



大气-海洋-海岸洪水灾害耦合模拟与应用

上海师范大学

目 录

1

大气-海洋-海岸洪水灾害耦合模拟

2

应用研究



1

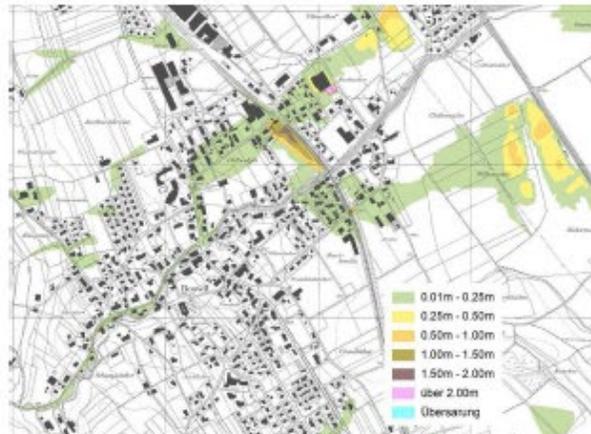
大气-海洋-海岸洪涝灾害 风险耦合模拟模型



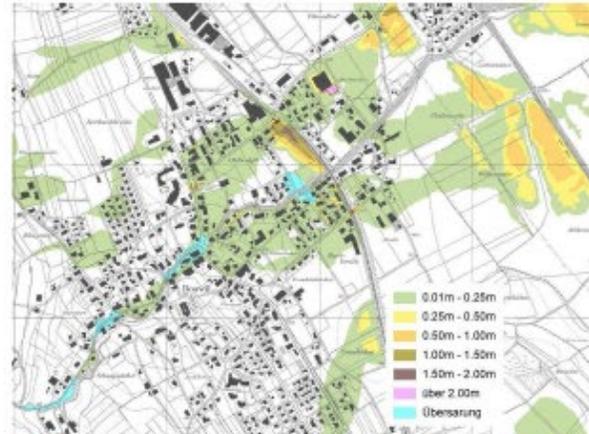
• 复合灾害

洪水灾害地图(Flood hazard map)

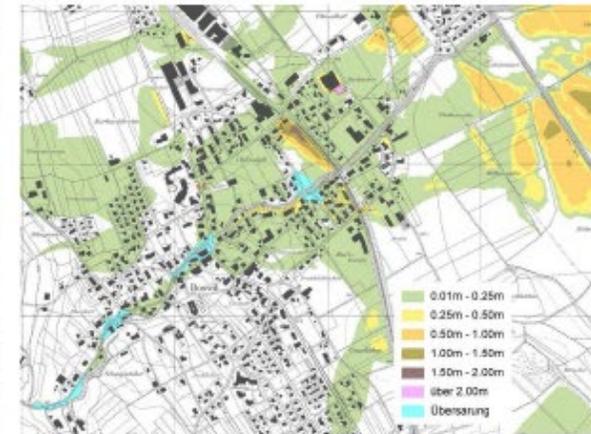
R=30



R=100



R=1000



- detailed assessment of flood depth
- return period: **30, 100, 1000yr**
- water depth in **0.25m / 0.5m** steps
- scale **1:5000**
- high topographic accuracy **10cm**

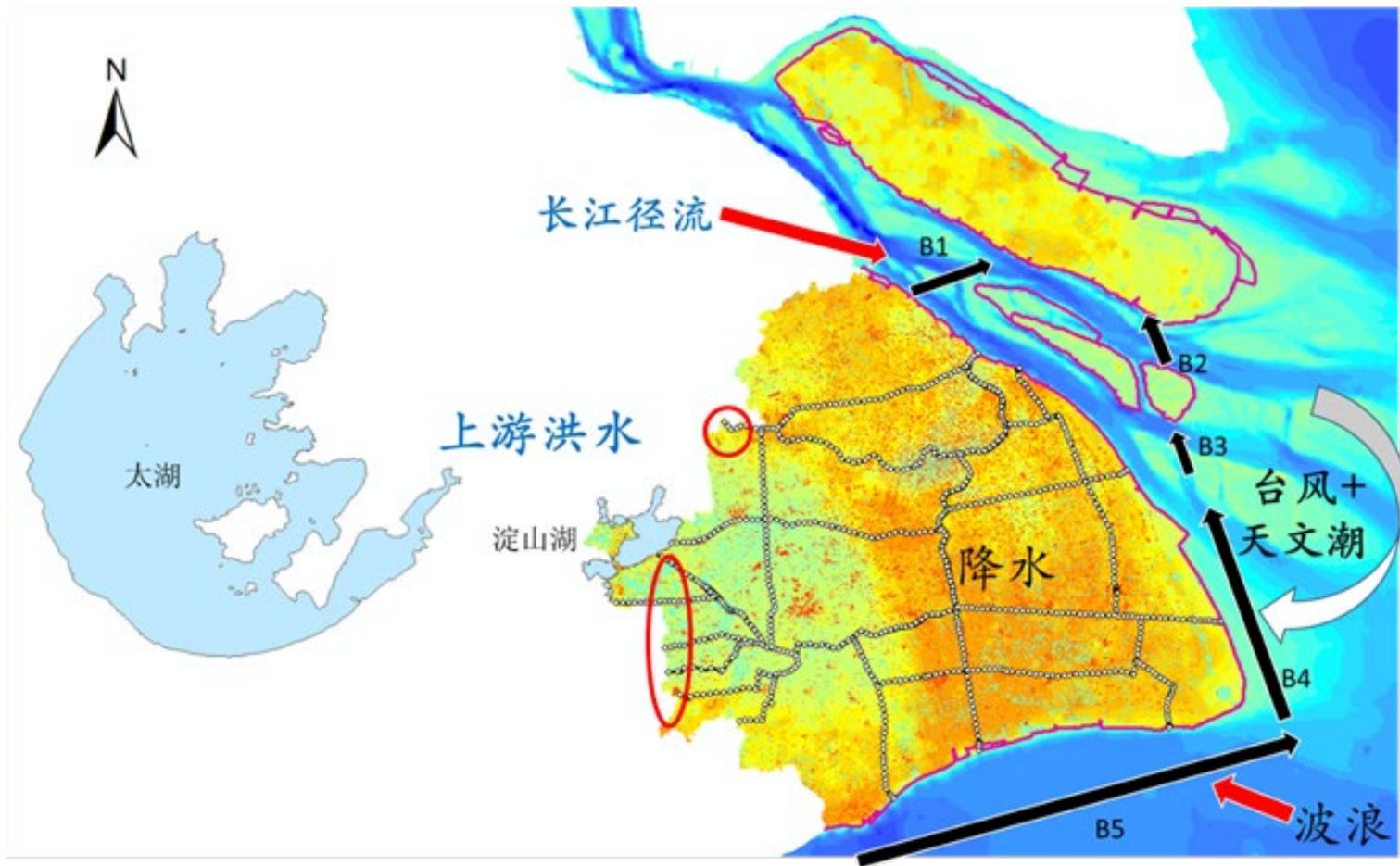


❖ **复合事件** (compound event) 和 **复合风险** (compound risk)

复合事件是多种致灾因素综合引发的极端事件。

- (1) 同时或连续发生的极端事件；
- (2) 极端情况与背景条件相结合，放大了整体影响；
- (3) 由“平均”事件组合产生的极端情况。

(Leonard et al., 2014; Poljanšek et al., 2017; Zscheischler, et al., 2018; IPCC, 2019)



风、暴、潮、洪“四碰头”事件

全球变暖驱动着风暴洪水的动态变化：海平面上升、风暴强度增加，叠加快速城市化背景下城市人口增长、地面沉降，上海，正面临着台风（风）、暴雨（暴）、天文高潮位（潮）和上游下泄洪水（洪）叠加的“四碰头”复合极端风暴洪水的严重威胁。

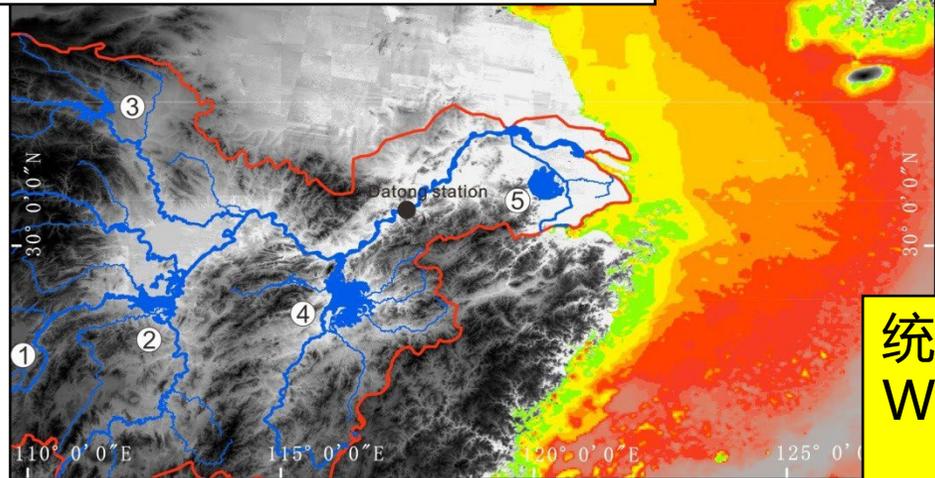


以上海市为例，模拟风暴潮（风）、暴雨（暴）、潮汐（潮）、洪水（洪）过程，特别是未来全球气候变化情况下，引起的多灾种叠加综合洪涝风险，设置多情景假设，**建立一体化风、暴、潮、洪数值模拟技术**

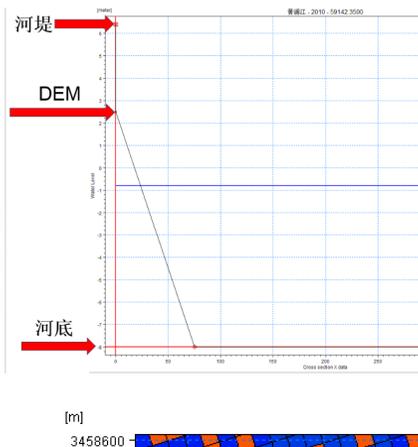


数据库建设

杭州湾和东海、黄海大陆架用全球海陆地形数据库 (GEBCO) 的数据



- 长江流域
- 长江
- ① 上流
- ② 洞庭湖
- ③ 汉江
- ④ 鄱阳湖
- ⑤ 太湖

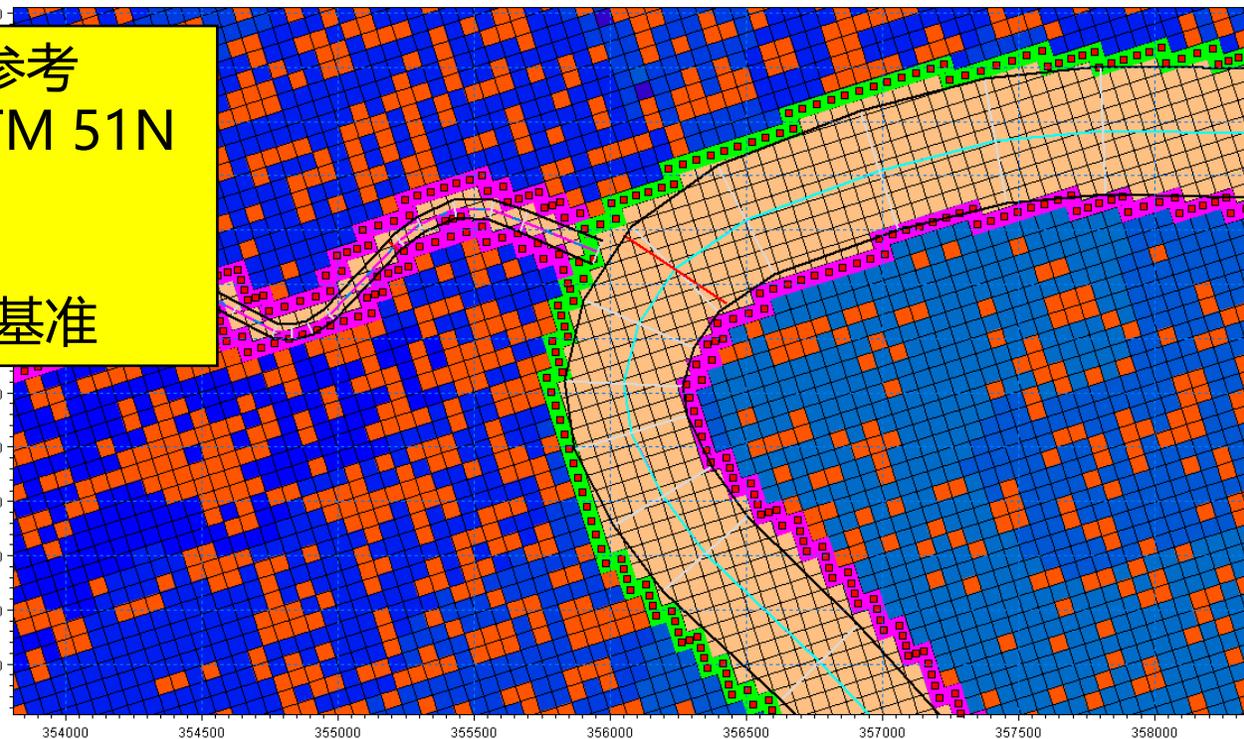
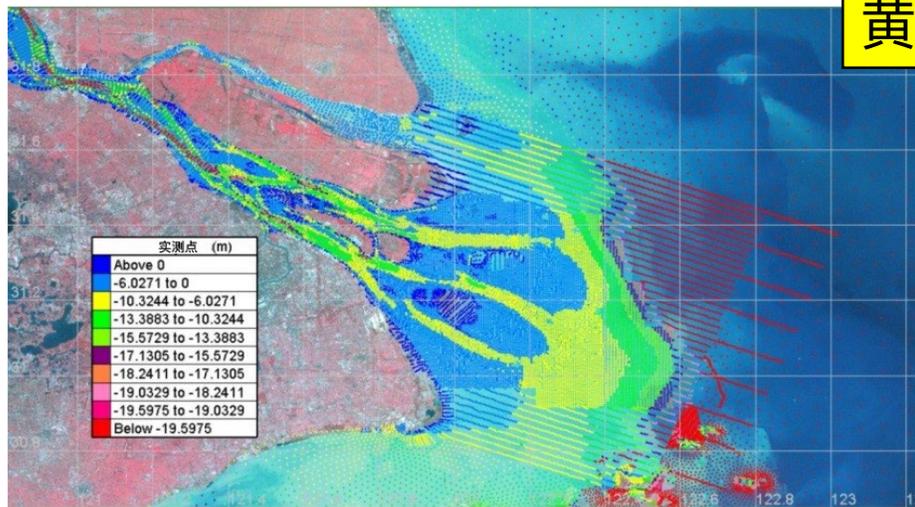


