

人工智能在气象预测中的应用

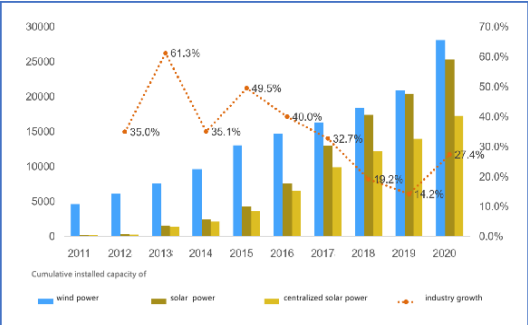
伏羲气象大模型

赵洋洋

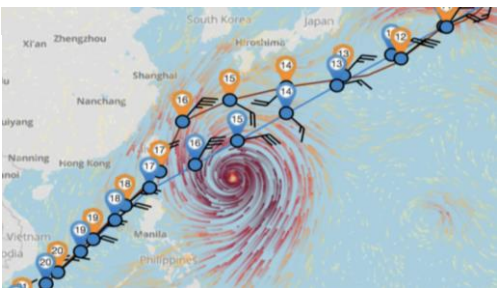
上海科学智能研究院

天气和气候预测重要性

- 准确的天气和气候预测对各行各业都至关重要



新能源效率提升



轮船航线优化

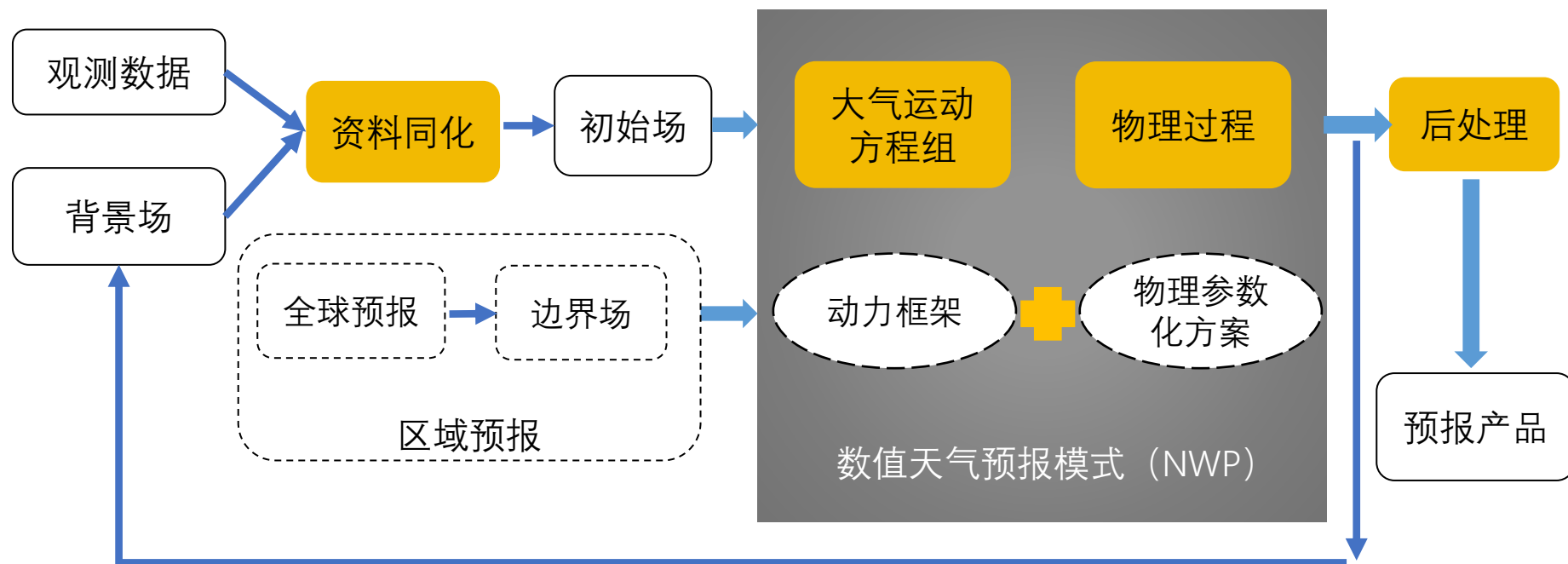


农业生产计划



灾害天气预防

传统数值天气预报模式存在挑战



基于超算运行

优势:

- 数值天气预报符合物理规律
- 无需训练即可应用于任意区域

局限性:

- 计算复杂度高，依赖大量超算资源
- 无法通过海量的观测数据系统性提升预报精度

AI改变传统气象预测世界格局

传统数值预报模式 (~2022)

第一梯队



欧洲 (IFS)

第二梯队



英国 (UM)



美国 (GFS)



日本 (GSM)

第三梯队



Korea Meteorological Administration

韩国 (KIM)



The Bureau of Meteorology

澳大利亚 (ACCESS)

国家气象局机构为主

气象大模型 (2022~2024)

国外



欧洲 (AIFS)



英伟达
(FourCastNet)



DeepMind
(GraphCast, GenCast)



微软
(Aurora)



UCLA
(Stormer)

国内



中国气象局
(风清、风雷、风顺)



Pangu-Weather



FuXi



FuXi-S2S



FengWu

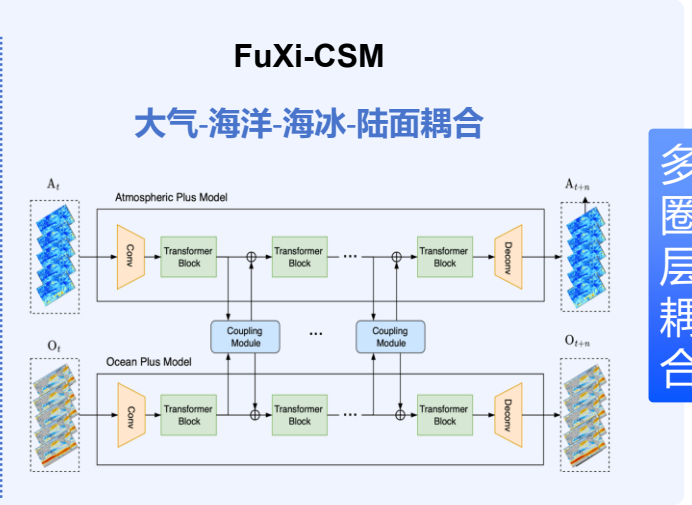
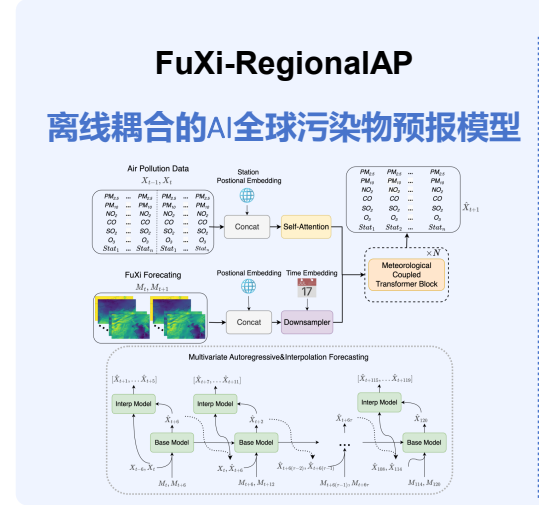
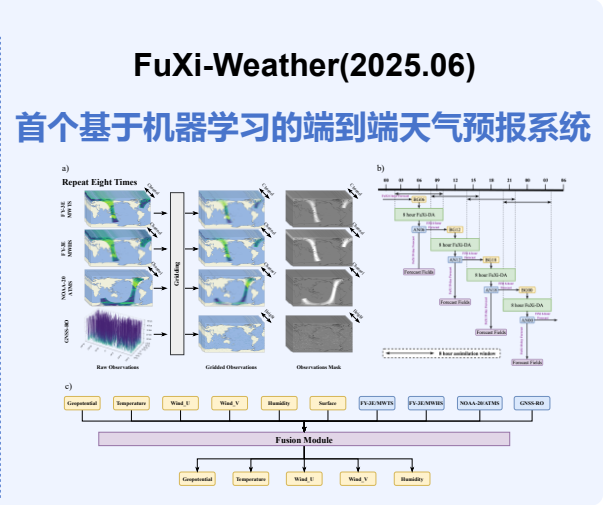
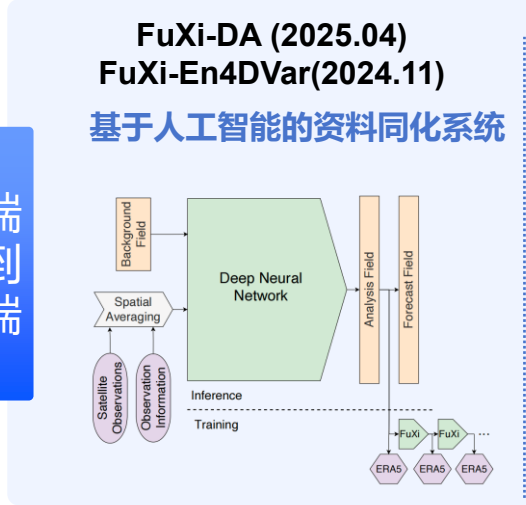
中国VS欧美：企业和科研单位

未来？

伏羲模型矩阵：从单一场景模型向体系化模型发展

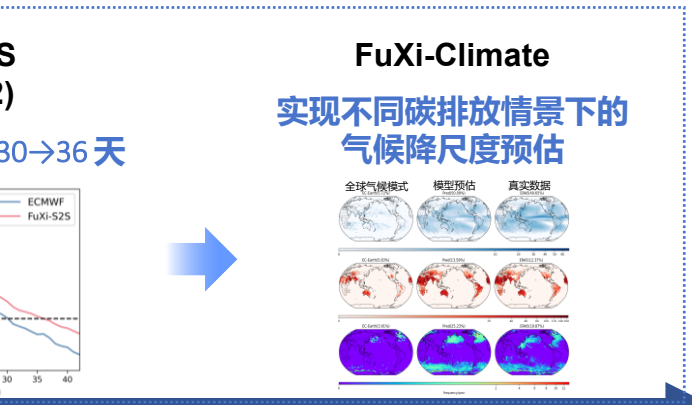
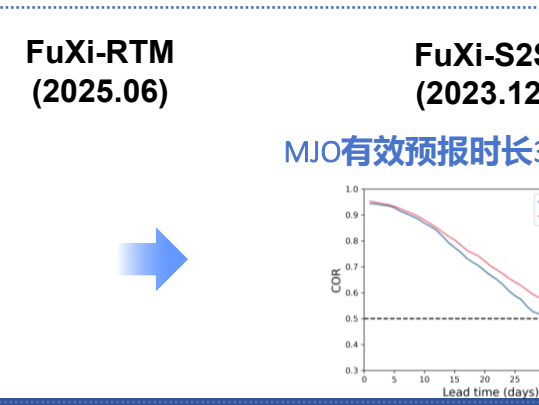
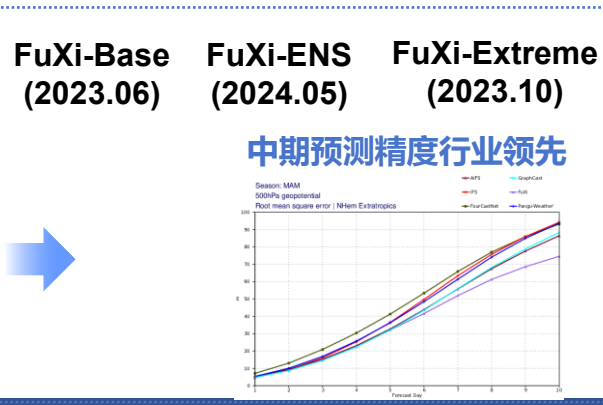
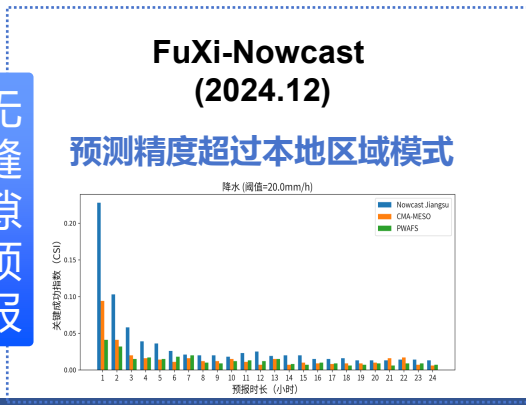
端到端优化和地球系统贯通的伏羲系列模型

