

柳小兰, 邓廷飞, 王道平, 等. 不同施肥处理对连作土壤-辣椒体系中重金属富集特性及辣椒品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 232-240.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.13.034

# 不同施肥处理对连作土壤-辣椒体系中重金属富集特性及辣椒品质的影响

柳小兰<sup>1,2</sup>, 邓廷飞<sup>1,2</sup>, 王道平<sup>1,2</sup>, 张清海<sup>3</sup>, 魏福晓<sup>1,2</sup>, 葛丽娟<sup>1,2</sup>, 潘雄<sup>1,2</sup>, 丁健<sup>4</sup>

(1. 贵州医科大学省部共建药用植物功效与利用国家重点实验室, 贵州贵阳 550014;

2. 贵州省中国科学院天然产物化学重点实验室, 贵州贵阳 550014;

3. 贵州医科大学公共卫生与健康学院, 贵州贵阳 550025; 4. 贵州万和生态环保有限公司, 贵州贵阳 550025)

**摘要:**为了研究不同施肥处理对连作障碍根际土壤与辣椒中重金属的含量特征、富集特性、安全性评价以及辣椒品质的影响, 寻求安全且有效缓解辣椒连作障碍的最佳施肥方式, 以连作障碍根际土壤和辣椒果实为研究对象, 对土壤和辣椒中 7 个重金属和 3 个品质指标进行测定。结果表明, 不同施肥处理下土壤重金属含量各异, 根际土壤 Cr、Cu、Zn、As、Pb 含量均在国家 II 级标准(GB 15618—2008)规定范围内, 样点达标率为 100%, T3、T9 处理中的 Cd 以及 T10 处理中的 Hg 在个别样点超标率均为 33.33%; 污染评价中, T3、T10 处理分别处于警戒线和轻度污染状态, 其他处理均为清洁水平; 不同施肥处理下, 辣椒同一重金属元素含量差异均较小, 在 2 种评价标准中, As、Hg 均未超标, Cd 则呈现不同程度的超标, 尤其在《农产品安全质量: 无公害蔬菜安全要求》评价标准中超标率达 100%; 不同施肥处理下 Cd 在辣椒中富集能力最强, 富集系数均大于 1, Cu 次之; T6 处理中, 辣椒素含量和辣度均为最高, 而二氢辣椒素含量则位于 T5、T7 处理之后, 排列第 3 位, 但三者之间含量相差较小。得出结论, 结合土壤重金属污染评价、土壤-辣椒果实重金属含量累积特征和富集特性以及辣椒果实品质评价进行综合考虑, T6 处理施肥效果最佳, 能够提升辣椒品质, 可安全且有效缓解辣椒的连作障碍现象。

**关键词:**辣椒; 根际土壤; 连作障碍; 重金属; 品质

**中图分类号:**S641.306 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)13-0232-08

辣椒具有降脂、降糖、抗癌等作用, 药食两用且营养丰富, 其种植面积位居我国蔬菜作物中的第 2 位。辣椒作为贵州省重点推进的农村产业革命 12 个特色优势产业之一, 是农民重要的经济收入来源。辣椒种植面积虽逐年扩增, 但产量品质却不佳, 有研究表明与连作障碍密切相关<sup>[1-2]</sup>, 还与重金属超标有一定关系<sup>[3]</sup>。贵州省很多地方生产的蔬菜中铅、砷、镉等重金属含量存在超标情况, 有些甚至接近临界值<sup>[4]</sup>。辣椒属于重金属高积累作物之

一, 辣椒果实相继被报道出重金属超标问题, 尤其是 Cd。重金属超标不仅影响辣椒口感, 降低营养价值和品质, 大大限制了无公害辣椒的生产和辣椒产品的出口, 降低经济效益<sup>[3]</sup>, 长期食用还会对人体肝脏等器官造成伤害<sup>[5-6]</sup>。

有研究表明, 通过施用有机肥<sup>[7-8]</sup>、微生物菌肥<sup>[9-10]</sup>或化肥减量配施有机肥<sup>[11-12]</sup>等措施, 均能促进辣椒果实生长发育, 改善辣椒品质, 实现提质增效。但张德林等研究发现, 施用混合型微生物菌肥会提高土壤 Cd 含量, 增加土壤污染风险<sup>[13]</sup>。刘荣乐等研究显示, 有机肥 Pb、Cd 超标率为 1.2%、67.9%<sup>[14]</sup>。而长期施用重金属超标的有机肥会导致土壤中重金属的积累, 进而影响作物的生长发育。唐政等研究表明, 施用猪粪有机肥使辣椒果实中 Cd 等重金属元素超标<sup>[15]</sup>。在贵州喀斯特山地农业环境制约下, 耕地资源环境面临着多重挑战, 为了缓解贵州辣椒连作障碍现象, 安全科学施肥才是实现辣椒产业可持续稳定发展的必经之路。本试验以大田试验为基础, 利用有机肥、生物菌剂和复

收稿日期: 2022-10-12

基金项目: 贵州省科技计划(编号: 黔科合支撑[2020]1Y121号); 国家自然科学基金(编号: 31960507, 42167054); 贵州省高等学校工程研究中心项目(编号: 黔教合 KY[2020]014); 贵州省科技计划项目(编号: 黔科合企企[2020]4013)。

作者简介: 柳小兰(1988—), 女, 贵州贵阳人, 硕士, 副研究员, 主要从事化学分析检验检测、环境及土壤资源保护与利用的研究工作。

E-mail: 952741179@qq.com。

通信作者: 邓廷飞, 硕士, 副研究员, 主要从事资源废弃物利用工作。

E-mail: 503620245@qq.com。

合肥不同组合的配合施用,研究不同施肥处理对根际土壤和辣椒果实中重金属的积累情况及辣椒品质的影响,并对其进行安全性评价,以期规避辣椒果实中重金属含量超标和缓解贵州省辣椒的连作障碍现象,为辣椒安全生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试植物:线椒品种香辣四号。

