[文章编号] 1003－4684(2025)05-0096-06

谱线混合效应对于卫星反演中国 CO_2 浓度的影响

张金业[1,2]，伍绪龙[1,2]

(1 湖北工业大学理学院，湖北 武汉 430068；2 湖北工业大学太阳能高效利用湖北省协同创新中心，湖北 武汉 430068)

[摘 要] 利用 GOSAT 卫星数据对中国大气中的 CO_2 浓度进行反演，并研究了谱线混合效应对反演结果的影响。基于 CO_2 反演模型进行了谱线混合效应的计算，并对引入谱线混合效应前后的光谱位置进行了对比。结果显示，在瓦里关、上甸子和鹿林三个站点，反演数据均略低于地面基站数据，略高于 GOSAT 产品数据，且呈现出与地基数据和 GOSAT 产品数据基本一致的增长趋势与季节性周期。相较于 GOSAT 产品数据，反演数据分别提升了 1.97×10^{-6}、2.94×10^{-6}、1.25×10^{-6}。相关系数分析显示，反演数据相对于 GOSAT 产品数据分别提高了 0.0025、0.0417 和 0.0069。

[关键词] GOSAT；二氧化碳；谱线混合效应

[中图分类号] TP79 [文献标识码] A

随着全球经济的整体向上发展与区域经济腾飞，全球温室效应不断加剧，造成了各类极端气候现象的出现。CO_2 是造成全球变暖的主要温室气体，而 CO_2 相关的数值测量与分析成为研究热点[1]。获取大气 CO_2 浓度的的主要方式有地面基站测量与卫星遥感产品两种，地面基站测量的方式受限于地理环境的空间限制，多个国家先后发射了碳卫星用于获取温室气体遥感数据，其中日本发射的 GOSAT 在获取大气 CO_2 柱丰度(XCO_2)方面应用广泛[2]。Yokota 等[3]提出了基于 GOSAT 卫星数据的 CO_2 和 CH_4 初步反演方法。针对例如上海、郑州、北京等中国区域的 CO_2 和 CH_4 反演模型也逐渐出现[46]。而针对 GOSAT 卫星数据的反演模型也存在诸多的优化方式，Christensen 等[7]报告了将谱线混合合并到一个简单的大气模型中。本文将基于谱线混合效应，改进了中国区域的 CO_2 浓度反演模型，并通过 GOSATL2 级数据产品与地面基站观测结果进行对比验证。

1 GOSAT 卫星数据产品

如图 1 所示，观测传感器(TANSO)与总线系统共同构成了 GOSAT 卫星平台。测温室气体成分的傅里叶变换光谱仪(FTS)和同步收集云和气溶胶信息的云和气溶胶成像仪(CAI)共同组成了 GOSAT 卫星平台的 TANSO[8]。总线系统则是一个支持多种卫星搭载的泛供应系统，主要负责数据通信、能量供应、运动状态以及数据的传输、处理和记录。

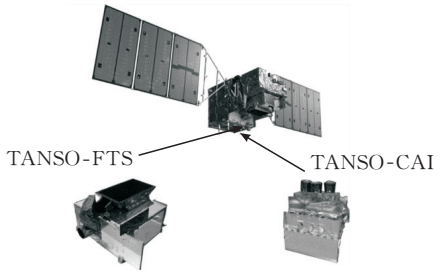


图 1 GOSAT 卫星结构

如图 2 所示，FTS 中搭载了光学系统(FTS-OPT)、控制系统(FTS-CNT)和电路系统(FTS-EL)。FTS-OPT 主体包含指向装置、监控摄像头、中继光学器件、傅里叶干涉仪、探测器和模拟信号处理器。所有光学元件都安装在 23°C 恒温的光具座上，光具座通过三个运动支架安装在卫星结构上，以隔离热变形。使用隔热毯和隔热器将光学元件与其环境进行辐射和传导隔离，以最大程度地减少短期温度变化。安装在 FTS-OPT 上的是用于 TIR 探测器的冷却器、黑体、用于 ILS 校准的二极管激光器、扩散板及其驱动机构、最大限度减少杂散光的遮光罩以及模拟电子器件。FTS-CNT 由傅里叶干涉仪控制器、指向装置控制器、探测器温度控制器和冷却器控制器组成。FTS-EL 负责加热器控制、数据处理以及与卫星总线系统的数据传输接口的任务。

