

平凉一次暴雨前对流层顶异常特征分析

赵慧, 马鹏程, 薛 启 (甘肃省平凉市气象局, 甘肃平凉 744000)

摘要 利用 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料和常规气象观测资料, 以 2016 年 7 月 18 日出现在平凉的区域性暴雨为例, 分析暴雨发生前对流层顶高度、温度以及各高度的垂直速度、位涡、风场变化特征。结果表明, 暴雨发生前 4 d 至前 2 d 对流层顶高度有明显的下降, 并于暴雨发生前 2 d 降至最低, 最低为 14.6 km, 相反地, 对流层顶温度在暴雨发生前 5 d 至前 2 d 开始上升, 并于暴雨发生前 2 d 升至最高, 可达 -65.6°C 。对流层顶高度在暴雨发生前 2 d 的空间形变主要体现在南北方向上, 高度的经向梯度变化比纬向梯度变化明显; 从纬向看, 暴雨发生前 2 d, 2 PVU 等位涡线可以向下发展到 380 hPa 附近, 凹陷最明显, 即暴雨发生前 2 d 平凉地区对流层顶会出现折卷现象, 暴雨发生当天, 上升运动最强盛, 最大垂直速度可达 -0.3 Pa/s ; 对流层顶高度下降主要原因是由高层向下侵入的高位涡冷空气及对流层顶折卷过程影响。以上结果表明, 对流层顶附近异常信号对暴雨预测有较好的指示意义。

关键词 对流层顶; 暴雨前; 位涡; 风场; 垂直速度; 对流层顶高度; 对流层顶温度

中图分类号 S 162 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)19-0195-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.19.051



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Analysis of Abnormal Characteristics of Tropopause before a Rainstorm in Pingliang

ZHAO Hui, MA Peng-cheng, XUE Qi (Pingliang Meteorological Bureau of Gansu Province, Pingliang, Gansu 744000)

Abstract By using the NCEP/NCAR global reanalysis data with the resolution of $1^\circ \times 1^\circ$ and conventional meteorological data, taking the regional rainstorm in Pingliang on July 18, 2016 for example, the variation characteristics of tropopause height, temperature and the vertical velocity, potential vorticity and wind fields of each height were analyzed. The results showed that the tropopause height decreased significantly from 4 days to 2 days before the rainstorm, and decreased to the lowest (14.6 km) 2 days before of the rainstorm. Conversely, the tropopause temperature began to rise from 5 days to 2 days before the rainstorm, and rose to the highest 2d before the rainstorm, reaching -65.6°C . The tropopause height was mainly reflected in the north-south direction 2 days before the rainstorm, and the meridional gradient change was more significantly than that in the zonal direction. From the zonal direction, the 2 PVU potential vorticity line could be developed down to 380 hPa 2 days before the rainstorm, and the depression was the most obvious, that was, 2 days before the rainstorm, the tropopause would appear folding in the Pingliang area, while the ascending movement was the strongest in the day of the rainstorm, and the maximum vertical speed could reach to -0.3 Pa/s . It was proposed that the lowering of the tropopause height was mainly due to the cold air from the high vorticity invaded by the upper layer and tropopause fold event process. Therefore, the characteristics of anomalous near the top of the tropopause could be applied to forecast rainstorm in Pingliang.

Key words Tropopause; Before rainstorm; Potential vorticity; Wind fields; Vertical velocity; Tropopause height; Tropopause temperature

暴雨是发生在对流层中的天气过程, 以往对暴雨的研究多集中在对流层中天气系统、中尺度模拟等方面, 较少关注对流层顶及平流层变化^[1-4]。传统意义上普遍认为平流层大气仅仅被动地接受对流层的影响, 然而随着近几年研究的深入, 这种“平流层是受对流层影响的被动系统”的传统观点由于两大问题的研究进展而发生改变, 一个是平流层的臭氧损耗问题, 研究指出平流层臭氧损耗造成了冬末夏初中高纬度地面的增温现象^[5-6], 另外一个则是北极涛动(AO)的提出和研究^[7-9]。

