

2003—2022 年宁夏不同生态分区土壤水分时空变化及其影响机制

杨秋琳¹, 米丽娜^{2,3}, 刘玉忠⁴, 邱思涵^{2,3}

(1.宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2.宁夏大学 生态环境学院, 宁夏 银川 750021; 3.西北土地退化与生态恢复国家重点实验室 培育基地, 宁夏 银川 750021; 4.宁夏回族自治区惠农渠管理处, 宁夏 石嘴山 753001)

摘要: [目的] 探究宁夏回族自治区不同生态分区土壤水分的时空变化及其影响机制, 为该地区生态建设与水资源管理提供科学依据。[方法] 以宁夏回族自治区为研究区, 基于 2003—2022 年遥感反演土壤水分、气象、植被覆盖 NDVI、土地利用等数据, 采用趋势分析、突变检验、Hurts 指数以及参数最优地理探测器, 探究土壤水分的时空变化及其影响机制。[结果] ① 2003—2022 年, 宁夏回族自治区全区年均土壤水分呈显著上升趋势, 增加区域占 68.99%, 减少区域占 31.01%。从不同分区看, 北部引黄灌区土壤水分缓慢下降 ($-0.022\%/a$), 中部干旱带缓慢上升 ($+0.030\%/a$), 南部山区显著上升 ($+0.107\%/a$), 且 2012 年发生突变。空间分布上, 土壤水分呈现“北部、南部高、中部低”的分布特征, 多年平均土壤水分依次为北部引黄灌区 (11.40%) > 南部山区 (10.70%) > 中部干旱带 (8.40%)。② 基于 Hurts 指数预测结果, 未来北部引黄灌区、中部干旱带、南部山区分别约有 49.09%, 60.43%, 62.91% 的区域土壤水分将减少, 需关注北部引黄灌区和中部干旱带的盐渍化及干旱风险。③ 最优参数地理探测器分析表明, NDVI 和地形是影响土壤水分分布的主要因素, 其中降水的影响随时间逐渐增强。[结论] 2003—2022 年宁夏回族自治区土壤水分变化趋势呈现出一定的区域差异性和复杂性, 未来土壤水分变化也将呈现显著的区域差异性。NDVI、地形、降水等因素共同影响着其时空分布。未来应综合考虑这些因素, 制定科学的土壤资源管理策略, 助力生态建设与水资源优化。

关键词: 土壤水分; 时空变化; 影响因子; 最优参数地理探测器; 宁夏回族自治区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0102-12

中图分类号: Q948.113

文献参数: 杨秋琳, 米丽娜, 刘玉忠, 等. 2003—2022 年宁夏不同生态分区土壤水分时空变化及其影响机制[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 102-113. Yang Qiulin, Mi Lina, Liu Yuzhong, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture in different ecological regions of Ningxia and their influencing mechanisms from 2003 to 2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 102-113. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.012; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.012.

Spatiotemporal variation of soil moisture in different ecological regions of Ningxia and their influencing mechanisms from 2003 to 2022

Yang Qiulin¹, Mi Lina^{2,3}, Liu Yuzhong⁴, Qiu Sihan^{2,3}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021,

China; 2. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

3. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 4. Huinong Canal Management Office, Ningxia Hui Autonomous Region, Shizuishan, Ningxia 753001, China)

Abstract: [Objective] Temporal and spatial changes in soil water in different ecological zones of the Ningxia Hui Autonomous Region and their influencing mechanisms were explored to provide a scientific basis for

收稿日期: 2024-11-07

修回日期: 2024-12-20

采用日期: 2024-12-21

资助项目: 国家自然科学基金项目“银川平原地下水浅埋灌区农业节水影响地下水盐迁移协同优化模拟与调控”(52160025); 宁夏重点研发计划“银川绿洲水盐循环模拟及农业节水控盐协同调控技术研发”(2021BEG03016); 国家重点研发计划“黄河上游河套平原节水控盐产能提升技术模式与应用”(2021YFD1900604-02); 国家自然科学基金联合基金项目(U24A20615)

第一作者: 杨秋琳(2001—), 女(汉族), 重庆市丰都县人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区水资源高效利用。Email: 17843719796@163.com。

通信作者: 米丽娜(1981—), 女(回族), 宁夏回族自治区固原市人, 博士, 副教授, 主要从事水资源高效利用及其环境效应的研究。Email: linami@nxu.edu.cn。

ecological construction and water resource management in this region. [Methods] Taking the Ningxia Hui Autonomous Region as the research area, based on remote sensing inversion data of soil moisture, meteorology, vegetation cover NDVI, and land use from 2003 to 2022, trend analysis, the mutation test, Hurts index, and parameter optimal geographic detector were used to explore the temporal and spatial changes of soil moisture and their influencing mechanism. [Results] ① From 2003 to 2022, annual soil moisture in Ningxia showed a significant upward trend, with 68.99% of the region experiencing increases and 31.01% experiencing decreases. Regionally, soil moisture declined slightly in the Northern Yellow River irrigation area ($-0.022\%/a$), increased modestly in the central arid zone ($+0.030\%/a$), and increased significantly in the southern mountainous area ($+0.107\%/a$), with a significant change in 2012. Spatially, soil moisture was high in the north and south and low in the center, with multi-year averages ranked as follows: Northern Yellow River irrigation area (11.40%) > southern mountainous area (10.70%) > central arid zone (8.40%). ② Hurst index predictions suggested that 49.09%, 60.43%, and 62.91% of the northern, central, and southern regions, respectively, are likely to experience declining soil moisture, highlighting the risks of salinization and drought in the north and center. ③ Geographic detector analysis identified NDVI and topography as the primary drivers of soil moisture distribution, with an increasing influence of precipitation over time. [Conclusion] Soil moisture trends in Ningxia from 2003 to 2022 displayed regional heterogeneity and complexity, and future changes are expected to follow similar patterns. NDVI, topography, and precipitation collectively shaped the soil moisture dynamics. These factors must be integrated into soil resource management strategies to support ecological and water resource optimization in the region.

Keywords: soil moisture; spatiotemporal changes; influencing factors; optimal parameters for geographic exploration; Ningxia Hui Autonomous Region

土壤水分在陆地—大气耦合系统中至关重要,影响水资源循环、能量循环和碳循环^[1-4],对水资源管理、气候预测、生态建设和农业等领域具有重大意义。准确分析多源、多时相土壤水分数据是研究气候变化背景下水资源循环、能量循环和碳循环变化的基础。土壤水分的时空变化受到地理环境、气候变化及人类活动等多种因素的影响^[5-6]。对于土壤水分的时空变化及其影响机制已成为全球研究热点,取得了一系列研究成果。李轩等^[7]采用趋势分析、相关分析等方法分析了华北土壤水分时空变化及其与气候的关系,发现土壤水分与气候要素之间均具有较好的响应关系;陈国茜等^[8]利用遥感反演三江源不同地理分区的土壤水分,发现南北区域对气候因子的响应不同;高萌萌等^[9]研究了内蒙古西辽河平原土壤水分变化特征,发现区域植被指数是影响土壤水分的主要因素;Chow K. C.等^[10]通过研究春季青藏高原土壤水分的变化,发现该地区土壤水分与中国东部季风区夏季降水相关,且有时滞效应;顾倩等^[11]分别采用趋势分析和最优参数地理探测器对渭河流域土壤水分进行时空变化和驱动因子分析,发现近 20 a 土壤水分显著下降,主要是因为受到地形地貌和气候因素的影响。

目前,对于土壤水分的监测方式有定点观测、遥感反演等。定点观测是最准确直接获取土壤水分

状况的监测方法,具有数据精度高、监测效率高等优点,但是很难形成时空连续的数据资料,难以精确表征较大区域土壤水分的时空变化特征;而遥感技术则具有大面积、全天时、全天候的动态监测优点,能够捕捉到不同时空尺度上的变化,为监测和分析土壤水分动态提供了重要数据基础,在生态环境监测与水资源管理领域得到了广泛应用。基于遥感大数据开展的相关土壤水分、干旱研究已成为众多科学家关注的研究热点。而且,未来在遥感数据反演土壤水分方面,人工智能算法将成为提高土壤水分数据质量的关键途径。

