

干旱半干旱区沙漠化土地水分动态研究进展

刘新平¹, 张铜会¹, 赵哈林¹, 赵学勇¹, 何玉惠²

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 2. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

摘 要: 随着土地沙漠化危害的不断加剧, 干旱、半干旱区沙漠化土地水分动态的研究显得至关重要。通过回顾国内外沙地水分动态的研究现状, 对研究中存在的问题作了简要评述, 指出了目前尚未涉及的研究空白和需要进一步深入的研究内容。认为今后的研究工作应注重从方法上的突破, 试验手段的创新和研究领域的拓展三个方面来进行。

关键词: 沙漠化; 土壤水分; 动态规律; 研究进展

中图分类号: S152.7; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005)01-0063-06

Research Advances on Moisture Dynamic of Desertified Lands in Arid and Semi-arid Regions

L U Xin-ping¹, ZHANG Tong-hui¹, ZHAO Ha-lin¹, ZHAO Xue-yong¹, HE Yu-hui²

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Forestry College of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Desertification is a main environmental problem causing extensive attention all over the world. China is one of the countries to be affected severely by desertification. Land desertification mostly occurred in arid, semi-arid and semi-wet areas. Soil water has very important effect on ecosystem stabilization, structure and function of the areas, even affects the probability holding back desertification ham. So, it is important to systematically study space-time pattern and dynamic laws of sandy land moisture, which have crucial significance to prevent desertification, renew the degenerative ecosystem. This review generalizes the internal and overseas research actuality of sandy land moisture dynamics, points out the present problems and vacancies in research. It is suggested that future research should give attention from having a methodological breakthrough, innovating the experimental instrument and developing the research field.

Key words: desertification; soil moisture; dynamic laws; research advance

荒漠化是全球广泛关注的重大环境问题, 我国是受其影响最为严重的国家之一^[1]。当前, 我国沙漠化土地总面积约为 35.88 万 km² (包括潜在沙漠化土地和已经沙漠化土地), 占全国陆地总面积的 3.74%。东起沿海, 西至内陆西北高原、盆地, 从南部的海南岛直至最北部的三江平原、呼伦贝尔均有不同程度的分布^[2,3]。干旱、半干旱区和半湿润区农牧交错地带, 生态系统脆弱, 随着人口和载畜量的不断增加, 加之不合理的开发利用, 使这些地区成为土地沙漠化的主要发生区。荒漠生态系统由于其环境的严酷性决定了它的脆弱性和不稳定性, 在这样的生态系统中, 土壤水分状况是系统重要的生态因素, 与系统大多数性质和过程都有直接或间接的关系, 决定着沙地土壤的发生、演化和土地生产力, 是土地沙漠化地区生态系统稳定、结构和功能正常发挥的关键因子, 对整个生态系统的水热平衡起决定作用^[4,5], 同时也是植物生

长的最大限制因子, 且影响到遏止沙漠化危害的可能性^[6]。因此, 对我国沙漠化土地水分时空格局及其动态规律进行系统研究, 无疑会对我国沙漠化防治、退化生态系统的恢复与重建, 以及对于沙地改良、开发利用, 沙地农业生产方向, 灌溉农业的经济效益和未来的发展趋势都具有极其重要的意义。本文旨在综述前人研究成果的基础上, 指出我国沙漠化土地水分动态研究中存在的问题以及今后的研究趋势。

1 研究进展

1.1 国外沙地水分研究现状

国外对沙漠化土地水分的研究起步较早。前苏联于 1912~1913 年首先由 M. N. 托马斯基对俄罗斯东南沙地水分状况进行了定位研究, 收集了很多沙地水分的资料。法国、日本相继也展开了沙地水分关系的详细研究。1970 年 Hillel

收稿日期: 2004-04-22

基金项目: 国家重点基础研究计划项目(G2000048704); 国家“十五”科技攻关项目(2002AB517A 06)

