

DOI: 10.20103/j.stxb.202311112448

琚玉枫,高演辰,张戈,何海龙.华北平原正向“暖干化”演变.生态学报,2024,44(17):7631-7645.

Ju Y F, Gao Y C, Zhang G, He H L. The North China Plain is turning warmer and dryer. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7631-7645.

华北平原正向“暖干化”演变

琚玉枫,高演辰,张戈,何海龙*

西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

摘要:降水(P)、气温(T)、土壤含水量(SWC)和土壤温度(ST)是影响农业生态系统的重要因素,准确刻画其时空变化特征是认识和理解水热交互作用、制定区域农业可持续发展策略的基础。然而,相关研究却严重受限于原位观测站点稀少、监测数据时序短等问题。为了更好地表征这些因素的时空变化特征及相互关系,研究基于 ERA5-Land 再分析数据,采用 Sen 斜率、Mann-Kendall 检验法对华北平原 1953—2022 年 P 、 T 、SWC 和 ST 的变化趋势、突变时间及时空格局进行制图与分析;进而用 Spearman 相关系数探讨了这些因素之间的关系。结果表明:近 70 年来,华北平原年降水总量在 509.80—1393.05 mm 之间波动,降水变化率为 -38.31 mm/10a,突变年份在 1988 年前后;夏季降水减少速率最快。年均气温在 12.11—15.35°C 之间波动,气温变化率为 0.27 °C/10a,突变年份在 1996 年左右;冬季气温升高速率最快。 P 和 T 均呈南高北低的分布特征,华北平原西南部降水减少速率较快而升温速率较慢,西北部则表现相反。SWC 均呈减少趋势,100—289 cm 层含水量变率最大且随时间减少的幅度逐渐增大;四个土层 SWC 季节变化幅度不同。ST 均呈升高趋势且升温速度随时间变快,0—7 cm 层升温速率最快。土壤升温幅度春季最大,秋季最小。SWC 减少幅度随深度增加而增大,ST 升高幅度随深度增加而减小,土壤深度对 SWC 和 ST 的影响相反,且 SWC 突变时间比 ST 突变时间早近 20 年。ST 和 SWC 呈南高北低的分布格局,且西北部变率大,东南部变率小。 T 与 P 、ST 与 SWC 之间的变化趋势相反, P 和 SWC、 T 和 ST 之间的变化趋势相同,SWC 与 T 和 P 、ST 与 T 和 P 的相关性随土壤深度而减小。综上,华北平原水热条件向“暖干化”演变。研究可增进对华北平原水热变化过程的认识,进而为该地农业可持续发展政策制定提供科学依据。

关键词:时空变化;降水;气温;土壤含水量;土壤温度;气候变化;再分析数据

The North China Plain is turning warmer and dryer

JU Yufeng, GAO Yanchen, ZHANG Ge, HE Hailong*

College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: Precipitation (P), air temperature (T), soil water content (SWC) and soil temperature (ST) are important factors affecting agroecosystems, and accurately depicting their spatio-temporal characteristics is the basis for recognizing and understanding the hydrothermal interactions, and for developing strategies for regional agricultural sustainable development. However, these related works are considerably constrained by the sparse and short-duration in-situ observations. In order to characterize the spatiotemporal changes of these factors and their interrelationships, the temporal changing trends, mutability characteristics, and spatial patterns of P , T , SWC and ST were mapped and analyzed using Sen's slope, Mann-Kendall test based on ERA5-Land reanalysis data in the North China Plain during 1953 and 2022. The relationships among these factors were then explored by using the Spearman's correlation coefficient. The results show that: (1) the annual total precipitation has fluctuated between 509.80 and 1393.05 mm over the past 70 years, with a change rate of -38.31 mm/10 a and abrupt change year around 1988 in the North China Plain, while the fastest decrease rate of precipitation was observed in summer; (2) The mean annual temperature fluctuated between 12.11 and 15.35°C, with a

基金项目:国家自然科学基金项目(42177251)

收稿日期:2023-11-11; 网络出版日期:2024-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hailong.he@nwfau.edu.cn

change rate of $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, the year of abrupt change was around 1996, while the fastest warming rate occurred in winter; (3) The distribution of P and T was characterized by higher in the south and lower in the north, with a faster rate of decrease in P and slower rate of T in the southwest of the North China Plain, while the opposite trend was found in the northwest. SWC showed a decreasing trend; (4) The SWC of 100—289 cm layer showed the largest rate of change and gradually increased with time, and the seasonal variations of SWC in the four soil layers were different; (5) ST showed an increasing trend and the warming rate became faster with time, and the 0—7 cm layer had the fastest rate of warming. Soil warming was the largest in spring and the smallest in autumn; (6) The magnitude of the SWC decrease increased with depth, the magnitude of the ST elevation decreased with depth. The effects of soil depth on SWC and ST were opposite, and the turning point of SWC was nearly 20 years earlier than that of ST. The spatial distribution of ST and SWC was higher in the south and lower in the north, and the variability was larger in the northwest and smaller in the southeast. P and SWC, T and ST were positively correlated, while SWC and T , P and ST were negatively correlated. The correlation of SWC with T and P , and ST with T and P decreased with soil depths. The North China Plain shows a dryer and warmer climate and the agriculture is vulnerable to future climate change. The study can improve our understandings of the hydrothermal change process in the North China Plain and provide a scientific basis for policy decisions on the sustainable agricultural development within this region.

Key Words: spatiotemporal variation; precipitation; temperature; soil water content; soil temperature; climate change; reanalysis data

全球气候变化引起物种种群结构变化、生物多样性降低、气候带北移、极端天气事件频发、多年冻土退化等问题,已成为制约人类社会可持续发展的重大问题^[1]。农业生态系统生产力与气候和土地的质量密切相关,是一种自我调节能力(韧性和恢复力)较为薄弱的生态系统,对气候变化影响最为敏感^[2]。据统计,全球每年约三分之一的粮食生产受干旱、热浪、洪涝灾害等气候变化的影响^[3]。我国华北平原是重要的粮食产区,小麦产量占全国一半以上,玉米产量约占全国总产量的40%^[4],对维护国家粮食安全具有举足轻重的意义。然而,全球气候变化导致华北平原气候条件发生变化,进而开始影响该地区作物物候和产量^[5],对区域粮食供给和经济发展带来严峻的挑战。

在众多气候变化指标中,降水量、气温、土壤温度和土壤含水量等水热因子是表征气候变化的重要指标,在预测农作物生长状态和产量方面也具有重要意义^[6-9]。例如,水热因子交互作用过程与气候变化影响研究表明:中等信度的增温会诱发区域气候向“暖湿化”或“暖干化”发展^[10],土壤温度和含水量间的互馈可显著增强东亚夏季气温和降水强度的变化^[11-12],造成极端气候事件发生的规模、频率和强度的增加,给农业生产和生态环境带来严重影响。此外,水热条件不仅影响作物种植类型和作物生长的各个阶段,还是研究农业生态系统关键过程的必要因子^[13]。研究表明,温度驱动大多数植物和土壤微生物生物性状的协调变化^[14],气温升高会增加蒸散量,进而降低土壤水分含量或墒情^[15],而降水是补给土壤含水量与作物耗水的重要来源。然而,有关水热条件变化特征的研究往往只选择降水和气温分别作为水和热因子的指标分开研究,忽略了水热之间的交互作用,而且很少考虑土壤的水分和温度的变化^[16]。因此,有必要综合考虑降水、气温及土壤含水量和土壤温度的变化特征,并分析这些要素间的相互作用关系,以便更好地理解区域气候变化特征并服务于农业生产决策。

目前,常用的水热要素资料来源包括站点测量、遥感反演、数值模拟及数据同化等。高精度的站点监测数据是进行降水^[17-18]、气温^[19-20]、土壤含水量^[21-22]和土壤温度^[23]等要素分析的理想数据。然而,不同区域的监测站点在数量、密度、资料时间序列长度、数据质量控制方面由于受地形、观测方法、管理等因素影响而不尽相同,影响区域或全球尺度分析结果的可靠性^[24]。虽然遥感探测范围广、测量频率高、受地形约束小,被广泛用于气温、降水、地表温度和土壤含水量等参数的反演,但遥感测量深度仅在地表0—5 cm^[25-26]。而数值模

拟结果的精度受输入数据质量、分辨率及模型参数的影响^[27]。数据同化技术利用遥感及地面观测资料并结合数值模拟或机器学习等手段重建格点化的再分析资料,其高时空分辨率和高精度特性相对于其他类型资料具有不可比拟的优越性^[28]。因此,世界各国都在开发自己的再分析资料,包括美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心的全球大气再分析资料(NCEP/NCAR)^[29]、日本气象厅的 JRA-55^[30]、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析产品 ERA 及其更新产品 ERA5-Land^[31]等。这些再分析资料为长时序多要素观测数据缺乏地区开展区域性研究提供了重要数据支撑。

