

基于站点观测和模式模拟的北京市土壤湿度

秦道清¹, 赵 岩¹, 王红瑞¹, 邓彩云¹, 赵 勇²

(1. 北京师范大学水科学研究院, 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为了获取全面的地面表层的时空变化信息, 研究行政区域尺度内的水循环和能量循环, 必需结合模型模拟和站点观测。基于国家气象局开发的时空连续的CLDAS土壤湿度产品, 结合已获取的北京市区域内82个监测站点的逐日土壤湿度监测数据, 评估CLDAS土壤湿度产品在行政区域尺度内的准确性与一致性, 进一步获取北京市行政区域内的精确、全面、连续的土壤湿度时空变化信息, 并在此基础上分析北京市土壤墒情时空变异特征。对比分析CLDAS产品和站点观测两种土壤湿度数据显示, 北京市2013年10月1日至12月31日范围内CLDAS产品具有以下特点: CLDAS产品基本与观测数据具有一致变化的趋势, 除顺义外CLDAS产品均高于观测数据。当日20:00的土壤湿度均高于8:00的土壤湿度, 在平均气温降为0℃后, 土壤湿度波动剧烈, 20:00与8:00的土壤湿度出现显著差异。在时间尺度上, 随着降水的减少, 北京市的土壤湿度在逐渐降低。在空间尺度上, 北京市干旱范围在逐渐扩大, 并且呈现以昌平为中心的极旱逐渐蔓延至多个区。由于顺义区土壤相对湿度较高, 呈现另外一个以顺义为中心的土壤相对湿度逐渐变小的区域, 但空间范围变化较小。

关键词: 土壤湿度; CLDAS; 站点观测; 模式模拟; 北京市

土壤湿度通过对陆地表面能源和降水的再分配, 作用于全球水循环, 客观反映了地表水文过程——降水和蒸发的综合效应^[1-2]。准确客观评估土壤水分的时空变异特征, 对研究地球表面的生化演变进程具有重要的意义^[3-4]。目前, 陆面土壤湿度信息可以通过常规观测、遥感资料反演和陆面过程模型模拟等手段获得。站点观测数据对气候模拟和检验十分重要, 但可用的地面站点土壤观测数据非常稀少。近年来随着遥感观测覆盖全球, 卫星遥感观测土壤湿度全面性大幅度提高, 但由于遥感对土壤湿度的反演属于间接观测, 并非直接所得, 土壤湿度的准确性依赖于反演模式的适用性, 且只能反映表层土壤湿度的状况^[5-6]。陆面模式种类繁多, 对土壤湿度和地表通量的模拟差别较大, 误差不仅来自于模式中的参数化方案和其中参数值, 也来自于驱动模式的强迫资料和初始条件的不确定性^[7]。

现有陆面过程模式可以模拟得到土壤水分的时空连续分布场, 为了解决由于初始观测、驱动数据和模型参数等都存在不确定性所导致的误差, 一般通过结合数据同化方法得到土壤湿度的准确估算。

收稿日期: 2018-06-19; 修订日期: 2018-10-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0401407); 国家自然科学基金项目 (51879010, 51479003)

作者简介: 秦道清 (1994-), 女, 四川人, 硕士研究生, 研究方向为水资源系统分析。

E-mail: qindaoqinglinda@163.com

通讯作者: 王红瑞 (1963-), 男, 河南人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源系统分析和环境规划与评价。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

目前,已建立的较为成熟的陆面数据同化系统有北美陆面数据同化系统NLDAS (North American Land Data Assimilation System)、全球陆面数据同化系统GLDAS (Global Land Data Assimilation System)和欧洲陆面数据同化系统ELDAS (European Land Data Assimilation System)。国内方面,李新等^[8]构建了中国西部陆面同化系统WCLDAS,以CoLM模型同化被动微波观测(SSM/I和AMSR-E),可以输出较高精度的土壤湿度和温度、蒸散发等同化资料。2013年,中国气象局师春香等^[9]开发了CMA陆面数据同化系统1.0 (CMA Land Data Assimilation System, CLDAS),逐时输出不同深度的土壤湿度/温度产品,以及气温、气压、风速、湿度、太阳辐射等大气驱动产品。2017年已经更新到CMA陆面数据同化系统(CLDAS-V2.5 (1 km)),较之前版本分辨率更高,输出逐日分层土壤湿度产品,目前在试运行阶段^①。

研究大尺度以及流域尺度或行政区域尺度的水循环和能量循环,需获取全面的地面表层时空变化信息,必需结合模型模拟和站点观测。模型模拟的优势在于内在的物理过程和动力学机制比较完善,可以模拟出模拟对象在时空上的演进变异趋势,而站点观测的优势在于陆面观测对象在观测时刻和其所代表的空间上的真值数据的获取^[10]。由于土壤湿度观测数据与陆面模式模拟结果都具有不确定性,如何准确地估算区域、土壤深度、时间三维的土壤湿度信息,即各个研究区域的不同时间段的各层土壤湿度信息,仍然是研究土壤湿度的主要方向^[7]。

近年来国内外开展了许多基于CLDAS的土壤湿度同化的相关研究,而缺少基于行政区域内小尺度站点实测数据融合时空连续的模型模拟数据的研究,CLDAS产品的准确性需要进一步评估,在小尺度内的应用值得进一步探索研究^[11-12]。一般而言,实测数据准确可信,但由于土壤水分传感器的维护成本较高,且在长时间的监测中会出现传感器监测不准的情况,结合与实测数据一致的CLDAS产品数据进行站点优化布局,以及在此基础上预测与分析可以获得时间和空间上连续的土壤湿度信息,对于土壤墒情的监测具有十分重要的意义。基于国家气象局开发的时空连续的CLDAS土壤湿度产品,结合已获取的北京市区域内82个监测站点的逐日土壤湿度监测数据,评估CLDAS土壤湿度产品在行政区域尺度内的准确性与一致性,进一步获取北京市行政区域内的精确、全面、连续的土壤湿度时空变化信息,并在此基础上分析北京市土壤墒情时空变异特征。研究北京市土壤墒情时空变异特征,对建立旱情监测实时动态平台的研究具有重要的意义,以期对北京地区的防灾减灾工作等提供重要的理论支持和数据支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

北京市位于华北平原的西北部,经纬度为115°25′~117°35′E, 39°28′~41°05′N。西北高,东南低,山地与平原分界明显;北部、西部被太行山脉、燕山山脉环绕,西北部以山区为主,地形高,多属中高山,延庆盆地镶嵌其中,而东南部以平原为主,地形低,沟通了松辽大平原和黄淮海平原。北京市土壤形成因素复杂,土壤类型多种多样,其地带性土壤为褐土。郊区土壤覆盖率为82%,面积约137.8万hm²,其中山区73.6万hm²,占52.63%;平原62.4万hm²,占47.37%。河流水系众多,大小河流160余条流经其中,

① 中国气象报社. http://2011.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxkj/2011xkjdt/201612/t20161206_344618.html.

