



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114324206 B

(45) 授权公告日 2024.01.16

(21) 申请号 202111557166.X  
 (22) 申请日 2021.12.18  
 (65) 同一申请的已公布的文献号  
 申请公布号 CN 114324206 A  
 (43) 申请公布日 2022.04.12  
 (73) 专利权人 复旦大学  
 地址 200433 上海市杨浦区邯郸路220号  
 (72) 发明人 王珊珊 周斌 张三保  
 (74) 专利代理机构 上海正旦专利代理有限公司  
 31200  
 专利代理师 陆飞 陆尤  
 (51) Int. Cl.  
 G01N 21/31 (2006.01)  
 G06F 18/24 (2023.01)

US 2017299686 A1, 2017.10.19  
 US 2021033589 A1, 2021.02.04  
 CN 108872093 A, 2018.11.23  
 CN 110687020 A, 2020.01.14  
 KR 20170116805 A, 2017.10.20  
 JP 2017090054 A, 2017.05.25  
 US 2018088204 A1, 2018.03.29  
 US 2015342005 A1, 2015.11.26  
 CN 111707622 A, 2020.09.25  
 CN 108956491 A, 2018.12.07  
 CN 113552080 A, 2021.10.26  
 T.Wagner et al..Cloud detection and classification based on MAX-DOAS observations.《Atmospheric Measurement Techniques》.2014, (第7期), 正文第1-5节. (续)  
 审查员 王姝月

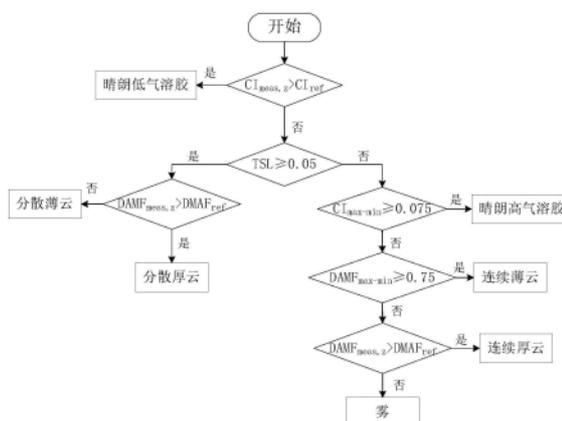
(56) 对比文件  
 CN 102735632 A, 2012.10.17  
 CN 108918436 A, 2018.11.30  
 KR 20130081842 A, 2013.07.18  
 KR 20200004680 A, 2020.01.14  
 RU 2649094 C1, 2018.03.29

权利要求书2页 说明书3页 附图2页

(54) 发明名称  
 基于被动多轴差分吸收光谱技术的天空条件分类方法

(57) 摘要  
 本发明属于光学测量技术领域,具体为一种基于被动多轴差分吸收光谱技术的天空条件分类方法。包括:利用被动MAX-DOAS观测技术提取天空条件识别因子,包括颜色指数和氧气二聚体大气质量因子;结合观测数据与模式模拟确定天空条件的识别阈值;利用已定的阈值对7种天空条件进行识别。流程为根据天顶方向的颜色指数阈值识别出晴朗天气下的低气溶胶荷载类型;再通过颜色指数的平滑度的阈值判断分出两支:通过天顶方向O<sub>4</sub> DAMF区分出分散厚云和分散薄云;通过颜色指数散度识别出晴朗高气溶胶,再通过DAMF散度识别出分散薄云,最后根据天顶方

向的O<sub>4</sub>DAMF区分出连续厚云和雾。本发明实现了天空条件的识别及对观测数据的去云处理。



CN 114324206 B

[接上页]

**(56) 对比文件**

Jianzhong Ma et al..MAX-DOAS measurements of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HCHO, and BrO at the Mt. Waliguan WMO GAW global baseline station in the Tibetan Plateau.《Atmospheric Measurement Techniques》.2020, (第20期),正文第1-7节.

ThomasWagner et al..Absolute calibration of the colour index and O<sub>4</sub> absorption derived from Multi AXis (MAX-)

DOAS measurements and their application to a standardised cloud classification algorithm.《Atmospheric Measurement Techniques》.2016, (第9期),正文第1-6节.

