

赵佳莹, 徐海明. 2014. 中国区域探空资料与再分析资料风速场的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (5): 587–600, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13065. Zhao Jiaying, Xu Haiming. 2014. Comparison of wind velocity among reanalysis and radiosonde datasets over China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (5): 587–600.

中国区域探空资料与再分析资料风速场的对比分析

赵佳莹^{1,2} 徐海明¹

1 南京信息工程大学气象灾害重点实验室, 大气科学学院, 南京 210044

2 黑龙江省气候中心, 哈尔滨 150030

摘要 利用中国高空探空资料和 NCEP/NCAR、ERA 以及 MERRA 三种再分析资料, 讨论了再分析资料风速场在中国区域的适用性问题。结果表明: 在中国区域的年平均场上, 高空风速在我国对流层高层和中层均存在长期减弱的趋势, 在我国东部和南部地区的对流层低层也存在减弱趋势, ERA-interim 资料和 MERRA 资料适用性相对较好。再分析资料风速在多年年平均场上普遍小于探空风速。在对流层高层, 1980 年代至 1990 年代 ERA-interim 资料适用性好, 而 21 世纪以后, NCEP/NCAR 的适用性较好; 在对流层中层和低层, NCEP/NCAR 资料适用性较好。在中国区域的季节平均场上, 高空风速在冬季的对流层高层和中层中普遍存在增加的趋势, 而在春季、夏季和秋季的对流层高层和中层存在减小的趋势。探空资料与再分析资料在冬季偏差最小, 在夏季偏差最大。在对流层中层和低层, NCEP/NCAR 资料和 MERRA 资料在冬季的可信度相对较好, MERRA 资料在夏季的可信度相对较好; 在对流层高层和平流层低层, ERA-interim 资料和 MERRA 资料在四季中的可信度都相对较好。

关键词 探空资料 再分析资料 风速场 年际变化特征 季节变化特征

文章编号 1006-9585 (2014) 05-0587-14

中图分类号 P465

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13065

Comparison of Wind Velocity among Reanalysis and Radiosonde Datasets over China

ZHAO Jiaying^{1,2} and XU Haiming¹

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Heilongjiang Provincial Climate Center, Harbin 150030

Abstract Using radiosonde and reanalysis data from NCEP/NCAR, European Center for Medium Range Weather Forecasts Reanalysis (ERA), and Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Application (MERRA), the applicability evaluation of the atmospheric wind velocity in the area of China are conducted in this paper. The annual mean wind velocity shows a downward trend in the middle and upper tropospheres, and a downward trend in the lower troposphere over the East and South China. Results indicate that the ERA-interim and MERRA wind velocities have better evaluation applicability. In general, the wind velocities of the three reanalysis datasets are lower than observations. In the upper troposphere, ERA-interim is significantly closer to the observed values in the 1980s and 1990s, whereas NCEP/NCAR is much better in the 21st century. In the middle and lower tropospheres, NCEP/NCAR wind velocities

收稿时间 2013-04-17 收到, 2013-12-05 收到修定稿

资助项目 公益性行业(气象)科研专项 GYHY200906014-02, 国家自然科学基金项目 41275094, 江苏省“青蓝工程”资助项目江苏省高校优势学科建设工程资助项目 PAPD

作者简介 赵佳莹, 女, 1987 年出生, 硕士, 主要从事短期区域气候变化的研究。E-mail: zhaojiaying36@qq.com

agree well with the observed values. In terms of seasonal mean field, wind velocity shows an upward trend in the middle and upper tropospheres in winter, and downward trends in spring, summer, and autumn. The smallest deviation between radiosonde and reanalysis datasets appears in winter, and the largest appears in summer. In the middle and lower tropospheres, NCEP/NCAR and MERRA wind velocities are significantly closer to the observed values in winter, whereas MERRA values are significantly closer in summer. In the tropopause and lower stratospheres, ERA-interim and MERRA wind velocities show significantly better performance in all four seasons.

Keywords Radiosonde dataset, Reanalysis dataset, Wind velocity, Annual mean variation, Seasonal variation

1 引言

再分析资料的出现解决了探空资料时空分布不均的问题，因此在气象研究中有着广泛的应用，但是再分析资料依赖于已积累的观测资料、所使用的模式系统和资料同化系统，也与某些具体细节的处理有关，所以再分析资料间难免存在差异，其本身也有一定缺陷。而再分析资料的准确度会对研究结果产生很大的影响。从再分析资料面世至今，国内（徐影和丁一汇，2001；赵天保和符淙斌，2006, 2009；郭艳君等，2009；高庆九等，2010；赵天保等，2010；Zhao et al., 2012）和国外（Bromwich et al., 2007；Grotjahn, 2008；Ma et al., 2008；Higgins et al., 2010）已经有很多学者对其进行了比较分析。随着观测资料的改善、卫星资料的引入和模式系统的改进，再分析资料的质量也在不断的提高，本文主要关注的全球大气资料再分析计划主要有：NCEP/NCAR 全球大气再分析计划（Kalnay et al., 1996）；ECMWF 的 1979~2008 年的 ERA-interim 全球再分析资料计划（Simmons and Gibson, 2000；Uppala et al., 2005；Dee et al., 2011）；NASA 的全球大气再分析计划 MERRA（Rienecker et al., 2011，于超越等，2011；Cullather and Bosilovich, 2012）。

国内外学者对不同的再分析资料从不同地区、不同时间角度进行了分析和比较。对于降水量，将 NCEP 资料和观测资料对比，发现 NCEP 再分析资料的月降水总量较观测值偏高，在东部的可信度好于青藏高原和西北西部地区，在夏季和年平均的可信度好于冬季，NCEP II 资料的可信度好于 NCEP I 资料（赵天保等，2004）。对于高空温度场，通过对比 NCEP/NCAR 资料、ERA 资料、日本 JRA-25 全球大气再分析计划（Japanese Re-Analysis 25 years，简称 JRA）和探空资料发现，NCEP/NCAR 资料在对流层上层更接近于探空资料，ERA 资料和 JRA 资料在对流层中下层与探空资料更为接近（支星和

徐海明，2013a, 2013b）。对于位势高度场，通过对比 NCEP/NCAR 资料、ERA 资料和探空资料发现，1970 年代前 ERA-40 资料对我国北方地区对流层低层位势高度描述好于 NCEP/NCAR 资料，1970 年代后 NCEP/NCAR 资料对内蒙古和华北对流层上层的位势高度的描述要好于 ERA-40 资料（黄刚，2006）。赵佳莹和徐海明（2014）讨论了 NCEP/NCAR、ERA-interim 以及 JRA 3 种再分析资料位势高度场的适用性，发现在年平均场上，NCEP/NCAR 资料适用性较高，在季节平均场上，NCEP/NCAR 资料在春季、夏季和冬季适用性较高，ERA 资料在秋季适用性较高。对于高空风速场，研究了 NCEP/NCAR 资料在中国区域气候变化研究中的可信度，发现 NCEP/NCAR 资料的可信度在东部比西部要高，随着高度升高，NCEP/NCAR 资料与探空资料的风速距平的误差减小，表明地形对 NCEP 资料的可信度具有较大影响（施晓晖等，2006）。

风速是气象研究中一个很重要的参量，它与大气环流、大气能量、大气质量有密切的关系。目前已经有许多关于地表面风速场的分析（任国玉等，2005；钟海玲等，2009），发现在近地面层年平均和季节平均风速均存在显著减弱的变化趋势，而对高空风速场还缺少一个全面系统的分析研究。同时，本文涉及到 ERA-interim 资料和 MERRA 资料均是新一代高分辨率再分析资料，目前对这两种再分析资料的适用性的研究几乎还是空白。因此，本文主要利用中国探空风速资料对再分析资料风速场在中国适用性进行评估。

2 资料与方法

2.1 资料

本文选用的 3 种再分析资料分别为：1) NCEP/NCAR 再分析资料，该资料始于 1948 年并一直更新至 2008 年，其水平分辨率为 2.5° （纬度） $\times 2.5^{\circ}$ （经度），垂直方向分 17 层。2) ERA-interim

再分析资料, 水平分辨率为 1.5° (纬度) $\times 1.5^{\circ}$ (经度), 垂直方向分32层。3) MERRA再分析资料, 始于1979年并一直更新至2008年, 其水平分辨率为 0.6667° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度), 垂直方向分42层。本文采用的探空资料是由气象信息中心提供的中国137个站的探空资料(简称OBS), 该资料为气象信息中心通过全球通信系统(GTS)接收的实时探空资料, 并进行了严格的质量控制。此资料垂直方向分17层, 时间分辨率为每天00:00(协调世界时, 下同)和12:00。探空资料采用的变量为逐月风速, 3种再分析资料采用的变量均为逐日纬向风(u)和经向风(v)分量。本文利用再分析资料的逐日纬向风和经向风分量求出逐日的风速, 再将逐日的风速求月平均值, 最后将得到的结果与探空资料作对比分析。

由于再分析资料和探空资料的时间范围不一致, 本文统一选取研究时间段为1980~2008年, 共29年; 选取层次为850、700、500、400、300、200、100和50 hPa, 共8层。

