DOI: 10.20103/j.stxb.202403090481

李君宜,牛健植,余新晓,苗禹博,王迪,焦鵬华.全球土壤含水量对植被和气候的响应.生态学报,2025,45(6):2682-2697.

Li J Y, Niu J Z, Yu X X, Miao Y B, Wang D, Jiao P H. Response of soil moisture content to vegetation and climate on a global scale. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6):2682-2697.

全球土壤含水量对植被和气候的响应

李君宜1,牛健植1,2,3,4,*,余新晓1,2,3,4,苗禹博1,5,王 迪1,焦鹏华1

- 1 北京林业大学水土保持学院,北京 100083
- 2 中国林业科学院林木资源高效生产全国重点实验室,北京 100083
- 3 北京林业大学水土保持与荒漠化防治国家林业局重点实验室,北京 100083
- 4 北京林业大学林业生态工程教育部工程研究中心,北京 100083
- 5 国家林业和草原局林草调查规划院,北京 100013

摘要:气候、植被和土壤含水量(Soil Moisture,SM)的变化密切相关,分析长时间序列 SM、植被覆盖、气温和降雨的变化以及植被、气候对 SM 的影响,有助于揭示全球变暖背景下土壤含水量-植被-大气间相互作用关系,为水资源短缺、土地退化、水资源保护等生态环境问题提供理论支持。以全球 MODIS 产品和 ERA5-Land 为数据源,获取 2001—2020 年 0—7 cm 土壤层中的含水量 SM1、7—28 cm 土壤层中的含水量 SM2、28—100 cm 土壤层中的含水量 SM3、28—289 cm 土壤层中的含水量 SM4、降雨、气温和归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)时序数据集,采用 Sen 趋势分析(Theil-Sen Median)、非参数统计检验(Mann-Kendall)、偏相关分析和复相关分析等方法,探究全球不同干湿气候区 SM、降雨、气温和 NDVI 的时空变化特征及 SM 对降雨、气温和 NDVI 的响应关系。结果显示:(1)近20 年来,全球不同干湿气候区 SM 总体呈现下降趋势,植被覆盖总体呈上升趋势;降雨量具体表现为"增-减-增"的变化趋势;气温总体呈上升趋势。(2)不同干湿气候区,SM 与降雨的相关性随土壤深度的增加而减弱;除湿润区外,SM 与 NDVI 均在 SM2 土壤层呈现较高的偏相关关系;除 SM1 土壤层外,不同干湿气候区 SM 与气温呈显著的负相关关系;除极干旱区,SM 随土壤深度的增加对气温的敏感性减弱。(3)通过复相关分析探究各因子的驱动区(共同驱动区、气候驱动区、植被驱动区),SM 变化主要受气候和 NDVI 的共同影响,受 NDVI 主导的区域面积较少,随着土壤深度的加深受气候主导的区域面积逐渐减小。

关键词:土壤含水量(SM);归一化植被指数(NDVI);气候-土壤-植被;全球;相互作用

Response of soil moisture content to vegetation and climate on a global scale

LI Junyi¹, NIU Jianzhi^{1,2,3,4,*}, YU Xinxiao^{1,2,3,4}, MIAO Yubo^{1,5}, WANG Di¹, JIAO Penghua¹

- 1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
- $2\ \mathit{State}\ \mathit{Key}\ \mathit{Laboratory}\ \mathit{of}\ \mathit{Efficient}\ \mathit{Production}\ \mathit{of}\ \mathit{Forest}\ \mathit{Resources}\,, \mathit{Beijing}\ 100083\,,\ \mathit{China}$
- 3 Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Beijing 100083, China
- 4 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
- 5 Academy of Forestry Inventory and Planning , National Forestry and Grassland Administration , Beijing 100013 , China

Abstract: Climate, vegetation and soil moisture content (Soil Moisture, SM) are closely related to each other. Analyzing the changes of SM, vegetation cover, temperature and rainfall in long time series and the effects of vegetation and climate on SM can help to reveal the interaction relationship between soil moisture content-vegetation-atmosphere under the background of global warming, and provide theoretical support to water shortage, land degradation, water resource protection and other ecological and environmental issues to provide theoretical support. In this study, global MODIS products and ERA5-Land

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42230714);国家自然科学黄河重点基金项目(U2243202)

收稿日期:2024-03-09; 网络出版日期:2024-12-23

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: nexk@ bjfu.edu.cn

were used as data sources to obtain the water content SM1 in the 0-7 cm soil layer, SM2 in the 7-28 cm soil layer, SM3 in the 28—100 cm soil layer, SM4 in the 28—289 cm soil layer, rainfall, air temperature, and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) time-series dataset for the years 2001—2020. The methods of Theil-Sen Median, non-parametric statistical test (Mann-Kendall), partial correlation analysis and complex correlation analysis were used to investigate the temporal and spatial characteristics of SM, rainfall, air temperature and NDVI in different wet and dry climatic regions of the world. NDVI in different wet and dry climatic regions of the world, and to investigate the spatial and temporal variations of SM, rainfall, air temperature and NDVI, as well as the response of SM to rainfall, air temperature and NDVI. The results show that: (1) Over the past 20 years, SM has generally shown a decreasing trend across various arid and humid climate zones worldwide, while vegetation cover has generally shown an increasing trend. Precipitation has shown an "increasedecrease-increase" pattern. Temperature showed an overall increasing trend. (2) In different arid and humid climate zones, the correlation between SM and precipitation weakened with increasing soil depth. Except in humid regions, SM and NDVI exhibited a higher partial correlation in the SM2 soil layer. Apart from the SM1 soil layer, SM showed a significant negative correlation with temperature across different arid and humid climate zones. The sensitivity of SM to temperature decreased with increasing soil depth, except in extremely arid regions. (3) Through multiple correlation analysis, we explore the driving zones of various factors (joint driving zones, climate driving zones, vegetation driving zones), it is found that SM changes are mainly influenced by both climate factors and NDVI. The area dominated by NDVI was relatively small, and the area dominated by climate decreases with increasing soil depth.

Key Words: soil moisture; Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); Climate-soil-vegetation; global; interaction

土壤含水量(Soil Moisture,SM)是陆地生态系统的关键综合变量,是土壤物质输送的载体^[1],充足的 SM 是植物生长的基本条件^[2]。SM 与气候、植被具有相互反馈效应。在气候变化和植被的影响下,SM 运动的频率、幅度和空间范围发生了明显变化,在时间上表现为与气温、降雨、植被耗水的强相关性,在空间上表现为不同深度 SM 与区域气候、植被的正负效应^[3]。探明气候变化和植被共同影响下全球 SM 的时空变化规律及其对植被更替和气候变化的响应,有助于深化认识全球 SM 运动规律、了解土壤水文过程、优化土地利用结构。

目前全球 SM 产品的来源主要包括模型模拟、遥感解释和现场观测。模型数据包括全球土地数据同化系 统 GLDAS 和 MERRA-2, 遥感数据包括 AMSR-E^[4]、CCI^[5]、SMOS^[6]和 SMAP^[7]。由于观测和测量方法面临一 定的局限和限制,全球 SM 通常通过模型模拟、遥感解译和扩展点测量来估算[8],陆面模型和数据同化技术结 合,增加了SM数据的空间覆盖范围和时间分辨率。ERA5-LAND作为一个全球再分析产品,提供了全球范围 内较高时间和空间分辨率的 SM 数据。全球范围内, ERA5-LAND 数据产品在相关研究中广泛应用。例如,它 被应用于中国的流域干旱研究^[9]和农业生产研究^[8],欧洲的农作物与 SM 响应研究^[10]和欧洲的 SM 估算比较 研究[11]以及全球表层和根区 SM 的卫星评估[12]。SM 的准确性可能受归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和气候的影响[13]。自 20 世纪 80 年代以来的遥感观测表明,全球大部分地区陆地植 被生长总体呈增加趋势。过去四十年全球植被叶面积增加了约540万km2。近年来,全球土壤异养呼吸显示 出增加的趋势^[14]。研究表明,陆地植物的碳吸收越来越受到 SM 的限制^[15],(65±26)%的蒸发来自 SM 而非 地表水[16]。SM 的增加可能间接加剧水循环[17]。到 21 世纪末,随着温室气体排放的增加,全球气候风险将 大幅增加^[18], 地表将面临严重的干旱化^[19], 然而, SM 的演变趋势仍然不确定。因此, 研究 SM 的时空变化特 征对于全球水循环具有重要的科学意义。此外,目前对于 SM 的影响因素研究也大多数基于单因素或单一土 壤层 SM 进行探讨,鲜有将不同土壤层 SM 及各影响因素统一讨论。例如 Yongping Tong^[3]等在黄土关键带水 蚀风蚀交错区典型小流域,研究了黄土关键带深层土壤水分对植被演替的响应。Albert等[20]研究了不同类 型植被的植被盖度对 0—50cm 土壤水分的响应。综上可知,目前开展的 SM 研究,主要以单因子分析及区域 小尺度分析为主,主要揭示了 SM 具有显著的不同时间尺度的变化特征并与气温、降雨等气候要素存在复杂 的相互作用,但目前鲜有针对全球不同土壤层 SM 的时空分布、影响因素研究及植被和气候对 SM 叠加效果研究。因此,本研究利用 SM 数据分析 2001—2020 年 SM 的时空变化趋势,充分利用不同土壤层 SM 数据判断 SM 与其他因素的相关性,并讨论气候和 NDVI 多因子对 SM 的综合协同作用。为精准预测 SM 变化,未来农业灾害、自然灾害和气候变化等的影响因素做预警预测^[21]。