牟福生 等.基于MAX-DOAS的对流层NO<sub>2</sub>和气溶胶光学厚度遥测反演.《大气与环境光学学报》.2015,第10卷(第03期),全文.

王杨 等.利用O<sub>4</sub>测量去除NO<sub>2</sub>柱浓度直射太阳光差分吸收光谱探测中云的影响.《光学学报》.2012,第12卷(第09期),全文.

1. 一种基于被动多轴差分吸收光谱技术的天空条件分类方法,其特征在于,基于如下原理:位于紫外和可见光波段的两个波长附近的光信号强度之比能够反映不同的太阳散射类型;散射的路径长短可以通过氧气二聚体 $O_4$ 的吸收来表征;具体步骤为:

(1) 首先,针对同一测量循环,从MAX-DOAS设备采集到的光谱中提取出天顶方向和各个离轴角度的颜色指数CI,通过光谱分析进而反演出 $O_4$ 差分斜柱浓度DSCD,并转换成所需要的 $O_4$ 大气质量因子DAMF来表征 $O_4$ 的吸收,最后计算出五种天空识别因子:

天顶方向的CI和DAMF,记为 $CI_{meas,z}$ 、 $DAMF_{meas,z}$ ;

$CI_{meas,z}$ 的平滑度,记为TSL,定义为 $CI_{meas,z}$ 时间序列进行2小时局部加权平滑后获得的 $CI_{smooth,z}$ 与实际值 $CI_{meas,z}$ 差值的绝对值,即 $TSL = |CI_{meas,z} - CI_{smooth,z}|$ ;

CI和DAMF的散度,记为 $CI_{max-min}$ 、 $DAMF_{max-min}$ ,定义为该循环内各角度CI和DAMF数值的最大值与最小值之差;

(2) 然后,利用辐射传输模式和实测气溶胶光学厚度AOD确定识别因子 $CI_{meas,z}$ 、 $DAMF_{meas,z}$ 的阈值 $CI_{ref}$ 和 $DAMF_{ref}$ ;以0.05为TSL的阈值;以0.075为 $CI_{max-min}$ 的阈值;以0.75为 $DAMF_{max-min}$ 的阈值;

(3) 最后,根据已确定的识别阈值区分出7种天空条件类型:晴朗低气溶胶、晴朗高气溶胶、分散薄云、分散厚云、连续薄云、连续厚云以及雾;

步骤(1)中提取天空识别因子,具体步骤为:首先提取实测光谱的340 nm和400 nm处的光信号强度之比作为CI;将采集到的太阳光谱,使用固定参考光谱的形式进行光谱分析,反演出各个仰角的 $O_4$ DSCD,除以当地的 $O_4$ 柱浓度VCD获得的 $O_4$ DAMF;

步骤(2)中确定识别因子阈值,具体步骤为:

$CI_{ref}$ 的确定:由于 $CI_{meas,z}$ 会随能见度下降而下降,因此 $CI_{ref}$ 的确定可以用于区分晴朗低气溶胶和其他天空条件类型; $CI_{ref}$ 的确定的流程为:根据气溶胶光学厚度为 $0.2 \pm 0.05$ 时的实测天顶方向的颜色指数与模拟值之间的比值,求出校正因子CF;辐射传输模式模拟AOD为0.75时的 $CI_{modeled,z}$ ;基于CF进行修正获得 $CI_{corrected,z}$ ,以此作为 $CI_{ref}$ ;

$DAMF_{ref}$ 的确定:考虑到天顶方向的 $DAMF_{meas,z}$ 在厚云情况下会远高于其他天空类型,并通过辐射传输模式模拟在不同高度的厚云和低气溶胶AOD=0.2时的 $DAMF_{modeled,z}$ ,发现基本厚云情形的结果下高于低气溶胶情形的2倍,所以确定AOD = 0.2时 $DAMF_{meas,z}$ 的2倍值作为其阈值;

TSL的阈值的确定: $CI_z$ 的平滑度TSL可以表征天空条件的变化情况,当有剧烈变化说明存在散云,根据 $CI_{meas,z}$ 频率分布情况,以频率最高的10% 即0.05为TSL阈值;

$CI_{max-min}$ 的阈值的确定:当有云存在时,CI散度明显下降,根据无云和云类型下的CI散度统计结果,设置其阈值为0.075;

