

镉污染对烤烟光合特性、产量及其品质的影响

马新明,李春明,田志强,袁祖丽

(河南农业大学农学院,郑州 450002)

摘要:采用盆栽方法,研究了 Cd 污染对烤烟叶片光合特性、烟叶品质及其产量的影响。结果表明,随着 Cd 处理浓度的增加,烟叶净光合速率 (P_n) 和气孔导度 (G_s) 逐渐降低,胞间 CO_2 浓度 (C_i) 随 Cd 浓度的增加逐渐增大;光系统 II 活性 (F_v/F_o)、最大光能转换效率 (F_v/F_m)、光化学猝灭系数 (qP)、非光化学猝灭系数 (NPQ)、电子传递的量子产率 (Φ_{PSII}) 和有效电子传递速率 (ETR) 则随 Cd 浓度的增加而降低;烤烟烟叶中的糖/碱比和氮/碱比升高,化学成分组成趋于不协调,不利于烟叶香吃味的形成。

关键词: Cd 污染;烤烟;光合特性;品质;产量

文章编号:1000-0933(2006)12-4039-06 中图分类号:X503.23 文献标识码:A

Effects of Cd pollution on photosynthetic characteristics, yield and quality of tobacco leaves

MA Xin-Ming, LI Chun-Ming, TIAN Zhi-Qiang, YUAN Zu-Li (College of Agronomy Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4039~4044.

Abstract: In order to understand the mechanism of the effect of Cd pollution on photosynthesis, quality and yield of tobacco leaves, pot experiments were carried out at the Research Station of Henan Agricultural University during 2002~2004. Soil having a pH value of 7.5 and containing 8.53 g kg^{-1} organic matter, 0.89 g kg^{-1} total N, 20.42 mg kg^{-1} Olsen P, 238 mg kg^{-1} NH_4OAc -K, and 0.11 mg kg^{-1} Cd was used in the experiments. 15 kg of sieved soil was placed in each 36 cm $\times$ 42 cm pot. Fertilizers used were $(NH_4)_2SO_4$, KNO_3 and KH_2PO_4 . Prior to sowing 3 g of N, 4.5 g of P_2O_5 and 9 g of K_2O were applied to each pot. The cultivar used in the experiments was Yunyan 85, with 20 leaves left after topping. The liquid Cd(Ac) $_2$ was applied to each pot as sewage with concentrations of 3, 6, 10, 30, 60 and 100 mg kg^{-1} after transplanting. Clean water was used as comparison. The experiment was arranged in a completely randomized design with three replications.

The net photosynthetic rate (P_n), intercellular CO_2 concentration (C_i) and stomatal conductance (G_s) of three identical functional leaves from the same position were determined during rosette, budding and harvest stages using a portable photosynthetic system (Li-6400). Maximal fluorescence (F_m), fixed fluorescence (F_o) and steady fluorescence (F_s) were determined after 30-minute dark adaptation while maximal fluorescence in the light (F_m') was measured after a certain length of light period (Hansatech FMS2 fluorometer). The same portion of each leaf was used for both kinds of measurements. PS II activity (F_v/F_o), PS II maximum light energy transformation (F_v/F_m), chemical quenching coefficient (qP), non-photochemical quenching coefficient (NPQ), the apparent photosynthetic electron transport rate (ETR) and the ratio of photochemical quantum yield of PS II (Φ_{PSII}) were calculated according to the following formulas: $F_v/F_o = (F_m - F_o)/F_o$, $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$, $qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o)$, $NPQ = (F_m - F_m')/F_m'$, $\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m'$, $ETR = (F_m' - F_s)/F_m' \times PAR \times 0.5 \times 0.84$. The contents of reductive sugar, total N, nicotine and Kalium in tobacco leaves and yield per plant were determined

基金项目:国家烟草专卖局重大招标资助项目(110200201005)

收稿日期:2005-08-04; **修订日期:**2006-08-28

作者简介:马新明(1963~),男,河南许昌人,博士,教授,主要从事作物生态和作物模型研究. E-mail: xinmingma @371.net

Foundation item: The project was financially supported by China Tobacco Autocratic Selling Bureau (No. 110200201005)

Received date: 2005-08-04; **Accepted date:** 2006-08-28

Biography: MA Xin-Ming, Ph. D., Professor, mainly engaged in crop eco-physiology and agriculture information technology. E-mail: xinmingma @371.net

according to standard methods in the literature.