平流层异常可影响对流层天气过程^[10-15]已被不断证实。有学者甚至建议把冬季北半球平流层的异常信号作为预报对流层天气变化的先行指标^[16-17]。Wang 等^[18]提出相对较弱的平流层异常也可以对对流层天气系统产生影响。龚道溢^[19]通过分析春季北极涛动(AO)指数的变化对梅雨带夏季降水年际变化的影响, 得出 AO 能够预测东亚夏季年际降水。李春等^[20]研究了北极涛动的年代际变化与大气环流及华北夏季降水异常变化的联系, 发现在年代际尺度上, 北极涛动与贝加尔湖地区阻塞高压发生频率、东亚夏季风强度和华北夏季降水之间有密切关系。姚秀萍等^[21]提出与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入在对流层高层表现最为显著。李

崇银等^[22]研究表明我国梅雨异常可能是受到平流层环流异常的影响, 而这种影响是通过北极涛动 AO 的变化来实现的。赵亮等^[23]通过分析气候平均意义下梅雨前期及梅雨期间东亚地区等熵位涡(IPV)的源区和演变过程, 发现梅雨发生前, 东亚地区对流层高层经向位涡梯度减弱, 贝加尔湖东侧是影响梅雨期降水的位涡源区。陈文等^[15]提出在季节内事件尺度上, 平流层极涡异常下传对对流层大气环流有明显的影响, 并且这种影响在东亚地区极为显著, 可影响东亚短期气候异常。雒佳丽等^[24]研究指出对流层顶附近的北半球环状模指数与梅雨期总降水量呈正相关。姜晓玲等^[25]分析了东亚夏季风暴发前后我国不同区域对流层顶高度变化特征, 指出夏季风暴发后我国东北部和中东部对流层顶会上升。还有学者研究了平流层异常信号在暴雪预报中的应用, 刘毅等^[26-27]研究表明平流层位相的超前信号及其演变对 2008 年雪灾有极为重要的指示意义, 可作为对流层异常天气预报的先行指标。

上述研究主要集中于平流层过程对梅雨、罕见暴雪等的影响, 对于对流层顶及平流层过程对暴雨的分析并不多见, 针对暴雨发生前对流层顶及平流层异常信号的研究少之又少。笔者以 2016 年 7 月 18 日发生在平凉地区的区域性暴雨为例, 利用 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 、逐日 4 个时次的再分析资料和常规气象观测资料, 对暴雨发生前对流层顶高度、温度以及各高度的垂直速度、位涡、风场特征进行分析, 以期找到暴

基金项目 平凉市气象局气象科研项目(PLZd-202101)。

作者简介 赵慧(1990—), 女, 甘肃秦安人, 工程师, 硕士, 从事大气科学研究。

收稿日期 2021-03-20

雨发生前对流层顶附近的异常信号,为平凉地区暴雨的预报提供科学的理论依据。

1 雨情实况

2016年7月18日,平凉遭遇了历史上较强的暴雨灾害,强降水主要出现在平凉市中东部,18日08:00—19日08:00气象局自动雨量站174站中降水量超过50 mm的有60站,超过70 mm的有16站,超过100 mm的有2站。最强降水出现在泾川县田家沟村,降水量为127.9 mm。

从2016年7月18日08:00—9日08:00平凉和庆阳县级观测站的24 h降水量(图1)可以看出,最强降水主要集中在平凉东部、庆阳西部,其中泾川站24 h降水量为104 mm,达大暴雨量级;离泾川站较近的镇原、西峰、宁县降水量分别为65、74和96 mm,可见泾川站及其周边地区是此次降水过程的强降雨带中心。

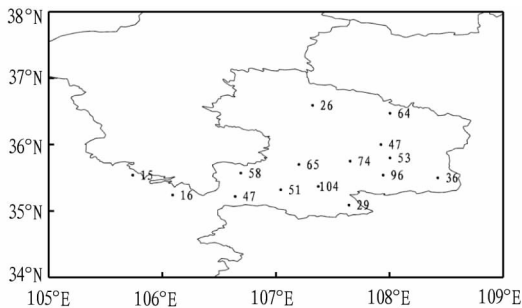


图1 2016年7月18日08:00—19日08:00降水量(单位:mm)

