

湖南光伏发电气候适宜性研究

江涤非^{1,2} 郭海峰^{1,2} 罗红梅^{1,2} 邓玲^{1,2}

(1 湖南省气象服务中心, 长沙 410118; 2 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118)

摘要: 利用湖南省97个国家地面气象站和3个辐射站1985—2015年的日照时数、日照百分率、浮尘日数以及太阳辐射观测资料, 基于中国气象局最新发布的太阳能资源评估方法, 分析了湖南省各地区的辐射总量、辐射稳定度、光伏发电年保证率、年浮尘日数。综合上述四个指标, 进行了湖南省光伏发电气候适宜性区划; 依据1985—1995年、1996—2005年及2006—2015年三个时间段的气候观测数据, 分析了气候变化对湖南省光伏发电气候适宜性的影响。结果表明: 在湖南省境内, 不适宜区占全省总面积的8.07%, 次适宜区占14.95%, 较适宜区占29.83%, 适宜区占47.15%, 洞庭湖区和湘东南具有最适宜开展光伏发电的气候条件。

关键词: 光伏发电, 气候适宜性, 太阳辐射, 气候变化, 湖南省

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.03.009

Study on Climate Suitability of Photovoltaic Power Generation in Hunan Province

Jiang Difei^{1,2}, Guo Haifeng^{1,2}, Luo Hongmei^{1,2}, Deng Ling^{1,2}

(1 Hunan Meteorological Service Center, Changsha 410118 2 Hunan Provincial Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha 410118)

Abstract: Based on the solar energy resources assessment method issued by China Meteorological Administration, the total radiation amount, radiation stability, annual guarantee rate of photovoltaic power generation and annual floating dust days of 97 national surface meteorological stations and 3 radiation stations in Hunan Province from 1985 to 2015 were analyzed. Based on the climate observation data of 1985—1995, 1996—2005 and 2006—2015, the impact of climate change on the climate suitability of photovoltaic power generation in Hunan Province is analyzed. The results show that: in Hunan Province, the unsuitable areas account for 8.07% of the total area of the province, the sub suitable areas account for 14.95%, the more suitable areas account for 29.83%, and the suitable areas account for 47.15%. Dongting Lake region and Southeast Hunan Province have the most suitable climate conditions for photovoltaic power generation.

Keywords: photovoltaic power generation, climate suitability, solar radiation, climate change, Hunan Province

0 引言

随着人口、工业、经济的高速度发展, 由温室气体导致的全球气候变暖趋势愈发明显, 对人类的生存环境和健康安全造成了较大的威胁^[1]。化石燃料的燃烧是导致温室气体过度排放的主要原因之一, 建立可再生能源(太阳能、风能、生物质能、海洋潮汐能等)为主体的可持续能源体系成为解决环境与能源问题的最有效途径^[2-3]。在各种可再生能源当中, 太阳能以其就地即取、广泛分布、对生态环境影响小等优势, 被普遍认为是未来竞争力最大的新能源之一^[4]。到达地球表面的太阳辐射能量高达 4×10^{15} MW/a, 是当前全

球耗能的2000余倍^[5]。近年来, 国外学者们利用地理信息系统、多因子评估、遥感辐射产品, 进行了光伏、光热发电的气候、土地适宜性研究^[6-9]。我国太阳能资源丰富, 许多学者针对太阳能辐射计算方法、太阳能资源时空特征分析、区划分析、开发利用、太阳能电站选址影响因素等做了大量研究^[10-14], 但对特定区域进行的光伏发电气候适宜性区划及评估研究仍较少。

湖南省太阳能资源较为丰富, 但省内太阳能发电占比较低, 存在较大的发展空间, 积极开发利用本地区太阳能等清洁可再生能源已势在必行。光伏发电是太阳能发电的一种重要的形式, 通过太阳能电池直接将光能转换为电能^[15]。光伏电站的建设除受到发电技术的影响外, 选址的合理性也至关重要, 不合理的选址往往导致发电效率低下, 损失量大, 电站运行寿命低等问题^[16]。2018年, 中国气象局发布了新的行业标准《太阳能资源评估方法》(QX/T89-2018), 取代了

