

土壤水分动态随机模型研究进展

胡 健, 吕一河

(中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘 要:土壤水是地球表层系统的重要组成,是水文循环的核心,控制着最基本的陆地生态系统格局与过程,是陆地生态系统健康运行的关键。土壤水分动态是研究水文过程和陆地生态系统过程相互作用及反馈必不可少的一环,是一系列水文、气候和生态过程非线性动态作用的结果。因此,土壤水分动态表现为脉动、无规律和随机的过程,对其研究需要随机方法。本文综述了基于土壤水分平衡的土壤水分动态随机模拟的研究进展,主要关注土壤水分动态随机模型分类比较和适用性。希望能为国内生态水文学的定量研究提供一些参考,促进对水文循环与陆地生态系统之间相互作用更好的理解,最终有助于水资源和生态系统的可持续管理。

关 键 词:陆地生态系统;生态水文;土壤水分平衡;土壤水分动态;随机模拟;研究进展

1 引言

土壤水分一直是生态水文学和自然地理学的重要议题,也是促进多学科交叉综合研究的重要环节(Rodriguez-Iturbe, 2000; Porporato et al, 2002; Zalewski, 2002)。生态水文学主要是研究水文循环与生态系统相互作用的科学,是一门交叉学科,而非多学科简单的综合,其中心主题是水文对生态系统格局、多样性、结构和功能的影响,并伴随着生态系统对水文循环与过程的反馈,涉及陆地与水生生态系统和人类与环境关系的管理(水资源问题)(Newman et al, 2006; Smettem, 2008)。

土壤水是地球表层系统的重要组成和水文循环的核心,控制着最基本的陆地生态系统格局与过程,是陆地生态系统健康运行的关键,即水文和生态过程的关键(D'Odorico et al, 2010; Legates et al, 2010)。水文过程对生态系统的影响主要是由土壤水分动态决定的,土壤水分动态通过对植被水分胁迫的发生、强度和历时的影响,决定着气孔导度、光合作用和生态系统的净初级生产力(Rodriguez-Iturbe et al, 2004),而且土壤水分含量影响着土壤微生物活动、植物N生产和N吸收,从而控制着N循

环和植物N的可获得性(D'Odorico et al, 2003, 2005)。在气候—土壤—植被动态系统(Climatic-Soil-Vegetation Dynamics System)中,土壤水分动态受一系列水文、气候(大气)和生态过程影响,如降雨、林冠截留、地表入渗、深层渗漏和植被水分利用(蒸散发,ET)等(Rodriguez-Iturbe et al, 2004)。而在土壤—植被—大气连续体(Soil-Plant-Atmosphere Continuum, SPAC)中,土壤水分是研究大尺度陆地表面过程与大气系统相互作用(Land-Atmosphere Interaction)的重要组分,土壤水分通过对冠层导度的影响调节植被景观到陆地表层大气的水汽通量,对大气湿度和大气边界层有强烈的作用,最终反馈于降水格局和水循环,同时受气候系统的影响,形成反馈环,特别是植被与水(Asbjornsen et al, 2011; Ellison et al, 2012; Orellana et al, 2012)、植被与气候(Bonan, 2008)、土壤水分与气候(D'Odorico et al, 2004; Legates et al, 2010; Seneviratne et al, 2010)间的反馈关系最为显著。

土壤水分动态是研究水文过程和陆地生态系统相互作用及反馈必不可少的一环,是气候、土壤性质、地形和植被类型等因素非线性作用的结果,所以对其分析表现出高度复杂性。这种复杂性主

收稿日期:2014-12;修订日期:2015-02。

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAC08B01)。

作者简介:胡健(1990-),男,四川简阳人,硕士生,主要从事景观格局与过程及生态水文研究,E-mail: jianhu_st@rcees.ac.cn。

引用格式:胡健,吕一河. 2015. 土壤水分动态随机模型研究进展[J]. 地理科学进展, 34(3): 389-400. [Hu J, Lü Y H. 2015. Research progress on stochastic soil moisture dynamic model[J]. Progress in Geography, 34(3): 389-400.]. DOI: 10.11820/dlkxjz.2015.03.014

要因为:①土壤水分格局与植被动态密切联系在一起,如植物根系吸水受土壤水分波动的影响,也是产生这种波动的主要驱动因素;②气候、土壤性质、地形和植被类型对土壤水分动态作用表现出强烈的非线性;③降水是土壤水分平衡主要驱动力,表现为脉冲的、无规律的随机事件,是生态水文系统的随机输入项,气候变化加剧了不确定性、随机性和不可预测性(Noy-Meir, 1973; D'Odorico et al, 2010)。因此,在气候、土壤和植被非线性系统作用下的土壤水分动态也表现为随机脉动特征,需要对土壤水分平衡进行随机描述,即土壤水分动态随机模拟(Eagleson, 2004; Rodriguez-Iturbe et al, 2004)。

自从Eagleson将随机理念引入生态水文学的定量研究,基于土壤水分平衡的土壤水分动态随机模拟得到了很大发展,并应用到生态水文研究的各个方面,特别值得一提的是Eagleson在2002出版的专著《Ecohydrology: darwinian expression of vegetation form and function》,将牛顿原理的物理简化思想与达尔文物种进化思想结合,提出生物气候最优原则;以及Rodriguez-Iturbe和Porporato在2004年出版的《Ecohydrology of water-controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics》一书,对水分限制区生态系统的土壤水分动态随机模拟的研究与应用进行了总结(Eagleson, 1978a, 1978b, 2004; Rodriguez-Iturbe et al, 2004; D'Odorico et al, 2010)。本文对土壤水分动态随机模型研究进展进行综述,梳理国内外随机模型发展过程,并比较各类随机模型的差异。希望对国内生态水文学的定量研究提供参考,深化对水文循环与陆地生态系统之间相互作用的理解,最终有助于水资源和生态系统可持续管理。

2 国内外土壤水分动态随机模型发展过程

2.1 国外发展过程

由于降雨作为生态系统的输入项,表现为间断的、无规律的随机事件,所以对于生态水文过程的研究需要考虑这种随机特性,特别是土壤水分研究(Noy-Meir, 1973; Rodriguez-Iturbe, 2000)。Eagleson (1978b)最早将降雨随机特性纳入土壤水分动态模型中,建立了随机动力学水平平衡模型。Milly(1993)对随机土壤水分动态建立了随机模型,特别是在

Milly模型中用一组非常简约的方程描述小时间尺度上的土壤水分平衡,但Milly的模型没有考虑蒸散发对土壤湿度的依赖,因而不能用于评价土壤水分动态对植被状态的影响。Rodriguez-Iturbe等(1999)和Laio等(2001)提出蒸散发是土壤水分的函数和深层渗漏与土壤水分呈非线性关系,通过该模型可以获得以气候、土壤、植被特征为参数的稳定状态土壤湿度概率密度函数,但未考虑土壤水分垂直分布差异和地形的作用(水平流和超渗产流)。Ridolfi等(2003)对Rodriguez-Iturbe和Laio土壤水分动态随机模型作了进一步发展,考虑地形因素对土壤水分动态的影响,研究地下非饱和边界水流及其与气候、土壤和坡地特征之间的关系,但未对地下水和产流方式对土壤水分平衡的作用机制进行描述。2005年之前土壤水分动态的随机模型,都是将降水作为随机变量,对单一土壤层的土壤水分动态进行随机模拟,并没有详细描述土壤水分在垂直方向的变化。而Laio(2006)则根据土壤水分沿土壤剖面垂直分布,构建了一个简化的土壤水分在不同深度时间动态的概率分析框架。

