

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.01.030

基于 SWAT 的积雪消融对高寒区农田土壤水分影响模拟

王 斌¹ 郭帅帅¹ 冯 杰² 黄金柏³ 官兴龙¹

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 淮安 223001;
3. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009)

摘要: 为明确我国高寒区积雪消融对春季农田土壤水分的作用, 针对气象站点监测数据、遥感及陆面模式同化数据在时空分辨率方面存在的不足, 以地处黑龙江省中部的呼兰河流域为例, 利用 SWAT (Soil and water assessment tool) 模拟流域降雪、积雪、融雪等过程, 研究流域内降雪、积雪、融雪的时空变化特征及其对春季农田土壤水分的影响。结果表明: 呼兰河流域的平均降雪量、最大日积雪量、融雪量空间分布呈现自西向东逐渐增加的相近特征; 积雪量、降雪量、融雪量变化率的空间分布特征相近, 这些变化率在流域内大部分区域呈现增长趋势; 降雪量、积雪量、融雪量的年时间序列关系密切, 与土壤水分的年际变化趋势相近, 农田土壤水分的年际变化受降水量影响较大; 上年 11 月至当年 3 月的各月积雪量、上年 11 月降雪量、当年 4 月融雪量与当年春季 4、5 月农田土壤水分含量的相关性较显著; 融雪水在 3 月下旬至 4 月上旬补给土壤水分, 能够促使农田土壤水分短期上升, 积雪量决定了融雪水对农田土壤水分的补给作用; 农田土壤水分在融雪前下降趋势平缓, 但在融雪后急剧下降。

关键词: 高寒区; 积雪消融; 农田土壤水分; SWAT

中图分类号: P426.63⁺5; P426.68 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0271-08 OSID:



Simulation on Effect of Snowmelt on Cropland Soil Moisture within Basin in High Latitude Cold Region Using SWAT

WANG Bin¹ GUO Shuaishuai¹ FENG Jie² HUANG Jinbai³ GONG Xinglong¹

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Huai'an Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Huai'an 223001, China
3. School of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The objective was to clarify the effects of the snowmelt on cropland soil moisture in spring of the high latitude cold region in China. The Hulan River Basin, which locates at the middle Heilongjiang Province, was adopted as the study area. In consideration of the deficiencies of spatial and temporal resolution of monitoring station data, remote sensing data and land surface model assimilation data, the hydrological processes such as snowfall, snow cover, and snow melting were simulated using soil and water assessment tool (SWAT). Research on spatial and temporal characteristics of snowfall, snow cover and snowmelt and their effects on the cropland soil moisture in spring of the Hulan River Basin were carried out. The results indicated that the spatial distributions of the average snowfall, the maximum daily snow cover, snowmelt within the Hulan River Basin showed a similar characteristic that gradually increased from west to east; the change rates of snow cover, snowfall and snowmelt exhibited the similar spatial distribution characteristics and these change rates showed increasing trend at most areas within the basin; the close relationships existed among the series of annual snowfall, snow cover and snowmelt, that were similar to the interannual variation trend of soil moisture, and the interannual variation of cropland soil moisture was greatly affected by precipitation. A related significant correlation existed between the snow cover in a period from the last November to the current March, the snowfall in the last November, snowmelt in current April, and the cropland soil moisture in April and May of the current year. The snowmelt water recharged the soil moisture from the late March to the early April, which could promote the short-term increase of soil moisture, and the amount of snow cover determined the replenishment of snowmelt water to cropland soil moisture; the change trends of soil moisture were gently decreased before snowmelt, whereas significantly decreased after snowmelt ended.

Key words: high latitude cold regions; snowmelt; cropland soil moisture; SWAT

收稿日期: 2020-12-26 修回日期: 2021-03-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400101、2017YFC0504203)

作者简介: 王斌(1976—),男,副教授,博士,主要从事农业节水和水文过程模拟研究,E-mail: wangbin@neau.edu.cn

0 引言

土壤水分是陆地生态系统的重要组成部分,也是影响陆地生态系统水文、生物和生物化学过程的关键因素^[1];积雪是一种特殊且重要的地面覆盖介质,对土壤具有良好的缓冲、绝热和保墒效应,影响土壤水分的迁移过程^[2-5]。不同的自然地理环境下,积雪的累积过程以及积雪与土壤水分的交换过程明显不同,关于积雪对土壤水分的影响方面,国内外学者已进行了相关研究。MOHAMMED 等^[6]在研究加拿大大草原西部边缘草地积雪消融过程中发现,部分积雪消融发生在土壤冻结期,该时期内的融雪主要去向是补给土壤水分。HARDER 等^[7]定量分析了加拿大萨斯喀彻温省作物残留对积雪消融过程的影响,结果表明作物残留有利于积雪堆积,并能抑制积雪升华。在美国西部典型山区,融雪对径流和表层土壤水分的影响十分显著,且春季融雪对土壤水分的补给比对径流的补给更快,但融雪与深层土壤水分无显著相关关系^[8]。在青藏高原多年冻土区沼泽和草甸观测场,积雪覆盖下的浅层土壤开始冻结和消融的时间都有所滞后,积雪覆盖能够促使浅层土壤水分变化速率略微增加^[9]。我国华北、西北等地区,积雪还能对冬小麦等越冬作物起到增湿、保温等作用^[10-11]。

