

# 融雪期季节性冻土湿度变化对融雪洪水的影响

王荣军<sup>1,2</sup>, 刘志辉<sup>2,3,4</sup>, 李诚志<sup>2,3</sup>, 胡铭<sup>1,2</sup>, 张文娜<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 教育部绿洲生态重点实验室 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆大学 干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046; 4. 干旱半干旱区可持续发展国际研究中心, 乌鲁木齐 830046)

**摘要:**利用天山北坡军塘湖流域 2009、2010 年春季融雪期季节性冻土湿度、雪深及流量数据,对春季融雪洪水与季节冻土的湿度变化进行分析,结果发现:(1) 融雪期融雪洪水的流量与雪深、季节性冻土的湿度具有密切的关系,雪深及季节性冻土的湿度决定着融雪洪水峰值变化;(2) 季节性冻土表层 10 cm 范围内湿度的变化会导致融雪洪水的产生,而 10 cm 以下季节性冻土的湿度剧烈变化引起融雪水的下渗而削弱了洪峰、降低了峰值。季节性冻土湿度的变化改变了下垫面的产流方式,研究季节性冻土湿度变化对融雪洪水的影响,对春季融雪洪水的预报具有重要意义。

**关键词:**季节性冻土; 土壤湿度; 融雪洪水; 军塘湖流域

中图分类号:P462.63<sup>+</sup>5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)04-0277-05

## Impact of Change in Seasonal Frozen Soil Moisture on Snowmelt Flood in Snowmelt Season

WANG Rong-jun<sup>1,2</sup>, LIU Zhi-hui<sup>2,3,4</sup>, LI Cheng-zhi<sup>2,3</sup>, HU Ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Wen-na<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi, 830046, China;

3. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 4. International Center for Desert Affairs-Research on Sustainable Development in Arid and Semi-arid Lands, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** Spring snow-melting flood and seasonal froze humidity change were analyzed based on the seasonal froze soil moisture, snow depth and runoff data from 2009 to 2012 in the Juntang River Basin in the north slope of Tianshan Mountain. The results indicate: (1) snowmelt flood flow has a close relationship with snow depth and seasonal froze soil moisture, and snowmelt flood peak depends on snow depth and seasonal froze soil moisture; (2) 10 cm range of seasonal frozen soil surface moisture will result in the generation of snowmelt flood, while seasonal froze soil below 10 cm moisture dramatic change caused snowmelt water infiltration and weaken the flood peak, lower peak. Seasonal frozen soil moisture change transforms the way of underling surface runoff, the study on effect of seasonal soil humidity change to snowmelt flood has an important significance to spring snowmelt flood forecast.

**Key words:** seasonal frozen soil; soil moisture; snowmelt flood; Juntang River Basin

融雪洪水是具有新疆特色的一种自然灾害,每年都会造成人民生命安全及经济的重大损失,尤其对于天山北坡经济圈,融雪洪水直接威胁着交通设施、通讯、水库及财产安全。因此,研究融雪型洪水的成因,做好洪水的预报与洪水调度,对于防洪抗旱、合理开发利用洪水资源,促进当地国民经济的发展具有重要意义。

截至目前,融雪洪水的研究主要集中在气象因子方面,并取得了一定的成果,如田华<sup>[1]</sup>对新疆融雪洪水气象因子进行了分析,发现平均气温由负转正,最高气温高于 5℃ 以及暖平流出现的时间对洪水具有指示意义;傅华等<sup>[2]</sup>利用 EOS/MODIS 卫星资料和气象水文台站观测资料,对 2002—2008 年库玛拉克河流域融雪期的洪水成因、积雪变化与气象因子的相

收稿日期:2012-11-09

修回日期:2013-01-11

资助项目:国家自然科学基金面上项目“天山北坡典型流域积雪—冻土水热耦合中融水产汇流机制研究”(41171023);重点项目“干旱区湖泊流域陆面过程及人类活动适应性——以艾比湖流域为例”(41130531)