收稿日期: 2020年12月9日; 修回日期: 2020年12月22日
第一作者: 江涤非(1989—), Email: wqlypj@163.com
通信作者: 郭海峰(1975—), Email: 7443086@qq.com
资助信息: 湖南省气象局指令性课题项目(XQKJ17D005)

《太阳能资源评估方法》(QX/T89-2008), 新标准更新了部分太阳能辐照量的计算方法、评价指标、等级划分标准, 既往的研究大多基于原评估方法中的计算方法来推算太阳辐照量^[17-19]。本研究基于《太阳能资源评估方法》(QX/T89-2018), 利用湖南省3个辐射站辐射观测资料以及97个地面站日照时数、浮尘日数观测资料, 从太阳辐射条件和浮尘日数两个方面开展湖南省太阳能资源评估以及光伏发电的气候适宜性研究, 并研究了气候变化背景下, 光伏发电气候适宜区的变动情况, 为湖南省光伏发电项目的选址提供气候参考依据。

1 资料和方法

1.1 气象资料

采用的气象资料来源于湖南省气象信息中心, 时间序列为1985—2015年。气象数据均经过了严格的质控, 数据质量较好; 选用气象站点为湖南省境内97个国家地面气象站以及3个辐射观测站(长沙、常宁、吉首); 气象数据类型为月日照时数、日照百分率、浮尘日数以及3个辐射站观测到的月水平面太阳辐照量。

1.2 研究方法

参照《太阳能资源评估方法》(QX/T89-2018)中定义了一种以日照百分率为重要参数计算水平面太阳辐照量的气候学公式, 利用该公式, 可以计算得出无太阳辐射观测地点的水平面太阳辐照量。计算公式如下:

$$GHR = EHR(a + bS), \quad (1)$$

式中: GHR 为水平面太阳辐照量(MJ/m^2); S 为日照百分率(%); a , b 为经验系数; EHR 为地外水平面太阳辐照量(MJ/m^2)。

根据长沙、常宁、吉首三个辐射站的辐射观测资料, 利用《太阳能资源评估方法》(QX/T89-2018)中的经验公式, 可以计算求出三个站1—12月的 a , b 值, 再取三个站各月 a , b 值的平均值作为本次研究推算各站点水平面总辐照量的经验系数。本研究采用Java语言进行原始数据的处理, 实现97个国家地面气象站点日地外法向太阳辐照度、水平面太阳辐照量的推算以及三个辐射站1—12月 a , b 经验系数的计算。

2 结果分析

2.1 影响光伏发电的气候因素

光伏发电受太阳辐射条件和浮尘天气影响较为显著。首先, 优良的太阳辐射条件是光伏电站选址的根本; 依据《光伏电站项目选址评估技术指南》(第1版), 光伏电站建站区的太阳辐射条件由太阳辐射总量、辐射稳定度以及光伏发电年保证率决定。其

中, 太阳辐射总量能直接反映一个地区蕴藏的太阳能资源储量以及可开发程度, 辐射总量的多少受日照时数、海拔、纬度、大气成分等因素的影响^[20]; 太阳辐射稳定度则可表征一个地区水平面太阳辐射年内的变化的稳定程度, 稳定度越高, 太阳能资源的可利用性与利用效率也就越高^[21], 国内外诸多学者在对特定地区进行太阳能资源评估或太阳能电站选址研究时, 均不约而同地将太阳辐射稳定度作为一个重要的评价指标^[22-24]; 光伏发电年保证率是指拟建电站的地址在长年代时间序列当中, 年水平面太阳总辐照量达到适合发电指标(丰富及以上)的年数与时间序列总年数的比值, 能从一定程度上反映一个地区开展光伏发电的气候适宜度。除太阳辐射条件外, 浮尘对光伏发电量和发电效率也会产生较大的影响, 空气中浓度较高的浮尘将造成太阳光大量的散射, 使得太阳辐射的利用率降低, 从而影响发电^[14], 一个地区年浮尘日数(Fd)越多, 光伏发电的效率和质量就越低。

