周盼盼,张明军,王圣杰,等. 2017. 高亚洲地区夏季 0 ℃ 层高度变化及其影响特征研究 [J]. 高原气象, 36(2): 371-383. Zhou Panpan, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. 2017. Variation and its influences of 0 ℃ Isotherm Height in summer over high Asia [J]. Plateau Meteorology, 36(2): 371-383. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2016. 00048.

高亚洲地区夏季0℃层高度变化及其影响特征研究

周盼盼,张明军,王圣杰,强 芳,王 杰,赵培培

(西北师范大学地理与环境科学学院,兰州 730070)

摘要:基于探空资料与空间分辨率为 3°×3°、2.5°×2.5°、2°×2°、1.5°×1.5°、1.125°×1.125°、1°×1°、 0.75°×0.75°、0.5°×0.5°的 ERA-Interim 再分析资料,运用气候倾向率和线性插补法,分析了 1979— 2012 年高亚洲地区夏季自由大气 0℃层高度的时空变化特征,并探讨了其与纬度、海拔的关系,以及不 同空间分辨率的 ERA-Interim 再分析资料与探空实测资料之间的相关性。结果表明:不同空间分辨率的 ERA-Interim 再分析资料与探空实测资料得到的 0℃层高度自 20 世纪 70 年代末以来普遍表现为上升趋势,并且分辨率为 0.75°×0.75°的再分析资料所得的 0℃层高度在 4800~5000 m 之间波动与探空实测 资料所得的 0℃层高度接近。不同空间分辨率的 ERA-Interim 再分析数据与探空实测数据得到的 0℃层 高度有相似的空间分布,并且其空间变化通常与纬度和海拔相关。高亚洲地区 0℃层高度表现出了从 北到南,从低海拔到高海拔增加的趋势。从 1979—2012 年将不同空间分辨率的 ERA-Interim 再分析资料得 到的 0℃层高度与探空实测结果存在冷偏差,并且分辨率相对较高的 ERA-Interim 再分析资料与探空实 测结果的冷偏差较小的比例更大。

关键词:高亚洲地区;0℃层高度;不同空间分辨率;ERA-Interim 文章编号:1000-0534(2017)02-0371-13 中图分类号:P403 文献标志码:A DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00048

1 引言

对流层中气温会随着海拔的升高而递减,当地 面气温在 0 ℃以上时,在高空中就会出现 0 ℃等温 面,称之为 0 ℃层高度(Diaz et al, 1996, 2003; 黄 小燕等, 2011; Folkins et al, 2013)。 0 ℃层高度不 仅能够反应高空大气冷暖气团的环流变化并且受地 面环境的影响较小,因此在气象预报工作中 0 ℃层 高度是提前反映气温的一个有效指标,其变化趋势 总是提前于地面气温的变化趋势(宫恒瑞等, 2010),所以研究其变化能较好地反应当地的气候 变化特征(Bradley et al, 2009; Zhang et al, 2010)。 近年来,中国学者利用 0 ℃层高度对一些区域的气 候变化开展了一些研究: Wang et al (2014)对高亚 洲地区 0 ℃层高度做了研究,发现 20 世纪 70 年代 以来无论是探空资料还是 NCEP/NCAR 再分析资 料所得的夏季0℃层高度在高亚洲地区均表现出普 遍上升趋势,并且与冰川物质平衡和平衡线高度都 表现出较好的相关性。Dong et al(2014)运用空间 分辨率为2.5°×2.5°的ERA-Interim 再分析资料对 祁连山区的0℃层高度做了分析,发现夏季祁连山 0℃层高度表现出随纬度的增加而降低,随海拔的 升高而增加的变化趋势,并且基于ERA-Interim 再 分析资料的0℃层高度变化趋势略大于探空站点的 变化趋势。宫恒瑞等(2010)发现2002—2006年乌 鲁木齐0℃层高度逐日变化与阿克苏河两条支流逐 日流量有较好的线性关系;毛炜峄等(2004)认为阿 克苏等3个站的0℃层高度逐日变化与阿克苏河两 条支流逐日流量之间有显著的相关性。综合上述可 知,运用探空资料在不同区域对0℃层高度已开展 了不同的研究。

高亚洲地区地处亚欧大陆中部干旱半干旱地

资助项目: 国家自然科学基金项目(41161012,41461003); 全球变化国家重大科学研究计划项目(2013CBA01801)

作者简介: 周盼盼(1990—) , 女 , 甘肃古浪人 , 硕士研究生 , 主要从事全球变化与可持续发展方面的研究. E-mail: geozhoupp@ 163.com 通讯作者: 张明军. E-mail: mjzhang2004@ 163.com

收稿日期: 2015-09-11; 定稿日期: 2016-04-14

带,以青藏高原为主体,包括,北起阿尔泰山,南 至喜马拉雅山的 20 多条山脉,其中包括世界上最 高的山脉和最大的草原,横跨52°N-26°N的温带 和亚热带地区。发育了数量众多和规模较大的山大 冰川,使之成为世界上中低纬度冰川最发育的地区 (谢自楚和刘潮海,2010)。高亚洲受到多种环流的 影响,西部和北部主要受西风环流影响,西南则受 强大的南亚季风影响,而东部和东南部受到东亚季 风的影响(康兴成, 1996; Yao et al, 2012)。高亚 洲是地球上除南极和北极地区之外的第三大冰冻 圈,分布着大量冰川。冰川作为天然的固体水库对 亚洲大气物理过程和天气气候变化产生着深刻的影 响,并且对亚洲中部干旱区生态环境以及社会经济 的发展有举足轻重的作用(刘时银等,2000;姚檀 栋等,2004; 谢自楚等,2009)。分析大气0℃层高 度的变化对高亚洲地区冰川的消融有一定的指导作 用,从而影响了高亚洲地区的水资源。