综合上面问题及需求,本研究选择大范围、高频率、长时序的气候,NDVI、SM数据,利用趋势分析、偏相关、复相关分析方法,系统分析全球自然条件下不同干湿气候区SM、NDVI、气候动态变化,研究NDVI、气候和SM相互关系,探讨气温、降雨及NDVI对SM的驱动作用,明确引起SM变化的区域规律,为今后SM预测和遥感反演建模提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

1.1.1 基于卫星的地表 SM 数据产品

SM 数据来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF),使用 1950 年 1 月至今全球气候第五代大气再分析数据集 ERA5-Land,数据类型为全球 2001—2020 的 SM 月均值数据(https://www.ecmwf.int/),分辨率为 0.1 °× 0.1°,数据覆盖了全球范围,其经度范围从 -180°到 180°,纬度范围从 -90°到 90°, ERA5-Land 是常用的土壤湿度再分析数据,还引入了动态植被模块,提高了空间分辨率。该数据在 ERA5 的基础上进行了优化,ERA5-Land 在空间分布上的统计效果得到了显著提高,尤其是根区 SM 的改善效果最为明显,数据集经过验证,目前已在大区域尺度上进行了广泛的研究实验。SM1 为 0 —7 cm 土壤层中的水量,SM2 为 7—28 cm 土壤层中的水量,SM3 为 28—100 cm 土壤层中的水量,SM4 为 100—289 cm 土壤层中的水量。

1.1.2 基于卫星的 NDVI、降雨及气温数据产品

NDVI 遥感影像数据来源于美国国家航空航天局所提供的 MOD13C2 数据产品。选用该数据集中全球范围内 2001—2020 年的月值数据,其空间分辨率为 0.05°×0.05° (https://cmr.earthdata.nasa.gov.search/concepts/C2565788914-LPCLOUD.html)。此数据是经过辐射校正、大气校正等处理后的数据。基于 Matlab 对 NDVI 数据计算,获得年最大值。

气候资料来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF),使用 1950 年 1 月至今全球气候第五代大气再分析数据集 ERA5-Land,数据类型为全球 2001—2020 的降雨、气温日均值数据(Daily statistics calculated from ERA5 data (copernicus.eu))。

联合国环境规划署基于降雨和蒸发对干湿状况的影响,将年降雨量和年潜在蒸发量(PET)的比值定义为干旱指数(AI),反映干湿变化 $^{[22]}$ 。全球气候区划分使用来自 CRU TS 全球 0.5° 年降雨量(Precipitation,P)和潜在蒸散量(Potential Evapotranspiration,PET)数据集。计算了定义为 P/PET 的干旱指数(AI) $^{[23]}$ 。根据干旱指数的分类将全球大陆划分为 5 个气候区(图 1):湿润(AI \geq 0.65),半湿润(0.5 \leq AI<0.65),半干旱(0.2 \leq AI<0.5)和干旱(0.03 \leq AI<0.2),极干旱(AI<0.03) $^{[23]}$ 。为了匹配干旱指数数据的分辨率,使用最近邻重采样方法将所有数据集处理为 0.5° ×0.5°。

1.2 研究方法

1.2.1 全球 SM、NDVI、气候因子的年际趋势分析

研究采用 Theil-Sen 斜率估计法对不同土壤层 SM、NDVI 和气候因子的变化趋势进行分析,该方法具有无需样本服从特定分布,也不受极少数极端值干扰的特点,适用于推断年最大 NDVI、年总降雨量、年平均 SM 和年平均气温的变化趋势,并采用 Mann-Kendall 方法进行趋势的显著性检验。

1.2.2 全球 SM 与降雨、气温和 NDVI 的年际相关分析

研究利用偏相关分析法分别分析全球 SM 与降雨、气温和 NDVI 的相关关系。使用 2001—2020 年 NDVI 最大值、年总降雨量、年平均气温、年平均 SM 数据,利用均值法和最大值法获得逐年数据,针对 SM 与降雨、

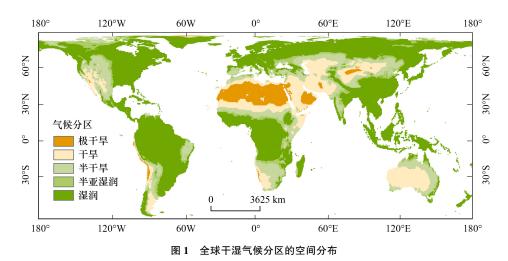


Fig.1 Spatial distribution of global dry and wet climate divisions

SM 与气温、以及 SM 与 NDVI 三组因子进行偏相关分析。在此分析中,正相关系数表明两因子之间存在正向关联,而负相关系数则反映它们之间的负向关系^[24]。偏相关分析是在考虑了简单线性相关的基础上深入研究两个影响因子之间关系的一种方法。该分析方法能够有效地消除其他因素的影响^[25],其计算公式如下:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xy} R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)} \sqrt{(1 - R_{yz}^2)}}$$
(1)

式中, $R_{xy,z}$ 表示自变量 z(降雨、气温或 NDVI)固定后因变量 x(SM)与自变量 y(气温、降雨或 NDVI)之间的偏相关系数。对相关性结果进行结果 P<0.05 的显著性检验。

1.2.3 多重共线性检验

当三个或更多变量之间存在多重共线性导致回归模型不稳定时,就会发生多重共线性。方差膨胀因子 (VIF) 是多元回归分析中使用的一种工具,用于评估独立因子之间的多重共线性程度,VIF 仅基于自变量。对于给定的自变量,使用方程 2 计算 VIF,其中 R^2 是该自变量对所有剩余自变量的回归的决定系数 $[^{26}]$ 。

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \tag{2}$$

一般来说,当 VIF 值大于 10 时,表示存在严重的多重共线性问题,可能会影响回归系数的准确性和稳定性。本研究将气温、降雨、NDVI 影响因素进行多重共线性检验。由表 1 可知, VIF 的值接近 1,说明气温、降雨、NDVI 的多重共线性在可接受范围内。

1.2.4 全球 SM 与降雨、气温和 NDVI 的复相关分析

研究利用复相关分析法来分析降雨、气温和 NDVI 对 SM 的协同作用。偏相关更注重分析各个因子分别 对 SM 的影响,而复相关分析法则综合考虑多个相关影响因子的共同作用,用于深入分析多个自变量与因变量之间的关系,能够有效反映各个要素的综合影响。复相关系数越大,表明要素或变量之间的线性相关程度越高^[23]。研究使用 2001—2020 年 NDVI 最大值、年总降雨量、年平均气温、年平均 SM 数据,基于复相关分析

表 1 变量多重共线性分析结果

Table 1 Results of multicollinearity analysis of variables

变量 Variate	方差膨胀因子 VIF			
气温 Temperature	1.34			
降雨 Precipitation	1.3			
归一化植被指数 NDVI	1.03			

VIF: 方差膨胀因子 Variance inflation factor; NDVI: 归一化植 被指数 Normalized difference vegetation index

法,对SM和降雨、气温、NDVI进行复相关分析。复相关的计算公式如下:

$$R_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - R_{xy}^2)(1 - R_{xz,y}^2)}$$
(3)