作者简介:王荣军(1986—),男,甘肃天水人,在读硕士,主要研究方向:资源环境与决策支持。E-mail:wrj2006168@qq.com

通信作者:刘志辉(1957—),男,教授,博士,主要研究方向:水文水资源、资源环境与空间决策支持、GIS等。E-mail:lzh@xju.edu.cn

互关系以及混合型和融雪型洪水的天气特性等进行了分析;吴素芬等<sup>[3]</sup>对北疆地区发生融雪洪水前期气温、降水、积雪和诱发洪水的升温条件进行了分析;王志杰<sup>[4]</sup>利用数理统计方法对三工河流域进行了研究,探讨天山北麓低山、丘陵地区春季融雪洪水产流成因机理;仇家琪等<sup>[5]</sup>根据天山北坡乌鲁木齐附近不同海拔 4 个气象台站冷季降水、蒸发、积雪和气温等资料,分析了春季融雪洪水规模及其产流的时空分布状况;俞永旺等<sup>[6]</sup>分析了影响春季融雪洪水形成的主要因子,指出融雪洪水的形成及河道来水量与初春 3 月份积雪深度有关;梁春成等<sup>[7]</sup>对宁家河的春季融雪洪水成因进行分析,指出其影响因素是地形、气象、冻土的物理性质;隗经斌<sup>[8]</sup>运用成因分析法和相关分析法,对军塘湖河量级较大的典型融雪洪水的个例进行了分析;陆智等<sup>[9]</sup>对新疆融雪洪水的特征及其形成原因进行了详细的分析,结果表明,积雪深度、热力条件、降水状况等是洪水形成的主要因子;魏守忠等<sup>[10]</sup>对发生在 1964—2001 年期间三工河干沟的春季洪水进行了逐步回归分析,得到两个相关性较好的三元模型方程;刘艳等<sup>[11]</sup>利用雪盖、径流、气象因子数据分析了玛纳斯河流域融雪径流特征及其与积雪—气温—降雨的关系;其他一些研究<sup>[12-16]</sup>也进行了融雪模型的构建,并对军塘湖流域春季融雪洪水进行了预报。

迄今为止,融雪洪水的研究主要集中于气象因素的影响方面,但关于季节性冻土湿度变化对融雪洪水影响的研究较少。鉴于此,本文从影响融雪洪水的下垫面出发,分析融雪期洪水与冻土湿度的关系,探讨季节性冻土水分变化对融雪洪水的影响机理,以期对融雪洪水预报提供理论指导。

## 1 研究区概况及数据获取

军塘湖流域位于新疆昌吉州呼图壁县境内,发源于天山北坡的特力斯喀达坂,流域面积约为 841 km<sup>2</sup>,最高海拔为 3 400 m,最高海拔到出山口红山水库的河长 47 km,平均高程为 1 503 m,河网在低山带的马扎尔汇合,流经呼图壁西部的前山丘陵后进入平原。流域地表覆盖类型主要为裸地和农田;流域土壤类型从高到底依次为高山草甸土、灰褐土、黑钙土、栗钙土及棕钙土,并有常年冻土层和季节冻土层存在。每年 2 月份气温开始回升,3 月份积雪开始大面积融化,若气温迅速升高,则会产生融雪洪水,4 月份左右积雪几乎完全融化,季节性冻土全部融通。

选取军塘湖流域内的小流域作为实验场(86°28′30″E,43°51′44″N),海拔 1 080 m,架设

CR23X 自动气象仪进行野外气象数据的定点采集,观测时间为 2009 年 3 月 2 日至 18 日和 2010 年 3 月 11 日至 4 月 6 日,即整个融雪期时间间隔为 30 min,分析时提取整点的观测数据。土壤湿度数据采集传感器为 CR23X 自动气象仪自带的 CS-615 探头,埋设深度为 0(积雪与地表界面),10,20,30,40 cm,积雪深度用钢尺直接测量。

