DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260508001
引用格式: 刘哲, 王萌, 李丹妮, 等. 多因素作用下包装饮用水中铜绿假单胞菌的活性变化与风险防控[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(15): 310–320.
Liu Zhe, Wang Meng, Li Danni, et al. Activity change and risk prevention and control of *Pseudomonas aeruginosa* in packaged drinking water under multiple factors [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(15): 310–320. (in Chinese with English abstract).

多因素作用下包装饮用水中铜绿假单胞菌的活性变化与风险防控

刘 哲[1*], 王 萌[1,2*], 李丹妮[1], 王 宇[1], 李广禄[1], 王 涛[1]
(1. 延安市食品质量安全检验检测中心, 延安 716000; 2. 延安市药品检验所, 延安 716000)

摘 要: 目的 研究时间、温度、菌株、初始污染水平和包装饮用水种类等多种因素对包装饮用水中铜绿假单胞菌活性的综合影响。**方法** 使用来源不同的铜绿假单胞菌菌株对市售不同种类的包装饮用水样品进行不同水平的人工定量污染, 通过滤膜法和平板计数法连续监测包装饮用水中的铜绿假单胞菌浓度在不同温度条件下的变化趋势, 分析相关因素对包装饮用水中铜绿假单胞菌活性的综合影响。**结果** 在饮用天然矿泉水中, 不同温度下铜绿假单胞菌浓度随时间变化的趋势存在本质差异: 在初始污染水平约为 70 CFU/mL 时, 23 ℃和 30 ℃条件下, 菌浓度自第 3~4 d 起呈指数级增长, 30 ℃条件下第 3 d 浓度即达到 10^6 CFU/mL, 15 ℃时增殖延迟至第 5~6 d, 第 9 d 浓度达到 10^6 CFU/mL, 而 8 ℃条件下菌浓度持续缓慢下降, 但至第 12 d 仍可检出(3 CFU/mL)。在饮用纯净水和其他饮用水中, 不同温度下铜绿假单胞菌的浓度总体呈下降趋势, 但衰亡速率存在显著差异: 在初始污染水平约为 70 CFU/mL 时, 饮用纯净水中的铜绿假单胞菌在 8 ℃和 30 ℃条件下衰亡速度最快, 第 3 d 即降至不可检出水平(0 CFU/mL); 15 ℃时, 衰亡速度最慢, 第 5 d 降至不可检出水平; 23 ℃时, 衰亡速度介于上述二者之间, 第 4 d 降至不可检出水平。在其他饮用水中, 30 ℃条件下, 铜绿假单胞菌衰亡速度最快, 第 3 d 即降至不可检出水平(0 CFU/mL); 15 ℃和 23 ℃条件下, 衰亡速度居中, 第 5 d 降至不可检出水平; 8 ℃时, 衰亡速度最慢, 第 7 d 降至不可检出水平。在温度、包装饮用水种类等测试条件相同时, 菌株和初始污染水平的差异对铜绿假单胞菌浓度变化趋势的影响大体一致。**结论** 时间、温度和包装饮用水种类等因素对铜绿假单胞菌活性的综合作用极显著, 但菌株和初始污染水平有差异时, 铜绿假单胞菌活性的变化趋势总体一致。研究结果将为包装饮用水在生产加工、质量控制和市场消费环节的风险防控提供更多科学依据。

关键词: 包装饮用水; 铜绿假单胞菌; 活性变化; 风险防控
中图分类号: TS275.1 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)15–0310–11

Activity change and risk prevention and control of *Pseudomonas aeruginosa* in packaged drinking water under multiple factors

LIU Zhe[1*], WANG Meng[1,2*], LI Dan-Ni[1], WANG Yu[1], LI Guang-Lu[1], WANG Tao[1]

收稿日期: 2026-05-08
第一作者/*通信作者: 刘哲(1989—), 男, 工程师, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: 295497279@qq.com
***通信作者:** 王萌(1991—), 女, 药师, 主要研究方向为食品和药品质量与安全。E-mail: 540124014@qq.com

(1. *Yan'an Center for Food Quality and Safety Control*, *Yan'an* 716000, China; 2. *Yan'an Institute for Drug Control*, *Yan'an* 716000, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate the comprehensive effects of multiple factors including time, temperature, bacterial strains, initial contamination levels and types of packaged drinking water on the viability of *Pseudomonas aeruginosa* in packaged drinking water. **Methods**　Different types of commercially available packaged drinking water samples were artificially contaminated with *Pseudomonas aeruginosa* strains from various sources at different levels. The concentration changes of *Pseudomonas aeruginosa* in packaged drinking water under different temperature conditions were continuously monitored using the membrane filtration method and plate count method, and the comprehensive effected of relevant factors on the viability of *Pseudomonas aeruginosa* in packaged drinking water were analyzed. **Results**　In natural mineral water for drinking, the trends of *Pseudomonas aeruginosa* concentration over time at different temperatures exhibited essential differences. When the initial contamination level was approximately 70 CFU/mL, at 23 ℃ and 30 ℃, the bacterial concentration increased exponentially from the 3rd to 4th day. At 30 ℃, the concentration reached 10^6 CFU/mL on the 3rd day. At 15 ℃, the proliferation was delayed until the 5th to 6th day, with the concentration reaching 10^6 CFU/mL on the 9th day. In contrast, at 8 ℃, the bacterial concentration showed a continuous slow decline, although it remained detectable (3 CFU/mL) until the 12th day. In purified water for drinking and other drinking water, the concentration of *Pseudomonas aeruginosa* generally showed a decreasing trend at different temperatures, but the decay rates differed significantly. When the initial contamination level was approximately 70 CFU/mL, in purified water for drinking, *Pseudomonas aeruginosa* decayed fastest at 8 ℃ and 30 ℃, becoming undetectable (0 CFU/mL) on the 3rd day. At 15 ℃, the decay rate was the slowest, with the concentration falling below the detection limit on the 5th day. At 23 ℃, the decay rate was intermediated between the above two, with the concentration becoming undetectable on the 4th day. In other drinking water, at 30 ℃, *Pseudomonas aeruginosa* exhibited the fastest decay, becoming undetectable (0 CFU/mL) on the 3rd day. At 15 ℃ and 23 ℃, the decay rate was moderate, with the concentration falling below the detection limit on the 5th day. At 8 ℃, the decay rate was the slowest, with the concentration becoming undetectable on the 7th day. Under identical test conditions, including temperature and type of packaged drinking water, the effects of differences in strain and initial contamination level on the trends of *Pseudomonas aeruginosa* concentration were generally consistent. **Conclusion**　The combined effects of factors including time, temperature and type of packaged drinking water on the viability of *Pseudomonas aeruginosa* are extremely significant. Nevertheless, despite differences in bacterial strains and initial contamination levels, the changing trends of *Pseudomonas aeruginosa* viability are generally consistent. The findings of this study will provide more scientific evidence for risk prevention and control in the production, processing, quality control and market consumption stages of packaged drinking water.