[收稿日期] 2024－03－05

[第一作者] 张金业(1981－)，女，湖北武汉人，湖北工业大学副教授，研究方向为光学大气环境遥感。

[通信作者] 伍绪龙(1999－)，男，湖南衡阳人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为卫星大数据处理。

FTS-OPT 的扫描装置和 FTS-EL 的所有组件都有冗余设计，以确保部分故障场景下系统的正常运行。

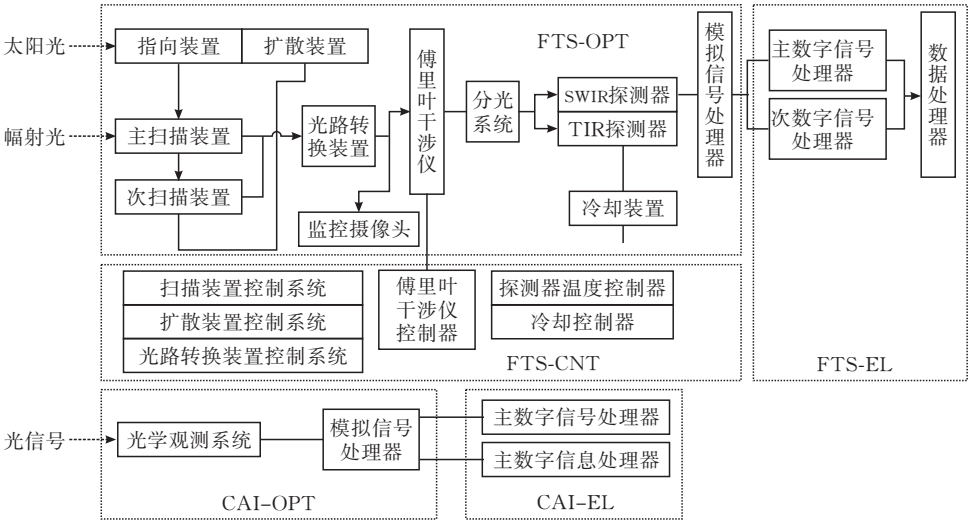


图 2　FTS 内部结构设计

CAI 的设计包含了光学系统(CAI-OPT)和电路系统(CAI-EL)。CAI-OPT 搭载了由三个望远镜组成的观测装置和负责将观测参数转换为电信号的光学信号处理器。CAI-EL 主要负责指令传输、数据传输和数据处理。CAI-EL 的所有组件同 FTS-EL 一样也都有冗余设计。

表 1 为 TANSO-FTS 按照总体数据处理流程划分的数据产品级别。获取的原始干涉图和遥测数据每天作为 L0 级数据传输到地面 9 次。GOSAT 的下行站点是康斯伯格卫星服务公司(KSAT)和地球观测中心(EOC)。然后将干涉图逆傅立叶变换为光谱。从光谱中检索有效光程和温室气体吸收，然后计算密度：从 SWIR 数据中获取 CO_2 和 CH_4 数据的柱密度，从 TIR 数据中检索 CO_2 垂直剖面。每三天创建一次全球温室气体分布，最后通过化学转移模型反演，检索温室气体的源和汇。日本宇宙航空开发机构(JAXA)负责提供 FTSL1A 级(原始干涉图)、L1B 级(地理定位光谱)数据以及 CAIL1A 级(原始输出数据)。日本国立环境研究所(NIES)负责 FTS 的 L2 级(柱浓度)、L3 级(全球)以及 CAI 的 L2 级(云标识产品)、L3 级(全球辐射与晴空反射率分布)。此外，标注温室气体源和汇反演的 L4 级也会进行发布。以上各级数据均在 GOSAT 官网(https://data2.gosat.nies.go.jp)发布并可获取 HDF5 格式的数据产品，且表中标注的最新版本均截止至 2024 年 2 月。

