网络出版时间:2026-02-04 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.08.013

氯乙酸类消毒副产物对生菜光合特性及食用安全的影响

叶凡[1],陈国元[1,2],姜子涵[1],李青松[1,2]
(1 厦门理工学院 环境科学与工程学院,福建 厦门 361024;2 厦门市水资源利用与保护重点实验室,福建 厦门 361024)

[摘 要] 【目的】研究环境相关浓度二氯乙酸(DCAA)和三氯乙酸(TCAA)慢性暴露对生菜光合特性及食用安全的影响,为评估氯乙酸类消毒副产物(DBPs)在农业生产中的潜在风险提供理论依据。【方法】以散叶生菜为试验材料,采用土培方法,用不同质量浓度(10,40,70和100 μg/L)DCAA和TCAA的水溶液灌溉35 d,测定不同处理下生菜生长特性和光合生理特性,并对生菜中DCAA和TCAA的富集系数(BCF)、转运系数(TF)及生菜食用健康风险进行评估。【结果】DCAA和TCAA(10,40,70和100 μg/L)组生菜叶片鲜质量分别较对照极显著下降了23.13%~41.64%和10.00%~28.00%,但株高与叶面积无显著变化。DCAA(70和100 μg/L)组生菜根系鲜质量、总根表面积、平均根系直径及总根体积分别较对照显著下降70.66%~73.88%,46.52%~69.70%,24.14%~26.37%和67.79%~78.85%,且降低程度普遍高于TCAA处理组(66.38%~66.81%,54.75%~55.78%,13.36%~16.44%和64.42%~64.90%),10 μg/L DCAA组生菜根系鲜质量显著下降28.69%,而10 μg/L TCAA组根系鲜质量无显著性变化。TCAA(40,70和100 μg/L)组生菜净光合速率(P_n)和胞间CO_2浓度(C_i)均显著降低45.08%~63.19%和13.00%~27.68%,且下降幅度均高于DCAA处理组(30.10%~39.09%和11.49%~18.52%)。污染物富集及转移特征显示,DCAA和TCAA在生菜体内的积累具有阈值效应,在70 μg/L灌溉组中BCF和TF出现峰值。生菜食用风险系数随着DCAA和TCAA灌溉浓度的增加而上升,但均小于1。【结论】环境相关浓度DCAA慢性暴露对生菜根系形态的损伤较为突出,而TCAA则表现出更强的光合毒性。DCAA和TCAA的风险系数虽未超标,但生菜光合能力下降与根系结构损伤表明,其慢性暴露(≥40 μg/L)将显著影响生菜生理功能及产量。

[关键词] 二氯乙酸;三氯乙酸;生菜;光合生理
[中图分类号] S636.2 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)08-0121-08

Effects of chloroacetic acid-based disinfection by-products on photosynthetic characteristics and food safety of lettuce

YE Fan[1],CHEN Guoyuan[1,2],JIANG Zihan[1],LI Qingsong[1,2]
(1 *School of Environmental Science and Engineering,Xiamen University of Technology,Xiamen,Fujian* 361024,*China*;
2 *The Key Laboratory of Water Resources Utilization and Protection of Xiamen,Xiamen,Fujian* 361024,*China*)

Abstract:【Objective】This research aims to investigate the effects of chronic exposure of lettuce (*Lactuca sativa*) to environmentally relevant concentrations of dichloroacetic acid (DCAA) and trichloroacetic acid (TCAA) on its photosynthetic characteristics and consumption safety, to provide a theoretical basis for evaluating the potential risks of chloroacetic acid-based disinfection byproducts (DBPs) in irrigated agriculture.

[收稿日期] 2025-06-30 [修回日期] 2025-09-05
[基金项目] 福建省科技计划项目(2021Y0041);厦门市自然科学基金项目(3502Z202573074)
[作者简介] 叶凡(1998—),男,安徽铜陵人,在读硕士,主要从事消毒副产物植物毒理研究。E-mail:185130117@qq.com
[通信作者] 陈国元(1980—),男,湖北襄阳人,副教授,主要从事生态毒理研究。E-mail:chengy@xmut.edu.cn

