

土壤水热与根系吸水模型研究进展 及其在西藏研究展望

刘伟^{1,2}, 徐冰², 汤鹏程², 李泽坤²

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

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)

摘要: 在土壤根区水分运动规律的研究中,通常以土壤水热耦合模型来定量描述和预测土壤水分变化规律,以根系吸水模型来模拟作物根区根系吸水机理及过程。西藏高寒地区低压低氧、强辐射、近地层冷热交换频繁,加之土层稀薄,浅层土壤水转化过程复杂,作物生长受水热胁迫影响较为明显,作物根区的水热耦合作用对根系吸水及能量传输和物质运移影响显著。为了进一步探求西藏地区特殊水热条件下的根区水热运移机理,摸清西藏高寒区作物根系吸水规律,就国内外土壤水热耦合模型和根系吸水模型的相关研究做了综述,针对西藏地区特有的水热条件,建议将水热耦合模型与根系吸水模型结合应用,构建考虑水热耦合因素的根系吸水模型,以更好地适应当地实际,揭示根系土壤水分运动规律。

关键词: 西藏高寒地区; 土壤水热耦合; 根系吸水模型; 研究进展与展望

中图分类号: S152; S311

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0254-07

Research progress on models of soil water and heat and root water uptake and prospect in Tibet

LIU Wei^{1,2}, XU Bing², TANG Pengcheng², LI Zekun²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China)

Abstract: In the study of water transport in root zone, the coupled model of soil water and heat is usually used to describe and predict soil water transport quantitatively, and the root water uptake model is used to simulate the process of root water uptake. With low pressure, low oxygen, strong radiation, and frequent exchange of cold and heat in the surface layers and thin soil layers, soil water transport in surface soil is complex and crop growing is affected by water and heat greatly. The root water uptake, energy transfer and substance migration are affected by hydro-thermal combination remarkably. In order to further explore the principle of hydro-thermal migration in the root zone and understand the characteristics of root water uptake in Tibet, the studies about model coupling soil water and heat and model of root water uptake in China and abroad are reviewed. In view of the unique hydrothermal conditions in Tibet, it is suggested to combine the coupled model of soil water and heat with the root water uptake model to build a root water absorption model considering the hydro-thermal coupling factors, so as to better adapt to the local reality and reveal the root soil water movement law.

Key words: high cold region of Tibet; hydro-thermal coupling; root water uptake modeling; research progress and prospect

收稿日期: 2018-09-19; 修回日期: 2018-12-08

基金项目: 中国水利水电科学研究院科研专项(MK2017J02); 国家自然科学基金项目(51579158、51609154)

作者简介: 刘伟(1992-), 男, 内蒙古赤峰人, 在读硕士研究生, 研究方向为农田水转化与水分高效利用。

通讯作者: 徐冰(1977-), 男, 内蒙古包头人, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事节水灌溉研究。

1 研究背景

土壤水分与作物产量的关系一直以来备受关注。作为联系地表水与地下水的纽带,土壤水在水资源形成、转化及消耗的过程中有着不可或缺的作用。土壤水分状况与农业、水文、环境等领域都有密切联系^[1],土壤水分运动与热量交换密不可分,进而将土壤水热问题整体考虑。目前,土壤水热运移规律的研究是许多学科研究的一个热点问题,比如水土保持、农田灌溉、土壤学等。适宜的土壤水热条件不仅能够保证作物根系良好生长以及作物最终能够高产;同时,在土壤环境中也是防治土壤发生次生盐碱化以及提高土壤肥力和土壤生产效率的重点。根系吸水是作物生长发育过程中最重要的生命活动之一,承担着农田土壤中作物与土壤之间物质运移和能量交换的重要使命^[2]。作物根系吸水状况不仅是作物自身长势以及土壤环境条件的反映,更是作物与土壤及大气的物质能量的交换和传输的体现。因此,探讨和研究田间水分利用效率的提高、土壤墒情的调节、灌溉制度的合理制定以及作物产量提高的前提是先弄清作物根系的吸水机理。

