

汞对烤烟光合作用和叶绿素荧光参数的影响

于建军¹, 张贵龙^{1,2}, 黎 娅³, 熊淑萍¹, 马新明¹

(1. 河南农业大学, 河南 郑州 450002; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 河南省经贸职业学院, 河南 郑州 450053)

摘 要:通过盆栽试验,研究了汞污染对烤烟光合作用和叶绿素荧光参数的影响。结果表明,汞能降低烤烟叶片气孔导度(Cond)和胞间 CO₂ 浓度(Ci),且低浓度(≤30 mg·kg⁻¹)的汞能提高烤烟叶片叶绿素含量和叶片光合速率(Pn),高浓度(≥60 mg·kg⁻¹)的汞使叶绿素含量和叶片光合速率(Pn)下降;当汞浓度低于 30 mg·kg⁻¹ 时,PS II 最大光化学效率(Fv/Fm)和 PS II 潜在光化学效率(Fv/Fo)升高,当汞浓度高于 60 mg·kg⁻¹ 时降低,而光化学猝灭系数(qP)变化趋势与其相反。非光化学猝灭系数(qNP)在汞处理浓度低于 10 mg·kg⁻¹ 时降低,在汞处理浓度高于 30 mg·kg⁻¹ 时升高;烟叶中汞的残留量随汞处理浓度升高而增加,并与叶绿素含量显著负相关。表明土壤汞污染引起烤烟叶片与外界气体交换受阻,叶片光合速率变化受气孔和非气孔因素调节。低浓度的汞刺激叶绿素合成,提高 PS II 化学活性和能量转化效率,改善 PS II 反应中心结构,减少能量耗散,提高光合效率。高浓度的汞降低叶绿素含量,抑制 PS II 化学活性和能量转化效率,加强能量耗散,降低光合效率。

关键词:烤烟;汞;光合作用;叶绿素荧光

中图分类号:X503.231 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)05-1963-06

Effects of Mercury on Photosynthesis and Chlorophyll Fluorescence Parameters of Flue-cured Tobacco

YU Jian-jun¹, ZHANG Gui-long^{1,2}, LI Ya³, XIONG Shu-ping¹, MA Xin-ming¹

(1. Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Henan Economy and Trade Vocational College, Zhengzhou 450053, China)

Abstract: In order to understand the mechanism of the effect of mercury (Hg) pollution on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters in tobacco, pot experiments were carried out on Henan agricultural university research station in 2005. The cultivar used was Yunyan 85. Compounds of Hg(Ac)₂ were mixed into soil with different levels of 0, 10, 30, 60, 90 and 120 mg·kg⁻¹. The net photosynthetic rate (Pn), CO₂ concentration in internal cells(Ci) and stomatal conductance(Gs) of functional leaves from the same position were determined with a mobile photosynthetic meter (LI-6400). Maximal fluorescence (Fm), fixed fluorescence (Fo) and steady fluorescence (Fs) were determined in the dark (for 15 min) and maximal fluorescence in the light (Fm') were determined with a Hansatech FMS2 photo-fluorometer. PS II activity (Fv/Fo), PS II maximum light energy transformation (Fv/Fm), chemical quenching coefficient (qP), and non-photochemical quenching coefficient (qNP) were calculated. The average numerical values of reductive sugar, total N, nicotine, and Kalium contents in tobacco leaves and leaf yield per plant were measured. The results showed that stoma conductance (Cond) and intercellular CO₂ concentration had a decreasing trend with the increase in Hg concentrations. The maximal PS II light energy transformation efficiency (Fv/Fm), PS II activity (Fv/Fo), photochemical quenching coefficient(qP), chlorophyll content of tobacco leaves, and net photosynthesis rate(Pn) all increased with Hg concentrations less than 30 mg·kg⁻¹, but they decreased at Hg concentrations more than 60 mg·kg⁻¹. Non-photochemical quenching coefficient(qNP) decreased when Hg concentration was 10 mg·kg⁻¹, but increased at Hg concentrations more than 30 mg·kg⁻¹. Content of Hg in tobacco leaves increased with Hg concentrations, and had a significantly negative correlation with the content of chlorophyll in tobacco leaves. These indicated that gas exchange between tobacco leaves and atmosphere was blocked under Hg pollution, and net photosynthesis rate was modulated by stomatal and non-stomal factors. Low concentration of Hg could stimulate the formation of chlorophyll, increase PS II