供试土壤:辣椒根际土壤。

供试肥料:(1)复合肥(市场购买),氮、磷、钾含量各占 18%;(2)微生物菌剂(贵州万和生态环保有限公司):枯草芽孢杆菌(1 000 亿/g);解淀粉复合菌剂(200 亿/g);淡紫拟青霉菌(260 亿/g)。(3)功能性有机肥:利用磷石膏和废弃菌棒等原料发酵自制,经贵州省中国科学院天然产物化学重点实验室检测,肥料 pH 值为 6.09, 含全氮 1.48%、全磷 1.95%、全钾 1.31%、有机质 41.25%、总腐殖酸 25.89%。

### 1.2 试验区概况

试验地位于贵州省贵阳市花溪区黔陶乡力合农业种植基地,该地属东部低中丘陵谷盆地区(106°45'42"E,26°19'2"N),地势东北高、西南低,地域北宽南窄,平均海拔约 1 350 m,年平均气温 15.6 °C,属亚热带高原季风气候;年平均日照时数 1 350 h,年平均降水量 1 100 mm,年平均无霜期 285 d。试验地为连续 7 年种植香辣四号品种的辣椒种植基地。

### 1.3 试验设计

试验于 2021 年 3—7 月在基地展开大田试验。辣椒于 2 月中下旬在大棚中育苗,3 月底起垄施肥后覆膜,按株行距 30 cm × 50 cm 移栽定植。定植后进行常规管理,试验期间不喷洒任何药剂,人工除草。每个区域试验设 12 个处理,每个处理重复 3 次,采用随机区组设计排列,共划分 36 个小区,每个小区面积为 6.0 m<sup>2</sup>,以常规施肥作为对照(CK)。复合肥施用量为 1 125 kg/hm<sup>2</sup>,功能性有机肥施用量为 15 t/hm<sup>2</sup>,复合肥和有机肥均为根部施肥;微生物菌剂施用量均为 7.5 kg/hm<sup>2</sup>,兑水后冲施根部。试验方案详见表 1。

### 1.4 样品采集与制备

1.4.1 样品采集 于 2021 年 8 月 7 日对成熟期辣椒进行采摘,每个处理选取长势基本一致的辣椒,

表 1 大田施肥试验方案设计

处理	复合肥	功能性有机肥	枯草芽孢杆菌	解淀粉复合菌剂	淡紫拟青霉菌
T1	0	+	0	0	0
T2	+	+	0	0	0
T3	0	+	+	0	0
T4	0	+	0	+	0
T5	0	+	0	0	+
T6	+	+	+	0	0
T7	+	+	0	+	0
T8	+	+	0	0	+
T9	0	0	+	0	0
T10	0	0	0	+	0
T11	0	0	0	0	+
CK	+	0	0	0	0

混合采摘 2 kg 左右果实,分别装袋标记。同时在对应的辣椒植株下利用木制工具采集 5 ~ 20 cm 的根际土壤(距植株 0.2 ~ 0.5 m),土壤样品质量约 1 kg,将样品装入洁净聚乙烯塑料袋封装,写上编号,与此同时做好采样记录。共采集样品 48 个,含辣椒果实 12 个、对应根际土壤 36 个。

1.4.2 样品制备 将辣椒样品用自来水冲洗 3 遍,再用超纯水(18.2 MΩ · cm)冲洗 3 遍,置于恒温鼓风干燥箱中于 105 °C 杀青 30 min 后,以 65 °C 烘干至恒质量,去除辣椒的胎座,采用高速万能粉碎机磨碎,过 60 目尼龙筛,装入聚乙烯塑料自封袋中,做好标记,密封保存。同时,将采集的土壤样品剔除植物的根、叶、石块等异物,放在通风处自然风干后,采用四分法研磨后,分别过 0.25、2.00 mm 筛,储存于塑料袋中备用。

### 1.5 样品测定

(1)土壤 pH 值的测定采用玻璃电极法(NY/T 1377—2007);(2)铅、镉含量的测定采用石墨炉原子吸收法;(3)砷、汞含量的测定采用原子荧光光谱法;(4)铜和锌含量的测定采用电感耦合等离子体发射光谱法;(5)辣椒素和二氢辣椒素含量的测定采用高效液相色谱法。检测依据均为现行有效的国家标准。

分析过程中以国家标准土壤样品(GSS-2、GSS-5)以及国家标准植株样品(GSV-2)进行分析质量控制,设定样品重复数 10% ~ 15%,每批样品设 2 个空白。

## 1.6 数据统计分析方法

数据统计分析采用 Excel 2013、DPS (7.05) 软件。

## 1.7 评价方法

1.7.1 土壤评价标准及方法 本研究参照我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—2008)<sup>[16]</sup>作为土壤质量评价标准,对不同施肥处理下的辣椒土壤重金属含量进行安全性评价。采用单因子指数法和综合污染指数法能较全面地反映土壤环境的整体质量状况,通过 N. L. Nemerow 综合指数法<sup>[17]</sup>对土壤环境质量进行客观性评价。

1.7.2 辣椒评价标准方法 本研究以《农产品安全质量:无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1—2001)<sup>[18]</sup>和《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》(WM/T2—2019)<sup>[19]</sup>作为评价标准,对不同施肥处理的辣椒中重金属 Cr、Cu、Zn、As、Hg、Pb、Cd 进行安全性评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理下土壤重金属含量特征

由表2可知,不同施肥处理下的土壤 pH 值范围为 4.24 ~ 5.12,均呈酸性;Cr 的含量范围为 29.61 ~ 40.31 mg/kg;Cu 的含量范围为 13.40 ~ 18.36 mg/kg;Zn 的含量范围为 40.82 ~ 53.26 mg/kg;Pb 的含量范围为 7.985 ~ 14.327 mg/kg;Cd 的含量范围为 0.021 ~ 0.150 mg/kg;As 的含量范围为 1.804 ~ 3.459 mg/kg;Hg 的含量范围为 0.074 ~ 0.177 mg/kg。

