DOI: 10.5846/stxb201806101295

周宏.干旱区包气带土壤水分运移能量关系及驱动力研究评述.生态学报,2019,39(18): - . Zhou H.Review of studies on the relationship between soil water movement and energy and their driving forces in the vadose zone of arid regions. Acta Ecologica Sinica,2019,39(18): - .

干旱区包气带土壤水分运移能量关系及驱动力研究 评述*

周宏

1 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站,中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室,中国科学院西北生态环境资源研究院,兰州 730000

2 中国科学院大学,北京 10049

摘要:包气带土壤能量和水分平衡及其驱动因子是维系地下水—土壤—植物—大气连续体(GSPAC)系统中水分运移发生的关 键因素。在降水稀少、水资源短缺的干旱地区,开展包气带土壤水分形态、运移过程与能量的耦合规律研究对揭示区域水资源 形成和转化机理具有极其重要的现实意义。文章总结了土壤水分运移理论研究进展,探讨了水分参与水文循环过程及干旱环 境下土壤水分可能表现形态及其降雨入渗、再分布、渗漏、蒸发、毛管水上升等过程驱动机制,评述了包气带土壤水分与能量过 程在不同空间尺度上生态水分效应。在一个非饱和土壤系统中,水分运移受包气带结构,土壤物理特征,植物根系和土壤生化 环境的综合控制,物质和能量平衡改变是驱动水分循环的源动力,而土壤环境变化是导致水分运移形态的发生变化根本原因。 因此,在气候变化背景下,研究干旱区土壤与大气界面以及包气带与饱和带界面水、汽、热耦合转化形式与能量驱动过程,能够 提升我们对包气带土壤水分运移规律机理的深入理解,丰富对区域气候和水文变化认知。为干旱区生态植被恢复建设和水资 源精细化管理提供理论向导。

关键词:干旱区;包气带;水分运移;能量;驱动力

Review of studies on the relationship between soil water movement and energy and their driving forces in the vadose zone of arid regions

ZHOU Hong

1 Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Network Research, Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, The Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 10049, China

Abstract: In the vadose zone, the soil energy and water balance and its driving forces are key factors that maintain soil moisture movement in the groundwater-soil-plant-atmospheric continuum (GSPAC) system. However, in arid regions with lower precipitation and water resources, studies on coupling soil water state and movement processes and the partitioning and migration of energy are important to understand the formation and transformation mechanisms of regional water resources. In this paper, advances in soil water transport theory are summarized. We also discuss the water cycle in the system and the possible ways by which soil water is lost under arid conditions, as well as the driving mechanisms behind rainwater infiltration, redistribution, drainage, evaporation, and capillary rise. This paper also reviews the ecological hydrological effect of soil moisture and energy processes on different spatial scales. In unsaturated soil systems, soil water movement is

收稿日期:2018-06-10; 网络出版日期:2019-00-00

基金项目:重点项目"荒漠绿洲非饱和带土壤水分运移及对地下水补给作用"(41630861)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhong@lzb.ac.cn

controlled by the vadose zone structure, soil physical characteristics, plant root system and soil biochemical environment. Changes in matter and energy balance are the driving forces of the hydrological cycle, and change in the soil environment is a fundamental factor for change in the soil water state. Therefore, under global climate change, studies on the energy and driving mechanism of coupling liquid water, water vapor, and heat transport through the interface between the soil surface and atmosphere or groundwater could elucidate the transport mechanism of soil water and help us to better understand regional climate and hydrological changes. The ultimate objective is to provide theoretical guidance for the restoration and construction of ecological vegetation and precision management of water resources.

Key Words: arid region; vadose zone; soil moisture movement; energy; driving forces

干旱区约占陆地表面 30%,占全球净初级生产力很大比例^[1,2]。受气候变化和大规模水土开发的影响, 干旱区面积还在不断扩张,干旱程度进一步加剧^[3-5],水资源供需矛盾更加凸显^[6]。而气候和水资源平衡恰 是维系干旱区脆弱的生态平衡关键要素。包气带则是地表水资源和地下水交换的主要通道,也是空气—水界 面和根系—土壤界面气体和矿物质交换的场所,包气带中土壤水分则是链接地球关键带生物过程和非生物过 程介质和桥梁^[7],一方面水分以降雨入渗形式储存到土壤水分进而补给到地下水^[8],相反地下水又会通过包 气带以土壤蒸发,植物蒸腾等形式将水分排泄到大气圈,促使水分在地下水—土壤—植物—大气连续体中发 生的频繁转化。当前,在生态系统生产力变化和人类活动双重驱动下,包气带土壤水分的利用和干扰在持续 加剧,水分循环在不同时空尺度上相互作用更加剧烈。

在全球储水量中,包气带土壤水约有 165000 亿 m³,我国土壤水分总储量为 33550 亿 m³,占全球粮食产量 60%的旱作农业完全依赖土壤水资源^[9]。并且荒漠区植被建设,绿洲农业灌溉和水资源管理都高度依赖于包 气带土壤水分通量和储存和变化。要实现对干旱区土壤水分科学管理和调控,必须揭示包气带水分入渗、再 分布、渗漏、蒸发、地下水毛管上升等相互之间转化过程及其驱动机制^[10]。因为入渗它不仅决定进入土壤中 水分的量,还强烈影响植物根吸水,土壤溶质迁移以及陆地表面蒸腾蒸发过程^[11-13];水分再分布作为入渗后 期土壤水分在势能和植物根系作用下的自我调节过程,理解其过程对提高干旱区植被降水利用,近地面氮等 元素的吸收,提高灌溉水平和满足不同作物不同根系层对水分的需求以及研究植物的生长有重要意义;研究 深层渗漏及其过程对评估包气带补给地下水量和地下水合理开发具有重要的参考价值^[14-16]。而蒸发则是构 成陆地水分平衡重要组成部分,其与土壤水分消长动态变化密切相关,它对实施农田节水技术,制定节水灌溉 制度极其重要^[17]。毛管水上升量的多少及其上升高度直接影响荒漠植物的生长状况,掌握地下水埋深与毛 管上升水之间的关系,也能够指导土壤盐渍化的预防和治理^[18]。

