

张玉洁,于振波,李恒昶,等.山东地面气象观测站网布局评估[J].海洋气象学报,2024,44(3):1-10.  
ZHANG Yujie, YU Zhenbo, LI Hengchang, et al. Evaluation of surface meteorological observing station networks in Shandong[J].  
Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(3): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230728001. (in Chinese)

## 山东地面气象观测站网布局评估

张玉洁<sup>1,2</sup>, 于振波<sup>1,2</sup>, 李恒昶<sup>1,2</sup>, 涂爱琴<sup>1,2</sup>

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2. 山东省气象工程技术中心, 山东 济南 250031)

**摘要** 基于滚动需求评估的原则和结构函数, 评估山东地面气象观测站网水平分辨率(平均站间距), 研究山东国家级基准、基本及常规气象观测站气温、相对湿度、降水的最佳布站方案和最佳布站距离。结果表明:(1) 国家气象观测站和区域气象观测站各要素水平分辨率由小到大依次为降水、气温、风向和风速、相对湿度、气压, 国家级基准、基本及常规气象观测站各要素水平分辨率均相同, 应用气象观测站气温与相对湿度要素的水平分辨率小于风向和风速及降水。(2) 除全球数值天气预报和海洋应用领域外, 山东4类地面气象观测站各要素的水平分辨率相比观测系统能力分析和审查工具(Observation System Capability Analysis and Review, OSCAR)中各应用领域突破值尚有一定的差距。(3) 山东国家级基准、基本及常规气象观测站的气温、相对湿度、降水的四季结构函数整体上随距离的增加而增大。气温、相对湿度、降水的线段内插、正三角形内插和正方形内插标准误差与距离均呈线性关系。在距离满足点值内插标准误差小于观测标准误差时, 气温、相对湿度和降水均为正三角形内插精度最高。(4) 山东国家级基准、基本及常规气象观测站气温、相对湿度和降水最佳的布站方案均为正三角形布设, 其中气温、相对湿度、降水的最佳布站距离应分别不超过43.6 km、63.4 km和40.3 km。

**关键词** 滚动需求评估; 观测系统能力分析和审查工具(OSCAR); 站网布局; 水平分辨率; 结构函数; 内插精度

中图分类号: P411 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)03-0000-12

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230728001

## Evaluation of surface meteorological observing station networks in Shandong

ZHANG Yujie<sup>1,2</sup>, YU Zhenbo<sup>1,2</sup>, LI Hengchang<sup>1,2</sup>, TU Aiqin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Shandong Meteorological Engineering Technology Center, Jinan 250031, China)

**Abstract** Based on the principle of Rolling Review of Requirements and structure function, the horizontal resolution (average distance between stations) of the surface meteorological observing station networks in Shandong is evaluated, and the optimum distribution scheme and distance of temperature, relative humidity and precipitation of national reference, basic and conventional meteorological observing stations in Shandong are studied. The results are as follows. (1) For national and regional meteorological observing stations, the meteorological elements with horizontal resolution from low to high are precipitation,

收稿日期: 2023-07-28; 修回日期: 2023-11-17

基金项目: 山东省气象局科研项目(2021SDYD11, 2018sdqzx05, 2023SDB008)

第一作者简介: 张玉洁, 女, 硕士, 正高级工程师, 主要从事探测资料应用研究, yjzhyw@163.com。

temperature, wind direction/wind speed, relative humidity and air pressure in sequence. For national reference, basic and conventional meteorological observing stations, the horizontal resolution of each element is the same. For meteorological application observing stations, the horizontal resolution of temperature and relative humidity is smaller than that of wind direction/wind speed and precipitation. (2) Except in fields of global numerical weather forecasting and marine application, there is still a significant gap between the horizontal resolution of each element of the 4 types of surface meteorological observing stations in Shandong and the breakthrough values in various application fields of OSCAR (Observation System Capability Analysis and Review). (3) The structure functions of the 4 seasons' temperature, relative humidity and precipitation of national reference, basic and conventional meteorological observing stations in Shandong enlarge with the increase of distance as a whole. The standard errors of linear, equilateral triangle and square interpolation of temperature, relative humidity and precipitation have linear relationship with distance. When the distance meets the condition that the standard error of point value interpolation is less than the standard error of observation, the accuracy of equilateral triangle interpolation of temperature, relative humidity and precipitation is the highest. (4) The optimum distribution scheme of temperature, relative humidity and precipitation of national reference, basic and conventional meteorological observing stations in Shandong is triangular layout. The optimum distribution distance of temperature/relative humidity/precipitation is equal to or less than 43.6/63.4/40.3 km.

**Keywords** Rolling Review of Requirements; OSCAR (Observation System Capability Analysis and Review); network layout; horizontal resolution; structure function; interpolation accuracy

## 引言

气象观测资料是辨别和解析区域与全球变化的重要条件<sup>[1]</sup>,气象、气候学基础理论研究以及各类气象服务的开展都离不开气象观测资料<sup>[2]</sup>。其中,地面气象观测资料尤为重要,它不仅有更长的时间观测序列,而且还可以更精准地反映近地面的大气特征<sup>[3]</sup>,对气象服务起着至关重要的作用。目前,自动气象站是地面气象观测资料的主要来源之一。在实际气象业务中,不仅需要台站所在区域的观测资料,而且还需要利用台站资料得到非台站位置的气象要素值<sup>[4-5]</sup>。地面气象观测站的站网密度及空间分布影响其监测能力<sup>[6]</sup>,布局科学合理的观测站网能提高预报预测的准确率和精细化水平。

气象站网的布局设计,最早起源于苏联,1946年,Drozdov等<sup>[7]</sup>提出将结构函数作为观测站网设计的依据。1982年,Mooley等<sup>[8]</sup>将结构函数应用于热带站网雨量场设计中,建立了内插误差与距离的关系。2004年,Schneebeli等<sup>[9]</sup>利用模糊数学和概率统计,研究了测雪站网的布站间距。我国观测站网设计研究起步较晚,1985年,廖洞贤<sup>[10]</sup>最早提出最优相邻测站间距、最优垂直网格和观测时间间隔的公式。1989年,卢文芳等<sup>[11]</sup>研究表明,上海地区二类和三类站的最佳距离分别为50 km和

30 km。赵瑞霞等<sup>[12]</sup>对北京地区站网布局进行研究,得到北京东南地区二类气象台站的最佳布站距离应不超过16 km。相关学者<sup>[13-15]</sup>也采用结构函数对气象站网布局开展研究,得到了陕北高原和陕南山地各要素站网合理间距以及四川降水和气温要素的合理布站间距等,取得了一系列研究成果。Munn<sup>[16]</sup>研究发现,气象要素间具有空间协相关和时间自相关性,这使得利用气象要素的时空分布来确定站网密度成为可能。Drozdov等<sup>[7]</sup>提出气象要素的内插标准误差只与该要素的结构函数有关,结构函数被广泛应用于气象观测站网的布局研究中。

目前,山东已基本建成功能完善、质量稳健的综合气象观测系统,站网数量也得到明显提升。但是,地面气象观测站网的整体探测能力如何,缺乏科学的评估,这在一定程度上影响着观测站网布局规划的合理性。此文依据世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)滚动需求评估(Rolling Review of Requirements, RRR)的原则,对山东已建地面气象观测站网与WMO的观测系统能力分析和审查工具(Observation System Capability Analysis and Review, OSCAR)各应用领域的需求进行评估。利用山东国家级基准、基本及常规气象观测站资料,基于结构函数研究其气温、相对湿度、降水的最佳布站方案与最佳布站距离。研究结果为山

