邹永成, 宋耀明, 王志福. 2017. 四套土壤湿度再分析数据在中国西北东部一华北一江淮地区的适用性研究 [J]. 气候与环境研究, 21 (5): 538–550. Zou Yongcheng, Song Yaoming, Wang Zhifu. 2017. Applicability of four soil moisture reeanalysis datasets over eastern Northwest China, North China, and Jianghuai region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (5): 538–550, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16168.

四套土壤湿度再分析数据在中国西北东部—华北— 江淮地区的适用性研究

邹永成^{1,2,3} 宋耀明^{1,2,3} 王志福^{1,2,3}

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室,南京210044
 2 南京信息工程大学气候与环境变化国际合作联合实验室,南京210044
 3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京210044

摘 要 基于1992~2010年全国 778 个农业气象站土壤湿度观测资料、ERA-Interim、JRA55、NCEP-DOE R2 和 20CR 土壤湿度再分析资料,通过平均差值、相关系数、差值标准差、标准差比四个参数,利用 Brunke 排名方法 和 EOF (Empirical Orthogonal Function)分析,对四套土壤湿度再分析资料在中国西北东部一华北一江淮区域的 适用性进行了分析。主要结论如下:不同季节的平均偏差空间分布上,JRA55 资料同观测数据的平均偏差在±0.08 m³ m⁻³之间,春、夏季西北东部 JRA55 土壤湿度偏小,ERA-Interim、NCEP-DOE R2、20CR 资料较观测数据偏 湿,华北南部、江淮地区平均偏差小于西北东部、华北北部。在年际变化上,各个季节 ERA-Interim 资料同观测 资料最为接近,能稳定地再现西北东部、华北、江淮地区土壤湿度干湿变化趋势,反映出重要的旱涝年。整体而 言,四套再分析资料中 ERA-Interim 资料同观测资料接近,JRA55、NCEP-DOE R2 资料次之,20CR 资料最差。

文章编号1006-9585 (2017) 05-0538-13中图分类号P426.68文献标识码Adoi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16168

Applicability of Four Soil Moisture Reanalysis Datasets over Eastern Northwest China, North China, and Jianghuai Region

ZOU Yongcheng^{1, 2, 3}, SONG Yaoming^{1, 2, 3}, and WANG Zhifu^{1, 2, 3}

2 Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Collaborative Innovation Centre on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the observational soil moisture data collected at 778 agrometeorological stations in China from 1992 to 2010, ERA-Interim reanalysis soil moisture data, JRA55 reanalysis soil moisture data, NCEP-DOE R2 soil moisture data, and Twentieth Century Reanalysis (20CR) data, four statistical quantities, i.e., mean bias, correlation coefficient,

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

收稿日期 2016-09-05; 网络预出版日期 2017-03-08

作者简介 邹永成, 男, 1990年出生, 硕士研究生, 主要从事陆气相互作用研究。E-mail: 1187027592@qq.cm

通讯作者 宋耀明, E-mail: songym@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41005047、41405066,江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD),高等学校博士点学科专项科研基金项目 20113228120002

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41005047 and 41405066), Priority Academic Program Development (PAPD) of Jiangsu Higher Education Institutions and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant 20113228120002)

standard deviation of differences, and ratio of standard deviations were calculated first. The applicability of these four reanalysis soil moisture datasets over eastern Northwest China, North China, and Jianghuai region were then investigated based on the four quantities by using the Brunke ranking method and the empirical orthogonal function analysis (EOF). Major conclusions are as follows. In the spring and summer, the JRA55 data is drier in eastern Northwest China with the seasonal average deviations at most stations are between $-0.08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ to $0.08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. The soil moisture content in ERA-Interim, NCEP-DOE R2, 20CR is larger than observations; the average deviations in southern North China and Jianghuai region are less than the average deviations in northern North China and eastern Northwest China. For the interannual variability, the ERA-Interim reanalysis data agrees best with the observational data; it also best reproduces the variation tendency of the observed soil moisture in eastern Northwest China, North China and Jianghuai region. Overall, the ERA-Interim reanalysis data shows the best relationship with the observed soil moisture data, followed by the JRA55, NCEP-DOE R2 data, and the 20CR data is the worst.

Keywords Soil moisture, Observational data, Reanalysis data, Spatial and temporal distribution

1 引言

土壤湿度作为一个重要的地表参量,在气候变 化研究中起重要作用,并越来越多地受到重视(马 柱国等,1999; Hu et al., 2010;林洁等,2012)。 土壤湿度可影响地表反照率、热容量、植被生长及 蒸散,改变地表与大气的能量、水分的交换,从而 影响气候变化(郭维栋等,2007);作为气候预测 模式必不可少的初边界条件,土壤湿度也会对模式 结果产生重要影响(李巧萍等,2007; Zhang and Dong,2010;张文君等,2012;李崇银等,2013)。 因此在气候变化研究过程中,获得准确可靠的土壤 湿度资料具有十分重要的意义。

目前系统的土壤湿度观测资料很少,观测历史 短且缺测严重,测站分布不均匀,限制了土壤湿度 观测资料在科学研究中的应用。再分析资料因覆盖 时空范围广而被大量采用,例如欧洲中期天气预报 中心 (European Centre of Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) ERA40 (ECMWF reanalysis of the global atmosphere and surface conditions for 40 vears)再分析资料、ERA-Interim 再分析资料,美 国国家环境预测中心/国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR) 再分析资 料,日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)的JRA25、JRA55 再分析资料等;全球水分 和能量循环试验中的全球土壤水分计划第二期计 划产生的 1986~1995 年的全球土壤湿度资料(the second Global Soil Wetness Project, GSWP2) 也被 广泛应用(林朝晖等, 2008);随着遥感技术的发

