doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.034

寒区春季融雪期表层土壤湿度变化与影响因素分析

王子龙　林百健　姜秋香　付　强　陈伟杰　孙　健
(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探究寒区春季融雪期表层土壤湿度时空变化及其影响因素,以松嫩平原黑土区为研究区,利用遥感和GLDAS模拟同化数据集,以温湿指数作为辅助指标,通过一元线性回归、相关分析、滑动平均及相对贡献率法,分析了融雪期表层土壤湿度时空变化特征,揭示了表层土壤湿度变化的具体驱动因素。结果表明:32 年来,融雪前期表层土壤湿度空间分布均呈减小趋势,融雪后期则呈南增、北减趋势;整体而言,融雪前期表层土壤湿度主要受积雪影响,后期主要与降雨及总降水变化密切相关,只有在积雪和降雨较少的地区,温度的蒸发作用才会相对明显;融雪前期表层土壤湿度多年变化主要由温度变化趋势驱动,积雪多年变化趋势对土壤湿度变化起到一种限制作用,降雨和总降水变化趋势决定了融雪后期表层土壤湿度的变化方向;从相对贡献率分析可知,融雪前期温度的升高和降雪的减少将导致表层土壤湿度的降低趋势放大一倍,但融雪后期降雨变化趋势的积极作用在一定程度上会影响春播前期土壤湿度暖干化的反馈过程,从而对陆气间水分交换产生积极影响。

关键词: 土壤湿度; 影响因素; 时空变化; 变化方向; 暖干化
中图分类号: S152.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)11-0301-11

Analysis of Surface Soil Moisture Changes and Influencing Factors during Spring Snowmelt in Cold Regions

WANG Zilong　LIN Baijian　JIANG Qiuxiang　FU Qiang　CHEN Weijie　SUN Jian
(*School of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In order to explore the temporal and spatial variation of surface soil moisture and its influencing factors during the spring snowmelt period in cold regions, the black soil region of Songnen Plain was taken as the research area, remote sensing and GLDAS were used to simulate the assimilation dataset, and the temperature and humidity indexes were used as an auxiliary index to pass the linear regression. Correlation analysis, sliding average and relative contribution rate method were used to analyze the temporal and spatial variation characteristics of surface soil moisture during the snowmelt period, and the specific driving factors of surface soil moisture change was revealed. The results showed that the spatial distribution of soil moisture in the surface of the snowmelt was decreasing in the early stage of snowmelt, and the southward increasing and northward decreasing trend was in the late stage of snowmelt in the past 32 years. On the whole, the surface soil moisture in the early stage of snowmelt was mainly affected by snow, and the latter was mainly related to rainfall and total precipitation changes, the evaporation of temperature in areas with less snow and less rainfall would be obvious; the change of surface soil moisture in the early stage was mainly driven by the trend of temperature change. The trend of years of snow accumulation had a limiting effect on soil moisture change. The trend of rainfall and total precipitation determined the change direction of surface soil moisture in the late stage of snowmelt; from the quantitative contribution results, the change of temperature and snow in the early stage of snowmelt caused the surface soil moisture to be more than doubled, but the positive effect of rainfall trend in the late snowmelt would affect the feedback process of soil moisture warming and drying in the early stage of spring snowing, which would have a positive impact on the water exchange between land and air.

Key words: soil moisture; influencing factors; time and space change; direction of change; warm drying

收稿日期: 2019-06-25　修回日期: 2019-08-29
基金项目: 国家自然科学基金项目(51579045)和黑龙江省自然科学基金项目(YQ2019E004)
作者简介: 王子龙(1982—),男,教授,博士,主要从事寒区农业水土资源高效利用研究,E-mail: wangzilong@neau.edu.cn
通信作者: 姜秋香(1982—),女,副教授,博士,主要从事寒区水土资源高效利用和管理研究,E-mail: jiangqiuxiang2017@163.com

0 引言

土壤湿度是土壤旱涝评价的直观指标,在控制陆气间水热平衡中起着重要作用[1-2]。土壤是水热循环的关键纽带,其湿度主要通过辐射通量、潜热通量和感热通量等方式的变化而变化,从而影响云和降水的时空分布特征[3-5]。温度和降水作为改变土壤湿度的主控因子,其时空分布存在一定差异性,导致土壤湿度变化的空间异质性较高[6-7]。尤其在季节性积雪区,温度回升、积雪融化、降雨均会对春季表层土壤湿度产生较大影响。因此,探究温度和降水对春季表层土壤湿度的影响具有重要意义。

在季节性积雪区,由于多年来全球变暖及积雪的显著减少,导致春季土壤水热状况发生较大变化[8-9]。梳理相关文献发现,春季土壤湿度研究主要集中于分布特征及影响因素方面。MCNAMARA 等[10]基于实测数据和模型模拟分析了土壤湿度的变化特征,认为春季后期土壤湿度主要由降雨、融雪和蒸发之间的水热平衡作用驱动;CLARK 等[11]根据美国西部春季土壤湿度和土壤温度在区域上的演变特征,证实了积雪在年际间空间位置上的分布不均,将导致土壤湿度、土壤温度和相关生物产生较大差异;SHINODA[12]利用雪深数据及其与土壤湿度间的相关程度,发现年际间季节性积雪累积量越大,则春季土壤湿度越高,反之则低;STEWART 等[13]和 HAMLET 等[14]研究了美国西部内陆地区春季土壤水分及地表径流情况,发现引起土壤水分和径流变化的主控因素为春季降雨而非积雪,积雪的作用相对微弱;LOPEZMORENO 等[15]发现,积雪累积和消融过程中,由于森林地区树木截取、遮荫及短波辐射的限制,导致局部土壤湿度空间分布存在差异;刘绪军等[16]通过试验发现,土壤在冻融交替时期,大气环境与土壤水热之间存在强烈的耦合关系,大气环境变化必然导致土壤水分、结构发生变化;DOUVILLE 等[17]利用 Meteo-France GCM 模型研究了融雪作用,结果表明,春季融雪对夏季土壤湿度影响较大,而对气温影响相对较弱。在量化区域表层土壤湿度变化过程中,需要表层土壤湿度的长期数据资料,由于传统手段获取土壤湿度数据主要通过地面观测,而在非植物生长期数据缺失较为严重,且时空分布存在不连续现象[18-19]。因此,长时间序列的春季表层土壤湿度及其影响因素研究数据主要源于遥感输出、模型模拟和数据同化等,这为研究土壤湿度与影响因素间的相互关系提供了有力保障。目前,从区域视角和时序演变维度开展春季融雪时期表层土壤湿度变化及其具体驱动因素的研究相对较少,而这方面研究对于深入了解春季土壤湿度时空变化规律具有实际意义。

鉴于此,为研究春季融雪期表层土壤湿度变化及其具体驱动因素,本文以多年遥感和模拟数据为基本资料,针对松嫩平原黑土区春季融雪期表层土壤湿度变化特征,通过定性和定量分析的方法,揭示积雪、降雨、温度因素对表层土壤湿度变化的影响,以期为春季表层土壤水资源循环效应提供参考,为农作物规划、合理安排播种及灌溉时间提供科学依据。

1 数据来源及方法

1.1 研究区概况

松嫩平原黑土区位于黑龙江省,该区域地理位置为 44°~52°N、124°~130°E,共有 23 个县市区,是我国重要粮食生产基地,如图 1 所示。受大陆性季风气候影响,该地区属于典型的半湿润半干旱地区,且冬季寒冷漫长,夏季湿热多雨。该区域是我国典型的三大季节性积雪区之一,冬季积雪累积期主要集中在 12 月至次年 2 月,此时期整个研究区均有积雪覆盖,历年 2 月积雪覆盖厚度达到最大,多年来最大积雪覆盖厚度均值达 17.9 cm,且 3 月积雪开始融化,至 4 月中旬融化完全,因此,定义 3 月为融雪前期,4 月为融雪后期,农作物播种期在历年 5 月。受地理位置的影响,其浅层土壤主要以黑土和黑钙土为主,历年来最低气温均出现在 1 月,最高气温出

