

# 黄河源区冻土水文关键要素变化过程及特征分析

施发祥<sup>1,3</sup>, 秦甲<sup>1,3\*</sup>, 韩添丁<sup>1,3</sup>, 孙洋<sup>4</sup>, 杨冰峰<sup>5</sup>, 付晓雷<sup>6</sup>, 游艳辉<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 江西财经大学, 南昌 330013; 5. 兰州理工大学, 兰州 730050; 6. 扬州大学, 江苏 扬州 225009)

**摘要:**冻土水文要素变化及关键参数的确定是黄河源区水文过程分析和模型模拟研究的核心内容之一。为进一步认识冻土冻融影响下黄河源区冻土水文关键要素变化及特征, 论文选取玛曲季节冻土观测站和康穷多年冻土观测站进行对比分析, 结合降水、蒸散发、冻土土壤水分的野外观测, 采用HYDRUS-1D模型冻融模块进行模拟分析。结果表明: ① 冻土冻融过程会改变土壤水力参数, 季节冻土饱和含水率 $\theta_s$ 冷季大于暖季, 残余含水率 $\theta_r$ 冷季小于暖季; 多年冻土饱和含水率 $\theta_s$ 冷季大于暖季, 残余含水率 $\theta_r$ 仅深层冷季小于暖季。② 季节冻土与多年冻土在年内冻结期间土壤含水量呈“U”形变化; 在冻结稳定时期季节冻土储水量减少比多年冻土快。③ 冻结稳定时期季节冻土与多年冻土底部渗漏通量都不断减少, 而多年冻土由于底部冻土层的存在, 底部渗漏通量减少到0后保持不变。④ 季节冻土与多年冻土在地下20 cm处存在冻结锋面, 冻结开始期间土壤水双向流向冻结锋面, 融化开始期间土壤水由冻结锋面双向流出。研究对于深化黄河源区冻土水文过程的认识, 优化水资源管理具有重要的理论和实际价值。

**关键词:**冻土水文要素; 土壤水力参数; 季节冻土; 多年冻土; 黄河源区

全球冰冻圈正处于加速萎缩状态<sup>[1-2]</sup>。冻土(季节冻土和多年冻土)作为冰冻圈的重要组成部分, 是地—水—气交换的关键要素, 也是高寒区域标志性的地质环境<sup>[3]</sup>。气候变暖背景下, 冻土的退化将破坏高寒区域水循环和水平衡<sup>[4-5]</sup>, 引发高寒草甸退化、荒漠化、生物多样性减少等系列问题<sup>[6-7]</sup>, 最终造成水资源恶化和生态功能退化<sup>[8-9]</sup>。冻土对水热变化极为敏感<sup>[10]</sup>, 冻土的冻融过程不仅会改变土壤自身水热性质, 也会影响土壤未冻水迁移过程<sup>[11]</sup>。分析冻土区不同深度土壤含水量的变化, 厘清季节冻土和多

年冻土活动层水文要素的变化机理, 有利于解决高寒区域地下水赋存、分布及运移的水资源问题。

冻土区别于其他土壤最显著的特征是冻土存在周期性冻融过程, 冻土的周期性冻融和冻土退化会改变土壤水力性质<sup>[12]</sup>。如活动层的冻融过程直接影响青藏高原多年冻土冻结层上水的动态变化<sup>[13]</sup>; 季节冻土的冻融过程和季风气候带来的降水使得青藏高原水储量增加<sup>[14]</sup>; 冰川退缩、冻土退化导致雅鲁藏布江陆地水储量每年下降约11.59 mm<sup>[15]</sup>; 冻土和高寒草甸的退化导致高寒区域土壤持水能力

收稿日期: 2023-05-01; 修订日期: 2023-06-22。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFC3201102); 国家自然科学基金项目(42171028); 冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE202110); 河海大学水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2021490611)。

[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2021YFC3201102; National Natural Science Foundation of China, No. 42171028; State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering Open Fund, No. SKLFSE202110; The Belt and Road Special Foundation of The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention of Hohai University, No. 2021490611.]

第一作者简介: 施发祥(1998—), 江西吉安人, 硕士生, 主要从事冻土水文研究。E-mail: shifaxiang@nieer.ac.cn

\*通信作者简介: 秦甲(1985—), 陕西咸阳人, 博士, 副研究员, 主要从事寒区水文过程与模拟研究。E-mail: qinjia418@lzb.ac.cn

引用格式: 施发祥, 秦甲, 韩添丁, 等. 黄河源区冻土水文关键要素变化过程及特征分析[J]. 地理科学进展, 2023, 42(9): 1691-1703. [Shi Faxiang, Qin Jia, Han Tianding, et al. Variation and characteristics of soil hydrological elements in the source region of the Yellow River. Progress in Geography, 2023, 42(9): 1691-1703.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.09.003

下降<sup>[16]</sup>等。对于冻土水文要素的研究大多基于水热耦合模型,通过考虑温度和水分的相互作用来模拟冻土的水文要素变化过程。如刘杨李<sup>[17]</sup>基于WEP-COR模型模拟青藏高原河流源区多年冻土活动层之间的水热通量变化;张伟等<sup>[18]</sup>基于Coup-Model模型模拟长江源区风火山区域多年冻土活动层水热迁移过程;秦越<sup>[19]</sup>改进GBEHM模型用来分析黑河上游冻土变化对土壤水热耦合传输的影响。一些水热耦合模型能够提高对冻土区域水文过程的模拟精度,但模型计算量大,所需要的多个参数难以确定<sup>[20-22]</sup>,且模型模拟的初始条件通常假设为均质土壤,很少考虑到冻土土壤属性会随冻土冻融过程发生变化。而水动力学模型HYDRUS-1D适用性广,广泛应用于生态农业、环境科学领域,用来表征土壤营养元素或污染物的溶质运移过程,模拟结果准确<sup>[20]</sup>。相比于其他陆面水文模型,HYDRUS-1D模拟所需要的土壤水力参数较易获取,且模型参数可调性高<sup>[23]</sup>,能够准确地模拟土壤未冻水的变化趋势。此外,HYDRUS-1D还能考虑冻土冻融过程对土壤属性的影响,对冷季和暖季分别模拟。因此,本文选取HYDRUS-1D模拟黄河源区关键水文要素变化<sup>[24]</sup>。目前国内外对冻土水文要素的研究主要聚焦于土壤含水量、储水量和持水能力的变化,对冻土底部渗漏通量、冻土垂直剖面含水量变化的研究较少。本文利用HYDRUS-1D模型对季节冻土和多年冻土活动层的底部渗漏通量、垂直剖面含水量进行对比分析,力求研究清楚冻土未冻水运移的过程及特征。

黄河源区冻土分布广泛,是中国西北地区重要的生态环境保护区<sup>[25]</sup>。近年来,随着全球气候变化

的加剧,冻土区域的水文过程受到很大影响<sup>[26-27]</sup>,季节冻土和多年冻土的冻融过程会直接影响黄河源区的产汇流过程和水文要素变化<sup>[28]</sup>。黄河源区地理环境具有特殊性,研究季节冻土和多年冻土活动层关键水文要素的变化对于黄河流域的生态环境保护和可持续发展具有重要意义。本文着眼于黄河源区季节冻土和多年冻土活动层的土壤未冻水迁移过程,在考虑降水和蒸散发的外界影响下利用HYDRUS-1D模型进行模拟分析<sup>[29]</sup>。本文研究结果可为厘清黄河源区冻土冻融过程与关键水文要素变化之间的相互关系提供参考,也可为黄河流域的水资源管理和生态环境保护提供重要科学理论和决策依据<sup>[30]</sup>。

## 1 研究区域、数据与方法

### 1.1 研究区概况

黄河源区通常指多石峡以上的集水区,海拔2669~6090 m,半干旱半湿润气候,冬季干冷、夏季温暖,年均降水约400 mm,年均气温约-3.5℃<sup>[31-32]</sup>。玛曲观测站位于研究区东南部,冻土类型为季节冻土,下垫面为高寒草甸和荒漠等,在地形和大气环流影响下,年内分冷、暖两季,冷季长于暖季<sup>[33]</sup>。康穷观测站位于研究区西南部,冻土类型为多年冻土。研究区区位图见图1。

