

# 基于拉曼激光雷达的大气温度和水汽反演分析

谭敏<sup>1,2,3</sup>, 王邦新<sup>1,2,3\*</sup>, 庄鹏<sup>1,2,3</sup>, 张站业<sup>1,2,3</sup>, 李路<sup>1,2,3</sup>,  
储玉飞<sup>1,2,3</sup>, 谢晨波<sup>1,2</sup>, 王英俭<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽合肥 230031
2. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽合肥 230037
3. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽合肥 230026

**摘要** 为了同时测量大气温度, 水汽和大气气溶胶, 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学中心研制了一台多功能拉曼激光雷达。该激光雷达采用多腔干涉滤光片的高性能光谱盒, 同时按小角度入射顺序安装, 分离不同波长的激光雷达回波信号, 并能高效率地提取信号。利用该台拉曼激光雷达进行连续观测, 分析了大气温度、水汽混合比的垂直分布。研究结果表明: 探测时间为5分钟, 激光能量为200 mJ时, 激光雷达和无线电探空仪测得的平均偏差很小, 10 km以下的总体趋势相似, 同时观测到逆温层位于对流层低层。在干净天的条件下, 6.2 km高度下的夜间统计温度误差在1K以下; 在轻微雾霾天的条件下, 2.5 km高度下的夜间统计温度误差在1K以下。水汽探测过程中, 激光雷达在4 km以内的相对误差不超过5%, 7.5 km以内的相对误差不超过20%。连续观测结果验证了拉曼激光雷达的可靠性, 实现了对对流层大气参数的实时测量。

**关键词** 拉曼激光雷达; 大气温度; 水汽混合比

**中图分类号:** TN958.98 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)05-1397-05

## 引言

温度、水汽和气溶胶是三个重要的大气气象参数。对这些参数的持续观察对于提高我们对天气和气候变化的理解至关重要, 特别是对地球大气的辐射和热平衡以及大气化学的研究。同时准确观测这些气象参数的日变化对于了解和预测天气变化的环境评估具有指导作用<sup>[1]</sup>。云的形成和水文循环是理解水蒸气浓度和运动的必要条件。气溶胶粒子通过吸收和散射辐射可以对地球大气辐射系统的平衡产生重大影响<sup>[2-3]</sup>。人类活动会产生许多颗粒和二次气溶胶, 导致能见度明显降低和雾霾加重。最重要的是, 悬浮在空气中的小颗粒(PM<sub>2.5</sub>)将导致空气污染问题并影响人体健康<sup>[4]</sup>。

北京市政府出台了一系列临时性政策, 比如根据车牌号牌限制出行, 限制粉尘排放和禁止焚烧等产生污染物的行为。2014年亚太经济合作组织峰会(Asia-Pacific Economic Cooperation, APEC), 北京及其周边地区包括河北、天津、

山东和内蒙古采取了这些措施来保证空气质量。测量实验于2014年11月至2015年1月在北京市怀柔区雁栖湖(40.41°N, 116.68°E)中国科学院大学(UCAS)大气观测现场进行。观测试验可以帮助我们理解空气污染的演变, 并评估空气污染控制措施的影响<sup>[5-6]</sup>。

激光雷达已经广泛应用于大气气溶胶、大气温度和水汽的空间分布及时间演变特征测量<sup>[1,7-8]</sup>。2014年11月, 依据中国科学院重点部署项目“先导2014京津冀地区灰霾综合外场实验”任务需求, 中国科学院大气光学重点实验室利用自行研制的温度水汽、气溶胶拉曼激光雷达(temperature, water vapor and aerosols Raman lidar, TWAR<sup>[9]</sup>)对北京市的大气温度、水汽和气溶胶进行了探测。

## 1 TWAR 激光雷达

TWAR 激光雷达安装在移动式方舱内, 可以很方便地移动到不同观察点。图1是TWAR激光雷达的结构框图以

收稿日期: 2018-03-12, 修订日期: 2018-09-10

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA17040524), 民用航天技术预先研究项目(D040103), 中国科学院合肥物质科学研究院“十三五”规划重点支持项目(KP-2019-05)资助