2.2 湖南省光伏发电气候条件

2.2.1 太阳辐射总量

太阳辐射总量主要由水平面太阳辐照量来表征, 通过QX/T89-2018中的气候学公式, 推算得到湖南省97个地面气象站点1985—2015年30年的年均水平面太阳总辐照量。利用克里金空间插值法, 对湖南省水平面太阳辐照量进行了空间插值分析, 结果如图1所示(分辨率 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$)。湖南省水平面太阳总辐照量在 $3508.22 \sim 4253.15\text{ MJ}/\text{m}^2$, 辐照量最高的地区为湘北洞庭湖区, 湘东南茶陵、炎陵、汝城以及湘南江华、宁远、道县等市县, 湘西北及湘西地区年水平面太阳总辐照量相对省内其他地区较低。

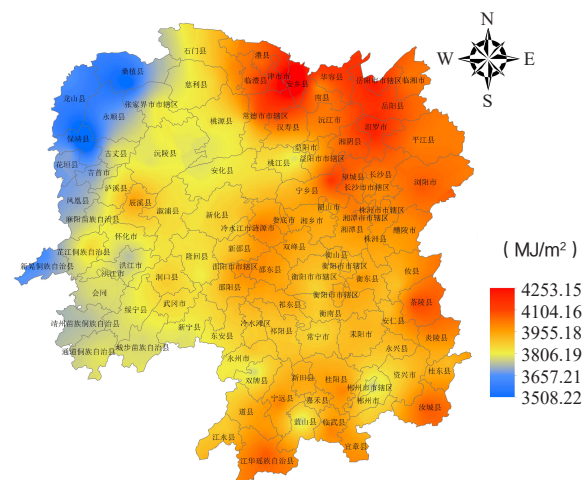


图1 湖南省水平面太阳总辐照量空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of total horizontal solar radiation in Hunan Province

此外，为了解湖南省水平面太阳辐射量的年际变化特征，对全省年水平面太阳总辐照量1985—2015年的变化趋势进行了分析。湖南省31年间年水平面太阳总辐照量波动较为明显，基本为每5年波动一次，从不同年代进行分析可知，近31年间，变化幅度最大的为2010—2015年，其次为1985—1990年。20世纪80年代、90年代以及21世纪10年代总辐照量均为较明显减少趋势，00年代呈现增加趋势；总体呈下降趋势，气候倾向率为 $-21.85 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ (图2)。

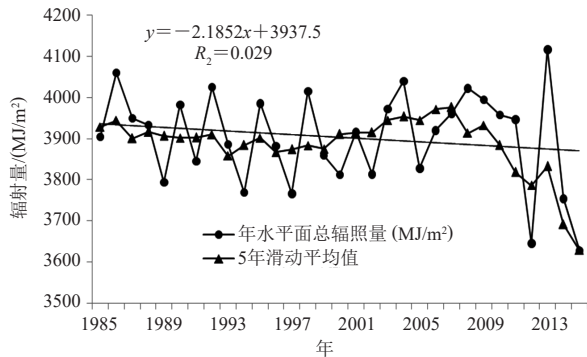


图2 1985—2015年湖南省年水平面太阳总辐照量年际变化趋势
Fig. 2 Interannual variation trend of total solar radiation on annual horizontal plane in Hunan Province from 1985 to 2015

2.2.2 太阳辐射稳定度

太阳辐射稳定度是一年当中月水平面太阳总辐照量最小值与最大值之比，根据太阳辐射稳定度的定义，计算得到研究区97个地面气象站1985—2015年太阳辐射稳定度的30年平均值，并用克里金插值法对研究区的稳定度进行空间插值分析。根据分析结果可知，湖南省各地太阳辐照量的稳定程度均不高，最低值为0.252，最高值为0.346，稳定度较高的区域主要为湘北洞庭湖湖区，湘东南炎陵、桂东、汝城以及衡阳北部等地；稳定度较低的区域主要为湘西、衡阳南部、郴州以及永州北部地区。

2.2.3 光伏发电年保证率

图3为湖南省1985—2015年间光伏发电年保证率的空间分布情况。由图可知，湖南省内不同地区光伏发电年保证率相差较大，为0.033~1，最低的为保靖，最高的为华容，呈现自东向西逐步递减的趋势。湖南省内，光伏发电年保证率较高的区域主要为湘北以及湘东北湖区、湘南、湘东南、湘中以及湘东等区域，年保证率较低的地区主要为湘西北以及怀化市、新晃县等市(县)。