由于地形、仪器更改、站点迁移和数据缺测等原因, 本文剔除了部分资料质量较差的站点资料, 个别站点缺测的少量数据采取内插法来补齐。最后

在700 hPa和850 hPa选取了79个测站, 500 hPa及以上层次选取了103个测站。为方便讨论, 将探空资料中质量较好的103个测站按照地理位置和测站疏密程度简单地划分为东北(1~13站)、华北(14~24站)、西北东部(25~43站)、华中华东(44~64站)、华南(65~74站)、西南(75~87站)和西北西部(88~103站)7个区域(图1)。

2.2 方法

为比较研究再分析资料与探空资料数值之间的差异, 本文采取双线性插值的方法将再分析资料的格点值插值到相应的探空站点上, 得到相应的中国区域探空站的再分析资料。采用线性趋势系数的方法比较研究再分析资料与探空资料位势高度场的长时间变化趋势。

3 高空年平均风速的差异

3.1 多年年平均风速的差异

图2是1980~2008年200 hPa多年年平均再分析资料风速与探空风速的差值。从图2a中可以看出, 除四川、青海和新疆部分测站外, 探空风速均大于NCEP/NCAR资料。在华东、华中和西南地区,

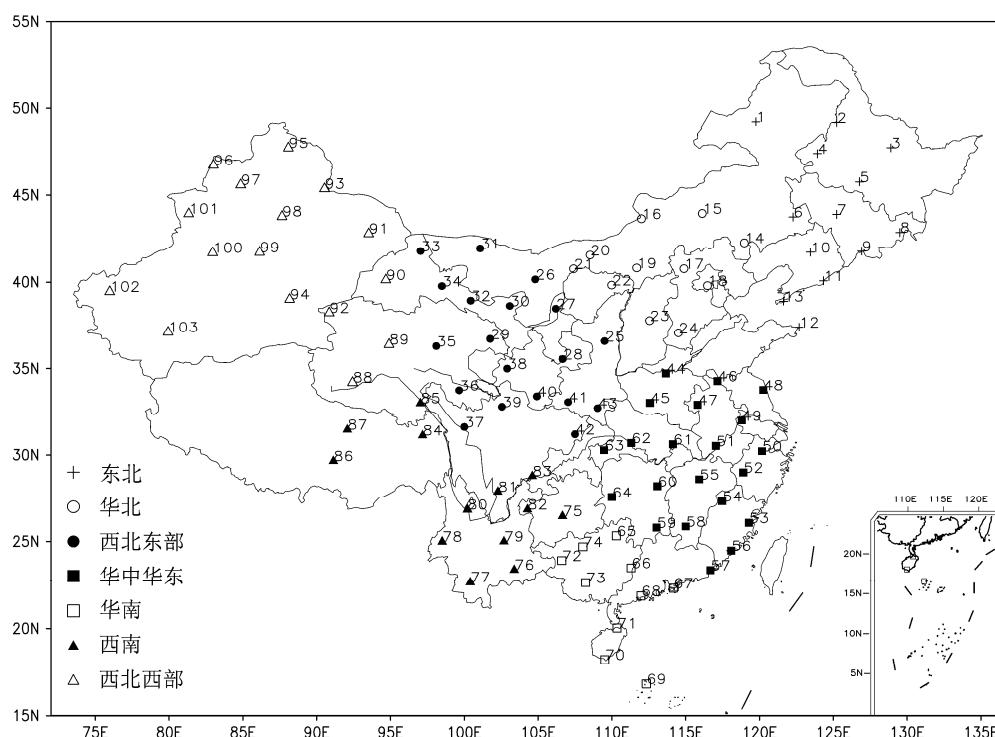


图1 中国区域探空站的分布图(数字代表台站的序号)

Fig. 1 Distribution of the radiosonde stations in China (numbers represent the series number of the stations)

探空资料与 NCEP 资料偏差较大, 最大偏差超过 0.75 m/s。在图 2b 中, 除四川和青海部分测站外, 探空风速大于 ERA-interim 资料, 偏差较大的区域集中在西北和西南地区, 风速相差可达 0.75 m/s。图 2c 表明,

除黑龙江和四川部分测站外, 探空资料风速大于 MERRA 资料, 偏差较大区域集中在华东、华中和西南地区。由此可知, 在 200 hPa 高空中, 探空资料的风速普遍大于再分析资料的风速, 二者偏差较大的区

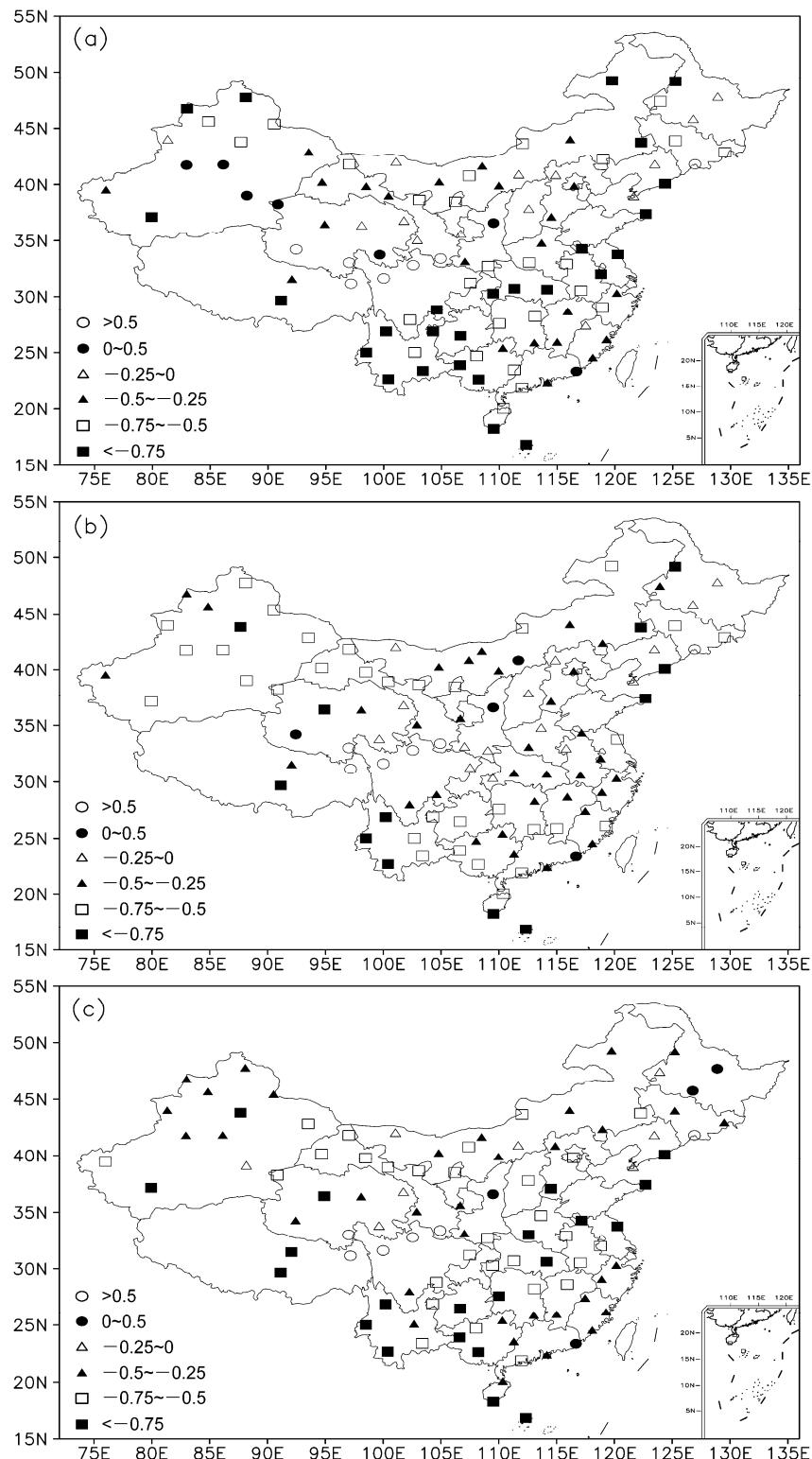


图 2 200 hPa 层上 (a) NCEP、(b) ERA、(c) MERRA 再分析资料与探空资料多年平均风速差值 (单位: m/s)

Fig. 2 Differences in multi-year mean wind velocities (units: m/s) between (a) NCEP, (b) ERA, and (c) MERRA and radiosonde dataset at 200 hPa