陆地地形：
采用单一矩形差分网格布设
陆地地形；
有约250万个矩形网格单元；
地形分辨率：
60 m×60 m

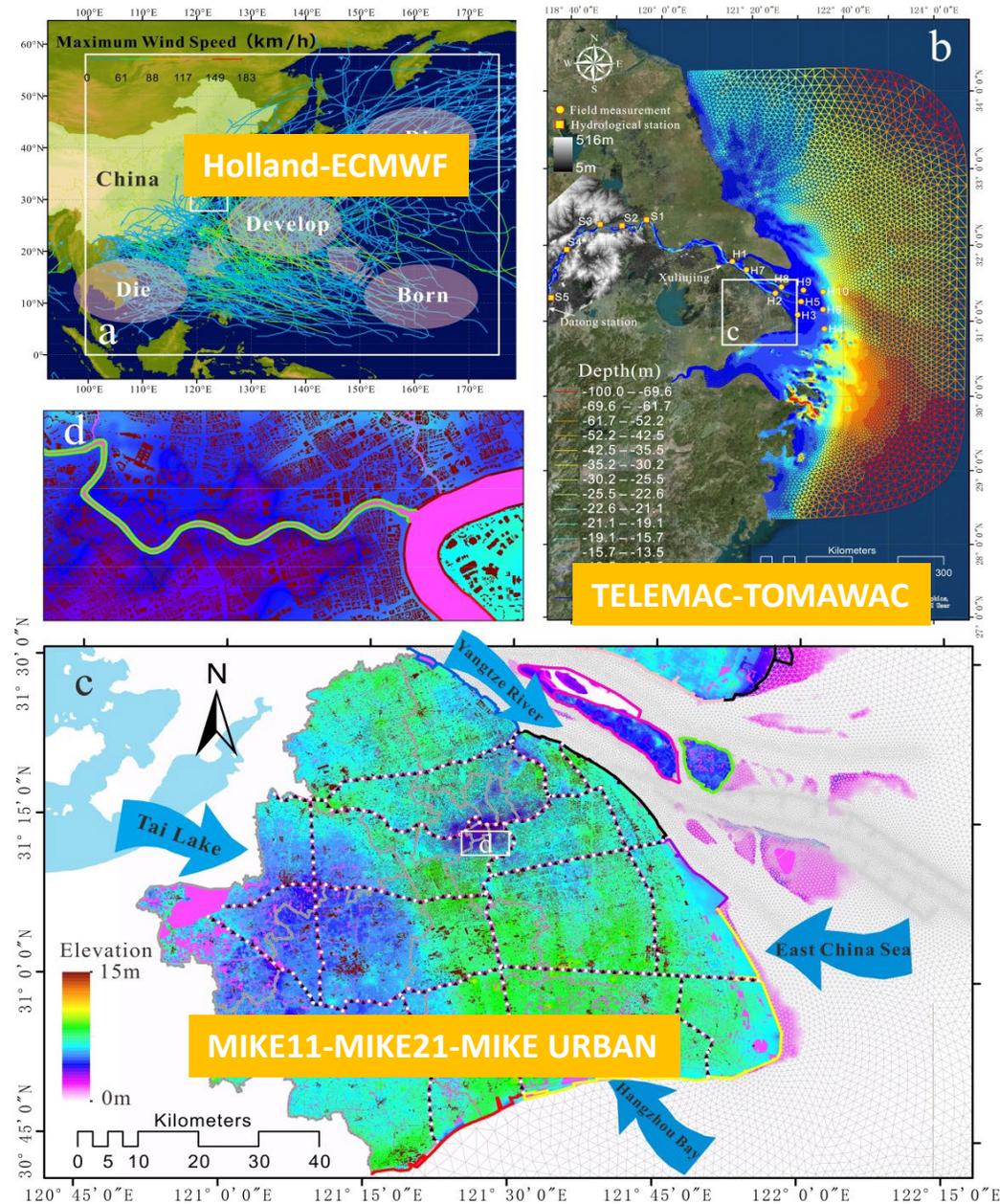
统一采用空间参考
WGS 1984 UTM 51N

高程基准面：
黄海1985高程基准

长江
口实
测水
深点



陆地地形网格



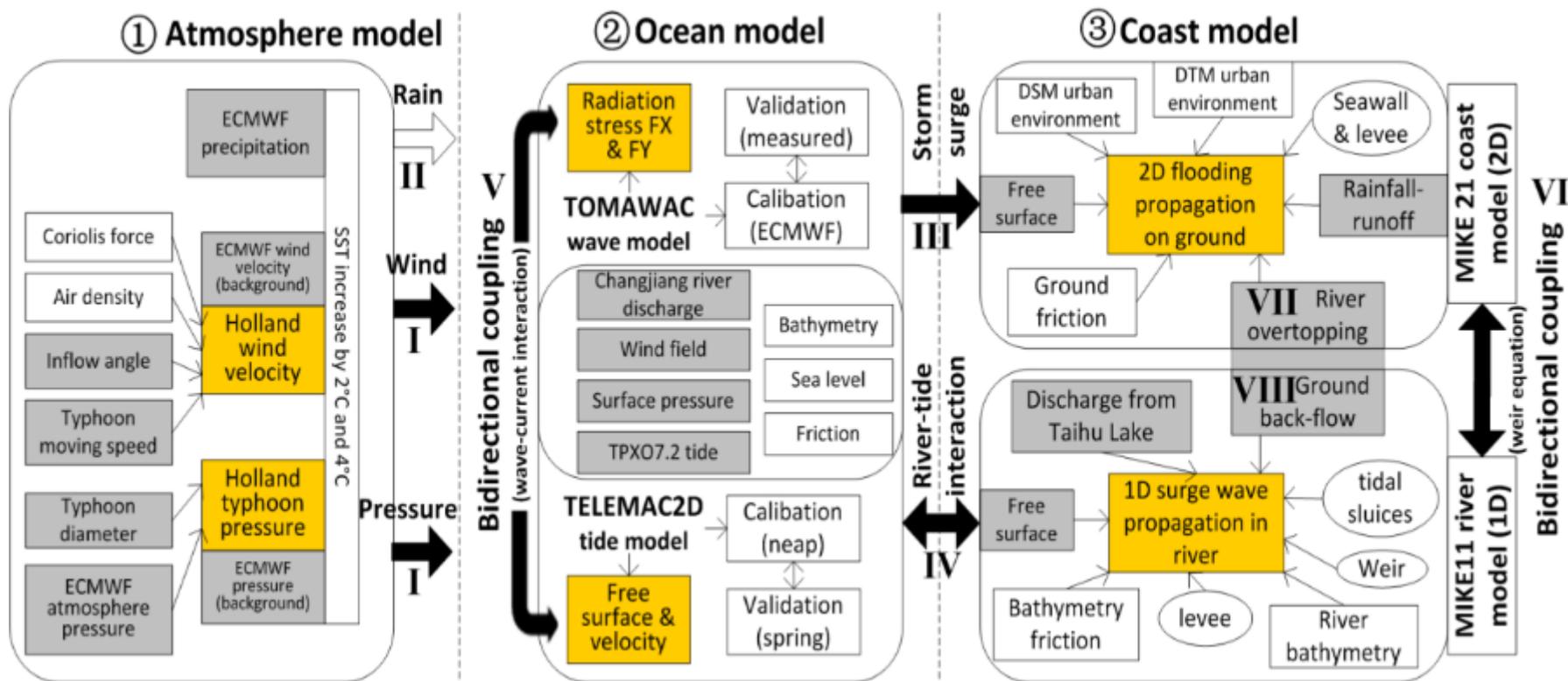
• 大气-海洋-海岸耦合模型构建

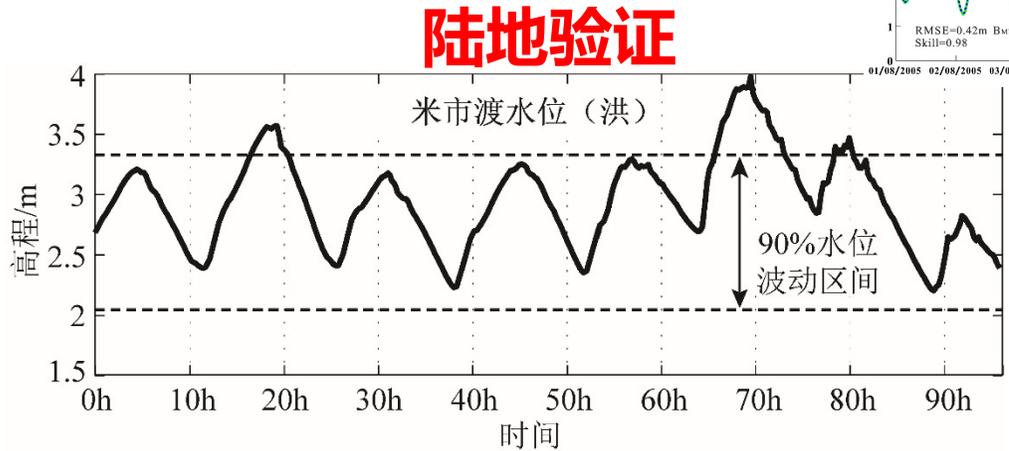
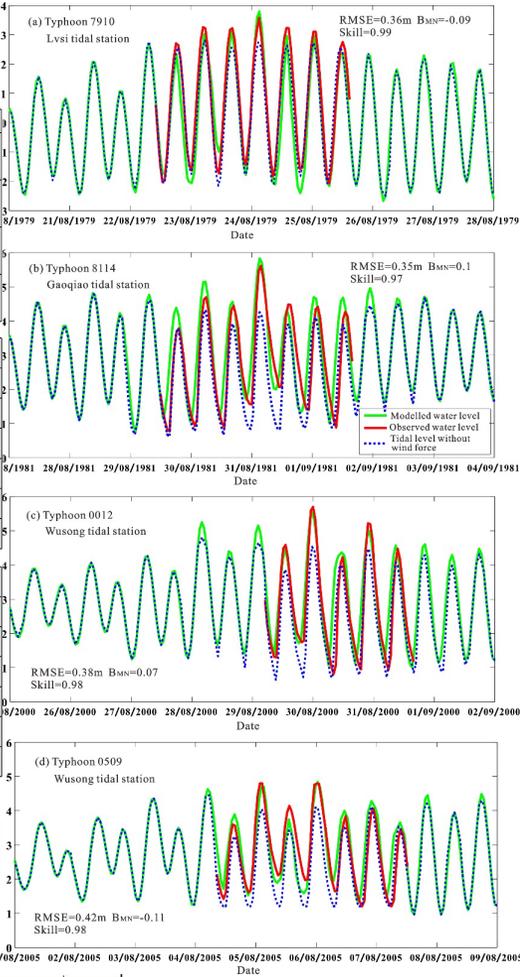
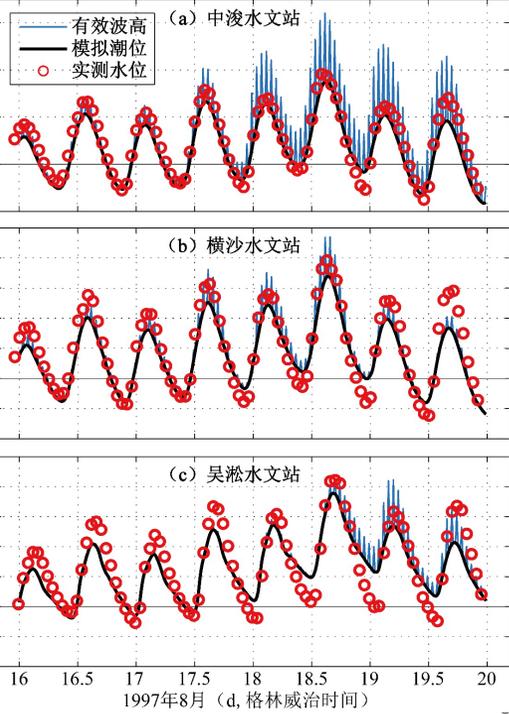
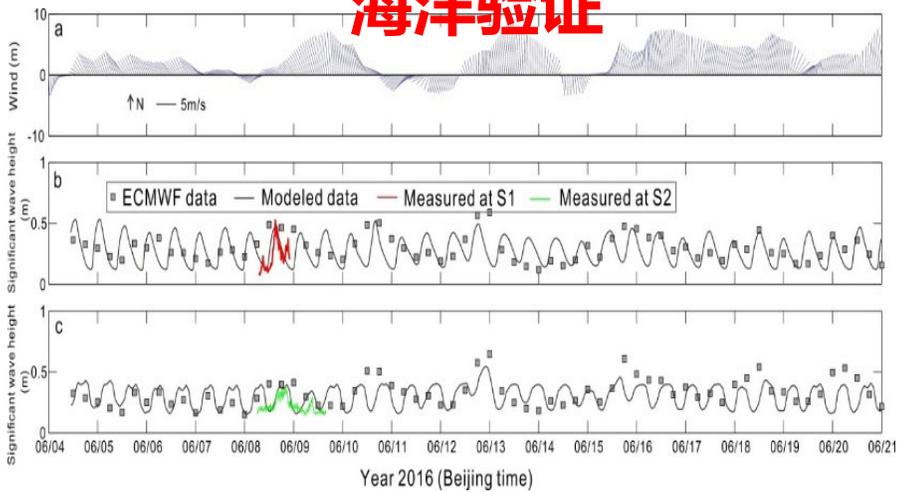
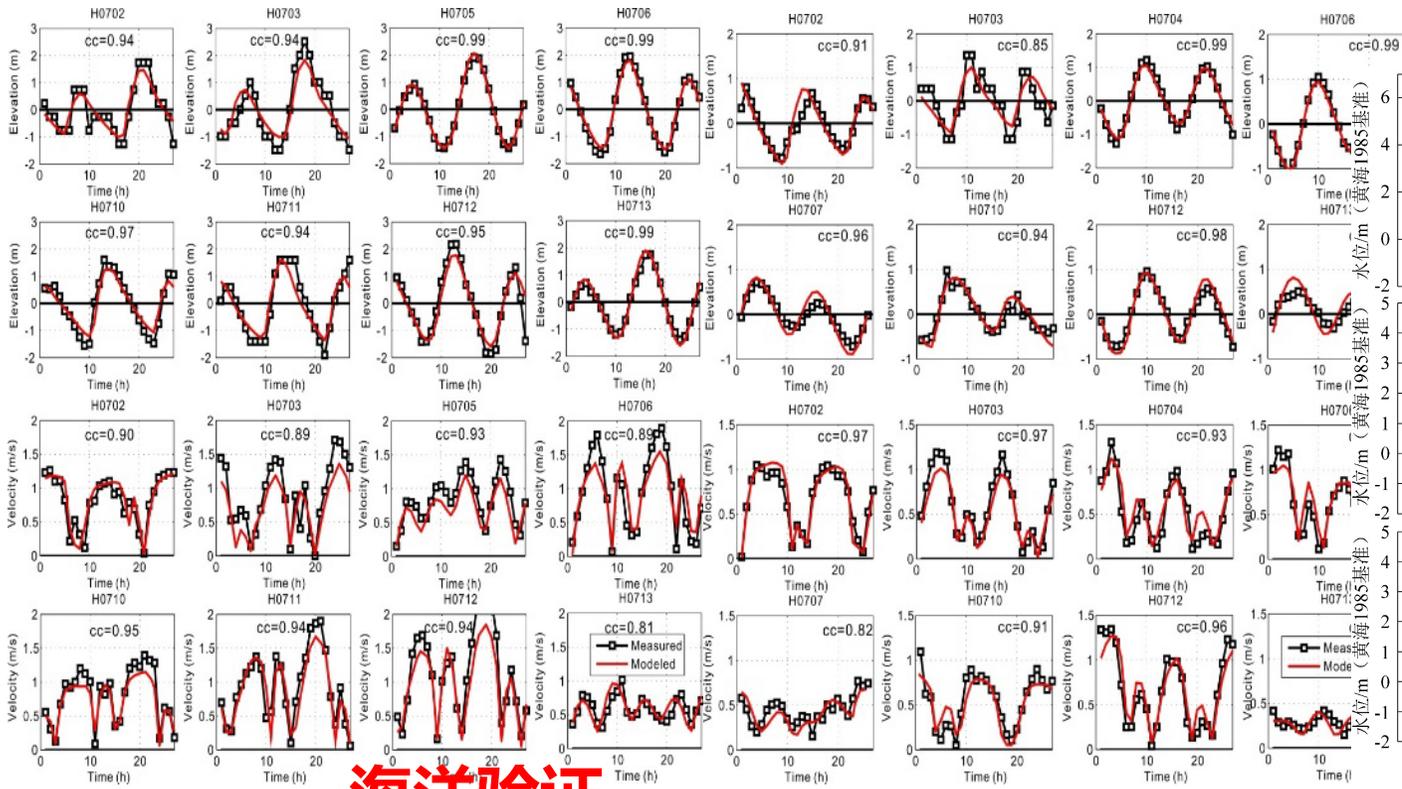
- (大气模型) 12km 台风模型提供时空变化的风场、气压和降雨数据;
 - (海洋模型) 不规则三角网提供台风时刻的水位、有效波高和流速数据;
 - (海岸模型) 实现洪水的河道穿透和陆地淹没
- (王璐阳等, 2019)

海表温度上升
海平面上升

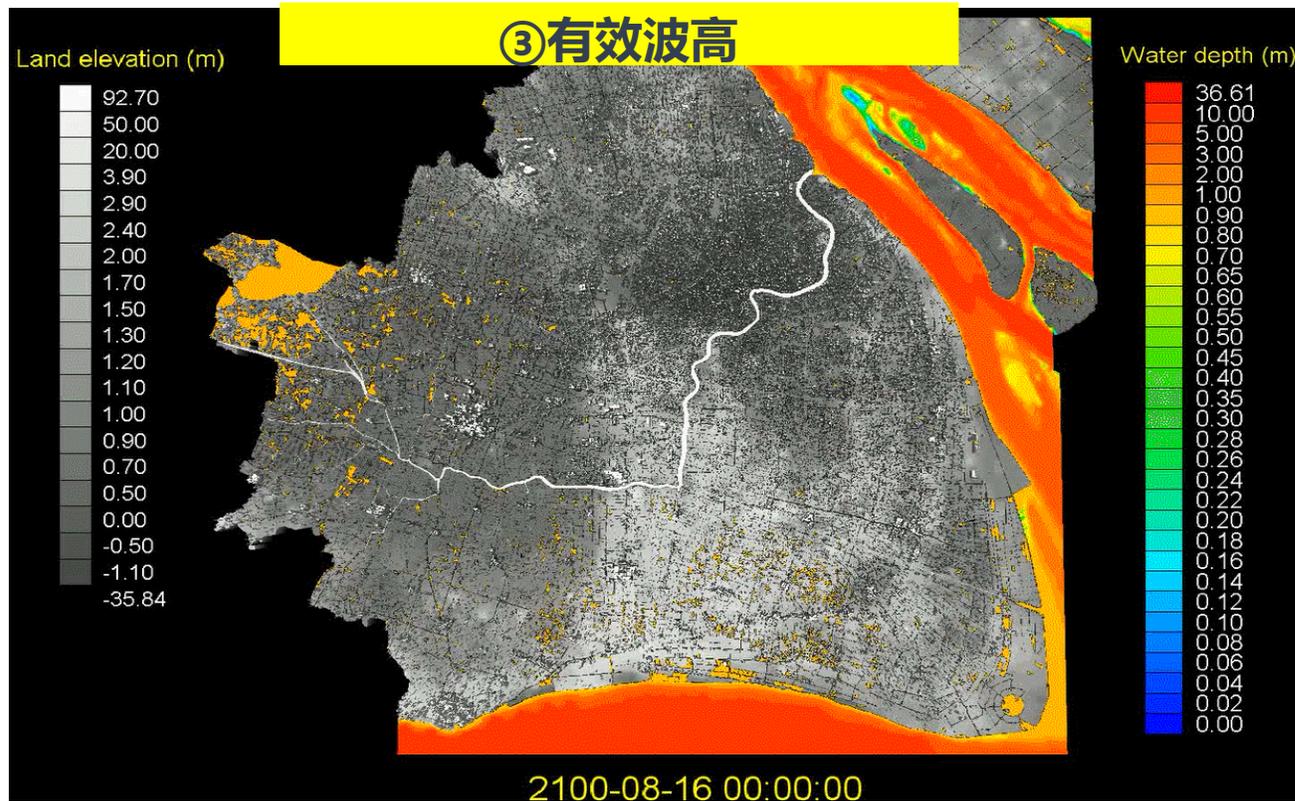
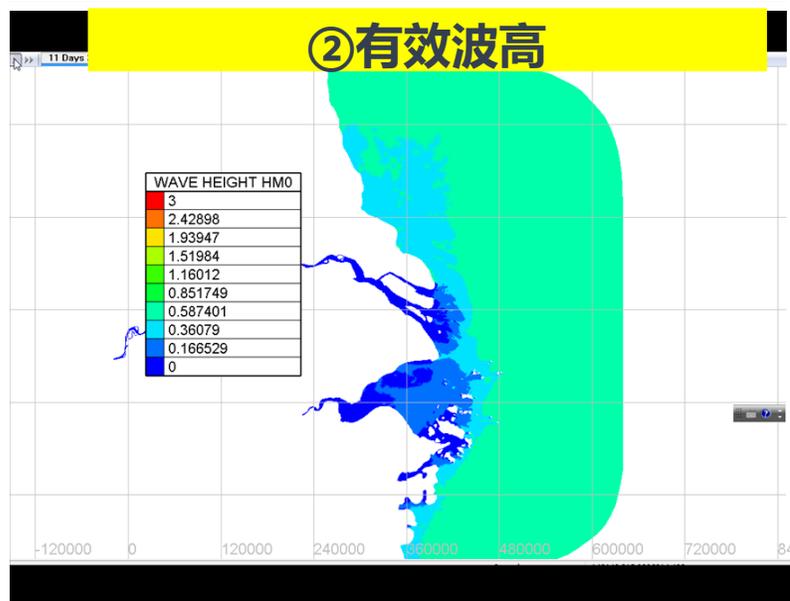
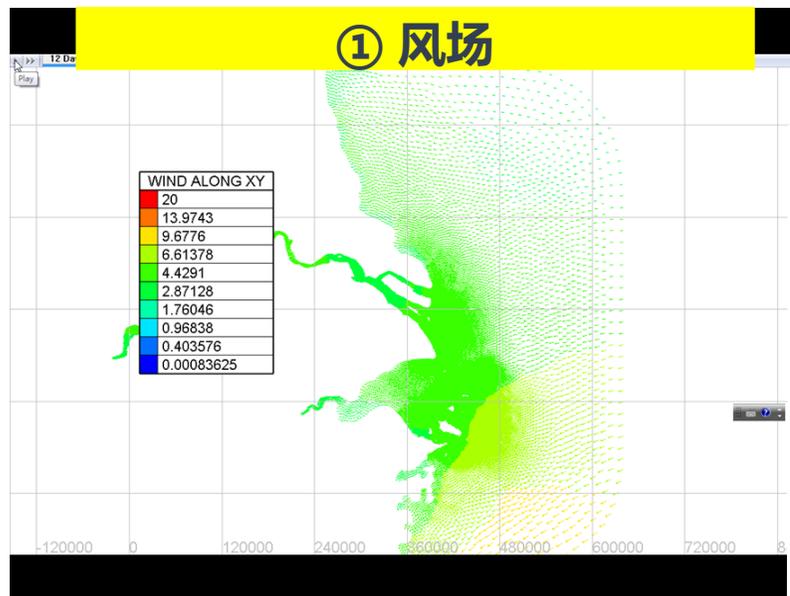
物理模型整体集成

