

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.010

Raman-Mie 激光雷达探测西安地区夏季气溶胶光学特性

宋跃辉, 鲁雷雷, 王玉峰, 李仕春, 辛文辉, 闫庆, 刘晶晶, 华灯鑫

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 采用 Raman-Mie 激光雷达探测了西安地区夏季气溶胶的光学特性, 分析了消光系数、后向散射系数和雷达比在不同天气条件下的变化规律。实验结果表明, 强降雨后, 气溶胶消光系数在 2~5 km 范围内递减, 并在 5 km 以上趋于稳定; 相对于降雨前, 降雨后低层气溶胶消光系数明显增大, 而 3 km 以上高度范围内雷达比减小。这可能是由雨后气溶胶沉降、底层水汽密度增加所引起的。统计结果表明, 晴天无云时, 2~3 km 范围内气溶胶的消光系数和雷达比均比较稳定, 消光系数在 $0.2 \sim 0.3 \text{ km}^{-1}$ 之间, 雷达比的平均值约为 50 sr; 3~5 km 范围内消光系数和雷达比均随高度递减; 5~8 km 范围内, 消光系数和雷达比逐渐趋于稳定, 消光系数和雷达比的平均值分别约为 0.05 km^{-1} 和 20 sr, 表明此范围内仍有微量的气溶胶粒子存在。实验期间, 水云的雷达比约为 17 sr。

关键词: 气溶胶; Raman-Mie 激光雷达; 消光系数; 雷达比

中图分类号: TN958.98; P407.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2016)03-0309-05

Optical properties of aerosols detected by Raman-Mie lidar at Xi'an in summer

SONG Yuehui, LU Leilei, WANG Yufeng, LI Shichun, XIN Wenhui,

YAN Qing, LIU Jingjing, HUA Dengxin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The optical properties of aerosols at Xi'an in summer are detected by Raman-Mie lidar, with the spatial-temporal changes of extinction coefficient, backscatter coefficient and lidar ratio under different weather conditions analyzed. Experimental results show that after rainfall the extinction coefficient of aerosols decreases with altitude between 2 km and 5 km, and that when the altitude is greater than 5 km, the extinction coefficient tends to be stable. After rainfall, the extinction coefficient of aerosols at low level is larger than that before rainfall, and the lidar ratio of aerosols above 3 km is smaller than that before rainfall. The possible reasons for the phenomenon are the aerosols deposition and the increase of water vapor density at low level caused by rainfall. Statistical results show that, in sunny and cloud-free days, between 2 km and 3 km, the extinction coefficient and the lidar ratio are all relatively stable, with the extinction coefficient between 0.2 km^{-1} and 0.3 km^{-1} , and the average value of lidar ratio about 50 sr. Between 3 km and 5 km, the extinction coefficient and the lidar ratio decrease with the increasing altitude. Between 5 km and 8 km, the extinction coefficient and the lidar ratio tend to be stable, and the average value of extinction coefficient and lidar ratio are about 0.05 km^{-1} and 20 sr respectively. So there are still traces of aerosol particles within this range. Finally, the lidar ratio of water cloud is about 17 sr during the experiment.

Key words: aerosol; Raman-Mie lidar; extinction coefficient; lidar ratio

收稿日期: 2016-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61405158, 61308105, 61308106)

作者简介: 宋跃辉, 男, 博士, 讲师, 研究方向为偏振激光雷达。E-mail: songyuehui@xaut.edu.cn

通讯作者: 华灯鑫, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为激光雷达遥感探测技术及光电检测技术。E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

气溶胶是全球气候变化研究中最大的不确定因子,同时近地表气溶胶直接危害人类健康,因此已成为大气科学和环境监测等领域的研究热点^[1]。激光雷达探测范围广,空间分辨率高,实时性好,在气溶胶探测研究中发挥着不可或缺的作用^[2]。

Mie 散射激光雷达和 Raman-Mie 激光雷达都可用于探测气溶胶的空间分布。Mie 散射激光雷达反演气溶胶消光系数时,需要根据天气条件设定雷达比,不利于消光系数的精细反演。而 Raman-Mie 激光雷达不仅能接收 Mie 散射回波信号,还能够接收氮气分子的 Raman 散射回波信号,可直接反演消光系数、后向散射系数和雷达比,在气溶胶光学特性精细反演方面具有一定的优势。

