

Discussion on the Feasibility of Using the Thermal Drainage of Haiyang Nuclear Power Plant to Introduce *Kandelia Obovate*

Tao Han¹ Lan Yao² Wansong Pan¹ Yuncai Liu² Mingbo Zhao²

1. Shandong Nuclear Power Co., Ltd., Yantai, Shandong, 265116, China

2. Weihai Blue Economic Research Institute Co., Ltd., Weihai, Shandong, 264402, China

Abstract

In accordance with the requirements of the National “14th Five-Year Plan” for the comprehensive utilization of nuclear energy, we will study how to use the waste heat from the thermal drainage of the Haiyang Nuclear Power Plant to transplant ecologically valuable mangrove *Kandelia obovate*, improve ecological environmental benefits, and help carbon peak and carbon neutrality. Analyzed the feasibility of introducing *Kandelia obovate* into the thermal drainage area of Shandong Haiyang Nuclear Power Plant from the provenance, afforestation methods and natural conditions (meteorology, heavy metal content, salinity and vegetation). Combining scientific introduction methods and necessary insulation measures in winter, it is believed that the introduction of *Kandelia obovate* from the thermal drainage of the Haiyang Nuclear Power Plant has the possibility of success.

Keywords

Haiyang Nuclear Power Plant; thermal drainage; waste heat; introduction; *Kandelia obovate*

探讨利用海阳核电厂温排水引种红树秋茄的可行性

韩涛¹ 姚岚² 潘万松¹ 刘云财² 赵明波²

1. 山东核电有限公司, 中国·山东 烟台 265116

2. 威海市蓝色经济研究院有限公司, 中国·山东 威海 264402

摘要

根据国家“十四五规划”关于核能综合利用相关要求, 研究利用海阳核电厂温排水余热移植具有生态价值的红树秋茄 (*Kandelia obovate*), 提高生态环境效益, 助力碳达峰碳中和。从种源地、造林方式和自然条件 (气象、重金属含量、盐度和植被) 等分析红树秋茄引种山东海阳核电厂温排水区域的可行性, 结合科学的引种方式和冬季必要的保温手段, 认为利用海阳核电厂温排水引种秋茄具有成功的可能。

关键词

海阳核电厂; 温排水; 余热; 引种; 红树秋茄

1 引言

核电是高效、清洁、安全和经济的能源, 具有资源消耗少、环境影响小和供应能力强等优点。核电站发电效率偏低, 仅为 30%~35%, 大部分热能经循环冷却水排放, 其余热未得到利用^[1], 核电厂运行期间产生的温排水会对排放区水体理化性质、水生生物及邻近海域产生一定的影响^[2], 因此重视和提高核电厂温排水余热资源的有效利用具有重要意义。

红树林是生长在热带、亚热带潮间带的木本植物群落, 一般分布在 32° S, 32° N 的滨海湿地^[2], 是三种

典型的蓝碳生态系统之一, 具有维护生物多样性、净化海洋环境、防风固浪、等生态功能^[3-6]。而秋茄 (*Kandelia obovate*) 是最耐寒的红树植物, 天然分布北界为福建福鼎 (27° 20' N)^[7-10]。20 世纪 50 年代末, 中国浙江沿海开展大规模的红树引种造林^[11], 秋茄分布北界已延伸至温州乐清 (27° 20' N)、台州椒江 (28° 41' N)、台州三门 (29° 09' N) 等地区^[12]。

将红树植物引种到海阳核电厂温排水区域, 充分利用核电厂温排水余热资源, 将红树北移的范围进一步扩大, 可以发挥红树林生态优势, 降低核电厂温排水对周围环境的影响, 同时为红树林抗寒基础性研究和低温驯化提供天然试验场地。

研究发现, 不同种源地、种植方式、温度、盐度、重金属和植被等都会影响秋茄向高纬度移植的成活率^[13-14]。因

【作者简介】韩涛 (1983-), 男, 中国山东青岛人, 硕士, 工程师, 从事核电厂环境监测与环境保护方面的研究。

此，此次研究将对秋茄原产地福建宁德和海阳核电厂温排水排放区域的自然条件进行调查对比，结合科学的引种方式和冬季必要的保温手段，对利用海阳核电厂温排水引种秋茄项目进行可行性分析。

