

文章编号: 1008-2786-(2016)3-257-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000126

不同土壤湿度资料在太行山区的对比

王飞宇^{1,2}, 占车生^{1*}, 贾仰文³, 牛存稳³, 胡实¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 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: 利用高时空分辨率地面气象数据驱动陆面模式 CLM3.5 得到的土壤湿度资料, 结合 ERA40 和 NCEP-2 再分析资料, 系统对比分析了 1980—2008 年太行山区生长季(5—9 月)表层(0~10 cm)土壤湿度时空变化, 并利用站点观测资料(1993—2008 年)对三套资料在太行山区的适应性进行了验证和比较。结果表明: CLM3.5 资料和 ERA40 资料能较好地描述太行山区土壤湿度的年际和年内变化特征, 且两者的土壤湿度呈现相对一致的“北干南湿”格局, 其中 CLM3.5 资料土壤湿度的时空变率高于 ERA40 资料; 而 NCEP-2 资料对土壤湿度时空分布的描述效果较差。太行山区土壤湿度与降水和相对湿度呈显著的正相关, 与气温呈显著的负相关, 实际条件下土壤湿度与气候变化的相互作用机制更加复杂。

关键词: 土壤湿度; 太行山; 再分析数据; 资料对比

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

土壤湿度作为陆面水文过程的综合指标之一, 反映局地的水文循环及气候的变化状况。它影响地表反照率、土壤热容量、蒸发过程等, 进而影响地表感热、潜热、辐射通量, 甚至局地天气变化。研究表明, 土壤湿度在气候变化中的作用仅次于海温^[1], 而其在陆地上的作用甚至超过海温^[2]。

太行山区作为华北平原的重要水源补给区^[3], 其土壤水分变化对周边人类社会的生产生活有着重要影响。前人在此区域已开展了诸多关于土壤水分的观测及试验研究, 如张秋英^[4]、朱奎^[5]、Song 等^[6]分别对位于太行山低山丘陵区的地带生态试验站以及崇陵流域开展工作, 分析了土壤水分的动态变化规律及其对降水、地表覆盖、坡度、土壤质地的响应。基于观测站点或试验小区的实测研究, 能够较好地说明局地尺度土壤水分的变化机制, 但不能充分代表太行山区域尺度土壤水分长期动态变化规律^[2],

因此, 获取覆盖全区域的长时间序列土壤湿度资料至关重要。

由于土壤湿度的时空变率非常大, 大范围的观测难以实现, 而山区的复杂地形又加剧了土壤湿度观测工作的难度。在这种背景下, 土壤湿度的模拟得到了广泛关注和发展。陆面过程模式作为数值模拟的一种有效方法, 在陆面状态变量的时空变化研究中进行了大量应用^[7-9], 如熊明明等^[7]利用 CLM3.0 模拟中国区域土壤湿度的时空变化, 结果表明模拟值较观测值偏高, 但模式能较好地反映中国土壤湿度的空间分布型。此外, 再分析资料由于其覆盖广、时间长等优点, 也在气候诊断、陆面模式验证等方面得到了广泛的应用^[8-10]。许多学者对这些资料在我国土壤湿度的研究进行了一些卓有成效的工作^[14-16], 例如: 张文君等^[8]汇总了国际上运用较广泛的四套土壤湿度资料(ERA40 和 NCEP/NCAR 再

收稿日期(Received date): 2015-10-06; 改回日期(Accepted): 2015-11-16。

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划(2015CB452701), 国家自然科学基金项目(41571019, 51209224, 41271003)资助。

[Supported by National Key Basic Research Development Program of China (973Program), No. 2015CB452701; National Natural Science Foundation of China, No. 41571019, 51209224 and 41271003.]

作者简介(Biography): 王飞宇(1992-), 女, 陕西西安人, 硕士, 主要从事流域水循环模拟研究。[Wang Feiyu (1992-), female, born in Xi'an, Shanxi, Master candidate, major in water cycle simulation.] E-mail: wangfy.14s@igsrr.ac.cn

* 通信作者(Corresponding author): 占车生(1975-)。[Zhan Chesheng(1975-)] E-mail: zhancs@igsrr.ac.cn

分析资料、全球土壤湿度计划资料(GSWP2)以及一套通用陆面模式 CLM 产生的土壤湿度资料),并与中国区域的土壤湿度观测资料进行了比较,结果表明四套资料基本能够揭示土壤湿度的空间分布。Liu 等^[9]利用五套再分析资料(ERA-Interim、MERRA、JRA-25、CFSR 和 NCEP/NCAR-R1 再分析资料)分析了中国东部地区春季土壤湿度的变化情况,结果表明:中国东部春季土壤湿度由东南向西北递减,MERRA 资料对土壤湿度的气候态描述较好,而 ERA-Interim 资料能较好地揭示土壤湿度的年际变化特征。以上研究证明了利用陆面模式和再分析资料进行中国范围内土壤湿度变化研究的可行性,其中常用的再分析资料包括欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA40 资料^[10]和美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的 NCEP-2 资料^[11-12]。但以往研究仍然基于大尺度范围,并未针对性地将较小尺度的山地作为研究对象,因此无法验证土壤湿度资料在山区的适用性。

本研究利用中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集驱动一个发展较为完善的陆面模式 CLM3.5,得到 1980—2008 年太行山区土壤湿度模拟资料,结合 ERA40、NCEP-2 再分析资料,对比分析了我国太行山区生长季(5—9 月)表层(0~10 cm)土壤湿度时空变化,利用站点观测土壤湿度资料(1993—2008 年)对三套资料在太行山区的适用性进行检验和比较,并初步分析了土壤湿度变化与气候要素的关系。

