



# 中华人民共和国国家标准

GB/T ××××—××××

## 空中云水资源气象评价方法

Meteorological Estimation Method of Clouds Water

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会 发布

## 目 次

前言 .....	II
引言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 空中云水资源评估指标 .....	2
5 空中云水资源评估内容 .....	2
附录 A（资料性附录） 云水含量计算 .....	3
附录 B（资料性附录） 云状分类 .....	4

## 前 言

本标准由中国气象局提出。

本标准由全国气象防灾减灾标准化技术委员会（SAC/TC345）归口。

本标准起草单位：武汉区域气候中心、湖北省人工影响办公室。

本标准主要起草人：郭广芬、周月华、向玉春、向华、叶建元。

本标准首次发布。

## 引 言

本标准依据《中华人民共和国气象法》，在引用和参考国家标准和行业标准的基础上，借鉴国内外相关的云水资源计算方法，并根据我国的现有观测方法和观测资料特点而编制的。

大气含水是空中水资源的主要组成部分，包括气体状态的水(汽)和固态、液态的水(云)。云中液水含量的定量测量对气候变化研究和灾害性天气监测、预报、人工增雨等均有着十分重要的作用。研究制定不同地区不同云层种类中包含的水资源总量以及可开发量对于科学评估利用和开发云层中的水资源具有重大意义。

随着空中云水资源观测技术的进步及空中云水资源研究的深入开展，本标准尚需不时修订。

# 空中云水资源气象评价方法

## 1 范围

本标准规定了一定区域上空云水资源的评估指标和评估内容。  
本标准适用于我国国内空中云水含量的计算和评估。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

QX/T 46-2007 《地面气象观测规范 第2部分：云的观测》。

## 3 术语和定义

### 3.1

**云水含量 cloud water content**

云中液态水和冰晶的总和（不包括雨水）。

### 3.2

**云量 cloud amount**

云遮蔽天空视野的成数。

### 3.3

**总云量 total cloud amount**

观测时天空被所有的云遮蔽的总成数。

### 3.4

**低云量 low cloud amount**

天空被低云族的云所遮蔽的成数。

### 3.5

**云状 cloud form**

根据天空中云的外形特征、结构、色泽、排列、高度以及伴见的天气现象将云进行的分类。

### 3.6

**云光学厚度 cloud optical thickness**

在可见光波长处云垂直消光（散射+吸收）的光学厚度。

### 3.7

**云水路径 cloud water path**

用来表征云水含量，即在单位面积垂直气柱中所含有的液态云水和固态云水的总和。

### 3.8

**凝结高度 condensation level**

空气块受抬升而绝热降温时有可能出现凝结现象的最低高度。

### 3.9

**凝结温度 condensation temperature**

空气块在凝结高度上所具有的温度。

## 4 空中云水资源评估指标

### 4.1 空中云水含量通过计算进行评估

云水含量计算公式可用云底高度和云顶高度间的水汽含量来计算。云顶高度、云底高度和水汽含量计算公式见附录A。

### 4.2 用气象台站观测云量进行评估

用气象台站观测资料表征空中云水资源的物理量有：云状、总云量、低云量和云状云量。

云状云量可通过同类云状出现频数与云状出现时天空覆盖度的乘积求得。

云状的分类见附录B。

### 4.3 用卫星遥感数据进行评估

卫星遥感资料来表征空中云水资源的物理量有：云光学厚度和云水路径。该数据可通过 <ftp://isccp.giss.nasa.gov/pub/data/D2Tars/> 下载。

## 5 空中云水资源评估内容

### 5.1 空中云水资源开发潜力

增雨潜力指空中云水资源可能形成降雨的潜力。计算公式为

$$\eta = 1 - e$$

$e$  为降水效率指地面总降水量与空中云水含量之比。计算公式为：

$$e = \frac{P_w}{P_v}$$

式中， $P_w$ 为降水量，单位为mm， $P_v$ 为云水含量，单位为mm。

### 5.2 空中云水资源的时空分布特征

#### 5.2.1 空间分布特征

分析空中云水资源高值分布中心和低值分布中心。

#### 5.2.2 时间分布特征

年际变化指年总云水资源和降水效率的逐年变化趋势，有无突变或转折。

季节变化指不同季节多年平均的云水资源和降水效率的变化趋势。季节云量也可用季节内所有月的云量之和或者用典型月作代表。

月际变化指一年内每个月的多年平均云水总含量和降水效率的逐月变化趋势。

附 录 A  
(资料性附录)  
云水含量计算

A.1 云底高度理论计算公式

$$H_{base} = \frac{t - t_d}{\gamma_d - \gamma_z} \approx 124(t - t_d)$$

$H_{base}$  为云底高度 (m),  $t$  为气温 (°C),  $t_d$  为露点温度 (°C),  $\gamma_d$  为干空气的绝热直减率, 近似于 0.98°C/100m,  $\gamma_z$  为露点温度在干绝热阶段的直减率, 近似于 0.17°C/100m。