【Method】Using loose-leaf lettuce as the test materials, a soil culture experiment was conducted. Irrigation was performed for 35 days with aqueous solutions of DCAA and TCAA at different mass concentrations (10, 40, 70 and 100 μg/L). The growth characteristics and photosynthetic physiological properties of lettuce were determined under different treatments, and the bioconcentration factor (BCF), transport factors (TF), and health risks of consuming lettuce of DCAA and TCAA in lettuce were also analyzed.【Result】Compared with the control group, in both the DCAA and TCAA (10, 40, 70 and 100 μg/L) groups, the fresh mass of lettuce leaves decreased significantly by 23.13%－41.46% and 10.00%－28.00%, respectively, but there was no significant difference in the height and leaf area of the plant. In DCAA (70 and 100 μg/L) groups, the fresh root mass, the total surface area of the roots, average root diameter and total root volume were significantly decreased by 70.66%－73.88%, 46.52%－69.70%, 24.14%－26.37% and 67.79%－78.85%, respectively, which were generally higher than those in the TCAA treatment group (66.38%－66.81%, 54.75%－55.78%, 13.36%－16.44%, and 64.42%－64.90%). Under 10 μg/L DCAA treatment, the root fresh mass of lettuce was significantly decreased by 28.69%. Under 10 μg/L TCAA treatment, no significant difference was observed in the root fresh mass. In contrast, the net photosynthetic rate (P_n) and intercellular CO_2 concentration (C_i) of lettuce were significantly reduced by 45.08%－63.19% and 13.00%－27.68% in the TCAA (40, 70, and 100 μg/L) group, which were higher than those in the DCAA treatment group (30.10% － 39.09% and 11.49% － 18.52%). The enrichment and transfer characteristics of the pollutants showed that the accumulation of DCAA and TCAA in lettuce had a threshold effect, and the peak values of BCF and TF were observed in the 70 μg/L irrigation group. The risk index (RI) of lettuce consumption increased with the increase of DCAA and TCAA irrigation concentration, but remained lower than 1 in both cases.【Conclusion】The damage to lettuce root morphology by chronic exposure to environmentally relevant concentration of DCAA was prominent, whereas TCAA showed stronger photosynthesis toxicity. Although the risk index for DCAA and TCAA did not exceed the threshold, the reduced photosynthetic capacity and root structure damage in lettuce indicate that chronic exposure (≥40 μg/L) will significantly impair the plant's physiological functions and yield.

Key words: dichloroacetic acid; trichloroacetic acid; lettuce; photosynthetic physiology

自新冠疫情暴发以来,全球范围内含氯消毒剂的使用量急剧增加,对环境产生了深远的影响。含氯消毒剂在有效杀灭病原体的同时,其产生的消毒副产物(disinfection by products, DBPs)会在自然界中积累,对生态系统和人类健康造成潜在威胁[1]。氯乙酸类物质是主要的DBPs之一,具有较强的生物毒性[2],其中二氯乙酸(dichloroacetic acid, DCAA)和三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCAA)是自然水体常见的氯乙酸类DBPs。罗莹等[3]在我国地表水中检测到三氯甲烷(trichloromethane, TCM)、三溴甲烷(tribromomethane, TBM)、DCAA和TCAA暴露浓度在0~51 μg/L。

DCAA和TCAA不容易被生物降解,能够在水体和土壤中长期存在[4],从而增加其在食物链中的生物积累和生物放大风险,最终会对人类健康造成影响。已有研究发现,DCAA和TCAA具有生物毒性,会对藻类、鱼类和其他水生无脊椎动物的生长发育产生负面影响[5-6]。QIN等[5]研究发现,DCAA和TCAA对近头状尖胞藻(*Raphidocelis subcapitata*)的半数效应剂量(EC_{50})分别是0.198和0.109 mmol/L。RANJAN等[6]研究了TCM、TBM和TCAA对绿豆(*Vigna radiata*)的影响,结果表明,绿豆的发芽指数、活力指数、耐受性指数及DNA损伤程度均有DBPs浓度依赖性,其中TCAA毒性最强。目前,我国地表水仍然是农田灌溉的主要水源。因此DCAA和TCAA等DBPs会通过自然水体的灌溉进入农田,从而对农作物的生产和安全产生影响。蔬菜是人们日常饮食的重要组成部分,了解氯乙酸类DBPs暴露对蔬菜生长和食用健康风险的潜在影响,对于保障食品安全和公共健康具有重要意义。

生菜(*Lactuca sativa*)属一年生或二年生草本植物,原产于欧洲地中海沿岸地区。生菜作为栽培周期较短的经济作物,能实现周年生产,有较高的经济价值,已成为人们日常生活中最常见的蔬菜。本试验以生菜为试验对象,灌溉环境相关浓度(0~

100 μg/L）DCAA 和 TCAA 水溶液，探究其慢性暴露条件下生菜的生长情况、光合特性及其在生菜体内的富集转运和食用健康风险，以期为含有氯乙酸类DBPs的水体在日常农田灌溉中的应用提供理论指导。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验用散叶生菜种子购于山东省寿光市寿光专业种子有限公司；营养土购于浙江金华美乐棵股份有限公司。纯 DCAA 和 TCAA（纯度≥95%）购于上海恒远生物科技有限公司，先用超纯水配制成 1 mg/L 母液，4 ℃保存，灌溉时再进行逐级稀释。

1.2　试验方法

生菜种子发芽及移栽试验参照姜子涵等[7]的方法进行。选择饱满、洁净的生菜种子，经湿纸巾浸种催芽 2 d 后，选取发芽一致的种子播种于育苗盘（覆盖 0.5 cm 营养土），每天用 5 mL 纯水灌溉，采用 GZP-350S 光照培养箱培养（光照强度 10 000 lx，光周期 12 h/12 h，日/夜温度 20 ℃/17 ℃），4 叶期移栽至 7 cm×7 cm×10 cm 的营养钵中（每钵约 96 g 营养土），每钵定植 1 株[7]。分别设置对照组和 10，40，70 和 100 μg/L DCAA 和 TCAA 灌溉组，每组设置 4 个重复，共 36 钵。对照组每株生菜每天灌溉 40 mL 超纯水，处理组每株生菜每天灌溉 40 mL 不同质量浓度的 DCAA 或 TCAA 水溶液。培养 35 d 后，原位测定叶片净光合速率（P_n）、气孔导度（G_s）、胞间 CO_2 浓度（C_i）、光系统Ⅱ（PSⅡ）最大量子产量（F_v/F_m）及 PSⅡ有效量子产量（$\Phi_{PSⅡ}$），收获生菜测定其株高、叶片鲜质量、叶片面积、根系鲜质量、总根长、总根表面积、平均根系直径和总根体积，然后采集根系土壤和生菜样本测定 DCAA 和 TCAA 含量。