## 2 季节性冻土水分变化

### 2.1 试验场季节性冻土的基本物理属性

冻土是多相和多成分的复杂体系,冻土的基本成分是:矿物或矿体骨架、冰、未冻水和气体,它们决定着冻土的结构、物理力学和热物理性质,并影响其冻结和融化过程。因此,土的物质组成、结构特征、理化性质是冻土水分迁移研究的基础<sup>[17]</sup>。融雪期试验场季节性冻土约为 40 cm(根据 40 cm 处出现负温),冻土基本特征如表 1 所示。

表 1 季节性冻土的物理属性

冻土深度/ cm	土壤质地	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	有机质/g
10	粉壤土	1.1890	0.0594
20	粉壤土	1.2666	0.0620
30	粉壤土	1.3081	0.0478
40	粉壤土	1.3591	0.0293

### 2.2 季节性冻土的湿度变化

2009 年融雪期冻土湿度变化见图 1,由图 1 可知,3 月 7 日之前,不同深度的冻土湿度变化曲线出现了明显的分层现象,从表层到深层湿度值依次增大(除 10 cm 湿度值明显高于 20 cm 外),湿度值变化幅度为 7.4%~18.6%,并基本维持在一个定值。3 月 6 日到 3 月 9 日期间,0 cm 处土壤湿度值出现周期性的波动变化,3 月 9 日之后湿度值在 7%~10% 范围内浮动变化;从 3 月 9 日起 10 cm 处的土壤湿度迅速回升,3 月 10 日后呈现平稳上升趋势;20 cm 以下的季节冻土湿度变化趋势大致相同,这种趋势从 3 月 2 日一直延续至 3 月 16 日,此后,各层湿度均出现了不同程度的上升。

2010 年季节性冻土的湿度变化如图 2 所示,由图 2 可知,季节性冻土未消融时,湿度从表层到深层依次增大,后大体呈现平稳状态。3 月 16 日开始 10 cm 冻土湿度出现突变,从 7% 剧升至 31.5%。随后 3 月 17 日起,10 cm 以上各层冻土湿度持续回升,在后续的几天内各层依次出现湿度的峰值,并且以较高的湿度值持续至 25 日。3 月 25、26 日各层湿度值均出现了变化幅度较大的周期性变化,有陡涨陡落现

象,3月27至31日,各层湿度值较稳定。3月31日之后,各层又出现以日为周期的波动变化,与空气湿度的变化相似,这种变化一直持续至融雪结束。

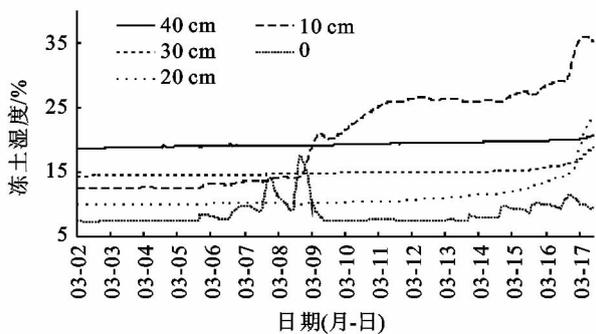


图1 2009年季节冻土湿度变化曲线

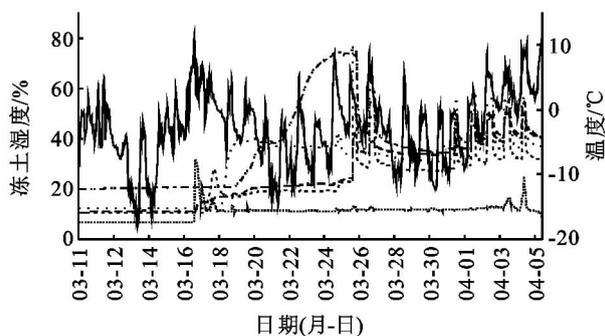


图2 2010年季节冻土湿度与空气温度变化曲线

### 3 融雪洪水的特征

春节融雪期,当空气温度上升至 $0^{\circ}\text{C}$ 以上时,积雪开始融化,迅速、持续的温度回升,则会引发融雪洪水<sup>[2]</sup>。白天温度高,积雪消融,夜间温度下降,积雪冻结,融雪洪水流量出现以天为周期的变化规律。

