

面向亚热带区域的高动态节点参数化水汽层析建模研究:以湖南省为例

陈必焰¹, 黄宁^{1,2}, 靳文凭³, 陈春花³

1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 北斗高精度卫星导航与位置服务湖南省工程研究中心, 长沙 410018;

3. 湖南省测绘科技研究所, 长沙 410018

摘要: 湖南省地处亚热带季风湿润气候区, 水汽活动剧烈, 强对流、暴雨等灾害性天气频发。精确监测高动态大气水汽场对该区域的极端天气预警具有重要意义, 但这通常受制于传统水汽层析技术在时间分辨率上的不足。针对此问题, 本文提出了一种高动态节点参数化水汽层析两步法, 该方法在节点参数化模型基础上, 通过引入随迭代过程自适应更新的水汽垂直变化参数, 优化了层析方程的设计矩阵。其核心“两步法”包含: 第一步, 在30 min长时段内重构水汽场的线性变化趋势项; 第二步, 基于第一步的建模残差, 进一步反演5 min短时段内的高频偏离项, 从而实现高时空分辨率的精确重构。基于2022年6月湖南省123个全球导航卫星系统GNSS (Global Navigation Satellite System) 站的实测数据实验表明, 与传统体素基模型(体素内水汽含量均匀分布且不变)、节点参数化模型(湿折射率由所在体素的8个节点经空间内插求取)和线性时变节点参数化模型(湿折射率随时间呈线性变化)相比, 本文提出的高动态节点参数化水汽层析两步法在精度上表现出显著优势, 其外符合精度分别提升了35%、29%和26%。本文方法为亚热带等水汽高动态变化区域提供了有效的高分辨率三维水汽场监测手段。

关键词: 水汽层析, 湿折射率, 节点参数化, 高动态, 亚热带

中图分类号: P2

引用格式: 陈必焰, 黄宁, 靳文凭, 陈春花. 2026. 面向亚热带区域的高动态节点参数化水汽层析建模研究: 以湖南省为例. 遥感学报, 30(5): 1289-1306

Chen B Y, Huang N, Jin W P and Chen C H. 2026. High-dynamic node-parameterized water vapor tomography modeling for subtropical regions: A case study of Hunan province. National Remote Sensing Bulletin, 30(5): 1289-1306 [DOI:10.11834/jrs.20264341]

1 引言

大气水汽作为对流层中最活跃的成分, 虽然其质量占比通常不足3%, 却是驱动全球能量循环与气候演变的核心要素。水汽通过相变过程释放或吸收潜热, 直接诱导云、雨、雾等天气现象的发生, 对极端灾害性天气的孕育起着决定性作用 (Philipona等, 2005)。在空间大地测量领域, 水汽的时空非均匀分布会导致显著的电磁波信号延迟, 成为制约高精度定位的主要误差源之一。反之, 利用这一延迟特性反演高精度的水汽场, 对于提升数值天气预报能力及灾害预警水平具有重要的科学

意义 (Weckwerth等, 2004)。

GNSS (Global Navigation Satellite System) 信号在穿越对流层时会受到大气介质折射率的影响, 导致传播路径弯曲和时间延迟 (万玮等, 2016)。这种曾在定位解算中被视为干扰项的误差, 实际上蕴含着丰富的大气状态信息。针对这一物理特性, Askne和Nordius (1987) 率先建立了湿延迟与大气可降水量PWV (Precipitable Water Vapor) 之间的转换模型, 为利用GNSS遥感水汽奠定了理论基石。Bevis等 (1992) 随即正式提出了GNSS气象学概念, 系统验证了地基GNSS反演水汽的可行性。为进一步解析水汽的垂直结构, 具有高时空分辨率优势的

收稿日期: 2024-08-13; 预印本: 2026-03-04

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2023YFE0208000); 国家自然科学基金 (编号: 42274042); 湖南省优秀青年基金 (编号: 2023JJ20060)

第一作者简介: 陈必焰, 研究方向为GNSS气象学。E-mail: yeary124@csu.edu.cn

GNSS层析技术应运而生。Flores等(2000)较早开展了地基水汽层析研究,并引入ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)数据证实了该技术捕捉对流层水汽时空变化的能力。在国内,宋淑丽(2004)利用上海地区的实测数据成功构建了区域三维水汽场,填补了相关空白。Champollion等(2005)则基于法国南部的高密度台站数据,实现了大气水汽的四维精细化反演,并揭示了层析结果与中尺度气象过程的强相关性。鉴于层析技术能够提供精细的三维水汽廓线,其在数值预报同化、水汽动态监测及极端降水预警等领域展现出广阔的应用前景(姚宜斌等,2017)。

传统的水汽层析反演通常基于空间离散化思想,利用三维网格或体素构建解算空间。在该数学框架下,通常预设一个基本约束,即湿折射率场在单一时间窗口及单个体素内部呈现各向同性的均匀分布特征,且数值保持恒定。依托射线追踪技术锁定信号穿越层析场时的空间轨迹,进而确立节点未知参数与斜向路径湿延迟SWD(Slant Wet Delay)分量间的泛函对应,从而形成待解算的层析观测矩阵。受限于卫星及地面站空间分布,SWD的空间分布是极不均匀的,导致部分体素无法被任何射线穿过。此外,还有一些格网只被同一个或一组来自同一测站的SWD穿过,缺乏其它方向的交叉射线,导致这些格网对应的湿折射率在估计时难以彼此分离。上述问题导致体素基层析模型观测方程组出现病态和秩亏,对此部分学者通过优化层析模型提升水汽反演质量。针对网格尺度敏感性问题的,Nilsson和Gradinarsky(2006)量化分析了水平与垂直分辨率的改变对反演精度的具体制约关系。此外,Chen和Liu(2014)进一步聚焦于层析空间的优化策略,重点探讨了研究区域的边界界定以及垂直分层方案的差异性对模型解算的影响。毕研盟等(2008)、曹玉静等(2012)分别开展了变间距网格划分的实证研究。结果表明,相较于均匀分层,采用非均匀的垂直分层策略能够更逼真地拟合水汽的垂直剖面结构,从而显著提升反演结果的可靠性。在传统的体素模型中,未知参数被定义为离散格网内的常数,这种简化处理难以精确捕捉水汽在局部空间的剧烈时空涨落,往往诱发显著的离散化误差。鉴于此,本文引入了Perler等(2011)提出的节点参数化方案。该方案的核心在于利用节点插值函数构建更为平滑的观测系数矩阵,从而将离散的体素建模升格

为连续的空间场建模。相关对比实验证明,该方法在还原复杂大气结构方面相较于传统非参数化手段具有显著优势。叶世榕等(2013)构建了一种顾及地球曲率效应的改进参数化模型。该方法采用了水平与垂直方向解耦处理的插值策略,有效提升了信号路径积分计算的严密性。Chen等(2020)通过引入混合插值机制来优化节点参数,该算法结合了水平方向的反距离加权与垂直方向的指数函数模型,成功改善了三维水汽场重构的空间连续性与精度。节点参数化层析建模中,任一点的湿折射率是由其所在体素的8个节点通过空间插值来确定。这会导致无法获得湿折射率对路径积分的解析解,需利用数值积分(如牛顿—科茨公式)来线性化层析方程,从而大大增加了计算负担。针对这一问题,Chen等(2023a)提出了一种具有解析解的节点参数化建模方法,极大地提高了建模效率并成功应用在全美国的广域水汽场反演中。节点参数化建模方法突破了体素基模型构建中观测数据尺度对空间分辨率的限制,理论上可实现任意尺度的对流层湿折射率场层析反演。

就层析产品的时间分辨率而言,最理想的方法是每个历元(如30 s)估计一次水汽场,这对于极端天气中水汽变化的研究具有重要意义,但需要高密度的GNSS站网来提供充足的SWD数据。通常情况下,层析建模将一段时间内(30 min至1 h)的水汽含量视为静止不变,这种静态假设不利于极端天气下的水汽反演,增大了层析反演误差。通过缩短时间窗口可弱化时间变化对水汽层析结果的影响,然而,此举会大大减少观测值数量,加剧层析方程的不适定问题。添加约束信息和融合多源数据是实现高时间分辨率水汽层析的重要途径。为缓解层析观测方程固有的秩亏与不适定性,引入基于气象学规律的先验信息是必要的正则化手段。通常的做法是构建虚拟观测方程,包括在水平与垂直维度上的平滑约束以及对流层顶的零值/边界约束,从而辅助模型收敛至物理意义更明确的可靠解(于胜杰等,2010;张豹等,2017)。Chen和Liu(2016)开展了多源异构数据的融合实验,该研究依托香港CORS网,将无线电探空、太阳光度计、微波辐射计等数据纳入统一解算体系。实证分析证实,这种多技术融合策略能够有效精化湿折射率场的反演质量,其解算精度显著优于单一GNSS层析模式。Xia等(2013)提出了一种集

成多源大气探测信息的增强型层析方案。通过将空基 COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) 掩星廓线与地基 GNSS 观测值进行联合解算, 该方法成功优化了对流层水汽结构的时空精细化表达, 为克服层析系统固有的观测几何局限提供了新思路。赵庆志等 (2021) 提出了一种外部数据驱动的初始化策略, 该方法从 ECMWF 再分析产品中提取高精度的水汽密度廓线作为先验初值, 并将其同化至层析模型中。基于香港地区的实验数据显示, 这种精细化的初值赋予机制能有效校正模型偏差, 大幅提升了最终的水汽反演精度。对于一些极端降水事件, 气团会在 10 min 甚至更短时间内快速穿过一个层析网格。在这种情况下, 30 min 及以上的时间分辨率无法有效捕捉水汽的快速变化特征, 以及无法满足其他高时间分辨率 (如 5 min 以上) 的极端天气水汽监测需求。

中国亚热带季风气候区的典型特点是水汽充沛、对流活动旺盛, 夏季常因水汽快速聚集而形成暴雨、雷暴等灾害性天气, 并可能引发滑坡、泥石流等次生灾害, 对人民的生命财产和生活出行造成严重威胁。因此, 该区域大气水汽场的快速、精确监测, 对提升短时临近天气预报的准确性和时效性显得尤为重要。研究区域湖南省地处亚热带季风气候的核心地带, 受季风环流进退与复杂地形的双重制约, 该地区大气环境极不稳定 (谭井树, 2022), 对高动态 (如 5 min 以上) 水汽监测技术的需求尤为迫切。针对上述需求, 本文旨在发展一种能够精确重构高动态水汽场的方法。从算法原理上讲, 该方法适用于任何拥有密集 GNSS 台站的地区。本文所提方法的核心价值在于捕捉水汽的快速时空变化, 因此应用在水汽活动剧烈的亚热带地区最能凸显其优势。基于此, 本文提出了一种高动态节点参数化水汽层析两步法, 该方法通过引入可在迭代中更新的自适应系数矩阵, 并结合由线性趋势项重构和高频偏离项反演组成的“两步法”框架, 以获取高精度、高时空分辨率的大气水汽场。