Fig. 1 Precipitation from 08:00 on July 18 to 08:00 on July 19, 2016

从泾川站18日08:00—21:00逐小时降水量的时间变化(图2)可以看出,此次暴雨过程主要集中在18日11:00—17:00,且在13:00—15:00降水量达到最大,3 h降水量接近60 mm,占18日白天(08:00—21:00)降水量的56.3%,16:00后降水量逐渐减小,21:00雨带东移,泾川站降水趋于结束。以下分析以泾川站为代表进行深入研究。

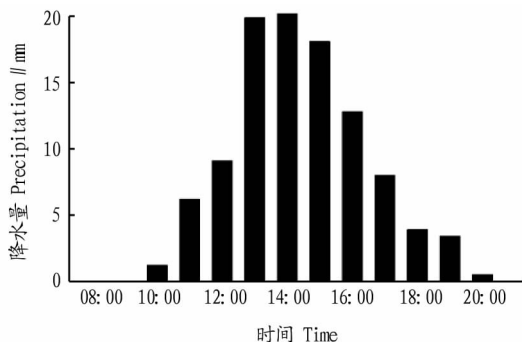


图2 2016年7月18日08:00—21:00泾川站降水量变化

Fig. 2 Change of precipitation at Jingchuan Station from 08:00 to 21:00 on July 18, 2016

2 暴雨发生前对流层顶高度和温度变化

为明确对流层顶对此次暴雨过程的影响,首先对暴雨发生前对流层顶高度和温度的变化进行研究,从图3可以看出,暴雨发生前4 d对流层顶高度开始明显下降,并于暴雨发生前2 d降至最低(14.6 km),接着对流层顶高度开始升高,

于暴雨发生后2 d升至最高(16.3 km),之后对流层顶高度基本维持在15.5~16.0 km,呈波动变化。分析对流层顶温度发现,其变化趋势与对流层顶高度变化正好相反,暴雨发生前6 d对流层顶温度开始上升,并于暴雨发生前2 d升至最高(-65.6℃),之后对流层顶温度开始下降,于暴雨发生后4 d降至最低(-74.8℃),之后对流层顶温度呈升高趋势。

为进一步明确对流层顶的经向和纬向变化,图4给出了此次暴雨发生前2 d内对流层顶高度的经向梯度和纬向梯度变化。从图4可以看出,每天4个时次的观测数据均表现为暴雨发生前2 d对流层顶高度的经向梯度明显大于暴雨发生前1 d及暴雨发生当天的值;对于对流层顶高度的纬向梯度而言,每天4个时次的观测数据同样表现为暴雨发生前2 d大于暴雨发生当天的值,而有3个时次发生了暴雨发生前2 d大于暴雨发生前1 d的值的现象。综合来看,无论是对流层顶高度的经向梯度还是对流层顶高度的纬向梯度,暴雨发生前2 d均大于暴雨发生当天的值,且经向梯度的变化比纬向梯度的变化更为明显,即暴雨发生前2 d对流层顶高度会发生明显形变且南北形变大于东西形变,也就是说对流层顶高度在暴雨发生前2 d的空间形变主要体现在南北方向上。

为明确暴雨发生前对流层顶高度降低的可能原因,下面着重从暴雨发生前经、纬向垂直剖面上垂直速度、位温等有关信号的变化进行分析。从暴雨发生前6 d、前4 d、前2 d以及暴雨发生当天在105°~108°E平均的经向垂直剖面(图5)可以看出,暴雨发生前6 d至前2 d平凉地区(27°~35°N)对流层中高层有明显的上升运动,最大垂直速度为-0.1 Pa/s,而在平凉地区北部(35°~40°N)表现为明显的下沉运动,随着时间的推移上升运动区逐渐北抬,直到暴雨发生当天整个研究区盛行强烈的上升运动,垂直速度可达-0.3 Pa/s,下沉运动则明显减弱。此外,还可以看出,位温随高度增大,最小值为320 K,最大值为420 K,在上升运动区,500~200 hPa高度内等位温线有明显向下弯曲的现象,也就是说对流层中上层上升运动区内位温增大。