以往生态水文学的研究主要集中于干旱区,特别是土壤水分动态随机模拟,并没有考虑地下水或深根植物利用深层土壤水分的作用(Wilcox et al, 2005)。Rodriguez-Iturbe等(2007)提出了生态水文学在湿润地区特别是有浅层地下水作用的生态系统研究的挑战和机遇,指出该类生态系统的土壤水分动态随机模拟需要充分认识地下水位波动作用,以及利用浅层地下水植物类群的根分布特征及生理生态等关键科学问题。土壤水与地下水的相互作用早在1978年就已得到研究,并且Ridolfi等(2008)发展了结合土壤水—潜水位动态的随机模型,但是并未考虑地面植被对土壤水分平衡的作用,以致影响土壤水分动态的随机模拟的准确性。地下水位对浅层地下水位和利用深根区土壤水分植被有着重要的作用(Nepstad et al, 1994; Rodriguez-Iturbe et al, 2007), Laio等(2009)和Tamea等(2009)在湿润区环境中将植被、浅层地下水、根水吸收和毛管通量对土壤水分动态的机制纳入模型,对水位和土壤水分动态分别进行了随机模拟。至此,基于土壤水分平衡的土壤水分动态随机模型从仅在干旱区对单层土壤水分动态的随机模拟,发展到考虑土壤水分垂直剖面差异与植物根垂直分布联系的模型,再到湿润地区考虑地下水位作用的模

型;已经从干旱区生态系统拓展到了有浅层地下水作用的湿润生态系统的土壤水分动态随机模拟;不仅使模型中对土壤水分平衡各组成的描述更为详细,而且模型适用范围更广。下文将模型分为三类进行比较。

2.2 国内发展过程

在气候、土壤和植被作用下的土壤水分动态随机模拟,需要基于过程和概率密度函数的形式对其随机特性进行描述才有意义(Rodriguez-Iturbe et al, 2004)。杨大文等(2008)和刘鹄等(2006b)分别对《生态水文学》和《Ecohydrology of water-controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics》这两本书的内容,及其在生态水文学定量研究中的贡献进行了介绍,并推荐作为生态水文学研究重要的参考书。基于土壤水分平衡的土壤水分动态的随机模拟也逐渐得到国内的重视。早期学者康绍忠(1990)基于土壤水分观测数据,用数学理论对土壤水分数据进行了随机模拟,黄冠华等(1997a, 1997b)以一维水平向具有空间变异而垂直向为均质二维非饱和流动中的均匀入渗问题为例,运用Monte Carlo随机模拟方法分析了土壤水分变量的随机统计特性及其一、二阶矩的时空分布规律。但是这些都不是基于生态水文过程的模拟。国内基于生态水文过程的随机模拟,最早由黄明斌等(2000a, 2000b)在Eagleson(1978a)随机动力学水平平衡模型的基础上,改进了原模型中蒸腾、蒸发量等项的计算方法,并在黄土高原特殊的生态水文系统进行了应用。刘鹄等(2007)、彭万杰等(2009)和王改改等(2009)应用Laio土壤水分动态随机模型,分别研究了祁连山浅山区草地、重庆铜梁地区和四川盆地丘陵区生长季土壤水分动态与土壤湿度概率密度函数特征,讨论了该模型在各研究区的适用性;黄磊等(2013)用Rodriguez-Iturbe土壤水分动态随机模型,模拟了沙坡头人工植被区生长季土壤水分动态与土壤湿度概率密度函数特征,讨论该模型在沙坡头地区的适用性。Pan等(2011, 2013)将土壤水分动态随机模型应用于农业灌溉地区,评估了中国东北平原灌溉地区土壤湿度的概率分布及小麦水分胁迫状况,并在坡面尺度上,结合非线性降雨—径流理论和土壤水平衡概率模拟,描述了径流作为降雨深度和径流系数的函数,发展了土壤水分概率密度函数坡面尺度的解析解和平均水分平衡。通过上述国内研究状况可知,研究大部分基于早期的“木桶”模型,进行点

尺度土壤水分动态随机模拟并探讨其适用性,对后两类模型关注很少;同时将这些模型应用于土壤水分动态与植物胁迫及植被格局的研究较少,也未用于探讨水文过程与生态系统功能,如土壤水分动态与生态系统碳氮循环。

3 土壤水分平衡

土壤水分平衡方程是水文学的基础方程,通常是研究土壤水分动态的基石,研究水文过程与生态过程相互作用的桥梁,以及大尺度陆地表面与大气过程的关键。土壤水分动态主要取决于土壤水分平衡的输入和输出项,即降雨入渗、蒸散发(ET)和泄流。土壤水分动态模拟的复杂程度主要取决于对各生态水文过程和多个土壤层进行描述的详细程度(D'Odorico et al, 2006)。根区土壤水分含量是水文循环必不可少的组成部分,也是陆地生态系统健康运行的关键(D'Odorico et al, 2010; Legates et al, 2010)。

水文循环的基础方程可以描述为(Legates et al, 2010):

$$nz_r \frac{ds}{dt} = (P + M) - (E + T) - (R_o + R_L + R_g) \quad (1)$$

式中: n 为孔隙率/%, Z_r 为土壤活动层深度/mm, s 为土壤体积含水量(取值0~1)。土壤含水量随时间(t)的变化由来自降雨(P)和融雪(M)的水分输入和通过土壤蒸发(E)、植物蒸腾(T)、蓄满或者超渗产流方式产生的地表径流(R_o)、侧向壤中流(R_L)和深层渗漏补给地下水(R_g)的水分损失过程来平衡。一般来讲,土壤水分含量是植物水分可得性的时间条件,可提供水分供给与水分需求相对状态的整体评价。通过土壤水分收支和表面能量平衡的结合,农学家、农业气象学家、水文气象学家和生态水文学家已经发展了大量模型用于计算土壤水分含量和蒸散量。D'Odorico等(2006)根据土壤水分平衡中气候、土壤、植被和地下水过程量化描述的详细程度,对土壤水分模型进行了简单分类。降雨与蒸散发等气象因素的不确定性,决定了土壤水分含量变化的随机性。基于土壤水分平衡的土壤水分动态随机模拟,现有的大量模型多将降雨和蒸散发作为随机因素,特别是以降雨为随机因素的模型居多。这些研究可以分为两类:一类是将降雨作为随机因素纳入到根区土壤水分平衡方程,而蒸散发被视为确

定性变量(Milly, 1993, 2001; Rodriguez-Iturbe et al, 2004; Laio, 2006; Laio et al, 2009; Tamea et al, 2009);另一类是在降雨波动不强烈,而其他气候因素随机性显著的地区,可能将降雨视为确定性变量,而蒸散发视为随机因素(Aboitiz et al, 1986; Or et al, 1994; Luo et al, 2007)。上述两大类模型中视降雨为随机因素的模型适用范围广,且发展成熟;视蒸散发为随机因素的模型适用于冬季降雨少,而蒸散发起主要作用的是农业系统。本文则主要介绍以降雨为随机因素的模型为主。

