

基于 Google Earth Engine 的黑龙省平原区 积雪变化对土壤湿度的影响研究^{*}

朱 龙, 冯晓楠, 武黎黎, 王凤文, 牛国宝, 谷承思
(安徽农业大学 资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要:为揭示黑龙省平原区域积雪对不同深度土壤湿度的补给效应,本研究基于 Google Earth Engine 平台利用 1960—2024 年 ERA5-Land 长时序数据,对比分析了黑龙省三江平原与松嫩平原雪水当量及土壤湿度的演变特征。综合采用 Mann-Kendall 检验、Pearson 相关分析、多元线性回归及随机森林模型,解析了各气象因子对土壤湿度的驱动机制。结果表明:1960—2024 年三江平原和松嫩平原的雪水当量与土壤湿度均呈明显下降趋势;Pearson 相关分析结果显示三江平原的雪水当量与深层土壤湿度呈统计学意义上的正相关($r=0.55, p<0.01$),而松嫩平原的这 2 个因子的相关性相对较弱($r=0.42, p<0.01$);多元线性回归与随机森林模型分析结果一致表明,随着土壤深度增加,积雪对水分的驱动贡献率明显上升。在深层土壤湿度水分变化中,雪水当量是最核心的驱动因子,它的重要性权重远超降水与气温;随机森林模型在各层位的模拟精度均优于线性回归。研究结果证实了冬季积雪对春季深层土壤水分的关键补给作用,可为东北黑土地保护及早情监测提供科学依据。

关键词:Google Earth Engine; 雪水当量; 土壤湿度; 驱动机制; 旱情监测

中图分类号:P426.68

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2026)03-0118-13

黑龙省是中国高纬度重要商品粮基地^[1-2],当地的农业生产高度依赖春季土壤墒情^[3]。随着全球气候持续变暖,高纬度地区积雪时空分布变化明显,冬季积雪融水已成为补充土壤水分^[4]、缓解春旱、推动植被返青的重要水文过程^[5-7]。研究积雪对土壤湿度的影响,对于理解寒区生态系统响应气候变化的过程,指导春季农业管理具有重要意义^[8]。积雪作为寒区春季土壤水分的关键补给源,所形成的水热效应对土壤墒情具有决定性作用^[9-10]。

众多学者已在积雪对土壤湿度的影响上展开了深入研究^[11-13],普遍证实冬季积雪通过春季消融过程对土壤墒情具有明显的提升作用,是缓解高纬度典型农耕区春旱的关键水分来源^[14]。近些年来,冬季积雪对春季土壤湿度的影响受到广泛关注。研究表明,在中国东北农田区,冬季积雪覆盖变化能够调节春季土壤水分状况^[15]。还有研究通过遥感观测与田间试验的结合,量化了雪水当量与土壤湿度的正相关关系,揭示了积雪融化不仅能直接增加地表水分,还能通过高反照率与低导热率产生的保温效应减小土壤冻结深度,从而在不同层面优化土壤的水热动态^[16]。

对于冻融期复杂的水热耦合过程,学术界已从单点野外观测逐步发展到利用物理模型如耦合热质传输模型(coupled heat and mass transfer model)对不同积雪覆盖条件下的动态规律进行精准模拟^[17]。特别是针对融雪水在冻结土壤中的渗透机理,已形成了基于土壤渗透性特征的定量算法,实现了对冻土入渗过程及入渗量的有效估算^[18-19]。研究发现,积雪可通过调节地表能量平衡影响冻土热状态,从而改变土壤水热过程^[20]。此外,积雪与土壤湿度的作用机制在空间上表现出非常明显的异质性,这种交互作用被证实会进一步传导至植被生长节律,成为驱动植被物候变化的重要因子^[21-22]。

积雪量与土壤湿度被公认为是中高纬度地区季节性气候预测的重要信息源。研究发现,准确的陆面初始化能明显提升干旱预测系统的性能,积雪对北半球高纬度地区春季气候的影响力甚至可与海表温度(sea surface temperature)相当,这确立了积雪作为全球及区域水文循环研究中不可忽视的上边界条件地位^[23]。

近些年来,遥感与再分析数据的应用推动研究从局地尺度向区域尺度拓展。研究者利用长时间序列雪水当

^{*} 收稿日期:2026-01-09 修回日期:2026-03-03 网络出版时间:2026-05-29T09:51

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 42171333)

第一作者简介:朱龙,男,研究方向为积雪定量遥感研究,E-mail:15695562661@163.com;通信作者简介:武黎黎,女,副教授,博士,E-mail:wulili@ahau.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20260528.1706.004

量与土壤湿度数据,定量分析了两者的统计关系,发现积雪对深层土壤湿度的影响具有明显滞后性,并且这种滞后性在干旱或半干旱平原区表现得更为明显。然而,现有研究仍存在以下不足之处:侧重流域径流或水文响应,对土壤层次结构的响应关注不足;多以单一区域为研究对象,缺乏干湿梯度对比分析;较少从长期尺度系统解析积雪对土壤湿度的驱动贡献和主导因子差异。特别是在中国东北典型农业平原区,关于积雪变化如何通过不同水文路径影响多层土壤湿度以及积雪变化影响多层土壤湿度的区域分异机制仍缺乏系统研究。

目前已有研究普遍关注积雪对水文过程的调控作用,但系统量化积雪-土壤湿度间接作用路径的研究仍相对薄弱^[24-25],尤其是对黑龙江省境内的三江平原与松嫩平原这2类干湿差异明显的区域而言,相关研究缺口更为突出。与已有研究相比,本研究在以下方面进行了拓展与深化:现有研究多集中于山区流域或寒区整体尺度,而本研究聚焦中国典型商品粮平原,在地形平坦、径流过程较弱的背景下探讨积雪-土壤湿度关系,更能突出融雪入渗过程对土壤湿度的直接贡献机制。本研究基于1960—2024年多源再分析数据,系统研究了60余年间积雪与土壤湿度协同变化的特征,弥补了以往研究时间尺度较短的缺陷。不同于已有研究多关注表层土壤水分,本研究比较了不同深度土壤湿度对积雪变化的响应差异,发现积雪对深层土壤水分的驱动作用明显更强,揭示了积雪补给的垂向传递机制。本研究结合多元线性回归与随机森林模型,定量评估积雪、降水及气温对土壤湿度的相对贡献,明确了雪水当量在深层土壤湿度变化中的主导作用。通过对三江平原与松嫩平原的对比分析,揭示了不同水热背景下积雪水文效应的空间差异,为寒区农业水资源管理提供了区域化的科学依据。本研究从长时序、多层土壤结构及区域差异角度深化了对平原区积雪-土壤湿度耦合机制的认识。

本研究基于 Google Earth Engine(GEE)遥感平台获取并分析1960—2024年的雪水当量、土壤湿度等高时空分辨率数据,构建了冬季积雪融水如何通过土壤湿度影响整体的土壤水分状况,从时空异质性角度揭示冬季积雪影响土壤湿度的驱动机制及区域差异。本研究聚焦于冬季积雪对春季土壤湿度的间接作用方式,深入分析雪水当量对土壤湿度的驱动关系,探究积雪如何通过土壤水文路径影响土壤湿度的变化,并揭示了三江平原与松嫩平原在干湿梯度下冬季积雪于春季消融后,融雪水通过冻融裂隙形成的垂向水文通道向深层渗透,并对各深度春季土壤水分发挥关键的补给与调节作用的空间差异及主导因子。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

