用于在变化气候下估计设计海况的非平稳广义极值模型。应用于法国海岸沿线的海上风电场。

Nicolas Raillard[1], Coline Poppeschi[1,2], Tessa Chevallier[2],YouenKervella[2],和 Laurent Dubus[3,4]IFREMER，RDT，F-29280，普卢扎内，法国[2]法国海洋能源公司，普卢扎内，法国[3]RTE，皮托，法国[4]世界能源与气象委员会，诺里奇，英国**通信作者：**Nicolas Raillard (nicolas.raillard@ifremer.fr)

arXiv:2603.08101v1 [stat.AP] 9 Mar 2026

版权声明。 作者已依据资助项目的开放获取条件，为本文档采用 CC-BY 4.0 国际公共版权许可，并将对本次投稿产生的作者接受稿之前的所有后续版本继续适用该许可。

摘要。 法国海上风电产业的快速扩张，要求我们重新审慎评估在气候变化驱动的海洋条件不断演变的情况下结构耐久性所面临的挑战。传统设计方法依赖于平稳环境条件这一假设，已不再适用。

本研究采用应用于月最大值的非平稳广义极值（GEV）模型，提出一种新颖的统计框架，用于评估未来有效波高的变化。该方法旨在降低不确定性，并提供适用于未来非平稳条件的稳健设计工具。基于CMIP6气候模型和再分析数据，结果显示，在未来情景（SSP1-2.6和SSP5-8.5）下，法国大西洋沿岸和英吉利海峡海岸的季节对比预计将更加明显；而法国地中海沿岸的结果则更难以解读，这是因为极端事件增幅较小且不确定性较大（模型间离散度较高）。预测表明，冬季将更加剧烈，夏季则更加平静，季节循环也将发生变化。总体而言，多模式集合显示，极端海况的设计水平将有所提高。

研究最后提出了一种新方法，用于计算结构在运行寿命期内的等效设计水平。该工具被认为对于确保未来海上风电场在变化气候下的韧性和经济可行性至关重要。

1 引言

法国海上风电产业正在快速扩张，预计到2027年底，随着七个大型海上项目投入运营，累计装机容量将达到3.6 GW。这一增长发生在一个既充满创新与机遇、又日益竞争激烈的环境中。

然而，这些海上结构物的长期耐久性和可靠性，在很大程度上取决于其在通常超过二十年的运行寿命内抵御不断变化的海洋条件的能力。气候变化正在改变海洋环境的动力学特征，波浪模式、风速以及极端天气事件的发生频率和强度均呈现出显著变化趋势（Amlashi（2024））。这些变化给海上风电场的设计条件带来了重大不确定性（Barkanov 等（2024）），尤其是在暴露于高波浪能和强风的区域；而这些区域通常也是最有利于能源生产的地区（Susini 等（2022））。

海气象研究对于了解和预测海上结构物在整个服役期内将面临的环境条件至关重要。特别是，有效波高、总海平面和风速的极端值是关键设计参数，直接影响结构性能、安全性和运行效率（Slater 等（2021））。有效波高是指最高三分之一波浪的平均高度，是确定结构物波浪载荷的关键因素，并在疲劳分析、基础稳定性以及风力涡轮机部件的总体设计中发挥核心作用（Zhang 等（2019））。

气候变化导致的极端波浪条件变化可能会增加波浪荷载。低估这些荷载可能造成结构损坏、过早疲劳，甚至灾难性失效（Schloer（2013））。传统上，海上风力涡轮机设计依赖于对历史海气象数据的统计分析，并假设环境条件是平稳的。然而，气候变化的非平稳性对这一方法提出了挑战。海平面上升、风暴路径变化以及波浪条件增强，都可能显著影响波浪载荷、疲劳寿命和结构完整性（Chellaa 等（2012））。

忽视这些变化趋势可能导致结构设计不足、运行寿命缩短和维护成本增加，最终损害海上风电项目的经济可行性与安全性。因此，评估气候变化对海况条件的影响，对于制定海上风电场及其他沿海基础设施的设计标准至关重要。本研究旨在应对这一挑战，提出一种新方法，以更好地研究有效波高的预测变化。最终目标是为工程师、设计人员和利益相关方提供更新的工具，以考虑非平稳环境条件，确保海上风电场在变化气候下保持韧性并具有成本效益。

本文结合最新气候模型与先进统计方法，研究法国海岸的极端波浪条件。我们提出了一种新方法，基于月最大值和长期非平稳模型，详见第三节“极值建模”。随后，在第四节“结果”中，运用这一框架揭示截至2100年极端海况重现期的变化。最后，第五节“讨论”介绍法国三段海岸的极端波浪预测，并对模型进行全面讨论和说明。

2 海况数据

2.1 海况数据

2.1.1 第六阶段耦合模式比较计划气候模型

气候模型是评估未来环境响应的重要工具。第六阶段耦合模式比较计划（CMIP6）代表了政府间气候变化专门委员会目前可用的最新一代气候模型（第六次评估报告，（IPCC，2022））。本研究所用的波浪数据具体来自一个数值波浪模型（WaveWatch III），该模型由耦合模式比较计划第六阶段（CMIP6）集合中的八个全球环流模式驱动（见表1）。有关这些数据的更多详情，请参见Meucci 等（2024）的文章。为与第六次评估报告框架保持一致，我们以1985–2014年为基准期，以2081–2100年为未来预测期。该数据集包含两种气候变化情景：SSP1-2.6和SSP5-8.5。波浪数据的输出频率为每3小时一次，空间分辨率为0.5° 。

2.1.2 再分析资料

再分析资料对于评估气候模型在过去时期（称为“历史时期”）的质量，以及在必要时对未来预测进行偏差调整，都是必不可少的。在英吉利海峡和大西洋，使用 HYWAT[1]再分析资料进行偏差校正。HYWAT 再分析资料采用非结构化网格，覆盖 43°N 至 52°N 的纬度范围，以及 7°W 至 5°E 的经度范围。数据为逐小时数据，空间分辨率从近岸约 500 米到离岸数公里不等。该再分析资料基于 HYCOM 和 Wavewatch III 的配置，采用与 TEST471 相对应的参数化方案（Michaud 和 Seyfried（2024））。风场和大气压力场由 ERA5 大气再分析资料驱动（Hersbach 等人（2020））。HYCOM 海流、水位和风暴潮（Jourdan 等人（2020））也每 10 分钟提供给 Wavewatch III 模式。在地中海，使用 MED-WAV 再分析资料[2] 进行偏差校正。MED-WAV 再分析资料采用两种网格。粗网格覆盖北大西洋，从 75°W 到 10°E（1/6°分辨率），并从 70°N 延伸至 10°S；细网格覆盖地中海，从 18°W 到 36°E，并从 30°N 到 46°N（1/24°分辨率）。数据为逐小时数据，分辨率为 1/24°。该再分析资料基于 WAM 4.6.2 模式。MED-WAV 再分析资料采用 Med-Physics 提供的日平均海流，以及欧洲中期天气预报中心提供的 ERA5 再分析资料驱动；该资料包含 1 小时、0.25° 水平分辨率的海面以上 10 米风场。

2.2 偏差校正

我们采用累积分布函数变换 **CDF-t** 方法（Michelangeli 等人（2009年）），以局地尺度再分析资料为参照，既校正偏差，又将全球气候模式的大尺度数据降尺度至特定位置。本研究在六个离岸位置应用了这一校正（位置见图1，坐标见表 2），这些位置是法国海岸线沿岸未来海上风电场的代表性场址。

[1]https://doi.org/10.17183/REJEUX_HYWAT[2]
https://doi.org/10.25423/cmcc/medsea_多年_波浪_006_012

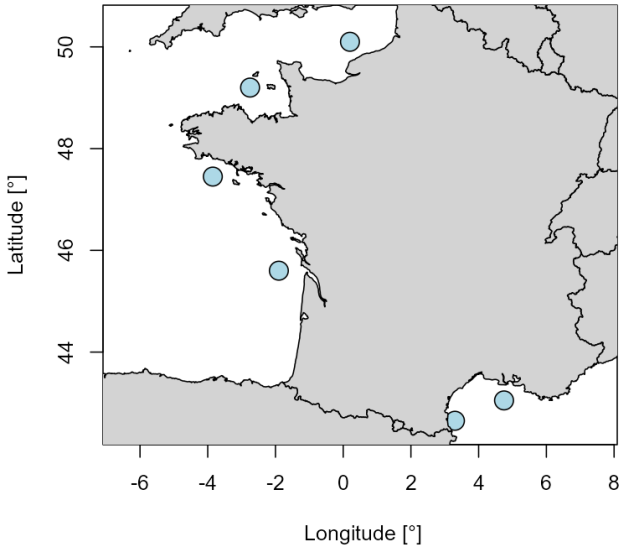


图1。选定代表点（SRP）在法国海岸的位置。

模型	提供方	参考
ACCESS-CM2	ACCESS（澳大利亚）	Bi等（2020）
AWI-CM-1-1-MR	AWI（德国）	Semmler等（2020）
CMCC-CM2-SR5	CMCC（意大利）	Lovato和Peano（2020）
EC-Earth3	EC-Earth联盟（欧洲）	EC-Earth联盟（EC-Earth）（2019）
IPSL-CM6A-LR	IPSL（法国）	Boucher等人（2018）
KIOST-ESM	KIOST（韩国）	Pak等人（2021）
MPI-ESM1-2-LR	MPI（德国）	Wieners等人（2019）
MRI-ESM2-0	MRI（日本）	Yukimoto 等人（2019）

表 1。 本研究所使用的风浪气候模型列表。

图2通过年平均值、累积分布函数（CDF）和月平均值展示了这一校正的影响。校正显著减小了各模式年平均值相对于再分析资料的离散程度。尽管 CDF-t 保留了所有分位数上的趋势，只调整秩和分布特性（而非均值），季节周期中的离散程度也明显降低。后者的改善是通过对每个月分别进行偏差校正实现的。

Name	纬度（WGS 84）	经度（WGS 84）
英吉利海峡东部	50.10	0.20
英吉利海峡西部	49.20	-2.75
北大西洋海岸	47.45	-3.85
南大西洋海岸	45.60	-1.90
法国地中海西部	42.65	3.30
法国地中海东部	43.05	4.75

表 2. 海岸代表点坐标。

3 极值建模

3.1 年度最大值模型

按照 Coles（2001年）的做法，我们使用**年度最大值**并采用**GEV** 分布进行建模:

$$M_n \sim \text{GEV}(\mu, \sigma, \xi),$$

其中， μ 为位置参数， σ 为尺度参数， ξ 为形状参数。

从实际操作的角度来看，数据按年份、模型和情景划分，并采用最大似然法对每组的年度最大值拟合**GEV** 分布。

模型拟合完成后，我们便能够超出观测值的范围，估计年度最大值分布的任意分位数，这在文献中称为重现水平 。在图8中，我们展示了基于拟合模型对这些量的估计，涵盖各个位置和情景。我们还通过查看 QQ图（此处未展示），逐一检查了拟合模型对数据的拟合效果。

3.2 月最大值模型

3.2.1 方法

我们将采用（Reinert 等，2021；Roustan 等，2022；Cheynel 等，2025）的方法，以下简要介绍。按年划分数据块并取最大值时，许多数据未被利用，因数据稀少，拟合参数的不确定性较大。然而，若使用更小的数据块（例如按月划分），则必须考虑数据的季节性，因为不能假定月最大值服从相同分布（例如，参见 Trasch 等（2023））。

$$M_{\text{m, n}} \sim \text{GEV}(\mu = f_1(\text{m})\ \sigma = f_2(\text{m})\ \xi), \tag{1}$$

其中，m 表示一年中的月份。由于难以估计 ξ （参见 Coles（2001年）），因此假设其在所有月份中均为常数。

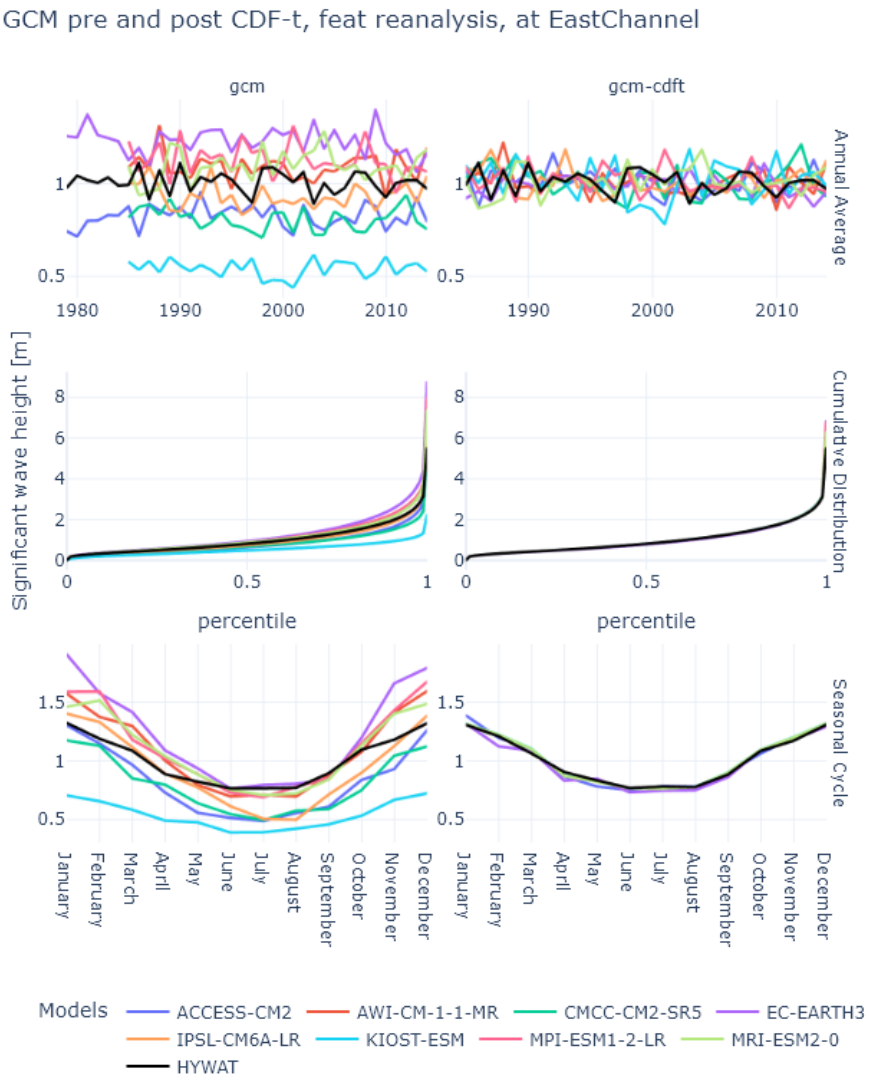


图2。东海峡测点的 CDF-t 验证。

3.2.2 重现水平的计算

N 年重现水平定义为（参见 Coles（2001年））：平均每一次 每 N 年会超过的数值。由方程 1 可知，由于我们处理的是月最大值，无法直接获得这一数值。不过，可以通过将月累积分布函数相乘，反推出年度最大值的分布，公式如下:

$$\mathbb{P}(M_n \leq x) = \prod_{m=1}^{12} \mathbb{P}(M_{n,m} \leq x), \tag{2}$$

若月最大值相互独立，则该做法是合理的。我们通过分析自相关函数和偏自相关函数检验了这一假设。分析表明，模型残差中不存在剩余的时间依赖性，这有力地支持了最初的假设。英吉利海峡东部代表点的相应图示见图3。这一发现与其他研究中观察到的结果一致（例如Cheynel等人（2025）；Youngman（2022））。

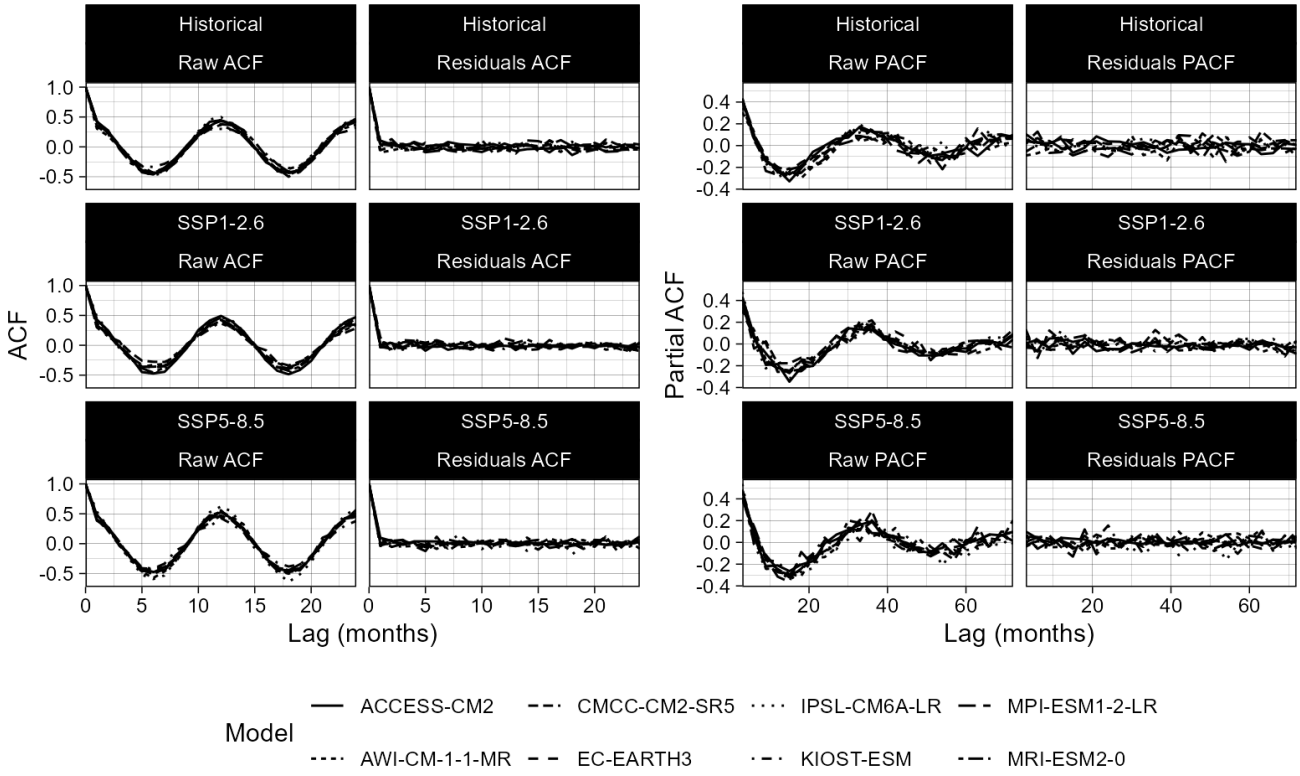


图3. 自相关函数（ACF，左）与偏自相关函数（PACF，右）的比较；地点为英吉利海峡东部，分别对应月最大值非平稳性建模之前（各图左列）与之后（各图右列）。

3.3 长期非平稳模型

3.3.1 方法

100年重现期值，即年超越率为$_{1\ 100}$的值，在设计研究中被广泛使用（Leach等人（2025））。如此低的发生概率要求研究基于充足的数据，以减少与外推相关的统计不确定性，至少需要20到30年的数据。然而，随着气候