A.2 云底高度经验计算公式

$$H = A(B - \lg f_0)$$

$H$  为云底高度 (m);  $A$ 、 $B$  为常数, 平均值是:  $A=5250$ ,  $B=2.028$ ;  $f_0$  为地面相对湿度。

A.3 云顶高度计算公式

$$H_{top} = a \cdot h_{500} - b$$

$H_{top}$  为云顶高度 (m),  $h_{500}$  为 500hPa 之位势高度 (m);  $a$  为常系数 (=6.44);  $b$  为常系数 (=24.16)。

A.4 云水含量计算公式

$$W = \frac{1}{\rho g} \int_{H_b}^{H_t} q dh \quad (1)$$

其中  $W$  为云水含量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $q$  为比湿 ( $\text{g}/\text{kg}$ );  $h$  为高度 (m);  $\rho$  为液态水密度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ );  $g$  为重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ );  $H_b$  为云底高度 (m);  $H_t$  为云顶高度 (m)。

A.5 用云中饱和混合比计算云水含量

$$L_z = 0.35 \frac{P_z}{T_z} (S_c - S_z)$$

$L_z$  为云中  $z$  高度上的含水量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $S_c$  为凝结高度上的饱和混合比 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $S_z$  为  $z$  高度上的饱和混合比 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $P_z$  为  $z$  高度上的气压 (hPa);  $T_z$  为  $z$  高度上的温度 (K)

混合比  $S$  计算公式:

$$S = \frac{622e}{P - e}$$

$S$  为混合比;  $P$  为气压 (hPa);  $e$  为水汽压 (hPa)。

附 录 B  
(资料性附录)  
云状分类

B.1 云状分类

按云的外形特征、结构特点和云底高度，将云分为三族，十属，二十九类：

表 1 云状分类表

云 族	云 属		云 类	
	学 名	简 写	学 名	简 写
低    云	积云	Cu	淡积云	Cu hum
			碎积云	Fc
			浓积云	Cu cong
	积雨云	Cb	秃积雨云	Cb calv
			鬃积雨云	Cb cap
	层积云	Sc	透光层积云	Sc tra
蔽光层积云			Sc op	
积云性层积云			Sc cug	
堡状层积云			Sc cast	
荚状层积云			Sc lent	
层云	St	层云	St	
		碎层云	Fs	
雨层云	Ns	雨层云	Ns	
		碎雨云	Fn	
中    云	高层云	As	透光高层云	As tra
			蔽光高层云	As op
	高积云	Ac	透光高积云	Ac tra
			蔽光高积云	Ac op
			荚状高积云	Ac lent
			积云性高积云	Ac cug
			絮状高积云	Ac flo
堡状高积云	Ac cast			
卷云	Ci	毛卷云	Ci fil	
		密卷云	Ci dens	
		伪卷云	Ci not	
		钩卷云	Ci unc	
卷层云	Cs	毛卷层云	Cs fil	
		薄幕卷层云	Cs nebu	
卷积云	Cc	卷积云	Cc	



# 国家标准《空中云水资源评价方法》编制说明

《空中云水资源评价方法》起草小组

(2008年12月10日)

## (一)、工作简况

2006年2月,武汉区域气候中心向中国气象局申报制定国家标准《空中水资源气象评价方法》,经专家评审,将该标准分为《空中水汽资源气象评价方法》和《空中云水资源气象评价方法》两个标准制订。早在项目申报时项目组就已经开始研究空中水汽资源,并且完成论文《湖北省空中水资源分析》(发表于《暴雨灾害》2007年26卷2期)。2007年11月,气发[2007]416号文“关于下达2008气象标准制订项目和审查项目计划的通知”中将《空中云水资源气象评价方法》列为2008年国家标准修订,批准了该标准起草单位为武汉区域气候中心。

接到任务后,武汉区域气候中心组织了起草小组,进行任务分工和时间进度安排。起草小组较完整地收集到了国内已完成的或在国内外翻译发表的有关空中水汽资源和云水资源的方法和结论。并在研究分析有关方法和结论的基础上,应用多种资料和方法计算分析了空中水汽资源,并对计算结果进行了比较(其分析报告《地面资料、GPS资料与探空资料计算空中水汽资源的比较分析》),对空中水汽资源开发潜力进行了计算分析(其分析报告《湖北省空中水资源开发潜力研究》,已被《人民长江》录用,将于12月份发表)。在仔细分析比较了空中水汽资源和云水资源的方法的基础上完成了《空中云水资源计算方法综述》(见附录)。

2008年12月,起草小组完成了国家标准《空中云水资源气象评价方法》征求意见稿,并及时上报中国气象局政策法规司。

## (二)、标准编制原则

目前空中云水汽资源评价还没有一个统一的标准方法,缺少一个有效的参照系,不利于分析空中云水资源状况及其开发潜力。同时,由于没有统一的评价方法标准,各地在分析空中水汽资源时,使用不同的资料和方法,所得的结论也就失去了同一性和可比性。

空中云水资源评价方法主要研究空中云水资源计算方法、分布特征及可开发潜力。目前我国关于空中水汽含量的计算方法以及观测手段已经相对比较成熟,但是对于空中云水资源的观测及计算还处于不断研究开发中。本标准通过收集国内外关于云水资源的计算方法和观测手段,比较各种计算空中水汽资源方法的优劣,同时考虑到目前我国观测台站分布特点,选取相对比较合理的计算方法,应用历史资料计算分析空中水汽资源分布特征,参考目前人工增雨开发空中云水资源的实际能力,计算分析空中云水资源开发潜力。

