

# 中亚地区云水含量时空特征分析

赵战成<sup>1</sup>, 程 华<sup>1</sup>, 武鹏飞<sup>2\*</sup>, 王健治<sup>3</sup>, 蒋聚金<sup>1</sup>

<sup>1</sup>新疆巴音郭楞蒙古自治州气象局, 新疆 库尔勒

<sup>2</sup>新疆农业气象台, 新疆 乌鲁木齐

<sup>3</sup>福建省民航厦门空管站, 福建 厦门

收稿日期: 2023年2月18日; 录用日期: 2023年3月20日; 发布日期: 2023年3月27日

## 摘 要

本文以中国新疆西北部及环临中亚5国云水时空特征与其植被覆盖下垫面所对应的叶面积指数为研究对象, 采用欧洲中心ERA5最新格点云水资料和低植被叶面积指数资料(0.25° × 0.25°), 统计分析了1980~2019年中亚地区空中云水资源的变化特征, 并用低植被叶面积指数卫星遥感资料分析该地区植被分布特征。研究表明: 云水时空特征与其植被覆盖下垫面所对应的叶面积指数有较好的对应关系, 40年来该地区空中云水含量呈逐年在减少趋势, 液态水含量减少较为明显, 且月际云水含量不均, 其中11月份液态水含量最高, 2月份含量最低, 冰水含量月际分布呈单一态势, 1月份最大, 8月份最少; 冰水含量主要集中在500~300 hPa之间, 液态水含量绝大部分在500 hPa以下; 云水含量较丰富区能基本对应低植被叶面积指数大值区的实际状态。

## 关键词

中亚, 冰水, 液态水, 叶面积指数, 植被

# Temporal and Spatial Characteristics of Cloud Water Content in Central Asia

Zhancheng Zhao<sup>1</sup>, Hua Cheng<sup>1</sup>, Pengfei Wu<sup>2\*</sup>, Jianzhi Wang<sup>3</sup>, Jujin Jiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bazhou Meteorological Bureau of Xinjiang, Korla Xinjiang

<sup>2</sup>Xinjiang Agricultural Meteorological Observatory, Urumqi Xinjiang

<sup>3</sup>Xiamen Air Traffic Control Station of Civil Aviation in Fujian Province, Xiamen Fujian

Received: Feb. 18<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 27<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 赵战成, 程华, 武鹏飞, 王健治, 蒋聚金. 中亚地区云水含量时空特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(2): 376-385. DOI: 10.12677/ccrl.2023.122040

## Abstract

Based on the latest grid cloud water data of ERA5 in the European Center and the data of low vegetation leaf area index ( $0.25 \times 0.25$  degrees), the change sensing characteristics of air cloud water resources in Central Asia from 1980 to 2019 are analyzed, and the vegetation distribution characteristics of Central Asia are analyzed using the remote sensing data of low vegetation leaf area index satellite. The study shows that the content of cloud water in the air in this area is decreasing year by year, the content of liquid water is decreasing obviously, and the content of inter-month cloud water is uneven, of which the highest content of liquid water in November, the lowest in February, the inter-month distribution of ice water content is a single trend, the largest in January, the least in August; The content of ice water is mainly concentrated between 500~300 hPa, and the most of the liquid water content is below 500 hPa; The cloud water content is rich in the area which corresponds well to the large value area of low vegetation leaf area index.

## Keywords

Central Asia, Ice Water, Liquid Water, Leaf Area Index, Vegetation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

工业革命以来,全球正在经历最显著的气候变化过程,截至2012年,过去的130a全球升温 $0.85^{\circ}\text{C}$  [1]。陆地升温幅度高于全球平均水平[2]。中国新疆及中亚地区同属干旱半干旱气候,降水稀少、水资源缺乏,地表植被稀少、生态环境脆弱,对气候变化影响十分敏感[3] [4]。新疆是我国“一带一路”发展战略的桥头堡,是我国同中亚国家连接的重要桥梁。1956~2005年以来新疆增温速率为 $0.28^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,与全国的变化较为一致,同时气候变暖背景下年降水量总体呈上升趋势[5] [6]。随着全球气温的升高,引起了中亚地区冰川和积雪的消融,面积减少了近三分之一,水资源严重匮乏,再加上该地区气候恶劣,地表裸露度高,干旱和洪水等自然灾害频繁发生,对中亚国家造成了巨大的经济损失。

