

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.06.006

## 地基 GNSS 水汽层析研究进展与展望

赵庆志<sup>1</sup>, 蒋朵朵<sup>1</sup>, 郭宏武<sup>2,3</sup>, 李祖锋<sup>4</sup>, 翟园<sup>2,3</sup>, 刘晨<sup>5,6</sup>

1. 西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054;
2. 中国气象局城市气象重点开放实验室, 北京 100000;
3. 西安市气象局, 西安 710000;
4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065;
5. 中国铁路设计集团, 天津 300251;
6. 天津市轨道交通导航定位及时空大数据技术重点实验室, 天津 300251)

**摘要:**地基 GNSS 水汽层析技术是 GNSS 气象学的重要分支, 利用该技术可实现三维大气水汽场反演, 对于极端天气监测和气象灾害预警预报等具有重要意义。地基 GNSS 水汽层析技术经过近 30 年的发展, 逐步形成了较为完善的理论与方法体系, 实现了高精度、高时空分辨率三维水汽信息反演, 并在大气水汽监测和降水预警预报中得到越来越多的创新应用。对地基 GNSS 水汽层析技术在层析模型设计矩阵构建、层析方程观测数据利用、水汽层析模型解算、层析结果影响因素分析及其应用方面的研究现状进行了综合梳理与总结, 并分析了其未来发展方向。

**关键词:**GNSS 水汽监测; 水汽层析; GNSS 气象学; 三维水汽; 对流层延迟

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2024)06-0071-13

## Research progress and prospect of ground-based GNSS water vapor tomography

ZHAO Qingzhi<sup>1</sup>, JIANG Duoduo<sup>1</sup>, GUO Hongwu<sup>2,3</sup>, LI Zufeng<sup>4</sup>, ZHAI Yuan<sup>2,3</sup>, LIU Chen<sup>5,6</sup>

1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. Key Laboratory of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100000, China;
3. Xi'an Meteorological Bureau, Xi'an 710000, China;
4. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China;
5. China Railway Design Corporation, Tianjin 300251, China;
6. Tianjin Key Laboratory of Rail Transit Navigation Positioning and Spatio-temporal Big Data Technology, Tianjin 300251, China)

**Abstract:** Ground-based GNSS water vapor tomography technology is an important branch of GNSS meteorology. This technology enables the inversion of the three-dimensional atmospheric water vapor field, which is of great significance for extreme weather monitoring and meteorological disaster warning and forecasting. Over the past 30 years, ground-based GNSS water vapor tomography technology has gradually developed a relatively comprehensive theoretical and methodologi-

收稿日期: 2024-06-23; 修订日期: 2024-08-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42274039); 咸阳市重点研发计划(社会发展领域)(L2023-ZDYF-SF-005); 中国气象局城市气象重点开放实验室开放基金(LUM-2023-17, LUM-2024-11); 天津市轨道交通导航定位及时空大数据技术重点实验室开放课题基金(TKL2024B03)

作者简介: 赵庆志(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事 GNSS 数据处理及其气象创新应用方面的研究。

cal system, achieving high precision and high temporal-spatial resolution inversion of three-dimensional water vapor information, and has seen more and more innovative applications in atmospheric water vapor monitoring and precipitation warning and forecasting. The research status of ground-based GNSS water vapor tomography technology is comprehensively reviewed and summarized in terms of the construction of the design matrix of the tomography model, the use of the observation data of the tomography equation, the calculation of the water vapor tomography model, the analysis of the influencing factors of the tomography results and their applications, and the future development direction is analyzed.

**Key words:** GNSS water vapor monitoring; Water vapor tomography; GNSS meteorology; Three-dimensional water vapor; Tropospheric delay

## 0 引言

地基全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)对流层水汽层析是指利用大量地基 GNSS 观测数据重构研究区域三维水汽结构的一种方法,即将研究区域离散化为若干体素,以斜路径湿延迟(slant wet delay, SWD)或斜路径水汽含量(slant water vapor, SWV)为观测量,以层析区域三维格网内湿折射率(或水汽密度)为待求参数,建立两者之间的观测方程,并研究其最佳解算方法。GNSS 的发展为大气水汽探测提供了新的技术手段。GNSS 水汽探测具有高精度、全天候及低成本等显著优势,逐渐成为大气水汽探测的主要方式之一。地基 GNSS 水汽探测技术包括 GNSS 二维水汽反演和 GNSS 三维水汽层析两个方面<sup>[1]</sup>。二维水汽反演主要指利用 GNSS 观测信息获取测站天顶方向的湿延迟(zenith wet delay, ZWD)或大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)<sup>[2]</sup>。目前,地基 GNSS 二维水汽反演技术已较为成熟,获取 PWV 的精度优于国际公认标准的 3 mm。但由于 PWV 为测站上空大气水汽的总和,仅能体现大气水汽的水平分布情况,无法反映水汽的垂直分布特征以及三维水汽的时空变化特性,限制了其在气象研究方面的创新应用,特别是在局域高时空大气水汽研究中,精细化的三维大气水汽场尤为重要,精确的大气水汽三维时空分布对于提升中尺度数值气象预报精度也具有非常重要的意义。因此,近年来 GNSS 水汽层析技术取得了快速发展,为获取高精度、高时空分辨率三维大气水汽场提供了重要的技术支撑。

自奥地利数学家 Radon<sup>[3]</sup>提出层析思想后,该技术首次在医学领域得到应用<sup>[4]</sup>。此后,该技术逐步应

用到地质学<sup>[5]</sup>、地震<sup>[6]</sup>、电离层<sup>[7]</sup>和风<sup>[8]</sup>等领域。在对流层方面,由 Braun 等<sup>[9]</sup>首次提出对流层层析概念,Flores 等<sup>[10]</sup>利用实测全球定位系统(global positioning system, GPS)数据对其进行验证,证实了该方法用于监测对流层时空变化的可行性,并将其称为 GNSS 水汽层析技术。Seko 等<sup>[11]</sup>利用 GNSS 水汽层析技术进行三维水汽反演,并验证了反演结果的可靠性。随后,该技术快速发展,并逐步成为获取高精度三维水汽信息的重要手段之一。

地基 GNSS 水汽层析技术可实现三维水汽的立体监测,而且还能监测水汽在垂向上的分布。利用该技术反演的三维水汽信息可有效改善短期预报的初始湿度场,提高数值预报的准确度,更加准确地分析中小尺度强对流天气形成、发展、演变和消亡过程中水汽的时变特性,对短临灾害性天气预警、定量降水预报等具有重要意义<sup>[12]</sup>。目前,凭借全天候监测、高时空分辨率及低成本等优势,地基 GNSS 水汽层析技术已经成为大气水汽监测领域的研究热点。随着 GNSS 的完善和地面监测站的增加,地基 GNSS 水汽层析技术可满足气象研究中高时空分辨率、高精度三维水汽探测的现实需求。目前已应用于降雨落区预报<sup>[13]</sup>、数值预报模式初始场改善<sup>[14]</sup>、大气延迟误差校正<sup>[15]</sup>、暴雨天气探测<sup>[16]</sup>及台风监测和预警<sup>[17-18]</sup>等领域。

