

于忠达, 周广庆, 周筠珺. 2017. 东亚中高纬土壤温度资料评估与分析 [J]. 大气科学, 41 (1): 147–166. Yu Zhongda, Zhou Guangqing, Zhou Yunjun, 2017. Evaluation and analysis of soil temperature data over middle and high latitudes of East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (1): 147–166, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15300.

东亚中高纬土壤温度资料评估与分析

于忠达^{1,2} 周广庆² 周筠珺¹

¹ 成都信息工程大学大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225

² 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 本文以一套俄罗斯土壤温度历史观测资料 RHSTD 为基础, 分析了四套土壤温度产品 [ERA-Interim 再分析资料、两套陆面模式离线运行产品 ERA-Interim/Land (简称 ERA-Land) 和 MERRA-Land、以及一套二十世纪再分析资料 NOAA-CIRES 20CR] 在东亚中高纬的可靠性, 并重点关注春夏季, 主要结论如下: 观测地温在 0~2 m 波动较大, 随季节在 0°C 上下摆动, 而 2 m 以下地温稳定少变, 并且在 60°N 以北地区出现永久冻结。四套地温产品较好地反映了这些特征。无论春夏, 还是年平均, 四套地温产品气候态都呈“南暖北冷”的特征, 但 ERA-Land 的空间分布与观测最接近。就季节循环而言, ERA-Land 最能反映该地区土壤的冻融过程和土壤温度的季节演变。四套地温产品年际变率 (标准差) 与观测的差异随季节和土壤层变化大, 情况比较复杂。就年际变化趋势而言, 四套地温产品与观测的相关性, 夏季好于春季, 表层好于深层, 并且 ERA-Land 土壤温度拥有四套地温产品最多的共性, 最能反映观测地温的年际变化。

关键词 东亚中高纬 土壤温度 资料评估 垂直廓线 气候态 季节循环 年际变化

文章编号 1006-9895(2017)01-0147-20

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15300

Evaluation and Analysis of Soil Temperature Data over Middle and High Latitudes of East Asia

YU Zhongda^{1,2}, ZHOU Guangqing², and ZHOU Yunjun¹

¹ College of Atmospheric Sciences/Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract This study investigates the qualities of four soil temperature reanalysis products over middle and high latitudes of East Asia based on a set of Russian historical soil temperature data (RHSTD). The four reanalysis products are the ERA-Interim re-analysis, ERA-Interim/Land (i.e. ERA-Land), and MERRA-Land generated by running land surface models offline, and a 20th century reanalysis (i.e. the NOAA-CIRES 20CR). More emphases are put on the spring and summer, and main results are as follows. Large seasonal fluctuations of 0–2 m soil temperature around 0°C are found in the RHSTD, but the soil temperature below 2 m stays relatively stable. Furthermore, the soil below 2 m is permanently frozen to the north of 60°N. The four reanalysis products well capture these characters. Regardless of the spring, summer

收稿日期 2015-11-13; **网络预出版日期** 2016-03-28

作者简介 于忠达, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 研究方向: 气候变化与气候模拟。E-mail: yzd@mail.iap.ac.cn

通讯作者 周广庆, E-mail: zhgq@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目高性能计算项目 2016YFB0200800

Funded by National Major Research High Performance Computing Program of China (Grant 2016YFB0200800)

or annual mean, the soil temperature climatology shown in the four reanalysis products is always “warm in the south and cold in the north”, while the spatial pattern of the ERA-Land is the closest to observations. In terms of seasonal cycle, the ERA-Land at this region has a better performance in reflecting the soil freezing and thawing processes and the seasonal evolution of soil temperature. Situations are more complex regarding the interannual variability of soil temperature, i.e. standard deviation, because errors between these re-analysis products and observations vary with season and soil layer greatly. As for the interannual change, the correlation between each reanalysis product and observations is better in the summer than in the spring, and the correlation in the upper layer is better than that in the deep layer. Meanwhile, the ERA-Land is the most representative of the four re-analysis products. It better reproduces the interannual changes in observed soil temperature than the other three products.

Keywords Middle and high latitudes of East Asia, Soil temperature, Data evaluation, Vertical profile, Climatology, Seasonal cycle, Interannual variation

1 引言

诸多研究表明, 欧亚大陆北部冬、春季积雪与东亚夏季气候密切相关(Yang and Xu, 1994; Wu and Kirtman, 2007; Wu et al., 2009; 穆松宁和周广庆, 2010; Yim et al., 2010; 许立言和武炳义, 2012)。积雪的反照率效应和水文效应被认为是其影响气候的两个重要途径(Barnett et al., 1988, 1989; Matsumura et al., 2010; Souma and Wang, 2010)。当冬、春季积雪偏多时, 地表反照率增大, 地表吸收的净短波辐射减少, 潜热、感热和长波辐射损失也减少, 陆地成了热汇。当积雪融化时, 积雪融水进入土壤, 使得土壤温度(湿度)降低(增加)。它在积雪消失后, 还通过积雪融水的低温和蒸发影响陆地的增暖过程, 进而阻碍亚洲大陆随后海陆热力差异的增加, 导致夏季风偏弱。

然而, 两种途径的重要性仍存在一定争议, 具体过程也不清楚。穆松宁和周广庆(2012)指出, 春、夏季陆面季节演变异常是前冬积雪—夏季气候“隔季相关”的重要桥梁: 当欧亚北部冬季增雪面积偏大时, 从春季向夏季欧亚北部大范围积雪—冻土自西向东、由南向北的融化进程减慢, 导致本应在春季融化的积雪和冻土向后推迟, 进而夏季东亚中高纬积雪和冻土融化强烈, 土壤温度明显偏低, 进而引起东亚夏季环流异常。他们的研究表明, 东亚中高纬土壤温度可能在积雪—夏季气候“隔季相关”中发挥重要作用。

那么, 土壤温度有何特性, 它对气候的影响到底如何? Carson and Moses (1963)较早地研究了美国阿贡国家实验室所在地上层土壤与大气热量交换的日循环和年循环, 发现热交换的日循环与地表

净辐射相似, 而年循环的最大值在 6 月和 11 月出现。中国学者围绕土壤温度与中国春、夏季降水的关系做了大量研究, 结果表明: 前期土壤温度(0.8~3.2 m)与同一地区或邻近地区后期降水有显著的统计相关性, 即前期土壤温度偏高, 则后期降水偏多, 反之亦然; 层次越深, 滞后时间也越长(汤懋苍等, 1986, 1988; 汤懋苍和张建, 1994; 章基嘉等, 1994)。Hu and Feng (2004)从能量(土壤焓)的角度解释了美国西南部夏季风降水与美国西北部前冬降水和雪盖的相关性, 并指出各土壤层(0~1 m)焓变率的量级在月到季节尺度上与大气都很相近。此外, 国内外学者针对地温的气候效应进行了许多数值试验。Xue et al. (2012)通过区域气候模式降尺度, 研究了美国西部春季次表层土壤温度异常对北美夏季降水的影响, 发现 5 月初美国西部次表层地温正异常会引起气旋式异常环流, 并通过 Rossby 波在西风气流中东传, 导致 6 月美国南部多雨和北部少雨。Mahanama et al. (2008)通过三个长期大气环流模式试验指出, 在绝大多数地区, 自由变化的次表层地温能显著增加近地面气温的变率和地面记忆时间。

通过以上总结可以发现, 土壤温度具有明显的气候效应, 但以往的研究大多关注中纬度土壤温度异常与中纬度气候的关系, 很少涉及中高纬土壤温度异常对中纬度的影响, 例如上文提到的东亚中高纬土壤温度异常对东亚大气环流的影响。为了回答这个问题, 我们需要一套在该地区较为可靠的土壤温度资料。

已有研究显示, 俄罗斯有近百年的土壤温度站点观测资料, 站点多、土壤分层细(0.05~3.2 m 深)。但其时空代表性较差, 测站集中于 50°N~65°N,

以北地区台站较少, 而且各站点记录长短不一, 有的可追溯到 19 世纪初, 有的则始于 20 世纪 90 年代, 并且各台站表层 (0.05~0.2 m) 地温在冷季不观测 (Gilichinsky et al., 1998; Frauenfeld et al., 2004; Frauenfeld and Zhang, 2011; Park et al., 2014), 因此把这套资料直接用于对时空覆盖均匀性要求较高的气候分析, 特别是与大气环流气候关系的分析, 多少显得力不从心。另一方面, 作为替代产品, 目前许多再分析资料和模式产品中都包含土壤温度, 例如欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的 ERA-40、ERA-Interim 和 ERA-Interim/Land (Kallberg et al., 2004; Berrisford et al., 2011; Balsamo et al., 2012), 但针对地温产品的系统性评估工作还较少, 更多的是基于观测地温的数值天气预报模式 (Godfrey and Stensrud, 2008; Holmes et al., 2012; Albergel et al., 2015)、气候系统模式 (PaiMazumder et al., 2008)、陆面模式 (陈海山等, 2010) 和资料同化系统 (Xia et al., 2013; Wang et al., 2016) 等的评估和改进工作。Albergel et al. (2015) 利用美国和欧洲地区近 700 个站点的观测土壤温度, 评估了 ECMWF 预测的 2012 年表层土壤温度 (时效为一天), 发现模式高估了美国下午的地温, 而低估了德国及周边地区的地温。PaiMazumder et al. (2008) 借助俄罗斯 400 多个台站的观测土壤温度, 检验了通用气候系统模式 (Community Climate System Model, CCSM) 全耦合时的地温气候态, 结果显示 CCSM 很好地抓住了土壤温度季节变化的位相, 但振幅与观测有差异: 冬季偏高, 夏季偏低, 春、秋两季与观测最为接近。值得注意的是, 当前陆面模式大都是柱模式 (Oleson et al., 2004), 不同的水平分布点彼此之间没有直接联系 (这有别于大气和海洋的同化分析), 同时在同化过程中也很少用到土壤温度的垂直廓线, 而且有时还会采用简化的同化方案 (Dee et al., 2011), 因此再分析地温的好坏很大程度上取决于所采用的大气强迫资料, 即使采用了一些土壤观测资料, 也往往仅限于表层。此外, 针对土壤湿度 (Yeh et al., 1984; Vinnikov et al., 1996; 马柱国等, 1999, 2000, 2001; 张文君等, 2008a, 2008b; 左志燕和张人禾, 2008) 和陆地表面温度 (皮温) (Wan et al., 2002; Tsuang et al., 2008) 的研究较为细致、透彻, 而对整层的土壤温度等变量研究还较少 (Albergel et al., 2015)。

综上所述, 由于该地区观测资料质量的限制、土壤温度产品评估工作的匮乏, 以及数值试验的需要, 评估当前再分析资料中土壤温度在东亚中高纬的适用性变得十分必要。本文选用了四套较新的、具有代表性的, 并且土壤垂直分层较细的土壤温度产品, 即 ERA-Interim/Land、ERA-Interim、MERRA-Land (Reichle et al., 2011) 和 NOAA-CIRES 20CR (Compo et al., 2011), 以及一套俄罗斯土壤温度历史观测资料。本文其他部分的内容安排如下: 第二部分为资料和方法介绍, 第三、四、五、六和七部分分别讨论土壤温度的单站垂直特征、土壤温度气候态的空间分布、土壤温度的季节循环 (多年平均态)、年际变率 (标准差) 和年际变化趋势。

2 资料和方法

本文使用了 5 套土壤温度数据, 包括俄罗斯土壤温度历史资料 RHSTD、两套再分析资料 (ERA-Interim 和 NOAA-CIRES 20CR) 和两套陆面模式离线产品 (Interim-Interim/Land 和 MERRA-Land)。下面作简要介绍。

2.1 观测资料

RHSTD (Russian Historical Soil Temperature Data) 为俄罗斯月平均和年平均土壤温度台站观测数据, 由科罗拉多大学和俄罗斯科学院 (RAS) 负责整理 ([http://data.eol.ucar.edu/codiac/dss/id=106.ARCSS078\[2015-11-13\]](http://data.eol.ucar.edu/codiac/dss/id=106.ARCSS078[2015-11-13]))。如图 1 所示, 土壤温度观测站点在东亚中高纬的 50°N~70°N 较为集中, 在 70°N 以北较少, 50°N 以南的蒙古和中国境内没有站点。土壤温度深度范围为 0.02~3.2 m, 共 13 层 (0.02、0.05、0.1、1.5、0.2、0.4、0.6、0.8、1.2、1.6、2.0、2.4 和 3.2 m)。时间跨度为 1882~1990 年, 但观测不连续, 很多台站的记录集中在 1930~1950 年。该套资料提供年平均和逐月平均两个版本。由于年平均数据缺测严重, 本文选用月平均资料。

2.2 再分析资料

ERA-Interim 是 ECMWF 利用 IFS (Integrated Forecast System) 研发的继 ERA-15 和 ERA-40 之后的第三代再分析资料 (Kallberg et al., 2004; Berrisford et al., 2011)。尽管 ERA-Interim 和 ERA-40 采用同一陆面模式 TESSEL (Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land) (van den Hurk et

