

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.01.023

CSTR:32310.14.stbxb.2025.01.023

刘博, 韩庆功, 张杰琳, 等. 变化环境下黄河中游土壤湿度时空格局及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 73-83.

LIU Bo, HAN Qinggong, ZHANG Jieli, et al. Spatial-temporal patterns and factors of soil moisture in the middle reaches of the Yellow River under changing environments[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 73-83.

变化环境下黄河中游土壤湿度时空格局及其影响因素

刘 博¹, 韩庆功¹, 张杰琳², 彭守璋^{2,3}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的]为识别黄河中游土壤湿度的主要驱动因子, 分析土地覆盖和气候变化对黄河中游土壤湿度变化的影响, 为区域生态环境保护 and 高质量发展提供理论依据。[方法]使用 SiB2 模型模拟黄河中游 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的表层土壤湿度 (SSM) 与根区土壤湿度 (RZSM), 分析其时空分布格局; 结合地理探测器、随机森林、SHAP 分析其主要驱动因子; 使用情景设置法分析土地覆盖与气候变化对 SSM 和 RZSM 变化的贡献。[结果]1) 参数校准后的 SiB2 模型可较好地模拟黄河中游的土壤湿度。2) 黄河中游土壤湿度整体呈南高北低的空间分布特征, SSM 和 RZSM 在不同生态分区、不同季节和不同土地覆盖类型下分布特征存在差异。3) 降水、土壤类型和向下短波辐射是黄河中游 SSM 的主要驱动因子, 降水、土壤类型和土地覆盖类型是黄河中游 RZSM 的主要驱动因子, 不同生态分区土壤湿度的驱动因子存在差异。4) 黄河中游土地覆盖类型的转换对 RZSM 的影响具有区域差异性, 叶面积指数 (LAI) 升高导致 RZSM 降低是主要的变化方向。5) 相较于 2000 年, 2020 年 SSM 和 RZSM 的下降分别由气候变化的差异和土地覆盖变化的差异所主导。[结论]2000—2020 年黄河中游地区土地覆盖变化导致根区土壤水分下降, 降水量对土地覆盖类型转换后土壤湿度的变化有重要影响。

关键词: SiB2 模型; 土壤湿度; 土地覆盖变化; 气候变化; 驱动因子

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0073-11

Spatial-temporal Patterns and Factors of Soil Moisture in the Middle Reaches of the Yellow River under Changing Environments

LIU Bo¹, HAN Qinggong¹, ZHANG Jieli², PENG Shouzhang^{2,3}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To identify the main driving factors of soil moisture in the middle reaches of the Yellow River, to analyze the impact of land cover and climate change on soil moisture changes in the middle reaches of the Yellow River, and to provide a theoretical basis for regional ecological environmental protection and high-quality development. [Methods] The SiB2 model was used to simulate the surface soil moisture (SSM) and root zone soil moisture (RZSM) in the middle reaches of the Yellow River for the years 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020, and to analyze their spatial and temporal distribution patterns. The main driving factors were analyzed by combining the GeoDetector, Random Forest, and SHAP, and the contribution of land cover and climate change to the changes of SSM and RZSM was analyzed by using scenario-setting method. [Results] 1) The SiB2 model could better simulate the soil moisture in the middle reaches of the Yellow River after the parameter calibration. 2) Soil moisture in the middle reaches of the Yellow River

收稿日期: 2024-07-10

修回日期: 2024-09-23

录用日期: 2024-10-17

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-27

资助项目: 国家自然科学基金项目 (U2243226, 42077451)

第一作者: 刘博 (2001—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事生态水文过程研究。E-mail: 2022050857@nwfufu.edu.cn

通信作者: 彭守璋 (1986—), 男, 博士, 研究员, 主要从事区域气候变化及恢复生态学研究。E-mail: szp@nwfufu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

showed overall spatial distribution characteristics of high in the south and low in the north, and there were differences in the distribution characteristics of SSM and RZSM under different ecological zones, different seasons and different land cover types. 3) Precipitation, soil type and downward shortwave radiation were the main drivers of SSM in the middle reaches of the Yellow River, and precipitation, soil type and land cover type were the main drivers of RZSM in the middle reaches of the Yellow River, and there were differences in the drivers of soil moisture in different ecological zones. 4) The effect of land cover type conversion on RZSM in the middle reaches of the Yellow River was regionally different, and the main direction of change was the decrease of RZSM due to the increase of leaf area index(LAI). 5) Compared to 2000, the decline in SSM and RZSM in 2020 was dominated by differences in climate change and land cover change, respectively. [Conclusion] Land cover changes in the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020 led to a decline in soil moisture in the root zone, and precipitation magnitude had an important effect on changes in soil moisture after land cover type conversion.

Keywords: SiB2 model; soil moisture; land cover change; climate change; driving factors

Received: 2024-07-10

Revised: 2024-09-23

Accepted: 2024-10-17

Online(www.cnki.net): 2024-12-27

随着全球气候变化和人类活动的增加,土壤湿度也随之普遍下降,且此趋势还可能持续下去^[1],甚至加剧气候变化^[2]。黄河中游流经黄土高原,具有生态环境脆弱、水土流失严重、水资源短缺、植被覆盖度低的特点^[3]。在全球气候变化背景下,黄河中游气候也发生显著变化,呈暖干化趋势^[4],此外,退耕还林(草)工程的开展显著改变该地区的下垫面性质^[5]。气候变化和人类活动共同加剧区域土壤水分亏缺^[6],从而限制区域生态系统稳定性和可持续发展,甚至导致植被的枯死和现有生态恢复成果的丧失。在气候变化和人类活动干扰背景下,研究黄河中游土壤湿度的主要驱动因子及土地覆盖和气候变化对其变化的影响,对黄河中游生态环境保护 and 高质量发展具有重要价值。

土壤湿度的时空变化受降水、温度、地形、土地利用、植被、土壤类型和深度等诸多因素影响^[7]。国内外学者的研究结果表明,土壤湿度的主要驱动因子因区域不同而不同,如 SENANAYAKE 等^[8]研究发现,澳大利亚东南部流域的土壤湿度受土壤质地的主导;KHAN 等^[9]研究表明,巴基斯坦土壤湿度变化取决于土地覆盖类型和降水量;郑金涛等^[10]研究表明,归一化植被指数和土壤类型是张承地区表层土壤湿度的主要驱动因素。目前,关于黄河中游土壤湿度驱动因子的研究较为缺乏,因此,有必要开展土壤湿度空间差异的归因分析。由于方法的差异可能导致驱动因子识别的结果不同,本研究采用随机森林(random forest, RF)、地理探测器(geographical detectors, GD)和 SHAP(shapley additive explanations)3 种方法,通过交互验证以求更加准确地得出土壤湿度的主要驱动因子。

退耕还林(草)工程的开展导致土壤湿度的降低^[11],但大多数研究在点尺度开展,区域性整体研究较少^[12],且相关研究均在气候存在差异的条件下分析土壤湿度的变化,可能对结果产生影响。相较于表层土壤湿度(surface soil moisture, SSM),根区土壤湿度(root zone soil moisture, RZSM)与植被恢复的可持续状态更加相关^[2],因此,本研究采用情景设置方法,在去除气候变化影响条件下分析退耕还林(草)工程推动的土地覆盖类型的变化和 LAI(leaf area index, LAI)的变化对 RZSM 的影响,并分离土地覆盖和气候变化对土壤湿度变化的贡献。

使用遗传算法校准 SiB2 模型,模拟 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的黄河中游地区的实际 SSM 与 RZSM,并分析其时空分布特征。采用 RF、GD 和 SHAP 定量分析土壤湿度的主要驱动因子,通过模拟情景的设置分析退耕还林(草)工程对 RZSM 的影响,并分离出土地覆盖和气候变化对黄河中游及其生态分区土壤湿度变化的贡献,以期为应对区域气候变化、植被恢复、水资源安全和土地资源合理利用等问题提供参考依据。