与青藏高原、华北、西北等地区不同,我国东北地区的降雪、积雪和融雪对土壤水分的影响具有明显的高寒地域特征。付强等^[3]在黑龙江省哈尔滨市开展的研究表明,积雪直接影响农田土壤水分的分布与迁移过程,土壤水分对气温变化的响应随积雪厚度的增加而延后。王子龙等^[12]利用积雪遥感数据和全球陆面数据同化系统(GLDAS)土壤水分数据研究了松嫩平原黑土区融雪期表层土壤的水分变化与影响因素,结果表明融雪前期的表层土壤水分主要受积雪影响,而后期主要与降雨及总降水变化密切相关。薄爱^[13]基于中国雪深度长期序列数据集和 ERA-Interim 土壤水分等数据,研究了1980—2012年东北地区积雪对土壤水分的影响,发现最大积雪深度和累积积雪深度与春季表层土壤水分存在时空相关性。黑龙江省是我国产粮最多的省份,除春小麦在4月上旬播种外,其他大田作物一般在5月上旬播种。因此,研究积雪消融对黑龙江省4—5月农田土壤水分的影响,明确积雪融雪对全省粮食作物生产的作用具有参考意义。

然而,受飘雪、遮挡、地形等因子影响,农田积雪很少呈均匀分布状态,而土壤水分的时空变异性又较大,加之我国土壤墒情站布设密度较低,与气象站

的布设位置通常也不一致,源于气象站、墒情站的降雪、土壤水分数据的时空同步性较差,时空代表性不高,即使单独设置监测站,所获取的点尺度资料也难以反映区域实际情况;同时,源于遥感、陆面模式等空间技术反演的积雪、土壤水分等数据的空间分辨率较低(如 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 等),受反演精度和空间分辨率所限,通常不适用于市县等区域尺度。相对而言,利用遵循水量平衡方程、能量平衡方程和水文循环原理的水文模型开展积雪融雪与土壤水分模拟研究更具时空优势^[14-17]。综上,本文利用 SWAT(Soil and water assessment tool)模型^[18-19],以地处高寒区的黑龙江省呼兰河流域为例,在流域尺度模拟积雪消融与土壤水分的逐日变化过程,研究积雪消融对农田土壤水分变化过程的影响,以期为指导流域农业生产提供科学依据。

1 SWAT 模拟土壤水分及积雪消融过程原理

水文响应单元(Hydrologic response unit, HRU)是 SWAT 模拟的基本单元^[20],其土壤剖面水量平衡方程为^[19]

$$W_t = W_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day,i} - Q_{surf,i} - E_{a,i} - w_{seep,i} - Q_{gw,i})$$

(1)

- 式中
- W_t ——时段末土壤水分含量,mm

W_0 ——时段初土壤水分含量,mm

t ——时段时间,d

$R_{day,i}$ ——第*i*天的降水量,mm

$Q_{surf,i}$ ——第*i*天的地表径流量,mm

$E_{a,i}$ ——第*i*天的蒸散量,mm

$w_{seep,i}$ ——第*i*天从土壤剖面进入不饱和带的水量,mm

$Q_{gw,i}$ ——第*i*天的回归流水量,mm

当平均气温低于降雪临界温度时,SWAT 定义降雪为降雪,降雪量累加到积雪量(覆盖在整个 HRU 区域上的水当量深度)中,积雪量随降雪增加,随积雪融化和升华减少,其质量守恒方程为

$$S = S_0 + R_{day} - E_{sub} - S_{mIt}$$

(2)

其中

$$S_{mIt} = b_{mIt} s_{cov} \left(\frac{T_{sno} + T_{max}}{2} - S_{MT} \right)$$

(3)

- 式中
- S ——某天的积雪水当量,mm

S_0 ——某天的初始积雪水当量,mm

R_{day} ——日平均气温低于降雪临界温度时某天的降雪水当量,mm

E_{sub} ——某天的积雪升华量,mm

S_{mIt} ——某天的融雪水当量,mm

b_{mIt} ——某天的融雪因子,mm/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)

s_{cov} ——积雪覆盖面积占 HRU 面积的比例
 T_{sno} ——某天的积雪温度,℃
 T_{max} ——某天的最高气温,℃
 S_{MT} ——融雪基温,℃

融雪因子存在季节性变化,在夏至和冬至时分别达到最大值和最小值,计算式为

$$b_{mlt} = \frac{S_{MX} + S_{MN}}{2} + \frac{S_{MX} - S_{MN}}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{365}(J - 81)\right) \tag{4}$$

式中 S_{MX} ——年内最大融雪速率,mm/(℃·d)
 S_{MN} ——年内最小融雪速率,mm/(℃·d)
 J ——年内日序数

SWAT 采取积雪面积消退曲线方程模拟 HRU 的积雪不均匀分布状态,即

$$s_{cov} = \frac{S}{S_{COVM}} \left[\frac{S}{S_{COVM}} + \exp\left(c_1 - c_2 \frac{S}{S_{COVM}}\right) \right]^{-1} \tag{5}$$