#### 3.1 融雪洪水的日变化

为了分析方便,对洪山水库的流量数据进行了插值,结果见图3—4。融雪期白天气温缓慢上升,雪层开始吸收热量,当温度上升到一定程度后积雪开始融化,融雪水流出。随着温度的降低,融化速率减缓,融化状态一直持续到夜间,融雪水断流为止。此段融雪过程中,融雪水经过地面的产流、河网的汇流,最终在出山口红山水库汇集,由于不同海拔积雪厚度与雪密度以及汇流时间的不同,流量增加呈缓慢的过程,每天在一定的时间内均出现洪峰,2009年最大洪峰 $109.17\text{ m}^3/\text{s}$ 出现在21:00,2010年最大洪峰 $18.56\text{ m}^3/\text{s}$ 出现在22:00,洪峰的出现及消失均是一个缓慢的过程。

#### 3.2 融雪期洪水的变化

在2009和2010年融雪期,由于不同的积雪状况与气候条件,融雪洪水的水文过程存在较大差异。

2009年融雪洪水日流量变化见图3,由图3可知,在融雪前期,流量几乎以基流大小保持不变,16日之后,流量出现了波峰变化,在17日出现了最大洪峰 $109.17\text{ m}^3/\text{s}$ ,最大洪峰出现之后,18日出现了第二次大波峰,最大洪峰 $46.13\text{ m}^3/\text{s}$ ,此后流量趋于稳定,洪峰变化较小。与此相比,2010年流量变化曲线(图4),在整个融雪期出现了周期变化,变化周期为连续的2至3d,从3月16日至4月6日,出现了3个周期洪峰变化,三次周期峰值依次为 $7.52\text{ m}^3/\text{s}$ , $17.00\text{ m}^3/\text{s}$ , $18.56\text{ m}^3/\text{s}$ ,峰值流量越来越大,最大洪峰为 $18.56\text{ m}^3/\text{s}$ ,且整个融雪期洪峰持续时间较长。