域主要是中国中部地区。总体上看, 在 200 hPa 处, ERA-interim 再分析资料与探空资料较为接近。

500 hPa 上的风速差值图与 200 hPa 较为类似(图略), 即除青藏高原个别测站外, 探空资料的

风速普遍大于再分析资料的风速, 差值分布比较均匀, 没有明显的大值中心。总体上看, NCEP/NCAR、MERRA 再分析资料与探空资料较为接近。

在 850 hPa 图上(图 3), 除四川和青海部分测

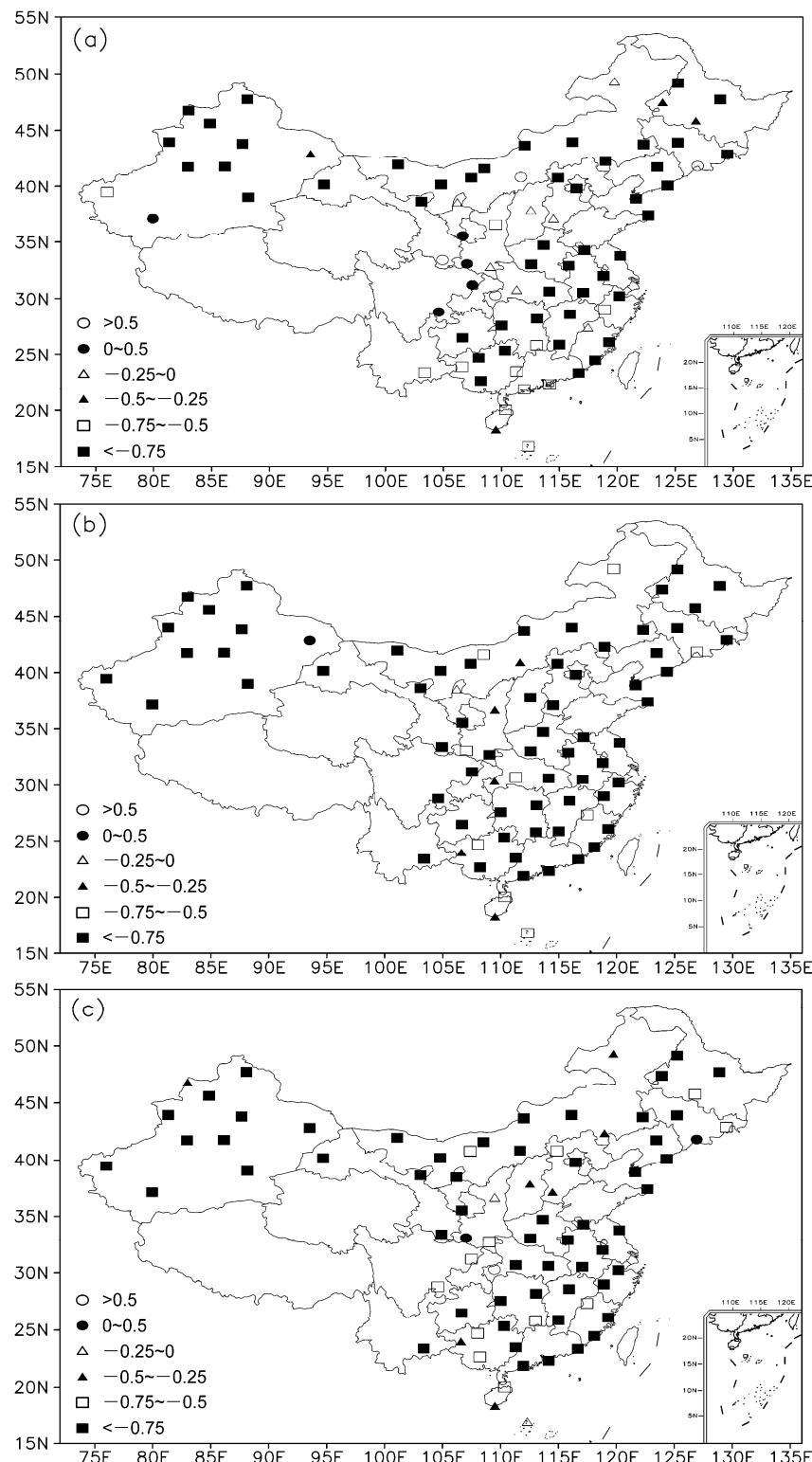


图 3 同图 2, 但为 850 hPa 层

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for 850 hPa

站外, 探空资料风速大于 NCEP/NCAR 资料, 在西北、东北、华中和华东地区偏差较大, 最大偏差超过 0.75 m/s。对于 ERA-interim 资料而言, 在中国区域明显小于探空资料中的风速, 并且二者偏差超过 0.75 m/s。MERRA 资料与 ERA-interim 资料较为相似。由此可知, 在 850 hPa 上, 探空资料的风速普遍大于再分析资料的风速, 在西南和西北东部地区, 探空资料与再分析资料偏差较大。总体上看, 在 850 hPa 上, NCEP/NCAR 再分析资料与探空资料较为接近。

为比较不同再分析资料在中国不同区域的适用性问题, 将中国划分为 7 个区域(如图 1)。图 4 分别给出了 200 hPa、500 hPa 和 850 hPa 上中国不同区域再分析资料与探空资料多年平均风速的偏差。从图中可以看出, 200 hPa 上, 西北东部再分析资料与探空资料区域平均的风速偏差最小, 低于 0.1 m/s, 而在华南地区区域平均的风速偏差最

大, 超过 0.5 m/s, 其它地区的偏差较为相似, 约为 0.4 m/s, 其中 ERA-interim 的风速与探空资料偏差较小, 这与上一小节得到的结论类似。500 hPa 上, 华中、华东再分析资料与探空资料区域平均的风速偏差最小, 约为 0.6 m/s; 西南地区的区域平均风速偏差最大, 可达 0.8 m/s; 其它地区偏差维持在 0.7 m/s 左右。3 种再分析资料中, ERA-interim 资料的区域平均风速与探空资料相差较大。850 hPa 上, 华南区域再分析资料与探空资料的风速偏差最小, 约为 0.7 m/s, 而在西南和西北西部地区的风速偏差最大, 可达 1.5 m/s。对比分析可知, NCEP/NCAR 资料在 850 hPa 处于探空资料最为接近, 并且在西南地区优势明显。虽然在对流层中, 风速是随着高度增加而增加, 但是探空资料与再分析资料的偏差却是随着高度增加而减小, 这可能与下垫面对风速的影响有关, 导致再分析资料在对流层低层的可信度小于对流层中层和高层。

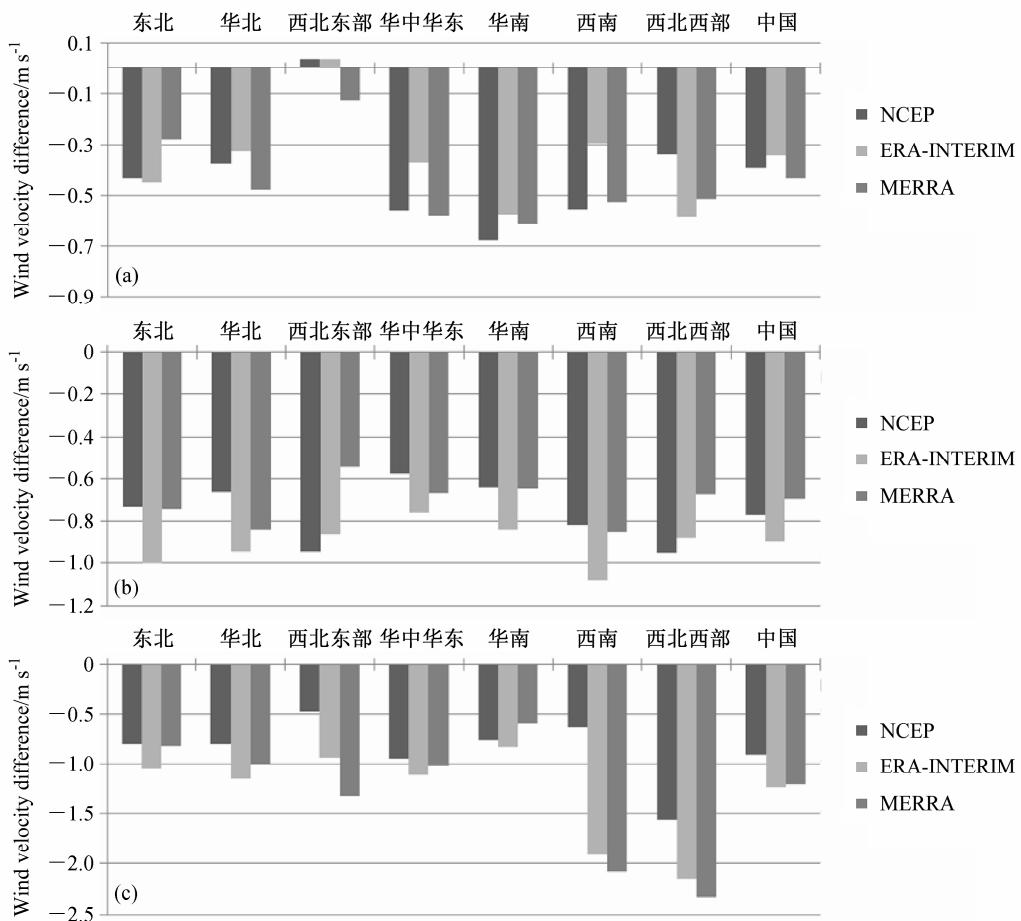


图 4 (a) 200 hPa、(b) 500 hPa、(c) 850 hPa 不同区域再分析资料与探空资料多年平均风速的偏差

Fig. 4 Differences in multi-year mean wind velocities between the three reanalysis datasets and radiosonde dataset for seven different regions in China at (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 850 hPa