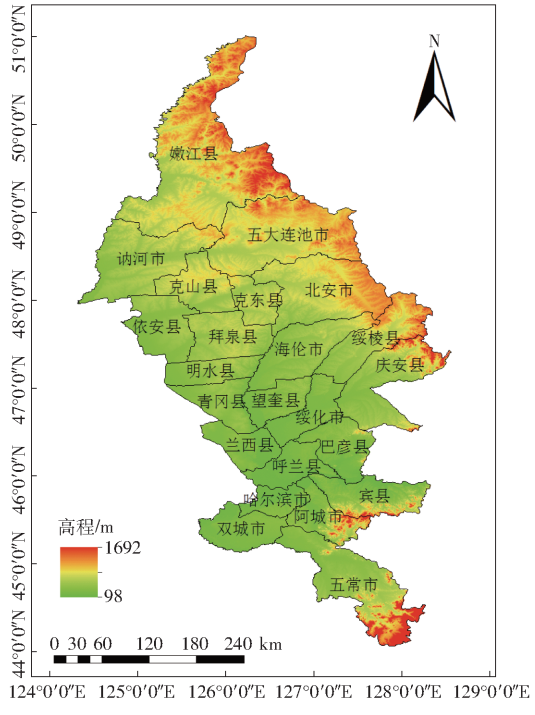


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

现在 8 月，年平均气温在 2.5 ~ 4.7℃之间变化，年降水量为 529 mm，年蒸发量为 1 326 mm，生态植被对气候变化较为敏感。

1.2　数据

1.2.1　积雪数据

本文使用的积雪数据集来自中国西部环境与生态科学数据中心（http://west dc. westgis. ac. cn/）提供的长时间序列雪深数据集，此数据集原始数据源于美国冰雪数据中心（https://nsidc. org/）提供的逐日被动微波遥感数据，由我国学者结合中国实际情况在 Chang 算法上进行雪深反演得到。其空间分辨率为 0.25° × 0.25°，数据质量可靠，且使用广泛[20-22]。本文采用的数据时间范围为 1979—2010 年，鉴于数据原始格式为 ASCII 码，需要采用 ArcGIS 10.2 软件进行处理，并统一转换为 Albers 投影，将日雪深数据集合成最大雪深数据，并提取松嫩平原黑土区雪深数据集。

1.2.2　GLDAS 数据

GLDAS 数据是由美国航空航天局（NASA）戈达德空间飞行中心（GSFC）、美国海洋和大气局（NOAA）国家环境预报中心（NCEP）联合发布。充分将卫星遥感数据和地面实测数据相结合，并采用最优陆面模式通过最先进的同化技术，从而生成陆面气温、降雨量及土壤湿度等通量数据[23]。本文采用的气温、降雨量、土壤湿度数据来自于 GLDAS-2 与 NOAH 模型结合所生成，选取时间尺度范围为 1979—2010 年，其空间分辨率为 0.25° × 0.25°。其中降雨量单位为 kg/(m^2 · s)，转换为月降水量（mm）；气温单位换算为℃，由于表层土壤湿度对气候的响应较为敏感，且对前期气候因素记忆性较短[24]，故文中选取表层土壤湿度 0 ~ 10 cm 数据集，并将土壤湿度单位换算为 m^3/m^3。目前，已从多方面验证 GLDAS 数据集，证明其质量可靠性较高，在气候、水文等领域得到了广泛的应用[6,25-31]。

1.3　研究方法

在数据处理分析过程中，使用的方法主要包括一元线性回归分析、相关分析、滑动平均法、F 检验法及相对贡献率法。具体方法介绍如下：

（1）为探究寒区春季融雪期表层土壤湿度、积雪深度、温度、降雨量及总降水量的时空变化情况，基于一元线性回归方法，分析研究对象在 1979—2010 年间长序列变化趋势，其线性趋势采用最小二乘法拟合，计算公式为

$$T_{rend} = \frac{n\sum_{i=1}^{n} iM_i - \sum_{i=1}^{n} i\sum_{i=1}^{n} M_i}{n\sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{1}$$

式中　T_{rend}——趋势斜率

n——研究时段年数

i——年序号

M_i——第 i 年基础数据值

（2）针对表层土壤湿度与各影响因子间的相关性特征，通过逐像元的空间分析方法，计算不同时期各因子与土壤湿度的相关系数，从而辨析春季融雪期表层土壤湿度与不同时期降雨量、积雪量、气温及总降水量间的响应关系，其计算公式为

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{2}$$

式中　ρ_{xy}——x 与 y 变量间的相关系数

x_i——第 i 年不同时期的土壤湿度

y_i——第 i 年不同时期的降雨量、积雪深度、气温和总降水量

$\bar{x}$——多年不同时期土壤湿度均值

$\bar{y}$——多年不同时期的降雨量、积雪深度、气温和总降水量均值

（3）在计算春季总降水量时，需要将雪深数据转换为雪水当量数据[32]，其转换公式为

$$\theta_{SWE} = \int_0^d \rho dz \tag{3}$$

式中　θ_{SWE}——雪水当量

ρ——积雪密度　　d——积雪深度

z——积雪深度变化量

（4）为定量研究多年各时期的降雨量、积雪深度、温度及总降水量对春季表层土壤湿度的贡献量，通过二元线性回归方法，对不同时期的积雪场、降雨场、降水场及温度场进行回归，这一理论在分离海表温度内外部变化上应用较为广泛[33-34]，其回归方程为

$$S^* = aP_i + bT_i + C \tag{4}$$

式中　S^*——土壤湿度回归场

P_i——各时段积雪、降雨、降水的时间序列

T_i——各时段温度的时间序列

a、b——回归系数

C——常数项

根据式（4）可知，积雪深度、降雨量、总降水量对春季融雪期表层土壤湿度变化趋势的贡献率计算式为

$$P_{con} = \frac{a\Delta P_i}{\Delta S^*} \times 100\% \tag{5}$$

式中　ΔS^*、ΔP_i——第 1 个 10 年与最后 1 个 10 年平均 S^* 和总降水量的变化量

同理可知,气温对春季土壤湿度变化趋势的贡献率计算式为

$$T_{con}=\frac{b\Delta T_i}{\Delta S^*}\times 100\% \tag{6}$$

式中 ΔT_i——第 1 个 10 年与最后 1 个 10 年平均温度的变化量

2 结果与分析

2.1 土壤湿度与影响因子时空变化特征

2.1.1 时间变化特征

近百年来,由于土壤湿度和大气间形成的反馈机制严重影响了能量和水分的交换,导致全球变暖和局部土壤干燥更加明显[6]。自 20 世纪 50 年代以来,东北地区春季气温大幅上升和局部降水减少导致表层土壤湿度发生较大变化[35]。图 2(图中蓝线为距平时间序列,红线为 3 年滑动平均值,K 是计算的趋势值)为 1979—2010 年松嫩平原黑土区春季融雪期表层土壤湿度及影响因子的时间变化特征曲线。由图 2a、2b 可知,30 多年来,松嫩平原黑土区在融雪前、后期温度变化均呈现明显增加趋势,其中 1979—1995 年间增加趋势较为迅速,而自 1995 年后增温现象趋于平缓;由图 2c 可知,就整个融雪期平均温度变化趋势而言,自 1985 年起温度开始迅速提升,且整体变化一直呈现增加趋势,但整个融雪期平均升温速率明显高于其融雪前、后期温度变化速率。由于地理位置所致,研究区融雪后期会伴随降雨现象,由图 2f 可知,融雪后期降雨量在长时间尺度上减小速率为 0.18 mm/(10 a),但其整体波动幅度较大,仅在 2000 年以后表现相对平稳;融雪作为影响春季表层土壤湿度的重要因子,由图 2g 可知,其长期变化趋势整体表现为下降趋势,多年降低趋势速率达 0.53 cm/(10 a),但积雪深度在 2010 年发生突变,突变后积雪深度距平值达 11.34 cm。较降雨量和降雪量多年变化特征相比,由图 2h 可知,多年总降水量变化呈降低趋势,其多年变化速率为 −0.61 mm/(10 a),其中 1985—1997 年间下降最为明显,此后其整体变化呈现增加趋势,但由于积雪在 2010 年出现极大雪深现象,导致总降水量在此年度较大。鉴于气温和降水的变化必然将导致土壤湿度发生变动,由图 2d 可知,在松嫩平原黑土区,多年融雪前期表层土壤湿度以每 10 年 0.004 m^3/m^3 的速率下降,且显著超过了 95% 的置信水平;如图 2e 所示,由于融雪后期降雨的影响,导致多年来融雪后期表层土壤湿度年代际波动特征较融雪前期存在一定差异性,主要表现为 1979—1987 年融雪后期表层土壤湿度快速向干旱化方向过渡,在 1987—1997 年间融雪后期表层土壤湿度保持相对稳定,变幅较小,而在 1997 年以后朝着湿润化方向发展。