东站网布局的设计与优化提供科学依据。

## 1 资料

山东地面气象观测站资料包括国家级基准、基本及常规气象观测站、国家气象观测站、区域气象观测站、农业小气候观测站和设施农业观测站(以下简称“应用气象观测站”)。各观测站具体信息见表1。此文在对山东地面气象观测站网水平分辨率评估中用到了表1所列的4类地面气象观测站中的台站数量,用于计算水平分辨率。在山东国家级基准、基本及常规气象观测站的最佳布站方式及站间距的研究中,用到了该类观测站1992—2021年的数据,因绝大多数台站海拔在200 m以下,泰山站海拔为1 533 m,其观测数据与其他台站差异明显,故未对泰山站的观测数据进行分析。地面气温、相对湿度的日均值以及降水的日值由各要素的小时平均值计算得到,观测资料经过了空间一致性和时间连续性等数据质量控制。除降水资料外,气温和相对湿度每间隔2 d选取1 d的数据作为筛选后的样本进行研究,这样可较好地避免相邻数据的过分相关。在所选的样本序列中,对于气温、相对湿度,选取1992—2021年的1、4、7、10月的资料分别代表冬、春、夏、秋季。对于降水,选取1992—2021年的1—2月、4—5月、7—8月、10—11月分别代表冬、春、夏、秋季。

## 2 方法

### 2.1 滚动需求评估

RRR是WMO在2015年启动编制新的全球综

合观测系统手册时被确定的重要原则,其流程被确定为WMO所有成员国和参与观测合作的网络应遵循的观测站网设计、规划发展和效果评价的规范<sup>[17]</sup>。OSCAR是全球综合观测系统的重要组成部分,它由4个组分构成:OSCAR/需求、OSCAR/分析、OSCAR/地面和OSCAR/空间。其中,OSCAR/分析将现有观测系统的能力与WMO的RRR过程提出的需求进行比对,使得专家和观测系统运行方找出差距并支持他们的规划。OSCAR将气象应用需求划分了14个领域,WMO按应用、变量、领域分别列出了各指标的观测用户需求,并给出了每种需求类型的门限值、目标值和突破值。在规划和设计观测系统时,从成本效益的角度出发,使观测系统达到突破值要求的水平是最适合的。

表1 山东地面气象观测站信息  
Table 1 Information of surface meteorological observing stations in Shandong

地面气象观测站类型	数量/个	资料时间
国家级基准、基本及常规气象观测站	123	1992—2021年
国家气象观测站	298	—
区域气象观测站	1 474	—
应用气象观测站	81	—

注:“—”表示该类观测站在此文的研究中不涉及资料时间。

表2给出了常用领域要素水平分辨率的目标值、突破值及门限值。由于不能获取到地面观测设备的各种完备数据,此文没有对全方位指标的需求差距分析评估,选取主要的评估指标水平分辨率,对山东已建的地面气象观测站网进行分析评估。

表2 常用观测要素的OSCAR应用领域的水平分辨率指标值

Table 2 Horizontal resolution index values of common observing elements in application fields of OSCAR 单位:km

要素	目标值/突破值/门限值				
	短时临近预报	高分辨率数值预报	全球数值天气预报	农业气象	海洋应用
气温(地表)	1/5/20	1/5/20	15/50/250	1/5/20	0.5/1/10
气压(地表)	—	1/5/20	15/100/500	—	1/10/25(海洋预报)
比湿(地表)	—	1/5/20	15/50/250	1/5/20	1/5/25
风向和风速(地表)	1/5/20	0.5/5/20	—	1/5/20	10/50/200
地表降水强度(固态或液态)	1/10/50	0.5/2/10	5/15/50	0.25/1/10	—

注:“—”代表该要素在该领域未设定观测用户需求值。

### 2.2 结构函数

结构函数揭示了变量在空间不同点间的离散程度。Gandin<sup>[18]</sup>将其定义为:某个气象要素在A、B两点间的结构函数 $b_f(A, B)$ 为两个站点间要素距平差值平方的平均值。计算公式为

$$b_f(A, B) = \overline{[f'(A) - f'(B)]^2}, \quad (1)$$

其中: $f'(A)$ 和 $f'(B)$ 分别代表要素 $f$ 在A、B两点的距平值。为了表征结构函数与站点间距的关系,需要计算站点间的距离,见公式(2)。

$$l = \rho [2 - 2\sin \theta_A \sin \theta_B - 2\cos \theta_A \cos \theta_B \cos(\lambda_A - \lambda_B)]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

其中: $l$ 代表 $A$ 、 $B$ 两点的站间距离, $\rho$ 为地球半径, $\theta$ 、 $\lambda$ 分别代表站点的纬度和经度。

### 2.3 观测随机误差及内插标准误差

#### 2.3.1 观测随机误差

气象要素的观测误差由系统误差和随机误差两部分组成<sup>[13]</sup>。其系统误差在采用偏差计算结构函数时已被消除。假设区域内气象要素在某点上的随机误差不与其他点的偏差和随机误差相关,且各点观测随机误差相等,则

$$b_f'(l) = b_f(l) + 2\sigma_f^2 \quad (3)$$

其中: $b_f'(l)$ 和 $b_f(l)$ 分别为实际和理论的结构函数, $l$ 和 $\sigma_f^2$ 分别代表 $A$ 、 $B$ 两点的距离和观测随机标准误差。由公式(3)可见,实际观测资料得到的结构函数要高于其理论值。若 $A$ 、 $B$ 两点重合时,即 $l=0$ ,则 $b_f(0)=0$ 。因此

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{2}b_f'(0) \quad (4)$$

将实际观测资料获得的结构函数推算至零距离,由公式(4)可得观测随机标准误差的估算值。

#### 2.3.2 内插标准误差

针对线段、正三角形、正方形3种内插情况进行讨论。气象要素插值其两点间的中点误差最大。 $A$ 、 $B$ 两点的中点 $C$ 的内插标准误差 $E$ 可表示为:

$$E = b_f\left(\frac{l}{2}\right) - \frac{1}{4}b_f(l) + \frac{1}{2}\sigma_f^2 \quad (5)$$

假设区域内满足各向同性和均匀性,由公式(3)、(4)可知,线段内插标准误差与结构函数的关系式如下:

$$E = b_f'\left(\frac{l}{2}\right) - \frac{1}{4}b_f'(l) - \frac{1}{2}b_f'(0) \quad (6)$$

其中, $b_f'(0)$ 是将结构函数与距离的关系曲线外推至距离零处而得到。

对平面正三角形和正方形的中心进行内插,其内插标准误差 $E$ 分别见公式(7)、(8):

$$E = b_f'\left(\frac{l}{\sqrt{3}}\right) - \frac{1}{3}b_f'(l) - \frac{1}{2}b_f'(0) \quad (7)$$

$$E = b_f'\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right) - \frac{1}{4}b_f'(l) - \frac{1}{8}b_f'(\sqrt{2}l) - \frac{1}{2}b_f'(0) \quad (8)$$