ERA5-Land 数据集质量好、时序长、空间分辨率高,已被广泛地应用于陆面过程关键变量的研究中^[30]。例如,在全球多个区域开展的气温^[32]、降水^[33]、土壤温度^[34]和土壤含水量^[35]的相关研究。ERA5-Land 与站点数据、GLDAS、ERA5 等资料的性能比较评估结果表明,该数据在华北平原地区与降水观测数据吻合度较好^[36],相关系数大于 0.60,偏差接近 1%^[37]。研究表明 ERA5-Land 气温在中国区域的精度也较好^[38]。虽然 ERA5-Land 土壤含水量数据与原位观测的空间相关性略差,但仍可较好地捕捉到原位观测所反映的变化^[39]。此外,开展长时序区域性研究对计算机存储和计算能力要求较高,而用于全球地理空间大数据分析的云计算平台 Google Earth Engine (GEE, <http://code.earthengine.google.com/>),可通过编程在线实现对数据集的调用和分析处理^[40-41]。

基于此,本研究使用站点观测数据验证 ERA5-Land 再分析资料在华北平原的适用性的基础上,通过 GEE 云平台调用和分析 ERA5-Land 再分析数据集中 1953—2022 年间的降水量、地表 2 m 温度、0—289 cm 土壤含水量和温度数据,系统、深入分析华北平原降水量、气温、土壤含水量和温度的年际、季节变化特征,并进一步揭示各水热要素之间的联系。研究结果预期可加深对华北平原水热条件变化过程的认识,为该区域气候变化风险管理和农业生产政策制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

华北平原地处中国东部,东与渤海、黄海毗邻,南以淮河干流和苏北灌渠为界,西接太行山,北靠燕山,包括河北、河南、山东、安徽、江苏、北京和天津五省二市的部分区域,经纬度介于 32°—41° N, 112°—121° E 之间(图 1),土地总面积约 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[42]。属暖温带半湿润气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,春季干旱少雨,平均气温为 12—16℃,平均降雨量为 500—900 mm;光热资源丰富,≥10℃积温为 3700—4700℃,年总辐射量为 4605—5860 MJ m⁻² a⁻¹。地形平坦,平均海拔在 50 m 以下,地势西高东低。华北平原是中国重要的粮棉油生产基地,主要粮食作物有小麦、水稻、玉米、高粱等,经济作物主要有棉花、花生、油菜等,种植制度为一年两熟或两年三熟。该地区以旱涝灾害为主,而长期抽取地下水用于工农业生产已经造成地下水位的严重下降^[43],是典型的气候脆弱区和受气候变化影响最为敏感的地区^[9]。

1.2 观测资料

GSOM(Global Summary of the Month)为美国国家海洋和大气局国家环境信息中心发布,包含从 1763 年至今的月度气象要素观测数据(<https://www.ncei.noaa.gov/maps/monthly/>),其中中国站点 700 多个。用于验证 ERA5-Land 降水和气温的可靠性的站点详细信息见表 1。由于部分站点存在缺测,考虑到观测资料的完整

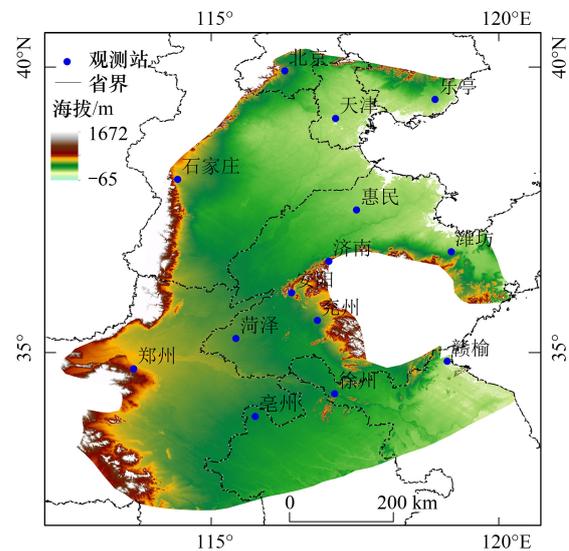


图 1 华北平原位置

Fig.1 Location of North China Plain

性,除赣榆、菏泽、乐亭和徐州站外,数据的时间范围为 1955 年 1 月 1 日至 2012 年 12 月 31 日。土壤含水量数据^[44]源于科学数据银行(<https://www.scidb.cn/en>),验证期为 1992—2019 年。土壤温度数据为中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)^[45],验证期为 1992—1996 年。

表 1 气象站点

Table 1 Meteorological stations

站点编号 Station_ID	站点 Station	开始时间 Begin_date	结束时间 End_date	纬度(E) Latitude	经度(N) Longitude	海拔 Elevation/m
53898	安阳	1951-01-01	2024-02-01	36.05°	114.4°	64
54511	北京	1951-01-01	2024-02-01	39.933°	116.283°	55
58102	亳州	1953-01-01	2024-02-01	33.883°	115.767°	42
58040	赣榆	1957-01-01	2024-02-01	34.85°	119.133°	10
54906	菏泽	1953-03-01	1994-12-01	35.25°	115.433°	51
54725	惠民	1951-01-01	2024-02-01	37.5°	117.533°	12
54823	济南	1951-01-01	2023-01-01	36.6°	117.05°	169
54539	乐亭	1957-01-01	2024-02-01	39.433°	118.9°	12
53698	石家庄	1955-01-01	2024-02-01	38.033°	114.417°	81
54527	天津	1954-01-01	2024-02-01	39.1°	117.167°	5
54843	潍坊	1951-01-01	2024-02-01	36.767°	119.183°	22
58027	徐州	1956-09-01	2024-02-01	34.283°	117.15°	42
54916	兖州	1951-01-01	2024-02-01	35.567°	116.85°	53
57083	郑州	1951-01-01	2024-02-01	34.717°	113.65°	111

1.3 ERA5-Land

ERA5-Land 再分析月数据集(<http://cds.climate.copernicus.eu/>),是由 ECMWF 采用陆面模式 Cy45r1,以第五代再分析产品 ERA5 模拟的陆地表大气变量作为驱动场,在 CHTESSEL 模型中模拟得到^[46]。此数据集地理坐标系为 WGS-84。通过修正热力学输入达到非线性动态降尺度,ERA5-Land 空间分辨率达到 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。ERA5-Land 共包含 50 个变量,汇总了从 1950 年到至今 3 个月前的实时数据(不断更新)。由于同一驱动场模拟的 ERA5-Land 数据一致性好,空间和时间分辨率高,时间跨度长,准确记录了过去几十年的全球陆面参数情况,被广泛应用于各类研究中^[47-48]。本研究选取了 ERA5-Land 再分析数据 1953 年 1 月至 2023 年 2 月的降水量(P)、气温(T)、0—7 cm 土层含水量(SWC1)、7—28 cm 土层含水量(SWC2)、28—100 cm 土层含水量(SWC3)、100—289 cm 土层含水量(SWC4)、0—7 cm 土层温度(ST1)、7—28 cm 土层温度(ST2)、28—100 cm 土层温度(ST3)和 100—289 cm 土层温度(ST4)共 10 个波段 70 年的月度数据用于华北平原水热状况分析(表 2)。

1.4 数据处理

(1) ERA5-Land 适用性验证

利用图形来展示 ERA5-Land 再分析与站点监测值的一致性评价数据准确性中广泛使用的一种方法。令 x 为实测值, y 为 ERA5-Land 值,借助 Sigmaplot 14 对二者进行拟合, R^2 用于判断实测值和再分析的一致性。若数据一致性好,则 R^2 接近 1,每点均落在 1:1 线周围。

(2) 数据预处理

基于 GEE 对 ERA5-Land 逐月数据进行了筛选、裁剪处理以及要素单位转换,使其满足研究时空范围和变化特征分析的需求。为了对气温、降水、土壤温度和含水量进行年和季节尺度变化特征分析,将每年 12 个月尺度数据进行平均计算得到年尺度数据。季节尺度数据则根据北半球典型季度划分法,按 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季进行合成计算。

表 2 研究数据详细信息

Table 2 Detailed information of the study data

要素 Factor	缩写 Abbreviation	ERA5-Land 波段 ERA5-Land band	空间分辨率 Spatial resolution	单位 Unit
总降水量 Total precipitation	<i>P</i>	total_precipitation_sum	0.1°×0.1°	m
气温 Temperature	<i>T</i>	temperature_2m	0.1°×0.1°	℃
0—7 cm 土层含水量 Soil water content of 0—7 cm layer	SWC1	volumetric_soil_water_layer_1	0.1°×0.1°	m ³ /m ³
7—28 cm 土层含水量 Soil water content of 7—28 cm layer	SWC2	volumetric_soil_water_layer_2	0.1°×0.1°	m ³ /m ³
28—100 cm 土层含水量 Soil water content of 28—100 cm layer	SWC3	volumetric_soil_water_layer_3	0.1°×0.1°	m ³ /m ³
100—289 cm 土层含水量 Soil water content of 100—289 cm layer	SWC4	volumetric_soil_water_layer_4	0.1°×0.1°	m ³ /m ³
0—7 cm 土层温度 Soil temperature of 0—7 cm layer	ST1	soil_temperature_level_1	0.1°×0.1°	℃
7—28 cm 土层温度 Soil temperature of 7—28 cm layer	ST2	soil_temperature_level_2	0.1°×0.1°	℃
28—100 cm 土层温度 Soil temperature of 28—100 cm layer	ST3	soil_temperature_level_3	0.1°×0.1°	℃
100—289 cm 土层温度 Soil temperature of 100—289 cm layer	ST4	soil_temperature_level_4	0.1°×0.1°	℃