2 高动态节点参数化水汽层析两步法模型构建

2.1 节点参数化层析模型

经典层析方法通常采用离散体素法, 即将对流

层分割为由经纬度和高度限定的规则网格, 并假定每个网格内的湿折射率在观测时段内保持均匀恒定。基于此假设, GNSS 信号路径上的 SWD 可表示为穿过的各体素截距与对应折射率的线性组合:

$$\text{SWD}_i = \sum_{j=1}^n N_j d_j \quad (1)$$

式中, n 为射线穿过的体素总数; N_j 和 d_j 分别代表第 j 个体素的湿折射率及其内的射线截距。然而, 这种阶梯状的非连续假设难以精确描述极端天气下水汽的剧烈变化。针对此局限, Perler 等 (2011) 引入了基于节点的参数化策略, 利用空间连续函数替代离散常数。在该模型中, 空间任意点的湿折射率由包围该点的 8 个顶角节点参数内插决定。以图 1 为例, 当射线 l 穿过体素 4 时, 对于截断路径 P1P3 上的湿折射率 N , 其 SWD 观测方程为

$$\text{SWD}_{P1P3} = \int_{P1}^{P3} N \cdot dl \quad (2)$$

由于该积分函数通常缺乏解析原函数, 传统解法多采用数值积分 (如牛顿—科茨公式), 即在路径 P1P3 上选取离散采样点进行加权求和以逼近积分值

$$\text{SWD}_{P1P3} = \frac{P3 - P1}{90} \left(7(N(P_1^1) + N(P_1^5)) + 32(N(P_1^2) + N(P_1^4)) + 12N(P_1^3) \right) \quad (3)$$

式中, $P_1^1, P_1^2, P_1^3, P_1^4$ 和 P_1^5 是指路径 P1P3 上的 5 个等距离散点, 各离散点湿折射率由所在体素的 8 个节点的湿折射率内插计算得到。

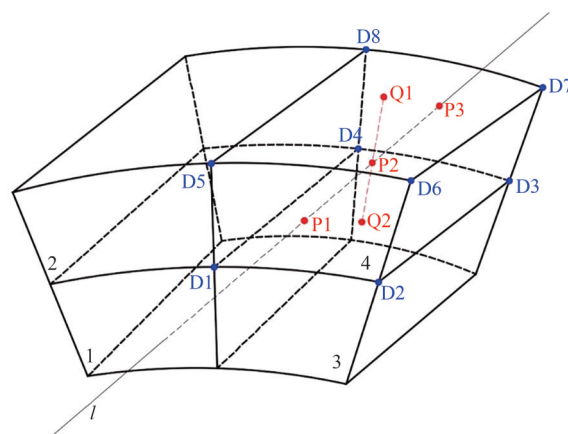


图1 基于节点参数化的层析体素模型示意图
Fig. 1 Node-based parameterization of tomographic voxel model schematic

尽管数值积分提升了空间分辨率, 但其复杂的线性化过程导致计算负荷数倍于体素模型, 严重

制约了广域建模效率。为解决算力瓶颈, Chen 等 (2023a) 提出了一种面向广域水汽层析反演的节点参数化层析优化模型。该方案将式 (2) 的路径积分重构为天顶湿延迟 ZWD (Zenith Wet Delay) 与投影函数的乘积形式:

$$\text{SWD}_{P1P3} = \int_{P1}^{P3} f(z) \cdot d\text{ZWD} \quad (4)$$

考虑到单个体素空间跨度较小, 射线路径上的天顶角 z 变化极微, 可近似取线段中点 P2 处的值。此时, 积分式简化为

$$\text{SWD}_{P1P3} = f(z) \cdot \int_{Q2}^{Q1} N \cdot dl \quad (5)$$

从几何关系上看, 设定 P2 为截距线段的中点, 其沿铅垂方向在体素上、下底面的投影点分别定义为 Q1 和 Q2。依据大气物理特性, 假设湿折射率在垂直方向遵循指数衰减规律, 则 P2 处的折射率值可通过 Q1 和 Q2 进行指数内插确定; 而 Q1, Q2 两点的数值则分别由其所在平面上的 4 个顶角节点经双线性内插求得。由此, 路径 Q1Q2 上任意高度 h 处的湿折射率 N 可建模为

$$N = N_{Q2} \cdot e^{\alpha(h-h_{Q2})} \quad (6)$$

式中, N_{Q2} 和 h_{Q2} 分别为 Q2 点的湿折射率和高度; α 为湿折射率垂直变化参数。通过联合式 (5) 和 (6), 可推导出基于 Q2 点的解析表达式:

$$\text{SWD}_{P1P3} = \frac{f(z) \cdot N_{Q2}}{\alpha} \left(e^{\alpha(h_{Q1}-h_{Q2})} - 1 \right) \quad (7)$$

同理, 以 Q1 点为参考点可得对称表达式:

$$\text{SWD}_{P1P3} = \frac{f(z) \cdot N_{Q1}}{\alpha} \left(1 - e^{\alpha(h_{Q2}-h_{Q1})} \right) \quad (8)$$

$$\text{SWD}_{P1P3} = f(z) \cdot \frac{\left((t_2 - t) N_{Q2}^{t_1} + (t - t_1) N_{Q2}^{t_2} \right) \cdot \left(e^{\alpha(h_{Q1}-h_{Q2})} - 1 \right) + \left((t_2 - t) N_{Q1}^{t_1} + (t - t_1) N_{Q1}^{t_2} \right) \cdot \left(1 - e^{\alpha(h_{Q2}-h_{Q1})} \right)}{2 \cdot \alpha \cdot (t_2 - t_1)} \quad (11)$$

堆叠层析窗口内所有射线, 可组成时变水汽层析方程组:

$$\mathbf{y} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{x} \quad (12)$$

式中, $\mathbf{y}$ 为由 SWD 值构建的观测值向量; $\mathbf{B}$ 为系数矩阵; $\mathbf{x}$ 为由待求节点的湿折射率组成的向量。在时变层析模型解算中, 如果同时将 t_1 、 t_2 时刻的各节点湿折射率作为未知数进行解算, 将加剧层析方程的不适定问题。对此, 本研究将 t_1 时刻的湿折射率场作为已知信息代入方程进行解算, 而其值由上一时间窗口层析解算得到, t_2 时刻的湿折射率场作为未知数进行解算, 进而又可以作为下一窗口的已知信息。对于层析初始时刻的湿折射率场, 可

最终观测方程取二者的均值以提高稳健性:

$$\text{SWD}_{P1P3} = \frac{f(z) \cdot \left(N_{Q2} \cdot e^{\alpha(h_{Q1}-h_{Q2})} - N_{Q1} \cdot e^{\alpha(h_{Q2}-h_{Q1})} + N_{Q1} - N_{Q2} \right)}{2 \cdot \alpha} \quad (9)$$

式中, N_{Q1} 和 N_{Q2} 可通过垂直指数内插和水平双线性内插建立起同体素 4 的 8 个节点间的线性关系。这一改进模型的核心优势在于建立了节点参数与 SWD 之间的直接解析关系, 避免了繁琐的数值积分迭代。相较于传统节点法, 该方法仅需对每段截距进行一次中心点计算, 在显著降低计算复杂度的同时, 完整保留了节点参数化模型在精细描述水汽连续变化方面的优势 (Chen 等, 2023a)。

2.2 高动态节点参数化水汽层析两步法

为反演高动态大气水汽三维结构信息, 本文提出一种高动态节点参数化水汽层析两步法, 首先基于长时段内 (如 30 min) 线性时变假设反演出湿折射率线性变化趋势项, 其次利用建模残差值进行第二步高动态 (5 min 以下) 层析解算, 反演出不符合线性时变假设的湿折射率偏离项。具体第 1 步: 线性趋势项重构, 将层析窗口设置为 30 min, 认为该时段内湿折射率随时间呈线性变化, 任一节点 n 在某一时刻 t 的湿折射率 N_n^t 为

$$N_n^t = \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} N_n^{t_1} + \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} N_n^{t_2} \quad (10)$$

式中, $N_n^{t_1}$ 、 $N_n^{t_2}$ 分别为起始与终点时刻 t_1 、 t_2 的湿折射率。将式 (10) 融入 (9) 中可得:

通过传统静态假设方法获取。

第 2 步: 高频偏离项反演, 基于线性时变层析结果可内插出任一时刻的湿折射率场, 进而计算出建模残差。进而将短时间 (5 min 以下甚至单历元) 窗口内的建模残差数据作为输入值, 构建残差层析模型:

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{x} \quad (13)$$

式中, $\Delta \mathbf{y}$ 为由建模残差值构建的向量; $\mathbf{A}$ 为短时间窗口内射线构成的系数矩阵。基于式 (12) 层析结果提取出每个节点湿折射率与周围节点湿折射率之间的比例关系, 并作为先验信息对式 (13) 进行约束。采用代数迭代算法进行求解, 迭代初

始值 $\Delta \mathbf{x}$ 为 0。具体为

$$\Delta \mathbf{x}_j^k = \Delta \mathbf{x}_j^{k-1} + \lambda \frac{y_i - \langle \mathbf{A}_i, \Delta \mathbf{X}^{k-1} \rangle}{\sum_{j=1}^n \mathbf{A}_{ij} \Delta \mathbf{X}_j^{k-1}} \cdot \mathbf{A}_{ij} \Delta \mathbf{X}_j^{k-1} \quad (14)$$

将迭代得到的湿折射率偏离项 $\Delta \mathbf{x}$ 加到线性时变湿折射率趋势项上即可得到更精确的高动态湿折射率场。

3 实验设计与研究数据

研究区域选取中国中南部的湖南省 (108.9°E—114.0°E, 24.9°N—30.0°N)。该区域地貌特征复杂, 整体呈现向北开口的马蹄形构造, 东、南、西三面分别为罗霄山脉、南岭和雪峰山脉环绕, 北部则为洞庭湖平原。这种独特的地形易导致南下冷空气与北上暖湿气流在此交汇, 使得该地区成为水汽辐合与强对流天气的频发区, 是验证高动态水汽层析算法的理想场所。为了验证本文所提出的高动态节点参数化水汽层析两步法, 反演实验的数据源依托于湖南省连续运行参考站系统 HNCORS (Hunan Continuously Operating Reference Stations)。该网络由 123 个均匀分布在全省各地的 GNSS 基准站组成 (空间分布见图 2)。层析区域水平范围设置为 108.9°E—114.0°E, 24.9°N—30.0°N。此外, 为了全面评估层析结果的精度, 本研究还引入了欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 发布的第五代大气再分析数据集 ERA5 (Albergel 等, 2018; Dee 等, 2011) 作为参考标准。ERA5 将模型数据与全球观测数据 (如探空气球、遥感卫星等) 结合起来, 形成一个全球完整的、一致的数据集, 取代了其前身 ERA-Interim 再分析。ERA5 提供了大量大气、陆地和海洋气候变量的每小时估计值, 其在时空分辨率和同化方法上相比 ERA-Interim 有了很大的升级。ERA5 可提供垂直方向上 1000 至 1 hPa (约 48 km) 共 37 个气压层的小时级大气参数, 水平格网分辨率可高达 0.25°×0.25°。鉴于 ERA5 再分析产品质量已被广泛验证 (Chen 等, 2021; Zhang 等, 2019), 其具有的较高时空分辨率可以满足评估层析湿折射率场精度的需求。本研究在参考前人经验的基础上, 确定了层析空间的几何边界。水平方向采用 0.3°×0.3° 的等间距划分, 经纬向各设 17 个格点; 垂直范围则界定在海平面至 11000 m 之间 (Chen 等, 2020, 2023b)。垂直方向的格网划分方案充分顾及了大气的物理分层规律及水汽随