宁夏回族自治区地处黄土高原与内蒙古高原的过渡地带,是典型的干旱与半干旱区,是中国黄河上游区域旱作农业发展的核心地之一。近年随着暖干化的气候变化趋势,气温持续升高,极端气候事件增加,加剧了干旱缺水的气候状况,水资源更加匮乏,限制了该地区农牧业及生态发展。由于地理环境、气候变化及人类活动等多种因素在时空尺度上的异质性与复杂性,使得土壤水分在时间和空间上亦呈现出不同的分布格局与演变特征。许多学者在小尺度或单点上对宁夏回族自治区境内土壤水分做过相应研究。然而,在整个宁夏回族自治区不同生态分区内,土壤水分的时空变化及影响机制仍缺乏系统研究成果。基于此,本研究利用 2003—2022 年土壤水分遥感数

据,结合该地区同时期的地形、气象、地貌、人类活动等数据,综合运用趋势分析、突变检验、未来趋势分析和最优参数地理探测器模型对区域土壤水分时空变化及其影响机制进行定量分析,不仅可为宁夏回族自治区生态建设与水资源优化管理提供依据,也能更好地服务于该地区生态保护和高质量发展战略。

1 研究区概况

宁夏回族自治区位于 $35^{\circ}14'N-39^{\circ}23'N$ 和 $104^{\circ}17'E-107^{\circ}39'E$ 之间,东邻陕西,西、北接内蒙古,南连甘肃,整体轮廓南北长、东西短,总面积约为 $6.60 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。由于地处黄河上游,黄河为宁夏回族自治区提供了丰富的地表水资源,黄河宁夏回族自治区段年引水资源量为 $6.00 \times 10^9 \text{ m}^3$ 左右(见图 1)。宁夏回族自治区处于中纬度地带,地势南高北低,西高东缓,地貌复杂多样,具有山脉、高原、平原、丘陵、河谷等。气候以大陆性半湿润半干旱气候为主,具有冬寒长,夏暑短,气候干燥,雨雪稀少的特点;昼夜温差较大,全年平均气温较低,约为 9.9°C ;降水主要集中在夏季,分布特点为南多北少,一般在 $180 \sim 600 \text{ mm}$ 之间。按照气候及自然条件,宁夏回族自治区可分为北部引黄灌区、中部干旱带以及南部山区。

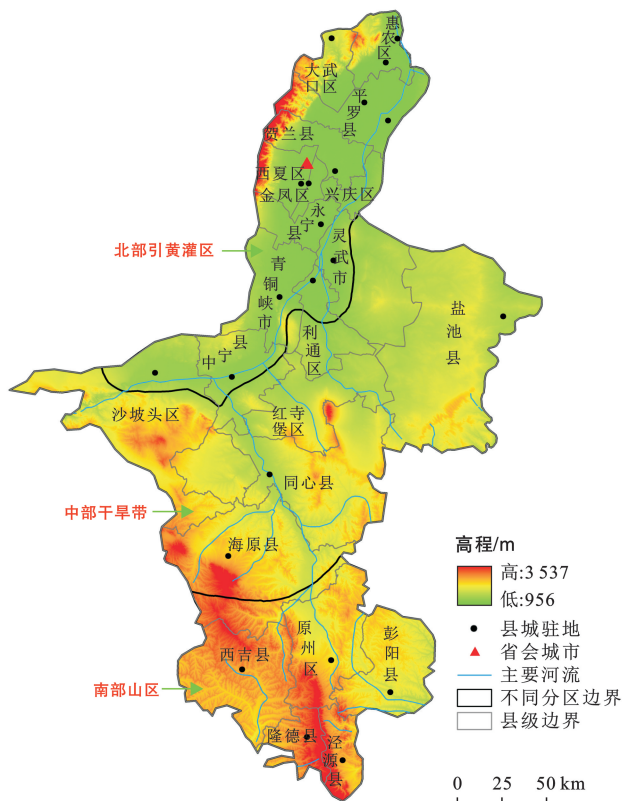


图 1 宁夏回族自治区的地形与区划图
Fig.1 Terrain and zoning map of Ningxia Hui Autonomous Region

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

本研究采用的数据主要包括土壤水分、植被指数 NDVI 数据、气象数据及其他数据。

土壤水分数据来源于宋沛林等制作的 2003—2022 年中国 1 km 分辨率逐日全天候地表土壤水分数据集(<https://data.tpdc.ac.cn/home>),时间分辨率为 1 d ,空间分辨率为 1 km ,数据格式为 HDF5。该数据是基于 AMSR-E 和 AMSR-2,分辨率为 36 km ,深度为 $0-10 \text{ cm}$ 的地表土壤水分(SSM)遥感数据,经降尺度处理生成的再分析数据。

归一化植被指数(NDVI)来源于 2000—2022 年美国航天航空局 AADS 的 MOD13Q1 植被指数数据产品,时间分辨率 16 d ,空间分辨率 250 m 。

气象数据包括 1901—2022 年逐月降水数据和逐月气温数据。逐月降水数据是据 CRU 发布的全球 0.5° 气候数据以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据,通过 Delta 空间降尺度生成,其空间分辨率为 1 km ,单位为 0.1 mm 。逐月气温数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/home>),数据格式为 NetCDF,空间分辨率分别为 1 km ,单位为 0.1°C 。

其他数据包括高程、地貌和土地利用数据。数字高程模型(DEM)来源于地理空间数据云(<https://www.gsccloud.cn/>),空间分辨率为 30 m 。利用 ArcGIS 从中提取得到海拔、坡向和坡度数据。地貌数据来源于资源环境科学数据平台(<http://www.resdc.cn>)提供的中国 $1:1\,000\,000$ 地貌类型空间分布数据集,其空间分辨率为 1 km 。土地利用数据来源于武汉大学遥感院遥感信息处理研究所(<http://irsip.whu.edu.cn/re-sources/CLCD.php>)提供的逐年 30 m 土地覆盖数据,包括农田、森林、灌木、草原、水域、冰雪、未利用地、建设用地和湿地 9 种用地类型。

为确保所有数据空间和时间上的一致性,数据均进行裁剪、投影和重采样处理,投影坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_48 N,空间分辨率为 1 km 。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析

(1) Theil-Sen median 趋势分析。Theil-Sen median 趋势分析(Sen 斜率估计法),是一种非参数统计检验方法。该方法计算效率高,精度高,抗噪性强,适用于长时间序列的趋势分析,其计算公式为:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{\text{SSM}_j - \text{SSM}_i}{j - i}\right) \quad (2022 \geq j > i \geq 2003) \quad (1)$$

式中:Median 为取中位数; SSM_i, SSM_j 分别为每个像元 i 和 j 年的土壤水分均值,当 $\beta > 0$ 时,表示土壤水分呈增加趋势,反之则呈下降趋势。

(2) Mana-Kendall 检验。Mana-Kendall 检验 (M-K 检验),也是一种非参数统计检验方法,用来判断趋势的显著性。该检验方法不需要样本遵从正态分布,不受异常值、缺失值干扰,适用性强。不但可检验时间序列的变化趋势,还可检验时间序列是否发生突变,因此被广泛应用到各个领域^[12-14]。

对于时间序列,标准化检验统计量 Z 定义为:

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

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

其中统计量 S 定义为:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(SSM_j - SSM_i) \quad (4)$$

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

式中: S 为统计量; n 为时间序列的长度 ($n = 20$); SSM_i, SSM_j 分别为每个像元 i 和 j 年的土壤水分均值, $i < j$; sgn 为函数符号。

在给定显著性水平 α 下,如果 $|Z| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$,表示研究的时间序列数据在 α 水平上趋势显著。 $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 为在置信水平 α 下,标准正态函数分布表对应的值。当 $|Z|$ 大于 1.65, 1.96, 2.58 时,分别表示趋势在 90%, 95%, 99% 的可信度上通过显著性检验^[15]。

