排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 10 月 Oct. 2018 | 第 36 卷 第 10 期 Vol. 36 No. 10
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.18.1142

西藏高寒区低温融雪水灌溉研究进展与展望


汤鹏程

汤鹏程[1,2], 徐冰[1,2*], 李泽坤[2], 何蒙[3]
(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 河北省水利科学研究院, 河北 石家庄 050000)

摘要: 低温融雪水是西藏高寒区的重要灌溉水源,然而由于西藏高海拔地区低压低氧、强辐射、近地层冷热交换频繁,加之地表土层薄,低温融雪水利用不当容易对作物造成寒害,为了能高效地利用低温融雪水灌溉,解决西藏高寒区的关键科学问题,依次对低温水灌溉对土壤特性的影响、低温水灌溉对作物生长的影响、西藏高寒区低温水灌溉现状等国内外研究现状进行分析,并总结出其面临的关键科学问题. 研究分析表明,未来应围绕融雪水-土壤-牧草耦合界面开展研究,探求低温融雪水灌溉条件下耦合界面各要素(土壤水热、根系吸水特征、牧草生长与生理生态)之间的互作机制与联动过程,揭示融雪水灌溉条件下牧草受到寒害胁迫的作用机理,创新高寒区融雪水调控灌溉理论. 作物生理与土壤水热等多学科交叉研究是降低低温融雪水灌溉危害的重要研究手段. 研究结果有助于西藏高寒区提出低温融雪水合理利用模式,提升高寒区牧草产量.

关键词: 西藏高寒区;低温;融雪水;灌溉;牧草
中图分类号: S271 **文献标志码**: A **文章编号**: 1674-8530(2018)10-1029-06

汤鹏程, 徐冰, 李泽坤, 等. 西藏高寒区低温融雪水灌溉研究进展与展望[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(10):1029-1034.
TANG Pengcheng, XU Bing, LI Zekun, et al. Progress and prospect of effect of snowmelt water irrigation on soil and pasture in frigid regions of Tibet[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2018,36(10):1029-1034. (in Chinese)

Progress and prospect of effect of snowmelt water irrigation on soil and pasture in frigid regions of Tibet

TANG Pengcheng[1,2], *XU Bing*[1,2*], *LI Zekun*[2], *HE Meng*[3]
(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 3. Hebei Institute of Water Resource, Shijiazhuang, Hebei 050000, China)

Abstract: Snowmelt water is an important water source for frigid region in Tibet. However, owing to the low pressure, low oxygen, strong solar radiation, frequent heat transfer and thin soil layer, improper application of low-temperature snowmelt water will cause chilling injury for the pasture. The infiltration and runoff of low-temperature snowmelt water are important for agricultural water cycles, efficient water use and irrigation and it is one of landmark hydrological processes in frigid regions. Therefore, efficient use of snowmelt irrigation becomes a key scientific problem that needs to be solved in Ti-

收稿日期: 2018-05-23; **修回日期**: 2018-06-09; **网络出版时间**: 2018-07-16
网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180716.1548.040.html
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579158, 51609154); 中国水利水电科学研究院科研专项(MK2017J02)
第一作者简介: 汤鹏程(1988—),男,河北石家庄人,工程师,博士(tangpc1988@163.com),主要从事节水灌溉与农田尺度水转化研究.
通信作者简介: 徐冰(1977—),男,内蒙古包头人,高级工程师,博士(nmxubing@163.com),主要从事节水灌溉与农田尺度水转化研究.

bet frigid regions. The present situation of low-temperature water irrigation and the effect of low-temperature water on soil and plants in Tibet were reviewed. The multi disciplinary including subjects of crop physiology, irrigation and water conservancy is the priority for reducing the hazard of low-temperature snowmelt in frigid regions of Tibet. The research results are helpful to raise the reasonable utilization mode of low-temperature snowmelt water in frigid regions of Tibet and increase the yield of pasture in frigid regions.

