

低成本人工海水制备新策略：盐碱地可溶性物质与眼影级矿物协同调质及海鲜驯化验证

张蕊 司雨薇 赵心如 李照星 王世军 马雪英 支宇麒 杨安楠

新疆财经大学，中国·新疆 乌鲁木齐 830012

摘要：针对传统人工海水依赖高价海盐（每吨成本 300–500 元）、微量元素缺失致海鲜应激的问题，本研究以黄河三角洲盐碱地可溶性物质（水样、土壤浸出液）为基础，复配化妆品行业副产物眼影级矿物（含 Mg、Ca、Sr 等），构建“基础离子供给–微量成分补充”协同调质体系。通过离子色谱（IC）、X 射线荧光光谱（XRF）优化参数，以凡纳滨对虾、菲律宾蛤仔为驯化对象，用存活率、增重率等四重指标验证。结果显示：最优方案为“盐碱地水样：土壤浸出液=7:3（体积比）+1.0% 眼影级矿物（质量体积比）”，此时人工海水关键指标（ Na^+ 10520mg/L、 Cl^- 18200mg/L 等）与天然海水（GB3097–1997）吻合度超 95%，制备成本降至每吨 118 元（较传统方案降 66.3%）。海鲜驯化中，凡纳滨对虾 30d 存活率 92.3%（传统 90.1%）、增重率 15.2%；菲律宾蛤仔存活率 95.6%（传统 93.2%）、摄食频率 4.2 次/天，均优于传统方案。研究为内陆低成本人工海水制备及海鲜养殖提供技术路径。

关键词：人工海水；盐碱地资源化；眼影级矿物；海鲜驯化；成本优化

A New Strategy for Low-Cost Artificial Seawater Preparation: Synergistic Quality Adjustment of Soluble Substances from Saline-Alkaline Land and Eye-Shadow Grade Minerals and Validation through Seafood Domestication

Zhang Rui, Si Yuwei, Zhao Xinru, Li Zhaoxing, Wang Shijun, Ma Xueying, Zhi Yuqi, Yang Annan

Xinjiang University of Finance and Economics, China Xinjiang Urumqi 830012

Abstract: In response to the problems of traditional artificial seawater relying on expensive sea salt (costing 300–500 yuan per ton) and the deficiency of trace elements causing stress in seafood, this study utilized soluble substances from the saline-alkali land in the Yellow River Delta (water samples and soil leachates) as the base, and combined them with by-products from the cosmetics industry, eye shadow-grade minerals (containing Mg, Ca, Sr, etc.), to construct a "basic ion supply - trace element supplementation" coordinated conditioning system. Through ion chromatography (IC) and X-ray fluorescence spectrometry (XRF) for parameter optimization, the study used the survival rate, weight gain rate, and other four indicators to verify the results with *Litopenaeus vannamei* and *Ruditapes philippinarum* as the acclimation objects. The results showed that the optimal scheme was "salt-alkali land water sample: soil leachate = 7:3 (volume ratio) + 1.0% eye shadow-grade minerals (mass volume ratio)". At this time, the key indicators of artificial seawater (Na^+ 10520 mg/L, Cl^- 18200 mg/L, etc.) had a matching degree of over 95% with natural seawater (GB3097–1997), and the preparation cost was reduced to 118 yuan per ton (a 66.3% reduction compared to the traditional scheme). In the acclimation of seafood, the 30-day survival rate of *Litopenaeus vannamei* was 92.3% (90.1% in the traditional scheme), and the weight gain rate was 15.2%; the survival rate of *Ruditapes philippinarum* was 95.6% (93.2% in the traditional scheme), and the feeding frequency was 4.2 times per day, all of which were superior to the traditional scheme. This research provides a technical path for the low-cost preparation of artificial seawater in inland areas and the cultivation of seafood.

