

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250211001

引用格式: 张甜, 李拥军, 王义平, 等. 甘肃省市售蔬菜中16种稀土元素含量调查及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 150–156.

ZHANG T, LI YJ, WANG YP, *et al.* Content investigation and health risk assessment of 16 kinds of rare earth elements in commercial vegetables in Gansu Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 150–156. (in Chinese with English abstract).

甘肃省市售蔬菜中16种稀土元素含量调查及健康风险评估

张甜, 李拥军*, 王义平, 刘小云

(甘肃省疾病预防控制中心, 兰州 730000)

摘要: **目的** 调查甘肃省市售蔬菜中16种稀土元素含量, 评估通过蔬菜摄入的稀土元素给人体带来的健康风险情况。**方法** 采集甘肃省13个市州市售的6类蔬菜样品, 用电感耦合等离子体质谱法测定其中16种稀土元素的含量。参照美国环境保护署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)推荐的健康风险分析方法, 用每日允许摄入量(allowable daily intake, ADI)对市售蔬菜中稀土元素进行健康风险评估。**结果** 甘肃蔬菜中稀土元素以Sc、Y、Ce、La、Nd、Pr等元素为主, 检出率超过50%, 6类蔬菜中稀土元素总含量为0.1764 mg/kg, 从高到低分别为瓜果类>叶菜类>茎菜类>茄果类>根类>豆类; 不同类别蔬菜稀土元素含量无差异($P>0.05$), 不同地区蔬菜中稀土元素含量有显著差异($P<0.05$)。16种稀土元素对人体的健康风险在人群中存在差异, 表现为成年男性、女性高于儿童。经蔬菜对稀土元素日均摄入量为0.0025 mg/(kg d), 低于参考值0.07 mg/(kg d)。**结论** 甘肃省市售蔬菜中稀土元素含量较低, 居民经蔬菜摄入的稀土元素对人体健康没有潜在的风险。

关键词: 蔬菜; 稀土元素; 健康风险评估

Content investigation and health risk assessment of 16 kinds of rare earth elements in commercial vegetables in Gansu Province

ZHANG Tian, LI Yong-Jun*, WANG Yi-Ping, LIU Xiao-Yun

(Gansu Provincial Center for Disease Control and Prevention, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the content of 16 kinds of rare earth elements in commercial vegetables and evaluate the health risks caused by the intake of rare earth elements in vegetables for users in Gansu Province.

Methods Samples from 6 categories were collected from 13 areas in Gansu Province, and the content of the 16 kinds of rare earth elements were measured by inductively coupled plasma mass spectrometry. According to the

收稿日期: 2025-02-11

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(23JRRA1797); 平凉市重点研发计划项目(PL-STK-2023B-072); 兰州市科技计划项目(2024-3-41); 甘肃省青年科技基金项目(23JRRA1804)

第一作者: 张甜(1989—), 女, 检验技师, 主要研究方向为食品与健康。E-mail: 957796054@qq.com

*通信作者: 李拥军(1980—), 男, 硕士, 检验技师, 主要研究方向为食品与健康。E-mail: 646343850@qq.com

health risk analysis method recommended by United States Environmental Protection Agency (USEPA), the allowable daily intake (ADI) was used to assess the health risk of rare earth elements in commercial vegetables.

Results The earth elements of vegetables sold in Gansu were mainly Sc, Y, Ce, La, Nd, Pr, with detection rate exceeds 50%, the total content of rare earth elements in the 6 types of vegetables was 0.1764 mg/kg, ranked from high to low as follows: Melon and fruit vegetables>leafy vegetables>stem vegetables>solanaceous fruit vegetables>root vegetables>bean vegetables. There were no significant differences in the content of rare earth elements among different vegetable categories ($P>0.05$), but significant differences were observed among vegetables from different areas ($P<0.05$). The health risks posed by the 16 kinds of rare earth elements varied among different population groups, with adult males and females exhibiting higher risks than children. The daily intake of rare earth elements through vegetable consumption was 0.0025 mg/(kg d), which was below the reference value of 0.07 mg/(kg d).

Conclusion The content of rare earth elements in commercial vegetables in Gansu Province is low. The intake of rare earth elements through vegetables by residents will not pose a risk to human health.