2.1.2 空间变化特征

图 3(图中黑点处为变化趋势通过 95% 显著性

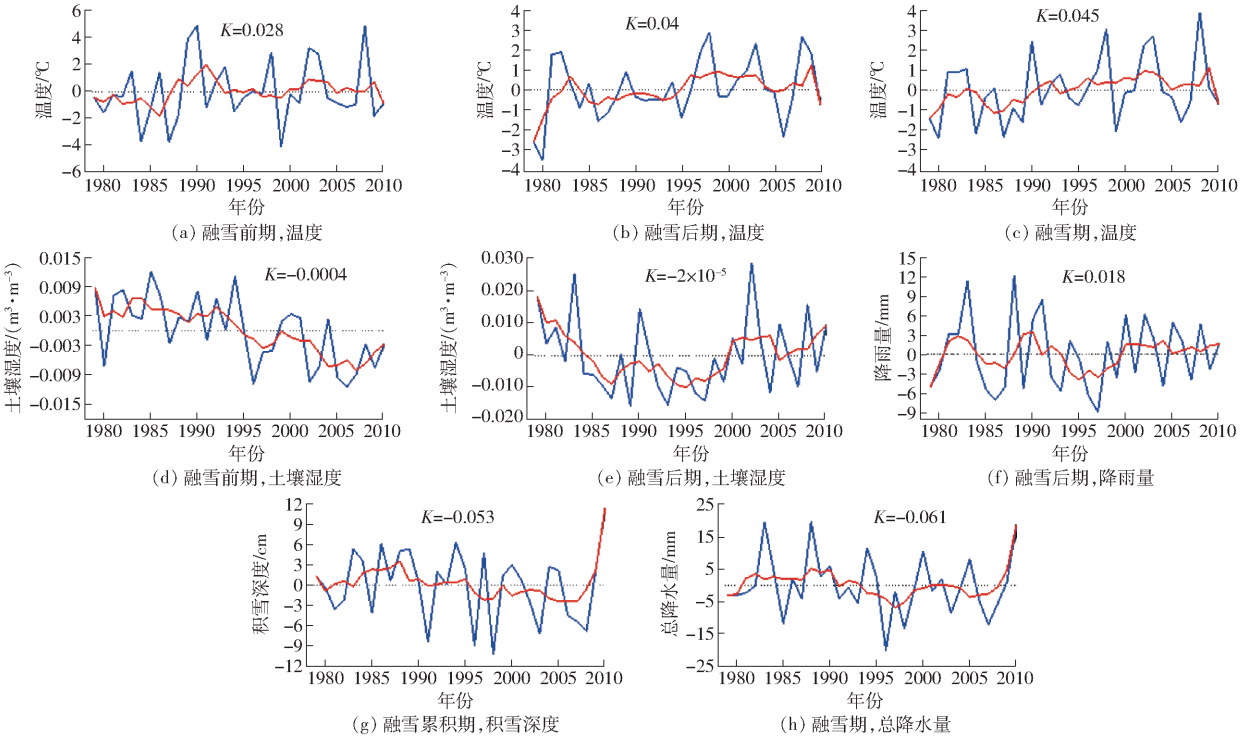


图 2 1979—2010 年松嫩平原黑土区不同时期各影响因子和土壤湿度异常变化曲线

Fig. 2 Anomalous changes of various influencing factors and soil moisture in different periods of black soil region of Songnen Plain from 1979 to 2010

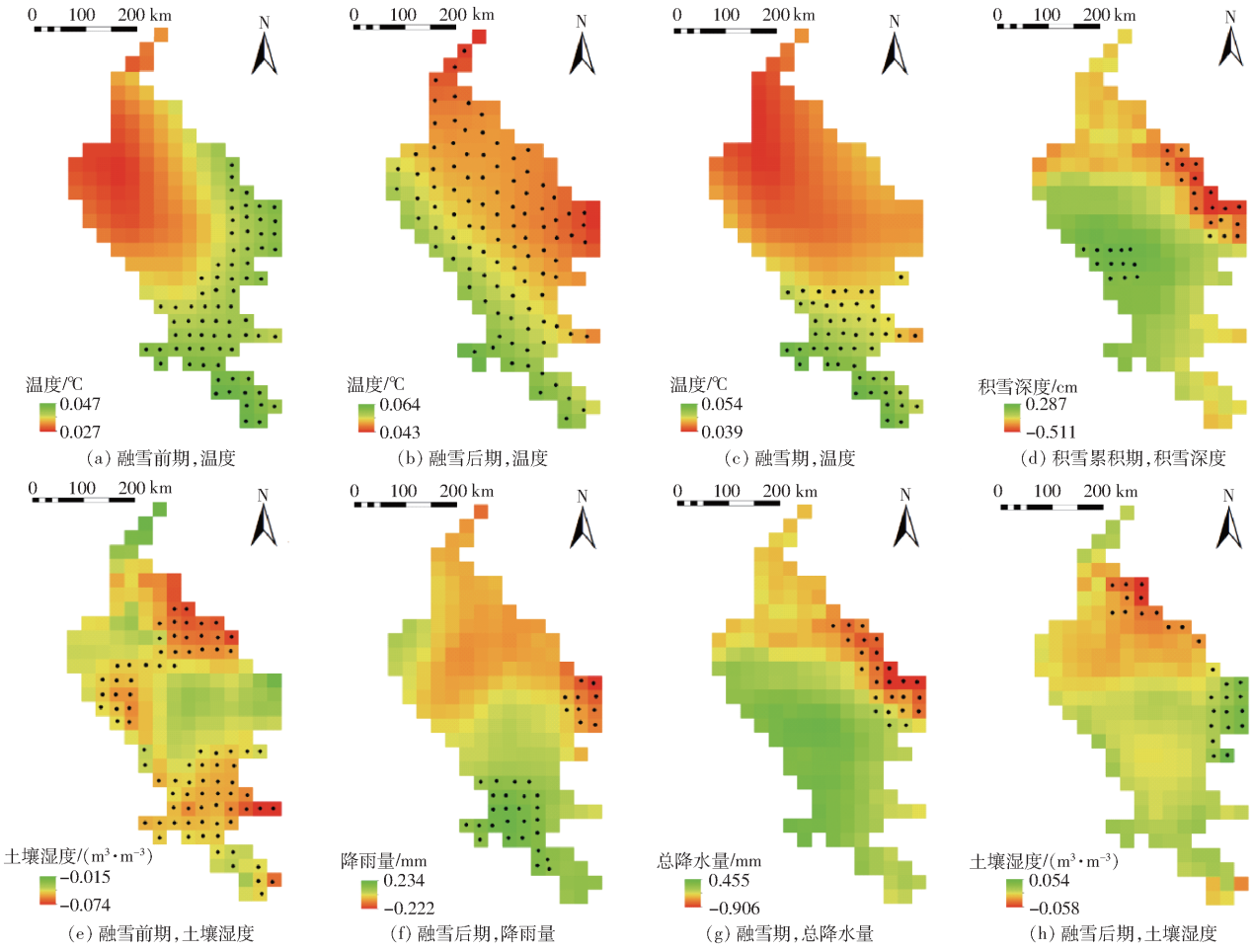


图 3　1979—2010 年松嫩平原黑土区不同时期各影响因子和土壤湿度空间变化趋势

Fig. 3　Spatial variation trends of various influencing factors and soil moisture in different periods of black soil region of Songnen Plain from 1979 to 2010