洪涝风险

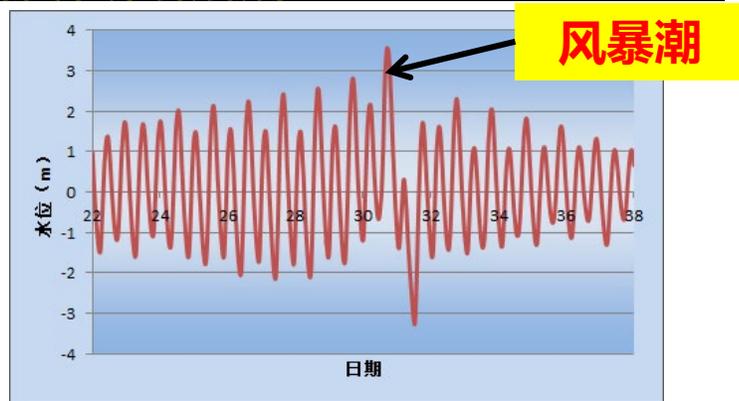




陆地验证

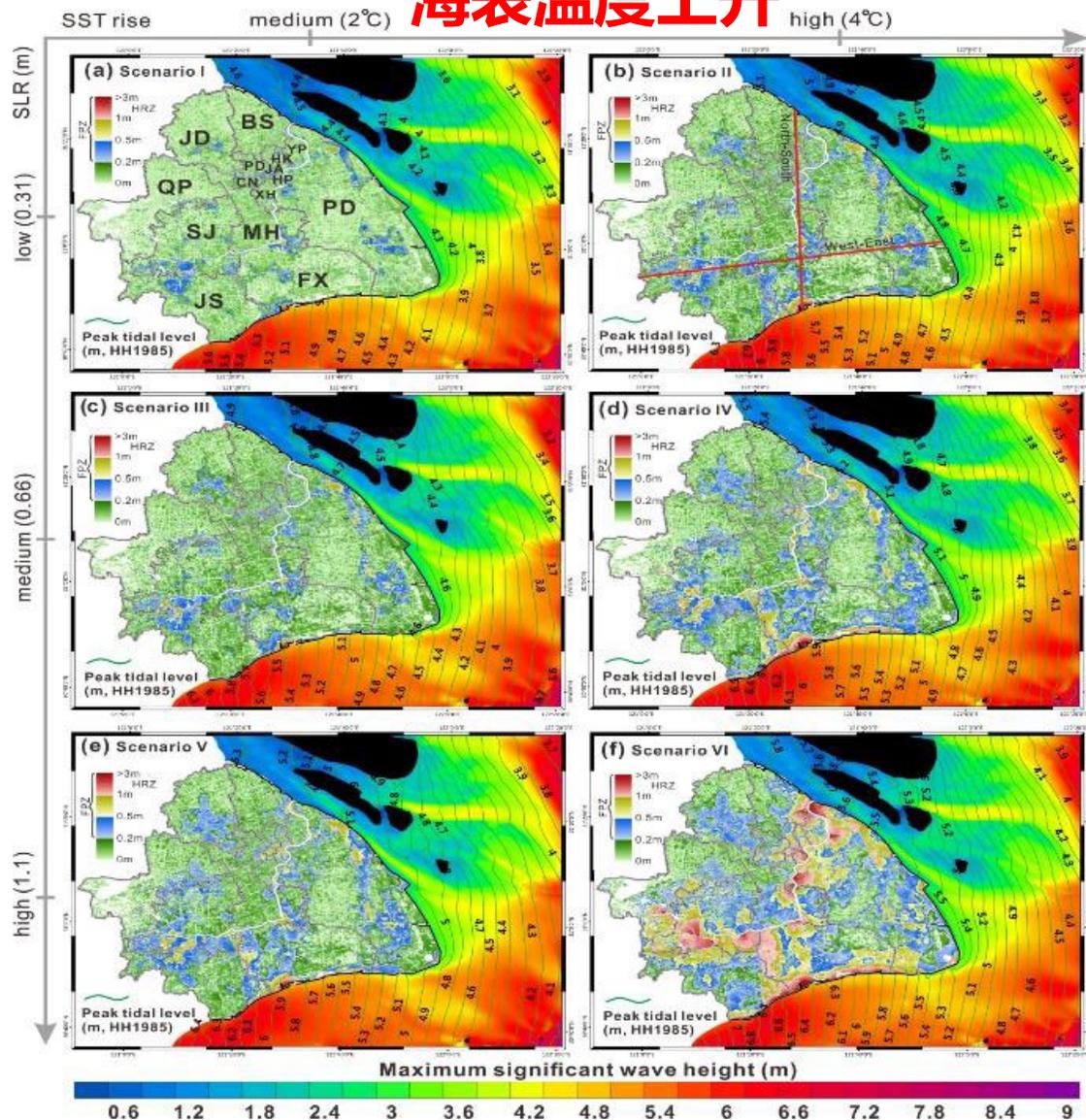


180米模拟结果：台风威马逊风暴潮增水叠加天文高潮和长江巨量径流3碰头情况下极端的海岸洪水淹没



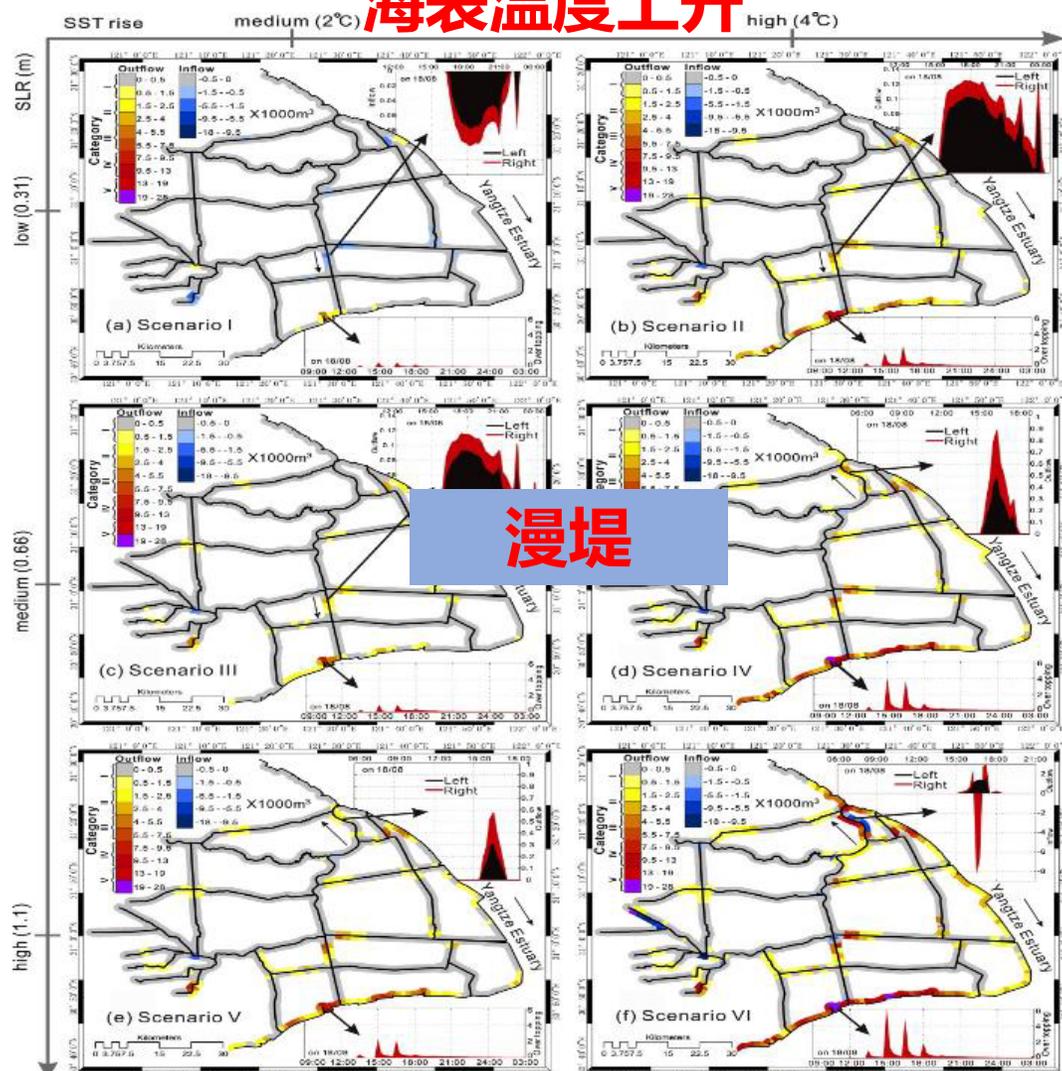
海表温度上升

海平面上升

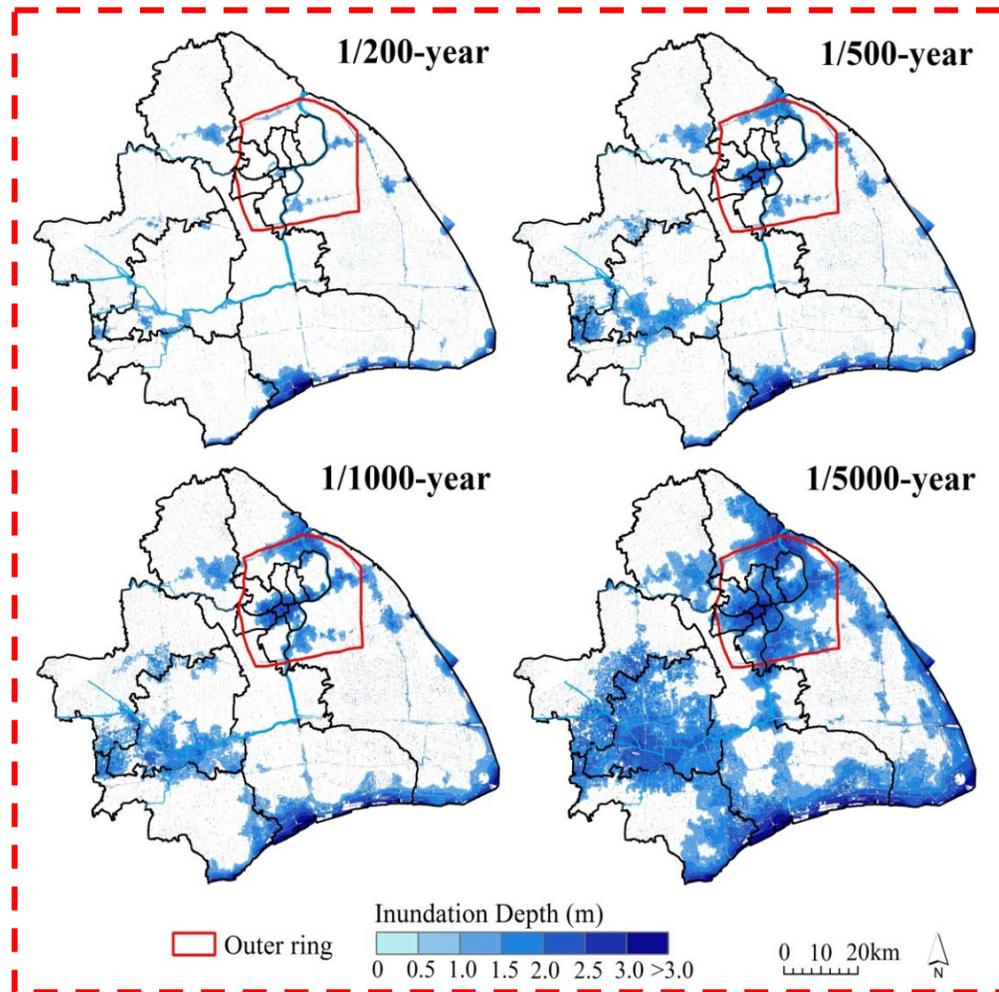


海表温度上升

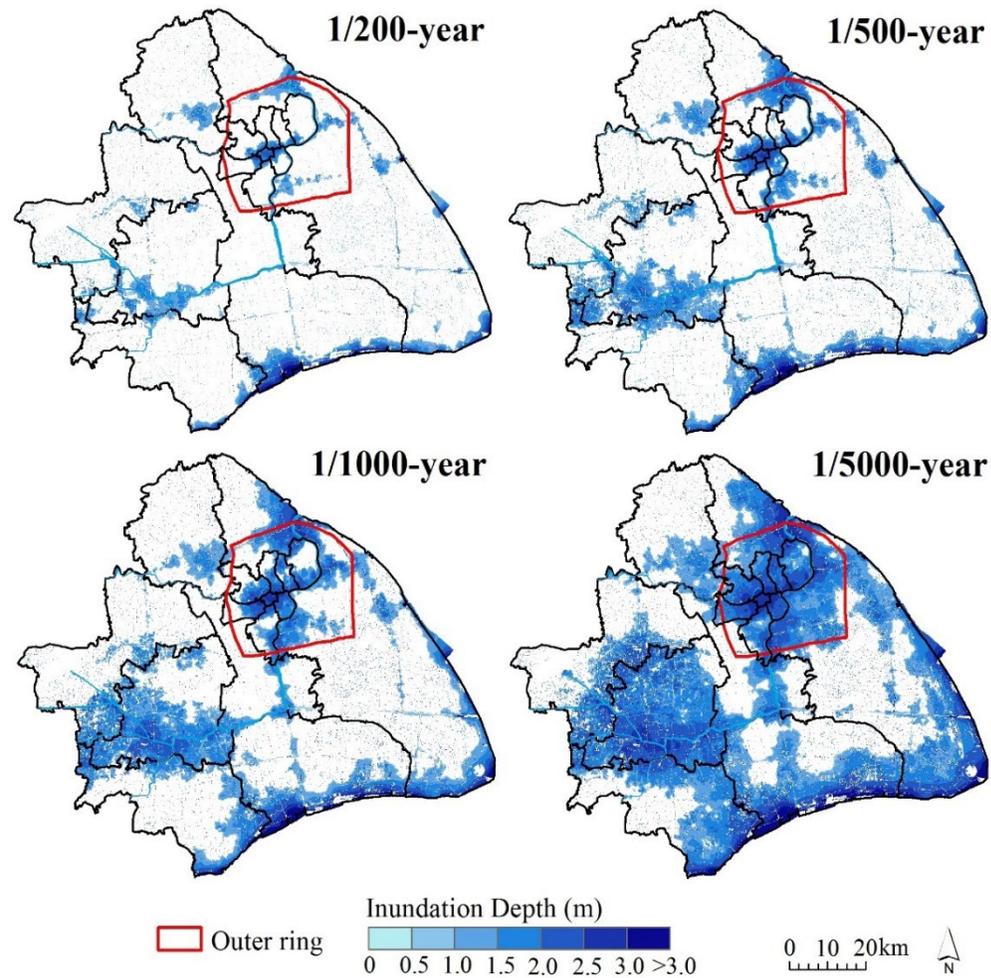
海平面上升



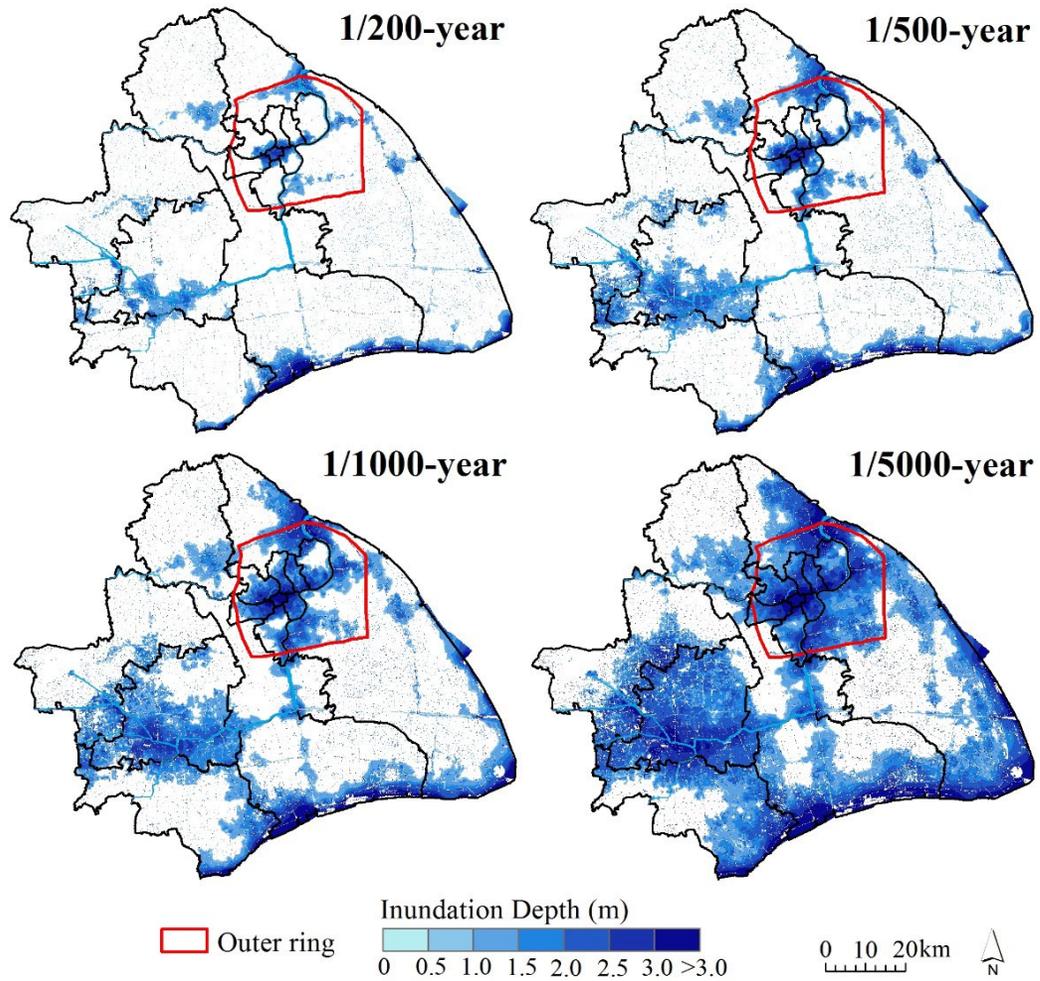
当前



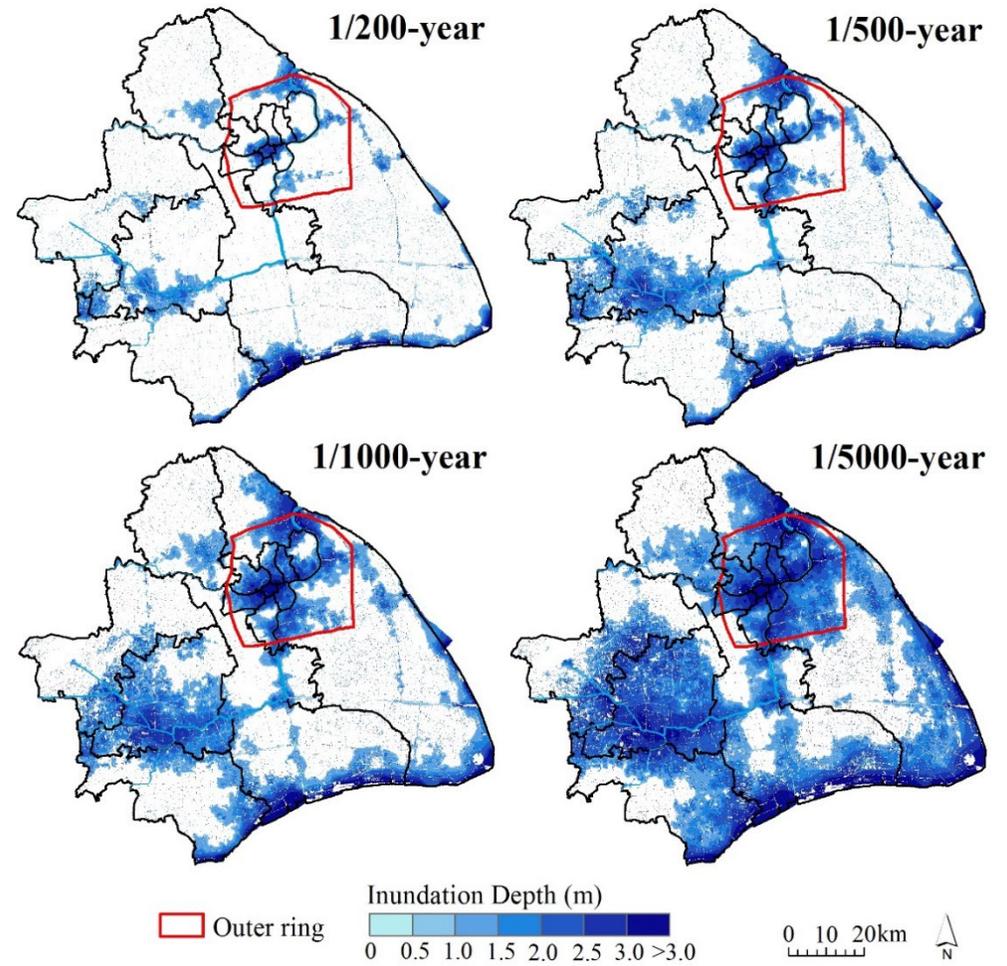
RCP4.5



RCP 8.5



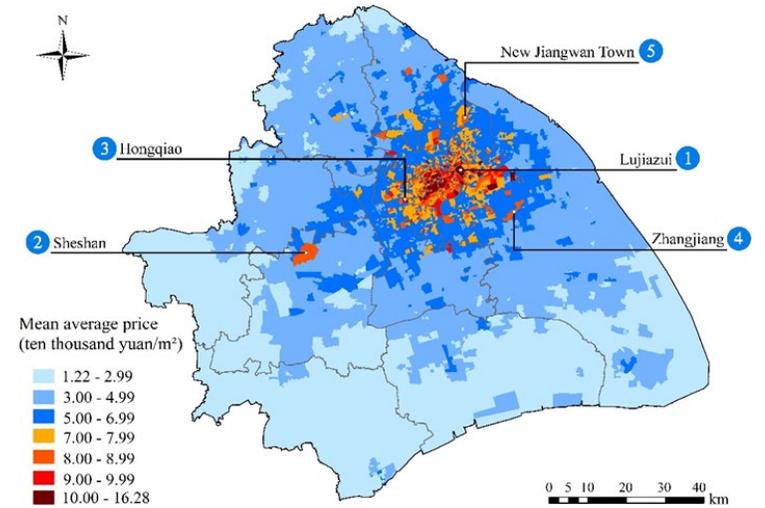
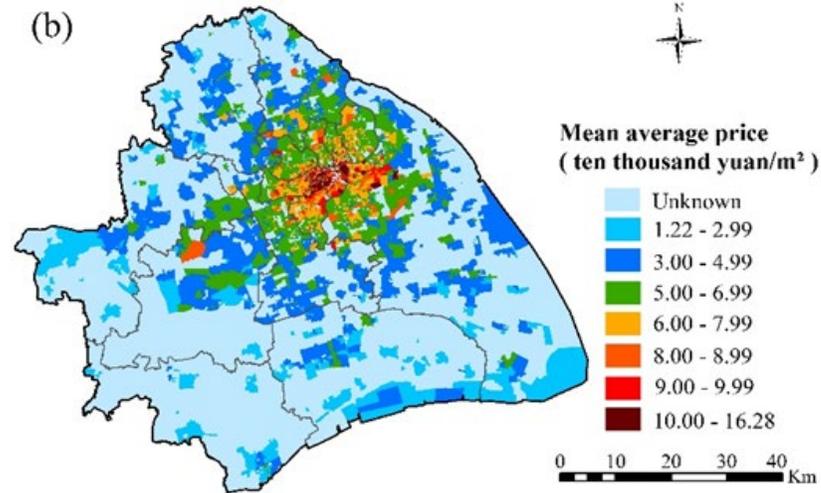
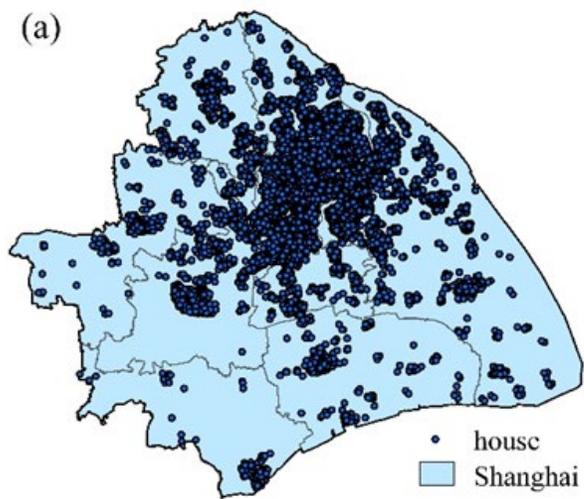
RCP8.5 High-end



2

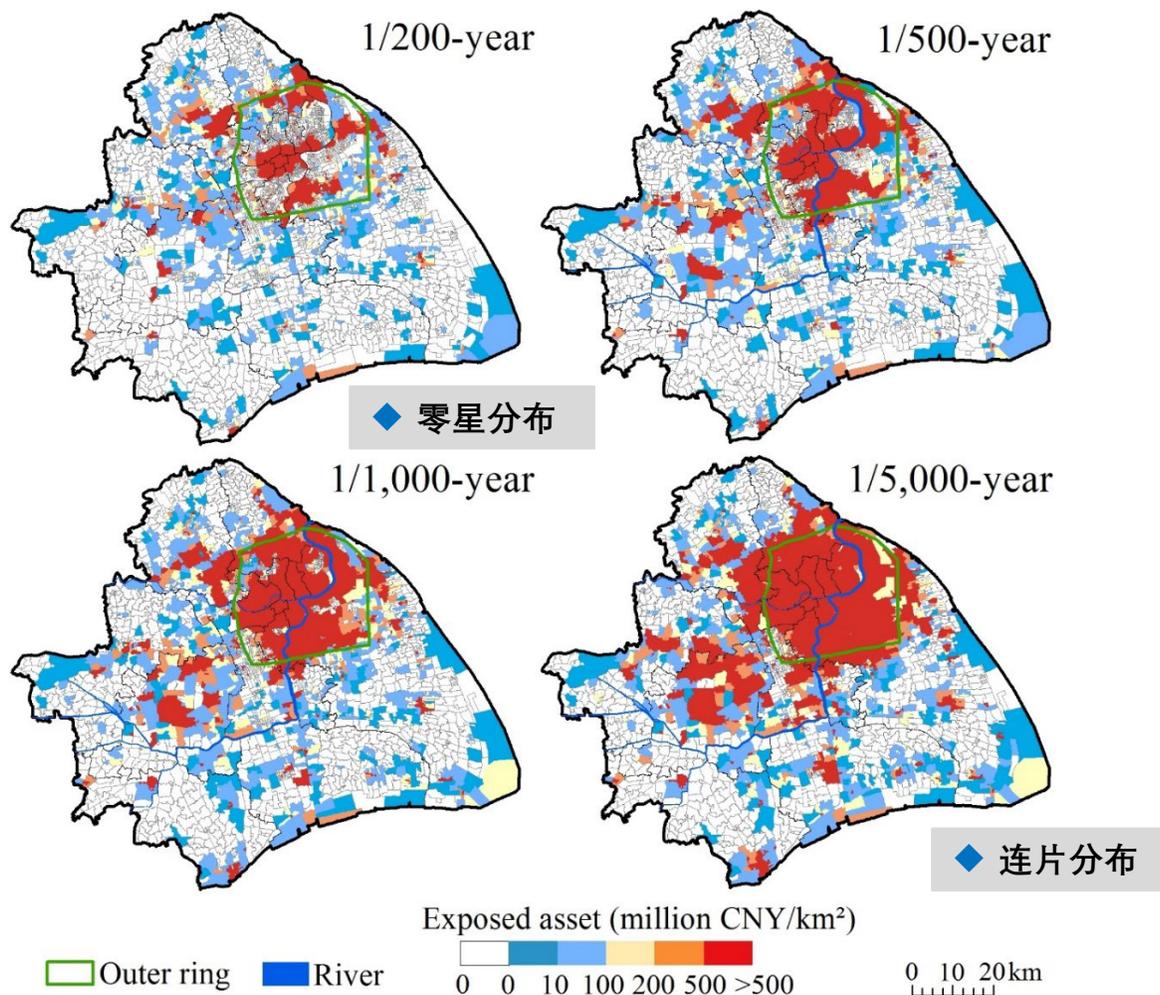
上海复合极端洪水风险评估与适应研究中的应用

上海住宅建筑的极端洪水风险评估与适应研究 (Shan et al., 2019; 单薪蒙等, 2021)



- Housing Price Mapping through Machine Learning and Online Data – A Case Study in Shanghai (Chen et al., 2019, submitted)

(1) 暴露分析



- ▶ 总体而言，住宅建筑暴露资产的空间分布为，200年一遇情景下呈零星分布，主要分布在外环两侧。随着重现期增大，零星分布的暴露区不断扩大，逐渐连片。同时，以苏州河口为中心的城市中心暴露逐渐增大。到1000年一遇，5000年一遇，形成两个分布区，外环内外的主城市区连片分布区和上海西部的松江低洼地区的连片分布区。