The results showed that the net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), PS II activity (F_v/F_o), PS II maximum light energy transformation (F_v/F_m), chemical quenching coefficient (qP), non-photochemical quenching coefficient (NPQ), the apparent photosynthetic electron transport rate (ETR) and the ratio of photochemical quantum yield of PS II (Φ_{PSII}) decreased with the increase in Cd concentration, while intercellular CO_2 concentration (C_i) behaved oppositely. The fact that the reductive Sugar/Nicotine ratio and Total-N/Nicotine ratio increased as the result of enhanced Cd pollution, has led to inharmonious chemical constituents in tobacco leaves and unpleasant aroma from them.

Key words: Cd pollution; tobacco; photosynthetic characteristics; quality; yield

重金属污染已成为当前重要的环境问题之一。在重金属污染中,镉污染尤为突出^[1]。有关 Cd 污染对植物光合特性的影响,前人已做了不少相关研究。如陶明煊等^[2]研究认为随 Cd 浓度的增加苕菜的光合、呼吸作用呈先升后降趋势,谷巍等^[3]认为 Cd 污染使菹草叶片叶绿体自发荧光强度、叶绿素含量、光合速率降低,杨丹慧等^[4]认为 Cd 对植物光合作用有明显的抑制作用,对光系统 I 和光系统 II 均有影响,但对后者的影响更显著,袁祖丽等^[5]研究表明 Cd 污染对烟草叶片的光合膜结构具有较大影响,蒋文智^[6]则在离体条件下研究了 Cd 污染与烟草叶片叶绿素某些光合特性的关系。但是关于重金属污染对烤烟不同生育时期光合特性及烟叶品质和产量影响的研究报道较少。基于此,于 2002~2004 年连续设置试验,较系统地研究了 Cd 污染对烤烟不同生育时期光合特性及烤后烟叶品质和产量的影响,旨在为实现烤烟优质丰产和无公害生产提供理论与技术指导。

1 试验处理与设计

试验以盆栽的方法,于 2002~2004 年在河南农业大学科教园区进行,供试土壤为壤质潮土,有机质含量 $8.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $65.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $20.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效钾含量 $238 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤 pH 值为 7.5, Cd 本底值为 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,装盆前土壤过筛,每盆装干土 15 kg (盆钵直径 36 cm,深 42 cm)。施用化肥分别为分析纯 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 KNO_3 和 KH_2PO_4 ,肥料均作基肥一次施入。施 N 量按 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土使用,氮、磷、钾比例为 $\text{N}^3\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=1:1.5:3$ 。供试品种为云烟 85,打顶后统一留 20 片叶。试验于移栽返苗后以 $\text{Cd}(\text{Ac})_2$ 溶液模拟污灌方式进行处理,包括 3, 6, 10, 30, 60 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以纯 Cd 计),以清水为对照,重复 3 次。

2 测定项目及方法

光合特性 分别在烤烟团棵期,现蕾期和采收期于晴天 9:00~11:00 之间进行。每处理取生长一致的 3 盆烤烟,每盆取 1 张同叶位展开的功能叶用美国 LICOR 公司生产的 LF6400 便携式光合测定系统测定光合速率、气孔导度、细胞间隙 CO_2 浓度。

叶绿素荧光特性 在测定光合特性的同时于同部位叶片用英国 Hansatech 公司生产的 FMS2 脉冲调制式荧光仪测定经暗适应 30 min 叶片的最大荧光 (F_m)、固定荧光 (F_o)、稳态荧光 (F_s) 和稳态最大荧光 (F_m'),并计算 PS II 活性 (F_v/F_o), PS II 最大光能转换效率 (F_v/F_m),光化学猝灭系数 (qP),非光化学猝灭系数 (NPQ),电子传递的量子产率 (Φ_{PSII}) 和有效电子传递速率 (ETR)。分别按下式计算^[7]: $F_v/F_o = (F_m - F_o)/F_o$, $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$, $qP = (F_m' - F_s)/(F_m - F_o)$, $NPQ = (F_m - F_m')/F_m'$, $\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m'$, $ETR = (F_m' - F_s)/F_m' \times PAR \times 0.5 \times 0.84$ 。每处理 3 株,最后求其平均值。