本文以水汽层析模型表达  $A \cdot x = y$  为基础,分别从水汽层析设计矩阵构建、层析方程观测数据利用、水汽层析模型解算、层析结果影响因素分析及其应用等方面,对该技术进行了综合梳理与总结,并分析了其发展动态。

## 1 经典 GNSS 水汽层析技术

经典 GNSS 水汽层析技术主要包括层析方程

构建和层析模型解算两部分。其中,层析方程构建包括层析观测方程和层析约束方程的构建;层析模型解算包括权值确定和三维水汽场解算,解算方法又可分为迭代算法和非迭代算法。在地基 GNSS 水汽层析中,输入数据主要包括 SWD 和 SWV 两大类。

### 1.1 层析方程构建

经典层析方程构建是基于分块法将层析区域参数化<sup>[10]</sup>。具体来讲,该方法将层析区域离散化为若干体素,假设体素块内的水汽密度或湿折射率在给定层析时段内为恒定常数,每条 GNSS 卫星信号穿过多个体素,则 GNSS 卫星信号上的 SWV (SWD)可表示为卫星信号穿过每个体素形成的截距与该体素内水汽密度(湿折射率)乘积之和。具体流程如下。

#### 1)层析观测方程构建

层析观测方程是水汽参数与观测值之间的函数关系式,即以 SWV (SWD)为输入值,水汽密度(湿折射率)为输出值,以截距形成的系数矩阵定义层析模型输入值与输出值间的关系。其中,观测方程中系数矩阵的构建具体包括:(1)建立局部空间直角坐标系;(2)计算信号射线与网格交点及其在每个网格内的截距;(3)判断 GNSS 信号是否从研究区域顶部穿出;(4)确定信号射线所穿过的网格编号并生成系数矩阵。

#### 2)层析约束方程构建

由于缺乏足够的观测数据以及“倒穹顶型”GNSS 信号簇与“盒型”层析区域的空间形态不匹配等现状,直接利用 GNSS 信号建立的观测方程存在不适定问题,因此不能直接利用最小二乘(least squares, LSQ)方法求解。通常基于体素内水汽的时空分布特征,添加额外的约束条件消除观测方程的不适定性。层析约束方程一般包括水平约束、垂直约束和先验约束方程。

(1)在水平约束建立方面,主要包括基于高斯加权函数和基于水平平滑约束的水平约束方程构建。基于高斯加权函数方法<sup>[10,19]</sup>是假定某体素块内的水汽参数是同层各相邻体素块水汽参数的加权平均值;基于水平平滑约束方法<sup>[20]</sup>是利用拉普拉斯算子给出同一水平面上不同位置体素与周围体素的函数关系。

(2)在垂直约束建立方面,通常假定大气水汽随高度增加呈指数递减<sup>[21]</sup>,建立垂直方向上相邻两

层体素间的约束关系。

(3)在先验约束建立方面,基于数值预报模型信息、标准大气参数和无线电探空数据等,将层析上边界的水汽密度强制约束为某一值或计算初始水汽密度值,建立先验约束方程<sup>[12,22]</sup>。

联合观测方程和约束方程,即可得到经典地基 GNSS 水汽层析模型

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{H} \\ \mathbf{V} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{A}$ 为层析观测方程的系数矩阵; $\mathbf{y}$ 为层析区域内所有从顶部穿出射线上的水汽信息组成的列向量; $\mathbf{H}$ 为水平约束的系数矩阵; $\mathbf{V}$ 为垂直约束的系数矩阵; $\mathbf{I}$ 为先验约束的系数矩阵,其为单位阵; $\mathbf{C}$ 为通过探空数据等方法得到的层析区域上边界的水汽密度值或利用现有数据计算的初始水汽密度值。

### 1.2 层析模型解算

层析模型解算主要包括权值确定和三维水汽场解算两部分。

1)在权值确定方面,经典定权方法主要是为不同观测类型的数据确定权值,其思想是将各种独立类型的输入信息设定相同的权值,然后为法方程设置最小特征值,通过调整约束方程的权值实现最小特征值条件下求解方程<sup>[10]</sup>。

2)在三维水汽场解算方面,根据解算结果是否迭代可将解算方法分为迭代重构算法和非迭代重构算法两大类。经典迭代算法主要包含代数重构算法(algebraic reconstruction technique, ART)<sup>[23]</sup>、联合迭代重构算法(simultaneous iterative reconstruction technique, SIRT)<sup>[24]</sup>和乘法代数重构算法(multiplicative algebraic reconstruction technique, MART)<sup>[25]</sup>等。经典非迭代算法主要包括奇异值分解法(singular value decomposition, SVD)<sup>[10,26]</sup>、阻尼最小二乘法<sup>[27]</sup>和 Kalman 滤波法<sup>[10]</sup>等。利用迭代算法进行三维水汽重构时,初值的选取非常重要<sup>[28]</sup>;利用非迭代算法进行三维水汽重构时,约束条件对层析模型解算结果具有较大影响<sup>[29]</sup>。

## 2 GNSS 水汽层析发展及动态分析

本章分别对地基 GNSS 水汽层析技术在层析设计矩阵构建、层析方程观测数据利用、水汽层析模型解算、层析结果影响因素分析及其应用等方面

进行介绍,并对其发展动态进行分析。

## 2.1 层析设计矩阵构建

层析设计矩阵的发展主要涉及观测方程构建、层析网格划分及约束方程构建3个方面。

1)在层析观测方程构建方面,主要基于分块法、节点法及水平参数化法构建观测方程。Flores等<sup>[10]</sup>采用分块法在进行射线追踪和走时计算时比较方便,但该方法基于体素块内的水汽含量恒定不变的假设,与实际水汽变化情况不符。针对该缺陷,Perler等<sup>[30]</sup>提出了节点法,将研究区域内所选节点上的信息作为待求变量,其他任意位置的值由相邻8个节点上的值内插得出,但该方法仍存在层析区域形状固定导致冗余参数过多的问题。针对该现状,相关学者提出了自适应节点参数化<sup>[31]</sup>、动态节点参数化<sup>[32]</sup>等水汽层析方法。上述分块法和节点法破坏了水汽在水平方向上的连续性。因此,Zhao等<sup>[33]</sup>提出了水平参数化方法,将研究区域离散化为若干垂直层,各层的水汽密度值由引入的水平参数化函数计算得到,但该方法在水汽垂直结构建模方面考虑较少。Zhang等<sup>[34]</sup>针对该问题提出了基于水平多项式和垂直指数函数的自适应分层函数层析方法。