海拔升高呈指数衰减的分布特性。本研究采取了变间距的加密策略, 将 0—11 km 的大气柱离散为高度不等的 15 个层级, 各层间距由底部的 400 m 逐级放宽至顶部的 2000 m。在该参数化配置下, 实验区共构建了 4335 个体素单元 (17×17×15), 并映射为 5184 个节点参数。考虑到研究区域地形起伏显著, 模型在射线追踪与方程构建过程中顾及了测站的实际高程。具体而言, 层析网格底部统一以 0 m 作为高程起算面, 为全区域提供统一基准; 而在计算各射线路径的 SWD 时, 积分起始点严格定义为 GNSS 接收机天线相位中心高度, 确保了地形表面以下的网格不参与有效信号的路径积分。

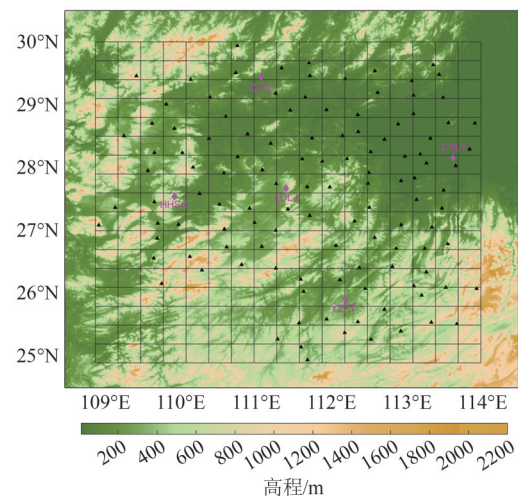


图 2 HNCORS 站点分布及层析区域示意图

Fig. 2 Distribution and tomographic region schematic of HNCORS sites

本项层析实验的时间窗口锁定于 2022 年 6 月全月, 共 30 天。基于 Bernese 的精密单点定位技术提取了每条射线路径的 SWD, 其中天顶对流层延迟 ZTD (Zenith Tropospheric Delay) 和湿延迟梯度值每 5 min 估计一次。为减轻多路径效应带来的不利影响, 截止高度角设置为 10°。为充分评估本文算法的精度, 进行了为期一个月的连续层析成像, 获取了时间分辨率为 30 min 的线性变化趋势项和 5 min 的湿折射率偏离项。在求解层析观测方程组时, 代数重构技术的收敛路径及最终解的稳定性高度依赖于迭代初值的质量。本研究通过综合考量, 为每一计算时刻构建了初始湿折射率场, 以引导迭代过程向全局最优解逼近, 减小因初值偏差带来的非解算性误差。在层析过程中, 在每

天 UTC 00 时刻, 06 时刻, 12 时刻和 18 时刻使用美国国家环境预报中心 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 提供的 GFS (Global Forecast System) 预报产品进行一次初始化, 其他历元则使用上一层析历元得到的结果作为先验信息, 从而避免误差积累。本文设置了 4 种层析方案进行对照实验, 方案一: 采用传统体素基模型, 体素内水汽含量均匀分布且不变; 方案二: 采用节点参数化模型, 体素内湿折射率随空间变化, 其值由所在体素的 8 个节点的湿折射率经垂直指数内插和水平双线性内插求取; 方案三: 采用线性时变节点参数化模型, 假设各节点的湿折射率随时间呈线性变化; 方案四: 采用本文提出的高动态节点参数化水汽层析两步法, 基于方案三的结果进一步反演时间分辨率为 5 min 的湿折射率场。上述 4 种方案中, 方案一和方案二所反演的水汽产品时间分辨率为 30 min; 方案三基于线性时变假设构建层析模型, 理论上可反演任一历元的水汽场; 方案四对应的时间分辨率为 5 min。就空间分辨率而言, 方案一采用的传统体素基模型对应的水平分辨率为 $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$, 垂直分辨率从下到上 400—2000 m 不等; 其他 3 个方案采用节点参数化模型, 理论上可获取任一空间位置的水汽折射率。需要强调的是, 高时空分辨率水汽产品的可靠性必须由高精度来保障, 若在 5 min 这样的短时间尺度下反演出的水汽场依然精确, 这种“高分辨率”才具有真正的科学意义和应用价值。

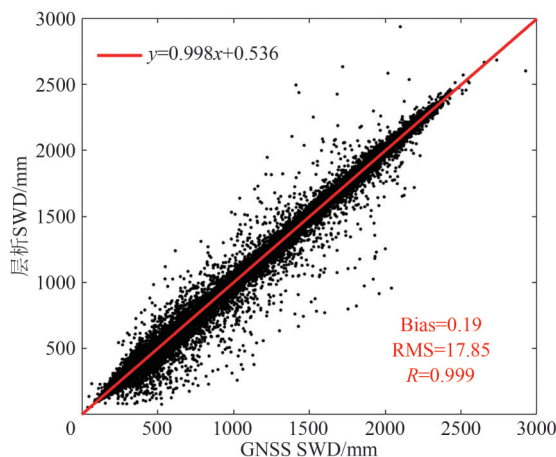
为了评估层析结果精度, 首先利用 GNSS 反演的 SWD 进行了一致性验证, 本研究预留了 5 个 GNSS

测站不参与建模, 仅作为独立验证点 (如图 2 所示)。鉴于地面离散站点的空间覆盖度有限, 难以刻画层析场在三维空间的整体偏差特性, 本文同步引入了 ERA5 再分析产品。该数据提供全球 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 格网下、1 h 分辨率的多层气象要素 (包括温度与相对湿度), 通过将其转化为湿折射率并插值至待验点位, 实现了对层析误差三维分布特征的全方位探测。

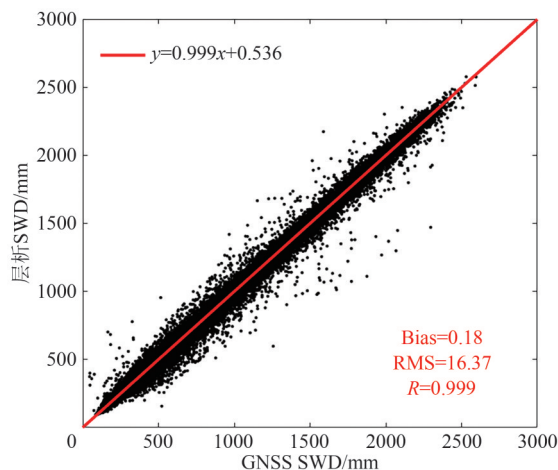
4 验证与分析

4.1 基于 GNSS 数据的精度评估

首先, 基于层析重构的湿折射率场积分求出每条 GNSS 射线路径的 SWD 值, 再与 GNSS 直接反演的 SWD 数据进行对比。图 3 展示了基于 2022 年 6 月参与层析反演的 118 个 GNSS 站反演的 SWD 与 4 个层析方案重构的 SWD 之间的散点图。从图 3 可以看出, 4 种层析方案重构的 SWD 均与 GNSS 反演的 SWD 有较高的一致性, 相关系数均为 0.999。方案一、方案二、方案三和方案四的内符合精度分别为 17.85 mm、16.37 mm、15.81 mm 和 13.72 mm。相较于传统方法 (方案一), 方案二、方案三和方案四对层析结果的精度提升分别达到 8%、11% 和 23%。而相对于节点参数化模型 (方案二), 线性时变节点参数化模型 (方案三) 和高动态节点参数化水汽层析两步法 (方案四) 可进一步提升层析精度达 3% 和 16%。总体而言, 本文提出的高动态节点参数化水汽层析两步法可显著提升层析模型的建模精度, 减小收敛误差。



(a) 方案一
(a) Scheme 1



(b) 方案二
(b) Scheme 2

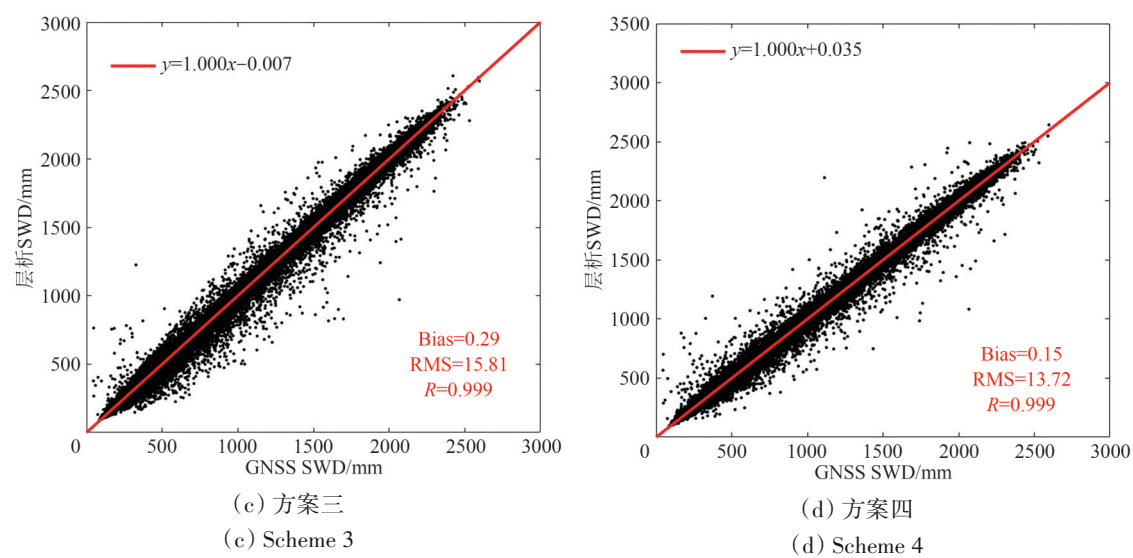


图3 GNSS反演SWD与层析重构SWD对比散点图,统计结果来自于2022年6月整月参与层析反演的118个GNSS站数据
Fig. 3 Scatter plots of SWD derived from GNSS versus reconstructed by tomography, based on statistical results from 118 GNSS station data participating in tomographic inversion for the entire month of June 2022

如前所述,层析实验中5个GNSS站不参与层析反演,而是作为验证站评估层析结果的外符合精度。这5个GNSS站分别为CSLY(113.631°E, 28.156°N, 85.683 m)、HHSQ(109.948°E, 27.546°N, 230.131 m)、LDLJ(111.427°E, 27.678°N, 218.215 m)、YZXT(112.207°E, 25.912°N, 211.821 m)和ZJCL(111.089°E, 29.432°N, 154.471 m)。从表1可知,GNSS与4个层析方案之间的SWD偏差比较小,均优于0.4 mm,而均方根RMS(Root Mean Square)误差值变化区间为7—12 mm。与图3中展示的层析建模内符合RMS值相比,表1中给出的5个外符合验证站的RMS值要小得多。这主要是因为内符合精度反映的是模型对所有观测数据的拟合能力,而密集站网中包含了大量不同质量的观测数据(如受多路径影响、低高度角、观测站环境和气候等),增加了模型整体拟合的难度。外符合精度则是在未参与建模的特定验证点上的表现,更能反映模型在未知点的预测能力。与方案一相比,方案二、方案三和方案四对层析结果的精度提升分别达到了8%、12%和35%。相对于方案二,方案三和方案四可提升层析精度达5%和29%。而高动态节点参数化水汽层析两步法(方案四)可进一步提升线性时变节点参数化模型(方案三)的层析精度达26%。图4进一步给出了5个验证站上GNSS反演SWD与4种层析方案重构SWD之间的对比RMS结果。从中可以看出,5个验证站上方案一、