式中, $R_{x,y}$ 表示因变量 x 与自变量 y,z 之间的复相关系数; R_{xy} 表示 x 与 y 之间的线性相关系数; $R_{xz,y}$ 表示控制

自变量 y 之后因变量 z 与自变量 z 的偏相关系数;其中 x,y 表示降雨、气温或 NDVI,z 表示 SM。

2 结果与分析

2.1 全球 SM、NDVI、气候因子年际变化趋势分析

2.1.1 全球 SM 年际变化趋势分析

研究全球 SM 水平梯度及垂直梯度变化趋势,可以帮助了解全球各区 SM 时空变化特征及各分区 SM 垂直变化特征(2001—2020 全球 SM 趋势空间分布见图 2)。

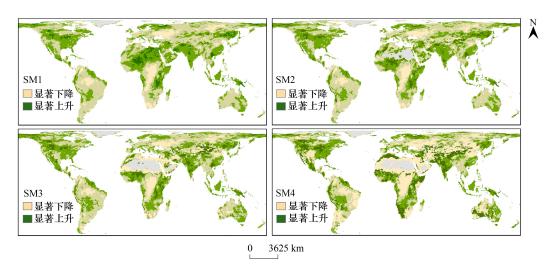


图 2 2001-2020 全球 SM 趋势空间分布

Fig.2 Spatial distribution of global soil water content trend from 2001 to 2020

由图 2 可知,2001—2020 年全球 SM 整体呈现一定的干化趋势,全球 SM 在垂直方向上表现出高度空间 差异性,全球超过 8.47%的 SM1 呈现显著下降趋势(P<0.05),主要发生在湿润区;5.84%SM2 呈显著上升趋势,主要发生在湿润区、半干旱区和干旱区。在 SM3 土壤层中,13.17%呈显著下降趋势,较 0—28 cm 层 SM 下降面积增多,主要发生在湿润区和干旱区,呈显著下降的面积分别为 53.3%和 57.6%。在湿润区和干旱区, SM4 中显示更大面积的显著下降。在 SM3 显著上升的地区中,湿润区和干旱区显著增加的面积占总体显著增加面积的 62.86%。由图 3 可知,在半湿润、半干旱和干旱区,SM1 与 SM2 变化趋势基本一致,均呈"增-减-增"的波动趋势;干旱区 SM1、SM2 差异较大,SM4 整体趋势平稳;极干旱区 SM3、SM4 整体呈明显下降趋势。

2.1.2 全球 NDVI 年际变化趋势分析

2001—2020 年全球 NDVI 总体呈显著增长趋势(图 4),具有显著增长趋势的面积占 86.75%(P<0.05),主要位于非洲中部的湿润区和南部的干旱区、半干旱区、欧亚大陆西部的湿润区、北美中部和东部湿润区、南美中部湿润区,东南亚和北亚西部的湿润区,其中半干旱区 NDVI 最高。NDVI 呈显著下降趋势的面积占13.25%(P<0.05),主要出现在亚洲中部极干旱区,澳洲西南部干旱区和南美东部半干旱区。由图 5 可知,湿润区、半湿润区、半干旱区 NDVI 呈显著增长趋势(P<0.05),干旱区 NDVI 呈"减-增-减-增"的波动趋势,极干旱区 NDVI 较平稳,在 2010—2015 年,半湿润、半干旱、干旱区 NDVI 呈现出"增-减"的波动趋势。

2.1.3 全球降雨、气温年际变化趋势分析

降雨和气温作为气候系统的重要组成部分,具有有效反映区域水热分布情况的特性,直接影响 SM 的变化。本研究选择年总降雨量和年平均气温作为分析区域气候变化情况的指标。

由图 6 2001—2020 全球降雨趋势空间分布图可知,在 2001—2020 年间,北半球降雨量显著上升主要在高低纬度,南半球降雨量显著上升主要出现在中低纬度。降雨量显著上升区域主要出现在湿润区,该部分面积

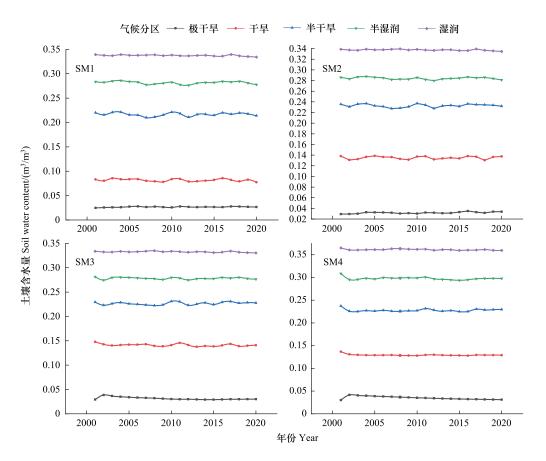


图 3 2001-2020 全球 SM 年际变化趋势

Fig.3 Interannual change trend of global soil water content from 2001 to 2020

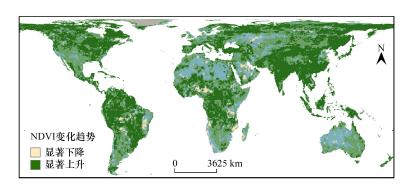


图 4 2001-2020 全球 NDVI 趋势空间分布

Fig.4 Spatial distribution of global NDVI trends from 2001 to 2020

占整个研究区面积的 65.8%,主要分布在北亚热带湿润地区和边缘热带湿润地区。降雨量显著下降区域主要出现在湿润区,其次是干旱和半干旱地区,均属暖热带地区。从面积来看,降雨显著上升占湿润区面积 7.63%,占半干旱面积 4.52%,占干旱区面积 5.2%。由图 7 2001—2020 全球降雨年际变化趋势图可知,全球不同干湿气候区降雨量差异较大,湿润区、半湿润区、半干旱区、干旱区年际总降雨量总体呈现上升趋势,在 2008—2013 年间,半湿润、半干旱区和干旱区均呈现出"增-减"的波动趋势。

由图 8、图 9 2001—2020 全球气温年际变化可知,2001—2020 年全球平均气温总体呈上升趋势,气温显著上升区域主要为湿润区及半湿润区,年际增长率分别为 0.49 和 0.45,主要位于非洲中部,南美洲中部及欧亚

西部;干旱区显著上升占干旱区面积 19.23%。气温显著下降的区域主要位于北美洲北部的湿润区,南美洲中部的湿润区及亚洲南部的干旱区、半干旱区、半湿润区、湿润区。在其他区域,气温显著下降区域较少,处于平稳状态。由图 9 可知,湿润区和半湿润区年平均气温差异较小,变化趋势基本一致;极干旱区年平均气温最大,平均气温为 28.86;在 2011—2013 年,干旱区发生了降温的趋势,在 2008—2010 年间,极干旱区发生了快速升温的趋势。

2.2 全球降雨、气温、NDVI对SM的影响

2.2.1 全球 NDVI 对 SM 的影响

基于偏相关分析的结果(图 10)表明,SM1 与 NDVI 显著的负相关主要出现北纬高纬度地区和热带雨林地区,占湿润区的 27.41%。NDVI 与 SM1,SM2 正相关区域的面积高于负相关区域,显著正相关出现在北美南部、欧亚大陆南部、南美洲东部和南部、澳大利亚和南非等(半)干旱地区,NDVI 与 SM1、SM2、SM3 的显著负相

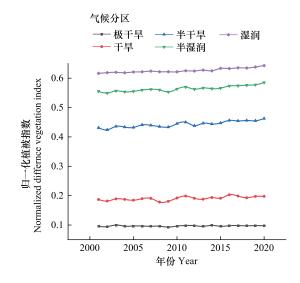


图 5 2001—2020 全球 NDVI 年际变化趋势 Fig.5 Spatial distribution of global rainfall trends from 2001 to 2020

关区域均主要出现在南美北部湿润区、北美西部湿润区;NDVI与SM3的显著正相关区域主要出现在北美西南部干旱区、极干旱区,南美南部极干旱区、干旱区和湿润区,非洲南部干旱区、半干旱区,亚洲中部干旱、半干旱区、澳洲干旱区和半干旱区;NDVI与SM4的显著正相关区域主要出现在亚洲南部干旱区、半干旱区、半湿润和湿润区,澳洲西部半湿润区,南美中部半湿润区和半干旱区,北美湿润区、半湿润区和半干旱区;NDVI与SM4的显著负相关区域主要出现在北美北部半干旱区,南美湿润区、半湿润区,非洲半干旱区,亚洲中部干旱区、半干旱区。