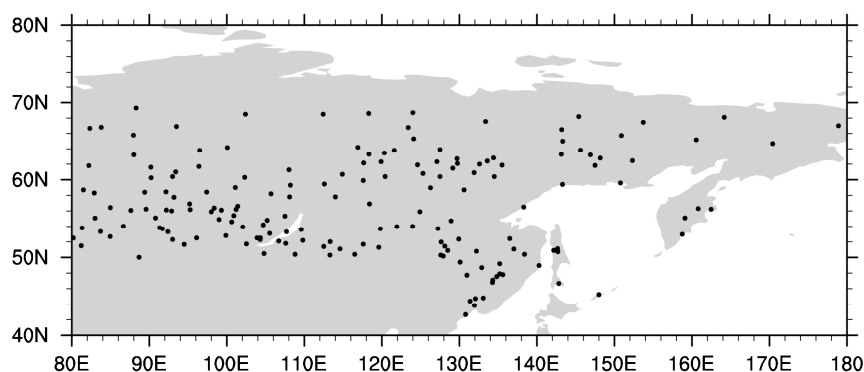


图1 东亚中高纬土壤温度观测站点分布

Fig. 1 Locations of soil temperature observation stations over middle and high latitudes of East Asia

al., 2000), 并将土壤按深度分为四层: 0~7 cm、7~28 cm、28~100 cm 和 100~289 cm, 但 ERA-Interim 所用 IFS 在 ERA-40 的基础上升级为 IFS CY31r2, 对应的资料同化方法由三维变分 (3D-Var) 变为四维变分 (4D-Var), 大气模式的水平分辨率也由 T159 (约 125 km) 提高到 T255 (约 80 km)。除个别情况外, 2002 年以前 ERA-Interim 同化的观测资料与 ERA-40 相同, 2002 年以后同化的观测资料与 ECMWF 业务预测系统相同 (Berrisford et al., 2009), 但都不含土壤温度 (Albergel et al., 2015)。资料的时段为 1979 年 1 月至今。

NOAA-CIRES 20CR 是美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 与科罗拉多大学的环境科学合作研究所 (Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, CIRES) 利用美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 全球预报系统 GFS 2008ex 生成的一套 20 世纪再分析资料, 简称 NOAA-CIRES (Compo et al., 2011)。该套资料最新版 V2c 时间范围为 1851~2011 年, 弥补了绝大多数再分析资料时间短的缺陷, 但水平分辨率较低为 T62 (约 200 km) (www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.20thC_ReanV2c.html[2015-11-13])。其中, 土壤在垂直方向上分为 4 层: 0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm 和 100~200 cm。值得注意的是, NOAA-CIRES 使用逐月海表温度和海冰浓度作为边界条件, 并同化了不常用的地表 (陆地和海洋) 气压, 同时采用集合卡曼滤波同化方法, 以提供资料不确定性的估计。检验结果显示, 该套资料能较好的重现地面逐日天气形势和温带对流层的环流 (Compo

et al., 2006)。

2.3 陆面模式离线运行产品

离线运行陆面模式可以有效地区分不同陆面参数化方案的好坏 (Polcher et al., 1998)。用再分析资料驱动陆面模式离线运行, 还能改进再分析资料中的陆面部分 (Reichle et al., 2011; Balsamo et al., 2015)。因此, 本文选取了两套此类数据——MERRA-Land (Reichle et al., 2011) 和 ERA-Interim/Land (Balsamo et al., 2012), 简称 ERA-Land。这两套数据生成方法相同, 即分别选用大气再分析资料 MERRA 和 ERA-Interim, 并根据 GPCP v2.1 降水 (Huffman et al., 2009) 订正其中的降水场, 分别驱动改进的陆面模式, 得到离线运行产品。

不同之处在于, ERA-Interim 不仅同化了大气, 还同化了 2 m 气温和相对湿度、以及积雪深度和范围等陆面变量, 但不含土壤温度和湿度 (Dee et al., 2011), 而 MERRA 是美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space, NASA) 用 GEOS-5.2.0 (Goddard Earth Observing System) 生成的第二代再分析资料, 只同化了观测的和遥感的大气状态 (Rienecker et al., 2011)。此外, MERRA-Land 的水平分辨率较高为 $2/3^\circ$ 经度 $\times 1/2^\circ$ 纬度, 所用陆面模式为 GEOS-5.7.2 Catchment (Koster et al., 2000; Reichle, 2012), 并将土壤温度分为 6 层 (0~10 cm、10~30 cm、30~70 cm、70~150 cm、1.5~3 m 和 3~13 m), 但土壤湿度分为 2 层, 即表层 (2 cm 厚) 和根区层 (0.75~1.0 m 厚) (Reichle, 2012)。ERA-Land 的水平分辨率较低为 T255 (约 80 km), 所用陆面模式 HTESSEL (Hydrology Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land) (Balsamo et al., 2015), 土壤垂直分层和 ERA-Interim 相同。

2.4 用法和说明

由表 1 可见，上述四套土壤温度产品均没有同化观测土壤温度。为了方便比较，四套土壤温度产品均取 1980~2010 年逐月数据（ERA-Land 根据逐日四次资料算得），并将其统一插值到 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 网格和 4 个新的土壤层：0~10 cm、10~30 cm、30~100 cm 和 100~200 cm，分别记为 L1、L2、L3 和 L4。其中，水平方向采用双线性插值；在垂直方向上，地温随深度变化缓慢，近似线性，所以采用线性插值并与厚度加权结合。RHSTD 取与四套土壤温度资料共同的时段 1980~1990 年，垂直方向处理同上。在下文的分析中，若无特殊说明，土壤温度气候态取各套资料所用年份的平均，标准差均取 1980~1990 年的平均偏差。所选区域为东亚中高纬，即（40°N~80°N，80°E~180°）。

由于文中所用 RHSTD 仅 11 年，且在某些年份、月份和土壤层缺测较多，为保证年平均和季节平均的代表性，本文选取满足如下条件的站点：各月地温缺测不超过四年，并且相邻三年不缺测。年平均、春季和夏季土壤温度可用站点分别如图 2a、b 和 c 所示。不难发现，无论年平均还是春季或夏季，观测地温 RHSTD 在 10~30 cm 层缺测均最少。在 0~10 cm 层，年平均和春季土壤温度全缺测，没有可用站点，而在夏季则有较多可用站点。因此，在下文的分析中将重点讨论 10~30 cm 土壤温度，同时考虑夏季不同层次土壤温度的差异。为了消除单站代表性差的影响，本文根据观测站点的分布和各站数据情况，在东亚中高纬选定了六个区域，分别记为 A~F，如图 2 方框所示。下文区域平均，观测取区域内站点平均，再分析取纬度余弦加权的面积平均。

3 土壤温度单站垂直特征

首先，我们利用观测资料 RHSTD，从中选取了 16 个逐月数据缺测均较少的站点，并据此分析了东亚中高纬地区土壤温度的单站垂直特征。图 3 显示，16 个代表站分布相对均匀。其中，星号、圆

圈、空心三角和实心三角站点分别代表东亚中高纬的东南角、95°E 以西、贝加尔湖地区和 60°N 以北。因此，所选站点能大致反映该地区土壤温度的基本特征及其经向和纬向差异。

图 4 为东亚中高纬 16 个代表站 11 年平均的各月土壤温度垂直廓线。由图可见，各站点土壤温度垂直廓线基本一致。土壤温度在 0~2 m 土层波动较大，随季节在 0℃ 上下摆动；在 2 m 以下土层则稳定少变，并且随着纬度的增加，在 60°N 以北地区（3 号和 166 号站）出现永久冻结现象。在季节演变上，冬季土壤温度随深度增加而缓慢升高，夏季随深度增加而迅速降低，春秋两季地温过渡现象明显。春季中下旬（4~5 月）上层土壤迅速增温（10℃ 左右），并经历了由冻到融的急剧变化，垂直廓线也由“冬季型”变为“夏季型”。秋季中上旬（9~10 月）则相反，上层土壤开始降温，垂直廓线由“夏季型”向“冬季型”转变，并在 60°N 以北地区（蓝线）开始出现冻结。春（秋）季上层土壤最先开始融（冻）的现象，也反映了上下层土壤温度变化的超前滞后关系。同时，东亚中高纬土壤温度也存在明显的经、纬向差异，尤其是夏、秋、冬三季。在贝加尔湖地区（绿线），各层土壤温度明显比东南地区（黑线）和 95°E 以西地区（红线）低，即为 50°N~60°N 的冷中心；而在 60°N 以北（蓝线），土壤温度较南侧低，冻土（低于 0° 的土层）持续时间也比南侧长。此外，东亚中高纬各月土壤温度随深度的变化“近似线性”或“分段线性”，所以本文在作地温垂直插值时，将线性插值和厚度加权结合是合理的。

那么前述四套土壤温度产品是否也具有观测所示的特征呢？为了回答这个问题，我们在图 3 所示四个区域各选一个有代表性的站点（编号为 3、48、68 和 152），将四套土壤温度产品用双线性方法插值到对应的观测站点。其垂直廓线与观测资料 RHSTD 的对比结果如图 5 所示。不难发现，四套土壤温度产品较好地重现了东亚中高纬地区地温

表 1 五套土壤温度资料的主要差异
Table 1 Main differences among the five sets of soil temperature data

	五套土壤温度资料				
	RHSTD	ERA-Interim	ERA-Land	MERRA-Land	NOAA-CIRES
生成/同化方案	台站观测	4D-Var	陆面 offline	陆面 offline	集合卡曼滤波
同化数据/边界条件	台站观测	海陆气观测（不含地温）	ERA-Interim（降水订正）	MERRA（降水订正）	地表气压；SST；海冰浓度
陆面模块	台站观测	TESSEL	HTESSEL	GEOS-5.7.2 Catchment	NCEP GFS 2008ex 自带
土壤分层	13 层	4 层	4 层	6 层/2 层	4 层

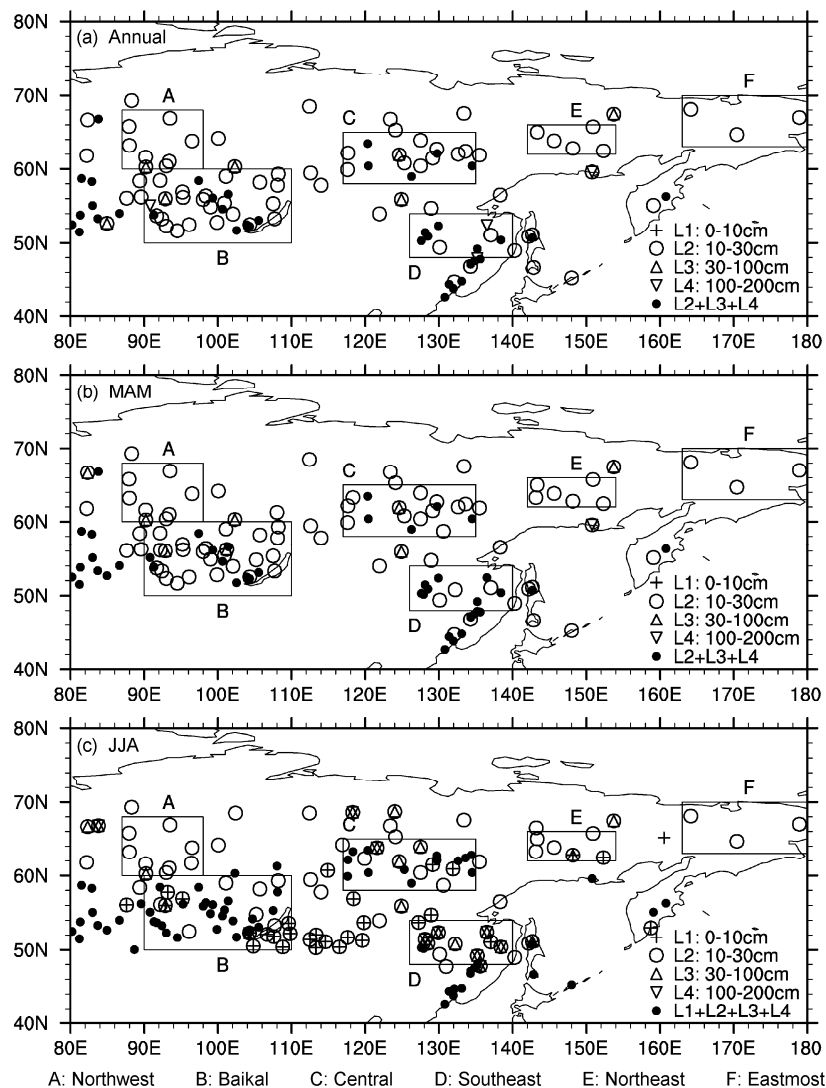


图2 (a) 年平均、(b) 春季和 (c) 夏季土壤温度可用站点分布, 站点标记 (黑点) 表示土壤温度在该点的相应 (多个) 土壤层不缺测。六个子区域记为 A-F (方框), 四个土壤层用 L1、L2、L3 和 L4 表示

Fig. 2 Available stations for computation of (a) annual mean, (b) spring, and (c) summer soil temperatures. The station markers (black dots) mean the soil temperature available at certain (multiple) layer(s) of the corresponding station. The six sub-domains (boxes) are denoted by A to F. The four soil layers are indicated by L1, L2, L3 and L4

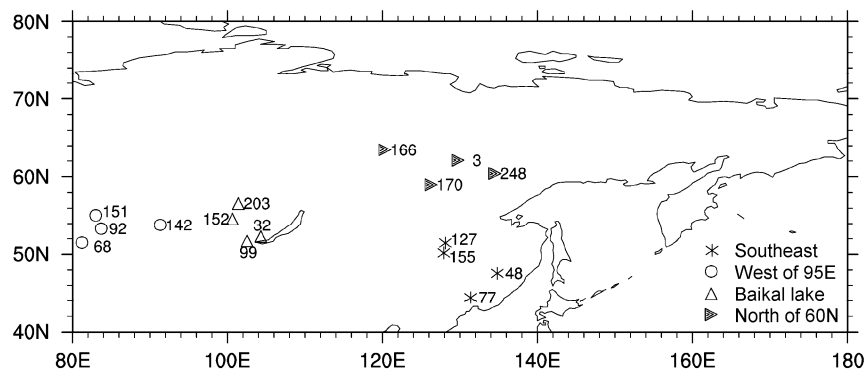


图3 用于分析土壤温度单站垂直特征的16个代表站

Fig. 3 Sixteen representative stations chosen for analysis of vertical characteristics of soil temperature