快速变化（Calvin等人（2023））， 长期平稳假设可能不再成立，因此需要扩展此类模型。在本研究中，除了前文在式（1）中引入的非参数周期外，我们还纳入了非线性、非参数趋势。基于该公式，我们得到以下模型，使季节循环能够随时间演变：

$$M_{\text{m,y}} \sim \text{GEV}(\mu = f_1(\text{m,y}), \sigma = f_2(\text{m,y}), \xi), \tag{3}$$

其中 m 表示月份，y 表示年份。这里假设，对于 $i = 1,2,$ f_i 而言，它是定义在月份和年份张量空间上的样条函数（Wood（2006））， 从而能够同时考虑季节性及其随时间的变化，这种变化是由非平稳气候的影响造成的。这使得我们能够使用 R 编程语言（R Core Team（2024））的 {evgam} 软件包（Youngman（2022））。

3.3.2 非平稳气候下设计海况的计算

使用模型（3）时，不能假设在考虑月份后，月最大值服从相同的分布，这与第3.2.2节中的推导不同。为了定义变化气候下的等效重现水平，我们决定考虑结构的整个使用寿命。

不失一般性地，假设海上风电场的设计使用年限为 $D_L = 30$ 年，且其设计年失效率为 $P_{\text{annual}} = \frac{1}{100^{\circ}}$ 那么，假设失效率与年份无关，持续时间 D_L 内的总体失效概率为：

$$P_{\text{survive over } D_L \text{ years}} = (1 - P_{\text{annual}})^{D_L} \approx 0.74.$$

在非平稳气候下，年度故障概率不再能被视为恒定值，因为它会受到地球系统内部变率或人为强迫所致长期气候响应的影响。在这种情况下，我们可以写出结构整个使用寿命 D_L 年内最大值的分布：

$$P(M_{D_L} \leq x) = \prod_{y=1}^{D_L} \prod_{m=1}^{12} \mathbb{P}(M_{m,y} \leq x), \tag{4}$$

仅假设各年最大值相互独立。基于式（4），我们提出定义一个等效设计条件：取结构整个使用寿命内最大值分布的适当分位数，使其在平稳气候下的整个使用寿命故障概率与之相同，例如上例中的 ≈ 0.74。

4 结果

现在，我们展示将非平稳模型拟合到波浪数据后得到的结果。为清晰起见，我们仅报告英吉利海峡东部一个代表性地点的详细结果；所有其他地点的结果均见在线补充材料。

图4展示了使用公式3计算的 99th 分位数，以及针对英吉利海峡东部地点的每个全球气候模式所估算的结果。如第3.3节所述，该量取决于月份和年份，是位置参数与尺度参数的函数。横轴表示年份，纵轴表示月份，从每个子图底部的1月到12月。值得注意的是，该图中的历史时期与未来时期之间存在时间间断。

该图清晰展示了有效波高（H_s）显著的季节性：在所有模型和时期中，冬季（黄色）的数值始终高于夏季（蓝色）。历史时期与情景 SSP1-2.6 之间的 H_s 季节对比开始显现，在 SSP5-8.5 情景下则更加显著。历史时期的 H_s 数值通常介于 3 至 7 m 之间，图 4 中的粗带表示其平缓变化。在 SSP1-2.6 情景下，范围仍相近（ 3 m 至 7 m ），但季节变化有所增强，如较窄的色带所示。相比之下，SSP5-8.5 情景下的范围更广（2 m 至 8 m），季节波动也更剧烈，例如， H_s 从 8月的约 2.5 m 变为 9月的 5 m。这些结果表明，季节对比有加剧趋势，表现为冬季数值更高（最高达 8 m）、夏季数值更低（约 2 m）；在比较历史时期与 SSP5-8.5 情景时，这一趋势尤为明显。

此外，图中还显示季节性随时间发生变化：对于大多数模型，夏季时段趋于延长，峰值出现时间也趋于推迟，不过也存在例外（AWI、KIOST 和 MRI 模型）。最后，当数据未显示季节性发生变化的迹象时，模型能够成功退化为平稳情形（例如 SSP1-2.6 情景下的 KIOST 模型）。

关于 SSP1-2.6 情景下 MRI-ESM2-0 的结果，还需补充说明：在预估期内，其季节性非常显著，季节循环发生了大幅偏移（见图 5）。其他地点也观察到了这一现象（见在线补充材料）。由于这一现象出乎意料，且无法用任何物理机制解释，因此在准确评估气候变化下极端海况的演变时，或许应忽略该模型。不过，由于本文侧重于方法论，我们决定在后续分析中保留该模型。

图5通过展示各模型采用非平稳方法估计的两个参考年份的月极端分位数，说明了前文讨论的季节性偏移：2010年对应于历史时期末，2100年代表未来时期末。该图最显著的特征是，在将灰色曲线（2010年）与彩色曲线（两种情景下的2100年）进行比较时，大多数模型中观察到的季节性偏移。后者在夏季取值较低，在冬季取值较高。另一个突出方面是未来情景中年初与年末之间的不对称性：1月的值比12月高出约0.2至0.5米，具体取决于模型。此外，最小 H_s 值往往出现在一年中更晚的时候，相邻斜率变得更陡，表明与历史时期相比，夏季更为显著且更为延长。总体而言，所有模型都表明季节循环向年末偏移，这意味着可能需要重新界定传统季节。例如，最低 H_s 值现在出现在7月而非6月。最后，SSP1-2.6与SSP5-8.5的比较表明，后者放大了这些效应。尽管所有模型总体上认同这一趋势，但KIOST 模型的变化最小，而MPI模型的变化最大。

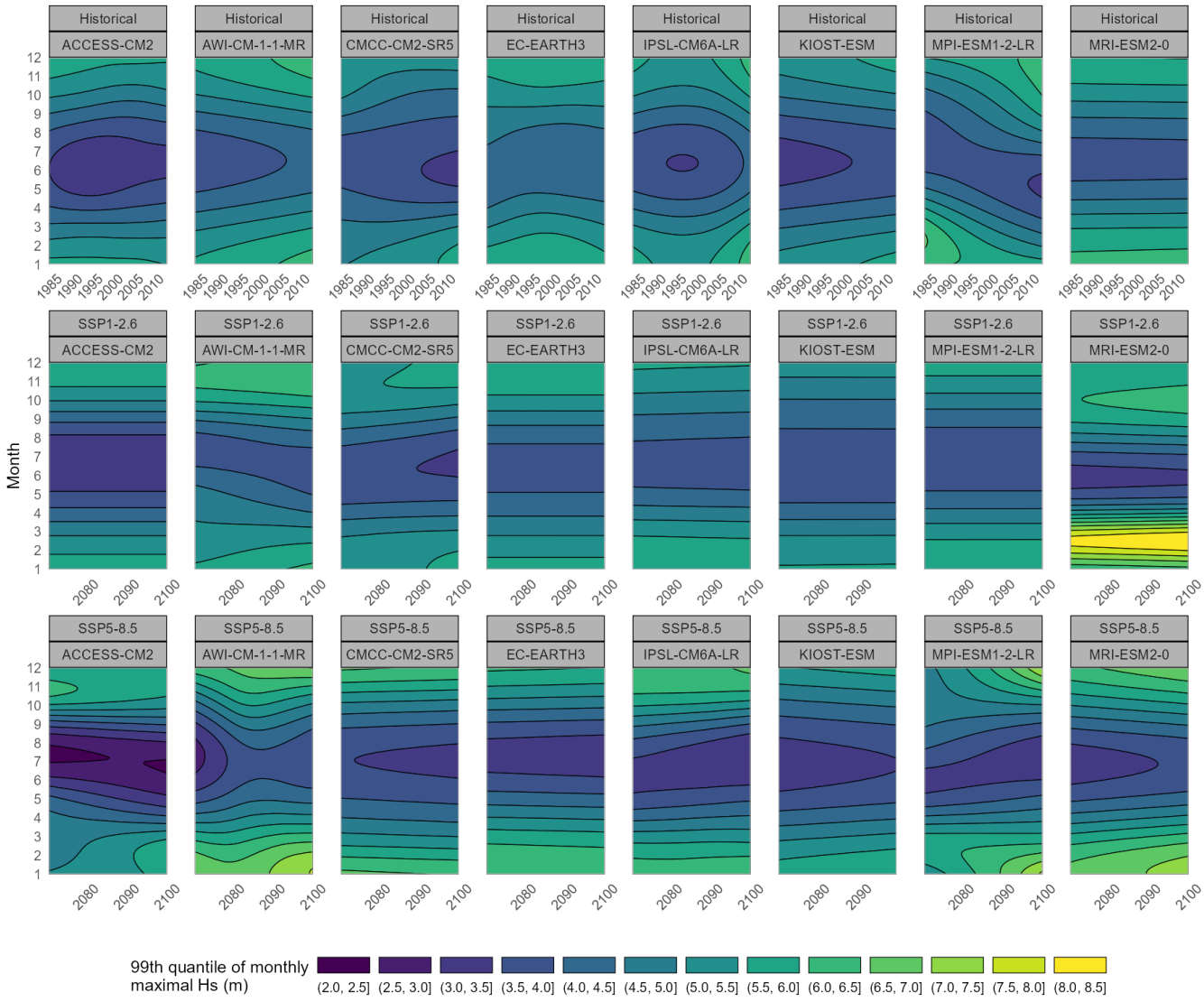


图4。 根据公式3的完全非平稳模型，在东英吉利海峡代表点得出的月度第99分位数对比。

由于夏季和冬季数值中均已识别出偏移，且这两种效应可能相互抵消，因此可能难以评估年度重现水平是否也随时间演变。这一点可在图6中加以考察。在此，我们先利用第3.2.2节的公式2对季节进行积分，再对该分位数函数求逆以获得重现水平，而该重现水平仍取决于年份。不确定性采用蒙特卡罗方法，通过对拟合模型进行模拟来估计。

我们发现，夏季的转移和冬季的增强可能会导致 AWI、MRI 以及 MPI 的年度重现水平上升，但仅在 SSP5-8.5 情景下如此。而 ACCESS-CM2、EC-EARTH、IPSL 和 KIOST 等一些模型则可能

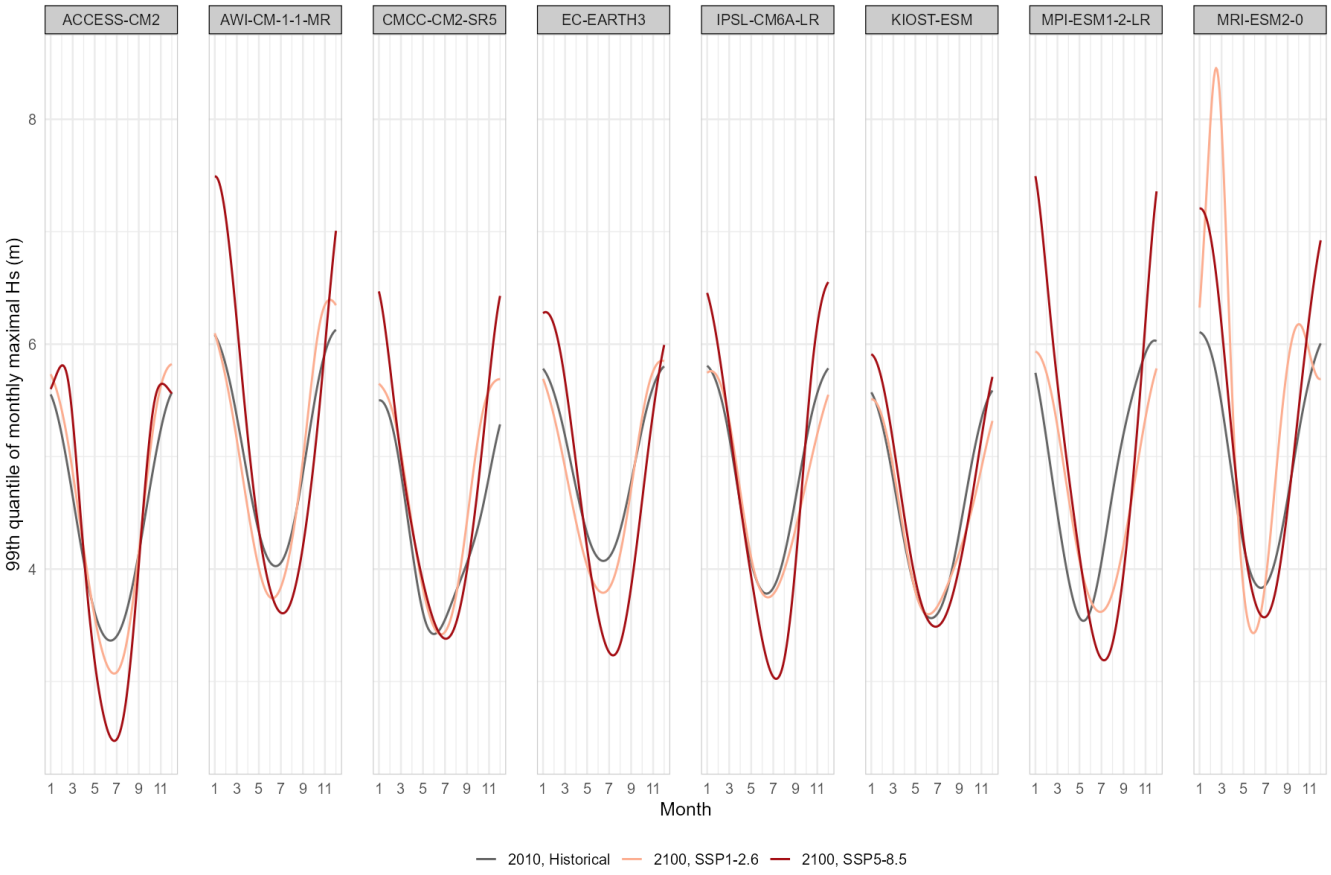


图5. 在东英吉利海峡代表点处，采用式3的完全非平稳模型得到的不同年份（月度99%分位数对比）（历史运行对应2010年，SP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景对应2100年）。

还表明重现水平不会随时间发生长期变化。最后，CMCC模型的结果则呈现相反趋势：在 SSP1-2.6 情景下重现水平上升，而在 SPP5-8.5 情景下则下降。

我们还可以注意到，MPI模型在历史时期呈现出一种更复杂的模式，经典线性方法无法捕捉到这种模式。回看图4，这种行为是由于夏季向年初偏移，随后冬季增强但不足以弥补这一变化，从而形成了典型的“倒钟形曲线”。

为了将估计值与使用经典平稳模型得到的结果进行比较，我们使用公式（4）估计了等效设计条件 。在平稳气候下，这一定义与百年重现水平一致。图7比较了不同模型和情景下的这些量。我们纳入了基于年最大值（圆点）、月最大值（三角形）以及所提出的非平稳方法（方块）估计的百年重现水平。