KEY WORDS: vegetable; rare earth elements; health risk assessment

0 引言

稀土元素是元素周期表中镧系元素和钪、钇等 17 种金属元素的总称^[1]。我国稀土资源储量丰厚,是世界稀土资源较大的国家。据不完全统计,全国有超过三分之二的省(区)均发现稀土资源,整体呈现南高北低的趋势,其中江西省分布最多,种类最全^[2-3]。稀土作为战略资源,在航天、电子、化工乃至军事、医药、绿色能源等方面应用尤为广泛,随着需求量的不断增加,稀土的开采范围也在不断扩展,这就使得稀土元素通过各种途径进入生活当中,从而对健康产生影响。有研究表明,稀土元素可以经土壤被植物的根吸收,以阳离子形式存在于植物中,通过增强光合作用、呼吸作用及养分吸收来促进植物生长发育,且对植物生长有低促高抑的作用^[4-6],作为稀土微肥在植物生长中广泛应用。而其在航天、电子、半导体及农业等产业的开发与利用,可能造成环境中的稀土元素增加,加之其较强的吸附作用及迁徙性不明显等特点,最终通过食物循环进入人体^[7-9]。稀土元素是人体的非必须微量元素,适量稀土还可参与人体免疫过程,具有抗炎、杀菌的功效^[10],若浓度水平太高,超过机体可承受和代谢水平时,会对机体相应脏器产生毒害作用^[11-12],如通过血脑屏障进入大脑,引起记忆力衰退;通过胎血屏障进入胎儿体内,蓄积浓度过高可导致出生缺陷及蓄积在肝肾影响脏器功能^[13-16];对神经、肌肉及消化系统、生殖系统、呼吸系统等多个系统都有影响,长期蓄积还可能诱发癌症^[17]。目前甘肃省关于稀土的研究报道相对较少,与省内居民健康相关的食品中稀土元素的含量也尚不明确,因此,开展对蔬菜中的稀土元素的监测并对其带来的健康安全风险评估显得尤为重要。

本研究通过测定甘肃省 13 个市州的不同品种蔬菜的稀土元素含量,分析稀土元素的分布状况及污染程度,明

确甘肃省蔬菜中稀土元素含量、分布特点,并结合健康风险评估方法,了解甘肃居民通过进食蔬菜摄入稀土元素带来的健康风险,引起食品安全监管部门和普通消费者对常见蔬菜中稀土元素可能存在健康安全风险的重视,为监管部门完善监督、监管制度,确保食品安全提供数据支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

以甘肃省 13 个市州(兰州、酒泉、武威、甘南、庆阳、平凉、天水、张掖、白银、金昌、陇南、嘉峪关、定西)的农贸市场及超市作为采样点,采集叶菜类(包括上海青、油菜、菠菜、茼蒿、甘蓝、韭菜、小白菜、西蓝花、香菜)38 份,豆角类(龙豆、四季豆、紫豆角)4 份,瓜果类(丝瓜、苦瓜、番瓜、佛手瓜)12 份,茄果类(番茄、茄子、辣椒、绿黄瓜、旱黄瓜)40 份,根茎类(马铃薯、白萝卜、胡萝卜)13 份,茎菜类(西芹、青笋、菜花、蒜薹、韭苔、小芹菜)14 份,总计 121 份,样品采集后尽快装袋,送回实验室,冷藏备用。

1.2 试剂

稀土混合标准溶液 GSB04-1789-2004: 含有钪(Sc)、镝(Dy)、铒(Er)、铕(Eu)、钆(Gd)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Yb) 16 种元素(质量浓度 100 $\mu\text{g/mL}$)、铈 GSB 04-1746-2004(质量浓度 1000 $\mu\text{g/mL}$)(国家有色金属及电子材料分析测试中心); 调谐液 Tune A[质量浓度(10.0 \pm 0.1) $\mu\text{g/L}$, 美国 Thermo 公司]; 硝酸(超级纯, 德国默克公司)。

1.3 仪器与设备

Elemental X2 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司); UltraWAVE 超级微波消解平台(意大利 Milestone 公司); FA2004 电子分析天平(精度为 0.0001 g, 上海沪粤明科

学仪器有限公司); Milli-Q 纯水仪(美国 Millipore 公司, 电阻率 18.2 MΩ·cm); DLABD-160 型手持式均质器[大龙兴创实验仪器(北京)股份公司]。

1.4 实验方法

1.4.1 样品准备

先用自来水将样品上的泥土冲洗干净, 再用蒸馏水清洗后自然晾干, 将每份样品粉碎匀浆, 放入冰箱冷冻备用。

1.4.2 样品前处理

准确称取样品(以湿重计)0.5 g(精确到 0.0001 g)于石英试管中, 再加入 2 mL 超纯硝酸后加盖, 冷消解过夜后, 用超级微波消解平台消解, 升温程序见表 1, 微波消解完成后, 溶液转移并用纯水定容至 100 mL 容量瓶待测, 同时做试剂空白。

