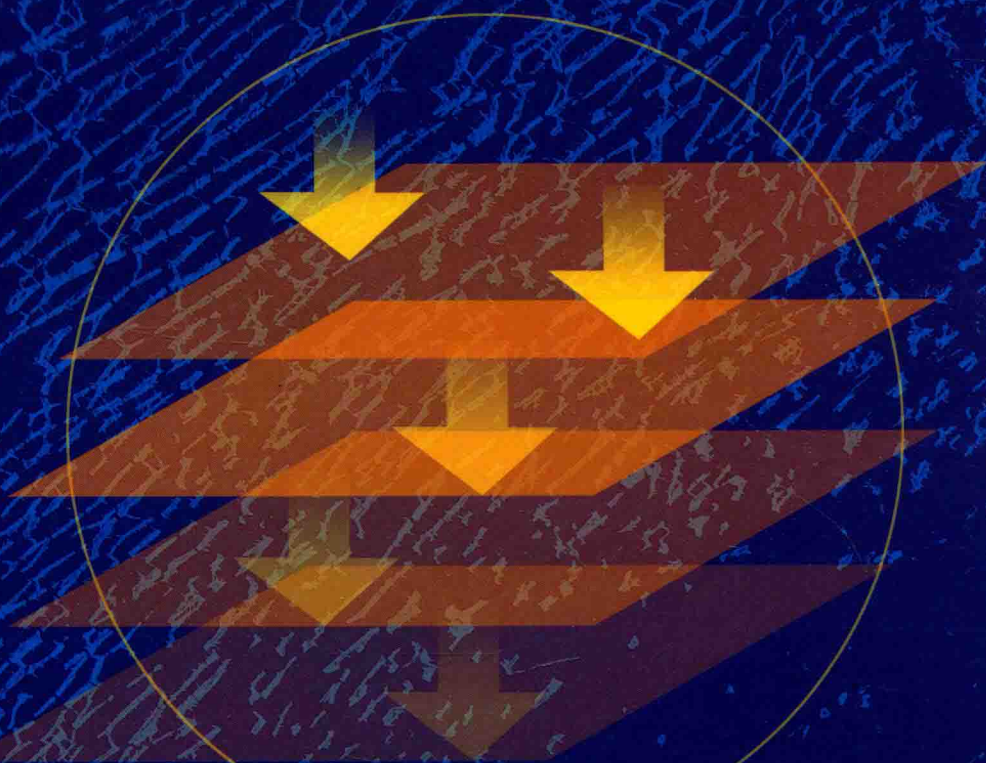


不同地表处理及 潜水位下土壤水热 迁移规律的试验研究

陈军锋 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

不同地表处理及 潜水位下土壤水热 迁移规律的试验研究

陈军锋 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍了季节性冻融期土壤的自然冻融过程及地表覆盖、灌水及潜水等对土壤冻融特征的影响,对地膜覆盖和秸秆覆盖下的冻融土壤水分入渗特性、不同秸秆覆盖量和不同潜水位下的土壤水热时空变化规律、不同气温降幅冻结作用潜水浅埋条件下土壤水热迁移规律进行了试验研究,对潜水浅埋条件下潜水与土壤水的转化规律进行了定量分析研究。

本书可作为从事水资源评价、水土保持、农业生产及冻土研究等相关科研人员和工程技术人员参考用书,也可供高校相关专业师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

不同地表处理及潜水位下土壤水热迁移规律的试验研究 / 陈军锋著. — 北京:中国水利水电出版社, 2014.12

ISBN 978-7-5170-2796-6

I. ①不… II. ①陈… III. ①土壤水—冻融循环—研究 IV. ①P642.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第312110号

书 名	不同地表处理及潜水位下土壤水热迁移规律的试验研究
作 者	陈军锋 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	170mm×240mm 16开本 7.5印张 158千字
版 次	2014年12月第1版 2014年12月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	23.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

冻融条件下的土壤水热迁移是一个多因素综合作用的复杂物理过程，包括土壤冻融过程、冻融土壤水分入渗和土壤剖面水热迁移等问题，土壤冻融过程中的水热迁移研究成果对于合理确定农业灌溉技术参数，水资源评价，有效利用土中水、热资源合理解决寒区和极地资源的开发，土壤盐渍化防治及基础工程建设等实际问题都具有重要意义。

