



# 考虑参数相关性的台风危险性分析

宋玉鹏

南京工业大学 土木工程学院

2022年12月29日

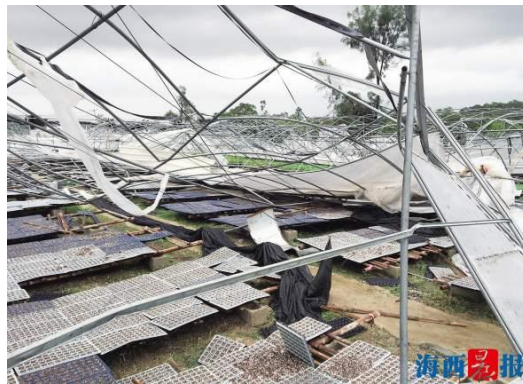


# 目录

1. 研究背景
2. 台风危险性分析
3. 参数相关性建模
4. 分析结果
5. 结论



# 1. 研究背景



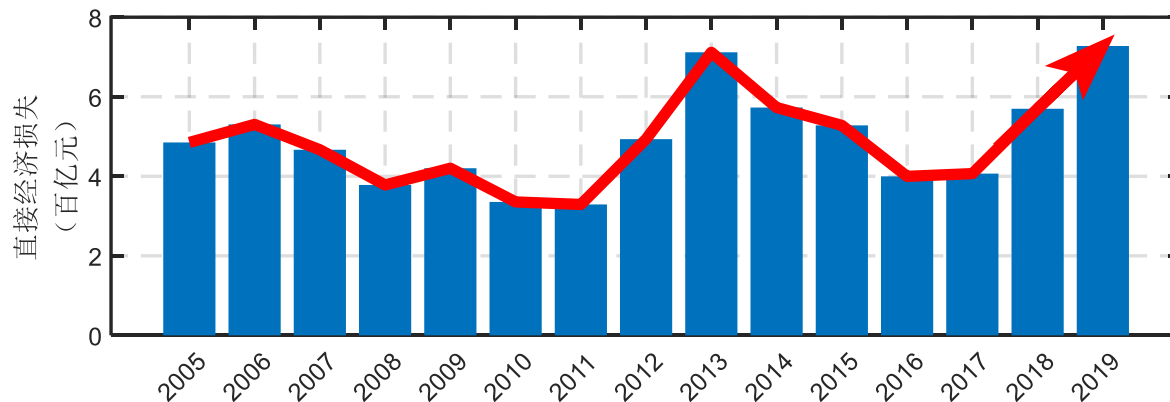
大棚



输电塔



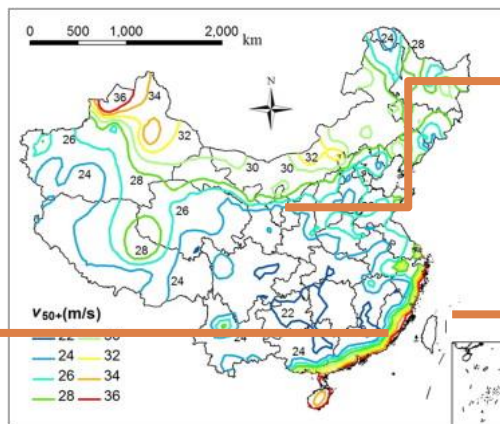
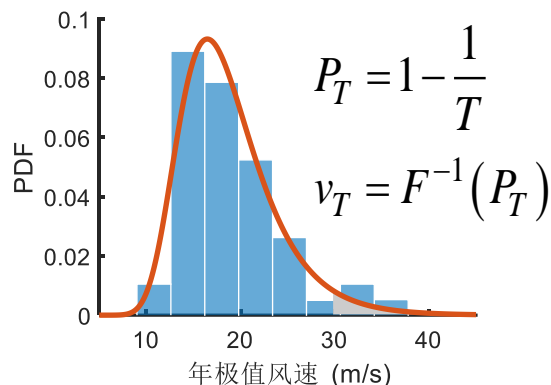
风机