1.3　测定项目及方法

选择顶部完全展开叶片，使用 TARGA-1 便携式光合作用测定仪（美国汉莎科学仪器有限公司）测定 P_n、G_s 和 C_i，激发光强为 200 μmol/（m^2·s），记录间隔时间 5 s[7]。采用 Yaxin-1161G 叶绿素荧光测试仪（北京雅欣理疗科技有限公司）测定 F_v/F_m 和 $\Phi_{PSⅡ}$，光化光强为 2 500 μmol/（m^2·s），持续时间 10 s。株高用直尺测定。采集生菜根，去除根部多余组织、土壤等，在根系扫描仪（LA2400，Canada Regent）中完成扫描，再使用 WINRHIZO 软件（Regent Instruments Inc.，Canada）对根系进行分析。叶片和根系鲜质量使用万分级电子天平（精艺兴业科技有限公司）测定，叶片面积采用方格计数法[8]测定。

采用气相色谱-质谱联用仪（GCMS-QP2010，Shimadzu）测定叶片、根系和土壤中 DCAA 和 TCAA 含量。生菜对 DCAA 和 TCAA 的富集系数（bioconcentration factor，BCF）和转运系数（translocation factor，TF）分别按公式（1）和（2）计算[9]：

$$BCF=C_v/C_s, \quad (1)$$

$$TF=C_u/C_d。 \quad (2)$$

式中：C_v 为生菜中 DCAA 或 TCAA 的总含量（μg/g），C_s 为生菜种植土壤中 DCAA 或 TCAA 的含量（μg/g），C_u 为生菜地上部分 DCAA 或 TCAA 的含量（μg/g），C_d 为生菜地下部分 DCAA 或 TCAA 的含量（μg/g）。

生菜食用健康评估以风险系数（risk index，RI）表示，按公式（3）计算[10]：

$$RI=DIM/(BW\times ADI)。 \quad (3)$$

式中：DIM 为 DCAA 或 TCAA 每日摄入量，μg/d，根据蔬菜中 DCAA 或 TCAA 含量，按我国城乡居民蔬菜日摄入总量 335.3 g 计算[11]；BW 为人体质量，按人均 65 kg 计算；ADI 为 DCAA 或 TCAA 每日允许摄入量，μg/（kg·d）。我国规定生活饮用水中 DCAA 和 TCAA 的限定浓度分别为 50 和 100 μg/L[12]，平均每天饮水量按 2.367 L 计算[13]，DCAA 和 TCAA 的日允许摄入量分别为 1.82 和 3.64 μg/（kg·d）。

1.4　数据分析

试验数据通过 Microsoft office 12.1.0 进行计算处理。利用 SPSS 25.0 软件进行 ANOVA 统计分析，使用 Origin 2022 软件进行作图。

2　结果与分析

2.1　DCAA 和 TCAA 对生菜生长特性的影响

不同质量浓度 DCAA 和 TCAA 对生菜生长特性的影响结果见表 1。由表 1 可知，与对照组相比，10，40，70 和 100 μg/L DCAA 组生菜叶片鲜质量分别极显著下降了 23.13%，32.34%，41.64% 和 39.82%（$P<0.01$）；根系鲜质量分别极显著下降了 28.69%，62.10%，70.66% 和 73.88%（$P<0.01$）；株高均有一定程度上升，而叶片面积均轻度下降，但均与对照组无显著性差异（$P>0.05$）。与对照组相比，40，70 和 100 μg/L DCAA 组生菜总根表面积分别显著下降了 16.83%（$P<0.05$），46.52% 和

69.70%($P<0.01$);平均根系直径分别极显著下降了22.09%,24.14%和26.37%($P<0.01$);总根体积分别极显著下降了59.13%,67.79%和78.85%($P<0.01$)。与对照组相比,70和100 μg/L DCAA组生菜总根长分别极显著下降了46.54%和60.08%($P<0.01$)。

与对照组相比,10,40,70和100 μg/L TCAA组生菜叶片鲜质量分别下降了10.00%($P<0.05$),16.17%,28.00%和22.70%($P<0.01$);株高和叶片面积均无显著性差异($P>0.05$)。与对照组相比,70和100 μg/L TCAA组生菜根系鲜质量分别极显著下降了66.38%和66.81%($P<0.01$);总根长分别极显著下降了51.56%和48.78%($P<0.01$);总根表面积分别极显著下降了55.78%和54.75%($P<0.01$);平均根系直径分别显著下降了16.44%和13.36%($P<0.05$);总根体积分别极显著下降了64.90%和64.42%($P<0.01$)。

