

doi: 10.6046/zrzyyg.2022200

引用格式: 郭艺, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 1948—2021年河南省土壤含水量时空分布特征及其影响因素研究[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(3): 241–252. (Guo Y, Gan F P, Yan B K, et al. Spatio-temporal distribution and influencing factors of soil moisture content in Henan Province during 1948—2021[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(3): 241–252.)

1948—2021年河南省土壤含水量时空分布特征及其影响因素研究

郭艺, 甘甫平, 闫柏琨, 白娟, 邢乃琛, 刘琪

(中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 本研究联合 1948—2014 年 GLDAS_2.0 数据和 2000—2021 年 GLDAS_2.1 数据, 构建河南省 1948—2021 年逐月土壤含水量数据集。利用 M-K 趋势分析和突变检验、小波分析、互相关分析, 揭示河南省土壤含水量的时空分布特征及主要影响因素。结果表明: 重构的 2000—2014 年逐月土壤含水量与 GLDAS_2.1 提供的月度土壤含水量的平均偏差为 2.09 mm, 平均绝对误差为 13.01 mm, 均方根误差为 18.26 mm, 数据是可信的。基于该构建的土壤含水量数据, 1948—2021 年土壤含水量则以 0.301 0 mm/a 的速度减少, 其中, 春季河南省土壤含水量的变化率为 -0.236 8 mm/a, 夏季土壤含水量的变化率为 -0.085 5 mm/a, 秋季土壤含水量的变化率为 -0.380 5 mm/a, 冬季土壤含水量的变化率为 -0.240 3 mm/a。空间上, 土壤含水量变化整体上由南向北递减, 与降水和蒸散发具有明显的一致性。垂向上, 单位深度土壤含水量为 2.63 mm/cm。小波分析与互相关分析表明降水是影响土壤含水量的主要因素。本研究不仅揭示了河南省长时间序列的土壤含水量及其时空分布特征, 还可为河南省地表水资源科学管理提供依据。

关键词: GLDAS; 土壤含水量; M-K 趋势分析; 小波分析; 互相关分析; 河南省

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)03-0241-12

0 引言

土壤水是大气降水、地表水和地下水相互转化的纽带, 在水分交换过程中起着重要作用^[1]。土壤含水量指保存在不饱和土壤层孔隙中的水分, 对于农业发展、生态建设、气候变化和碳循环等具有重要意义^[2-3]。传统的土壤含水量的监测主要为人工田间监测, 费时费力, 且空间代表性不强^[4-5]。随着遥感技术的发展, 利用传感器获取的地表反射或辐射的能量反演土壤含水量具有较强的空间代表性, 能够频繁持久地提供地表环境变化特征^[6]。国内外学者已经做了大量的土壤水遥感反演研究, 证明了基于卫星遥感数据可以获得高空间分辨率的土壤水时空动态变化^[7-9]。全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system data, GLDAS)数据是全球变化与水循环研究的重要数据源之一^[10], 近年来, 大量学者对 GLDAS 数据的通用性和精度进行了研究^[11-17]。程善俊等^[18]利用 GLDAS 数据分析了

1948—2010 年黄土高原半干旱区气温、降水和土壤的变化趋势, 讨论了气温和降水对土壤湿度的影响和贡献; 沈润平等^[19]通过对比分析站点实测数据和不同遥感数据的土壤含水量产品, 发现 GLDAS 的 Noah 模型的土壤含水量数据在中国地区整体精度最高; 张述文等^[20]利用 GLDAS 数据和 GMIP5 产品研究了中国区域土壤湿度对降水的耦合特征; 吴盼等^[21]通过融合 GLDAS 土壤含水量数据与温度植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, TV-DI)数据, 将青藏高原的土壤含水量降尺度至 1 km 空间分辨率; 孙茂军等^[22]基于 MODIS 与 GLDAS 数据反演了湟水河流域土壤含水量; 刘佩佩等^[23]利用陕西省 2016 年 97 个站点土壤温度观测数据, 评估了 GLDAS 不同版本的土壤温度数据, 发现 GLDAS2.1-Noah 数据可以模拟出土壤温度的季节尺度变化和日变化。

基于上述研究背景, 本研究首先联合 GLDAS_2.0 与 GLDAS_2.1 陆面模型数据, 重构 1948—2021 年河南省土壤含水量; 其次, 利用 M-K 趋势分析

收稿日期: 2022-05-16; 修订日期: 2023-01-09

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“流域水循环要素与自然资源遥感调查监测”(编号: DD20221642)资助。

第一作者: 郭艺(1992-), 女, 博士, 工程师, 主要从事水文地质、环境地质、水文遥感方面的研究。Email: cugguoyi@163.com。

和突变检验揭示,分析河南省土壤含水量的时空分布特征;最后,利用小波分析与空间互相关分析揭示影响河南省土壤含水量的主要因素,为土壤水资源的合理利用提供了理论基础。

1 数据源

GLDAS 数据是通过融合近实时地面基站观测数据和卫星数据产品,提供陆地表面状态变量及通量的实时数据。GLDAS 陆面模型已从 GLDAS_1 更新至 GLDAS_2, GLDAS_2 有 3 个组成部分: GLDAS_2.0, GLDAS_2.1 和 GLDAS_2.2。GLDAS_2.0 完全使用普林斯顿气象强迫输入数据,并提供 1948—2014 年期间的数据。GLDAS_2.1 是结合 2000 年至今的模型和观测数据进行的。GLDAS_2.2 产品包括同化了 GRACE 重力数据的从 2003 年至今的数据。目前, GLDAS 驱动了 3 种陆面模型 (LSMs): Noah, Catchment (CLSM) 和 Variable Infiltration Capacity (VIC), 可以提供全球范围内高空间分辨率 (2.5° ~ 1 km) 数据, 时间跨度有 3 h 一值、1 d 一值和一月一值。本研究利用空间分辨率为 0.25° × 0.25°, 每月一值的 GLDAS_NOAH025_M.020 模型 (以下称 GLDAS_2.0) 和 GLDAS_NOAH025_M.021 模型 (以下称 GLDAS_2.1) 分别计算 1948—2014 年和 2000—2021 年 4 层 (0 ~ 10 cm, 10 ~ 40 cm, 40 ~ 100 cm, 100 ~ 200 cm) 土壤含水量。同时利用上述模型中提供的气温数据、降水数据和蒸散发数据计算相应研究时段内的气温、降水和蒸散发。

2 研究方法

1) 1948—2021 年土壤含水量数据构建。GLDAS_2.1 模型相较于 GLDAS_2.0 模型存在一定的改进, 因此 GLDAS_2.1 数据相较于 GLDAS_2.0 数

据具有更高的精度。但 GLDAS_2.1 模型仅提供 2000 年以后的数据, 而 GLDAS_2.0 模型提供 1948—2014 年的数据。鉴于 GLDAS_2.0 数据和 GLDAS_2.1 数据存在交集, 因此本研究提出通过对比 2 个数据集提供的参数之间的回归相关性构建 1948—2021 年逐月土壤含水量。整个过程分为 3 步: 第一步根据 GLDAS_2.0 和 GLDAS_2.1 提供的 2000—2014 年气温、降水、蒸散发和土壤含水量数据, 比较两者之间的相关性, 构建 2 个数据集之间的经验公式; 第二步, 利用经验公式和 GLDAS_2.0 数据估算 2000—2014 年逐月气温、降水、蒸散发和土壤含水量, 利用该时期的 GLDAS_2.1 数据开展构建数据的质量评估; 第三步, 经过评估合格后, 1948—2021 年土壤含水量数据由 1948—1999 年的重建数据和 GLDAS_2.1 提供的 2000—2021 年数据构成。

