

# 寒区中小河流冻土水文特性与产流机制探讨

1张廷利 2刘振海

1 呼伦贝尔水文水资源分中心; 2 根河市住房和城乡建设局

**[摘要]**寒区中小河流生态环境、水文特性相对复杂,特别是国内外对冻土期产流机制相对不系统,需要工作人员重点评估产流机制的特点,通过结合黑龙江省汤旺河春季融雪径流情况,分析出寒区动土影响下中小河流的产流机制和特点,采用相关案例及成果资料分析冻土期及洪水期产流的对比关系,依托黑龙江省的天气气象、水文特点确定产流规律,计算出春季的水量、水文预报情况,提高水量分析的有效性。基于此,文章就寒区中小河流冻土水文特性与产流机制进行了分析。

**[关键词]**寒区;中小河;冻土;融雪径流;产流

**[DOI]** 10.12252/j.issn.2096-627X.2021.12.1608

## 引言

寒区中小河冻土多发于东北地区,其原因是该地区的温度较低(大多在零摄氏度以下),冰渣中混有不同规模的岩石和土壤。其中,寒区中小河冻土可细分为短期、季节性及多年冻土三种类型。另外,地球表面多年冻土及季节性冻土占据陆地面积的50%。相关统计显示,多年冻土占陆地面积的25%,故工作人员要做好冻土温度的控制,确保冻土的流变性相关标准。一旦冻土的强度远小于相关标准时,可能会导致周边建筑物、径流出现冻胀和融沉的危险。

## 一、寒区中小河流基本概述

寒区中小河流支流,共分为东西两源头,东侧为主流,流域地理位置为东经 $128^{\circ}52' \sim 129^{\circ}50'$ 之间,北纬 $47^{\circ}26' \sim 48^{\circ}43'$ 之间,汇入松花江当中。该河流域总长度为454km,流域面积约20779平方千米,河道平均比值为0.657%。由于流域的气候条件为温带大陆性季风气候,春季、秋季的温度变化较大,存在升温缓慢、降温速度快的特点,大风天气频发,夏季降水量较大,相对湿度较大,冬季寒冷、少雨且极为漫长。另外,平均气温较低,大约为 $-1.05^{\circ}\text{C} \sim -1.01^{\circ}\text{C}$ 之间,全年气温在 $10^{\circ}\text{C}$ 以上,积温在 $1995^{\circ}\text{C} \sim 2336^{\circ}\text{C}$ 之间<sup>[1]</sup>。另外,本地区全年日照天数较多,每年日照时间在2400h左右,无霜期时间较长,约全年的三分之一,时间约为120d左右。河流封冻期时间为160d,全年流冰期时间约为15d,最大冰面厚度为1.25m,最大冻土深度为3.1m,且全年平均水面的蒸发量超过465mm。由于该河流处于中高纬度的寒冷地带,冻土时间较长,每年超过200d,在季节交替的作用下,发现该地的在每年夏季流量明显提升。为探索冻土水分的动态规律特征,工作人员要结合当地的生态环境、水流资源、水文报告展开系统的评估与分析,确定寒区冻土层水文、土壤的规律特征。

## 二、寒区冻土层中土壤水分动态规律

冻土主要包括不稳定封冻期、稳定封冻期、不稳定融冻期、稳定融冻期、无冻期几个阶段,在当地气温、积雪、冻土功能的影响下,土壤的包气带厚度及土壤中的水分存在一定变化规律,且这一现象与降水径流的变化有着较为直接的关系<sup>[2]</sup>。另外,冻土本身含冰碴的体积较大,故冻土并不透水,具备调节、蓄水的作用,也可抑制蒸发进行。河流在降水作