位涡综合表征了大气热力、动力和水汽特征,暴雨的发生需要有充沛的水汽和有利的动力、热力条件,因而诊断位涡与暴雨之间关系是具有应用价值的。进一步分析暴雨发生前纬向垂直剖面上位涡的变化,以了解暴雨发生前对流层顶高度降低的可能原因。从暴雨发生前3 d至发生当天在36°N处位涡的纬向垂直剖面(图6)可以看出,位涡随高度逐渐升高,最大值可达100 PVU以上,最大位涡出现在100 hPa附近,300 hPa以上位涡的纬向垂直剖面基本呈波状分布,且越往高层变化越平缓,300 hPa以下位涡的纬向垂直剖面则有明显的谷峰变化。选2 PVU位涡线作为动力对流层顶,在暴雨发生前3 d(图6a),平凉地区2 PVU的位涡线位于350 hPa附近,并且在108°E附近出现凹陷,这种凹陷与对流层高层冷空气的活动有关;暴雨发生前2 d(图6b),2 PVU的位涡线向下发展至380 hPa附近,108°E附近的凹陷明显加深,这是对层顶折卷的体现;暴雨发生前1 d(图6c),380 hPa附近的凹陷东移至110°E且有所减弱,折卷略有东移并伴随减弱;暴雨发

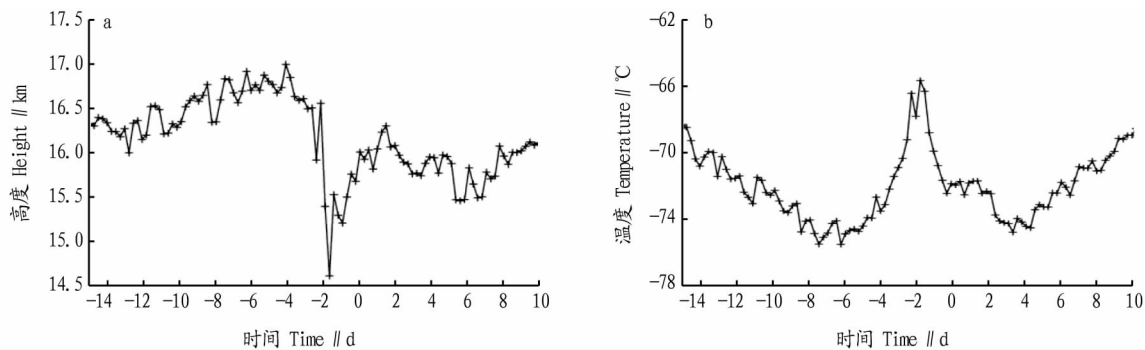


图 3 暴雨发生前 15 d 至暴雨发生后 10 d 对流层顶高度 (a) 和温度 (b) 变化趋势

Fig. 3 Variations of the tropopause height (a) and the tropopause temperature (b) from the 15th day before the rainstorm to the 10th day after the rainstorm