Key words: frigid regions of Tibet; low temperature; snowmelt; irrigation; pasture

西藏是中国五大牧区之一,天然草原8 200万hm^2,但牧区地处高原,且日温差大、太阳辐射强、空气干湿度变化大,尤其在藏北高原地区,寒旱并存,水、热资源时空分配不均,土壤贫瘠[1]. 多年来,西藏高海拔地区农、牧业生产一直停留在较为原始的生产状态,与此同时,由于农牧业生产中用水制度不健全,水利及其配套设施相对短缺,致使西藏高海拔地区灌溉、作物需耗水等水利相关科研事业发展滞后. 实际生产中西藏高海拔地区低温融雪水春灌导致牧草返青期推后、出苗率降低甚至死亡的问题同样对高寒区农业生产与草原生态产生显著影响[2].

融雪水的入渗与径流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、农业灌溉与利用的研究都起到至关重要的作用. 然而受特殊的自然地理因素与生产习俗影响,高海拔地区草地灌溉技术落后,造成灌溉草地效益低下,影响牧民发展灌溉草地的积极性. 近年来,约52%的天然草原发生沙退化,草地生态系统破坏严重. 随着牧区水利的发展,西藏地区人工牧草灌溉制度研究受到高度关注.

随着草原生态的恶化,国家、西藏自治区多举措开展保护草原生态、促进牧民增收的工作,以灌溉草地为主的牧区水利逐步受到重视. 水利部批准编制《全国牧区水利发展规划》(2012),明确牧区水利建设应“以保护和改善草原生态为基本目标,以合理开发、优化配置、保护水资源为核心,以高标准节水灌溉饲草料地建设为重点”.《西藏自治区牧区水利发展规划》提出,到2020年较现状增加灌溉饲草地5.2万hm^2,达到100万hm^2. 饲草料地建设规模的迅猛发展迫切需要研究提高饲草地节水高效的灌溉管理措施. 2005年12月,国家环境保护总局在北京组织召开了“水电水利项目水环境与水生态保护技术政策研讨会”,会议着重讨论了低温水灌溉的影响与减缓措施. 综上可知,低温水源在西藏高寒区灌溉上的应用是值得关注的科技问题. 因此,文中在阐述高海拔地区低温融雪水作为灌溉水源有何特点的基础上,依次对低温水灌溉对土壤特性的影响、低温水灌溉对作物生长的影响、西藏高寒区低温水灌溉现状层层递进逐步开展阐述.

1 国内外研究进展及问题分析

1.1 低温水灌溉对土壤特性的影响

近50 a以来,国际与国内水利相关专业专家应用不同方法,从多角度入手对不同状态土壤物理特性及土壤中温度、含水率等相关科技问题进行了大量研究. SCHADT等[3]研究表明,温度变化的非恒温条件下土壤中水分的物理性质(黏滞性、表明张力、密度等)对土壤自身温度再分布过程影响显著,继而对土壤温度势、基质势、土壤溶质势产生影响,与此同时,土壤水动力学相关参数的改变亦会反作用于土壤温度的变化. SCHERLER等[4]针对该类问题同样做了相关研究,研究表明,土壤孔隙率与外界温度变化密切相关,高温条件下土壤中冷端与热端水分交换运动更加频繁. 国内外学者对温度变化条件下的土壤入渗过程做了大量室内模拟试验,已有研究成果认为土壤自身温度越高,水流湿润锋顶端到达土柱设定位置耗费时间越少. 国内学者在20世纪90年代对温度与土壤水分特性关系进行了研究,认为温度对土壤水势的影响与土壤含水量密切相关,且具有滞后效应[5]. 任杰等[6]研究认为在无外来水源补给时,土壤不同深度含水率的变化与土壤对应埋深处温度的日变化过程存在函数关系,并认为以“天”为时间尺度时,土壤温度变化是导致土壤水分运移的重要原因之一. 高红贝等[7]就温度对土壤水分运动基本参数的影响进行了较为系统的研究,认为当土壤随埋深变化存在温度梯度时,温度因素必然会对土壤不同深度处的水分势能及动能产生影响,其中土壤水分的势能是造成土壤出现结构性改变的主要原因. 同时其研究团队通过室内试验认为温度变化对土壤的饱和导水率具有显著影

