DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251021001
引用格式: 阮莎莎, 林凯, 杨淋清, 等. 2019—2023 年深圳市市售食用菌中二氧化钛含量及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 226–231.
RUAN SS, LIN K, YANG LQ, *et al*. Content and health risk assessment of titanium dioxide in commercially available edible mushrooms in Shenzhen from 2019 to 2023 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 226–231. (in Chinese with English abstract).

2019—2023 年深圳市市售食用菌中二氧化钛含量及健康风险评估

阮莎莎[1], 林 凯[1], 杨淋清[1], 雷伶刚[1], 梁少霞[2], 姜 帅[1], 姜 杰[1], 王 超[1*]
[1. 深圳市疾病预防控制中心, 深圳 518055; 2. 珀金埃尔默企业管理(上海)有限公司广州分公司, 广州 510370]

摘 要: 目的 分析 2019—2023 年深圳市市售食用菌中二氧化钛(titanium dioxide, TiO_2)的污染特征并评估居民摄入的健康风险。**方法** 在 2019—2023 年期间, 研究采集了 228 份深圳市市售食用菌样本, 涵盖双孢菇、杏鲍菇和金针菇。通过电感耦合等离子体光谱法(inductively coupled plasma optical emission spectrometry, ICP-OES)对样品中 TiO_2 的含量水平进行测定, 采用单颗粒电感耦合等离子体质谱法(single particle inductively coupled plasma mass spectrometry, SP-ICP-MS)分析纳米 TiO_2 颗粒(titanium dioxide nanoparticles, TiO_2NPs)的含量水平及颗粒大小, 以此探究其污染特征, 并利用目标危害商数(target hazard quotients, THQ)评估市售食用菌中 TiO_2 暴露所致的人体健康风险。**结果** 不同种类食用菌中 TiO_2 含量差异显著, 双孢菇的 TiO_2 均值为 47.23 mg/kg, 检出率 83.33%, 高于杏鲍菇(0.37 mg/kg, 23.33%)和金针菇(0.32 mg/kg, 10.00%)。双孢菇中 TiO_2 含量年际波动明显, 2021 年平均值达峰值(59.86 mg/kg), TiO_2NPs 颗粒平均尺寸大于 100 nm, 纳米颗粒的浓度和大小呈显著正相关。健康风险评估显示, 成人和儿童的 THQ 均小于 1, 儿童风险约为成人的 1.8~1.9 倍, 双孢菇的风险贡献突出。**结论** 深圳市市售食用菌中 TiO_2 暴露的健康风险处于较低水平。但是, 需关注其含量波动对消费者尤其是儿童群体健康风险的潜在影响。

关键词: 食用菌; 二氧化钛; 二氧化钛纳米颗粒; 健康风险; 污染特征

Content and health risk assessment of titanium dioxide in commercially available edible mushrooms in Shenzhen from 2019 to 2023

RUAN Sha-Sha[1], LIN Kai[1], YANG Lin-Qing[1], LEI Ling-Gang[1], LIANG Shao-Xia[2], JIANG Shuai[1], JIANG Jie[1], WANG Chao[1*]
[1. *Shenzhen Center for Disease Control and Prevention*, *Shenzhen* 518055, *China*;
2. *PerkinElmer Enterprise Management* (*Shanghai*) *Co*., *Ltd*., *Guangzhou Branch*, *Guangzhou* 510370, *China*]

收稿日期: 2025-10-21
基金项目: 深圳市科创委项目(JCYJ20230807151805011); 深圳市医学重点学科项目(SZXK066)
第一作者: 阮莎莎(1992—), 女, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为理化检验及食品风险监测。E-mail: 735341150@qq.com
***通信作者:** 王超(1986—), 男, 副主任技师, 主要研究方向为理化检验及食品风险监测。E-mail: raulw2003@163.com

