

## 云南凤庆茶叶中铜、铅、锌、镉、铬和砷的健康风险评估

缪德仁, 李 晓, 杨婉秋\*

(昆明学院 化学化工学院, 云南 昆明 650214)

**摘要:** 饮食摄入是人类暴露于环境污染物的主要途径之一, 而茶叶是一种颇受人们喜爱的非酒精饮料. 因此, 以凤庆县具有代表性的 5 个茶园的茶叶嫩叶为研究对象, 采用 ICP-MS 分析茶叶中的重金属元素含量, 通过目标危害系数 ( $THQ$ ) 和风险指数 ( $HI$ ) 对茶叶中 Cu, Pb, Zn, Cd, Cr 和 As 的摄入健康风险进行评估. 结果表明, 茶叶中 Cu, Pb, Zn, Cd, Cr 和 As 的含量均未超过各级标准的限定值, 茶叶中各重金属元素  $EDI$  的平均值由大到小的顺序为:  $EDI(\text{Zn}) > EDI(\text{Cu}) > EDI(\text{Cr}) > EDI(\text{Pb}) > EDI(\text{As})$ ; As 的  $THQ$  最高, 达  $10^{-1}$  数量级, 而 Cr 的  $THQ$  最低, 仅为  $10^{-3}$  数量级; 各重金属元素的  $HI$  均小于 1, 表明凤庆茶园茶叶中的重金属对人体健康风险较小.

**关键词:** 凤庆县; 茶叶; 重金属; 健康; 风险评估

**中图分类号:** TS272 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674 - 5639 (2019) 03 - 0056 - 05

**DOI:** 10. 14091/j. cnki. kmxyxb. 2019. 03. 012

### Health Risk Assessment of Cu, Pb, Zn, Cd, Cr and As in Tea Leaves from Fengqing County in Yunnan

MIAO Deren, LI Xiao, YANG Wanqiu\*

(College of Chemistry & Chemical Engineering, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214)

**Abstract:** Food consumption is one of the main routes for human exposure to heavy metals, and tea is among the most widely consumed non-alcoholic beverages. In this paper, the concentrations of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr and As) in tea leaves, collected from five representative tea gardens, were analyzed by ICP-MS, and the health risk of heavy metals were evaluated by the Target hazard quotients ( $THQ$ ) and hazard index ( $HI$ ). The results indicated that the concentrations of heavy metals in tea leaves did not exceed the limit values of every standard. The descending order of mean values of  $EDI$  for heavy metals is as follows:  $EDI(\text{Zn}) > EDI(\text{Cu}) > EDI(\text{Cr}) > EDI(\text{Pb}) > EDI(\text{As})$ . Among all the heavy metals, Arsenic has the highest  $THQ$  value, which is  $10^{-1}$  order of magnitude, while the Chromium has the lowest  $THQ$  value, which is only  $10^{-3}$  order of magnitude. Both the  $THQ$  and  $HI$  values are far below 1, suggesting that consumption of tea leaves produced from Fengqing County should pose little potential risk to human health.

**Key words:** Fengqing county; tea leaves; heavy metals; health; risk assessment

饮食摄入是人类暴露于环境污染物的主要途径之一<sup>[1-2]</sup>. 茶叶是一种颇受人们喜爱的非酒精饮料, 全球目前约有 160 多个国家 (地区) 近 30 亿人有饮茶的习惯, 每天饮用约 180 ~ 200 亿杯<sup>[3-5]</sup>. 茶叶中含有多钟有益于人体健康的活性成分 (如茶多酚、多糖、氨基酸、咖啡因等) 和微量矿物

元素<sup>[6]</sup> (如 Cu, Zn, Se 等), 但同时茶叶中也含有对人体健康有害的重金属元素<sup>[7]</sup> (如 Pb, As, Cd 等). 而适量的 Cu 和 Zn 等人体必需微量元素在人体新陈代谢中起着至关重要的作用, 但是微量的 Pb 和 Cd 等非人体必需的重金属元素则会对人体的健康造成不利的影响<sup>[1,8]</sup>.