响. 当高山融雪水融化汇入河道后，水温仍较低，低温水入渗到河道两岸后，易与浅层地下水产生传递交换，低温水与天然地下水极易产生低温水层在下、天然地下水层在上的情况，造成土壤出现非等温环境，土壤出现温度梯度，低温水的汇入必然会导致土壤含水率和温度出现再分布过程. 阳勇等[8]将土壤看成饱和多孔介质，认为土壤的冻融过程及水热交换过程贯穿于寒区产流、土壤入渗及蒸散发全过程中，通过对水热耦合模型优化，并通过模型模拟探讨了季节性冻土区土壤水热传输过程，认为冻结期土壤的热传导过程往往自下而上居多，雪水及土壤融化期，土壤热传导过程自上而下居多. 王风等[9]通过多年野外观测，认为土壤表层含水率的升高与土壤深层水分在毛管作用下上移密切相关，而土壤上层与下层间的温度差是毛管作用的重要驱动力之一，其研究认为土壤中固态水含量比例是土壤含水率与土壤温度场共同作用所导致的. 张超等[10]基于热力学方程与水流动力理论对坡面薄层水流扰动下的土壤不同深度温度再分布过程进行了定量模拟与分析，认为土壤表层水流与土壤上表面之间的温度差易对表层水流的换热系数产生显著影响，进而对不同深度土壤温度变化产生影响，且深部土壤温度变化具有滞后效应. 目前国内外已有研究成果可以相对准确地描述和估算土壤水入渗的边界条件，但针对低温水尤其是高寒区融雪水入渗后形成的上部自然温度层与下部低温含水层双向水热动态变化的过程及机理研究仍不多见，同时由于低温水入渗而导致的土壤物理及水分特征参数的改变仍是亟待解决的科学问题.

针对西藏地区特殊的地理、气象条件，胡国杰等[11]、刘杨等[12]分别基于 COUPMODEL 模型与 SHAW 模型对西藏高海拔地区土壤水热耦合进行了模拟研究，但以上研究仅局限于土壤水热观测值与实测值之间的拟合，没有将实际灌溉或作物种植对土壤水热耦合的作用与反作用考虑在内. 目前高寒灌溉草地植物生理与土壤水热耦合研究缺乏学科交叉，多为相互独立、单一的植物生理学、生态学或土壤学研究. 随着近年来膜上灌、膜下滴灌等新技术的出现，土壤温度与水分的变化关系、土壤水热耦合效应研究得到进一步关注. 但目前多集中于水热变化关系、规律等，对其产生机理的研究相对较少，尤其是此类问题在高海拔地区的研究尚属于空白.

1.2　低温水灌溉对作物生长的影响

低温融雪水春灌对作物的影响主要表现在寒害与旱害上. 植物生理学上通常认为稍高于 0 ℃的温度对作物所起的有害作用，称之为寒害. 整理已有的研究成果，可以反映低温水对作物产生寒害及干旱胁迫的敏感性指标概括分为 2 类：① 作物品质与形态指标，如作物根茎结构、根系活力、作物相对产量、叶面积指数、出苗率等；② 作物生理活动指标，包括可溶性糖、可溶性蛋白质、精氨酸、脱落酸、组氨酸、脯氨酸、超氧化物歧化酶、根贮藏蛋白含量、净光合速率、蒸腾速率等[13].

