

海洋工程装备

### 3种钢材在东海初期腐蚀速率的空间变异分析

马少政<sup>1,2,3</sup>, 孙虎元<sup>1,3</sup>, 孙立娟<sup>1,3</sup>, 王昭<sup>1,2,3</sup>

(1.中国科学院海洋研究所 海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室, 山东 青岛 266071;  
2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋腐蚀与  
防护开放工作室, 山东 青岛 266237)

**摘要:** 为了研究 X80、EH36 和 45# 钢在东海海域 42 个站位的初期腐蚀速率。通过动电位极化曲线法获取出东海实测的 X80、45# 和 EH36 钢 2019 年 9 月在东海 42 个站位的初期腐蚀速率数据, 并以地统计学方法对数据进行分析, 探索研究区内 3 种钢材初期腐蚀速率的空间分布及其变异特征, 绘制初期腐蚀速率预测图。对于每一种钢材初期腐蚀速率的空间分布, 45# 钢在西南部高, 东北部低; EH36 钢在东北部高, 西南部低; 而 X80 钢靠近长江口海域低, 其他海域高。X80、45#、EH36 钢在东海的平均初期腐蚀速率分别为 0.42、0.49、0.17 mm/a, 并且 3 种钢材在东海初期腐蚀速率分布的空间变异特征明显, 空间自相关性强, X80、45#、EH36 钢的块金值分别为 0.0148、0.0044、0.0017, 变程为 1000~2000 km。

**关键词:** 东海; 腐蚀; 典型钢材; 地统计分析; 空间变异特征

中图分类号: TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)10-0063-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.10.011

### Analysis of the Spatial Variability of the Initial Corrosion Rate of Three Steel in the East China Sea

MA Shao-zheng<sup>1,2,3</sup>, SUN Hu-yuan<sup>1,3</sup>, SUN Li-juan<sup>1,3</sup>, WANG Zhao<sup>1,2,3</sup>

(1.Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

**ABSTRACT:** To study the initial corrosion rate of X80, EH36 and 45# steel at 42 stations in the East China Sea, in this paper, the initial corrosion rate of X80, 45# and EH36 steel measured in the East China Sea in September 2019 were obtained by the potential polarization curve method. The data was analyzed by geostatistics to explore the spatial distribution and variation characteristics of the initial corrosion rate of the three steels in the study area, and draw the initial corrosion rate prediction map.

收稿日期: 2021-07-13; 修订日期: 2021-08-07

Received: 2021-07-13; Revised: 2021-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(41476067); 中国科学院科学号高端用户项目(KEXUE2018G13)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41476067); Senior User Project of RV KEXUE of Chinese Academy of Sciences(KEXUE2018G13)

作者简介: 马少政(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为钢材的防腐防污。

Biography: MA Shao-zheng(1996—), Male, Master, Research focus: anticorrosion and antifouling of steel.

通讯作者: 孙虎元(1970—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为腐蚀监测、检测及海洋大数据研究。

Corresponding author: SUN Hu-yuan(1970—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: corrosion monitoring, detection and marine big data research.

引文格式: 马少政, 孙虎元, 孙立娟, 等. 3种钢材在东海初期腐蚀速率的空间变异分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(10): 063-068.

MA Shao-zheng, SUN Hu-yuan, WANG Zhao, et al. Analysis of the spatial variability of the initial corrosion rate of three steel in the East China Sea[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(10): 063-068.

The spatial distribution characteristics of the initial corrosion rate of each type of steel are as follows: the spatial distribution of the initial corrosion rate of 45# steel is higher in the southwest and lower in the northeast; the spatial distribution of the initial corrosion rate of EH36 steel is higher in the northeast, lower in the southwest; while the spatial distribution of the initial corrosion rate of X80 steel is obviously lower in the seas close to the Yangtze River estuary, and higher in other seas. The distribution of the initial corrosion rate of the three steels presents different characteristics. At the same time, statistical analysis shows that the average initial corrosion rate of the three steels in the East China Sea is 0.42 mm/a for X80, 0.49 mm/a for 45#, and 0.17 mm/a for EH36. In addition, the spatial variability of the initial corrosion rate distribution of the three steels in the East China Sea is obvious, and the spatial autocorrelation is strong. The nugget values of X80, 45# and EH36 are 0.0148, 0.0044, and 0.0017, respectively, and the range is between 1000~2000 km.