式中 S_{COVM} ——100% 积雪覆盖时的雪深阈值,mm
 $c_1、c_2$ ——积雪面积消退曲线形状系数

采用积雪温度延迟因子计算积雪温度,计算式为

$$T_{sno,i} = T_{sno,i-1}(1 - T_{mp}) + T_i T_{mp} \tag{6}$$

式中 $T_{sno,i}$ ——第 i 天的积雪温度,℃
 $T_{sno,i-1}$ ——第 $i-1$ 天的积雪温度,℃
 T_{mp} ——积雪温度延迟因子
 T_i ——第 i 天的平均气温,℃

从以上方程可以看出,利用 SWAT 模拟土壤水分与积雪消融过程,需要确定 $S_{MT}、S_{MX}、S_{MN}、S_{COVM}、T_{mp}$ 等参数。

2 研究流域 SWAT 模型构建与应用

2.1 流域概况

呼兰河水系地处黑龙江省中部,松嫩平原(黑龙江省内部分)东部,为松花江左岸一级支流,整体呈东北-西南流向(图 1),地理范围介于 125°23′~128°44′E、45°47′~48°8′N 之间,全流域枯水期潜水埋深为 3~10 m^[21]。上游林区(图 2 中混交林分布区域,下同)地势较高,中下游农业区(图 2 中农田分布区域,下同)地势较平坦,利用数字高程模型(DEM)提取的河口以上集水区面积为 36 369 km²。流域属温带大陆性季风气候,多年平均最低气温、最高气温和平均气温分别为 -2.9、8.4、2.5℃,多年平均降水量 565.5 mm,冬季寒冷漫长,降雪期和积雪期可达半年之久,主要集中在 11 月至翌年 3 月,融雪期在 3—4 月。呼兰河流域是黑龙江省开发较早的富饶农业带,流域内的绥化、海伦等市县已被确定为限制开发的国家农产品主产区。

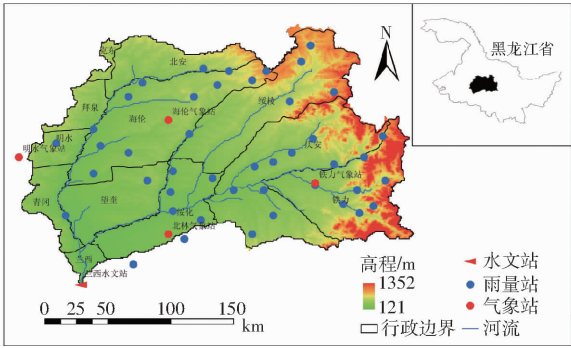


图 1 呼兰河流域地形及站点分布
Fig.1 Topography and station distribution in Hulan River Basin

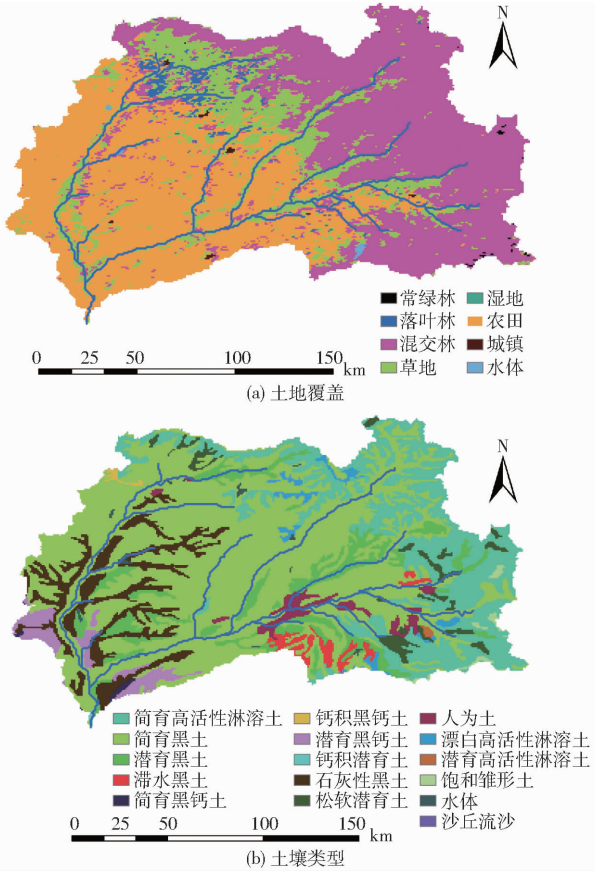


图 2 呼兰河流域土地覆盖与土壤类型空间分布
Fig.2 Spatial distributions of land cover and soil types in Hulan River Basin

2.2 数据来源与处理

DEM 来源于黑龙江省 1:1 000 000 地面高程图,以兰西站(46°15′N,126°21′E)为出口提取的集水区(以下称呼兰河流域)面积为 27 712 km²(图 1)。土地覆盖数据从国际地圈-生物圈计划(IGBP)建立的全球土地覆盖数据集提取,重分类后得到混交林(43.02%)、农田(42.3%)、草地(13.6%)等 8 种土地覆盖类型,见图 2a。土壤数据来源于世界和谐土壤数据库(HWSD),分上下两层,第 1 层 300 mm,第 2 层 700 mm,提取的流域土壤分布情况见图 2b,包括筒育黑土(56.91%)、潜育黑钙