烟叶品质和产量 取中部烘烤后烟叶测定各品质指标,其中还原糖、烟碱和烟叶钾含量按文献[8]的方法测定;全氮采用凯氏定氮法^[9]测定,同时记载每盆烤烟产量。

最后,对所得数据按参考文献^[10]进行多重比较和统计分析。

3 结果与分析

3.1 Cd 污染对烟草叶片净光合速率 (P_n),胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和气孔导度 (G_s) 的影响

从表 1 可以看出,在不同生育时期, P_n 、 G_s 和 C_i 均于现蕾期最大,采收期最小,在同一生育时期, P_n 、 G_s 随 Cd 浓度的增加而降低, C_i 随 Cd 浓度的增加而增大。经统计分析, P_n 在团棵期和采收期分别于 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 差异呈显著性降低,现蕾期差异不显著; G_s 在团棵期、现蕾期和采收期均于 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 呈显著性降低,其中团棵期和采收期达极显著水平;而 C_i 分别在 6 、 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 呈差异显著性增加。

表 1 Cd 污染对烟草叶片 P_n 、 G_s 和 C_i 的影响
Table 1 Effect of Cd pollution on P_n , G_s and C_i in tobacco leaves

处理浓度 (mg kg ⁻¹) Concentration	团棵期 Rosette stage			现蕾期 Budding stage			采收期 Harvesting stage			
	<i>P_n</i>	<i>G_s</i>	<i>C_i</i>	<i>P_n</i>	<i>G_s</i>	<i>C_i</i>	<i>P_n</i>	<i>G_s</i>	<i>C_i</i>	
Cd	0	15.53a	0.08A	180.67d	16.63a	0.09a	246.67b	14.07a	0.06A	164.00b
	3	12.57b	0.07A	210.33cd	16.13a	0.09a	247.00b	11.75ab	0.05A	185.67b
	6	11.57b	0.05AB	250.67bc	15.10a	0.06ab	250.67b	9.62ab	0.05A	218.67ab
	10	11.30b	0.03B	227.67c	15.20a	0.03b	274.33ab	9.32ab	0.03B	219.33ab
	30	11.37b	0.03B	280.67b	14.70a	0.03b	285.00ab	7.80ab	0.02B	223.00ab
	60	10.36bc	0.03B	326.00a	13.20a	0.03b	327.33a	5.56b	0.02B	240.33ab
	100	8.87c	0.03B	344.33a	12.18a	0.03b	348.33a	5.55b	0.02B	277.33a

表中数据为 3 个测定值的平均值, A、B、C 和 a、b、c 分别指在 1% 和 5% 显著水平下的差异, P_n 、 G_s 和 C_i 的单位分别为 $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{mol}(\text{air})^{-1}$ 。Each value was the average of 3 measured data, A、B and C; significant at 1% levels of probability, a、b and c: significant at 5% levels of probability, the units of P_n 、 G_s and C_i was $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{mol}(\text{air})^{-1}$ respectively. 下同, the same below

3.2 Cd 污染对烟草叶片 PS II 活性(F_v/F_o) 和 PS II 最大光能转换效率(F_v/F_m) 的影响

从表 2 可以看出,随着烟草生育时期的推进, F_v/F_o 和 F_v/F_m 呈先降后升趋势,并均以现蕾期值最低,随 Cd 浓度的增大, F_v/F_o 和 F_v/F_m 均呈下降趋势。团棵期,处理与对照及处理间差异均不显著;现蕾期,与对照相比, F_v/F_o 和 F_v/F_m 分别在 $30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 呈差异显著性降低;采收期, F_v/F_o 和 F_v/F_m 均在 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 呈差异显著性降低。

表 2 Cd 污染对烟草叶片 F_v/F_o 和 F_v/F_m 的影响
Table 2 Effect of Cd pollution on F_v/F_o and F_v/F_m in tobacco leaves