- ▶ 尽管沿杭州湾的洪水淹没范围大，但由于住宅建筑分布较少，暴露只有少量零散分布。

(Shan et al., 2019)

图3 4种重现期下，上海住宅建筑暴露资产分布图

(2) 损失分析

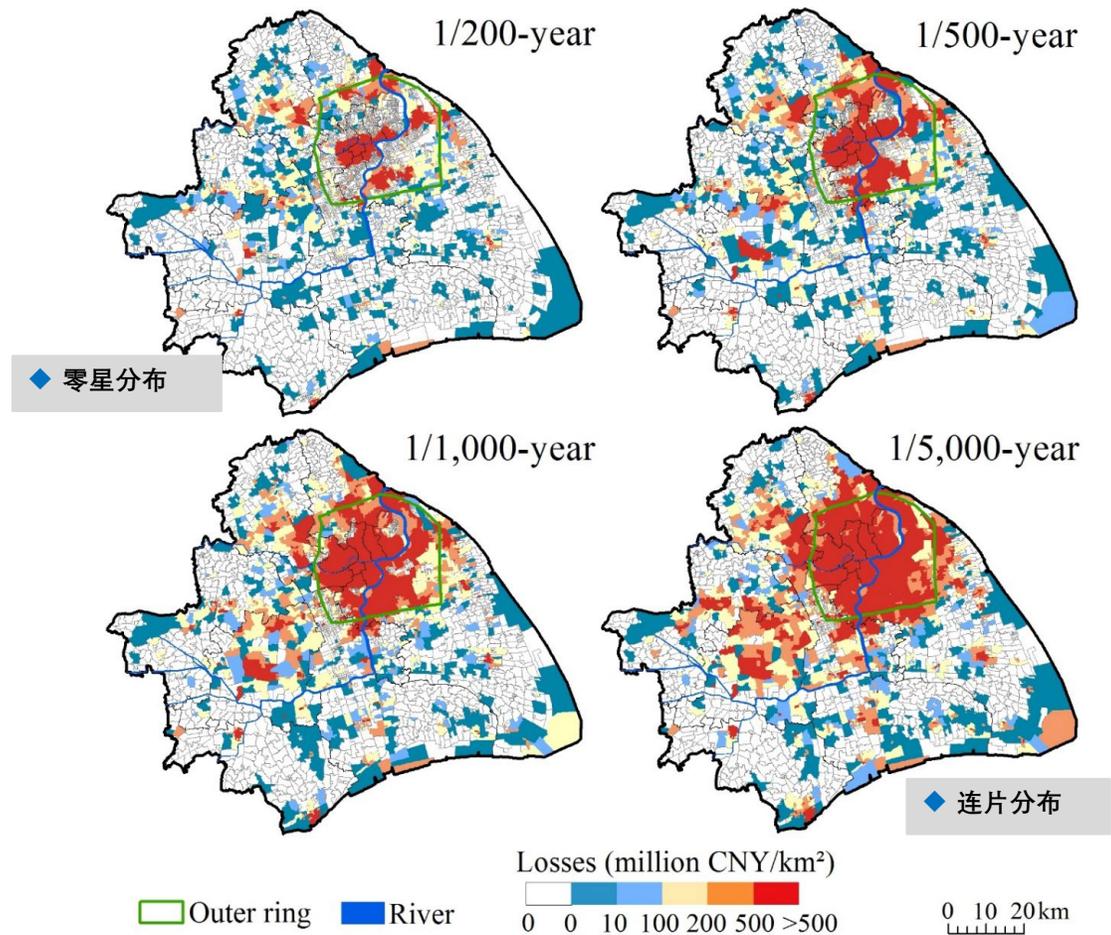
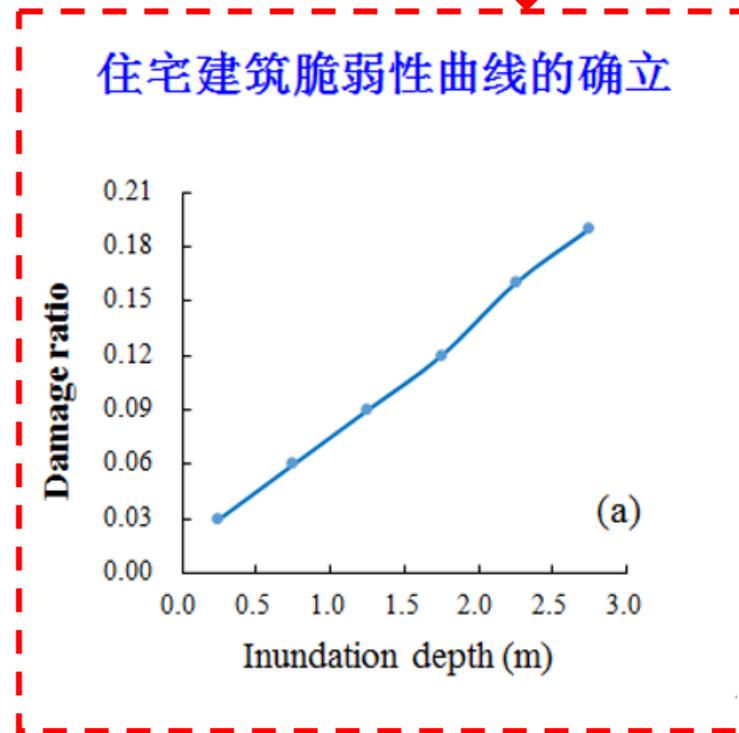
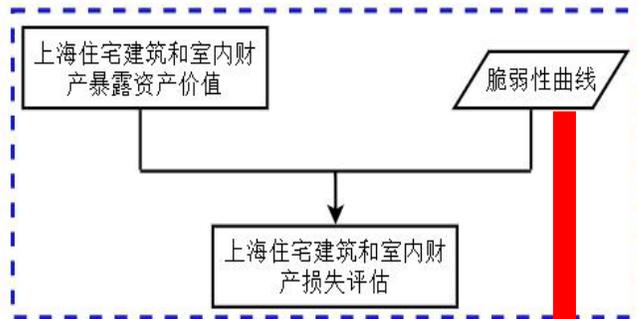
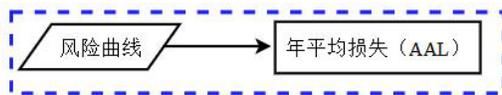


图6 上海市4种重现下住宅建筑淹没损失分布图

损失分析

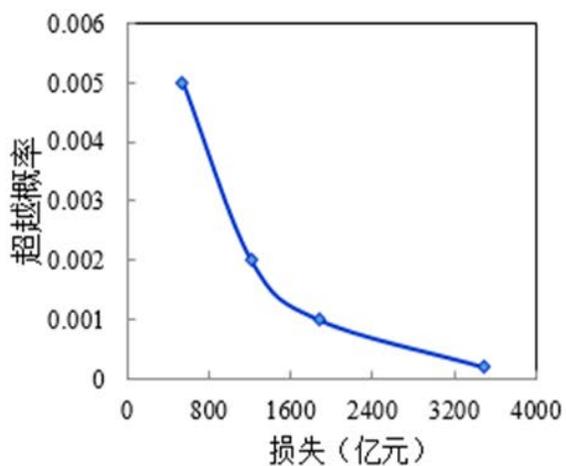


风险分析

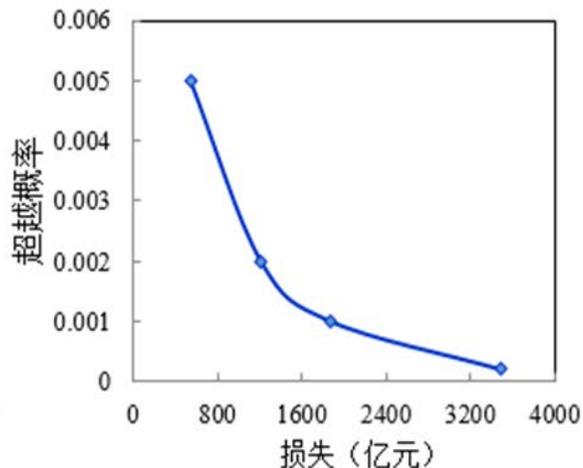


风险可以表示成一条曲线，用以描绘所有可能场景下致灾事件重现期（或概率）及其对应的损失。建立超越概率-损失曲线，计算**年均损失 (average annual losses, AAL)**，可通过计算曲线以下的面积得出。

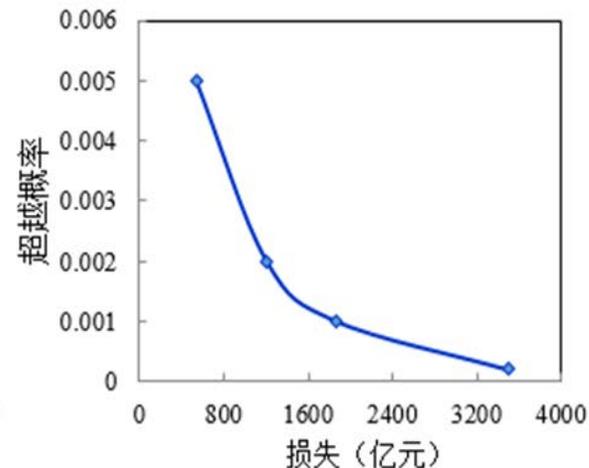
RCP 4.5 住宅建筑风险曲线



RCP 8.5 住宅建筑风险曲线



RCP8.5High-end 住宅建筑风险曲线



➤建立4种重现期下超越概率-损失曲线，经计算得出：在**RCP4.5、RCP8.5、RCP8.5High-end情景下**，住宅建筑的AAL分别为**7.0亿元、7.7亿元、8.9亿元**。

(4) AAL的空间格局

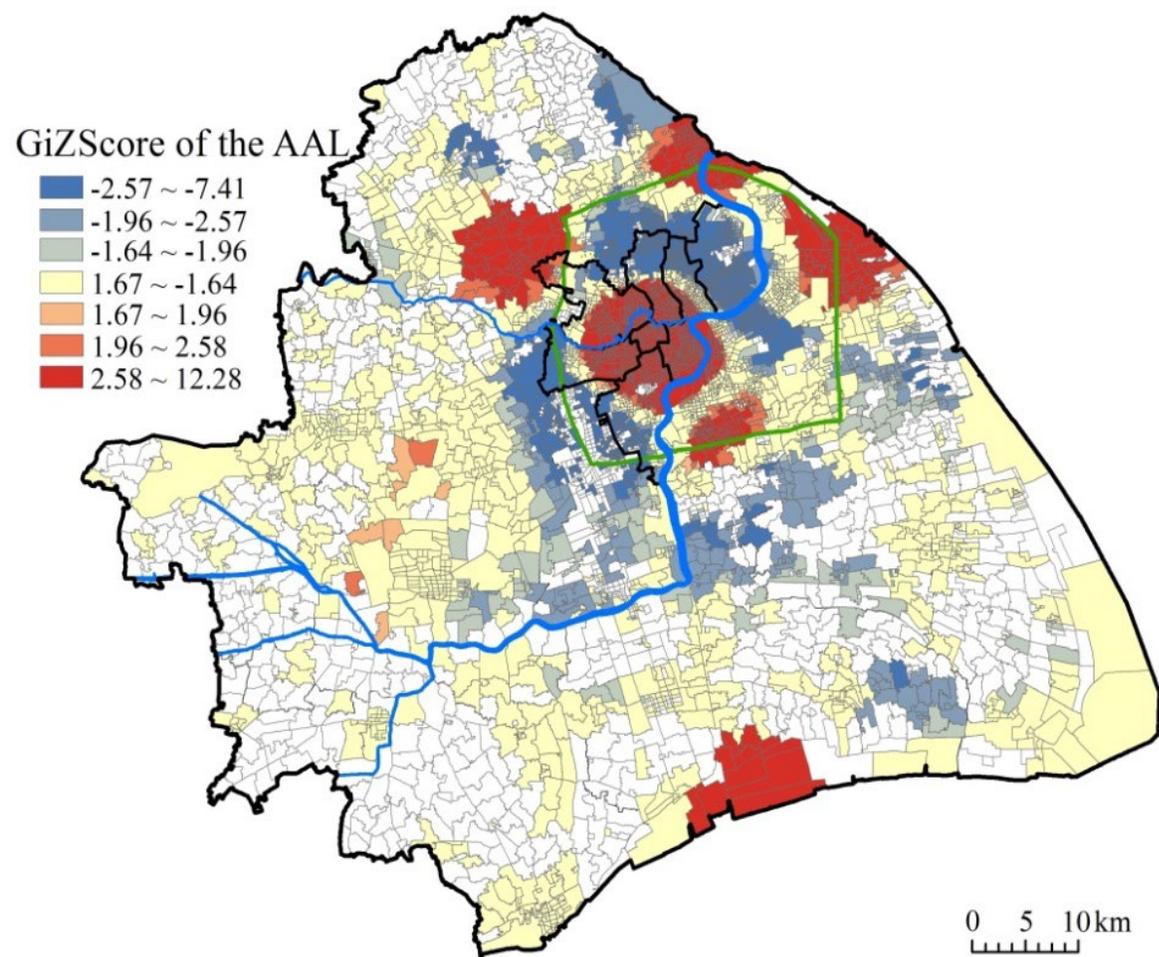


Fig. 8 The hot/cold spots of the AAL for resident buildings and household properties at the NC level in Shanghai

