

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.001.

董金义, 罗敏, 孟凡浩, 等. 蒙古高原土壤水分时空演变格局演变特征分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 110-121.

Dong Jinyi, Luo Min, Meng Fanhao, et al. Spatiotemporal Evolution of Soil Moisture and Its Driving Forces in the Mongolian Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 110-121.

蒙古高原土壤水分时空演变格局演变特征分析

董金义^{1,2}, 罗敏^{1,2}, 孟凡浩^{1,2}, 萨楚拉^{1,2}, 包玉海^{1,2}

(1. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022; 2. 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: [目的] 解析蒙古高原土壤水分的时空分异及变化规律并量化关键驱动因素的影响, 为区域生态恢复及生态系统可持续发展提供理论依据。[方法] 基于 ERA5 土壤水分数据揭示了 2000—2020 年蒙古高原 0—289 cm 土壤水分空间分异特征及变化规律, 并量化了气象、归一化植被指数 (NDVI)、陆地水储量异常 (TWSA)、土壤质地、地形等不同环境因子的影响。[结果] (1) 2000—2020 年蒙古高原土壤水分整体呈东北高、西南低的分布特征。土壤水分由浅至深呈先增加再减少的趋势, 且仅深层土壤水分 (100—289 cm) 变化趋势显著。(2) 大部分区域未来变化趋势呈持续稳定状态, 从土壤表层到第 4 层分别有 58.5%, 76.7%, 91.3%, 98.8% 的区域土壤水分变化趋势与过去相同; 蒙古高原西北部及内蒙古中部地区土壤水分干化情况可能会进一步加重。(3) 温度、TWSA、降水和 NDVI 是影响土壤水分空间分布的主导环境因子。大部分因子交互呈现出双因子增强作用, 蒙古高原土壤水分空间分异是多因子共同作用的结果。(4) 表层和次表层土壤水分的变化主要受降水的正向影响, 主控区域分别占 98.7%, 94.8%; 降水和 TWSA 对 28—100 cm 土壤水分的主控区域分别集中在森林和草原覆盖区, 主导区域面积占比分别为 38.7%, 38.8%; TWSA 降低是导致深层土壤水分干化的主要驱动力且其主控区域面积占比达 58.6%; 植被耗水的增加以及温度的升高分别主控 16.2%, 14.8% 区域 100—289 cm 土壤水分变化。[结论] 土壤水分的时空分异及变化规律明显, 各深度的土壤水分的主要驱动力各有不同, 对蒙古高原生态恢复及生态系统可持续发展意义重大, 未来应深入分析人类活动对其的影响。

关键词: 土壤水分; 时空变化; 蒙古高原; 地理探测器; 气候变化

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0110-12

Spatiotemporal Evolution of Soil Moisture and Its Driving Forces in the Mongolian Plateau

Dong Jinyi^{1,2}, Luo Min^{1,2}, Meng Fanhao^{1,2}, Sa Chula^{1,2}, Bao Yuhai^{1,2}

(1. College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Hohhot 010022, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to analyze the spatiotemporal differentiation and variation of soil moisture in the Mongolian Plateau, and to quantify the influence of key driving factors, so as to provide a theoretical basis for regional ecological restoration and sustainable ecosystem development. [Methods] Based on the ERA5 soil moisture data, the spatial differentiation and changes of soil moisture at the depth of 0—289 cm in the Mongolian Plateau from 2000 to 2020 were revealed, and the impacts of different environmental factors such as meteorology, normalized difference vegetation index (NDVI), terrestrial water storage anomaly (TWSA), soil texture, and topography were further quantified. [Results] (1) From 2000 to 2020, soil moisture in the Mongolian Plateau displayed a distribution characteristic of high level in the north-

收稿日期: 2023-04-02

修回日期: 2023-05-09

资助项目: 国家自然科学基金 (42101030, 42361024, 42261079); 内蒙古高校青年科技英才项目 (NJYT22027, NJYT23019); 内蒙古师范大学基本科研业务费项目 (2022JBBJ014, 2022JBQN093)

第一作者: 董金义 (1999—), 男 (蒙古族), 内蒙古阿荣旗人, 硕士研究生, 研究方向为土壤水分变化。E-mail: 20224016032@mails.imnu.edu.cn
通信作者: 罗敏 (1990—), 女, 山东邹城人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源和遥感与地理信息系统研究。E-mail: luomin@imnu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

east and low level in the southwest. From shallow to deep layers, the soil moisture presented a change trend of no significant increase (0—28 cm), no significant decrease (28—100 cm) and significant decrease (100—289 cm). (2) There were 58.5%, 76.7%, 91.3%, and 98.8% of the regions with Hurst index greater than 0.5. The change trend of soil moisture in most regions in the future will be the same as in the past. The drying of soil moisture in the northwestern Mongolian Plateau and central Inner Mongolia may further aggravate. (3) Temperature, TWSA, precipitation, and NDVI were the dominant environmental factors affecting the spatial distribution of soil moisture. Most of the factor interactions showed a bi-factor enhancement effect, and the spatial differentiation of soil moisture in the Mongolian Plateau was the result of the joint action of multiple factors. (4) The changes in surface and subsurface soil moisture were mainly positively affected by precipitation, and the dominant control areas accounted for 98.7% and 94.8% of the total vegetated area of the plateau, respectively. The main control areas of precipitation and TWSA on soil moisture at the layer of 28—100 cm concentrated in areas covered by forestland and grassland, with the dominant area accounting for 38.7% and 38.8%, respectively. The decrease in TWSA was the main driving force leading to the drying of soil moisture in the layer of 100—289 cm, with the main dominant area accounting for 58.6%. The increase in water consumption by vegetation and the increase in temperature dominantly controlled the changes in soil moisture in layer of 100—289 cm in 16.2% and 14.8% of the plateau, respectively. [Conclusion] The spatial and temporal differentiation and change patterns of soil moisture are obvious, and the main driving forces of soil moisture at each depth are different. This is of great significance to the ecological restoration of the Mongolian Plateau and the sustainable development of the ecosystem. In the future, the impact of human activities on it should be analyzed in depth.

Keywords: soil moisture; spatiotemporal change; Mongolian Plateau; geographic detector; climate change

土壤水分作为大气-植被-土壤-地下水系统的纽带和核心,同时也是地表植被赖以生存的水分条件基础,降水、灌溉水以及地下水只有转化成土壤水分才能被植被吸收利用^[1-2]。聚焦土壤水分的时空分异特征及变化规律并实现关键驱动因素的量化对区域生态恢复及可持续发展都具有重要的现实意义^[3]。蒙古高原位于典型的干旱半干旱气候过渡带,水资源稀缺是制约当地经济发展和生态稳定的关键因素^[4-5]。特别是近几十年受气候变化以及经济快速发展的影响,蒙古高原土壤干化现象明显、植被生产力退化加剧,严重威胁区域生态系统稳定和已经取得的生态建设成效^[6-7]。蒙古高原特殊的地理位置,导致长时间、连续准确的土壤水分监测数据缺乏,对蒙古高原土壤水分的时空分异特征及关键驱动要素很难进行全面分析^[8-9]。

遥感监测、反演以及陆面过程模型模拟的土壤水分产品具有快速、宏观和动态等特点,使得土壤水分相关研究实现了由点向面的跨越,对大尺度土壤水分时空变化规律研究具有重要意义^[10-11]。遥感土壤水分产品 AMSR-E, SMOS, ECV 以及再分析土壤水分产品 NCEP-CFSR, GLDAS, MERRA, ERA5 等广泛用于全球及区域尺度土壤水分相关研究^[12]。如范科

科等^[13]基于 NCEP-CFSR 等再分析土壤水分产品,揭示了青藏高原地区土壤水分的时空变化特征;Qiu 等^[14]联合 ECV, ERA-Interim 和站点监测数据,量化了 1996—2010 年中国土壤水分变化特征。然而,作为气候变化的敏感区域,目前针对蒙古高原土壤水分时空变化规律的研究相对较少,主要集中在数据精度评价方面^[15]。因此,亟待基于遥感或再分析土壤水分产品开展气候变化背景下蒙古高原土壤水分时空分布特征及其变化规律的研究。