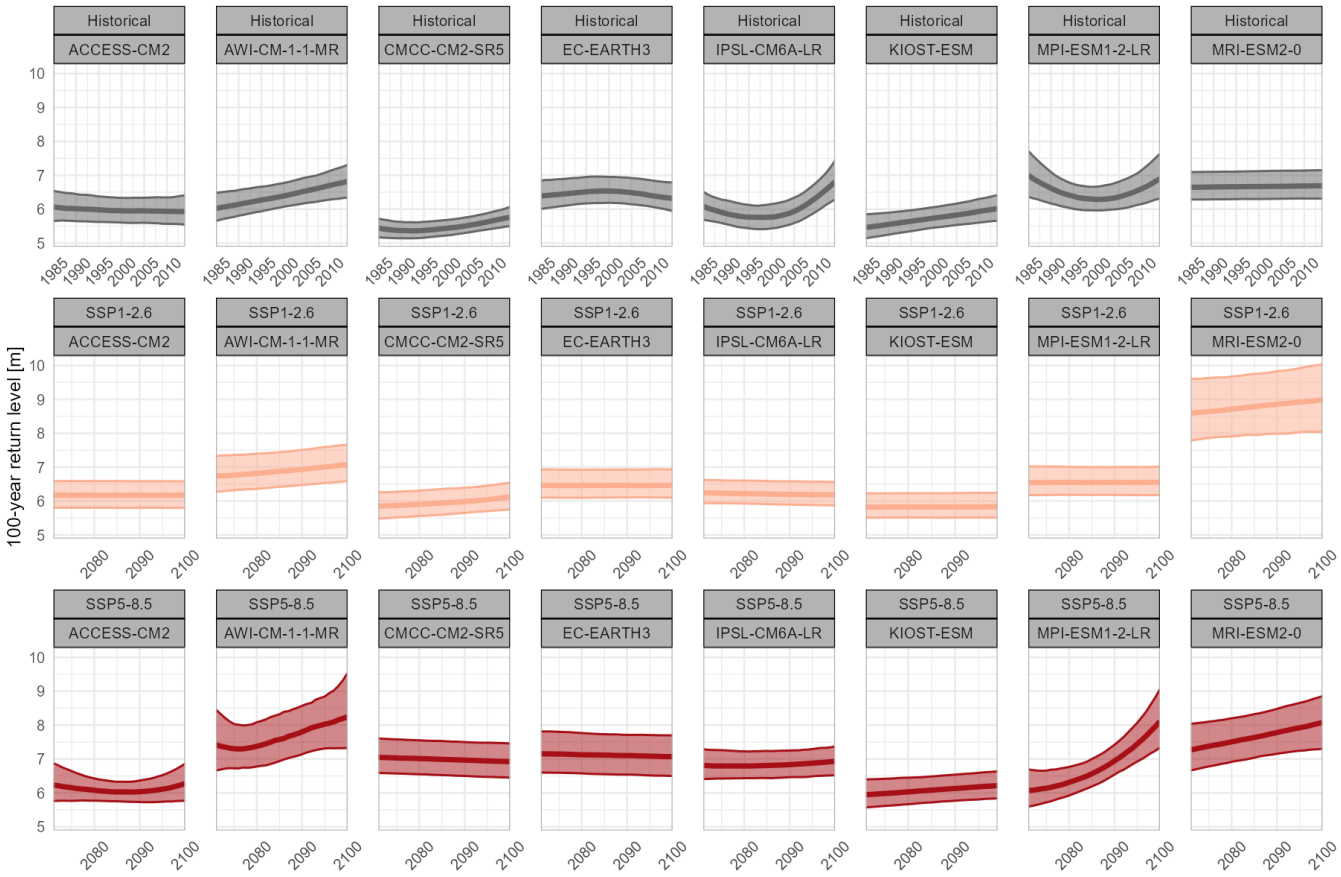


图 6.英吉利海峡东部代表点年重现水平的比较，　　nt

这张图最主要的发现是，与年最大值相比，使用月最大值能显著降低百年重现水平估计的不确定性。这一改进主要归因于模型拟合的数据量增加到原来的十二倍，尽管模型复杂度也有所提高。图中还显示，不同方法之间具有很强的一致性，各项估计值通常都落在彼此的置信区间内。相比之下，由于用于拟合GEV模型的数据有限，年最大值方法可能会产生虚假结果。

对于前文确定的平稳情形（例如 SSP1-2.6 情景下的 KIOST 模型），三种方法给出的估计结果相近，其中完全非平稳模型的置信区间最窄。对所有模型的重现水平取平均后，历史时期约为 6.15 m，SSP1-2.6 情景约为 6.75 m，SSP5-8.5 情景约为 7 m，这表明未来情景预测的重现水平更高。

最后，图8给出了此前详细介绍的各海滨代表点（表 2）在全文所采用方法下的等效设计条件估算结果。所有趋势均呈逐步变化：先是从历史时期到SSP1-2.6，随后到SSP5-8.5，尽管未来情景下的重现期非常相似。

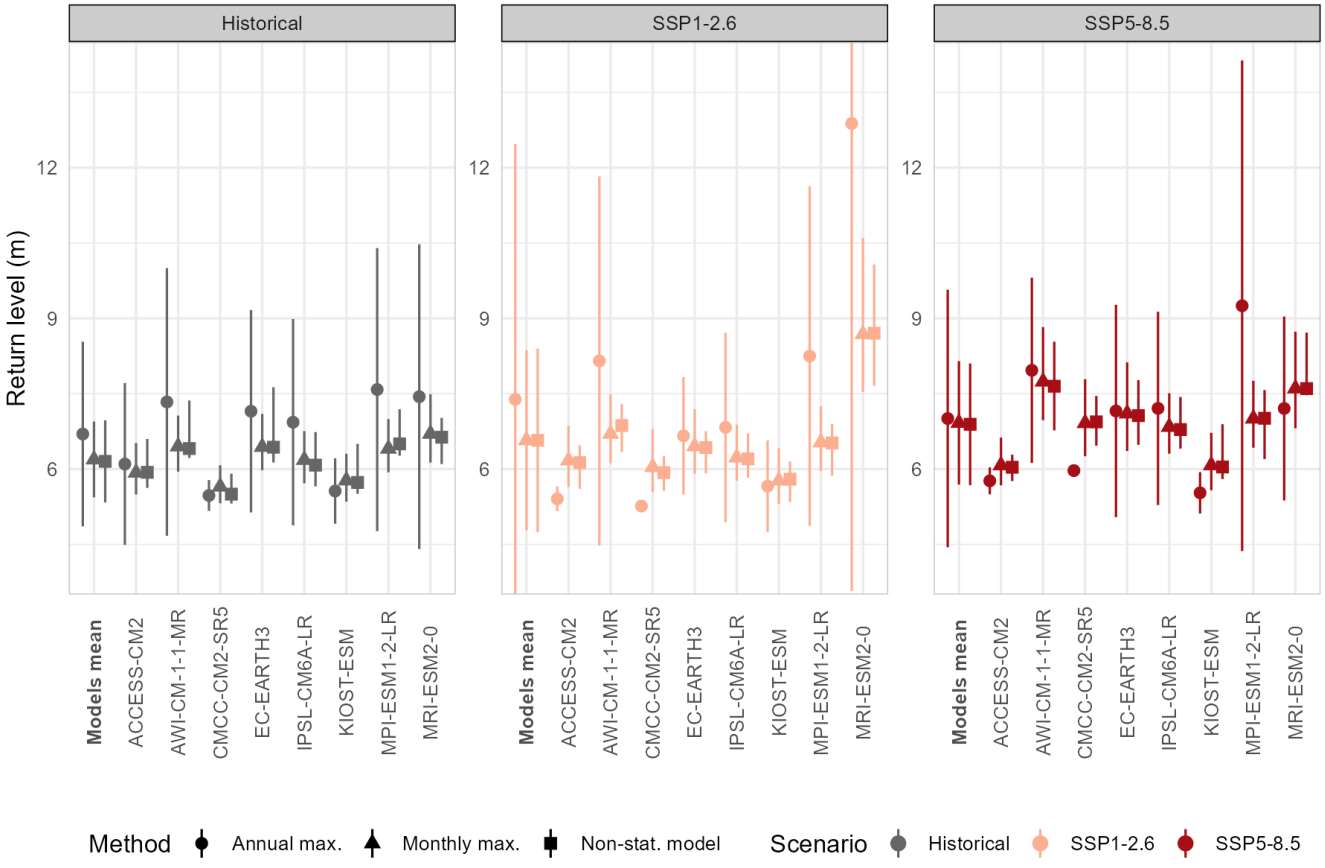


图7。英吉利海峡东部代表点的年重现水平比较 nt

只有海峡东部位置略有下降，其他代表点则均呈上升趋势。海峡西部位置略有上升，北大西洋位置明显上升约2.5米，南大西洋位置上升约1米，地中海西部位置在历史情景下显著上升5米、在未来情景下上升10米；最后，地中海东部位置在历史情景和SSP5-8.5下上升1米，在SSP1-2.6下上升2米。总体而言，对于位于英吉利海峡和大西洋的点位，我们可以得出与上一图相同的结论。非平稳月度方法降低了不确定性，其数值接近月最大值法的结果。然而，对于地中海中的代表点，年最大值法给出的不确定范围最小。需要指出的是，与所有其他代表点相比，地中海西部位置的 H_s 值非常高，最高可达20米，不确定性最高可达30米。与英吉利海峡和大西洋相比，地中海区域各位置的结果差异较大，这可能是由于季节性较弱（参见在线补充文档中的图9和图10），以及全球气候模式对该区域海况的表征不够有说服力。事实上，海岸过程非常重要，但在非常

用于驱动数值波浪模型的大尺度气候模型。这对地中海的影响尤为显著；与大西洋或英吉利海峡相比，地中海四周均为海岸线。

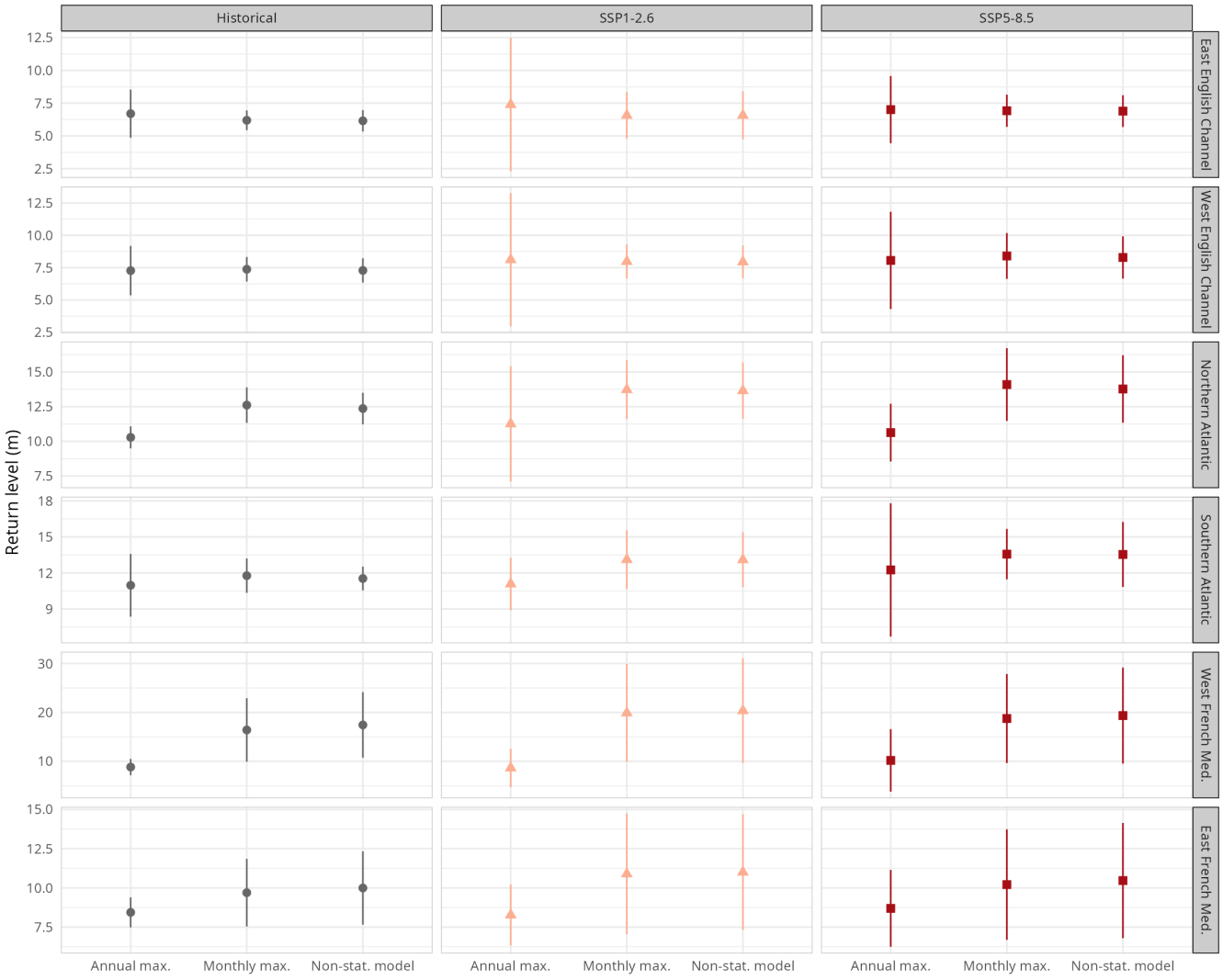


图8。 在不同代表点和不同情景下，比较各全球气候模式采用不同所提方法得到的平均100年重现水平。

总之，寿命期设计水位表示风电场结构寿命期内不可超越的波高。图9展示了英吉利海峡的寿命期设计水位。对于所有模型，历史情景（1985—2014年）的寿命期设计水位（7.4米）均低于未来情景（2081—2100年）；SSP1-2.6（8米）和SSP5-8.5（8.2米）的结果彼此接近。SSP5-8.5的不确定性最大。不确定性最高的模型

在历史时期和SSP5-8.5情景下为CMCC和MPI，而在SSP1-2.6情景下为KIOST。研究所有沿海海滨的寿命期设计水位很有意义（见附录图13至16）。大西洋沿岸与英吉利海峡的情况相似，不过数值更高：历史时期为11至13米，两个SSP情景下均为13至15米。与北部相比，大西洋南部的数值最低。地中海的SSP1-2.6数值似乎高于SSP5-8.5，其不确定性也非常高，甚至高于其他所有沿海海滨。地中海东部的数值较低，历史时期约为10米，两个SSP情景下约为12米；而西部的数值较高，所有情景下均约为20米。地中海的不确定性很大，在SSP情景下所有模型之间的差异为4至14米，约10米；相比之下，大西洋和英吉利海峡的不确定性较低，所有模型之间的最大差异为3米。

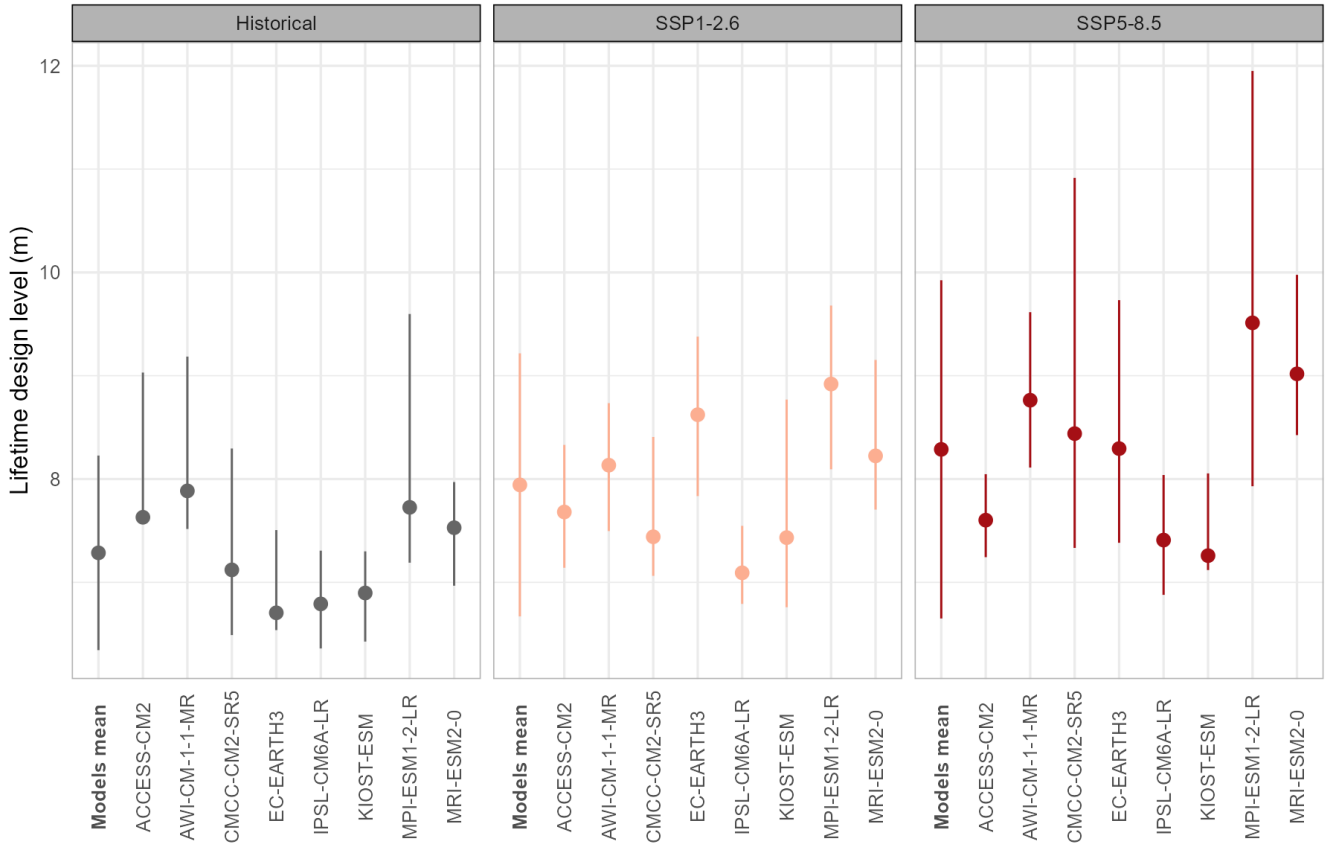


图 9。 基于完全非平稳模型估计的英吉利海峡西部位置在不同全球气候模式和不同情景下的寿命期设计水位比较。

5 讨论

法国的三片沿海海滨——大西洋、英吉利海峡和地中海——在气候驱动的波浪模拟中呈现出根本不同的预测表现和不确定性范围，这对海上风电开发具有重要影响。集合分析和区域研究表明，大西洋和英吉利海峡沿岸的模式结果总体上更为一致，尤其是在风暴路径活动变化方面信号更清晰，冬季极端事件也显著增强；相比之下，地中海既是气候热点，也是模型间离散度大得多的海盆，而且在某些模式波浪集合中存在若干物理上不合理的离群值（例如，少数模拟中 H_s 极大），这可能与全球气候模式分辨率较粗、局地气旋生成的表征不佳，以及未能解析海岸/风区效应有关（Hemer 等（2013）；Morim 等（2019）；Cos 等（2022））。因此，几位作者提醒，对地中海预测必须谨慎解读：集合中位数往往与单个模式极端值不同，而看似不切实际的高值通常源于风强迫偏差或动力驱动因素解析不足，而非稳健的物理信号（Giorgi 和 Lionello（2008）；Davison 等（2024））。相比之下，大西洋盆地的极端事件季节性往往呈现明显的“加深”趋势，冬季峰值更强，H_s的夏季对比也更鲜明；多个模式研究和波浪预测均较一致地再现了这一信号（Hemer 等（2013）；Meucci 等（2024））。最后，第六阶段耦合模式比较计划（以及更早的第五次耦合模式比较计划）中的模式族，在波浪气候大尺度驱动因素（风暴路径、地表风场和季节变化）的表征方面存在显著的模型间差异；某些模式（例如 KIOST-ESM、部分 CMCC 配置和 MPI-ESM 变体）产生了各异的风强迫特征，因而给出不同的波浪预测。模式评估和排序研究已记录了这种异质性，这也说明在推导局地极端 H_s 估计值时，应采用多模式、偏差校正和高分辨率降尺度策略（Meucci 等（2024）；Lorenzo 等（2025））。总之，大西洋和英吉利海峡的预测呈现出相对一致的季节信号——尤其是冬季极端事件增强的趋势更清晰——而地中海的预测仍然更加不确定，也更容易出现孤立且在物理上值得质疑的极端值。因此，地中海的风险评估需要严格进行模式选择、降尺度和合理性检验，而不能盲目依赖未经处理的全球气候模式驱动波浪输出（Hemer 等（2013）；Cos 等（2022）；Davison 等（2024））。