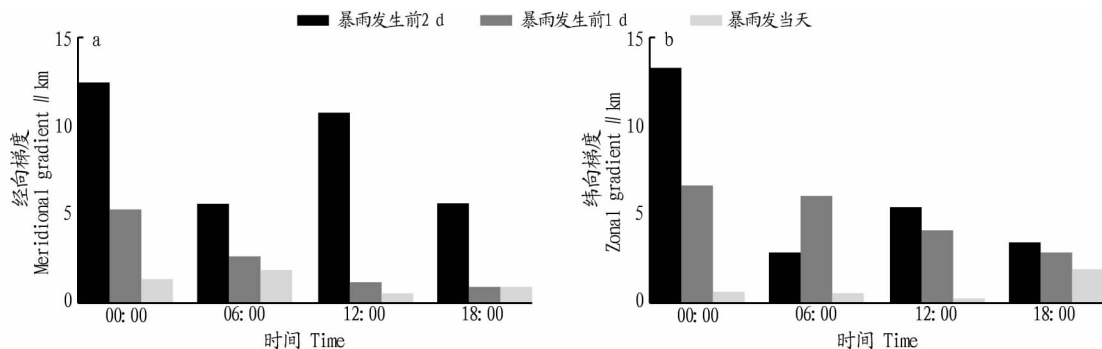
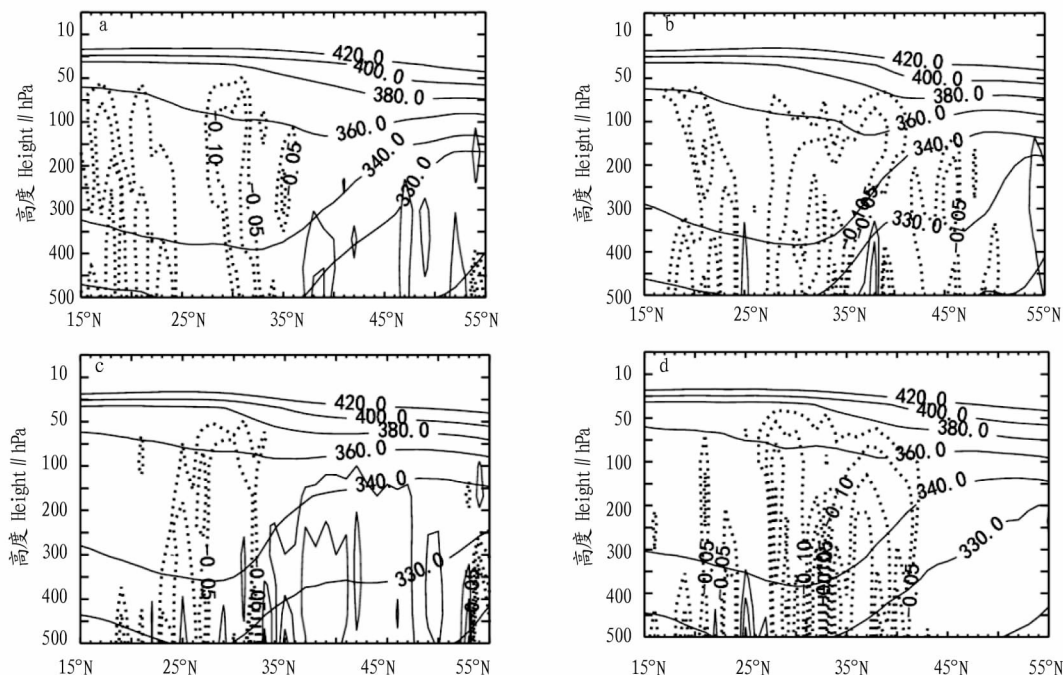


图 4 暴雨发生前 2 d 内对流层顶高度的经向梯度 (a) 和纬向梯度 (b)

Fig. 4 The meridional gradient (a) and the zonal gradient (b) of the tropopause height at the 2nd day before the rainstorm



注:细实线表示位温(K);粗实线表示正垂直速度;粗点线表示负垂直速度(Pa/s)

Note:The thin solid line represents the potential temperature (K); the thick solid line represents the positive vertical velocity; the thick dotted line represents the negative vertical velocity (Pa/s)

图 5 暴雨发生前 6 d (a)、前 4 d (b)、前 2 d (c) 和发生当天 (d) 105°~108°E 平均经向垂直剖面

Fig. 5 The average meridional vertical section of 105°-108°E before 6 d (a), 4 d (b), 2 d (c) and the day (d) of rainstorm

生当天(图 6d), 2 PVU 的位涡线向上发展至 360 hPa 附近, 凹陷东移至 111°E 附近, 也就是说对流层顶折卷维持东移和减

弱趋势。这与对流层顶高度变化结果(图 3a)一致, 对流层顶在暴雨发生前 2 d 降至最低, 之后开始缓慢回升。

综上所述,暴雨发生前平凉地区的对流层顶附近会有来自高层(平流层)的高位涡空气向下侵入,导致对流层顶的下降和折卷。而暴雨发生当天平凉地区及其北部对流层顶的下沉气流消失了,折卷现象也逐渐减弱并东移,这是因为暴雨发生当天平凉地区主要受大范围的上升气流控制,与之伴

随的是对流层顶的抬高。根据 Hoskins 位涡理论^[28],负位涡代表不稳定的暖湿气流,正位涡则代表冷空气活动,也就是说暴雨发生前有来自平流层的冷空气进入到对流层中,从而引起对流层顶的下降,暴雨发生当天对流层空气进入到平流层中,大范围的上升气流又导致对流层顶高度回升。