方案二、方案三和方案四的RMS值波动范围分别为9—16 mm、9—14 mm、8—14 mm和5—11 mm。整体来说,方案一精度最差,方案二次之,而方案四在5个验证站上表现均最佳。此外,从图4还可以看出不同测站之间的RMS值相差较大,其中LDLJ站上RMS值最大,YZXT站上RMS值最小。这种差异与测站所处的具体地理环境密切相关。湖南省呈现西、南、东三面环山,向北开口的马蹄形地势,且中部和北部水系发达(如洞庭湖平原)。这种复杂的地形与水文条件共同作用,导致了局地热力与动力环境的显著差异。如位于山区迎风坡的测站与位于湖区平原的测站,其水汽输送、垂直运动和日变化特征完全不同,水汽含量和时空变化的剧烈程度自然也存在巨大差异,这直接导致了各站RMS值的不同。

表1 基于5个GNSS验证站反演SWD与4个层析方案重构SWD之间的对比结果

Table 1 The comparative results between the SWD inverted from five GNSS validation stations and the SWD reconstructed from four tomographic schemes				
统计值	方案一	方案二	方案三	方案四
Bias	0.29	0.33	-0.13	-0.02
RMS	11.56	10.64	10.16	7.53
Min	-43.49	-42.08	-38.47	-29.44
Max	44.33	42.18	39.31	29.33

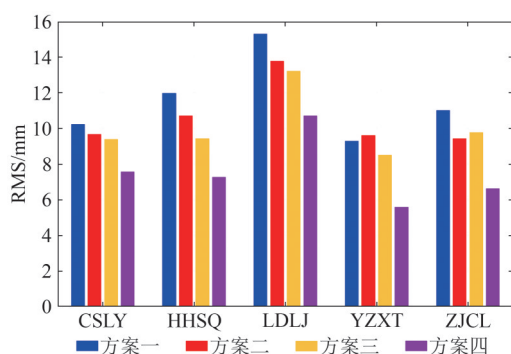


图4 5个验证站上GNSS反演SWD与4种层析方案重构SWD之间的对比结果

Fig. 4 Comparative analysis between GNSS-inverted SWD and tomographically reconstructed SWD from four distinct schemes across five validation stations

4.2 基于ERA5再分析产品的验证分析

由于GNSS验证站点空间分布不均且稀疏,此外GNSS反演的SWD是对整个射线路径水汽含量的积分值,其评估结果无法充分反映层析水汽的质量。因此,本研究利用前文所述的ERA5再分析数据作为参考标准,对不同方案的层析结果进行验证。

本研究采用了ERA5的37个气压层的小时级地势高、相对湿度和温度数据,通过垂直指数内插和水平双线性内插得到各节点的湿折射率值,进而与层析结果进行对比。图5展示了ERA5与层析湿折射率差值的RMS误差和相对RMS随高度的变化。具体而言,图5中每一高度处的RMS误差是基于该高度层上所有水平节点在整个实验时段内的湿折射率残差汇聚计算得到的,反映了该高度面上层析结果的整体精度。相对RMS是指RMS误差与相应高度层的ERA5平均湿折射率间的比值。如图5(a)所示,整体上层析结果的RMS值随着高度上升快速减小,与水汽含量随高度变化的趋势一致。方案一的RMS值从近地面约25 mm/km减少到10 km处的约1 mm/km,而其他3个方案从近地面约17—19 mm/km下降到10 km处的不足1 mm/km。图5(b)进一步显示四种层析方案的相对RMS随着高度升高呈增大趋势,从近地面的20%以下逐步增加到10 km处的43%—55%。层析结果在6 km以下表现稳定,相对RMS在10%至20%间波动,而相对RMS在6 km以上迅速增大。这主要是因为高空水汽含量极低(即真实值非常小),而相对误

差为绝对误差与真实值之比;因此,即使模型的绝对误差与其他层级相当,极小的分母也会导致相对误差显著放大。从各层析方案的表现来看,与GNSS评估结果一致,方案一整体表现最差,方案四在各高度层均取得了最佳表现。

图6直观展示了研究区域内ERA5与4种方案之间湿折射率RMS误差的空间分布情况。为了更全面地评估方案四的优势,图6采用了多层布局:图6(a)—(d)展示了各方案相对于ERA5的绝对RMS误差分布,图6(e)—(g)则展示了前3种方案与方案四之间的RMS差值分布(即RMS方案X-RMS方案4)。从上排的绝对误差分布可以看出,方案一(图6(a))的整体精度最差,其RMS误差变化范围为5—30 mm/km,特别是在研究区域的东南角(约25°N—26.5°N, 113°E—114°E)存在显著的高误差热点区域。该区域主要位于湖南省东南部的郴州地区,地处南岭山脉北麓。作为暖湿气流由南向北输送的关键通道,南岭山脉复杂的地形抬升作用使得该处大气对流活动极为剧烈,水汽垂直结构变化复杂且迅速。这种剧烈的局部小气候特征显著增加了层析建模的难度,导致各方案在此处的RMS误差普遍较高。相比之下,方案二和方案三的高误差区域逐渐收敛,RMS上限分别降至25 mm/km和22 mm/km。而方案四(图6(d))在全域范围内表现最为优异,整体呈现代表低误差的深蓝色调,即使在东南角的高难区域,其RMS误差峰值也被显著压制在15 mm/km以内。

为了进一步量化并直观呈现方案四相对于其他方案的精度提升细节,图6(e)—(g)绘制了RMS差值图。图中所有区域均呈现代表正值的暖色调,直观证明了方案四的精度在空间上全面优于其他3种方案。值得注意的是,为了突显方案四相对于表现较好的方案二和方案三的精进改进,我们在下排使用了自适应的色标范围。如图6(e)所示,方案一与方案四的差异最大,差值高达14 mm/km,且集中在东南角;而对于方案三(图6(g)),虽然其整体表现已较为接近方案四,但通过精细化的色标(0—3 mm/km)仍可清晰分辨出方案四在东南复杂区域具有2—3 mm/km的精度优势,说明所提出的高动态节点参数化水汽层析两步法对层析的整体精度改善明显。上述精度分析充分证明,本文提出的高动态节点参数化水汽层析两步法所生

成的 5 min 分辨率水汽产品，其精度甚至优于传统方法在更长时间尺度下的结果。这为该高分辨率

产品的可靠性提供了坚实的定量支撑，使其能够用于后续的精细化气象过程分析。

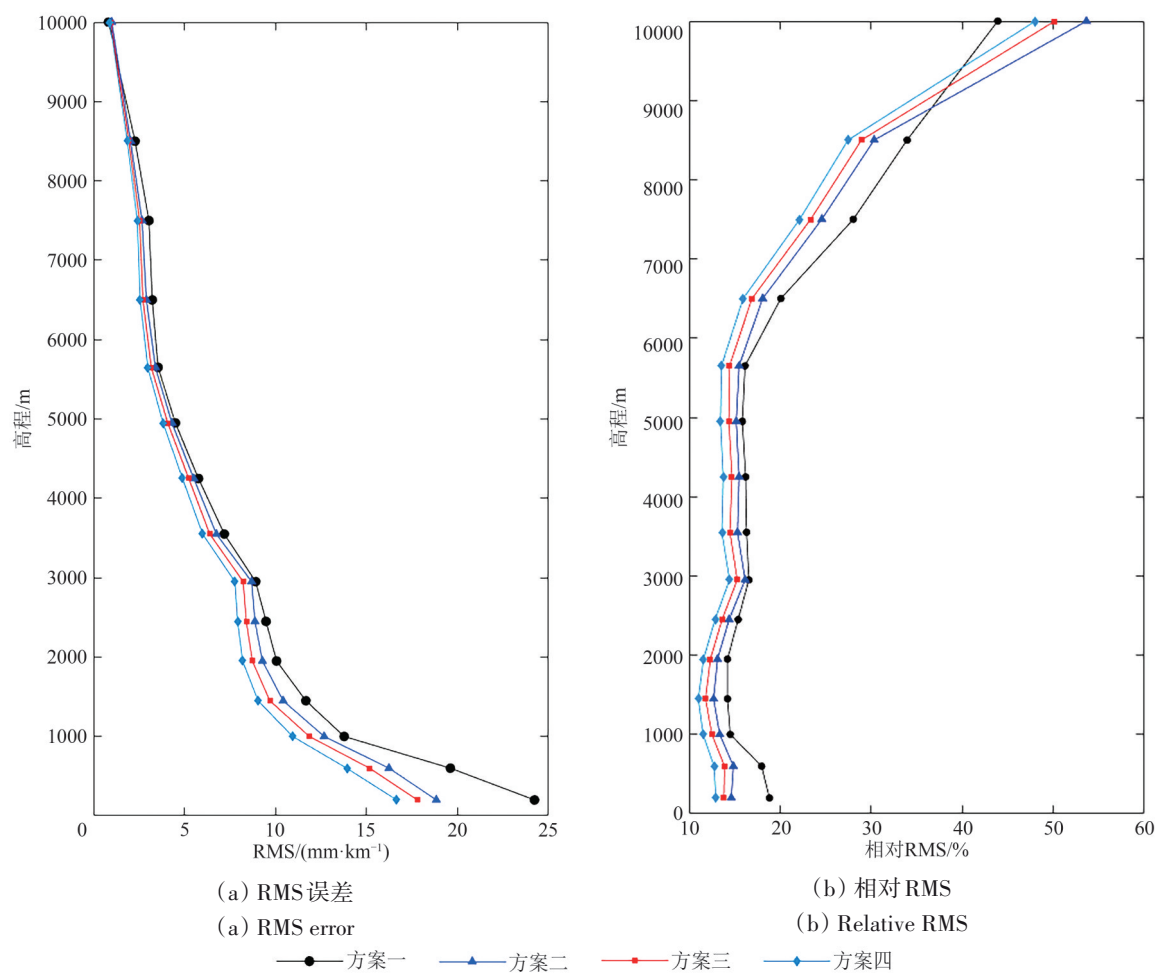
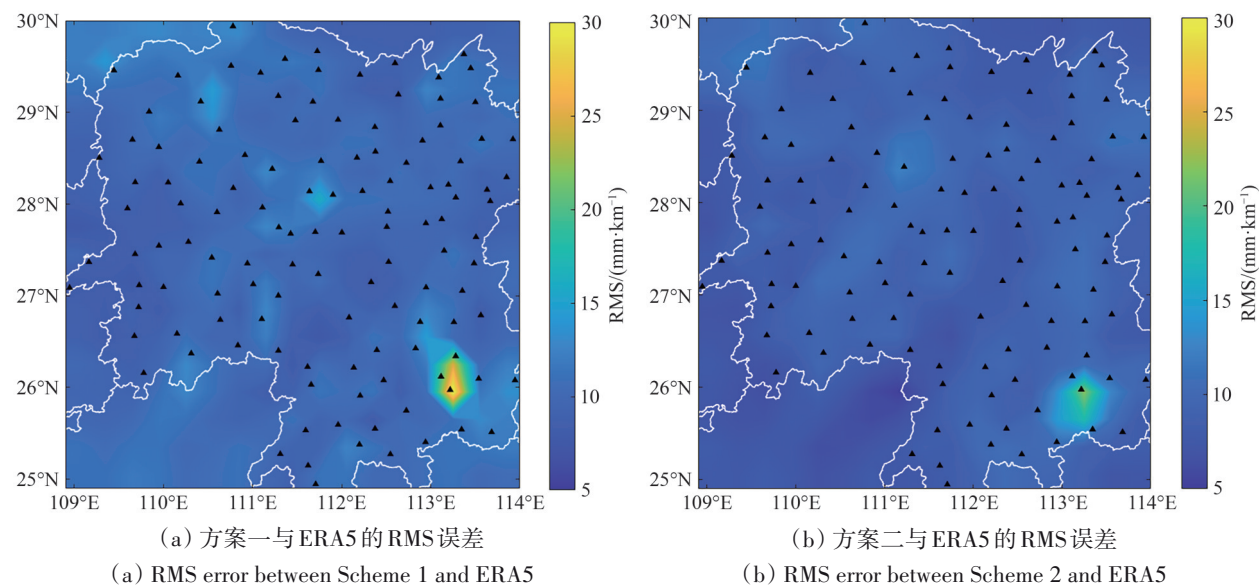