表1 不同浓度DCAA和TCAA对生菜生长特性的影响

Table 1 Effects of different concentrations of DCAA and TCAA aqueous solution on the growth characteristics of lettuce

消毒副产物 Disinfection by-products	质量浓度/(μg·L^{-1}) Concentration	株高/cm Plant height	叶片鲜质量/(g·株$^{-1}$) Leaf fresh weight	叶片面积/(cm^2·片$^{-1}$) Leaf area	根系鲜质量/(g·株$^{-1}$) Root fresh weight
对照Control group	0	9.87±1.39	25.29±1.20	43.64±1.66	4.67±0.35
二氯乙酸 DCAA	10	10.65±0.80	19.44±0.99**	41.77±3.79	3.33±0.45**
	40	10.75±0.50	17.11±0.74**	40.68±4.73	1.77±0.09**
	70	11.00±0.81	14.76±0.78**	42.72±3.34	1.37±0.24**
	100	10.42±1.02	15.22±0.46**	42.88±1.89	1.22±0.18**
三氯乙酸 TCAA	10	9.85±1.03	22.76±0.26*	41.44±2.49	4.26±0.65
	40	9.70±0.33	21.20±1.04**	40.42±2.72	3.53±0.36*
	70	9.82±1.00	18.21±0.42**	42.40±1.92	1.57±0.39**
	100	9.80±0.31	19.55±1.46**	43.08±1.73	1.55±0.38**

消毒副产物 Disinfection by-products	质量浓度/(μg·L^{-1}) Concentration	总根长/(mm·株$^{-1}$) Total root length	总根表面积/(cm^2·株$^{-1}$) Total root surface area	平均根系直径/mm Average root diameter	总根体积/(cm^3·株$^{-1}$) Total root volume
对照Control group	0	852.52±56.06	143.02±18.05	0.584±0.043	2.08±0.21
二氯乙酸 DCAA	10	802.50±61.73	124.20±16.31	0.516±0.041	1.87±0.14
	40	768.21±82.71	118.95±17.71*	0.455±0.053**	0.85±0.08**
	70	455.76±13.53**	76.48±5.23**	0.443±0.033**	0.67±0.02**
	100	340.36±39.56**	43.33±7.52**	0.430±0.039**	0.44±0.02**
三氯乙酸 TCAA	10	1 025.91±85.46*	153.84±10.71	0.536±0.032	2.09±0.21
	40	1 121.05±136.62**	153.60±9.33	0.516±0.043	2.24±0.13
	70	412.94±11.28**	63.25±9.24**	0.488±0.016*	0.73±0.03**
	100	436.66±37.64**	64.72±6.08**	0.506±0.034*	0.74±0.02**

注:*表示处理组与对照组差异显著($P<0.05$),**表示处理组与对照组差异极显著($P<0.01$)。下表同。

Note: * indicates significant difference between the treatment group and the control group ($P<0.05$), and ** indicates highly significant difference between the treatment group and the control group ($P<0.01$). The same below.

2.2 DCAA和TCAA对生菜叶片光合特性的影响

不同质量浓度DCAA和TCAA水溶液灌溉35 d后,生菜叶片P_n、G_s和C_i的变化如表2所示。由表2可知,与对照组相比,10,40,70和100 μg/L DCAA组生菜P_n分别极显著下降了25.06%,30.10%,35.61%和39.09%($P<0.01$);G_s分别极显著下降了19.32%,22.62%,39.25%和41.62%($P<0.01$);与对照组相比,40和70 μg/L DCAA组生菜C_i分别显著下降了11.49%和13.86%($P<0.05$),100 μg/L DCAA组极显著下降了18.52%($P<0.01$)。

与对照组相比,10,40,70和100 μg/L TCAA组生菜P_n分别极显著下降了30.10%,49.28%,45.08%和63.19%($P<0.01$);G_s分别极显著下降了19.22%,33.88%,39.17%和40.53%($P<0.01$);与对照组相比,40,70和100 μg/L TCAA组生菜C_i分别下降了13.00%($P<0.05$),21.84%和