$DAMF_{max-min}$ 的阈值的确定:DAMF散度在厚云或雾的情况才会明显下降,同样根据薄云、雾、厚云的DAMF散度统计结果,设置其阈值为0.75;

步骤(3)中所述根据已确定的识别阈值区分出7种天空条件类型,具体步骤为:

首先,进入判断 $CI_{meas,z}$ 与 $CI_{ref}$ 的大小,若实测 $CI_{meas,z}$ 大于 $CI_{ref}$ 则确定为晴朗低气溶胶,反之则进入下一步判断;

若TSL大于等于0.05,则进入分散云的判断,接着进入判断 $DAMF_{meas,z}$ 是否大于 $DAMF_{ref}$ ,是则识别为分散厚云,反之识别为分散薄云;

若TSL小于0.05,则进入判断 $CI_{\max-\min}$ 是否大于0.075,是则识别为晴朗高气溶胶,反之接着判断 $DAMF_{\max-\min}$ 是否大于0.75;是则判断为连续薄云,反之进入判断 $DAMF_{\text{meas},z}$ 是否大于 $DAMF_{\text{ref}}$ ;是则为连续厚云,反之为雾。

## 基于被动多轴差分吸收光谱技术的天空条件分类方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于光学测量技术领域,具体地涉及被动遥感观测数据的去云处理以及数据校准。

### 背景技术

[0002] 无云晴朗天气是多轴差分吸收光谱技术(MAX-DOAS)反演气溶胶和痕量气体廓线的最理想条件,而在多云天空下的大气光路复杂,特别是存在快速变化的云的情况下,廓线反演质量会有所降低。原则上,在辐射传输模拟中考虑云信息也是可以去除云的影响,但是在普通的观测实验中,关于云属性的必要信息是比较缺乏的。因此,对每一次测量的云和气溶胶进行识别和分类对于测量结果的质控是很重要的。常见云信息的获取是通过视觉检查或相机图像等其他来源,仍然是需要通过一定的图像识别方法来进行并且缺乏一定的准确性,但是通过MAX-DOAS观测的颜色指数(CI)和氧气二聚体( $O_4$ )大气质量因子(DAMF)对不同天空条件显著的反馈差异,从物理意义的角度识别天空条件,其精度相对于其他方法更高。

### 发明内容

[0003] 为了去除MAX-DOAS观测数据受云的影响,本发明提供一种快速、简便、精确的基于被动多轴差分吸收光谱技术(MAX-DOAS)的天空条件分类方法。

[0004] 本发明提供的基于被动多轴差分吸收光谱技术的天空条件分类方法,其基本原理是,位于紫外和可见光波段的两个波长附近的光通量之比能够反映不同的太阳散射类型;散射的路径长短可以通过氧气二聚体( $O_4$ )的吸收来表征;具体步骤为:

[0005] (1)首先,针对同一测量循环,从MAX-DOAS设备采集到的光谱中提取出各个角度的颜色指数(CI),通过光谱分析软件进而反演出 $O_4$ 差分斜柱浓度(DSCD),并转换成所需要的 $O_4$ 大气质量因子(DAMF),最后计算出五种识别因子:天顶方向的CI和DAMF( $CI_{meas,z}$ ,  $DAMF_{meas,z}$ )、 $CI_{meas,z}$ 的平滑度(TSL)、CI和DAMF的散度( $CI_{max-min}$ ,  $DAMF_{max-min}$ );其中,TSL定义为颜色指数时间序列进行2小时局部加权平滑后获得的 $CI_{smooth,z}$ 与实际值 $CI_{meas,z}$ 差值的绝对值,即 $TSL = |CI_{meas,z} - CI_{smooth,z}|$ ;CI和DAMF的散度,记为 $CI_{max-min}$ 、 $DAMF_{max-min}$ ,定义为该循环内各角度CI和DAMF数值的最大值与最小值之差;

[0006] (2)然后,利用辐射传输模式和实测气溶胶光学厚度(AOD)确定识别因子 $CI_z$ 、 $DAMF_z$ 的阈值 $CI_{ref}$ 和 $DAMF_{ref}$ ;以0.05为TSL的阈值;以0.075为 $CI_{max-min}$ 的阈值;以0.75为 $DAMF_{max-min}$ 的阈值。