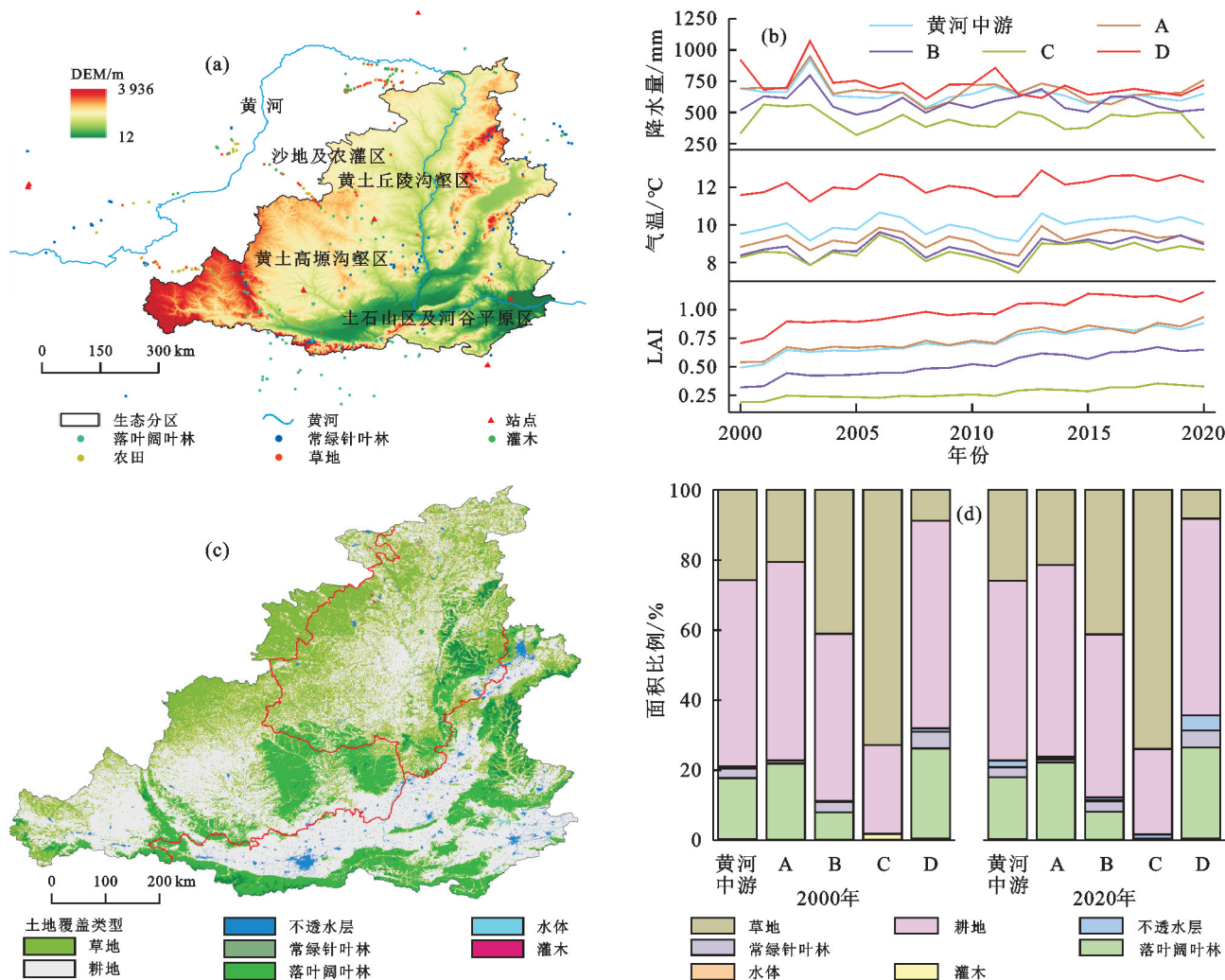
1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河中游(33°39'29"~40°34'58"N,103°58'25"~113°32'32"E)是内蒙古托克托县的河口镇至河南郑州桃花峪间的黄河河段。黄河中游主要为暖温带大陆性季风气候,冬季干燥,夏季多雨,降水时空分布不均,整体呈由东南向西北递减趋势,全年约 70%的降水量集中在 6—9 月。参考黄土高原生态分区^[13],将黄河中游划分为(A)黄土高原沟壑区、(B)黄土丘陵

沟壑区、(C)沙地及农灌区、(D)土石山区及河谷平原区 4 个区域(图 1a),各区间自然地理条件、人类活动强度、土地覆盖类型等存在显著差异。2000—2020 年各区降水、气温和 LAI 均表现为土石山区及河谷平原区>黄土高原沟壑区>黄土丘陵沟壑区>沙地及农灌区,其中,LAI 在各个生态分区均呈明显上升趋势(图 1b)。黄土高原沟壑区的主要土地覆盖类型

为耕地、常绿阔叶林和草地,黄土丘陵沟壑区以草地和耕地为主,土石山区及河谷平原区的主要土地覆盖类型为耕地和常绿阔叶林,沙地及农灌区的草地和耕地占比达 90%以上(图 1c)。2000—2020 年除土石山区及河谷平原区出现草地面积减小外,黄河中游及各生态分区均出现耕地面积减少、林草地和不透水层面积增大的变化(图 1d)。



注:图中 A、B、C、D 分别为黄土高原沟壑区、黄土丘陵沟壑区、沙地及农灌区和土石山区及河谷平原区。下同。

图 1 研究区地理概况

Fig.1 Geographical overview of the study area

1.2 数据来源与处理

1.2.1 气象数据 本研究用于驱动 SiB2 模型的气候强迫数据来自欧洲中期天气预报中心(<https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>)提供的 ERA5-Land 再分析数据集^[14],空间分辨率为 9 km,包括逐小时的向下短波辐射、向下长波辐射、温度、露点温度、风速和降水量共 6 个变量。其中,露点温度用于计算模型所需的水汽压数据,计算公式为^[15]:

$$E = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 \times T_{\text{dew}}}{T_{\text{dew}} + 237.3}\right) \quad (1)$$

式中: E 为水汽压, kPa; T_{dew} 为露点温度, °C。

1.2.2 土地覆盖类型数据 土地覆盖类型数据使用欧洲航天局发布的 300 m 土地覆盖数据产品^[16],下载自欧洲中期天气预报中心,根据 SiB2 模型定义的植被类型将其整理为落叶阔叶林、常绿针叶林、灌木、耕地、草地、水域、不透水层共 7 种土地覆盖类型。

1.2.3 植被指数数据 本研究使用的植被指数数据来源于“MODIS/061/MOD15A2 H”数据集,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 8 d,包括叶面积指数和光合有效辐射比例数据,通过谷歌地球引擎(google earth engine, GEE)进行预处理和下载。由于该数据集不包含 2000 年 2 月 18 日之前的数据,使用 2001

年 1 月 1 日至 2001 年 2 月 17 日的数据代替,从而构建完整的 2000 年植被指数数据集。

1.2.4 数字高程模型 本研究使用的数字高程模型为 NASA 发布的 NASADEM_HGT,空间分辨率 30 m。借助 GEE 对数字高程模型数据进行预处理和下载,计算模型运行所需的坡度数据。