收稿日期:2007-09-21

基金项目:国家烟草专卖局资助项目(110200201005)

作者简介:于建军(1957—),男,河南郑州,副教授,主要从事烟草草学研究。

通讯联系人:马新明 E-mail xinmingma@126.net

activity and light energy transformation, improve the structure of PS II reaction center, decrease energy loss and increase photosynthesis rate; however, high concentration of Hg showed the reverse effects.

Keywords: flue-cured tobacco; mercury; photosynthesis; chlorophyll fluorescence

随着化学工业的迅速发展,汞类化合物被广泛应用于农业、工业和医药业^[1,2]。但汞作为生命非必需元素极易在环境(土壤)中积累,不仅对作物生长具有强的毒害作用^[3,4],而且严重威胁人类健康^[5-7]。研究表明,汞进入人体后,与人体蛋白质的巯基(-SH)结合,改变蛋白质结构,干扰蛋白质功能,甚至引起人体关键酶失去活性^[8]。植物受汞毒害后,细胞基因组 DNA 断裂, DNA 甲基化水平改变,根尖细胞增殖降低,有丝分裂异常,出现染色体片断,染色体桥等染色体畸形^[9,10]。汞能引起烟草、水稻等作物叶绿素含量^[11,12]和抗氧化酶系清除自由基的功能降低,膜脂氧化作用加剧^[13,14]。这些已有的研究为我们进一步研究汞对作物危害机理和耐性机制奠定了理论基础。迄今为止有关汞对作物危害无损鉴定指标的研究尚不多见。光合特性和叶绿素荧光参数是作物对逆境胁迫较灵敏的指标,在逆境条件下,这些指标的变化可对作物受害进行无损鉴定^[15]。本试验以烤烟为材料,研究汞污染条件下烤烟的光合和叶绿素荧光参数的变化规律,探索汞对烤烟生长毒害的机理,以期通过无损鉴定快速诊断烤烟受汞污染的程度,进一步丰富无公害烟叶生产理论。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验采用盆栽方式于 2005 年在河南农业大学科教园区进行。以云烟 85 为供试品种,所用土壤潮土, pH=7.5, 有机质 $0.84 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $8.85 \times 10^2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $65.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $20.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $2.38 \times 10^2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 汞的本底值 $0.0308 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。用醋酸汞作污染源,以分析纯 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 KNO_3 和 KH_2PO_4 作基肥与醋酸汞一起施入土壤($\text{N:P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=1:1.5:3$),施氮量为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验采用完全随机区组设计^[31],设 6 个处理,15 次重复,按纯汞计算土壤中施汞浓度为 0、10、30、60、90、120 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,以不施醋酸汞的 0 处理为对照。

1.2.2 操作过程

在烟苗移栽前 15 d 把过筛后的土壤装入塑料盆中(规格 $400 \text{ mm} \times 340 \text{ mm}$),每盆盛干土 15 kg,然后按试验设计的处理要求分别施入不同浓度的醋酸汞,并充分搅拌与土壤均匀混合。装土后每盆浇等量的水,移栽前 5 d 疏松土壤。移栽时选叶龄为 8.1 的健壮烟苗移栽,移栽后的管理同一般大田生产。

1.2.3 仪器和药品规格

叶绿素测定仪为日本美能达(MINOLTA)公司生产的 SPAD-502 型,光合测定仪为美国 Li-COR 公司生产的 Li-6400 型,荧光测定仪为英国 Hansatech 公司生产的 FMS2 调制式。所用的醋酸汞的规格为 25 $\text{g} \cdot \text{瓶}^{-1}$,分析纯。

1.3 叶绿素含量测定

在移栽后 60 d 选取生长一致的 5 棵植株,用叶绿素测定仪(SPAD-502)测定倒 3 叶叶绿素含量,以 SPAD 值表示。

1.4 光合作用测定

用 Li-6400 型便携式光合作用测定系统测定。选择晴朗的天气于上午 9:30—11:30 测定净光合速率(P_n)、气孔导度($Cond$)和蒸腾速率(Tr)。仪器使用开放式气路, CO_2 浓度为 $385 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 左右。测定光为自然光,在现蕾期每处理选生长一致的植株 5 株,选倒 3 叶测定。

