

防城港核电站温排水对红树林群落特征影响分析

李英花^{1,2,3}, 何斌源^{1,2,3}, 赖廷和^{1,2,3}, 李梦^{1,2,3},
莫珍妮^{1,2,3}, 朱婷^{1,2,3}, 黄中坚^{1,2,3}, 宁秋云^{1,2,3}

(1.广西壮族自治区海洋研究院, 广西南宁 530022; 2.自然资源部广西海洋检测中心, 广西南宁 530022;
3.广西壮族自治区海洋灾害应急中心, 广西南宁 530022)

摘要:近年来,人们对红树林保护的关注度很高,但有关核电站温排水对红树林群落特征影响的研究较少,多数研究仅限于实验室条件下模拟极端温度对红树植物生长、生理特性等的影响。本文以国投钦州电厂温升区的红树林为参照系,对照分析防城港核电站温排水影响区域的红树林群落特征,分析预测核电站 5 号、6 号机组温升因素对红树林的影响程度,可为后续滨海电厂对红树林影响评价研究奠定基础,为相关研究提供思路和方法指导。研究结果表明:(1)两个林区红树植物种类及群落类型相近,以桐花树或白骨壤为建群种、逐渐向秋茄群落演替的发展方向是一致的;红树群落多样性指数均较低,变化范围相近,两个林区之间的 4 类多样性指数均无显著性差异。(2)通过相同群落类型在不同区域、不同温升区比较可知,处于更高温升区的红树林群落结构更加稳定,群落特征更优,说明温升对核电站周边红树林的群落特征无明显不利影响。(3)局部林区的历史与现状数据对比结果表明,3 个样方处于 2 °C~4 °C 温升区范围,但 3 个样方的群落种类组成、优势种及群落类型均维持稳定,群落密度和平均株高总体呈上升趋势。温排水或自然导致的 2 °C~4 °C 温升,对本地区红树林群落无明显的负面影响。综上所述,红沙核电 5 号、6 号机组温排水不会对 1 °C 温升线范围内的红树林生态造成不可接受的影响。

关键词:滨海电厂; 温排水; 红树林; 群落特征

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)01-0017-09

Effects of the thermal discharge from the Fangchenggang nuclear power plant on the community characteristics of mangroves

LI Yinghua^{1,2,3}, HE Binyuan^{1,2,3}, LAI Tinghe^{1,2,3}, LI Meng^{1,2,3}, MO Zhenni^{1,2,3},
ZHU Ting^{1,2,3}, HUANG Zhongjian^{1,2,3}, NING Qiuyun^{1,2,3}

(1.Guangxi Academy of Oceanography, Nanning 530022, China; 2.Guangxi Marine Testing Center, Ministry of Natural Resources of China, Nanning 530022, China; 3.Guangxi Marine Disaster Emergency Center, Nanning 530022, China)

Abstract: In recent years, much attention has been paid to mangrove conservation, but research on the effects of the thermal discharge from nuclear power plants on mangrove community characteristics is scarce, with most studies limited to simulating the effects of temperature extremes on mangrove plant growth and physiological characteristics under laboratory conditions. In this paper, the mangroves in the temperature rise area of the Qinzhou power plant were used as a reference system, and the mangrove community characteristics in the

收稿日期: 2024-03-19, 修订日期: 2024-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(42366009); 防城港核电站红树林监测项目(4600021727)

作者简介: 李英花(1983—), 女, 广西南宁人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生态, E-mail: 515278447@qq.com

通信作者: 何斌源(1969—), 男, 广西东兴人, 研究员, 博士, 主要研究方向为海洋生态与修复, E-mail: hebinyuan2008@126.com

temperature rise area of the Fangchenggang nuclear power plant were analysed and predicted, which can lay the foundation for subsequent studies on the evaluation of the impact of coastal power plants on mangroves and provide guidance for related research. The results of the study show that: (1) the mangrove plant species and community types in the two forest areas are similar, and the direction of development is the same in that the mangrove tree or white bone loam is used as a community building species and gradually evolves towards the autumn eggplant community; the mangrove community diversity indices are low and the range of change is similar, and there is no significant difference in the four types of diversity indices between the two forest areas. (2) The comparison of the same community types in different areas and different temperature rise zones shows that the mangrove communities in higher temperature rise zones are more stable in structure and have better community characteristics; the temperature rise has no obvious adverse effect on affecting the community characteristics of the forest area. (3) The comparison of historical and current community data in the local forest area showed that three samples are in the range of 2 °C–4 °C temperature rise zone, but the community species composition, dominant species and community types in all three sites remained stable, and the community density and average plant height generally showed an increasing trend. There was no significant negative impact on the mangrove communities in this area due to warm water drainage or the naturally induced 2 °C–4 °C temperature rise. In summary, this study shows that the warm water drainage from units 5 and 6 of the Hongsha nuclear power plant will not have an unacceptable impact on the mangrove ecology within the 1 °C temperature rise line.