检验的地区）为 32 年来融雪各时期表层土壤湿度及影响因子的空间分布特征。由图 3a 可知，融雪前期多年温度升高了 0.8 ~ 1.5℃，且南部的升温速率明显高于北部，但仅东南少部分地区趋势变化较为显著（$P < 0.05$）；由图 3b 可知，融雪后期温度的升温速率约为前期升温速率的两倍，而其空间趋势分布特征由西南向西北方向递减；由图 3c 可知，多年融雪期平均温度整体呈增加趋势，且增温幅度由北向南依次递增，尤其在绥化市以南地区增温最为显著；由图 3d 可知，松嫩平原黑土区多年积雪深度变化呈现南增北减趋势，其减小趋势表现最为明显地区主要在北安市和五大连池市等地；由图 3e 可知，多年融雪前期表层土壤湿度在整个研究区均呈现下降趋势，但其降低程度存在一定差异，如五大连池市下降趋势最为明显（$P < 0.05$），而在依安、呼兰县及其以南地区在均值 -0.000 4 m^3/m^3 左右波动，且较为显著，其余地区下降幅度相对较低。至融雪后期残留的积雪完全融化，由图 3f 可知，多年融雪后期降雨量呈南增北减的趋势，尤其在呼兰县以南地区增加幅度相对较高；由图 3g 可知，融雪期总降水量的增加趋势主要分布在研究区西南一带，其像元统计量占研究区像元总数的 48.2%，其余地区呈减小趋势，极少部分地区通过了显著性检验；由图 3h 可知，就融雪后期表层土壤湿度而言，由于其主要受温度、降雨和融雪的影响，故研究区大部分地区变化趋势与积雪深度（图 3d）、降雨量（图 3f）、总降水量（图 3g）均存在一定的相似处，主要表现为南部地区均高于北部地区，但少数地区也存在一定的差异，如在庆安县部分地区土壤湿度也会表现为增加趋势。综上所述，松嫩平原黑土区融雪前期表层土壤湿度表现为不同程度的降低趋势，而融雪后期表层土壤湿度则呈现南增北减趋势，由此可知，融雪前期表层土壤湿度变化趋势与温度变化有关，而融雪后期表层土壤湿度变化趋势与降水有关，但融雪前期降雪和后期温度可能也在一定程度上影响土壤湿度，因此需要更进一步分析其具体影响特征。

2.2　表层土壤湿度与各因子间相关关系分析

为探索春季融雪期表层土壤湿度与各影响因子间的响应关系，基于 1979—2010 年各融雪时期表层土壤湿度及影响因子数据，分析春季融雪时期表层

土壤湿度与各因子间的相关关系,结果如图 4 所示。由图 4a、4d 可知,多年来融雪前期表层土壤湿度与此时期温度的相关程度较弱,但其与多年积雪深度之间存在较好的相关性,即当冬季积雪深度偏高(或偏低)时,融雪前期表层土壤湿度增加(或减少);由图 4e 可知,融雪后期表层土壤湿度与冬季积雪深度不存在相关性,表明冬季积雪深度对春季融雪后期表层土壤湿度影响较低。综上可知,随着春季温度的不断升高,冬季积雪在融雪前期已基本融化,从而在融化前期补给表层土壤,而后期补给表层土壤水分含量相对较少,因此积雪已不再是影响融雪后期土壤湿度的主要因素,但对融雪后期土壤湿度影响还存在一定的不确定性。图 4b、4c 为融雪后期温度、降雨量与融雪后期表层土壤湿度的相关关系,其结果表明,融雪后期降雨量和此时期表层土壤湿度相关程度较高,而融雪后期温度与此时期表层土壤湿度相关程度较弱。由此可知,融雪后期降雨量是影响此时期表层土壤湿度的关键因素;就整个积雪融化期而言,进一步计算了融雪期总降水量与融雪后期表层土壤湿度的相关关系,由图 4f 可知,总降水量与融雪后期表层土壤湿度间存在一定的相关性。综上可知,融雪后期表层土壤湿度对融化期总降水量和融化后期降雨量的依赖性要强于温度,但年际内降水的积极作用可能会在一定程度上掩盖温度对表层土壤湿度的作用,主要由于降水和温度对表层土壤湿度影响存在一定的空间局限性。鉴于此,需进一步明确春季表层土壤湿度对降水和温度在空间上的具体响应关系。