ABSTRACT: Objective　To analyze the pollution characteristics of titanium dioxide (TiO_2) in commercially available edible mushrooms in Shenzhen from 2019 to 2023 and assess the human intake health risks. **MeTHQds**　From 2019 to 2023, the study collected 228 samples of commercially available edible fungi from Shenzhen, including *Agaricus bisporus*, *Pleurotus eryngii* and *Flammulina velutipes*. The content level of TiO_2 in the samples was determined by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES), while the content level and particle size of titanium dioxide nanoparticles (TiO_2NPs) were analyzed using single particle inductively coupled plasma mass spectrometry (SP-ICP-MS). Based on these analyses, the pollution characteristics were explored, and the target hazard quotients (THQ) were used to assess the human health risks caused by TiO_2 exposure from commercially available edible fungi. **Results**　The content of TiO_2 in different types of edible mushrooms varied significantly. The mean TiO_2 content in *Agaricus bisporus* was 47.23 mg/kg with a detection rate of 83.33%, which was higher than that in *Pleurotus eryngii* (0.37 mg/kg, 23.33%) and *Flammulina velutipes* (0.32 mg/kg, 10.00%). The TiO_2 content in *Agaricus bisporus* fluctuated significantly interannually, with the average value reaching a peak of 59.86 mg/kg in 2021. Additionally, the average size of TiO_2NPs in *Agaricus bisporus* was greater than 100 nm, and there was a significant positive correlation between the concentration and size of nanoparticles. Health risk assessment showed that THQ for both adults and children were less than 1, with the risk for children approximately 1.8–1.9 times that for adults. *Agaricus bisporus* contributed prominently to the risk. **Conclusion**　The health risk of TiO_2 exposure from commercially available edible mushrooms in Shenzhen is at a low level. However, it is necessary to pay close attention to the potential impacts of TiO_2 content fluctuations on the health risks of consumers, especially the children group.

KEY WORDS: edible mushrooms; titanium dioxide; titanium dioxide nanoparticles; health risk; contamination characteristics

0　引　言

二氧化钛(TiO_2)作为食品添加剂(E171), 因良好的增白性和稳定性, 被广泛用于糖果、巧克力、膨化食品等领域[1–3]。然而, 关于 TiO_2 安全性问题也有争议, 2021 年欧洲食品安全局(European Food Safety AuTHQrity, EFSA)指出, 食品级纳米 TiO_2 颗粒(titanium dioxide nanoparticles, TiO_2NPs)中粒径小于 100 nm 的占比可能达 50%, 且存在潜在遗传毒性, 促使欧盟于 2022 年全面禁止其作为食品添加剂[4–5]。有研究显示 TiO_2 和 TiO_2NPs 被用来保持蘑菇的洁白外观和新鲜, 以延长货架期[6–7]。我国允许 TiO_2 在部分食品中限量使用, 但是针对食用菌这类高消费量食材中 TiO_2 的系统性健康风险评估研究很少。

TiO_2 和 TiO_2NPs 的毒性机制方面的研究逐渐增多[8–10]。研究表明, 非纳米级 TiO_2 的毒理学效应相对温和[11]; 但是 TiO_2NPs 可在大鼠脑、肝、睾丸等器官蓄积, 影响生殖发育[11–12]; 另外, TiO_2NPs 已被证实会诱发氧化应激、加剧神经炎症、扰乱大脑生化过程, 最终导致神经元功能和结构损伤[13]; TiO_2NPs 暴露可通过引起血小板的活化及聚集增加, 进而诱发动脉血栓的形成[14]。暴露评估层面, 中国居民 TiO_2 膳食暴露量整体较低, 但儿童因高糖食品消费偏好, 暴露风险高于成人[15]。然而, 现有研究主要聚焦于糖果、膨化食品等品类, 对食用菌中 TiO_2 风险评估的研究较少[16]。

针对食用菌中 TiO_2 暴露风险研究欠缺的问题, 本研究系统检测了深圳市市售主要食用菌品类(如双孢菇、杏鲍菇和金针菇)中 TiO_2 的含量及 TiO_2NPs 特征, 分析污染水平及品种差异; 结合居民膳食消费量数据, 采用目标危害商数(target hazard quotients, THQ)模型, 评估不同人群(尤其是儿童)的暴露风险, 为深圳食用菌中 TiO_2 的风险管控提供数据支撑, 为指导生产和引导消费提供科学依据。深圳作为沿海特大城市, 食用菌市场流通量大、品类丰富[17], 食用菌是深圳市居民日常饮食的常用食材, 因此, 开展本研究对完善区域性食品安全监管具有现实意义。

1　材料与方法

1.1　样品采集

本研究依据深圳市疾控系统食品安全风险监测方案采集样本[18], 每次采样由 2 名经专业采样技术培训且具备独立作业能力的人员执行。采样量需满足分析测试需求, 并最大限度客观反映样品污染状况, 同步详实记录采样信息。每份样品均独立包装、粘贴唯一识别标签, 运输过程中全程保持低温保存。2019—2023 年期间, 于深圳市各区大中型超市、农贸市场及街道市场等场所开展样品采集, 具体样品信息见表 1。