综上所述, 在对流层高层, 除西部部分测站外, 探空资料风速普遍大于 3 种再分析资料风速, 其中在我国中部区域偏差较为明显, 相对而言, ERA-interim 资料与探空资料较为接近。在对流层中层, 探空资料风速也普遍大于 3 种再分析资料中的风速, 但风速偏差没有明显的区域性, NCEP/NCAR、MERRA 资料与探空资料较为接近。在对流层低层, 探空资料风速仍大于 3 种再分析资料风速, 其中在我国西北和西南交界处二者偏差较大, 相对而言, NCEP/NCAR 资料与探空资料较为接近。随高度变化而言, 探空资料的风速都大于再分析资料风速, 但在不同的高度上, 彼此的差值有所不同, 3 种再分析资料在不同高度不同区域的可信度也有差别。

3.2 年平均风速的年际差异

图 5a-c 分别给出了 1980~2008 年 3 种再分析资料与探空资料中国区域平均的年平均风速的逐

年偏差。从图 5a 中可以看出, 在对流层中下层, 探空资料风速大于 NCEP/NCAR 资料风速, 二者相差约为 1 m/s, 偏差没有明显的年际差异。在对流层上层, 2000 年以前, NCEP/NCAR 资料风速大于探空风速, 1980 年代二者相差最大, 可达 1 m/s。随着时间的推移, 二者差值缩小, 到 2000 年后, 转变为 NCEP/NCAR 资料风速小于探空资料风速, 二者相差 0.5 m/s 左右。对于 ERA-interim 资料(图 5b), 在对流层中下层, 均是探空资料大于 ERA-interim 资料, 偏差没有明显的年际变化。在对流层上层, 1980 年代初期, ERA-interim 资料风速大于探空资料风速。但在 1980 年代后期到 1990 年代, 转变为探空资料风速大于 ERA-interim 资料风速, 二者相差约为 0.5 m/s。到 2000 年后, 探空资料仍大于 ERA-interim 资料, 二者的偏差也增大到 1 m/s。MERRA 资料(图 5c)与 ERA-interim 资料相

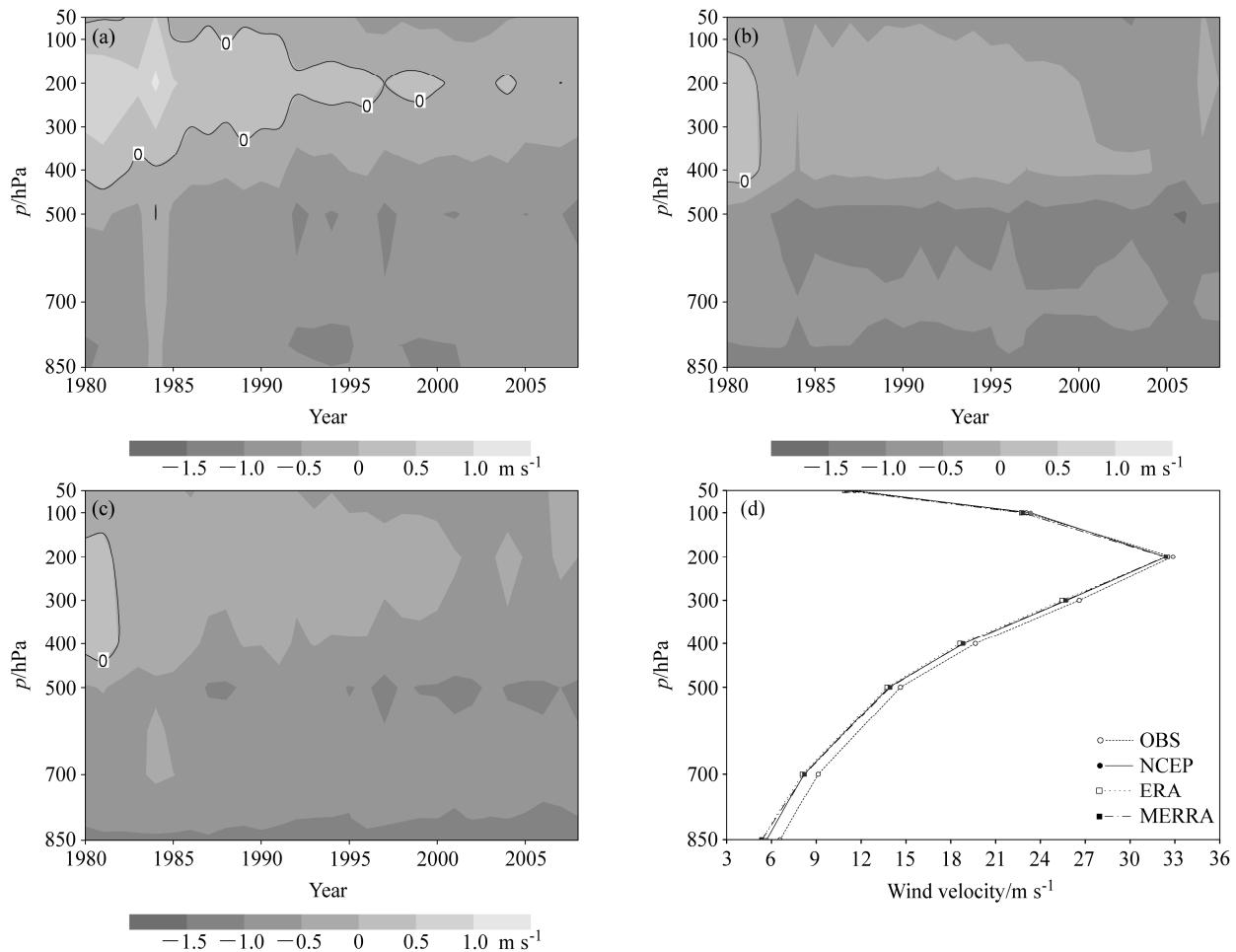


图 5 再分析资料 (a) NCEP、(b) ERA、(c) MERRA 与探空资料中国区域平均的年平均风速的逐年偏差以及 (d) 4 种资料中国区域平均的多年平均风速的垂直廓线

Fig. 5 Time-pressure cross sections of nationwide-averaged differences in multi-year mean wind velocities between (a) NCEP, (b) ERA, and (c) MERRA reanalysis datasets and radiosonde dataset and (d) vertical profiles of the nationwide-averaged wind velocities from four datasets

似，在对流层低层，探空资料风速大于再分析资料风速，随着时间的变化，二者之间的偏差逐渐由 1 m/s 增加到 1.5 m/s。在对流层中层，21 世纪以前探空资料风速大于 MERRA 资料风速，21 世纪以后探空资料风速仍大于 MERRA 资料风速。但二者偏差增大。在对流层上层，MERRA 资料与 ERA-interim 资料状况类似，即 1980 年代初期，MERRA 资料风速大于探空资料风速；1980 年代后期到 21 世纪，探空资料风速大于 MERRA 资料风速。结合中国区域平均的多年平均风速的垂直廓线（图 5d）可知，在对流层中，风速随高度的增加而增加，对流层顶到平流层低层，风速随高度的增加而减小，即风速大约在 200 hPa 的高度上达到最大值，这也与以前的研究结论一致（任国玉等，2009）。因为探空资料与再分析资料的高空风速差值的大小随高度逐渐减小，所以在 200 hPa 高度上探空资料与再

分析资料的相对偏差较小，即在对流层高层，再分析资料的可信度相对较高。

通过上述对比分析可知，在对流层中下层中，NCEP/NCAR 资料与 MERRA 资料的适用性较好。在对流层高层中，1980 年代至 1990 年代，ERA-interim 资料和 MERRA 资料的适用性较好；21 世纪以后，NCEP/NCAR 资料的适用性较好。

3.3 多年平均值的季节差异

图 6a–c 是 3 种再分析资料与探空资料中国区域平均的多年月平均风速偏差随季节的变化。从图中可以看出，NCEP 资料的风速在对流层低层小于探空资料，差值的最大中心出现在 5~6 月，达到 1.5 m/s；在对流层中层，NCEP/NCAR 资料的风速仍小于探空资料，差值的最大中心出现在 4~8 月，二者相差 1.2 m/s；在对流层高层，8 月至次年 4 月，NCEP/NCAR 资料的风速略大于探空资料，差值约