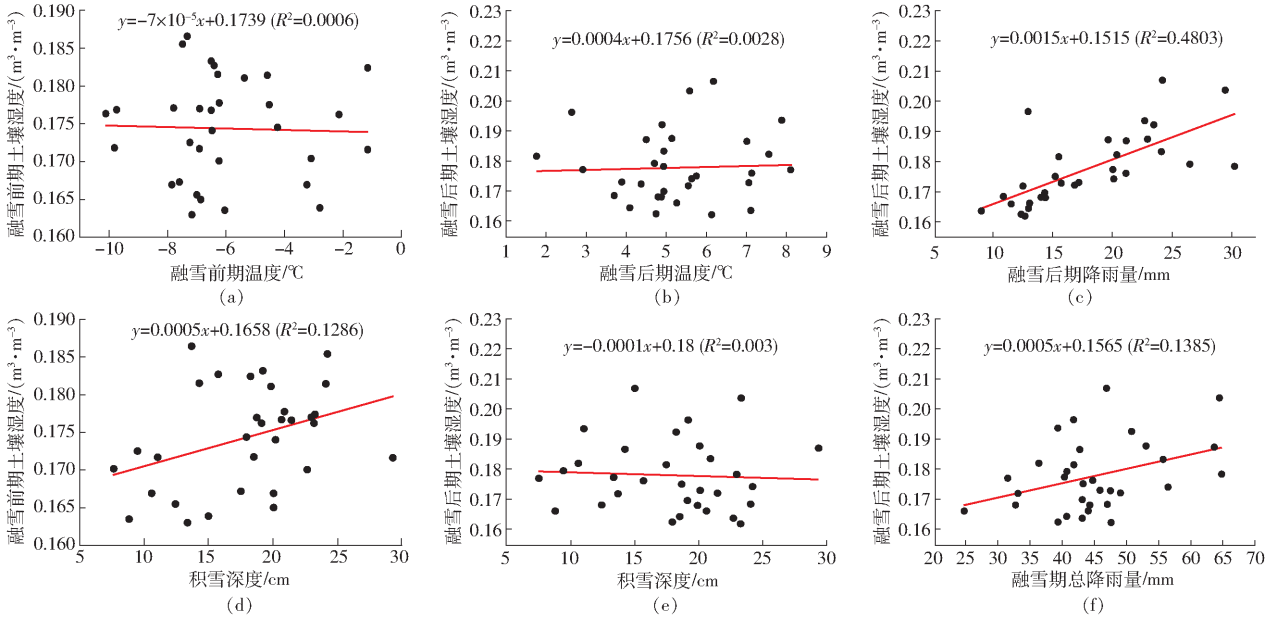


图 4 各影响因子与不同时期土壤湿度的相关关系

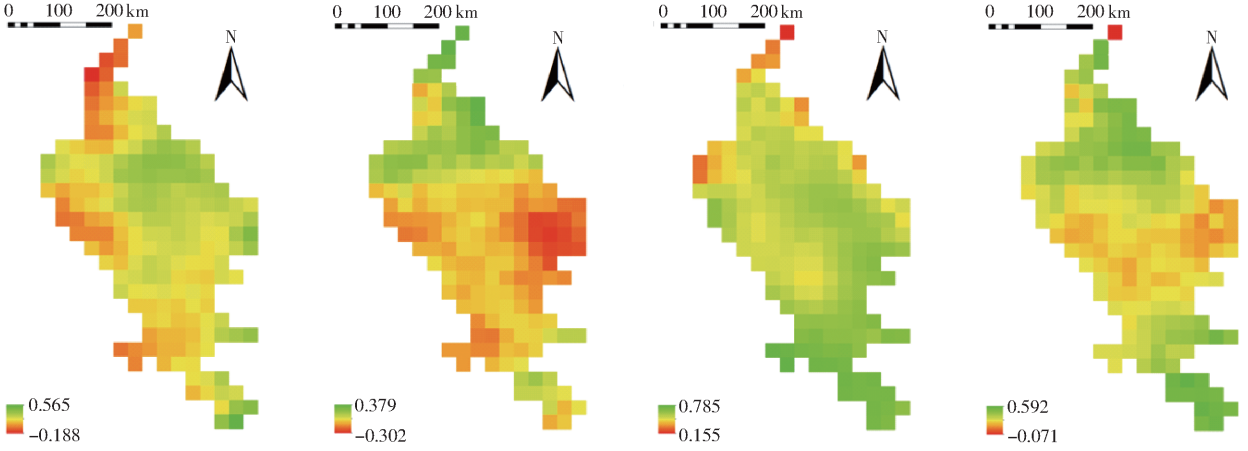
Fig. 4 Correlation between meteorological factors and soil moisture in different periods

2.3 表层土壤湿度与温湿指数间相关关系

由于表层土壤湿度的记忆性相对较短,对前期气候信息的存储能力有限,且表层土壤受外界因素影响较大[24],因此短时间尺度上温度和降水最能直观反映表层土壤湿度的变化情况。为了更好反映空间位置上表层土壤湿度对影响因子共同作用下的响应程度,引入温湿指数的概念,其主要通过降水量和温度的比值来描述,以此辨析春季融雪时期表层土壤湿度和积雪深度、温度、降雨量及总降水量同时作用下的响应关系。

松嫩平原黑土区春季融雪时期表层土壤湿度对不同温湿指数的相关关系如图 5 所示。图 5a 为融雪前期表层土壤湿度与温湿指数(积雪深度与融雪前期温度比值)间的相关关系,由图可知,除嫩江县、依安县等地区表现为负相关外,其余地区均呈正相关关系,且大部分地区均通过了 90% 的置信水平检验;图 5b 为融雪后期表层土壤湿度和温湿指数(积雪深度与融雪期平均温度比值)间的相关关系,结果显示,嫩江县及其周边地区表现为显著正相关关系,而其南部地区正相关关系较弱或呈显著负相关关系,尤其在绥棱县、庆安县等地负相关性较强。由此可知,鉴于影响因子时空变化的非均匀性,松嫩平原黑土区大部分地区融雪前期表层土壤湿度主要受积雪的影响,但在研究区北部由于积雪深度偏大且融化时间相对迟缓,导致部分地区呈现负相关现象;随着温度的不断升高,研究区残留积雪在融雪后期全部融化,故其北部表层土壤湿度表现为正相关现象,而研究区南部由于积雪的补给作用降低,从而温度的蒸发作用增强。由图 5c 可知,融雪后期表层土壤湿度与温湿指数(融雪后期降雨量与融雪后期

温度比值）呈正相关关系，且大部分地区相关程度较高，而相关系数在空间上表现为由北向南逐渐递增规律，这主要与融雪后期降雨呈南多北少的分布特征有关。图 5d 表示融雪后期表层土壤湿度与温湿指数（总降水量与平均温度比值）间相关关系，由图可知，在研究区南部和北部地区正相关系数较高，表明该地区对降水的作用较为明显，而在研究区中间地区相关现象不明显，其主要原因是由于在总降水少的部分地区，温度对表层土壤湿度的蒸发作用与降水对表层土壤湿度的补给作用相当，故两者之间的反向作用相互弱化了其对表层土壤湿度影响。综上所述，在季节性积雪区，积雪作为冬季主要的地表覆盖物会累积至次年春季，从而起到增加春季表层土壤湿度的作用，然而融雪水只是春季表层土壤水分的补给来源之一，在积雪作用减弱时期，降雨则是土壤湿度的重要补充，而温度控制表层土壤水分的蒸发过程，故温度作用一定程度上会缩小土壤湿润化进程。



(a) 融雪前期土壤湿度与积雪深度和融雪前期温度的比值　(b) 融雪后期土壤湿度与积雪深度和融雪期平均温度的比值　(c) 融雪后期土壤湿度与融雪后期降雨量和融雪后期温度的比值　(d) 融雪后期土壤湿度与总降水量和融雪期平均温度的比值

图 5　土壤湿度与不同时段温湿指数的响应关系

Fig. 5　Response of soil moisture to temperature and humidity index in different time periods

2.4　表层土壤湿度变化与影响因子间的响应规律

基于松嫩平原黑土区多年各影响因子变化特征，从而辨析春季表层土壤湿度的响应机制。图 6 为春季表层土壤湿度变化速率与影响因子间多年变化速率关系。如图 6a 所示，融雪前期土壤湿度的变化速率为积雪深度和温度两种因素诱导所致。当多年温度整体呈增加趋势时，融雪前期表层土壤湿度均呈减小趋势；由温度的变化方向可知，温度幅度增加越明显，则土壤湿度减小程度越大；而由积雪深度幅度变化方向可知，积雪深度幅度朝着增加趋势方向发展时，融雪前期表层土壤湿度减小程度逐渐减弱；当积雪深度减小速率和温度增加速率幅度均较大时，土壤湿度减小最为明显，但伴随着积雪深度速率的增加，土壤湿度减小速率相对降低。由此可知，多年温度变化速率决定了融雪前期表层土壤湿度的发展方向，但多年积雪深度的增加速率没有导致融雪前期土壤湿度向增加趋势方向发展，因此，只能说相应积雪深度的增加速率对土壤湿度减小起到了一个抑制作用。图 6b 为融雪后期表层土壤湿度变化速率与此时期温度、降雨量变化速率关系。由图可知，降雨作为影响融雪后期表层土壤湿度关键因子，主要起到了“控制器”的作用，其主要表现如下：当多年融雪后期降雨量速率大于 0 mm/a 时，土壤湿度呈现增加趋势，反之，除个别地区土壤湿度大于零外，大部分土壤湿度呈减小趋势，而小部分地区土壤湿度大于零可能由于融雪后期残留的积雪融化所致；温度越高，那么土壤水分蒸发作用越明显，故沿温度速率增加的方向可知，土壤湿度呈微弱减小趋势，但影响关系存在不明显现象。图 6c 表示融雪后期土壤湿度与多年积雪深度及融雪期平均温度的速率变化关系，由图可知，融雪后期表层土壤湿度变化趋势在平均温度和积雪深度的作用下没有明显的变化规律。图 6d 为融雪后期表层土壤湿度与多年冬春季节累计总降水量及平均温度的关系，由图可知，融雪后期土壤湿度的变化速率由总降水量变化速率决定，而温度的速率变化表现不明显，其主要表现在当总降水量速率增加时，融雪后期表层土壤湿度呈现增加趋势，从而也进一步印证了降水是控制融雪后期表层土壤湿度的主要因素，控制了土壤湿度的变化方向，总降水量速率变化会在一定程度上掩盖温度作用的影响。

2.5　表层土壤湿度变化与影响因子间贡献率计算

在季节性积雪区，冬季最大积雪深度、春季温度及降雨量的时空演变会对表层土壤湿度变化产生一定的影响[10]，因此，针对融雪期土壤湿度变化趋势及其与影响因子间响应关系，基于定量化方法计算