就农田生产而言，土壤温度是影响作物生长的主要因素之一，其变化除受气候变化影响之外，灌溉水温度也是对其产生影响的重要参数，当土壤温度产生 1 ℃的变化时，作物生理及生长会产生明显变化. 已有研究认为低温水对植物造成危害主要是由于细胞内酶活性的降低导致的间接损伤. 当水温接近 0 ℃，植物体细胞代谢过程中的协调性会受到影响，甚至导致作物最终受伤或死亡. WU 等[14]认为，灌溉水、土壤水温度对植物生长影响的表现形式是多样化的，它可以直接影响作物的生理及吸水过程，进而对作物根区部分、植株部分等干物质的积累产生影响. 国内学者就土壤温度对大豆产量的影响进行了试验研究，认为土壤温度对大豆发育及产量影响显著，而灌溉水温度是引起土壤温度变化最直接的因素. 部分学者针对水库低温水灌溉对小麦生长的影响进行了评价，认为低温水灌溉会在一定程度上降低小麦的根系活性.

利用高山融雪水经渠道输水是当前西藏牧区草地灌溉的主要方式之一. 当地牧民习惯在播种前和分蘖前、后对牧草灌水 1 ~ 2 次，牧草生长中后期进入雨季则不再灌溉. 根据已有研究，播种前和分蘖前、后(4 月底至 6 月初，此时西藏多数草原地区积温仍较低，常伴有雨雪天气)是牧草的灌水关键期，若此时作物受到水分胁迫会导致大幅度减产. 因此，春灌既符合当地牧民生产习惯又满足牧草需水要求，对牧草产量影响显著. 但此时融雪水最低温度接近 0 ℃，相关研究表明低温水灌溉会在一定程度上降低作物的根系活性，高山融雪水经较短距离输水进入渠道后水温仍较低(0 ~ 7 ℃)，一些地区经低温融雪水灌溉后出现牧草返青推迟、出苗率低甚至死亡的现象，如图 1 所示. 造成灌溉草地效益低下，影响牧民发展灌溉草地的积极性. 当前，关于低温水对作物的影响研究主要集中于水库水、井水，

对于西藏高寒区地区温度更低的融雪水灌溉对作物的影响研究尚未见报道. 因此在西藏高寒地区,如何在防止作物因缺水导致水分胁迫的过程中,同时避免因灌溉水水温过低导致寒害发生是急需解决的科学问题.



图1 西藏低温融雪水灌溉后部分牧草出苗率低甚至减产死亡

Fig. 1 Effect of snowmelt water irrigation on pasture in frigid regions of Tibet

1.3 西藏高寒区低温水灌溉现状

截至20世纪末,西藏水利主要集中于解决农、牧民的安全饮水问题. 在国家"九五"及"十五"项目实施期间,西藏开展了以土渠防渗、防渗为主的水利工程,兼有极少量微型的高效灌溉(喷灌)先行试点项目. 在国家实施"十一五"项目期间,西藏高寒地区水利工程加速开展,截至2010年,新建完成多种水利工程项目3 000余处,新增灌溉饲草地6.07万 hm^2. 西藏高寒地区由单一种植青稞或天然草原放牧向粮食作物多元种植、新增舍饲等畜牧形式改变. 西藏阿里地区首次在海拔4 350 m的噶尔县成功引种及试种成功80 hm^2 多年生紫花苜蓿,突破了中国海拔4 000 m以上地区不能种植、生产优质多年生牧草的限制.

21世纪以来,伴随着国家与地方政府对水利项目的逐渐重视,西藏高海拔地区水利及其相关科研工作亦逐步向前推进. 中国水利水电科学研究院研究团队对西藏拉萨市当雄县灌溉人工草地建设及其规划现状进行了实地调查,初步认为唯有发展健全水利灌溉设施,推广种植多年生优质人工饲草地,才是有效应对高海拔地区草、畜矛盾的有力举措. 中国水科院徐冰研究团队通过西藏北部地区人工牧草耗水量计算,确定了西藏高寒地区高效节水灌溉系统(喷灌)的水利设计参数,并基于现有的喷灌技术和新能源提水技术,探究了适合当雄、那曲等地区的现代高效节水灌溉方法,即光伏驱动高效喷灌技术. 该研究团队(2010—2016年)在拉萨市郊、拉萨市当雄县进行耐寒作物(青稞)、耐寒牧草(燕麦)需耗水规律、高效灌溉关键技术初步研究,以多年田间定量试验为基础,初步掌握了西藏高寒地区特殊低温水源灌溉条件下作物选种、灌溉制度制定、田间管理等第一手试验资料[15].