表 1 微波消解升温程序
Table 1 Microwave digestion heating program

步骤	控制温度/°C	升温时间/min	恒温时间/min
1	130	5	5
2	150	3	5
3	180	3	15

1.4.3 样品测定

用调谐液调试电感耦合等离子体质谱仪, 待灵敏度、氧化物和双电荷化合物指标达到测定要求, 仪器工作参数设置: 射频功率为 1340 W, 玻璃球锥形雾室, 辅助气流速 0.80 L/min, 载气流速 0.85 L/min, 冷却气流速 13.0 L/min; 测量方式为跳峰模式; 测量通道 3, 测量时间 90 s, 冲洗时间 30 s, 采样锥(Ni) 1.1 mm, 截取锥(Ni) 0.75 mm, 检测元素 ^{45}Sc 、 ^{89}Y 、 ^{139}La 、 ^{140}Ce 、 ^{141}Pr 、 ^{146}Nd 、 ^{147}Sm 、 ^{153}Eu 、 ^{157}Gd 、 ^{159}Tb 、 ^{163}Dy 、 ^{165}Ho 、 ^{166}Er 、 ^{169}Tm 、 ^{172}Yb 、 ^{175}Lu 。

稀土元素混合标准溶液逐级稀释, 配制质量浓度为 0.2、0.5、1.0、5.0、20.0、50.0、100.0 μg/L 的标准系列溶液; 每个标准系列加入质量浓度 10 μg/L 的内标铈元素标准溶液, 并用 2% HNO₃ (V:V) 定容。

在电感耦合等离子体质谱仪最优状态测定, 以元素浓度为横坐标(X, mg/kg)、响应值为纵坐标(Y), 绘制标准曲线。在相同条件下测定试剂空白及试样溶液。

1.5 数据处理

1.5.1 稀土元素含量差异分析

用 SPSS 19.0 软件对不同蔬菜类别和不同地区的稀土

元素含量差异进行分析, 由于样本数量、测定元素较多, 测定结果仅列举不同类蔬菜或不同地区稀土元素含量的平均值并进行非参数卡方检验, 以 *P* 小于 0.05 为具有显著差异, 小于 0.01 为具有极显著差异。

1.5.2 健康风险评价

参照美国环保局推荐的健康风险分析方法, 采用每日允许摄入量(acceptable daily intake, ADI)方法对甘肃省市售蔬菜中稀土元素进行健康风险评估。ADI 的计算公式(1)为:

$$\text{ADI} = \frac{C \times \text{GW} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (1)$$

式中: ADI 为日均摄入量, mg/(kg·d); *C* 为样品中总稀土元素的含量, mg/kg; GW 为每日摄入量, kg/d, 以中国居民膳食指南中人群总蔬菜的日均摄入量^[18]为标准; EF 为暴露频率(exposure frequency), 365 d/a; ED 为暴露周期(exposure duration), 70 a; BW 为人体重量(body weight); AT 为终生时间(all time), (365×70) d。由于目前没有膳食中稀土元素暴露的标准值, 本研究以朱为方等^[19]提出的 ADI 值 0.07 mg/(kg·d) 作为评价标准。各参数具体数值见表 2。

表 2 稀土元素经蔬菜进入人体的暴露参数
Table 2 Exposure parameters of rare earth elements in the human body via vegetables

人群	日摄入量/(kg/d)	ED/a	BW/kg	致癌 AT/d
成年男性	0.5	30×365	66.2	70×365
成年女性	0.5	30×365	57.3	70×365
儿童	0.4	30×365	36.0	70×365

2 结果与分析

2.1 检出情况分析

GB 5009.94—2012《食品安全国家标准 植物性食品中稀土元素的测定》中各稀土元素的检出限见表 3。经检测 121 份蔬菜中各稀土元素含量有差异, Sc、Y、La、Ce、Pr、Nd、Eu 检出率超过 50%, 其中 Sc (71.1%)、Y (90.1%)、La (76.9%)、Ce (98.3%)、Pr (63.6%)、Nd (75.2%)、Eu (57.0%), 结果见表 4。Tb、Ho、Tm、Er、Yb、Lu 则检出率较低, 不足 20%。甘肃省蔬菜中不同稀土元素含量与我国土壤中稀土元素背景值特征一致^[19], 说明蔬菜中稀土的含量与土壤中稀土元素含量有关。

表 3 各稀土元素检出限
Table 3 Limits of detection for rare earth elements

元素	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
检出限/(mg/kg)	0.00060	0.00030	0.00040	0.00030	0.00020	0.00020	0.00020	0.00006
元素	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
检出限/(mg/kg)	0.00010	0.00006	0.00008	0.00003	0.00006	0.00003	0.00006	0.00003