(3) Sen 斜率

使用 Sen 斜率^[49]量化气温、降水、土壤温度和土壤含水量在 1953—2022 年间的变化趋势:

$$\beta = \text{median} \left[\frac{X_j - X_i}{j - i} \right], \quad i, j \in [1953, 2022] \quad (1)$$

式中, median 为取中值函数; X 为变量的栅格文件; i 和 j 为变量栅格文件的时间, 且 $i < j$; β 为变量的斜率, β 大于(小于)0, 呈上升(下降)趋势。为便于要素空间变化特征比较, 对 Sen 斜率进行归一化处理。

(4) Mann-Kendall 检验

使用 Mann-Kendall (M-K) 非参数检验法确定各要素突变时间^[50]。首先, 对华北平原 70 年的时间序列 X 数据构造秩序列 s_k :

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i, r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i \quad (2)$$

式中, s_k 是第 i 年数值大于 j 年数值个数的累计数, 当 $k=1$ 时, $s_1=0$ 。假定时间序列独立, 统计量 UF_k 定义为:

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中, UF 为标准正态分布, 它是按时间序列 X 顺序 X_1, X_2, \dots, X_n 计算的统计量序列, $UF_1=0$; $E(s_k)$, $\text{Var}(s_k)$ 是累计数 s_k 的均值和均方差, 当 X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立且由相同连续分布时, 可由公式 4 和公式 5 算出:

$$E(s_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (4)$$

$$\text{Var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (5)$$

按照时间序列逆序构造逆序列 UB。当 UF 值大于(小于)0 呈上升(下降)趋势, 当超过临界置信水平线 ($\alpha=0.01$, 置信水平线为 ± 2.58), 表明上升或下降趋势显著, 超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。若 UF 和 UF 两条曲线在临界线之间出现交点, 则交点对应时刻为突变开始时间。研究以突变时间为界绘制各要素在华北平原的空间格局图, 进行变化特征分析。

(5) Spearman 秩相关系数

Spearman 秩相关系数是基于两个变量排序位次,精确量化两个变量之间单调关系的非参数度量,它对异常值不太敏感。考虑到降水、气温、土壤含水量和温度数据异常值的影响,研究使用 Spearman 秩相关系数计算这些变量之间的相互关系。 $|\rho| \leq 0.3$ 为弱相关, $0.3 < |\rho| \leq 0.5$ 为低度相关, $0.5 < |\rho| \leq 0.8$ 为显著相关, $0.8 < |\rho| \leq 1$ 为高度相关。Spearman 秩相关系数的计算方法^[51]如下:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (6)$$

式中, n 为单个变量的样本总数,在本研究中, $n=70, 280, 840$ 时分别为年度、季度及月度数量; d_i 为第 i 个数据对的位次值之差。该操作在 SPSSAU 在线分析网站 (<http://spssau.com/indexs.html>) 进行。

2 结果与分析

2.1 ERA5-Land 可靠性评估

图 2 为华北平原降水、气温、土壤温度和土壤含水量的站点监测数据与 ERA5-Land 再分析的月度数据的一致性评估结果。由图 2 可见, ERA5-Land 再分析产品对月平均气温和月平均 0 cm 土壤温度的表达与站点观测相似, 回归拟合 R^2 分别为 0.991 和 0.986, 而对月降水量的表达与站点观测数据相比略差, 回归拟合 $R^2 = 0.756$ 。ERA5-Land 对土壤含水量的表达较差, 但仍有部分点落于 1:1 线周围。所以, ERA5-Land 再分析是进行华北平原气温和土壤温度时空变化特征分析的站点数据的替代产品。即使该数据集对降水和土壤含水量的表达不理想, 然而发挥其全球覆盖、长时间序列的优势开展相关变量的时空变化特征分析能够弥补站点数据稀少或缺失、观测时间短等方面的不足。

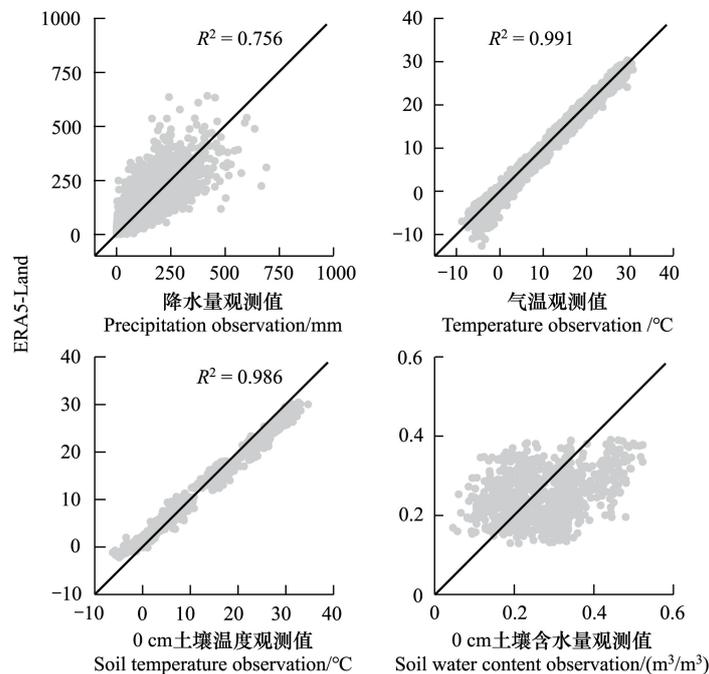


图 2 华北平原站点观测和 ERA5-Land 再分析月度数据一致性评估

Fig.2 The monthly data evaluation of constancy between site observations and ERA5-Land reanalysis in the North China Plain

2.2 华北平原降水、气温时空变化特征

1953 年至 2022 年间, 华北平原年降水量在 509.80—1393.05 mm 之间波动(图 3), 整体呈波动下降趋势, 平均降水量为 823.16 mm, 最高值出现在 1954 年, 最低值出现在 2019 年。降水量变率为 $-38.31 \text{ mm}/10\text{a}$, 这

一变化在统计学上具有显著性($P < 0.01$)。从 20 世纪 50 年代至今,每相邻十年的平均降水量差值分别为-84.04、-77.92、40.96、-59.88、-10.95 和 -67.76 mm。对降水的季节变化进行分析发现,华北平原春夏秋冬四个季节降水量均呈下降趋势,夏季降水减少速率最快(-26.42 mm/10a),春季次之(-7.16 mm/10a),秋季和冬季的减少速率相近,分别为-3.42 mm/10a 和 -4.39 mm/10a。通过 M-K 突变检验(图 4)得出,在 1953—1957 年间降水呈不显著上升趋势,1958—2010 年间降水呈不显著下降趋势,在 2011—2022 年间降水呈显著下降趋势。降水量在 1988 年左右开始发生突变。

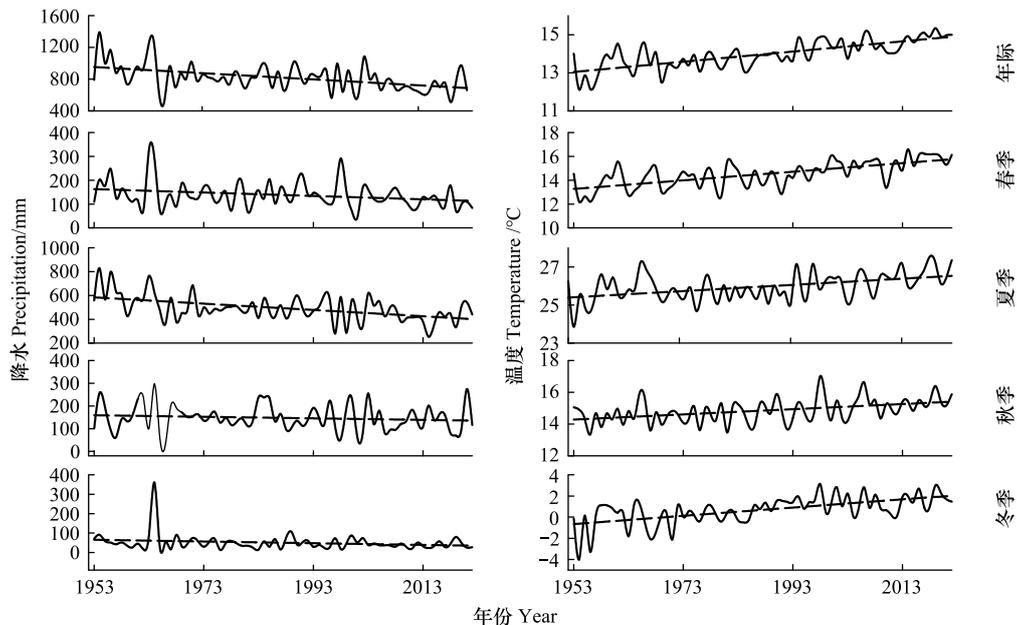


图 3 1953—2022 年华北平原降水、气温的年均及季节变化特征

Fig.3 Annual and seasonal changes of precipitation and air temperature in the North China Plain from 1953 to 2022