4 土壤水分动态随机模型比较

以降雨为随机过程,根据土壤水分动态随机模型对气候、土壤和植被相关的生态水文过程描述的详细程度和模型的适用性,将其分为三类:第I类——“木桶”模型(“Bucket models”),描述日尺度根区平均土壤水分平衡;第II类——垂直分层模型(Vertically distributed models),描述土壤水分沿土壤剖面垂直分布,不考虑浅层地下水作用;第III类——地下水补给模型(Water table recharge model),湿润环境下考虑浅层地下水通过毛管作用对土壤水分动态的影响。这三类模型对各生态水文过程描述的类型见表1。以下基于土壤水分平衡和各生态水文过程描述的详细程度、差异和假设不同,比较上述三类土壤水分动态随机模拟模型。

4.1 “木桶”模型(Bucket models)

“木桶”模型,是描述生长季植被根区日尺度垂直平均水平衡的模型,强调土壤水分随时间的动态变化,以及与水平衡相关的生态水文过程随时间或者土壤水分的动态变化,代表性模型为Rodriguez-Iturbe和Laio土壤水分动态随机模型(Rodriguez-Iturbe et al, 1999; Laio et al, 2001; Rodriguez-Iturbe et al, 2004)。该类模型假设:①降雨发生形式为显著的泊松过程;②土壤水分在根区垂直方向均匀,即土壤层考虑为根区单层模型;③忽略地形因素对土壤水分平衡的影响,即忽略水平侧向流的作用;④不考虑根区土壤水分与潜水位动态的相互作用;⑤土壤水分损失与土壤水分含量有关。因此,这类模型适用于地形平坦和干旱、半干旱地区生长季的土壤水分动态模拟(表1)。根据质量平衡原理,点尺度单位时间内土壤含水率的变化等于土壤水分输入项和水分损失项的差。“木桶”模型中土壤水分平衡通用表达式为:

$$nz_r \frac{ds(t)}{dt} = \phi[s(t), t] - \chi[s(t)] \quad (2)$$

式中: n 为孔隙率/%; Z_r 为土壤活动层深度/mm; t 为时间, $s(t)$ 为时刻 t 的土壤相对含水量(取值0~1); $\phi[s(t), t]$ 是来自降雨的入渗率; $\chi[s(t)]$ 为根区土壤水分损失。

输入项:

$$\phi[s(t), t] = R(t) - I(t) - Q[s(t), t] \quad (3)$$

式中: $R(t)$ 是降雨(Rainfall), $I(t)$ 是植被截留损失的降雨量(Interception), $Q[s(t), t]$ 是径流率(Runoff)。

损失项:

$$\chi[s(t)] = E[s(t)] + L[s(t)] \quad (4)$$

式中: $E[s(t)]$ 和 $L[s(t)]$ 分别为蒸散率(Evapotranspiration)和泄流率(Leakage)。

方程(2)是基于状态变量 $s(t)$ 的普通随机差分方程,土壤水分是随时间变化的变量,土壤水分平衡方程主要组成的机制描述如图1。关于Rodriguez-Iturbe和Laio模型与其他两类模型比较见表1。在不同气候、土壤和植被条件下,为反映降雨随机性对土壤水平衡过程的长期影响机制,该类土壤水分随机模型将降雨视作一个随机过程,服从泊松分布,其中蒸散发、径流等则是确定的解析解,用来描述土壤水分动态的长期统计特性,而不仅仅局限于已有的有限降雨数据(Noy-Meir, 1973; Laio et al, 2001)。而传统的土壤水平衡模型则认为仅在观测降雨数据的基础上才可以有解析解,解出同降雨序列对应的土壤水分动态的解(康绍忠, 1990; 申双和等, 1993)。

由于驱动因素降雨是以泊松过程描述,方程(2)是随机差分方程,其解只有以概率形式才有意义,可通过基于过程的Chapman-Kolmogorov进化方程求解出土壤湿度概率密度函数(Soil Moisture Probability Density Function)。该函数的物理意义是指长期土壤水分动态变化过程中土壤湿度取某一值的密集程度,与植物水分胁迫有关(Porporato et al, 2001; Rodriguez-Iturbe et al, 2004)。Laio等(2001)对Rodriguez-Iturbe模型中蒸散发项的改进,深化了蒸发和蒸腾生理生态意义的理解(表1)。过去几年中,国内学者刘鹤等(2006a)总结了不同气候、土壤和植被对土壤湿度概率密度函数的影响,潘兴瑶等(2008)探讨了土壤水分动态随机模拟在土壤水分平衡研究中的应用,但仍局限于单层匀质土壤水分动态的随机模拟。

表1 三类基于土壤水分平衡的土壤水分动态随机模型比较及地下水位的影响

Tab.1 Comparison of three types of stochastic soil moisture dynamics model based on water balance equation and the effect of water table

生态水文过程	I类“木桶”模型		II类垂直分布模型		III类地下水补给模型		
	Rodriguez-Iturbe等(1999)	Laio等(2001)	Laio(2006)	Laio等(2009), Tamea等(2009)			
				S	HM	LM	
土壤层数	单层均匀	单层均匀	多层	单层	多层	多层	
降雨	泊松过程	泊松过程	泊松过程	—	—	泊松过程	
植被截留	固定阈值	固定阈值	固定阈值	—	—	固定阈值	
蒸散发	s^*, s_l 决定	s_h, s_w, s^*, s_{fc} 决定	根密度决定, 不考虑蒸发	根密度决定	根密度决定	根密度决定和水分胁迫功能, 不考虑蒸发	
土壤厚度	有限土壤厚度	根区土壤厚度	根区土壤厚度	饱和含水率深度	$s_{fc} < s < 1$ 区域	$s < s_{fc}$ 区域	
地表入渗	显著泊松过程	显著泊松过程	显著泊松过程	—	LM与HM边界不存在水分交换	显著泊松过程	
地表径流	蓄满产流	蓄满产流	超渗产流	—	—	超渗产流	
地下水位	—	—	—	S与HM交界面的随机波动	受水位影响	不受水位影响	
适用性	干旱生态系统	干旱生态系统	干旱生态系统	湿润生态系统(有地下水作用)			
地下水补给	—	—	—	降低潜水位	毛管提升作用 HM水分增加	—	
水分再分布	—	—	—	提升潜水位	LM补给增加HM含水量	土壤水分衰减	
水平流	—	—	—	潜水位波动	受水位影响	不受水位影响	

注:“—”表示模型中没有表述或者考虑。假设植物气孔主要受土壤水分的控制, s^* 气孔开始关闭点的土壤含水量, s_w 为气孔完全关闭点的土壤含水量, s_h 为土壤水分蒸发开始点的土壤含水量, s_{fc} 为田间持水量决定着蓄满产流的土壤含水量, s_l 为地表径流产生某一阈值的土壤含水量,这些土壤水分状态影响植物蒸腾作用和地面蒸发,决定土壤水分动态。LM、HM和S含义见图2和4.3节。

