

# 白酒中土味素来源、去除方法及土霉味防治措施研究进展

彭德君<sup>1</sup>, 丁子元<sup>2</sup>, 龙俊勇<sup>1</sup>, 陈晓园<sup>2</sup>, 郑晓卫<sup>2</sup>, 张庆国<sup>1</sup>, 肖成志<sup>1</sup>, 刘沛通<sup>2</sup>, 邓莉川<sup>2\*</sup>

(1.酒鬼酒股份有限公司, 湖南 吉首 455454; 2.中粮营养健康研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:**白酒是中国传统发酵蒸馏酒, 一般在一个复杂的酿造体系中生产, 其风味风格的形成受到诸多因素的影响, 酿造原料、环境变化或操作不当, 都对酒体品质影响很大。白酒基酒中常见异嗅味有很多, 其中土霉味是普遍存在的, 并且对白酒的香气、口感的影响最为严重。白酒中土霉味的主要物质是土味素, 该文主要就白酒中土味素的来源、去除方法及土霉味防治措施的研究进展进行综述, 旨在为白酒品质的稳定和提升提供科学依据。

**关键词:**土味素; 来源; 去除方法; 土霉味; 防治措施

中图分类号: TS261      文章编号: 0254-5071(2025)09-0022-05      doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2025.09.004

引文格式: 彭德君, 丁子元, 龙俊勇, 等. 白酒中土味素来源、去除方法及土霉味防治措施研究进展[J]. 中国酿造, 2025, 44(9): 22-26.

## Research progress on the source, removal methods of geosmin and control measures of earthy-muddy taste in Baijiu

PENG Dejun<sup>1</sup>, DING Ziyuan<sup>2</sup>, LONG Junyong<sup>1</sup>, CHEN Xiaoyuan<sup>2</sup>, ZHENG Xiaowei<sup>2</sup>, ZHANG Qingguo<sup>1</sup>,  
XIAO Chengzhi<sup>1</sup>, LIU Peitong<sup>2</sup>, DENG Lichuan<sup>2\*</sup>

(1.Jiugui Liquor Co., Ltd., Jishou 455454, China; 2.Nutrition & Health Research Institute of COFCO, Beijing 102209, China)

**Abstract:** Baijiu is a traditional Chinese fermented and distilled spirit, typically produced within a complex brewing system where its flavor and style are influenced by various factors. The formation of its flavor style is affected by many factors. Changes in brewing materials, environment or improper operation have a great impact on the quality of Baijiu. There are many common off-flavors in the base liquor of Chinese Baijiu, among which the earthy muddy flavor is widely existed and had the most serious impact on the aroma and taste of Baijiu. The main substance causing the earthy muddy flavor in Baijiu is geosmin. The research progress on the source avoid methods of geosmin in Baijiu, and methods for its removal were mainly reviewed, aiming to provide a basis for the stability and improvement of the Baijiu quality.

**Key words:** geosmin; sources; avoidance methods; earthy-muddy odour; removal methods

随着人民生活水平的提高, 消费普遍升级, 精神层面的需求逐步凸显, “喝好酒”逐渐成为消费者的共识, 这对白酒的品质提出了更高的要求。然而白酒酿造工艺复杂, 且酿造环境多为开放式, 若卫生、操作不到位, 白酒中难以避免会产生一些不友好物质, 影响白酒风味及品质<sup>[1]</sup>。

白酒中常见的异嗅味包括泥臭味、糠味、糊味、馊味、土霉味、油味、酸涩味、苦味等<sup>[2]</sup>, 会在嗅觉、味觉上引起饮用者强烈的不适感, 甚至对健康造成一定影响。其中, 土霉味是白酒中普遍存在的, 并对香气、口感的影响最为严重<sup>[3-4]</sup>。