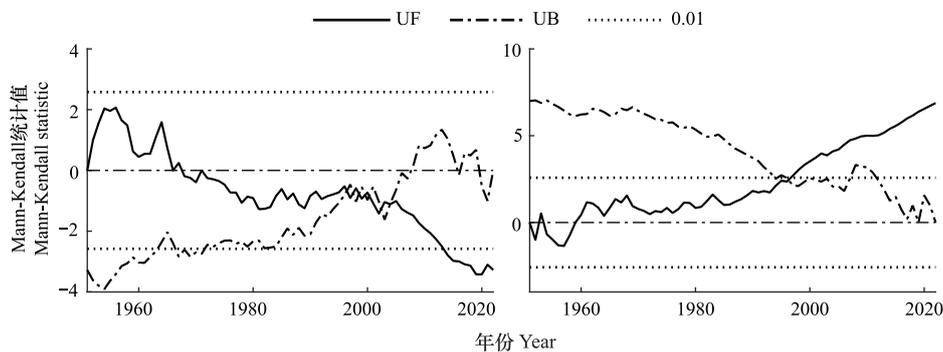


图 4 1953—2022 年期间华北平原年降水量和年均气温 Mann-Kendall 检验

Fig.4 Mann-Kendall test of annual precipitation and annual air temperature in the North China Plain during 1953 and 2022

UF:时间序列 X 顺序计算的统计量序列;UB:时间序列 X 逆序计算的统计量序列

1953 年至 2022 年间,华北平原年均气温在 12.11—15.35℃ 之间波动(图 3),年均气温呈波动中上升趋势,气温变率为 0.27℃/10a($P < 0.01$)。平均气温为 13.98℃,最高值出现在 2019 年,最低值出现在 1965 年。气温从 20 世纪 50 年代至今,每相邻十年的平均温度差值分别为 0.17、0.19、0.11、0.67、-0.069、0.57℃,升温幅度随时间增大。进一步分析气温季节变化发现,华北平原四季的气温均呈上升趋势,冬季气温升高速率最快(0.39℃),春季次之(0.36℃/10a),夏季(0.17℃/10a)和秋季(0.16℃/10a)气温上升速率趋同。通过 M-K 检

验(图4)得出,在1953—1957年间气温呈不显著下降趋势,1958—1997年间气温呈不显著上升趋势,在1998—2022年间气温呈显著上升趋势。在1996年左右气温开始发生突变。

从1998年前后的华北平原降水量分布情况(图5)来看,该区域表现出低纬度地区降水多、高纬度地区降水少的特征。1998年前,华北平原年均降水量位于624.76—1309.73 mm之间,降水量基本随纬度升高而减少。1988年后,该区域年均降水量在501.50—1211.47 mm间波动,降水量高值区(1000—1200 mm/a)位于华北平原南部,低值区(400—600 mm/a)位于华北平原西北部。除西南部的局部地区降水量减小速率快,华北平原其他大部分地区降水量减小速率基本一致(图6)。

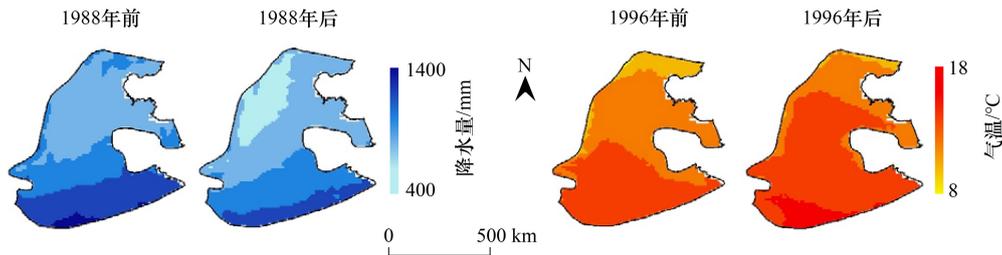


图5 降水和气温突变前后的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of precipitation and temperature before and after abrupt change

1953—2022年华北平原气温变化空间分布(图5)与降水量变化空间分布情况相反,具有气温随纬度增加而升高的特征。气温发生突变的时间为1996年。1996年前,华北平原气温在8.70—15.48℃之间;1996年后,气温在9.86—16.40℃之间。其西部和北部部分区域升温速率快,西南部升温速率较慢(图6)。

2.3 华北平原不同土层含水量和温度在不同时间尺度的变化特征

1953—2022年华北平原SWC1—SWC4的变化存在较好的一致性,均呈减小趋势(图7),由浅到深4层土壤含水量分别在0.22—0.34、0.21—0.34、0.21—0.34

和0.22—0.37 m³/m³之间波动。土壤含水量减小幅度随深度增加而增大,其中SWC4变化幅度最大,每十年减少0.014 m³/m³($P < 0.01$,表3),SWC3变化次之(每十年减少0.01 m³/m³, $P < 0.01$),SWC1和SWC2变化相同,均为每十年减少0.007 m³/m³。20世纪50年代至今,每相邻的10年间,上三层土壤含水量差值均随着时间的推移而逐渐减小,然而第四层土壤含水量差值却呈现出逐渐增大的趋势。进一步分析季节变化(表3和图7)发现,1953—2022年不同土层的四季含水量均呈现波动减少的趋势,但减小幅度不同。SWC1变率的绝对值:春季>冬季>夏季=秋季;SWC2变率的绝对值:春季>夏季=秋季=冬季;SWC3变率绝对值:夏季>秋季>冬季>春季;SWC4变率的绝对值:秋季>夏季=冬季>春季。对各层土壤含水量进行M-K突变检验(图8),发现距地表越近,其突变时间越早,SWC1—SWC4突变时间分别发生在1974、1975、1977、1978年。

1953—2022年华北平原ST1—ST4的变化均呈上升趋势(图7)。四层土壤温度升高幅度在0.253—0.262℃/10a之间,距地表越近升温幅度越大。20世纪50年代至今,各层每相邻10年升温速度越来越快,1953—2022年土层温度持续升高,2003—2012年土层温度呈轻微下降,2013—2022年土层温度又显现出上升趋势。各层土壤温度季节变化显示(表3和图7):1953—2022年ST1—ST4四季温度均上升,上三层温度上升幅度:春季>夏季>冬季>秋季,第四层温度上升幅度:春季>冬季>夏季>秋季。对各层温度进行M-K突变检验分

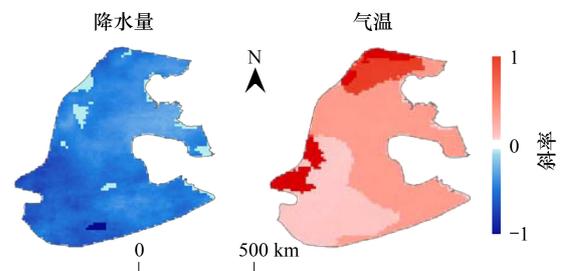


图6 1953—2022年华北平原降水和气温 Sen 斜率空间分布

Fig.6 Spatial distribution of precipitation and temperature Sen's slope in North China Plain from 1953 to 2022

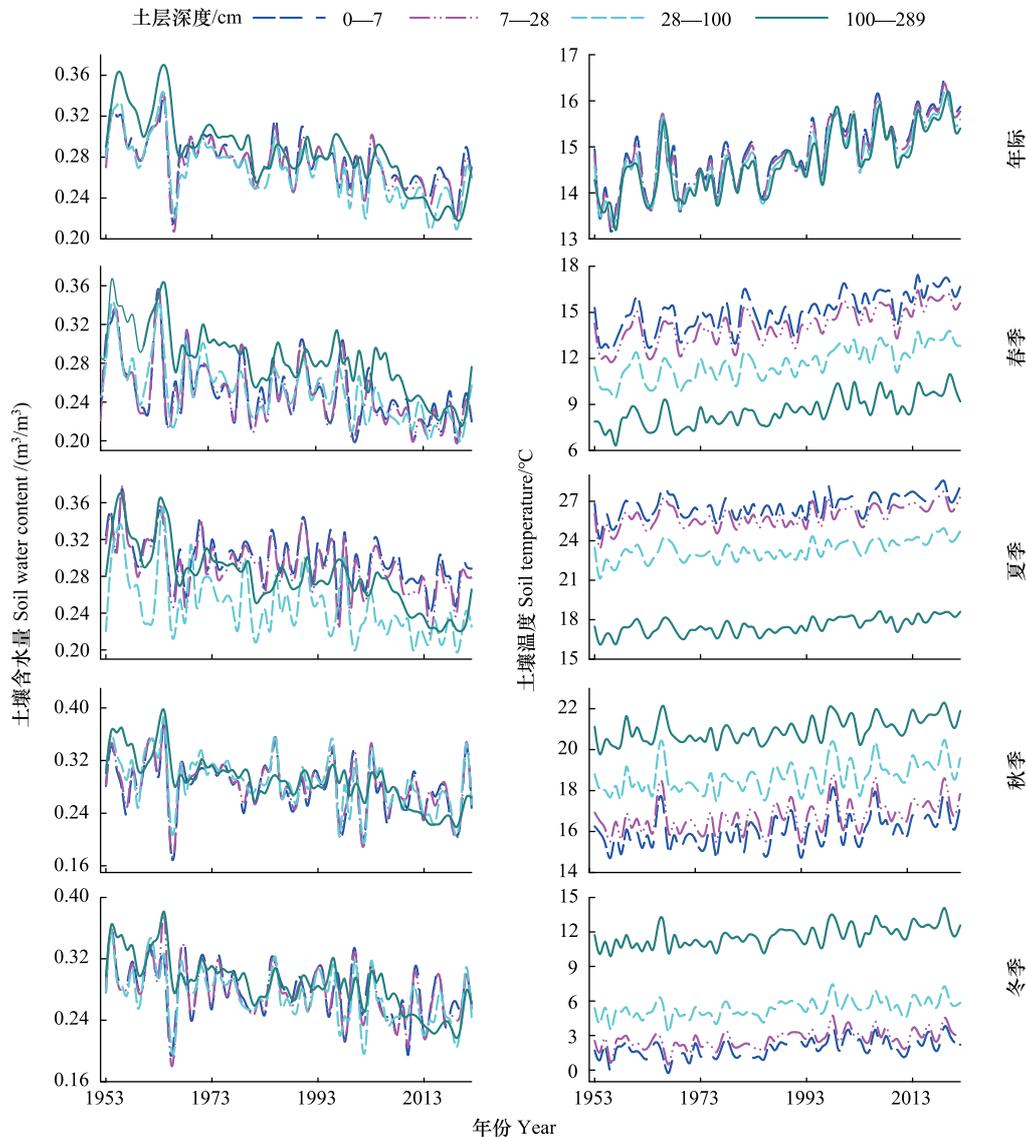


图 7 1953—2022 年华北平原土壤含水量和土壤温度的变化

Fig.7 Changes of soil water content and soil temperature in North China Plain from 1953 to 2022