Cd 处理浓度(mg·kg ⁻¹) Cd concentration	团棵期 Rosette stage		现蕾期 Budding stage		采收期 Harvesting stage	
	F_v/F_o	F_v/F_m	F_v/F_o	F_v/F_m	F_v/F_o	F_v/F_m
0	7.09a	0.88a	5.38a	0.84a	6.01a	0.86a
3	6.62a	0.87a	4.64ab	0.82ab	5.97a	0.86a
6	6.59a	0.87a	4.63ab	0.82ab	5.73a	0.85a
10	6.59a	0.87a	4.42ab	0.81ab	5.70a	0.85a
30	6.39a	0.86a	3.88bc	0.79ab	5.47ab	0.84ab
60	6.25a	0.86a	3.60bc	0.78bc	5.37ab	0.85ab
100	6.10a	0.86a	2.92c	0.74c	4.65b	0.82b

3.3 Cd 污染对烟草叶片荧光化学淬灭系数(qP) 和非荧光化学淬灭系数(NPQ) 的影响

试验结果表明(表 3):光化学淬灭系数(qP) 在 3 个生育时期均随 Cd 浓度的增大而降低。并分别在 6 、 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 呈差异显著性降低,其中采收期差异达极显著水平;非光化学淬灭系数(NPQ) 在 3 个生育时期均随 Cd 浓度的增大而降低。并分别在 3 、 $30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 呈差异显著性降低。

3.4 Cd 污染对烟草叶片有效电子传递速率(ETR) 和电子传递的量子产率(Φ_{PSII}) 的影响

对电子传递的量子产率(Φ_{PSII}) 和有效电子传递速率(ETR) 的测定结果表明(表 4),无论 Cd 浓度的高低,随烟草生育时期的推进, Φ_{PSII} 有生有降, ETR 则持续降低。与对照相比, Φ_{PSII} 在团棵期、现蕾期和采收期分别于 30 、 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 呈差异显著性降低,其中团棵期和采收期差异达极显著水平;而 ETR 分别于 6 、 $6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 呈差异显著性降低,其中团棵期差异达极显著水平。

表 3 Cd 污染对烟草叶片 qP 和 NPQ 的影响

Table 3 Effect of Cd pollution on qP and NPQ in tobacco leaves						
Cd 处理浓度(mg ·kg ⁻¹)	团棵期 Rosette stage		现蕾期 Budding stage		采收期 Harvesting stage	
Cd concentration	qP	NPQ	qP	NPQ	qP	NPQ
0	0.90a	0.32a	0.90a	0.25a	0.94A	0.27a
3	0.82ab	0.17b	0.89ab	0.19ab	0.84AB	0.20ab
6	0.77bc	0.15b	0.87ab	0.18ab	0.77BC	0.14ab
10	0.75bc	0.14b	0.86ab	0.17ab	0.70C	0.13ab
30	0.70bc	0.14b	0.86ab	0.12b	0.66CD	0.10b
60	0.70bc	0.14b	0.84ab	0.10b	0.65CD	0.10b
100	0.67c	0.11b	0.80b	0.09b	0.55D	0.08b

表 4 Cd 污染对烟草叶片 Φs II和 ETR(μmol m⁻² s⁻¹)的影响

Table 4 Effect of Cd pollution on Φs II and ETR (μmol m ⁻² s ⁻¹) in tobacco leaves						
Cd 处理浓度(mg ·kg ⁻¹)	团棵期 Rosette stage		现蕾期 Budding stage		采收期 Harvesting stage	
Cd concentration	Φs II	ETR	Φs II	ETR	Φs II	ETR
0	0.76A	80.43A	0.72a	62.56a	0.77A	38.17a
3	0.69AB	71.32AB	0.70a	57.28a	0.69AB	32.08b
6	0.65AB	65.40B	0.68a	49.63b	0.64BC	29.28b
10	0.64AB	60.58BC	0.69a	49.39b	0.58C	23.11c
30	0.59B	49.75C	0.66a	44.67b	0.54CD	20.37c
60	0.59B	48.44C	0.64ab	37.85c	0.55CD	19.49c
100	0.56B	33.84D	0.58b	27.83d	0.44D	13.94d

3.5 Cd 污染对烤烟品质及产量的影响

试验结果表明(表 5),随着 Cd 污染浓度的递增,烟叶中各化学成分含量有升有降,但品质指标糖/碱比和氮/碱比升高。总氮含量为 2.18 %~2.27 %,经差异显著性分析,3 mg ·kg⁻¹和 6 mg ·kg⁻¹与对照间差异达显著水平,其它浓度差异不显著。