针对以上事实,为全面揭示蒙古高原土壤水分时空分异特征及变化规律,本文基于长时序、高精度的 ERA5 再分析土壤水分产品,研究蒙古高原不同深度土壤水分的时空分异特征及动态变化趋势;在此基础上进一步揭示蒙古高原气象、NDVI 和 TWSA 等关键驱动要素的影响,以期气候变化背景下该区域水资源管理、生态系统保护及干旱等自然灾害的预防提供科学依据。

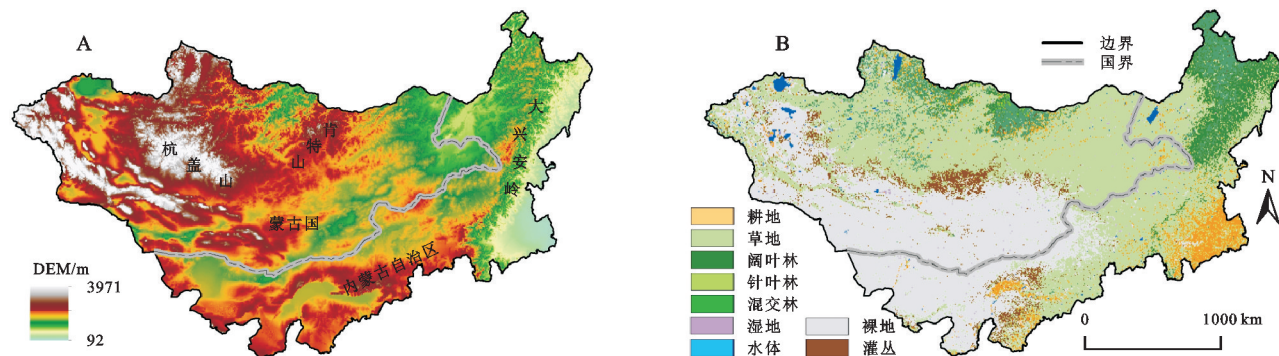
1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

蒙古高原主体包括中国内蒙古自治区(以下简称“内蒙古”)和蒙古国,地理位置介于 88°43′—126°04′E,

37°24′—53°23′N。蒙古高原北起萨彦岭、雅布洛诺夫山脉,南至阴山山脉,东起大兴安岭、西至阿尔泰山;地势整体西高东低,平均海拔 1 580 m(图 1)。研究区属温带大陆性气候,多年平均降水量约 200 mm;

冬季寒冷干燥且时间跨度长,夏季炎热昼夜温差大。受高原水热条件影响,植被覆盖由东北向西南依次跨越森林、森林草原、典型草原、荒漠草原、戈壁荒漠,生态环境多样且脆弱^[16]。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2021)5443 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 蒙古高原地形和土地覆盖类型

Fig. 1 Mongolian plateau terrain and land cover types

1.2 数据来源

本研究采用的数据包括土壤水分、土地利用覆盖变化(LUCC)、降水、温度、数字高程模型(DEM)、土壤类型、NDVI 和 TWSA 等数据。土壤水分、降水及温度数据采用 2000—2020 年的 ERA5 再分析数据集,时空分辨率分别为 1 个月和 0.1°。其中,ERA5 产品包括 0—7, 7—28, 28—100, 100—289 cm 共 4 层不同深度土壤水分。DEM 数据源于中国地理空间数据云平台,用于对研究区坡度和坡向的计算。土壤类型数据来源于 FAO 的 HWSD1.2 全球土壤同化数据库,该数据包括土壤中砂粒、粉粒和黏粒含量等参数。NDVI 数据来源于美国地质勘察局(USGS)网站发布的 MODIS 每 8 d 的 MOD13A2 产品,空间分辨率为 500 mm。TWSA 数据采用 Li 等^[17]通过机器学习技术重建的 1979 年以来全球尺度的数据集,其时空分辨率为 0.5°/月。LUCC 数据来自 1:100 万的内蒙古和蒙古国植被类型数据。为了保证数据分辨率的统一,本研究通过最邻近插值法将所有数据均重采样到 0.1°。

2 研究方法

2.1 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验

Theil-Sen Median 趋势分析是一种非参数估计方法,该方法受数据异常值的影响较小,能够很好地揭示时间序列的变化趋势^[18]。在像元尺度上,采用该方法计算 2000—2020 年土壤水分和其驱动因子的变化趋势。具体计算公式如下:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad 2000 \leq i < j \leq 2020 \quad (1)$$

式中: x_j 与 x_i 分别为第 i 和第 j 年的像元观测值; β

为时间序列的斜率;当 $\beta > 0$ 时,表示研究时段内时间序列呈增加趋势,反之呈下降趋势。

Mann-Kendall 检验方法可用来判断 Theil-Sen Median 趋势的显著性。相关计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{S(s)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{S(s)}} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$S(s) = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18} \quad (4)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_j 与 x_i 分别为第 i 和第 j 年的像元观测值; n 为时间序列长度; sgn 为符号函数。在给定显著性水平 α 下,当统计量 $|Z| > u_{1-\alpha/2}$ 时,表示时间序列变化趋势显著。本研究取 $\alpha = 0.05$,相应 Z 的阈值为 ± 1.96 。

2.2 重标极差(R/S)分析

R/S 分析用于定量描述时间序列的长程依赖性。本研究基于 R/S 分析方法的 Hurst 指数分析蒙古高原土壤水分变化趋势的持续性特征^[19]。对于蒙古高原土壤水分的时间序列 $SM_t, t = 1, 2, 3, \dots, n$, 对于任意正整数 τ , 定义该时间序列的均值序列:

$$\overline{SM}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} SM_t \quad (t = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

累计离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{t=1}^{\tau} (SM_t - \overline{SM}_\tau) \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (7)$$

极差:

$$R_{\tau} = \frac{\max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau)}{1 \leq t \leq \tau} \quad (\tau = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

标准差:

$$S_{\tau} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (SM_{\tau} - \overline{SM_{\tau}})^2} \quad (\tau = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (9)$$

Hurst 指数:

$$\frac{R_{\tau}}{S_{\tau}} = (\alpha \tau)^H \quad (10)$$

Hurst(H 值)包含 3 种形式:当 $0.5 < \text{Hurst} \leq 1$, 表明时间序列是一个持续性序列,即未来变化与过去变化趋势一致,且 H 值越接近于 1,则持续性越强;如果 $H = 0.5$,则说明时间序列为随机序列,不存在长期相关性;如果 $0 \leq H < 0.5$,表明此时间序列具有反持续性,即未来变化趋势与过去保持相反, H 值越接近于 0,则相逆性越强。

2.3 地理探测器

地理探测器是探测地理要素的空间分异特性并阐明其背后驱动力的一种统计方法^[20]。本研究分别利用地理探测器的因子探测、交互探测和生态探测来探究不同深度土壤水分空间分异的驱动力、多因子交互作用以及因子间作用的显著性差异。

2.3.1 因子探测 选择因子探测器计算各因子的 q 值,来量化不同因子对蒙古高原土壤水分空间分异的贡献,计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{g=1}^K N_g \sigma_g^2}{N \sigma^2} \quad (11)$$

式中:因子总数记为 K ; N 与 N_g 分别为全区与层 g 的单元数; σ^2 与 σ_g^2 分别为全区与层 g 的 Y 值的方差; $\sum_{g=1}^K N_g \sigma_g^2$ 与 $N \sigma^2$ 分别为层内方差之和以及全区总方差;值取值范围介于 0~1。选择温度(TEMP)、陆地水储量异常(TWSA)、降水(PREP)、归一化植被指数(NDVI)、土地利用/土地覆盖变化(LUCC)、砂粒(Sand)、粉粒(Silt)、黏粒(Clay)、高程(DEM)、坡度(Slope)与坡向(Aspect)共 11 个驱动因子进行蒙古高原土壤水分空间分异驱动力分析。

2.3.2 交互作用探测 交互作用探测用于探究两个影响因子共同作用时,对因变量 Y 的解释能力较单因子为增强还是减弱。首先通过因子探测计算两个自变量 X_1 与 X_2 别对 Y 的 q 值,得到 $q(X_1)$ 与 $q(X_2)$,然后再计算两个因子交互作用下的 q 值,即 $q(X_1 \cap X_2)$,最后确定交互类型。