以国家自然科学基金项目《季节性冻融期不同地表条件下非饱和带土壤水分迁移转化规律的研究》（项目批准号：40472132）、山西省自然科学基金项目《干旱半干旱气候区冬春季节土壤水热动态预测技术研究》（项目批准号：2012011033—2）和太原理工大学2012年校青年基金项目《季节性冻融期地下水浅埋区潜水与土壤水转化规律的研究》（2012L016）为依托，进行了大量的室内外试验研究，本书总结了国家自然科学基金项目和山西省自然科学基金项目的部分试验研究成果，采用试验分析法研究了冻融土壤的水热迁移问题。

基于大量的田间试验，分析了季节性冻融期土壤的自然冻融过程，地表覆盖、灌水及潜水等对土壤冻融特征的影响，以及季节性冻融期地膜覆盖和秸秆覆盖下的土壤水分入渗特性；采用数理统计法研究了不同秸秆覆盖量和不同潜水位下的土壤水热时空变化规律；通过室内潜水浅埋条件下的土壤单向冻结试验，研究了不同气温降幅冻结作用下土壤水热迁移的规律；探索了季节性冻融期不同潜水位埋深下潜水与土壤水的转化规律。

衷心感谢我的恩师郑秀清教授多年来对我的悉心指导和谆谆教导，从留校任教到博士毕业及本书的顺利出版，均凝聚了郑老师的大量心血。感谢邢述彦教授、山西省水文勘测局太谷均衡实验站站

长孙明高工、李金柱高工、薛明霞工程师等对试验工作给予的大力支持和帮助！感谢杨军耀副教授对室内土壤冻结试验的指导！感谢研究生吕薛锋和张厚泉为室内土壤冻结试验顺利完成付出的辛勤劳动！

本书可作为水利类和农业类相关学科科研人员的参考用书，由于作者专业知识、学术水平和实践经验有限，书中难免有错误之处，恳请读者批评指正。

作者

2014年8月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
参考文献	4
第 2 章 试验内容及方法	7
2.1 田间试验	7
2.1.1 冻融土壤入渗试验	8
2.1.2 土壤温度和土壤含水率监测	9
2.2 室内试验	12
2.2.1 试验装置	12
2.2.2 试验土样	13
2.2.3 系统测试	13
2.2.4 试验方案	14
参考文献	15
第 3 章 季节性冻融期土壤温度变化及冻融特征	16
3.1 冻融期气温与太阳辐射	16
3.1.1 气温	16
3.1.2 太阳辐射	19
3.2 冻融期土壤温度的剖面变化特征	21
3.2.1 土壤表面辐射—热量平衡	21
3.2.2 耕作层土壤温度	22
3.2.3 不同秸秆覆盖量的土壤温度	26
3.2.4 不同潜水位下土壤温度	29
3.3 土壤冻融特征	34
3.3.1 土壤的自然冻融过程	34
3.3.2 地表覆盖下土壤冻融特性	35
3.3.3 灌水对土壤冻融特性的影响	37
3.3.4 不同潜水位下土壤冻融特性	42

3.4 土壤冻融机理	46
3.5 本章小结	48
参考文献	49
第4章 季节性冻融期田间土壤水分运动	51
4.1 地表覆盖下土壤水分入渗特性	51
4.1.1 地膜覆盖对冻融土壤入渗特性的影响	52
4.1.2 秸秆覆盖对冻融土壤入渗特性的影响	54
4.1.3 冻融期地表覆盖下土壤入渗特性的变化规律	55
4.2 不同秸秆覆盖量下土壤水分迁移特征	57
4.2.1 土壤剖面水分时空变化特征	57
4.2.2 土壤剖面水分时空变化的统计学分析	59
4.3 不同潜水位下土壤水分迁移特征	60
4.3.1 土壤水分时空分布特征	61
4.3.2 土壤水分时空变异特征	63
4.3.3 不同冻融阶段土壤剖面水分变化特征	64
4.4 本章小结	66
参考文献	67
第5章 不同气温降幅冻结作用下土壤剖面水热迁移	69
5.1 不同冻结气温降幅下土壤剖面温度变化规律	69
5.1.1 气温降幅对土壤温度的影响	69
5.1.2 土壤质地对土壤温度的影响	70
5.1.3 土壤剖面温度变化阶段的划分	71
5.2 不同冻结气温降幅下土壤水分迁移规律	72
5.2.1 气温降幅对水分迁移的影响	73
5.2.2 土壤质地对水分迁移的影响	74
5.3 本章小结	75
参考文献	75
第6章 潜水浅埋条件下潜水与土壤水的转化	76
6.1 年内潜水蒸发量变化特征	77
6.1.1 潜水蒸发量	77
6.1.2 潜水蒸发系数	78
6.1.3 潜水蒸发量预报	83
6.2 冻融期潜水入流量变化规律	86
6.2.1 冻融期潜水入流量变化特征	86