端到端



多圈层耦合

无缝隙预报



0-12小时（短临预测）

0-15天（中期预测）

45-60天（次季节预测）

~100年（气候预测）

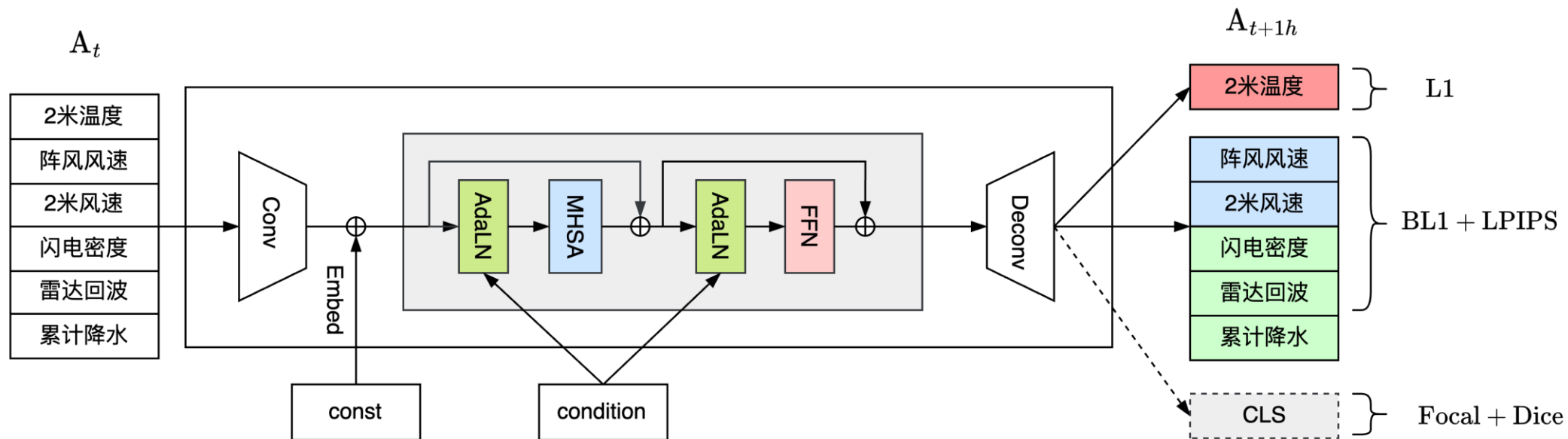
天气气候一体化，确定性概率预报协同

无缝隙天气气候预报系统

01

FuXi-Nowcast: 短临预测大模型（0-12小时）

基于多模态大模型的12小时高精度预报。



多源信息利用

- 动态数据：自动站和CLDAS
- 静态数据：地形、海陆、站点位置等地理信息

自适应归一化层

- 编码时间周期信息，如日变化、季节变化
- 可根据周期信息动态调节特征

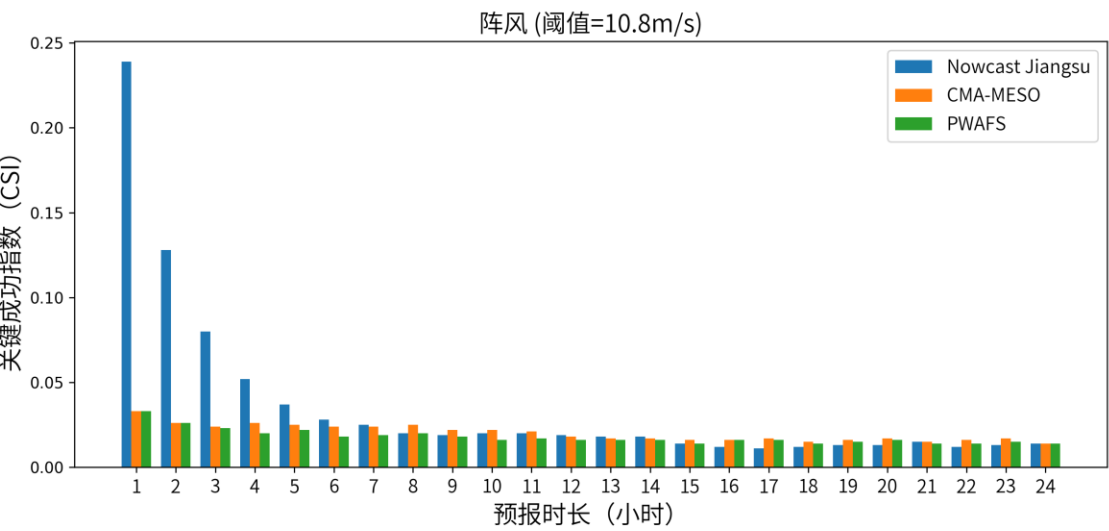
分组预测和优化

- 根据不同气象要素特征，分三组优化
- 平衡L1损失 (BL1) 提升TS指标，图像相似度损失函数 (LPIPS) 优化小尺度结构特征
- 辅助的降水二分类分支，降低小雨误报概率

FuXi-Nowcast：阵风/降水预报

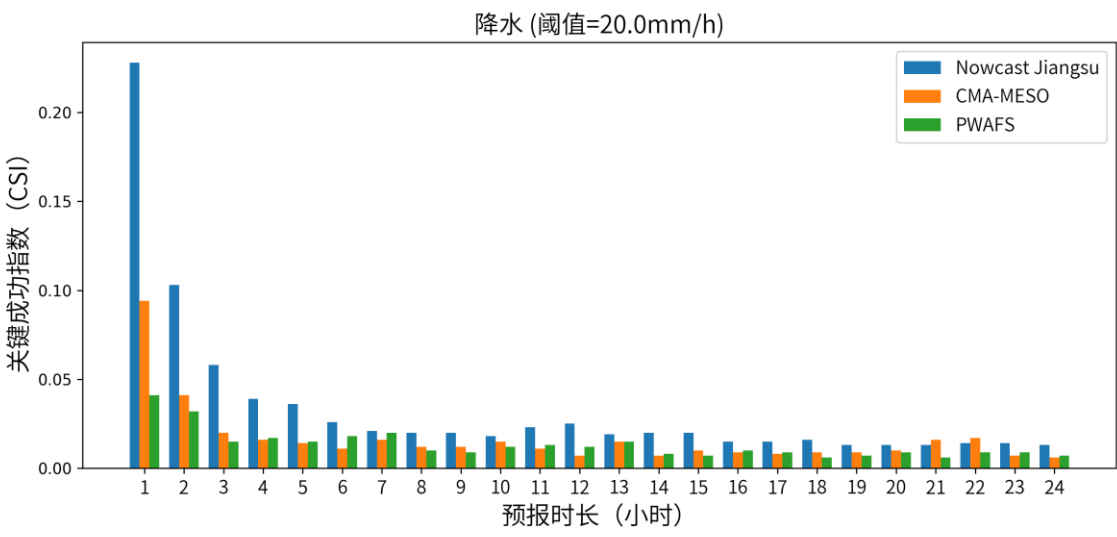
阵风（阈值=10.8m/s）预报

关键成功指数相对CMA- MESO和PWAFS模式分别提升106.43%和173.64%



降水（阈值=20.0mm/h）预报

关键成功指数相对CMA- MESO和PWAFS模式分别提升104.59%和153.80%



预报时间段2025年6月和7月，空间范围华东区域（29.01° N ~ 36.68°N，114.67° E ~ 122.34° E）

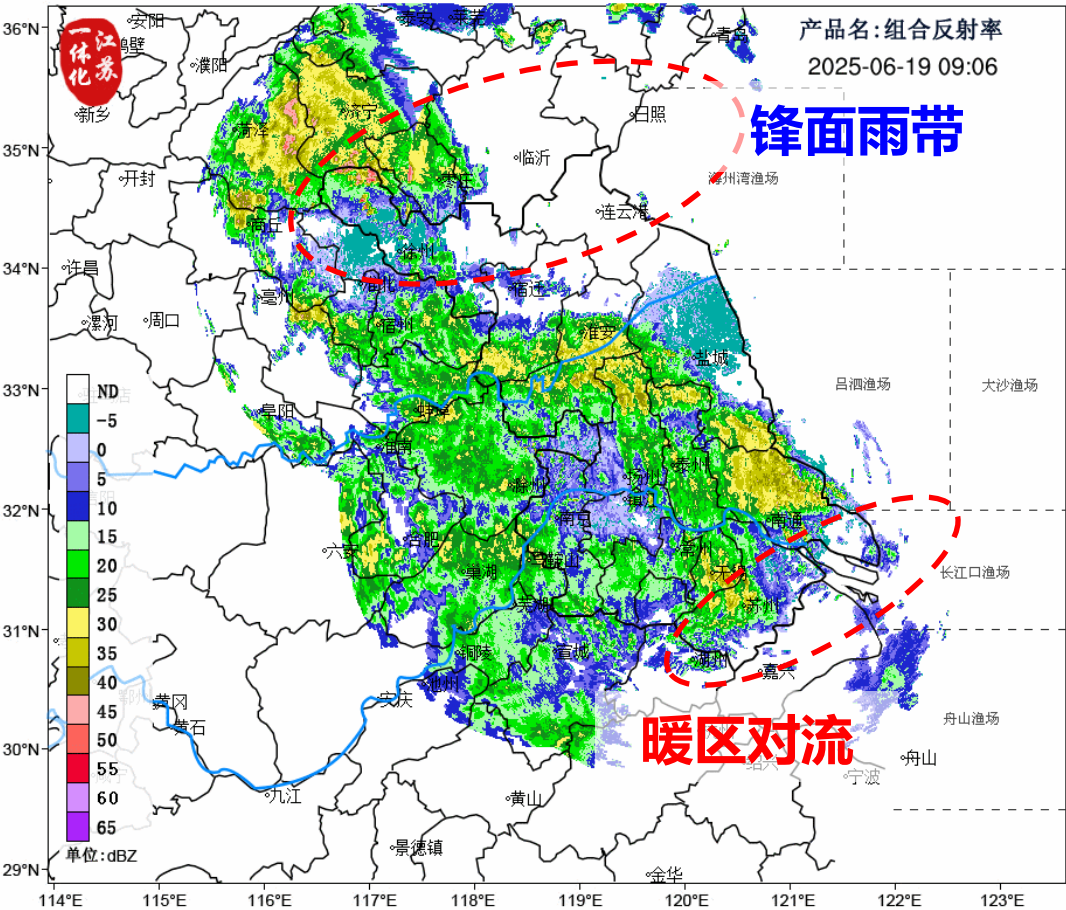
FuXi-Nowcast: 准确预测对流初生

6月19日梅雨锋南侧暖区局地对流

观测

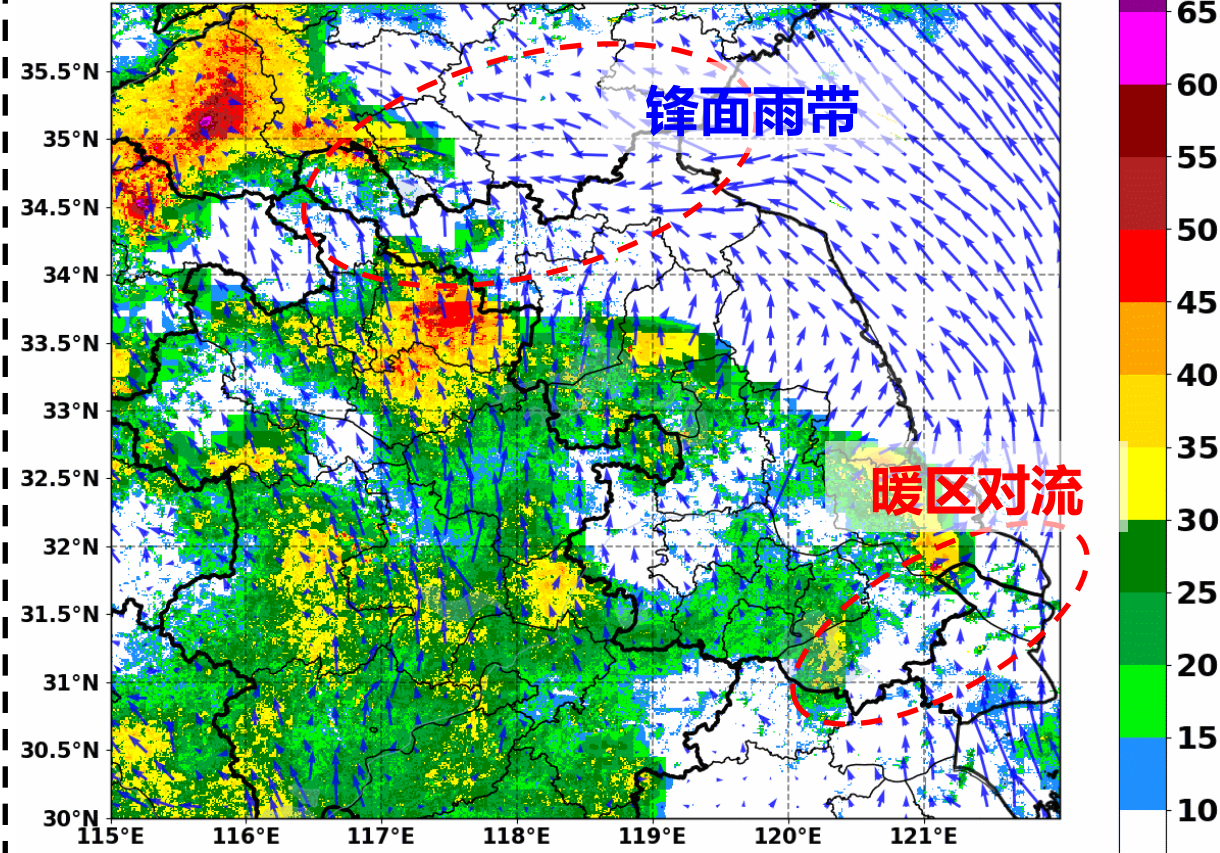
预测

9:00-19:00逐1h雷达回波实况

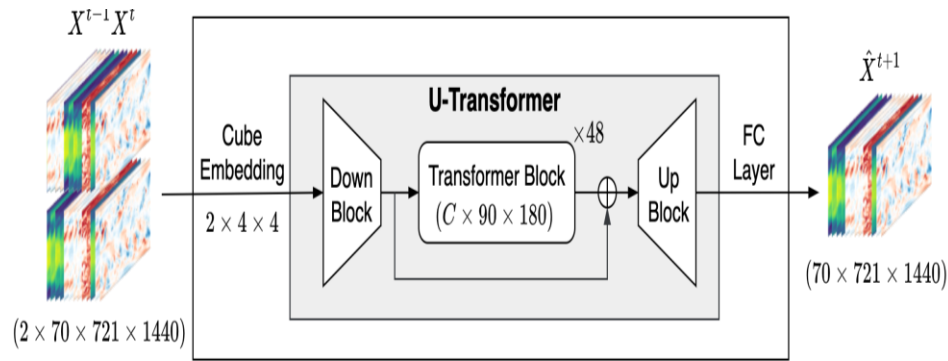


8:00(8:20)+1~+11h逐1h雷达回波预报

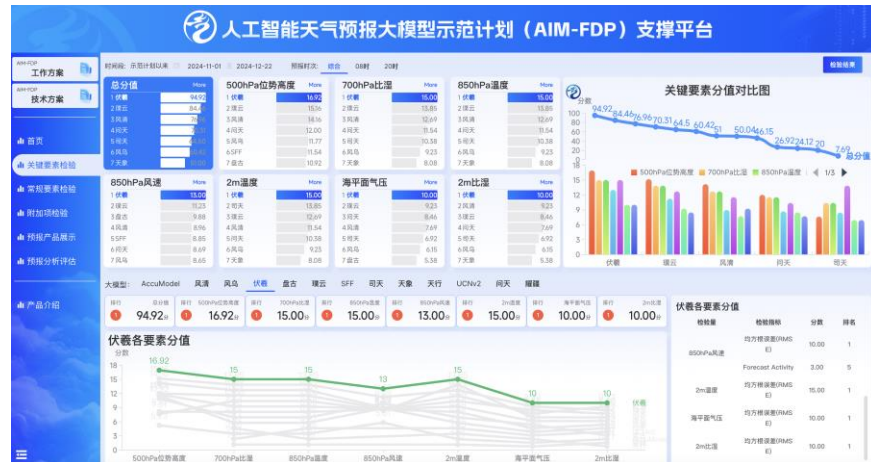
2025-06-19 08:00:00 + 1h (extra)