Key words: coastal power plant; temperature drainage; mangrove; community characteristics

核能作为重要的清洁能源之一,可以大量提供能源,又不会释放温室气体,发展核能是我国重要的能源发展战略。然而,目前我国所有在建和运行的核电厂均为滨海建址,核电厂安全运行的同时将向海洋排放大量温排水,温排水扩散给周边海域带来明显的增温效应,周边海域环境发生显著改变,因此,近年来核电温排水对环境的影响引起人们的普遍关注。红树林是以红树植物为主体的植物群落,主要分布于热带和亚热带地区潮间带,是兼有海洋和陆地特性的特殊类型的生态系统^[1],在维持河口海湾生态环境、防风护岸、净化环境、保护和维持湿地生态系统等方面具有重要的作用,素有“海上森林”之称^[2-3]。近年来,国内外学者对于温排水引起的海洋生态效应方面的研究较多,主要着重于对浮游动植物、底栖动物和鱼类分布等方面的影响^[4-6],而有关红树林群落特征的影响方面,由于缺乏背景数据且需要进行长期观测,目前多数研究仅限于实验室条件下模拟极端温度对红树植物生长、生理特性等影响,迄今为止未见有温排水对红树林群落特征影响的实际研究。

防城港核电厂位于防城港市港口区内,规划容量为6台百万千瓦级压水堆核电机组,采用一

次规划、分期建设的方式。2016年,防城港核电厂一期工程(1号、2号机组)已经投产发电,二期工程3号机组于2023年3月25日正式投产发电,4号机组将全面转入热试准备阶段。三期工程(5号、6号机组)正在报批核准。

钦州湾是我国红树林主要分布海湾,根据数值模拟和现实观测,目前防城港核电厂1号、2号机组运行导致的温升1 °C范围内仅有红树林5.36 ha,不足以观测温升1 °C及以上条件对红树林的影响。但是,在防城港核电厂东北方向约6.5 km处的国投钦州电厂的一期、二期项目已分别于2007年、2016年并网发电,叠加天津大学数模温升包络线与红树林分布图层发现,在国投钦州电厂温升3 °C~4 °C海域有一定面积的红树林分布,历史资料显示两地红树物种和群落类型与核电周边海域较为相似。当评价起点为尚未开工建设的工程时,可采用参照系对比法进行评价,按照“空间换时间”的思路,设定用于横向比较的参照系,根据参照系的变化趋势,去预测同类评价对象的变化趋势。

因此,本文以空间距离不远、生境条件足够近似且历史上经受同类胁迫因素的生态系统——国投钦州电厂温升区的红树林为参照系,

对照分析防城港核电厂温排水影响区域的红树林群落特征,以参照对象的动态变化分析预测核电厂 5 号、6 号机组温升因素对红树林的影响程度,可为后续滨海电厂对红树林影响的评价研究奠定基础,为相关研究提供思路和方法指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

防城港核电厂厂址位于防城港市港口区光坡镇东面约 6.5 km 的红沙漓南侧光岭至山鸡啼一带。核电 5 号、6 号机组中心地理位置为 108°33'10"E、21°40'29"N。防城港核电厂排水口位于钦州湾海域,平均潮差为 2.40 m,为正规全日潮。所在的钦州湾属亚热带季风性湿润气候,年平均气温为 22.3 °C,年平均降水量为 2173.1 mm,年平均蒸发量为 1718 mm,年平均相对湿度为 80%。参考《广西防城港红沙核电 5 号、6 号机组工程海域使用论证报告书》的数值模拟结果,通过遥感解译,得出防城港核电三期模拟温升 1 °C 范围内的红树林总面积为 28.31 ha,以此范围内的红树林区作为受影响的研究林区,同时采用核电厂三期温排水数值模拟分析及验证专题报告的结果来确定各个梯度的模拟温升区。

距离核电站东北方向约 6.5 km 的国投钦州电厂,建于广西钦州市钦州港经济技术开发区鹰岭作业区东南端,厂区地坪为围海填筑而成。该电厂采用直流供水系统,以钦州湾海水作为冷却水源,取排水采用金鼓江排水、鹰岭水道取水的布置方案。电厂总装机容量为一期 2×600 MW+二期 2×1000 MW,均已投入商业运行。本文以金鼓江范围内红树林区域作为研究的参照林区,并通过该电厂温升包络线确定各个梯度的实际温升区。

1.2 样方设置

在两个林区以梯度温升区为单元布设调查样方,共设置 10 m×10 m 红树林群落调查样方 20 个;其中,在影响林区<0.5 °C、0.5 °C~1 °C、1 °C~2 °C、2 °C~3 °C 模拟温升区域各布设 2 个样方,共布设调查样方 8 个;在参照林区实

际温升<0.5 °C、0.5 °C~1 °C、2 °C~3 °C 包络线区域各布设 2 个样方,在 1 °C~2 °C、3 °C~4 °C 温升区域各布设 3 个样方,共布设调查样方 12 个(表 1)。

表 1 调查站位信息

Tab.1 Survey station information

调查区域/所属电厂	温升区/°C	样方编号	经度/°	纬度/°	
影响林区/防城港核电厂	<0.5	FC08	108.5574	21.6619	
		FC09	108.5445	21.6536	
	0.5~1	FC01	108.5309	21.7526	
		FC10	108.5310	21.6235	
	1~2	FC04	108.5616	21.7040	
		FC07	108.5666	21.6687	
	2~3	FC05	108.5713	21.7079	
		FC06	108.5749	21.6918	
	参照林区/国投钦州电厂	<0.5	QZ01	108.6768	21.8024
			QZ02	108.6760	21.8029
0.5~1		QZ03	108.6700	21.7911	
		QZ04	108.6668	21.7909	
1~2		QZ05	108.6626	21.7808	
		QZ12	108.6458	21.7371	
		QZ13	108.6463	21.7365	
2~3		QZ06	108.6344	21.7599	
		QZ07	108.6355	21.7595	
3~4		QZ09	108.6371	21.7532	
		QZ10	108.6371	21.7528	
		QZ11	108.6368	21.7513	