2) M-K 趋势分析与突变检验。M-K 检验方法的全称是 Mann-Kendall 检验方法, 是一种非参数统计检验方法, 主要包括趋势分析和突变检验, 计算简便且检测效果良好, 因此被广泛使用在趋势检验和突变检验方面。趋势性检验的结果主要包括变化率 τ 值和显著性水平 p 值。 τ 值为正代表上升趋势, 为负则表示下降; 对于 p 值, 当 $p < 0.05$ 时, 说明存在显著性变化趋势, $0.05 < p < 0.1$ 时轻微变化, $p > 0.1$ 时变化不显著。其原理简单为存在时间序列 x_i , 则 M-K 趋势分析的统计量 S 为:

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

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: x_j 为时间序列的第 j 个数据; n 为样本数据长度; sgn 为符号函数。

Mann 和 Kendall 证明, 当 $n \geq 8$ 时, 统计量大致服从正态分布, 其均值为 0, 方差为:

$$\text{Var}(S) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)]/18, \quad (3)$$

式中 t_i 为第 i 组的数据点的数目。

标准化统计量计算公式为:

$$z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

即 z_c 服从标准正态分布。

衡量趋势大小的指标为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right), \quad (5)$$

式中 $1 < j < i < n$ 。当 β 为正时表示“上升趋势”, 当 β 为负时表示“下降趋势”。

同时, 还可以通过 M-K 算法开展时间序列的突变检验。

对于时间序列 x_i , 构造秩序列 r_i 表示 $x_i > x_j$ ($1 \leq j \leq i$) 的样本累计数, 定义 S_k 为:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad (6)$$

$$x_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i. \quad (7)$$

定义时间序列的标准正态分布统计量 UF_k 为:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{Var(S_k)}} \quad k = 2, 3, \dots, n, \quad (8)$$

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4}, \quad (9)$$

$$Var(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}. \quad (10)$$

式中: $E(S_k)$ 为 S_k 的均值; $\sqrt{Var(S_k)}$ 为 S_k 的方差。其中 $UF_1 = 0$, 并且在给定显著性水平 α 下, 若 $|UF_k| > U_\alpha$, 则表明序列存在明显的趋势变化。

将时间序列按逆序排列, 重复上述步骤, 同时使得 $UB_k = -UF_k (k = n, n-1, \dots, 1)$, 其中 $UB_1 = 0$ 。通过分析统计序列 UB_k 和 UF_k 的交点分析突变的时间节点。若 $UF_k > 0$, 则说明序列呈现上升趋势, 反之则为下降趋势。当其超过显著性水平的临界值,

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n (G20_i G21_i) - \sum_{i=1}^n G20_i \sum_{i=1}^n G21_i}{\sqrt{\left(n \sum_{i=1}^n G20_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n G20_i \right)^2 \right) \left(n \sum_{i=1}^n G21_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n G21_i \right)^2 \right)}}, \quad (13)$$

$$M_{BE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (G21_i - G20_i), \quad (14)$$

$$M_{AE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |G21_i - G20_i|, \quad (15)$$

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (G21_i - G20_i)^2}, \quad (16)$$

式中 $G20_i$ 和 $G21_i$ 分别为 GLDAS_2.0 和 GLDAS_2.1 时间序列的第 i 个数据。

3 结果与分析

3.1 基于 GLDAS_2.0 与 GLDAS_2.1 的土壤含水量数据构建

图1为基于 GLDAS_2.0 与 GLDAS_2.1 的气温、降水、蒸散发和土壤含水量之间的关系。由图1可知, 基于 GLDAS_2.0 的气温、降水、蒸散发和土壤含水量与基于 GLDAS_2.1 得到的相应数据具有高度的线性相关性。GLDAS_2.0 和 GLDAS_2.1 提供

表明时间数据的上升或者下降趋势显著。

3) 小波分析。小波分析是在 20 世纪 80 年代初发展起来的新方法, 可以分析整个数据的变化和局部变化, 克服了短时傅里叶变换固定分辨率的缺点。小波分析具有在低频部分存在较高频率分辨率和较低的时间分辨率以及在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率的优点。本研究利用小波分析确定时间序列的不同周期出现在哪个时域和频域上。一个时间序列 $f(t)$ 的 Morlet 连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = \left(\frac{1}{\sqrt{a}} \right) \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (11)$$

$$\varphi(t) = e^{w_0 i t} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (12)$$

式中: a 为伸缩尺度, 也称为尺度因子, 反映的是小波的周期长度; b 为平移因子, 反映的是时间上的平移; w_0 为无量纲频率; i 为复数。

4) 数据质量评估。评估指标包括相关系数 R 、平均偏差 M_{BE} 、平均绝对误差 M_{AE} 和均方根误差 (root mean squared error, RMSE), 计算公式分别为:

的 2000—2014 年逐月气温之间的线性关系见图 1(a), 利用该线性关系计算的 2000—2014 年逐月气温与 GLDAS_2.1 提供的气温 M_{BE} 为 $0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$, M_{AE} 为 $0.53 \text{ } ^\circ\text{C}$, $RMSE$ 为 $0.64 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。GLDAS_2.0 和 GLDAS_2.1 提供的 2000—2014 年的月度降水之间的线性关系见图 1(b), 利用该线性关系计算的 2000—2014 年逐月降水与 GLDAS_2.1 提供的月降水量的 M_{BE} 为 -0.20 mm , M_{AE} 为 12.87 mm , $RMSE$ 为 21.80 mm 。GLDAS_2.0 和 GLDAS_2.1 提供的 2000—2014 年的月度蒸散发之间的线性关系见图 1(c), 利用该线性关系计算的 2000—2014 年逐月蒸散发与 GLDAS_2.1 提供的月蒸散发的 M_{BE} 为 -0.09 mm , M_{AE} 为 9.45 mm , $RMSE$ 为 12.53 mm 。GLDAS_2.0 和 GLDAS_2.1 提供的 2000—2014 年的月度土壤含水量之间的线性关系见图 1(d), 利用该线性关系计算的 2000—2014 年逐月土壤含水量与 GLDAS_2.1 提供的月度土壤含水量的 M_{BE} 为 2.09 mm , M_{AE} 为 13.01 mm , $RMSE$ 为 18.26 mm 。

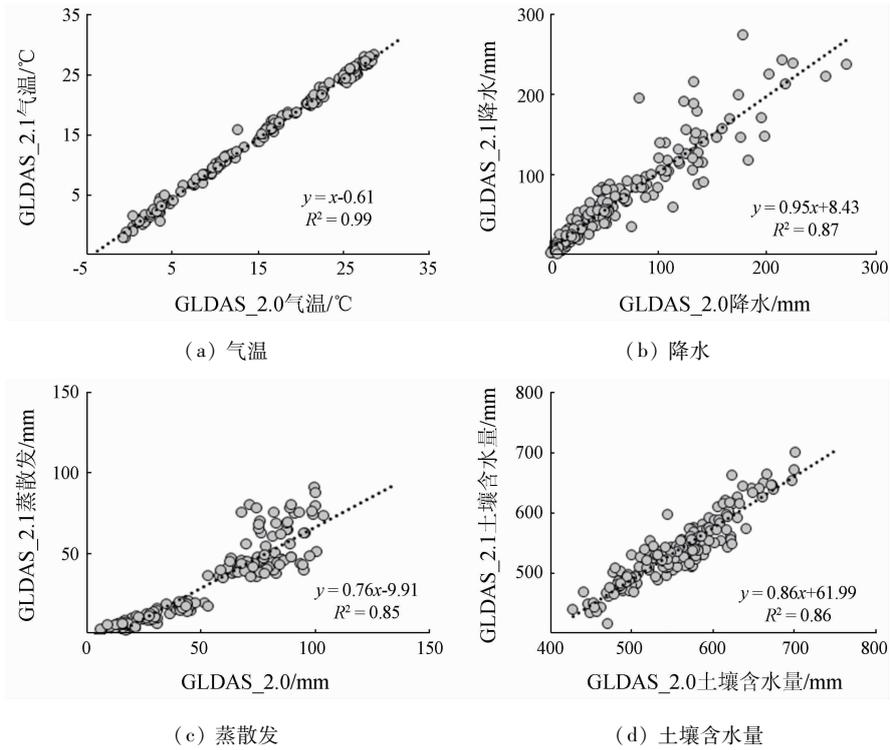


图1 基于GLDAS_2.0与GLDAS_2.1的气温、降水、蒸散发和土壤含水量之间的关系

Fig. 1 Relationship of temperature, precipitation, evaporation and soil moisture content between GLDAS_2.0 and GLDAS_2.1