就土壤中各重金属含量而言,Cr 表现为 T3 > T1 > T5 > T7 > T4 > T8 > T9 > T10 > T11 > CK > T6 > T2;Cu 表现为 T7 > T8 > T3 > T5 > T1 > T2 > T6 > T10 > T4 > T9 > T11 > CK;Zn 表现为 T7 > T8 > T3 > T5 > T1 > T10 > T9 > T11 > T6 > T2 > T4 > CK;As 表现为 T3 > T7 > T5 > T1 > T8 > CK > T2 > T11 > T4 >

表2 不同施肥处理下土壤重金属含量

处理	特征值	pH 值	重金属含量(mg/kg)						
			Cr	Cu	Zn	As	Hg	Cd	Pb
T1	均值	4.86	39.52	15.80	49.47	3.14	0.08	0.04	14.14
	CV(%)	1.87	19.15	7.13	11.36	21.01	13.91	110.70	10.60
T2	均值	5.08	29.61	14.67	41.59	2.74	0.09	0.05	11.24
	CV(%)	8.21	37.17	38.14	35.87	12.96	10.02	140.33	38.28
T3	均值	4.57	40.31	16.81	51.04	3.46	0.09	0.15	14.33
	CV(%)	2.41	21.58	5.24	3.56	18.89	17.41	91.96	19.68
T4	均值	4.76	35.76	14.05	41.27	2.06	0.08	0.02	11.44
	CV(%)	3.81	22.22	9.58	2.74	12.12	12.65	13.49	16.90
T5	均值	4.82	39.30	15.92	50.90	3.21	0.08	0.03	13.51
	CV(%)	4.98	21.93	6.57	1.04	30.38	16.16	25.10	15.75
T6	均值	4.46	29.92	14.58	42.14	1.80	0.08	0.05	8.33
	CV(%)	3.57	20.97	0.84	4.01	19.30	11.84	97.34	54.02
T7	均值	4.75	37.96	18.36	53.26	3.29	0.10	0.03	13.88
	CV(%)	1.17	15.25	13.17	7.87	16.55	13.82	34.82	13.04
T8	均值	4.55	33.64	17.49	51.59	2.99	0.09	0.07	12.94
	CV(%)	1.80	21.54	4.41	0.99	16.55	8.29	92.25	12.60
T9	均值	5.02	31.54	13.78	43.38	1.93	0.09	0.13	11.36
	CV(%)	1.63	24.01	5.44	5.84	28.53	34.08	79.57	10.95
T10	均值	5.12	31.00	14.35	45.73	1.81	0.18	0.03	7.99
	CV(%)	0.70	26.02	7.27	6.34	25.88	105.69	7.88	48.51
T11	均值	5.09	30.36	13.63	43.07	2.14	0.07	0.07	11.04
	CV(%)	2.46	18.81	6.21	6.12	41.06	24.04	85.33	15.17
CK	均值	4.24	29.94	13.40	40.82	2.79	0.09	0.03	10.91
	CV(%)	3.04	25.68	5.58	3.87	68.48	24.11	19.70	19.47
GB 15618—2008			≤120	≤50	≤150	≤35	≤0.2	≤0.25	≤50

T9 > T10 > T6; Hg 表现为 T10 > T7 > T9 > T2 > T3 > T8 > CK > T1 > T4 > T5 > T6 > T11; Pb 表现为 T3 > T1 > T7 > T5 > T8 > T4 > T9 > T2 > T11 > CK > T6 > T10; Cd 表现为 T3 > T9 > T11 > T8 > T2 > T6 > T1 > CK > T10 > T7 > T5 > T4。由上可知, T3 处理中 7 种重金属含量排名均在前 5 位, T1、T5、T7、T8 处理中均有至少 5 种重金属排名在前 5 位, 表明 T1、T3、T5、T7、T8 处理对重金属的吸收、螯合或固定能力比其他处理强。

研究区域中各元素分布和累积程度的差异以及受人为活动影响的程度, 可通过变异系数反映, 其值越大说明受人为活动干扰越强烈<sup>[20]</sup>。就变异程度来看, 土壤 pH 值均为弱变异, 而土壤重金属的变异程度各异。T2 处理中的 Cr、Cu、Zn、T5、T11、CK 处理中的 As、T9、T10 处理中的 Hg、T2、T6、T10 处理中的 Pb、T1、T2、T3、T6、T7、T8、T9、T11 处理中的 Cd, 均为强变异; 其中以重金属 Cd 的变异范围广且变异程度较大, 表明重金属 Cd 受人为活动干扰影响比其他重金属元素大。

根据国家 II 级标准 (GB 15618—2008) 可知, 除了 T10 处理中重金属 Hg 达到临界值 0.2 mg/kg 外, 其他各施肥处理中的土壤重金属含量均远远低于标准限量值。

## 2.2 不同施肥处理下土壤重金属污染评价

通过《土壤环境质量标准》和 N. L. Nemerow 综合指数法得出不同施肥处理下土壤重金属单项、综合及分级评价结果 (表 3)。不同施肥处理下, 土壤重金属 Cd 的单因子污染指数 ( $P_i$ ) 在 T3、T9 处理的重复中最高分别为 1.18、0.94, 表明 T3 处理属于轻度污染, T9 处理属于尚清洁; Hg 的单因子污染指数 ( $P_i$ ) 在 T10 重复中最高为 1.97, 表明 T10 处理处于轻度污染。其他金属元素单因子污染指数 ( $P_i$ ) 均低于 0.7, 处于无污染状态, 属于安全等级。