析(图 8)表明,ST1—ST4 的突变时间分别发生在 1996、1995、1993、1993 年,各层距地表越远其突变时间越早。土层深度对含水量和温度的影响呈现相反的趋势,且含水量突变时间比温度突变时间早将近 20a。

华北平原四个土层含水量的空间分布表明:1953—2022 年华北平原各土层含水量空间分布上呈南高北低的分布特征(图 9)。这种特征在上下两层含水量空间变化情况略有不同,主要表现在突变前后在北部上两层含水量均在 $0.2\text{—}0.3\text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间波动,而北部特别是西北部下两层含水量在突变前后变化较复杂。在 SWC3 发生突变(1977 年)前,含水量在 $0.2\text{—}0.3\text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间变化,之后该层西北部含水量下降至 $0.2\text{—}0.1\text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间。SWC4 北部含水量发生突变(1978 年)前,北部含水量在 $0.2\text{—}0.4\text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间,之后该层北部含水量在 $0.1\text{—}0.3\text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间。从 1953—2022 年华北平原 SWC1—SWC4 的 Sen 斜率空间变化分布情况(图 10)可以看出,上三层含水量在西北部区域减少趋势较为明显,且随深度增加,含水量减少幅度高值区逐步向东南方向延伸。SWC4 减小幅度从西北向东南方向逐步变小,而 Sen 斜率变化更为复杂。

各土层温度的空间分布显示(图 9):1953—2022 年华北平原各土层年均温度空间分布均随纬度增高而

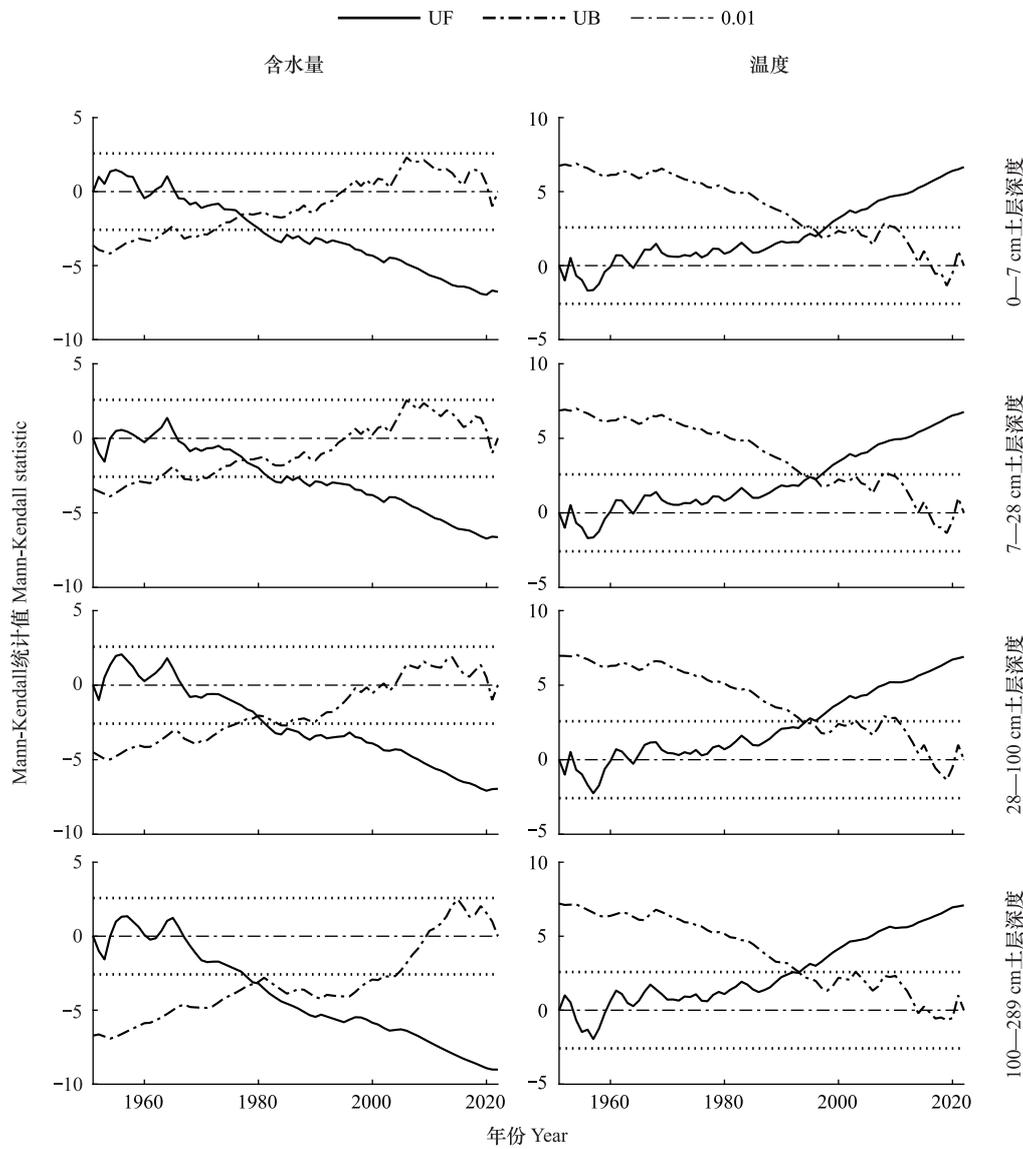


图 8 1953—2022 年华北平原年土壤含水量和土壤温度 Mann-Kendall 检验

Fig.8 Soil water content and soil temperature Mann-Kendall test in the North China Plain during 1953—2022

表 3 1953—2022 年四个土层的含水量和温度的斜率

Table 3 Soil water content and soil temperature tendency rates of four soil layers during 1953—2022

时间 Time	SWC1	R ²	SWC2	R ²	SWC3	R ²	SWC4	R ²
春 Spring	$y = -0.0008x + 0.2803$	-0.505 **	$y = -0.0009x + 0.2799$	-0.539 **	$y = -0.0001x + 0.2869$	-0.659 **	$y = -0.0013x + 0.3293$	-0.797 **
夏 Summer	$y = -0.0006x + 0.3217$	-0.483 **	$y = -0.0007x + 0.3169$	-0.495 **	$y = -0.0011x + 0.3014$	-0.633 **	$y = -0.0014x + 0.3277$	-0.811 **
秋 Autumn	$y = -0.0006x + 0.3025$	-0.377 **	$y = -0.0007x + 0.3068$	-0.404 **	$y = -0.0009x + 0.3213$	-0.494 **	$y = -0.0015x + 0.3419$	-0.805 **
冬 Winter	$y = -0.0007x + 0.3024$	-0.394 **	$y = -0.0007x + 0.3017$	-0.419 **	$y = -0.0008x + 0.2999$	-0.513 **	$y = -0.0014x + 0.3357$	-0.798 **
年 Year	$y = -0.0007x + 0.3018$	-0.626 **	$y = -0.0007x + 0.2994$	-0.614 **	$y = -0.001x + 0.3023$	-0.692 **	$y = -0.0014x + 0.3351$	-0.837 **
	ST1	R ²	ST2	R ²	ST3	R ²	ST4	R ²
春 Spring	$y = 0.0427x + 13.563$	0.715 **	$y = 0.0424x + 12.648$	0.740 **	$y = 0.0406x + 10.255$	0.769 **	$y = 0.0361x + 7.3044$	0.747 **
夏 Summer	$y = 0.0232x + 25.836$	0.520 **	$y = 0.0239x + 25.029$	0.563 **	$y = 0.0246x + 22.45$	0.642 **	$y = 0.0204x + 16.825$	0.648 **
秋 Autumn	$y = 0.0177x + 15.417$	0.493 **	$y = 0.0174x + 16.133$	0.508 **	$y = 0.0173x + 18.071$	0.522 **	$y = 0.0164x + 20.401$	0.571 **
冬 Winter	$y = 0.0213x + 1.1774$	0.530 **	$y = 0.0211x + 1.9313$	0.546 **	$y = 0.0208x + 4.6247$	0.559 **	$y = 0.0278x + 10.684$	0.633 **
年 Year	$y = 0.0262x + 13.969$	0.737 **	$y = 0.0262x + 13.908$	0.745 **	$y = 0.0259x + 13.816$	0.750 **	$y = 0.0253x + 13.766$	0.764 **