6.2.2	冻结期潜水入流量预报模型	91
6.2.3	冻融期潜水入流总量与潜水位埋深的关系	92
6.3	不同冻结气温降幅下潜水入流量变化规律	94
6.3.1	气温降幅对潜水入流量的影响	95
6.3.2	土壤质地对潜水入流量的影响	96
6.4	冻融期潜水与土壤水的相互转化量分析	96
6.4.1	潜水的补给与耗损	97
6.4.2	影响因素分析	105
6.5	本章小结	106
	参考文献	107
第7章	冻融期土壤水热耦合迁移机理	108
7.1	土壤冻融过程中的物理现象	108
7.2	冻融期土壤水热耦合迁移机理	109
	参考文献	111

第1章 绪 论

水资源短缺、洪涝灾害、水环境恶化三大水问题是制约我国国民经济发展的主要问题，党中央、国务院十分重视水资源问题，江泽民曾指出：“水是人类生存的生命线，也是农业和整个经济建设的生命线。”2014年6月，习近平就保障国家水安全问题发表了重要讲话，精辟论述了治水对民族发展和国家兴盛的极端重要性，深刻分析了当前我国水安全的严峻形势。我国水资源总量丰富，但人均水资源占有量仅为世界平均水平的1/4。随着社会经济的飞速发展，水资源的供需矛盾日剧尖锐。水资源的严重短缺已经成为影响我国工农业经济发展、居民饮水安全的最主要因素，在我国北方干旱半干旱区，水资源短缺问题尤为严重，其中农业用水问题更是雪上加霜。在有限的水资源条件下，如何高效合理开发利用水资源、减少水资源的无效耗损是缓解水资源供需矛盾的主要途径之一。

温度在 0°C 或 0°C 以下，并含有冰的各种岩土和土壤均称为冻土。其中，3年或3年以上处于冻结状态的土层为多年冻土；冬季冻结、夏季全部融化的土层为季节性冻土。我国多年冻土面积为 $2.068\times 10^6\text{km}^2$ ，约占全国国土总面积的1/5；季节性冻土面积为 $5.137\times 10^6\text{km}^2$ ，约占全国国土面积的53.5%^[1-2]。季节性冻土主要分布于北纬 30° 以北地区，而这些地区大多数属于干旱、半干旱、水资源严重短缺区。近年来，随着干旱及水污染灾情的日益加重，农业生产的发展严重地受着干旱缺水的威胁。为了减少由土表蒸发引起的土壤水分的无效损失，提高作物水分利用效率，生产中常采用土壤表面覆盖的方法。冬季地面覆盖是近几年来为解决北方缺水地区水资源短缺而进行土壤储水保墒的一项重要措施，对于合理高效利用水资源意义重大。

土壤水是联系地表水和地下水的纽带，是土壤三相组成中最活跃的因素。在地下水浅埋区，潜水与土壤水联系密切，两者相互转化十分强烈，特别是在季节性冻融期，土壤的冻结与融化过程使得本已转化强烈的过程更加复杂化。潜水与土壤水相互迁移转化是大气降水、灌溉水、土壤水与地下水循环的一个重要环节，在此过程中，涉及到潜水蒸发、地表土壤蒸发等关键性问题。在非冻结期，潜水蒸发是潜水向土壤剖面输送水分，水分和水中的盐分自下而上在土壤中运动，并通过土壤蒸发或植物蒸腾进入大气的过程，地表水分进入大气而盐分留在土壤上层，所以在一些蒸发强烈的干旱地区，潜水蒸发也是导致土