表 1 样品信息
Table 1 Sample informations

样本类型	采样时间					合计
	2019	2020	2021	2022	2023	
双孢菇	30	28	30	30	50	168
杏鲍菇	/	/	/	20	10	30
金针菇	/	/	/	20	10	30
合计	30	28	30	70	70	228

注: /表示未采集到相关样本。

1.2 仪器与试剂

ICAP PRO XP 电感耦合等离子体光谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); PE 2000G 电感耦合等离子体质谱仪(美国 PerkinElmer 公司); BSA 623S-CW 电子天平(精度 0.001 g, 德国 Sartorius 公司); LABTOP MAX 超级微波消解仪(北京莱伯泰科仪器股份有限公司); E300H 超声波清洗仪(德国 Elma Schmidbauer GmbH 公司); Millipore 痕量元素分析超纯水系统(德国 Merck 公司)。

钛元素标准溶液(质量浓度 1000 mg/L, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); GBW10021 (GSB-12)生物成分分析标准物质-豆角[钛元素参考范围(21±4) mg/kg, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所]; 氩气(纯度≥99.995%)、氦气(纯度≥99.995%)(深圳市深特工业气体有限公司)。

1.3 TiO_2 含量检测

参考 GB 5009.246—2016《食品安全国家标准 食品中二氧化钛的测定》第一法 电感耦合等离子体-原子发射光谱法测定样品中 TiO_2 的含量水平。实验过程中采取空白样品、平行双样和标准物质等手段进行质量控制、保证数据的稳定性和准确性。TiO_2 的检出限为 0.3 mg/kg。

1.4 TiO_2NPs 的检测

称取 0.5 g 匀浆的样品于 50 mL 离心管中, 加入超纯水定容至 50 mL。放置于超声波清洗仪中 150 W 超声 20 min, 静置 10 min 后取上清液上机测试。

1.5 健康风险评价

采用 THQ 评价蘑菇中 TiO_2 人体健康风险, THQ 是由美国环境保护署提出的, 用于评估包括化学污染物的暴露对人体的非致癌健康风险。评价标准如下: 如果 THQ≤1, 说明化学物质暴露对人体健康无明显影响; 如果 1<THQ≤10, 说明化学物质暴露对人体健康有风险; 如果 THQ>10, 则说明化学物质暴露存在慢性毒性效应。THQ 计算如公式(1)所示:

$$\mathrm{THQ}=\frac{C\times E_{\mathrm{F}}\times E_{\mathrm{D}}\times F_{\mathrm{IR}}\times 10^{-3}}{\mathrm{RfD}\times \mathrm{BW}\times T_{\mathrm{A}}} \quad (1)$$

式中: C 是蘑菇中 TiO_2 的含量, mg/kg; E_F 是暴露频率, 365 d/a; E_D 是暴露年限, 成年人: 30 a; 儿童 7 a[19]; F_{IR} 是平均食用菌摄入量, 成年人: 122.5 g/d; 儿童 93.4 g/d[19]; RfD 是参考剂量(reference dose), 5 mg/(kg • d)[11,20–21]; BW 即是人体平均体重(average body weight), 成年人: 63.45 kg; 儿童 25.6 kg[19]; T_A 是非致癌源平均暴露时间, 成年人: 10950 d; 儿童 2555 d。

1.6 数据处理

根据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)推荐的方法进行数据分析[22], 当所有样品 TiO_2 含量检出率小于 40%时, 低于检出限(limit of detection, LOD)的数据可以用 0 或 LOD 计算平均值; 当高于 LOD 的样品比例大于等于 40%时, 低于 LOD 的数据用 1/2LOD 进行统计。本研究采用 WPS 12.1 和 Graphpad Prism10 进行数据处理和绘图。