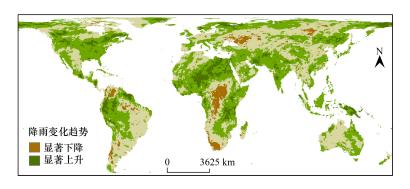


图 6 2001-2020 全球降雨趋势空间分布

Fig.6 Spatial distribution of global rainfall trends from 2001 to 2020

表 2 不同干湿气候区全球 SM 与 NDVI 的相关系数表

Table 2 Correlation coefficient between global soil water content and NDVI in different dry and wet climate regions

	土壤深度 Soil depth	极干旱区 Hyperarid zone	干旱区 Dry zone	半干旱区 Semi-arid zone	半湿润区 Sub-humid zone	湿润区 Humid zone
偏相关系数	SM1	0.43±0.14	0.53±0.11	0.51±0.22	0.43±0.24	0.23±0.19
Partial correlation coefficient	SM2	0.49 ± 0.08	0.59 ± 0.09	0.57 ± 0.17	0.47 ± 0.18	0.13 ± 0.15
	SM3	0.09 ± 0.02	0.52 ± 0.11	0.59 ± 0.18	0.526 ± 0.16	0.13 ± 0.17
	SM4	-0.08 ± 0.3	0.21±0.2	0.32 ± 0.24	0.38±0.24	0.25±0.27

由表 2 可知,各干湿气候区 SM 与 NDVI 的偏相关系数随着深度的增加呈现先上升后下降的趋势,除湿润区外,其他干湿气候区均在 SM2 土壤层呈现较高的偏相关关系。SM 与 NDVI 的偏相关系数最高出现在干旱区;半干旱区、半湿润区 SM3 与 NDVI 的偏相关系数较SM2 增高;在极干旱区域,SM4 与 NDVI 呈负相关关系;湿润区 SM4 与 NDVI 偏相关系数较浅层 SM 与 NDVI 偏相关系数更高;相比其他干湿气候区,湿润区 NDVI 对SM1、SM2、SM3 均呈现较高的偏相关系数。

2.2.2 全球降雨对 SM 的影响

通过对 SM 与降雨偏相关分析发现,降雨是地表水的主要来源,表层 SM 对降雨表现出直接的响应。在各气候区域,SM1 与降雨的显著正相关区域面积为 12054 万 km²,占研究区面积的 83.56%,SM2 与降雨的显著正相关区域面积为 11058 万 km²,占研究区面积的 76.66%,SM3 与降雨的显著正相关区域面积为 8030 万 km²,占研究区面积的 55.67%,SM4 与降雨的显著正相

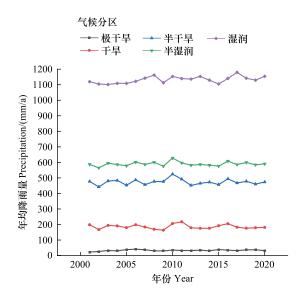


图 7 2001—2020 全球降雨年际变化趋势

Fig.7 Interannual change trend of global rainfall from 2001 to 2020

关区域面积为 4921 万 km²,占研究区面积的 34.11%。由图 11 可知,SM1 与降雨的显著负相关主要出现在北美洲西部湿润区及北部半湿润区,南美洲中部湿润区和亚洲西南部湿润区;SM2 与降雨的显著负相关主要出现在北美洲西部湿润区、干旱、半干旱区,南美洲中部湿润区,亚洲南部极干旱、干旱、半干及湿润区;SM3 与降雨的显著负相关主要出现在北美洲西部干旱半,干旱区域,南美洲中部湿润区,非洲南部半干旱、半湿润区,大洋洲干旱区,亚洲中部南部干旱区、半干旱区、半湿润区及湿润区;SM4与降雨的负相关主要出现在北

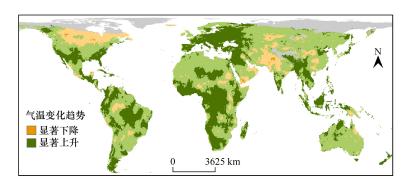


图 8 2001—2020 全球气温趋势空间分布

Fig.8 Spatial distribution of global temperature trends from 2001 to 2020

表 3 不同干湿气候区全球 SM 与降雨的相关系数表

Table 3 Correlation coefficient table between global soil water content and precipitation in different dry and wet climate regions

	土壤深度 Soil depth	极干旱区 Hyperarid zone	干旱区 Dry zone	半干旱区 Semi-arid zone	半湿润区 Sub-humid zone	湿润区 Humid zone
偏相关系数	SM1	0.84±0.05	0.79±0.03	0.75±0.04	0.73±0.03	0.71±0.03
Partial correlation coefficient	SM2	0.67 ± 0.04	0.67 ± 0.04	0.73 ± 0.04	0.72 ± 0.03	0.73 ± 0.03
	SM3	0.29 ± 0.06	0.51 ± 0.03	0.65 ± 0.03	0.65 ± 0.03	0.71 ± 0.04
	SM4	0.15 ± 0.1	-0.19 ± 0.09	0.25 ± 0.08	0.48 ± 0.06	0.67±0.1

美洲北部干旱区、半干旱区、亚湿润区及湿润区,南美洲东部湿润区、南部干旱区、半干旱区、半湿润区及湿润区,非洲南部干旱区、半干旱区、半湿润区及湿润区,大洋洲干旱区,亚洲中部及南部极干旱区、干旱区、半干旱区、半湿润区及湿润区。

由表 3 可知,相同深度的 SM 与降雨的偏相关系数在各干湿气候区差异较大。在 SM1、SM2 土壤层,各干湿气候区 SM 与降雨均呈现较高的相关性;在极干旱区,SM3 与降雨平均系数为 0.29,占研究区面积的 0.4%;极干旱区 SM3 与降雨相关系数下降较大。从极干旱区到湿润区,SM2、SM3 与降水的偏相关系数普遍呈上升趋势。在干旱区,SM4 与降雨的负相关面积占研究区面积的 1.3%。从土壤深度来看,不同干湿气候区的 SM 与降雨相关系数均随着深度的加深而减少。

2.2.3 全球气温对 SM 的影响

从不同干湿气候条件下气温与 SM 之间的偏相关 关系(图 12)可以看出,大部分区域 SM 与气温呈现显

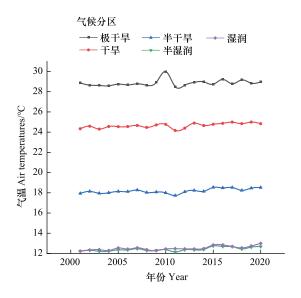


图 9 2001—2020 全球气温年际变化趋势

Fig.9 Interannual trend of global temperature change from 2001 to 2020

著的负相关关系,由此可知,气温对于 SM 影响表现为抑制作用。在 SM1、SM2、SM3 土壤层,SM 与气候的显著正相关关系主要出现在北美东部湿润区,北美南部、南美中部、非洲中部及亚洲南部湿润区,亚洲西部半湿润区、澳洲东部半干旱区均呈现显著负相关关系;在 SM4 土壤层,SM 与气候的显著正相关关系主要出现在北美北部的湿润区、半湿润、半干旱区,显著负相关出现在南美北部湿润区及非洲中部湿润区。

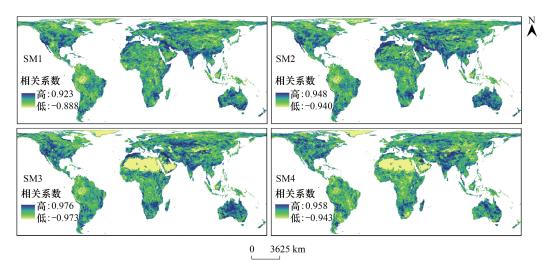


图 10 全球 SM 与 NDVI 相关性的空间分布

Fig.10 Spatial distribution of correlation between global soil water content and NDVI

由表 4 可知,除 SM1 土壤层外,不同干湿气候区 SM 与气温呈显著的负相关关系;除极干旱区外,在 SM2—SM4 土壤层,随着深度的增加,偏相关系数均呈现减小的趋势,而在极干旱区,在 SM2—SM4 土壤层,随着深度的增加,偏相关系数呈现先减小后增加的趋势;在 SM1、SM2、SM3 土壤层,气温与 SM 在半湿润区均呈现较高的偏相关关系,在 SM4 土壤层,SM 与气温在湿润区呈现较高的偏相关关系。