1.3 研究方法

1.3.1 群落调查时间及内容

2022 年 8 月,开展影响林区和参照林区 20 个红树林样方的群落调查,红树林群落调查指标包括:红树植物种类;植株的基径、高度和冠幅;群落覆盖度;红树植物的构件数;幼苗幼树种类、密度、高度,等等。调查方法严格按照《红树林生态监测技术规程》(HY/T081—2005)要求执行。调查过程中,首先鉴别、记录调查样方内的红树植物种类;采取目测法确定群落总体特征值——群落覆盖度,即群落树冠投影占地面的比例;使用测高杆(精确到 0.01 m)测量树冠离地面的高度即株高,每木检尺;采用材径尺(精确到 0.1 cm)测量基径,即植株基面或者接近板根位置

的直径。使用测高杆分别测量树冠投影的长轴和短轴(精确到 0.01 m), 计算投影范围(冠幅乘积); 记录红树植物的构件数; 在各样方均取 5 个 1 m×1 m 的小样方, 现场计数幼苗数量, 用直尺测量幼苗高度(精确到 0.1 cm)。

1.3.2 群落物种多样性

根据影响林区和参照林区各个样方的红树林群落调查结果, 计算种间相遇机率指数(PIE)、Simpson 指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)等指标, 对比分析红树林植物物种多样性。群落物种多样性各计算公式如下^[7]:

$$PIE = N(N-1) / \sum N_i \times (N_i - 1) \quad (1)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (p_i)^2 \quad (2)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i \quad (3)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (4)$$

式中: S 为该样方的物种数目; p_i 为第 i 物种的个体数占总数的比例; N 为调查样方中所有物种的个体数之和; N_i 为第 i 物种的个体总数。

2 结果与讨论

2.1 红树林植物群落种类构成及分布

根据现场调查结果, 影响林区内有 7 种真红树植物分布, 包括白骨壤(*Avicennia marina*)、秋茄(*Kandelia obovata*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、卤蕨(*Acrostichum aureum*)、无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)、海漆(*Excoecaria agallocha*); 另外还有 4 种半红树植物分布, 分别为苦郎树(*Clerodendrum inerme*)、海杧果(*Cerbera manghas*)、黄槿(*Hibiscus tiliaceus*)、阔苞菊(*Pluchea indica*)。1 °C ~ 2 °C 温升区有真红树 6 种, 分别为桐花树、白骨壤、秋茄、海漆、无瓣海桑、卤蕨; 其中, 海漆和卤蕨均未形成群落, 零星分布在高潮带或海堤后方的咸酸地; 无瓣海桑仅有 4 株, 分布在红沙核电厂取水口近岸滩涂。2 °C ~ 3 °C 温升区内有 4 种真红树植物分布, 分别为桐花树、秋茄、白骨壤、海漆, 海漆仅在高潮带零星分布。影响林区的白骨壤、桐花树、秋茄多为混生, 从龙门港镇南部至大坪坡沿岸均有分

布。主要树种的生态位广阔, 占据所有样方, 但在垂直分布上存在分化的现象。

参照林区红树林共有真红树 5 种, 包括桐花树、白骨壤、秋茄、海漆、卤蕨; 半红树 4 种, 分别是苦郎树、黄槿、阔苞菊、海杧果。从红树植物种类分布来看, 参照海域 3 °C ~ 4 °C、2 °C ~ 3 °C、1 °C ~ 2 °C、0.5 °C ~ 1 °C 等 4 个不同温升区红树植物种类没有差异, 钦州湾主要树种——白骨壤、桐花树、秋茄和海漆, 在各个温升区均有分布。

2.2 红树林群落结构特征

2.2.1 群落总体结构特征

红树植物在长期的竞争和相互适应的生长过程中, 逐步形成相对稳定的植物群落, 红树群落可由一种或者几种不同的红树植物形成^[8-9]。群落类型可根据建群种或者共建种来命名, 共建种覆盖度应达到 10% 以上, 共建种之间以“+”相连, 乔灌层之间以“-”相连^[10]。

根据植物种类和结构特征(表 2), 影响林区和参照林区样方内建群的红树植物均主要有桐花树、白骨壤和秋茄 3 种; 主要群落类型有桐花树、白骨壤-桐花树、白骨壤+桐花树、桐花树+白骨壤、桐花树+白骨壤+秋茄、桐花树+秋茄+白骨壤、白骨壤、桐花树+秋茄 8 种类型。两个林区的红树植物种类及群落类型很接近, 均是以桐花树或白骨壤为建群种, 逐渐向秋茄群落演替的发展方向。