作者简介: 刘新平(1978-), 男, 甘肃安西人, 硕士研究生, 主要从事恢复生态学和干旱区水文学研究工作。

等指出细粒土壤层基质势会阻止土壤水分入渗到相对大孔隙的粗粒土壤层^[7]。只有当细粒土层达到饱和以后,土壤水分才可能渗入深部粗粒土壤层^[8]。对于裸地蒸发,Van Bavel和Hillel在1976年应用微气象学方法,综合考虑土壤水热状况及大气因子作用进行了研究,为蒸发研究与土壤水热运移研究结合在一起提供了一个很好的范例^[9]。Evans在1981年研究认为在荒漠地区,一方面,沙漠中水分向下湿润的深度一般较浅,通常在降雨以后土壤表面立即开始蒸发,湿润层的水分由于蒸发而向下再分配逐渐减少^[10]。Parkin等在1995年应用时域反射仪(TDR)在室内实验指出,浸水条件下土壤入渗湿润峰是时间的函数^[11]。由于受降水的随机性和不连续性影响,某点的土壤水分稳态概率密度函数依赖土壤水分入渗和蒸发损失表现出非线性特征^[12]。Timlin在2002年研究指出,在降水或灌溉过程中,对土壤垂直剖面内不同位置的入渗湿润峰进行同步试验观测是非常必要的^[13]。在定量的研究土壤水分运动规律模拟理论方面,国外取得了丰硕的成果。1856年法国工程师Darcy通过实验得到了达西饱和土壤水流运动方程,开创了土壤水分运动定量研究的新局面。1936年,Richards在前人工作的基础上,又得出了Darcy-Richards非饱和土壤水流运动方程,该模型的提出标志着土壤水流运动模型研究进入一个新阶段^[14]。1957年,Philip结合前人的理论和实验成果,考虑了非饱和带中汽态水的运动,首次提出了非恒温条件下土壤液态与汽态水流运动方程,成为土壤水汽模型发展的又一个里程碑^[15]。1958年DeVries对Philip方程进行了扩充,引进了吸附水中的热平流和湿润热概念^[16]。1972年Jackson进一步改进和完善了Millington和Quirk(1959)提出的以土壤水分特征曲线为基础的模型,得到了以土壤水分特征曲线的实测值作参数的Jackson方程,这是目前最精确的非饱和土壤导水率计算模型^[17]。在此基础上,1982年Milly推出了考虑滞后效应的非均质土壤水热联合运动模型^[18]。土壤水分运动参数是建立水分动态模型的基础,土壤水分特征曲线是研究土壤水分入渗、蒸发及溶质运移过程中推求各种水分运动参数的重要手段。Assouline等认为土壤特征与土壤水分特征曲线有非常紧密的联系,土壤水分特征曲线可以对土壤体含水量与土壤颗粒分布的关系进行最小二乘法回归模拟^[19,20]。Cosby等利用土壤颗粒组成的累积曲线,结合物理模型(把土壤颗粒看作不能被压缩和不收缩的刚体)推求土壤水分特征曲线。这种方法结果误差相对较小,并考虑了土壤水分滞后作用的影响,对沙地土壤比较准确^[21,22]。概念模型也是目前推算土壤水分特征曲线精度较高,适应性较好的模型^[23]。土壤水分持留曲线是土壤体水分含量与压力水头之间的关系。这在研究土壤水分流动和溶质运移中有重要的作用,较常用的是Brooks-Corey(1964)年提出的模型^[24];Gardner(1970)模型^[25];Van-Genuchten(1980)模型^[26]和Russo根据Gardner(1958)年的模型推导出的Gardner-Russo(1988)模型^[27]。对于沙地土壤来说,Van-Genuchten模型拟和效果最好。国外的研究注重从点到面的扩展,立足于定量的基本规律的研究,是特殊到一般的实现

过程,这种方法适于研究土壤水分动态这样多学科交叉、内容庞大的课题,从而减少了研究的重复性。

1.2 国内沙地水分研究现状

我国开展沙地水分的研究较晚,基础也很薄弱,对土壤中水分运动的模拟研究主要在农田水利方面:讨论土壤的入渗与蒸发过程,以及土壤中的水盐运动,为制定合理的灌溉与排水技术提供依据^[28]。对沙漠化土地水分的研究开始于上世纪60年代初期,中国科学院治沙队率先对包括民勤在内的干旱区进行了水文、植被的调查研究,采用定点人工测定沙地土壤水分常数,确定了水分运动的简单过程,初步掌握了沙地的水土状况^[29,30]。进入20世纪70年代,我国沙地土壤水分的研究在理论、方法和手段方面都逐步与国际趋同。