1 研究区概况

太行山区(35.05~41.31°N,111.98~116.34°E,图 1)位于我国华北平原西侧,属我国两大地势阶梯的过渡地带,处于湿润区半湿润区与西部半干旱区干旱区的分界,属暖温带大陆季风气候,雨热同期,年降水量在 600 mm 左右,季节分布极为不均,河流有明显洪水期。年平均气温 10℃,平均最低气温 -10℃,平均最高气温 28℃。土壤贫瘠,砾石含量高,水分短缺,农林系统功能不强。研究区总面积 120 743 km²,海拔 50~3 043 m。

2 资料与方法

2.1 观测资料

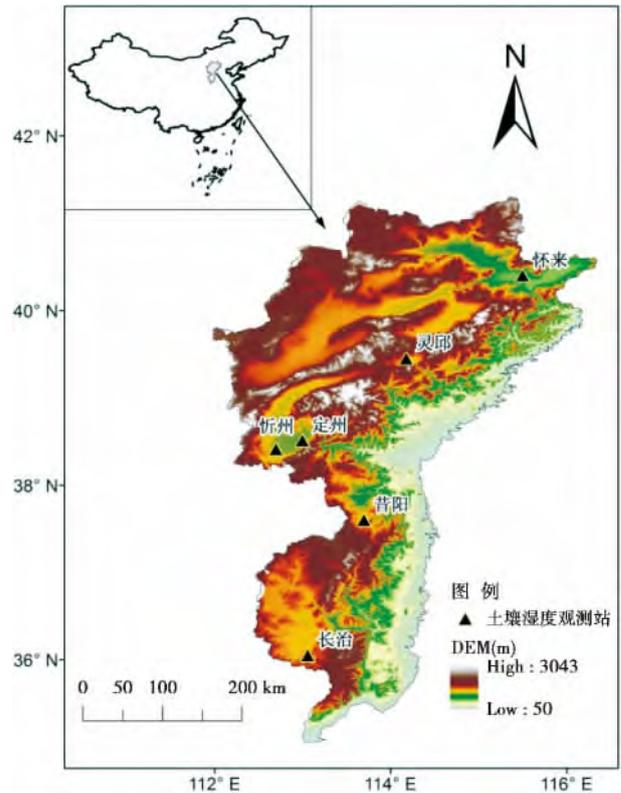


图 1 太行山区及土壤湿度站点分布图

Fig. 1 Locations of the Taihang Mountains and soil moisture observation station

本研究中使用的观测资料为国家气象信息中心提供的中国区域站点土壤湿度数据,大部分观测始于 20 世纪 80 年代,观测每 10 d 进行一次(通常在每月 8 日、18 日和 28 日),基本反映了每月各旬的特征,冬季在冻土地区不进行观测。尽管该套资料的时空分辨率较低,但这是目前观测时间最长,覆盖范围最广的一套站点土壤湿度观测资料^[13],其中部分站点资料被 Robock 等^[14]纳入全球土壤湿度数据库,被广泛应用于陆气耦合模式等的模拟检验中。太行山区内分布 6 个站点(图 1),资料范围为 1993—2008 年。

土壤湿度的测定利用土钻分层取样,取样深度位于 0~1 m,垂向上分为 5 层,分别为 10 cm、20 cm、50 cm、70 cm 和 100 cm。利用烘干称重法(105℃)测定并计算土样的质量含水量 w , $w = \frac{m_2 - m}{m}$,其中 w 为土壤质量含水量(%), m^2 为湿土质量(g), m 为干土质量(g)。

由于 CLM3.5 模式模拟结果为土壤体积含水量,而观测资料为土壤重质量含水量,因此需要根据

以下公式将观测的土壤质量含水量转换为土壤体积含水量: $q = w \times \rho$, 其中 q 为土壤体积含水量 ρ 为土壤容重。

此外,本文还使用了“中国地面气候资料月值数据集”中1980—2010年的降水、气温、相对湿度和风速资料。

2.2 陆面模式与强迫资料

2.2.1 模式与算法

本文选取 CLM3.5 模式,以中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集作为气象输入,以模式自带的陆面特性参数数据作为地表数据输入,其他物理参数采取模式默认值,对太行山区1980—2008年的土壤湿度进行离线(offline)模拟。

CLM3.5 (Community Land Model version 3.5) 模式是 NCAR 发布的陆面过程模式,是在 CLM3.0 的基础上对陆面参数和水文过程加以改进,引进并完善了径流、地下水、碳循环和冻土过程,其具体生物物理过程包括太阳辐射、长波辐射与植被冠层和土壤的相互作用,冠层和土壤的势能及湍流通量,土壤和雪层的热量传输,冠层、土壤与雪层的水文过程,以及气孔的生理机能和光合作用^[15]。这些过程被描述为地表反照率、辐射通量、动量、感热与潜热通量、土壤与雪的温度、水文过程、气孔阻抗与光合作用、湖模型、河流传输模型以及可挥发性有机物等不同的参数化方案^[16]。土壤湿度的计算属于水文过程的一部分,系统满足如下的水量平衡方程:

$$\begin{aligned} \Delta W_{can} + \Delta W_{sno} + \sum_{i=1}^N (\Delta w_{liq\ i} + \Delta w_{ice\ i}) \\ = (q_{rain} + q_{sno} - E_v - E_g - q_{over} - q_{drai} - q_{rgwl}) \Delta t \end{aligned} \quad (1)$$

其中 ΔW_{can} 为植被冠层水的变化量, ΔW_{sno} 为雪水变化量, $\Delta w_{liq\ i}$ 为土壤水变化量, $\Delta w_{ice\ i}$ 为土壤冰变化量。 q_{rain} 为液态降水, q_{sno} 为固态降水, E_v 为植被蒸散发, E_g 为地面蒸发, q_{over} 为地表径流, q_{drai} 为地下径流, q_{rgwl} 为冰川、湿地、湖泊类型中产生的径流, N 为土壤层数, Δt 为时间步长。