2.2.2 突变检验 通常,在气候、水文等领域 Mana-Kendall 突变检验有着广泛的应用,而魏凤英等^[16]研究表明,Mana-Kendall 突变检验并不适用于存在多个或多个尺度突变的序列,即当置信区间内有多个交点,可能存在伪变点,需去除杂点。因此,本文采用 Pettitt 突变检验,它是一种非参数统计检验方法,检验时间序列中是否存在显著的突变点。该方法结构简单,且受异常值影响小,弥补了 Mana-Kendall 突变检验的不足^[17]。Pettitt 突变检验中 Mann-Whitney 统计量^[18]的方程表达式为:

$$U_{i,N} = U_{i-1,N} + \sum_{i=1}^N \text{sgn}(x_i - x_i) \quad (6)$$

式中: x_i, x_i 为时间序列中的 2 个值; t 为值的排列序号; N 为样本总数; $U_{i,N}$ 为新序列。

顺序统计量理论引用的统计量 $k_{i,N}$ 和检验两个样本累积分布函数的最大差值而求得的累积概率 p ,

一般情况下,当 $p \leq 0.05$ 时认为数据中存在突变点。公式分别为:

$$k_{i,N} = \max |U_{i,N}| \quad (7)$$

$$p = -2 \exp \left[-\frac{6k_{i,N}^2}{(N^3 + N^2)} \right] \quad (8)$$

式中: $k_{i,N}$ 为最大统计量; p 为显著性检验指标。

2.2.3 土壤水分未来变化趋势预测 Hurts 指数可以预测未来时间序列的变化趋势^[19]。一般采用重标极差法 (R/S) 计算 Hurts 指数,取值为 0~1。当 $H = 0.5$ 时,时间序列为相互独立、方差有限的随机序列;当 $0.5 < H < 1$,时间序列变化具持续性,未来变化将与过去变化趋势相一致,且 H 越接近 1,持续性越强;当 $0 < H < 0.5$,时间序列具有反持续性,过去的变化不具有可持续性, H 越接近 0,反持续性越强。计算公式为:

$$\frac{R_\tau}{S_\tau} = (c\tau)^H \quad (9)$$

极差公式为:

$$R_\tau = \max_{1 \leq i \leq \tau} X_{i,\tau} - \min_{1 \leq i \leq \tau} X_{i,\tau} \quad (\tau = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

标准差公式为:

$$S_\tau = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (SSM_t - \overline{SSM}_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\tau = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

累计离差公式为:

$$X_{i,\tau} = \sum_{t=1}^{\tau} (SSM_t - \overline{SSM}_\tau) \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (12)$$

定义均值公式为:

$$\overline{SSM}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} SSM_t \quad (\tau = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

式中: H 为 Hurts 指数; c 为常数。

2.2.4 最优参数地理探测器 地理探测器 (Geodetector) 是探测和利用空间分异性的工具^[20]。本文选用最优参数地理探测器 (OPGD),选择单因子探测及交互探测对研究区土壤水分的各种影响因素进行分析,影响因子的类型和指标见表 1。

表 1 基于地理探测器的土壤水分影响因子
Table 1 Geographic detectors based on influencing factors of soil moisture

类型	主要指标	因子代号	单位
地形	坡向	X_1	度
	坡度	X_2	度
	地形	X_3	m
气象	年降水量	X_4	mm
	年均气温	X_5	°C
地貌	地貌类型	X_6	
人类活动	土地利用类型	X_7	
归一化植被指数	NDVI	X_8	

(1) 单因子探测器。用于计算每个影响因子对土壤水分的影响程度,通常用 q 值来量化, q 的值为 $[0,1]$, q 值越高,解释程度就越大,自变量对因变量的影响力也就越大。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (14)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2 \quad (15)$$

式中: h 为自变量的分层, $h=1,2,\dots,L$; N_h 和 N 分别

为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区因变量的方差;SSW 和 SST 分别为层内方差之和与区域总方差。

(2) 交互探测器。用来揭示两个不同自变量是否会对因变量产生交互影响,即是否会增加或减弱对因变量的解释能力,主要是通过对两个自变量的 q 值以及它们产生交互作用时的 q 值大小进行比较来得到其产生的交互影响。交互影响的结果主要分为以下几种(表 2)。

表 2 交互探测器两个不同自变量产生交互影响的依据及关系

Table 2 Basis and relationship between interaction of two different independent variables of interactive detector

依据	交互关系
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3 结果与分析

3.1 宁夏回族自治区分区土壤水分年际变化特征

为研究宁夏回族自治区土壤水分随时间的变化特征,利用 Mann-Kendall 检验判断 2003—2022 年宁夏回族自治区全境及不同分区土壤水分年均值的变化趋势,并在 0.05 置信水平上判断其显著性。根据检验结果,将变化趋势划分为显著 ($|Z| > 1.96$) 和不显著 ($|Z| \leq 1.96$)。从年均土壤水分年际变化图(图 2)可以看出,近 20 a 间,宁夏回族自治区土壤水分整体呈显著性上升的趋势 ($p < 0.05$),以 0.033%/a 的速率增加,表明土壤正在逐渐湿化。土壤水分年均值介于 9.11%~10.63%,多年平均值为 9.72%,最低值出现在 2006 年,为 9.80%,最高值出现在 2018 年,为 10.63%,变化幅度较小。

自北部向南部(图 3),3 个分区的土壤水分变化趋势存在显著差异。北部引黄灌区土壤水分呈缓慢下降的趋势,但不显著 ($p > 0.05$),平均以 0.022%/a 的速率减少,且在 2003—2017 年变化幅度较缓和,自 2018 年起土壤水分变化幅度较大;与北部引黄灌区相反,中部干旱带土壤水分呈缓慢上升的趋势,但不显著 ($p > 0.05$),平均以 0.030%/a 的速率增加,波动起伏较小,且平均土壤水分含量显著低于北部引黄灌区和南部山区,2022 年年均土壤水分为 8.34%,比 2003 年的 8.81% 降低了 5.33%;南部山区的土壤水分含量介于北部引黄灌区与中部干旱带,其整体呈显著上升的趋势 ($p < 0.05$),平均以 0.107%/a 的速率

增加,2022 年年均土壤水分为 11.21%,比 2003 年的 10.71% 增加了 4.67%。值得关注的是,2017 年后南部山区土壤水分含量超过北部引黄灌区。

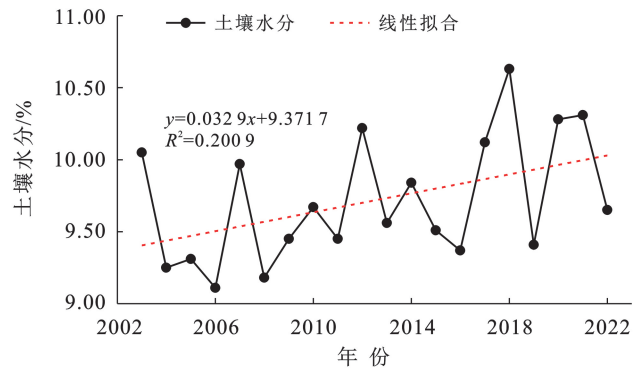


图 2 2003—2022 年宁夏回族自治区年均土壤水分变化
Fig.2 Annual average variation of soil moisture in Ningxia Hui Autonomous Region from 2003 to 2022

3.2 宁夏回族自治区分区土壤水分年际空间分布格局

利用 2003—2022 年的年均土壤水分数据,计算 20 a 平均值得到 2003—2022 年年均土壤水分空间分布图(图 4a)。可以看出,各个分区的土壤水分含量在空间上分布差异较明显,总体呈现出“北部、南部高,中部低”的分布特征,多年年均土壤水分达到 9.70%,北部引黄灌区土壤水分介于 0.04%~25%之间,年均值为 11.40%;中部干旱带土壤水分介于 5.80%~24.90%之间,其年均值相对较低,为 8.40%;南部山区土壤水分介于 8.00%~20.40%之间,年均值为 10.70%。土壤水分含量由高到低依次为北部引黄灌区、南部山区、中部干旱带(表 3)。