KEY WORDS: packaged drinking water; *Pseudomonas aeruginosa*; activity change; risk prevention and control

0　引　言

包装饮用水作为日常生活中不可或缺的饮品, 其质量安全直接关系到公众的身体健康[1–5]。随着人们生活水平的提高, 对包装饮用水的需求日益增长, 同时对其安全性也提出了更高的要求[6]。铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)是一种常见的革兰氏阴性条件致病菌, 广泛存在于自然环境中, 具有较强的环境适应能力和抗逆性, 是包装饮用水污染防控的重点对象[7–11]。

铜绿假单胞菌为条件致病菌, 通过产生外毒素 A、弹性蛋白酶、胞外酶 S 等致病因子, 引起皮肤软组织感染、肺炎、败血症等, 对免疫缺陷人群(如烧伤患者、早产儿)致死率可达 30%[12]。我国 GB 19298—2014《食品安全国家标准 包装饮用水》严格规定, 包装饮用水中铜绿假单胞菌“不得检出”。然而, 近年来各地政府部门通过监督抽检仍持续在部分包装饮用水产品中检出该菌[13–17], 通过调查分析, 原因主要涉及水源污染、生产环节卫生缺陷、包装材料污染等因素[18–22]。

目前, 关于包装饮用水中铜绿假单胞菌的研究主要集中在污染来源、检测方法以及消毒控制措施等方面[23–26]。虽然已有部分研究探讨了单一因素对铜绿假单胞菌存活的影响[27–31], 但针对多因素交互作用下铜绿假单胞菌活性变化的系统研

究仍较为缺乏。包装饮用水中铜绿假单胞菌的活性变化在客观上受到包括但不限于时间、温度、菌株、初始污染水平和包装饮用水种类等多种因素的交互影响，单一影响因素的研究难以全面揭示包装饮用水中铜绿假单胞菌活性变化的复杂趋势，也难以为铜绿假单胞菌污染的风险防控提供更加科学、严谨的数据和策略支撑。本研究旨在系统分析时间、温度、菌株、初始污染水平和包装饮用水种类等重要因素对包装饮用水中铜绿假单胞菌活性的综合影响和交互作用，其中，温度方面将模拟一年四季产品在超市、驿站、库房等销售或暂存点的环境温度(8、15、23 和 30 ℃)进行设置，研究结果将为包装饮用水生产企业在优化生产工艺、完善质量管控体系等方面提供更为完善的科学依据，同时为监管部门制定更有效的监管措施提供理论支持，并为消费领域的个人、家庭和单位等场景的包装饮用水饮用安全提供风险防控支持，以更为全面的保障包装饮用水的品质与安全。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 实验样品

饮用天然矿泉水：百岁山饮用天然矿泉水(规格：570 mL/瓶)；饮用纯净水：娃哈哈饮用纯净水(规格：596 mL/瓶)；其他饮用水：康师傅包装饮用水(规格：550 mL/瓶)。

样品为市售不同种类包装饮用水，结合此次研究目的，选取富含矿物质营养成分的饮用天然矿泉水、矿物质离子含量极低的饮用纯净水和人工少量添加矿物质的其他饮用水作为实验样品，以观测不同种类包装饮用水中矿物质营养成分的多少对铜绿假单胞菌活性变化的影响。不同种类包装饮用水的品牌为随机选取。

1.1.2 实验菌株

铜绿假单胞菌(ATCC 9027，美国典型培养物保藏中心)。表型特征：十六烷三甲基溴化铵琼脂(cetrimide agar，CN)平板 36 ℃±1 ℃培养 48 h±2 h，菌落呈蓝绿色、圆形、扁平，直径 2~3 mm；边缘不规则，呈轻微锯齿状。

铜绿假单胞菌[编号：YA 200714，于实验室包装饮用水(饮用纯净水)样品中分离获得]。经菌落形态鉴别、氧化酶实验、乙酰胺实验和绿脓菌素测定实验以及全自动微生物生化鉴定系统确认。表型特征：CN 琼脂平板 36 ℃±1 ℃培养 48 h±2 h，菌落呈蓝色，圆形，隆起，直径约 2 mm，边缘整齐。

1.1.3 试 剂

营养肉汤、营养琼脂、平板计数琼脂、CN 琼脂基础培养基(北京陆桥技术股份有限公司)；丙三醇(分析纯，天津市天力化学试剂有限公司)

1.1.4 仪器与设备

BD Phoenix M50 全自动微生物生化鉴定系统(美国 Becton Dickinson 公司)；AC2-4S1 型生物安全柜(新加坡艺思高公司)；YC-520 L 医用冷藏箱(精度 0.1 ℃，温度波动度：±0.22 ℃，经年度校准验证，安徽中科美菱低温科技股份有限公司)；15、23、30、36 ℃恒温培养箱(分辨率：0.1 ℃，温度波动度：±0.30 ℃，经年度校准验证，上海一恒科技有限公司)；CHG-6S 型六联不锈钢过滤系统(常州未来仪器制造有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 样品准备

取生产批号相同的各实验样品按二级采样方案，以 GB 8538—2022《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法》铜绿假单胞菌“滤膜法”对铜绿假单胞菌指标进行检测，同时按三级采样方案，以 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 菌落总数测定》中的方法对样品中菌落总数进行测定，取铜绿假单胞检测结果均为 0 CFU/250 mL，且菌落总数测定结果均小于 1 CFU/mL 的样品作为本次实验的样品。

1.2.2 实验菌株准备

取菌株编号为 ATCC 9027 和 YA 200714 的铜绿假单胞菌冻存管(–70 ℃保存)，室温至融化，将管中菌液划线接种于营养琼脂平板上，培养 18~24 h 进行复苏，挑取复苏后的茁壮菌落再次划线接种于营养琼脂平板上培养 18~24 h 进行复壮。

1.2.3 样品处理与检测方法

(1)低污染水平的样品制备与检测

挑取复壮后的 ATCC 9027 菌落，用纯化水制备成浓度约为 6×10^3 CFU/mL 的菌液。取饮用天然矿泉水(百岁山饮用天然矿泉水)、饮用纯净水(娃哈哈饮用纯净水)和其他饮用水(康师傅包装饮用水)3 个种类的包装饮用水，根据样品规格，每种包装饮用水的每瓶样品中分别接种 100、103 和 97 μL 混匀后的菌液(使接种后不同规格包装饮用水中铜绿假单胞菌的浓度保持一致)，接种后各类包装饮用水样品的初始污染水平理论值约为 260 CFU/250 mL。每种包装饮用水均同时接种 121 瓶(一次性接种完成)，取接种后的 3 种包装饮用水实验样品各一瓶，立即用 GB 8538—2022 铜绿假单胞菌“滤膜法”进行检测，确定各种类包装饮用水实验样品中铜绿假单胞菌的初始浓度，每种包装饮用水剩余的 120 瓶样品分为 4 组，每组 30 瓶，分别保存于 8、15、23 和 30 ℃的冷藏箱或温箱中，之后连续每天以“滤膜法”对在不同温度条件下存放的各种包装饮用水实验样品进行铜绿假单胞菌浓度监测，每个监测实验均需同步设置 1 个平行，持续 30 d。所购实验样品按二级或三级采样方案对铜绿假单胞菌和菌落总数的测定结果均为 0 CFU/250 mL 或小于 1 CFU/mL，产品处于保质期内且非近期生产，默认产品在未开封或未受到污染的情况下，产品微生物状态不会也不应发生变化。同时，铜绿假单胞菌实验菌株的菌落在(360±20) nm 波长紫外灯下呈现荧光反应，监测期间如出现非目标菌污染，可及时发现异常菌落，故此处及以下实

验过程不设置未接种菌液的同批次包装饮用水作为空白对照与实验样品同步进行监测。

(2)较高污染水平的样品制备与检测

挑取复壮后的 ATCC 9027 菌落, 用纯化水制备成浓度约为 1×10^6 CFU/mL 的菌液。取百岁山、娃哈哈和康师傅 3 个种类的包装饮用水, 依据样品规格, 每种包装饮用水的每瓶样品中分别接种 50.0、52.2 和 47.8 μL 混匀后的菌液, 接种后各类包装饮用水样品的初始污染水平理论值约为 90 CFU/mL, 每种包装饮用水分别接种 4 瓶, 接种后摇匀, 分别存放于 8、15、23 和 30 ℃的冷藏箱或温箱中。

