

热带滨海景观设施的腐蚀特征及其影响因素简析

容宇媚^{1a}, 张际标^{1a, 2}, 陈春亮^{1b}, 邓培昌^{1a}, 胡杰珍^{1c}

(1. 广东海洋大学 a. 化学与环境学院 b. 分析测试中心 c. 机械与动力工程学院, 广东 湛江 524088;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 广东 湛江 524000)

摘要: **目的** 研究热带滨海地区景观设施的腐蚀特征及影响因素。**方法** 通过宏观调查和微区检查的方法, 对比分析湛江、珠海和深圳 3 个典型的热带滨海城市景观设施腐蚀状况的差异, 总结热带滨海景观设施的腐蚀特征。**结果** 缝隙腐蚀和焊缝腐蚀是热带滨海景观设施发生频次最高的腐蚀类型, 其中出现缝隙腐蚀的频次平均为 66.6%, 出现焊缝腐蚀的频次平均为 53.2%。随着离海岸距离的增大, 景观设施腐蚀程度减小, 其中景观设施在 200 m 发生大面积腐蚀的程度比 100 m 平均减轻 22.1%。景观设施向海面发生严重腐蚀的比例比背海面高, 其中景观设施向海面在 100 m 发生腐蚀比背海面严重, 比 200 m 平均增高 10.4%。**结论** 热带滨海地区景观设施的腐蚀差异与设施离海距离、设施朝向以及热带海洋大气环境要素(相对湿度和大气污染物浓度)密切相关。

关键词: 热带滨海地区; 景观设施; 腐蚀特征; 大气腐蚀; 环境因素

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2021)07-0062-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.07.009

Corrosion Characteristics of Tropical Coastal Structures and Analyses of Their Influencing Factors

RONG Yu-mei^{1a}, ZHANG Ji-biao^{1a,2}, CHEN Chun-liang^{1b}, DENG Pei-chang^{1a}, HU Jie-zhen^{1c}

(1. a. College of Chemistry and Environment, b. Analysis and Testing Center, c. College of Mechanical and Power Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524000, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the corrosion characteristics and influencing factors of structures in tropical coastal ar-

收稿日期: 2021-01-01; 修订日期: 2021-02-18

Received: 2021-01-01; Revised: 2021-02-18

基金项目: 广东省科技计划项目(2016A020225004); 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)资助项目(ZJW-2019-08); 广东海洋大学冲一流和创新强校工程项目(231419018, 230420007)

Fund: Guangdong Science and Technology Plan Project (2016A020225004); Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang) Funded Project (ZJW-2019-08); Special Fund for Transforming into a First-class University (231419018) and University Improvement through Innovation Project (230420007) of Guangdong Ocean University.

作者简介: 容宇媚(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋资源与环境。

Biography: RONG Yu-mei (1994—), Female, Master student, Research focus: marine resources and environment.

通讯作者: 张际标(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋资源与环境。

Corresponding author: ZHANG Ji-biao (1971—), Male, Ph. D, Associate professor, Research focus: marine resources and environment.

引文格式: 容宇媚, 张际标, 陈春亮, 等. 热带滨海景观设施的腐蚀特征及其影响因素简析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 062-069.

RONG Yu-mei, ZHANG Ji-biao, CHEN Chun-liang, et al. Corrosion characteristics of tropical coastal structures and analyses of their influencing factors[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(7): 062-069.

cas. Through micro-scale investigation and microzone inspection in three typical coastal cities of Zhanjiang, Zhuhai, and Shenzhen, the corrosion characteristics and differences of structures are compared and summarized. The survey results show that crevice corrosion and weld corrosion are the corrosion types of highest occurrence frequency for tropical coastal structures. The average frequency of crevice corrosion is about 66.6%, and the average frequency of weld corrosion is about 53.2%. With the increase of the distance from the coastline, the average decrease of corrosion degree from structures 100 m away from coastlines to structures 200 m away from coastlines is 22.1%. The serious corrosion proportion on the side of structures near the sea is higher than the far side of structures, and the average serious corrosion proportion difference between near sides and far sides of structures 100 m away from the sea is 10.4% higher than those 200 m away from the sea on average. The corrosion difference of structures in tropical coastal areas is closely related to the distance from the sea, the orientation of structures and the environmental factors (relative humidity and air pollutant concentration) of the tropical marine atmosphere.

KEY WORDS: tropical coastal area; coastal structures; corrosion characteristics; atmospheric corrosion; environmental factors

热带滨海地区大气具有高温、高湿、高盐雾的热带气候环境特点,是金属材料和设施遭受大气腐蚀破坏的重灾区。随着我国经济社会的高速发展和人民生活水平的快速提升,民众对健身和娱乐的需求日益旺盛,为此滨海地区健身、游乐和观赏设施的数量和规模均得到快速的发展。由于对各类金属设施在热带海洋环境中的腐蚀状况知之甚少,滨海景观设施的选材和维护长期依赖经验,导致大量的景观设施由于腐蚀破损而快速丧失其娱乐和景观功能,甚至酿成重大安全事故。

目前,国内对滨海地区设施腐蚀方面的研究集中在某一种或几种金属及其合金材料的腐蚀状况、腐蚀规律以及防腐蚀措施和防腐技术等方面。例如滨海地区大气环境下金属工艺材料腐蚀行为^[1-3]、滨海地区输电铁塔、海上风电塔架^[4-6]、现场机械设备^[7]及电厂钢结构^[8-9]等防腐蚀研究。国外对滨海地区大气腐蚀的研究主要涉及金属设施腐蚀失效的预测方法^[10]、金属腐蚀机理^[11-12]、模拟金属及合金的腐蚀行为^[13]、金属及合金热喷涂层的防护性能^[14-16]等。影响腐蚀的环境要素有多种,学者们通过研究各类设施在海洋大气环境下的腐蚀特征,认为 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、湿度以及尘粒是滨海地区大气腐蚀的主要因素^[17-23]。