极端有效波高的季节变化显示，法国三大沿海海滨之间存在显著差异，这既反映了大气环流模式的影响，也体现了海盆形态的作用。在大西洋沿岸和英吉利海峡，Bricheno 和 Wolf（2018）以及 Bulteau（2013）的研究强调，极端事件明显以冬季为主，这与增强的西风暴和北大西洋低压有关；相比之下，夏季总体较为平静，进一步证实了强烈的季节性规律。这些研究表明，冬季最大值预计将增强，这与我们的结果一致，即严冬增多，而 H_s 在夏季的值极低。事实上，Bricheno 和 Wolf（2018）预计，在RCP4.5和RCP8.5情景下，到世纪中叶和世纪末，法国三个沿海海滨的年最大值 H_s 将增加。总体而言，所有研究都认为，寒季仍是极端 H_s的主导季节，尽管未来预测显示季节循环将更加复杂，夏季持续时间更长且到来更晚。Chirosca 和 Rusu（2022）利用2001年至2020年的ERA5数据发现，H_s 95 百分位值在北大西洋沿岸和英吉利海峡南部呈上升趋势。至于

Vanem（2015）比较了1970—1999年与2071—2100年的情况，发现未来波浪气候中的极端事件趋向于增强，这与我们在RCP4.5和RCP8.5情景下针对北大西洋所得的结果相似。Bulteau（2013）利用峰值超阈值法和广义帕累托分布，基于1958年至2002年的数值波浪后报BOBWA 数据库，发现大西洋和英吉利海峡的100年重现水平增强，这与我们的结果一致。在此背景下，我们的结果显示冬季趋于更加剧烈，而夏季则更加平静，但到来时间延后且持续时间更长；同时，100年 H_s 重现期增加。这些结果与先前研究的发现一致，表明未来的波浪气候将呈现更强的季节对比，并且平静条件将在时间上重新分配至初秋。

采用非平稳极值模型已成为评估波浪极值变化的一项关键进展，在不断演变的气候条件下，其表现优于平稳性假设。传统平稳模型假定波浪气候的统计特征随时间保持不变，但在存在长期趋势、风暴状况变化或风况与风区模式演变的情况下，这一假设日益失效，而这些因素在法国海岸线尤为重要。Vanem（2015）表明，在极值建模中纳入随时间变化的位置和尺度参数，可在非平稳强迫下显著改善重现水平（例如百年 H_s）的估计，并降低预估偏差。对于RCP4.5，Vanem（2015）报告百年重现水平的不确定性为13.15 m，显著大于我们方法所得的不确定性（最大为10 m）。不确定性的降低很可能归因于我们分析中使用了更多数据，因为所有模型样本量的增加带来了更为稳健的极值估计。Turki等人（2020年）强调，非平稳方法能够刻画不同海盆（例如北大西洋、地中海）波浪极值的局地、季节和方向变率，而平稳性假设无法再现观测到的事件强度、发生时间和频率变化。最近，Ewans和Jonathan（2023）强调，非平稳极值分析对于气候适应和海岸工程不可或缺，因为它们量化了罕见极端波浪事件的概率如何在未来情景下演变，而非假定历史稳定性。作为对这些发现的补充，较早的研究（Mendez等人（2008）；Menendez等人（2009年））说明，对季节参数中的非平稳性进行建模，可通过捕捉风暴活动和风区的季节变化，为海洋极值提供更为真实的重现值估计，从而支持对极端 H_s采用非平稳参数化。总体而言，这些研究共同得出结论：非平稳模型不仅能为变化中的波浪气候提供更为真实的统计表征，而且对于在非平衡气候系统中得出可信的重现期和极值预估也至关重要。因此，我们对波浪极值的研究为月最大值提供了一种新的有效方法，可降低偏差并考虑气候变化。使用月最大值而非年最大值可提供更精细的时间分辨率，从而更好地刻画波浪极值的年内变率及其季节驱动因素。该方法能够检测极端事件发生时间和强度的变化，而这些信息在仅考虑年最大值时会丢失。此外，月最大值提高了非平稳分析的稳健性，因为它们提供了更大的样本量，并使得显式建模季节协变量（例如风暴季节性、气候指数）成为可能，从而得到更为准确且具有物理意义的极值重现水平估计。

6 结论与展望

本研究提出一种基于月最大值的非参数方法，利用8个全球气候模式估计月尺度和年尺度的重现水平，并明确考虑气候变化的影响。一项关键贡献在于提出一种在变化气候驱动的非平稳条件下计算设计水平——相当于重现期——的新方法。我们的结果与现有文献的一致性增强了该方法的可信度与相关性。

通过利用月最大值，我们大幅降低了极值估计中的不确定性。这一简约的数据驱动模型能够刻画季节性及其潜在变化，以及极端事件本身的变化，因而特别适用于评估对海上风电场设计至关重要的罕见事件。

我们的研究结果表明，未来气候下季节对比增强的信号具有一致性，表现为冬季更为剧烈、夏季更为平静但持续时间更长，在大西洋和英吉利海峡尤为明显。尽管模式间存在显著不确定性——在地中海最为突出——集合结果总体上表明，在SSP1-2.6和SSP5-8.5两种情景下，极端海况均有所增强。

本工作为未来研究开辟了若干方向：解决极值估计中的偏差以提高历史一致性；改进沿法国海岸线的波浪模型，以更好地表征局地动力过程；发展刻画季节性及其演变的参数化方法；并探索未来气候情景下有效波高（H_s）与峰值周期（T_p）的联合分布，以增强海上风电设计的稳健性。

代码和数据可用性。 支持本研究结论的数据和代码已在 Zenodo 上公开，网址为：https://doi.org/10.5281/zenodo.17977552。该存储库包含数据集以及复现论文中所示图表所需的全部脚本。所有分析和可视化均使用 R 统计计算开源软件完成（R 核心团队（2024））。

作者贡献。 概念构思：NR、CP、YK 和 LD；方法学：NR；数据整理：NR、TC 和 CP；数据可视化：NR 和 TC；软件：NR 和 TC；初稿撰写：NR、CP、YK。所有作者均批准了最终提交的论文。

利益冲突。 作者声明，他们不存在已知的竞争性经济利益或个人关系，这些利益或关系可能会被视为影响本文所报告的研究工作。

致谢。本研究得到 France Energies Marines 及其成员和合作伙伴的支持，同时获得法国政府资助；该资助由法国国家研究署在法国2030投资计划下管理（资助编号 ANR-10-IEED-0006-34），并通过 2C-NOW 项目实施。

参考文献

Amlashi, H.：《气候变化对海上风力发电机设计的潜在影响》，海洋可再生能源，https://doi.org/10.1115/OMAE2024-128589，2024年。Barkanov, E., Penalba, M., Martinez, A., Martinez-Perurena, A., Zarketa-Astigarraga, A., and Iglesias, G.：《通过第六阶段耦合模式比较计划研究多种气候变化情景和预报时效下欧洲海上可再生能源资源的演变》，《能源转换与管理》，301，118058，https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.118058，2024年。Bi, D., Dix, M., Marsland, S., O'Farrell, S., Sullivan, A., Bodman, R., Law, R., Harman, I., Srbinovsky, J., Rashid, H. A., Dobrohotoff, P., Mackallah, C., Yan, H., Hirst, A., Savita, A., Dias, F. B., Woodhouse, M., Fiedler, R., and Heerdegen, A.：《ACCESS-CM2 的配置与自旋上升：新一代澳大利亚社区气候与地球系统模拟器耦合模式》，《南半球地球系统科学》，70，225–251，https://doi.org/10.1071/es19040，2020年。Boucher, O., Denvil, S., Levavasseur, G., Cozic, A., Caubel, A., Foujols, M.-A., Meurdesoif, Y., Cadule, P., Devilliers, M., Ghattas, J., Lebas, N., Lurton, T., Mellul, L., Musat, I., Mignot, J., and Cheruy, F.：《为第六阶段耦合模式比较计划准备的 IPSL IPSL-CM6A-LR 模式输出》，https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1534，2018。Bricheno, L. and Wolf, J.：《应对高端气候变化情景的欧洲未来波浪条件》，《地球物理学研究杂志：海洋》，123，8762–8791，https://doi.org/10.1029/2018JC013866，2018。Bulteau, T.：《法国海岸沿线有效波高的空间极值分析》，https://brgm.hal.science/hal-00857627v1，2013。Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., Jotzo, F., Krug, T., Lasco, R., Lee, Y.-Y., Masson-Delmotte, V., Meinshausen, M., Mintenbeck, K., Mokssit, A., Otto, F. E., Pathak, M., Pirani, A., Poloczanska, E., Pörtner, H.-O., Revi, A., Roberts, D. C., Roy, J., Ruane, A. C., Skea, J., Shukla, P. R., Slade, R., Slangen, A., Sokona, Y., Sörensson, A. A., Tignor, M., van Vuuren, D., Wei, Y.-M., Winkler, H., Zhai, P., Zommers, Z., Hourcade, J.-C., Johnson, F. X., Pachauri, S., Simpson, N. P., Singh, C., Thomas, A., Totin, E., Alegría, A., Armour, K., Bednar-Friedl, B., Blok, K., Cissé, G., Dentener, F., Eriksen, S., Fischer, E., Garner, G., Guivarch, C., Haasnoot, M., Hansen, G., Hauser, M., Hawkins, E., Hermans, T., Kopp, R., Leprince-Ringuet, N., Lewis, J., Ley, D., Ludden, C., Niamir, L., Nicholls, Z., Some, S., Szopa, S., Trewin, B., van der Wijst, K.-I., Winter, G., Witting, M., Birt, A., and Ha, M.：《政府间气候变化专门委员会，2023年：气候变化2023：综合报告。政府间气候变化专门委员会第六次评估报告第一、第二和第三工作组的贡献》 [核心撰写团队，H. Lee 和 J. Romero（编辑）]。政府间气候变化专门委员会，日内瓦，瑞士。https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6-9789291691647，2023年。Chellaa, A., Tøruma, D., and Myrhauga：《海上风力发电机下部结构波浪冲击力概述》，《能源学报》，第217–226页，https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.022，2012年。Cheynel, J., Pineau-Guillou, L., Lazure, P., Marcos, M., and Raillard, N.：《通过验潮站分析揭示的区域极端风暴潮变化》，《海洋动力学》，75，29（11页），https://doi.org/10.1007/s10236-025-01675-6，2025年。Chirosca, A. and Rusu, L.：《欧洲海域风浪气候特征：聚焦主要海上航线》，《海洋科学与工程》，10，https://doi.org/10.3390/jmse10010075，2022年。Coles, S.：《极值统计建模导论》，《施普林格统计学系列》，https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675- 0，2001年。

Cos, J., Doblas-Reyes, F., and Jury, M.：《第五次和第六阶段耦合模式比较计划预估中的地中海气候变化热点》，《地球系统动力学》，13，321–340，https://doi.org/10.5194/esd-13-321-2022，2022年。Davison, S., Benetazzo, A., and Barbariol, F.：《地中海类热带气旋期间极端波浪场的特征分析》，《海洋科学前沿》，10，https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1268830，2024年。EC-Earth Consortium (EC-Earth)：为第六阶段耦合模式比较计划（CMIP）准备的 EC-Earth联盟 EC-Earth3 模式输出，https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.181，2019年。Ewans, K. and Jonathan, P.：《估算气候变化对有效波高100年重现期值影响的不确定性》，《海洋工程》，272，https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113840，2023年。Giorgi, F. and Lionello, P.：《地中海区域气候变化预估》，《全球与行星变化》，63，90–104，https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005，2008年。Hemer, M., Fan, Y., and Mori, N.：《多模式集合预估的波浪气候变化》，《自然·气候变化》，3，471–476，https://doi.org/10.1038/nclimate1791，2013年。Hersbach, B., Bell, P., Berrisford, S., Hirahara, A., Horányi, J., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, C., Peubey, R., Radu, D., Schepers, A., Simmons, C., Soci, S., Abdalla, X., Abellan, G., Balsamo, P., Bechtold, G., Biavati, J., Bidlot, M., Bonavita, G., De Chiara, P., Dahlgren, D., Dee, M., Diamantakis, R., Dragani, J., Flemming, R., Forbes, M., Fuentes, A., Geer, L., and Haimberger：《ERA5 全球再分析》，Quaterly journal of the royal meteorological society，https://doi.org/10.1002/qj.3803，2020年。政府间气候变化专门委员会：《2022年气候变化：影响、适应与脆弱性》，https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-13/，2022年。Jourdan, D., Paradis, A., Pasquet, H., Michaud, R., Baraille, L., Biscara, A., and Dalphinet, P.：《HOMONIM 项目第三阶段：定义与内容》，Quaterly journal of the royal meteorological society，https://doi.org/10.5150/jngcgc.2020.087，2020年。Leach, C., Ewans, K., and Jonathan, P.：《气候模式变量100年重现期值随时间的变化》，《海洋工程》，324，120605，https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120605，2025年。Lorenzo, M., Meucci, A., and Liu, J.：《从全球到区域尺度的第六阶段耦合模式比较计划衍生风浪极值：澳大利亚东南部单一全球气候模式高分辨率模式比较计划与协调区域气候降尺度实验降尺度研究》，《气候动力学》，https://doi.org/10.1007/s00382-024-07504-8，2025年。Lovato, T. and Peano, D.：为第六阶段耦合模式比较计划（CMIP）准备的 CMCC CMCC-CM2-SR5 模式输出，https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1362，2020年。Mendez, F., Menendez, M., and Luceno, A.：《有效波高极值分布的季节性与持续时间》，《海洋工程》，35，131–138，https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.07.012，2008年。Menendez, M., Mendez, F., and Izaguirre, C.：《季节性对估算有效波高重现值的影响》，《海岸工程》，56，211–219，https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.07.004，2009年。Meucci, I., Young, C., Trenham, M., and Hemer：《由第六阶段耦合模式比较计划衍生的海洋表面波浪气候：8模式集合》，Scientific data，https://doi.org/10.1038/s41597-024-02932-x，2024年。Michaud, L. and Seyfried, A. P.：《HYWAT：法国大西洋海岸45年的潮汐、风暴潮和海况高分辨率重演。圣马洛沿岸淹没风险应用》，https://doi.org/10.5150/jngcgc.2024.094，2024年。Michelangeli, P.-A., Vrac, M., and Loukos, H.：《概率降尺度方法：风速累积分布函数的应用》，《地球物理研究快报》，36，https://doi.org/10.1029/2009GL038401，2009年。Morim, J., Hemer, M., and Wang, X.：《全球多变量风浪气候预估的稳健性与不确定性》，《自然·气候变化》，9，711–718，https://doi.org/10.1038/s41558-019-0542-5，2019年。

Pak, G., Noh, Y., Lee, M.-I., Yeh, S.-W., Kim, D., Kim, S.-Y., Lee, J.-L., Lee, H. J., Hyun, S.-H., Lee, K.-Y., Lee, J.-H., Park, Y.-G., Jin, H., Park, H., and Kim, Y. H.：《韩国海洋科学技术院地球系统模式及其模拟特征》，《海洋科学杂志》，56，18–45，https://doi.org/10.1007/s12601-021-00001-7，2021年。R 核心团队：R：统计计算语言，R 统计计算基金会，奥地利维也纳，https: //www.R-project.org/，2024年。Reinert, M., Pineau-Guillou, L., Raillard, N., and Chapron, B.：《极值分析揭示布雷斯特风暴潮的季节性转变》，《地球物理研究杂志：海洋》，126，https://doi.org/10.1029/2021jc017794，2021年。Roustan, J.-B., Pineau-Guillou, L., Chapron, B., Raillard, N., and Reinert, M.：《气候变率导致欧洲风暴潮季节转变》，《科学报告》，12，https://doi.org/10.1038/s41598-022-12356-5，2022年。Schloer, S.：《固定式海上风力涡轮机的疲劳与极端波浪载荷：完全非线性波浪强迫对结构动力学的影响》，博士论文，第176页，https://orbit.dtu.dk/en/publications/fatigue-and-extreme-wave-loads-on-bottom-fixed-offshore-wind-turb，2013年。Semmler, T., Danilov, S., Gierz, P., Goessling, H. F., Hegewald, J., Hinrichs, C., Koldunov, N., Khosravi, N., Mu, L., Rackow, T., Sein, D. V., Sidorenko, D., Wang, Q., and Jung, T.：《使用 AWI 气候模式 AWI-CM-1-1 进行第六阶段耦合模式比较计划模拟》，Journal of Advances in Modeling Earth Systems，12，https://doi.org/10.1029/2019ms002009，2020年。Slater, B., Anderson, M., Buechel, S., Dadson, S., Han, S., Harrigan, T., Kelder, K., Kowal, T., Lees, T., Matthews, C., Murphy, R., and Wilby：《非平稳极端天气和水文事件：检测、归因与管理方法综述》，Hydrol. Earth Syst. Sci，3897–3935页，https://doi.org/10.5194/hess-25-3897-2021，2021年。Susini, S., Menendez, M., Eguia, P., and Blanco, J. M.：《气候变化对北海和爱尔兰海海上风能的影响》，Frontiers in Energy Research，10，https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.881146，2022年。Trasch, M., Raillard, N., Perier, V., Le Boulluec, M., Repecaud, M., and Matoug, C.：《布雷斯特 IFREMER 现场试验场的海洋气象条件》，https://doi.org/10.1201/9781003360773，2023年。Turki, I., Baulon, L., and Massei, N.：《用于研究极端风暴潮多尺度变率的非平稳分析：英吉利海峡海岸案例》，Natural Hazards and Earth System Sciences，20，3225–3243，https://doi.org/10.5194/nhess-20-3225-2020，2020年。Vanem, E.：《考虑气候变化导致的极端波浪气候趋势与转变的非平稳极值模型》，Applied Ocean Research，52，201–211，https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.06.010，2015年。Wieners, K.-H., Giorgetta, M., Jungclaus, J., Reick, C., Esch, M., Bittner, M., Legutke, S., Schupfner, M., Wachsmann, F., Gayler, V., Haak, H., de Vrese, P., Raddatz, T., Mauritsen, T., von Storch, J.-S., Behrens, J., Brovkin, V., Claussen, M., Crueger, T., Fast, I., Fiedler, S., Hagemann, S., Hohenegger, C., Jahns, T., Kloster, S., Kinne, S., Lasslop, G., Kornblueh, L., Marotzke, J., Matei, D., Meraner, K., Mikolajewicz, U., Modali, K., Müller, W., Nabel, J., Notz, D., Peters-von Gehlen, K., Pincus, R., Pohlmann, H., Pongratz, J., Rast, S., Schmidt, H., Schnur, R., Schulzweida, U., Six, K., Stevens, B., Voigt, A., and Roeckner, E.：为第六阶段耦合模式比较计划历史模拟准备的 MPI-M MPI-ESM1.2-LR 模式输出，https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6595，2019年。Wood, S. N.：《广义加性混合模型的低秩尺度不变张量积平滑项》，《生物统计学》，62，1025–1036，https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2006.00574.x，2006年。Youngman, B. D.：《evgam：广义加性极值模型的 R 软件包》，《统计软件杂志》，103，1–26，https://doi.org/10.18637/jss.v103.i03，2022年。

