

基于高分辨率格点数据长江航道小时尺度雾发生时空规律研究

王露践^{1,2*}, 李世禧^{1,2}, 邢益航^{1,2}, 张帆³, 周春辉³, 方思达⁴, 白磊^{1,2#}

¹海南大学生态学院, 海南 海口

²海南省热带生态环境修复工程研究中心(海南大学), 海南 海口

³武汉理工大学航运学院, 湖北 武汉

⁴湖北省区域气候中心, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年4月11日; 录用日期: 2024年5月9日; 发布日期: 2024年5月16日

摘要

长江作为中国的重要“黄金水道”，与公路、铁路共同构成了中国庞大的交通物流网络。长江的通航环境对气象条件尤其敏感，特别是对影响能见度的雾。由于传统雾观测数据在定义、持续时间统计窗口和地形复杂区域的站点空间代表性方面存在不足，本研究利用1951~2016年中国地区的天气现象观测数据(A文件)和1979~2018年的格点化高分辨率气象大数据，采用大数据方法，探索长江航道及其沿岸地区的雾气候态发生的时空规律。研究发现，长江上游的荆州至宜昌，奉节至武陵航段的雾小时数相对较少；而在三峡库区，宜昌至奉节航段的雾小时数是整个长江水道中最多的，紧随其后的是武陵至涪陵航段。季节性分析显示，夏半年(4月至9月)，宜昌至奉节航段的雾小时数远高于其他航段；而在冬半年(10月至次年3月)，这一航段的雾小时数则明显低于其他航段，且安庆至武汉航段的雾小时数超过了下游宝山至安庆航段。雾事件通常出现在气温6°C~17°C、湿度0.005~0.0075 kg/kg、气压1010~1020 hPa、风速0.9~2 m/s的条件下。本研究的结果为长江航道大雾的时空分布特征提供了定量分析，实现了雾的航道公里级发生小时区划，为长江航道运营管理提供了更好的服务。

关键词

雾日统计, 机器学习, KD-Tree, 气象要素

Study on the Spatiotemporal Patterns of Fog Occurrence in the Yangtze River Navigation Channel Based on High-Resolution Grid Data at Hourly Scale

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王露践, 李世禧, 邢益航, 张帆, 周春辉, 方思达, 白磊. 基于高分辨率格点数据长江航道小时尺度雾发生时空规律研究[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(3): 534-542. DOI: 10.12677/ccrl.2024.133058

Lujian Wang^{1,2*}, Shixi Li^{1,2}, Yihang Xing^{1,2}, Fan Zhang³, Chunhui Zhou³, Sida Fang⁴,
Lei Bai^{1,2#}

¹School of Ecology, Hainan University, Haikou Hainan

²Center for Eco-Environment Restoration Engineering of Hainan Province (Hainan University), Haikou Hainan

³School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

⁴Hubei Regional Climate Center, Wuhan Hubei

Received: Apr. 11th, 2024; accepted: May 9th, 2024; published: May 16th, 2024

Abstract

The Yangtze River, as an important “golden waterway” in China, together with highways and railways, forms a huge transportation and logistics network in China. The navigational environment of the Yangtze River is particularly sensitive to meteorological conditions, especially fog affecting visibility. Due to shortcomings in traditional fog observation data in terms of definition, duration statistics window, and spatial representativeness of station sites in complex terrain regions, this study utilizes weather phenomenon observation data in China from 1951 to 2016 (A file) and gridded high-resolution meteorological big data from 1979 to 2018. By using big data methods, it explores the spatiotemporal patterns of fog occurrences along the Yangtze River and its adjacent areas. The study found that the number of fog hours from Jingzhou to Yichang in the upper reaches of the Yangtze River and from Fengjie to Wuling is relatively low; however, in the Three Gorges Reservoir area, the number of fog hours from Yichang to Fengjie is the highest along the entire Yangtze waterway, followed closely by the Wuling to Fuling section. Seasonal analysis shows that during the summer half-year (April to September), the number of fog hours from Yichang to Fengjie is much higher than in other sections; while during the winter half-year (October to March of the following year), the number of fog hours in this section is significantly lower than in other sections, with the fog hours from Anqing to Wuhan exceeding those in the downstream Baoshan to Anqing section. Fog events typically occur under conditions of temperature 6°C~17°C, humidity 0.005~0.0075 kg/kg, pressure 1010~1020 hPa, and wind speed 0.9~2 m/s. The results of this study provide a quantitative analysis of the spatiotemporal distribution characteristics of heavy fog along the Yangtze River, achieve kilometer-level hour zoning for fog in the waterway, and provide better service for the operation and management of the Yangtze River waterway.