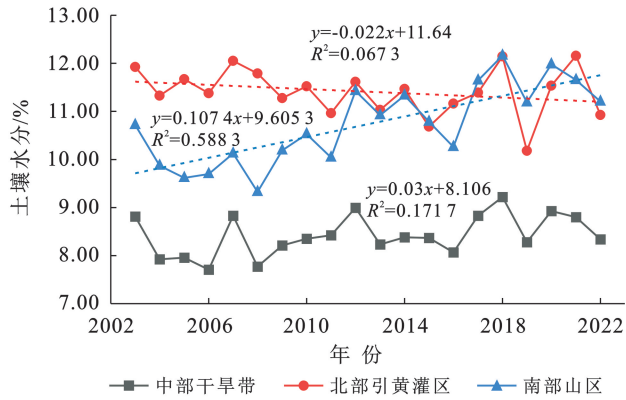


图 3 2003—2022 年宁夏回族自治区不同分区年均土壤水分变化

Fig.3 Annual average variation of soil moisture in different districts of Ningxia Ningxia Hui Autonomous Region from 2003 to 2022

表 3 宁夏回族自治区 2003—2022 年分区年均土壤水分变化情况统计分析

Table 3 Statistical analysis of annual average soil moisture changes in Ningxia Hui Autonomous Region from 2003 to 2022

分区	面积/ km ²	土壤水分/%			
		最小值	最大值	平均值	标准差
北部引黄灌区	14 788	0.04	25.00	11.40	3.20
中部干旱带	28 732	5.80	24.90	8.40	1.00
南部山区	11 986	8.00	20.40	10.70	1.60
全自治区	55 506	0.04	25.00	9.70	2.40

为进一步分析宁夏回族自治区逐年的空间变化趋势,分别选取 2003,2007,2012,2017,2022 年进行特定时间的年均土壤水分变化分析。从图 4b—4f 可以看出,5 个特定年份的年均土壤水分变化规律大致相同,总体呈现“北部、南部高,中部低”的变化特征。并且,不同年份的土壤水分在空间分布上存在不同差异,土壤水分最大值均出现在北部引黄灌区和贺兰山西部边缘及南部六盘山附近,其中 2007 年北部引黄灌区土壤水分增加较为明显;土壤水分最低值普遍出现在中部干旱带附近,其中 2022 年中部干旱带土壤水分减小较为明显。

3.3 宁夏回族自治区土壤水分变化趋势及其显著性

将 Theil-Sen median 趋势分析和 Mana-Kendall 检验结合,可以有效反映 2003—2022 年宁夏回族自治区土壤水分变化趋势及其显著性。由 Theil-Sen median 趋势分析进行逐栅格计算变化趋势斜率, β 取值范围为 $-0.006 \sim 0.007$ 。由 Mana-Kendall 检验进行逐栅格计算显著性, Z 取值范围为 $-4.77 \sim 5.35$,根据其分别在 0.1,0.05,0.01 置信水平上的显著性检验结果

划分为:极显著($2.58 < Z$)、显著($1.96 < Z \leq 2.58$)、微显著($1.65 < Z \leq 1.96$)和不显著($Z \leq 1.65$)^[21]。因此,将两种检验结果利用 ArcGIS 重分类、叠加,得到像元尺度上土壤水分变化趋势,并将结果划分为 8 种变化类型(表 4)。结合图 5 和表 4 可以看出,研究区约 68.99% 的区域土壤水分呈增加趋势,土壤水分趋势增加区域远高于趋势减少的区域。其中,极显著增加面积为 11 299.88 km²,约占区域面积的 20.36%,主要集中在南部山区和中部干旱带的吴忠市北部、中宁县西北部以及北部引黄灌区黄河两岸区域,尤其南部山区土壤水分整体呈现出极显著增加趋势,极小部分呈现不显著增加趋势;而土壤水分呈减少趋势的区域约 31.01%,其中微显著、显著和极显著减少的区域为 5 793.58 km²,约占区域总面积的 10.44%,主要位于北部引黄灌区和贺兰山脉附近;土壤水分以不显著增加和减少为主的区域主要集中在中部干旱带,只有靠近南部山区的海原县、同心县东部和灵武市西部土壤水分存在显著增加和极显著增加趋势,还有极小部分呈现显著减少趋势的土壤水分零散分布在中部干旱带。

表 4 宁夏回族自治区 2003—2022 年年均土壤水分变化趋势显著性统计

Table 4 Statistics on annual average soil moisture change trends in Ningxia Hui Autonomous Region from 2003 to 2022

β 值	Z 值	SSM 变化趋势	面积/ km ²	所占 比例/%
$\beta > 0$	$2.58 < Z$	极显著增加	11 299.88	20.36
	$1.96 < Z \leq 2.58$	显著增加	7 461.59	13.44
	$1.65 < Z \leq 1.96$	微显著增加	3 561.21	6.42
	$Z \leq 1.65$	不显著增加	15 971.25	28.77
$\beta < 0$	$Z \leq 1.65$	不显著减少	11 418.49	20.57
	$1.65 < Z \leq 1.96$	微显著减少	1 341.83	2.42
	$1.96 < Z \leq 2.58$	显著减少	2 019.23	3.64
	$2.58 < Z$	极显著减少	2 432.52	4.38

3.4 宁夏回族自治区分区土壤水分突变特性分析

经 Pettitt 突变检验结果显示(图 6),宁夏回族自治区全境 p 为 $0.20 > 0.05$,说明该时段区域没有显著突变;北部引黄灌区 p 为 $0.64 > 0.05$,同样没有显著突变;中部干旱带 p 值 $0.27 > 0.05$,同样没有显著突变;南部山区 p 为 $0.003 2 < 0.05$,说明该时段该区域发生显著突变,且显著突变的时刻为 2012 年,突变前多年平均土壤水分为 10.00%,突变后土壤水分为 11.00%,突变后的土壤水分相对增加了 13.00%。具体原因可能与当年气候异常,极端天气过程频繁,强降雨、短历时暴雨频发,降雨量偏大有关。