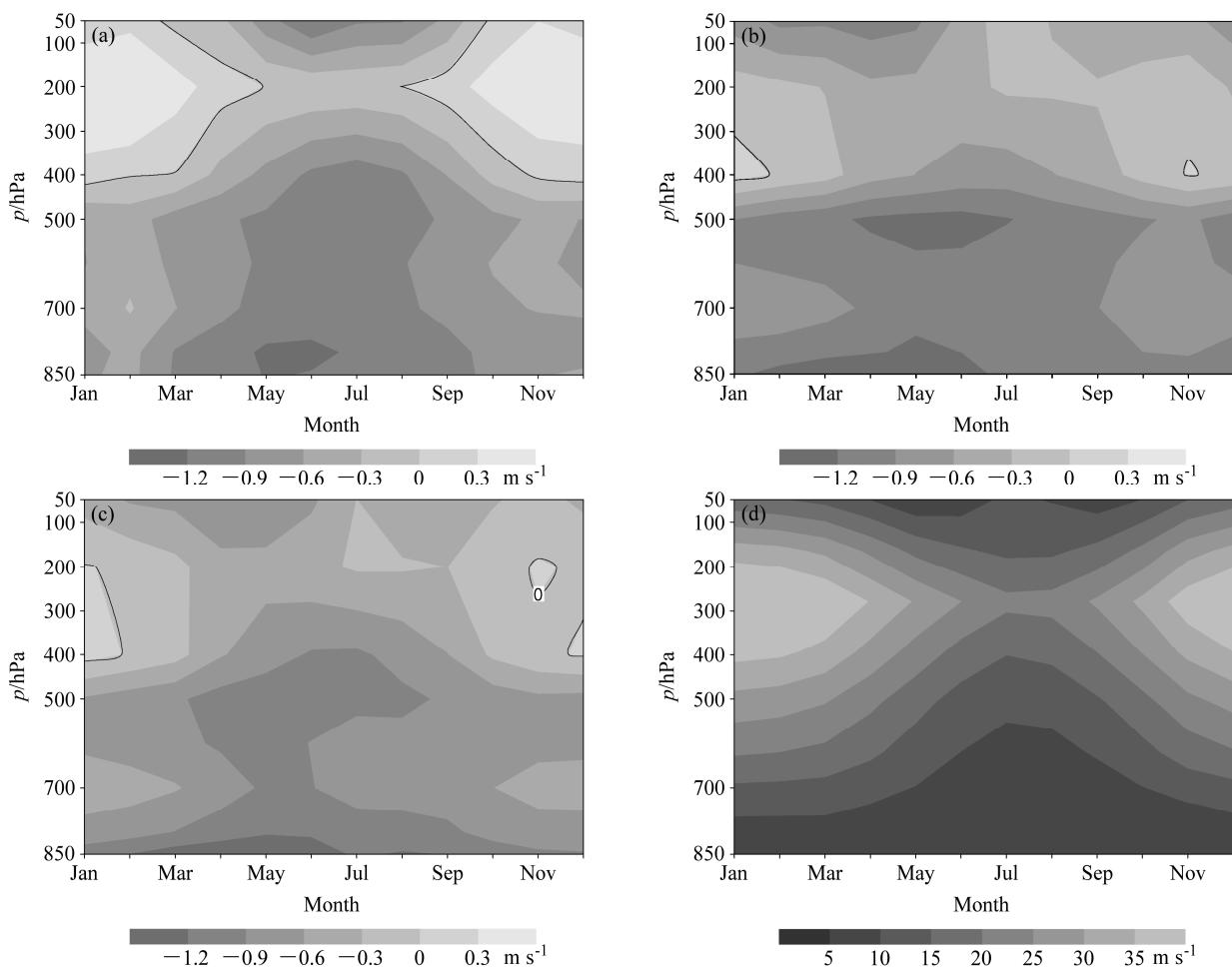


图 6 再分析资料 (a) NCEP、(b) ERA、(c) MERRA 与探空资料中国区域平均的多年月平均风速差值的季节变化以及 (d) 探空资料中国区域平均的多年月平均风速

Fig. 6 Time-pressure cross sections of nationwide-averaged differences in multi-month mean wind velocities between (a) NCEP, (b) ERA, and (c) MERRA reanalysis datasets and radiosonde dataset and (d) vertical profiles of the nationwide-averaged wind velocities from radiosonde dataset

为 0.3 m/s; 其余月份探空资料的风速略大于 NCEP 资料, 差值约为 0.3 m/s, 并在 6 月的 50 hPa 处出现一个正值中心。ERA-interim 资料的风速在对流层低层小于探空资料, 大值中心出现在 2~6 月, 差值达到 1.5 m/s, 其余月份二者的差值可达 1.2 m/s; 在对流层中层, ERA-interim 资料的风速小于探空资料, 偏差的大值中心出现在 4~7 月, 二者相差 1.5 m/s, 其余月份二者差值约为 1.2 m/s; 在对流层高层, 全年普遍为探空资料的风速略大于 ERA-interim 资料, 最大差值为 0.6 m/s 左右。在平流层低层, 探空资料与 ERA-interim 资料的最大差值场出现在 4~5 月, 差值可达 1.2 m/s。在对流层低层和中层, MERRA 资料风速小于探空资料风速, 差值大值中心出现在 3~7 月, 较 ERA-interim 资料延迟一个月, 差值达到 1.2 m/s。在对流层高层和平流层低层, MERRA 资料与 ERA-interim 资料较为类似, 即全年普遍为探空资料的风速略大于 MERRA 资料, 最大差值在 0.6 m/s 左右。结合中国区域平均的多年月平均风速(图 6d), 对流层低层平均风

速较小, 流层中层和上层在冬季和夏季风速相差较多, 冬季平均风速较大, 夏季平均风速较小。比较而言, 再分析资料的风速在夏季的对流层中层和低层的相对偏差较大, 即适用性较弱。

由此可知, 再分析资料在对流层中层和低层的夏季可信度相对较差, 在对流层高层的冬季可信度相对较好。对比 3 种再分析资料, 在对流层中层和低层, NCEP/NCAR 资料和 MERRA 资料在冬季的可信度相对较好, MERRA 资料在夏季的可信度相对较好; 在对流层高层和平流层低层, ERA-interim 资料和 MERRA 资料在四季中的可信度都相对较好。

4 长期变化趋势的差异

4.1 年平均风速的长期变化趋势

图 7 给出了 200 hPa 探空资料与 3 种再分析资料多年年平均风速的长期变化趋势。从探空资料的长期变化趋势(图 7a)可以看出, 在东北、新疆、四川和湖北的 200 hPa 高度上风速均存在增强的趋

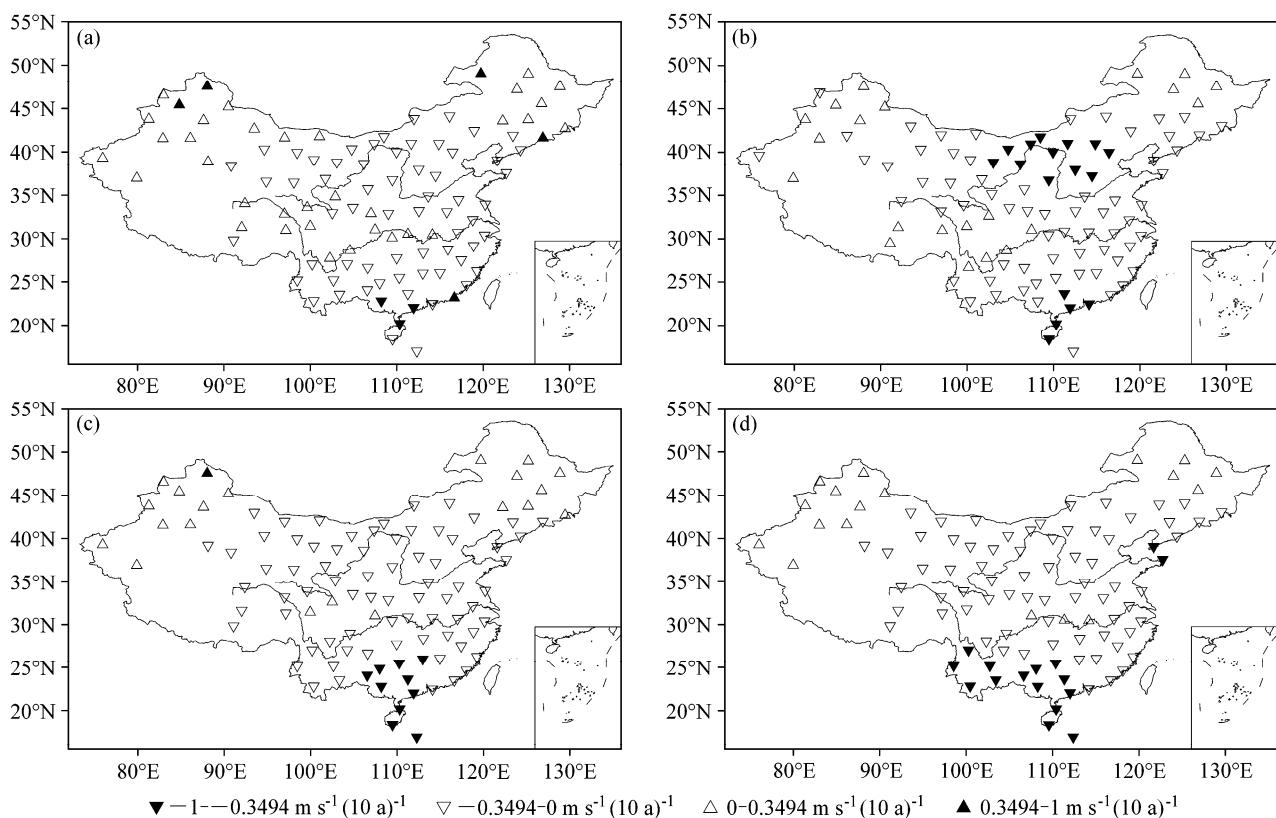


图 7 200 hPa (a) 探空资料与 (b) NCEP、(c) ERA、(d) MERRA 3 种再分析资料多年年平均风速的长期变化趋势(实心三角形表示线性趋势达到 0.05 显著性水平)