**KEY WORDS:** East China Sea; corrosion; typical steel; geostatistical analysis; spatial variation characteristics

人们在探索海洋、开发海洋资源的过程中会用到钢材，而钢材在海洋中会受到海水环境的腐蚀<sup>[1]</sup>。早在 20 世纪初，学者们就认识到了海水对金属材料严重的腐蚀性，并通过一些试验来研究其机理，以寻求防护方法。1930 年后，美国以及欧洲的一些发达国家在天然海水中进行了大量的腐蚀试验，并获取了数百种材料的腐蚀数据。我国从 20 世纪 50 年代开始建立海水腐蚀实验站，从此开始了腐蚀数据的积累，但腐蚀数据在材料种类和实验海区等方面，与发达国家相比，差距很大<sup>[2]</sup>。侯保荣等<sup>[3]</sup>通过电连接模拟外海试验发现，浪花飞溅区的腐蚀状况最为严重。Al-Muhanna 等<sup>[4]</sup>采用电化学阻抗谱技术，研究了 4 种合金在科威特海湾连续新鲜海水系统中的动态腐蚀，研究表明，季节变化对测试材料腐蚀行为有影响。侯健等<sup>[5]</sup>在南海进行了 A3 钢的实海挂片试验，并预测了我国南海不同海深下 A3 钢的腐蚀深度。Venkatesan 等<sup>[6]</sup>在印度洋对 5 种钢材进行了 5 个海深条件下的实海挂片试验，研究表明，影响钢材腐蚀速率的关键因素为溶解氧量。高扬等<sup>[7]</sup>对 X80 钢在黄海海域的海水腐蚀性进行了研究，结果表明，X80 钢的海水腐蚀性与海水的密度、盐度、溶解氧含量相关性最为显著。王昭等<sup>[8]</sup>在黄海进行了 EH36 钢的初期腐蚀速率调查，并做了地统计分析，绘制了初期腐蚀速率预测图。ZOU 等<sup>[9]</sup>对比了电化学方法和失重法对于腐蚀速率测定的准确性，结果表明，通过电化学方法能够很好地呈现钢材在海水中的初期腐蚀速率。

传统的海洋腐蚀研究一般在室内、海滨和岸基试验站进行，缺少对于离岸海水中材料腐蚀状况的调查和研究<sup>[10-11]</sup>。X80、45#和 EH36 钢为海洋工程的常用钢材，调查此三种钢材在东海实海的初期腐蚀速率对于开发海洋资源、船舶制造及航行有着重要的参考意义<sup>[12-14]</sup>。地统计学是由研究空间变异以及空间结构的变异函数和用于预测空间分布的克里格插值法组成<sup>[15]</sup>，已经在农业、渔业、地质、遥感等领域得到广泛的应用<sup>[16-19]</sup>。使用地统计分析方法，研究东海海域三种钢材初期腐蚀速率的空间变异并进行空间分布的预测，这对于海洋用钢的选择与维护具有

重要意义。本文基于海洋中测得的腐蚀速率，计算了在东海海域三种钢材初期腐蚀速率的半方差函数，根据拟合效果最好的参数来计算分析三种钢材初期腐蚀速率的空间变异特点，并运用克里格法进行插值，绘制了三种钢材在东海的初期腐蚀速率预测图。

## 1 试验

### 1.1 试验海域站位

笔者于 2019 年 9 月 11 日—25 日搭乘“向阳红 18”科考船对东海海域（如图 1 所示）的 42 个站位进行了海水腐蚀性调查。取科考船在每个站位采得的次表层海水作为腐蚀电解质，在科考船实验室内即刻测试三种钢材在该站位的腐蚀数据。