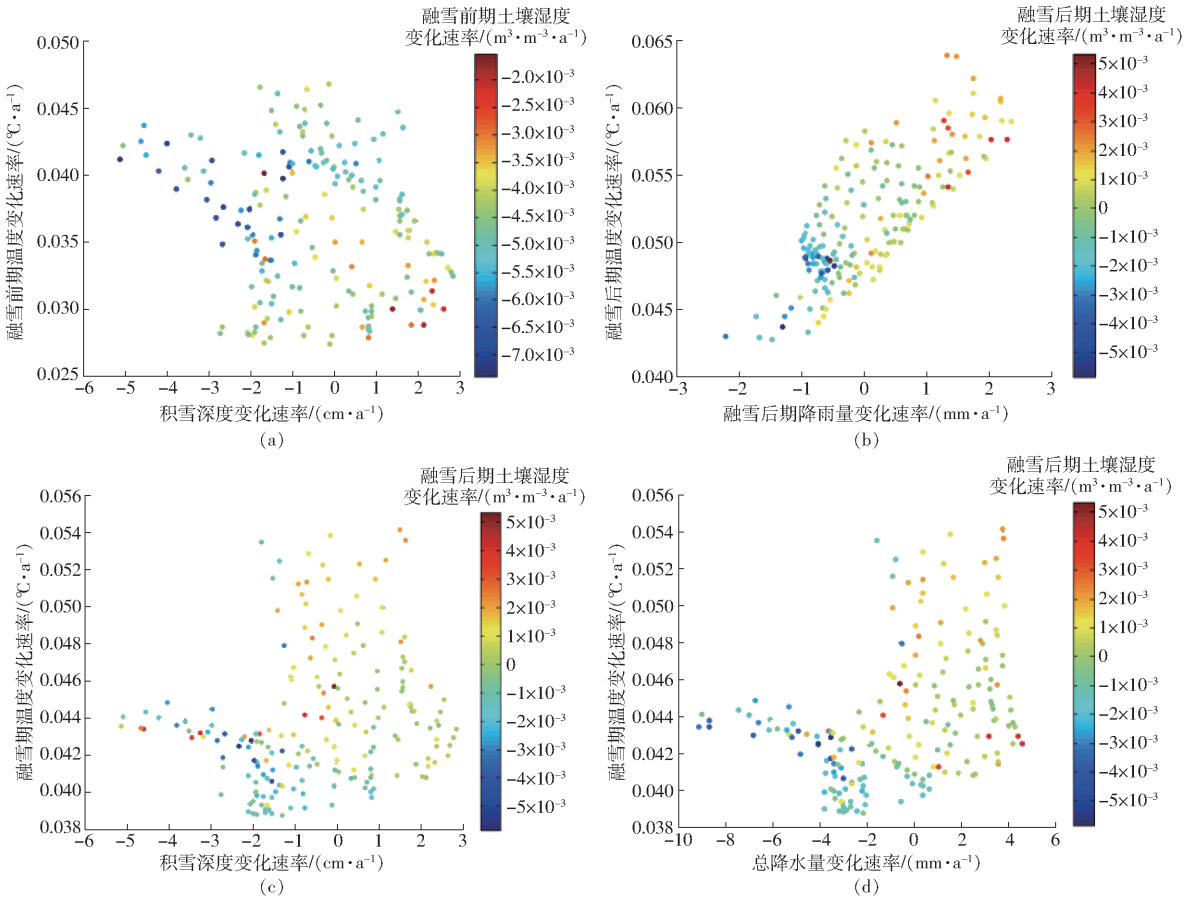


图 6 土壤湿度变化速率与积雪深度、降雨量、总降水量及温度变化速率关系

Fig. 6 Relationships between soil moisture change and snow, rainfall, total precipitation and temperature trends

了影响融雪期表层土壤湿度因素的贡献率,进而明确了长时间序列上影响因子变化对土壤湿度的具体驱动因素。由于本文计算的贡献率为相对贡献率,故其相对贡献率之和为 100%,其结果如图 7 所示。由图 7 可知,各影响因子对表层土壤湿度贡献率存在一定的空间异质性。图 7a、7d 为融雪前期表层土壤湿度变化与此时期温度及积雪深度贡献率空间分布图,总体来看,积雪深度变化趋势对融雪前期土壤湿度的平均相对贡献率为 39.4%,而温度变化趋势的平均相对贡献率 60.6%,从而进一步说明融雪前期温度的升高作用强于降雪减少所引起的表层土壤湿度变化,同时温度的升高和降雪的减少作用将导致融雪前期土壤湿度的降低趋势放大了 1 倍。图 7b、7e 为融雪后期温度、降雨量对融雪后期土壤湿度变化趋势的贡献率,研究区南部地区降雨的贡献率较高,而北部地区温度的贡献率较高。整体而言,融雪后期降雨对融雪后期表层土壤湿度的平均贡献率为 59.6%,融雪后期温度的平均贡献率为 40.4%,由此可知,降雨的贡献率明显强于温度的贡献率,再次证明降雨是影响融雪后期土壤湿度变化的主要因子。图 7c、7f 为融雪期平均温度及总降水量对春季融雪后期表层土壤湿度变化的贡献率,其中松嫩平原黑土区总降水量对土壤湿度的相对贡献率均值为 55.9%,平均温度的贡献率均值为 44.1%,结果表明,当降雪和降雨同时作用时,总降水量多年变化趋势作用依旧高于温度变化趋势作用,而这种变化趋势作用会在一定程度上影响春季融雪后期表层土壤湿度的干湿化进程。

3 讨论

在季节性积雪区,春季融雪期表层土壤湿度变化受多方面因素影响,而气温和降水是春季表层土壤湿度变化的主要因素[10],气候影响因子变化会在一定程度上制约局部地区春季表层土壤湿度时空分布特征。研究结果表明,融雪期表层土壤水分变化主要受融雪和降雨的影响[25],但由于多年来春季温度的变暖加剧了春季表层土壤水分蒸发程度[36],同时降水的变化也进一步影响着表层土壤水分含量[37],这导致中国东北地区春季土壤湿度整体呈降低趋势[38]。鉴于此,本文从定性和定量角度探索了融雪不同时期表层土壤湿度变化的具体驱动因素。