1.5 叶绿素荧光测定

测定光合作用的同时,用 FMS2 调制式荧光测定仪测定。叶片在光下夹上叶夹后正对太阳光 15 min 后,测定叶片实际生长光强下的荧光值(F_s);暗适应叶片可变荧光 F_v , PS II 最大光化学效率= F_v/F_m , PS II 潜在光化学效率= F_v/F_o ,其他参数均有仪器自动计算生成。试验数据用 Excel 处理,多重比较采用 Duncan's 新复极差法^[32]。

2 结果与分析

2.1 汞对烤烟光合作用的影响

2.1.1 对烤烟叶片叶绿素含量和光合速率的影响

叶绿素是高等植物吸收光能的主要色素,其含量高是衡量叶片光合能力的重要农学参数^[16]。

不同浓度的汞处理后,烟草叶绿素含量发生不同

的变化(图 1)。移栽后 60 d, $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理叶绿素含量分别较对照增加 4.91% 和 16.14%, 当土壤汞污染浓度高于 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 随土壤汞浓度的升高叶绿素含量明显下降。60、90、120 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别比对照下降 1.91%、15.32%、22.68%。汞浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 叶片光合速率分别比对照增加 0.27% 和 1.53%。当汞浓度大于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 表现为随汞浓度的增大, 烟叶光合速率呈先升后降的趋势(图 2)。当汞浓度为 60、90 和 120 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 叶片光合速率分别比对照下降 1.07%、2.11% 和 3.49%。表明低浓度 ($\leq 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的汞污染可以刺激烤烟叶绿素的合成, 提高光合速率, 高浓度 ($\geq 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的汞可以抑制叶绿素合成, 降低光合速率。

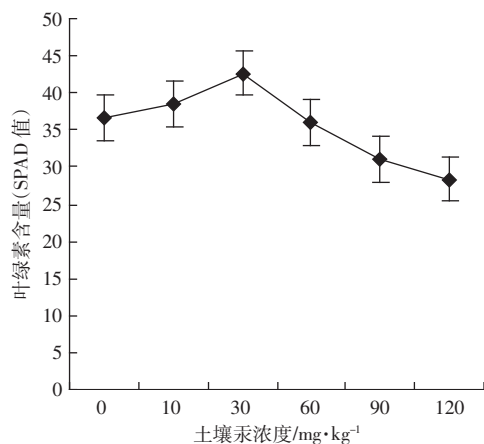


图 1 土壤汞污染对烤烟叶绿素含量的影响

Figure 1 Effect of mercury pollution in soil on the content of chlorophyll in flue-cured tobacco leaves

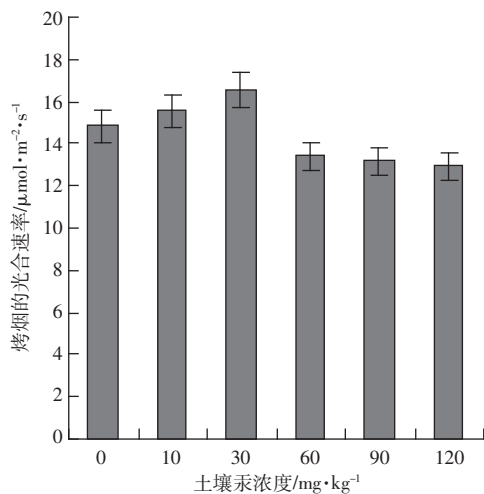


图 2 土壤汞污染对烤烟光合速率的影响

Figure 2 Effect of mercury pollution in soil on photosynthesis rate of flue-cured tobacco

