广西植物 Guihaia Jan. 2026, 46(1): 98-109 http://www.guihaia-journal.com

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202501015

邱思婷, 盘远方, 苏治南, 等, 2026. 濒危海草贝克喜盐草生物量的时空变化及其关键影响因素 [J]. 广西植物, 46(1): 98-109.

QIU ST, PAN YF, SU ZN, et al., 2026. Spatiotemporal variation in biomass of threatened seagrass *Halophila beccarii* and its key influencing factors [J]. Guihaia, 46(1): 98-109.

濒危海草贝克喜盐草生物量的时空变化及其关键影响因素

邱思婷[1,2], 盘远方[1,2], 苏治南[1,2], 邱广龙[1,2*]

(1. 广西科学院, 广西海洋科学院(广西红树林研究中心), 广西红树林保护与利用重点实验室, 广西 北海 536000;
2. 自然资源部北部湾滨海湿地生态系统野外科学观测研究站, 广西 北海 536015)

摘 要: 为深入探究濒危海草贝克喜盐草(*Halophila beccarii*)生物量在华南沿海的分布特征及其驱动因素, 该研究以华南沿海4省(区)6个区域(花场湾、洋浦、沙井、唐家湾、义丰溪和诏安)的贝克喜盐草为研究对象, 系统分析了其生物量在华南沿海的时空动态变化及关键环境影响因子。结果表明: (1)华南沿海贝克喜盐草的平均地上生物量、地下生物量和总生物量分别为(11.98±13.06) g·m^{-2}DW (平均值±标准差, 下同)、(12.06±12.96) g·m^{-2}DW 和(24.05±23.70) g·m^{-2}DW。其中, 唐家湾的生物量显著低于其他研究地点($P<0.05$)。生物量呈现明显的季节变化, 冬春季节低, 夏秋季节高。(2)除 pH 和亚硝酸盐以外, 其他环境因子(如水温、盐度、无机磷、硝酸盐和氨氮)在不同研究地点间均存在显著性差异($P<0.05$)。(3)相关性分析结果显示, 地上生物量与水温和无机磷呈显著正相关($P<0.05$), 而与氨氮呈显著负相关($P<0.05$); 地下生物量与无机磷和硝酸盐呈显著正相关($P<0.05$); 总生物量与无机磷和硝酸盐呈显著正相关($P<0.05$), 但与氨氮浓度呈显著负相关($P<0.05$)。(4)主成分分析(PCA)结果显示, 水温和亚硝酸盐是促进总生物量积累的主要正向因子, 而氨氮对其产生抑制作用。(5)线性回归进一步证实, 间隙水理化因子对总生物量的影响具有显著线性关系($R^2=0.118$, $P<0.001$)。该研究结果对深入理解贝克喜盐草的生态习性、环境适应机制及其濒危原因具有重要的科学价值, 同时为该物种的保护与管理提供了理论依据。

关键词: 贝克喜盐草, 生物量, 间隙水理化因子, 多元统计分析, 华南沿海

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2026)01-0098-12

Spatiotemporal variation in biomass of threatened seagrass *Halophila beccarii* and its key influencing factors

QIU Siting[1,2], PAN Yuanfang[1,2], SU Zhinan[1,2], QIU Guanglong[1,2*]

(1. *Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization, Guangxi Academy of Marine Sciences (Guangxi Mangrove Research Center), Guangxi Academy of Sciences*, Beihai 536000, Guangxi, China; 2. *Observation and Research Station of Coastal Wetland Ecosystem in Beibu Gulf, Ministry of Natural Resources*, Beihai 536015, Guangxi, China)

收稿日期: 2025-08-09 **接受日期:** 2025-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(32170399); 自治区直属公益性科研院所基本科研业务费项目(2022GMRC-02); 广西科学院改革发展专项(2024YGFZ504-102)。

第一作者: 邱思婷(1996—), 硕士, 助理研究员, 主要从事滨海湿地生态学和海草生态学研究, (E-mail)qstin1996@126.com。

*通信作者: 邱广龙, 博士, 研究员, 研究方向为海草与红树林生态学研究, (E-mail)gqiu@gxams.ac.cn。

Abstract: To enhance the understanding of biomass distribution and its driving factors in the threatened seagrass *Halophila beccarii* along the South China coast, this study systematically investigated the spatiotemporal dynamics of its biomass and key environmental variables across six regions (Huachangwan, Yangpu, Shajing, Tangjiawan, Yifengxi, and Zhao'an), located in four coastal provinces (regions) of South China. Seasonal field sampling was conducted to capture intra-annual variations. The results were as follows: (1) The mean aboveground, belowground, and total biomass values of *H. beccarii* were (11.98 ± 13.06) g · m^{-2}DW ($x \pm s$, the same below), (12.06 ± 12.96) g · m^{-2} DW, and (24.05 ± 23.70) g · m^{-2} DW, respectively, in which biomass at Tangjiawan was significantly lower than that at other research sites ($P<0.05$). Distinct seasonal patterns were observed, with lower biomass during winter and spring and higher values in summer and autumn. (2) Except for pH and nitrite, all other environmental factors (water temperature, salinity, inorganic phosphorus, nitrate, and ammonia nitrogen) differed significantly among sites ($P<0.05$), indicating substantial spatial heterogeneity in habitat conditions. (3) Correlation analyses revealed that aboveground biomass was significantly positively correlated with water temperature and inorganic phosphorus ($P<0.05$), and negatively correlated with ammonia nitrogen ($P<0.05$). Belowground biomass was positively correlated with inorganic phosphorus and nitrate ($P<0.05$). Total biomass showed positive correlations with inorganic phosphorus and nitrate ($P<0.05$), and a negative correlation with ammonia nitrogen ($P<0.05$), suggesting that both nutrient availability and temperature play key roles in regulating productivity. (4) Principal component analysis (PCA) result showed that water temperature and nitrite were the main positive factors affecting total biomass, whereas ammonia nitrogen exhibited an inhibitory effect, underscoring the importance of nutrient balance and thermal environment. (5) Linear regression further confirmed a significant linear relationship ($R^2 = 0.118$, $P<0.001$) between pore water physicochemical factors and total biomass, indicating that other unmeasured variables may also influence biomass variability. The results of this study have important scientific value for understanding the ecological characteristics, environmental adaptation mechanism, and causes of endangerment of *H. beccarii*, and offer a theoretical foundation for its conservation and management of this species.

Key words: *Halophila beccarii*, biomass, pore water physicochemical factors, multivariate statistical analysis, South China coast

海草是广泛分布于温带和热带海域的沉水性被子植物,通常生长在潮间带和潮下带浅水区(Short et al., 2007)。海草具有较高的初级生产力,既能通过食物链与碎屑循环为浅海生态系统提供营养和能量,又能将营养物质(氮、磷)和有机碳传送到海洋深处(Duarte & Dorte, 2017),为海洋"蓝碳"作出了重要贡献(Mcleod et al., 2011)。此外,海草还能通过削弱波浪能量、捕获沉积物和调节养分循环等机制来保护海岸线,同时还能作为沿海污染的生物指标(Lewis & Richard, 2009; Ondiviela et al., 2014; Costanza et al., 2017)。尽管海草在生态系统功能方面很有价值,但与珊瑚礁和红树林相比,其在科研、管理和保护方面未受到国际和国内社会的足够关注(Kumar & Deepak, 2021)。并且,全球气候变化和人类活动引起的沿海富营养化和盐度变化等问题,正加速全球海草床的衰退(Waycott et al., 2009)。在众多海草物种中,贝克喜盐草(*Halophila beccarii*)因其生境脆弱性而被世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)列为濒危物种(Short et al., 2011)。贝克喜盐草是水鳖科喜盐草属的海草植物,形态小,雌雄同株,有一年生和多年生生活史,生长快,种群变化大(邱广龙等, 2020; Geng et al., 2022)。多生长于受人为活动影响较大的潮间带,偏好淤泥或泥沙底质生境(Kumar & Deepak, 2021)。据报道,全球贝克喜盐草主要分布于马来西亚、泰国、新加坡、印度和中国等亚洲国家和地区(Short et al., 2011),在中国则集中分布于广西、广东、福建和海南 4 省(区)(黄向旭等, 2010; 邱广龙等, 2013; 陈石泉等, 2015; 钟超等, 2024)。

