组织老化,叶绿素含量降低,使其捕获光能和转化成化学能的能力减弱,导致 Pn 明显下降。

表 2 氟污染对玉米幼苗固定光强下光合参数的影响

Table 2 Effects of fluoride pollution on the parameters of photosynthesis of maize seedlings in a fixed light intensity

处理/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	$Pn/μ\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$G_s/μ\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$C_i/μ\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	$Tr/mmol \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
0	11.967±0.066b	0.115±0.003b	199.067±2.755c	1.499±0.086a
0.25	12.448±0.043a	0.128±0.003a	195.975±1.933c	1.654±0.048a
0.5	11.330±0.110c	0.111±0.005b	199.100±2.268c	1.487±0.042a
5	10.249±0.112d	0.104±0.004b	212.250±1.365b	1.408±0.104b
10	10.029±0.042d	0.063±0.005c	234.250±4.710a	1.413±0.064b

注:表中同一列数据后标不同字母者为差异显著($\alpha=0.05$)。

Note: Different lower case letters beside the data in the same column denote significant difference at 5% level. ($\alpha=0.05$).

2.4 氟污染对玉米幼苗叶片 MDA 量的影响

MDA 是膜脂过氧化作用的最终产物,是膜系统受害的重要指标之一,其含量可以反映细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱^[10]。因此,MDA 的积累在一定程度上反映了体内自由基活动的状况,进而体现细胞膜的伤害程度。由图 2 可看出,随着氟浓度的增加,MDA 含量逐渐上升,说明膜脂过氧化加剧,低浓度氟处理下($\leq 0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),玉米幼苗叶片中 MDA 含量略微有所升高,但与对照无显著差异($\alpha=0.05$),氟浓度为 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,与对照相比上升了 56.95%,当氟浓度 $\geq 0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,叶片中 MDA 含量上升幅度较大。相关分析表明,氟浓度与 MDA 含量呈显著的正相关性,相关系数 $r=0.9001$ 。

2.5 氟污染对玉米幼苗抗氧化酶活性的影响

植物体受到逆境胁迫时会产生大量的活性氧自

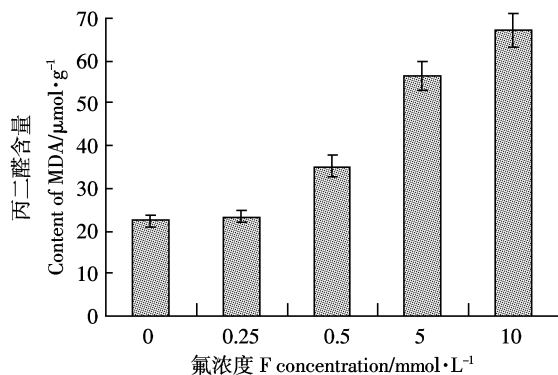


图 2 氟污染对玉米幼苗叶片 MDA 量的影响

Figure 2 Effects of fluoride pollution on MDA content of maize seedlings leaf

由基(O_2^- 、 $\text{OH}^\cdot$ 、 H_2O_2 等),从而对植物的细胞造成伤害,此时植物体会启动抗氧化系统中的酶如 SOD、POD 和 CAT 等试图清除或削弱自由基的毒害作用。如图 3 所示,玉米幼苗经不同浓度的氟处理后,体内活性氧清除系统遭到破坏,叶片内 SOD 活性随 F 浓度的增高先略微增高再递减,但总体呈下降趋势,有的学者把污染逆境下植物 SOD 活性上升的现象称为应激上升^[11]。与 SOD 相反,POD 活性却一直处于上升状态,氟浓度为 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,与对照相比,SOD 活性下降了 21.49%,POD 活性却上升了 83.69%,均达到显著差异水平($\alpha=0.05$),CAT 也表现出下降的趋势,但降幅没有 SOD 明显,与对照也无显著差异,表明 CAT 对氟的敏感性不高。已有研究表明,SOD 是对氟化物最为敏感的酶^[12],本试验结果也证实了这一观点。结合图 2,SOD 是植物细胞中的自由基清除剂之一,而 MDA 是自由基引导的膜脂过氧化的产物,因此,SOD 酶活性与 MDA 含量密切相关。本研究结果也与此相符,在不同浓度的氟化物处理过程中,SOD 酶活性下降,MDA 含量上升,二者呈负相关,而 POD 活性与 MDA 含量呈正相关。