世界银行中亚生态和自然资源专家米娜苏雅在Vlast杂志上曾言“气候变化是中亚所有国家的共同问题,因此应对其后果需要在区域合作方面共同努力”。

近年来,中亚地区吸引外国投资水平不断提高,但主要投资领域是能源和资源开发,但农业、轻工业、服务业和高新技术等产业仍是中亚五国鼓励发展的重点产业。中国提出的“丝绸之路经济带”战略为中亚地区发展带来了极大的发展机遇。因此研究了解中国新疆、中亚地区云水特征与植被覆盖情况对实现国家发展战略有积极的意义。

前人对中亚云水时空特征影响方面开展了大量研究,林彤等利用CloudSat卫星和CALIPSO卫星融合产品DARDAR数据对我国西北地区冰云发生概率的水平和季节分布特征进行了分析,发现冰云有明显的季节变化和地区分布[7];张小娟等利用美国宇航局(NASA)云数据集分析了我国新疆三大山区云中液态水的时空分布特征,发现山区云水资源有减少的趋势[8];刘菊菊等指出中国平均整层云水量无明显线性趋势[9];杨大生等发现:中国中部纬度上对流层中层的月平均液态水含量比南部及北部的量值大[10] [11] [12],平均冰水含量纬向垂直分布的高值区主要在对流层中上部;这些大多是针对气候资料相对密集

的地区的研究。因为云水作为天气气候的一种重要指标，在地球气候系统的辐射能量收支和大气水气循环过程中起着非常重要的作用，其宏观特征(如云量、云高、云厚、云水含量等)的变化，都能对气候变化产生影响；而云水的形成受多种因子制约，云含水量常在很小范围和很短的时间内就有很大的差异，因此精确地了解云水资源有很大的难度；本文将中国新疆西北部及中亚地区云水时空特征及反应其下垫面植被覆盖情况的叶面积指数分布的遥感信息作为对应分析背景，探讨、研究该地区的植被分布以及空中云水资源变化之间的关联性，不失为一种直观反映观测资料缺乏、地广人稀地区地表植被变化状态的科学途径，也期待对中国提出的“一带一路”经济发展战略有所帮助。

## 2. 研究区域概况

一般而言，“中亚”是指中亚五国：哈萨克，吉尔吉斯，乌兹别克、塔吉克、土库曼这五个斯坦。本文选取的中亚地理范围为中国新疆的西北部及中亚五国所在区域，即北纬 35°~55°和东经 50°~85°之间。该地区地处欧亚大陆腹地，远离各大海洋，降水稀少，空气极其干燥，该地区气候干旱，开垦荒地使地表疏松，容易导致土地荒漠化(土地沙化、沙漠化)是气候变化影响最脆弱的区域之一，为典型的温带大陆性干旱或半干旱气候。该区域地处丝绸之路咽喉地带，是“一带一路”必经之地，其地理位置和植被分布见如下卫星影像图 1。