表 1　GOSAT 各级产品数据划分说明

传感器及波段	产品级别	产品描述	最新版本
FTSSWIR	L1B	短波红外光谱数据	V300.300
	L2	CO_2 柱浓度产品	V230.231
	L3	全球 CO_2 月平均分布产品	—
FTSTIR	L1B	热红外光谱数据	V300.300
	L2	CH_4 柱浓度产品	V230.231
	L3	全球 CH_4 月平均分布产品	—
CAI	L1B+	原始图像数据	V02.00
	L2	云标识产品	V02.00
	L3	全球辐射与晴空反射率分布	V02.00

本文主要使用了 GOSAT 的 L1 级产品数据进行中国大气 XCO_2 反演，并且在后续的结果分析中使用到 L2 级产品数据进行对比验证。

2　基于 GOSAT 的中国 CO_2 浓度反演

2.1　反演模型

CO_2 的反演模型建立在最优估计理论的基础上，本文针对 GOSAT 卫星 FTS 的 SWIR 光谱数据反演 XCO_2。FTS 接收到的光谱信号 P 主要取决于大气状态相关的参数 X，X 也包含一些大气成分含量与仪器参数的相关量。建立简单的正向辐射传输模型[3]：

$$P = F(X) + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{1}$$

其中，$\boldsymbol{\varepsilon}$ 是误差向量。而考虑到在正向模型的基础上进行反演的过程，X 可以分解为需要参与反演的向量 $\boldsymbol{x}$ 与不参与反演的向量 $\boldsymbol{b}$，则公式(1)可以表

达为：

$$P = F(\boldsymbol{x},\boldsymbol{b}) + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{2}$$

在此基础上的反演模型属于中度非线性问题，在处理的过程中通过最优估计的方式进行处理，并且涉及到最大后验概率密度的使用，则可以得到该过程的代价函数：

$$J(x) = [P - F(x)]^{\mathrm{T}} \boldsymbol{S}_{\varepsilon}^{-1} [P - F(x)] + [x - x_a]^{\mathrm{T}} \boldsymbol{S}_a^{-1} [x - x_a] \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{P}$ 即为需要观测的光谱信号向量，$\boldsymbol{S}_{\varepsilon}$ 和 $\boldsymbol{S}_a$ 分别是观测的误差协方差矩阵和先验协方差矩阵，x_a 为 x 的初始化结果。通过代价函数的计算可以代表反演结果的适合程度，那么就需要在有限次的迭代过程中来寻找代价函数的最小值。常见的方式是使用 L-M 牛顿非线性迭代：

$$\boldsymbol{x}_{i+1} = \boldsymbol{x}_i + \hat{S} [\boldsymbol{K}_i^{\mathrm{T}} S_{\varepsilon}^{-1} (y - F(\boldsymbol{x}_i)) - S_a^{-1} (\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_a)] \tag{4}$$

$$\hat{S} = ((1+\gamma) S_a^{-1} + \boldsymbol{K}_i^{\mathrm{T}} S_{\varepsilon}^{-1} \boldsymbol{K}_i)^{-1} \tag{5}$$

式中，i 为迭代次数，$\boldsymbol{K} = \dfrac{\partial F(\boldsymbol{x},\boldsymbol{b})}{\partial x}$ 为雅可比矩阵，也可以代表 P 对于 $\boldsymbol{x}$ 的敏感程度。γ 为 L-M 牛顿非线性迭代系数，$\hat{S}$ 为协方差阵，表示整个反演过程的可靠程度。

大气 CO_2 浓度的反演过程需要在去除有云像元的基础上得到完整的初始状态向量 $\boldsymbol{x}_a$，然后代入正演模型进行 L-M 牛顿非线性迭代，在每一次迭代后需要判断结果是否收敛且残差符合最小阈值，符合条件的即为最优解。但由于全球不同地理区域的地表条件差异巨大，笼统的处理往往很难得到最好的结果，将中国区域参考已有数据库进行独立的反演则会得到更加准确的反演结果。