1.2.5 土壤参数数据 本研究使用的土壤数据来自联合国粮农组织土壤门户网站(<https://www.fao.org/>)提供的世界土壤数据库,空间分辨率为 1 km。模型所需的土壤孔隙度、土壤湿度指数、土壤水势和土壤饱和导水率 4 个土壤参数基于土壤质地数据计算得到,计算公式为^[17]:

$$\theta_s = 0.489 - 0.00126 \times P_{\text{sand}} \quad (2)$$

$$b = 2.91 + 0.159 \times P_{\text{clay}} \quad (3)$$

$$\phi_s = -0.01 \times 10^{(1.88 - 0.0131 \times P_{\text{sand}})} \quad (4)$$

$$K_s = 7.0556 \times 10^{(-6.884 + 0.0153 \times P_{\text{sand}})} \quad (5)$$

式中: θ_s 为土壤孔隙度; b 为土壤湿度指数; ϕ_s 为土壤水势,m; K_s 为土壤饱和导水率,m/s; P_{sand} 为土壤中沙粒所占比例; P_{clay} 为土壤中黏粒所占比例。

1.2.6 模型校准与验证数据 本研究共收集黄河中游及周边地区站点实测数据 85 条,其中,SSM 数据 51 条,RZSM 数据 34 条。考虑到站点数据的土地覆盖类型多为耕地,本研究还使用野外调查获取的实际土地覆盖类型提取中国土壤湿度数据集(SMCI)中的数据作为补充^[18],同样作为基准值用于模型的校准与验证。其中包含 91 个落叶阔叶林、88 个常绿阔叶林、68 个灌木、75 个耕地和 79 个草地点位。

1.3 研究方法

1.3.1 SiB2 模型 SiB2 是基于植物生理过程改进的土壤-植被-大气模型,用来研究单层植被中的水、能量及 CO₂ 通量^[19]。该模型能够计算并输出不同深度的土壤湿度,其中 0~2 cm 土层被定义为表层,2~100 cm 土层为所有植被覆盖类型的根区重叠部分,在本研究将其视为根区。SiB2 模型中,表层和根区和土壤湿度的控制方程为:

$$\frac{\partial W_1}{\partial t} = \frac{1}{D_1} \left[P_1 - Q_{1,2} - \frac{E_{gs}}{\rho_w} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial t} = \frac{1}{D_2} \left[Q_{1,2} - Q_{2,3} - \frac{E_{ct}}{\rho_w} \right] \quad (7)$$

式中: W_1 和 W_2 分别为土壤表层和根区土壤湿度,m³/m³; P_1 为降雨入渗到表层土壤的速率,m/s; $Q_{i,i+1}$ ($i=1,2$)为第 i 和 $i+1$ 层间的土壤水流速,m/s; D_1 和 D_2 分别为土壤表层和根区厚度,m; ρ_w 为液态水的密度,kg/m³; E_{gs} 和 E_{ct} 分别为表层土壤蒸发速率和植被蒸腾速率,m/s。

将 SiB2 模型在黄河中游区域逐网格运行,空间分辨率为 1 km。首先,设立 1 a 的预热期以使模型达到水热平衡;然后,通过模拟的 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年实际情景研究其时空变化与驱动因子;通过情景设置分离土地覆盖与气候变化的贡献(表 1), $S_{R1} \sim S_{R5}$ 为实际情景, S_{C1} 和 S_{C2} 分别为只更改气候数据年份和土地覆盖数据年份的控制情景,其中土地覆盖数据包含植被指数数据与土地覆盖类型数据。

表 1 模型模拟情景年份设置

Table 1 Model simulation scenario year setting

情景指标	S_{R1}	S_{R2}	S_{R3}	S_{R4}	S_{R5}	S_{C1}	S_{C2}
土地覆盖数据	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2020
气候数据	2000	2005	2010	2015	2020	2020	2000

1.3.2 模型校准方法 遗传算法是受生物自然选择和遗传过程的启发而形成的一种基于种群的全局搜索算法,通过模拟自然界自然选择和遗传过程中的选择、交叉和突变等过程实现对模型参数的校准^[20],可有效提升模型模拟精度。SiB2 模型的默认参数通常适用于全球范围内的土地覆盖类型,直接用于黄河中游地区土壤湿度的模拟可能产生较大误差,因此,本研究在正式模拟前使用遗传算法分别对 SiB2 模型的落叶阔叶林、常绿针叶林、灌木、耕地和草地的参数进行校准,以提高 SiB2 模型在黄河中游地区的模拟精度。评价模型模拟性能的主要指标包括纳什效率系数(nse)、相关系数(r)和平均绝对误差(MAE),计算公式为:

$$nse = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$r = \frac{\text{cov}(\text{obs}, \text{sim})}{\sqrt{SD_{\text{obs}} \cdot SD_{\text{sim}}}} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad (10)$$

式中: n 为样本数; O_i 和 S_i 分别为第 i 个观测值和模拟值; $\bar{O}$ 为观测平均值; $\text{cov}(\text{obs}, \text{sim})$ 为观测值与模拟值的协方差; SD_{obs} 与 SD_{sim} 分别为观测值与模拟值的方差。

1.3.3 驱动因子识别方法 本研究采用地理探测器、随机森林和 SHAP 3 种方法来识别不同深度土壤湿度的主要驱动因子,将至少 2 种方法中重要性排名位于前 3 的驱动因子视为主要驱动因子,以提高结果的准确性。为避免因土地覆盖类型变化导致同一位置在不同年份模拟值的差异影响结果,仅使用来自 5 个实际情景中土地覆盖类型未发生变化的栅格平均值作为输入数据。地理探测器使用 R 语言 GD 包实现,随机森林与 SHAP 分别使用 Python 语言 scikit-learn 包和

shap 包实现。

将 SiB2 模型的输入变量作为驱动因子进行分析, 由于 4 个土壤属性具有相同的空间分布特征, 使用土壤类型进行代替。最终选定包括土地覆盖类型(LUCC)、土壤类型(ST)、光合有效辐射比(FPAR)、叶面积指数(LAI)、坡度(SLOPE)、高程(DEM)、降水(PRAC)、地面 2 m 气温(T2M)、水汽压(EA)、风速(U)、向下短波辐射(SSRD)和向下长波辐射(STRD)的 12 个驱动因子。

地理探测器是一种空间统计方法, 用于探测空间分异性并揭示背后的驱动因子^[21], 是探究驱动力和因子分析的有效工具, 本研究使用地理探测器中的分异及因子探测器进行分析。地理探测器 q 值计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (11)$$

式中: q 为解释力, q 越大解释力越强; h 为变量或因子分层数; L 为变量或因子总分层数; N 和 σ^2 分别为全区单元数和因变量方差; N_h 和 σ_h^2 分别为层 h 的单元数和因变量方差。

随机森林是一种基于决策树的集成学习方法^[22], 通过构建多个决策树来提高预测准确性和稳定性。其优点包括简单易实现、可解释性强, 以及能够有效降低变量的多重共线性和模型过拟合问题等。随机森林在分类、回归、特征选取和重要性排序等问题表现出色, 广泛应用于许多领域。

SHAP 是基于合作博弈论 Shapley 值构建的一

个机器学习可解释模型^[23], 它通过计算在合作中个体的贡献来确定其重要程度, 从而解释模型预测的结果。每个特征变量的 SHAP 可表示特征对结果的贡献值, 同一特征所有样本 SHAP 的算数平均数可表征特征重要性, 计算公式为:

$$y_i = y_{\text{base}} + f(x_{i1}) + f(x_{i2}) + \cdots + f(x_{im}) \quad (12)$$

$$I_j = \frac{\sum_{i=1}^n |f(x_{ij})|}{n} \quad (13)$$

式中: y_i 为第 i 个样本的预测值, $i \in (1, \cdots, n)$; y_{base} 为所有样本预测值的平均值; x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个特征, $j \in (1, \cdots, m)$; $f(x_{ij})$ 为 x_{ij} 的 SHAP 值; I_j 为第 j 个特征的相对重要性; $|f(x_{ij})|$ 为 $f(x_{ij})$ 的绝对值。