上述参数的平均偏差、平均绝对误差和RMSE与各参数的平均值相比可以忽略不计,因此认为本研究构建的数据是可信的。因此,综合GLDAS_2.0和GLDAS_2.1数据集构建的1948—2021年河南省

数据集由1948—1999年的重建数据和2000—2021年的GLDAS_2.1数据组成,该数据既保留了GLDAS_2.1的数据质量,也综合GLDAS_2.0数据延长了数据时间长度(图2)。

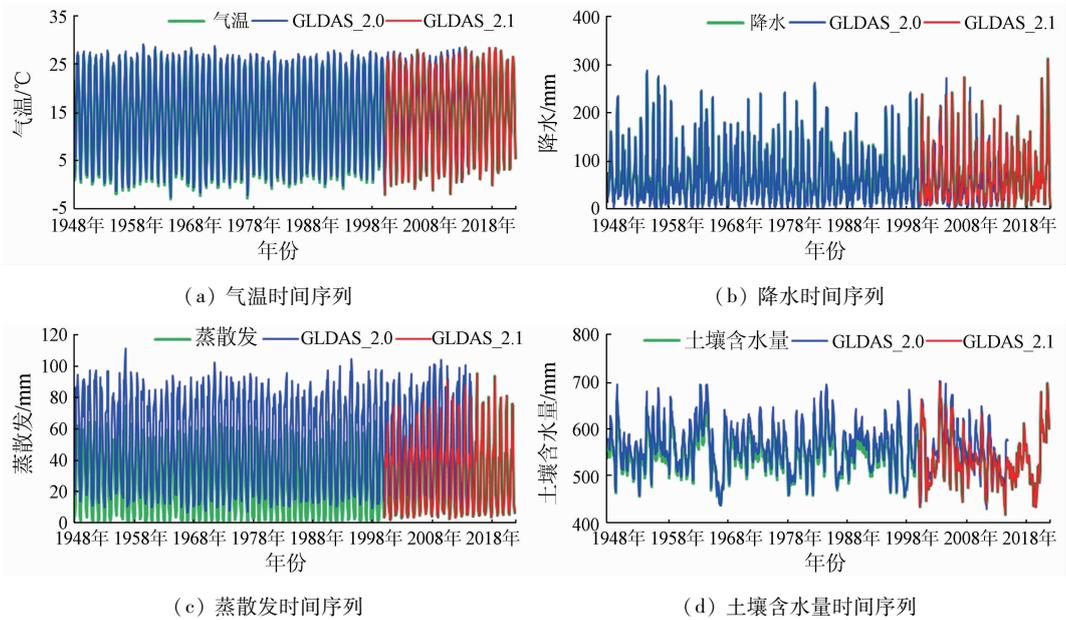


图2 基于GLDAS_2.0与GLDAS_2.1构建的1948—2021年河南省气温、降水、蒸散发和土壤含水量时间序列

Fig. 2 Temperature, precipitation, evaporation and soil moisture content of Henan Province during 1948 to 2021 based on GLDAS_2.0 and GLDAS_2.1

3.2 河南省土壤含水量的年际变化特征

河南省 1948—2021 年平均气温、年降水、年蒸散发和年平均土壤含水量分别为 $14.17 \pm 0.75 \text{ }^\circ\text{C}$, $839.32 \pm 126.66 \text{ mm}$, $362.17 \pm 27.53 \text{ mm}$ 和 $543.83 \pm 26.89 \text{ mm}$, 其变异系数分别为 0.05, 0.15, 0.08 和 0.05。M-K 趋势分析(图 3)表明, 1948—2021 年年平均气温、年降水和年蒸散发增加速度分别为 $0.025 \text{ }^\circ\text{C/a}$, 0.092 mm/a 和 0.215 mm/a , 年平均土壤含水量则以 0.301 mm/a 的速度减少, 其中, 仅温度的变

化符合 0.05 的显著性水平。

M-K 突变分析表明, 河南省 2000 年后的平均气温呈显著增加状态; 年降水虽然持续减少, 但未通过 0.05 的显著性水平, 在 1950 年和 2019 年有 2 次具有显著性的突变; 年蒸散发在 20 世纪 50 年代—21 世纪初, 显著减少, 并在 2014 年具有一次有显著意义的突变; 年平均土壤含水量时增时减, 但在 1950 年和 2017 年以后具有显著意义的减少, 并在 2007 年具有一次有显著意义的突变。

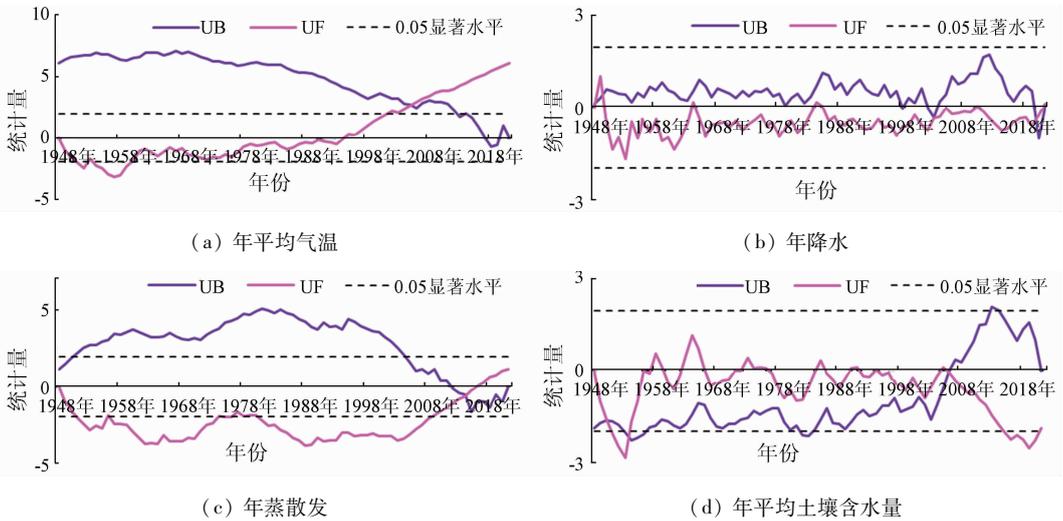


图 3 1948—2021 年河南省年平均气温、年降水、年蒸散发和年平均土壤含水量的 M-K 突变分析

Fig. 3 M-K test of temperature, precipitation, evaporation and soil moisture content of Henan Province from 1948 to 2021

3.3 河南省土壤含水量的季节变化特征

图 4 为河南省 1948—2021 年不同季节土壤含

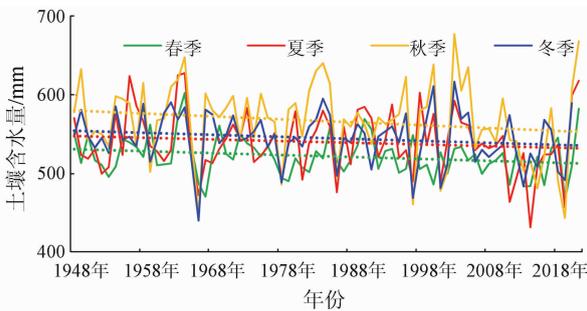


图 4 1948—2021 年河南省土壤含水量季节变化趋势

Fig. 4 Seasonal variations of soil moisture content of Henan Province in 1948—2021