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$

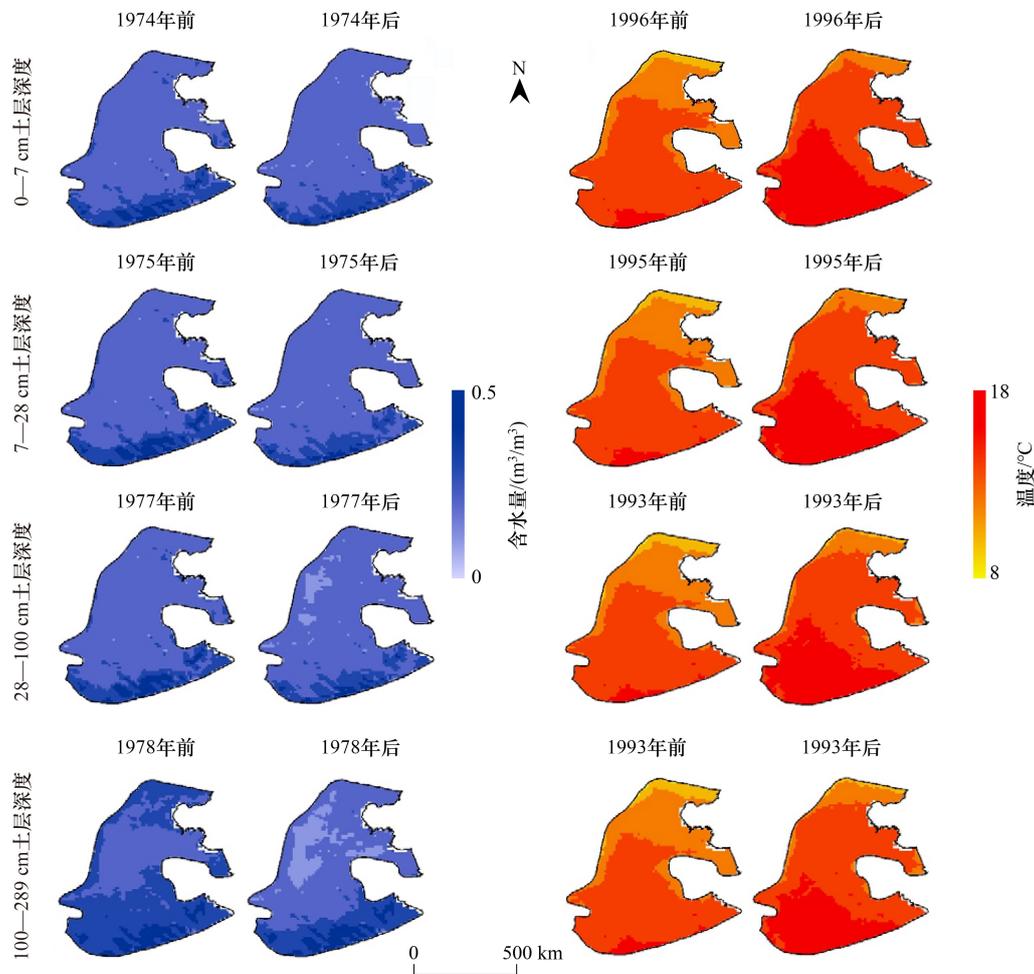


图9 土壤含水量和土壤温度在突变前后的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of soil water content and soil temperature before and after abrupt change

降低。ST1 在 1996 年前最高温度为 17.03℃,最低温度为 9.75℃;1996 年后最高温度为 17.81℃,最低温度为 10.88℃。ST2 在 1995 年前最高温度为 17.03℃,最低温度为 9.58℃;1995 年后最高温度为 17.78℃,最低温度为 10.69℃。ST3 在 1993 年前最高温度为 16.95℃,最低温度为 9.25℃;1993 年后最高温度为 19.79℃,最低温度为 10.41℃。ST4 在 1993 年前最高温度为 16.80℃,最低温度为 9.10℃;1993 年后最高温度为 17.79℃,最低温度为 10.26℃。1953—2023 年华北平原各土层温度 Sen 斜率空间分布情况(图 10)与土层水分斜率空间分布情况相似,西北部变化剧烈,东南部变化较缓。

2.4 华北平原地气系统多变量的相关性分析

气温、降水、土壤温度和含水量是陆地和气候系统水热交互过程的重要参数。4 个水热要素的相关分析(表 4)结果表明:10 个变量均通过 99% 置信水平的显著性检验。 P 与 T 之间的相关系数为 -0.58,说明 P 与 T 之间存在显著负相关关系。 P 与 ST 之间呈显著负相关关系,相关系数在 -0.51—-0.64 之间。 P 与 $SWC1$ 和 $SWC2$ 呈高度正相关关系,相关系数均为 0.88; P 与 $SWC3$ 为显著正相关关系,相关系数为 0.79; P 与 $SWC4$ 为低度正相关关系,相关系数为 0.46。 T 与 ST 呈高度正相关关系,相关系数在 0.91—0.99 之间; T 与 SWC 呈显著负相关关系,相关系数在 -0.66—-0.70 之间。 ST 与 SWC 呈显著负相关关系,相关系数在 -0.67—-0.78 之间。在统计学意义上, SWC 与 T 、 SWC 与 P 、 ST 与 T 、 ST 与 P 的相关性随土壤层的加深而减小。

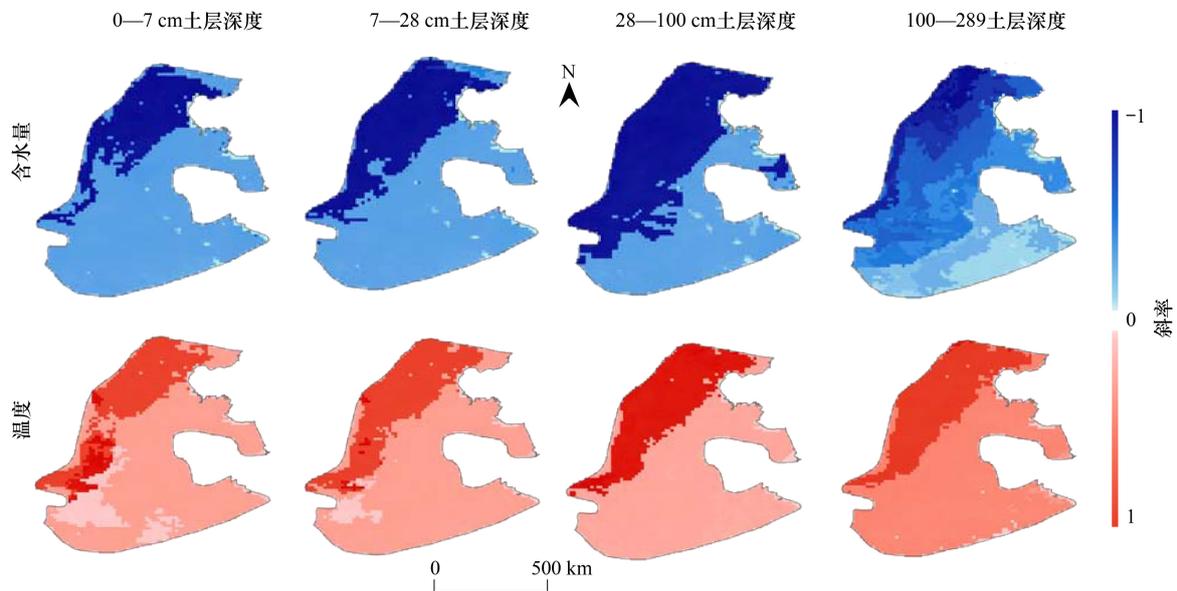


图 10 1953—2022 年华北平原土壤含水量和土壤温度 Sen 斜率空间分布

Fig.10 Spatial distribution of soil water content and soil temperature Sen's slope in North China Plain from 1953 to 2022

表 4 降水, 气温, 土壤水及土壤温度之间的 Spearman 相关系数

Table 4 Spearman correlation coefficient of precipitation, air temperature, soil water content and soil temperature

因子 Factor	<i>P</i>	<i>T</i>	SWC1	SWC2	SWC3	SWC4	ST1	ST2	ST3	ST4
<i>P</i>	1									
<i>T</i>	-0.58 **	1								
SWC1	0.88 **	-0.7 **	1							
SWC2	0.88 **	-0.7 **	0.98 **	1						
SWC3	0.79 **	-0.72 **	0.91 **	0.93 **	1					
SWC4	0.46 **	-0.66 **	0.63 **	0.67 **	0.78 **	1				
ST1	-0.64 **	0.99 **	-0.76 **	-0.77 **	-0.78 **	-0.67 **	1			
ST2	-0.64 **	0.99 **	-0.76 **	-0.77 **	-0.78 **	-0.68 **	0.99 **	1		
ST3	-0.59 **	0.97 **	-0.75 **	-0.75 **	-0.77 **	-0.69 **	0.98 **	0.99 **	1	
ST4	-0.51 **	0.91 **	-0.7 **	-0.71 **	-0.77 **	-0.71 **	0.92 **	0.93 **	0.97 **	1

