

沙地土壤水分时空动态研究进展

洪光宇^{1,2,3}, 王晓江^{2,3}, 王少昆⁴, 刘果厚¹, 高孝威^{2,3},

苏雅拉·巴雅尔⁵, 张雷^{2,3}, 李卓凡^{2,3}, 李梓豪^{2,3}

(1.内蒙古农业大学 草原与资源环境学院, 呼和浩特 010010; 2.内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010; 3.内蒙古大青山森林生态系统国家定位观测研究站, 呼和浩特 010010; 4.中国科学院西北生态环境资源研究院 乌拉特荒漠草原研究站, 兰州 730000; 5.乌审旗乌兰陶勒盖治沙站, 内蒙古 鄂尔多斯 017300)

摘 要:水分在沙地生态系统中起着重要作用,是土壤、植物和大气中物质与能量循环不可缺少的介质,因此研究沙地土壤水分变化规律及其影响因子对揭示沙地生态系统的稳定性及阐明沙地水文变化过程具有重要的意义。从沙地土壤水分时间和空间变化、水分入渗特征以及水量平衡研究方面阐述了沙地土壤水分研究现状和动态特征,分析了土壤水分的时空变化特征及其影响因子,揭示了不同层次土壤水分时空变化规律、不同降雨条件下土壤水分变化特征以及不同人工植被区在不同降雨条件下土壤水分入渗量的响应,总结了沙地土壤水分模型的研究进展,探讨了沙地土壤水分模型的研究与环境因素的关系。通过对沙地土壤水分研究进展的综述,展望了今后应加强如下研究:(1)对沙区不同造林模式混交林开展植物功能型与土壤水量关系研究,找出人工植被在不同时期对土壤水分利用的阈值;(2)建立从点到面尺度转化的模型关系,更好地定量大尺度下区域水分承载力;(3)对土壤—植被—大气系统水量平衡和水分传输过程及转化规律等进行系统研究并建立耦合模型;(4)探索在有限的水资源环境下通过提高沙地土壤肥力,进而提高植被生产力。

关键词:沙地土壤水分; 时空变化; 降雨入渗; 水量平衡

中图分类号:S152.7; X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0390-09

Research Progress on Spatiotemporal Dynamics of Soil Moisture in Sandy Land

HONG Guangyu^{1,2,3}, WANG Xiaojiang^{2,3}, WANG Shaokun⁴, LIU Guohou¹,

GAO Xiaowei¹, SU Yalabayaer⁵, ZHANG Lei^{2,3}, LI Zhuofan^{2,3}, LI Zihao^{2,3}

(1.College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China; 2.Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, China; 3.Daqingshan Forest Ecosystem Research Station, Hohhot 010010, China; 4.Urat Desert grassland Research Station, Lanzhou, Gansu 730000, China; 5.Wulantaolegai Sand Control Station, Ordos 017300, China)

Abstract: Water plays an important role in the ecosystem of sandy land, and it is an indispensable medium for the circulation of matter and energy in soil, plants and atmosphere. Therefore, the study on the change law of soil water in sandy land and its influencing factors is of great significance to reveal the stability of the ecosystem of sandy land and to clarify the process of hydrological change in sandy land. From sandy soil moisture changes in time and space, water infiltration characteristics and water balance research expounded the sandy soil water dynamic characteristics, research status and analyzed the spatial and temporal variations of soil moisture and its impact factors, revealed the different levels of soil moisture change rules of time and space, changes of soil moisture in different rainfall conditions and different artificial vegetation zone in the response of the amount of soil water infiltration under different rainfall conditions, summarized the research progress of sand soil moisture model, discussed the research of sand soil moisture model's relationship with

收稿日期:2020-04-01

修回日期:2020-08-04

资助项目:内蒙古重大专项(2019ZD007);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2019MS03036, 2018MS03036);内蒙古重大专项(zdxx2018060);国家自然科学基金(31960284);内蒙古大青山森林生态系统国家定位观测研究站运行(2020132026;2019132010);2018年内蒙古自治区研究生科研创新项目(B2018111934Z)

第一作者:洪光宇(1985—),女(锡伯族),内蒙古呼和浩特市人,助理研究员,在读博士,研究方向为沙地生态系统恢复与沙地水资源管理与应用。E-mail:nmgghy@163.com

通信作者:刘果厚(1956—),男,内蒙古呼和浩特市人,教授,博士生导师,研究方向:植物多样性保护和荒漠化植被恢复与重建。E-mail:guohouliu@163.com。

environmental factors. Based on the review of the research progress on soil moisture in sandy land, the following researches should be strengthened in the future. (1) To study the relationship between plant function type and soil water amount in mixed forests with different afforestation modes in sandy land, and to find out the threshold value of artificial vegetation on soil water use in different periods. (2) To establish the model relation of transformation from point to plane scale to better quantify regional water bearing capacity under large scale. (3) To Systematically study the water balance, water transfer process and transformation law of the soil-vegetation-atmosphere system and establish the coupling model; (4) To explore how to improve the productivity of vegetation by improving the soil fertility of sandy land in the limited water resources environment.

Keywords: soil moisture of sandy land; temporal and spatial change; rainfall infiltration; water balance

荒漠化一直是全球关注的环境问题,我国是受荒漠化影响较为严重的国家之一。据统计,全球荒漠化土地面积为 4 560 万 km^2 。2015 年我国第五次荒漠化监测显示,我国的荒漠化土地面积高达 261.16 万 km^2 ,占全球荒漠化面积的 5.23%,约占我国国土面积 27.20%,其中沙化土地面积为 172.12 万 km^2 ,约占我国国土面积 17.93%。我国是受风沙危害较严重的地区,土地沙化问题严重制约着我国的经济增长,我国西北地区贫困县占全国贫困县的 40%的,贫困人口数占总贫困人口数的 25%。为了有效遏制土地沙化带来的危害,防止沙化面积增大,我国在沙区开展了不同类型的生态建设工程,通过在风沙源区进行人工植被建设来构建北方生态屏障,改善生态环境,促进经济发展。沙地生态系统作为我国干旱、半干旱区主要的生态系统类型,在维持区域生态稳定和提高生态系统服务起着关键作用。但沙地生态系统因为其所处的环境较恶劣,因此该生态系统稳定性差和对环境变化敏感。因此沙地生态系统受到更多国内外学者的关注。沙地土壤水分受多种因素的综合影响,主要有地形、土壤性质和土地利用方式等^[1]。土壤水分的时空动态变化主要受降水、植被类型以及地表覆盖度等因素的影响^[2-3]。水分是沙地生态系统发展的主要限制因子,对沙区生态系统结构的稳定与功能的发挥起到关键作用,是决定生态系统植被格局和变化过程的主要驱动因子。沙区生态系统中,植物所需水分是由土壤水供给,同时水分是土壤—植被—大气系统中物质和能量循环的载体^[4]。土壤水分变化能直接反映人工植被区的生态水文过程。沙地土壤水分含量的大小与分布对土壤的物理性质和植物的生长具有重要的影响^[5]。土壤水分的变化在时间与空间尺度上对整个生态系统内因子间的相互作用具有显著影响。因此研究沙区土壤水分的变化规律、土壤水分与环境之间的关系及其土壤水分与植被相互作用的机理,对研究沙区生态系统的结构及其稳定性具有重要意义,有助于预测极端天气对沙区生态系统的危