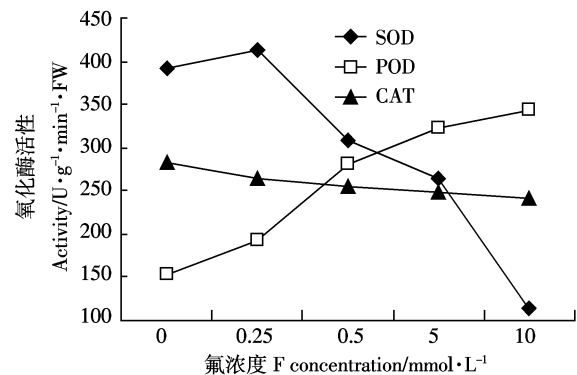


图 3 氟污染对玉米幼苗氧化酶活性的影响

Figure 3 Effects of fluoride pollution on the activity of SOD, POD and CAT of maize seedlings

3 讨论

3.1 氟污染对植物的伤害

植物受氟化物污染后,正常的生理生化过程受到影响,产生不同程度的伤害,氟化物对植物的伤害分为可见伤害和不可见伤害,可见伤害主要表现为生长缓慢,株型矮小,叶片脱落,生育受抑制等,而不可见伤害主要是对植物光合机构、细胞结构^[13]、呼吸代谢以及遗传物质的影响^[14]。

生物量是植物对逆境胁迫响应的综合体现及对

逆境胁迫的综合反应^[15]。如表1所示,不同浓度的氟化物处理玉米幼苗后,从植株的外部形态到生物量,均受到不同程度的影响,国内外已有大量文献报道,高浓度氟对植物生长有明显的抑制作用,但是低浓度下氟对植物促进生长的机理尚不明确,马飞等^[16]的研究结果表明,低浓度氟促进叶片光合产物和结构物质的形成,高浓度氟则相反。在本试验中,低浓度氟的促进作用可能与叶片光合产物的重新分配有关。叶片褪绿是植物受到伤害最典型的外观症状之一,将明显影响植物的产量和品质。

在不失绿的情况下是否影响生长长期以来一直有争论,Benedict等认为无影响^[17],但也有大量报道,指出无可见伤害症状对植物生长有影响。本文研究表明,植物受到不同程度的氟化物污染后,微量氟对植物生长没有明显的伤害,甚至有促进作用,但高浓度的氟无论在可见伤害还是无可见伤害,都对植物生长造成了伤害。

3.2 氟污染对叶绿素和光合作用的影响

叶绿素是高等植物参与光合作用的主要光合色素,也是影响植物光合作用的主要因素之一,叶绿素含量高低在一定程度上反映了植物光合作用水平的强弱。

本文研究结果表明,玉米幼苗受到低浓度氟的轻微刺激后,诱导了叶绿素的合成,从而在很短的一个时期内促进了光合作用进程,进而增强玉米幼苗长势,但促进效果不是很明显。对此,Weistein等^[18]认为是一种类激素刺激作用,但具体机理有待进一步研究。高浓度氟处理使玉米幼苗叶绿素降低,光合受阻,这与国内外大多数研究结果相同。有关高浓度氟化物降低叶绿素、抑制光合作用的观点已为人们公认,但其机制尚不统一。有人认为氟化物取代叶绿素叶啉环中的 Mg^{2+} ,抑制了叶绿素早期合成^[8];还有人根据叶绿体解体同缺绿病同步发生的时间进程,提出叶绿素分子结构崩解是主要原因^[19],对氟污染植物叶片亚显微结构研究表明,细胞损伤最普遍的现象是细胞发生皱缩、干瘪、萎陷,在细胞器中,叶绿体结构破坏最严重,造成叶绿体片状结构难以辨认,外膜内陷^[20];现在研究显示,细胞环境变化导致色素结构变化可能是更重要原因。植物受氟化物污染后,积累在叶片的氟破坏了叶绿体的结构,促进叶绿素的分解,使叶绿素含量下降,导致叶片光合作用受到抑制。