针对影响林区和参照林区均出现的相同群落类型, 结合具体温升因素, 对群落结构特征进行分析。

2.2.2 桐花树群落

以桐花树为建群优势种的群落, 出现在 FC01、QZ01、QZ02、QZ03、QZ04 和 QZ05 样方。影响林区 FC01 样方位于 0.5 °C ~ 1 °C 模拟温升区, 参照林区 QZ01 和 QZ02 样方位于 <0.5 °C 温升区, QZ03 和 QZ04 样方位于 0.5 °C ~ 1 °C 温升区, QZ05 样方位于 1 °C ~ 2 °C 温升区。影响林区 FC01 样方桐花树的种群覆盖度为 67%, 植株密度为 70 株/100 m², 平均株高为 214 cm, 平均基径为 6.7 cm, 平均冠幅乘积为 2.13 m²; 参照林区各样方桐花树种群覆盖度为 70% ~ 85%, 植株

表 2 研究区域红树植物群落特征

Tab.2 Characteristics of mangrove plant communities in the study area

群落类型	样方编号	种群	植株密度/株·100 m ⁻²	平均株高/cm	平均基径/cm	平均冠幅乘积/m ²	种群覆盖度/(%)	
桐花树	FC01	桐花树	70	214	6.7	2.13	67	
		白骨壤	3	255	11.7	12.07	16	
		秋茄	1	310	17.2	7.25	3	
	QZ01	桐花树	135	256	6.8	2.62	81	
		白骨壤	1	300	14.0	14.00	3	
		秋茄	1	260	6.8	5.00	1	
	QZ02	桐花树	137	228	12.9	1.68	85	
	QZ03	桐花树	178	278	9.0	2.38	80	
	QZ04	桐花树	171	247	7.1	2.07	71	
		秋茄	12	299	9.2	3.83	9	
	QZ05	桐花树	113	231	7.9	2.35	70	
		白骨壤	2	375	21.3	9.28	5	
		秋茄	2	320	9.3	9.15	5	
	桐花树+白骨壤	FC07	桐花树	60	127	3.5	0.54	22
			白骨壤	36	146	4.0	1.93	46
桐花树+白骨壤+秋茄	FC05	桐花树	55	152	4.8	0.95	38	
		白骨壤	10	219	9.9	3.81	28	
		秋茄	7	189	5.4	2.86	15	
桐花树+秋茄+白骨壤	QZ07	桐花树	61	207	5.3	0.98	22	
		白骨壤	4	333	21.3	22.84	33	
		秋茄	14	227	5.7	6.00	30	
桐花树+秋茄	QZ12	桐花树	158	191	3.9	0.86	58	
		秋茄	38	218	7.0	2.32	38	
白骨壤+桐花树	FC06	桐花树	22	170	4.0	0.94	8	
		白骨壤	62	233	5.4	3.27	74	
		秋茄	1	170	3.1	0.24	0.1	
	FC09	桐花树	92	168	4.2	0.56	16	
白骨壤		80	220	5.9	2.92	75		
白骨壤-桐花树	FC04	桐花树	65	200	5.9	2.22	44	
		白骨壤	9	311	10.6	12.76	35	
		秋茄	9	217	6.1	3.29	9	
	QZ06	桐花树	58	230	6.5	1.79	24	
		白骨壤	33	339	8.6	7.54	57	
		秋茄	1	270	4.7	5.25	1	
	QZ10	桐花树	126	213	5.4	0.66	33	
		白骨壤	19	377	14.4	7.31	54	
	QZ11	桐花树	91	200	5.3	1.41	34	
白骨壤		16	329	12.8	11.31	48		
		秋茄	1	280	14.6	9.30	2	

续表

群落类型	样方编号	种群	植株密度/株·100 m ⁻²	平均株高/cm	平均基径/cm	平均冠幅乘积/m ²	种群覆盖度/(%)
白骨壤-桐花树	QZ13	桐花树	157	224	4.7	1.22	39
		白骨壤	14	374	11.8	15.85	45
		秋茄	13	298	6.1	1.17	3
白骨壤	FC08	桐花树	3	193	4.1	1.07	1
		白骨壤	86	303	6.9	3.94	78
		秋茄	5	166	4.2	1.48	2
	FC10	桐花树	3	148	4.2	1.50	2
		白骨壤	91	181	5.8	2.51	80
	QZ09	桐花树	6	195	5.4	0.77	1
白骨壤		74	340	8.0	4.22	79	

密度为 113 ~ 178 株/100 m², 平均株高为 228 ~ 256 cm, 平均基径为 6.8 ~ 12.9 cm, 平均冠幅乘积为 1.68 ~ 2.62 m²。调查过程中, FC01 样方无更新层, 参照林区更新层较丰富, QZ02 样方密度最大, 达到 2080 株/100 m²。通过两个区域比较可知, 参照林区桐花树群落特征优于影响林区, 未见温升对红树群落的明显影响, 相反, 温升因素有可能起到一定的促进作用。

2.2.3 白骨壤-桐花树群落

群落以白骨壤和桐花树为共建种, 白骨壤与桐花树形成明显分层, 出现在 FC04、QZ06、QZ10、QZ11 和 QZ13 样方。影响林区 FC04 样方位于 1 °C ~ 2 °C 模拟温升区; 参照林区 QZ06 样方位于 2 °C ~ 3 °C 温升区, QZ10 和 QZ11 样方位于 3 °C ~ 4 °C 温升区, QZ13 样方位于 1 °C ~ 2 °C 温升区。