[0007] (3)最后,根据已确定的识别阈值区分出7种天空条件类型:晴朗低气溶胶、晴朗高气溶胶、分散薄云、分散厚云、连续薄云、连续厚云以及雾。

[0008] 本发明步骤(1)中,所述提取天空识别因子,具体步骤为:

[0009] 首先提取实测光谱的340 nm和400 nm处的光信号强度之比作为CI;将采集到的太阳光谱,使用固定参考光谱的形式进行光谱分析,反演出各个仰角的 $O_4$  DSCD,除以当地的 $O_4$ 柱浓度(VCD)获得的 $O_4$  DAMF。这里以上海地区为例, $O_4$  VCD =  $1.32 \times 10^{43}$  molecule<sup>2</sup>.cm<sup>-5</sup>。

[0010] 本发明步骤(2)中,所述确定天空条件识别因子阈值,具体步骤为:

[0011]  $CI_{ref}$ 的确定:由于 $CI_{meas,z}$ 会随能见度下降而下降,因此 $CI_{ref}$ 的确定可以用于区分晴朗低气溶胶和其他天空条件类型; $CI_{ref}$ 的确定的流程为:根据气溶胶光学厚度为 $0.2 \pm 0.05$ 时的实测天顶方向的颜色指数与模拟值之间的比值,求出校正因子(CF);辐射传输模式模拟AOD为0.75时的 $CI_{modeled,z}$ ;基于CF进行修正获得 $CI_{corrected,z}$ ,以此作为 $CI_{ref}$ ;

[0012]  $DAMF_{ref}$ 的确定:考虑到天顶方向的 $DAMF_{meas,z}$ 在厚云情况下会远高于其他天空类型,并通过辐射传输模式模拟在不同高度的厚云和低气溶胶(AOD=0.2)时的 $DAMF_{modeled,z}$ ,发现基本厚云情形的结果下高于低气溶胶情形的2倍,所以确定 $DAMF_{meas,z}$ (AOD = 0.2)的2倍值作为其阈值;

[0013] TSL阈值的确定: $CI_z$ 的平滑度TSL可以表征天空条件的变化情况,当有剧烈变化说明存在散云,根据 $CI_{meas,z}$ 频率分布情况,以频率最高的10% 即0.05为TSL阈值;

[0014]  $CI_{max-min}$ 的阈值的确定:当有云存在时, $CI$ 散度明显下降,根据无云和云类型下的 $CI$ 散度统计结果,设置其阈值为0.075;

[0015]  $DAMF_{max-min}$ 的阈值的确定: $DAMF$ 散度在厚云或雾的情况才会明显下降,同样根据薄云、雾、厚云的 $DAMF$ 散度统计结果,设置其阈值为0.75。

[0016] 以上阈值的确定经过了足够的数据结果验证,可以适用于任何MAX-DOAS仪器。

[0017] 本发明步骤(3)中所述根据已确定的识别阈值区分出7种天空条件类型,具体步骤为:

[0018] 首先,进入判断 $CI_{meas,z}$ 与 $CI_{ref}$ 的大小,若实测 $CI_{meas,z}$ 大于 $CI_{ref}$ 则确定为晴朗低气溶胶,反之则进入下一步判断;

[0019] 若TSL大于等于0.05,则进入分散云的判断,接着进入判断 $DAMF_{meas,z}$ 是否大于 $DAMF_{ref}$ ,是则识别为分散厚云,反之识别为分散薄云;

[0020] 若TSL小于0.05,则进入判断 $CI_{max-min}$ 是否大于0.075,是则识别为晴朗高气溶胶,反之接着判断 $DAMF_{max-min}$ 是否大于0.75;是则判断为连续薄云,反之进入判断 $DAMF_{meas,z}$ 是否大于 $DAMF_{ref}$ ;是则为连续厚云,反之则为雾。