Keywords

Fog Day Statistics, Machine Learning, KD-Tree, Meteorological Elements

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长江作为我国主要的内河航道之一，全线航道约有 4250 公里。航道因河流地形及气候特征而异，上游 1000 多公里为峡谷地形，中下游地广人稀，湿度较大。在影响长江航道通航环境的多种气象灾害中，大雾和大风天气最直接危及航运安全。目前，大雾天气已成为制约长江航道安全通航的重要因素之一。

雾是指大量微小水滴悬浮空中,使水平能见度小于 1.0 km 的天气现象[1]。在空间上,基于站点研究发现中国主要雾区有长江中游区、海岸区、云贵高原区、陇东-陕西区、淮河流域、天山及其新疆北疆地区[2] [3],其中华北区、川渝区以及长江中下游区雾出现频率较高(12 h 以上的雾) [4] [5]。在时间上,在中国内陆雾在冬季(11 月至次年 2 月)发生频率较高[6]。而在中国近海,雾日主要集中在 2~7 月,其中 4 月雾频率最高[7]。在日内小时尺度上,基于能见度反演出雾的发生时间在中国内陆、南部沿海雾发生时间多在清晨 6~8 时,东部及沿海多发生在夜间 20~21 时[5]。而这些研究缺乏针对长江航道大雾天气的时空规律研究。在中国西双版纳,不同下垫面(热带雨林和亚热带常绿阔叶林),对于雾日和雾持续时间存在差异[8]。因此,不能用少数空间上离散站点来分析大区域的雾的时空分布。对雾日内小时尺度的时间规律,数据多使用海事部门部署的能见度仪和航道周边气象站能见度仪,这样不能有效全线监测长江航道上大雾天气。在三峡库区航道,5~6 月和 11~12 月为大雾高发时期,早晨至上午为大雾高发时段,午后至傍晚前为大雾低发时段[9]。大多数雾情形成于 0~8 时,结束于 8~12 时[10]。可见发生规律,有别于内陆其他地区发生的时间。近些年三峡库区年平均雾日数呈弱的下降趋势[11] [12],而长持续时间的(持续在 12 h,连续 3 天以上)大雾天气有明显增加趋势[11]。在未来气候变化背景下,气温升高,相对湿度减弱,大多数地区雾日呈减少趋势[13]。在时间维度上,不同的统计窗口会得到不同的分析结论。因此有必要使用高时间分辨率的气象数据进行分析,补充先前在不同时间尺度上雾的研究。

在 2013 年,前向散射能见度仪的能见度数据作为能见度投入使用,取代了人工观测能见度。该仪器当 10 min 能见度平均值小于 750 m,相对湿度大于 80% 判识为雾[14],这样的观测标准把原先把雾当做视程障碍现象的“面状”观测变为能见度仪的“点状”观测。这样使得现有观测,能够捕捉到大尺度范围雾发生情况,对于局地发生的雾现象无法捕捉。现有雾的判识,受到空间尺度效应的制约,会使基于数值模式输出和站点观测的雾预报模式存在一定误差。因此,需要使用高时空分辨率气象大数据反演获得高时空分辨率的雾数据,可以弥补先前在空间尺度上对于雾的规律认识的不足。

现有研究中,通常以雾日进行统计。根据 2016 年中国气象局发布的新地面气象观测业务技术规定[15],霾和雾均以能见度进行划分。在标准中有霾日的定义,可以类比出雾日的定义:通常以每日 20 时为日界,持续在 6 h (含)以上,当日日数据文件天气现象记为雾,定义为 1 个雾日出现。如果 1 d 日界内,雾没有持续 6 h,但在 20 时日界附近前后持续 6 h,若日界前或日界后雾持续 4 h (含)以上,则在相应日记雾。若日界前和日界后雾持续均为 3 h,只在日界前记录为雾日。在日数据文件中,标记雾是白天还是夜间记录时,规定 8 时前后持续 3 h,只在夜间记录,若在 8 时前和后持续 4 h 以上,则应在白天和夜间相应记录。雾(辐射雾)一般出现在夜间和清晨[16],这样很容易遇到 20 时和 8 时两个雾日统计窗口(日界),所以雾日统计很难精确地描述衡量雾的持续时间。因此,需要在时间维度上用小时尺度衡量雾持续时间。