分析综合污染指数 ( $P_{综}$ ), T3、T10 处理的综合污染指数分别为 0.87、1.41, 分别处于警戒线和轻度污染状态。这是由于本研究选定的污染评价因子中, Cd 贡献率极高所导致, 这与贵州省土壤 Cd 具有“天生的”高背景特性<sup>[21]</sup>密切相关。而其他处理的均为清洁水平, 属于安全等级。

## 2.3 不同施肥处理下辣椒重金属元素含量特征及安全性评价

由表 4 可知, 辣椒果实中 Cr 的含量范围为 0.06 ~ 1.75 mg/kg; Cu 的含量范围为 7.18 ~

8.86 mg/kg; Pb 的含量范围为 0.114 ~ 0.750 mg/kg; Cd 的含量范围为 0.175 ~ 0.269 mg/kg; As 的含量范围为 0.008 ~ 0.197 mg/kg; Hg 的含量范围为 0.00 ~ 0.003 mg/kg。

就辣椒果实的重金属含量而言, 不同施肥处理中 Cr 表现为 T10 > CK > T7 > T11 > T1 > T2 > T8 > T6 > T5 > T4 > T9 > T3; Cu 表现为 T6 > T10 > T4 > T3 > T5 > T2 > T7 > T1 > T8 > T11 > T9 > CK; Zn 表现为 T8 > T4 > T7 > T5 > T2 > T1 > T3 > T6 > T11 > CK > T10 > T9; As 表现为 T4 > CK > T1 > T5 > T10 > T6 > T2 > T11 > T9 > T3 > T8 > T7; Hg 在 T1 ~ T5 处理中未检出或低于仪器检出限, 其他处理表现为 T7 = T8 = T9 = CK > T6 = T10 = T11; Pb 表现为 T3 > T2 > T4 > T5 > T6 > T7 > T11 > T8 > T9 > T10 > CK > T1; Cd 表现为 T11 > T2 > T4 > T10 > T6 > CK > T5 > T3 > T7 > T1 > T9 > T8。不同施肥处理下的辣椒果实同一重金属元素含量差异均较小, 且累积量呈现随机性。

由变异程度来看, 重金属 Cr 在 T1、T10、T11 处理中为中等强度变异, 其他处理均为强变异; Cu 在 T6、T9、T10、T11 处理中为中等强度变异, 其他处理中均为弱变异; Zn 在 T1、T2、T4、CK 处理中为弱变异, 其他处理中均为中等强度变异; As 在 T11、CK 处理中为中等强度变异, 其他处理均为强变异; Hg、Pb 在 T10 处理中为中等强度变异, 其他处理均为强变异; Cd 在 T4、T5、T6、T7、CK 处理中为强变异, 其他处理中为中等强度变异。由上可知, 重金属 Cr、As、Hg、Pb、Cd 在各处理中的变异系数变幅极大, 为 11.92% ~ 150.37%, 其中强变异占比为 68.33%, 表明不同施肥处理下辣椒果实中重金属 Cr、As、Hg、Pb、Cd 含量分布不均匀, 这可能与肥料的种类和施用均匀度、大气干湿沉降以及人为采摘等因素有关。

鉴于辣椒具有药食同源的特性, 在药用行业中潜力巨大<sup>[22]</sup>, 因此本研究以《农产品安全质量: 无公害蔬菜安全要求》《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》作为评价标准, 对辣椒中重金属 Cr、Cu、Zn、As、Hg、Pb、Cd 进行评价。结果显示: 以《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》作为评价标准时, 重金属 Cr、Zn 未做规定; 除了 T2、T11 处理中的 Cd 含量达到限量临界值 (0.3 mg/kg) 外, 且超标率均为 66.67%, 其他重金属在各个处理中的含量均远远低于限量值。以《农产品安全质量: 无公害蔬菜安全要求》作为评价标准时, 重金属 Cu、Zn 未做规定;

表 3 不同施肥处理下土壤重金属单项、综合及分级评价结果

处理	重复	单因子污染指数( $P_i$ )							综合污染指数( $P_{综}$ )	污染等级
		Cr	Cu	Zn	As	Hg	Cd	Pb		
T1	I	0.34	0.29	0.29	0.07	0.35	0.04	0.29	0.38	安全
	II	0.39	0.32	0.36	0.08	0.45	0.09	0.31		
	III	0.26	0.33	0.34	0.11	0.45	0.40	0.25		
T2	I	0.34	0.35	0.32	0.07	0.44	0.06	0.31	0.36	安全
	II	0.15	0.16	0.16	0.07	0.43	0.02	0.13		
	III	0.20	0.37	0.26	0.10	0.34	0.45	0.23		
T3	I	0.36	0.35	0.35	0.08	0.41	1.18	0.34	0.87	警戒线
	II	0.39	0.32	0.33	0.12	0.54	0.52	0.28		
	III	0.25	0.34	0.33	0.09	0.40	0.09	0.23		
T4	I	0.32	0.29	0.27	0.05	0.35	0.07	0.27	0.36	安全
	II	0.35	0.25	0.27	0.06	0.42	0.08	0.22		
	III	0.22	0.30	0.28	0.07	0.45	0.10	0.19		
T5	I	0.33	0.31	0.34	0.07	0.35	0.08	0.32	0.39	安全
	II	0.40	0.30	0.34	0.08	0.38	0.09	0.25		
	III	0.25	0.34	0.34	0.12	0.48	0.13	0.24		
T6	I	0.31	0.29	0.27	0.04	0.44	0.10	0.06	0.35	安全
	II	0.21	0.29	0.29	0.05	0.38	0.07	0.23		
	III	0.22	0.29	0.28	0.06	0.35	0.40	0.21		
T7	I	0.37	0.35	0.34	0.08	0.57	0.08	0.32	0.45	安全
	II	0.29	0.33	0.34	0.09	0.44	0.08	0.27		
	III	0.28	0.42	0.39	0.11	0.57	0.14	0.25		
T8	I	0.35	0.33	0.35	0.07	0.40	0.14	0.29	0.43	安全
	II	0.25	0.36	0.34	0.10	0.43	0.54	0.25		
	III	0.24	0.36	0.34	0.08	0.47	0.10	0.23		
T9	I	0.34	0.27	0.28	0.05	0.35	0.94	0.25	0.70	安全
	II	0.23	0.29	0.31	0.05	0.40	0.55	0.23		
	III	0.22	0.27	0.28	0.07	0.65	0.10	0.20		
T10	I	0.33	0.31	0.30	0.04	0.35	0.13	0.07	1.41	轻度污染
	II	0.23	0.29	0.33	0.05	0.34	0.11	0.22		
	III	0.21	0.27	0.29	0.07	1.97	0.13	0.19		
T11	I	0.31	0.28	0.29	0.05	0.37	0.11	0.26	0.42	安全
	II	0.23	0.29	0.30	0.05	0.28	0.53	0.21		
	III	0.22	0.25	0.27	0.09	0.46	0.16	0.19		
CK	I	0.32	0.29	0.28	0.05	0.37	0.15	0.27	0.42	安全
	II	0.21	0.26	0.27	0.05	0.38	0.11	0.21		
	III	0.21	0.26	0.26	0.14	0.55	0.12	0.18		