## (三)、收集整理有关部门的空中云水汽资源评价标准

中国气象局：QX/T 46-2007 《地面气象观测规范 第2部分：云的观测》

目前空中云水汽资源评价还没有一个统一的标准方法，各研究在分析空中云水汽资源时，使用不同的资料和方法。

#### （四）、标准主要内容

标准所适用的范围与领域、适用于标准的术语和定义、多种空中云水资源的评估方法和计算方法。空中云水资源的计算所涉及的名词有：

云水含量：云中液态水和冰晶的总和（不包括雨水）。

云量：云遮蔽天空视野的成数。

总云量：观测时天空被所有的云遮蔽的总成数。

低云量：天空被低云族的云所遮蔽的成数。

云状：根据天空中云的外形特征、结构、色泽、排列、高度以及伴见的天气现象将云进行的分类。

云光学厚度：在可见光波长处云垂直消光(散射+吸收)的光学厚度。

云水路径：用来表征云水含量，即在单位面积垂直气柱中所含有的液态云水和固态云水的总和。

凝结高度：空气块受抬升而绝热降温时有可能出现凝结现象的最低高度。

凝结温度：空气块在凝结高度上所具有的温度。

本标准推荐的空中云水资源评估方法有三种：

空中云水含量通过计算进行评估，云水含量计算公式可用云底高度和云顶高度间的水汽含量来计算。

用气象台站观测云量进行评估，用气象台站观测资料表征空中云水资源的物理量有：云状、总云量、低云量和云状云量。

用卫星遥感数据进行评估，卫星遥感资料来表征空中云水资源的物理量有：云光学厚度和云水路径。

空中云水资源的开发潜力进行评估，以及空中云水资源的时空分布特征进行分析。

#### （五）、主要试验、验证分析

起草小组收集了国内已完成的或在国内外翻译发表的有关空中云水汽资源的方法和结论，并将其归纳总结分为5类计算方法。（1）外场台站观测，（2）通过计算云底和云高，利用水汽含量计算公式计算云厚中的水汽含量，（3）国际卫星云计划的反演资料，（4）通过光学厚度反演的遥感辐射资料，（5）通过辐射亮温反演的遥感辐射资料。

目前，获取云量资料的方法有 3 种：(1)由地面气象台站目测而得；(2)通过卫星探测的辐射资料反演而得；(3)通过资料同化(或资料模拟)方法而得。来源于地面测站的云量资料能够较好地反映局地云气候特征，但由于受观测视野和设站及观测条件的限制，使得地面测站的云量资料时空连续性较差，尤其在地广站稀的地区，资料的不完整问题就显得更为突出。通过卫星探测的辐射资料反演而来的云量资料具有较好的空间覆盖性，适于反映大范围的云气候特征，但在应用此资料之前，利用地面测站资料对其进行验证是必要的。

通过地面台站观测的云量、低云量、高云量和云状云量等评估指标虽然在评估云水资源时有较大的误差，但是地面台站观测积累了大量的历史数据，使我们研究历史云水资源非常有用的资料，因此将其推荐为空中云水资源的方法之一。通过计算云底和云高，利用水汽含量计算公式计算云厚中的水汽含量，则是利用探空资料计算空中云水资源，其具有探空站的长时间序列资料，并且计算结果较为准确，是我们研究空中云水资源的必要方法，而国际卫星云计划的反演资料具有大尺度分析云水资源的优势，并且很多学者对其进行过研究检验，认为其适用于我国云水资源的研究。虽然地基微波辐射和遥感辐射方法对于云水量的观测较为准确，但是其历史资料较少，多为过程观测数据，观测数据不具备规范性，并且其更多的用于研究过程降水云水含量特征，不能用于评估一地的空中云水资源的丰富与缺乏。而标准主要用于评估一地云水资源的丰富与缺乏，及其分布特征。

刘洪利等（刘洪利，2003）对比分析了国际卫星云气候计划(ISCCP)的 D2 资料和地面测站云资料，发现二者总云量的整体分布和气候变化都比较一致，但定量上略有差别，尤其是中国北方地区差别较大。

国内外的大量工作已证明，探测大气柱中水汽和云液态水总量的双波长地基微波辐射计，在晴空和非降水云天的探测原理和方法已日趋成熟，探测水汽总量的精度可与探空相比，探测云液态水总量也有可接受的精度。Wei 等综合对比了几种地基微波辐射计遥感水汽总量和云液态水总量的反演方法，并对反演精度进行了详细的分析。

通过比较各种计算空中水汽资源方法的优劣，同时考虑到目前我国观测台站分布特点，获取的数据的有效性及其资料长度，推荐三种方法评估我国空中云水资源的方法，即：计算云底高度和云顶高度来估算云水含量的方法、通过气象台站观测的总量、云状等指标来估算云水含量，还有通过遥感观测手段得到的云水路径和云光学厚度的数据来评价云水资源。