2.2.4 浮尘天气影响

浮尘天气对光伏发电的影响主要用年浮尘日数表征，省内各地区年浮尘日数为0~41.77 d/a，年浮尘

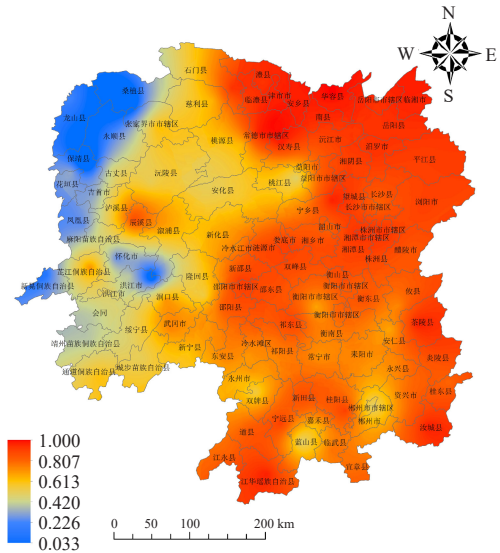


图3 1985—2015年湖南省光伏发电年保证率空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of annual guarantee rate of photovoltaic power generation in Hunan Province from 1985 to 2015

日数较多的地区为湘中偏北区域，主要为益阳、常德两市的大部分区域；湘南临武、嘉禾、宜章以及湘西北张家界、湘西自治州、怀化部分县市；年浮尘日数较少的区域主要为湘中偏东以及湘东南区域，涵盖衡阳、湘潭、株洲、长沙、岳阳大部分区域以及桂东、汝城、资兴、炎陵、郴州等县市。1985—2015年，湖南省年浮尘日数呈现较为明显的下降趋势，幅度较大，气候倾向率为1 d/10 a。

2.3 光伏发电气候适宜性区划

湖南省光伏发电的气候适宜性主要从太阳辐射条件和浮尘天气影响来进行考虑。选取辐射总量等级 R_s (年水平面太阳总辐照量)、太阳辐照量稳定度等级 R_w 、光伏发电年保证率 R_t 以及年浮尘日数 F_d 四个指标来进行综合评估。基于上述四个指标，设计一个综合指数 S ，计算方法如下：

$$S = R_s \times W_1 + R_w \times W_2 + R_t \times W_3 - F_d \times W_4, \quad (2)$$

式中： $W_1 \sim W_4$ 为辐射总量、稳定度、年保证率以及年浮尘日数的权重， R_s 、 R_w 、 R_t 、 F_d 为4个指标的重分类值。 R_s 、 R_w 、 R_t 指标的重分类赋值，依据《太阳能电站项目选址评估技术指南》(第1版)中划定的标准进行， F_d 则根据专家意见分类赋值；四个指标的具体赋值情况如表1~表4所示。将辐射总量等级、稳定度等级、光伏发电年保证率以及浮尘日数四个指标权重等级分别定为0.40、0.25、0.25、0.1。重分类值和权重确定后，在GIS平台中，通过图形处理和计算，得到湖南省光伏电站选址气候适宜性区划。不适宜区为综合

指数 $S < 1.8$ 的区域, 次适宜区为 $1.8 \leq S < 2.4$ 的区域, 较适宜区为 $2.4 \leq S < 3.0$ 的区域, 适宜区为 $3.0 \leq S \leq 3.6$ 的区域。

表1 辐射总量等级重分类赋值规则
Table 1 Classification and assignment rule of total radiation level

名称	符号	分级阈值 (MJ/m ²)	赋值
最丰富	A	$R_s \geq 6300$	7
很丰富	B	$5040 \leq R_s < 6300$	5
丰富	C	$3780 \leq R_s < 5040$	3
一般	D	$R_s < 3780$	1

表2 稳定度等级重分类赋值规则
Table 2 Classification and assignment rule of stability level

名称	符号	分级阈值 (MJ/m ²)	赋值
稳定	A	$R_w \geq 0.47$	7
较稳定	B	$0.36 \leq R_w < 0.47$	5
一般	C	$0.28 \leq R_w < 0.36$	3
不稳定	D	$R_w < 0.28$	1