2.3.3 生态探测 生态探测用于分析两个影响因子对因变量空间分布的影响是否呈显著差异,用 G 统计量来衡量:

$$G = \frac{N_{X_1}(N_{X_2} - 1) \sum_{g=1}^K N_g \sigma_g^2}{N_{X_2}(N_{X_1} - 1) \sum_{g=1}^K N_g \sigma_g^2} \quad (12)$$

式中: N_{X_1} 与 N_{X_2} 为因子样本量,其余符号含义均与因子探测相同。

2.4 回归分析

采用回归分析定量区分主导环境因子的变化对蒙古高原土壤水分的影响^[21]。首先对参与回归的时间序列进行标准化处理:

$$z(\gamma) = \frac{\gamma - \bar{\gamma}}{s(\gamma)} \quad (13)$$

式中: γ 为原始时间序列; $\bar{\gamma}$ 和 $s(\gamma)$ 分别为时间序列的均值和标准差。然后对标准化之后的时间序列建立多元线性回归方程:

$$SM_{pre} = a \cdot PREP + b \cdot TEMP + c \cdot NDVI + d \cdot TWSA + \theta \quad (14)$$

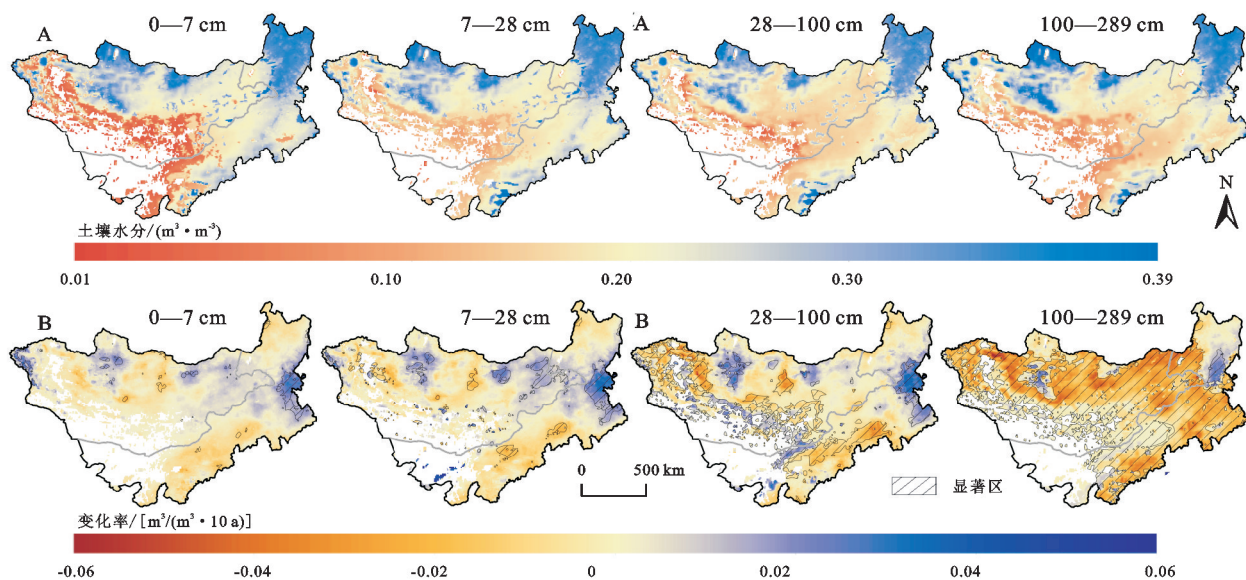
式中: a, b, c, d 分别为降水、温度、NDVI 和陆地水储量异常的回归系数,可用于量化不同因子对土壤水分影响的大小; θ 为回归常数项。

3 结果与分析

3.1 蒙古高原土壤水分时空分布及变化格局

2000—2020 年蒙古高原土壤水分空间分布呈现由西南向东北阶梯式增加的分布特征,且北部山区土壤水分明显高于其他地区(图 2)。高原 0—7, 7—28, 28—100 以及 100—289 深度土壤水分均值分别为 0.21, 0.22, 0.21, 0.22 m^3/m^3 。不同深度土壤水分变化速率存在强烈的时空异质性,整体上随着土层深度的加深,土壤水分呈显著减少趋势的面积进一步扩张(图 3)。蒙古高原 0—100 cm 土壤水分呈减少趋势的面积占比分别为 44.4%, 42.7%, 52.2%, 主要分布在蒙古高原西北及东南部地区,且大部分区域减少趋势并不显著;而 100—289 cm 深度土壤水分呈减少趋势的面积占比高达 74.7%,且大部分区域(65.2%)土壤水分减少趋势均通过显著性检验,呈增加趋势的区域集中分布在高原东北部。

从时间尺度来看,2000—2020 年蒙古高原 0—7, 7—28 cm 土壤水分整体呈不显著增加趋势,增长率分别为 0.000 15, 0.000 24 $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$;随着土层深度的增加,28—100, 100—289 cm 土壤水分开始呈现减少趋势,减少速率分别为 -0.000 03, -0.001 3, 且 100—289 cm 土壤水分减少趋势通过显著性检验($p < 0.05$)。该结果说明随着土层深度的增加,土壤水分呈现由增到减的变化趋势特征。



注:斜线覆盖的区域表示变化率已通过显著性检验。

图2 2000—2020年蒙古高原不同深度土壤水分的空间分布与变化趋势空间分布格局

Fig. 2 Spatial distribution and change trend spatial distribution pattern of soil moisture at different depths in the Mongolian Plateau from 2000 to 2020

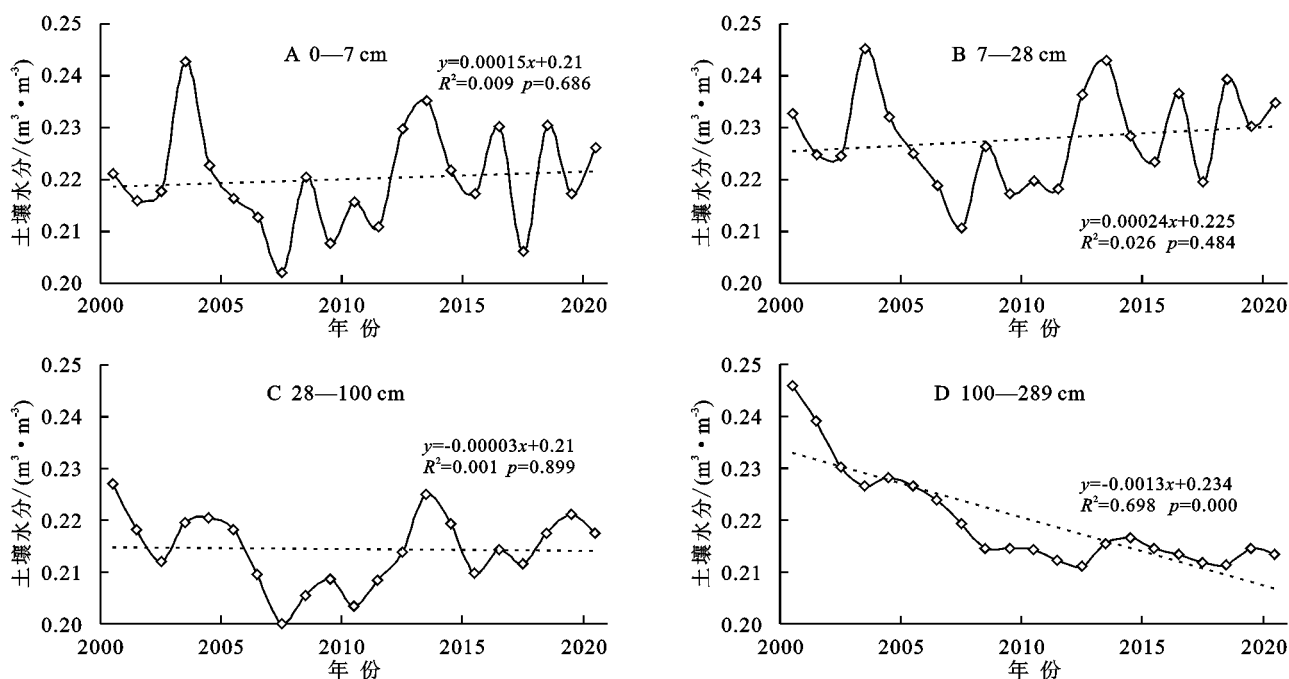


图3 2000—2020年不同深度土壤水分时间序列变化趋势

Fig. 3 Change trends of soil moisture time series at different depths from 2000 to 2020