[0021] 本发明方法能够准确有效地识别出7种天空条件类型,可以很好地被运用到MAX-DOAS观测数据的去云处理中,并合理地控制数据质量。

## 附图说明

[0022] 图1是天空识别因子提取流程图。

[0023] 图2是典型天空条件下的观测视场照片、气溶胶光学厚度、颜色指数以及 $O_4$ 吸收的日变化情况。

[0024] 图3是实施案例提供的一种基于MAX-DOAS观测的天空条件分类方法流程图。

## 具体实施方式

[0025] 下面结合附图及上海市青浦区实施案例,对本发明的具体实施方式进行详细描述。需要注意,此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明,但本发明不限于该案例。

[0026] (1)天空条件识别因子提取流程如图1所示。MAX-DOAS采集太阳光谱,计算340 nm和400 nm处的光强信号之比作为 $CI$ 。通过光谱分析软件,获取各仰角的 $CI$ 和 $O_4$ DSCD,除以当

地的 $O_4$ 柱浓度VCD获得的 $O_4$  DAMF,这里以上海地区为例, $O_4$  VCD为 $1.32 \times 10^{43}$  molecules $^2$ .cm $^{-5}$ 。其中, $O_4$  DSCD的反演方法为:将各个仰角下的测量光谱除以固定的一条参考光谱,得到差分光学厚度;卷积高分辨率太阳光谱获取Ring光谱,将卷积好的标准痕量气体吸收截面( $O_4$ , BrO,  $SO_2$ ,  $NO_2$ , HCHO)和Ring光谱一起在338-370 nm波段范围内与去除慢变化后实测光谱进行拟合,最后得到 $O_4$  DSCD。

[0027] (2) 典型天空条件下的观测视场照片、气溶胶光学厚度、颜色指数以及 $O_4$ 吸收的日变化情况如图2所示,可以看出在晴朗高气溶胶情况下,CI在高仰角会相对偏低,在低仰角相差不大;而 $O_4$  DAMF却在低仰角会相对偏低,在高仰角反而有微小的偏高。在有云或雾出现的情况下,各个仰角的CI都有所降低,高仰角下降不明显,且在各个仰角差异不大。当有分散云出现时,各个仰角CI会有剧烈变化, $O_4$  DAMF变化较小。薄云与雾、厚云类型下的区别在于DAMF散度不一样,薄云的DAMF散度会高于雾和厚云的天空类型。而对于雾和厚云的天空类型的区分,可以发现由于厚云中光的多次散射作用,厚云中所天顶方向的 $O_4$  DAMF会远高于雾和晴朗低气溶胶天空条件。为了识别这些天空条件类型,确定5种识别因子:天顶方向的CI和DAMF( $CI_{meas,z}$ ,  $DAMF_{meas,z}$ )、 $CI_{meas,z}$ 的平滑度(TSL)、CI和DAMF的散度( $CI_{max-min}$ ,  $DAMF_{max-min}$ )。对应的阈值确定流程为如下:

[0028] 根据气溶胶光学厚度为 $0.2 \pm 0.05$ 时的实测天顶方向的颜色指数与模拟值之间的比值,求出校正因子(CF);辐射传输模式模拟AOD为0.75时的 $CI_{modeled,z}$ ;基于CF进行修正获得 $CI_{corrected,z}$ ,以此作为 $CI_{ref}$ 。以 $DAMF_{meas,z}$  (AOD = 0.2)的2倍值作为其阈值。根据 $CI_{meas,z}$ 频率分布情况,以频率最高的10%(约0.05)为TSL阈值。根据无云和云类型下的CI散度统计结果,可以设置其阈值约为0.075。同样根据薄云、雾、厚云的DAMF散度统计结果,可以设置其阈值约为0.75。

[0029] (3) 天空条件识别流程如图3所示,首先进入判断 $CI_{meas,z}$ 与 $CI_{ref}$ 的大小,若实测 $CI_{meas,z}$ 大于 $CI_{ref}$ 则确定为晴朗低气溶胶,反之则进入下一步判断;若TSL大于等于0.05,则进入分散云的判断,接着进入判断 $DAMF_{meas,z}$ 是否大于 $DAMF_{ref}$ ,是则识别为分散厚云,反之识别为分散薄云;若TSL小于0.05,则进入判断 $CI_{max-min}$ 是否大于0.075,是则识别为晴朗高气溶胶,反之接着判断 $DAMF_{max-min}$ 是否大于0.75;是则判断为连续薄云,反之进入判断 $DAMF_{meas,z}$ 是否大于 $DAMF_{ref}$ ;是则为连续厚云,反之则为雾。