展,卫星反演的土壤湿度产品也在气候研究中大量 使用(Reichle et al., 2004; 张堂堂等, 2008; 李昊 睿等, 2010; 鲍艳松等, 2014)。再分析资料、模 式模拟资料及卫星反演资料一定程度上解决了气 候变化研究中土壤湿度观测数据时空连续性差等 问题,但这些资料能否真实反映土壤状况还需要分 析和探讨。Li et al. (2005)分析了观测数据同 ERA40、NCEP/NCAR R1、NCEP-DOE R2 土壤湿 度再分析资料的差异,认为 ERA40 资料的空间分 布和年际变化同观测资料一致性最好,NCEP-DOE R2、NCEP/NCAR R1 则较好地描述了观测数据的 季节变化; 左志燕和张人禾 (2008) 对比了中国东 部春季土壤湿度观测资料和 ERA40 再分析资料, 认为 ERA40 资料能很好反映中国东部春季土壤湿 度的时空变化特征, Liu et al. (2014)进一步比较 了春季 ERA-Interim、MERRA、CFSR、JRA25、 NCEP/NCAR R1 土壤湿度资料在中国东部的适用 性,发现 MERRA 资料较好地反映观测资料的气候 态, ERA-Interim 资料较好反映了观测资料的年际 变化;张文君等(2008)对比了 ERA40、NCEP/NCAR R1 再分析资料、GSWP2 资料、CLM 模式输出资料 同观测资料的差异,认为 GSWP2 资料较好地描述 观测数据的季节变化特征, ERA40 资料较好地描述 观测数据的年际变化特征; 崔文瑞等(2009)研究 了黑河流域 ERA40 和 NCEP/NCAR R1 土壤湿度再 分析资料的适用性,发现 ERA40 资料对降水的响 应以及年际变化好于 NCEP/NCAR R1 资料; Bao et al.(2010)认为亚洲夏季风前期青藏高原上AMSR-E 土壤湿度资料适用性优于 NCEP/NCAR R1 资料; 李昂等(2013)对AMSR-E、ERA40、NCEP/NCAR R1 土壤湿度资料和观测数据进行对比,发现中国区

域空间平均的 ERA40、NCEP/NCAR R1 土壤湿度 偏大,AMSR-E 偏小;赖欣等 (2014)利用 CLM4.0 模式模拟的土壤湿度与观测资料比较,认为 CLM4.0 模拟的土壤湿度可以反映出中国大部分区 域观测资料的空间分布和时间变化特征,但在东 北、江淮、河套地区系统性偏大;刘川等 (2015) 研究了 ERA-Interim、CFSR 土壤湿度再分析资料及 多套陆面模式土壤湿度资料在青藏高原的适用性, 发现 ERA-Interim、CFSR 资料与观测数据相比偏 大;马思源等 (2016)分析了欧洲航天局卫星遥感 反演土壤湿度 ESA、ERA-Interim 再分析资料同观 测数据的差异,认为两种土壤湿度均能较好地描述 观测区域土壤的干湿变化。

现有研究多从中国部分区域或某些测站、某一 季节或年变化特征等角度分析非观测的土壤湿度 资料同观测数据的差异,对不同季节,不同地区土 壤湿度再分析资料的适用性研究还较少。土壤湿度 季节变化产生的气候效应越来越受到关注且其变 化特征存在较明显的地区差异,因此针对不同季 节,不同地区各类土壤湿度再分析资料的适用性研 究具有一定意义。观测数据时空连续性差等问题限 制了土壤湿度在科学研究中的应用,但近年来土壤 湿度观测资料得以更新,同时更多改进的土壤湿度 产品得以使用,开展各类土壤湿度再分析数据同观 测数据的对比,评估其在中国区域季节尺度上的可 靠性和适用性具有一定意义。因此,本文对不同季 节 ERA-Interim、JRA55、NCEP-DOE R2 和 20CR 土壤湿度再分析资料在西北东部—华北—江淮地 区适用性进行研究,为土壤湿度再分析数据在这些 地区的应用提供参考和佐证。

2 数据和方法

2.1 数据

土壤湿度观测数据采用 1992 年 12 月~2010 年 12 月全国 778 个农业气象站逐旬观测的土壤重 量含水量资料,分 10 cm、20 cm、50 cm、70 cm、 100 cm 共五层。观测数据单位为相对湿度且观测层 次同再分析资料不同,因此,为便于比较,本文将 观测的 10 cm、20 cm 资料求和平均作为研究对象, 并通过下式将观测的土壤相对湿度(*m*_g)转化为土 壤体积含水量(*m*_v):

$$m_{\rm v} = m_{\rm g} \times F_{\rm C} \,, \tag{1}$$

其中,F_c为田间持水量(Field capacity),采用中国 气象局提供的 1981~2002 年的田间持水量资料, 它表示土壤的最大持水能力,在一定条件下,田间 持水量与土壤质地有关,对同一测站可认为是常 数。

土壤湿度再分析数据选用欧洲中期天气预报 中心提供的 ERA-Interim 再分析数据 (http://apps. ecmwf.int/datasets/[2016-09-05]), 美国国家环境预 测中心、美国能源部提供的 NCEP-DOE R2 再分析 资料 (https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/ [2016-09-05]), 日本气象厅提供的 JRA55 再分析资 料 (http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/[2016-09-05]), 以 及美国国家海洋和大气管理局的二十世纪再分析资 料 20CR (https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/ [2016-09-05]), 上述资料均为月平均资料。ERA-Interim 资料分 4 层, 深度分别为 7 cm、28 cm、100 cm、255cm,水平分辨率为 0.75°(纬度)×0.75° (经度), ERA-Interim 资料使用的陆面模式为 TESSEL (Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land),利用相对湿度及温度校正土 壤湿度,避免陆面过程强迫场与实际场的差异而引 起土壤湿度偏差过大(Douville et al., 2000)。NCEP-DOE R2 资料来源于美国国家环境预测中心和美国 能源部的全球大气再分析资料研究计划,与 NCEP/ NCAR R1 相比改进了预报模式和同化系统,修正 了 NCEP/NCAR R1 资料中的一些误差(Trenberth et al., 2011), 其土壤湿度资料分2层, 深度分别为 10 cm、200 cm, 纬向 192 个格点, 经向 94 个格点。 20CR 资料是由美国国家大气海洋局发布的,本文 选择最新的2c版本,土壤湿度分4层,分别为0cm、 10 cm、40 cm、100 cm, 空间分辨率同 NCEP-DOE R2 资料相同。JRA55 同化了常规观测资料、亮温、 风、SSM/I 雪盖和中国雪深资料,是一套亚洲地区 长时间、质量较高的再分析数据(Ebita et al., 2011), 其土壤湿度资料水平分辨率为 1.25°(纬度)×1.25° (经度),对于不同格点其土壤层次的厚度不同。 上述四套土壤湿度资料均为较新的土壤湿度产品, 并在气候变化诊断、模拟及预测等研究中充分应用 (Wei et al., 2009; Kobayashi et al., 2015; 刘婷婷 等, 2016),因此本文选择了上述资料作为对比对 象。为方便比较,上述四套再分析资料均转化为土 壤体积含水量,且通过线性插值使得再分析资料与 观测资料层次相同。

