

# 前言

自工业革命以来，人类工农业生产和生活等活动向地球大气累积排放了大量的 CO<sub>2</sub> 等温室气体，造成了气候系统持续变暖，这是人类活动造成的气候变化，本书简称人为气候变化。2021 年 8 月 9 日，政府间气候变化专门委员会（IPCC）第一工作组（WG I）发布的第六次评估报告（AR6）指出，人为影响已造成的气候变暖是 2000 年来前所未有的，当前气候系统许多层面的状态也是过去几个世纪甚至几千年来前所未有的。自 1850 年以来，最近的 40 年中每一个 10 年相比之前的任何一个 10 年都暖。2001 ~ 2020 年全球表面平均温度比 1850 ~ 1900 年高 0.99 (0.84 ~ 1.10) °C，2011 ~ 2020 年全球表面温度比 1850 ~ 1900 年高 1.09 (0.95 ~ 1.20) °C，而海洋表面的增温幅度则为 0.88 (0.68 ~ 1.01) °C。1901 ~ 2018 年全球平均海平面上升了 0.20 (0.15 ~ 0.25) m。1901 ~ 1971 年，海平面平均上升速率为 1.3 (0.6 ~ 2.1) mm/a，1971 ~ 2006 年增加到 1.9 (0.8 ~ 2.9) mm/a，2006 ~ 2018 年进一步增加到 3.7 (3.2 ~ 4.2) mm/a<sup>\*</sup>。无论是地球表面的升温，还是海平面的上升，均呈现加速态势，人为气候变化已经影响全球每个区域，且伴随很多极端天气气候事件。

2023 年 7 月 27 日，联合国秘书长就 7 月全球气温创下新高发表声明。他表示，这仅仅是一个开始，全球变暖的时代已经结束，全球沸腾的时代到来了。极端气候正成为新常态，各国必须做出反应来适应极端气候。联合国秘书长采用“沸腾时代”一词对全球气候变暖的继续发展，以及未来极端气候将趋于常态化发出了严峻的警告。

观测表明，21 世纪的前 20 年（2000 ~ 2019 年）全球共发生 7348 起重大灾害，造成约 123 万人死亡，以及约 2.97 万亿美元的经济损失，相比 20 世纪的最后 20 年（1980 ~ 1999 年）灾害大增主要是气候灾害激增导致，其中洪水和风暴是发生频率最高的致灾事件，分别是 20 世纪的最后 20 年的 2.3 倍、1.4 倍<sup>\*\*</sup>。21 世纪的前 20 年登陆中国的（超）强台风数是 20 世纪的最后 20 年的 2 倍多，海平面上升叠加台风风暴潮、高温热浪和强降水等极端事件严重威胁着中国沿海地区经济社会的可持续发展<sup>\*\*\*</sup>。

本书在国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项“海岸带和沿海地区全球化综合风险研究”项目（批准号：2017YFA0604900）“海岸带和沿海地区对海平面变化、极端气候事件的响应及脆弱性研究”课题（编号：2017YFA0604902）的资助下，以中国

---

<sup>\*</sup> IPCC. 2021. Summary for policymakers/Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate Change 2021: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

<sup>\*\*</sup> UNDRR. 2020. The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019) .

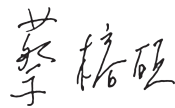
<sup>\*\*\*</sup> 蔡榕硕，刘克修，谭红建. 2020. 气候变化对中国海洋和海岸带的影响、风险与适应对策. 中国人口·资源与环境，30(9): 1-8.

海岸带和沿海地区的若干自然和社会系统承灾体对气候变化尤其是极端天气气候事件的响应及脆弱性为主要研究目标,开展了中国海岸带和沿海地区自然和社会系统承灾体对气候变化的响应、适应和脆弱性的研究与评估,包括气候致灾因子危害性的变化、承灾体的暴露度和脆弱性、综合风险特征,以及适应策略等内容。

本书的研究与评估工作历时5年,主要研究并阐述了中国海岸带和沿海地区主要气候致灾因子的观测事实,评估并揭示了中国海岸带生态系统和沿海地区陆域生态系统,包括红树林、盐沼与海草床、珊瑚礁、河口、滨海城市、农田、森林、草地等生态系统,以及近海渔业资源、重要渔场沿海地区社会经济(包括沿海省市县区域社会经济、滨海城市社会经济)和港口建设对主要气候致灾因子的响应、适应和脆弱性,评估了不同气候情景下未来(2030~2100年)中国海岸带和沿海地区的气候致灾因子危害性、自然和社会系统的承灾体脆弱性,以及全球变化综合风险,包括潜在的灾难性风险,分析并提出了相关的气候变化风险管理等适应策略,以期为中国海岸带和沿海地区应对气候变化及管理决策提供科学依据。

本书内容安排及主要作者如下:第1章,绪论(蔡榕硕);第2章,红树林(蔡榕硕、颜秀花、丁如一、李翠华);第3章,盐沼与海草床(杨正先、韩建波、程浩、苏岫、韩成伟);第4章,珊瑚礁(蔡榕硕、谭红建、郭海峡、肖家光);第5章,河口浮游植物生态系统(郭海峡、蔡榕硕、谭红建);第6章,近海重要渔业资源(韩志强、刘星雨、王迎宾、刘雪琴);第7章,近海重要渔场(韩志强、周永东、刘星雨);第8章,滨海城市生态系统(徐霞、江红蕾、关梦茜、张童);第9章,农田生态系统(徐霞、江红蕾、关梦茜、张童);第10章,森林生态系统(徐霞、江红蕾、关梦茜、黄奕钦);第11章,草地生态系统(徐霞、江红蕾、关梦茜、黄奕钦);第12章,沿海地区社会经济(李翠华、蔡榕硕、颜秀花);第13章,滨海城市社会经济(蔡榕硕、许炜宏);第14章,港口建设(纪棋严、庄圆、鲁明洋);第15章,影响、风险和适应综合评估(蔡榕硕)。全书由蔡榕硕统稿,由颜秀花、李翠华、郭海峡承担格式的统一及图表的编排等工作。

本书涉及的学科较多,观测调查资料有限,气候变化综合风险具有不确定性,包括多致灾因子的叠加影响、多承灾体暴露度和脆弱性的动态变化,沿海地区灾害损失多样,因此本书的研究成果及对相关气候变化影响的认识仍然存在较多的局限性,不妥之处恳请读者予以指正。