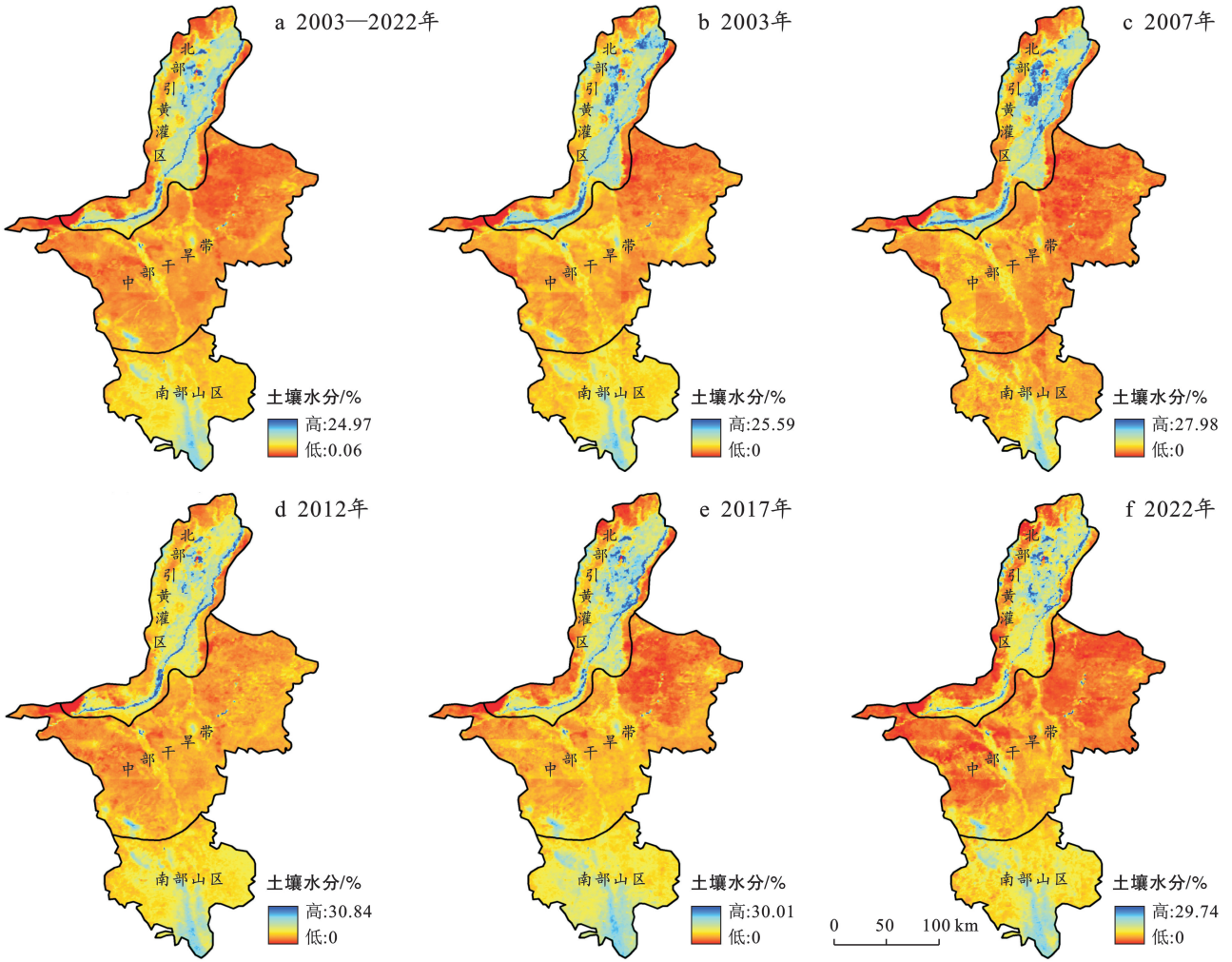


图 4 2003—2022 年宁夏回族自治区年均及典型年土壤水分空间分布

Fig.4 Spatial distribution of average soil moisture in Ningxia Hui Autonomous Region from 2003 to 2022

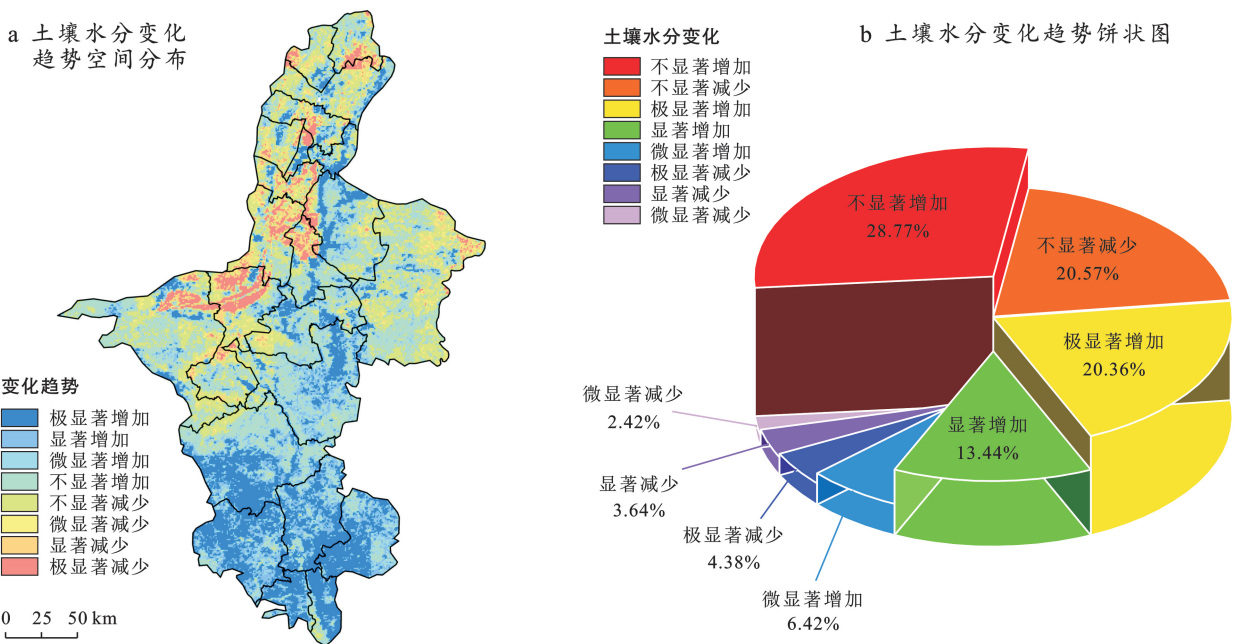
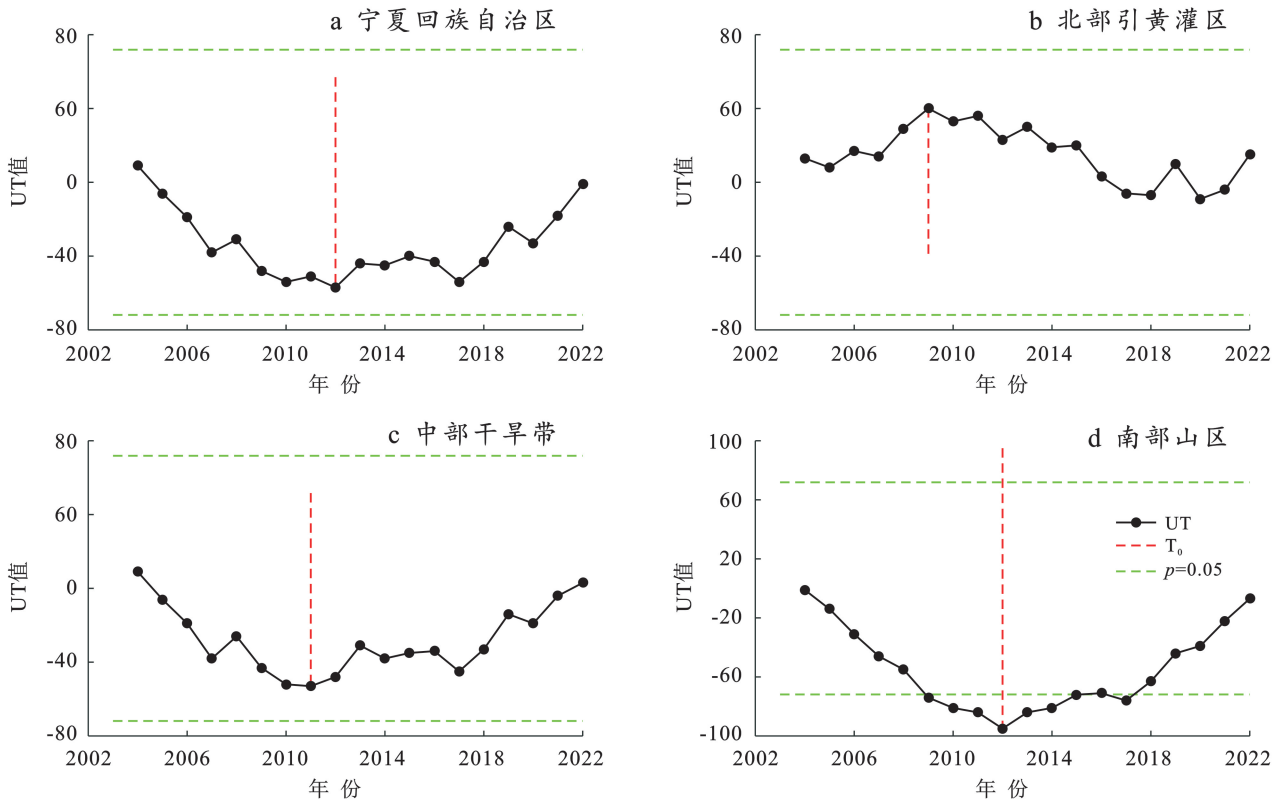


图 5 宁夏回族自治区 2003—2022 年年均土壤水分变化趋势

Fig.5 Annual average change trend of soil moisture change in Ningxia Hui Autonomous Region from 2003 to 2022



注: UT 为年均土壤水分 Pettitt 突变检验值。

图 6 宁夏回族自治区 2003—2022 年年均土壤水分 Pettitt 突变检验

Fig. 6 Pettitt mutation test for annual average soil moisture in Ningxia Hui Autonomous Region from 2003 to 2022