收稿日期: 2019 - 05 - 06

基金项目: 云南省高校食品安全检测技术重点实验室建设项目.

作者简介: 缪德仁 (1969—), 男, 云南丽江人, 教授, 博士, 主要从事分析化学研究.

\* 通讯作者: 杨婉秋 (1980—), 女, 云南石林人, 副教授, 博士, 主要从事分析检验研究, E-mail: amyfall@163. com.

研究<sup>[9-11]</sup>表明, 茶叶中的重金属元素可对人体健康造成影响; 但也有研究<sup>[4]</sup>指出, 普洱茶中的 As, Cd, Pb 和 Hg 等重金属元素的含量对人体不存在致癌风险, 日饮茶的风险指数 (Hazard index, HI) 低于可接受的限值. 与其他食物不同, 饮用茶汤是茶叶中有毒、有害元素进入人体的主要途径之一. 大量的研究<sup>[12-15]</sup>均表明, 茶汤中的金属含量远低于茶叶本身. 然而, 这些研究通常采用在特定的时间内 (5~10 min) 浸泡茶叶 1~2 次, 进而测定茶汤中的金属元素含量. 显然, 这与国人饮茶的习惯并不完全一致. 在我国人们通常会对茶叶进行多次冲泡<sup>[16]</sup>, 而冲泡次数的多少和金属元素在茶叶中的可浸出性将直接影响到茶叶中金属元素的浸出量. 因此, 从表面上看, 采用茶汤中重金属含量进行人体健康风险评估看似较为合理, 但由于饮茶习惯和方式的差异, 有可能导致健康风险的低估, 且由于冲泡时间和次数的差异, 致使不同研究结论之间的可比性较差. 尽管采用茶叶中重金属总量进行健康风险评估可能会导致风险的高估, 但在对人们健康的保护和研究结果的可借鉴性方面则具有优势.

云南省凤庆县是云南茶叶种植面积较广、茶产量较大的产区之一. 该产区位于 Pb-Zn-Ag-Cu-S-Hg 矿化带, 土壤中重金属元素背景值较高<sup>[17]</sup>, 目前鲜见有关于对该产区茶叶中重金属元素的健康风险评估的研究报道. 基于此, 本研究以凤庆县具有代表性的 5 个茶园的茶叶嫩叶为研究对象, 选取 Cu 和 Zn 为代表性的人体必需元素, 以及 Pb, Cd, Cr 和 As 为代表性的有毒有害元素, 采用美国环保署 (USEPA) 推荐的污染物摄入量与标准参考剂量 (Standard reference dose, RfD) 进行比较的方法<sup>[18]</sup>, 通过目标危害系数 (Target hazard quotients, THQ) 和风险指数 (HI) 对茶叶中 Cu, Pb, Zn, Cd, Cr 和 As 的摄入健康风险进行评估, 以期为该产区茶叶的饮用安全提供理论支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集与制备

茶叶样品分别采自云南省凤庆县具有代表性的 5 块茶园 (大窝拓茶园、大梁子茶园、彭家社茶园、大寺乡茶园和洛党乡茶园) 的茶树嫩叶 (一芽二叶), 样品依次采用自来水和超纯水清洗、杀青

(100℃)、研磨并过 60 目尼龙孔筛后, 编号备用.

### 1.2 金属元素的测定

茶叶中 Cu, Pb, Zn, Cd, Cr 和 As 的测定采用微波消解-ICP-MS 测定. 微波消解: 准确称取 0.2 g (精确至 0.001 g) 处理好的茶叶样品于消解罐中, 加入 8 mL HNO<sub>3</sub> 静置过夜, 次日于 100℃ 赶酸仪中预消解 30 min; 稍冷后, 加盖放入微波消解仪中消解. 具体条件如表 1 所示.