如图1所示,选取中国东北黑龙江省境内的三江平原和松嫩平原为研究区,该区域既是中国典型寒区平原农业区,也是中国重要商品粮生产基地^[26]。区域内黑土广泛分布且土层较厚,富含有机质和营养成分,具有良好的水分保持能力和土壤肥力,对农作物生长具有重要的促进作用^[27]。三江平原和松嫩平原自然地理条件相似,均处于中高纬度地区;两地气候均属中温带大陆性季风气候,冬季寒冷漫长,积雪期一般持续4~5个月,降雪过程稳定且具有明显季节性积累特征。三江平原和松嫩平原冬季地表长期被积雪覆盖,积雪在区域水循环过程中发挥重要调节作用,积雪的融化过程成为春季土壤水分的重要补给来源。同时,上述2个区域农业活动对气候与水分条件高度敏感,使得积雪、土壤湿度、植被生长之间的耦合关系具有重要的农业生态意义。三江平原与松嫩平原在地理位置、气候背景、积雪过程及农业功能方面具有明显共性,为开展寒区积雪水文效应的区域对比研究提供了良好的自然基础。

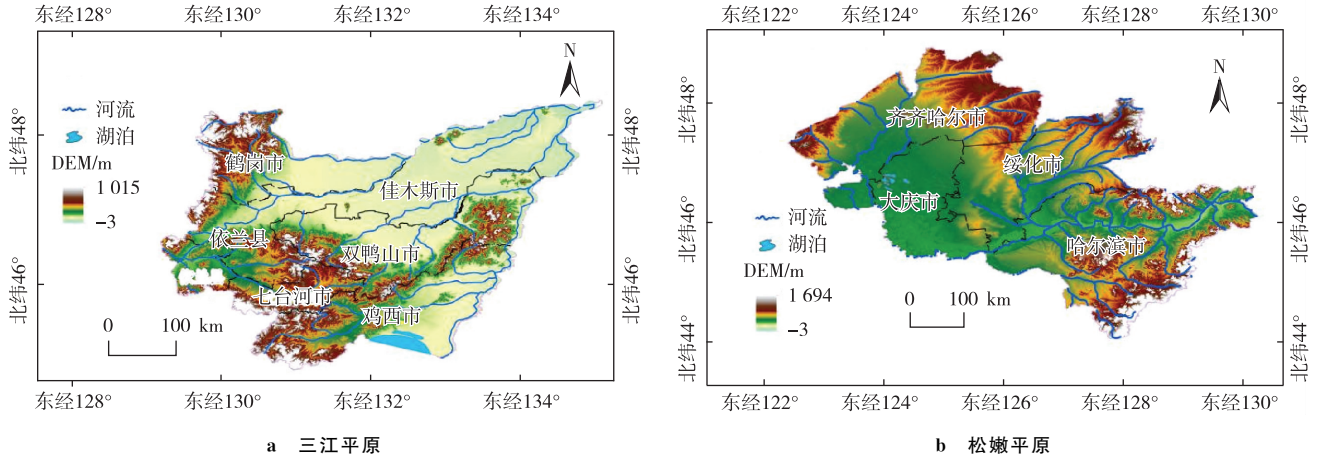
与三江平原相比,松嫩平原地势整体略高,地形以缓波状平原为主,区域水分条件相对偏干,属于半干旱向半湿润过渡带。受西部干旱气流及降水梯度影响,该区域年降水量相对较低,蒸发作用较强,水分供需矛盾较为突出。农业种植结构以玉米、大豆等旱作作物为主,对春季土壤水分变化极为敏感。然而,由于冬季降雪量相对较小且积雪厚度较浅,雪层保温与蓄水能力有限,导致春季融雪补水效应相对较弱。在气温快速回升的背景下,土壤水分易出现快速消耗现象,春季水分受限特征明显。因此,松嫩平原中积雪对土壤湿度的影响更易表现为水分调节不足型响应,它的生态与农业系统对积雪变化具有较高敏感性。

三江平原地势低平开阔,河网密集,整体属于湿润气候区,水热条件优于松嫩平原。区域降水较为充沛,地下水位较高,地表水文过程活跃,为湿地与水田农业发育提供了良好条件。该区域以水稻种植为主,对稳定水源供给依赖程度较高。受气候条件影响,冬季积雪覆盖稳定且持续时间长,雪层厚度较大,积雪储水能力更强。在春季气温回升期间,积雪缓慢融化形成持续补水过程,有效地提高了土壤的含水量并延长了土壤的湿润状态。因此,在三江平原,积雪融水在春季土壤水分形成过程中发挥重要作用,表现出明显的融雪补水主导型水文响应特征。

1.2 数据来源

本研究使用的数据均来自 GEE 平台中的 ECMWF/ERA5_LAND/DAILY_AGGR 数据集。其中,雪水当

量数据涵盖了 1960—2024 年间各年 12 月到次年 4 月的平均值,土壤湿度、气温、降水和潜在蒸散发数据涵盖了每年 4 月和 5 月的数值。土壤湿度数据选取了土层深度为 0~7 cm 的表层土壤湿度(SM_L1)、土层深度为 7~28 cm 的中层土壤湿度(SM_L2)和土层深度为 28~100 cm 深层土壤湿度(SM_L3)。本研究所有数据均采用 0.1°的空间分辨率(约 9 km),相较于普遍使用的 0.25°分辨率,具有更高的空间精度。



注:图中数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)的 SRTMDEMUTM 90M 分辨率数字高程数据产品;三江平原与松嫩平原边界、河流及湖泊矢量数据均来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>)中的 1:1 000 000 全国基础地理数据库。

图 1 研究区区位示意图

Fig. 1 Location map of the study area

1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall(MK)检验

本研究采用非参数统计方法 MK 检验对 1960—2024 年黑龙江省典型平原区域的雪水当量及不同深度土壤湿度的长时序演变特征进行分析。MK 检验无须样本遵循特定分布,能客观判定序列的增长或下降趋势及该趋势是否具有统计学意义,结合 Theil-Sen 斜率估算方法计算趋势斜率,用以定量描述各变量在上述时段的平均变化强度。对于样本量为 n 的时间序列 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,各变量检验统计量 S 计算方法如下:

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

其中: $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数,它的定义为:

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

当 $n \geq 10$ 时,统计量 S 近似服从正态分布,通过标准化处理得到统计量 Z ,具体公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0; \\ 0, & S = 0; \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\text{Var}(S)$ 表示求统计量 S 的方差。在给定检验水平 α 下,若 $|Z| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$,则表示结果通过统计学显著性检验。本研究中 α 取值为 0.05,即当 $|Z| > 1.96$ 时,判断趋势在 $p < 0.05$ 水平上存在统计学意义上的关联。趋势斜率的计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall 1 \leq i < j \leq n, \quad (4)$$

其中: β 为趋势斜率, $\text{Median}(\cdot)$ 表示求中位数。若 $\beta > 0$,则表示呈明显的增长趋势;若 $\beta < 0$,则表示呈明显的下降趋势。

1.3.2 Pearson 相关性分析

本研究为探究各环境因子之间的线性相关性而采用 Pearson 相关系数 r 对主要变量之间的关系进行分析。Pearson 相关分析是常用于分析 2 组连续变量间线性关系强度与正负关系的方法, r 的取值范围为 -1 到 1 。当 $r > 0$ 时,表示变量间呈正相关;当 $r < 0$ 时则表示呈负相关; r 值趋于 1 或 -1 代表变量间线性相关程度强, r 值趋近于 0 则表示变量间无明显线性关联。 r 值的计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (5)$$

其中: X_i 、 Y_i 代表第 i 年某 2 个变量的观测值; $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 代表这 2 个变量的样本平均值; m 代表样本数量,即年份数。

1.3.3 多元线性回归分析

本研究借助多元线性回归(multiple liner regression)分析方式系统评估雪水当量和气象因子对春季土壤湿度的驱动影响力,将春季 3 层土壤湿度设为因变量,雪水当量和气象因子作为自变量构建多元线性回归模型,以此量化土层墒情受到积雪与气候条件的影响程度,具体公式如下:

$$b = \beta_0 + \beta_1 a_1 + \beta_2 a_2 + \cdots + \beta_k a_k + \epsilon,$$

其中:因变量 b 分别是 3 层土壤湿度, $a_1 \sim a_k$ 为雪水当量、气象因子等自变量, β_0 为常数项, $\beta_1 \sim \beta_k$ 为各变量的回归系数, ϵ 为残差项。