然而，CO_2 反演模型的研究往往忽略了谱线混合效应。由于谱线混合效应的影响随着压力的增加而增加，并且 CO_2 反演主要受到对流层下部压力展宽的 CO_2 的影响，因此在光谱模型中考虑对流层较低压力下谱线混合的影响非常重要。

2.2 谱线混合效应

谱线混合是由吸收体相邻谱线之间量子态布居的碰撞转移引起的[9]。当通过玻尔兹曼分布总体吸收或透射强度时，这种群体的碰撞转移不能简单地表征——它们的影响必须纳入线形的描述中。线形状和压力偏移的描述是从寻求将压力展宽推广到所有光谱区域的理论演变而来的，首先是孤立的线[10]，然后是重叠的线[11]。一个特别有用的推导涉及将所有碰撞细节累积到弛豫矩阵中[12]，这使得微观碰撞理论和实验之间能够进行相对清晰的比较。使用此推导，压力展宽重叠线的吸收系数 K'（排除其他展宽机制并假设碰撞持续时间无穷小）可写为：

$$K'(v) = \frac{N}{\pi} \mathrm{Im} \left\{ \sum_{l,l'} d_l \ll l \mid [\boldsymbol{I}(v - v_l) - iP\boldsymbol{M}]^{-1} \mid l' \gg d_{l'} \rho_{l'} \right\} \tag{6}$$

其中，$\boldsymbol{I}$ 是单位矩阵，d_l 和 $d_{l'}$ 是第 l 行和第 l' 行的偶极矩矩阵元，v_l 是行位置，$\rho_{l'}$ 是 l' 级的相关布居。P 是总压力，N 是吸收体的数密度。$\boldsymbol{M}$ 是描述碰撞对吸收体影响的弛豫矩阵，它是将谱线混合引入线形描述中的方式。

$\boldsymbol{I}(v - v_l) - iP\boldsymbol{M}$ 可以倒置从而将每条线的吸收系数表示为：

$$K'_l(v) = N \frac{S_l}{\pi} \left(\frac{P\gamma_{L,l}}{(v - v_l - P\delta_l)^2 + (P\gamma_{L,l})^2} + \frac{(v - v_l - P\delta_l) P Y_l}{(v - v_l - P\delta_l)^2 + (P\gamma_{L,l})^2} \right) \tag{7}$$

其中，$\gamma_{L,l}$ 是洛伦兹半宽，δ_l 是线中心的压力偏移，S_l 是积分线强度，压力的一阶近似[1]用于描述线混合系数 Y_l，即

$$Y_l = 2 \sum_{l' \neq l} \frac{\mathrm{d}_{l'}}{\mathrm{d}_l} \frac{\boldsymbol{M}_{l'l}}{v_l - v_{l'}} \tag{8}$$

其中，$\boldsymbol{M}_{l'l}$ 弛豫矩阵第 l 行和第 l' 列的矩阵元。Niro 等[14]给出了 $\boldsymbol{M}_{l'l}$ 的计算方法，$\boldsymbol{M}_{l'l}$ 的计算涉及采用微观碰撞模型来解释能量和动量传递以及与向上和向下转变相关的详细平衡，据此可以得到空气中 CO_2 的弛豫矩阵为：

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{CO_2\text{-}air}}(T) = 0.21\, \boldsymbol{M}_{\mathrm{CO_2\text{-}O_2}}(T) + 0.79\, \boldsymbol{M}_{\mathrm{CO_2\text{-}N_2}}(T) \tag{9}$$

其中 T 是温度，弛豫矩阵 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{CO_2\text{-}O_2}}$ 和 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{CO_2\text{-}N_2}}$ 分别为 CO_2-O_2 和 CO_2-N_2 混合物构建的。