各变量由不同但彼此联系参数化方案得到,其中土壤湿度的计算方法如下:

$$\theta_i = \frac{w_{liq\ i}}{\Delta z_i \rho_{liq}} + \frac{w_{ice\ i}}{\Delta z_i \rho_{ice}} \quad (2)$$

其中 Δz_i , ρ_{liq} , ρ_{ice} 分别为第 i 层的土层厚度、液态水密度和冰密度。详细的物理过程见文献^[25-26]。

2.2.2 强迫数据

利用中国科学院青藏高原研究所制作的中国区

域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集^[17]构建大气驱动场,以驱动陆面模式 CLM3.5,该驱动数据集以 Princeton 气候数据、GLDAS 资料、GEWEX - SRB 辐射资料,以及 TRMM 降水资料为背景场,融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成。其空间分辨率为 0.1° , 时间分辨率为 3 h,包含近地面气温、近地面气压、近地面空气比湿、近地面全风速、地面向下短波辐射、地面向下长波辐射、地面降水率等 7 个要素。

2.3 再分析资料

土壤湿度再分析资料近年来得到了广泛应用,各种资料依其所采用的陆面模式、强迫数据及同化技术不同而有所差异。目前全球范围内使用较为广泛的再分析资料有来自欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的 ERA40 资料^[20],来自美国国家环境预报中心/国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 的第一套再分析资料^[22],及在其基础上发展的第二套再分析资料(后文简称 NCEP-2)^[18]。

ERA40 资料是在第一代 ERA15 资料基础上发展起来的,水平分辨率更高,对同温层和行星边界层的描述更加精确。其采用 TESSEL^[19] (Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land) 模式对雪盖和植被层的参数化方案等进行了改进。本文使用的 ERA40 资料为月平均值 (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/era40-mod/>),时间范围为 1957 年 9 月至 2002 年 8 月,空间分辨率为 2.5° 。

NCEP-2 资料是利用改进的预报模式和最新的同化系统,对 NCEP-1 处理过程中存在的问题进行了校正后得到的更优的全球大气再分析资料。本文使用的 NCEP-2 资料也为月平均值 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.gaussian.html>),时间范围为 1979 年 1 月至 2014 年 12 月,空间分辨率为 T62 高斯网格。

2.4 数据预处理

考虑到太行山土层稀薄,水分赋存能力较差,本研究仅对太行山区表层 (0~10 cm) 土壤湿度的时空变化进行分析。由于陆面模式 CLM3.5 资料和再分析资料采用与观测资料不同的土壤垂直分层,为了与观测进行对比,将几套土壤湿度资料双线性插值到 10 cm 深度处。此外,按照观测资料的缺测情况对土壤湿度资料做相应的缺测化处理。

双线性插值方法是气候研究中一种常用插值方法,其核心思想是将格网数据在两个方向分别进行

一次线性插值。已知函数 f 在 $Q_{11} = (x_1, y_1)$ 、 $Q_{12} = (x_1, y_2)$ 、 $Q_{21} = (x_2, y_1)$ 和 $Q_{22} = (x_2, y_2)$ 四个点的值, 想要得到函数 f 在点 $P = (x, y)$ 的值。首先 x 方向上进行插值, 得到 $R_1 = (x, y_1)$ 和 $R_2 = (x, y_2)$ 两个点的值:

$$f(R_1) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{21}) \quad (3)$$

$$f(R_2) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{22})$$

然后在 y 方向上进行插值, 得到 P 点的值:

$$f(P) \approx \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} f(R_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} f(R_2) \quad (4)$$

双线性插值的示意图如图 2 所示。

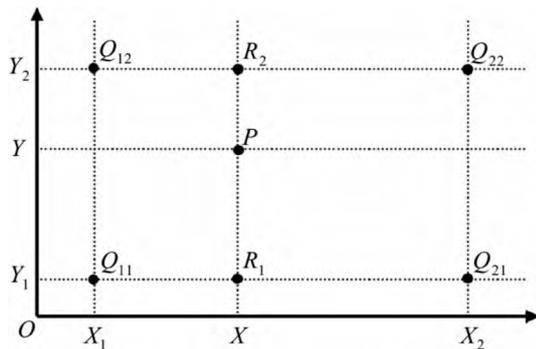


图 2 双线性插值示意图^[20]

Fig. 2 Sketch of bilinear interpolation

3 结果与分析

3.1 土壤湿度资料的验证

由于站点观测资料时空分辨率的限制, 本研究仅对 1993—2002 年太行山区生长季(5—9 月) 观测与模拟土壤湿度进行对比。1993—2002 年太行山区各站点生长季观测与模拟土壤湿度的泰勒图如图 3 所示, 在泰勒图中, 观测值被定义为在横坐标轴方向距原点一个单位的点(图 3 观测), 半径长度表示总标准差的变化幅度, 与纵坐标轴的角度表示相关系数, 距观测点的长度表示模式误差。因此模拟值距观测点的长度越短, 表示模拟值的空间分布越接近于观测值^[21]。

三套土壤湿度资料与观测资料相比, 在不同站点的一致性具有显著差异(图 3)。CLM3.5 资料与观测资料在怀来和灵邱站具有显著的空间相关性, 相关系数分别为 0.77 和 0.78, 标准差比率分别为 1.05 和 0.75, 在忻州和长治站也有较好的相关性(r

> 0.5) 标准差比率接近 0.9, 表明两套土壤湿度资料在这四个站点的年际变化特征具有较好的一致性, 而两者在其他站点没有显著的相关性。ERA40 资料与观测资料在怀来、灵邱、忻州和长治站均具有显著的空间相关性, 相关系数均超过 0.6, 其中两者在忻州站的相关系数达到 0.83, 标准差比率分别为 0.64、0.51、0.49 和 0.92, 表明 ERA40 资料与观测资料整体上具有较好的一致性, 但其土壤湿度的年际变化幅度低于观测土壤湿度。NCEP-2 资料与观测资料在各站点均没有显著相关性, 相关系数均小于 0.4, 且两者标准差差异较大。