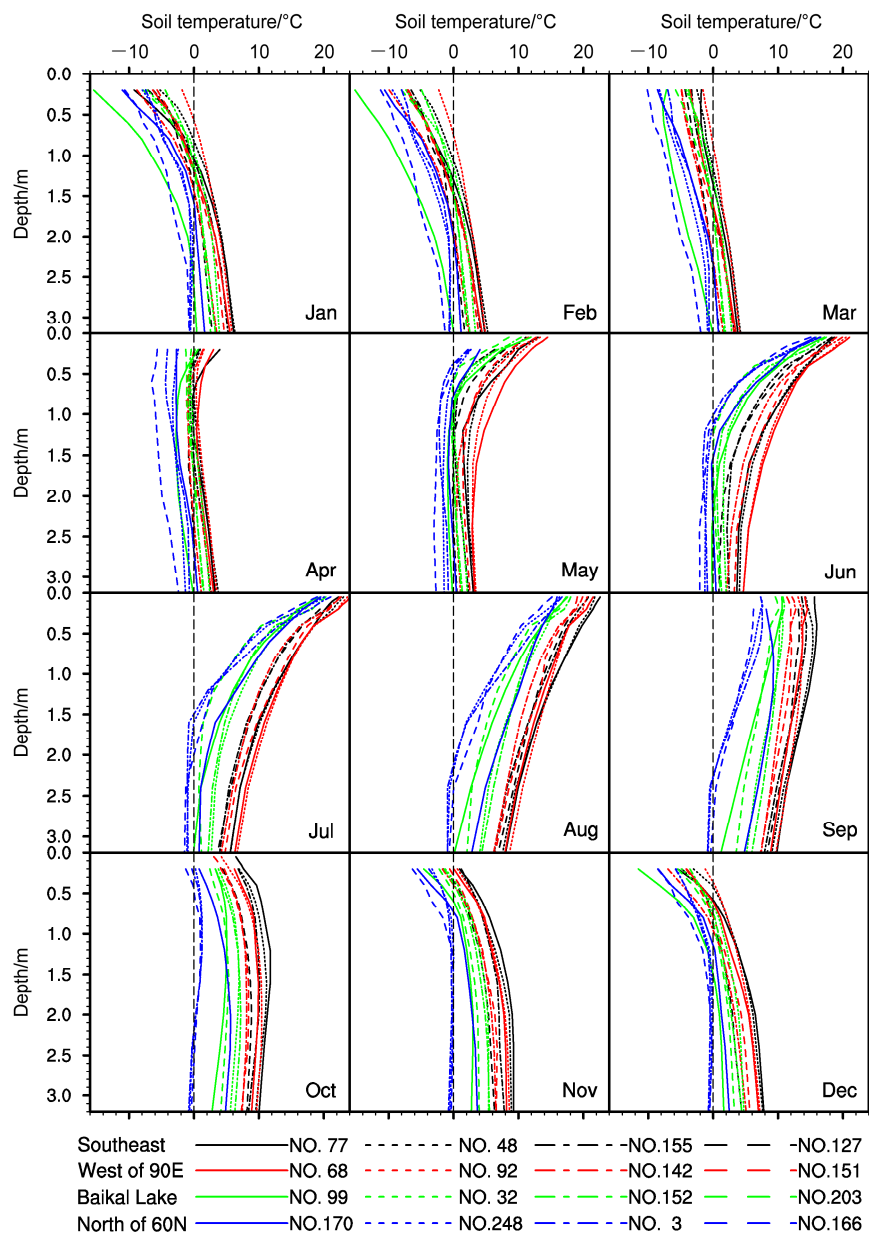


图4 东亚中高纬16个代表站1980~1990年平均的1~12月土壤温度垂直廓线(单位: °C)。代表站分布如图3

Fig. 4 Vertical profiles of soil temperature at sixteen representative stations from January to December averaged over the period from 1980 to 1990 (units: °C). Locations of these stations are shown in Fig.3

的基本特征, 包括地温的垂直廓线及其季节演变特征, 以及地温的经、纬向差异。不过, 各套地温产品的数值与观测的差异也很明显, 尤其是 60°N 以北 (蓝线), 四套地温产品均低估了该地区的土壤温度。因此, 四套地温产品较好地反映了东亚中高纬地温的基本特征, 但数值上有差异。

4 土壤温度气候态的空间分布特征

图6给出了东亚中高纬地区五套资料年平均土

壤温度的气候态。由图可见, 四套土壤温度产品在 0~10 cm、10~30 cm 和 30~100 cm 的空间分布十分相似, 各层差异较小, 而年平均土壤温度 RHSTD 在 0~10 cm 层没有可用观测站(图 2a), 30~100 cm 层可用站点又较少, 可用站点较多的 10~30 cm 地温应具有更好的代表性, 所以下面取该层进行分析。在空间分布形态上, 与观测 (圆点) 一样, ERA-Interim (图 6a2)、ERA-Land (图 6b2)、MERRA-Land (图 6c2) 和 NOAA-CIRES (图 6d2)

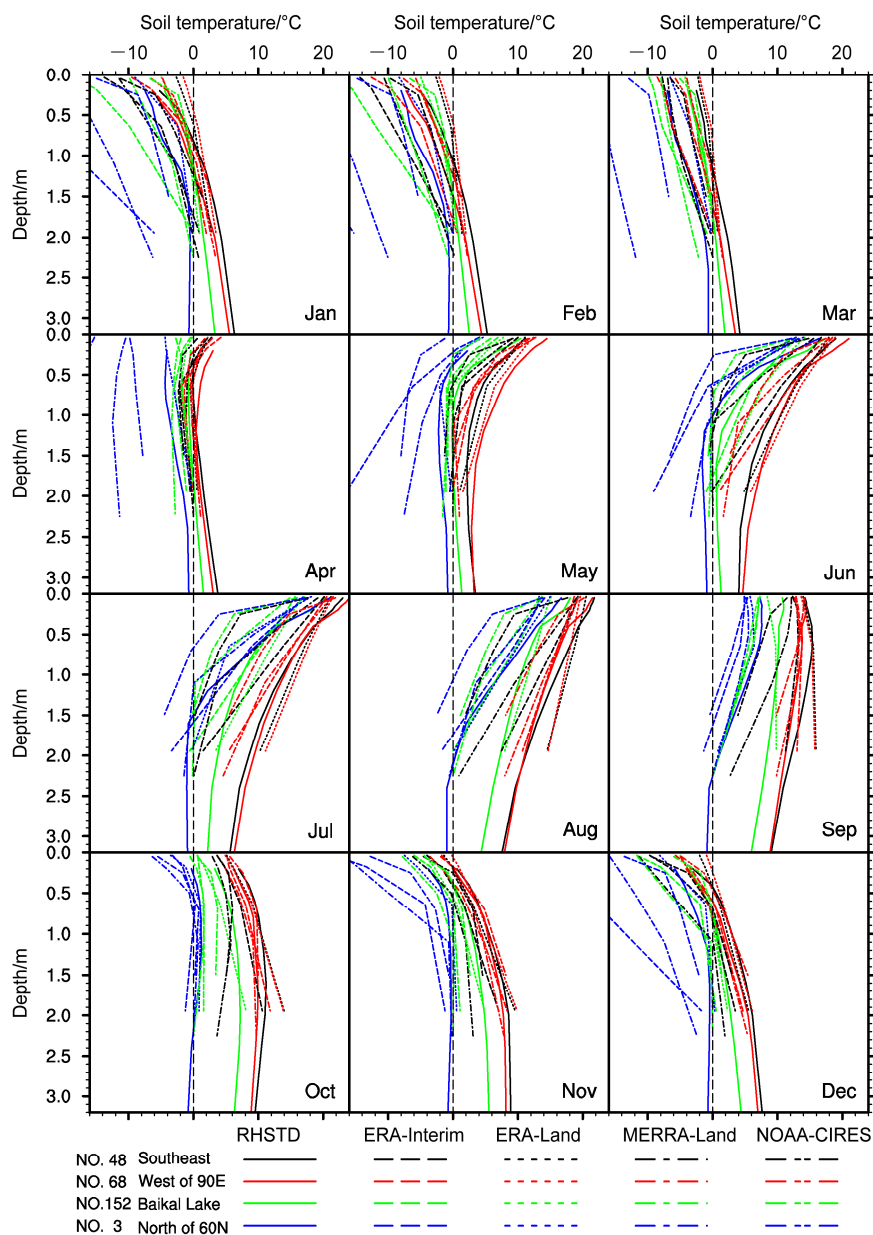


图5 同图4, 但为 RHSTD 4 个代表站及四套地温产品水平插值到对应站点的结果

Fig. 5 Same as Fig.4, but for observations of RHSTD at four representative stations and values of the four soil temperature reanalysis products horizontally interpolated to corresponding stations

地温都呈现“南暖北冷”特征,并在北部沿海 $130^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 范围内有一个冷中心。尽管欧亚大陆北部陆地覆盖类型复杂,遍布森林、灌木、草地、湿地和苔原等 (Groisman et al., 2007),但其地表净辐射应是决定地温分布的主要因素。从年平均的地表净辐射气候态看,其呈现由赤道向极区递减的分布 (Hatziastassiou and Vardavas, 1999; Hatziastassiou et al., 2004)。因此,地温“南暖北冷”的空间分布更多地是辐射作用的结果,而复杂

的土壤热力性质至多对其起到一些调制作用。这四套地温产品年平均气候态与观测值具有显著的空间相关性,相关系数分别为 0.91、0.91、0.93 和 0.85,均达到 0.01 显著性水平 (表略)。但是,在贝加尔湖东北部和西南部,ERA-Interim、ERA-Land 和 MERRA-Land 土壤温度也有明显的低值次中心,NOAA-CIRES 由于空间分辨率较低和同化方案等原因没有呈现这一特征,而该处 RHSTD 恰好缺测。

另一方面,尽管四套地温产品在各土壤层的空

间相关系数都很高, 均在 0.91 以上且达到 0.01 显著性水平 (表略), 但 65°N 以北和贝加尔湖地区差异明显。由图 6 可见, 在上述地区, ERA-Interim (图 6a2) 和 MERRA-Land (图 6c2) 明显低于 ERA-Land (图 6b2) 和 NOAA-CIRES (图 6d2), 对应的东亚中高纬土壤温度的经向梯度也更大。东亚中高纬 A-F 区 (图 2) 区域平均 10~30 cm 年平均土壤温度气候态进一步 (表 2) 表明, ERA-Land 土壤温度与观测最为接近, 而 ERA-Interim 与 MERRA-Land 与观测差异最大。因此, ERA-Land 年平均土壤温度较好地反映了东亚中高纬地温的空间分布特征, 不过高估了北部沿海 130°E~150°E 范围内的地温 (图 6b2)。

春季各套土壤温度资料的空间分布 (图 7) 与年平均相似, 0~10 cm、10~30 cm 和 30~100 cm 地温的空间分布也基本相同, 但随深度增加土壤温度有所降低, 尤其是 30~100 cm 层 60°N 以南地区。同样地, 在 65°N 以北和贝加尔湖地区四套土壤温度产品存在较大差异, 但在北部沿海 130°E~150°E 范围内, 春季 ERA-Land 和 NOAA-CIRES 与观测的差异比年平均小得多。比较四套土壤温度产品与观测地温的空间分布 (图 7) 以及各子区域平均的 10~30 cm 春季土壤温度气候态 (表 2), 可以发现: 春季 ERA-Land 土壤温度与观测最为接近。

表 2 1980~1990 年各区域平均 10~30 cm 层土壤温度的气候态和标准差 (°C)。R1、R2、R3 和 R4 分别代表 ERA-Interim、ERA-Land、MERRA-Land 和 NOAA-CIRES, OBS 代表 RHSTD。A-F 为 6 个子区域, 分布如图 2

Table 2 Climatologies and standard deviations of domain-averaged soil temperature at 10–30 cm depth during the period of 1980–1990. R1, R2, R3, R4, and OBS represent data ERA-Interim, ERA-Land, MERRA-Land, NOAA-CIRES, and RHSTD, respectively. A to F represent the six sub-domains shown in Fig.2