3.2 蒙古高原土壤水分变化持续性分析

为了确定土壤水分变化趋势的持续性,通过 R/S 分析得到蒙古高原土壤水分变化的 Hurst 指数空间分布图(图 4)。结果发现,蒙古高原土壤水分的 Hurst 指数介于 0.26~0.75,从表层到第 4 层土壤水分呈正向持续性变化($Hurst > 0.5$)的区域面积占比分别为 58.5%,76.7%,91.3%,98.8%,其中 Hurst 指数大于 0.5 的区域主要分布在肯特山地区、阴山地区、杭爱山北部及大兴安岭南,说明这些区域土壤

水分处于持续稳定变化状态。随着土层深度的增加, Hurst 指数大于 0.5 的区域面积呈现逐渐增加的趋势,即保持当前变化趋势的区域面积将会逐渐增大,说明深层土壤水分变化趋势的持续稳定性更高。

通过 Hurst 分析结果与变化趋势结果叠加,进一步得出蒙古高原土壤水分变化趋势持续性分类图(图 5)。不难看出,从表层到第 3 层土壤水分呈现持续增加趋势的面积占比分别为 38.5%,48.4%,44.2%,主要集中在大兴安岭东部丘陵平原以及色楞格河上游地区。0—

100 cm 土壤水分持续减少区域主要分布在内蒙古西部和蒙古国西北部区域, 占比分别为 20.2%, 28.4%, 47.2%。除东北部和西南部部分区域外, 100—289 cm 土壤水分均呈现持续减少趋势, 占比高达 73.8%, 其中

呈持续显著减少趋势的面积占 65.2%。随着深度的加深, 呈不稳定变化趋势的地区占比呈现减少趋势 (41.3%, 23.2%, 8.6%, 1.3%) 且主要集中在 0—28 cm, 表现为前后变化相反或波动变化。

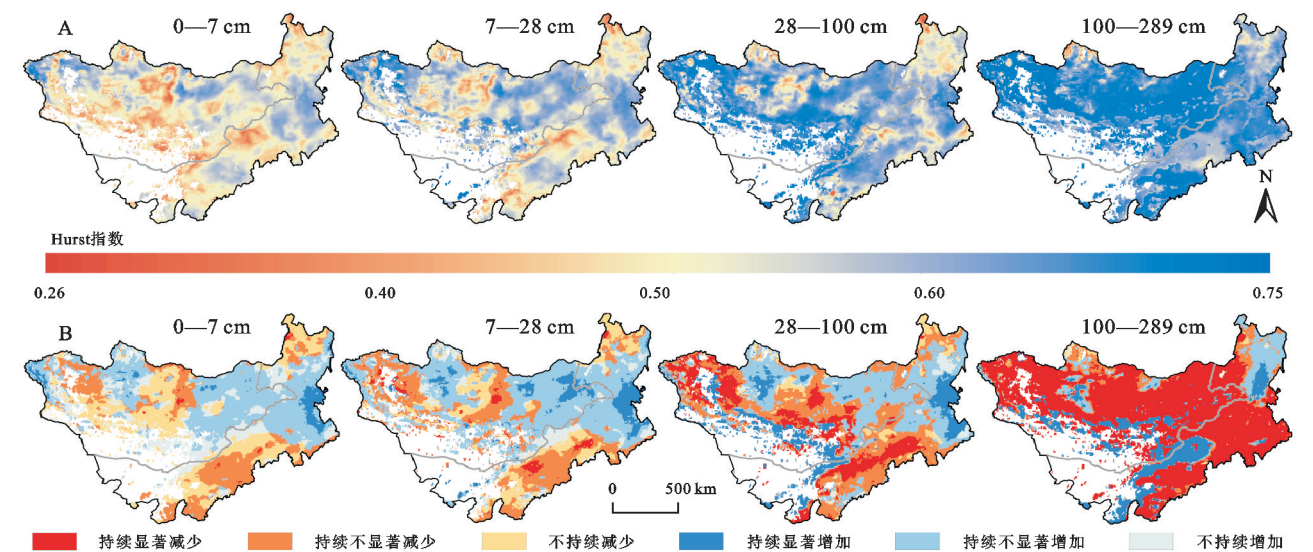


图 4 蒙古高原植土壤水分 Hurst 指数空间分布及变化趋势

Fig. 4 Spatial distribution and changing trend of Hurst index of plant soil moisture on the Mongolian Plateau

3.3 土壤水分空间分异驱动力分析

图 5 显示了不同环境因子对土壤水分的空间分异的驱动力(q 值)。TEMP, TWSA, PREP 和 NDVI 对不同深度土壤水分空间分异的解释力均在 75% 以上($q>0.75$), 是蒙古高原土壤水分空间分布的主导环境因子。其中, TEMP 对不同深度土壤水分空间分异的解释度最高, q 值介于 0.90~0.93。TWSA 次之, q 值也均在 0.89 以上。PREP 对不同深度土壤水分的驱动力均排名第 3。NDVI 的驱动力位于第 4, q 值介于 0.77~0.84。LUCC 对不同深度土壤水分驱动力差异不大, q 值介于 0.66~0.70。在土壤质地因子中, Sand 的驱动力相对最大, q 值在 0.5 左右, 其次是 Silt 和 Clay, 可能与不同土壤质地的持水能力有关。而地形因子对不同深度土壤水分驱动力最弱, q 值均不足 0.3。相比较而言, 不同地形因子中 DEM 的驱动力相对最大($q>0.25$); Aspect 驱动力最小, q 值在 0.20 以下, 与 Slope 二者 q 值均未通过显著性检验($p>0.01$)。

蒙古高原土壤水分空间分异驱动因素的交互探测与生态探测结果如图 6 所示。主导环境因子(除 NDVI 外)与土壤质地因子、LUCC 以及土壤质地因子与地形因子, 交互后的 q 值均大于单个因子的 q 值, 呈现出双因子增强作用, 说明蒙古高原土壤水分空间分异是多因子共同作用的结果。双因子交互后平均解释率最高的 4 组是: TEMP \cap Sand, TEMP \cap Silt, PREP \cap Sand 和 PREP \cap Silt, 交互作用均达到 0.93, 说明特定土壤质地显著增加了温度、降水对土壤水分的解释力。TWSA 与土壤

因子次之, 解释率均在 0.9 以上。Aspect \cap Slope 交互作用最小, 解释率介于 0.19~0.25。NDVI 与其他所有因子交互均表现为单因子减弱, 可能与植物生长需要消耗土壤水分有关。

在 0—7, 7—28, 100—289 cm 土层中, TWSA 与 NDVI 的生态探测结果显示对蒙古高原土壤水分的空间分异特征无显著性差异(检测结果为 N), 其余因子间均呈现显著性差异, 说明在特定深度下 TWSA 与 NDVI 对蒙古高原土壤水分的空间分异特征具有相似的机理。

3.4 环境因子时空变化格局

为了深入探讨环境变化对土壤水分动态的影响, 利用 Theil-Sen Median 趋势分析法探究了 NDVI、降水、温度与 TWSA 的变化趋势。如图 7 所示, NDVI 变化趋势呈现较强的空间异质性, 变化速率介于 -0.01~0.01/a。NDVI 呈增加趋势的面积占 94.7%, 呈减少趋势的面积仅占 5.3%, 零星分布于蒙古国西北部和内蒙古中部地区。除高原东北部部分区域(10.8%)TWSA 表现为上升趋势, 其他地区 TWSA 均呈现不同程度的减少趋势。近 21 a, 研究区降水变化速率介于 -4.66~12.31 mm/a, 其呈现增长趋势的面积占研究区植被覆盖总面积的 68.5%。降水增加较为明显的区域主要分布在蒙古高原东部, 如大兴安岭、肯特山东部山地地区; 而阴山山脉、杭爱山附近地区降水呈显著下降趋势。蒙古高原温度以增加趋势为主, 平均增速 0.013℃/a。特别是肯特山东部、大兴安岭西部以及东部平原地区的温度增长率明显高于其他地区。温度呈减少趋势的面