蔡榕硕

2024年12月30日

# 目录

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                           | 1  |
| 1.1 引言                             | 1  |
| 1.2 基本概念与定义                        | 2  |
| 1.2.1 气候变化                         | 2  |
| 1.2.2 影响、适应、脆弱性和风险                 | 2  |
| 1.2.3 海面、海平面和极端事件                  | 3  |
| 1.2.4 研究对象                         | 4  |
| 1.3 国内外研究进展                        | 4  |
| 1.3.1 研究计划                         | 4  |
| 1.3.2 研究现状                         | 5  |
| 1.3.3 主要科学问题和关键技术问题                | 6  |
| 1.4 本书结构                           | 7  |
| 参考文献                               | 7  |
| 第 2 章 红树林                          | 9  |
| 2.1 引言                             | 9  |
| 2.2 数据与方法                          | 10 |
| 2.2.1 数据                           | 10 |
| 2.2.2 方法                           | 18 |
| 2.3 结果与分析                          | 26 |
| 2.3.1 红树林演变特征及归因分析                 | 26 |
| 2.3.2 红树林气候致灾因子危害性分析               | 33 |
| 2.3.3 全国红树林暴露度、脆弱性及综合风险评估          | 37 |
| 2.3.4 国家级和省级自然保护区红树林暴露度、脆弱性及综合风险评估 | 42 |
| 2.3.5 红树林适应性分析                     | 79 |
| 2.4 结语                             | 86 |
| 参考文献                               | 88 |
| 第 3 章 盐沼与海草床                       | 97 |
| 3.1 引言                             | 97 |
| 3.2 数据与方法                          | 99 |
| 3.2.1 数据                           | 99 |

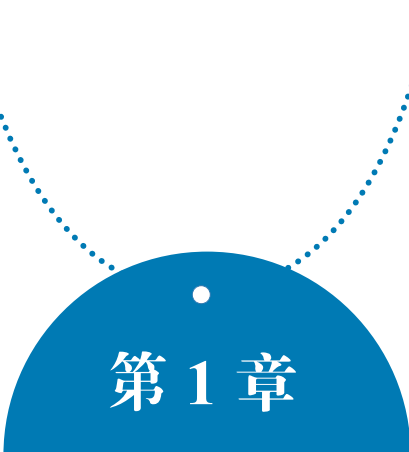
|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| 3.2.2 方法 .....                                  | 102 |
| 3.3 结果与分析 .....                                 | 108 |
| 3.3.1 盐沼的历史变化及归因分析 .....                        | 108 |
| 3.3.2 海草床的历史变化及归因分析 .....                       | 115 |
| 3.3.3 典型盐沼、海草床气候致灾因子危害性分析 .....                 | 119 |
| 3.3.4 典型盐沼暴露度、脆弱性及综合风险评估 .....                  | 121 |
| 3.3.5 典型海草床暴露度、脆弱性及综合风险评估 .....                 | 140 |
| 3.3.6 典型盐沼、海草床评估结果综合分析 .....                    | 150 |
| 3.3.7 盐沼与海草床适应性分析 .....                         | 153 |
| 3.4 结语 .....                                    | 160 |
| 参考文献 .....                                      | 161 |
| <b>第4章 珊瑚礁</b> .....                            | 170 |
| 4.1 引言 .....                                    | 170 |
| 4.2 数据与方法 .....                                 | 171 |
| 4.2.1 数据 .....                                  | 171 |
| 4.2.2 方法 .....                                  | 174 |
| 4.3 结果与分析 .....                                 | 176 |
| 4.3.1 珊瑚礁变化趋势及归因分析 .....                        | 176 |
| 4.3.2 珊瑚礁气候致灾因子危害性分析 .....                      | 179 |
| 4.3.3 珊瑚礁暴露度、脆弱性及综合风险评估 .....                   | 182 |
| 4.3.4 珊瑚礁适应性分析 .....                            | 190 |
| 4.4 结语 .....                                    | 194 |
| 参考文献 .....                                      | 195 |
| <b>第5章 河口浮游植物生态系统</b> .....                     | 199 |
| 5.1 引言 .....                                    | 199 |
| 5.2 数据与方法 .....                                 | 201 |
| 5.2.1 数据 .....                                  | 201 |
| 5.2.2 方法 .....                                  | 203 |
| 5.3 结果与分析 .....                                 | 206 |
| 5.3.1 长江口及邻近海域浮游植物生态系统对气候变化的响应特征及<br>归因分析 ..... | 206 |
| 5.3.2 长江口及邻近海域浮游植物生态系统气候致灾因子危害性分析 .....         | 211 |
| 5.3.3 长江口及邻近海域浮游植物生态系统暴露度、脆弱性及综合风险评估 .....      | 213 |
| 5.3.4 长江口及邻近海域赤潮暴发灾害风险预估 .....                  | 218 |
| 5.3.5 长江口及邻近海域浮游植物生态系统适应性分析 .....               | 220 |
| 5.4 结语 .....                                    | 220 |
| 参考文献 .....                                      | 221 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第 6 章 近海重要渔业资源</b>       | 226 |
| 6.1 引言                      | 226 |
| 6.2 数据与方法                   | 227 |
| 6.2.1 数据                    | 227 |
| 6.2.2 方法                    | 228 |
| 6.3 结果与分析                   | 232 |
| 6.3.1 气候变化对渔业资源影响的检测与归因分析   | 232 |
| 6.3.2 渔业资源气候致灾因子危害性分析       | 234 |
| 6.3.3 渔业资源暴露度、脆弱性及综合风险评估    | 236 |
| 6.3.4 气候变化下主要经济种类栖息地变化      | 257 |
| 6.3.5 气候变化对重要渔业资源“三场一通道”的影响 | 264 |
| 6.3.6 渔业资源适应性分析             | 267 |
| 6.4 结语                      | 268 |
| 参考文献                        | 268 |
| <b>第 7 章 近海重要渔场</b>         | 271 |
| 7.1 引言                      | 271 |
| 7.2 数据与方法                   | 272 |
| 7.2.1 数据                    | 272 |
| 7.2.2 方法                    | 272 |
| 7.3 结果与分析                   | 272 |
| 7.3.1 初级生产力                 | 272 |
| 7.3.2 叶绿素                   | 273 |
| 7.3.3 浮游植物                  | 274 |
| 7.3.4 浮游动物                  | 275 |
| 7.3.5 溶解氧                   | 276 |
| 7.3.6 总氮                    | 277 |
| 7.3.7 应对策略                  | 278 |
| 7.4 结语                      | 279 |
| 参考文献                        | 279 |
| <b>第 8 章 滨海城市生态系统</b>       | 280 |
| 8.1 引言                      | 280 |
| 8.2 数据与方法                   | 281 |
| 8.2.1 数据                    | 281 |
| 8.2.2 方法                    | 283 |
| 8.3 结果与分析                   | 285 |
| 8.3.1 沿海地区城市化过程             | 285 |
| 8.3.2 极端气候危害性分析             | 288 |