		土壤温度气候态 (原值-OBS) /°C						土壤温度标准差 (原值) /°C					
		A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
年平均	R1	-6.8	-4.3	-6.7	-4.1	-6.1	-5.8	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.4
	R2	-1.5	-0.9	1.1	0.1	2.1	0.9	<u>0.2</u>	0.3	0.5	0.5	0.7	<u>0.3</u>
	R3	-4.4	-4.5	-4	-4.4	-4.4	-3.7	0.7	0.7	1	0.8	0.7	0.9
	R4	-4	-2.6	-3	-2.7	1	0	0.3	0.5	0.8	0.4	0.8	0.8
	OBS	0	0	0	0	0	0	0.5	0.4	0.7	0.5	0.6	0.9
春季	R1	-7.8	-3.8	-8.8	-3.1	-10.7	-10.6	1.5	1.2	1.4	1.1	1.3	1.3
	R2	-2.2	-1.3	0.7	-0.1	1.3	1.5	<u>0.3</u>	0.8	<u>0.8</u>	0.7	1.1	<u>0.5</u>
	R3	-4.9	-4.1	-5.1	-3.3	-6.4	-4	1.4	1.2	1.4	0.9	1.4	1.3
	R4	-3.2	-2.1	-3.9	-1.9	0.3	1.6	0.6	<u>0.5</u>	1.2	0.7	1.4	1.2
	OBS	0	0	0	0	0	0	0.7	0.9	1.1	0.7	1	1.1
夏季	R1	-2.2	-4.3	-2.8	-2.8	-1.9	-2.6	0.9	0.6	0.7	0.9	0.7	0.6
	R2	-1.6	-3	-1.7	-1.3	-0.8	-2.2	1.1	0.7	0.8	1	0.9	0.6
	R3	-3.7	-5.6	-3.3	-4.3	-2.5	-3.3	0.9	0.7	0.8	0.8	0.8	0.6
	R4	-8	-8	-8.4	-7.8	-4.6	-4.9	1.1	0.9	0.8	0.7	0.7	1.1
	OBS	0	0	0	0	0	0	0.8	0.6	0.6	0.7	0.9	0.6

注: 气候态加粗数值代表与观测差异最小。标准差加粗 (下划线) 数值代表比观测高 (低) 0.3°C 以上。

夏季各套土壤温度资料的空间分布 (图 8) 与春季相似, 也都表现为 “南暖北冷”。在夏季, 即使中高纬度日照时间长, 但地表的净辐射依然是 “南高北低” [见 Hatzianastassiou et al. (2004) 图 6], 相应地, 地温也呈现 “南高北低” 的分布结果。所不同的是, 夏季土壤温度随深度的增加而降低表现更为明显, 各层地温的差异增大。在 65°N 以北地区四套土壤温度产品之间的差异比春季更小, 北部沿海 130°E~150°E 范围内的低值中心消失, 经向温度梯度的差异也减小。此外, 夏季四套土壤温度产品在 0~10 cm 层差异最小, 10~30 cm 层次之, 30~100 cm 层差异最大。进一步分析显示, ERA-Land (NOAA-CIRES) 第 1~3 层地温与观测资料的空间相关性均最好 (差), 分别为 0.80、0.85 和 0.85 (0.67、0.76 和 0.77), 但都达到了 0.01 显著性水平 (表略)。各子区域平均的夏季 10~30 cm 土壤温度气候态 (表 2) 也说明, ERA-Land 土壤温度与观测最为接近, NOAA-CIRES 与观测差异最大。综上所述, 在东亚中高纬地区, ERA-Land 土壤温度能较好地反映该地区年平均、春季和夏季土壤温度的空间分布。

5 土壤温度的季节循环

有研究指出, 欧亚大陆北部积雪与我国夏季气

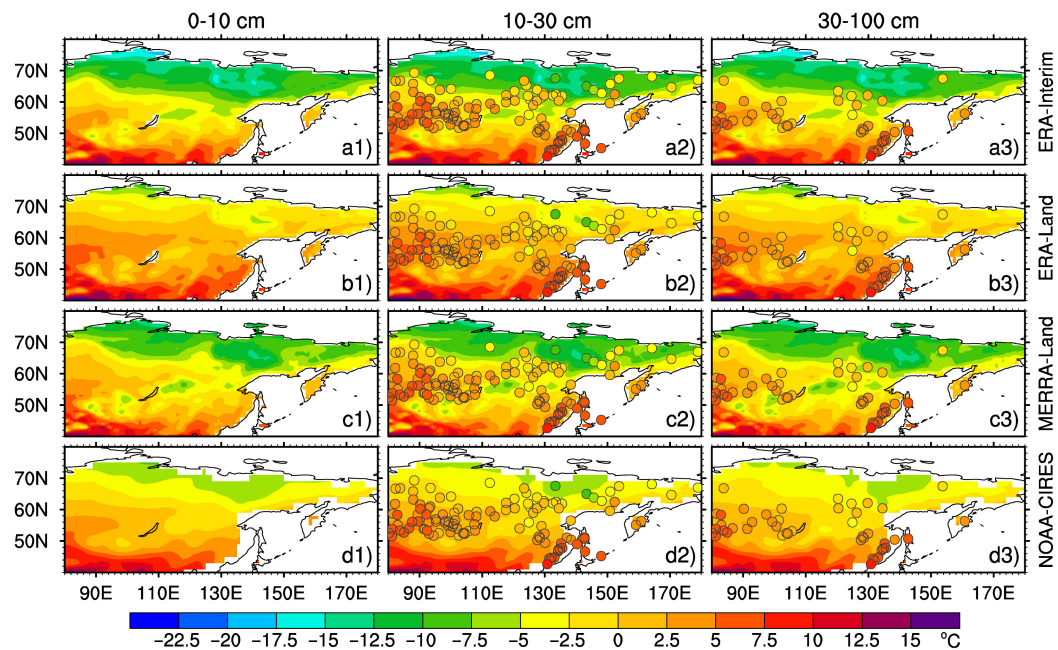


图6 东亚中高纬 0~10 cm、10~30 cm、30~100 cm 年平均土壤温度气候态的空间分布 (单位: °C): (a1, a2, a3) ERA-Interim; (b1, b2, b3) ERA-Land; (c1, c2, c3) MERRA-Land; (d1, d2, d3) NOAA-CIRES. 带圈圆点为 RHSTD

Fig. 6 Spatial patterns of climatologies of 0-10cm, 10-30cm, and 30-100cm annual mean soil temperatures over middle and high latitudes of East Asia (°C): (a1, a2, a3) ERA-Interim; (b1, b2, b3) ERA-Land; (c1, c2, c3) MERRA-Land; (d1, d2, d3) NOAA-CIRES. Dots with circle indicate observations from RHSTD

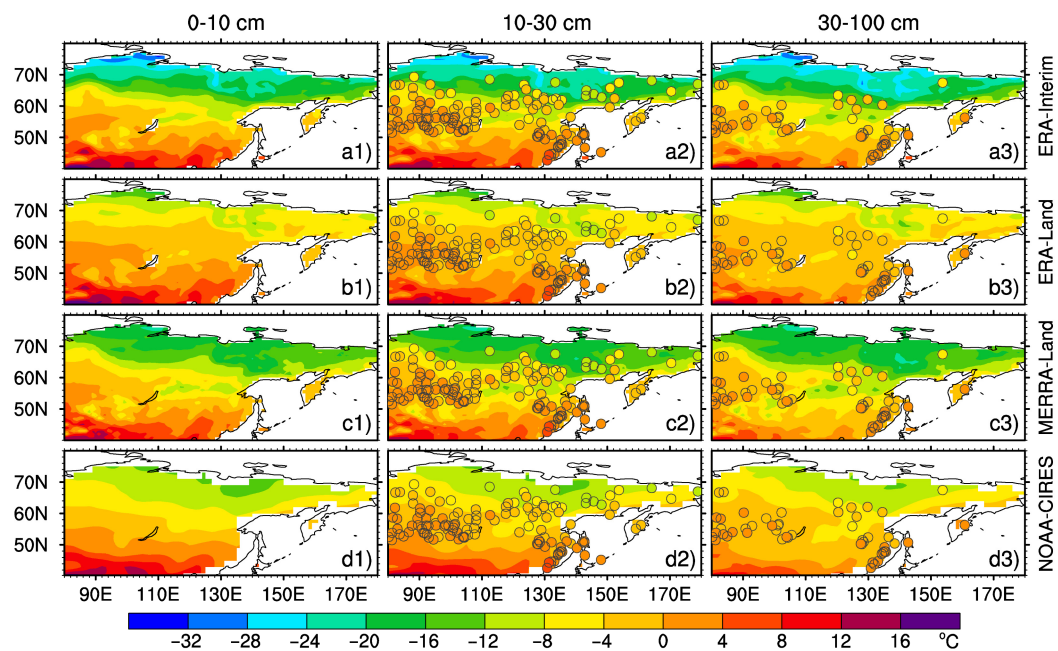


图7 同图6, 但为春季

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for the spring

候异常有关, 并且该地区春夏季陆面演变异常可能是两者“隔季相关”的重要桥梁(穆松宁和周广庆, 2012)。本节分析土壤温度的季节演变特征。

在东亚中高纬六个子区域 A-F (图 2), 五套资

料 10~30 cm 土壤温度的季节循环如图 9 所示。由图可见, 四套地温产品在各区与观测 (RHSTD) 均有较一致的季节演变特征, 表现为夏季地温最高、冬季地温最低, 且秋季与观测最为接近, 但各产品

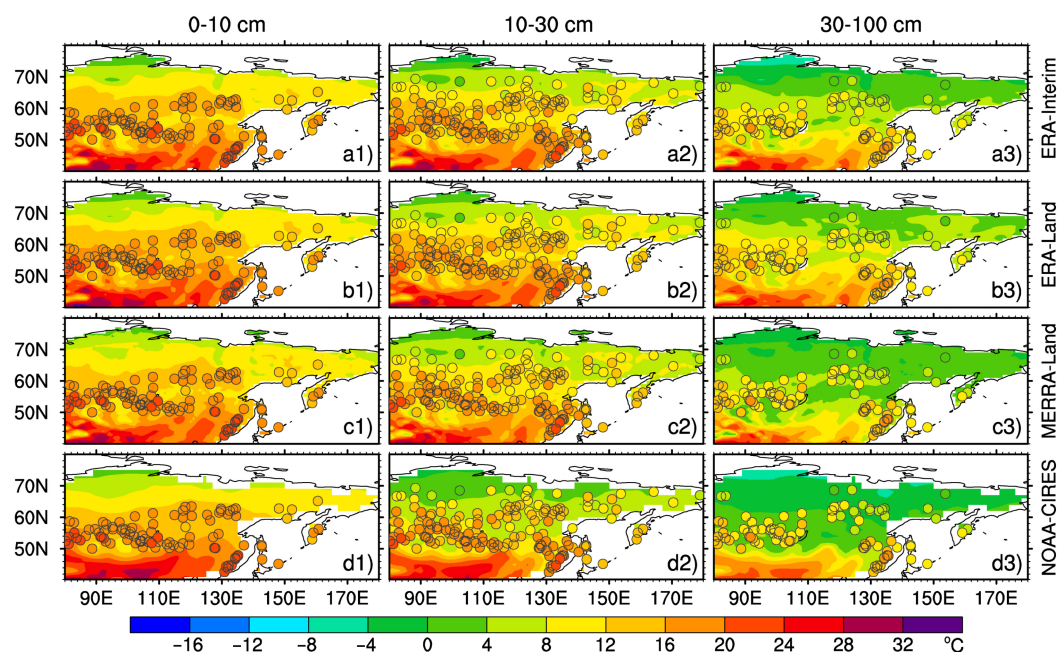


图 8 同图 6, 但为夏季

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for the summer

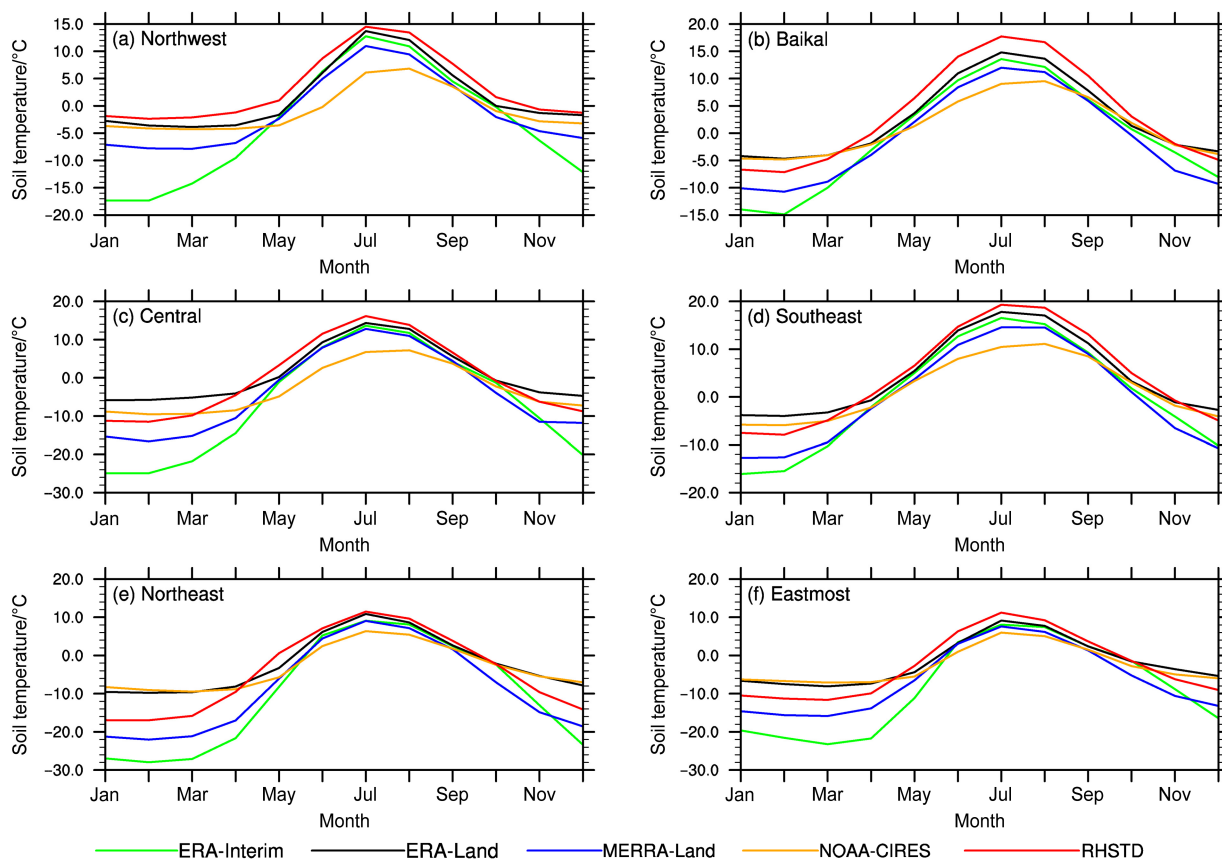


图 9 东亚中高纬 A-F 区区域平均 10~30 cm 土壤温度的季节循环 (1980~1990 年平均) (单位: °C)。(a-f) 依次对应图 2 中 A-F 区