害。本文对国内外沙地土壤水分的研究进展进行了总结,综述沙地生态系统在降雨后土壤水分在时间和空间上的变化特征及雨后土壤水分的入渗规律,归纳了针对沙区土壤水分平衡问题的相关研究,对土壤水分的测量方法及土壤水分模型研究进展进行了阐述,并提出以后需要关注的重点研究方向和内容。

1 国内外沙地土壤水分研究概况

1.1 国外沙地土壤水分研究现状

国外学者对沙地土壤水分的研究起始于 1912—1913 年,由前苏联 MN 托马斯基对位于前苏联东南部的沙地水分特征进行了定位研究,首次对该地区沙地水分变化进行了研究并且对其进行了类型的划分,并收集了大量该区大气凝结水数据。1930—1936 年,前苏联对捷克的沙地、那伦沙地的土壤水分特征及地下水位动态变化进行系统的观测与分析,对中亚沙区水分状况做了大量的研究^[6]。从此开始通过对水分状况的研究来确定沙地的旱情,并建立简单的水分平衡方程。法国和日本相继分别对于干旱沙地的露水凝结水以及形成条件和做沙地土壤的含水量、砂粒大小及其之间的关系做了大量的研究与论述^[7]。对土壤水分平衡研究逐渐加入热量平衡,并开始对地下水与水分变化开始进行了研究。简单的观测和论述是远远不够的。从 70 年代开始,开始运用多学科交叉的方法研究沙地水分变化。首先运用物理学的方法对不同粒径组成的沙地土壤水分运动状态进行研究,并得出有机质含量影响沙地土壤田间持水量,植物在不同生长阶段和不同的环境下萎蔫点不同,粒径越小孔隙体积越大并且土壤蒸发越慢,孔隙度越大有机质和可溶性盐含量越高等相关结论^[8-10]。随着气象观测站的建立,气象学和气候学的理论被逐步应用到沙地土壤水分的研究中。通过气象观测得出,沙地表层土壤温度与水分含量间有显著相关关系并且表层土壤中液态水也就是游离水含量与空气温度有函数关系^[11-13]。降水后沙区的水分入渗受地形、土壤

物理性质、初始含水量和地温影响。应用热力学与水文学对沙区的土壤水分变化研究得出气压势只有在沙地水分含量大于最小持水量时才会影响水分迁移^[14]。运用生物学和生态学理论探讨了土壤水分亏缺的临界值^[14]与植被的蒸腾耗水之间的关系^[15-16]。此外,对土壤表层蒸发^[17]、凝结水^[18-19]、地下水分补给及土壤的水分动态变化预测等进行了深入的研究。最后通过数值模拟的方式,逐步建立数学模型模拟不同降水过程中土壤水分的入渗过程,以此来研究土壤水分输入与输出的过程,从而使得沙区的土壤水变化研究比较系统与完整^[20-21]。

1.2 国内沙地土壤水分研究现状

60年代初期,我国开始对沙地的土壤水分进行研究,中科院治沙队率先建立定位观测场对包括民勤在内的干旱区植被与沙地水分进行调查,对沙地土壤毛细管水、沙丘水分分布特征、水分渗透和水面蒸发以及植被蒸腾进行测定,初步掌握了水分运动过程及其影响因素^[22]。70年代末期,我国开始从土壤水分的能量进行研究,对势值变化以及分子自由能及各种函数式等进行了分析,用定量连续的能量结果代替定性间断的方法对土壤水分进行研究^[23]。80年代初期 SPAC 理论开始在国内应用,土壤—植物—大气被定义成一个连续体,研究水分在该系统中转换过程,通过能量指标水势的变化来研究水分变化。80年代末,我国开始对沙地水分研究加入了动力学方法。中国科学院沙坡头试验站与清华大学、瑞典 LUND 大学进行合作,开展了沙地土壤水分动力学基础研究。对沙地降雨水分入渗进行动态研究,收集了沙地不同降水强度下土壤水分动态资料^[24-25]。从90年代开始,中科院沙坡头沙漠生态系统国家野外科学观测站首先对沙区的土壤水分变化进行连续观测,我国各地也相继对不同沙区开始了连续观测。土壤水分监测系统开始进入多样化、简单化和自动化时代,这使得对沙地生态系统土壤水分的动态变化规律、时空分布特征及其与环境的关系研究变得更准确和更便捷,使得研究变得更深入更广泛^[26-38]。遥感技术^[39]与同位素技术被应用于沙区土壤水分的监测与研究中,监测方法上更加多样化。对雨量的监测出现了雨量传感器自动记录仪,对土壤水分变化的监测中发展多尺度观测,其中运用了中子探测水分仪、TDR 土壤水分测定仪、频域反射仪 FDR 探地雷达测量法等测量技术^[40-44]。