分属海河流域的北运河、大清河、永定河、蓟运河、潮白河五大水系。北京市是典型的暖温带大陆性季风气候特征, 夏季炎热多雨, 冬季干燥, 春秋短促, 年平均气温, 平原地区为 11~12 ℃, 海拔 1800 m 以下山区为 7~10 ℃^[13]。多年平均降水量 544 mm (1978-2015), 降水多集中在 6-9 月。降雨年际年内变幅较大, 1978-2015 年中最大年降水量为 813.2 mm (1994 年), 最少年降水 267 mm (1999 年), 相差 3 倍以上。降雨空间分布不均匀, 山前迎风坡最高达 700~800 mm, 深山区甚至少于 500 mm, 平原及部分山区处在平均水平 500~650 mm^[14]。

北京市是全国易发旱灾的重点地区之一, 16 个区中有 12 个区县被列为全国易旱地区, 市内连续枯水年可达 9 年, 历史记载最长枯水期为 20 年^[15-16]。旱灾是北京市持续时间最长且发生次数最频繁、涉及空间范围最广且影响最深远的自然灾害。干旱持续特征体现在年内和年际, 年内干旱持续, 为季节干旱, 最为显著的为春夏连旱。干旱的区域特征体现在, 除北运河、潮白河、蓟运河三个水系的山区外, 其他地区为春旱和秋旱同时易发区。

目前北京市旱情监测站点总数达到 84 个, 监测站网覆盖率比较高, 监测站点分布比较合理 (图 1)。依托北京市旱情监测系统, 已经得到 82 个固定监测站点的田间持水量、土壤干容重、土壤酸碱度、土壤有机质含量、土壤标定以及土壤饱和含水量。北京市土壤墒情监测平台对土壤湿度长时间连续监测, 实时输出每日站点 2 个时段的土壤湿度信息, 即 8:00 和 20:00。监测站点为自动土壤水分观测站, 土壤水分传感器存在着系统误差, 在长时间监测运行下, 一些土壤水分传感器出现问题, 监测数据可能出现问题。对于问题观测站点的数据处理是文章开展的基本前提, 在此基础上进行站点的合理布局优化有利于土壤墒情监测平台的完善。

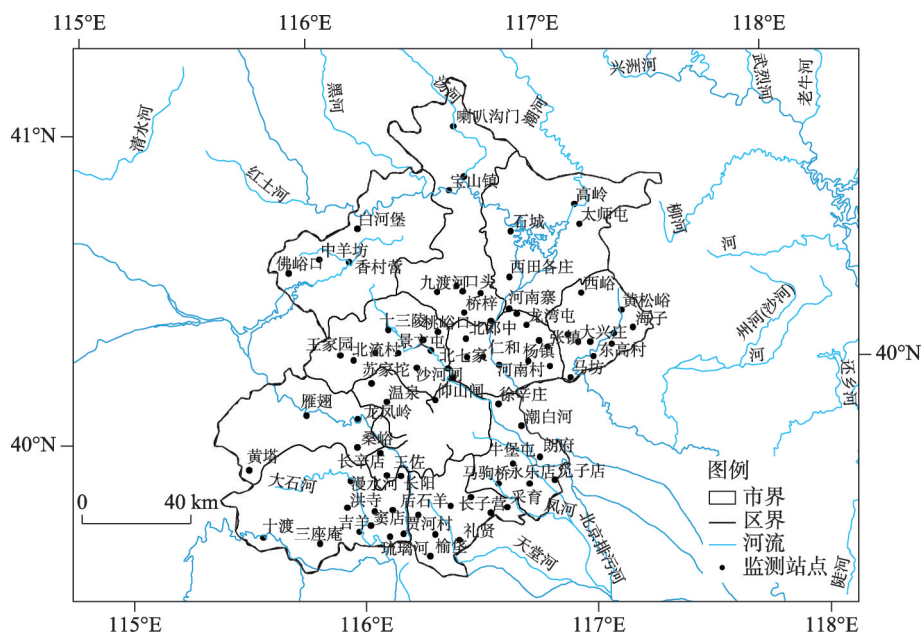


图 1 北京市旱情监测站点分布

Fig. 1 Distribution of drought monitoring sites in Beijing

根据中国气象数据共享网所提供的日降水量数据集^②, 可知在2013年10月1日至2013年12月31日研究时间内北京市监测降水情况。在研究时间内, 只有少量降水, 降水集中在2013年10月1日、8日、19日、22日, 且降水多发生在20:00至次日8:00, 多集中在晚间。

1.2 研究方法

利用评估后的CLDAS产品与地面观测数据相结合, 获取北京市土壤湿度时空变化特征。由于表层土壤密切关联农业生产以及气象预报, 本文研究侧重表层土壤(0~10 cm)的空间分布特征进行分析^[17]。

首先, 从当日8:00和20:00两个时刻分析土壤湿度的变化, 以对CLDAS产品进行评估。同时对其在空间上的变化进行分析, 结合82个站点所在的CLDAS产品(1/16°×1/16°)空间栅格分布, 对应所属区县的行政区划进行对比分析。为了更好地判别CLDAS产品估计与站点观测数据的一致性, 从均方根误差RMSE(Root Mean Square Error)进行分析。均方根误差RMSE是观测值与真实值偏差的平方与次数比值的平方根。在这里以站点观测数据作为真实值, CLDAS产品作为其“观测值”, 计算82个站点的均方根误差, 以RMSE来衡量土壤湿度的CLDAS产品同站点观测数据之间的偏差情况。RMSE对两个数据中的两端大小误差十分敏感, 可以很好地反映出CLDAS产品的精确程度。其计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T_{eff}} (X_{obs}^t - X_{CLDAS}^t)^2}{T_{eff}}} \quad (1)$$

式中: X_{obs}^t 代表 t 时刻的实测数据; X_{CLDAS}^t 代表 t 时刻的CLDAS产品数据; T_{eff} 代表有实测数据时刻的总个数。

其次, 利用CLDAS产品辅助评价82个站点的土壤湿度数据的可靠度, 筛选获取了可信度较高的观测站点的土壤湿度数据, 进一步分析北京市土壤墒情的时空分布以及变异特征分析。