2)在层析网格划分方面,主要包括层析高度确定、水平分辨率确定及垂直分辨率确定3个方面。

在层析高度确定方面,多数研究基于经验确定,如15 km<sup>[10]</sup>、12 km<sup>[35]</sup>、10.4 km<sup>[36-37]</sup>、10 km<sup>[30,38]</sup>及8 km<sup>[39]</sup>等,但不同研究区域的水汽分布不同,层析区域高度选择过高会引入较多没有信号穿过的空体素<sup>[39]</sup>,而层析高度选择过低则会导致层析反演结果精度较差<sup>[40]</sup>。针对缺乏合理高度确定原则的问题,基于无线电探空仪可以提供不同高度上精确的水汽垂直廓线信息,以及气象、电离层和气候卫星联合观测系统(constellation observing system for meteorology, ionosphere, and climate, COSMIC)掩星数据的高分辨率、全球覆盖及全天候的优势,相关研究提出了依据无线电探空<sup>[39,41]</sup>、COSMIC<sup>[42]</sup>等水汽垂直廓线资料及阈值确定层析高度的方法。

在水平分辨率确定方面,传统方法采用自定义等间距的水平网格划分方式<sup>[10,43]</sup>,导致不同网格包含的水汽信息差异较大。针对该缺陷,Chen等<sup>[39]</sup>提出了基于移动研究区域及在水平方向上搜索射

线穿过网格数最大化方法,以确定最优水平网格分布,与无线电探空数据计算的水汽密度相比,达到了1.05 g/m<sup>3</sup>的较高精度,但该方法在实际操作中较为困难。因此,赵庆志<sup>[44]</sup>提出了一种易于操作的非均匀对称水平网格划分方法,利用实测数据进行检核。结果表明,本文提出的方法提高了有射线穿过的网格数(约9%),改善了层析反演结果的精度(约18%)。

在垂直分辨率确定方面,传统方法采用等间距的垂直网格划分方式<sup>[29,35]</sup>,操作简便且分层后获得的离散区域形状规则,但均匀的垂直分辨率不符合大气水汽的实际分布。针对该缺陷,相关研究提出了基于“低密高疏”原则的经验性非均匀垂直分层方法<sup>[39,41]</sup>,但该方法在理论上仍不够严密,且不同历元分层高度相同。因此,范士杰等<sup>[45]</sup>提出了自适应垂直非均匀分层方法,该方法反演的大气湿折射率的均方根误差(root mean square error, RMSE)相较于垂直均匀分层方法减小约23.3%;王昊等<sup>[46]</sup>提出了自适应非均匀指数分层方法,该方法反演的水汽密度的RMSE相较于传统均匀分层方法降低了0.401 g/m<sup>3</sup>,在低海拔和恶劣天气下层析结果的精度和质量显著提高。

3)在约束方程构建方面,主要包括水平约束、垂直约束及先验约束3个方面。

在水平约束方面,通常在水平方向上假设某一体素块的水汽值是周围几个体素块的加权平均值,包括基于高斯加权函数方法<sup>[10,47]</sup>和基于水平平滑约束方法<sup>[20,23]</sup>。但传统水平约束中,高斯加权函数的平滑因子通常由经验性确定<sup>[46,48]</sup>,然而,平滑因子随时间、地区及层析模型结构的变化而变化。为了解决该问题,Xia等<sup>[49]</sup>提出了利用ERA-Interim数据确定最优平滑因子的方法,该方法反演的水汽密度精度较传统经验性确定平滑因子的方法提高了10.95%。

在垂直约束方面,通常采用指数函数建立约束方程<sup>[10,48]</sup>,但该方法建立的垂直约束解算结果精度较低,且垂直方向上空间水汽廓线符合指数变化的规律与实际水汽分布存在偏差。针对上述现状,相关学者在垂直约束方面进行了一系列研究,如提出了基于高斯函数<sup>[50]</sup>、实时COSMIC数据<sup>[49]</sup>、实测GNSS PWV<sup>[51]</sup>及短期探空信息拟合函数<sup>[52]</sup>构建垂直约束的方法,表1给出了不同垂直约束的性能对比。

表 1 不同垂直约束的性能对比

Tab. 1 Performance comparison with different vertical constraints

方法	精度
高斯函数	相对于指数函数所得结果,层析湿折射率的标准差减小了 3.8 mm/km <sup>[50]</sup>
实时 COSMIC 数据	相对于传统非实时 COSMIC 数据,解算结果的 RMSE 降低了 12.8% <sup>[49]</sup>
实测 GNSS PWV	该约束与实际对流层水汽分布一致 <sup>[51]</sup>
短期探空信息拟合函数	相对于指数函数,解算结果的 RMSE 降低了 5.7% <sup>[52]</sup>

表 2 不同先验约束的性能对比

Tab. 2 Performance comparison of different priori constraints

方法	精度
COSMIC 掩星数据	COSMIC 掩星事件得到的水汽密度值的垂直分辨率高,且精度较高 <sup>[59]</sup>
太阳光度计	全球自动观测网(aerosol robotic network, AERONET)太阳光度计可以提供精确的可降水量值,与探空水汽资料相比的 RMSE 仅 2.89 mm <sup>[60]</sup>
AIRS	当使用 AIRS 廓线进行初始化时, RMSE 从未超过 3.0 g/m <sup>3</sup> ,有时甚至小于无线电探空初始化的解 <sup>[57]</sup>
ECMWF-ERA-Interim 再分析资料	相较于不加先验约束的层析方程,采用该方法反演的水汽密度的 RMSE 由原来的 1.82 g/m <sup>3</sup> 减小到 1.07 g/m <sup>3</sup> <sup>[58]</sup>

析区域的卫星信号则被当作无效信息剔除。相关学者针对该缺陷进行了大量研究,主要包括在层析区域侧面穿出和在层析区域侧面穿入且在层析区域顶部穿出两种情况。此外,随着 Multi-GNSS、多源水汽观测技术的发展,融合多源多类型数据逐步成为水汽层析技术的研究重点,主要包括 Multi-GNSS 数据利用以及多源水汽层析方面。

在层析区域侧面穿出的 GNSS 信号利用方面,相关学者提出了一系列理论方法,填补了关于层析区域侧面穿出射线利用方面的理论空白。如经验指数负相关<sup>[61]</sup>、构建水汽比例因子模型<sup>[41]</sup>、引入水汽单位指数<sup>[62]</sup>、附加辅助层析区域<sup>[63]</sup>、顾及边界入射信号<sup>[64]</sup>及虚拟信号<sup>[36,65]</sup>等方法。此外,赵庆志等<sup>[37]</sup>通过引入比例系数并构建其与高度的函数模型,利用在层析区域侧面穿入顶部穿出的 GNSS 信号构建层析观测方程。

在 Multi-GNSS 数据利用方面,相关学者发现多系统数据能够提高数据利用率<sup>[29,66-67]</sup>,实现高网格覆盖<sup>[64,68]</sup>,且较单系统层析结果更加可靠<sup>[69-70]</sup>。

在多源水汽数据利用方面,通过附加额外的水汽

在先验约束方面,相关研究通常基于无线电探空数据<sup>[10]</sup>、标准大气参数<sup>[53]</sup>及数值预报模型信息<sup>[54]</sup>等,将层析上边界的水汽密度强制约束为某一值或计算初始水汽密度值。此外,COSMIC 掩星数据<sup>[55]</sup>、太阳光度计<sup>[56]</sup>、大气红外探测仪(atmospheric infrared sounder, AIRS)<sup>[57]</sup>及 ECMWF-ERA-Interim 再分析资料<sup>[58]</sup>等先验水汽数据,也逐步应用到先验约束方程构建中,表 2 给出了不同先验约束的性能对比。