1.2.1 沙地水分变化特征

沙地水文常数不仅能阐明沙地水文有效体系,而且可以进一步建立沙地水分有效体系寻找水分控制奠定基础,提供理论依据。陈荷生等(1991)提出沙地土壤含水量的变化和水分运动规律受沙地中热流运动和温度分布的影响^[31]。钱鞠等(1993~1994)研究认为固定沙丘水分深度分布剖面可划分为4层:表层干沙层;水分强烈变化层;低含水量缓变层;高含水量变化层。并指出水分势能与水分动态存在较好的对应性^[32]。土壤水分运动参数反应了土壤的性质和特征,沙地水分特征曲线表明,沙土吸力、导水率均与体积含水率之间有密切的相关性^[33]。冯起、张国盛等(1995,1999)研究指出沙地水分动态具有垂直变化和季节变化。垂直变化表现为:表层干沙层(0~10 cm或0~20 cm);水分活跃层(20~80 cm);水分稳定层(80 cm以下)。季节变化表现为冬春季的调整与弱失水阶段(12月~5月下旬);夏季降水补给阶段(6月~8月下旬);秋季失水阶段(9月~11月下旬)^[34,35]。蒲庸昌等(1997)认为沙地部位、季节、当年和前一年降水量及分布都会影响沙地含水量的年变化^[36]。气候条件的差异,决定了沙地水分分布状况的明显不同。冯起、程国栋(1999)在大尺度范围研究发现各地带沙地表层干沙层一般厚10~40 cm,含水率变化在0.5%~2.0%之间。40~60 cm以下沙层含水率较大,变化在2.0%~8.0%之间。40~60 cm也是水分剧烈变化层的下界,该层分为上层较湿层,全湿层和反“S”型^[37]。陈有君、关世英等(2000)提出沙地的地理位置不同,水分状况分异很大,影响土壤水的条件变异也很大。沙地不同部位土壤含水量的变化梯度是:丘间湿地>沙丘北坡>沙丘南坡>丘岗顶部。这是地形坡度、径流运动、土层渗透性、地下水位、太阳辐射强度、气流与风力风速等影响水分运移与蒸散的多因素制约的结果^[38]。王兵、崔向慧等(2002)研究认为沙地0~120 cm深度范围内,随深度增加土壤含水量从上层向下层逐渐增大,但变化平缓^[39]。我国干旱、半干旱区沙漠化土地面积广袤,由于降水量、土壤类型、植被类型、地形、温度、光照等因素的不同,其土壤水分变化特征在空间分布上既有连续性,又有变异性,从而增加了研究的复杂性和艰巨性。目前正处于小区域研究汇总到大范围定量探索研究阶段。

1.2.2 降水与蒸发条件下沙地水分动态

在沙漠环境中,有限的大气降水是沙地水分的直接补给

来源,也是无灌溉条件下天然植被得以生存的主要水源之一,降水进入沙丘后,一部分入渗转化为沙丘水储存在沙层中,供植物生长,另一部分以物理蒸发的方式重返大气中^[40]。土壤蒸发与降水入渗是沙地水分循环的两个基本过程,长期以来,国内蒸发研究主要集中在农田蒸发与水面蒸发方面,方法主要是实验测定或用经验与半经验公式计算。Green-Ampt模型是降水入渗常用的经验半经验模型^[28]。土壤入渗是制约土壤水分循环的重要因素,也是土壤十分重要的物理性质。刘元波,陈荷生等(1995)对沙地降水入渗进行动态监测得出每次较大的降雨发生后,0~6 m深度以上均反映出沙地水分的增加,而后逐渐减少,呈现由降雨产生的波动。降雨期间沙地水分传递速度为0.35~2.29 cm/h之间,20~30 mm降雨量其最大入渗深度达60 cm,但不超过1 m^[41]。康绍忠等(1997)研究发现入渗后土壤水分再分布规律是,在表层0~10 cm内土壤含水率急剧减少,20~50 cm的土壤含水率开始有增大趋势,然后再逐渐减少,60 cm以下的含水率略有变化。在有蒸发条件的土壤水分分布剖面有明显的水流零通量面存在^[42]。冯起,程国栋(1999)研究指出降水40 mm以上时,3%~4%的水分可以浸透3 m深度土层,当降水小于30 mm时,仅能浸透2 m的土层,降水10 mm以上才能浸透干沙层,降水10 mm以下均被表层蒸发掉,对40 cm以下土层影响不大^[37]。沙地土壤水的形态学研究和以能量为基础的动力学研究二者不是相互排斥而是相辅相成的。体积含水率和吸力分别反映了土壤水数量和能量特征,其数量变化过程和能量传递过程是一致的。而沙地水分运动的方向取决于土水势。杨文治,绍明安(2000)提出土壤水分流动的速率取决于再分布开始时,土壤上层的湿润程度和下层的干燥程度及土壤导水性质,一般降雨产流的时间随土壤深度的增加而缩短^[43]。赵哈林等(2003)研究指出降雨只能影响到土壤表层0~0.8 m范围的土壤水分含量,主要是由于降水更多的被植被蒸腾作用所消耗^[44]。王新平等(2003)研究指出间歇性降水与瞬时土壤表面高蒸发相互影响,导致雨季(生长季)沙丘土壤浅层处于频繁的干湿交替状态,累积入渗量与入渗深度均随土壤初始含水率的提高而递减^[45]。李新荣,马凤云等(2001)通过对沙地结皮的研究认为,土壤质地是引起土壤水平入渗系数变异的主要原因,生物土壤结皮对降水入渗具有明显截留保持作用,能够改变降水入渗过程中土壤水分的再分配格局,减少降水对深层土壤的有效补给^[6]。王新平,张利平(1996)研究认为干沙层的逐渐发育对地表蒸发起屏蔽作用,40 cm深度内土壤含水率对地表蒸发有70%~77%以上的影响作用^[46]。沙地水分状况和运动状态受沙土的土质和粒径组成的影响。沙粒较粗时,孔隙率小,沙中的水蒸气扩散系数小,沙丘蒸发速度慢^[47]。同时,土壤温度也对沙地水分影响较为明显,当土壤在夜间冷却时,水汽压下降,水汽从温度高的地下向温度低的地表运动,并进行蒸发^[48]。热力规律会影响土层中水蒸气的迁移,特别是液态水随温度呈现函数关系^[49]。降水可以看作是随机模型,虽然降水在空间上分配不均衡,但采用随机模型来模拟降水过程证明是可行的。降水过程的随机模型结合土壤水和表层水运动的确定性模型,可以研究蒸发输出与土壤水