### 1 白酒中土味素及其来源

土味素又称土嗅素 (geosmin, GSM)、土臭素等, 是白酒呈现土霉味、糠臭味<sup>[5]</sup> (尤其是土糠味<sup>[6]</sup>) 的主要异嗅物质, 也是造成水、葡萄酒、威士忌等含土腥味或土霉味的主要原因<sup>[7]</sup>。由于其具有极低的感官阈值 (在水中阈值为 10 ng/L<sup>[8]</sup>, 在 46%vol 酒精水溶液中其阈值为 0.11 μg/L<sup>[9]</sup>), 通常在 45 ℃ 时, 质量浓度为 7 ng/L 就容易让人感到不适。

土味素产生的研究主要集中在白酒生产工艺管理和卫生方面的考察, 有些缺乏确切的科学依据<sup>[10]</sup>。长期以来行业内都认为糠臭味来源于糠壳, 因糠壳发霉或蒸煮不彻底而进入最终酒体中<sup>[11]</sup>。但近些年, 土味素越来越受到研究者的重视。如 DU H 等<sup>[12]</sup>通过气相色谱-嗅闻-质谱联用 (gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, GC-O-MS) 技术对蒸煮前后糠壳中挥发性风味物质进行检测, 均未检测到 GSM, 进一步追溯整个酿造过程发现, 该异味物质来源于大曲, 制曲过程中检测到含量较高的 GSM (约 6 μg/kg), 且经验证产 GSM 的微生物主要是大曲中的链霉菌<sup>[13]</sup>。李玮<sup>[14]</sup>进一步验证了 GSM 主要是由于制曲过程中微生物生长繁殖所产生的。谢正敏等<sup>[9]</sup>虽然在糠壳中检测到了 GSM, 但其表示白酒中糠臭味物质不一定是糠壳带入的, 需要系统进行溯源研究。张溪桐等<sup>[8]</sup>研究发现, 在大曲制备后期, 含水量下降至 10%~20%, 土味素含量仍在上升, 最高可达到 (9.75±0.50) μg/kg。

收稿日期: 2024-09-29

修回日期: 2025-02-12

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2024JK2151)

作者简介: 彭德君 (1973-), 女, 工程师, 本科, 研究方向为酒体设计。

\*通讯作者: 邓莉川 (1991-), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为食品生物技术。

此外,路虎等<sup>[11]</sup>在浓香、清香、酱香三大香型白酒的酒醅样中均检测到GSM,且其含量变化规律相似,均随着发酵时间延长,GSM含量小幅度增加,后由于环境因素改变而开始缓慢下降,最终达到稳定平衡的状态,并且清香型白酒酒醅中的GSM含量最高,浓香型其次,酱香型白酒相对最低。杜海<sup>[10]</sup>通过考察白酒酿造特定环境因子(如水分、温度、含酒精量等)对产GSM菌株的影响情况结果发现,产GSM的链霉菌在含水量50%的酿造基质,温度为30℃,中性偏碱性(pH7~8)的环境中可以大量繁殖,但当环境pH<6时,该类微生物的生长受到明显抑制,而当环境为酸性(pH3~5)且酒精度>10%vol时,该类微生物生长受到完全抑制,这为白酒酿造过程中通过控制关键环境因素提供可靠的理论依据。

## 2 土味素去除方法

GSM是饮用水中最常见的污染异嗅物质之一,现有研究检测到地表水中GSM的质量浓度为50~500 ng/L<sup>[15]</sup>。目前白酒中GSM去除的方法报道相对较少<sup>[1]</sup>,但国内外对饮用水中异嗅物去除方法研究较多且应用广泛,通常包括物理吸附法、化学氧化法、生物降解法、膜分离法及以上方法的组合工艺。

### 2.1 吸附法

目前异嗅物去除方法研究较多且应用较广的是物理吸附去除法<sup>[1]</sup>,吸附剂种类很多,主要包括凹凸棒土<sup>[16-17]</sup>、沸石<sup>[18]</sup>、活性炭、陶瓷吸附剂等。早在1997年就有研究者指出水中土霉味的去除过程不是简单的单分子层吸附,而是吸附剂和吸附质通过电子共用或转移进行表面结合的化学吸附,从而去除污染异嗅物<sup>[19]</sup>。