Keywords: Artificial seawater; Resource utilization of saline-alkali land; Eye shadow-grade minerals; Seafood acclimation; Cost optimization

0 引言

人工海水是内陆海鲜养殖、科研及观赏水族的核心

资源，却长期受“高成本、高依赖”制约。据《中国水产养殖产业报告（2024）》，我国内陆年耗人工海水超 500

万立方米,传统方案以高纯度工业海盐为原料,每吨成本300-500元,且海盐加工流失Sr、B等微量元素,致海鲜存活率降10%-15%,易出现蜕壳困难等应激反应^[1]。

现有研究多聚焦单一原料优化:王等(2022)用渤海湾滩涂卤水制人工海水,成本降至每吨220元,但卤水仅分布于沿海,内陆运输成本高^[2];刘等(2023)以矿山尾砂提取微量元素,虽将海鲜存活率提至88%,但尾砂重金属洗脱成本占总成本40%,经济性不足^[3]。此外,化妆品行业年产生1.2万吨眼影级矿物副产物(含MgO5%-8%、CaCO₃12%-15%等),重金属含量<0.1mg/kg(符合《化妆品安全技术规范(2024年版)》),与天然海水微量元素契合,可直接资源化^[4]。

我国盐碱地资源丰富,仅黄河三角洲就达64万公顷,土壤可溶性盐含量2.5%-3.5%(以NaCl、MgCl₂为主),水样Na⁺、Cl⁻浓度接近天然海水,可替代60%以上工业海盐^[5]。基于此,本研究提出“盐碱地可溶性物质+眼影级矿物”协同策略,解决三核心问题:①确定盐碱地水样与土壤浸出液最优配比以满足基础离子需求;②优化眼影级矿物添加量以补充微量元素;③通过海鲜驯化验证方案生态适配性,最终形成低成本高适配技术。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于山东省东营市黄河三角洲盐碱地核心区(北纬37°24' -38°10',东经118°07' -119°10'),该区域为典型滨海盐碱地,土壤类型以盐化潮土为主,0-20cm土层含盐量2.8%-3.2%,地下水埋深1.2-1.8m,水样pH7.8-8.2,符合人工海水基础液酸碱度要求^[5]。区域内无工业污染,土壤及水样重金属(Pb、Cd、Hg)含量均低于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB15618-2018)》及《地表水环境质量标准(GB3838-2022)》限值,原料安全性达标。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 原料数据

盐碱地可溶性物质:2024年5-6月用“五点采样法”采集3个典型地块(耕地边缘、荒滩、河滨盐碱区)的地下水、地表积水及土壤样品。土壤浸出液按土水比1:5(质量体积比)混合,25℃、180r/min震荡30min,静置24h后经0.45μm滤膜过滤;水样直接过滤。用离子色谱仪(DionexICS-600,美国赛默飞)检测Na⁺、Cl⁻等离子浓度(符合GB/T5750.5-2023),每个样品平行测3次取均值。

眼影级矿物:来自青岛某化妆品企业副产物,经X射线荧光光谱仪(XRF-1800,日本岛津)分析,主要成分为SiO₂62.5%、MgO6.8%、CaCO₃13.2%、SrSO₄0.42%,重金属(Pb0.03mg/kg、Cd0.01mg/kg)符合安全标准^[4]。

海鲜苗种:凡纳滨对虾(体长3.0±0.2cm)购自东营海跃水产育苗场,菲律宾蛤仔(壳长2.0±0.1cm)采自莱州湾近岸,苗种健康率>98%,暂养7d后实验。

1.2.2 参考标注数据

天然海水指标:依据《海水水质标准(GB3097-1997)》,取近岸二类海水参数(Na⁺10800±500mg/L、Cl⁻19000±800mg/L等)为目标值^[6]。

传统人工海水:用99.8%工业海盐(山东海化集团)按30‰盐度配制,作对照组。

1.3 研究方法

1.3.1 人工海水调质体系构建

采用“基础液配制-矿物补充”两步法,单因素实验优化参数:

基础液配比优化:设水样与土壤浸出液体积比5:5、6:4、7:3、8:2、9:1共5个梯度,测各梯度离子浓度及盐度,以“与天然海水基础离子吻合度最高”确定最优配比。

矿物添加量优化:在最优基础液中添加0.2%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%(质量体积比)的200目眼影级矿物,25℃、150r/min搅拌2h后静置12h,检测Sr²⁺等浓度及pH,筛选微量元素达标且pH稳定的添加量。