表3 光伏发电年保证率重分类赋值规则
Table 3 Classification and assignment rules for annual guarantee rate of photovoltaic power generation

名称	符号	分级阈值 (MJ/m ²)	赋值
高	A	$60\% \leq R_t \leq 80\%$	7
较高	B	$50\% \leq R_t < 60\%$	5
一般	C	$40\% \leq R_t < 50\%$	3
低	D	$R_t < 40\%$	1

表4 年浮尘日数重分类赋值规则
Table 4 Classification and assignment rules of annual floating dust days

名称	符号	分级阈值 (MJ/m ²)	赋值
多	A	$F_d \geq 16.8$	7
较多	B	$5.7 \leq F_d < 16.8$	5
一般	C	$1.8 \leq F_d < 5.7$	3
少	D	$F_d < 1.8$	1

根据区划统计, 从气候角度分析, 在湖南省境内不适宜开展发电的区域占全省总面积的8.07%, 总面积为1.71万 km², 集中分布在湘西北地区, 不适宜区日照时长较短, 日照百分率低, 年浮尘日数较多, 导致水平面太阳辐射量少, 太阳能资源匮乏, 太阳辐射稳定度和年保证率也普遍较低; 在进行光伏发电选址时, 应尽量避免上述地区。次适宜区占全省总面积的14.95%, 约为3.17万 km²; 次适宜区基本位于不适宜区东部, 且紧邻不适宜区, 呈条带状。较适宜区在湖南省境内的面积约为6.32万 km², 占全省面积的29.83%。其分布具有三个特征, 一是位于次适宜区的东部, 且紧邻次适宜区; 二是湘中偏北的桃江、安化、益阳、宁乡、汉寿等县市以及湘南的临武、宜章、嘉禾、新

田、宁远等县市的部分区域; 三是湘东北临湘以及湘东浏阳、醴陵两县的部分区域; 较适宜区内可在考虑其他宏观和微观因素的情况下, 因地制宜开展光伏发电^[25]。湖南省境内, 适宜区的面积最大, 占全省总面积的47.15%, 约合9.98万 km², 适宜区大部分位于较适宜区东部, 紧邻较适宜区; 其中, 洞庭湖区和湘东南具有最适宜开展光伏发电的气候条件。

3 讨论与结论

1) 本研究利用1985—2015年湖南省97个地面气象站日照百分率、日照时数、浮尘日数以及3个辐射站水平面太阳辐射量对湖南省光伏发电的气候适宜性进行了区划及评价, 评价综合考虑了辐射总量、辐射稳定度、光伏发电年保证率以及年浮尘日数; 最终得到的区划和评价结果与湖南省光伏产业发展的实际情况较为吻合, 气候较为适宜光伏发电的洞庭湖区、衡阳北部、永州南部等地光伏产业发展态势良好^[26]。此外, 根据研究结果, 目前开发较少的湘东南(炎陵、桂东、汝城、茶陵、资兴)气候条件优异, 具有较大的发展潜力, 可成为未来湖南省光伏产业发展的新发地。

2) 湖南省年太阳总辐射量呈现波动下降趋势, 造成这种变化的原因较多, 可能与人类活动, 工业发展相关^[17-19]。但由于省内各县市年浮尘日数自20世纪80和90年代—21世纪10年代出现较大幅度的下降, 其下降幅度较太阳总辐射量更高, 光伏发电的大气环境条件有了较大程度的改善, 致使从1985—2015年, 适宜区的面积有了一定程度的增加, 光伏发电的气候条件得到了显著改善, 这种变化有利于湖南省太阳能资源的开发利用。

3) 气候条件是光伏发电最为重要的因素之一, 较好的太阳辐射和环境空气条件, 可以提升光伏发电量、发电效率和电池寿命, 保证对电网持续稳定的供电; 除此之外, 还存在其他宏观因素(地形条件、距离负荷中心的位置、当地政策导向)和微观因素(电站所在位置周边物体阴影、局地风向风速)^[25, 27]; 本研究仅考虑了宏观气候条件, 有待在今后的研究中不断进行补充和完善。