27.68%（$P<0.01$）。

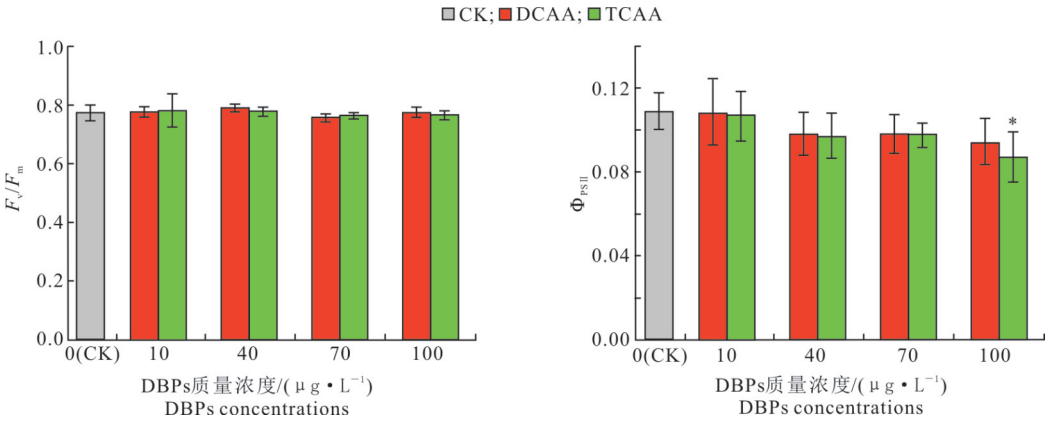
表 2　不同质量浓度 DCAA 和 TCAA 对生菜叶片光合生理特性的影响

Table 2　Effects of different concentrations of DCAA and TCAA aqueous solution on photosynthetic physiological characteristics of lettuce leaves

消毒副产物 Disinfection by-products	质量浓度/(μg·L^{-1}) Concentration	净光合速率(P_n)/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Net photosynthetic rate	气孔导度(G_s)/(mmol·m^{-2}·s^{-1}) Stomatal conductance	胞间 CO_2 浓度(C_i)/(μmol·mol^{-1}) Intercellular CO_2 concentration
对照 Control group	0	8.34±0.06	87.21±6.10	312.48±4.99
二氯乙酸 DCAA	10	6.25±0.06**	70.36±0.25**	288.44±10.63
	40	5.83±0.08**	67.48±4.53**	276.57±36.79*
	70	5.37±0.04**	52.98±5.37**	269.18±1.75*
	100	5.08±0.06**	50.91±3.06**	254.60±4.63**
三氯乙酸 TCAA	10	5.83±0.14**	70.45±1.38**	288.76±8.58
	40	4.23±0.04**	57.66±2.48**	271.87±3.97*
	70	4.58±0.09**	53.05±0.35**	244.23±7.12**
	100	3.07±0.05**	51.86±6.34**	226.00±6.00**

2.3　DCAA 和 TCAA 对生菜叶片叶绿素荧光特性的影响

不同质量浓度 DCAA 和 TCAA 水溶液灌溉 35 d 后，生菜叶片 F_v/F_m 和 $\Phi_{PS\,II}$ 值如图 1 所示。图 1 显示，与对照组相比，10，40，70 和 100 μg/L DCAA 组生菜 F_v/F_m 值有一定程度上升，而 $\Phi_{PS\,II}$ 值轻度下降，但均无显著性差异（$P>0.05$）；10，40 和 70 μg/L TCAA 组生菜 F_v/F_m 和 $\Phi_{PS\,II}$ 值均与对照组无显著性差异（$P>0.05$）；100 μg/L TCAA 组生菜 F_v/F_m 与对照组无显著性差异，但 $\Phi_{PS\,II}$ 值显著下降了 20.18%（$P<0.05$）。



* 表示处理组与对照组差异显著（$P<0.05$），** 表示处理组与对照组差异极显著（$P<0.01$）。

* indicates significant difference between the treatment group and the control group ($P<0.05$), and ** indicates highly significant difference between the treatment group and the control group ($P<0.01$).

图 1　不同质量浓度 DCAA 和 TCAA 对生菜叶片叶绿素荧光特性的影响

Fig. 1　Effects of different concentrations of DCAA and TCAA aqueous solution on chlorophyll fluorescence characteristics of lettuce leaves

2.4　DCAA 和 TCAA 对生菜食用安全的影响

不同质量浓度 DCAA 和 TCAA 水溶液灌溉 35 d 后，生菜 BCF、TF 和 RI 如表 3 所示。由表 3 可知，40 和 70 μg/L DCAA 组生菜 BCF 较 10 μg/L DCAA 组分别显著增加了 16.42% 和 41.79%（$P<0.05$）；40，70 和 100 μg/L TCAA 组生菜 BCF 较 10 μg/L TCAA 组分别显著增加了 18.75%，48.75% 和 26.25%（$P<0.05$）。70 μg/L DCAA 组生菜 TF 较 10 μg/L DCAA 组显著增加了 45.00%（$P<0.05$）；70 和 100 μg/L TCAA 组生菜 TF 较 10 μg/L TCAA 组分别显著增加了 59.09% 和 31.82%（$P<0.05$）。生菜食用 RI 值随着 DCAA 和 TCAA 灌溉浓度（10～100 μg/L）的增加而上升，但均小于 1。

表3 不同质量浓度DCAA和TCAA对生菜DCAA和TCAA的富集、转运和风险系数的影响

Table 3 Effects of different concentrations of DCAA and TCAA aqueous solution on BCF, TF and RI of DCAA and TCAA in lettuce

消毒副产物 Disinfection by-products	质量浓度/(μg·L^{-1}) Concentration	富集系数 BCF	转运系数 TF	风险系数 RI
二氯乙酸DCAA	10	0.67±0.03 c	0.20±0.02 b	0.006±0.000 7 c
	40	0.78±0.05 b	0.18±0.01 b	0.020±0.001 1 b
	70	0.95±0.08 a	0.29±0.02 a	0.042±0.003 7 a
	100	0.66±0.01 c	0.21±0.01 b	0.048±0.004 0 a
三氯乙酸TCAA	10	0.80±0.06 c	0.22±0.02 c	0.004±0.000 3 c
	40	0.95±0.11 b	0.19±0.02 c	0.011±0.001 0 b
	70	1.19±0.16 a	0.35±0.04 a	0.031±0.004 5 a
	100	1.01±0.01 b	0.29±0.01 b	0.033±0.003 2 a

注:同列数据后标不同小写字母表示同一DBPs不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Data in the same column are followed by different lowercase letters to indicate significant differences among different treatments in the same DBPs($P<0.05$).