## 附录（标准制定过程中空中云水资源计算方法综述）

## 空中云水资源计算方法综述

摘要：本文完整地收集到了国内已完成的或在国内外翻译发表的有关空中云水汽资源的方法和结论，并将其归纳总结分为 5 类计算方法。(1) 外场台站观测，(2) 通过计算云底和云高，利用水汽含量计算公式计算云厚中的水汽含量，(3) 国际卫星云计划的反演资料，(4) 通过光学厚度反演的遥感辐射资料，(5) 通过辐射亮温反演的遥感辐射资料。

关键词：云量；云水含量；ISCCP 资料；云水路径；云光学厚度；地基微波辐射计

目前，获取云量资料的方法有 3 种：(1) 由地面气象台站目测而得；(2) 通过卫星探测的辐射资料反演而得；(3) 通过资料同化(或资料模拟)方法而得。来源于地面测站的云量资料能够较好地反映局地云气候特征，但由于受观测视野和设站及观测条件的限制，使得地面测站的云量资料时空连续性较差，尤其在地广站稀的地区，资料的不完整问题就显得更为突出。通过卫星探测的辐射资料反演而来的云量资料具有较好的空间覆盖性，适于反映大范围的云气候特征，但在应用此资料之前，利用地面测站资料对其进行验证是必要的。

## 一、外场台站观测：

云是悬浮在大气中的小水滴、过冷水滴、冰晶或它们的混合物组成的可见聚集体；有时也包含一些较大的雨滴、冰粒和雪晶。其底部不接触地面。

云的观测主要包括：判定云状、估计云量、测定云高和选定云码。云的观测应尽量选择能看到全部天空及地平线的开阔地点或平台进行，云的观测应注意它的连续演变。观测时，如阳光较强，须戴黑色(或暗色)眼镜。总云量反映了云的水平分布情况，云状则在一定意义上表现出云的垂直分布特征。

Hahn 等的全球云气候资料分析中将天气报码中的高、中、低 27 种云状归并成 6 类，以云状云量(定义为云状出现频数与云状出现时天空覆盖度的乘积)来表征。

云量是指云遮蔽天空视野的成数。按云的外形特征、结构特点和云底高度，将云分为三族，十属，二十九类。观测中需要记录的云状为云属。

云族	云属
低云	积云 (Cu)、积雨云 (Cb)、层积云 (Sc)、层云 (St)、雨层云 (Ns)
中云	高层云 (As)、高积云 (Ac)
高云	卷云 (Ci)、卷层云 (Cs)、卷积云 (Cc)

云量观测包括总云量、低云量。总云量是指观测时天空被所有的云遮蔽的总成数，低云量是指天空被低云族的云所遮蔽的成数，均记整数。

积云、积雨云云高可利用下列经验公式来估算：

$$H = \frac{t - t_d}{\gamma_d - \gamma_z} \approx 124(t - t_d) \quad (4.4)$$

式中，H 为云高(m)，t 为气温(°C)， $t_d$  为露点温度(°C)， $\gamma_d$  为干空气的绝热直减率，近似于 0.98°C/100m， $\gamma_z$  为露点温度在干绝热阶段的直减率，近似于 0.17°C/100m。

(地面气象观测规范)

分析内容包括多年年、月或季节平均总云量、6 种类型云状云量(cloud type amount)、中云云量和低云云量、低云云底高度以及在此基础上所作的年变化、日变化谐波分析和年际变化等等，是现有较为客观定量、包含云信息最丰富的地面观测云气候资料。

宫德吉等（宫德吉，2000）通常人们认为，既然云量代表着天空中云的多少，那么它也应该是空中水量的反映。然而对内蒙古各地气候资料的分析表明，笼统的总云与空中水汽的相关性并不好。实上，云的形状、厚度、所处的高度各不相同，云滴的大小、密度也不一致，含水量差异很大。总云量只反映了天空视野被云遮蔽的成数，而不管云内的云滴谱或水汽含量情况，也不管云的厚度，所以总云量不能很好地映空中的水汽量在多数情况下，低云量可以比总云量更好地反映空中的水汽情况。

王宝鉴等（王宝鉴，2006）等分析了祁连山地区的总云量、低云量的时空分布特征，并分析了其余降水之间的关系，认为低云量与降水的相关性更好。

苏立娟的硕士论文利用 ISCCP 云气候资料集中的 D2 资料集、历史天气图、内蒙古中部地区 25 个地面观测站每日四个时次的云量、云状、16 种天气现象和日降水地面观测资料、9 个气候因子、内蒙古自治区 117 个地面观测站的月降水资料、12 个探空站的探空资料以及呼和浩特地区的降雹等七类资料，采用趋势分析和统计分析等方法研究分析了内蒙古地区的 19 种云量参数、降水和可降水量的时空分布特征和多年变化趋势；详细分析了内蒙古中部地区春夏季降水云、天气系统、降水类型、降水强度的特征、呼和浩特地区的降雹特征；研究分析了气候因子的多年时间分布和变化趋势以及同云量、降水、可降水量的关系。