生物量是能量流动和物质循环的基础,同时也是衡量生态系统结构与功能的重要指标(邓筱凡等, 2022)。海草在海洋生态系统中扮演着重要角色,其生物量是衡量海草生态系统结构和功能的关键指标,直接反映了该生态系统的健康状况

和生产力水平(赵牧秋等,2020)。海草生物量的变化关系到海草与其他生物体之间的相互作用、物质的流动及其能量转化(郑凤英等, 2012)。因此,监测和研究海草生物量对评估海草生态系统功能至关重要,尤其是在探讨环境变化对海草生长与生态功能的影响时具有重要意义。海草的生长与发育受遗传基因精准调控,同时也受到外界环境的显著影响(Qin et al., 2020; Ankel et al., 2021)。通常而言,光照、温度、盐度、营养盐、无机碳源、水动力条件、污染物含量、动物摄食压力和人类活动等被认为是限制海草生长、发育的重要外界因素(许战洲等,2007;韩秋影和施平,2008;刘伟妍等,2017)。有研究发现,营养盐的供应在海草生长过程中起着决定性作用,适宜的营养盐可以促进海草的生长,但过量的营养盐输入会引起富营养化,进而影响海草生物量的积累和生态系统的稳定性(Jones et al., 1997; Cambridge & Kendrick, 2009)。江志坚等(2023)研究发现,铵盐浓度在 25~50 μmol · L^{-1}范围内可以促进海草生物量的积累,浓度过高则会引发毒性效应。此外,温度、盐度、pH 等也是影响海草生物量的关键因素(Munns, 2002; Lee et al., 2007)。其中,温度升高可能通过抑制光合作用或改变代谢途径而影响海草的生长,盐度波动则通过调节海草的生理过程,进而影响其生长和生物量积累(陈石泉等,2019;李政等,2021;刘有才等,2024)。水体 pH 值的波动对海草生物量的影响较为复杂,短期内 pH 升高可能通过促进光合作用而促使生物量增加,但长期酸化或剧烈波动则可能通过营养限制、生理胁迫和生态竞争抑制海草生物量的积累(Zimmerman et al., 1997; 蔡嘉丽,2023)。因此,生物量的变化不仅反映了种群的生长状况,还反映了环境因素对其生长和生态功能的影响。研究贝克喜盐草生物量及其关键环境因子的关系,不仅能够帮助预测其生态系统的生产力水平,还能为贝克喜盐草的保护、恢复与资源保育提供科学依据。

我国对贝克喜盐草研究起步较晚,以往的研究报道主要集中在物种分布、形态结构、功能性状、种群动态、土壤种子库和遗传变异这几个方面(邱广龙等,2013;陈石泉等,2019;盘远方等,2024,2025;Chen et al., 2024),而对贝克喜盐草生物量及其关键驱动因子之间的相关性研究较少,这限制了人们对这一濒危物种生长策略的深入理解,也严重阻碍了其保护和研究工作的有效开展。研究贝克喜盐草生物量有助于更好地掌握贝克喜盐草种群的生长发育状况、种群动态及预测贝克喜盐草生态系统的健康状况和生产力水平,对贝克喜盐草种群的更新、恢复具有重要意义。鉴于此,本研究以华南沿海(福建、广东、广西和海南)的贝克喜盐草为研究对象,通过测定不同研究地点贝克喜盐草生物量和间隙水理化因子,拟探讨:(1)华南沿海贝克喜盐草的生物量及时空差异;(2)影响海草生物量的关键环境因素。本研究以期为贝克喜盐草的种群建立、发展、自我恢复,以及对其濒危机制的探讨和资源保育研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究调查区域包括:海南省澄迈县花场湾(HCW)和儋州市洋浦(YP)、广西壮族自治区钦州市沙井(SJ)、广东省珠海市唐家湾(TJW)和汕头市义丰溪(YFX),以及福建省漳州市诏安湾(ZA),各研究地点的贝克喜盐草海草床情况见表 1。其中,ZA、YFX、TJW 和 SJ 属于亚热带海洋性季风气候,年均降水量 1 300~2 200 mm,降水主要集中在 6—8 月,年平均气温 18~23 ℃;HCW 和 YP 属于热带海洋性季风气候,年均降水量在1 600 mm 以上,年平均气温 22~26 ℃(Geng et al., 2022)。

1.2 样品的采集与处理

2022 年 5 月至 2023 年 11 月期间,根据各个研究地点贝克喜盐草海草床面积大小、分布、水文情况及其与海堤的位置关系,设置 3~4 条垂直于海堤或岸边的样带,每条样带平行间隔 50~100 m。退潮时,在每条样带有贝克喜盐草均匀分布处,用直径 7 cm 的圆柱形采样器随机采集 3 个高度为 10 cm 的柱状样品,放入密封袋中,置于便携式冷藏箱内储存,随后带回实验室。采样频率为每季度 1 次(其中,2022 年春季只调查了 YP 和 SJ 这两个地点,2022 年夏季未调查 YP)。每个样品用 50 目标准筛筛洗后,将贝克喜盐草挑拣出来,洗净后分为地上部分和地下部分,分别装入信封内,置于 70 ℃的烘箱内烘干至恒重,用电子天平

表 1　各研究地点的基本情况

Table 1　Basic information of each research site

研究地点 Research site	纬度 Latitude	经度 Longitude	海草覆盖率 Seagrass coverage (%)	大型藻类覆盖率 Macroalgae coverage (%)	叶片啃食比 Leaf herbivory rate (%)
洋浦 YP	19°43′09.68″N	109°12′34.03″E	31.45±9.57a	24.60±11.53a	15.46±4.94a
花场湾 HCW	19°55′07.46″N	109°58′37.37″E	25.33±3.66b	9.38±3.92b	5.74±1.77c
沙井 SJ	21°29′19.55″N	108°34′38.24″E	20.97±4.56b	2.78±2.11d	10.95±5.46b
唐家湾 TJW	22°01′51.28″N	113°35′31.12″E	2.24±0.24d	5.37±3.88c	5.91±2.11c
义丰溪 YFX	23°32′33.37″N	116°53′53.74″E	25.33±10.23b	4.20±3.56c	7.64±5.69b
诏安 ZA	23°40′05.82″N	117°13′26.13″E	10.77±2.11c	1.08±1.11d	0.06±0.24d

注：数据为均值±标准差，不同小写字母表示各组间差异显著（$P<0.05$）。

Note: Data are $\bar{x}\pm s$, and different lowercase letters indicate significant differences among groups ($P<0.05$).