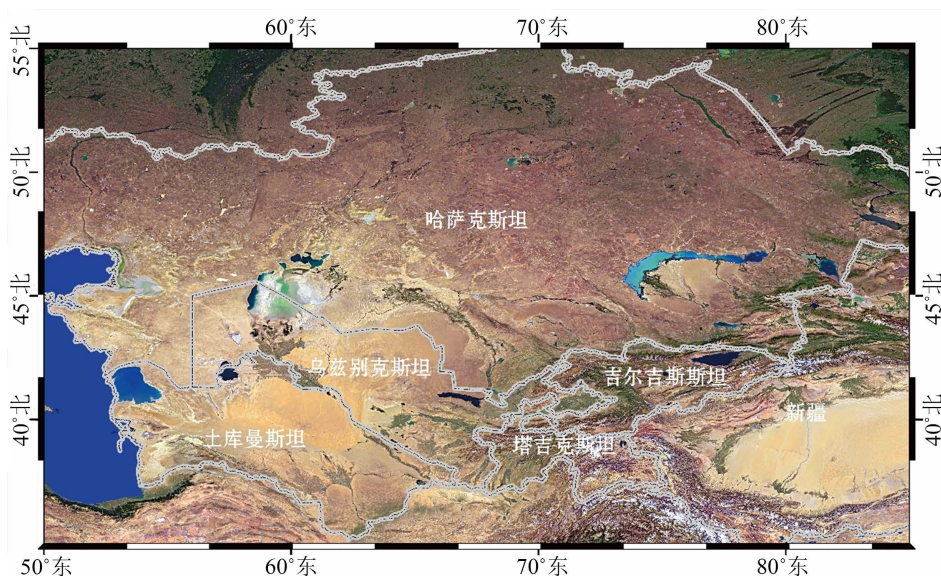


Figure 1. Satellite image of central Asia

图 1. 中亚地区卫星影像图

## 3. 资料和方法

空中云水资源是指存在于大气中的液态水和固态水总量。据不完全统计地球上超过 50% 以上的区域被云所覆盖，云的含水量多少因云的种类、发展阶段和在云中所处的部位的不同有很大差异。云有多种形态，包括：液态水、冰水、冰水混合态统称为云水；不同地区和不同降水云体中的云水资源有很大差异，需通过多种仪器的观测和综合分析进行评估，通过理论分析研究其变化规律，通过实验研究其开发利用的途径和技术。以中国西部及环临的中亚 5 国的云水时空及其对应下垫面叶面积指数为研究对象，基于欧洲中心 ERA5 最新格点云水资料和低植被叶面积指数资料(0.25° × 0.25°)，来统计分析 1980~2019 年中亚地区空中云水资源的变化特征，并用低植被叶面积指数卫星遥感资料分析来印证中亚地区植被分

布情况是一种新尝试。

### 3.1. 资料

本文中使用的资料为欧洲数值预报中心(ECMWF) ERA5-LandT 全球格点数据集,空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 垂直方向上从 1000~1 hPa 共有 37 层, 时间尺度上为每月的月平均数据, 起止时间为 1980 年 1 月至 2019 年 12 月共计 40 年的完整历史序列, 众所周知, 200 hPa 以上几乎没有云水的存在[13], 因此本文仅使用了 100~1000 hPa 的 27 层的月平均数据。层数和气压对应见如下表 1。

**Table 1.** The number of layers and the corresponding pressure

**表 1.** 层数和对应气压

层数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
气压(hPa)	1	2	3	5	7	10	20	30	50	70	100	125	150
层数	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
气压(hPa)	175	200	225	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
层数	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37		
气压(hPa)	750	775	800	825	850	875	900	925	950	975	1000		

### 3.2. 研究方法

我们定义为格点云水含量的公式为:

$$Z(v) = \frac{1}{v} \int_v^{\infty} \frac{\rho l}{s} dv$$

式中:  $\rho$  是云液水(云冰水)密度,  $s$  是湿空气密度,  $v$  为格点区域的体积。

我们定义区域内的云水总量公式为:

$$V = \sum \sum \sum v(z) dt dz dp$$

式中  $V$  是我们计算的指定范围内、特定时间和从地面到顶层所有格点云水(液态水和冰水)含量的总和。为指定的时间段, 为指定的范围, 为从地面到高空气压层。

叶面积指数(leaf area index)又称叶面积系数, 是指单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数。即: 叶面积指数 = 叶片总面积/土地面积。常用叶面积指数(LAI)由下式中求得:

$$LAI = 0.75 \rho \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (L_{ij} - B_{ij}) m$$

式中,  $L_{ij}$  为叶子的长度,  $B_{ij}$  最大叶子宽度,  $n$  为第  $j$  株的总叶片数;  $m$  为测定株数; 种为种植密度。

