

# 易覆冰区域气象数据信息插值技术研究

范强, 吴建蓉, 张啟黎, 黄军凯, 赵超, 李长兴, 陈佳胜, 袁娴枚

贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州贵阳, 550002

## Research on interpolation technology of meteorological data information in icing regions

Qiang Fan, Qili Zhang, Jianrong Wu, Junkai Huang, Chao Zhao, Changxing Li, Jiasheng Chen, Xianmei Yuan

Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guizhou Guiyang, 550002, China

**摘要:** 随着全球气候变暖、极端天气的增多, 电网覆冰灾害问题将会更加突出。为减少输电线路覆冰事故的发生, 有效保障电力系统的安全运行, 有必要充分利用和发挥好输电线路覆冰在线监测作用。本文在研究覆冰数据特点和几种常用气象数据插值算法的特点基础上, 分别采用了自然邻域法、反距离权重法和克里金算法对覆冰数据中缺测和异常的气象参数进行插值补全, 并结合交叉验证对比研究在研究区域的插值算法适用性, 为后续历史覆冰样本数据分析积累充分的数据基础。

**关键词:** 覆冰; 气象数据; 插值; 克里金法; 反距离权重法

**ABSTRACT:** With the increase of global warming and extreme weather, the problem of power grid icing disasters will be more prominent. In order to reduce the occurrence of transmission line icing accidents and effectively ensure the safe operation of power system, it is necessary to make full use of the on-line monitoring of transmission line icing. In this paper, the characteristics of ice cover data and interpolation algorithms of several common meteorological data are studied. The natural neighborhood method, inverse distance weight method and Kriging algorithm are used to interpolate and complete the meteorological parameters of missing measurement and abnormal in ice cover data. The applicability of interpolation algorithm in the study area is studied by cross-validation comparison. This paper has accumulated sufficient data basis for the subsequent analysis of historical ice covering sample data.

**KEY WORD:** Icing; Meteorological data; Interpolation; Kriging method; Inverse distance weighted method

## 0 背景

电力系统安全稳定运行直接影响着生产和生活, 电能传输是电网运行的重要环节, 输电线路的安全可靠尤为重要<sup>[1-4]</sup>。受温度、湿度、风速等气象因素的影响, 尤其是在冬季湿度大、气温低的中高海拔地区、山地时容易覆冰, 输电线路安全运行遭遇极大挑战。由于输电线路大多为长距离, 电网线路经常跨越情况复杂的中重冰区、易覆冰微地形区, 严重情况下极易导致导线断线、杆塔倒塌等风险发生, 从而引发较大面积的停电<sup>[5-9]</sup>。

多年来, 随着覆冰监测技术日新月异发展, 电网在覆冰运维和监测方面积累了丰富的覆冰观测数据, 包括有人工巡检报送和在线覆冰监测

终端数据<sup>[10-14]</sup>, 但由于观测技术手段不同等原因, 历史覆冰监测数据存在汇总杂乱、格式不统一、参数缺失等问题, 导致覆冰观测数据利用率相对较低, 如何充分利用这些数据发挥防冰减灾重要作用是亟待解决的问题。

利用空间插值算法对气象数据进行填补处理是对空间数据中离散的样本点数据增补, 也就是将空间气象监测数据从离散型转变为曲面型, 这样会有利于建立气象分布模型,

气象数据的空间插值方法是填补离散样本点之间的空间中缺失数据的一种方法, 即将空间上离散的气象监测数据转换为曲面数据, 以便对气象分布进行建模研究<sup>[15-16]</sup>。常用气象数据差值算法有自然邻域法 (NN, Natural Neighbor)、

反距离权重法 (IDW, Inverse Distance Weighted)、克里金法 (Kriging)、样条插值等, 算法的选择需要重点结合研究区域的地形地貌及气候特点<sup>[17-18]</sup>。因此, 本文以某地区覆冰在线监测系统记录的覆冰观测数据为基础, 从覆冰数据缺失情况及插值算法的基本原理着手, 针对各气象数据插值算法对覆冰终端气象参数进行插值精度对比, 从而选取精度较优的算法建立覆冰气象数据库, 对同类型地区的气象数据库建立具有参考价值。