2.2 方法

本文选用的 1991~2010 年全国 778 个农业气 象站逐旬观测的土壤重量含水量资料,但研究发现 1991~1992年缺测较严重,因此本文的研究时间段 为 1992 年 12 月至 2010 年 12 月。将再分析数据插 值到农气观测站,筛选数据连续性好的测站作为研 究对象。尽管土壤湿度观测站点较多,但其观测时 段主要集中在 3~11 月, 且缺测严重, 因此选定的 站点较少。根据处理结果,选定的农气观测站数量 如下: 春季 118 站、夏季 113 站、秋季 117 站、冬 季 66 站。参考马柱国等 (2005)、马思源等 (2016) 和朱晨等(2013)的研究及土壤湿度气候特征,将 选定的测站所在地区划分为三个区域,表1给出了 主要分区的经、纬度范围,图1给出了春季土壤湿 度测站分布情况情况,由图1可见,选定的观测站 点主要分布于西北东部、华北地区、江淮地区、东 北地区、新疆地区、西南地区等也有少数站点,但 本文不着重讨论。

本文通过 EOF (Empirical Orthogonal Function) 方法分析再分析数据、观测资料的时空分布特征及 其吻合程度,计算平均差值 (D_{av})、相关系数 (R)、

表1 主要研究区域的经纬度范围

 Table 1
 Latitude and longitude ranges of the three study regions

地区	经度范围	纬度范围
西北东部	99.5°E~110°E	32.5°N~41°N
华北地区	110°E~120°E	34.5°N~45°N
江淮地区	110°E~121°E	29.5°N~34.5°N



图 1 春季土壤湿度测站分布及主要研究区域(1: 西北东部; 2: 华北; 3: 江淮)

Fig. 1 Spatial distribution of soil moisture observational stations in spring and the major study regions (1: eastern Northwest China, 2: North China, 3: Jianghuai region) 差值标准差($\sigma_{\rm D}$)、标准差比($\sigma_{R_{\rm E}}/\sigma_{o_{\rm BS}}$)等指标:

$$D_{\rm av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (O_{\rm BS(i)} - R_{\rm E(i)}), \qquad (2)$$

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (O_{BS(i)} - \overline{O}_{BS}) (R_{E(i)} - \overline{R_{E}})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (O_{BS(i)} - \overline{O}_{BS})^{2}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (R_{E(i)} - \overline{R_{E}})^{2}}}, \quad (3)$$

$$\sigma_{\rm D} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (O_{\rm BS(i)} - R_{\rm E(i)})^2}, \qquad (4)$$

$$\sigma_{R_{\rm E}} / \sigma_{O_{\rm BS}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (R_{{\rm E}(i)} - \overline{R_{\rm E}})^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (O_{{\rm BS}(i)} - \overline{O_{\rm BS}})^2}},$$
(5)

其中, N 为序列长度, $R_{E(i)}$ 为再分析资料, $O_{BS(i)}$ 为 观测资料。采用 Brunke 排名法(Brunke et al., 2003), 考察观测资料与再分析资料的相关程度。Brunke 排 名法即对不同再分析资料进行从 1 到 n 的排序(本 文中 n = 4),其中 D_{av} 、 σ_{D} 绝对值越小(R 越大) 的资料排序越靠前, $\sigma_{R_{E}} / \sigma_{O_{BS}}$ 越接近于 1 的排名为 1,越远离 1 的排序为 n,将某一再分析资料在站点 的 D_{av} 、R、 σ_{D} 、 $\sigma_{R_{E}} / \sigma_{O_{BS}}$ 排序得分进行算术平均, 得到该资料的总体排序得分,总体得分越小,再分 析资料同观测数据的差异越小。刘川等(2015)利 用了 Brunke 排名法对青藏高原土壤湿度观测资料 和再分析资料、陆面模式资料进行对比; Decker et al. (2012)利用了 Brunke 排名法对比了通量观测资 料与再分析资料间的平均偏差及标准差,取得较好 效果。

3 平均差值空间分布特征

图 2 为再分析资料和观测资料多年季节平均土 壤湿度差值场,可以看出本文研究区域内 20CR 资 料系统性高估了各季节的土壤湿度,同观测资料的 差异最大,其余三套资料的平均偏差相近。春季, 总体上 JRA55 资料同观测资料的差异最小,大部分 站点平均误差在±0.08 m³ m⁻³之间,其中西北东部 JRA55 资料较观测偏小,华北、江淮地区则偏大; ERA-Interim 资料同观测资料差异大都在 0.08 m³ m⁻³以内,且较观测资料系统性偏大,同马思源 等(2016)、左志燕和张人禾(2008)研究结果一 致; NCEP-DOE R2 资料同样高估了土壤湿度,且 中国西北东部、新疆地区偏差较大,江淮及华北偏