（精度 0.000 1 g）称重，计算每个样地单位面积内贝克喜盐草海草床的地上生物量（aboveground biomass, AB）、地下生物量（belowground biomass, BB）和总生物量（total biomass, TB）。

1.3 理化因子采样与测定

于退潮期间，采用原位采集法在海草床沉积物无积水区域进行采样，此时潮间带海草床完全暴露且水深为零。具体步骤如下。（1）研究地点准备：在每个研究地点挖掘深度约 30 cm 的沉积物剖面，静置 5～10 min；（2）间隙水抽取：使用注射器缓慢抽取孔隙水约 500 mL，操作时避免吸入沉积物颗粒；（3）样品处理：抽取的间隙水立即注入棕色避光密封瓶，现场冷藏（4 ℃）保存，并于 24 h 内经 0.45 μm 滤膜抽滤，分装后冷冻（−20 ℃）保存，用于实验室测定无机磷（inorganic phosphorus, IP）、亚硝酸盐（nitrite, NO_2^--N）、硝酸盐（nitrate, NO_3^--N）和氨氮（ammonia nitrogen, NH_3-N）的浓度；（4）原位参数测定：采用多功能水质检测仪（衡欣 AZ86031）现场测定间隙水的盐度、温度、pH 及总溶解性固体（total dissolved solids, TDS）含量，每条样带平行测定 3 组数据。盐度依据实用盐标表示，无量纲。

1.4 统计分析

在数据分析前，采用 Shapiro-Wilk 检验评估各变量的正态性，对于不满足正态分布的数据，通过对数转化以满足后续分析需求。采用单因素方差分析（one-way ANOVA）对不同研究地点的贝克喜盐草生物量以及环境因子进行差异性检验。当检验结果达到显著水平 $P<0.05$ 时，再运用 Tukey-Kramer HSD test 进行多重比较。

为探究海草生物量和间隙水理化因子之间潜在的线性关联关系，本研究计算了各变量之间的 Pearson 相关系数，并采用 Origin 2024 绘制相关性热图。在相关性分析的基础上，为识别理化因子主要变异结构，利用 IBM SPSS Statistics 25.0 的主成分分析（principal component analysis, PCA）对其进行降维处理，主成分的提取基于特征值大于 1 的标准（Kaiser, 1960）。此外，为探究间隙水理化因子对海草总生物量的影响，利用 IBM SPSS Statistics 25.0 构建了线性回归（linear regression）模型，模型中因变量为贝克喜盐草总生物量，自变量为主成分分析结果识别出的特征值大于 1 的因子。最终模型中各自变量的贡献将通过标准化回归系数（Beta）以及基于 t 检验的 P 值来呈现（显著性水平设为 0.05 ）。所有数据的整理以及绘图分别在 Excel 2007、IBM SPSS Statistics 25.0 和 Origin 2024 中完成。

2　结果与分析

2.1 贝克喜盐草生物量的区域差异和季节变化

华南沿海贝克喜盐草平均的地上生物量、地下生物量和总生物量分别为（11.98±13.06）g·m^{-2}DW、（12.06±12.96）g·m^{-2}DW 和（24.05±23.70）g·m^{-2}DW，并且地上生物量、地下生物量和总生物量均表现为唐家湾最小，分别为（2.29±2.85）g·m^{-2}DW、（1.57±2.23）g·m^{-2}DW 和（3.86±4.70）g·m^{-2}DW（图 1：A、C、E；表 2）。不同研究地点贝克喜盐草生物量总体的变异范围较

小(58.29%~142.18%),其中 HCW 和 TJW 的变异系数较大,均在 110.01%以上;而 YFX 的变异系数最小,变异系数在 75.68%以下(表 2)。

唐家湾贝克喜盐草的生物量显著小于其他研究地点的生物量($P<0.05$)(图 1:A、C、E);贝克喜盐草的地上生物量、地下生物量和总生物量随着季节变化基本表现出相同的变化趋势(除花场湾地下生物量在 2023 年冬季和沙井地下生物量在 2023 年夏季以外),即在冬季和春季较低,而夏季和秋季较高(图 1:B、D、F)。

2.2 海草床间隙水理化因子的空间差异

如图 2 所示,除了 pH 和亚硝酸盐在不同研究地点间差异不显著外($P>0.05$)(图 2:C、F),其余间隙水理化因子在不同研究地点间存在不同程度的差异性($P<0.05$)。其中,盐度为 HCW 最高,YFX 最低,呈现 HCW>ZA>YP>TJW>SJ>YFX 的规律(图 2:A);水温为 YFX 最高,SJ 最低,呈现 YFX>TJW>YP>HCW>ZA>SJ 的规律(图 2:B);总溶解性固体为 ZA 最高,TJW 最低,呈现 ZA > HCW>SJ > YP>YFX >TJW 的规律(图 2:D);无机磷含量为 ZA 最大,TJW 最小,呈现 ZA > HCW>YP >YFX>SJ > TJW 的规律(图 2:E);硝酸盐含量为 TJW 最高,HCW 最低,呈现 TJW > ZA>YP >YFX>SJ >HCW 的规律(图 2:G);而氨氮含量为 YP 最高,TJW 最低,呈现 YP > HCW>ZA >SJ>YFX >TJW 的规律(图 2:H)。

2.3 贝克喜盐草生物量与间隙水理化因子的多元统计分析

Pearson 相关性分析结果(图 3)表明,贝克喜盐草总生物量与地上生物量、地下生物量均呈极显著正相关($r=0.91$, $P<0.01$);地上生物量与地下生物量呈极显著正相关($r=0.66$, $P<0.01$)。pH、盐度、总溶解性固体和亚硝酸盐均与生物量指标的相关性不显著($P>0.05$),无机磷与所有生物量指标均呈极显著正相关($P<0.01$)。硝酸盐与地下生物量($r=0.10$)和总生物量($r=0.11$)呈正相关($P<0.05$)。氨氮与地上生物量呈极显著负相关($P<0.01$),与总生物量呈显著负相关($P<0.05$)。水温与地上生物量呈极显著正相关($r=0.16$, $P<0.01$)。