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$

3 讨论

由上述研究可知,1953—2022 年华北平原年降水总量呈减少趋势,夏季降水减少速率最快,降水量呈南多北少的分布特征;年平均气温呈上升趋势,冬季气温升高最快,气温呈南高北低的分布特征,该研究与杨若子等^[18]及叶金印等^[20]的研究结果一致。气温倾向率为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,比阿多等^[42]研究结果高 $0.04^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,这可能与研究时段与研究数据不同有关。本研究结果是以 1953—2022 年的 ERA5-Land 逐月的近地表 2 m 温度数据为基础得到的,而阿多等^[42]采用 1960—2013 年的气象站点日均温数据进行分析。土壤含水量减少幅度随深度增加而增大,而程善俊等^[52]的研究表明,1948—2010 年华北地区暖季 10—100 cm 土壤湿度的减小比其他土层厚度(0—10 cm、100—200 cm)更为迅速,其原因可能是本研究使用 ERA5-Land 数据研究基于自然分区的华北平原,而程善俊等使用 GLDAS 同化资料对中国华北地区分析土壤湿度。这说明土壤含水量和气温变化受区域位置、土壤深度以及时间的影响。

降水、气温、土壤含水量和温度之间存在复杂的互馈作用,这些作用会加强气候变化的复杂性。Zuo

等^[53]研究发现,地表潜热通量增加和感热通量减少会引起土壤含水量增加,陆海温度梯度减小会造成中国东南部东亚季风环流减弱,导致华北降水减少。Li 等^[11]在东亚地区的研究发现,925 hPa 下土壤温度反馈强度受长波辐射、地表热量分配和温度对流的影响,且主要取决于对流层以下非绝热加热过程,能够显著增强东亚夏季日均气温和最低地表气温的年际变化。已有研究证实了净辐射、土壤含水量和大气湿度 3 个变量与地表温度的长期变化呈显著相关^[54],土壤水分-大气耦合通过地表能量平衡的变化加速全球变暖^[55]。在华北平原,土壤水分和降水呈正相关关系,且这种相关性随深度增加而逐渐减小。同时土壤水分与气温呈负相关关系,这与程善俊等^[56]的研究结果一致。母娅霆等^[57]发现,土壤温度与气温、太阳辐射及土壤含水量均呈显著负相关关系,土层越深,相关性越弱。

华北平原水热变化特征刻画存在不确定性,这主要与研究使用的数据有关。站点数据的代表性受地形条件的限制;同时,通过插值获取的降水数据在复杂地形条件下的精度有待研究。此外,在长期的观测过程中,观测仪器的更换、观测规范和资料计算方法的变化、观测台站位置的迁移、测站周围环境的变化和城市热岛效应等问题都会影响陆面要素观测的精度,进而影响到水热情况的不确定性^[24]。卫星遥感数据受传感器、数据采集时的天气条件、反演算法等影响,也存在显著的系统偏差和不确定性^[25]。数值模式模拟的数据质量受模型开发者对地球系统物理过程的认识水平、模型自身的系统误差和参数化方案的影响^[28],从而导致模式输出结果存在系统性偏差。同时,数据的时空分辨率也会造成研究之间结果的差异。本研究采用的 ERA5-Land 再分析资料在一定程度上能够表征华北平原气候变化特征,但因受数据集本身系统误差以及空间分辨率的影响,其结果与真实水热变化特征之间仍存在不确定性。因此,需进一步对观测站点数据、遥感反演和再分析资料等多源数据进行数据融合与同化,以提高研究数据的准确性,为精准刻画水热要素变化特征服务。

华北平原农业生产受水热条件的影响和制约,该地区水热条件的变化对作物类型、物候期、作物种植和灌溉方式、田间水分温度管理等方面具有重要指导意义。1953 年以来,华北平原水热条件总体趋于暖干化,为实现该地区粮食生产稳定、保障国家粮食安全,在农业生产中应调整高耗水作物种植面积和空间布局,合理采用的节水灌溉措施,减少农业用水量,以适应水热条件的变化^[4]。

4 结论

本文利用华北平原降水、气温、土壤含水量和土壤温度观测数据验证了 ERA5-Land 再分析产品在该区域的可靠性,重点分析了 1953—2022 年间华北平原降水、气温、土壤含水量和土壤温度的年代际、季节变化特征。主要结论如下:

(1) 华北平原年降水量在 509.80—1393.05 mm 之间波动,降水倾向率为 -38.31 mm/10a,夏季降水减少速率最快,突变年份在 1988 年前后。年均气温在 12.11—15.35℃ 之间波动,气温变率为 0.27℃/10a,冬季气温升高速率最快,突变年份在 1996 年左右。从空间分布特征来看,降水量和气温均呈南高北低的分布特征,其西南部降水减少速率较快而升温速率较慢。

(2) 四个土层土壤含水量均呈减少趋势,100—289 cm 层土壤含水量变率最大且随时间减少的幅度逐渐增大。华北平原四个土层土壤含水量突变时间依次为 1974、1975、1977、1978 年,这表明土壤含水量发生突变时间与深度之间存在一定关系,深度越大,突变时间越晚。土壤含水量的季节变化幅度随深度而异,0—7 cm 和 7—28 cm 层土壤含水量春季变化幅度最大,28—100 cm 层夏季变化幅度最大,100—289 cm 层秋季变化幅度最大。

(3) 四个土层土壤温度均呈升高趋势,且升温速率随时间越来越快,0—7 cm 层升温速率最快。华北平原四个土层土壤温度发生突变的时间依次为 1996、1995、1993、1993 年,土层越深,土壤温度越早发生突变。土壤温度的季节变化率不同,四个土层春季升温幅度最大,秋季升温幅度最小。从空间分布特征来看,华北平原土壤温度和含水量呈南高北低的分布格局,土壤温度和含水量西北部变率大,东南部变率小。

(4) 降水、气温、土壤含水量和温度之间存在复杂的相关关系。在统计学意义上,降水与气温、土壤含水

量与土壤温度呈负相关关系;降水和土壤含水量、气温和土壤温度呈正相关关系;土壤含水量与气温、土壤含水量与降水、土壤温度与气温、土壤温度与降水的相关性随土壤深度增加而减小。

本研究得出华北平原水热条件向“暖干化”演变,一定程度上对认识该地区气候变化以及华北平原农作物种植、农田水热管理、国家粮食安全战略的践行具有重要的参考价值。ERA5-Land 再分析通过了与站点观测资料的一致性检验,保证了本文结果的可靠性。然而,虽然 ERA5-Land 能够刻画土壤含水量和降水的时空变化趋势,但在具体数值方面有失精准。水热因子之间存在复杂的相互影响,本研究仅就水热因子的统计学关系进行分析。因此,在随后的研究中,可通过数值模式进一步对土壤含水量和降水量进行更高精度的模拟,或对水热条件变化以及交互影响的机理进行研究。

参考文献(References):