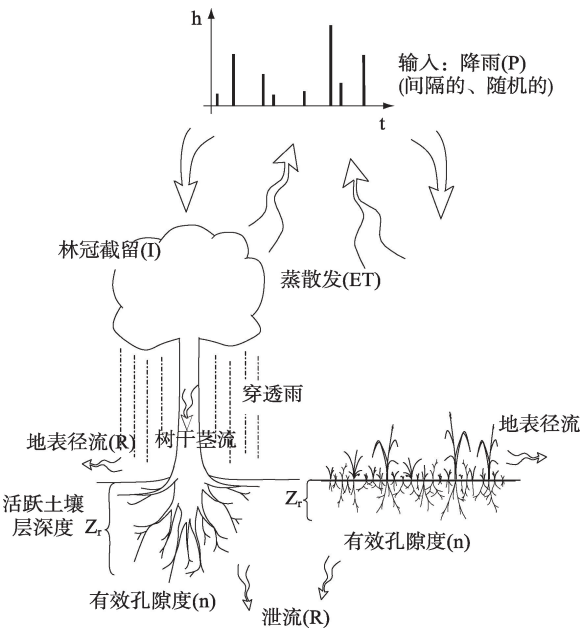


图1 不同植被类型作用下土壤水分平衡的多种机制 (引自 Laio et al, 2001)

Fig.1 Schematic representation of the various mechanisms of soil water balance with emphasis on the role of different functional vegetation types (from Laio et al, 2001)

4.2 垂直分布模型(Vertically distributed models)

垂直分布模型提供了对土壤水分在垂直方向上不同深度时间动态的简单概率分析框架,土壤水分动态随机描述的时间尺度为日尺度,概率模型的解析解(土壤湿度稳定状态的概率密度函数)是建立在简单但现实的假设基础之上,是沿土壤剖面的一维土壤水分动态模拟,以Laio土壤水分动态随机模型为代表(Laio, 2006)。该模型假设:①降雨发生形式为显著的泊松过程;②地形平坦,忽略水平流(Lateral flow)作用;③不存在土壤水分与地下水位(Water table)之间的相互作用,地下水位较深;④日尺度降雨入参与再分布瞬时发生,作为活塞流(Piston flow),即水分瞬间入渗表面,使土壤水分从原始值增至田间持水量值(s_{fc});⑤植物蒸腾作用与土壤各层的根密度有关,忽略土壤蒸发;⑥土壤为匀质、并无深度限制;⑦在生长季,根的分布和最大蒸腾率为常数,即在任意深度 z 时,土壤薄层的土壤水分损失只与该深度的植物根密度有关,不受相邻层土壤水分的影响;⑧任一深度的湿润事件发生作为泊松过程,不随时间而变化。因此,此类模型适用于平坦、

无地下水作用和水分限制区(干旱、半干旱和半湿润地区)生态系统的土壤水分动态随机模拟(表1)。

在上述假设下,位于土壤深度 z 时无限小的薄层(dz)的水平土壤水分平衡可以表达为如下方程(Guswa et al, 2004; Laio, 2006):

$$n \frac{\partial s(z,t)}{\partial t} = - \frac{\partial q(s,z,t)}{\partial z} - U(s,z) \quad (5)$$

式中: n 物理意义与上述方程一致; $s(z,t)$ 是土壤深度为 z 和 t 时刻的土壤水分含量; $q(s,z,t)$ 是垂直水分通量; $U(s,z)$ 描述的是非时间维的每单位的土壤薄层植物吸水量。

当边界层条件在陆地表面($z=0$)时,表面水分收入通量 $q(s,z,t)$ 等于净降雨率 $R(t)$ (降雨入渗地面的部分),而净降雨率可以由总降雨率 $TR(t)$ 、植被截留 $I(t)$ 和地表径流 $SR(t)$ 计算,方程如下:

$$q(s,z=0,t) = R(t) = TR(t) - I(t) - SR(s,t) \quad (6)$$

当土壤水分再分布瞬时完成、缺少降雨输入和忽略土壤蒸发时,土壤水分改变仅依赖于植物根吸收(Feddes et al, 2001):

$$U(s,z) = T_p r(z) \rho(s) \quad (7)$$

式中: T_p 是来自根区潜在蒸腾率; $r(z)$ 为根密度函数,与深度呈反相关; $\rho(s)$ 为水分胁迫衰减指数。

这类模型与“木桶”模型中Laio等(2001)对降雨作为泊松过程和同时发生的活塞流的假设是一致的,与“木桶”模型的主要差异在于土壤层和蒸散发项,前者当 $s^* < s < 1$ 时,日蒸散发损失为常数,即最大蒸散(E_{\max});当 $s_w < s < s^*$ 时,日蒸散发损失随土壤水分线性减少,最小为 E_w (当 $s=s_w$);当 $s_h < s < s_w$ 时,只有蒸散发项从 E_w 线性减少到0;当 $0 < s < s_h$ 时,蒸散为0(表1)。而后两类模型的蒸散发项是土壤层中植被根密度的函数。其详细比较见表1。垂直模型提供了研究土壤水分剖面分布的工具,以概率的形式表述土壤水分剖面特征,能够得到长期土壤水分平衡下的垂直剖面特征。Laio等(2006)利用垂直分布模型研究了长期土壤水分剖面分布特征与土壤根系生物量垂直分布的关系,以及气候变化和土壤性质对这两者关系的影响机制,将土壤水分剖面特征与根剖面特征结合,对气候和土壤属性影响根剖面特征进行了理论解释。

4.3 地下水补给模型(Water table recharge model)

“木桶”模型和垂直分布模型由于没有考虑地下水与土壤水分动态的相互作用,最终影响土壤水分平衡方程的描述。而在具有浅层地下水的环境

下,地下水在根区的土壤水分平衡中起着重要作用(Tamea et al, 2009)。

地下水补给模型是结合地下水位深度随机模型与垂直分布模型的一类综合模型。该类模型水分再分配和地下水补给过程依赖于土壤水分状况,植物根对浅层地下水和非饱和带土壤水分的吸收,以及地下水通过毛管流(Capillary flux)作用产生的上升水流对土壤水分平衡的影响(表1)。模型假设:①土壤柱体垂直方向从土表到无限深;②土壤水力特性如有效孔隙度、颗粒大小分布和饱和水力传导度,在空间上均匀,并不随时间变化;③水平方向为点尺度的平坦区域,不存在地形梯度和局部异质性;④植物根生物量沿土壤剖面垂直分布呈指数函数,并且根区垂直分布是不随时间变化的常量,不考虑根生物量生长和再分布;⑤日尺度土壤剖面水分再分配瞬时完成;⑥忽略由于植物根的作用使水分在非饱和带高水分区(HM)与非饱和带低水分区(LM)的再分布;⑦土壤垂直方向根据土壤水分饱和程度分三个区域,分别为饱和区(S)——土壤达到饱和($s=1$),非饱和带高水分区($s_{ic} < s < 1$)(HM)——该区控制着降雨入渗、再分配、植物根吸水和来自该层以下饱和区的毛管通量来影响土壤水分平衡,非饱和带低水分区($s < s_{ic}$)(LM)——水分含量低,水力传导性忽略,上升的毛管通量不能到达这一层,该层的下边界为地下水与土壤水分作用的上限(图2)(Rodriguez- Iturbe et al, 2007; Laio et al, 2009; Tamea et al, 2009)。因此,该类模型适用于具有浅层地下水位、平坦和土壤质地均匀地区的土壤水分动态的随机模拟。从地下水补给模型的基本假设来看,该类模型一方面需要考虑地下水位的变化规律,即地下水位的随机模拟,另一方面土壤垂直剖面的水分动态与地下水位的相互作用需要分别从饱和区、非饱和带高水分区和低水分区进行土壤水分动态的随机模拟。