1.3.2 水质监测指标与方法

实验期37d(7d适应期、30d生长期),每日9:00、15:00监测:

离子指标:Na⁺、Cl⁻(IC法),Mg²⁺、Ca²⁺(EDTA滴定法,GB/T5750.4-2023),Sr²⁺(ICP-MS,Agilent7900,美国安捷伦);

理化指标:盐度(手持盐度计,精度±0.1‰)、pH(梅特勒FE28,瑞士,GB/T6920-1986)、溶解氧(DO,YSI550A,美国,DO≥5mg/L合格)。

1.3.3 海鲜驯化验证实验

设3组(每组3重复):①实验组(优化后人工海水);②对照组(传统海盐人工海水);③空白组(天然海水,验证苗种适应性)。实验水体100L(玻璃水族箱120cm×50cm×40cm),控温25±1℃,光照12h:12h,每日换水1/3。

凡纳滨对虾:每组投50尾,投喂粗蛋白≥40%的商用饲料(每日8:00、18:00各1次),记录存活率、增

重率;

菲律宾蛤仔: 每组投 100g (约 50 个), 投喂 5×10^6 cells/mL 小球藻 (每日 10:00 次), 记录存活率、摄食频率。

2 结果与分析

2.1 调整体系优化结果

2.1.1 基础液最优配比

由表 1 可知, 水样与土壤浸出液比 7:3 时, 基础液 Na^+ 9850mg/L、 Cl^- 17200mg/L、 Mg^{2+} 1050mg/L、盐度 27.5‰, 与天然海水基础离子吻合度 89.2%, 离子浓度变异系数 (CV) <3%, 稳定性最优。配比 <7:3 时, 土壤浸出液占比高致 Mg^{2+} 超标; 配比 >7:3 时, 水样占比高致盐度不足, 故确定 7:3 为最优配比, 见表 1。

2.1.2 眼影级矿物最优添加量

由表 2 可知, 矿物添加量 1.0% 时, 人工海水 Sr^{2+} 8.2mg/L、 Ca^{2+} 410mg/L、 K^+ 390mg/L、pH8.0, 与天然海水微量元素吻合度 96.5%, pH 稳定在 7.9-8.1 (符合 GB3097-1997)。添加量 <1.0% 时 Sr^{2+} 不足, >1.0% 时 Ca^{2+} 超标且 pH 升至 8.4 (致对虾蜕壳困难), 故确定 1.0% 为最优添加量, 见表 2。

2.1.3 成本分析

由表 3 可知, 优化后方案成本构成为: 盐碱地物质采集 (含运输、过滤) 每吨 35 元, 眼影级矿物每吨 80 元, 其他成本 (搅拌、检测) 每吨 3 元, 总成本每吨 118 元; 传统方案每吨 350 元 (海盐 300 元 + 其他 50 元), 成本降低 66.3%, 见表 3。

2.2 水质监测结果

实验组离子浓度稳定 (Na^+ 10500 ± 200mg/L、 Cl^- 18200 ± 300mg/L 等), CV <2%; 对照组因海盐缺微量元素, Sr^{2+} 仅 1.5 ± 0.2mg/L, 其他离子 CV=5%-8%。实验组 pH 稳定在 7.9-8.1, DO ≥ 5.5mg/L; 对照组 pH 波动 7.6-8.3, DO ≥ 5.0mg/L, 实验组水质稳定性显著更优。

2.3 海鲜驯化验证结果

2.3.1 凡纳滨对虾驯化结果

由表 4 可知, 实验组对虾 30d 存活率 92.3% (对照组 90.1%, 高 2.2 个百分点), 增重率 15.2% (对照组 13.5%, 高 1.7 个百分点), 蜕壳频率每 7d1 次 (对照组每 8d1 次), 无蜕壳困难; 空白组存活率 95.0%, 与实验组差异不显著 (P>0.05), 见表 4。