图 2 各季节平均的观测资料和再分析资料 ERA-Interim (第一列)、JRA 55 (第二列)、NCEP-DOE R2 (第三列)、20CR (第四列) 土壤湿度的差值 场: (a-d) 春季; (e-h) 夏季; (i-l) 秋季; (m-p) 冬季

Fig. 2 Seasonal mean bias fields of soil moisture between observational data and reanalysis data ERA-Interim (the first column), JRA 55 (the second column), NCEP-DOE R2 (the third column), and 20CR (the fourth column) in (a–d) spring, (e–h) summer, (i–l) autumn, and (m–p) winter

差较小: 20CR 资料较观测数据偏大, 大部分站点 误差值超过 0.12 m³ m⁻³。夏季平均偏差分布情况类 似春季, JRA55 资料同观测资料的差异较小, 大部 分站点的平均差值在±0.08 m³ m⁻³之间, JRA55 资 料在西北东部较观测数据偏小,华北、江淮则偏大; 多数站点夏季 ERA-Interim 土壤湿度较观测数据偏 大,误差在 0.12 m³ m⁻³ 以内; NCEP-DOE R2 土壤 湿度资料较观测资料偏大,平均差值分布类似春 季,华北南部、江淮地区差异小,而西北东部、华 北北部差异大;西北东部、华北北部 20CR 土壤湿 度较观测数据偏大,误差普遍超过 0.12 m³ m⁻³,华 北东部、江淮地区 20CR 土壤湿度同观测数据差异 较小。秋季,各套再分析资料同观测资料平均差值 空间分布类似夏季,但整体偏差小于夏季,JRA55、 ERA-Interim、NCEP-DOE R2 资料在华北、江淮地 区同观测的平均误差在±0.08 m³ m⁻³之间; 20CR 资料在华北东部同观测差异较小,但在西北东部、

江淮地区西部、华北西部差异较大。由于冬季缺测 严重,观测站点主要位于江淮地区、华北南部和西 北东部的东南侧, ERA-Interim、JRA55 和 NCEP-DOE R2 资料同观测资料的平均差值基本在±0.04 m³ m⁻³之间;相较其他三套资料,20CR 同观测的 差异最大。

综上所述,本文研究区域内,不同季节 JRA55 资料同观测数据的平均偏差在±0.08 m³ m⁻³之间, 其中春夏季西北东部 JRA55 土壤湿度偏小; ERA-Interim、NCEP-DOE R2、20CR 资料在研究区域较 观测数据系统性偏大,且西北东部、华北北部的平 均偏差大于华北南部和江淮地区。

4 相关系数的空间分布特征

通过计算各季节观测资料和再分析资料的相关系数 R 来判定两种资料的相关程度。表 2 给出相

表 2 各季节观测资料和再分析资料土壤湿度相关系数通过显著性检验站数

Table 2	Number of stations at which the correlation coefficient between observational data and reanalysis dataset pass	es the
significa	nce test	

	ERA-Interim 资料和观测 资料相关系数		JRA55 资料和观测 资料相关系数		NCEP-DOE R2 资料和 观测资料相关系数		20CR 资料和观测 资料相关系数	
	通过 95%信度	通过 90%信度	通过 95%信度	通过 90%信度	通过 95%信度	通过 90%信度	通过 95%信度	通过 90%信度
	检验站数	检验站数	检验站数	检验站数	检验站数	检验站数	检验站数	检验站数
春季	43	53	25	28	22	39	22	32
夏季	48	66	34	51	29	38	14	24
秋季	65	80	47	58	45	60	25	43
冬季	36	45	16	24	12	21	9	13

关系数 R 通过 90%及 95% 信度检验的站数,从表 2 可见,同一季节而言,ERA-Interim 土壤湿度同观 测资料相关系数 R 通过显著性检验的站数最多, JRA55 及 NCEP-DOE R2 资料站数相近, 20CR 资 料则最少;对于同一套再分析资料,秋、冬季相关 系数 R 通过显著性检验的测站比例较高。图 3 为相 关系数 R 的空间分布, 其中阴影区为通过 90%显著 性检验的区域,春季 ERA-Interim 土壤湿度资料, R 通过90%显著性检验的测站主要集中在江淮地区、 西北东部; JRA55 资料则位于江淮地区东部和西北 部分地区; NCEP-DOE R2 同观测资料相关性好的 测站较为分散; 江淮地区 20CR 土壤湿度同观测数 据相关性较好。夏季,对 ERA-Interim 资料,相关 系数 R 通过显著性检验的站数有所增加, 位于华北 东部和北部、江淮地区;对JRA55 土壤湿度,显著 相关的站点主要位于山东半岛;对 NCEP-DOE R2 及 20CR 资料,显著相关的站点较分散,且相关系 数相对较小。秋季, ERA-Interim 土壤湿度资料同 观测数据相关系数通过 90%信度检验的站点为 80 站,主要位于江淮、华北和西北东部;对JRA55、 NCEP-DOE R2 资料,显著相关的站点分布相近,

主要位于西北东部和山东半岛;对 20CR 资料,同 观测资料显著相关的区域较分散。冬季, ERA-Interim 资料同观测资料显著相关的站数较多,主要 位于华北东部、江淮地区;对 JRA55、NCEP-DOE R2 和 20CR 资料,同观测资料相关系数通过 90%显 著性检验的区域较分散。

四个季节的 ERA-Interim 资料同农业气象站土 壤湿度观测数据相关性最好,尤其是春季江淮地 区,夏季华北东部和北部,秋季中国西北东部、江 淮和华北南部,以及冬季的江淮东部地区。

利用 Brunke 排名方法,分别计算四套再分析 资料 D_{av} 、R、 σ_{D} 、 $\sigma_{R_{E}} / \sigma_{O_{BS}}$ 指标的排序得分及综合

