

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2020122
引用格式: 王佳新,萨楚拉,毛克彪,等. 蒙古高原土壤湿度时空变化格局及其对气候变化的响应[J]. 国土资源遥感,2021,33(1):231–239. (Wang J X, Sa C L, Mao K B, et al. Temporal and spatial variation of soil moisture in the Mongolian Plateau and its response to climate change[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(1): 231–239.)

蒙古高原土壤湿度时空变化格局及其对气候变化的响应

王佳新^{1,3}, 萨楚拉^{1,3}, 毛克彪², 孟凡浩^{1,3}, 罗 敏^{1,3}, 王牧兰^{1,3}

(1. 内蒙古师范大学地理科学学院,呼和浩特 010022; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081; 3. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室,呼和浩特 010022)

摘要: 土壤水作为一种重要的水资源,其时空分布和动态变化对植被的分布和生长状况具有显著影响。蒙古高原是典型的干旱–半干旱气候区,也是亚欧大陆温带草原的主要构成部分,气候变化导致的土壤含水量变化无疑会对草原生态系统健康及稳定产生直接影响;厘清蒙古高原土壤湿度时空特征及其对气候变化的响应有助于为生态保护相关政策的制定提供科学支撑。本研究基于 GLDAS–Noah 土壤湿度数据,运用线性回归分析、相关分析和 Mann–Kendall(M–K)检验等方法,分析 1982—2018 年不同深度土壤湿度的时空格局、变化趋势及突变性等特征,并与 CRU 温度、降水数据相结合探讨土壤湿度对气象因子变化的响应。结果表明:①蒙古高原年均土壤湿度总体呈“东北高西南低”的空间分布格局,且有明显的高值区、过渡带和低值区;②近 37 a 来,蒙古高原 0~10 cm(SM1)土壤湿度整体呈现不显著上升趋势,变化速率为 0.002 m³/m³/10 a,M–K 结果显示在 2012 年前后发生突变;10~40 cm(SM2)土壤湿度的下降趋势较显著,变化速率为 -0.005 m³/m³/10 a,其突变发生在 1996 年左右;③基于像元尺度的相关性分析表明不同季节土壤湿度整体上与降水呈显著正相关关系,与温度呈显著负相关关系。

关键词: 蒙古高原; 土壤湿度; 气候变化; GLDAS

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001–070X(2021)01–0231–09

0 引言

由全球气候增暖带来的区域干旱化趋势日益明显,受到科学界的普遍关注^[1]。土壤湿度作为影响气候变化的重要因素之一,主要参与陆地–大气间水分与能量的循环和交换,同时对生态系统的水循环、能量平衡及区域气候变化有显著影响^[2–3]。蒙古高原属于典型的干旱、半干旱气候区,脆弱且复杂的生态环境因降水量少、水资源匮乏对气候变化的响应极为敏感^[4]。草地作为蒙古高原生态系统的特殊组成成分,土壤湿度动态变化会影响草原的生物量和承载力,进而影响草地生态及畜牧业的健康发展^[5]。

目前,部分学者在不同区域关于土壤湿度与气候变化间关系的研究已经取得一些成果。如王晓婷等^[6]基于中国东部 722 个逐月观测数据分析站点尺

度上土壤湿度与温度、降水的关系,结果表明土壤湿度与温度普遍呈负反馈关系,与降水存在较好的正反馈关系。以中国西南地区为研究区,邓元红等^[7]探究了不同深度土壤湿度与气候要素的时空相关性,发现温度主要对表层土壤湿度有控制作用,但深层土壤湿度的干湿取决于降水多少。此外,我国学者在青藏高原^[8–10]和黄土高原^[11–12]等地区也进行了土壤湿度时空变化方面的大量研究。对于蒙古高原地区,魏宝成等^[13]基于 AMSR–2 微波数据,构建土壤湿度反演模型,并探讨年内植被生长期土壤湿度对气候因子及 NDVI 的响应,发现不同子气候区的响应程度存在差异。从当前研究现状来看,受蒙古高原特殊地理位置、观测站点稀少等原因影响,缺乏基于长时序的土壤湿度变化及其对气候要素响应的相关认识。

传统获取土壤湿度的方法主要通过野外实测,这种方法获取数据精度高,但采样点少且代表

收稿日期: 2020–04–23; 修订日期: 2020–12–10
基金项目: 国家自然科学基金项目“基于多源遥感数据的蒙古高原积雪监测及草地植被生长影像机制研究”(编号: 41861014)、中国农业科学院草原研究所科技创新工程草原非生物灾害防灾减灾团队(编号: CAAS–ASTIP–2016–IGR–04)及内蒙古科技计划项目(编号: 201702116)共同资助。
第一作者: 王佳新(1995–),女,硕士研究生,主要从事遥感与地理信息系统应用研究。Email: 2930361488@qq.com。
通信作者: 萨楚拉(1977–),男,副教授,博士,主要从事遥感与地理信息系统应用研究。Email: sachulan@126.com。

性弱,无法对大范围土壤湿度的变化快速监测。而遥感反演受到植被、土层厚度和土壤粗糙度等影响,限制了土壤湿度的区域尺度研究^[14]。数值模式通过数据同化等手段获取长时序、大规模和高精度的土壤湿度数据,使得大尺度的时空变化研究成为可能,但同化结果一定程度上依赖于初始参数的准确性。为解决这一缺陷,GLDAS 创建了全球范围的陆面同化系统,且与其他同化产品对比分析表明,GLDAS 生成的结果更加准确合理^[15]。因此,本文基于 1982—2018 年 GLDAS - Noah 模式土壤湿度数据分析蒙古高原土壤湿度时空分布特征及动态变化趋势;基于此探讨其对降水、温度的响应。本研究可为监测区域旱情、加强水土管理和促进农牧业生产合理布局提供科学依据。