2 结果与分析

2.1 市售蘑菇中 TiO_2 含量

本研究对深圳市市售的 3 类食用菌(双孢菇、杏鲍菇和金针菇)中 TiO_2 的含量水平进行了系统检测, 结果如表 2 所示, 不同种类食用菌的 TiO_2 含量水平相差很大。双孢菇中 TiO_2 含量最高, 平均值为 47.23 mg/kg, 远高于杏鲍菇和金针菇的平均含量水平 0.37 mg/kg 和 0.32 mg/kg。因杏鲍菇和金针菇中 TiO_2 检出率较低, 本研究中杏鲍菇和金针菇中 TiO_2 低于 LOD 的数据用 LOD 计算平均值。双孢菇中 TiO_2 浓度范围是 ND~281.81 mg/kg, 浓度范围也远高于杏鲍菇和金针菇。另外, 双孢菇与杏鲍菇、金针菇的检出率分别为 83.33%、23.33%和 10.00%, 双孢菇的检出率明显高于杏鲍菇和金针菇, 说明 TiO_2 在市售双孢菇中普遍存在, 表明其污染来源或暴露途径具有特殊性。

2.2 不同年份不同种类的食用菌 TiO_2 含量水平

2019—2023 年深圳市市售双孢菇、杏鲍菇和金针菇中 TiO_2 含量特征见表 3 和图 1。2019—2023 年深圳市售食用菌中 TiO_2 含量水平呈现显著种类差异与时间波动性。

表 2 食用菌中 TiO_2 含量
Table 2 TiO_2 content in edible mushrooms

样本类型	样本量	范围/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	标准偏差/(mg/kg)	中位数/(mg/kg)	检出率/%
双孢菇	168	ND~281.81	47.23	42.39	40.40	83.33
杏鲍菇	30	ND~1.06	0.37	0.17	0.30	23.33
金针菇	30	ND~0.60	0.32	0.07	0.30	10.00

注: ND 为未检出, 表 3 同。

表 3　2019—2023 年食用菌中的 TiO_2 含量

Table 3　Content of TiO_2 in edible mushrooms from 2019 to 2023

样本类型	年份	范围/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	标准差/(mg/kg)	中位数/(mg/kg)	检出率/%
双孢菇	2019	ND~108.88	31.07	29.26	29.01	90.00
	2020	ND~164.09	42.56	46.08	36.27	71.43
	2021	ND~167.75	59.86	37.01	58.79	96.67
	2022	ND~113.40	39.73	37.83	39.16	70.00
	2023	ND~281.81	56.47	48.96	56.41	86.00
杏鲍菇	2022	ND~0.61	0.33	0.07	0.30	25.00
	2023	ND~1.06	0.44	0.26	0.33	50.00
金针菇	2022	ND~0.35	0.30	0.01	0.30	5.00
	2023	ND~0.60	0.35	0.11	0.30	20.00

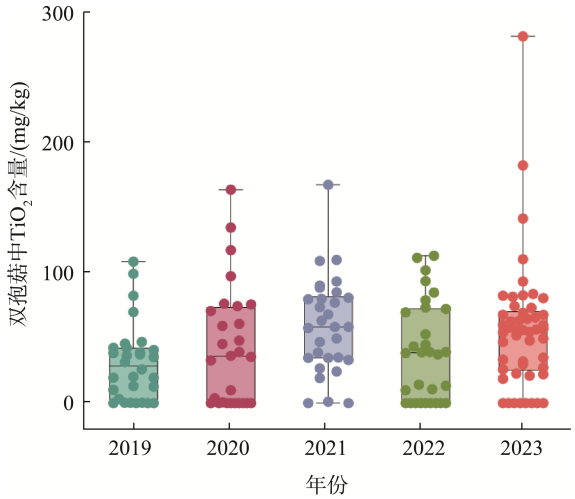


图 1　2019—2023 年双孢菇中 TiO_2 含量

Fig.1　Content of TiO_2 in *Agaricus bisporus* from 2019 to 2023

杏鲍菇和金针菇的 TiO_2 含量水平较低，不足双孢菇的 2%，污染水平轻微。但是相较于 2022 年，2023 年杏鲍菇和金针菇的含量和检出率都有显著上升，需关注其长期趋势。

数据显示，食用菌中双孢菇是 TiO_2 暴露主要贡献品种，含量水平波动明显。2019—2023 年，双孢菇中 TiO_2 含量范围在 ND~281.81 mg/kg 间动态变化，平均值有高低起伏。平均值在 2021 年达峰值(59.86 mg/kg)，2023 年虽有回落但仍维持较高水平且出现单一样本极值(281.81 mg/kg)；另外，双孢菇中 TiO_2 的检出率一直大于等于 70%。结果说明，相对于杏鲍菇和金针菇，双孢菇中 TiO_2 含量水平较高且长期存在，可能与环境、生产环节相关，应持续关注。