作者简介: 谭敏, 1989年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室博士研究生

e-mail: thankm@mail.ustc.edu.cn \* 通讯联系人 e-mail: bxwang@aiofm.ac.cn

及实物图。

Nd:YAG 激光器的出射光频率为 1 064 nm(1 000 mJ), 经二倍频、三倍频产生 532 nm (500 mJ) 和 355 nm (200 mJ) 频率的激光。1 064 和 532 nm 出射光通过小窗口传输到大气中, 使用直径为 300 mm, 焦距为 4 m 的卡塞格林望远镜(图 1 中标记为 A)接收回波信号。在光学后继接收盒中, 1 064 nm 的弹性信号被 PMT6(Photomultiplier Tube, 光学倍增管)接收。532 nm 的信号通过偏振片分为平行和垂直信号分别被 PMT7 和 PMT8 接收。这些信号可以用于分析气溶胶和云层的分布特性。

355 nm 的激光通过扩束镜(可以使激光束的发散角缩小到 0.1 mrad, 这可以保护工作人员的眼睛, 同时也能减少背景噪声和能量密度)经过大窗口传输到大气中。回波信号被

直径为 450 mm, 焦距为 4 m 的卡塞格林望远镜(图 1 中标记为 B)接收。光学后继接收盒中, 入射光经过准直后被 BS1(Beam Splitter, 分束片)分开, 使得拉曼信号和弹性信号分开, 大于 370 nm 的波长被透过(透过率为 95%), 而小于 370 nm 的波长被反射(1%透过)。由 355 nm 激发的水汽和 N<sub>2</sub> 的振动-转动拉曼信号分别约为 407 和 386 nm, 它们被 BS2 分开, 分别聚焦在 PMT4 和 PMT5 上, 355 nm 的弹性信号聚焦于 PMT1 上, 低阶量子数转动拉曼信号聚焦于 PMT2 上, 高阶量子数转动拉曼信号聚焦于 PMT3 上。在整个接收光路中, 可以调节 IF1—IF3(Interference Filter, 干涉滤光片)的角度, 从而选择提取的转动拉曼信号的中心波长, 以确认最合适的干涉滤光片参数。

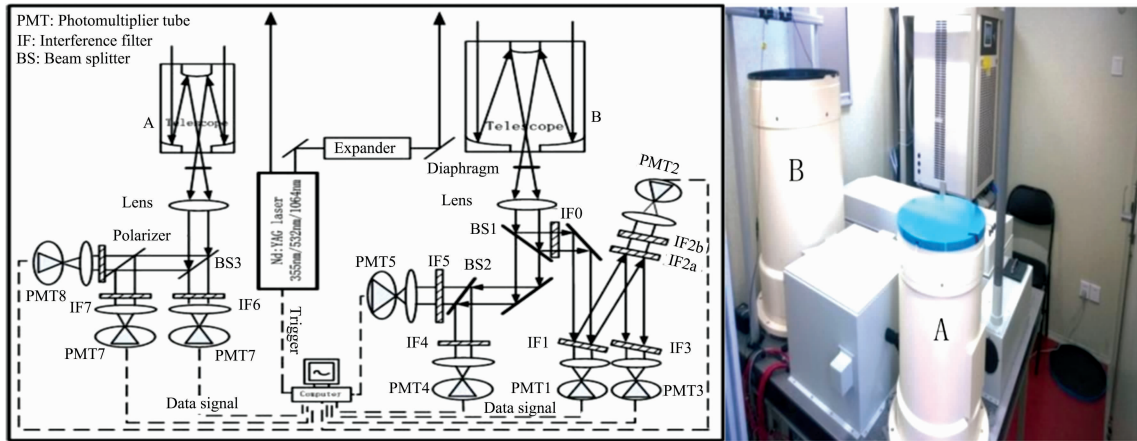


图 1 TWAR 激光雷达的结构图和照片

Fig. 1 Schematic diagram and photograph of the developed TWAR lidar

## 2 探测原理

由于转动拉曼光谱的强度分布包含关于大气温度的信息, 因此可以根据 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的纯转动拉曼散射谱线强度与大气温度的依赖关系反演大气温度的分布。为了计算大气温度的分布, 表达见式(1)和式(2)<sup>[9]</sup>

$$Q(T, z) = \frac{S_{j_{\text{low}}}(T, z)}{S_{j_{\text{high}}}(T, z)} \approx \exp\left(-\left(\frac{A}{T^2(z)} + \frac{B}{T(z)} + C\right)\right) \quad (1)$$

$$T(z) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC - 4A \ln Q}}{2(C + \ln Q)} \quad (2)$$