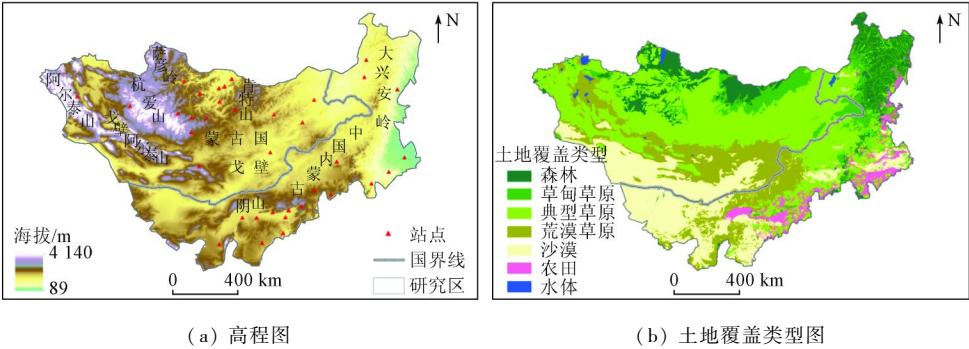


图 1 蒙古高原高程及土地覆盖类型图

Fig. 1 Mongolian Plateau elevation and land cover types map

1.2 数据源及其预处理

本文选用全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)的土壤湿度产品数据^[17],空间和时间分辨率分别为0.25°和3 h。垂直深度分别选取0~10 cm(SM1)和10~40 cm(SM2),单位为kg/m²,将站点数据与GLDAS数据的量纲统一转换为m³/m³。以0~10 cm土壤湿度值为参考,对10~40 cm土壤湿度值乘以1/3做归一化处理^[12]。站点资料选用中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集和国际土壤湿度网络(International Soil Moisture Network, ISMN)提供的37个具有代表性的观测数据。

温度、降水数据采用East Anglia 大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)集合全球4 000多个站点气象数据构建的一套覆盖面广、分辨率高且观测全面的月平均气象因子数据集,空间上以0.5°网格覆盖全球陆地。考虑到数据空间分辨率的一致性,对气象数据重采样为0.25°。并将四季划分为春季(3—5月),夏季(6—8月),秋季(9—11月)及冬季(12—次年2月)。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

蒙古高原地处东亚内陆中心,位于37°46'~53°08'N, 87°40'~122°15'E之间,面积2.75×10⁶ km²。高原四面环山,北起萨彦岭、雅布洛诺夫山及肯特山脉,南至阴山山脉,东抵大兴安岭,西连萨彦岭、阿尔泰山。地貌类型以高平原和山地为主,平均海拔约1 580 m。研究区夏季短暂炎热,最高温达30~35℃,冬季漫长严寒,最低温达-40℃以下,多年均温约3.8℃,年降水量约200 mm^[16]。由于受土壤、气候等因素影响,自然植被分带如图1所示。

2 研究方法

2.1 突变分析

1) Mann-Kendall 方法。该方法常被用于分析气候要素趋势和突变,其优势在于适用范围较宽,人为影响因素较少,定量化程度较高。M-K方法通过构造一组序列来检验土壤湿度样本序列的趋势和突变,即

$$d_k = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{j-1} a_{ij}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (1)$$

式中, $a_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases}, 1 \leq j \leq i。$

定义统计量:

$$UF_k = \frac{(d_k - E(d_k))}{\sqrt{\text{var}(d_k)}}, \quad 1 \leq k \leq n, \quad (2)$$

式中: $E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4}; \quad \text{var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, 2 \leq k \leq n。$

此时 UF_k 服从标准分布,样本反向序列 $UB_k,$

使 $UF_K = -UB_K$ 。 UF_K 值的正(负)说明序列呈上升(下降)趋势,当 UF_K 和 UB_K 超过临界线时,说明变化趋势显著,超出的范围就是突变发生的时间区间。若两条曲线存在交点且位于临界线之间,则对应于该点的时间就是突变开始的时刻。

2)滑动 T 检验法。利用 M-K 方法对气候要素长时间序列进行突变检验时,若有多个突变点时,应判断真假突变点,还需经过滑动 T 检验再次验证,即

$$T = (\bar{X}_1 - \bar{X}_2) / (S \times \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}), \quad (3)$$

其中, $S = \sqrt{(n_1 \times S_1^2 + n_2 \times S_2^2) / (n_1 + n_2 - 2)}$ 。

方程服从自由度 $V = n_1 + n_2 - 2$ 的 T 分布。 X_1 和 X_2 是交叉点两端子样本序列,数量分别为 n_1 和 n_2 ,取 $n_1 = n_2$;子序列平均值为 $\bar{X}_1$ 和 $\bar{X}_2$;方差为 S_1^2 和 S_2^2 。若 $|t_i| > t_\alpha$ (显著性水平 α),表示位于交叉点前后的两个子序列差异较显著,说明是突变点;反之,则不是突变点^[18]。

2.2 趋势分析

slope 趋势法是基于一元线性回归方法进行逐像元求取土壤湿度的年际变化,即

$$slope = \frac{n \sum_{i=1}^n (i W_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n W_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}, \quad (4)$$

式中: $slope$ 为土壤湿度的年际变化率; i 为年份数量; n 为时间序列长度; W_i 为第 i 年土壤湿度值。若斜率大于(小于)0,则说明土壤湿度较上一时间增加(减少);若 $slope$ 为 0 说明相比上一时间未发生变化。