## 二、根据云底和云顶高以及水汽含量公式估算云水含量

凝结高度也成抬升高度，是空气块受抬升而绝热降温时有可能出现的最低高度。

凝结温度是空气块在凝结高度上所具有的温度。

用云中饱和混合比计算含水量

$$L_z = 0.35 \frac{P_z}{T_z} (S_c - S_z)$$

$L_z$  为云中  $z$  高度上的含水量 ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )； $S_c$  为凝结高度上的饱和混合比 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )； $S_z$  为  $z$  高度上的饱和混合比 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )； $P_z$  为  $z$  高度上的气压 (hPa)； $T_z$  为  $z$  高度上的温度 (K)

混合比  $S$  计算公式：

$$S = \frac{622e}{P - e}$$

$S$  为混合比； $P$  为气压 (hPa)； $e$  为水汽压 (hPa)。

云底高度（凝结高度的理论式）计算公式：

$$H_{base} = \frac{t - t_d}{\gamma_d - \gamma_z} \approx 124(t - t_d)$$

$H_{base}$  为云底高度 (m)， $t$  为气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )， $t_d$  为露点温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )， $\gamma_d$  为干空气的绝热直减率，近似于  $0.98^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ， $\gamma_z$  为露点温度在干绝热阶段的直减率，近似于  $0.17^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

云底高度（凝结高度的经验式）计算公式：

$$H = A(B - \lg f_0)$$

$H$  为云底高度 (m)； $A$ 、 $B$  为常数，平均值是： $A=5250$ ， $B=2.028$ ； $f_0$  为地面相对湿度。

暖锋云系云顶高度（对流层层顶高度）计算公式：

$$H_{top} = a \cdot h_{500} - b$$

$H_{top}$  为云顶高度 (m),  $h_{500}$  为 500hPa 之位势高度 (m); a 为常数 (=6.44); b 为常数 (=24.16)。

波状云的云顶高度

$$H_p = 2(H_b + 100)$$

$H_p$  为波状云的云顶高度 (m);  $H_b$  为实测的或估算的云底高度 (m)。

探空资料采用相对湿度阈值方法确定云层厚度, 根据探空资料计算云层厚度的水汽含量。整层大气可降水量可表示为

$$W = \frac{1}{\rho g} \int_0^{p_{z0}} q dp \quad (1)$$

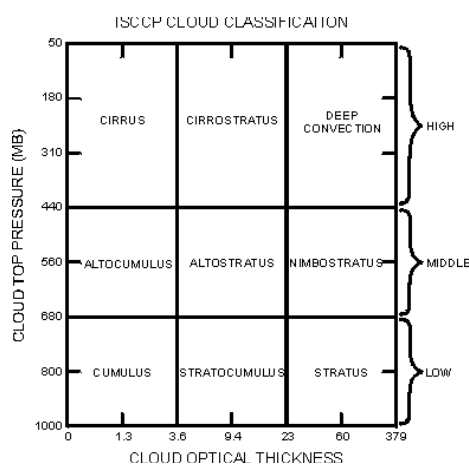
其中q为比湿, P为气压,  $\rho$  为液态水密度, g为重力加速度。P<sub>z0</sub> 为地面气压。在实际应用中, 比湿通常根据水汽压e计算出来, 它和水汽压的关系为

$$q = \frac{\varepsilon e}{p - (1 - \varepsilon)e} \quad (2)$$

式中,  $\varepsilon = \mu_v \mu_d$ ,  $\mu_v$  和  $\mu_d$  分别为水汽和干空气的平均摩尔质量, 为0.622。

### 三、国际卫星云气候计划 ISCCP 的 D2 资料

魏丽等 (魏丽, 1996; 魏丽, 1997)、王可丽等 (王可丽, 2001) 利用ISCCPC2资料, 将ISCCPC2总云量、地面观测总云量和NCEP / NCAR再分析总云量作了对比分析, 证明了 ISCCP资料的可用性。国际卫星云气候计划ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) 为我们提供了一种难得的适合于揭示大范围云气候特征的手段并提供了地面观测无法提供的云的物理性质参量, 该数据包括: 云按照云顶气压和光学厚度分为15类, 监测各种云的云量总云量、平均云顶温度、平均云顶气压、云光学厚度、云水路径。



云的分类 (云按照云顶气压和光学厚度分为15类)

云水含量在 ISCCP中用云水路径 (cloud water path, 简称 CWP)参数表示, CWP的物理意义是指在单位面积垂直气柱中所含有的液态云水 (cloud liquid water path, 简称LwP)和 固态 云水 (cloud ice water path, 简称IWP)的总和。

宜树华等 (宜树华, 2003) 利用 ISCCP 的 D2 数据对中国西北地区云时空分布特征的初步分析。陈勇航等 (陈勇航, 2005) 利用 ISCCP 的 D2 数据对我国西北地区空中云水资源的时空分布特征进行了分

析。李兴宇等（李兴宇，2008）对中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势进行了分析。刘洪利等（刘洪利，2003）对比分析了国际卫星云气候计划(ISCCP)的 D2 资料和地面测站云资料，发现二者总云量的整体分布和气候变化都比较一致，但定量上略有差别，尤其是中国北方地区差别较大。ISCCP 资料比较齐全，尤其在站点稀少的高原、荒漠地区比其他云资料更有优势。刘瑞霞等（刘瑞霞，2002）利用 ISCCP 资料分析青藏高原云气候特征。