用 GB 4789—2022 菌落总数测定中的方法对接种后的样品立即进行检测(因接种后实验样品中铜绿假单胞菌浓度较大, 故使用平板计数法进行测定), 测定各种类包装饮用水实验样品中铜绿假单胞菌的初始浓度, 之后每天用平板计数法对存放于不同温度条件下的 3 种包装饮用水实验样品进行铜绿假单胞菌浓度的连续监测, 持续 12 d。

(3)不同实验菌株的低污染水平样品制备与检测

挑取复壮后的 YA 200714 菌落, 用纯化水制备成浓度约为 6×10^3 CFU/mL 的菌液。同(1)操作, 进行样品接种, 将接种后的样品分为 4 组, 每组 30 瓶, 分别保存于 8、15、23 和 30 ℃的冷藏箱或温箱中。同(1)操作, 对各种类包装饮用水实验样品中的铜绿假单胞菌以 GB 8538—2022 铜绿假单胞菌中的滤膜法进行初始浓度测定和连续 30 d 的铜绿假单胞菌浓度监测。

1.3　数据处理

实验数据采用 Microsoft Excel 2021 进行整理, 采用 Origin 2026 绘制折线图, 采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。各实验条件下, 每个时间点的浓度为单次测定值, 折线图直接呈现原始数据, 不设误差棒。

较高初始污染水平实验(12 d)中, 铜绿假单胞菌浓度经 $\log_{10}$ (CFU/mL+1)转换后, 采用 SPSS 26.0 进行重复测量方差分析, 检验温度、包装饮用水种类及时间的主效应和交互效应。球形检验采用 Mauchly 法, 不满足时以 Greenhouse-Geisser 校正。事后两两比较采用 Bonferroni 法。显著性水平设定为 α=0.05。效应大小采用偏 η^2 表示。

本研究中 30 d 连续监测实验因监测周期较长、样品需求量较大, 各实验条件下仅进行单次生物学重复, 结果以原始测定值呈现, 趋势分析以折线图直观展示为主。12 d 监测实验同样为单次生物学重复, 重复测量方差分析结果反映的是同一批次样品在不同时间点的浓度变化趋势, 而非多批次独立实验的统计推断, 在解读统计结果时需注意这一局限性。

2　结果与分析

实验主要研究了时间、温度、菌株、初始污染水平和包装饮用水种类等多种因素对包装饮用水中铜绿假单胞菌活性的综合影响, 实验数据采用 Origin 2026 软件进行可视化处理, 绘制了铜绿假单胞菌浓度随时间变化的折线图。并采用 SPSS 26.0 软件对较高初始污染水平下, 时间、温度和包装饮用水种类等因素对铜绿假单胞菌活性影响的显著性进行统计分析。

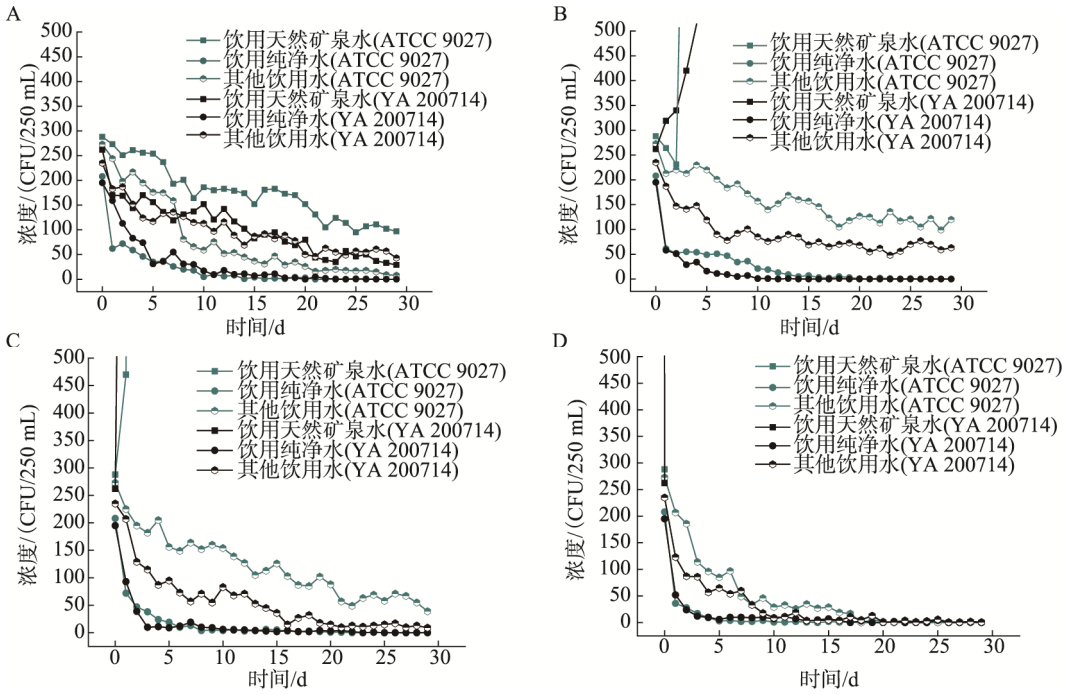
2.1　不同菌株的铜绿假单胞菌在包装饮用水中的活性变化。

本次研究中, ATCC 9027 菌株与 YA 200714 菌株铜绿假单胞菌在包装饮用水种类、保存温度和初始污染水平等其它测试条件相同时, 在包装饮用水中的活性随时间发展, 变化趋势大体一致。

以下为实测初始污染水平约 250 CFU/250 mL, 保存温度为 8、15、23、30 ℃时, ATCC 9027 菌株与 YA 200714 菌株在 3 种包装饮用水中的浓度随时间发展的变化趋势(图 1)。在 8、15、23、30 ℃等保存温度条件下, ATCC 9027 菌株与 YA 200714 菌株的铜绿假单胞菌在 3 种包装饮用水中的浓度均随时间发展呈现大体一致的下降或上升趋势。二者在各温度条件下的饮用纯净水和其他饮用水中总体呈下降趋势, 分析其原因, 可能是饮用纯净水和其他饮用水(康师傅矿泉水)中的矿物质离子含量极低或仅含有少量矿物质, 实验中, 两种铜绿假单胞菌既无法正常进入休眠状态, 通过减少或停滞生命活动以维持存活, 也无法在外源营养物质极度缺乏的环境中维持生命正常的代谢活动, 同时, 铜绿假单胞菌对外界环境不利温度因素的抗性和在不同温度环境中代谢活跃程度的自然差异, 导致在不同温度条件下的两种饮用水中, 两种铜绿假单胞菌的浓度均总体呈下降趋势。在饮用天然矿泉水中, 8 ℃条件下, 两种铜绿假单胞菌的浓度均总体呈下降趋势。在 15 ℃时, ATCC 9027 菌株的浓度总体呈先下降然后快速上升的趋势, YA 200714 菌株的浓度则直接呈现总体快速上升趋势, 23 ℃和 30 ℃时二者总体均呈现快速上升趋势。分析其原因, 可能是 8 ℃时, 环境温度低, 虽然饮用天然矿泉水中富含矿物质营养成分, 但包装饮用水中铜绿假单胞菌对低温不利因素的抗性较差, 导致菌体逐渐衰亡, 而在适宜的温度(15、23 和 30 ℃)环境中, 两种铜绿假单胞菌均可利用丰富的外源营养物质进行活跃代谢, 使得铜绿假单胞菌浓度呈现总体上升或快速上升趋势。15 ℃时, 环境温度相对较低, 两种铜绿假单胞菌的差异可能是偶然因素影响, 也可能提示从实验室饮用纯净水样品中分离出的 YA 200714 野生菌株对较低温度环境的适应性相对较强, 菌体进入正常代谢活动的过程更为迅速。

