

高寒区土壤包气带融雪入渗特征及其影响因素分析*

戴长雷^{1,2,3}, 孙思淼^{2,3}, 叶勇⁴

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程博士后科研流动站, 哈尔滨 150001; 2. 黑龙江大学 水利电力学院, 哈尔滨 150080; 3. 黑龙江大学 寒区地下水研究所, 哈尔滨 150080; 4. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要:融雪入渗是寒区重要的标志性水文过程之一, 其特性及影响因素对于寒区春季产汇流过程、农业灌溉及地下水模拟与利用等方面的研究都起到至关重要的作用。融雪入渗过程可以大致划分为积雪层入渗、融层入渗、冻层入渗和未冻包气带层入渗 4 个阶段, 主要影响因素包括上述 4 个层位的位置规模、结构岩性、容水性、持/给水性质、透水性, 以及其对应的积雪表面、地表面、冻层上界面、冻层下界面、地下潜水面 5 个界面的界面特征, 同时环境影响因子对于融雪入渗过程也有一定的影响。

关键词:融雪; 入渗; 影响因素; 包气带; 寒区

中图分类号: S152.7; P941.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)03-0269-04

Analysis of Influencing Factors of Snowmelt Water Infiltration into Ground in Frigid Zone

DAI Chang-lei^{1,2,3}, SUN Si-miao^{2,3}, YE Yong⁴

(1. Postdoctoral Scientific Research Station of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Water Conservancy & Electric-power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 3. Institute of Frigid Zone Groundwater, Heilongjiang University, Harbin, 150080, China; 4. Institute of Water Resources, IWH, Beijing 100044, China)

Abstract: The infiltration of snowmelt water into ground, one of the most important parts and symbols of hydrologic cycle in frigid zone, is crucial to the researches on generation and confluence process of spring runoff, agricultural irrigation and groundwater simulation and management in frigid zone. It can be reduced to 4 phases: infiltration in snow cover; infiltration in soil melting layer; infiltration in soil frost layer; and infiltration in unfrozen aeration zone. Influencing factors of snowmelt water infiltration into ground can be classified into 3 types. The first are interfaces which include the snow surface, ground surface, upper bound of frost layer, below bound of frost layer and water table. The second include the situation, scale, structure, lithology characteristics, water capacity, water retention and water permeability of the 4 layers above the last are surroundings and regional factors which can also influence the process to some degree.

Key words: snowmelt; infiltration; influencing factors; unsaturated zone; frigid zone

在特殊的低温条件作用下, 寒区冻融现象交替发生。对于包气带土壤来说, 每年春天, 上覆积雪融化, 融雪水部分蒸发, 部分产流, 更多的是下渗越过积雪层来到土壤包气带部分融冻的层位。寒区土壤包气带春季融雪入渗特征分析对于如下三个方面的研究有重要影响: (1) 寒区春季河川产汇流分析; (2)

寒区春季农业灌溉量计算^[1-2]; (3) 寒区春季地下水动态模拟^[3-4]。其中, 对于融雪产汇流的研究则主要集中于融雪径流预报方面: 俞鑫颖等^[5]、裴欢等^[6]结合 GIS 与 DEM 技术建立了分布式融雪径流模型, 并对典型区实例进行应用分析, 王建等^[7]利用积雪的能量平衡和修正的 SCS 径流方程来模拟高寒草

* 收稿日期: 2010-02-09

基金项目: 黑龙江大学青年科学基金(QT01); 黑龙江大学博士启动基金; “十一五”国家科技支撑计划重点三级专题(2006BAB14B0406)

作者简介: 戴长雷(1978-), 男, 山东郓城人, 博士, 副教授, 主要从事寒区地下水及国际河流方向的教学及科研工作。E-mail: hydro-dai Changlei@126.com.

地积雪融水和雨水混合补给径流,都取得了较好效果,而利用试验方法进行融雪径流较少,杨绍富、刘志辉^[8]通过接水称重试验观测到某坡度下试验样方侧向出流的融雪水量;在融雪入渗对农业灌溉方面的影响,樊贵盛^[9-10]、郑秀清^[11-12]、何志萍^[13]、陈军锋^[14]等人以冬春两季大田灌溉实验为手段,全面、系统地研究了土壤在冻融作用下的入渗特性、阻渗机理和影响冻融土壤入渗特性的主要因素,为冬灌及农业节水灌溉提供了大量数据与理论基础;在融雪入渗对于地下水影响方面也有一定的研究,如:尚松浩、雷志栋等^[15]建立了地下水浅埋条件下土壤水热耦合迁移模型,进行了冻融期地下水位变化情况下土壤水分运动的研究,郭占荣等^[16]选择天山典型冻土区的 3 种代表性土壤,利用地中渗透仪观测冻融期的地下水补给与损耗,肖迪芳等^[17]在分析冻土水文特性和地下水补给过程的基础上,根据 58 个地下水位观测点资料,分析了寒区地下水位变化与降水及河流水位变化之间的关系;另外,周石礞等^[18-20]对雪中水分迁移的机理及影响因素进行了一系列实验研究,为寒区包气带以上积雪层水分迁移提供了丰富的理论依据。