3 讨 论

3.1 DCAA和TCAA对生菜生长特性的影响

株高能反映植物的整体发育状况,可以指示植物对逆境的适应能力[14]。本研究中,10~100 μg/L DCAA组生菜株高有一定程度增加,而10~100 μg/L TCAA组生菜株高有轻微下降,但与对照组均无显著性差异,说明在本试验浓度下,DCAA和TCAA慢性暴露对生菜生长无明显影响。根系是植物吸收营养的主要器官,在植物抗逆过程中起着重要作用[15]。TANG等[16]用含有50 mmol/L Cd的营养液培育生菜12 d,其根长和根生物量分别降低了18.58%和42.53%。本研究显示,10~100 μg/L DCAA暴露导致生菜根系鲜质量、总根长、总根表面积、平均根系直径和总根体积均呈浓度依赖性下降,表明DCAA可抑制生菜根系生长,并可引起根结构退化;低浓度TCAA(10和40 μg/L)暴露使生菜总根长显著或极显著增加,而总根表面积、平均根系直径和总根体积均无显著变化;70和100 μg/L TCAA组生菜各根系指标均显著或极显著下降。结果表明,低浓度TCAA慢性暴露可促进生菜根系分枝增多或根长增大,以增强资源吸收,而根系直径和根系鲜质量对TCAA较敏感,表现为随浓度增加而下降。叶片是植物光合作用、呼吸作用和蒸腾作用等重要生理过程的核心器官[17]。李倩[18]研究表明,向聚合草(*Symphytum officinale*)叶面喷施Cd溶液(30~150 mg/L)20 d后,其叶片面积和生物量均轻度下降。本研究表明,10~100 μg/L DCAA和TCAA组生菜叶片鲜质量相较于对照组显著或极显著下降,而叶片面积无显著差异,说明DCAA和TCAA可能干扰了生菜对养分的吸收,从而影响了叶片生物量的积累,但生菜通过调整生长策略来应对胁迫,优先维持叶片面积以保证光合作用能正常进行。

3.2 DCAA和TCAA对生菜叶片光合特性的影响

植物光合生理特性可以评估植物的生长状况及其对环境变化的响应[19]。邓雯等[20]用含有Cd(12.5~100 mg/kg)的土壤培育桤木(*Alnuscremastogyne*)75 d后,其P_n下降了44.74%~74.91%,G_s下降了53.63%~74.70%,而C_i随Cd质量浓度的增加呈现上升趋势。有研究表明,C_i是判断光合限制原因的关键指标,P_n、G_s和C_i同时减小,光合限制由气孔因素主导;P_n和G_s减小而C_i不变或增大,光合限制由非气孔因素主导[21]。本研究显示,随着灌溉水溶液中DCAA和TCAA浓度的增加,生菜叶片的P_n、G_s和C_i均呈现递减趋势,表明DCAA和TCAA胁迫对生菜光合作用具有显著的抑制作用,气孔限制是P_n下降的主要原因。同时,TCAA的抑制程度超过同浓度DCAA,表明TCAA对生菜碳同化过程的干扰更为严重。

3.3 DCAA和TCAA对生菜叶片叶绿素荧光特性的影响

叶绿素荧光参数能直接衡量植物PSⅡ反应中心的运转状态[22]。F_v/F_m表示暗适应下PSⅡ反应中心的潜在最大活性,$\Phi_{PSⅡ}$反映植物PSⅡ反应中心实际能量转化效率[23]。王涛等[24]研究表明,用Cd(25~100 mg/L)处理生菜21 d后,F_v/F_m下降了21.95%~26.83%;$\Phi_{PSⅡ}$降低了71.43%~75%。本

研究结果显示，10～70 μg/L DCAA 和 TCAA 组生菜 F_v/F_m 和 $\Phi_{PS\text{Ⅱ}}$ 值均无显著变化；100 μg/L DCAA 组生菜 F_v/F_m 和 $\Phi_{PS\text{Ⅱ}}$ 值也无显著变化，但 100 μg/L TCAA 组生菜 $\Phi_{PS\text{Ⅱ}}$ 值显著下降，导致 PSⅡ的光能转化效率降低，从而对光合作用产生一定程度的负面影响。