还原糖含量为 15.45 %~22.99 %,3,6 mg ·kg⁻¹和 10 mg ·kg⁻¹与对照间差异达极显著水平,其它浓度差异不显著。

表 5 Cd 污染对烤烟品质及产量的影响

Table 5 Effect of Cd pollution on quality and yield of tobacco leaves							
Cd 处理(mg ·kg ⁻¹)	总氮(%)	还原糖(%)	烟碱(%)	钾(%)	糖/碱	氮/碱	产量
Cd concentration	Total N(%)	Reductive sugar(%)	Nicotine(%)	Kalium(%)	Sugar/Nicotine	N/Nicotine	Yield(g/pot)
0	2.27a	15.99C	2.32a	1.96A	6.89	0.98	165.96A
3	2.18b	22.99A	2.10b	1.85AB	10.95	1.04	151.90A
6	2.18b	17.47B	1.91bc	1.67AB	9.15	1.14	148.41AB
10	2.23a	17.45B	1.88c	1.56B	9.27	1.18	143.68B
30	2.20a	15.45C	1.82c	1.54B	8.48	1.21	142.24BC
60	2.24a	15.95C	1.81c	1.44B	8.83	1.24	134.00BC
100	2.21ab	15.57C	1.65c	1.08C	9.46	1.34	121.85C
标准 Standard		1.5 %~3.5 %	18 %~24 %	1.5 %~3.5 %	>2 %	3~7	1

烟碱含量随 Cd 污染浓度的增加逐渐下降,且与对照间差异达显著水平,6 mg ·kg⁻¹分别与其它各处理间差异不显著,除 6 mg ·kg⁻¹外,3 mg ·kg⁻¹处理与其它处理间的差异均达显著水平。

烟叶中钾含量随 Cd 污染浓度的增加逐渐下降,在 10 mg ·kg⁻¹呈差异极显著性降低,除 100 mg ·kg⁻¹外,处理间差异均不显著。

烤烟烟叶中品质指标糖/碱比和氮/碱比均高于对照,且高于相应优质烟叶标准,化学成分组成趋于不协调,不利于烟叶香吃味的形成。

烟叶产量随着 Cd 污染程度的增加而逐渐降低,在 10mg ·kg⁻¹呈差异极显著性降低。

可见,Cd 污染不但影响烟叶的品质,不利于烟叶香吃味的形成,还引起烟叶减产。

4 结论与讨论

本实验的测定结果表明,土壤中 Cd 污染可明显降低 F_v/F_o 、 F_v/F_m 、 ETR 和 Φ_{PSII} ,同时 qP 和 NPQ 也有明显的下降趋势。 F_v/F_o 随 Cd 浓度的增加而降低说明 Cd 污染下 PS II 活性失活,而在 Cd 污染下烟草叶片叶绿素含量下降较快^[16] 和 Φ_{PSII} 降幅较高的事实显示了光合系统失活的可能原因是 PS II 天线色素或色素蛋白复合体受到破坏^[17],另外叶绿素的降解及叶绿素细胞始终遭到破坏也会导致光合能力的下降^[18]; F_v/F_m 随 Cd 浓度的增加而降低说明 Cd 污染下的烟草叶片的光合机构受到一定程度的伤害,因而对光能吸收和转化效率明显下降,阻碍了为暗反应的光合碳同化积累更多所需的能量^[19],抑制了碳同化的高效运转和有机物的积累,从而导致烟草光合碳同化的受阻,造成过剩光能的增多,同时,代表 PS II 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分的 NPQ 也随 Cd 浓度的增加而降低,说明其耗散过剩光能的能力减弱^[15],这样会加重对烟草光合机构的抑制,并最终导致烟草叶片净光合速率(P_n)的下降; C_i 与 P_n 之间有密切的相关关系,是分析光合速率下降原因的指标之一^[7,11,20],结果表明,随 Cd 处理浓度的增加, P_n 逐渐降低, C_i 逐渐升高,二者之间呈现明显的负相关,说明烤烟植株光合速率下降的主要原因是非气孔限制,即由叶肉细胞光合活性下降引起的^[21]。