公式(7)中的 Y_l 项使得线形不对称。然后可以将公式（8）与归一化高斯函数进行卷积，将每条线的吸收系数描述：

$$K'_l(z) = \frac{S_l}{\gamma_{D,l} \sqrt{\pi}} (\mathrm{Re}W(z) + P \cdot Y_l \mathrm{Im}W(z)) \tag{10}$$

其中 W 是复数概率函数：

$$W(z) = \frac{i}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-t^2}}{z - t} \mathrm{d}t \tag{11}$$

$$z = x + iy, x = \frac{v - v_l - P \cdot \delta_l}{\gamma_{D,k}} \sqrt{\ln 2}, y = P \frac{\gamma_{L,l}}{\gamma_{D,l}} \sqrt{\ln 2} \tag{12}$$

$\gamma_{L,l}$ 和 $\gamma_{D,l}$ 分别是洛伦兹宽度和高斯宽度。ASMA 等[15]给出了 W 实部和虚部的计算方法如下：

$$\mathrm{Re}W(z) = \frac{y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-t^2}}{y^2 + (x - t)^2} \mathrm{d}t \tag{13}$$

$$\mathrm{Im}W(z) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x - t) e^{-t^2}}{y^2 + (x - t)^2} \mathrm{d}t \tag{14}$$

2.3　反演结果

本文进行谱线混合效应的大气透过率的计算，并使用逐线积分模式将 120 km 高度的大气分为 50 层，其中 25 km 以下每 1 km 一层，25～50 km 每 2.5 km一层，50 km 以上每 5 km 一层[16]。利用 CO_2 反演模型对引入谱线混合效应前后两种大气透过率的。表 2 为 4866 ～1881 cm^{-1}范围内选取的 6 个谱线位置在引入谱线混合效应前后的位置对比，结果中除 $P(12)$外所有谱线结果均向同一方向偏移，偏移量为 0.0004 ～0.0019 cm^{-1}。

表 2　引入谱线混合效应前后的谱线位置对比

谱线编号	引入谱线混合效应前位置/(cm^{-1})	引入谱线混合效应后位置/(cm^{-1})	差值/(cm^{-1})
8	4880.9611	4880.9606	−0.0005
10	4879.2755	4879.2745	−0.0010
12	4877.5730	4877.5734	+0.0004
18	4872.3027	4872.3018	−0.0009
24	4866.7883	4866.7871	−0.0012
31	4878.9476	4879.9457	−0.0019

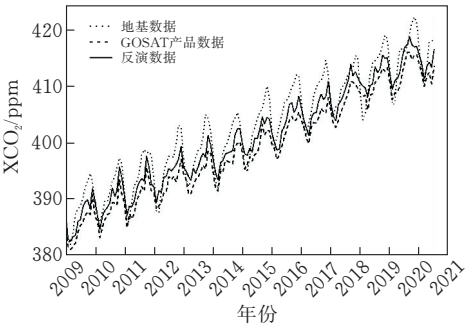
引入谱线混合效应的最终反演结果与 GOSAT 卫星产品数据的对比则会有更为直观与可靠的验证。此外，地面基站的观测结果可以更为准确地代表实际结果，是卫星反演数据验证的重要依据。温室气体世界数据中心(WDCGG)提供了中国区域瓦里关、上甸子、鹿林三个地面观测站点的 XCO_2 数据。表 3 为 3 个站点的地理位置及所获取的 XCO_2 数据的时间范围，其中上甸子站的数据仅更新至 2015 年 9 月，这可能与该站点所处的地理位置有关，尤其是 287 m 的过低海拔的影响。

表 3　地面基站地理位置及数据时间范围

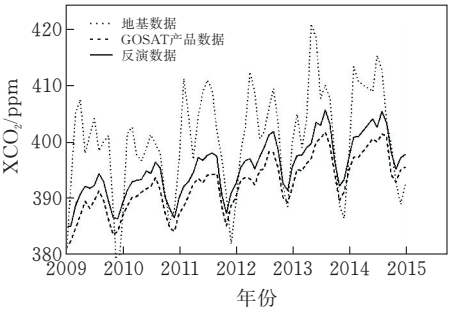
站点	位置	海拔/m	数据时间
瓦里关	36.29°N，100.90°E	3810	2009 年 6 月至 2021 年 12 月
上甸子	40.65°N，117.12°E	287	2009 年 6 月至 2015 年 9 月
鹿林	23.47°N，120.87°E	2862	2009 年 6 月至 2021 年 12 月