Yukimoto, S., Koshiro, T., Kawai, H., Oshima,N., Yoshida, K., Urakawa,S., Tsujino, H., Deushi,M., Tanaka, T., Hosaka,M., Yoshimura, H., Shindo, E., Mizuta, R., Ishii, M., Obata, A., 和 Adachi, Y.：MRI MRI-ESM2.0 模式为第六阶段耦合模式比较计划耦合模式比较计划准备的输出，https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.621，2019。Zhang, D., Xu, Z., Li, C., Yang, R., Shahidehpour, M., Wu, Q., 和 Yan, M.：考虑气候变化影响及极端条件脆弱性的风能经济与可持续发展前景，《电力杂志》，32，7–12，https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.05.013，2019。

1 代表点的月度分位数

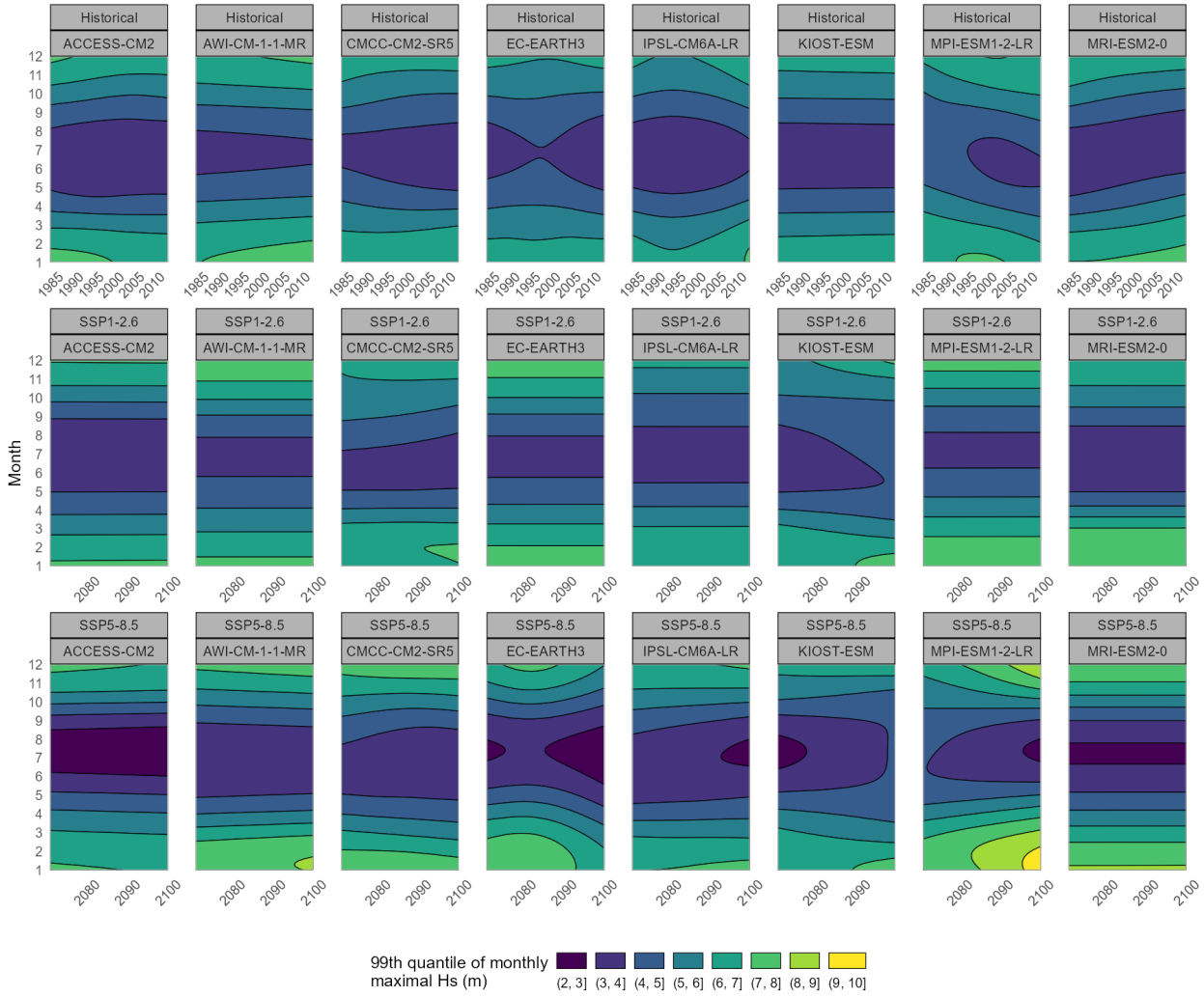


图 S1：对　　英吉利海峡西部代表点月度第99分位数的比较

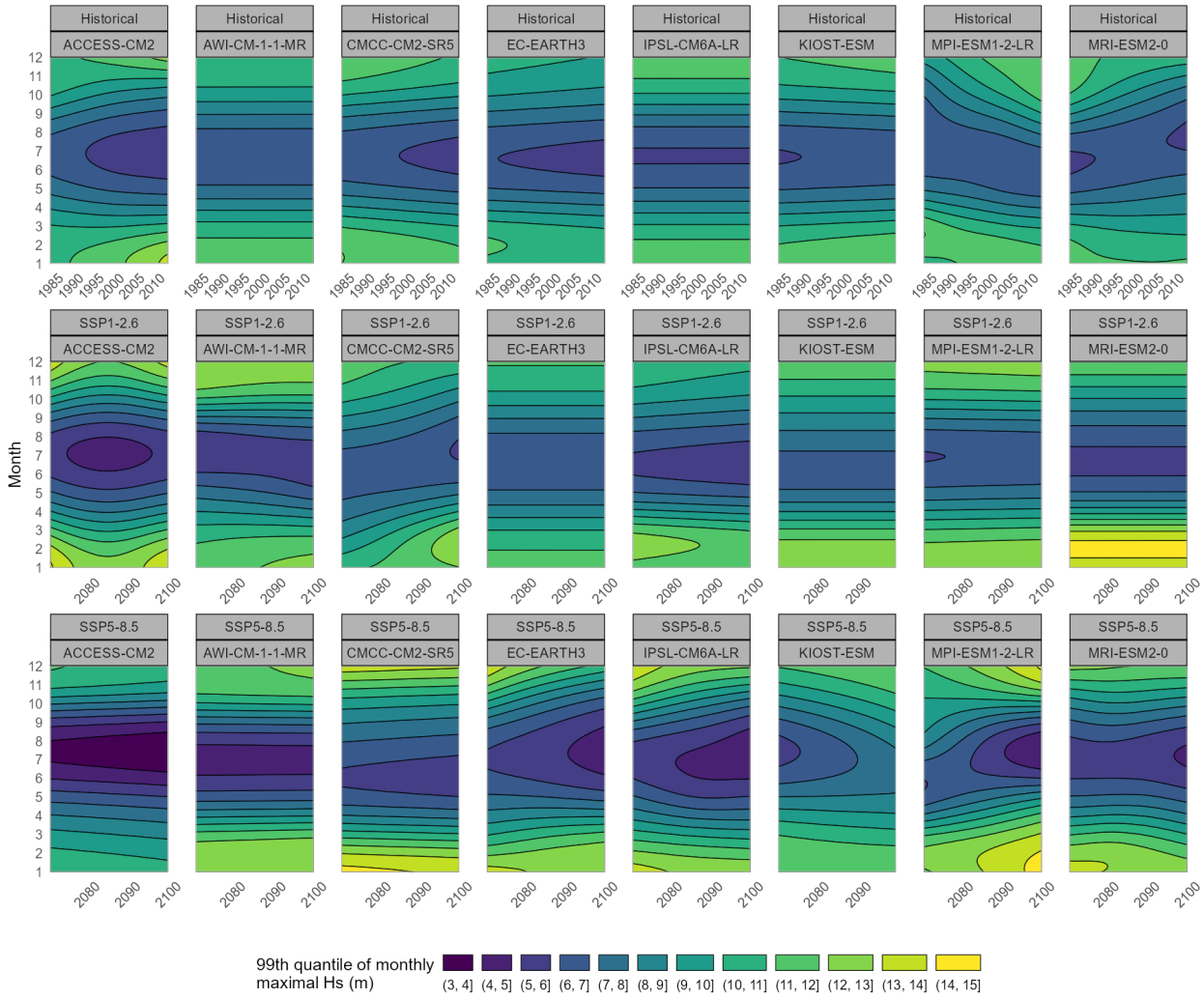


图 S2：北大西洋代表点月度第99分位数的比较

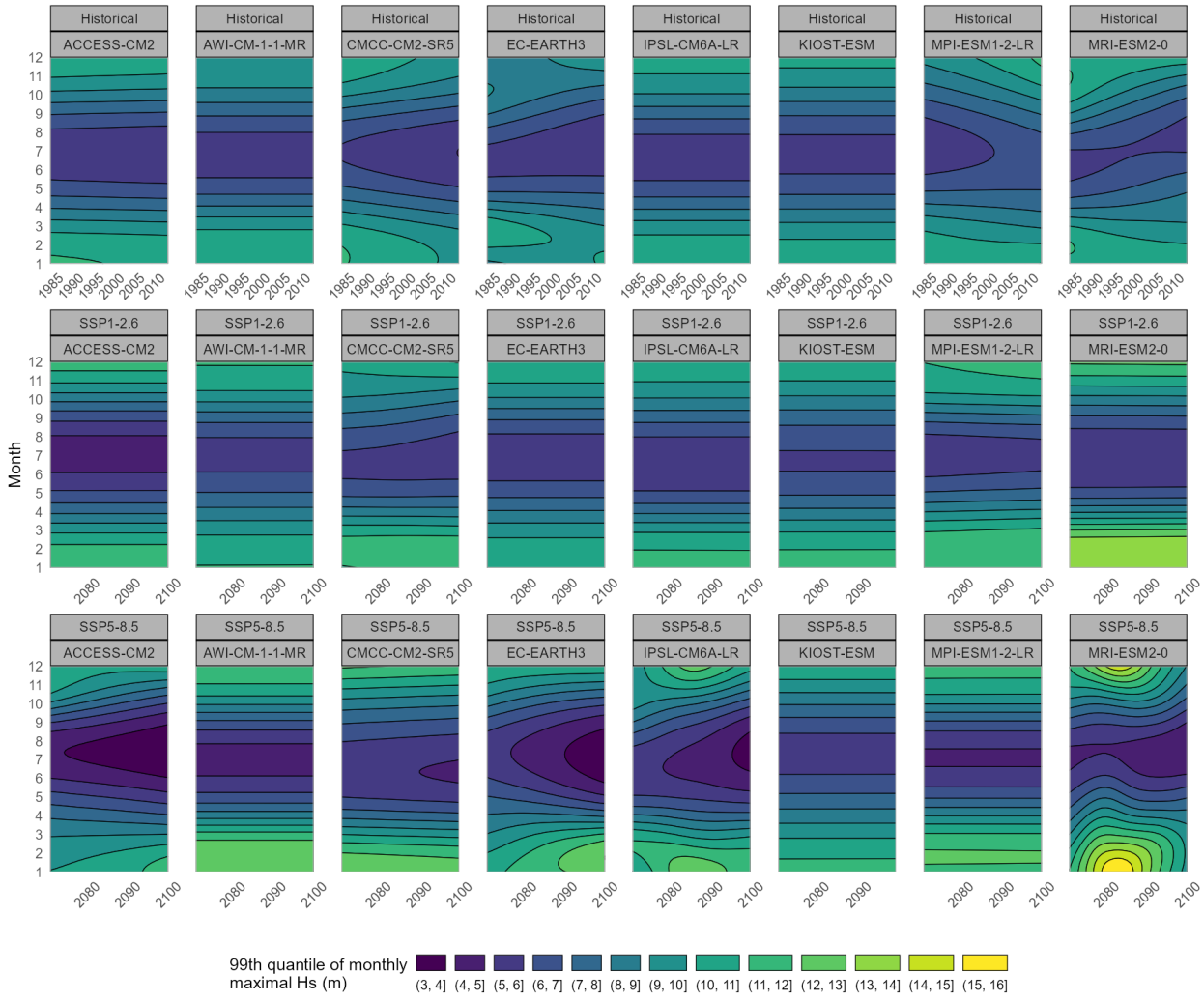


图 S3：南大西洋代表点的月度第99分位数对比

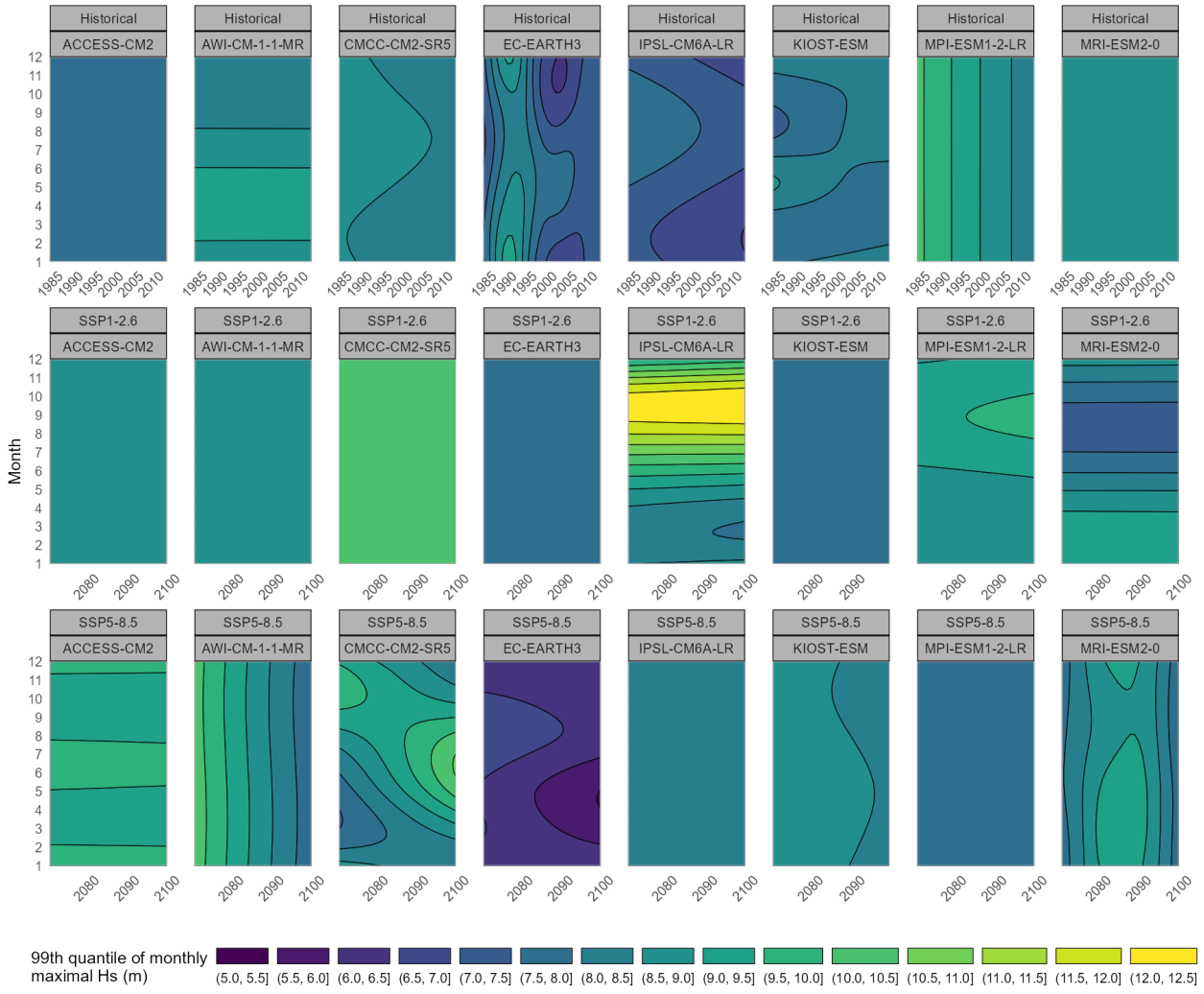