图5 ERA5与层析湿折射率差值随高度的变化

Fig. 5 Variations of the difference between ERA5 and tomographic wet refractivity with altitude



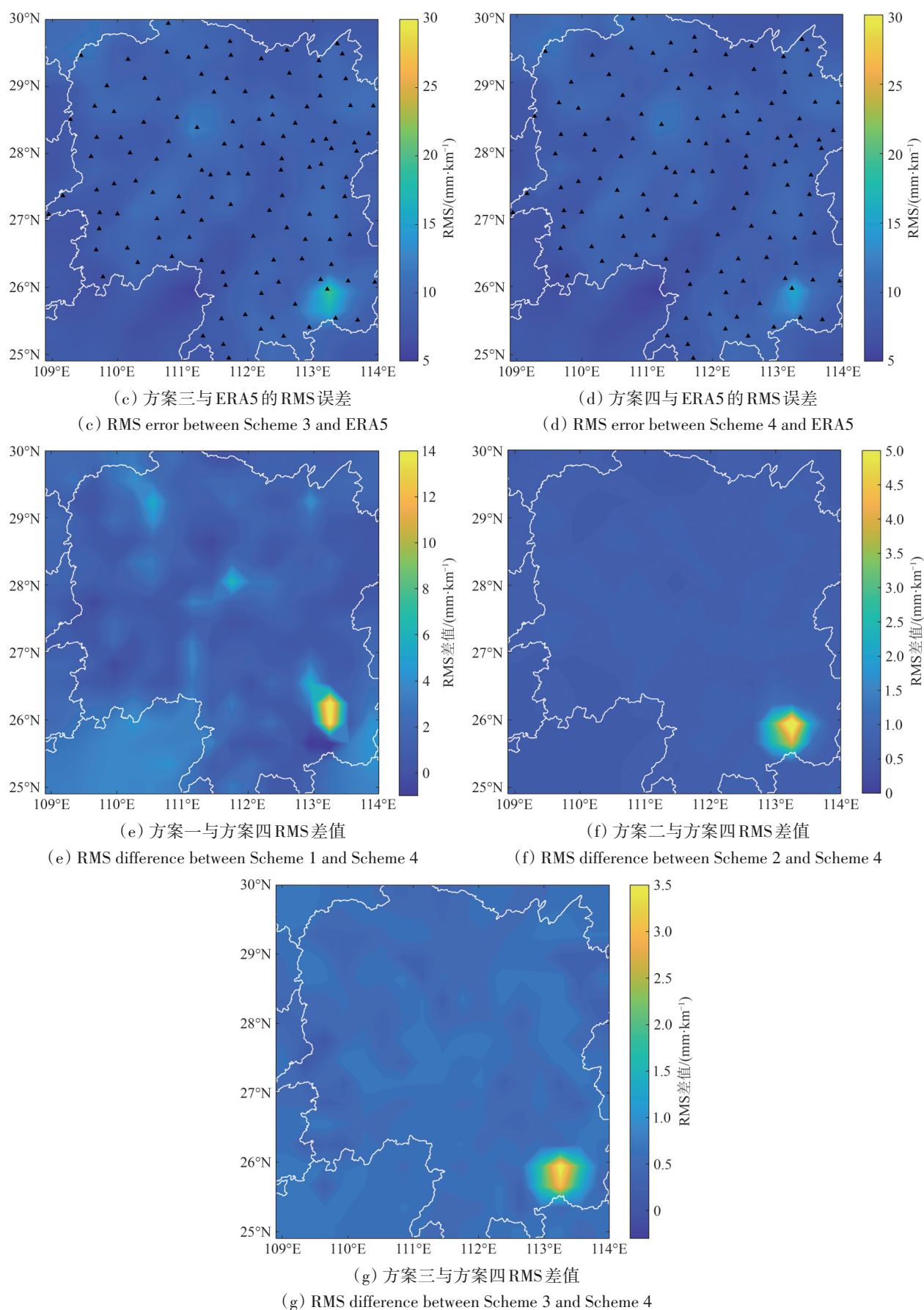


图6 4种方案相对于ERA5的湿折射率RMS误差及方案间RMS差值的空间分布(黑色三角形代表GNSS站)

Fig. 6 Spatial distribution of wet refractivity RMS errors of four schemes with respect to ERA5 and RMS differences between schemes (Black triangles represent GNSS stations)

4.3 基于层析产品的强降雨期间大气水汽变化分析

2022年6月19日湖南省中北部地区经历了一次大范围强降雨过程。如图7所示，湖南省中北部地区降雨量在40 mm以上，其中北部部分地区累积降雨量超80 mm，达到暴雨级别。图8展示了基于ERA5再分析产品的2022年6月19日湖南省PWV演变图，时间间隔为2 h。从图8中可清晰看出，湖南省中北部区域（27°N以北，110°E以东）PWV值明显高于其他地区。从UTC 00:00至08:00，PWV逐渐向27°N—30°N和111°E—112°E这一区域聚集，随后逐渐消散（UTC 10:00之后）。与图7对比，可以看出PWV聚集区正好是强降雨发生区域，显示出两者之间密切相关。从图8（d）和（e）两图可见，UTC 06:00—08:00两小时内PWV出现了显著增大现象，且高值区向北部移动。本文所反演的5 min分辨率水汽场产品，其可靠性已由前述的精度评估所证实，可辅助于进一步分析该时段内的PWV变化特征。

首先，基于层析水汽场产品积分得到了时间分辨率为5 min的PWV图。图9展示了2022年6月19日UTC 06:00—07:50湖南省层析PWV演变图。整体上，层析PWV与ERA5 PWV相符，呈现出北高南低分布，且量级一致。从细节上看，层析PWV图空间分布不如ERA5的PWV图连贯，出现很多零散区。这主要是由两个原因造成的：（1）在积分计算PWV时顾及了地形改正，且节点参数化模型中各点的水汽密度在空间上是变化的；（2）ERA5的每个格网单元上PWV代表是整个格网在一小时内的平均值，未顾及更细致的地形起伏。因此，层析PWV图更能反映出真实的水汽时空分布信息。从图9可见，湖南省中北部地区PWV在该时段内显著增大，且可观测到水汽从东部向中部聚集。

与图7相比，强降雨发生区域（28.5°N—29.5°N，111.5°E—112°E）和（27°N—27.5°N，111.8°E—112.1°E）均发生显著水汽聚集现象。

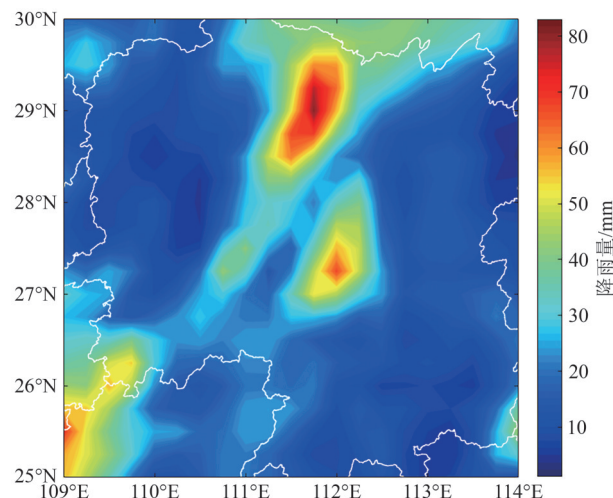
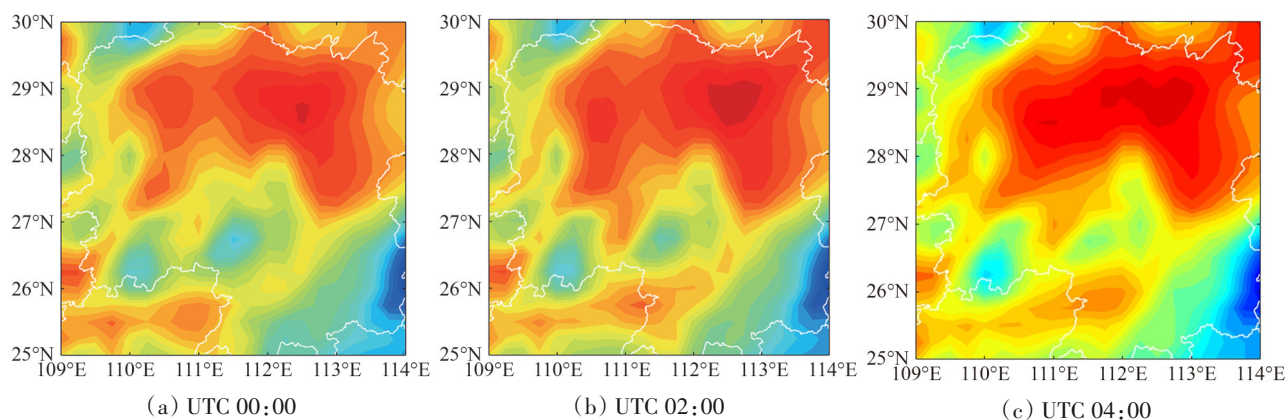


图7 2022年6月19日湖南省降雨分布图

Fig. 7 The precipitation distribution map of Hunan Province on June 19, 2022

图10和11进一步展示了基于层析产品的2022年6月19日UTC 06:00—07:50湖南省纬度29°和经度111°的水汽密度剖面演变图。鉴于5 km以上水汽密度值较小，只展示了5 km以下剖面图。从图10可见，在UTC 06:00—06:30时段内，经度109°E—110.5°E上空受高山影响水汽出现堆积现象。在随后的UTC 06:40—07:50时段内，水汽越过山脉向经度112°E附近聚集。从图11可以看出，经度111°切线方向上地表起伏较大。受此影响，水汽出现了聚集现象，特别是在纬度28°N—29°N上空呈现明显的水汽聚集和消散。总体而言，本研究所反演的高动态水汽产品可揭示强降雨期间大气水汽的聚集和消散现象。