图 3 为本文反演结果与地面基站数据(下文简称地基数据)、GOSAT 产品数据的对比折线图，所使用的数据时间的起点为 GOSAT 产品数据可获取的最早时间，终点为各地基数据可获取的最新时间。图 a、b、c 分别为瓦里关、上甸子、鹿林的对比折线图，三个站点的反演数据结果均与地基数据、GOSAT 产品数据具有基本一致的增长趋势与季节性趋势，且反演数据值整体略低于地基数据，略高于 GOSAT 产品数据。

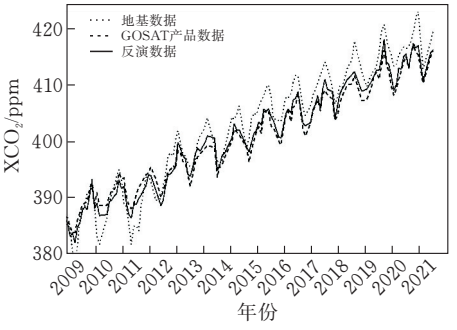
图 4 为本文反演结果与地基数据、GOSAT 产品数据的小提琴图，图 a、b、c 分别为瓦里关、上甸子、鹿林三个站点的对比结果。小提琴图显示的反演数据结果的整体分布与地基数据、GOSAT 产品数据基本相似，且与 GOSAT 产品数据具有非常高的吻合度。这是由于卫星测量的光谱数据会受到复杂的大气环境的影响，相对地基测量的形式依然会有一些区别。这种区别在小提琴图上也明显地表现为地基数据的分布相较而言更加符合自然情况下的正态分布。此外，图中 1/4 中位数，中位数以及 3/4 中位数也进一步验证了反演数据的 3 类中位数同样表现为略低于地基数据，略高于 GOSAT 产品数据。



(a)瓦里关



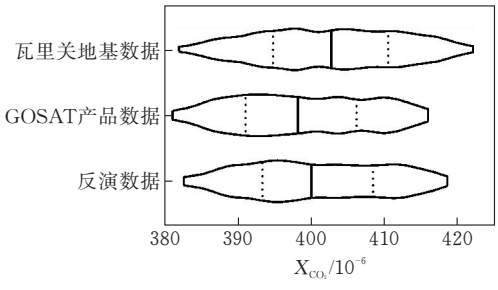
(b)上甸子



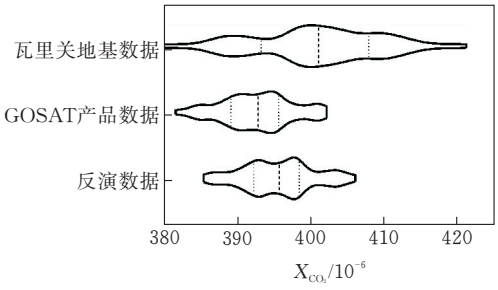
(c)鹿林

图 3　反演结果与地基数据、GOSAT 产品数据的对比

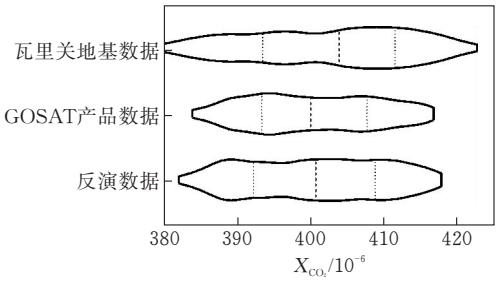
表 4 为瓦里关、上甸子和鹿林的地基数据与 GOSAT 产品数据相关系数分别为 0.9681、0.6695 和 0.9782，均通过 0.01 的显著性验证。可见 GOSAT产品数据已经能够较好地表现当地的CO_2浓度，由于上甸子地面基站本身独特的地理位置的影响，该站点的相关性表现略差。而瓦里关、上甸子