土(25.99%)、潜育黑土(6.22%)等16种类型。逐日气象数据来源于海伦、北林、铁力、明水4个气象站,逐日降水数据采用43个雨量站实测资料(图1)。

2.3 模型率定与评价

确定性系数 D_c 计算式为^[22]

$$D_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

(7)

式中 $Q_{obs,i}$ ——第 i 天的实测流量, m^3/s
 $Q_{sim,i}$ ——第 i 天的模拟流量, m^3/s
 $\overline{Q_{obs}}$ ——实测流量均值, m^3/s

现行 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》将模拟精度分为甲($D_c > 0.9$)、乙($0.90 \geq D_c \geq 0.70$)、丙($0.70 > D_c \geq 0.50$)3个等级。本文采用 SUFI 2 (Sequential uncertainty fitting version 2) 算法^[23]率定模型,利用 D_c 评价 SWAT 模拟精度,根据模型率定结果选取参数的最终适用值,并输出研究所需各种模拟数据。利用兰西站 1982—2000 年实测日流量数据,以 1982 年为预热期,1983—1995 年为率定期,1996—2000 年为验证期,率定结果见表 1。模型率定期和验证期 D_c 分别为 0.81、0.79,达到《水文情报预报规范》规定的乙级精度,高于

表 1 呼兰河流域 SWAT 参数率定结果

Tab.1 Calibration results of SWAT parameters in Hulan River Basin

参数	数值
基流 alpha 因子 (ALPHA_BF)/d	0.675
河岸蓄量的基流 alpha 因子 (ALPHA_BNK)/d	0.321
冠层最大截留容量 (CANMX)/mm	15.500
主河道冲积层有效水力传导度 (CH_K2)/(mm·h ⁻¹)	444.499
主河道曼宁 n 值 (CH_N2)	0.028
水分条件 II 下的初始 SCS 径流曲线数 (CN2)	86.723
植被吸收补偿因子 (EPCO)	0.465
土壤蒸发补偿因子 (ESCO)	0.649
地下水延迟时间 (GW_DELAY)/d	470.500
地下水再蒸发系数 (GW_REVAP)	0.198
深层含水层渗透系数 (RCHRG_DP)	0.067
产生再蒸发的浅层含水层水深阈值 (REVAPMN)/mm	603.000
降雪临界温度 (SFTMP)/℃	-2.770
年内最小融雪速率 S_{MN} (SMFMN)/(mm·℃ ⁻¹ ·d ⁻¹)	2.050
年内最大融雪速率 S_{MX} (SMFMX)/(mm·℃ ⁻¹ ·d ⁻¹)	5.270
融雪基温 S_{MT} (SMTMP)/℃	4.310
50% 积雪覆盖时的雪水当量 (SN050COV)	0.086
100% 积雪覆盖时的雪深阈值 S_{COVM} (SNOCVMX)/mm	47.500
地表径流延迟时间 (SURLAG)/h	20.711
积雪温度延迟因子 T_{mp} (TIMP)	0.743
气温递减率 (TLAPS)/(℃·km ⁻¹)	-8.499

SWAT 在邻近的阿什河流域月流量过程模拟时的精度 ($D_c = 0.65$, 丙级精度)^[24], 表明 SWAT 模拟呼兰河流域水文过程的精度和可靠性较高。

3 结果与分析

依据吴琮等^[25]提出的黑龙江省冬季(11月至翌年3月)、春季(4—5月)划分标准,为论述方便,定义11月至翌年3月、4—5月分别为呼兰河流域冬季、春季,提取 SWAT 模拟的呼兰河流域 1982—2000 年 HRU 的逐日降雪量、融雪量、积雪量及农田土壤水分数据,分析积雪融雪量的时空变化特征及其对农田土壤水分的影响。

3.1 积雪融雪特性参数的空间分布特征

统计呼兰河流域 1982—2000 年各 HRU 的最大日积雪量、年平均降雪量及最大日融雪量(水当量)(图 3a~3c),采用一元线性方程的斜率评价平均积雪量、总降雪量及平均融雪量变化趋势(图 3d~3f)。

由图 3a~3c 可知,最大日积雪量、年平均降雪量及最大日融雪量的空间分布特征相近,总体表现为自西向东增加;不同地区的积雪量、降雪量和融雪量在数值上差异明显,最大日积雪量相差 54.9 mm,年平均降雪量相差 27.4 mm,最大日融雪量相差 37.6 mm;在诺敏河和呼兰河干流源区等区域,存在最大日积雪量、年平均降雪量及最大日融雪量的斑块状高值区,但这些特性参数在流域西部农田覆盖区均处于较低水平。由图 3d~3f 可知,多年平均积雪量变化率和总降雪量变化率空间分布特征十分相近,诺敏河、通肯河源区及流域西部农田覆盖区域为下降区,流域西南的呼兰河上游区域为增长区,全流域的变化率总体上呈增长趋势;平均融雪量变化率很小,仅在流域东南部出现了 2 个斑块状增长区,其他大部分区域呈下降趋势。此外,呼兰河流域积雪融雪特性参数的多年变化趋势还与水系分布情况有关,安邦河、诺敏河及通肯河上游,呼兰河干流与通肯河交汇处等区域均呈现增长趋势,而通肯河中游、欧根河、诺敏河上游等区域均呈现下降趋势。从图 3 还可以看出,积雪量、降雪量特性参数空间变化差异较大,但融雪量特性参数空间变化差异较小。