定义当日20:00与8:00的CLDAS产品与站点观测数据的平均误差ME为:

$$ME_{CLDAS} = \frac{1}{T_{eff}} \sum_{t=1}^{T_{eff}} (X_{CLDAS, 20}^t - X_{CLDAS, 8}^t) \quad (2)$$

$$ME_{obs} = \frac{1}{T_{eff}} \sum_{t=1}^{T_{eff}} (X_{obs, 20}^t - X_{obs, 8}^t) \quad (3)$$

式中: ME_{CLDAS} 为站点CLDAS产品当日20:00的土壤湿度与8:00的土壤湿度的平均误差; $X_{CLDAS, 20}^t$ 指CLDAS产品在 t 日20:00的土壤湿度数据; $X_{CLDAS, 8}^t$ 指CLDAS产品在 t 日8:00的土壤湿度数据。 ME_{obs} 为站点实测数据当日20:00的土壤湿度与8:00的土壤湿度的平均误差。

针对82个站点的土壤质地以及田间持水量存在差异, 土壤单位体积含水量 θ_v 并不能良好地反映土壤墒情, 以土壤相对湿度作为表示土壤干旱的指数, 计算公式为:

$$R_{sm} = \frac{w}{f_c} \times 100\% \quad (4)$$

② 中国气象数据共享网: <http://data.cma.cn>.

$$w = \frac{\theta_v}{\rho} \quad (5)$$

式中: R_{sm} 为土壤相对湿度 (%); w 为土壤重量含水量 (%); θ_v 为土壤体积含水量 (g/cm^3); ρ 为土壤容重 (g/cm^3); f_c 为土壤田间持水量 (%).

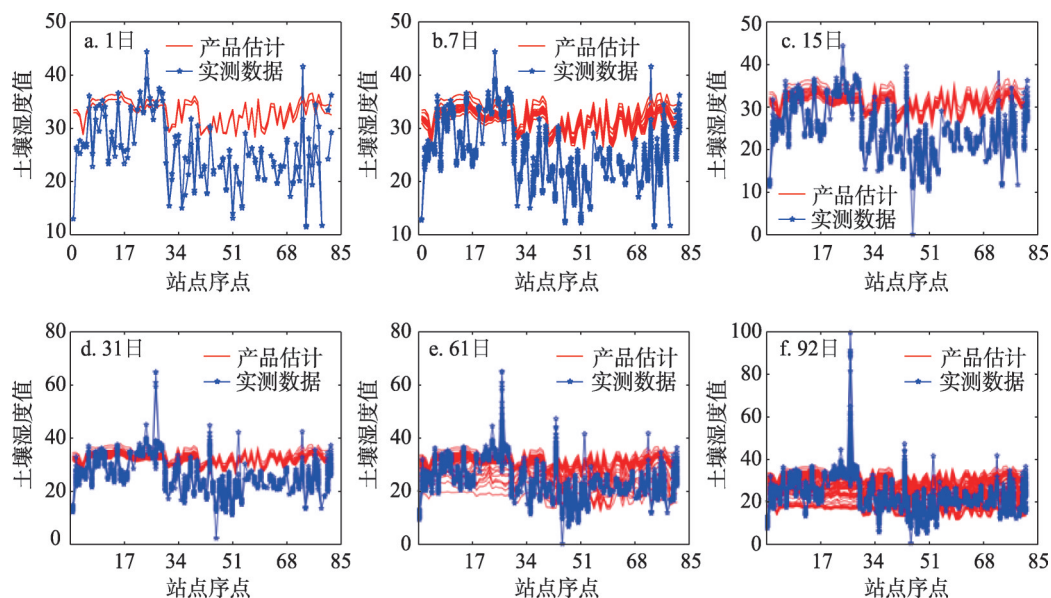
2 结果分析

2.1 CLDAS产品的评估

综合土壤湿度研究的国内外进展, 结合站点观测数据从时间、空间对CLDAS土壤湿度产品开展评估, 时间以当日8:00和20:00两个时刻分析土壤湿度的变化, 空间对比站点实际信息分析空间差异性。CLDAS产品数据时间序列为2013年10月1日至2013年12月31日^③, 每日含8:00和20:00两个固定时段, 时间长度为92 d, 时间序列的长度为184。利用ArcGIS的NetCDF工具箱, 提取得到了监测站点所在栅格的土壤湿度0~10 cm数据。实测数据中的0值代表缺测数据。

(1) 时间变异评估

对CLDAS产品与站点观测数据, 分别以1日(8:00、20:00)、7日(8:00、20:00)、15日(8:00、20:00)、31日(8:00、20:00)、61日(8:00、20:00)、92日(8:00、20:00)做累计对比(图2)。结果显示CLDAS产品与站点观测数据呈现良好的一致趋势, 且除个别站点外, CLDAS产品一般略高于实测数据。61日累计对比时发现, 相比之前1日、7日、15日、31日累计的CLDAS产品数据变化较大。故对CLDAS产品分成10月、11月和12月三部分分别对比分析。



注: 红线代表8:00、20:00的逐日数据。

图2 研究时间内CLDAS产品估计与实测累日对比

Fig. 2 The comparison of CLDAS products with observation data day by day

③ 数据来源于中国气象科学数据共享服务网: <http://cdc.cma.gov.cn:8081/home.do>.

10月(图3)的CLDAS产品波动较小,8:00与20:00的产品估计相差较小,与站点观测数据整体具有明显的一致变化趋势,除顺义的几个站点外,产品估计略高于站点的观测数据。11月(图4)前期,CLDAS产品波动比较小,11月底开始8:00与20:00的产品估计相差较大,且8:00的产品估计略高于20:00。这与2013年11月26日最高气温降为0℃比较吻合,说明CLDAS产品在0℃以下出现明显的波动。12月(图5)起8:00的产品估计和20:00的存在较大的差异性,这与气温的变化有关。说明CLDAS产品估计基于陆面模式CLM在实际的北京市区域尺度模拟时,对于气温0℃以下时间段的模拟存在较大偏差。