(a)瓦里关



(b)上甸子



(c)鹿林

图 4 反演结果与地基数据、GOSAT 产品数据的小提琴图

和鹿林的地基数据与反演产品数据相关系数分别为 0.9706、0.7112 和 0.9850，也均通过 0.01 的显著性验证，且相较于 GOSAT 产品数据分别提升了 0.0025、0.0417、0.0069。根据计算，地基数据、GOSAT 产品数据和反演数据在瓦里关站的 XCO_2 均值分别为 402.40×10^{-6}、398.77×10^{-6} 和 400.74×10^{-6}，在上甸子分别为 400.63×10^{-6}、392.78×10^{-6} 和 395.72×10^{-6}，在鹿林分别为 402.12×10^{-6}、400.35×10^{-6} 和 401.60×10^{-6}。这种提升体现在 CO_2 浓度的数值上，则 3 个站点反演数据相较于 GOSAT 产品数据分别提升了 1.97×10^{-6}、2.94×10^{-6} 和 1.25×10^{-6}。

表 4 地基数据与 GOSAT 产品数据、反演数据相关系数

站点	相关系数		差值
	地基与 GOSAT	地基与反演	
瓦里关	0.9681	0.9706	0.0025
上甸子	0.6695	0.7112	0.0417
鹿林	0.9782	0.9850	0.0069

3 结束语

本文基于 GOSAT 卫星数据产品，采用反演模型对中国大气中的 CO_2 浓度进行了深入研究，并着重探讨了谱线混合效应对反演结果的影响。首先，本文介绍了 GOSAT 卫星的数据产品，以及中国 CO_2 浓度反演的基本原理。随后，本文建立了 CO_2 的反演模型，并详细探讨了谱线混合效应在该模型中的重要性和处理方法。

本文基于 CO_2 反演模型进行了谱线混合效应的计算，并将引入谱线混合效应前后的光谱位置进行了对比。在引入谱线混合效应后，光谱位置发生了微小的变化，这反映了谱线混合效应对光谱的影响。例如，在选取的 6 个谱线位置中，除了谱线 12 外，其他谱线的位置均向同一方向偏移，且偏移量在 0.0004 ～0.0019 cm^{-1} 之间。这表明谱线混合效应对光谱位置的影响是微小但可观察的。

然后将反演结果与地面基站观测数据和 GOSAT 产品数据进行了对比验证发现，瓦里关、上甸子和鹿林三个站点的反演数据与地基数据、GOSAT 产品数据具有基本一致的增长趋势与季节性变化。此外，反演数据值整体略低于地基数据，略高于 GOSAT 产品数据。反演数据相较于 GOSAT 产品数据在均值上分别提升了 1.97×10^{-6}（瓦里关站）、2.94×10^{-6}（上甸子站）和 1.25×10^{-6}（鹿林站）。这表明反演数据相对于地基数据而言有所提升，与 GOSAT 产品数据相比也有所改善。

进一步分析相关系数和数值差异显示，地基数据与 GOSAT 产品数据、反演数据之间的相关性分别为 0.9681、0.9706，提升 0.0025（瓦里关站）；0.6695、0.7112，提升 0.0417（上甸子站），0.9782、0.9850，提升 0.0069（鹿林站）。这些数据表明反演数据与地基数据的相关性较高，而相对于 GOSAT 产品数据而言，反演数据的相关性也有所提高。

综上所述，本研究深入探讨了利用 GOSAT 卫星数据反演中国大气中 CO_2 浓度的方法和准确性，特别关注了谱线混合效应对反演结果的影响。研究结果为利用卫星数据进行大气环境研究提供了重要的理论基础和实践指导，为更准确地理解和监测大气 CO_2 浓度提供了有益的参考。

[参 考 文 献]

[1] 张淳民，屈燕，栗彦芬.基于 GOSAT 卫星遥感探测的 CO2 和 CH4 时空变化特性分析[C]// 西部光子学学术会议，2012：11

[2] 张兰兰，张金业. 基于 GOSAT 卫星数据的中国 CH4 浓度时空分布[J]. 湖北工业大学学报，2018，33(04)：4.