#### 四、地基遥感云液态水总量

国内外的大量工作已证明，探测大气柱中水汽和云液态水总量的双波长地基微波辐射计，在晴空和非降水云天的探测原理和方法已日趋成熟，探测水汽总量的精度可与探空相比，探测云液态水总量也有可接受的精度。Wei等综合对比了几种地基微波辐射计遥感水汽总量和云液态水总量的反演方法，并对反演精度进行了详细的分析。Snider在长期实验后分析了大气水汽总量和云液态水总量的季节变化特征，还检验了可降水量（水汽总量）、云液态水总量与降水发生之间的相关关系。Han等将微波辐射计和云幕仪、电声探测系统以及常规地面观测系统组合成一个综合系统来反演对流层的大气水汽和云液态水总量，并提出微波辐射计有可能在今后的无球探空系统中充当主角。针对地基微波辐射计应用地域越来越广泛的情况，吕达仁等发展了一个具有全球普适性的大气降水反演方法，利用了微波辐射亮温和地面气象观测反演水汽总量。魏重等发展了一个全球普适的双频道遥感水汽和云液态水总量的反演算法。

在大气微波遥感中，大气微波辐射的特性依赖于大气对微波的吸收。根据现代光谱理论及实验研究发现，在微波波段，水汽、氧气、云中液态水和降水是微波辐射最主要的吸收物质。从图1可以发现，频率从10 GHz到220 GHz范围的微波波段内，水汽对微波有三个吸收带，在22.235 GHz、153 GHz和183.31 GHz附近；氧气在60 GHz和118.75 GHz附近具有强吸收带；云液水对微波辐射的吸收出现在一个从10 GHz到40 GHz的连续频域范围内。根据基尔霍夫定律，某辐射体在某波段的吸收愈强，则在该波段的辐射也就愈强。因此，在22.235 GHz频段附近微波辐射的变化可主要反映大气中水汽含量的变化，而在22.235 GHz附近水汽吸收带和60 GHz附近氧气分子的强吸收带两者中间是大气窗区，即35 GHz频段附近的微波辐射的变化可主要反映云液态水总量的变化。基于上述原理，包括上述吸收频带的微波辐射计能够用于探测大气垂直气柱内的总水汽含量和云液态水总量。

通常选择对水汽敏感和对液态水敏感的两个波段，即双波段地基微波辐射计，可探测大气垂直方向的水汽总量和云路径积分液水含量。但是波长选择略有不同。

双波长（35.0和22.2GHz，或31.65和20.6GHz）微波辐射计在探测大气垂直方向的水汽总量和云路径积分液水含量方面有较好的精度。地基微波辐射计探测到的微波衰减光学厚度，是路径上气态（氧气、水汽）、液态（云滴、雨滴）物质的微波衰减光学厚度的总和。

魏重（魏重，1995）给出了双波微波辐射计的物理反演算法。在非降水云天时，微波衰减光学厚度 $\tau_c$ 是由氧气、水汽和云液态水三部分贡献组成，许多工作已表明，水汽和云液态水的路径衰减光学厚度 $\tau_q$ 和 $\tau_l$ 分别与探测路径上水汽总量 $Q$ 和路径积分云液水含量 $L$ 有很好的线性关系。

$$\begin{cases} \tau_{c1} = a_1 + \tau_{q1} + \tau_{l1} = a_1 + b_1Q + c_1L \\ \tau_{c2} = a_2 + \tau_{q2} + \tau_{l2} = a_2 + b_2Q + c_2L \\ \tau_{c3} = a_3 + \tau_{q3} + \tau_{l3} = a_3 + b_3Q + c_2L \end{cases}$$

其中 $a$ ， $b$ ， $c$ 为经验回归常数。实际上，在非降水云天时，只需前两个波长的关系就可以根据物理或统计的方法，反演出相应的 $Q$ 和 $L$ 。

**物理反演方法（光学厚度）：**

在上面方程组中的前两式，可进一步写成

$$\tau_{c1} = \tau_{a1} + \tau_{l1} \approx 0.1119 + 0.0002193L_1 \quad (\text{I})$$

$$\tau_{c2} = \tau_{a2} + \tau_{l2} \quad (\text{II})$$

其中  $\tau_{a1}$ ,  $\tau_{a2}$  为两波段的无云背景大气衰减光学厚度，(I) 式中是将  $\tau_{a1}$  看作一个气候常数  $\tau_{a10}$ 。

实际上，进一步分析还有下列两式

$$\tau_{a1} = a_1 + b_1Q = 0.02648 + 0.01698Q \quad (\text{III})$$

$$\tau_{a2} = a_2 + b_2Q$$

或

$$Q = m + n\tau_{a2} = 0.8581 + 12.30\tau_{a2} \quad (\text{IV})$$

另外

$$\tau_{l1} / \tau_{l2} = (\lambda_2 / \lambda_1)^2 = 1 / 0.406 \quad (\text{V})$$