Fig. 7 Linear trends for the wind velocities from (a) radiosonde dataset, (b) NCEP, (c) ERA, and (d) MERRA at 200 hPa (solid triangles indicate linear trends reach 0.05 significance level)

势，且增加的趋势超过 $0.2 \text{ m s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$ ，中国其他区域风速均存在减小的趋势，其中华北、西北西部和华南地区风速减小的趋势较为明显，超过 $0.6 \text{ m s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$ 。从 NCEP/NCAR 资料的长期变化趋势（图 7b）可以看出，风速的变化趋势的分布与探空资料基本一致，即除东北、西北西部和西南地区外，高空风速存在减小的趋势，且在华北和西北东部风速减小的趋势较探空资料更为明显。在东北、西北西部和西南地区风速存在增加的趋势，但趋势比探空资料弱。从 ERA-interim 资料（图 7c）和 MERRA 资料（图 7d）风速的长期变化趋势可以看到，与 NCEP/NCAR 资料比较，这两种再分析资料的长期变化趋势与探空资料更为接近，只是在部分站点的变化幅度上略有差别。由此可知，在 200 hPa 高度上，东北、西北西部和西南地区风速存在增加的趋势，其余地区风速存在减弱的趋势，华北、西北东部和华南地区风速减弱趋势最为明显。3 种再分析资料对比，ERA-interim 资料和 MERRA 资料与探空资料较为接近，这或许与这两种再分析资料有较高的水平分辨率有关。

500 hPa 多年平均风速的长期变化趋势与

200 hPa 较为类似（图略），即除东北北部、新疆北部和青藏高原存在风速增加的趋势外，中国其余地区存在较为一致的风速减小的趋势，约为 $0.2 \sim 0.4 \text{ m s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$ ，没有明显的大值中心。3 种再分析资料对比，MERRA 资料与探空资料相差较多。

图 8 给出了 4 种资料在 850 hPa 上多年平均风速的长期变化趋势。探空资料表现为除华北、华东、华南和西南地区风速存在减小的趋势外，其它地区风速不存在一致的增加或减弱的趋势，这种情况或许与下垫面对对流层低层的风速有影响有关。NCEP/NCAR 资料与探空资料在该高度上相差较大，表现为除新疆和华南沿海个别测站外，中国区域的风速存在减弱的趋势，并且中国东部地区风速减弱的趋势较为明显。ERA-interim 资料也与探空资料有较大差别，表现为中国中部和西部地区存在风速增加的趋势，中国东部地区存在风速减弱的趋势，并且东北地区风速减弱得较为明显。MERRA 资料与探空资料较为接近，表现为华北、华东、华南和西南地区存在风速减小的趋势，其它地区风速没有一致的变化趋势。由此可知，在 850 hPa 高度上，华北、华东、华南和西南地区有风速减小的趋

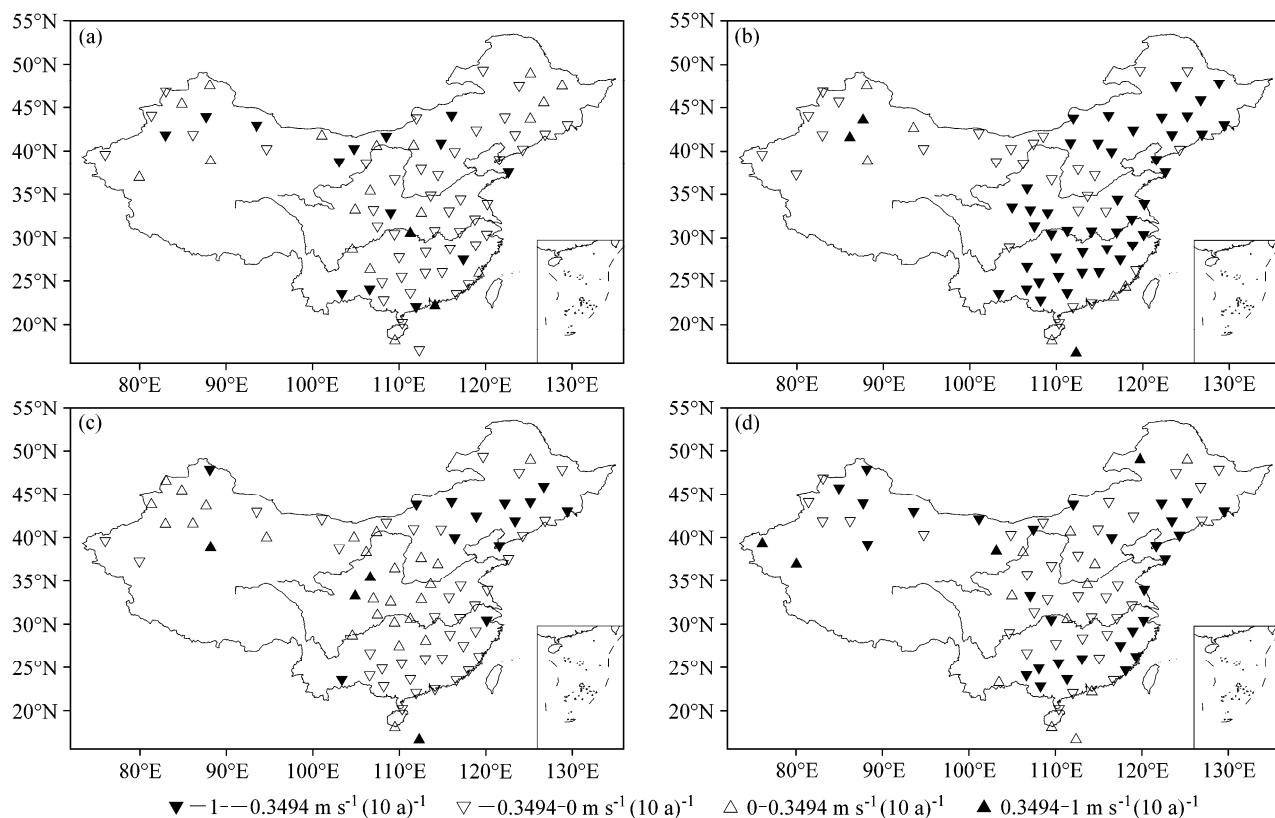


图 8 同图 7，但为 850 hPa

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for 850 hPa

势, 其它地区风速变化不一致。3种再分析资料对比, MERRA 资料与探空资料较为接近。

图 9 分别给出了 200 hPa、500 hPa 和 850 hPa 层上中国不同区域探空资料与再分析资料多年平均风速的长期变化趋势。从图中可以看出, 200 hPa 上, 除西北西部地区存在弱的增加趋势外, 其余地区风速均存在减弱的趋势, 其中华北和华南地区减弱得较为明显, 可达 $0.6 \text{ m s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$; 东北和西南地区风速减弱趋势较小, 约为 $0.2 \text{ m s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$ 。对比 3 种再分析资料, ERA-interim 资料与探空资料较为接近; 在中国西部, NCEP/NCAR 资料比 MERRA 资料更接近探空资料, 在中国中部和东部地区, 则是 MERRA 资料比 NCEP/NCAR 资料更接近探空资料。500 hPa 上, 中国区域均存在风速减弱的趋势, 西北西部和东北地区风速减弱的趋势较小, 约为 $0.05 \text{ m s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$; 华中、华东和华南地区风速减弱的趋势较为明显, 约为 $0.25 \text{ m s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$ 。对比 3 种再分析资料, ERA-interim 资料与探空资

料较为接近, 且在华北和西北东部地区有明显的优势, NCEP/NCAR 资料次之, MERRA 资料与探空资料相差较大。850 hPa 上, 中国区域均存在风速减弱的趋势, 西南和西北西部地区风速减弱的趋势较小, 小于 $0.05 \text{ m s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$; 东北和华北地区风速减弱的趋势比较明显, 大于 $0.1 \text{ m s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$ 。对比 3 种再分析资料, ERA-interim 资料与探空资料较为接近, 特别是在华中、华东和华南地区有明显优势; NCEP/NCAR 资料与探空相差最多。由上述分析可知, 中国高空风速存在减弱的趋势, 而中国地面观测的风速也存在减弱的趋势(任国玉等, 2005; 钟海玲等, 2009), 表明风速减弱的趋势不局限于地表面, 在高空也有相似特征的反映。

综上所述, 中国区域高空风速普遍存在减弱的趋势, 并且随高度的增加, 风速减弱的趋势也愈加明显。ERA-interim 资料与探空资料较为接近, MERRA 资料次之, NCEP/NCAR 资料与探空资料相差较多。