## 2.2 GNSS 观测数据利用

传统水汽层析方法能够利用的卫星信号是完整穿过层析区域的观测数据,而对于未完整穿过层

析区域的卫星信号则被当作无效信息剔除。相关学者针对该缺陷进行了大量研究,主要包括在层析区域侧面穿出和在层析区域侧面穿入且在层析区域顶部穿出两种情况。此外,随着 Multi-GNSS、多源水汽观测技术的发展,融合多源多类型数据逐步成为水汽层析技术的研究重点,主要包括 Multi-GNSS 数据利用以及多源水汽层析方面。

在层析区域侧面穿出的 GNSS 信号利用方面,相关学者提出了一系列理论方法,填补了关于层析区域侧面穿出射线利用方面的理论空白。如经验指数负相关<sup>[61]</sup>、构建水汽比例因子模型<sup>[41]</sup>、引入水汽单位指数<sup>[62]</sup>、附加辅助层析区域<sup>[63]</sup>、顾及边界入射信号<sup>[64]</sup>及虚拟信号<sup>[36,65]</sup>等方法。此外,赵庆志等<sup>[37]</sup>通过引入比例系数并构建其与高度的函数模型,利用在层析区域侧面穿入顶部穿出的 GNSS 信号构建层析观测方程。

## 2.3 水汽层析模型解算

层析模型解算包括层析模型权值确定和三维水汽场解算两个方面。

1)在层析模型权值确定方面,Flores 首次提出了基于经验设置迭代终止阈值确定不同类型观测值权值的方法<sup>[10]</sup>,但该方法与观测方程结构紧密相关,有时仅通过调节权值也不一定能得到较好的层析结果<sup>[76]</sup>。随后相关学者进行了大量研究,根据多源数据单位权方差相等的思想,发展了方差-分量抗

差估计<sup>[19]</sup>、基于齐性检验的验后方差估计<sup>[77]</sup>及基于拉普拉斯算子的自适应平滑<sup>[78]</sup>等方法,但上述方法仅从数学或统计学角度确定最优权值,耗时长且不够严密。因此,于胜杰等<sup>[79]</sup>提出了顾及水汽参数空间分布规律的选权拟合法,克服了忽略水汽参数空间分布确定权值的缺陷,但并未顾及同类型不同观测值定权的问题。针对该问题,相关学者提出了基于参数实际关系特征确定同类型不同观测值和不同类型观测值信息的层析模型权值确定方法<sup>[80]</sup>。

2)在三维水汽场解算方面,主要包括迭代和非迭代两种算法。在迭代算法中,针对传统迭代算法依赖初值精度且迭代终止条件难以确定的缺陷,提出了自适应 SIRT(adaptive SIRT, ASIRT)算法<sup>[75]</sup>、自适应

代数重构算法(adaptive algebraic reconstruction technique, AART)<sup>[81]</sup>及两步迭代算法(two-step projected iterative algorithm, TSPIA)<sup>[82]</sup>等。在非迭代算法中,针对传统非迭代算法由于忽视小奇异值的变化导致层析结果波动较大的缺陷,提出了自适应 Kalman 滤波方法<sup>[83]</sup>、改进岭估计(improved ridge estimation, IRE)算法<sup>[84]</sup>、遗传算法(genetic algorithm, GA)<sup>[85]</sup>和 Tikhonov 正则化方法<sup>[86]</sup>等。此外,针对单个重构算法在层析水汽反演中的局限性,即非迭代算法依赖额外的约束条件及迭代算法受初始值精度影响大,相关学者提出了 LSQ+SVD+MART<sup>[39]</sup>和 SVD+改进的 ART(improved ART, IART)<sup>[87]</sup>等迭代与非迭代组合算法,表 3 给出了不同算法的性能对比。

表 3 不同算法的性能对比

Tab. 3 Performance comparison of different algorithms

算法	精度	稳定性
迭代算法	ASIRT	—
	AART	TSPIA>ASIRT>AART
	TSPIA	—
非迭代算法	自适应 Kalman 滤波	— 稳定性强
	IRE	IRE>SVD
	GA	GA>LSQ
	Tikhonov 正则化	— 仅调整小奇异值权重而不消除,稳定性强
迭代与非迭代组合算法	SVD+IART	SVD+IART>IART

## 2.4 水汽层析影响因素分析

随着 Multi-GNSS、多源水汽层析技术的发展及 GNSS 水汽层析理论的逐步完善,相关学者在水汽层析影响因素方面进行了大量探索,主要影响因素包括单/多系统、GNSS 测站密度、多源水汽、约束条件及层析网格划分等。

在单/多系统影响方面,相关学者提出了利用实测 GPS 和仿真 GPS 数据双系统组合<sup>[29]</sup>、GPS 和 GLONASS 数据组合<sup>[69]</sup>及 GPS/GLONASS/GALILEO/BDS 四系统组合<sup>[67]</sup>等水汽反演方法,提高了 GNSS 观测数据网格覆盖率,且多系统水汽层析结果优于单系统。在测站密度影响方面,Zhao 等<sup>[88]</sup>发现随着测站数目增多,数据网格覆盖率显著上升;此外,测站密度疏密变化较多系统对层析结果有更大影响。在多源水汽影响方面,张文渊等<sup>[89]</sup>发现相较于传统 GNSS 层析模型,GNSS/RS 层析模型的观测信号数量和网格覆盖率更高,且各类精度

指标及不同高度层上的水汽产品质量均优于传统 GNSS 层析模型。在约束条件影响方面,戚铭心<sup>[90]</sup>发现不同的垂直约束条件对层析结果有细微的影响;水平约束虽有负面影响,但其可弥补层析模型自身的缺陷,因此将其引入层析方程是合理的;此外,相较于水平约束,初值的精度对层析结果的影响更为显著。在层析网格划分影响方面,相关学者<sup>[91]</sup>发现水汽层析中网格大小、水平及垂直分辨率均会影响层析反演结果质量等。Zhang 等<sup>[92]</sup>利用香港地区 30 年的探空数据,分析了不同月份层析区域顶层高度的变化特点;Zhao 等<sup>[42]</sup>结合 COSMIC 数据提供的水汽垂直分布信息,以水汽密度  $0.2 \text{ g/m}^3$  为界限确定最优顶层高度,上述研究说明同一区域的不同时间段内最优层析顶层高度也有较大差距。