2.1.2 对叶片气体交换的影响

叶面气孔控制着植物的光合和蒸腾作用, 气孔导度与植物光合效率具有一定的耦合关系^[17,18]。测定结果表明(图 3), 随汞浓度的升高烤烟叶片气孔导度明显下降, 且表现为低浓度处理 ($\leq 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 下降幅度小, 高浓度处理 ($\geq 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 下降幅度大。说明汞对烤烟叶片气孔导度的影响具有一定的累加效应。由图 4 可以看出, 烤烟叶片胞间 CO_2 浓度 (C_i) 总体表现为随汞浓度的升高而降低, 其变化趋势与气孔导度相似, 但是下降的幅度较小。这可能是两方面原因所致, 一方面由于叶片气孔导度下降, 外界 CO_2 向叶内扩散受阻, 进入叶片 CO_2 的量减少, 引起叶片内 CO_2 浓度降低。另一方面由于叶片光合速率下降, 所同化的 CO_2 减少, 所以胞间 CO_2 下降的速度较慢。

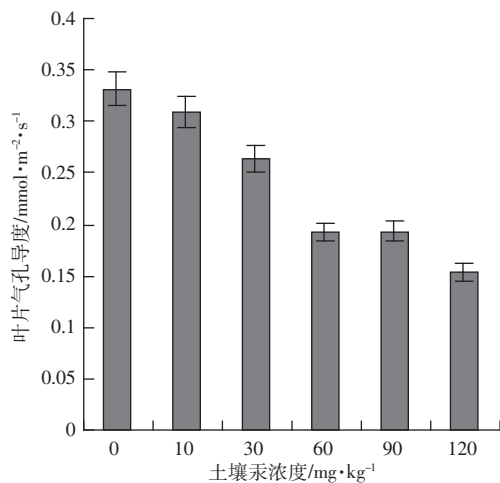


图 3 土壤汞污染对烤烟叶片气孔导度的影响

Figure 3 Effect of mercury pollution in soil on stomata conductance in flue-cured tobacco leaves

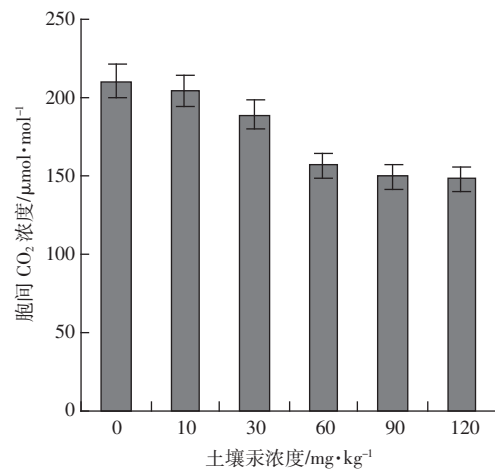


图 4 土壤汞污染对烤烟叶片胞间 CO_2 的影响

Figure 4 Effect of mercury pollution in soil on intercellular CO_2 concentration in flue-cured tobacco leaves

2.2 汞对烤烟叶绿素荧光参数的影响

2.2.1 对 PS II 光化学效率和活性的影响

由表 1 可以看出,汞浓度较低时($\leq 30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时,烤烟叶片 Fv/Fm 与对照相比分别升高 1.77%, 5.77%。当汞浓度高于 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,随处理浓度的增加 Fv/Fm 降低,表明汞胁迫使 PS II 受到了伤害,降低了 PS II 原初光能转化效率,光合作用原初反应过程受抑制,光合电子由 PS II 反应中向 QA、QB 及 PQ 库传递过程受到影响。减少了叶绿体激发能从捕光色素蛋白复合体(LHC II)向 PS II 传递,这可能与高浓度的汞使 PS II 捕光色素蛋白复合体(LHC II)变性有关。

植物叶片 PS II 的光化学活性可以用 Fv/Fo 值来表示^[6]。结果(表 1)表明,随汞浓度的升高 Fv/Fo 的变化趋势和 Fv/Fm 的相同,在低浓度($\leq 30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时, Fv/Fo 值随汞浓度增加而升高,高浓度($>30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时, Fv/Fo 值与对照相比明显下降。表明土壤中汞轻度污染时,能提高 PS II 的光化学活性,高浓度时抑制 PS II 的光化学活性。