水量的年际变化趋势, 图 5 为不同季节土壤含水量的 M-K 突变分析。综合图 4 和图 5 可知, 整体上 1948—2021 年春季河南省土壤含水量的变化率为 -0.236 mm/a (仅 2016 年后其降低的趋势具有显著性水平), 春季土壤含水量的突变点 1982 年和 1994 年。1948—2021 年夏季土壤含水量的变化率为 -0.085 mm/a (不具显著性), 夏季土壤含水量的突变点 1953 年末—1954 年初。1948—2021 年秋季土壤含水量的变化率为 -0.380 mm/a (不具有显著性), 秋季土壤含水量的突变点 1953 年和 2011 年。1948—2021 年冬季土壤含水量的变化率

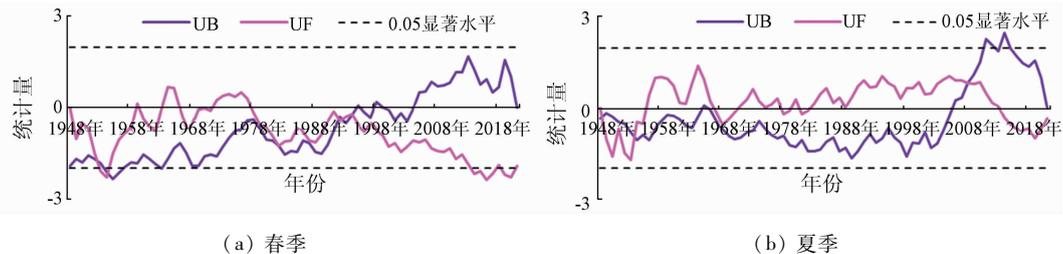


图 5-1 1948—2021 年河南省土壤含水量季节变化的 M-K 突变检验

Fig. 5-1 M-K test of soil moisture content of different seasonal in Henan Province in 1948—2021

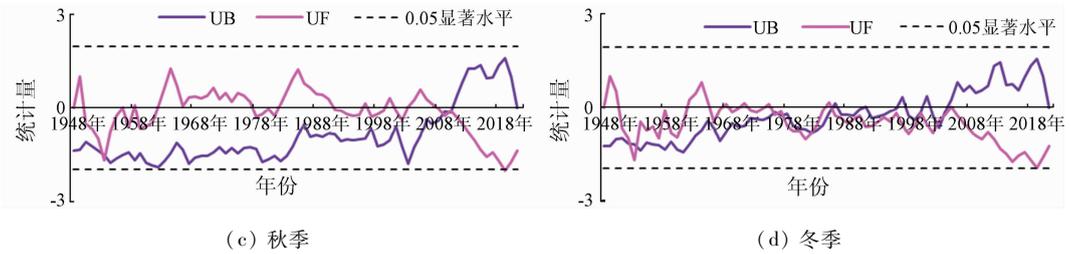


图 5-2 1948—2021 年河南省土壤含水量季节变化的 M - K 突变检验

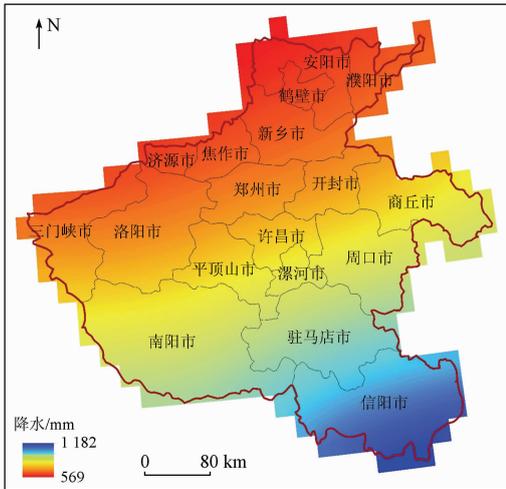
Fig. 5-2 M - K test of soil moisture content of different seasonal in Henan Province in 1948—2021

为 -0.2403 mm/a (不具显著性), 冬季土壤含水量的突变点 1966 年、1982 年、1987 年和 2000 年。

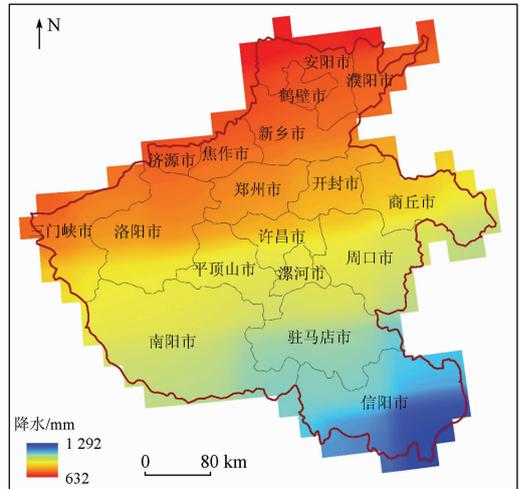
3.4 土壤含水量的空间分布特征

图 6 左、右列分别为河南省 1948—1999 和 2000—2021 年平均年降水、蒸散发和土壤含水量分布。由图 6 可知, 整体上河南省土壤含水量呈现自

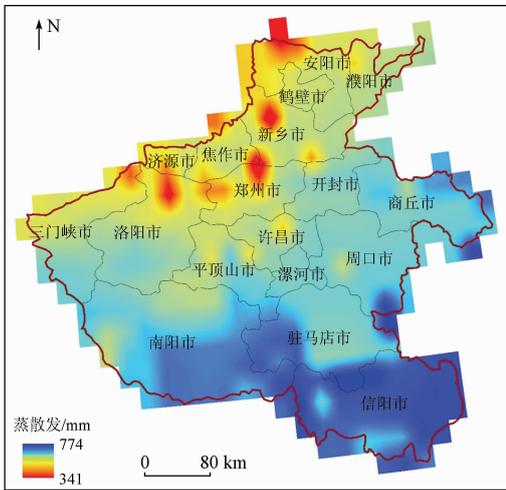
南向北减少的趋势, 其空间分布特征与年降水和年蒸散发的空间分布具有一致性。就局部而言, 三门峡市和洛阳市南部、平顶山市西部的土壤含水量具有东西向的条带状高值区域; 商丘市北部和开封市中部呈东西向的条带状的高值区域。



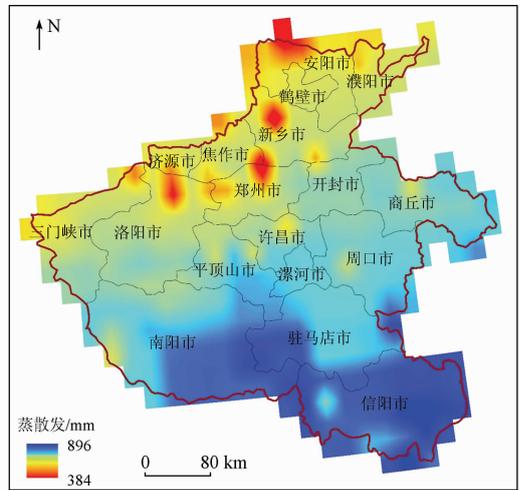
(a) 1948—1999 年平均年降水



(b) 2000—2021 年平均年降水



(c) 1948—1999 年平均年蒸散发



(d) 2000—2021 年平均年蒸散发

图 6-1 1948—1999 年以及 2000—2021 年河南省平均年降水、蒸散发和土壤含水量空间分布

Fig. 6-1 Spatial distribution of precipitation, evaporation and soil moisture content during 1948 to 1999 and 2000 to 2021