2.2　铜绿假单胞菌在不同种类包装饮用水中的活性变化。

实验中, 在菌株、样品保存温度和初始污染水平等测试条件相同时, 铜绿假单胞菌在不同种类包装饮用水中的活性随时间发展呈现明显差别。



注: A. 8 ℃; B. 15 ℃; C. 23 ℃; D. 30 ℃。此处用“CFU/250 mL”为单位进行浓度计量时, 由于在 15 ℃, 特别是 23 ℃和 30 ℃温度条件下, 铜绿假单胞菌在饮用天然矿泉水中增殖极快, 实验初期便已大量增殖(在稳定期, 浓度已达到 10^6 CFU/mL 级别), 故铜绿假单胞菌浓度快速上升的趋势无法在图中完全展现, 图 2、3 同。

图 1 不同温度下 3 种包装饮用水中的菌株浓度变化

Fig.1 Changes in bacterial concentration in 3 kinds of packaged drinking water under different temperatures

在饮用纯净水和其他饮用水中, 铜绿假单胞菌浓度在各温度条件下均呈总体下降趋势; 在饮用天然矿泉水中, 除 8 ℃保存时呈总体下降趋势外, 其余温度均呈快速上升趋势或总体上呈上升趋势。原因分析如 2.1, 在矿物质离子含量极低, 或仅含有少量矿物质的饮用纯净水或其它饮用水中, 铜绿假单胞菌因缺少外源营养物质摄入而难以维持正常的生命活动, 导致菌体快速衰亡, 而在富含矿物质营养成分的饮用天然矿泉水中, 除 8 ℃时, 菌体可能因为对低温不利因素的抗性较差而出现缓慢衰亡外, 在适宜的温度(15、23 和 30 ℃)条件下, 铜绿假单胞菌可利用丰富的外源营养物质实现快速增殖。表明水中矿物质等营养成分的多少对包装饮用水铜绿假单胞菌的活性存在显著影响。

具体见图 1 中 ATCC 9027 菌株和 YA 200714 菌株在不同种类包装饮用水中随时间发展的浓度变化趋势。

2.3 铜绿假单胞菌在不同温度条件下包装饮用水中的活性变化

在菌株、包装饮用水种类和初始污染水平等测试条件相同时, 铜绿假单胞菌在不同温度保存的包装饮用水中, 其活性随时间发展呈现较大区别。以下为 ATCC 9027 菌株、实测初始污染水平约 250 CFU/250 mL 时, 饮用天然矿泉水、饮用纯净水和其他饮用水中铜绿假单胞菌浓度在各温度条件下随时间发展的变化趋势(图 2)。

在饮用天然矿泉水中, 8 ℃条件下, 铜绿假单胞菌浓度总体呈下降趋势; 15 ℃条件下, 总体呈先下降然后快速上升趋势; 23 ℃和 30 ℃条件下, 总体呈快速上升趋势, 且 30 ℃时总体上升趋势更快(另可参见图 3, 饮用天然矿泉水中铜绿假单胞菌浓度的变化趋势)。

在饮用纯净水中, 铜绿假单胞菌浓度在各温度条件下均总体呈下降趋势, 直至浓度为 0 CFU/250 mL。同时, 数据显示, 在 15 ℃条件下, 铜绿假单胞菌浓度的总体下降趋势最为缓和, 表明在特殊环境(纯净水)中, 铜绿假单胞菌在特定温度条件下能维持更高活性, 温度条件不适宜时, 则活性更容易丧失, 菌体更易死亡。

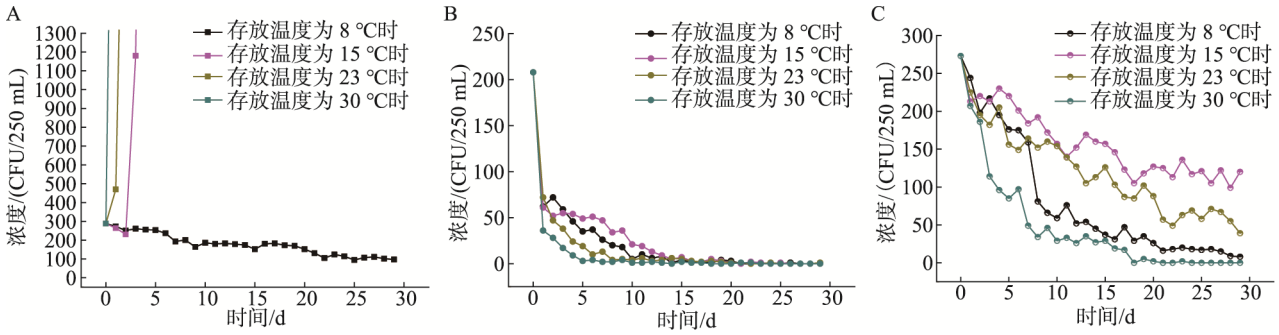
在其他饮用水中, 铜绿假单胞菌浓度在各温度条件下总体呈下降趋势。其中在 15 ℃和 23 ℃条件下总体下降趋势较为缓慢, 在 8 ℃和 30 ℃条件下总体下降趋势较快。也表明在特定环境(其他饮用水)中, 在适宜的温度条件下, 铜绿假单胞菌能维持相对更高的活性, 存活时间更长, 温度条件不适宜时, 活性更容易丧失, 菌体更易死亡。