基于气候影响因子共同作用下,融雪前、后期表层土壤湿度变化各不相同,32 年来,融雪前期表层土壤湿度下降趋势最为明显,而融雪后期则呈先下

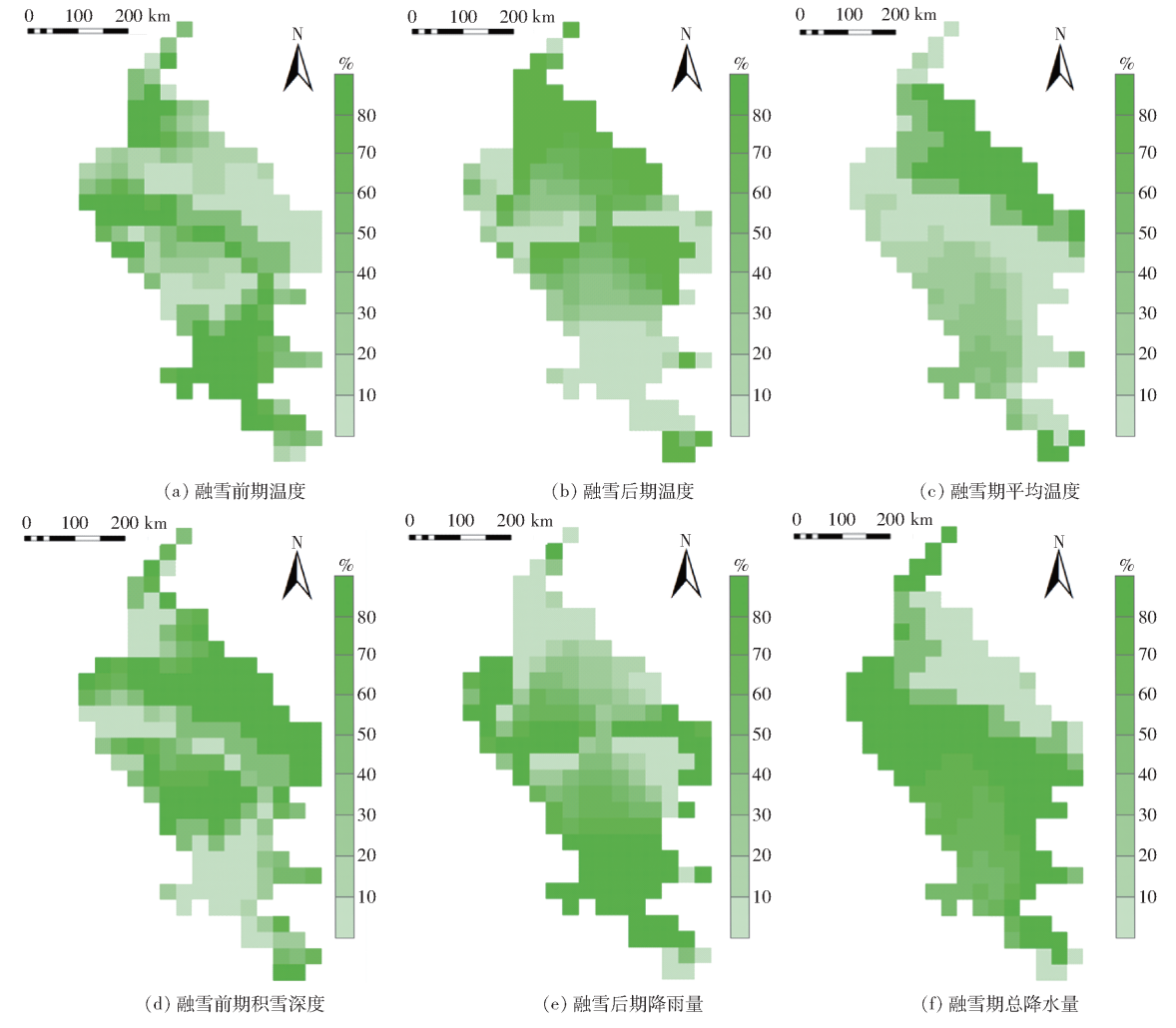


图 7　总降水量、积雪深度、降雨量、温度对不同时期土壤湿度的相对贡献率

Fig. 7　Relative contribution rates of precipitation, snow cover, rainfall and temperature to soil moisture in different periods

降后上升趋势。根据年际内融雪期表层土壤湿度和影响因子间的相关性结果可知，融雪前期表层土壤湿度对积雪深度具有较强的相关性，而后期相关程度较弱，由此判定，松嫩平原黑土区大部分积雪在融雪前期融化，融雪水与表层土壤湿度表现为正相关关系，但这种正相关关系会存在一定的时间限制，当超过季节性时间尺度限制时，其对表层土壤湿度的影响相对变弱，这与 AMBADAN 等[26]研究结果相似；融雪后期降雨量和总降水量与此时期表层土壤湿度相关性较强，而温度对融雪前后期相关性均较弱，通过温湿指数与表层土壤湿度在空间位置上相关关系发现，只有在积雪和降雨较少的地区，温度对土壤湿度的影响才会明显，由此可知，当降雨和融雪总量达到一定程度时，降水作用会掩盖温度的蒸发作用，从而导致播种前期表层土壤湿润。

在气候影响因子不可改变的背景下，正确认识融雪期表层土壤湿度变化规律及其具体影响因素显得尤为重要。通过定性分析和相对贡献率结果可知，多年春季融雪时期表层土壤水分变化趋势主要与温度、融雪和降雨变化趋势有关，但融雪前后期影响因素也存在一定差异性。融雪前期表层土壤湿度变化主要由温度变化速率驱动，而融雪后期则由降雨量和总降水量变化速率驱动。在半湿润半干旱地区，气温的上升趋势将导致土壤水分蒸发作用明显，从而使土壤湿度减小，由于土壤湿度减少，则土壤吸力增加，这将导致蒸散作用减弱，表层土壤显热和潜热发生变化，这又进一步加剧了升温过程，从而导致升温-蒸散-土壤湿度间形成一种暖干化的反馈过程[39-40]。但融雪后期降雨趋势变化作用可能会影响这种反馈过程，这对生态环境、春季播种及合理利用水资源产生积极影响。

本文在探讨春季表层土壤湿度对影响因子的响应因素时存在一些不足，由于微波遥感及数据同化模拟空间分辨率较低，每个像元所代表的区域尺度较大，且极个别像元存在一定的误差；在实际中土壤湿度会受到植被、地形、土壤性质等多种因素的影响；在探究温度、降雨量及总降水量变化趋势贡献率时是通过线性回归方法计算，而气候影响因子变化

较为复杂,只能从相对角度上作为一个参考变量进行比对。鉴于以上不足,对于响应因素方面可能存在一定的局限性。因此,需进一步使用多种遥感数据,综合考虑多因素共同影响的作用。在全球变暖的大背景下,有助于正确了解不同时空尺度上土壤水分及环境因子的响应特征,从而为春播期农业规划给予一定的指导。

4 结论

(1)32 年来,松嫩平原黑土区春季融雪前期表层土壤湿度总体呈减小趋势,但融雪后期则呈先下降后上升趋势;受空间异质性的影响,融雪前期表层土壤湿度在整个研究区域均呈现减小趋势,而融雪后期表层土壤湿度南部地区呈升高趋势,北部呈下降趋势,并且从南部到北部逐渐递减。

(2)在研究区南部,融雪前期表层土壤湿度主要受积雪影响,融雪后期表层土壤湿度主要受降雨影响,在研究区北部,融雪后期表层土壤湿度主要受积雪和降雨的综合影响;不同地区融雪后期表层土壤湿度对降水和温度的影响存在差异,只有在积雪和降雨较少的地区,温度的蒸发作用才相对较为明显,反之则被降水作用所掩盖。

(3)在春季融雪前、后,表层土壤湿度变化趋势响应因素存在差异。融雪前期温度变化趋势决定此时期表层土壤湿度的变化方向,而积雪变化趋势在一定程度上会限制土壤湿度的干旱化过程,同时温度的升高和降雪的减少导致融雪前期表层土壤湿度干旱化程度放大一倍;而融雪后期表层土壤湿度主要由降雨和总降水变化趋势驱动,同时,降雨和总降水对融雪后期表层土壤湿度的积极作用会影响土壤湿度暖干化的反馈过程,对春季融雪后期表层土壤湿度变化产生积极影响。

参 考 文 献

[1] ZENG J, LI Z, CHEN Q, et al. Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 163: 91 – 110.

[2] CHAHINE M T. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. Nature, 1992, 359(6394): 373 – 380.

[3] DAN L, JI J, LIU H. Use of a land surface model to evaluate the observed soil moisture of grassland at the Tongyu reference site [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2008, 25(6): 1073 – 1084.

[4] SHUKLA J, MINTZ Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate[J]. Science, 1982, 215(4539): 1498 – 1501.

[5] NICOLAI-SHAWN R. Climate research applications of remote-sensing based soil moisture: spatial representation, predictability and drought response [D]. Zurich: ETH Zurich, 2016.

[6] CHENG S, GUAN X, HUANG J, et al. Long-term trend and variability of soil moisture over East Asia[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2015, 120(17): 8658 – 8670.

[7] 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 Shanjun, GUAN Xiaodan, HUANG Jianping, 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. (in Chinese)

[8] HENRY H A. Soil freeze-thaw cycle experiments: trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(5): 977 – 986.