- ◆ 图8表明, local G_i^* 统计结果显示了上海住宅建筑和室内财产的AAL的分层模式 (图8)。热点和冷点分别占1342 (34.6%) 和1238 (31.9%) 个居委会。热点和冷点的AAL模式和街镇级的AAL分布相似。
- ◆ 热点占据了中心城区, 周围是冷点, 然后围绕南翔, 友谊路, 高行, 北蔡分区/镇 (图7中的①, ②, ③, ④) 的四个热点位于内外, 外环 (图8)。
- ◆ 上海西部松江低洼地区没有出现明显的热点。相比之下, 沿着杭州湾的奉贤区湾旅游区周围有一个明显的热点。AAL的这些空间格局揭示了上海风暴洪水风险的分布。

湿措施

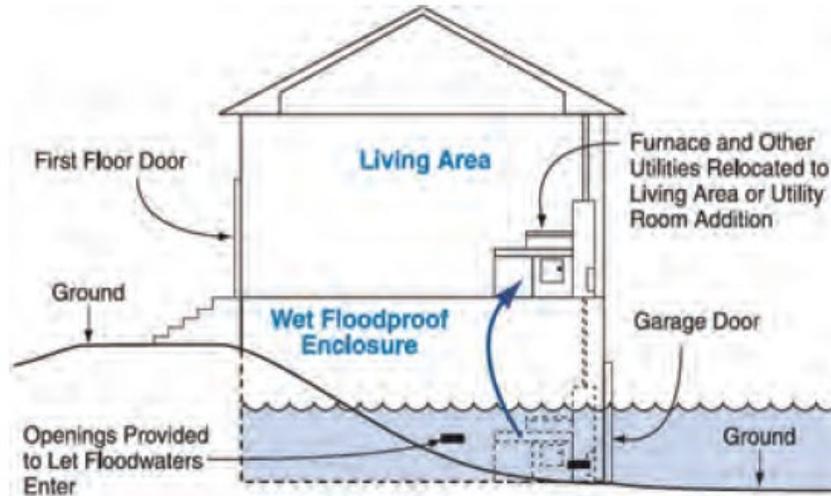


Figure 1 Example of a wet floodproofed building (Source: FEMA, 2009b).

干措施

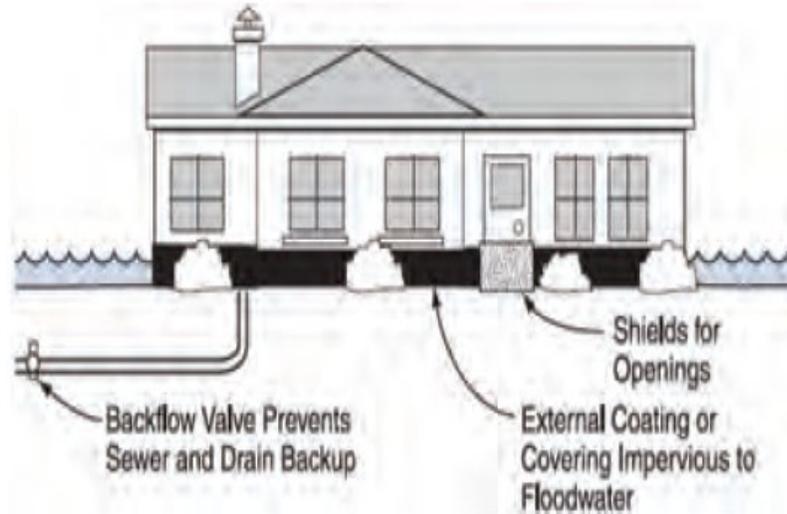
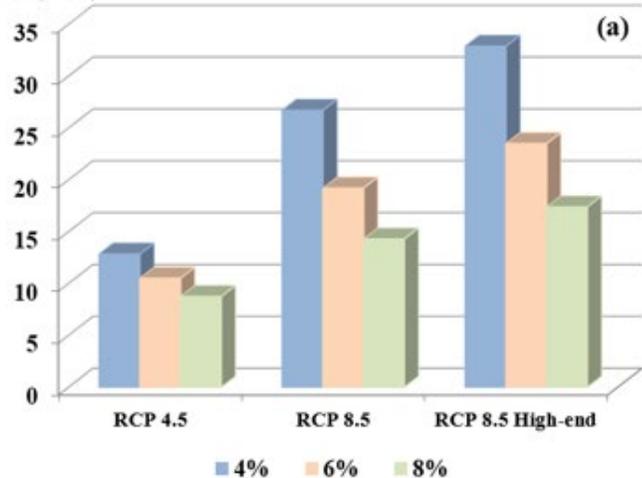


Figure 2 Example of a dry floodproofed building (Source: FEMA (2009b).

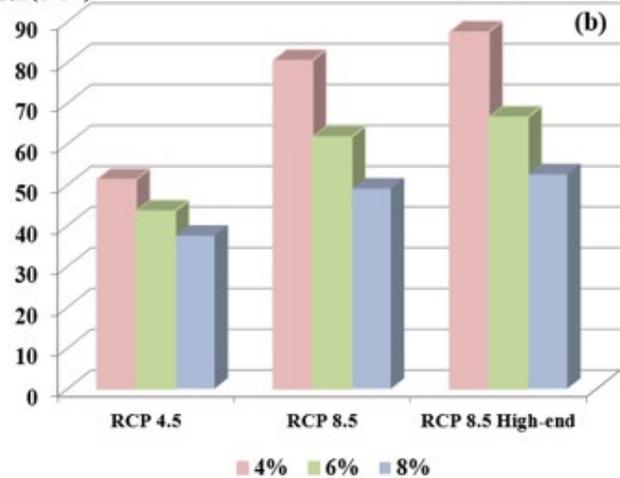
- **图1**: 一个防潮湿建筑物的示例。防潮需要对房屋的一部分进行改造，以使洪水可以进入，但对房屋及其财物的损害最小。
- **图2**: 一个干燥防洪建筑的示例。建筑物的干式防潮意味着房屋的易洪水部分已经过水密处理，因此洪水无法进入建筑物（FEMA, 2009b）。

(Shan et al., 2021)

净现值(亿元)

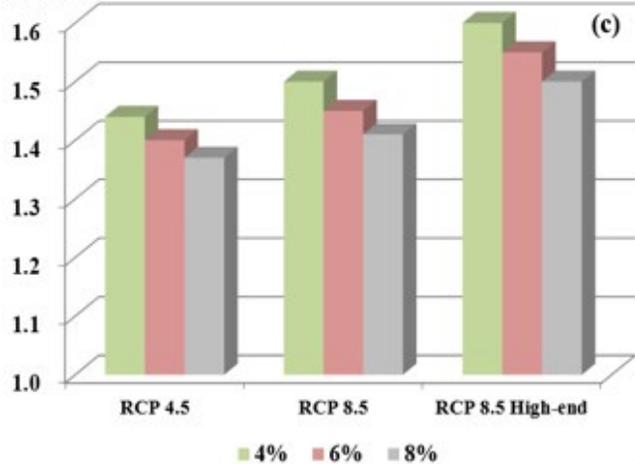


净现值(亿元)

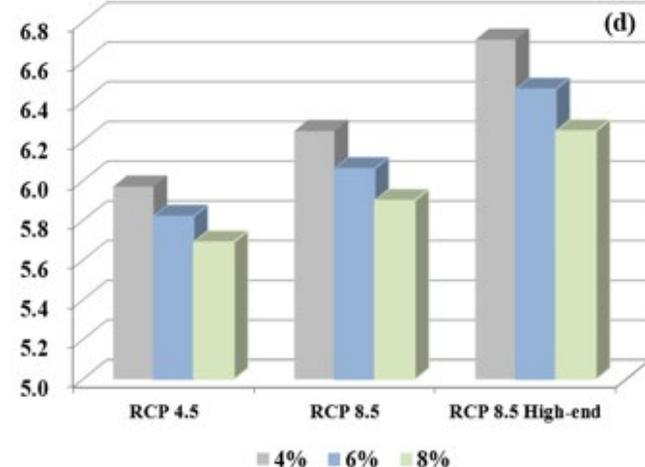


- 在不同折现率8%, 6%, 4%下, 干措施(a)和湿措施(b)的净现值

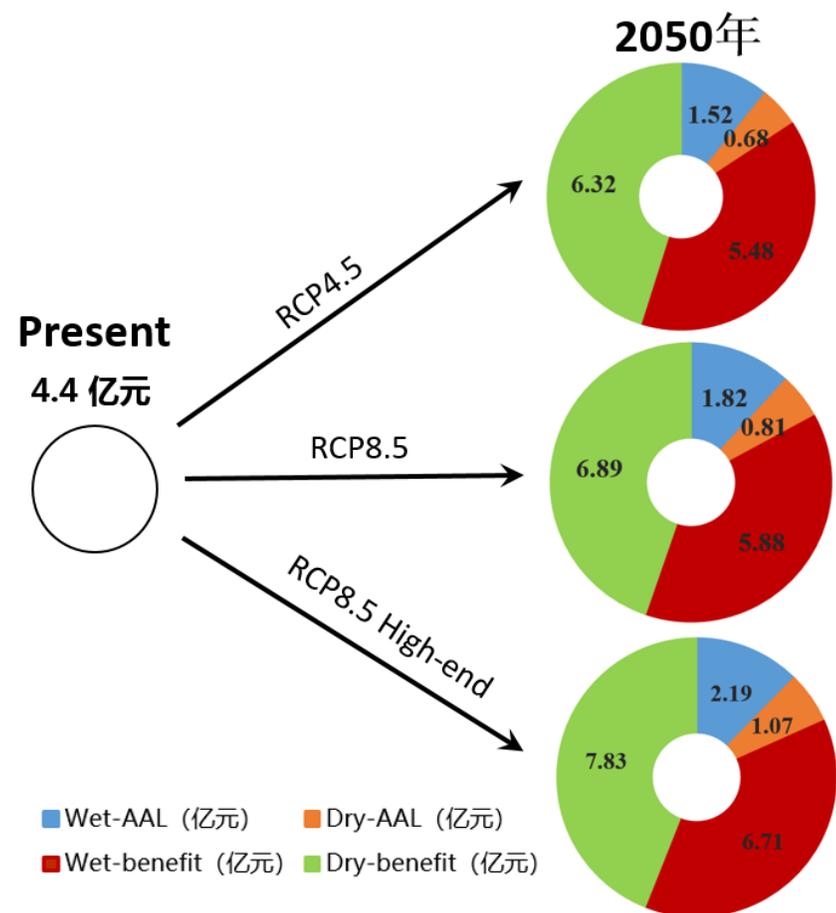
收益成本比



收益成本比

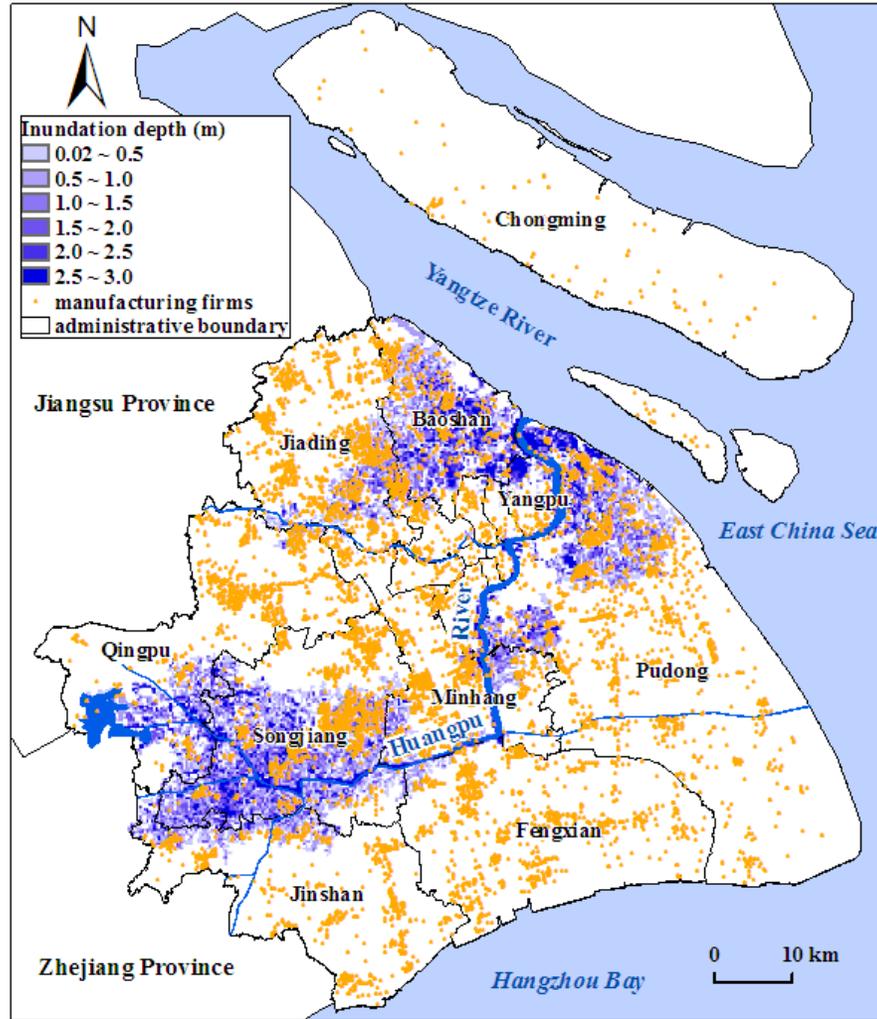


- 在不同折现率8%, 6%, 4%下, 干措施(c)和湿措施(d)的收益成本比

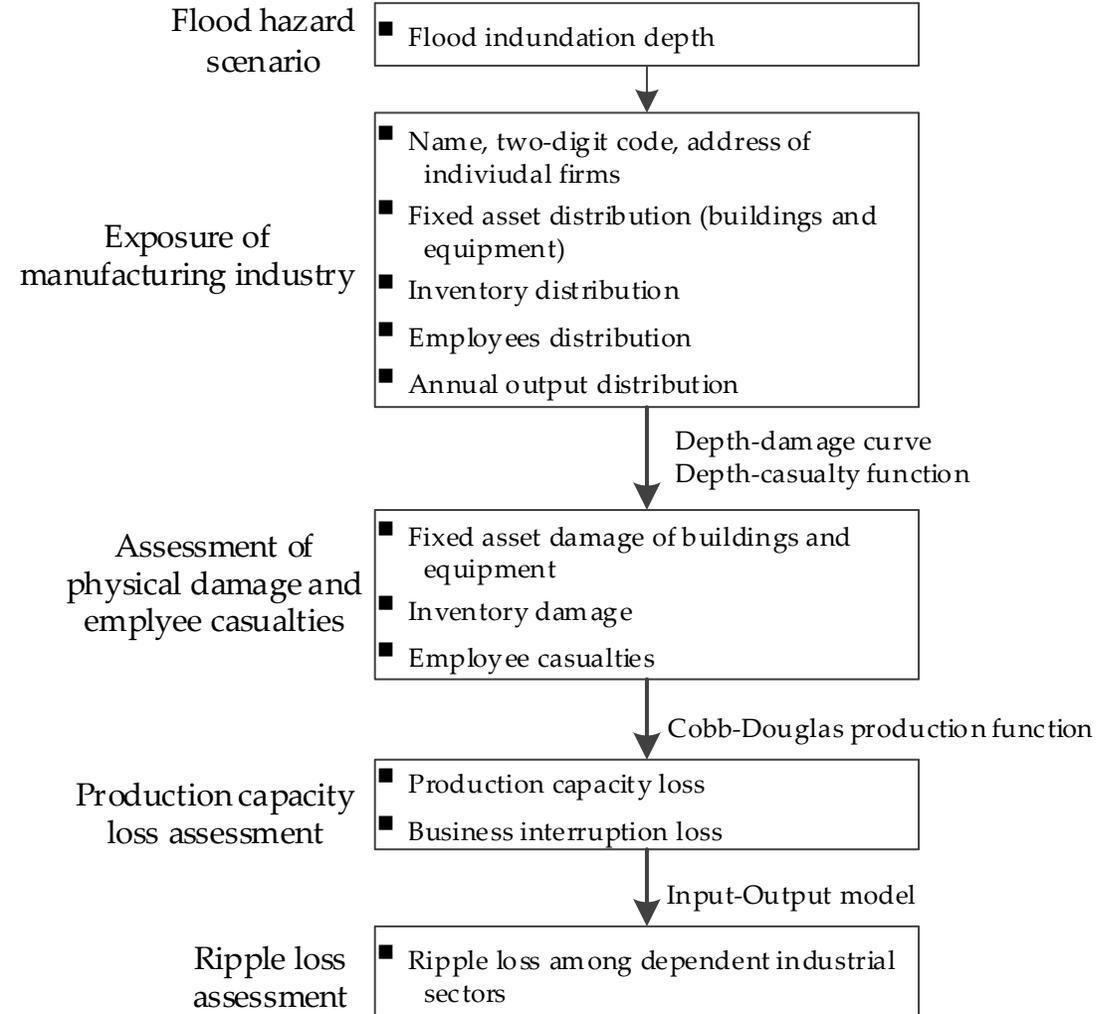


**极端风暴洪水情景下上海制造业经济
损失综合评估
(Li et al., 2019)**

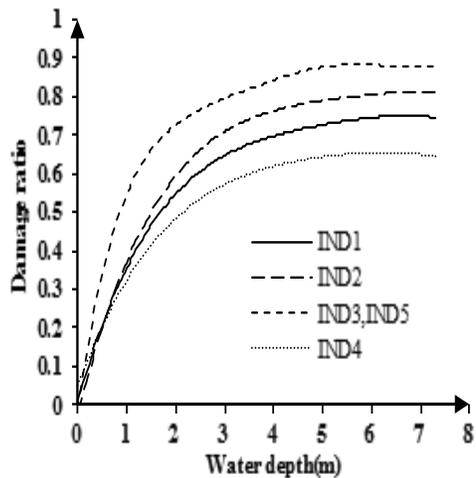
(Li et al., 2019)