2 沙地土壤水分时间变化特征

沙地土壤水分含量的时间变化主要体现在季节性差异上,不同的季节由于降水量的不同导致了土壤

含水量具有季节性特征。在我国干旱、半干旱区,降水集中在6—9月,因此对土壤含水量进行了3个阶段的划分,12月至下一年5月下旬为一个阶段,该阶段属于冬春季节,积雪融水并有少量降雨情况对土壤水分进行了补给,温度较低所以植被对土壤水分利用较少,是土壤水分含水量的调整阶段和弱失水阶段,该阶段被称之为水分的稳定期。6—8月下旬为一个阶段,该阶段属于夏季,降雨较多对土壤水分补给充足,但也是植被生长的主要时期,温度较高导致了植物蒸腾和土壤蒸发较大,该时期土壤水分含量减小,属于土壤水分的消耗期。9—11月下旬为一个阶段,该阶段属于秋季,降雨逐渐减少,温度逐渐降低,植物生长停止对水分的消耗逐渐减少,该阶段属于积累期。对沙坡头柠条人工林土壤水分含量在不同降水年际间季节变化进行研究得出,在柠条生长季4—10月间,土壤水分含量变化具有明显的季节规律,在4—5月的生长初期,初始含水量相对较高,但随着时间变化呈下降趋势。在6—8月生长旺季,在没有降水补给情况下土壤水分含量迅速减小,在9—10月生长末期,土壤水分含量趋于稳定,但低于春季。并且土壤水分含量湿润年份高于干旱年份^[45]。研究表明,表层土壤水分含量变化对季节更敏感,具有强烈的季节趋势在春秋季节低蒸散多降雨的情况下,使该层次的初始含水量较高。在高蒸散率和少的降雨条件下0—15 cm 土层出现最低含水量的情况都在夏季。该层土壤水分含量具有明显的季节变异性,在大降雨和土壤初始含水量较高的情况下变异性越高相关系数为 $R^2 = 0.8366$,与土壤水分含量的季节趋势一致^[46]。

沙区不同时期建植的植被及不同人工植被类型条件下的土壤水分变化差异显著。在沙坡头区固沙植被在9~10 a后土壤水分呈下降趋势,特别在大于100 cm 土层深度。固沙植物根系区对水分的利用加剧了土壤水分亏缺的状况,进而影响植物的生长发育,导致优势种盖度下降,草本和土壤结皮开始发育,进而改变了植被组成,从而使种群的稳定性变差,种植固沙灌木树种15 a后,200—300 cm 土层水分含量够维持在一个相对稳定的数值^[47]。对科尔沁沙地生物结皮与其他植被覆盖雨后耗水率的研究得出,雨后10 d生物结皮样地的耗水率比差巴嘎蒿灌木林、小叶锦鸡儿灌木林、樟子松林、草地和裸沙样地分别降低64.00%,76.85%,61.17%,78.21%和19.07%。生物结皮样地相对其他植被覆盖样地不同层次(0—40 cm,80—180 cm)土壤的耗水量最低,40—80 cm 土壤层裸沙样地耗水量最低,但与生物结皮样地没有

差异性,雨后第4天差巴嘎蒿灌木林、小叶锦鸡儿灌木林、樟子松林、草地样地在0—40 cm土壤层水分显著开始下降,裸沙样地在20—40 cm土壤层,生物结皮样地在0—20 cm土壤层水分含量显著降低;差巴嘎蒿灌木林样地80—100 cm土壤层水分从第3天开始显著下降,小叶锦鸡儿灌木林样地在100—120 cm,140—180 cm土壤层水分从第2天开始显著下降,樟子松林样地在60—120 cm土壤层水分从第3天开始显著下降,草地样地在40—60 cm,80—100 cm土壤层水分从第3天开始显著下降^[48]。

3 沙地土壤水分空间变化特征

土壤水分的空间变化主要是对土壤不同深度含水量的变化规律进行研究。在不同人工植被区不同深度的土壤水分含量变化不同,由于受降雨、蒸发、气候和植被等多因素的影响,从而导致土壤水分的空间变异性。在0—60 cm深度土壤水分变化频繁和剧烈,其土壤水分含量变化范围在2.3%~13.8%。60—160 cm处通常被认为是上层土壤的潜在供应库,该层次受外部降雨、植被蒸腾和土壤蒸发的影响较小,通常降雨量较大或者上次土壤处于长时间干旱情况下,该层才发生变化,为土壤水分相对稳定层。深层土壤主要分布在160 cm以下,属于水分稳定层。对沙坡头区柠条样地0—200 cm土壤水分含量分层进行研究得出,表层20 cm处的土壤水分含量明显高于其他层次,200 cm处土层的含水量较低且波动较小。在0—40 cm和100—200 cm中,随着深度加深土壤含水量逐渐下降,40—100 cm土层中,随着深度的加深土壤水分含量逐渐增加。在湿润年份0—100 cm处为土壤水分变化剧烈层,而在干旱年份0—20 cm处为土壤水分变化剧烈层^[45]。对毛乌素沙地不同飞播年杨柴灌木林土壤剖面水分变化特征进行研究得出,在0—180 cm范围内,林龄为38 a的样地土壤体积含水量显著高于30 a和15 a样地,30 a和15 a样地差异不显著。随着土层深度的增加,林龄为38 a和30 a的样地土壤体积含水量分别在80—100 cm和20—40 cm间达到最大值,分别为8.21%和7.85%,15 a样地则呈现降低的趋势。土壤体积含水量最大值随着林龄的增加有向深层次运移的趋势,并且最小值均出现在140—180 cm。随着杨柴灌木林林龄的增加,0—20 cm土壤层水分呈现减小趋势,20—100 cm土壤层水分基本呈现增大趋势,100—180 cm土壤层水分出现先减小后增大的趋势^[49]。降雨量与土壤水分空间变异性呈显著的正相关关系,降雨越大空间变异性越大。对沙坡头人工固沙植被区1956年建植的植被区进行研究,得出15 mm的降雨事件下,

0—15 cm深度土层水分含量的变异系数为20.26%,0—30 cm深度土层水分含量的变异系数为16.43%,13 mm的降雨时间下,该深度土层含水量变异系数为16.06%。在长时间无雨的环境下0—15 cm深度土层水分含量变异系数降到4%,0—30 cm深度土层水分含量变异系数降到4.35%,说明0—15 cm土层比0—30 cm土层的空间变异性对降雨强度和土壤水分含量响应更强烈^[46]。