## 2.5 水汽层析结果应用

基于地基 GNSS 水汽层析技术能够获取高精度、高时空分辨率三维水汽信息,近年来在改善数

值模式初始场、降水落区预报、暴雨天气探测及台风监测和预警等方面进行了创新应用。

在数值同化方面, Trzcina 等<sup>[14,93]</sup>将 GNSS 层析技术得到的湿折射率同化到天气研究与预报(weather research and forecasting, WRF)数据同化(data assimilation, DA)系统中,发现同化水汽层析数据对相对湿度的预测有积极影响;此外,还发现 GNSS 层析数据的同化对 WRF 模型的影响大于 ZTD 观测值,证实了地基 GNSS 水汽层析技术在天气预报方面的潜力。在降水落区预报方面, Chen 等<sup>[94]</sup>通过分析香港地区 2010—2014 年 3 次强降雨时水汽场的时空演变特征,证明了层析技术可以很好地探测降雨时水汽的时空变化;Zhao 等<sup>[13]</sup>发现在强降雨发生前, PWV 时间序列呈上升趋势,大气水汽廓线在降雨发生前 1~2 h 发生显著的垂直运动,为降水落区预报提供可能;吴皓等<sup>[95]</sup>利用层析 PWV、PWV 变化率、温度、露点温度、气压、经度和纬度等多种参数,构建了 BP(back propagation)神经网络短时降雨落区预测模型,并在湖南省进行降雨预测实验,发现该模型能较好地对降雨落区进行预测,同时能够对 94% 的中雨及以上等级降雨事件进行准确预测,验证了层析产品在大范围降雨落区预报方面的可行性。在暴雨天气探测方面,黄瑾芳等<sup>[16]</sup>利用 GNSS 水汽层析技术研究“黑色暴雨”预警事件,发现在“黑色暴雨”发生前,出现低层大气中大量水汽聚集现象;在发布预警时,出现低层水汽含量急剧减少及上层水汽含量增加的现象,为 GNSS 水汽层析技术在暴雨天气探测方面的研究提供参考依据。在台风监测和预警方面,周苏娅<sup>[17]</sup>发现台风连续影响时期高层区域的水汽密度变化较小,而中低层区域水汽密度变化较大;相关学者重建 2013—2014 年间 3 个超级台风过境期间的三维水汽场,对比研究台风过境期间水汽的三维时空变化特征,发现在超强台风的影响下对流层低层(1.6 km 以下)PWV 含量变化不大,且时空增长率很小,而在对流层高层(1.6~8.5 km)PWV 含量以较大的时空增长率持续增加,且随着高度的增加而变大,为台风监测和预警提供理论参考<sup>[18]</sup>。

### 3 总结与展望

#### 3.1 总结

对现有地基 GNSS 水汽层析技术在层析设计矩阵构建、层析方程观测数据利用、水汽层析模型

解算、层析结果影响因素分析及其应用等方面进行了梳理与总结,给出了较为完善的 GNSS 水汽层析技术发展体系方法。在层析模型构建方面,现有理论与方法较为完善,普遍使用体素优化、引入侧面射线及融合多源水汽资料等方法改善水汽层析反演精度,但当前研究未充分考虑多源水汽时空分辨率不一致问题。在层析模型解算方面,相关学者在经典迭代重构算法和非迭代重构算法的基础上,提出了大量改进算法,此外,相较于单一的重构算法,还提出了迭代和非迭代组合算法,既克服了非迭代重构算法对约束方程的依赖,又解决了迭代重构算法受迭代初值精度影响大的难题。在水汽层析影响因素分析方面,主要包括单/多系统、测站密度、多源水汽及层析网格划分等对层析结果的影响。最后,相关研究证明了该技术在改善数值模式初始场、降雨落区预报、暴雨天气探测及台风监测和预警等方面具有较大的应用潜力。

#### 3.2 展望

地基 GNSS 水汽层析技术经过多年发展,已形成较为完善的理论和方法体系,但其在层析网格划分、多源数据选取及 GNSS 测站个数确定等方面的研究中还缺少相关的理论依据,另外,在层析技术的应用方面研究较少。主要包括:

1)在层析观测方程构建方面。基于体素的层析技术以操作简便的优势成为主流,但其在减少层析方程的病态情况方面已趋于饱和,有待进一步改进,以提高结果的准确性。

2)在层析网格划分方面。在水平分辨率的确定上,尽管多数研究仍以均匀网格划分为主,但实际上在研究区域中心位置穿过的网格射线数较多,而在层析区域边缘位置射线穿过较少,甚至许多位于边缘区域的网格并没有射线穿过,即均匀水平网格划分与实际射线分布特点不一致。针对该问题发展出的非均匀网格划分方法多为经验确定,缺乏相关的理论依据,有待进一步探索。

3)在数据选取方面。已有研究表明多系统较单系统效果更好,在相同的观测条件下,多系统组合观测值较单系统可实现更高的网格覆盖率,尤其是对中高层网格覆盖率的改善,但其选取原则、数量及时间分辨率等缺乏相关的标准。

4)在测站选取方面。现有 GNSS 观测网存在测站空间几何构型较差、观测值分布不均匀的问题,影响了层析解算结果,通过加密 GNSS 观测网

能够从整体上提高层析的精度,主要是改善了底层格网的几何结构。然而,随着 GNSS 站数量的增多,测站密度、空间分布及是否选取研究区域外的测站等问题有待研究。

5)在层析技术应用方面。目前只有极少数开展水汽层析结果的创新应用研究,且尚未业务化,层析技术的适用性及应用领域等方面仍有待进一步探索。

因此,GNSS 水汽层析技术仍需针对层析网格划分、数据选择及测站选取等方面进一步探索,在层析反演结果应用方面有待进一步加强,为地基 GNSS 水汽层析技术的切实落地应用探索新道路。