近年来台风给我国造成的直接经济损失

# 1. 研究背景

对地表观测资料的**统计建模**构成我国现行建筑结构抗风设计的基础：



我国50年一遇风速区划

**天气尺度气象系统控制地区**  
一般有较完备的地表观测资料，适用于统计建模途径。

**台风影响地区**

台风事件罕遇、台风中观测设备毁坏导致观测资料中台风风速稀缺，难以构成可靠的统计基础。

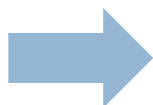
**海洋工程结构**



缺乏长期稳定的观测数据，不具备统计条件。

## 台风危险性分析

台风气象参数随机性



台风模型

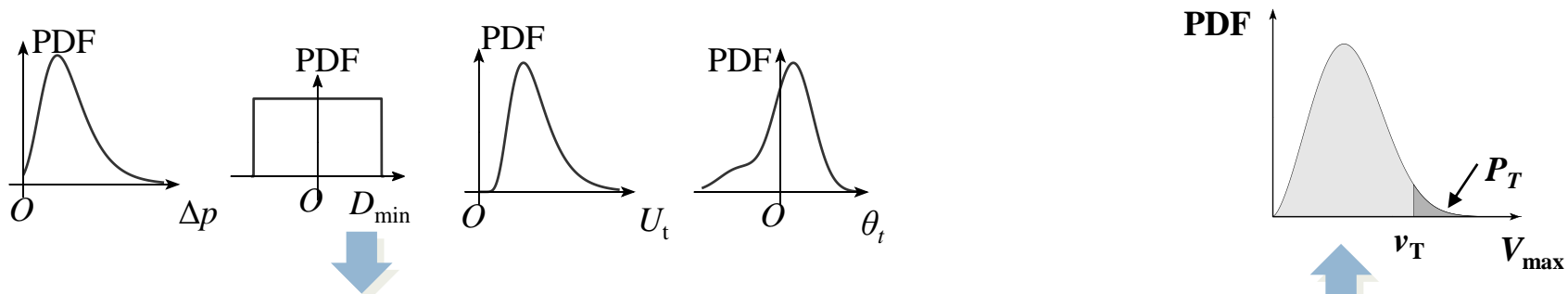


地表风速随机性

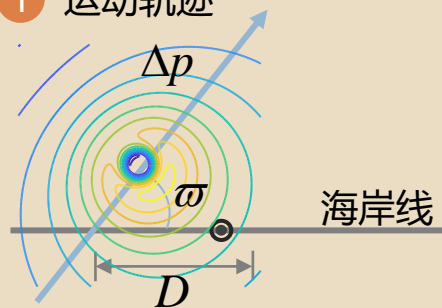
# 2. 台风危险性分析

## □ 场域视角下台风危险性分析

基于随机模拟，分析随机性由台风关键参数向台风地表风速转移，并得到场域设计风速。



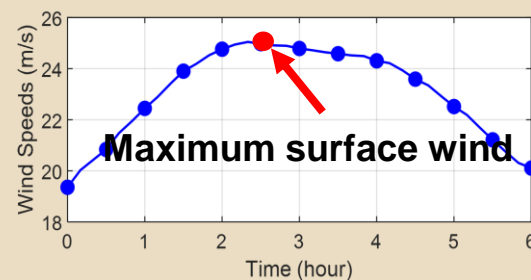
### 1 运动轨迹



### 2 经验地表风速场

$$v = c \left( 0.865 V_{\max}^g + 0.5 U_t \right) - \frac{U_t}{2} \left[ 1 - \cos(\varpi - \varpi_m) \right]$$

### 3 地表风速时程

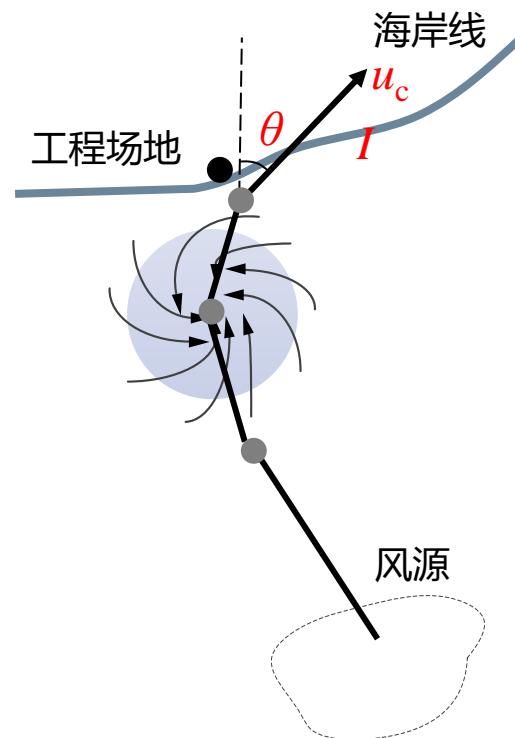


- ✓ 台风关键参数具备较好的可统计性，避免了统计地表风速的困境；
- ✓ 被风机结构国际设计标准采用；
- ✓ 经验地表风场模型简化了台风边界层风场的分布规律。

## 2. 台风危险性分析

### □ 海域视角下台风危险性分析

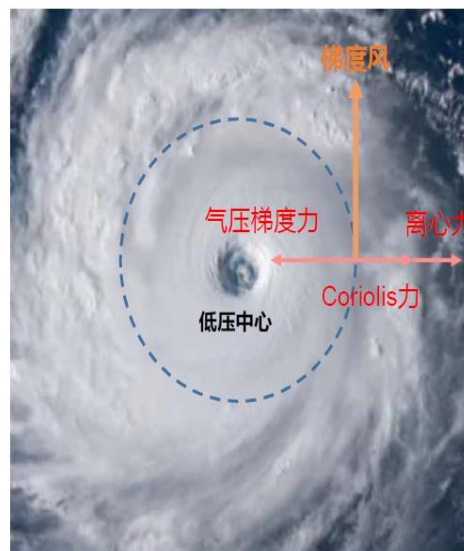
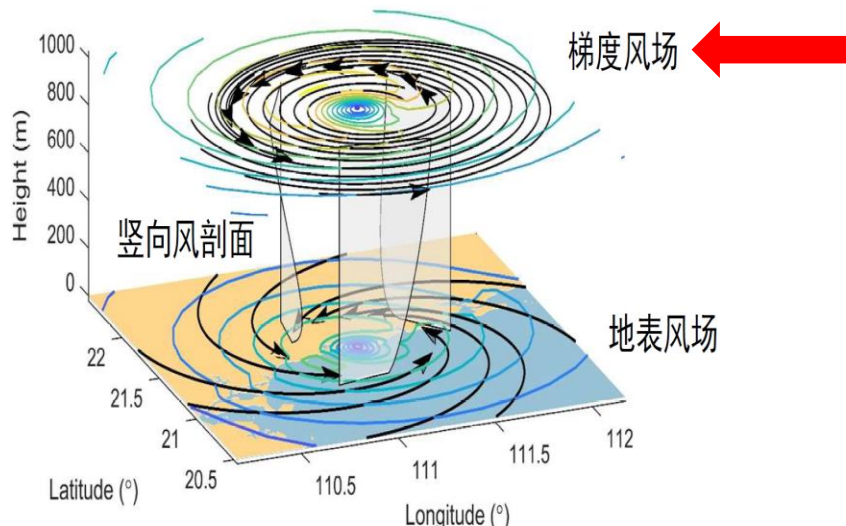
- 台风发生
- 台风运动轨迹与强度演化
  - ✓ 自回归模型
  - ✓ Markov模型
- 台风登陆后的强度衰减
- 在场域视角下采用边界层风场模型模拟台风地表风速



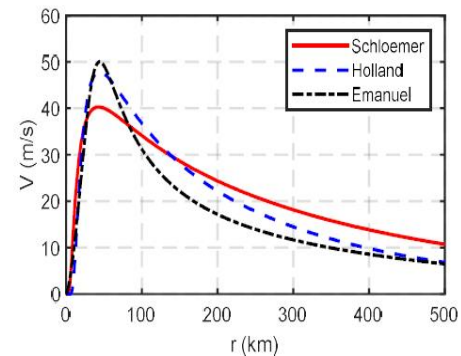
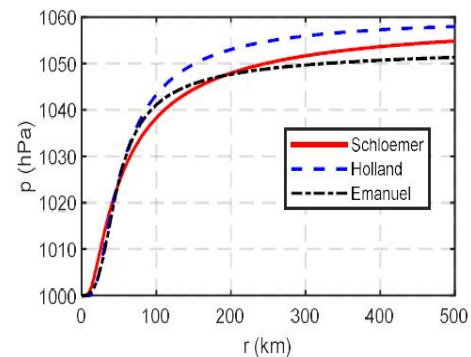
- ✓ 随机性传播链条更加完整;
- ✓ 可以利用所有有效的台风历史记录进行随机源的识别和建模;
- ✓ 可以统一给出整个海岸线（包括历史数据匮乏地区）的分析结果。