西藏被称为中国的高原水塔,水资源储量极其丰富,地表水资源总量4 482亿 m^3,地下水资源总量1 107亿 m^3,人均水资源量约18.7万 m^3,为全国平均水平的82倍,水资源总量、人均水资源量均居全国第一. 然而西藏地区水资源总量丰富的表象之下,有近25%的耕地、人工饲草地灌溉得不到保障,绝大部分地区的田间灌溉仍以大水漫灌的形式开展,灌溉水有效利用系数低于0.4,低效的水资源利用率是西藏水资源开发利用过程中亟待解决的问题之一. 同时在西藏高寒地区特殊的气象条件下,春季土地解冻晚,由于融雪水的存在,早春高寒地区浅层土壤冻融现象交替发生. 冻融过程中土壤剖面温度和热量变化过程十分复杂,高海拔地区由于采用低温融雪水灌溉,土壤物理性质受冻融作用影响显著,低温融雪水在固态与液态二象转化过程中体积反复膨胀收缩,对土壤团聚结构产生破坏,当土壤微团聚体结构产生破坏后,直接导致土壤水分入渗率发生改变. 在西藏高海拔地区早春季节土壤极易连续发生冻融交替现象,春季低温融雪水量大,反复的冻融过程对土壤结构的破坏有叠加作用,且土壤团聚体越大,破坏叠加作用越剧烈. 由于西藏水利科研兴起较晚,以灌溉为主的农业生产等相关科研同样滞后,虽然近年来已有不同领域研究人员关注该领域相关研究,但西藏高寒条件下作物水分生理性状、极端条件下SPAC水分运移机制、作物需耗水量与灌溉制度、不同节水灌溉节水技术优选与工程参数优化等相关技术应用与科学研究极为欠缺,亟待增加和拓展,以适应新时代高寒区水利科技发展的要求.

2 面临关键科学问题及研究展望

2.1 面临关键科学问题

西藏高寒草原地区土壤贫瘠,多年耕作的土壤层仅有20~40 cm,下面多为沙层与砾石层,如图2所示. 该地区春季往往习惯利用低温融雪水漫灌人工牧草与天然草场,粗放的灌溉方式会对表层土壤性质与牧草品质产生重大影响.

当前,在国内低海拔地区对作物春灌研究表明,适宜春灌能够改善作物根系层含水量、提升作物品质,增加作物产量. 近年来,西藏高寒地区已有

研究成果表明,燕麦、青稞在雨季来临前的早期灌溉对其最终产量的影响至关重要,播种前 - 苗期的水分胁迫导致作物减产 50% 以上,由此可论证高海拔地区牧草春灌的必要性. 但是针对部分天然草场与燕麦在早春时候经融雪水灌溉后出现死苗、减产的现象尚没有合理的解释. 以西藏当雄地区 50 a 气象资料分析结果为例,正常水文年内该地区多年均降雨量为 470 mm,然而春季降雨量多年平均仅为 60 mm,7—10 月份降雨占全年 70% 以上,春季是西藏高寒区饲草地灌水的关键期. 与其他地区相比,西藏高寒区灌溉饲草地除受土壤质地、气象条件、水肥高效利用、田间管理等综合技术应用不足的影响外,低温融雪水利用不当是导致牧草增产率低甚至减产、死苗的原因之一,但是针对其产生机理尚没有合理的解释.