目前,Raman-Mie 激光雷达已广泛应用于大气气溶胶的探测研究中。在国外,2007 年 D. Muller 等人总结了欧洲、亚洲 Raman 激光雷达探测的雷达比,为 CALIPSO 数据反演提供了合理的雷达比设定值^[3]。2010 年,Sungchul Choi 等同时采用转动 Raman 激光雷达回波信号和振动 Raman 激光雷达回波信号反演了气溶胶雷达比,进行了对照研究,并反演了波长指数^[4]。2013 年,Jia Su 结合 Raman-Mie 散射激光雷达和多波长激光雷达,提出了一种多波长激光雷达比的数据反演方法^[5]。在国内,2010 年伯广宇等人采用 Raman-Mie 激光雷达,探测了边界层内气溶胶在 532 nm 波长的消光系数、后向散射系数和雷达比,实验结果表明雷达比分布在 43~72 sr 之间,总平均值为 57.9 sr^[6]。2015 年,西安理工大学激光雷达遥测研究中心利用自主研发的多通道高光谱分辨率 Raman 激光雷达,在晴天和有云条件下对西安局部地区进行了实验观测,获得了温湿度及气溶胶廓线^[7]。

西安是西北地区的经济文化中心,人口密集,工业废气和汽车尾气排放量大,且近年来雾霾天气频发,严重影响人们的生产生活,因此深入研究西安地区气溶胶的光学特性和动态变化规律具有重要的研究意义。鉴于此,在 2014 年夏季,利用西安理工大学自主研发的 Raman-Mie 激光雷达对西安局部地

区气溶胶进行了连续观测,反演了不同天气条件下的消光系数、后向散射系数和雷达比,统计并分析了不同天气条件下气溶胶光学特性的变化规律,对西安地区气象研究和环境保护工作具有重要意义。

1 Raman-Mie 激光雷达探测原理

Raman-Mie 激光雷达方程如式(1)、(2)所示。

$$P(\lambda_R, z) = C_R \frac{Y(z)}{z^2} N_{N_2}(z) \sigma_{N_2} \cdot \exp \left\{ - \int_0^z \left\{ [\alpha_m(\lambda_L, z) + \alpha_m(\lambda_R, z)] + [\alpha_a(\lambda_L, z) + \alpha_a(\lambda_R, z)] \right\} dz \right\} \quad (1)$$

$$P(\lambda_L, z) = C_M \frac{Y(z)}{z^2} [\beta_m(\lambda_L, z) + \beta_a(\lambda_L, z)] \cdot \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha_m(\lambda_L, z) + \alpha_a(\lambda_L, z)] dz \right\} \quad (2)$$

式(1)中 $P(\lambda_R, z)$ 为激光雷达接收到的 Raman 散射回波信号, λ_L 为激光波长, λ_R 为氮气分子的 Raman 散射波长, C_R 为 Raman 散射通道的激光雷达系统常数, $Y(z)$ 为几何重叠因子, $N_{N_2}(z)$ 为氮气分子数密度, σ_{N_2} 为氮气分子后向散射截面, $\alpha_m(\lambda_L, z)$ 和 $\alpha_m(\lambda_R, z)$ 分别为大气分子在波长 λ_L 、 λ_R 的消光系数, $\alpha_a(\lambda_L, z)$ 和 $\alpha_a(\lambda_R, z)$ 分别为大气气溶胶在波长 λ_L 、 λ_R 的消光系数。式(2)中, $P(\lambda_L, z)$ 为 Mie 散射回波信号, C_M 为 Mie 散射通道的激光雷达系统常数, $\beta_a(\lambda_L, z)$ 和 $\beta_m(\lambda_L, z)$ 分别为大气气溶胶和大气分子在波长 λ_L 的后向散射系数。

1.1 消光系数

求解式(1)可得气溶胶消光系数为:

$$\alpha_a(\lambda_L, z) = \frac{\frac{d}{dz} \left[\ln \frac{N_{N_2}(z)}{P(z, \lambda_R) z^2} \right] - \alpha_m(\lambda_R, z) - \alpha_m(\lambda_L, z)}{1 + \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_R} \right)^k} \quad (3)$$