在参阅大量文献的基础上,结合具体试验结果,笔者认为,诸多因素导致了光合速率的降低,但是主

要包括两方面的因素:气孔限制和非气孔限制,非气孔限制是由于叶肉细胞使气孔扩散的阻抗增加、 CO_2 溶解度下降、Rubisco对 CO_2 的亲合力降低以及核酮糖1,5-二磷酸(RuBP)再生能力下降;同时,积累在叶绿体内的氟化物抑制了RuBP羧化酶的活性,而RuBP羧化酶是绿色植物光合过程中固定 CO_2 的一种重要酶。有研究表明,当大气中氟化物含量超过 $0.5\text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,离体小麦叶片的RuBP羧化酶的活性就会受到抑制,从而抑制其光合作用^[21],且随其浓度的增加和受害时间的延续,氟化物对光合机构的损害越严重^[22];也有试验表明, $30\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaF溶液可使叶绿体ATP酶的活性平均下降54.25%^[23],因而降低了叶绿体ATP酶合成ATP的能力。正常环境条件下ATP是植物光合过程中重要的中间产物,如果ATP合成量减少,则意味着光合暗反应中植物固定 CO_2 的能力——同化力的下降^[24],导致 CO_2 在胞间积累;而逆境下,ATP合成量的减少可以缓解过多ATP对叶绿体的伤害。气孔限制则是由于叶肉细胞气孔开度的下降导致 C_i 下降,使叶绿体内 CO_2 供应受阻。从本文研究的结果来看(如表2),植物受到氟化物污染后,尽管 G_s 随处理浓度的增加而下降并且下降幅度显著($\alpha=0.05$),但并没有直接导致 C_i 的下降,相反, C_i 还有所上升,因此可以说明,光合速率的下降与气孔导度的减小有着一定的联系,但主要原因还是非气孔限制因素所致,非气孔限制因素直接导致了光合速率的下降。

3.3 氟污染对抗氧化酶活性的影响

自由基是机体正常代谢的产物,虽然它在细胞代谢过程中不断地产生,但由于机体自身存在保护系统,能不断地清除自由基,故正常情况下无危害。当植物处于逆境条件时,细胞内自由基的产生和清除的平衡会遭到破坏,此时积累的自由基就会对植物的细胞造成伤害,而自由基伤害与膜脂过氧化的关系更受到广泛重视。植物逆境下产生的自由基会引发膜脂的过氧化作用,攻击类脂中不饱和脂肪酸而引发一系列自由基反应,最终使膜脂和膜蛋白损伤而使细胞内膜系统破坏,造成细胞膜系统的伤害。膜脂过氧化作用增加是植物受环境胁迫伤害的共同特征之一,丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的主要产物之一,同时MDA又可与细胞膜上的蛋白质、酶等结合,引起蛋白质分子内和分子间的交联,从而使蛋白失活,破坏了生物膜的结构与功能^[25]。

如图2所示,氟处理下,玉米幼苗体内MDA含

量增加,组织自动氧化速度加快,且具浓度效应,即随氟处理浓度的提高,玉米幼苗体内 MDA 含量和组织自动氧化速率增加越显著。SOD、POD、CAT 共同组成植物体内一个有效的活性氧清除系统,三者协调一致的共同作用,能有效清除植物体内的自由基和过氧化物^[26]。本研究表明,玉米幼苗经过不同浓度的氟处理后,产生的影响各不相同,SOD 活性先升后降,POD 持续上升,CAT 虽有下降,但总的影响不是很明显;前人的研究结果说明 SOD 是一种诱导酶,较低剂量氟化物的刺激可能诱导 SOD 酶活力升高,但随剂量加大,又抑制 SOD 酶活力,这与氟在植物体内累积的量与其产生的效应有关。如图 3 所示,氟浓度 $\leq 0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,SOD 活性与对照相比上升了 5.1%。本试验中,低氟处理时,玉米幼苗叶片中的 SOD 和 POD 活性随之升高,这是玉米幼苗对氟胁迫的适应性反应,对于降低体内活性氧自由基毒害、保护膜结构完整性有积极作用,在一定程度上忍耐、减缓或抵抗 F 胁迫;这符合了上述所说的高活性的保护酶能够降低膜脂过氧化作用,与前人的研究结论相一致。随处理浓度的增加,叶片 MDA 含量与 SOD 活性变化相反,主要是由于 SOD 活性的下降,保护酶防御系统能力降低,SOD 活性的这种变化趋势与勾晓华等^[27]研究结果一致;Seppanen 等^[28]对马铃薯中 SOD 活性研究表明,SOD 有利于防止过氧化反应导致的毒害,植物氟污染后,SOD 活力的下降,削弱了抗氧化系统的能力,最终会引起可见伤害,这在其他氟化物对植物伤害的研究中已得到证实。从本试验研究的结果来看,不同氟处理下,POD 活性大幅上升,主要是氟通过一系列生理生化过程,产生很多过氧化物,过氧化物酶底物增加,使得过氧化物酶活性渐增加。POD 活性的上升使活性氧清除系统在一定范围内保持平衡,从而保证植物体自身正常的生长代谢。目前认为 POD 活性上升可能是氟化物通过抑制 SOD 活性,使植物清除 O_2 的能力下降,造成 O_2 的大量积累。而 O_2 与 H_2O_2 反应生成氧化性和破坏性更强的羟自由基($\text{OH} \cdot$),POD 具有清除叶绿体中 H_2O_2 和少量 O_2 的能力,SOD 活性的下降刺激了 POD 活性的上升^[29]。