0℃层高度的测量以释放大规模的探空气球为 基础,此操作成本较高,因此在气象监测网络中探 空站的分布相对于气象站要稀疏得多,而再分析资 料却有着较好的空间连续性,其数据可信度已得到 验证,尤其体现在长时间序列的趋势分析研究中 (胡增运等, 2013; Wang et al, 2014)。因此,结合 再分析资料有利于更深入的分析大气0℃层高度与 大气温度的变化。再分析资料 ERA-Interim 模拟效 果较好(白磊等,2013; 高路等,2014; 高路和郝 璐, 2014), 但是在全国范围内采用 ERA-Interim 对 大气0℃层高度的研究尚有待开展;而格点资料用 于计算大气0℃层高度可能存在尺度效应,即不同 的空间分辨率数据可能会对计算结果产生影响,与 NCEP 系列资料不同, ERA-Interim 资料同时提供 不同空间分辨率数据,不同空间分辨率数据运用在 0℃层高度研究中存在怎样的差异缺乏足够的认 识。因此,本文结合不同空间分辨率的 ERA-Interim 再分析数据探讨了大气0℃层高度的时空变化 特征,分析了不同空间分辨率的 ERA-Interim 再分 析资料的异同,从而能够更好地将不同空间分辨率 的 ERA-Interim 再分析资料运用于0℃层高度等各 个方面的研究。

2 数据与方法

2.1 数据来源

采用 1979—2012 年气象站探空资料与不同空 间分辨率的 ERA-Interim(简称 ERA-I) (Dee et al, 2011) 再分析资料分析了高亚洲地区大气0℃层高 度的时空变化。探空资料由中国气象局国家气象信 息中心提供,选取了中国西部37个探空站(图1)规 定气压层(400 hPa、500 hPa、700 hPa 和850 hPa) 上的逐月位势高度和温度,包括08:00 与20:00(北 京时,下同)。为了确保数据质量,对每个等压面 上两个时次的平均值利用最大惩罚 F 法(PMFT) (Wang, 2008a, 2008b; 曹丽娟等, 2010) 进行均一 性检验,并进而对元数据支持(如仪器更换、算法 变化等)的断点采用 QM 法进行了订正。ERA-I 再 分析资料来源于欧洲中期天气预报中心,本文的 ERA-I 数据分别选取了 16 个规定气压层(950 hPa, 925 hPa, 900 hPa, 875 hPa, 850 hPa, 825 hPa, 800 hPa, 775 hPa, 750 hPa, 700 hPa, 650 hPa, 600 hPa, 550 hPa, 500 hPa, 450 hPa和400 hPa)上 的逐月气温和位势高度,并选取经度为61.5°E— 109°E、纬度为 22°N-55. 5°N 的区域范围,通过线 性插补方法计算得到自由大气夏季(6-8月)0℃ 层的平均高度。



2.2 研究方法

2.2.1 大气0℃层高度的计算

0 ℃层高度一般是通过已知气压层的高度和特 定气压层的空气温度进行线性插值计算得到。0 ℃ 层高度的计算步骤为: 先分别判断出 08:00 和 20:00两个时次0 ℃层所在位置的上下两个标准气 压层,然后利用线性插值法计算出每个时次的0 ℃ 层高度,再求取两个时次的均值,便可得到0 ℃层 高度值,利用线性插值法计算0 ℃层高度的公式 如下:

$$H = T_{\text{down}} \frac{H_{\text{down}} - H_{\text{up}}}{T_{\text{up}} - T_{\text{down}}} + H_{\text{down}} \quad , \tag{1}$$

式中: H 为0 ℃ 层高度(单位: m), H_{up} 和 H_{down} 分别 是0 ℃ 层所在位置的上下两个标准气压层高度(单 位: m), T_{up} 和 T_{down} 分别为 0 \mathbb{C} 层所在位置的上下两个标准气压层的温度(单位: \mathbb{C})。其中 ERA-H 再分析数据和探空数据 0 \mathbb{C} 层高度的计算都依据上面方法所得。

2.2.2 主要方法

本文采用反距离加权法将最近的 4 个再分析格 点数据插值到具有实测探空资料的站点位置上,分 析了 0 ℃ 层高度的时空变化特征以及不同空间分辨 率的 ERA-I 再分析数据之间的异同。利用森斜率 (Sen,1968) 来计算 0 ℃ 层高度在时间上的变化趋 势。运用 Mann-Kendall 检验法(Mann,1945; Kendall,1955) 来检测高亚洲地区 0 ℃ 层高度变化的显 著性,如果它通过 0.05 水平的显著性检验,则认 为变化趋势明显。此外,采用了偏差公式(*B*) 来计 算探空站点和不同空间分辨率格点插值之后的差 异,即分别采用实测站点和相应的加权内插格点的 时间序列按照如下公式计算:

$$B = 100 \times \frac{\overline{P_{\text{Rs}}} - \overline{p_{\text{ss}}}}{\overline{p_{\text{ss}}}} \quad , \qquad (2)$$

式中: P_{Ka} 为 ERA-I 再分析资料加权内插到各站点 后在时间序列中的均值, $\overline{P_{\text{Sa}}}$ 为各个站点在时间序 列中的均值。最后, 运用 ArcGIS9. 3 制作与 0 °C 层 高度相关的空间分布图。

3 结果分析

3.1 夏季0℃层高度的空间特征

基于不同空间分辨率的 ERA-I 再分析资料和 探空站点的夏季0℃层高度空间分布(图2)可以看 出,不同空间分辨率的 ERA-I 再分析数据和探空数 据所得的0℃层高度的空间分布格局较为一致, 高亚洲地区南北差异较大,即随着纬度的升高,