式中,  $Q(T, z)$  是低阶转动量子数谱线强度与高阶转动量子数谱线强度之比;  $S_{j_{\text{low}}}(T, z)$  和  $S_{j_{\text{high}}}(T, z)$  分别为低阶转动量子数和高阶转动量子数拉曼通道所对应的大气回波信号。A, B 和 C 是可以通过拟合确定的校准系数;  $z$  是高度。

高度  $z$  处的水汽混合比可以用式(3)表示<sup>[10]</sup>

$$WVMR(z) = C_w \frac{P_{wv}(z)}{P_{RR}(z)} T_r(z) \quad (3)$$

式(3)中,  $C_w$  是标定常数;  $P_{wv}(z)$  和  $P_{RR}(z)$  分别是水汽通道和氮气通道的回波信号;  $T_r(z)$  是大气透过率校正项, 它是

散射体和激光雷达之间的大气在氮气分子拉曼散射波长和水汽分子拉曼散射波长上的透过率比值。

## 3 结果与讨论

### 3.1 温度探测

观测实验是在 2014 年 11 月 1 日至 2015 年 1 月 31 日进行的, TWAR 激光雷达放置于北京市怀柔区中国科学院大学雁栖湖校区(40.41°N, 116.68°E), 激光雷达每隔 15 min 探测一次, 每次探测 4 分钟(激光器发射 5 000 个激光脉冲, 脉冲频率为 20 Hz)。图 2 显示了激光雷达和无线电探空仪的温度分布图以及统计温度不确定性分布图。统计温度不确定性可以按照式(4)计算

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial Q} \Delta Q \approx \frac{T_1 - T_2}{Q_1 - Q_2} Q \sqrt{\frac{P_{RR1} + P_{B1}}{P_{RR1}^2} + \frac{P_{RR2} + P_{B2}}{P_{RR2}^2}} \quad (4)$$

式(4)中,  $P_{RR1}$  和  $P_{RR2}$  分别为低阶量子数转动拉曼通道和高阶量子数转动拉曼通道去除噪声后的纯转动拉曼大气回波信号;  $P_{B1}$  和  $P_{B2}$  分别是两个通道的噪声信号;  $Q$  为两信号的比值。

在处理激光雷达信号时, 首先要对数据进行降噪处理,

本文选择三角滤波法, 3 km 以下的平滑窗口选择 120 m, 3 km 以上的平滑窗口选择 600 m。由图 2 可知, TWAR 激光雷达探测的温度和无线电探空仪探测的温度在 10 km 高度以内仍具有相同的趋势, 吻合的很好, 同时大气温度随着高度升高而降低, 下降速率约为  $6 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ 。然而 500 m 以下的激光雷达探测的温度不是那么的准确, 这主要是因为近地面几何因子的影响。