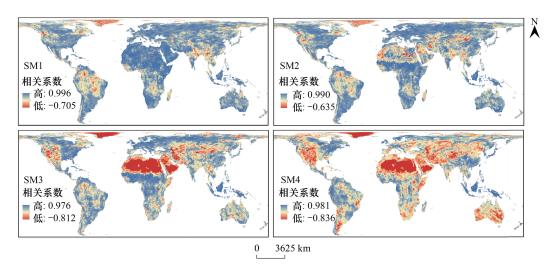


图 11 全球 SM 与降雨相关性的空间分布

Fig.11 Spatial distribution of the correlation between global soil water content and precipitation

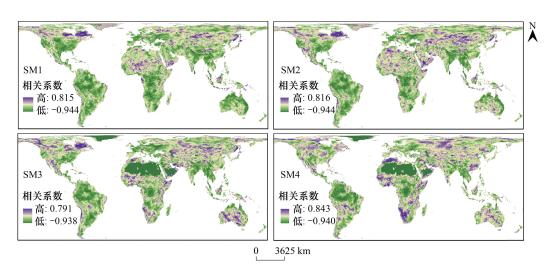


图 12 全球 SM 与气温相关性的空间分布

Fig.12 Spatial distribution of the correlation between global soil water content and temperature

表 4 不同干湿气候区全球 SM 与气温的相关系数表

Table 4 Correlation coefficient between global soil water content and air temperature in different dry and wet climate regions

	土壤深度 Soil depth	极干旱区 Hyperarid zone	干旱区 Dry zone	半干旱区 Semi-arid zone	半湿润区 Sub-humid zone	湿润区 Humid zone
偏相关系数	SM1	0.09±0.13	0.23±0.12	0.32±0.11	0.33±0.12	0.31±0.12
Partial correlation coefficient	SM2	-0.07 ± 0.14	-0.28 ± 0.13	-0.56 ± 0.13	-0.58 ± 0.17	-0.54 ± 0.15
	SM3	-0.04 ± 0.2	-0.23 ± 0.12	-0.42 ± 0.08	-0.51 ± 0.16	-0.51 ± 0.1
	SM4	-0.47 ± 0.14	-0.23 ± 0.27	-0.27 ± 0.19	-0.33 ± 0.2	-0.5 ± 0.16

2.3 NDVI、气候对全球 SM 的复合影响

2.3.1 全球气候对 SM 的复合影响

通过对 SM 与气温、降雨的复相关分析(图 13),气温、降雨对 SM 的变化有共同驱动作用,其中 SM1, SM2,SM3 受降雨和气温共同驱动较强烈,各气候区均有较强的复相关关系。

就空间分布来看,气温、降雨对 SM1、SM2 超过 80% 贡献度的区域均主要集中在干旱和半干旱区域,如澳

大利亚、非洲南部、欧洲南部、南美南部和北美南部,分别占研究区面积的 81.69%和 79.30% (P < 0.05)。气温、降雨对 SM3 超过 80%贡献度的区域占研究区面积的 61.20% (P < 0.05)。气温、降雨对 SM4 超过 80%贡献度的区域占研究区面积的 38.27% (P < 0.05)。主要位于南美洲北部的湿润区,非洲中部的湿润区及亚洲北部的湿润区。SM3、SM4 与气温、降雨之间复相关系数较高的区域较 SM1、SM2 有所减少。

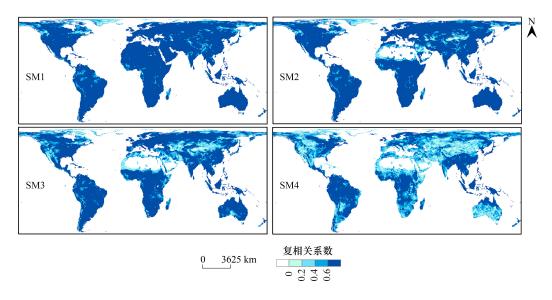


图 13 全球 SM 与气温、降雨复相关性的空间分布

Fig.13 Spatial distribution of complex correlation between global soil water and temperature and precipitation

对 SM 与气温、降雨与 NDVI 的复相关与 SM 与气温、降雨复相关进行比较,满足气温、降雨、NDVI 与 SM 复相关显著、NDVI 和 SM 偏相关不显著和 SM 与气温、降雨复相关显著的象元看作气候驱动区;满足气温、降雨、NDVI 与 SM 复相关显著、气温、降雨和 SM 复相关显著和 SM 与 NDVI 偏相关显著的像元定义为植被驱动区,满足气温、降雨、NDVI 与 SM 复相关显著、气温、降雨和 SM 复相关显著和 SM 与 NDVI 偏相关显著的像元定义为植被驱动区,满足气温、降雨、NDVI 与 SM 复相关显著、气温、降雨和 SM 复相关显著和 SM 与 NDVI 偏相关显著的像元定义为共同驱动区。因此,北美中部湿润区、半干旱区,亚洲南部干旱平旱区,澳洲干旱半干旱区可看作 SM1 共同主导区域;亚洲西部干旱区、亚洲北部湿润区、亚洲南部湿润区可看作 SM1 有候驱动区。北美东南部湿润区、亚洲西南部干旱、半干旱区,亚洲西北部湿润区、澳洲中部干旱、半干旱区可看作 SM2 共同驱动区;亚洲西部极干旱区,南美北部湿润区,亚洲北部湿润区可看作 SM2 有候驱动区。北美中部湿润区、西北部半干旱、湿润区可看作 SM3 共同驱动区;南美东南部湿润区,非洲北部湿润区、南部半干旱区可看作 SM3 有候驱动区;北美西南部干旱区,北美中部湿润区,北美北部半干旱区,亚洲中部干旱区可看作 SM3 植被驱动区;北美东南部及南美中东部湿润区,非洲中西部湿润区,亚洲西部湿润区可看作 SM4 共同驱动区;北美北部半干旱区、湿润区,非洲南部湿润区,非洲中西部湿润区,大洋洲东部干旱区半干旱区,亚洲中部干旱区半干旱区可看作 SM4 植被驱动区;北美南美中部湿润区、亚洲北部湿润区可看作 SM4 气候驱动区。

整体而言,SM 变化主要受气候和 NDVI 的共同影响,受 NDVI 影响主导的区域面积较少,随着土壤深度的加深受气候主导的区域面积逐渐减小。

2.3.2 全球 NDVI 和气候对 SM 的复合影响

研究利用全球 SM 与 NDVI、降雨和气温之间的复相关性分析来反应植被和气候对 SM 的复合影响(见图 14 和表 5)。

由图 14 全球 SM 与 NDVI、降雨、气温复相关性的空间分布图可知 SM1、SM2 与气温、降雨、NDVI 之间复

相关系数高于 0.8 的区域均主要集中在干旱和半干旱区域,如澳大利亚、非洲南部、欧洲南部、南美南部和北美南部,分别占研究区面积的 39.46%和 31.79%(P<0.05)。SM3 与气温、降雨、NDVI 之间复相关系数高于 0.8 的占研究区面积的 19.96%(P<0.05)。SM4 与气温、降雨、NDVI 之间复相关系数高于 0.8 的占研究区面积的 5.94%(P<0.05)。SM3、SM4 与气温、降雨及 NDVI 之间复相关系数较高的区域较 SM1、SM2 均有减少。

由表 5 可知,在极干旱、干旱、半干旱及半湿润区,SM 与气候、NDVI 随着土壤深度的增加,复相关系数均呈现增高的趋势,而湿润区则在 SM3 土壤层呈现下降的趋势。在各土壤层,SM 与气候、NDVI 的复相关系数均在极干旱区较高。结合图 14 可知,整个研究区在不同干湿气候条件下,SM1 与 NDVI、降雨和气温的复相关系数的低值区域均主要分布在干旱区、半干旱区和半湿润区,例如,北美北部、亚洲北部及非洲北部等少部分地区。SM2 与 NDVI、降雨、气温的复相关系数与 SM1 相比在各干湿气候区均有所升高,低值区域主要出现在干旱区。SM3 与 NDVI、降雨、气温的复相关系数的低值区域主要出现在半干旱区,例如非洲中部半干旱区、亚洲北部及中部。然而,SM4 与 NDVI、降雨、气温的复相关系数的低值区域主要出现在湿润区,其余区域复相关系数均值均较高,但分布范围缩小。

