

中国地区氧化亚氮浓度时空变化特征分析

马鹏飞^{1,2}, 熊效振³, 陈良富⁴, 陶明辉⁵, 陈 辉^{1,2}, 张玉环^{1,2}, 张丽娟^{1,2},
厉 青^{1,2}, 周春艳^{1,2}, 陈翠红^{1,2}, 张连华^{1,2}, 翁国庆^{1,2}, 王中挺^{1,2*}

1. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100029
2. 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101
3. NOAA Center for Satellite Applications and Research, College Park, MD 20740, USA
4. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101
5. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074

摘 要 氧化亚氮是一种重要的温室气体和臭氧损耗物。利用热红外反演大气温湿廓线, 由于大气氧化亚氮含量较少且变化幅度不大, 一般都当作常量处理。但是在反演氧化亚氮时, 由于大气温湿廓线和地表温度等参数相对氧化亚氮变化较大, 可能很小的扰动就会覆盖掉氧化亚氮的吸收信号。因此有必要在上千个通道中, 选取信噪比最高的通道, 反演分析氧化亚氮浓度的时空变化特征, 进而掌握我国氧化亚氮浓度的变化规律, 为研究我国氧化亚氮排放对气候变化的贡献, 制定合理的氧化亚氮减排政策等, 提供可靠数据支撑。采取一种优化后的最优敏感廓线通道选取法, 利用 AIRS 数据, 基于最优估计法反演氧化亚氮浓度, 与 TCOON 观测网中加拿大站点进行比对, 结果显示卫星遥感与地面观测结果一致性较好, 相关系数 r 为 0.73, 该算法可以推广到 IASI 和 CrIS 等热红外高光谱数据, 使对氧化亚氮的观测数据增加到 20 多年, 这种长时间序列的产品是对目前地面观测的有效补充。在氧化亚氮反演验证的基础上分析了我国氧化亚氮的年均值变化和月均值变化情况, 以及它的空间分布特征。时空变化结果显示, 我国氧化亚氮浓度在低纬度地区浓度相对较高, 每年在华南地区的夏季达到峰值, 月度间变化幅度较大, 相比于月度变化, 年度之间的变化幅度相对较小。监测结果同时显示, 印度、巴基斯坦等国在紧邻我国地区, 夏季氧化亚氮浓度较高, 因此我国氧化亚氮浓度的时空变化特征除本地排放贡献外, 也有一定的外部区域传输影响。

关键词 热红外数据; 氧化亚氮浓度; 时空分布特征

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)01-0020-05

引 言

国际社会专家学者越来越关注气候变化和臭氧损耗物^[1]。氧化亚氮(N_2O)在这两个问题中都扮演着重要的角色, 它是排在二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氟氯烃(CFC)之后的第四重要的温室气体, 具有长达 120 年的寿命, 其全球变暖潜能约为 CO_2 的 300 倍。由于 N_2O 是平流层一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO_2)的主要来源, 会催化臭氧破坏, 目前 N_2O 被公认为人类最重要的平流层臭氧消耗物质^[2]。开展气候变化和臭氧损耗物这两个方面的研究, 有必要对氧化亚氮浓度的分布特征进行监测。由于地面监测在地理空间上

覆盖有限, 且大气上层氧化亚氮的浓度变化相对较大, 因此卫星遥感是氧化亚氮浓度监测的重要手段。卫星遥感空间连续监测特征, 目前被用来监测多种大气成份, 包括气态污染物、温室气体、云和气溶胶等, 但由于氧化亚氮在空气中含量较少, 其吸收特征容易受到其他吸收干扰, 目前反演难度较大, 国内外研究较少。开展我国的氧化亚氮卫星遥感反演, 掌握氧化亚氮浓度时间和空间分布变化特征, 可为我国应对气候变化提供数据支撑。

目前通常使用两种技术来观测平流层氧化亚氮浓度, 一种使用太阳掩星观测, 另一种是临边观测。近些年, 利用热红外探测仪(thermal infrared sounder, TIR)可以提供对对流层中上层氧化亚氮浓度的分布情况。EOS/Aqua 上的大气红外