目前,颗粒、粉末活性炭吸附剂研究较多且较为深入<sup>[20-21]</sup>,一般情况下粉末活性炭对GSM的吸附效果比颗粒活性炭更好,但活性炭的吸附效果与原水中GSM的起始浓度、活性炭投加量、吸附时间、环境等因素紧密相关。陶辉等<sup>[22]</sup>探究了粉末活性炭的粒径对水中GSM的吸附效果,发现粒径越小GSM的吸附速率越快、效果也越好,投加量为10 mg/L时,粒径为100目以上的活性炭吸附90 min后,GSM的去除率均达96%以上,粒径200目以上的活性炭对GSM的吸附容量值很接近。郭晓鸣等<sup>[23]</sup>进一步验证了粉末活性炭目数对2-MIB和GSM吸附能力的影响,同时发现pH、温度以及初始浓度等对木质粉末活性炭吸附能力影响较小。李一兵等<sup>[24]</sup>研究了粉末活性炭主要性能指标对吸附水中2-MIB和GSM的效能影响,发现2-MIB吸附量和GSM吸附量分别与1.0~1.2 nm、0.64~1.0 nm孔径区间微孔的比表面积(或孔容积)显著相关,碘吸附值与2-MIB吸附量显著相关,但对GSM无明显影响,其他指标亚甲蓝吸附值、酚值、表面酸碱官能团含量与该2种物质吸附量均没有明显关联。

除了常规状态下的固体活性炭,周日安<sup>[25]</sup>考察了不同形态活性炭对水中土臭素的去除效果,发现使用炭浆溶液在先投加活性炭充分吸附后再加聚合铝的情况下,投加25 mg/L的炭浆溶液土臭素的去除率达到90%以上。另外,吴德好<sup>[26]</sup>采用高锰酸钾和粉末活性炭联用处理有土腥味和霉烂味的原水,1 mg/L的高锰酸钾和10 mg/L的粉末活性炭投加量去除率平均可以达到92%以上,滤后水的GSM和2-MIB含量均低于其嗅阈浓度。

此外,葛苏阳等<sup>[15]</sup>采用炉渣和污泥高温合成陶瓷吸附剂去除水中GSM,在GSM质量浓度为200 ng/L下反应时间10 h内去除率可达到80%以上,且偏碱性环境更有利于合成陶瓷吸附剂对GSM的吸附,pH=7时去除率最高,同时当合成陶瓷吸附剂的投加量达到2 g/L时去除率最大。并且该陶瓷吸附剂经5次再生GSM的去除率仍能达到76.9%,具有生产成本低、高效可循环使用的特点。

葡萄酒领域,BEHR M等<sup>[27]</sup>对比了活性炭、壳聚糖、沸石等方法对白葡萄酒中GSM去除效率,发现活性炭效果较好,而壳聚糖和沸石效果一般。LISANTI M T等<sup>[28]</sup>评估了7种处理(活性炭、膨润土、聚乙烯吡咯烷酮(polyvinyl-polyrrolidone, PVPP)、酵母细胞壁、酪蛋白酸钾、沸石和葡萄籽油)在降低葡萄酒中土臭素浓度方面的功效,发现活性炭等处理方法即使可以有效去除GSM,但对原酒风味影响较大,尤其是酯类物质损失较多。仅葡萄籽油处理不仅可以有效降低红或白葡萄酒中的GSM(去除率均在80%以上),还能减少原葡萄酒香气风味的损失。因此,物理吸附法在白酒异嗅味去除应用方面还需要结合GSM去除效果及感官品评综合评估。