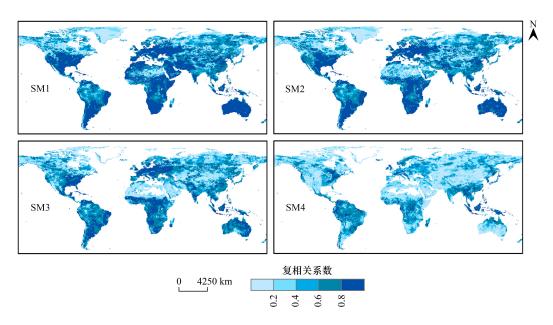


图 14 全球 SM 与 NDVI、降雨、气温复相关性的空间分布图

Fig.14 Spatial distribution of complex correlation between global soil water content and NDVI precipitation and air temperature

表 5 不同干湿气候区全球 SM 与 NDVI、降雨、气温的平均复相关系数表

Table 5 Average multiple correlation coefficients between global soil water content and precipitation and air temperature in different dry and wet climate regions

	土壤深度 Soil depth	极干旱区 Hyperarid zone	干旱区 Dry zone	半干旱区 Semi-arid zone	半湿润区 Sub-humid zone	湿润区 Humid zone
复相关系数	SM1	0.1777	0.0320	0.0430	0.0804	0.1389
Coefficient of complex correlation	SM2	0.3475	0.1296	0.0573	0.0819	0.1439
	SM3	0.4915	0.3000	0.0923	0.1124	0.1422
	SM4	0.5046	0.5050	0.3585	0.3072	0.1820

在极干旱区,气温、降雨、NDVI 对 SM1、SM2、SM3、SM4 超过 80% 贡献度的面积分别为 230 万 km²、14 万 km²、4 万 km²、466 万 km²、2900 km²。在干旱区,气温、降雨、NDVI 对 SM1、SM2、SM3、SM4 超过 80% 贡献度的面积分别为 1494 万 km²、658 万 km²、180 万 km²、2.3 万 km²。在半干旱区,气温、降雨、NDVI 对 SM1、SM2、SM3、SM4 超过 80% 贡献度的面积分别为 1468 万 km²、1288 万 km²、635 万 km²、24 万 km²。在半湿润区,气

温、降雨、NDVI 对 SM1 超过 80% 贡献度的面积分别为万 466 万 km^2 、467 万 km^2 、268 万 km^2 、6.9 万 km^2 。 在湿润区,气温、降雨、NDVI 对 SM1、SM2、SM3、SM4 超过 80% 贡献度的面积分别为 1968 万 km^2 、2083 万 km^2 、1747 万 km^2 、804 万 km^2 。 随着土壤深度的增加,在不同干湿气候区,气候、NDVI 对 SM 超过 80% 贡献度的面积均逐渐减少。

3 讨论

3.1 全球 SM、NDVI、降雨、气温趋势分析

本研究表明 2001—2020 年全球 SM 呈现一定干化趋势,这与 Wang 和 Guo^[23]的研究结果一致。全球 SM 变化趋势不仅受气候因素的影响,还受全球植被的影响。本研究发现全球植被呈向好的态势,这与 Zhu 等^[27]的结论相似,赤道地区由于降雨较多,NDVI 有升高趋势。同时,森林再生和其他施肥等做法的综合影响对 NDVI 的升高也产生影响。本研究全球降雨呈现出明显的时空分布特征,总体呈上升趋势,东半球变干,西半球变湿,北半球显著上升主要在高低纬度,南半球显著上升主要出现在中低纬度,欧亚和非洲与北美在年际趋势上存在着一个近似相反的关系。这与刘帅的研究结果一致^[28]。全球干旱区、半干旱区年降雨的变化趋势存在一定相似性,但具体到每个区域,其变化趋势却不相同,例如南美干旱区呈下降趋势,而北美干旱区则相反,北美和中亚西南同处于湿润时段,华北和北非与北美和中亚东南部降雨在长期趋势上具有相反的特征,这表明,全球干旱区和半干旱区的降水变化趋势受到多种因素的影响,包括地理位置、气候系统的变化以及人类活动等。本研究发现全球陆地平均气温上升趋势所占面积多。这与沈贝蓓等的研究结果一致^[29]。全球变暖呈现波动上升的趋势,其中超过 24.65%的区域经历了升温,而仅有 0.19%的地区出现降温,变暖的地区多于变冷的地区。这主要是由于全球范围内温室气体浓度的增加所导致的,这一趋势对全球生态系统和人类社会构成了严峻挑战,需要国际社会采取更加有效的行动来应对气候变化带来的影响^[30]。

3.2 全球 NDVI、降雨、气温对 SM 的影响

本研究通过对 SM 与降雨偏相关分析发现,降雨是地表水的主要来源,表层 SM 对降雨表现出直接的响应 这与 Li^[31]等的研究结果一致,土壤湿度与降雨变化耦合强度较大,且在时间尺度上呈同步变化。SM 与降雨 之间的反馈是一个复杂的过程,降雨会直接导致 SM 增加^[32],而 SM 反过来对降雨产生间接影响。一方面, SM 的增加有助于促进蒸散作用,提供降雨所需的水汽含量^[33]。另一方面,SM 通过调整地表有效能量在感热和潜热通量间的再分配,影响边界层温湿廓线,从而对边界层高度、湿静力能和抬升凝结高度等产生影响,最终影响降雨^[33]。本研究发现在干旱区 SM4 与降雨呈负相关,可能是因为此土壤深度较深,受降雨影响存在滞后效应,且植被的根系有所变化,浅层根系与深层根系共存于此土壤深度,增加对土壤水分的利用,造成 SM 的降低,进而表现为 SM 与降雨的负相关。

研究通过 SM 与气温的偏相关分析发现,部分区域 SM 与气温呈现明显的负相关关系,气温对于 SM 影响表现为抑制作用。Fennessy a 和 Shukla^[34]指出,几乎所有初始 SM 显著增加(减少)的地区,季节性平均蒸发量显著增加(减少),季节性平均地表气温显著降低(增加),这表明气温的增加导致土壤蒸散发增多,进而导致 SM 减少。本研究发现在各干湿气候区,随着土壤深度的增加,其抑制作用呈现不断减弱的变化趋势,在湿润区,随着土壤深度的不断加深,其抑制作用呈现先减弱后增强的变化趋势,这现象可能归因于土壤水深度的增加导致其对气候变化的敏感性降低,因而响应速度减缓。例如,表层土壤在经历干旱后能够在降雨事件后迅速恢复;相比之下,深层土壤水位较深,其补给主要依赖于河湖渗流和偶发的短时强降雨^[34]。研究发现 SM 对于气温的响应弱于对降雨的响应,土壤水分的变化直接受到降雨事件的影响。较大的降雨事件能够显著增加土壤层中的水分含量^[35],相比之下,土壤水分对气温的响应则更加复杂,因为它不仅受到降雨的影响,还受到其他因素如蒸发、植被蒸腾等的影响^[36]。研究通过 SM 与 NDVI 的偏相关分析发现,表层 SM(SM1,SM2)的增加会增强 NDVI 的动态变化,这种情况出现在北美南部、欧亚大陆南部、南美洲东部和南部、澳大利亚和南非等半干旱地区。研究在南美西部地区观测到的负相关表明,表层 SM(SM1,SM2)增加往往会抑制 NDVI,这

可能与土壤水分过剩(如渍涝)有关。本研究发现 SM3 与 NDVI 的相关性更高,因为与近表层浅层相比,植物根系对该层水分的利用率更高。同时,SM2 对 NDVI 的敏感度更高,可能因为该层的粗根比例相对较高,可更有效地利用土壤水分促进植被生长。Khanal^[37]的研究结果表明,植被功能通常与近地表土壤湿度的关系更强,特别是在半干旱地区和树木覆盖率低的地区。相比之下,在树木覆盖率高的地区和干旱地区,与陆地储水量的相关性与近地表土壤湿度相当,甚至更高,这表明植被可以利用其深层根系来获取更深层的土壤水分,类似于干旱地区的植被。植被生长与 SM 正负相关性共存,归因于不同植被类型对土壤水分吸收的差异以及不同植被具有不同深度的根系层,吸收不同深度的土壤水来生长。SM 在植被生长过程中的量化评定及具体影响机制还有待进一步探讨。