特性、土壤水分常数^[50-52]。康绍忠(1990)将随机模拟的方法应用于土壤水分的定量研究中,经模拟和预测表明该方法能以一定的精度来模拟或预测土壤水分在长时期内的动态变化过程^[53]。陈渠昌,吴忠瀚等(1999)认为滴灌条件下沙地土壤水分的再分配过程可由非饱和土壤水分运移的柱坐标基本微分方程来描述,在确定参数之后,用数值法解此方程可得出任一时刻的土壤水分分布和建立土壤水分运移模型,来模拟土壤水分运动^[54]。黄强,刘玉芸(2002)研究认为,沙漠地区土壤多为风成沙,土壤颗粒粗,而且组成均匀,用Van Genuchten提出的水分特征曲线公式和Mualem提出的非饱和土壤导水率公式描述沙地土壤水分特征,效果较好^[55]。可以看到,降水与蒸发条件下的沙地水分动态的研究我们已经取得了阶段性的成果,但是尚有很多没有研究清楚和没有涉及到的领域。土壤水分运移地过程研究已不能满足应用需求。降水与蒸发条件下的沙地水分动态既有时间序列上的变化,亦有空间序列上的变化,这既是难点,也是优势。以土壤水能态观点进行深入研究,相信会带来沙地土壤水分动态模拟理论研究领域的新的突破。

1.2.3 植被生长条件下沙地水分动态

沙地水分变化也同植被种类、密度、树种及根系分布深度有密切的相关性。研究植被生长条件下的沙地水分动态是探究沙地水分空间变异性不可忽视的一个重要方面。Evans等(1981)发现,荒漠条件下植被周围及裸土的入渗率皆表现出多样性^[56]。王新平,张利平等(1996)指出采用不同树种混栽,可以充分利用不同深度水分,并促进水分循环过程中降水入渗对深层水分的补给,以平衡蒸散耗水量^[46]。张继贤(1997)研究得出天然植被下的固定风沙地60 cm以上沙层含水量较人工植被高,60 cm以下沙层含水量为1%~2%,为稳定含水量,而人工植被无明显的稳定含水量层,导致风沙土深层水分条件恶化,生态系统由人工向自然生态系统演替^[57]。张称意,史绣华(1997)研究认为受植被根系吸水的影响,沙地水分存在着空间异质性,离植株越远,沙地平均有效水贮量越大^[58]。李新荣,马凤云等(2001)研究指出固沙植被发展9~10 a后土壤含水量开始明显下降,特别是较深层(大于100 cm)的含水量下降明显。较深层含水量的变化规律与固沙植被中深根性的灌木种的盖度大小密切相关,当盖度下降至6%~9%时,100~300 cm沙层能维持相对稳定的较低含水量(1%~1.5%)^[6]。赵文智(2002)提出无论是水平格局或是垂直格局,人工植被的建立将增强沙地土壤水分的异质性^[59]。同时,沙地植被蒸腾作用以及其它的生理特性和过程的维持也和沙地水分有密切关系。沙地植物生态群落演替和生物适应性的发展,使植被对沙地水分动态的影响更趋复杂化,其过程和机制尚需进一步研究。