### 2.2 生物法

生物降解法主要是指利用微生物通过降解、自身代谢、协同降解等作用去除异嗅物质。早在1965年,HOEHN R C<sup>[29]</sup>研究发现,蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)可以降解水中土霉味物质。随着研究的深入,越来越多细菌被发现可以降解GSM,包括有假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)、红球菌属(*Rhodococcus maris*)、 $\alpha$ 变形菌门(*Alpha-Proteobacteria*)等菌种,部分菌株可单独作用降解GSM,而部分菌株则需要共存状态下才能降解<sup>[30]</sup>。此外,生物处理工艺主要是生物滤池,将具有降解或转化GSM能力的微生物作为载体附着于滤料(石英砂、生物陶粒、活性炭<sup>[31]</sup>等)上,制成生物过滤器,滤料的选择会影响GSM的去除率,可根据实际需求进行选择和应用。

从大曲中筛选得到可抑制产GSM的链霉菌生长的菌株,并通过菌株协同组合形成微生物菌剂,再添加到生产大曲中,从根源上减少GSM的产生。ZHI Y等<sup>[32]</sup>从不同大曲中分离出14株芽孢杆菌对GSM的主要来源之一的桑氏链霉菌(*Streptomyces sampsonii*)的生长均具有拮抗作用,其

中从茅台大曲中筛选得到的枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)2-16和解淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*)1-45两株菌效果最为显著,抑制率分别为57.8%和84.3%,并在模拟发酵实验中有效防止了GSM的产生(接种比例1:1),经鉴定抗菌物质为脂肽。此后,杜海等<sup>[33]</sup>通过在白酒大曲制备原料中接种微生物菌剂,可有效抑制产GSM的白色链霉菌菌株,这些抑制菌包括发酵毕赤酵母、酿酒酵母、米曲霉、东方伊萨酵母、异常威克汉姆酵母、库德毕赤酵母、枯草芽孢杆菌等,主要来源于白酒生产过程中,不仅不会对白酒生产产生不利影响,还能提高风味物质及酒精产量。徐岩等<sup>[34]</sup>通过在大曲中添加含有地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)、短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus*)、酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)以及短乳杆菌(*Lactobacillus breri*)的微生物菌剂,添加了微生物菌剂的大曲中GSM的含量低至3.4 μg/kg,与未添加前相比,平均下降了70%左右。

此外,张溪桐等<sup>[8]</sup>在中温大曲筛选出6株能耐受低含水量,且对链霉菌有较好抑制作用的真菌*Aspergillus* sp. LBM32010、*Aspergillus* sp. LBM32013、*Rhizopus* sp. LBM32021、*Trichosporon* sp. LBM32022、*Lichtheimia* sp. LBM32026和*Trichosporon* sp. LBM32030,其中*Aspergillus* sp.对GSM的抑制效果最好,GSM含量从(34.79±2.34) μg/kg下降至(3.11±1.22) μg/kg,抑制率为91.06%,展现了大曲中原位微生物在低含水量条件下对链霉菌和GSM的抑制能力。

### 2.3 化学氧化法

氧化法主要是指通过高锰酸钾、二氧化氢、臭氧、紫外光等对异嗅物进行降解,产生羟基自由基进一步引发系列氧化反应,是去除水中GSM的重要途径<sup>[35]</sup>。现举例不同的氧化法,尤其是高级氧化法<sup>[36]</sup>去除饮用水中GSM的效果进行整理对比,见表1。

| 项目    | 方法                                                            | GSM初始质量浓度/<br>(ng·L <sup>-1</sup> ) | 去除率/<br>% |
|-------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------|
| 臭氧    | O <sub>3</sub> <sup>[37]</sup>                                | /                                   | >75       |
|       | O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>[38]</sup> | 70                                  | 100       |
|       | UV/O <sub>3</sub> <sup>[39]</sup>                             | 500                                 | 100       |
| 紫外光   | UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>[40]</sup>              | 183                                 | 90        |
|       | 真空UV <sup>[41]</sup>                                          | 100                                 | 100       |
| 光催化   | 光催化:TiO <sub>2</sub> 催化UV <sup>[42]</sup>                     | 10 000                              | 99        |
| 光照-芬顿 | 芬顿反应结合光照 <sup>[43]</sup>                                      | 100                                 | 50        |
| 其他    | 超声 <sup>[44]</sup>                                            | 10 000                              | >90       |
|       | 高锰酸钾 <sup>[45]</sup>                                          | 5 000                               | 22.5      |