该模型考虑地下水作用的水流模式(图2),地下水位通过毛管作用对土壤水分平衡的作用与地下水位动态密切相关。地下水位动态的随机模拟,分为两种情况:一种是浅层地下水位条件(SWT),当土壤饱和层与非饱和层边界深度(y)比关键深度 y_c (土壤水分含量为田间持水量的深度)浅时,即 $y > y_c$,地下水位接近土壤表面,在表面($z=0$)的土壤水分含量超过了田间持水量(s_{ic}),根据假设⑦,即没有LM层,关键深度 y_c 参照Laio等(2009)计算;另一种是深层

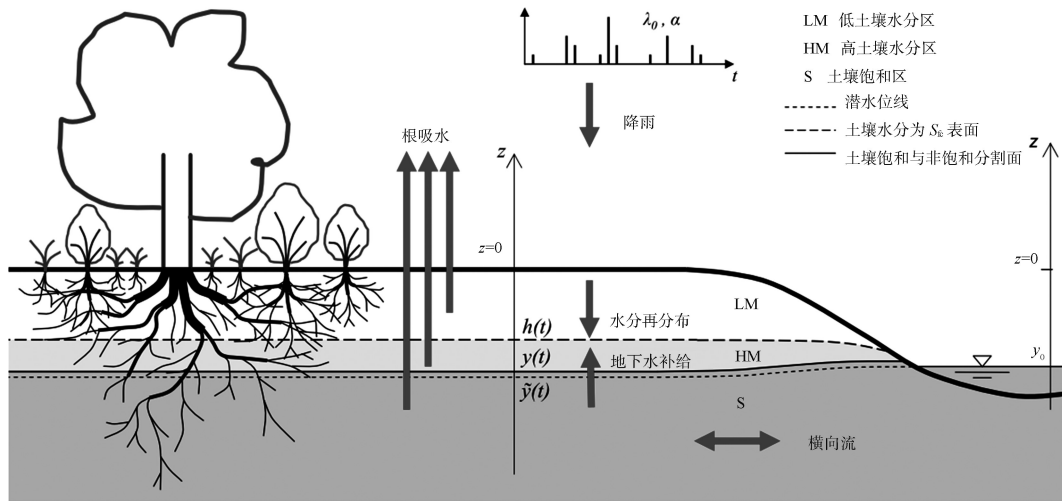


图2 考虑地下水与土壤水作用的水流模式(引自 Laio et al, 2009)

Fig.2 Scheme of the water fluxes in the soil column considering interactions between soil water content and water table
(from Laio et al, 2009)

地下水位条件(DWT),当 $y < y_c$,此时HM与LM边界层深度 h 是关于 y 的函数,两者关系参照Laio等(2009)。在没有降雨输入的土壤干化过程中,由于 y 和 h 的随机波动,特殊层的土壤水分动态随时间变化的四种状态,分别为完全饱和状态($s=1, t=t_0$)、高水分状态土壤水分动态由 y 决定($s > s_{fc}, t=t_1$)、高低水分过渡($s=s_{fc}, t=t_2$)和低水分状态($s < s_c, t=t_3$),亦即土壤水分动态不受地下水动态的影响,所以在LM和HM区域的土壤水分动态可以分别单独模拟(图3)。

4.3.1 非饱和和高水分区(HM)土壤水分动态随机模拟

根据土壤水分平衡,HM区域土壤水分梯度主要是由于来自土壤饱和区的上升毛管流使该区域的水分含量增加,以及植物根吸水运移到土壤表面使HM水分含量降低,所以HM区的水分平衡是输入项——毛管通量 $v(z)$ 与损失项——根在HM区的吸水 $U(z)$ 间的平衡,用方程(8)表达,即:

$$v(z) = U(z) \quad (8)$$

损失项——根在HM区的吸水 $U(z)$ (各符号物理意义参照方程(7)):

$$U(z) = T_p r(z) \quad (9)$$

输入项——毛管通量 $v(z)$:

$$v(z) = \begin{cases} T_p \int_z^0 r(z) dz = T_p (1 - e^{z/b}) & y \geq y_c, \text{SWT} \\ T_p \int_z^h r(z) dz = T_p (e^{h/b} - e^{z/b}) & y < y_c, \text{DWT} \end{cases} \quad (10)$$

该类模型中,将HM区稳定状态水平平衡通过达西定律描述,如下:

$$-k(s_y) \left(\frac{d\psi}{ds_y} \frac{ds_y}{dz} + 1 \right) = v(z) \quad (11)$$

式中:当 $s > s_{fc}$ 时, $s_y = s_y(z)$ 是稳定状态土壤剖面。土壤水势 ψ 和非饱和水力传导度 k 分别由方程(12)表示(Brooks et al, 1964)。

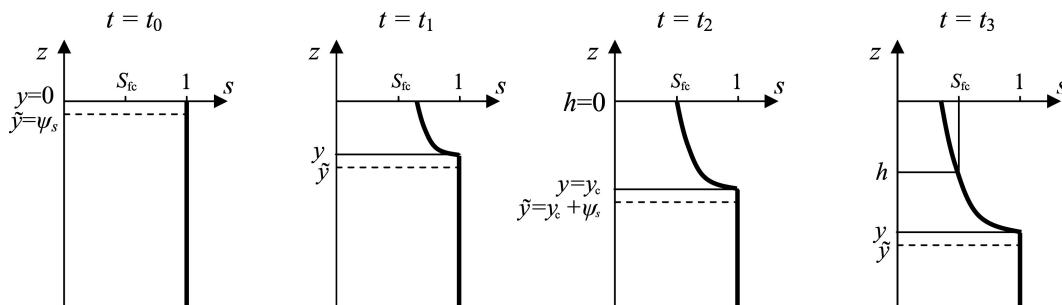


图3 在土壤干化阶段不同地下水水位位置与土壤湿度动态关系(引自 Laio et al, 2009)

Fig.3 Sketch of the water table position and soil moisture dynamics in a soil drying phase (from Laio et al, 2009)

$$\psi(s) = \psi_s s^{-1/m}; k(s) = \begin{cases} k_s s^{(2+3m)/m} & s_{fc} < s \leq 1 \\ 0 & s \leq s_{fc} \end{cases} \quad (12)$$

将方程(12)与(11)结合化简,得到关于剖面土壤水分 $s_y(z)$ 对潜水位深度 y 、土壤和植被属性依赖的差分方程(13),即描述垂直剖面的土壤水分动态方程,如下:

$$\frac{ds_y}{dz} = \frac{ms_y^{(m+1)/m} [k(s_y) + v(z)]}{\psi_s k(s_y)} \quad (13)$$

解析方程(13)需要具体的边界条件和相应土壤深度 z 的毛管通量 v 。Tamea 等(2009)通过设定一系列的边界条件,得到土壤水分剖面分布的数值解。当HM区的土壤基质势用二次函数描述时,推出HM区的土壤水分剖面的近似解,表达式如下:

$$s_y = \begin{cases} [1 + (s_{fc}^{-1/(2m)} - 1)(\frac{y-z}{y-h})]^{-2m} & y \geq y_c, \text{SWT} \\ [1 + (s_{fc}^{-1/(2m)} - 1)(\frac{y-z}{y_c})]^{-2m} & y < y_c, \text{DWT} \end{cases} \quad (14)$$