3.2 积雪融雪与农田土壤水分的年际变化特征

由于呼兰河流域连续的降雪和积雪过程跨越日历年,为合理统计年度降雪量和积雪量,设置水文年自上年 6 月至翌年 5 月,并以翌年命名,所得呼兰河流域 1983—2000 年降雪量、积雪量、融雪量及农田土壤水分含量动态过程见图 4。

由图 4 可知,在 1983—2000 水文年间,降雪量、

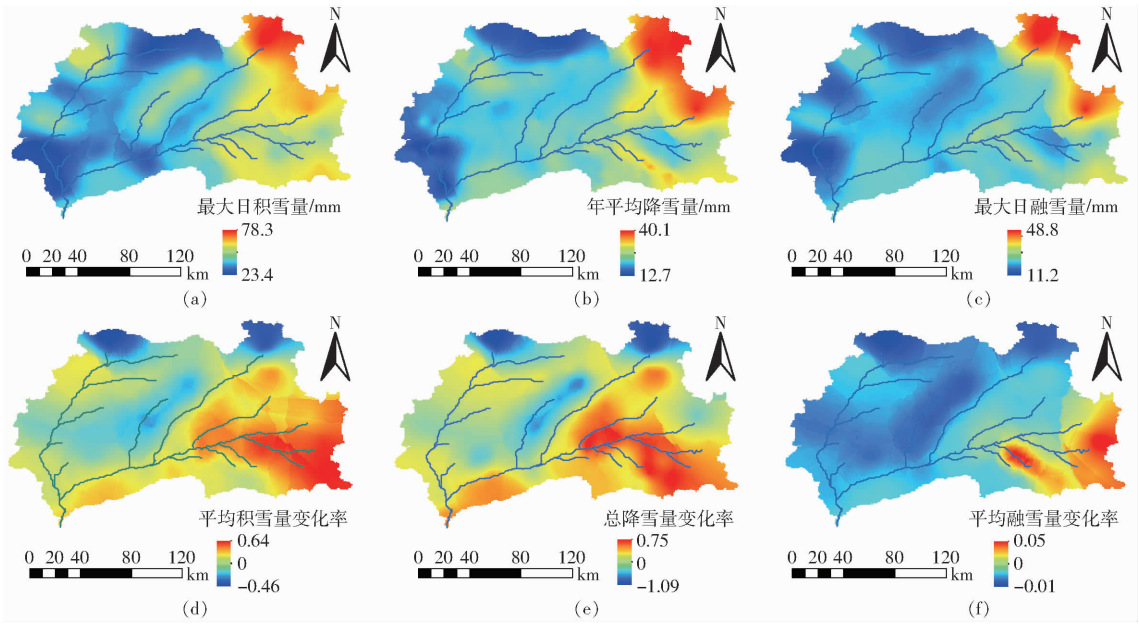


图 3 呼兰河流域降雪、积雪融雪特性参数的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of characteristic parameters of snowfall, snow cover and snowmelt in Hulan River Basin

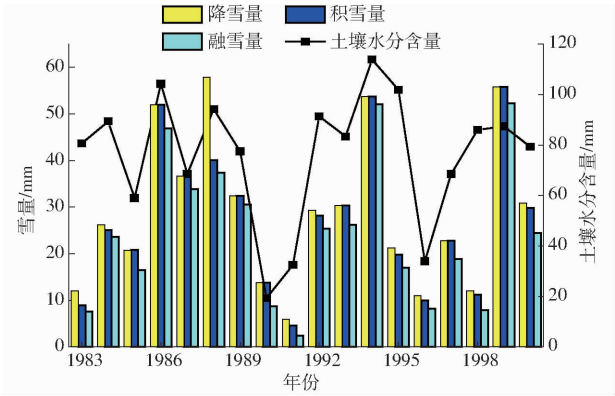


图 4 呼兰河流域积雪融雪与农田土壤水分含量的年变化过程

Fig. 4 Annual change of snowfall, snow cover and snowmelt and cropland soil moisture in Hulan River Basin

积雪量、融雪量及农田土壤水分含量的年际变化趋势相似,以 1990 年和 1996 年为界,都经历了两次较大的上升下降变化过程;年降雪量、年积雪量、年融雪量的变化趋势十分相近,降雪量与积雪量、降雪量与融雪量的相关系数分别为 0.968 4、0.968 7,而积雪量与融雪量相关系数高达 0.996 6。分析这些雪量数据可知,在多年平均情况下,积雪量和融雪量分别占降雪量的 94.5 %、83.9 %,表明在降雪-积雪-

融雪过程中存在雪升华现象,降雪-积雪过程中升华量占降雪量的 5.5 %,积雪-融雪过程中升华量占降雪量的 10.6 %,二者合计为 4.7 mm/年,占年降雪量的 16.1 %。统计 1983—2000 水文年的呼兰河流域农田土壤水分含量与降水量年数据,发现二者相关系数为 0.881 7;图 4 所示的 1990、1991、1996 年的 3 个水文年农田土壤水分含量较低,同期水文年降水量也较少,分别为 237.9、367.9、315.1 mm,均低于 1983—2000 水文年间降水量平均值 493.2 mm。由流域水量平衡方程可知,降水量是流域水量的直接来源,据此分析降水量是影响呼兰河流域年度农田土壤水分的重要因素。