Fig. 9 Seasonal cycles (1980~1990 average) of domain-averaged 10~30 cm soil temperature over sub-domains A to F in middle and high latitudes of East Asia (units: °C). (a) to (f) correspond to sub-domains A to F shown in Fig. 2

与观测的差异不同。ERA-Interim 和 MERRA-Land 在各区被一致低估,但夏半年与观测差异小,ERA-Interim 在冬季被严重低估,MERRA-Land 在冬季也被低估,但不严重。NOAA-CIRES 地温冬半年与观测较为吻合,但夏半年明显低于观测,季节循环的“振幅”因而偏小。ERA-Land 地温的季节演变与观测很相近,12 个月地温与观测的平均绝对误差在 A-F 六个区最小,分别为 1.5、2.1、2.7、1.8、3.4

和 2.5°C (表略),因此最能反映观测地温的季节循环。

值得注意的是,四套资料在东亚中高纬的各个子区域(图 9)、各土壤层(图 10)与观测差异最大的时段皆为冷季,即当年 11 月至次年 5 月,而其余月份与观测都很接近。因此,四套资料在冷季的大偏差,很可能源自陆面模式,特别是其对季节性雪盖和土壤冻融等模拟的偏差,而非同化方案、

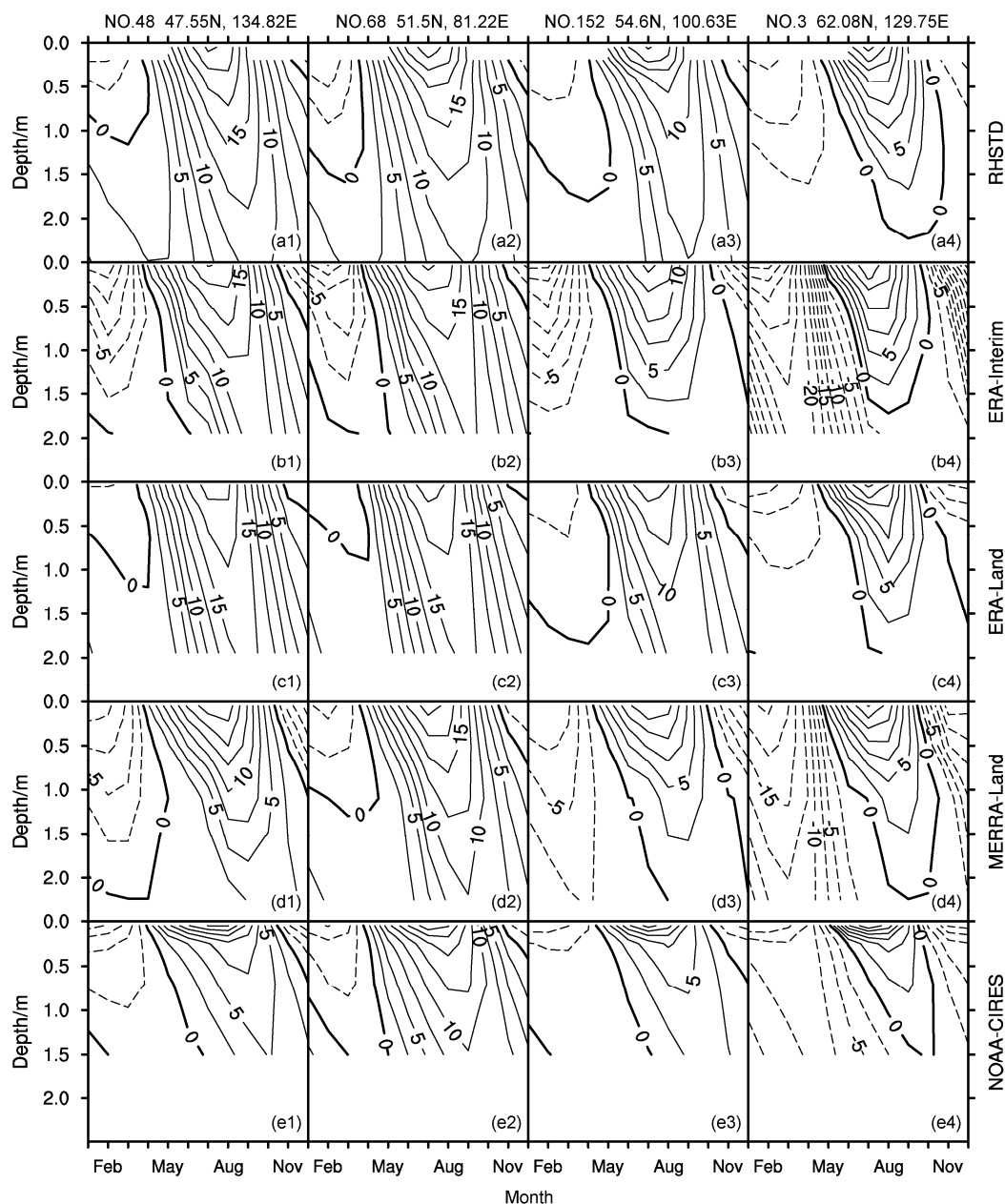


图 10 东亚中高纬 4 个代表站处 1980~1990 年平均的土壤温度时间—深度剖面 (单位: °C): (a1, a2, a3, a4) RHSTD (观测); (b1, b2, b3, b4) ERA-Interim; (c1, c2, c3, c4) ERA-Land; (d1, d2, d3, d4) MERRA-Land; (e1, e2, e3, e4) NOAA-CIRES。代表站分布如图 3

Fig. 10 Time-depth cross sections of 1980-1990 mean soil temperature at the four representative stations over middle and high latitudes of East Asia (units: °C): (a1, a2, a3, a4) RHSTD (observed); (b1, b2, b3, b4) ERA-Interim; (c1, c2, c3, c4) ERA-Land; (d1, d2, d3, d4) MERRA-Land; (e1, e2, e3, e4) NOAA-CIRES. Locations of these stations are shown in Fig. 3

同化数据和边界条件的差异(表 1)。Zhang (2005) 指出, 积雪具有高反照率、高放射率、高吸收率、高相变潜热和低热传导性, 不同的雪盖开始时间、持续时间、雪盖厚度和融雪过程, 可以影响积雪对地面起增温作用还是冷却作用。Dutra et al. (2010) 则指出, 欧洲中心 HTESSEL 陆面模式模拟的林区(开阔地)积雪最终消退时间偏早(晚), 土壤温度整体偏低, 雪盖面积偏少, 改进积雪参数化方案后这些系统性偏差明显减小。

图 10 为东亚中高纬 4 个代表站多年平均的土壤温度时间—深度剖面。图中 48、68、152 和 170 号站分布如图 3, 分别代表东亚中高纬东南角、95°E 以西、贝加尔湖地区和 60°N 以北。若低于 0°C 的土层视为冻土, 则在东亚中高纬东南侧(图 10a1), 冻土深度较浅(不足 110 cm), 仅冬季存在; 95°E 以西(图 10a2)冻土稍深(约 150 cm); 贝加尔湖地区(图 10a3)冻土更深, 持续时间也稍长; 在 60°N 以北地区(图 10a4), 除 5~10 月上层土壤外, 其余全为冻土, 各层、各月地温也比南侧低, 与这个地区寒冷的气候是一致的。四套再分析产品都较好地抓住了上述特征, 但 ERA-Land 地温产品(图 10b1~b4)在冻土深度和持续时间上与观测(图 10a1~a4)最为接近, 各深度、各月地温与观测差异也较小, 但其余三套地温产品的季节演变与观测的差异较大, 主要表现为季节变化的幅度较观测更强烈(ERA-Interim 和 MERRA-Land)或更平稳(NOAA-CIRES)。综上所述, ERA-Land 地温最能反映了东亚中高纬土壤的冻融过程和土壤温度的季节演变。

6 土壤温度的年际变率(标准差)

为了进一步评估四套土壤温度产品的年际变化, 本文分析了四套土壤温度产品的年际变率(标准差)及其与观测的差异, 并重点关注春季和夏

季。东亚中高纬地区五套资料年平均土壤温度的标准差如图 11 所示, 各套资料在 0~10 cm、10~30 cm 和 30~100 cm 层的空间分布基本相同, 各层差异较小。为了不失代表性, 这里仍取观测站点较多的 10~30 cm 层进行分析。在空间分布形态上, 观测土壤温度(图 11a2 圆点)的变率表现为: 东亚中高纬西北部较低, 贝加尔湖以西中等, 东亚中高纬东北部(55°N 以北 125°E 以东)较大。除 ERA-Interim(图 11a2)外, ERA-Land(图 11b2)、MERRA-Land(图 11c2)和 NOAA-CIRES(图 11d2)都能大致抓住这一特征, 并且与观测显著相关。空间相关系数分别为 0.34、0.60 和 0.47, 均达到了 0.01 的显著性水平(表 3)。值得注意的是, MERRA-Land 第 2~4 层地温变率与观测的空间相关性均最好(表 3), 但高估了东亚中高纬绝大多数地区的地温变率(表 2)。此外, 在 RHSTD 缺测较多的 65°N 以北地区, 四套地温产品之间的差异较大。

与年平均类似, 春季上、下层地温标准差具有较好的空间相似性, 但春季各层地温的年际变率更大(图 12)。就 10~30 cm 而言, 在空间分布上, 春季观测地温的年际变率有一定的“北高南低”特征: 西伯利亚中东部(60°N 以北 120°E~155°E)最高(约 1.5°C), 贝加尔湖及其以西地区居中(1.0~1.5°C), 而东亚中高纬东南部较低(约 1.0°C)。四套地温产品变率的空间分布与观测有一定的相似性, 空间相关系数都在 0.29 以上且达到 0.01 显著性水平, 其中 NOAA-CIRES 最高为 0.38(表 3)。在量值上, ERA-Interim 和 MERRA-Land 高估了大部分地区的变率, ERA-Land 则低估了大部分地区的变率(表 2)。尽管 NOAA-CIRES 也存在高估或低估变率的区域(表 2), 但它与观测在第 2~4 土壤层均显著相关(表 3), 因而与观测的整体差异最小。

表 3 观测地温(RHSTD)标准差与四套地温产品标准差的空间相关系数。L1~L4 为四个土壤层, 分层如图 2

Table 3 Spatial correlation coefficients between the standard deviation of observed soil temperature and those of the four soil temperature re-analysis products. L1 to L4 indicate the four soil layers shown in Fig.2

	年平均空间相关系数				春季空间相关系数				夏季空间相关系数			
	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
ERA-Interim	—	0.16	0.01	0.35	—	0.29	0.25	0.27	0.48	0.43	0.15	0.11
ERA-Land	—	0.34	<u>0.40</u>	<u>0.39</u>	—	0.34	0.28	<u>0.35</u>	0.50	0.41	0.03	0.39
MERRA-Land	—	0.60	0.54	<u>0.40</u>	—	0.32	0.00	-0.11	0.33	0.40	0.04	-0.02
NOAA-CIRES	—	0.47	<u>0.48</u>	0.37	—	0.38	0.47	<u>0.32</u>	0.11	0.16	-0.01	-0.05

注: 各季节、各土壤层自由度不同。加粗(下划线)数值达到 0.01 (0.05) 显著性水平。

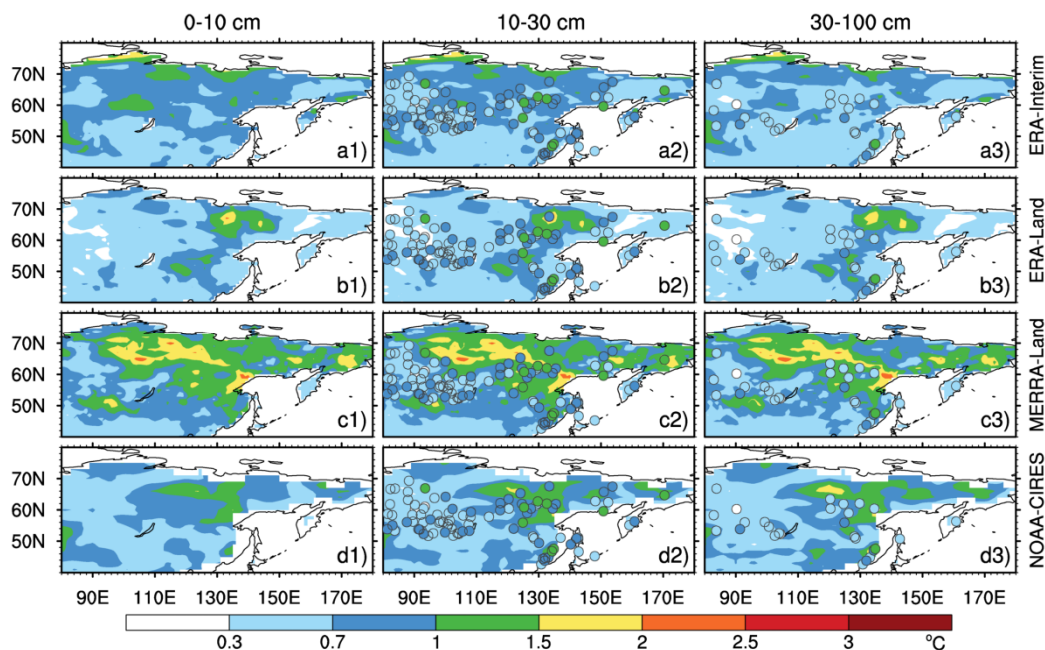


图 11 东亚中高纬 1980~1990 年 0~10 cm、10~30 cm、30~100 cm 年平均土壤温度标准差的空间分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$): (a1, a2, a3) ERA-Interim; (b1, b2, b3) ERA-Land; (c1, c2, c3) MERRA-Land; (d1, d2, d3) NOAA-CIRES. 带圈圆点为 RHSTD (观测)