|               |                             |     |
|---------------|-----------------------------|-----|
| 8.3.3         | 暴露度评估                       | 290 |
| 8.3.4         | 脆弱性评估                       | 292 |
| 8.3.5         | 综合风险评估                      | 292 |
| 8.4           | 结语                          | 300 |
|               | 参考文献                        | 300 |
| <b>第 9 章</b>  | <b>农田生态系统</b>               | 304 |
| 9.1           | 引言                          | 304 |
| 9.2           | 数据与方法                       | 306 |
| 9.2.1         | 数据                          | 306 |
| 9.2.2         | 方法                          | 306 |
| 9.3           | 结果与分析                       | 308 |
| 9.3.1         | 极端气候危害性分析                   | 308 |
| 9.3.2         | 暴露度评估                       | 311 |
| 9.3.3         | 脆弱性评估                       | 312 |
| 9.3.4         | 综合风险评估                      | 322 |
| 9.4           | 结语                          | 323 |
|               | 参考文献                        | 323 |
| <b>第 10 章</b> | <b>森林生态系统</b>               | 326 |
| 10.1          | 引言                          | 326 |
| 10.2          | 数据与方法                       | 327 |
| 10.2.1        | 基于 BIOME-BGC 模型的森林生态系统生产力模拟 | 327 |
| 10.2.2        | 光合作用                        | 328 |
| 10.2.3        | 自养呼吸和异养呼吸                   | 328 |
| 10.2.4        | 植被蒸腾                        | 330 |
| 10.3          | 结果与分析                       | 331 |
| 10.3.1        | 极端气候的空间格局和变化过程              | 331 |
| 10.3.2        | 暴露度评估                       | 333 |
| 10.3.3        | 脆弱性评估                       | 334 |
| 10.3.4        | 综合风险评估                      | 339 |
| 10.4          | 结语                          | 340 |
|               | 参考文献                        | 340 |
| <b>第 11 章</b> | <b>草地生态系统</b>               | 344 |
| 11.1          | 引言                          | 344 |
| 11.2          | 数据与方法                       | 345 |
| 11.2.1        | 碳水通量过程观测方法                  | 345 |
| 11.2.2        | 碳水通量的估算方法                   | 348 |
| 11.2.3        | 基于 CASA 模型的草地生态系统生产力模拟      | 350 |

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 11.2.4 基于陆地生态系统模型 (TESim) 的草地生态系统生产力模拟 ..... | 351 |
| 11.3 结果与分析 .....                             | 353 |
| 11.3.1 极端气候的空间格局和变化过程 .....                  | 353 |
| 11.3.2 暴露度评估 .....                           | 355 |
| 11.3.3 脆弱性评估 .....                           | 356 |
| 11.3.4 综合风险评估 .....                          | 359 |
| 11.4 结语 .....                                | 360 |
| 参考文献 .....                                   | 361 |
| <b>第 12 章 沿海地区社会经济</b> .....                 | 365 |
| 12.1 引言 .....                                | 365 |
| 12.2 数据与方法 .....                             | 366 |
| 12.2.1 数据 .....                              | 367 |
| 12.2.2 方法 .....                              | 368 |
| 12.3 结果与分析 .....                             | 372 |
| 12.3.1 气候致灾因子危害性分析 .....                     | 372 |
| 12.3.2 暴露度评估 .....                           | 374 |
| 12.3.3 脆弱性评估 .....                           | 379 |
| 12.3.4 综合风险评估 .....                          | 383 |
| 12.3.5 适应性分析 .....                           | 387 |
| 12.4 结语 .....                                | 389 |
| 参考文献 .....                                   | 390 |
| <b>第 13 章 滨海城市社会经济</b> .....                 | 392 |
| 13.1 引言 .....                                | 392 |
| 13.2 数据与方法 .....                             | 393 |
| 13.2.1 数据 .....                              | 393 |
| 13.2.2 方法 .....                              | 394 |
| 13.3 结果与分析 .....                             | 402 |
| 13.3.1 海岸洪水危害性分析 .....                       | 402 |
| 13.3.2 暴露度评估 .....                           | 409 |
| 13.3.3 脆弱性评估 .....                           | 421 |
| 13.3.4 综合风险评估 .....                          | 428 |
| 13.3.5 适应性分析 .....                           | 439 |
| 13.4 结语 .....                                | 442 |
| 参考文献 .....                                   | 444 |
| <b>第 14 章 港口建设</b> .....                     | 449 |
| 14.1 引言 .....                                | 449 |
| 14.2 数据与方法 .....                             | 450 |

|               |                         |            |
|---------------|-------------------------|------------|
| 14.2.1        | 数据                      | 450        |
| 14.2.2        | 方法                      | 451        |
| 14.3          | 结果与分析                   | 464        |
| 14.3.1        | 中国沿海验潮站余水位特征            | 464        |
| 14.3.2        | 中国沿海港口极值水位重现期变化         | 469        |
| 14.3.3        | 海平面上升对中国港口建设的影响、风险及应对措施 | 474        |
| 14.4          | 结语                      | 475        |
|               | 参考文献                    | 476        |
| <b>第 15 章</b> | <b>影响、风险和适应综合评估</b>     | <b>478</b> |
| 15.1          | 引言                      | 478        |
| 15.2          | 气候变化危害性基本特征             | 479        |
| 15.2.1        | 温度变化                    | 479        |
| 15.2.2        | 海平面变化                   | 481        |
| 15.2.3        | 登陆中国的热带气旋变化             | 482        |
| 15.2.4        | 中国东部区域和沿海地区极端天气气候       | 483        |
| 15.3          | 自然系统                    | 484        |
| 15.3.1        | 海岸带生态系统                 | 484        |
| 15.3.2        | 近海渔业资源                  | 490        |
| 15.3.3        | 沿海地区陆域生态系统              | 491        |
| 15.4          | 社会系统                    | 495        |
| 15.4.1        | 沿海地区                    | 495        |
| 15.4.2        | 滨海城市                    | 496        |
| 15.4.3        | 港口建设                    | 499        |
| 15.5          | 综合风险与适应对策               | 501        |
| 15.5.1        | 综合风险                    | 501        |
| 15.5.2        | 适应对策                    | 502        |
|               | 参考文献                    | 504        |



# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 引 言

在全球气候变暖背景下，最近几十年来中国海洋与气候发生了显著的变化，海岸带和沿海地区的自然和社会系统对此产生了明显的响应。其中，1960 ~ 2022 年中国近海尤其是渤海、黄海和东海（以下简称“中国东部海域”）有显著的变暖趋势，远超全球海洋平均增加量，中国东部海域升温速率（约  $0.016^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ）高于中国内陆的升温速率（约  $0.015^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ）(Cai et al., 2017; Yan et al., 2020)。海水温度的快速上升导致海洋热浪（marine heatwave, MHW）的发生频率和强度显著增大。海洋热浪是指发生在海洋中的中短期气候尺度的极端高海温事件，其持续时间通常是数日到几个月，甚至更长，范围可延伸数百千米至上千千米，并可向深海发展（Hobday et al., 2016）。中国近海显著的升温变暖是海洋热浪频繁发生的重要原因之一。观测显示，自 1982 年以来，中国近海海洋热浪增多变强，尤其是 2010 ~ 2019 年的变化更显著，中国东部海域、南海（5 ~ 9 月）海洋热浪的平均发生频率分别是 20 世纪 80 年代的 20 倍和 4 倍（蔡榕硕和谭红建，2024; Tan et al., 2022, 2023）。

近 60 年来，在中国海洋升温变暖并频繁出现海洋热浪的同时，中国沿海地区的海平面呈现明显的上升趋势，并有显著的区域性特征。其中，自 20 世纪 80 年代以来，中国沿海地区海平面几乎每 10 年上升一个明显的台阶（自然资源部，2022）。海平面的上升增加了沿海低洼地被淹没和滨海湿地生境丧失的风险，并且抬高了极值水位（极端海面）发生的基础水位，极值水位也呈现明显升高的趋势，未来极值水位的重现期明显缩短（许炜宏和蔡榕硕，2022）。值得注意的是，登陆中国沿海地区的强热带气旋如强或超强台风正在增多变强（蔡榕硕等，2020b），台风风暴潮叠加海平面变化对海岸带和沿海地区自然和社会系统造成的影响和风险也在持续加剧（蔡榕硕等，2020b, 2021; 蔡榕硕和许炜宏，2022）。研究还显示，未来登陆中国的台风将增多变强，这将增加海岸洪水发生的频率，沿海地区尤其是北方沿海地区将面临更严重的台风灾害（聂心宇等，2023），沿海地区洪涝灾害的加剧也将增加人员伤亡和社会经济损失。上述分析表明，中国海岸带和沿海地区正在经受气候变暖、海平面上升以及随之而来的各种增多变强的极端事件的影响。因此，有关中国海岸带和沿海地区自然和社会系统对气候变化的响应及脆弱性，包括气

气候变化影响、风险和适应等问题的研究愈显迫切。

为便于读者理解本书中气候变化及其影响等相关的基本概念，本章将首先介绍气候变化，影响、适应、脆弱性和风险，以及海面、海平面和极端事件等的基本概念与定义；其次回顾国内外研究进展，包括研究计划、研究现状及主要科学问题和关键技术问题；最后简要介绍本书结构。

## 1.2 基本概念与定义

### 1.2.1 气候变化

根据 IPCC 有关气候变化的概念与定义，气候变化是指气候状态的变化，包括气候系统的自然变率和人为排放温室气体造成的变化，即气候变化的原因可能是自然的内部过程或外部强迫，如太阳周期的改变、火山喷发等，也可能是人为活动，如排放温室气体造成大气成分变化或土地开发利用变化。气候状态的变化可通过其长期的平均值和（或）变率的变化来判断，并且这种变化会持续较长时间，通常为几十年或更长时间。这也是 IPCC 气候变化科学评估报告与联合国气候变化框架公约（UNFCCC）定义的气候变化的区别，UNFCCC 的第一条将气候变化定义为：“除在可比时期内所观测到的自然气候变率之外，直接或间接归因于人类活动改变全球大气成分所导致的气候变化”。因此，UNFCCC 对人类活动改变大气成分后导致的气候变化与自然原因导致的气候变率作了明确的区分，即 UNFCCC 定义的气候变化主要指人为活动影响造成的气候变化。

本书主要采用 IPCC 对气候变化的定义。气候变化的概念与定义还存在狭义与广义之分。在传统的大气科学方面，气候以大气中的气温、气压、湿度和降水量等气象（候）要素在 30 年内的长期平均状态来界定，这是狭义的气候变化。20 世纪初，人们认为气候是不变的，即 30 年内平均的气象（候）要素值是稳定的。但之后人们认识到，30 年内的气候平均状态是变化的。后来，人们又认识到，表征海洋、冰雪、陆面和生物圈特征的代表性要素的长期平均值也是变化的。因此，气候变化的概念不仅限于大气科学，还可以延伸到其他领域。例如，人们采用海水的温度、盐度和流场等要素在 30 年内的平均值来研究海洋的长期变化。因此，传统意义上气候变化的定义延伸至其他学科或用于分析自然现象等要素的长期变化，就成为广义的气候变化（蔡榕硕等，2022）。

### 1.2.2 影响、适应、脆弱性和风险

2014 年 4 月，IPCC 第二工作组（WG II）发布的第五次评估报告（AR5）基于影响、适应和脆弱性，评估了气候变化导致的风险，这是该报告的亮点。IPCC WG II 的 AR5 指出，就观测到的影响、脆弱性和暴露度而言，近几十年来气候变化已对所有大陆和海洋的自然与人类系统产生影响。对于自然系统而言，气候变化影响的证据是最有力和最全面的。IPCC WG II 的 AR5 还指出，有关气候变化影响的风险（risk）来自气候变化的相关危害性（hazard）（包括危害性事件和趋势）与自然和人类系统的暴露度（exposure）和脆弱性（vulnerability）的相互作用；气候系统的变化与社会经济过程的变化（包括适应和减缓）是气候变化危害性、暴露度和脆弱性的驱动因子（IPCC，2014）。

2022年2月,IPCC WG II发布的第六次评估报告(AR6)指出,风险概念是IPCC 3个工作组的核心,并再次强调,在气候变化的背景下,与气候有关的危险(危害)性、受影响的人类与生态系统的暴露度和脆弱性之间的动态相互作用可能产生风险,还指出人类对气候变化的反应可能带来的风险是风险概念中考虑的一个新方面,而自然和人类系统的脆弱性是风险的一个组成部分(IPCC, 2022)。值得注意的是,IPCC WG II的AR6强调了韧性(resilience),也称为恢复力,具有广泛的意义。适应通常是围绕恢复力来组织的,即在受到扰动后反弹并恢复到以前的状态。同时,IPCC WG II的AR6特别关注系统转型和能源转型,其中系统转型指自然和人类系统的基本属性发生变化,这也与具有气候适应性的可持续发展紧密相关。