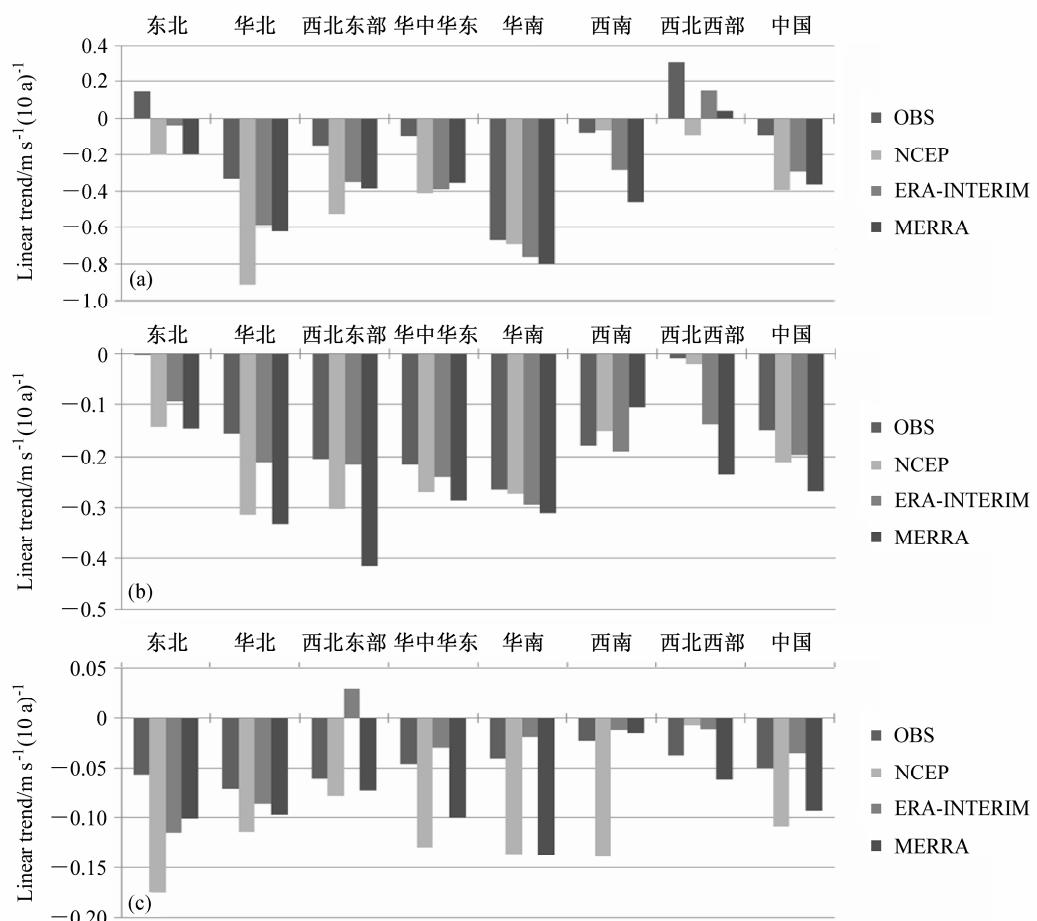


图 9 同图 4, 但为多年平均风速的长期变化趋势
Fig. 9 Same as Fig. 4, but for the linear trends of wind velocities

4.2 长期变化趋势的季节差异

图 10 给出了探空资料与 3 种再分析资料月平均风速长期变化趋势随季节的变化。探空资料表现为在对流层中低层中，除 11 月和 12 月以外，中国区域平均风速均存在减弱的趋势，并且在 2 月出现了一个弱的负值中心；与之刚好相反，在冬季的对流层高层至平流层低层风速存在增强的趋势，平流层低层在 2 月风速增强最为明显，而对流层高层在 12 月增加最为明显，这种变化趋势的季节分布形势与以前的研究结论（张爱英等，2009）较为一致。在夏季和秋季，对流层中存在风速减弱的趋势，这与夏季西风急流在近 30 年里是减弱的结果（杨莲梅和张庆云，2008）较为一致。3 种再分析资料在对流层中下层均能表现出中国区域平均风速的减弱趋势，但风速的减弱程度与探空资料略有差别。NCEP/NCAR 资料可以反映夏季和秋季风速减弱的趋势，但减弱的强度较探空资料更为明显，但不能反映出冬季平流层低层风速增加的变化趋势。ERA-interim 资料与 MERRA 资料也均能表现出夏季和秋季风速减弱的趋势，但变化幅度与 NCEP/

NCAR 资料比较接近，均大于探空资料，同时两种资料也均能表现出冬季对流层高层和平流层低层风速增加的趋势，但是变化幅度小于探空资料。相对而言，ERA-interim 资料在冬季的可信度好于 MERRA 资料。

以上分析可知，中国区域平均的风速在对流层低层存在减弱的趋势，其中 2 月减弱趋势最为明显。在对流层中层和高层的春季、夏季和秋季风速也存在减弱的趋势，其中在 6~7 月和 9 月减弱趋势最为明显。在对流层中层和高层的冬季风速存在增加的趋势，其中 12 月增加趋势最为明显。在平流层低层的冬季风速也存在增加的趋势，其中 2 月增加的幅度最为明显。3 种再分析资料对比，ERA-interim 资料风速与探空资料风速较为接近。

5 结论和讨论

本文利用 NCEP/NCAR、ERA-interim 和 MERRA 3 种再分析资料的风速场与中国 103 站探空资料的风速场，采用偏差和线性趋势等统计分析方法，从

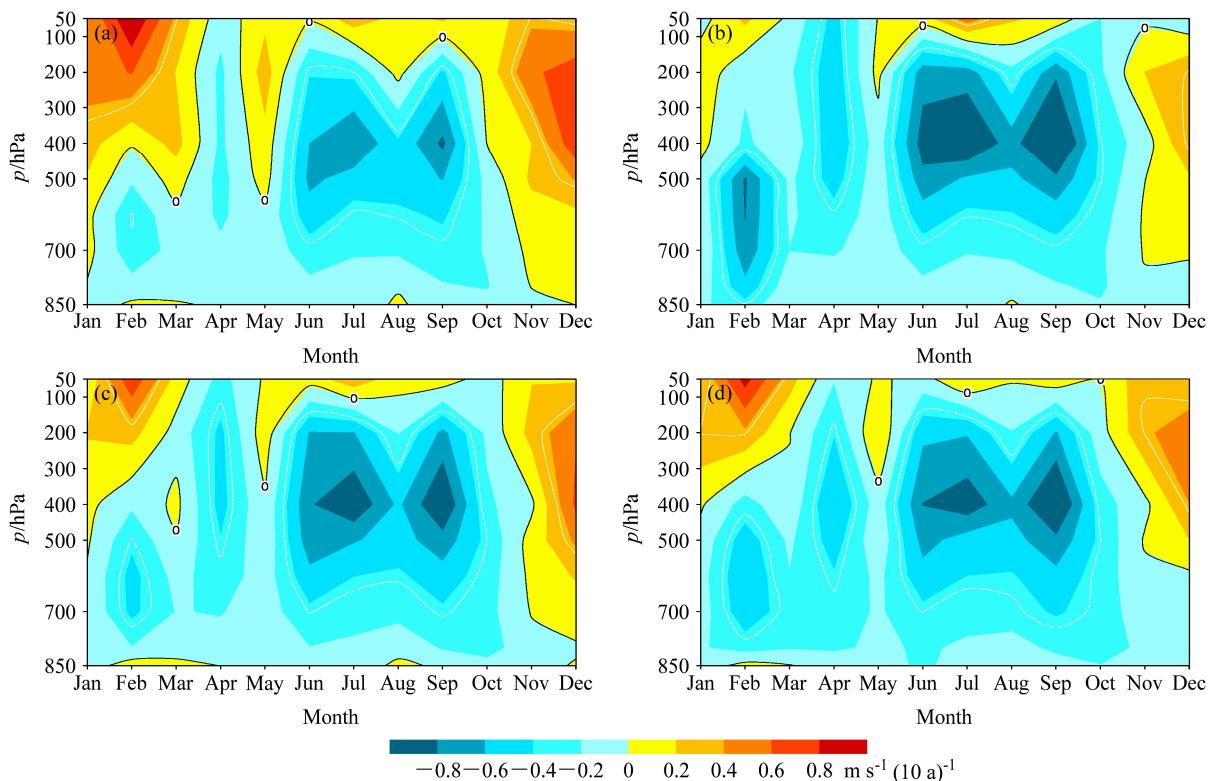


图 10 (a) 探空资料与再分析资料 (b) NCEP、(c) ERA、(d) MERRA 月平均风速的长期变化趋势随季节的变化（白虚线表示达到 0.05 显著性水平）

Fig. 10 Time-pressure cross sections of linear trends of wind velocities from (a) radiosonde dataset, (b) NCEP, (c) ERA, and (d) MERRA (white dotted lines indicate linear trends reach 0.05 significance level)

不同角度对中国区域的高空风速场进行了全面系统的对比分析, 得到以下几点结论:

(1) 在多年平均场上, 在对流层中, 探空资料的风速普遍大于3种再分析资料风速。在对流层高层, ERA-interim再分析资料与探空资料较为接近。在对流层中层, NCEP/NCAR、MERRA再分析资料与探空资料较为接近。在对流层低层, NCEP/NCAR再分析资料与探空资料较为接近。

(2) 在不同的时间段, 中国区域平均的探空风速与3种再分析资料风速之间存在差异。近30年来, 在对流层中下层NCEP/NCAR资料与MERRA资料的适用性较好; 1980年代到1990年代, 在对流层高层ERA-interim资料和MERRA资料的适用性较好, 21世纪以后, NCEP/NCAR的适用性较好。