表 4 不同类别蔬菜中 16 种稀土元素的检出率(%)
Table 4 Detection rates of 16 kinds of rare earth elements in different types of vegetables (%)

元素	豆角类(n=4)	根茎类(n=13)	瓜果类(n=12)	茄果类(n=40)	茎菜类(n=14)	叶菜类(n=38)	总计(n=121)
Sc	25	76.9	100.0	72.5	71.4	63.2	71.1
Y	100	76.9	91.7	90.0	100.0	89.5	90.1
La	75	84.6	100.0	75.0	78.6	68.4	76.9
Ce	100	100.0	100.0	97.5	100.0	97.4	98.3
Pr	75	69.2	75.0	62.5	57.1	60.5	63.6
Nd	75	84.6	100.0	72.5	64.3	71.0	75.2
Sm	25	30.8	41.7	25.0	35.7	47.4	35.5
Eu	75	84.6	41.7	40.0	57.1	65.8	57.0
Gd	0	30.8	41.7	25.0	35.7	50.0	35.5
Tb	0	15.4	8.3	10.0	14.3	36.8	19.0
Dy	0	23.1	25.0	10.0	21.4	47.4	25.6
Ho	0	7.7	0	10.0	14.3	28.9	14.9
Er	0	15.4	0	10.0	14.3	36.8	18.2
Tm	0	0	0	5.0	14.3	18.4	9.1
Yb	0	15.4	0	10.0	14.3	36.8	18.2
Lu	0	0	0	5.0	7.1	18.4	8.3

2.2 不同类别蔬菜稀土元素含量

6 类蔬菜总稀土含量为 0.1764 mg/kg, 各类蔬菜稀土含量不同。其中瓜果类蔬菜含量最高, 为 0.0160 mg/kg, 叶菜类次之, 为 0.0133 mg/kg; 豆角类蔬菜含量最低, 为 0.0046 mg/kg, 详细结果见表 5。总稀土含量从高到低分别

为瓜果类>叶菜类>茎菜类>茄果类>根类>豆角类, 可能是甘肃本地未大面积使用叶片类的稀土微肥, 使得瓜果类蔬菜稀土含量略高于叶菜类, 而叶菜根系吸水性强, 叶片吸收杀虫剂多, 植株整体富集的金属元素多, 对稀土元素也有一定的富集^[20]。

表 5 不同蔬菜类别中各稀土元素含量差异分析(平均值: mg/kg)
Table 5 Analysis of the differences in the content of rare earth elements among different vegetable categories (average: mg/kg)

元素	根类(n=13)	叶菜类(n=38)	茄果类(n=40)	瓜果类(n=12)	豆角类(n=4)	茎菜类(n=14)	总计(n=121)	显著性 P
Sc	0.0453	0.0770	0.0843	0.1068	0.0465	0.0827	0.0786	0.475
Y	0.0022	0.0084	0.0034	0.0017	0.0012	0.0038	0.0047	0.093
La	0.0264	0.0617	0.0388	0.1371	0.0207	0.0524	0.0554	0.585
Ce	0.0057	0.0323	0.0182	0.0055	0.0028	0.0181	0.0195	0.428
Pr	0.0007	0.0038	0.0021	0.0005	0.0003	0.0014	0.0022	0.338
Nd	0.0028	0.0153	0.0082	0.0022	0.0012	0.0056	0.0087	0.322
Sm	0.0004	0.0030	0.0014	0.0003	0.0002	0.0011	0.0016	0.250
Eu	0.0013	0.0014	0.0008	0.0008	0.0005	0.0007	0.0010	0.600
Gd	0.0006	0.0043	0.0021	0.0008	-	0.0015	0.0024	0.338
Tb	0.0001	0.0006	0.0003	0.0000	-	0.0002	0.0003	0.281
Dy	0.0003	0.0018	0.0006	0.0002	-	0.0006	0.0009	0.086
Ho	-	0.0003	0.0001	-	-	0.0001	0.0001	0.115
Er	0.0002	0.0012	0.0005	-	-	0.0004	0.0006	0.189
Tm	-	0.0001	-	-	-	-	-	0.174
Yb	0.0001	0.0008	0.0003	-	-	0.0003	0.0004	0.122
Lu	-	0.0001	-	-	-	-	-	0.178