### 1.2 数据来源

分别在玛曲季节冻土观测站和康穷多年冻土观测站布设气象、冻土、水文等不同类型的观测仪器。在玛曲季节冻土观测站配置有一个METER EM50数据记录器和多个METER SMST探针。SMST探针每15 min记录一次土壤剖面温度、土壤

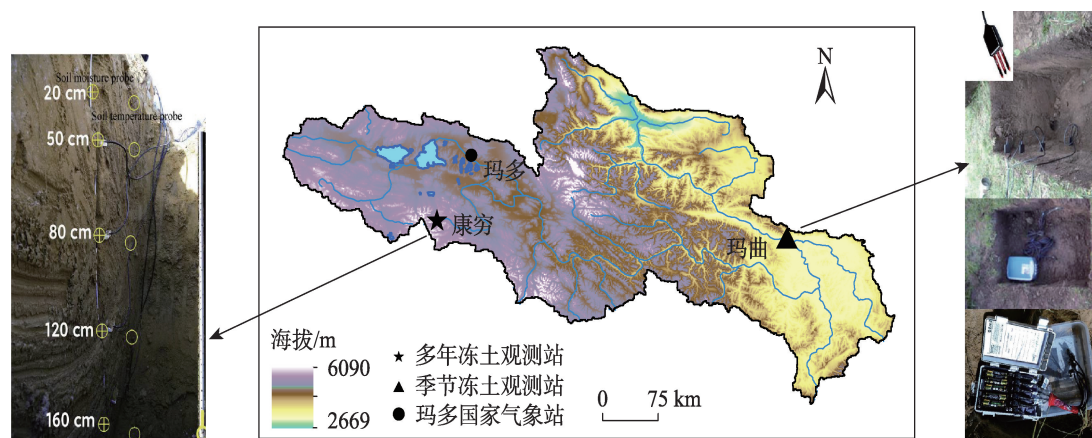


图1 黄河源区及观测站示意图

Fig.1 The source region of the Yellow River and observation stations

含水量。在康穷多年冻土观测站配置有 S-SMC-M005 土壤湿度传感器和 HOBO 压力式水位计, 每 4 h 记录一次土壤含水量和地下水位。本文使用 5 cm、20 cm、80 cm 深度的土壤含水量数据对模型模拟结果进行验证。文中降水数据包括降雨和降雪。实际观测中康穷多年冻土观测站 12 月、1 月部分降水数据有缺失, 用国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn>) 玛多国家气象站的降水数据补齐, 蒸散量数据由 Penman-Monteith 公式计算。

### 1.3 HYDRUS-1D 模型关键参数及模拟过程

#### 1.3.1 水分运动方程

HYDRUS-1D 模型基于 Richards 方程模拟多层冻土条件下的一维水分运动, 用来分析冻土冻融过程中土壤未冻水、土壤储水量及底部渗漏通量的变化<sup>[24]</sup>。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为土壤体积含水率 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $t$  为时间 (d);  $z$  为土柱垂向深度 (cm);  $h$  为压力水头 (cm);  $K$  为非饱和导水率 ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )。

采用 Van-Genuchten 模型 (VG 模型) 模拟多层冻土未冻水的运动<sup>[34-35]</sup>。

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |ah^n|\right)^m} & (h < 0) \\ \theta_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

式中:  $\theta_s$  为饱和含水率 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $\theta_r$  为残余含水率 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $K_s$  为饱和导水率 ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $\alpha$ 、 $n$ 、 $m$ 、 $l$  为经验参数,  $m=1-1/n$ ,  $n>1$ ,  $l=0.5$ ;  $S_e$  为土壤有效水分含量。

#### 1.3.2 时间离散化

HYDRUS-1D 模型使用有限差分元方法进行数值求解, 时间离散化的合理性是提升模型计算速度和稳定性的关键<sup>[36]</sup>。本文将冻土土壤水分下渗过程的初始时间步长定为 0.1 d, 最小步长定为 0.001 d, 最大步长定为 5 d。

#### 1.3.3 初始条件和边界条件

HYDRUS-1D 模型仅考虑一维垂向运移时的土壤水分运动<sup>[37]</sup>, 模型模拟的一维垂直土柱简图见图 2。玛曲观测站季节冻土一维土柱高 160 cm, 等间

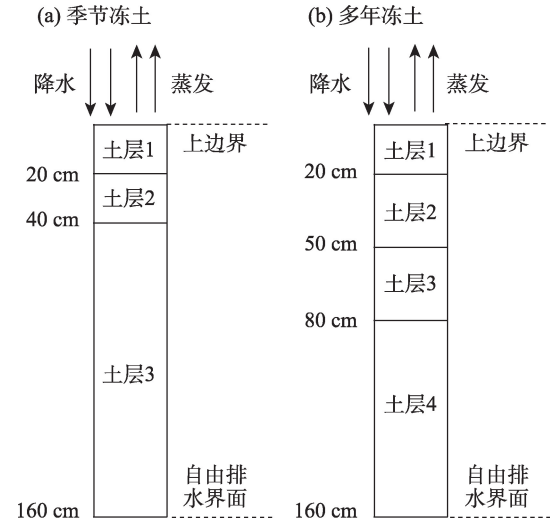


图2 模拟土柱简图

Fig.2 Diagram of simulated soil column

隔分为 160 个垂向网格单元, 初始条件下分 3 层土壤 (0~20 cm、>20~40 cm、>40~160 cm)。康穷观测站多年冻土一维土柱高 160 cm, 等间隔分为 160 个垂向网格单元, 初始条件下分 4 层土壤 (0~20 cm、>20~50 cm、>50~80 cm、>80~160 cm)。土壤剖面的初始含水量用不同深度土壤实测含水量插值得到。HYDRUS-1D 模型上边界为大气边界条件, 由于观测站冬季降雪稀少, 不单独输入降雪量, 而输入日降水量 (包括降雨和降雪) 和日蒸散量。下边界 (地下 160 cm) 默认为自由排水界面。

#### 1.4 输出关键水文要素

设置初始条件与边界条件后, 利用 HYDRUS-1D 模型对黄河源区冻土水文要素进行模拟, 本文主要分析不同深度的冻土土壤含水量、土壤储水量、底部渗漏通量和垂直剖面含水量的变化过程。土壤含水量指单位体积冻土内所含有未冻水的量, 也称土壤含水率 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )。由于 HYDRUS-1D 模型在“点”尺度上模拟, 文中土壤储水量特指一维冻土土柱中所含有的液态水总量 (用水深表示, 单位 cm)。底部渗漏通量指单位时间内冻土中液态水渗漏穿过下边界的总量 ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )。文中提及的土壤含水量、土壤储水量、土壤水分等均为未冻水。

## 2 结果分析

### 2.1 季节冻土土壤水力参数的率定与验证

有学者已经证明采用实测土壤剖面含水率随时间的变化反演土壤水力参数具有可行性<sup>[38]</sup>。VG



模型中土壤水力参数反演求解所赋初值参考 Zheng 等<sup>[39]</sup>和 HYDRUS-1D 模型中土壤水力参数数据库。研究中综合考虑玛曲的气候和环境变化情况以及季节冻土夏季融化、冬季冻结的特征,将季节冻土分冷季(2016年11月1日至2017年6月1日)和暖季(2017年6月2日至10月31日)分别进行模拟。采用决定系数( $R^2$ )和均方根误差(RMSE)对模型模拟准确性进行评价, $R^2$ 越接近1、RMSE 越接近0 说明模型模拟效果越好。

如图3所示,冷暖季不同深度土层土壤含水量模拟值与实测值对比结果表明:HYDRUS-1D 模型对于季节冻土冻融过程水文要素变化模拟精度较高,模拟结果可信。冷季浅层土壤模拟效果优于深层土壤,5 cm、20 cm 土壤含水量  $R^2$  大于0.90,80 cm 土壤含水量  $R^2$  为0.67。暖季模拟效果不如冷季( $R^2$