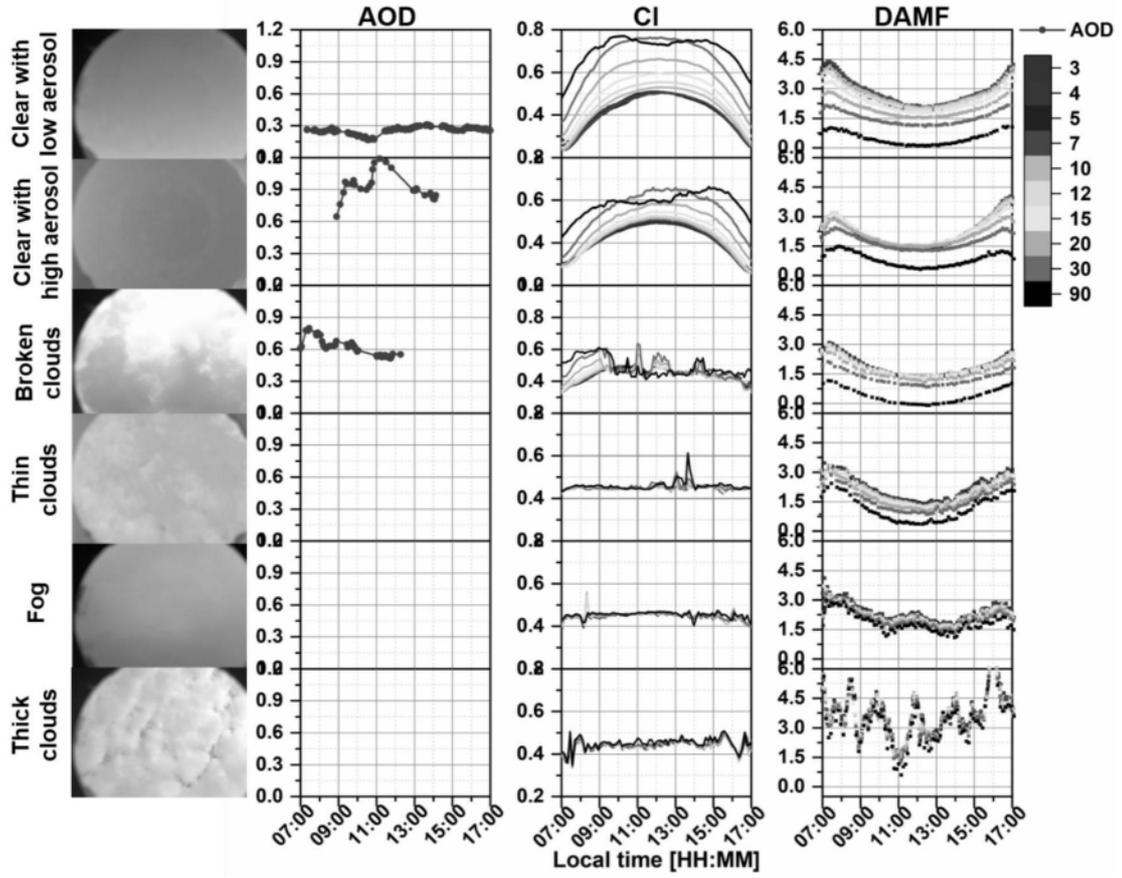


图1

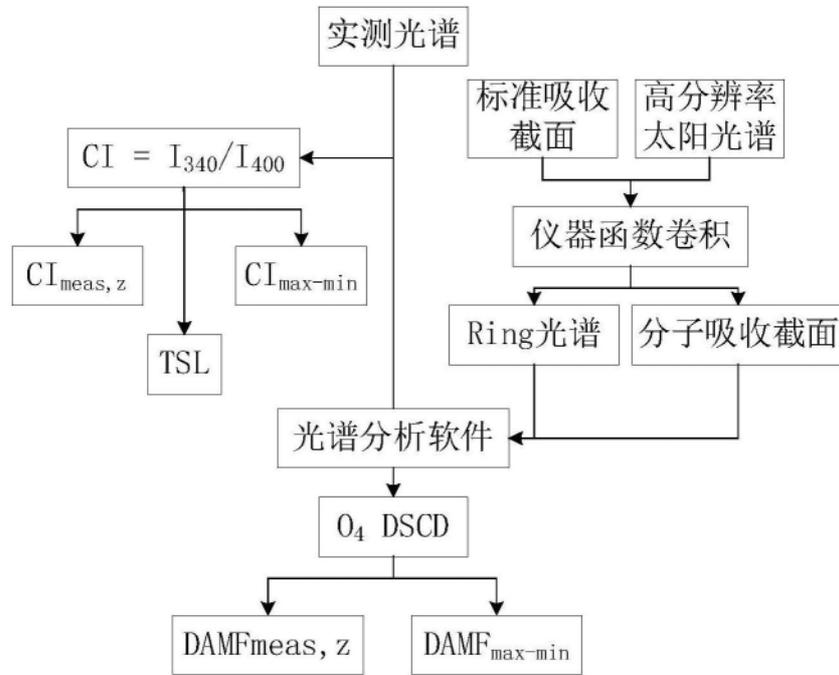