2.3　双孢菇中 TiO_2NPs 分析

使用单颗粒电感耦合等离子体质谱法(single particle inductively coupled plasma mass spectrometry, SP-ICP-MS)检测双孢菇中 TiO_2NPs 的颗粒大小和浓度。挑选了 6 个不同浓度水平的双孢菇样本进行检测，结果如图 2 所示，双孢菇中 TiO_2NPs 的颗粒大小的平均值大于 100 nm，小于 100 nm 的 TiO_2NPs 较少。根据目前的研究显示，100 nm 以上 TiO_2NPs 的毒性较小，说明市售双孢菇中 TiO_2NPs 引起的毒性效应较小。另外，Spearman 相关性分析结果表明，TiO_2NPs 的浓度和大小呈显著正相关(Spearman r=0.9429, P=0.017)(图 2)。

2.4　市售食用菌中 TiO_2 的健康风险评估

本研究采用常用的 THQ 模型评价市售食用菌中 TiO_2 暴露的健康风险，THQ 是以污染物的暴露剂量与其 RfD 的比值来评估人体健康风险水平。结果如表 4 所示，双孢菇中 TiO_2 暴露对成人与儿童的健康风险均高于杏鲍菇和金针菇。双孢菇、杏鲍菇和金针菇的 THQ 加和数据显示 3 种食用菌中 TiO_2 暴露引起的儿童风险(0.0295~0.0688)约为成人的 1.8~1.9 倍，这与儿童体重轻、膳食暴露参数差异相关。但是

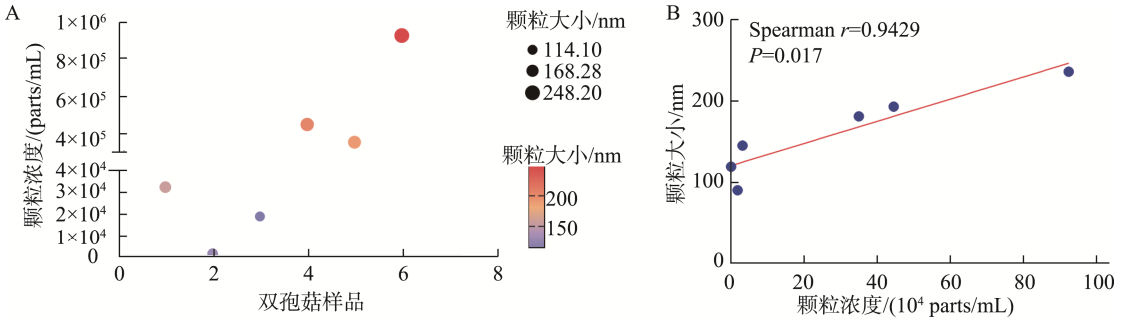


图 2　食用菌中 TiO_2NPs 的污染特征

Fig.2　Pollution characteristics of TiO_2NPs in edible mushrooms

表 4 食用菌中 TiO_2 暴露的健康风险
Table 4 Health risk of TiO_2 exposure in edible mushrooms

样本类型	THQ 成人		THQ 儿童	
	P_{50}	P_{90}	P_{50}	P_{90}
双孢菇	0.0156	0.0364	0.0295	0.0688
杏鲍菇	0.0001	0.0002	0.0002	0.0004
金针菇	0.0001	0.0001	0.0002	0.0003
合计	0.0158	0.0367	0.0299	0.0695

各类食用菌 THQ 的中位值暴露水平 P_{50} 和高暴露水平 P_{90} 远小于 1.0, 说明深圳市市售食用菌中 TiO_2 暴露的健康风险处于较低水平, 不具有潜在的健康风险。但双孢菇的风险贡献相对突出, 需持续关注其 TiO_2 含量波动对健康风险的潜在影响, 尤其是儿童群体的暴露风险。

3 讨 论

作为食品添加剂, TiO_2 广泛应用在食品工业中[23–25]。TiO_2 和 TiO_2NPs 的毒性也被公众关注, 研究显示, TiO_2 经口或吸入后, 会在消化系统、肺、肝脏等多个器官发生累积, TiO_2NPs 的暴露会显著诱导 DNA 和染色体损伤, 显示出潜在的遗传毒性效应[26–27]。近年来, TiO_2 和 TiO_2NPs 作为增白剂和保鲜剂用于食用菌的增白和保鲜[7,28]。有研究表明, 使用合适浓度的 TiO_2、$Na_2S_2O_5$ 和 Na_2SO_3 复合溶液处理能够改善双孢菇的色泽, 延缓开伞[21]; TiO_2NPs 能够通过呼吸作用和能力代谢缓解羊肚菌的采后衰老[29]。但是关于市售蘑菇中 TiO_2 和 TiO_2NPs 的暴露特征及风险评估研究很少。