## 1 数据来源

电网输电线路自然覆冰常呈现不可预见性、多样性及随机性, 尤其是电网设备在冬季冰期受到微地形区的影响, 从而使得局部区域存在气象差异, 甚至不同的微地形类别在同一区域也会有不同的覆冰特性和差异, 因此, 每年冬季, 都会将这些存在微地形、微气象区域内的电网设备作为冬季防冰减灾检查和巡视的重中之重区域。在气象数据选取方面, 覆冰监测终端部署在线路杆塔上, 其监测的气象数据已然是该杆塔所处微地形微气象作用的结果, 其准确性比气象部门模式预报格点数据较高。本研究数据源来源于电网输电线路覆冰监测终端自投运以来的覆冰厚度数据及对应气象参数数据。覆冰终端监测覆冰数据主要包含等值覆冰厚度、数据观测时间、气温、

## 2. 常见空间插值方法

本部分主要针对常用于气象数据插值的自然邻域法、反距离权重插值、克里金插值法进行原理研究及对比分析。

### 2.1 自然邻域法

自然邻域法 (也称作 Sibson 或区域占用插值) 主要是利用找待查询点附近的输入样本集合, 并根据区域面积大小按照比例对样本子集的权重实现插值<sup>[19-20]</sup>。自然邻域法局部特性较好, 但只能用来查询被查询点周边的样本子集, 同时要确保插值高度在所使用的样本范围内。

### 2.2 反距离权重法

反距离权重法实现的前提是假定所有的测

湿度、风速、风向、雨量、气压等属性信息。

覆冰终端极易受到运行环境的气候影响, 覆冰在线监测系统记录的覆冰观测数据主要存在以下问题: 1) 部分在线监测点存在缺失对应气象传感器导致部分气象要素缺失, 比如气压等; 2) 极端天气条件下, 终端覆冰较重导致传感器无法失正常运行, 气象要素记录异常, 比如风速传感器长时间为 0; 3) 仪器故障, 导致传回数据异常。

在进行插值之前需要剔除布设时间较短的终端和等值覆冰厚度较低的覆冰记录 (<10mm), 并通过设立一定的气象参数值阈值的方式对异常气象参数进行剔除, 考虑到插值过程繁琐, 精度难以保证, 考虑到架空输电线路所处环境复杂以及传感器的不稳定性, 覆冰相关数据不可避免地出现部分缺失、异常的“脏数据”, 直接剔除覆冰记录中缺失气象参数较多的记录。各个气象参数阈值见下表 1 所示。

表 1 覆冰在线监测气象数据异常值识别阈值表  
Tab1 Anomaly recognition for of icing online monitoring meteorological data threshold

项 目	温度 (°C)	大气压强 (hPa)	风速 (m/s)	相对湿 度 (%)
阈 值	超出区间 -30~40	超出区间 400~1000	超出区间 0~30	超出区 间 0~100

量值都会随着这些值到待插值点的距离增大而减小, 利用待插值点和已知点之间距离的反比计算权重实现插值<sup>[19-20]</sup>, 即样本点的值最终由范围内多个已知样本点的加权平均得到, 计算公式为:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_i \frac{1}{d_i^k})}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{d_i^k})} \quad \text{式 (1)}$$

上式中,  $n$  为区域内对未知点有影响的已知点数量;  $Z$  为区域内待插值点的估计值;  $d_i$  为第  $i$  个已知点到该待插值点的距离;  $Z_i$  为第  $i$  个已知点的值;  $k$  为指定的幂,  $k$  值应选择平均绝对误差值最小。

反距离权重法优点是原理易懂, 使用范围广, 当需要插值的数据样本变化较大时插值效果较

好,但插值精度会受权重系数影响,结果容易发生牛眼值(较明显的高值或低值)

### 2.3 克里金法

克里金法(又称空间局部插值法)是1951年由南非工程师克里金提出,后由法国地理数学家G·马特隆发展深化的一种基于统计学的插值方法,属于确定性插值。克里金法同反距离权重法类似,根据实测数据对待插点的取值进行线性无偏最优估计来预测未测量位置的值,计算公式为:

$$Z_{(x)} = \sum_{i=1}^n (\gamma_i Z_i) \quad \text{式(2)}$$

式中,  $Z_{(x)}$  为插值点估计值;  $\gamma_i$  为第  $i$  个样本点的权重系数;  $Z_i$  为第  $i$  个样本点的已知值。