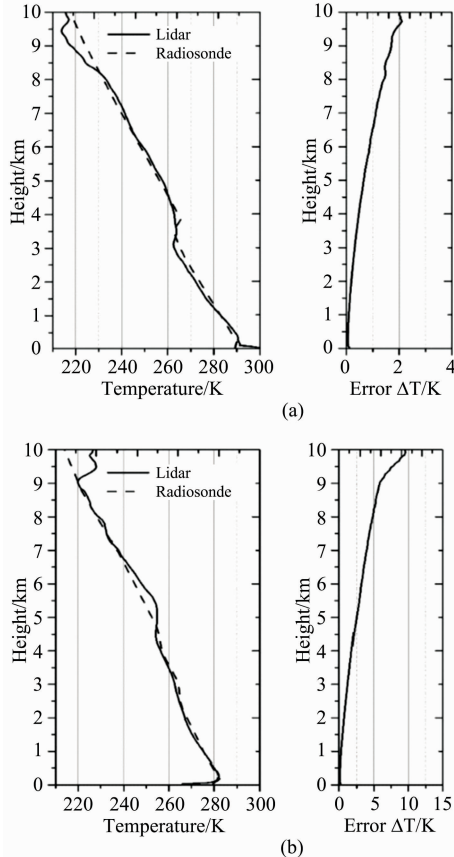


图 2 (a)2014 年 11 月 8 日和 (b)2014 年 11 月 13 日在雁栖湖测得的激光雷达和无线电探空仪的温度曲线

误差曲线显示了统计温度的不确定性

Fig. 2 Lidar and radiosonde temperature profiles measured at Yanqi Lake (40. 41°N, 116. 68°E) on (a) 8 November 2014 and (b) 13 November 2014

Error profiles show the statistical temperature uncertainty

标定系数  $a, b, c$  可以通过反演公式拟合得出

$$Q(T) = \exp(a/T^2 + b/T + c) \quad (5)$$

本文反演的标定系数为  $a = 1.35 \times 10^5$ ,  $b = -4.7 \times 10^3$ ,  $c = 24.71$ 。图 2(a) 为 2014 年 11 月 8 日晚上 20:30 的温度廓线, 该天为干净天; 图 2(b) 为 2014 年 11 月 13 日晚上 20:30 的温度廓线, 该天为轻微雾霾天。在干净天的情况下, 激光雷达与无线电探空仪在 10 km 以下的温度廓线吻合的很好, 6.2 km 以下的统计误差小于 1 K, 然而在轻微雾霾天的情况下, 统计误差小于 1 K 的高度仅为 2.5 km。此外由于 9 km 左右有云的出现, 导致转动拉曼通道探测到了强烈的米散射信号, 因此在云层上方有较大的统计不确定性, 但是同时可

以观察到云层下方的激光雷达和无线电探空仪探测的温度吻合的很好, 且 6 km 以下的统计误差不超过 3 K。

图 3 显示了 2014 年 11 月 8 日 20:00 至 22:00 间的连续温度廓线, 虽然由于数据统计的不确定性带来温度数据的波动, 但是仍然可以通过 TWAR 激光雷达观察到温度的连续变化过程。激光雷达调整为每隔五分钟工作一次, 每次发射 2 000 个激光脉冲。为了更好地观察到温度的时空变化, 连续的温度廓线依次平移 13 K。从图中可以看出 2 h 内的温度变化比较稳定, 2~3 km 的温度缓慢增加, 这很可能是因为人类活动以及太阳辐射的挥发, 导致近地面热空气上移引起的。

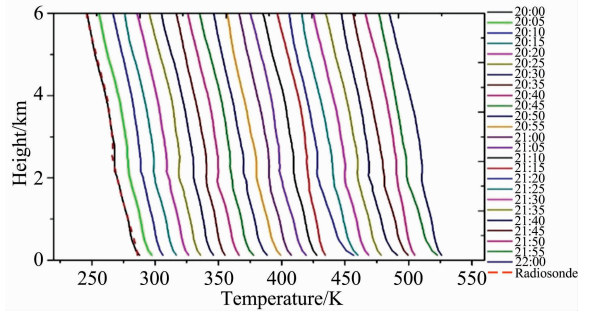


图 3 TWAR 激光雷达探测的连续温度廓线

Fig. 3 Consecutive temperature profiles measured with TWAR lidar

### 3.2 水汽混合比探测

图 4 为 2014 年 7 月 28 日激光雷达和无线电探空仪探测的水汽混合比, 本次观测地点位于中国科学院合肥物质研究院大气光学中心, 观测时间为 19:30—20:00, 在观测地同时释放探空气球进行对比验证。图 4(a) 显示了无云条件下, 10 km 以内的激光雷达和无线电探空仪探测的水汽混合比。图 4(b) 和 (c) 分别为激光雷达探测的水汽与无线电探空仪探测的水汽之间的误差和相对误差。由观测结果可知, 4 km 以