本研究集中于深圳市市售双孢菇、杏鲍菇和金针菇中 TiO_2 的污染特征及健康风险研究, 结果显示, 深圳市售食用菌中 TiO_2 污染呈现种间差异大、双孢菇主导和逐年波动的特征。不同种类食用菌的 TiO_2 含量存在显著差异, 双孢菇中 TiO_2 含量最高, 杏鲍菇和金针菇中 TiO_2 平均含量不足双孢菇的 2%。这种差异可能与食用菌的生长特性、栽培基质及环境暴露途径有关: 一方面可能为保持双孢菇的颜色及新鲜, 使用 TiO_2 作为双孢菇的增白剂和保鲜剂; 另一方面也可能是双孢菇多采用覆土栽培模式, 土壤作为栽培基质, 若受 TiO_2 污染(如工业排放、农业投入品等带入), 更易吸收富集; 而杏鲍菇、金针菇常以木屑、棉籽壳等为基质, 基质中 TiO_2 初始含量及迁移效率可能较低, 导致其 TiO_2 积累量少、检出率低。双孢菇 TiO_2 含量呈现时间波动性, 2021 年达峰值(59.86 mg/kg), 极值(281.81 mg/kg)出现在 2023 年, 反映部分生产批次或环境介质可能存在 TiO_2 输入异常, 有可能存在 TiO_2 添加剂的不当使用, 这也反映出当前食用菌种植环节仍存在 TiO_2 暴露的不确定性。

目前尚无食用菌中 TiO_2 的限量标准, 但是现有的相关标准仍可为食用菌中 TiO_2 评估提供参考: GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》中将 TiO_2 列为允许使用的着色剂, 其限值呈现分级特征: 其中宽松限值(10.0 g/kg)适用于蜜饯、膨化食品等需突出着色效果的食品, 中等限值(2.0~5.0 g/kg)涵盖可可制品、果酱等, 更契合“微量带入”场景, 严格限值(0.5 g/kg)针对蛋黄酱、脱水马铃薯制品等直接入口、高食用频率食品, 而固体饮料等类别可以“按生产需要适量使用”。在国外标准中, 美国食品药品监督管理局(U.S. Food and Drug Administration, FDA)标准允许 TiO_2 作为着色剂通用使用, 限量不超过食品重量的 1% (10 g/kg), 且对农产品特定场景豁免残留限量[30]; 欧盟除了关注食品添加剂 TiO_2 的安全外, 也关注纳米级 TiO_2 的潜在风险[5]。目前, 深圳市售食用菌中 TiO_2 的最高值为 281.81 mg/kg, 低于上述我国的严格限值 0.5 g/kg 即 500 mg/kg, 显示深圳市市售食用菌中 TiO_2 含量水平在限值允许范围内。

深圳市售食用菌整体THQ均远小于1, 表明食用菌中 TiO_2 的暴露无显著健康风险。双孢菇对风险的贡献占比超过 99%, 显示双孢菇是食用菌中 TiO_2 暴露的关键风险载体。其中, 儿童 THQ 值(0.0295~0.0688)约为成人的 1.8~1.9 倍, 这与儿童体重轻、膳食摄入量相对较高的暴露参数直接相关。该结果与楼甜甜[21]的研究相同, 双孢菇中 TiO_2 的暴露风险处于可接受水平, 儿童的暴露风险高于成年人。另外, 双孢菇中检出的 TiO_2NPs 颗粒大小的平均值大于 100 nm, 根据 EFSA (2021)的毒性评估标准, 该粒径范围的纳米颗粒毒性较低[4], 说明深圳市市售双孢菇中 TiO_2NPs引起的健康风险小。尽管大粒径颗粒毒性较弱, 但其高浓度可能通过物理阻塞或离子释放机制影响消化道功能, 这一点尚未在现有风险评估模型中充分考量, 后续可根据纳米颗粒毒性效应的研究发现进一步开展风险评估。

需要说明的是, 本研究只是聚焦于市售食用菌中 TiO_2 和 TiO_2NPs 的污染情况进行风险评估, 未考虑生物利用率、其他途径的暴露情况以及不同地区不同人群的暴露剂量, 因此评估具有不确定性。