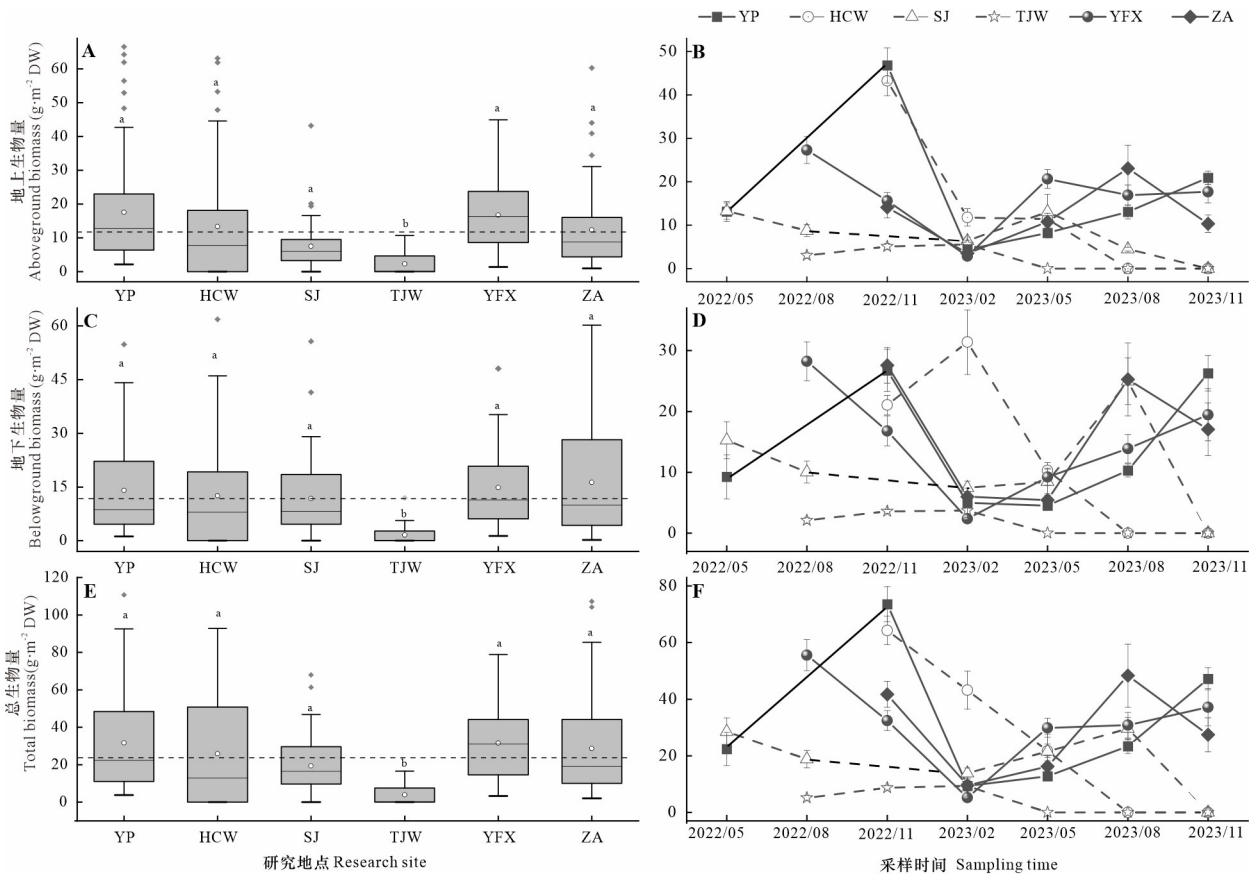
主成分分析结果(表 3)显示,特征值大于 1 的成分有 4 个,累积方差百分比达到了77.189%。通过主成分分析,将 8 个变量简化为 4 个综合维度:主成分 1 (PC1)主要反映水体矿化程度,与总溶解性固体、盐度和 pH 密切相关;主成分 2 (PC2)主要反映氮循环微生物活性,与亚硝酸盐、硝酸盐和氨氮相关;主成分 3 (PC3)主导温度驱动的营养释放,与水温、无机磷和氨氮相关;主成分 4 (PC4)反映氮形态与酸碱性互作以及指示污染输入特征,与氨氮、硝酸盐和 pH 相关。影响贝克喜盐草总生物量的间隙水理化因子主要有总溶解性固体、盐度、亚硝酸盐、水温和氨氮。综合线性回归分析结果(表 4)表明,PC3 和 PC2 是总生物量的关键促进因子,其中 PC3 贡献最大。PC1 和 PC4 分别对总生物量有微弱促进作用和抑制作用。总生物量回归模型解释了 11.8%变异,其统计可靠性较高($F=11.950$, $P<0.001$)。

3 讨论

3.1 贝克喜盐草生物量变异分析

生物量是植物初级生产力的直接体现,生物量的高低也是评估生态系统健康状况和能量流动的关键指标(Tang et al., 2018)。本研究发现,华南沿海贝克喜盐草的平均地上生物量、地下生物量和总生物量分别为(11.98±13.06) g·m^{-2}DW、(12.06±12.96) g·m^{-2}DW 和(24.05±23.70) g·m^{-2}DW,不同研究地点的生物量存在显著性差异,其中唐家湾的生物量显著低于其他研究地点。本研究结果反映了贝克喜盐草在不同环境条件下的生长和分布差异,这种差异与其所处的生境特征、海草的生长周期及水分和养分的供应等因素密切相关,这与杨梓暄等(2024)的研究结果相同。Pan 等(2025)研究发现,唐家湾人为干扰程度最大,超过 70%,其余研究地点人为干扰程度相对较低(20%~39%),并且人为干扰程度对贝克喜盐草的地上生物量和地下生物量呈显著负相关。此外,不同研究地点之间的纬度跨度较大,并且研究地点间的间隙水营养盐、水温和盐度等环境因子存在显著性差异,这也是导致不同研究地点贝克喜盐草生物量存在较大变异的原因。

贝克喜盐草生物量的变化除受到环境因素影响以外,还与其种群生长特性密切相关(Qin et al., 2020; Ankel et al., 2021)。本研究发现,生物量随季节变化基本呈现冬春季节较低、夏秋季节较高的规律。不同时间段内各研究地点的贝克喜盐草生长状况(如覆盖度和密度)存在较大差异,这也是导致生物量在时空上变异的重要原因。例如,



箱体外的线条表示数据的正常范围，即最大值和最小值；箱体中间的线和点分别表示中位数和平均值；箱体外的点表示离群值。下同。A、C 和 E 分别代表贝克喜盐草地上、地下和总生物量在不同研究地点之间的差异性。虚线表示贝克喜盐草生物量的均值。B、D 和 F 分别代表贝克喜盐草地上、地下和总生物量的时空分异趋势。不同小写字母表示不同处理组之间的生物量差异显著（$P<0.05$）。

The lines outside the box represent the normal range of the data, namely the maximum and minimum values; the line and point inside the box represent the median and mean, respectively; the points outside the box indicate outliers. The same below. A, C, and E represent the differences in aboveground, belowground, and total biomass of *H. beccarii* across different research sites, respectively. The dashed lines indicate the mean biomass of *H. beccarii*. B, D, and F indicate the spatiotemporal variation trends of aboveground, belowground, and total biomass of *H. beccarii*, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences in biomass among different research sites ($P<0.05$).

图 1　各研究地点贝克喜盐草的地上、地下和总生物量

Fig. 1　Aboveground, belowground and total biomass of *Halophila beccarii* at each research site

在整个调查期间（2022 年 11 月至 2023 年 11 月），唐家湾和沙井样地覆盖度和密度较低，并且这两个样地的海草植被出现了退化现象。其中，唐家湾在 2023 年 2 月之后进入衰退期，沙井在 2023 年 8 月之后进入衰退期；后续追踪观察发现，两处植被直至 2024 年 3 月后才开始恢复。这一现象反映了植被覆盖度和密度对生物量变化具有重要影响。