对沙坡头区人工固沙植被区土壤0—200 cm深度不同土层水分含量进行研究,发现60—80 cm土层平均水分含量最高,80 cm以下土壤含水量逐渐降低,0—5 cm土层水分含量最小。对不同土层的空间变异性进行分析后得出,160—180 cm深度土层水分变异系数为0.72,180—200 cm深度土层的变异系数是0.73,这两个层次的变异最大,表层0—5 cm处变异系数也较大为0.66。0—200 cm各土层的水分空间异质性明显各土层水分有效变程存在差异且无规律,在60—80 cm深度的土层变程最小,为7.04 m。20~40 cm处最大,为19.71 m^[50]。环境改变与人类活动影响沙地植物群落的在不同尺度上的配置格局,因此改变了土壤水分的分布格局。对科尔沁沙地草场、禁牧的半流动沙地和被重度干扰的丘间洼地土壤含水量在降水后进行了空间异质性分析,研究表明随着植被盖度的增加降水后土壤水分含量变异幅度逐渐减小,但沙质草场表层与亚表层土壤水分的空间结构差异大,表层含水量有较强的空间依赖性,丘间洼地表层土壤水分含量在空间变异的差异相对较小^[51]。

在沙区土壤水分变化研究中,地表干燥的土层称为干沙层,主要受到降雨与蒸发共同作用,是水分变化最活跃的土层。因为干沙层的变化与土壤表层蒸发有着极显著的相关性,因此减小土壤水分蒸发对沙区水资源的保护极为重要。固沙植被的演替及地表微生物结皮的出现改变了沙地土壤水分的分配,在固沙植被区土壤的干沙层比流动沙地厚。流动沙丘的干沙层对深层土壤水分蒸散有抑制作用,从而使沙丘含水量保持稳定。对沙坡头不同年限建立的植被区土壤水分进行研究得出,建植较长时间的植被区深根性灌木树种黄柳(*Salix gordejvii*)、柠条锦鸡儿和花棒(*Hedysarum scoparium*)等植被的土壤剖面水分比流动沙丘含水量小,从上到下呈递减趋势,从1982—2000年间土层深度在0—60 cm范围内水分含量高并且变异系数较大。在土层深度为100—300 cm间土壤水分含量呈递减趋势^[47]。对沙地不同植被类型的表层土壤水分含量进行时间和空间上的研究,得出不同植被类型表层土壤水分变化具有高度的变异性,且呈正态分布。雨后表层土壤水分含量在空间上的变异程度与降雨量呈显著正相关关系,干早期

随着土壤水分含量的减小,变异系数降低,土壤表层的水分含量变化规律与空间的变异性一致^[46]。土壤水分含量在不同固沙植被区变化存在显著差异,植被建立后沙地土壤有效水分显著减少。对科尔沁沙地杨树林、樟子松林和小叶锦鸡儿固定沙丘和流动沙丘、天然草地、丘间低地的土壤水分进行测定,结果显示对于原址是流动沙丘的建植区的雨养型植被,在只有降水的补充下,土壤水分含量垂直变化范围在2%~4%,低于受地下水影响的植被类型。地下水影响型因受地下水影响土壤垂直水分含量随着深度增加呈增大趋势,水分含量在2%~28%^[52]。对科尔沁沙地固沙植被区和流动沙地土壤水分变化进行比较得出,人工建植植被区土壤含水量低于流动沙地和天然植被区,同一段时间内的蒸散量与其降水量呈显著正相关^[53]。沙区的土壤水分在冬季受冻融作用的影响,土壤层在0—30 cm和100—140 cm处受冻融影响显著,在60—100 cm土层深度影响较小,不同的地表覆盖受冻融作用影响的土层深度会出现不同^[54]。

4 沙地人工植被区降雨入渗变化规律

研究者对沙地的雨后水分入渗、入渗后水分再分配过程以及水分运移规律进行了大量的研究。目前对降雨入参与沙区土壤含水量的垂直变化将土壤层次划为0—20 cm处的表层干沙层、20—140 cm处对降雨响应较大的变化层或者活跃层和140 cm以下水分含量较稳定的层次^[55]。研究者主要对干沙层和变化层的水分含量变化以及雨后水分再分配和入渗规律进行了大量的研究,结果表明土壤的入渗速率与降水的呈线性关系,入渗速率和入渗深度与初始含水量呈负相关关系^[55-62]。对不同类型的沙地雨后水分入渗规律进行研究掌握其变化特征,并对影响入渗过程的原因及影响因素进行了研究,得出降雨量、降雨历时和强度在不同月份和年份变异较大,不同的降雨特征与其他的生物与非生物因素综合影响生态系统的蒸散以及降雨对植被的根系层土壤进行水分的有效补充^[63-69]。

在沙区降雨后水分入渗的过程中,主要受重力影响,沙地吸水过程快于脱水。沙地水分在变化过程中进行着能量的传递。在水分进入到沙地中从浅层次到深层次土壤的含水量以及土壤吸水能力变化差值呈减小趋势,研究表明60 cm土层可以作为水分活跃度的分界线,降雨期间水分的入渗速率为0.35~2.29 cm/h^[70-71]。对科尔沁沙地樟子松人工林、山杏灌木林、草地和荒草地的入渗特征进行研究得出,因为受到土壤质地、孔隙度大小土壤容重和土壤的初始水分含量等因素的影响荒草地入渗率最快,最稳定,累计入渗率最大,乔木林地最小。入渗回归模型中拟合度