## 2. 台风危险性分析

### □ 本研究：场域视角下的台风危险性分析方法



台风梯度风场示意图



Georgiou在Holland模型的基础上发展的台风梯度风风场模型，该模型考虑了台风移动速度的影响。该模型中梯度风的表达式为：

$$V_g(r, \alpha) = \frac{1}{2}(U_t \sin \alpha - fr) + \sqrt{\frac{1}{4}(U_t \sin \alpha - fr)^2 + \frac{100B\Delta p}{\rho} \left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^B \exp\left[-\left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^B\right]}$$

## 2. 台风危险性分析



### □ 本研究：场域视角下的台风危险性分析方法

式中：

台风局部轨迹参数：

- $\theta$ ：台风中心移动方向，正北方为零，顺时针为正；
- $U_T$ ：台风中心移动速度；
- $d_{\min}$ ：台风路径距离场址的最小距离；

台风动力学结构参数：

- $\Delta p = p_{\infty} - p_c$ 为中心压差， $p_c$ 和 $p_{\infty}$ 分别为台风中心和外围气压；
- $R_{\max}$ ：最大风速半径， $\ln R_{\max} = 5.51\Delta p^{-0.117} + 6.707 \times 10^{-3} \phi + \sigma_{\ln R_{\max}} \varepsilon_{\ln R_{\max}}$ ，  
 $\sigma_{\ln R_{\max}} = -1.836 \times 10^{-4} \Delta p + 0.364$ ， $\varepsilon_{\ln R_{\max}} \sim N(0,1)$ ；

其它参数：

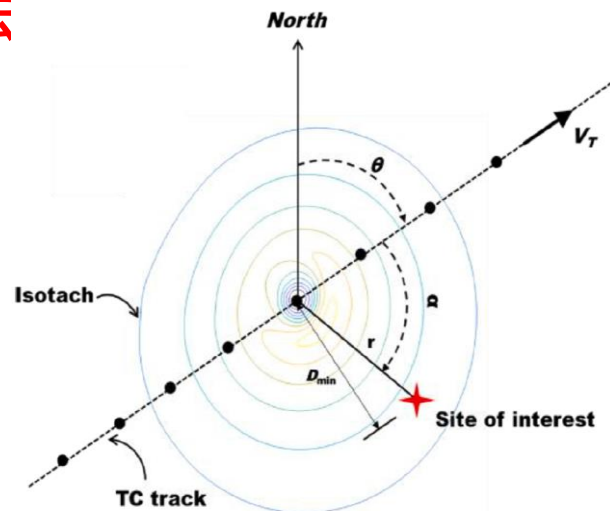
$\alpha$ ：台风前进方向与场址至台风中心连线的夹角；

$f$ ：Coriolis系数， $f = 2\Omega \sin \phi$ ， $\Omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ ， $\phi$ 为场址所在的纬度；

$r$ ：场址距台风中心的距离；

$B$ ：Holland参数， $B = 4.1025 \times 10^{-5} \Delta p^2 + 0.0293 \Delta p + 0.7959 \ln R_{\max} - 4.601 + \sigma_B \varepsilon_B$ ，

$\sigma_B = -0.0027 \Delta p - 0.1311 \ln R_{\max} + 0.8815$ ， $\varepsilon_B \sim N(0,1)$ 。

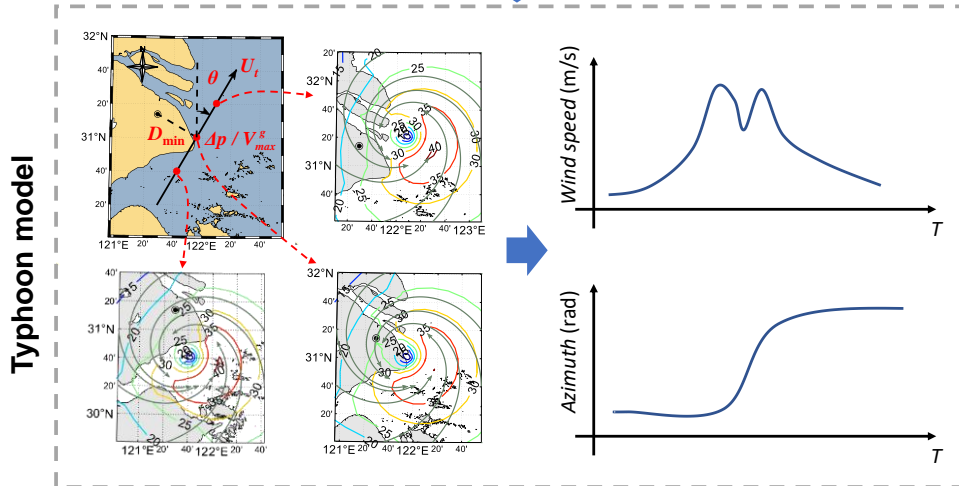
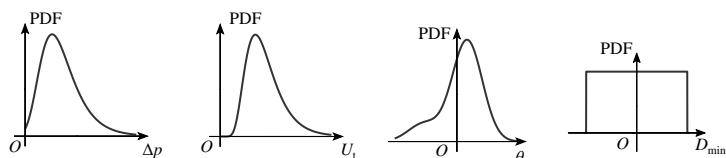




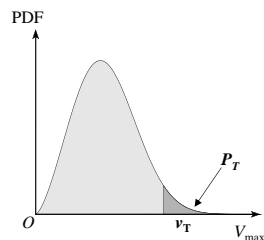
# 2. 台风危险性分析

## □ 本研究：场域视角下的台风危险性分析方法

### Typhoon random source



PDF of annual maximum typhoon-induced wind speed



### 基本变量：

- (1) 中心压差： $\Delta p$
- (2) 台风中心移动速度： $U_T$
- (3) 台风中心移动方向： $\theta$
- (4) 台风路径距场址最小距离： $d_{\min}$

一旦上述四个变量的值确定，便可以给出场址的风速。

观测数据表明，上述四个变量具有显著的随机性，因此需要建立上述四个随机变量的概率模型。在此基础上，可以获得场域的地表台风风速。

## 2. 台风危险性分析



### □ 本研究：场域视角下的台风危险性分析方法

- 场址每年发生N个台风事件服从Poisson分布，即

$$\Pr\{N = k\} = \frac{\xi^k e^{-\xi}}{k!}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