2 结果与分析

2.1 模型结果评价

利用收集的点位实测数据, 对参数校准后的 SiB2 模型进行土壤湿度模拟性能评价。结果显示, 校准后的模型模拟值与实测数据吻合程度较高(图 2)。使用 SMCi 数据进行验证, SSM 和 RZSM 的 r 分别为 0.903、0.803; 使用站点实测数据验证, SSM 和 RZSM 的 r 分别为 0.846、0.779, MAE 为 0.014~0.039 m^3/m^3 , 当 $r > 0.7$ 且 $\text{nse} > 0.5$ 时模型模拟性能是可接受的^[24], 参数校准后模型仅在 RZSM 站点数据验证上 nse 较差, 其他方面均表现较好, 表明使用校准后的 SiB2 模型研究黄河中游的土壤湿度较为可靠。

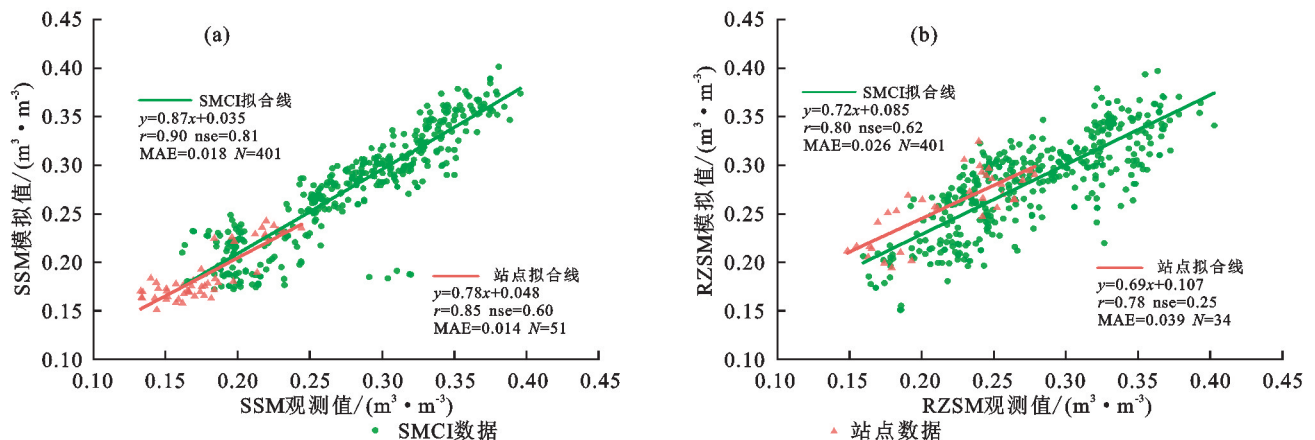


图 2 土壤湿度模拟值与观测值散点分布

Fig.2 Scatter distribution of simulated and observed values for soil moisture

2.2 土壤湿度的时空分布特征

黄河中游的 SSM 和 RZSM 空间分布较为一致, 总体表现为由南向北递减趋势, 高值主要集中在南部、中部及东部的山地地区, 低值则主要分布在黄河中游的西北部(图 3a、图 3b)。黄河中游全区 SSM 年平均值为 0.259 m^3/m^3 , 各生态分区中黄土高原沟壑区最高(0.277 m^3/m^3), 土石山区及河谷平原区次之(0.272 m^3/m^3), 沙地及农灌区最低(0.199 m^3/m^3)。黄河中游

全区 RZSM 年平均值为 0.267 m^3/m^3 , 各生态分区中土石山区及河谷平原区最高(0.285 m^3/m^3), 黄土高原沟壑区次之(0.278 m^3/m^3), 沙地及农灌区最低(0.211 m^3/m^3)。不同植被覆盖类型的土壤湿度存在差异(图 3c、图 3d), SSM 平均值依次为常绿针叶林>落叶阔叶林>耕地>草地>灌木, RZSM 平均值依次为常绿针叶林>落叶阔叶林>耕地>灌木>草地。

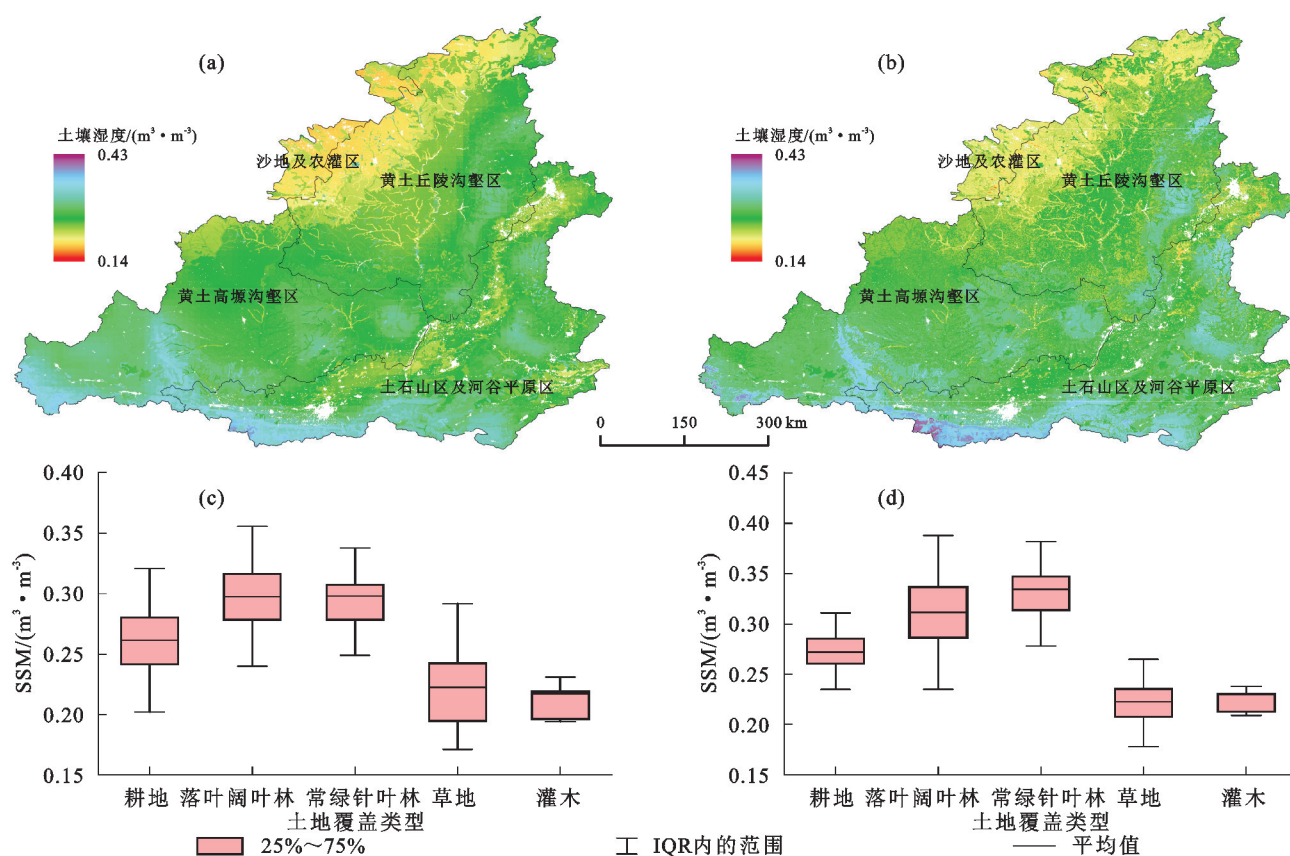


图 3 2000—2020 年土壤湿度的年平均值空间分布及不同土地覆盖类型平均值

Fig.3 Spatial distribution of annual mean values of soil moisture and mean values for different land cover types from 2000 to 2020