最好的模型是 Horton 模型,拟合度为0.948^[72]。科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工林在累计降雨量为43.4 mm后的120 h内流动沙丘土壤水分入渗到180 cm处,5 a生小叶锦鸡儿入渗深度到达土层150 cm处。雨后流动沙丘土壤各层次含水量变化比有植被覆盖区变化剧烈,在植被覆盖区随着生长年限的增加土壤浅层水增加,降雨入渗深度变小,15 a生小叶锦鸡儿入渗土层深度在100 cm以内,5 a生入渗深度在150 cm以内。在土壤浅层形成水层,并且有植被覆盖区入渗花费的时间多于流动沙丘,雨后短期内流动沙丘的浅层土壤含水量较高,而后固沙植被土层深处的土壤含水量高^[60]。对宁夏的风沙区封育中的退化草场利用地下水补给量的测量方式进行研究,测定降雨后水分入渗的补给系数范围在0.119~0.257^[73]。在毛乌素沙地对油蒿群落有生物结皮和去除生物结皮的土壤水分进行降雨入渗研究得出:在相同降雨条件下有生物结皮的油蒿群落水分平均入渗系数比没有结皮的油蒿群落低,降雨后水分入渗到相同的土层深度有生物结皮的土壤水分响应的时间更长,生物结皮滞留了降雨入渗,在降雨小于20 mm时,滞留作用对10—20 cm土层更强,使0—20 cm土层深度出现水分亏缺,从而导致油蒿群落逐渐衰退。随着降雨量的增加,有生物结皮和无生物结皮的油蒿群落土壤水分入渗系数呈增加趋势。在62.75 mm的降雨量下二者土壤水分的平均入渗系数都达到了最大值^[56]。在腾格里沙区对固定、半固定沙地土壤水分入渗进行研究得出,在入渗达到稳定前,流动的沙丘入渗率大于半固定沙丘,但在稳定后半固定沙丘反而大于流动沙丘,半固定沙丘的平均稳渗率最大,为16.8 mm/min。不同类型沙丘的入渗值达到稳定需要6.3~8.8 min。流动和半固定沙丘入渗量基本相同 Koctakob 和 Horton 公式比较其他的经验公式分别适合于研究沙丘水分和沙层水分的入渗^[74]。

降雨量决定土壤水分入渗深度和入渗速率,研究得出在毛乌素沙地单次降雨量在10 mm以上时,水分才能在沙地近地表循环中被利用,降雨入渗主要在12 h内完成。15 mm降雨量可以对地下水进行补充^[75]。小于10 mm的降水量由表层的土壤吸收,10~20 mm的降水量可以入渗到超过30 cm土层深度并对土壤有水分补给,但无法入渗到60 cm土层。30~40 mm降水条件下水分可以入渗到60 cm以下,并有水分补给,但是无法入渗到100 cm处^[76]。在科尔沁沙地对土壤不同月份的湿润度进行研究,沙地土层深度在40—300 cm处水湿润度与前月的降水关系是显著正相关关系,当月的降水量与0—300 cm土壤湿润度呈显著相关性^[71,77]。降雨不仅影响着含水率的变化同时也对地下水有一定的补给,对科尔沁沙地

的沙丘、草甸区土壤水分变化进行研究得出,降雨后 20 min,沙丘表层的水分能达到最大值,然后开始下渗,入渗到 20—60 cm。降雨越大,引起土壤水分变化的时间越长。即使年降雨量在 450 mm 的丰水年,降水对地下水的补给作用很小。对于草甸地即使发生小降雨事件也能入渗到较深土层,10 cm 降雨事件,20 min 内 20—40 cm 土层水分能达到最大值,随着时间增加表层土壤水分开始下降,湿润锋向下运移^[78]。对科尔沁沙地流动沙丘水分入渗及再分配的过程进行研究得出,入渗的速率与降雨强度呈显著正相关关系,且存在线性关系。湿润锋运移速率是随着降雨量的增大而加快,最后达到一个稳定值。降雨量在 13.4 mm 以上是才会对地下水进行补给^[55]。对库布其沙地油蒿群落的土壤水分补给进行研究得出,降雨在 5 mm 以下时仅能使空气湿润增加和降低土壤的温度,可以缓解旱情。但不能有效对土壤进行补给^[65]。对科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛的土壤水进行研究,42 mm 的降雨可入渗到 40 cm 处,降雨结束后渗 1 d 后,20—40 cm 土层含水量达到峰值^[79]。

5 沙地土壤水分平衡研究

研究沙区土壤水分平衡是研究沙区水文过程的基础,是研究大气变化与植被生长耦合关系的关键。沙区土壤水分变化过程主要由土壤水分的输入和输出来决定,对于沙区而言主要由降雨入渗量和蒸散发(ET)量决定。通常来说土壤含水量和植物可利用水量是对沙区植被稳定性评价的标准。现阶段研究者已经对沙地不同群落土壤水分含量和蒸散量做了大量的研究,并且发展大量模型对土壤含水量与蒸散量进行估算。

在干旱沙漠区主要利用蒸渗仪(Lysimeter)对土壤实际蒸散量进行测定是最有效与最准确的方法^[80-83],同时通过蒸渗仪测得的数值可对其他测量方法与模型进行校准与验证。通过蒸渗仪确定某一点的植被蒸散损失量,来研究土壤水分动态变化,从而扩展到模拟时空尺度上土壤水量的输入与输出变化,有助于在沙区建立水文过程与植被格局之间的量化关系^[84-87]。目前学者多在不同时间和空间尺度下对植物的蒸腾进行长期的监测,通过对树干液流的日变化^[88-90],季节变化^[89,91]及与环境因子的关系^[92-96]估算单株植物的蒸腾耗水量,结合叶面积指数及盖度估算种群的蒸腾耗水量,实现了从叶片到种群尺度的转换。同时根据测量结果建立不同尺度下的数学方程,结合土壤蒸发进而从种群尺度扩展到群落水平。通过对比实测蒸散发,此方法简单可行并可根据具体情况进行尺度转换^[87,97-100]。

在土壤水分平衡研究中,建立土壤水分动态模型时,通常把蒸散发作为确定变量,降雨作为随机变量。根据其模型的适用范围主要分为“木桶”模型、垂直分

布模型和地下水补给模型^[101]。“木桶”模型主要是在对植被生长季根系分布区不同土壤层水分的日垂直变化,该模型适合于干旱、半干旱区域,因为忽略地形因素所以适用于地形平坦区域。垂直分布模型在“木桶”模型的基础上考虑了土壤各层的根密度,在对气候与土壤关系研究中,结合土壤水分剖面变化与根系垂直生物量分布的关系,并且忽略了地下水作用,也同样适用于平坦的干旱、半干旱地区。地下水补给模型是把地下水与垂直分布模型结合在一起的综合模型。该模型适合不同土壤质地,研究气候和植被对土壤湿度的影响。通过水分再分配与地下水补给中土壤水分变化,考虑植物根系对不同层土壤水的吸收过程中,地下水在毛管流作用下产生上升水。

6 问题与展望

对于沙地生态系统,土壤水分是重要的水资源之一,它将大气、土壤和植被的水文过程及对植被格局变化的相互影响联系起来。它反映入渗、蒸散发、补给等多方面的水文过程和植物对的水分利用过程。土壤水分变化与沙地生态系统之间相互作用,是学者关注的热点话题。本文从沙地土壤水分入渗,沙地土壤水分时空变化及其水平衡分析了沙地生态系统土壤水分的变化特征,研究工作相对较全面,但是由于沙地生态系统包含内容的多样性与复杂性,在未来的研究应着重以下几方面:

(1) 沙地水量平衡的问题一直是国内外研究热点之一,以往的研究是对沙地人工建植区单个物种角度去分析土壤水分与群落稳定性的关系。没有考虑对多物种共存情况下的适应关系和种内、种间的竞争机制。因此通过控制试验模拟野外极端天气,结合种群内不同物种自身生理生态变化,综合分析土壤水分和天气等外在因素对其生长的影响,寻找到植物萎蔫时、生长发育敏感期,生理生态过程的特殊期以及稳定期对土壤水分变化的响应,确定有效土壤水分含量变化阈值,对探讨极端天气和干旱胁迫下群落稳定性有重要的意义。

(2) 对沙地生态系统的研究对象不同,所以尺度不同。在沙地对群落土壤水分变化进行研究并且建立模型是点研究,通过遥感技术和水量模型综合进行区域水量估测的研究是面研究。但不同的空间尺度研究结果差异很大,进而引起对水量估测的结果不够准确,应加强对点和面上水量转化关系研究。建立从点到面尺度转化的模型关系,以实现在不同空间尺度转化上对水分变化的预测,更好的定量大尺度下区域水分承载力。

(3) 沙区气候变化引起的土地退化是全球正在面对的难题,了解气候变化如何影响水资源可利用量和植被覆盖度是解决这一问题的关键。气候变化引起降水量的改变,进而对植物的生长发育过程产生影

响,如水分循环、养分循环以及生产力等。建立沙地生态系统土壤水分—植被—气象因子之间耦合模型对于掌握沙地生态系统水分循环机制和变化规律具有重要的意义。通过研究植被和土壤水之间的关系,建立耦合方程,同时研究不同造林模式下降雨对植被土壤水分的补给规律及植物对降雨的响应机制,构建模型研究不同造林模式下植被生长变化对降水脉动的响应。通过点尺度下的时间尺度研究来推算空间尺度上植被生长与降水的关系,以期实现通过气象因子来预测植被变化,为沙地生态系统的恢复与可持续经营提供理论依据。

(4) 沙地有限的水资源高效利用需要合理的建植配置,也需要增强沙地肥力来促进植被恢复与提高生产力。未来需要从沙地改土培肥、草田轮作、营造薪炭林等方面来改良贫瘠沙地从而有效的提高沙地土壤肥力,通过合理的土地利用方式和生产经营活动保护土壤的生态环境,探索沙地在有限的水资源环境下进行退化土地恢复与重建,恢复土地生产能力。

参考文献:

- [1] 徐飞,赖晓明,朱青,等.太湖流域丘陵区两种土地利用类型土壤水分分布控制因素[J].生态学报,2016,36(3):592-599.
- [2] 李禄军,志荣,克钧,等.绿洲:交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化规律[J].水土保持学报,2007,21(1):123-127.
- [3] 肖绪培,宋乃平,谢腾腾,等.荒漠草原区不同土地利用类型土壤水分时空特征[J].生态与农村环境学报,2013,29(4):478-482.
- [4] 刘昌明,孙睿.水循环的生态学方面:土壤—植被—大气系统水分能量平衡研究进展[J].水科学进展,1999,10(3):251-259.
- [5] 肖洪浪,李新荣,段争虎,等.流沙固定过程中土壤—植被系统演变对水环境的影响[J].土壤学报,2003,40(6):810-814.
- [6] 库利克,赵兴梁译.干旱地区沙地水分状况与水分平衡[M].呼和浩特:内蒙古林学院,1988.
- [7] 韩德儒,杨文斌,杨茂仁.干旱、半干旱区沙地灌(乔)木种水分动态及其应用[M].北京:中国科学技术出版社,1996.
- [8] Eden M J, Parry J T. Remote sensing and tropical land management[M]. John Wiley and Sons, 1986.
- [9] Svirezhev Y. M. Modern problems of mathematical ecology [A]. Proceedings of the international congress of mathematicians[C]. Poland:Warszawa, 1983:1677-1693.
- [10] 李千红,小林哲夫.中国毛乌素沙漠的沙丘的沙蒸发特征[J].农业气象,1989,44(4):301-305.
- [11] Wang D. Dynamics of soil water and temperature in aboveground sand cultures used for screening plant salt tolerance[J]. Soil Science Society Of America Journal, 2002,66(5):1484-1492.
- [12] Paolo Do. Preferential states in soil moisture and climate dynamics [J]. Proceedings of the National Academ of Sciences of the United of America, 2004, 101(24):8848-8852.
- [13] Porporato A, Daly E, I. Rodriguez-iturbe. Soil water balance and ecosystem response to climate change[J]. American Naturalist, 2004,164(5):625-632.
- [14] Bond W J, Wierenga P J. Immobile water during solute transport in unsaturated sand columns[J]. Water Resources Research, 1990,26(10):2475-2481.
- [15] Bastiaanssen W G M, Pelgrum H, Droogers P, et al. Area-average estimates of evaporation, wetness indicators and top soil moisture during two golden days in EFEDA [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1997,87(2/3):119-137.
- [16] Wang Q, Takahashi H. A land surface water deficit model for an arid and semiarid region:Impact of desertification on the water deficit status in the loess plateau, China [J]. Journal of Climate, 1999,12(1):244-257.
- [17] 李爱德,王耀林,赵明,等.民勤地区沙面蒸发及影响因素的初步研究[J].干旱区研究,1996,13(3):54-59.
- [18] Authors U. Quarterly journal of the royal meteorological society[J]. Biomedical Market Newsletter, 2012, 106(450):659-690.
- [19] Jacobs A F G, Heusinkveld B G, Berkowicz S M. A simple model for potential dewfall in an arid region[J]. Atmospheric Research, 2002,64(1/4):285-295.
- [20] Brown K W, Evans G B, Thomas J C. Increased soil water retention by mixing horizons of shallow sandy soils[J]. Soil Ence, 1985,139(2):118-121.
- [21] Beysens D, Muselli M, Nikolayev V, et al. Measurement and modelling of dew in island, coastal and alpine areas[J]. Atmospheric Research, 2005,73(1/2):1-22.
- [22] 方正三,朱成琪,王伟康.甘肃民勤沙地水分初步研究[C]//中国地理学会,中国科学院地理部.全国地理学术会议论文集(自然地理).北京:科学出版社,1962.
- [23] 朱祖祥.土壤水分的能量概念及其意义[J].土壤学进展,1979(1):1-21.
- [24] 杨诗秀,雷志栋,段新杰,等.应用土壤水动力学原理研究沙区土壤水分动态特征[A].见:刘家琼:中国科学院沙坡头沙漠试验研究站年报 1991—1992[R].兰州:甘肃科学技术出版社,1993.
- [25] 刘元波,杨诗秀.积水条件下沙地入渗湿润锋速度变化规律[A].见:崔书红.沙漠生态系统[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1994.
- [26] 冯起,高前兆.半湿润地区植被影响下的沙地水分动态[J].干旱区研究,1994,11(4):58-63.
- [27] 陈隆亨,李福兴.中国风沙土[M].北京:科学出版社,1998:1-88.
- [28] 郭柯,董学军,刘志茂.毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点:兼论老固定沙地上油蒿衰退原因[J].植物生态学报,2000,24(3):275-279.