### 参考文献

- [1] 姚宜斌,赵庆志. GNSS 对流层水汽监测研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 935-952.  
YAO Yibin, ZHAO Qingzhi. Research progress and prospect of monitoring tropospheric water vapor by GNSS technique[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 935-952(in Chinese).
- [2] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97 (D14): 15787-15801.
- [3] RADON J. Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte längs gewisser mannigfaltigkeiten[J]. Computed Tomography, 1917, 69: 262-277.
- [4] BRAMLET R. Reconstruction tomography in diagnostic radiology and nuclear medicine [J]. Clinical Nuclear Medicine, 1978, 3(6): 245.
- [5] BOURJOT L, ROMANOWICZ B. Crust and upper mantle tomography in Tibet using surface waves[J]. Geophysical Research Letters, 1992, 19(9): 881-884.
- [6] KISSLING E, ELLSWORTH W L, EBERHART-PHILLIPS D, et al. Initial reference models in local earthquake tomography[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1994, 99 (B10): 19635-19646.
- [7] HAJJ G A, IBANEZ-MEIER R, KURSINSKI E R, et al. Imaging the ionosphere with the global positioning system [J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 1994, 5(2): 174-187.
- [8] GAO J, XUE M, SHAPIRO A, et al. A variational method for the analysis of three-dimensional wind fields from two Doppler radars[J]. Monthly Weather Review, 1999, 127(9): 2128-2142.
- [9] BRAUN J, ROCKEN C, MEERTENS C, et al. Development of a water vapor tomography system using low cost L1 GPS receivers[C]// Proceedings of 9<sup>th</sup> ARM Science Team Meeting. San Antonio, 1999: 2226.
- [10] FLORES A, RUFFINI G, RIUS A. 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays[J]. Annales Geophysicae, 2000, 18(2): 223-234.
- [11] SEKO H, SHIMADA S, NAKAMURA H, et al. Three-dimensional distribution of water vapor estimated from tropospheric delay of GPS data in a mesoscale precipitation system of the Baiu front[J]. Earth, Planets and Space, 2000, 52: 927-933.
- [12] 宋淑丽,朱文耀,丁金才,等. 上海 GPS 网层析水汽三维分布改善数值预报湿度场[J]. 科学通报, 2005, 50(20): 2271-2277.  
SONG Shuli, ZHU Wenyao, DING Jincai, et al. Improve the accuracy of the humidity field from numerical weather prediction model using the three-dimensional water vapor tomography result in Shanghai GPS network [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(20): 2271-2277 (in Chinese).
- [13] ZHAO Q, MA X, YAO Y. Preliminary result of capturing the signature of heavy rainfall events using the 2-d-/4-d water vapour information derived from GNSS measurement in Hong Kong[J]. Advances in Space Research, 2020, 66(7): 1537-1550.
- [14] TRZCINA E, ROHM W. Estimation of 3D wet refractivity by tomography, combining GNSS and NWP data: first results from assimilation of wet refractivity into NWP[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2019, 145(720): 1034-1051.
- [15] YU W, CHEN B, DAI W, et al. Real-time precise point positioning using tomographic wet refractivity fields[J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 928.
- [16] 黄瑾芳,张卫星,楼益栋. 北斗/GPS 准实时水汽层析算法研究与暴雨天气应用[C]// 第九届中国卫星导航学术年会论文集——S01 卫星导航应用技术. 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2018: 6.  
HUANG Jinfang, ZHANG Weixing, LOU Yidong, et al. Study on near real-time water vapor tomography using BDS/GPS and rainstorm weather application[C]// Proceedings of 9<sup>th</sup> China Satellite Navigation Academic Annual Conference—S01 Satellite Navigation Application Technology. Academic Exchange Center, China Satellite Navigation System Management Office, 2018: 6(in Chi-

- nese).
- [17] 周苏娅. 香港地区台风时期对流层水汽变化研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.  
ZHOU Suya. The research of water vapor variation over Hong Kong region during typhoon[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2020(in Chinese).
- [18] 朱明晨. GNSS 水汽反演技术精化及台风水汽动态监测[D]. 南京: 东南大学, 2024.  
ZHU Mingchen. GNSS water vapor inversion technology improvement and dynamic monitoring during typhoon events[D]. Nanjing: Southeast University, 2024(in Chinese).
- [19] 宋淑丽, 朱文耀, 丁金才, 等. 上海 GPS 综合应用网对可降水汽量的实时监测及其改进数值预报初始场的试验[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 631-638.  
SONG Shuli, ZHU Wenyao, DING Jincui, et al. Real time monitoring of PWV from SGCAN and its application test in numerical weather forecast[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4): 631-638(in Chinese).
- [20] WEN D, LIU S, TANG P. Tomographic reconstruction of ionospheric electron density based on constrained algebraic reconstruction technique[J]. GPS Solutions, 2010, 14: 375-380.
- [21] ELÓSEGUI P, RUIS A, DAVIS J L, et al. An experiment for estimation of the spatial and temporal variations of water vapor using GPS data[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1998, 23(1): 125-130.
- [22] 于胜杰, 柳林涛, 梁星辉. 约束条件对 GPS 水汽层析解算的影响分析[J]. 测绘学报, 2010, 39(5): 491-496.  
YU Shengjie, LIU Lintao, LIANG Xinghui. Influence analysis of constraint conditions on GPS water vapor tomography[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(5): 491-496(in Chinese).
- [23] 何林, 柳林涛, 苏晓庆, 等. 水汽层析代数重构算法[J]. 测绘学报, 2015, 44(1): 32-38.  
HE Lin, LIU Lintao, SU Xiaoqing, et al. Algebraic reconstruction algorithm of vapor tomography[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(1): 32-38(in Chinese).
- [24] TONG L, ZHANG K, LI H, et al. An investigation of near real-time water vapor tomography modeling using multi-source data[J]. Atmosphere, 2022, 13(5): 752.
- [25] WANG X, DAI Z, ZHANG E, et al. Tropospheric wet refractivity tomography using multiplicative algebraic reconstruction technique[J]. Advances in Space Research, 2014, 53(1): 156-162.
- [26] WAN M, ZHANG K, WU S, et al. Development of a new vertical water vapor model for GNSS water vapor tomography[J]. Remote Sensing, 2022, 14(22): 5656.
- [27] HIRAHARA K. Local GPS tropospheric tomography[J]. Earth, Planets and Space, 2000, 52(11): 935-939.
- [28] ROHM W, ZHANG K, BOSY J. Unconstrained, robust Kalman filtering for GNSS troposphere tomography[J]. Atmospheric Measurement Techniques Discussion, 2013, 6(5): 9133-9162.
- [29] BENDER M, STOSIUS R, ZUS F, et al. GNSS water vapour tomography-expected improvements by combining GPS, GLONASS and Galileo observations[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(5): 886-897.
- [30] PERLER D, GEIGER A, HURTER F. 4D GPS water vapor tomography: new parameterized approaches[J]. Journal of Geodesy, 2011, 85: 539-550.
- [31] DING N, ZHANG S, WU S, et al. Adaptive node parameterization for dynamic determination of boundaries and nodes of GNSS tomographic models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(4): 1990-2003.
- [32] ZHANG W, ZHANG S, NAN D, et al. An improved tropospheric tomography method based on the dynamic node parameterized algorithm[J]. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2020, 17(2): 191-206.
- [33] ZHAO Q, YAO Y, YAO W. Troposphere water vapour tomography: a horizontal parameterised approach[J]. Remote Sensing, 2018, 10(8): 1241.
- [34] ZHANG W, ZHANG S, MOELLER G, et al. An adaptive-degree layered function-based method to GNSS tropospheric tomography[J]. GPS Solutions, 2023, 27(2): 67.
- [35] MIRANDA P M A, MATEUS P. Improved GNSS water vapor tomography with modified mapping functions[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(18): 1-8.
- [36] 姚宜斌, 赵庆志, 罗亦泳. 附加虚拟信号精化水汽层析模型的方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1658-1664.  
YAO Yibin, ZHAO Qingzhi, LUO Yiyong. An approach of imposing virtual signals to sophisticate water vapor tomographic model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(11): 1658-1664(in Chinese).
- [37] 赵庆志, 姚宜斌, 姚顽强. 顾及层析区域外测站的