1.3.4 随机森林模型与重要性评估

本研究引入机器学习算法中的随机森林回归模型进一步解析积雪、气温、降水等因子对土壤水分影响的非线性贡献特征。通过集成多棵决策树来有效处理高维气象数据中的共线性问题,输出各因子特征重要度数值。基于从 GEE 平台导出的长时序逐月数据集,按比例划分训练集与测试集。通过 Python 模型拟合效果通过确定系数 R^2 进行定量评估,该系数的计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^l (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^l (\bar{y} - y_i)^2},$$

其中: $\hat{y}_i$ 为 Python 模型输出的预测值; y_i 为 ERA5-Land 原始观测值; $\bar{y}$ 为观测值的平均值; l 为样本总数。 R^2 值越接近 1 ,代表模型对黑龙江省典型平原区土壤水分动态的解释力越强。

2 结果与分析

2.1 研究区雪水当量与土壤湿度的时空演变特征

本研究利用 MK 检验与式(1)~(4)对三江平原和松嫩平原 1960—2024 年的雪水当量及 SM_L1、SM_L2 和 SM_L3 的演变趋势进行了定量评估,结果如图 2 所示。

2.1.1 雪水当量的趋势演变特征

1960—2024 年研究区整体雪水当量呈波动下降特征,如图 2a、b 所示:1) 三江平原雪水当量的 Z 值为 -0.05 ($|Z| < 1.96$), p 值为 0.959 ,下降趋势未达到统计学显著性标准;由趋势斜率 β 值为 -0.0047 可知,该区域积雪资源稳定且缩减较为平缓。2) 松嫩平原雪水当量下降态势更为明显, Z 值为 -1.66 , p 值为 0.097 也未达到统计学显著性标准,但趋势斜率 β 值为 -0.0772 ,说明该区域积雪储存量在长时序中存在较大规模的持续缩减。

2.1.2 不同深度土壤湿度的趋势演变特征

相比于雪水当量,研究区各层土壤湿度的下降趋势表现得更为明显:1) 三江平原各深度土壤湿度的 Z 值在 $-1.94 \sim -1.90$ 之间,对应的 p 值在 $0.052 \sim 0.058$ 之间(接近于 α 的取值 0.05),趋势斜率 β 值在 $-0.0003 \sim -0.0002$ 之间,均呈临界统计学显著性下降趋势,表明区域内水分流失风险在研究时段内逐年累积(图 2c~e)。2) 松嫩平原呈现明显的干旱化趋势,区域内 SM_L1、SM_L2 和 SM_L3 的 Z 统计量绝对值分别为 3.95 、 4.46 和 4.13 ,且下降趋势在 $p < 0.001$ 水平上均具有统计学意义(图 2f~h)。

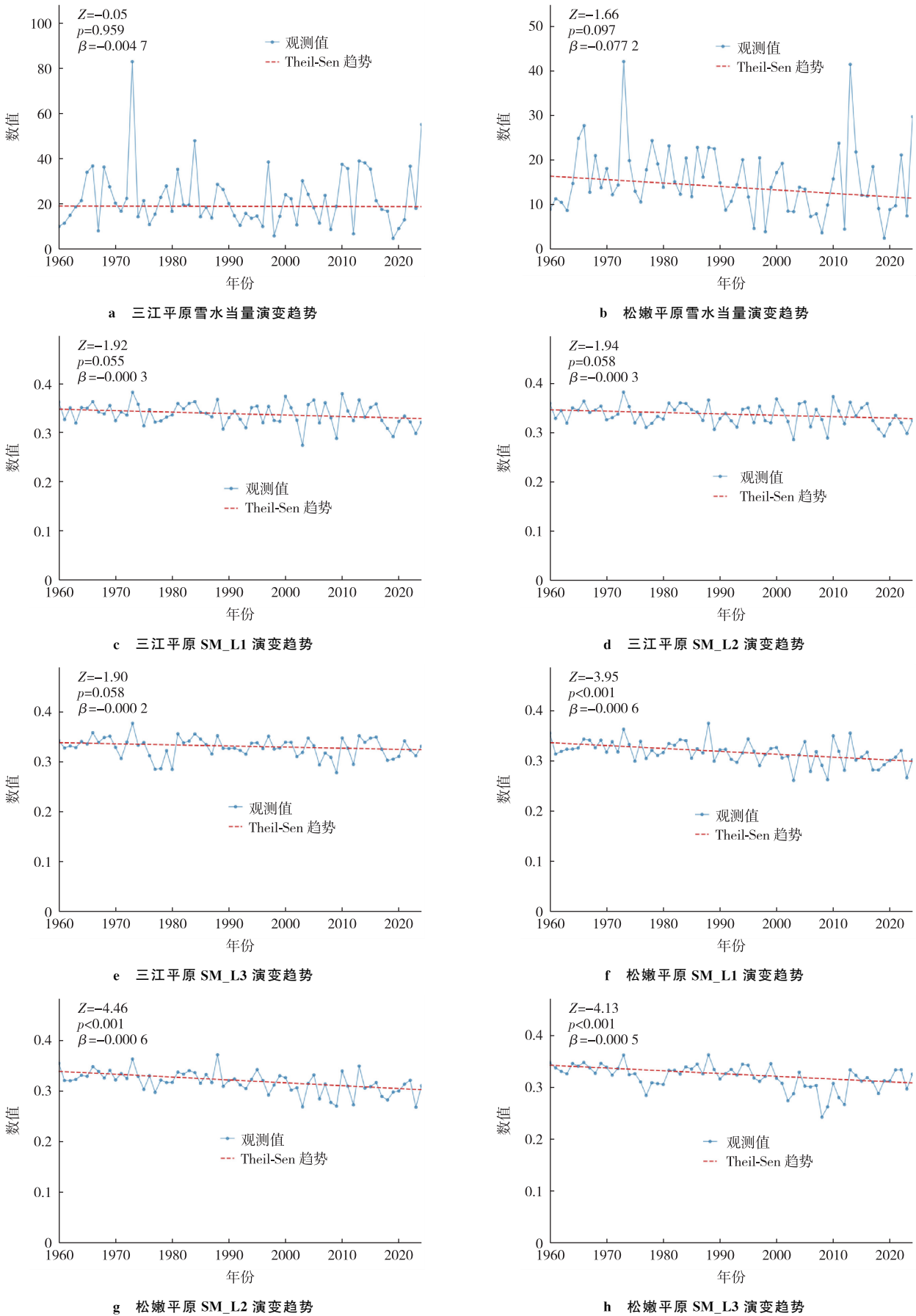


图 2 研究区雪水当量与土壤湿度演变趋势

Fig. 2 Evolution trends of snow water equivalent and soil moisture in the study area

2.1.3 演变原因分析

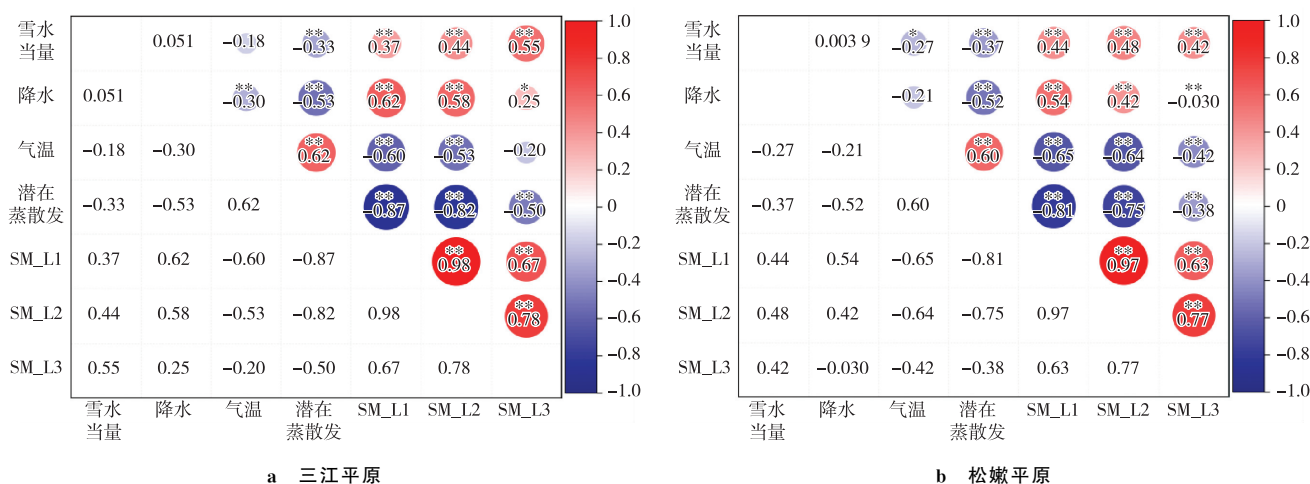
1) 气温升高驱动积雪消融提前:研究时段内冬季气温的普遍回升,积雪消融起始时点不断前移,雪水当量峰值出现时间随之提前。