1 入渗特征

寒区土壤包气带融雪入渗过程可以分为积雪层入渗、融层入渗、冻层入渗、冻层至饱水带入渗 4 个阶段,如图 1 所示。

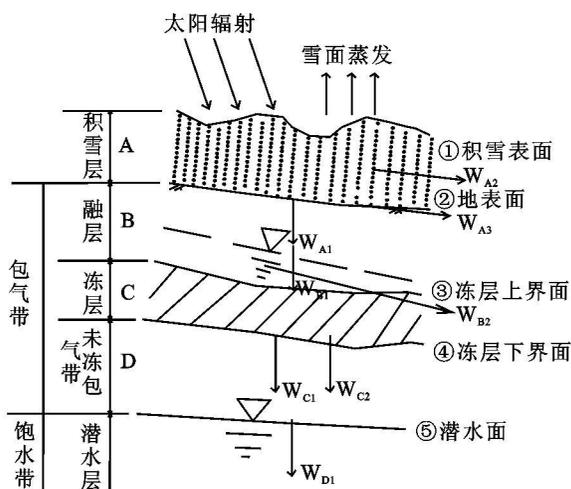


图 1 寒区融雪入渗过程概念图

1.1 积雪层入渗

在太阳辐射、温度、风力等因素的共同作用下,地表积雪自表面和层间同时融化。融雪水部分蒸发,部分形成汇流积聚后侧向或垂向运动:一方面形成雪层侧向渗流,一方面在重力的作用下穿过积雪层,渗至积雪层和包气带交界的地表面。这是寒区

春季融雪入渗的第一个阶段,其水量平衡公式如下。

$$W_A = W_{A1} + W_{A2} + W_{A3} \quad (1)$$

式中: W_A ——积雪表面和积雪内部融雪水总量 (L^3); W_{A1} ——积雪层底部水分向下入渗量 (L^3); W_{A2} ——积雪层间水分侧向流量(类似壤中流) (L^3); W_{A3} ——积雪底部水分侧向径流量 (L^3)。

1.2 包气带融层入渗

在春季融雪的同时,由于温度的升高,冬季完全冻结的土壤包气带自上而下开始融化,在地表和尚未融透的冻层之间形成一个融层。当融雪水越过积雪层到达地表面后,如果融雪水足够多且超过地表面的渗透能力,则部分融雪水沿着地表超渗产流,部分融雪水穿过地表渗入包气带融层。由于下伏冻层的渗透能力远小于融层,当融雪速度大于融层底部下渗速度时,水分在融层底部渐渐地蓄积起来,部分形成侧向的壤中流,部分在融层饱水以后,溢出地表,蓄满产流,这一阶段的水量平衡公式如下。

$$W_B = W_{B1} = W_{B1} + W_{B2} \quad (2)$$

式中: W_B ——融层顶部渗入水量,其值与积雪层底部渗出量 (W_{A1}) 相等 (L^3); W_{B1} ——融层底部向下渗水量 (L^3); W_{B2} ——融层包气带侧向壤中流量 (L^3)。

1.3 包气带冻层入渗

从融化开始,到融化结束,寒区冻层和融层一般会共存 12 个月。由于地下冰的胶结作用,冻层的渗透性能一般小于融层。同时,由于冻层的岩土层冻结前属于包气带,冻结后仍存在连通的孔隙,所以冻层仍然可以透水。在融层底部蓄积的地下水,一方面传递热量加速冻层上部的融化,一方面有部分融雪水越过冻层界面继续向下渗流进入冻层。这部分融水在冻层内向下渗流的过程中,由于重力因素和热力因素双重驱动,部分水分遇冷变成地下冰加强了冻层,部分地下冰遇热被渗流融化从而加强了下渗的水量。最后,终于有部分下渗水在耗尽热量前穿过冻层,这一阶段的水量平衡公式如下。

$$W_C = W_{C1} = W_{C1} + W_{C2} \quad (3)$$

式中: W_C ——冻层顶部渗入水量,其值与融层底部渗出量 (W_{B1}) 相等 (L^3); W_{C1} ——冻层底部向下渗水量 (L^3); W_{C2} ——冻层地下冰与下渗水流交换水量(可正可负) (L^3)。