Fig. 11 Spatial patterns of standard deviations of 0~10 cm, 10~30 cm, and 30~100 cm annual mean soil temperature from 1980 to 1990 over middle and high latitudes of East Asia (units: $^{\circ}\text{C}$): (a1, a2, a3) ERA-Interim; (b1, b2, b3) ERA-Land; (c1, c2, c3) MERRA-Land; (d1, d2, d3) NOAA-CIRES. Dots with circle are for RHSTD

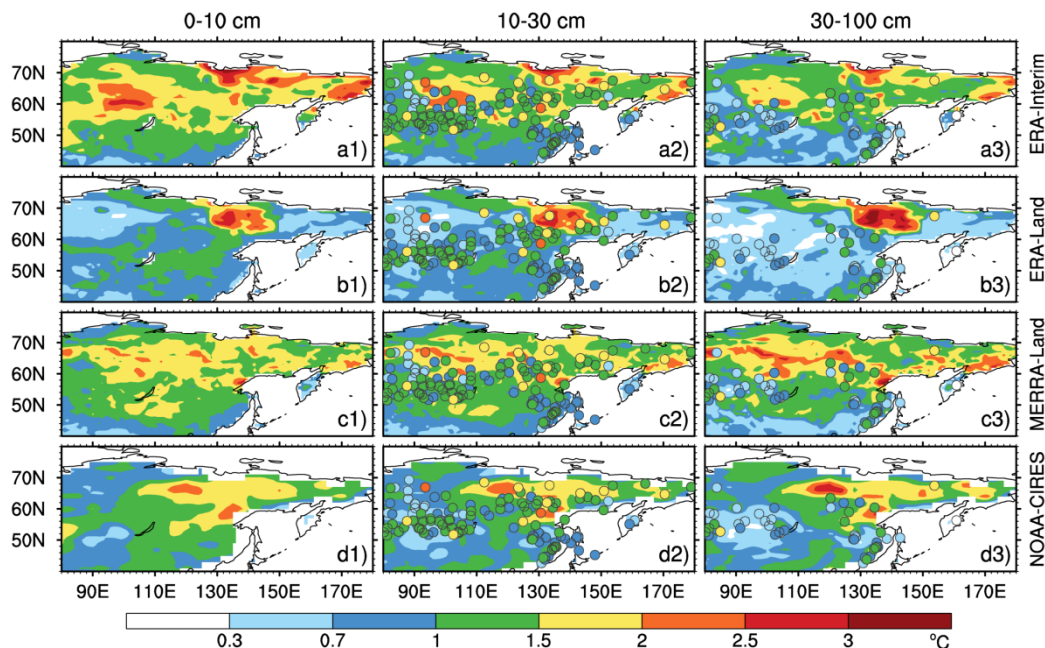


图 12 同图 11, 但为春季

Fig. 12 Same as Fig. 11, but for the spring

如图 13 所示, 夏季四套土壤温度产品年际变率的空间分布都表现为“北高南低”, 并且变率随深度的增加而递减, 尤其是在贝加尔湖以北地区, 因而各套地温上、下层变率的分布较为相似。就

10~30 cm 而言, ERA-Interim (图 13a2)、ERA-Land (图 13b2) 和 MERRA-Land (图 13c2) 地温变率大值区位于北部沿海 $90^{\circ}\text{E} \sim 130^{\circ}\text{E}$ 范围内, 并呈“倒三角”状, 三套地温产品间量值差异也很小。此外,

这三套地温产品与观测值在空间上显著相关, 相关系数分别为 0.43、0.41 和 0.40 (表 3), 各子区域平均地温的变率与观测的差异都不超过 0.3°C (表 2)。0~10 cm 也有类似特征, 只是在东亚中高纬东北角和东南侧与 10~30 cm 存在一定差异。在 30~100 cm 土壤层, ERA-Interim (图 13a3)、ERA-Land (图 13b3) 和 MERRA-Land (图 13c3) 地温变率的大值区缺少观测值, 因而难以说明这三套资料在该层的适用性。而 NOAA-CIRES 各层地温的变率与观测、其他三套地温产品都有明显的差异, 所以用来描述这一地区夏季地温的变率效果会较差。

综上所述, 在不同季节和土壤层, 四套地温产品变率的空间分布与观测的差异不同。就年平均而言, MERRA-Land 空间分布形态与观测最为接近, 但高估了绝大多数地区地温的变率。春季, NOAA-CIRES 也存在高估或低估变率的区域, 但它与观测在各土壤层均显著相关, 因而与观测的整体差异最小。夏季, ERA-Interim、ERA-Land 和 MERRA-Land 均能较好地反映 0~10 cm 和 10~30 cm 层观测地温变率的空间分布, 而 30~100 cm 根据稀少的站点难以判断各套资料的好坏。

7 土壤温度的年际变化

为了进一步评估四套土壤温度产品的年际变化, 我们分析了春季和夏季 A-F 六个区平均 10~30 cm 土壤温度的年际变化趋势。图 14 即为春季地温的年际变化。就 1980~1990 年而言, 在贝加尔湖地区 (图 14b; B 区)、西伯利亚中部 (图 14c; C 区) 和东亚中高纬东南部 (图 14d; D 区), 四套土壤温度产品的年际变化曲线与观测较为一致, 但在 C 区 1984 年以前, ERA-Interim、MERRA-Land 和 NOAA-CIRES 与观测有较大差异, 仅 ERA-Land 与观测基本吻合。表 4 也显示, ERA-Land 在 B、C 和 D 区地温距平与观测相关性最高, 分别为 0.98、

0.94 和 0.93, 均达到 0.01 显著性水平。就 1980~2010 年而言, 在 B、C 和 D 区, 四套地温产品的年际变化比较接近 (C 区差异略大), 并伴有明显的振荡特征, 尤其是 D 区, 四套地温产品均有较明显的“准 6 年”振荡。相关性分析显示, ERA-Land 地温距平在 B、C 和 D 区与其他地温产品相关性均最好 (表略)。

然而, 在东亚中高纬西北部 (图 14a; A 区)、东北部 (图 14e; E 区) 和最东部 (图 14f; F 区), 尽管 MERRA-Land 等地温产品与观测也有显著的相关性 (表 4), 但与观测的差异都比 B、C 和 D 区大的多, 相关性也整体偏低。这可能与 A、E 和 F 区观测站点较少、区域代表性较差有一定关系。同时, 对于整个时段, 即 1980~2010 年, 四套地温产品年际变化趋势相互差异较大 (图 14a, e, f), 一致性偏低, 相关性较差 (表略)。因此, 很难确定哪一套地温产品更好地代表了这三个地区。综上所述, 除 A、E 和 F 区外, 春季 ERA-Land 最能代表观测土壤温度的年际变化。

夏季各套土壤温度资料 10~30 cm 地温距平的年变化则较为明朗 (图 15)。除 NOAA-CIRES 外, 其余三套地温产品 ERA-Interim、ERA-Land 和 MERRA-Land 在各区均十分接近, 差异很小, 与观测地温 (1980~1990 年) 距平的年变化也较吻合 (A 区稍差), 并且与观测的相关性均通过 99% 的信度检验 (表 4)。值得注意的是, 与春季一样, 在 A-F 六个区, ERA-Land 地温平均态与观测差异也都最小 (表 2)。

上述分析仅讨论了 10~30 cm 地温, 但前述分析显示: 夏季越往深层, 四套地温产品间气候态的差异越大。因此, 10~30 cm 土壤层未必能代表整个土壤层。图 16 给出了夏季可用观测站点较多、代表性较好的 B 区和 C 区 (图 2c) 在其他三个土壤层 0~10 cm、30~100 cm 和 100~200 cm 地温距

表 4 1980~1990 年各区域平均 10~30 cm 土壤温度观测值与四套地温产品的时间相关系数。A-F 为 6 个子区域, 分布如图 2

Table 4 Temporal correlation coefficients between domain-averaged RHSTD at 10–30 cm depth and those of the four reanalysis products during the period from 1980 to 1990. A to F indicate the six sub-domains shown in Fig. 2

	春季时间相关系数						夏季时间相关系数					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
ERA-Interim	0.79	0.95	0.85	0.83	0.89	0.59	0.76	0.94	0.89	0.92	0.82	0.90
ERA-Land	0.75	0.98	0.94	0.93	0.37	<u>0.61</u>	0.73	0.92	0.87	0.94	0.79	0.84
MERRA-Land	<u>0.69</u>	0.93	<u>0.70</u>	0.88	0.89	0.76	0.74	0.94	0.86	0.94	0.80	0.90
NOAA-CIRES	0.73	0.93	0.78	0.80	0.32	0.50	0.52	0.77	0.23	0.55	0.19	<u>0.71</u>