影响林区 FC04 样方桐花树的覆盖度为 44%, 白骨壤的覆盖度为 35%, 桐花树植株密度为 65 株/100 m², 白骨壤植株密度为 9 株/100 m², 桐花树的平均株高为 200 cm, 平均基径为 5.9 cm, 平均冠幅乘积为 2.22 m²; 白骨壤平均株高为 311 cm, 平均基径为 10.6 cm, 平均冠幅乘积为 12.8 m²。参照林区各样方桐花树的覆盖度为 24% ~ 39%, 白骨壤的覆盖度为 45% ~ 57%, 桐花树植株密度为 58 ~ 157 株/100 m², 白骨壤植株密度为 14 ~ 33 株/100 m², 桐花树的平均株高为 200 ~ 230 cm, 平均基径为 4.7 ~ 6.5 cm, 平均冠幅乘积为 0.66 ~ 1.79 m²; 白骨壤平均株高为 329 ~ 377 cm, 平均基径为 8.6 ~ 14.4 cm, 平均冠幅乘积

为 7.31 ~ 15.85 m²。调查过程中, FC04 样方无更新层, 参照林区 QZ06 和 QZ13 存在更新层, 桐花树更新层密度达到 180 株/100 m²。

比较同样处于 1 °C ~ 2 °C 温升区的 FC04 和 QZ13 样方可以发现, 两个样方的群落覆盖度接近, QZ13 样方植株密度、平均株高、平均基径和平均冠幅乘积均优于 FC04 样方。同样处于不同温升区的 QZ06、QZ10 和 QZ11 样方, 总体群落长势更加良好, 表明温升因素不是影响红树林群落特征的主要因素。

2.2.4 白骨壤群落

以白骨壤为建群优势种的群落, 出现在 FC08、FC10 和 QZ09 样方。影响林区 FC08 和 FC10 样方分别位于 <0.5 °C、0.5 °C ~ 1 °C 模拟温升区, 参照林区 QZ09 样方位于 3 °C ~ 4 °C 温升区。

影响林区 FC08 和 FC10 样方白骨壤的覆盖度为 78% ~ 80%, 植株密度为 86 ~ 91 株/100 m², 平均株高为 181 ~ 303 cm, 平均基径为 5.8 ~ 6.9 cm, 平均冠幅乘积为 2.51 ~ 3.94 m²; 参照林区 QZ09 样方白骨壤的覆盖度为 79%, 植株密度为 74 株/100 m², 平均株高为 340 cm, 平均基径为 8.0 cm, 平均冠幅乘积为 4.22 m²。调查过程中, FC08 样方存在白骨壤更新层, FC10 样方存在桐花树更新层, 更新层密度分别为 20 株/100 m² 和 40 株/100 m², QZ09 无更新层。

比较可知, 分别处于不同温升区的 FC08、FC10 和 QZ09 样方, 群落覆盖度接近, QZ09 样方植株密度虽然略低, 但是平均株高、平均基径和平均冠幅乘积更大, 处于更高温升区的 QZ09

样方群落结构更加稳定,说明温升因素对群落结构的稳定性未造成负面的影响。

2.3 红树林群落物种多样性

从影响林区和参照林区红树林群落生物多样性指数(表 3)可以看出,影响林区 Simpson 指数 D 为 0.062 ~ 0.498, Shannon-Wiener 多样性指数 H' 为 0.204 ~ 1.019, 种间相遇机率指数 PIE 为 1.067 ~ 2.002, Pielou 均匀度指数 J 为 0.204 ~ 0.996; 参照林区 Simpson 指数 D 为 0.000 ~ 0.474, Shannon-Wiener 多样性指数 H' 为 0.000 ~ 1.021, 种间相遇机率指数 PIE 为 1.000 ~ 1.919, Pielou 均匀度指数 J 为 0.079 ~ 0.710。对比影响林区和参照林区可知,两个林区的群落多样性指数均较低,变化范围相近, T 检验表明林区之间的 4 类指数均无显著性差异($p=0.134 \sim 0.290$)。

2.4 群落结构动态分析

2.4.1 影响林区群落结构往年数据对比

对比 FC10 样方在 2015—2022 年的群落调查数据(图 1)可知,FC10 样方群落中的植物种数没有变化,群落密度和平均株高总体呈上升趋势。2015 年样方内植株高度最高的 3 株白骨壤分别为 150 cm、148 cm 和 146 cm,本次调查居前三的植株株高分别为 270 cm、250 cm 和 250 cm,植株高度明显增大。幼苗密度下降,可能与群落覆盖度增长至较高值有关。

根据《防城港核电厂温升模拟报告》(天津大学)模拟结果,大坪坡(FC10 样方)的红树林群落处在红沙核电温排水 1 °C 温升范围之外,但该红树林区向海滩涂广阔平坦,白日滩涂露空时太阳辐射温度较高,涨潮水体在经过滩涂上涨过程中持续增温;天津大学无人机水温遥测结果显示,核电排水口西侧的海岸潮间带水温与核电排水口水温相当,FC10 样方处于 2 °C ~ 3 °C 自