式中, k 是大气气溶胶的 Angstrom 指数, 对流层大气气溶胶的 k 值通常假设为 1。

在设定雷达比的情况下,消光系数也可采用 Fernald 法对式(2)进行求解获得。

$$\alpha_a(z) = - \frac{s_a}{s_m} \alpha_m(z) + \frac{S(z) \cdot \exp \left[2 \left(\frac{s_a}{s_m} - 1 \right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz' \right]}{\frac{S(z_c)}{\alpha_a(z_c) + \frac{s_a}{s_m} \alpha_m(z_c)} + 2 \int_z^{z_c} S(z') \exp \left[2 \left(\frac{s_a}{s_m} - 1 \right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z'') dz'' \right] dz'} \quad (4)$$

式中, $S(z)$ 为 Mie 散射通道的距离平方校正信号。 s_a 为气溶胶雷达比,其取值由气溶胶粒子特性决定,大气分子的雷达比 s_m 可设定为 $8\pi/3$ 。大气分子的

消光系数可以利用美国标准大气模型计算获得, z_c 为参考高度,一般选取不含气溶胶粒子大气层的所在高度为参考高度。

1.2 后向散射系数

结合式(1)和式(2),可得到气溶胶后向散射系数为:

$$\beta_a(\lambda_L, z) = -\beta_m(\lambda_L, z) + [\beta_a(\lambda_L, z_c) + \beta_m(\lambda_L, z_c)] \times \frac{P(\lambda_R, z_c) P_L(\lambda_L, z) N_{N_2}(z)}{P(\lambda_L, z_c) P_R(\lambda_R, z) N_{N_2}(z_c)} \times \frac{\exp\left\{-\int_{z_c}^z [\alpha_a(\lambda_R, z') + \alpha_m(\lambda_R, z')] dz'\right\}}{\exp\left\{-\int_{z_c}^z [\alpha_a(\lambda_L, z') + \alpha_m(\lambda_L, z')] dz'\right\}} \quad (5)$$

式中, $\beta_a(\lambda_L, z)$ 和 $\beta_m(\lambda_L, z)$ 分别为 z 处气溶胶和大气分子在波长 λ_L 的后向散射系数。

1.3 雷达比

利用反演的消光系数和后向散射系数即可计算气溶胶雷达比。

$$S(z) = \frac{\alpha_a(\lambda_L, z)}{\beta_a(\lambda_L, z)} \quad (6)$$

2 实验及数据反演

2014年7月,采用 Raman-Mie 激光雷达进行了连续实验观测。该系统激光器发射波长为 355 nm,单脉冲能量为 150 mJ,重复频率为 20 Hz,脉宽为 10 ns,望远镜有效接收直径为 250 mm,详细结构及参数见参考文献[7]。

利用 Mie 散射通道(355 nm)回波信号和 Raman 散射通道(387 nm)回波信号反演了气溶胶光

学特性,单次观测实验的累积脉冲数目 2 000 个。

为保证信噪比,观测实验在夜间进行。为消除几何盲区的影响,主要分析了 2~8 km 高度范围内气溶胶的光学特性。

2.1 强降雨前后气溶胶的光学特性

西安地区夏季高温湿热,阵雨、暴雨等强降雨天气频发。2014年7月23日西安地区阵雨,7月22日和7月24日均为多云天气。为研究降雨前后西安地区气溶胶光学特性的变化规律,反演了7月22日和7月24日的观测数据,如图1所示。其中,采用 Fernald 法反演时,设定雷达比为 50 sr^[8-9]。由图1可知,Fernald 法和 Raman-Mie 法反演的消光系数整体变化趋势基本一致,这也验证了反演结果的有效性。然而,设定雷达比会对 Fernald 法的反演结果产生不利影响,导致其与 Raman-Mie 法的反演结果在局部存在一定差异。因此,以下主要针对 Raman-Mie 法的反演结果进行分析。

由图1可看出,7月22日气溶胶消光系数和雷达比在 2~3.5 km 均比较稳定,消光系数最大值达到 0.28 km⁻¹,雷达比在 40~61 sr 之间。二者在 3.5~4.3 km 范围内随高度逐渐减小,并于 4.3 km 之后趋于稳定,稳定后的平均值分别约为 0.06 km⁻¹和 16 sr,表明 4.3~8 km 范围内仍存在一定含量的气溶胶粒子。