0 ℃层高度呈明显的降低趋势。其中不同空间分辨 率的 ERA-I 再分析资料的低值区出现在 50°N 左右 的阿尔泰山,0 ℃层高度在 3000 m 左右,最高不超 过 3500 m;而高值区出现在 30°N 左右的青藏高 原,且在喜马拉雅山形成了一个高值闭合区,0 ℃ 层高度在 5500 m 以上。探空站点中0 ℃层高度在 4500~5000 m 之间的站点分布最多,占总站点的 37.8%,分布在青藏高原以北,这些站点的平均海 拔为 1725 m;0 ℃层高度在 5500 m 以上的站点只 有 7 个,占总站点的 18.9%,都分布在青藏高原的 东南部,其中,这些站点的平均海拔为 3754 m。所 以,0 ℃层高度的分布与纬度、海拔有密切的关系。 随着 ERA-I 再分析资料空间分辨率的提高,在青藏 高原的西南边界处0 ℃层高度略微降低并向东凹进, 而青藏高原的东南边界0 ℃层高度升高到 5500 m 以 上并明显向东凸出,这与所处青藏高原东南部的甘 孜站、巴塘站、昌都站的0℃层高度相符。因此, ERA-I 再分析资料的空间分辨率越高,能够更细致 的体现0℃层高度的空间变化,更好的与探空实测 站点所得的0℃层高度吻合,对小区域的精确研究 提供了较为准确的再分析资料。此外,青藏高原东 坡特殊的地形使高原东坡对流明显,产生高原低 涡,从而影响了高原邻近地区的降水,低涡的移动 也可能给更广的区域带来暴雨天气(江吉喜和范梅 珠,2002;赵玉春和王叶红,2010)。由此可见,高 分辨率的再分析资料对类似青藏高原大地形山脚处 的复杂天气现象预测提供参考。

高亚洲地区夏季0℃层高度的变化趋势较为明 显。如图 3i 所示,高亚洲地区大部分探空站点的 0℃层高度都呈增加趋势,在37个探空站点中有





86. 5%的站点0℃层高度倾向率为正值且在0. 179 ~12. 044 m•a⁻¹之间变化,其中有53%的站点通过 了0. 05的显著性检验,且通过0. 05的显著性检验 的站点大多分布在青藏高原东北部(图4i)。而在 青藏高原东南方向的昌都站、巴塘站、西昌站、丽 江站和腾冲站五个站点的0℃层高度的倾向率呈减 小趋势,因此,在高亚洲地区夏季0℃层高度总体 上升较明显。



图 4 基于不同空间分辨率的 ERA -I 再分析资料和探空站点的夏季 0 ℃层高度变化趋势的显著性

(a) 3°×3°, (b) 2. 5°×2. 5°, (c) 2°×2°, (d) 1. 5°×1. 5°, (e) 1. 125°×1. 125°, (f) 1°×1°, (g) 0. 75°×0. 75°, (h) 0. 5°×0. 5°, (i) 探空站
Fig. 4 Significance of trend magnitude for 0 °C isotherm height derived from ERA-I reanalysis of different spatial resolutions and radiosonde stations in summer. (a) 3°×3°, (b) 2. 5°×2. 5°, (c) 2°×2°, (d) 1. 5°×1. 5°, (e) 1. 125°×1. 125°, (f) 1°×1°, (g) 0. 75°×0. 75°, (h) 0. 5°×0. 5°, (i) radiosonde station

如图 3a - h 所示,在 ERA-I 再分析资料当中,不同 空间分辨率的数据均呈现出相似的变化趋势,即夏 季 0 °C 层高度倾向率从东北到西南呈减小趋势。如 图 4 所示,通过 0.05 显著性检验的格点从低分辨 率 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 的 20.5%、2.5°×2.5°的 24.9%到高分辨 率 0.75°×0.75°的 27.8%、0.5°×0.5°的 28.1%可 以看出,随着分辨率的提高,通过 0.05 显著性检 验的格点占总格点的百分比在增大,即 ERA-I 再分 析资料的分辨率越高,通过 0.05 显著性检验的格 点相对越多。总体来看,无论是不同空间分辨率的 ERA-I 再分析数据(图 3a - h)还是探空数据(图 3i) 都表明,1979—2012 年高亚洲地区夏季 0 °C 层高度 呈上升趋势。

3.2 内插不同空间分辨率的 ERA-I 格点数据与实 测资料的对比分析

从不同空间分辨率的 ERA-I 再分析资料 0 ℃ 层高度内插数据偏差(图 5) 来看,绝大部分站点的 内插格点数据与实测资料的偏差为负值,主要集中 在-3%~0%之间,也就是说再分析资料得到的0 ℃ 层高度比探空实测资料结果偏冷。其中,分辨率最 低的 3°×3°的 ERA-I 内插格点数据与实测资料偏差 (图 5a) 在-3%~0%之间占总数的 83.78%,而分辨 率较高的 1.125°×1.125°(图 5e)、0.75°×0.75° (图 5g)、0.5°×0.5°(图 5h)的 ERA-I 内插格点数 据与实测资料偏差在-3%~0%之间的却占总数的 91.89%, 远远大于分辨率较低的数据偏差, 即分辨 率越高的 ERA-I 再分析资料得到的0℃层高度比 探空实测的结果偏冷更明显。总体来看, ERA-I 再 分析资料在偏差较小的范围-1%~0%之间的只有 分辨率为 0. 5°×0. 5°的占总数的37. 84%,其余各 分辨率的偏差在-1%~0%范围之间的略小于它占 总数的 35. 13%。