式中， $\xi$  为台风的年发生率。

- 那么由台风导致的场址年最大风速的概率分布函数为：

$$F_{m1}(v) = \sum_{k=0}^{\infty} \Pr\{N = k\} F_m(v)^k = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{[\xi F_m(v)]^k e^{-\xi}}{k!} = e^{-\xi} \cdot e^{\xi F_m(v)} = e^{-\xi[1-F_m(v)]}$$

式中， $F_m(v)$  为场址在一次台风影响中最大风速的概率分布函数，可由前述台风危险性方法并结合Monte Carlo模拟得到。

- 由此可得重现期为T年的场址风速为：

$$v_T = F_{m1}^{-1}\left(1 - \frac{1}{T}\right) = F_m^{-1}\left[1 + \frac{1}{\xi} \ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right] \approx F_m^{-1}\left(1 - \frac{1}{\xi T}\right)$$

# 3. 参数相关性建模

## □ 关注的随机变量

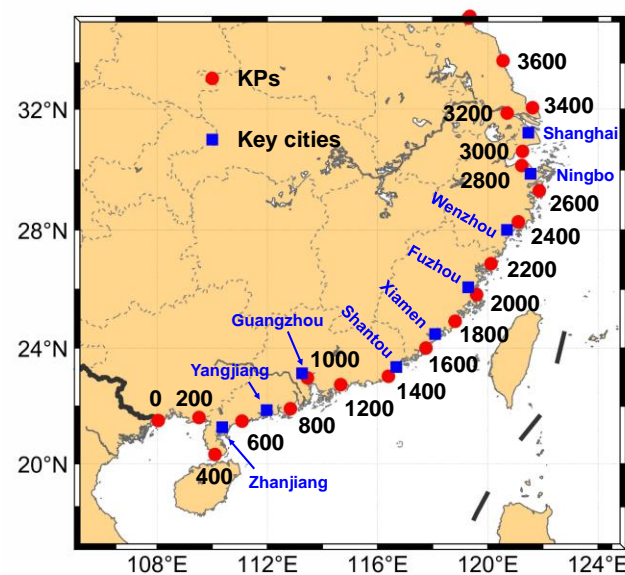
- (1) 中心压差:  $\Delta p$
- (2) 台风中心移动速度:  $U_T$
- (3) 台风中心移动方向:  $\theta$
- (4) 台风路径距场址最小距离:  $d_{\min}$

## □ 数据来源

中国气象局: 台风中心最佳路径数据集  
(1980-2013)