从IPCC WG II的AR5到AR6,有关气候变化的危害性、暴露度和脆弱性,以及影响、风险和适应等概念与定义基本保持不变。本书主要采用IPCC WG II的AR5和AR6中的基本概念与定义。气候变化危害性( $H$ )也称为危险性,是指可能发生的自然或人为等物理致灾事件(致灾因子)或趋势及其物理影响,可造成生命损失、伤害或其他健康影响,以及财产、基础设施、生计、服务提供、生态系统、环境资源的损害和损失。暴露度( $E$ )是指自然和人类系统中人员、生计、物种或生态系统、环境功能、服务和资源、基础设施或经济、社会或文化资产有可能受到不利影响的位置和环境。脆弱性( $V$ )也称为易损性,是指自然和人类系统中承灾体易受不利影响的倾向或习性,内含各种概念和要素,包括对危害的敏感性( $S$ )或易感性以及应对和适应能力的缺乏,是一种容易受到致灾因子不利影响的状态,与其对气候致灾因子不利影响的敏感性和适应性( $A$ )密切相关。具体而言,敏感性是承灾体容易感受到气候致灾因子和人类干扰的内在属性,适应性则是承灾体面对气候致灾因子和人类干扰时的应对能力及恢复能力。简言之,脆弱性是自然和人类系统等承灾体的内在属性,不论气候变化致灾事件是否发生,脆弱性均存在,而暴露度指自然物理致灾事件(气候致灾因子)发生时的影响范围与承灾体在空间分布上的交集,即承灾体受到气候致灾因子不利影响的范围或数量,范围越大或数量越多,则暴露度越大(秦大河, 2015)。

本书中有关气候变化的影响(impact)主要是指气候变化(包括极端天气气候事件)对自然和人类系统等承灾体的影响,通常也是指某一特定时期的气候变化或危险气候事件之间的相互作用以及暴露的自然和人类系统的脆弱性,对生命、生活、健康状况、生态系统、经济、社会、文化、服务和基础设施产生的作用。风险( $R$ )是指造成有价值的事物(承载体)处于险境且结果不确定的可能性,通常表述为危害性事件或趋势发生的概率与其可能影响的乘积,或表达为气候致灾因子危害性( $H$ )、承灾体暴露度( $E$ )和脆弱性( $V$ ) 3个因素构成的函数,即 $R=f(H, E, V)$ 。

书中的风险主要是指气候变化影响的风险,且风险主要来自脆弱性、暴露度以及危害性的相互作用。此外,适应还指对实际或预期的气候及其影响进行调整的过程。在某些系统中,适应是为了趋利避害。在自然系统中,人为干预可能会促进对预期的气候及其影响的调整。

### 1.2.3 海面、海平面和极端事件

海面是海洋表面的简称,主要呈现海流、波浪和潮汐等海水不停运动的各种状态。

海平面是指人们为了更容易认识海洋表面的变化，消除了海洋中波浪和潮汐等波动后在一定时间内海面高度的平均状态，通常是指长期观测 19 年以上通过各种滤波后的平均海面。因此，海平面实际上是指假定海面波动停止或静止时的水位，是一种无形的水平面。平均海平面一般采用观测 19 年以上每小时潮位高度的平均值，这是为了消除天文潮 18.61 年的交点分潮。

沿海地区发生的极端事件包括极值水位（极端水位）、极端高海温、强和超强台风等。其中，极值水位或极端水位又称为极端海面或极端海平面（extreme sea level, ESL），是指在一定时间内海洋中包括沿海某处观测水位的极值，一般采用 1 年内的极大值。极值水位主要由海平面、风暴增水和潮汐等组成。值得注意的是，即使是小幅度的海平面上升，也能显著增加沿海地区低洼地海岸洪水发生的频率和强度，这是由于海平面的上升抬高了潮汐、波浪和风暴潮的基础水位，这种变化在沿海地区尤其是陆架海区尤为显著（Oppenheimer et al., 2019; 蔡榕硕和谭红建, 2020）。

极端高海温事件又称为海洋热浪，通常以 30 年作为基准期，如 1982 ~ 2011 年，当海水表面温度至少连续 5d 超过季节性变化的阈值（通常将日变化的第 90 百分位数定义为热浪阈值），即表明发生海洋热浪，并且将间隔时间小于等于 2d 的两次极端高海温事件也看作同一次海洋热浪（Hobday et al., 2016）。海洋热浪一旦发生，可用一系列指标来定量描述海洋热浪的特征，包含热浪的平均强度、持续时间、最大强度、累积强度、发生频次等。强热带气旋（如台风或强台风）是指发生在热带或副热带洋面上的热带天气系统，将热带气旋底层中心附近最大平均风力（风速）达 12 级及以上的，统称为台风。强（超强）台风经常伴随破坏性的大风、强降水、风暴潮和大浪，通常对沿海地区的自然和社会系统产生严重影响。

本书涉及的极端降水和极端温度等其他极端事件将在相关章节作必要解释。

## 1.2.4 研究对象

与海岸带和沿海地区有密切联系的自然和经济社会尤其容易受到海洋变化的影响，包括海平面上升、台风风暴潮、海洋热浪等极端事件。远离海岸的其他社区也会受到海洋变化的影响，如极端高海温等事件。当前，全球沿海低洼地区居住着约 6.8 亿人（约占 2010 年全球人口的 10%），预计到 2050 年将超过 10 亿人（IPCC, 2014）。本书的研究对象为中国海岸带和沿海地区自然和社会系统，包括红树林、盐沼与海草床、珊瑚礁、河口，近海渔业资源，沿海地区的滨海城市、农田、草地、森林等生态系统，沿海地区与滨海城市的社会经济及港口建设。具体的研究对象与界定将在后续各章节分别详述。

## 1.3 国内外研究进展

### 1.3.1 研究计划

有关气候变化的影响、脆弱性和适应，以及综合风险研究，国际上先后启动了国际地圈 - 生物圈计划（IGBP）、国际全球环境变化人文因素计划（IHDP）、灾害风险综合研究计划（RDR）等重大计划。2012 年，IPCC 发布了《管理极端事件和灾害风险 推