针对上述问题,本研究在高时空分辨率格点气象数据大数据基础上,使用机器学习方法研究长江航道内雾气候态上发生的时空规律,深入了解航道上雾与气温、湿度、风速等气象变量的关系,为长江航道雾精细化预警工作提供理论依据。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

为了确定长江航道的范围,人工在 Google Earth 上,以 5 km 为间隔标定长江航道。航道开始于宝山(编号: 0),结束于重庆(编号: 404),长江干线航道整体区间范围见图 1。

为了能够更好的利用观测数据,以 0.1° 为半径,使用 KD-tree 算法检索航道周边国家级气象站提取得到的。图 2 为浮标与最临近气象站点之间的距离。在图中,有 71 个站点符合最邻近的距离要求,去除重复站点,仅剩 24 个站点,这些站点可以为本研究提供数据支持。

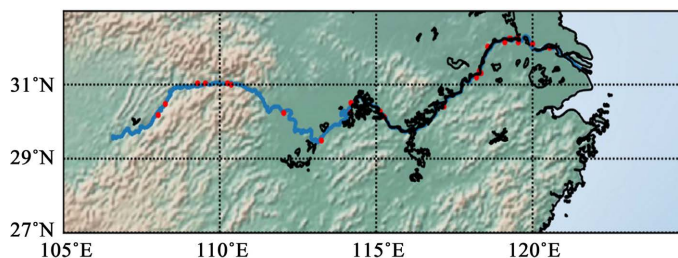


Figure 1. Buoy on the Yangtze River main channel and surrounding adjacent meteorological stations (Figure No. GS(2019)1822). (Red dots represent meteorological stations within a 0.1° range of the waterway, and blue dots represent points along the waterway)

图 1. 长江干线航道浮标与周边临近气象站(审图号 GS(2019)1822 号)。(红点为航道 0.1° 范围内的气象站, 蓝点为航道点)

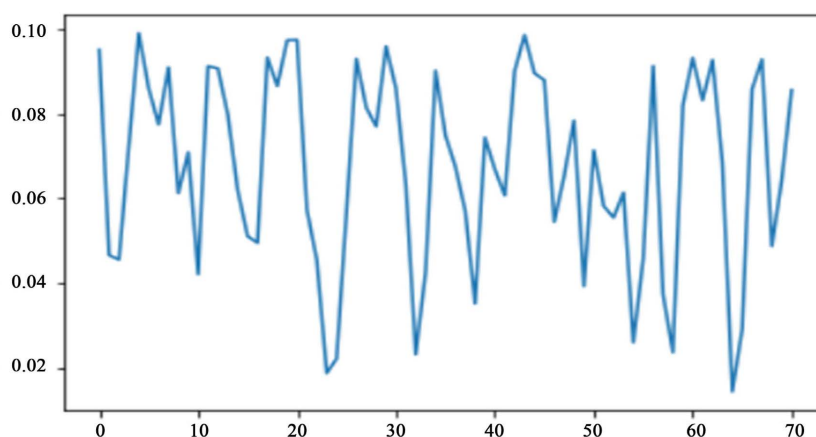


Figure 2. Distance between adjacent stations and the nearest main channel buoy (unit: degrees)

图 2. 相邻站点距离最邻近干线浮标距离(单位: $^\circ$)

2.2. 数据资料

为了获取雾发生具体时间,本研究收集整理中国 1951~2016 年的天气现象观测数据(A 文件)。该文件包含中国地区 2474 站。文件中天气现象以日为时间单位,记录了主要的天气现象发生的时间(记录可以精确到分钟)。这些数据经过多次清洗,获得以小时为单位的雾发生的时间标识文件。以这些文件为基础,处理结合其他气象变量展开分析。

2.3. 研究方法

为了更准确对雾数据进行分析,根据《地面气象观测业务技术规定》和《雾的预报等级》,雾的强度划分等级主要依据是能见度(见表 1)。两个标准差异在,观测等级中无轻雾划分,雾均以能见度小于 1 km 进行区别。