壤盐渍化的主要原因,进而影响作物的正常生长。

在季节性冻融期,潜水蒸发并非完全通过土壤蒸发逸散出土壤剖面,由于土壤冻结作用潜水存储于土壤剖面中。冻结期潜水向土壤水转化,消融期土壤水回补潜水^[3],土壤冻结作用导致了潜水的耗损^[4]、土壤剖面水分和盐分迁移产生了冻害和土壤盐碱化问题^[5-6]。因此,地下水浅埋区土壤水热迁移问题的研究对于地下水浅埋区地下水资源量的科学评价和土壤盐碱化防治等具有重要的指导意义,对于进一步揭示冻融期地下水浅埋区潜水与土壤水的转化规律具有一定的理论意义。

冻融条件下的土壤水热迁移是一个多因素综合作用的复杂物理过程,土壤冻融过程中的水热迁移研究成果对于合理确定农业灌溉技术参数、水资源评价、有效地利用土中水、热资源合理解决寒区和极地资源的开发、土壤盐渍化防治及基础工程建设等实际问题都具有重要意义^[7]。冻融土壤水热迁移规律的研究已成为国际前沿学科关注的热点,许多中外学者从不同角度对不同区域的季节性冻土特征进行了研究。Talamucci等^[8]对多孔介质冻融过程中冰晶的形成以及土壤的冻胀进行了分析;Fremond等^[9]基于能量守恒、嫡不等概念以及流动率与自由边界正交的原则建立了水热运移耦合方程,对土壤冻融过程进行了模拟;Goering等^[10]依据质量、动量及能量守恒建立了多孔介质中水、热耦合三维数值模型,并将计算结果与室内土壤冻融试验进行了对比分析。Shoop等^[11]根据试验监测数据建立了数学模型,对冻融期非饱和土壤的水分迁移进行了研究;Milly^[12]采用以土壤基质势和温度为变量的土壤水、汽、热耦合方程,模拟了等温、非等温条件下非均质土壤的水分运动。

国内在此方面的研究起步较晚,但发展很快。周德源等^[13]对内蒙古河套灌区季节冻土水分迁移规律做了研究;张立杰等^[14]采用野外试验手段,通过气象、土壤剖面水分含量及土水势能的观测分析,研究了季节性冻融过程中土壤水分迁移规律及潜水的形成特征;刘海昆等^[15]分析了我国北方冻土的变化过程,并就土壤冻结作用对土壤水分的动态影响进行了综合分析;王凤等^[16]应用中子仪—TDR联合测定法对冻融过程中黑土固态水和液态水分含量的动态特征进行了分析,研究表明固态水含量是土壤温度和土体含水量综合作用的结果;朱春鹏等^[17]对季节冻土区高速公路路基土中的水分迁移变化进行了研究,张树光^[18]进行了风积土在不同冻结温度、含水量、干密度等条件下的水分迁移试验,设计了风积土在水分、温度、荷载作用下的冻融试验,研究了风积土的冻胀特征,从工程地质角度研究了冻融作用下水热迁移对土的力学特性影响;王子龙等^[19-20]运用统计学理论与方法分析了季节性冻土区不同时期土壤剖面水分的空间变异特征。苑俊廷等^[21]季节性冻融期3种处理地块土壤剖面含水率的变化特征进行了研究。郑秀清等^[22]对豆茬地水分的入渗特性进行