2) 降水形态改变:气温升高推动冬季固态降雪向液态降雨转换,而液态降雨在地表更易形成径流而非积雪覆盖,从而降低了春季融雪对土壤水分的有效补给量。

3) 蒸发强度增加:随着生长季气温的升高,地表及植被蒸腾作用增强,加剧了土壤水分的散失,尤其是在松嫩平原这种土壤湿度下降趋势极为明显的区域,水分蒸发散失量可能已远超融雪补给量。

2.2 研究区雪水当量与土壤湿度的相关性响应特征

为定量解析雪水当量对区域土壤水分的补给效应,本研究利用式(5)计算了雪水当量与 SM_L1、SM_L2 和 SM_L3 之间的 Pearson 相关系数 r ,结果如图 3 所示。



注:“*”“**”分别表示变量间的相关性分别在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平上具有统计学意义。

图 3 研究区土壤湿度与各气象因子的相关系数热力图

Fig. 3 Heatmap of correlation coefficients between soil moisture and various meteorological factors in the study area

2.2.1 雪水当量与土壤水分补给的关联性

结果表明,在三江平原和松嫩平原,雪水当量与各层土壤湿度之间均呈统计学意义上的正相关($p < 0.05$), r 值均在 0.37 以上,证实冬季积雪消融是黑龙江省典型平原区农田土壤水分重要的补给源之一。

2.2.2 不同深度雪水当量对积雪补给的垂直响应差异

对比雪水当量与不同深度土壤湿度的 r 值可以发现,积雪消融对土壤水分的补给表现出明显的深层累积效应,在三江平原和松嫩平原表现出不同的垂直演化特征:1) 图 3a 显示三江平原雪水当量随土层深度增加与土壤湿度的相关性逐渐增强,即与 SM_L3 的相关性最强($r = 0.55$),与 SM_L2 的相关性次之($r = 0.44$),与 SM_L1 的相关性较弱($r = 0.37$);这表明融雪水在三江平原的下渗过程具有良好的连通性,深层土壤作为水分的储存库,对积雪消融信号的保留比浅层土壤更稳定。2) 松嫩平原中浅层补给最为活跃,如图 3b 所示,雪水当量与 SM_L2 和 SM_L1 的相关性(r 值分别为 0.48 和 0.44)略强于与 SM_L3 的相关性($r = 0.42$);这反映出松嫩平原融雪水的下渗补给主要集中在中浅层,深层补给受限于当地复杂的下垫面条件或更高的蒸散发速率。

2.2.3 多气象因子驱动下雪水当量的补给主动性评估

在所有气象因子中,雪水当量对土壤湿度的相关贡献位序仅次于降水,明显高于气温和潜在蒸散发的负相关强度。在三江平原,雪水当量与 SM_L3 的 r 值为 0.55,超过了降水与 SM_L3 的 r 值 0.25(图 3a),这凸显了在高寒平原区,冬季积雪在解决深层土壤季节性缺水时起到了关键作用。在松嫩平原,尽管降水的影响力较大,但雪水当量与 SM_L1、SM_L2 和 SM_L3 均有较强的相关性($r \geq 0.42$)(图 3b),表明积雪是该区域抗旱保墒不可忽视的生态屏障。

2.3 研究区土壤湿度演变的多元驱动定量解析

为了定量分析各气象因子对土壤湿度演变的贡献权重,本研究以 3 层土壤湿度为因变量,雪水当量、降水、气温和潜在蒸散发为自变量构建多元线性回归模型。经检验,各模型的方差膨胀因子(variance inflation factor)

值均在 2 左右,表明变量间不存在严重的多重共线性,模型结果真实可靠。

2.3.1 雪水当量对不同层位土壤水分的贡献分析

标准化回归系数 Beta 反映了在同等变率下雪水当量对土壤湿度的影响力大小。如表 1 和图 4 所示,回归结果证实了积雪补给的“深层主导性”特征。三江平原雪水当量是深层水分的主要驱动力,在以 SM_L3 为因变量构建的回归模型中,雪水当量的 Beta 值高达 0.433,远高于降水和气温的 Beta 值,这意味着在三江平原冬春季积雪消融的缓慢补给机制对维持深层土壤水分起到了决定性作用,甚至超过了降水的贡献。松嫩平原雪水当量影响力随土层深度增加而增强,在分别以 SM_L1、SM_L2 和 SM_L3 为因变量构建的回归模型中,雪水当量的 Beta 值由 0.195 逐步上升至 0.269,虽然降水和潜在蒸散发在浅层土壤中表现出极强的驱动性,但随着土层深度的增加,这些气象因子的敏感度下降,而积雪补给信号在垂直剖面上表现出更强的稳定性。

表 1 研究区各层土壤湿度演变的多元线性回归模型参数

Tab. 1 Parameters of the multiple linear regression model for soil moisture evolution across different layers in the study area						
研究区域	因变量	自变量	Beta 值	t 值	p 值	R ² 值
三江平原	SM_L1	雪水当量	0.135	2.230	0.029	0.809
		降水	0.252	3.731	<0.001	
		气温	-0.125	-1.743	0.086	
		潜在蒸散发	-0.610	-7.160	<0.001	
	SM_L2	雪水当量	0.222	3.213	0.002	0.750
		降水	0.242	3.134	0.003	
		气温	-0.064	-0.783	0.437	
		潜在蒸散发	-0.581	-5.954	<0.001	
	SM_L3	雪水当量	0.433	4.145	<0.001	0.430
		降水	0.041	0.351	0.727	
		气温	0.152	1.224	0.226	
		潜在蒸散发	-0.429	-2.915	0.005	
松嫩平原	SM_L1	雪水当量	0.195	2.829	0.006	0.768
		降水	0.254	3.377	0.001	
		气温	-0.284	-3.625	<0.001	
		潜在蒸散发	-0.442	-4.661	<0.001	
	SM_L2	雪水当量	0.246	3	0.004	0.670
		降水	0.150	1.669	0.1	
		气温	-0.307	-3.283	0.002	
		潜在蒸散发	-0.394	-3.482	<0.001	
	SM_L3	雪水当量	0.269	2.281	0.026	0.317
		降水	-0.206	-1.592	0.117	
		气温	-0.252	-1.878	0.065	
		潜在蒸散发	-0.236	-1.448	0.153	

2.3.2 雪水当量的正向补给与潜在蒸散发负向驱动效应分析

从驱动因子的作用方向来看,研究区内土壤湿度的动态演变主要受雪水当量的正向补给与潜在蒸散发的负向损耗共同制约。表 1 和图 4 显示,除深层土壤外,潜在蒸散发在各模型中均表现为最强的负向驱动力,它的 Beta 值的绝对值维持在 0.4~0.6 之间。这表明尽管雪水当量为土壤提供了关键的水分增益,但这种增益始终受到潜在蒸散发驱动的水分损耗的强烈干扰。在气温升高背景下,积雪量的缩减与蒸散发的明显增强构成了目前研究区土壤湿度普遍下降的根本动力机理。