- [1] Hoegh-Guldberg O, Jacob D, Taylor M, Guillén Bolaños T, Bindi M, Brown S, Camilloni I A, Diedhiou A, Djalante R, Ebi K, Engelbrecht F, Guiot J, Hijioka Y, Mehrotra S, Hope C W, Payne A J, Pörtner H O, Seneviratne S I, Thomas A, Warren R, Zhou G. The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C. *Science*, 2019, 365(6459): eaaw6974.
- [2] 刘立涛, 刘晓洁, 伦飞, 吴良, 鲁春霞, 郭金花, 曲婷婷, 刘刚, 沈镭, 成升魁. 全球气候变化下的中国粮食安全问题研究. *自然资源学报*, 2018, 33(6): 927-939.
- [3] 贾根锁. IPCC《气候变化与土地特别报告》对陆气相互作用的新认知. *气候变化研究进展*, 2020, 16(1): 9-16.
- [4] 莫兴国, 夏军, 胡实, 林忠辉. 气候变化对华北农业水资源影响的研究进展. *自然杂志*, 2016, 38(3): 189-192.
- [5] Wen P F, Wei Q R, Zheng L, Rui Z X, Niu M J, Gao C K, Guan X K, Wang T C, Xiong S P. Adaptability of wheat to future climate change: effects of sowing date and sowing rate on wheat yield in three wheat production regions in the North China Plain. *The Science of the Total Environment*, 2023, 901: 165906.
- [6] 何玉杰, 孔泽, 卢晓, 张江, 王猛, 彭长辉, 朱求安. 水热条件分别控制了温带草地 NDVI 的年际变化和增长趋势. *生态学报*, 2022, 42(2): 766-777.
- [7] He W J, Liu Y Y, Sun H P, Taghizadeh-Hesary F. How does climate change affect rice yield in China? *Agriculture*, 2020, 10(10): 441.
- [8] 乐章燕, 廖荣伟, 刘晶森, 卢建立, 白月明, 梁宏, 安顺清, 黄鹤. 水分胁迫对华北平原冬小麦地上部分及产量的影响. *气象与环境学报*, 2014, 30(6): 120-124.
- [9] 毛喜玲, 殷淑燕, 刘海红. 1960—2020 年华北地区玉米单产对气候变化的响应. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(10): 193-200.
- [10] 赵东升, 高璇, 吴绍洪, 郑度. 基于自然分区的 1960—2018 年中国气候变化特征. *地球科学进展*, 2020, 35(7): 750-760.
- [11] Li K, Zhang J Y, Wu L Y, Yang K, Li S S. The role of soil temperature feedbacks for summer air temperature variability under climate change over East Asia. *Earth's Future*, 2022, 10(4): e2021EF002377.
- [12] Li K, Zhang J Y, Yang K, Wu L Y. The role of soil moisture feedbacks in future summer temperature change over East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(22): 12034-12056.
- [13] 夏龙, 宋小宁, 蔡硕豪, 胡容海, 郭达. 地表水热要素在青藏高原草地退化中的作用. *生态学报*, 2021, 41(11): 4618-4631.
- [14] Buzzard V, Michaletz S T, Deng Y, He Z L, Ning D L, Shen L N, Tu Q C, Van Nostrand J D, Voordeckers J W, Wang J J, Weiser M D, Kaspari M, Waide R B, Zhou J Z, Enquist B J. Continental scale structuring of forest and soil diversity via functional traits. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3(9): 1298-1308.
- [15] 李梁, 杨泽粟, 何杭. 中国北方蒸散-降水耦合度时空变化与水热因子的关系. *干旱气象*, 2022, 40(5): 791-803.
- [16] Zhang J Y, Wu L Y, Dong W J. Land-atmosphere coupling and summer climate variability over East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D5): D05117.
- [17] 桑林, 余乐福. 华北地区夏季降水的气候特征分析. *气象研究与应用*, 2018, 39(1): 24-27, 65.
- [18] 杨若子, 邢佩, 杜吴鹏, 党冰, 轩春怡, 熊飞麟. 1961—2017 年华北地区降水气候特征分析. *地理科学*, 2020, 40(9): 1573-1583.
- [19] Seo Y W, Ha K J. Changes in land-atmosphere coupling increase compound drought and heatwaves over northern East Asia. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2022, 5: 100.
- [20] 叶金印, 黄勇, 张春莉, 杨祖祥. 近 50 年淮河流域气候变化时空特征分析. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 84-91.
- [21] 李轩, 过志峰, 吴门新, 何延波. 华北地区土壤水分的时空变化特征. *应用生态学报*, 2021, 32(12): 4203-4211.
- [22] 宋献方, 王仕琴, 肖国强, 王志民, 刘鑫. 华北平原地下水浅埋区土壤水分动态的时间序列分析. *自然资源学报*, 2011, 26(1): 145-155.
- [23] 张慧智, 史学正, 于东升, 王洪杰, 赵永存, 孙维侠, 黄宝荣. 中国土壤温度的空间插值方法比较. *地理研究*, 2008, 27(6): 1299-1307.
- [24] 高艳红, 刘伟, 曾礼. 陆面过程高分辨率模拟的不确定性. *高原气象*, 2021, 40(6): 1364-1376.
- [25] Peng J, Loew A, Merlin O, Verhoest N E C. A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(2): 341-366.
- [26] 田浩, 刘琳, 张正勇, 陈泓瑾, 张雪莹, 王统霞, 康紫薇. 2001—2020 年中国地表温度时空分异及归因分析. *地理学报*, 2022, 77(7): 1713-1729.
- [27] Latif, M. Uncertainty in climate change projections. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 110(1): 1-7.

- [28] 秦大河. 气候变化科学概论. 北京: 科学出版社, 2018: 30-33.
- [29] Bao X H, Zhang F Q. Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*, 2013, 26(1): 206-214.
- [30] Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, Ebata A, Moriya M, Onoda H, Onogi K, Kamahori H, Kobayashi C, Endo H, Miyaoka K, Takahashi K. The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2015, 93(1): 5-48.
- [31] Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, Albergel C, Arduini G, Balsamo G, Boussetta S, Choulga M, Harrigan S, Hersbach H, Martens B, Miralles D G, Piles M, Rodríguez-Fernández N J, Zsoter E, Buontempo C, Thépaut J N. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 2021, 13(9): 4349-4383.
- [32] Zou J, Lu N, Jiang H, Qin J, Yao L, Xin Y, Su F Z. Performance of air temperature from ERA5-Land reanalysis in coastal urban agglomeration of Southeast China. *The Science of the Total Environment*, 2022, 828: 154459.
- [33] Zhang Y, An C B, Liu L Y, Zhang Y Z, Lu C, Zhang W S. High mountains becoming wetter while deserts getting drier in Xinjiang, China since the 1980s. *Land*, 2021, 10(11): 1131.
- [34] Cao B, Gruber S, Zheng D H, Li X. The ERA5-Land soil temperature bias in permafrost regions. *The Cryosphere*, 2020, 14(8): 2581-2595.
- [35] 刘维成, 徐丽丽, 朱姜韬, 段伯隆, 孙义, 郑涛. 再分析资料和陆面数据同化资料土壤湿度产品在中国北方地区的适用性评估. *大气科学学报*, 2022, 45(4): 616-629.
- [36] Xie W H, Yi S Z, Leng C, Xia D F, Li M L, Zhong Z W, Ye J F. The evaluation of IMERG and ERA5-Land daily precipitation over China with considering the influence of gauge data bias. *Scientific Reports*, 2022, 12: 8085.
- [37] Jiao D L, Xu N N, Yang F, Xu K. Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China. *Scientific Reports*, 2021, 11: 17956.
- [38] Huang X L, Han S, Shi C X. Multiscale assessments of three reanalysis temperature data systems over China. *Agriculture*, 2021, 11(12): 1292.
- [39] Wu Z Y, Feng H H, He H, Zhou J H, Zhang Y L. Evaluation of soil moisture climatology and anomaly components derived from ERA5-land and GLDAS-2.1 in China. *Water Resources Management*, 2021, 35(2): 629-643.
- [40] Caihong Gao, Qifan Wu, Miles Dyck, Lei Fang, Hailong He. Greenhouse area detection in Guanzhong Plain, Shaanxi, China; Evaluation of four classification methods in Google Earth Engine. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2022, 48 (6): 747-763.
- [41] Velastegui-Montoya A, Montalvón-Burbano N, Carrión-Mero P, Rivera-Torres H, Sadeck L, Adami M. Google earth engine: a global analysis and future trends. *Remote Sensing*, 2023, 15(14): 3675.
- [42] 阿多, 熊凯, 赵文吉, 宫兆宁, 井然, 张磊. 1960—2013 年华北平原气候变化时空特征及其对太阳活动和大气环境变化的响应. *地理科学*, 2016, 36(10): 1555-1564.
- [43] 曹艳萍, 秦奋, 庞营军, 赵芳, 黄金亭. 2002—2016 年华北平原植被生长状况及水文要素时空特征分析. *生态学报*, 2019, 39(5): 1560-1571.
- [44] Wang A., Shi X.. A Multilayer Soil moisture dataset based on the gravimetric method in China. *Science Data Bank*, 2021[2022-05-26]. <http://cstr.cn/31253.11.sciencedb.00539>. CSTR:31253.11.sciencedb.00539.
- [45] 国家气象信息中心. 中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)(1951—2010). 时空三极环境大数据平台. 2019.
- [46] 岳书平, 闫业超, 张树文, 杨久春, 王文娟. 基于 ERA5-LAND 的中国东北地区近地表土壤冻融状态时空变化特征. *地理学报*, 2021, 76(11): 2765-2779.
- [47] Copernicus Climate Change Service(C3S). C3S ERA5-Land reanalysis. Copernicus Climate Change Service, date of access. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!home>, 2019.
- [48] Muoz S J. ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).2019, doi:10.24381/cds.68d2bb3034.
- [49] Jiang R G, Xie J C, Zhao Y, He H L, He G H. Spatiotemporal variability of extreme precipitation in Shaanxi Province under climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 130(3): 831-845.
- [50] 胡琦, 马雪晴, 胡莉婷, 王雅婧, 徐琳, 潘学标. Matlab 在气象专业教学中的应用——气象要素的 M-K 检验突变分析. *实验室研究与探索*, 2019, 38(12): 48-51, 107.
- [51] Song H Y, Park S. An analysis of correlation between personality and visiting place using Spearman's rank correlation coefficient. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2020, 14(5): 1951-1966.
- [52] 程善俊, 黄建平, 季明霞, 管晓丹, 郭瑞霞. 中国华北暖季土壤湿度的变化特征. *干旱气象*, 2015, 33(5): 723-731.
- [53] Zuo Z Y, Zhang R H. Influence of soil moisture in Eastern China on the East Asian summer monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(2): 151-163.
- [54] Jiang K, Pan Z H, Pan F F, Teuling A J, Han G L, An P L, Chen X, Wang J L, Song Y, Cheng L, Zhang Z Y, Huang N, Ma S Q, Gao R P, Zhang Z Z, Men J Y, Lv X Q, Dong Z Q. Combined influence of soil moisture and atmospheric humidity on land surface temperature under different climatic background. *iScience*, 2023, 26(6): 106837.
- [55] Qiao L, Zuo Z Y, Zhang R H, Piao S L, Xiao D, Zhang K W. Soil moisture-atmosphere coupling accelerates global warming. *Nature Communications*, 2023, 14: 4908.
- [56] 程善俊, 管晓丹, 黄建平, 季明霞. 利用 GLDAS 资料分析黄土高原半干旱区土壤湿度对气候变化的响应. *干旱气象*, 2013, 31(4): 641-649.
- [57] 母娅霆, 刘子琦, 李渊, 朱大运. 喀斯特地区土壤温度变化特征及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2021, 41(7): 2738-2749.