克里金法的权重值  $\gamma_i$  由半变异函数模型决定。采用的半变异函数一般有球面函数、高斯函数、指数函数和幂函数,具体列举见下表2。本研究选取高斯函数和球面函数两种半变异函数。

表2 克里金法常用的半变异函数表

Tab2 semi-variance function of Kriging method

函数类型	函数公式
球面函数	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left( 1.5 \left( \frac{ h }{a} \right) - 0.5 \left( \frac{ h }{a} \right)^3 \right) & 0 <  h  < a \\ C_0 + C_1 &  h  > a \end{cases}$
高斯函数	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left( 1 - e^{-\frac{ h }{a}} \right)$
指数函数	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-\left( \frac{ h }{a} \right)^2} \right]$
幂函数	$\gamma(h) = C_0 + C_1  h ^\lambda \quad 0 < \lambda < 2$

式中,块金值  $C_0$  表示由测量误差及空间变异导致;基台值  $C_0+C_1$  表示数据对之间的最大方差;变程  $a$  表示参数存在相关性的最远距离。

### 3 空间插值精度评估方法

本研究主要针对三种插值算法在气温、湿度、气压、风速、日照时数上的插值结果与实测气象值之间的精度对比评价,来综合对比适宜插值算法。

重点选用4种精度指标,包括CC(Correlation Coefficient,相关系数)、MAE(Mean Absolute Error,平均绝对值误差)、MSE(Mean Square Error,均方误差)和RMSE(Root Mean Square Error,均方根误差)进行插值算法精度综合评价,通过计算各要素的实测值与估算值的误差指标来验证各种模型的精度,计算方式选择交叉验证的方式,插值结果精度评价指标的计算公式详见表3。

表3 精度评价指标计算公式

Tab3 Precision evaluation index calculation formula

精度指标	公式	最优值
MAE	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  Y_i - X_i $	0
MSE	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2$	0
RMSE	$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}$	0
CC	$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \times (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$	1

上表中,  $X_i$  和  $Y_i$  分别为第  $i$  个点对应要素的实测值和估计值。

CC 则反映了估计值和观测值的线性相关性,CC 越接近1则说明两者相关性越强。 $R^2$  反映了曲线的拟合优度;MAE、MSE 和 RMSE 均反映了估计值和实测值之间的绝对偏离程度,其值越小则说明绝对误差越小。

### 4. 覆冰气象数据插值结果对比分析

选择多种插值方法采用交叉验证的方式对降水、温度、相对湿度、风速、气压等气象要素进行空间插值,选取最优的空间插值算法来提取易覆冰样本的气象因子。

#### 4.1 温度空间插值

采用空间插值算法对研究区域的覆冰期间平均温度进行空间插值计算,插值结果见下图1。

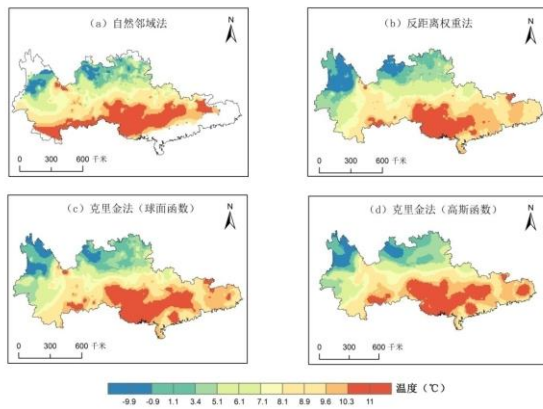


图1 不同空间插值方法计算得出的温度空间分布图  
Fig1 Temperature spatial distribution map calculated by different spatial interpolation methods

根据表4 温度空间插值交叉验证结果,经综合比较,自然邻域法相关系数相对较高,各类误差也相对较小,采用自然邻域法作为覆冰期间平均温度插值的推荐方法。

表4 温度空间插值交叉验证结果  
Tab4 Temperature spatial interpolation cross-validation results