土壤水能交换及其构成形态是驱动生态系统的循环最重要过程,也是影响地面温度,水分输送及植被生 长发育与生态系统生产力的重要因素^[19]。而干旱区由于降水稀少、蒸发强烈,因此低水势下土壤水汽运移和 交换过程,其产生的能量转换和质量迁移是地表质能平衡计算不可或缺的重要汇源项,对维持干旱半干旱区 植被和生态系统起到重要的作用^[20]。然而,包气带参与水文循环和联系过程是高度复杂的生态水文系统,水 分循环在驱动力、过程、能量三大方面均具有耦合特性,受多重因素的共同支配。因此,在干旱区关键带包气 带开展土壤水分时空格局、水分形态及其能量驱动过程理论研究对水资源调控和揭示植物生态水文过程显得 尤为关键。本文对包气带土壤水分能量理论及方法,土壤水分表现形态,土壤水分运移过程及驱动力,包气带 土壤水分、能量平衡与生态水文效应等问题的研究进展予以评述,并提出未来亟待开展的研究工作,旨在推动 相关领域研究的深入开展。

1 包气带水分运移理论发展与应用

包气带土壤水分运移受土体结构,水分形态、能量和驱动力综合制约,会呈现不同表现形式。由此也形成 了许多研究理论方法,包括毛管势理论,土水势理论,层流理论,湿润锋面入渗理论和零通量面等理论。这些 理论从不同过程和角度阐述了对包气带土壤水分运移研究规律认知和解决方法。Gardner 基于毛管理论指出 温度与土壤水势的正相关关系,Green 和 Ampt 根据毛管理论提出了 Green-Ampt 入渗模型^[21],但也存在土壤 模型概念化失真和驱动力考虑不全面的两大理论缺陷;1931 年 Richards 对张力计发明,使得土水势理论得到 广泛的应用和推广。我国一些学者较早应用势能理论研究饱和-非饱和土壤水运动及溶质运移问题。并且随 着土壤水、热、能量等耦合理论发展形成,使其成为包气带水分运移最主要的理论之一;湿润锋面入渗理论至 今仍是解释包气带水分入渗理论过程常用的理论,但由于近年来优先流理论的提出受到了挑战;零通量理论 是在水势理论基础上提出的,随后 70 年代英、法、美等国学者依据理论基础,研制出便携式中子水分仪和负压 计,使零通量面法成为研究包气带水分运移的最有效方法之一。Sharm 等利用该方法研究了潜水蒸发及补给 量,包气带水分与土壤水势的关系^[22-24]。此外美国科学家 Fabishenco 还提出解决土壤非饱和流问题的混沌理 论,但由于该理论提到是土壤水分在小尺度内运动过程,而实际更关注大尺度,因而还有许多问题待解决。每 一种理论的发展和应用,都为完善水分运移过程与能量、驱动力关系研究提供了重要的基础理论和工具,但实 际中仍然有各自的局限性(表1)。

Table 1 The main theories development and appreadon of son moisture movement				
理论名称 Theory types	理论原理 Theoretical principle	水分运移驱动力 Driving forces for water movement	假定条件 Assumptions conditions	应用的局限性 The application limitation
毛管势理论 Capillary potential theory	球形土粒成规则排列,且 形成孔隙为粗细相间的 念珠状管道	毛细力	土壤孔隙形状排列概化	除去毛管力,还有更重要的 吸附力
土水势理论 Soil moisture potential theory	应用质量和能量守恒原 理建立平衡方程	土壤水势差	简化理论条件	经常在实际中忽略温度势 和压力势的存在
层流理论 Laminar flow theory	直接应用达西定律描述 水流运移	基质势和重力势差	基于恒温提出,且忽略了 水汽压	达西定律基于饱和运动得 出,而水分通常是非饱和 运移
湿润锋面入渗理论 Wetting front infiltration theory	只要水分补充大于入渗, 任何时候可以呈现入渗 锋面	吸附力	当蓄水饱和时,湿润锋才 会向前推进	水分入渗不是同时进行,还 存在以大孔隙形式优先 入渗
零通量面理论 Zero flux plane theory	土壤水分运移中存在水 势为零的剖面	基质势和重力势差	把零通量面的位置假定 稳定存在的	零通量面从形成、发育到消 失的过程很快,计算误差 较大
优先流理论 Preferential flow theory	包气带在整个人渗剖面 上接受水分补给	土壤介质各项异性和流 动的非均匀性	土壤表层未达到饱和甚 至干燥土壤也产优先流	土壤大孔隙流时空变异性 极强,影响因素繁多
混沌理论 Chaos theory	动力学角度研究不可积 系统轨道稳定性	水动态不稳定及其依存 条件变化	水分动态过程有各自的 轨道模式	注重小尺度运动过程,而实 际中更关注大尺度

表1 土壤水分运移主要理论发展及应用

2 包气带水分运移形态

包气带土壤水分运移通常包含水势梯度、温度梯度、浓度梯度、渗透梯度等影响下水、空气、水汽等动态流 过程,并且它们以相互转化和迁移的形式存在^[25,26]。基于菲克定律,早在 1940 年 Penman 等就认为包气带水 分运移同时存在液态流和气态流两个形态^[27],而液态流又可分割为薄膜流和毛管流。随后在 Philip 等提出 的 PDV 模型中,将水分通量分割为等温液流、非等温液流、等温汽流和非等温汽流四种形态^[25],并且认为在 土壤非饱和带,主要是基质势和温度势驱动土壤水分在不同生境表现出了特有的运动形态。

在干旱区,正常水分情况下,浅层包气带水分由液态水流,水汽流或二者混合流态组成^[28],而液态流存在 基质势驱动和热驱动等温流和热流两种流态^[26, 29, 30]。Tokunaga 等还研究发现土壤水分含水量只要能够维持 孔隙间需要连通性,并且颗粒间水分构成的液体摆环不破裂,毛管梯度驱动的毛管流就是包气带水分液态流运移的主要形态^[31]。低含水量条件下薄膜流可能在土壤的水分运移过程中扮演重要角色。此时总水通量中液态水占极小比例^[32,33],水汽运动成为了最重要一部分^[34-36],Madi等通过土柱试验独立研究了水汽在极端干旱环境中扩散和冷凝过程,并在隔离液态水情况下证实了水汽的存在^[37]。Sanjit等通过 Hydrus-1D 模拟发现在墨西哥干旱区包气带水汽通量要占总水通量的大约 10%^[38],如果在沙漠裸地浅层 2 cm 处,这一数据能占到 25%^[39]。水汽运移由于同样存在由基质势和热驱动力等温汽流和热汽流两种流态,且热驱动水汽流在大多数包气带占主导地位,为植物生长提供重要的水分来源^[40]。Syvertsen等研究发现水汽流可以增强树木维持光合作用能力,在夜间对季节性干旱的 15—35 cm 层每小时土壤水分有 40%贡献率^[41,42]。此外,雾、露水等水分形态在干旱和半干旱环境的水分平衡中起重要作用^[43]。总之,受气候变化和土壤环境的影响,参与运移水分形态在不同界面之间转化频繁,因此在区分和确定每一个过程主导水分形态仍然有许多不确定性。