作为初值，取  $\tau_{a1}$  为气候常数 0.1119，则有下列步骤：

(A) 由 (I) 式， $\tau_{l1}^{(0)} = \tau_{c1} - \tau_{a10}$

并有  $L^{(0)} = \tau_{l1}^{(0)} / 0.0002193$

(B) 根据 (V) 式， $\tau_{l2}^{(0)} = 0.406\tau_{l1}^{(0)}$

(C) 根据 (II) 式， $\tau_{a2}^{(0)} = \tau_{c2} - \tau_{l2}^{(0)}$

(D) 根据 (IV) 式， $Q^{(0)} = m + n\tau_{a2}^{(0)}$

(E) 根据 (III) 式， $\tau_{a1}^{(1)} = a_1 + b_1Q^{(0)}$

(F) 根据 (I) 式， $\tau_{l1}^{(1)} = \tau_{c1} - \tau_{a1}^{(1)}$

(G) 重复步骤 B 到 D，得到一次迭代的  $Q^{(1)}$ ，以  $|Q^{(1)} - Q^{(0)}| \leq \varepsilon$  为判据。若不满足，则以  $Q^{(1)}$  代  $Q^{(0)}$ ，

以  $\tau_{a1}^{(1)}$  代  $\tau_{a10}$ ，重复步骤 A 到 F，直到满足。这时  $Q^{(n)}$ 、 $L^{(n)}$  即为反演的水汽总量和云夜水含量。

**统计方法反演（辐射亮温）：**

吕达仁等（吕达仁等，1993）利用具有气候、海拔和地表等不同代表性的探空质本建立了由地基微波辐射及反演水汽总量的普适性回归方程。这些方程包括 2 到 4 个变量，他们至少可适用于北半球绝大部分地区。



吕达仁等分析水汽总量和双波长辐射计垂直方向的探测亮温  $T_b(\lambda)$  ( $\lambda$  为辐射计波长) 之间的关系

$$Q = \int_0^{\infty} \rho_{H_2O}(z) dz \quad (1)$$

$$T_b(\lambda) = T_{\infty} \exp\left(-\int_0^x (\alpha_{H_2O}(\lambda, z) + \alpha_r(\lambda, z)) dz + \int_0^{\infty} T(z) (\alpha_{H_2O}(\lambda, z) + \alpha_r(\lambda, z)) dz\right) \\ \cdot \exp\left(-\int_0^z (\alpha_{H_2O}(\lambda, z') + \alpha_r(\lambda, z')) dz'\right)$$

其中  $T_{\infty}$  为宇宙背景亮温 2.7K,  $\rho_{H_2O}(z)$  代表  $z$  高度的水汽含量,  $\alpha_{H_2O}(\lambda, z)$  和  $\alpha_r(\lambda, z)$  分别代表  $z$  高度处的水汽吸收系数和水汽以外 (主要是氧气) 的吸收系数。由定性分析可看出  $T_b(\lambda)$  与  $T(z)$ 、 $\rho_{H_2O}(z)$  和  $\rho_r(z)$  均有关系, 而这些量又直接或间接地与大气的温、湿、压廓线有关, 因此选了以下 10 个因子参与回归关系得建立:  $T_{b1}$  (单位 K) —— 第一个波长的亮温,  $T_{b2}$  (K) —— 第二个波长的亮温,  $T_s$  (K) —— 地面气温,  $e_s$  ( $g/cm^3$ ) —— 地面绝对湿度,  $p_s$  (hPa) —— 地面气压,  $h$  (km) —— 测站海拔高度,  $T_{b1}/T_s$ ,  $T_{b2}/T_s$ ,  $e_s/p_s$  和  $T_s \times e_s / (273.15 \times e_s)$ 。选取有足够代表性的探空样本, 尽量包括高原、平原、海洋和大陆的特征, 同时也顾及季节和时间的代表性。对两组频率分别进行逐步回归分析, 并用最小二乘法对回归系数进行估计。这两组频率分别是 22.2 和 35.0 GHz (称第一组频率对), 20.6 和 31.65 GHz (第二组频率对)。另外还发现测晴空水汽总量 20.6 GHz 优于 22.2 GHz。

何生存 (何生存, 2005) 采用 31.65 GHz 和 23.87 GHz 在黄河上游增雨基地的地基用双频段微波辐射计遥感资料反演了黄河上游地区秋季云中液态水含量。利用 2003 年 10 月 1 日 ~ 28 日近一个月在西北人工增雨基地 (河南县) 的地基双频段微波辐射计观测资料和相应的探空资料 (泽库县), 并对每一份探空资料采用相对湿度阈值方法确定云层厚度, 结合微波辐射计观测资料, 经过统计分析, 得到了黄河上游地区秋季的地基双频段微波辐射计遥感云中水汽含量 (V) 和液态水含量 (L) 的反演公式。

水汽含量反演公式:

$$V = 140.148 \times 10^{-3} TB_{(23)} - 69.822 \times 10^{-3} TB_{(31)} + 18.1$$

液态水含量反演公式:

$$L = -7.37 \times 10^{-3} TB_{(23)} + 29.4 \times 10^{-3} TB_{(31)} + 0.24$$

刘朝顺等 (刘朝顺, 2006) 对地基微波辐射计遥感反演大气柱中的水汽总量和云液态水总量的辐射传输原理和反演方法进行了研究。选取的波段频率为 23.8 GHz 和 36.5 GHz。