插值算法	CC	MAE(°C)	MSE	RMSE(°C)
反距离权重法	0.75	1.78	7.12	2.74
克里金法 (高斯函数)	0.74	1.83	7.34	2.70
克里金法 (球面函数)	<b>0.76</b>	1.74	6.99	2.64
自然邻域法	<b>0.76</b>	<b>1.63</b>	<b>5.92</b>	<b>2.43</b>

#### 4.2 相对湿度插值

采用空间插值算法对研究区域的覆冰期间平均相对湿度进行空间插值计算,插值结果见下图2。

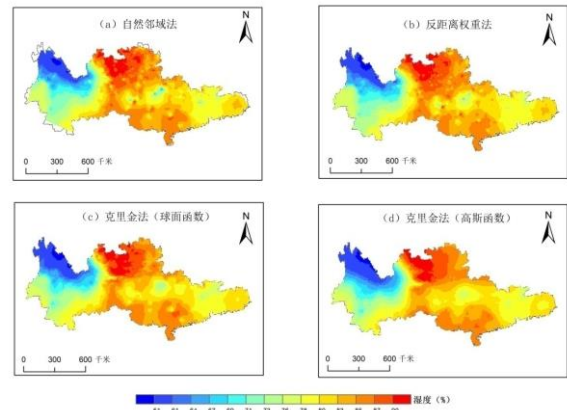


图2 不同空间插值方法计算得出的相对湿度空间分布图

Fig2 Spatial distribution of relative humidity calculated by different spatial interpolation methods

根据表5 相对湿度空间插值交叉验证结果,经综合比较,虽然克里金(球面函数)法相关系数相对较高,与克里金(高斯函数)法相差不大,但克里金(高斯函数)法各类误差相对较小,采用克里金(高斯函数)法作为覆冰期间平均相对湿度插值方法。

表5 相对湿度空间插值交叉验证结果  
Tab5 Relative humidity spatial interpolation cross-validation results

插值算法	CC	MAE(%)	MSE	RMSE(%)
反距离权重法	0.73	4.76	45.3	6.73
克里金法 (高斯函数)	0.75	<b>4.56</b>	<b>40.8</b>	<b>6.38</b>
克里金法 (球面函数)	<b>0.76</b>	4.73	42.4	6.51
自然邻域法	0.69	5.16	53.3	7.30

#### 4.3 风速空间插值

采用空间插值算法对研究区域的覆冰期间平均风速进行空间插值计算,插值结果见下图3。

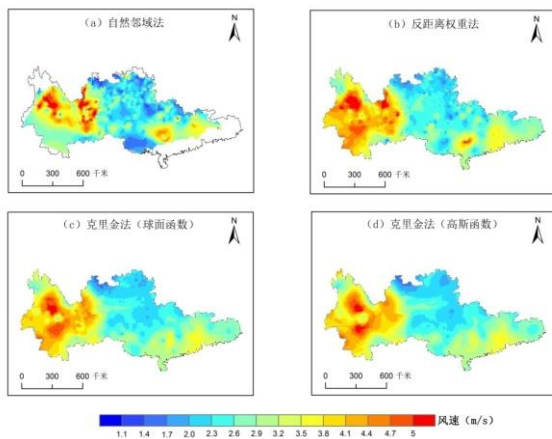


图3 不同空间插值方法计算得出的风速空间分布图  
Fig3 Spatial distribution of wind speed calculated by different spatial interpolation methods

根据表6 风速空间插值交叉验证结果, 经综合比较, 虽然反距离权重法相关系数相对较高, 但各类误差与克里金法比较相差较大。同时克里金(高斯函数)法和克里金(球面函数)相比, 前者各类误差较小, 采用克里金(高斯函数)法作为覆冰期间平均风速插值方法。

表6 风速空间插值交叉验证结果

Tab6 Wind speed interpolation cross-validation results

插值算法	CC	MAE(m/s)	MSE	RMSE(m/s)
反距离权重法	<b>0.38</b>	0.96	2.12	1.45
克里金法 (高斯函数)	0.35	<b>0.93</b>	<b>1.95</b>	<b>1.39</b>
克里金 (球面函数)	0.36	0.94	1.95	1.40
自然邻域法	0.35	0.99	2.34	1.53