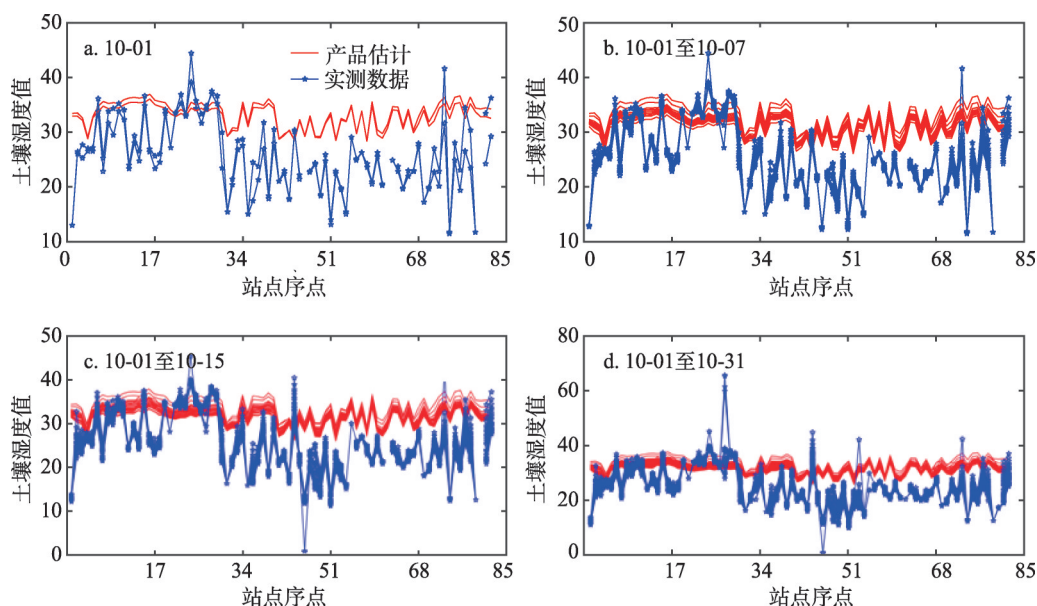


图3 10月份CLDAS产品估计与实测累日对比

Fig. 3 The comparison of CLDAS products with observation data of October

从机理上分析,由于选取研究时段内含有土壤封冻期,观测仪器采集的土壤湿度数据,影响了模拟结果与观测的对比,造成了产品与观测的差异。其次,由于产品分辨率较低,参数未根据不同区域的实际情况进行分析造成土壤空间不匹配问题,也会造成产品与观测的差异^[18]。

(2) 空间变异评估

各站点CLDAS产品与站点观测数据的RMSE如图6,图中纵轴代表二者的RMSE,横轴为站点序号。对比RMSE结果显示,站点27北郎中的均方根误差较大,其他大部分站点的均方根误差在10附近变化,这与CLDAS产品数据偏高有关。另外分别分析8:00与20:00两个不同时刻的RMSE,得出海淀(4~5)、大兴(12~18)、顺义(19~29)等区县20:00的RMSE高于8:00的RMSE。

经过对站点所在区县的CLDAS产品与实测数据之间的误差统计分析可知,大部分区县站点的CLDAS产品估计均高于站点观测数据,只有顺义的站点存在相反的情况,即CLDAS产品估计低于站点观测数据。为了更好地描述各区县的CLDAS产品与实测数据偏差情况,分别对当日20:00和8:00计算其平均误差ME,结果见表1。对比CLDAS数

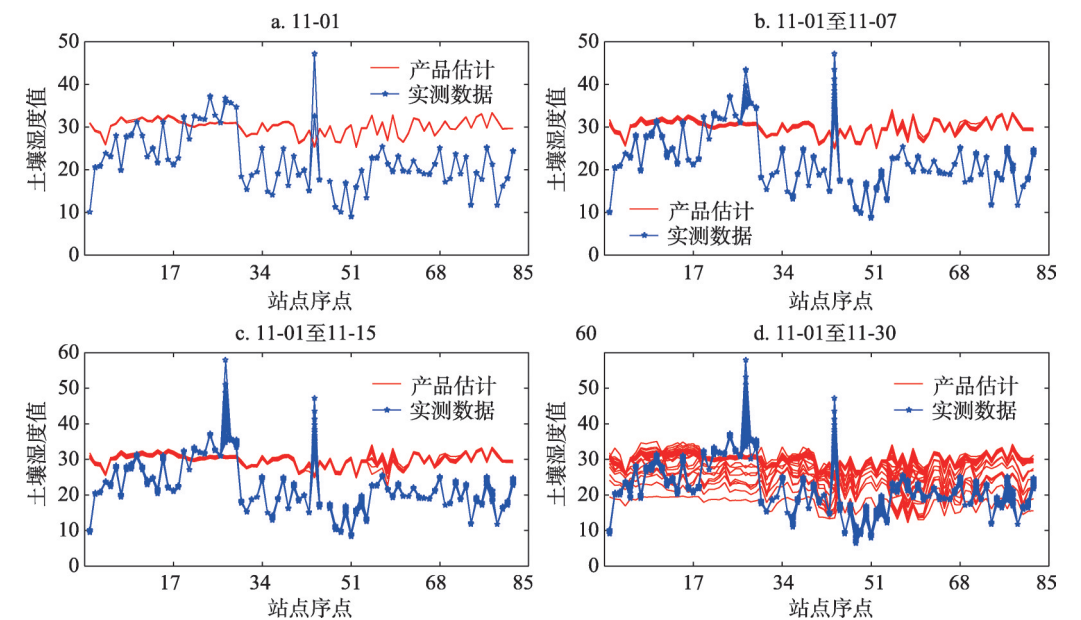


图4 11月份CLDAS产品估计与实测累日对比

Fig. 4 The comparison of CLDAS products with observation data of November

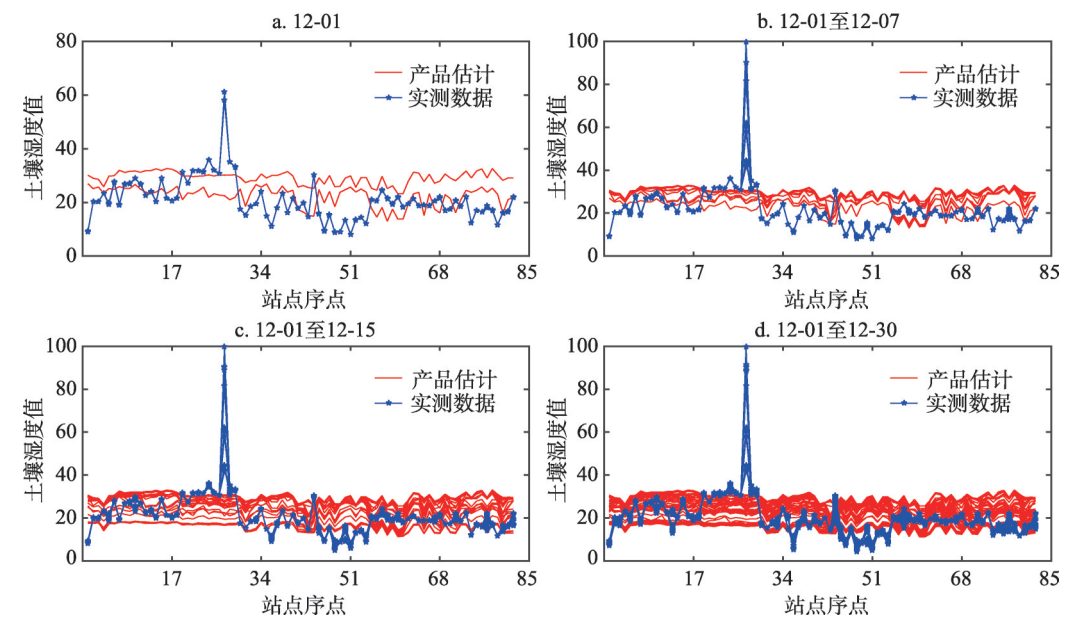


图5 12月份CLDAS产品估计与实测累日对比

Fig. 5 The comparison of CLDAS products with observation data of December

据与实测数据平均误差，结果显示，CLDAS产品在0℃之前比10月的平均误差与实测值的平均误差更吻合；而在0℃之后，CLDAS产品的平均误差远大于实测值的平均误差。