针对时间划分采用整齐划一的方法,即 4~9 月为夏半年;10 月至次年 3 月为冬半年。其中地名由相应字母缩写表示,江阴(jy)、南京(nj)、安庆(aq)、武汉(wh)、岳阳(yy)、荆州(jz)、宜昌(ye)、奉节(fj)、武陵(wl)、涪陵(fl),3.1~3.2 节中,使用航道附近 24 个站点的天气现象数据进行统计分析。在 3.3 节中,使用 WRF 同化中国 2400 站后的格点化 5 km 分辨率小时尺度气象数据和前述 24 站天气现象数据建立小时尺度雾与小时尺度气象要素(气温、比湿、气压和风速)之间的随机森林树模型。经过十折交叉验证,对于雾的辨识能有 99.2% 的精度。使用双线性插值方法,在 5 km 格点化气象数据基础上,提取航道上的固定

间隔的气象数据，并利用前述机器学习模型反演小时尺度的雾现象。在此基础上，分析长江航道上小时尺度雾发生的规律。

Table 1. Classification of fog severity

表 1. 雾的等级划分

预报等级	预报等级参照能见度范围	观测等级	观测等级参照能见度范围
轻雾	1 km < 能见度 ≤ 10 km	-	-
大雾	500 m < 能见度 ≤ 1 km	雾	500 m < 能见度 ≤ 1 km
浓雾	200 m < 能见度 ≤ 500 m	浓雾	50 m < 能见度 ≤ 500 m
强浓雾	50 m < 能见度 ≤ 200 m	-	-
特强浓雾	能见度 ≤ 50 m	强浓雾	能见度 ≤ 50 m

3. 结果与分析

3.1. 长江干线周边台站雾现象发生时间统计分析

长江航道上雾在月尺度上发生次数如图 3 所示。通过图 3(a)可看出，12 月是雾发生次数最多的月份，共有 4 次，其次为 1 月份、11 月份。7~9 月份发生次数最少，平均还不到 0.5 次。其中长江上游雾发生次数在月尺度上的规律同全航道大致相同，12 月份雾发生次数最多(达 2.5 次)，1 月份次之，7~9 月份最少，平均不到 0.5 次。长江中游依然是 12 月份雾发生次数最多的月份(达 3.5 次)。其次是 11 月份，有 1 次，6~10 月份没有雾发生。对于长江下游而言，12 月份依然是雾发生次数最多的月份，共有 7 次。其次为 6 和 1 月份，各有 2 次，4、8 和 9 月份没有雾事件发生。

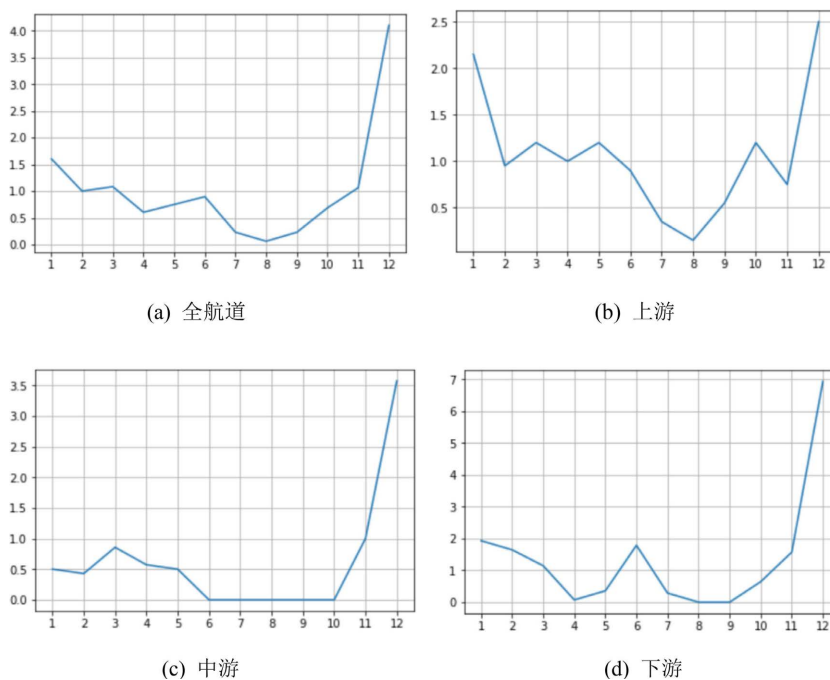


Figure 3. Frequency of fog occurrences on a monthly scale along the Yangtze River navigational waterway