As、Hg 均未超标;Cr 在 T3、T4、T5、T6、T9 处理均未超标,其他处理均超标;Pb 在 T1 处理中未超标,在 T9、T10、CK 处理中达到限量临界值(0.2 mg/kg),其他处理均超标;各个处理中 Cd 含量均远远高于限量值(0.05 mg/kg),且超标率为 100%。由此可知,2 种评价标准下,结果均显示辣椒果实中 As、Hg

未超标,而 Cd 有不同程度的超标,表明辣椒果实对 Cd 的吸收富集能力高于其他重金属。结果不一致主要是由于 2 种评价的标准以及侧重点不同所导致,由此表明,单一标准评价具有一定的局限性,结合多种标准共同评价可使评价结果更为全面可靠。通过以上分析可知,辣椒果实中的重金属 Cr、Pb、Cd

表 4 不同施肥处理下辣椒果实中重金属的含量

mg/kg

处理	特征值	Cr	Cu	Zn	As	Hg	Pb	Cd
T1	均值	0.64	7.79	20.67	0.055	ND	0.114	0.192
	CV(%)	11.92	1.76	1.46	129.49	/	141.12	19.79
T2	均值	0.63	8.20	20.79	0.033	ND	0.324	0.253
	CV(%)	147.10	6.50	4.43	87.90	/	96.47	22.68
T3	均值	0.06	8.49	20.61	0.013	ND	0.750	0.210
	CV(%)	55.73	5.04	10.25	85.19	/	112.39	21.12
T4	均值	0.26	8.51	21.93	0.197	ND	0.311	0.236
	CV(%)	77.01	7.49	8.77	48.36	/	107.58	51.33
T5	均值	0.27	8.31	21.73	0.054	ND	0.304	0.216
	CV(%)	102.38	5.43	16.45	133.69	/	129.35	37.30
T6	均值	0.47	8.86	20.22	0.039	0.002	0.297	0.229
	CV(%)	135.26	20.50	14.46	98.36	51.85	103.19	48.43
T7	均值	0.74	8.13	21.78	0.008	0.003	0.246	0.204
	CV(%)	117.29	3.92	21.47	150.37	68.84	97.69	41.99
T8	均值	0.58	7.54	22.36	0.012	0.003	0.207	0.175
	CV(%)	122.30	6.66	14.68	92.32	99.40	140.06	17.87
T9	均值	0.22	7.38	16.29	0.020	0.003	0.192	0.185
	CV(%)	37.11	22.45	16.14	55.73	73.26	70.48	12.60
T10	均值	1.75	8.81	18.43	0.054	0.002	0.191	0.231
	CV(%)	21.24	15.78	18.09	61.80	27.46	15.68	13.62
T11	均值	0.74	7.52	19.62	0.033	0.002	0.233	0.269
	CV(%)	12.69	12.19	11.89	13.29	46.09	84.58	14.27
CK	均值	0.92	7.18	19.09	0.057	0.003	0.171	0.227
	CV(%)	58.22	8.32	7.69	25.59	50.56	80.13	36.56
WM/T 2—2019		-	≤20.0	-	≤2.0	≤0.2	≤5.0	≤0.3
GB 18406.1—2001		≤0.5	-	-	≤0.5	≤0.01	≤0.2	≤0.05

注：“ND”表示未检出或低于仪器检出限；“/”表示因未检出或低于检出限而造成计算缺失的值；“-”表示未规定。

含量较高(尤其是 Cd),具有一定的食用风险,应引起重视。

#### 2.4 不同施肥处理下辣椒的品质特性

辣椒素、二氢辣椒素、辣度是反映辣椒食用品质的重要指标。由表 5 可知,不同施肥处理下的辣椒品质各不相同,其中辣椒素的含量范围为 0.673 ~ 0.838 mg/g,二氢辣椒素的含量范围为 0.177 ~ 0.246 mg/g,辣度范围为 97 ~ 123。不同施肥处理下,辣椒素含量表现为 T6 > T3 > T2 > T4 = T7 > T8 > T9 > T5 > T1 > T11 > T10 > CK;二氢辣椒素含量表现为 T7 > T5 > T6 > T3 > T8 > T2 > T4 > T11 > T10 > T9 > T1 > CK;辣度表现为 T6 > T3 > T2 = T7 > T5 > T8 > T4 > T9 > T1 > T10 = > T11 > CK。由上可知,虽然 T6 处理中二氢辣椒素含量位居第 3 位,但与 T5、T7 处理的含量相差较小,且不论

是辣椒素含量还是辣度,T6 处理均为最高,且 T6 处理中辣椒素、二氢辣椒素、辣度分别为是 CK 处理的 1.25、1.36、1.27 倍,表明 T6 处理的肥料配合施用效果最佳,能够提升辣椒品质,可有效缓解辣椒的连作障碍现象。