用下,其土壤的含水量也发生一定变化,存在无冻地区和无冻期的差别。冻土形成的基本条件是当地的气温始终在零下,当局部河流出现积水问题时,土壤会逐渐解冻。同时,白天土壤气温始终在零上,而夜晚的气温始终在零下,故当地低温在 $0^{\circ}\text{C}$ 的区间波动。当地表土壤频繁在融化、冻结两个状态变化时,土壤本身会存在不稳定的封冻期,此时包气带土层温度始终高于地表的温度,并且当地的水汽、液态水会受到温度变化的影响,致使地层温度逐渐降低,最终出现冻结现象。在地面降水、融雪渗入的影响下,水资源会在近地表区域聚集冻结现象。一旦地面温度趋于 $0^{\circ}\text{C}$ 以下时,地面会处于稳定的封冻期状态,而冻土不会受到雨水入渗的影响,并且冻土下方界面的水分及其蒸发水分会迅速移动到冻层趋于,以冰晶的表现方式集聚在冻结锋面,并逐渐充填到土壤的孔隙当中。由于地平地土壤的含水量相对较大,当地表水位较高时,土壤中滞留的水分相对不稳定,在重力作用下进入到不稳定封冻趋于,当冻土层的含水量大于田间的持水量时,冻土层处于一个饱和的状态。另外,冻层内部土壤、水分的活动相对微弱,基本不会向上方蒸发。融冻期状态下,融冻的冰层会与水分运动、重力条件、温度势能共同作用,但主导为基质势,处于冻结表面的上方(融冻层),此时水分会逐渐出现蒸发情况,也会在由下至上运移的作用下出现融冻界面滞留的问题,故需要水分继续填充作用,直至土壤孔隙被填满,最终形成冻层水。

最后,冻土融化后会逐渐浸入土壤当中,此时土壤会受到基质势、毛管势及自身重力的影响下出现运移,总水势剖面表现为零通量面状态。由于水分作用主要表现为零通量面,处于向上和向下的运移状态,上、下运移分别表现为蒸发、补给供水的作用<sup>[3]</sup>。零通量面的位置参数也与当地的降水量相关,当黑龙江省出现大规模降水情况时,零通量面会出现上升状态,当处于一定高度后会逐渐小时。因此,零通量面供水非常充分,它会促使整个坡面受到向上蒸发的影响,还会受到重力的影响,及时补充地下水资源,在降雨间歇期间,包气带土壤会受到蒸发的影响,导致零通量面出现下降状态,但零通量面的埋深不会达到潜水表面,此时潜水表面不会蒸发。

## 三、寒区冻土层作用下的产流机制

### (一) 融雪径流机制

融雪径流机制主要发生在初春,在天气初步回温的影响

下,黑龙江地区的太阳辐射量会逐渐增强,此时地表的积雪已经出现融化现象,而融化放热主要吸收了当地空气中的温度,故此融雪量大致在65%至70%左右、当地太阳辐射量约为33%左右。强降雨、融化放热会给予冻土表面一定热源,会导致凝结的积雪结构发生改变,进而导致积雪的理化性质也发生一定变化,促进了积雪的融化过程。在此过程中,融雪出水属于物理变化,融化过程中积雪所融化的水会在薄膜和悬着毛管中出现,促使雪颗粒逐渐填充孔隙,并在重力作用下出现重力水,促使水资源向土壤表面流动。一旦当融雪强度超过融雪下渗的强度时,冻土会形成重力水和毛管水。其中,薄膜水、毛管水均做垂直方向的运动,并在重力作用下向岸坡移动。初期状态下融雪水会出现地下下渗的情况,当坑洼填满后会开始流淌。在融雪、出水至最后径流出现的阶段,各个阶段的时间阶段均会出现一定停滞情况,不论是融雪期的降温状态抑或是融雪水的雪层冻结状态,都会受到当地低温升高的影响又一次出现融化现象。例如融雪过程的温度较低,此时融雪水下层土壤受到冰点温度的影响,又一次出现冻结反应,此时被冻结区域需要等到气温升高后才可实现融化,但白天、夜晚的冻结情况都会导致融雪径流过程更加滞后<sup>[4]</sup>。

当融雪的水量在地表时,地表中部分水资源需要被蒸发,另一部分水资源需要填充值坑洼区域,还有一小部分的水资源会汇入松花江内。因此,冻土不透水层与地表距离较近,其产流方法主要为地表饱和状态的径流,并且还会受到土壤中含水量和地下径流量的影响。融雪径流的形成呈由小到大的状态,过程形成了两次洪水问题,均会受到当地低温到高温状态的变化而变化<sup>[5]</sup>。统计当地水文条件后可以发现,春季径流是一个混合径流的过程,该过程的径流的变化相对较小,且会受到融雪水量、土壤变化而变化,在气温影响下更容易导致径流滞后问题。