了研究。

由于冻融土壤水热迁移的复杂性和边界条件的多变性,一些研究学者采用数值模拟方法进行了大量研究,杨诗秀等^[23]人建立了土壤冻结条件下的水热耦合迁移的数值模拟模型,并进行了室内试验检验;安维东等^[24]人进行了渠道冻结时水热迁移的数值模拟;郑秀清等^[25]采用垂向一维水热耦合迁移数值模拟模型,研究冻融条件下田间土壤水分运移规律;张殿发等^[26]探讨冻融土壤中水运移机理并模拟其运移规律;汪丙国等^[27]建立了土壤沟垄微地形条件下土壤剖面二维饱和一非饱和水流数学模型,对冬小麦生长条件下土壤水分的动态变化规律进行了模拟;陆垂裕等^[28]提出了可以用来统一计算土壤剖面降雨、灌溉入渗、地表积水、地表径流、蒸发、蒸腾以及当这些现象交替出现时的复杂上表面边界条件的一维土壤水运动数值模型并进行了应用分析。近年来,土壤—植被—大气系统模型在冻土水热耦合迁移研究中得到了广泛的应用^[29-32],Flerchinger等^[33]对作物残茬覆盖条件下土壤水热迁移规律进行了模拟研究;李瑞平等^[34-36]运用SHAW模型对内蒙古河套灌区3种盐渍化土壤冻融期水热盐动态变化进行了模拟研究,并分析了秋灌制度对田间土壤水盐运移的影响;赵林等^[37-38]利用唐古拉综合观测场活动层及气象塔2007年的数据资料,采用SHAW模型对唐古拉地区活动层土壤水热特征进行了单点数值模拟研究;阳勇等^[39]以黑河源区高山草甸冻土带的基本气象参数、植被参数和土壤水热性质参数为输入条件,利用COUPMODEL模型计算了试验点两个完整年度日尺度上的各种基本水热状况;胡国杰等^[40]利用COUPMODEL模型,对唐古拉研究区活动层土壤的水热特征进行模拟;胡和平等^[41]建立了综合考虑土壤冻融、土壤水汽通量、植被覆盖和陆面—大气近地层水热交换的一维冻土—植被—大气连续体模型,模拟了固液相变、气态水迁移、土壤水、汽、热耦合迁移等过程,应用该模型对青藏高原安多观测点的水热交换过程进行了模拟分析。

可见,目前冻融期土壤水热耦合迁移的研究方法主要有实验分析法和数值模拟分析法。实验分析是通过田间试验或室内实验进行土壤冻结或融化过程中土壤水分和土壤温度的动态监测,分析土壤水热迁移机理及其变化规律。由于田间试验大多是在一定的小气候条件下进行的,因此研究成果在应用中有一定的局限性。数值模拟分析方法则是利用土壤水动力学基本原理,通过建立冻融土壤系统水热耦合迁移的数学模型,用数值法求解该模型,进而分析土壤水热的变化规律,该方法具有一定的普遍性和灵活性,可用于模拟不同气候、不同土壤、不同耕作条件下的水热耦合迁移规律,因此越来越受到学者们的重视。

总之,冻融土壤水热迁移的研究成果涉及面较广,在冻融土壤水热迁移的模拟研究和室内外试验方面均取得了较多的研究成果,对水热迁移规律有了一

定的认识。但由于研究课题的复杂性及试验研究条件的限制,较少考虑地表覆盖措施、潜水及气温变化幅度等对冻融土壤水热迁移的影响。

参 考 文 献

- [1] 徐学祖,王家澄.中国冻土分布及其地带性规律的初步探讨.第二届全国冻土学术会议论文选集[M].兰州:甘肃人民出版社,1983.
- [2] 周幼吾,郭东信,程国栋,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.
- [3] 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.
- [4] 赵东辉.原状土冻结期间潜水消耗初步研究[J].冰川冻土,1997,19(1):73-78.
- [5] 徐学祖,邓友生.冻土中水分迁移的实验研究[M].北京:科学出版社,1991.
- [6] 张殿发,王世杰.土地盐碱化过程中的冻融作用机制[J].水土保持通报,2000,20(6):14-17.
- [7] 程国栋.中国冻土研究近今进展[J].地理学报,1990,45(2):220-223.
- [8] Talamucci F. Freezing processes in porous media: Formation of ice lenses, swelling of the soil [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2003, 37(5-6): 595-602.
- [9] Fremond M, Lassoed R. Rain falling on a frozen ground [A]. Thymus J F. Ground Freezing 2000 [C]. Rotterdam: Balkema, 2000, 25-30.
- [10] Goering D J, Instanes A, Kundsén S. Convective heat transfer in railway embankment ballast [C]. // Thymus J F. Ground Freezing 2000. Rotterdam: Balkema, 2000; 31-36.
- [11] Shoop Sally. A and Bigl Susan. R. Moisture migration during freeze and thaw of unsaturated soils: Modeling and large scale experiments [J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 25(1): 33-45.
- [12] Milly P. C. D. Moisture and heat transport in hysteretic inhomogeneous porous media [J]. Water Resources, 1982, 18(3): 489-498.
- [13] 周德源.河套灌区季节冻土水分迁移规律[J].内蒙古水利,1994,1:27-30.
- [14] 张立杰,常兴义.季节性冻土区包气带土壤水分运移规律的研究[J].黑龙江水利科技,1996,3:20-24.
- [15] 刘海昆,黄树祥,王慧.论冻土对土壤水分动态的影响[J].黑龙江水利科技,2002,3:87.
- [16] 王风,乔云发,韩晓增,等.冻融过程黑土2m土体固液态水分含量动态特征[J].水科学进展,2008,19(3):361-366.
- [17] 朱春鹏,张喜发,张冬青.季节性冻土地区道路冻深的研究[J].辽宁交通科技,2004,(4):16-18,33.
- [18] 张树光.辽西地区风积土的强度、冻融特性及其分形性质的研究[D].辽宁工程技术大学,2004.
- [19] 王子龙,付强,姜秋香,等.季节性冻土区不同时期土壤剖面水分空间变异特征研究[J].地理科学,2010,30(5):772-776.
- [20] Wang Z L, Fu Q, Jiang Q X, et al. Numerical simulation of water - heat coupled