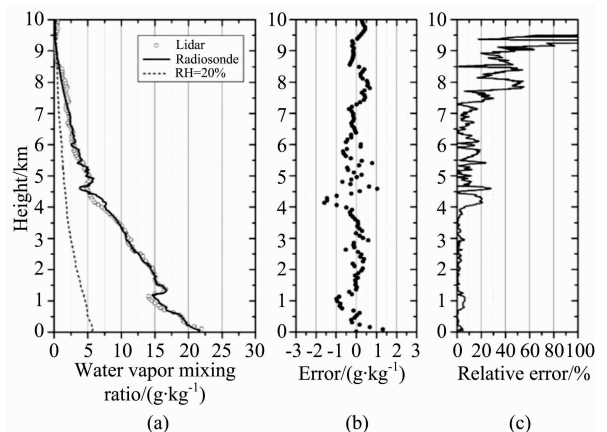


图 4 (a)激光雷达探测的水汽(黑色圆圈)与探空气球探测的水汽(黑色曲线); (b)误差; (c)相对误差

Fig. 4 (a) Profiles of water-vapor mixing ratio, measured with lidar (circles) and radiosondes launched at night (black curves) on 28 July 2014; (b) Difference between lidar and local radiosonde measurements; (c) Relative error profile

内的相对误差不超过 5%，7.5 km 以内的相对误差不超过 20%。同时由于几何因子的影响，400 m 以内的误差较大。

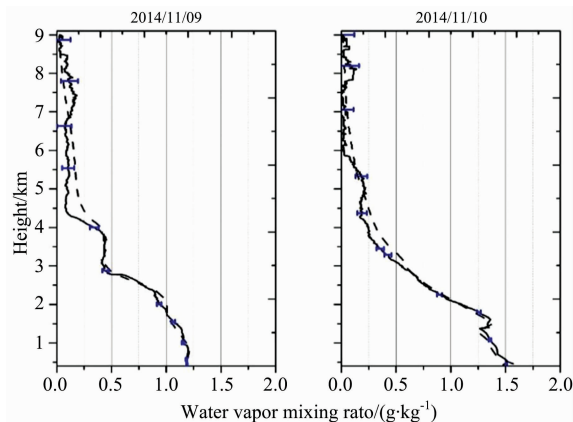


图 5 2014 年 11 月 9 日和 10 日用激光雷达(黑色曲线)和无线电探空仪(黑色虚线)探测的水汽混合比

Fig. 5 Profiles of water-vapor mixing ratio, measured with lidar (black curves) and radiosonde (black dashes) for 9 and 10 November 2014

图 5 为 2014 年 11 月 9 日和 10 日激光雷达和无线电探空仪探测的水汽混合比,观测地点为北京怀柔区中国科学院大学雁栖湖校区(40.41°N, 116.68°E)。对比可知,激光雷达和无线电探空仪的观测数据吻合的比较好,但是并不如合肥的数据,这主要是因为北京无线电探空仪释放位置距离观测点约 15 km。另外,我们也可以发现北京的冬季非常干燥,水汽混合比一般低于  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

## 4 结 论

利用 TWAR 激光雷达在北京怀柔进行了连续观测,结论如下:

(1) TWAR 激光雷达探测到的大气温度和水汽与无线电探空仪探测的数据吻合的非常好。

(2) 干净天的情况下, TWAR 激光雷达探测的 6.2 km 以内的夜间统计温度误差小于 1 K; 轻微雾霾天的情况下, TWAR 激光雷达 2.5 km 以内的夜间统计温度误差小于 1 K。

(3) 水汽探测过程中, TWAR 激光雷达在 4 km 以内的相对误差不超过 5%, 7.5 km 以内的相对误差不超过 20%。

## References

- [ 1 ] Behrendt A, Nakamura T, Onishi M, et al. *Applied Optics*, 2002, 41(36): 7657.
- [ 2 ] Bardouki H, Liakakou H, Economou C, et al. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(2): 195.
- [ 3 ] Ramanathan V, Feng Y. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1): 37.
- [ 4 ] Oberdorster G. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2001, 74(1): 1.
- [ 5 ] Chen Z, Zhang J, Zhang T, et al. *SCIENCE CHINA Chemistry*, 2015, 58(9): 1385.
- [ 6 ] Wang Z, Li J, Wang Z, et al. *SCIENCE CHINA Earth Sciences*, 2014, 57(1): 3.
- [ 7 ] Radlach M, Behrendt A, Wulfmeyer V. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(2): 159.
- [ 8 ] Hammann E, Behrendt A, Mounier F Le, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(5): 2867.
- [ 9 ] LIU Yu-li, XIE Chen-bo, SHANG Zhen, et al(刘玉丽, 谢晨波, 尚震, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2016, 36(6): 1978.
- [10] Whiteman D N, Melfi S H, Ferrare R A. *Applied Optics*, 1992, 31(16): 3068.