根据公式(6)、(7)、(8),由各观测要素结构函数便可计算不同距离下内插标准误差 $E$ 值。

### 2.4 最大容许误差和最大容许距离

Gandin<sup>[18]</sup>研究发现,对绝大多数气象要素而言,其点值内插的标准误差不应超过观测标准误差。

最大容许误差可由公式(5)右边前两项的数值不超过观测标准误差来确定,因此

$$E \leq \frac{3}{2}\sigma_f^2 \quad (9)$$

$$E_{\max} = \frac{3}{2}\sigma_f^2 = \frac{3}{4}b_f'(0) \quad (10)$$

公式(10)中 $E_{\max}$ 为最大容许误差,对应距离为最大容许距离。该距离为站间距合理布局的依据。

## 3 结果与讨论

### 3.1 山东地面气象观测站网水平分辨率评估分析

观测站网水平分辨率由站网水平站间距计算公式<sup>[19]</sup>得到

$$C = \sqrt{10\,000 \times S / (N_1 + N_2 + \dots + N_i + \dots + N_m)} \quad (11)$$

其中: $C$ 表示平均站间距,即水平分辨率,单位为 $\text{km}$ ;  $S$ 表示面积,单位为 $\text{万 km}^2$ ;  $N_i$ 表示第 $i$ 种仪器的观测站数量;  $m$ 表示观测目标要素的仪器种类数量。

山东4类地面气象观测站各要素水平分辨率见表3。区域气象观测站最小,应用气象观测站最大。其中,区域气象观测站降水要素水平分辨率最小,为 $10.36 \text{ km}$ ,应用气象观测站风向和风速及降水要素水平分辨率最大,为 $58.59 \text{ km}$ 。国家气象观测站和区域气象观测站各要素水平分辨率由小到大依次为降水、气温、风向和风速、相对湿度、气压,国家级基准、基本及常规气象观测站各要素水平分辨率相同,应用气象观测站气温与相对湿度水平分辨率小于风向和风速及降水。

山东各地市地面气象观测站各要素水平分辨率见表4。各市地面气象观测站各要素水平分辨率大致为:气压最大,相对湿度次之,再次之为风向和风速,风向和风速水平分辨率略大于气温和降水。除滨州、德州、东营、菏泽、济宁外,其他地市降水要素的水平分辨率均最小。各地市地面观测站各要素水平分辨率分布趋势与全省的基本一致。山东各市地面气象观测站降水、气温、风向和风速的水平分辨率优于相对湿度和气压的水平分辨率。

就各市观测要素水平分辨率而言,菏泽的相对湿度、气压、风向和风速水平分辨率全省最大,东营的气温、降水要素的水平分辨率全省最大;济南的气温、降水、风向和风速要素的水平分辨率全省最小,



日照的相对湿度、气压要素的水平分辨率全省最小。力较强,临沂、菏泽、潍坊地面观测站整体探测能力  
 综上,济南、青岛、淄博、日照地面观测站整体探测能 较弱。

表3 山东地面气象观测站网各要素水平分辨率

Table 3 Horizontal resolution of each element of surface meteorological observing station networks in Shandong

观测要素	国家级基准、基本及 常规气象观测站		国家气象观测站		区域气象观测站		应用气象观测站	
	数量/个	水平分辨率/km	数量/个	水平分辨率/km	数量/个	水平分辨率/km	数量/个	水平分辨率/km
气温	123	35.83	283	23.62	1 364	10.76	81	44.15
相对湿度	123	35.83	81	44.15	294	23.17	81	44.15
气压	123	35.83	78	44.99	258	24.74	0	—
风向和风速	123	35.83	237	25.81	1 103	11.96	46	58.59
降水	123	35.83	298	23.02	1 470	10.36	46	58.59

注:“—”代表该要素数量为0,对应的水平分辨率未做计算。

表4 山东各市地面气象观测站网各要素水平分辨率

Table 4 Horizontal resolution of each element of surface meteorological observing station networks in cities of Shandong

城市	地面气象观测站数量及水平分辨率									
	气温		相对湿度		气压		风向和风速		降水	
	数量/个	水平分辨率/km	数量/个	水平分辨率/km	数量/个	水平分辨率/km	数量/个	水平分辨率/km	数量/个	水平分辨率/km
济南	137	7.64	44	13.48	31	16.06	126	7.97	138	7.61
青岛	172	8.10	83	11.66	73	12.44	167	8.22	182	7.88
济宁	161	8.34	22	22.55	16	26.44	80	11.83	159	8.39
泰安	111	8.36	25	17.62	13	24.43	110	8.40	124	7.91
德州	146	8.42	17	24.68	12	29.38	103	10.03	143	8.51
聊城	120	8.48	20	20.77	15	23.98	118	8.55	118	8.55
淄博	82	8.53	40	12.21	35	13.05	79	8.69	93	8.01
日照	70	8.76	43	11.18	40	11.59	69	8.82	83	8.04
枣庄	59	8.79	13	18.74	11	20.37	58	8.87	61	8.65
菏泽	155	8.86	13	30.58	10	34.86	58	14.48	153	8.91
威海	68	9.24	43	11.61	35	12.87	67	9.30	76	8.74
滨州	100	9.58	29	17.78	21	20.90	74	11.13	98	9.67
烟台	131	10.29	71	13.97	60	15.20	126	10.49	147	9.71
临沂	149	10.74	29	24.35	20	29.32	145	10.89	168	10.12
潍坊	138	10.82	35	21.49	23	26.51	79	14.31	144	10.60
东营	52	12.59	52	12.59	44	13.69	50	12.84	50	12.84

将山东4类地面气象观测站各要素水平分辨率与OSCAR各应用领域的指标值(门限值、突破值、目标值)进行对比分析(图1—2)。可见,国家级基准、基本及常规气象观测站和国家气象观测站的气温、相对湿度、气压、风向和风速要素的水平分辨率仅优于全球数值天气预报的突破值,高于其门限值,降水要素的水平分辨率达到了短时临近预报和全球数值天气预报的门限值;区域气象观测站的气温、风向和风速、降水要素的水平分辨率基本达到了OSCAR各应用领域的门限值。其中,气温和降水要素的水平分辨率分别优于全球数值天气预报的目标值和突破值,风向和风速要素的水平分辨率优于海洋应用领域突破值。相对湿度、气压要素水平分辨率略差,仅优于全球数值天气预报的突破值,与海洋应用领域门限值持

平;应用气象观测站的气温、相对湿度要素的水平分辨率略优于全球数值天气预报突破值,风向和风速要素的水平分辨率优于海洋应用的门限值,降水要素的水平分辨率最差,未达到任何常用应用领域的门限值。

综上,除全球数值天气预报和海洋应用领域外,4类地面气象观测站各要素水平分辨率相比OSCAR各应用领域突破值尚有较大差距。其中,区域气象观测站探测能力最好,应用气象观测站探测能力最弱。国家级基准、基本及常规气象观测站和国家气象观测站的气温、相对湿度、气压、风向和风速探测能力相当,降水略优;区域气象观测站气温、降水、风向和风速探测能力略优于气压和相对湿度;应用气象观测站气温、相对湿度探测能力优于风向和风速及降水,降水要素的探测能力最弱。