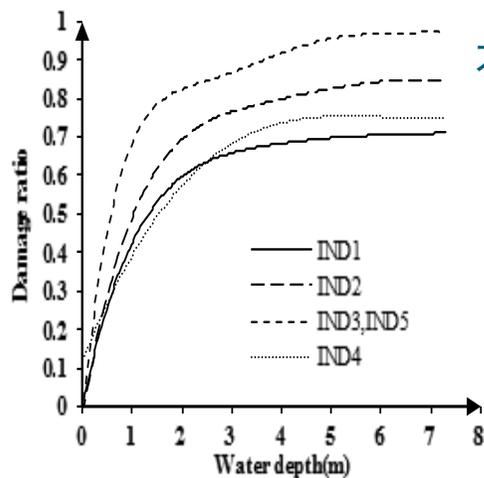
洪水淹没情景及制造业企业分布



集成评估框架



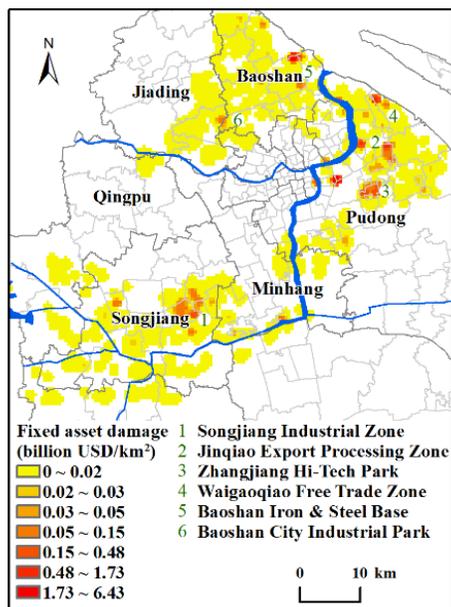
(a) Depth-damage curves of fixed asset



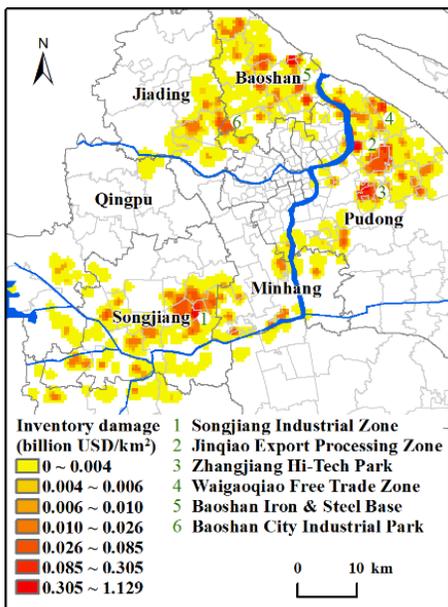
(b) Depth-damage curves of inventory

不同类型制造业淹没 深度-损失曲线

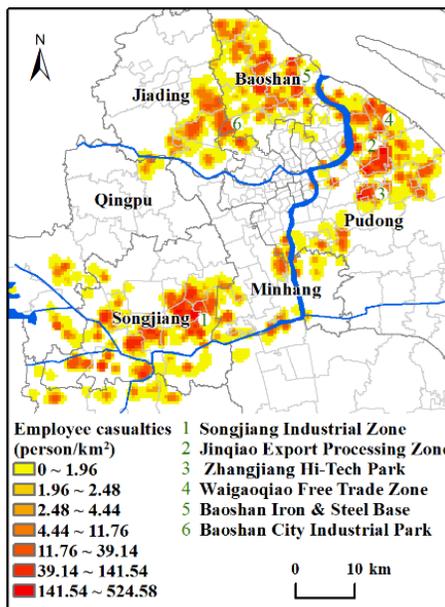
极端洪涝灾害对松江区、浦东新区和宝山区的制造业企业造成严重损失，嘉定区、闵行区和青浦区也有一些轻微损失。松江工业区、金桥出口加工区、张江高科技园区、外高桥保税区、宝山钢铁基地、宝山都市工业园等重点工业开发区及周边地区存在多个损失热点。淹没深度大、资产暴露密度高、产业结构易损性高等因素共同影响，将导致这些工业区可能遭受严重破坏。



(a) Fixed asset damage



(b) Inventory damage



(c) Employee casualties

投入产出表

	Processing sectors (Purchases)			Final demand	Total output	
	Sector 1	...Sector j ...	Sector n			
Processing sectors (Sales)	Sector 1	X_{11}	X_{1j}	X_{1n}	Y_1	Q_1
	...					
	Sector i	X_{i1}	X_{ij}	X_{in}	Y_i	Q_i
	Sector j	X_{j1}	X_{jj}	X_{jn}	Y_j	Q_j
	...					
	Sector n	X_{n1}	X_{nj}	X_{nn}	Y_n	Q_n
Value added		Z_1	Z_j	Z_n		
Total outlays		Q_1	Q_j	Q_n		

表中， b_{0j} 为与第 j 个制造业部门相关的逆矩阵系数列总和，研究区域内 b_{0j} 在2.50~5.09之间变化，说明制造业部门在区域产业体系中具有较强的联动效应。S20(通信设备、计算机及其他电子设备)、S19(电气机械及器材制造业)、S18(交通运输设备制造业)、S16(通用设备制造业)、S17(专用设备制造业)等 b_{0j} 较高的制造业部门，不仅是区域经济增长的龙头和动力，也是防范灾害风险最脆弱、最关键的节点。对于这些关键制造业部门直接受损引发的全系统波及损失，应给予更多关注。

各制造业部门受损造成的间接波及损失. (unit: billion USD).

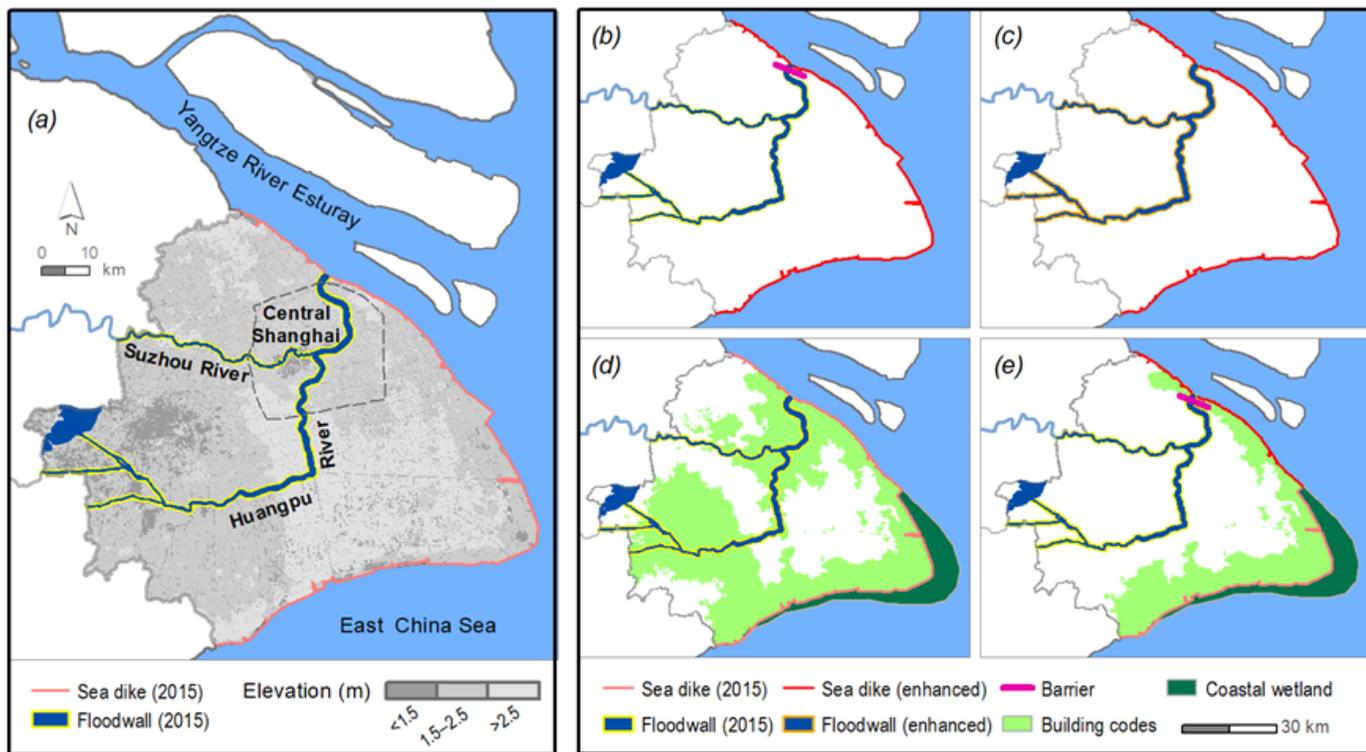
Sector codes	ΔQ	ΔY	b_{0j}	Ripple loss	Sector codes	ΔQ	ΔY	b_{0j}	Ripple loss
S06	0.99	0.74	2.50	1.85	S16	0.88	0.75	3.86	2.90
S07	0.07	0.06	3.77	0.23	S17	0.68	0.65	3.70	2.41
S08	0.24	0.21	3.36	0.71	S18	1.86	1.31	3.92	5.14
S09	0.13	0.12	3.60	0.43	S19	0.97	0.84	4.00	3.36
S10	0.27	0.25	3.72	0.93	S20	6.26	3.63	5.09	18.48
S11	1.87	1.40	3.11	4.35	S21	0.38	0.36	3.49	1.26
S12	3.46	1.98	3.68	7.29	S22	0.02	0.01	3.31	0.03
S13	0.37	0.33	2.97	0.98	S23	0.06	0.03	4.03	0.12
S14	3.93	2.19	3.45	7.56	S24	0.03	0.02	3.36	0.07
S15	0.59	0.49	3.54	1.73	Total	23.06	15.37		59.80

制造业部门受损造成的其他各部门间接损失(unit: billion USD).

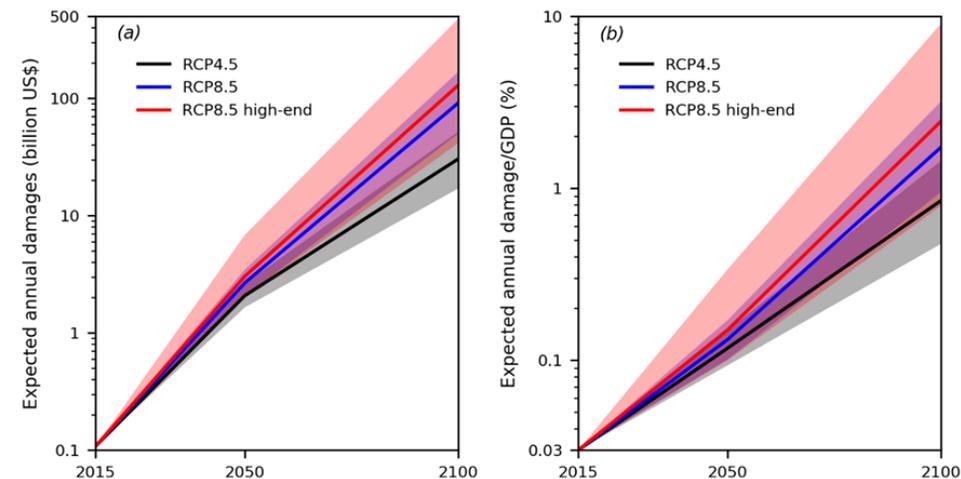
Indirect affected industries	b_{i0}	Ripple loss	Indirect affected industries	b_{i0}	Ripple loss
A Farming, forestry, animal husbandry and fishery	0.27	0.16	K Realty business	0.48	0.37
B Mining Industry	5.38	5.55	L Leasehold and business service industry	2.55	1.90
C Manufacturing Industry	49.42	43.76	M Scientific research, technical service and geologic examination industry	0.09	0.07
D Production and supply of electric power, gas and water	2.62	1.97	N Water conservancy, environment and public institution management	0.01	0.01
E Construction industry	0.07	0.05	O Neighborhood services and other service industry	0.28	0.21
F Wholesale and retail trade	1.89	1.67	P Education	0.04	0.03
G Traffic, storage and mail business	2.36	1.74	Q Sanitation, social security and social welfare industry	0.01	0.01
H Accommodation and food industry	0.35	0.25	R Cultural, physical and entertainment industry	0.03	0.02
I Information transfer, computer service and software industry	0.83	0.59	S Public administration and social organization	0.03	0.03
J Finance industry	1.76	1.41	Total		59.80

整个系统的波及损失估计约为600亿美元，是制造业年产值损失的2.6倍。从产能损失到波及损失具有显著的倍增效应。因此，不仅要关注制造业内部的直接损害和产能损失，还要关注对相关产业的连锁影响。

上海洪水风险适应措施的成本-收益分析 (Du et al., 2020)

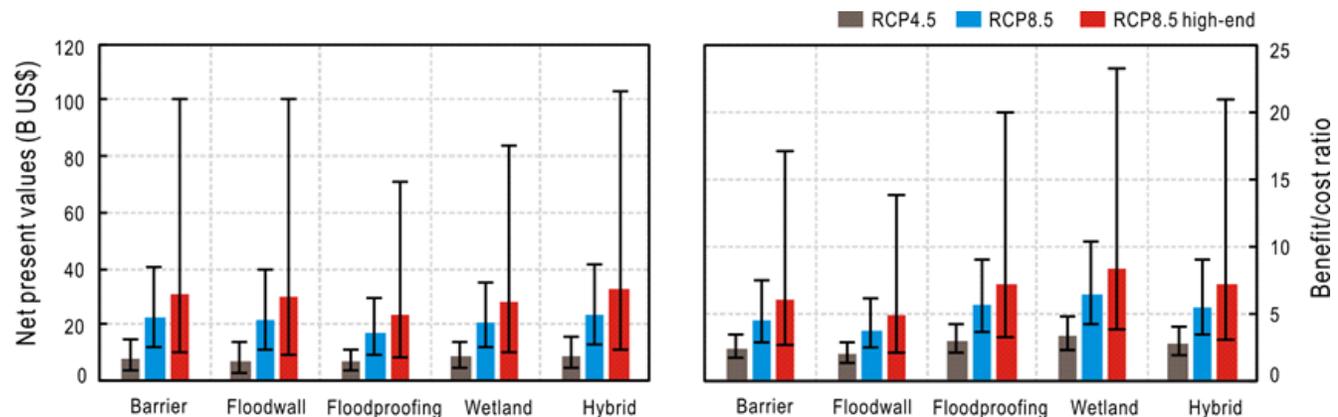
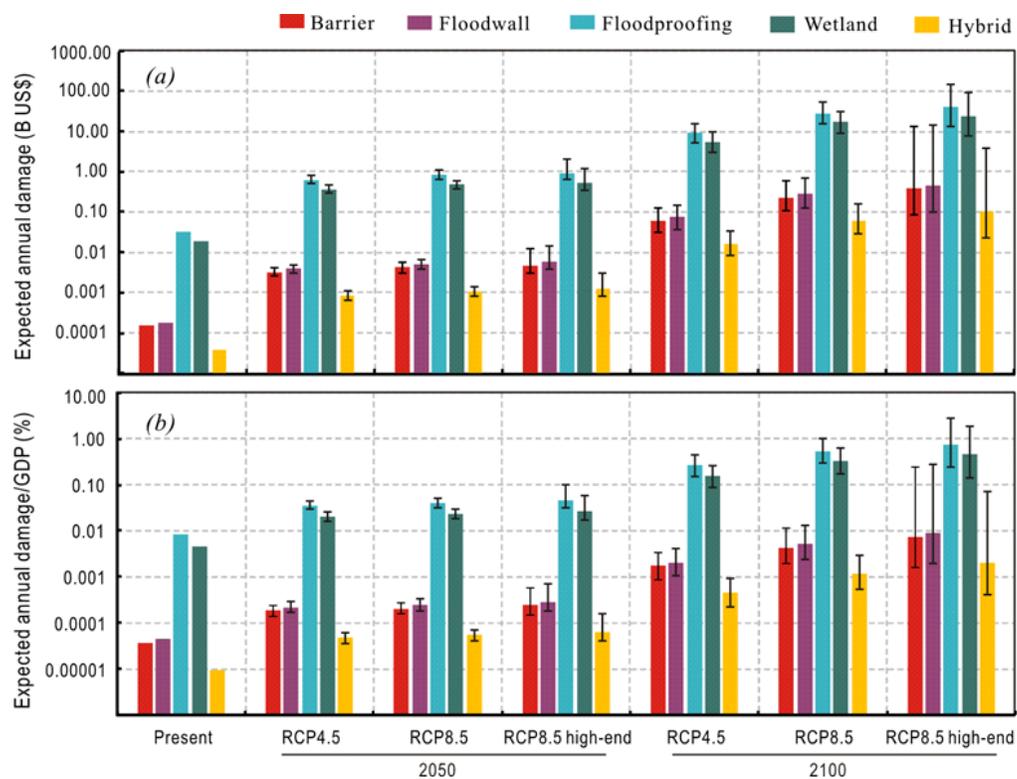


- 目前上海的防洪情况 (a) ; 未来“硬”保护措施: 包括新的风暴潮挡潮闸(b) 及其加高防洪墙和海堤(c) ; “软”适应措施包括加强建筑规范和自然海岸 (d); 混合策略(e)。



- 在未来海平面上升的情况下(以5%-95%为界的中位数估计), 洪涝灾害年期望损失(a)及其GDP占比(b)

(Du et al., 2020)

