

天然水环境痕量元素洁净实验室设计实践

苏函¹

(1.河口海岸学国家重点实验室(华东师范大学), 上海 200241)

摘要: 河口海岸学国家重点实验室(华东师范大学)2022年2月正式启用的天然水环境痕量元素洁净实验室,是国内痕量元素领先的优秀实验平台。本研究基于已有洁净室的建造经验,并结合实验室团队负责人张经院士及其课题组的使用建议,从洁净室全塑料的内饰设计、洁净空调系统和全方位的纯水供应等方面入手,探索出了大幅降低洁净室内痕量元素的空白的一整套技术体系。天然水环境痕量元素洁净室目前运行良好。在洁净室内部进行痕量环境测试,洁净度达到千级或百级需求,并且室内痕量元素含量低于 10^{-12} g/g级别,完全满足水体样本痕量元素研究。天然水环境痕量元素洁净室持续服务于国家重大科研需求,产出痕量元素及其同位素研究的重要成果。

关键词: 天然水环境洁净实验室;痕量元素;设计实践;室内空白

中图分类号: P734.2

文献标识码:

A design practice of Clean Laboratory for Trace Elements in Natural Water Environment

Su Han¹

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, 200241, Shanghai, China)

Abstract: The Clean Laboratory for Trace Elements in Natural Water Environment in State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Sciences (East China Normal University) has been officially launched in February 2022, which is a leading experimental platform for trace elements studying in China. This study is based on the construction experience of existing clean rooms, and combined with the suggestions of the laboratory team leader, Academician Zhang Jing, and his research group for use. A complete technical system has been explored to significantly reduce the blank of trace elements in cleaning rooms, starting from the all-plastic interior design of clean rooms, clean air conditioning systems, and comprehensive pure water supply, and so on. The Clean Laboratory for Trace Elements in Natural Water Environment is currently operating well.

Conduct trace environmental testing in the clean room, with a cleanliness level of 1000 or 100 levels, and trace element content indoor below the 10^{-12} g/g level, fully meeting the research requirements for trace elements in water samples. The Clean Laboratory for Trace Elements in Natural Water Environment continues to serve for major national scientific research, producing important achievements in trace element and isotope research.

Keywords: Clean Laboratory for Trace Elements in Natural Water Environment; Trace elements; design practice; trace element content indoor

1 前言

天然水环境痕量元素对陆地、河口、近海和开阔大洋环境中的生物生长等方面扮演着重要的角色。这些痕量元素及同位素在环境中起到的生物地球化学作用，对于认识全球环境迁移转化具有十分重要的意义。天然水体中的痕量元素（包括 Fe、Zn、Cu、Pb、Cd、Co、Cr 等）的含量大都低于 ppb 级，近海水体、特别是大洋水体中这些元素远低于日常实验室环境中元素含量。在采集、预处理和分析过程中，极易受到周围环境的影响，极易被玷污。鉴于此情况，科学家们发现早期研究与最新研究相比，海水中痕量金属含量发生数量级浓度的降低，这得益于样品采集、预处理及分析过程中的痕量操作和痕量环境。因此，建立完善的痕量洁净实验室对痕量元素分析至关重要。

我国痕量元素洁净室大多服务于地质样品（矿物、岩石、沉积物等）的预处理和分析的洁净实验室。但对于低含量的水体样品，特别是开阔大洋水体样品，洁净程度要求更高，需要痕量空白极低才可满足大洋水体样品的分析要求。痕量样品的采集、预处理和仪器分析在洁净度、温湿度控制等方面存在差别，一般会根据具体需求进行个性化的设计。目前，河口海岸学国家重点实验室（华东师范大学）早在 2011 年建立的洁净室，主要用于海水及大洋水体的前处理工作。虽然该前处理洁净室功能性齐全，但面积较小，无法满足大批量样品前处理工作，且国重室需搬迁到新校区，因此，需要开展新的天然水环境痕量元素洁净室的设计研究和实践。