2.2.2 对荧光淬灭和光能耗散的影响

结果表明(表 1),随土壤汞浓度增加,烤烟叶片 qP 变化分两个阶段,在低浓度($\leq 30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)处理下,随处理浓度增加而降低。高浓度处理($\geq 60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)使 qP 明显增加。非光化学淬灭系数(qNP)反映 PS II 天线色素吸收的光能不能用于光化学电子传递而以热的形式耗散的部分^[9]。非光化学能量耗散的提高,有助于耗散过剩的激发能,缓解环境对光合作用的影响。所以非光化学淬灭是一种自我保护机制,对光合机构起一定保护作用。在不同浓度的汞处理下, qNP 值发生变化(表 1),在 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下比对照降低 22.42%。当汞浓度大于 $30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时 qNP 值升高。说明烤烟对高浓度汞适应是通过加快叶黄素循环,耗散过剩能量,保护光合机构^[21]来实现的。

表 1 汞污染对烤烟叶绿素荧光参数的影响
Table 1 Effect of mercury pollution on chlorophyll fluorescence parameters

汞浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Fo	Fm	Fv	Fv/Fm	Fv/Fo	qP	qNp
0	167.33a	880.33a	723.00a	0.82a	4.32b	0.43b	0.52a
10	147.01b	847.33a	700.33a	0.83a	4.76b	0.42b	0.37b
30	130.00c	865.00a	718.00a	0.83a	5.52a	0.36c	0.55a
60	150.00b	774.00b	623.00b	0.80b	4.15b	0.61a	0.77a
90	154.33b	818.00a	649.67a	0.79b	4.21b	0.54b	0.62a
120	164.33a	729.00b	564.67b	0.77b	3.44c	0.56a	0.61a

注:a,b,c 表示 $P<0.05$,下同。a,b,c express $P<0.05$,the same below.

2.3 汞在烟叶中的残留

由表 2 可以看出,随土壤添加汞浓度的增加,各部位烟叶中汞的残留量逐渐升高,且较低浓度($10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)处理,即能显著引起汞在烟叶中残留。另据回归分析表明,上、中、下部叶汞的残留量与叶绿素含量(SPAD 值)分别呈显著负相关(表 3)。说明汞对烤烟叶绿素的合成具有抑制作用。

表 2 汞在烟叶中的残留($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 2 The content of Hg in tobacco leaves($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatment	上部叶 Upper	中部叶 Middle	下部叶 Lower
0	0.034a	0.046a	0.048a
10	0.079a	0.108b	0.108b
30	0.154b	0.143b	0.152b
60	0.155b	0.153b	0.153b
90	0.156b	0.159b	0.162b
120	0.259c	0.178b	0.219c

表 3 烟叶中汞的残留量与叶绿素的关系
Table 3 The relationship of Hg and chlorophyll in flue-cured tobacco leaves

	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	F	$F_{0.05}$
上部叶 Upper	$y=40.775-37.622x$	-0.566	1.886	0.242
中部叶 Middle	$y=41.643-46.858x$	-0.436	0.937	0.388
下部叶 Lower	$y=42.102-46.854x$	-0.525	1.522	0.285

3 讨论

重金属对植物光合作用的影响是通过影响光合过程中的电子传递、破坏叶绿体和叶绿素等光合系统的完整性而实现的^[22]。高浓度的镉可抑制叶绿素酸酯还原酶(*protochlorophyllidreductase*)活性,并影响氨基- γ -酮戊(*aminolaevulinic acid*)的合成进而抑制叶绿素的合成^[23]。已有研究认,为 Pb^{2+} 可能是取代叶绿素分子中的 Mg^{2+} ,破坏了叶绿素的结构,从而使叶绿素的生理功能受到抑制^[24]。细胞超微结构研究表明,汞毒害使植物叶绿体基粒内囊体膜解体,嗜饿颗粒增多,且体积增大,叶绿体外被的双层膜出现破裂的现象^[20]。本文的试验结果一定程度上再次验证了上述结论。

重金属毒害可使植物叶片气孔阻力增加,抑制叶片与外界气体交换,导致植物光合速率降低^[15]。土壤重金属能严重抑制植物根系生长,根尖细胞加速退化,水分吸收和运输受到破坏,叶面细胞水势降低,膨压减小,脱落酸(ABA)含量升高,导致气孔开度降低,甚至关闭^[15]。本研究中,土壤经汞处理后,烤烟叶片气