#### 2.5 不同施肥处理下土壤-辣椒体系中重金属的富集特征

不同重金属元素在根际土-辣椒果实中迁移特性不同,本研究用富集系数 BCF(即辣椒果实中重金属含量/土壤中重金属含量)表示辣椒果实中重金属相对于土壤的富集程度。在一定程度上,BCF 可体现出元素在土壤-植物系统中迁移难易程度<sup>[23]</sup>;BCF 越大,表明重金属元素迁移进入辣椒体内的能力就越强。

由表 6 可知,不同施肥处理下辣椒果实对土壤

表 5 不同施肥处理下辣椒的品质特性

处理	辣椒素 (mg/g)	二氢辣椒素 (mg/g)	辣度
T1	0.695	0.198	102
T2	0.758	0.213	111
T3	0.766	0.233	114
T4	0.730	0.209	107
T5	0.712	0.244	109
T6	0.838	0.241	123
T7	0.730	0.246	111
T8	0.727	0.220	108
T9	0.711	0.199	104
T10	0.676	0.207	101
T11	0.677	0.208	101
CK	0.673	0.177	97

注:表中数据为 3 次重复处理的平均数。

中重金属的富集能力各异,其中对 Cr 表现为 T10 > CK > T11 > T2 > T7 > T8 > T1 = T6 > T4 = T9 = T5 > T3;对 Cu 表现为 T10 > T6 > T4 > T2 > T11 > CK > T9 > T5 > T3 > T1 > T7 > T8;对 Zn 表现为 T4 > T2 > T6 > CK > T11 > T8 > T5 > T1 > T7 > T3 > T10 > T9;对 Pb 表现为 T3 > T6 > T2 > T4 > T10 > T5 > T11 > T7 > T9 > T8 = CK > T1;对 Cd 表现为 T4 > T5 > T7 > T10 > CK > T2 > T6 > T1 > T11 > T8 > T3 > T9;对 As 表现为 T4 > T10 > T6 > CK > T1 > T5 > T11 > T2 > T9 > T8 = T3 > T7;对 Hg 表现为 CK > T8 > T9 > T7 > T11 > T6 > T10。由上可知,除重金属 Pb 外,其他重金属在 CK 处理中的富集能力排名均在前 6 位,表明 CK 处理比其他处理中土壤重金属迁移富集到辣椒果实的风险更大。

整体而言,不同施肥处理中重金属 Cd 的迁移富集能力最强,富集系数范围为 1.397 ~ 11.187;Cu 次之,富集系数范围为 0.431 ~ 0.614;Zn 与 Cu 富集能力相当,富集系数范围为 0.376 ~ 0.531;其他元素富集能力较小,且富集系数均低于 0.1。因此 Cd、Cu、Zn 很容易被辣椒吸收进而富集在辣椒的果实中,尤其是 Cd,不仅对农产品品质产生危害,还可通过食物链的传递作用在人体内积累,进而增加影响健康。

### 3 结论与讨论

本研究表明,不同施肥处理下土壤重金属含量各异,除了 T10 处理中重金属 Hg 达到临界值 0.2 mg/kg 外,其他各施肥处理中各土壤重金属元

表 6 不同施肥处理下的富集系数 (BCF)

处理	BCF						
	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
T1	0.016	0.493	0.418	0.008	4.336	0.018	/
T2	0.021	0.559	0.500	0.029	4.947	0.012	/
T3	0.001	0.505	0.404	0.052	1.404	0.004	/
T4	0.007	0.606	0.531	0.027	11.187	0.096	/
T5	0.007	0.522	0.427	0.022	8.581	0.017	/
T6	0.016	0.608	0.480	0.036	4.897	0.022	0.026
T7	0.019	0.443	0.409	0.018	8.023	0.002	0.029
T8	0.017	0.431	0.433	0.016	2.676	0.004	0.034
T9	0.007	0.535	0.376	0.017	1.397	0.010	0.032
T10	0.056	0.614	0.403	0.024	7.604	0.030	0.011
T11	0.024	0.552	0.456	0.021	4.002	0.015	0.027
CK	0.031	0.536	0.468	0.016	7.135	0.020	0.035

注:“/”表示因辣椒果实未检出或低于检出限而造成计算缺失的值。

素含量均远远低于标准限量值;不同施肥处理下重金属的变异程度也各不相同,其中以重金属 Cd 的变异范围广且变异程度较大,表明 Cd 受到的人为活动干扰影响比其他重金属大。此外,根据研究区的土壤 pH 值并结合国家 II 级标准 (GB 15618—2008) 可知,本研究中不同施肥处理下土壤 Cr、Cu、Zn、As、Pb 含量均在该标准规定范围内,样点达标率为 100%;而 Cd 在 T3、T9 处理中,Hg 在 T10 处理中的个别样点超标率均为 33.33%。将不同施肥处理下各重金属元素含量按降序排列得出,除了 T6 和 CK 处理外,其他处理的重金属均以不同顺序出现在前 5 位排名,尤其 T1、T3、T5、T7、T8 处理均有至少 5 种重金属排名在前 5 位,说明 T6、CK 处理较其他处理的重金属累积潜在风险小。结合土壤重金属污染评价结果,即 T6 处理与 CK 处理相比,综合污染指数小;结合重金属的富集特性,即重金属 Hg 在 CK 处理中的富集能力最强,表明 T6 处理相对优于 CK 处理。根据辣椒果实评价,T6 处理的辣椒素和辣度均为最高,二氢辣椒素含量也相对较高,整体品质较高,肥料配合施用效果最佳,可知 T6 处理能够提升辣椒品质,可安全有效地缓解辣椒的连作障碍现象。