方程(10)、(12)-(14)中 b 、 m 为常数,其他参数参照前面方程。

HM区通过对正确的数值解(13)和近似解(14)在不同分割层深度 y 的模拟实例(图4),可以得出近似解的模拟效果较好,特别是深层根和细颗粒土壤质地条件,所以可以利用近似解求解土壤湿度概率密度函数,简化计算。

4.3.2 非饱和和带低水分区(LM)土壤水分动态随机模拟

由于毛管作用只能达到深度 h ,所以在LM区土壤水分动态与地下水位动态无关。因此,LM区的土壤水分动态可利用“木桶”模型与垂直分布模型结合进行模拟(Laio et al, 2001; Laio, 2006)。LM

区域基于垂直分布模型的局部水分平衡可以通过如下方程表示:

$$n \frac{\partial s'(z, t)}{\partial t} = Q(z, t) - Ulm(z, s') \quad (15)$$

式中: $s'(z, t)$ 为LM区 z 层土壤水分, $Ulm(z, s')$ 是根在深度 z 的吸收, $Q(z, t)$ 是达到 z 层的入渗量。关于各生态水文过程的详细描述参照 Tamea 等(2009),该类模型LM、HM和S区的详细比较参照表1。

4.3.3 概率密度函数

地下水补给模型土壤湿度概率密度函数与前两类模型有较大的区别,主要是因为纳入了地下水位动态的随机模拟,其与土壤垂直剖面的S、LM和HM三个层次的相互作用也是分层并随机的,所以在某一深度 z 的土壤湿度概率密度要考虑这三个层的贡献,用相对权重表示, $W_{s,i}$ ($i=1, 2, 3$) 分别对应三种状态 (Rodriguez- Iturbe et al, 1999; Laio et al, 2001; Laio, 2006; 刘 鹄 等, 2006a; Tamea et al, 2009)。这些权重由 y 和 h 的潜水位动态的随机模拟概率累计密度函数获得(Laio et al, 2009)。从而得到三种状态下的分段土壤湿度概率密度函数,表达式如下:

$$p(s|z^*) = \begin{cases} W_{s,1}(z^*) & s = 1, S \\ W_{s,2}(z^*) p_2(s|z^*) & s_{fc} \leq s(z^*) < 1, \text{HM} \\ W_{s,3}(z^*) p_3(s|z^*) & s_w \leq s(z^*) < s_{fc}, \text{LM} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $W_{s,1}(z^*)$, $W_{s,2}(z^*)$, $W_{s,3}(z^*)$ 分别是深度为 z^* 时,饱和区、LM和HM的相对权重; $p_2(s|z^*)$ 和 $p_3(s|z^*)$ 分别是HM和LM层的土壤湿度概率密度函数,详

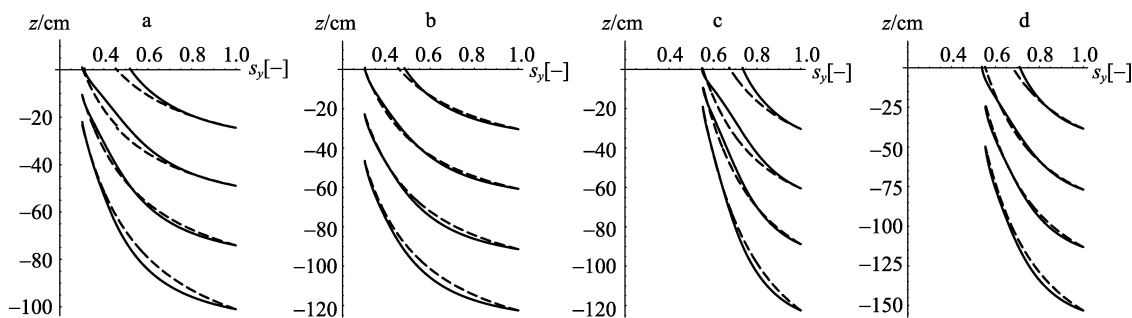


图4 浅水位与深水位条件下数值解(实线)与近似解(虚线)在HM区模拟的土壤水分剖面比较

(y 分别是 y_c 的 0.5、1、1.5 和 2 倍;图 a、b 是壤质砂土,图 c、d 是壤土;根深度 a、c 是 10 cm, b、d 是 40 cm)(引自 Laio et al, 2009)

Fig.4 Comparison between exact (solid line) numerical solution of equation (13) and approximate (dashed line) equilibrium soil moisture profiles in the high-moisture zone, for shallow and deep water table conditions ($y=0.5, 1, 1.5$ and 2 times the critical depth, y_c), in (Figs. a, b) loamy sand and (Figs. c, d) loam, with $b=10$ cm (Figs. a and c) and $b=40$ cm (Figs. b and d) (from Laio et al, 2009)

细内容参考 Tamea 等(2009)。

地下水补给模型主要将土壤垂直剖面划分为 S、LM 和 HM 三层,考虑地下水位的随机波动通过毛管作用与土壤层的 HM 层相互作用,从而影响土壤水分动态。Tamea 等(2009)利用该模型研究了不同土壤质地、气候和植被等相关参数对随机模拟的土壤湿度概率密度函数概率分布的影响、长期土壤水分剖面分布特征和根吸水的概率密度函数特征等。

5 总结与展望

自从 Eagleson(1978a)将随机理念引入生态水文学的定量研究,Rodriguez-Iturbe 和 Laio 利用随机模拟的方法,基于土壤水分平衡研究土壤水分动态,探讨气候、土壤和植被的影响,以及土壤水分动态影响干旱区生态系统过程和水文过程,包括土壤水分动态时空格局、植物水分胁迫、植被空间分布格局、生态系统氮循环与碳循环(Rodriguez-Iturbe et al, 2004)。以 Eagleson、Rodriguez-Iturbe 和 Porporato 出版的两部专著为契机,开启了生态水文学定量研究的新阶段(Eagleson, 2004; Rodriguez-Iturbe et al, 2004)。在该阶段以“木桶”模型为主,通过对土壤水分平衡的各生态水文过程差异的描述,为水文与生态过程相互作用研究提供了一种有效的理论工具。垂直分布模型与地下水补给模型,进一步丰富了对各生态水文过程的详细描述,使该类理论工具适用范围和科学性进一步提高,特别是地下水补给模型考虑了地下水的作用,将以前只适用于水分限制区的模型拓展到了湿润地区。

尽管基于土壤水分平衡的土壤水分动态随机模拟模型作为生态水文学定量研究的有效工具,得到了国内学者的关注,但在国内发展相对滞后(刘鹤等, 2006a; 潘兴瑶等, 2008)。主要是因为:一方面,国内关于此类研究大部分基于早期的木桶模型,进行点尺度土壤水分动态随机模拟,并探讨其适用性(黄明斌等, 2000a; 刘鹤等, 2007; 彭万杰等, 2009; 王改改等, 2009; 黄磊等, 2013);而对后两类模型关注不够,没有利用好这些模型研究水文过程与生态过程之间的关系,如水文过程与植被格局、生态系统功能与服务,以及大尺度陆地—大气相互作用。另一方面,这些以概率论和随机方法为基础的模型,建立在一系列假设的基础之上,同时模型结果通常以概率密度函数形式展示,并不像传统定