3 包气带土壤水分循环及能量过程

随着地下水单元纳入到 Philip 于 1966 年提出的 SPAC 系统中^[44],目前形成了较为完整的地下水—土 壤—植物—大气连续体系统概念(Groundwater-Soil-Plant-Atmosphere Continuum, GSPAC),逐步的统一了水分 运移与能量转化的动态过程关系。在干旱区水分循环系统包括水平和垂直两个方向主要过程(图1)。包气 带作为联系地表各层圈相互作用的敏感带,为垂直和水平通量水分与能量交换提供了场所。包气带水分运移 过程首先遵循水量平衡定律,其次是水分双向流通界面及其通量大小,包括空气和土壤界面以及土壤与地下 水界面。在水土系统中,如果把土壤及其所含的水分看作是一个系统,当系统保持在恒压以及溶质浓度和力 场不变的情况下,系统和环境之间没有能量在交换,系统处于平衡状态。一旦平衡破坏,就会导致能量转移和 再分配,土壤水分在包气带中流通、吸收和分解就会发生改变。早在 1996 年张富仓就基于"活化能"的概念 讨论了土壤水分运移机制,土壤水的表观或平均活化能是耗费在一个水分子越过两流线准平衡位置势能全所



图 1 土壤水分在 GSPAC 耦合系统中的循环过程 Fig.1 Characteristics of water circulation in GSPAC system

需能量,水分运动需要克服能垒(Energy barrier)。后来随着土壤势能概念提出,可以较为准确描述包气带水 分能量平衡过程,而其势能也决定了土壤保持水分能力,土壤水分特征曲线则表示了包气带水分隐含的能量 水平。而在土壤与大气界面系统中,水势是联系 GSPAC 连续体系统各个部分物质和能量交换标志,并通过水 势来定量计算出水分运动的能量在整个系统中各个环节的能量水平的变化。地表植被一大气间的相互作用 能量平衡改变将直接或间接决定着降雨、水分入渗、蒸发以及地下水补给等关键的生态水文过程^[45-47]。因 此,要系统地揭示包气带水分运移能量过程首先需要掌握包气带结构,土壤热力和水力特性,其次是土壤水分 的运动和交换的连接通道^[47-50]。而拓展这方面的研究对预测全球与区域的水分循环过程、水资源构成及其 对环境的影响具有重要的作用。

4 包气带水分运移驱动力

当土壤内任意两点的湿度不同时,土壤对水分的吸力也有差异,此差值称为为引起水流的驱动力。土壤 水分运移驱动力普遍观点土壤水势,该理论最早起始于 S.A.Taylor 1983 著作的物理的土壤学:灌溉与非灌溉 土壤的物理学。包气带水分运动其实是土壤水势驱动水分的毛管运移,其内在动力是水势梯度,即土壤水从 水势高处往水势低处流动,对于非饱和土壤水分水势就是重力势和基质势。Saito 等通过试验证实了驱动土 壤液态通量和气态通量的基质势梯度^[26,51,52]。尤其浅表层土壤水分和水汽运移过程中,基质势为主要驱动 力^[53]。对于昼夜温差较大的干旱区,不容忽视另一个重要驱动力就是温度势。早在 19 世纪初期 Boucoyous^[54]提出了包气带土壤含水量变化主要受温度场的影响的观点,随后 Lebedeff^[55]在试验中证明了温 度梯度是土壤中水汽运移的主要能量驱动力,而 Cahill 等还认为水汽运移中温度梯度驱动实际是土壤表面冷 热收缩和扩张引起的对流驱动^[35]。李佩成等^[56-58]也在"内在水出渗补给"假说中认为内在水补给土壤水的 驱动力,除了重力和分子力,还包括温度梯度诱发热动力。Andraski 等^[59]研究指出在干旱区厚包气带尤其要 综合考虑等温水流、等温汽流和非等温汽流下的温度梯度和水势梯度驱动,因为干旱区稀疏植被和包气带特 性正是由低水势和向上的水力梯度所控制。此外,不能忽略非物理过程驱动水分运移的发生,包括人为因素, 植物根系,动物洞穴等。

4.1 土壤水分蒸发

通常情况下土壤蒸发经历二个主要阶段,在土壤水分初始饱和第一阶段,水分主要以液态水蒸发为主, Brooks 等^[60-63]研究发现毛管力是驱动土壤水分运移的主要因子;之后随着土壤含水量降低,逐渐转向由气态 运移控制蒸发第二阶段,维持土壤水分从蒸发锋面向地表运移能量为水势梯度以及温度梯度,且该阶段以水 汽运移为主,直至水势梯度与重力及粘滞力间达到平衡^[64],孟春雷等^[65]通过试验证实了该观点。再者 Tokunaga 等认为在蒸发第二阶段,土壤颗粒与薄膜交界面上离子电价不平衡性,高浓度盐水等也会驱动水汽 运移^[66-68]。此外,水分蒸发运移另一个阶段就是脱离土壤表层进入大气循环,空气饱和气压差则成为水分向 大气扩散的主要驱动力。然而实际蒸发中各个阶段并没有明显的界限,加之土壤水分补给和蒸发同时进行, 因此很难通过试验区分不同阶段变化过程,更多时候是通过模型模拟实现。

4.2 土壤水分入渗及渗漏

20世纪70年代英国水文学者 Cooper 提出了零通量面法,由于该方法能够确定土壤水分变化量的去向, 因此对降水入渗认识程度有了新进展^[69]。降雨或灌溉结束后,由于渗透斑块性,在水平和垂直两个方向上都 可能导致土壤水分入渗发生变化^[70]。垂直通量上水分能够在包气带中下渗,主要是因为两个平行系统之间 存在土壤水势能量差值产生的势能驱动,即重力势能^[71,72],在干旱区这种能量驱动的变化频率和强度更 高^[73]。郑子成等^[74]研究还发现在湿润锋到达之前高含水量阶段主要驱动力为重力势;随着土壤水分含量的 减小,受重力势梯度和基质势的共同作用,且以基质势为主。而压力水头、土壤热量等都会影响水势能,进而 改变水分入渗途径。此外,一些生物和非生物因素也是驱动水分入渗的重要源动力,如细根植物和土壤之间 物质和能量交换作用以及土壤生物结皮^[75,76]。水平通量上入渗主要体现在水分扩散,其主要驱动力是土壤 基质势,并随基质势梯度的增加而加快^[77]。土壤水分入渗涉及竖直和水平两个方向交换,并随着土层包气带 结构以及水分含量变化,入渗会受到一种或几种驱动力交互影响,这就要求更加精细试验支撑土壤水分入渗 过程的驱动机制研究。