3.2 贝克喜盐草生物量与间隙水理化因子的相关性分析

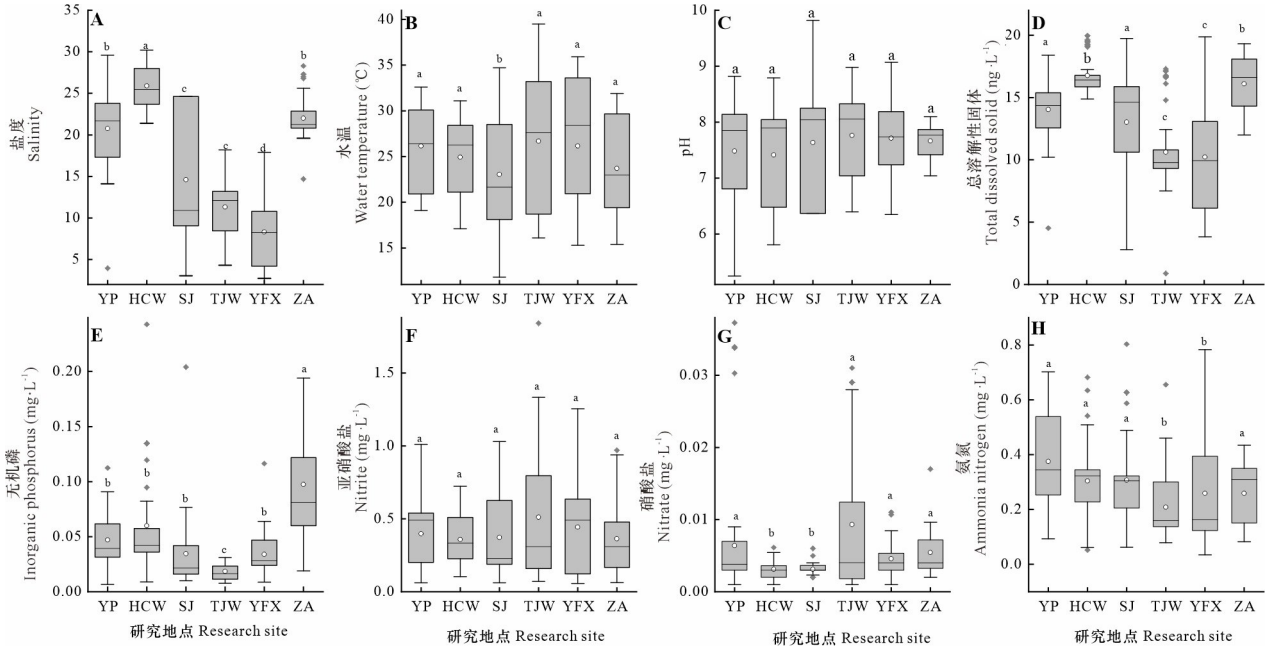
本研究发现，地上生物量与水温和无机磷呈极显著正相关、与氨氮呈极显著负相关；地下生物量与无机磷呈极显著正相关，与硝酸盐呈显著正相关；总生物量与无机磷呈极显著正相关，与硝酸盐呈显著正相关，与氨氮呈显著负相关。这说明水温和营养盐（氮、磷养分）在海草生长过程中具有复杂的交互作用，尤其是水温作为最强的综合促进因子，可通过影响细胞酶活性、光合作用效率和光合作用产物的积累，直接影响海草的生长季节和生物量积累（李森等，2011；李勇等，2014）。具体而言，间隙水水温升高可加速沉积物中微生

表 2 不同研究地点贝克喜盐草生物量的统计描述

Table 2 Statistical information on the biomass of *Halophila beccarii* at different research sites

研究地点 Research site	生物量 Biomass	均值 Mean	中位数 Median	标准差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 *CV* (%)
花场湾 HCW	地上生物量 Aboveground biomass	13.30	7.73	17.16	1.38	2.95	129.01
	地下生物量 Belowground biomass	12.55	7.98	14.98	1.23	3.92	119.34
	总生物量 Total biomass	25.85	12.98	28.43	0.74	2.67	110.01
洋浦 YP	地上生物量 Aboveground biomass	17.53	12.73	15.59	1.55	4.87	88.94
	地下生物量 Belowground biomass	14.05	8.68	12.51	1.18	3.70	88.99
	总生物量 Total biomass	31.85	22.40	25.92	1.08	3.30	82.07
沙井 SJ	地上生物量 Aboveground biomass	7.29	5.95	7.27	2.82	11.53	99.82
	地下生物量 Belowground biomass	10.45	7.61	11.04	1.78	6.93	105.71
	总生物量 Total biomass	17.74	14.76	15.60	1.13	4.20	87.97
唐家湾 TJW	地上生物量 Aboveground biomass	2.29	0.13	2.85	0.92	2.75	124.35
	地下生物量 Belowground biomass	1.57	0.10	2.23	2.15	9.70	142.18
	总生物量 Total biomass	3.86	0.23	4.70	0.89	2.72	121.54
义丰溪 YFX	地上生物量 Aboveground biomass	16.70	16.29	9.73	0.21	2.60	58.29
	地下生物量 Belowground biomass	14.74	11.38	11.16	1.05	3.95	75.68
	总生物量 Total biomass	31.44	31.08	19.53	0.48	2.67	62.10
诏安 ZA	地上生物量 Aboveground biomass	12.37	8.77	11.47	1.98	7.50	92.75
	地下生物量 Belowground biomass	16.27	9.94	15.39	0.95	2.76	94.61
	总生物量 Total biomass	28.64	19.12	25.37	1.32	4.18	88.59

物的代谢,促进氮和磷的矿化和硝化作用,从而导致氨氮和无机磷的积累(蔚枝沁等,2012;刘松林等,2016)。氨氮浓度过高会对海草产生毒性,可能通过抑制光合作用和破坏细胞膜影响生物量的积累(蔚枝沁等,2012)。相比之下,无机磷的增加则有助于缓解氨氮的毒性,促进海草生长(刘松林等,2016)。同样,硝酸盐作为硝化过程的终产物,也能有效促进海草的生物量积累(黄驰等,2017)。亚硝酸盐可能作为氮循环中间产物或与其他关键因子(如硝酸盐)共变,即使它与生物量的简单线性相关不显著,也会在 PCA 定义的多元空间中与高生物量区域相关联。一般认为,生长在沙质或有机质丰富的沉积物中的海草会受氮限制,而生长在碳酸盐沉积物中的海草通常会受到磷限制,在某些特定条件下,海草可能受到氮和磷的双重限制(Fourqurean & Zieman, 2002)。适度的营养盐浓度可促进海草生长,受营养盐限制的海草床,营养物质含量的增加可能会促进海草生物量的增加。赵牧秋等(2020)发现氮和磷不是三亚周边海区泰来草(*Thalassia hemprichii*)生长的限制因子,因为氮、磷等营养物质仅增加了泰来草的株高,其生物量和生产力并未有显著改善。此外,蔚枝沁



不同小写字母表示不同研究地点之间的环境因子差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences in environmental factors among different research sites ($P<0.05$).

图 2　不同研究地点的环境因子对比

Fig. 2　Comparison of environmental factors among different research sites

等(2012)和刘松林等(2016)对海南黎安港海草床的研究结果表明,氮输入过量将导致氮磷比增加,进而加剧氮磷的限制效应。本研究结果表明,沉积物间隙水无机磷浓度过低可能是限制珠海唐家湾贝克喜盐草生长的一个原因;在钦州沙井,无机磷和硝酸盐可能是主要限制因子;而在澄迈花场湾,硝酸盐则可能是主要限制因子。氮、磷等营养物质对华南沿海贝克喜盐草生物量具有显著影响,这与 Orth 等(2006)的研究结论一致。

本研究中,虽然间隙水盐度、总溶解性固体和 pH 本身与生物量相关性不显著,但盐度与总溶解性固体呈极显著正相关,pH 与盐度和总溶解性固体呈极显著负相关。水温与 pH 呈极显著正相关,与盐度和总溶解性固体呈极显著负相关。这是因为水温升高会导致 CO_2 溶解度降低,从而使得 pH 值增大,致使水体离子溶解受到抑制(彭人勇和徐嘉男,2019)。高盐度和总溶解性固体含量指向间隙水的蒸发浓缩作用,高温季节伴随强降雨,淡水输入成为主导因子,地表径流输入淡水稀释水体,导致盐度与总溶解性固体同步下降。贝克喜盐草分布区域多为季风气候控制下的河口区,受干湿季节影响显著,降雨事件以及河口淡水输入会引起海草生长的近岸海域盐度下降(Sánchez-Lizaso et al., 2008)。盐度降低可减少海草渗透调节能耗,将更多能量分配给海草生长,促进了海草生长。另外,贝克喜盐草通常被认为是广盐性物种,盐度耐受范围为 0~30,最适生长区间为 10~20(杨梓暄等,2024;盘远方等,2025)。本研究区域的间隙水盐度(均值为 17.54)在贝克喜盐草最适生长区间内,不显著的相关性表明在贝克喜盐草耐受范围内盐度不是其生物量的主要限制因子。总之,盐度和总溶解性固体通过影响离子平衡、渗透调节或间接影响其他关键因子对海草生物量产生微弱的积极效应。