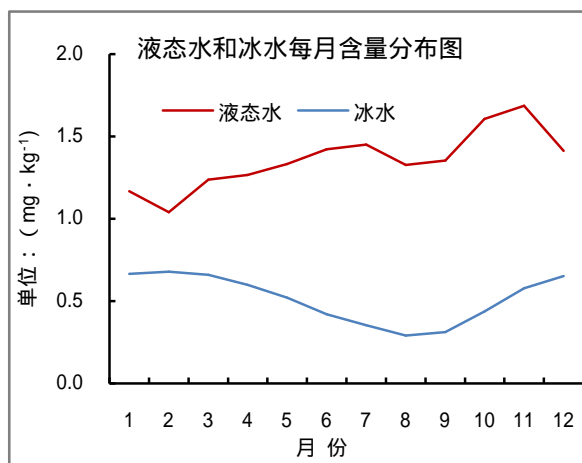
## 4. 空中云水含量的时空特征

云水一词我们已在前文中提及, 包含空中液态水、冰水和混合水, 此文中我们仅讨论和分析空中的液态水以及冰水, 未将混合状态的云水统计在列。

### 4.1. 整层云水含量的时间分布

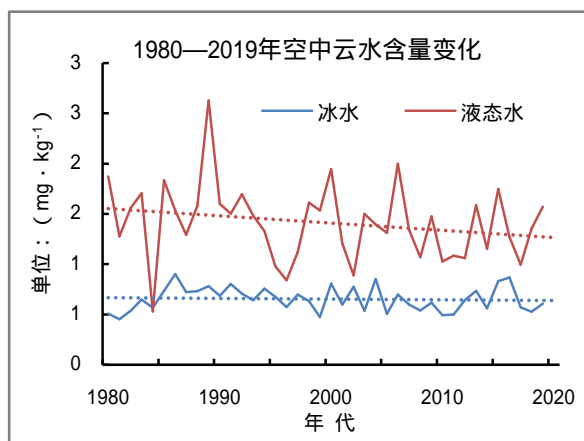
对研究区域范围内 40 年的空中液态水和冰水按照月份和年代进行求和, 分析其月季变化和年代际变化, 并对年代际变化做线性趋势分析[14] [15] [16] [17]。从图 2 中我们可以看出液态水和冰水分布形式不一, 液态水 11 月份含量最高, 达到了  $1.687 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 2 月份最少, 仅有  $1.041 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其它月份处于平

均态,这一特征和我国内陆沿海一带春夏多,秋冬少有明显不同[18][19];冰水含量分布呈单一态势,两头高,中间低,其中8月份最少,含量为 $0.292\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,2月份最多,含量为 $0.678\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,两者相差2倍多,且与液态水含量相反,其2月份为最少,冰水含量却是2月份最多。



**Figure 2.** The whole layer of liquid water and ice water changes from month to month

**图 2.** 整层液态水和冰水月际变化



**Figure 3.** The whole layer of liquid water and ice water varies from year to year

**图 3.** 整层液态水和冰水年际变化

从图3中得出,近40年以从图3中得出,近40年以来中亚地区的液态水和冰水均是减少的态势,此点与整个大气环境背景——增暖增湿大背景不尽一致[20],这也从另一个角度反映出中国新疆西北部和中亚地区的干旱程度有所加剧的实际趋势。2000年以前,液态水含量变幅较大,液态水含量最多的年份在1990年,最大值为 $2.628\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,最少的在1985年,数值为 $0.531\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 两者含量相差5倍之多,在2000年以后变幅明显减少,2006年的最大值 $2.000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和2002年的最小值 $0.889\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 仅相差两倍多;冰水含量相对于液态水含量变幅较小,最少年份在1981年,含量为 $0.453\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,最多年份在1986年,含量为 $0.902\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,两者相差一倍左右,最大变幅也是出现在2000年以前,整体呈现减少趋势,但不是很明显。

## 4.2. 整层云水含量的空间分布

本研究将 40 年格点云水含量从底层到高层进行求和, 然后对其进行格点平均得出图 4、图 5, 从整层冰水含量格点平均分布图可以看出, 从哈萨克斯坦西北角经里海上空到南部一带有一个冰水含量大值区, 冰水含量在  $1.000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  以上, 最大值达到了  $2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 从整个分布来看, 冰水含量分布不均。