综上所述,国内外对滨海地区设施腐蚀方面的研究多以某一种或一类金属及其合金材料为研究对象,探讨其腐蚀行为,对滨海城市景观设施在热带海洋环境中的总体腐蚀状况的调查及研究很少。为此,文中以广东省 3 个典型热带滨海城市(湛江、珠海和深圳)为调查目标,围绕各类滨海景观设施展开大气腐蚀调查,以了解滨海景观设施的腐蚀状况,探寻影响景观设施大气腐蚀的主要环境因素,为滨海景观设施的设计和选材、养护及安全管理提供技术支持。

1 材料和方法

1.1 调查地点

在湛江选取了 3 个调查地点,分别为湛江海滨公

园(Zhanjiang Seashore Park, ZJSP)、金沙湾(Jinsha Bay, JSB)和东海岛龙海天浴场(Longhaitian Bath, LHTB);在珠海选取了 5 个调查地点,分别为珠海海滨公园(Zhuhai Seashore Park, ZHSP)、景山公园(Jingshan Park, JSP)、野狸岛公园(Yelidao Park, YLDP)、珠海大剧院(Zhuhai Grand Theatre, ZHGT)和格力海岸海滨公园(Gree Coast Seashore Park, GCSP);在深圳选取了 6 个调查地点,分别是深圳湾公园(Shenzhen Bay Park, SZBP)、深圳湾运动公园(Shenzhen Bay Sports Park, SZBSP)、深圳人才公园(Shenzhen Talent Park, SZTP)、女娲海滨公园(Nuwa Seashore Park, NWSP)、东和公园(Donghe Park, DHP)和盐田区海滨健身广场(Yantian District Seashore Fitness Plaza, YTSFP)。各热带滨海城市的具体调查位置分布如图 1 所示。

1.2 调查内容

本次调查的内容包括每个调查点的经纬度、各设施距海岸线的距离、设施腐蚀部位、腐蚀类型以及腐蚀程度。参考 Champion 的腐蚀标准样图,根据单位面积中腐蚀面积的大小,将腐蚀面积和尺寸定义为:极微小(0.0006 cm^2)、微小(0.003 cm^2)、小(0.016 cm^2)、中(0.08 cm^2)、较大(0.4 cm^2)、大(2.0 cm^2)和很大(10.0 cm^2)等 7 种类型。根据这一标准,定义每个设施被腐蚀的程度,并比较了设施向海面 and 背海面腐蚀状况的差异。

在湛江 3 个站位中,调查了 47 种设施;在珠海 5 个站位中,调查了 55 种设施;在深圳 6 个站位中,调查了 66 种设施。将调查的金属设施分为游乐设施、体育健身设施、美化设施(钢雕、铜雕等)、休息设施(长椅、凳子)、公共卫生设施(垃圾桶)、信息设施(导向牌、警示牌等)、服务设施和交通设施等 8 大类。各个城市中所调查的设施类型及各类设施的占比情况如图 2 所示。据图 2 显示,三个城市调查的设施以游乐和体育健身设施为主,其中珠海的景观设施中游乐设施占据很大的比例。

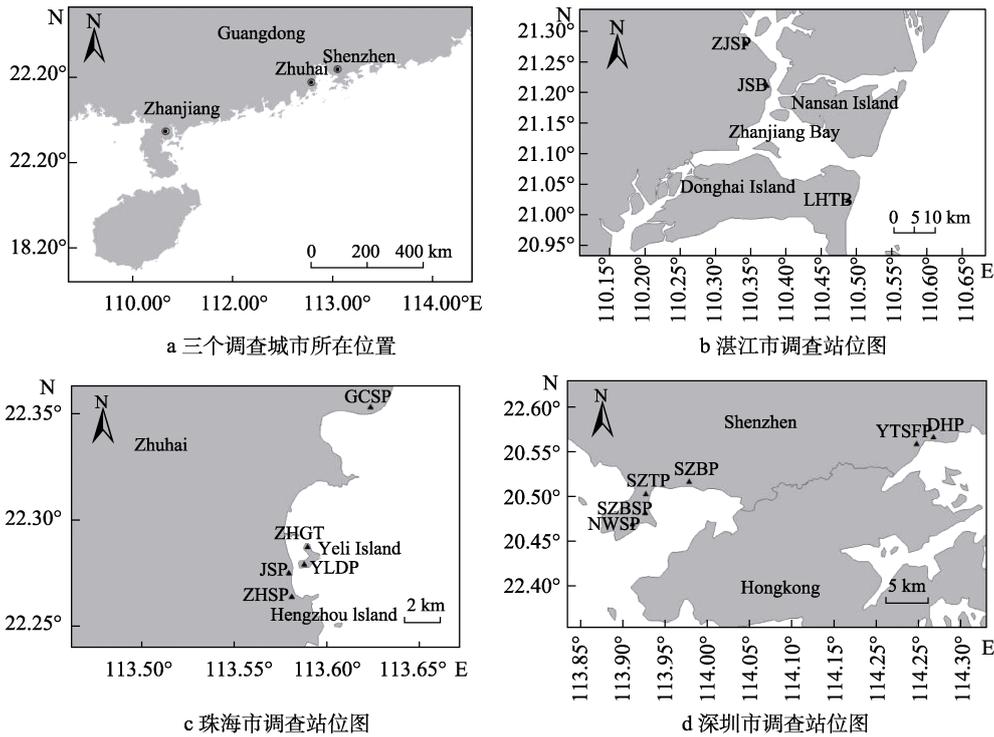


图 1 广东省三个调查城市所在位置和调查站位分布

Fig.1 Survey sites and stations of three cities in Guangdong province: a) location of three survey cities in Guangdong province; b) survey stations in Zhanjiang city; c) survey stations in Zhuhai city; d) survey stations in Shenzhen city