1.2.4 沙地土壤水分对植被生长的影响

沙地土壤水分对植物生长也有较大的影响^[60]。很大程度上决定着植被的成分、结构、形态和生理特性。李玉山(1989)研究指出植物根系吸收和蒸腾加剧沙层干燥的深度和强度,入渗层,蒸发影响层和蒸腾影响层的深度共同决定了土壤水分循环层深度^[61]。杨文斌(1991)对干旱区风沙土

的水分动态规律,固沙林的土壤,植物水分关系以及蒸发、蒸腾规律进行了较为全面系统的研究,提出光照强度和土壤含水率是影响蒸腾速率的两个主要因子^[62]。吴林等(1996)认为不同土壤水分对杨树和沙棘光合速率、蒸腾速率以及瞬时WUE有不同的影响,土壤水分含量高低对植物光合速率影响较大,土壤持水量越大,其光合速率越高^[63]。李洪建等(2001)研究得出土壤含水量与植物水势和含水率有较大的相关性^[64]。冯金朝等(2001)指出在沙地土壤水分亏缺条件下,沙冬青叶片的光合作用和蒸腾作用对土壤水分的变化表现出较强的密切关系^[65]。杨建伟等(2002)研究提出不同土壤水分对枝条生长速率有不同的影响,并指出沙棘适宜于长年根系分布区土壤含水量平均处于中度亏缺(55% Q_r 以上)的立地条件^[66]。李丽霞等(2002)通过研究土壤干旱条件下沙棘苗木生长、光合和水分关系的变化,指出在同样环境条件下,蒸腾速率随干旱胁迫程度加重而降低^[67]。黄振英等(2002)研究指出沙柳在不同环境状态下会表现出弹性的水分消耗特点,其叶片的气孔导度和光合速率早春早期明显低于湿润期,其水分利用效率日平均值在春夏季前比雨季高10%^[68]。沙地土壤水分对植被生长的影响机制仍有很多不清楚的地方,有待继续研究。

2 未来研究趋势及展望

由于沙漠化对国民经济及人民生活的影 响越来越大,已经引起全世界的广泛关注,尤其是干旱半干旱地区国家,为了遏制沙漠化的进一步发展,越来越多的国家对沙地水分研究给予了极大的重视。由此,也对沙地水分的研究提出了更高的要求。近年来沙地水分的研究取得了丰硕的科研成果,为我国广袤的沙漠化地区生态环境的恢复和重建,人民生活水平的提高和沙地综合整治利用做出了突出的贡献。同时,在21世纪,随着人们对生态环境条件的要求提高,沙地土壤水分的研究也面临更大的挑战。研究中存在的问题和尚未涉及地空白领域需要进一步探究,今后可以从以下三方面进行深入研究。

2.1 方法上的突破

长期以来,我国沙地水分的研究主要是采用形态学的静态的方法,这种方法只能阐明沙地水分运动的简单过程,对于受气候、植被、土质等多重因素制约的沙地水分动力学规律很难揭示其本质,需要我们从土壤水动态和能态的观点出发,结合地统计学、数理建模、数学物理方法、计算机模拟和3S技术来研究沙地水分动态规律。这些新方法已经有不少学者在尝试。庄季屏等(1989)提出土壤水势梯度才是土壤水分运动的驱动力^[69]。刘元波等(1997)指出形态学静态的研究方法已不能满足沙地水分研究,沙地水分运动的动力学机制、过程和特征研究正成为沙地水分研究的主导方向^[70]。我国沙地水分动态的模拟理论研究一直是一个薄弱的环节。

参考文献

- [1] 慈龙骏,吴波.中国荒漠化气候类型划分与中国荒漠化潜在发生范围的确定[J].中国沙漠,1997,17(2):107-112
- [2] 赵丽娅,赵哈林.我国沙漠化过程中的植被演替研究概述[J].中国沙漠,2000,20(增刊):1-7
- [3] 董光荣,等.中国沙漠形成演化气候变化与沙漠化研究[M].北京:海洋出版社,2002.560-568