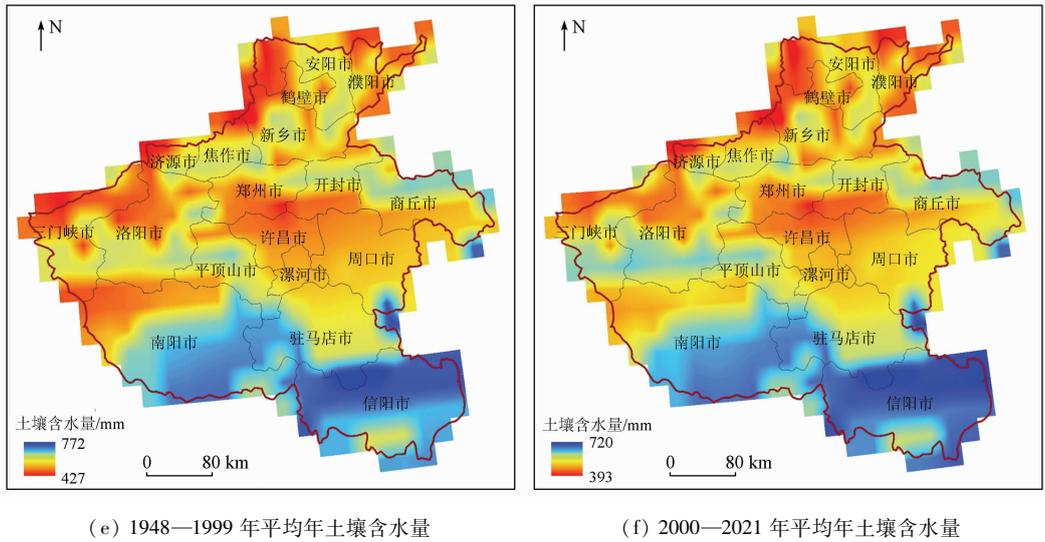


图 6-2 1948—1999 年以及 2000—2021 年河南省平均年降水、蒸散发和土壤含水量空间分布

Fig. 6-2 Spatial distribution of precipitation, evaporation and soil moisture content during 1948 to 1999 and 2000 to 2021

4 讨论

4.1 河南省土壤含水量随深度的变化规律

Noah 模型提供了 4 个土壤层(0 ~ 10 cm, 10 ~ 40 cm, 40 ~ 100 cm 及 100 ~ 200 cm)的土壤含水量,不同深度的土壤含水量年内的分布特征不同。2000—2021 年各层逐月土壤含水量减去各层平均土壤含水量得到土壤含水量距平值,根据该距平值可以判断土壤含水量的年内盈亏状态。由图 7(a)

可知, [0, 10) cm, [10, 40) cm, [40, 100) cm 和 [100, 200] cm 深度的土壤含水量在春季均处于亏损状态,秋季均处于盈余状态。夏季, [0, 10) cm 和 [10, 40) cm 深度的土壤含水量为盈余状态, [40, 100) cm 和 [100, 200] cm 深度的土壤含水量为亏损状态。冬季, [10, 40) cm 深度的土壤含水量为平衡状态, [0, 10) cm 和 [100, 200) cm 深度的土壤含水量为亏损状态, [40, 100) cm 深度的土壤含水量为盈余状态。

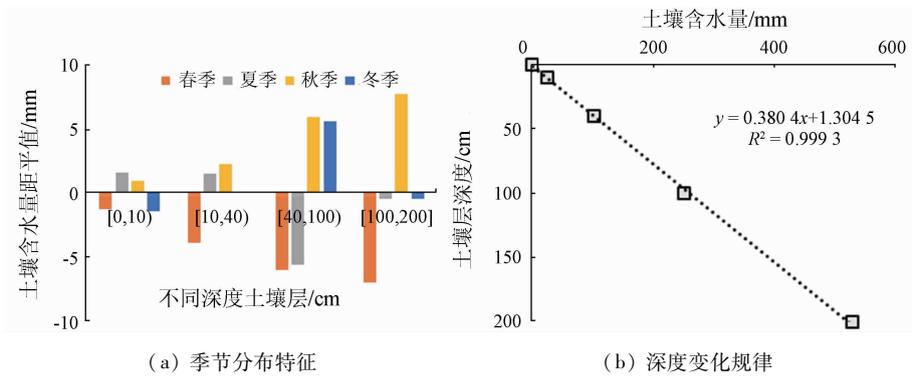


图 7 2000—2021 年河南省不同深度土壤含水量季节分布特征及随深度的变化规律
 Fig. 7 Depth distribution characteristics of soil moisture content in different seasons in Henan Province during 2000 to 2021

不同深度的单位深度土壤含水量差异较大。2000—2021 年 [0, 10) cm 土壤层的平均土壤含水量为 24.83 mm, 变异系数为 0.13, 单位深度土壤含水量为 2.48 mm/cm; [10, 40) cm 土壤层的平均土壤含水量为 76.70 mm, 变异系数为 0.11, 单位深度土壤含水量为 2.56 mm/cm; [40, 100) cm 土壤层的平均土壤含水量为 148.07 mm, 变异系数为 0.15, 单位深度土壤含水量为 2.47 mm/cm; [100, 200] cm

土壤层的平均土壤含水量为 277.27 mm, 变异系数为 0.07, 单位深度土壤含水量为 2.77 mm/cm。综合 Noah 陆面模型提供的不同土壤层深度的土壤含水量, 可知随着土壤层深度的增加以及土壤层厚度的增加, 土壤含水量呈线性增加(图 7(b))。土壤含水量与土壤深度之间的线性关系为: $y = 2.63x - 3.43$ ($R^2 = 0.999$), 即整体上单位深度土壤含水量为 2.63 mm/cm。

降水、蒸散发和植被覆盖影响了土壤含水量的垂向变化^[24-25]。受蒸散发的直接影响,表层土壤单位深度土壤含水量较小;随着土壤埋深增加,蒸散发能力逐渐减小,使得单位深度土壤含水量增加;植物的根系深度一般在 1 m 左右,植物耗水导致该层的单位深度土壤含水量最小^[11];当土壤埋深超过 1 m 时,植物根系减少导致耗水量逐渐减少,使得单位深度土壤含水量增加。

4.2 河南省土壤含水量的影响因素

由图 8(a)可知,河南省降水与土壤含水量呈正比,降水多的年份土壤含水量就多,降水与土壤含水

量之间的相关系数为 0.53。蒸散发对土壤含水量的影响不大,但降水与蒸散发的差值(净补给量)与土壤含水量之间的呈正相关关系,相关系数为 0.61。上述结果表明,土壤含水量受降水和蒸散发的综合影响,但降水的影响权重更大。由图 8(b)可知,用水量与土壤含水量之间无显著关系,且考虑用水量后的补给量(即净补给量与用水量的差值)和土壤含水量之间的相关系数与净补给量和土壤含水量之间的相关系数相似。因此影响土壤含水量的主要因素为气象因素。

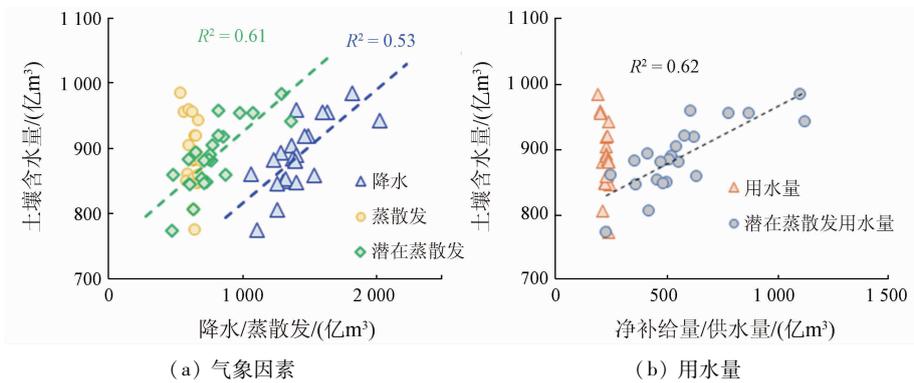


图 8 土壤含水量与气象因素(降水、蒸散发)和用水量之间的关系

Fig. 8 Relationship between soil moisture content with precipitation and evaporation and water consumption