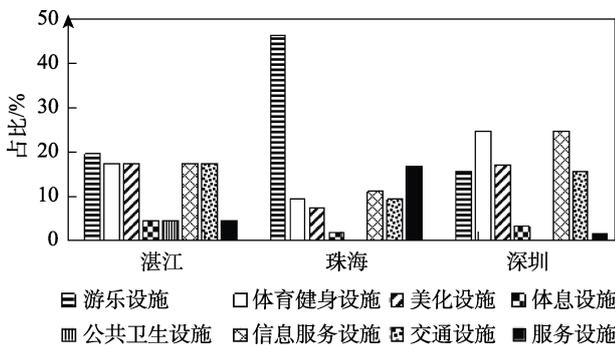


图 2 湛江、珠海、深圳三个城市调查的各类景观设施占比情况

Fig.2 Type proportions of landscape facilities surveyed in three cities of Zhanjiang, Zhuhai and Shenzhen

1.3 调查分析方法

调查分析方法分为宏观调查、微区检查方法和数据处理方法。宏观调查中，每个调查站位的经纬度用 GPS 定位仪定位，并记录。每种设施离海岸线的距离在高清卫星地图下载器 (BIGEMAP) 上定位，并测定。用肉眼和高清相机 (Nikon 1J5) 观察各景观设施的微区腐蚀状态、类型和受腐蚀部位，并借助软尺测量计算腐蚀的面积。最后根据 Champion 的标准图谱法计算设施腐蚀面积的大小，定义设施表面腐蚀的程度。

各城市调查站位图用 ARCGIS 制作，用 excel 进行数据统计和分析，并用 Origin 绘制各数据变化图。

2 结果与分析

2.1 广东省滨海景观设施的主要腐蚀类型

广东省滨海景观设施表面主要以涂层和金属材料自身的致密氧化膜保护层作为防腐措施 (见图 3)。除此之外，珠海及深圳的设施还采取了部分其他防腐措施。例如在珠海调查的旋转飞椅类游乐设施中，有钢链连接部分包裹了塑料保护层，在深圳调查的游乐设施中，有螺丝钉连接部位均在螺丝钉表面套上一个胶帽，使螺丝钉隔绝大气环境。通过对比可知，珠海和深圳的景观设施的防腐措施比湛江多。

通过调查统计 3 个城市各类设施的腐蚀类型，发现全面腐蚀、磨损腐蚀、缝隙腐蚀、焊缝腐蚀及点蚀是常见的腐蚀类型。其中缝隙腐蚀和焊缝腐蚀发生在各类型设施内；而磨损腐蚀主要存在于游乐设施和体育健身设施中；全面腐蚀出现频次较小，只在湛江调查站位中 25% 的美化设施、50% 的交通设施和珠海调查站位中 25% 的美化设施中出现，如图 4a—c 所示。根据统计分析 3 个调查城市中景观设施出现不同腐蚀类型的频次 (见图 4d) 可知，湛江、珠海及深圳的景观设施发生缝隙腐蚀的频次分别是 63.8%、61.8%、74.2%，发生焊缝腐蚀的频次分别是 53.2%、56.4%、50%，可见缝隙腐蚀和焊缝腐蚀景观设施的主要腐蚀类型。由于设施的连接形式多样及设施接地安装的缘故，设施发生缝隙腐蚀和焊缝腐蚀的部位主要存在于设施的凹槽部位、镶嵌部位、钢材转折部位、

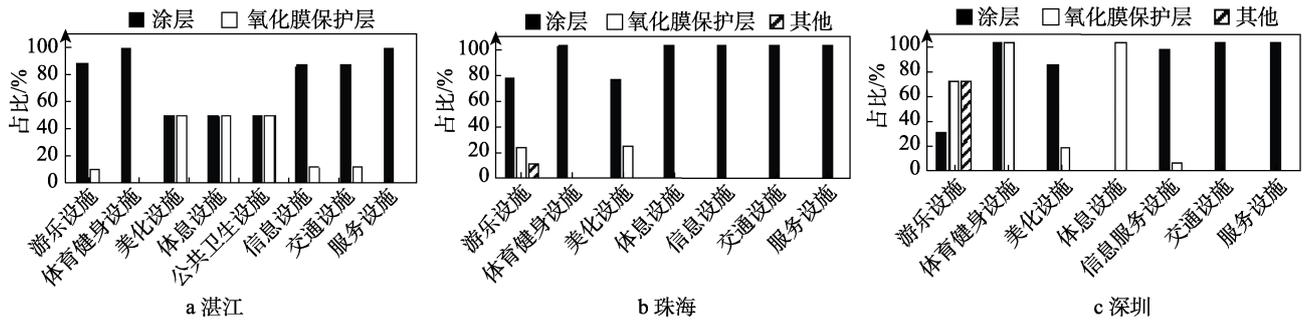


图 3 3 个热带滨海城市景观设施防腐措施

Fig.3 Anti-corrosion measures of landscape facilities in three tropical cities: a) Zhanjiang; b) Zhuhai; c) Shenzhen