#### 4.4 气压空间插值成果

采用空间插值算法对研究区域的覆冰期间平均大气压强进行空间插值计算, 插值结果见下图4。

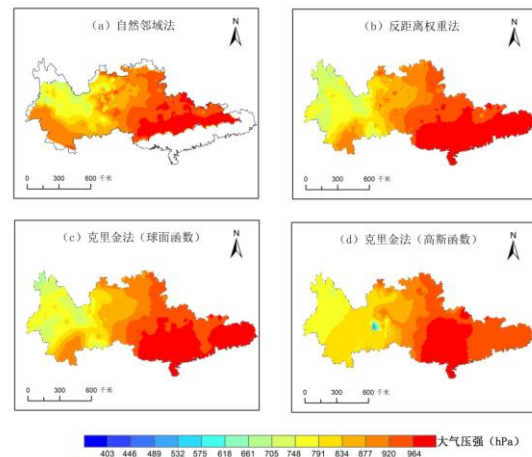


图4 不同空间插值方法计算得出的大气压强空间分布图

Fig4 Spatial distribution map of atmospheric pressure calculated by different spatial interpolation methods

根据表7 大气压强空间插值交叉验证结果, 经综合比较, 克里金法(球面函数)相关系数相对较高, 各类误差也相对较小, 采用克里金法(球面函数)作为覆冰期间平均大气压强插值方法。

表7 大气压强空间插值交叉验证结果

Tab7 Atmospheric pressure interpolation cross-validation results

插值算法	CC	MAE(hPa)	MSE	RMSE(hPa)
反距离权重法	0.62	49.3	5528.29	74.4
克里金 (高斯函数)	0.62	51.0	5054.25	72.3
克里金 (球面函数)	<b>0.64</b>	<b>48.0</b>	<b>4979.74</b>	<b>70.6</b>
自然邻域法	0.55	50.5	5959.22	77.2

#### 4.5 日照时数空间插值

采用空间插值算法对研究区域的覆冰期间日照时数进行空间插值计算, 插值结果见下图5。

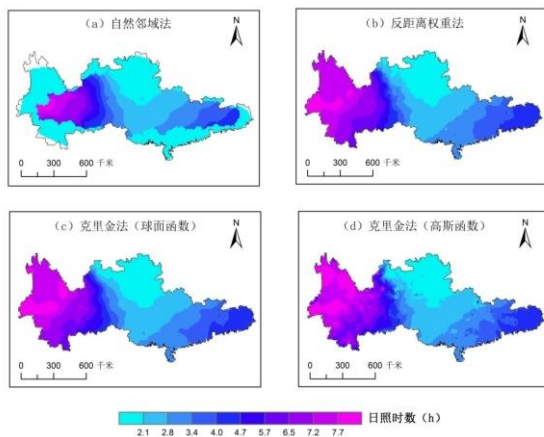


图5 不同空间插值方法计算得出的日照时数空间分布图

Fig5 Spatial distribution of sunshine hours calculated by different spatial interpolation methods

根据表8日照时数空间插值交叉验证结果,经综合比较,4种插值算法的相关系数相差不大,自然邻域法各类误差相对较小,采用自然邻域法作为覆冰期间平均日照时数插值方法。

表8 日照时数空间插值交叉验证结果  
Tab8 Spatial interpolation of sunshine hours cross-validation results

插值算法	CC	MAE(h)	MSE	RMSE(h)
反距离权重法	<b>0.97</b>	<b>0.31</b>	0.26	0.50
克里金法 (高斯函数)	0.96	0.32	0.25	0.51
克里金法 (球面函数)	<b>0.97</b>	0.32	0.25	0.50
自然邻域法	<b>0.97</b>	0.32	<b>0.23</b>	<b>0.48</b>

#### 4.6 小结

通过交叉验证方法可以实现对多种插值算法进行科学评价,选出最适合的插值方法。自然邻域法作为覆冰期间平均温度和日照时数的插值算法,平均相对湿度、风速、气压等其余气象参数采用克里金法插值,其中平均相对湿度和风速采用克里金(高斯函数)法,气压采用克里金(球面函数)法进行插值,能取得较高插值精度。