- movements in seasonal frozen soil [J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 2011, 54 (3): 970 - 975.
- [21] 苑俊廷, 陈军锋, 郑秀清, 等. 季节性冻融期土壤剖面含水率变化特征研究 [J]. *河南农业科学*, 2008, (5): 56 - 58.
- [22] Zheng X Q, Vanliew M W, Flerchinger G N. Experimental study of infiltration into a bean stubble field during seasonal freeze - thaw period [J]. *Soil science*, 2001, 166 (1): 3 - 10.
- [23] 杨诗秀, 雷志栋, 朱强, 等. 土壤冻结条件下的水热耦合运移的数值模拟 [J]. *清华大学学报*, 1988, 28(1): 112 - 120.
- [24] 安维东, 陈肖柏, 吴紫汪. 渠道冻结时热质迁移的数值模拟 [J]. *冰川冻土*, 1988, 9(1): 35 - 46.
- [25] 郑秀清, 樊贵盛. 冻融土壤水热迁移数值模型的建立及仿真分析 [J]. *系统仿真学报*, 2001, 13(3): 308 - 311.
- [26] 张殿发, 郑琦宏. 冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究 [J]. *地理科学进展*, 2005, 24(4): 46 - 55.
- [27] 汪丙国, 靳孟贵, 方连育, 等. 沟播冬小麦田土壤水流动系统模拟 [J]. *中国农村水利水电*, 2006(2): 35 - 37, 40.
- [28] 陆垂裕, 裴源生. 适应复杂上表面边界条件的一维土壤水运动数值模拟 [J]. *水利学报*, 2007, 38(2): 136 - 142.
- [29] Nassar I N, Horton R, Flerchinger G N. Simultaneous heat and mass transfer in soil columns exposed to freezing - thawing conditions [J]. *Soil Science*, 2000, 165(3): 208 - 216.
- [30] Scherler M, Hauck C, Hoelzle M, et al. Meltwater Infiltration into the Frozen Active Layer at an Alpine Permafrost Site [J]. *Permafrost and Periglacial Process*, 2010, 21 (4): 325 - 334.
- [31] Wu S H, Jansson P - E, Zhang X Y D. Modeling temperature, moisture and surface heat balance in bare soil under seasonal frost conditions in China [J]. *European of Journal of Soil Science*, 2011, 62(6): 780 - 796.
- [32] 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.
- [33] Flerchinger G N, Sauerb T J, Aiken R A. Effects of crop residue cover and architecture on heat and water transfer at the soil surface [J]. *Geoderma*, 2003, 116(1): 217 - 233.
- [34] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水热盐运移规律研究 [J]. *水利学报*, 2009, 40(4): 403 - 412.
- [35] 李瑞平, 史海滨, 王长生, 等. 秋灌定额对越冬期土壤水盐运移分布的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(6): 43 - 46.
- [36] Li R P, Shi H B, Flerchinger G N, et al. Simulation of freezing and thawing soils in Inner Mongolia Hetao irrigation district, China [J]. *Geoderma*, 2012, 173 - 174(3): 28 - 33.