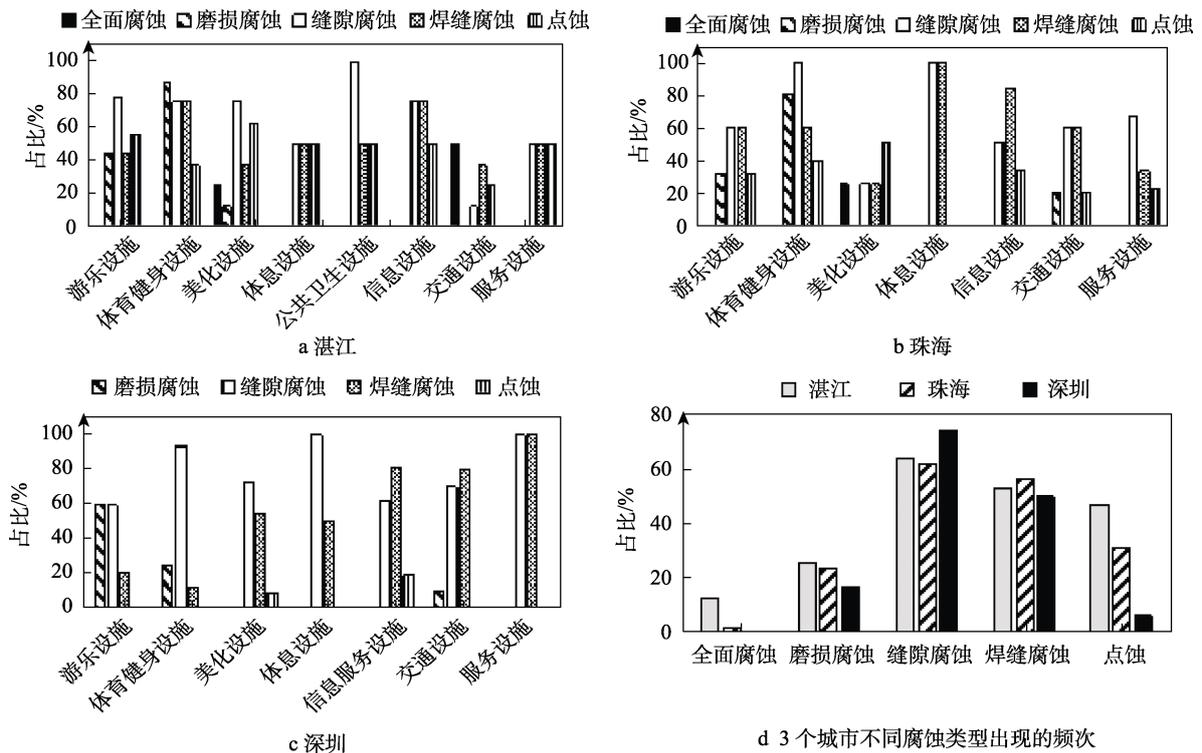


图 4 3 个热带滨海城市景观设施发生腐蚀的类型和频次

Fig.4 Corrosion types and occurrence frequency of landscape facilities in three tropical coastal cities: a) Zhanjiang; b) Zhuhai; c) Shenzhen; d) occurrence frequency of different types of corrosion in three cities

构件连接部位、焊接部位、与地面连接部位等易遭受腐蚀的脆弱部位；磨损腐蚀主要出现在有轨道滑行类游乐设施的轨道表面、体育健身设施扶手、脚踏部位；点蚀主要出现在设施表面。

2.2 离海不同距离景观设施的腐蚀特征

根据 Champion 的腐蚀标准样图，定义了景观设施腐蚀程度的类型：极微小（0.0006 cm²）、微小（0.003 cm²）、小（0.016 cm²）、中（0.08 cm²）、较大（0.4 cm²）、大（2.0 cm²）和很大（10.0 cm²）。通过比较 3 个调查城市的景观设施腐蚀程度与离海距离远近的关系（见图 5a—c）可知，在 0~100 m、101~200 m、201~300 m 等 3 个离海距离范围内，湛江、珠海及深圳的景观设施发生很大面积腐蚀的平均比例分别是 7.2%、2.8%、0%；发生大面积腐蚀的平均比例分别是 27.7%、5.6%、23.8%；发生较大腐

蚀面积的平均比例分别是 10.6%、25%、4.8%。3 个城市的景观设施发生很大面积腐蚀的平均比例随着离海距离的增大而减小，发生大及较大面积腐蚀的平均比例随着离海距离的增大先增大再减小。

统计 3 个城市景观设施腐蚀程度的占比情况（图 5d）可知，湛江、珠海、深圳的景观设施发生很大面积腐蚀的比例分别是 12.8%、1.8%、0%；发生大面积腐蚀的比例分别是 42.6%、20%、4.5%；发生较大面积腐蚀的比例分别是 17%、18.2%和 9.1%。根据 3 个城市腐蚀程度的占比情况，认为湛江发生大面积的腐蚀程度的比例比珠海及深圳高。