2 种源地

不同种源地秋茄胚轴成活率差异明显，较低纬度种源的秋茄抗寒力低，较高纬度的种源的秋茄抗寒力高^[13]。中国红树林自然分布北界为福建福鼎（27° 16′ N），与此次引种秋茄原产地福建宁德（26° 39′ N）纬度差异较小。

3 造林方式

研究人员在舟山地区分别选用了天然苗、胚轴、容器苗进行秋茄引种试验。结果显示，胚轴造林成活率最高（57.6%），其次是容器苗（28.5%），天然苗成活率为极低^[13]。因此，此次引种试验苗种由大量胚轴和少量天然苗、容器苗组成。

4 自然条件

4.1 气象条件

海阳核电厂为位于山东省烟台海阳市核电产业区邵家庄村南 200m 处，地处三面环海的岬角东端，地理坐标 121° 22′ E，36° 42′ N。海阳核电厂自建气象观测站近 10 年（2012 年 1 月—2020 年 12 月）监测数据情况显示，核电厂附近年平均气温 13.1℃，冬季（12 月、1 月、2 月）温度范围为 -13.9℃~15.1℃，最低温 -13.9℃，冬季平均气温 1.0℃；年平均降水量 613.3mm（未统计冬季降水量），降水集中在七、八月份（占全年降水量的 52%），近十年最大降水量 1173.7mm（2020 年），最低降水量 408.7mm（2015 年）。

温州乐清湾是中国红树林人工引种林分布的最北界，地理坐标是 121° 09′ 22′ E~121° 12′ 13′ E，

28° 19′ 50′ E~28° 21′ 33N，年平均气温 17.7℃，年平均海水温度为 18.9℃，冬季（12 月、1 月、2 月）温度范围为 10℃~19℃，极端低温 -5.8℃（1973.12.26），冬季平均气温 8℃；年平均降水量 2043.1mm，降水集中在七月份。

对秋茄原产地、引种最北缘地区及山东核电厂自然条件（如表 1 所示）对比发现，最北缘引种地区温州乐清湾曾经历过 -5.8℃的极端天气，而原产地宁德常年气温在 2.7℃以上，其他自然条件差距较小。引种地海阳核电厂自然条件与温州乐清湾纬度、气温、降水量等自然条件均存在较大差异。虽然核电厂温排水区域的温度相对有所提高，可在一定程度上减少极端天气对秋茄的伤害，但是自然条件的差异对此次引种试验带来较大的挑战。

表 1 秋茄自然分布及引种区域自然条件对比

地区	原产地 (福建宁德)	引种最北缘地区 (温州乐清湾)	引种区 (山东海阳核电厂)
纬度	26° 39′ N	28° 21′ N	36° 42′ N
年平均气温℃	18.5	17.7	13.1
冬季平均温度℃	11	8	1
极端最低温℃	2.7	-5.8	-13.9
年降水量 mm	1631.7	2043.1	613.3

4.2 温排水区海水温度条件

红树林是嗜热植物，极端低温是秋茄安全越冬的关键因子^[9-10]。有研究发现，舟山地区 2009 年出现极端天气，冬季最低温达到 -5.6℃，2008 年种植的秋茄容器苗冻死率达到 60%，但寒冬后存活的幼苗顺利度过下一年冬天^[13]。表明经过适当的抗寒性驯化，存活下来的秋茄幼苗会具有较强的抗寒能力。2020 年海阳核电厂排水口区域的温度检测结果显示（如表 2、图 1 所示），冬季（12 月、1 月、2 月）排水口温度范围在 6.6℃~19.2℃，可以为秋茄幼苗的过冬提供一定的保障。

