

算函数模型。

Step 5. 计算气象信息数值: 以气象测点的历史、实测、预测数据为输入, 根据步骤 Step 4 确定的气象数据推算函数关系模型, 计算分析区域内所有网格对应的历史、实测、预测气象数据。

步骤 Step 4 和 Step 5 都以气象测点的数据为输入, 不同的是 Step 4 是为了确定网格与气象测点的数据映射关系, 而 Step 5 用以计算网格的气象数值。

Step 6. 获取输电线路气象环境数据: 根据输电线路的首末端厂站及杆塔的空间分布以及线路走向, 结合输电线路在遭受到不同类型气象灾害时的受影响空间范围, 获得对应线路气象数据的取值网格集合。这些网格通过 Step 5 插值后的数据即为该输电线路的气象环境数据。

上述的 6 个步骤中, Step 1 至 Step 4 是为了确定研究区域内网格与气象测点的数据映射关系, 只需要执行一次。每次进行气象环境数据网格化计算时只需要执行步骤 Step 5 和 Step 6。

3 实验验证与结果分析

3.1 插值评价标准

在进行空间插值拟合时, 有多个变异函数可供选择, 如何比较各种函数模型的优劣需要定量的指标作为依据。输电线路气象环境的网格化插值由于测点数量有限, 采用逐点交叉验证的方法验证模型的精度。方法是: 依次移除一个测点, 用剩余测点进行空间插值, 得到被移去点的预测值, 最后做出实测样品与预测样品的散点图并对估计误差进行统计。

插值精度可以通过计算三项检验标准来判断: 平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)、平均相对误差 (Mean Relative Error, MRE)、均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE)。通过计算一致性指标 (the index of agreement, A) 来衡量预测值和真实值的吻合程度, A 取值在 0~1 之间, 1 表示预测值与实测值完全吻合, 0 表示不吻合。

四项检验标准的计算公式如下:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (7)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 / n} \quad (9)$$

$$A = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^n (|O_i - \bar{O}| + |P_i - \bar{P}|)} \quad (10)$$

式中, O_i 为第 i 个测点的实测值; P_i 为第 i 个测点的预测值; \bar{O} 为 n 个测点实测值的平均值; \bar{P} 为 n 个测点预测值的平均值; n 为用于插值的测点总数。

3.2 仿真实验

基于电力系统已有的 GIS 系统, 选取江苏省为研究区域, 按照 3 Km×3 Km 的网格大小对其进行网格划分, 利用电网可获取的 996 个气象测点 2017 年某日的温度数据, 对其进行 30% 的均匀随机抽样并检验数据分布特征。该日江苏省的温度数据范围为 8°C 到 13°C, 且数据符合正态分布特征。选取东仲 5643 线、江陵 5292 线、堡任 5231 线、陵武 5288 线、任上 5238 线、上盐 5239 线、上仪 5240 线、田都 5216 线、伊上 5251 线等部分 500kV 的输电线路, 依据线路杆塔地理位置绘制线路走向, 将其加入到 GIS 系统, 以反映不同半变异函数模型下的输电线路气象环境数据对比。在使用默认参数的条件下, 分别利用 Kriging 的 4 种半变异函数模型进行插值, 插值结果如图 2 至图 5 所示。