注: 加粗 (下划线) 数值达到 0.01 (0.05) 显著性水平。

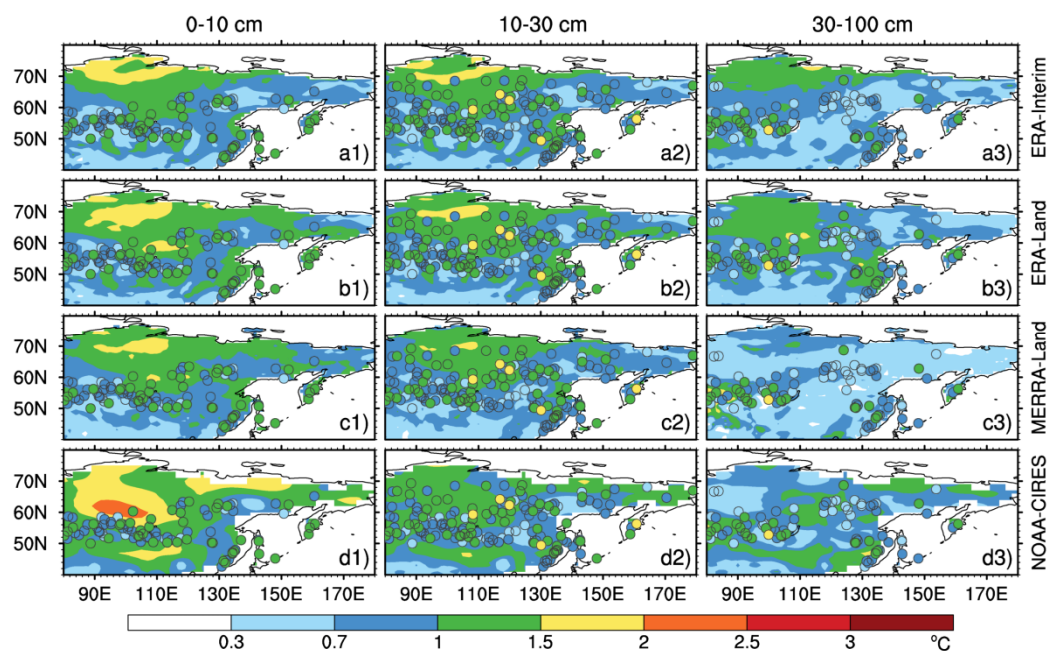


图 13 同图 11, 但为夏季

Fig. 13 Same as Fig. 11, but for the summer

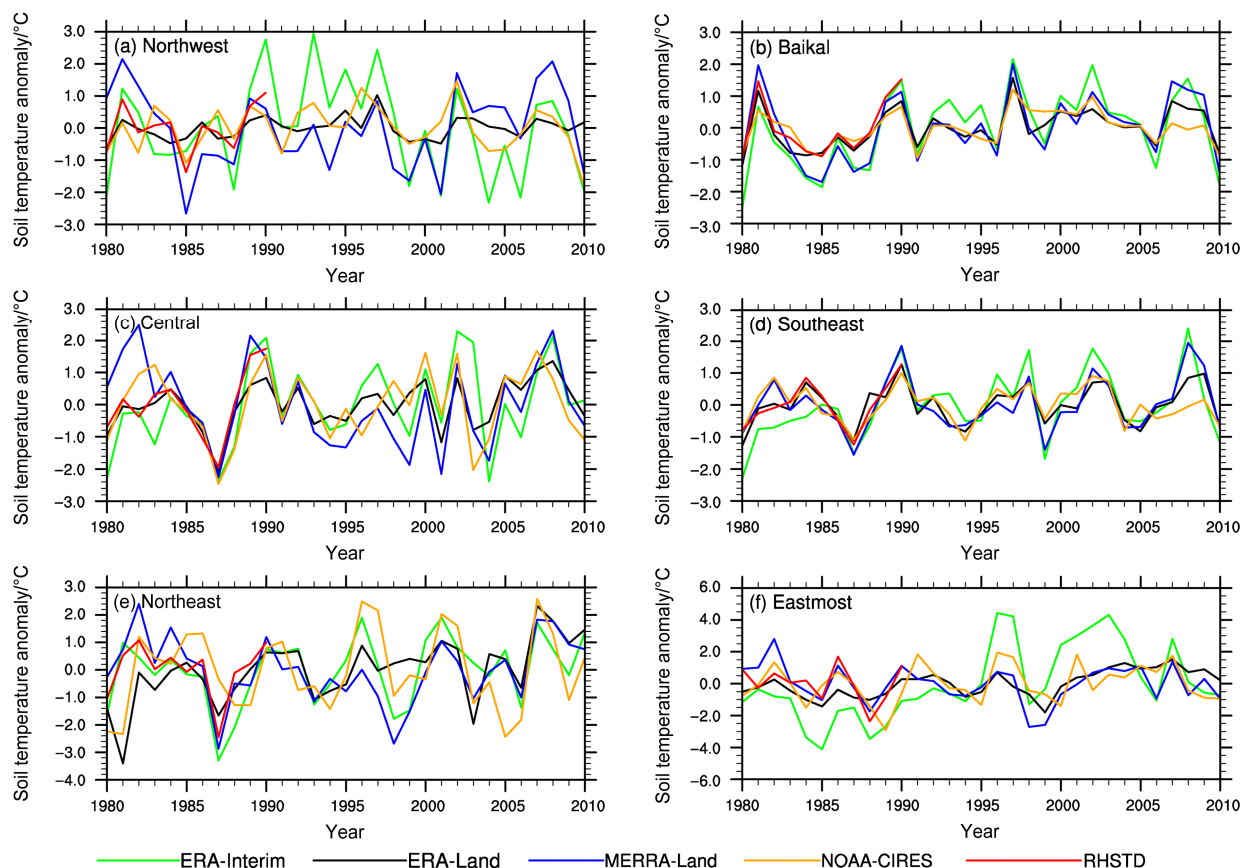


图 14 春季各区域平均的 10~30 cm 土壤温度距平的年际变化 (单位: °C)。 (a-f) 分别对应图 2 中 A-F

Fig. 14 Interannual variations of domain-averaged 10-30 cm soil temperature anomalies in the spring over sub-domains A to F in middle and high latitudes of East Asia (units: °C). (a) to (f) correspond to sub-domains A to F shown in Fig. 2

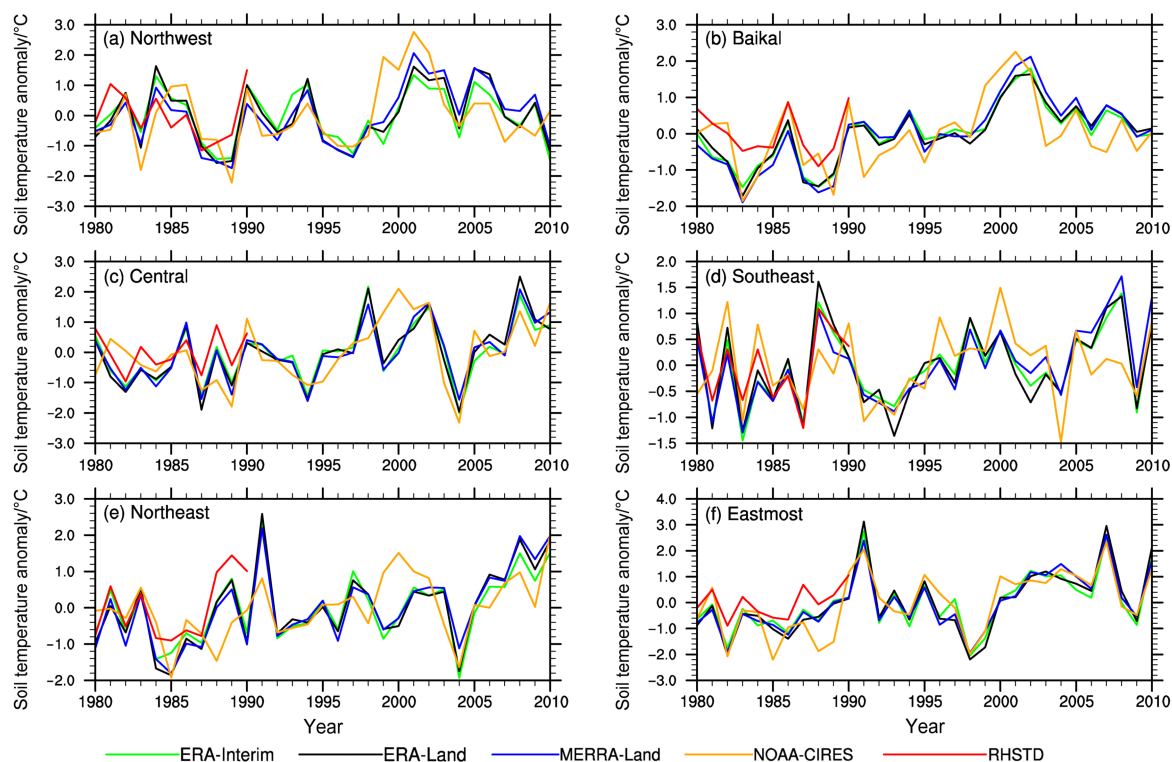


图 15 同图 14, 但为夏季

Fig. 15 Same as Fig.14, but for the summer

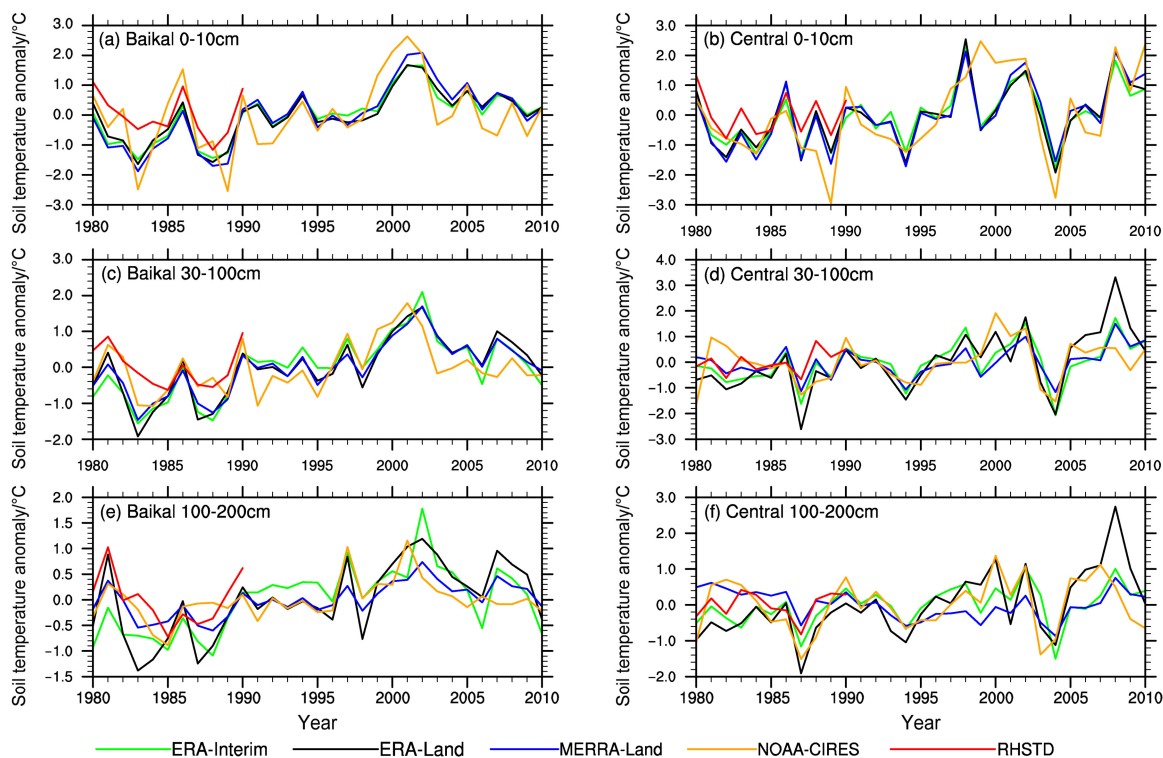


图 16 夏季 B 区 (左) 和 C 区 (右) 区域平均 0~10、30~100、100~200 cm 土壤温度距平的年际变化 (单位: °C)。B 区和 C 区分布如图 2

Fig. 16 Interannual variations of domain-averaged 0–10 cm, 30–100 cm, and 100–200 cm soil temperature anomalies in the summer over sub-domains B (left) and C (right) in middle and high latitudes of East Asia (units: °C). Sub-domains B and C are shown in Fig.2

平的年变化曲线。由图可见,在 B 区和 C 区 0~10 cm 土层,以及 B 区 30~100 cm 土层,各套地温产品(NOAA-CIRES 除外)距平的年变化趋势基本吻合,与观测地温距平(1980~1990 年)的相关性均达到 0.01 显著性水平(表略)。在更深的土壤层,四套地温产品之间差异变大,与观测的相关性也变差(表略)。此外,ERA-Interim 和 ERA-Land 地温在 B 区和 C 区这三个土壤层与观测地温均显著正相关,因而更接近观测;四套地温资料在 B 区(贝加尔湖地区)的一致性也好于 C 区(表略)。

综合上述分析,四套地温产品的年变化趋势与观测的相关性,夏季好于春季,表层好于深层。其中,ERA-Land 土壤温度拥有四套地温产品最多的共性,并且最能体现观测地温的年际变化。

8 总结和讨论

本文利用俄罗斯 1980~1990 年的土壤温度观测数据,从平均态和异常两个方面检验了四套土壤温度产品在东亚中高纬(40°N~80°N, 80°E~180°)的可靠性。主要结论如下:

(1) 就垂直廓线而言,0~2 m 土壤温度波动较大,随季节在 0°上下摆动;2 m 以下稳定少变,并且随着纬度的增加,在 60°N 以北地区出现永久冻结。冬季(夏季)土壤温度随深度增加而缓慢升高(迅速降低)。在经纬向差异上,贝加尔湖地区为 50°N~60°N 的冷中心,而 60°N 以北土壤温度较南侧低,冻土持续时间也比南侧长。四套土壤温度产品较好地反映了该地区地温的上述基本特征,但都低估了 60°N 以北地区的土壤温度。

(2) 就气候态而言,无论春夏,还是年平均,四套地温产品都呈“南暖北冷”的特征,但 ERA-Land 土壤温度的空间分布与观测最接近,差异最小。

(3) 就季节循环而言,在 10~30 cm 土壤层,四套地温产品与观测都很相近,但 ERA-Land 地温与观测的平均绝对误差在 A-F 六个区都最小。多年平均土壤温度的时间(月份)—深度剖面表明,ERA-Land 地温在各深度层与观测差异也较小,对应的冻土深度和持续时间与观测也较接近,因而最能反映了东亚中高纬土壤的冻融过程和土壤温度的季节演变。

(4) 在不同季节和土壤层,四套地温产品年际变率(标准差)与观测的差异不同。就年平均而言,MERRA-Land 空间分布形态与观测最为接近,但高估了绝大多数地区地温的变率。春季,NOAA-

CIRES 也存在高估或低估变率的区域,但它与观测在各土壤层均显著相关,因而与观测的整体差异最小。夏季,ERA-Interim、ERA-Land 和 MERRA-Land 均能较好地反映 0~10 cm 和 10~30 cm 层观测地温变率的空间分布,而 30~100 cm 根据稀少的站点难以判断四套再分析地温的好坏。

(5) 就土壤温度的年际变化而言,四套地温产品与观测的相关性,夏季好于春季,表层好于深层。其中,ERA-Land 土壤温度拥有四套地温产品最多的共性,并且最能体现观测地温的年际(1980~1990)变化趋势。

本文所用的东亚中高纬土壤温度站点观测资料 RHSTD 仅 11 年(1980~1990),时间和空间上缺测均较多。因此,本文从多个角度比较了五套资料的平均态和异常,并且在分析过程中,同时考虑四套地温产品之间,以及它们与观测的异同点,以保证本文结果的可靠性。此外,四套再分析土壤温度均没有同化 RHSTD,所以从独立检验的角度而言,结果较为可靠。

本文着眼于欧亚大陆北部前冬积雪—东亚夏季气候的关系,重点分析了积雪消融期间,即春季和夏季,四套土壤温度产品在东亚中高纬的适用性,所以较少涉及秋季和冬季。在随后的研究中,将通过统计诊断和数值试验进一步分析土壤温度异常在上述积雪—气候关系中的作用和影响机理。

致谢 感谢科罗拉多大学和俄罗斯科学院提供的土壤温度观测资料,以及 ECMWF、NOAA-CIRES 和 NASA 提供的土壤温度产品。

参考文献 (References)