1992年卢振民等应用1966年Philip提出的土壤—植物—大气连续体(SPAC)定量的研究土壤水分的迁移,建立了比较完整的SPAC水流运动模型,该模型可用一般的气候资料和土壤水分运动参数预测土壤水分动态^[71]。土壤水分的遥感监测是目前遥感技术应用研究的前沿领域。热惯量法遥感土壤水分的方法已得到认可。微波遥感土壤水分较可见光与近红外及热红外遥感土壤水分具有独特的优越性,与其它方法结合起来测定土壤水分其应用前景相当广阔。

2.2 试验手段的创新

我国在沙地水分研究中,通常是利用现有仪器人工观测沙地水分数据,通过统计软件处理分析数据,得出具有统计意义的结论。而对于实验仪器,人为等造成的误差通常考虑不足。不断改进试验方法和更新试验仪器是确保结论的真实性和提高试验数据精度的基础。目前,对于沙地水分研究的试验仪器主要有:雨量计、水位计、温湿度计、烘箱、中子水分仪、水银负压计、测渗仪、热电偶计、TDR(时域反射仪)、水分平衡场等。这些仪器在测量土壤水分中都有其固有的优缺点。中子水分仪具有测量方便,快捷,不受滞后作用的影响,测定水分范围宽,测定深度不限以及可以与自动记录系统和计算机连接等优点,特别是适用于土壤水分的大范围连续定位动态观测,但也存在不足,较深处测量土壤水分的分辨率不够准确,测定表层土壤水分含量的精度较低,同时,还具有一定的辐射危害性^[72]。很多研究者发现,时域反射仪(TDR)能在很短的时间内测量出土壤累积入渗量及湿润峰位置^[73]。放射性元素示踪法近年来得到了一定的应用。电阻法经测试对沙地水分长期动态监测被认为是一种简便易行较烘干法要好的新方法。另外,圭尔夫入渗仪,CB-0221多点温度自动测定系统,以及利用氯化钴试纸法测定沙地水分入渗速率都是有益的尝试。

2.3 研究领域的拓展

包括研究尺度和研究内容。我国沙地水分的研究多集中在研究者工作区,不能反映区域特性。而且时间上不具有连续性。可以应用景观生态学理论中的尺度效应放大研究的时间和空间尺度,对揭示沙地水分时间和空间上的规律性会有所帮助。同时随着科学技术的发展,地统计学和数学物理方法的引入应用,给土壤水空间变异性研究带来了新的途径,使土壤水的研究逐步由定性的经验描述走向定量的理论分析。研究内容主要集中在沙地水分常数,降水入渗和蒸发条件下的沙地水分运动,植被生长条件下的沙地水分动态。而对不同厚度干沙层下沙地水分的蒸发规律,沙地水分与溶质、热量的关系和运移问题的研究少见报道。同时沙地土壤水分运动的随机模型及其应用,以及以干旱区土壤水及其运动规律为中心的农业节水机理研究和以土壤水为纽带的大气水—土壤水—地下水界面水分转换研究,分形理论的应用的研究都需要进一步深入。