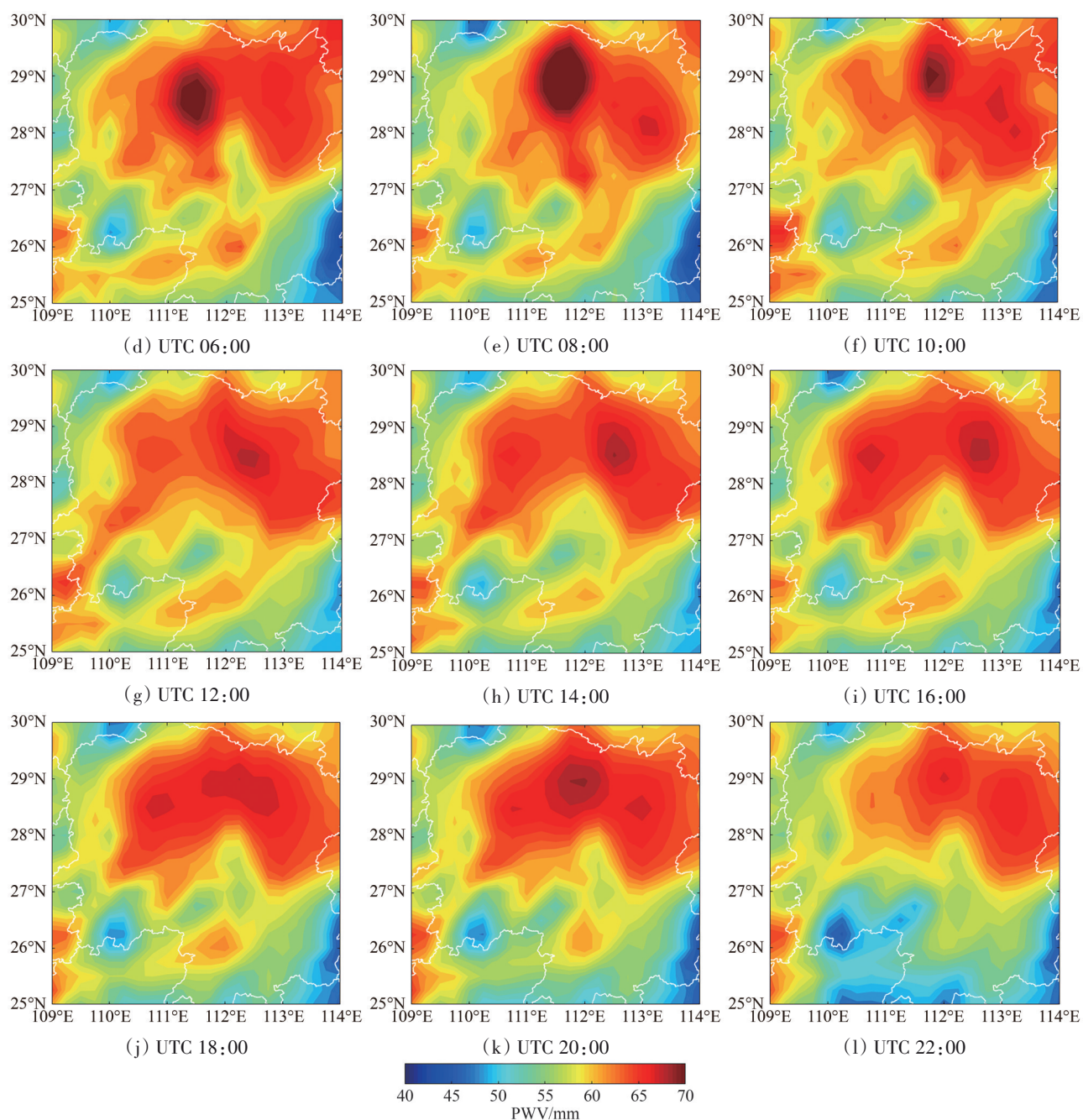
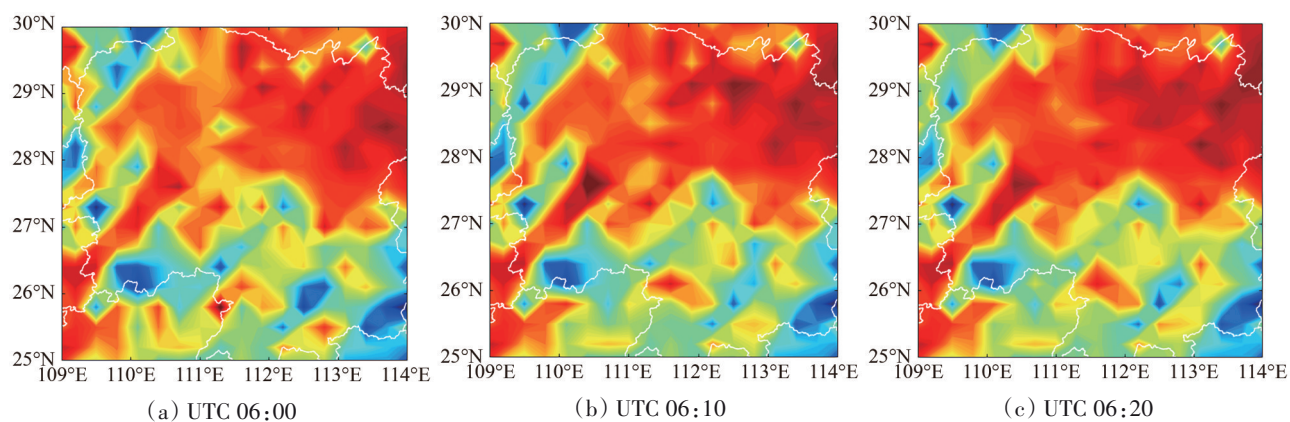


图8 基于ERA5再分析产品的2022年6月19日UTC 00:00—22:00湖南省PWV演变图

Fig. 8 The evolution map of PWV in Hunan Province from UTC 00:00 to 22:00 on June 19, 2022, based on ERA5 reanalysis data



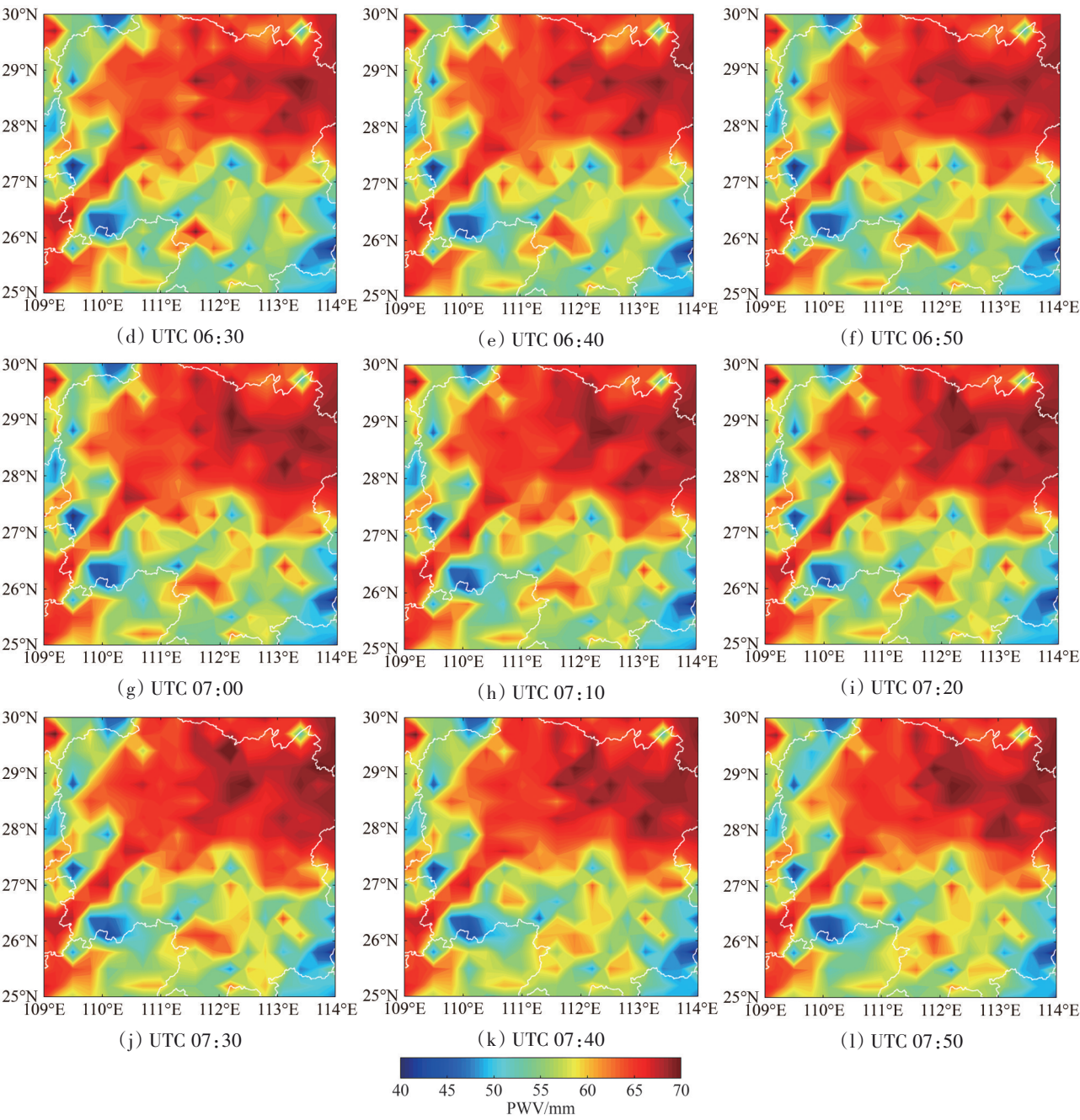
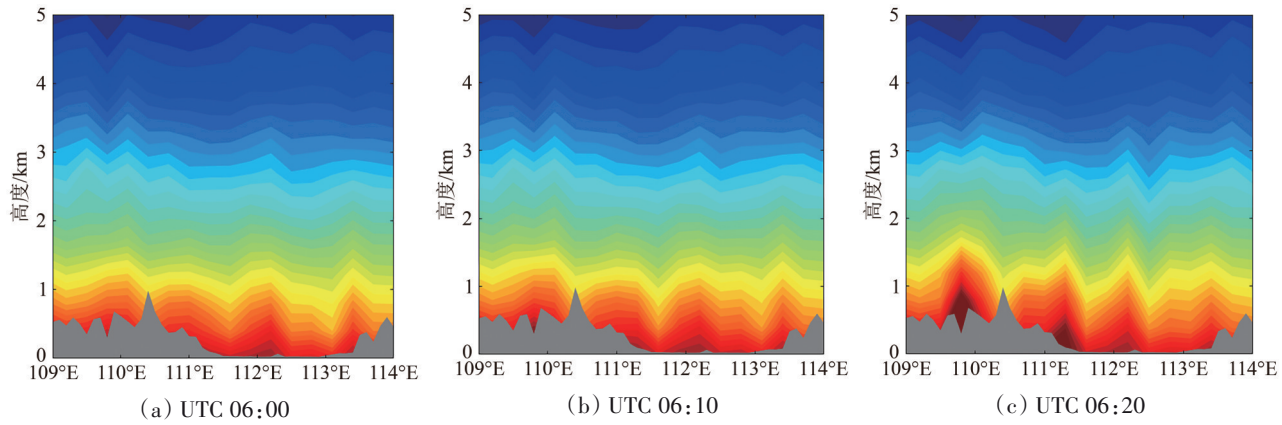


图9 基于层析产品的2022年6月19日UTC 06:00—07:50湖南省PWV演变图

Fig. 9 The evolution map of PWV in Hunan Province from UTC 06:00 to 07:50 on June 19, 2022, based on tomographic products