- GNSS水汽层析建模方法[J]. 测绘学报, 2021, 50(3): 285-294.
- ZHAO Qingzhi, YAO Yibin, YAO Wanqiang. A method to establish the tomography model considering the data of GNSS stations outside the research area[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(3): 285-294(in Chinese).
- [38] 赵庆志, 姚宜斌, 姚顽强, 等. 利用ECMWF改善射线利用率的三维水汽层析算法[J]. 测绘学报, 2018, 47(9): 1179-1187.
- ZHAO Qingzhi, YAO Yibin, YAO Wanqiang, et al. A method to improve the utilization rate of satellite rays for three-dimensional water vapor tomography using the ECMWF data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(9): 1179-1187(in Chinese).
- [39] CHEN B, LIU Z. Voxel-optimized regional water vapor tomography and comparison with radiosonde and numerical weather model[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88: 691-703.
- [40] YAO Y, ZHAO Q. A novel, optimized approach of voxel division for water vapor tomography[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2017, 129: 57-70.
- [41] YAO Y, ZHAO Q. Maximally using GPS observation for water vapor tomography[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(12): 7185-7196.
- [42] ZHAO Q, YAO Y, YAO W, et al. An optimal tropospheric tomography approach with the support of an auxiliary area[J]. *Annales Geophysicae*, 2018, 36(4): 1037-1046.
- [43] HAJI-AGHAJANY S, AMERIAN Y, VERHAGEN S. B-spline function-based approach for GPS tropospheric tomography[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 88.
- [44] 赵庆志. 地基GNSS水汽反演关键技术研究及其应用[J]. 测绘学报, 2018, 47(3): 424.
- ZHAO Qingzhi. Studies on the key technologies in water vapor inversion using ground-based GNSS and its applications[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(3): 424(in Chinese).
- [45] 范士杰, 陈岩, 彭秀英, 等. 地基GNSS水汽层析的自动垂直非均匀分层方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(9): 924-928.
- FAN Shijie, CHEN Yan, PENG Xiuying, et al. Automatic vertical non-uniform stratification method for GNSS water vapor tomography[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(9): 924-928(in Chinese).
- [46] 王昊, 丁楠, 张文渊, 等. GNSS水汽层析的自适应非均匀指数分层方法[J]. 测绘学报, 2022, 51(3): 327-339.
- WANG Hao, DING Nan, ZHANG Wenyuan, et al. An adaptive non-uniform vertical stratification for GNSS water vapor tomography[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(3): 327-339(in Chinese).
- [47] 宋淑丽. 地基GPS网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2004.
- SONG Shuli. Sensing three dimensional water vapor structure with ground-based GPS network and application in meteorology[D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2004(in Chinese).
- [48] JIANG P, YE S R, LIU Y Y, et al. Near real-time water vapor tomography using ground-based GPS and meteorological data; long-term experiment in Hong Kong[J]. *Annales Geophysicae*, 2014, 32(8): 911-923.
- [49] XIA P, YE S, JIANG P, et al. Assessing water vapor tomography in Hong Kong with improved vertical and horizontal constraints[J]. *Annales Geophysicae*, 2018, 36(4): 969-978.
- [50] 张豹, 姚宜斌, 胡羽丰, 等. 高斯函数在香港地区对对流层层析实验中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(8): 1047-1053.
- ZHANG Bao, YAO Yibin, HU Yufeng, et al. The application of Gauss function in tropospheric tomography in Hong Kong area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(8): 1047-1053(in Chinese).
- [51] YAO Y, LIU C, XU C. A new GNSS-derived water vapor tomography method based on optimized voxel for large GNSS network[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(14): 2306.
- [52] 何秀凤, 詹伟, 施宏凯. 顾及边界信号及垂直约束的GNSS水汽层析方法[J]. 测绘学报, 2021, 50(7): 853-862.
- HE Xiufeng, ZHAN Wei, SHI Hongkai. A GNSS water vapor tomography method considering boundary signals and vertical constraint[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(7): 853-862(in Chinese).
- [53] CHAMPOLLION C, MASSON F, BOUIN M N, et al. GPS water vapour tomography; preliminary results from the ESCOMPTE field experiment[J]. *Atmospheric Re-*

- search, 2005, 74(1-4): 253-274.
- [54] SONG S, ZHU W, DING J, et al. 3D water-vapor tomography with Shanghai GPS network to improve forecasted moisture field [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(5): 607-614.
- [55] 夏朋飞, 蔡昌盛, 戴吾蛟, 等. 地基 GPS 联合 COSMIC 掩星数据的水汽三维层析研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(8): 892-896.  
XIA Pengfei, CAI Changsheng, DAI Wujiao, et al. Three-dimensional water vapor tomography using ground-based GPS and COSMIC occultation observations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(8): 892-896(in Chinese).
- [56] CHEN B, LIU Z. Assessing the performance of troposphere tomographic modeling using multi-source water vapor data during Hong Kong's rainy season from May to October 2013[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9(10): 5249-5263.
- [57] BENEVIDES P, CATALAO J, NICO G, et al. 4D wet refractivity estimation in the atmosphere using GNSS tomography initialized by radiosonde and AIRS measurements: results from a 1-week intensive campaign[J]. GPS Solutions, 2018, 22(4): 91.
- [58] 赵庆志, 姚宜斌, 辛林洋. 融合 ECMWF 格网数据的水汽层析精化方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(8): 1131-1138.  
ZHAO Qingzhi, YAO Yibin, XIN Linyang. A method to sophisticate the water vapor tomography model by combining the ECMWF grid data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(8): 1131-1138(in Chinese).
- [59] 许超玲, 史俊波, 郭敬明, 等. 联合地基 GPS 和空基 COSMIC 掩星的可降水量研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(4): 467-470.  
XU Chaoqian, SHI Junbo, GUO Jingming, et al. Analysis of combining ground-based GPS network and space-based COSMIC occultation observation for precipitable water vapor application[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(4): 467-470(in Chinese).
- [60] LIU Z, WONG M S, NICHOL J, et al. A multi-sensor study of water vapour from radiosonde, MODIS and AERONET: a case study of Hong Kong [J]. International Journal of Climatology, 2013, 33(1): 109-120.
- [61] BENEVIDES P, CATALAO J, MIRANDA P M. Experimental GNSS tomography study in Lisbon (Portugal)[J]. Física de la Tierra, 2014, 26: 65-79.
- [62] YAO Y B, ZHAO Q Z, ZHANG B. A method to improve the utilization of GNSS observation for water vapor tomography[J]. Annales Geophysicae, 2016, 34(1): 143-152.
- [63] 赵庆志, 姚宜斌, 罗亦泳. 附加辅助层析区域提高射线利用率的水汽反演方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(9): 1203-1208, 1222.  
ZHAO Qingzhi, YAO Yibin, LUO Yiyong. A method to improve the utilization of observation for water vapor tomography by adding assisted tomographic area [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(9): 1203-1208, 1222(in Chinese).
- [64] 胡鹏, 黄观文, 张勤, 等. 顾及边界入射信号的多模水汽层析方法[J]. 测绘学报, 2020, 49(5): 557-568.  
HU Peng, HUANG Guanwen, ZHANG Qin, et al. A multi-GNSS water vapor tomography method considering boundary incident signals[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(5): 557-568(in Chinese).
- [65] LIU S, ZHANG K, WU S, et al. An improved GNSS tropospheric tomographic model with an extended region and combining virtual signals [J]. Atmospheric Research, 2023, 287: 106703.
- [66] BENEVIDES P, NICO G, CATALÃO J, et al. Analysis of Galileo and GPS integration for GNSS tomography[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 55(4): 1936-1943.
- [67] 王维, 宋淑丽, 王解先, 等. 长三角地区多模 GNSS 斜路径观测分布及水汽仿真层析[J]. 测绘学报, 2016, 45(2): 164-169.  
WANG Wei, SONG Shuli, WANG Jiexian, et al. Distribution analysis of multi GNSS slant delays and simulated water vapor tomography in Yangtze River delta[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(2): 164-169(in Chinese).
- [68] ZHAO Q, YAO Y, CAO X, et al. Accuracy and reliability of tropospheric wet refractivity tomography with GPS, BDS, and GLONASS observations[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(9): 2836-2847.
- [69] 夏朋飞, 叶世榕, 江鹏. GPS/GLONASS 组合精密单点定位技术在三维水汽层析中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(1): 72-76.  
XIA Pengfei, YE Shirong, JIANG Peng. Research on three-dimensional water vapor tomography using GPS/GLONASS PPP method[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(1): 72-76(in Chinese).
- [70] DONG Z, JIN S. 3-D water vapor tomography in Wuhan from GPS, BDS and GLONASS observations