表 2 海阳核电厂排水口水温检测结果

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
排水口温度℃	11.4℃~ 13.0℃	6.6℃~ 17℃	10.6℃~ 20.2℃	13.8℃~ 23.2℃	25.0℃~ 27.8℃	28.2℃~ 30.4℃	30.4℃~ 33.0℃	33.8℃~ 35.5℃	31.0℃~ 34.2℃	25.2℃~ 28.2℃	22.2℃~ 24.8℃	15.0℃~ 19.2℃

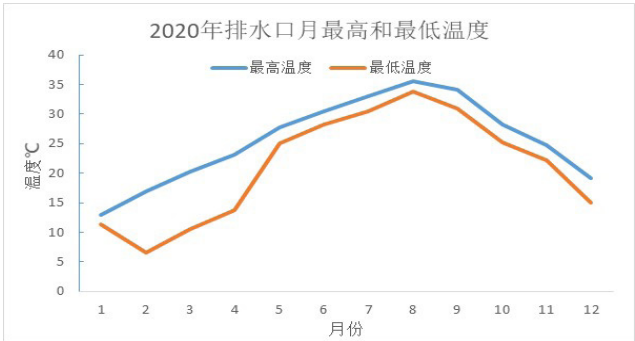


图 1 2020 年排水口月最高和最低温度图

4.3 秋茄引种区重金属检测

重金属是一类重要而突出的环境污染物,对植物生长具有明显的抑制作用^[15]。秋茄对重金属具有较强的抗性和富集力^[16-18],但是重金属含量过高会对秋茄造成伤害,不利于秋茄生长^[18]。由于秋茄生长环境的特殊性,低浓度重金属对其萌发影响较小,高浓度重金属移植秋茄幼苗的萌发,且浓度越高、作用时间越久,抑制效应越强^[19-21]。

研究发现,高浓度重金属会使秋茄幼苗根系破坏、生物量下降、叶片窄小、叶片数减少、茎高降低,造成幼苗存活率降低^[22]。其中重金属Cu和Zn、较高浓度的Cr⁶⁺等对秋茄幼苗的生长具有明显的抑制作用^[23]。其中,秋茄根系对Pb胁迫十分敏感,会造成植物根系破坏,导致植物死亡^[24]。但有研究发现,低浓度Cd(10~20mg/L)处理对秋茄生长具有一定促进作用,但当处理浓度提高至40mg/L时,幼苗株高显著降低^[24]。

采用电感耦合等离子体质谱法对海阳核电厂温排水重金属进行检测,结果显示所有被检重金属浓度较低,均在国标允许范围内(如表3所示),不会对秋茄幼苗萌发及生长产生抑制。

表3 山东海阳核电厂温排水区域水质重金属检测结果

序号	重金属	浓度(mg/L)	标准(mg/L)
1	Pb	0.00802	< 0.05
2	Hg	0.00035	< 0.0005
3	Cb	未检出(< 0.0005)	< 0.01
4	Cr	0.0218	< 0.5
5	Mn	0.155	—
6	Cu	未检出(< 0.02)	—
7	Zn	0.260	—
8	Ni	未检出(< 0.05)	—

4.4 盐度

由于特殊的生长环境,秋茄对盐有很强的耐受力。大量文献研究发现,在低盐度条件下,秋茄生长较快^[13,26],一般认为10‰~20‰盐度范围的水环境秋茄生长最好^[25]。与低盐度促进生长相反,秋茄的成活率会随着盐度的增加而提高^[13]。有研究发现秋茄幼苗的根、茎和叶片的热值会随着盐胁迫强度的提高而提高,即适当的盐胁迫可以促使秋茄积累更多的有机物,从而增加其抗寒能力^[26]。

受诸多因素影响,舟山海域海水盐度范围变动较大,表层盐度为12.6~30.1^[13],秋茄幼苗能够存活并顺利越冬,表明秋茄适应的盐度范围十分广泛。采用YSI-6600水质分析仪对海阳核电厂温排水区海水水质调查发现,该区域海水盐度为27.8‰~30.9‰,盐度范围虽不利于秋茄幼苗生长,但仍在秋茄幼苗可以生长存活的盐度范围之内^[27]。同时,较高的盐度条件下提高了秋茄幼苗的抗寒性,可以在一定程度上提高温排水区秋茄顺利越冬的可能性。