3.3 月积雪融雪量与月农田土壤水分含量的相关性

在呼兰河流域农田覆盖下的 110 个 HRU 中,提取 1982—1999 年的 11—3 月降雪量、积雪量及融雪量,分别与 1983—2000 年春季 4—5 月的农田土壤水分含量进行相关性分析,并统计相关性通过显著性检验 ($P < 0.05$) 的 HRU 数量(表 2)。

由表 2 可知,降雪量、积雪量、融雪量与春季农田土壤水分含量的相关性有很大不同:除上年 11 月降雪量外,冬季其他月份降雪量与春季各月农田土壤水分含量的相关性很弱,表现为上年 12 月、当年

表 2 降雪量、积雪量、融雪量与春季各月农田土壤水分含量显著相关的 HRU 数量

Tab. 2 Number of HRU that had significant correlation between amount of snowfall, snow cover and snowmelt and monthly cropland soil moisture in spring

月份	降雪量					积雪量					融雪量	
	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	3 月	4 月
4	57	0	5	0	4	34	77	17	26	72	0	48
5	84	0	5	0	0	32	76	27	39	57	0	54

1—3 月降雪量与当年 4、5 月农田土壤水分含量显著相关的 HRU 数量很少,甚至为 0;冬季各月积雪量与春季各月农田土壤水分含量的相关性均较强,尤其上年 12 月、当年 3 月积雪量与当年春季各月农田土壤水分含量的相关性更大;3 月融雪量与当年春季各月农田土壤水分含量的相关性极弱,而 4 月融雪量与当年春季各月农田土壤水分含量的相关性较强。分析产生这些现象的原因可能是:在降雪和积雪方面,春季 4、5 月的农田土壤水分,与各月降雪量、积雪稳定性、积雪累积深度以及前期气候变化等因素有关;在融雪方面,当土壤温度较低时,融雪与土壤水分含量联系较弱,积雪消融对土壤水分的补给随地温上升而增强,从而使得 4 月融雪量与 4、5

月农田土壤水分含量具有较强的相关性。

3.4 积雪融雪条件下农田土壤水分日过程变化规律

为具体分析呼兰河流域降雪、积雪及融雪过程对春季 4—5 月农田土壤水分的影响,以 4 个气象站所在县市的农田土地覆盖类型区为例,以上年 11 月初至翌年 5 月末为分析时段,模拟所得 4 个县市农田区的降雪量、积雪量、融雪量、降雨量及土壤水分含量的逐日变化过程(图 5),统计 4 个县市农田区的最大积雪量、积雪时间,计算 4 个农田区在积雪期(积雪开始至结束)与融雪期(融雪开始—4 月 30 日)的农田土壤水分标准差和变异系数(表 3),其中积雪时间为积雪量累积时间序列中大于 1 mm 且连续出现的天数。

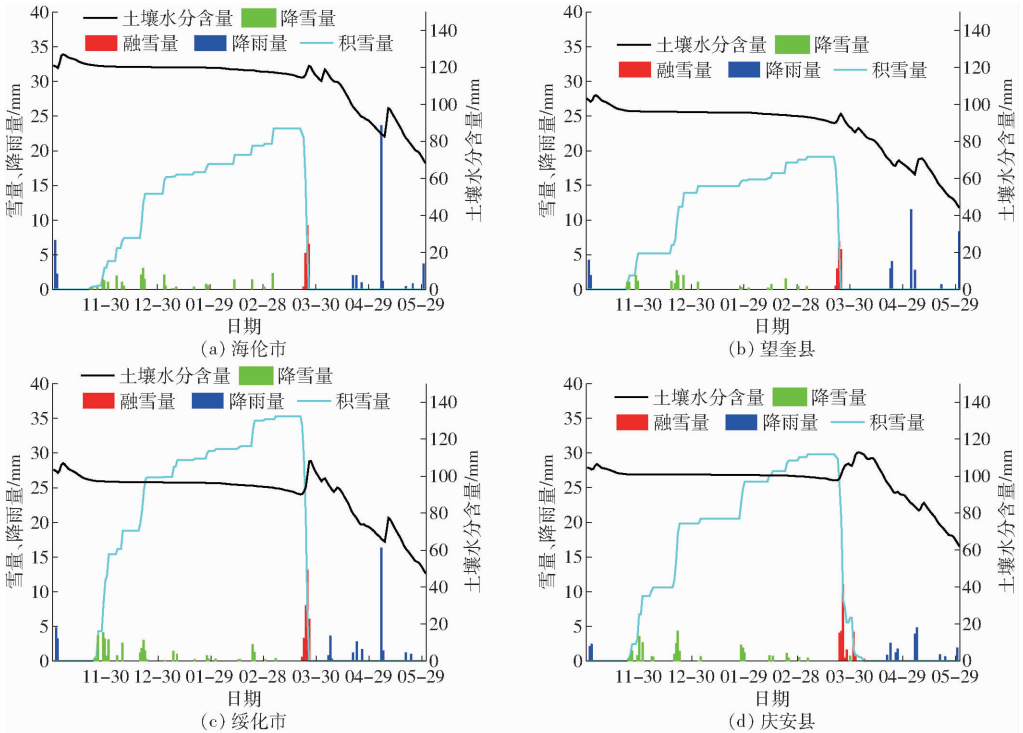


图 5 呼兰河流域典型农田区雨雪与土壤水分含量的日变化过程

Fig.5 Daily change processes of rainfall, snow and soil moisture in typical cropland areas in Hulan River Basin