干旱区由于蒸发强,降雨少,要发生深层渗漏几乎不可能,因为降水首先需弥补长期以来由于土壤干旱导 致的水分亏缺。Walvoord等^[57]研究发现在一些荒漠区域几乎数年都没有监测到深层渗漏事件发生。但也有 学者认为由于区域气候、土壤、植被覆盖等导致差异,一些干旱区域在降水、灌溉等事件发生后会产生水分渗 漏,尤其在荒漠、沙丘低洼地带^[78]。White等研究发现当满足土壤含水量较高,土壤存在连续性的大孔隙和水 分能够在土壤表面自由移动条件时,重力势驱动水分能够发生深层渗漏^[79,80]。同时土壤的吸湿和脱湿过程 以及滞后效应也能够驱动土壤水分深层渗漏^[81]。此外,诱发降水形成渗漏另一个驱动因子就是植物根系强 持水性和粗根系,因为粗根能够形成大的空隙通道,导致优先流发生。Robinson等^[82]研究发现由于植物强持 水性和较低的土壤饱和持水力可能导致较高的深层渗漏,并且浅根系植物比深根系植物更能诱发深层渗漏 量。尽管目前针对渗漏的不连续,驱动因子不确定性等方面研究取得了一些进展,但仍然主要集中在定性评 价方法上。

4.3 土壤水分再分布

土壤水分再分布是入渗后期土壤水分自我调节过程。通常情况下,降雨或灌溉结束后一段时间内土壤水 会在重力势和基质势的作用下继续向前或周围运动,实现水分再分布,直到土水势达到平衡。由于复杂的土 根系统,水分再分布在深层与上层包气带土壤内交替进行。一是垂直方向上根系驱动较湿润的深层土壤水分 向干燥的表层土壤的提升过程,也称之为水势驱动的被动运移过程^[83-87]。Feddes 等^[88,89]研究指出发生在夜 间这种被动运移过程是影响植物群落动态和土壤水汽蒸发通量一种普遍的现象;二是降雨后土壤势能驱动较 湿润的表层土壤水分向干燥的深层土壤的运输过程;三是水平通量上根系拉力驱动土壤水分在水平方向的侧 向运输过程^[90-93]。此外,水携带的热量,脉冲式降水,土根系统等通过改变土壤水分热力和水力特性^[94,95],以 及土壤、根系、茎杆、叶片的水力传导度等都会驱动水分再分配过程的发生^[48,96,97]。但要从机理上揭示水分 再分布驱动源,需要综合考虑植物体、表土环境和表层大气环境对其共同作用。

4.4 土壤水分扩散

在干旱区,水平通量上水分交换和迁移可以使相邻植被类之间植物根系实现水分互利共生^[98-100],维持系 统功能稳定性和持续性^[101]。水分能够横向迁移驱动因素主要有以下方面:一是灌概或降雨引起的土壤水分 梯度差,即基质势梯度。Shen 等^[102]研究发现农田灌溉水可以运移到防护林,Stratford 等^[103,104]也证实湿地、草地和林地相邻景之间存在水分扩散和交换。二是地下水位梯度差异造成的横向水流和根系延伸吸水, Zhang 等^[105]研究发现由根系延伸吸水导致交换主要发生 0—200 cm 土层,由地下水梯度导致交换发生能够 在 200—260 cm 土层进行;三是植物蒸腾拉力驱动,Xiao 等^[106]研究发现距边界 0.85 m 树木的蒸腾耗水来自 降雨和地下水为 216.9 mm,占其总蒸腾耗水量的 32.4%。但是目前关于土壤水分水平方向运移和交换研究 仍然较少,通常在一些研究和模拟中通常不予考虑或忽略其影响。

4.5 毛管水上升

毛管水指上升毛管深度的地下水可通过毛管作用上升至根系活动层水分,是沟通地下水与作物根层水分 之间的桥梁。在土壤饱和含水层,毛管力驱动地下水向上输水,直至基质势平衡。在毛管水活动层,基质势差 是驱动毛细管水在土壤层界面发生交换的主要动力,当下界面的总势大于上界面总势时,湿润锋面停止推进, 毛管水上升过程结束^[107]。史文娟等研究发现土壤有夹砂层存在时,土壤温度势亦会驱动毛管水向上运 移^[108]。而在土壤水分补给和消耗层,Jorenush等认为土壤蒸发和植物蒸腾作用是驱动静态地下水上升的主 要动力^[109]。陈亚宁等研究证实干旱区胡杨通过根系水力提升作用,白天从地下水埋深较土壤中提升水分, 夜晚释放到浅层土壤^[110]。尽管水势平衡理论能够解释毛管水上升过程变化,但针对包气带土壤结构变化和 植物根系分布如何共同驱动毛管水上升过程机理研究仍显不足,这可能是土壤毛管水运移理论未来研究需要

关注的问题。

5 包气带水分、能量平衡与生态水文效应

包气带是陆地生态系统物质、能量信息传递交换场所,人类活动和气候变化都会导致植被和水土资源格局的改变,可能对生态水文系统造成威胁^[111]。而包气带土壤水分作为陆地表面生态水文过程最主要的环境变量,其水分形态及能量平衡过程对陆地表面水文循环过程产生显著影响^[112,113]。在全球尺度上,尽管干旱区包气带水分仅占0.05%,但它通过控制和分割地表水能通量交换,对全球范围能量平衡,降雨分布以及气候变化预测起着重要作用,远超过了其物理数量意义^[82,114]。区域尺度干旱区包气带水汽热运移过程能够影响陆面和大气层之间质量、水分通量和能量通量之间平衡^[39,115,116]。田块尺度包气带水汽热运移过程能够影响陆面和大气层之间质量、水分通量和能量通量之间平衡^[39,115,116]。田块尺度包气带潜热与显热之间能量平衡及其分割关系决定着大气的水汽和热量,影响作物利用水分方式以及生存策略,最终驱动着不同尺度气候过程以及土壤水分变化,Cahill等研究发现在粉砂壤土浅层2 cm 处,由土壤水汽导致热传输能够占到总热通量40%—60%左右,且包气带水循环过程水分迁移方式和交换量不仅关系到水分和物质迁移,又决定着土壤的发育过程、演化和土地生产力^[117]。因此,在小尺度土根系统中研究中,要应用能量平衡的观点揭示水分在局部循环中的发生和消减过程,构建包气带土壤水分运移与荒漠植物水分利用动态关系,而在大尺度上,应探索人类活动以及气候变化与包气带土壤结构,生态系统演变之间的互相作用过程(图2)。