图 3. 月尺度长江航道上雾发生次数

图4为月小时尺度雾发生次数的统计,通过图4(a)~(c)中可以看出在12月份雾发生次数的统计中上游、中游、下游雾发生次数的规律大致相同,皆是在7时之后开始有雾发生,且都是8时雾发生次数最多,上游和中游大约为8次,下游次数最多(可达17.5次)。0~7时没有雾的发生,且都在8时后次数大幅度减少,大约在17~19时偶有雾发生。图4(d)~(f)为1月雾在小时尺度上发生次数的统计。上游、中游、下游皆是在7时后有雾的发生,8月份次数最多,其中上游、下游发生次数大约为8次,中游最多(可达14次)。不同的是,中游在10~16时无雾事件发生。图4(g)~(i)为2月份雾在小时尺度上发生次数的统计。上游、中游和下游依然是0~7时没有雾的发生,8月份发生次数最多,此时中游发生次数最多(可达14次)。此时与其他月份不同的是,在11时之后,长江航道全航线几乎没有雾的发生。与基于机器学习的长江重庆航道雾情特征提取[17]研究结果相近。

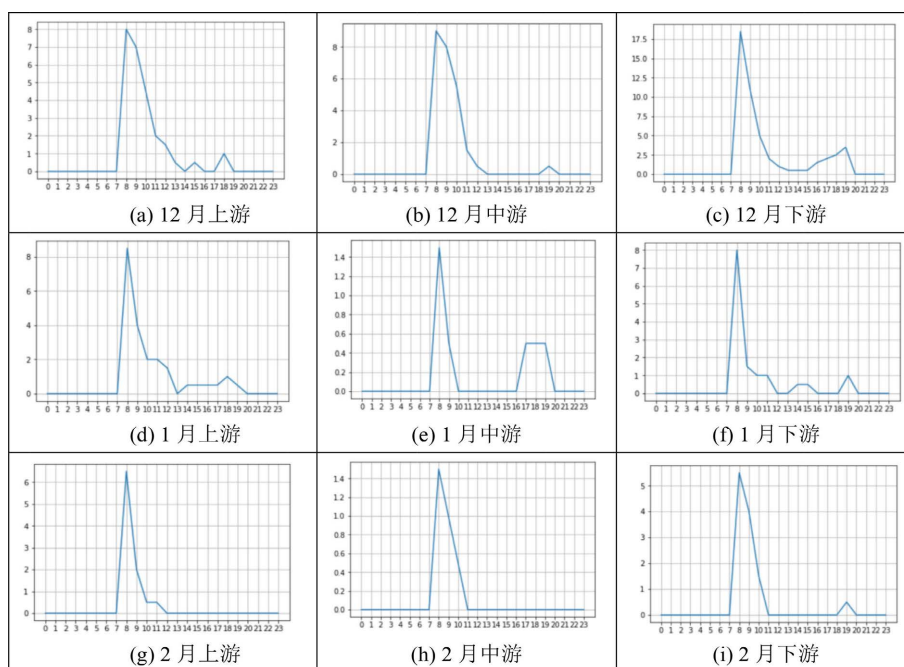
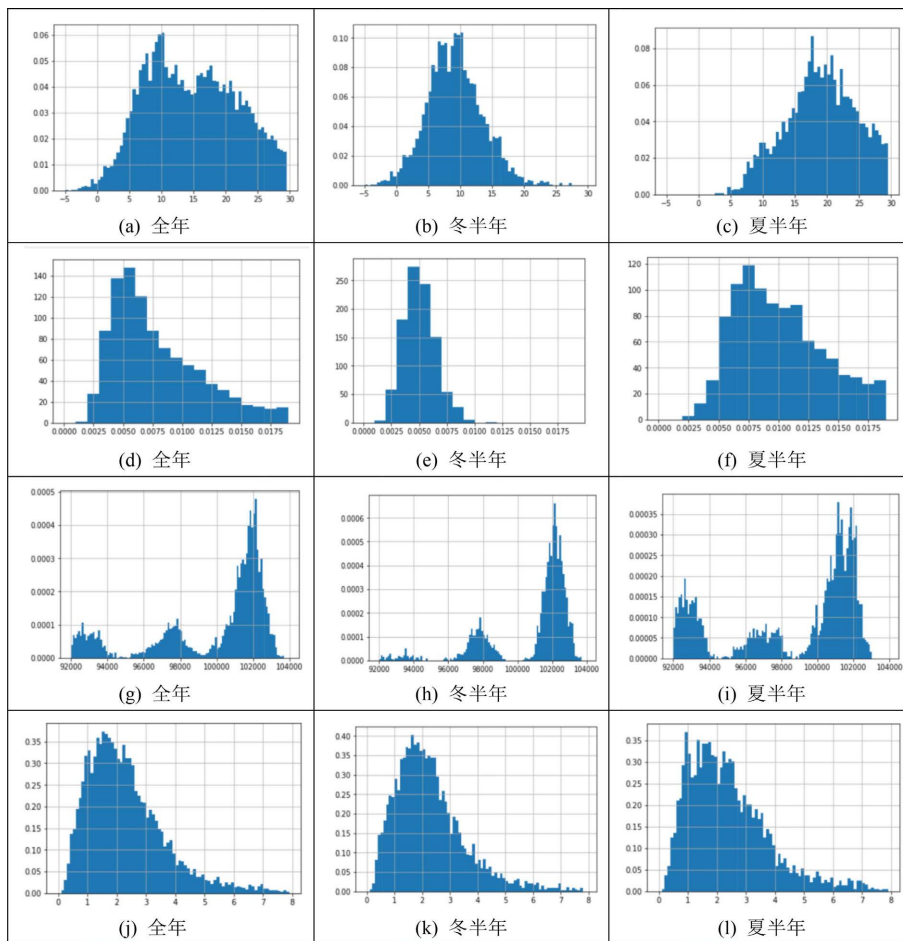