由表1可以看到,氧化法在水中的应用国内外研究较多,臭氧、紫外光等高级氧化法几乎可以完全去除水中的

GSM,但其去除效率与研究者试验的初始浓度有关。而氧化法在白酒方面鲜有报道,徐岩等<sup>[46]</sup>通过在蒸馏前,将过氧化氢投入酒醅中,在蒸馏过程中,控制流酒温度为30~35℃,在蒸馏后,控制蒸馏得到的白酒的酒精度为65%vol~70%vol,大大减少了酒中土霉异味,使得白酒中GSM的含量低至0.5 μg/L。但该发明专利是否能真正应用于白酒的土霉味去除还有待验证。

### 2.4 组合工艺

组合工艺是结合不同的处理方式提高异嗅物质的去除效率和效果,包括活性炭吸附与膜反应器结合、臭氧与颗粒活性炭联用、氧化法与生物滤池组合等,一般均比单一的处理方式效果明显提升,有效提高水质的安全性<sup>[20,47-48]</sup>。

## 3 土霉味避免办法

白酒的异嗅物质较多,与生产工艺、环境及操作等息息相关,土霉味的产生虽有大量研究表明其主要来源于大曲微生物的代谢,但在白酒的生产过程中,从原辅料、水、窖泥、糟醅等生产环节都有可能滋生霉菌,造成异杂味的污染,并且在储存过程中不易挥发、消除,也不易被其他物质掩盖<sup>[7,49]</sup>。因此,通过常规的储存、勾调掩盖方式很难消除问题,解决土霉味首先还是得从根源上着手。

### 3.1 原辅料及用水

白酒生产原料一般为高粱、小麦等,辅料为疏松度大的稻壳。首先从原辅料采购验收上,要确保其含水量符合要求,不存在霉变现象;其次在运输、储存过程中要保证环境干燥,避免受潮;再者从工艺上辅料可在工艺标准范围内适当加强清蒸,去除异杂味,同时清蒸结束后及时摊凉,冷却后使用或收集待用<sup>[7]</sup>。

此外,加强用水质量检测,避免酿造及降度勾调过程中水的污染。土嗅素(GSM)和2-甲基异莰醇(2-methylisoborneol,2-MIB)是饮用水中最典型也是最常见的污染异嗅物质<sup>[15]</sup>,如用水不当,水中的土霉味物质可直接带入白酒生产中。

### 3.2 封窖及清窖

封窖和清窖的质量是保证窖内糟醅发酵正常的关键,一方面决定了窖池封闭的密封性及染菌情况,一方面直接影响到糟醅出酒的质量<sup>[4]</sup>。浓香型白酒发酵时间长达60~80 d,在此期间若封窖泥敞露,泥质容易干裂引起窖池出现裂痕感染杂菌,同时,封窖泥营养成分的不断减少,窖泥香味较差,容易产生糠臭味,这些气味极可能会随着面糟酒的蒸馏而进入酒体中,影响白酒的品质<sup>[4]</sup>。

首先,窖泥要湿度适当,不能为了防止干裂而调至水分含量过度,以免泥水渗入糟醅带入土泥味<sup>[7]</sup>。同时,窖泥尽量现和现用,避免封窖时间过长而发臭。其次,要加强窖泥检查频率,在发酵过程中确保一旦产生裂缝要及时用滋润泥封口<sup>[49]</sup>,但不可浇水柔化,避免生水沿裂缝进入糟醅