台风的场域影响半径: 250km

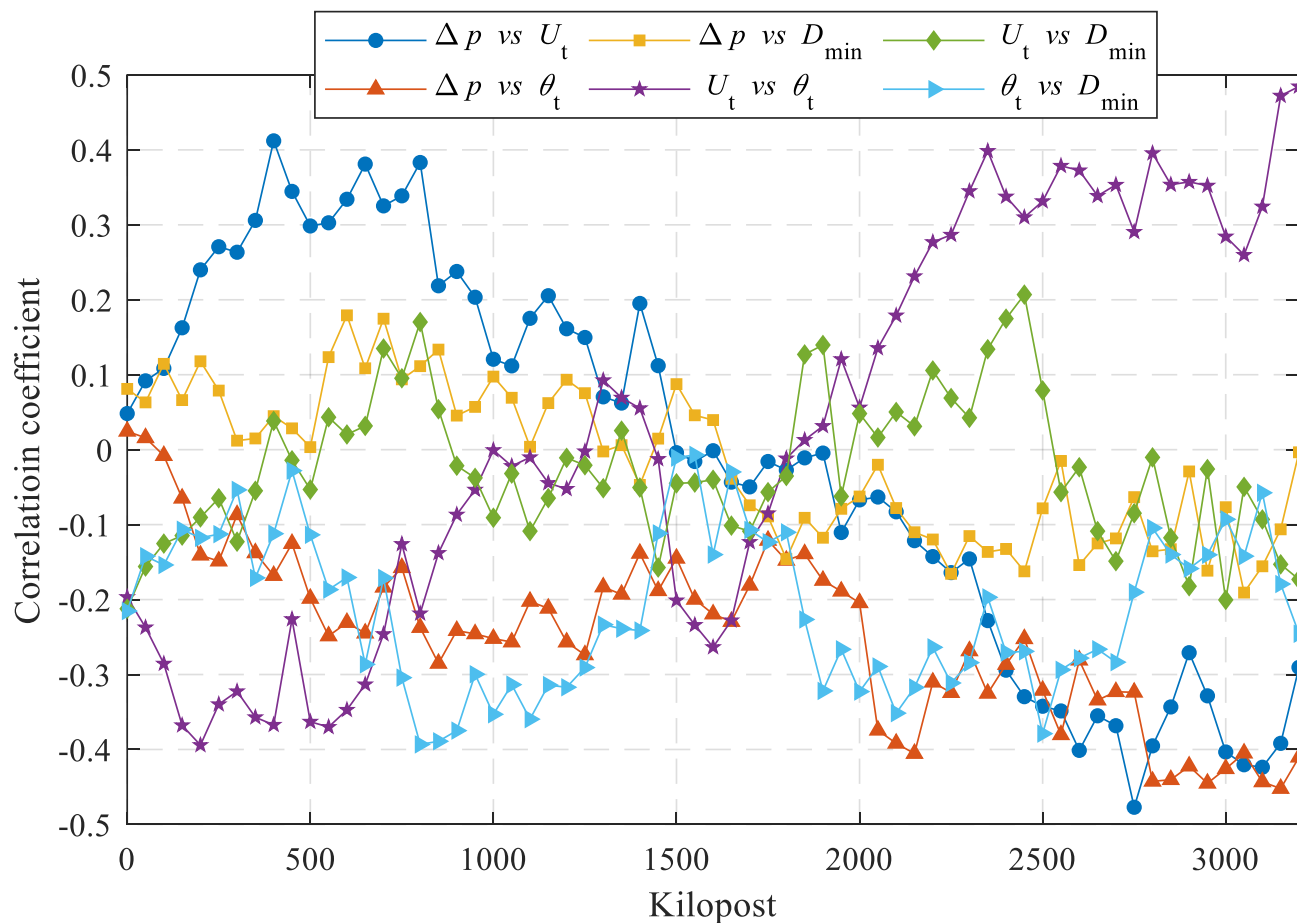
获取海岸线上一系列点和9个关键城市的数据



# 3. 参数相关性建模



## 参数的相关性分析



不同场域四个变量间的相关性计算结果

# 3. 参数相关性建模

## 多维随机变量相关性建模：C-vine copula方法

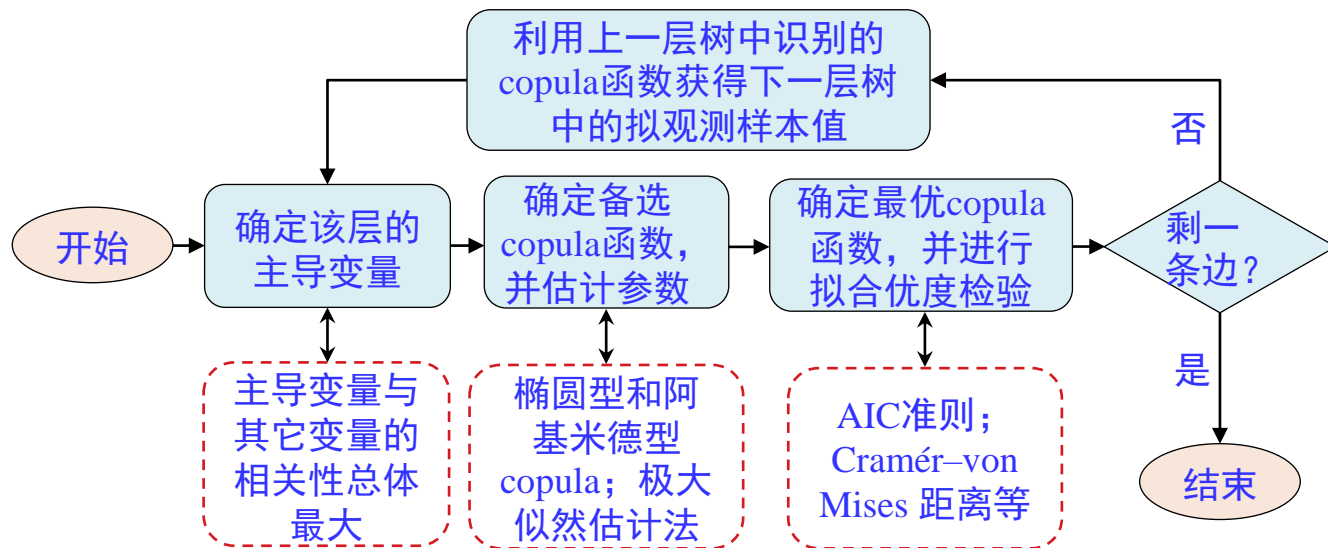
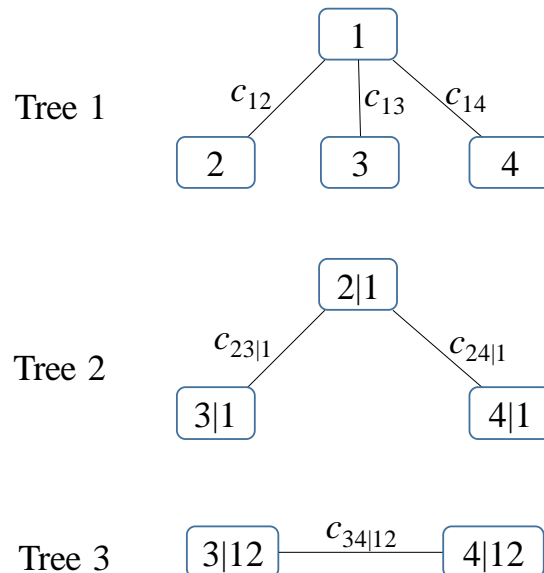
$$f(\mathbf{x}) = c_{12}(F_1, F_2) \cdot c_{13}(F_1, F_3) \cdot c_{14}(F_1, F_4) \times \\ c_{23|1}(F_{2|1}, F_{3|1}) \cdot c_{24|1}(F_{2|1}, F_{4|1}) \times \\ c_{34|12}(F_{3|12}, F_{4|12}) \times (f_1 f_2 f_3 f_4)$$

$F_i$ : CDF of  $X_i$ ;

$f_i$ : PDF of  $X_i$ ;

$F_{i|j}$ : conditional CDF of  $X_i$  given  $X_j$ ;

$c(\cdot, \cdot)$ : bivariate copula density function.



# 3. 参数相关性建模



## □ 边缘概率分布建模结果

City	$U_t$	$D_{\min}$	$\vartheta_t$	$\Delta p$	$\xi$
Shanghai	Gumbel $\mu = 6.26$ m/s, $\sigma = 2.63$ m/s	Uniform $a = -250$ km, $b = 250$ km	Binormal $t = 0.08$ , $\mu_1 = 1.11$ rad, $\sigma_1 = 0.05$ rad, $\mu_2 = -0.075$ rad, $\sigma_2 = 0.76$ rad	Weibull $\mu = 25.15$ , $\sigma = 1.64$ hPa	1.38
Ningbo	Log normal $\mu = 1.93$ m/s, $\sigma = 0.42$ m/s	Uniform $a = -250$ km, $b = 250$ km	Binormal $t = 0.63$ , $\mu_1 = 0.35$ rad, $\sigma_1 = 0.49$ rad, $\mu_2 = -0.75$ rad, $\sigma_2 = 0.53$ rad	Weibull $\mu = 31.9$ , $\sigma = 1.69$ hPa	1.59
Wenzhou	Gamma $a = 5.45$ , $b = 1.25$ m/s	Uniform $a = -250$ km, $b = 250$ km	Binormal $t = 0.46$ , $\mu_1 = 0.46$ rad, $\sigma_1 = 0.32$ rad, $\mu_2 = -0.98$ rad, $\sigma_2 = 0.52$ rad	Weibull $\mu = 35.3$ , $\sigma = 1.75$ hPa	1.86
Fuzhou	Gumbel $\mu = 4.63$ m/s, $\sigma = 2.33$ m/s	Uniform $a = -250$ km, $b = 250$ km	Binormal $t = 0.09$ , $\mu_1 = 1.18$ rad, $\sigma_1 = 0.20$ rad, $\mu_2 = -0.71$ rad, $\sigma_2 = 0.65$ rad	Weibull $\mu = 39.56$ , $\sigma = 2.18$ hPa	2.41
Xiamen	Gumbel $\mu = 4.58$ m/s, $\sigma = 2.14$ m/s	Uniform $a = -250$ km, $b = 250$ km	Binormal $t = 0.81$ , $\mu_1 = -0.56$ rad, $\sigma_1 = 1.06$ rad, $\mu_2 = -1.22$ rad, $\sigma_2 = 0.09$ rad	Weibull $\mu = 36.35$ , $\sigma = 2.01$ hPa	2.57
Shantou	Weibull $\mu = 6.1$ , $\sigma = 2.59$ m/s	Uniform $a = -250$ km, $b = 250$ km	Binormal $t = 0.59$ , $\mu_1 = -0.04$ rad, $\sigma_1 = 0.90$ rad, $\mu_2 = -1.29$ rad, $\sigma_2 = 0.40$ rad	Lognormal $\mu = 3.23$ , $\sigma = 0.60$	2.68
Guangzhou	Gumbel $\mu = 4.46$ , $\sigma = 2.15$ m/s	Trapezoidal $a = -250$ km, $b = 250$ km, $t = 0.34$	Binormal $t = 0.072$ , $\mu_1 = 1.28$ rad, $\sigma_1 = 0.11$ rad, $\mu_2 = -0.82$ rad, $\sigma_2 = 0.71$ rad	Gumbel $\mu = 20.17$ hPa, $\sigma = 12.20$ hPa	2..54
Yangjiang	Weibull $\mu = 6.17$ , $\sigma = 2.53$ m/s	Uniform $a = -250$ km, $b = 250$ km	Binormal $t = 0.53$ , $\mu_1 = -0.61$ rad, $\sigma_1 = 1.02$ rad, $\mu_2 = -1.14$ rad, $\sigma_2 = 0.28$ rad	Gumbel $\mu = 19.35$ hPa, $\sigma = 12.40$ hPa	3.16