收稿日期: 2019-12-16, 修订日期: 2020-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501407, 41971324)资助

作者简介: 马鹏飞, 1984 年生, 生态环境部卫星环境应用中心高级工程师 e-mail: mpf136@163.com

* 通讯作者 e-mail: wzt_07@126.com

探测仪(the atmospheric infrared sounder, AIRS)是一种稳定的高光谱 TIR 探测仪,自 2002 年以来已进行了较长时间的观测,并已成功用于痕量气体反演,如 CO_2 , CH_4 和 CO 等,本工作基于高光谱卫星遥感数据,利用最优估计法,反演出我国氧化亚氮浓度的时间和空间变化情况,从而为我国应对气候变化提供数据支撑。

1 反演算法

1.1 算法描述

热红外氧化亚氮反演,受很多因素影响,如温湿廓线、地表温度、 CH_4 等^[3]。基于贝叶斯理论提出的最优估计法是求解这一类问题的通用方法,该方法的核心思想是,通过构建目标函数和选择寻优策略,在先验误差协方差矩阵和观测噪声协方差矩阵的限定下,以迭代的形式逐步逼近真值。

在之前研究的基础上^[5-6],基于 AIRS 数据^[4],通过计算不同通道的氧化亚氮权重函数,选取最佳信息层,假设其他

气体的吸收信息为“噪声”,氧化亚氮的吸收信息为“信号”,模拟比较不同气体的透过率和吸收强度变化,综合选取通道信噪比最高的,作为反演通道集,最终利用最优估计法开展氧化亚氮廓线反演,进一步计算柱浓度。其中,算法所需的大气廓线包括温度、湿度和臭氧,以及地面参数包括地表温度和发射率由 AIRS 二级产品种提取,辐射值采用经过晴空订正后的产品。

1.2 地面验证

选择德克萨斯州沿海海洋观测网(Texas Coastal Ocean Observation Network, TCOON)中加拿大站点 2010 年 7 月—9 月的有效观测值均值,同时选取对应的卫星遥感反演结果均值进行比对,选取原则为:(1)卫星过境时间地面观测时间间隔不超过 1 h;(2)卫星过境点与地面观测点距离在 1 度以内。

验证结果如图 1 所示,卫星遥感与地面观测结果一致性较好,相关系数 r 为 0.73,验证样本数为 7 月—9 月内的 23 个有效值。

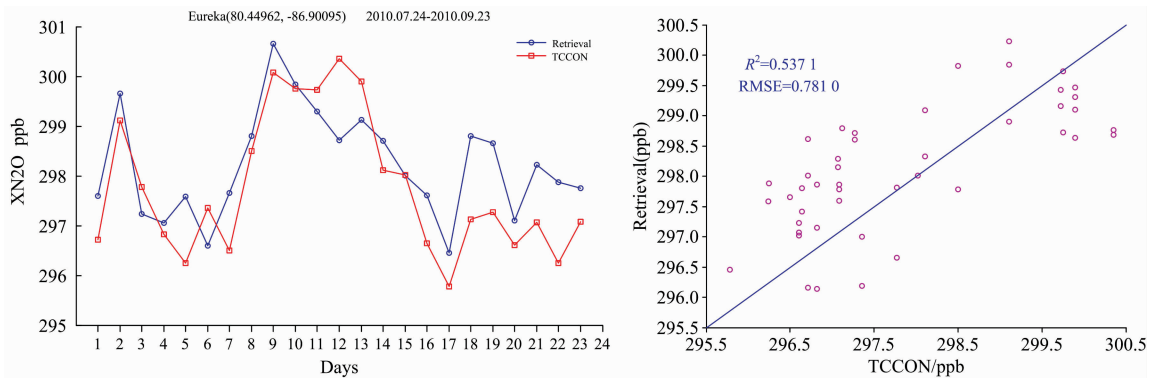


图 1 2010 年 7 月—9 月反演得到的 N_2O 柱浓度与 Eureka 站点观测结果对比

Fig. 1 Comparison of the results retrieved from the AIRS data and the Eureka observations for July to September 2010