本研究中,间隙水理化因子对贝克喜盐草总生物量的线性影响具有显著性($P<0.001$),所纳入的因子(总溶解性固体、盐度、亚硝酸盐、水温和氨氮)确实对贝克喜盐草生物量产生了可检测的影响,但其解释力不算特别高($R^2 = 0.118$),表明变量间存在关联但存在非线性关系或复杂交互效

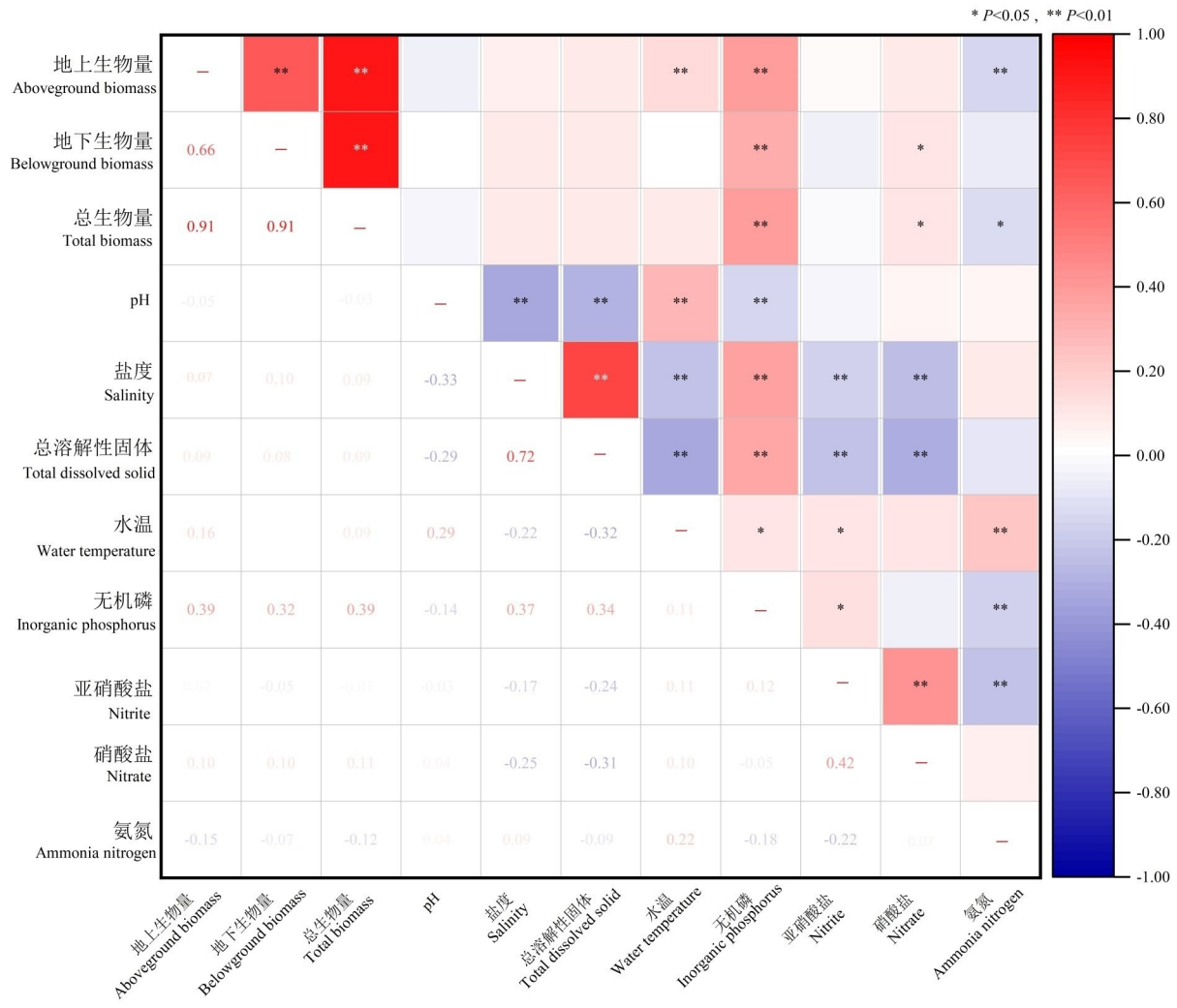


图 3 相关性分析热值

Fig. 3 Correlation analysis calorific value

应。张璐璐等(2018)发现富营养化(营养盐增加)和盐度降低会协同作用,显著降低日本鳗草(*Zostera japonica*)的生物量(包括地上和地下部分),两者共同作用时对生物量的抑制效果大于单一因素的作用。另外,光限制、沉积物特性、生物互作、水文动力、遗传分异和其他限制性养分等也会影响海草生物量,在一定程度上影响此回归模型对间隙水理化因子线性影响的解释力。虽然间隙水理化因子并非贝克喜盐草生物量的主控驱动力,但其通过间接路径(如调节养分有效性或胁迫强度)参与海草生长调控。因此,未来的研究应进一步整合非线性建模方法,并加强对沉积物、水体和生物的多维度监测,深入解析海草生长过程中的变异来源。

4 结论

本研究揭示了华南沿海贝克喜盐草生物量的时空分布特征及其关键驱动因素。本研究发现,贝克喜盐草的生物量有空间异质性,该物种在季节性环境变化中具有适应性。除 pH 和亚硝酸盐以外,其他间隙水理化因子在不同研究地点间存在显著性差异。特别是水温、无机磷、氨氮、亚硝酸盐和硝酸盐与贝克喜盐草生物量的变化密切相关,表明这些因子在贝克喜盐草的生长和生物量积累中发挥了重要作用。通过主成分分析,本研究进一步识别出水温和亚硝酸盐作为促进贝克喜盐草总生物量积累的关键因子,而氨氮则显著抑

表 3　特征值及主成分矩阵

Table 3　Eigenvalues and principal component matrix

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalues			变量 Variable	成分得分系数矩阵 Component score coefficient matrix			
	合计 Total	方差百分比 Variance percentage (%)	累积方差百分比 Cumulative percentage of variance (%)		1	2	3	4
1	2.475	30.939	30.939	pH	−0.201	−0.202	0.174	−0.478
2	1.476	18.451	49.390	盐度 Salinity	0.337	0.022	0.230	0.178
3	1.192	14.894	64.285	总溶解性固体 Total dissolved solid	0.352	0.024	0.073	−0.012
4	1.032	12.904	77.189	水温 Water temperature	−0.186	−0.057	0.623	−0.148
5	0.678	8.477	85.666	无机磷 Inorganic phosphorus	0.173	0.325	0.474	−0.257
6	0.501	6.259	91.925	亚硝酸盐 Nitrite	−0.140	0.531	0.050	0.092
7	0.409	5.116	97.041	硝酸盐 Nitrate	−0.199	0.328	0.057	0.475
8	0.237	2.959	100	氨氮 Ammonia nitrogen	−0.044	−0.371	0.364	0.621

表 4　总生物量的主成分回归结果

Table 4　Principal component regression results for total biomass

		Beta	*t*	*P*	*F*	R^2
	回归模型 Regression model	—	—	0	11.950	0.118
自变量 Independent variable	PC1	0.104	2.097	0.037	—	—
	PC2	0.206	4.140	0	—	—
	PC3	0.230	4.616	0	—	—
	PC4	−0.111	−2.226	0.027	—	—

制其生物量的增长。这一发现为贝克喜盐草在特定环境条件下的生长模式和适应机制提供了新的见解，也为海草床的保护和修复提供新思路：(1)可通过建立氮负荷监测体系、实施氮减排措施来减轻氨氮污染对海草床的威胁；(2)在修复项目中应优先选择水温适宜、无机磷和硝酸盐等营养盐浓度适中的区域作为移植点。本研究结果可直接应用于贝克喜盐草的保护区规划、移植修复及生态工程。

参考文献：

ANKEL M, RUBAL M, VEIGA P, et al., 2021. Reproductive cycle of the seagrass *Zostera noltii* in the Ria de Aveiro Lagoon [J]. Plants, 10(11): 2286.