积占比为 15.1%，集中分布在库苏尔湖东南部、大兴

安岭东部平原以及西部高原。

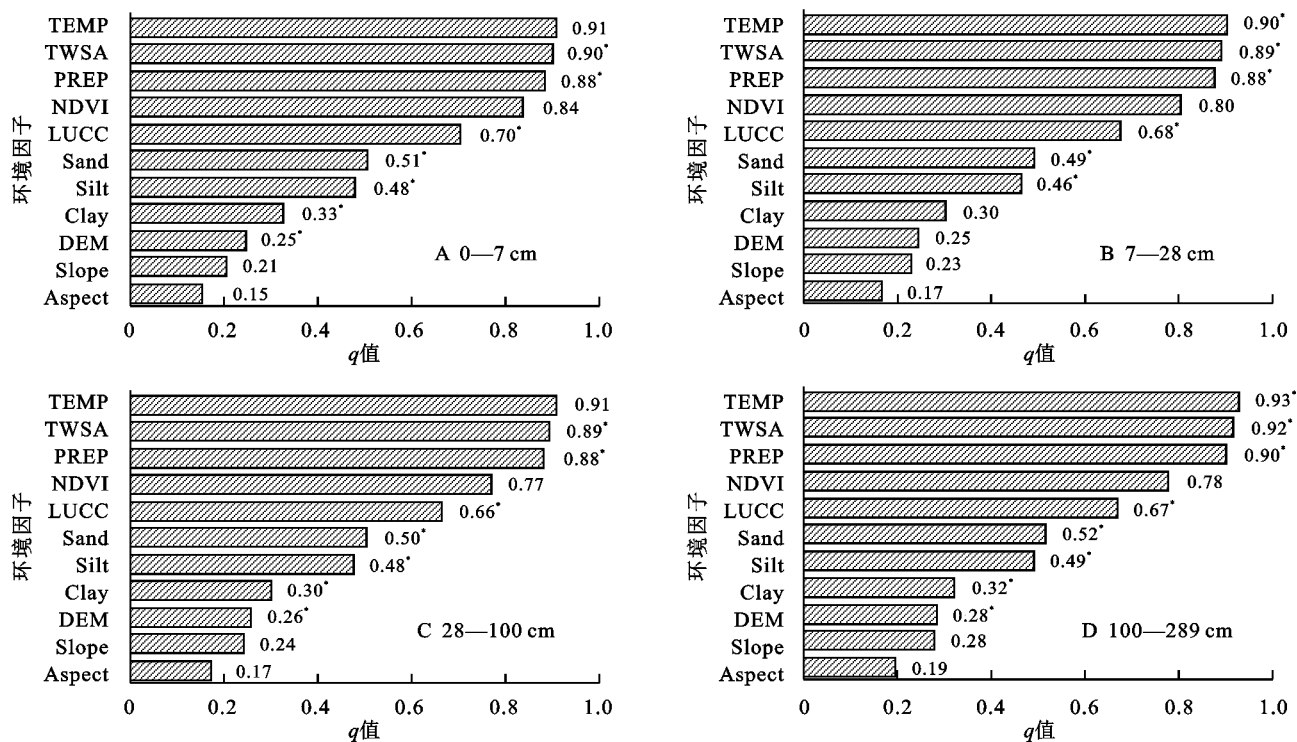
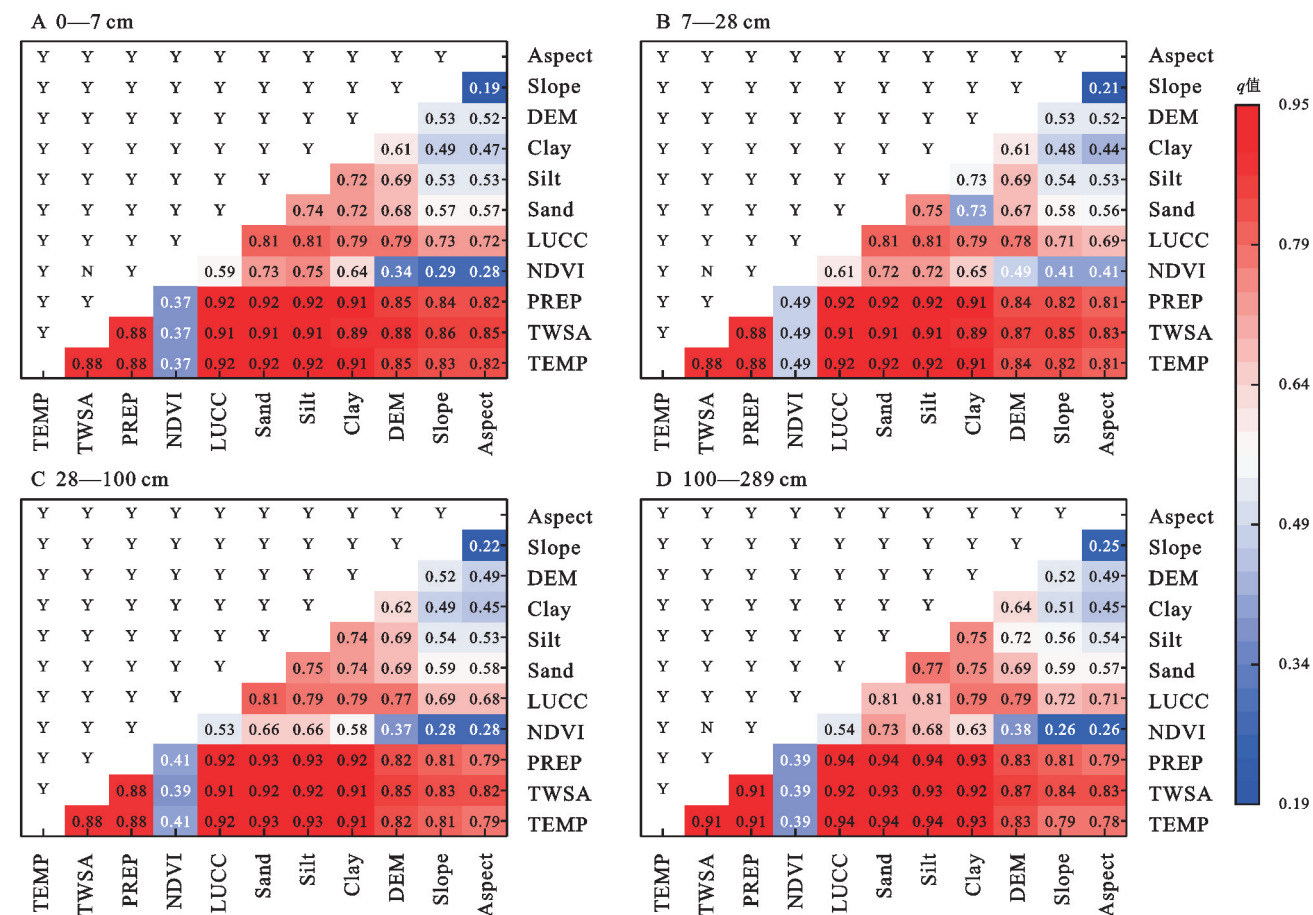


图5 蒙古高原土壤水分因子探测 q 值

Fig. 5 Detection q value of soil moisture factors on the Mongolian Plateau



注: Y 代表显著, N 代表不显著。

图6 蒙古高原土壤水分交互探测与生态探测

Fig. 6 Interactive detection and ecological detection of soil moisture in the Mongolian Plateau

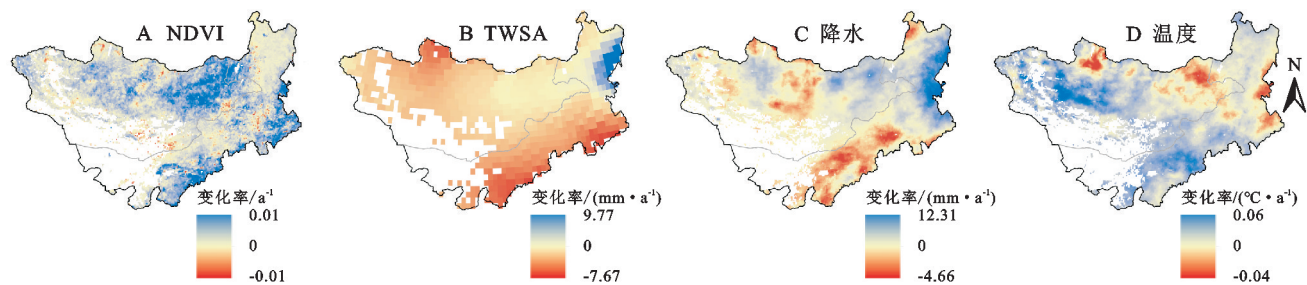


图 7 2000—2020 年蒙古高原影响因子变化趋势空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of changing trends of influencing factors in the Mongolian Plateau from 2000 to 2020