总体上, CLM3.5 模拟资料和 ERA40 再分析资料能较好地反映大部分站点土壤湿度的年际变化特征, 其中 CLM3.5 土壤湿度的年际变率显著高于 ERA40 资料, 而 NCEP-2 再分析资料对站点土壤湿度的描述能力较差。实际上三套土壤湿度资料相比站点观测资料普遍偏高, 造成这种误差的原因众多: 观测值为在固定深度采集土样得到, 而土壤湿度的实际分布是非线性的, 用特定深度的观测值代表整层土壤湿度本身具有不确定性; 模式和再分析资料对于土壤湿度的分层与观测深度的实际分层不一致, 在换算过程中会引入误差^[22-23]; 模式模拟结果和再分析资料均为格网尺度, 而观测资料为点尺度, 在尺度转换中也可能引入误差^[24]。

为了检验三套资料对土壤湿度长期变化的描述能力, 以上述验证中与观测资料较为一致的怀来和灵邱站为代表, 对太行山区土壤湿度的年际变化和生长季内变化特征进行了对比分析。为避免不同资料之间的单位转换引入误差, 对土壤湿度观测资料、CLM3.5 模拟资料和再分析资料均进行了标准化处理。

3.1.1 土壤湿度年际变化

土壤湿度年际变化趋势如图 4 所示, 1993—2002 年怀来站土壤湿度总体上呈波动下降趋势, 观测土壤湿度下降幅度为 $-0.90 \text{ mm}^3 / (\text{mm}^3 \cdot \text{a})$, CLM3.5 资料、ERA40 资料和 NCEP-2 资料土壤湿度下降幅度分别为 -1.18 、 -0.70 和 $-1.9 \text{ mm}^3 / (\text{mm}^3 \cdot \text{a})$, 其中 CLM3.5 资料和 ERA40 资料对 1993—2001 年土壤湿度年际变化趋势的描述与观测资料具有较好的相关性, 但两者均未反映出土壤湿度在 2002 年的下降趋势。

1993—2002 年灵邱站土壤湿度呈现“湿—干—湿”的变化趋势, 其中 1993—1995 年土壤湿度显著

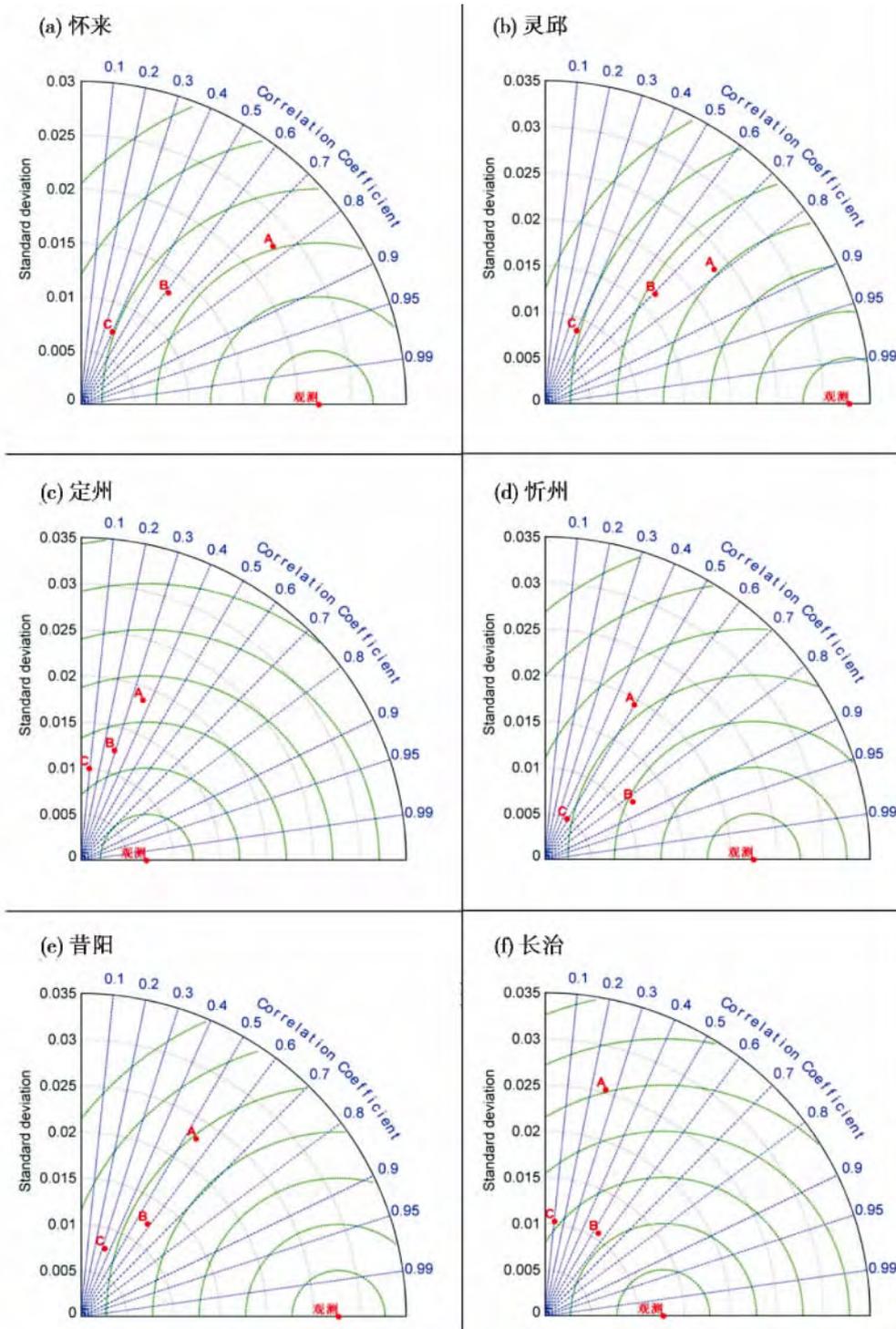


图 3 1993—2002 年生长季 0 ~ 10 m 平均观测和模拟土壤湿度的泰勒图
 (A. CLM3.5; B. ERA40; C. NCEP - 2)