CAI J L, 2023. Effects of ocean acidification on the growth, physiology and rhizomephere of tropical seagrasses [D]. Sanya: Hainan Institute of Tropical Oceanography: 1-74. [蔡嘉丽, 2023. 海洋酸化对热带海草生长、生理及根区环境的影响 [D]. 三亚：海南热带海洋学院：1-74.]

CAMBRIDGE M, KENDRICK G, 2009. Contrasting responses of seagrass transplants (*Posidonia australis*) to nitrogen, phosphorus and iron addition in an estuary and a coastal embayment [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 371 (1): 34-41.

CHEN S Q, LIN G Y, CAI Z F, et al., 2019. Patterns and impacting factors of the distribution of the seagrass resources in Dongzhai Harbour of Hainan [J]. Wetland Science & Management, 15(4): 53-56. [陈石泉, 林国尧, 蔡泽富,

等, 2019. 海南东寨港海草资源分布特征及影响因素[J]. 湿地科学与管理, 15(4): 53-56.]

CHEN S Q, WU Z J, CHEN X H, et al., 2015. Investigation and analysis of the distribution status of seagrass resources in the southern part of Hainan Island [J]. Haiyang Xuebao, 37 (6): 106-113. [陈石泉, 吴钟解, 陈晓慧, 等, 2015. 海南岛南部海草资源分布现状调查分析 [J]. 海洋学报, 37(6): 106-113.]

CHEN S T, PAN Y F, QIU S T, et al., 2024. Assembly and comparative analysis of the multichromosomal mitochondrial genome of globally endangered seagrass *Halophila beccarii* [J]. BMC Plant Biology, 24 (1): 1040.

COSTANZA R, DE GROOT R, BRAAT L, et al., 2017. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? [J]. Ecosystem Services, 28: 1-16.

DENG X F, ZHANG H Y, WU Z X, et al., 2022. Distribution and ecological characteristics of seagrass bed of Mashanli sea area in Rongcheng [J]. Haiyang Xuebao, 44 (8): 97-109. [邓筱凡, 张宏瑜, 吴忠迅, 等, 2022. 荣成马山里海域海草床分布现状及其生态特征 [J]. 海洋学报, 44(8): 97-109.]

DUARTE C M, DORTE J K, 2017. Export from seagrass meadows contributes to marine carbon sequestration [J]. Frontiers in Marine Science, 4(13): 1-7.

FOURQUREAN J W, ZIEMAN J C, 2002. Nutrient content of the seagrass *Thalassia testudinum* reveals regional patterns of relative availability of nitrogen and phosphorus in the Florida Keys USA [J]. Biogeochemistry, 61 (3): 229-245.

GENG X X, CAI Z F, JIA S W, et al., 2022. Environmental determinants of the distribution of *Halophila beccarii* Ascherson in Hainan Island, China [J]. Sustainability, 14(20): 13491.

HAN Q Y, SHI P, 2008. Progress in the study of seagrass ecology [J]. Acta Ecologica Sinica, 28 (11): 5561-5570. [韩秋影, 施平, 2008. 海草生态学研究进展[J]. 生态学报, 28(11): 5561-5570.]

HUANG C, ZHANG J P, JIANG Z J, et al., 2017. Nutrients uptake processes of seagrass and its competition with epiphytic algae [J]. Journal of Fisheries Research, 39(3): 222-228. [黄驰, 张景平, 江志坚, 等, 2017. 海草对营养盐的吸收过程及其与附生藻类的竞争机制 [J]. 渔业研究, 39(3): 222-228.]

HUANG X X, YAN Y H, YI Q W, et al., 2010. Karyomorphological studies of *Halophila* (Hydrocharitaceae) from Hong Kong, China [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 18(4): 391-393. [黄向旭, 严岳鸿, 易绮斐, 等, 2010. 香港喜盐草属植物的核型分析[J]. 热带亚热带植物学报, 18(4): 391-393.]

JIANG Z J, PREMARATHNE C I, FANG Y, 2023. Effects of ammonium enrichment on the photosynthesis, glutamine synthetase and amino acid composition of seagrass *Halophila beccarii* Asch [J]. Journal of Tropical Oceanography, 42(3): 116-125. [江志坚, PREMARATHNE C I, 方扬, 等, 2023. 铵态氮加富对贝克喜盐草光合作用、谷氨酰胺合成酶和氨基酸成分的影响 [J]. 热带海洋学报, 42(3): 116-125.]

JONES C G, LAWTON J H, SHACHAK M, 1997. Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers [J]. Ecology, 78(7): 1946-1957.

KAISER H F, 1960. The application of electronic computers to factor analysis [J]. Educational and Psychological Measurement, 20(1): 141-151.

KUMAR A M, DEEPAK A, 2021. The current status of *Halophila beccarii*: An ecologically significant, yet vulnerable seagrass of India [J]. Ocean and Coastal Management, 200: 105484.

LEE K S, PARK S R, KIM Y K, 2007. Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: A review [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 350(1): 144-175.

LEWIS M A, RICHARD D, 2009. Nonnutrient anthropogenic chemicals in seagrass ecosystems: fate and effects [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 28(3): 644-661.

LI S, FAN H Q, QIU G L, et al., 2011. Study advance on primary productivity of seagrass [J]. Marine Environmental Science, 30 (1): 143-147. [李森, 范航清, 邱广龙, 等, 2011. 海草生产力研究进展 [J]. 海洋环境科学, 30 (1): 143-147.]

LI Y, LI W T, NIE M, et al., 2014. Seasonal variations in the morphology and growth of *Zostera marina* in Swan Lake, Shandong [J]. Marine Science, 38 (9): 39-46. [李勇, 李文涛, 聂猛, 等, 2014. 山东荣成天鹅湖大叶藻形态和生长的季节性变化研究 [J]. 海洋科学, 38 (9): 39-46.]

LI Z, LI W T, YANG X L, et al., 2021. Distribution and ecological characteristics of seagrass in Shuangdao Bay, Weihai [J]. Progress in Fishery Sciences, 42 (2): 176-183. [李政, 李文涛, 杨晓龙, 等, 2021. 威海双岛湾海域海草分布及其生态特征 [J]. 渔业科学进展, 42(2): 176-183.]

LIU S L, JIANG Z J, ZHOU C Y, et al., 2016. Temporal and spatial variation of dissolved organic matter and its controlling factors in seagrass bed ecosystem of Xincun Bay, Hainan Island [J]. Chinese Journal of Ecology, 35(8): 2144-2151. [刘松林, 江志坚, 周沉冤, 等, 2016. 海南新村湾海草床生态系统溶解有机物的时空变化及其控制因素 [J]. 生态学杂志, 35 (8): 2144-2151.]