Cd 污染降低了烟叶产量及烟叶中总氮和烟碱含量;较低浓度 Cd 处理($3\sim 10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)提高了还原糖含量;用以反映烟叶香吃味品质的糖/碱比与氮/碱比均趋于不协调。表明在 Cd 污染条件下,虽然某些单项品质指标有变好的趋势,但就品质指标的协调性而言,均有下降,即在污染条件下不易形成优质烟叶。其原因可能是烤烟在 Cd 污染下,烤烟叶片的净光合速率下降, F_v/F_o 、 F_v/F_m 、 ETR 、 Φ_{PSII} 、 qP 和 NPQ 也相对较低,这不利于更充分地利用捕光色素所吸收的光能,从而降低其光能利用效率;在团棵期,烟株以氮代谢为主^[22],烟叶对光能利用效率的降低,导致为氮同化积累的同化力(ATP 和 $NADPH$)减少,从而限制了氮素的同化^[23];现蕾期和采收期,烟株以碳代谢为主^[22],烟叶对光能利用效率的降低,同样限制碳素的同化和代谢,从而导致 C、N 代谢失调,进而影响到烟叶产量的提高和烟叶品质指标糖/碱比和氮/碱比的协调性,不利于烟叶香吃味的形成。

References:

- [1] Qin T C, Wu Y S, Wang H X, et al. Effect of cadmium, lead and their interactions on the physiological and ecological characteristics of root system of *Brassica chinensis*. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(3): 320~325.
- [2] Tao M X, Wu G R, Gu G P, et al. Toxicity of Cd^{2+} on the Photosynthetic and Respiratory Rate and ATPase Activity of *Nymphoides peltatum* (Gmel.) O. Ktze. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*, 2002, 25(3): 94~98.
- [3] Gu W, Shi G X, Zhang C Y, et al. Toxic Effects of Hg^{2+} , Cd^{2+} and Cu^{2+} on Photosynthetic Systems and Protective Enzyme Systems of *Potamogeton crispus*. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2002, 28(1): 69~74.
- [4] Yang D H, Xu C H, Wang K F, et al. The effects of Cadmium on Chlorophyll-protein complexes and distribution of excitation energy in spinach Chloroplasts. *Acta Botanica Sinica*, 1990, 32(3): 198~204.
- [5] Yuan Z L, Ma X M, Han J F, et al. Effect of Cd contamination on ultramicroscopic structure and some elements content of tobacco leaves. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2919~2927.
- [6] Jiang W Z. Effect of Cadmium on some photosynthetic characteristics of chloroplasts of isolated tobacco leaves. *Acta Agriculturae Universitatis Henanensis*, 1991, 25(4): 387~392.
- [7] Ma X M, Wang X C, Wang Z Q. Effects of N-form on photosynthetic characteristics in late growth stages and spikes of wheat cultivars with specialized enduses. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2587~2593.
- [8] Wang R X, Han F G. Analytical means of the nicotian chemistry quality, Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1992.
- [9] Xiao X Z, Li D C, Guo C F, et al. Tobacco Chemistry, Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1997.
- [10] Gai J Y. Statistical Methods of Experiment. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [11] Wang K Q, Wang B R. The effect of soil moisture upon net photosynthetic rate of the Goldspur apple tree. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2): 206~214.
- [12] Zhang Q D, Liu H Q, Zhang J H, et al. Effects of limited irrigation on some photosynthetic functions of flag leaves in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(6): 869~873.
- [13] Zhang Q D, Jiang G M, Zhu X G, et al. Photosynthetic capability of 12 genotypes of *Triticum aestivum*. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2001, 25(5): 532~

536.