图 S4：C　　西地中海代表点处月度第99分位数的比较

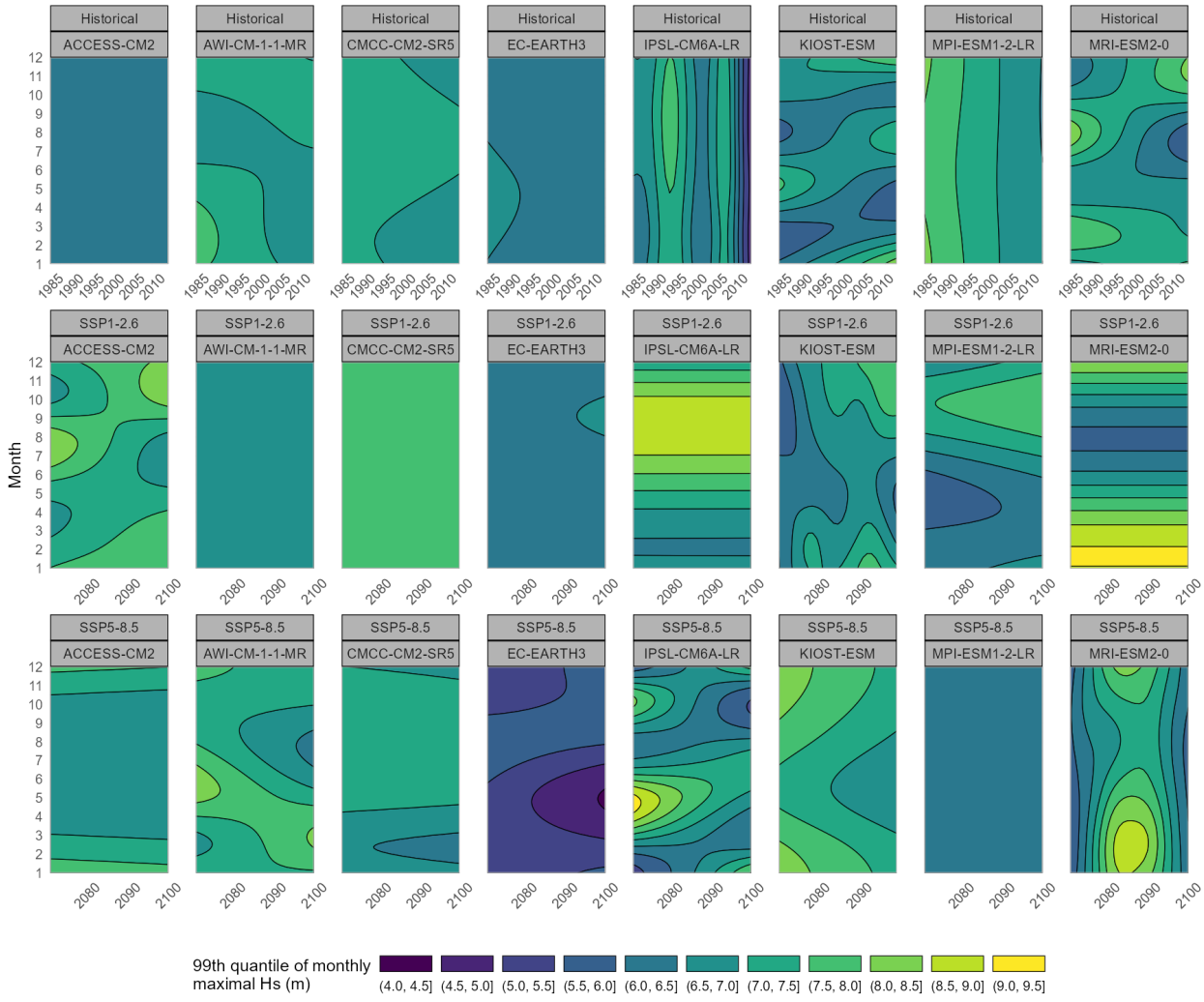


图 S5：C　　位于东地中海代表点的月度第99分位数比较

2　Co给定年份代表点月度分位数的比较

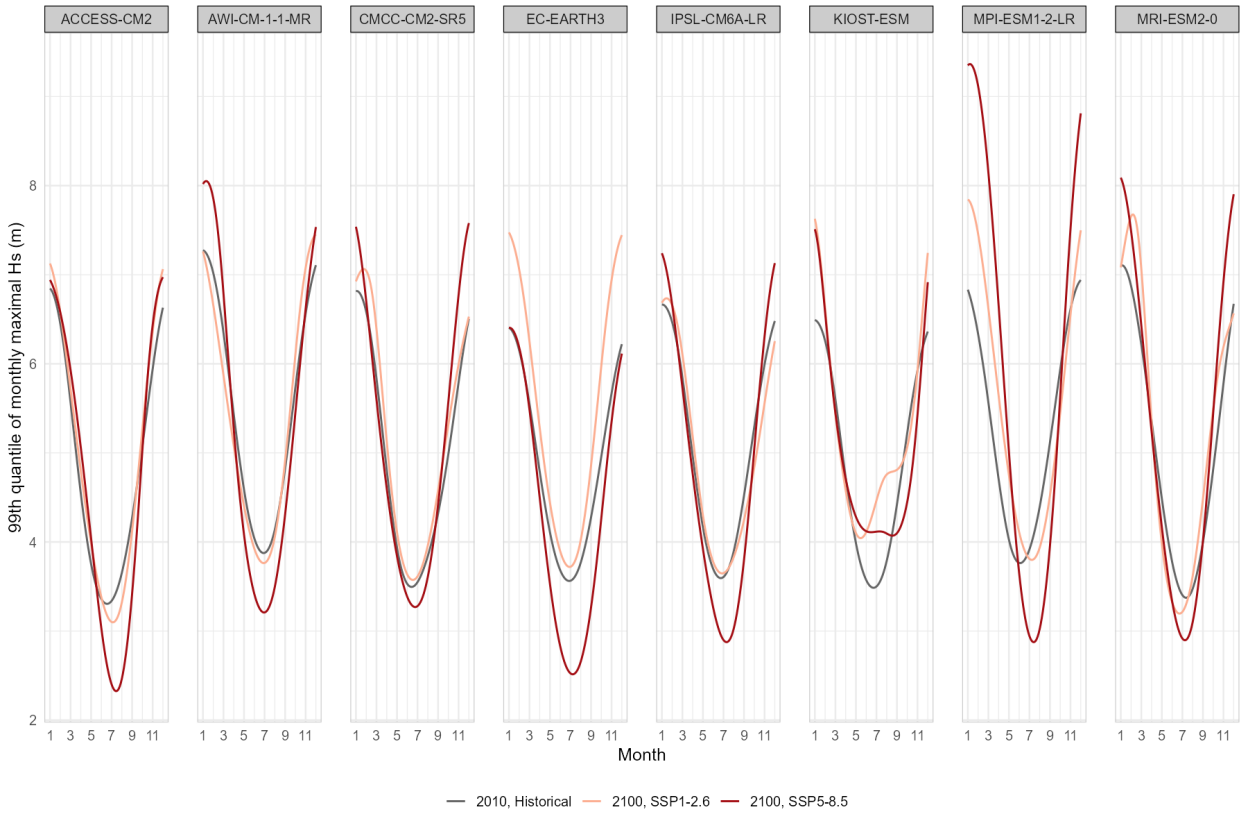


图 S6：英吉利海峡西部代表点给定年份的月度第99分位数比较（历史运行对应2010年，SP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景对应2100年）

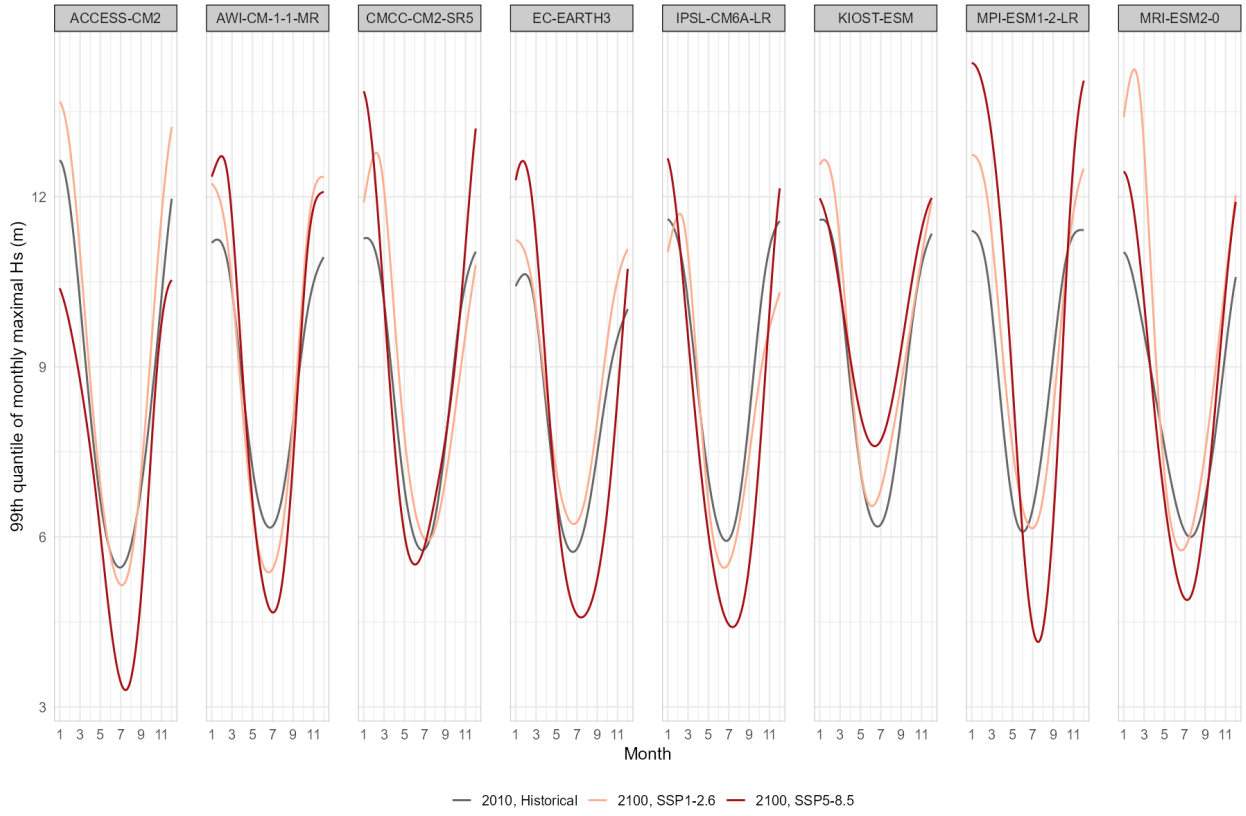


图 S7：北大西洋代表点在指定年份的月度第99分位数比较（历史运行采用2010年，SP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景采用2100年）

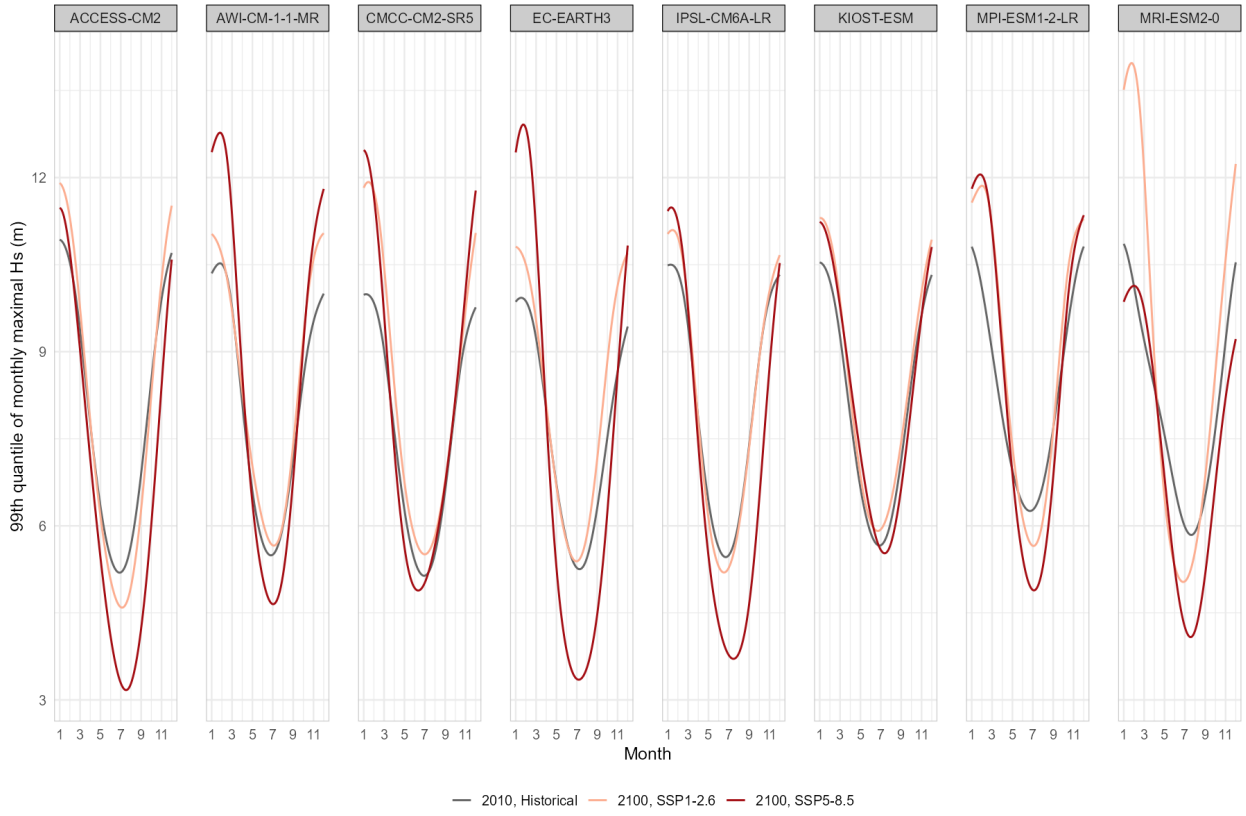


图 S8：南大西洋代表点在指定年份的月度第99分位数比较（历史运行对应2010年，SP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景对应2100年）

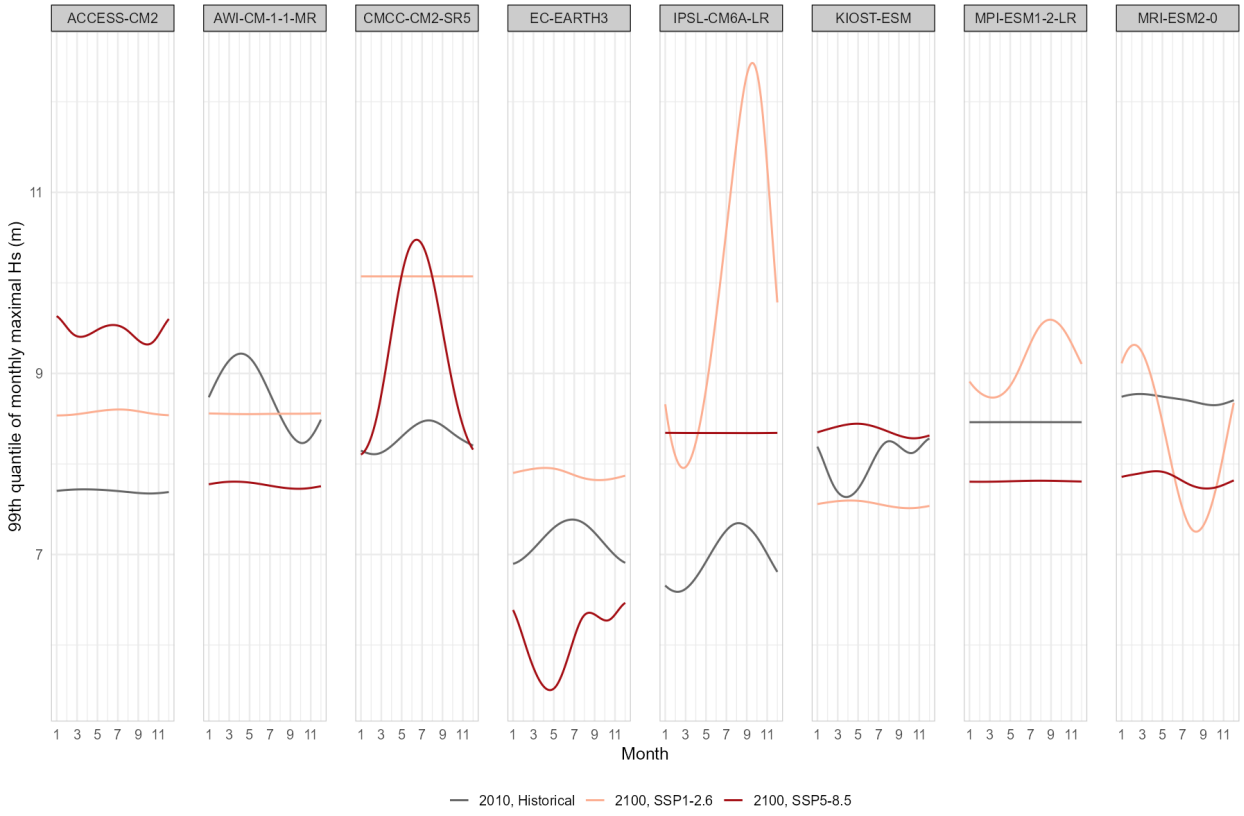


图 S9：西地中海代表点在指定年份的月度第99分位数比较（历史运行对应 2010年，SP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景对应 2100年）