图 5 1979—2012 年高亚洲地区不同空间分辨率 ERA-I 再分析资料 0 ℃ 层高度内插格点数据在不同偏差范围内站点数分布 (a) 3°×3°, (b) 2.5°×2.5°, (c) 2°×2°, (d) 1.5°×1.5°, (e) 1.125°×1.125°, (f) 1°×1°, (g) 0.75°×0.75°, (h) 0.5°×0.5°
Fig.5 Number distribution of 0 ℃ isotherm height derived from ERA-I reanalysis of different spatial resolutions interpolated grids for different bias ranges in High Asia from 1979 to 2012. (a) 3°×3°, (b) 2.5°×2.5°, (c) 2°×2°, (d) 1.5°×1.125°, (f) 1°×1°, (g) 0.75°×0.75°, (h) 0.5°×0.5°

从插值后格点和站点的偏差空间分布情况 (图6)可以看出,整个区域内站点的偏差普遍适 中,其中只有阿勒泰站、塔城站、腾冲站的偏差较 大,可能是因为这些站所处地势较为复杂,站点多 分布在海拔相对较低的区域,与周围地势差异较 大。偏差较小的站点大多分布在青藏高原的东部, 其中分辨率为 3°×3°和 2.5°×2.5°的偏差较小点在 整个区域零散分布,而其余各个不同分辨率的偏差 较小点在青藏高原的东部分布较为集中,其他区域 零散分布。也就是说,ERA-I 再分析资料得到的 0℃层高度插值到不同的站点以后,青藏高原东部 的一些站点在 ERA-I 再分析数据分辨率相对较高 的情况下偏差较小,而青藏高原北部的一些站却在 ERA-I 再分析数据分辨率相对较高的情况下偏差较 大,可能是因为在青藏高原北部毗邻塔克拉玛干沙 漠地势落差较大而东部地势落差相对较小,北部站 点所在地势要比东部更复杂所致。

3.3 夏季0℃层高度的时间特征

由 1979—2012 年高亚洲地区基于不同空间分 辨率的 ERA-I 再分析资料和探空站点的夏季 0 ℃ 层高度年际变化趋势(图7)可以看出,不同空间分 辨率的ERA-I再分析数据和探空实测数据的0 ℃

(a) (b) (c) 50°N 40°N 30°N (d) (e) (f) 50°N 40°N 30°N 70°E 80°E 90°E 100°E (h) (g) 50°N 40°N 0~1 1-2 30°N 80°E 90°E 100°E 70°E 80°E 70°E

图 6 1979—2012 年高亚洲地区不同空间分辨率 ERA-I 再分析资料内插格点 0 ℃ 层高度偏差的空间分布
(a) 3°×3°, (b) 2. 5°×2. 5°, (c) 2°×2°, (d) 1. 5°×1. 5°, (e) 1. 125°×1. 125°, (f) 1°×1°, (g) 0. 75°×0. 75°, (h) 0. 5°×0. 5°
Fig. 6 Spatial distribution of bias of 0 ℃ isotherm height derived from ERA-I reanalysis of different spatial resolutions in High Asia from 1979 to 2012. (a) 3°×3°, (b) 2. 5°×2. 5°, (c) 2°×2°, (d) 1. 5°×1. 5°, (e) 1. 125°×1. 125°, (f) 1°×1°, (g) 0. 75°×0. 5°

层高度变化有较为近似的变化趋势,并且都随着时 间的推移,0℃层高度均呈上升趋势。其中,探空 站点的0℃层高度(图7i)以每年2.9m(p<0.01) 的趋势增加,而其他不同空间分辨率的 ERA-I 再分 析数据的0℃层高度均以低于探空站点观测值 (2.9 m • a⁻¹)的趋势增加。并且,分辨率为 1°×1° 的 ERA-I 再分析数据(图 7f) 与探空站点观测值所 计算得到的0℃层高度的变化趋势最相近。此外, 再分析数据随着分辨率的提高,图7a~h的截距从 4251 m 升高到 5238 m, 即分辨率越高 0 ℃ 层高度 相对越高。其中,图 7i显示 1979—2012 年探空资 料得到的0℃层高度在4800~5100 m 之间波动,而 空间分辨率为 3°×3°、2.5°×2.5°、2°×2°、1.5°× 1.5°、1.125°×1.125°(图 7a~e)的再分析资料所 得的0℃层高度在4100~4500 m 之间波动,比探空 实测资料所得的0℃层高度低。分辨率为0.75°× 0.75°的再分析资料所得的0°C 层高度在4800~

5000 m 之间波动与探空实测资料所得的 0 °C 层高 度接近。分辨率最高的 0.5°×0.5°的再分析资料所 得的 0 °C 层高度的最低值超过了 5100 m 比探空实 测资料所得的 0 °C 层高度高得多。从 1995 年以后 分辨率为 0.75°×0.75°的再分析资料与探空实测资 料的 0 °C 层高度较吻合但是其极值都比探空实测资 料略低,此分辨率的再分析资料相比其他分辨率的 再分析资料在此区域有微弱的提高,可能是由于高 亚洲地区地形复杂,在高海拔区站点分布较少且 ERA-I 再分析资料算法较单一,用 37 个探空站点 0 °C 层高度的平均值与 ERA-I 再分析资料比较存在 一定的误差。因此,在 0 °C 层高度的年际变化过程 中分辨率为 0.75°×0.75°的再分析资料所得的 0 °C 层高度的结果更具参考价值。