还需要进行  
假设检验。

### 3. 参数相关性建模



#### □ 变量间相关结构建模结果

City	Dominating order	Identified copulas
Shanghai	$\Delta p, D_{\min}, \theta, U_t$	C <sub>12</sub> : Clayton270, $\lambda = 0.2865$ C <sub>13</sub> : QS copula, $\lambda = 0.0503$ C <sub>14</sub> : Clayton90, $\lambda = 0.9241$ C <sub>23 1</sub> : QS copula, $\lambda = -0.0395$ C <sub>24 1</sub> : Clayton90, $\lambda = 0.2951$ C <sub>34 12</sub> : QS copula, $\lambda = -0.1395$
Ningbo	$\Delta p, D_{\min}, \theta, U_t$	C <sub>12</sub> : Clayton90, $\lambda = 0.3542$ C <sub>13</sub> : QS copula, $\lambda = 0.1153$ C <sub>14</sub> : Frank, $\lambda = -3.6652$ C <sub>23 1</sub> : QS copula, $\lambda = 0.0178$ C <sub>24 1</sub> : Frank, $\lambda = -0.5588$ C <sub>34 12</sub> : QS copula, $\lambda = 0.0454$
Wenzhou	$\theta, D_{\min}, U_t, \Delta p$	C <sub>12</sub> : QS copula, $\lambda = 0.0183$ C <sub>13</sub> : QS copula, $\lambda = 0.0443$ C <sub>14</sub> : QS copula, $\lambda = 0.0470$ C <sub>23 1</sub> : Gumbel-asmy, $\lambda = 37.3523, \alpha = 0.1161, \beta = 0.2843$ C <sub>24 1</sub> : Clayton90-asmy, $\lambda = 26.4886, \alpha = 0.4697, \beta = 0.2246$ C <sub>34 12</sub> : Clayton-asmy, $\lambda = 33.5232, \alpha = 0.1457, \beta = 1$
Fuzhou	$\theta, D_{\min}, U_t, \Delta p$	C <sub>12</sub> : QS copula, $\lambda = -0.0523$ C <sub>13</sub> : QS copula, $\lambda = 0.0178$ C <sub>14</sub> : QS copula, $\lambda = 0.0426$ C <sub>23 1</sub> : Clayton, $\lambda = 0.1338$ C <sub>24 1</sub> : Clayton, $\lambda = 0.1560$ C <sub>34 12</sub> : Clayton90-asmy, $\lambda = 57.1194, \alpha = 0.0814, \beta = 1$
Xiamen	$D_{\min}, \theta, U_t, \Delta p$	C <sub>12</sub> : QS copula, $\lambda = -0.0550$ C <sub>13</sub> : Clayton90, $\lambda = 0.1917$ C <sub>14</sub> : Frank, $\lambda = -0.8383$ C <sub>23 1</sub> : QS copula, $\lambda = 0.0576$ C <sub>24 1</sub> : QS copula, $\lambda = 0.1370$ C <sub>34 12</sub> : Clayton90, $\lambda = 0.0974$

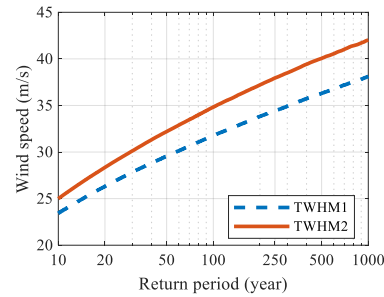
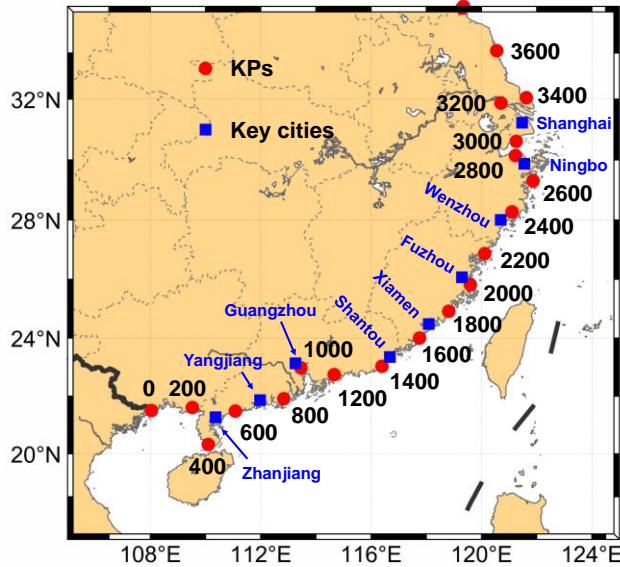
还需要进行拟合优度检验。