(3) 中国区域平均的探空风速与3种再分析资料之间存在季节差异, 不同季节表现为不同的差异特征。在夏季, 再分析资料在对流层中层和低层的可信度相对较差; 在冬季, 对流层高层的可信度相对较好。对比3种再分析资料, 在冬季的对流层中层和低层, NCEP/NCAR资料和MERRA资料的可信度相对较好, 而在夏季MERRA资料的可信度相对较好; 在对流层高层和平流层低层, ERA-interim资料和MERRA资料在四季中的可信度都相对较好。

(4) 高空年平均风速除了在对流层高层的东北北部和西北西部地区存在长期的增强趋势外, 其它地区均存在减弱的趋势。相对于其它两种再分析资料, ERA-interim资料适用性相对较好。风速的长期变化趋势也存在明显的季节差异, 中国区域平均风速在对流层底层全年都存在减弱的趋势, 在春季、夏季和秋季的对流层中层和高层风速也存在减弱的趋势, 而在冬季的对流层中层高层以及平流层低层风速则存在增加的趋势, 同样相对于其它两种再分析资料, ERA-interim资料适用性较好。总体来说, ERA-interim资料在表征风速变化趋势方面较其它两种再分析资料有较明显的优势。

本文虽然讨论了我国高空风速的多年平均和月平均场的变化特征及不同再分析资料在中国区域的适用性问题, 并得到了一定的结论。但是资料对比分析是一个比较复杂的问题, 仅依靠地理位置而划分的区域范围不够精细和合理, 不同资料在不同区域的适应性有待进一步研究。同时, 本文并没有解释不同时间段某些区域探空资料与再分析资料偏

差较大的原因, 这是下一步需要解决的问题。

参考文献 (References)

- Bromwich D H, Fogt R L, Hodges K I, et al. 2007. A tropospheric assessment of the ERA-40, NCEP, and JRA-25 global reanalyses in the polar regions [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D10), doi: 10.1029/2006JD007859.
- Cullather R I, Bosilovich M G. 2012. The energy budget of the polar atmosphere in MERRA [J]. *J. Climate*, 25 (1): 5–24.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137: 553–597.
- 高庆九, 管兆勇, 蔡佳熙, 等. 2010. 两种再分析资料中夏季地表气温与中国测站资料的差异 [J]. *大气科学*, 34 (3): 471–482. Gao Qingjiu, Guan Zhaoyong, Cai Jiaxi, et al. 2010. Differences in 1958–2001 summertime surface air temperatures between two reanalysis data and observations in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (3): 471–482.
- Grotjahn R. 2008. Different data, different general circulations? A comparison of selected fields in NCEP/DOE AMIP-II and ECMWF ERA-40 reanalysis [J]. *Dyn. Atmos. Oceans*, 44 (3): 108–142.
- 郭艳君, 李庆祥, 丁一汇. 2009. 探空资料中的人为误差对中国温度长期变化趋势的影响 [J]. *大气科学*, 11 (6): 1309–1318. Guo Yanjun, Li Qingxiang, Ding Yihui. 2009. The effect of artificial bias on free air temperature trend derived from historical radiosonde data in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 11 (6): 1309–1318.
- Higgins R W, Kousky V E, Silua V B S, et al. 2010. Intercomparison of daily precipitation statistics over the United States in observations and in NCEP reanalysis products [J]. *J. Climate*, 23 (17): 4637–4650.
- 黄刚. 2006. NCEP/NCAR和ERA-40再分析资料以及探空观测资料分析中国北方地区年代际气候变化 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 310–320.
- Huang Gang. 2006. The assessment and difference of the interdecadal variations of climate change in northern part of China with the NCEP/NCAR and ERA-40 reanalysis data [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (3): 310–320.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471.
- Ma L J, Zhang T J, Li Q X, et al. 2008. Evaluation of ERA-40, NCEP-1, and NCEP-2 reanalysis air temperatures with ground based measurements in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 113(D15), doi: 10.1029/2007JD009549.
- 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近50年中国地面气候变化基本特征 [J]. *气象学报*, 12 (6): 942–956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 12 (6): 942–956.
- 任国玉, 张爱英, 王颖, 等. 2009. 我国高空风速的气候学特征 [J]. *地理研究*, 28 (6): 1583–1592. Ren Guoyu, Zhang Aiying, Wang Ying, et al. 2009. Climatology of upper wind speeds over China [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 28 (6): 1583–1592.
- Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R, et al. 2011. MERRA: NASA's modern-ERA retrospective analysis for research and applications [J]. *J.*

- Climate, 24 (14): 3624–3648.
- 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. 2006. NCEP/NCAR 再分析风速、表面气温距平在中国区域气候变化研究中的可信度分析 [J]. 气象学报, 64 (6): 709–722. Shi Xiaohui, Xu Xiangde, Xie Li'an. 2006. Reliability analyses of anomalies of NCEP/NCAR reanalysis wind speed and surface temperature in climate change research China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 64 (6): 709–722.
- Simmons A J, Gibson J K. 2000. The ERA project plan [R]. ECMWF Reanalysis Project Report Series No. 1.
- Uppala S M, Kullberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA 40 re-analysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131 (612): 2961–3012.
- 徐影, 丁一汇. 2001. 美国 NCEP/NCAR 近 50 年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析 [J]. 应用气象学报, 12 (3): 337–347. Xu Ying, Ding Yihui. 2001. Confidence analysis of NCEP/NCAR 50-year global reanalyzed data in climate change research in China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 12 (3): 337–347.
- 杨莲梅, 张庆云. 2008. 夏季亚洲副热带西风急流气候特征 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 10–20. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2008. Climate features of summer Asia subtropical westerly jet stream [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (1): 10–20.
- 于超越, 周天军, 李博, 等. 2011. 对流层和平流层温度中 ENSO 信号的多种资料比较 [J]. 大气科学, 35 (6): 1020–1032. Yu Chaoyue, Zhou Tianjun, Li Bo, et al. 2011. ENSO signals in the tropospheric and stratospheric temperatures: A comparison among different datasets [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (6): 1020–1032.
- 张爱英, 任国玉, 郭军, 等. 2009. 近 30 年我国高空风速变化趋势分析 [J]. 高原气象, 28 (3): 680–687. Zhang Aiying, Ren Guoyu, Guo Jun, et al. 2009. Change trend analyses on upper-air wind speed over China in past 30 years [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 28 (3): 680–687.
- 赵佳莹, 徐海明. 2014. 中国区域探空资料与再分析资料位势高度场的对比分析 [J]. 气象科学, 34 (2): 128–138. Zhao Jiaying, Xu Haiming. 2014. Comparison of geopotential heights between reanalysis datasets and radiosonde datasets over the area of China [J]. *Journal of the Meteorological Sciences* (in Chinese), 34 (2): 128–138.
- Zhao T B, Dai A G, Wang J H. 2012. Trends in tropospheric humidity from 1970 to 2008 over China from a homogenized radiosonde dataset [J]. J. Climate, 25 (13): 4549–4566.
- 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. 2006. NCEP 再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较 [J]. 气候与环境研究, 9 (2): 278–294. Zhao Tianbao, Ai Likun, Feng Jinming. 2004. An intercomparison between NCEP reanalysis and observed data over China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 9 (2): 278–294.
- 赵天保, 符淙斌. 2006. 中国区域 ERA-40、NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 14–32. Zhao Tianbao, Fu Congbin. 2006. Preliminary comparison and analysis between ERA-40, NCEP-2 reanalysis and observations over China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11 (1): 14–32.
- 赵天保, 符淙斌. 2009. 应用探空观测资料评估几类再分析资料在中国区域的适用性 [J]. 大气科学, 33 (3): 634–648. Zhao Tianbao, Fu Congbin. 2009. Applicability evaluation for several reanalysis datasets using the upper-air observations over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (3): 634–648.
- 赵天保, 符淙斌, 柯宗建, 等. 2010. 全球大气再分析资料的研究现状与进展 [J]. 地球科学进展, 25 (3): 242–254. Zhao Tianbao, Fu Congbin, Ke Zongjian, et al. 2010. Global atmosphere reanalysis datasets: Current status and recent advances [J]. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 25 (3): 242–254.
- 支星, 徐海明. 2013a. 3 种再分析资料的高空温度与中国探空温度资料的对比: 年平均特征 [J]. 大气科学学报, 36 (1): 77–87. Zhi Xing, Xu Haiming. 2013a. Comparative analysis of free atmospheric temperature between three reanalysis datasets and radiosonde dataset in China: Annual mean characteristic [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (1): 77–87.
- 支星, 徐海明. 2013b. 3 种再分析资料的高空温度与中国探空温度资料的对比: 季节平均特征 [J]. 高原气象, 32 (1): 97–109. Zhi Xing, Xu Haiming. 2013b. Comparative analysis of free atmospheric temperature between three reanalysis datasets and radiosonde dataset in China: Seasonal mean characteristic [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 32 (1): 97–109.
- 钟海玲, 高荣, 李栋梁. 2009. 地面风速的气候特征及其对沙尘暴的影响研究 [J]. 中国沙漠, 29 (2): 321–326. Zhong Hailing, Gao Rong, Li Dongliang. 2009. Characteristics of surface wind speed and impacts on sand-dust storms [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 29 (2): 321–326.