3.5 宁夏回族自治区分区土壤水分未来变化趋势

从土壤水分的 Hurts 指数分布图发现宁夏回族自治区土壤水分的未来趋势 Hurts 指数介于 0.14~0.86, 均值为 0.46, 呈现 Hurts 现象(图 7a)。其中, Hurts 指数 ≤ 0.5 的区域占研究区的 68.65%, Hurts 指数 > 0.5 的区域占研究区的 31.35%, 这表明未来一段时期研究区大部分地区的土壤水分与 2003—2022 年的变化趋势整体表现为相反趋势。为了更好地研究宁夏回族自治区土壤水分未来发展趋势, 将土壤水分变化趋势结果(图 5)与 Hurts 指数分布图结果进行叠加, 将土壤水分的变化趋势分为持续增加、持续减少、由增加变为减少、由减少变为增加、无法预测等 5 类。从图 7b 结合表 5 可以看出, 未来整个研究区土壤水分由增加变为减少的区域为 47.80%, 所占比例最多, 主要分布在中部干旱带的同心县、盐池县北部、海原县北部及南部山区西吉县、泾源县大部; 其次是持续增加的区域占 21.19%, 主要分布在中部干旱带红寺堡区、利通区、盐池县南部及南部山区原州区、海原县南部及彭阳县西部; 由减少变为增加的区域占 20.85%, 主要分布在北部引黄灌区及中部干旱带盐池县北部、海原县西北部; 持续减少的区域占比相对较少, 为 10.16%, 主要分布在北部引黄灌区及盐池县南部。

总体来说, 未来土壤水分变化北部引黄灌区、中部

干旱带、南部山区分别约有 49.09%, 60.43%, 62.91% 的面积呈减少趋势(持续减少+由增加变减少所占面积比值), 约有持续增加、持续减少和由增加变为减少区域的土壤水分变化应引起持续关注, 以防盐渍化及干旱灾害发生。

表 5 2003—2022 年宁夏回族自治区不同分区土壤水分未来变化趋势

Table 5 Future change trends of soil moisture in different regions of Ningxia Hui Autonomous Region from 2003 to 2022

分区	土壤水分变化面积所占比例/%				
	无法预测	持续增加	持续减少	由增加变减少	由减少变增加
北部引黄灌区	0.00	13.03	21.85	27.24	37.88
中部干旱带	0.00	18.98	8.41	52.02	20.59
南部山区	0.00	36.44	0.09	62.82	0.65
全自治区	0.00	21.19	10.16	47.80	20.85

3.6 宁夏回族自治区土壤水分变化的驱动机制分析

3.6.1 单因子探测结果 每个影响因子对土壤水分变化的影响程度可用 q 值来量化, q 值越大, 表明该因子对土壤水分的影响程度越强, 反之越弱。单因子探测结果见表 6。由表 6 可以得到, 2003—2022 年 NDVI 的 q 值在 0.358~0.481 之间, 地形的 q 值在 0.391~0.478 之间, 显示各年份 NDVI 和地形为土壤水分变化的主要影响因子。年降水量和土地利用类

型的 q 值也较大,年均气温、地貌类型、坡度、坡向的 q 值依次减小,其中坡向的 q 值最小,仅在 0.002~0.007 之间,说明这些影响因子对土壤水分变化的影响程度在时间上较为一致。而且,根据影响因子的排序结果可知,NDVI 和地形的影响程度交替进行,而

降水量的影响作用近年有所增强,可能反映了气候变化导致的降水格局改变有关,进一步加强了土壤水分的动态变化。总体来看,NDVI、地形、年降水量和土地利用类型是土壤水分变化的关键影响因子,而其他因子的作用相对稳定。

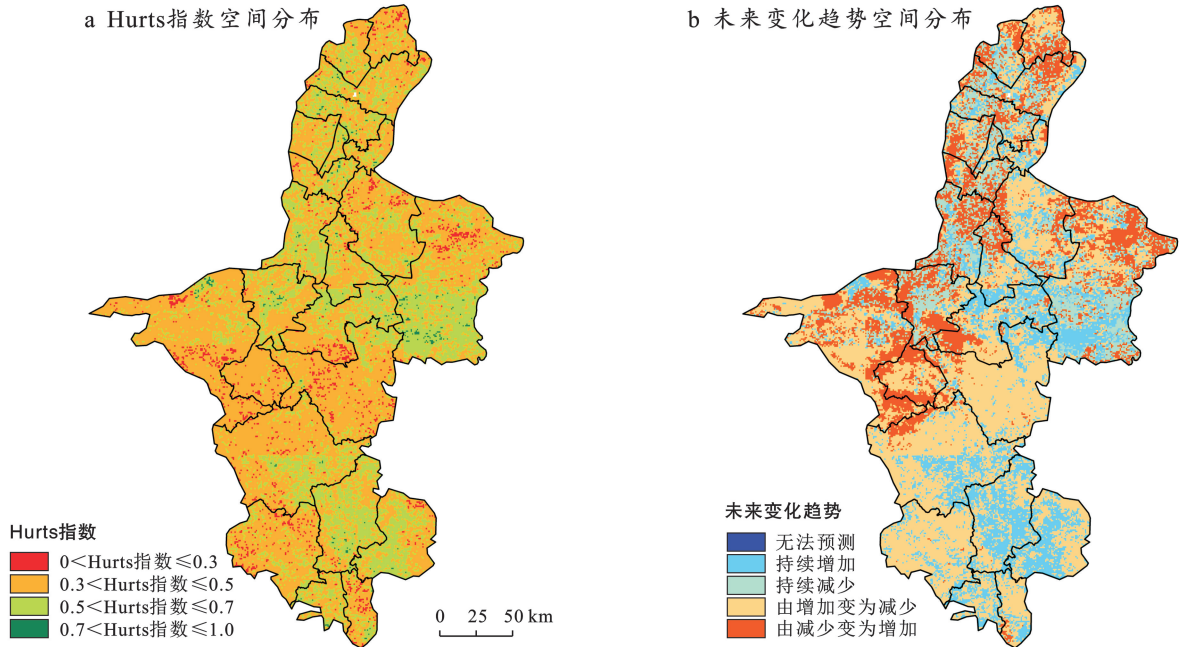


图 7 2003—2022 年宁夏回族自治区年均土壤水分 Hurts 指数空间分布及未来变化趋势

Fig.7 Spatial distribution and change trend of Hurts index of annual average soil moisture in Ningxia Hui Autonomous Region from 2003 to 2022

表 6 2003—2022 年宁夏回族自治区土壤水分单因子探测的结果

Table 6 Results of single-factor detection of soil moisture in Ningxia Hui Autonomous Region from 2003 to 2022

影响因子	2003 年		2008 年		2013 年		2018 年		2022 年	
	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序
坡向(X_1)	0.005	8	0.007	8	0.003	8	0.003	8	0.002	8
坡度(X_2)	0.044	7	0.054	7	0.033	7	0.034	7	0.034	7
地形(X_3)	0.409	2	0.478	1	0.391	2	0.433	1	0.407	1
年降水量(X_4)	0.246	4	0.248	4	0.313	3	0.327	3	0.315	3
年均气温(X_5)	0.182	5	0.241	5	0.195	5	0.222	5	0.191	5
地貌类型(X_6)	0.156	6	0.167	6	0.096	6	0.095	6	0.105	6
土地利用类型(X_7)	0.275	3	0.305	3	0.292	4	0.296	4	0.265	4
NDVI(X_8)	0.481	1	0.463	2	0.409	1	0.379	2	0.358	2

3.6.2 交互作用探测 从图 8 可以看出,影响因子之间的交互关系表现为双因子增强以及非线性增强两种类型,说明在各影响因子间的交互作用均大于单一影响因子对土壤水分的作用。2003 年交互作用影响力排在前 4 的分别是 NDVI \cap 地形(0.617),NDVI \cap 降水量(0.597),土地利用类型 \cap 地形(0.547),NDVI \cap 气温(0.543);2008 年交互作用影响力排在前 4 的分别是 NDVI \cap 地形(0.617),NDVI \cap 降水量(0.598),土地利用类型 \cap 地形(0.585),地貌 \cap 地形(0.57);2013 年交互作用影响力排在前 4 的分别是 NDVI \cap 地形

(0.562),NDVI \cap 降水量(0.554),土地利用类型 \cap 降水量(0.541),降水量 \cap 地形(0.512);2018 年交互作用影响力排在前 4 的分别是 NDVI \cap 地形(0.577),土地利用类型 \cap 降水量(0.541),降水量 \cap 地形(0.539),土地利用类型 \cap 地形(0.524);2022 年交互作用影响力排在前 4 的分别是 NDVI \cap 地形(0.553),降水量 \cap 地形(0.54),土地利用类型 \cap 降水量(0.506),NDVI \cap 降水量(0.503)。由此可知,NDVI 和地形的交互作用在各年份中均占据重要地位,表明植被覆盖与地形特征对土壤水分的变化影响较为显著。总体来说,