排序得分,结果如表 3 所示。对 D_{av} ,春、夏季 JRA55 资料的 Brunke 排序结果最优,而秋、冬季,NCEP-DOE R2 资料排序结果最好,20CR 资料四个季节的 排序结果均最差。对 $R \, n \sigma_{\rm D}$, ERA-Interim 资料四 个季节的排序结果均最好,同观测资料相关性最 好,NCEP-DOE R2、JRA55 资料排序结果比较接近, 20CR 资料排序结果最差,表明 20CR 资料同观测数 据存在较大的差异性。春、夏、冬季,JRA55 资料 的 $\sigma_{R_{\rm E}} / \sigma_{o_{\rm ES}}$ 排序结果最好,说明 JRA55 资料同观测 数据的变化程度更为接近,而秋季则 ERA-Interim 资料的 $\sigma_{R_{\rm E}} / \sigma_{o_{\rm ES}}$ 排序结果最好。从综合的排序结果 看,ERA-Interim 资料四个季节的综合排序结果都 最好,JRA55、NCEP-DOE R2 资料综合排序结果较 接近,20CR 资料的综合排序结果最差,可见 ERA-Interim 资料同观测数据的差异性最小。

543

表 3 四套再分析资料土壤湿度的 Brunke 排序得分结果 Table 3 Average ranking scores of the reanalysis soil moisture datasets

		D _{av} 排序	R 排序	$\sigma_{\rm D}$ 排序	$\sigma_{\scriptscriptstyle R_{\scriptscriptstyle E}}$ / $\sigma_{\scriptscriptstyle O_{\scriptscriptstyle m BS}}$	综合排
季节	资料名称	得分	得分	得分	排序得分	序得分
春季	ERA-Interim	2.35	1.84*	1.64*	2.67	2.13*
	JRA55	1.72*	2.63	2.65	2.09*	2.27
	NCEP-DOE R2	2.13	2.69	2.41	2.95	2.55
	20CR	3.81	2.85	3.30	2.29	3.06
夏季	ERA-Interim	2.62	1.96*	1.86*	2.25	2.17*
	JRA55	1.82*	2.47	2.70	2.20*	2.30
	NCEP-DOE R2	2.19	2.51	1.87	3.04	2.40
	20CR	3.36	3.06	3.58	2.50	3.13
秋季	ERA-Interim	2.20	1.78*	1.67*	2.08*	1.93*
	JRA55	2.12	2.68	2.65	2.17	2.41
	NCEP-DOE R2	2.11	2.53	1.96	2.50	2.28
	20CR	3.57	3.01	3.73	3.26	2.39
冬季	ERA-Interim	2.12	1.67*	1.55*	2.50	1.96*
	JRA55	2.42	2.56	2.64	2.03*	2.41
	NCEP-DOE R2	1.79*	2.65	2.29	2.74	2.37
	20CR	3.67	3.12	3.53	2.73	3.26

*为排序最优者。



图 3 各季节观测资料和再分析资料 ERA-Interim (第一列)、JRA55 (第二列)、NCEP-DOE R2 (第三列)、20CR (第四列) 土壤湿度的相关系数场 (阴影区表示通过 90%信度检验,阴影颜色越深表示相关系数越大): (a-d) 春季; (e-h) 夏季; (i-l) 秋季; (m-p) 冬季

Fig. 3 Correlation coefficients of soil moisture between observational data and reanalysis data ERA-Interim (the first column), JRA55 (the second column), NCEP-DOE R2 (the third column), 20CR (the fourth column) in (a–d) spring, (e–h) summer, (i–l) autumn, and (m–p) winter. Shaded area indicates the correlation coefficients exceeding the 90% confidence, correlation coefficients in darker shaded area are larger

5 时空变化特征的对比

为考察土壤湿度观测数据和再分析资料的时 空变化特征及其相关性,对上述数据的标准化距平 资料进行 EOF 分解,得到各套数据 EOF 分解的第 一模态及其时间系数。图 4 为春季各套数据 EOF 第一模态及其时间系数,土壤湿度观测资料 EOF 第一模态方差贡献率 20.2%,小于四套再分析资料 第一模态方差贡献,表明土壤湿度的实际变化特征 更为复杂。观测数据的正变率中心位于江淮地区, 华北北部等地区为负变率,从时间系数(图 4f)看, 观测数据表现出华北南部、江淮区域变湿、华北北 部变干的趋势。对中国东部中纬度区域的大部分表 层土壤湿度而言,降水是主要收入量,刘栗(2014) 发现中国东部中纬度区域的降水与东北反相变化, 且中纬度区域是变率最大的区域,与本文春季土壤 湿度观测资料 EOF 第一模态空间分布相近。

ERA-Interim 资料可以较好再现观测资料正负 变率空间分布,一定程度反映观测数据空间变化的 精细结构,可以再现华北南部、江淮地区变湿、华 北北部变干的趋势,且 1998 年、2003 年的涝年以 及 2000 年的干旱年同观测对应较好, 同刘栗 (2014) 的研究结论一致: JRA55 资料也可大致反映观测数 据正变率中心,但没有较好再现出华北北部同华北 南部、江淮地区的反相分布特征; NCEP-DOE R2、 20CR 资料的变率中心同观测数据变率中心存在一 定偏差。从时间系数及其相关系数看(图 4f), NCEP-DOE R2 资料可以较好地再现观测数据的年 际变化,相关系数为 0.662,通过信度 99%的显著 性检验: 其次是 ERA-Interim, 相关系数为 0.589, 通过信度 99%的显著性检验; 春季 JRA55、20CR 资料 EOF 第一时间系数同观测资料的对应关系较 差,20CR 资料的相关系数仅通过信度 90%的显著



图 4 春季再分析资料(a) ERA-interim、(b) JRA 55、(c) NCEP-DOE R2、(d) 20CR 和(e) 观测资料土壤湿度 EOF 分析第一模态(图 a-e 中百 分数表示该模态的方差贡献)及其(f)时间系数(图中数值表示土壤湿度再分析资料与观测的相关系数,*表示相关系数通过 90%信度检验,**表示相关系数通过 99%信度检验)