贵州省属于 Cd 的地球化学异常区。在《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》《农产品安全质量:无公害蔬菜安全要求》2 种评价标准下,本研究不同施肥处理下辣椒果实的 As、Hg 均未超标,而 Cd 则呈现不同程度的超标。尤其在《农产品安全质

量:无公害蔬菜安全要求》评价中,各个处理中辣椒果实 Cd 含量远远超出限量值(0.05 mg/kg),超标率为 100%,表明辣椒果实对 Cd 具有较强富集效应,属于高 Cd 累积蔬菜,这与一些研究结果<sup>[24-25]</sup>相反。本研究中辣椒果实对 Cd 具有高富集特性,对 As、Hg 吸收量较低,这与前人研究结果<sup>[26-27]</sup>相似。辣椒对土壤中重金属 Cd 具有较强的吸收迁移富集能力,可能与研究区土壤呈酸性有关,即 pH 值较低的土壤中 Cd<sup>2+</sup> 的迁移能力较强<sup>[28]</sup>,这与一些研究结果<sup>[29-31]</sup>相符;而与江水英等的研究结果不一致,即辣椒果实 BCF 中,Zn 最大,Cd 次之<sup>[32]</sup>。本研究中各处理辣椒中重金属 Cd 的富集系数均大于 1,与殷山红的研究结果<sup>[33]</sup>相反,这可能与辣椒品种、肥料种类、施肥方式、土壤理化性质、土壤元素有效态等综合因素有关。有研究表明,重金属低积累农作物的筛选标准是可食部位中重金属含量低于国家食品安全相关标准,且作物对重金属元素的转运系数和富集系数均小于 1<sup>[34]</sup>。本研究中,辣椒果实 Cd 含量均超过国家食品安全标准(0.05 mg/kg)<sup>[35]</sup>,且各个施肥处理下的辣椒果实对 Cd 的富集系数均大于 1,表明本研究使用的辣椒品种可能属于易富集 Cd 品种。但 Cd 从土壤到辣椒根、茎、叶、果实的转运情况尚不清楚,需进一步试验,方可确定本研究使用的辣椒品种是否为易富集 Cd 品种,此方向值得深入探究,以期对低富集 Cd 的辣椒品种筛选提供理论支撑,对辣椒安全生产具有重要的理论意义。

#### 参考文献:

- [1] 高晶霞,高 昱,吴雪梅,等. 辣椒连作土壤微生物群落及土壤离子对微生物菌剂的响应[J]. 西南农业学报,2020,33(8):1659-1664.
- [2] 高晶霞,谢 华. 不同连作年限下辣椒的光合特性与果实品质[J]. 北方园艺,2021,(19):48-53.
- [3] 李欣欣,李 桃,徐卫红,等. 不同辣椒品种镉吸收与转运的差异[J]. 中国蔬菜,2017,(9):32-36.
- [4] 李 渝,罗龙皂,蒋太明. 贵州省农产品产地环境质量现状及其评价研究进展[J]. 农业环境与发展,2012,29(4):11-14.
- [5] 孟晓飞,郭俊梅,杨俊兴,等. 河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价[J]. 环境科学,2021,42(2):900-908.
- [6] 刘南婷,刘鸿雁,吴 攀,等. 典型喀斯特地区土壤重金属累积特征及环境风险评价[J]. 农业资源与环境学报,2021,38(5):797-809.
- [7] 关天霞,李彩霞,马国泰,等. 连续施用有机肥对菜田土壤 Cu 和 Zn 积累及辣椒产量品质的影响[J]. 水土保持学报,2020,34(3):219-225.
- [8] 邵建辉. 有机生物肥对温室土壤有机碳和重金属以及辣椒品质的影响[J]. 农业科技与信息,2021(11):56-58.
- [9] 杨志刚,叶英杰,常海文,等. 微生物菌肥及土壤修复剂对干制辣椒生长、品质及产量的影响[J]. 北方园艺,2020,(19):1-7.
- [10] 侯 栋,蒯佳琳,岳宏忠,等. 利用功能型混合微生物菌剂替代部分化肥对日光温室辣椒生长及品质的影响[J]. 浙江农业科学,2021,62(9):1736-1739.
- [11] 靳亚忠,熊亚男,孙 雪,等. 化肥减施与木霉菌有机肥配施对辣椒产量、品质及根际土壤酶活性的影响[J]. 四川农业大学学报,2021,39(2):199-204.
- [12] 姜怡帆. 减施磷肥增施木霉菌对露地红干椒生长、产量及品质的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [13] 张德林,余星语,喻 文,等. 3 种微生物菌肥对川芎生长发育、产质量和镉富集的影响[J]. 中国实验方剂学杂志,2022,28(5):124-132.
- [14] 刘荣乐,李书田,王秀斌,等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报,2005,4(2):392-397.
- [15] 唐 政,邱建军,陈小香,等. 有机种植中施肥引发的重金属累积风险研究[J]. 广东农业科学,2012,16(16):95-97.
- [16] 土壤环境质量标准:GB 15618—2008[S].
- [17] 柳小兰,张清海,林绍霞,等. 黔产山银花及其产地土壤重金属含量分析与评价[J]. 水土保持通报,2015,35(5):222-231.
- [18] 农产品安全质量 无公害蔬菜安全要求:GB 18406.1—2001[S].
- [19] 中华人民共和国商务部. 药用植物及制剂外经贸绿色行业标准:WM/T2—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
- [20] 罗成科,张佳瑜,肖国举,等. 宁东基地不同燃煤电厂周边土壤 5 种重金属元素污染特征及生态风险[J]. 生态环境学报,2018,27(7):1285-1291.
- [21] 杨永忠. 贵州环境异常元素地球化学研究[J]. 贵州地质,1999,16(1):66-72.
- [22] 邓文溢,文江平. 辣椒的化学成分与药理作用研究进展[J]. 湖北农业科学,2021,60(15):5-10,75.
- [23] Zhang J, Yang R D, Li R C, et al. Accumulation of heavy metals in tea leaves and potential health risk assessment: a case study from Puan county, Guizhou Province, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2018,15(1):133-154.
- [24] 曹 柳,孟晓飞,杨俊兴,等. 河南省大气重金属沉降高风险区蔬菜重金属含量及健康风险评估[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(12):2170-2183.
- [25] 涂春艳,陈婷婷,廖长君,等. 矿区农田蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. 农业环境科学学报,2020,39(8):1713-1722.
- [26] 陈玉梅,周根娣,胡 洁,等. 土壤重金属复合污染对茄果类蔬菜的影响研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版),2016,15(5):495-501.
- [27] 李富荣,李 敏,杜应琼,等. 茄果类蔬菜对其产地土壤重金属的吸收富集与安全阈值研究[J]. 农产品质量与安全,2018,(1):52-58.