- Albergel C, Dutra E, Muñoz-Sabater J, et al. 2015. Soil temperature at ECMWF: An assessment using ground-based observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 120 (4): 1361–1373, doi:10.1002/2014JD022505.
- Balsamo G, Albergel C, Beljaars A, et al. 2012. ERA-Interim/Land: A global land-surface reanalysis based on ERA-Interim meteorological forcing [R]. ERA Report Series, 25pp.
- Balsamo G, Albergel C, Beljaars A, et al. 2015. ERA-Interim/Land: A global land surface reanalysis data set [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19 (1): 389–407, doi:10.5194/hess-19-389-2015.
- Barnett T P, Dumenil L, Schlese U, et al. 1988. The effect of Eurasian snow cover on global climate [J]. *Science*, 239 (4839): 504–507, doi:10.1126/science.239.4839.504.
- Barnett T P, Dümenil L, Schlese U, et al. 1989. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (5): 661–685, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<0661:TEOESC>2.0.CO;2.
- Berrisford P, Dee D, Fielding K, et al. 2009. The ERA-Interim archive

- version 1.0 [R]. ERA Report Series, 16pp.
- Berrisford P, Dee D P, Poli P, et al. 2011. The ERA-Interim archive version 2.0 [R]. ERA Report Series No. 1, 23pp.
- Carson J E, Moses H. 1963. The annual and diurnal heat-exchange cycles in upper layers of soil [J]. *J. Appl. Meteor.*, 2(3): 397–406, doi:10.1175/1520-0450(1963)002<0397:TAADHE>2.0.CO;2.
- 陈海山, 熊明明, 沙文钰. 2010. CLM3.0 对中国区域陆面过程的模拟试验及评估 II: 土壤温度 [J]. *气象科学*, 30 (5): 621–630. Chen Haishan, Xiong Mingming, Sha Wenyu. 2010. Simulation of land surface processes over China and its validation. Part II: Soil temperature [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 621–630, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2010.05.008.
- Compo G P, Whitaker J S, Sardeshmukh P D. 2006. Feasibility of a 100-year reanalysis using only surface pressure data [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87 (2): 175–190, doi:10.1175/BAMS-87-2-175.
- Compo G P, Whitaker J S, Sardeshmukh P D, et al. 2011. The twentieth century reanalysis project [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137 (654): 1–28, doi:10.1002/qj.776.
- 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, doi:10.1002/qj.828.
- Dutra E, Balsamo G, Viterbo P, et al. 2010. An improved snow scheme for the ECMWF land surface model: Description and offline validation [J]. *J. Hydrometeorol.*, 11 (4): 899–916, doi:10.1175/2010JHM1249.1.
- Frauenfeld O W, Zhang T J. 2011. An observational 71-year history of seasonally frozen ground changes in the Eurasian high latitudes [J]. *Environ. Res. Lett.*, 6 (4): 044024, doi:10.1088/1748-9326/6/4/044024.
- Frauenfeld O W, Zhang T J, Barry R G, et al. 2004. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D5): D05101, doi:10.1029/2003JD004245.
- Gilichinsky D A, Barry R G, Bykhovets S S, et al. 1998. A century of temperature observations of soil climate: Methods of analysis and long-term trends [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost. Yellowknife, Canada: Collection Nordicana No 55, 313–317.
- Godfrey C M, Stensrud D J. 2008. Soil temperature and moisture errors in operational Eta model analyses [J]. *J. Hydrometeorol.*, 9 (3): 367–387, doi:10.1175/2007JHM942.1.
- Groisman P Y, Bartalev S A, The NEESPI Science Plan Development Team. 2007. Northern Eurasia earth science partnership initiative (NEESPI), science plan overview [J]. *Global Planet. Change*, 56 (3–4): 215–234, doi:10.1016/j.gloplacha.2006.07.027.
- Hatzianastassiou N, Vardavas I. 1999. The net radiation budget of the Northern Hemisphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D22): 27341–27359, doi:10.1029/1999JD900771.
- Hatzianastassiou N, Matsoukas C, Hatzidimitriou D, et al. 2004. Ten year radiation budget of the earth: 1984–93 [J]. *Int. J. Climatol.*, 24 (14): 1785–1802, doi:10.1002/joc.1110.
- Holmes T R H, Jackson T J, Reichle R H, et al. 2012. An assessment of surface soil temperature products from numerical weather prediction models using ground-based measurements [J]. *Water Resour. Res.*, 48 (2): W02531, doi:10.1029/2011WR010538.
- Hu Q, Feng S. 2004. A role of the soil enthalpy in land memory [J]. *J. Climate*, 17 (18): 3633–3643, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<3633:AROTSE>2.0.CO;2.
- Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. 2009. Improving the global precipitation record: GPCP version 2.1 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (17): L17808, doi:10.1029/2009GL040000.
- Kållberg P, Simmons A, Uppala S, et al. 2004. The ERA-40 archive [R]. ERA-40 Project Report Series, 36pp.
- Koster R D, Suarez M J, Ducharme A, et al. 2000. A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model: 1. Model structure [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D20): 24809–24822, doi:10.1029/2000JD900327.
- 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 1999. 土壤湿度与气候变化关系的研究进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 14 (3): 299–305. Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. 1999. Progress in the research on the relationship between soil moisture and climate change [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 14 (3): 299–305, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.1999.03.014.
- 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 2000. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系 [J]. *气象学报*, 58 (3): 278–287. Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. 2000. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over East China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 58 (3): 278–287, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2000.03.003.
- 马柱国, 符淙斌, 谢力, 等. 2001. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题 [J]. *地球科学进展*, 16 (4): 563–568. Ma Zhuguo, Fu Congbin, Xie Li, et al. 2001. Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 16 (4): 563–568, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2001.04.019.
- Mahanama S P P, Koster R D, Reichle R H, et al. 2008. Impact of subsurface temperature variability on surface air temperature variability: An AGCM study [J]. *J. Hydrometeorol.*, 9 (4): 804–815, doi:10.1175/2008JHM949.1.
- Matsumura S, Yamazaki K, Tokioka T. 2010. Summertime land-atmosphere interactions in response to anomalous springtime snow cover in northern Eurasia [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D20): D20107, doi:10.1029/2009JD012342.
- 穆松宁, 周广庆. 2010. 冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系 [J]. *大气科学*, 34 (1): 213–226. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2010. Relationship between winter Northern Eurasian fresh snow extent and summer climate anomalies in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1): 213–226, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.20.
- 穆松宁, 周广庆. 2012. 欧亚北部冬季增雪“影响”我国夏季气候异常的机理研究——陆面季节演变异常的“纽带”作用 [J]. *大气科学*, 36 (2): 297–315. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2012. Mechanism for the correlation of winter fresh snow extent over Northern Eurasia and summer climate anomalies in China: Anomalous seasonal transition of land as a bond [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (2): 297–315, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11015.
- Oleson K, Dai Y J, Bonan G, et al. 2004. Technical description of the community land model (CLM) [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-461+STR, 174pp, doi:10.5065/D6N877R0.
- PaiMazumder D, Miller J, Li Z, et al. 2008. Evaluation of community climate system model soil temperatures using observations from Russia [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 94 (3–4): 187–213, doi:10.1007/s00704-007-0350-0.
- Park H, Sherstiukov A B, Fedorov A N, et al. 2014. An observation-based

- assessment of the influences of air temperature and snow depth on soil temperature in Russia [J]. *Environ. Res. Lett.*, 9 (6): 064026, doi:10.1088/1748-9326/9/6/064026.
- Polcher J, McAvaney B, Viterbo P, et al. 1998. A proposal for a general interface between land surface schemes and general circulation models [J]. *Global Planet. Change*, 19 (1–4): 261–276, doi:10.1016/S0921-8181(98)00052-6.
- Reichle R H. 2012. The MERRA-Land data product [R]. GMAO Office Note No. 3, 38pp.
- Reichle R H, Koster R D, De Lannoy G J M, et al. 2011. Assessment and enhancement of MERRA land surface hydrology estimates [J]. *J. Climate*, 24 (24): 6322–6338, doi:10.1175/JCLI-D-10-05033.1.
- 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, doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
- Souma K, Wang Y Q. 2010. A comparison between the effects of snow albedo and infiltration of melting water of Eurasian snow on East Asian summer monsoon rainfall [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D02): D02115, doi:10.1029/2009JD012189.
- 汤懋苍, 张建. 1994. 季平均 3.2 m 地温距平场在汛期预报中的应用 [J]. *高原气象*, 13 (2): 178–187. Tang Maocang, Zhang Jian. 1994. Seasonal mean soil temperature anomaly field at depth 3.2 m and its application in prediction for flood season [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 13 (2): 178–187.
- 汤懋苍, 尹建华, 蔡洁萍. 1986. 冬季地温分布与春、夏降水相关的统计分析 [J]. *高原气象*, 5 (1): 40–52. Tang Maocang, Yin Jianhua, Cai Jieping. 1986. A statistical relationship between the field of soil temperature in winter and of the precipitation in spring and flood season [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 5 (1): 40–52.
- 汤懋苍, 张建, 王敬香, 等. 1988. 我国季平均的 0.8 m 地温距平场与后一季降水场的相关分析 [J]. *气象学报*, 46 (4): 481–485. Tang Maocang, Zhang Jian, Wang Jingxiang, et al. 1988. The similarity between the seasonal anomalous maps of soil temperature and the precipitation of the subsequent season [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 46 (4): 481–485, doi:10.11676/qxxb1988.061.
- Tsuang B J, Chou M D, Zhang Y C, et al. 2008. Evaluations of land-ocean skin temperatures of the ISCCP satellite retrievals and the NCEP and ERA reanalyses [J]. *J. Climate*, 21 (2): 308–330, doi:10.1175/2007JCLI1502.1.
- van den Hurk B J J M, Viterbo P, Beljaars A C M, et al. 2000. Offline validation of the ERA40 surface scheme [R]. ECMWF Technical Memorandum 295, 43pp.
- Vinnikov K Y, Robock A, Speranskaya N A, et al. 1996. Scales of temporal and spatial variability of midlatitude soil moisture [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (D3): 7163–7174, doi:10.1029/95JD02753.
- Wan Z M, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. 2002. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 83 (1–2): 163–180, doi:10.1016/S0034-4257(02)00093-7.
- Wang L, Li X P, Chen Y Y, et al. 2016. Validation of the global land data assimilation system based on measurements of soil temperature profiles [J]. *Agric. Forest Meteorol.*, 218–219: 288–297, doi:10.1016/j.agrformet.2016.01.003.
- Wu B Y, Yang K, Zhang R H. 2009. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (1): 31–44, doi:10.1007/s00376-009-0031-2.
- Wu R G, Kirtman B P. 2007. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow [J]. *J. Climate*, 20 (7): 1285–1304, doi:10.1175/JCLI4068.1.
- Xia Y L, Ek M, Sheffield J, et al. 2013. Validation of Noah—Simulated soil temperature in the North American land data assimilation system phase 2 [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52 (2): 455–471, doi:10.1175/JAMC-D-12-033.1.
- 许立言, 武炳义. 2012. 欧亚大陆春季融雪量与东亚夏季风的可能联系 [J]. *大气科学*, 36 (6): 1180–1190. Xu Liyan, Wu Bingyi. 2012. Linkage between spring Eurasian snowmelt and East Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (6): 1180–1190, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12001.
- Xue Y K, Vasic R, Janjic Z, et al. 2012. The impact of spring subsurface soil temperature anomaly in the western U.S. on North American summer precipitation: A case study using regional climate model downscaling [J]. *J. Geophys. Res.*, 117(D11): D11103, doi:10.1029/2012JD017692.
- Yang S, Xu L Z. 1994. Linkage between Eurasian winter snow cover and regional Chinese summer rainfall [J]. *Int. J. Climatol.*, 14 (7): 739–750, doi:10.1002/joc.3370140704.
- Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. 1984. The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change—A numerical experiment [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 112 (3): 474–490, doi:10.1175/1520-0493(1984)112<0474:TEOSMO>2.0.CO;2.
- Yim S Y, Jhun J G, Lu R Y, et al. 2010. Two distinct patterns of spring Eurasian snow cover anomaly and their impacts on the East Asian summer monsoon [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D22): D22113, doi:10.1029/2010JD013996.
- 章基嘉, 葛玲, 孙照渤. 1994. 中长期天气预报基础 [M]. 北京: 气象出版社, 310–323. Zhang Jijia, Ge Ling, Sun Zhaobo. 1994. Basis of Medium and Long Term Weather Forecast (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 310–323.
- Zhang T J. 2005. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview [J]. *Rev. Geophys.*, 43 (4): RG4002, doi:10.1029/2004RG000157.
- 张文君, 周天军, 宇如聪. 2008a. 中国土壤湿度的分布与变化 I. 多种资料间的比较 [J]. *大气科学*, 32 (3): 581–597. Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2008a. Spatial distribution and temporal variation of soil moisture over China. Part I: Multi-data intercomparison [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (3): 581–597, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.15.
- 张文君, 宇如聪, 周天军. 2008b. 中国土壤湿度的分布与变化 II. 耦合模式模拟结果评估 [J]. *大气科学*, 32 (5): 1128–1146. Zhang Wenjun, Yu Rucong, Zhou Tianjun. 2008b. Spatial distribution and temporal variation of soil moisture over China. Part II: The evaluations for coupled models' simulations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 1128–1146, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.12.
- 左志燕, 张人禾. 2008. 中国东部春季土壤湿度的时空变化特征 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38 (11): 1428–1437. Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. 2009. Temporal and spatial features of the soil moisture in boreal spring in eastern China [J]. *Science in China Series D—Earth Sciences (in Chinese)*, 52 (2), 269–278, doi:10.1007/s11430-009-0011-5.