在平均海拔4 000 m的西藏高寒地区,农业科学的理论研究相较低海拔地区起步较晚。针对高寒区特殊环境条件下的土壤水分运动规律以及水热耦合条件下的根系吸水研究仍处于起步阶段。另外除去本身高海拔地区低压低氧(氧气含量约为内地50%~80%)、强辐射(年日照时数3 000 h以上)、近地层水热交换频繁且复杂的自然条件之外,在当地还有着利用低温融雪水进行田间灌溉的生产实际,更进一步加剧了近地层根区土壤的水热交换条件。在此条件下所导致的农作物减产,多年生作物返青推迟等现象产生。种种条件均说明土壤根区水热运移机理的探求的重要性^[3-7]。因此,探索西藏高寒地区土壤水热环境特性、作物根系生长及根系吸水规律具有重要的现实意义,为进一步展开高寒区水热耦合条件下的土壤水分运动规律研究提供基础。这既是高寒地区农田灌溉基础理论研究的难点也是技术应用急需解决的关键科技问题。由此对高寒区考虑水热耦合因素的根系吸水模型研究做出初步展望,以期对相关研究有所裨益。

2 土壤水热耦合模型的研究进展

土壤水热耦合模型是一种能够较完善地定量描述和预测土壤中的水分变化,进而揭示土壤水分运

动规律的模型。与等温模型不同的是,土壤水热耦合模型不仅能在比较湿润的区域有着更好的模拟效果,而且对于土壤内部温度梯度对蒸发产生影响的干燥土壤,它能够更好地揭示土壤中水分与热量之间相互作用相互影响的规律。

2.1 土壤水热耦合模型的起源

土壤水热的相关研究在很长的一段时期之中,均处于定性描述或者是依据经验理论来处理实际生产中所遇到的问题。在水热耦合模型出现之前,主要以等温模型为主,顾名思义该模型假设土壤内部温度是相等的,不存在温度梯度,进而将问题简化处理。但是随着土壤温度理论的研究的进步发现土壤内部温度梯度对蒸发作用是存在着不可忽视的影响的,因此诞生了土壤水热耦合的概念。

由于问题的复杂性,土壤水分运动在起初很长一段时间内都只能处于定性描述的阶段,直到1907年 Buckingham^[8]提出了毛管势理论,1931年 Richards^[9]提出了非饱和流方程,数学物理手段才慢慢应用到了土壤水的研究领域,使得问题从定性描述推进到定量研究的阶段。1957年 Philip等^[10]率先提出了水热耦合的概念,从能量平衡的角度看待土壤水分变化。相较于等温模型更为完善的是考虑到非等温条件下的土壤蒸发,从而以质能平衡角度提出水-气-热耦合运移理论,由此所构建的水热耦合方程中是以温度和含水率为未知函数。

这些水热耦合运移的理论的提出以及相关模型的建立,都为后期水热耦合理论的进一步研究和发展的奠定了良好的基础。

2.2 冻融条件下的土壤水热耦合模型

土壤热质迁移是冻土学研究的基本问题之一,冻胀问题的根本原因是土壤水分的相变问题,而水分相变正是由热量的迁移导致的。出于冻胀问题研究的需要,最早可以追溯到1973年, Harlan^[11]通过模型的建立,认为冻土中未冻水量是温度的函数,并通过这样的函数来表示连通冻土和未冻土的不饱和水流与热流。该模型针对土壤在冻结过程中水热耦合问题做出了较为全面的描述,但是没有涉及冻融过程中溶盐离子的迁移问题^[12]。近年来,随着对寒区和极地资源的探索和开发的不断深入,冻融过程中的溶盐离子迁移的研究也越来越引起相关学者的关注。土壤中的溶液几乎不存在纯净状态,溶盐离子以水为介质在土壤中迁移,而随着土壤水相变的产生,水中的盐分又表现出自身的运移特点,并且会反作用于土壤冻融过程。在冻融耦合模型方面,