NDVI、地形、降水等自然因素与土地利用等人为因素共同影响着宁夏回族自治区区域土壤水分的时空变

化过程与分布格局,在土壤水分预测和管理中,需要综合考虑多因子的交互作用,而非单因子的影响。

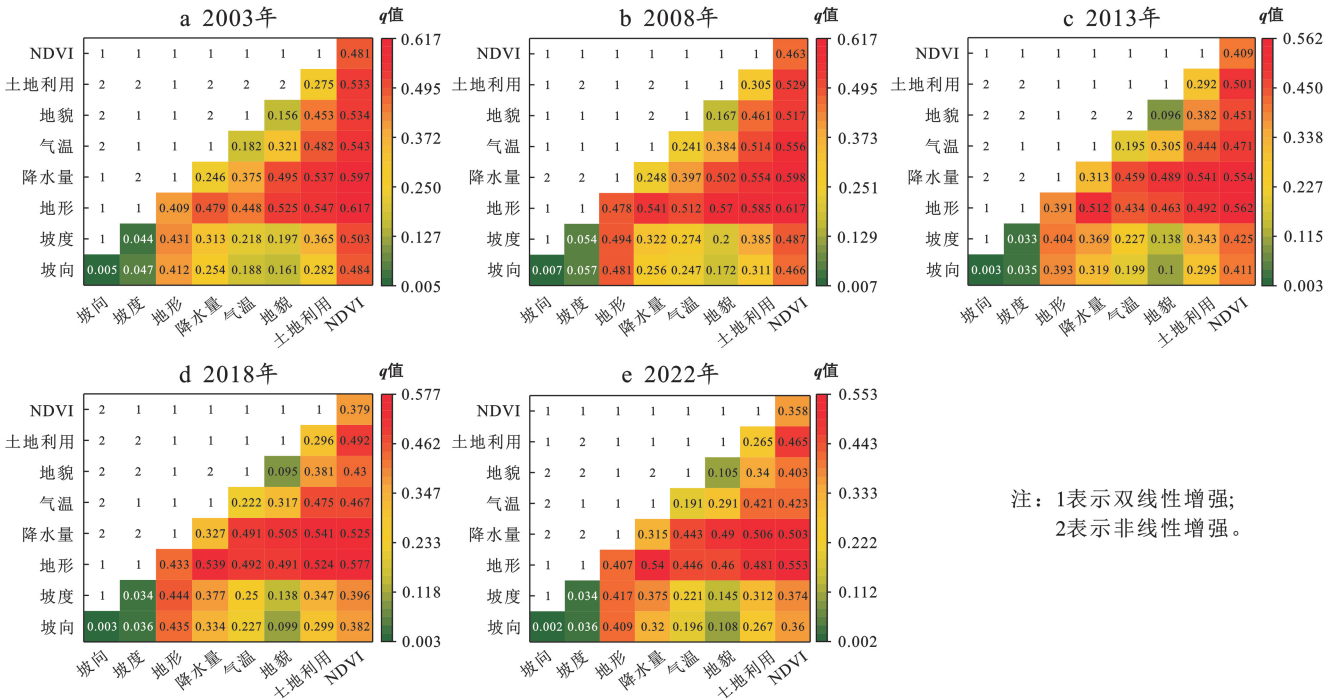


图 8 2003—2022 年宁夏回族自治区土壤水分交互探测的结果

Fig.8 Results of soil moisture interactive detection in Ningxia Hui Autonomous Region from 2003 to 2022

4 讨论

(1) 多年宁夏回族自治区土壤水分在空间上呈现出“北部、南部高,中部低”的分布特征,这与易成功^[22]的研究结果相似。进一步探究其原因,北部引黄灌区作为中国四大古老灌区之一,其土壤水分主要得益于黄河丰富的过境地表水资源。而南部山区,特别是六盘山脉一带,由于地形动力抬升作用明显,阻断了北上水汽,导致山区附近降雨增强,进而土壤水分含量相对较高。

(2) 近 20 年宁夏回族自治区全境土壤水分整体呈显著性上升趋势,但不同分区存在显著差异。具体来说,北部引黄灌区土壤水分呈缓慢下降趋势,尽管这一变化并不显著。这主要是该区域土壤水分主要来源于黄河过境地表水,自黄河流域实行“八七分水”方案以来,为应对水资源短缺问题,区域不断实行节水改造工程、最严格的水资源管理制度以及“四水四定”政策,这些措施导致引黄灌溉水量逐年减少,尽管区域气温增加,降水也略有增加,但是区域不到 200 mm 的降水和近 1 800 mm 的蒸发量,无法补足因干流水源补给不足造成的缺水问题,从而使得区域土壤水分呈现下降趋势。中部干旱带土壤水分呈缓慢上升趋势,同样这一变化也不显著。在同样的气候条件下,除了部分区域如红寺堡等采用扬黄设施引水灌

溉,周边多荒漠草原,干旱缺水,难以形成径流,地下水量少,因此土壤水分含量普遍较低。至于土壤含水量逐渐缓慢增加,可能与降水略有增加、地方在水资源利用上面做了大量的工作,例如加大水源工程建设力度、发展高效节水补灌工程,使区域水资源量有所增加^[23]有关。南部山区土壤水分则呈显著上升趋势,这主要得益于该区域山区天然降水增加、实行水源涵养、水土保持以及水土流失治理有重要关系^[24]。近年来,受环流形势、贝加尔湖冷涡槽及回流高压等因素的影响^[25],南部山区频繁发生极端降雨事件,导致降雨量显著增加^[26]。同时,当地政府大力实施退耕还林措施,有效改善了土壤水分的保持能力。这些因素共同作用,使得南部山区的土壤水分呈现出明显的上升趋势。

(3) 土壤水分增加的区域所占比例高达 68.99%,远大于土壤水分减少的区域(31.01%),表明宁夏回族自治区大部分地区土壤水分状况在逐渐改善,这与近年来西北干旱区降水增加、气候湿润化有密切关系。其中,南部山区土壤水分整体呈现出显著增加趋势,而北部引黄灌区和贺兰山脉附近土壤水分减少。南部山区降水的增加,可能会引起径流过程的变化,甚至洪水灾害事件的发生,而土壤水分持续减少可能导致局部区域的干旱灾害。这些问题引起政府及水资源管理部门的高度关注。

5 结论

(1) 宁夏回族自治区不同分区年际尺度土壤水分时空分布不均衡且差异较大。2003—2022 年土壤水分总体表现为显著性上升趋势,土壤水分增加的区域(68.99%)远大于土壤水分减少的区域(31.01%)。从不同分区看,北部引黄灌区呈缓慢下降趋势,这一变化并不显著,年均土壤水分平均以 0.022%/a 的速率减少;中部干旱带呈缓慢上升趋势,同样这一变化也不显著,年均土壤水分平均以 0.030%/a 的速率增加;南部山区呈显著上升趋势,年均土壤水分平均以 0.107%/a 的速率增加,且在 2012 年发生显著突变,上升幅度明显增加。从土壤水分空间分布格局看,土壤水分呈现出“北部、南部高,中部低”的分布特征,多年平均土壤水分由高到低依次为:北部引黄灌区(11.40%)>南部山区(10.70%)>中部干旱带(8.40%)。

(2) 基于 Hurts 指数的未来趋势预测表明,宁夏回族自治区区域 68.65% 的土壤水分变化趋势将与过去变化趋势相反。从分区来看,未来土壤水分变化北部引黄灌区、中部干旱带、南部山区分别约有 49.09%, 60.43%, 62.91% 的面积呈减少趋势(持续减少+由增加变减少所占面积比例),约有 51.18%, 39.57%, 37.09% 的面积呈增加趋势(持续增加+由减少变增加所占面积比例),持续增加、持续减少和由增加变为减少区域的土壤水分变化尤其北部引黄灌区及中部干旱带应引起持续关注,以防盐渍化及干旱灾害发生。

(3) 宁夏回族自治区土壤水分分布的主要影响因素为 NDVI 和地形,其解释力几乎均大于 40.00% 其次是降水和土地利用变化的影响,而且随着时间的推移,降水对宁夏回族自治区不同分区土壤水分影响逐渐增强。

参考文献 (References)

- [1] Dobriyal P, Qureshi A, Badola R, et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 458: 110-117.
- [2] 王国杰, 薛峰, 齐道日娜, 等. 基于风云三号卫星微波资料反演中国地表土壤湿度及其对比 [J]. *大气科学学报*, 2018, 41(1): 113-125.
Wang Guojie, Xue Feng, Qi Daorina, et al. Soil moisture retrievals from FY-3B satellite microwave brightness and comparative analyses over China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2018, 41(1): 113-125.
- [3] 蔡江涛. 澳大利亚土壤湿度时空变化及其对植被影响研究 [D]. 江苏 南京: 南京信息工程大学, 2022.