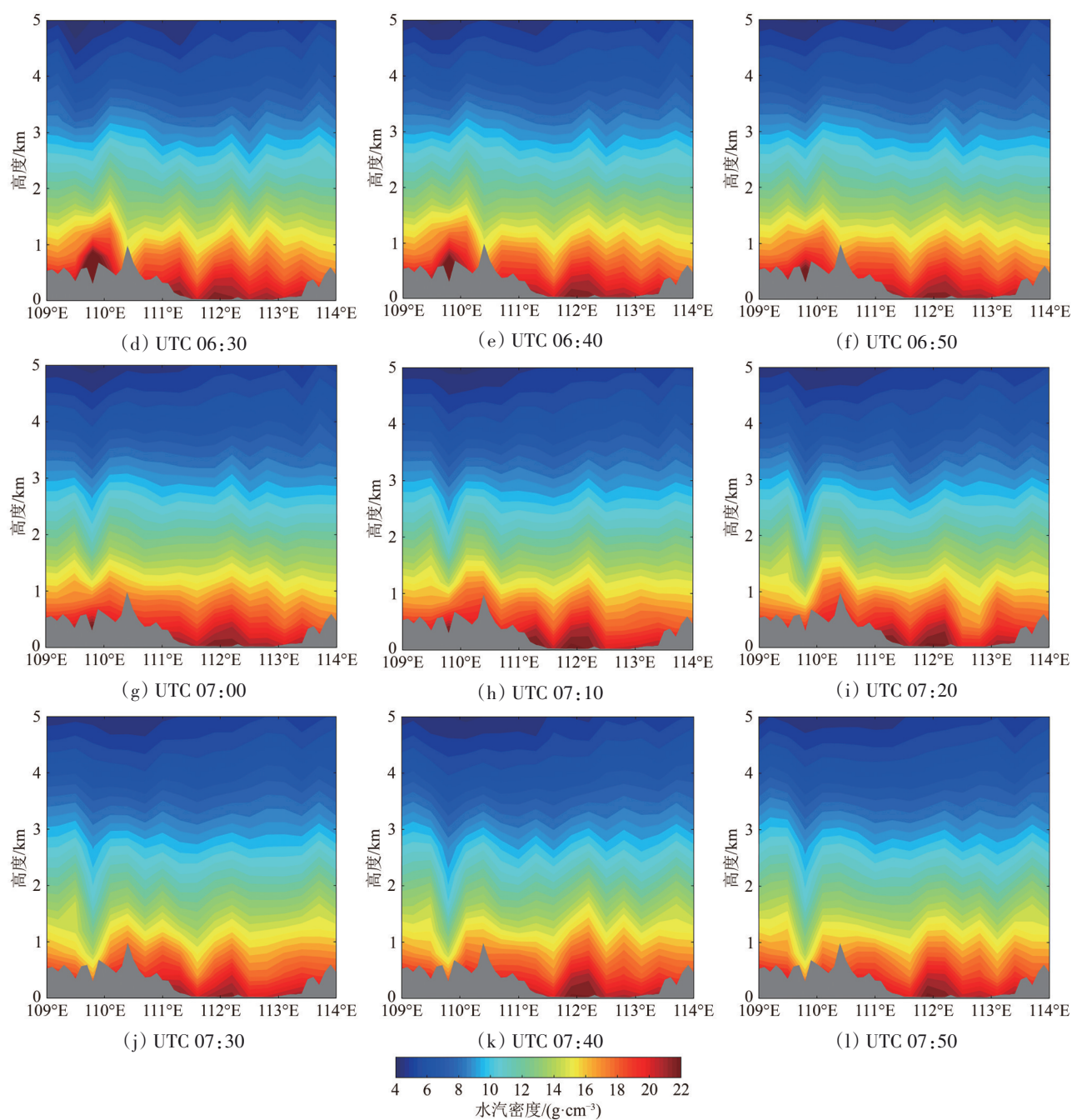
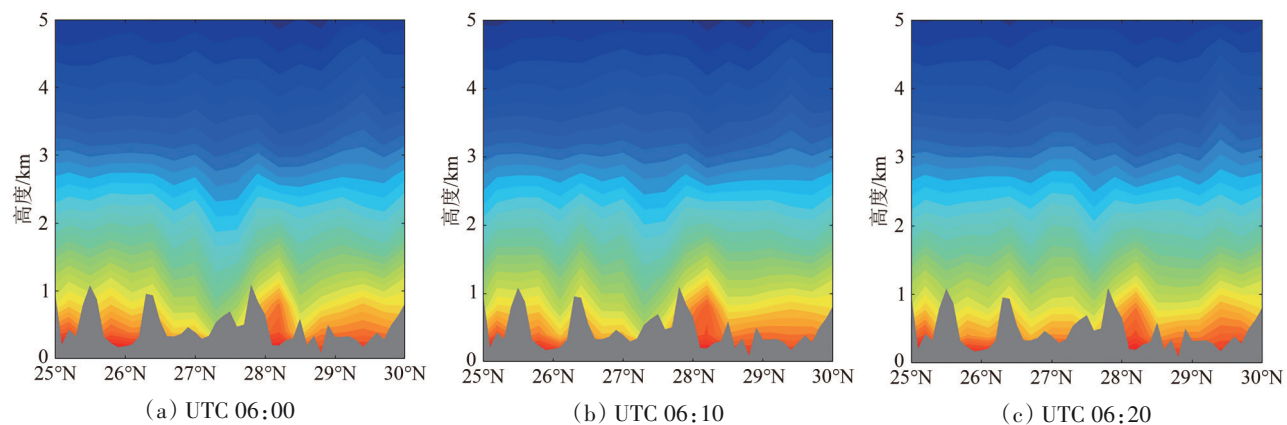


图 10 基于层析产品的2022年6月19日UTC 06:00—07:50湖南省纬度29°的水汽密度剖面演变图,灰色区域为地面
 Fig. 10 The evolution map of the PWV density profile at latitude 29° in Hunan Province from UTC 06:00 to 07:50 on June 19, 2022, based on tomographic products. The grey area represents the ground-level



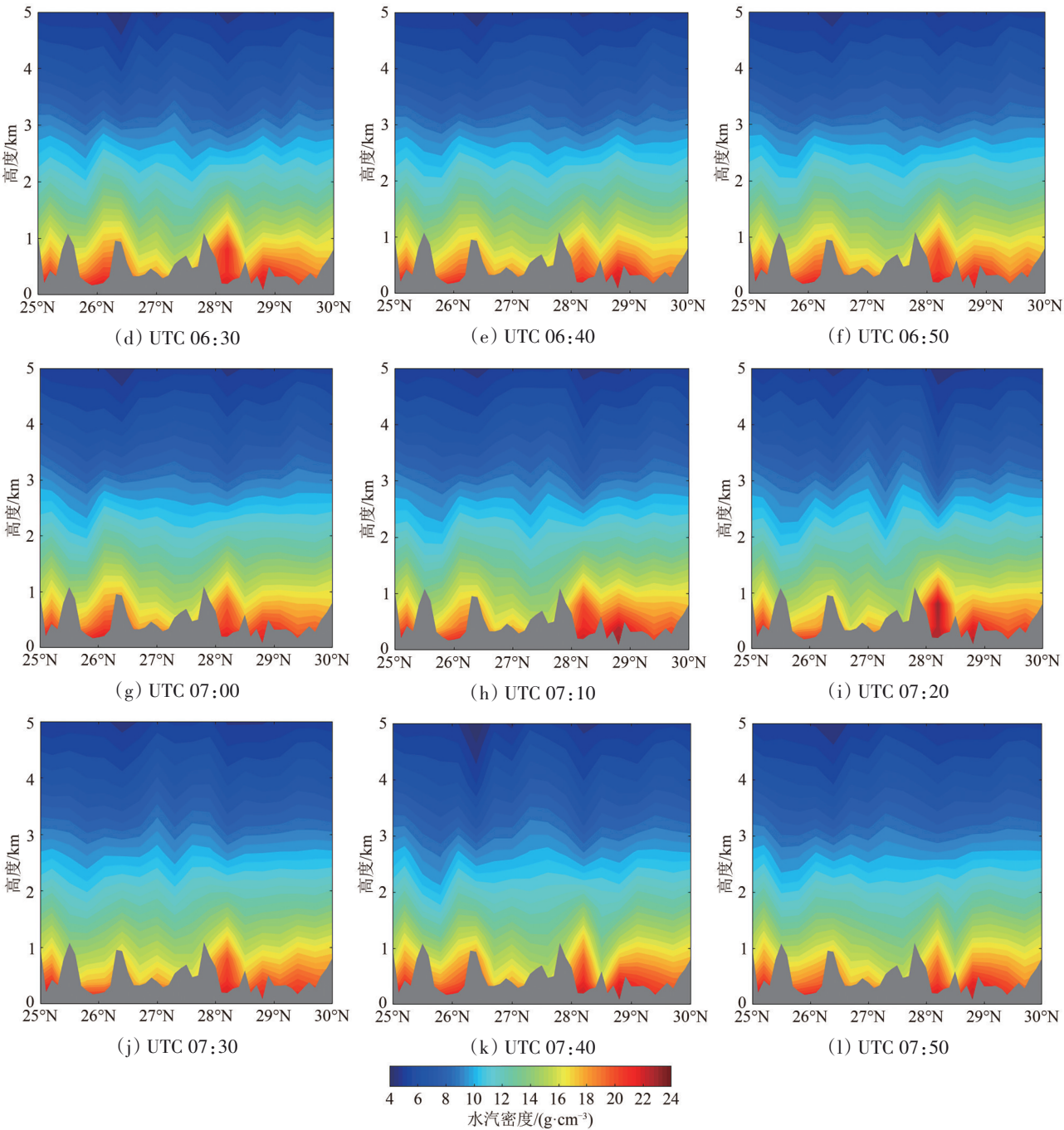


图 11 基于层析产品的 2022 年 6 月 19 日 UTC 06:00—07:50 湖南省经度 111° 的水汽密度剖面演变图,灰色区域为地面
Fig. 11 The evolution map of PWV density profile at longitude 111° in Hunan Province from UTC 06:00 to 07:50 on June 19, 2022, based on tomographic products. The grey area represents the ground-level

5 结 论

受地面 GNSS 观测站分布、密度等现实因素的制约,时空分辨率问题一直困扰着水汽层析方法,提高层析产品的时空分辨率成为当前水汽层析研究的主要目标之一。本文针对此需求,提出了一种高动态节点参数化水汽层析两步法。该方法通过引入自适应更新的垂直变化参数优化了节点参数化

模型的系数矩阵,并设计了由长时段线性趋势项和短时段高频偏离项构成的“两步法”框架,旨在突破传统层析方法在时空分辨率上的瓶颈。基于 2022 年 6 月的湖南省 GNSS 站网观测数据的试验表明,高动态节点参数化水汽层析两步法在精度上显著优于传统体素基模型(体素内水汽含量均匀分布且不变)、节点参数化模型(湿折射率由所在体素的 8 个节点经空间内插求取)和线性时变节

点参数化模型(湿折射率随时间呈线性变化),其外符合精度分别提升了35%、29%和26%。对一次强降雨过程的案例分析也证实,该方法生成的5分钟分辨率水汽产品能有效捕捉降雨期间水汽的快速聚集和消散过程,展示了其在监测高动态天气事件中的应用潜力。

综上,本研究为高动态、高精度三维水汽场的反演提供了一种有效的技术途径。未来的研究将集中在以下几个方面:(1)融合无线电探空、雷达等多源数据,进一步提升高动态节点参数化水汽层析两步法在数据稀疏区域的稳定性和精度;(2)将本方法推广应用于其他不同气候特征(如干旱、高纬度等)的区域,系统性地评估其普适性与性能表现;(3)探索将高分辨率层析产品应用于数值天气预报模式的数据同化,以期改善短时临近预报的效果。

参考文献(References)