1994年,岳汉森^[13]推导出了冻融条件下的水热运移方程。2006年,胡和平等^[14]在结合 Richards 连续方程的基础上,建立了一维冻土-植被-大气连续体模型。模型不仅具有较好的边界条件适应性,而且综合考虑土壤冻融、土壤水汽通量、植被覆盖和近地层水热交换等情况。2009年,李瑞平等^[15]为摸清寒旱区土壤冻融过程中水热盐的迁移规律,采用 SHAW 模型对冻融期河套地区的盐渍化土壤进行了相应模拟研究。2010年,在冻结条件下水热耦合模型的基础上,刘畅等^[16]通过模拟季节性冻土的试验,总结了冻结期土壤水热的迁移变化规律。2011年,针对地下水浅埋区季节性冻融土壤水分运动情况,彭振阳等^[17]通过试验观测,定性定量地分析了其水分运动规律。鉴于积雪覆盖对土壤水热变化的影响,2015年,付强等^[18]对积雪覆盖下土壤的含水率变化进行了分析,研究表明不同厚度和密度的积雪对土壤有不同程度的保墒作用。2016年,奚茜等^[19]运用 PCA 法求解土壤水热耦合模型,通过简化全隐式差分格式,提高了模型计算效率。

2.3 干旱条件下的土壤水热耦合模型

在干旱地区的土壤耦合模型的研究中,牛国跃等^[20]于1997年率先提出了沙漠裸土模型,模型同时考虑了气液两相水分运动。在此基础上,马金珠等^[21]于1998年在线性化迭代后得到了用于沙漠包气带的水汽热耦合模型。Sun 等^[22]基于试验观测资料,对耦合模型和简化的耦合模型进行数值模拟,结果表明,无论在干燥或湿润条件下,简化的耦合模型均更具优势。Liu 等^[23]针对干旱表面水气热运动变化,通过相应模型进行了模拟分析。Bittelli 等^[24]针对裸土水气热运移规律构建的模型,通过模拟发现与观测值有很好的—致性。

针对西藏高寒区的自然条件,朱绪超等^[25]2015年分别从遥感反演、定点观测、模型模拟以及布点调查4个方面对青藏高原地区土壤水分研究进展进行了综述。就模型模拟方面,常用模型有陆面过程模式 CLM3.0、常用的水热耦合模型 SHAW 模型和 COUPMODEL 模型,除此之外还有 VIC-3L 模型、BATS 陆面模型、WRF 模式、LDAS 模型等^[26-34]。以上各模型在青藏高原多年冻土区活动层土壤水热模拟中各具优势,同时也存在着各自的不足。研究大多是以水文、陆面过程分析以及冻土学的研究为重点,针对特殊自然条件下复杂的水热运移情况,尤其是侧重于农田土壤水分以及作物减产机理的研究尚属空白。进一步分析可以发现,仅仅依靠土壤水

热耦合模型并不能充分地解释和说明一定的水热条件对作物植株,尤其是作物根系生长的影响机理。因此,通过以上研究可以看出水热变化条件在作物生长过程中起到了重要的作用,针对青藏高原地区特殊水热条件,适宜西藏地区的水热耦合模型将会是进一步的研究热点。

3 作物根系吸水模型的研究进展

植物根系吸水模型是通过数学物理方法来定量地体现和反映根系吸水的机理和过程的一种模型。根据研究尺度的不同,一般可分为两类:一类是微观模型,另一类是宏观模型。

3.1 微观吸水模型

微观吸水模型由于其模型假设单根吸水特性沿径向不变的特点,所以又称之为单根径向流模型。微观模型假定植物根系分布均匀,与之相对应的根系的各项物理特性也均匀分布。微观模型主要用于研究植物根系的吸水机理^[35]。

微观模型由 Gardner^[36]于1960年率先提出。为了简化问题的求解,提出了均—性假设,即假设在沿根长方向上单根的直径、吸水特性以及土壤的初始条件和导水性能等各项物理特性均不变,并且忽略重力作用条件下垂直方向的水分运动,将土壤水分运动简化为平面径向流动问题。相应的定解条件为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rD(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r}] \\ \theta = \theta_0 \text{ 或 } \psi = \psi_0 & t = 0, r \geq 0 \\ q = -2\pi r_r k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial r} = 2\pi r_r D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} & r = r_r, t > 0 \\ \theta = \theta_0 \text{ 或 } \psi = \psi_0 & r = r_r, t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