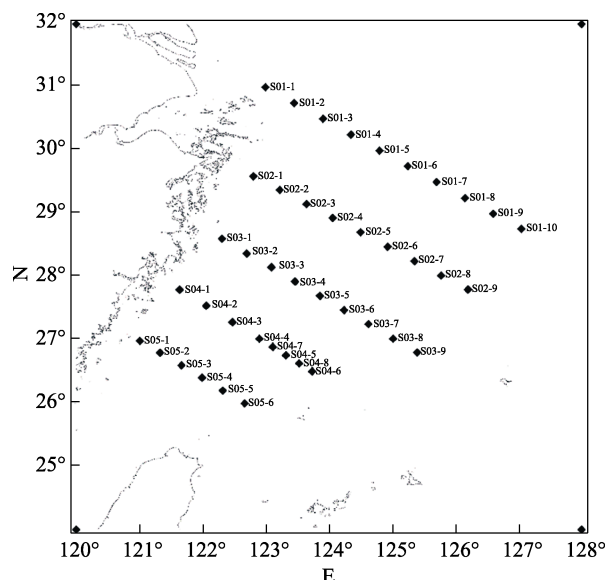


图 1 东海海域 42 个站位点  
Fig.1 42 stations in the East China Sea

### 1.2 试验样品

本航次选取 X80、45#和 EH36 钢材作为研究材料，将 3 种钢分别切割成 1 cm×1 cm×1 cm 的正方体

钢块, 使用焊锡在试样的一面焊接铜线, 将一面裸露在外, 其余钢面以及连接铜线的面均用环氧树脂密封, 自然放置, 直到环氧树脂固化。在每次电化学测试前, 都用 SiC 砂纸将实验面打磨如镜面光滑 (2000#)。然后用去离子水将实验面的杂质冲洗干净, 再用无水乙醇冲洗并吹干, 最后在海水中进行下一步试验。

### 1.3 测试方法与计算

开路电位与极化曲线均使用 Gamry1000E 电化学工作站测试。采用三电极体系, 参比电极为饱和甘汞电极 (SCE), 工作电极为 3 种钢材, 辅助电极为铂电极。为了消除参比电极与海水间的液接电势, 使用盐桥连接参比电极与海水。试验所用的电解质溶液是 42 个站位的现取新鲜海水。测试极化曲线前, 先进行开路电位测试至开路电位稳定, 然后进行极化曲线试验。极化曲线测试时, 扫描范围为  $-150 \sim 150$  mV (相对于开路电位), 扫描速率为  $0.5$  mV/s, 腐蚀电流等数据使用 fitting 软件拟合计算。钢材年腐蚀速率计算见式 (1)。

$$v = \frac{J_{\text{corr}} \times A}{n \times \rho \times F} \times 87\ 600 \quad (1)$$

式中:  $J_{\text{corr}}$  为初期腐蚀电流密度,  $\text{A}/\text{cm}^2$ ;  $A$  为相对原子质量;  $n$  为钢材的电化学反应过程中所转移的电子数;  $\rho$  为钢材的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $F$  为法拉第常数,  $F=26.8\text{A}\cdot\text{h}/\text{mol}$ 。

### 1.4 数据处理与分析

运用地统计学的相关理论, 对 3 种钢材在东海海域的初期腐蚀速率的空间分布特征进行分析<sup>[20]</sup>。使用 Global Mapper 将各站位的经纬度坐标转换为投影坐标, 即可算出各站位在海上的实际距离。根据式 (2), 使用 42 个站位测得的初期腐蚀速率数据求出半方差函数。然后使用高斯、球形、指数 3 种模型对半方差函数进行拟合, 并得出最优模型, 进而对 3 种钢材的初期腐蚀速率进行空间异质性分析。文中进行半方差函数分析所使用的软件为 GS+9.0 版本, 使用克里格插值法计算绘制东海 3 种钢材的初期腐蚀速率分布预测图。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(y_i) - z(y_i + h)]^2 \quad (2)$$

式中:  $\gamma(h)$  是间隔为  $h$  时数据的半方差;  $h$  为两个站位间的距离;  $z(y_i)$  和  $z(y_i+h)$  分别为站在  $y_i$  处和  $y_i+h$  处的腐蚀速率值;  $N(h)$  是站位间隔为  $h$  的数据对的数量。

## 2 结果及分析

### 2.1 空间变异性分析

使用经典统计的方法对三种钢材的初期腐蚀速

率数据进行计算, 进而分析三种钢材在东海海域的空间变异特征, 计算结果见表 1。

表 1 3 种钢材的初期腐蚀速率的变异性数据计算结果  
Tab.1 Calculation results of the variability data of the initial corrosion rate of three steels

钢材	站位数	最大值 /(mm·a <sup>-1</sup> )	最小值 /(mm·a <sup>-1</sup> )	平均值 /(mm·a <sup>-1</sup> )	标准 偏差	变异系数 /%
X80	42	0.79	0.11	0.42	0.14	33
45#	42	1.06	0.23	0.49	0.14	29
EH36	42	0.30	0.08	0.17	0.05	29