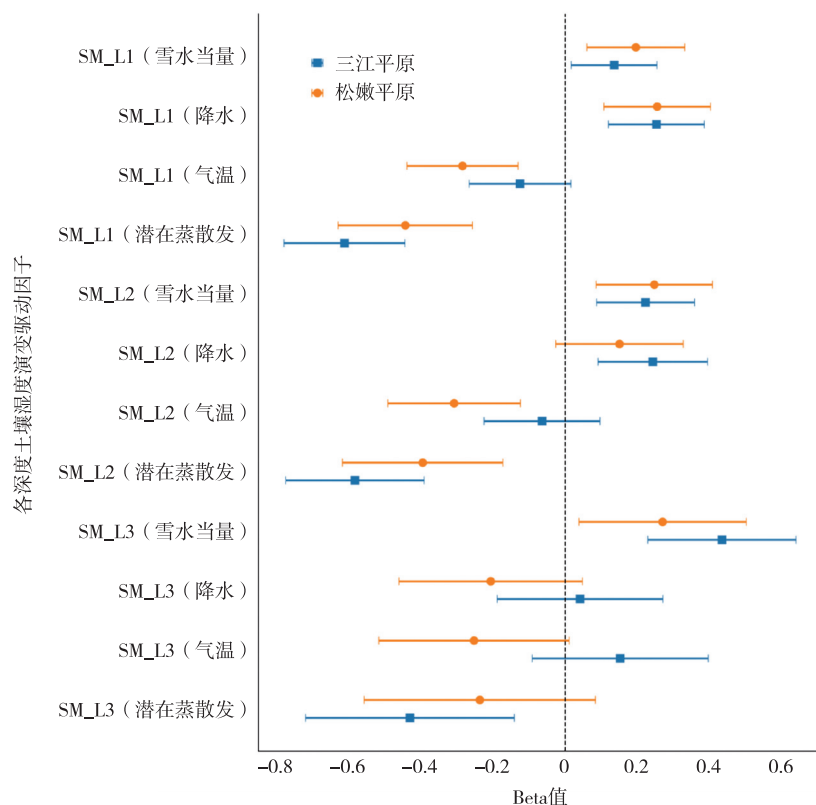


图4 研究区各深度土壤湿度演变驱动因子森林图

Fig. 4 Forest map of driving factors for soil moisture evolution at various depths in the study area

2.3.3 降水与潜在蒸散发驱动贡献差异对比分析

在所有土层中,三江平原对潜在蒸散发的敏感程度均明显高于松嫩平原。表1显示:在以 SM_L1 为因变量的回归模型中,与松嫩平原相比,三江平原的潜在蒸散发 Beta 绝对值更高;甚至在以 SM_L3 为因变量的回归模型中,三江平原的潜在蒸散发驱动效应依然明显 ($p=0.005$),而松嫩平原的潜在蒸散发驱动效应已无统计学意义 ($p=0.153$)。由此可见三江平原的水分演变受蒸发散过程的制约更为强烈。降水对三江平原土壤水分的正向驱动表现出更好的垂直持续性。以 SM_L1 和 SM_L2 为因变量的回归模型中,三江平原的降水 Beta 值均在 0.24 以上,该因子的驱动效应具有统计学意义 ($p<0.05$);对于松嫩平原而言,仅在以 SM_L1 为因变量的回归模型中降水的驱动效应具有统计学意义 (Beta 值为 0.254, $p=0.001$),在以 SM_L2 为因变量的回归模型中,降水的驱动效应已明显减弱 ($p=0.1$)。上述结果反映出三江平原和松嫩平原的降水入渗转化效率上存在明显区别。

2.4 随机森林模型的土壤湿度演变重要性评估

2.4.1 模型精度评估

为验证驱动分析的可靠性,本研究采用随机森林回归模型对各深度土壤湿度进行模拟测算。图5展示了三江平原与松嫩平原各土层土壤湿度观测值与模型预测值的 1:1 验证结果。结果显示,随机森林模型在浅层土壤具有较强的解释力,三江平原 SM_L1 模型的验证结果 R^2 值达到 0.722,松嫩平原该模型验证结果的 R^2 值为 0.558。随着土层深度的增加, R^2 值呈现明显的下降趋势,其中松嫩平原 SM_L3 模型的验证结果 R^2 值仅为 0.041。这表明地表及浅层土壤湿度受气象因子的直接驱动作用更为剧烈,而深层土壤湿度受地下水补给、土壤质地、热传导等复杂因素的缓冲,其中的演变机制具有更强的非线性和不确定性。

2.4.2 驱动因子重要性排序

基于随机森林模型提取的特征重要性权重,如图6所示,进一步量化了各气象因子的贡献率。在对三江平原和松嫩平原的 SM_L1 和 SM_L2 的驱动因子中,潜在蒸散发具有主导驱动作用,它的贡献权重普遍维持在 0.7 左右。这说明在生长季及非冰冻期,浅层和中层土壤水分亏缺主要受蒸发散强度的控制。同时,SM_L3 驱动机制发生明显变化:雪水当量的重要性权重在三江平原和松嫩平原分别跃升至 0.43 和 0.38,成为深层土壤水分演变的首要或重要驱动因子。这一发现与 2.3 节中线性回归结果高度吻合,再次印证了寒区积雪消融对深层土壤水分具有长效且关键的补给意义。