2 中国及周边国家地区氧化亚氮浓度时空变化特征分析

2.1 月均值变化

在利用验证结果完善反演算法的基础上,开展了我国氧化亚氮浓度的时空变化反演分析。如图 2 所示为 2011 年我国氧化亚氮浓度的月均值分布图,时空分布显示,我国氧化亚氮浓度月度间变化比较明显,从 1 月份开始,氧化亚氮浓度逐月递增,8 月份最高,之后逐月递减。

如图 3、图 4 所示,在 2011 年和 2012 年夏季,我国及周边国家如印度、巴基斯坦、哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦等国,氧化亚氮浓度均为最高,在冬季降到最低。低纬度地区氧化亚氮会被布鲁尔-多普森环流,传输至平流层,从而向高纬度地区扩散、沉降。对于我国夏季氧化亚氮浓度高值区,除了本地农业等排放外,还会在一定程度上受到平流层的传输和沉降影响。

2.2 季均值变化

图 5 给出了 2011 年我国氧化亚氮浓度的季节均值变化

图,由图可以看出,氧化亚氮浓度在夏季(6 月—8 月)达到最高值,春、秋季次之,冬季最低。氧化亚氮的人为排放源主要来自于农业排放,其他一些较小的排放源来自工业、城市垃圾和化石燃料燃烧等。而我国为了用仅占全球 7% 的耕地,养活占全球 22% 的人口,近年来积极推进农业集约化规模化发展,这也导致了对氮肥的大量使用,增加了氧化亚氮的排放量。从反演结果来看,氧化亚氮的高值区分布和我国的农业集约化发展情况一致,尤其在西北地区、西南地区 and 南部地区,在夏季氧化亚氮浓度急剧升高。

2.3 年均值变化

图 6 结果所示,赤道地区氧化亚氮浓度年均值始终处于高值区。Prinn 将全球范围划分为四个纬度带,即北纬 90° —北纬 30° 、北纬 30° 到赤道、赤道到南纬 30° 、南纬 30° 到南纬 90° 共四个区域。通过分析四个区域内十年的氧化亚氮浓度数据,发现北纬 30° 到赤道这个区域内,氧化亚氮浓度最高。本文反演结果和该分析较为一致。由我国 2004 年、2006 年和 2011 年—2013 年,5 年的年均值分布结果显示,我国氧化亚氮浓度高值区主要集中于南部地区,浓度随纬度的升高而递减,均匀分布,年际之间浓度变化不大。