量方式那么直观,也限制了这些模型的应用。根据各类模型发展中存在的问题和目前生态水文学发展需求,提出几点未来研究中的努力方向:

(1) 概率密度能够说明一些总体的、普遍的状态(定性),但不能对具体生态水文过程进行定量分析,以及对极端事件进行预测,所以土壤水分动态定量模拟尚需深入研究。

(2) 点尺度土壤水分动态随机模拟是建立在一系列的简化假设基础上,一方面,某些简化假设的合理性和科学性值得探讨;另一方面,目前发展的模型并没有很好地解决复杂地形的作用、侧向流对土壤水分动态模拟的作用等问题。因此,需要细化土壤水分时间动态和空间分异格局影响因子的深入定量研究,为点尺度模型方法的时空尺度拓展提供科学机理和方法论基础。

(3) 土壤水分动态模拟中还需要强化土壤水分与植物生理生态过程动态反馈关系的机理研究,从而更好地服务于植物水分胁迫、生理生态过程以及生态水文过程驱动下的生态系统功能与服务的研究与应用。

(4) 现有的过程模型多建立在点尺度上,基于一系列气候、土壤和植被参数进行模拟,将小尺度模型参数外推到大尺度,综合考虑地形、景观空间格局以及人类干扰的作用,成为未来模型适应较大尺度复杂环境下模拟所需要突破的一大研究难点。

(5) 定量研究土壤水分的非线性动态过程在“蓝绿”水存量和流量变化中的贡献,也是进一步改善水资源可持续利用与管理关键环节,该方向的发展将面临众多创新机遇。

(6) 全球变化背景下,大尺度陆地与大气的相互作用及对水问题的解决需要多学科的交叉和集成,更需要各领域学者的合作,特别是水文学家(关心水文过程与水资源)、生态学家(关心生态系统格局与过程)和社会学家(人类健康和社会利益)的合作,从而搭建以水为核心和纽带的沟通科学与社会的桥梁。

参考文献(References)

- 黄冠华, 沈荣开. 1997a. 大尺度非饱和土壤水分运动的随机模型及有效参数的结构分析[J]. 水利学报, (11): 39-48.
[Huang G H, Shen R K. 1997a. Study on stochastic model of large-scale unsaturated flow and analysis of its effective parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, (11): 39-48.]

- 黄冠华, 沈荣开. 1997b. 非均质土壤中二维非饱和土壤水分运动的随机分析[J]. 水科学进展, 8(2): 117-122. [Huang G H, Shen R K. 1997b. Stochastic analysis of two-dimensional unsaturated flow in a heterogeneous soil[J]. *Advances in Water Science*, 8(2): 117-122.]
- 黄磊, 张志山, 陈永乐. 2013. 干旱人工固沙植被区土壤水分动态随机模拟[J]. 中国沙漠, 33(2): 568-573. [Huang L, Zhang Z S, Chen Y L. 2013. Probabilistic modeling of soil moisture dynamics in a revegetated desert area[J]. *Journal of Desert Research*, 33(2): 568-573.]
- 黄明斌, 邵明安, 李玉山. 2000a. 一个改进的随机动力学水平衡模型及其应用研究 I: 模型[J]. 水利学报, 31(6): 20-26. [Huang M B, Shao M A, Li Y S. 2000a. A modified stochastic-dynamic water balance model and its application: I. model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 6: 20-26.]
- 黄明斌, 邵明安, 李玉山. 2000b. 一个改进的随机动力学水平衡模型及其应用研究 II: 应用[J]. 水利学报, 31(6): 27-33. [Huang M B, Shao M G, Li Y S. 2000b. A modified stochastic-dynamic water balance model and its application II: model validation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 31(6): 27-33.]
- 康绍忠. 1990. 土壤水分动态的随机模拟研究[J]. 土壤学报, 27(1): 17-24. [Kang S Z. 1990. Stochastic modeling of dynamic process of soil moisture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 27(1): 17-24.]
- 刘鹄, 赵文智. 2006a. 基于土壤水分动态随机模型的土壤湿度概率密度函数研究进展[J]. 水科学进展, 17(6): 894-904. [Liu H, Zhao W Z. 2006a. Advances in research on soil moisture probability density functions obtained from models for stochastic soil moisture dynamics[J]. *Advances in Water Science*, 17(6): 894-904.]
- 刘鹄, 赵文智. 2006b. "Ecohydrology of water-controlled ecosystems soil moisture and plant dynamics" 评介[J]. 地球科学进展, 21(8): 879-880. [Liu H, Zhao W Z. 2006b. On review of "ecohydrology of water-controlled ecosystems-soil moisture and plant dynamics [J]. *Advances in Earth Science*, 21(8): 879-880.]
- 刘鹄, 赵文智, 何志斌, 等. 2007. 祁连山浅山区草地生态系统点尺度土壤水分动态随机模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 37(9): 1212-1222. [Liu H, Zhao W Z, He Z B, et al. 2007. Stochastic modelling of soil moisture dynamics in a grassland of Qilian Mountain at point scale[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 37(9): 1212-1222.]
- 潘兴瑶, 夏军, 张鲁. 2008. 土壤水分随机模型支持下的土壤水平衡研究进展[J]. 资源科学, 30(3): 460-467. [Pan X Y, Xia J, Zhang L. 2008. A review of soil water balance studies based on stochastic soil moisture model[J]. *Researches Science*, 30(3): 460-467.]
- 彭万杰, 郭异礁. 2009. 虎峰镇土壤水分的动态及其随机模拟[J]. 安徽农业科学, 37(6): 2622-2624, 2631. [Peng W J, Guo Y J. 2009. Dynamics of soil water in Hufengxia Town and its stochastic simulation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 37(6): 2622-2624, 2631.]
- 申双和, 周英. 1993. 农田土壤水分的随机模拟和预报[J]. 南京气象学院学报, 16(3): 324-328. [Shen S H, Zhou Y. 1993. Stochastic modeling and prediction of soil moisture in cropped fields[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 16(3): 324-328.]
- 王改改, 吕家恪, 魏朝富. 2009. 四川盆地丘陵区土壤水分的动态及其随机模拟[J]. 中国农村水利水电, (11): 22-26. [Wang G G, Lv J K, Wei C F. 2009. Soil moisture dynamics and its stochastic simulation in hilly areas in Sichuan Basin[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 11: 22-26.]
- 杨大文, 丛振涛, 雷志栋. 2008. 生态水文学: 植被形态与功能的达尔文表达[J]. 冰川冻土, 30(5): 903-905. [Yang D W, Cong Z T, Lei Z D. 2008. Book review on ecohydrology: Darwinian expression of vegetation form and function[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30(5): 903-905.]
- Aboitiz M, Labadie J W, Heermann D F. 1986. Stochastic soil moisture estimation and forecasting for irrigated fields[J]. *Water Resources Research*, 22(2): 180-190.
- Asbjornsen H, Goldsmith G R, Alvarado-Barrientos M S, et al. 2011. Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: a review[J]. *Journal of Plant Ecology*, 4(1-2): 3-22.
- Bonan G B. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. *Science*, 320: 1444-1449.
- Brooks R H, Corey A J. 1964. Hydraulic properties of porous media[C]//Corey A T, Dils R E, Yevjevich V M. *Hydrology Papers*. Fort Collins, CO: Colorado State University: 3.
- D'Odorico P, Laio F, Porporato A, et al. 2003. Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles II: a case study[J]. *Advances in Water Resources*, 26(1): 59-70.
- D'Odorico P, Laio F, Porporato A, et al. 2010. Ecohydrology of terrestrial ecosystems[J]. *Bioscience*, 60(11): 898-907.
- D'Odorico P, Laio F, Ridolfi L. 2005. Noise-induced stability in dryland plant ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(31): 10819-10822.
- D'Odorico P, Porporato A. 2004. Preferential states in soil moisture and climate dynamics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(24): 8848-8851.