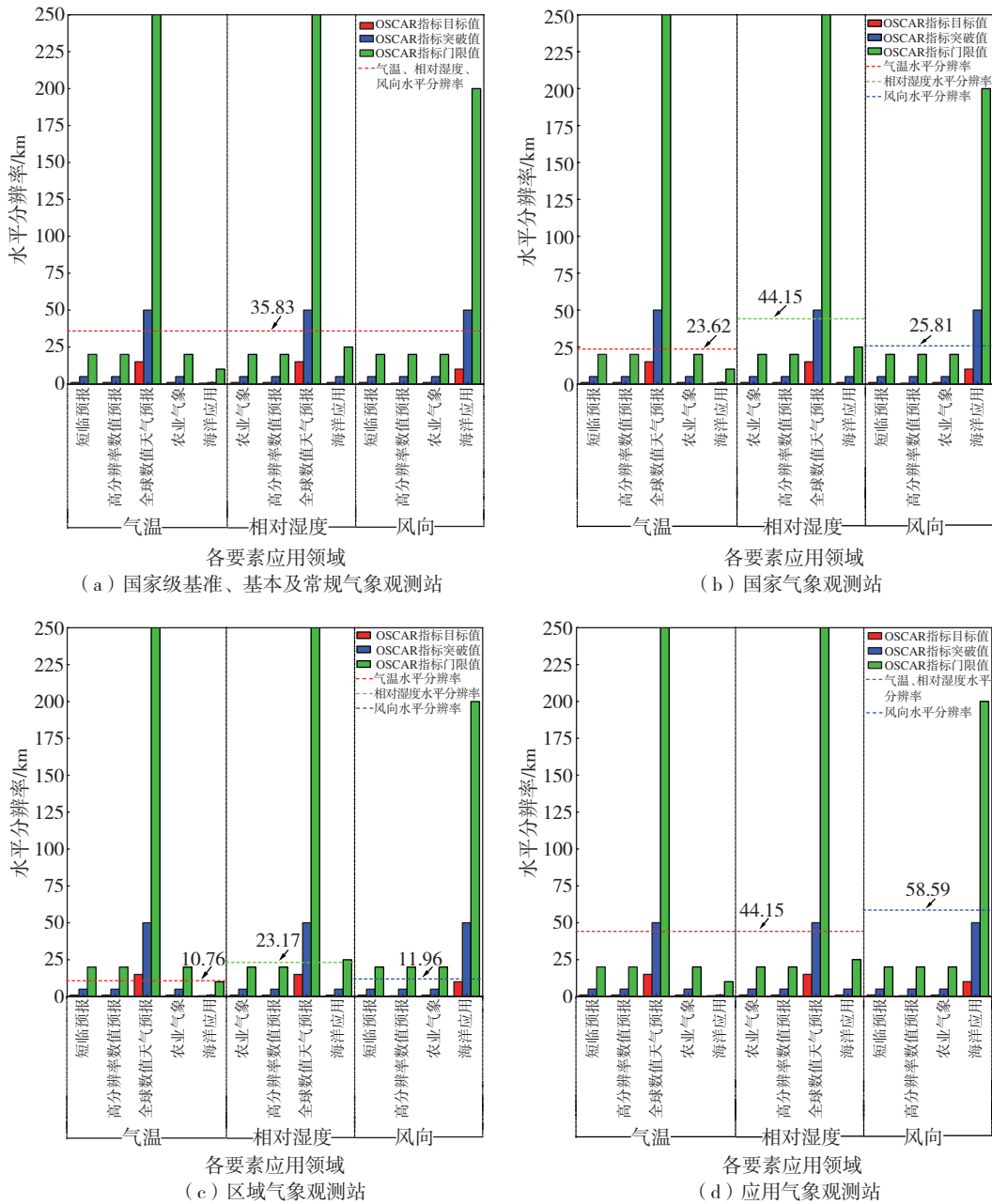


图1 4类地面气象观测站气温、相对湿度、风向的水平分辨率与OSCAR各领域指标值对比  
 Fig.1 Comparison between horizontal resolution of temperature, relative humidity and wind direction of 4 types of surface meteorological observing stations and index values of various fields of OSCAR

### 3.2 山东国家级基准、基本及常规气象观测站最佳布站方式和站间距分析

#### 3.2.1 地面气温、相对湿度及降水结构函数

图3a为山东国家级基准、基本及常规气象观测站日平均气温四季结构函数随距离变化特征。气温四季结构函数大致上随距离增加而增大,且随着距离的增加,结构函数的季节差异性也逐渐变大。其中,夏、秋、冬季结构函数差异不显著,春季结构函数明显大于其他3个季节,且结构函数随距离的变化

更为剧烈一些。主要原因是山东春季处于冬、夏季风抗争的地带,冷暖气团进退不定,南北风交替十分频繁,导致气温变化幅度较大。距离小于600 km,气温四季结构函数变化较为平稳,近似线性,此后随着距离的增大,结构函数曲线波动较明显。由站点数量和距离的统计结果(图3b)可见,600 km以后,随着距离的增加,站点数变得越来越少,站点样本数过少造成结构函数偏离度变大,出现较大的波动。