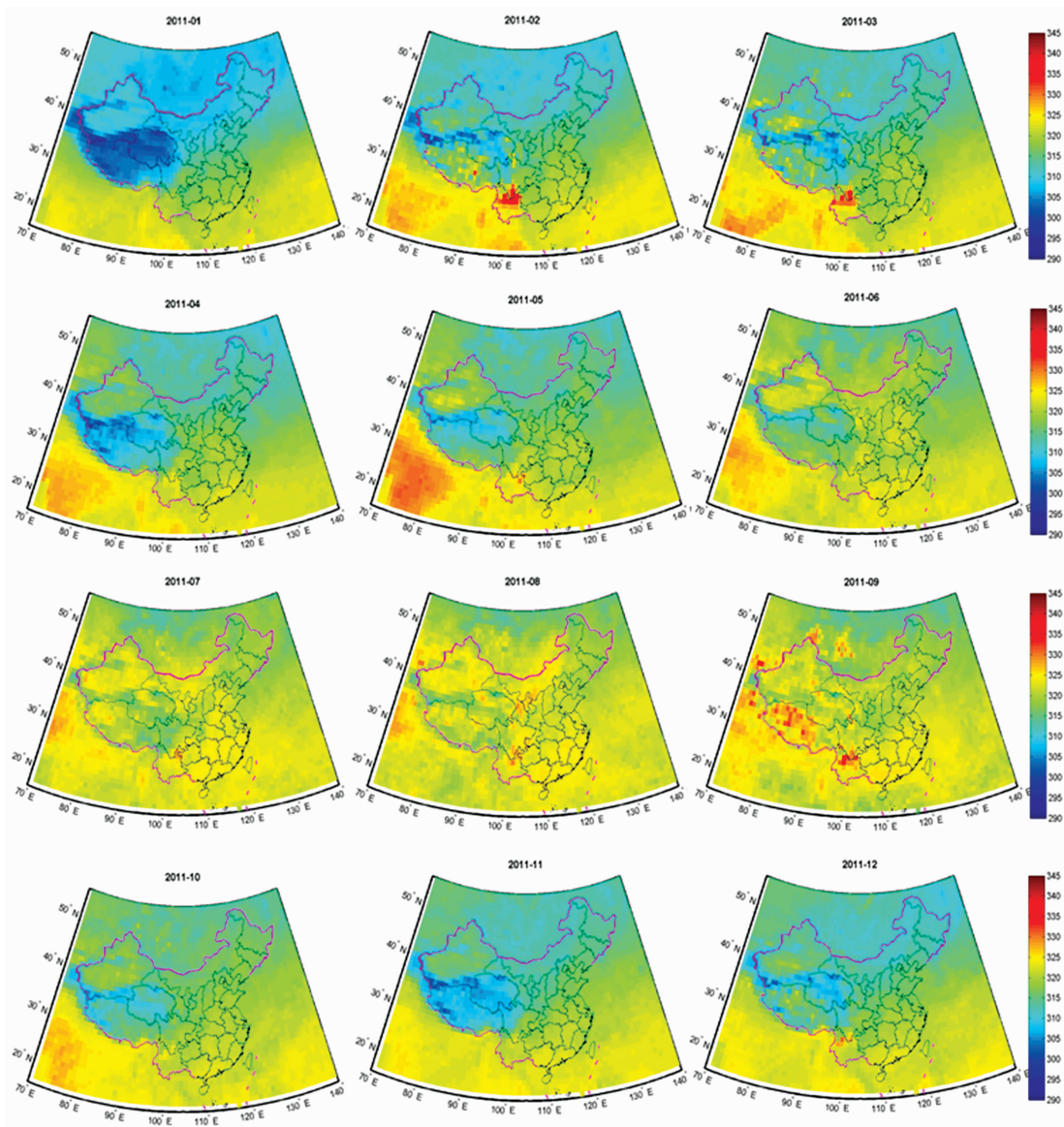


图 2 2011 年我国大气氧化亚氮的月均值变化

Fig. 2 Distribution of monthly mean nitrous oxide concentration in 2011

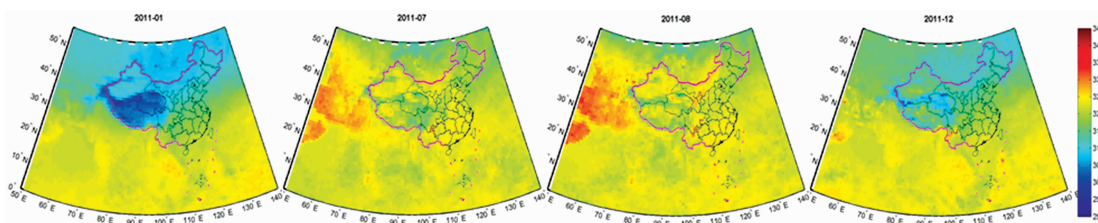


图 3 2011 年我国及周边国家的 N_2O 浓度月均值变化

Fig. 3 Distribution of monthly mean nitrous oxide concentration in China and surrounding countries (2011)

3 结 论

在前述氧化亚氮廓线反演研究的基础上,优化了高光谱

反演通道选取,在地面验证的基础上,完善反演算法,并给出了我国及周边国家氧化亚氮浓度的时空分布图,结合我国农业发展的实际情况,分析了我国氧化亚氮浓度的月度变化、季节变化和年际变化,得到我国氧化亚氮浓度的时空变