3.4　DCAA 和 TCAA 对生菜食用安全的影响

BCF 可以反映植物对环境中污染物的富集能力[25]。本研究结果表明，10～100 μg/L DCAA 和 TCAA 水溶液灌溉条件下，生菜对 DCAA 和 TCAA 的 BCF 均在 70 μg/L 灌溉组达到最大值。同时，各浓度处理条件下，生菜对 TCAA 的 BCF 均高于 DCAA，这可能是因为 Cl 的强负电性使 TCAA 的疏水性更高，从而使其更容易通过脂质双层的被动扩散进入植物细胞[26]。

TF 是衡量植物将化学物质从根部向地上部转运能力的指标，对于评估植物可食用部分的安全性具有指导意义[27]。本试验结果显示，10～100 μg/L DCAA 和 TCAA 水溶液灌溉条件下，生菜的 TF 均在 70 μg/L 灌溉组达到最大值，与 BCF 一致。这可能是因为 DCAA 和 TCAA 具有类似激素和藻毒素等污染物的低促高抑效应[28]。低浓度污染物暴露情况下，植物根系活力、能量及物质代谢等生理活性增强[29]，促进了植物对污染物质的吸收，并将其从根部转运到地上部，以减轻污染物对根系造成的伤害[9]。而高浓度污染物暴露会严重干扰植物的正常生长和代谢，减弱其对污染物的吸收和转移[29]。70 μg/L DCAA 和 TCAA 水溶液灌溉条件下，生菜表现出最强的耐受性和 DBPs 处理能力，其对 DCAA 和 TCAA 的吸收速率、运输效率与体内的解毒能力达到最佳状态，BCF 和 TF 出现峰值。

污染物暴露条件下，农作物的食用健康风险评估极其重要。本研究采用 RI 对污染物的健康风险进行评价，表征其风险大小，若 RI 值小于 1，认为污染物健康风险可以接受；反之，则认为污染物存在健康风险[10]。研究结果显示，10～100 μg/L 的 DCAA 和 TCAA 水溶液灌溉 35 d 时生菜的 RI 值均远小于 1，表明试验浓度的 DCAA 和 TCAA 长期灌溉对生菜食用健康的风险较低。

4　结　论

环境相关浓度 DCAA 与 TCAA 水溶液灌溉条件下，生菜生长、光合生理及污染物富集特性均具有 DBPs 浓度依赖效应。与 TCAA 相比，DCAA 慢性暴露对生菜根系形态的损伤较为严重，而 TCAA 则表现出更强的光合毒性。DCAA 和 TCAA 均可明显降低生菜叶片鲜质量，但株高和叶面积无显著变化。污染物富集及转移特征显示，DCAA 和 TCAA 在生菜体内的积累具有阈值效应，在 70 μg/L 灌溉组中 BCF 和 TF 值出现峰值。生菜的 RI 值虽然暂未超标，但其光合作用减弱与根系结构损伤表明，DCAA 和 TCAA 慢性暴露（≥40 μg/L）将严重威胁生菜生理功能及产量形成。

[参考文献]

[1] PARVEEN N, CHOWDHURY S, GOEL S. Environmental impacts of the widespread use of chlorine-based disinfectants during the COVID-19 pandemic [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(57): 85742-85760.

[2] DENG Y L, LUO Q, LIU C, et al. Urinary biomarkers of exposure to drinking water disinfection byproducts and ovarian reserve: a cross-sectional study in China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 421: 126683.

[3] 罗莹，刘娜，孙善伟，等. 我国地表水中典型DBPs的暴露水平及生态风险[J]. 中国环境科学，2021，41(4)：1806-1814.
LUO Y, LIU N, SUN S W, et al. Occurrence and ecological risk of typical DBPs in Chinese surface water[J]. China Environmental Science, 2021, 41(4): 1806-1814.

[4] RODRIGUEZ M J, SERODES J, ROY D. Formation and fate of haloacetic acids (HAAs) within the water treatment plant [J]. Water Research, 2007, 41(18): 4222-4232.

[5] QIN L T, LIU M, ZHANG X, et al. Concentration addition, independent action, and quantitative structure-activity relationships for chemical mixture toxicities of the disinfection by products of haloacetic acids on the green alga *Raphidocelis subcapitata* [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2021, 40(5): 1431-1442.

[6] RANJAN J, MANDAL T, MANDAL D D. Mechanistic insight for DBP induced growth inhibition in *Vigna radiata* via oxidative stress and DNA damage [J]. Chemosphere, 2021, 263, 128062.

[7] 姜子涵，马腾，叶凡，等. 低剂量MC-LR慢性暴露对生菜氮代谢的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2025(4)：1-13.
JIANG Z H, MA T, YE F, et al. Effect of low dose MC-LR chronic exposure on nitrogen metabolism in *Lactuca sativa*[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2025(4): 1-13.

[8] 刘小锐，黄成东，祝红伟. 叶用莴苣叶面积测定方法的研究[J]. 中国蔬菜，2020(12)：78-81.
LIU X R, HUANG C D, ZHU H W, et al. Studies on measuring methods of leaf area in lettuce[J]. China Vegetables, 2020(12): 78-81.