崔欣格,王 瑞,赵 昊,等. 微生物菌肥对不同连作土壤及烟株生长的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(13):240-245.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.13.035

# 微生物菌肥对不同连作土壤及烟株生长的影响

崔欣格,王 瑞,赵 昊,赵银龙,王颖斌,代晓燕,徐淑霞  
(河南农业大学生命科学学院,河南郑州 450001)

**摘要:**为研究施加微生物菌肥对不同连作年限植烟土壤的影响,选择连作2年和连作4年的植烟土壤,以常规施肥为对照,分析微生物菌肥对不同连作年限土壤理化性质、土壤酶活、土壤细菌群落结构及烟草农艺性状的作用。结果表明,不同连作年限植烟土壤中施加微生物菌肥,与常规施肥相比,菌肥显著提高了土壤的pH值及有机质、碱解氮和速效磷含量;显著提升了土壤脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性;显著提升了土壤细菌群落丰富度与多样性;显著改善了烟草根长、茎长、叶长等农艺性状,且均为高剂量组的提升效果显著优于低剂量组。综上,不同连作年限植烟土壤在土壤酶活性、土壤细菌群落结构及烟草农艺性状方面存在显著差异,施加微生物菌肥能够显著提升土壤理化性质、土壤酶活性、土壤细菌群落结构及烟草农艺性状;高剂量菌肥组提升效应优于低剂量组;菌肥对连作4年植烟土壤的改善效果整体优于对连作2年植烟土壤的改善效果。

**关键词:**微生物菌肥;烟草连作;土壤酶活性;烟草农艺性状;土壤细菌群落

**中图分类号:**S572.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)13-0240-06

作为世界上最大的烟草生产国,我国有着悠久的烟草种植历史<sup>[1]</sup>。河南地处中原,是重要的浓香型烟叶产区<sup>[2]</sup>,2018年烟草种植面积约4.7万hm<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。烟草业的发展对农业经济产生了积极影响,作为重要的经济作物,烟草产量高低和品质好坏与经济效益密切相关<sup>[4]</sup>。土壤是作物生长的基础介质,土壤肥力及施肥方式是影响烟叶产量和品质的重要因素之一<sup>[5]</sup>。现代化农业由于常年连续施用化学肥料,

导致土壤酸化板结以及盐基离子严重流失,进而使得土壤贫瘠,影响作物生长<sup>[6]</sup>。同时由于土地资源相对不足及对经济效益的追求,实际烟草种植往往会出现不同程度的连年耕作现象<sup>[7]</sup>。烟草作为一种忌连作作物<sup>[8]</sup>,长期连作会导致烟株生长速度缓慢、烟株矮小、烟叶成熟度差和烟叶质量下降<sup>[9]</sup>,同时会破坏土壤养分<sup>[10]</sup>、降低土壤酶活性及改变土壤微生物群落结构等<sup>[11-12]</sup>。针对烟草生产栽培中出现的问题,对肥料进行改良具有重要意义<sup>[4]</sup>。

微生物菌肥具有提高土壤肥力、增加土壤有益菌群、促进作物生长和提升作物产量等功能<sup>[13]</sup>。大量研究表明,施加微生物菌肥能够在维持产量的基础上显著提升土壤肥力及农产品的品质<sup>[14-17]</sup>。现阶段对于微生物菌肥的研究主要集中在对作物的促生作用上,而对于不同连作年限的土壤理化性

收稿日期:2022-09-26

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:222102110120);河南省烟草公司洛阳市公司科技专项(编号:2021410300270050)。

作者简介:崔欣格(1998—),女,河南南阳人,硕士研究生,主要从事环境微生物研究。E-mail:cuixing19@163.com。

通信作者:徐淑霞,博士,教授,主要从事环境污染物的微生物转化和修复研究。E-mail:xushuxia97@163.com。

[28] Clemens S, Aarts M G M, Thomine S, et al. Plant science; the key to preventing slow cadmium poisoning[J]. Trends in Plant Science, 2013, 18(2): 92-99.

[29] 王大州,林 剑,王大霞,等. 根际土-辣椒系统中重金属的分布及食品安全风险评估[J]. 地球与环境, 2014, 42(4): 546-549.

[30] 张 建,杨瑞东,陈 蓉,等. 贵州喀斯特地区土壤-辣椒体系重金属元素的生物迁移积累特征[J]. 食品科学, 2017, 38(21): 175-181.

[31] 李非里,刘丛强,杨元根,等. 贵阳市郊菜园土-辣椒体系中重

金属的迁移特征[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4): 52-56.

[32] 江水英,吴声东,肖化云,等. 贵溪冶炼厂周边菜园地土壤-辣椒系统中重金属的迁移特征[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(3): 628-632.

[33] 殷山红. 猪粪源有机肥不同施用量下土壤和蔬菜中重金属的累积及风险评估[D]. 山东:聊城大学, 2019.

[34] 邢 丹,张爱民,王永平,等. 贵州典型土壤-辣椒系统中镉的迁移富集特征[J]. 西南农业学报, 2016, 29(2): 332-336.

[35] 国家食品安全标准:GB 2762—2022[S].