FuXi-Base: 业务评测

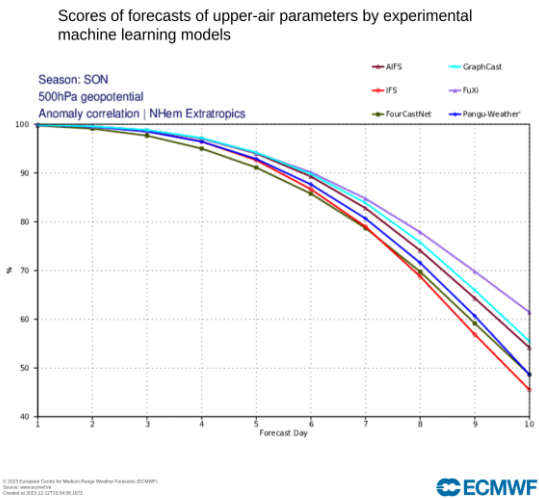


基于数据驱动的大模型，在
预报精度上**首次达到了**
ECMWF集合预报的集合平均
水平



在中国气象局组织的人工智
能天气预报大模型示范计划
中，目前为止**总分排名第一**

第三方权威机构评估

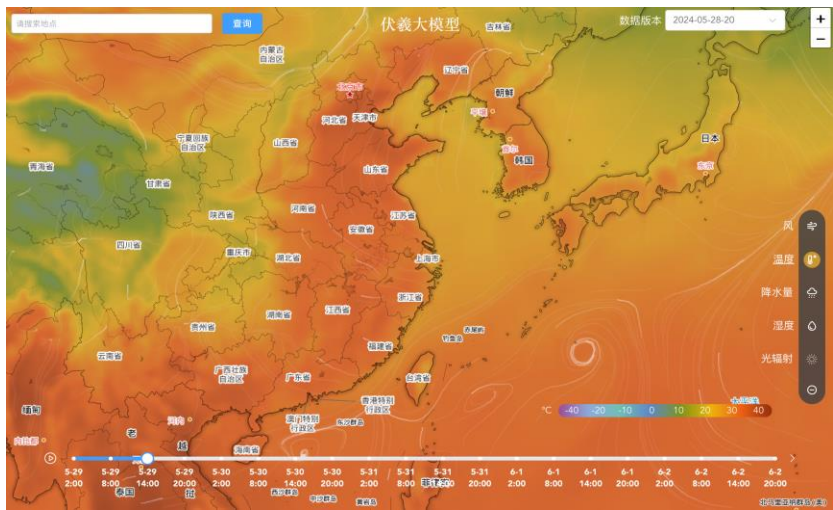


ECMWF大模型业务评测中整体精度**最优**

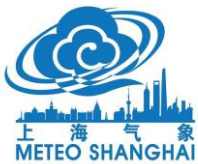
Model	Lead time (days)	Pressure				Temperature				Humidity				Wind Vector			
		500hPa	700hPa	850hPa	2m	500hPa	700hPa	850hPa	2m	500hPa	700hPa	850hPa	2m	500hPa	700hPa	850hPa	2m
IFS HRES	42	335	304	521	801	0.62	1.16	1.82	2.63	3.63	0.55	0.96	1.27	1.53	1.81	1.69	3.29
IFS ENS Mean	42	332	277	429	821	0.65	1.11	1.82	2.17	2.80	0.51	0.84	1.06	1.22	1.58	1.63	2.98
ERA5 Forecasts	43	342	316	534	811	0.59	1.19	1.87	2.68	3.66	0.51	0.91	1.33	1.59	1.86	1.63	3.40
Pangu-Weather (oper.)	48	336	309	510	785	0.65	0.98	1.74	2.54	3.55	0.51	0.86	1.17	1.45	1.74	1.71	3.03
GraphCast (oper.)	40	324	277	427	751	0.55	0.93	1.56	2.36	3.40	0.48	0.76	1.03	1.39	1.58	1.48	2.74
Keisler (2022)	40	319	345	544	787	0.60	1.22	1.87	2.63	3.55	0.55	0.94	1.29	1.41	1.65	2.28	3.51
Pangu-Weather	44	333	294	501	778	0.62	1.05	1.71	2.51	3.54	0.51	0.86	1.19	1.47	1.79	1.66	3.00
GraphCast	39	324	274	468	731	0.51	0.94	1.56	2.33	3.36	0.47	0.79	1.06	1.30	1.58	1.42	2.76
FuXi	40	325	276	429	835	0.54	0.97	1.59	2.34	3.93	0.48	0.82	1.10	1.31	1.51	1.47	2.80
Spherical-CuNi	45	341	336	546	815	0.71	1.18	1.86	2.64	3.62	0.58	0.89	1.17	1.41	1.72	2.01	3.36
NeuralGCM 0.7	37	313	267	489	751	0.54	0.97	1.58	2.38	3.42	0.48	0.82	1.12	1.40	1.71	1.49	2.81
NeuralGCM ENS Mean	43	326	285	424	808	0.65	1.02	1.53	2.15	2.75	0.54	0.82	1.02	1.30	1.53	1.76	2.88
Climate4	40	325	276	429	835	0.54	0.97	1.59	2.34	3.93	0.48	0.82	1.10	1.31	1.51	1.47	2.80

谷歌WeatherBench2评测中**综合最优**

FuXi-Base：业务化应用



伏羲大模型业务化预报系统



上海市气象局



中国气象局

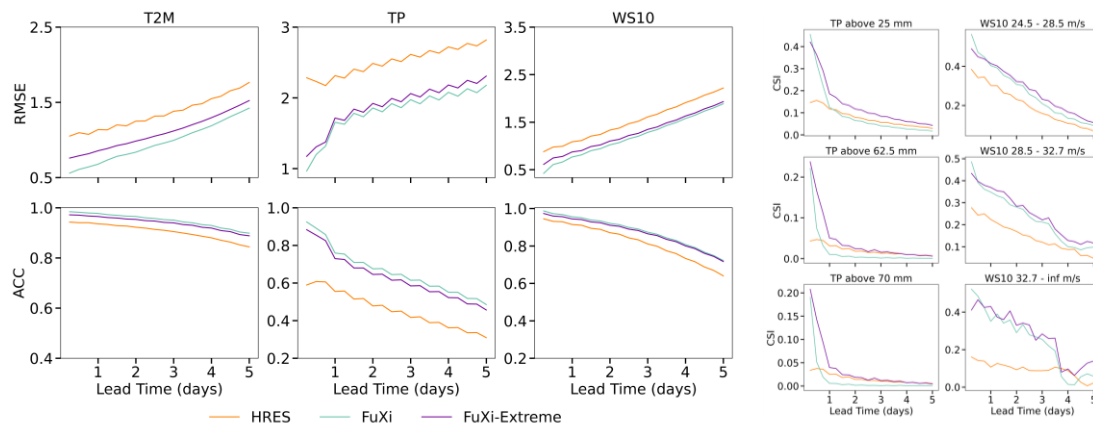
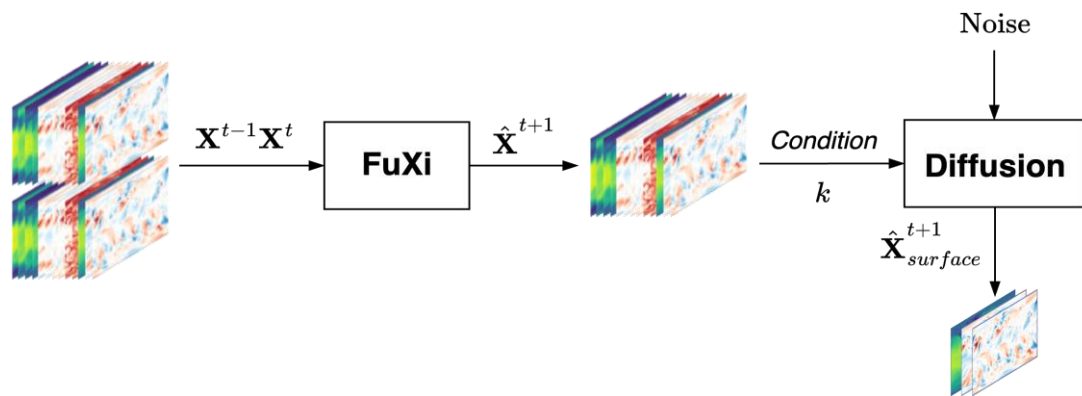


香港天文台



ECMWF

FuXi-Extreme: 针对极端天气优化的大模型



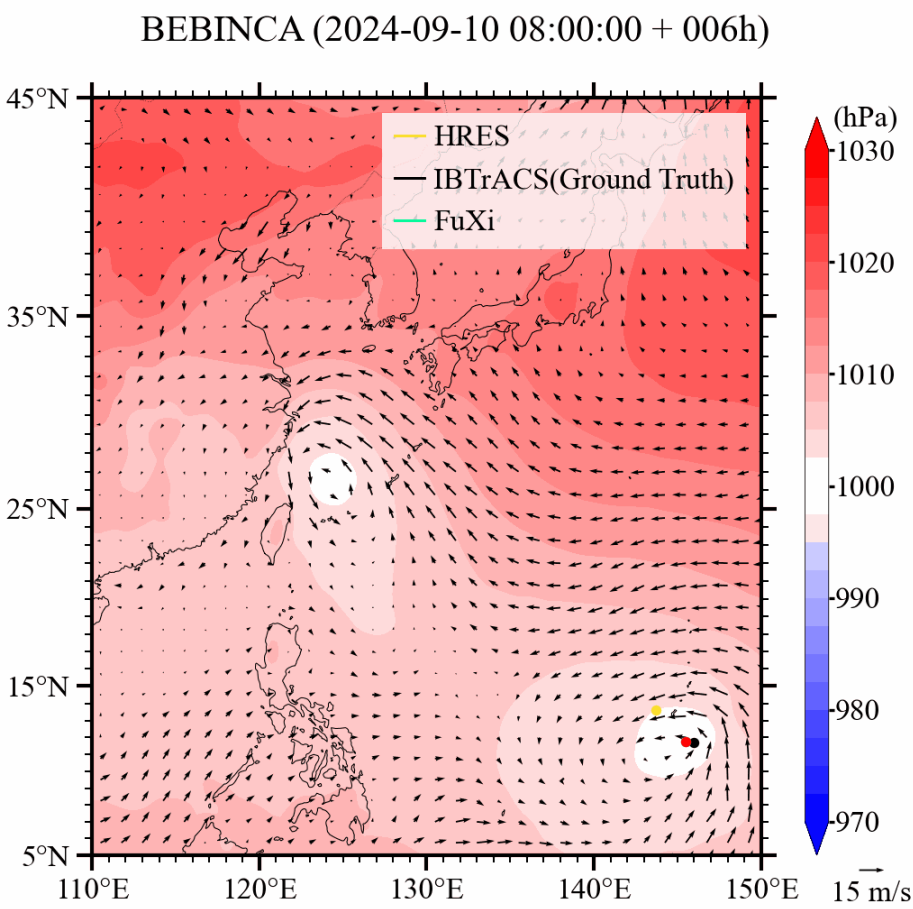
- ML模型预报结果趋于平滑，对极端天气预报能力不足

- 采用扩散模型，极端降水、极大风等CSI指标上超过HRES

FuXi-Extreme：台风“贝碧嘉”预测

台风“贝碧嘉”是1949年以来登陆上海的最强台风

2024年9月16日凌晨到上午“贝碧嘉”登陆上海



9月10日23点伏羲即预测“贝碧嘉”在上海登陆

台风“贝碧嘉”伏羲预测专报

◆ 预报结论

根据伏羲最新预测数据, 2024 年 13 号台风“贝碧嘉”预计在 9 月 16 日 08 时左右于上海浦东登陆, 对上海地区影响集中在 9 月 15 日-16 日两天, 其中 9 月 15 日下午开始出现降水, 晚上降水逐渐增强, 9 月 16 日影响较大, 全天降水量达到大到暴雨级别, 中午前雨势较大, 之后降水逐渐减弱, 台风期间风雨影响较大, 需注意防范。

◇ 附 1：“贝碧嘉”台风伏羲预测路径

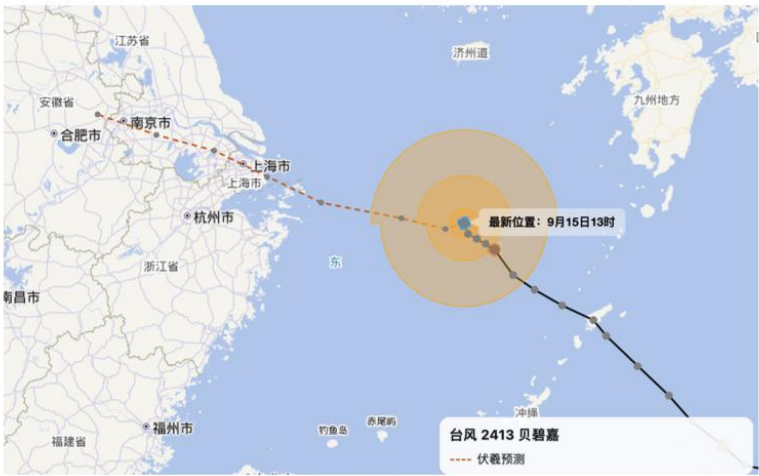


图 1 最新发布台风“贝碧嘉”伏羲预测路径

FuXi-Ens: 中期集合预报大模型

通过数据驱动的大模型学习最优扰动，直接优化CRPS。

- 集合平均：MSE和ACC指标除了Z500和T850的第1-2天预报全部优于ECWMF结果。
- 概率预报：98.1%的气象要素CRPS指标优于ECMWF集合预报
- 极端预报：96.3%气象要素的BS指标优于ECMWF集合预报