Fig. 3 Taylor diagram of long-term mean annual soil moisture in the growing season (0 ~ 10 cm) from the simulated and the observed during 1993—2002 (A. CLM3.5; B. ERA40; C. NCEP - 2)

上升,1995—1998 年土壤湿度显著下降,1998—2002 年土壤湿度波动上升,但趋势不显著。观测资料、CLM3.5 资料、ERA40 和 NCEP - 2 再分析资料的土壤湿度下降幅度分别为 -1.5、-2.0、-0.2 和

-0.6 mm³ / (mm³ · a) 表明 CLM3.5 资料相比于两套再分析资料能够更好地描述 1993—2002 年太行山区站点土壤湿度的年际变化特征,但与观测资料相比仍然具有一定误差。

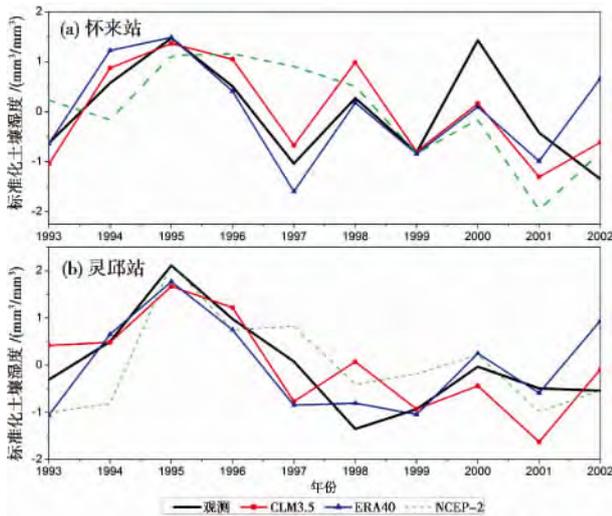


图4 1993—2008年生长季0~10 cm土壤湿度年际变化 (a. 怀来站; b. 灵邱站)

Fig. 4 Inter-annual variations of soil moisture (0~10 cm) in the growing season during 1993—2008 (a. Huailai; b. Lingqiu)

3.1.2 土壤湿度生长季内变化

土壤湿度生长季内变化趋势如图5所示, 1993—2002年怀来和灵邱站表层(0~10 cm)土壤湿度的季节变化特征较为一致, 从5月到9月均呈现显著的上升趋势, 其中CLM3.5资料和ERA40资料能够较好地描述土壤湿度的季节变化趋势, 但两者均未反映出观测土壤湿度在9月的增加, NCEP-2资料对观测土壤湿度季节变化的描述效果相对较差。

总体上, 土壤湿度的变化与降水关系密切, 同时受到土壤质地和植被生长状况的影响。5月开始降水增多, 但由于降水强度较小, 且土壤干燥, 因此土壤仅有轻微的增湿趋势; 6—8月降水持续增多, 整个夏季降水量可达到全年降水量的65.7%^[25], 土壤水得到充足供应, 土壤湿度显著增加; 9月开始尽管降水逐渐减少, 但由于前期降水入渗, 使得土壤湿度持续增加。

由于观测站点的地理位置不同, 其局地气候和地形差异会对土壤湿度变化产生影响, 因此上述基于站点的对比分析不能充分代表土壤湿度资料在整个太行山区的适应性, 还需要进行土壤湿度资料在区域尺度的对比分析。

3.2 土壤湿度空间分布的比较

由于三套土壤湿度资料的时间范围有所差异, 因此取1980—2002年为比较时段, 1980—2002年太行山地生长季0~10 cm多年平均土壤湿度空间

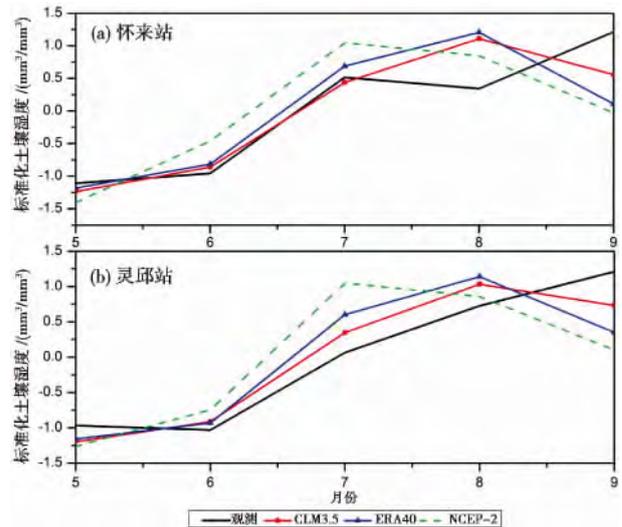


图5 各套资料1993—2008年生长季0~10 cm土壤湿度年内变化对比 (a. 忻州站; b. 灵邱站)

Fig. 5 Comparisons of intra-annual variations of soil moisture in the growing season during 1993—2008 (0~10 cm) between different datasets (a. Xinzhou; b. Lingqiu)