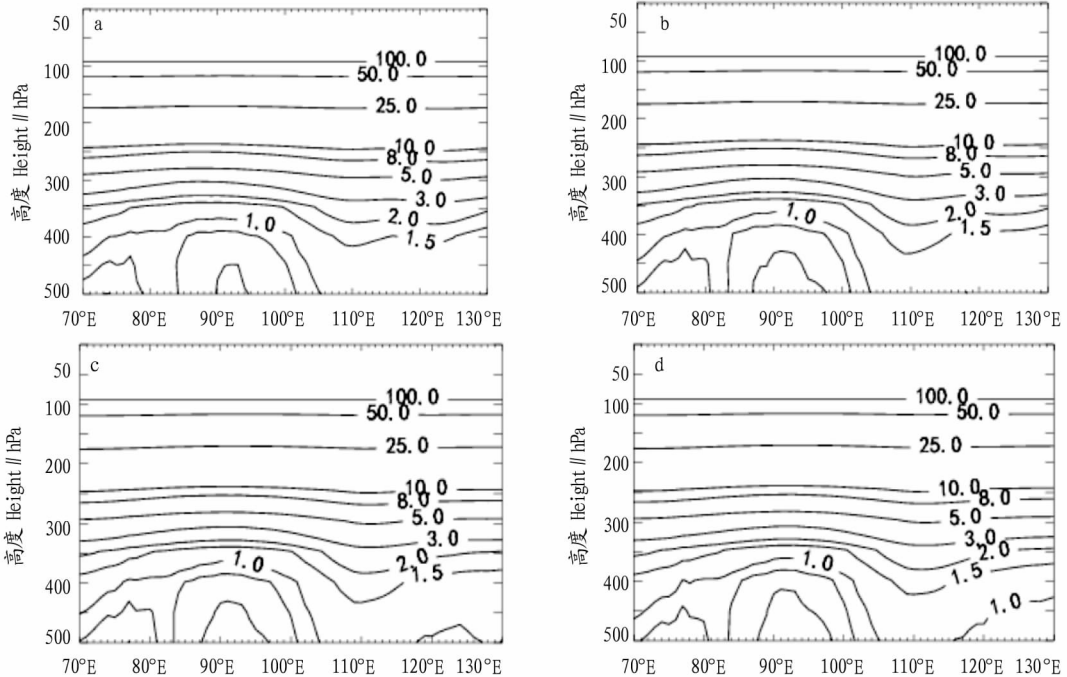


图6 暴雨发生前3 d(a)、前2 d(b)、前1 d(c)和发生当天(d)36°N位涡纬向垂直剖面(单位:PVU)

Fig. 6 The longitude-height cross sections of potential vorticity fields along 36°N on the 3rd day (a) the 2nd day (b) the 1st day before the rainstorm(c) and the day of rainstorm

3 结论

针对2016年7月18日发生在平凉地区的区域性暴雨,利用NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料和常规气象观测资料分析了此次暴雨发生前平凉地区对流层顶的异常特征,得到以下结论:

(1)暴雨发生前4 d至前2 d对流层顶高度有明显的下降,并于暴雨发生前2 d降至最低,最低为14.6 km,相反地,对流层顶温度在暴雨发生前5 d至前2 d开始上升,并于暴雨发生前2 d升至最高,可达 -65.6°C 。

(2)无论是对流层顶高度的经向梯度还是纬向梯度,暴雨发生前2 d均大于暴雨发生当天的值,且经向梯度的变化比纬向梯度的变化更为明显,也就是说对流层顶高度在暴雨发生前2 d的空间形变主要体现在南北方向上。

(3)暴雨发生前6 d至前2 d平凉地区有明显的上升运动,在其北部为下沉运动,随着暴雨的发生,上升运动不断增强且范围扩大,最大垂直速度可达 -0.3 Pa/s ;从纬向看,暴雨发生前2 d,2 PVU等位涡线可以向下发展至380 hPa附近,凹陷最明显,即暴雨发生前2 d平凉地区对流层顶会出现折卷现象。