6 结论与展望

包气带作为"四水"联系和物质能量交换的场所。受到了国内外学者的持续关注,一个多世纪以来,科学家针对包气带土壤水分运移水分及能量关系及其驱动力机制行了长期的探索和研究。从早期达西定律的数学理论定性定量研究到后来的Philip、Nielsen等学者物质和能量平衡观点提出,形成了一系列基于数学理论及物理模型的研究方法,同时现代观测和监测技术发展为土壤水分迁移机制研究提供了重要基础理论和科学工具,逐步形成了较为成熟的土壤水分运移与其驱动力之间的理论关系,使干旱区深入开展包气带土壤水分运移研究成为了可能。但由于土壤水分运移的复杂性,现有理论在实践中存在有土壤孔隙形状的理想概化, 土壤水势理论简化,理论与试验的不匹配,对水流特性及水驱动力考虑的不够全面等方面的问题。这导致许多试验和模拟只能在特定和理想的环境下完成。但是实际上水分在地下水—土壤—植物—大气连续体中循环是一个十分复杂生态水文过程,受到多种气候因子和人为因素共同调控。任何一个变量的变化都会促使水分与能量平衡过程发生改变,再平衡过程会反馈于降雨、灌溉入渗、蒸发、径流等过程,再次作用于地下水与土壤之间以及陆面和大气之间的水分交换。

随着全球气候变化的加剧,特别是气候变暖进一步加速了水循环过程,导致不同尺度水资源的重新分配,

干旱区作为对全球气候变化响应最敏感的地区之一,变化环境的驱动将使大气与土壤界面水分和能量效应的 动态变化更加强烈。降水变率大,气温上升、干旱趋于加剧等因素已经严重威胁着干旱区生态水文环境,水资 源匮乏,生境退化和荒漠化是不可回避的问题,因此,深入认识和了解包气带水分运动形态,驱动机制以及能 量平衡关系有助于进一步探索干旱区土壤水分运移规律,揭示降雨入渗、水分再分布等过程与植物生长的关 系,对开展生态植被建设和改善水资源综合管理具有重要的意义。因此,未来亟待以下方面加强和拓宽相关 研究。

(1) 拓展对包气带水分运移耦合理论的研究。

基于土壤势能的"能量"观点,针对不同的气候类型、土壤分类和植物根系组成提出相应的分势模块,并 进行多种理论的耦合建模,通过引入新的理论方法不断的完善全能量理论体系建立。此外,要加强对土壤水 分能量测量技术研发,提升土壤水分运移过程的记录和监测手段。

(2)开展土壤水、汽、热运移耦合机理研究。

包气带土壤水分的运移不仅受植被,降雨以及包气带结构等综合因素的控制,而且也伴随着热和溶质的 迁移以及物质和能量变化。因此,要研究土壤物理、化学和生物过程对土壤水汽热运移的影响。揭示水流通 量形式和热通量对维持土壤水分稳定性贡献。

(3)加强包气带土壤水分运移驱动机制研究。

借助 GSPAC 系统中土壤水分水分与能量的交换和平衡理论,通过 Hydrus-1D/2D/3D、SWAP、WAVES, SWAT 等模型,探究液流、汽流、热流等运移过程及其驱动机制,并结合遥感技术,揭示包气带水分运移形态与 能量和驱动力之间耦合关系,提升干旱区包气带水分系统研究水平。

(4)加强不同尺度上调控土壤水分运移的驱动机理研究。

不同时空尺度上,决定土壤水分变化和迁移往往不是单一因素,而是诸许多因子的协作,气候因子,包气 带结构与土壤质地,地形地貌和植被类型等都有可能参与或驱动土壤水分交换和再分布,因此推动不同时空 尺度上土壤水分与驱动因素关系研究尤为重要。

致谢:本综述论在构思和结构方面得到了赵文智老师的悉心指导,在修改过程提出了许多有针对性的意见和 建议,在此表示致谢!

参考文献(References):

- [1] Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, Bi J Q, Shi J R, Wang X, Chang Z L, Huang Z W, Yang S, Zhang B D, Wang G Y, Feng G H, Yuan J Y, Zhang L, Zuo H C, Wang S G, Fu C B, Chou J F. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the loess plateau. Advances in Atmospheric Sciences, 2008, 25(6): 906-921.
- [2] Grace J, José J S, Meir P, Miranda H S, Montes R A. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. Journal of Biogeography, 2006, 33(3): 387-400.
- [3] Feng S, Fu Q. Expansion of global drylands under a warming climate. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(19): 10081-10094.
- [4] Schwinning S, Sala O E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems. Oecologia, 2004, 141(2): 211-220.
- [5] Zhao W Z, Liu B. The response of sap flow in shrubs to rainfall pulses in the desert region of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(9): 1297-1306.
- [6] Kahil M T, Dinar A, Albiac J. Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation to climate change in arid and semiarid regions. Journal of Hydrology, 2015, 522: 95-109.
- Banwart S, Bernasconi S M, Bloem J, Blum W, Brandao M, Brantley S, Chabaux F, Duffy C, Kram P, Lair G, Lundin L, Nikolaidis N, Novak M, Panagos P, Ragnarsdottir K V, Reynolds B, Rousseva S, de Ruiter P, van Gaans P, van Riemsdijk W, White T, Zhang B. Soil processes and functions in critical zone observatories: hypotheses and experimental design. Vadose Zone Journal, 2011, 10(3): 974-987.
- [8] Nakhaei M, Šimůnek J. Parameter estimation of soil hydraulic and thermal property functions for unsaturated porous media using the HYDRUS-2D code. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2014, 62(1): 7-15.
- [9] Korzoun V I, Sokolov A A, Budyko M I, Voskresensky K P, Kalinin G P. World Water Balance and Water Resources of the Earth. Paris:

UNESCO, 1978.