4 结 论

从本文研究的结果看,尽管低浓度氟化物在某种程度上促进了玉米幼苗的生长,但总体来看,氟化物的存在是不利于植物的生长的,微量氟对植物生长促进效应的机理也尚不明确,且目前也没有证据证明氟

是植物生长的必需元素。因此,不能否认,这种低浓度氟处理对植物生长和有关酶活性短时间的提高是植物自身的一种保卫反应,还是氟参与了其生理过程,这些问题还需进一步探讨。

参考文献:

- [1] 朱文江, 吴卫. 上海市郊氟化物污染对农业的影响 [J]. 中国环境科学, 1990, 10(5): 393–396.
ZHU Wen-jiang, et al. Effects of fluoride pollutants on agriculture in the suburbs of Shanghai [J]. *Chin Environ Sci*, 1990, 10(5): 393–396.
- [2] Loganathan P, Hedley M J, Wallace G C, et al. Fluoride accumulation in pasture forages and soils following long-term applications of phosphorus fertilizers [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 115: 275–282.
- [3] Arnesen A K M. Availability of fluoride to plants grown in contaminated soils [J]. *Plant and Soil*, 1997, 191: 13–25.
- [4] 江海东, 周琴, 李娜, 等. Cd 对油菜幼苗生长发育及生理特性的影响 [J]. 中国油料作物学报, 2006, 28(1): 39–43.
JIANG Hai-dong, ZHOU Qin, LI Na, et al. Effect of Cd on the growth and physiological characteristics of rape seedlings [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2006, 28(1): 39–43.
- [5] 于群英, 李粉茹, 慈恩. 氟对土壤理化性质和玉米生长的影响 [J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 103–107.
YU Qun-ying, LI Fen-ru, CI En. Effects of fluorine on soil physical and chemical properties and maize growth [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(3): 103–107.
- [6] 吴代赦, 吴铁, 董瑞斌. 植物对土壤中氟吸收、富集的研究进展 [J]. 南昌大学学报·工科版, 2008, 30(2): 103–111.
WU Dai-she, WU Tie, DONG Rui-bin, et al. Advances in absorption and enrichment of soil fluoride by plants [J]. *Journal of Nanchang University*, 2008, 30(2): 103–111.
- [7] Meistrick V. Direct Effects air of pollutants on plants—fluorides [M]//Allan H L, Sagar V K. Air pollution and plants. New York: New York Press, 1994, 133–141.
- [8] 周青, 黄晓华. 大气氟污染对农作物的危害 [J]. 农业环境保护, 1992, 11(5): 228–231.
ZHOU Qing, HUANG Xiao-hua. The harm of atmospheric fluoride pollution on crops [J]. *Agro-environmental Protection*, 1992, 11(5): 228–231.
- [9] 明华, 曹莹, 胡春胜, 等. 铅胁迫对玉米光合特性及产量的影响 [J]. 玉米科学, 2008, 16(1): 74–78.
MING Hua, CAO Ying, HU Chun-sheng, et al. Effect of lead stress on the photosynthetic characteristics and yield of maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(1): 74–78.
- [10] Becana M, Dalt on D A, Moran J F, et al. Reactive oxygen species and antioxidants in legume nodules [J]. *Physiologia Plantarum*, 2000, 109(4): 372–381.
- [11] 王建华, 徐同. 模拟酸雨对棉花子叶圆片膜保护酶活性和膜脂质过氧化作用的影响 [J]. 应用生态学报, 1993, 13(3): 228–234.
WANG Jian-hua, XU Tong. Effect of the simulated acid rain on the protecting enzymes and lipid peroxidation of membrane in cotton