(4)暴雨发生前平凉地区的对流层顶附近有自高层的高位涡冷空气向下侵入是对流层顶下降的主要原因,暴雨发生当天对流层大范围的上升气流又导致对流层顶高度的回升。

总的来说,平凉暴雨发生前,对流层顶会出现异常信号,主要表现在对流层顶高度的下降和对流层顶附近高位涡冷空气的向下侵入,关于冷空气的向下侵入对平凉暴雨过程的作用该研究只是个例研究,冷空气的向下侵入是否始终在暴雨发生前2 d达到最强,是否每次暴雨发生前会出现侵入方向的改变并伴随强度的减弱,还有待于大量的个例来验证。

参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 255.
- [2] 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 等. 1998 夏季中国暴雨的形成机理与预报研究[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 184.
- [3] 赵玉春, 王叶红. 近30年华南前汛期暴雨研究概述[J]. 暴雨灾害, 2009, 28(3): 193-202, 228.
- [4] 王林, 覃军, 陈正洪, 等. 鄂东两次暴雨前后近地层物理量场异常特征分析[J]. 气象, 2010, 36(12): 28-34.
- [5] HARTMANN D L, WALLACE J M, LIMPASUVAN V, et al. Can ozone depletion and global warming interact to produce rapid climate change? [J]. PNAS, 2000, 97(4): 1412-1417.
- [6] HU Y Y, TUNG K K. Possible ozone-induced long-term changes in planetary wave activity in late winter[J]. J Climate, 2003, 16(18): 3027-3038.
- [7] THOMPSON D W J, WALLACE J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. Geophys Res Lett, 1998, 25(9): 1297-1300.
- [8] KODERA K. On the origin and nature of the interannual variability of the winter stratospheric circulation in the Northern Hemisphere[J]. J Geophys Res, 1995, 100(D7): 14077-14087.
- [9] BALDWIN M P, DUNKERTON T J. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere [J]. J Geophys Res, 1999, 104(D24): 30937-30946.
- [10] BALDWIN M P, DUNKERTON T J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes[J]. Science, 2001, 294(5542): 581-584.

时会自动检查错误,检查出错误后会自动消除错误。后端框架基础使用 SpringBoot,数据层使用的是 Mybatis,简单易上手,便

于维护。用户基本信息使用 Mysql,保存用户的信息,使用 redis 保存经常用到的数据来降低整个项目的响应时间。

表 2 猪场水帘降温耗水量

Table 2 Water cooling water consumption of pig farm

序号 Code	栋舍名称 Name of building	猪舍数量 Quantity 个	水帘面积 Water area m ³	使用月份 Using month	蒸发量 Evaporation capacity kg/(h·m ²)	日耗水量 Daily water consumption//m ²	日洒漏浪费 Daily spill leakage waste//%
1	产房	3	27.0	5	30	12.15	30
2	配种妊娠	4	13.5	7	30	11.34	30
3	保育舍	4	0	7	0	0	0
4	生长育成舍	6	13.5	7	30	17.01	30

前端采用 JavaScript^[10] 语言编写,采用比较流行的 Vue 框架。Vue 的优点在于可以自底向上应用,是一种渐进式的框架,而且简单易学,Vue 只关视图层,并且还可以和其他以后的数据库或者项目整合在一起。生猪水足迹计算界面如图 2 所示。



图 2 生猪水足迹计算器

Fig. 2 Pig water footprint calculator

平台采取开放使用的方式,让更多的生猪养殖用户与研究人员参与进来,通过记录用户数据在经济效益和环境效益方面如何合理减少用水量,针对性提出改进方案和措施;对猪舍进行优化改革,达到节约用水的目的。

4 结语

该研究的目的是一个基于面向对象设计技术的生猪水足迹应用系统,该系统可以收集生猪水足迹数据与研究人员分析数据,为用户提供一个开放的平台和共享的数据库,为

我国生猪水足迹计算提供一个专业、可靠、方便的计算机智能化系统。

该系统已经初步实现了生猪水足迹的相关计算,为今后的进一步研究开发积累了宝贵经验,奠定了重要的基础。但该系统仍存在一些有待改善与加强之处,比如针对一些复杂的数据还不能够很好地进行处理和计算,针对类似问题将会继续研究和改进,从而提高水足迹的准确性,这是今后仍需要解决的一个重要问题。