为0.64~0.86)。

率定和验证后的土壤水力参数见表1。季节冻土的冻融变化会导致土壤水力参数发生变化。不同深度季节冻土残余含水率 $\theta_r$ 冷季小于暖季,饱和含水率 $\theta_s$ 冷季大于暖季。后续对冻土区域的研究中,充分考虑冻土冻融所引起的土壤水力参数变化对于提高水文模型模拟的精度有重要意义。

**2.2 季节冻土不同深度土壤含水量变化**

图4是季节冻土冷季和暖季实测与模拟的土壤未冻水含量对比图。冷季模拟效果优于暖季,冷季 RMSE 均不超过  $0.023 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ,暖季 RMSE 为  $0.015 \sim 0.04 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。在季节冻土开始冻结之前, HYDRUS-1D 模型能够准确捕捉冷季 5 cm 土壤含水量从  $0.36 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  波动变化到  $0.42 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  的过程,进一步说明模型模拟效果较好。由于不同深度

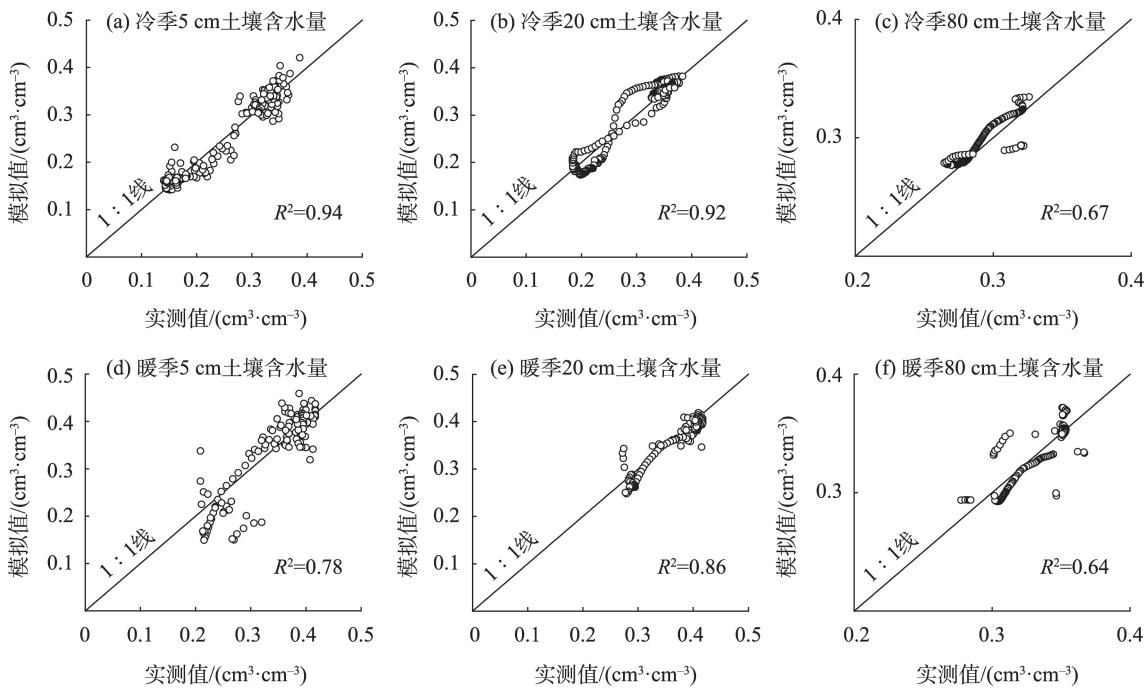


图3 冷季和暖季不同深度土壤含水量模拟值与实测值比较

Fig.3 Comparison of simulated and measured values of soil water content at different depths during the cold and warm periods

表1 季节冻土土壤水力参数

Tab.1 Soil hydraulic parameters of seasonally frozen soil

阶段	土层深度/cm	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha$	$n$	$K/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	$l$
冷季	0~20	0.05	0.464	0.030	1.829	3.80	0.5
	>20~40	0.02	0.456	0.050	1.350	12.17	0.5
	>40~160	0.01	0.412	0.027	1.440	4.33	0.5
暖季	0~20	0.07	0.417	0.038	1.535	2.85	0.5
	>20~40	0.05	0.428	0.075	1.234	5.97	0.5
	>40~160	0.01	0.367	0.016	1.270	4.56	0.5

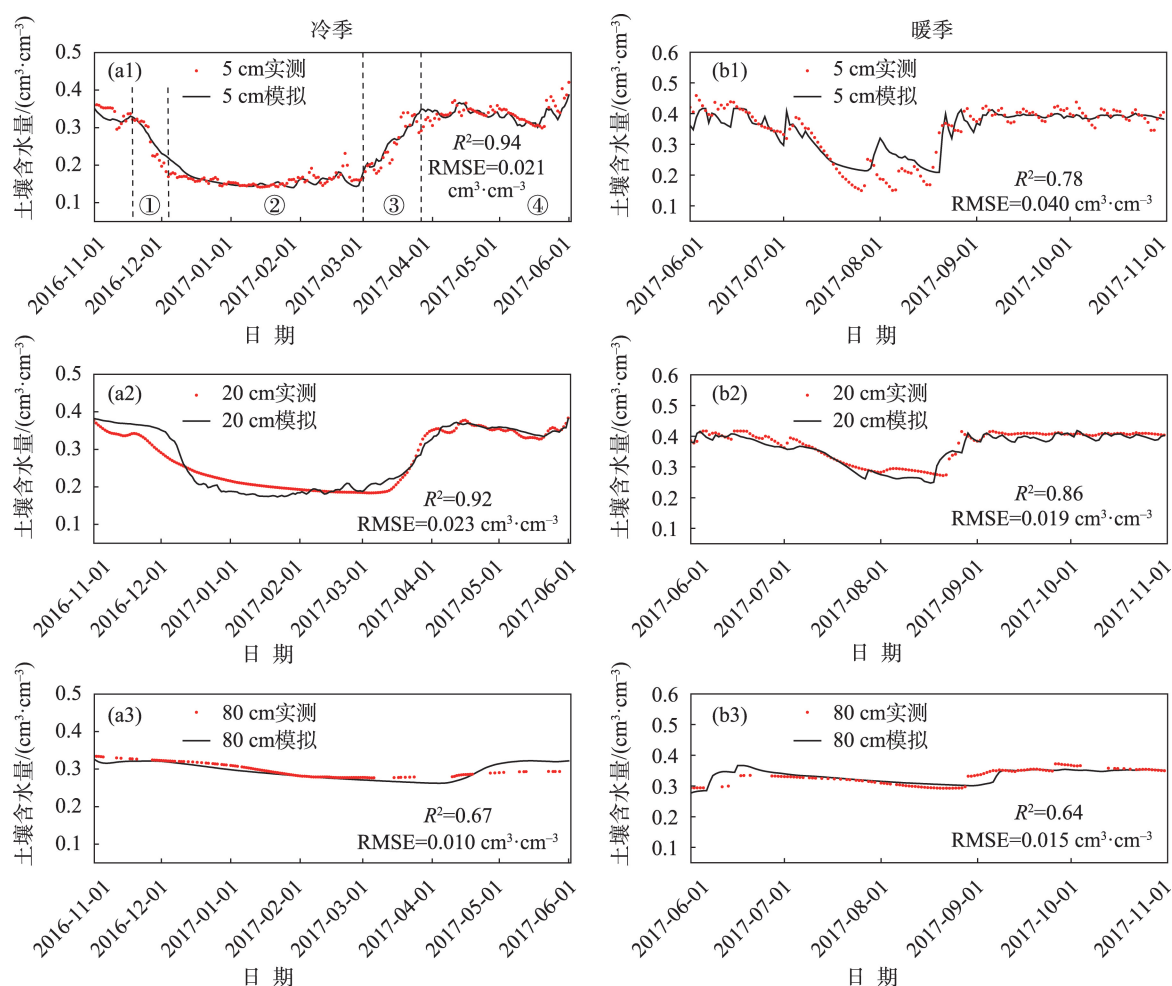


土层的渗透速率和储水能力不同,20 cm 土壤含水量变化与5 cm 相比在时间上有滞后,但整体变化趋势一致。研究中将表层5 cm 土壤含水量变化的拐点作为季节冻土冻融过程的转折点,将冷季土壤未冻水年内变化过程划分为4个时期(图4左)。