本研究以大幅降低痕量空白为目标，参考国内现有洁净室的现状和存在问题，按照国际上痕量要求标准。通过与河口海岸学国家重点实验室（华东师范大学）海洋生物地球化学团队负责人张经院士及其课题组沟通，给予宝贵的洁净室使用经验和功能性建设经验作为参考。同时结合本研究在长期维护洁净室各设备的经验，极力推进洁净室的建设，最终于 2022

年2月正式成功启用天然水环境痕量元素洁净实验室(简称痕量洁净室)。该洁净室的建设,正在为大洋水体中痕量元素及其同位素的前处理工作做出一定的示范作用,为提升我国在痕量元素及其同位素化学海洋学研究领域的能力具有重要的意义。本文着重介绍痕量洁净室的功能和设计实践。

2 天然水环境痕量元素洁净室功能概况

为满足复杂的前处理步骤和对洁净度的不同要求,痕量洁净室设计为多个功能间,包括万级洁净度的清洗间、万级洁净度的仪器间、千级洁净度的样品处理间、百级洁净度的蒸酸间和百级洁净度的样品处理间等。具体的实验室内部布局和功能可见图1。

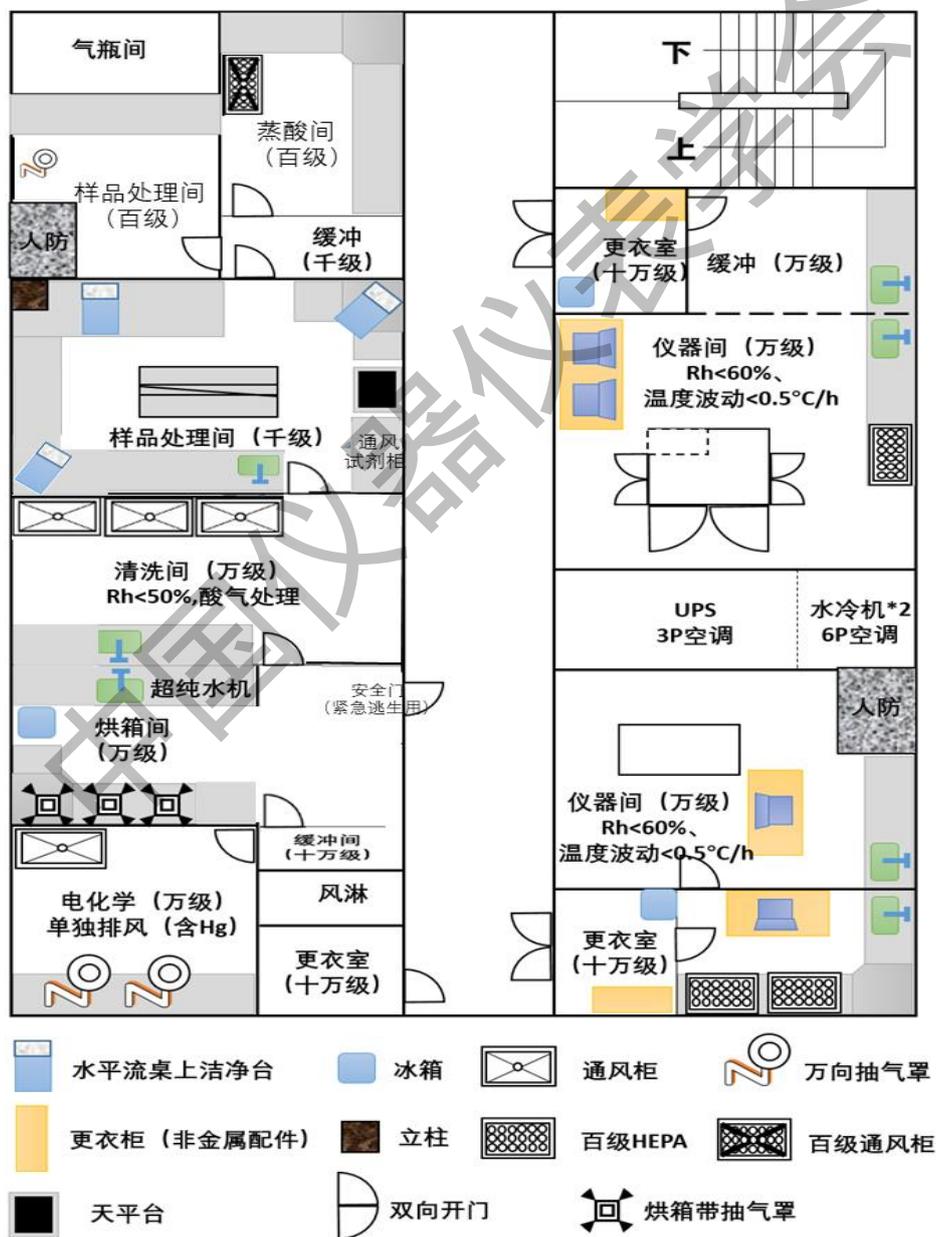


图1 天然水环境痕量元素洁净实验室内部功能图

3 高效的空气质量系统

3.1 洁净空调系统

洁净空调系统是洁净室里最重要的部分，它是洁净室内洁净度、温湿度和压差的重要保证，对于维持室内痕量洁净环境中发挥着不可替代的作用。建造实验功能齐全的痕量洁净室（图 1），不仅要具备制冷、制热、加湿、除湿等功能，还要满足不同实验室对温度、湿度、洁净度的特殊要求。在满足上述痕量洁净室要求的基础上，本研究在净化空气滤网安装、排风设备、加湿设备和自控系统的细节上进行部分改造和创新，尽量做到降低痕量洁净室内金属空白和方便维护的目的。

1) 改造净化空调滤网更换方式，便于定期维护

本痕量洁净室输送的洁净空气，是通过大压头的风机，经过四重不同规格滤网过滤后，才可进入房间内。处于新风进风口的尼龙初筛滤网是更换频率最高的部分，本研究将固定尼龙滤网的装置定制加工成前后固定中间可抽拉的方式固定滤网，从而方便更换和清洗滤网。除新风滤网外，按照前后顺序分别是初级 G4 袋式过滤器、中级 F8 袋式过滤器和高效 HEPA 过滤器。本研究还通过改变初级过滤器和中效过滤器的更换周期，减少高效过滤器更换频率，达到降低痕量洁净室的维护成本。