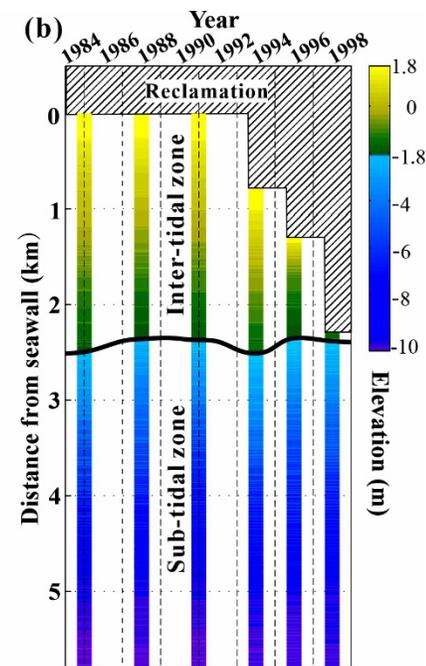
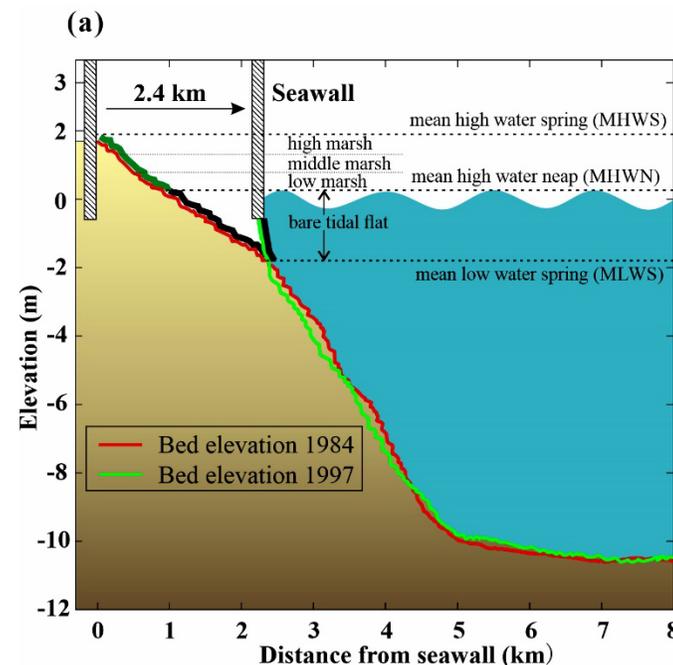
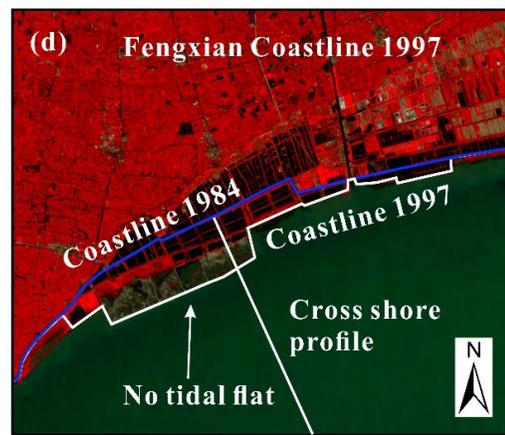
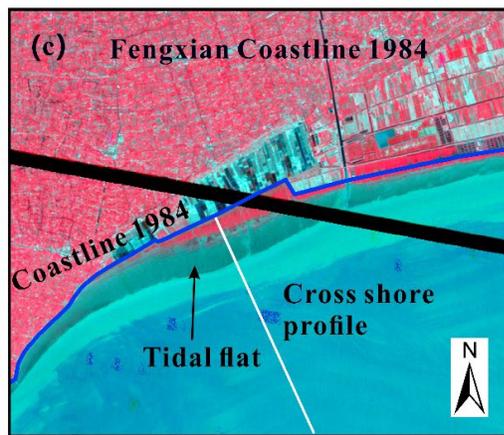
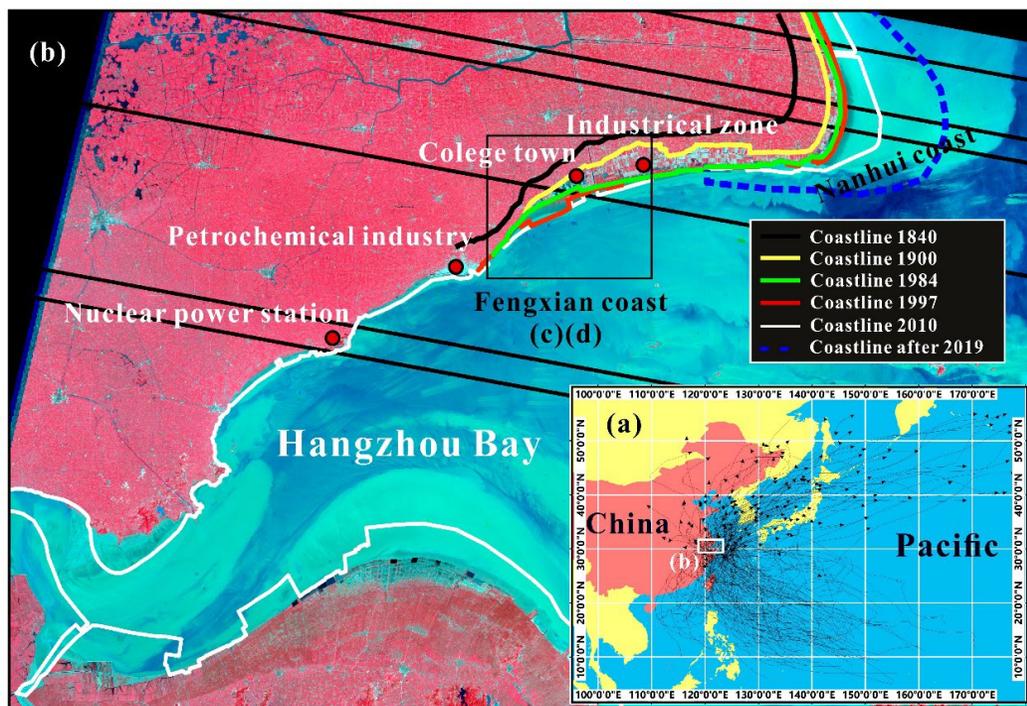


- 不同海平面上升情景(以5%-95%为界的中位数估计)和适应措施下的年期望损失(a)及其GDP占比(b)。

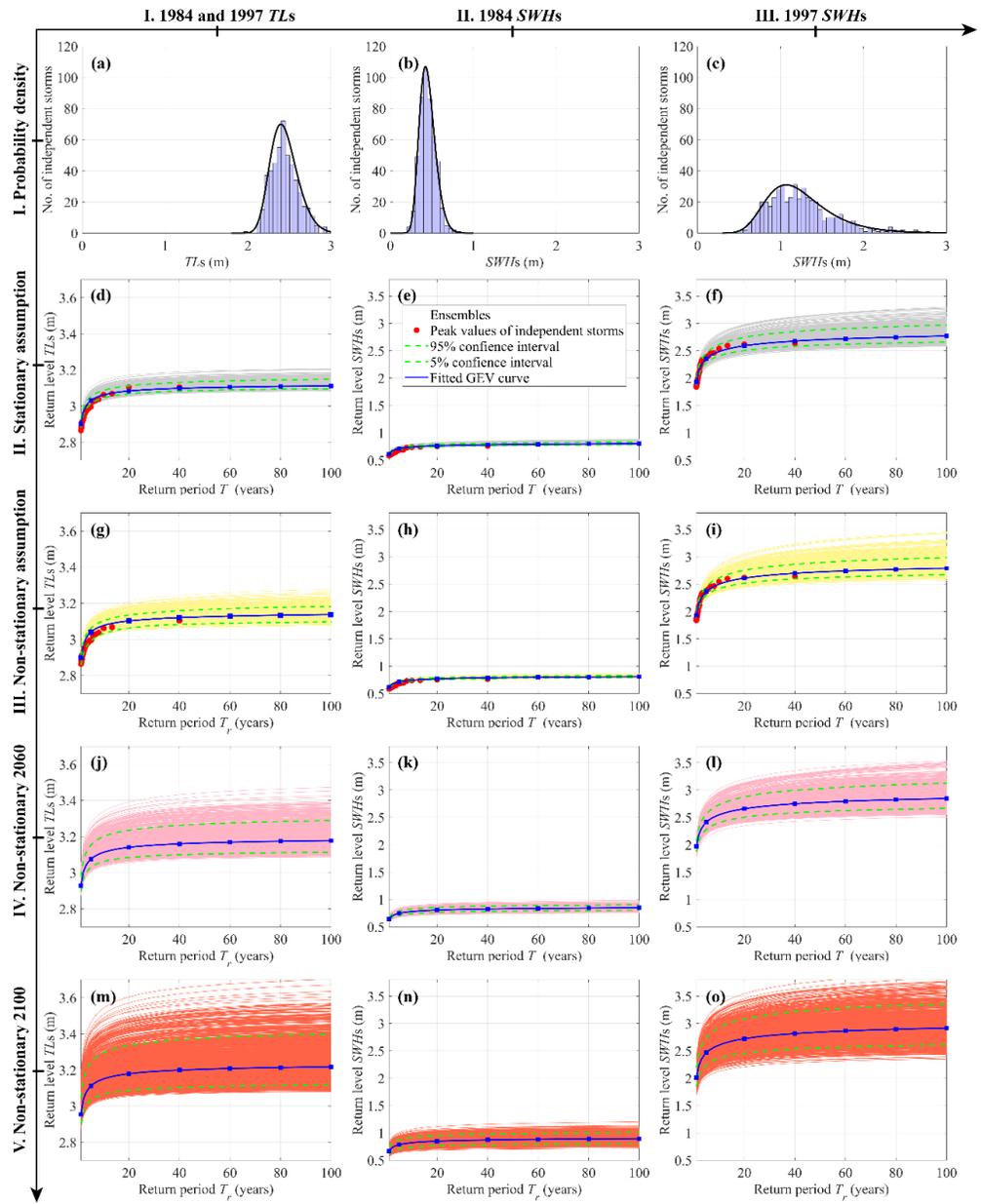
- 贴现率为8%的适应措施的成本-效益。(a) 净现值和(b) 效益/成本比率(以5%-95%为界限的中值估计);

围海造田对风暴潮潜在风险的驱动作用评估 (Zhang et al., 2021)

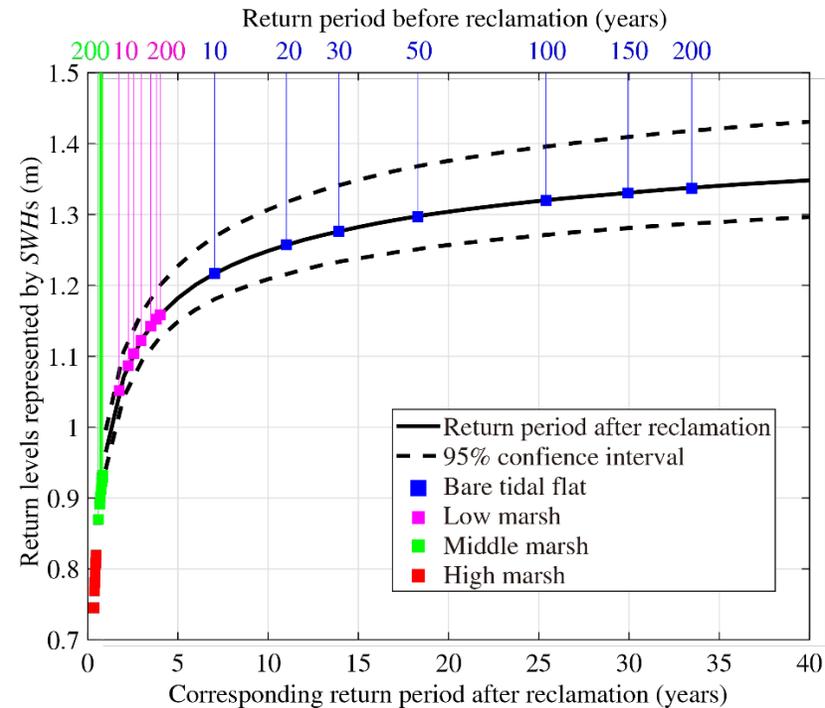
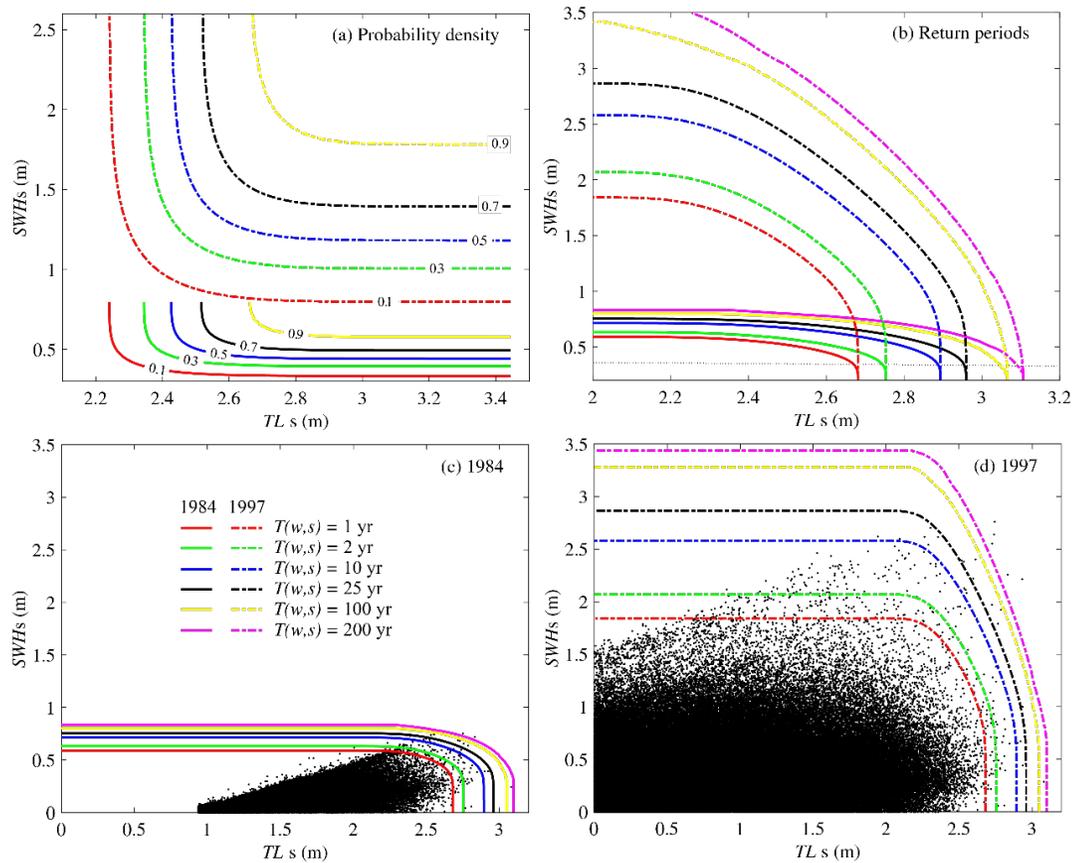
(Zhang et al., 2021)



岸线变迁 (1984-1998): (a) 海塘-潮滩变迁, 及大潮高潮位 (MHWS), 大潮低潮位 (MLWS), 小潮高潮位 (MHWN) 和小潮低潮位 (MLWN) 的水位线指示的高潮滩 (1.3 ~ 1.8 m), 中潮滩(0.8~1.3 m), 低潮滩(0.3 ~ 0.8 m) 和光滩 (-1.8 ~ 0.3 m)位置。 (b) 1984至1998年间潮滩高程变化和围垦过程

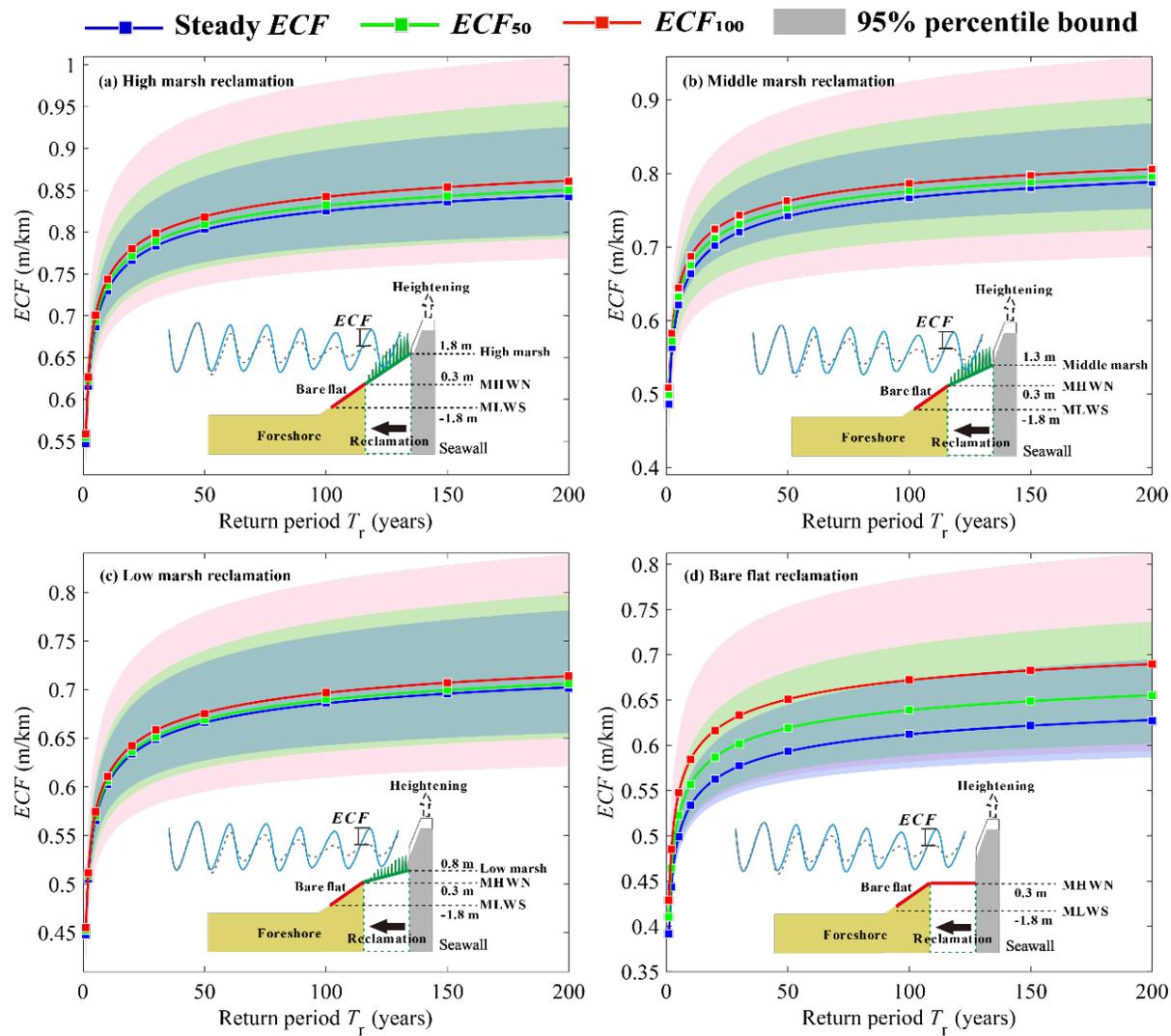


可能性密度(1st row) 和波高、水位广义极值重现期变化 (2nd - 5th row). 1st 列2nd 和 3rd 列为围垦前后的波高水位对比。
 非稳态假设：基于1979-2018观测数据；非稳态2060：表示基于实测的40年预测（2019-2060）；非稳态2100：表示基于实测的80inane预测（2060-2100）。

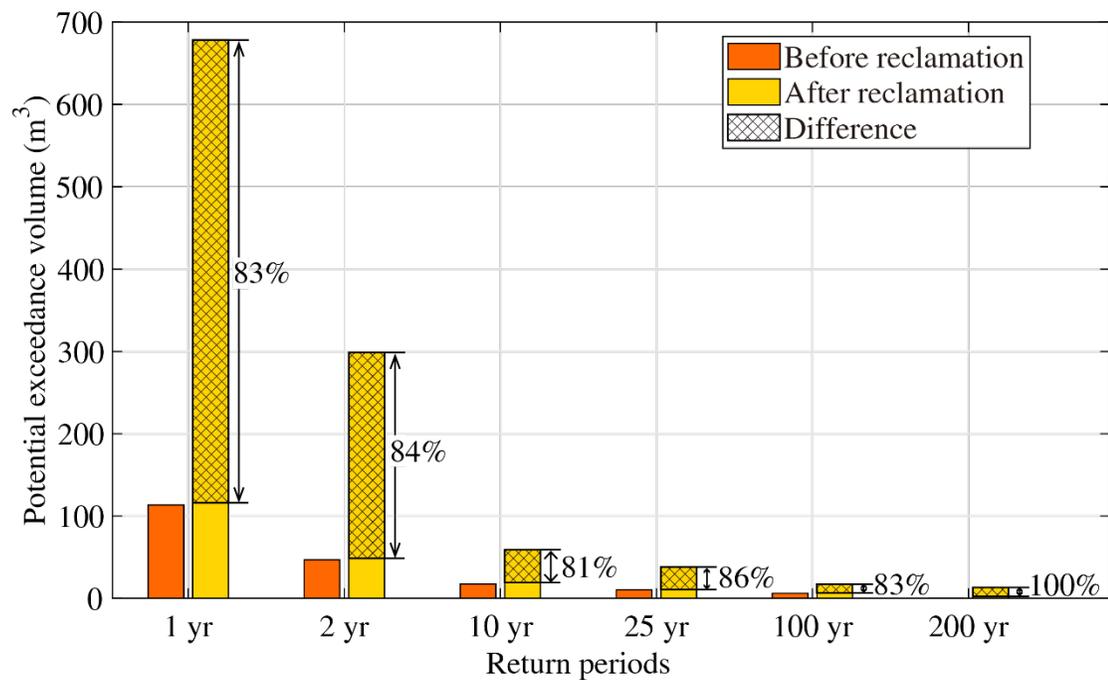


近岸水位和波高联合累积概率曲线和联合重现期曲线。(a, b) 围垦前后的联合累积概率 $F(w, s)$ 曲线和联合重现期 $T(w, s)$ 曲线的比较; (c, d) 过去40年每小时波高-水位散点图, 及围垦前后联合重现期曲线比较