进气候变化适应特别报告》。2011年,联合国国际减灾战略(UNISDR)发布的《全球减灾评估报告》评估了全球气候变化背景下的灾害事件风险;2015年,UNISDR发布了2015~2030年减轻灾害风险框架,将“减轻灾害风险与应对气候变化”作为未来减轻灾害风险的重点领域。近年启动的“未来地球计划”(Future Earth)等国际科学计划也高度关注全球气候变化的风险研究。此外,2014年4月IPCC WG II发布的AR5聚焦于气候变化的风险,这成为该报告的一个新亮点,而气候变化风险也是IPCC 3个工作组的核心概念。

“十二五”期间,中国启动了全球变化研究重大计划,包括“我国典型海岸带系统对气候变化的响应机制及脆弱性评估研究”等973项目,以及国际综合风险防范计划(IHDP-IRG)”等重大国际合作研究项目;2015年,中国还发布了《中国极端气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告》。国家海洋局发布了一系列有关海平面变化、风暴潮、海浪及海冰等灾害的风险评估技术标准,但全球气候变化影响尚未被全面系统地纳入评估技术标准中。“十三五”期间,中国颁布了《国家应对气候变化规划(2014—2020年)》《国家综合防灾减灾规划(2016—2020年)》等规划,极大促进了中国应对灾害风险能力的提高。在2016年启动的国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项中,更是将全球变化影响、风险、减缓和适应等作为专项的总体目标之一。

### 1.3.2 研究现状

自20世纪80年代以来,自然灾害风险评估的发展经历了以下阶段:初期,发展出“压力-状态-响应”“源-途径-受体-影响”“致灾因子-承灾体-脆弱性-风险”等概念模型;之后,针对灾害系统的平稳随机性,从基于观测数据的单致灾因子简单统计模型发展到多致灾因子的联合概率模型,并考虑到极端气候事件的全球和区域气候模式,建立了多致灾因子-多承灾体-损失分布的复杂联合概率/数值模型。近年来,针对全球变化影响下自然灾害系统出现阶段性、周期性及趋势性的非平稳性带来的挑战,目前的热点是要发展出能刻画孕灾环境渐变性与极端事件突发性相结合的新评估方法。此外,风险评估对象从承灾体物理损毁及直接经济损失,逐步深入到生态系统和社会经济系统功能损失,评估成果从单指标逐步转变为多指标和多灾种的综合表达。

近百年特别是最近几十年来,对海岸带和沿海地区有重要影响的气候变化特征为显著升温和海平面上升及伴随的极端事件。特别是,自20世纪90年代初以来,海洋变暖正在加速,海平面加快上升,海洋热浪等极端事件也在增加。这些海洋气候致灾因子的变化,如海平面上升、海洋变暖、海水酸化和脱氧等,正在重塑海洋生态系统并影响人类社会的安全(IPCC, 2019; Oppenheimer et al., 2019; Bindoff et al., 2019; 蔡榕硕和谭红建, 2020; 蔡榕硕等, 2020a)。在全球气候变暖背景下,渐变性与突发性的气候致灾因子(事件)正在对海岸带和海洋生态系统产生严重的影响。例如,相比大洋,海岸带和沿海地区的红树林、盐沼与海草床、珊瑚礁、河口等生态系统以及近海渔业资源更易受到升温变暖、海平面变化和极端气候事件等气候致灾因子的影响。目前已出现滨海湿地减少、生物多样性下降、生态系统结构和功能退化等问题,而海岸带的富营养化、围填海和过度捕捞等人类干扰因素则进一步加剧了气候变化带来的影响和风险。

研究表明,自19世纪以来,由于气候变暖、海平面上升、极端气候事件和人类活动的影响,全球湿地面积相对于工业化前水平下降了近50%。其中,自20世纪60年代以来,全球红树林更是出现大规模死亡现象,并归因于海平面变化、热带气旋、高温热浪和干旱等极端天气气候事件(蔡榕硕等,2020; Bindoff et al., 2019; Sippo et al., 2018)。此外,过去几十年来,海水淹没、海岸侵蚀和盐碱化正在加速湿地植被向陆地一侧迁移。在温室气体低浓度和很高浓度排放情景(RCP2.6和RCP8.5)下,未来全球海岸带湿地将损失20%~90%;全球升温1.5℃和2℃时,暖水珊瑚礁将分别减少70%~90%和99%以上。自20世纪70年代以来,世界上河口区的营养盐和有机质不断累积和增加。自20世纪80年代初以来,海洋变暖、缺氧加剧和富营养化导致近海区域的有害藻华(harmful algal blooms, HAB)增加尤其显著,这对粮食供应、旅游业、经济发展及人类健康产生了一系列负面的影响。此外,分析表明,1930~2010年全球235种鱼类种群的最大潜在渔获量下降了4.1%,这可能增加以下风险:对人类生计和粮食安全的影响,以及由鱼类种群分布变化引起的潜在冲突(蔡榕硕等,2020a; Bindoff et al., 2019)。

由于全球气候变化具有显著的多样性及多尺度特征,中国沿海地区的升温变暖、海平面变化和极端事件危险性的时空格局复杂多变,海岸带和沿海地区的各类承灾体,包括红树林、盐沼与海草床、珊瑚礁、河口等海岸带生态系统,农田、草地、森林和滨海城市等沿海地区陆域生态系统,以及近海渔业资源、沿海地区社会经济和港口建设,对全球气候变化的响应机制不一,并且存在叠加耦合放大效应。因此,海岸带和沿海地区的气候变化综合风险具有高度的不确定性。迄今,有关中国海岸带和沿海地区承灾体对气候变化的响应特征、机制及未来变化趋势的研究还相当薄弱,亟待深入认识,这也是中国海岸带和沿海地区应对气候变化的重要科学基础。

### 1.3.3 主要科学问题和关键技术问题

在气候变暖背景下,最近40年来地球表面温度几乎每10年上升一个台阶,极端高海温、强(超强)台风事件也显著增加(IPCC, 2021; 蔡榕硕等, 2020b)。与此同时,中国沿海地区平均海平面的高度也是几乎每10年上升一个台阶(自然资源部, 2022)。IPCC WG II的AR6指出,全球每升温0.1℃都将对地方和区域产生额外的影响,这种影响通常也是极端的,并且许多自然生态系统正因此面临突破其气候临界点,即生态阈值,而一旦突破系统的临界点,将从一种状态跃变到另一种状态,并产生一系列的骨牌效应(IPCC, 2022)。这也将使得人类社会特别是沿海地区经济社会的可持续发展受到严重的威胁(蔡榕硕等, 2019, 2021)。