- [14] Hunter N P A, Oquist G, Hurry V M. Photosynthesis, photoinhibition and low temperature acclimation in cold tolerant plants. *Photosyn. Res.*, 1993, 37:19.
- [15] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis. Basics. *Ann Rev. Plant Physiol. Plant. Mol. Biol.*, 1991, 42:313.
- [16] Yuan Z L, Li C M, Xiong S P, *et al.* Effect of Cd and Pb pollution on chlorophyll content, activity of protectase and cell membrane lipid peroxidation change in tobacco leaves. *Journal of Henan Agricultural University*, 2005, 39(1):15~19.
- [17] Saitanis C J, Riga Karandinos A N, Karandinos M G. Effects of ozone on chlorophyll and quantum yield of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) varieties. *Chemosphere*, 2001, 42(8):945~953.
- [18] Ohe M, Rapolu M, Mieda T, *et al.* Decline in leaf photooxidative-stress tolerance with age in tobacco. *Plant Science*, 2005, 168(6):1487~1493.
- [19] Innocentia E D, Guidia L, Soldatinia G F. Characterisation of the photosynthetic response of tobacco leaves to ozone: CO₂ assimilation and chlorophyll fluorescence. *Journal of Plant Physiology*, 2002, 159(8):845~853.
- [20] Yang M S, Pei B H, Zhu Z T. Physiological study of double cross hybrid clones of white poplar under water stress. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3):312~317.
- [21] Xu D Q. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis. *Plant Physiology Communications*, 1997, 33(4):241~244.
- [22] Liu G S, Wang Y T, Wang Y F, *et al.* Tobacco Cultivation. Beijing: China Agricultural Press, 2003.
- [23] Dai T B, Cao W X, Jing Q. Effects of nitrogen form on nitrogen absorption and photosynthesis of different wheat genotypes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6):849~852.

参考文献:

- [1] 秦天才, 吴玉树, 王焕校, 等. 镉、铅及其相互作用对小白菜根系生理生态效应的研究. *生态学报*, 1998, 18(3):320~325.
- [2] 陶明煊, 吴国荣, 顾龚平, 等. Cd²⁺ 对苻菜光合、呼吸速率和 ATPase 活性的毒害影响. *南京师范大学学报(自然科学版)*, 2002, 25(3):94~98.
- [3] 谷巍, 施国新, 张超英, 等. Hg²⁺、Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 对苻草光合系统及保护酶系统的毒害作用. *植物生理与分子生物学学报*, 2002, 28(1):69~74.
- [4] 杨丹慧, 许春辉, 王可玢, 等. 镉离子对菠菜叶绿体色素蛋白质复合物及激发能分配的影响. *植物学报*, 1990, 32(3):198~204.
- [5] 袁祖丽, 马新明, 韩锦峰, 等. 镉污染对烟草叶片超微结构及部分元素含量的影响. *生态学报*, 2005, 25(11):2919~2927.
- [6] 蒋文智. 镉对离体烟草叶片叶绿素某些光合特性的影响. *河南农业大学学报*, 1991, 25(4):387~392.
- [7] 马新明, 王小纯, 王志强. 氮素形态对不同专用型小麦生育后期光合特性及穗部性状的影响. *生态学报*, 2003, 23(12):2587~2593.
- [8] 王瑞新, 韩富根. 烟草化学品质分析法. 郑州:河南科技出版社, 1990.
- [9] 肖协忠, 李德臣, 郭承芳, 等. 烟草化学. 北京:中国农业科技出版社, 1997.
- [10] 盖钧镒. 统计方法. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [11] 王克勤, 王斌端. 土壤水分对金矮生苹果光合速率的影响. *生态学报*, 2002, 22(2):206~214.
- [12] 张其德, 刘合芹, 张建华, 等. 限水灌溉对冬小麦旗叶某些光合特性的影响. *作物学报*, 2000, 26(6):869~873.
- [13] 张其德, 蒋高明, 朱新广, 等. 12 个不同基因型冬小麦的光合能力. *植物生态学报*, 2001, 25(5):532~536.
- [16] 袁祖丽, 李春明, 熊淑萍, 等. Cd、Pb 污染对烟草叶片叶绿素含量、保护酶活性及膜脂过氧化的影响. *河南农业大学学报*, 2005, 39(1):15~19.
- [20] 杨敏生, 裴保华, 朱之梯. 水分胁迫下白杨派双交无性系主要生理过程研究. *生态学报*, 1999, 19(3):312~317.
- [21] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题. *植物生理学通讯*, 1997, 33(4):241~244.
- [22] 刘国顺, 王彦亭, 汪耀富, 等. 烟草栽培学. 北京:中国农业出版社, 2003.
- [23] 戴廷波, 曹卫星, 荆奇. 氮形态对不同小麦基因型氮素吸收和光合作用的影响. *应用生态学报*, 2001, 12(6):849~852.