- [29] 张国盛,王林和,董智,等.毛乌素沙地主要固沙灌(乔)木林地水分平衡研究[J].内蒙古农业大学学报,2001,23(3):1-9.
- [30] 王兵,崔向慧,白秀兰,等.荒漠化地区土壤水分时空格局及其动态规律研究[J].林业科学研究,2002,15(2):43-49.
- [31] 刘发民,张应华.黑河流域荒漠地区梭梭人工林地土壤水分动态研究[J].干旱区研究,2002,19(2):27-31.
- [32] 陈有君,红梅.浑善达克沙地不同植被下的土壤水分状况[J].干旱区资源与环境,2004,18(1):68-73.
- [33] 阿拉木萨,蒋德明,李雪华,等.科尔沁沙地典型人工植被区土壤水分动态研究[J].干旱区研究,2007,24(5):604-609.
- [34] 李新荣,张志山,王新平,等.干旱区土壤植被系统恢复的生态水文学研究进展[J].中国沙漠,2009,29(5):845-852.
- [35] 安慧,安钰.毛乌素沙地南缘沙柳灌丛土壤水分及水量平衡[J].应用生态学报,2011,22(9):2247-2252.
- [36] Li X R, Zhang Z S, Tan H J, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of northern China: relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert [J]. *Sci China Life Sci*, 2014,57(5):539-548.
- [37] Liu J L, Zhao W Z, Li F R. The effects of the identity of shrub species on the distribution and diversity of ground arthropods in a sandy desert ecosystem of northwestern China [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2014,6(6):587-596.
- [38] YANG WenBin, TANG JinNian, LIANG HaiRong, et al. Deep soil water infiltration and its dynamic variation in the shifting sandy land of typical deserts in China [J]. *ence China(Earth ences)*, 2014,57(8):1816-1824.
- [39] Mouazen A M, Ramon H. Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture content[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006,86(2):218-229.
- [40] Skierucha W, Wilczek A, Alokina O. Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2008,147(2):544-552.
- [41] Riley T C, Endreny T A, Halfman J D. Monitoring soil moisture and water table height with a low-cost data logger[J]. *Computers & Geosciences*, 2006,32(1):135-140.
- [42] Nemali K S, Montesano F, Dove S K, et al. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates:ECH2O and Theta probes[J]. *Entia Horticulturae*, 2007,112(2):227-234.
- [43] Kizito F, Campbell C S, Campbell G S, et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor[J]. *Journal of Hydrology*, 2008,352(3/4):367-378.
- [44] Abbasi A Z, Islam N, Shaikh Z A. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2014,36(2):263-270.
- [45] 王艳莉,刘立超,高艳红,等.人工固沙植被区土壤水分动态及空间分布[J].中国沙漠,2015,35(4):942-950.
- [46] 潘颜霞,王新平,苏延桂,等.荒漠人工固沙植被区土壤水分的时空变异性[J].生态学报,2009,29(2):993-999.
- [47] 李新荣,马风云,龙立群,等.沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J].中国沙漠,2001,21(3):217-222.
- [48] 洪光宇,王晓江,张雷,等.科尔沁沙地生物结皮与其他植被覆盖耗水率的研究[J].内蒙古林业科技,2017,43(4):14-20.
- [49] 洪光宇,王晓江,张雷,等.毛乌素沙地不同林龄杨柴灌木林土壤剖面水分变化特征[J].内蒙古林业科技,2016,42(4):6-9.
- [50] 马风云,李新荣,张景光,等.沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性[J].应用生态学报,2006,17(5):789-795.
- [51] 赵学勇,左小安,赵哈林,等.科尔沁不同类型沙地土壤水分在降水后的空间变异特征[J].干旱区地理,2006,29(2):275-281.
- [52] 阿拉木萨,蒋德明,李雪华,等.科尔沁沙地典型人工植被区土壤水分动态研究[J].干旱区研究,2007,24(5):604-609.
- [53] 阿拉木萨,裴铁瑶,蒋德明.科尔沁沙地人工固沙林土壤水分与植被适宜度探讨[J].水科学进展,2005,16(3):426-431.
- [54] 宗芹,阿拉木萨,骆永明,等.冻融条件下土壤水分物理性提升的试验研究[J].水土保持学报,2013,27(1):230-234.
- [55] 刘新平,张铜会,赵哈林,等.流动沙丘降雨入渗和再分配过程[J].水利学报,2006,37(2):24-28.
- [56] 张军红,吴波.油蒿群落生物结皮对降水入渗过程的影响[J].中国科学院大学学报,2014,31(2):214-221.
- [57] 陈有君,刘钟龄.内蒙古浑善达克沙地土壤水分状况的分析[J].干旱区资源与环境,2000,14(1):80-85.
- [58] 王新平,李新荣,康尔泗,等.腾格里沙漠东南缘人工植被区降水入参与再分配规律研究[J].生态学报,2003,23(6):1234-1241.
- [59] 黄利江,赵萍,张广才,等.宁夏盐池沙地水分动态研究初探[J].林业科学研究,2004,17(S):31-38.
- [60] 阿拉木萨,蒋德明,裴铁瑶.科尔沁沙地人工小叶锦鸡儿植被水分入渗动态研究[J].生态学杂志,2004,23(1):56-59.
- [61] 叶冬梅,秦佳琪,韩胜利,等.乌兰布和沙漠流动沙地土壤水分动态、土壤水势特征的研究[J].干旱区资源与环境,2005,19(3):126-130.
- [62] 刘峻杉,徐霞,张勇,等.长期降雨波动对半干旱灌木群落生物量和土壤水分动态的效应[J].中国科学:生命科学,2010,40(2):166-174.
- [63] 石莎,冯金朝,邹学勇.不同地形条件对沙漠植物生长和沙地土壤水分的影响[J].干旱区地理,2007,30(6):846-851.