这种变化既揭示了中国海岸带和沿海地区承灾体气候暴露度和气候变化危害性的不断增加,也预示了未来承灾体的气候变化综合风险很可能趋于加剧。为此,本书将通过分析气候变化背景下中国海岸带和沿海地区的多致灾因子气候危害性与多承灾体暴露度、脆弱性的相互作用,并基于构建的气候致灾因子危害性-承灾体暴露度和脆弱性-综合风险的评估技术体系,开展气候变化危害性、承灾体的暴露度和脆弱性相互作用产生的影响与风险以及相关适应性的评估,力图阐明海岸带和沿海地区自然和社会系统等承灾体的气候变化综合风险系统构成及机制,探讨不同气候情景下未来承灾体面临的气候变

化影响、脆弱性和适应性,评估综合风险,并针对不同的承灾体提出应对气候变化影响和风险的适应策略措施,以期为中国海岸带和沿海地区应对气候变化、参与国际气候谈判与治理提供科学参考。

## 1.4 本书结构

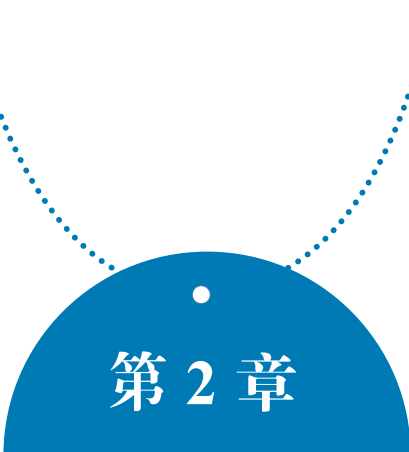
本书重点分析近60年来影响中国海岸带和沿海地区的气候致灾因子的危害性,评估海岸带生态系统、近海渔业资源、沿海地区陆域生态系统及沿海地区社会经济沿海和港口等承灾体的气候脆弱性和适应性,并给出不同气候情景下未来承灾体的气候变化综合风险评估结果。

全书共分为两部分,共有15章,分别为海岸带和沿海地区的自然系统和社会系统承灾体对气候变化的响应及脆弱性。第一部分为海岸带和沿海地区的自然系统部分,由第1~7章组成:第1章为绪论,主要阐述本书涉及的基本概念与定义、国内外研究进展,包括本书重点关注的主要科学问题和关键技术问题;第2~5章分别为海岸带的红树林、盐沼与海草床、珊瑚礁、河口等生态系统;第6~7章分别为近海重要渔业资源和重要渔场。第二部分为海岸带和沿海地区的陆域生态和社会系统部分,由第8~15章组成:第8~11章分别为沿海地区的滨海城市、农田、森林和草地4种陆域生态系统;第12~13章分别为沿海省市县、滨海城市的社会经济;第14章为港口建设;第15章为影响、风险和适应综合评估。各章的结构及要点如下:第1章为绪论,第2~14章由引言、数据与方法、结果与分析、结语组成,第15章为综合评估。

## 参考文献

- 蔡榕硕,韩志强,杨正先. 2020a. 海洋的变化及其对生态系统和人类社会的影响、风险及应对. 气候变化研究进展, 16(2): 182-193.
- 蔡榕硕,刘克修,谭红建. 2020b. 气候变化对中国海洋和海岸带的影响、风险与适应对策. 中国人口·资源与环境, 30(9): 1-8.
- 蔡榕硕,谭红建. 2020. 海平面加速上升对低海拔岛屿、沿海地区及社会的影响和风险. 气候变化研究进展, 16(2): 163-171.
- 蔡榕硕,谭红建. 2024. 中国近海变暖和海洋热浪演变特征及气候成因研究进展. 大气科学, 48(1): 121-146.
- 蔡榕硕,谭红建,郭海峡. 2019. 中国沿海地区对全球变化的响应及风险研究. 应用海洋学学报, 38(4): 514-527.
- 蔡榕硕,谭红建,郭海峡,等. 2022. 气候变化与中国近海初级生产. 北京: 科学出版社.
- 蔡榕硕,王慧,郑惠泽,等. 2021. 气候临界点及应对: 碳中和. 中国人口·资源与环境, 31(9): 16-23.
- 蔡榕硕,许炜宏. 2022. 未来中国滨海城市海岸洪水灾害的社会经济损失风险. 中国人口·资源与环境, 32(8): 174-184.
- 聂心宇,谭红建,蔡榕硕,等. 2023. 利用区域气候模式预估未来登陆中国热带气旋活动. 气候变化研究进展, 19(1): 23-37.
- 秦大河. 2015. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告: 精华版. 北京: 科学出版社.
- 许炜宏,蔡榕硕. 2022. 不同气候情景下中国滨海城市海岸极值水位重现期预估. 海洋通报, 41(4): 379-390.
- 自然资源部. 2022. 2021 中国海平面公报.

- Bindoff N L, Cheung W W L, Kairo J G, et al. 2019. Changing ocean, marine ecosystems, and dependent communities//Pörtner H O, Roberts D C, Masson-Delmotte V, et al. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Cai R S, Tan H J, Kontoyiannis H. 2017. Robust surface warming in offshore China seas and its relationship to the east Asian monsoon wind field and ocean forcing on interdecadal time scales. *Journal of Climate*, 30(22): 8987-9005.
- Hobday A, Alexander L, Perkins S, et al. 2016. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141: 227-238.
- IPCC. 2014. Summary for policymakers//Field C B, Barros V R, Dokken D J, et al. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press: 1-32.
- IPCC. 2019. Summary for policymakers//Pörtner H O, Roberts D C, Masson-Delmotte V, et al. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- IPCC. 2021. Summary for policymakers//Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. *Climate Change 2021: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- IPCC. 2022. Summary for policymakers//Pörtner H O, Roberts D C, Poloczanska E S, et al. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Oppenheimer M B C, Glavovic J, Hinkel R, et al. 2019. Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities//Pörtner H O, Roberts D C, Masson-Delmotte V, et al. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Sippo J Z, Lovelock C E, Santos I R, et al. 2018. Mangrove mortality in a changing climate: an overview. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 215: 241-249.
- Tan H J, Cai R S, Bai D P, et al. 2023. Causes of 2022 summer marine heatwave in the East China Seas. *Advances in Climate Change Research*, 14(5): 633-641.
- Tan H J, Cai R S, Wu R G. 2022. Summer marine heatwaves in the South China Sea: trend, variability and possible causes. *Advances in Climate Change Research*, 13(3): 323-332.
- UNDRR. 2020. The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019).
- Yan Z W, Ding Y H, Zhai P M, et al. 2020. Re-assessing climatic warming in China since 1900. *Journal of Meteorological Research*, 34(2): 243-251.