对比总结 3 个城市的景观设施的腐蚀特征，认为景观设施的腐蚀程度具有随着离海距离的增大而减小的趋势。3 个城市景观设施的腐蚀程度有所区别，

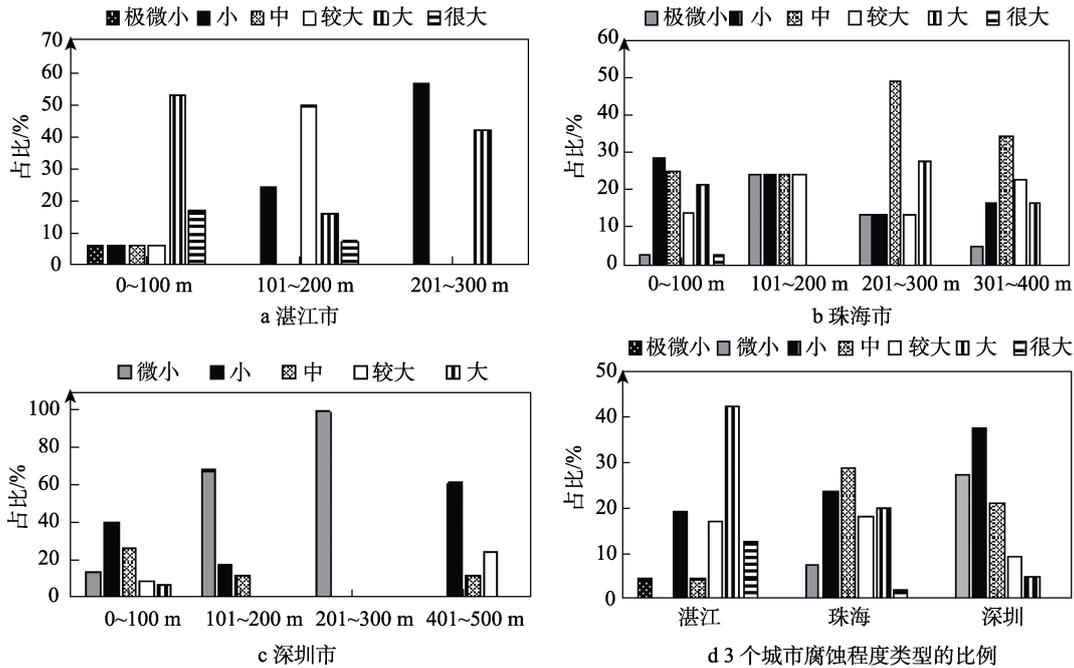


图5 3个滨海城市景观设施腐蚀程度与离海远近的关系

Fig.5 Relationship between facility corrosion and distance from the sea in three coastal cities: a) Zhanjiang; b) Zhuhai; c) Shenzhen; d) proportion of corrosion types in three cities

表现为湛江的景观设施腐蚀程度比珠海和深圳大。

2.3 不同向海方向下景观设施的腐蚀特征

通过对比景观设施朝海面 and 背海面腐蚀面积的差异, 统计分析了3个城市14个调查站位的景观设施朝向的腐蚀状况, 如图6所示。可以看出, 湛江市的3个调查站位中, 景观设施向海面出现大面积腐蚀的概率更高, 湛江海滨公园(80%)、龙海天浴场(85.7%)、金沙湾(93.8%)的景观设施向海面腐蚀面积比背海面大。珠海市的5个调查站位中, 有66.7%的景观设施向海面 and 背海面的腐蚀面积大小无明显差异, 其余4个调查站位的景观设施向海面出现大面积腐蚀的比例更高。深圳市的6个调查站位中, 有2个站位的景观设施向海面出现大面积腐蚀比例高, 分别为深圳湾公园调查的所有景观设施和深圳湾运动

公园中84.6%的景观设施; 有3个调查站位中景观设施向海面 and 背海面的腐蚀面积大小无明显差异的比例高, 分别为深圳人才公园(53.8%)、女娲海滨公园(70%)、东和公园(100%)。

通过分析3个城市景观设施腐蚀程度与朝向及离海远近的关系(见图7), 了解到景观设施在0~100 m、101~200 m、201~300 m、301~400 m、401~500 m的距离范围内, 向海面腐蚀面积比背海面大的比率分别是79.2%、68.8%、53.3%、35.3%、0%, 向海面 and 背海面腐蚀面积无明显差异的比率分别20.8%、25%、33.3%、58.8%、100%。认为向海面腐蚀面积大的比率随着离岸距离的增大而减小, 而景观设施向海面 and 背海面腐蚀面积无明显差异的比率随着离岸距离的增大而增大。汇总14个调查站位的景观设施在不同向海方向下的腐蚀特征, 认为景观设施发生向海面腐蚀大的

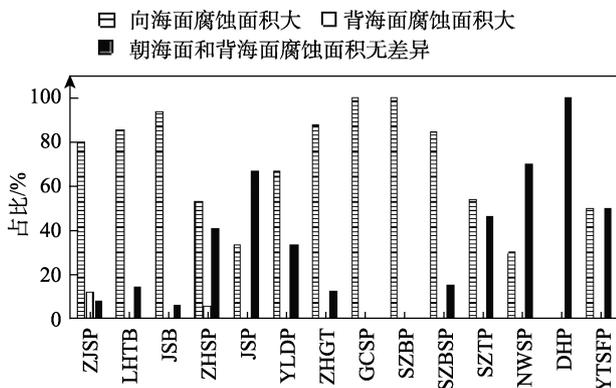


图6 景观设施腐蚀程度与朝向的关系

Fig.6 Relationship between corrosion degree and orientation of landscape facilities

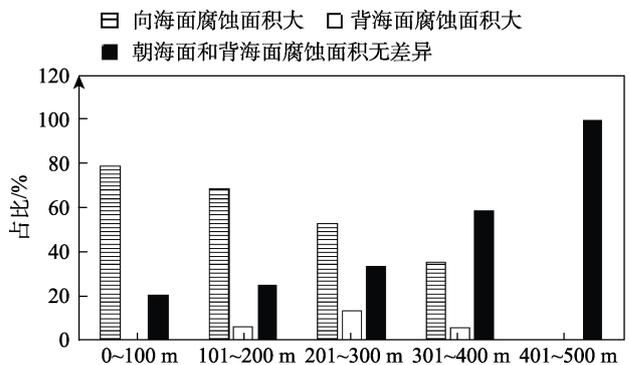


图7 3个城市景观设施腐蚀程度与朝向、离海远近的关系
Fig.7 The relationship between the corrosion degree of landscape facilities and their orientation, distance from the sea in three cities