小波分析可以用来揭示时间序列不同时段和频域的周期变化特征^[26-28]。本研究分别对河南省

1948—2021 年平均年气温、年降水、年蒸散发和年平均土壤含水量进行连续小波变换(图 9)。图中红

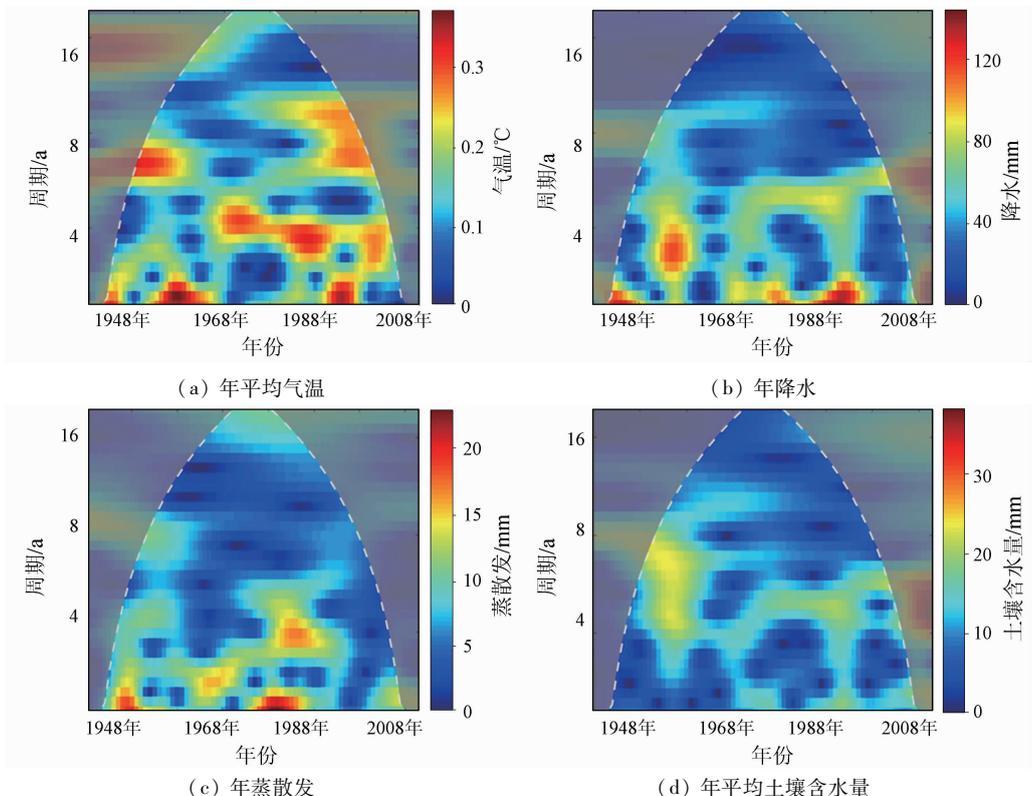


图 9 1948—2021 年河南省年平均气温、降水、蒸散发和土壤含水量的 Morlet 连续小波变换

Fig. 9 Morlet continuous wavelet transform of annual mean temperature, precipitation, evaporation and soil moisture content in Henan Province during 1948 to 2021

色与蓝色分别表示能量密度的峰值和谷值,颜色深浅表示能量密度的相对变化。白色虚线圈闭的值为通过了95%置信水平检验。由图9可知,土壤含水量在1958—1970年具有4~8a的周期性,该周期性主要是受气温和降水的周期性影响。1978—2018年除了表现出高度的年内变化特征,还具有4~6a的周期性,该周期性主要是受降水的周期性影响。由图9可知,年降水的周期性和年蒸散发的周期性具有互补的表现形式,且土壤含水量的周期性主要受降水的影响。

4.3 河南省土壤含水量相对气象因素的滞后性

气象因子(降水和蒸散发)对地表水资源的影响一方面表现在时间分布上,一方面表现在空间分布上^[29]。就时间方面来说,地表水资源与降水时间变化特征具有一致性,降水多的年份/月份,地表水

资源增加,降水少的年份/月份,地表水资源下降。但受到地表入渗能力的影响,相对于降水,地表水资源具有一定的滞后性^[30]。变量之间的互相关系数可以揭示滞后时间^[31-33]。图10为1948—2021年年尺度和月尺度土壤含水量与降水和蒸散发之间的互相关系数分布。由图10(a)可知,年尺度的土壤含水量与降水之间的相关性较高,最大互相关系数为滞后时间为0a时的0.723。相比年降水,年蒸散发与土壤含水量之间的互相关系数不大。由图10(b)可知,月尺度的土壤含水量与降水和蒸散发之间的相关性都较高,其中土壤含水量与降水之间的最大互相关系数为滞后时间为2个月的0.475,土壤含水量与蒸散发之间的最大互相关系数为滞后时间为4个月的0.380。

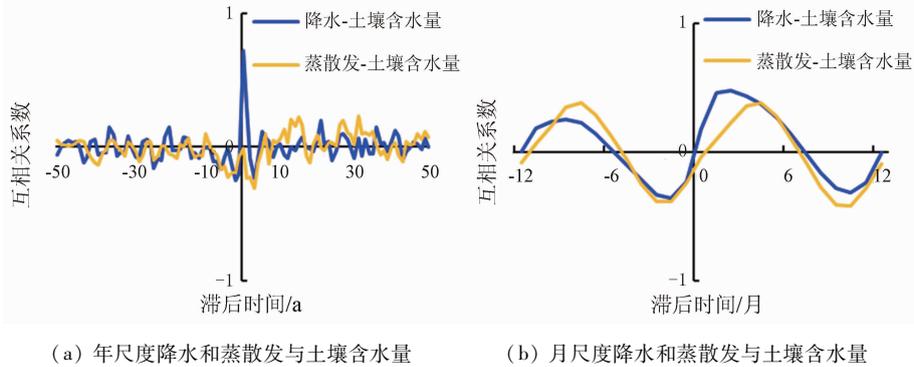
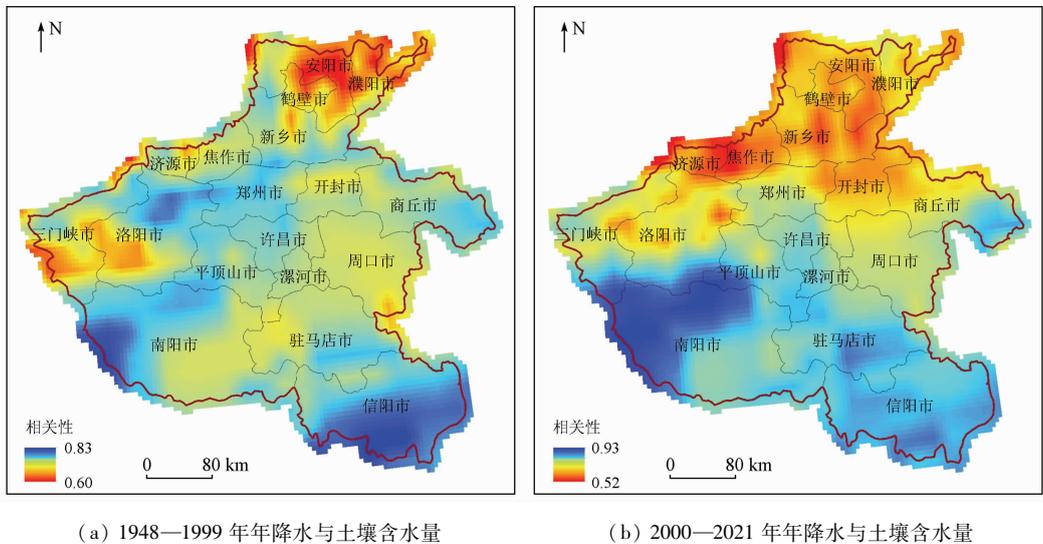