4 结 论

本研究对 2019—2023 年深圳市市售食用菌中 TiO_2 含量进行了分析和评估, 阐述了 TiO_2 和 TiO_2NPs 的污染状况、特征及其潜在健康风险。食用菌中 TiO_2 和 TiO_2NPs 产生的健康风险较低, 处于安全可控范围, 数据显示双孢菇是 TiO_2 暴露主要贡献品种。研究结果为深圳市市售食用菌中 TiO_2 和 TiO_2NPs 的安全及健康评价提供了依据, 为食品安全监管和风险防控提供了数据支撑。

参考文献

[1] 薛晴, 于甜, 古志华. 国内外食品中二氧化钛的标准法规现状研究[J]. 食品安全导刊, 2023(20): 1–3.
XUE Q, YU T, GU ZH. Research on the status of standards and regulations of titanium dioxide in food at home and abroad [J]. China

Food Safety Magazine, 2023(20): 1–3.

[2] 陈奇, 闫峻, 王玖, 等. 二氧化钛在食品领域的应用及安全性研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2019, 36(10): 938–940.
CHEN Q, YAN J, WANG J, *et al*. Advances on applications and safety of TiO_2 in food field [J]. Journal of Environment and Health, 2019, 36(10): 938–940.

[3] GEISS O, PONTI J, SENALDI C, *et al*. Characterisation of food grade titania with respect to nanoparticle content in pristine additives and in their related food products [J]. Food Additives and Contaminants Part A-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment, 2020, 37(2): 239–253.

[4] YOUNES M, AQUILINA G, CASTLE L, *et al*. Safety assessment of titanium dioxide (E171) as a food additive [J]. EFSA Journal, 2021, 19(5): e06585.

[5] 李敏, 席静, 苏悦, 等. 中欧果酱食品添加剂法规标准对比分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 345–351.
LI M, XI J, SU Y, *et al*. Comparative analysis of regulations and standards for food additives in jam between China and European Union [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(22): 345–351.

[6] 单楠. 纳米包装材料制备及其在双孢蘑菇和金针菇保鲜的应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
SHAN N. Preparation of packaging of nanocomposite-based and its application on *Agaricus bisporus* and *Flammulina velutipes* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.

[7] 张玉, 王伟, 王强, 等. 双孢蘑菇保鲜剂使用现状及安全性探讨[J]. 农产品质量与安全, 2016(5): 69–72.
ZHANG Y, WANG W, WANG Q, *et al*. Current status and safety discussion of *Agaricus bisporus* preservation agents [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2016(5): 69–72.

[8] BOUZENZANA S, ROUABHI R, BOUZENZANA A, *et al*. Sub-chronic oral exposure to titanium dioxide nanoparticles induces neurotoxicity in Wistar rats: Evidence from mitochondrial, Micro-CT, and behavioral analyses [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2025, 32(36): 21703–21721.

[9] WANG, LJ, LOU YT, LI B. Exposure to titanium dioxide nanoparticles disrupts the BTB by interfering with the assembly of stress granules in germ cells [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 373: 123799.

[10] WOLF S, SRIRAM K, CAMASSA LMA, *et al*. Systematic review of mechanistic evidence for TiO_2 nanoparticle-induced lung carcinogenicity [J]. Nanotoxicology, 2024, 18(5): 437–463.

[11] WARHEIT DB, BOATMAN R, BROWN SC. Developmental toxicity studies with 6 forms of titanium dioxide test materials (3 pigment-different grade & 3 nanoscale) demonstrate an absence of effects in orally-exposed rats [J]. Regulatiry Toxicology Pharmacology, 2015, 73(3): 887–896.

[12] 曹国洲, 刘在美, 钟莺莺, 等. 食品包装复合膜中纳米二氧化钛食品安全风险评估[J]. 食品科技, 2018, 43(12): 345–348.
CAO GZ, LIU ZM, ZHONG YY, *et al*. Risk assessment of TiO_2 nanoparticles in composite film of food packaging [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(12): 345–348.

[13] ZHANG X, SONG Y, GONG H, *et al*. Neurotoxicity of titanium dioxide nanoparticles: A comprehensive review [J]. International Journal of Nanomedicine, 2023, 18: 7183–7204.