3.5 土壤水分对环境因子变化的响应

基于回归分析法进一步量化各环境因子变化对蒙古高原土壤水分的影响,结果如图 8 所示。0—7,

7—28 cm 土壤水分与降水呈现显著正相关性,分别有 99.7%,97.5% 的区域回归系数介于 0.33~1.00,说明 0—28 cm 土壤水分受降水正向影响显著。

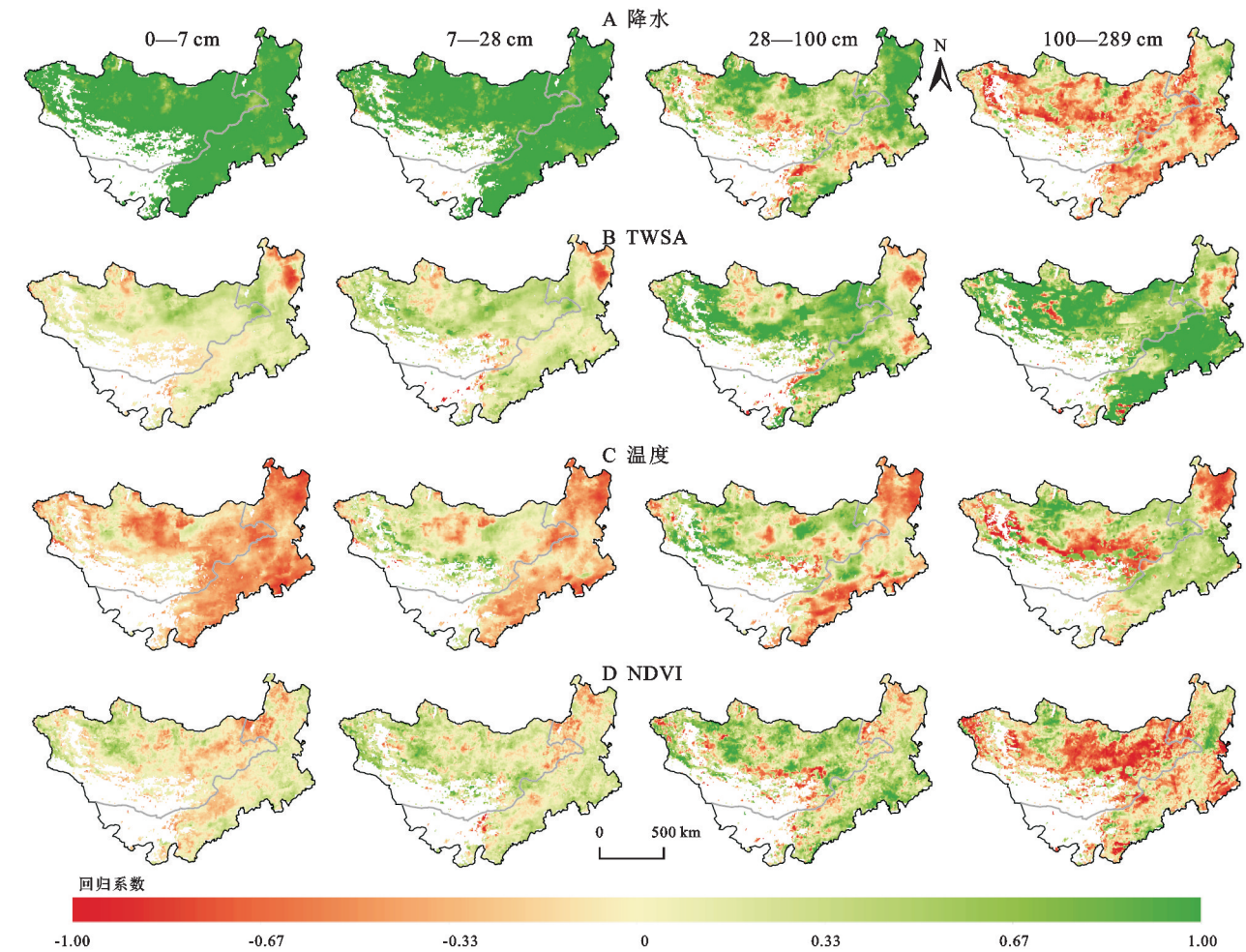


图 8 蒙古高原不同土深度土壤水分与不同环境因子的回归系数空间分布格局

Fig. 8 Spatial distribution pattern of regression coefficients between soil moisture and different environmental factors at different soil depths on the Mongolian Plateau

通过对比不同环境因子对土壤水分影响的大小,发现降水为 0—7,7—28 cm 土壤水分主控因子的区域占比高达 98.7%,94.8%(图 9)。随着土层深度的加深,降水的主控作用明显降低。81.2% 的区域降水对 28—100 cm 土壤水分呈正相关关系,但降水占主控因子的区域占比下降为 38.8%。当研究区土层深度为 100—289 cm 时,降水正向影响的区域呈现出断层式下

降,表现为负相关的区域面积高达 65.9%,而降水占主控因子的区域面积仅占 10.5%,且主要分布于正向影响区域。TWSA 与 0—7 cm 及 7—28 cm 土壤水分以正相关(51.0%,72.8%)为主,相关性较低且空间分析相似。与降水相反,随着土层深度的加深,TWSA 与土壤水分的正相关性显著增强,TWSA 与 28—100 cm 及 100—289 cm 土壤水分呈正相关区域的面积占比分别为 83.7%,

91.1%。此外,TWSA 作为 0—7,7—28,28—100,100—289 cm 土壤水分主控影响因子的占比分别为 0.6%,1.8%,38.8%,58.6%。温度与浅层土壤水分(0—28 cm)以负相关关系为主,温度与 0—7 cm 和 7—28 cm 土壤水分呈负相关的区域占比分别为 89.2%,58.3%;呈正相关的区域集中分布在西北部山区。随着土层深度加深,温度与 28—100 cm 和 100—289 cm 土壤水分呈正相关关系的区域进一步扩大,面积占比分别为 56.0%,64.6%。需要指出的是,温度作为不同深度土壤水分

变化的主控因子的面积占比为 0.5%~14.8%。NDVI 与不同深度土壤水分的相关性差异较大。NDVI 与 0—7,7—28,28—100 cm 土壤水分呈正相关关系的区域面积分别为 51.0%,72.8%,72.0%,且主要分布在高原西北部和东南部地区。NDVI 与 100—289 cm 土壤水分以负相关为主,呈负相关区域面积占比为 61.4%,主要分布在蒙古国东部和内蒙古的中部地区。随着土层深度的增加,NDVI 占主导作用的面积比例由 0.2% 升高至 16.2%。

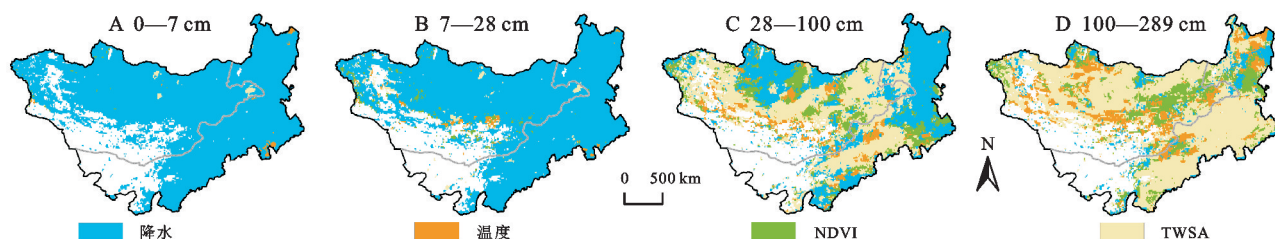


图 9 蒙古高原不同深度土壤水分变化主控环境因子空间分布格局

Fig. 9 Spatial distribution pattern of main environmental factors controlling soil moisture changes at different depths in the Mongolian Plateau