由图 4 可知,黄河中游不同生态分区土壤湿度的季节空间变化和月平均值变化,SSM 在年内的波动更大,而 RZSM 则具有较高的稳定性。SSM 的季节平均值表现为秋季>夏季>冬季>春季,可能是因为 SSM 受降水影响较大,在降水量较高的秋季和夏季土壤湿度较高,而在冬季和春季,由于降水不足以弥补水分蒸发的损失,土壤湿度逐渐降低。RZSM 的季节平均值表现为秋季>冬季>春季>夏季,RZSM 受气候影响同时受植被影响也较大,在植被蒸腾较高的夏季,根区土壤水分损失更多,导致夏季土壤湿度在 4 个季节中最低,此现象在黄河中游中部及东部的森林地区较为明显。黄河中游及其不同生态分区年内 SSM 均呈先增加后减小再增加并再次减小趋势,黄河中游及其生态分区 RZSM 基本均呈先减小后增大再次减小趋势,其中,沙地及农灌区月平均值较为稳定,变化较小。

2.3 主要驱动因子分析

分异及因子探测器(图 5a)显示,降水、土壤类型和向下短波辐射对 SSM 有更高的影响。降水、土地覆盖类型和土壤类型对 RZSM 有更高的影响。使用随机森林模型计算驱动因子对不同深度土壤湿度的重要性(图 5b)表明,SSM 的驱动因子重要性最高的前 3 位分别是降水、土壤类型和向下短波辐射,RZSM 的驱动因子重要性前 3 位分别是降水、土地覆盖类型和土壤类型。使

用 SHAP 进行特征重要性评估(图 5c),对 SSM 来说,其解释力较强的驱动因子前 3 位为降水、土壤类型和土地覆盖类型,而 RZSM 解释力较强的前 3 位变量为降水、土地覆盖类型和土壤类型。

对黄河中游各个生态分区的土壤湿度进行驱动因子重要性排序(图 6)。黄土高原沟壑区 SSM 的主要驱动因子为土壤类型、降水和地面 2 m 气温;黄土丘陵沟壑区 SSM 的主要驱动因子为土壤类型和降水;沙地及农灌区 SSM 的主要驱动因子为向下短波辐射、土壤类型和降水,RZSM 的主要驱动因子为土地覆盖类型、土壤类型和坡度;黄土高原沟壑区 RZSM、黄土丘陵沟壑区 RZSM、土石山区及河谷平原区 SSM 和 RZSM 的主要驱动因子均为土壤类型、土地覆盖类型和降水。可以看出,降水和土壤类型几乎对各生态分区 SSM 和 RZSM 都有重要影响,特别是土壤类型对各生态分区 SSM 和 RZSM 的重要性均位于前 4 位,土地覆盖类型对各生态分区 RZSM 有重要影响,而作为黄河中游全区 SSM 主要驱动因子的向下短波辐射仅对沙地及农灌区 SSM 有较强的影响。

2.4 土地覆盖与气候变化对土壤湿度的影响

由于耕地向林草地、草地向林地的转换及植被变化是黄河中游土地覆盖变化的主要趋势,本研究仅针对耕地向林草地、草地向林地的转换及植被 LAI 变化进行

分析。在土地覆盖类型转换情况下(图 7a),有 24.7% 的面积 RZSM 上升,75.3% 的面积 RZSM 下降,其中, RZSM 下降的区域主要分布在沙地及农灌区、黄土高原沟壑区西北部及黄土丘陵沟壑区大部分区域, RZSM 上升的区域则主要集中于土石山区及河谷平原区。黄河

中游 80.7% 的面积在 2000—2020 年未发生土地覆盖类型的转换(图 7b),但植被生长状态也发生巨大变化,其中,88.7% 的面积 RZSM 随 LAI 的上升而下降,9.3% 的面积 RZSM 随 LAI 的上升而上升,1.1% 的面积随 LAI 的下降而上升,0.9% 的面积随 LAI 的下降而下降。

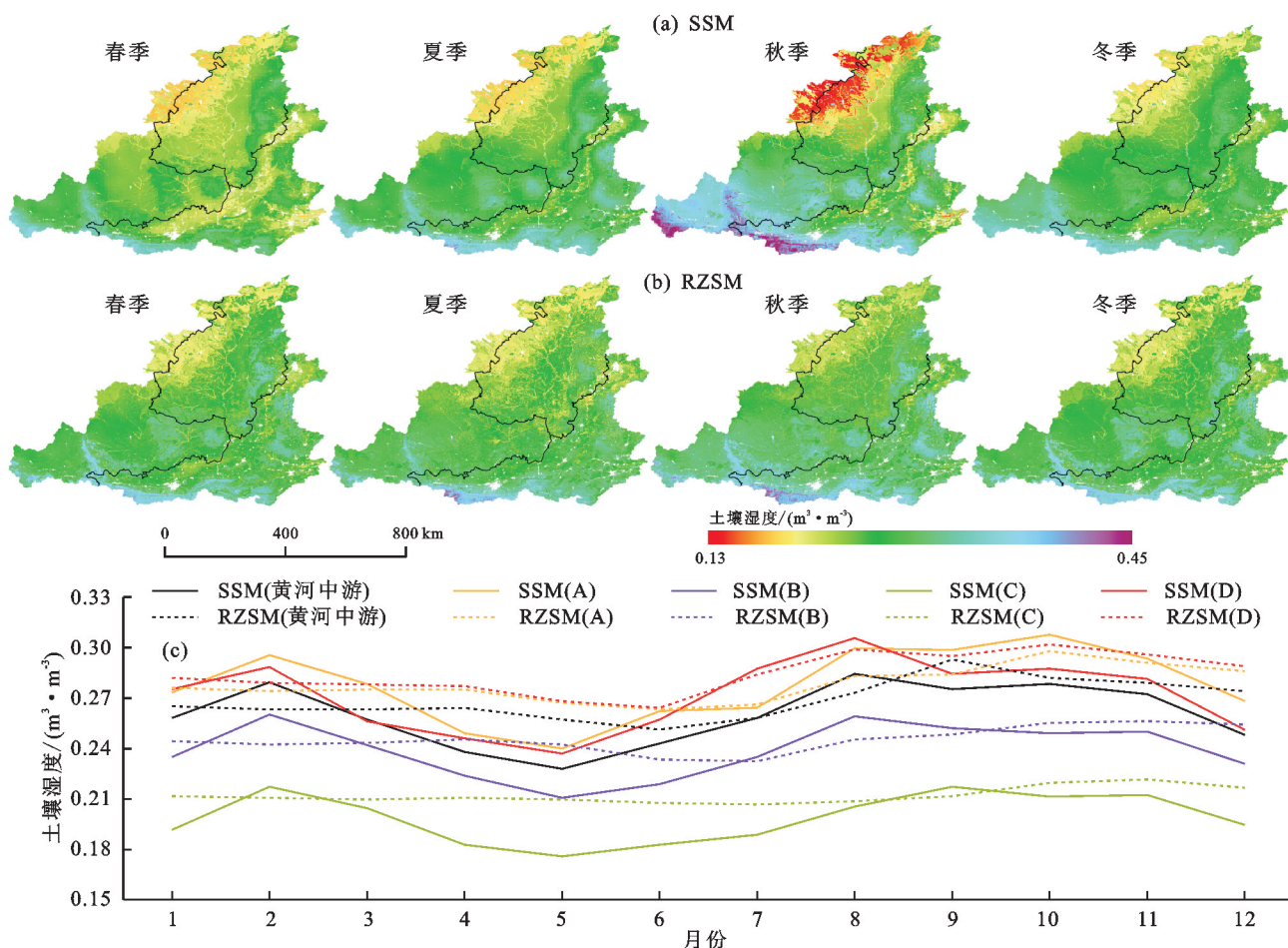


图 4 黄河中游及各生态分区土壤湿度变化特征

Fig.4 Characteristics of soil moisture changes in the middle reaches of the Yellow River and various ecological subregions