表 1 微波消解的条件和参数

步骤	控制温度/℃	升温时间/min	恒温时间/min	功率/W
1	120	10	5	1 200
2	150	5	5	1 200
3	180	10	30	1 200

消解完毕并冷却后, 缓慢打开罐盖排气, 取下内盖后置于 150℃ 赶酸仪, 赶酸至 1 mL 左右, 用超纯水定容至 20 mL, 备测. ICP-MS 的测定条件与郝伟等<sup>[19]</sup>所报道的方法一致. 本研究所用试剂均为优级纯, 水为超纯水.

### 1.3 健康风险评估

采用 USEPA 提出的 *RfD*, 通过 *HI* 和 *THQ* 来评估人体摄入重金属所造成的潜在健康风险. 重金属的日估计摄入量 (Estimated daily intake, EDI) 是健康风险评估的基本参数. *EDI* 的计算如下<sup>[20]</sup>:

$$EDI = \frac{C \times E_F \times E_D \times F_{IR}}{W_{AB} \times T_A \times 1\,000}, \quad (1)$$

式中, *C* 为茶叶中重金属的含量 (mg/kg), *E<sub>F</sub>* 为暴露频率 (365 d/a), *E<sub>D</sub>* 为暴露时间 (70 a), *W<sub>AB</sub>* 为平均体质量 (成人, 60 kg), *T<sub>A</sub>* 为平均暴露时间 (*E<sub>F</sub>* × *E<sub>D</sub>*), *F<sub>IR</sub>* 为茶叶摄取率 [g/(人 · d)]. 假设成人每天饮用茶汤 1 250 mL, 则对应的茶叶干质量为 8.0 g<sup>[21]</sup>. 单一金属的潜在非致癌效应可通过 *THQ* 进行评估, *THQ* 值 < 1 表明没有明显的毒性 (非致癌) 风险. 随着 *THQ* 值的增加, 毒性 (非致癌) 风险增加<sup>[22]</sup>.

$$THQ = \frac{EDI}{RfD}, \quad (2)$$

式中 *RfD* 是口服参考剂量. 各金属元素 *RfD* 值设置为 Cu [0.04 mg/(kg · d)], Pb [3.6 × 10<sup>-3</sup> mg/(kg · d)], Zn [0.3 mg/(kg · d)], Cd [5 × 10<sup>-4</sup> mg/(kg · d)], As [3 × 10<sup>-4</sup> mg/(kg · d)]. 由于 Cr(VI) 在胃部酸性条件下可还原为 Cr(III), 因此 Cr 的 *RfD* 值设置为

1.5 mg/(kg·d)<sup>[21]</sup>.

多种重金属总的潜在风险是所有研究污染物危害系数的总和<sup>[22]</sup>, 可由下式进行计算:

$$HI = \sum_{i=1}^n THQ_i, \quad (3)$$

式中,  $THQ_i$  是第  $i$  种污染物的  $THQ$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 茶叶中各金属元素的含量

采用微波消解-ICP-MS 测定法对茶叶嫩叶样品中的 Cu, Pb, Zn, Cd, Cr 和 As 的含量进行分

析, 结果列于表 2 之中.

茶叶嫩叶中各重金属元素的含量分析结果表明, 在研究的 5 个茶园嫩叶中, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr 和 As 的含量范围分别为: 9.76 ~ 17.28, 0.29 ~ 0.92, 27.24 ~ 42.68, 0.04 ~ 0.08, 0.96 ~ 1.13, 0.29 ~ 0.59 mg/kg 之间, 远低于各标准所规定的最高允许限量值.

### 2.2 健康风险评估

对茶叶中各重金属的日估计摄入量 ( $EDI$ ) 进行计算, 结果列于表 3 之中.