## 第 2 章

# 红 树 林

### 2.1 引 言

红树林主要生长在热带、亚热带海岸潮间带，是以红树植物为主体的常绿灌木或乔木组成的耐盐常绿森林，属于潮滩湿地木本生物群落，主要分布于淤泥深厚的海湾或河口盐渍土壤的滨海湿地。红树林湿地是指分布有一定面积红树林的滨海湿地，包括有林地、林外裸滩、潮沟等，是陆地与海洋的交错过渡地带。红树林生态系统是指以真红树或半红树等植物为生产者和消费者、分解者等生物与非生物环境组成的系统，是生产力最高的海岸带生态系统之一，具有抵抗风浪、保护海岸的作用，并具有碳汇的功能，因此在适应和减缓气候变化的影响和风险方面具有重要作用（Alongi, 2008, 2015）。

研究指出，近半个世纪以来，全球红树林面积减少了约 35%，到 2015 年全球红树林面积为  $1.4752 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，较 2010 年减少 3.98%（联合国粮食及农业组织，2015）。其中，自 20 世纪 60 年代以来，全球出现了大规模的红树林死亡，约有 70% 是由海平面变化及热浪和干旱等极端天气气候事件引起的（Sippo et al., 2018）。中国海岸带红树林自然分布于南北回归线之间的海南、广西、广东、福建、台湾、香港、澳门等地（林鹏，1997；王文卿和王瑁，2007），但主要集中分布于海南、广东和广西的海岸带，占全国红树林总面积的 97%（未统计台湾）。其中，红树林天然分布的北界是福建福鼎，红树林人工引种的北界为浙江乐清，南界在海南岛南岸。根据红树林的种类组成、外貌结构和演替特征，中国红树林植物可分为 7 个植物群系，即木榄群系、红树群系、秋茄群系、桐花树群系、白骨壤群系、海桑群系和水椰群系（林鹏，1997；王文卿和王瑁，2007）。其中，木榄群系和红树群系主要分布于海南、广东雷州半岛和广西钦州地区；海桑群系和水椰群系仅分布于海南；秋茄群系、桐花树群系和白骨壤群系分布最广，中国东南沿海绝大部分地区都有分布。海南的红树林几乎包括了我国红树植物的全部种类（王友绍，2013）。随着纬度的提高，红树植物种类减少，且矮化现象极为明显。在福建厦门以北地区主要分布有秋茄。

就面积大小而言，中国红树林面积仅占全球红树林面积的约 1.5%（FAO，2007；

Spalding et al., 2010), 分布于全球红树林分布区的北缘。近几十年来, 随着中国沿海地区经济社会的快速发展, 人口快速向海岸带地区集中, 城市化进程加快, 海岸带深受多次大规模围填海、过度捕捞和陆源污染物排放等的影响(中国科学院, 2014), 海岸带红树林生态系统也因此受到了剧烈的环境变化与人类活动的干扰。历史上中国红树林面积曾达 25 万  $\text{hm}^2$  (国家海洋局, 1996), 20 世纪 50 年代面积锐减至不到 5 万  $\text{hm}^2$  (张乔民, 2001), 至 1973 年面积为 4.87 万  $\text{hm}^2$ , 并持续减少至 2000 年的 1.86 万  $\text{hm}^2$ , 且红树林斑块破碎化, 形状不规则, 连通度低。2000 年以来, 中国对红树林的保护、管理与恢复日益重视, 红树林面积也得到了一定程度的恢复。2010 年后, 红树林面积逐步恢复至 2.08 万  $\text{hm}^2$ , 2013 年红树林面积约为 3.21 万  $\text{hm}^2$  (贾明明, 2014)。

然而, 近几十年来, 在气候变化背景下沿海海平面快速上升 (IPCC, 2019; 自然资源部, 2023)。预计到 21 世纪末, RCP2.6 和 RCP8.5 情景下全球海平面均值分别上升约 0.43 m (0.29 ~ 0.59 m) 和 0.84 m (0.61 ~ 1.10 m), RCP4.5 和 RCP8.5 情景下东海海平面分别上升 33 ~ 84 cm、47 ~ 122 cm, 南海海平面分别上升 34 ~ 79 cm、49 ~ 109 cm (Oppenheimer et al., 2019; 蔡榕硕和谭红建, 2020; 王慧等, 2018)。研究指出, 气候变化背景下海平面的持续快速上升将对红树林构成严重威胁。当海平面上升速率大于 6.1 mm/a 时, 红树林生境将难以有效应对海平面上升 (SLR) 的影响 (Alongi, 2008; Sasmito et al., 2016; Saintilan et al., 2020), 并且增多变强的台 (飓) 风风暴潮等极端事件对红树林等生态系统也有明显的影响。例如, 2013 年“海燕”超强台风对菲律宾中部红树林造成了严重的损毁, 包括连根拔起、折断等, 受影响面积占菲律宾红树林总面积的 3.5% (Long et al., 2016; Villamayor et al., 2016); 2014 年“威马逊”台风对海南省海口东寨港红树林造成损毁 (颜秀花等, 2019)。

为此, 本章重点关注中国红树林对气候变化的响应及脆弱性, 包括影响、风险和适应。首先, 基于 IPCC 气候变化综合风险核心概念及理论框架, 构建红树林气候变化综合风险评估指标体系; 其次, 利用历史文献、现场采样、遥感观测和模式模拟等数据, 应用 ArcGIS、谷歌地球引擎、MATLAB 等工具, 分析红树林的变化趋势及其对气候变化和人类活动的响应, 包括分布面积和风险格局变化, 研究红树林的气候致灾因子危害性、暴露度和脆弱性; 最后, 评估 3 种温室气体排放情景 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 (分别代表低浓度、中等浓度、很高浓度排放情景, 统称 RCPs) 下未来红树林的气候变化综合风险水平, 分析并提出红树林适应气候变化的对策措施。

## 2.2 数据与方法

### 2.2.1 数据

研究对象主要包括分布于海南省、广西壮族自治区、广东省、福建省、浙江省的红树林, 基本涵盖了中国红树林主要分布区 (图 2.1)。红树林分布面积的变化分析主要利用历史文献、调查观测和遥感数据。

气候致灾因子危害性、红树林的暴露度和脆弱性评估, 以及综合风险评估应用了以下数据资料。