注: n 为样本量; P<0.05 为具有显著差异, P<0.01 为具有极显著差异, 下同; -表示未检出。

2.3 不同地区蔬菜中稀土元素含量

稀土元素除 La 元素外, 其他 15 种元素在不同地区的蔬菜中都具有显著差异。甘肃省土地面积较大, 东西跨度越大, 地貌丰富, 土壤质地差异较大, 各地果蔬批发市场较多, 所售卖蔬菜来源较为复杂, 导致各地区样品检测结果呈现显著差异。6 类蔬菜中稀土元素含量经对比无显著性差异, 见表 6。

2.4 健康风险评估

根据美国环保局推荐的健康风险分析方法, 以 0.07 mg/(kg d)

作为日均摄入量的安全剂量判断标准, 按照甘肃省蔬菜中总稀土元素平均含量 0.1764 mg/kg, 计算可知甘肃省居民经食用蔬菜摄入稀土元素日均摄入量为 0.0025 mg/(kg d), 低于本研究参考的稀土 ADI 0.07 mg/(kg d); 而按照类别分别计算 6 类蔬菜的稀土元素日均摄入量都远低于参考值, 这说明甘肃省居民经日均食用蔬菜摄入的稀土元素量较低, 通过蔬菜摄入稀土元素引起的人体健康风险小。稀土元素对人体的健康风险在人群中略有差异, 成年男性、女性高于儿童, 见表 7, 此结果与孙维敏等^[21]的研究结果相似。稀土应用颇为广泛, 通过其他食品及环境污染、医疗等途径进入

表 6 不同地区蔬菜中稀土元素含量差异分析(平均值: mg/kg)

Table 6 Analysis of the differences in rare earth element content in vegetables from different regions (average: mg/kg)

元素	兰州 (n=11)	酒泉 (n=11)	武威 (n=11)	甘南 (n=9)	庆阳 (n=11)	平凉 (n=10)	天水 (n=11)	张掖 (n=9)	白银 (n=11)	金昌 (n=9)	陇南 (n=3)	嘉峪关 (n=9)	定西 (n=7)	总计 (n=121)	显著性
Sc	0.0003	0.0132	0.0020	0.0582	0.1633	0.1969	0.0956	0.2115	0.1328	0.0123	0.0457	0.0221	0.0414	0.0786	<i>P</i> <0.01
Y	0.0020	0.0037	0.0007	0.0053	0.0098	0.0042	0.0017	0.0014	0.0025	0.0064	0.0268	0.0092	0.0027	0.0047	<i>P</i> <0.01
La	0.0403	0.0290	0.0040	0.0485	0.0303	0.0243	0.1597	0.0365	0.2118	0.0119	0.0931	0.0248	0.0022	0.0554	0.138
Ce	0.0064	0.0095	0.0021	0.0172	0.0305	0.0240	0.0052	0.0033	0.0084	0.0297	0.1836	0.0409	0.0099	0.0195	<i>P</i> <0.01
Pr	0.0006	0.0011	0.0002	0.0020	0.0036	0.0020	0.0005	0.0003	0.0010	0.0033	0.0226	0.0047	0.0011	0.0022	<i>P</i> <0.01
Nd	0.0026	0.0046	0.0008	0.0084	0.0149	0.0078	0.0019	0.0013	0.0046	0.0129	0.0847	0.0185	0.0042	0.0087	<i>P</i> <0.01
Sm	0.0004	0.0008	0.0000	0.0017	0.0030	0.0015	0.0002	0.0003	0.0007	0.0025	0.0162	0.0035	0.0007	0.0016	<i>P</i> <0.01
Eu	0.0005	0.0004	0.0002	0.0006	0.0014	0.0014	0.0014	0.0004	0.0006	0.0016	0.0070	0.0018	0.0005	0.0010	<i>P</i> <0.01
Gd	0.0004	0.0010	0.0000	0.0023	0.0042	0.0021	0.0008	0.0005	0.0017	0.0031	0.0253	0.0049	0.0006	0.0024	<i>P</i> <0.01
Tb	0.0001	0.0001	0.0000	0.0002	0.0006	0.0003	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	0.0033	0.0007	0.0001	0.0003	<i>P</i> <0.01
Dy	0.0002	0.0006	0.0000	0.0009	0.0018	0.0007	0.0001	0.0001	0.0004	0.0013	0.0070	0.0019	0.0005	0.0009	<i>P</i> <0.01
Ho	0.0000	0.0001	0.0000	0.0002	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0011	0.0003	0.0001	0.0001	<i>P</i> <0.01
Er	0.0001	0.0003	0.0000	0.0006	0.0013	0.0005	0.0000	0.0001	0.0002	0.0009	0.0057	0.0013	0.0002	0.0006	<i>P</i> <0.01
Tm	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0001	0.0000	0.0000	<i>P</i> <0.01
Yb	0.0000	0.0003	0.0000	0.0005	0.0009	0.0003	0.0000	0.0001	0.0002	0.0005	0.0031	0.0008	0.0001	0.0004	<i>P</i> <0.01
Lu	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0001	0.0000	0.0000	<i>P</i> <0.01