① 冻结开始时期(2016年11月18日至12月4日):处于融化状态的土壤由于负温开始冻结,土壤含水量迅速降低并达到最小值,5、20 cm 土壤含水量迅速下降,深层80 cm 土壤含水量变化不大。② 冻结稳定时期(2016年12月5日至2017年3月1日):持续的负温使得土壤完全冻结,土壤含水量稳定在低值不变,5、20、80 cm 土壤含水量分别稳定在0.15、0.17、0.30  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  左右。③ 融化开始时期(2017年3月2日至3月27日):气温由0℃开始回升,处于冻结状态的季节冻土开始融化,此时降水

增强,土壤含水量迅速上升。5 cm 土壤含水量从0.15  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  上升到0.34  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ,20 cm 土壤含水量从0.17  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  上升到0.36  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ,80 cm 土壤含水量变化不明显。④ 完全融化时期(2017年3月28日至6月1日):季节冻土完全融化,土壤含水量主要受降水、蒸发等外界因素影响而波动变化。

HYDRUS-1D 模型在暖季模拟效果不如冷季(图4右),模型虽然能够很好地模拟5、20 cm 土壤含水量的整体变化趋势,但处理不好土壤含水量曲线拐点的高值和低值(在7月26日、8月5日模拟值高于实测值)。80 cm 土壤含水量变化幅度小,稳定在0.35  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  左右。总的来说,不同深度土壤含水量冷季小于暖季,冷季季节冻土的冻融变化使得表层土壤含水量呈“U”形变化,暖季季节冻土完全融化,土壤含水量变化主要受降水等外部条件影响。



注:图中①②③④分别指冻结开始时期(2016年11月18日至12月4日)、冻结稳定时期(2016年12月5日至2017年3月1日)、融化开始时期(2017年3月2日至3月27日)、完全融化时期(2017年3月28日至6月1日)。

图4 冷季(左)、暖季(右)不同深度土壤含水量变化

Fig.4 Changes of soil water content at different depths during the cold period (left) and the warm period (right)

## 2.3 季节冻土水文要素变化分析

### 2.3.1 土壤储水量变化

如图5所示,季节冻土冷季与暖季土壤储水量变化差异明显。整体而言,冷季土壤储水量小于暖季,冷季土壤储水量在32~50 cm呈“U”型变化,暖季土壤储水量在49~52 cm波动变化。季节冻土冻结开始时期,土壤温度迅速下降,土壤快速冻结。已冻结的土壤水转化为冰,形成冻结带<sup>[40]</sup>,使得土壤储水能力下降,土壤储水量减少。稳定冻结时期,由于季节冻土冻结带的存在,土壤储水量难以通过水分下渗的形式得到补充。这一时期,玛曲观测站日夜温差大,蒸发损失增加,导致土壤储水量不断减少。融化开始时期,已冻结的季节冻土逐渐消融,土壤中冻结的冰转化为未冻水,土壤含水量增加,地下水水位上升,使得土壤储水量也增加。完全融化时期,完全融化的季节冻土与非冻土的土壤属性相似,土壤储水量的波动变化主要受降水和蒸发等外界因素影响。

### 2.3.2 底部渗漏通量变化

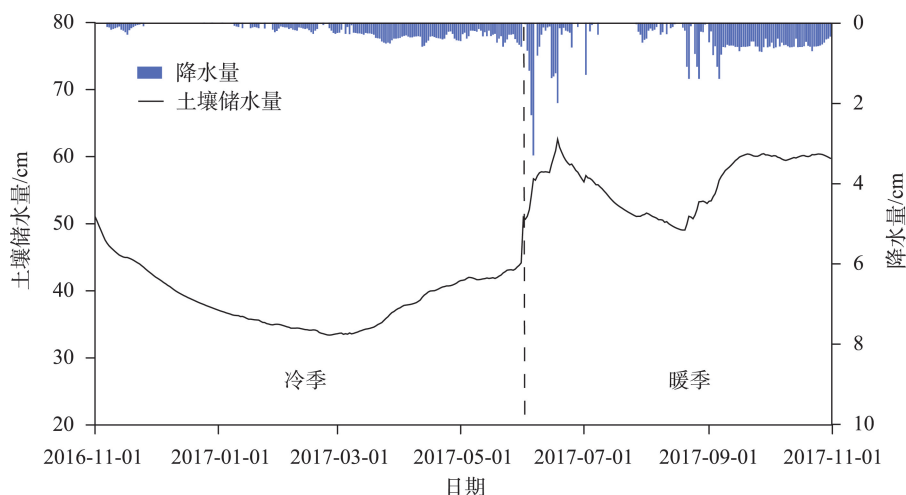
季节冻土底部渗漏通量的变化情况如图6。底部渗漏通量在冷季冻结开始时期从 $0.62 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 逐渐减少至 $0.16 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,这一时期土壤水开始冻结成冰,底部渗漏通量减少。冻结稳定时期,随着时间的推移,正在冻结的冰层继续增厚,在季节冻土层底部形成一个稳定的冻结带。冻结带的冰层厚度大、渗透能力低,有效地阻止了地下水下渗到底部,因此,这一期间底部渗漏通量进一步减少。直到季

节冻土完全融化,冻结带中的冰完全融化成未冻水,渗漏通量随之增加。暖季季节冻土全部消融,之前冻结的土壤水迅速融化释放并下渗至底部,同时降水增多和降水入渗使得底部渗漏通量迅速增加,在2017年6月20日达到最大值( $1.11 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )。底部渗漏通量达到最大值之后,受降水强度、土壤质地、蒸散发、植被覆盖等因素的影响,各层土壤不易达到饱水状态。降水入渗还不足以使得各层土壤达到最大饱和含水量,因而底部渗漏通量又开始减少,在2017年9月11日减少到最小值( $0.05 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )。在2017年9月11日至11月11日期间,底部渗漏通量随降水波动变化。总的来说:冷季季节冻土冻结带的形成会阻碍土壤水分下渗,底部渗漏通量减少;暖季季节冻土完全融化,土壤水分正常下渗,底部渗漏通量主要受降水等外部条件影响。

### 2.3.3 土壤垂直剖面含水量变化

季节冻土冻结开始期间(2016年11月18日至12月4日)和融化开始期间(2017年3月2日至3月27日)逐日的土壤垂直剖面含水量变化情况见图7。能够清晰地看出:冻结开始期间土壤垂直剖面含水量逐渐减少(曲线从右至左,含水量逐渐减少),融化开始期间土壤垂直剖面含水量逐渐增加(曲线从左至右,含水量逐渐增加)。

冻结锋面是冻土冻融过程中未冻水与冰的交界面<sup>[41]</sup>。冻结锋面上方有一定的水分压力梯度,土壤未冻水会不断流向冻结锋面来弥补水分压力梯度造成的水分损失<sup>[42]</sup>。季节冻土在20 cm处存在明



注:图中冷季为2016年11月1日至2017年6月1日,暖季为2017年6月2日至10月31日。图6同。

图5 季节冻土年内土壤储水量变化

Fig.5 Changes of soil water storage of seasonally frozen soil during the year

显的冻结锋面(图7)。对80 cm上方土壤含水量变化进行分析,冻结开始期间土壤未冻水从20 cm土层上方和下方双向流向冻结锋面,20 cm处土壤含水量最高;融化开始期间土壤未冻水分别从冻结锋面上方和下方向土壤表层和深层流动,20 cm处土壤含水量达到最低值,且越接近地表土壤含水量越大。对>80~160 cm土壤含水量变化进行分析,深层土壤含水量变化不大。从图7能够清晰地看出:在地下80 cm处土壤含水量出现明显的“跃减(跃增)”现象,冻结开始期间由 $0.3 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 跃减到 $0.16 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ,融化开始期间由 $0.13 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 跃增到 $0.26 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