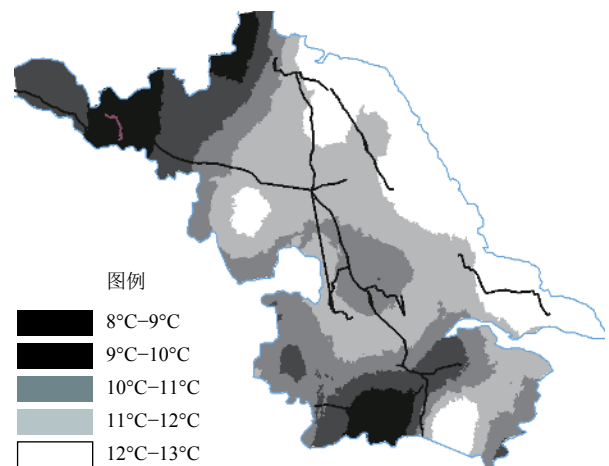


图 2 球面模型插值结果

3.3 结果分析

基于前文确定的 Kriging 插值校验方法, 统计后可得表 1 所示的交叉验证结果。从校验结果对比可知, 对

于选定区域的温度网格化插值, 高斯模型的 MAE 为 0.812, MRE 为 0.117, RMSE 为 1.05, 较其他三种模型误差大, 且一致性较其他 3 种模型小, 由此可知高斯模型建模拟合效果较差; 球面模型和指数模型平均绝对误差分别为 0.032 和 0.037, 比较接近, 标准均方根误差为 0.308 和 0.297, 表明误差较小, 一致性指标分别为 0.94 和 0.96, 说明这两种模型的拟合效果较好, 其中指数模型的拟合效果最优. 从插值校验结果对比可知, 在使用默认参数的情况下对江苏省输电线路关联温度分布插值, 各函数模型的优选顺序为: 指数模型>球面模型>高斯模型>线性模型.

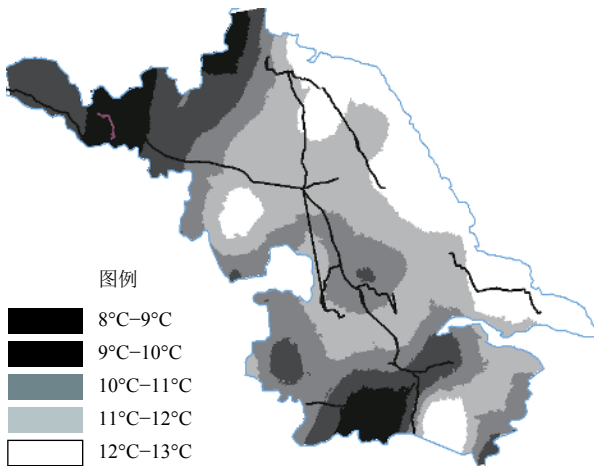


图3 指数模型插值结果

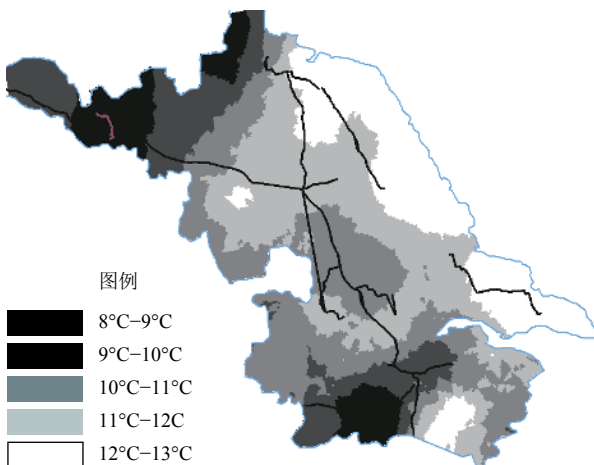


图4 高斯模型插值结果

4 结论与展望

影响气象数据网格化建模精度的因素主要包括 2 个方面. 第一是插值方法本身引起的误差, 如参与插

值的气象测点数量、插值方法的选择、插值参数的设置等; 第二是外界因素对气象要素的影响而引起的误差, 如高程、经纬度、坡度、坡向、输电线路走向、气象测点的数目和分布状况、大气环流及观测数据本身的误差等对不同气象要素的影响.

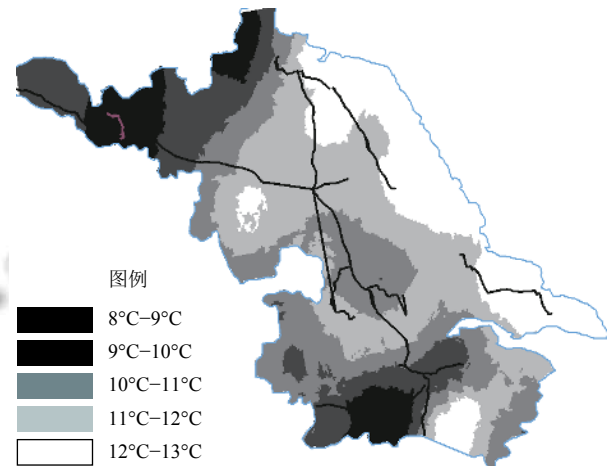


图5 线性模型插值结果

表1 四种半变异模型插值校验结果

变异模型	MAE	MRE	RMSE	A
球面模型	0.215	0.032	0.308	0.94
指数模型	0.208	0.037	0.297	0.96
高斯模型	0.812	0.117	1.05	0.72
线性模型	0.454	0.053	0.502	0.87