表 7 蔬菜中 16 种稀土元素对不同人群的 ADI 值[mg/(kg d)]

Table 7 ADI values of 16 kinds of rare earth elements in vegetables for different population groups [mg/(kg d)]

元素	平均值/(mg/kg)	成年男性	成年女性	儿童
Sc	0.0786	0.0002545	0.0002941	0.0002247
Y	0.0047	0.0000151	0.0000174	0.0000133
La	0.0554	0.0001793	0.0002071	0.0001582
Ce	0.0195	0.0000630	0.0000728	0.0000556
Pr	0.0022	0.0000071	0.0000082	0.0000063
Nd	0.0087	0.0000282	0.0000325	0.0000248
Sm	0.0016	0.0000053	0.0000061	0.0000046
Eu	0.0010	0.0000034	0.0000039	0.0000030
Gd	0.0024	0.0000077	0.0000089	0.0000068
Tb	0.0003	0.0000009	0.0000011	0.0000008
Dy	0.0009	0.0000028	0.0000033	0.0000025
Ho	0.0001	0.0000004	0.0000005	0.0000004
Er	0.0006	0.0000019	0.0000022	0.0000017
Tm	/	/	/	/
Yb	0.0004	0.0000012	0.0000014	0.0000011
Lu	/	/	/	/

注: /表示小于 0.00001。

人体引起的健康危害尚未知, 如需明确还需作进一步调查研究。

3 讨论与结论

经过本次检测, 甘肃省蔬菜中平均总稀土元素含量 0.1764 mg/kg, 对比全国土壤稀土背景值^[22]可知, 甘肃省稀土总量低于全国平均值, 可能是蔬菜稀土总含量较低的主要原因。东部沿海地区^[23]为 0.0166 mg/kg, 自贡市^[24]蔬菜稀土平均含量 0.0370 mg/kg, 福州市^[25]为 0.1410 mg/kg, 均低于甘肃省。陕西省蔬菜中稀土含量为 0.2240 mg/kg^[26], 惠州大亚湾地区蔬菜中稀土平均含量为 0.2280 mg/kg^[27], 包头市平均含量 0.3900 mg/kg^[28], 略高于甘肃省。与赣南地区矿区^[29]的 0.8430 mg/kg, 山东地区^[30]的 1.5550 mg/kg 及江西地区^[31]3.0070 mg/kg 比较可知, 甘肃省的稀土含量明显低于上述三地, 甘肃省蔬菜稀土平均含量处于全国中等偏低水平。13 个地区间的稀土元素含量呈显著性差异, 造成此种现象的原因有两个: ①甘肃省土地面积广, 东西

跨度越大, 地区间气候环境差别明显, 土壤质地不同, 不同土质含稀土元素种类和含量多少有差异, 造成植物生长过程富集程度不一; ②本次检测针对全省蔬菜, 各地商超及蔬菜批发市场较多, 各采样地区蔬菜来源较为分散, 导致样品检测结果差异明显。

甘肃省居民每日通过蔬菜摄入的稀土, 分别按照平均总稀土含量 0.1764 mg/kg 和元素平均含量最高值 0.1371 mg/kg 计算得出 ADI 值分别为 0.0025 mg/(kg d) 和 0.0019 mg/(kg d) 均低于本研究参考值 0.0700 mg/(kg d)。据此可知, 甘肃省居民通过每日食用蔬菜摄入稀土元素的膳食暴露量少, 引起的健康风险小。本研究也存在不足之处, 研究对象是采用甘肃省各地区蔬菜评估居民稀土含量暴露水平, 未考虑环境、水质和其他食品中稀土元素的影响, 所以研究结论存在一定的局限性, 不能全面地反映甘肃省居民的稀土暴露水平, 还需展开综合检测进行系统评价。