Figure 4. Frequency of fog occurrences on an hourly scale

图4. 月小时尺度雾发生次数

3.2. 雾发生时周边台站气象要素特征

图5表示的分别为月尺度长江航道上雾发生时气温、比湿、气压及风速,通过图5(a)~(c)可以看出对于全年而言,10℃左右雾发生次数最多,-5℃~5℃时发生次数最少。冬季半年时,6~7、8~10摄氏度时发生次数最多。暖季时,此时15℃~25℃为雾发生次数最多的气温范围,17℃左右为雾发生次数最多的温度。通过图5(d)~(f)可以看出对于全年而言,比湿在0.0050左右时,是雾发生概率最大的时候,当比湿大于0.0055时,概率逐渐下降。冬半年时,比湿在0.0050 kg/kg左右时,依然是雾发生概率最大的时候,比湿大于0.0100 kg/kg时几乎无雾发生。夏半年时,在比湿为0.0075左右时雾发生概率最大。通过图5(g)~(i)可以看出存在周期性变化,对于全年、冬半年、夏半年而言,气压在1010~1020 hPa范围内时,雾发生概率最大,冷季较多,暖季较少。气压在920~940 hPa、960~990 hPa时,也有雾事件的发生,概率较小。通过图5(j)~(l)可以看出三者变化规律大致相同,对于全年、冬半年时,风速为1.5 m/s左右时雾发生概率最高,夏半年时,风速为0.9 m/s、1.5~2 m/s时,雾发生概率最大,当风速大于2.5 m/s时,雾发生次数逐渐减小。



注：子图(a)~(c)为月尺度上雾发生时气温情况的统计，(d)~(f)为月尺度上雾发生时比湿的情况统计，(g)~(i)为月尺度上雾发生时气压的情况统计，(j)~(l)为月尺度上雾发生时的风速情况统计。

Figure 5. Distribution of temperature, specific humidity, atmospheric pressure, and wind speed during fog occurrences on a monthly scale along the Yangtze River navigational route
图 5. 月尺度长江航道上雾发生时气温、比湿、气压和风速分布

3.3. 基于机器学习算法的长江航道雾现象反演

图 6 为 2005 至 2012 年间长江航道的雾时数逐月统计图，通过图 6 可以看出不同段落及月份间雾时数存在显著差异。1 月，江阴至南京段雾时数略降至约 2250 小时，南京至安庆段增至 2500 小时。安庆至武汉段呈先升后降趋势，而武汉至岳阳段小幅上升至 2750 小时。岳阳至荆州段降至 2250 小时左右；宜昌至武陵段在奉节段大幅波动后稳定在 2250 小时；武陵至涪陵段略升至 3000 小时。2 月，整体雾时数上升，江阴至安庆段增至约 3500 小时，安庆至武汉段波动后稳定在 3600 小时。武汉至荆州段在岳阳处略增至 3900 小时后降至 3500 小时，宜昌至武陵段雾时数最短，仅 500 小时。3 月趋势与 2 月相似，整体雾时数有所增加，除荆州至武陵段外，大部分区域超 4500 小时。4 月，南京至安庆段雾时数下降至约 4000 小时；安庆至武汉段显著下降后回升至 3750 小时左右。武汉至荆州段降至 3250 小时，荆州至宜昌段剧烈降至 2000 小时左右。