参考文献

- 李柯, 何凡能. 中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1049-1054.
- Vasilis F, James E M, Ken Z. The technical, geographical and economic feasibility for solar energy to supply the energy needs of the US. Energy Policy, 2009, 37(2): 387-399.
- John B, Lado K, Daniele P, et al. The potential of solar electric power for meeting future US energy needs: a comparison of projections of solar electric energy generation and Arctic National Wildlife Refuge oil production. Energy Policy, 2004, 32(2): 289-297.
- Dickinson W C, Cheremisin of f P N. Solar Energy Technology

- Handbook. London: Butterworths, 1980.
- [5] 赵利勇, 胡明辅, 杨贞妮. 太阳能利用技术与发展. 能源与环境, 2007, (4): 55-57.
- [6] Effat H A. Selection of potential sites for solar energy farms in ismailia governorate Egypt using SRTM and multicriteria analysis. International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS, 2013, 2(1): 205-220.
- [7] Yassine Charabi. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. Renewable Energy, 2011, 36(9): 2554-2561.
- [8] Lurawn S M, Idress M O, Ahmed G B, et al. GIS-Based optimal site selection for installation of large-scale smart grid-connected photovoltaic(PV) power plants in selangor Malaysia. American Journal of Applied Sciences, 2017, 14(1): 174-183.
- [9] Wang S F, Koch B. Determining profits for solar energy with remote sensing data. Energy, 2010, 35: 2934-2938.
- [10] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法. Acta Meteorologica Sinica, 1964, 34(3): 304-315.
- [11] 鞠晓慧, 屠其璞, 李庆祥. 我国太阳总辐射气候学计算方法的再讨论. 南京气象学院学报, 2005, 28(4): 516-521.
- [12] 黄晚华, 帅细强, 汪扩军. 考虑地形条件下山区日照和辐射的GIS模型研究. 中国农业气象, 2006, 27(2): 89-93.
- [13] 王炳忠, 张富国, 李立贤. 我国的太阳能资源及其计算. 太阳能学报, 1980, 1(1): 1-9.
- [14] 徐卜. 大型光伏地面电站建设选址研究. 经济视野, 2013, (17): 259-262.
- [15] 施钰川. 太阳能原理与技术. 陕西: 西安交通大学出版社, 2009: 1-2.
- [16] 肖建华, 姚正毅, 孙家欢. 并网太阳能光伏电站选址研究述评. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1598-1605.
- [17] 杜东升, 张剑明, 张建军. 湖南省太阳能资源时空分布特征及评估. 中国农学通报, 2015, 31(36): 170-175.
- [18] 刘可群, 陈正洪, 夏智宏. 湖北省太阳能资源时空分布特征及区划研究. 华中农业大学学报, 2007, 26(6): 888-893.
- [19] 周扬, 吴文祥, 胡莹, 等. 西北地区太阳能资源空间分布特征及资源潜力评估. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1738-1749.
- [20] 康德拉捷夫. 太阳能辐射. 李怀瑾, 邹进上, 牛天任, 等译. 北京: 科学出版社, 1962: 511-519.
- [21] 吕银娇. 江西省太阳能资源评价及屋顶和南墙的实际得热分析. 南昌: 江西理工大学, 2018.
- [22] Wegertseder P, Lund P, Mikkola J, et al. Combining solar resource mapping and energy system integration methods for realistic valuation of urban solar energy potential. Solar Energy, 2016, 135: 325-336.
- [23] 杨富程, 孙周, 韩二红. 拉萨地区太阳能资源变化特征分析及评估. 可再生能源, 2014, 32(12): 1791-1796.
- [24] 曾燕, 王珂清, 谢志清, 等. 江苏省太阳能资源评估. 南京气象学院学报, 2012, 35(6): 658-663.
- [25] 施渊. 光伏并网发电系统选址及电能质量研究. 南京: 东南大学, 2016.
- [26] 陈浩, 石辉, 邓小亮. 光伏大规模发电并网对湖南电网运行影响分析. 湖南电力, 2018, 38(6): 5-7.
- [27] Griffith J S, Rathod N S, Paslaski J. Some tests of flat plate photovoltaic module cell temperatures in simulated field conditions. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1981: 822-830.