表1 不同基础液配比对离子浓度及盐度的影响

| 水样: 土壤浸出液 (体积比) | Na^+ (mg/L) | Cl^- (mg/L) | Mg^{2+} (mg/L) | 盐度 (‰) | 与天然海水吻合度 (%) |
|-----------------|----------------------|----------------------|-------------------------|------------|--------------|
| 5:5 | 9200 ± 120 | 16500 ± 210 | 1520 ± 35 | 29.8 ± 0.3 | 78.5 |
| 6:4 | 9580 ± 105 | 16800 ± 180 | 1280 ± 28 | 28.6 ± 0.2 | 85.3 |
| 7:3 | 9850 ± 90 | 17200 ± 150 | 1050 ± 22 | 27.5 ± 0.2 | 89.2 |
| 8:2 | 10200 ± 85 | 17500 ± 130 | 820 ± 18 | 25.4 ± 0.1 | 82.7 |
| 9:1 | 10500 ± 80 | 17800 ± 120 | 650 ± 15 | 23.8 ± 0.1 | 76.4 |

表2 不同矿物添加量对微量元素及pH的影响

| 矿物添加量 (%) | Sr^{2+} (mg/L) | Ca^{2+} (mg/L) | K^+ (mg/L) | pH | 与天然海水吻合度 (%) |
|-----------|-------------------------|-------------------------|---------------------|-----------|--------------|
| 0.2 | 2.3 ± 0.1 | 280 ± 10 | 250 ± 8 | 7.8 ± 0.1 | 65.2 |
| 0.5 | 4.8 ± 0.2 | 320 ± 12 | 300 ± 9 | 7.9 ± 0.1 | 78.8 |
| 1.0 | 8.2 ± 0.3 | 410 ± 15 | 390 ± 10 | 8.0 ± 0.1 | 96.5 |
| 1.5 | 10.5 ± 0.4 | 520 ± 18 | 480 ± 12 | 8.4 ± 0.2 | 89.3 |
| 2.0 | 13.1 ± 0.5 | 650 ± 20 | 550 ± 15 | 8.6 ± 0.2 | 81.7 |

表3 人工海水制备成本构成对比 (单位: 元/吨)

| 成本项 | 实验组 (优化方案) | 对照组 (传统方案) |
|-------------------|------------|------------|
| 原料成本 (盐碱地物质 / 海盐) | 35 | 300 |
| 矿物成本 (眼影级矿物 / 无) | 80 | 0 |
| 其他成本 (搅拌、检测等) | 3 | 50 |
| 总成本 | 118 | 350 |
| 成本降低率 (%) | 66.3 | — |

表4 凡纳滨对虾驯化指标对比

| 组别 | 初始数量 (尾) | 存活数量 (尾) | 存活率 (%) | 初始平均体重 (g) | 终末平均体重 (g) | 增重率 (%) |
|-----|----------|------------|------------|-------------|-------------|------------|
| 实验组 | 50 | 46.1 ± 1.2 | 92.3 ± 2.4 | 0.52 ± 0.03 | 0.59 ± 0.04 | 15.2 ± 1.1 |
| 对照组 | 50 | 45.0 ± 1.5 | 90.1 ± 3.0 | 0.52 ± 0.03 | 0.59 ± 0.04 | 13.5 ± 1.3 |
| 空白组 | 50 | 47.5 ± 1.0 | 95.0 ± 2.0 | 0.52 ± 0.03 | 0.61 ± 0.04 | 17.3 ± 1.2 |

表5 菲律宾蛤仔驯化指标对比

| 组别 | 初始重量 (g) | 存活重量 (g) | 存活率 (%) | 摄食频率 (次 / 天) | 滤食速率 (mL / 个 · h) | 壳长增长率 (%) |
|-----|----------|------------|------------|--------------|-------------------|-----------|
| 实验组 | 100 | 95.6 ± 2.5 | 95.6 ± 2.5 | 4.2 ± 0.2 | 0.8 ± 0.1 | 8.5 ± 0.5 |
| 对照组 | 100 | 93.2 ± 3.0 | 93.2 ± 3.0 | 3.8 ± 0.3 | 0.6 ± 0.1 | 7.2 ± 0.6 |
| 空白组 | 100 | 97.8 ± 2.0 | 97.8 ± 2.0 | 4.5 ± 0.2 | 1.0 ± 0.1 | 9.8 ± 0.4 |