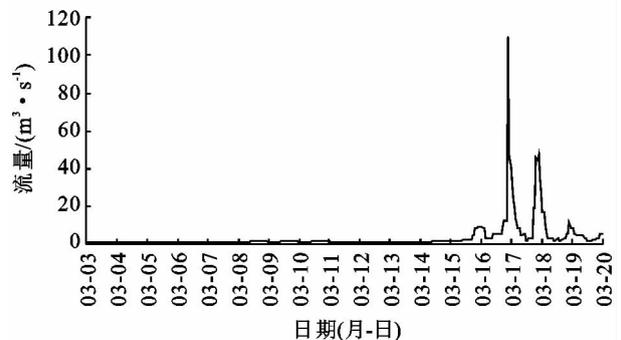


图3 2009年红山水库融雪期流量过程

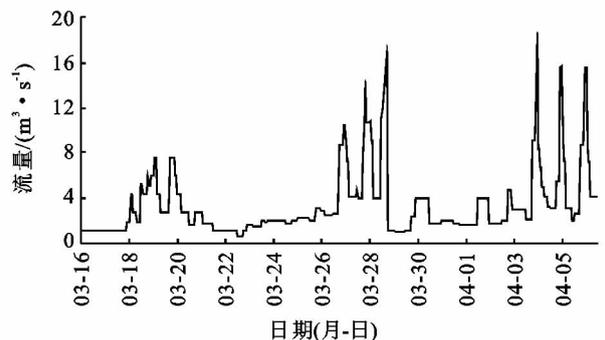


图4 2010年红山水库融雪期流量过程

## 4 季节性冻土消融对融雪洪水的影响

季节性冻土是积雪消融的下垫面,冻土的冻结、消融决定着融雪水的下渗,不同融雪期,冻土的冻结状态不同,形成了不同的产流方式<sup>[18]</sup>,冻土未消融之前,冻土是弱透水层或不透水层,融雪水在冻土界面形成超渗产流;冻土消融后,融雪水下渗,冻土积雪界面形成蓄满产流。季节性冻土湿度在融雪期的不同时期,随着土壤入渗变化对融雪洪水产生不同影响<sup>[19]</sup>。

#### 4.1 季节性冻土的湿度变化对融雪洪水形成过程的影响

由图5可知,3月6日之前,积雪的深度变化幅度较小,在太阳辐射与空气温度的影响下,积雪发生

压实作用,使积雪的深度发生了微小变化,不产生融雪水。在6—9日内,雪深发生较大变化,变化的幅度为3.1 cm/d,积雪深度的较大变化产生融雪水,而流量保持基流大小,未见明显变化,从冻土湿度的变化趋势来看,表层的冻土湿度发生变化并出现周期性的波动,由于融雪水的表层下渗所致,水分的下渗削弱了地面的汇流,因而河道汇流量减小。结合图1,3月6日至3月9日,0 cm冻土湿度值较高,而以下各层湿度值未变,由此得知,表层冻土因为积雪融水带来的热量而发生了消融,湿度值增加,以下各层冻土处于冻结状态,融雪水的下渗只发生在10 cm范围内。9日至17日之间,流量变化微小,而积雪发生变化,10 cm冻土湿度的值较高且保持不变,湿度值未超过田间持水量的35.2%(2010年冻土湿度图),融雪水下渗未能到达10 cm,因而融雪水储蓄在土壤表层10 cm内。17日各层冻土湿度出现了剧增,水分变化明显,地面以蓄满产流方式影响着融雪洪水的形成。

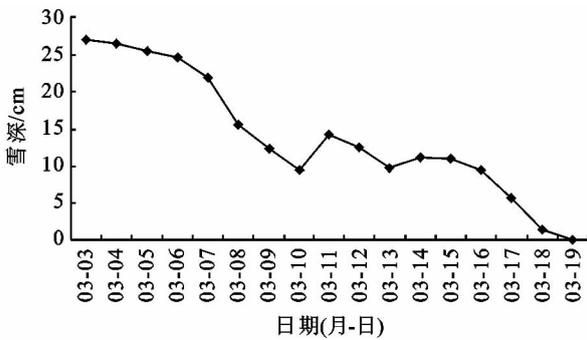


图5 2009年融雪期积雪深度趋势线

2010年融雪洪水发生在3月27—29日、4月4—6日,土壤湿度伴随着周期性的变化,白天由于融雪水下渗补给,湿度值超过田间持水量,土壤达到饱和状态,夜间积雪冻结,融雪水停止下渗,而土壤内部水分在重力作用下进行下渗,湿度值维持在田间持水量值附近,融雪水在冻土—积雪的界面以蓄满产流为主,影响融雪洪水的发生。

#### 4.2 季节性冻土湿度变化对洪峰的影响

融雪水是融雪洪水的来源,从水量平衡的角度来看,积雪融水的消耗包括雪层表面蒸发、融雪水的下渗及地面径流,融雪期蒸发相对下渗及地面产流可以忽略不计,如果融雪水受土壤中下渗调蓄影响小,则其主要以地面径流的形成存在,容易发生融雪洪水。如果融雪水受土壤下渗作用调蓄影响较大,一般无融雪性洪水。