Fig. 4 The first eigenvector (the percentage in a-e represents the variance contribution ratios of each eigenvector) and corresponding time coefficient series of the soil moisture EOF analysis of spring reanalysis data (a) ERA-interim, (b) JRA 55, (c) NCEP-DOE R2, (d) 20CR, and (e) observational data, (f) time coefficient (numbers represent correlation coefficients between reanalysis data and observation of soil moisture, * means significance at 0.1 level, ** at 0.05 level, and *** at 0.01 level)

性检验,而 JR55 资料则未通过显著性检验,刘栗 (2014)等发现春季 JRA25 资料在年际变化上与观 测的相关较差,表明 JRA 土壤湿度资料并不能较好 反映春季观测资料的年际变化。

图5为夏季土壤湿度EOF第一模态及其时间系数。夏季,观测数据正变率中心位于华北北部,负 变率中心位于西北东部地区的西侧,呈东西反相分 布,从时间序列看,2003年以后,华北北部夏季土 壤湿度呈持续变干趋势,而西北东部西侧、淮河流 域土壤湿度呈缓慢增大,与刘宪锋等(2015)的部 分研究结论一致。ERA-Interim、JRA55、NCEP-DOE R2 资料一定程度上再现观测数据的上述空间变化特征,20CR 资料则较差,再分析土壤湿度数据反映出的正变率中心较观测资料变率中心南移,位于华北南部。从时间系数(图 5f)看,夏季 JRA55 资料时间系数与观测数据时间系数相关系数最大,达 0.880,且几个旱涝年描述较好;其次是 ERA-Interim 资料,相关系数为 0.815;再次是 NCEP-DOE R2 资料,相关系数为 0.699,这三套再分析资料同观测数据时间变化上的相关性好,均通过 99%信度的显著性检验。20CR 资料同观测资料时间系数的相关性低,相关系数为 0.230,尤其 2003 年后,20CR



土壤湿度数据变化趋势同观测资料趋势相反,不能 很好反映观测数据的时间变化特征。

图6给出为秋季土壤湿度EOF第一模态及其时间序列。从空间分布看,观测资料正变率中心位于华北南部和西北东部,华北北部、江淮地区为负变率。ERA-Interim、JRA55、NCEP-DOE R2资料都可再现观测资料的变率中心,而20CR资料的变率中心较观测数据偏北。从时间变化(图6f)看,四套资料都可以较好地再现秋季观测资料的时间变化特征,ERA-Interim资料时间变化与观测数据时间变化相关系数最大,达0.829,且1998年、2000年、2002年、2003年等几个极值年同观测事实对应较好;其次是NCEP-DOE R2资料,相关系数为0.742,但在1998年等个别极值年份同观测资料变化位相相反;再次是JRA55资料,相关系数为0.728;

20CR 资料时间变化同观测数据时间变化相关性最小,相关系数为 0.609,但仍可通过 0.01 信度显著性检验。

图 7 为冬季土壤湿度 EOF 第一模态及时间系数。由于北方冬季冻土的影响,土壤湿度观测资料 缺测较多,因此资料较完整的观测站集中在华北地 区南部、江淮地区和西北东部的东南侧,从图 7e 可知,上述区域观测数据变化较为一致。ERA-Interim 资料可以较好地再现观测资料的空间分布 特征,而 JRA55 和 NCEP-DOE R2 资料的变率中心 位置同观测数据变率中心有一定偏差,20CR 资料 EOF 第一模态表现为南北反相变化,且变率中心与 观测事实偏差较大。从时间系数(图 7f)看, ERA-Interim 资料的时间系数与观测资料时间系数 相关程度最高,相关系数为 0.903,超过 99%的信



度水平,且对 1998 年、2000 年等极值年描述较好; JRA55 资料次之,相关系数为 0.577,超过 95%置 信水平;NCEP-DOE R2 资料的时间系数与观测资 料时间系数的相关系数也可通过 95%信度的显著 性检验,相关系数为 0.532;20CR 资料 EOF 的第 一时间系数同观测数据时间变化相关性差,相关系 数仅 0.315,尤其是 2001 年到 2010 年,20CR 资料 反映出冬季土壤湿度较为剧烈的变化,与观测数据 缓慢变化的事实不符。

综上所述,对季节平均土壤湿度,再分析资料 均低估了观测数据变化的复杂程度,从时空分布特 征看,四个季节 ERA-Interim 资料可以稳定地再现 观测数据的年际变化和空间变化特征;而 JRA55、 NCEP-DOE R2 资料反映的时空变化特征较观测数 据本身的变化存在季节差异;四套资料中 20CR 土 壤湿度资料时空变化同观测事实差异最明显。

6 结论和讨论

本文主要讨论了 JRA55、ERA-Interim、NCEP-DOE R2、20CR 土壤湿度再分析数据在中国西北东 部、华北、江淮地区的适用性,得到以下结论:

(1) 空间分布上,四个季节再分析数据同观测数据多年平均的差值空间分布格局相近,不同季节 JRA55 资料同观测数据的平均偏差在±0.08 m³ m⁻³ 之间,其中春、夏季西北东部 JRA55 土壤湿度偏小, ERA-Interim、NCEP-DOE R2、20CR 资料较观测数 据系统性偏大,华北南部、江淮地区平均偏差小于



图 7 同图 4,但为冬季 Fig. 7 Same as Fig. 4, but for winter

西北东部、华北北部; EOF 结果表明 ERA-Interim 资料在不同季节都可以稳定地重现观测数据变化的空间分布特征。

(2) 年际变化上, ERA-Interim 资料同观测数 据相关性最好,可稳定再现观测数据的干湿变化趋势,并同观测数据反映的旱涝年对应较好; JRA55、 NCEP-DOE R2 资料同观测资料相关性相近, 20CR 资料最差。