2.3.2 菲律宾蛤仔驯化指标对比

由表 5 可知，实验组蛤仔 30d 存活率 95.6%（对照组 93.2%，高 2.4 个百分点），摄食频率 4.2 次 / 天（对照组 3.8 次 / 天，高 10.5%），滤食速率 0.8mL / 个 · h（对照组 0.6mL / 个 · h），壳长增长率 8.5%（对照组 7.2%），适配性更优，见表 5。

3 讨论

3.1 调质方案可行性分析

“盐碱地可溶性物质 + 眼影级矿物”策略核心优势为“双资源循环”：盐碱地物质天然含基础离子，替代高价海盐降原料成本 60% 以上；眼影级矿物副产物补充微量元素，既解决化妆品固废问题，又弥补传统人工海水短板^[4-5]。优化后人工海水与天然海水离子吻合度超 95%，因盐碱地物质的离子平衡特性及矿物的缓慢释放效应——土壤浸出液 Mg²⁺ 缓冲盐度波动，矿物 Sr²⁺ 通过离子交换缓慢释放，避免微量元素骤变^[9]。

3.2 海鲜驯化效果影响因素

实验组海鲜表现优异，源于两方面：①微量元素适配：Sr²⁺（8.2mg/L）促对虾蜕壳增重，Ca²⁺（410mg/L）适配蛤仔壳质合成^[6]；②水质稳定：pH7.9-8.1 避免应激，DO ≥ 5.5mg/L 保障呼吸代谢。且实验组成本仅为传统方案的 33.7%，适配小规模内陆养殖。

3.3 研究局限性与展望

本研究仅验证凡纳滨对虾、菲律宾蛤仔的适配性，高盐性海鲜（如三文鱼）需进一步研究；长期驯化中矿物缓释稳定性及盐碱地物质季节变化（如雨季离子降）可能影响水质，后续需结合动态调质模型优化，可通过遥感监测盐碱地离子分布、物联网调控矿物添加量提升适用性。

4 结语

“盐碱地水样：土壤浸出液 = 7:3+1.0% 眼影级矿物”

体系，使人工海水关键指标与天然海水吻合度超 95%，符合《海水水质标准（GB3097-1997）》。

优化后人工海水每吨成本 118 元，较传统方案降 66.3%，兼具资源循环与经济优势。

海鲜驯化中，凡纳滨对虾 30d 存活率 92.3%、增重率 15.2%，菲律宾蛤仔存活率 95.6%、摄食频率 4.2 次 / 天，均优于传统方案，验证生态适配性。

研究为内陆低成本人工海水制备及海鲜养殖提供新路径，可推广至黄河三角洲、松嫩平原等盐碱地区域，助力“盐碱地变养殖宝地”。

参考文献：

[1] 中国水产科学研究院. 中国水产养殖产业报告（2024）[R]. 北京：中国农业出版社，2024.

[2] 王浩，张丽，李强. 渤海湾滩涂卤水制备人工海水的技术优化与应用[J]. 水产学报，2022, 46(8): 1350-1358.

[3] 刘敏，陈杰，吴涛. 矿山尾砂提取微量元素对人工海水海鲜养殖的影响[J]. 环境工程学报，2023, 17(6): 1890-1898.

[4] 国家药品监督管理局. 化妆品安全技术规范（2024 年版）[S]. 北京：中国医药科技出版社，2024.

[5] 中国科学院南京土壤研究所. 黄河三角洲盐碱地资源调查与利用研究[R]. 南京：中国科学院南京土壤研究所，2021.

[6] 国家环境保护总局. 海水水质标准（GB3097-1997）[S]. 北京：中国标准出版社，1997.

[7] 农业部渔业局. 凡纳滨对虾养殖技术规范（GB/T26876-2022）[S]. 北京：中国农业出版社，2022.

[8] 山东省海洋局. 菲律宾蛤仔人工养殖水质要求（DB37/T3788-2020）[S]. 济南：山东科学技术出版社，2020.