参考文献

- [1] 倪嘉缙. 稀土生物无机化学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
NI JZ. Bioinorganic Chemistry of rare earth elements [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [2] 傅太宇, 李葆华, 董晓燕, 等. 我国稀土矿床分布、分类及特征分析[J]. 河南科技, 2015(14): 124–126.
FU TY, LI BH, DONG XY, *et al.* Analysis on the distribution, classification and characteristics of rare earth deposits in China [J]. Henan Science and Technology, 2015(14): 124–126.
- [3] 张茂兰. 基于面向对象的稀土矿山占地方式分类方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
ZHANG ML. Object-oriented classification and application of rare earth mine land occupation [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [4] 何跃君, 薛立. 稀土元素对植物的生物效应及其作用机理[J]. 应用生态学报, 2005(10): 1983–1989.
HE YJ, XUE L. Biological effects of rare earth elements and their action mechanisms [J]. Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10): 1983–1989.
- [5] 唐庆华. 稀土元素的植物生理效应[J]. 吉林工程技术师范学院学报, 2016, 32(2): 87–88.
TANG QH. The physiological effects of lanthanon upon plants [J]. Journal of Jilin Engineering Normal University, 2016, 32(2): 87–88.
- [6] 谢寅峰, 李群, 沈惠娟, 等. 稀土对银杏苗木叶内含物及其产量的效应[J]. 南京林业大学学报, 2000(6): 71–74.
XIE YF, LI Q, SHEN HJ, *et al.* Effects of rare earth elements on some leaf inclusion and leaf yield in seedlings of ginkgo biloba [J]. Nanjing Forestry University, 2000(6): 71–74.
- [7] 马莉. 矿区农田—蔬菜稀土累积特征及内生菌介导蔬菜安全生产探究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2023.
MA L. Characterization of rare earth accumulation in farmland-vegetables in mining areas and investigation of endophytic bacteria-mediated safe vegetable production [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2023.
- [8] AMYOT M, CLAYDEN MG, MACMILLAN GA, *et al.* Fate and trophic transfer of rare earth elements in temperate lake foodwebs [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(11): 6009–6017.
- [9] LI Y, YANG JL, JIANG Y. Trace rare earth element detection in food and agricultural products based on flow injection walnut shell packed microcolumn preconcentration coupled with inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(12): 3033–3041.
- [10] 曲建超. 稀土对健康的危害[J]. 抗癌之窗, 2021(2): 70–71.
QU JQ. The hazards of rare earths to health [J]. Window on Cancer Fight, 2021(2): 70–71.
- [11] CAI DJ, RUI YK. Determination of rare earth elements in *Camellia oleifera* seeds from rare earth elements mining areas in Southern Jiangxi, China by ICP-MS [J]. Journal of Consumer Protection and Food Safety, 2011, 6(3): 349–351.
- [12] 宋雁. 稀土元素的毒理学安全性研究进展[J]. 卫生研究, 2013, 42(5): 885–892.
SONG Y. Research progress on the toxicological safety of rare earth elements [J]. Journal of Hygiene Research, 2013, 42(5): 885–892.
- [13] ZHUANG MQ, ZHAO JS, LI SY, *et al.* Concentrations and health risk assessment of rare earth elements in vegetables from mining area in Shandong, China [J]. Chemosphere, 2017, 168: 578–582.
- [14] LIANG T, LI KX, WANG LQ. State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(3): 1499–1513.
- [15] 刘建国, 王素华, 武婧, 等. 稀土元素生物效应研究进展[J]. 中国职业医学, 2015, 42(3): 335–337.
LIU JG, WANG SH, WU J, *et al.* Research progress on biological effects of rare earth elements [J]. China Occupational Medicine, 2015, 42(3): 335–337.
- [16] 朱为方, 张辉, 邵萍萍, 等. 稀土区儿童智商调查研究—I. 赣南稀土区生物效应研究[J]. 科学通报, 1996(10): 914–916.
ZHU WF, ZHANG H, SHAO PP, *et al.* Investigation on children's intelligence in rare earth regions—A study on bioeffect of rare earth in South Jiangxi [J]. Chinese Science Bulletin, 1996(10): 914–916.
- [17] 李智民, 张凯琳, 刘中韬. 农用稀土对喷施作业人员健康的影响[J]. 中国稀土学报, 2003(5): 594–596.
LI ZM, ZHANG KL, LIU ZT. The impact of agricultural rare earths on the health of spraying operators [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2003(5): 594–596.
- [18] 中国营养学会. 中国居民膳食指南[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2021.
China Nutrition Society. Dietary guidelines for Chinese residents [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2021.
- [19] 朱为方, 徐素琴, 邵萍萍, 等. 赣南稀土区生物效应研究—稀土日允许摄入量[J]. 中国环境科学, 1997, 17(1): 65–68.
ZHU WF, XU SQ, SHAO PP, *et al.* Investigation on intake allowance of rare earth—A study on bio effect of rare earth in South Jiangxi [J]. China Environmental Science, 1997, 17(1): 65–68.
- [20] 李凝玉, 李志安, 庄萍, 等. 施肥对两种苋菜吸收积累镉的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5937–5942.
LI NY, LI ZAN, ZHUANG P, *et al.* Effect of fertilizers on Cd uptake of two edible amaranthus herbs [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5937–5942.
- [21] 孙维敏, 陈素传, 季琳琳, 等. 安徽省薄壳山核桃产地土壤和果实中有机磷阻燃剂污染特征及风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025,