概率更高，且随着离海距离的增大而减小。

3 影响滨海景观设施腐蚀的环境因素简析

气象要素和污染物是主要的大气腐蚀影响因素。气象因素包括温度、相对湿度、表面湿润时间、降雨和光照等。大气污染物包括 SO₂、海盐粒子 (Cl⁻)、NO_x、H₂S、NH₃、无机物和有机物尘埃等^[20]。为此，结合调查城市的相对湿度、大气污染物浓度与设施的腐蚀状况，分析热带滨海大气环境要素对景观设施的腐蚀影响。

3.1 相对湿度

相对湿度是影响金属大气腐蚀的重要因素之一。大气中相对湿度越大，空气中所含的气态水达到饱和而凝结成液态水附着在金属表面结露越容易，产生冷凝作用越明显，腐蚀速率也相应增加^[20]。根据国家气象信息中心的历史气候背景^[24]，可获得湛江、珠海和深圳 1981—2010 年的累年各月平均相对湿度（见图 8），其中湛江的年平均相对湿度为 81.33%，珠海约为 79.75%，深圳约为 74.92%。每种金属都有发生腐蚀的临界相对湿度，如碳钢的腐蚀临界相对湿度值约为 65%^[21]。当金属表面液膜溶解有其他腐蚀性介质时，金属发生腐蚀的临界相对湿度会下降。3 个城市的年平均相对湿度都在 70% 以上，其中，湛江和珠海属于潮湿型环境 (RH>75%)，金属设施在潮湿环境下的腐蚀速率增加，这与图 5d 中湛江和珠海景观设施的腐蚀程度比深圳大的结果相一致的。

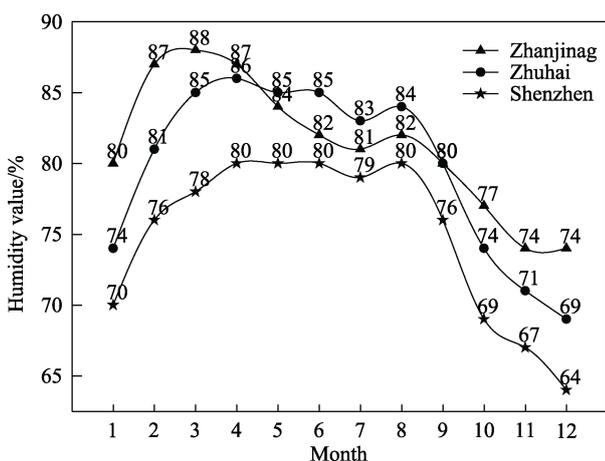


图 8 湛江、珠海和深圳 1981 年到 2010 年的月平均相对湿度

Fig.8 Monthly average of relative humidity in different coastal cities of Zhanjiang, Zhuhai and Shenzhen from 1981 to 2010

3.2 大气污染物含量 (Cl⁻、NO_x、SO_x)

依据大气中含有的腐蚀性介质种类，可以把大气

环境分为 2 类^[23]，即含有 Cl⁻ 的海岸大气以及含有 SO₂ 的工业大气。我国的整个东南沿海经济区，已发展为既含有 Cl⁻ 又含有 SO₂ 的工业-海岸大气区^[25]。文中调查的湛江、珠海和深圳处于东南沿海经济区内，滨海设施受到工业环境因子和海洋环境因子的共同影响。

1) 工业大气腐蚀性因子。工业大气腐蚀性因子包括 SO₂、SO₃ 和 NH₃ 等，以 SO₂ 为主^[26]。在工业大气污染中，SO₂ 影响腐蚀的机理为：SO₂ 被薄液膜吸附形成 H₂SO₃，进而被氧化成 H₂SO₄^[25]，H₂SO₄ 是强酸，具有强腐蚀性，会促使活泼的金属溶解，使金属的腐蚀速率增大。氯化物的主要腐蚀性成分为 NO₂⁻。有研究表明^[27]，当 NO₂⁻ 浓度足够高时，能使钢筋表面形成完整的钝化膜，起到保护作用；用量不足时，可能使钢筋表面形成小阳极、大阴极的腐蚀电池，反而加速金属腐蚀。根据 2014—2018 年湛江、珠海和深圳等官方环境质量报告（表 1—3）可知，湛江的 SO₂ 浓度 (11.2 μg/m³) 比珠海 (8.6 μg/m³) 和深圳 (8.0 μg/m³) 略高，而珠海 (31.2 μg/m³) 和深圳 (32.0 μg/m³) 的 NO₂ 浓度大约是湛江 (15.4 μg/m³) 的 2 倍。

2) 海岸大气腐蚀性因子。海岸大气中的腐蚀性因子主要是氯离子的含量。海盐中的 Cl⁻ 会引起金属钝化膜破裂，溶于液膜中形成强腐蚀介质。当其浓度超过氯离子的临界浓度时，发生点蚀，促进阳极溶解过程^[28-29]。有研究表明^[30-31]，热带海岛大气中氯离子沉降速率较大，随着离海距离的增加，盐雾的浓度及沉积速率均会下降。

表 1 湛江市 2015—2018 年污染物含量
Tab.1 Pollutant content in Zhanjiang city from 2015 to 2018 μg/m³

污染物	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	平均值
SO ₂	13.0	10.0	10.0	14.0	9.0	11.2
NO ₂	15.0	15.0	14.0	19.0	14.0	15.4

表 2 珠海市 2015—2018 年污染物含量
Tab.2 Pollutant content in Zhuhai city from 2015 to 2018 μg/m³