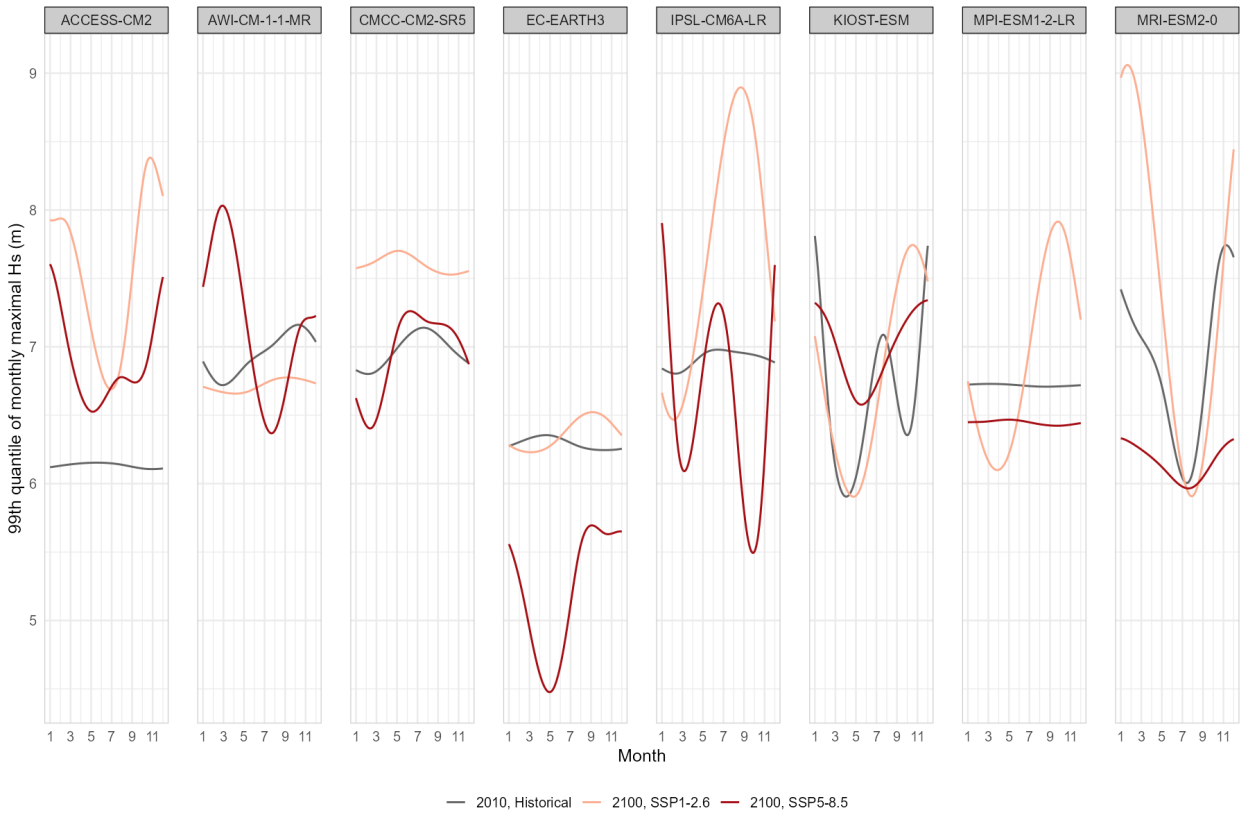


图 S10：东地中海代表点在指定年份的月度第99分位数比较（历史运行对应2010年，SP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景对应2100年）