表 2 为不同土地覆盖和气候条件下 SiB2 模型模拟的 SSM 和 RZSM 年平均值。与 S_{R1} 相比, S_{R5} 模拟的 SSM 和 RZSM 分别减少 0.004 69、0.009 67 m^3/m^3 , 体现土地覆盖变化和气候差异对土壤湿度的综合影响。 S_{R1} 和 S_{C1} 情景的对比表明, 2 个时期气候差异对土壤湿度造成的影响中, 气候的变化使 SSM 降低, RZSM 升高, 对 2000—2020 年 SSM 和 RZSM 变化的贡献分别为 95.31% 和 -2.69%。 S_{R1} 和 S_{C2} 的对比表明, 2 个时期土地覆盖变化对土壤湿度造成的影响中, 2000—2020 年的土地覆盖变化使 SSM 升高, RZSM 降低, 对 2000—2020 年 SSM 和 RZSM 变化的贡献分别为 -58.42% 和 99.69%。

同样通过情景设置分离土地覆盖与气候变化对黄河中游各生态分区土壤湿度变化的影响(表 3), 2020 年相较于 2000 年除在沙地及农灌区和黄土高原沟壑区的 SSM 升高外, 其余 2 区 SSM 和 4 个生态分区 RZSM 均

降低。只有气候发生改变时(S_{C1}), 黄土高原沟壑区和沙地及农灌区的 SSM 和 RZSM 均上升, 土石山区及河谷平原区 SSM 与 RZSM 均下降, 黄土丘陵沟壑区 SSM 下降 RZSM 上升, 只有土地覆盖类型发生改变时(S_{C2}), 4 个生态分区均呈 SSM 升高, RZSM 降低。

3 讨论

许旭^[25]研究表明, 黄河中游土壤湿度呈南高北低的分布特征, 具有较为明显的季节差异, 年内呈增加-减小-增加-减小趋势, 月最小值出现在 6 月, 月最大值出现在 9 月。本文对 SSM 的模拟结果与其较为相似, 但季节分布特征和最小值月份不相同, 可能是因为土层深度不同所导致的, 且年份的差异也可能对其结果产生影响。黄河中游 RZSM 的年内稳定性高于 SSM, 与李润春等^[26]研究结论相吻合, 可能是由于表层土壤直接暴露于降雨、太阳辐射和风等气象强迫

之中,而深层土壤受气候强迫的作用相对较小且具有更好的稳定性^[8]。

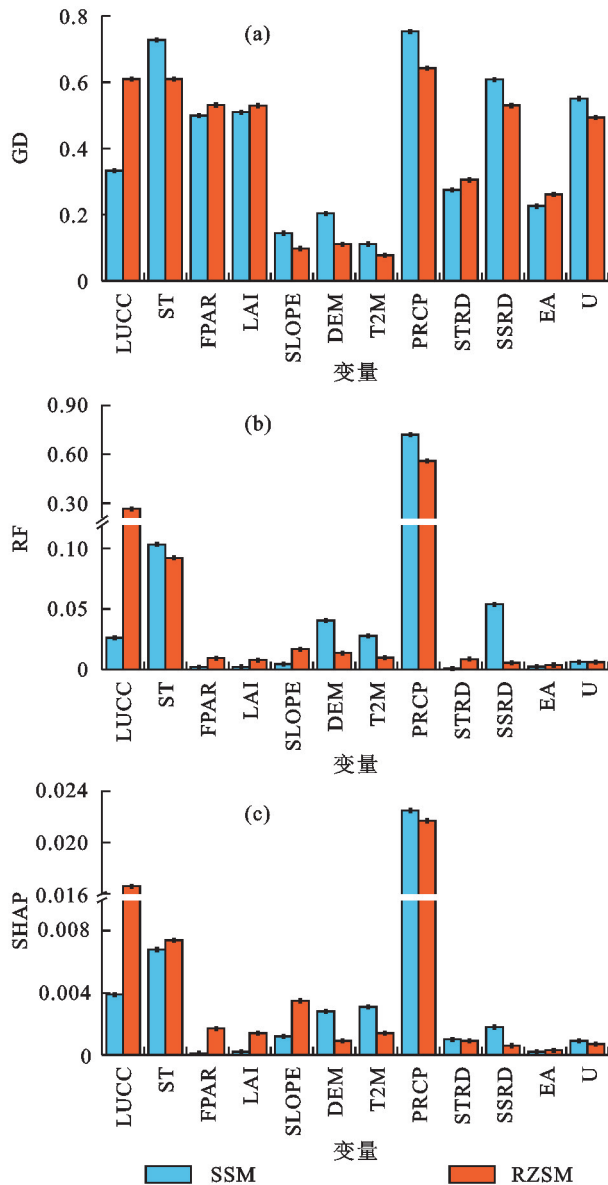


图 5 黄河中游 SSM 和 RZSM 驱动因子分析

Fig.5 Analysis of SSM and RZSM drivers in the middle reaches of the Yellow River

本研究使用 3 种方法来共同识别黄河中游及各生态分区土壤湿度的主要驱动因子,结果表明,土壤湿度的驱动因子因区域(自然条件)的差异而不同,不同土层深度土壤湿度驱动因子不同。此外,不同方法对主导因素识别的结果存在差异,但在重要性较强的驱动因子上具有相似性,因此,可使用多种方法进行驱动因子识别,提高结果准确性。

只改变气候条件下(S_{C1}),黄河中游及各生态分区土壤湿度变化呈现出差异性,各生态分区土壤湿度变化因气候条件的差异而不同,SSM 主要受土壤蒸发和降水入渗所控制,与气候条件关系更加密切,与降水变化方向一致;RZSM 与植被生长更加相关^[2],

受到气候条件、土地覆盖类型和植被生长状况的共同影响,变化与区域降水量变化方向存在差异;在只改变土地覆盖条件下(S_{C2}),黄河中游及各生态分区 SSM 均上升,而 RZSM 均下降,表明土地覆盖变化在全区及各个生态分区对土壤湿度的影响具有一致性。仅就 2000 年与 2020 年土壤湿度的差异而言,气候变化对 SSM 的影响大于土地覆盖变化,土地覆盖变化则主导 RZSM 的变化,由于土地覆盖和气候变化不是单独作用于土壤湿度, S_{C1} 与 S_{C2} 情景导致土壤湿度变化的加和并不等于 S_{R5} 的实际变化。

退耕还林(草)工程推动耕地向林草地类型的转换导致 RZSM 的变化具有区域差异性,可能是区域自然条件的差异导致的。降水是黄河中游土壤水分的主要补给源,在降水量较大的土石山区及河谷平原区多数的类型转换导致 RZSM 的升高,在降水资源较差的沙地及农灌区和黄土丘陵沟壑区多数的类型转换导致 RZSM 降低,黄土高原沟壑区的降水空间分布则导致 RZSM 对类型转换的响应在空间上的分异,与其他研究者^[7,27]分别在中国北方地区和黄土高原开展的研究结论类似,降水量的大小对土地利用类型转换后的土壤湿度有重要影响。在降水量充足的区域进行退耕还林(草)是更好的选择,在降水不足的区域则可能达不到预期的成果。退耕还林(草)工程可能更适宜在土石山区及河谷平原区和黄土高原沟壑区的大部分区域进行,在沙地及农灌区和黄土丘陵沟壑区则要谨慎对待。

WANG 等^[28]在黄土高原研究发现,在降水没有发生显著变化的情况下增加植被覆盖能降低土壤湿度。本研究发现,2000—2020 年黄河中游土地覆盖类型保持不变地区,80.7% 面积 RZSM 因 LAI 升高而降低,是黄河中游 LAI 变化对 RZSM 影响的主要方向,但也同时存在着其他 3 种变化组合,与王蕾钦^[29]分析降水条件下黄土高原植被恢复对土壤水分影响的结果类似,可能是由于植被建设既有增加降水入渗、降低表层土壤湿度蒸发、升高土壤湿度的作用,也有可能因为植被蒸腾而降低土壤湿度的作用,2 种作用间的平衡导致不同结果^[30]。在今后的研究中,进一步认识植被恢复和土壤水分的关系并探究适宜的植被恢复状态,是该地区植被恢复和水资源可持续发展的关键问题。