污染物	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	平均值
SO ₂	11.0	9.0	9.0	7.0	7.0	8.6
NO ₂	33.0	29.0	32.0	32.0	30.0	31.2

表 3 深圳市 2015—2018 年污染物含量
Tab.3 Pollutant content in Shenzhen city from 2015 to 2018 μg/m³

污染物	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	平均值
SO ₂	9.0	8.0	8.0	8.0	7.0	8.0
NO ₂	35.0	33.0	33.0	30.0	29.0	32.0

结合大气污染物腐蚀影响机制及滨海景观设施腐蚀特征分析，认为湛江的滨海景观设施发生腐蚀程度大的比例更高，可能与湛江大气环境中相对湿度

高、SO₂含量较高和NO₂⁻含量较低有关。根据设施腐蚀程度与距离海岸远近的关系分析可知,随着设施离海岸距离的增大,设施腐蚀程度较小,这一规律与Cl⁻随着离海岸距离的增大,沉降速率减小相一致^[22],认为Cl⁻是影响设施腐蚀程度的一个重要因素。

4 结论

通过对广东省3个热带滨海城市的景观设施开展腐蚀特点调查和统计分析,获得了滨海景观设施在热带大气环境中的主要腐蚀特征:

1) 热带滨海景观设施易遭受海洋大气腐蚀,腐蚀主要分布在焊接部位、螺丝钉连接部位、凹槽部位、有缝隙的部位、镶嵌部位、钢材转折部位、构件连接部位、与地面连接部位等腐蚀脆弱部位,其中景观设施发生缝隙腐蚀的频次平均为66.6%,焊缝腐蚀的频次平均为53.2%,二者是景观设施腐蚀的主要类型。

2) 景观设施的腐蚀程度与景观设施离海距离、朝向有紧密的联系。随着离海距离的增大,腐蚀程度减小,向海面 and 背海面腐蚀程度无差异的比率增大。

3) 相对湿度、大气污染物含量影响腐蚀的规律与景观设施腐蚀程度的结果相对应。相对湿度及大气污染物含量越高,腐蚀程度越大,认为相对湿度及大气污染物含量是影响热带滨海景观设施腐蚀状况的重要环境要素。

参考文献:

- [1] 唐其环,李军念,代红,等.万宁滨海与西沙群岛大气腐蚀性对比研究[J].装备环境工程,2010,7(6):1-4.
TANG Qi-huan, LI Jun-nian, DAI Hong, et al. Comparative study on atmospheric corrosivity between Wanning coast and Xisha islands[J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(6): 1-4.
- [2] 胡晓黎,韩方运,牛林,等.海洋和沿海环境铝大气腐蚀特征及影响因素[J].腐蚀与防护,2011,32(11):849-853.
HU Xiao-li, HAN Fang-yun, NIU Lin, et al. Characteristics and influencing factors of atmospheric corrosion of aluminum in marine and coastal environments[J]. Corrosion and protection, 2011, 32(11): 849-853.
- [3] 时凌琳,彭兴黔,乔长贵.钢结构的近海大气腐蚀研究[J].福建建筑,2008(2):4-6.
SHI Ling-lin, PENG Xing-qian, QIAO Chang-gui. Research on Offshore Atmospheric Corrosion of Steel Structures [J]. Fujian architecture, 2008(2): 4-6.
- [4] 陈川,黄海军,王俊,等.我国湿热海上风电大气区金属重防腐涂料的性能研究[J].装备环境工程,2015,12(4):89-94.
CHEN Chuan, HUANG Hai-jun, WANG Jun, et al. Study on the performance of heavy metal anticorrosive coatings in atmospheric regions of hot and humid offshore wind

- power in China[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(4): 89-94.
- [5] 刘峰,宋弘清,黄政然,等.沿海地区输电铁塔防护涂层耐腐蚀性能研究[J].装备环境工程,2015,12(4):76-81.
LIU Feng, SONG Hong-qing, HUANG Zheng-ran, et al. Corrosion resistance of protective coatings for transmission towers in coastal areas[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 76-81.
- [6] 张晓东,王俊,揭敢新,等.我国东南沿海海上风电塔架防护涂装体系设计与评价思考[J].装备环境工程,2013,10(5):7-10.
ZHANG Xiao-dong, WANG Jun, JIE Gan-xin, et al. Thoughts on design and evaluation of protective coating system for offshore wind power towers in China's south-east coast[J]. Equipment environmental engineering, 2013, 10(5): 7-10.
- [7] 贾海涛,杜岩.滨海项目现场机械设备防腐问题与应对办法[J].山西建筑,2017(14):236-237.
JIA Hai-tao, DU Yan. Anti-corrosion problems and countermeasures of mechanical equipment in coastal project[J]. Shanxi architecture, 2017(14): 236-237.
- [8] 王路东,张鼎明,李威力,等.热带滨海电厂腐蚀控制综合技术[J].全面腐蚀控制,2013(8):69-72.
WANG Lu-dong, ZHANG Ding-ming, LI Wei-li, et al. Comprehensive technology for corrosion control of tropical coastal power plant[J]. Total corrosion control, 2013(8): 69-72.
- [9] 秦德华,李坤强.滨海电厂控制系统电器设备的大气腐蚀与防护[J].广东电力,2011,24(10):88-91.
QIN De-hua, LI Kun-qiang. Atmospheric corrosion and protection of electrical equipment of binhai power plant control system[J]. Guangdong electric power, 2011, 24(10): 88-91.
- [10] HÁJKOVÁ K, ŠMILAUER V, JENDELE L, et al. Prediction of reinforcement corrosion due to chloride ingress and its effects on serviceability[J]. Engineering structures, 2018, 174: 768-777.
- [11] AMALA J, EHSAN B, ALIREZA A, et al. Rebar corrosion detection, protection, and rehabilitation of reinforced concrete structures in coastal environments: A review[J]. Construction and building materials, 2019, 224: 1026-1039.
- [12] MORENO J D, BONILLA M, ADAM J M, et al. Determining corrosion levels in the reinforcement rebars of buildings in coastal areas. A case study in the Mediterranean coastlines[J]. Construction and building material, 2015, 100: 11-21.
- [13] TANAKA H, INOUE M, ISHIKAWA T, et al. Simulating study of atmospheric corrosion of steels in a coastal industrial zone: Effect of SO₃²⁻ on the formation of β-FeOOH rust particles synthesized from FeCl₃ solutions[J]. Corrosion science, 2016, 112: 241-245.
- [14] KATAYAMA H, KURODA S. Long-term atmospheric corrosion properties of thermally sprayed Zn, Al and