(3) 日变化特征

通过以上分析可知8:00的CLDAS产品与20:00的CLDAS产品存在较大的差异性，

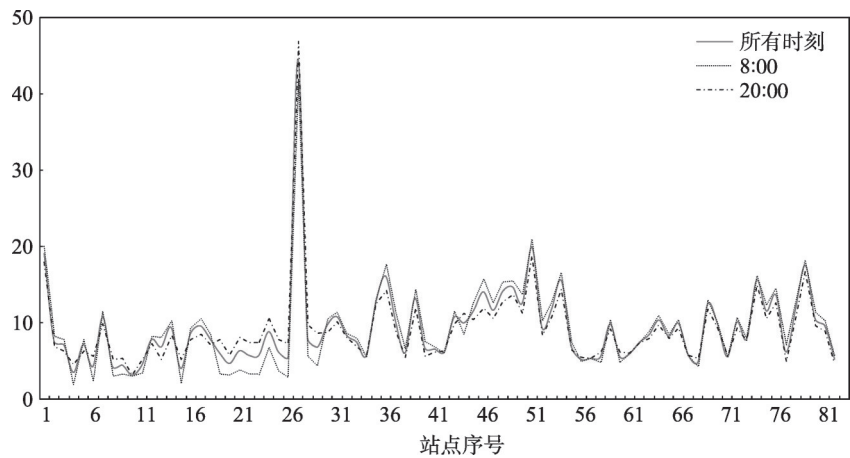


图6 各站点CLDAS产品与站点观测数据的RMSE

Fig. 6 The RMSE of CLDAS product and observation data of each site

并与气温的变化有关，0℃以下二者差异性更明显。在研究时间范围内土壤湿度随着时间不断变化，对此构建相邻时刻的关系图（图7）。结果显示，整体而言，不区分8:00和20:00时刻的土壤湿度，其相邻时刻的关系不具有明显特征，这与CLDAS产品0℃以下变化波动明显有关。10月的CLDAS产品相邻时刻的关系呈现两条直线，8:00土壤湿度与前一日8:00的存在线性关系，与前一日20:00的关系不大。同样地，20:00的土壤湿度与前一天20:00的存在着一定的线性关系，而与当日8:00关系不大。11月的CLDAS产品相邻时刻的关系有以下特点：8:00对应时刻的土壤湿度集聚于直线附近，20:00对应时刻的土壤湿度大部分集聚与直线附近，但仍有较多散落点在直线两旁。12月的CLDAS产品相邻时刻的线性关系相比10月、11月较不明确，这与CLDAS产品0℃以下变化波动明显有关。整体而言，如果将CLDAS产品的土壤湿度分成8:00和20:00两种，其相邻时刻仍呈现比较明显的线性关系，有必要分别对8:00和20:00的数据进行研究。

相关文献研究表明，傍晚起土壤中的水蒸汽出现冷凝，浅层土壤含水量略有增加，深层存在一定的滞后性^[19]。土壤湿度的日变化是由水分运移导致的，水分主要来自对气态水的凝结和吸附作用，而水汽运动的方向受温度梯度的驱动。因此在白天，地表温度高于空气温度和较深层地温，水汽在向上蒸散的同时也由地表流向土壤内部，土壤内部含水量增加；在夜晚地表温度低于深层地温，水汽则由土壤内部流向地表，土壤内部含

表1 各区县站点当日20:00与8:00土壤湿度 平均误差比较				
Table 1 The average error of soil moisture at 20 o'clock and 8 o'clock in each district				
区县	实测	10月	0℃之前	0℃之后
朝阳	0.10	0.15	0.14	-6.18
丰台	-0.07	0.50	0.45	-6.70
海淀	0.09	0.29	0.24	-6.38
通州	0.13	0.43	0.31	-7.33
大兴	0.07	0.40	0.01	-8.62
顺义	0.06	0.31	0.16	-6.83
房山	0.06	0.38	0.19	-7.77
门头沟	0	0.41	-0.12	-6.89
昌平	0.06	0.32	0.23	-6.27
延庆	0.07	0.25	-1.07	-5.97
怀柔	0.07	0.29	-0.22	-6.15
密云	0.01	0.28	0.12	-6.53
平谷	0.07	0.24	0.15	-6.89