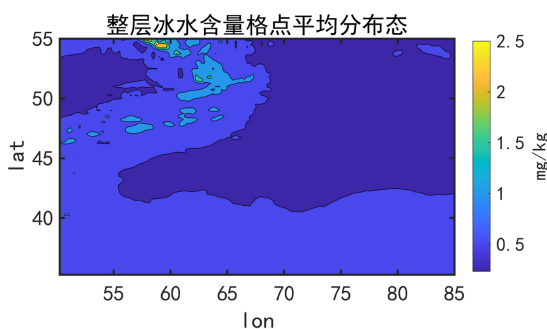


Figure 4. Lattice point distribution of liquid water content in the whole layer

图 4. 整层液态水含量格点分布

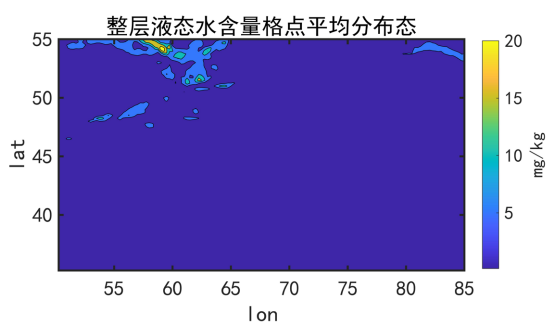


Figure 5. Lattice point distribution of ice water content in the whole layer

图 5. 整层冰水含量格点分布

## 4.3. 整层云水沿经、纬方向剖面特征

为了能够清晰的掌握和了解大气层中云水的垂直分布, 我们对研究范围内的数据沿径向和纬向做剖面分析, 求取云水的平均态得到下图。

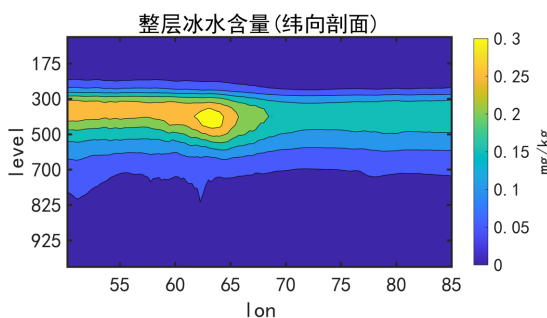
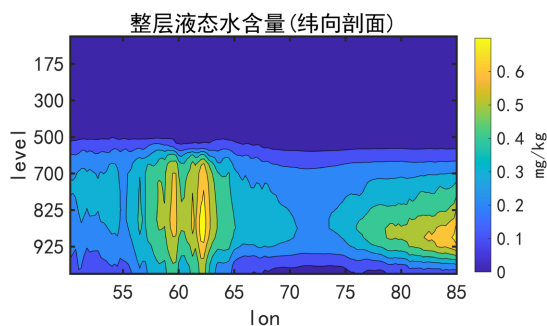


Figure 6. Zonal profile of ice water content

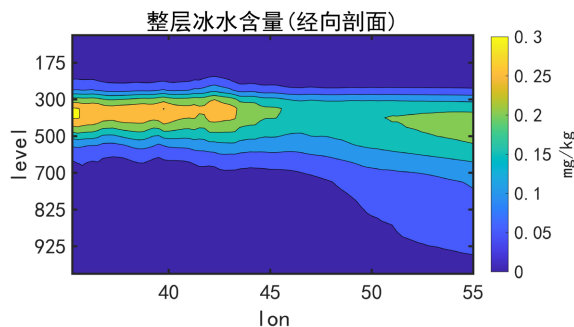
图 6. 冰水含量纬向剖面图



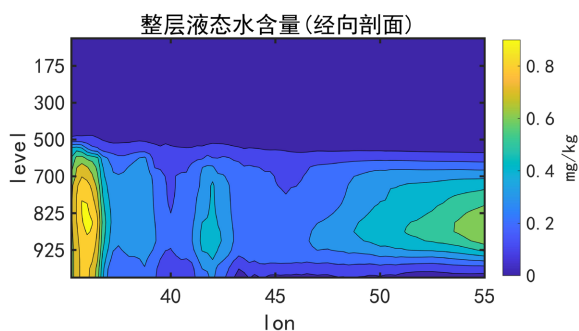
**Figure 7.** Zonal profile of liquid water content  
**图 7.** 液态水含量纬向剖面图

从纬向的剖面图 6 中可以看出，冰水含量大值区主要集中在高层 500~300 hPa 之间，极值出现在东经 63° 上空，达到了  $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其余层次含量非常小，而且西部冰水含量高于东部，对应液态水含量图 7 中，在 500 hPa 以上几乎无液态水区出现，这个不难理解，高层温度维持较低，液态水无法存在，大值区主要集中在 825 hPa 附近，东西两端各有一个大值中心，极值达到了  $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  以上。

从径向剖面图 8 可以看到，冰水含量大值区与纬向剖面图基本一致，主要在高层 500~300 hPa 之间，极值在  $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，南端维持较高，北端低层也有一部分冰水含量，由于该地区纬度较高，温度较低，因此有冰水含量的存在；图 9 中可以看出，低层液态水含量较丰富，极值达到了  $0.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  以上，南北两端有大值区出现，中间部分含量相对较低，从卫星遥感影像图中也可以看到，南北两端植被覆盖度相对较高，中间部分植被较少。