孔导度下降,胞间 CO_2 浓度降低,这与 Nirupama M 等^[6]研究结果一致。

植物处在逆境条件下,光合速率下降的内在原因可能因光抑制和光氧化现象所引起^[25]。在本试验中,土壤汞浓度低于 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,烤烟 PS II 光能传递效率和光化学活性提高,非光化学淬灭系数(qNP)降低。这可能是由于低浓度的汞刺激叶绿素合成,提高叶绿素 a/b 值,增加天线色素,吸收较多的光能,降低 qNP ,减少光能耗散,提高光能传递效率,激发光化学活性,提高光合效率。当土壤汞浓度过高($\geq 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)时,烤烟 PS II 光能传递效率和光化学活性降低,非光化学淬灭系数(qNP)升高。主要是因为土壤中汞浓度超过烤烟的忍受能力,超氧化物歧化酶(SOD)等保护酶活性受到抑制,引起了叶片中膜脂过氧化产物 MDA 含量的大量累积^[26],当酶促活性氧系统不足以清除植物体内的大量活性氧时,活性氧分子便开始攻击光反应中心,光合色素分解加快,反应中心色素分子数量减少,光能吸收降低, qNP 升高,光能耗散增加,引起光化学效率的下降,甚至导致光化学功能的丧失^[26,27]。研究认为,逆境条件下植物提高非光化学淬灭,耗散过剩能量,以免光合机构遭到破坏^[28],是植物对逆境抗性的表现。在试验中还发现,光化学淬灭系和非光化学淬灭系数的变化趋势几乎相同。这可能与汞引起膜脂氧化加强有关。膜脂氧化产生大量醌类物质,而这些醌类物质可作为荧光猝灭剂^[29],接受电子主要用于中和自身的氧化,导致光合膜上传递的电子数量减少,进而引起光合速率下降,其具体机理还须进一步研究。韩志萍,王趁义^[30]研究认为芦竹对镉、铅、汞具有较好的吸收能力,叶内汞的富集量可达 $21.58 \sim 11.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。李玉双等^[31]研究也得出类似的结论。本研究结果表明,烤烟对汞具有一定的富集能力,表现为随汞处理浓度升高,烟叶中汞残留量增加。

4 结论

综合上述研究结果,土壤受到汞污染后,烤烟光合作用能力的变化是气孔因素和非气孔因素共同作用的结果。烤烟的光合特性和叶绿素荧光参数对汞的响应随汞浓度的不同而不同,低浓度($\leq 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的汞刺激叶绿素的合成和 PS II 化学活性,提高 PS II 光能转化效率和光合速率;高浓度($\geq 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的汞抑制叶绿素的合成、PS II 化学活性和光能转化效率,降低光合速率。土壤汞污染导致烤烟叶片气孔导度、胞间 CO_2 浓度降低。汞浓度低时,在影响烤烟光合

速率变化的因素中,非气孔因素占主导作用,当汞浓度高时,气孔因素对光合速率的降低起主要作用。烟叶中汞的残留量随土壤汞浓度升高而增加,且与叶绿素含量显著负相关。因此,气体交换参数和叶绿素荧光参数可以作为土壤汞污染下烤烟受毒害鉴定的较好指标。

参考文献:

- [1] 林健荣,邓平建,李喜梅,等. 氯化汞对草地贪夜蛾 sf9 细胞及核型多角体病毒的损伤与致突变研究 [J]. 中国农业科学, 2006, 39(1): 88-94.
LIN Jian-rong, DENG Ping-jian, LI Xi-mei, et al. Study on the damage and mutation of sf9 cell and AcMNPV treated by HgCl_2 [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(1): 88-94.
- [2] Notten M J M, Oosthoek A J P, Rozema J, et al. Heavy metal concentrations in a soil plant snail food china along a terrestrial soil pollution gradient[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 138(1): 178-190.
- [3] Wong S C, Li X D, Zhang G, et al. Heavy metals in agricultural soil of the Pearl River Delta, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119:33-44.
- [4] Mejare M, Bulow L. Metal-binding proteins and peptides in bioremediation and phytoremediation of heavy metals [J]. *Trends in Biotech*, 2001, 19(2): 67-73.
- [5] Mustafa K, Sule O, Imre K, et al. Heavy metal accumulation in calcareous soil and sorghum plants after addition of sulphurcontaining waste as a soil amendment in Turkey[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 111(1): 41-46.
- [6] 程旺大,姚海根,张国平,等. 镉胁迫对水稻生长和营养代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(3): 528-537.
CHENG Wang-da, YAO Hai-gen, ZHANG Guo-ping, et al. Effect of cadmium on growth and nutrition metabolism in rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(3): 528-537.
- [7] 陈同斌,宋波,郑袁明,等. 北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估[J]. 中国农业科学, 2006, 39(8): 1589-1597.
CHEN Tong-bin, SONG Bo, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of lead concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risks[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(8): 1589-1597.
- [8] Farina M, Brandao R, Fabiana S de Lara, et al. Profile of nonproteinthiols, lipid peroxidation and delta-amino levulinate dehydratase activity in mouse kidney and liver in response to acute exposure to mercuric chloride and sodium selenite[J]. *Toxicology*, 2003, 184(2-3): 179-187.
- [9] Moral J B, Mourra I N P, Beclin C, et al. DNA methylation and chromatin structure affect transcriptional and post-transcriptional silencing in Arabidopsis[J]. *Curr Biol*, 2000, 10: 1591-1594.
- [10] 高扬,李学玲,辛树权. 汞对洋葱根尖细胞有丝分裂的影响[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2003, 2(2): 55-57.
GAO Yang, LI Xue-ling, XIN Shu-quan. Effect of mercury on the mitosis of root tip of onion [J]. *Journal of Jilin Normal University (Natural Science)*, 2003, 2(2): 55-57.
- [11] 严重玲,杨先科,陈蓉蓉,等. Pb、Hg 胁迫对烟草叶片氧化物酶及叶