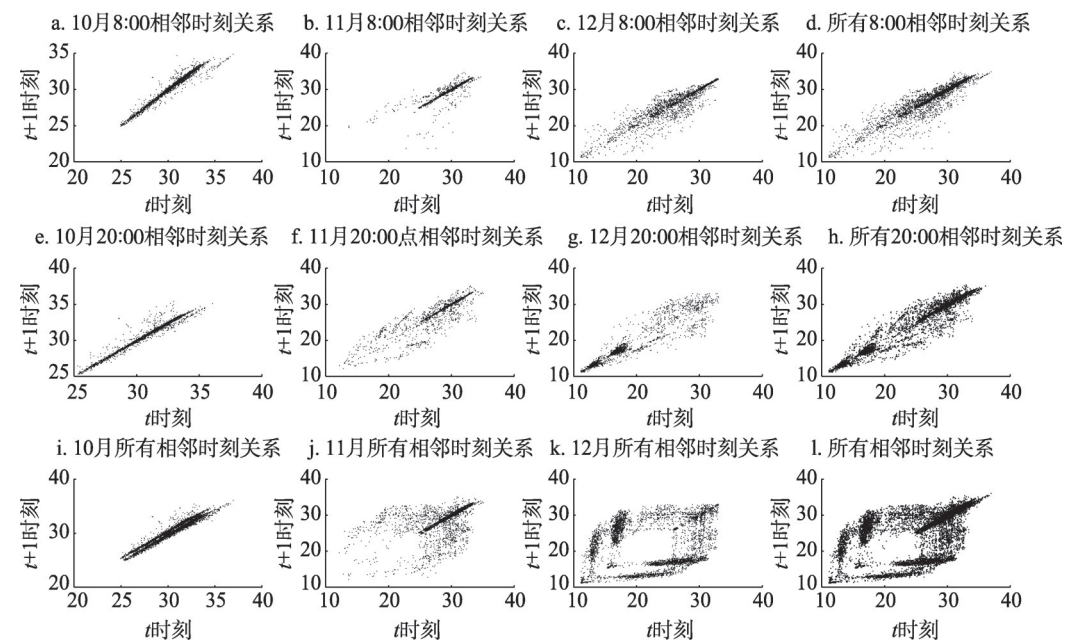


图7 CLADS产品数据相邻时刻关系

Fig. 7 The relation between CLADS product data with that of the previous day

水量降低^[20]。对比站点观测数据可知20:00的土壤湿度一般高于8:00的土壤湿度。但对CLDAS产品两个时刻统计分析发现，在10月CLDAS产品20:00的土壤湿度高于8:00的土壤湿度，在11月底（0℃以下）开始发生差异性发生显著性变化。

2.2 土壤湿度时空变化

对于缺测数据，用CLDAS模拟状态作为伪观测值，与实际的观测值构成一个伪观测序列。

结合站点实测的土壤容重、田间持水量等地表参数计算土壤相对湿度，分别从时间、空间角度来分析变异特征，探讨研究时间内北京市土壤相对湿度的当日和逐日变异特征，以及土壤墒情空间变异特征。

通常以20 cm土壤相对湿度作为干旱指数分析的标准，受制于现有北京市范围内CLDAS产品深层数据与表层完全相同的条件，故选取10 cm土壤相对湿度来表征干旱指数，其划分标准参考表2。

2.2.1 时间差异分析

对于北京市土壤墒情的时空变异主要从当日和逐日两个方面进行分析，其中当日主

表2 土壤相对湿度与干旱指数划分^[12]

Table 2 The division by soil relative moisture and drought index

干旱类型	土壤相对湿度范围	干旱影响程度
无旱	>60%	地表湿润或正常
轻旱	50%~60%	地表蒸发量小，近地表空气干燥
中旱	40%~50%	土壤表面干燥，地表植物叶片有萎蔫出现
重旱	30%~40%	干土层较厚，地表植物萎蔫，叶片干枯
特旱	<30%	基本无土壤蒸发，地表植物干枯、死亡

要包括8:00与20:00两个时刻,逐日差异性从2013年10月到2013年12月共92天进行分析。考虑到CLDAS产品对0℃的敏感,故将当日两个时刻差异性分析分为6个时间范围,分别是所有时长,0℃前期(2013年10月1日至2013年11月25日),后期(2013年11月26日至2013年12月31日)以及10月,11月,12月。对所有站点平均可得表3,可知随着时间变化,20:00的土壤相对湿度与8:00的差异越来越大,但都在不大于0.002的范围内。以分期前后对比,差异性更为显著。

从逐日分析上来说,11-12月北京市内无降水,已经不能满足植物蒸腾作用和蒸发的需要,土壤水分呈明显的消退趋势,北京市的土壤相对湿度在逐月降低。对比分期前后与3个月份的土壤相对湿度变化,可知在平均气温0℃附近开始变化比较明显,这与CLDAS产品估计的趋势比较接近。

2.2.2 空间差异分析

为了更加准确地分析北京市土壤相对湿度的空间变化,剔除基本不变和相差较大的两类问题站点,根据2013年10-12月的0~10 cm土壤相对湿度进行空间克里金插值结果如图8,从10月开始至12月,随着降水的减少,北京市的土壤湿度在逐渐降低,干旱范围在不断扩大,基本呈现昌平和顺义为中心的两个极点扩张与收缩。除了CLDAS产品对顺义各站点的模拟偏低之外,顺义的土壤相对湿度相比其他区较高,随着时间变化逐渐

表3 不同时间范围8:00与20:00的土壤相对湿度
Table 3 The soil relative moisture at 8 o'clock and 20 o'clock during different time ranges

时间范围	时刻	土壤相对湿度
所有时长	整体	0.3906
	8:00	0.3901
	20:00	0.3911
分期前	整体	0.4101
	8:00	0.4096
	20:00	0.4105
分期后	整体	0.3617
	8:00	0.3608
	20:00	0.3621
10月	整体	0.4247
	8:00	0.4245
	20:00	0.4250
11月	整体	0.3889
	8:00	0.3885
	20:00	0.3892
12月	整体	0.3582
	8:00	0.3573
	20:00	0.3590

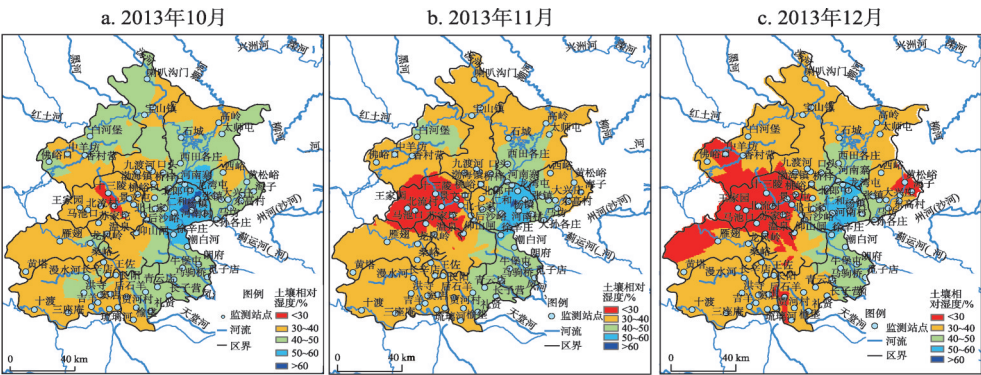


图8 北京市土壤相对湿度空间插值变化

Fig. 8 Spatial interpolation variation of soil relative moisture in Beijing city

降低, 但仍在轻旱范围内。由于设置站点的稀疏不同, 所剔除的问题站点中有一些典型位置不可替代, 如十渡站点, 如果结合模式模拟, 还原问题站点数据是土壤湿度同化研究的一个新问题。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 本文对CLDAS产品在北京地区的适用性做了评估, 对比分析了CLDAS产品与观测数据在时空变化上的差异, 并用均方根误差判别了CLDAS产品与观测数据的一致性, 得出在气温 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时, CLDAS产品能为北京地区提供有效的时空连续的土壤湿度数据, 而当气温降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时, CLDAS产品存在较大偏差。