由于篇幅所限, 文中只选取了江苏省级电网可获取的单日温度数据进行了仿真实验, 对不同半变异模型的插值结果进行了比较以选取适合该省内输电线路温度数据插值的半变异函数. 然而, 如前文所述影响气象数据空间分布的因素众多, 很难确定一种适用于所有时空环境的气象数据插值方法, 需要综合分析各种影响因素, 结合各种网格化插值方法的特点进行离散点的动态自适应插值, 才能得到最优的插值结果. 这也是后续需要进行进一步深入研究的方向.

参考文献

- 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思: (一) 新的挑战与反思. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 1-6.
- 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思: (二) 任务与展望. 电力系统自动化, 2009, 32(10): 1-5.

- 3 薛禹胜, 吴勇军, 谢云云, 等. 停电防御框架向自然灾害预警的拓展. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 18–26.
- 4 潘一飞, 李华强, 许海青, 等. 考虑气象因子条件下的电网连锁故障预测. 华北电力大学学报, 2014, 41(1): 53–59.
- 5 段涛, 罗毅, 施琳, 等. 计及气象因素的输电线路故障概率的实时评估模型. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 59–67.
- 6 刘明军, 邵周策, 上官帖, 等. 输电线路山火故障风险评估模型及评估方法研究. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 82–89.
- 7 李小燕, 丁明, 齐先军. 考虑天气因素的输电网可靠性区间评估及其仿射算法. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 8–13.
- 8 李震宇, 武国亮, 王志利, 等. 电力微气象风偏灾害监测预警技术及系统实现. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 125–131.
- 9 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国陆地区域气象要素的空间插值. 地理学报, 2002, 57(1): 47–56.
- 10 李军龙, 张剑, 张丛, 等. 气象要素空间插值方法的比较分析. 草业科学, 2006, 23(8): 6–11.
- 11 焦永清, 李斌, 张坤. 基于空间可视化的气温插值方法比较. 测绘工程, 2013, 22(5): 62–64.
- 12 弓小平, 杨毅恒. 普通 Kriging 法在空间插值中的运用. 西北大学学报 (自然科学版), 2008, 38(6): 878–882.
- 13 李增涛, 高鹏, 张三敏, 等. 克里金插值参数设置对网格化结果的影响. 物探化探计算技术, 2015, 37(5): 666–670.
- 14 张景雄. 空间信息的尺度、不确定性与融合. 武汉: 武汉大学出版社, 2008. 8–14.
- 15 曾怀恩, 黄声享. 基于 Kriging 方法的空间数据插值研究. 测绘工程, 2007, 16(5): 5–8, 13.
- 16 刘峰. 应用 Kriging 算法实现气象资料空间内插. 气象科技, 2004, 32(2): 110–115.
- 17 弓小平, 杨毅恒. 普通 Kriging 法在空间插值中的运用. 西北大学学报 (自然科学版), 2008, 38(6): 878–882.
- 18 季青, 余明. 基于协同克里格插值法的年均温空间插值的参数选择研究. 首都师范大学学报 (自然科学版), 2010, 31(4): 81–87.
- 19 郭丽萍. 基于 ArcGIS Engine 的三维地形可视化与分析系统设计. 计算机系统应用, 2007, 16(12): 2–6.
- 20 郭翔. 遥感水情监测地理信息系统的开发与应用. 计算机系统应用, 2000, 9(5): 56–57.
- 21 Wilson J P, Gallant J C. Terrain Analysis: Principles and Applications. New York: Wiley, 2000. 29–50.
- 22 Hengl T, Reuter H I. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Amsterdam: Elsevier, 2009. 141–168.
- 23 汤国安, 刘学军, 房亮, 等. DEM 及数字地形分析中尺度问题研究综述. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(12): 1059–1066.
- 24 秦承志, 呼雪梅. 栅格数字地形分析中的尺度问题研究方法. 地理研究, 2014, 33(2): 270–282.