- [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 62.
- [71] 吴昊, 鄂盛龙, 夏朋飞, 等. 联合地基 GNSS 及空基 GNSS 掩星探测水汽三维分布[J]. *导航定位与授时*, 2020, 7(1): 92-97.
- WU Hao, E Shenglong, XIA Pengfei, et al. Remote sensing the atmospheric water vapor using observations from the ground-based GNSS network and space-based radio occultation[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(1): 92-97(in Chinese).
- [72] HEUBLEIN M, ALSHAWAF F, ERDNÜB B, et al. Compressive sensing reconstruction of 3D wet refractivity based on GNSS and InSAR observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 39(2): 197-217.
- [73] 张文渊, 张书毕, 郑南山, 等. GNSS/MODIS 信号紧耦合水汽层析算法[J]. *测绘学报*, 2021, 50(4): 496-508.
- ZHANG Wenyuan, ZHANG Shubi, ZHENG Nanshan, et al. Tightly coupled water vapor tomography algorithm for combining GNSS and MODIS signals[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(4): 496-508(in Chinese).
- [74] CHEN B, TAN J, WANG W, et al. Tomographic reconstruction of water vapor density fields from the integration of GNSS observations and Fengyun-4A products[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1-12.
- [75] ZHANG W, LOU Y, LIU W, et al. Rapid troposphere tomography using adaptive simultaneous iterative reconstruction technique[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94: 1-12.
- [76] 张豹. 地基 GNSS 水汽反演技术及其在复杂天气条件下的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- ZHANG Bao. The study of water vapor inversion using ground-based GNSS and its applications in severe weather condition[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016(in Chinese).
- [77] GUO J, YANG F, SHI J, et al. An optimal weighting method of global positioning system (GPS) troposphere tomography[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(12): 5880-5887.
- [78] ZHANG B, FAN Q, YAO Y, et al. An improved tomography approach based on adaptive smoothing and ground meteorological observations[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 886.
- [79] 于胜杰, 柳林涛. 利用选权拟合法进行 GPS 水汽层析解算[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2012, 37(2): 183-186.
- YU Shengjie, LIU Lintao. Application of fitting method by selection of the parameter weights on GPS water vapor tomography [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(2): 183-186(in Chinese).
- [80] ZHAO Q, YAO Y, YAO W. A troposphere tomography method considering the weighting of input information[J]. *Annales Geophysicae*, 2017, 35(6): 1327-1340.
- [81] 张文渊, 张书毕, 左都美, 等. GNSS 水汽层析的自适应代数重构算法[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2021, 46(9): 1318-1327.
- ZHANG Wenyuan, ZHANG Shubi, ZUO Doumei, et al. Adaptive algebraic reconstruction algorithms for GNSS water vapor tomography[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(9): 1318-1327(in Chinese).
- [82] LIU S, ZHANG K, WU S, et al. A two-step projected iterative algorithm for tropospheric water vapor tomography[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 5999-6015.
- [83] 江鹏, 叶世榕, 何书镜, 等. 自适应 Kalman 滤波用于 GPS 层析大气湿折射率[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2013, 38(3): 299-302.
- JIANG Peng, YE Shirong, HE Shujing, et al. Ground-based GPS tomography of wet refractivity with adaptive Kalman filter[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(3): 299-302(in Chinese).
- [84] ZHAO Q, LI Z, YAO W, et al. An improved ridge estimation (IRE) method for troposphere water vapor tomography[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, 207: 105366.
- [85] YANG F, GUO J, SHI J, et al. A GPS water vapour tomography method based on a genetic algorithm[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(1): 355-371.
- [86] SORKHABI O M, DJAMOUR Y. 4D modeling of precipitable water vapor to assess flood forecasting by using GPS signals[J]. *Natural Hazards*, 2024, 120(1): 181-195.
- [87] 夏朋飞, 叶世榕. 一种基于组合重构算法的对流层层析技术[J]. *大地测量与地球动力学*, 2017, 37(9): 928-932.
- XIA Pengfei, YE Shirong. A troposphere tomography technique based on combined reconstruction algorithm [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(9): 928-932(in Chinese).

- [88] ZHAO Q, ZHANG K, YAO W. Influence of station density and multi-constellation GNSS observations on troposphere tomography [J]. *Annales Geophysicae*, 2019, 37(1): 15-24.
- [89] 张文渊, 张书毕, 郑南山, 等. 联合 GNSS/RS 多源数据反演三维大气水汽分布研究[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(6): 1951-1964.  
ZHANG Wenyuan, ZHANG Shubi, ZHENG Nanshan, et al. Study on the retrieval of 3D atmospheric water vapor distribution using GNSS and RS multi-source data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(6): 1951-1964(in Chinese).
- [90] 戚铭心. 顾及水汽分布的 GNSS 水汽层析精化模型及软件开发[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.  
QI Mingxin. GNSS water vapor tomography refined models considering water vapor distributions and software development[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024(in Chinese).
- [91] NILSSON T, GRADINARSKY L. Water vapor tomography using GPS phase observations; simulation results [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(10): 2927-2941.
- [92] ZHANG W, ZHANG S, DING N, et al. A tropospheric tomography method with a novel height factor model including two parts: isotropic and anisotropic height factors [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11):1848.
- [93] TRZCINA E, HANNA N, KRYZA M, et al. TOMOREF operator for assimilation of GNSS tomography wet refractivity fields in WRF DA system[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125 (17): 5339.
- [94] CHEN B, LIU Z, WONG W K, et al. Detecting water vapor variability during heavy precipitation events in Hong Kong using the GPS tomographic technique [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(5): 1001-1019.
- [95] 吴皓, 陈必焰, 黄宁, 等. 湖南省大区域三维水汽层析反演及降雨预报应用[J]. *中国防汛抗旱*, 2024, 34(4): 8-16.  
WU Hao, CHEN Biyan, HUANG Ning, et al. Application of 3D water vapor tomography inversion and rainfall forecasting in large area of Hunan province [J]. *China Flood & Drought Management*, 2024, 34 (4): 8-16(in Chinese).

(编辑:孟彬)