在全球变暖的背景下,高海拔地区的地面气温 与自由大气温度虽然受地形影响,却仍表现出较好 的相关性(Pepin and Seidel,2005),并且自由大气



2期



图 7 1979—2012 年高亚洲地区基于不同空间分辨率的 ERA -I 再分析资料和探空站点的夏季 0 ℃ 层高度年际变化趋势 (a) 3°×3°, (b) 2. 5°×2. 5°, (c) 2°×2°, (d) 1. 5°×1. 5°, (e) 1. 125°×1. 125°, (f) 1°×1°, (g) 0. 75°×0. 75°, (h) 0. 5°×0. 5°, (i) 探空站 Fig. 7 Inter-annual variation of 0 ℃ isotherm height derived from ERA-I reanalysis of different spatial resolutions and radiosonde stations in summer over High Asia from 1979 to 2012. (a) 3°×3°, (b) 2. 5°×2. 5°, (c) 2°×2°, (d) 1. 5°×1. 5°, (e) 1. 125°×1. 125°, (f) 1°×1°, (g) 0. 75°×0. 75°, (h) 0. 5°×0. 5°, (i) radiosonde station

温度受地面环境影响较小变化趋势提前与地面气温 (宫恒瑞等, 2010)。所以, 同时结合分辨率为1°× 1°的 ERA-I 再分析资料的变化趋势以及分辨率为 0. 75°×0. 75°的 ERA-I 再分析资料的0℃层高度, 对邻近海拔相对较高、地形复杂、气象监测匮乏地 区,运用于气温资料的重建,这对于山区气候以及 气象预报提供参考依据。

如图 8 所示,选取 37 个探空站点及其所对应 的最邻近的分辨率为 0. 75°×0. 75°的 ERA-I 再分析 格点,得出分辨率为 0. 75°×0. 75°的 ERA-I 再分析 资料与探空资料从 1979—2012 年夏季 0 ℃ 层高度 相关性较好且相关系数为 0. 99(*p*<0. 0001)。而都 兰站与茫崖站相比其他站点相关性有所降低,可能 是因为都兰站和茫崖站只提供了气压层为 400 hPa 和 500 hPa 上的逐月位势高度和温度,在运算过程 中数据相对简便,因此存在一定的误差且相关性不



图 8 1979—2012 年高亚洲地区逐个站点夏季 0 ℃层高度与 分辨率为 0. 75°×0. 75°的 ERA-I 再分析资料之间的相关性 Fig. 8 Correlation of 0 ℃ isotherm height derived from ERA-I reanalysis of 0. 75°×0. 75° spatial resolutions and radiosonde stations in summer in High Asia from 1979 to 2012

3.4 夏季0℃层高度与海拔、纬度的关系

图 9、图 10 分别是不同空间分辨率的 ERA-I 数 据插值到各个站点的所得的夏季 0 ℃ 层高度的箱 图。由图 9 可以看出, ERA-I 再分析数据和探空数 据所得的 0 ℃ 层高度都随着纬度的增加有明显的下 降趋势,其中最高值都出现在 30°N 左右。探空站 的实测 0 ℃ 层高度的最高值在 6100 m 左右, 不同 空间分辨率的 ERA-I 再分析资料所得的 0 ℃ 层高 度的最高值都低于 6000 m, 而探空站的实测最低值 却与再分析资料的最低值近似, 因此, 探空实测的 0℃层高度在 24°N—48°N 的区域范围内下降幅度 比再分析资料的大,且二者的0℃层高度都与纬度 有很好的相关性。此外, 不同空间分辨率的 ERA-I 再分析资料所得的0℃层高度(图 9a~h)随纬度的 变化有大体相似的趋势, 大多数都能与探空资料相 吻合。对于不同分辨率的 ERA-I 再分析资料, 它们 插值到各个站点后其0℃层高度随纬度的变化大体 相同, 只有个别站点有微小的差异, 所以, 不在具 体赘述。



图 9 1979—2012 年基于不同空间分辨率的 ERA-I 再分析资料和探空数据的夏季 0 ℃ 层高度随纬度的变化
(a) 3°×3°, (b) 2. 5°×2. 5°, (c) 2°×2°, (d) 1. 5°×1. 5°, (e) 1. 125°×1. 125°, (f) 1°×1°, (g) 0. 75°×0. 75°, (h) 0. 5°×0. 5°, (i) 探空站
Fig. 9 The box plot of 0 ℃ isotherm height change with latitude derived from ERA-I reanalysis of different spatial resolutions and radiosonde stations in summer from 1979 to 2012. (a) 3°×3°, (b) 2. 5°×2. 5°, (c) 2°×2°, (d) 1. 5°×1. 5°, (e) 1. 125°×1. 125°, (f) 1°×1°, (g) 0. 75°×0. 5°, (i) adjoind station

由图 10 可以看出,夏季 0 ℃ 层高度与海拔也 有一定的关系。不同空间分辨率的 ERA-I 再分析 数据与探空数据所得的 0 ℃层高度都随海拔的升高 而增加。其中,探空数据的 0 ℃层高度的最高值 (图 10i)在 6100 m 左右,而再分析数据的 0 ℃层高 度的最高值(图 10a~h)都在 6000 m 左右,所以, 探空实测的 0 ℃ 层高度与 ERA-I 再分析资料所得 的 0 ℃ 层高度差异不大。此外,海拔最低的克拉玛 依 站 从 1979—2012 年 0 ℃ 层 高 度 的 中 值 为 3978.54 m,海拔最高的沱沱河站 0 ℃ 层高度的中 值为 5519.71 m,而最低的中值所在站点却是海拔 为 735.3 m 的阿勒泰站,最高的中值所在站点却是



图 10 1979—2012 年基于不同空间分辨率的 ERA-I 再分析资料和探空数据的夏季 0 ℃ 层高度随海拔的变化
(a) 3°×3°, (b) 2. 5°×2. 5°, (c) 2°×2°, (d) 1. 5°×1. 5°, (e) 1. 125°×1. 125°, (f) 1°×1°, (g) 0. 75°×0. 75°, (h) 0. 5°×0. 5°, (i) 探空站
Fig. 10 The box plot of 0 ℃ isotherm height change with altitude derived from ERA-I reanalysis of different spatial resolutions and radiosonde stations in summer from 1979 to 2012. (a) 3°×3°, (b) 2. 5°×2. 5°, (c) 2°×2°, (d) 1. 5°×1. 5°, (e) 1. 125°×1. 125°, (f) 1°×1°, (g) 0. 75°×0. 75°, (h) 0. 5°×0. 5°, (i) radiosonde station