- [4] 黄秉维, 郑度, 赵名茶, 等. 现代自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 258- 277.
- [5] Andrew J, Baird, Robert L, Wilby. 生态水文学[M]. 赵文智, 王根绪译. 北京: 海洋出版社, 2002: 55- 81.
- [6] 李新荣, 马凤云, 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): 218- 222.
- [7] Hillel D, Gardner W R. Transient infiltration into crust topped profiles[J]. Soil Sci, 1970, 109: 69- 76.
- [8] Sackschewsky M R, Kemp C J, Link S O, et al. Soil water balance changes in engineered soil surface[J]. Journal of Environmental Quality, 1995, 24(2): 352- 359.
- [9] Van Bavel, CHM, Hillel, D. Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat[J]. Agric Meteorol, 1976, 17: 453- 476.
- [10] Daniel D Evans. Water in Desert Ecosystem[M]. New York: Academic Press, 1981: 265- 270.
- [11] Parkin G W, Kachanoski R G, Elrick D E, et al. Unsaturated hydraulic conductivity measured by time domain reflectometry under a rainfall simulator[J]. Water Resour Res, 1995, 31: 447- 454.
- [12] Rodriguez- Iturbe I, Porporato A, Ridolfi L, et al. Probabilistic modeling of water balance at a point: the role of climate, soil and vegetation[J]. Proc Math, Phys Eng Sci (The R. Soc.), London, Ser A, 1999, 455: 3789- 3805.
- [13] Timlin D, Pachepsky Y. Infiltration measurement of using a vertical time- domain reflectometry probe and a reflection simulation model[J]. Soil Sci, 2002, 167: 1- 8.
- [14] 张福锁, 龚元石, 李晓林. 土壤与植物营养研究新动态[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 1- 16.
- [15] Philip J R, de Vries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Trans Am. Geophys Union, 1957, 38: 222- 232.
- [16] De Vries, D A. Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media[J]. Trans Am. Geophys Union, 1958, 39: 909- 916.
- [17] Jackson, R D. On the calculation of hydraulic conductivity[J]. Soil Sci Am. Proc. 1972, 36: 380- 382.
- [18] Milly, P C D. Moisture and heat transport in hysteric, inhomogeneous porous media: A matric head-based formulation and a numerical model[J]. Water Res Res, 1982, 18: 489- 498.
- [19] Assouline S, Tessier D. A conceptual model of the soil water retention curve[J]. Water Res Res, 1998, 34(2): 223- 231.
- [20] Panjit Kumar Ghosh. Estimation of soil moisture characteristics from mechanical properties of soil[J]. Soil Sci, 1979, 130(2): 60- 63.
- [21] Campbell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data[J]. Soil Sci, 1974, 117: 311- 314.
- [22] Cosby B J, Hornberger G M, Clapp R B, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils[J]. Water Res Res, 1984, 20: 682- 690.
- [23] Williams J, Prebble R E, Williams W T, et al. The influence of texture, structure, and clay mineralogy on the soil moisture characteristic[J]. Aus J. Soil Res, 1983, 21: 15- 32.
- [24] Milly P C D. Estimation of the Brooks- Corey parameters from water retention data[J]. Water Resour Res, 1987, 23: 1085- 1089.
- [25] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of soil water: I Redistribution[J]. Water Resour Res, 1970a, 6: 851- 861.
- [26] Van Genuchten M Th. A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci Soc Am. J., 1980, 44: 892- 898.
- [27] Russo D. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: on the selection of a model for the hydraulic properties[J]. Water Resour Res, 1988, 24: 453- 459.
- [28] 杨邦杰, 隋红建. 土壤水热运动模型及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1997: 2- 72.
- [29] 方正三, 朱成琪, 王伟康. 甘肃民勤沙地水分初步研究[A]. 见: 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)[C]. 北京: 科学出版社, 1962.
- [30] 江爱良, 陈建绥. 降水对沙地水分影响的初步观测[A]. 见: 中国科学院治沙部. 治沙研究, 第4号[C]. 北京: 科学出版社, 1962: 255- 265.
- [31] 陈荷生, 康跃虎, 等. 腾格里沙漠沙坡头地区植物生长与水分平衡的初步研究[J]. 中国沙漠, 1991, 11(2): 1- 10.
- [32] 钱鞠, 马金珠, 等. 腾格里沙漠西南缘固定沙丘水分动态与水分势能变化特征研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1999, 35(1): 218- 224.