在 Gardner 的基础上,不少学者对其进行了研究和改进。1976年, Molz^[37]提出了土-根系统水流动模型,模型根据根表面与根组织内部的不同水力特性,将土壤中水分流动根据不同水力特性加以联系^[38]。随着计算机技术的不断发展,新的计算方法和计算手段应用到各个学科领域。1986年, Hainsworth 等^[39]借助 X 射线摄影法,发现根系吸水速率和土壤含水率梯度与根长呈负相关,并指出原因可能是根表面随着根径减小而减小,因此均—圆柱体的假设可能是错误的。紧随其后, Novak^[40]在土壤剖面充分湿润条件下,于1987年得出了作物根系吸水速率的表达式。与均—性假设不同的是其假定根系吸水速率在土壤剖面上呈现指数分

布,较贴合实际。

与国外研究情况相比,国内的吸水模型相关研究是从20世纪80年代开始的。针对不同作物类型的吸水特性的不同,1992年,康绍忠等^[41]从作物吸水机理出发,结合动态模拟的方法,对作物的根系吸水速率展开了研究。1996年,罗远培等^[42]在实测数据的基础上,分析得到了关于冬小麦,玉米的微观吸水模型。龚道枝等^[43]2004年以果树为研究对象,较系统和全面的研究了二维根系吸水特性。2013年,高晓瑜等^[44]对国内外常用的水盐胁迫条件下作物根系吸水模型及其相关研究作了综述。

总的来说,由于研究尺度为单根,故在严格条件下根区微域内土壤水分运动规律,微观吸水模型能描述得更好。但是由于微观模型中包含的参数许多都难以测定,并且由于田间实际根系分布的复杂性,使得微观根系吸水模型难以体现整个根系的土壤水分运动规律和吸水机理。

3.2 宏观吸水模型

宏观吸水模型,顾名思义较微观吸水模型不同的是其研究对象是整个根系,并将整个根系看作是一个吸水器。在根系分布上也与微观模型不同,假定在根系均匀分布在根系所在土层中,而整个根区的根系密度又是不均匀的^[45]。随着土壤物理等其他相关学科的研究不断深入,进一步发现作物根系的吸水速率取决于土壤含水率、植物本身的生理特性以及近地气象条件,故整个根系从土壤中吸收水分的吸水速率是不尽相同的。从数学角度来看,宏观吸水模型是土壤水分运动基本方程的右边加上一个根系吸水速率项:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla [k(h) \nabla (H)] - S \quad (2)$$

式中: θ 为体积含水率; t 为时间; h 为土水势; k 为非饱和土壤导水率; H 为总土水势; S 为根系吸水速率。

之后的宏观模型的发展和改进,实质上都是在通过修改吸水项 S 来建立一个更加切合实际的吸水模式,不难看出根系吸水项的确定是宏观模型的关键所在。通常根据模型影响吸水速率的主导因子和建模方式将其分3类:吸水机理模型、蒸腾权重原理模型和水动力学原理模型。

(1)吸水机理模型:主要是以水分物理参数和根系密度为主导因子来构建的模型,最早有Gardner模型、Whisler模型等。此类模型具有清晰的机理性和物理过程,但是由于其中许多参数很难准确地测定,如根系水势和土壤、根系对水流的阻力等,因此相应的模型应用也受到较大限制。

(2)蒸腾权重模型:将蒸腾量在根系层土壤剖面上按照一定的权重进行分配,建立包含权重因子的根系吸水函数即为蒸腾权重模型。根据权重分配不同进一步可分为如下3类:

线性模型:即吸水强度在土壤剖面上呈现线性规律,典型的有:均匀分布的Feddes模型,按4:3:2:1的比例分配的Molz-Remson模型。

非线性模型:即结合植物根系在空间上分布的不同情况,在线性模型的基础上作出进一步的补充。罗毅和于强(2000)通过田间试验资料的分析对Molz-Remson模型、Feddes模型以及Selim-Iskandar模型做出了进一步改进。