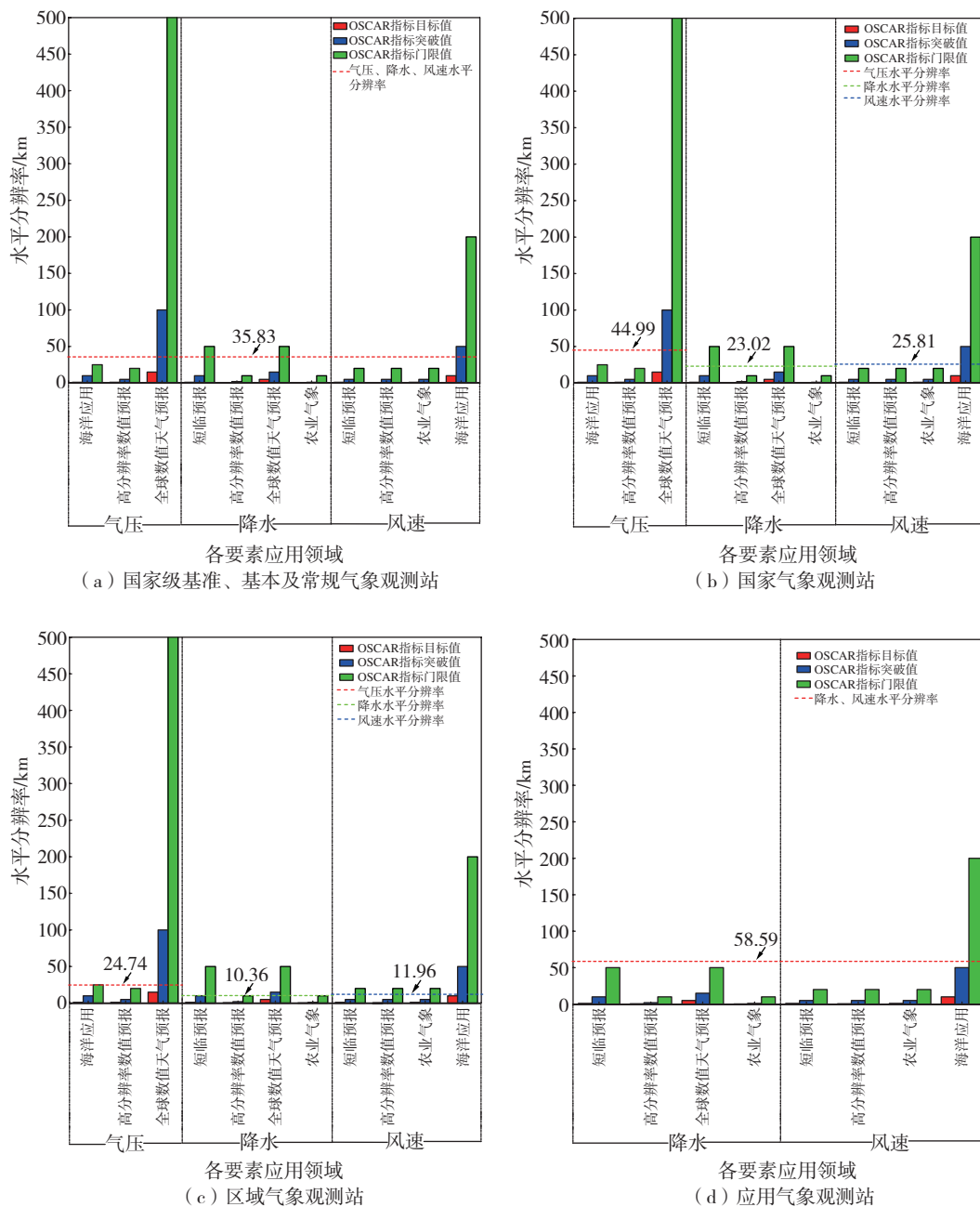


图2 4类地面气象观测站气压、降水、风速水平分辨率与OSCAR各领域指标值对比

Fig.2 Comparison between horizontal resolution of air pressure, precipitation and wind speed of 4 types of surface meteorological observing stations and index values of various fields of OSCAR

相对湿度四季结构函数基本上随距离增加而增大,春季结构函数最大,夏季结构函数最小(图4a)。其中,冬、春季相对湿度的结构函数变化趋势基本一致,且其结构函数随距离的增加变化幅度明显,夏季相对湿度的结构函数随距离的增大变化不明显。冬、春季冷空气影响频繁,空气干冷,地面相对湿度的空间变化率较大,而夏季空气相比冬春季要湿润一些,且气温相对高一些,因而其结构函数的分布也较为均

匀。图4b为降水结构函数随距离的变化,夏季降水结构函数较春、秋、冬季有明显差异,主要是由降水的随机性较大导致的。夏季降水的结构函数最大,冬季最小。夏季雨水丰沛,暴雨的小尺度特征明显,而冬季的降水量小且多为系统性降水,故其结构函数值也非常小,且结构函数随距离基本不变。相对湿度及降水结构函数在远距离处出现的波动也是由于站点样本数过少,造成了结构函数偏离度变大。

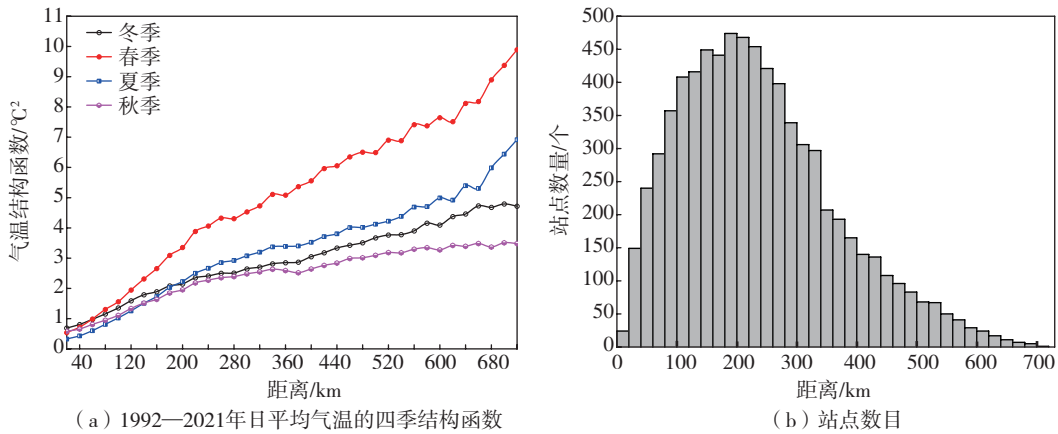


图3 山东国家级基准、基本及常规气象观测站1992—2021年日平均气温四季结构函数及站点数目统计  
Fig.3 Structure functions of 4 seasons' daily mean temperature of national reference, basic and conventional meteorological observing stations in Shandong from 1992 to 2021 and distribution of the number of stations

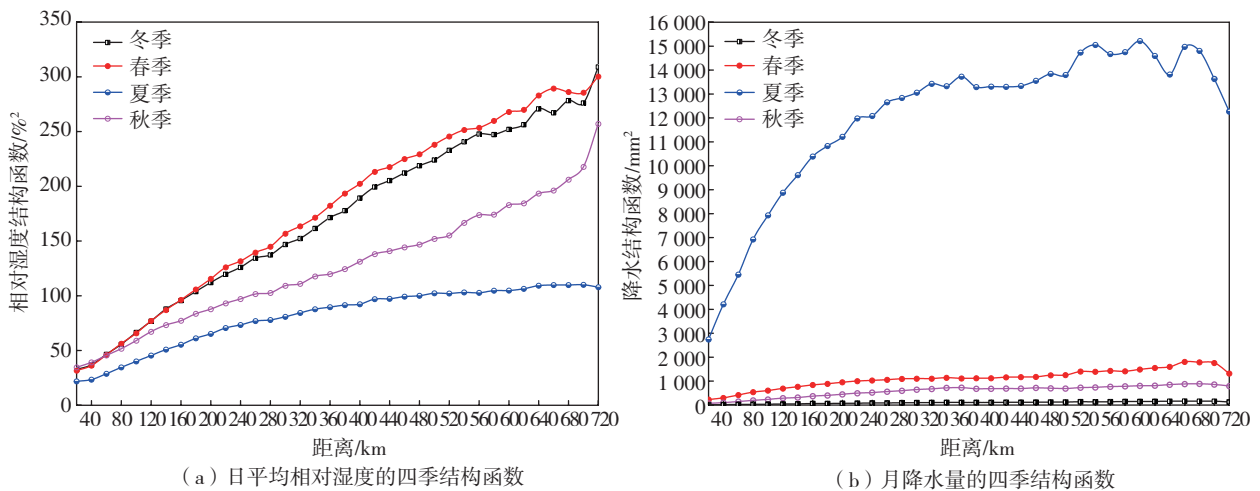


图4 山东国家级基准、基本及常规气象观测站1992—2021年相对湿度和降水量的四季结构函数  
Fig.4 Structure functions of 4 seasons' relative humidity and precipitation of national reference, basic and conventional meteorological observing stations in Shandong from 1992 to 2021

由于实际计算的结构函数为离散数据,为此需要对结构函数进行拟合。采用线性、二次多项式、三次多项式、指数4种函数对结构函数进行拟合,拟合结果(图略)显示,二次或三次多项式的拟合效果好。由公式(4)中 $b_f'(0) > 0$ 的限制条件以及结构函数拟合要满足拟合精度高及拟合函数尽量简单等特点,故采用二次或三次多项式对气温、相对湿度及降水的结构函数与距离的关系进行拟合,拟合后的回归方程见表5。