4.5 植被

有研究发现,互花米草会导致秋茄幼苗不能顺利越冬^[13],有研究认为此现象是由于互花米草的遮挡作用和其分泌的次级代谢物的抑制作用所导致^[28]。芦苇同样会抑制秋茄的生长,且密度越高抑制作用越强^[14]。海阳核电厂温排水区域未发现互花米草入侵,芦苇只在非种植区有少量分布,不会对秋茄幼苗产生破坏。

5 存在的挑战

秋茄是全世界最北分布的红树植物^[29],也是中国自然分布纬度最高的红树植物,但秋茄向高纬度地区移植过程中,低温仍然是其成功越冬的巨大威胁^[9-10]。作为最耐寒的红树植物,秋茄天然分布北界为福建福鼎(27° 20' N),而海阳核电厂位于较高纬度(36° 42' N)。根据海阳核电厂温排水区域的本底调查数据推测,其海水水质、土壤、植被等对秋茄生长存活影响较小,但气象条件对秋茄的生产影响较大,尤其是冬季极端天气远远超过秋茄存活的温度。海阳核电厂排水口水温监测数据显示,排水口水温在冬季仍然保持较高的温度(6.6℃~19.2℃),可以在冬季为秋茄提供较高的水温及土壤温度,但空气温度较低,对秋茄能否成功抵御低温带来巨大的挑战。

6 可行的措施

结合目前关于红树植物北移相关数据资料和海阳核电厂温排水区域的自然条件,科学的引种和提供冬季极端低温下的保暖措施是成功的关键。有研究发现,经历过冬季低温后,胚轴造林成活率为57.6%,容器苗造林成活率为28.5%。而从胚轴和容器苗两种造林方法下秋茄的生长状况来看,容器苗造林幼苗的生长指标,优于胚轴造林^[13]。

为了兼顾此次引种的实验性和成功率,本次引种以胚轴为主,同时移植少量容器苗和天然苗。保暖措施主要分两部分:一是低温来临前喷施植物防冻剂,其最佳实施时间在晚秋、初冬、春天到春寒,气温在10℃~15℃时使用,每7天喷施一次,连续使用2~3次,可大大促进糖分和干物质的积累,从而提升植物的抗冻能力。二是在引种区搭建小型半封闭塑料薄膜保温棚,一定程度上隔绝外界寒冷空气,保持棚内的温度和湿度。

7 结语

基于对秋茄原产地福建宁德和山东海阳核电厂温排水区域自然条件的调查对比,海阳核电厂温排水区域基本满足秋茄的引种条件,该引种方案有成功的可能性。同时,我们要结合科学的引种方式和冬季必要的保温手段,以抵御北方冬季可能出现的极端低温天气,提高引种的成功率。

参考文献

- [1] 梁珊珊,张兵,李俊生,等.环境一号卫星热红外数据监测核电站温排水分布——以大亚湾为例[J].遥感信息,2012(2):41-46.