- [64] Wang X P, Cui Y, Pan Y X, et al. Effects of rainfall characteristics on infiltration and redistribution patterns in revegetation-stabilized desert ecosystems[J]. Journal of Hydrology, 2008, 358(1/2): 134-143.
- [65] 魏雅芬, 郭柯, 陈吉泉. 降雨格局对库布其沙漠土壤水分的补充效应[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1346-1355.
- [66] 赵景波, 马延东, 邢闪, 等. 腾格里沙漠宁夏中卫沙层含水量研究[J]. 山地学报, 2010, 28(6): 15-21.
- [67] 吴永胜, 哈斯, 乌格特莱勒. 毛乌素沙地南缘沙丘表面径流特征[J]. 科学通报, 2011, 56(34): 2917-2922.
- [68] 王永义. 降雨入渗补给规律分析[J]. 地下水, 1998, 20(2): 74-75.
- [69] Liu H, Lei T W, Zhao J, et al. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(1/2): 24-32.
- [70] 刘元波, 陈荷生, 高前兆, 等. 沙地降雨入渗水分动态[J]. 中国沙漠, 1995, 15(2): 143-150.
- [71] 何志斌, 赵文智. 半干旱区流动沙地土壤湿度变异及其对降雨的依赖[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 359-362.
- [72] 吕刚, 翟景轩, 李叶鑫, 等. 辽西北风沙地不同植物群落土壤入渗特性[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 133-139.
- [73] 李娟, 叶立, 张维江. 宁县中部干旱风沙区降雨入渗补给系数的估算[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 22-26.
- [74] 赵景波, 马延东, 邢闪, 等. 腾格里沙漠宁夏回族自治区中卫市沙层水分入渗研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 12-17.
- [75] 原鹏飞, 丁国栋, 王炜炜, 等. 毛乌素沙地降雨入渗和蒸发特征[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(4): 23-27.
- [76] 张军红, 吴波, 杨文斌, 等. 不同演替阶段油蒿群落土壤水分特征分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1597-1603.
- [77] 赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. 科学通报, 2001, 46(22): 1851-1857.
- [78] 李东方, 刘延玺, 王冠丽, 等. 科尔沁沙地沙丘、草甸区土壤水、地下水对降雨的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(4): 123-128.
- [79] 王少昆, 赵学勇, 左小安, 等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛下土壤水分对降雨响应的空间变异性[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 389-393.
- [80] 张志山, 李新荣, 何明珠, 等. 沙漠人工植被蒸渗池测定及蒸腾量推算[J]. 草业学报, 2006, 15(6): 32-37.
- [81] 刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J]. 水利学报, 1998, 29(10): 36-39.
- [82] Chen J Y, Wu K. Preliminary analyses for crop water consumption by using lysimeter[J]. the Journal of Chinese Geography, 1997, 7(3): 64-71.
- [83] 王新平, 康尔泗, 张景光, 等. 草原化荒漠带人工固沙植丛区土壤水分动态[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 216-222.
- [84] 金艳霞, 王新平, 张亚峰, 等. 红砂(*Reaumuria soongorica*)、珍珠(*Salsola passerine*)蒸腾耗水规律的尺度整合[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 286-293.
- [85] Yang G, Pu R, Zhao C, et al. Estimating high spatio-temporal resolution evapotranspiration over a winter wheat field using an IKONOS image based complementary relationship and Lysimeter observations[J]. Agricultural Water Management, 2014, 133(2): 34-43.
- [86] Marek G, Gowda P, Marek T, et al. Estimating pre-season irrigation losses by characterizing evaporation of effective precipitation under bare soil conditions using large weighing lysimeters[J]. Agricultural Water Management, 2016, 169(5): 115-128.
- [87] 张志山, 李新荣, 何明珠, 等. 沙漠人工植被蒸渗池测定及蒸腾量推算[J]. 草业学报, 2006, 15(6): 32-37.
- [88] 徐先英, 孙保平, 丁国栋, 等. 干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 895-905.
- [89] 夏桂敏, 康绍忠, 李王成, 等. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1186-1193.
- [90] 臧春鑫, 杨劼, 袁劼, 等. 黄土丘陵沟壑区中间锦鸡儿整株丛树干液流特征与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 420-426.
- [91] 岳广阳, 张铜会, 赵哈林, 等. 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3205-3213.
- [92] 王慧梅, 孙伟, 祖元刚, 等. 不同环境因子对兴安落叶松树干液流的时滞效应复杂性及其综合影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3109-3116.
- [93] 徐军亮, 章异平. 春季侧柏树干边材液流的滞后效应分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 109-112.
- [94] 赵文飞, 王华田, 亓立云, 等. 春季麻栎树干边材木质部液流垂直变化及其滞后效应[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 320-325.
- [95] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2145-2151.
- [96] 殷秀辉, 程飞, 张硕新. 油松树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(5): 24-28.
- [97] 于红博, 杨劼, 臧春鑫, 等. 皇甫川流域中国沙棘树干液流日变化及其相关因子[J]. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1071-1076.
- [98] 张志山, 李新荣, 王新平, 等. 沙漠人工植被区的蒸发蒸腾[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2484-2490.
- [99] 张志山, 张小由, 谭会娟, 等. 热平衡技术与气孔计法测定沙生植物蒸腾[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(1): 60-66.
- [100] 张志山, 谭会娟, 周海燕, 等. 用气孔计测定沙漠人工植物的蒸腾[J]. 草业学报, 2006, 15(4): 129-135.
- [101] 胡健, 吕一河. 土壤水分动态随机模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2015, 34(3): 389-400.