[9] 马腾,袁昭瑞,姜子涵,等. 微囊藻毒素-LR对生菜非结构性碳水化合物代谢的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(2):135-144.
MA T,YUAN Z R,JIANG Z H,et al. Effect of microcystin-LR on non-structural carbohydrate metabolism in *Lactuca sativa* [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2024,52(2):135-144.

[10] 李彦文. 典型微囊藻毒素在土壤-蔬菜系统中的污染特征与毒性研究[D]. 广州:暨南大学,2015.
LI Y W. Occurrence and phytoxicity of typical microcystins in soil-vegetable system[D]. Guangzhou:Jinan University,2015.

[11] 中华人民共和国环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京:中国环境出版社,2013:226.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population (adults)[M]. Beijing:China Environmental Publishing House,2013: 226.

[12] 冯桂学,刘娜,辛晓东,等. HPLC-MS-MS法与GC法对比测定饮用水中9种卤乙酸[J]. 中国给水排水,2023,39(22):144-149.
FENG G X,LIU N,XIN X D,et al. Comparison of ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry and gas chromatography for determination of nine haloacetic acids in drinking water[J]. China Water & Wastewater,2023,39(22):144-149.

[13] 徐鹏,黄圣彪,王子健,等. 北京和上海市居民冬夏两季饮用水消费习惯(英文)[J]. 生态毒理学报,2008(3):224-230.
XU P,HUANG S B,WANG Z J,et al. Water consumption habit in general population of Shanghai and Beijing,China (English)[J]. Asian Journal of Ecotoxicology,2008(3):224-230.

[14] ADAMCZYK S,ZANTIS L J,VAN LOON S,et al. Biodegradable microplastics induce profound changes in lettuce (*Lactuca sativa*) defense mechanisms and to some extent deteriorate growth traits[J]. Environmental Pollution,2024,363:125307.

[15] ZHANG Y,XIAO T,YI F,et al. SimiR396d targets SiGRF1 to regulate drought tolerance and root growth in foxtail millet [J]. Plant Science,2023,326:111492.

[16] TANG W,LIANG L,XIE Y,et al. Foliar application of salicylic acid inhibits the cadmium uptake and accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.)[J]. Frontiers in Plant Science,2023,14:1200106.

[17] 童宝洁,淡冬莹,李佳蔚. 植物叶片高温耐受能力及调节策略研究进展[J]. 植物研究,2025,45(2):171-180.
TONG B J,DAN D Y,LI J W. Research progress on heat tolerance and regulatory strategies of plant leaves[J]. Bulletin of Botanical Research,2025,45(2):171-180.

[18] 李倩. 叶面喷施甜菜碱促进聚合草叶片积累镉的机制研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2024.
LI Q. Mechanism of betaine foliar application in promoting cadmium accumulation in *Symphytum officinale* leaves[D]. Yangling,Shaanxi:Northwest A&F University,2024.

[19] 涂淑萍,黄航,杜曲,等. 不同品种茶树叶片光合特性与叶绿素荧光参数的比较[J]. 江西农业大学学报,2021,43(5):1098-1106.
TU S P,HUANG H,DU Q,et al. Comparison of photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of different *Camellia sinensis* cultivars[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2021,43(5):1098-1106.

[20] 邓雯,胡红玲,张成浩,等. 桤木幼苗生长及光合生理特性对镉胁迫的响应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(7):1-10.
DENG W,HU H L,ZHANG C H,et al. Response of growth and photosynthetic physiology of *Alnus cremastogyne* seedlings to cadmium stress[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2025,53(7):1-10.

[21] FARQUHAR G D,SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology,1982,33:317-345.

[22] 夏溪,龚睿,冷寒冰,等. 高温胁迫下杜鹃花叶绿素荧光响应及耐热性评价[J]. 北方园艺,2025(6):82-89.
XIA X,GONG R,LENG H B,et al. Comprehensive evaluation of chlorophyll fluorescence response and heat tolerance of different azalea cultivars to high-temperature stress[J]. Northern Horticulture,2025(6):82-89.

[23] 徐薪璐,孔淑鑫,吕卓,等. 靓竹叶色表型叶片形态、结构与光合特性相关性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2025,49(1):145-154.
XU X L,KONG S X,LÜ Z,et al. The relationship of appearance, structure and photosynthetic characteristics of different leaf color phenotypes of *Sasaella glabra 'Albostriata'*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition),2025,49(1):145-154.

[24] 王涛,黄语燕,陈永快,等. 镉胁迫对生菜生长、生理特性及镉富集转运特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(7):115-124.
WANG T,HUANG Y Y,CHEN Y K,et al. Effects of cadmium stress on growth,physiological characteristics and cadmium enrichment and transport of lettuce[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2024,52(7):115-124.

[25] 匡政成,郭利双,李玉军,等. 陆地棉品种对镉累积与转运的差异研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2025,51(1):18-25.
KUANG Z C,GUO L S,LI Y J,et al. Study on difference of accumulation and translocation of cadmium in upland cotton varieties[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences),2025,51(1):18-25.

[26] 黄睿. 环境因素对铜绿微囊藻产DBPFP能力的影响及作用机制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
HUANG R. The influence of environment factors on microcystis producing DBPFP and its mechanism[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2016. (下转第137页)