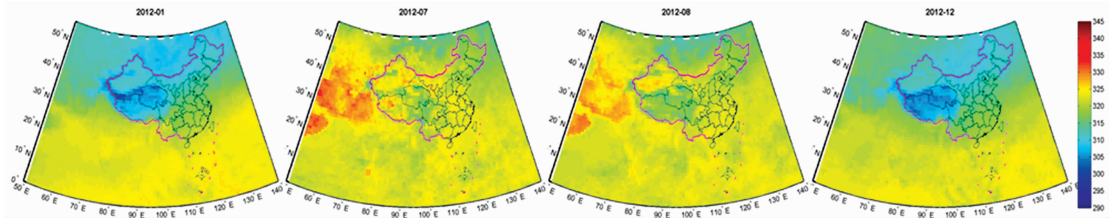


图 4 2012 年我国及周边国家的 N₂O 浓度月均值变化

Fig. 4 Distribution of monthly mean nitrous oxide concentration in China and surrounding countries(2012)

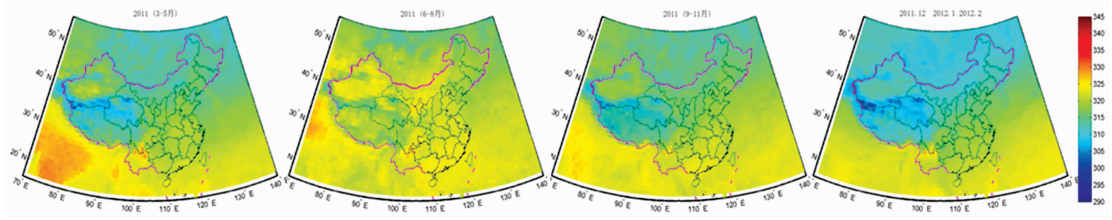


图 5 2011 年我国大气 N₂O 的季节变化

Fig. 5 Distribution of seasonal mean nitrous oxide concentration in China(2011)

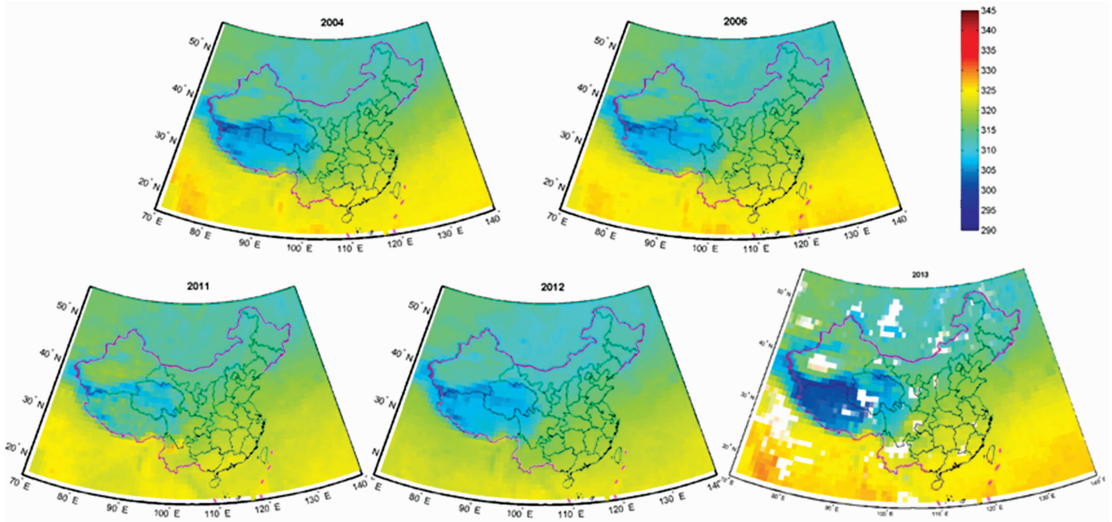


图 6 2004 年、2006 年、2011 年—2013 年我国大气 N₂O 浓度分布情况

Fig. 6 Distribution of nitrous oxide concentration in China from 2004, 2006, 2011 to 2013