2.3 相关分析

检验土壤湿度与气候要素间的响应关系可以通过计算二者的相关系数实现,即

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5)$$

式中: r_{xy} 为 x 与 y 的相关系数; x_i 和 y_i 分别为第 i 年或 i 月的土壤湿度值或气候要素值; $\bar{x}, \bar{y}$ 分别为多年或多月土壤湿度或气候要素的平均值。 $|r_{xy}| \leq 0.3$ 为弱相关, $0.3 < |r_{xy}| \leq 0.5$ 为低度相关, $0.5 < |r_{xy}| \leq 0.8$ 为显著相关, $0.8 < |r_{xy}| \leq 1$ 为高度相关^[19]。

3 结果与分析

3.1 数据精度验证

大尺度的土壤湿度地面测量相对困难,当前多

选择地表类型单一,地势平坦观测站点的平均值作为主要数据源。为保证验证数据质量,剔除非晴空条件下的观测数据,共选取 37 个站点数据(图 1),对不同季节 0~10 cm GLDAS 土壤湿度数据进行精度验证,如图 2 所示。不同站点平均相关系数 R^2 为 0.701 4,均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 为 0.028 5,平均绝对误差 (mean absolute error, MAN) 为 0.021 1。此结果与宋海清^[20] 对 GLDAS 土壤湿度数据在内蒙古的评估结果相近,这表明 GLDAS 数据可以较准确地模拟蒙古高原土壤湿度时空变异性。

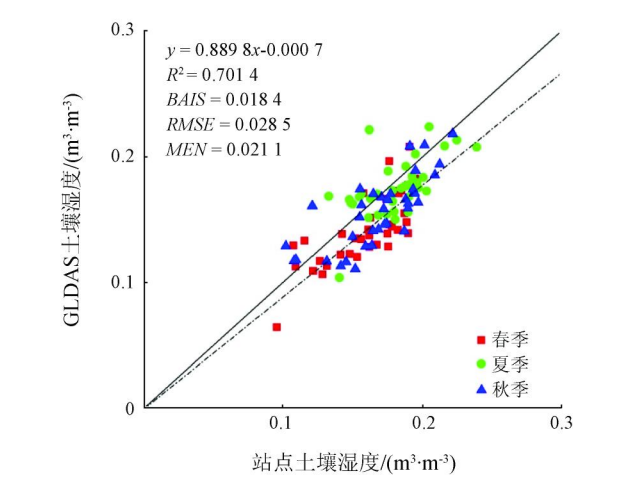


图 2 GLDAS 土壤湿度数据与观测站点土壤湿度数据精度验证

Fig. 2 Accuracy verification of GLDAS soil moisture data and soil moisture data at measured sites

3.2 土壤湿度的时间变化分析

由图 3 可知,1982—2018 年蒙古高原不同深度年均土壤湿度的变化趋势不同,可看出 SM1 以 $0.002 \text{ m}^3 / \text{m}^3 / 10 \text{ a}$ 的速率呈微弱上升趋势 ($p > 0.05$),年均值介于 $0.142 6 \sim 0.164 4 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ 之间。而研究区 SM2

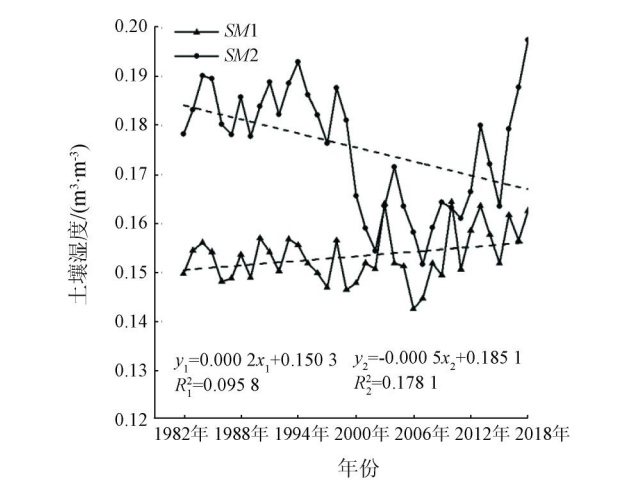


图 3 1982—2018 年蒙古高原土壤湿度的年际变化

Fig. 3 Inter-annual changes in soil moisture in the Mongolian Plateau from 1982 to 2018

以 $-0.005\text{ m}^3/\text{m}^3/10\text{a}$ 的速率呈下降趋势 ($p < 0.05$), 年均值介于 $0.151\text{ 7} \sim 0.197\text{ 5 m}^3/\text{m}^3$ 之间。说明近 37 a 高原表层土壤湿度变湿趋势不显著, 深层土壤湿度呈显著变干趋势, 这种差异是因为表层土壤对短期气候要素响应较快, 而深层土壤受长期气候变化的影响较大。

采用 M-K 方法对蒙古高原不同层土壤湿度的年均变化进行趋势分析和突变检验, 如图 4 所示。SM1 呈上升的年份有 1982—1986 年、1990—1992 年、1993—1996 年、2013—2018 年, 其余年份呈下降趋势。SM2 除 1982—1986 年、1993—1997 年呈上升趋势外其余年份均为下降趋势。2002—2018 年期间, $|UF_{d_k}| > 1.96$, 表明土壤湿度下降趋势明