4 讨论

土壤水分作为影响陆面过程的关键因素之一,可以用于对气候和环境变化的实时监测。卫星遥感反演土壤水分产品仅能获取表层(0—5 cm)土壤水分且抗干扰能力较差,而 ERA5 再分析土壤水分产品可获得不同深度土壤水分数据,具有抗干扰性强和实效性可靠等优点^[22-23]。该数据在干旱半干旱区得到广泛应用且精度较高。有研究指出,尽管 ERA5 土壤水分数据与实测站点数据相关性随土层深度加深而减弱,但整体能够表现深层土壤水分的分布特征及变化规律^[24]。因此,本研究利用 ERA5 不同深度土壤水分产品对 2000—2020 年蒙古高原土壤水分时空分异特征及其变化规律进行分析。研究结果表明,蒙古高原土壤水分空间异质性明显,不同深度土壤水分均呈现由西南向东北递增的分布格局。其空间分异主要由温度、TWSA、降水和 NDVI 等环境因子共同决定。随着土层深度的增加,降水和植被条件对土壤水分的解释力呈现降低趋势,可能是由于深层土壤水分的稳定性更高,而浅层土壤水分更易受到外界环境因素随机变化的影响。陈斌等^[25]也指出深层土壤水分较浅层土壤水分稳定性更强。温度主要通过影响蒸散发间接影响土壤水分含量。温度对不同深度土壤水分空间分异的解释力均在 90% 以上($q > 0.9$)。可能是由于在干旱地区土壤水分含量较低,降水量少且转化为土壤水分的能力有限,蒸散发反过来限制降水与土壤水分的转化,导致温度影响略高于降水,但

二者均属于主要气候影响因子。此外,在分析温度与土壤水分的关系时,发现二者关系不均为负相关关系,这与韩新生^[26]、吴芹芹^[27]等的结论不同,与程文举等^[28]的结果较为一致。究其原因,蒙古高原属于干旱半干旱区,在本就水分极度匮乏的地区温度升高,并不一定引起土壤水分的减少,同时温度对浅层土壤水分较深层土壤水分的影响力更强,进一步佐证了本研究结论,也反映出土壤水分空间分布的控制因素受基本气候条件影响较大。相较于气候和植被因素,地形要素和土壤质地对蒙古高原土壤水分空间分异的影响较小,但与主导环境因子进行交互作用时,主要呈现出双因子增强的作用。这种现象可能与蒙古高原特殊的土壤质地、地形地貌、水热条件以及特有的植被类型等因素有关。

从时间尺度来看,2000 年以来研究区域整体呈现暖湿化趋势。降水作为浅层土壤水分变化的主控因子,降水的增加导致表层和次表层土壤水分呈不显著增加趋势,抵消了升温导致的土壤水分流失。随着土层深度的加深,降水的主控地位显著降低。Yuan 等^[31]指出蒙古高原低强度降水(< 5 mm)比例远高于中等强度和高强度降水比例,在部分区域该比例甚至高于 80%。而低强度降水优先补给浅层土壤水分而无法渗透到深层。这可能是降水主控地位随土层深度加深而显著降低的原因。而对于 28—100 cm 土壤水分,降水对其变化呈主导作用的区域主要集中在蒙古国北部和内蒙古东北部山区。可能是由于高山区降水丰沛,中、强降水事件相对较多。与降水相反,随着土层深度的加深,TWSA 对

土壤水分的控制作用逐渐凸显。特别是对于 100—289 cm 土壤水分, TWSA 主控区域远高于其他影响因子。在干旱半干旱区, 浅层地下水是深层土壤水分的重要补给来源^[32]。考虑到二者高度一致的空间变化分布特征及正相关关系, TWSA 的降低可能是导致研究区深层(100—289 cm)土壤水分显著降低的主要原因。此外, 由于土层深度加深导致的降水主控作用的降低, 温度和 NDVI 的主控作用也逐渐凸显。特别是蒙古国东部植被覆盖度增加导致的耗水增加以及高原西南部和东北部部分地区强烈的升温, 进一步加剧了深层土壤干化。综上所述, 尽管 2000 年以来蒙古高原降水增加, 但深层土壤水分变化与气候干湿变化并不对应, 依然存在较大的潜在干旱风险。朱飙等^[33]发现潜在蒸散发的增加可能是导致二者不对称的主要原因。后续研究应结合潜在蒸散发等因子进一步深入探索研究区深层土壤水分持续下降的原因。Hurst 分析结果也表明, 土层深度越深, 未来土壤水分变化趋势的可持续性越强。特别是蒙古国西北部和内蒙古中部的 0—100 cm 土壤水分以及蒙古国北部和内蒙古中部的 100—289 cm 的土壤水分(图 5)未来可能会持续干化, 应当予以重视。

5 结论

(1) 2000—2020 年蒙古高原不同深度土壤水分整体呈西南低、东北高的分布格局, 存在明显的空间异质性。蒙古高原土壤水分由浅至深呈现先增加后减少的变化趋势特征, 仅 100—289 cm 土壤水分变化趋势通过显著性检验($p < 0.05$), 说明深层土壤水分干化情况更加显著。0—7, 7—28, 28—100, 100—289 cm 土壤水分呈现减少趋势的比例分别为 44.38%, 42.7%, 52.2%, 74.7%。

(2) 蒙古高原土壤水分的 Hurst 指数介于 0.26~0.75, 从表层到第 4 层分别有 58.5%, 76.7%, 91.3%, 98.8% 的区域 Hurst 指数大于 0.5, 说明未来大部分区域土壤水分变化趋势与过去相同; 结合趋势分析结果, 蒙古高原西北部及内蒙古中部地区土壤水分干化情况可能会进一步加重。

(3) 温度、TWSA、降水和 NDVI 是影响土壤水分空间分布的主导环境因子, 地形因子的解释力相对最弱。土壤水分空间分异是多因子共同作用的结果, 主导环境因子(除 NDVI 外)、地形因子与土壤质地因子、LUCC 交互后, 均呈现出双因子增强作用。

(4) 表层和次表层土壤水分的变化主要受降水的正向影响, 主控区域分别占 98.7%, 94.8%; 降水和 TWSA 对 28—100 cm 土壤水分的主控区域分别集

中在森林和草原覆盖区, 主导区域面积占比分别为 38.7%, 38.8%; TWSA 降低是导致 100—289 cm 土壤水分干化的主要驱动力其主控区域面积占比为 58.6%; 植被耗水的增加以及温度的升高分别主控 16.2%, 14.8% 区域 100—289 cm 土壤水分变化。

参考文献(References):

- [1] Baldwin D, Manfreda S, Keller K, et al. Predicting root zone soil moisture with soil properties and satellite near-surface moisture data across the conterminous United States[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 393-404.
- [2] Jian S Q, Zhao C Y, Fang S M, et al. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 206: 85-96.
- [3] 包青岭, 丁建丽, 王敬哲, 等. 基于 VIC 模型模拟的干旱区土壤水分及其时空变化特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(9): 3048-3059.
Bao Q L, Ding J L, Wang J Z, et al. Spatio-temporal variation of soil moisture in arid area based on VIC land surface model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 3048-3059.
- [4] 郭欣欣, 付强, 卢贺, 等. 东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(19): 123-130.
Guo X X, Fu Q, Lu H, et al. Spatial variability and its controlling factors of soil moisture on cropland-forestland mixed hillslope in black soil area of Northeast China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(19): 123-130.
- [5] Liu Y, Cui Z, Huang Z, et al. Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China[J]. *Catena*, 2019, 182: 104147.
- [6] 刘兆飞, 王蕊, 姚治君. 蒙古高原气温与降水变化特征及 CMIP5 气候模式评估[J]. *资源科学*, 2016, 38(5): 956-969.
Liu Z F, Wang R, Yao Z J. Air temperature and precipitation over the Mongolian Plateau and assessment of CMIP5 climate models[J]. *Resources Science*, 2016, 38(5): 956-969.
- [7] 甄江红, 王亚丰, 田圆圆, 等. 城市空间扩展的生态环境效应研究: 以内蒙古呼和浩特市为例[J]. *地理研究*, 2019, 38(5): 1080-1091.
Zhen J H, Wang Y F, Tian Y Y, et al. Study on ecological environment effects of urban spatial expansion: Taking inner Mongolia Hohhot City as an example[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(5): 1080-1091.
- [8] 耿德源, 赵天杰, 施建成, 等. 地基雷达的微波面散射模型对比与土壤水分反演[J]. *遥感学报*, 2021, 25(4): 929-940.
Geng D Y, Zhao T J, SHI J C, et al. Surface microwave