- [37] 赵林, 李韧, 丁永建. 唐古拉地区活动层土壤水热特征的模拟研究 [J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 930-936.
- [38] 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): 280-290.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 胡和平, 叶柏生, 周余华, 等. 考虑冻土的陆面过程模型及其在青藏高原 GAME/Tibet 试验中的应用 [J]. 中国科学 D 辑地球科学, 2006, 36(8): 755-766.

第2章 试验内容及方法

2.1 田间试验

试验区位于太原盆地，太原市以南 60km 处的太谷县武家堡村，行政区隶属于晋中市太谷县，地理位置位于东经 $112^{\circ}30' \sim 112^{\circ}33'$ ，北纬 $37^{\circ}26' \sim 37^{\circ}27'$ 之间。试验区属大陆性干旱半干旱气候，主要特征是春季风大雨少，夏季雨量高度集中，秋季阴雨连绵，冬季寒冷少雪。多年平均（1954—2008 年）气温 9.9°C ；年降水量 415.2mm，主要集中在 6—9 月；水面蒸发能力 1642.4mm（小型蒸发器）；历史最大冻土深度 92cm（1960 年），多年平均相对湿度 74%，多年平均风速 0.9m/s，全年平均无霜期 200d。试验区东高西低，海拔高程为 773.0~783.0m，地面坡度 3‰。其北部边界为汾河支流乌马河，是一条间歇性河流，由东向西流过，它的上游建设有中型水库（庞庄水库），一般年份无弃水，丰水年份有水流过。东部边界为太徐公路，南西边界为乡村道路。20 世纪 60—70 年代开挖的祁太退水渠从试验区中心通过。

试验区位于第四系冲洪积平原区，地表以砂壤土为主，土壤质地以砂土、壤砂土、砂壤土、壤砂土和黏土互层为主，具有水平分带性。地下水为松散岩类孔隙水系统，含水层岩性以粉细砂、细砂为主，并具有多层性和透镜体，单层厚 1.0~2.0m，总厚 15.0~25.0m；地下水位埋深 25.0m。

山西省水文水资源勘测局太谷均衡实验站由中心实验场和地下水均衡区两部分组成，面积分别为 0.011km^2 和 7.72km^2 ，设有蒸渗计观测系统、模拟池观测系统、包气带观测系统、地面气象观测系统、地下水均衡区观测系统 5 大系统，是目前我国规模较大、观测实验项目较全的省级水均衡试验站之一。如图 2.1 所示。

试验站地面气象观测系统按县级气象站规模设立，观测项目有：气温、地温（分地表、5cm、10cm、15cm 和 20cm 5 个深度）、雪深、天气现象、风向风速、相对湿度、水汽压、降水量、小型蒸发量、E601 蒸发量、冻土深度、日照和太阳辐射。地面气象观测于 2004 年 1 月 1 日开始，于 2007 年 12 月 31 日结束，观测时间为每天北京时间 8:00 和 20:00。根据水均衡实验要求进

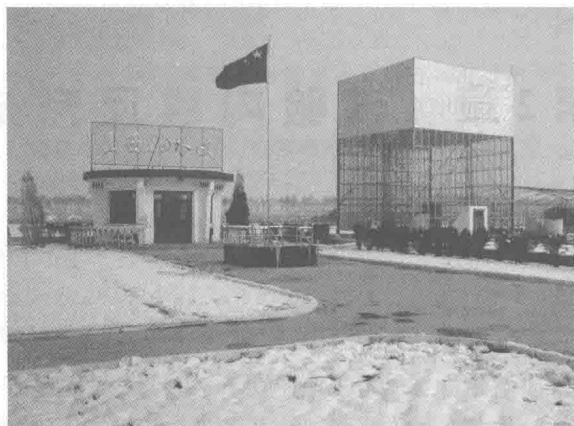


图 2.1 山西省水文水资源勘测局太谷均衡实验站

行 2m 高风向风速与 10m 高风向风速对比观测，地面 70cm 雨量与 0cm 雨量对比观测，天空辐射与太阳直接辐射对比观测。所有观测项目均按国家气象标准执行。太阳辐射量观测时间为每天北京时间 8:00、11:00、14:00、17:00 和 20:00，冬季 20:00 是日落时间，不监测。