3.2.2 内插标准误差与距离的关系

将表5中各要素四季回归方程分别代入公式(6)—(8),即可得到气温、相对湿度及降水在线段、正三角形、正方形3种内插方式下的内插标准误差与距离的关系式(式略)。由关系式绘制日平均气

温、日平均相对湿度及月降水的内插标准误差与距离的关系曲线,见图5—7。可见,四季的日平均气温、日平均相对湿度及月降水在3种内插方式下的内插标准误差均随距离的增加而增大。对气温、相对湿度、降水而言,在距离越小的情形下,正方形内插精度最高,线段内插精度最低,而当距离超过某一临界距离阈值时,正三角形内插精度最高,正方形内插精度最低。且该临界距离阈值随观测要素和季节的不同而不同。

气温、相对湿度、降水内插精度的季节性差异较大。气温内插标准误差由大到小的季节排序为春、冬、秋、夏;距离小于70 km,相对湿度内插标准误差由大到小的季节排序为秋、冬、春、夏,随距离变大,内插标准误差由大到小的季节排序为春、冬、秋、夏;降水



内插标准误差由大到小的季节排序为夏、春、秋、冬。春季气温内插误差最大,与春季结构函数最大相一致,主要是春季气温的时间变幅和空间梯度较大导致的;夏季相对湿度内插标准误差最小,与夏季结构函数最小是一致的;而冬季降水的内插标准误差最小,与冬季的降水量相比其他季节都少有关。

### 3.2.3 最大容许内插标准误差及最大容许距离

利用表5各要素的回归方程分别求取其距离为零处的结构函数 $b_j'(0)$ ,然后代入公式(10)即得到 $E_{\max}$ 。将 $E_{\max}$ 再分别代入到3.2.2节中得到的气温、相对湿度及降水在线段、正三角形、正方形3种内插方式下的内插标准误差与距离的关系式中,即可得到各要素在线段、正三角形、正方形3种内插方式下的最大容许距离,结果见表6。由最大容许距离,结合图5—7,当距离满足点值内插标准误差小于观测标准误差时,气温、相对湿度和降水均表现为正三角形内插精度最高,且正三角形内插的最大容许距离也最大。故对山东国家级基准、基本及常规气象观测站的气温、相对湿度和降水,科学合理的布站方案

均为正三角形布设。气温最佳布站距离应不超过43.6 km,相对湿度最佳布站距离应不超过63.4 km,降水最佳布站距离应不超过40.3 km。

表5 山东国家级基准、基本及常规气象观测站1992—2021年日平均气温、日平均相对湿度及月降水量结构函数与距离的回归方程

Table 5 Regression equation of structure function and distance of daily mean temperature, daily mean relative humidity and monthly precipitation of national reference, basic and conventional meteorological observing stations in Shandong from 1992 to 2021

要素	季节	回归方程
气温	春季	$b_j' = 0.33586 + 0.01472 \times l - 3.583 \times 10^{-6} \times l^2$
	夏季	$b_j' = 0.23164 + 0.00947 \times l - 2.331 \times 10^{-6} \times l^2$
	秋季	$b_j' = 0.21395 + 0.01174 \times l - 1.802 \times 10^{-5} \times l^2 + 1.184 \times 10^{-8} \times l^3$
	冬季	$b_j' = 0.37217 + 0.01233 \times l - 2.150 \times 10^{-5} \times l^2 + 1.931 \times 10^{-8} \times l^3$
相对湿度	春季	$b_j' = 14.47767 + 0.54629 \times l - 2.0904 \times 10^{-4} \times l^2$
	夏季	$b_j' = 10.84518 + 0.34827 \times l - 4.3373 \times 10^{-4} \times l^2 + 1.9772 \times 10^{-7} \times l^3$
	秋季	$b_j' = 21.55182 + 0.46296 \times l - 8.0561 \times 10^{-4} \times l^2 + 7.9905 \times 10^{-7} \times l^3$
	冬季	$b_j' = 19.53968 + 0.48514 \times l - 1.572 \times 10^{-4} \times l^2$
降水	春季	$b_j' = 146.40681 + 5.5713 \times l - 0.01058 \times l^2 + 8.2084 \times 10^{-6} \times l^3$
	夏季	$b_j' = 2227.29064 + 64.08049 \times l - 0.11163 \times l^2 + 6.3141 \times 10^{-5} \times l^3$
	秋季	$b_j' = 46.84689 + 2.37636 \times l - 0.0018 \times l^2$
	冬季	$b_j' = 5.66508 + 0.33636 \times l - 1.6713 \times 10^{-4} \times l^2$

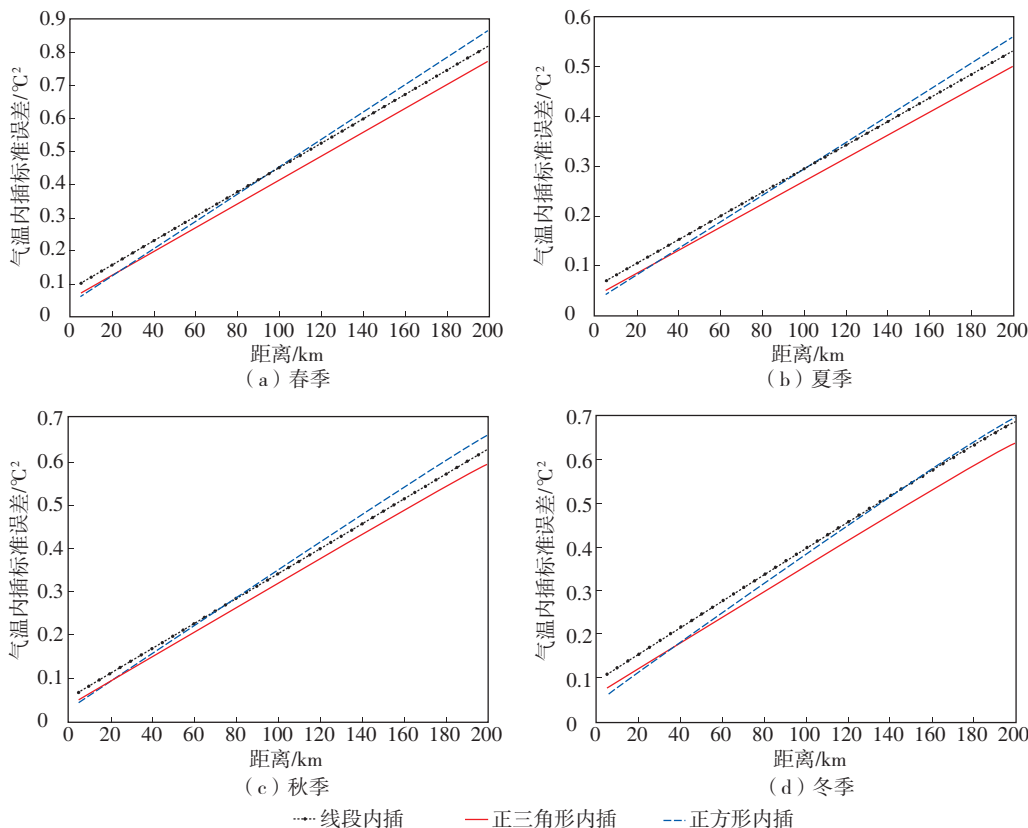


图5 山东国家级基准、基本及常规气象观测站1992—2021年日平均气温在3种布站方案下的内插标准误差与距离的关系

Fig.5 Relationship between interpolation standard error and distance of daily mean temperature of national reference, basic and conventional meteorological observing stations in Shandong from 1992 to 2021 under three stationing schemes