1.4 冻层至饱水带的入渗

穿过冻层的融雪水在重力作用下继续下渗,最后到达潜水饱水带。这一过程中,水分一般不会发生侧向径流。这一阶段的水量平衡公式如下。

$$W_D = W_{D1} = W_{D1} \quad (4)$$

式中: W_D ——冻层下包气带顶部渗入水量,其值与

冻层底部渗出量($W_{c1} + W_{c2}$)相等(L^3); W_{D1} —— 冻层下包气带下渗补给潜水带的水量(L^3)。

2 影响因素

基于上述分析可知, 可将影响寒区土壤包气带春季融雪入渗的因素分为界面因素、层间因素和环境因素三大类。

表 1 影响融雪入渗的界面因素

界面名称	所处位置	界面特征	影响融雪入渗的因素	向下渗入项	向上渗出项
积雪表面	整个融雪入渗系统的最上面	界面可能有起伏	太阳辐射、温度、风速、风向、大气降水、降尘等	降水入渗	雪面蒸发
地表面	积雪层和融层之间	可能是草地、森林、耕地、人工不透水面、或不土壤质地的裸地	透水性能、地面覆被等	雪层下渗水	融层蓄满溢出水
冻层上界面	融层和冻层之间	可能是连续的, 也可能是不连续的	地下冰胶结情况、地下冰融化情况等	深层渗漏水	融层底部蓄水传热而导致的冻层上部融水
冻层下界面	冻层和未冻包气带之间	可能有一定的坡度	界面孔隙度、坡度等	深层渗漏水	无
地下潜水面	未冻包气带和饱和水带之间	可能在一定的幅度内波动	地下水位的高程、埋深等	深层渗漏水	毛细水

2.2 层间因素

融雪水自上而下渗入到潜水带之前要经过 4 个层带, 它们分别是积雪层、融层、未融的冻层、未冻的

2.1 界面因素

界面是指研究对象与环境的接触带。理想条件下的融雪入渗系统的分界面自上而下存在 5 个, 它们分别是积雪表面、地表面、冻层上界面、冻层下界面和地下潜水面。各分界面的相对位置、透水性能、连续性、起伏性等特征均对融雪入渗有明显的影响, 分析归纳如表 1 所示。

包气带层。这 4 个层带的位置规模、结构岩性以及容水/ 持水/ 给水/ 透水等水理性质对于入渗量、入渗速度、入渗路径等都有明显的影响, 分析整理如表 2。

表 2 影响融雪入渗的层间因素

入渗层位	位置规模	结构岩性	容水性性质	持/ 给水性性质	透水性性质
积雪层	厚度、空间分布范围、所在地理位置、连续性等	雪粒性质、雪层密度、雪层孔隙度	雪层饱和含水量、实际含水量等	雪层持水度、给水度等	雪层渗透系数等
融层	埋深、连续性、厚度变化等	矿物成分、矿物粒径、颗粒级配、分选度、磨圆度	土壤前期含水量、岩层空隙容水度等	田间持水量、释水系数等	融层导水系数等
冻层	与上/ 下层的相对位置埋深、连续性、厚度变化等	地下冰胶结情况、冻层孔隙度	地下冰含量、地下冰/ 水比例等	冻层不同温度条件下的给水度等	冻层渗透率等
冻层下未冻包气带	范围、连续性、埋深、厚度均匀度等	矿物成分、矿物粒径、颗粒级配、分选度、磨圆度	土壤饱水度、饱和差等	实际持水度、重力给水度、贮水系数等	水力传导系数等

2.3 环境因素

温度是积雪是否融化的控制性因素, 影响融雪入渗的环境温度因素既包括具体层位的温度、具体的温

度值, 又包括温度的变化特征和累积特征。从不同的角度将影响寒区春季融雪入渗的环境因素分析总结如表 3。

表 3 影响融雪入渗的环境因素

环境因素	基本特征
上部环境因素	上部环境的太阳辐射、温度因素、风力因素、降水降尘因素、人类活动因素等
下部环境因素	下部潜水含水层的水位、水量、水温、水压、水质及其动态变化特征等
侧向环境因素	融雪入渗系统的侧向与地表水的交叉情况及水/ 热输入输出特征等
区域因素	区域地形地貌、区域基础地质、区域水文地质、区域植被、区域气候等
环境温度因素	气温、雪温、土壤温度; 时段积温、温度的正负性、温度的昼夜变化等