表 3 红树林群落生物多样性指数

Tab.3 Biodiversity indices of mangrove communities

林区	样方编号	D	H'	PIE	J
影响林区	FC01	0.103	0.347	1.117	0.219
	FC04	0.363	0.971	1.581	0.613
	FC05	0.388	1.019	1.648	0.643
	FC06	0.401	0.912	1.682	0.575
	FC07	0.469	0.954	1.900	0.954
	FC08	0.159	0.501	1.192	0.316
	FC09	0.498	0.996	2.002	0.996
	FC10	0.062	0.204	1.067	0.204
参照林区	QZ01	0.029	0.125	1.030	0.079
	QZ02	0.000	0.000	1.000	/
	QZ03	0.000	0.000	1.000	/
	QZ04	0.123	0.349	1.141	0.349
	QZ05	0.067	0.249	1.072	0.157
	QZ06	0.474	1.021	1.919	0.644
	QZ07	0.370	0.948	1.599	0.598
	QZ09	0.139	0.384	1.163	0.384
	QZ10	0.258	0.692	1.351	0.437
	QZ11	0.268	0.679	1.371	0.428
	QZ12	0.313	0.710	1.458	0.710
	QZ13	0.261	0.748	1.356	0.472

然温升区。FC10 样方群落的优势种及群落类型均较为稳定,群落密度和平均株高总体呈上升趋势,说明该区域温升 2 °C ~ 3 °C 对红树林未造成不可接受的影响。

2.4.2 参照林区群落结构往年数据对比

本次参照林区群落调查的 QZ09 和 QZ10 样方,与广西红树林研究中心 2017 年金鼓江群落调查样方位置一致,比较两个年份之间的群落特征数据(表 4)可知:QZ09 样方中有 1 株桐花树植株死亡,但随之有 4 株白骨壤补充。QZ10 样

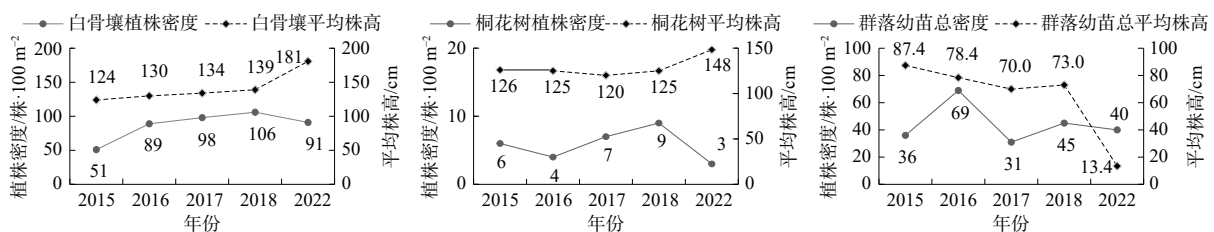


图 1 FC10 样方植株密度和平均株高历年变化

Fig. 1 Changes in plant density and mean plant height in the FC10 sample over the years

方的白骨壤植株减少了8株,死亡的白骨壤植株留下的空间迅速被更多的桐花树植株填补。群落种类组成未发生变化,覆盖度均有增加,群落密度稍有波动,平均株高整体稍有增加,总体上两个样方群落优势种和群落类型较为稳定,处在动态平衡之中。QZ09和QZ10均处于国投钦州电厂温排水3℃~4℃温升线范围内,说明温升因素对红树群落稳定性的影响是可接受的。

表4 参照林区QZ09和QZ10现状数据与2017年调查资料对比
Tab.4 Comparison of status data for reference forest areas QZ09 and QZ10 with 2017 survey information

站位	调查年份	种群	密度/株·100 m ⁻²	平均株高/cm	覆盖度/(%)
QZ09	2017	桐花树	7	180	70
		白骨壤	70	345	
	2022	桐花树	6	195	80
		白骨壤	74	340	
QZ10	2017	桐花树	105	180	65
		白骨壤	27	373	
	2022	桐花树	126	213	87
		白骨壤	19	377	

2.5 温排水对红树植物种类分布的影响分析

红树植物主要分布在亚热带和热带的沿海地区,大多数的树种对低温较敏感,过低的温度会使红树植物冻死或阻止其开花结实、种子萌发、幼苗生长^[11]。因此,红树林宏观上的分布主要受温度的影响。红树林生长的最适宜温度为最冷月平均温度不低于20℃,年平均气温范围为25℃~30℃,年平均海水温度范围为24℃~27℃。中国沿海不同区域自然分布的红树林植物群落从南到北,随着纬度上升、温度下降,其组成种类逐渐减少,群落结构趋于简单,群落种类多样性呈递减趋势。李元跃和林鹏划分的中国红树植物耐寒性等级序列表明,秋茄是中国耐寒性最强的红树植物,其自然分布的纬度最高,可到达福建省福鼎市,最低月均温度为8.4℃^[12]。有关研究认为,如果全球气温升高2℃,红树植物的分布区将向高纬度扩张约2.5个纬度。就我国而言,如果气温升高2℃,红树林的自然分布北界将由现在的福建省福鼎市扩张到浙江省嵊州市附近,引种分布北界由现在的浙江省乐清市北移到杭州湾^[13]。

2008年,南方遭遇50年一遇的持续低温雨雪冰冻天气,对华南沿海各省的红树林区造成了不同程度的危害。陈鹭真等在对遭受寒潮的10个代表性红树林区进行红树植物受害程度的调查中发现,极端低温伴随夜间退潮时,红树林受害更为显著^[14]。