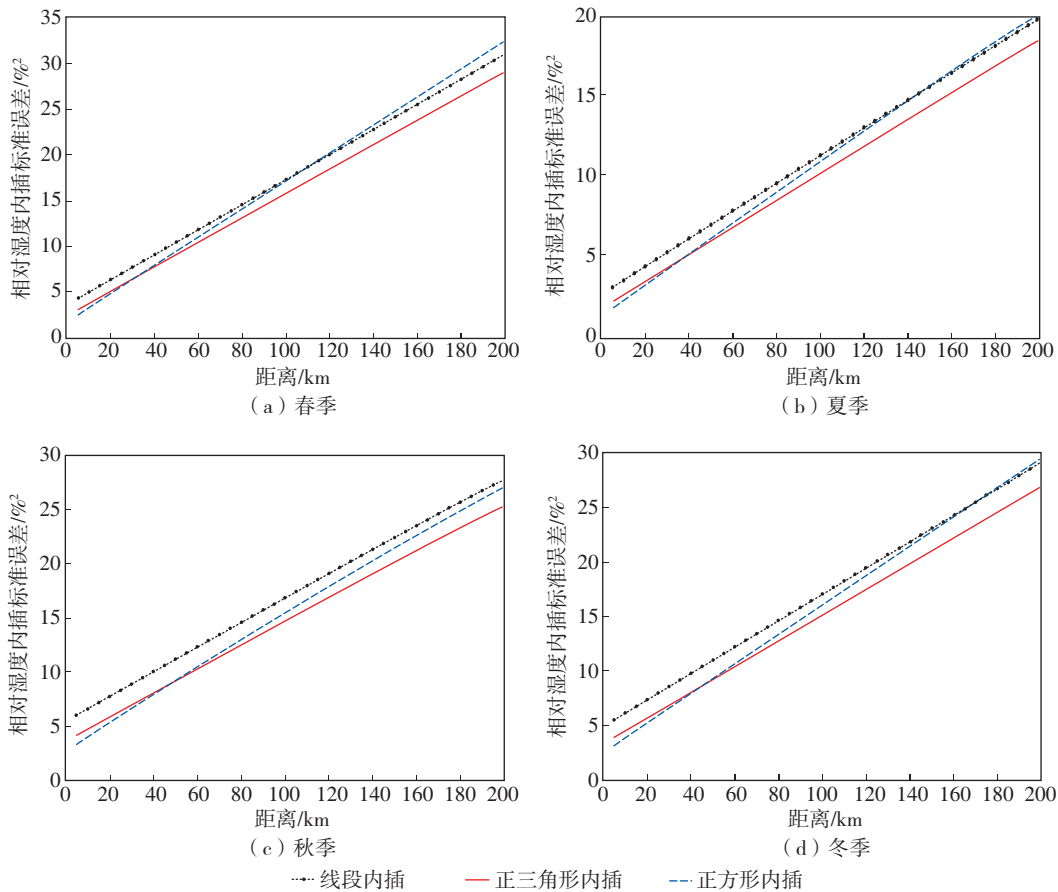


图6 山东国家级基准、基本及常规气象观测站 1992—2021 年的日平均相对湿度在 3 种布站方案下的内插标准误差与距离的关系

Fig.6 The same as Fig.5, but for daily mean relative humidity

#### 4 结论

依据 WMO 的 RRR 原则,评估了山东 4 类地面观测站各要素的水平分辨率,与 OSCAR 不同气象应用领域的需求进行对比分析,评估了山东地面观测站网的探测能力。利用山东 1992—2021 年国家级基准、基本及常规气象观测站资料,基于结构函数研究了气温、相对湿度、降水要素的最佳布站方案和最佳布站距离。主要结论如下:

(1)就山东 4 类地面气象观测站各要素水平分辨率而言,区域气象观测站最小,应用气象观测站最大。国家气象观测站和区域气象观测站各要素水平分辨率由小到大依次为降水、气温、风向和风速、相对湿度、气压,国家级基准、基本及常规气象观测站各要素的水平分辨率均相同,应用气象观测站气温与相对湿度要素的水平分辨率小于风向和风速及降水。各地市地面观测网探测能力显示,济南、青岛、淄博、日

照探测能力较强,临沂、菏泽、潍坊探测能力较弱。

(2)除全球数值天气预报和海洋应用领域外,山东 4 类地面气象观测站各要素水平分辨率相比 OSCAR 各应用领域突破值尚有较大差距。区域气象观测站探测能力最好,应用气象观测站探测能力最弱。国家级基准、基本及常规气象观测站和国家气象观测站的气温、相对湿度、气压、风向和风速探测能力相当,降水略优;区域气象观测站气温、降水、风向和风速探测能力略优于气压和相对湿度;应用气象观测站气温、相对湿度探测能力优于风向和风速及降水。

(3)山东国家级基准、基本及常规气象观测站气温、相对湿度、降水四季结构函数整体上随距离的增加而增大,结构函数的季节性差异明显。气温结构函数春季最大,秋季最小;相对湿度结构函数春季最大,夏季最小;降水结构函数夏季最大,冬季最小。不同观测要素结构函数的季节性差异反映了各要素的时间变幅和空间梯度季节分布的不同。