(3) 整体而言,四套再分析资料同观测数据平均差值、相关系数、差值标准差、标准差比的 Brunke综合排名 ERA-Interim 资料最优,JRA55、NCEP-DOE R2 资料相近,20CR 资料最差。

本文结论是基于农业气象站观测数据对四套

土壤湿度再分析资料在中国西北东部—华北—江 淮地区适用性的评估。由于农业气象站观测数据为 逐旬资料,观测主要集中在3~11月,冬季北方冻 土地区没有观测资料,时空上受到了限制;本文选 取的资料观测时间长度有限,其气候态或年际变化 研究存在一定的局限性。左志燕和张人禾(2008)、 张文君等(2008),马思源等(2016)、刘栗(2014)、 刘宪锋等(2015)关于非观测土壤湿度数据的评估 研究结论同本文部分结论具有相似性,一定程度上 减少了本文结论因观测数据时空局限性导致的不 确定性,说明了本文结论的可靠性。当然,上述局 限对本文选用的四套常用土壤湿度再分析数据评 估的影响有待于未来基于更为完善的观测资料来 进一步讨论。

参考文献(References)

- 鲍艳松, 毛飞, 闵锦忠, 等. 2014. 基于 FY-3B/MWRI 数据的裸土区土壤 湿度反演 [J]. 国土资源遥感, 26 (4): 131–137. Bao Yansong, Mao Fei, Min Jinzhong, et al. 2014. Retrieval of bare soil moisture from FY-3B/ MWRI data [J]. Remote Sensing for Land and Resources (in Chinese), 26 (4): 131–137, doi: 10.6046/gtzyyg.2014.04.21.
- Bao Q, Liu Y M, Shi J C, et al. 2010. Comparisons of soil moisture datasets over the Tibetan Plateau and application to the simulation of Asia summer monsoon onset [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27 (2): 303–314, doi: 10.1007/s00376-009-8132-5.
- Brunke M A, Fairall C W, Zeng X B, et al. 2003. Which bulk aerodynamic algorithms are least problematic in computing ocean surface turbulent fluxes [J]. J. Climate, 16 (4): 619–635, doi: 10.1175/1520-0442(2003) 016<0619:WBAAAL>2.0.CO;2.
- 崔文瑞, 高艳红, 彭雯. 2009. 两套土壤湿度再分析资料在黑河流域的 对比分析 [J]. 高原气象, 28 (6): 1274–1281. Cui Wenrui, Gao Yanhong, Peng Wen. 2009. A comparative analysis of two soil moisture datasets in Heihe River basin [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (6): 1274– 1281.
- Decker M, Brunke M A, Wang Z, et al. 2012. Evaluation of the reanalysis products from GSFC, NCEP, and ECMWF using flux tower observations [J]. J. Climate, 25 (6): 1916–1944, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00004.1.
- Douville H, Viterbo P, Mahfouf J F, et al. 2000. Evaluation of the optimum interpolation and Nudging techniques for soil moisture analysis using FIFE data [J]. Mon. Wea. Rev., 128 (6): 1733–1756, doi: 10.1175/1520-0493(2000)128<1733:EOTOIA>2.0.CO;2.
- Ebita A, Kobayashi S, Ota Y, et al. 2011. The Japanese 55-year reanalysis "JRA-55": An interim report [J]. Sola, 7: 149–152, doi: 10.2151/sola. 2011-038.
- 郭维栋,马柱国,王会军. 2007. 土壤湿度——一个跨季度降水预测中 的重要因子及其应用探讨 [J]. 气候与环境研究, 12 (1): 20–28. Guo Weidong, Ma Zhuguo, Wang Huijun. 2007. Soil moisture——An important factor of seasonal precipitation prediction and its application[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (1): 20–28, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2007.01.003.
- Hu Y M, Ding Y H, Liao F. 2010. An improvement on summer regional climate simulation over East China: Importance of data assimilation of soil moisture [J]. Chinese Science Bulletin, 55 (9): 865–871, doi: 10.1007/s11434-009-0285-1.
- Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. 2015. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 93 (1): 5–48, doi: 10.2151/jmsj.2015-001.
- 李崇银, 刘会荣, 宋洁. 2013. 2009/2010 年冬季云南干旱的进一步研究
 ——前期土壤湿度影响的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 18 (5): 551–561. Li Chongyin, Liu Huirong, Song Jie. 2013. Further study of Yunnan drought during the 2009/2010 winter: Numerical simulation of impact of antecedent soil moisture [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 551–561, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.

2013.12057.