变异系数为标准差与平均值的比值, 其反映了数据的离散程度。通常认为, 变异系数大于 30% 时, 数据的变异性表现为强变异。从表 1 可知, 在东海海域, X80、45# 和 EH36 钢的初期腐蚀速率有明显不同, 说明这 3 种钢材在东海海域的耐腐蚀性依次为 EH36 钢 > X80 钢 > 45# 钢。从 3 种钢的变异系数可以看出, 在东海海域, 3 种钢材初期腐蚀速率的空间变异程度没有较大差异, 都表现为较强。同时可以看出, X80 钢和 45# 钢的标准偏差小于 EH36 钢, 这说明了 EH36 钢的腐蚀速率数据的离散程度小于其他两种钢。数据离散程度大小不同的原因为 3 种钢材受不同海域海洋环境差异的影响不同, X80 钢和 45# 钢受海洋环境变化影响较大, 而 EH36 钢受海洋环境变化影响较小。

### 2.2 空间异质性分析

半方差是所有以给定间距相隔的数据点测值之差平方的平均值。从理论上讲, 半方差随着间隔距离的增大而增大, 并经过一定的间距 (变程, range) 后, 最终达到一个固定值, 称为基台值 (sill)。当数据不再具有空间相关性时, 基台值代表间隔距离上的最大数据方差。变程的大小决定了两点之间是否存在相关性, 若两点之间的距离大于变程, 那么这两点在空间上不存在相关性, 故该点的数据不能用于插值。理论上讲, 当两个数据点距离为 0 时, 半方差函数也应该为 0, 但由于测量误差、空间变异等因素, 使得两数据点很接近时, 其半方差函数也不为 0, 该函数值即为块金值。计算 3 种钢材初期腐蚀速率的半方差函数, 并对半方差函数进行最优模型的拟合, 拟合参数见表 2。

表 2 3 种钢材初期腐蚀速率最优半方差函数拟合的参数  
Tab.2 Fitting parameters of optimal semivariogram for the initial corrosion rate of three steels

钢材	模型	块金值 ( $C_0$ )	基台值 ( $C_0+C_1$ )	块金值/ 基台值	变程 $a/m$	决定 系数
X80	高斯	0.0148	0.0541	0.274	1 295 574	0.110
45#	指数	0.0044	0.0725	0.061	1 966 800	0.360
EH36	高斯	0.0017	0.0072	0.237	1 107 819	0.178

结合相应模型，可以得出半方差函数。

X80 的半方差函数为：

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & , h = 0 \\ 0.0184 + 0.0393 \times \left( 1 - e^{-\frac{h^2}{1295574^2}} \right) & , h > 0 \end{cases} \quad (3)$$

45#的半方差函数为：

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & , h = 0 \\ 0.0184 + 0.0393 \times \left( 1 - e^{-\frac{h^2}{1295574^2}} \right) & , h > 0 \end{cases} \quad (4)$$

EH36 的半方差函数为：

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & , h = 0 \\ 0.0017 + 0.0055 \times \left( 1 - e^{-\frac{h^2}{1107819^2}} \right) & , h > 0 \end{cases} \quad (5)$$

由表 2 的数据可知，X80 钢和 EH36 钢的半方差函数最优拟合模型为高斯模型，而 45#钢的最优拟合模型是指数模型。使用 3 种钢材最优拟合模型的参数进行空间异质性分析，这样可以使 3 种钢材初期腐蚀速率与空间的关系得到良好的反映。从表 2 可以看出，3 种钢材的块金值均偏小，说明在较小间隔下，3 种钢材在东海海域的初期腐蚀速率数据的测试误差和空间变化较小。块金值与基台值的比值可以度量腐蚀速率数据总体的空间自相关性强弱。一般认为，比值小于 25%、25%~75%以及大于 75%的空间自相关性分别表现为较强、中等程度以及较弱。由表 2 可知，45#钢和 EH36 钢有较强的空间自相关性，而 X80 略低于其他两种钢。在东海海域，3 种钢材的变程都较大，为 1000~2000 km，说明 3 种钢材的初期腐蚀速率在较大的范围内都具有良好的空间自相关性。因为钢材的初期腐蚀速率受到海洋环境因素（如海水温度、密度、盐度、溶解氧等）的影响，所以在变程内，对钢材的腐蚀有影响的海洋环境因素具有一定的自相关性。钢材的初期腐蚀速率在海洋中的空间自相关性越强，说明根据克里金插值法所绘制的初期腐蚀速率预测图越准确，在选择海洋用钢的时候更具参考意义。