## 2.4 多年冻土活动层水文要素变化分析

为进一步明晰黄河源区冻土水文要素变化特征,本文补充康穷多年冻土观测站土壤储水量、土壤底部渗漏通量、土壤垂直剖面含水量变化进行对

比分析。多年冻土模拟的时间范围为2016年9月29日至2017年9月29日,其中冷季为2016年10月25日至2017年5月7日,暖季为2016年9月29日至10月24日、2017年5月8日至9月29日。模拟过程中土壤水力参数所赋初值参考Cao等<sup>[43]</sup>,对模型进行对比验证的土壤含水量数据来自中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室。验证后的土壤水力参数见表2,HYDRUS-1D模型模拟结果较好( $R^2$ 介于0.65~0.89, RMSE 介于 $0.031 \sim 0.05 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )。

### 2.4.1 土壤储水量变化

图8为HYDRUS-1D模型模拟多年冻土活动层的年内土壤储水量变化。与季节冻土冻融过程类似,将土壤储水量的变化划分为4个时期:①冻结开始时期(2016年10月25日至11月12日);②冻结稳定时期(2016年11月13日至2017年5月7日);③融化开始时期(2017年5月8日至6月6日);④融化最大时期(2017年6月7日至9月29日)。与季节冻土冻融变化过程中④完全融化时期不同,由于多年冻土底部冻土层并未完全融化,多年冻土冻融变化过程中第四阶段为④融化最大时期。

分别对多年冻土冻融变化4个时期的土壤储水量进行分析:①冻结开始时期,多年冻土开始冻结,土壤储水量由26 cm迅速下降并达到弱饱和状态。②冻结稳定时期,康穷观测站气温低且降水稀少,多年冻土活动层处于稳定冻结阶段。活动层冻结的土壤水阻碍水分下渗,土壤储水量主要以蒸发的形式损失,土壤储水量有微弱的减少。③融化开始时期,气温开始升高,多年冻土活动层开始融化,原

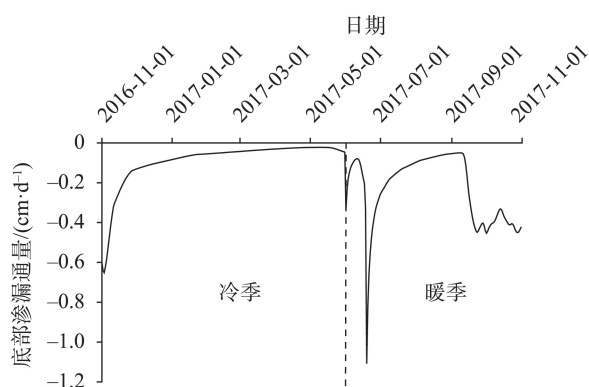
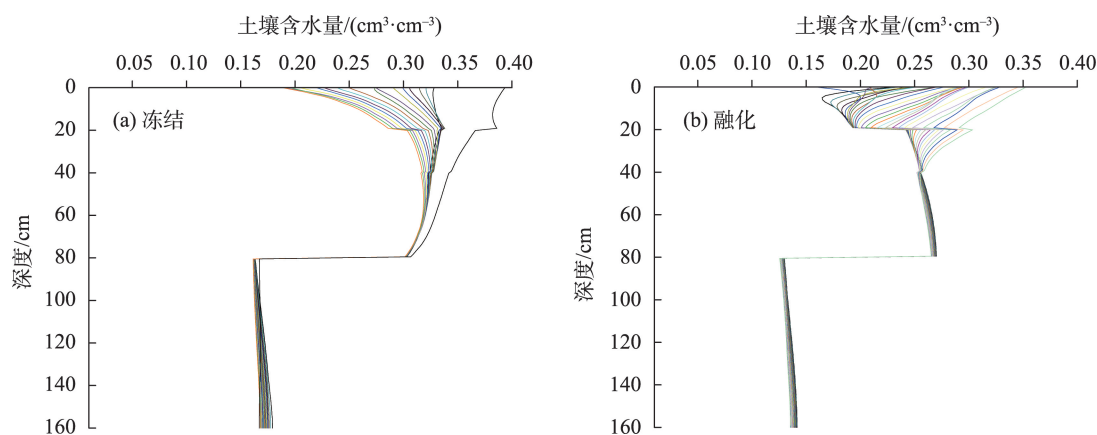


图6 季节冻土年内底部渗漏通量变化

Fig.6 Changes of bottom leakage flux of seasonally frozen soil during the year



注:图a中曲线从右至左依次为2016年11月18日至12月4日不同深度土壤含水量变化情况;图b中曲线从左至右依次为2017年3月2日至3月27日不同深度土壤含水量变化情况。

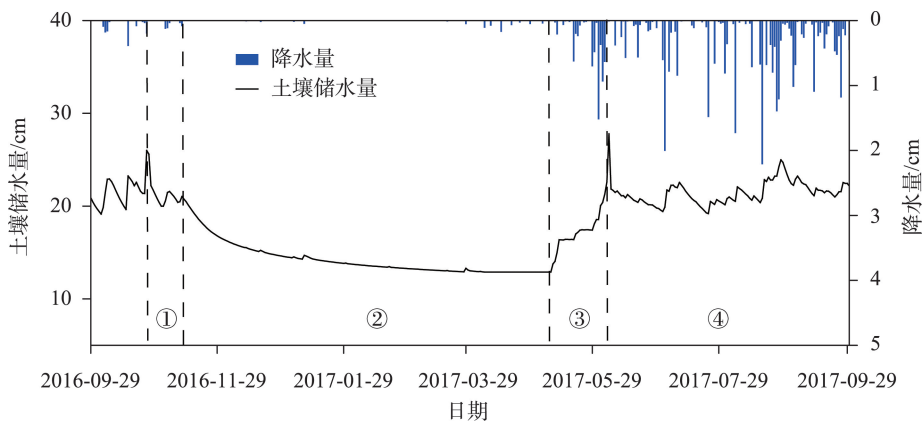
图7 季节冻土冻结开始期间(a)和融化开始期间(b)土壤含水量变化

Fig.7 Changes of soil water content of seasonally frozen soil at the beginning of freezing (a) and thawing (b)



表2 多年冻土土壤水力参数  
Tab.2 Soil hydraulic parameters of permafrost

阶段	土层深度/cm	$\theta/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha$	$n$	$K/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	$l$
冷季	0~20	0.09	0.50	0.041	1.53	22.50	0.5
	>20~50	0.07	0.48	0.042	1.56	28.10	0.5
	>50~80	0.06	0.42	0.073	1.58	45.90	0.5
	>80~160	0.06	0.41	0.064	1.61	80.78	0.5
暖季	0~20	0.09	0.37	0.028	1.73	20.54	0.5
	>20~50	0.06	0.42	0.030	1.73	28.80	0.5
	>50~80	0.07	0.29	0.037	1.65	49.86	0.5
	>80~160	0.08	0.31	0.042	1.60	98.56	0.5



注:图中①②③④分别指冻结开始时期(2016年10月25日至11月12日)、冻结稳定时期(2016年11月13日至2017年5月7日)、融化开始时期(2017年5月8日至6月6日)、融化最大时期(2017年6月7日至9月29日)。

图8 多年冻土年内土壤储水量变化

Fig.8 Changes of soil water storage of permafrost during the year

先冻结在活动层的水被释放出来,土壤储水量迅速上升达到28 cm。④融化最大时期,多年冻土活动层完全融化,地下水位上升,土壤储水量在19~24 cm之间波动变化。这一时期康穷观测站属于雨季,降水显著增多。从图8能够看出土壤储水量波动变化的峰值稍微迟滞于降水最大值出现的时间,进一步说明降水是影响多年冻土土壤储水量变化的一个重要因素<sup>[44]</sup>。

2.4.2 底部渗漏通量变化

图9为多年冻土活动层底部渗漏通量的变化情况,底部渗漏通量的变化也分为冻结开始时期、冻结稳定时期、融化开始时期、融化最大时期4个时期。冻结开始时期,由于多年冻土双向冻结的特性,尽管有少量降水抵达地表,已经开始冻结的活动层会阻碍水分下渗,底部渗漏通量在波动变化后逐渐减少。冻结稳定时期,完全冻结的活动层形成一道“隔水层”,活动层底部阻碍水分下渗。这一期间康穷降水稀少,低含量的土壤未冻水还要以蒸发的形式损失,基本渗透不到下边界,因此底部渗漏