- [10] Harter T, Onsoy Y S, Heeren K, Denton M, Weissmann G, Hopmans J W, Horwath W R. Deep vadose zone hydrology demonstrates fate of nitrate in eastern San Joaquin Valley. California Agriculture, 2005, 59(2): 124-132.
- [11] Braud I, Fernandez P, Bouraoui F. Study of the rainfall-runoff process in the Andes region using a continuous distributed model. Journal of Hydrology, 1999, 216(3/4): 155-171.
- [12] Rana G, Katerji N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. European Journal of Agronomy, 2000, 13(2/3): 125-153.
- [13] Dardanelli J L, Ritchie J T, Calmon M, Andriani J M, Collino D J. An empirical model for root water uptake. Field Crops Research, 2004, 87 (1): 59-71.
- [14] Kinzelbach W, Aeschbach W, Alberich C, Goni I B, Beyerle U, Brunner P, Chiang W H, Rueedi J, Zollmann K. A Survey of Methods for Groundwater Recharge in Arid and Semi-Arid Regions. UNEP/DEWA/RS.02-2, Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2002.
- [15] Rimon Y, Dahan O, Nativ R, Geyer S. Water percolation through the deep vadose zone and groundwater recharge: preliminary results based on a new vadose zone monitoring system. Water Resources Research, 2007, 43(5): W05402.
- [16] Yang W B, Tang J N, Liang H R, Dang H Z, Wei L. Deep soil water infiltration and its dynamic variation in the shifting sandy land of typical deserts in China. Science China Earth Sciences, 2014, 57(8): 1816-1824.
- [17] 熊伟,王彦辉,程积民,于澎涛.不同植被覆盖条件下土壤水分蒸发的比较.中国水土保持科学,2005,3(3):65-68.
- [18] 王丁,费良军. 层状土壤上升毛管水运移特性试验研究. 地下水, 2009, 31(1): 35-37, 66-66.
- [19] Brown K W, Rosenberg N J. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. Agronomy Journal, 1973, 65 (3): 341-347.
- [20] 曾亦键,万力,王旭升,曹文炳.浅层包气带地温与含水量昼夜动态的实验研究.地学前缘,2006,13(1):52-57.
- [21] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science, 1911, 4: 1-24.
- [22] Sharma M L, Barron R J W, Craig A B. Land use Effects on Groundwater Recharge to an Unconfined Aquifer. Institute of Natural Resources and Environment, Division of Water Resources, Report No.(91/1), 1991.
- [23] 张惠昌. 应用"零通量面"方法研究包气带水分的运移规律. 兰州大学学报: 自然科学版, 1988, 24(S1): 125-128.
- [24] 李茜, 冷俊杰, 高佩玲, 张石峰. 零通量面法用于农田蒸发蒸腾量的研究. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 176-179.
- [25] Philip J R, De Vries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. EOS, Transactions American Geophysical Union, 1957, 38(2): 222-232.
- [26] Saito H, Šimůnek J, Mohanty B P. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone. Vadose Zone Journal, 2006, 5(2): 784-800.
- [27] Penman H L. Gas and vapour movements in the soil: I. The diffusion of vapours through porous solids. Journal of Agricultural Science, 1940, 30 (3): 437-462.
- [28] Scanlon B R, Levitt D G, Reedy R C, Keese K E, Sully M J. Ecological controls on water-cycle response to climate variability in deserts. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(17): 6033-6038.
- [29] Zeng Y J, Wan L, Su Z B, Saito H, Huang K L, Wang X S. Diurnal soil water dynamics in the shallow vadose zone (field site of China University of Geosciences, China). Environmental Geology, 2009, 58(1): 11-23.
- [30] Banimahd S A, Zand-Parsa S. Simulation of evaporation, coupled liquid water, water vapor and heat transport through the soil medium. Agricultural Water Management, 2013, 130: 168-177.
- [31] Tokunaga T K. Hydraulic properties of adsorbed water films in unsaturated porous media. Water Resources Research, 2009, 45(6): W06415.
- [32] Grifoll J, Cohen Y. A front tracking numerical algorithm for liquid infiltration into nearly dry soils. Water Resources Research, 1999, 35(8): 2579-2585.
- [33] Salzmann W, Bohne K, Schmidt M. Numerical experiments to simulate vertical vapor and liquid water transport in unsaturated non-rigid porous media. Geoderma, 2000, 98(3/4): 127-155.
- [34] Milly P C D. A linear analysis of thermal effects on evaporation from soil. Water Resources Research, 1984, 20(8): 1075-1085.
- [35] Cahill A T, Parlange M B. On water vapor transport in field soils. Water Resources Research, 1998, 34(4): 731-739.
- [36] Stone A E C, Edmunds W M. Unsaturated zone hydrostratigraphies: a novel archive of past climates in dryland continental regions. Earth-Science Reviews, 2016, 157; 121-144.
- [37] Madi R, De Rooij G. Numerical and experimental quantification of coupled water and water vapor fluxes in very dry soils//Proceedings of the EGU General Assembly Conference. Vienna, Austria: EGU, 2015.
- [38] Deb S K, Shukla M K, Sharma P, Mexal J G. Coupled liquid water, water vapor, and heat transport simulations in an unsaturated zone of a sandy

loam field. Soil Science, 2011, 176(8): 387-398.