2.1.1 冻融土壤入渗试验

2004 年 11 月至 2005 年 3 月采用自制双套环入渗仪进行了入渗试验，内环直径 26cm，外环直径 80cm，在地表封冻前，一次性预埋于试验地块，内环下环深度为 20cm。入渗内环供水用量筒计量，内外环水位用自制的钢卡装置控制。土壤含水率采用烘干法测定，土壤温度采用预埋热敏电阻（电阻值误差 0.5Ω）测定，测定深度均为 5cm、10cm、15cm、20cm、40cm、60cm 和 100cm。地表封冻前打孔，将热敏电阻全部预埋在蒸渗计中，根据测定的电阻值，按律定关系求得土壤剖面温度。其关系式为

$$R_x = R_{25} e \left(\frac{B}{273.15} - \frac{B}{298.15} \right) \text{ 或 } x = \frac{B}{\ln \frac{R_x}{R_{25}} + \frac{B}{298.15}} - 273.15$$

式中 R_{25} 、 R_x ——实时实测电阻和 25℃ 时的电阻值，Ω；

x ——实时温度值，℃；

B ——常数，一般取 3000。

试验田为山西省水文水资源勘测局太谷均衡实验站休闲深耕地，土壤类型为壤土，有明显的犁底层，耕作层深度约 20cm，其土壤含水率平均为 19.8%。试验田块分为裸地（LD）、地膜覆盖地（MD）和秸秆覆盖地（JD）3 种。MD 覆盖物为厚度 0.1mm 的聚乙烯白色塑料布；JD 覆盖物为玉米秸

秆，长约 5cm，平均厚度为 18cm。试验采用积水入渗的方法，内外环积水深度均为 2cm。入渗试验重复一次，取其平均结果，试验用水为深井水，水温变化在 1.5~9℃。冻融期间，入渗试验、地温和土壤含水率的监测均始于 8：00。

2.1.2 土壤温度和土壤含水率监测

1. 冻融期不同日期灌水

试验田为秋耕休闲地，土壤类型为壤土，试验田块分为 LD、MD 和 JD。为了充分揭示冻融期不同冻融阶段灌水对土壤温度和冻融特性的影响，2004 年 11 月至 2005 年 3 月共进行了 24 组田间试验。每种地表条件的试验地块分 8 块，分别以 G0~G7 表示，G0 代表冻融期末灌溉地块，G1~G7 分别代表不同灌水日期地块，冻融期仅灌水一次，灌水定额均为 225m³/hm²，灌水时间均为上午 8：00，灌水水源为试验区地下水，水温 6~8℃。灌水日期见表 2.1。土壤含水率采用干燥法测定，土壤温度采用热敏电阻测定，冻结与融化深度采用人工土钻取土观测法确定，观测时间均为 8：00~9：00。

表 2.1 季节性冻融期系列灌水试验地块设计

地 块	灌水日期/(月-日)	冻 融 阶 段
G1	11-30	不稳定冻结阶段(2004 年 11 月 11 日至 2004 年 12 月 24 日)
G2	12-14	
G3	12-27	稳定冻结阶段(2004 年 12 月 25 日至 2005 年 2 月 12 日)
G4	01-06	
G5	02-16	消融解冻阶段(2005 年 2 月 13 日至 2005 年 3 月 17 日)
G6	02-25	
G7	03-15	

2. 不同秸秆覆盖量

试验田为秋耕休闲地，土壤类型为壤土，试验田块分为裸地 (LD) 和 5 种不同覆盖厚度 (5cm、10cm、15cm、20cm 和 30cm) 的玉米秸秆覆盖田块，分别记为 JD05、JD10、JD15、JD20 和 JD30。每一种地表处理分别设 3 个重复，共有试验田块 18 个，每个田块规格为 3m×3m。冻融期同步监测土壤水分动态、土壤温度和冻层深度，监测于 2005 年 11 月 11 日开始，监测时间均为 8：00~9：00。

(1) 土壤质量含水率动态监测。采用常规人工取土钻取样，室内烘箱烘干、称质量的方法测定，每 5d 监测 1 次，监测点设置见表 2.2。