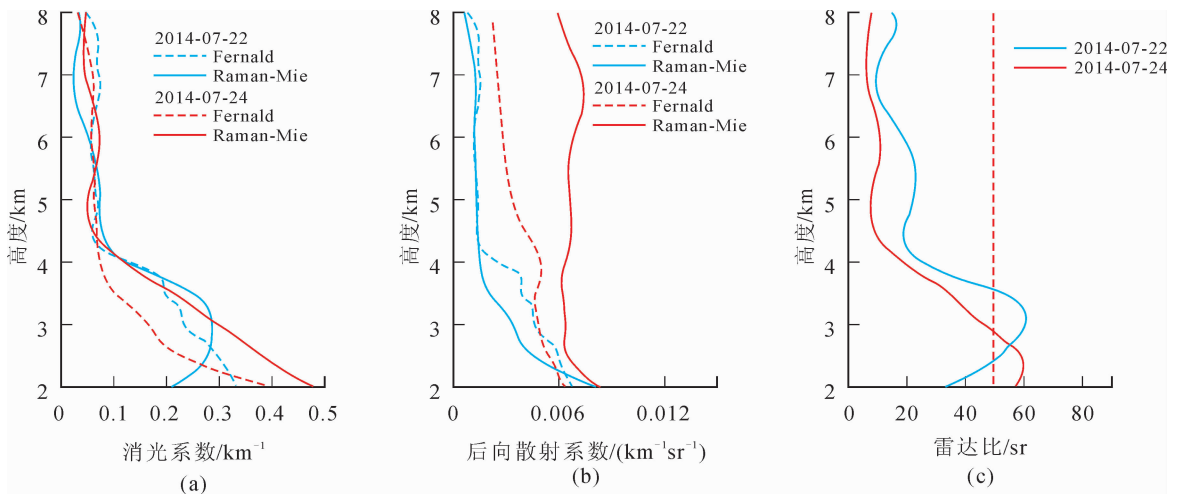


图1 强降雨前后西安地区气溶胶的光学特性

Fig. 1 Optical properties of aerosol at Xi'an before and after strong rainfall

强降雨后(7月24日)气溶胶消光系数在 2~5 km 范围内递减,并于 5 km 后趋于稳定。相对于降雨前,降雨后低层气溶胶消光系数明显增大,而 3 km 以上雷达比减小。消光系数和雷达比在 5 km 以上趋于稳定,平均值分别约为 0.04 km⁻¹和 10 sr,雷达比接近于大气分子的雷达比(8 π /3),这表明

降雨后 5~8 km 范围内基本不含气溶胶粒子。这可能是由降雨后气溶胶沉降、底层水汽密度增加所引起的。

2.2 晴天无云时气溶胶的光学特性

工业废气、地面扬尘、汽车尾气等是城市气溶胶的主要来源,与人类的生产生活息息相关。为研究

西安地区夏季城市气溶胶的统计规律,分别反演了晴天无云时气溶胶的消光系数、后向散射系数、雷达比及其多日均值,结果如图2所示。

由晴天无云时气溶胶光学特性的多日均值可知,2~3 km 高度范围内气溶胶消光系数较大,消光系数均值约为 0.27 km^{-1} ,气溶胶雷达比在 40~60 sr 之间,均值约为 50 sr。该范围内气溶胶消光系数和雷达比均比较稳定,这表明 2~3 km 为气溶胶的

均匀分布区域。3~5 km 高度范围内,消光系数和雷达比都随高度递减,表明在此高度范围内气溶胶含量逐渐减小。5~8 km 范围内,消光系数和雷达比相对稳定,消光系数约为 0.06 km^{-1} ,雷达比为 20 sr,这表明此范围内气溶胶的含量基本稳定。同时,由于 5~8 km 范围内的消光系数和雷达比都高于大气模型,说明在此天气条件下,人类生产生活对城市高空气溶胶分布会造成一定的影响。