3 个不同代表点的年重现水平

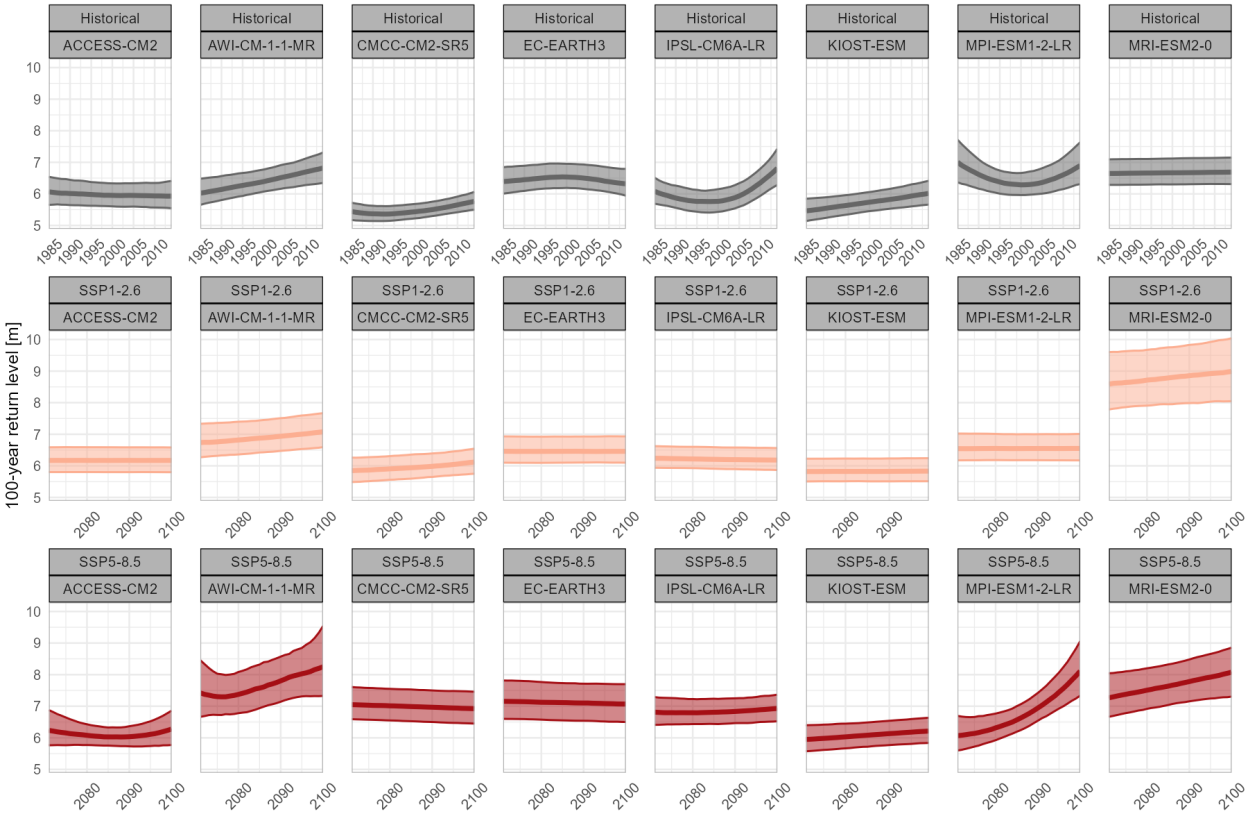


图 S11：东英吉利海峡代表点的年重现水平对比

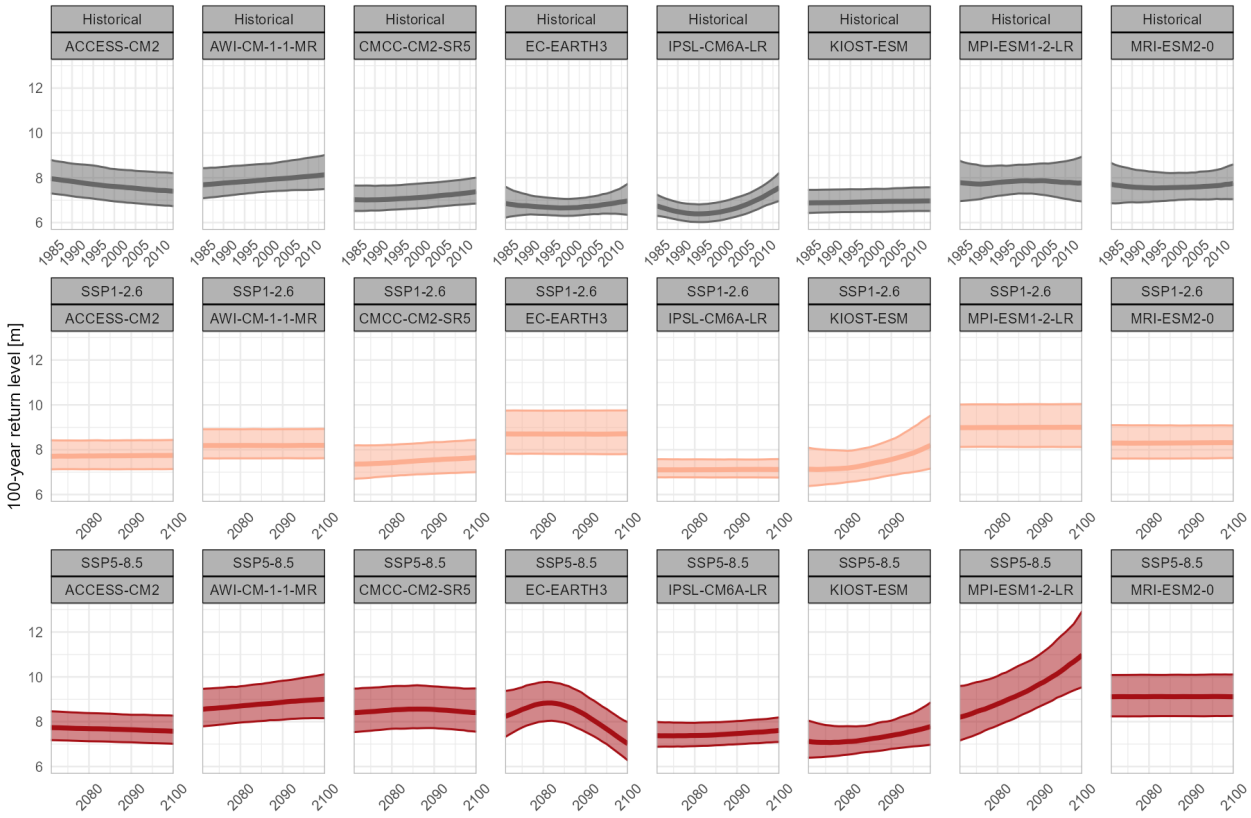


图 S12：英吉利海峡西部代表点的年重现水平比较

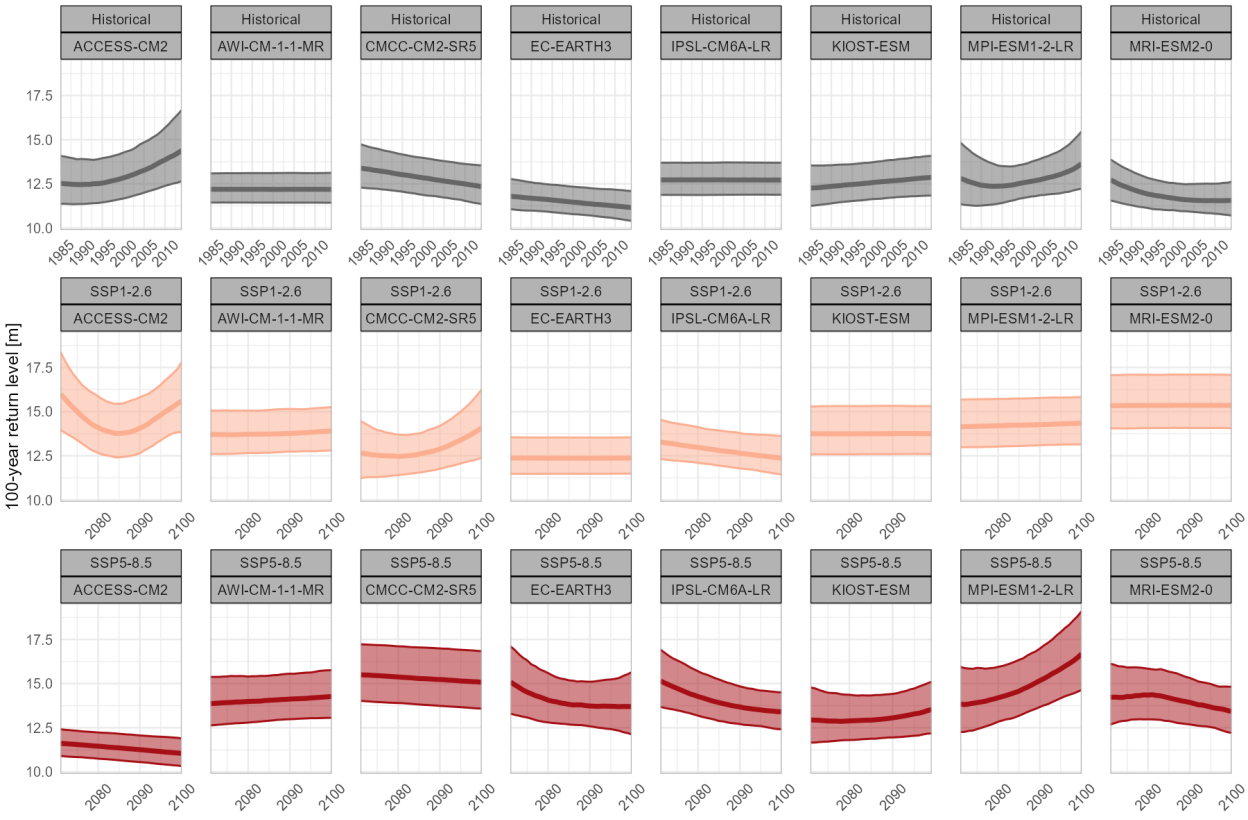


图 S13：北大西洋代表点年重现水平的比较

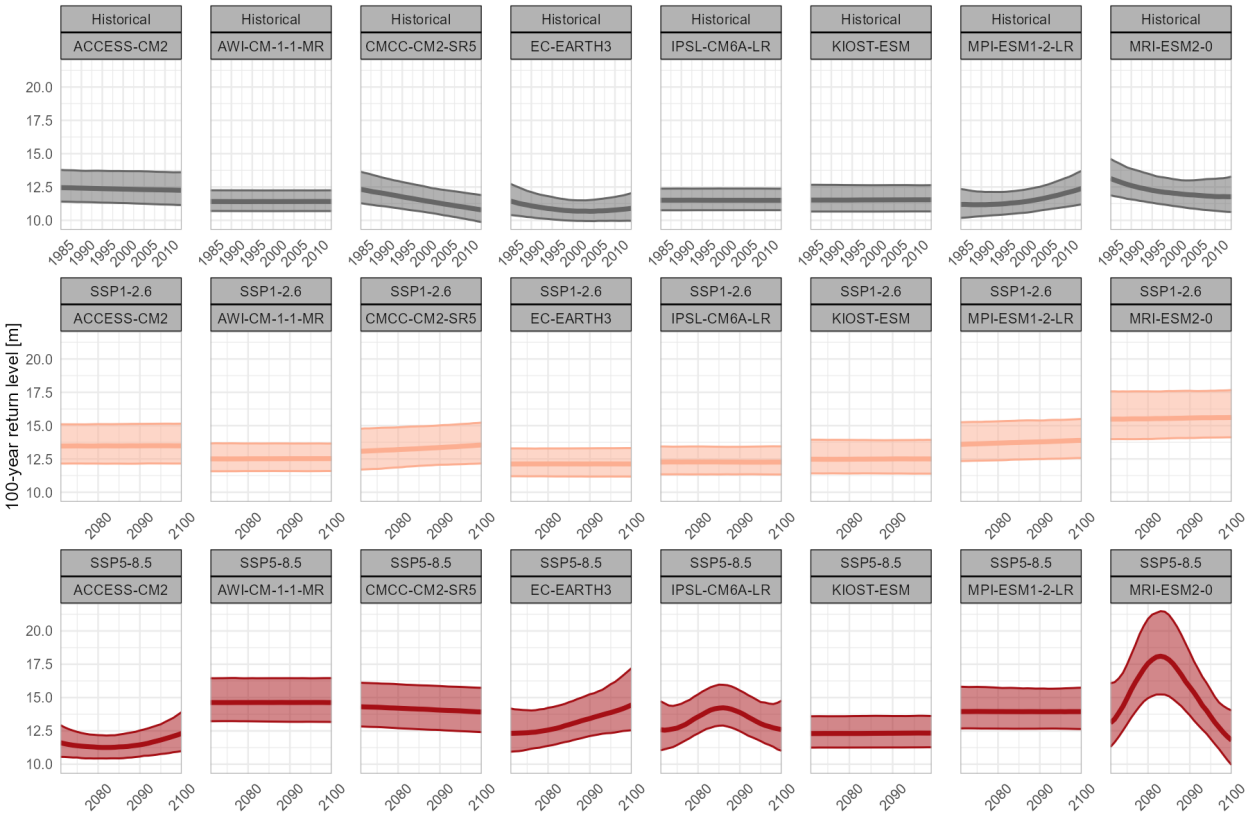


图 S14：南大西洋代表点的年重现水平对比

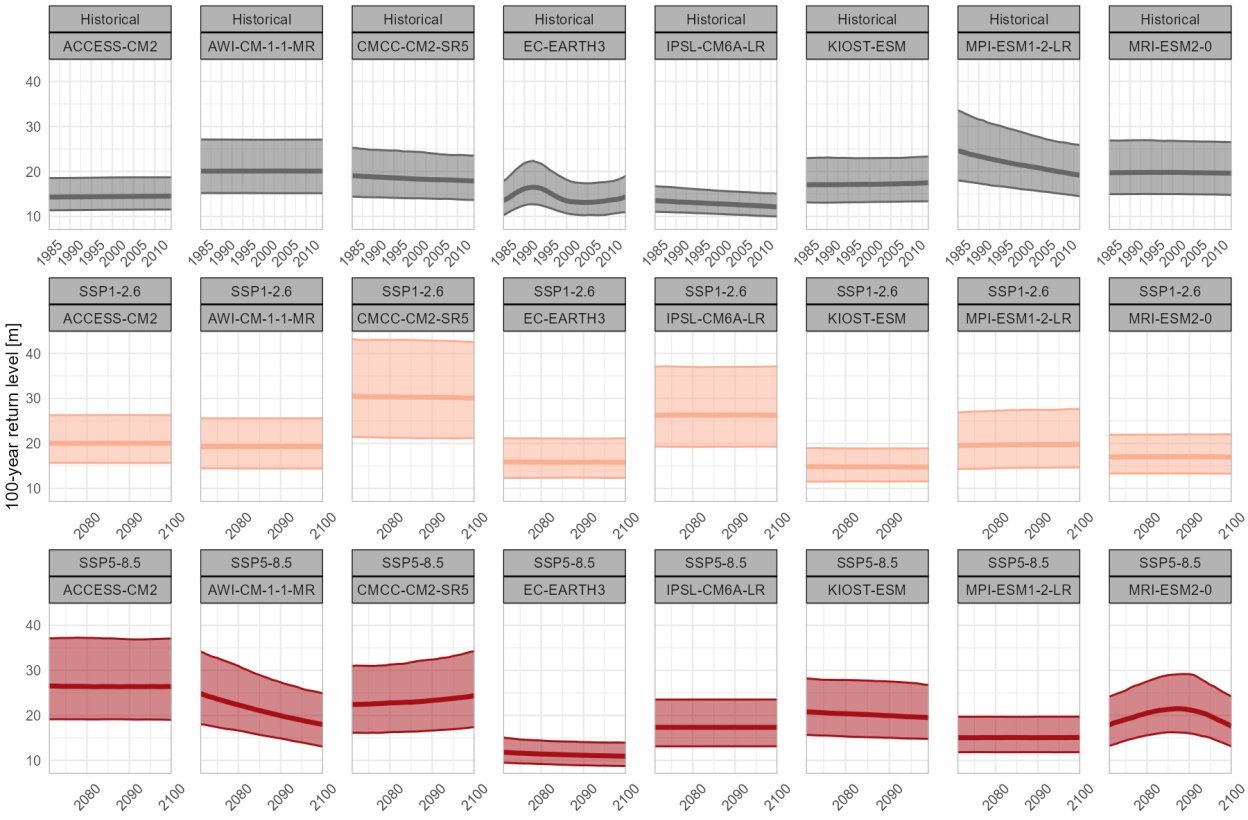
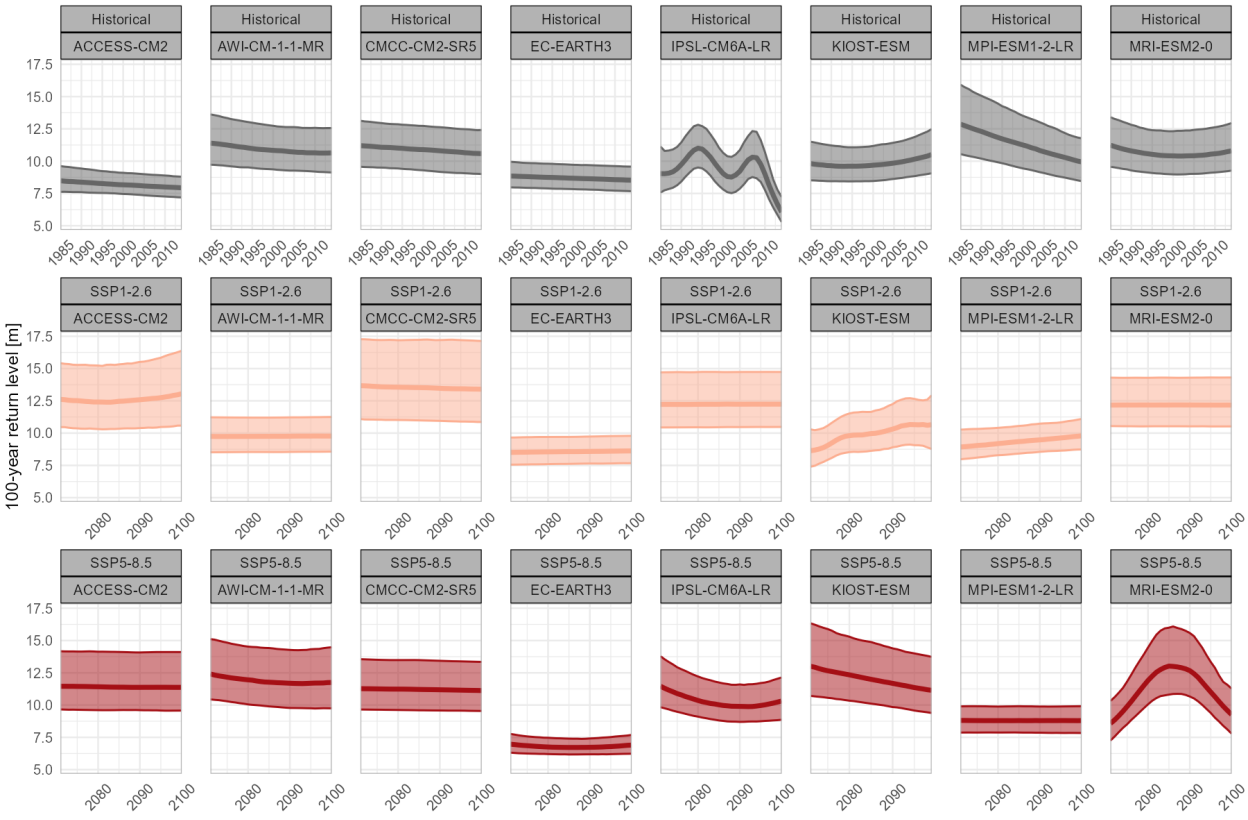


图 S15：西地中海代表点的年重现水平比较



图S16：东地中海代表点的年重现水平比较

4 各代表点的寿命期设计水位

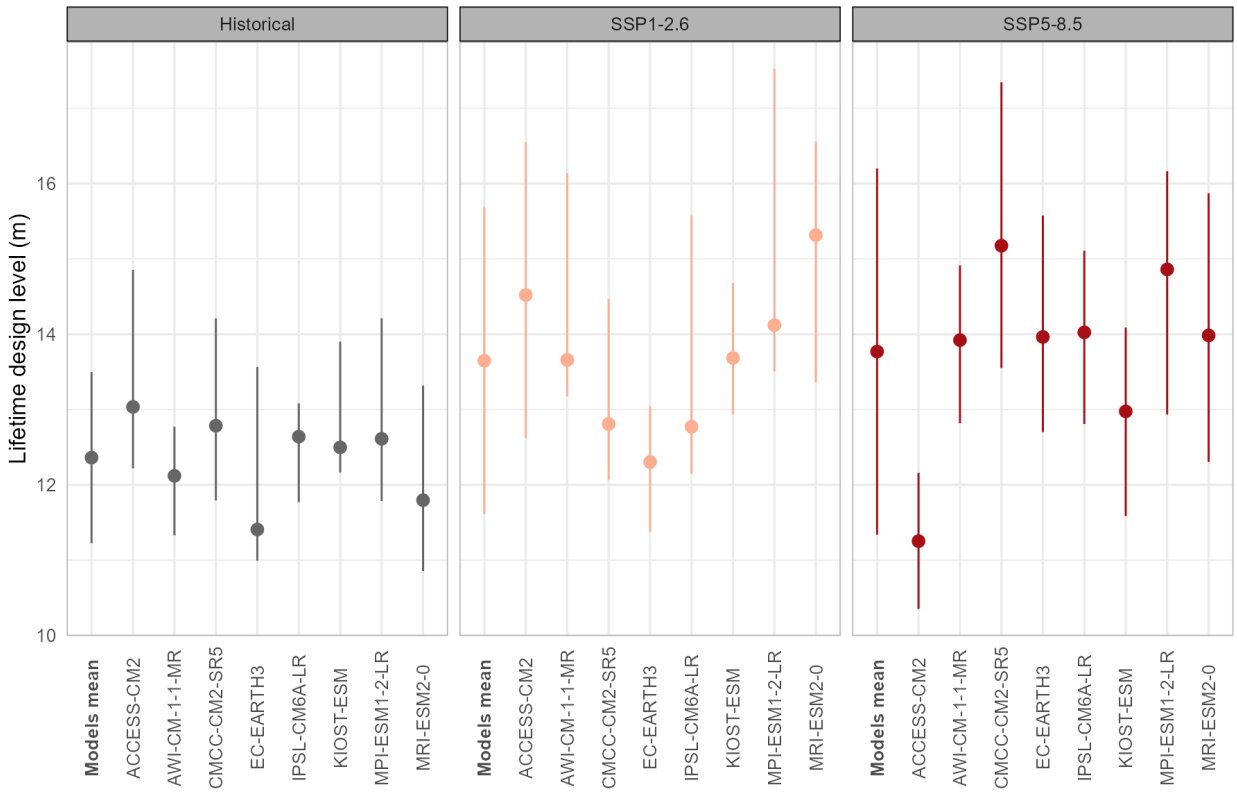


图 S17：北大西洋代表点的年重现水平比较

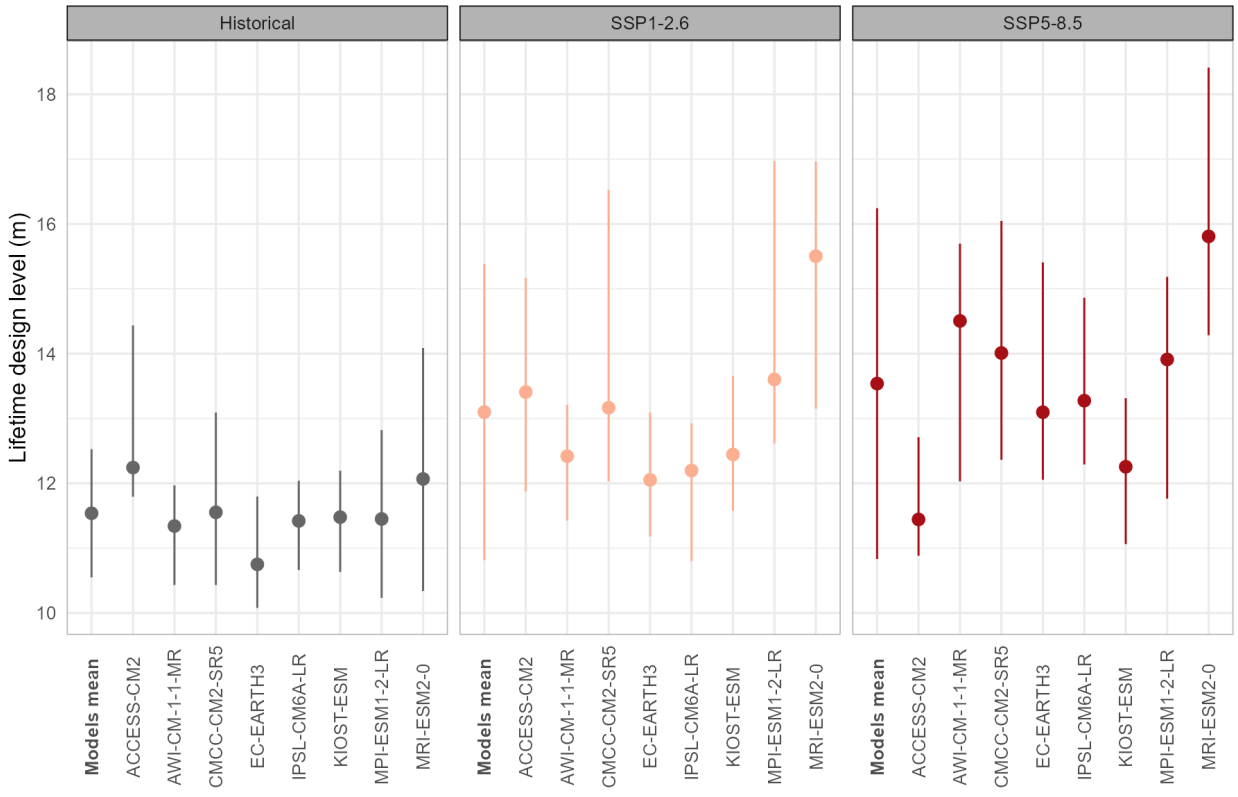


图 S18：南大西洋代表点处年重现水平的比较

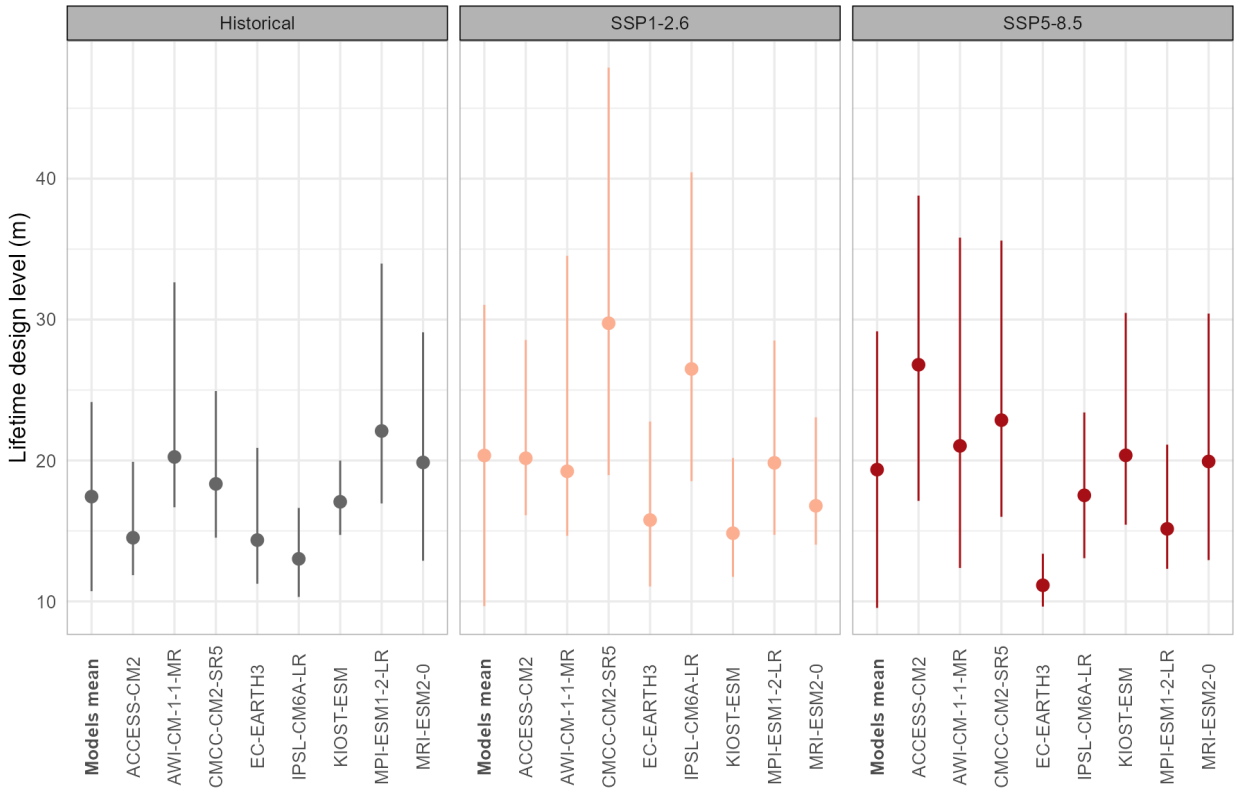


图 S19：西地中海代表点的年重现水平对比

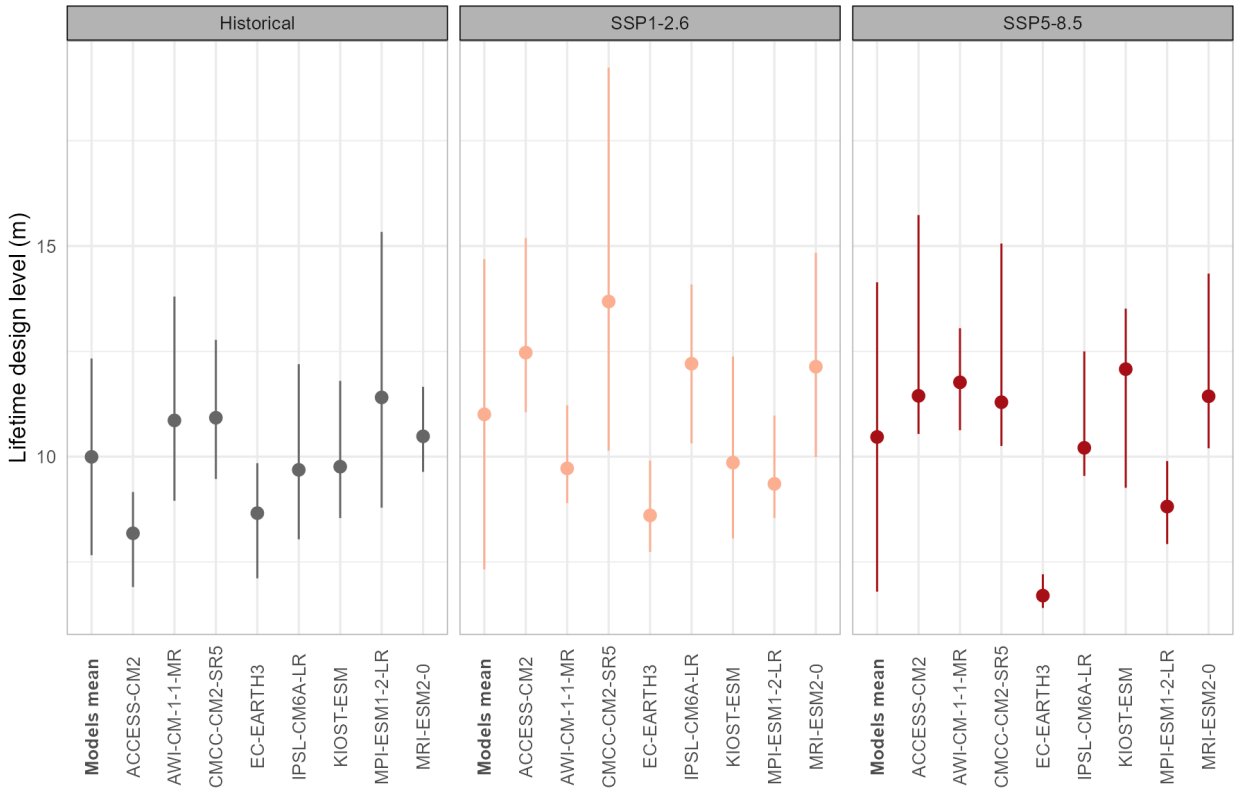


图 S20：东地中海代表点的年重现水平比较