显。由于表层土壤湿度更易受到降水、温度、风速及光照等外界因素影响, 土壤湿度发生变化的概率较大。进一步探究高原近 37 a 各层土壤湿度发生突变的开始时间。由图 4(b) 可知 UF 与 UB 在临界线间于 1996 年有 1 个交点(临界值 $u_{0.05} = \pm 1.96$), 说明 1996 年为 SM2 开始突变的时间。SMI 的两条曲线在临界线间有 5 个交点, 分别为 1984 年、2012 年、2014 年、2016 年和 2018 年(图 4(a))。为判断真假突变点, 采用滑动 T 检验再次验证, 当 $\alpha = 0.05$ 时, $t_{0.05} = \pm 2.145$, 2012 年 $t = -2.682$, 通过显著性检验。综上所述, 近 37 a 研究区 SM1 和 SM2 的突变时间分别发生在 2012 年和 1996 年左右。

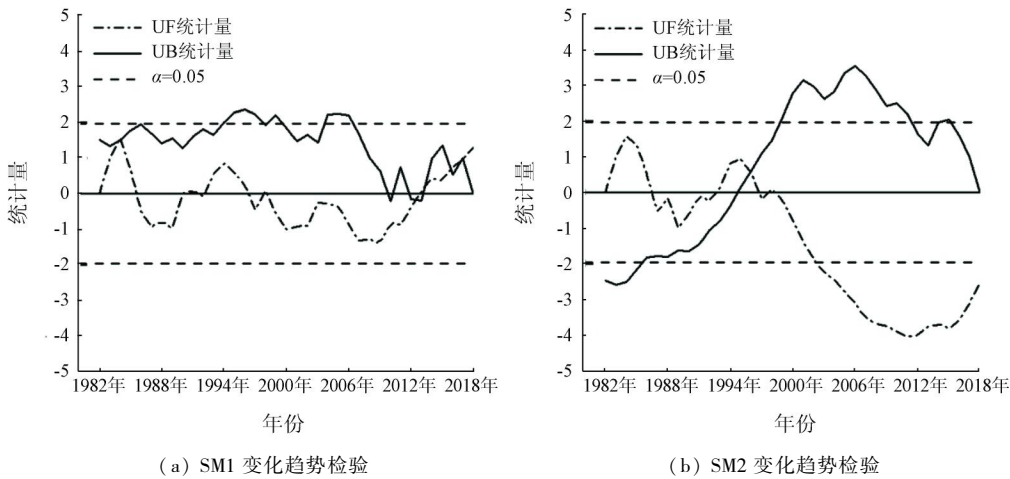


图 4 1982—2018 蒙古高原年平均土壤湿度变化趋势显著性检验

Fig. 4 Significance test of annual mean soil moisture variation trend in the Mongolian plateau from 1982 to 2018

3.3 土壤湿度的空间格局及变化分析

从 1982—2018 年蒙古高原多年平均土壤湿度的空间分布看出(图 5(a)和(b)), 土壤湿度总体分布表现为由北向南, 由东北向西南逐渐减少的趋势, 且呈现出高原外围土壤湿度相对较高, 内部相对较低的空间格局。SM1 高值区主要分布于蒙古国阿尔泰山、杭爱山以北, 萨彦岭东部山间盆地以及肯特山的森林草原地区; 内蒙古东部从大兴安岭森林覆盖区一直向南延伸到科尔沁沙地以及南部的河套平原

灌溉区。这些地区土壤湿度介于 $0.15 \sim 0.29\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。SM1 过渡带, 蒙古国主要分布于科布多省 - 后杭爱省 - 中央省 - 肯特省 - 东方省 - 苏赫巴托尔省北部; 内蒙古主要分布在阿拉善腾格里沙漠绿洲 - 鄂尔多斯高原 - 锡林郭勒草原。低值区蒙古国主要分布于戈壁阿尔泰山地 - 巴彦洪戈尔省 - 南戈壁省 - 中戈壁省及东戈壁省的荒漠草原区; 内蒙古分布于西部的巴丹吉林沙漠, 最小值出现在阿拉善荒漠区, 这些区域的值介于 $0.05 \sim 0.08\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。SM2 与 SM1

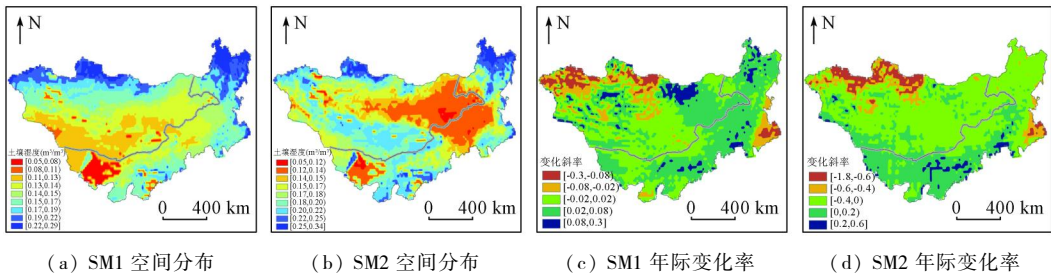


图 5 1982—2018 蒙古原高多年平均土壤湿度的空间分布及年际变化

Fig. 5 Spatial distribution and interannual variation of average soil moisture in Mongolia's original high during 1982—2018

在空间分布表现基本一致,高原中部的典型和荒漠草原区 SM2 值较低,可能由于这些地区土壤质地与周边区域不同导致的。蒙古高原土壤湿度空间分布格局受到不同土地覆盖类型的影响很大(图 1),同时也可能受高原四面环山,海拔因素或下垫面的影响^[14]。

为深入研究蒙古高原长时序土壤湿度的变化情况,利用趋势分析法计算不同层土壤湿度的年际变化率(图 5(c)和(d))。研究区 SM1 整体呈上升趋势的区域占总面积的 71.36% ($slope > 0$),其中显著增加的地区占 21.88% ($p < 0.05$),主要分布于阿尔泰山、杭爱山、肯特山、阴山山脉及东部大兴安岭等区域,这些地区共同点是海拔高且有森林或草地覆盖。SM2 整体呈下降的趋势($slope < 0$),减少的区域