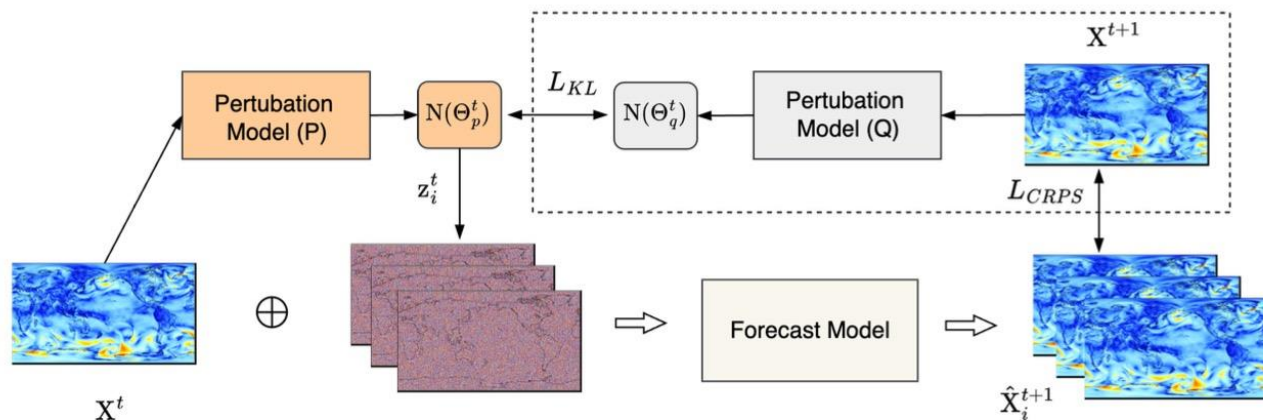
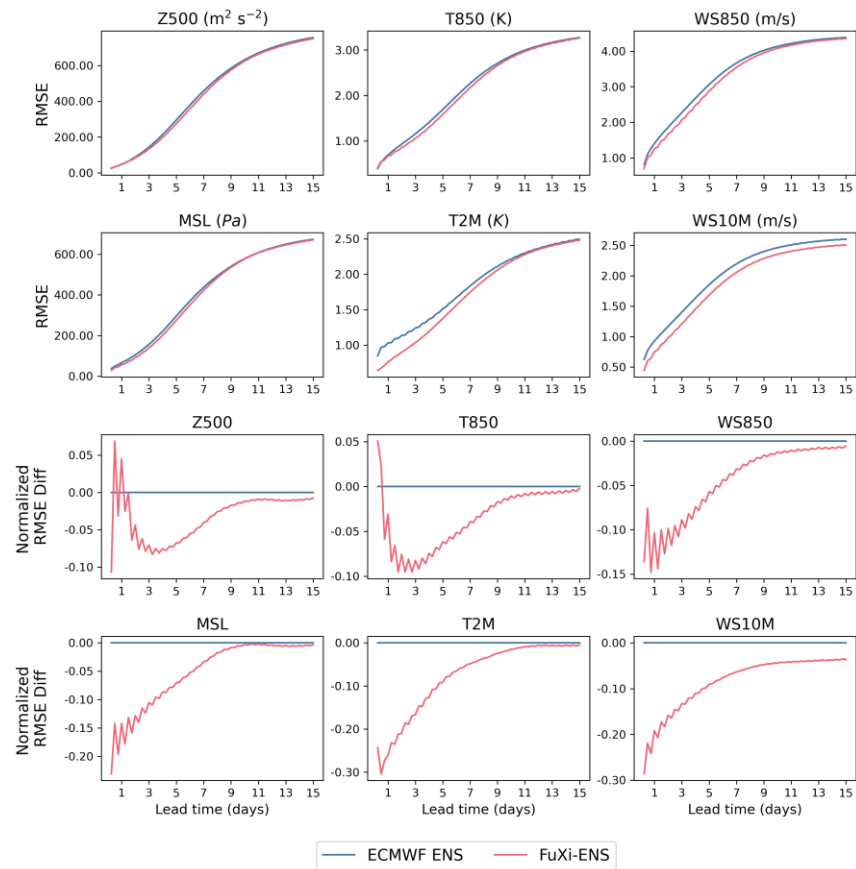
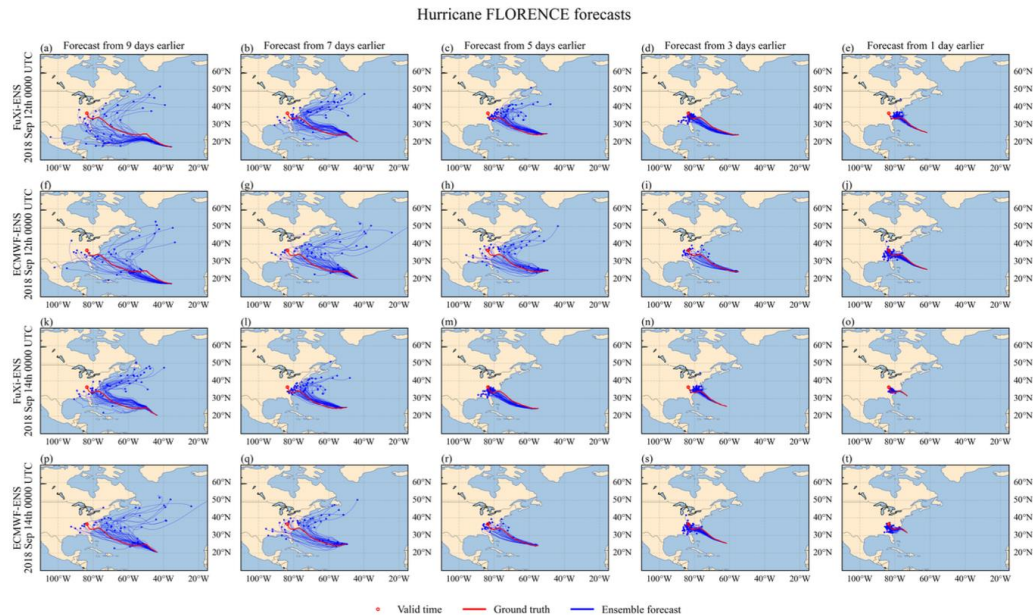


Fig. 6: Schematic diagram of the structures of the FuXi-ENS model.

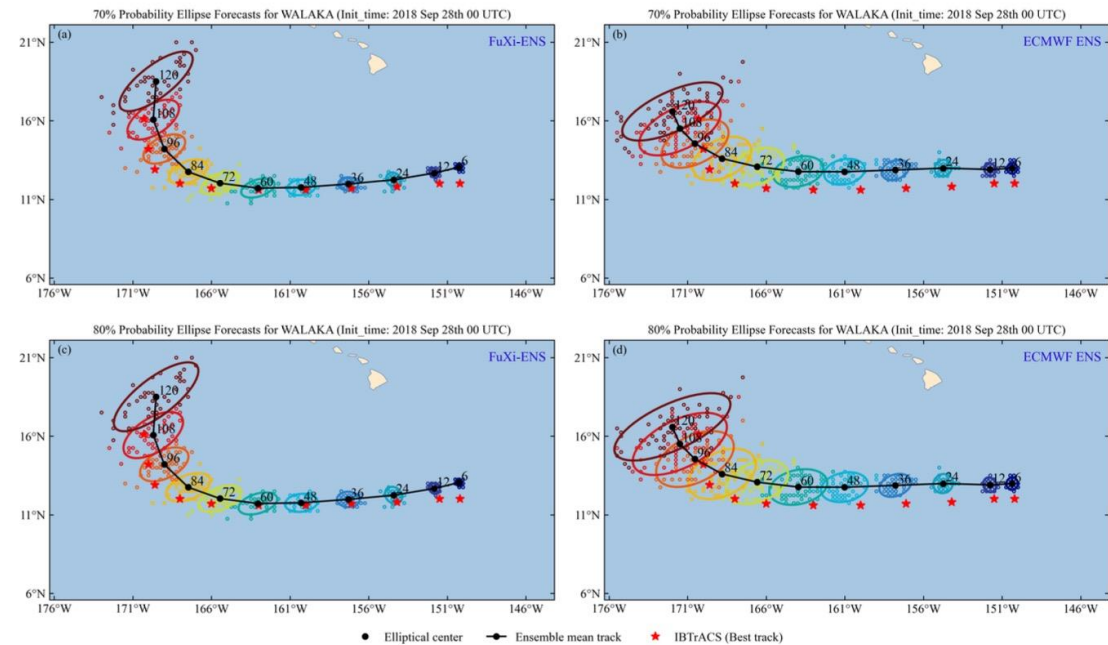


FuXi-Ens: 台风概率预报

相对 ECMWF, 伏羲中期集合预报模型对台风路径的概率预测精度更高。



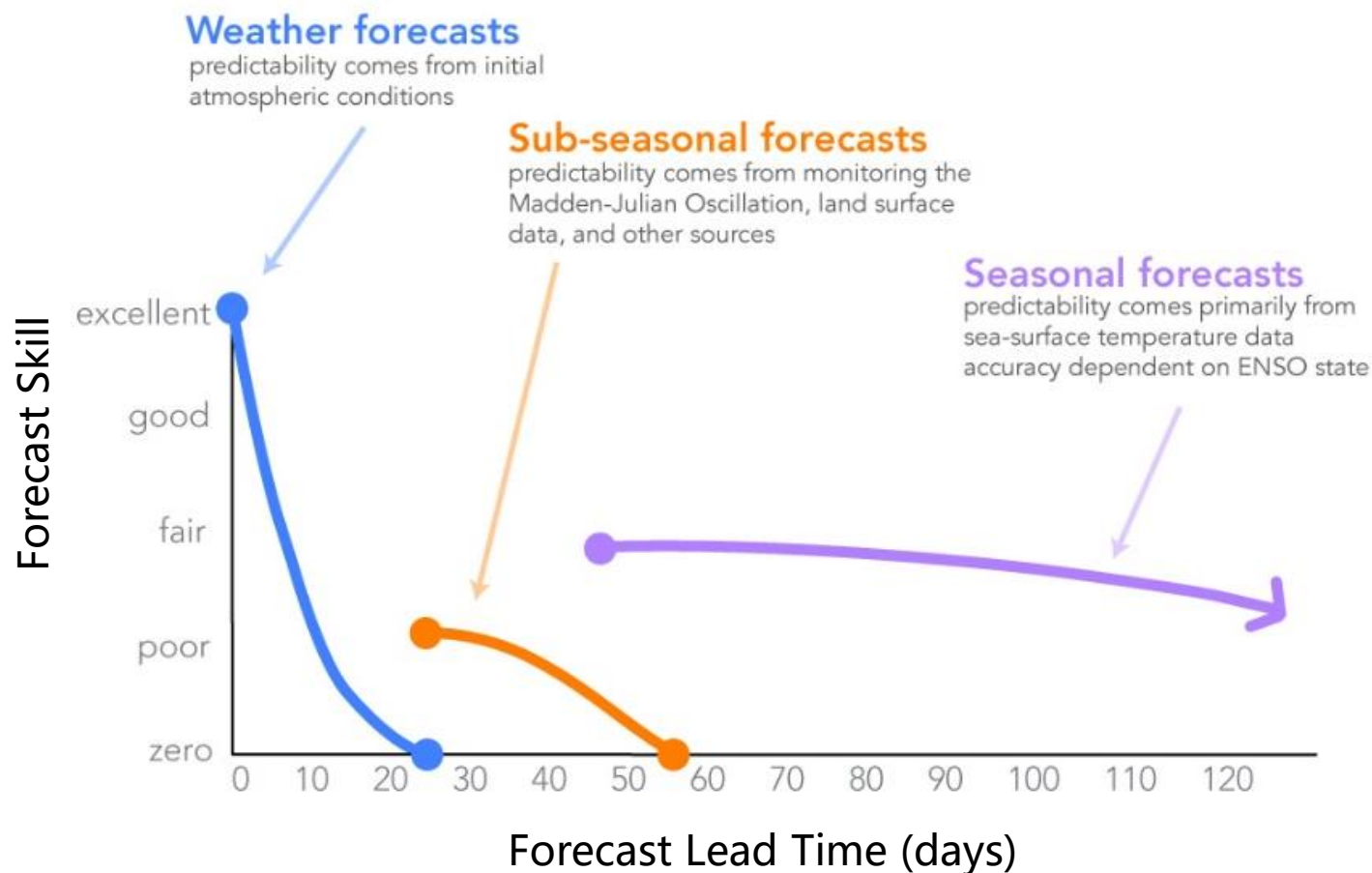
Supplementary Figure 10: Tropical cyclone (TC) track forecasts by FuXi-ENS (first and third rows) and ECMWF ensemble (second and fourth rows) for Hurricane Florence initialized at 00 UTC on various dates: 9 days (first column), 7 days (second column), 5 days (third column), 3 days (fourth column), and 1 day (fifth column). Blue and red lines are the predicted tracks by different members from FuXi-ENS or ECMWF ensemble and the International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) tracks, respectively. Blue and red dots represent the predicted and observed TC center at valid time.



Supplementary Figure 12: Example diagrams of the 70% and 80% probability ellipse for Hurricane Walaka (2018). The black line is the ensemble mean track, the stars are the observed best track positions, colored dots are the track positions predicted by each ensemble member, and the black dots are the center of each probability ellipse.

次季节预报：“可预报性沙漠”

与中短期天气预报和长期气候预报相比，次季节预报面临更大的挑战 and 不确定性。

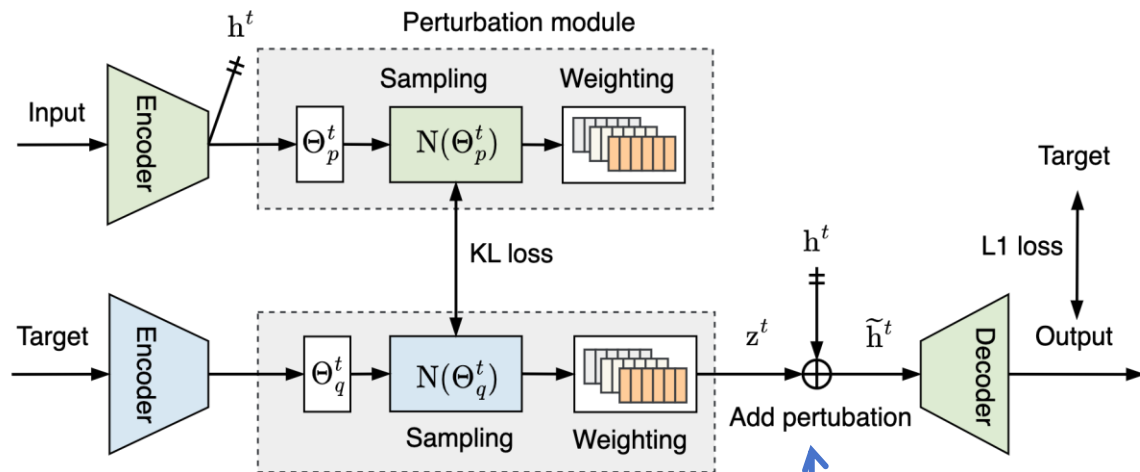


* Christopher et al., 2017

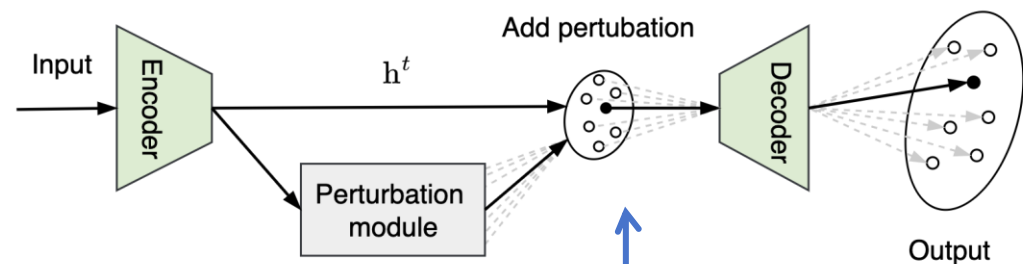
FuXi-S2S：首个人工智能次季节预报大模型

创新性引入**流依赖扰动**构建集合预报，首次可以预报未来60天，时间分辨率6小时，空间分辨率0.25°。
1块A100 GPU在10秒内完成1次集合预报。

伏羲次季节气象大模型训练系统

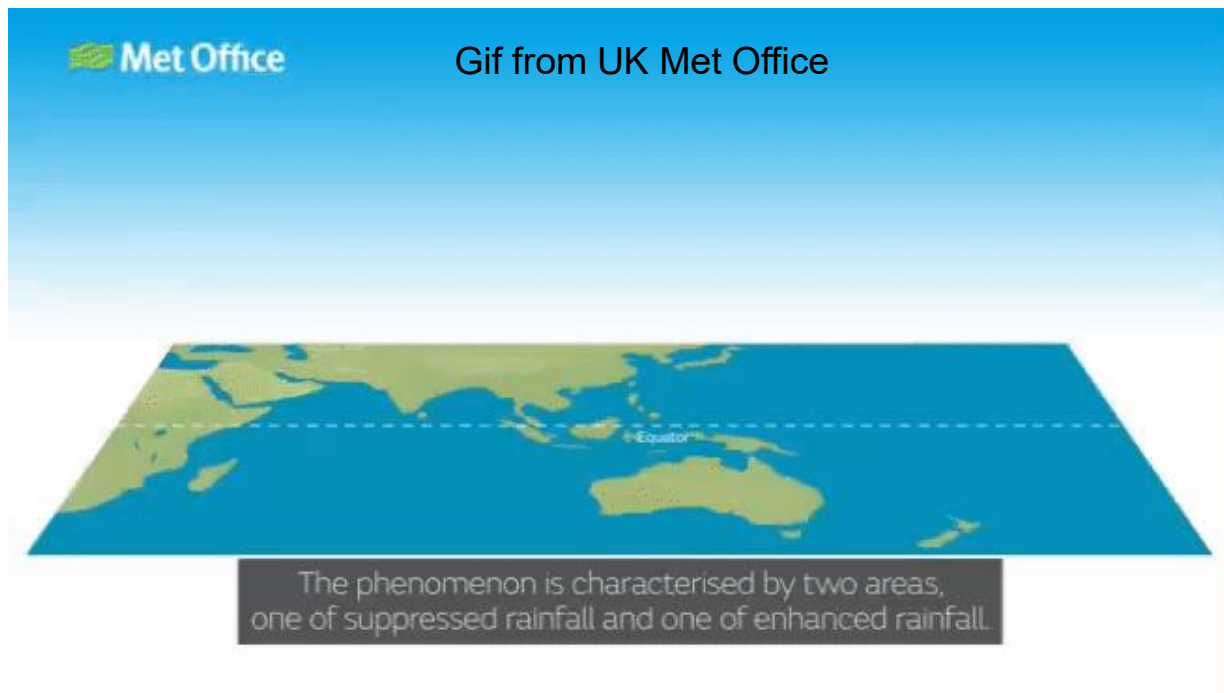


伏羲次季节气象大模型推理系统



隐空间
添加扰动

次季节可预报性的关键：MJO



什么是MJO?