图10 1948—2021年年尺度和月尺度降水和蒸散发与土壤含水量之间的互相关系数分布

Fig. 10 Correlation distribution between annual and monthly precipitation and evaporation with soil moisture content in 1948—2021

图11为1948—1999年及2000—2021年河南省年降水、年蒸散发与土壤含水量之间的互相关系

数空间分布。由图11可知,整体上降水对土壤含水量的影响要大于蒸散发。1948—1999年河南省北

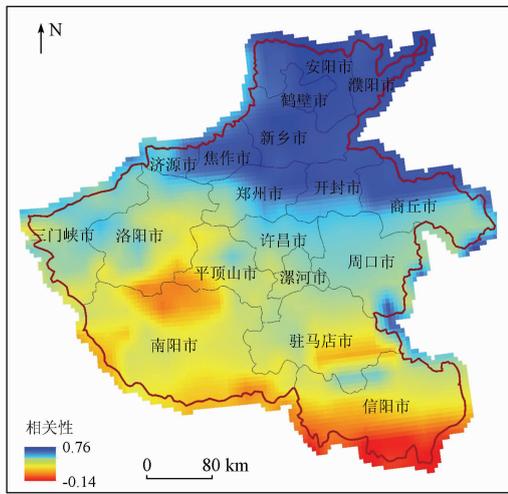


(a) 1948—1999年年降水与土壤含水量

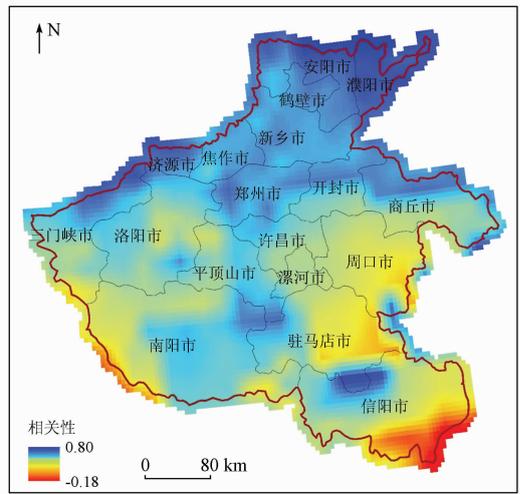
(b) 2000—2021年年降水与土壤含水量

图11-1 1948—1999年以及2000—2021年河南省年降水、蒸散发与土壤含水量之间的互相关系数空间分布

Fig. 11 - 1 Spatial distribution of the correlation coefficients between annual precipitation and evaporation with soil moisture content in Henan Province during 1948 to 1999 and 2000 to 2021



(c) 1948—1999 年蒸散发与土壤含水量



(d) 2000—2021 年蒸散发与土壤含水量

图 11-2 1948—1999 年以及 2000—2021 年河南省年降水、蒸散发与土壤含水量之间的互相关系数空间分布
Fig. 11-2 Spatial distribution of the correlation coefficients between annual precipitation and evaporation with soil moisture content in Henan Province during 1948 to 1999 and 2000 to 2021

部城市,如安阳市和濮阳市,其土壤含水量主要受蒸散发和降水的综合影响;而郑州市、洛阳市北部、南阳市西部和信阳市主要受降水的影响。相较于 1948—1999 年,2000—2021 年蒸散发对河南省土壤含水量的影响逐渐加重。河南省北部地区受蒸散发的影响较大,南部地区受降水的影响较大。

5 结论

本文基于 GLDAS_2.0 陆面模型提供的 1948—2014 年土壤含水量数据和 GLDAS_2.1 陆面模型提供的 2000—2021 年土壤含水量数据,重现构建了 1948—2021 年逐月河南省土壤含水量,并利用统计方法分析了河南省土壤含水量的主要时空分布规律,主要结论如下:

1) 1948—2021 年河南省土壤含水量平均值为 543.83 ± 26.89 mm, M-K 趋势分析结果表明河南省土壤含水量以 0.3010 mm/a 的速度减少,其中,春季河南省土壤含水量的变化率为 -0.2368 mm/a,夏季土壤含水量的变化率为 -0.0855 mm/a,秋季土壤含水量的变化率为 -0.3805 mm/a,冬季土壤含水量的变化率为 -0.2403 mm/a。

2) 空间上,土壤含水量主要受降水和蒸散发的综合影响,表现出由南向北递减的空间变化特征。垂向上,单位深度土壤含水量的平均值为 2.63 mm/cm,其中 $[0, 10)$ cm, $[10, 40)$ cm, $[40, 100)$ cm 和 $[100, 200)$ cm 土壤层的单位深度土壤含水量为 2.48 mm/cm, 2.56 mm/cm, 2.47 mm/cm 和 2.77 mm/cm。

3) 小波分析与互相关分析表明降水是影响土

壤含水量的主要因素,土壤含水量在 1978—2018 年具有 4~6 a 的周期性,土壤含水量滞后于降水 2 个月左右。

尽管本研究可以为河南省土壤含水量本底值以及影响因素提供参考和框架,但是不得不承认的是,本研究所利用的土壤含水量仅为地表以下 2 m 内的土壤含水量,不能代表整个土壤层。在下一步的研究中应考虑如何融合其他数据以揭示整个土壤层含水量。

参考文献 (References):

[1] 雷志鹏,胡和平,杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展,1999,10(3):311-318.
 Lei Z P, Hu H P, Yang S X. A review of soil water research[J]. Advances in Water Science, 1999, 10(3): 311-318.

[2] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2010, 99(3-4):125-161.

[3] 解文艳,樊贵盛. 土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报,2004,35(3):272-275.
 Xie W Y, Fan G S. Influence of moisture content on infiltration characteristics in field soils[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004, 35(3): 272-275.

[4] 张学礼,胡振琪,初士立. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 土壤通报,2005,36(1):118-123.
 Zhang X L, Hu Z Q, Chu S L. Methods for measuring soil water content: A review [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(1): 118-123.

[5] 朱国锋,蒲焱,何元庆,等. 横断山区土壤相对湿度时空分异[J]. 地理科学,2012,32(7):872-877.
 Zhu G F, Pu T, He Y Q, et al. Spatial and temporal variation of soil relative moisture in Hengduan mountainous region, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(7): 872-877.