表 3 呼兰河流域典型农田区积雪融雪与农田土壤水分变化特征

Tab.3 Characteristics of snow cover, snowmelt and soil moisture change in typical cropland areas in Hulan River Basin						
农田区地点	最大积雪量/ mm	积雪时间/d	积雪期土壤水分 含量标准差/mm	积雪期土壤水分 含量变异系数/%	融雪期土壤水分 含量标准差/mm	融雪期土壤水分 含量变异系数/%
海伦市	23.2	124	1.51	1.27	9.13	8.52
望奎县	19.1	121	1.51	1.59	7.75	7.56
绥化市	35.3	122	1.68	1.75	10.22	11.30
庆安县	29.8	134	0.80	0.79	8.40	10.37

由图 5 可知,模拟的 4 个县市农田区降雪主要集中在 11 月至翌年 2 月,融雪期较短,约在 3 月下旬至 4 月上旬;另经统计,在集中融雪时段,这 4 个农田区的融雪量可占总降雪量的 85% ~ 90%。在模拟时段之初,4 个农田区的土壤水分含量处于

100 ~ 120 mm 之间,从 11 月中旬至翌年 3 月中下旬左右,地表均有积雪覆盖,农田土壤水分变化平缓,变化范围在 3.2 ~ 7.3 mm 之间,积雪量在消融之初达到最大值,4 个农田区积雪量在 19.1 ~ 35.3 mm 之间;分析产生这种现象的原因是,在此期间气温较

低,土壤呈冻结状态,仅有很小的蒸发速率,大部分降雪都积累在农田土壤表面。随气温上升,积雪开始消融,土壤逐渐解冻,融雪水入渗补给土壤水,使得农田土壤水分短期波动上升,各地的农田土壤水分在融雪后 1~10 d 内均达到极大值,土壤水分含量增长率依次为 5.4% (图 5a)、5.4% (图 5b)、19.7% (图 5c)、15.4% (图 5d),积雪量决定了融雪水对土壤水的补给作用。在达到极大值后,各地的农田土壤水分整体表现为急剧下降趋势,分析原因是该时期农田土壤水分的蒸发速率随气温升高而增强;此外,还可以看出,春季降雨也促使了农田土壤水分短暂升高。可见,在连续的农田土壤水分动态过程中,融雪水和雨水的间断补给是农田土壤水分在局部时段上升的主要原因,这种补给延缓了土壤水分的大幅下降,为春小麦前期生长和其他大田作物播种创造有利的土壤水分条件。

4 结论

(1)呼兰河流域最大日积雪量、年平均降雪量、

最大日融雪量的空间分布呈现自西向东逐渐增加的相近特征;积雪量、降雪量变化率的空间分布特征十分相近,全流域的变化率总体上呈增长趋势;融雪量变化率很小,流域大部分区域的变化率呈下降趋势。

(2)呼兰河流域降雪量、积雪量、融雪量和农田土壤水分的年际变化趋势相似,降雪量、积雪量、融雪量之间的联系十分密切,多年平均的雪升华量占降雪量的 16.1%;农田土壤水分的年际变化受降水量影响较大,降水量是影响呼兰河流域年度农田土壤水分含量的重要因素。

(3)在呼兰河流域,上年 11 月降雪量、冬季各月积雪量、4 月融雪量与春季 4、5 月农田土壤水分含量显著相关,其他月份的降雪量、积雪量、融雪量与春季 4、5 月农田土壤水分含量相关关系不显著。

(4)融雪对农田土壤水分的补给时段在 3 月下旬至 4 月上旬,能够促使农田土壤水分短期上升,积雪量决定了融雪水对土壤水的补给作用;农田土壤水分在融雪前下降趋势平缓,在融雪后急剧下降,受融雪或降雨补给而呈短期上升波动变化。

参 考 文 献

[1] 常学尚,常国乔. 干旱半干旱区土壤水分研究进展[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 156-163.
CHANG Xueshang, CHANG Guoqiao. Advances in research and prospect on soil moisture in arid and semi-arid areas[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 156-163. (in Chinese)

[2] 汪恩良,富翔,韩红卫,等. 中国东北地区季节性积雪导热系数及温度变化特征分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 275-285.
WANG Enliang, FU Xiang, HAN Hongwei, et al. Analysis of thermal conductivity and temperature variation characteristics of seasonal snow in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 275-285. (in Chinese)

[3] 付强,蒋睿奇,王子龙,等. 不同积雪覆盖条件下冻融土壤水分运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 152-159.
FU Qiang, JIANG Ruiqi, WANG Zilong, et al. Soil moisture movement during freezing-thawing period under different snow covers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 152-159. (in Chinese)

[4] 王湘浩. 不同积雪覆盖条件下积雪-冻融黑土水热特征研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
WANG Xianghao. Study on water and heat characteristics of snow and freezing-thawing black soil under different snow cover [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[5] 梁爽. 东北农田区积雪对土壤水热的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
LIANG Shuang. A study on influence of snow cover on soil water and heat in the farmland in Northeast China[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)

[6] MOHAMMED A A, PAVLOVSKII I, CEY E E, et al. Effects of preferential flow on snowmelt partitioning and groundwater recharge in frozen soils[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2019, 23(12): 5017-5031.