- Albergel C, Dutra E, Munier S, Calvet J C, Munoz-Sabater J, de Rosnay P and Balsamo G. 2018. ERA-5 and ERA-Interim driven ISBA land surface model simulations: which one performs better?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(6): 3515-3532 [DOI: 10.5194/hess-22-3515-2018]
- Askne J and Nordius H. 1987. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science*, 22(3): 379-386 [DOI: 10.1029/RS022i003p00379]
- Bevis M, Businger S, Herring T A, Rocken C, Anthes R A and Ware R H. 1992. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14): 15787-15801 [DOI: 10.1029/92JD01517]
- Bi Y M, Mao J T and Mao H. 2008. Tropospheric water vapor profiles using GPS network in Hainan. *Journal of Applied Meteorological Science*, 19(4): 412-419 (毕研盟, 毛节泰, 毛辉. 2008. 海南GPS网探测对流层水汽廓线的试验研究. *应用气象学报*, 19(4): 412-419) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2008.04.004]
- Cao Y J. 2012. GPS Tomographing Three-Dimensional Atmospheric Water Vapor and Its Meteorological Applications. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (曹玉静. 2012. 地基GPS层析大气三维水汽及其在气象中的应用. 北京: 中国气象科学研究院)
- Champollion C, Masson F, Bouin M N, Walpersdorf A, Doerflinger E, Bock O and Van Baelen J. 2005. GPS water vapour tomography: preliminary results from the ESCOMPTE field experiment. *Atmospheric Research*, 74(1/4): 253-274. [DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.04.003]
- Chen B Y, Dai W J, Xia P F, Ao M S and Tan J S. 2020. Reconstruction of wet refractivity field using an improved parameterized tropospheric tomographic technique. *Remote Sensing*, 12(18): 3034 [DOI: 10.3390/rs12183034]
- Chen B Y, Jin L J, Wang J Y, Jin W P and Wang W. 2023a. Wide-area retrieval of water vapor field using an improved node parameterization tomography. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20: 1001805 [DOI: 10.1109/LGRS.2023.3293824]
- Chen B Y and Liu Z Z. 2014. Voxel-optimized regional water vapor tomography and comparison with radiosonde and numerical weather model. *Journal of Geodesy*, 88(7): 691-703 [DOI: 10.1007/s00190-014-0715-y]
- Chen B Y and Liu Z Z. 2016. Assessing the performance of troposphere tomographic modeling using multi-source water vapor data during Hong Kong's rainy season from May to October 2013. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(10): 5249-5263 [DOI: 10.5194/amt-9-5249-2016]
- Chen B Y, Tan J S, Wang W, Dai W J, Ao M S and Chen C H. 2023b. Tomographic reconstruction of water vapor density fields from the integration of GNSS observations and Fengyun-4A products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 4100712 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3239392]
- Chen B Y, Yu W K, Wang W, Zhang Z T and Dai W J. 2021. A global assessment of precipitable water vapor derived from GNSS zenith tropospheric delays with ERA5, NCEP FNL, and NCEP GFS products. *Earth and Space Science*, 8(8): e2021EA001796 [DOI: 10.1029/2021EA001796]
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda M A, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars A C M, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer A J, Haimberger L, Healy S B, Hersbach H, Hólm E V, Isaksen I, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally A P, Monge-sanz B M, Morcrette J J, Park B K, Peubey C, De Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J N and Vitart F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656): 553-597 [DOI: 10.1002/qj.828]
- Flores A, Ruffini G and Rius A. 2000. 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays. *Annales Geophysicae*, 18(2): 223-234 [DOI: 10.1007/s00585-000-0223-7]
- Nilsson T and Gradinarsky L. 2006. Water vapor tomography using GPS phase observations: simulation results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(10): 2927-2941 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.877755]
- Perler D, Geiger A and Hurter F. 2011. 4D GPS water vapor tomography: new parameterized approaches. *Journal of Geodesy*, 85(8): 539-550 [DOI: 10.1007/s00190-011-0454-2]
- Philipona R, Dürr B, Ohmura A and Ruckstuhl C. 2005. Anthropogenic greenhouse forcing and strong water vapor feedback increase temperature in Europe. *Geophysical Research Letters*, 32(19): L19809 [DOI: 10.1029/2005GL023624]
- Song S L. 2004. Sensing Three Dimensional Water Vapor Structure with Ground-Based GPS Network and the Application in Meteorology. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, CAS (宋

- 淑丽. 2004. 地基 GPS 网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用. 上海: 中国科学院研究生院(上海天文台)
- Tan J S. 2022. Tropospheric Tomography in Subtropical Regions by Incorporating FY-4A and GNSS Water Vapor Data: A Case Study in Hunan Province. Changsha: Central South University (谭井树. 2022. 融合 FY-4A 和 GNSS 水汽数据的亚热带地区对流层层析研究——以湖南省为例. 长沙: 中南大学) [DOI: 10.27661/d.cnki.gzhnu.2022.005915]
- Wan W, Chen X W, Peng X F, Bai W H, Xia J M, Liang H, Zhang X M, Xiong P, Yang T, Cao Y C, Yin C, Zhao L M and Hong Y. 2016. Overview and outlook of GNSS remote sensing technology and applications. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 858-874 (万玮, 陈秀万, 彭学峰, 白伟华, 夏俊明, 梁宏, 张学民, 熊攀, 杨婷, 曹云昌, 尹聪, 赵利民, 洪阳. 2016. GNSS 遥感研究与应用进展和展望. *遥感学报*, 20(5): 858-874) [DOI: 10.11834/jrs.20166228]
- Weckwerth T M, Parsons D B, Koch S E, Moore J A, LeMone M A, Demoz B B, Flamant C, Geerts B, Wang J H and Feltz W F. 2004. An overview of the international H₂O Project (IHOP_2002) and some preliminary highlights. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(2): 253-278 [DOI: 10.1175/BAMS-85-2-253]
- Xia P, Cai C and Liu Z. 2013. GNSS troposphere tomography based on two-step reconstructions using GPS observations and COSMIC profiles. *Annales Geophysicae*, 31(10): 1805-1815 [DOI: 10.5194/angeo-31-1805-2013]
- Yao Y B, Zhang S and Kong J. 2017. Research progress and prospect of GNSS space environment science. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1408-1420 (姚宜斌, 张顺, 孔建. 2017. GNSS 空间环境学研究进展和展望. *测绘学报*, 46(10): 1408-1420) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170333]
- Ye S R, Jiang P and Liu Y Y. 2013. A water vapor tomographic numerical quadrature approach with ground-based GPS network. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 42(5): 654-660 (叶世榕, 江鹏, 刘炎炎. 2013. 地基 GPS 网层析水汽三维分布数值积分方法. *测绘学报*, 42(5): 654-660)
- Yu S J, Liu L T and Liang X H. 2010. Influence analysis of constraint conditions on GPS water vapor tomography. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 39(5): 491-496 (于胜杰, 柳林涛, 梁星辉. 2010. 约束条件对 GPS 水汽层析解算的影响分析. *测绘学报*, 39(5): 491-496)
- Zhang B, Yao Y B, Hu Y F and Xu C Q. 2017. The application of Gauss function in tropospheric tomography in Hong Kong area. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(8): 1047-1053 (张豹, 姚宜斌, 胡羽丰, 许超铃. 2017. 高斯函数在香港地区对流层层析实验中的应用. *武汉大学学报(信息科学版)*, 42(8): 1047-1053) [DOI: 10.13203/j.whugis20150165]
- Zhang W, Zhang H, Liang H, Lou Y, Cai Y, Cao Y, Zhou Y and Liu W. 2019. On the suitability of ERA5 in hourly GPS precipitable water vapor retrieval over China. *Journal of Geodesy*, 93(10): 1897-1909 [DOI: 10.1007/s00190-019-01290-6]
- Zhao Q Z, Yao Y B and Xin L Y. 2021. A method to sophisticate the water vapor tomography model by combining the ECMWF grid data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(8): 1131-1138 (赵庆志, 姚宜斌, 辛林洋. 2021. 融合 ECMWF 格网数据的水汽层析精化方法. *武汉大学学报(信息科学版)*, 46(8): 1131-1138) [DOI: 10.13203/j.whugis20190323]

High-dynamic node-parameterized water vapor tomography modeling for subtropical regions: A case study of Hunan province

CHEN Biyan¹, HUANG Ning^{1,2}, JIN Wenping³, CHEN Chunhua³

1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Beidou High-precision Satellite Navigation and Location Service Hunan Engineering Research Center, Changsha 410018, China;

3. Hunan Province Mapping and Science and Technology Investigation Institute, Changsha 410018, China

Abstract: Atmospheric water vapor is a crucial component of the troposphere, playing a decisive role in the global energy budget and the formation of severe weather events. Hunan province, located in a subtropical monsoon humid climate zone with complex topography, frequently experiences extreme weather disasters such as severe convection and rainstorms driven by intense water vapor activity. Precisely monitoring the high-dynamic three-dimensional (3D) water vapor field is of great significance for early warning of these disasters. However, Global Navigation Satellite System (GNSS) water vapor tomography, a primary remote sensing technique, faces significant challenges. Traditional voxel-based models assume uniform water vapor distribution within a grid, failing to describe continuous spatial variations. Moreover, limited by station density, these methods often require long time windows (e.g., 30 minutes) to accumulate observations, resulting in low temporal resolution that misses the rapid evolution of water vapor during extreme weather. This study aims to develop a novel tomography framework to reconstruct water vapor fields with high spatiotemporal resolution (e.g., 5 minutes) in high-dynamic environments.

A High-dynamic Node-parameterized Water Vapor Tomography Two-step Method (HNT-TSM) is proposed. Unlike discrete voxel models, this method employs a node-based parameterization strategy where the wet refractivity at any spatial point is determined by the interpolation of eight surrounding node parameters, ensuring spatial continuity. To address the ill-posed problem in high-resolution retrieval, the method incorporates an adaptive vertical constraint, introducing a vertical variation parameter that updates automatically during iteration

to optimize the design matrix. The core reconstruction follows a "two-step" framework: (1) a 30-minute window is used to reconstruct the linear variation trend (background field) to ensure model stability; (2) based on the modeling residuals from the first step, a residual tomography model inverts high-frequency deviation terms within short 5-minute intervals. This approach effectively separates stable background signals from rapid dynamic fluctuations, implemented using the Algebraic Reconstruction Technique (ART).

The method was validated using GNSS data from 123 stations in the Hunan Continuously Operating Reference Stations (HNCORS) network during June 2022. Four schemes were designed for comparison: Scheme 1 (traditional voxel-based model with uniform distribution), Scheme 2 (standard node-parameterized model), Scheme 3 (linear time-varying node-parameterized model), and Scheme 4 (the proposed HNT-TSM). Evaluation using independent Slant Wet Delays (SWD) and ERA5 reanalysis demonstrated that HNT-TSM significantly outperforms the benchmarks. Specifically, in terms of external validation accuracy, the proposed method improved by 35%, 29%, and 26% compared to Scheme 1, Scheme 2, and Scheme 3, respectively. Furthermore, in a heavy rainstorm case study on June 19, the 5-minute resolution products generated by HNT-TSM successfully captured rapid water vapor convergence and dissipation processes missed by low-resolution models, showing high consistency with the precipitation distribution.

The HNT-TSM effectively resolves the conflict between temporal resolution and model stability in GNSS tomography. By integrating node parameterization with a two-step reconstruction strategy, it achieves high-precision 3D monitoring at a 5-minute level. This method demonstrates significant advantages in regions with complex terrain and active water vapor changes, such as the subtropical monsoon region. The resulting high-spatiotemporal-resolution products provide robust data for analyzing extreme weather mechanisms and hold great potential for data assimilation in numerical weather prediction systems.

Key words: water vapor tomography, wet refractivity, node parameterization, high-dynamic, subtropical

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFE0208000); National Natural Science Foundation of China (No. 42274042); Natural Science Foundation of Hunan Province for Excellent Young Scholars (No. 2023JJ20060)