滋生霉菌。最后,在开窖取醅时要做好窖壁四周霉变糟醅的检查和清理,避免影响酒体质量。

### 3.3 其他

高温堆积是酱香型白酒独特风格形成原因的关键工序之一,堆积过程中微生物代谢产生多种香味物质,且适当延长堆积发酵时间有利于网罗空气中的有益微生物,使酒体更纯正,但同时也要避免堆积时间过长,糖化堆过老容易产生青霉,会使酒体产生霉味及降低出酒率<sup>[7]</sup>。

此外,酱香白酒要加强下沙轮次母糟的管理,避免因母糟变质引起酒体霉味。酱香白酒传统生产于重阳时节开始下沙,此时气温较高,母糟在开窖后极易霉变,因此要控制母糟每日取用量,确保当日母糟当日用完,并且每日取用的母糟和窖内剩余母糟都应拍紧呈块状堆好,降低霉变速率。

## 4 总结与展望

异嗅物质的存在严重影响白酒的香气口感,尤其是土霉味不易消除也不易掩盖,对白酒品质影响很大。多项研究已证实GSM的主要来源是大曲,且以链霉菌属为主,为GSM的防控提供了科学依据。但在GSM的防控中仍然不能忽视整个生产各个环节的操作、卫生环境所带来的隐患,在坚持传统酿造的同时,加强工艺创新,以更严更高的标准、更优更细的工艺生产出更高品质的白酒。

目前白酒中去除GSM的工艺研究相对较少,但近年来也有一些突破和尝试,尤其是生物降解法,但如何将这些可抑制霉菌生长的菌株真正应用到白酒的生产过程中还有待进一步研究和验证。此外,水中的GSM去除方法有很多值得借鉴,但不论是吸附法还是氧化法,在去除白酒GSM的同时都有可能影响酒中的风味物质,对白酒的香气、口感、风格造成很大的损失或破坏。因此,白酒中的GSM去除方法后续还需要加强,更有针对性的开展研究和应用,为市场提供更健康、优质的白酒。