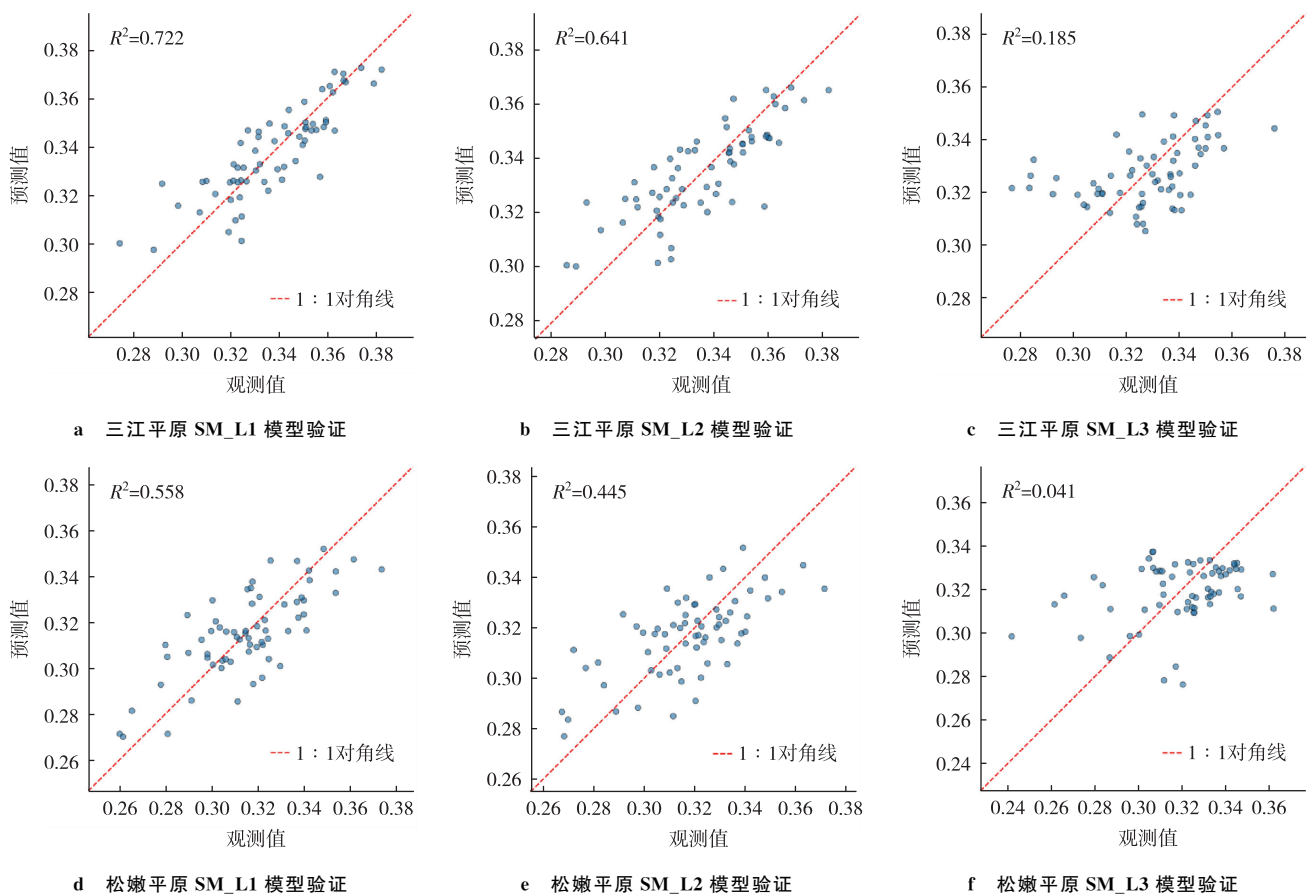


图 5 随机森林模型模拟精度验证图

Fig. 5 Validation of random forest model simulation accuracy

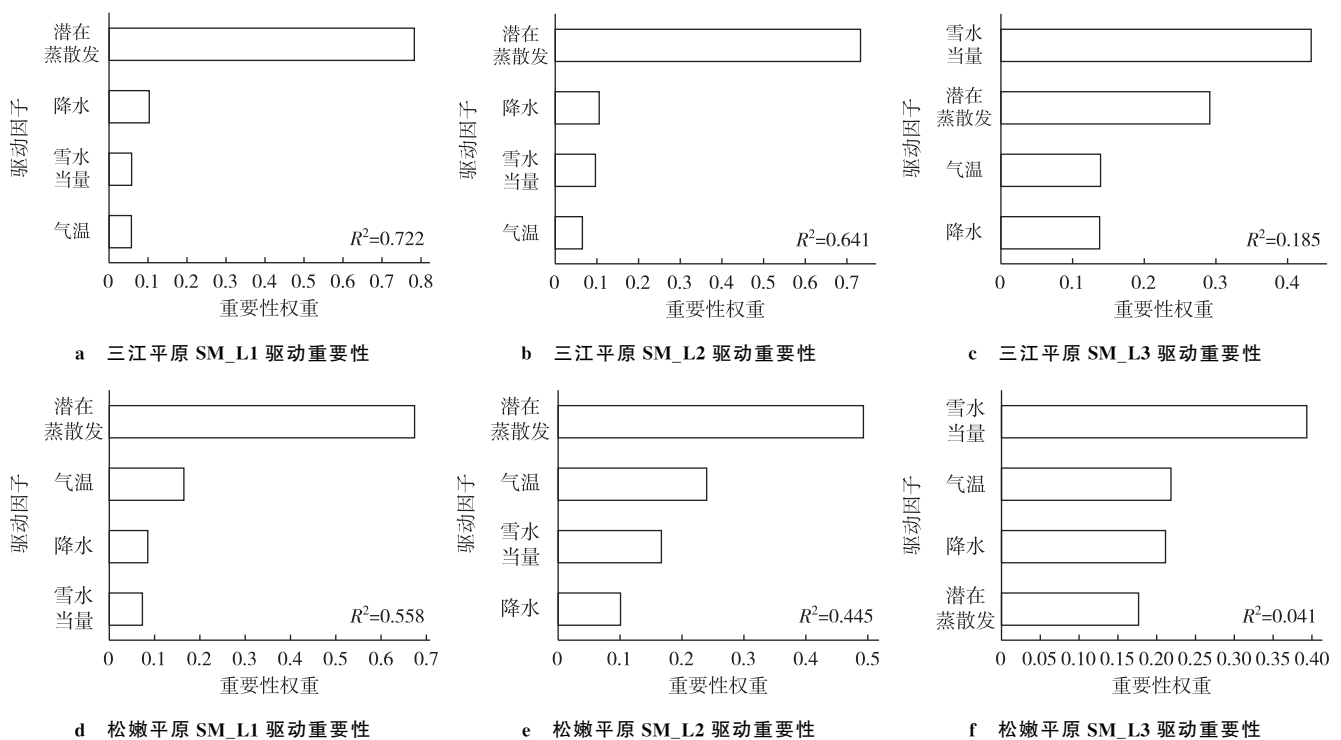


图 6 各深度土壤湿度驱动因子随机森林重要性排序图

Fig. 6 Random forest importance ranking of soil moisture driving factors at various depths

3 讨论

3.1 积雪变化对不同深度土壤湿度的影响机制

冬季积雪作为寒区陆地水循环的重要组成部分,储水与缓释过程对春季土壤水分形成具有关键调节作用。本研究结果表明,雪水当量变化对春季土壤湿度具有明显影响,并在不同土壤深度及区域尺度上表现出明显差异,反映出典型寒区平原积雪-土壤水分耦合机制。积雪通过融雪补给过程直接影响表层土壤水分状况。冬季积累的积雪在春季气温升高阶段逐渐融化,形成持续性的水分输入,相较于降水事件的瞬时补给,融雪过程具有缓慢释放特征,从而能够在短时间内明显提高表层土壤含水量。本研究发现,随着土层深度增加,雪水当量对土壤湿度的贡献权重明显上升。对于三江平原和松嫩平原的 SM_L3 而言,雪水当量的重要性权重分别跃升至 0.43 和 0.38,成为核心驱动因子,这主要得益于寒区特有的土壤冻融循环过程及该过程对入渗路径的重构。从物理机制上看,冬春交替之际频繁的冻融循环通过水分相变产生的物理应力作用,在土壤剖面中诱发产生了大量非均匀分布的大孔隙及冻融裂隙。这些裂隙作为水分运移的“优先流路径”,极大地增强了冻土在消融期的渗透能力。这种深层主导性反映了寒区特有的水文补给路径:春季融雪水在低温环境下不易被地表蒸发,而是通过土壤大孔隙发生垂直入渗,有效地进入深层蓄水池^[28]。这证实了积雪在维持深层水分稳定性、缓解季节性缺水方面的关键生态屏障作用。这种效应对于维持深层水分稳定性、缓解春季旱情具有重要的生态意义,本研究结果部分支持了 Zhao 等人^[29]的研究结论。

在 1960—2024 年,三江平原和松嫩平原的雪水当量整体呈波动下降趋势,且与土壤湿度的下降表现出明显的同步性。随着气候持续变暖,冬季气温回升导致积雪消融提前、峰值缩减,直接减少了春季融雪对土壤水分的有效补给总量。此外,降雪形态向液态降雨的转变使得水分更易转化为地表径流而非下渗补给,进一步加剧了深层土壤的干旱化风险。这种“积雪-土壤湿度”路径的弱化,是研究区深层水分流失风险逐年累积的重要原因。

虽然积雪提供了关键的水分增益,但对于 SM_L1 和 SM_L2 而言,潜在蒸散发表现出明显的负向主导作用。在物理机制上,浅层土壤直接与大气进行水分和能量交换,气温升高和蒸散发增强会导致地表水分迅速流失,这一发现与 Meng 等人^[30]和 Seneviratne 等人^[31]的研究一致。特别是在生长季,强烈的植被蒸腾和土壤蒸发共同构成了浅层水分亏缺的主要诱因,这解释了为何随机森林模型中潜在蒸散发的贡献权重在浅层接近 0.7。

3.2 三江平原与松嫩平原驱动模式的异同

三江平原土壤湿度对驱动因子响应的敏感性:三江平原各层土壤湿度与驱动因子的回归模型拟合优度普遍高于松嫩平原。这可能与三江平原土壤中较高的粘粒含量及植被覆盖有关,因而该平原土壤中的水分对降水及积雪变率的响应更加敏感且规律性更强。