占 69.71%,其中 52.39% 为显著降低($p < 0.05$),主要分布于杭爱山北部、萨彦岭及科尔沁沙地等地区。

3.4 土壤湿度对气候要素的响应

分析蒙古高原降水量、温度的距平变化(图 6),发现近 37 a 来降水量以 $-5.251\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率呈下降趋势($p > 0.05$),1998 年降水量最大,2017 年最小。研究区多年来温度以 $0.363\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 呈上升趋势($p < 0.05$),1984 年温度最低,2007 年最高。气候要素的年际变化与丹丹^[21]分析的 1975—2010 年期间蒙古高原气候变化研究结果类似。探究研究区长时序气候变化特征既可作为短期气候变化的参考,也可对未来气候的预测提供科学依据。

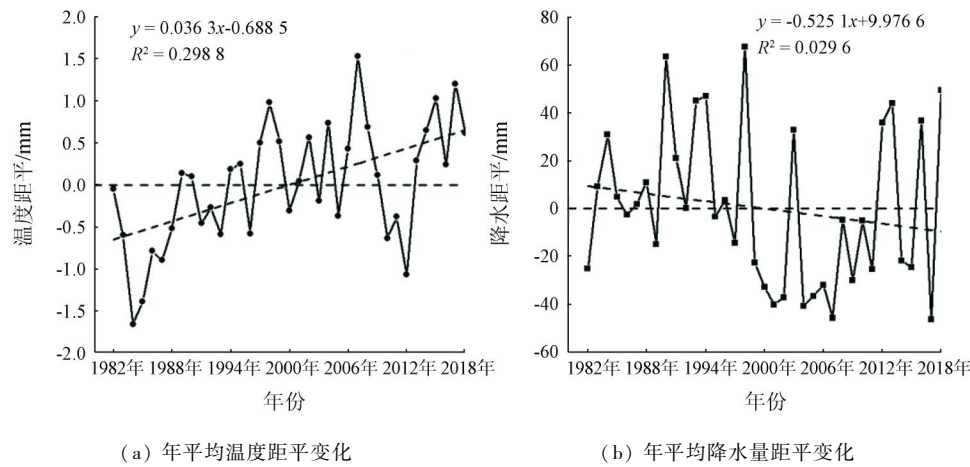


图 6 蒙古高原年平均温度、降水量距平变化
Fig. 6 Anomalies of the original high annual average temperature and precipitation in Mongolia

通过分析 1982—2018 年蒙古高原不同季节土壤湿度与降水量、温度的相关性的空间分布情况,可知各季节土壤湿度与二者的相关性有显著差异。土壤湿度与降水量整体表现为显著正相关关系(表 1)。

表 1 不同季节各层土壤湿度与降水相关系数面积占比

Tab. 1 Area ratio of correlation coefficient between soil moisture and precipitation in different seasons									
相关性	分布范围 R	SM1				SM2			
		春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
显著负相关	-0.8 ~ -0.5					1.1			1.5
低度负相关	-0.5 ~ -0.3				1.1	18.1		0.07	20.8
负弱相关	-0.3 ~ 0	0.4	0.2	0.2	31.2	65.1	0.7	8.3	58.8
正弱相关	0 ~ 0.3	13.1	6.5	9.1	51.2	15.5	8.7	27.6	18.7
低度正相关	0.3 ~ 0.5	28.7	18.6	28.2	13.9	0.2	20.3	35.1	0.1
显著正相关	0.5 ~ 0.8	57.6	60.0	61.6	2.6		60.5	28.7	
高度正相关	0.8 ~ 1	0.2	14.7	0.9			9.9	0.02	

SM1 在春、夏、秋季有超过 99.6% 的地区与降水量呈正相关,这些区域包括高原东北部和中部的大部分地区(图 7(a) - (c))。夏季,分别有 60% 和 14.7% 的地区与降水量呈显著正相关和高度正相关,呈高度相关的地区主要包括蒙古国的杭爱山和肯特山森林草原区及内蒙古东北部的西乌珠穆沁草原和呼伦贝尔草原(图 7(b))。冬季,呈正相关的地区占 67.7%,主要分布于通辽科尔沁沙地和阿拉

善巴丹吉林 - 腾格里沙漠(图 7(d)),该区域虽降水少,但因荒漠区相比其他地区地表反射率强,下垫面吸收能量较多,积雪融化后土壤湿度随之增加^[22]。相比之下,SM2 与降水量的相关性有所不同。春季,有 84.3% 的区域土壤湿度与降水量呈负相关,主要因为 3、4 月份降水较少,而高原积雪和冻土不断消融,土壤湿度增加。夏季,呈正相关的地区占 99.3% (70.4% 为显著和高度相关)。秋季,有

91.6%的地区与降水量呈正相关(28.7%为显著相关)。冬季,呈正相关的地区占18.8%,由于受蒙古高压及西伯利亚寒潮的影响,高原整体干燥寒冷,深层土壤出现回冻。研究发现,土壤湿度与降水量相关性会随土壤层加深而减小。

通过相关性分析发现:土壤湿度与温度以显著负相关关系为主(表2)。SM1在春季有64.6%的地区土壤湿度与温度呈正相关,3,4月份气温回升,高原内部的冻土消融、积雪融化导致土壤湿度增大(图7(e))。夏季,呈负相关的地区占92.2%(30.3%为显著和高度相关),主要分布于蒙古国西北部的阿尔泰山、杭爱山、萨彦岭的森林草原区及内蒙古东