LIU W Y, HAN Q Y, TANG Y Q, et al., 2017. Review of nutrient enrichment and global warming effects on seagrasses [J]. Chinese Journal of Ecology, 36(4): 1087-1096. [刘伟妍, 韩秋影, 唐玉琴, 等, 2017. 营养盐富集和全球温度升高对海草的影响 [J]. 生态学杂志, 36(4): 1087-1096.]

LIU Y C, XU Z, DONG Y, et al., 2024. Ecological characteristics and influencing factors of seagrass bed in Caofeidian [J]. Marine Development and Management, 41 (4): 97-105. [刘有才, 徐追, 董岳, 等, 2024. 曹妃甸海草床生态特征及限制因子研究 [J]. 海洋开发与管理, 41(4): 97-105.]

MCLEOD E, CHMURA G L, BOUILLON S, et al., 2011. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2 [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 9(10): 552-560.

MUNNS R, 2002. Comparative physiology of salt and water stress [J]. Plant, Cell & Environment, 25(2): 239-250.

ONDIVIELA B, LOSADA I J, LARA J L, et al., 2014. The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate [J]. Coastal Engineering, 87: 158-168.

ORTH R J, CARRUTHERS T J B, DENNISON W C, et al., 2006. A global crisis for seagrass ecosystems [J]. Bioscience, 56(12): 987-996.

PAN Y F, QIU S T, SU Z N, et al., 2025. Adaptation strategies of functional traits of the global threatened seagrass *Halophila beccarii* to salinity [J]. Acta Ecologica Sinica, 45(9): 4535-4547. [盘远方, 邱思婷, 苏治南, 等, 2025. 全球濒危海草贝克喜盐草功能性状对盐度的适应策略 [J]. 生态学报, 45(9): 4535-4547.]

PAN Y F, QIU S T, SU Z N, et al., 2025. Tropical-subtropical divergence in *Halophila beccarii* functional traits: environmental filtering and conservation implications in coastal China [J]. Bulletin of Marine Science, 101: 1733-1748.

PAN Y F, SU Z N, QIU S T, et al., 2024. Temporal and spatial pattern and their relationship between the seed bank and sexual reproduction of *Halophila beccarii* along the coasts of Southern China [J]. Guihaia, 45(1): 69-79. [盘远方, 苏治南, 邱思婷, 等, 2024. 华南沿海贝克喜盐草种子库与有性繁殖的时空格局及其关系 [J]. 广西植物, 45(1): 69-79.]

PENG R Y, XU J N, 2019. Experiment study on dissolution and spillover of CO_2 in saline-alkaline water [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 40(2): 20-23, 35. [彭人勇, 徐嘉男, 2019. 二氧化碳在盐碱水中溶解及溢出的实验研究 [J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 40(2): 20-23, 35.]

QIN L Z, KIM S H, SONG H J, et al., 2020. Influence of regional water temperature variability on the flowering phenology and sexual reproduction of the seagrass *Zostera marina* in Korean coastal waters [J]. Estuaries and Coasts, 43(3): 449-462.

QIU G L, FAN H Q, LI Z S, et al., 2013. Population dynamics and seed banks of the threatened seagrass *Halophila beccarii* in Pearl Bay, Guangxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 33(19): 6163-6172. [邱广龙, 范航清, 李宗善, 等, 2013. 濒危海草贝克喜盐草的种群动态及土壤种子库——以广西珍珠湾为例 [J]. 生态学报, 33(19): 6163-6172.]

QIU G L, SU Z N, FAN H Q, et al., 2020. Biological and ecological characteristics of intertidal seagrass *Halophila beccarii* and its conservation countermeasures [J]. Marine Environmental Science, 39(1): 121-126. [邱广龙, 苏治南, 范航清, 等, 2020. 贝克喜盐草的生物学和生态学特征及其保护对策 [J]. 海洋环境科学, 39(1): 121-126.]

SÁNCHEZ-LIZASO J L, ROMERO J, RUIZ J, et al., 2008. Salinity tolerance of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: Recommendations to minimize the impact of brine discharges from desalination plants [J]. Desalination, 221(1/2/3): 602-607.

SHORT F, CARRUTHERS T, DENNISON W, et al., 2007. Global seagrass distribution and diversity: a bioregional model [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 350(1): 3-20.

SHORT F T, POLIDORO B, LIVINGSTONE S R, et al., 2011. Extinction risk assessment of the world's seagrass species [J]. Biological Conservation, 144(7): 1961-1971.

TANG Z Y, XU W T, ZHOU G Y, et al., 2018. Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(16): 4033-4038.

WAYCOTT M, DUARTE C M, CARRUTHERS T J, et al., 2009. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(30): 12377-12381.

XU Z Z, HUANG L M, HUANG X P, et al., 2007. Review of seagrass biomass and primary production research [J]. Acta Ecologica Sinica, 27(6): 2594-2602. [许战洲, 黄良民, 黄小平, 等, 2007. 海草生物量和初级生产力研究进展 [J]. 生态学报, 27(6): 2594-2602.]

YANG Z X, PAN Y F, QIU G L, et al., 2024. Effects of different salinity on leaf and stem morphology of the endangered seagrass *Halophila beccarii* [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 40(3): 301-309. [杨梓暄, 盘远方, 邱广龙, 等, 2024. 不同盐度对濒危海草贝克喜盐草叶茎形态的影响 [J]. 广西科学院学报, 40(3): 301-309.]

YU Z Q, DENG H, WU K W, et al., 2012. Nutrient contents of dominant seagrass species and their affecting factors in Hainan Province [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science) (4): 131-141. [蔚枝沁, 邓泓, 吴可为, 等, 2012. 海南优势海草营养元素的含量及其影响因素研究 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版) (4): 131-141.]

ZHAGN L L, HAN Q Y, SHI Y F, et al., 2018. Synergistic effects of eutrophication and salinity on biomass and carbon and nitrogen contents of *Zostera japonica* [J]. Marine Science, 42(12): 55-61. [张璐璐, 韩秋影, 史云峰, 等, 2018. 富营养化和海水盐度对日本鳗草生物量和碳氮含量的协同影响 [J]. 海洋科学, 42(12): 55-61.]

ZHAO M Q, WANG H, WAGN S, et al., 2020. Morphological and growth characteristics of *Thalassia hemprichii* and their relationship with the concentration of nutrients in the sea area around Sanya [J]. Journal of Hainan Tropical Ocean University, 27(2): 27-34. [赵牧秋, 王慧, 王帅, 等, 2020. 三亚周边海域泰来草形态、生长特征及其与环境营养元素含量的关系 [J]. 海南热带海洋学院学报, 27(2): 27-34.]

ZHENG F Y, HAN X D, JIN Y M, et al., 2012. Interspecific differences of seagrass morphology and growth patterns and their allometry [J]. Chinese Journal of Ecology, 31(9): 2412-2419. [郑风英, 韩晓弟, 金艳梅, 等, 2012. 海草形态、生长的种间差异及其相关生长关系 [J]. 生态学杂志, 31(9): 2412-2419.]

ZHONG C, LIAO Y Q, LIU W J, et al., 2024. Status, threats and conservation suggestions on seagrass beds in Guangdong [J]. Biodiversity Science, 32(2): 23201. [钟超, 廖亚琴, 刘伟杰, 等, 2024. 广东沿海海草床的现状、面临的威胁与保护建议 [J]. 生物多样性, 32(2): 23201.]

ZIMMERMAN R C, KOHRS D G, STELLER D L, et al., 1997. Impacts of CO_2 enrichment on productivity and light requirements of eelgrass [J]. Plant Physiology, 115(2): 599-607.

（责任编辑　李　莉　王登惠）