- [39] Bittelli M, Ventura F, Campbell G S, Snyder R L, Gallegati F, Pisa P R. Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils. Journal of Hydrology, 2008, 362(3/4): 191-205.
- [40] Walvoord MA, Stonestrom D A, Andraski B J, Striegl R G. Constraining the inferred paleohydrologic evolution of a deep unsaturated zone in the Amargosa Desert. Vadose Zone Journal, 2004, 3(2): 502-512.
- [41] Syvertsen J P, Cunningham G L, Feather T V. Anomalous diurnal patterns of stem xylem water potentials in larrea tridentata. Ecology, 1975, 56 (6): 1423-1428.
- [42] Warren J M, Brooks J R, Dragila M I, Meinzer F C. In situ separation of root hydraulic redistribution of soil water from liquid and vapor transport. Oecologia, 2011, 166(4): 899-911.
- [43] Uclés O, Villagarcía L, Cantón Y, Lázaro R, Domingo F. Non-rainfall water inputs are controlled by aspect in a semiarid ecosystem. Journal of Arid Environments, 2015, 113: 43-50.
- [44] Philip J R. Plant water relations: some physical aspects. Annual Review of Plant Physiology, 1966, 17: 245-268.
- [45] Vereecken H, Huisman J A, Bogena H, Vanderborght J, Vrugt J A, Hopmans J W. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: a review. Water Resources Research, 2008, 44(4): W00D06.
- [46] 李红寿, 汪万福, 郭青林, 范宇权, 李燕飞. 敦煌莫高窟干旱地区水分凝聚机理分析. 生态学报, 2009, 29(6): 3198-3205.
- [47] 李红寿, 汪万福, 武发思, 安黎哲. 盐分对极干旱土壤水分垂直分布与运转的影响. 土壤, 2011, 43(5): 809-816.
- [48] Zou C B, Barnes P W, Archer S, Mcmurtry C R. Soil moisture redistribution as a mechanism of facilitation in savanna tree-shrub clusters. Oecologia, 2005, 145(1): 32-40.
- [49] Dall'Amico M, Endrizzi S, Gruber S, Rigon R. A robust and energy-conserving model of freezing variably-saturated soil. The Cryosphere, 2011, 5 (2): 469-484.
- [50] Lin Y, Horita J. An experimental study on isotope fractionation in a mesoporous silica-water system with implications for vadose-zone hydrology. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2016, 184: 257-271.
- [51] Jiang J M, Zhao L, Zhai Z. Estimating the effect of shallow groundwater on diurnal heat transport in a vadose zone. Frontiers of Earth Science, 2016, 10(3): 513-526.
- [52] Huang J T, Zhou Y X, Wenninger J, Ma H Y, Zhang J, Zhang D R. How water use of Salix psammophila bush depends on groundwater depth in a semi-desert area. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 556.
- [53] Zeng Y, Su Z, Wan L, Yang Z, Zhang T, Tian H, Shi X, Wang X, Cao W. Diurnal pattern of the drying front in desert and its application for determining the effective infiltration. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(6): 703-714.
- [54] Bouyoucos G. Effect of temperature on the movement of water vapor and capillary moisture in soils. Journal of Agricultural Research, 1915, 5: 141-172.
- [55] Lebedeff A F. The movement of ground and soil waters. Gravitation, 1927, 1: 40-44.
- [56] 李佩成. 关于"内在水"补给土壤水的假设与初证. 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 1-5.
- [57] Walvoord M A, Plummer M A, Phillips F M, Wolfsberg A V. Deep arid system hydrodynamics 1. Equilibrium states and response times in thick desert vadose zones. Water Resources Research, 2002, 38(12): 44-1-44-15.
- [58] Scanlon B R, Keese K, Reedy R C, Simunek J, Andraski B J. Variations in flow and transport in thick desert vadose zones in response to paleoclimatic forcing (0-90 kyr): field measurements, modeling, and uncertainties. Water Resources Research, 2003, 39(7): 1179.
- [59] Andraski B J. Soil water movement under natural site and waste site conditions: A multiple year field study in the Mojave Desert, Nevada. Water Resources Research, 1997, 33(8): 1901-1916.
- [60] Brooks R H. Hydraulic Properties of Porous Media. Fort Collins: Colorado State University Press, 1964.
- [61] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [62] Lehmann P, Assouline S, Or D. Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media. Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2008, 77(5): 056309.
- [63] Shokri N, Or D. What determines drying rates at the onset of diffusion controlled stage 2 evaporation from porous media? Water Resources Research, 2011, 47(9): W09513.
- [64] Shokri N, Lehmann P, Or D. Liquid-phase continuity and solute concentration dynamics during evaporation from porous media: pore-scale processes near vaporization surface. Physical Review. E, Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics, 2010, 81(4): 046308.
- [65] 孟春雷, 崔建勇. 干旱区土壤蒸发及水热耦合运移模式研究. 干旱区研究, 2007, 24(2): 141-145.
- [66] Peters A. Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. Water Resources Research, 2013,

11

49(10): 6765-6780.

- [67] Kelly S F, Selker J S. Osmotically driven water vapor transport in unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(6): 1634-1641.
- [68] Tokunaga T K. Physicochemical controls on adsorbed water film thickness in unsaturated geological media. Water Resources Research, 2011, 47 (8) · W08514.
- [69] Cooper J D. Measurement of Moisture Fluxes in Unsaturated Soil in Thetford Forest. Wallingford: Institute of Hydrology, 1980.
- [70] Chorover J, Troch P A, Rasmussen C, Brooks P D, Pelletier J D, Breshears D D, Huxman T E, Kurc S A, Lohse K A, McIntosh J C, Meixner T, Schaap M G, Litvak M E, Perdrial J, Harpold A, Durcik M. How water, carbon, and energy drive critical zone evolution: the Jemez-Santa Catalina critical zone observatory. Vadose Zone Journal, 2011, 10(3): 884-899.
- [71] Hubbell J M, Nicholl M J, Sisson J B, McElroy D L. Application of a Darcian approach to estimate liquid flux in a deep vadose zone. Vadose Zone Journal, 2004, 3(2): 560-569.
- [72] Scanlon B R, Reedy R C, Gates J B. Effects of irrigated agroecosystems: 1. Quantity of soil water and groundwater in the southern High Plains, Texas. Water Resources Research, 2010, 46(9): W09537.
- [73] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, Leffler A J, Ogle K, Pockman W T, Sandquist D R, Potts D L, Schwinning S. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. Oecologia, 2004, 141(2): 254-268.
- [74] 何丹,马东豪,张锡洲,张佳宝,郑子成.土壤入渗特性的空间变异规律及其变异源.水科学进展,2013,24(3):340-348.
- [75] Canadell J, Jackson R B, Ehleringer J B, Mooney H A, Sala O E, Schulze E D. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. Oecologia, 1996, 108(4): 583-595.
- [76] Chamizo S, Cantón Y, Lázaro R, Solé-Benet A, Domingo F. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems. Ecosystems, 2012, 15(1): 148-161.
- [77] 邓建才,卢信,陈效民,王代长,蒋新.封丘地区土壤水分扩散率的研究.土壤通报,2005,36(3):317-320.
- [78] 冯伟,杨文斌,党宏忠,李卫,石星,王永胜,梁海荣. 毛乌素沙地流动沙丘土壤水分对降雨的响应. 中国沙漠, 2015, 35(2): 400-406.
- [79] White R E. The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil//Stewart B A, ed. Advances in Soil Science. New York, NY: Springer, 1985: 95-120.
- [80] Wangemann S G. Elucidation of Preferential Flow Paths in Soils[D]. Brooking: South Dakota State University, 1994.
- [81] 李卫,冯伟,杨文斌,唐进年,党宏忠.流动沙丘水分深层入渗量与降雨的关系.水科学进展,2015,26(6):779-786.
- [82] Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, Hornbuckle B K, Jones S B, Knight R, Ogden F, Selker J, Wendroth O. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review. Vadose Zone Journal, 2008, 7(1): 358-389.
- [83] Caldwell M M, Richards J H. Hydraulic lift: water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots. Oecologia, 1989, 79(1): 1-5.
- [84] Burgess S S O, Pate J S, Adams M A, Dawson T E. Seasonal water acquisition and redistribution in the Australian woody phreatophyte, Banksia prionotes. Annals of Botany, 2000, 85(2): 215-224.
- [85] Ishikawa C M, Bledsoe C S. Seasonal and diurnal patterns of soil water potential in the rhizosphere of blue oaks: evidence for hydraulic lift. Oecologia, 2000, 125(4): 459-465.
- [86] Ryel R, Caldwell M, Yoder C, Or D, Leffler A. Hydraulic redistribution in a stand of *Artemisia tridentata*: evaluation of benefits to transpiration assessed with a simulation model. Oecologia, 2002, 130(2): 173-184.
- [87] Hultine K R, Williams D G, Burgess S S O, Keefer T O. Contrasting patterns of hydraulic redistribution in three desert phreatophytes. Oecologia, 2003, 135(2): 167-175.
- [88] Mooney H A, Gulmon S L, Rundel P W, Ehleringer J. Further observations on the water relations of *Prosopis tamarugo* of the northern Atacama Desert. Oecologia, 1980, 44(2): 177-180.
- [89] Feddes R A, Hoff H, Bruen M, Dawson T, de Rosnay P, Dirmeyer P, Jackson R B, Kabat P, Kleidon A, Lilly A, Pitman A J. Modeling root water uptake in hydrological and climate models. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(12): 2797-2810.
- [90] Schulze E D, Caldwell M M, Canadell J, Mooney H A, Jackson R B, Parson D, Scholes R, Sala O E, Trimborn P. Downward flux of water through roots (i.e. inverse hydraulic lift) in dry Kalahari sands. Oecologia, 1998, 115(4): 460-462.
- [91] Smith D M, Jackson N A, Roberts J M, Ong C K. Reverse flow of sap in tree roots and downward siphoning of water by *Grevillea robusta*. Functional Ecology, 1999, 13(2): 256-264.
- [92] Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, Beverly C R, Ong C K, Khan A A H, Bleby T M. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. Tree Physiology, 2001, 21(9): 589-598.
- [93] McCulley R L, Jobbagy E G, Pockman W T, Jackson R B. Nutrient uptake as a contributing explanation for deep rooting in arid and semi-arid