MJO是一种大气现象，其特征是在赤道附近云层和降雨的准周期性向东传播，通常每30到90天重现一次。

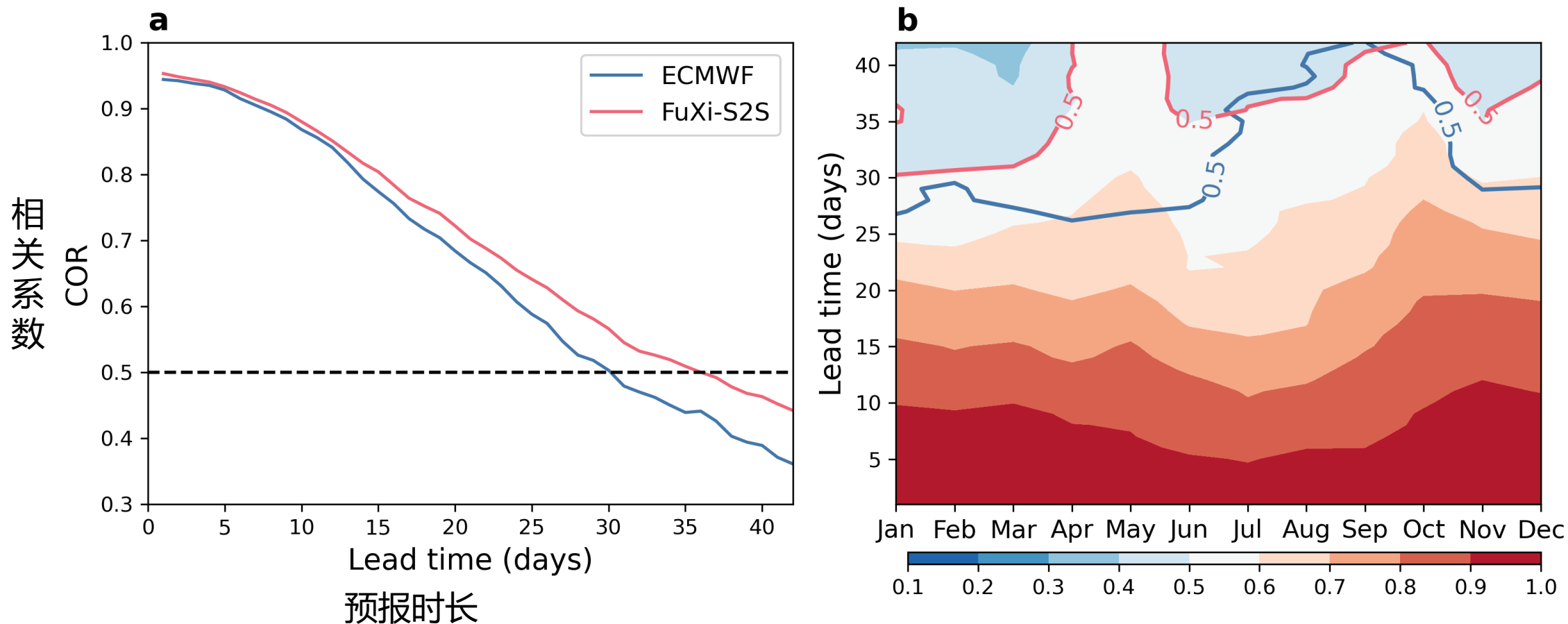


为什么MJO预报重要?

- 次季节时间尺度可预报性的主要来源
- 对全球天气和气候有显著影响
- 准确预测MJO对于农业规划、灾害预警以及长期气候研究非常重要

FuXi-S2S：显著改进MJO预测

MJO有效预测时长从30天延长到了36天，超过权威的ECMWF次季节模式。



FuXi-S2S：国家局官方大模型之一

联合国国家气候中心，发布人工智能全球次季节-季节预测大模型系统“风顺”。

中国气象局

China Meteorological Administration

首页

机构设置

新闻资讯

政务公开

政务服务

交流互动

气象服务

当前位置：首页 > 探索实践

气候演变预测添新智 聚焦人工智能全球次季节—季节预测大模型“风顺”

发布时间：2024年07月03日

来源：中国气象报社

【字体：大 中 小】

打印本页

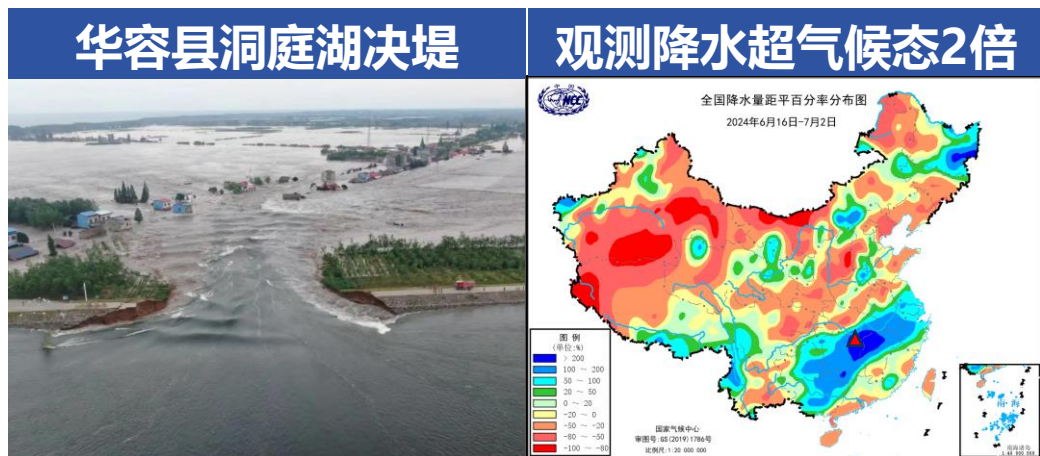
分享：

高温热浪、干旱持续、暴雨频发……在世界各地，全球变暖的当下，极端天气气候事件频发，亟待全人类共同应对，特别亟需在前端开展更长预见期的精准预报。6月18日，中国气象局发布人工智能全球次季节—季节预测大模型系统“风顺”（以下简称“风顺”大模型）。

由国家气候中心联合复旦大学和上海科学智能研究院团队研发的“风顺”大模型是目前国内外首个基于人工智能方法实现次季节—季节全球气候异常预测的大模型系统，其创新性地引入了海气相互作用和基于流依赖的集合扰动智能生成技术，能够实现面向未来60天全球基本要素和环流场的预测。

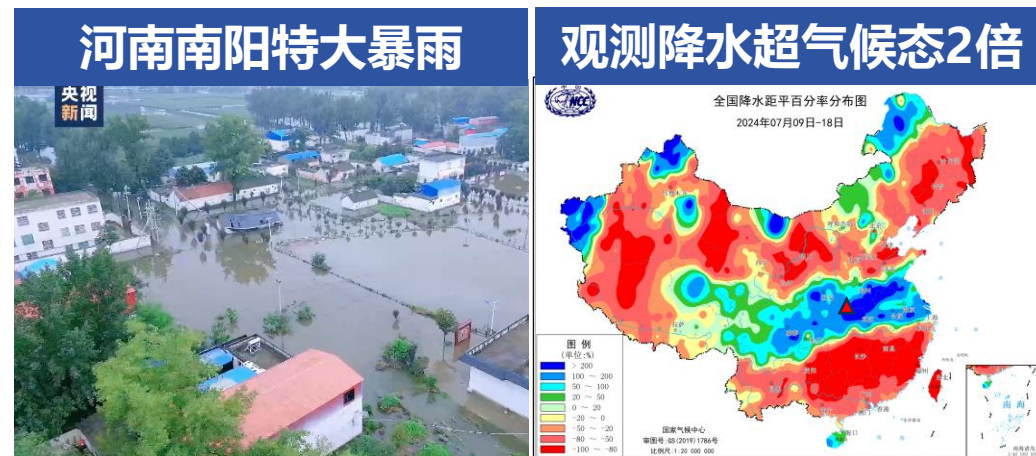
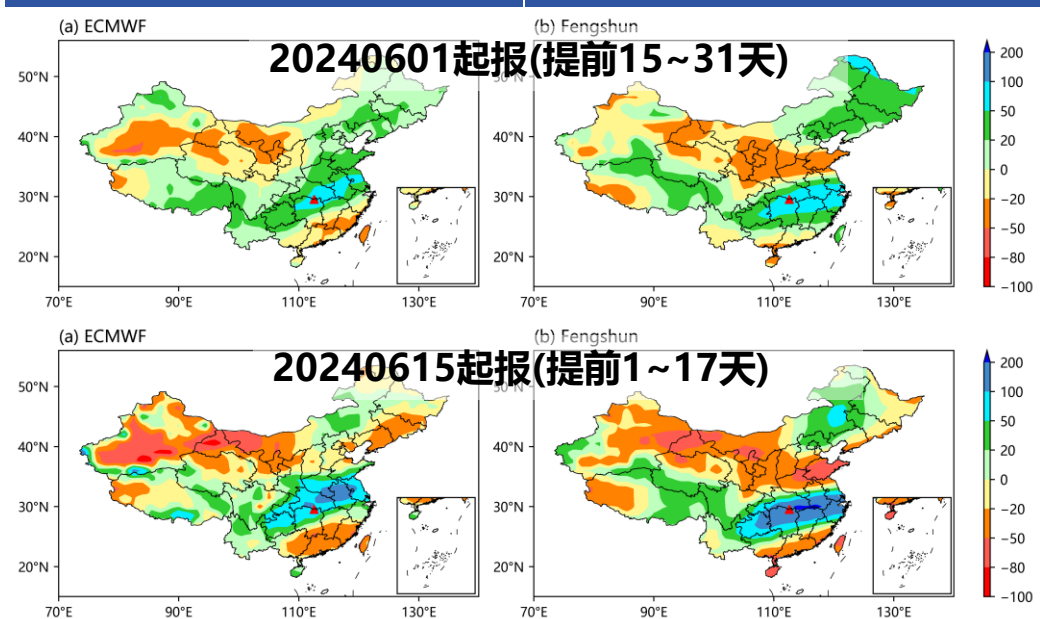
入选2024中国十大气象科技进展与气候研究重大进展