2.4 包装饮用水中铜绿假单胞菌在初始污染水平不同时的活性变化。

在菌株、包装饮用水种类和保存温度等测试条件相同, 但初始污染水平不同时, 包装饮用水中铜绿假单胞菌活性随时间发展的变化趋势总体一致, 区别较小。

以下为使用 ATCC 9027 菌株, 制备不同初始污染水平的包装饮用水在保存温度为 8、15、23 和 30 ℃(图 3)时,

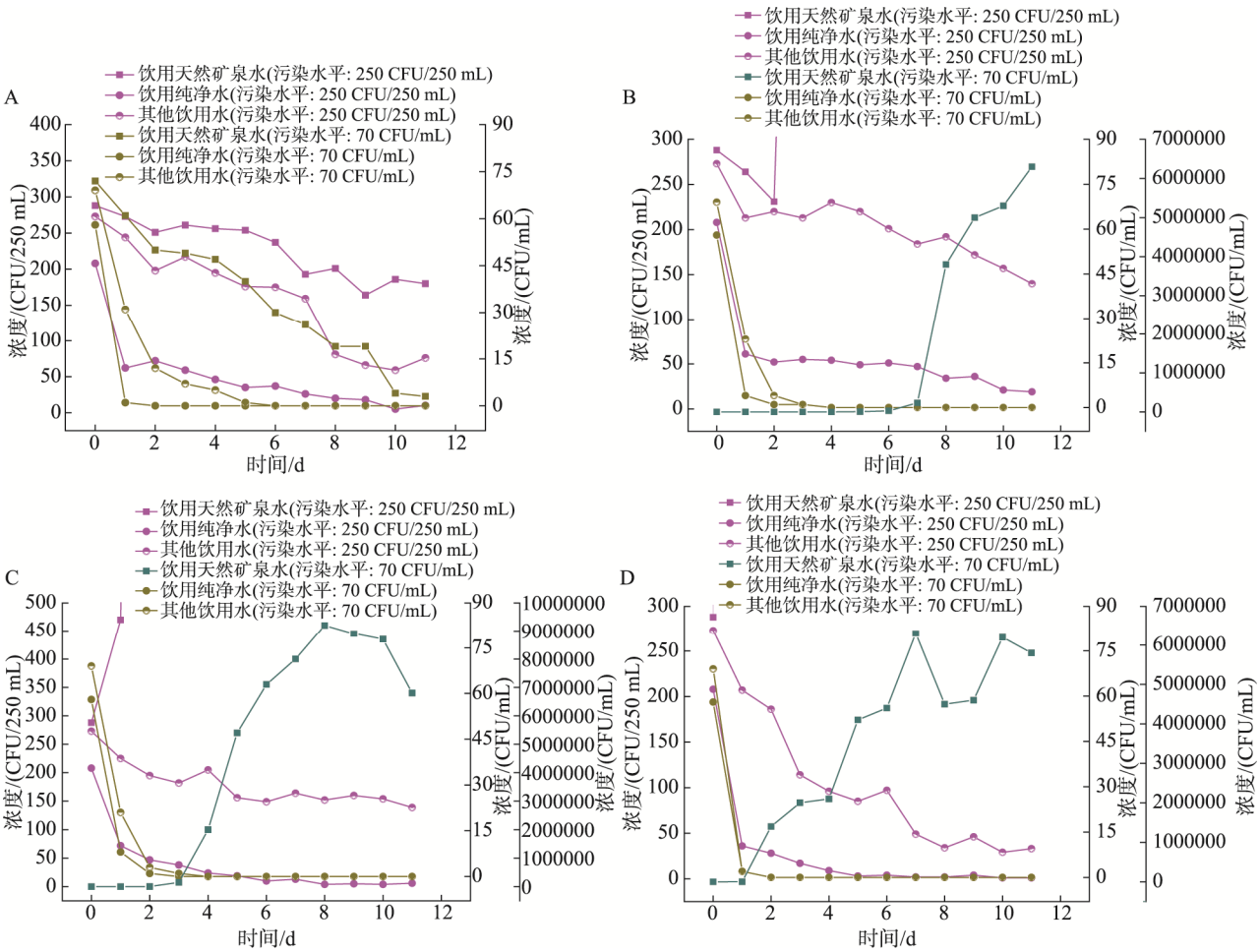
铜绿假单胞菌浓度随时间发展的变化趋势。在初始污染水平不同时，同一种包装饮用水在 8 ℃条件下，铜绿假单胞菌的浓度均总体呈下降趋势；在 15 ℃条件下，饮用天然矿泉水中的铜绿假单胞菌浓度总体均先下降后转为上升，其它两种包装饮用水总体均呈下降趋势；23 ℃条件下，饮用天然矿泉水中的铜绿假单胞菌浓度均早期即总体呈快速上升趋势，饮用纯净水和其他饮用水在不同初始污染水平时，均总体呈下降趋势；30 ℃条件下，饮用天然矿泉水中的铜绿假单胞菌浓度均呈快速上升趋势，其他两种包装饮用水均总体呈下降趋势。



注：A. 饮用天然矿泉水；B. 饮用纯净水；C. 其他饮用水。

图 2　不同种类包装饮用水中菌株在各温度条件下的浓度变化

Fig.2　Changes in bacterial concentration in different types of packaged drinking water under various temperature conditions



注：A. 8 ℃；B. 15 ℃；C. 23 ℃；D. 30 ℃；图 B~D 因 70 CFU/mL 初始污染水平下菌量增长后数值跨度较大，故设置 3 个纵轴：左侧纵坐标轴对应 250 CFU/250 mL 组(CFU/250 mL)，中间和右侧纵坐标轴分别对应 70 CFU/mL 组的低值区和高值区(CFU/mL)。

图 3　铜绿假单胞菌在初始污染水平不同时的活性变化

Fig.3　Activity changes of *Pseudomonas aeruginosa* at different initial contamination levels

2.5 较高初始污染水平时，时间、温度和包装饮用水种类对铜绿假单胞菌活性影响的显著性分析

使用 ATCC 9027 菌株制备较高污染水平的包装饮用水样品，连续 12 d 监测在不同温度和包装饮用水种类条件下，铜绿假单胞菌浓度的变化情况，见表 1。采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。铜绿假单胞菌浓度数据经 $\log_{10}$ (CFU/mL+1)转换以改善正态性。采用重复测量方差分析(repeated-measures ANOVA)检验温度、包装饮用水种类及时间对铜绿假单胞菌浓度的主效应和交互效应。采用 Mauchly 检验评估球形假设，当球形假设被违反时，采用 Greenhouse-Geisser 法校正自由度和 P。事后两两比较采用 Bonferroni 法。显著性水平设定为 α=0.05。效应大小采用偏 eta 方(partial η^2)表示。

2.5.1 重复测量方差分析结果

Mauchly 球形检验表明，时间主效应[(W=0.012, χ^2(54)=128.76, P<0.001)]及其与温度的交互效应[(W=0.025, χ^2(153)=215.43, P<0.001)]均违背球形假设。因此，采用 Greenhouse-Geisser 校正结果进行分析，见表 2。重复测量方差分析(经 Greenhouse-Geisser 校正)结果显示(表 2)，时间、温度、包装饮用水种类的主效应均极显著(P<0.001)。时间与温度、时间与包装饮用水种类、温度与包装饮用水种类的两因素交互效应，以及时间×温度×包装饮用水种类的三因素交互效应均极显著(P<0.001)。效应量(偏 η^2)表明，时间及其交互作用是浓度变化的主要来源。

表 1 不同包装饮用水种类和温度条件下铜绿假单胞菌随时间的浓度变化

Table 1 Changes in concentration of *Pseudomonas aeruginosa* over time under different types of packaged drinking water and temperature conditions

包装饮用水种类	温度/℃	铜绿假单胞菌浓度/(CFU/mL)											
		第 1 d	第 2 d	第 3 d	第 4 d	第 5 d	第 6 d	第 7 d	第 8 d	第 9 d	第 10 d	第 11 d	第 12 d
饮用天然矿泉水	8	72	61	50	49	47	40	30	26	19	19	4	3
	15	72	73	60	75	280	3.4×10^3	2.6×10^4	2.3×10^5	3.8×10^6	5.0×10^6	5.3×10^6	6.3×10^6
	23	72	84	1.9×10^3	1.5×10^5	2.0×10^6	5.4×10^6	7.1×10^6	8.0×10^6	9.2×10^6	8.9×10^6	8.7×10^6	6.8×10^6
	30	72	910	1.4×10^6	2.0×10^6	2.1×10^6	4.1×10^6	4.4×10^6	6.3×10^6	4.5×10^6	4.6×10^6	6.2×10^6	5.8×10^6
饮用纯净水	8	58	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	58	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	58	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	58	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
其他饮用水	8	69	31	12	7	5	1	0	0	0	0	0	0
	15	69	23	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	69	21	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	69	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2 铜绿假单胞菌浓度重复测量方差分析结果(经 Greenhouse-Geisser 校正)

Table 2 Results of repeated measures analysis of variance for *Pseudomonas aeruginosa* concentrations (Greenhouse-Geisser corrected)