[3] YOKOTA T，YOSHIDA Y，EGUCHI N，et al.

Global concentrations of CO_2 and CH_4 retrieved from GOSAT: first preliminary results[J].Scientific Online Letters on the Atmosphere Sola, 2009, 5:160-163.

[4] 朱希扬.上海市大气 CO_2 浓度时空变化特征与影响因素研究[D].上海:华东师范大学,2016.

[5] 师丽魁，娄运生，方文松. 郑州城区大气 CO_2 浓度变化特征及影响因素分析[J]. 气象与环境科学，2013(01):4.

[6] 王长科,王跃思,刘广仁.北京城市大气 CO_2 浓度变化特征及影响因素[J].环境科学，2003，24(04):5.

[7] CHRISTENSEN L E, SPIERS G D, MENZIES RT, et al. Laser spectroscopy of CO_2 near 2.05 μm: Atmospheric retrieval biases due to neglecting line-mixing [J] .Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2012,113(10):739-748.

[8] 侯姗姗,雷莉萍,关贤华.温室气体观测卫星 GOSAT 及产品[J].遥感技术与应用，2013，28(02):8.

[9] HARTMANN J M, BOULET C, ROBERT D. Collisional effects of molecular spectra: laboratory experiments and models, consequences for applications[J]. collisional effects on molecular spectra, 2008,8(01): 333-355.

[10] ANDERSON P W , WEISS P R .Pressure broadening in the Microwave and Infra-red regions[J]. Phys Rev, 1949, 76(05):647-661.

[11] BARANGER M. Problem of overlapping lines in the theory of pressure broadening[J]. Physical Review, 1958, 111(02):494-504.

[12] FANO U.Pressure broadening as a prototype of relaxation[J]. Physical Review, 1963, 131(01): Phys Rev, 1949, 76(5):647-661.

[13] ROSENKRANZ P.Shape of the 5 mm oxygen band in the atmosphere[J].IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1975, 23(04):498-506.

[14] NIRO F, JUCKS K , HARTMANN J M .Spectra calculations in central and wing regions of CO_2 IR bands. IV: software and database for the computation of atmospheric spectra[J].Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2005, 95(04):469-481.

[15] ABRAROV S M, QUINE B M.Efficient algorithmic implementation of the Voigt/complex error function based on exponential series approximation - ScienceDirect[J].Applied Mathematics and Computation, 2011, 218(05):1894-1902.

[16] 周敏强,张兴赢,王普才,等.二氧化碳柱浓度的卫星反演试验及地基验证[J].SCIENTIA SINICA Terrae, 2015, 45(06):856-863.

The Impact of Line-mixing Effects on Satellite Retrieval of CO_2 Concentration in China

ZHANG Jinye[1,2], WU Xulong[1,2]

(1 *School of Science, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*;

2 *Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: In this paper, we used GOSAT satellite data to invert the CO_2 concentration in China's atmosphere, and studied the impact of the Line-mixing Effects on the inversion results. The Line-mixing Effect was calculated based on the CO_2 inversion model, and the spectral positions before and after the Line-mixing Effects were compared. The results show that at the three sites of Waliguan, Shangdianzi and Lulin, the inversion data are slightly lower than the ground data and slightly higher than the GOSAT product data and show a growth trend that is basically consistent with the ground data and GOSAT product data. Compared with GOSAT product data, the inversion CO_2 concentrations increased by 1.97×10^{-6}, 2.94×10^{-6}, 1.25×10^{-6} respectively, and the correlation coefficients were improved by 0.0025, 0.0417 and 0.0069 respectively.

Keywords: GOSAT; CO_2; Line-mixing Effects

[责任编校：闫　品]