FuXi-S2S：汛期实战检验优于ECMWF S2S结果



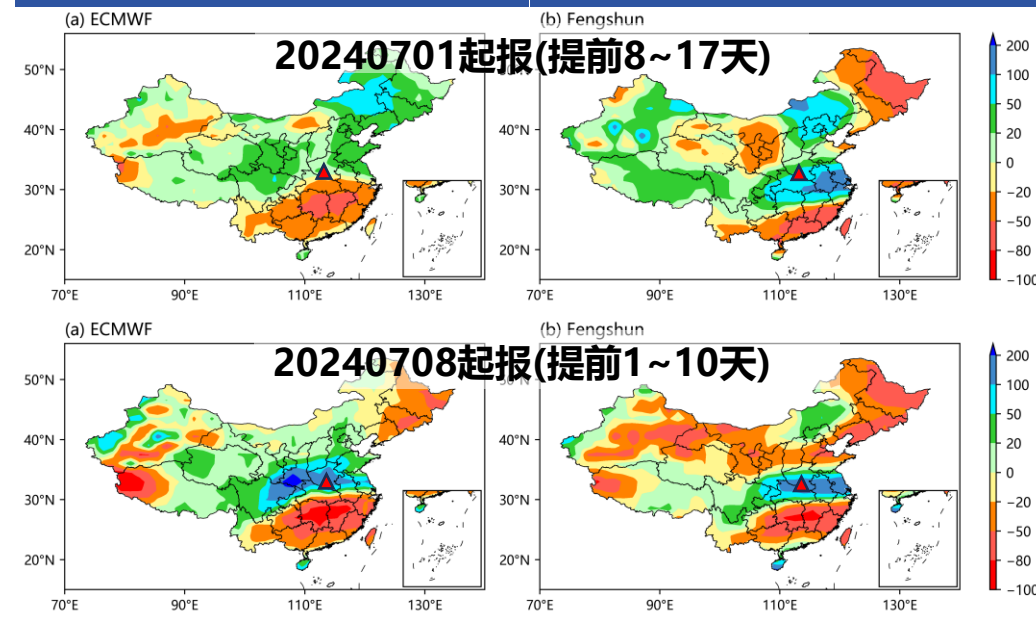
EC实时预测偏北偏弱

FuXi-S2S 实时预测



EC实时预测偏北偏弱

FuXi-S2S 实时预测



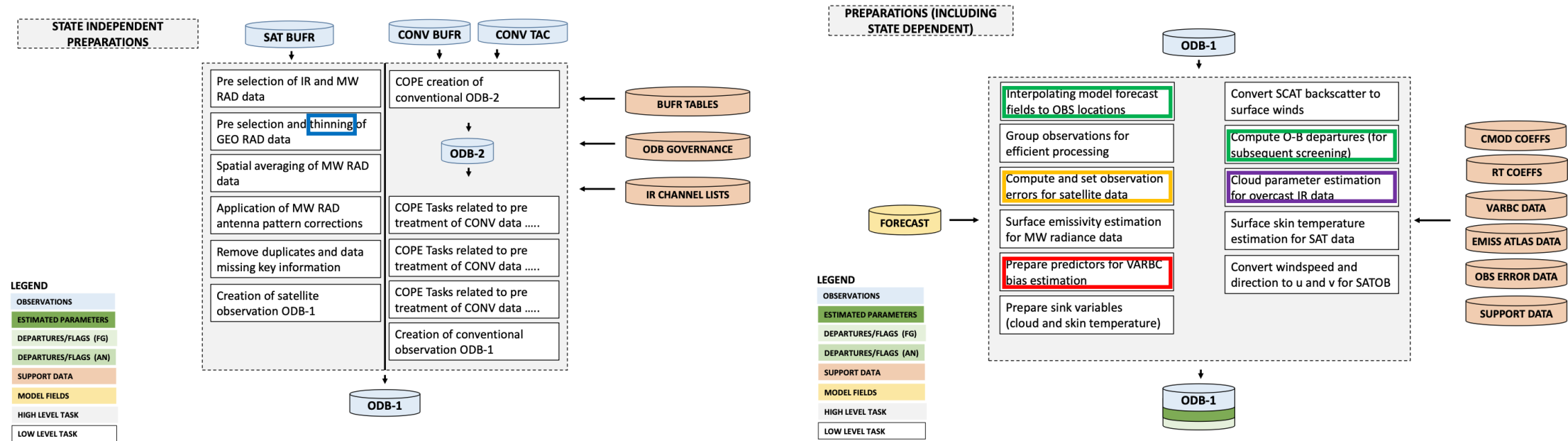
端到端预报系统

02

端到端优化气象大模型

- 资料预处理流程

ECMWF IFS DOCUMENTATION – Cy48r1

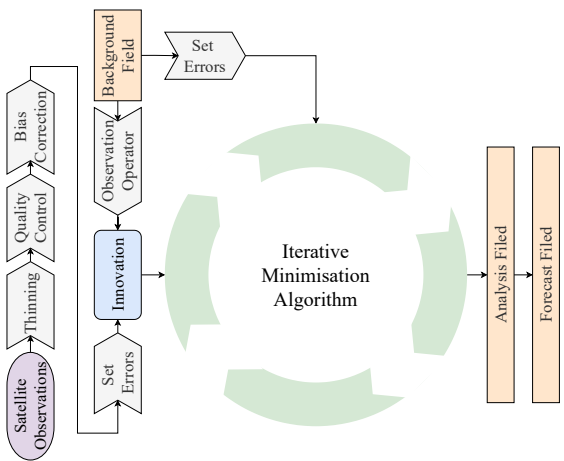


稀疏化 → 估计观测误差 → 观测算子 (模式空间转到观测空间) → 偏差订正 → 云检测

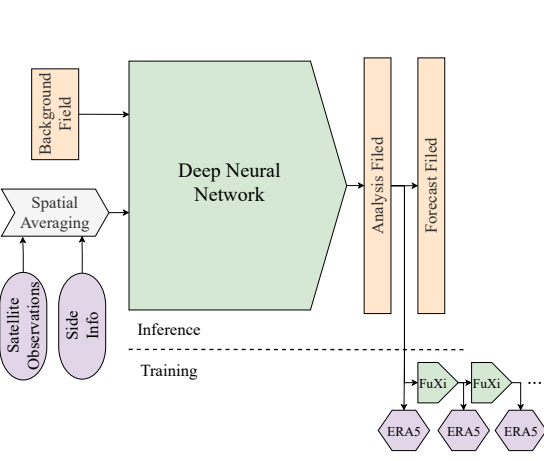
观测资料处理流程复杂；大量有用观测被丢弃

FuXi-DA：同化框架和数据特征

Variational DA



FuXi-DA



传统同化观测资料处理流程复杂，大量有用观测被丢弃

超级观测处理，保留所有观测信息

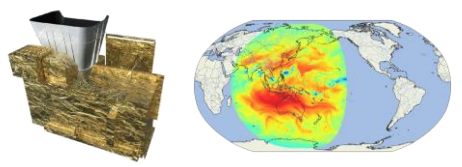
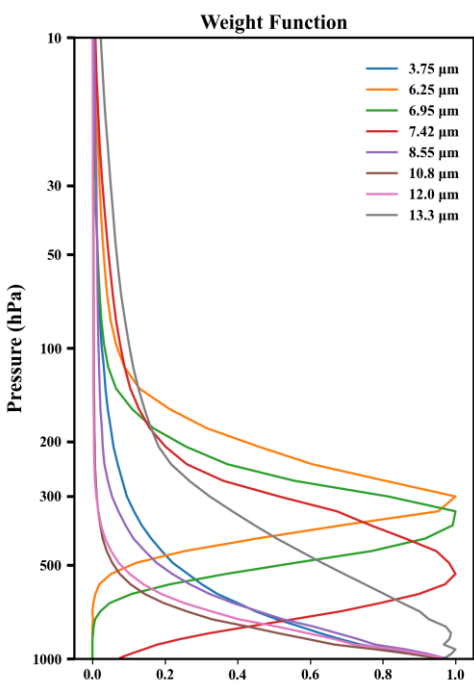
不再执行传统“稀疏化”操作，最大化保留卫星观测信息

直接同化卫星观测，无需传统观测算子

通过独立编码背景场和卫星观测在特征空间完成信息融合

使用深度学习方法直接同化卫星观测

	波段范围	中心波长 (μm)	空间分辨率 (km)	用途
可见光与近红外	0.45~0.49	0.47	1	气溶胶
	0.55~0.75	0.65	0.5	雾、云
	0.75~0.90	0.83	1	植被
短波红外	1.371~1.386	1.37	2	卷云
	1.58~1.64	1.61	2	云、雪
	2.1~2.35	2.22	2	卷云、气溶胶
中波红外	3.5~4.0	3.75(High)	2	火点
	3.5~4.0	3.75(Low)	4	地表
水汽	5.8~6.7	6.25	4	水汽和云导风
	6.75~7.15	6.95	4	水汽和云导风
	7.24~7.60	7.42	4	水汽和云导风
	8.3~8.8	8.55	4	云导风
长波红外	10.3~11.3	10.8	4	海表温度
	11.5~12.5	12.0	4	海表温度
	13.0~13.6	13.3	4	云顶高度



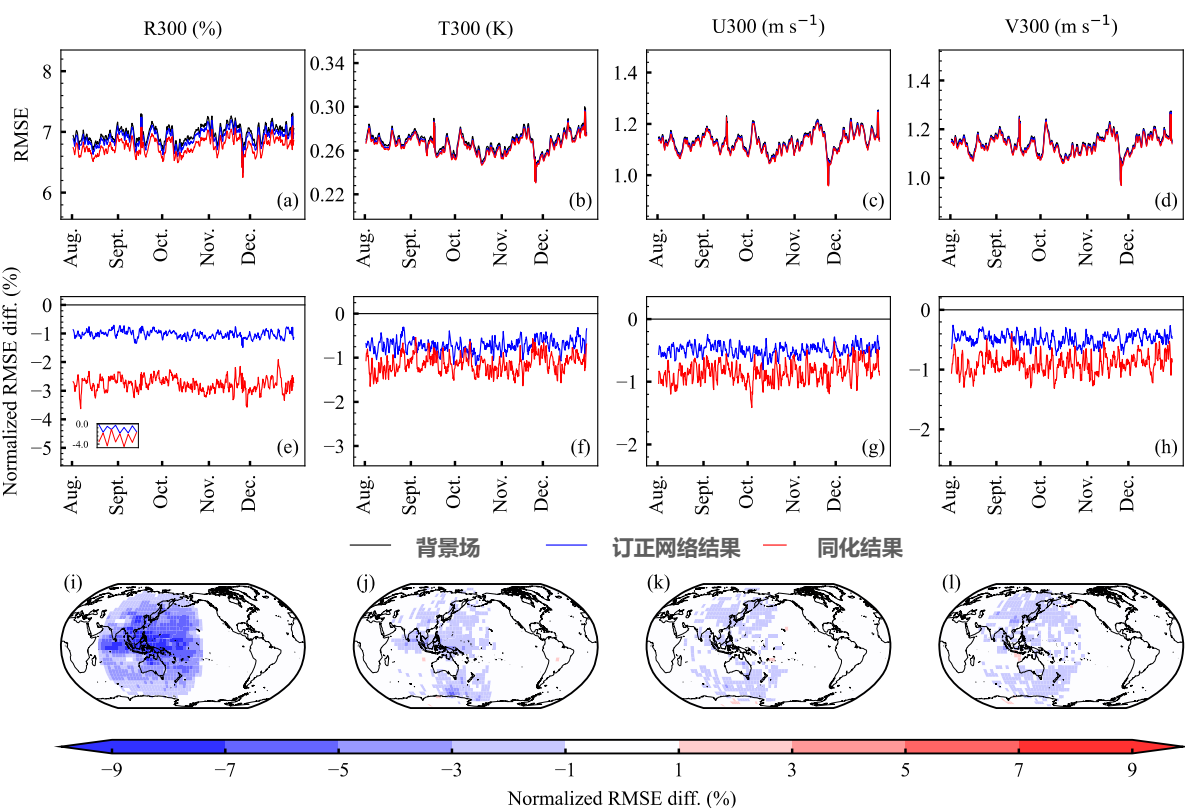
同化时间窗[-1H,+1H]

Xu X, Sun X, Han W, et al. Fuxi-da: A generalized deep learning data assimilation framework for assimilating satellite observations[J]. npj Climate and Atmospheric Science, 2025, 8(1): 156.

FuXi-DA: 检验结果

分析场

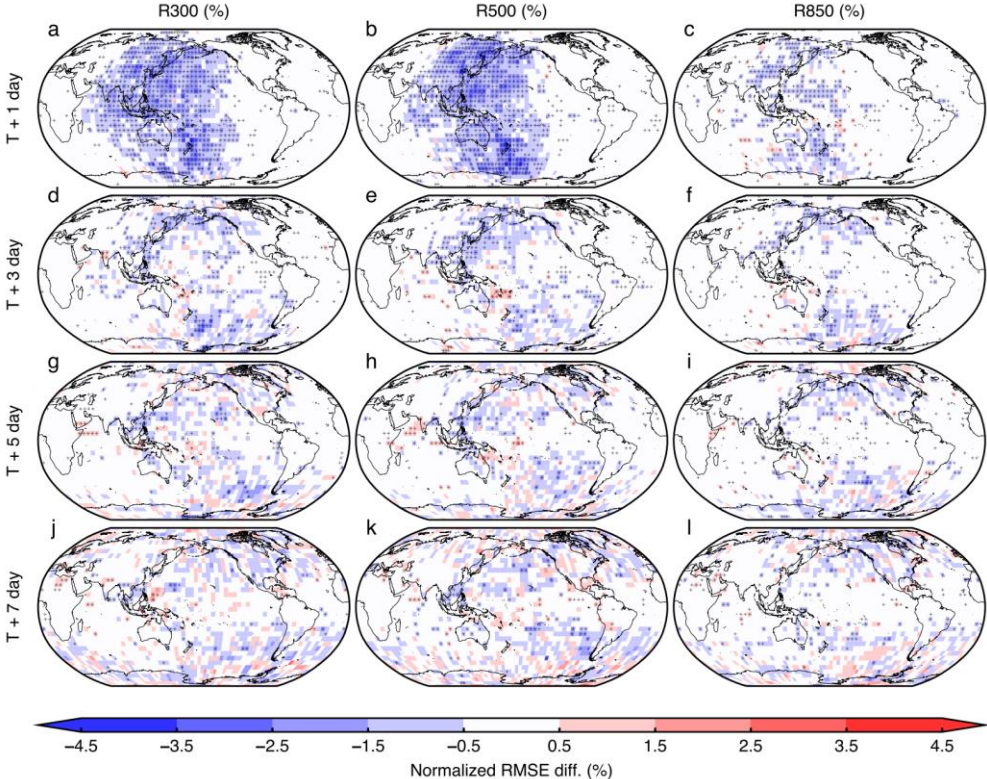
同化AGRI后，分析误差减小，时序改善稳定，区域改善合理



XXXX

预报场

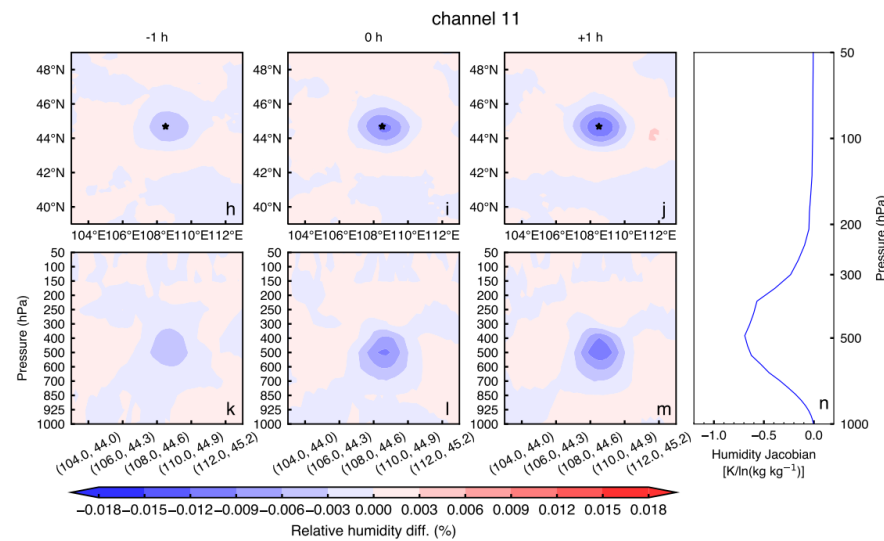
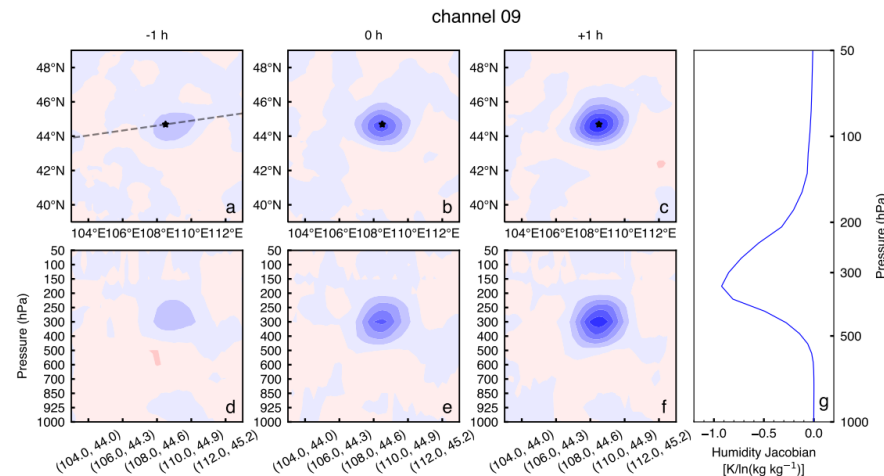
同化AGRI资料后，预报误差减小