## 4 结论

易覆冰区域在冬季极易造成局部区域气象差异,这些微气象区是历年来冬季覆冰灾害多发区和覆冰巡检的重点区域。对覆冰监测终端的气

象数据信息进行插值处理能有效解决微气象对防冰减灾工作部署的影响。通过本文对影响易覆冰区域的主要气象因素,包括温度、相对湿度、气压、风速、日照等因素研究发现,在解决易覆冰区域气象数据信息的众多插值方法中,克里金插值方法有很好的适应性,对于不同复杂程度的地形均能实现有效的空间插值,精度较高。但考虑到易覆冰区域在覆冰时温度较低且变化范围较小,天气多为雨雪基本无日照,自然邻域法具有较好的适应性。本文的研究成果为后续的易覆冰区域气象数据库的建立积累了数据基础,同时也为电网防冰减灾决策提供了数据支撑。

### 致谢

本成果由南方电网公司科技项目(GZKJXM20222394)资助。

## 参考文献

- [1]文屹,吴建蓉,曾华荣等.基于时空图卷积网络的输电线路覆冰预测[J].广西科学,2023,30(01):106-113.
- [2]吕黔苏,毛先胤,吴建蓉等.基于称重法和气象站的输电线路覆冰厚度测量系统[J].自动化与仪器仪表,2021(12):143-146.
- [3]Zhao J, Zhang H, Zou H, et al. Probability prediction method of transmission line icing fault based on adaptive relevance vector machine[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1568-1577.
- [4]Sun W, Wang C. Staged icing forecasting of power transmission lines based on icing cycle and improved extreme learning machine[J]. Journal of cleaner production, 2019, 208: 1384-1392.
- [5]郝艳捧,王信媛,梁苇等.连续3天覆冰微气象数据驱动的架空输电线路覆冰类型识别与预测[J].南方电网技术,2023,17(06):107-116.
- [6]曾华荣,杨旗,马覃峰等.基于多元、多维数据的输电线路覆冰处置辅助决策系统设计[J].电力大数据,2022,25(05):43-52.
- [7]吴建蓉,文屹,杨涛等.基于气象过程信息及指标遴选判据的电网覆冰灾害评估研究[J].电力大数据,2021,24(11):48-54.
- [8]Li L, Luo D, Yao W. Analysis of transmission line icing prediction based on CNN and data mining technology[J]. Soft Computing, 2022, 26(16): 7865-7870.
- [9]Li H, Chen Y, Zhang G, et al. Transmission line ice coating prediction model based on EEMD feature extraction[J]. IEEE access, 2019, 7: 40695-40706.
- [10]张睿哲,周恺,赵留学等.基于微气象微地形的北京地区输电线路覆冰预测技术[J].科学技术与工程,2022,22(33):14744-14751.
- [11]庄文兵,祁创,熊小伏等.计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测[J].电力系统保护与控制

- 制, 2019, 47(17):6-13.
- [12] Yang L, Hu Z, Nian L, et al. Prediction on freezing fraction and collision coefficient in ice accretion model of transmission lines using icing mass growth rate[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(2): 364-375.
- [13] Dong B, Jiang X, Yin F. Development and prospect of monitoring and prevention methods of icing disaster in China power grid[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(22): 4480-4493.
- [14] Han X, Sun P, Xing B, et al. Influence of torsion on icing process of transmission lines[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(20): 4230-4238.
- [15] 姜晓剑, 刘小军, 黄芬, 等. 逐日气象要素空间插值方法的比较[J]. 应用生态学报, 2010, (03): 624-630.
- [16] 李淼, 鲍振鑫, 王卫光等. 基于空间网格化的黄淮海流域降水插值研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(06):39-46.
- [17] 陈雅婷, 刘奥博. 中国流域降水数据的空间插值方法评估[J]. 人民长江, 2019, 50(4): 100-105.
- [18] 王国庆, 唐雄朋, 刘佩瑶, 等. 山西省岚河流域水气象要素演变及响应关系[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(4):67-70, 83.
- [19] 包建强, 王义, 许懿娜等. 复杂艰险山区高分辨率DEM制作方法应用分析[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(03):74-80.
- [20] 谭衢霖, 徐潇, 王浩宇等. 不同地貌类型区DEM空间内插算法精度评价[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(01):139-149.

#### 作者简介:

范强(1986年-), 男, 河南濮阳, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网生产监控及分析、新能源技术研究。

吴建蓉(1986年-), 女, 四川成都, 高工, 硕士, 从事输电方面的研究。