分布如图6所示。CLM3.5模拟的太行山区土壤湿度在 $0.22 \sim 0.32 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$ 之间, 由北向南呈“干—湿—干”的格局, 在 39°N 附近的高山区存在一个高值中心($0.32 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$), 并向南北两侧低山区递减, 40°N 以北山区土壤湿度梯度较大, 平均土壤湿度为 $0.23 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$, 南部山区土壤湿度梯度较小, 且空间分布较为均匀, 土壤湿度在 $0.27 \sim 0.3 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$ 之间。ERA40再分析资料的土壤湿度在 $0.20 \sim 0.24 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$ 之间, 由西北向东南呈均匀增加趋势, 不存在明显的高值中心, 其空间分布格局与海拔高程由西北向东南的递减趋势大体上相反。NCEP-2再分析资料的土壤湿度在 $0.24 \sim 0.26 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$ 之间, 东北部和南部山前平原为高值区, 土壤湿度由东部平原向西部高山区呈递减趋势。以上结果表明: 三套资料的土壤湿度值变化范围有明显差异, 表现为CLM3.5资料 > NCEP-2资料 > ERA40资料, 其中两套再分析资料的土壤湿度梯度明显低于CLM3.5资料; CLM3.5模拟土壤湿度除了存在一个明显湿中心外, 与ERA40再分析资料土壤湿度的空间干湿格局具有较好的一致性, 土壤湿度总体上呈“北低南高”特征, 其中 40°N 以北的山前平原是主要的土壤湿区, 而NCEP-2再分析资料的土壤湿度空间分布与其他两套资料存在较大差异。

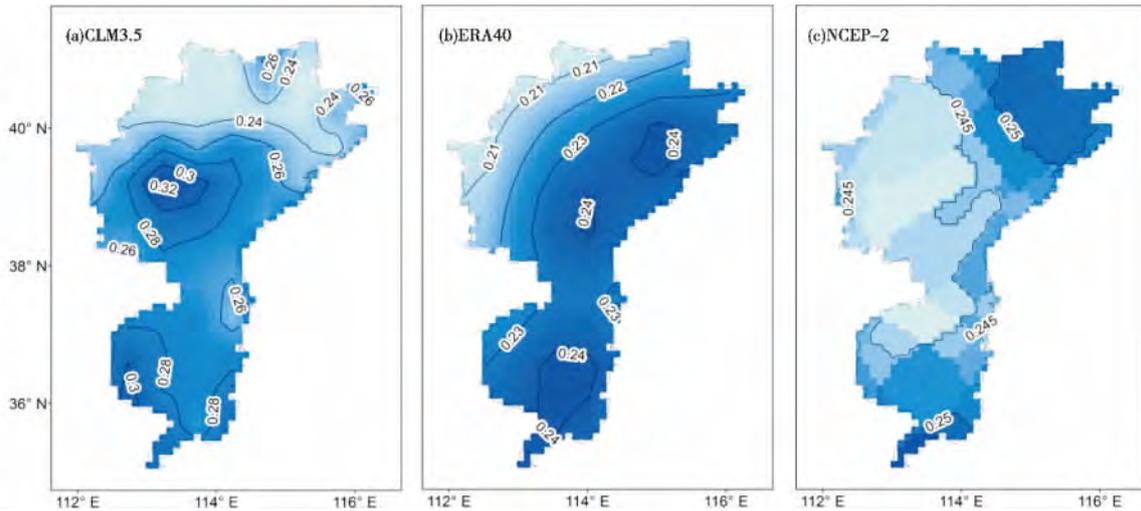


图 6 1980—2002 年太行山区生长季 0 ~ 10 cm 平均土壤湿度的空间分布 (a. CLM3.5; b. ERA40; c. NCEP - 2)

Fig. 6 The spatial distribution of long-term mean annual soil moisture in the growing season (0 ~ 10 cm) over the Taihang Mountains during 1980—2002 (a. CLM3.5; b. ERA40; c. NCEP - 2)

3.3 土壤湿度变化与气象要素的关系

土壤中水分的变化通过改变地表反照率、土壤热容量和植被生长状况,使得地表能量收支和局地天气发生变化^[26]。以气象观测资料较充分的怀来和长治站为例,利用 CLM3.5 资料和 ERA40 再分析资料分析了土壤湿度长期变化与气候要素的相关关系(表 1)。CLM3.5 资料与各气象要素的相关性在两个站点均显著相关,通过了 $P < 0.05$ 的显著性检验,而 ERA40 资料仅与怀来站的降水具有显著相关性 ($P < 0.05$, $r = 0.73$),与其他要素均无显著的相关性,这可能是由于:CLM3.5 模式模拟结果是利用融合了气象台站观测资料的中国区域高时空分辨率气象要素驱动数据集驱动得到,因此其模拟土壤湿度相比全球尺度的 ERA40 再分析资料具有更高的精度,能够更好地响应区域气候变化。

表 1 土壤湿度与气象要素的年相关系数

Tab. 1 Yearly correlation coefficients between soil moisture and meteorological factors

气象要素	怀来		长治	
	CLM3.5	ERA40	CLM3.5	ERA40
降水	0.48**	0.73*	0.64**	0.58
气温	-0.52**	-0.22	-0.51**	-0.45
相对湿度	0.37*	-0.13	0.48*	0.28
风速	0.38*	0.33	-0.05	-0.12