变异来源	F	校正后自由度	P	偏 η^2
时间	205.34	(3.21, 28.89)	<0.001	0.958
温度	88.67	(2.15, 19.35)	<0.001	0.908
包装饮用水种类	152.91	(1.82, 16.38)	<0.001	0.944
时间×温度	45.23	(9.63, 86.67)	<0.001	0.834
时间×包装饮用水种类	38.77	(6.44, 57.96)	<0.001	0.812
温度×包装饮用水种类	25.12	(3.64, 32.76)	<0.001	0.736
时间×温度×包装饮用水种类	18.45	(19.32, 173.88)	<0.001	0.672

注: P<0.001 表示极显著；偏 η^2 为效应量，反映变异来源对浓度变化的解释程度；校正后自由度：括号内第一个数值为分子自由度，第二个为分母自由度；小数自由度为 Greenhouse-Geisser 校正结果(因 Mauchly 球形检验不满足, P<0.001)。

2.5.2　简单效应分析

鉴于存在显著的三因素交互作用, 进一步按包装饮用水种类分组进行简单效应分析, 以明确温度对铜绿假单胞菌浓度随时间变化的影响在不同水种类中的具体差异。

在饮用天然矿泉水中, 时间×温度的交互效应极显著(F=32.45, df=(9.21,82.89), P<0.001, 偏 η^2=0.782), 表明不同温度下铜绿假单胞菌浓度随时间变化的趋势存在本质差异: 23 ℃和 30 ℃条件下, 菌浓度自第 3~4 d 起呈指数级增长, 30 ℃条件下第 3 d 浓度即达到 10^6 CFU/mL, 15 ℃时增殖延迟至第 5~6 d, 第 9 d 浓度达到 10^6 CFU/mL, 而 8 ℃条件下菌浓度持续缓慢下降, 但至第 12 d 仍可检出(3 CFU/mL)。事后多重比较显示, 8 ℃组与 15 ℃组在第 5 d 及以后的浓度差异均极显著(P<0.001), 8 ℃组与 23 ℃、30 ℃组在第 3 d 及以后的浓度差异均极显著(P<0.001), 15 ℃组与 23 ℃、30 ℃组在第 4 d 及以后的浓度差异均极显著(P<0.001)。

在饮用纯净水中, 时间×温度的交互效应显著(F=4.28, df=(8.76,78.84), P<0.01, 偏 η^2=0.321), 表明不同温度下铜绿假单胞菌的衰亡速率存在显著差异: 8 ℃和 30 ℃条件下, 铜绿假单胞菌衰亡速度最快, 第 3 d 即降至不可检出水平(0 CFU/mL); 15 ℃时, 铜绿假单胞菌衰亡速度最慢, 第 5 d 降至不可检出水平; 23 ℃时: 铜绿假单胞菌衰亡速度介于上述二者之间, 第 4 d 降至不可检出水平。事后多重比较显示, 8 ℃组与 15 ℃组在第 2~4 d 的浓度差异均显著(P<0.05), 30 ℃组与 15 ℃组在第 2~3 d 的浓度差异均显著(P<0.05), 其余组间差异无统计学意义(P>0.05)。

在其他饮用水中, 时间×温度的交互效应显著(F=3.87, df=(9.12, 82.08), P<0.01, 偏 η^2=0.294), 表明不同温度下铜绿假单胞菌的衰亡速率存在显著差异: 30 ℃条件下, 铜绿假单胞菌衰亡速度最快, 第 3 d 即降至不可检出水平(0 CFU/mL); 15 ℃和 23 ℃条件下, 铜绿假单胞菌衰亡速度居中, 第 5 d 降至不可检出水平; 8 ℃时: 铜绿假单胞菌衰亡速度最慢, 第 7 d 降至不可检出水平。事后多重比较显示, 30 ℃组与 15 ℃组在第 2~4 d 的浓度差异均显著(P<0.05), 30 ℃组与 23 ℃组在第 2~3 d 的浓度差异均显著(P<0.05), 其余组间差异无统计学意义(P>0.05)。

3　讨论与结论

3.1　讨　论

3.1.1　水源地选取与污染控制

实验结果表明, 铜绿假单胞菌在饮用天然矿泉水等富含矿物质营养成分的水质中存活状态佳, 在适宜的条件下可以快速增殖, 并达到百万级 CFU/mL 的浓度。即便在低温(8 ℃)条件下, 衰亡速度也较为缓慢, 连续监测至第 30 d, 仍然有三分之一以上(ATCC 9027 菌株)或约五分之一左右(YA 200714 菌株)的菌体存活, 表明源水若天然存在铜绿假单胞菌污染, 将难以彻底清除, 并对包装饮用水后续生产加工环节持续带来交叉污染风险。提示企业生产用源水的选取在因地制宜的基础上应尽可能选取未受铜绿假单胞菌污染的水源地, 并积极采取污染防控措施, 降低周边环境或人为因素对源水的污染风险。同时, 持续对源水污染情况进行监测, 出现铜绿假单胞菌污染时, 评估质量控制风险, 结合实际情况采取污染控制、消除污染或更换水源地等措施。

3.1.2　包装容器的污染控制和清洗消毒

实验表明, 包装饮用水受铜绿假单胞菌污染后, 铜绿假单胞菌将在产品中持续存活一段时间, 存活时间受包装饮用水种类、产品存放的环境温度、初始污染水平等因素影响从数天至数十天或更长时间不等, 产品中铜绿假单胞菌活性受以上因素影响也存在快速、缓慢消亡或快速、缓慢增殖等变化区别。提示对产品包装容器清洗消毒和污染风险控制的重要性, 对瓶、桶、盖等包装容器的微生物污染控制, 尤其是对周转容器的清洗消毒应予以高度重视。

3.1.3　消费领域的风险提示与控制

根据 GB 19298—2014《食品安全国家标准 包装饮用水》定义描述, 包装饮用水是指: 密封于符合食品安全标准和相关规定的包装容器中, 可供直接饮用的水。但是, 受饮用水种类、产品工艺、质量控制等因素影响, 包装饮用水存在因微生物污染而出现质量或安全问题的客观风险, 尤其在使用周转容器的桶装水领域, 包装容器洗消环节可能存在的问题将进一步提高该类风险。

结合此次实验结果和日常的包装饮用水产品检验实际情况, 提示产品受微生物污染后, 包括铜绿假单胞菌在内的多种细菌将在产品中长期存在, 并受包装饮用水种类、环境温度和时间等因素影响可能出现大量增殖, 急剧升高产品带来的健康和安全风险。提示消费领域应当进一步提高对包装饮用水质量安全的重视程度, 包括饮用前应检查产品的感官特征, 出现水体异常浑浊、有絮状物、漂浮物等异常情况应避免饮用, 对使用周转容器生产的桶装水, 在有条件时尽量加热煮沸后再饮用。

同时, 包装饮用水, 特别是桶装水, 在拆封过程中若使用不洁工具、直接用肢体接触桶口, 或是开封后完全或部分暴露于外界环境时, 极易受到环境微生物或外源营养成分的二次污染。在较高环境温度条件下, 部分种类的包装饮用水(如饮用天然矿泉水)或受外源营养成分二次污染的饮用纯净水及其它饮用水中, 污染的微生物会大量增殖, 导致产品卫生质量大幅下降, 安全风险大幅升高。因此, 实验结果提示, 消费者在产品拆封时应使用专用或洁净工具, 开封后应注意产品的卫生防护或环境卫生的控制, 如难以避免时, 拆封后应尽量将产品置于阴凉避光环境, 并