3.3 全球植被和气候对 SM 的复合影响

本研究 SM 与 NDVI、气候的复相关表明,随着土壤深度的增加,在不同干湿气候区,气温、降雨、NDVI 对 SM 超过 80%贡献度的面积均逐渐减少,这可能是因为,随着土壤深度的增加,SM 对气候因子的敏感性降低,浅层土壤更容易受到降水和蒸发作用的直接影响,而深层土壤则更多地依赖于地下水位和长期累积的水分供应,且随着土壤深度的增加,植物可能会通过调整根系分布来适应地下水位的变化,从而减少对土壤水分的依赖。这种适应机制可能会导致深层土壤中的水分对气候因子的敏感性[38]。研究通过复相关进行全球 SM 驱动因子分区,满足气候、NDVI 与 SM 复相关显著、NDVI 和 SM 偏相关不显著和 SM 与气候复相关显著的象元看作气候驱动区域;满足气候、NDVI 与 SM 复相关显著、气候和 SM 复相关不显著和 SM 与 NDVI 偏相关显著的像元定义为植被驱动区域,满足气候、NDVI 与 SM 复相关显著、气候和 SM 复相关显著和 SM 与 NDVI 偏相关显著的像元定义为植被驱动区域,满足气候、NDVI 与 SM 复相关显著、气候和 SM 复相关显著和 SM 与 NDVI 偏相关显著的像元定义为共同驱动区域。该分区方法与陈云浩等的分区方法一致[39],表现出了一定的区域时空特征。该方法通过因子分析有助于识别出影响 SM 变化程度的主要因素。在全球 SM 驱动因子分区中,类似的因子分析可以用来识别影响 SM 的关键因素,如降雨、地形、植被覆盖等[40]。

全球气候系统的复杂性和动态变化,包括大气、海洋、冰川和陆地表面等多个组成部分的相互作用[41]。例如,CCSM3 模型就是一个集成了这些组成部分的耦合气候模型,它能够在不同的空间分辨率下产生现实的模拟结果[41]。因此在进行全球 SM 驱动因子分区时,考虑地理和气候条件的多样性是一个复杂但至关重要的过程。在地理条件方面,地形、土壤和植被等局部预测因素对于理解和预测地球表面过程(ESP)在高纬度地区的分布具有重要意义[42]。这意味着,在进行全球 SM 驱动因子分区时,不能仅依赖于气候因素,还必须考虑地形、土壤和植被等局部条件的影响。此外,环境因素对植物分布的影响在全球和区域尺度上存在差异,这些差异随着纬度和植物类群而变化[43]。这表明,在全球范围内考虑地理和气候条件的多样性时,必须考虑不同纬度区域的特定环境因素,以及这些因素如何影响 SM 分布。考虑到太阳地球工程可能导致的区域气候差异[44],在进行全球 SM 驱动因子分区时,还必须评估这些技术措施可能带来的长期影响。本研究在进行SM 驱动因素分区,仅考虑了气温、降水和 NDVI 作为因子,这是因为本研究的重点是基于不同的干湿气候区进行划分,而并非深入探究小区域内的 SM 影响因素。这样的划分方法有助于理解在大尺度上不同气候条件下 SM 的分布和变化规律,而不会因局部的微气候或土地利用变化而干扰研究结果。因此,在后续的 SM 主导因素分区研究中建议考虑气候变化、大气和海洋的相互作用、地形、土壤和植被等局部条件的影响,以及不同纬度区域的特定环境因素。

整体来看,综合考虑多方面指标对于陆地干湿响应的评估结果更为温和,即明显变化区域相对较少。干湿变化综合评估的核心在于深入理解多维度、多圈层要素间的相互关系,特别是大气-土壤-径流-植被多要素之间的相互作用及其对系统干湿演变的推动与制约作用。理解多要素之间的相互作用、推动与制约机制有助于全面认识并准确预测气候变化背景下陆地干湿演变的趋势、阈值等特征,进而为生态系统的可持续性提供科学支撑^[45]。

4 结论

(1)全球 SM、NDVI、降雨、气温趋势分析

2001—2020 年全球 SM 在空间分布上呈现一定的干化趋势,全球不同干湿气候区 NDVI、降雨及气温均总体呈显著增长趋势,SM、降雨年际变化较平稳,气温波动较大。

(2)全球 NDVI、降雨、气温对 SM 的影响

SM-降雨的偏相关关系表明,在 SM1、SM2 土壤层,各干湿气候区 SM 与降雨均呈现较高的相关性;极干旱区 SM3 与降雨相关系数下降较大。在干旱区,SM 与降雨的偏相关性在 SM4 土壤层呈负相关,从土壤深度来看,不同干湿气候区的 SM 与降雨相关系数均随着深度的加深而减少。SM-气温的关系表明,除 SM1 土壤层外,不同干湿气候区 SM 与气温呈显著的负相关关系,而在极干旱区,在 SM1—SM4 土壤层,随着深度的增加,偏相关系数均呈现先减小后增加的趋势。SM-NDVI 的关系表明,各干湿气候区 SM 与 NDVI 的偏相关系数随着深度的增加呈现先上升后下降的趋势;除湿润区外,均在 SM2 土壤层呈现较高的偏相关关系;在极干旱区域,SM4 与 NDVI 呈负相关关系。

(3)全球 NDVI 和气候对全球 SM 的复合影响

SM 与气温、降雨、NDVI 的复相关表明,SM1 与 NDVI、降雨和气温的复相关指数的低值区域均主要分布在干旱区、半干旱区和半湿润区。SM2 与 NDVI、降雨的复相关指数的低值区域主要出现在干旱区。SM3 与 NDVI、降雨、气温的复相关系数的低值区域主要出现在半干旱区。SM4 与 NDVI、降雨、气温的复相关指数的低值区域主要出现在湿润区。探究 SM 驱动因子进行分区,北美中部湿润区、澳洲干旱半干旱区为 SM1、SM2 共同驱动区;北美中部湿润区、西北部半干旱、湿润区可看作 SM3 共同驱动区;北美东南部及南美中东部湿润区,非洲中西部湿润区,亚洲西部湿润区可看作 SM4 共同驱动区;亚洲西部干旱、半干旱区,亚洲北部湿润区可看作 SM1、SM2 植被驱动区;北美北部干旱区、亚洲中部干旱区可看作 SM3、SM4 植被驱动区;南美南部湿润区可看作 SM1、SM2 气候驱动区;南美中部、东南部湿润区可看作 SM3、SM4 气候驱动区。

参考文献 (References):