松嫩平原土壤湿度对驱动因子响应的复杂性:相比之下,松嫩平原 SM_L3 与驱动因子的回归模型模拟效果较为一般。这表明在半干旱特征明显的松嫩平原,深层土壤水分可能受到更复杂的区域地下水埋深或地下水循环的调控,单一的气象因子解释力有限。

3.3 模型不确定性与局限性分析

本研究引入随机森林模型作为多元线性回归的补充,有效识别了驱动因子的非线性贡献。这种模型互证具有科学性,2 种方法在主导因子识别上的高度一致,从而增强了结果的稳健性。线性模型给出了影响的方向性,而非线性模型则量化了贡献的优先级。然而,上述模型也存在不确定性,这是因为 ERA5-Land 的积雪产品基于 H-TESSEL 陆面过程模型生成,虽未直接同化地表观测,但受到高质量大气强迫数据的约束。在东北平原等地形平坦区域,ERA5-Land 能较好地捕捉积雪的年际变化和空间分布特征。已有研究表明:ERA5-Land 在中国区域的积雪密度模拟与地面实测具有较好的一致性^[32],但本研究认为在积雪深度和雪水当量的绝对量值方面,采用再分析数据可能在局部地区例如林区或高海拔区存在数值高估现象,而且 SM_L3 与驱动因子回归模型的模拟精度随着土层深度增加也有所下降。在北半球尺度评估中,ERA5-Land 对积雪覆盖及季节变化的模拟亦与多源观测数据表现出较高一致性^[33],因此被广泛应用于寒区积雪与水文研究。ERA5-Land 再分析数据也广泛应用于土壤湿度研究,多项研究表明该数据集能够较好地捕捉土壤湿度的时序变化特征,并与地面观测数据表现出较高相关性^[34]。在中国区域的评估结果显示,在中国区域,遥感产品在绝对值上最接近观测,而 ERA5-Land 等再分析数据虽存在湿偏差,但在时间变化和相关性方面表现更优,其中 ERA5-Land 在中国北方地区表现尤为可靠^[35]。因此,ERA5-Land 被认为适用于大尺度气候与陆面水文过程分析。未来的研究可考虑引入土壤物理参数以及地下水动态,进一步完善对深层水分演变机制的理解。

4 结束语

综合上述,本研究得出以下主要结果与核心结论。

1) 积雪与土壤湿度年际变化:1960—2024 年,研究区雪水当量与各层土壤湿度呈现出明显的同步下降趋势。三江平原积雪资源较为稳定,趋势斜率 β 值为 -0.0047 ,土壤水分流失变化处于临界统计学显著性边缘(p 值范围为 $0.052\sim 0.058$,接近 0.05 的阈值),水分流失风险正在逐年累积。相比之下,松嫩平原积雪缩减更为剧烈,趋势斜率 β 值达 -0.0772 ,SM_L1、SM_L2 和 SM_L3 呈现极为明显的下降($|Z|>3.95$)。

2) 积雪补给效应区域差异:积雪消融对土壤水分的补给表现出不同的空间模式。三江平原表现为“深层累积效应”,雪水当量与 SM_L3 的关联性最高($r=0.55$),在以 SM_L3 为因变量的回归模型中,雪水当量的 Beta 值高达 0.433 ,远超降水的贡献,证实了积雪融水在该区具有良好的垂直入渗连通性。松嫩平原的积雪补给则主要集中在中浅层(雪水当量与 SM_L1 和 SM_L2 的相关系数 r 值均不低于 0.44),深层补给受限于复杂的下垫面条件,导致以 SM_L3 为因变量的回归模型解释力($R^2=0.041$)远低于三江平原。

3) 驱动机制从“浅层蒸散”向“深层积雪”的物理转型:驱动分析揭示了水分演变的层位差异性。在表层及浅层,即土壤深度为 $0\sim 28$ cm,潜在蒸散发是主导驱动因子,重要性权重普遍维持在 0.7 左右。而进入深度为 $28\sim 100$ cm 的深层土壤后,驱动机制发生转型,雪水当量的贡献率明显上升,在三江平原和松嫩平原的权重分别跃升至 0.43 和 0.38 ,取代潜在蒸散发成为深层水分演变的首要驱动力。

4) 寒区深层蓄水效应:本研究量化证实了冬季积雪作为蓄水池,通过春季消融垂直入渗对深层土壤水分发挥了不可替代的补给作用。在气候变暖导致潜在蒸散发负向驱动增强的背景下,积雪量的缩减直接弱化了这一补给路径,是导致东北黑土地深层水分流失的动力机理。

本研究通过多元回归与随机森林模型的交叉互证,有效识别了驱动因子的非线性贡献,并排除了共线性干扰,充分提升了驱动分析的科学性。模型验证显示,随机森林模型在浅层水分模拟中表现出的高精度优点为未来寒区水资源精准管理与农业防灾减灾提供了可靠的科学依据与逻辑起点。

参考文献:

- [1] 修乃温,胡一凡,范文义. 黑龙江省土地利用类型演变精细化模拟分析[J/OL]. 环境科学, 2025-09-16. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202506241>.
Xiu Naiwen, Hu Yifan, Fan Wenyi. Refined simulation and analysis of land use type evolution in Heilongjiang Province[J/OL]. Environmental Science, 2025-09-16. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202506241>.
- [2] 王晓楠,范锦祺. 以科技创新培育新质生产力助推黑龙江省农业现代化建设[J]. 黑龙江农业科学, 2025 (9): 88-93.
Wang Xiaonan, Fan Jinqi. Cultivating new quality productive forces by scientific and technological innovation to promote agricultural modernization in Heilongjiang province[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2025 (9): 88-93.
- [3] 李高良,胡笑涛,王亚昆,等. 卫星遥感在作物缺水诊断与预测中的应用进展[J]. 节水灌溉, 2026 (3): 14-25.
Li Gaoliang, Hu Xiaotao, Wang Yakun, et al. Application of satellite remote sensing in the diagnosis and prediction of crop water stress[J]. Water Saving Irrigation, 2026 (3): 14-25.
- [4] 左仕一,胡支涛,安婧雪,等. 海河流域生态环境对气象干旱和人类活动的响应[J]. 环境科学, 2026, 47 (4): 2382-2392.
Zuo Shiyi, Hu Zhitao, An Jingxue, et al. Ecological environment of the Haihe River Basin in response to meteorological drought and human activities[J]. Environmental Science, 2026, 47 (4): 2382-2392.
- [5] 王欣,晋锐,杜培军,等. 青藏高原地表冻融循环与植被返青期的变化趋势及其气候响应特征[J]. 遥感学报, 2018, 22 (3): 508-520.
Wang Xin, Jin Rui, Du Peijun, et al. Trend of surface freeze-thaw cycles and vegetation green-up date and their response to climate change on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22 (3): 508-520.
- [6] Ni J W, Chen J, Tang Y, et al. Duration of vegetation green-up response to snowmelt on the Tibetan Plateau[J]. Biogeosciences, 2025, 22 (11): 2637-2651.
- [7] Zheng J S, Xu X Y, Jia G S. Effects of Shifting Spring Phenology on Growing Season Carbon Uptake in High Latitudes[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2022, 127 (12): e2022JG006900.
- [8] Grippa M, Kergoat L, Le Toan T, et al. The impact of snow depth and snowmelt on the vegetation variability over central Siberia[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32 (21): 412-1-412-4.
- [9] 印玉明. 松嫩平原黑土区积雪表面温度反演研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.