3 结论

融雪入渗是寒区春季最重要的水文过程之一, 分析融雪入渗特征及其影响因素对于寒区春汛产汇流计算、寒区春耕墒情灌溉补水规划等具有重要的

意义。由分析整理可知, 对于潜水位低于极限冻深、主要由松散岩土构成的土壤包气带, 融雪入渗大致可以划分为积雪层入渗、融层入渗、冻层入渗和未冻包气带层入渗 4 个阶段。上述 4 个层位及其对应的积雪表面、地表面、冻层上界面、冻层下界面、地下潜

水面 5 个界面是影响融雪入渗的主要因素,此外,环境因素还起一定的作用。基于本文分析的结果,进一步加强指标参数的试验监测和模拟模型的理论推演是亟待深入研究的方向。

参考文献:

[1] 陈晓飞,田静,张雪萍,等.积雪融雪过程中水、热、溶质耦合运移规律的研究进展[J].冰川冻土,2006,28(1):288-292.

[2] 汤英.古尔班通古特沙漠融雪水文过程试验与模拟[D].新疆石河子:石河子大学,2008.

[3] 冯宝平.入渗条件下温度对土壤水分运动及参数影响的实验研究[D].西安:西安理工大学,2001.

[4] 李扬.季节冻土水分迁移模型研究[D].长春:吉林大学,2008.

[5] 俞鑫颖,刘新仁.分布式冰雪融水雨水混合水文模型[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):23-27.

[6] 裴欢,房世峰,刘志辉,等.分布式融雪径流模型的设计及应用[J].资源科学,2008,30(3):454-459.

[7] 王建,丁永建,刘时银.高寒草地春季积雪融水和雨水混合补给径流模拟干[J].干旱区资源与环境,2006,20(1):88-92.

[8] 杨绍富.融雪过程中水热耦合实验研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2009.

[9] 樊贵盛,郑秀清,潘光在.地下水埋深对冻融土壤水分入渗特性影响的试验研究[J].水利学报,1999(3):22-27.

[10] 樊贵盛,郑秀清,贾宏骥.季节性冻融土壤的冻融特点

和减渗特性的研究[J].土壤学报,2000,37(1):24-32.

[11] 郑秀清,樊贵盛.土壤含水率对季节性冻土入渗特性影响的试验研究[J].农业工程学报,2000,16(6):52-55.

[12] 郑秀清,陈军锋,邢述彦,等.季节性冻融期耕作层土壤温度及土壤冻融特性的试验研究[J].灌溉排水学报,2009(3):65-68.

[13] 何志萍.冻融土壤水分入渗规律的试验研究[D].太原:太原理工大学,2003,1:93-98.

[14] 陈军锋,郑秀清,邢述彦,等.地表覆膜对季节性冻融土壤入渗规律的影响[J].农业工程学报,2006,22(7):18-21.

[15] 郭占荣,韩双平,荆恩春.西北内陆盆地冻结-冻融期的地下水补给与损耗[J].水科学进展,2005,16(3):321-325.

[16] 尚松浩,雷志栋,杨诗秀,等.冻融期地下水位变化情况下土壤水分运动的初步研究[J].农业工程学报,1999,15(2):64-68.

[17] 肖迪芳,张鹏远,廖厚初.寒冷地区地下水动态规律分析[J].黑龙江水专学报,2008,35(3):120-122,128.

[18] 周石砦,中尾正義,坂井亚规子,等.准确测定湿雪的含水率-秋田谷式含水率计测量值的气温订正[J].湖南师范大学自然科学学报,2001,24(2):80-83.

[19] 周石砦,中尾正義,桥本重将,等.水在雪中下渗的数学模拟[J].水利学报,2001,32(1):6-10.

[20] 周石砦,中尾正義,桥本重将,等.积雪最低含水饱和度的野外测定[J].水利学报,2004,35(2):29-33.

(上接第 72 页)

[6] Chen J, Stark J M. Plant species effects and carbon and nitrogen cycling in a sagebrush-crested wheatgrass soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 47-57.

[7] Gomah A H M, Nahid I, Amer H A. Nitrogen mineralization in sludge damended desert soil as affected by rate of sludge, salinity and wetting and drying cycles [J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1989, 3: 417-429.

[8] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,

2007.

[9] 汪勇,羊向东,沈吉,等.陕西红碱淖近百年来环境变化的湖泊沉积记录[J].湖泊科学,2004,16(2):105-112.

[10] 汪勇,沈洁,羊向东,等.陕北红碱淖沉积物粒度特征所揭示的环境变化[J].沉积学报,2006,24(3):349-355.

[11] 鲁瑞洁,夏虹,强明瑞,等.近 130 a 来毛乌素沙漠北部泊江海子湖泊沉积记录的气候环境变化[J].中国沙漠,2008,28(1):44-49.