### 2.3 腐蚀速率预测图及特征

根据半方差函数的最优模型参数，使用克里格法进行插值，绘制了 3 种钢材在东海海域研究区内的初期腐蚀速率预测图，如图 2 所示。从图 2 可以看出，45#、EH36 和 X80 钢在东海的初期腐蚀速率具有明显的空间差异，45#的空间分布表现为西南部高、东北部低；而 EH36 呈现东北部高、西南部低的特点；

X80 钢在靠近长江口的初期腐蚀速率低，其他海域的初期腐蚀速率高。同时从图 2 中可以看出，3 种钢材在东海海域初期腐蚀速率的空间分布不同。值得关注的是，3 种钢在长江口的初期腐蚀速率均表现为较低，这是因为长江口的海水盐度较低等因素导致的<sup>[21]</sup>。

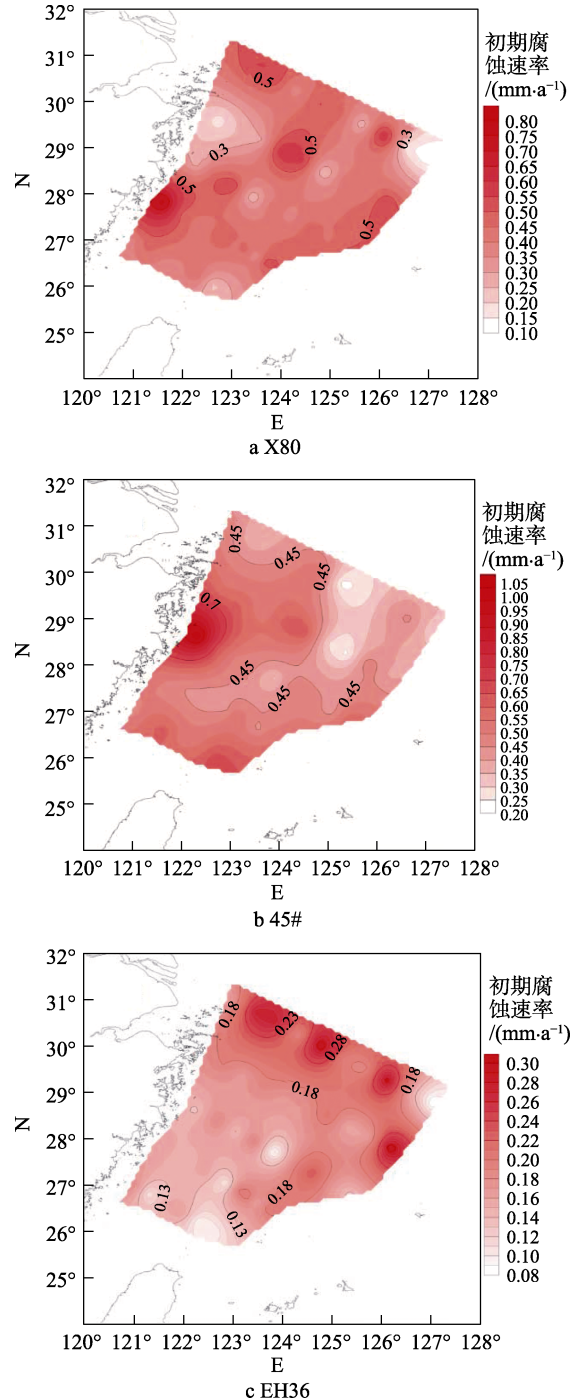


图 2 3 种钢材的初期腐蚀速率预测  
Fig.2 The initial corrosion rate prediction map of the three steels

选取断面 S01 的实测初期腐蚀速率数据作折线图，如图 3 所示。可以明显地看出，X80 和 45#的初期腐蚀速率相差不大，并且都高于 EH36 的初期腐蚀速率。同时，3 种钢材的初期腐蚀速率在同一断面的