### 参考文献:

- [1] 范奇高,林慧,程平言,等. 白酒中异杂类物质的吸附去除研究进展[J]. 酿酒科技,2022(8):98-102,111.
- [2] WU J, LIU Y, ZHAO H, et al. Recent advances in the understanding of off-flavors in alcoholic beverages: Generation, regulation, and challenges [J]. *J Food Compos Anal*, 2021, 103: 104117.
- [3] 杜海. 中国白酒中一种土霉味物质的发现及其成因研究[D]. 无锡:江南大学,2009.
- [4] 黄箭,谢正敏,施思,等. 气相色谱质谱联用法测定封窖泥中的两种土霉味物质[J]. 中国酿造,2023,42(2):215-220.
- [5] 孙细珍,杨强,张帆,等. 小曲清香型白酒中异嗅味-糠味和水嗅味物质研究[J]. 酿酒科技,2019(11):30-34.
- [6] 李泽霞,姜东明,单凌晓,等. GC-O-MS对白酒中的糠味物质的研究[J]. 酿酒,2020,47(1):44-50.
- [7] 何发军,陈勇,叶灿,等. 酱香白酒中霉味的产生原因及其解决措施[J]. 酿酒科技,2024(2):65-69.
- [8] 张溪桐,徐岩,杜海. 低含水量条件下大曲中抑制土味素的功能微生物解析[J]. 食品与发酵工业,2022,48(13):55-62.
- [9] 谢正敏,练顺才,李杨华,等. 酿酒用糠壳中糠味物质的研究[J]. 酿酒科技,2016(1):47-49.
- [10] 杜海. 产土味素菌群对白葡萄酒的影响机制及监测控制[D]. 无锡:江南大学,2013.
- [11] 路虎,杜海,徐岩. 中国白酒固态发酵及蒸馏过程中糠嗅味物质变化规律的研究[J]. 酿酒科技,2012(8):29-32.
- [12] DU H, FAN W L, XU Y. Characterization of geosmin as source of earthy odor in different aroma type Chinese liquors[J]. *J New Mat Electrochem Syst*, 2011, 14(3): 8331-8337.
- [13] DU H, LU H, XU Y, et al. Influence of geosmin-producing *Streptomyces* on the growth and volatile metabolites of yeasts during Chinese liquor fermentation[J]. *J Agr Food Chem*, 2015, 63(1): 290-296.
- [14] 李玮. 白酒中GSM的检测与形成规律研究[D]. 天津:天津科技大学,2014.
- [15] 葛苏阳,吴睿,徐力刚. 炉渣污泥合成陶瓷吸附剂去除饮用水中土臭素的研究[J]. 土壤通报,2017,48(2):488-494.
- [16] 谢义忠,魏艳,康宇炜,等. 凹凸棒土吸附去除饮用水中典型嗅味物质的研究[J]. 化学工程师,2013,27(4):26-28,32.
- [17] MA C, ZUO X, SHI W, et al. Adsorption of 2-methylisoborneol and geosmin from water onto thermally modified attapulgite[J]. *Desalin Water Treatment*, 2014, 52: 999-1006.
- [18] YUNCU B, KNAPPE D R U. Removal of 2-methylisoborneol and geosmin with high-silica zeolites[C]//Fast tracks to water quality: 2007 AWWA water quality technology conference & exposition, November 4-8, 2007, Charlotte, North Carolina, USA.2007.
- [19] 古小超,姜伟,李泽利,等. 土臭素和2-甲基异茨醇去除方法和路径研究进展[J]. 环保科技,2021,27(2):58-64.
- [20] RIDAL J, BROWNEE B, MCKENNA G, et al. Removal of taste and odour compounds by conventional granular activated carbon filtration [J]. *Water Qual Res J Canada*, 2001, 36(1): 43-54.
- [21] 庞雅丽. 高锰酸钾与粉末活性炭联用去除水中嗅味物质[D]. 北京:北京工业大学.2011.
- [22] 陶辉,徐春燕,杨嘉玮,等. 粉末活性炭粒径对其吸附水中土臭素的影响[J]. 中国给水排水,2015,31(15):40-44.
- [23] 郭晓鸣,董紫君,王璐,等. 粉末活性炭去除2-MIB和GSM影响因素研究[C]. 青岛:全国水质安全与二氧化氯应用技术研讨会,2017.
- [24] 李一兵,方华,韩正双,等. 活性炭指标对吸附去除2-MIB和土臭素效能的影响[J]. 工业水处理,2021,41(10):91-96.
- [25] 周日安,张苏燕,郑仕,等. 活性炭去除水中的2-甲基异茨醇和土臭素的优化试验研究[J]. 城镇供水,2023(1):65-68.
- [26] 吴德好. 饮用水中土腥味和霉烂味的去除方法研究[J]. 安徽化工,2005,31(4):41-43.
- [27] BEHR M, COCCO E, LENOUVEL A, et al. Earthy and fresh mushroom off-flavors in wine: optimized remedial treatments[J]. *Am J Enol Viticult*, 2013, 64(4): 545-549.
- [28] LISANTI M T, GAMBUTI A, GENOVESE A, et al. Earthy off-flavour in wine: Evaluation of remedial treatments for geosmin contamination [J]. *Food Chem*, 2014, 154: 171-178.