- [33] 刘元波, 陈荷生, 高前兆, 等. 田间测定沙地水分运动参数初步研究[J]. 中国沙漠, 1996, 16(1): 19- 23
- [34] 冯起, 高前兆. 禹城沙地水分动态规律及其影响因子[J]. 中国沙漠, 1995, 15(2): 153- 157
- [35] 张国盛, 王林和, 等. 毛乌素沙区风沙土机械组成及含水率的季节变化[J]. 中国沙漠, 1999, 19(2): 145- 150
- [36] 蒲庸昌, 韩天宝. 固定沙地的水分状况与沙地造林[J]. 内蒙古林业科技, 1997, 2: 28- 32
- [37] 冯起, 程国栋. 我国沙地水分分布状况及其意义[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 225- 236
- [38] 陈有君, 关世英, 李绍良, 等. 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
- [39] 王兵, 崔向慧, 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): 143- 149.
- [40] 李爱德, 王耀林, 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
- [41] 刘元波, 陈荷生, 等. 沙地降水入渗水分动态[J]. 中国沙漠, 1995, 15(2): 143- 150
- [42] 康绍忠, 等. 积水入渗条件下土壤水分动态变化的野外观测与分析[J]. 水土保持通报, 1997, 17(1): 7- 12
- [43] 杨文智, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 68- 69
- [44] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程及其恢复机理[M]. 北京: 海洋出版社, 2003. 202- 205
- [45] 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.
- [46] 王新平, 张利平, 等. 干旱沙区陆面蒸散量与土壤水分关系的数值计算[J]. 中国沙漠, 1996, 16(1): 388- 391
- [47] 李千红, 小林哲夫. 中国毛乌素沙漠的砂丘的砂蒸发特性[J]. (日)农业气象, 1989, 44(4): 301- 305
- [48] 冯起, 高前兆. 沙地水分的研究进展[J]. 中国沙漠, 1992, 13(2): 9- 13
- [49] (苏)H. Ф. 库利克. 干旱地区沙地水分状况与水分平衡[M]. 赵兴梁译. 内蒙古林学院沙漠治理系, 1989. 35- 44
- [50] John L. Thames and Daniei D. Evans. Water in Desert Ecosystems [M]. New York: Academic Press, Dowden, Hutchinson & Ross, 1981. 10- 11.
- [51] Hillel, D. Computer Simulation of Soil Water Dynamics, A compedium of Recent Work [J]. International Development Research Center, Ttawa, Canada, 1977, 2: 195- 214
- [52] Dalding F R, G L Cuningham. The Influence of Soil Water Potential on the Perennial Vegetation of a Desert Area, Southwest [J]. Nature, 1974, 19: 241- 248
- [53] John L. Thames, Daniei D. Evans. Water in Desert Ecosystem [M]. New York: Academic Press, 1981. 10- 11.
- [54] 陈渠昌, 吴忠渤, 等. 滴灌条件下沙地土壤水分分布与运移规律[J]. 灌溉排水, 1999, 18(1): 28- 31.
- [55] 黄强, 刘玉芸, 李生秀, 等. 塔克拉玛干沙漠土壤水分运动参数的计算[J]. 干旱区地理, 2002, 25(1): 75- 78
- [56] Evans D D, Thames J L (Ed.). Water in Desert Ecosystem [M]. Dowden: Hutchinson & Ross, 1981. 223- 247.
- [57] 张继贤. 沙坡头地区风沙土的水热状况[J]. 中国沙漠, 1997, 17(2): 154- 158
- [58] 张称意, 史绣华, 张衡. 羊柴林沙地水分状况及其动态变化的研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1997, 28(4): 563- 567.
- [59] 赵文智. 科尔沁沙地人工植被对土壤水分异质性的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 113- 119
- [60] Liang J, Zhang J, Wong M H. Canstomatal closure caused by xylem ABA explain the inhibition of leaf photosynthesis under soil drying [J]. Photosyn. Res., 1997, 51: 149- 159
- [61] 李玉山. 土壤——水分关系及其调节[A]. 见: 朱显谟. 黄土高原土壤与农业[M]. 北京: 农业出版社, 1989. 342- 365
- [62] 杨文斌. 梭梭抗旱生理生态水分关系的研究[J]. 生态学报, 1991, 11(4): 23- 27.
- [63] 吴林, 李亚东, 刘洪章. 水分逆境对沙棘生长和叶片光合作用的影响[J]. 吉林农业大学学报, 1996, 18(4): 45- 49
- [64] 李洪建, 王孟本, 等. 黄土区4个树种水势特征的研究[J]. 植物研究, 2001, 21(1): 100- 105
- [65] 冯金朝, 周宜君, 等. 沙冬青对土壤水分变化的生理响应[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 223- 226
- [66] 杨建伟, 韩蕊莲, 等. 不同土壤水分状况对杨树和沙棘水分关系及生长的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(3): 579- 586
- [67] 李丽霞, 梁宗锁, 等. 土壤干旱对沙棘苗木生长及水分利用的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(2): 296- 302
- [68] 黄振英, 董学军, 等. 沙柳光合作用和蒸腾作用日动态变化的初步研究[J]. 西北植物学报, 2002, 22(4): 817- 823
- [69] 庄季屏. 四十年来的中国土壤水分研究[J]. 土壤学报, 1989, 26(3): 241- 248
- [70] 刘元波, 陈荷生, 高前兆. 沙地水分动力学研究新视角[J]. 中国沙漠, 1997, 17(1): 95- 98
- [71] 卢振民, 林贤超, 陈纪卫. 土壤—作物—大气系统(SPAC)水流动态模拟与实验研究. III 综合模型与模拟研究[A]. 谢贤群, 等. 作物与水分关系研究[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 323- 358
- [72] 陈洪松, 邵明安. 中子仪标定及其在坡地土壤水分测量中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 68- 71.
- [73] Noborio K, McInnes K J, Heilman J L. Measurements of cumulative infiltration and wetting front location by time domain reflectometry [J]. Soil Sci., 1996, 161(8): 480- 483