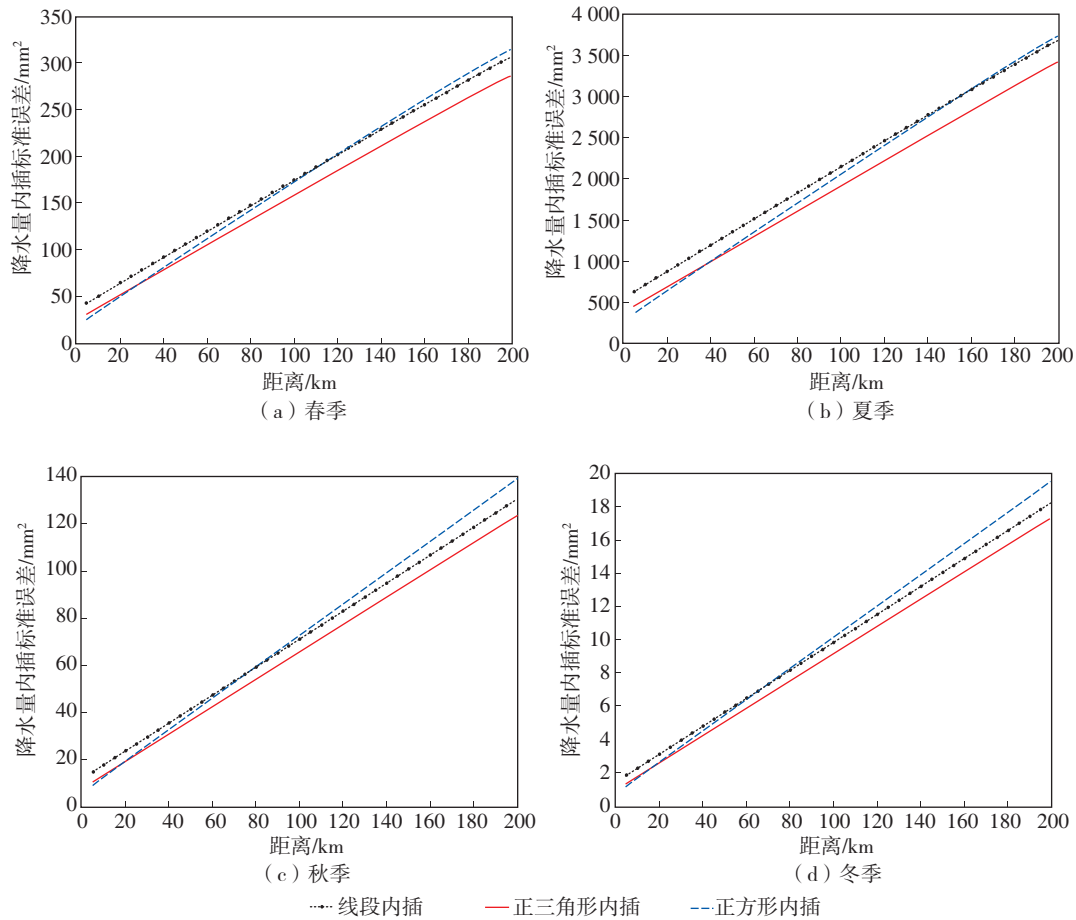


图7 山东国家级基准、基本及常规气象观测站1992—2021年的月降水量在3种布站方案下的内插标准误差与距离的关系

Fig.7 The same as Fig.5, but for monthly precipitation

表6 各观测要素在3种布站方案下的最大容许内插标准误差和最大容许距离

Table 6 The maximum allowable interpolation standard error and the maximum allowable distance of each observing element under three stationing schemes

要素	季节	$E_{\max}$	$\sqrt{E_{\max}}$	最大容许距离/km		
				线段内插	正三角形内插	正方形内插
气温	春季	0.251 9 $^{\circ}\text{C}^2$	0.501 9 $^{\circ}\text{C}$	45.6	54.6	50.9
	夏季	0.173 7 $^{\circ}\text{C}^2$	0.416 8 $^{\circ}\text{C}$	48.9	58.5	54.5
	秋季	0.160 5 $^{\circ}\text{C}^2$	0.400 6 $^{\circ}\text{C}$	36.5	43.6	40.7
	冬季	0.279 1 $^{\circ}\text{C}^2$	0.528 3 $^{\circ}\text{C}$	60.5	72.5	67.7
相对湿度	春季	10.858 3 $\% ^2$	3.295 2 $\%$	53.0	63.4	59.1
	夏季	8.133 9 $\% ^2$	2.852 0 $\%$	62.3	74.6	69.6
	秋季	16.163 9 $\% ^2$	4.020 4 $\%$	93.8	112.7	105.6
	冬季	14.654 8 $\% ^2$	3.828 2 $\%$	80.6	96.2	89.8
降水	春季	109.805 $\text{mm}^2$	10.478 8 mm	52.7	63.0	58.9
	夏季	1 670.468 $\text{mm}^2$	40.871 4 mm	69.7	83.4	77.9
	秋季	35.135 $\text{mm}^2$	5.927 5 mm	39.4	47.1	44.0
	冬季	4.249 $\text{mm}^2$	2.061 3 mm	33.7	40.3	37.6

(4) 山东国家级基准、基本及常规气象观测站气温、相对湿度、降水的线段、正三角形、正方形内插标准误差与距离均呈线性关系,且随距离增加而增大。在距离满足点值内插标准误差小于观测标准误

差时,气温、相对湿度和降水均为正三角形内插精度最高。

(5) 山东国家级基准、基本及常规气象观测站的气温、相对湿度和降水,最佳布站方案均为正三角

形布设。气温最佳布站距离应不超过 43.6 km,相对湿度最佳布站距离应不超过 63.4 km,降水最佳布站距离应不超过 40.3 km。

### 参考文献:

- [1] FENG S, HU Q, QIAN W H. Quality control of daily meteorological data in China, 1951–2000: a new dataset [J]. *Int J Climatol*, 2004, 24(7): 853-870.
- [2] 高理, 刘焕彬. 1991—2021 年山东省人体舒适度时空分布特征[J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(3): 71-79.
- [3] ZHAO H, ZOU X L, QIN Z K. Quality control of specific humidity from surface stations based on EOF and FFT: case study[J]. *Front Earth Sci*, 2015, 9(3): 381-393.
- [4] 朱文刚, 李昌义, 车军辉. 基于统一高度 Cressman 方法的地面 2 m 气温客观分析[J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(2): 138-148.
- [5] 张茜茹, 陈益玲, 李长军, 等. 两种融合降水实况分析产品在山东地区的适用性评估[J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(2): 100-108.
- [6] 李伶俐, 胡庆芳, 黄勇, 等. 近实时卫星降水数据对南京“20170610”极端性强降水过程的监测分析[J]. *高原气象*, 2018, 37(3): 806-814.
- [7] DROZDOV O A, SHEPELEVSKII A A. The theory of interpolation in a stochastic field of meteorological elements and its application to meteorological map and network rationalization problems[J]. *Trudy Niu Gugms*, 1946, Series 1, No.13.
- [8] MOOLEY D A, ISMAIL M. Structure functions of rainfall field and their application to network design in the tropics [J]. *Arch Meteor Geophys Bioclimatol Ser B*, 1982, 30(1): 95-105.
- [9] SCHNEEBELI M, LATERNSE R M. A probabilistic model to evaluate the optimal density of stations measuring snowfall[J]. *J Appl Meteor*, 2004, 43(5): 711-719.
- [10] 廖洞贤. 最优测站距离、最优垂直分层和最优观测时间间隔的决定[J]. *气象学报*, 1985, 43(2): 153-161.
- [11] 卢文芳, 王永华. 空间结构函数在上海地区气象站网设计中的应用[J]. *南京气象学院学报*, 1989, 12(3): 325-332.
- [12] 赵瑞霞, 李伟, 王玉彬, 等. 空间结构函数在北京地区气象观测站网设计中的应用[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(1): 94-101.
- [13] 白光弼, 刘岳俊. 高原和山区气象站网的合理布局[J]. *陕西气象*, 1992(3): 18-21.
- [14] 于杰, 曾文华, 王建刚. 中国东南地区气象要素场线性内插标准误差初步分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2003, 4(5): 95-99.
- [15] 岑思弦, 李跃清, 赖欣. 四川降水相关函数场的分析及其在气象观测站网布局中的应用[J]. *干旱气象*, 2015, 33(5): 874-881.
- [16] MUNN R E. The design of environmental monitoring systems [J]. *Prog Phys Geog: Earth Environ*, 1980, 4(4): 567-576.
- [17] 许小峰. 世界气象组织观测系统的需求与评估 [EB/OL]. (2022-4-12) [2023-07-28]. <https://blog.sciencenet.cn/blog-1310230-1333587.html>.
- [18] GANDIN L S. The planning of meteorological station networks [R]. Geneva: WMO, 1970.
- [19] 吴薇, 黄晓龙, 周春花, 等. 四川省地面雨量站网现状分析[J]. *气象科技*, 2023, 51(5): 639-647.