变化情况比较相似。

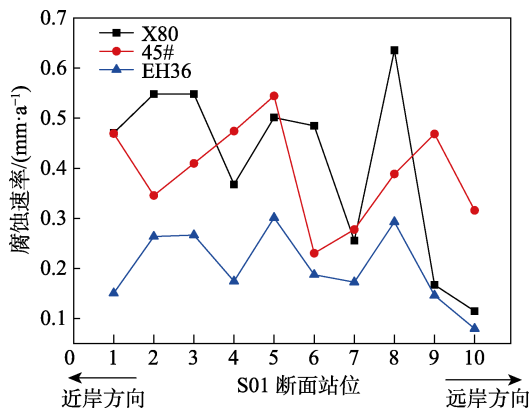


图 3 断面 S01 初期腐蚀速率折线图

Fig.3 Broken line graph of initial corrosion rate of section S01

### 3 结论

1) 使用地统计学方法绘制了 X80、45#和 EH36 钢在东海的初期腐蚀速率预测图, X80、45#和 EH36 钢的初期腐蚀速率分别为 0.11~0.79 mm/a、0.23~1.06 mm/a、0.08~0.30 mm/a。由初期腐蚀速率预测图可以判断 3 种钢材初期腐蚀速率的空间分布特征。

2) 在东海海域, EH36 钢的初期腐蚀速率小于 X80 和 45#钢, 在海洋环境中 EH36 钢具有优良的耐蚀性能。

3) 在研究区内, 45#和 EH36 钢的初期腐蚀速率的变异程度均为中等程度变异, X80 钢为强变异。异质性特征表现为 45#和 EH36 钢均属于强的空间自相关性, X80 钢为中等程度的空间自相关性, 且空间自相关性的范围为 1000~2000 km。

致谢: 感谢 2019 年秋季国家自然科学基金委共享航次东海航次(航次编号: NORC2019-02)给予的大力支持, 感谢“向阳红 18”科考船在出海工作上的帮助。

#### 参考文献:

[1] 朱相荣, 黄桂桥, 林乐耘, 等. 金属材料长周期海水腐蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(3): 142-148.  
ZHU Xiang-rong, HUANG Gui-qiao, LIN Le-yun, et al. Research progress on the long period corrosion law of metallic materials in seawater[J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 2005, 25(3): 142-148.

[2] 夏兰廷, 王录才, 黄桂桥. 我国金属材料的海水腐蚀研究现状[J]. 中国铸造装备与技术, 2002(6): 1-4.  
XIA Lan-ting, WANG Lu-cai, HUANG Gui-qiao. Present status of research on sea-water corrosion of metal in China[J]. China foundry machinery & technology,

2002(6): 1-4.

[3] 侯保荣, 张经磊. 海洋钢结构浪溅区、潮差区防腐蚀方法的研究[J]. 海洋科学, 1983, 7(4): 31-33.  
HOU Bao-rong, ZHANG Jing-lei. Protection of marine steel construction from in splashing and tidal zone[J]. Marine sciences, 1983, 7(4): 31-33.

[4] AL-MUHANNA K, HABIB K. Corrosion behavior of different alloys exposed to continuous flowing seawater by electrochemical impedance spectroscopy (EIS)[J]. Desalination, 2010, 250(1): 404-407.

[5] 侯健, 郭为民, 邓春龙. 深海环境因素对碳钢腐蚀行为的影响[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 82-84.  
HOU Jian, GUO Wei-min, DENG Chun-long. Influences of deep sea environmental factors on corrosion behavior of carbon steel[J]. Equipment environmental engineering, 2008, 5(6): 82-84.

[6] VENKATESAN R, VENKATASAMY M A, BHASKARAN T A, et al. Corrosion of ferrous alloys in deep sea environments[J]. British corrosion journal, 2002, 37(4): 257-266.

[7] 高杨, 孙虎元, 孙立娟. X80 管线钢在黄海海水中的初期腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(5): 327-331.  
GAO Yang, SUN Hu-yuan, SUN Li-juan. Initial corrosion behavior of X80 pipeline steel in the Yellow Sea[J]. Corrosion & protection, 2018, 39(5): 327-331.

[8] 王昭, 孙虎元, 孙立娟, 等. EH36 钢在黄海的初期腐蚀速率的空间变异特征的地统计分析[J]. 海洋科学, 2020, 44(1): 67-74.  
WANG Zhao, SUN Hu-yuan, SUN Li-juan, et al. Geostatistical analysis of the spatial variability of the initial corrosion rate of EH36 steel in the Yellow Sea[J]. Marine sciences, 2020, 44(1): 67-74.

[9] ZOU Y, WANG J, ZHENG Y Y. Electrochemical techniques for determining corrosion rate of rusted steel in seawater[J]. Corrosion science, 2011, 53(1): 208-216.