- scattering model evaluation and soil moisture retrieval based on ground-based radar data[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(4): 929-940.
- [9] 王静, 方锋, 黄鹏程, 等. AMSR-E 土壤水分产品评价及在干旱监测中的应用[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(3): 650-664.
- Wang J, Fang F, Huang P C, et al. Evaluation of Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E) soil moisture products over China and its application in drought monitoring[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(3): 650-664.
- [10] Ma H L, Zeng J Y, Chen N C, et al. Satellite surface soil moisture from SMAP, SMOS, AMSR2 and ESA CCI: A comprehensive assessment using global ground-based observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111215.
- [11] Al-Yaari A, Wigneron J P, Dorigo W, et al. Assessment and inter-comparison of recently developed/reprocessed microwave satellite soil moisture products using ISMN ground-based measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 289-303.
- [12] Meng X J, Mao K B, Meng F, et al. A fine-resolution soil moisture dataset for China in 2002—2018 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(7): 3239-3261.
- [13] 范科科, 张强, 孙鹏, 等. 青藏高原土壤水分变化对近地面气温的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(1): 82-97.
- Fan K K, Zhang Q, Sun P, et al. Effect of soil moisture variation on near-surface air temperature over the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 82-97.
- [14] Qiu J X, Gao Q Z, Wang S, et al. Comparison of temporal trends from multiple soil moisture data sets and precipitation: The implication of irrigation on regional soil moisture trend[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 48: 17-27.
- [15] Luo M, Sa C L, Meng F H, et al. Assessing remotely sensed and reanalysis products in characterizing surface soil moisture in the Mongolian Plateau[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2021, 14(10): 1255-1272.
- [16] Luo M, Meng F H, Sa C L, et al. Response of vegetation phenology to soil moisture dynamics in the Mongolian Plateau[J]. *Catena*, 2021, 206: 105505.
- [17] Li F P, Kusche J, Chao N F, et al. Long-term (1979—present) total water storage anomalies over the global land derived by reconstructing GRACE data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(8): e2021GL093492.
- [18] 刘扬, 杨永春, 张轲, 等. 1960—2011 年河西走廊地表干湿状况的时空变化及影响因素[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 54-60.
- Liu Y, Yang Y C, Zhang K, et al. Temporal and spatial variation of humidity and Its influential factors in Hexi Corridor during 1960—2011 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(1): 54-60.
- [19] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题: 以在气候变化研究中的应用为例[J]. *地理科学*, 2004, 24(2): 177-182.
- Jiang T H, Deng L T. Some problems in estimating a Hurst exponent: A case study of applicatings to climatic change[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(2): 177-182.
- [20] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [21] 张世喆, 朱秀芳, 刘婷婷, 等. 气候变化下中国不同植被区总初级生产力对干旱的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3429-3440.
- Zhang S Z, Zhu X F, Liu T T, et al. Response of gross primary production to drought under climate change in different vegetation regions of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(8): 3429-3440.
- [22] Yang S Q, Zeng J Y, Fan W J, et al. Evaluating root-zone soil moisture products from GLEAM, GLDAS, and ERA5 based on in situ observations and triple collocation method over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2022, 23(12): 1861-1878.
- [23] 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 remote sensing and reanalysis soil moisture products on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1778-1791.
- [24] 曾俊涵. 基于陆面模拟和机器学习的土壤湿度多源数据融合研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- Zeng J H. Research on Multi-Source Data Fusion of Soil Moisture Based on Land Surface Simulation and Machine Learning[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2022.
- [25] 陈斌, 鲁延芳, 占玉芳, 等. 荒漠绿洲过渡带土壤水分空间分布特征及对植被的影响[J]. *西北林学院学报*, 2023, 38(2): 25-32.
- Chen B, Lu Y F, Zhan Y F, et al. Spatial distribution characteristics of soil moisture and its influence on vegetation in desert-oasis ecotone[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(2): 25-32.
- [26] 韩新生, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分时空变化与影响因素[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 111-117.

- Han X S, Wang Y H, Yu P T, et al. Temporal and spatial variation and influencing factors of soil moisture in *Larix principis-rupprechtii* plantation in semiarid Liupan Mountains, Northwest China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 111-117.
- [27] 吴芹芹, 莫淑红, 程圣东, 等. 黄土区冻融期不同土地利用土壤水分与温度的关系 [J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 627-635.
- Wu Q Q, Mo S H, Cheng S D, et al. Study on the correlation between soil moisture and temperature of different land uses in the loess area during a freezing-thawing period [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 627-635.
- [28] 程文举, 席海洋, 司建华, 等. 内陆河流域浅山区土壤水热时空动态及其对气象因子的响应 [J]. 高原气象, 2022, 41(6): 1435-1445.
- Cheng W J, Xi H Y, Si J H, et al. Temporal and spatial dynamic change of soil water-heat and its response to meteorological factors in an inland river basin in low coteau area [J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(6): 1435-1445.
- [29] 杨志辉, 赵军, 朱国锋, 等. 顾及植被覆盖影响的石羊河流域土壤水分遥感估算及空间格局分析 [J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8826-8837.
- Yang Z H, Zhao J, Zhu G F, et al. The remote sensing estimation and spatial pattern analysis of soil moisture in the Shiyang River Basin in consideration of vegetation cover affect [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8826-8837.
- [30] 李浙华, 李生字, 李丙文, 等. 不同植被覆盖度沙垄土壤化学性质的空间分异 [J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 160-167.
- Li Z H, Li S Y, Li B W, et al. Spatial variation of soil chemical properties of longitudinal dunes with different vegetation coverage levels [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 160-167.
- [31] Yuan X L, Li L H, Chen X, et al. Effects of precipitation intensity and temperature on NDVI-based grass change over Northern China during the period from 1982 to 2011 [J]. Remote Sensing, 2015, 7(8): 10164-10183.
- [32] Rao W B, Chen X, Meredith K T, et al. Water uptake of riparian plants in the lower Lhasa River Basin, South Tibetan Plateau using stable water isotopes [J]. Hydrological Processes, 2020, 34(16): 3492-3505.
- [33] 朱飙, 张强, 李春华, 等. 我国干旱半干旱区气候变化特征及其对干湿波动的影响 [J]. 大气科学学报, 2023, 46(1): 42-54.
- Zhu B, Zhang Q, Li C H, et al. Characteristics of climate change in arid and semi-arid areas of China and its influence on climatic dry-wet fluctuation [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(1): 42-54.

(上接第 109 页)

- [22] Meyer N, Welp G, Rodionov A, et al. Nitrogen and phosphorus supply controls soil organic carbon mineralization in tropical topsoil and subsoil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 119: 152-161.
- [23] 张星星, 杨柳明, 陈忠, 等. 中亚热带不同母质和森林类型土壤生态酶化学计量特征 [J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5828-5836.
- Zhang X X, Yang L M, Chen Z, et al. Patterns of eco-enzymatic stoichiometry on types of forest soils from different parent materials in subtropical areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): 5828-5836.
- [24] 阳宽达, 谢红霞, 隋兵, 等. 基于 GIS 的降雨空间插值研究: 以湖南省为例 [J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 134-138, 145.
- Yang K D, Xie H X, Sui B, et al. Research on spatial interpolation of rainfall based on GIS: A case study of Hunan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation Research, 2020, 27(3): 134-138, 145.
- [25] 胡丹桂, 舒红. 基于协同克里金空气湿度空间插值研究 [J]. 湖北农业科学, 2014, 53(9): 2045-2049.
- Hu D G, Shu H. Air humidity based on CoKriging interpolation [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(9): 2045-2049.
- [26] 赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 基于 Cokriging 的耕层土壤全氮空间特征及采样数量优化研究 [J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 415-422.
- Zhao Y T, Chang Q R, Li Z P, et al. Study on spatial distribution of total nitrogen in arable soil layer and optimization of number of soil samples for the study based on Cokriging [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 415-422.