注: ** , * 分别代表通过了 0.01 和 0.05 的显著性检验

如表 1 所示,怀来和长治站生长季表层(0 ~ 10 cm)土壤湿度与降水和相对湿度均呈显著的正相关,与气温呈显著的负相关。马柱国等^[36]研究表明,中国东部中纬度地区(30 ~ 40°N)土壤湿度和降水同期相关系数很大,且为正相关关系,而与气温呈反相关关系。Yang 等^[27]利用 WAVES 模型模拟了不同的气温和降水情景下太行山区土壤湿度的变化情况,结果也表明土壤湿度对降水变化很敏感,降水增多使得土壤湿度升高,这与本文的结果是一致的;而气温升高的影响则比较复杂,这与当地植被对温度变化的适应性大小有关。此外, Qiu 等^[28]通过分析我国华北平原不同空间尺度下土壤湿度的时空变化态势,结果表明除降水外,在较大尺度的空间范围内土壤质地和地形与土壤湿度的相关性也很大。

总体上,太行山区表层土壤湿度和降水的关系最为密切,其次是气温和相对湿度,而与风速的关系具有区域差异性,其在怀来站呈显著正相关,而在长治站呈显著负相关。由于山地具有垂直地带性,随着海拔升高,太阳辐射强度、气压、水汽含量等都会受到影响,从而引起植被、土壤、水文、动物群落某些特征的变化^[29],因此未来还需结合更细致的下垫面资料,更精确地分析土壤湿度与气候变化的相互作用。

4 结论

本研究利用高时空分辨率地面气象数据驱动陆

面模式 CLM3.5 得到的土壤湿度资料、ERA40 和 NCEP-2 再分析资料,系统对比分析了 1980—2010 年太行山区生长季(5—9 月)表层(0~10 cm)土壤湿度的时空变化,利用站点观测资料(1993—2008 年)对三套资料在太行山区的适应性进行了验证,并初步分析了土壤湿度与气象要素的相互关系。结果表明:CLM3.5 资料和 ERA40 资料能较好地描述太行山区土壤湿度的年际和年内变化特征,且两者的土壤湿度呈现相对一致的“北干南湿”格局,其中 CLM3.5 资料土壤湿度的时空变率高于 ERA40 资料;而 NCEP-2 资料对土壤湿度时空分布的描述效果较差。太行山区土壤湿度与降水和相对湿度呈显著的正相关,与气温呈显著的负相关,实际条件下土壤湿度与气候变化的相互作用机制更加复杂。结果证明了 CLM3.5 资料和 ERA40 再分析资料在研究太行山区土壤湿度变化及其与气候变化关系的有效性。

需要注意的是,本研究对土壤湿度资料的验证基于有限的观测站点,不能够充分代表资料在整个太行山区的适应性,未来还需更细致的观测资料进一步对土壤湿度及其与气候变化的相互作用进行分析。

致谢:研究中使用的驱动数据集是由中国科学院青藏高原研究所青藏高原多圈层数据同化与模拟中心开发的,特此致谢。

参考文献(References)

- [1] US National Research Council. GOALS (Global Ocean - Atmosphere - Land System) for Predicting Seasonal-to-Interannual Climate: A Program of Observation, Modeling, and Analysis [M]. Washington D C: National Academies Press, 1994: 103
- [2] 马柱国,符凉斌,谢力,等. 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, 2001, 16(4): 563 - 566 [Ma Zhuguo, Fu Congbin, Xie Li, et al. Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(04): 563 - 567]
- [3] 宋献方,李发东,刘昌明,等. 太行山区水循环及其对华北平原地下水补给的研究[J]. 自然资源学报, 2007, 22(3): 398 - 408 [Song Xianfang, Li Fadong, Liu Changming, et al. Water cycle in Taihang Mt. and its charge to groundwater in North China plain[J]. *Journal of natural resources*, 2007, 22(3): 398 - 408]
- [4] 张秋英,李发东,欧国强,等. 土壤水对降水和地表覆盖的响应[J]. 北京林业大学学报, 2006, 27(5): 37 - 41 [Zhang Qiuying, Li Fadong, Ou Guoqiang, et al. Response of soil moisture variation to precipitation and mulching measures[J]. *Journal of Beijing Forestry University* 2006, 27(5): 37 - 41]
- [5] 朱奎,夏军,邓群,等. 太行山山地丘陵区雨季土壤水分动态规律研究——以崇陵流域为研究区[J]. 水利水电技术, 2007, 38(10): 6 - 9 [Zhu Kui, Xia Jun, Deng Qun, et al. Study on dynamic law of soil moisture during rainy season in hilly area of Taihang Mountain: A case study on Chongling Watershed[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, 38(10): 6 - 9]
- [6] Song Xianfang, Wang Peng, Yu Jingjie, et al. Relationships between precipitation, soil water and groundwater at Chongling catchment with the typical vegetation cover in the Taihang mountainous region, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(4): 787 - 796
- [7] 熊明明,陈海山,俞淼. CLM3.0 对中国区域陆面过程的模拟试验及评估 II: 土壤湿度[J]. 气象科学, 2011, 31(1): 1 - 10 [Xiong Mingming, Chen Haishan, Yu Miao. Simulation of land surface processes over China and its validation Part II: Soil moisture[J]. *Sci. Meteorol. Sin*, 2011, 31(1): 1 - 10]
- [8] 张文君,周天军,宇如聪. 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, 2008, 32(3): 581 - 597 [Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Yu Rucong. Spatial distribution and temporal variation of soil moisture over China. Part I: Multi-data inter-comparison[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(3): 581 - 597]
- [9] Liu Li, Zhang Renhe, Zuo Zhiyan. Intercomparison of spring soil moisture among multiple reanalysis data sets over eastern China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(1): 54 - 64
- [10] Simmons A J, Gibson J K. The ERA - 40 Project Plan, ERA - 40 Project Report Series No. 1, ECMWF [M]. Reading, UK, 2000: 63
- [11] Kistler R, Collins W, Saha S, et al. The NCEP - NCAR 50 - year reanalysis: Monthly means CD - ROM and documentation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(2): 247 - 267
- [12] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40 - year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437 - 471
- [13] 李明星,马柱国,牛国跃. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究[J]. 科学通报, 2011, 56(16): 1288 - 1300 [Li Mingxing, Ma Zhuguo, Niu Guoyue. Modeling spatial and temporal variations in soil moisture in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(17): 1809 - 1820]
- [14] Robock A, Vinnikov K Y, Srinivasan G, et al. The global soil moisture data bank [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(6): 1281 - 1299
- [15] Oleson K W, Bonan G B, Levis S, et al. CLM3.5 documentation [J/OL]. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2007 [2015 - 10 - 06]. http://www.cgd.ucar.edu/tss/clm/distribution/clm3.5/CLM3_5_documentation.pdf.
- [16] Oleson K W, Dai Y, Bonan G, et al. Technical description of the community land model (CLM) [J/OL]. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2004 [2015 - 10 - 06]. <http://www.cgd.ucar.edu/tss/clm/distribution/clm3.0/index.html>.
- [17] 何杰,阳坤. 中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集 [DB]. 寒区旱区科学数据中心, 2011. doi: 10.3972/westdc.002.2014.db. [He Jie, Yang Kun. China Meteorological Forcing Dataset [DB]. Cold and Arid Regions Science Data Center at Lanzhou, 2011. doi: 10.3972/westdc.002.2014.db.]
- [18] Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. Ncep-doe amip - ii