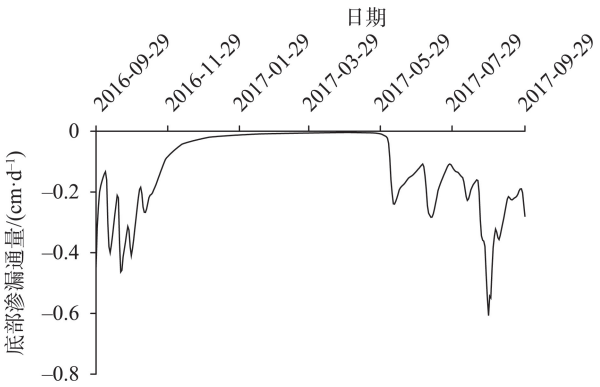


图9 多年冻土年内底部渗漏通量的变化

Fig.9 Changes of bottom leakage flux of permafrost during the year

通量减少到0后稳定不变。融化开始时期,多年冻土活动层中的冰迅速融化成水,地下水位上升,未冻水通过土壤孔隙下渗,底部渗漏通量迅速增加至0.24 cm·d<sup>-1</sup>。融化最大时期,土壤温度高于0℃,多年冻土活动层完全融化,同时降水在土壤中垂直入渗以壤中流的形式产生底部渗漏通量,底部渗漏通

量迅速增加并波动变化。此外,多年冻土的冻融过程一定程度上会改变土壤的孔隙结构,导致土壤孔隙的连通性增强或减弱,土壤水分下渗能力升高或降低,从而影响底部渗漏通量变化。

#### 2.4.3 土壤垂直剖面含水量变化

多年冻土活动层冻融过程的土壤垂直剖面含水量变化情况见图10。土壤含水量变化与季节冻土相似,冻结开始期间(2016年10月25日至11月12日)土壤垂直剖面含水量逐渐减少,融化开始期间(2017年5月8日至6月6日)土壤垂直剖面含水量逐渐增加。多年冻土活动层冻融过程中同样存在冻结锋面。冻结开始期间土壤水双向流向冻结锋面,20 cm处土壤含水量最高;融化开始期间土壤水由冻结锋面向土壤表层和深层流动,20 cm处土壤含水量更低,且越接近地表土壤含水量越大。与季节冻土不同,多年冻土由于活动层底板的存在,80 cm处并没有出现“跃减(跃增)”现象。

### 3 讨论

本文利用HYDRUS-1D模型的冻融模块模拟分析黄河源区冻土冻融过程对关键水文要素变化的影响。在对VG模型土壤水力参数进行率定与验证的过程中,发现将年内模拟时间段分冷季和暖季,模拟效果更好。事实上,冷季冻土冻融过程中土壤水、热变化复杂,不同土层土壤属性(如质地、孔隙度、水分保持能力等)均会发生变化。而土壤水力参数取决于土壤的孔隙度、容重等等<sup>[45]</sup>。在后续对冻土区域的研究中,区分冻土冻融变化时期与

冻土不发生冻融变化的时期对于提高水文模型的模拟精度具有十分重要的意义。

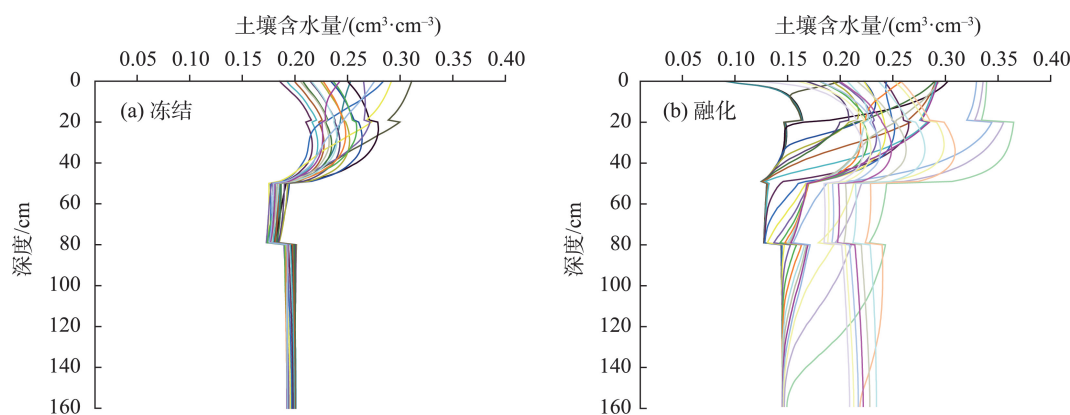
对季节冻土土壤含水量变化进行模拟,模拟效果冷季优于暖季。原因是冷季降水稀少,模型输入的上边界条件简单;而暖季降水波动变化大,输入上边界条件后模型难以精细地捕捉到后续降水、蒸发的变化。无论是季节冻土还是多年冻土,土壤含水量变化都能清晰地分为冻结开始时期、冻结稳定时期、融化开始时期、完全融化时期(融化最大时期),这与曹伟等<sup>[44]</sup>的研究结论一致。此外,由于冻土冻融变化特征,表层季节冻土与多年冻土活动层土壤含水量呈“U”形变化,深层则变化不明显。

分别讨论季节冻土与多年冻土活动层水文关键要素变化过程与特征:

(1) 对比季节冻土与多年冻土土壤储水量变化,冻结稳定时期季节冻土储水量减少得比多年冻土快,原因是季节冻土冻结带相比多年冻土活动层阻水能力稍弱,仍有少数土壤水下渗。

(2) 对比季节冻土与多年冻土活动层底部渗漏通量变化,冻土冻结期间底部渗漏通量都不断减少,说明逐渐冻结的土壤水会阻碍水分下渗。而多年冻土由于活动层底板的存在,底部渗漏通量维持在0。年内冻结期间,冻土冻融变化会改变土壤孔隙结构,导致土壤孔隙的连通性增强或减弱,影响底部渗漏通量变化。在非冻结期间,季节冻土、多年冻土与非冻土的土壤属性相似,土壤储水量、底部渗漏通量主要受降水强度、土壤质地、蒸散发、植被覆盖等外部因素影响。

(3) 对比季节冻土与多年冻土垂直剖面含水量



注:图a中曲线从右至左依次为2016年10月25日至11月12日不同深度土壤含水量变化情况;图b中曲线从左至右依次为2017年5月8日至6月6日不同深度土壤含水量变化情况。

图10 多年冻土冻结开始期间(a)和融化开始期间(b)土壤含水量变化

Fig.10 Changes of soil water content of permafrost at the beginning of freezing (a) and thawing (b)

变化,冻土冻结开始期间含水量逐渐减少,融化开始期间含水量逐渐增加。浅层冻土稳定性不如深层,因此,土壤含水量变化幅度大。与多年冻土不同,季节冻土地下80 cm处土壤含水量出现明显的“跃减(跃增)”现象。原因可能是:冻结开始期间季节冻土双向冻结,随着时间的推移,冻结深度逐渐加深,冻结带的下限也随之下降。当冻结带的下限到达80 cm时达到最大冻结深度,土壤中的未冻水绝大部分冻结成冰,土壤含水量“跃减”。同理,融化开始期间80 cm处冻结水迅速释放,土壤含水量“跃增”。

## 4 结论

基于HYDRUS-1D模型,本文对黄河源区季节冻土和多年冻土活动层年内冻土水文关键要素变化进行分析。结果表明:

(1) 冻土冻融循环会导致土壤水力参数发生变化。季节冻土和多年冻土饱和含水率 $\theta$ ,冷季大于暖季;对残余含水率 $\theta_r$ 而言,季节冻土不同深度冷季均小于暖季,而多年冻土仅深层冷季小于暖季。

(2) 季节冻土与多年冻土活动层冻融过程中土壤含水量变化过程相似,年内冻结期间土壤含水量呈“U”形变化,待完全融化后土壤含水量主要受降水等外部因素影响。对季节冻土而言,不同深度土壤含水量冷季小于暖季。

(3) 冻结稳定时期季节冻土储水量减少比多年冻土快,二者底部渗漏通量都不断减少,而多年冻土由于活动层底板的存在,底部渗漏通量减少到0后保持不变。

(4) 季节冻土与多年冻土活动层在地下20 cm处有冻结锋面。冻结开始期间土壤水双向流向冻结锋面,融化开始期间土壤水由冻结锋面双向流出。

## 参考文献(References)

[1] 钟敬玥, 康世昌, 郭万钦, 等. 最近十多年来冰冻圈加速萎缩: IPCC第六次评估报告之冰冻圈变化解读 [J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 946-953. [Zhong Xinyue, Kang Shichang, Guo Wanqin, et al. The rapidly shrinking cryosphere in the past decade: An interpretation of cryospheric changes from IPCC WGI Sixth Assessment Report. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3): 946-953.]