部大兴安岭和科尔沁沙地等地区(图7(f))。夏季炎热干燥,植被生长茂盛,温度升高导致土壤湿度被大量蒸发。秋季和冬季分别有55.6%和86.4%的地区与温度呈负相关(图7(g)和图7(h)),秋冬季温度降低,表层土壤湿度主要受到降水的影响较大。研究区SM2与SM1在空间分布上也有较好的一致性。春夏秋季分别有60.1%、82.1%和68.2%的地区土壤湿度与温度呈负相关。冬季,83.6%的地区土壤湿度与温度呈正相关,由于温度降低导致深层土壤出现回冻现象,土壤湿度也随之降低。结果表明,土壤湿度与温度的相关性会随土壤层的加深而减小。

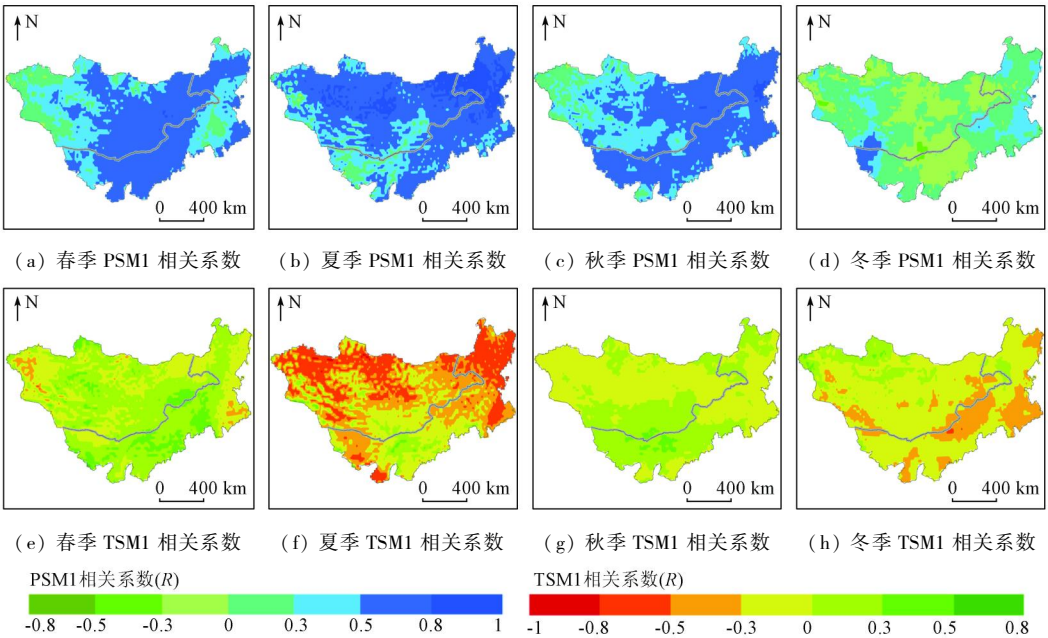


图7 1982—2018年蒙古高原不同季节0~10 cm土壤湿度与降水量(P)、温度(T)的相关性

Fig.7 Correlation between 0~10 cm soil moisture and precipitation (P) and temperature (T) in different seasons of Mongolian Plateau from 1982 to 2018

表2 不同季节各层土壤湿度与温度相关系数面积占比

Tab.2 Area ratio of correlation coefficient between soil moisture and temperature in different seasons									
相关性	分布范围 R	SM1				SM2			
		春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
高度负相关	-1 ~ -0.8		0.3				0.1		
显著负相关	-0.8 ~ -0.5	0.1	30.0		0.2	1.8	29.1		
低度负相关	-0.5 ~ -0.3	2.3	32.3		21.5	13.0	29.6	1.0	0.8
负弱相关	-0.3 ~ 0	33.1	29.6	55.6	64.7	45.3	23.3	67.2	15.6
正弱相关	0 ~ 0.3	54.3	7.0	42.5	13.1	29.2	12.6	30.1	78.3
低度正相关	0.3 ~ 0.5	10.2	0.8	1.9	0.5	9.0	4.0	1.7	5.3
显著正相关	0.5 ~ 0.8	0.1				1.7	1.3		

深入探究不同层土壤湿度对气候变化的响应,利用相关分析方法计算0~12月不同时滞下二者的相关性,讨论土壤湿度对气候因子的滞后效应。由图8(a)可知SM1有85.7%的地区对降水无滞后现象(时滞为0),对降水明显滞后一个月的区域占

13.4%,其余月份极少地区对降水有滞后现象。而有83.6%的地区土壤湿度对温度的响应滞后6~7个月(图8(c))。这表明SM1对降水的响应快速,而对温度的响应较缓慢。SM2有91.5%的地区对前一个月的降水存在滞后现象(图8(b)),并有95.5%

的地区土壤湿度对当月温度无滞后效应(图 8 (d)),说明深层土壤湿度对温度响应较快。综上所述

述,表层土壤湿度对温度有明显滞后现象,而深层土壤湿度对降水的滞后效应更显著。

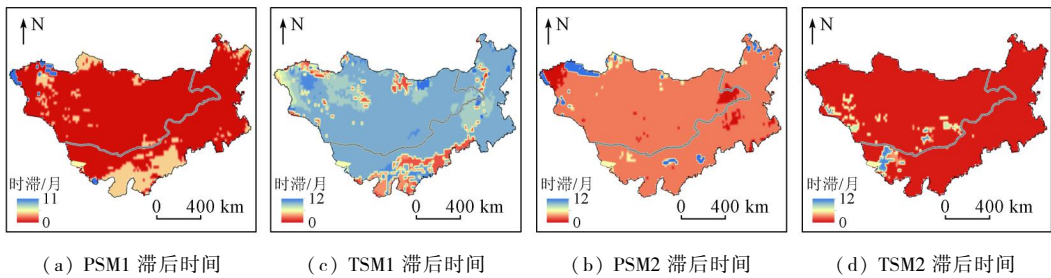


图 8 不同层土壤湿度对降水量、温度响应滞后时间空间分布

Fig. 8 The spatial distribution of the lag time of the response of different layers of soil moisture to precipitation and temperature