5 月，整体雾时数大幅下降。江阴至南京段稳定在 2200 小时；南京至安庆段降至 1800 小时左右，安庆至武汉段上升至 1500 小时；武汉至荆州段降至 1000 小时左右。此时，宜昌至奉节段雾时数最长，

高达 5000 小时；奉节至涪陵段维持在 2000 小时。7 月和 8 月，雾主要发生在长江下游，上游和中游几乎无雾。宜昌至奉节段雾时数维持在 5000 小时。9 月，江阴至南京段略增至 1600 小时左右；南京至安庆段下降至 1300 小时左右，安庆至荆州段在武汉段略增后稳定在 1300 小时。10 月，江阴至南京段上升至 4750 小时左右；南京至安庆段波动后降至 4250 小时；安庆至武汉段上升至 4750 小时；武汉至荆州段维持在 4250 小时；荆州至宜昌段经波动后剧烈下降至 2000 小时；宜昌至奉节段仍为雾时数最长区域，高达 5000 小时；奉节至武陵段波动后降至 2500 小时。

11 月，江阴至安庆段小幅增加至 5000 小时；安庆至武汉段波动后回升至 5000 小时；武汉至荆州段大致维持在 5000 小时；荆州至奉节段剧烈波动后回升至 5000 小时，最低降至 2000 小时；奉节至涪陵段在武陵处波动后回升至 5000 小时。12 月，江阴至南京段维持在 3000 小时左右，南京至安庆段略增至 3500 小时；安庆至武汉段波动后稳定在 3500 小时；武汉至岳阳段增至 4000 小时左右；岳阳至宜昌段小幅波动；宜昌至奉节段经剧烈波动后回升，最低降至近 0 小时。年末，下游的雾时数高于上游和中游。

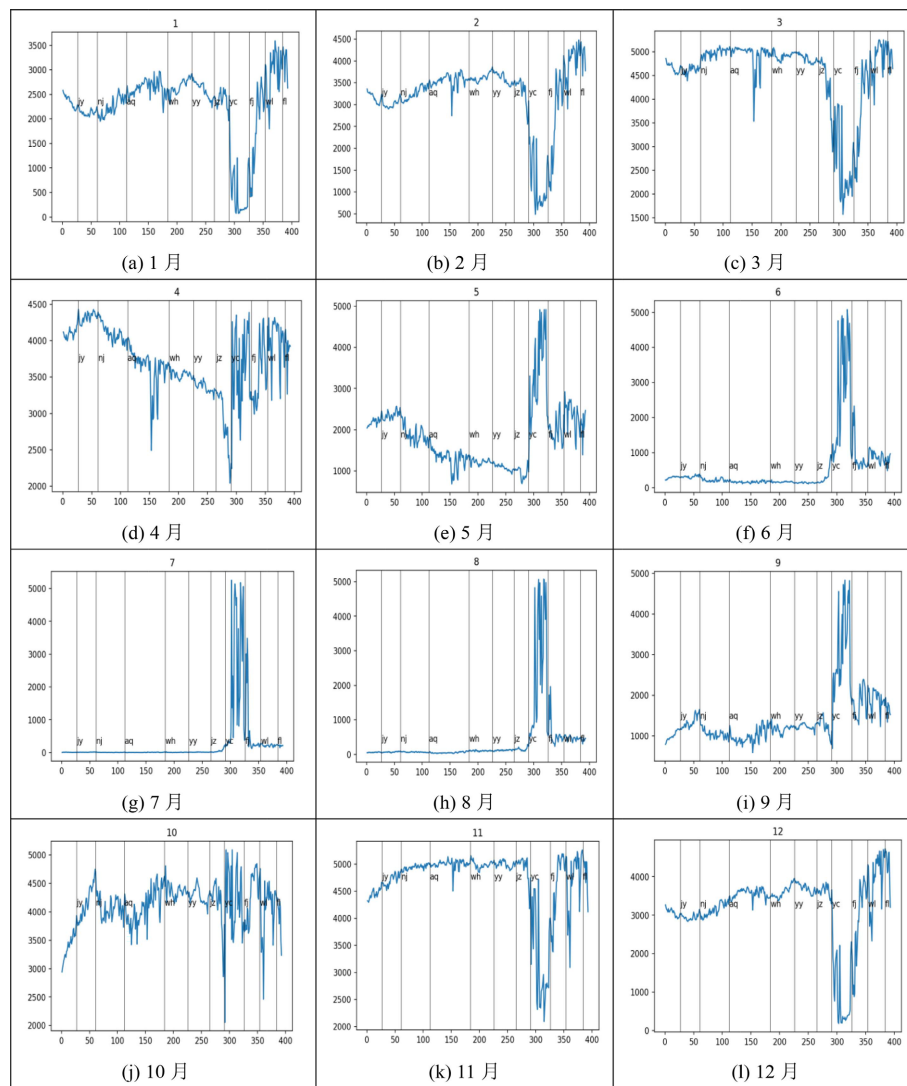


Figure 6. Machine learning algorithm-derived monthly hourly fog duration on the navigational route from 2005 to 2012