[2] 张威, 李亚鹏, 柴乐, 等. 1990—2020年间念青唐古拉山中段北坡边坝地区冰川变化及气候响应 [J]. 地理科学

进展, 2021, 40(12): 2073-2085. [Zhang Wei, Li Yapeng, Chai Le, et al. Glacier change and response to climate in the northern slope of the middle Nyainqêntanglha Mountains during 1990–2020. Progress in Geography, 2021, 40(12): 2073-2085.]

[3] 陈瑞, 杨梅学, 万国宁, 等. 基于水热变化的青藏高原土壤冻融过程研究进展 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(11): 1944-1958. [Chen Rui, Yang Meixue, Wan Guoning, et al. Soil freezing-thawing processes on the Tibetan Plateau: A review based on hydrothermal dynamics. Progress in Geography, 2020, 39(11): 1944-1958.]

[4] Cheng G D, Wu T H. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(F2): F02S03. doi: 10.1029/2006JF000631.

[5] St Jacques J-M, Sauchyn D J. Increasing winter baseflow and mean annual streamflow from possible permafrost thawing in the northwest territories, Canada [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36: L01401. doi: 10.1029/2008GL035822.

[6] Bibi S, Wang L, Li X P, et al. Climatic and associated cryospheric, biospheric, and hydrological changes on the Tibetan Plateau: A review [J]. International Journal of Climatology, 2018, 38: E1-E17. doi: 10.1002/joc.5411.

[7] Oliva M, Pereira P, Antoniadis D, et al. The environmental consequences of permafrost degradation in a changing climate [J]. Science of the Total Environment, 2018, 616/617: 435-437.

[8] Woo M K, Kane D L, Carey S K, et al. Progress in permafrost hydrology in the new millennium [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2008, 19(2): 237-254.

[9] 杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 水文学研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 36-45. [Yang Dawen, Xu Zongxue, Li Zhe, et al. Progress and prospect of hydrological sciences. Progress in Geography, 2018, 37(1): 36-45.]

[10] Wang S L, Jin H J, Li S X, et al. Permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau and its environmental impacts [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2000, 11(1): 43-53.

[11] 马俊杰, 李韧, 刘宏超, 等. 青藏高原多年冻土区活动层水热特性研究进展 [J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 195-204. [Ma Junjie, Li Ren, Liu Hongchao, et al. A review on the development of study on hydrothermal characteristics of active layer in permafrost areas in Qinghai-Tibet Plateau. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 195-204.]

[12] 胡国杰, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土区土壤冻融期间水热运移特征分析 [J]. 土壤, 2014, 46(2): 355-



360. [Hu Guojie, Zhao Lin, Li Ren, et al. Characteristics of hydro-thermal transfer during freezing and thawing period in permafrost regions. *Soils*, 2014, 46(2): 355-360. ]
- [13] Chang J, Wang G X, Li C J, et al. Seasonal dynamics of suprapermfrost groundwater and its response to the freezing-thawing processes of soil in the permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58(5): 727-738.
- [14] 秦毅坤, 王泽根, 范东明. 青藏高原区域水储量变化的GRACE RL06和TRMM联合反演[J]. *测绘学报*, 2020, 49(10): 1285-1294. [Qin Yikun, Wang Zegen, Fan Dongming. The joint inversion of regional water reserve changes in the Qinghai-Tibet Plateau based on GRACE RL06 and TRMM data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(10): 1285-1294. ]
- [15] 冯雨晴. 青藏高原冰川冻土变化及其生态与水文效应研究: 以黄河源、雅鲁藏布江流域和冻土退化带为典型区[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [Feng Yuqing. Changes of glaciers and permafrost in Qinghai-Tibet Plateau and their ecological and hydrological effects: Take the Yellow River source, the Yarlung Zangbo River Basin and permafrost degradation turning zone as typical study region. Beijing, China: China University of Geosciences (Beijing), 2020. ]
- [16] 陈发虎, 汪亚峰, 甄晓林, 等. 全球变化下的青藏高原环境影响及应对策略研究[J]. *中国藏学*, 2021(4): 21-28. [Chen Fahu, Wang Yafeng, Zhen Xiaolin, et al. Environmental impacts and response strategies on the Qinghai-Tibet Plateau under global change. *China Tibetology*, 2021(4): 21-28. ]
- [17] 刘扬李. 基于WEP模型的高原寒区冻土水循环模拟研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019. [Liu Yangli. Water cycle simulation of frozen soil in plateau cold region based on WEP model. Zhengzhou, China: North China University of Water Resources and Electric Power. 2019. ]
- [18] 张伟, 王根绪, 周剑, 等. 基于CoupModel的青藏高原多年冻土区土壤水热过程模拟[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1099-1109. [Zhang Wei, Wang Genxu, Zhou Jian, et al. Simulating the water-heat processes in permafrost regions in the Tibetan Plateau based on CoupModel. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1099-1109. ]
- [19] 秦越. 青藏高原东北部典型流域冻土退化及其生态水文效应研究[D]. 北京: 清华大学, 2018. [Qin Yue. Frozen ground degradation and its eco-hydrological impacts in typical basins in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau. Beijing, China: Tsinghua University, 2018. ]
- [20] 赵广涛, 徐翠玲, 张晓东, 等. 海底沉积物—水界面溶解甲烷渗漏通量原位观测研究进展[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(12): 73-81. [Zhao Guangtao, Xu Cuiling, Zhang Xiaodong, et al. Research progress in in-suit observations of dissolved methane seepage fluxed across the water-sediment interface. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2014, 44(12): 73-81. ]
- [21] 苟娇娇, 缪驰远, 段青云. 水文模型参数敏感性分析—优化—区域化方法研究进展[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(7): 1338-1348. [Gou Jiaojiao, Miao Chiyuan, Duan Qingyun. Progress in parameter sensitivity analysis-optimization-regionalization methods for hydrological models. *Progress in Geography*, 2022, 41(7): 1338-1348. ]
- [22] 孙青言, 陆垂裕, 郭辉, 等. 地表水地下水耦合模型在大型山丘平原交错区的研发与应用[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(8): 1371-1385. [Sun Qingyan, Lu Chuiyu, Guo Hui, et al. A coupled surface water-groundwater model and its application in a large-scale hillplain region. *Progress in Geography*, 2021, 40(8): 1371-1385. ]
- [23] Šimůnek J, Genuchten M T, Šejna M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes [J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2): 587-600.
- [24] 毕彪, 钱云楷, 艾宪锋, 等. 基于HYDRUS-1D模拟的降雨入渗条件下VG模型参数敏感性分析[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(7): 36-41. [Bi Biao, Qian Yunkai, Ai Xianfeng, et al. Sensitivity analysis of VG model parameters under rainfall infiltration using HYDRUS-1D simulation. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(7): 36-41. ]
- [25] 陆智博, 宋芊, 赵健赟, 等. 黄河源区2005—2020年生态用地格局变化与分异趋势[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(6): 277-284. [Lu Zhibo, Song Qian, Zhao Jianyun, et al. Changes in ecological land patterns and divergence trends in Yellow River source area from 2005 to 2020. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(6): 277-284. ]
- [26] Gao Z Y, Niu F J, Wang Y B, et al. Suprapermfrost groundwater flow and exchange around a thermokarst lake on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 593: 125882. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125882.
- [27] 阳勇, 陈仁升. 冻土水文研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 711-723. [Yang Yong, Chen Rensheng. Research review on hydrology in the permafrost and seasonal frozen regions. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 711-723. ]