同时,本研究存在一些局限性。陆面过程模型一般以 0.5~3 h 为时间步长模拟,需要大量的模拟时间,因此,本研究只模拟了 5 个年份,无法体现 2000—2020 年黄河中游土壤湿度的年际变化趋势。本研究气象数据的空间分辨率较低,虽然可以通过重采样方式应用于研究之中,但较低分辨率的气象数据表达复杂地形的能力有限,无法体现小尺度地形对气候数据造成的

影响,从而导致模型模拟精度的降低。目前,长期气候网格数据集空间分辨率普遍较低,但高分辨率气候数据区域地理和生态相关研究十分重要,气候数据使用前进行降尺度是一个较好的解决方法。

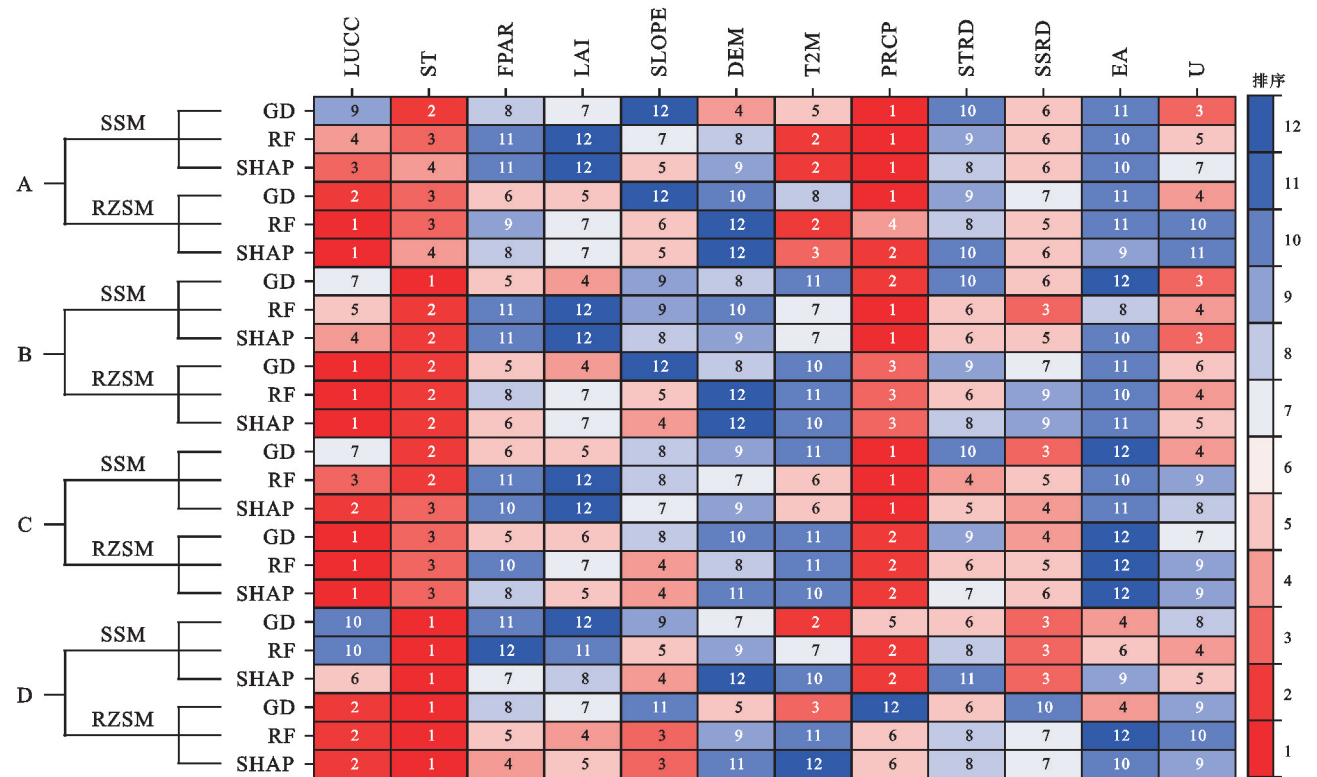


图 6 生态分区驱动因子重要性排序

Fig.6 Ranking of the importance of drivers for different ecological subregions

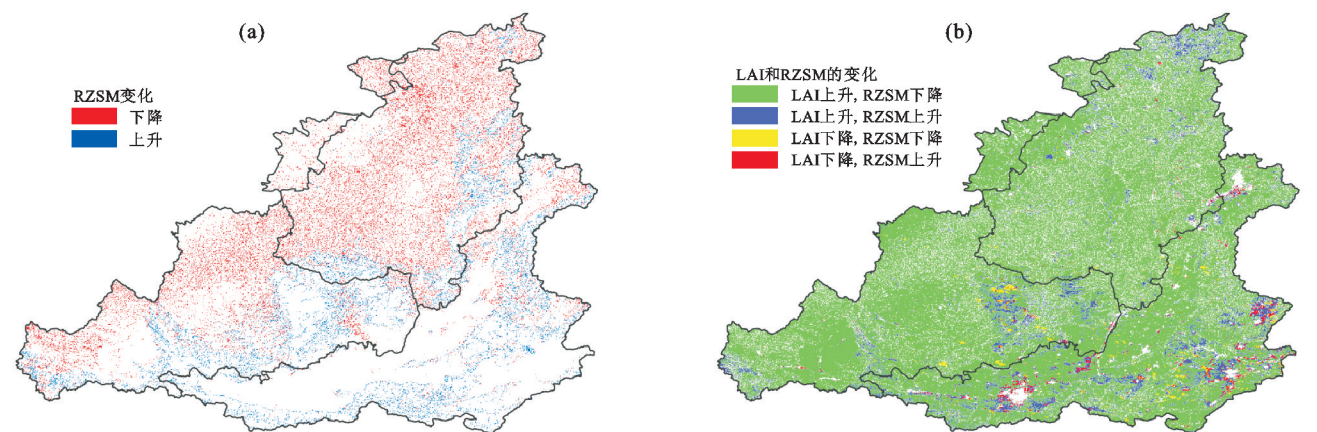


图 7 退耕还林(草)工程对 RZSM 影响的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the impacts of the “Grain for Green” Program on RZSM

表 2 不同土地覆盖与气候条件土壤湿度模拟值

Table 2 Modelled values of soil moisture for different land cover and climatic conditions

类型	情景	土地覆盖时期/a	气候时期/a	年平均值/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	变化量/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	贡献率/%
SSM	S_{R1}	2000	2000	0.269 84	—	—
	S_{C1}	2000	2020	0.265 37	−0.004 47	95.31
	S_{C2}	2020	2000	0.272 58	0.002 74	−58.42
	S_{R5}	2020	2020	0.265 15	−0.004 69	100.00
RZSM	S_{R1}	2000	2000	0.274 16	—	—
	S_{C1}	2000	2020	0.274 42	0.000 26	−2.69
	S_{C2}	2020	2000	0.264 52	−0.009 64	99.69
	S_{R5}	2020	2020	0.264 49	−0.009 67	100.00

表 3 各生态分区不同土地覆盖与气候条件土壤湿度模拟值

Table 3 Simulated values of soil moisture for different land cover and climatic conditions in each ecological subregion