图 2　西藏高海拔地区薄土层现状

Fig. 2　Present situation of soil layers in frigid regions of Tibet

西藏高寒区低压低氧、强辐射、表层壤土稀薄,在如此独特的环境下,由于低温融雪水灌溉导致土壤物理、水分运动特性是如何变化的? 土壤水、热具有怎样的耦合规律? 低温融雪水灌溉对牧草生长产生何种影响? 根系吸水特性是否会出现显著变化? 牧草生理生态指标的变化规律具有何种特征? 解决这些关键科学问题,阐明西藏高寒区独特气象条件下,低温融雪水 - 土壤 - 牧草耦合界面各要素(低温水、土壤物理与水热特性、根系吸水特征、牧草生长与生理指标)之间的互作机制与联动过程,揭示融雪水灌溉条件下牧草受到寒害胁迫的作用机理,最终从牧草生长与生理学角度探求高寒区融雪水合理利用的关键阈值.

2.2　研究展望

未来研究应紧密围绕西藏高海拔地区水利科研的薄弱环节,针对西藏高寒草地利用低温融雪水进行灌溉的实际,开展如下研究:

1) 低温融雪水灌溉条件下土壤特性变化与土壤水热耦合的量化表征. 通过野外定位观测,研究不同低温融雪水灌溉定额下土壤结构体稳定型、微团聚体、容重等物理指标的变化规律;通过室内试验,对不同温度条件下土壤水分特征曲线、扩散率、导水率等水分运动参数的温度效应进行研究,探求低温融雪水灌溉条件下土壤物理与水分运动特性的变化规律. 通过对土壤水分和温度连续观测,求解偏微分控制方程(土壤水、热传导方程)获取最优边界条件,实现对土壤水热耦合的量化表征.

2) 低温融雪水灌溉对作物根系吸水的影响. 通过对作物根系密度、根系分布、根系活力的定量观测,探求低温融雪水灌溉对作物根系生长的影响;基于氢氧稳定同位素技术,通过分析植株茎水与不同水源的(降水、融雪水、土壤水)$\delta^{18}O$ 和 δD 含量组成与分布规律,确定融雪水灌溉条件下作物根系吸水来源与吸水特征.

3) 低温融雪水灌溉对作物生理指标影响及产生寒害胁迫的作用机理. 通过野外定位观测,研究不同融雪水灌溉条件下作物蒸腾速率、净光合速率、气孔导度、叶绿素荧光参数及其生物量的变化规律;通过实验室化验分析,对低温水灌溉后作物体内酶活性、作物根系渗透调节物质的指标变化特征进行研究,从植物生理学的角度揭示低温融雪水灌溉对作物产生寒害胁迫的作用机理与关键阈值.

在以上具体研究内容的基础上,探索低温水对土壤水分特性、作物根系生长及水分生理特性的影响机理,进一步深化草地灌溉基础理论. 充分结合发挥土壤学、作物生理学、土壤水动力学、农田水利学等学科的交叉优势,就低温融雪水灌溉对作物产生的寒害及干旱胁迫的影响进行研究,提出合理的融雪水径流利用模式,制定合理的融雪水春灌灌溉制度,是高寒地区草地灌溉基础理论研究的难点和技术应用急需解决的关键科技问题.

参考文献(References)

[1] 鹿海员,李和平,高占义,等. 基于草原生态保护的牧区水土资源配置模式[J]. 农业工程学报,2016,32(23):123 - 129.
LU Haiyuan, LI Heping, GAO Zhanyi, et al. Water and land resources allocation model of pastoral area based on grassland ecological conservation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 123 - 129. (in Chinese)

[2] 汤鹏程,徐冰,高占义,等. 西藏高海拔地区气象数据缺失条件下的 ET_0 计算研究[J]. 水利学报,2017(9):1055 - 1063.
TANG Pengcheng, XU Bing, GAO Zhanyi, et al. Simplified limited data ET_0 equation adapted for high-elevation

locations in Tibet[J]. Journal of hydraulic engineering, 2017(9):1055 - 1063. (in Chinese)

[3] SCHADT C W, MARTIN A P, LIPSON D A, et al. Seasonal dynamics of previously unknown fungal lineages in tundra soils[J]. Science, 2003, 301: 1359 - 1361.

[4] SCHERLER M, HAUCK C, HOEL M, et al. Meltwater infiltration into the frozen active layer at an alpine permafrost site[J]. Permafrost and perglacial process, 2010,21(4):325 - 334.