尽快饮用。有条件时，或特殊人群(如婴幼儿、老人、孕妇及免疫力低下人群)应煮沸后饮用。如饮用过程中发现感官异常，则应立即停止饮用并果断弃置。

3.1.4 微生物指标与包装饮用水的保质期

此次实验数据表明，产品在出厂时如各项微生物指标均符合要求，则卫生方面的品质可以长时间维持。目前市面上使用一次性包装容器的瓶装水或小桶水标识的保质期时间较长，一般在 12 个月或更长时间，但使用周转容器的桶装水保质期则一般在 45 d 左右，使用周转容器的桶装水标识短保质期可能有其它因素的考虑，但仅从实验情况来看，合格产品在未开封时，微生物方面的因素一般不会对产品质量产生较大影响，尤其是矿物质离子含量极低，或仅含有少量矿物质的饮用纯净水或其它饮用水，如排除包装容器可能带入不定量的外源营养物质，则以上种类饮用水中，即便存在标准限量之外的其它微生物，在常规储存温度条件下，其菌体也可能处于持续衰亡状态。但应注意饮用天然矿泉水或含有较多矿物质营养成分的其他饮用水，除标准限量以外的其它微生物在大量增殖时，也可能对产品质量造成严重影响并对消费者健康带来风险。

需要指出的是，本研究是在实验室接种单一菌种的条件下完成的，且未涉及万级或百万级 CFU/mL 的超高或极高初始污染水平的特殊情况。在实际场景中，产品可能受到多种微生物的混合污染，且总体污染水平可能达到超高或极高水平。在微生物的相互作用下，产品中的微生物状态将更为复杂。因此，即便在矿物质离子含量极低的饮用纯净水或其他饮用水中，标准限量以外的微生物也可能带来不确定的安全风险。此外，产品保质期还受包装材料阻隔性、光线等因素影响。因此，本研究结果可作为保质期设定的参考之一，但不否定产品现行保质期设定的合理性。

3.2 结 论

菌株、时间、温度、初始污染水平和包装饮用水种类等多因素综合作用下，包装饮用水中铜绿假单胞菌的活性呈现明显差异。其中，温度、包装饮用水种类和时间等因素对铜绿假单胞菌活性的影响极显著，在适宜的温度(15、23 和 30 ℃)条件下，饮用天然矿泉水中的铜绿假单胞菌浓度随时间发展呈总体上升或快速上升趋势，且温度越高，总体上升趋势越快，但在低温(8 ℃)时，铜绿假单胞菌浓度总体呈下降趋势。在各温度条件下的饮用纯净水和其他饮用水中，铜绿假单胞菌浓度下降幅度虽有不同，但整体均呈快速下降趋势。同时，经 Greenhouse-Geisser 校正的重复测量方差分析也证实：时间、温度与包装饮用水种类对铜绿假单胞菌活性存在极显著的三重交互效应，表明铜绿假单胞菌在富含矿物质营养成分的包装饮用水中具有极高活性，但活性与环境温度关联紧密，温度较低时，活性大幅降低，在适当的温度范围内，温度越高，活性越高；而在纯净水或含有极少矿物质营养成分的其他饮用水中，活性明显较低，且不同温度下铜绿假单胞菌的衰亡速率也存在显著差异。同时，3 因素的交互效应也表明温度对铜绿假单胞菌活性的影响依赖于包装饮用水的种类和时间，这种复杂的交互效应提示在评估铜绿假单胞菌污染风险时，需综合考虑储存温度、包装饮用水种类和储存时间 3 个因素。但同时应注意，本研究中的其他饮用水仅涉及添加了硫酸镁、氯化钾等矿物质用于调节口味的康师傅包装饮用水，未涉及饮用天然水、饮用天然泉水等。菌株和初始污染水平差异对铜绿假单胞菌活性的影响则较小，在温度、包装饮用水种类等测试条件相同时，铜绿假单胞菌浓度随时间的变化趋势总体一致，但应注意，本研究中仅涉及实测值约 70 CFU/mL 的较高初始污染水平，而未涉及万级或百万级 CFU/mL 的超高或极高初始污染水平的特殊情况。本研究结果与潘波等[27]关于包装饮用水种类，以及 Legnani 等[29]关于水中矿物质营养含量对铜绿假单胞菌活性影响的单一因素研究结果一致，但进一步揭示了多因素对铜绿假单胞菌活性的综合影响和交互效应，为包装饮用水在生产加工、质量控制和市场监管以及消费环节的风险防控提供了更多科学依据。

参考文献

[1] 夏西洋, 古其会, 陈玲, 等. 包装饮用水生产系统中真菌风险分析及溯源[J]. 现代食品科技, 2025, 41(8): 274 285.
Xia Xiyang, Gu Qihui, Chen Ling, et al. Fungal risk analysis and traceability in packaged drinking water production systems[J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 274–285.

[2] 廖振宇, 曹东丽, 张华, 等. 我国包装饮用水行业发展现状及存在的问题[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(3): 737–741.
Liao Zhenyu, Cao Dongli, Zhang Hua, et al. Development status and existing problems of packaged drinking water industry in China [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(3): 737–741.

[3] 骆业巧. 包装饮用纯净水微生物污染情况分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(1): 360–363.
Luo Yeqiao. Analysis of the microbial contaminations of packaged drinking purified water [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(1): 360–363.

[4] 国家食品安全风险评估中心. 包装饮用水中溴酸盐的健康风险评估[EB/OL]. (2024-09-15) [2026-01-16]. http://www.cfsa.net.cn/ywgz/yjbg/202409/t20240915_32145.html.
National Food Safety Risk Assessment Center. Health risk assessment of bromate in packaged drinking water [EB/OL]. (2024-09-15) [2026-01-16]. http://www.cfsa.net.cn/ywgz/yjbg/202409/t20240915_32145.html.

[5] Falcone-Dias M F, Vaz-Moreira I, Manaia C M. Bottled mineral water as a potential source of antibiotic resistant bacteria [J]. Water Research, 2012, 46(11): 3612–3622.

[6] 杭一平. 湖南加强包装饮用水生产企业食品安全风险评估[J]. 食品界, 2024(2): 138.
Hang Yiping. Hunan strengthens food safety risk assessment for packaged drinking water production enterprises[J]. Food Industry, 2024(2): 138.

[7] 周德庆. 微生物学教程[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2011: 256–258.
Zhou Deqing. Microbiology course [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2011: 256–258.

[8] Mahmud Z H, Paul D, Gope P S, et al. *Pseudomonas aeruginosa* in bottled drinking water: potential health hazard [C]//12th Annual Scientific Conference (ASCON). Dhaka: ICDDR, 2009: 74.

[9] 冯秀娟, 董川, 苏洋, 等. 宁夏桶装水中铜绿假单胞菌的污染情况、耐药性及同源性分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(6): 295–302.
Feng Xiujuan, Dong Chuan, Su Yang, et al. Analysis of contamination, drug resistance, and homology of *Pseudomonas* aeruginosa isolated from barreled water in Ningxia [J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(6): 295–302.

[10] 杨穗珊, 朱梦, 常秀亭, 等. 海南省桶装饮用水中铜绿假单胞菌耐药性、T3SS 毒力基因分布与同源性分析[J]. 中国热带医学, 2023, 23(12): 1307–1312.
Yang Suishan, Zhu Meng, Chang Xiuting, et al. Drug resistance, distribution and homology analysis of type III secretion system virulence genes of *Pseudomonas aeruginosa* isolated from barreled drinking water in Hainan Province [J]. China Tropical Medicine, 2023, 23(12): 1307–1312.