2009年3月9日前期,流量几乎未变,而季节冻土表层湿度3月6日发生了较大的变化,3月9日10 cm处的冻土湿度迅速升高,并一直保持在25%左

右。因此,融雪水在3月6日起开始下渗,下渗的融雪水滞留在10 cm土层内,减少了地表径流,影响着河水的流量变化。此后的融雪过程中,积雪消融,融雪水继续在10 cm土层内下渗,湿润锋面未超越10 cm,湿度的变化只在表层发生。3月11降雪增加了雪深,雪深由原来的9.4 cm升至14.2 cm,在之后的融雪中,雪深变化曲线较平缓。3月17日土壤湿度各层变化较大,而流量出现了整个融雪期的最大峰值109.17 m<sup>3</sup>/s,峰值过后,出现了46.13 m<sup>3</sup>/s的第二次洪峰,此后流量趋于基流。因此,融雪期融雪水的下渗,土壤10 cm范围内的湿度与洪峰具有密切关系,积雪迅速融化,0—10 cm发生显著消融,20 cm以下未消融形成隔离层,即蓄满产流发生,径流产生量与10 cm以下未消融的冻土阻隔入渗有很大的关系,即20 cm及以下的湿度变化会减小洪峰。

由图6可知,雪深在整个融雪期有三次起伏变化,2010年3月16至3月20日雪深从36.3 cm降至18.8 cm,3月21日至3月27日雪深由38.9 cm降至19.1 cm,3月28日之后雪深变化缓慢。洪山水库流量变化也呈现出相对应的大周期洪峰变化,在第一次洪峰变化中,流量最大值为7.52 m<sup>3</sup>/s,而在洪峰出现之前,土壤湿度出现了较大的变化,0—40 cm处冻土湿度出现了昼夜周期性变化,冻土各层水分开始下渗。26日至28日的第二个周期洪峰中,流量的峰值为14.23 m<sup>3</sup>/s,土壤各层也出现了周期性融雪水下渗,融雪水从表层向深层的下渗在一定程度上削弱了洪峰流量。第三个周期洪峰变化中,融雪水下渗呈现周期性变化,融雪水在土壤中的下渗减少了地面融雪水的产流,从而影响融雪洪水的峰值,最大峰值为23.48 m<sup>3</sup>/s。

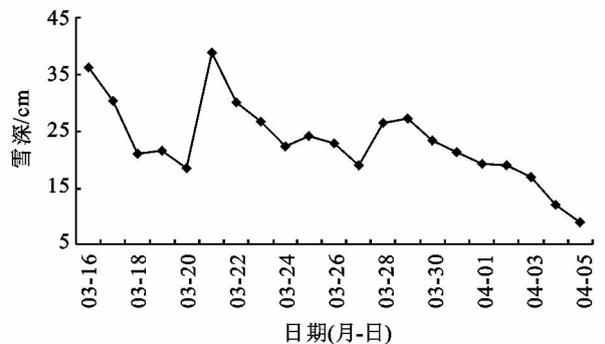


图6 2010年融雪期积雪深度

对比2009与2010年流量变化可知,融雪水受土壤下渗的调蓄。土壤湿度在10 cm内变化,有利于洪水的形成,而10 cm以下各层土壤湿度的变化,可削弱洪峰、降低峰值。这对于干旱区的洪水预防具有重大的现实意义。

## 5 结论

(1) 季节性冻土受气温、地温和积雪的影响,融雪期季节性冻土从表层向深层依次融化,融雪水的下渗也呈现出从地表向深层下渗的变化规律。

(2) 积雪的深度变化及冻土水分的下渗,共同决定了融雪洪水的流量,融雪期融雪洪水的流量持续时间较长,并显示出明显的周期性变化。

(3) 融雪期 10 cm 内季节性冻土湿度的变化,会产生较大融雪洪水,而 10 cm 以下季节性冻土湿度不大,下伏土壤冻层如果形成了阻隔层,其阻隔层离地表越近,洪水洪峰越大,且这一现象十分突出。消除阻隔层后,洪峰变得相对平缓。