(上接43页)

- [3] Lorenz E N. Available potential energy and maintenance of the general circulation. Tellus, 1955, 7: 157-167.
- [4] 谢义炳. 能量天气分析、预报方法的现状和将来的可能发展. 气象科技资料, 1978, (2): 5-9.
- [5] 谢义炳. 湿斜压天气的动力学问题. 吉林: 吉林人民出版社, 1980: 1-15.
- [6] 丁一汇, 周秀骥. 创新育人 奉献——纪念谢义炳先生诞辰90周年. 气象学报, 2007, 65(5): 663-664.
- [7] 吴宝俊. 湿有效位能及其在暴雨分析和预报中的应用. 气象, 1982, 8(11): 4-7.
- [8] 吴宝俊, 蒋凤英. 有限区域湿有效位能收支方程. 气象学报, 1983, 41(3): 338-342.
- [9] 章国材, 吴宝俊. 有限区域湿有效能量的层结、斜压、正压分量及其收支方程. 大气科学, 1985, 9(4): 406-412.
- [10] 刘延英, 许晨海, 吴宝俊. 1990年京津冀三次暴雨的分析. 应用气象学报, 1993, 4(3): 349-355.
- [11] 刘延英, 钱玉英, 翟盘茂. 一个内陆台风的湿有效能量分析. 应用气象学报, 1995, 6(1): 63-69.
- [12] 刘延英, 仪清菊, 周丽, 等. 1991年江淮梅雨的湿有效能量分析. 气象学报, 1999, 57(6): 741-750.
- [13] 周海光, 刘延英, 刘蔚. 1998年广东省三次暴雨过程的湿有效能量分析. 应用气象学报, 2006, 17(1): 10-18.
- [14] 李任承, 林朝旭, 霍英等. 湿静力平衡温度及其在大气对流运动中的应用. 气象学报, 2014, 72(3): 614-627.
- [15] 邹丽丽, 谭桂容, 李任承, 等. 对流有效位能的本质和一种新的计算方法. 气象科技进展, 2017, 7(3): 7-15.
- [16] 丁一汇, 蔡则怡, 李吉顺. 中尺度对流系统的形成发展. 吉林: 吉林人民出版社, 1980: 69-80.
- [17] 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题. 气象学报, 1994, 52(3): 274-283.
- [18] 丁一汇. 暴雨和强对流天气的发生和反馈作用. 北京: 气象出版社, 1986: 120-188.
- [19] 孙继松, 陶祖钰. 强对流天气分析与预报中若干基本问题. 气象, 1986, 38(2): 164-173.
- [20] 俞小鼎. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析. 气象, 2012, 38(11): 1313-1329.
- [21] 廖晓农, 倪允琪, 何娜, 等. 导致“7.21”特大暴雨过程中水汽异常充沛的天气尺度动力过程分析研究. 气象学报, 2013, 71: 997-1011.
- [22] 李云静, 张建春, 王捷纯, 等. 一次冷涡背景下强对流不稳定条件的成因分析. 气象, 2013, 39(2): 210-217.
- [23] 冉令坤, 齐彦斌, 郝寿昌. “7.21”暴雨过程动力因子分析和预报研究. 大气科学, 2014, 38(1): 83-100.
- [24] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析. 气象学报, 2015, 73(3): 425-441.
- [25] 梁俊平, 张一平. 2013年8月河南三次西南气流型强对流天气分析. 气象, 2015, 41(11): 1328-1340.
- [26] 马旭林, 孙丽娜, 姜胜, 等. 一次江淮强暴雨过程的湿有效能量及其收支特征. 大气科学学报, 2015, 38(3): 289-298.
- [27] 刘璐, 冉令坤, 周玉淑, 等. 北京“7.21”暴雨的不稳定性及其触发机制分析. 大气科学, 2015, 39(3): 583-595.
- [28] 栗哈, 王新敏, 张霞, 等. 河南“7.19”豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析. 气象, 2018, 44(9): 1136-1147.
- [29] 赵思雄, 孙建华, 鲁蓉, 等. “7.20”华北和北京大暴雨过程的分析. 气象, 2018, 44(3): 351-360.
- [30] 杨大升, 刘余滨, 刘式适. 动力气象学. 北京: 气象出版社, 1983: 95-96.
- [31] 李任承, 符长锋, 吴万素. 嫡的演化与暴雨形成和落区的探讨. 气象, 1995, 21(3): 11-16.