**Figure 8.** Vertical profile of ice water content  
**图 8.** 冰水含量径向剖面图



**Figure 9.** Vertical profile of liquid water content  
**图 9.** 液态水含量径向剖面图

#### 4.4. 中亚地区 2000 年前后二十年整层云水含量的变化

为了更加了解整层云水含量的格点变化状况,我们用 1980~1999 年和 2000~2019 年前后各二十年的云水格点资料的差值进行对比分析,得到下图。

从图 10 中可以看出,冰水含量大部分地区的差值均在-1~0 之间,有极小区域出现了正的变化,变化明显区域有两块地区,一个在哈萨克斯坦国家外部西北角,一个在中国新疆西南部地区。从图 11 中可以看到,研究区域范围内液态水含量绝大部分区域也在减少,仅有西北角地区在增加。

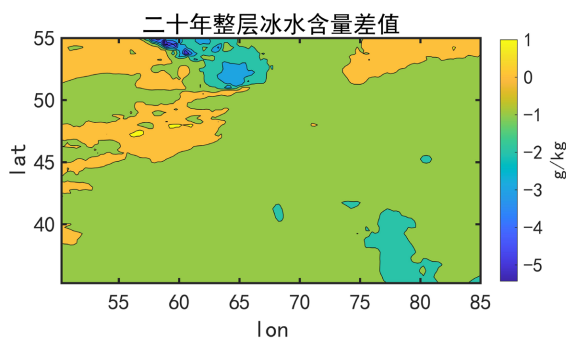


Figure 10. Diagram of the difference of ice water content between the two decades before and after

图 10. 前后 20 年冰水含量差值图

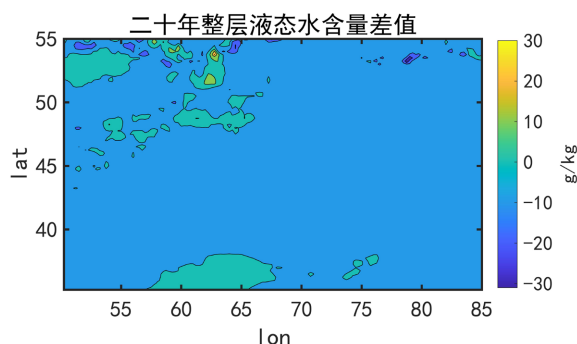


Figure 11. Diagram of the difference of liquid water content between the two decades before and after

图 11. 前后 20 年液态水含量差值图

### 5. 低植被叶面积指数分布特征

植被是生态系统中非常重要且不可或缺的一个环节,是地球表面覆盖的重要组成部分,更是反映地表植被状况的一个非常重要的特征。本文所定义的“低植被”作物,泛指由农作物和混合农业、灌溉作物、矮草、高草、苔原、常绿灌木、落叶灌木等组成。

本研究取过去四十年(1980~2019 年)的各月平均低植被叶面积指数作为背景,发现同期叶面积指数变化不明显,因而采用最近年份植被旺盛期的平均数据作为代表分析其分布特点,得到图 12。

从图 12 结合图 1 卫星遥感影像图分析可以看出,叶面积指数高值区大部分在中纬度偏北一带,其余高值区在中国新疆的天山山区和西部山区,里海南端附近也有一个高值区,这些地区对应影像图上植被覆盖度相对较高,其余地区大部分都是裸露的地表或者沙漠、戈壁等,其它地区叶面积指数均较低,里海、咸海和中国的沙漠腹地叶面积指数均为 0,亦即没有植被。