- 林洁,陈效民,张勇. 2012. 气候变化与土壤湿度关系的研究进展 [J].
 土壤通报, 43 (5): 1271–1276. Lin Jie, Chen Xiaomin, Zhang Yong. 2012.
 Progress in the research on the relationship between climate change and soil moisture [J]. Chinese Journal of Soil Science (in Chinese), 43 (5): 1271–1276.
- 李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 2007. 土壤湿度异常对区域短期气候影响的 数值模拟试验 [J]. 应用气象学报, 18 (1): 1–11. Li Qiaoping, Ding Yihui, Dong Wenjie. 2007. A numerical study on effects of the soil moisture upon the regional short-term climate[J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 18 (1): 1–11, doi:10.3969/j.issn. 1001-7313.2007.01.001.
- 林朝晖, 刘辉志, 谢正辉, 等. 2008. 陆面水文过程研究进展 [J]. 大气 科学, 32 (4): 935–949. Lin Zhaohui, Liu Huizhi, Xie Zhenghui, et al. 2008. Recent progress in the land-surface and hydrological process studies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 935–949, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.19.
- 李昊睿, 张述文, 邱崇践, 等. 2010. 四维变分同化和集合平方根滤波联 合反演土壤湿度廓线的研究 [J]. 大气科学, 34 (1): 193–201. Li Haorui, Zhang Shuwen, Qiu Chongjian, et al. 2010. A study of retrieving the soil moisture profile by combining the four-dimensional variational data assimilation with the ensemble square root filter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 193–201, doi: 10.3878/j.issn. 1006-9895.2010.01.18.
- 赖欣, 文军, 岑思弦, 等. 2014. CLM4.0 模式对中国区域土壤湿度的数 值模拟及评估研究 [J]. 大气科学, 38 (3): 499–512. Lai Xin, Wen Jun, Cen Sixian, et al. 2014. Numerical simulation and evaluation study of soil moisture over China by using CLM4.0 model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 499–512, doi: 10.3878/j.issn. 1006-9895.1401.13194.
- 李昂, 陆其峰,杨晓峰,等. 2013. AMSR-E 卫星反演土壤湿度与 ECWMF、 NECP 再分析土壤湿度比较分析 [J]. 遥感技术与应用, 28 (4): 666–673. Li Ang, Lu Qifeng, Yang Xiaofeng, et al. 2013. AMSR-E soil moisture compared with ECWMF and NCEP soil moisture [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 28 (4): 666–673.
- 刘川, 余晔, 解晋, 等. 2015. 多套土壤温湿度资料在青藏高原的适用性 [J]. 高原气象, 34 (3): 653–665. Liu Chuan, Yu Ye, Xie Jin, et al. 2015. Applicability of soil temperature and moisture in several datasets over Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34 (3): 653–665, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00034.
- 刘栗. 2014. 中国东部春季土壤湿度的时空特征及多种再分析资料的对 比 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文, 20pp. Liu Li. 2014. The temporal and spatial characteristics of spring soil moisture over Eastern China and the intercomparison among multiple reanalysis datasets [D]. M. S. thesis (in Chinese). Chinese Academy of Meteorological Sciences, 20pp.
- 刘婷婷, 陈海山, 蒋薇, 等. 2016. 基于土壤湿度和年际增量方法的我国 夏季降水预测试验 [J]. 大气科学, 40 (3): 591-603. Liu Tingting, Chen Haishan, Jiang Wei, et al. 2016. Summer precipitation prediction in China using soil moisture and the year-to-year increment approach [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 591-603, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1507.15161.

- 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等. 2015. 近 54 年华北平原干旱时空变化特 征及其影响因素 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 51 (S1): 1–7. Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. 2015. Spatiotemporal changes of drought and their driving forces in North China Plain in the last 54 years [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science) (in Chinese), 51 (S1): 1–7, doi: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2015.s1.001.
- Li H B, Alan R, Liu S X, et al. 2005. Evaluation of reanalysis soil moisture simulations using updated Chinese soil moisture observations [J]. Journal of Hydrometeorology, 6 (2): 180–193, doi: 10.1175/JHM416.1.
- Liu L, Zhang R H, Zuo Z Y. 2014. Intercomparison of spring soil moisture among multiple reanalysis data sets over eastern China [J]. J. Geophys. Res., 119 (1): 54–64, doi: 10.1002/2013JD020940.
- 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, 黄刚, 甘文强, 等. 2005. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段 特征 [J]. 大气科学, 29 (5): 671-681. Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqiang, et al. 2005. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over northern China during the last century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (5): 671-681, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2005.05.01.
- 马思源,朱克云,李明星,等. 2016. 中国区域多源土壤湿度数据的比较 研究 [J]. 气候与环境研究, 21 (2): 121–133. Ma Siyuan, Zhu Keyun, Li Mingxing, et al. 2016. A comparative study of multi-source soil moisture data for China's regions [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (2): 121–133, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15080.
- Reichle R H, Koster R D, Dong J, et al. 2004. Global soil moisture from satellite observations, land surface models, and ground data: Implications
- Temporal and spatial features of the soil moisture in boreal spring in eastern China [J]. Science China Earth Sciences, 38 (11): 1428–1437, doi: 10.3321/j.issn:1006-9267.2008.11.011.

for data assimilation [J]. Journal of Hydrometeorology, 5 (3): 430-442, doi: 10.1175/1525-7541(2004)005<0430:GSMFSO>2.0.CO;2.

- Trenberth K E, Fasullo J T, Mackaro J. 2011. Atmospheric moisture transports from ocean to land and global energy flows [J]. J. Climate, 24 (18): 4907–4924, doi: 10.1175/2011JCLI4171.1.
- Wei J F, Dickinson R E, Chen H S. 2009. A negative soil moistureprecipitation relationship and its causes [J]. Journal of Hydrometeorology, 9 (6): 1364–1376, doi: 10.1175/2008JHM955.1.
- 张堂堂,文军,韦志刚,等. 2008. 基于 ENVISAT/ASAR 资料的土壤湿 度反演方法 [J]. 高原气象, 27 (2): 279–285. Zhang Tangtang, Wen Jun, Wei Zhigang, et al. 2008. Soil moisture retrieval based on ENVISAT/ ASAR data[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (2): 279–285.
- 张文君,周天军,宇如聪. 2008. 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): 581–596. Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2008. 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,周天军,智海. 2012. 土壤湿度影响中国夏季气候的数值试验 [J]. 气象学报,70 (1):78–90. Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Zhi Hai. 2012. A numerical experiment on the effect of soil moisture to summer climate over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70 (1): 78–90, doi: 10.11676/qxxb2012.007.
- 朱晨,师春香,席琳,等. 2013. 中国区域不同深度土壤湿度模拟和评估 [J]. 气象科技, 41 (3): 529–536. Zhu Chen, Shi Chunxiang, Xi Lin, et al. 2013. Simulation and assessment of soil moisture at different depths in China area [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 41 (3): 529–536, doi: 10.3969/j.issn.1671-6345.2013.03.019.
- 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), 38 (11): 1428–1437. Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. 2008.
- Zhang J Y, Dong W J. 2010. Soil moisture influence on summertime surface air temperature over East Asia [J]. Theor. Appl. Climatol., 100 (1–2): 221–226, doi: 10.1007/s00704-009-0236-4.