图2

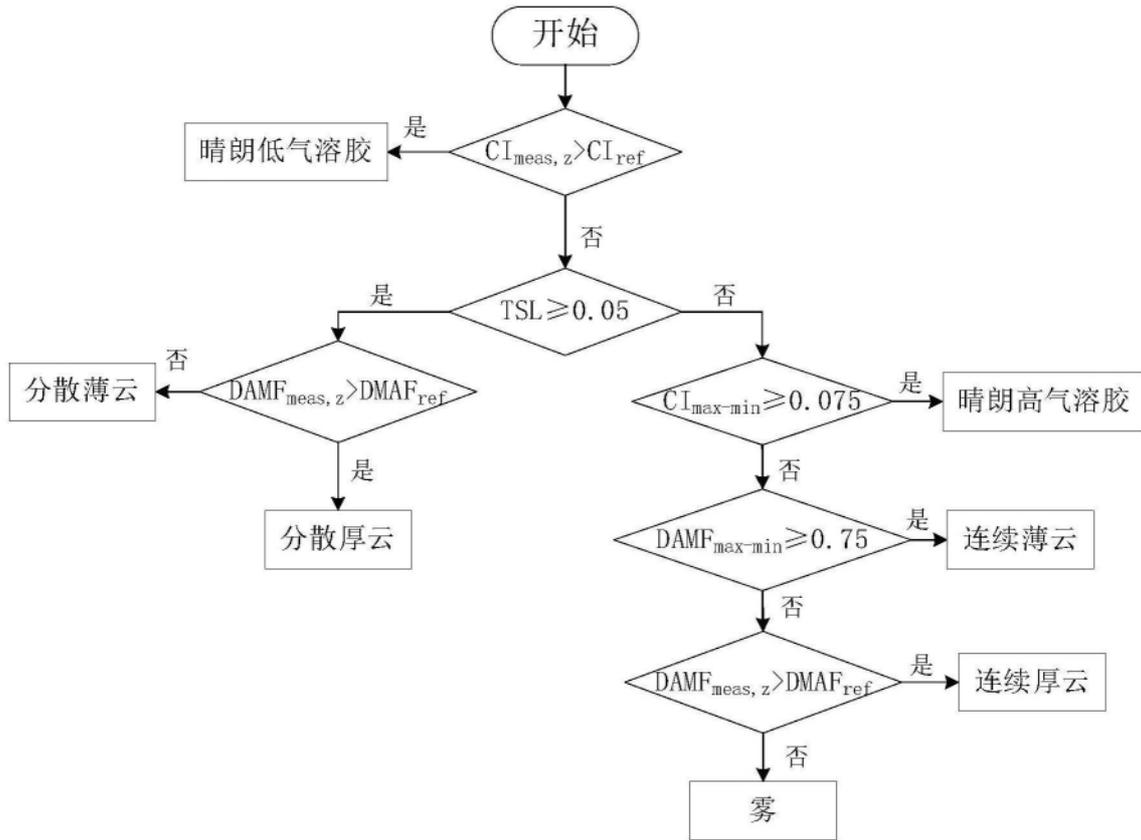


图3