2) 定制 PP 排风机，承受痕量洁净室内大量的强酸气体的腐蚀

痕量洁净室的清洗间和蒸酸间是强酸环境的重灾区（图 1），这两个实验室内长期处于易挥发的酸性试剂环境中，需要及时排出，同时痕量洁净室内这两个功能间还需要万级的洁净度。因此该实验室内的排风机不仅需要在满足达到万级洁净度的排风量外，还要求排风机本身耐酸腐蚀，减少风机故障的频率，保证痕量洁净室的正常运行。因此，对于排风机的选型和定制过程，根据痕量洁净室的特殊需求，定制聚丙烯（PP）材质的排风机，PP 风叶和 PP 排风机框架，电机需表面涂覆特氟龙材料，以达到耐酸的特性。另外，本研究还特别关注排风机与通风柜的接连处，使用结构胶密封在 PP 焊缝的接缝处，杜绝酸性气体外溢的现象。

3) 定制加湿设备，尽量降低加湿水蒸气的金属空白

痕量洁净室在外界空气干燥的情况下会启动加湿功能，此时加湿器会将水蒸气带入实验室内。常规加湿器是使用自来水喷洒到空调箱内起到加湿的效果。这种做法加湿效率低，浪费大量的水，而且自来水中金属含量高，可能存在增加金属空白的可能。考虑到上述两个

顾虑，本研究定制特殊加湿器，设置纯水管道定时将纯水通入加湿器内，加湿器通过先加热后再排入空调箱水蒸气的方式提高加湿效率的方式，以达到对痕量洁净室加湿的目的。

4) 精密的空调自控系统，满足痕量洁净室恒温恒湿的要求

由于痕量洁净室内实验室功能不同，需要对不同实验室内的特殊需求进行精密的空调自控，以满足不同实验室对洁净度和温湿度精度的不同要求的目的。通过与自控供应商不断沟通，最终确定通过多个空调箱独立控制各实验室的方案，其中包括新风量(控制新风阀开度)、送风量(控制风机频率)、电动水阀(通过调节暖通水管内水流量，来控制空调内盘管的温度)、排风量(与送风量联动，以保障房间内压差正常)等细节。痕量洁净室启用后，本研究对上述设备进行系统的检查和维护，并进行这些设备联动的记录，以保证痕量洁净室内恒温恒湿的洁净环境。