- [2] 於凡,张永兴.滨海核电站温排水对海洋生态系统影响的研究[J]. 辐射防护通讯,2008,28(1):1-7.
- [3] 唐剑武,叶属峰,陈雪初,等.海岸带蓝碳的科学概念、研究方法以及在生态恢复中的应用[J].中国科学:地球科学,2018,48(6):10.
- [4] Mcleod E, Chmura GL, Bouillon S, et al. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂[J]. FRONT ECOL ENVIRON,2011(7):362-370.
- [5] Howard J, Sutton-Grier A, Herr D, et al. Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation[J]. FRONT ECOL ENVIRON,2017,15(1):362-365.
- [6] 章海波,骆永明,刘兴华,等.海岸带蓝碳研究及其展望[J].中国科学:地球科学,2015,45(11):1641-1648.
- [7] 林鹏.中国红树林生态系[M].北京:科学出版社,1997.
- [8] Quisthoudt K, Schmitz N, Randin CF, et al. Temperature variation among mangrove latitudinal range limits worldwide[J]. Trees, 2012,26(6):1919-1931.
- [9] Ellis W L, Bowles J W, Erickson A A, et al. Alteration of the chemical composition of mangrove (*Laguncularia racemosa*) leaf litter fall by freeze damage[J]. Estuarine Coastal and Shelf science,2006,68(1/2):363-371.
- [10] Osland M J, Hartmann A M, Day R H, et al. Microclimate Influences Mangrove Freeze Damage: Implications for Range Expansion in Response to Changing Macroclimate[J]. ESTUAR COAST,2019(7):1178-1182.
- [11] 陈秋夏,杨升,王金旺,等.浙江红树林发展历程及探讨[J].浙江农业科学,2019,60(7):1177-1181.
- [12] 卢翔,刘星,王金旺,等.江苏引种红树植物秋茄越冬抗寒技术研究[J].林业科技,2019,44(6):15-17.
- [13] 林楠.舟山地区红树植物秋茄移植技术研究[D].舟山:浙江海洋学院,2010.
- [14] 李建清,徐何方,叶丽珍,等.秋茄红树林北移引种造林技术[J].浙江林业科技,2001,21(6):3.
- [15] Zhang F Q, Wang Y S, Lou Z P, et al. Effect of heavy metal stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*)[J]. CHEMOSPHERE,2007,67(1):44-50.
- [16] Zhang F Q, Wang Y S, Sun C C, et al. A novel metallothionein gene from a mangrove plant *Kandelia candel*[J]. ECOTOXICOLOGY,2012,21(6):1633-1641.
- [17] 何东进,游巍斌,王韧,等.中国红树林天然分布北缘区不同起源秋茄林湿地沉积物重金属空间分布特征比较[J].应用与环境生物学报,2013,19(6):945-951.
- [18] 谢翔宇,翁铂森,赵素贞,等.Cd胁迫下接种丛枝菌根真菌对秋茄幼苗生长与抗氧化酶系统的影响[J].厦门大学学报(自然版),2013(2):244-253.
- [19] 王铮敏.Bap和Cr(VI)对红树植物秋茄幼苗生长及生理生态效应研究[J].厦门:厦门大学,2008.
- [20] 陈荣华,林鹏.汞和盐度对三种红树种苗生长影响初探[J].厦门大学学报:自然科学版,1988(1):110-115.
- [21] 郑逢中,林鹏.红树植物秋茄幼苗对镉耐性的研究[J].生态学报,1994,14(4):7.
- [22] Rahman MM, Chongling Y, Islam KS. Accumulation, distribution and toxicological effects induced by cadmium on the development of mangrove plant *Kandelia candel* (L.)[J]. CONTEMP PROBL ECOL,2011(6):98-102.
- [23] Chih-Yu C, Fei-Suang H, Chen SS, et al. Reduced toxicity of Cu and Zn to mangrove seedlings (*Kandelia candel* (L.) Druce.) in saline environments[Z]. 1995.
- [24] 秦天才,吴玉树,王焕校,等.镉、铅及其相互作用对小白菜根系生理生态效应的研究[J].生态学报,1998,18(3):320-325.
- [25] 卢昌义.秋茄红树林的造林技术及其生态学原理[J].厦门大学学报:自然科学版,1990(6):694-698.
- [26] 林鹏,王文卿.盐胁迫下红树植物秋茄(*Kandelia candel*)热值变化的研究[J].植物生态学报,1999(5):82-86.
- [27] 郑文教.盐度对秋茄幼苗的生长和水分代谢的效应[J].厦门大学学报(自然科学版),1990(5):575-579.
- [28] 佚名.互花米草成分研究Ⅱ.GC-MS法研究挥发性成分[J].中国生化药物杂志,2002,23(1):2.
- [29] 仇建标,黄丽,陈少波,等.强潮差海域秋茄生长的宜林临界线[J].应用生态学报,2010(5):1252-1257.