- 绿素代谢的影响[J]. 贵州环保科技, 1997, 1:39-42.
- YAN Chong-ling, YANG Xian-ke, CHEN Rong-rong, et al. Effects of Hg, Cd stress on the activated oxygen scavenging system and chlorophyll metabolism in tobacco leaves[J]. *Guizhou Science and Technology of Environmental Protection*, 1997, 1: 39-42.
- [12] 王泽港, 骆剑峰, 刘冲. 单一重金属污染对水稻叶片光合作用特性的影响[J]. 上海环境科学, 2004, 23 (6) : 240 - 243.
- WANG Ze-gang, LUO Jian-feng, LIU Chong. Effects of individual heavy metal on photosynthetic characteristics in rice leaves[J]. *Shanghai Environmental Science*, 2004, 23(6):240-243.
- [13] 徐楠, 施国新. Hg²⁺胁迫对浮萍体细胞 DNA 一级结构和抗氧化酶体系的损伤[J]. 植物生态学报, 2003, 27 (3) : 299 - 303.
- XU Nan, SHI Guo-xin. Damage to DAN primary structure and anti-oxidant enzymes in leman minor induced by Hg²⁺[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2003, 27(3):299-303.
- [14] Mishra A, Choudhuri M A. Monitoring of phytotoxicity of lead and mercury from germination and early seedling growth indices in two rice cultivars[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, 114:339-346.
- [15] Nirupama M, Mohn F H. Use of chlorophyll fluorescence in metal stress research; a case study with the green microalga *Scenedesmus* [J]. *Eco-toxicology and Environmental Safety*, 2003, 55:64-69.
- [16] 沈波, 庄杰云, 张克勤, 等. 水稻叶绿素含量的 QTL 及其与环境互作分析[J]. 中国农业科学, 2005, 38(10):1937-1943
- SHEN Bo, ZHUANG Jie-yun, ZHANG Ke-qin, et al. Analysis of interaction between QTL and environment on chlorophyll contents in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10):1937-1943.
- [17] 王建林, 于贵瑞, 王伯伦, 等. 水稻北方粳稻光合速率、气孔导度对光强和 CO₂ 浓度的响应[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1):16-25.
- WANG Jian-lin, YU Gui-rui, WANG Bo-lun, et al. Response of photosynthetic rate and stomatal conductance of rice to light intensity and CO₂ concentration in northern China[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2005, 29(1):56-25.
- [18] 张治安, 杨福, 陈展宇, 等. 菰叶片净光合速率日变化及其与环境因子的相互关系[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3):502-509.
- ZHANG Zhi-an, Yang-fu, CHEN Zhan-yu, et al. Relationship between diurnal changes of net photosynthetic rate and environmental factors in leaves of *Zizania latifolia*[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(3):502-509.
- [19] 汪良驹, 刘卫琴, 孙国荣, 等. ALA 对萝卜不同叶位叶片光合作用与叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报, 2005, 25(3):488-496.
- WANG Liang-ju, LIU Wei-qin, SUN Guo-rong, et al. Effects of 5-aminol Evulinic acid on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of radish seedlings[J]. *Acta Bot Borealoecident Sin*, 2005, 25(3):488-496.
- [20] 孙艳, 樊爱丽, 徐伟君. 草酸对高温胁迫下黄瓜幼苗叶片光合机构和叶黄素循环的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(9):1774-1779.
- SUN Yan, FAN Ai-li, XU Wei-jun. Effects of oxalate on photosynthetic apparatus and xanthophyll cycle in Leaves of cucumber seedlings under high temperature stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(9):1774-1779.
- [21] 杨晓青, 张岁岐, 梁宗锁, 等. 水分胁迫对不同抗旱类型冬小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响 [J]. 西北植物学报, 2004, 24 (5):812-816.
- YANG Xiao-qing, ZANG Shui-qi, LIANG Zong-suo, et al. Effects of water stress on chlorophyll fluorescence parameters of different drought resistance winter wheat cultivars seedlings[J]. *Acta Bot*, 2004, 24(5):812-816.
- [22] 杨刚, 伍钧, 唐亚. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24 (12) :1507-1512.
- YANG Gang, WU Jun, TANG Ya. Research advances in plant resistance mechanisms under lead stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (12):1507-1512.
- [23] Prasad D D K, Prasad A R K. Effect of lead and mercury on chlorophylls synthesis in mung bean seedlings[J]. *Phytochemistry*, 1987, 26 : 881-883.
- [24] Kupper H, Kupper F, Spiller M. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants[J]. *Exp Bot*, 1996, 47:259-266.
- [25] Stobart A K, Griffiths W T, Ameen B I, et al. The effect of Cd²⁺ on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley plant [J]. *Plant Physiology*, 1985, 63:293-298.
- [26] 徐红霞, 翁晓燕, 毛伟华, 等. 镉胁迫对水稻光合、叶绿素荧光特性和能量分配的影响[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(4):338-342.
- XU Hong-xia, WENG Xiao-yan, MAO Wei-hua, et al. Effects of cadmium stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence characteristics and excitation energy distribution in leaves of rice[J]. *Chinese J Rice Science*, 2005, 19(4):338-342.
- [27] Foy C D, Chaney R L, White M C. The physiology of metal toxicity in plants [J]. *Ann Rcu Plant Physiol*, 1978, 29:511-526.
- [28] ZHAO M, DING Z S. The changes and components of non-photochemical quenching under drought and shade conditions in maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(1):59-62.
- [29] 王中. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.140.
- WANG Zhong. Plant physiology[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005. 140.
- [30] 韩志萍, 王趁义. 不同生态型芦竹对 Cd、Hg、Pb、Cu 的富集与分布[J]. 生态环境, 2007, 16(4):1092-1097.
- HAN Zhi-ping, WANG Chen-yi. Accumulation and distribution of cadmium, lead, mercury, and copper in *Arundodonax* of different eco-type[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(4):1092-1097.
- [31] 李玉双, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 超富集植物叶用红苋菜(*Beta vulgaris* var. *cicla* L.) 及其对 Cd 的富集特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1386-1389.
- LI Yu-shuang, SUN Li-na, SUN Tie-heng, et al. Cadmium hyper accumulator *Beta vulgaris varcicla* L. and its accumulating characteristics [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26 (4):1386-1389.
- [32] 李春喜, 姜丽娜, 邵云, 等. 生物统计学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- LI Chun-xi, JIANG Li-na, SHAO Yun, et al. Biostatistics[M]. Beijing: *Science Press* (in Chinese), 2005.