(2) 结合站点观测与CLDAS产品, 对北京市10-12月土壤相对湿度分析可知, 20:00的土壤相对湿度高于8:00的土壤相对湿度; 当气温下降到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 土壤相对湿度逐渐下降, 且20:00与8:00的土壤相对湿度间的差距增大; 随时间推移, 干旱范围以昌平为中心点逐渐扩大。因此, 站点观测和模式模拟的结合能够更全面地掌握土壤墒情变异特征, 为防旱抗旱工作提供理论支撑。

3.2 讨论

运用观测的82个站点的土壤湿度资料检验了CLDAS产品效果; 结合观测资料和CLDAS产品, 揭示北京市土壤湿度时空变化情况。结果表明:

(1) 就CLDAS产品效果而言, CLDAS产品0~10 cm土壤湿度数据与实测数据具有良好的-致性。通过对比分析CLDAS产品和站点观测两种土壤湿度数据, 可知北京市2013年10月1日至2013年12月31日范围内CLDAS产品具有以下特点: CLDAS产品基本与观测数据具有一致变化的趋势, 除顺义外CLDAS产品均高于观测数据。因此, CLDAS产品可提供较好的土壤湿度模拟结果, 对区域干旱检测具有重要意义。孙小龙等^[11]以内蒙古地区为研究区, 对CLDAS的土壤湿度和降水数据进行评估, 使用土壤相对湿度法和连续无降水日数法检测2014年夏季干旱, 结果表明, CLDAS资料能够很好地再现日土壤相对湿度动态变化情况和降水落区与量级, 能够满足干旱检测需求。韩帅等^[12]针对2012年中国区域的严重干旱, 利用CLDAS产品, 并结合新的中国地表土壤水文参数数据集, 计算2012年中国区域土壤相对湿度, 根据《气象干旱等级》国家标准进行干旱检测, 结果表明, 利用土壤容重、田间持水量等信息, 结合CLDAS产品, 可实时获取时空连续的土壤相对湿度产品, 可以实现对中国区域的干旱实时监测。本文对CLDAS产品评估结果与孙小龙等^[11]、韩帅等^[12]研究结果一致。这证实了CLDAS产品的有效性。

(2) 就时空变化而言, 在时间变化上, 站点观测资料和CLDAS产品都揭示出, 当日8:00与20:00的土壤湿度差异在平均气温降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后增大; 10-12月土壤湿度呈明显的减少趋势。就空间变化而言, 10-12月, 随着降水的减少, 北京市的土壤湿度在逐渐降低, 干旱范围在不断扩大, 基本呈现以昌平和顺义为中心的两个极点扩张与收缩。土壤湿度受气温的影响, 马柱国等^[21], 王晓婷等^[22], Seneviratne^[23]等也指出气候因素中的温度和降水对土壤湿度的影响最大。其中, 各层土壤湿度与降水呈正相关关系, 与气温均为负相关关系。本文对北京市土壤湿度随气温的变化研究结果与马柱国^[21], 王晓婷等^[22], Seneviratne^[23]的研究结果一致。

CLDAS产品自身的尺度较大,对于区域内更为详细的土壤湿度空间特征分析具有一定的参考意义,辅助站点观测数据同时以CLDAS作为准确性的评价,对于获取精确的土壤湿度空间分布十分重要。一般而言,实测数据准确可信,但由于自动化设施维护成本以及不可控因素的发生导致监测异常的情况;就不同地区而言,土壤质地、植被类型、地形等因素的差异也会导致土壤湿度的差异,因而,需要有足够代表性的站点才能反映整个区域土壤水分的动态变化^[24]。土壤湿度构建覆盖率高和分布合理的监测站网,能大幅提升实时掌握旱情状况的机动能力,并及时预报墒情的发展趋势,作用于防旱抗旱、应对减灾决策,防止或减轻旱情旱灾对农林牧等造成的经济损失。本文分析得出,当气温降至0℃以下时,CLDAS产品在北京地区出现较大偏差。韩帅等^[12]研究表明,在冬季,北方大部分地区地表为冰雪冻土,地表土壤水文参数空间变异性较大,可通过增加观测站点,更为准确地获取土壤水文参数,提高干旱监测能力。因此,在基于提高旱情监测数据采集站点的高覆盖率的基础上结合时空连续分布的CLDAS产品是获取行政区域尺度下的准确可靠连续的土壤湿度数据的有效途径,针对自动化设备所存在的不确定性开展不准站点的同化工作,对于获取北京市土壤墒情的时空分布特征具有重要的现实应用意义。

参考文献(References):

- [1] 郭维栋,马柱国,姚永红.近50年中国北方土壤湿度的区域演变特征.地理学报,2003,68(S1): 83-90. [GUO W D, MA Z G, YAO Y H. Regional characteristics of soil moisture evolution in northern China over recent 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 68(S1): 83-90.]
- [2] 兰鑫宇,郭子祺,田野,等.土壤湿度遥感估算同化研究综述.地球科学进展,2015,30(6): 668-679. [LAN X Y, GUO Z Q, TIAN Y, et al. Review in soil moisture remote sensing estimation based on data assimilation. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(6): 668-679.]
- [3] REICHLER R H, ENTEKHABI D, MCLAUGHLIN D B. Downscaling of radio brightness measurements for soil moisture estimation: A four dimensional variational data assimilation approach. *Water Resources Research*, 2001, 37(9): 2353-2364.
- [4] WALKER J P, HOUSER P R. A methodology for initializing soil moisture in a global climate model: Assimilation of near-surface soil moisture observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D11): 11761-11774.
- [5] KERR Y H. Soil moisture from space: Where are we?. *Hydrogeology Journal*, 2007, 15(1): 117-120.
- [6] ROBOCK A, VINNIKOV K Y, SRINIVASAN G, et al. The global soil moisture data bank. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(6): 1281-1300.
- [7] 李得勤,段云霞,张述文.土壤湿度观测、模拟和估算研究.地球科学进展,2012,27(4): 424-434. [LI D Q, DUAN Y X, ZHANG S W. Soil moisture measurement and simulation: A review. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(4): 424-434.]
- [8] 李新,黄春林,车涛,等.中国陆面数据同化系统研究的进展与前瞻.自然科学进展,2007,17(2): 163-173. [LI X, HUANG C L, CHE T, et al. Progress and prospect of land surface data assimilation system in China. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(2): 163-173.]
- [9] SHI C X, XIE Z H, QIAN H, et al. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(9): 1430-1440.
- [10] 鱼腾飞,冯起,司建华,等.遥感结合地面观测估算陆地生态系统蒸散发研究综述.地球科学进展,2011,26(12): 1260-1268. [YU T F, FENG Q, SI J H, et al. Estimating terrestrial ecosystems evapotranspiration: A review on methods of integrating remote sensing and ground observations. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(12): 1260-1268.]
- [11] 孙小龙,宋海清,李平,等.基于CLDAS资料的内蒙古干旱监测分析.气象,2015,41(10): 1245-1252. [SUN X L,