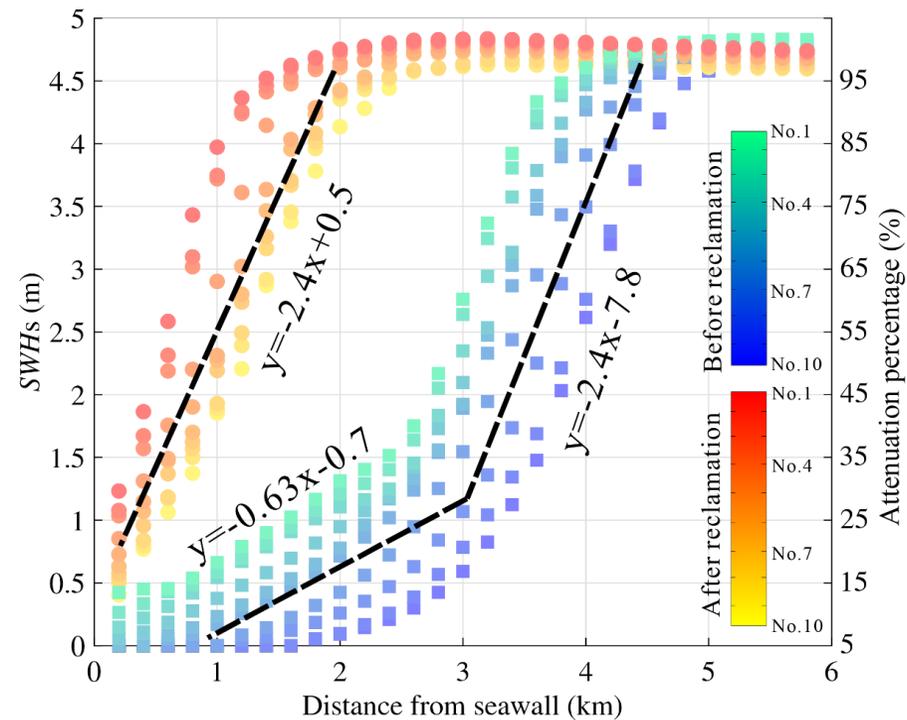
围垦前后每公里宽的潮滩计算的重现期变化, 其中红点、绿点、粉红点和蓝点分别代表围垦前高、中、低潮滩和光滩的重现期变化。黑色曲线表示围垦后的重现期与重现期水平, 虚线表示95%百分位数



1 km宽潮滩护岸与海塘高度等价转换关系ECF。(a) 1984年奉贤海岸高潮滩（1.8m）围垦，并考虑50年（ ECF_{50} ）和100年（ ECF_{100} ）的海堤生命周期。为更具通用性还计算了（b）中潮滩（高程1.3m），（c）低潮滩（0.8m）；（d）光滩（0.3m）围垦的等价转换关系，阴影显示95%置信区间。

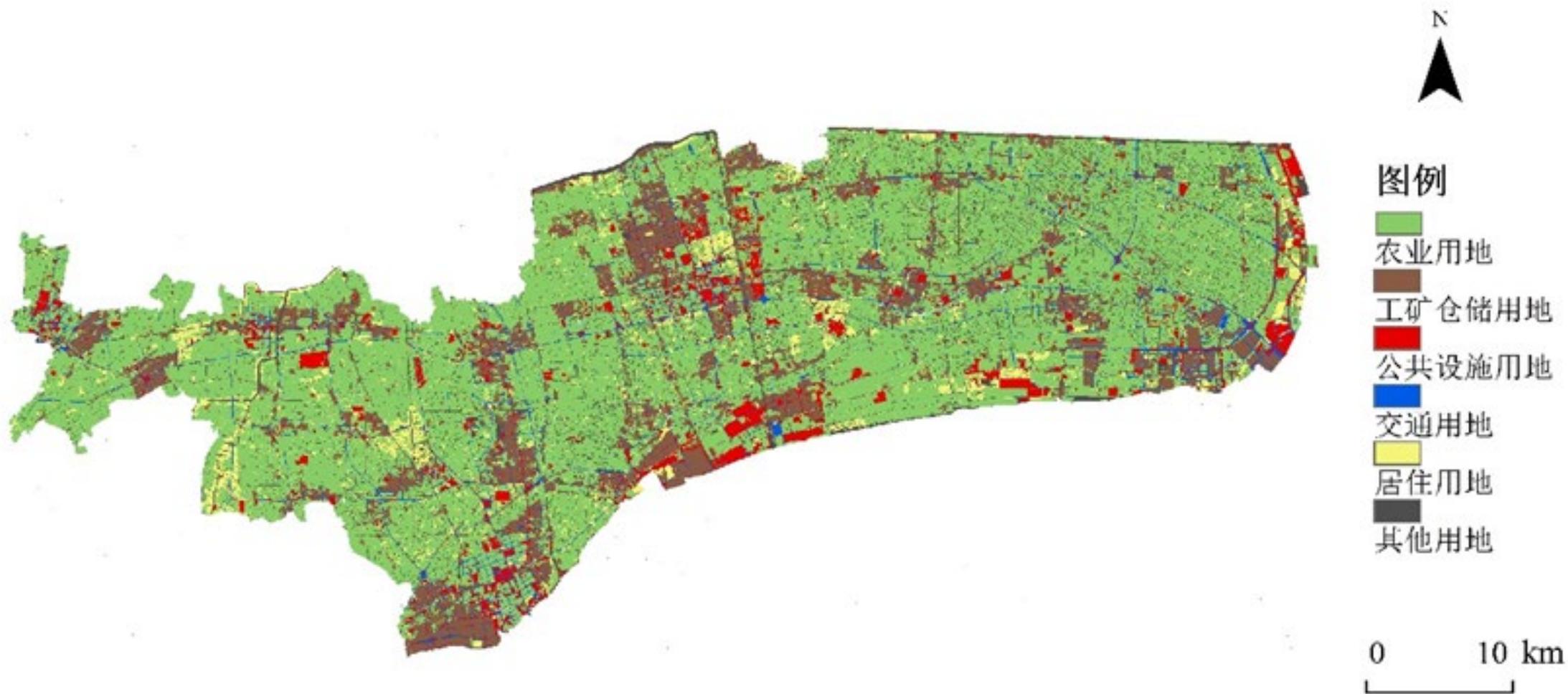


填海前和填海后的潜在超标量比较。假设海堤根据1997年窄潮间带条件下计算的1/1、1/2、1/10、1/25、1/100和1/200年重现期的潮浪高度进行设置。



过去40年十个主要风暴潮的波高降低和衰减趋势分析。色阶表示填海前和填海后的情况。

土地利用变化情景下杭州湾北岸极端洪灾风险评估 (姜丽等, 2021)



2050年杭州湾北岸土地利用分布模拟图

未来情景资产价值损失分析

暴露分析:

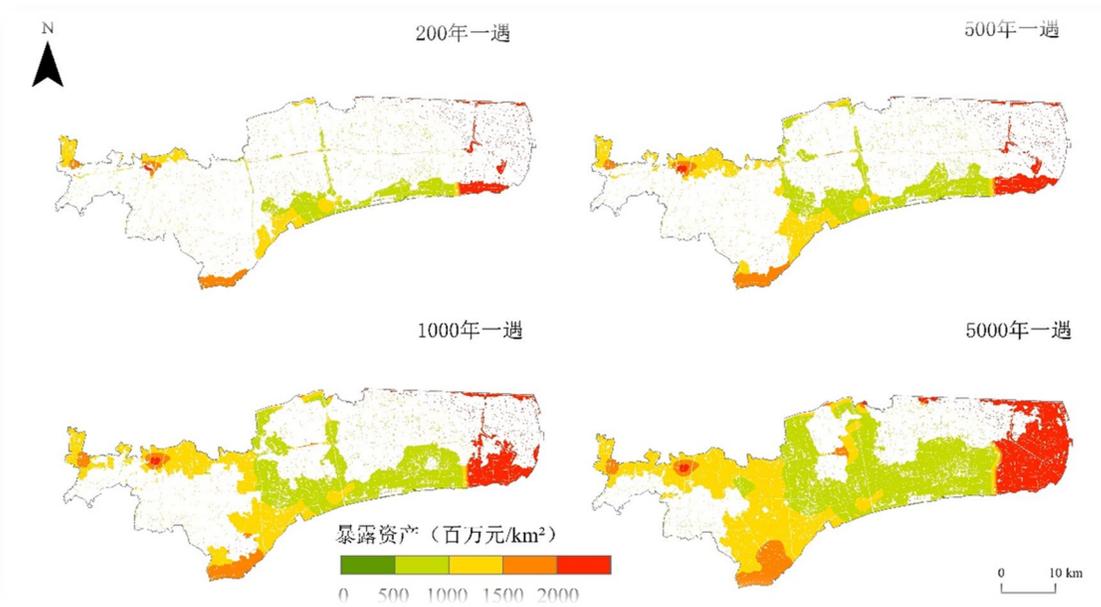


图1 RCP8.5H情景下单位面积暴露资产图

表1 未来多个风暴潮淹没情景不同重现期下土地利用暴露资产表

土地利用类型	未来不同重现期下土地利用暴露资产 (亿元)											
	RCP=4.5				RCP=8.5				RCP=8.5H			
	RP=200	RP=500	RP=1000	RP=5000	RP=200	RP=500	RP=1000	RP=5000	RP=200	RP=500	RP=1000	RP=5000
居住用地	294	528	849	1700	310	555	907	1739	347	603	1001	1782
工业用地	615	1083	1660	2321	654	1141	1704	2377	691	1274	1787	2417
交通用地	160	275	447	769	167	293	471	786	179	329	504	798
公共设施用地	272	388	615	1207	283	408	646	1237	302	456	698	1260
农业用地	1188	1889	3005	6434	1258	1987	3206	6673	1354	2208	3514	6925
其他用地	246	343	488	950	255	354	511	980	266	379	549	1013
合计	2774	4506	7065	13381	2926	4738	7445	13792	3139	5249	8053	14196

损失分析:

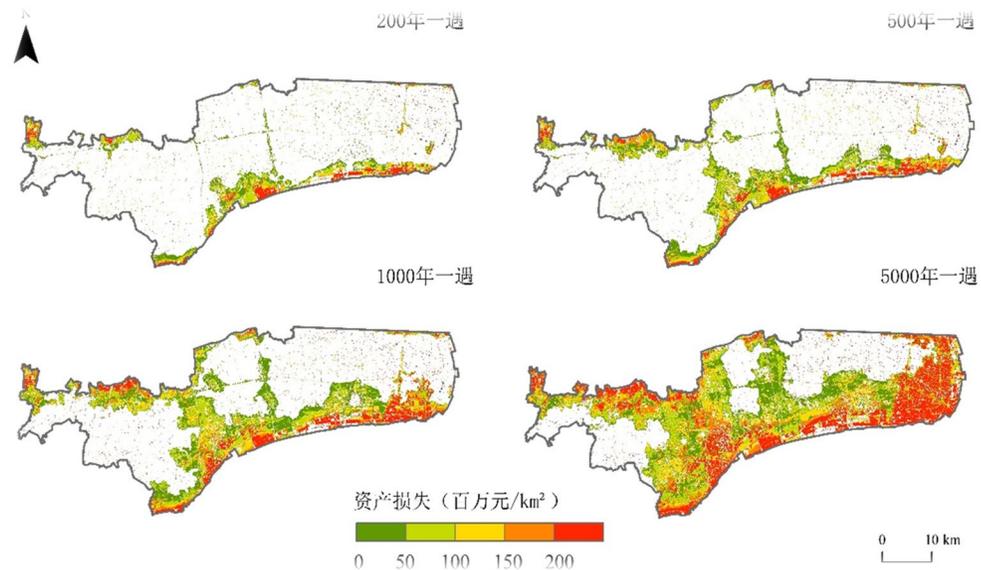


图2 RCP8.5H情景下单位面积资产损失图

土地利用类型	不同重现期下土地利用资产损失 (亿元)											
	RCP=4.5				RCP=8.5				RCP=8.5H			
	RP=200	RP=500	RP=1000	RP=5000	RP=200	RP=500	RP=1000	RP=5000	RP=200	RP=500	RP=1000	RP=5000
居住用地	5	9.9	16	39.3	19	37	61	150	22	41	67	160
工业用地	6.9	12.3	19.8	40	26	47	75	151	29	53	81	159
交通用地	0.6	1.2	2.1	4.9	2	5	8	19	3	5	9	20
公共设施用地	5.7	8.3	11.6	24.4	21	31	43	92	23	33	46	97
农业用地	44.5	87.9	143.9	350.7	173	334	552	1334	195	373	606	1427
其他用地	2.8	4.1	5.6	11.4	10	15	21	43	11	16	23	46
合计	65.5	123.7	199	470.7	251	469	760	1789	283	521	832	1909

表2 未来多个风暴潮淹没情景不同重现期下土地利用资产损失表

现状情景资产价值损失分析

暴露分析:

表3 不同重现期下土地利用暴露资产 (亿元)

土地利用类型	不同重现期下土地利用暴露资产 (亿元)			
	RP=200	RP=500	RP=1000	RP=5000
居住用地	81	133	204	517
工业用地	144	232	387	672
交通用地	42	68	115	245
公共用地	79	112	156	372
农业用地	306	471	682	1751
其他用地	73	100	133	289
合计	725	1116	1677	3846

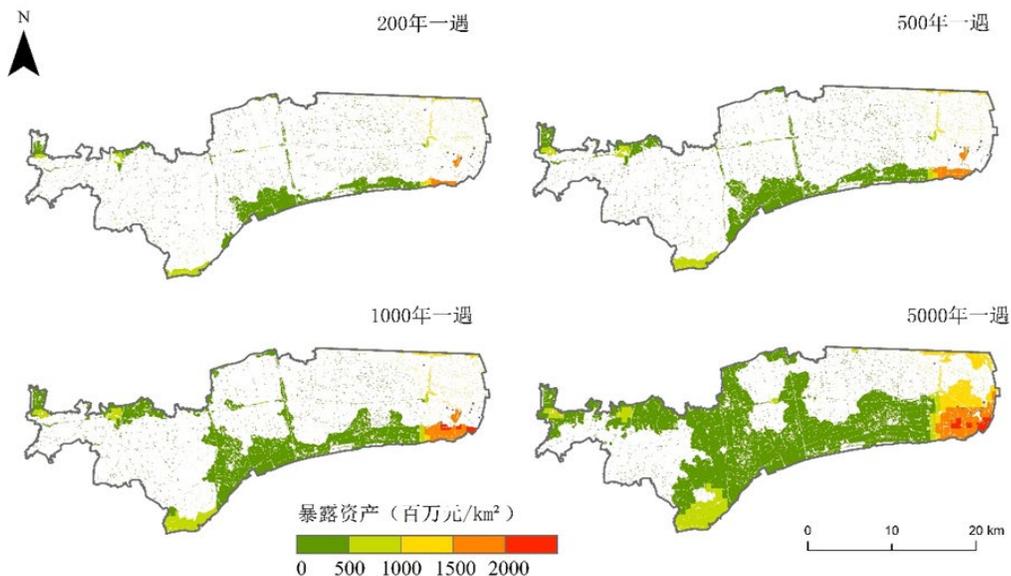


图3 现状情境下资产价值暴露分析

损失分析:

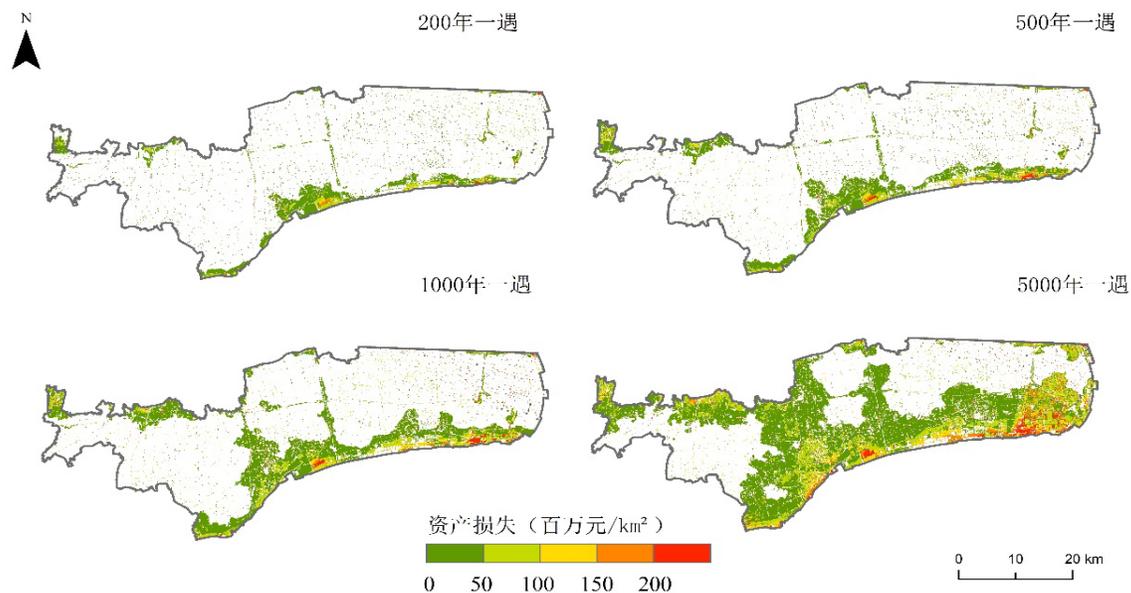


图4 现状情景资产价值损失分析

表4 不同重现期下土地利用损失资产 (亿元)

土地利用类型	不同重现期下土地利用损失资产 (亿元)			
	RP=200	RP=500	RP=1000	RP=5000
居住用地	2.9	4.6	6.1	12.4
工矿仓储用地	5.6	9.7	15.9	36.2
交通用地	0.6	1.1	1.9	4.9
公共用地	6.0	8.7	11.6	24.8
农业用地	37.5	76.8	121.5	321.1
其他	4.7	9.0	14.3	38.4
合计	57.2	109.9	171.3	437.9

主要相关文章

- [1]王璐阳, 张敏, 温家洪, 等. 上海复合极端风暴洪水淹没模拟. 水科学进展, 2019, 30(4): 546-555.
- [2] Xinmeng Shan, Jiahong Wen, Min Zhang, et al. Scenario-Based Extreme Flood Risk of Residential Buildings and Household Properties in Shanghai. Sustainability, 2019, 11, 3202; doi:10.3390/su11113202.
- [3] Weijiang Li, Jiahong Wen, Bo Xu, et al. Integrated Assessment of Economic Losses in Manufacturing Industry in Shanghai Metropolitan Area Under an Extreme Storm Flood Scenario. Sustainability, 2019, 11, 126.
- [4] Shiqiang Du*, Paolo Scussolini, Jeroen C. J. H. Aerts*. Hard or soft flood adaptation? Advantages of a hybrid strategy for Shanghai. Global Environmental Change, 2020, 61, 102037.
- [5]单薪蒙, 杜士强, 温家洪, 等. 基于网络大数据和水文-水动力模型的沿海城市洪水风险与适应研究. 科学通报, 2021. doi: 10.1360/TB-2020-1536.
- [6] Min Zhang, Zhijun Dai, Tjeerd J. Bouma. Tidal-flat reclamation aggravates potential risk from storm impacts. Coastal Engineering, 2021, 166, 103868.
- [7] 姜丽, 於家, 温家洪, 等. 土地利用变化情景下杭州湾北岸极端洪灾风险评估. 地理科学进展, 2021, in press.