- [1] Bhunia G S, Chatterjee U, Shit P K, Kashyap A. Wasteland reclamation and geospatial solution; existing scenario and future strategy//Modern Cartography Series. Academic Press, 2021, 10: 87-113.
- [2] Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Wu L H, Cao Y, Li H W, Li C J, Yang Y J, Hu Z Y, Tian S Q. Variation trend of global soil moisture and its cause analysis. Ecological Indicators, 2020, 110: 105939.
- [3] Tong Y P, Wang Y Q, Song Y, Sun H, Xu Y T. Spatiotemporal variations in deep soil moisture and its response to land-use shifts in the Wind-Water Erosion Crisscross Region in the Critical Zone of the Loess Plateau (2011—2015), China. Catena, 2020, 193; 104643.
- [4] Njoku E G, Jackson T J, Lakshmi V, Chan T K, Nghiem S V. Soil moisture retrieval from AMSR-E. IEEE transactions on Geoscience and remote sensing, 2003, 41(2): 215-229.
- [5] Enenkel M, Reimer C, Dorigo W, Wagner W, Pfeil I, Parinussa R, Jeu R D. Combining satellite observations to develop a global soil moisture product for near-real-time applications. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(10): 4191-4208.
- [6] Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J P, Delwart S, Cabot F, Boutin J, Escorihuela M, Font J, Reul N, Gruhier C, Juglea S, Drinkwater M, Hahne A, Martín-Neira M, Mecklenburg S. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(05): 666-687.
- [7] Entekhabi D, Njoku E, O'Neill P, Kellogg K, Entin J. The NASA soil moisture active passive (SMAP) mission formulation [C]//2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2011: 2302-2305.
- [8] De Santis D, Biondi D, Crow W T, Camici S, Modanesi S, Brocca L, Massari C. Assimilation of satellite soil moisture products for river flow prediction: An extensive experiment in over 700 catchments throughout Europe. Water Resources Research, 2021, 57(6): e2021WR029643.
- [9] 朱丽,吕潇雨,郭浩,孟翔晨,田芸菲. ERA5-Land 降水产品在黄河流域干旱监测中的适用性研究. 干旱气象, 2023, 41(5): 677.
- [10] Pinke Z, Decsi B, Kardos M K, Kern Z, Kozma Z, Pásztor L, Ács L. Changing patterns of soil water content and relationship with national wheat and maize production in Europea Journal of Agronomy, 2022, 140: 126579.
- [11] Zohaib M, Choi M. Satellite-based global-scale irrigation water use and its contemporary trends. Science of the Total Environment, 2020, 714-136719.
- [12] Xu L, Chen N C, Zhang X, Moradkhani H, Zhang C, Hu C L. In-situ and triple-collocation based evaluations of eight global root zone soil moisture products. Remote Sensing of Environment, 2021, 254: 112248.
- [13] 郑曼迪, 刘忠, 许昭辉, 李剑辉, 孙君龄. 基于微波遥感的土壤水分反演估算研究进展. 土壤学报, 2024, 61(01): 16-28.
- [14] Bond-Lamberty B, Bailey V L, Chen M, Gough C M, Vargas R. Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades. Nature, 2018, 560(7716): 80-83.
- [15] Feng X M, Fu B J, Zhang Y, Pan N Q, Zeng Z Z, Tian H Q, Lyu Y, Chen Y Z, Ciais P, Wang Y P, Zhang L, Cheng L, Maestre F T,

- Fernández-Martínez M, Sardans J, Peñuelas J. Recent leveling off of vegetation greenness and primary production reveals the increasing soil water limitations on the greening Earth. Science Bulletin, 2021, 66(14): 1462-1471.
- [16] Good S P, Noone D, Bowen G. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes. Science, 2015, 349 (6244): 175-177.
- [17] Zhou S, Williams A P, Lintner B R, Berg A M, Zhang Y, Keenan T F, Cook B I, Hagemann S, Seneviratne S I, Gentine P. Soil moisture-atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands. Nature Climate Change, 2021, 11(1): 38-44.
- [18] Magnan A K, Pörtner H O, Duvat V K E, Garschagen M, Guinder V A, Zommers Z, Hoegh-Guldberg O, Gattuso J P. Estimating the global risk of anthropogenic climate change. Nature Climate Change, 2021, 11(10): 879-885.
- [19] Park C E, Jeong S J, Joshi M, Osborn T J, Ho C H, Piao S L, Chen D L, Liu J G, Yang H, Park H, Kim B M, Feng S. Keeping global warming within 1.5 C constrains emergence of aridification. Nature Climate Change, 2018, 8(1): 70-74.
- [20] Albert K R, Kongstad J, Schmidt I K, Ro-Poulsen H, Mikkelsen T N, Michelsen A, Linden L V D, Beier C. Temperate heath plant response to dry conditions depends on growth strategy and less on physiology. Acta Oecologica-International Journal of Ecology, 2012, 45: 79-87.
- [21] 包青岭, 丁建丽, 王敬哲, 刘婕, 马春玥. 基于 VIC 模型模拟的干旱区土壤水分及其时空变化特征. 生态学报, 2020, 40(9): 3048-3059.
- [22] 管晓丹,石瑞,孔祥宁,刘婧晨,甘泽文,马洁茹,罗雯,曹陈宇.全球变化背景下半干旱区陆气机制研究综述.地球科学进展,2018,33 (10):995.
- [23] Huang J P, Yu H P, Guan X D, Wang G Y, Guo R X. Accelerated dryland expansion under climate change. Nature climate change, 2016, 6(2): 166-171.
- [24] 路中, 雷国平, 郭一洋, 马泉来. 不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响. 生态学报, 2021, 41(05): 1894-1906.
- [25] 骆伯胜, 钟继洪, 陈俊坚. 土壤肥力数值化综合评价研究. 土壤, 2004, (01): 104-106+111.
- [26] Midi H, Sarkar S K, Rana S. Collinearity diagnostics of binary logistic regression model. Journal of interdisciplinary mathematics, 2010, 13(3): 253-267.
- [27] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Arneth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Peñuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng, N. Greening of the Earth and its drivers. Nature climate change, 2016, 6(8): 791-795
- [28] 刘帅, 王建捷, 陈起英, 孙健. GRAPES_GFS 模式全球降水预报的主要偏差特征. 气象学报, 2021, 79(02): 255-281.
- [29] 沈贝蓓, 宋帅峰, 张丽娟, 王子晴, 任崇, 李永生. 1981—2019 年全球气温变化特征. 地理学报, 2021, 76(11): 2660-2672.
- [30] 张强,李栋梁,姚玉璧,王芝兰,王莺,王静,王劲松,王素萍,岳平,王慧,韩兰英,司东,李清泉,曾刚,王欢.干旱形成机制与预测 理论方法及其灾害风险特征研究进展与展望.气象学报,2024,82(01):1-21.
- [31] Li M X, Wu P L, Sexton D M H, Ma Z G. Potential shifts in climate zones under a future global warming scenario using soil moisture classification. Climate Dynamics, 2021, 56; 2071-2092.
- [32] Cheng S J, Guan X D, Huang J P, Ji F, Guo R X. Long-term trend and variability of soil moisture over East Asia. Journal of Geophysical Research; Atmospheres, 2015, 120(17); 8658-8670.
- [33] 张述文, 刘源, 曹帮军, 李少英. GLDAS 和 CMIP5 产品的中国土壤湿度—降水耦合分析及变化趋势. 气候与环境研究, 2016, 21(02): 188-196
- [34] Fennessy M J, Shukla J. Impact of initial soil wetness on seasonal atmospheric prediction. Journal of Climate, 1999, 12(11): 3167-3180.
- [35] 周怀洲,吴碧琼,陈鹏宇,简毅,邓捷,宋春林,杨宇,王根绪,孙守琴.水力侵蚀作用下坡地土壤碳氮淋溶迁移特征.中国农业气象, 2024,45(09):943-952.
- [36] Lockart N, Kavetski D, Franks S W. On the role of soil moisture in daytime evolution of temperatures. Hydrological Processes, 2013, 27(26): 3896-3904.
- [37] Khanal P, Hoek Van Dijke A, Schaffhauser T, Li W T, Paulus S J, Zhan C H, Orth R. Relevance of near-surface soil moisture vs. terrestrial water storage for global vegetation functioning. EGUsphere, 2023, 2023; 1-19.
- [38] Qi J, Markewitz D, Radcliffe D. Modelling the effect of changing precipitation inputs on deep soil water utilization. Hydrological Processes, 2018, 32(5): 672-686.
- [39] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983~1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716.
- [40] 王秀红. 多元统计分析在分区研究中的应用. 地理科学, 2003, 23(1): 66-71.
- [41] Collins W D, Bitz C M, Blackmon M L, Bonan G B, Bretherton C S, Carton J A, Chang P, Doney S C, Hack J J, Henderson T B, Kiehl J T, Large W G, McKenna D S, Santer B D, Smith R D. The community climate system model version 3 (CCSM3). Journal of climate, 2006, 19 (11): 2122-2143.
- [42] Aalto J, Luoto M. Integrating climate and local factors for geomorphological distribution models. Earth surface processes and landforms, 2014, 39 (13): 1729-1740.
- [43] Huang E, Chen Y X, Fang M, Zheng Y, Yu S X. Environmental drivers of plant distributions at global and regional scales. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(3): 697-709.
- [44] Kravitz B, MacMartin D G, Robock A, Rasch P J, Ricke K L, Cole J N, Curry C L, Irvine P J, Ji D Y, Keith D W, Kristjánsson J E, Moore J C, Muri H, Singh B, Tilmes S, Watanabe S, Yang S T, Yoon J H. A multi-model assessment of regional climate disparities caused by solar geoengineering. Environmental Research Letters, 2014, 9(7): 074013.
- [45] 王亚萍, 王帅, 丁婧祎, 赵文武, 尹嘉敏. 气候变化背景下全球陆地干湿变化研究综述. 生态学报, 2023, 43(02): 475-486.