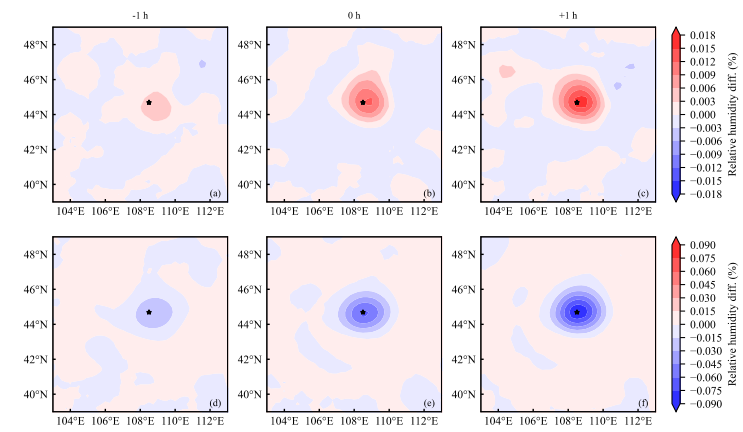
单次同化后进行10天预报，预报场的RMSE减小率

FuXi-DA: 可解释性分析

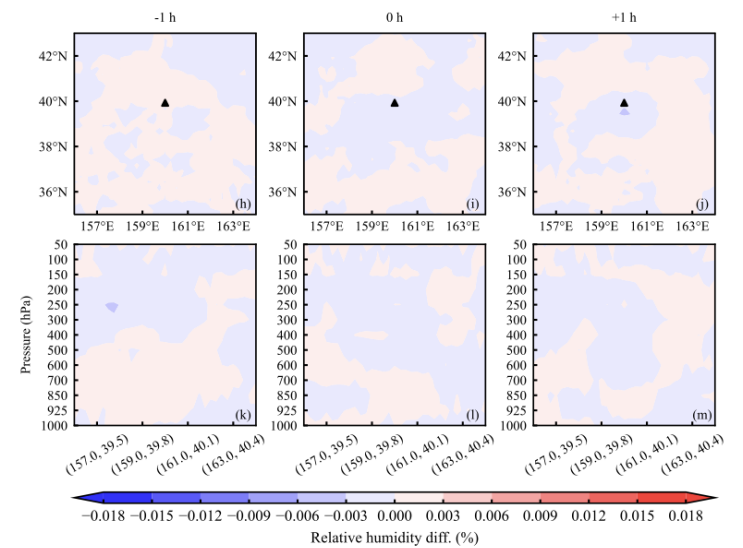
分析增量满足物理先验知识，且具备云区观测识别能力。



晴空点添加1K扰动的分析增量
(上: 通道9; 下: 通道11)



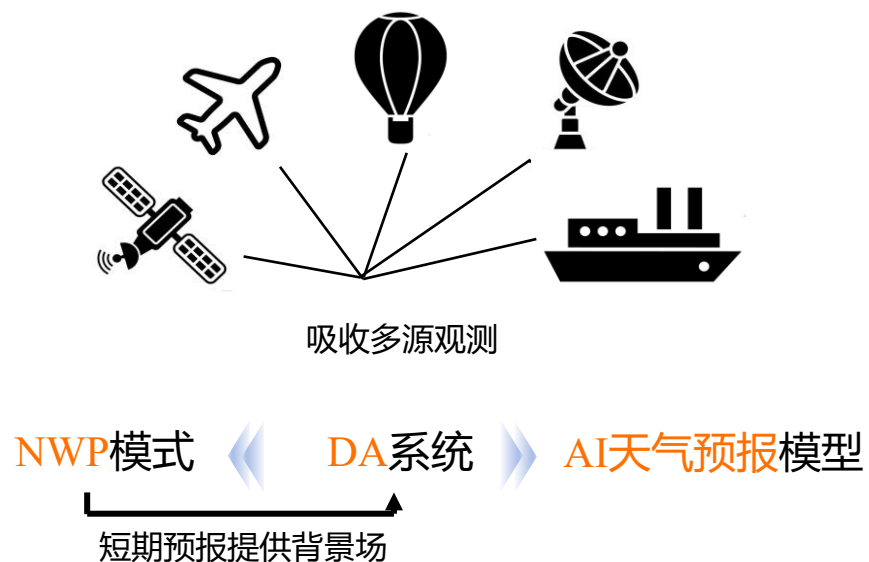
晴空点添加-1K和5K扰动的分析增量 (通道9)



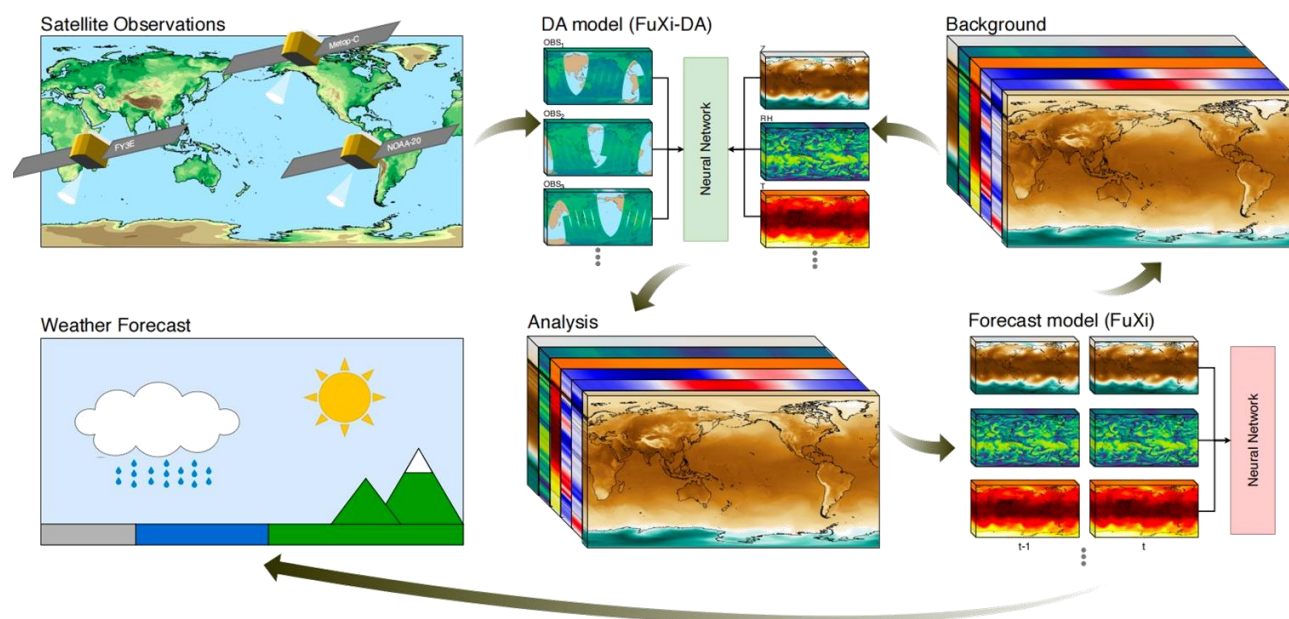
云区点添加1K扰动的分析增量 (通道11)

FuXi-Weather: 端到端优化气象大模型

首个预报精度超过ECMWF的端到端气象大模型，完全摆脱对数值模式依赖



传统方法：只有约8%的观测数据被使用，
万核HPC集群，运行近5个小时



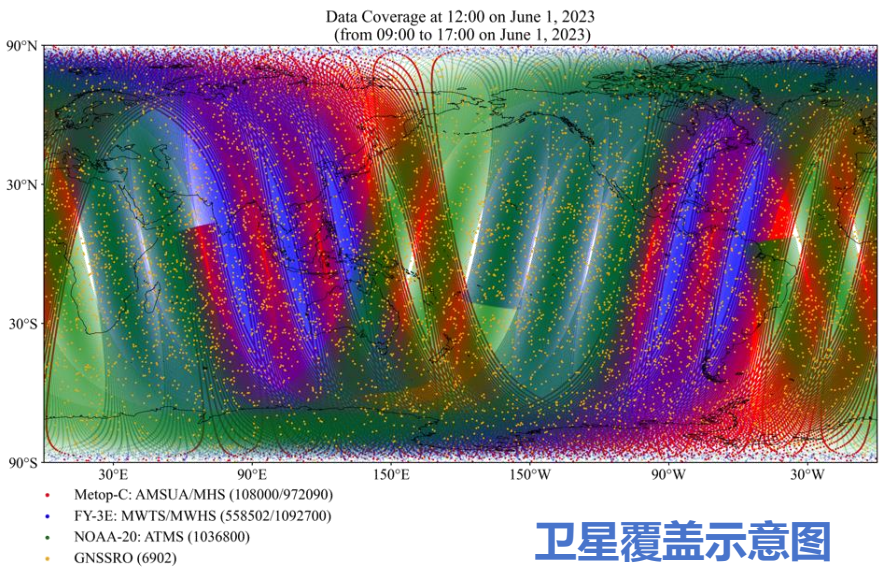
直接同化 L1 级，实现数据的快速循环同化，同化与预测协同优化

FuXi-Weather：系统架构和特点

- 采用基于**多模态**融合技术的同化框架
- 使用**3个极轨卫星**和**20+掩星**数据生成高质量、稳定的分析场

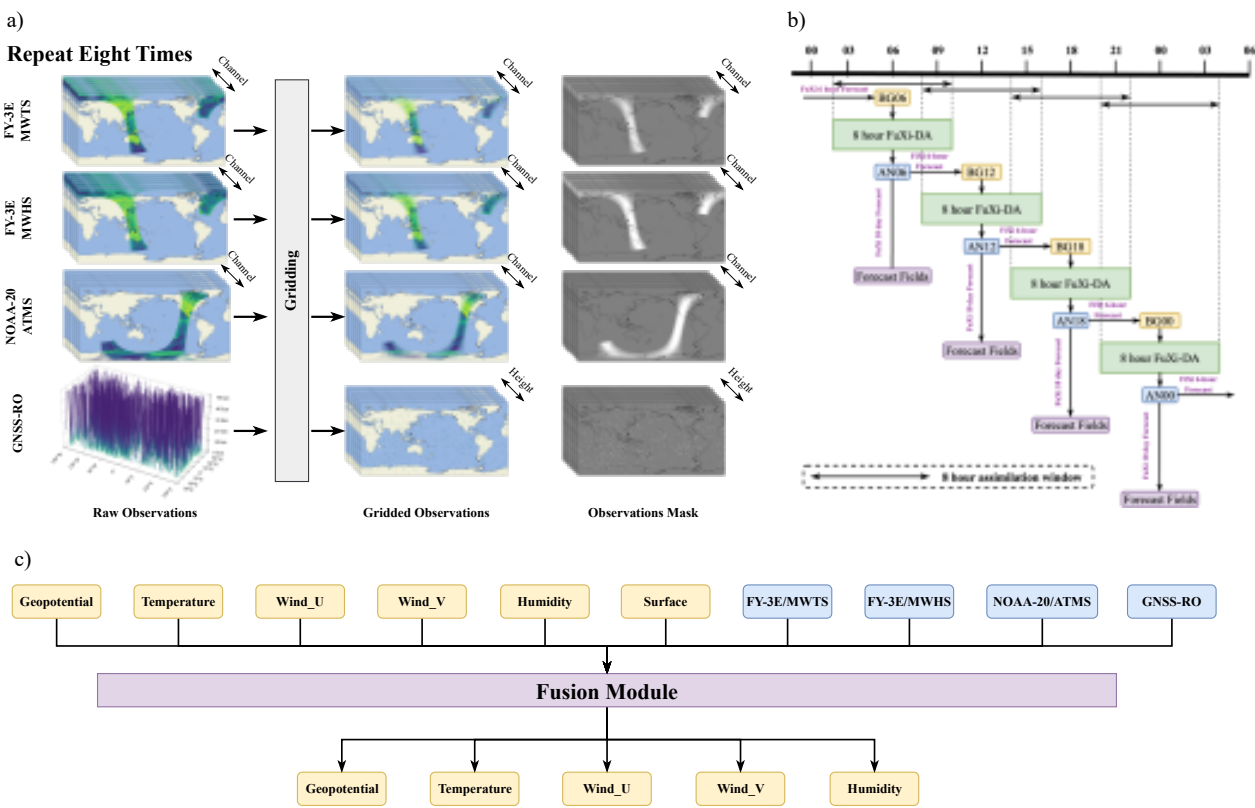
Table 2: A summary of polar-orbiting satellite information.

Satellite	Orbit	Instruments	Channels	Preprocessed Data Dimensions
FY-3E	Polar-orbiting (early morning)	MWTS-III	17	$8 \times 20 \times 720 \times 1440$
		MWHS-II	15	$8 \times 18 \times 720 \times 1440$
Metop-C	Polar-orbiting (morning)	AMSU-A	15	$8 \times 18 \times 720 \times 1440$
		MHS	5	$8 \times 8 \times 720 \times 1440$
NOAA-20	Polar-orbiting (afternoon)	ATMS	22	$8 \times 25 \times 720 \times 1440$
GNSS-RO	-	-	-	$8 \times 32 \times 720 \times 1440$



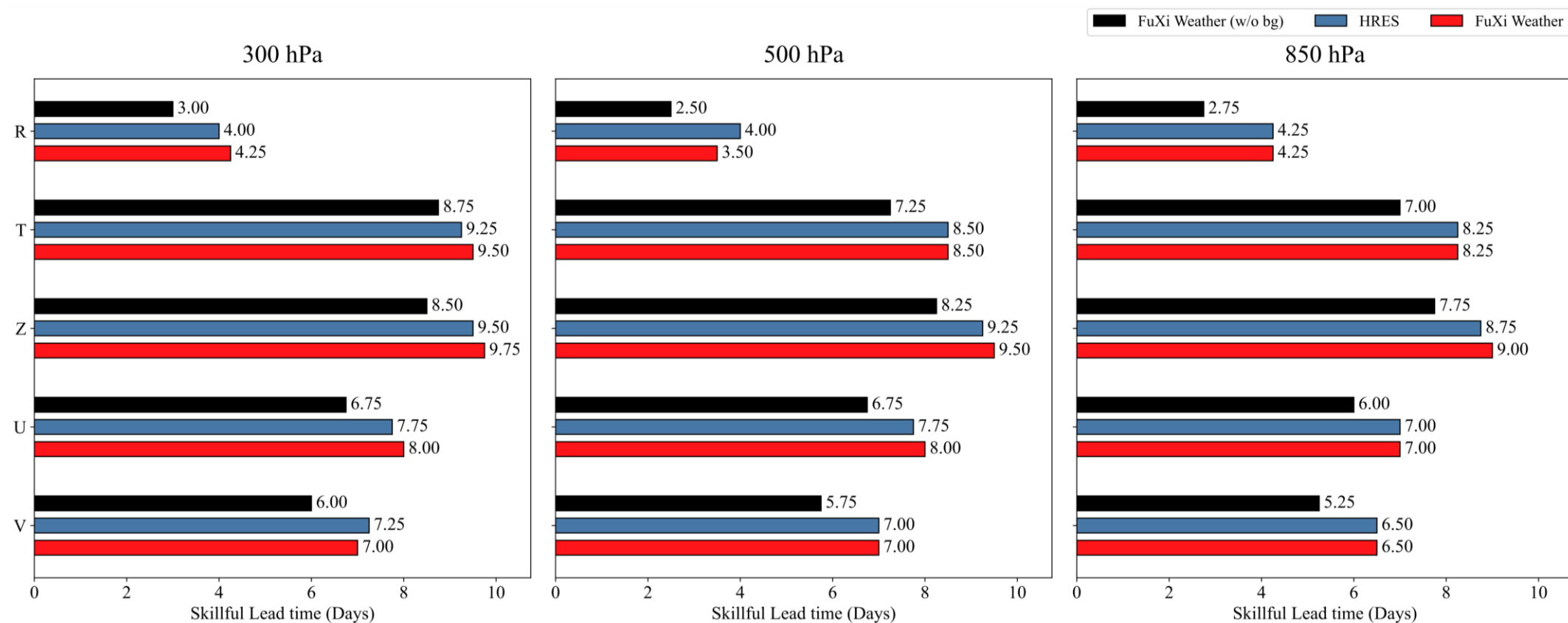
卫星覆盖示意图

- 采用在线学习策略，动态更新天气预报系统
- **端到端联合优化**同化和预报



FuXi-Weather: 评测结果

- Z500有效预报天数为9.5天，超过同期EC的9.25天
- 以300hPa、500hPa、850hPa为例，87%气象要素的可预报天数达到或超过同期EC结果