[10] LUO Ya-nan, SONG Shi-zhe, JIN Wei-xian, et al. In field electrochemical evaluation of carbon steel corrosion in a marine test environment[J]. Anti-corrosion methods and materials, 2009, 56(6): 316-322.

[11] 张晓东, 胡裕龙, 卜世超, 等. 船体钢海水腐蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2018, 15(6): 33-40.  
ZHANG Xiao-dong, HU Yu-long, BU Shi-chao, et al. Research progress in seawater corrosion of hull structural steel[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(6): 33-40.

[12] 麻力, 虞毅. 海洋用 X80 管线钢焊接接头的组织性能[J]. 焊接, 2011(8): 44-47.  
MA Li, YU Yi. Microstructure and properties of welded joint of X80 pipeline steel used in the offshore[J]. Welding & joining, 2011(8): 44-47.

[13] 董英豪, 周杰, 杨海艳, 等. 碳钢表面磷酸镁涂层制备与防腐性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(5): 515-520.  
DONG Ying-hao, ZHOU Jie, YANG Hai-yan, et al.

- Anti-corrosion performance of magnesium phosphate coating on carbon steel[J]. *Corrosion science and protection technology*, 2017, 29(5): 515-520.
- [14] 高秀华, 邱春林, 杜林秀. 轧制工艺对 EH36 船板钢显微组织和力学性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2010, 34(5): 5-7.
- GAO Xiu-hua, QIU Chun-lin, DU Lin-xiu. Effect of rolling process on microstructure and mechanical properties of EH36 ship plate steel[J]. *Materials for mechanical engineering*, 2010, 34(5): 5-7.
- [15] 李俊晓, 李朝奎, 殷智慧. 基于 ArcGIS 的克里金插值方法及其应用[J]. *测绘通报*, 2013(9): 87-90.
- LI Jun-xiao, LI Chao-kui, YIN Zhi-hui. ArcGIS based kriging interpolation method and its application[J]. *Bulletin of surveying and mapping*, 2013(9): 87-90.
- [16] 柳慧, 郭芳芳, 王世维, 等. 玉米大斑病在大尺度上的空间分布[C]//中国植物保护学会 2019 年学术年会论文集. 贵阳, 2019.
- LIU Hui, GUO Fang-fang, WANG Shi-wei, et al. The spatial distribution of corn leaf spot disease on a large scale[C]// *Proceedings of the Chinese Society of Plant Protection*. Guiyang, Guizhou, 2019.
- [17] 杨晓明, 戴小杰, 朱国平. 基于地统计分析西印度洋黄鳍金枪鱼围网渔获量的空间异质性[J]. *生态学报*, 2012, 32(15): 4682-4690.
- YANG Xiao-ming, DAI Xiao-jie, ZHU Guo-ping. Geostatistical analysis of spatial heterogeneity of yellowfin tuna(*Thunnus albacares*) purse seine catch in the western Indian Ocean[J]. *Acta ecologica sinica*, 2012, 32(15): 4682-4690.
- [18] 张龙飞. 基于地统计分析的大同盆地  $V_{se20}$  及建筑场地类别预测[J]. *城市地质*, 2020, 15(1): 56-62.
- ZHANG Long-fei. Prediction of  $V_{se20}$  and building site classification in Datong basin based on geostatistical analysis[J]. *Urban geology*, 2020, 15(1): 56-62.
- [19] CASTILLO-SANTIAGO M Á, GHILARDI A, OYAMA K, et al. Estimating the spatial distribution of woody biomass suitable for charcoal making from remote sensing and geostatistics in central Mexico[J]. *Energy for sustainable development*, 2013, 17(2): 177-188.
- [20] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数与 Kriging 插值分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 555-566.
- GUO Xu-dong, FU Bo-jie, CHEN Li-ding, et al. The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua plain of Hebei Province: Semivariogram and kriging analysis[J]. *Acta geographica sinica*, 2000, 55(5): 555-566.
- [21] 石鑫, 宋金明, 李学刚, 等. 长江口邻近海域海水 pH 的季节变化及其影响因素[J]. *海洋与湖沼*, 2019, 50(5): 1033-1042.
- SHI Xin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, et al. Seasonal change of pH in the waters off Changjiang river estuary and its impact factors[J]. *Oceanologia et limnologia sinica*, 2019, 50(5): 1033-1042.