Cai Jiangtao. Study on the spatio-temporal variations of soil moisture in Australia and its impact on vegetation [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022.

- [4] 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 土壤湿度与气候变化关系的研究进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 1999, 14(3): 299-305.
Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. Research progress and prospect of the relationship between soil moisture and climate change [J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(3): 299-305.
- [5] 山仑, 邓西平, 康绍忠. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向 [J]. *水利学报*, 2002, 33(9): 27-31.
Shan Lun, Deng Xiping, Kang Shaozhong. Current situation and perspective of agricultural water used in semi-arid area of China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(9): 27-31.
- [6] 索朗杰塔, 杜军, 卓嘎, 等. 1981—2020 年青藏高原春季土壤湿度时空变化特征及其与高原季风的关系 [J]. *大气科学*, 2022, 46(2): 473-485.
Suo L, Du Jun, Zhuoga, et al. Characteristics of the spring soil moisture evolution over the Tibetan Plateau from 1981 to 2020 and its relationship with the plateau monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, 46(2): 473-485.
- [7] 李轩, 过志峰, 吴门新, 等. 华北地区土壤水分的时空变化特征 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(12): 4203-4211.
Li Xuan, Guo Zhifeng, Wu Menxin, et al. Temporal and spatial variations of soil moisture in North China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(12): 4203-4211.
- [8] 陈国茜, 祝存兄, 李素云, 等. 三江源地区土壤水分的地理分区遥感模型构建及时空变化 [J]. *草地学报*, 2021, 29(S1): 199-207.
Chen Guoqian, Zhu Cunxiong, Li Suyun, et al. Remote sensing model construction and spatial-temporal change of soil moisture in the source region of the Three Rivers [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(S1): 199-207.
- [9] 高萌萌, 刘琼, 王轶, 等. 内蒙古西辽河平原植被指数时空变化及其影响因素研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 175-182.
Gao Mengmeng, Liu Qiong, Wang Yi, et al. Spatial and temporal variations in vegetation index and its impact factors in the West Liaohe Plain in Inner Mongolia [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 175-182.
- [10] Chow K C, Chan J C L, Shi Xueli, et al. Time-lagged effects of spring Tibetan Plateau soil moisture on the monsoon over China in early summer [J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(1): 55-67.
- [11] 顾倩, 耿广坡, 郑若琳, 等. 渭河流域土壤水分时空变化

- 及其影响因素分析[J].水土保持研究,2024,31(5):199-211.
- Gu Qian, Geng Guangpo, Zheng Ruolin, et al. Analysis on spatiotemporal variation of soil moisture and its influencing factors in Weihe River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(5):199-211.
- [12] 王重洋,弓卫,畅蓬博.基于 MK 检验的延安站 30 年辐射量特征分析[J].陕西水利,2022(10):184-185.
- Wang Chongyang, Gong Wei, Chang Pengbo. Analysis of radiation characteristics of Yan'an station in 30 years based on MK test [J]. Shaanxi Water Resources, 2022(10):184-185.
- [13] 张菲,刘景时,巩同梁,等.喜马拉雅山北坡卡鲁雄曲径流与气候变化[J].地理学报,2006,61(11):1141-1148.
- Zhang Fei, Liu Jingshi, Gong Tongliang, et al. Hydrological regime of the Karuxung watershed in North Himalayas [J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(11):1141-1148.
- [14] 李丽娟,郑红星.华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析:以潮白河为例[J].地理学报,2000,55(3):309-317.
- Li Lijuan, Zheng Hongxing. Characteristics and driving forces of annual runoff changes for rivers in North China: A case study in the Chaobaihe River [J]. Acta Geographica Sinica, 2000,55(3):309-317.
- [15] 王建邦,赵军,李传华,等.2001—2015 年中国植被覆盖人为影响的时空格局[J].地理学报,2019,74(3):504-519.
- Wang Jianbang, Zhao Jun, Li Chuanhua, et al. The spatial-temporal patterns of the impact of human activities on vegetation coverage in China from 2001 to 2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(3):504-519.
- [16] 魏凤英,张婷,韩雪.MTM-SVD 方法在印度洋海表温度与华南降水耦合特征分析中的应用[J].海洋通报,2013,32(2):133-140.
- Wei Fengying, Zhang Ting, Han Xue. MTM-SVD approach and its application in the spatio-temporal variability analysis of SST of the Indian Ocean and precipitation of South China [J]. Marine Science Bulletin, 2013,32(2):133-140.
- [17] 李建勋,唐子豪,张永进,等.基于 Kriging 方法和 Pettitt 检验的数据冲突判别[J].计算机工程与应用,2020,56(3):86-93.
- Li Jianxun, Tang Zihao, Zhang Yongjin, et al. Conflict detection of data based on Kriging method and pettitt test [J]. Computer Engineering and Applications, 2020,56(3):86-93.
- [18] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics, 1979,28(2):126-135.
- [19] 秦格霞,芦倩,孟治元,等.1982—2015 年中国北方草地 NDVI 时空动态及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(1):101-108.
- Qin Gexia, Lu Qian, Meng Zhiyuan, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland NDVI and its response to climate change in Northern China from 1982 to 2015 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(1):101-108.
- [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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.
- [21] 刘粲.黄土高原植被恢复对土壤水分的影响研究[D].河北石家庄:河北地质大学,2022.
- Liu Can. Study on the effect of vegetation restoration on soil moisture on the Loess Plateau [D]. Shijiazhuang, Hebei: Hebei GEO University, 2022.
- [22] 易成功.2000—2020 年中国干旱半干旱区土壤湿度时空变化及影响因素[D].河南 洛阳:信阳师范学院,2022.
- Yi Chenggong. Temporal and spatial variation of soil moisture and its influencing factors in arid and semi-arid areas of China from 2000 to 2020 [D]. Luoyang, Henan: Xinyang Normal University, 2022.
- [23] 杨有芳.宁夏中部干旱带水利建设与发展目标[J].科技传播,2012,4(8):45.
- Yang Youfang. Water conservancy construction and development goal in arid zone of Central Ningxia [J]. Public Communication of Science & Technology, 2012,4(8):45.
- [24] 王丽,黄征学,黄顺江.宁夏中南部生态环境现状及保护思路[J].环境与可持续发展,2021,46(4):52-57.
- Wang Li, Huang Zhengxue, Huang Shunjiang. The situation of ecology and environment in Central and Southern Ningxia [J]. Environment and Sustainable Development, 2021,46(4):52-57.
- [25] 张成军,杨文海,范小明,等.宁夏南部山区初夏连阴强降雨过程的物理机制和概念模型[J].安徽农业科学,2012,40(36):17701-17704.
- Zhang Chengjun, Yang Wenhai, Fan Xiaoming, et al. Formation mechanism and conceptual model of the early summer continuous heavy rainfall weather in the mountain areas of South Ningxia [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012,40(36):17701-17704.
- [26] 赵逸雪,褚阳,张汉辰.宁夏历史降雨时空分布特征及基于 MLP 神经网络的趋势预测[J].宁夏大学学报(自然科学版),2023,44(4):362-368.
- Zhao Yixue, Chu Yang, Zhang Hanchen. Analysis of spatial and temporal distribution characteristics of historical rainfall in Ningxia and trend prediction based on MLP neural network [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2023,44(4):362-368.