[11] Mohammadi Kouchesfahani M, Alimohammadi M, Nabizadeh Nodehi R, et al. *Pseudomonas aeruginosa* and heterotrophic bacteria count in bottled waters in Iran [J]. Iranian Journal of Public Health, 2015, 44(11): 1514–1519.

[12] 李兰娟, 任红. 传染病学[M]. 9 版. 北京: 人民卫生出版社, 2018: 217–219.
Li Lanjuan, Ren Hong. Infectious diseases [M]. 9th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2018: 217–219.

[13] 广东省市场监督管理局. 关于 15 批次食品不合格情况的通告(2026 年第 1 期)[EB/OL]. (2026-01-09) [2026-01-16]. https://amr.gd.gov.cn/zwgk/zdlyxxgk/cjjc/spcj/content/post_4312761.html.
Guangdong Provincial Administration for Market Regulation. Announcement on 15 batches of unqualified food (2026 Issue No. 1) [EB/OL]. (2026-01-09) [2026-01-16]. https: //amr. gd. gov. cn/zwgk/zdlyxxgk/cjjc/spcj/content/post_4312761. html.

[14] 贵州省市场监督管理局. 关于 36 批次食品抽检不合格情况的通告(2025 年第 47 期)[EB/OL]. (2025-12-17) [2026-01-16]. https://amr.guizhou.gov.cn/zwgk/xxgkml/zdlyxx/sjspcjtg/202512/t20251217_89065079.html.
Guizhou Provincial Administration for Market Regulation. Announcement on 36 batches of unqualified food inspection (2025 Issue No. 47) [EB/OL]. (2025-12-17) [2026-01-16]. https://amr.guizhou.gov.cn/zwgk/xxgkml/zdlyxx/sjspcjtg/202512/t20251217_89065079.html.

[15] 江苏省市场监督管理局. 2025 年 8—9 月饮料产品质量监督抽检结果[EB/OL]. (2025-09-30) [2026-01-16]. http://scjgj.jiangsu.gov.cn/col/col76876/ index.html.
Jiangsu Provincial Administration for Market Regulation. Quality supervision and inspection results of beverage products from August to September 2025 [EB/OL]. (2025-09-30) [2026-01-16]. http://scjgj.jiangsu.gov.cn/col/col76876/index.html.

[16] 冯秀娟, 高俊峰, 苏洋, 等. 宁夏桶装饮用水中铜绿假单胞菌污染情况分析及预防控制措施研究[J]. 现代食品, 2023, 29(5): 182–185.
Feng Xiujuan, Gao Junfeng, Su Yang, et al. Study on the pollution and control measures prevention of *Pseudomonas aeruginosa* in barreled drinking water in Ningxia [J]. Modern Food, 2023, 29(5): 182–185.

[17] 湖南省市场监督管理局. 包装饮用水中铜绿假单胞菌的风险解析[EB/OL]. (2021-12-07) [2026-01-16]. http://amr.hunan.gov.cn/ztx/cjxxx/202112/t20211207_21268613.html.
Hunan Provincial Administration for Market Regulation. Risk analysis of *Pseudomonas aeruginosa* in packaged drinking water [EB/OL]. (2021-12-07) [2026-01-16]. http://amr.hunan.gov.cn/ztx/cjxxx/202112/t20211207_21268613.html.

[18] Wingender J, Flemming H C. Biofilms in drinking water and their role as reservoir for pathogens [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2011, 214(6): 417–423.

[19] 肖剑峰, 袁凤君. 2022—2024 年湖南省包装饮用水铜绿假单胞菌污染特征分析与防控策略研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 315–320.
Xiao Jianfeng, Yuan Fengjun. Analysis of pollution characteristics and prevention and control strategies of *Pseudomonas aeruginosa* in packaged drinking water in Hunan Province from 2022 to 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 315–320.

[20] 张丽, 汪霞丽, 蒋昊, 等. 湖南省包装饮用水铜绿假单胞菌风险防控[J]. 食品安全导刊, 2024(4): 34–36.
Zhang Li, Wang Xiali, Jiang Hao, et al. Risk prevention and control of *Pseudomonas aeruginosa* in packaged drinking water in Hunan Province [J]. Food Safety Guide Magazine, 2024(4): 34–36.

[21] 徐双. 桶装饮用水生产过程中微生物污染的分析[J]. 当代化工研究, 2021(20): 100–102.
Xu Shuang. Analysis of microbial pollution in the production of barreled

drinking water [J]. Modern Chemical Research, 2021(20): 100–102.

[22] 马金灿, 郝瑀, 董冠杰, 等. 桶装饮用水中铜绿假单胞菌污染控制措施研究[J]. 中国食品安全, 2024(2): 49–53, 60.
Ma Jincan, Hao Yu, Dong Guanjie, et al. Control measure of *Pseudomonas aeruginosa* contamination in barreled drinking water [J]. China Food Safety, 2024(2): 49–53, 60.

[23] 支晓红. 包装饮用水中铜绿假单胞菌的控制措施及检测方法[J]. 食品安全导刊, 2023(9): 46–48.
Zhi Xiaohong. Control measures and detection methods of *Pseudomonas aeruginosa* in packaged drinking water [J]. China Food Safety Magazine, 2023(9): 46–48.

[24] Georgieva V, Dimitrova Y. Study of the microbiological quality of Bulgarian bottled water in terms of its contamination with *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Central European Journal of Public Health, 2016, 24(4): 326–330.

[25] Wang Hongying, Chi Zhe, Cong Ying, et al. Development of a fluorescence assay for highly sensitive detection of: *Pseudomonas aeruginosa* based on an aptamer-carbon dots/graphene oxide system [J]. RSC Advances, 2018, 8(57): 32454–32460.

[26] 庞婕, 刘杰, 孔庆岩, 等. 实时荧光 PCR 法检测包装饮用水中铜绿假单胞菌的研究[J]. 食品安全导刊, 2024(6): 69–71, 75.
Pang Jie, Liu Jie, Kong Qingyan, et al. Study on the detection of *Pseudomonas* aeruginosa in packaged drinking water by real-time fluorescent PCR [J]. Food Safety Guide Magazine, 2024(6): 69–71, 75.

[27] 潘波, 曾志明, 沈中锋, 等. 不同类型瓶装水中铜绿假单胞菌的数量变化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(5): 1356–1360.
Pan Bo, Zeng Zhiming, Shen Zhongfeng, et al. Study on the quantity variation of *Pseudomonas aeruginosa* in different types of bottled water [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(5): 1356–1360.

[28] Kannan A, Gautam P. A quantitative study on the formation of *Pseudomonas aeruginosa* biofilm [J]. SpringerPlus, 2015, 4: 379.

[29] Legnani P, Leoni E, Rapuano S, et al. Survival and growth of *Pseudomonas aeruginosa* in natural mineral water: a 5-year study [J]. International Journal of Food Microbiology, 1999, 53(2–3): 153–158.

[30] Lewenza S, Abboud J, Poon K, et al. *Pseudomonas aeruginosa* displays a dormancy phenotype during long-term survival in water [J]. PLoS One, 2018, 13(9): e0198384.

[31] Briancesco R, Paduano S, Semproni M, et al. Behavior of *Pseudomonas aeruginosa* and *Enterobacter aerogenes* in water from filter jugs [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(21): 8263.

(责任编辑: 曹岱琳 蔡世佳)