指数模型:指随土壤深度增加根系密度的变化呈现指数关系。针对不同的水分条件以及植被类型情况,许多学者就此展开了探索:1992年,康绍忠等^[41]在黄土高原特定的气候条件下,提出了小麦的吸水模型。模型中规避了较难测定的参数如根系密度、阻力等,使得模型在实际应用中也比较简便,但是由于模型是在特定的试验条件下得到的,相对应的局限性也是无法避免的。1997年提出的邵爱军等^[46]建立的模型是在实测资料的基础上,运用多元非线性回归的数值方法得到的,推求出的经验因数不仅能够体现作物吸水量峰值情况,还能反映根系吸水在剖面上分布情况。通过验证发现具有较好的模拟效果。

(3)水动力学原理模型:该类模型是基于土壤水动力学原理推导出来的。由于以往模型中存在参数多,而且难以测定导致应用受到限制的问题。因此,以Hornert^[47]的假定为基础,在总结已有模型中的不足,通过数值模拟反推求得了模型。该模型主要研究对象为土-根系统,并未涉及SPAC系统中大气因素的影响。并且在模型中依然存在着许多难测定的因素,如水流阻力、根透性、根长密度等,因此在实际中应用也受到了一定限制。

将微观模型和宏观模型进行对比可以看出,由于微观模型研究对象为单根,故其在严格的模拟条件下对根区小范围内的土壤水分运动规律有着较好的模拟效果。根据这一特点,常借助微观模型来研究根系的吸水机制以及相关的水势变化关系。但是由于微观模型的均一性假设与实际情况的不相符,所以,微观模型所模拟的单根吸水特点是不能够代表整个根系的吸水规律的。宏观模型将整个根系看做整体,可以忽略掉水势梯度的影响,并且模型假设也更符合田间实际情况,但是针对不同的水分条件和作物类型,模型的边界条件又会难以控制。因此,宏观模型在实际应用中还

需要进一步研究。

3.3 其他吸水模型

(1) 多维度根系吸水模型。Gardner 模型是从简单的一维形式开始,近年来模型的发展也越来越涉及复杂的根结构以及土壤和植物的相关过程,研究形式也从一维变向二维和三维。目前来看,三维模型最能反映根系在土壤中吸收水分的实际情况,因此也成为未来的根系吸水模型的发展趋势,目前应用较广泛的有 Hydrus-3D, R-SMWS 模型等^[48-49]。

(2) 水盐胁迫下的根系吸水模型。在干旱和半干旱地区,尤其是盐渍化地区,水盐胁迫对作物根系吸水的影响较为显著,双重胁迫下作物吸水需要消耗更多的能量。然而宏观模型很少涉及水盐共同胁迫下的根系吸水机制。因此,对其定量研究也越来越重要^[50-54]。

根系吸水模型旨在模拟根系吸水机理,进而调节作物根系发育以及植株生长。李凯等^[55]、徐满厚等^[56]针对植物根系和增温条件对青藏高原地区水热过程以及生物量影响进行了模拟;李玉庆等^[57]2015年通过蒸渗仪法提出了基于彭曼公式而构建的青稞根系吸水模型。然而针对高寒区独特条件下的根系吸水模型研究目前尚待完善,结合高寒区的自然条件,提出符合当地实际条件的根系吸水模型,是明确高寒区作物根系生长机理、探求根系水分运动规律以及物质运移规律的必要条件。

4 西藏地区考虑水热耦合因素的根系吸水模型研究展望

4.1 面临的科学问题

随着数学模型研究的出现,越来越多的复杂物理问题都可以通过模型模拟来展开进一步机理性研究。通过问题的简化,提出相应假设,构建数学方程,确立边界条件以及模型最后的适用性验证,完整的建模过程就完成了。通过建模求解自然科学问题是一种十分高效、实用的方法。随着生产实际的需求不断加大,对于复杂的土壤内部能量的交换,水分盐分的运移规律的描述也在逐步深入,旨在揭示土壤水分与热量交换运移规律的土壤水热耦合模型的研究需要也在逐步提升。而根系吸水是根系生长过程中最基本的生命活动,土壤与根系之间的物质能量交换与土壤水热环境又是互相联系,互相作用的关系。这就对根系吸水模型的进一步研究提出了相应要求。