表 2 研究区茶园茶叶嫩叶中重金属元素的含量

茶叶样品编号	元素及含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )					
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As
T1 (大窝拓茶园)	17.28	0.92	42.68	0.06	1.10	0.52
T2 (大梁子茶园)	15.25	0.91	33.53	0.06	1.04	0.59
T3 (彭家社茶园)	9.76	0.83	28.61	0.08	0.96	0.40
T4 (大寺乡茶园)	11.00	0.29	32.28	0.04	1.08	0.29
T5 (洛党乡茶园)	12.56	0.72	27.24	0.05	1.13	0.40
平均值	13.17	0.73	32.87	0.06	1.06	0.44
最大值	17.28	0.92	42.68	0.08	1.13	0.59
最小值	9.76	0.29	27.24	0.04	0.96	0.29

表 3 茶叶中各重金属元素的日估计摄入量

样品编号	重金属元素及 $EDI/(\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1})$					As (致癌)
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	
T1	$2.3 \times 10^{-3}$	$12.0 \times 10^{-5}$	$5.7 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$6.9 \times 10^{-5}$
T2	$2.0 \times 10^{-3}$	$12.0 \times 10^{-5}$	$4.5 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$7.8 \times 10^{-5}$
T3	$1.3 \times 10^{-3}$	$11.0 \times 10^{-5}$	$3.8 \times 10^{-3}$	$11.0 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$5.3 \times 10^{-5}$
T4	$1.5 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-3}$	$5.3 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$3.9 \times 10^{-5}$
T5	$1.7 \times 10^{-3}$	$9.6 \times 10^{-5}$	$3.6 \times 10^{-3}$	$6.7 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$5.3 \times 10^{-5}$
平均值	$1.8 \times 10^{-3}$	$9.7 \times 10^{-5}$	$4.4 \times 10^{-3}$	$7.8 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$5.8 \times 10^{-5}$

茶叶中各重金属元素的日估计摄入量计算结果表明, 各元素  $EDI$  的平均值由大到小的顺序为:  $EDI(\text{Zn}) > EDI(\text{Cu}) > EDI(\text{Cr}) > EDI(\text{Pb}) > EDI(\text{As})$ . Nkansah 等<sup>[20]</sup>研究了加纳市场茶叶中重金属元素的  $EDI$ , 结果表明, 各元素  $EDI$  的平均值由大到小的顺序为:  $EDI(\text{Fe}) > EDI(\text{As}) > EDI(\text{Cd}) > EDI(\text{Zn}) > EDI(\text{Pb})$ ; Li 等<sup>[21]</sup>研究了

国江西茶叶中各重金属元素的  $EDI$ , 结果表明, 各元素  $EDI$  的平均值由大到小的顺序为:  $EDI(\text{Al}) > EDI(\text{Cu}) > EDI(\text{Ni}) > EDI(\text{Pb}) > EDI(\text{Co}) > EDI(\text{Cd})$ . 不同的研究所得茶叶中各重金属元素的  $EDI$  值的大小顺序略有差别, 这主要与茶叶中重金属元素的含量有关. 本研究对茶叶中各重金属元素的  $THQ$  值和  $HI$  值进行计算, 结果列于表 4 之中.

表4 茶叶中各重金属元素的目标危害系数和风险指数

样品编号	元素及目标危害系数 <i>THQ</i>						风险指数 <i>HI</i>
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As	
T1	$5.8 \times 10^{-2}$	$3.3 \times 10^{-2}$	$1.9 \times 10^{-2}$	$1.6 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-1}$	$2.4 \times 10^{-1}$
T2	$5.0 \times 10^{-2}$	$3.3 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2}$	$1.6 \times 10^{-1}$	$0.93 \times 10^{-3}$	$2.6 \times 10^{-1}$	$2.7 \times 10^{-1}$
T3	$3.2 \times 10^{-2}$	$3.1 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$2.2 \times 10^{-1}$	$0.87 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-1}$	$1.9 \times 10^{-1}$
T4	$3.8 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$0.93 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-1}$	$1.4 \times 10^{-1}$
T5	$4.2 \times 10^{-2}$	$2.7 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-1}$	$1.9 \times 10^{-1}$

*THQ* 和 *HI* 评价结果表明, 在各重金属元素中, As 的 *THQ* 最高, 达  $10^{-1}$  数量级, 而 Cr 的 *THQ* 最低, 仅为  $10^{-3}$  数量级. 通常 *THQ* < 1, 表明茶叶中的重金属元素没有明显的健康风险, 随着 *THQ* 值的增加, 风险逐步增大. 在本研究中, 各茶园茶叶中各重金属的 *THQ* 和 *HI* 均小于 1, 表明凤庆茶园茶叶中的重金属对人体健康风险较小. 该结论与 Li 等<sup>[21]</sup> 和 Nkansah 等<sup>[20]</sup> 的研究结论一致.