[5] 陈艳梅,王少丽,高占义,等. 不同灌溉制度对根层土壤盐分影响的模拟[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(3):263 - 269.
CHEN Yanmei, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al. Modeling effects of different irrigation managements on root-zone soil salinity[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2014, 32(3): 263 - 269. (in Chinese)

[6] 任杰,沈振中,赵坚,等. 低温水入渗条件下土壤水分温度动态变化[J]. 水科学进展,2013,24(1):125 - 131.
REN Jie, SHEN Zhenzhong, ZHAO Jian, et al. Dynamic variation of soil moisture and temperature under infiltration of low-temperature water[J]. Advances in water science, 2013, 24(1): 125 - 131. (in Chinese)

[7] 高红贝,邵明安. 温度对土壤水分运动基本参数的影响[J]. 水科学进展,2011,22(4):484 - 494.
GAO Hongbei, SHAO Ming'an. Effect of temperature on soil moisture parameters[J]. Advances in water science, 2011, 22(4): 484 - 494. (in Chinese)

[8] 阳勇,陈仁升,吉喜斌,等. 黑河高山草甸冻土带水热传输过程[J]. 水科学进展,2010,21(1):30 - 34.
YANG Yong, CHEN Rensheng, JI Xibin, et al. Heat and water transfer processes on alpine meadow frozen grounds of Heihe mountainous in northwest China[J]. Advances in water science, 2010, 21(1): 30 - 34. (in Chinese)

[9] 王风,乔云发,韩晓增,等. 冻融过程黑土土体固液态水分含量动态特征[J]. 水科学进展,2008,19(3):361 - 366.
WANG Feng, QIAO Yunfa, HAN Xiaozeng, et al. Study on the dynamic characteristics of solid and liquid water in the process of freezing - thawing in black soil[J]. Advances in water science, 2008, 19(3): 361 - 366. (in Chinese)

[10] 张超,冯杰,刘方贵. 坡面薄层水流对土壤温度影响的数值分析[J]. 农业工程学报,2010,26(4):64 - 69.
ZHANG Chao, FENG Jie, LIU Fanggui. Numerical analysis of influence of hill slope sheet flow on soil temperature[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 64 - 69. (in Chinese)

[11] 胡国杰,赵林,李韧,等. 基于COUPMODEL模型的冻融土壤水热耦合模拟研究[J]. 地理科学, 2013,33(3):356 - 362.
HU Guojie, ZHAO Lin, LI Ren, et al. The water - thermal characteristics of frozen soil under freeze-thaw based on COUPMODEL[J]. Scientia geographica sinica, 2013, 33(3): 356 - 362. (in Chinese)

[12] 刘杨,赵林,李韧. 基于SHAW模型的青藏高原唐古拉地区活动层土壤水热特征模拟[J]. 冰川冻土,2013,35(2):281 - 289.
LIU Yang, ZHAO Lin, LI Ren. Simulation of the soil water - thermal features within the active layer in Tanggula region, Tibetan Plateau, by using SHAW model[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2013, 35(2): 281 - 289. (in Chinese)

[13] GULER M, ARALAN H, CEMEK B, et al. Long-term changes in spatial variation of soil electrical conductivity and exchangeable sodium percentage in irrigated mesic ustifluvents[J]. Agricultural water management, 2013, 135: 1 - 8.

[14] WU S H, JANSSON P E, KOLARI P. Modeling seasonal course of carbon fluxes and evapotranspiration in response to low temperature and moisture in a boreal scots pine ecosystem[J]. Ecological modelling, 2011, 222(17): 3103 - 3119.

[15] 徐冰,邬佳宾,郭克贞,等. 西藏牧区生态水利研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(3):84 - 86.
XU Bing, WU Jiabin, GUO Kezhen, et al. Research progress of ecological water conservancy in pasture area of Tibet[J]. Journal of water resources and water engineering, 2012, 23(3): 84 - 86. (in Chinese)

(责任编辑 朱滢云)