4 结论与展望

本研究以蒙古高原为研究区,基于 GLDAS - Noah 土壤湿度数据,分析了 1982—2018 年不同深度土壤湿度的时空格局、变化趋势及突变性特征,并讨论其对气候要素变化的响应。结论如下:

1)不同深度的年均土壤湿度在空间上整体表现出东北高、西南低且呈现出外围相对较高、内部相对较低的格局,可能受到北冰洋和太平洋水汽的输送以及不同土地覆盖类型的影响^[21],还可能受到地形地貌、土壤质地、积雪分布及人为等多重因素的共同作用^[16,23]。

2)从时间变化来看,0 ~ 10 cm 土壤湿度以 0.002 m³/m³/10 a 的速率呈不显著上升趋势,显著增加地区占 21.88%,这与土壤湿度对降水的快速响应以及气候变暖导致的积雪融化加快和冻土消融有密切联系。10 ~ 40 cm 土壤湿度以 -0.005 m³/m³/10 a 的速率呈显著下降趋势,有 52.39% 区域表现为显著降低,地表温度上升,降水量减少和潜在蒸发的加剧是使土壤湿度降低的重要原因^[24]。

3)近 37 a 来,年降水量整体上以 5.251 mm/10 a 的速率下降,减少趋势不显著。而年均温度以 0.363 °C/10 a 上升,增加趋势较为显著。过去 40 a 蒙古高原平均温度上升幅度大于全球的平均值,而降水量则呈下降的趋势,区域气候的变化会导致水资源短缺、草原荒漠化及植被生产力降低等生态环境问题^[25]。

4)不同季节土壤湿度与降水量主要呈正相关关系,而与温度以负相关关系为主,并且土壤湿度与二者的相关性会随土壤层加深逐渐变小。表层土壤湿度对温度有明显的滞后现象,有 83.6% 的地区滞后 6—7 个月;而深层土壤湿度对降水的滞后效应更显著,约占总面积的 91.5%。

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[J]. 地理学报,2003(s1):83-90.
Guo W D, Ma Z G, Yao Y H. Regional evolution characteristics of soil moisture in northern China in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2003(s1):83-90.

[2] Hendersonsellers A, Yang Z L, Dickinson R E. The project for inter-comparison of land-surface parameterization schemes[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 74(4):489-503.

[3] Seneviratne S I, Corti T, Edouard L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2010, 99(3):125-161.

[4] 包刚,包玉海,覃志豪,等. 近 10 年蒙古高原植被覆盖变化及其对气候的季节响应[J]. 地理科学, 2013, 33(5):613-621.
Bao G, Bao Y H, Qin Z H, et al. Vegetation cover change and its seasonal response to climate in the Mongolian plateau in recent 10 years[J]. Geographical Science, 2013, 33(5):613-621.

[5] 胡云锋,巴图娜存,毕力格吉夫,等. 乌兰巴托—锡林浩特样带草地植被特征与水热因子的关系[J]. 生态学报, 2015, 35(10):3258-3266.
Hu Y F, Batunacun, Biligejifu, et al. Relationship between grassland vegetation characteristics and hydrothermal factors in Ulaanbaatar-Xilinhot transect[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(10):3258-3266.

[6] 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[J]. 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 temperature and humidity changes in eastern China and their relationship with climate background[J]. Advance in Earth Science, 2009, 24(2):181-191.

[7] 邓元红,王世杰,白晓永,等. 西南地区土壤湿度与气候之间的互馈效应[J]. 生态学报, 2018, 38(24):8688-8699.
Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, et al. Mutual feedback effects between soil moisture and climate in Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24):8688-8699.

[8] Bi H Y, Ma J W, Zheng W J, et al. Comparison of soil moisture in GLDAS model simulations and in situ observations over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2016, 121(6):2658-2678.

[9] 王美林,姜群鸥,邵雅琪,等. 基于 TVDI 的玛曲土壤湿度时空

变化及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 141 – 152.

Wang M L, Jiang Q O, Shao Y Q, et al. Temporal and spatial changes of soil moisture in Maqu based on TVDI and their influencing factors[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 141 – 152.

[10] 范科科, 张 强, 史培军, 等. 基于卫星遥感和再分析数据的青藏高原土壤湿度数据评估[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1778 – 1791.

Fan K K, Zhang Q, Shi P J, et al. Evaluation of soil moisture data on the Qinghai – Tibet Plateau based on satellite remote sensing and reanalysis data[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(9): 1778 – 1791.

[11] 张 翀, 雷田旺, 宋佃星. 黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞关联及时空特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2128 – 2138.

Zhang C, Lei T W, Song D X. Time – dependent and spatial – temporal characteristics of vegetation cover and soil moisture on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2128 – 2138.

[12] 程善俊, 管晓丹, 黄建平, 等. 利用 GLDAS 资料分析黄土高原半干旱区土壤湿度对气候变化的响应[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 641 – 649.

Cheng S j, Guan X D, H J P, et al. Using GLDAS data to analyze the response of soil moisture to climate change in the semi – arid region of the Loess Plateau[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(4): 641 – 649.

[13] 魏宝成, 玉 山, 贾 旭, 等. 基于 AMSR – 2 蒙古高原土壤湿度反演及对气象因子响应分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 837 – 845.