3 结论

通过以上研究可以获得如下结论:

- 1) 凤庆茶叶中 Cu, Pb, Zn, Cd, Cr 和 As 的含量均低于各标准所规定的最高允许限量值;
- 2) 凤庆茶叶中各重金属元素的 *EDI* 值均较低, 平均值由大到小的顺序为: *EDI* (Zn) > *EDI* (Cu) > *EDI* (Cr) > *EDI* (Pb) > *EDI* (As);
- 3) 风险评价结果表明, 凤庆茶叶中 As 的目标危害系数 (*THQ*) 最高 (达  $10^{-1}$ )、Cr 最低 (仅为  $10^{-3}$  数量级), Cu, Pb, Zn, Cd, Cr 和 As 的健康风险指数均低于 1, 因此饮用凤庆茶叶对人体无明显的健康风险.

[参考文献]

[1] MARTORELL I, PERELLO G, MARTI-CID R, et al. Human exposure to arsenic, cadmium, mercury, and lead from foods in Catalonia, Spain: temporal trend [J]. *Biological Trace Element Research*, 2011, 142: 309 – 322.

[2] LIU X, SONG Q, TANG Y, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: a multi-medium analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 463: 530 – 540.

[3] GEBERTSADIK D W, CHANDRAVANSI B S. Levels of metals in commercially available Ethiopian black teas and their infusions [J]. *Bulletin of the Chemical Society of*

*Ethiopia*, 2011, 24 (3): 339 – 349.

[4] SHEN F M, CHEN H W. Element composition of tea leaves and tea infusions and its impact on health [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 80 (3): 300 – 304.

[5] SHARMA R K, AGARWAL M, MARSHALL F M. Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) contamination of vegetables in urban India: a case study in varanasi [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 154: 254 – 263.

[6] CABARERA C, GIMENEZ R, LOPEZ M C. Determination of tea components with antioxidant activity [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2013, 51 (15): 4427 – 4435.

[7] SALAHINEJAD M, AFAKI F. Toxic and essential mineral elements content of black tea leaves and their tea infusions consumed in Iran [J]. *Biological Trace Element Research*, 2010, 134: 109 – 117.

[8] ABDEL-ATY A M, CHOI J H, RAHMAN M M, et al. Residues and contaminants in tea and tea infusions: a review [J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2014, 31 (11): 1794 – 1804.

[9] SOFUOGLU S C, KAVCAR P. An exposure and risk assessment for fluoride and trace metals in black tea [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 158 (2): 392 – 400.

[10] ZHU F, WANG X, FAN W, et al. Assessment of potential health risk for arsenic and heavy metals in some herbal flowers and their infusions consumed in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185 (5): 3909 – 3916.

[11] AFFHOLDER M C, PRUDENT P, MASOTTI V, et al. Transfer of metals and metalloids from soil to shoots in wild rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) growing on a former lead smelter site: human exposure risk [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 454: 219 – 229.