- Yin Yuming. Retrieval of snow surface temperature in black soil region of Songnen Plain[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- [10] Pan M X, Zhao F, Ma J Y, et al. Effect of snow cover on spring soil moisture content in key agricultural areas of Northeast China[J]. Sustainability, 2022, 14 (3): 1527.
- [11] 孙悦. 欧亚春季融雪异常变化及其对东北亚夏季陆面热力异常的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
Sun Yue. The abnormal changes of Eurasian spring snowmelt and their impacts on the summer land surface thermal anomalies in Northeast Asia[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2024.
- [12] 宋少辉, 吴学睿, 赵乐文. 基于 GPS-IR 的复杂寒区地表冻融状态监测研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22 (4): 65-70.
Song Shaohui, Wu Xuerui, Zhao Lewen. Surface freezing-thawing monitoring in complex cold region based on GPS-IR[J]. Geospatial Information, 2024, 22 (4): 65-70.
- [13] Walsh J E, Jasperson W H, Ross B. Influences of snow cover and soil moisture on monthly air temperature[J]. Monthly Weather Review, 1985, 113 (5): 756-768.
- [14] 韩书新, 苏晓蕾, 石慕真, 等. 黑龙江省粮食主产区雪水当量变化对土壤墒情的影响[J]. 东北农业大学学报, 2024, 55 (7): 60-70.
Han Shuxin, Su Xiaolei, Shi Muzhen, et al. Analysis of impact of changes in snowwater equivalent on soil moisture in main grain producing areas of Heilongjiang Province[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 55 (7): 60-70.
- [15] Liang S, Li X F, Zheng X M, et al. Effects of winter snow cover on spring soil moisture based on remote sensing data product over farmland in Northeast China[J]. Remote Sensing, 2020, 12 (17): 2716.
- [16] 蒋玲梅, 崔慧珍, 王功雪, 等. 积雪、土壤冻融与土壤水分遥感监测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35 (6): 1237-1262.
Jiang Lingmei, Cui Huizhen, Wang Gongxue, et al. Progress on remote sensing of snow, surface soil frozen/thaw state and soil moisture[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35 (6): 1237-1262.
- [17] 王子龙, 柳春先, 姜秋香, 等. 基于 COUPMODEL 的松嫩平原黑土区土壤水热过程模拟[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50 (9): 50-58.
Wang Zilong, Liu Chunxian, Jiang Qiuxiang, et al. Simulation of soil water-heat process in black soil region of Songnen Plain based on COUPMODEL[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50 (9): 50-58.
- [18] 梁文林. 积雪覆盖变化对东北春旱的缓解作用评估: 以松嫩平原玉米种植区为例[J]. 农业灾害研究, 2025, 15 (4): 326-328.
Liang Wenlin. Evaluation on the mitigation effect of snow cover change on spring drought in Northeast China: a case study of maize planting area in the Songnen Plain[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2025, 15 (4): 326-328.
- [19] Gray D M, Toth B, Zhao L, et al. Estimating areal snowmelt infiltration into frozen soils[J]. Hydrological Processes, 2001, 15 (16): 3095-3111.
- [20] 梁爽, 杨国东, 李晓峰, 等. 基于 SN THERM 雪热力模型的东北地区季节冻土温度模拟[J]. 冰川冻土, 2018, 40 (2): 335-345.
Liang Shuang, Yang Guodong, LI Xiaofeng, et al. Simulation of seasonally frozen soil temperature based on the Snow Thermal Model (SN THERM) in Northeast China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40 (2): 335-345.
- [21] 陈秀雪. 东北典型农田区积雪对土壤的水热效应研究[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学 (中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2023.
Chen Xiuxue. The impact of snowpack on soil hydrothermal in typical cropland regions of Northeast China[D]. Harbin: Vniversity of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences), 2023.
- [22] Xiong T, Du S H, Zhang X Y, et al. An increasing delay in vegetation spring phenology over northern snow-covered landmass driven by temperature and snowmelt[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2025, 361: 110310.
- [23] Douville H. Relative contribution of soil moisture and snow mass to seasonal climate predictability: a pilot study[J]. Climate Dynamics, 2010, 34 (6): 797-818.
- [24] Aragon C M, Hill D F. Changing snow water storage in natural snow reservoirs[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2024, 28 (4): 781-800.
- [25] Girons Lopez M, Vis M J P, Jenicek M, et al. Assessing the degree of detail of temperature-based snow routines for runoff modelling in mountainous areas in Central Europe[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24 (9): 4441-4461.
- [26] 张富国. 松嫩平原春玉米适应气候变化的优化播期及其产量效应评估[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2025.
Zhang Fuguo. Optimal sowing date and yield effect evaluation of spring maize adaptation to climate change in Songnen Plain [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2025.

- [27] 康龙, 吴克宁, 冯喆, 等. 黑土区主要粮食作物适生区模拟及种植结构优化潜力评估[J]. 资源科学, 2025, 47 (12): 2740-2754.
- Kang Long, Wu Kening, Feng Zhe, et al. Simulation of suitable areas for major grain crops in the black soil region of Northeast China and potential assessment of optimizing planting structure[J]. Resources Science, 2025, 47 (12): 2740-2754.
- [28] He Z H, Shook K, Spence C, et al. Modelling the regional sensitivity of snowmelt, soil moisture and streamflow generation to climate over the Canadian Prairies using a basin classification approach[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2023, 27 (19): 3525-3546.
- [29] Zhao L T, Gray D M. Estimating snowmelt infiltration into frozen soils[J]. Hydrological processes, 1999, 13 (12/13): 1827-1842.
- [30] Meng F H, Luo M, Sa C L, et al. Quantitative assessment of the effects of climate, vegetation, soil and groundwater on soil moisture spatiotemporal variability in the Mongolian Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2022, 809: 152198.
- [31] 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.
- [32] Yang J W, Jiang L M, Pan J M, et al. Comparison of machine learning-based snow depth estimates and development of a new operational retrieval algorithm over China[J]. Remote Sensing, 2022, 14 (12): 2800.
- [33] Kouki K, Luoju K, Riihelä A. Evaluation of snow cover properties in ERA5 and ERA5-Land with several satellite-based datasets in the Northern Hemisphere in spring 1982—2018[J]. The Cryosphere, 2023, 17 (12): 5007-5026.
- [34] Lal P, Singh G, Das N N, et al. Assessment of ERA5-land volumetric soil water layer product using in situ and SMAP soil moisture observations[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 2508305.
- [35] Ling X L, Huang Y, Guo W D, et al. Comprehensive evaluation of satellite-based and reanalysis soil moisture products using in situ observations over China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25 (7): 4209-4229.

Study on the Impact of Snowmelt Changes on Soil Moisture in Plain Areas of Heilongjiang Province Based on Google Earth Engine

ZHU Long, FENG Xiaonan, WU Lili, WANG Fengwen, NIU Guobao, GU Chengsi

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: To reveal the recharge effects of snowmelt on soil moisture at different depths in plain regions of Heilongjiang Province, this study utilized long-term ERA5-Land data from 1960 to 2024 on the Google Earth Engine platform, comparing and analyzing the spatiotemporal evolution characteristics of snow water equivalent (SWE) and soil moisture in the Sanjiang Plain and Songnen Plain. By integrating Mann-Kendall tests, Pearson correlation analysis, multiple linear regression, and random forest models, we examined the driving mechanisms of various meteorological factors on soil moisture. Results show that both SWE and soil moisture in the Sanjiang and Songnen Plains exhibited significant declining trends from 1960 to 2024. Pearson correlation analysis indicated a statistically significant positive correlation between SWE and deep soil moisture in the Sanjiang Plain ($r=0.55$, $p<0.01$), whereas the correlation was relatively weaker in the Songnen Plain ($r=0.42$, $p<0.01$). Both multiple linear regression and random forest models consistently demonstrated that the contribution of snowmelt to soil moisture increases significantly with increasing soil depth. In the variation of deep soil moisture, snow water equivalent is the most critical driving factor, with its importance far exceeding that of precipitation and temperature. The random forest model demonstrated higher simulation accuracy across all soil layers compared to linear regression. The study confirms the key role of winter snowmelt in replenishing springtime deep soil moisture, providing scientific support for the protection of Northeast China's black soil and drought monitoring.

Keywords: Google Earth Engine; snow water equivalent; soil moisture; driving mechanism; drought monitoring

(责任编辑 陈新颖)