Wei B C, Yu S, Jia X, et al. Soil moisture retrieval and response to meteorological factors in the Mongolian Plateau based on AMSR – 2[J]. Chinese Journal of Eco – Agriculture, 2016, 24(6): 837 – 845.

[14] 师春香, 谢正辉, 钱 辉, 等. 基于卫星遥感资料的中国区域土壤湿度 EnKF 数据同化[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(3): 375 – 385.

Shi C X, Xie Z H, Qian H, et al. Assimilation of EnKF data of regional soil moisture in China based on satellite remote sensing data[J]. Science in China: Earth Sciences, 2011, 41(3): 375 – 385.

[15] 刘丽伟, 魏 栋, 王小巍, 等. 多种土壤湿度资料在中国地区的对比分析[J]. 干旱气象, 2019, 37(1): 40 – 47.

Liu L W, Wei D, Wang X W, et al. Comparative analysis of various soil moisture data in China[J]. Arid Meteorology, 2019, 37(1): 40 – 47.

[16] 秦福莹. 蒙古高原植被时空格局对气候变化的响应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.

Qin F Y. Study on the response of the temporal and spatial pattern of the vegetation on the Mongolian Plateau to climate change[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.

[17] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The Global Land Data Assimilation System[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381 – 394.

[18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 58 – 60.

Wei F Y. Statistical diagnosis and prediction technology of modern climate[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007: 58 – 60.

[19] 索玉霞, 王正兴, 刘 闯, 于伯华. 中亚地区 1982 年至 2002 年植被指数与温度和降水的相关性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1422 – 1429.

Suo Y X, Wang Z X, Liu C, et al. Analysis of the correlation between vegetation index and temperature and precipitation in Central Asia from 1982 to 2002[J]. Resources Science, 2009, 31(8): 1422 – 1429.

[20] 宋海清, 李云鹏, 张静茹, 等. 内蒙古地区多种土壤湿度资料的初步评估[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(8): 139 – 144.

Song H Q, Li Y P, Zhang J R, et al. Preliminary evaluation of various soil moisture data in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(8): 139 – 144.

[21] 丹 丹. 蒙古高原近 35 年气候变化[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014.

Dan D. Climate change on the Mongolian Plateau in the past 35 years[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2014.

[22] 廖小荷, 何 清, 金莉莉, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地冬季积雪下垫面地表反照率及土壤温湿度变化特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 393 – 400.

Liao X H, He Q, Jin L L, et al. Characteristics of surface albedo and soil temperature and humidity changes in the winter snow cover of the Taklimakan Desert hinterland[J]. China Desert, 2018, 38(2): 393 – 400.

[23] 那音太, 秦福莹, 贾根锁, 等. 近 54a 蒙古高原降水变化趋势及区域分异特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1253 – 1261.

Na Y T, Qin F Y, Jia G S, et al. Variation trend and regional differentiation of precipitation in the Mongolian Plateau in recent 54 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1253 – 1261.

[24] Jin L Q, Zhang J Q, Wang R Y, et al. Analysis for spatio – temporal variation characteristics of droughts in different climatic regions of the Mongolian Plateau based on SPEI[J]. Sustainability, 2019, 11(20): 5767.

[25] Bao G, Qin Z H, Bao Y H, et al. NDVI – based long – term vegetation dynamics and its response to climatic change in the Mongolian Plateau[J]. Remote Sensing, 2014, 6(9): 8337 – 8358.

Temporal and spatial variation of soil moisture in the Mongolian Plateau and its response to climate change

WANG Jiaxin^{1,3}, SA Chula^{1,3}, MAO Kebiao², MENG Fanhao^{1,3}, LUO Min^{1,3}, WANG Mulan^{1,3}

(1. School of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information System, Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010022, China)

Abstract: As an important water resource, soil water has a significant impact on the distribution and growth of

vegetation by its temporal and spatial distribution and dynamic changes . The Mongolian Plateau is a typical arid – semi – arid climate zone , and it is also a major component of the temperate grasslands of the Eurasian continent . Changes in soil water content caused by climate change will undoubtedly have a direct impact on the health and stability of the grassland ecosystem . Clarifying the soil moisture of the Mongolian Plateau as well as the temporal and spatial characteristics and their response to climate change helps provide scientific support for the formulation of ecological protection related policies . Based on GLDAS – Noah soil moisture data , the authors used linear regression analysis , correlation analysis , and Mann – Kendall (MK) test methods to analyze the temporal and spatial patterns , changing trends , and mutation characteristics of soil moisture at different depths from 1982 to 2018 . Combined with CRU temperature and precipitation data , the authors explored the response of soil moisture to changes in meteorological factors . The results are as follows : ① The annual average soil moisture of the Mongolian Plateau is generally in a spatial distribution pattern of “high in the northeast and low in the southwest ” , and there are obvious high – value areas , transitional zones and low – value areas . ② In the past 37 years , the soil moisture of 0 ~ 10 cm (SM1) in the Mongolian Plateau has shown an insignificant upward trend , with a rate of change of $0.002\text{ m}^3/\text{m}^3/10\text{ a}$. The results of MK showed that a sudden change occurred around 2012 ; soil moisture of 10 ~ 40 cm (SM2) , the downward trend was more significant , the rate of change was $-0.005\text{ m}^3/\text{m}^3/10\text{ a}$, and its sudden change occurred around 1996 . ③ The correlation analysis based on the pixel scale shows that the soil moisture in different seasons has a significant positive correlation with precipitation on the whole , and has a significant negative correlation with temperature .

Keywords: Mongolian Plateau ; soil moisture ; climate change ; GLDAS

(责任编辑: 李 瑜)