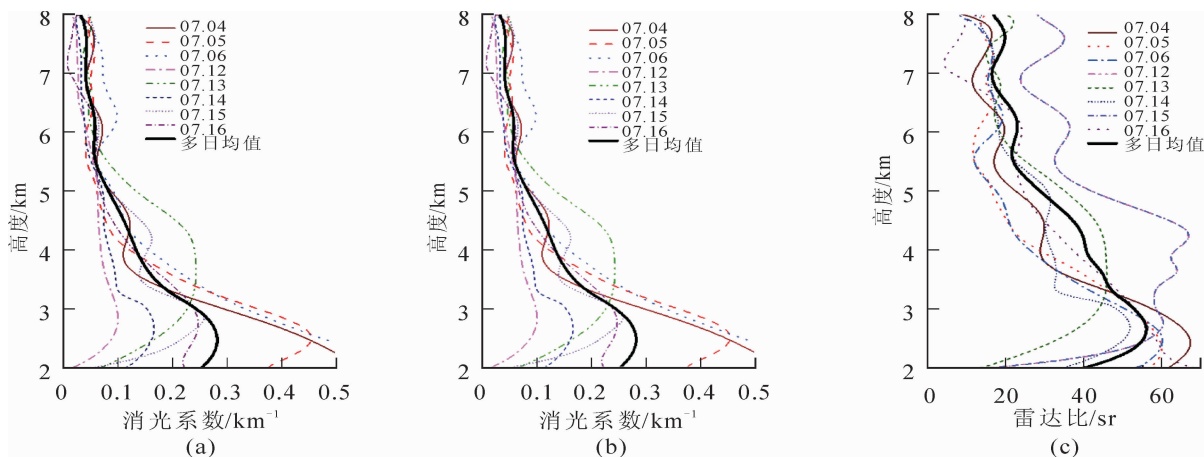


图2 夏季晴天无云时西安地区气溶胶光学特性

Fig. 2 Optical properties of aerosols at Xi'an when it is sunny and cloud-free in summer

2.3 水云的光学特性

云是影响天气变化的重要因素,研究云的光学特性对天气预报、人工降雨等均具有十分重要的意义。2014年7月3日西安局部地区阵雨,夜间开展了观测实验,图3为夜间20时20分至20时55分Mie散射通道距离平方校正信号的时空演化图。由图3可知,20时20分开始观测到4~5 km处有云层出现,云层厚度约为300 m。

明,水云在 355 nm 处雷达比约为 $19 \text{ sr}^{[10]}$,因此可判定该云层为水云。

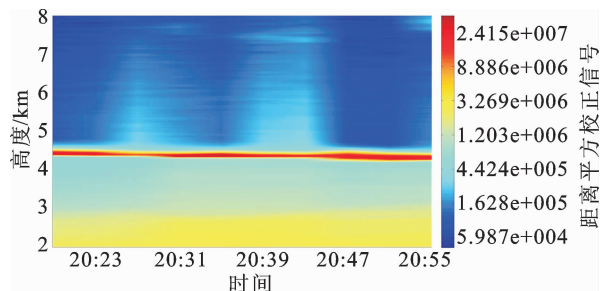


图3 2014年7月3日 Mie 散射通道距离平方校正信号时空演化图

Fig. 3 Range corrected signal of Mie channel on July 3, 2014

为分析该云层的光学特性,对20时27分的观测数据进行了反演,如图4所示。受云层影响,消光系数和后向散射系数在4 km 高度处骤然增加,最大值分别达到了 0.9 km^{-1} 、 $0.06 \text{ km}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 。此外,云层高度处的雷达比约为 17 sr。已有研究结果表

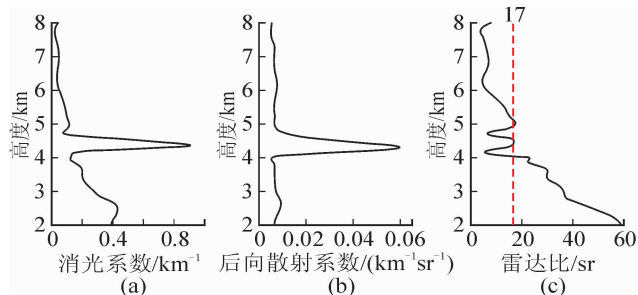


图4 2014年7月3日20时27分西安地区气溶胶光学特性
Fig. 4 Optical properties of aerosol at 20:27 on July 3 in Xi'an, 2014