通过回顾两类模型的研究进展,不难发现,虽然我国在该方面的研究起步较晚,但是在探索和研究中也

出现了许多丰硕的研究成果。然而在经济发展和科学研究都相对落后的西藏地区,相关研究仍处于起步状态。由于西藏地处高原,气象条件和地理条件都具有特殊性,农作物生长发育以及农艺手段上所面临的条件都与内地有所不同,比如昼夜温差较大、氧气稀薄以及早春时节利用融雪水进行田间灌溉等实际问题。当地作物在低温融雪水灌溉条件下,根区土壤潜热交换频繁,冻融情况较平原地区更为复杂。现有的根系吸水模型并不能很好地描述这种条件,进而反映高寒区牧草根系的吸水状况。以往研究中也未将高海拔、低温水等特殊地理、生产条件考虑在内。即使是冻融条件下的水热耦合模型研究也并未考虑高寒区土层稀薄、潜热交换频繁的土壤条件。

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、田间管理等综合技术应用不足的影响外,由于表层壤土浅薄,壤土层下的砂砾石层对作物根系自下而上的水分补充过程也有显著影响。同时,砂砾石层切断土壤毛管后,由于灌溉带来的水分渗漏对作物根系生长的影响尚不明确。

低温融雪水灌溉加剧了根区土壤水热条件改变,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^[58-60]。与水库等常温灌溉相比,低温融雪水灌溉所带来的影响中,影响程度和作用机理都尚待明确。

微观上,就作物本身而言,针对高寒区特殊自然条件,适宜当地的典型根系吸水模型有待进一步建立,根系吸水过程相较于低海拔地区有哪些特殊性需要进一步研究。

4.2 研究展望

为了进一步明确西藏高寒区土壤水分运动规律以及水热运移机理,下一步研究应侧重如下几点:

(1) 高寒区植被覆盖条件下土壤水热耦合的量化表征。基于田间试验,通过水量平衡计算,借助称重式蒸渗仪,开展西藏高寒地区以青稞为典型作物的需耗水规律研究。在薄土层条件下,揭示集中降雨和灌溉所产生的深层渗漏机制,摸清强辐射条件下表层土壤及作物的蒸散规律。在土壤含水率、土壤容重等基础物理指标观测的基础上,对比分析不同温度下土壤水分特征曲线变化规律,结合田间实测土壤含水率变化数据,对现有水分运动方程进行修正。

(2) 高寒区典型作物根系吸水模型建立。以西藏高寒地区广泛种植的青稞为例,通过对作物全生育期内根系密度及根系分布的定期观测,开展充分灌溉条件下作物根系吸水能力及吸水规律的研究。结合当地

灌溉习惯,模拟融雪水灌溉,与常温水灌溉进行对比,采用氢氧同位素法确定根系吸水来源,进一步分析融雪水灌溉对作物根系生长的影响。通过对作物根系吸水深度以及作物根系主要发育深度的观测,揭示根系发育深度随时间变化的规律。结合水热耦合模型,针对高寒区土壤水分运动规律特点和水分运移机理特性,将水分运动参数中的温度变量作为函数耦合到根系吸水模型之中,进而建立考虑水热耦合因素的根系吸水模型。

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。针对当地自然地理、气象条件的特殊性,在水热条件变化较为繁复的情况下,为进一步摸清西藏高寒区土壤水热运移规律以及根区土壤水分运动规律提供基础。

参考文献:

- [1] 雷志栋,杨诗秀,等. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988.
- [2] 郭向红,孙西欢,马娟娟. 根系吸水模型参数的混合遗传算法估算方法[J]. 农业机械学报,2009,40(8):80-85.
- [3] 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]. 排灌机械学报,2018,36(10):1029-1034.
- [4] 郑和祥,郭克贞,郝万龙. 作物生长指标与土壤水分状况及地温关系研究[J]. 水土保持研究,2011,18(3):210-212+216.
- [5] 徐冰,汤鹏程,李奇,等. 基于CROPWAT模型的拉萨地区燕麦优化灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(6):35-39+183.
- [6] 徐冰,郭佳宾,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+90.
- [7] 徐冰,田德龙,郭克贞,等. 西藏高寒牧区燕麦耗水量与灌溉制度初步研究[J]. 节水灌溉,2013(3):57-59+62.
- [8] BUCHINGHAM E. Studies on the movement of soil moisture [J]. U. S. Department of Agriculture, Bureau of Soils, 1907,38.
- [9] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids in porous mediums [J]. Physic, 1931,1(5):318-333.
- [10] PHILIP J R, DE VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradient [J]. American Geophysical Union, 1957,38(2):222-232.
- [11] HALAN R L. Analysis of coupled heat - fluid transport in partially frozen soil [J]. Water Resources Research, 1973,9(5):1314-1323.
- [12] 于炜,刘廷玺. 科尔沁沙地坨甸相间地区冻融期土壤水热运移规律数值分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- [13] 岳汉森. 土壤在冻融过程中水-热-盐耦合运移数学模型之初探[J]. 冰川冻土,1994,16(4):308-313.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 刘畅,陈晓飞,苑杰,等. 冻结条件下土壤水热耦合迁移的数值模拟[J]. 水电能源科学,2010,28(5):94-97.
- [17] 彭振阳,黄介生,曾文治,等. 季节性冻融土壤水分运动规律[J]. 武汉大学学报,2011,44(6):696-700.
- [18] 付强,蒋睿奇,王子龙,等. 不同积雪覆盖条件下冻融土壤水分运动规律研究[J]. 农业机械学报,2015,46(10):152-159.
- [19] 奚茜,盛炎平,王爱文. 土壤水热耦合模型全隐式差分格式及其数值模拟[J]. 北京信息科技大学学报,2016,31(1):48-54.
- [20] 牛国跃,孙菽芬,洪钟祥. 沙漠土壤和大气边界层中水热交换和传输的数值模拟研究[J]. 气象学报,1997,55(4):892-901.
- [21] 马金珠,张惠昌,易立新,等. 腾格里沙漠包气带水、汽、热运动耦合模型及水热状况模拟[J]. 中国沙漠,1998,18(4):340-345.
- [22] SUN Shufen, ZHANG Xia, WEI Guoan. A simplified version of the coupled heat and moisture transport model [J]. Global and Planetary Change, 2003,37(3):265-276.
- [23] LIU B C, LIU W, PENG S W. Study of heat and moisture transfer in soil with a dry surface layer [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005,48(21-22):4579-4589.
- [24] BITTELLI M, VENTURA F, CAMPBELL G S, et al. Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2008,362(3-4):191-205.
- [25] 朱绪超,邵明安. 青藏高原土壤水分研究进展[J]. 土壤通报,2015,46(6):1523-1528.
- [26] 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):930-937.
- [27] 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.
- [28] 郭东林,杨梅学. SHAW模式对青藏高原中部季节冻土区土壤温、湿度的模拟[J]. 高原气象,2010,29(6):1369-1377.
- [29] 陈晓磊,杨梅学,万国宁,等. CLM3和SHAW模式在青