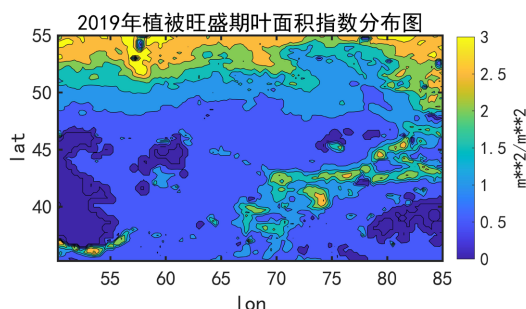


Figure 12. Leaf area index distribution of low vegetation  
图 12. 低植被叶面积指数分布图

## 6. 结论

1) 研究区域内整层液态水和冰水年际变化均有减少的趋势，液态水含量减少明显，反映了中国新疆西北部和中亚地区 40 年来干旱状况呈加重态势。

2) 液态水和冰水的月际分布不均，液态水含量 11 月份最大，2 月份最少，冰水含量呈现单一态势，8 月份最少，1 月份最多，此点与中国沿海一带云水分布不同。

3) 整层冰水含量主要集中在 500~300 hPa 之间，大值区在 400 hPa 附近，液态水含量主要在 500 hPa 以下，大值区在 825 hPa 附近。

4) 叶面积指数高值区大部分在中纬度偏北一带，云水含量相对丰富地区对应叶面积指数大值区。

5) 中国新疆西北部和中亚地区的云水时空分布较好的反映出该地区实际植被覆盖状况。

## 7. 讨论

全球气候变化背景下，针对地广人稀、经济落后、地面观测站点少，气象资料匮乏、干旱气候特征明显的中国新疆西北部及中亚地区用关云水时空特征来反映植被覆盖度的叶面指数之间相关联系应该是一个值得研究方向。中国新疆西北部和中亚地区的干旱程度有所加剧的实际趋势，与全球大气环境背景——增暖增湿大背景不尽一致。

## 参考文献

- [1] IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [2] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 黄建平, 季明霞, 刘玉芝, 等. 干旱半干旱区气候变化研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(1): 9-14.
- [4] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 姚俊强. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 2994-3008.
- [5] Li, Q.H., Chen, Y.J., Shen, Y.J., Li, X.G. and Xu, J.H. (2011) Spatial and Temporal Trends of Climate Change in Xinjiang, China. *Journal of Geographical Sciences*, **21**, 1007-1018. <https://doi.org/10.1007/s11442-011-0896-8>
- [6] 张音, 古丽贤·吐尔逊拜, 苏里坦, 刘迁迁. 近 60a 来新疆不同海拔气候变化的时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 822-829.
- [7] 林彤, 郑有飞, 李特, 王立稳. 基于卫星资料的中国西北地区冰云特征分析[J]. 高原气象, 2018, 37(4): 1051-1060.
- [8] 张小娟, 王军, 黄观, 等. 新疆 3 大山区云中液态水时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 846-854.
- [9] 刘菊菊, 游庆龙, 周毓荃, 等. 基于 ERA-Interim 的中国云水量时空分布和变化趋势[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1590-1604.
- [10] 杨大生, 王普才. 中国地区夏季 6~8 月云水含量的垂直分布特征[J]. 大气科学, 2012, 36(1): 89-101.
- [11] Paltridge, G.W. (2010) Cloud-Radiation Feedback to Climate. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,

- 106, 895-899. <https://doi.org/10.1002/qj.49710645018>
- [12] 张建新, 廖飞佳, 王文新. 中天山山区大气总水汽量和云液水量的遥感研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 89-92.
- [13] 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.
- [14] 陈勇航, 邓军英, 张萍, 马承愚, 何清, 杨莲梅, 余其多, 翟璟豪. 中天山附近强降雨过程中云冰水含量随高度变化特征[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 655-664.
- [15] Smith, M.D. (2019) Local Time Variation of Water Ice Clouds on Mars as Observed by THEMIS. *Icarus*, **333**, 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.06.009>
- [16] 石晓兰, 杨青, 姚俊强, 韩雪云, 李建刚. 基于 ERA-Interim 资料的中国天山山区云水含量空间分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(2): 50-56.
- [17] 李如琦, 唐冶, 阿布力米提江·阿不力克木, 等. 中亚五国暴雨分布及其环流特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1): 1-6.
- [18] 叶培龙, 王天河, 尚可政, 等. 基于卫星资料的中国西部地区云垂直结构分析[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 97-98.
- [19] 王洪强, 陈勇航, 彭宽军, 等. 基于 Aqua 卫星总云量资料分析山区云水资源[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 89-96.
- [20] 陈勇航, 彭宽军, 史玉光, 等. 天山山区与塔克拉玛干沙漠云水资源的对比分析[J]. 干旱区地理, 2009, 32(6): 886-891.