参考文献

[1] 刘晓磊,栾一博,胡科,等. 中国生猪生产耗水及影响因素分析[J]. 资源科学,2016,38(1):110-118.
 [2] 朱赞,顾世祥,苏沛兰,等. 基于 LMDI 的滇中受水区农业用水量变化影响因素分析[J]. 节水灌溉,2020(12):68-73.
 [3] 孙才志,张灿灿. 中国人均水足迹驱动效应分解与空间聚类分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(2):1-11.
 [4] 龙爱华,徐中民,王新华,等. 人口、富裕及技术对 2000 年中国水足迹的影响[J]. 生态学报,2006,26(10):3358-3365.
 [5] 谌伟,李荷华. LMDI 分解方法在碳排放领域用法探讨[J]. 生态经济,2015,31(8):93-96.
 [6] 侯希明. 吉林省畜牧业生产水足迹及其影响因素研究[D]. 长春:东北师范大学,2016.
 [7] 邢玲. 夏季肉鸡养殖场降温的几种方法[J]. 现代畜牧科技,2017(2):14.
 [8] 刘芳. 养猪场处理污水稻田利用决策支持系统研究[D]. 扬州:扬州大学,2010.
 [9] 高源. 计算机软件开发中 JAVA 编程语言的应用[J]. 网络安全技术与应用,2021(1):40-42.
 [10] LIMA I, SILVA J, MIRANDA B, et al. Exposing bugs in JavaScript engines through test transplantation and differential testing[J]. Software quality journal, 2021, 29(1):129-158.

(上接第 198 页)

[11] HARTLEY D E, VILLARIN J T, BLACK R X, et al. A new perspective on the dynamical link between the stratosphere and troposphere[J]. Nature, 1998, 391(6666):471-474.
 [12] BLACK R X. Stratospheric forcing of surface climate in the Arctic Oscillation[J]. J Climate, 2002, 15(3):268-277.
 [13] 胡永云. 平流层极地臭氧损耗影响对流层气候的研究进展[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(5):561-568.
 [14] 张伟,陶祖钰,胡永云,等. 气旋发展中平流层空气干侵入现象分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(1):61-67.
 [15] 陈文,魏科. 大气准定常行星波异常传播及其在平流层影响东亚冬季气候中的作用[J]. 地球科学进展, 2009, 24(3):272-285.
 [16] BALDWIN M P, THOMPSON D W J, SHUCKBURGH E F, et al. Weather from the stratosphere? [J]. Science, 2003, 301(5631):317-319.
 [17] 胡永云. 关于平流层异常影响对流层天气系统的研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7):713-720, 769.
 [18] WANG L, CHEN W. Downward Arctic Oscillation signal associated with moderate weak stratospheric polar vortex and the cold December 2009[J]. Geophys Res Lett, 2010, 37(9):L09707.

[19] 龚道溢. 北极涛动对东亚夏季降水的预测意义[J]. 气象, 2003, 29(6):3-6.
 [20] 李春,罗德海,方之芳,等. 北极涛动年代际变化与华北夏季降水的联系[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(6):755-762.
 [21] 姚秀萍,吴国雄,赵兵科,等. 与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入研究[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2007, 37(3):417-428.
 [22] 李崇银,顾毅,潘静. 梅雨与北极涛动及平流层环流异常的关联[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6):1632-1641.
 [23] 赵亮,丁一汇. 梅雨期高位涡源区及其传播过程[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6):697-709.
 [24] 崔佳丽,田文寿,张培群,等. 梅雨发生前对流层顶及平流层异常信号的分析[J]. 气象学报, 2012, 70(4):655-669.
 [25] 姜晓玲,王东海,尹金方,等. 夏季风爆发前后中国区域对流层顶高度变化特征[J]. 应用气象学报, 2016, 27(4):445-453.
 [26] 刘毅,赵燕华,管兆勇. 平流层环流异常对 2008 年 1 月雪灾过程的影响[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4):548-555.
 [27] 向纯怡,何金海,任荣彩. 2007/2008 年冬季平流层环流异常及平流层-对流层耦合特征[J]. 地球科学进展, 2009, 24(3):338-348.
 [28] 寿绍文,励申申,寿亦莹,等. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社, 2003:1-370.