[12] BASGEL S, ERDMOGLU S B. Determination of mineral

- and trace elements in some medicinal herbs and their infusions consumed in Turkey [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 359 (3): 82–89.
- [13] STREET R, SZAKOVA J, DRABEK O, et al. The status of micronutrients (Cu, Fe, Mn, Zn) in tea and tea infusions in selected samples imported to the Czech Republic [J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2006, 24 (2): 62–71.
- [14] KARAK T, BHAGAT R M. Trace elements in tea leaves, made tea and tea infusion: a review [J]. *Food Research International*, 2010, 43 (9): 2234–2252.
- [15] SZYMZYCHA-MADEJA A, WELNA M, POHL P. Elemental analysis of teas and their infusions by spectrometric methods [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2012, 35: 165–181.
- [16] LV H P, LIN Z, TIAN J F, et al. Contents of fluoride, lead, copper, chromium, arsenic and cadmium in Chinese Pu-erh tea [J]. *Food Research International*, 2013, 53 (2): 938–944.
- [17] 杨婉秋, 王亚琴, 肖涵. 云南省凤庆县茶叶中矿质元素含量分析 [J]. *昆明学院学报*, 2015, 37 (6): 39–43.
- [18] FU Q L, LIU Y, LI L, et al. A survey on the heavy metal contents in Chinese traditional egg products and their potential health risk assessment [J]. *Food additives & contaminants: Part B, Surveillance*, 2014, 7 (2): 99–105.
- [19] 郝伟, 何咏, 陈雪, 等. 全自动消解-ICP-MS 法检测不同茶叶中的稀土含量 [J]. *昆明学院学报*, 2016, 38 (3): 39–42.
- [20] NKANSAH M A, OPOKU F, ACKUMEY A A. Risk assessment of mineral and heavy metal content of selected tea products from the Ghanaian market [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188 (6): 1–11.
- [21] LI L H, FU Q L, ACHAL V, et al. A comparison of the potential health risk of aluminum and heavy metals in tea leaves and tea infusion of commercially available green tea in Jiangxi, China [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2015, 187 (5): 4445–4457.
- [22] USEPA. Concepts, methods and data sources for cumulative health risk assessment of multiple chemicals, exposures and effects: a resource document [EB/OL]. [2019-03-06]. <http://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=190187>.

(上接第 47 页)

- [9] 施守杰, 符云鹏, 杨双剑, 等. 遮阴对烤烟上部叶光合特性及品质的影响 [J]. *山东农业科学*, 2016, 48 (2): 24–28.
- [10] 刘玉英, 李卓琳, 韩佳育, 等. 模拟降雨量变化与 CO<sub>2</sub> 浓度升高对羊草光合特性和生物量的影响 [J]. *草业学报*, 2015, 24 (11): 128–136.
- [11] 蔡昆争, 骆世明. 不同生育期遮光对水稻生长发育和产量形成的影响 [J]. *应用生态学报*, 1999, 10 (2): 193–196.
- [12] 刘贤赵, 康绍忠, 李庆志, 等. 不同生育期遮阴条件下番茄矿质氮的分配效应 [J]. *农业工程学报*, 2003, 19 (2): 199–202.
- [13] 樊金娟, 阮燕晔. *植物生理学实验教程* [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2015.
- [14] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. *现代植物生理学实验指南* [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [15] 王峥嵘, 魏建荣, 周兴华, 等. 不同光照强度对烤烟生长及品质的影响 [J]. *云南农业大学学报*, 2011, 26 (2): 14–20.
- [16] 黄一兰, 李文卿. 光强对烤烟光合作用影响的初步研究 [J]. *烟草科技*, 2000 (9): 36–38.
- [17] 武常青, 胡彦波, 贺国强. 遮阴对烤烟叶片光合特性的影响 [J]. *现代化农业*, 2010 (9): 1–5.
- [18] 刘典三, 刘国顺, 贾芳芳, 等. 不同光强对烤烟质体色素及其降解产物的影响 [J]. *华北农学报*, 2013, 28 (1): 234–238.
- [19] 云菲, 刘国顺, 史宏志, 等. 光氮互作对烤烟叶片光合色素及荧光特性的影响 [J]. *中国烟草学报*, 2010, 16 (4): 44–50.
- [20] 朱祝军, 喻景权, GERENDAS J, 等. 氮素形态和光照强度对烟草生长和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 清除酶活性的影响 [J]. *植物营养与肥科学报*, 1998, 4 (4): 379–385.
- [21] 王平荣, 张帆涛, 高家旭, 等. 高等植物叶绿素生物合成的研究进展 [J]. *西北植物学报*, 2009, 29 (3): 629–636.
- [22] 王红丽. 遮阴对浓香型烤烟光合生理及质量风格的影响 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.