- [6] 赵立军. 基于MODIS数据的北京地区土壤含水量遥感信息模型研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
Zhao L J. Study on remote sensing information model of soil water content in Beijing based on MODIS data[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [7] Sonia I S, Thierry C, Edouard L, et al. Investigating soil moisture - climate interactions in a changing climate: A review[J]. Earth - Science Reviews, 2010, 99(3 - 4): 121 - 161.
- [8] Nazmus S, Iliana M, John B. Leveraging Google Earth Engine for drought assessment using global soil moisture data[J]. Remote Sensing, 2018, 10(8): 1265.
- [9] Jostein B, Paul D H, Philipp S, et al. Monitoring soil moisture drought over northern high latitudes from space[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1200.
- [10] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The global land data assimilation system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381 - 394.
- [11] 刘任莉, 余敦先, 李敏, 等. 利用卫星观测数据评估GLDAS与WGDM水文模型的适用性[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(11): 1596 - 1604.
Liu R L, She D X, Li M, et al. Using satellite observations to assess applicability of GLDAS and WGDM hydrological model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(11): 1596 - 1604.
- [12] 钱安, 易爽, 孙广通, 等. GLDAS_NOAH_M. 2. 1水文模型在青藏高原的适用性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(3): 254 - 259.
Qian A, Yi S, Sun G T, et al. GLDAS_NOAH_M. 2. 1 hydrological model and its application analysis in Qinghai - Tibet Plateau[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(3): 254 - 259.
- [13] 王文, 崔巍, 王鹏. GLDAS Noah模型水文产品与中国地面观测及卫星观测数据的对比[J]. 水电能源科学, 2017, 35(5): 1 - 6.
Wang W, Cui W, Wang P. Comparison of GLDAS Noah model hydrological outputs with ground observations and satellite observations in China[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(5): 1 - 6.
- [14] 王晨阳, 马元喜. 不同土壤水分条件下小麦根系生态生理效应的研究[J]. 华北农学报, 1992, 7(4): 1 - 8.
Wang C Y, Ma Y X. Ecological and physiological effects on root systems of wheat under different soil water conditions[J]. Acta Agriculturae Boreali - Sinica, 1992, 7(4): 1 - 8.
- [15] 王洁, 边宇晗, 陈裕迪, 等. 基于GRACE陆地水储量估算土壤湿度变化: 以中国东部季风区为例[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(3): 459 - 468.
Wang J, Bian Y H, Chen Y D, et al. Estimation of soil moisture changes based on GRACE terrestrial water storage: Taking the monsoon region in eastern China as an example[J]. South to North Water Transfers and Water Science and Technology, 2021, 19(3): 459 - 468.
- [16] 汪小菊, 王文, 王鹏. GLDAS月气温数据在中国区的适用性评估[J]. 水电能源科学, 2014, 32(11): 10 - 13.
Wang X J, Wang W, Wang P. Assessing applicability of GLDAS monthly temperature data in China[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(11): 10 - 13.
- [17] 许顺芳, 王林松, 陈超, 等. 利用GRACE及气象数据评估GLDAS水文模型在青藏高原的适用性[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(1): 8 - 13.
Xu S F, Wang L S, Chen C, et al. Using GRACE and in - situ measurements to assess the applicability of GLDAS hydrological model in Tibet Plateau[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(1): 8 - 13.
- [18] 程善俊, 管晓丹, 黄建平, 等. 利用GLDAS资料分析黄土高原半干旱区土壤湿度对气候变化的响应[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 641 - 649.
Cheng S J, Guan X D, Huang J P, et al. Analysis of response of soil moisture to climate change in semi - arid Loess Plateau in China based on GLDAS data[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(4): 641 - 649.
- [19] 沈润平, 张悦, 师春香, 等. 长时间序列多源土壤湿度产品在中国地区的比较分析[J]. 气象科学, 2016, 44(6): 867 - 874.
Shen R P, Zhang Y, Shi C X, et al. Inter - comparison of various long - time soil moisture datasets in China[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(6): 867 - 874.
- [20] 张述文, 刘源, 曹帮军, 等. GLDAS和CMIP5产品的中国土壤湿度-降水耦合分析及变化趋势[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(2): 188 - 196.
Zhang S W, Liu Y, Cao B J, et al. Soil moisture - precipitation coupling and trends in China, based on GLDAS and CMIP5 products[J]. Climatic and Environmental Research, 2016, 21(2): 188 - 196.
- [21] 吴盼, 冯雨晴, 梁四海, 等. 基于GLDAS与TVDI降尺度反演土壤含水量[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 265 - 270.
Wu P, Feng Y Q, Liang S H, et al. Soil moisture - precipitation coupling and trends in China based on GLDAS and CMIP5 products[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(3): 265 - 270.
- [22] 孙茂军, 李霞, 李小刚, 等. 基于MODIS与GLDAS数据的涅水河流域土壤水反演[J]. 世界地质, 2019, 38(1): 286 - 292.
Sun M J, Li X, Li X G, et al. Soil water inversion in Huangshui River basin based on MODIS and GLDAS data[J]. Global Geology, 2019, 38(1): 286 - 292.
- [23] 刘佩佩, 宋海清, 鲍炜炜, 等. CLDAS和GLDAS土壤温度数据在陕西省的适用性评估[J]. 气象科技, 2021, 49(4): 604 - 611.
Liu P P, Song H Q, Bao W W, et al. Applicability evaluation of CLDAS and GLDAS soil temperature data in Shaanxi Province[J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(4): 604 - 611.
- [24] 艾宁, 强大宏, 刘长海, 等. 半干旱黄土区山地枣林春季土壤水分动态变化研究[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(2): 342 - 348.
Ai N, Qiang D H, Liu C H, et al. Dynamics of spring soil moisture in jujube forest in the semi - arid hilly area of Loess Plateau[J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(2): 342 - 348.
- [25] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 149 - 156.
He Q H, He Y H, Bao W K. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas[J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(2): 149 - 156.

- [26] 米热古力·艾尼瓦尔,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,等. 基于小波分析的伊塞克湖水位变化特征[J]. 水土保持研究,2014,21(1):168-172.
Mihrigul A, Hamid Y, Mamattursum E, et al. Water level variations of Issyk-kul Lake based on wavelet analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1):168-172.
- [27] 祁晓凡,杨丽芝,晔韩,等. 济南泉域地下水位动态及其对降雨响应的交叉小波分析[J]. 地球科学进展,2012,27(9):969-978.
Qi X F, Yang L Z, Ye H, et al. Cross wavelet analysis of groundwater level regimes and precipitation-groundwater level regime in Ji'nan Spring Region[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(9):969-978.
- [28] 邵晓梅,许月卿,严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),2006,42(4):503-509.
Shao X M, Xu Y Q, Yan C R. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River basin[J]. Journal of Peking University (Natural Science), 2006, 42(4):503-509.
- [29] 张建云,章四龙,王金星,等. 近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展,2007,18(2):230-234.
Zhang J Y, Zhang S L, Wang J X, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2):230-234.
- [30] Guo Y, Wang F, Qin D J, et al. Hydrodynamic characteristics of a typical Karst spring system based on time series analysis in northern China[J]. China Geology, 2021, 4(3):434-448.
- [31] Bouchaoua L, Manginb A, Chauve P. Turbidity mechanism of water from a karstic spring example of the Ain Asserdoune spring (Beni Mellal Atlas, Morocco) [J]. Journal of Hydrology, 2002, 265(1):34-42.
- [32] Fiorillo F, Doglioni A. The relation between Karst spring discharge and rainfall by cross-correlation analysis (Campania, southern Italy) [J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18(8):1881-1895.
- [33] 李建鸿,蒲俊兵,张陶,等. 相关和频谱分析法在岩溶系统中的应用研究综述[J]. 中国岩溶,2020,39(3):335-344.
Li J H, Pu J B, Zhang T, et al. Application of correlation and spectrum analysis in Karst system research [J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3):335-344.

Spatio-temporal distribution and influencing factors of soil moisture content in Henan Province during 1948—2021

GUO Yi, GAN Fuping, YAN Bokun, BAI Juan, XING Naichen, LIU Qi

(China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: This study constructed a monthly soil moisture content dataset of Henan Province during 1948—2021 by combining 1948—2014 GLDAS_2.0 data and 2000—2021 GLDAS_2.1 data. Through the Mann-Kendall (M-K) trend analysis, mutation test, wavelet analysis, and cross-correlation analysis, this study revealed the spatio-temporal distribution and critical influencing factors of soil moisture content in Henan Province. The results show that compared with the monthly soil moisture content data provided by GLDAS_2.1, the reconstructed monthly soil moisture content data during 2000—2014 showed an average deviation, average absolute error, and root mean square error of 2.09 mm, 13.01 mm, and 18.26 mm, respectively, indicating reliable data. According to the constructed soil moisture content data, the soil moisture content decreased at a rate of 0.301 0 mm/a during 1948—2021, with change rates of -0.236 8 mm/a in spring, -0.085 5 mm/a in summer, -0.380 5 mm/a in autumn, and -0.240 3 mm/a in winter in Henan Province. Spatially, the soil moisture content decreased from south to north, highly consistent with precipitation and evapotranspiration. The soil moisture content was 2.63 mm/cm in the vertical direction. The wavelet and cross-correlation analyses show that precipitation is a critical factor influencing soil moisture content. This study revealed the long-time-series spatio-temporal distribution of soil moisture content in Henan Province, providing a basis for the scientific management of surface water resources in Henan Province.

Keywords: GLDAS; soil moisture content; M-K trend analysis; wavelet analysis; cross-correlation analysis; Henan Province

(责任编辑:李瑜)