3 结语

采用 Raman-Mie 激光雷达于2014年7月对西安地区城市气溶胶进行了连续观测,分析了强降雨前后、晴天无云以及水云等不同天气条件下气溶胶的消光系数、后向散射系数和雷达比。实验结果表明,强降雨后,气溶胶消光系数在 2~5 km 内呈递减趋势,于 5 km 后趋于稳定;相对于降雨前,降雨后低层气溶胶消光系数明显增大,而 3 km 以上雷达比减小。统计结果表明,晴天无云时,2~3 km 为气溶胶分布较为均匀的区域,3~5 km 为气溶胶分

布递减区域,5~8 km 为气溶胶微量分布区域。实验期间,水云的雷达比在 17 sr 左右。研究结果对西安地区气象研究和环境保护具有重要的研究意义。

参考文献:

- [1] 张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J]. 地球科学进展, 2007, 22(1): 12-16.
ZHANG Xiaoye. Aerosol over china and their climate effect[J]. Advances in Earth Sciences, 2007, 22(1): 12-16.
- [2] 华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增刊 3): 21-27.
HUA Dengxin, SONG Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 21-27.
- [3] MÜLLER D, ANSMANN A, MATTIS I, et al. Aerosol-type-dependent lidar ratios observed with Raman lidar[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112(D16): 4288-4298.
- [4] CHOI S C, BAIK S H, PARK S K, et al. The measurement of the LIDAR ratio by using the rotational Raman LIDAR[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2010, 14(3): 174-177.
- [5] SU Jia, LIU Zhaoyan, WU Yonghua, et al. Retrieval of multi-wavelength aerosol lidar ratio profiles using Raman scattering and Mie backscattering signals[J]. Atmospheric Environment, 2013, 79: 36-40.
- [6] 伯广宇, 谢晨波, 刘东, 等. 拉曼激光雷达探测合肥地区夏秋季边界层气溶胶的光学性质[J]. 中国激光,

2010, 37(10): 2526-2532.

BO Guangyu, XIE Chenbo, LIU Dong, et al. Optical properties of aerosol in planetary boundary layer measured by Raman lidar at Hefei in summer and autumn[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(10): 2526-2532.

- [7] 王玉峰, 高飞, 朱承炫, 等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的拉曼激光雷达系统[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 370-379.

WANG Yufeng, GAO Fei, ZHU Chengxuan, et al. Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 370-379.

- [8] 赵一鸣, 潘超, 王丽东, 等. 激光雷达探测河北望都气溶胶[J]. 遥测遥控, 2015, 36(4): 64-70.

ZHAO Yiming, PAN Chao, WANG Lidong, et al. Aerosol monitoring by lidar at Wangdu, Hebei[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(4): 64-70.

- [9] 刘巧君, 郑玉臣, 朱建华, 等. 利用紫外 Mie 散射激光雷达探测澳门地区沙尘暴事件[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(3): 625-629.

LIU Qiaojun, ZHENG Yuchen, ZHU Jianhua, et al. Ultraviolet Mie lidar observations of aerosol extinction in a dust storm case over Macao[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(3): 625-629.

- [10] HU Yongxiang. Depolarization ratio-effective lidar ratio relation: theoretical basis for space lidar cloud phase discrimination [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(11): 224-238.

(责任编辑 王卫勋,王绪迪)

(上接第 264 页)

- [10] MICKOVSKI S B, ENNOSL A R. Model and whole plantstudies on the anchorage capabilities of bulbs[J]. Plant and Soil, 2003, 255(2): 641-652.
- [11] 胡建林, 张培文. 扩体型锚杆的研制及其抗拔试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1615-1619.
HU Jianlin, ZHANG Peiwen. Development of underreamed anchor and experimental study of uplift resistance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1615-1619.

- [12] 彭文祥, 曹佳文. 充气锚杆的研究现状及展望[J]. 科技导报, 2010, 28(5): 111-115.

PENG Wenxiang, CAO Jiawen. A view of studies on inflatable anchor[J]. Science and Technology Review, 2010, 28(5): 111-115.

- [13] 中冶集团建筑研究总院. 岩土锚杆(索)技术规程: CECS22—2005[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

(责任编辑 周 蓓)