- 16(6): 34–44.
SUN WM, CHEN SC, JI LL, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of organophosphorus flame retardants in soil and nuts of *Carya illinoensis* production areas from Anhui Province [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2025, 16(6): 34–44.
- [22] 魏复盛, 刘廷良, 滕恩江, 等. 我国土壤中稀土元素背景值特征[J]. *环境科学*, 1991, 12(5): 78–82, 97.
WEI FS, LIU TL, TENG ENJ, *et al.* A survey on the background contents of rare earth elements in Chinese soil [J]. *Environmental Science*, 1991, 12(5): 78–82, 97.
- [23] 代玉冰, 孙帅, 耿柠波, 等. 我国东部沿海地区蔬菜中稀土元素的累积分布特征及健康风险评估[J]. *环境化学*, 2023, 42(7): 2180–2189.
DAI YB, SUN S, GENG NB, *et al.* Accumulation characteristics and health risk assessment of rare earth elements in vegetables from the eastern coastal region of China [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(7): 2180–2189.
- [24] 李谦, 廖青, 梅玉琴. 自贡市市售食品中稀土元素含量调查[J]. *中国卫生工程学*, 2013, 12(4): 313–315.
LI Q, LIAO Q, MEI YQ. Investigation of rare earth contents in the foods sold in Zigong City [J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2013, 12(4): 313–315.
- [25] 陈宏靖, 杨艳. 福州市市售蔬菜中稀土元素测定及结果分析[J]. *中国预防医学杂志*, 2016, 17(10): 754–758.
CHEN HJ, YANG Y. The measurement of rare earth elements in vegetables on markets in Fuzhou City [J]. *Chinese Preventive Medicine*, 2016, 17(10): 754–758.
- [26] 程国霞, 王彩霞, 田丽, 等. 陕西省蔬菜中稀土元素的含量特征及评价[J]. *现代预防医学*, 2016, 43(13): 2355–2358, 2371.
CHENG GX, WANG CX, TIAN L, *et al.* Content characteristics and evaluation of rare earth elements in the fresh vegetables from Shanxi Province [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2016, 43(13): 2355–2358, 2371.
- [27] 钟叶芳, 陶玉芬, 欧日华, 等. 惠州大亚湾区市售水果蔬菜中稀土元素含量分析及健康风险评估[J]. *食品安全导刊*, 2023(31): 117–121.
ZHONG YF, TAO YF, OU RH, *et al.* Content Analysis and health risk assessment of rare earth elements in fruits and vegetables sold in Dayawan, Huizhou [J]. *China Food Safety Magazine*, 2023(31): 117–121.
- [28] 卜宁, 史雪敏, 宋海燕, 等. 包头市出产蔬菜水果稀土元素含量检测及健康风险评估[J]. *现代预防医学*, 2021, 48(4): 628–631, 635.
BU N, SHI XM, SONG HY, *et al.* Rare earth element content detection and health risk assessment of fruits and vegetables produced in Baotou [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2021, 48(4): 628–631, 635.
- [29] 袁丽娟, 郭孝培, 魏益华, 等. 赣南典型稀土矿区周边土壤和动植物产品中稀土元素组成特征及其健康风险评估[J]. *环境化学*, 2019, 38(8): 1850–1863.
YUAN LJ, GUO XP, WEI YH, *et al.* Compositions and health risk assessment of rare earth elements in soil, animal and plant products around rare earth mining area in Southern Jiangxi Province [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(8): 1850–1863.
- [30] 褚遵华. 山东某轻稀土矿区粮食、蔬菜、水果中稀土元素含量研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
CHU ZH. Study on the contents of rare earth elements in cereals, vegetables and fruits of a rare earth ore area, Shandong Province [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [31] 金姝兰, 黄益宗, 胡莹, 等. 江西典型稀土矿区土壤和农作物中稀土元素含量及其健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(12): 3084–3093.
JIN SL, HUANG YZ, HU Y, *et al.* Rare earth elements content and health risk assessment of soil and crops in typical rare earth mine area in Jiangxi Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(12): 3084–3093.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)