- 藏高原中部 NMQ 站的模拟研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 291 - 300.
- [30] 夏坤, 罗勇, 李伟平. 青藏高原东北部土壤冻融过程的数值模拟[J]. 科学通报, 2011, 56(22): 1828 - 1838.
- [31] 张伟, 王根绪, 周剑, 等. 基于 CoupModel 的青藏高原多年冻土区土壤水热过程模拟[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1099 - 1109.
- [32] 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.
- [33] 潘永洁, 吕世华, 高艳红, 等. 砾石对青藏高原土壤水热特性影响的数值模拟[J]. 高原气象, 2015, 34(5): 1224 - 1236.
- [34] 马琴, 刘新, 李伟平, 等. 青藏高原夏季土壤有机质及砾石影响水热传输特性的数值模拟[J]. 大气科学, 2014, 38(2): 337 - 351.
- [35] 杨培岭, 郝仲勇. 植物根系吸水模型的发展动态[J]. 中国农业大学学报, 1999(2): 67 - 73.
- [36] GARDNER W R. Dynamic aspects of water availability to plants[J]. Soil Science, 1960, 89(2): 63 - 73.
- [37] MOLZ F J. Water transport in the soil root system: Transient analysis [J]. Water Resources Research, 1976, 12: 805 - 807.
- [38] 赵成义. 作物根系吸水特性研究进展[J]. 中国农业气象, 2004, 25(2): 39 - 42.
- [39] HAINSWORTH J M, AYLMOORE L A G. Water extraction by single plant roots I [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(4): 841 - 848.
- [40] NOVAK V. Estimation of soil - water extraction patterns by roots [J]. Agricultural Water Management, 1987, 12(4): 271 - 278.
- [41] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 冬小麦根系吸水模式的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 1992, 20(2): 5 - 12.
- [42] 罗远培, 李韵珠. 根土系统与作物水氮资源利用效率[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 35 - 45.
- [43] 龚道枝, 康绍忠, 张建华, 等. 苹果树蒸发蒸腾量的测定和计算[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(Z1): 429 - 431.
- [44] 高晓瑜, 霍再林, 冯绍元, 等. 水盐胁迫条件下作物根系吸水模型研究进展及展望[J]. 中国农村水利水电, 2013(1): 45 - 48 + 54.
- [45] 赵成义, 黄俊梅, 王玉潮, 等. 植物根系吸水特性研究[J]. 干旱区地理, 1999, 22(2): 88 - 96.
- [46] 邵爱军, 李会昌. 野外条件下作物根系吸水模型的建立[J]. 水利学报, 1997, 28(2): 69 - 73.
- [47] HONERT T H V D. Water transport in plants as a catenary process [J]. Discussions of the Faraday Society, 1948, 3: 146 - 153.
- [48] VRUGT J A, WIJK M T, HOPMANS J W, et al. One -, two -, and three - dimensional root water uptake functions for transient modeling [J]. Water Resources Res, 2001, 37(10): 2457 - 2470.
- [49] HEINEN M. Compensation in root water uptake models combined with three-dimensional root length density distribution [J]. Vadose Zone Journal, 2014, 13(2): 373 - 373.
- [50] SEPASKHAH A R, YARAMI N. Evaluation of macroscopic water extraction model for salinity and water stress in saffron yield production [J]. International Journal of Plant Production, 2010, 4(3): 175 - 186.
- [51] LI Huijie, YI Jun, ZHANG Jiangguo, et al. Modeling of soil water and salt dynamics and its effects on root water uptake in Heihe arid wetland, Gansu, China [J]. 2015, 7(12): 2382 - 2401.
- [52] SKAGGS T H, VAN GENUCHTEN M T, SHOUSE P J, et al. Macroscopic approaches to root water uptake as function of water and salinity stress [J]. Agricultural Water Management, 2006, 89(1/2): 140 - 149.
- [53] 谭红朝, 李秧秧. 根系吸水的能量模型实验验证与评价[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 50 - 53.
- [54] 王玉阳, 陈亚鹏. 植物根系吸水模型研究进展[J]. 草业科学, 2017, 26(3): 214 - 225.
- [55] 李凯, 高艳红, CHEN Fei, 等. 植被根系对青藏高原中部土壤水热过程影响的模拟[J]. 高原气象, 2015, 34(3): 642 - 652.
- [56] 徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 等. 模拟增温对青藏高原高寒草甸根系生物量的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6812 - 6822.
- [57] 李玉庆, 张存, 张文贤. 土壤水分及氮素淋失胁迫下根系吸水过程的模拟[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(12): 95 - 102.
- [58] 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, 48(9): 1055 - 1063.
- [59] 汤鹏程, 徐冰, 郭克贞, 等. 西藏高寒牧区灌溉人工草地节水高产综合技术研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 128 - 131 + 171.
- [60] 汤鹏程, 徐冰, 郭克贞, 等. 西藏高寒牧区燕麦生理指标与气象因子的关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 97 - 100.