## 小结

通过比较各种计算空中水汽资源方法的优劣, 同时考虑到目前我国观测台站分布特点, 获取的数据的有效性及其资料长度, 推荐三种方法评估我国空中云水资源的方法, 即: 计算云底高度和云顶高度来估算云水含量的方法、通过气象台站观测的总量、云状等指标来估算云水含量, 还有通过遥感观测手段得到的云水路径和云光学厚度的数据来评价云水资源。

## 参考文献:

- [1] 魏丽, 钟强, 侯萍. 中国大陆卫星反演云参数的评估[J]. 高原气象. 1996, 15(2): 147~156.
- [2] 魏丽, 钟强. 青藏高原云的气候学特征[J]. 高原气象. 1997, 16(1): 10~15.
- [3] 王可丽, 江灏, 陈世强. 青藏高原地区的总云量——地面观测、卫星反演和同化资料的对比分析

- [J]. 高原气象, 2001, 20(3): 252~257.
- [4] 宜树华, 刘洪利, 李维亮, 等. 中国西北地区云时空分布特征的初步分析[J]. 气象, 2003, 29(1): 7~11.
- [5] 李兴宇, 郭学良, 朱江. 中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势[J]. 大气科学, 2008, 32(5): 1094~1106
- [6] 刘瑞霞, 刘玉洁, 杜秉玉, 等. 利用ISCCP资料分析青藏高原云气候特征[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 226~234.
- [7] 陈勇航, 黄建平, 陈长和, 等. 西北地区空中云水资料的时空分布[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 905~912
- [8] 翁笃鸣, 韩爱梅. 我国卫星总云量与地面总云量分布的对比分析[J]. 应用气象学报, 1998, 9(1): 33~37.
- [9] 吕达仁, 魏重, 忻妙新, 等. 地基微波遥感大气水汽总量的普适性回归反演[J]. 大气科学, 1993, 17(6): 721~731.
- [10] 魏重. 三波段地基微波辐射计联合遥感云雨大气参数的方法[J]. 大气科学, 1995, 19(1): 21~30.
- [11] 何生存, 郭三刚, 王治邦, 等. 黄河上游地区秋季云中液态水含量的微波遥感[J]. 青海气象, 2005(3): 54~56.
- [12] 刘朝顺, 吕达仁, 杜秉玉. 地基遥感大气水汽总量和云液态水总量的研究[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(5): 606~612.
- [13] 刘洪利, 朱文琴, 宜树华, 等. 中国地区云的气候特征分析[J]. 气象学报, 2003, 61(4): 466~473.
- [14] 宫德吉, 沈建国, 祁伏裕. 内蒙古的空中水资源状况[J]. 内蒙古气象, 2000, 3: 7-12.
- [15] 王宝鉴, 黄玉霞, 王劲松, 等. 祁连山云和空中水汽资源的季节分布与演变[J]. 地球科学进展, 2006, 21(9): 948~955.
- [16] 陈少勇, 董安祥. 祁连山区低云量的气候变化与异常研究[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 545~548.
- [17] 沈志宝, 陈有虞. 青藏高原平均云量的估算及其分布特征[J]. 高原气象, 1987, 6(4): 335~343.
- [18] 刘锦丽, 吕达仁, 张凌, 等. 降水云中液水含量的空基遥感[J]. 遥感学报, 2003, 7(3): 227~232.
- [19] 李玉林, 杨梅, 曾光平. 江西省夏季降水效率特征[J]. 气象科技, 2004, 32(1): 44~47.
- [20] 王名才 主编. 大气科学常用公式[M]. 1994, 北京: 气象出版社.
- [21] 刘国纬 著. 水文循环的大气过程[M]. 1997, 北京: 科学出版社.
- [22] 段英, 吴志会. 利用地基遥感方法检测大气中汽态、液态水含量分布特征[J]. 应用气象学报, 1999, 10(1): 34~40.
- [23] 杨景梅, 邱金桓. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究[J]. 大气科学, 2002, 26(1): 9~23.
- [24] 龚佃利, 边道相. 山东省空中水资源的初步分析[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(4): 474~482.
- [25] 向华, 周月华, 王海军. 湖北省空中水资源分析[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(2): 134-138.
- [26] 程炳岩, 张永亮, 霍锐. 河南空中水资源的时空分布特征[J]. 河南气象, 1999, 2: 21~22.
- [27] 李霞, 张广兴. 天山可降水量和降水转化率的研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 209-513.
- [28] 汪晓滨, 李淑日, 游来光, 等. 北京冬夏降水系统中云水量及其统计特征分析[J]. 应用气象学报, 2001, 12(增刊): 107—112.
- [29] 赵永丽, 黄德学. 山南空中水资源[J]. 西藏科技, 2007, 169(5): 24~26.
- [30] 翁笃鸣, 韩爱梅. 我国卫星总云量与地面总云量分布的对比分析[J]. 应用气象学报, 1998, 9(1): 33-37.
- [31] 张焕昭, 徐东亮, 刘海群. 黑龙江省空中云水资源开发现状分析与展望[J]. 黑龙江气象, 2007(1): 12-14.
- [32] 周德平, 宫福久, 张淑杰, 等. 辽宁云水资源分布特征及开发潜力分析[J]. 自然资源学报, 2005,

20(5): 644~649.