海拔为 4300 m 的定日站。所以,海拔最低的站点 并不与0 ℃层高度的最低值相对应,但是从整体来 看,探空站的海拔从 449.5 m 的平原站升高到 4533.1 m 的高山站所对应的0 ℃ 层高度从 3978.54 m升高到了 5519.71 m,也就是说,0 ℃层 高度大体上是随着海拔的升高而升高的。此外,不 同空间分辨率的 ERA-I 再分析资料与海拔的关系 都表现出相似的趋势,各个分辨率之间的差异微 小,在此不再赘述。

4 讨论

以 ERA-I 再分析资料为代表的格点气候资料 用于分析长期气候变率的可信度问题一直是气候研 究的重点问题之一(Simmons et al, 2004; Liu et al, 2012)。已有研究(Dong et al, 2014)将 ERA-I 格点 数据应用于 0 ℃层高度的研究,但其前提是要对不 同的空间分辨率有明确认识。以青藏高原为例,基 于 ERA-I 再分析资料的地面气温一般要高于实地 观测的结果(Zhang and Guo, 2011; Bao and Zhang, 2013)。而本研究选取了8种不同空间分辨率的 ERA-I 再分析数据,得到的0℃层高度都略低于探 空资料得到的结果,即再分析资料在自由大气中存 在冷偏差,这与之前对地面气温的认识(You et al, 2013) 是一致的。而在高亚洲地区每种空间分辨率 的 ERA-I 数据都可以反映出 0 ℃ 层高度变化的长 期趋势,但是,分辨率越高所得到的结果并不是越 精确。例如,本研究中,0.75°×0.75°的格点在研 究0℃层高度的时间变化过程中与探空资料较相 符, 而0℃层高度的空间变化中与探空资料最相符 的却是 0. 5°×0. 5°的格点数据。每种空间分辨率的 ERA-I 再分析资料得到的结果都有相似的趋势,而 不同空间分辨率的 ERA-I 再分析资料在不同的研

究尺度中却有略微差异。因此,在应用 ERA-I 再分 析资料计算0℃层高度变化时应注意其空间分辨率 的问题。

在高海拔地区,地面气温与自由大气温度的相 关性虽然受地形影响,但是总体仍表现出较好的相 关性(Pepin and Seidel,2005;王立伟等,2014)。 在全球变暖的情况下,气温对冰川变化起主导作 用,使高亚洲地区的冰川普遍存在着持续退缩 (Kang et al,2010;王圣杰等,2011;Zhang et al, 2012)。随着夏季大气0℃层高度的升高,地面温 度处于0℃以上的情况频繁发生,由于冰川的积累 和消融受到水热条件的综合作用(Ohmura et al, 1992),所以在高海拔区会直接导致冰体的消融。 在我国大部分冰川区,夏季降水占全年降水量的一 半以上,夏季0℃层高度的变化直接影响区域冰川 水资源。

5 结论

基于高亚洲地区 37 个气象台站的长期探空资 料与不同空间分辨率的 ERA-I 再分析资料,研究了 1979—2012 年大气0℃层高度的时空变化,分析了 不同空间分辨率的 ERA-I 再分析资料得到的大气0 ℃层高度与探空实测资料得到的0℃层高度之间的 相关性,得出以下主要结论:

(1) 不同空间分辨率的 ERA-I 再分析数据与 探空实测数据得到的 0 ℃层高度自 20 世纪 70 年代 末以来高亚洲地区普遍表现为上升趋势。89.2%的 探空站表现出升高趋势,其中 48.6%的站点通过了 0.05 水平的显著性检验,不同空间分辨率的 ERA-I 再分析资料在高亚洲地区也表现出同样的升高趋 势,并且分辨率为 0.75°×0.75°的再分析资料所得 的 0 ℃层高度在 4800~5000 m 之间波动与探空实 测资料所得的 0 ℃层高度接近。

(2) 不同空间分辨率的 ERA 再分析数据与探空实测数据得到的 0 ℃ 层高度有相似的空间分布,并且其空间变化通常与纬度和海拔相关。高亚洲地区 0 ℃ 层高度表现出了从北到南,从低海拔到高海拔增加的趋势,并且,在青藏高原出现了封闭的高值区。

(3) 从 1979—2012 年将不同空间分辨率的 ERA-I 数据插值到各个站点得到绝大部分站点的内 插格点数据与实测资料偏差为负值,主要集中在 -3%~0%之间,也就是说 ERA-I 再分析资料得到 的0 ℃层高度比探空实测结果偏冷,这种自由大气 的冷偏差在青藏高原东部偏小,其中,分辨率相对 较高的 ERA-I 再分析资料与探空实测结果的冷偏 差较小的比例更大。

参考文献:

- Bao X H , Zhang F Q. 2013. Evaluation of NCEP-CFSR , NCEP-NCAR , ERA-Interim and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau [J]. J Climate , 26(1): 206-214.
- Bradley R S , Keimig F T , Diaz H F , et al. 2009. Recent changes in freezing level heights in the tropics with implications for the deglacierization of high mountain regions [J]. Geophys Res Lett , 36 (17): L17701. DOI: 10. 1029/2009GL037712.
- 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(656): 553-597.
- Diaz H F , Eischeid J K , Duncan C , et al. 2003. Variability of freezing levels , melting season indicators and snow coverfor selected high– elevation and continental regions in the last 50 years [J]. Climatic Change , 59(1–2): 33–52.
- Diaz H F , Graham N E. 1996. Recent changes in tropical freezing heights and the role of sea surface temperature [J]. Nature , 383 (6596): 152–155.
- Dong L , Zhang M , Wang S , et al. 2015. The freezing level height in the Qilian Mountains , northeast Tibetan Plateau based on reanalysis data and observations , 1979—2012 [J]. Quaternary International , 380–381: 60–67. DOI: 10. 1016/j. quaint. 2014. 08. 049.
- Folkins I. 2013. The melting level stability anomaly in thetropics [J]. Atmos Chem Phys , 13(3): 1167-1176.
- Kang S C , Xu Y W , You Q L , et al. 2010. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau [J]. Environ Res Lett , 5 (1): 015101. DOI: 10. 1088/1748-9326/5/1/015101.
- Kendall M R. 1955. Rank Correlation Methods [M]. London: Charles Griffin.
- Liu Z F , Xu Z X , Yao Z J , et al. 2012. Comparison of surface variables from ERA and NCEP reanalysis with station data over eastern China [J]. Theor Appl Climatol , 107(3-4): 611-621.
- Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 13(3): 245-259.
- Ohmura A , Kasser P , Funk M. 1992. Climate at the equilibrium line of glaciers [J]. Journal of Glaciology , 38(130): 397-411.
- Pepin N C , Seidel D J. 2005. A global comparison of surface and freeair temperatures at high elevations [J]. J Geophys Res , 110(D3) : D03104. DOI: 10. 1029/2004JD005047.
- Sen P K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association , 63(324) : 1379–1389.
- Simmons A J , Jones P D , Da Costa Bechtold V , et al. 2004. Comparison of trends and low-frequency variability in CRU , ERA-40 , and NCEP/NCAR analyses of surface air temperature [J]. J Geophys Res , 109(D24) : D24115. DOI: 10. 1029/2004JD 005306.

- Wang S , Zhang M , Pepin N C , et al. 2014. Recent changes in freezing level heights in High Asia and their impact on glacier changes [J]. J Geophys Res , 119(4): 1753–1765.
- Wang X L. 2008a. Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test [J]. J Appl Meteor Climatol , 47(9): 2423-2444.
- Wang X L. 2008b. Penalized maximal F test for detecting undocumented mean shift without trend change [J]. J Atmos Ocean Technol , 25(3): 368-384.
- Yao T , Thompson L , Yang W , et al. 2012. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. Nature Climate Change , 2(9) : 663–667.
- You Q L , Fraedrich K , Ren G , et al. 2013. Variability of temperature in the Tibetan Plateau based on homogenized surface stations and reanalysis data[J]. Int J Climatol , 33(6): 1337–1347.
- Zhang G X , Sun S F , Ma Y F , et al. 2010. The response of annual runoff to the height change of the summertime 0 °C level over Xinjiang [J]. Journal of Geographical Sciences , 20(6): 833–847.
- Zhang M J , Wang S J , Li Z Q , et al. 2012. Glacier area shrinkage in China and its climatic background during the past half century [J]. Journal of Geographical Sciences , 22(1): 15–28.
- Zhang Y S , Guo Y. 2011. Variability of atmospheric freezing-level height and its impact on the cryosphere in China [J]. Annals of Glaciology , 52(58): 81-88.
- 白磊,王维霞,姚亚楠,等. 2013. ERA-Interim 和NCEP/NCAR 再分析数据气温和气压值在天山山区适用性分析[J]. 沙漠与绿洲 气象,7(3): 51-56. Bai Lei, Wang Weixia, Yao Yanan, et al. 2013. Reliability of NCEP/NCAR and ERA-Interim reanalysis date on Tianshan Mountainous Area[J]. Desert Oasis Meteor,7(3): 51-56.
- 曹丽娟,鞠晓慧,刘小宁.2010. PMFT 方法对我国年平均风速的均 一性检验[J]. 气象, 36(10): 52-56. Cao Lijuan, Ju Xiaohui, Liu Xiaoning. 2010. Penalized maximal F test for the homogeneity study of the annual mean wind speed over China[J]. Meteor Mon, 36(10): 52-56.
- 高路,陈兴伟,林广发. 2014. 基于 ERA-Interim 再分析资料的中国 极端气温分析[J]. 南水北调与水利科技,12(2): 75-78. Gao Lu, Chen Xingwei, Lin Guangfa. 2014. Analysis of extreme temperatures in China based on ERA-Interim reanalysis Date [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 12(2): 75-78.
- 高路,郝璐. 2014. ERA-Interim 气温数据在中国区域的适用性评估 [J]. 亚热带资源与环境学报,9(2):75-81. Gao Lu, Hao Lu. 2014. Verification of ERA-Interim Reanalysis Date over China [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment,9(2):75-81.
- 宫恒瑞,石玉,冯志敏. 2010. 春季融雪期0℃层高度与乌鲁木齐河 径流量的关系[J]. 干旱区研究,27(1): 69-74. Gong Hengrui, Shi Yu, Feng Zhimin. 2010. Relationship between the 0℃ layer height and the streamflow of the Urumqi River in the period of spring snowmelt[J]. Arid Zone Research, 27(1): 69-74.
- 胡增运,倪勇勇,邵华,等. 2013. CFSR, ERA-Interim和 MERRA 降 水资料在中亚地区的适用性[J]. 干旱区地理, 36(4): 700-

708. Hu Zengyun , Ni Yongyong , Shao Hua , et al. 2013. Applicability study of CFSR , ERA-Interim and MERRA precipitation estimates in Central Asia [J]. Arid Land Geography , 36(4): 700– 708.