ecosystems. Oecologia, 2004, 141(4): 620-628.

- [94] Dirksen D. Water Movement and Frost Heaving in Unsaturated Soil without an External Source of Water[D]. Ithaca: Cornell University, 1964.
- [95] Wu J Y. Heat and Mass Transfer in Freezing Unsaturated Soil[D]. Saskatoon, Saskatchewan: University of Saskatchewan, 1977.
- [96] Collins S L, Sinsabaugh R L, Crenshaw C, Green L, Porras-Alfaro A, Stursova M, Zeglin L K. Pulse dynamics and microbial processes in aridland ecosystems. Journal of Ecology, 2008, 96(3): 413-420.
- [97] Meinzer F C, Brooks J R, Bucci S, Goldstein G, Scholz F G, Warren J M. Converging patterns of uptake and hydraulic redistribution of soil water in contrasting woody vegetation types. Tree Physiology, 2004, 24(8): 919-928.
- [98] Abid Karray J, Lhomme J P, Masmoudi M M, Mechlia N B. Water balance of the olive tree-annual crop association: a modeling approach. Agricultural Water Management, 2008, 95(5): 575-586.
- [99] Wildy D T, Pate J S, Bartle J R. Budgets of water use by *Eucalyptus kochii* tree belts in the semi-arid wheatbelt of Western Australia. Plant and Soil, 2004, 262(1/2): 129-149.
- [100] Crosbie R S, Wilson B, Hughes J D, McCulloch C, King W M. A comparison of the water use of tree belts and pasture in recharge and discharge zones in a saline catchment in the Central West of NSW, Australia. Agricultural Water Management, 2008, 95(3): 211-223.
- [101] Miller G R, Cable J M, McDonald A K, Bond B, Franz T E, Wang L X, Gou S, Tyler A P, Zou C B, Scott R L. Understanding ecohydrological connectivity in savannas: a system dynamics modelling approach. Ecohydrology, 2012, 5(2): 200-220.
- [102] Shen Q, Gao G Y, Fu B J, Lü Y H. Soil water content variations and hydrological relations of the cropland-treebelt-desert land use pattern in an oasis-desert ecotone of the Heihe River Basin, China. Catena, 2014, 123: 52-61.
- [103] Stratford C J, Robins N S, Clarke D, Jones L, Weaver G. An ecohydrological review of dune slacks on the west coast of England and Wales. Ecohydrology, 2013, 6(1): 162-171.
- [104] Yi J, Zhao Y, Shao M A, Li H J, Jiang R, Hill R L, Si B C. Hydrological processes and eco-hydrological effects of farmland-forest-desert transition zone in the middle reaches of Heihe River Basin, Gansu, China. Journal of Hydrology, 2015, 529: 1690-1700.
- [105] Zhang K C, An Z S, Cai D W, Guo Z C, Xiao J H. Key role of desert-oasis transitional area in avoiding oasis land degradation from Aeolian desertification in Dunhuang, northwest China. Land Degradation & Development, 2017, 28(1): 142-150.
- [106] Xiao Q L, Huang M B. Fine root distributions of shelterbelt trees and their water sources in an oasis of arid northwestern China. Journal of Arid Environments, 2016, 130; 30-39.
- [107] 张平,吴昊,殷洪建,李宝刚,王海坤.土壤构造对毛细管水上升影响的研究.水土保持研究, 2011, 18(4): 265-267.
- [108] 史文娟, 汪志荣, 沈冰, 宋孝玉. 夹砂层土体构型毛管水上升的实验研究. 水土保持学报, 2004, 18(6): 167-170.
- [109] Jorenush M H, Sepaskhah A R. Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions. Agricultural Water Management, 2003, 61(2): 125-141.
- [110] 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,周洪华,郝兴明,朱成刚. 荒漠河岸林建群植物的水分利用过程分析. 干旱区研究, 2018, 35(1): 130-136.
- [111] Bekele E G, Knapp H V. Watershed modeling to assessing impacts of potential climate change on water supply availability. Water Resources Management, 2010, 24(13): 3299-3320.
- [112] Vinnikov K Y, Robock A, Qiu S, Entin J K, Owe M, Choudhury B J, Hollinger S E, Njoku E G. Satellite remote sensing of soil moisture in Illinois, United States. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 104(D4): 4145-4168.
- [113] Moran M S, Peters-Lidard C D, Watts J M, McElroy S. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. Canadian Journal of Remote Sensing, 2004, 30(5): 805-826.
- [114] Vereecken H, Huisman J A, Bogena H, Vanderborght J, Vrugt J A, Hopmans J W. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: a review. Water Resources Research, 2008, 44(4): W00D06.
- [115] Risi C, Bony S, Vimeux F, Jouzel J. Water-stable isotopes in the LMDZ4 general circulation model: Model evaluation for present-day and past climates and applications to climatic interpretations of tropical isotopic records. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115 (D12): D12118.
- [116] Yoshimura K, Miyazaki S, Kanae S, Oki T. Iso-MATSIRO, a land surface model that incorporates stable water isotopes. Global and Planetary Change, 2006, 51(1/2): 90-107.
- [117] Thomas Z, Ghazavi R, Merot P, Granier A. Modelling and observation of hedgerow transpiration effect on water balance components at the hillslope scale in Brittany. Hydrological Processes, 2012, 26(26): 4001-4014.