# 4. 分析结果

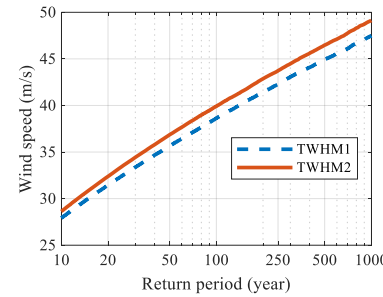


## 参数相关性对台风危险性分析结果的影响

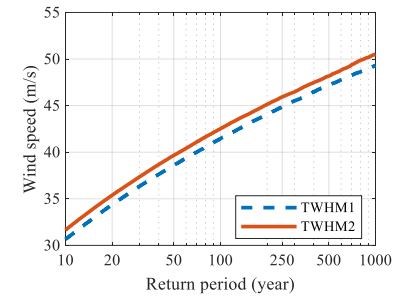
TWHM1: 考虑相关性; TWHM2: 不考虑相关性



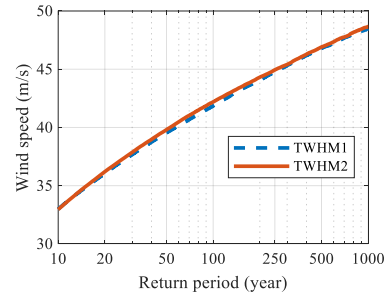
(a) Shanghai



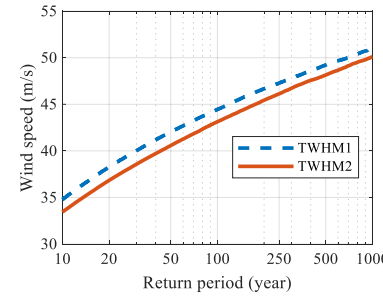
(b) Ningbo



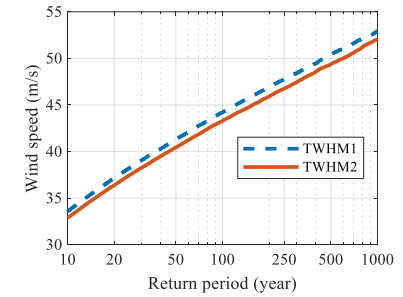
(c) Wenzhou



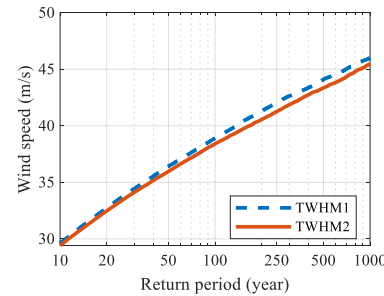
(d) Fuzhou



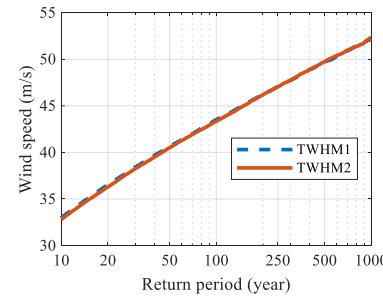
(e) Xiamen



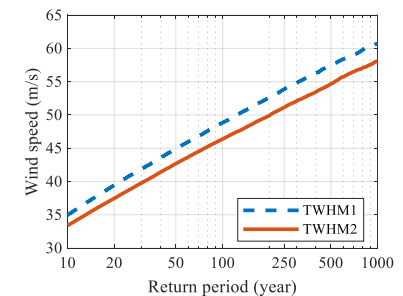
(f) Shantou



(g) Guangzhou



(h) Yangjiang



(i) Zhanjiang

结果表明：这四个随机变量的相关性对不同场域的极端设计风速具有不同程度的影响。

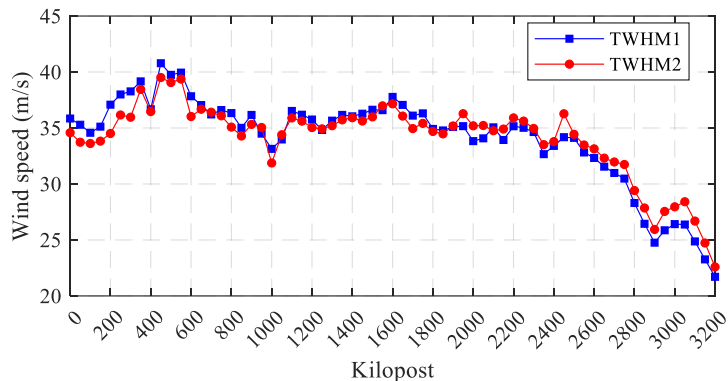
不同城市不同重现期的设计风速



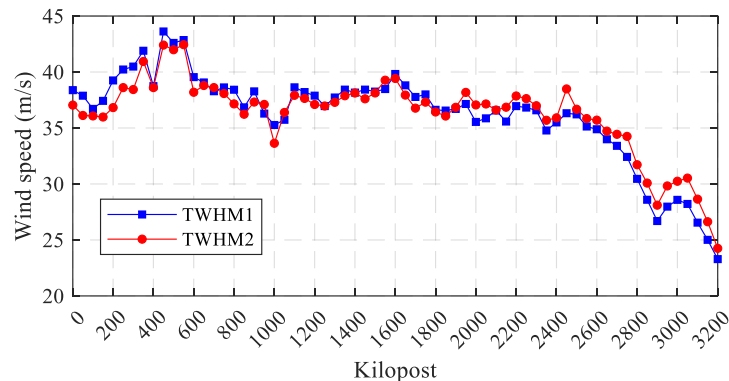
# 4. 分析结果

## 参数相关性对台风危险性分析结果的影响

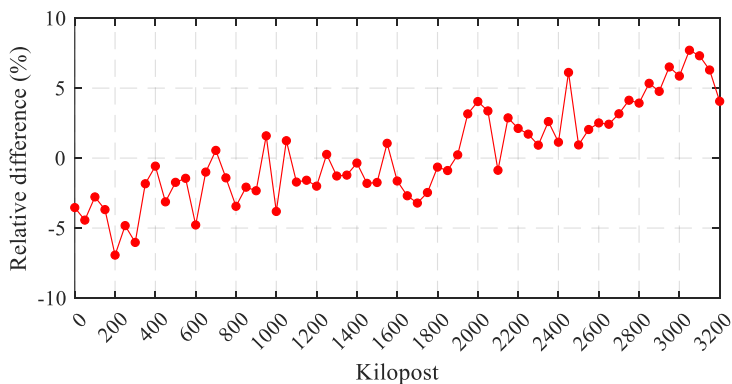
TWHM1: 考虑相关性; TWHM2: 不考虑相关性



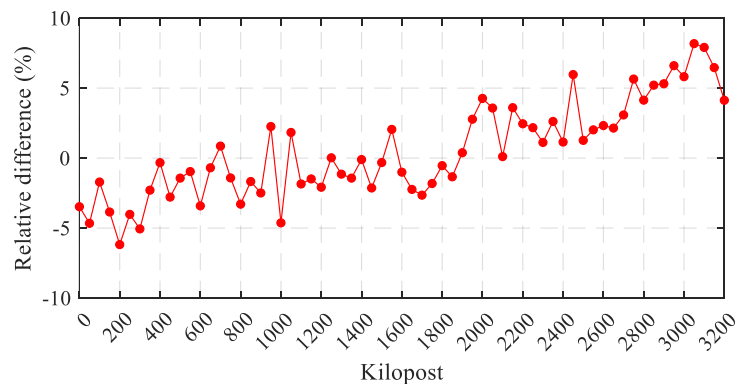
(a) Wind speed associated with  $T = 50$  years