类型	分区	$S_{R1}/$ ($m^3 \cdot m^{-3}$)	$S_{C1}/$ ($m^3 \cdot m^{-3}$)	$S_{C2}/$ ($m^3 \cdot m^{-3}$)	$S_{R5}/$ ($m^3 \cdot m^{-3}$)	气候 变化/%	土地覆盖 变化/%
SSM	A	0.283 78	0.287 33	0.286 21	0.288 04	83.33	57.04
	B	0.246 48	0.244 82	0.248 62	0.243 33	52.70	−67.94
	C	0.198 57	0.207 02	0.201 13	0.204 81	135.42	41.03
	D	0.289 54	0.272 51	0.293 87	0.273 18	104.10	−26.47
RZSM	A	0.284 44	0.289 95	0.275 00	0.281 94	−220.40	377.60
	B	0.247 88	0.253 01	0.235 07	0.240 65	−70.95	177.18
	C	0.207 51	0.217 31	0.194 15	0.203 45	−241.38	329.06
	D	0.300 21	0.288 80	0.295 13	0.280 48	57.83	25.75

4 结 论

1)经过参数校准后的 SiB2 模型能够较好地模拟黄河中游 SSM 与 RZSM。

2)黄河中游土壤湿度总体呈南高北低的空间分布特征,SSM 更易受气候的影响,年内波动大于 RZSM,不同生态分区土壤湿度存在明显差异。

3)土壤湿度的主要驱动因子在不同深度的土层、不同地区和不同方法得出的结果存在差异。地理探测器、随机森林和 SHAP 3 种方法在重要性较高的驱动因子上一致性较高,降水、土壤类型和向下短波辐射是黄河中游 SSM 的主要驱动因子,降水、土壤类型和土地覆盖类型是黄河中游 RZSM 的主要驱动因子。

4)黄河中游耕地向林草地和草地向林地的转换对 RZSM 的影响具有区域差异性,在降水充足的区域施行退耕还林(草)工程是优先的选择,在降水量不足的地区则需要谨慎进行。黄河中游 LAI 的变化对 RZSM 的变化产生差异性的影响,LAI 升高导致 RZSM 的降低是主要的变化方向。

5)2020 年相较于 2000 年黄河中游 SSM 和 RZSM 平均值下降,土地覆盖变化对其下降的贡献分别为 −58.42% 和 99.69%,而气候变化的贡献分别为 95.31%和 −2.69%,气候差异对黄河中游 SSM 的下降有重要影响,土地覆盖变化则主导黄河中游 RZSM 的下降。

参考文献:

[1] SCHLAEPPER D R, BRADFORD J B, LAUENROTH W K, et al. Climate change reduces extent of temperate drylands and intensifies drought in deep soils[J].Nature Communications,2017,8:e14196.

[2] LI W, MIGLIAVACCA M, FORKEL M, et al. Widespread increasing vegetation sensitivity to soil moisture [J].Nature Communications,2022,13(1):e3959.

[3] 任保平,杜宇翔.黄河中游地区生态保护和高质量发展战略研究[J].人民黄河,2021,43(2):1-5.

REN B P, DU Y X. Strategy of ecological protection

and high-quality development in the middle reaches of the Yellow River[J].Yellow River,2021,43(2):1-5.

[4] WANG Y P, WANG S, ZHAO W W, et al. The increasing contribution of potential evapotranspiration to severe droughts in the Yellow River Basin[J].Journal of Hydrology,2022,605:e127310.

[5] 李艳忠,刘昌明,刘小莽,等.植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响[J].自然资源学报,2016,31(12):2005-2020.

LI Y Z, LIU C M, LIU X M, et al. Impact of the grain for green project on the land use/cover change in the middle reaches of the Yellow River[J].Journal of Natural Resources,2016,31(12):2005-2020.

[6] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.

SHAO M A, JIA X X, WANG Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau [J].Advances in Earth Science, 2016,31(1):14-22.

[7] DENG L, YAN W M, ZHANG Y W, et al. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: Evidence from Northern China[J].Forest Ecology and Management,2016,366:1-10.

[8] SENANAYAKE I P, YEO I Y, HANCOCK G R, et al. A decadal record of soil moisture space-time variability over a South-east Australian catchment [J]. Hydrological Processes,2022,36(12):e14770.

[9] KHAN I, ARSALAN M, GHAZAL L, et al. Satellite based assessment of soil moisture and associated factors for vegetation cover: A case study of Pakistan and adjoining regions[J].Pakistan Journal of Botany,2018,50(2):699-709.

[10] 郑金涛,金晓媚,李晴,等.基于地理探测器的张承地区表层土壤湿度变化的驱动因素分析[J].水文地质工程地质,2024,51(2):204-214.

ZHENG J T, JIN X M, LI Q, et al. Driving factors analysis of surface soil moisture variation in Zhangjiakou-Chengde district based on geodetector [J]. Hydrogeology and

- Engineering Geology, 2024, 51(2): 204-214.
- [11] YU B, LIU G, LIU Q. Effects of land use changes for ecological restoration on soil moisture on the Chinese Loess Plateau: A meta-analytical approach[J]. Journal of Forestry Research, 2020, 31(2): 443-452.
- [12] JIAO Q, LI R, WANG F, et al. Impacts of re-vegetation on surface soil moisture over the Chinese Loess Plateau based on remote sensing datasets[J]. Remote Sensing, 2016, 8(2): e156.
- [13] 杨艳芬, 王兵, 王国梁, 等. 黄土高原生态分区及概况[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7389-7397.
- YANG Y F, WANG B, WANG G L, et al. Ecological regionalization and overview of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7389-7397.
- [14] MUÑOZ-SABATER J, DUTRA E, AGUSTÍ-PAN-AREDA A, et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(9): 4349-4383.
- [15] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. In Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: e57.
- [16] PLUMMER S, LECOMTE P, DOHERTY M. The ESA Climate Change Initiative (CCI): A European contribution to the generation of the Global Climate Observing System [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 203: 2-8.
- [17] COSBY B J, HORNBERGER G M, CLAPP R B, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils[J]. Water Resources Research, 1984, 20(6): 682-690.
- [18] LI Q L, SHI G S, SHANGGUAN W, et al. A 1 km daily soil moisture dataset over China using in situ measurement and machine learning [J]. Earth System Science Data, 2022, 14(12): 5267-5286.
- [19] SELLERS P J, RANDALL D A, COLLATZ G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. part I: model formulation[J]. Journal of Climate, 1996, 9(4): 676-705.
- [20] Holland H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence[M]. Cambridge: Mit Press, 1992.
- [21] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [22] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [23] LUNDBERG S, LEE S I. A unified approach to interpreting model predictions[C]. New York: Curran Associates, 2017: 4768-4777.
- [24] MERZ R, PARAJKA J, BLÖSCHL G. Scale effects in conceptual hydrological modeling[J]. Water Resources Research, 2009, 45(9): eW09405.
- [25] 许旭. 黄河中游区土壤湿度影响因素及模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- XU K. Study on influencing factors and simulation of soil moisture in the middle reaches of the Yellow River [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [26] 李润春, 张秀芝, 王丽, 等. 黄河中游地区土壤湿度特征分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 85-91.
- LI R C, ZHANG X Z, WANG L, et al. Analysis on soil moisture content in the middle reaches of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(1): 85-91.
- [27] JIN T T, FU B J, LIU G H, et al. Hydrologic feasibility of artificial forestation in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(8): 2519-2530.
- [28] WANG Y, SHAO M, LIU Z. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2010, 159(1): 99-108.
- [29] 王蕾钦. 黄土高原植被恢复对土壤水分的影响分析[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- WANG L Q. The impact of vegetation restoration on soil moisture on the Chinese Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.
- [30] 杨荣金, 傅伯杰, 刘国华, 等. 黄土丘陵沟壑区生态环境建设中的水问题: 以延河流域为例[J]. 环境科学, 2004(2): 37-42.
- YANG R J, FU B J, LIU G H, et al. Research on the relationship between water and eco-environment construction in loess hilly and gully regions[J]. Environmental Science, 2004(2): 37-42.