## Study on Atmospheric Temperature and Water-Vapor Mixing Ratio Based on Raman Lidar

TAN Min<sup>1,2,3</sup>, WANG Bang-xin<sup>1,2,3\*</sup>, ZHUANG Peng<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Zhan-ye<sup>1,2,3</sup>, LI Lu<sup>1,2,3</sup>, CHU Yu-fei<sup>1,2,3</sup>, XIE Chen-bo<sup>1,2</sup>, WANG Ying-jian<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

2. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China

3. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

**Abstract** Raman lidar has been designed by the Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, which measures atmospheric temperature, water vapor, and aerosol simultaneously. A high-performance spectroscopic box that utilizes multicavity interference filters, mounted sequentially at small angles of incidence, is used to separate the lidar return signals at different wavelengths, and to extract the signals with high efficiency. The external experiments are carried out for simultaneous detection of atmospheric temperature, water vapor, under clear and hazy weather conditions. The vertical profiles of temperature, water vapor are analyzed. The results show that for an integration time of 5 min and laser energy of 200 mJ, the

mean deviation between measurements obtained by lidar and radiosonde is small, and the overall trend is similar. The temperature inversion layer is found in the low troposphere. The statistical temperature error for nighttime is below 1 K up to a height of 6.2 km under clear weather conditions, and up to a height of 2.5 km under slightly hazy weather conditions, with 5 min of observation time. Moreover, the relative error in water vapor detection process mostly does not exceed 5% up to 4 km, and is well below 20% up to 7.5 km. Continuous observations verify the reliability of Raman lidar to achieve real-time measurement of atmospheric parameters in the troposphere.

**Keywords** Raman lidar; Temperature; Water vapor

\* Corresponding author

(Received Mar. 12, 2018; accepted Sep. 10, 2018)

(上接 1392 页)

#### 4.2 会议注册系统

请登陆光谱网会议主页: <http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/index.php?mid=24>

注册并提交您的参会信息, 包括个人信息、报告题目、墙报题目、住房预定等信息。

#### 4.3 会议住宿

会议酒店:

##### 1. 世外桃源酒店

地址: 四川省成都市武侯区科华北路 69 号

酒店房间价格: 标间 620 元/间天; 大床房 560 元/间天

##### 2. 科华苑宾馆

地址: 四川省成都市武侯区科华北路 141 号

酒店房间价格: 标间 360 元/间天; 大床房 470 元/间天

由于会议期间住宿相对紧张, 涉及到房间预定、会议安排等因素, 务请各位专家、同学在截止日期前注册, 只有在收到注册费后, 才会进行会议相关安排, 务请体谅与协助。

#### 五、会议组织机构

大会组委会人员组成请见如下链接: [http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/extend.php?mid=24&body\\_id=12](http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/extend.php?mid=24&body_id=12)

学术委员会人员组成见如下链接: [http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/extend.php?mid=24&body\\_id=13](http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/extend.php?mid=24&body_id=13)

有关会议的邀请报告、住房信息、交通路线、稿件编号等信息敬请登录会议主页查询。

#### 六、组委会和会务组联系方式

组委会:

吴兰: 13688385033 Email: wulan@scu.edu.cn

会务组:

注册&住宿: 张亮 15902844473 Email: zhang.liang@scu.edu.cn

报告&论文: 李成辉 18980877825 Email: atcpubs@scu.edu.cn

厂商联络: 王香凤 13520034335 Email: xiangfeng@bnu.edu.cn

#### 七、支持媒体

会议官网: 光谱网(<http://www.sinospectroscopy.org.cn>)

会议各类信息发布以光谱网信息为准。

#### 主办单位:

中国光学学会

中国化学会

中国光学学会光谱专业委员会

#### 承办单位:

四川大学分析测试中心

中国光学学会光谱专业委员会

四川大学分析测试中心

2019 年 11 月 18 日