(b) Wind speed associated with  $T = 100$  years



(c) Relative difference for the wind speed associated with  $T = 50$  years



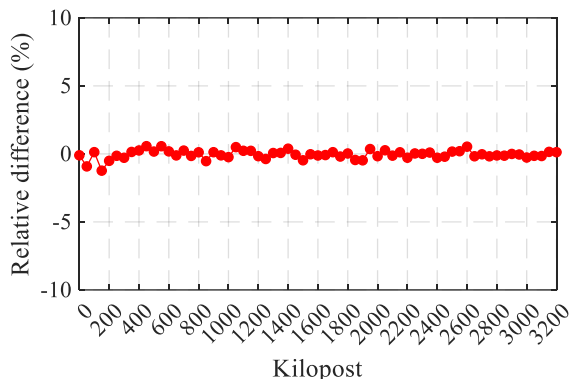
(d) Relative difference for the wind speed associated with  $T = 100$  years

不同场域50年和100年重现期的设计风速

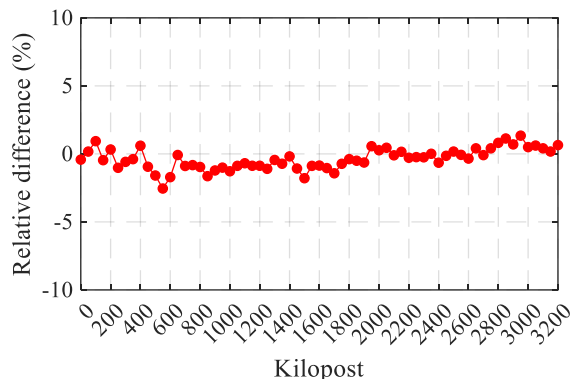
# 4. 分析结果

## □ 灵敏度分析结果

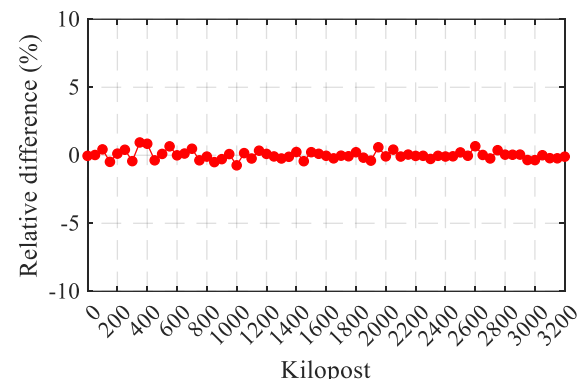
仅考虑2个变量相关性和不考虑相关性时场域的50年设计风速的相对误差：



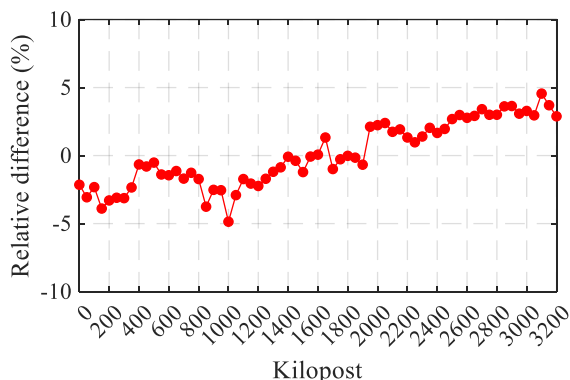
(a)  $\theta_t$  vs  $U_t$



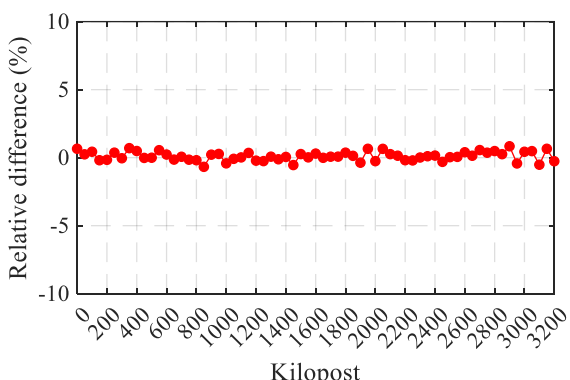
(b)  $\theta_t$  vs  $\Delta p$



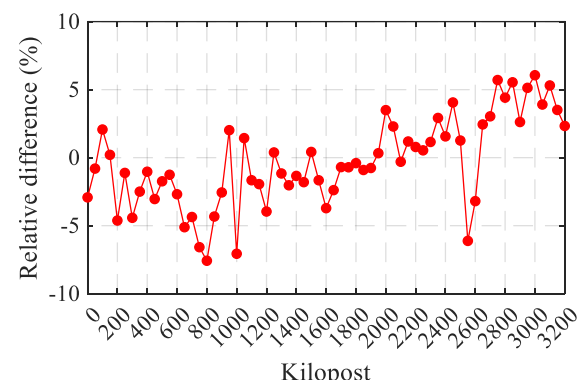
(c)  $\theta_t$  vs  $D_{\min}$



(d)  $U_t$  vs  $\Delta p$



(e)  $U_t$  vs  $D_{\min}$



(f)  $\Delta p$  vs  $D_{\min}$

参数间相关性可对设计风速分析结果产生大于5%相对误差的影响。

- 台风危险性分析中的四个关键参数具有显著的随机性和复杂的相关性，在分析中应合理考虑；
- C-vine copula方法能够适用于台风危险性分析中关键参数随机模型的建立，且建模灵活、方便；
- 在台风危险性分析中，参数相关性对不同场域的不同重现期设计风速具有不同程度的影响。对于某些场域，能够产生大于5%相对误差的影响，因此在台风危险性分析中应当考虑这些参数的相关性。

**谢谢！ 敬请批评指正！**

宋玉鹏

南京工业大学土木工程学院

E-mail: [songyupeng@njtech.edu.cn](mailto:songyupeng@njtech.edu.cn)