通常认为冬季海水温度20℃是红树林分布的临界水温,因此红树植物低温胁迫的研究从气温进一步延伸到气温和水温的相互作用。陈鹭真等模拟冬季低温和夜间低潮对无瓣海桑幼苗影响的结果表明,极端低温如遇夜间高潮可以对无瓣海桑幼苗起到一定保温作用,从而缓解低温对叶片及幼苗生长造成的伤害^[15]。

红树林为喜温植物,未来的全球变暖趋势可能对红树林有积极的影响,例如,气温升高可能改变其大规模的分布、林分结构,提高生物多样性。冬季广西防城港红沙核电温排水导致的海水温升,在一定程度上提高了项目影响区域的水温和气温,对于受到低温胁迫的红树林能起到一定程度的保护作用。

如果夏季出现持续极端高温天气,对红树植物的危害较大。本研究收集的2007—2022年钦州湾中部表层水温最高为35.0℃,这个最高水温比当地7月平均水温(30.5℃)高出了4.5℃,出现在2012年7月。统计发现33℃~35℃的高温天气持续长达4d,每天持续6h左右。同时据《中国海湾志 第十二分册 广西海湾》对钦州龙门站1966—1983年定位站观测资料统计,极端最高水温为34.0℃(1976年8月24日),最热月7月的平均温度为29.89℃。上述情况说明调查区域的红树林不仅经过夏季正常高温的考验,也经过了特别高温的考验。

本次调查发现,参照林区国投钦州电厂引起的3℃~4℃、2℃~3℃、1℃~2℃、0.5℃~1℃4个温升区的红树植物种类没有差异,主要树种——桐花树、白骨壤、秋茄和海漆,在各个温升区均有分布,而且长势良好。这表明现实温升0.5℃~4℃对于红树植物分布范围没有产生明显的负面影响。

影响林区的模拟1℃~2℃、2℃~3℃温升区范围内的红树植物种类稍多于参照林区,除

了本区域广布的白骨壤、桐花树、秋茄和海漆之外, 项目组在 FC07 站位(核电进水口范围内, 模拟 $1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升区)发现 4 株无瓣海桑幼树。无瓣海桑引种自孟加拉国, 是一种非常适应热带生境的红树植物。另外, 在 FC08 站位(核电排水口西部 100 m, 滩涂温升 $2\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区)发现了本次调查仅有的 1 株木榄幼苗, 株高 75 cm。木榄纬度分布尺度很广, 南起海南省三亚, 北至福建省龙海, 也是一种适温能力很强的红树植物。

总之, 目前的红沙核电温升幅度对本区域红树植物种类分布未产生负面影响, 5 号、6 号机组运行之后的 $1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升也不会对本区域红树植物种类分布产生负面影响。

2.6 温排水对红树林群落的影响分析

对于广西红树林群落类型的划分, 李信贤等^[16]认为有 10 个群系 19 个群落类型; 梁士楚^[17]认为有 8 个群系 15 个群落类型, 组成种类主要有白骨壤、桐花树、秋茄、木榄、红海榄、海漆、老鼠簕和银叶树 8 种, 由这些种类形成单优势种或 2 个共建种的红树植物群落。在广西海岸红树林群落的演替进程中, 白骨壤和桐花树通常作为先锋树种, 生长在外滩形成先锋群落, 红海榄和秋茄是演替中期和中后期阶段的优势树种, 木榄则是演替后期的主要优势树种。

海岸红树林的演替, 主要是红树林与潮间带土壤基质、盐度、浸淹程度的相互适应及相互作用而形成的演替关系, 不同的红树林群落类型在潮间带大致与海岸线平行, 呈带状分布, 主要由土壤基质及其营养贫富、盐度等因素所决定, 是多项影响因素作用的综合结果。

本次调查参照林区 $3\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升线范围内的样方群落特征与往年相比较为稳定, 植株密度和株高总体上呈上升趋势。由此可判断, 温排水对本地区红树林群落无明显的负面影响。

3 结论

(1) 研究区域红树林具有明显的河口红树林特征。影响林区和参照林区均以桐花树或白骨壤为建群种, 形成桐花树群落、白骨壤群落、白骨壤-桐花树群落、桐花树+白骨壤+秋茄群落及桐花树+秋茄群落等。群落以原生林为主, 生长

良好、成熟稳定。低盐海域以桐花树为主, 高盐海域以白骨壤占优势, 桐花树常与白骨壤、秋茄等其他树种混生。两个林区红树植物种类及群落类型相近, 以桐花树或白骨壤为建群种、逐渐向秋茄群落演替的发展方向是一致的; 红树林群落多样性指数均较低, 变化范围相近, 两个林区之间的 4 类多样性指数均无显著性差异。

(2) 相同群落类型在不同的温升区无明显负面影响。相同群落类型表明群落构建树种种类、优势种及共优种一致, 群落更新演替历程及生长条件差异性不大。桐花树、白骨壤-桐花树和白骨壤 3 种群落类型在不同区域、不同温升区的群落特征差异表明, 处于更高温升区的红树林群落结构更加稳定, 群落特征更优, 说明温升对核电厂周边红树林的群落特征无明显不利影响。