### 参考文献:

- [1] 田华,杨晓丹,张国平,等. 2009年3月中旬新疆融雪型洪水气象成因分析[J]. 气象,2011,37(5):590-598.
- [2] 傅华,贾丽红,肖继东,等. 阿克苏地区库玛拉克河流域融雪洪水分型及成因[J]. 干旱区研究,2011,28(3):433-437.
- [3] 吴素芬,刘志辉,邱建华. 北疆地区融雪洪水及其前期气候积雪特征分析[J]. 水文,2006,26(6):84-87.
- [4] 王志杰,迪里木拉提,李从林. 天山北麓低山丘陵地区春季融雪洪水的研究:以三工河古河道为例[J]. 干旱区地理,2002,25(4):302-308.
- [5] 仇家琪,徐俊荣,陈亚宁. 天山北坡春季雪洪形成的气候因子分析[J]. 干旱区地理,1995,18(1):43-50.
- [6] 俞永旺,徐冰,白东明,等. 天山北坡雀尔沟河春季融雪

洪水的成因分析[J]. 干旱区研究,1995,12(3):15-20.

- [7] 梁春成,杨乃康,陈亚宁. 天山宁家河春季融雪洪水成因初探[J]. 干旱区地理,1993,16(3):75-79.
- [8] 隗经斌. 新疆军塘湖河典型融雪洪水过程研究[J]. 冰川冻土,2006,28(4):530-534.
- [9] 陆智,刘志辉,闫彦. 新疆融雪洪水特征分析及防洪措施研究[J]. 水土保持研究,2007,14(6):256-258,261.
- [10] 魏守忠,常绪正,马健,等. 影响三工河干沟春季融雪洪水发生的气象因素[J]. 干旱区研究,2005,22(4):476-480.
- [11] 刘艳,李杨,张璞. 玛纳斯河流域融雪径流与积雪一气象因子分析[J]. 水土保持研究,2010,17(2):145-149.
- [12] 房世峰. 基于“3S”技术的分布式融雪径流模型的设计和应用[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2007.
- [13] 秦艳. WRF与干旱区分布式融雪径流模型的耦合及应用研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2009.
- [14] 乔鹏,秦艳,刘志辉. 基于能量平衡的分布式融雪径流模型[J]. 水文,2011,31(3):22-27.
- [15] 房世峰,裴欢,刘志辉,等. 遥感和GIS支持下的分布式融雪径流过程模拟研究[J]. 遥感学报,2008,12(4):655-672.
- [16] 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.
- [17] 徐学祖. 冻土分类现状及建议[J]. 冰川冻土,1994,16(3):193-201.
- [18] 戴长雷,孙思淼,叶勇. 高寒区土壤包气带融雪入渗特征及其影响因素分析[J]. 水土保持研究,2010,17(3):269-272.
- [19] 王爱娟,张平仓. 水土保持措施对小流域洪水过程的影响研究[J]. 水土保持研究,2008,15(6):18-20.

(上接第276页)

### 参考文献:

- [1] 王立坤. 三江平原井灌水稻灌溉制度建模及其优化研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2002.
- [2] 刘景瑞. 三江平原资源与生态水利的实施探讨[J]. 水利水电科技进展,2002,22(6):27-29.
- [3] 李震. 多水源优化调度的管理与决策[D]. 天津:天津大

学,2009:40-43.

- [4] 顾文权,邵东国,黄显峰,等. 水资源优化配置多目标风险分析方法研究[J]. 水利学报,2008,39(3):339-345.
- [5] 邹元春,于晓菲,霍莉莉,等. 三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征[J]. 环境科学,2012,33(4):1209-1215.
- [6] 丁大发,吴泽宁,王海政. 黄河流域水资源多维临界调控风险估计[J]. 人民黄河,2003,25(1):45-47.