[7] HARDER P, POMEROY J W, HELGASON W D. Implications of stubble management on snow hydrology and meltwater partitioning[J]. Canadian Water Resources Journal/Revue Canadienne Des Ressources Hydriques, 2019, 44(2): 193-204.

[8] HAMMOND J C, HARPOLD A A, WEISS S, et al. Partitioning snowmelt and rainfall in the critical zone: effects of climate type and soil properties[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(9): 3553-3570.

[9] 常娟,王根绪,高永恒,等. 青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7289-7301.
CHANG Juan, WANG Genxu, GAO Yongheng, et al. Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7289-7301. (in Chinese)

[10] 尹君,苏筠. 农谚在河南冬小麦种植及气候适应中的应用[J]. 地域研究与开发, 2011, 30(4): 153-157.

YIN Jun, SU Yun. Application of farming proverbs in the planting and drought adaptation of winter wheat: taking Henan Province as a case[J]. Areal Research and Development, 2011, 30(4): 153 – 157. (in Chinese)

[11] 郭锐, 芦亚玲, 韩兰英, 等. 应用长时序 NDVI 评价雨养农业区冬小麦全生育期受旱状况[J]. 高原气象, 2019, 38(6): 1300 – 1308.

GUO Ni, LU Yaling, HAN Lanying, et al. Evaluation of drought condition in the whole growth period of winter wheat in rain-fed agricultural area by using long sequence NDVI data[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(6): 1300 – 1308. (in Chinese)

[12] 王子龙, 林百健, 姜秋香, 等. 寒区春季融雪期表层土壤湿度变化与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 301 – 311.

WANG Zilong, LIN Baijian, JIANG Qiuxiang, et al. Analysis of surface soil moisture changes and influencing factors during spring snowmelt in cold regions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 301 – 311. (in Chinese)

[13] 薄爱. 1980—2012 年东北地区积雪对土壤湿度的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2019.

BAO Ai. Snow depth in Northeast China from 1980 to 2012 effect on soil moisture[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2019. (in Chinese)

[14] 黄金柏, 温佳伟, 王斌, 等. 阿伦河流域耦合融雪分布式水文模型的构建[J]. 人民黄河, 2015, 37(11): 18 – 24.

HUANG Jinbai, WEN Jiawei, WANG Bin, et al. Development of a distributed hydrology numerical model combined with snowmelt of Alun River Basin[J]. Yellow River, 2015, 37(11): 18 – 24. (in Chinese)

[15] 黄金柏, 王斌, 温佳伟. 黑龙江省西部半干旱区雨季及融雪期径流特性[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(5): 87 – 96.

HUANG Jinbai, WANG Bin, WEN Jiawei. Characteristics of surface runoff in the rainy season and snowmelt period of semiarid western of Heilongjiang Province[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(5): 87 – 96. (in Chinese)

[16] GRUSSON Y, SUN X, GASCOIN S, et al. Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an alpine watershed[J]. Journal of Hydrology, 2015, 531: 574 – 588.

[17] ABBAS T, HUSSAIN F, NABI G, et al. Uncertainty evaluation of SWAT model for snowmelt runoff in a Himalayan watershed [J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2019, 30(2): 265 – 279.

[18] ARNOLD J G, WILLIAMS J R, MAIDMENT D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(2): 171 – 183.

[19] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool: theoretical documentation version 2009 [R]. Texas Water Resources Institute, 2011.

[20] 牛腾, 岳德鹏, 于佳鑫, 等. 基于最小响应单元的地下水埋深时空分异特征研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 238 – 246.

NIU Teng, YUE Depeng, YU Jiaxin, et al. Spatial and temporal variation characteristics of groundwater depth based on minimum response unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 238 – 246. (in Chinese)

[21] 丛璐. 松嫩平原(黑龙江)地下水动态特征及超采区评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.

CONG Lu. Research on the groundwater dynamic characteristics and evaluation of overmining area in Songnen Plain (Heilongjiang Province)[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)

[22] 中国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22482—2008 水文情报预报规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[23] ABBASPOUR K C, YANG J, MAXIMOV I, et al. Modeling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT[J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2 – 4): 413 – 430.

[24] 高晓曦, 左德鹏, 马广文, 等. 降水空间异质性对非点源关键源区识别面积变化的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4564 – 4571.

GAO Xiaoxi, ZUO Depeng, MA Guangwen, et al. Impact of spatial heterogeneity of precipitation on the area change in critical source area of non-point sources pollution[J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4564 – 4571. (in Chinese)

[25] 吴琼, 梁桂彦, 吴玉影, 等. 黑龙江省四季划分及气候特点分析[J]. 林业勘察设计, 2009(4): 95 – 96.

WU Qiong, LIANG Guiyan, WU Yuying, et al. Four seasons division and climate characteristic analysis of Heilongjiang Province[J]. Forest Investigation Design, 2009(4): 95 – 96. (in Chinese)