- [29] HOEHN R C. Some relationships between certain aquatic Actinomycetes and *Bacillus cereus*[D]. Denton: North Texas State University, 1963.
- [30] 韩正双, 韩宏大, 闫慧敏, 等. 生物法去除水中土臭素和2-甲基异莰醇的研究进展[J]. 供水技术, 2016, 10(3): 7-12.
- [31] YU L Y, ZHOU B H, YUAN R F, et al. Removal of MIB and geosmin in drinking water by biological activated carbon process[C]. //2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering: ICETCE 2011, Lushan: IEEE, 2011: 5293-5296.
- [32] ZHI Y, WU Q, DU H, et al. Biocontrol of geosmin-producing *Streptomyces* spp. by two *Bacillus* strains from Chinese liquor[J]. **Int J Food Microbiol**, 2016, 2311-2319.
- [33] 杜海, 徐岩. 一种有效抑制大曲中土味素形成的微生物菌剂: CN201711354651[P]. 2024-09-24.
- [34] 徐岩, 杜海, 杜小威, 等. 一种大曲中土味素的抑制方法: 201910318589 [P]. 2024-09-24.
- [35] 卢伟. 氧化法去除水中土臭素和2-MIB的研究进展[J]. 供水技术, 2018, 12(3): 1-5.
- [36] 张宇峰, 张欣然, 曹宇安, 等. 高级氧化降解饮用水中嗅味物质土臭素和2-甲基异莰醇的研究进展[J]. 化学通报, 2023, 86(12): 1451-1458.
- [37] TERASHIMA K. Reduction of musty odor substances in drinking water-A pilot plant study[J]. London: Iwa Publishing, 1988.
- [38] PARK G, YU M, GO J, et al. Comparison between ozone and ferrate in oxidising geosmin and 2-MIB in water[J]. **Water Sci Technol**, 2007, 55(5): 117-25.
- [39] COLLIVIGNARELLI C, SORLINI S. AOPs with ozone and UV radiation in drinking water: contaminants removal and effects on disinfection byproducts formation[J]. **Water Sci Technol**, 2004, 49(4): 51-56.
- [40] JO C H, DIETRICH A M, TANKO J M. Simultaneous degradation of disinfection byproducts and earthy-musty odorants by the UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation process[J]. **Water Res**, 2011, 45(8): 2507-2516.
- [41] KUTSCHERA K, BRNICK H, WORCH E. Photoinitiated oxidation of geosmin and 2-methylisoborneol by irradiation with 254 nm and 185 nm UV light[J]. **Water Res**, 2009, 43(8): 2224-2232.
- [42] BAMUZ A, PEMU E E, CHIRWA E M N. Photocatalytic degradation of geosmin: Intermediates and degradation pathway analysis[J]. **Chem Eng Trans**, 2011, 24: 91-96.
- [43] PARK, JEONG-ANN N, HYE-LIM C, et al. Oxidation of geosmin and 2-methylisoborneol by the photo-Fenton process: Kinetics, degradation intermediates, and the removal of microcystin-LR and trihalomethane from Nak-Dong River water, South Korea[J]. **Chem Eng J**, 2017, 313: 345-354.
- [44] SONG W, O'SHEA K E. Ultrasonically induced degradation of 2-methylisoborneol and geosmin[J]. **Water Res**, 2007, 41(12): 2672-2678.
- [45] LIU S, TANG L, WU M, et al. Parameters influencing elimination of geosmin and 2-methylisoborneol by K<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub>[J]. **Separat Purif Technol**, 2017, 182: 128-133.
- [46] 徐岩, 杜海, 杜小威, 等. 一种白酒蒸馏过程中土霉异味的控制方法: CN201910321131.2[P]. 2024-09-24.
- [47] 闫慧敏, 韩正双, 李荣光, 等. 基于南水北调中线原水的土臭素去除技术研究[J]. 供水技术, 2017, 11(3): 14-18.
- [48] 王文东, 范银萍, 刘国旗, 等. O<sub>3</sub>-颗粒活性炭联用去除对二甲基异莰醇研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(5): 33-37, 42.
- [49] 刘平, 孙啸涛, 许德富, 等. 浓香型白酒中主要异嗅味研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(16): 396-407.