[9] WANG C H, DONG W J, WEI Z G. Study on relationship between the frozen-thaw process in Qinghai-Xizang Plateau and circulation in East-Asia [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(3): 310 – 312.

[10] MCNAMARA J P, CHANDLER D, SEYFRIED M, et al. Soil moisture states, lateral flow, and streamflow generation in a semi-arid, snowmelt-driven catchment[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(20): 4023 – 4038.

[11] CLARK M P, HENDRIKX J, SLATER A G, et al. Representing spatial variability of snow water equivalent in hydrologic and land-surface models: a review[J]. Water Resources Research, 2011, 47(7): 1 – 23.

[12] SHINODA M. Climate memory of snow mass as soil moisture over central Eurasia[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(24): 33393 – 33403.

[13] STEWART I T, CAYAN D R, DETTINGER M D. Changes toward earlier streamflow timing across Western North America [J]. Journal of Climate, 2005, 18(8): 1136 – 1155.

[14] HAMLET A F, MOTE P W, CLARK M P, et al. Twentieth-century trends in runoff, rvapotranspiration, and soil moisture in the Western United States[J]. Journal of Climate, 2007, 20(8): 1468 – 1486.

[15] LOPEZMORENO J I, REVUELTO J, GILABERTE M, et al. The effect of slope aspect on the response of snowpack to climate warming in the Pyrenees[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 117(1 – 2): 207 – 219.

[16] 刘绪军, 景国臣, 杨亚娟, 等. 冻融交替作用对表层黑土结构的影响[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(1): 42 – 46.
LIU Xujun, JING Guochen, YANG Yajuan, et al. Effects of alternate freezing and thawing on the structure of black topsoil [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(1): 42 – 46. (in Chinese)

[17] DOUVILLE H, ROYER J F. Sensitivity of the Asian summer monsoon to an anomalous Eurasian snow cover within the Météo-France GCM[J]. Climate Dynamics, 1996, 12(7): 449 – 466.

[18] GUAN X, HUANG J, GUO N, et al. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(4): 692 – 700.

[19] WANG G, HUANG J, GUO W, et al. Observation analysis of land-atmosphere interactions over the Loess Plateau of Northwest

China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115(16): 1 - 15.
[20] 白淑英, 史建桥, 沈渭寿, 等. 近 30 年西藏雪深时空变化及其对气候变化的响应[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(1): 144 - 151.
BAI Shuying, SHI Jianqiao, SHEN Weishou, et al. Spatial-temporal variation of snow depth in Tibet and its response to climatic change in the past 30 years[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(1): 144 - 151. (in Chinese)
[21] 白淑英, 史建桥, 高吉喜, 等. 1979—2010 年青藏高原积雪深度时空变化遥感分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(4): 628 - 637.
BAI Shuying, SHI Jianqiao, GAO Jixi, et al. Analysis of spatial-temporal variations of snow depth over the Qinghai-Tibetan Plateau during 1979—2010[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014,16(4): 628 - 637. (in Chinese)
[22] 张晓闻, 臧淑英, 孙丽. 近 40 年东北地区积雪日数时空变化特征及其与气候要素的关系[J]. 地球科学进展, 2018, 33(9):958 - 968.
ZHANG Xiaowen, ZANG Shuying, SUN Li. Spatial-temporal variation characteristics of snow cover days in Northeast China in the past 40 years and their relationship with climatic factors[J]. Advances in Earth Science,2018,33(9): 958 - 968. (in Chinese)
[23] 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.
[24] 李若麟, 保鸿燕, 李课臣, 等. 全球土壤湿度的记忆性及其气候效应[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1470 - 1481.
LI Ruolin, BAO Hongyan, LI Kechen, et al. The memory and climate effects of global soil moisture[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1470 - 1481. (in Chinese)
[25] 范科科, 张强, 史培军,等. 基于卫星遥感和再分析数据的青藏高原土壤湿度数据评估[J]. 地理学报, 2018,73(9): 1778 - 1791.
FAN Keke, ZHANG Qiang, SHI Peijun,et al. Evaluation of remote sensing and reanalysis soil moisture products on the Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(9): 1778 - 1791. (in Chinese)
[26] AMBADAN J T, BERG A A, MERRYFIELD W J, et al. Influence of snowmelt on soil moisture and on near surface air temperature during winter-spring transition season[J]. Climate Dynamics, 2017,51(4): 1295 - 1309.
[27] ALLEN R J, ZENDER C S. The role of eastern Siberian snow and soil moisture anomalies in quasi-biennial persistence of the Arctic and North Atlantic Oscillations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(16): 1 - 12.
[28] ZAWADZKI J, KEDZIOR M A. Statistical analysis of soil moisture content changes in Central Europe using GLDAS database over three past decades[J]. Central European Journal of Geosciences, 2014, 6(3): 344 - 353.
[29] CHEN Y, YANG K, QIN J, et al. Evaluation of AMSR - E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2013, 118(10): 4466 - 4475.
[30] 王斌,朱士江,黄金柏,等. 基于全球陆面数据同化系统蒸散量的 GSAC 模型率定[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2): 232 - 240.
WANG Bin, ZHU Shijiang, HUANG Jinbai, et al. GSAC model calibration based on evapotranspiration data from global land data assimilation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(2): 232 - 240. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180230&flag = 1&joumal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.030. (in Chinese)
[31] 李登宣, 王澄海. 青藏高原春季土壤湿度与中国东部夏季降水之间的关系[J]. 冰川冻土,2016,38(1): 89 - 99.
LI Dengxuan, WANG Denghai. The relation between soil moisture over the Tibetan Plateau in spring and summer precipitation in the eastern China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1):89 - 99. (in Chinese)
[32] 马丽娟, 秦大河. 1957—2009 年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 1 - 11.
MA Lijuan, QIN Dahe. Spatial-temporal characteristics of observed key parameters for snow cover in China during 1957—2009[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1): 1 - 11. (in Chinese)
[33] LI G, REN B, ZHANG J, et al. Net air-sea surface heat flux during 1984—2004 over the North Pacific and North Atlantic oceans (10°N ~ 50°N): annual mean climatology and trend[J]. Theoretical and Applied Climatology,2011, 104(3 - 4): 387 - 401.
[34] POLYAKOV I V, AlEXEEV V A, BHAT U S, et al. North Atlantic warming: patterns of long-term trend and multidecadal variability[J]. Climate Dynamics, 2010, 34(2 - 3): 439 - 457.
[35] 孙力, 安刚, 高枞亭, 等. 中国东北地区地表水资源与气候变化关系的研究[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 42 - 49.
SUN Li, AN Gang, GAO Zongting,et al. Relationship between climate variation and surface water resources in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(1): 42 - 49. (in Chinese)
[36] 吉奇, 宋冀凤, 刘辉. 近 50 年东北地区温度降水变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(5): 1 - 5.
JI Qi, SONG Jifeng, LIU Hui. Characteristics of temperature and precipitation in Northeast China from 1951 to 2000[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2006, 22(5): 1 - 5. (in Chinese)
[37] 王杰, 刘珂, 任红玲,等. 吉林省春季土壤水分分布特征及影响因素分析[J]. 地理科学, 2012, 32(6): 759 - 763.
WANG Jie, LIU Ke, REN Hongling, et al. Soil moisture characteristics of spring in Jilin Province and its influencing factors[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(6): 759 - 763. (in Chinese)
[38] 左志燕, 张人禾. 中国东部春季土壤湿度的时空变化特征[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2008, 38(11): 1428 - 1437.
ZUO Zhiyan, ZHANG Renhe. Temporal and spatial variation characteristics of soil moisture in spring in eastern China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2008, 38(11): 1428 - 1437. (in Chinese)
[39] HUANG J P, YI Y H. Inversion of a nonlinear dynamical models from the observation[J]. Science in China (Series B), 1991,34(10): 1246 - 1251.
[40] HUANG J, YU H, GUAN X, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 166 - 171.