- Zn-Al coatings exposed in a coastal area[J]. Corrosion science, 2013, 76: 35-41.
- [15] LEBOZEC N, THIERRY D, PERSSON D, et al. Influence of microstructure of zinc-aluminium-magnesium alloy coated steel on the corrosion behavior in outdoor marine atmosphere[J]. Surface & coatings technology, 2019, 374: 897-909.
- [16] GUEDES S C, GARBATOV Y, ZAYED A, et al. Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere[J]. Corrosion science, 2009, 51(9): 2014-2026.
- [17] 刘军, 丁铸. 滨海气候下混凝土结构腐蚀环境特征研究[J]. 广东土木与建筑, 2007(9): 24-26.
LIU Jun, DING Zhu. Study on Corrosion Environment Characteristics of Concrete Structures in Coastal Climate[J]. Guangdong civil engineering and construction, 2007(9): 24-26.
- [18] 张菲菲. 深圳滨海建筑物表层氯离子沉积规律研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
ZHANG Fei-fei. Study on chloride ion deposition on the surface of Shenzhen coastal buildings[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016.
- [19] 刘争春. 沿海大气环境下典型金属材料初期腐蚀行为研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
LIU Zheng-chun. Study on the initial corrosion behavior of typical metal materials in the coastal atmospheric environment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [20] 李晓刚. 金属大气腐蚀初期行为与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
LI Xiao-gang. Initial behavior and mechanism of atmospheric corrosion of metals[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [21] 付安庆, 邢少华, 张胜涛, 等. 交流阻抗技术监测碳钢在海洋大气中的腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(4): 243-246.
FU An-qing, XING Shao-hua, ZHANG Sheng-tao, et al. AC impedance monitoring of carbon steel corrosion in the marine atmosphere[J]. Corrosion science and protection technology, 2007, 19(4): 243-246.
- [22] CORVO F, PEREZ T, DZIB L R, et al. Outdoor-indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres[J]. Corrosion science, 2007, 50(1): 220-230.
- [23] MENDOZA A R, CORVO F. Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel[J]. Corrosion science, 1999, 41(1): 75-86.
- [24] 中国气象数据网[DB/OL]. <http://data.cma.cn/data/weatherBk.html>.
China meteorological data network[DB / OL]. <http://data.cma.cn/data/weatherBk.html>.
- [25] 陈文娟, 郝龙, 董俊华, 等. 模拟工业-海岸大气中 SO₂ 对 Q235B 钢腐蚀行为的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(7): 802-810.
CHEN Wen-juan, HAO Long, DONG Jun-hua, et al. Effect of SO₂ on the corrosion behavior of Q235B steel in simulated industrial-coastal atmosphere[J]. Acta metallurgica sinica, 2014, 50(7): 802-810.
- [26] 柯伟, 王振尧, 韩薇. 大气腐蚀与装备环境工程[J]. 装备环境工程, 2004, 1(1): 1-6.
KE Wei, WANG Zhen-yao, HAN Wei. Atmospheric corrosion and equipment environmental engineering[J]. Equipment environmental engineering, 2004, 1(1): 1-6.
- [27] 乔冰, 杜荣归, 林昌健, 等. NO₂⁻ 和 Cl⁻ 对模拟混凝土孔隙液中钢筋腐蚀行为的影响[J]. 金属学报, 2010, 46(2): 245-250.
QIAO Bing, DU Rong-gui, LIN Chang-jian, et al. Effects of NO₂⁻ and Cl⁻ on the corrosion behavior of steel bars in simulated concrete pore fluids[J]. Acta metallurgica sinica, 2010, 46(2): 245-250.
- [28] 杨大宁, 汪川, 王振尧, 等. 变电站常用金属的大气腐蚀行为及其防护[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 126-129.
YANG Da-ning, WANG Chuan, WANG Zhen-yao, et al. Atmospheric corrosion behavior and protection of common metals in substations[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(1): 126-129.
- [29] 刘凯吉. 大气腐蚀环境的分类及腐蚀性评定[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(10): 26-27.
LIU Kai-ji. Classification and corrosion evaluation of atmospheric corrosive environments[J]. Total corrosion control, 2015, 29(10): 26-27.
- [30] 唐其环. 海洋大气腐蚀性分类分级[J]. 环境技术, 2003(1): 2-4.
TANG Qi-huan. Classification and classification of marine atmospheric corrosiveness[J]. Environmental technology, 2003(1): 2-4.
- [31] 胡杰珍, 刘泉兵, 胡欢欢, 等. 热带海岛大气中氯离子沉降速率[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(06): 463-466.
HU Jie-zhen, LIU Quan-bing, HU Huan-huan, et al. Chloride ion deposition rate in the atmosphere of tropical islands[J]. Corrosion and protection, 2018, 39(06): 463-466.