- 黄小燕,张明军,王圣杰,等.2011.中国西北地区近50年夏季0℃ 层高度及气温时空变化特征[J].地理学报,66(9):1191-1199. Huang Xiaoyan, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. 2011. Variation of 0℃ isotherm height and ground temperature in Summer in Northwest China during the past 50 years [J]. Journal of Geographical Sciences, 66(9): 1191-1199.
- 江吉喜,范梅珠. 2002. 夏季青藏高原上的对流云和中尺度对流系统 [J]. 大气科学,26(2): 263-270. Jiang Jixi, Fan Meizhu. 2002. Convective clouds and mesoscale convective systems over the Tibetan Plateau in summer[J]. Chinese J Atmos Sci,26(2): 263-270.
- 康兴成. 1996. 小冰期以来高亚洲地区的气候变化 [J]. 冰川冻土, 18(増刊): 289-295. Kang Xingcheng. 1996. Climate changes in the Qing-Zang Plateau Area since the little ice age [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 18(Suppl): 289-295.
- 刘时银,丁永建,叶佰生,等. 2000. 高亚洲地区冰川物质平衡变化 特征研究[J]. 冰川冻土,22(2): 98-105. Liu Shiyin, Ding Yongjian, Ye Baisheng, et al. 2000. Regional characteristics of glacier mass balance variations in High Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,22(2): 98-105.
- 毛炜峰,吴钧,陈春艳.2004.0℃层高度与夏季阿克苏河洪水的关 系[J].冰川冻土,26(6):697-704. Mao Weiyi,Wu Jun,Chen Chunyan.2004. Relationship of 0℃ level height and summer flood of AKsu River,Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,26(6):697-704.
- 王立伟,张明军,高峰. 2014. 1977—2010 年长江源区夏季大气0℃ 层高度变化[J].高原气象,33(3): 769-774. Wang Liwei, Zhang Mingjun, Gao Feng. 2014. Variation of 0℃ atmospheric height in the headwaters of Changjiang River in summer during 1977-2010[J]. Plateau Meteor, 33(3): 769-774. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2014. 00048.
- 王圣杰,张明军,李忠勤,等. 2011. 近 50 年来中国天山冰川面积变 化对气候的相应[J]. 地理学报,66(1): 38-46. Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. 2011. Response of Glacier Area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the past 50 years [J]. Journal of Geographical Sciences,66(1): 38-46.
- 谢自楚,刘潮海. 2010. 冰川学导论[M]. 上海: 上海科学普及出版 社, Xie Zichu, Liu Chaohai. 2010. Introduction to glaciology [M]. Shanghai: Shanghai popular science press.
- 谢自楚,周宰根,李巧媛,等. 2009. 高亚洲冰川系统物质平衡特征 及其对全球变化响应研究进展与展望[J]. 地球科学进展,24 (10): 1065-1072. Xie Zichu, Zhou Zaigen, Li Qiaoyuan, et al. 2009. Progress and prospects of mass balance characteristic and responding to global change of glacier system in High Asia[J]. Adv Earth Sci,24(10): 1065-1072.
- 姚檀栋,刘时银,蒲健辰,等. 2004. 高亚洲冰川的近期退缩及其对 西北水资源的影响[J]. 中国科学: D 辑,34(6): 535-543. Yao Tandong, Liu Shiyin, Pu Jianchen, et al. 2004. Recent glacial re-

treat in High-Asia in China and its impact on water resources in Northwest China[J]. Science in China: Series D , 2004 , 34(6) : 535-543.

赵玉春, 王叶红. 2010. 高原涡诱生西南涡特大暴雨成因的个例研究

[J]. 高原气象, 29(4): 819-831. Zhao Yuchun, Wang Yehong. 2010. A case study on Plateau Vortex inducing Southwest Vortex and producing extremely heavy rain[J]. Plateau Meteor, 29(4): 819-831.

Variation and Its Influences of 0 °C Isotherm Height in Summer over High Asia

ZHOU Panpan, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, QIANG Fang, WANG Jie, ZHAO Peipei (Geography and Environmental Science College, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on radiosonde data and ERA-Interim reanalysis with resolution of $3^{\circ} \times 3^{\circ}$, 2. $5^{\circ} \times 2.$ 5° , $2^{\circ} \times 2^{\circ}$, 1. $5^{\circ} \times 1.$ $125^{\circ} \times 1.$ 125° , $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 0. $75^{\circ} \times 0.$ 75° , 0. $5^{\circ} \times 0.$ 5° . The variation of 0 °C isotherm height in summer over High Asia during 1979—2012 is analyzed by using the climate tendency rate and linear interpolated. The relationship with latitude and altitude as well as the correlation of ERA-Interim reanalysis with different spatial resolutions and radiosonde data are discussed. The result indicates that variation of 0 °C isotherm height in summer since 1970s shows an increasing trend based on radiosonde data and ERA-Interim reanalysis with different spatial resolutions. 0 °C isotherm height based on the reanalysis data with resolution of 0. $75^{\circ} \times 0.$ 75° is fluctuate between 4800~5000 m which is close to the radiosonde data. 0 °C isotherm height based on the ERA-Interim reanalysis with different resolutions and radiosonde data have similar spatial distribution which are usually associated with latitude and altitude. In High Asia, 0 °C isotherm height showed an increasing trend from north to south and from low to high elevations. ERA-Interim reanalysis with different spatial resolutions interpolated to each stations have the negative bias of most interpolated gridded data and measured data during 1979—2012, which 0 °C isotherm height based on the reanalysis data exists cold bias with radiosonde data , in which the small cold bias of the ERA-Interim reanalysis with high spatial resolutions and radiosonde data as greater proportion. **Key words**: High Asia; 0 °C isotherm height; Different spatial resolutions; ERA-Interim