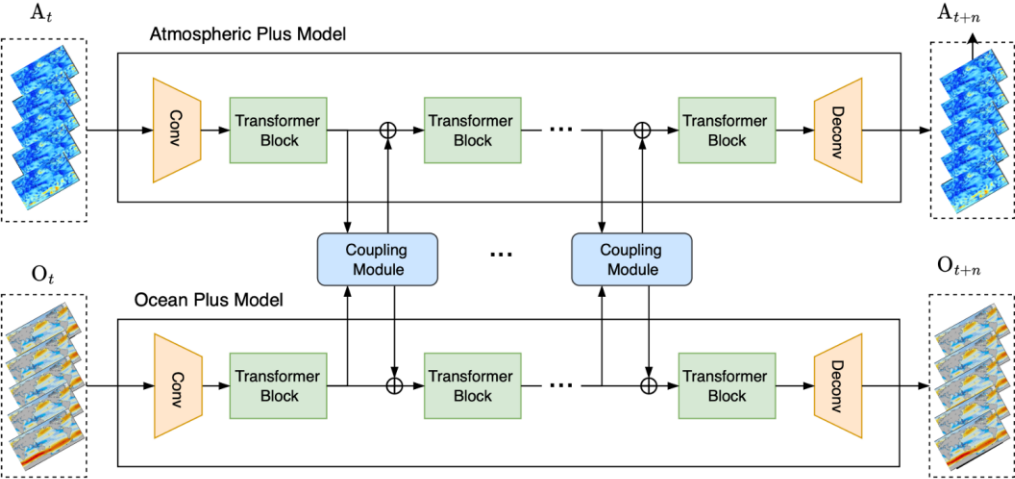


从大气走向更复杂系统

03

海陆气冰耦合多圈层大模型

领域前沿探索：国家气候中心合作，通过**国智院&上智院**科学智能联合创新中心立项（高时空分辨率多圈层耦合的地球仿真系统开发及应用）



由大气环流模型升级为气候系统模型

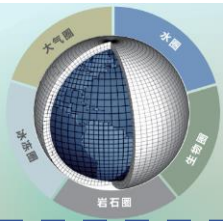
不仅抓住海气相互作用，还抓住陆气、冰气相互作用，为大模型S2S预报提供更多可预报性来源

FuXi-S2S: 大气环流模型

海: SST
气: 对流层

Type	Full name	Abbreviation
Upper-air variables	geopotential	Z
	temperature	T
	u component of wind	U
	v component of wind	V
	specific humidity	Q
Surface variables	2 m temperature	T2M
	2 m dewpoint temperature	D2M
	sea surface temperature	SST
	outgoing longwave radiation	OLR
	10 m u wind component	U10
	10 m v wind component	V10
	100 m u wind component	U100
	100 m v wind component	V100
	mean sea-level pressure	MSL
	total column water vapor	TCWV
	total precipitation	TP

FuXi-CSM: 气候系统模型



海: 上层海水温、盐、流
陆: 土壤湿度、温度、积雪
气: 延伸至平流层
冰: 极地海冰

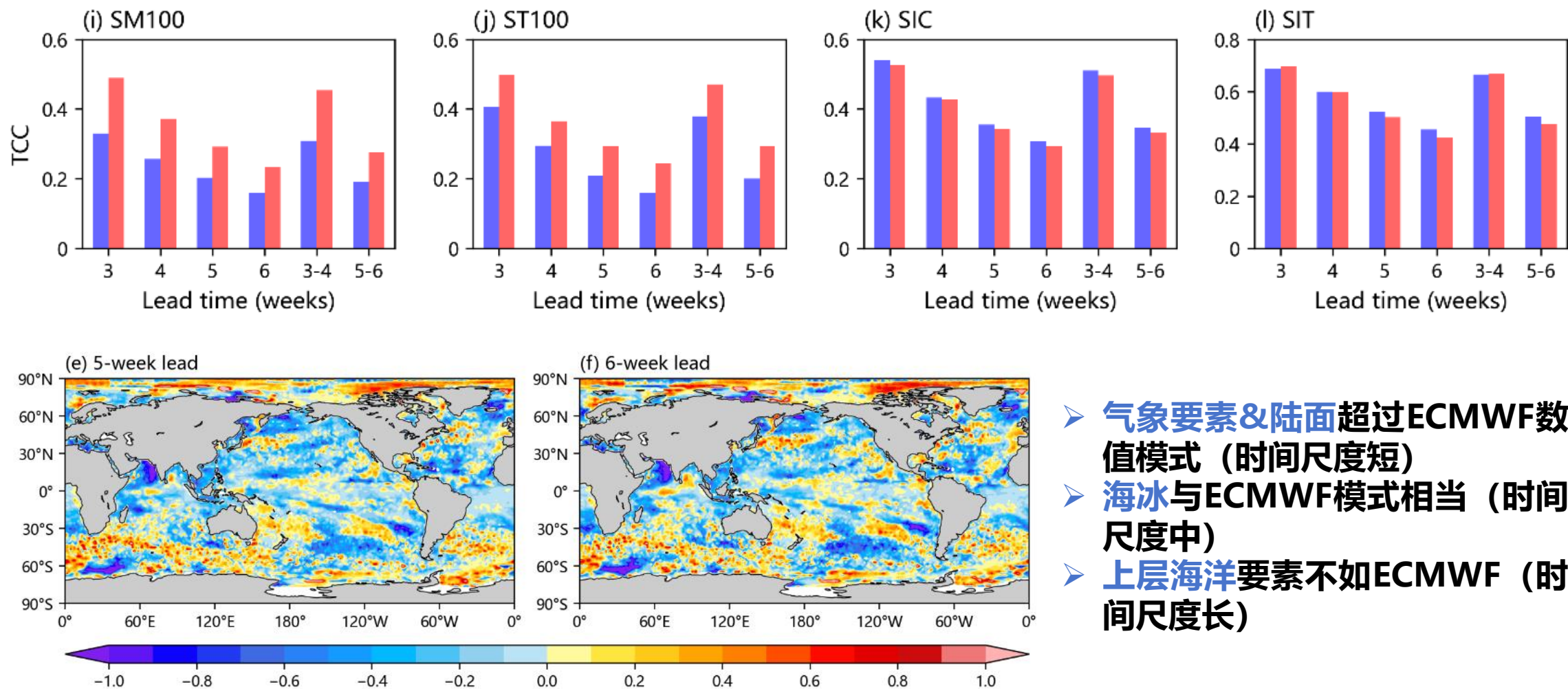
Type	Full name	Abbreviation
Upper-air variables	geopotential	Z
	temperature	T
	u component of wind	U
	v component of wind	V
	specific humidity	Q
Single-air variables	2 m temperature	T2M
	minimum 2 m temperature	T2M_MIN
	maximum 2 m temperature	T2M_MAX
	2 m dewpoint temperature	D2M
	10 m u wind component	U10
	10 m v wind component	V10
	100 m u wind component	U100
	100 m v wind component	V100
	mean sea-level pressure	MSL
	total cloud cover	TCC
Land variables	outgoing longwave radiation	OLR
	total precipitation	TP
	soil moisture from 0 to 289 cm	SM
	soil temperature from 0 to 289 cm	ST
	snow density	RSN
Upper-ocean variables	snow depth	SD
	potential temperature	PT
	salinity	S
	u component of surface current	OCU
	v component of surface current	OCV
Single-ocean variables	sea surface height	SSH
	ocean mixed layer thickness	MLT
	sea ice concentration	SIC
Sea-ice variables	sea ice thickness	SIT

增加要素数量，丰富要素种类

从16个要素增加至29个，且包含了海-陆--冰多个圈层的要素

多圈层要素预测技巧

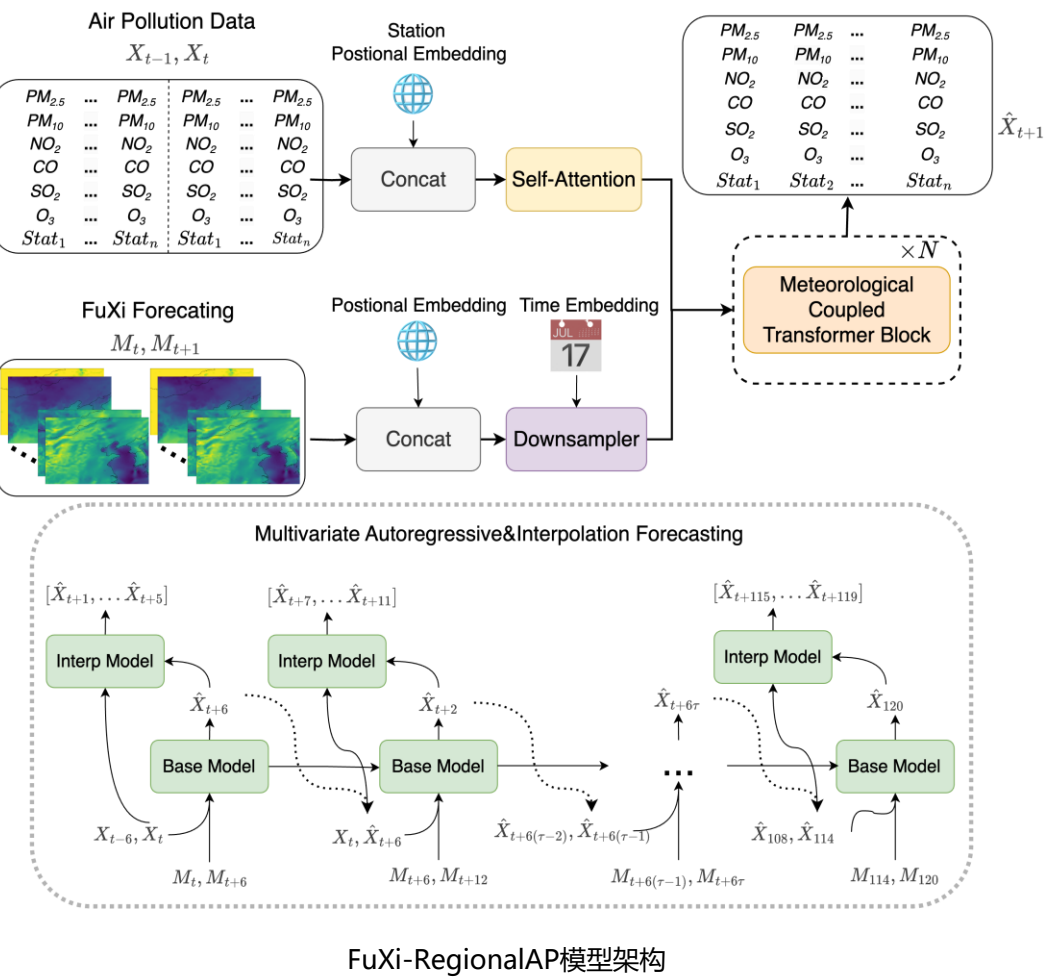
FuXi-CSM要素评估 (红AI; 蓝EC数值模式)



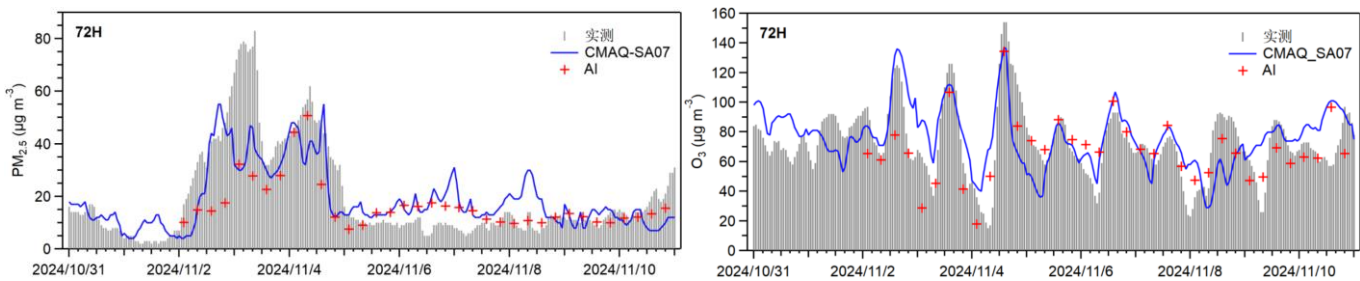
- 气象要素&陆面超过ECMWF数值模式 (时间尺度短)
- 海冰与ECMWF模式相当 (时间尺度中)
- 上层海洋要素不如ECMWF (时间尺度长)

FuXi-RegionalAP：气象耦合区域污染物预报

与上海市环境监测中心合作



- 区域大气污染物**气象耦合预报方案**，大幅度提升预报准确性，效果达到**SOTA**
- 设计了6小时自回归预报+1小时插帧预报的**组合模型方案**，实现**未来5天1小时分辨率**预报



Time	24H				48H				72H			
Model	RegionalAP		SHA-CMAQ-ENS		RegionalAP		SHA-CMAQ-ENS		RegionalAP		SHA-CMAQ-ENS	
Metric	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE
PM2.5	0.82	13.5	0.85	11.0	0.74	15.4	0.79	12.5	0.73	15.0	0.76	12.7
PM10	0.76	14.9	0.88	10.7	0.58	17.0	0.78	13.4	0.53	15.8	0.67	15.2
NO2	0.84	7.6	0.76	10.9	0.72	9.7	0.75	12.8	0.64	10.3	0.64	13.7
O3	0.81	16.1	0.73	19.6	0.77	18.6	0.64	22.5	0.74	19.5	0.67	22.3
SO2	0.60	0.8	0.56	2.6	0.65	1.1	0.68	2.2	0.2	1.1	0.2	0.36
CO	0.73	0.1	0.77	0.2	0.76	0.1	0.72	0.1	0.71	0.1	0.52	0.68

2024年进博会期间FuXi-RegionAP试运行与上海市环境监测中心最优集合预报结果对比，RegionalAP在受本地源排放影响大的污染物类别上具有明显优势