- reanalysis (r - 2) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(11): 1631 - 1643
- [19] Van den Hurk B J J M, Viterbo P, Beljaars A C M, et al. Offline validation of the ERA40 surface scheme [M]. Reading, UK: EC-MWF, 2000.
- [28] 叶金印, 邱旭敏, 黄勇, 等. 气象遥感图像及格点场重采样插值方法 [J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(18): 237 - 241 [Ye Jinyin, Qiu Xumin, Huang Yong, et al. Resampling interpolation methods of meteorological remote sensing image and grid point field [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(18): 237 - 241]
- [31] Taylor K E. Taylor diagram primer [J/OL]. Livermore: PCMDI, Lawrence Livermore National Laboratory, 2005 [2015 - 10 - 06]. <http://www-pcmdi.llnl.gov/about/staff/Taylor>.
- [22] 赖欣, 文军, 岑思弦, 等. 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*, 2014, 38(3): 499 - 512 [Lai Xin, Wen Jun, Cen Sixian, et al. Numerical simulation and evaluation study of soil moisture over China by using CLM4. 0 model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2014, 38(3): 499 - 512]
- [23] 李明星, 马柱国, 杜继稳. 区域土壤湿度模拟检验和趋势分析——以陕西省为例 [J]. *中国科学: D 辑*, 2010(3): 363 - 379 [Li Mingxing, Ma Zhuguo, Du Jiwen. Regional soil moisture simulation for Shaanxi Province using SWAT model validation and trend analysis [J]. *Science China Earth Sciences* 2010 53(4): 575 - 590]
- [24] 赵天保, 符淙斌. 中国区域 ERA - 40, NCEP - 2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析 [J]. *气候与环境研究* 2006, 11(1): 14 - 32 [Zhao Tianbao, Fu Congbin. Preliminary comparison and analysis between ERA - 40, NCEP - 2 reanalysis and observations over China [J]. *Clim. Environ. Res* 2006 11: 14 - 32]
- [25] 李发东, 宋献方, 张秋英, 等. 太行山山前平原降水量特征及其分布的小波分析 [J]. *应用气象学报*, 2005, 16(3): 367 - 373 [Li Fadong, Song Xianfang, Zhang Qiuying, et al. Wavelet analysis of precipitation and its distribution in the piedmont region of Taihang mountains - a case study at Luancheng station [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(3): 367 - 373]
- [26] 马柱国, 魏和林. 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*, 2000, 58(3): 278 - 287 [Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. Relationship between regional soil moisture variable and climatic variability over East China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(3): 278 - 287]
- [27] Yang Yonghui, Watanabe M, Wang Zhiping, et al. Prediction of changes in soil moisture associated with climatic changes and their implications for vegetation changes: WAVES model simulation on Taihang Mountain, China [J]. *Climatic Change*, 2003, 57(1 - 2): 163 - 183
- [28] Qiu Jianxiu, Mo Xingguo, Liu Suxia, et al. Exploring spatiotemporal patterns and physical controls of soil moisture at various spatial scales [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 118(1 - 2): 159 - 171
- [29] 孙建, 程根伟. 山地垂直带谱研究评述 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1544 - 1550 [Sun Jian, Cheng Genwei. Mountain altitudinal belt: a review [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(9): 1544 - 1550]

Comparison of Different Soil Moisture Records in the Taihang Mountains, China

WANG Feiyu^{1 2}, ZHAN Chesheng¹, JIA Yangwen³, NIU Cunwen³, HU Shi¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. 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: A sets of soil moisture data produced from CLM3. 5 driven by the China Meteorological Forcing Dataset, and two widely-used re-analysis soil moisture datasets (ERA40 and NCEP - 2) were used to systematically and comparably analyze the spatial-temporal variations of surface (0 ~ 10 cm) soil moisture in the growing season (May to September) over the Taihang Mountains from 1980 to 2008, and matched them with observational data within the same study area. Results show that CLM3. 5 data and ERA40 data are generally consistent well with the observations, and both exhibits a relatively consistency of spatial distribution of soil moisture, namely dry in the north while wet in the south, in which spatio-temporal variability of soil moisture simulated by CLM3. 5 is larger than that of ERA40 data. However, NCEP - 2 doesn't describe the spatio-temporal distribution of soil moisture well. Moreover, soil moisture has significantly positive correlation with precipitation and relative humidity in the Taihang Mountains, whereas negative correlation with air temperature. In real condition, the mechanism of interaction between soil moisture and climate change is more complex.

Key words: Taihang Mountain; soil moisture; reanalysis data; data comparison