化特征。在下一步研究中，将把算法推广到同类载荷跨轨红外探测仪(The Cross-Track Infrared Sounder, CrIS)和红外大气探测仪(The Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI)中，通过和 AIRS 数据的结合将使我们能够获得

20 多年的氧化亚氮观测数据，作为目前地面观测、航空观测和平流层卫星观测的补充数据，将有助于我们获得氧化亚氮的三维立体分布、变化趋势以及在大气中的传输等，为我国氧化亚氮减排政策提供科学依据。

References

[1] Prinn R, Cunnold D, Rasmussen R, et al. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012), 1990, 95(D11): 18369.
 [2] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Science, 2009, 326: 123.
 [3] Rodgers C D, Connor B J. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D3): 4116.
 [4] Susskind J, Barnet C, Blaisdell J. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2003, 41(2): 309.
 [5] Ma Pengfei, Chen Liangfu, Wang Zhongting, et al. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(7): 3985.
 [6] Xiong X, Maddy E S, Barnet C, et al. J. Geophys. Res., 2015, 119: 9107.

Temporal and Spatial Characteristics of Nitrous Oxide Concentration in China

MA Peng-fei^{1, 2}, XIONG Xiao-zhen³, CHEN Liang-fu⁴, TAO Ming-hui⁵, CHEN Hui^{1, 2}, ZHANG Yu-huan^{1, 2},
ZHANG Li-juan^{1, 2}, LI Qing^{1, 2}, ZHOU Chun-yan^{1, 2}, CHEN Cui-hong^{1, 2}, ZHANG Lian-hua^{1, 2},
WENG Guo-qing^{1, 2}, WANG Zhong-ting^{1, 2*}

1. Satellite Environment Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100101, China

3. NOAA Center for Satellite Applications and Research, College Park, MD 20740, USA

4. The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth (RADI), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

5. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract Retrieves nitrous oxide profiles from the thermal infrared satellite data, the results will be affected by the impact of atmospheric parameters such as atmospheric temperature and humidity profiles, as well as surface parameters such as surface temperature and surface emissivity and the like. N_2O own changes to a lesser extent, so when using the optimal estimation inversion, to get a priori profile and to select the inversion channel are the keys. Therefore, the inversion of nitrous oxide is rarely seen in China. Study and analyze the absorption characteristics of nitrous oxide and other interfering gases in the thermal infrared region for channel selection, based on this, to retrieve and analyze the temporal and spatial variation characteristics of nitrous oxide concentration is of great practical significance for the study of global climate change in China. In this paper, under the inversion framework of the optimal estimation method, an optimal sensitive profile channel selection method is used to retrieve the nitrous oxide concentration using the AIRS data. Compared with the Canadian station in the TCCON observation network, the results show that the retrieval results are in good agreement with the ground observations, and the correlation coefficient r is 0.73. This algorithm can be extended to the thermal infrared hyperspectral data such as IASI and CrIS, and increase the observation data of nitrous oxide to more than 20 years. This long-time series product is an effective supplement to the current ground observation. The annual and monthly mean changes of nitrous oxide and its spatial distribution characteristics in China are analyzed for the first time. The results show that the change of nitrous oxide concentration is obvious with time and latitude, among which the annual change of the nitrous oxide concentration is small, and the monthly and seasonal mean value changes greatly. From January of each year, the concentration of nitrous oxide increased month by month, reached the maximum in July and August, and then began to decline month by month. The seasonal variation was the highest in summer (June–August), spring and autumn are the second, while winter is the lowest. According to the annual average, the concentration of nitrous oxide in China changes obviously with latitude, and the higher the latitude is, the lower the concentration is. High-value regions are mainly concentrated in South China, especially in summer. The low-value regions are north China and southwest China. In the west of China, the concentration of nitrous oxide is higher in summer. In addition to local emissions, this seasonal or monthly mean change is also affected by air convection and transport.

Keywords Thermal infrared data; Nitrous oxide concentration; Temporal and spatial distribution characteristics

(Received Dec. 16, 2019; accepted Apr. 10, 2020)

* Corresponding author