图 6. 2005~2012 年机器学习算法反演航道雾逐月小时数

4. 结论

本研究利用站点和格点数据结合机器学习方法,对长江主航道的雾空间分布进行了深入探究,得出以下结论:

1) 2005至2012年间,长江航道覆盖2000余公里,研究显示长江中下游地区(宝山至荆州)在这八年间的雾小时数保持在30,000小时以内。相比之下,上游的荆州至宜昌,奉节至武陵航段的雾小时数相对较少。特别是在三峡库区内,宜昌至奉节航段雾小时数为整个长江水道中最多的,其次是武陵至涪陵航段。

2) 在2005至2012年期间,长江不同段落及月份的雾时数表现出显著的季节性差异。冬季与春季(1月至4月),江阴至南京段雾时数略降,而南京至安庆及安庆至武汉段呈波动上升,尤其武汉至荆州段3月达峰值后下降。夏季(5月至8月),长江下游雾时数大减,特别是宜昌至奉节段。秋季(9月至11月),江阴至南京段雾时数渐增,安庆至武汉段先降后升。12月,江阴至南京段雾时数小幅增加,安庆至武汉及岳阳至宜昌段呈波动,其中安庆至武汉段雾时数超过宝山至安庆段。夏半年(4月至9月),宜昌至奉节段雾时数高于其他航段;冬半年(10月至次年3月),则显著低于其他航段,而4月至5月期间则相反。

基金项目

海南省自然科学基金青年基金项目(423QN317);国家自然科学基金(No. 52171349);海南大学科研基金资助项目(KYQD(ZR)-22083);中央高校基本科研业务费专项资金资助(项目批准号:2019IVA103)。

参考文献

- [1] 中国气象局综合观测司. 地面气象观测业务技术规定(2016版) [S]. 北京: 气象出版社, 2016.
- [2] 王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 中国雾区的分布及其季节变化[J]. 地理学报, 2005(4): 689-697.
- [3] 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 我国大雾的气候特征及变化初步解释[J]. 应用气象学报, 2005(2): 220-230.
- [4] 孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 最近40年中国雾日数和霾日数的气候变化特征[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(3): 397-406.
- [5] 陈潇潇, 郭品文, 罗勇. 中国不同等级雾日的气候特征[J]. 气候变化研究进展, 2008(2): 106-110.
- [6] 张璐. 中国冬季雾形成机制的区域性特征及差异分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [7] 白彬人. 中国近海沿岸海雾规律特征、机理及年际变化的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
- [8] 张晶, 宋清海, 张一平, 等. 西双版纳热带雨林和哀牢山亚热带常绿阔叶林雾特征研究[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8758-8765.
- [9] 白永清, 陈正洪, 陈鲜艳, 等. 长江山区航道剖面能见度分析及局地影响因素初探[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2): 339-345.
- [10] 代娟, 陈正洪, 田树青, 等. 长江山区航道雾的时空分布特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2): 333-338.
- [11] 黄治勇, 牛奔, 叶丽梅, 等. 长江三峡库区极端大雾天气的气候变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(5): 646-652.
- [12] 虞俊, 王遵娅, 张强. 长江三峡库区大雾的变化特征分析及原因初探[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(1): 97-105.
- [13] 刘赫男, 罗勇. 2050年前中国雾日变化趋势的预估[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(5): 266-270.
- [14] 王国强, 林磊, 任义方, 等. 新地面气象观测规定下轻雾和霾的观测[J]. 气象水文海洋仪器, 2018, 35(2): 25-27.
- [15] 中央气象. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [16] 林建, 杨贵名, 毛冬艳. 我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势[J]. 气候与环境研究, 2008(2): 171-181.
- [17] 陈施吉, 李家启, 王远谋, 等. 基于机器学习的长江重庆航道雾情特征提取[J]. 热带气象学报, 2022, 38(6): 845-853.