(3) 局部林区的历史与现状数据对比表明, 区域红树林群落稳定持续发展。影响林区 FC10 样方、参照林区 QZ09 及 QZ10 样方的现状数据与历史数据对比结果显示, 虽然 FC10 样方处于 $2\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 自然温升区(本研究实测值), 参照林区 QZ09 和 QZ10 样方处于国投钦州电厂实际 $3\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升线范围内, 但 3 个样方的群落种类组成、优势种及群落类型均维持稳定, 群落密度和平均株高总体呈上升趋势。根据现有数据分析, 温排水或自然导致的 $2\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升, 对本地区红树林群落无明显的负面影响。

(4) 综上所述, 红沙核电 5 号、6 号机组温排水不会对 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升线范围内的红树林生态造成不可接受的影响。局部林区的历史与现状数据对比显示, 温排水或自然导致的 $2\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升对本地区红树林群落无明显的负面影响。

参考文献:

- [1] 林 鹏. 中国红树林生态系 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [2] BAYEN S, WURL O, KARUPPIAH S, et al. Persistent organic pollutants in mangrove food webs in Singapore[J]. Chemosphere, 2005, 61(3): 303-313.
- [3] 唐秋霞, 王友绍. 雷州半岛红树林群落特征及其分布格局 [J]. 生态科学, 2021, 40(5): 23-32.
- [4] 李亚红, 周 箐, 赵小芳, 等. 大港发电厂温排水对附近海域浮游动物影响研究 [J]. 环境保护科学, 2014, 40(3): 5-8.

(下转第 46 页)

- [24] ZHANG C, YU Z G, ZENG G M, et al. Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability[J]. *Environment International*, 2014, 73: 270-281.
- [25] 魏璟弢, 张焕玲, 李 铁, 等. 胶州湾及青岛近海表层沉积物重金属赋存形态研究 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2012, 42(增刊 1): 157-164.
- [26] 张志永, 万成炎, 胡红青, 等. 长江中上游表层沉积物重金属形态分布特征及风险评价 [J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 770-780.
- [27] LIU M, CHEN J B, SUN X S, et al. Accumulation and transformation of heavy metals in surface sediments from the Yangtze River estuary to the East China Sea shelf[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 245: 111-121.
- [28] LI C, SANCHEZ G M, WU Z F, et al. Spatiotemporal patterns and drivers of soil contamination with heavy metals during an intensive urbanization period (1989–2018) in southern China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 114075.
- [29] 张 志, 张润宇, 王立英, 等. 淡水沉积物中重金属生物有效性的研究进展 [J]. *地球与环境*, 2020, 48(3): 385-394.
- [30] LIU X Z, SHENG Y Q, LIU Q Q, et al. Ecological and environmental risks of heavy metals in sediments in Dingzi Bay, South Yellow Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 188: 114683.
- [31] 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 等. 九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价 [J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4601-4612.
- [32] 季永新, 张文杰, 黄津祥. As(V) 在粉质黏土中的吸附特性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(12): 2206-2214.

(本文编辑: 胡莹莹)

(上接第 25 页)

- [5] 谢 礼, 林 霞, 朱艺峰. 象山港国华宁海电厂附近海域小型底栖动物的群落结构 [J]. *生态科学*, 2012, 31(2): 167-172.
- [6] 蒋朝鹏, 徐兆礼, 陈佳杰, 等. 秦山核电温排水对鱼类分布的影响 [J]. *中国水产科学*, 2016, 23(2): 478-488.
- [7] 许会敏, 叶 蝉, 张 冰, 等. 湛江特呈岛红树林植物群落的结构和动态特征 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 864-869.
- [8] 范航清, 黎广钊, 周浩郎, 等. 广西北部湾典型海洋生态系统——现状与挑战 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [9] 潘良浩, 史小芳, 曾 聪, 等. 广西红树林的植物类型 [J]. *广西科学*, 2018, 25(4): 352-362.
- [10] 李丽凤, 刘文爱, 莫竹承. 广西钦州湾红树林群落特征及其物种多样性 [J]. *林业科技开发*, 2013, 27(6): 21-25.
- [11] 黄 星, 辛 琨, 王薛平. 我国红树林群落生境特征研究简述 [J]. *热带林业*, 2009, 37(2): 10-12.
- [12] 李元跃, 林 鹏. 中国红树植物生态解剖学研究综述 [J]. *海洋科学*, 2006(04): 69-73.
- [13] 陈小勇, 林 鹏. 我国红树林对全球气候变化的响应及其作用 [J]. *海洋湖沼通报*, 1999(2): 11-17.
- [14] 陈鹭真, 王文卿, 张宜辉, 等. 2008 年南方低温对我国红树植物的破坏作用 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 186-194.
- [15] 陈鹭真, 杜晓娜, 陆鑫眉, 等. 模拟冬季低温和夜间退潮对无瓣海桑幼苗的协同作用 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 953-958.
- [16] 李信贤, 温远光, 何妙光. 广西红树林类型及生态 [J]. *广西农学院学报*, 1991, 10(4): 70-81.
- [17] 梁士楚. 广西红树植物群落特征的初步研究 [J]. *广西科学*, 2000, 7(3): 210-216.

(本文编辑: 胡莹莹)