[14] 金秋硕. Nfe2l2/Nrf2 在纳米二氧化钛暴露致小鼠动脉血栓形成中的作用及机制研究[D]. 沈阳: 中国医科大学, 2023.
JIN QS. The role of Nfe2l2/Nrf2 in arterial thrombosis induced by titanium dioxide anoparticle in mice [D]. Shenyang: China Medical University, 2023.

[15] 操悦. 中国居民二氧化钛和二氧化钛纳米颗粒的膳食暴露风险评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
CAO Y. Risk assessment of dietary exposure of titanium dioxide and titanium dioxide nanoparticles in Chinese population [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.

[16] 黄湘鹭, 罗飞亚, 邢书霞, 等. 二氧化钛及其纳米颗粒在食品、药品和化妆品领域安全风险研究进展[J]. 中国药理学与毒理学杂志, 2023, 37(1): 63–73.
HUANG XL, LUO FY, XING SX, *et al*. Research progress in safety risk of titanium dioxide and its nanoparticles in foods, drugs and cosmetics [J]. Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology, 2023, 37(1): 63–73.

[17] 关键. 深圳食用菌年成交额 36 亿元[N]. 深圳商报, 2010-09-10(B03).
GUAN J. The annual transaction volume of edible fungi in Shenzhen reaches 3.6 billion yuan [N]. Shenzhen Commercial Daily, 2010-09-10(B03).

[18] 杨冬燕, 王舟, 雷伶刚, 等. 2018—2019 年深圳市米面及其制品中重金属污染状况的监测与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(24): 9261–9265.
YANG DY, WANG Z, LEI LG, *et al*. Monitoring and analysis of heavy metal pollution in rice, flour and their products in Shenzhen from 2018 to 2019 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(24): 9261–9265.

[19] 王北洪, 刘静, 姚真真, 等. 栽培食用菌重金属含量的测定及健康风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(2): 490–496.
WANG BH, LIU J, YAO ZZ, *et al*. Determination and health risk evaluation of heavy metals in cultivated edible mushrooms [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(2): 490–496.

[20] FABIAN E, LANDSIEDEL R, MA-HOCK L, *et al*. Tissue distribution and toxicity of intravenously administered titanium dioxide nanoparticles in rats [J]. Archives of Toxicology, 2008, 82(3): 151–157.

[21] 楼甜甜. 典型果蔬“三剂”风险评估及基于脆弱性评价模型的预警初探[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
LOU TT. Risk assessment and pre-warning based on vulnerability model of “three additives” in typical fruit and vegetable [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[22] 王绪卿, 吴永宁, 陈君石. 食品污染监测低水平数据处理问题[J]. 中华预防医学杂志, 2002(4): 63–64.
WANG XQ, WU YN, CHEN JS. Problems in low-level data processing for food contamination monitoring [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2002(4): 63–64.

[23] MESGARI M, AALAMI AH, SAHEBKAR A. Antimicrobial activities of chitosan/titanium dioxide composites as a biological nanolayer for food preservation: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 176: 530–539.

[24] WARHEIT DB. Safety of titanium dioxide (E171) as a food additive for humans [J]. Frontiers in Toxicology, 2024, 6: 1333746.

[25] KWON R, KIM S, YOUN S, *et al*. Fate Determination and characterization of food additive silicon dioxide and titanium dioxide in commercial foods [J]. Frontiers in Bioscience-Landmark, 2023, 28(2): 36.

[26] CAO Y, CHEN J, BIAN Q, *et al*. Genotoxicity evaluation of titanium dioxide nanoparticles *in vivo* and *in vitro*: A meta-analysis [J]. Toxics, 2023, 11(11): 882.

[27] SHABBIR S, KULYAR MF, BHUTTA ZA, *et al*. Toxicological consequences of titanium dioxide nanoparticles (TiO_2NPs) and their jeopardy to human population [J]. Bionanoscience, 2021, 11(2): 621–632.

[28] GONG M, ZHANG T, WU Y, *et al*. Synergizing postharvest physiology and nanopackaging for edible mushroom preservation [J]. Food Chemistry, 2025, 463(Part1): 141099.

[29] SHI C, WU Y, FANG D, *et al*. Nanocomposite packaging regulates extracellular ATP and programed cell death in edible mushroom (*Flammulina velutipes*) [J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125702.

[30] Food and Drug Administration. Electronic code of federal regulations color additive status list [EB/OL]. (2019-11-01) [2025-12-14]. https://www.fda.gov/industry/color-additive-inventories/color-additive-status-list

(责任编辑: 安香玉　韩晓红)