- cotyledon disc[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 13(3): 228–234.
- [12] 孟范平, 李桂芳, 吴方正. 氟化氢对植物抗氧化酶活性的影响[J]. 环境导报, 1997(6): 18–22.
- MENG Fan-ping, LI Gui-fang, WU Fang-zheng. Effect of HF on the activity of antioxidative enzymes in plants[J]. *Environment Herald*, 1997(6): 18–22.
- [13] Domingos M, Klumpp A, Rinaldi M C S, et al. Combined effects of air and soil pollution by fluoride emissions on *tibouchina pulchra* cogn, at Cubatao, SE Brazil, and their relations with aluminium[J]. *Plant and Soil*, 2003(249): 297–308.
- [14] Gristan N P. Cytogenetic effect of gaseous fluorides on grain crops[J]. *Fluoride*, 1993, 26(1): 23–32.
- [15] Muppala P, R eddy. Meenakshi Kaur. Sodium fluoride induced growth and metabolic changes in *salicornia brachiata* roxb[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2008, 188: 171–179.
- [16] 马 飞, 欧明君, 葛才林. 氟污染对作物光合产物输配的影响[J]. 农业环境保护, 2001, 20(2): 94–97.
- MA Fei, OU Ming-jun, GE Cai-lin. Impacts of fluorine pollution on transportation and distribution of photosynthates in crops[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(2): 94–97.
- [17] 谢正苗, 吴卫红, 徐建民. 环境中氟化物的迁移和转化及其生态效应[J]. 环境科学进展, 1999, 7(2): 40–52.
- XIE Zheng-miao, WU Wei-hong, XU Jian-min. Translocatton and transformatton of fluorifes in the environment and their biological effects[J]. *Advances in Environmental Science*, 1999, 7(2): 40–52.
- [18] Weistein L H. Effects of gaseous air pollution in agriculture and horticulture[M]. London: Butterworth Scientific, 1982.
- [19] Miller G W, The effect of fluoride on higher plant [J]. *Fluoride*, 1993, 26(1): 3–22.
- [20] Fornasiero R B. Phytotoxic effect of fluorides[J]. *Plant Science*, 2001, 161: 979–985.
- [21] Parry M A J. Inhibition of ribulose-P₂ carboxylase/oxygenase by fluoride[J]. *J of Enperi Bot*, 1984, 35(3): 1177–1181.
- [22] Mackowiak C L, Grossl P R, Bugbee B G. Biogeochemistry of fluoride in a plant-solution system[J]. *J Environ Qual*, 2003, 32: 2230–2237.
- [23] Giannini J L, et al. The partial characterization of fluoride inhibition of chloroplast coupling factor[J]. *J of Fluochem*, 1998, 41: 79–93.
- [24] Giannini J L, et al. Effect of NaF on biochemical processes of isolated soybean chloroplast[J]. *Fluoride*, 1995, 18(2): 72–78.
- [25] Kanazawa S, Sano S, Koshiba T, et al. Changes in antioxidative enzymes in cucumber cotyledons during natural senescence: comparison with those during dark-induced senescence[J]. *Physiologia Plantarum*, 2000, 109(2): 211–216.
- [26] Elkahoui S, Hernandez J A, Abdelly C, et al. Effects of salt on lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities of *catharanthus roseus* suspension cells[J]. *Plant Science*, 2005(168): 607–613.
- [27] 勾晓华, 王勋陵. 氟化氢对植物叶片中 SOD 酶活力和 MDA 含量的影响[J]. 西北植物学报, 1995, 15(5): 71–76.
- GOU Xiao-hua, WANG Xun-ling. Effects of HF on activity of superoxide dismutase and concentration of MDA in plants[J]. *Acta Bot Bore-al—Occident Sin*, 1995, 15(5), 71–76.
- [28] Seppanen M M, Fagerstedt K. The role of superoxide dismutase activity in response to cold acclimation in potato[J]. *Physiol Plant*, 2000, 108: 279–285.
- [29] 徐丽珊, 申秀英, 许晓路. 氟化物危害佛手的生理生化表现[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 653–656.
- XU Li-shan, SHEN Xiu-ying, XU Xiao-lu. Physiological and biochemical manifestation of the fingered citron polluted-fluoride[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4): 653–656.