- [28] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 长江黄河源区多年冻土变化及其生态环境效应 [J]. 山地学报, 2004, 22(3): 278-285. [Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, et al. Permafrost change and its effect on eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers. Journal of Mountain Science, 2004, 22(3): 278-285. ]
- [29] 曹伟, 盛煜, 吴吉春, 等. 黄河源区不同类型冻土土壤水分入渗特性 [J]. 生态学报, 2021, 41(2): 655-664. [Cao Wei, Sheng Yu, Wu Jichun, et al. Soil moisture infiltration characteristics of different types of frozen soil in the source area of the Yellow River. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 655-664. ]
- [30] 李云玲, 郭旭宁, 郭东阳, 等. 水资源承载力评价方法研究及应用 [J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 342-349. [Li Yunling, Guo Xuning, Guo Dongyang, et al. An evaluation method of water resources carrying capacity and application. Progress in Geography, 2017, 36(3): 342-349. ]
- [31] 梁鹏飞, 李宗杰, 辛惠娟, 等. 黄河源区径流变化特征及影响因素研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(4): 64-71. [Liang Pengfei, Li Zongjie, Xin Huijuan, et al. Characteristics of runoff changes and influencing factors in the source region of the Yellow River. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2022, 33(4): 64-71. ]
- [32] 罗琪, 张廷龙, 李振朝, 等. 黄河源区高寒草地—大气间水热交换通量特征 [J]. 气象与减灾研究, 2022, 45(3): 207-215. [Luo Qi, Zhang Tinglong, Li Zhenchao, et al. Characteristics of vapour and heat flux exchange between alpine grassland and atmosphere in the source region of the Yellow River. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2022, 45(3): 207-215. ]
- [33] 张戈, 赖欣, 刘康. 黄河源区玛曲土壤冻融过程中地表水热交换特征分析 [J]. 高原气象, 2023, 42(3): 575-589. [Zhang Ge, Lai Xin, Liu Kang. Characteristics of surface water and heat exchange during soil freezing and thawing of Maqu Station in the source area of the Yellow River. Plateau Meteorology, 2023, 42(3): 575-589. ]
- [34] 张海阔, 姜翠玲, 李亮, 等. 基于HYDRUS-1D模拟的变水头入渗条件下VG模型参数敏感性分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 32-40. [Zhang Hai-kuo, Jiang Cuiling, Li Liang, et al. Parameter sensitivity analysis of VG model in the varying-head infiltration based on HYDRUS-1D simulation. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(1): 32-40. ]
- [35] 洪光宇, 王晓江, 刘铁山, 等. 基于Hydrus-1D模型的毛乌素沙地杨柴(*Hedysarum laeve*)灌木林土壤含水量模拟 [J]. 中国沙漠, 2022, 42(6): 233-242. [Hong Guang-yu, Wang Xiaojang, Liu Tieshan, et al. Applicability of Hydrus-1D Model in simulating the soil moisture in *Hedysarum laeve* in Mu Us Sandy Land, China. Journal of Desert Research, 2022, 42(6): 233-242. ]
- [36] 王晓彤, 胡振琪, 梁宇生. 基于Hydrus-1D的黄河泥沙充填复垦土壤夹层结构优化 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 76-86. [Wang Xiaotong, Hu Zhenqi, Liang Yusheng. Structural optimization of reclaimed subsidence land interlayers filling with the Yellow River sediments using a Hydrus-1D model. Transactions of the CSAE, 2022, 38(2): 76-86. ]
- [37] Šimůnek J, Šejna M, Saito H, et al. The Hydrus-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media [R]. Riverside, USA: University of California Riverside, 2005.
- [38] Šimůnek J, Šejna M, Saito H, et al. The Hydrus-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 4.17 [R]. Riverside, USA: University of California Riverside, 2013.
- [39] Zheng C, Šimůnek J, Zhao Y, et al. Development of the Hydrus-1D freezing module and its application in simulating the coupled movement of water, vapor, and heat [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126250. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126250.
- [40] 刘建龙, 滕继东, 张升, 等. 气态水迁移诱发非饱和粗粒土冻胀的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(7): 1297-1305, 1379. [Liu Jianlong, Teng Jidong, Zhang Sheng, et al. Experimental study on frost heave in unsaturated coarse-grained soil caused by vapour transfer. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(7): 1297-1305, 1379. ]
- [41] 温智, 邓友生, 冯文杰, 等. 冻土水分迁移机理研究: 评述与展望 [J]. 冰川冻土, 2023, 45(2): 588-589. [Wen Zhi, Deng Yousheng, Feng Wenjie, et al. Study on the mechanism of moisture migration in freezing soils: Review and prospect. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(2): 588-589. ]
- [42] 汪菲, 唐少容, 王红雨. 季冻区土体水分迁移研究综述 [J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(S1): 51-55, 70. [Wang Fei, Tang Shaorong, Wang Hongyu. Review of research on soil mobility in seasonally frozen area. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(S1): 51-55, 70. ]
- [43] Cao W, Sheng Y, Wu J C, et al. Soil hydrological process and migration mode influenced by the freeze-thaw process in the activity layer of permafrost regions in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 184: 103236. doi: 10.1016/j.coldregions.2021. 103236.
- [44] 曹伟, 盛煜, 吴吉春, 等. 黄河源区多年冻土活动层土壤

水文过程季节变异分析 [J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 1-10. [Cao Wei, Sheng Yu, Wu Jichun, et al. Seasonal variation of soil hydrological processes of active layer in source region of the Yellow River. *Advances in Water Science*, 2018, 29(1): 1-10. ]

[45] 秦萍, 王正, 孙兆军, 等. 基于 LH-OAT 方法的 VG 模型参数敏感性分析 [J]. 节水灌溉, 2019(10): 97-102. [Qin Ping, Wang Zheng, Sun Zhaojun, et al. Sensitivity analysis of VG model parameter based on LH-OAT method. *Water Saving Irrigation*, 2019(10): 97-102. ]

## Variation and characteristics of soil hydrological elements in the source region of the Yellow River

SHI Faxiang<sup>1,3</sup>, QIN Jia<sup>1,3\*</sup>, HAN Tianding<sup>1,3</sup>, SUN Yang<sup>4</sup>, YANG Bingfeng<sup>5</sup>,  
FU Xiaolei<sup>6</sup>, YOU Yanhui<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China; 5. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 6. Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China)

**Abstract:** Hydrological element variation analysis and key parameter identification are one of the core contents of the research on hydrological processes and model simulation in the source region of the Yellow River. In order to understand the influence of freeze-thaw action on soil hydrological elements in the source region of the Yellow River, this study compared the data from the MQ seasonally frozen soil observatory and the KQ permafrost observatory. Based on the data of field monitoring, variability of soil hydrological elements was examined and simulated by the freeze-thaw module of the HYDRUS-1D software. The results showed that: 1) The freeze-thaw process of soil leads to changes of soil hydrological elements. The saturated soil moisture ( $\theta_s$ ) of seasonally frozen soil is higher during cold period than warm period, the residual soil moisture ( $\theta_r$ ) is the opposite. For permafrost,  $\theta_s$  during cold period is higher than warm period,  $\theta_r$  during cold period is lower than warm period in the deep layer only. 2) The soil water content of both seasonally frozen soil and permafrost shows a U-shaped change during freezing within the year, and the water storage of seasonally frozen soil decreases faster than permafrost during the rapid freezing period. 3) The bottom leakage flux of seasonally frozen soil and permafrost both decreases continuously during the stable frozen period, while the bottom leakage flux of permafrost decreases to 0 because of the baseplate of permafrost active layer, and remains unchanged. 4) The frozen peak point of both seasonally frozen soil and permafrost exists at 20 cm below soil surface. Soil water flows bilaterally to the frozen peak point during the rapid freezing period, and flows bilaterally out from the frozen peak point during the rapid thawing period. This study has important theoretical and practical value for understanding of the hydrological process of frozen soil more profoundly and optimizing the management of water resources in the source region of the Yellow River.

**Keywords:** soil hydrological elements; soil hydraulic parameters; seasonally frozen soil; permafrost; source region of the Yellow River