图2展示的是在上述的主要改造方面基础上建立的痕量洁净室空调系统现场图。自痕量洁净室启用以来，本研究根据不同季节的温湿度情况，已建立一套良好的洁净空调系统，同时制定出一套痕量洁净室日常维护体系，包括滤网的更换时间、空调外机和空调箱的日常维护和各电动设备的联动系统，正在稳定的为痕量洁净室提供恒温恒湿的洁净环境。经过严格痕量操作进行检测痕量洁净室内金属元素空白，达到测试极低水体样本中痕量元素的分析要求。



图2 空调外机和洁净空调箱的设备图

3.2 无金属裸露的内装设计

痕量洁净室需要严格降低环境内的金属空白，因此对于洁净室内的实验室内饰的要求也很高，应在各个细节做到无金属外漏，尽量选择非金属材料。基于上述原因，本研究在实验室内室的实验用品和材料上做出调整和改进：

1) 室内的墙体和吊顶外露均为非金属材料

在本痕量洁净室内的墙体和吊顶是采用5cm厚度的岩棉夹心彩钢板上覆PP板，在符合灭火材料需求的情况下满足无金属裸露的条件。该工艺是本研究与施工方多次讨论确定的方

案，既能将 PP 板和彩钢板牢固固定住，同时将结合处用 PP 焊条密封住。这样既可以保障牢固度，同时能保证无金属外漏，起到降低室内金属空白的作用。

2) 洁净室内风道均为 PP 材质

回风口和风管均采用 PP 材料作为主要风道。对于需要用金属螺丝等金属材质固定的部位，采用在金属部位贴覆结构胶的方式，减少金属裸露的风险。通过上述的各方式来降低洁净室内金属空白。

3) 洁净室内家具均采用耐腐蚀的塑料材质

洁净室内经常处于酸性环境，室内材料均需要耐酸腐蚀。本研究在课题组提供的建议基础上，设计一整套非金属耐腐蚀材质的实验家具和基本设施，定制加工成为可用于洁净室内的家具，比如 PP 实验台（无金属焊接，承重能力强）、PP 水槽（上水管和下水管均为非金属材料）、PP 万向罩等。

基于上述对室内材料的改进，现正在启用的无金属洁净室可见图 3。



图 3 痕量金属洁净室不同功能间的内部照片

3.3 全面供应净化水

为了满足痕量洁净室内对金属空白的痕量要求，实验室内供应纯水就是不可缺少的重要部分。因此，采用大型纯水机，水质达到 $15\text{M}\Omega$ 以上，根据不同实验室的用水要求，精确铺

设低金属空白耐腐蚀的纯水管道，完全满足实验室内实验用水。图 4 展示的是痕量洁净室的纯水间。



图 4 痕量洁净室纯水间

4 结论

本研究通过针对洁净空调系统、无金属材质内饰，以及全方位纯水供应等方面进行针对性的改造，现已建成的天然水环境痕量金属洁净实验室，室内洁净条件完全满足样品痕量分析的要求，并且已制定严格的洁净室日常维护体系，正在稳定的为洁净室提供恒温恒湿的洁净环境。天然水环境痕量元素洁净室持续服务于国家重大科研需求，产出痕量元素及其同位素研究的重要成果，为我国痕量元素分析的科研事业贡献力量。

5 致谢

天然水环境痕量元素洁净实验室受华东师范大学和河口海岸学国家重点实验室(华东师范大学)的项目资助。感谢海洋生物地球化学团队负责人张经院士及其课题组的指导和帮助。感谢河口海岸学国家重点实验室江红老师和瞿建国老师的帮助。