### (二) 融冻期与无冻期产流对比

冻土融冻期产流条件相对苛刻,它会受到直流径流参数的变化而发生变化,特别是融冻期河流的径流参数较大,且透水性较差,此时会导致融雪水和降雨均转化成径流。同时,径流流量峰值也会出现一定变化,特别冬季的径流量相对较小,例如某片地区的均为100%的冻土,此时冬季的径流量趋于0。在此过程中,融冻期、无冻期产流也会出现一定变化,所形成的产流机制也相对不同。例如融冻初期时,冻土层与地表相对接近,此时包气带的厚度参数基本为0,其产流方式主要是促使地表径流饱和为主。在融冻深度不断增加的影响下,包气带也会出现增厚,透土层就会出现下移现象,导致饱和和区域的面积缩小。此时,土壤中的径流量和地下水资源的径流比重会有明显差别,处于增加状态,最终会导致冻土层化通,故冻层的水位会明显下移,产流方式与无冻期相类似。受冻土透水性的影响,当自然降水浸入土壤内部时,水量会在冻层锋面大量集聚,处于上升状态,此时冻层上方容易形成一个自由的水平

面,故冻层径流积水深度也会出现一定变化。如果当地继续有降水情况时,会继续形成一个相对稳定的地面径流。受到当地生态、水文、土壤等因素的影响,冻土融冻期降雨对地下水的补充收益较低,可能会导致土壤温度过低的问题,激发了植物的截留作用。另外,融冻期包气带的厚度相对较小,此时土壤中的水资源含量过高,故土壤可吸收的水分较少,致使径流系数也发生一定变化。无冻期状态时,土层会受到冻结影响,导致核心土壤相对疏松,但土壤的透水性能相对较好,在冻土化通的影响下,地下水位容易出现升高,出现饱和河流、地下径流混合汇入松花江的情况,此时为该状态的产流机制。在汤旺河区域的产流机制评估中,工作人员选择了1967年至2019年春季地区河流径流量的变化情况,期间要汇总水文信息资料,再对径流量进行实地考察、评估和监控,采用洪水期降雨径流方案评估土壤、降水与径流的关系,最终发现春季场次产流量相对较大。

### 结束语

综上所述,为分析寒区中小河流冻土水文特性与产流机制的影响,文章采用汤旺河的冻土水文特征进行分析,评估出该地区冻土的特点及水文动态分布规律。为提高冻产流机制分析质量,工作人员要了解冻土期、洪水期产流量的变化因素及变化影响,侧重对寒区融雪径流进行评估,可进一步提高水文预报的效率。另外,工作人员也要了解温度对冻土观测资料的直接影响,在动态化评估中分析出其产流机制,提高研究的质量。

### 参考文献:

- [1] 曹伟,盛煜,吴吉春,彭尔兴. 冻土退化影响下坡面水文过程研究进展及趋势展望[J]. 水文, 2020, 40(02): 1-6.
- [2] 丁永建,张世强,陈仁升. 冰冻圈水文学: 解密地球最大淡水水库[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(04): 414-424.
- [3] 程根伟,范继辉,彭立. 高原山地土壤冻融对径流形成的影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(10): 1020-1029.
- [4] 刘丽君,邓国立. 北方寒区河流水利工程下游最小生态需水量确定方法研究[J]. 黑龙江水利科技, 2012, 40(03): 60-61.
- [5] 叶柏生,丁永建,焦克勤,沈永平,张健. 我国寒区径流对气候变暖的响应[J]. 第四纪研究, 2012, 32(01): 103-110.
- [6] 杨广云,阴法章,刘晓凤,等. 寒冷地区冻土水文特性与产流机制研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 4.
- [7] 王晓巍. 北方季节性冻土的冻融规律分析及水文特性模拟. 东北农业大学, 2010.
- [8] 王晓巍,付强,丁辉,等. 季节性冻土区水文特性及模型研究进展[J]. 冰川冻土, 2009(5): 7.

作者简介: 张廷利, 1974年7月, 男, 内蒙古自治区, 最高学历, 本科, 现有职称, 副高级工程师, 研究方向: 陆地水文