- SONG H Q, LI P, et al. Analysis of drought monitoring in inner Mongolia based on CLDAS data. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(10): 1245-1252.]
- [12] 韩帅, 师春香, 林泓锦, 等. CLDAS 土壤湿度业务产品的干旱监测应用. *冰川冻土*, 2015, 37(2): 446-453. [HAN S, SHI C X, LIN H J, et al. The CLDAS soil moisture operation products applied to monitor soil drought. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(2): 446-453.]
- [13] 王红瑞, 林欣, 刘琼, 等. 基于系统聚类的北京气温变化过程遍历特征分析. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(2): 193-200. [WANG H R, LIN X, LIU Q, et al. Ergodicity analysis based on system clustering for temperature variation process of Beijing. *System Engineering Theory & Practice*, 2010, 30(2): 193-200.]
- [14] 徐宗学, 张玲, 阮本清. 北京地区降水量时空分布规律分析. *干旱区地理*, 2006, 29(2): 186-192. [XU Z X, ZHANG L, RUAN B Q. Analysis on the spatiotemporal distribution of precipitation in the Beijing region. *Arid Land Geography*, 2006, 29(2): 186-192.]
- [15] 王红瑞, 刘昌明, 毛广全, 等. 水资源短缺对北京农业的不利影响分析与对策. *自然资源学报*, 2004, 19(2): 160-169. [WANG H R, LIU C M, MAO G Q, et al. Negative effects of water scarcity on agriculture in Beijing and countermeasures. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(2): 160-169.]
- [16] 陈午, 许新宜, 王红瑞, 等. 基于改进序关系法的北京市水资源可持续利用评价. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 164-176. [CHEN W, XU X Y, WANG H R, et al. The evaluation of water resources sustainable utilization in Beijing based on improved rank correlation analysis. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(1): 164-176.]
- [17] 姚志龙, 赵爱萍. 陇东地区主要土类土壤质地及其与水分常数相关性研究. *土壤通报*, 2011, 42(2): 280-284. [YAO Z L, ZHAO A P. The relativity of main kinds of soil texture and moisture constant in Longdong area. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(2): 280-284.]
- [18] 韩帅, 师春香, 姜立鹏, 等. CLDAS 土壤湿度模拟结果及评估. *应用气象学报*, 2017, 28(3): 369-378. [HAN S, SHI C X, JIANG L P, et al. The simulation and evaluation of soil moisture based on CLDAS. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(3): 369-378.]
- [19] 范爱武, 刘伟, 王崇琦. 土壤温度和水分子日变化实验. *太阳能学报*, 2002, 23(6): 721-724. [FAN A W, LIU W, WANG C Q. Experimental study on the daily changes of soil temperature and water content. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2002, 23(6): 721-724.]
- [20] 李德帅, 王金艳, 王式功, 等. 陇中黄土高原土壤水分变化特征及其机理分析. *中国沙漠*, 2014, 34(1): 140-147. [LI D S, WANG J Y, WANG S G, et al. Soil moisture characteristics and analysis on its moving mechanism in Central Gansu, a part of the Semi-arid Loess Plateau. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(1): 140-147.]
- [21] 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系. *气象学报*, 2000, 58(3): 278-287. [MA Z G, WEI H L, FU C B. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over East China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(3): 278-287.]
- [22] 王晓婷, 郭维栋, 钟中, 等. 中国东部土壤温度、湿度变化的长期趋势及其与气候背景的联系. *地球科学进展*, 2009, 24(2): 181-191. [WANG X T, GUO W D, ZHONG Z, et al. Long term trends of soil moisture and temperature change in East China in relationship with climate background. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(2): 181-191.]
- [23] SENEVIRATNE S I, CORTI T, DAVIN E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth Science Reviews*, 2010, 99(3): 125-161.
- [24] 张蕾, 吕厚荃, 王良宇, 等. 中国土壤湿度的时空变化特征. *地理学报*, 2016, 71(9): 1494-1508. [ZHANG L, LU H Q, WANG L Y, et al. Spatial-temporal characteristics of soil moisture in China. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1494-1508.]

Soil moisture in Beijing based on site observation and model simulation

QIN Dao-qing¹, ZHAO Yan¹, WANG Hong-rui¹, DENG Cai-yun¹, ZHAO Yong²

(1. College of Water Science, Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: It is of great significance to accurately and objectively evaluate the spatial and temporal variation characteristics of soil moisture in studies on the biochemical evolution process of the earth surface. Thus, the combination of model simulation and site observation is necessary to studying water and energy recycling at a regional scale especially. In this paper, based on daily soil surface (0-10 cm) moisture data of 82 monitoring stations in Beijing and GLDAS soil moisture products, the accuracy and consistency of CLDAS was evaluated and the spatio-temporal variability of soil moisture content in Beijing was examined. The root mean square error (RMSE) was used to identify the consistency of CLDAS products and observation values. Specifically, we compared and analyzed the accumulated values of CLDAS products and observation data in 1 day (8:00, 20:00), 7 days (8:00, 20:00), 15 days (8:00, 20:00), 31 days (8:00, 20:00), 61 days (8:00, 20:00), and 92 days (8:00, 20:00). The results showed that: (1) Although the data from CLDAS products were generally slightly higher than the measured data, CLDAS products and site observation data show a good consistency that RMSE in various countries was almost around 10; (2) CLDAS products could reflect the distribution characteristics of soil moisture in Beijing when the temperature was higher than 0 °C, while there existed a bias in GLDAS products when the temperature was lower than 0 °C; (3) Based on drought identification based on soil moisture data, we found that the drought area in Beijing was gradually expanding and one extreme drought center was spreading from Changping (soil relative moisture content < 30%) to other districts. Meanwhile, the other area with high soil relative humidity (soil relative moisture content > 50%), centered in Shunyi District, gradually decreased at a spatial scale; (4) In terms of temporal scale, soil moisture in Beijing gradually decreased with the decrease of precipitation that soil humidity at 20:00 was all higher than that at 8:00 in the same day ($ME_{obs} > 0$). When the temperature was lower than 0 °C, soil humidity at 20:00 and 8:00 became significantly different. These conclusions would help us make effective use of GLDAS products in soil moisture related studies and would help us know the spatial and temporal variability of soil moisture content in Beijing.

Keywords: soil moisture; CLDAS; site observation; model simulation; Beijing