- D'Odorico P, Porporato A. 2006. Dryland ecohydrology[M]. Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands.
- Eagleson P S. 1978a. Climate, soil, and vegetation 1: introduction to water-balance dynamics[J]. *Water Resources Research*, 14(5): 705-712.
- Eagleson P S. 1978b. Climate, soil, and vegetation: 3. simplified model of soil-moisture movement in liquid-phase[J]. *Water Resources Research*, 14(5): 722-730.
- Eagleson P S. 2004. Ecohydrology: darwinian expression of vegetation form and function: second edition[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Ellison D, N. Futter M, Bishop K. 2012. On the forest cover-water yield debate: from demand-to supply-side thinking [J]. *Global Change Biology*, 18(3): 806-820.
- Feddes R A, Hoff H, Bruen M, et al. 2001. Modeling root water uptake in hydrological and climate models[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(12): 2797-2809.
- Guswa A J, Celia M A, Rodriguez-Iturbe I. 2004. Effect of vertical resolution on predictions of transpiration in water-limited ecosystems[J]. *Advances in Water Resources*, 27(5): 467-480.
- Laio F. 2006. A vertically extended stochastic model of soil moisture in the root zone[J]. *Water Resources Research*, 42(2): W02406.
- Laio F, D'Odorico P, Ridolfi L. 2006. An analytical model to relate the vertical root distribution to climate and soil properties[J]. *Geophysical Research Letters*, 33(18): L18401.
- Laio F, Porporato A, Ridolfi L, et al. 2001. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress: II. probabilistic soil moisture dynamics[J]. *Advances in Water Resources*, 24(7): 707-723.
- Laio F, Tamea S, Ridolfi L, et al. 2009. Ecohydrology of groundwater-dependent ecosystems: 1. stochastic water table dynamics[J]. *Water Resources Research*, 45(5): W05419.
- Legates D R, Mahmood R, Levina D F, et al. 2010. Soil moisture: a central and unifying theme in physical geography [J]. *Progress in Physical Geography*, 35(1): 65-86.
- Luo Y, Lei Z D, Zheng L, et al. 2007. A stochastic model of soil water regime in the crop root zone[J]. *Journal of Hydrology*, 335(1-2): 89-97.
- Milly P C D. 1993. An analytic solution of the stochastic storage problem applicable to soil-water[J]. *Water Resources Research*, 29(11): 3755-3758.
- Milly P C D. 2001. A minimalist probabilistic description of root zone soil water[J]. *Water Resources Research*, 37(3): 457-463.
- Nepstad D C, Decarvalho C R, Davidson E A, et al. 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures[J]. *Nature*, 372: 666-669.
- Newman B D, Wilcox B P, Archer S R, et al. 2006. Ecohydrology of water-limited environments: a scientific vision[J]. *Water Resources Research*, 42(6): W06302.
- Noy-Meir I. 1973. Desert ecosystems: environment and producers[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1): 25-51.
- Or D, Groeneveld D P. 1994. Stochastic estimation of plant-available soil-water under fluctuating water-table depths [J]. *Journal of Hydrology*, 163(1-2): 43-64.
- Orellana F, Verma P, Loheide S P, et al. 2012. Monitoring and modeling water-vegetation interactions in groundwater-dependent ecosystem[J]. *Reviews of Geophysics*, 50(3): Rg3003.
- Pan X Y, Potter N J, Xia J, et al. 2013. Hillslope-scale probabilistic characterization of soil moisture dynamics and average water balance[J]. *Hydrological Processes*, 27(10): 1464-1474.
- Pan X Y, Zhang L, Potter N J, et al. 2011. Probabilistic modeling of soil moisture dynamics of irrigated cropland in the North China Plain[J]. *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques*, 56(1): 123-137.
- Porporato A, Laio F, Ridolfi L, et al. 2001. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress III: vegetation water stress [J]. *Advances in Water Resources*, 24(7): 725-744.
- Porporato A, Rodriguez-Iturbe I. 2002. Ecohydrology: a challenging multidisciplinary research perspective[J]. *Hydrological Sciences Journal- Journal des Sciences Hydrologiques*, 47(5): 811-822.
- Ridolfi L, D'Odorico P, Laio F, et al. 2008. Coupled stochastic dynamics of water table and soil moisture in bare soil conditions[J]. *Water Resources Research*, 44(1): W01435.
- Ridolfi L, D'Odorico P, Porporato A, et al. 2003. Stochastic soil moisture dynamics along a hillslope[J]. *Journal of Hydrology*, 272(1-4): 264-275.
- Rodriguez-Iturbe I. 2000. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate- soil- vegetation dynamics[J]. *Water Resources Research*, 36(1): 3-9.
- Rodriguez-Iturbe I, D'Odorico P, Laio F, et al. 2007. Challenges in humid land ecohydrology: interactions of water table and unsaturated zone with climate, soil, and vegetation

- [J]. *Water Resources Research*, 43(9): W09301.
- Rodriguez-Iturbe I, Porporato A. 2004. *Ecohydrology of water-controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Rodriguez-Iturbe I, Porporato A, Ridolfi L, et al. 1999. Probabilistic modelling of water balance at a point: the role of climate, soil and vegetation[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 455: 3789-3805.
- Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4): 125-161.
- Smettem K R J. 2008. Welcome address for the new 'ecohydrology' journal[J]. *Ecohydrology*, 1(1): 1-2.
- Tamea S, Laio F, Ridolfi L, et al. 2009. Ecohydrology of groundwater-dependent ecosystems 2: stochastic soil moisture dynamics[J]. *Water Resources Research*, 45(5): W05420.
- Wilcox B P, Newman B D. 2005. Ecohydrology of semiarid landscapes[J]. *Ecology*, 86(2): 275-276.
- Zalewski M. 2002. Ecohydrology: the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 47(5): 823-832.

Research progress on stochastic soil moisture dynamic model

HU Jian, LÜ Yihe

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for
Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China)

Abstract: As an important component of the earth surface system and the core of hydrological cycle, soil water controls the most basic terrestrial ecosystem patterns and processes, which is key for the healthy operation of the terrestrial ecosystem. Soil moisture dynamics is an indispensable part of the research on the interactions and feedbacks between hydrological processes and terrestrial ecosystem processes, which is the result of non-linear interactions among a series of hydrological, climatic, and ecological processes. Consequently, soil moisture dynamics needs to be studied by stochastic methods, which can reasonably describe the characteristics of soil moisture dynamics including the pulse, erratic, and random processes. In this article, we systematically review the development of stochastic modeling of soil water content based on the principle of soil water balance, and focus on the classification and application of these models. This review could supply some useful reference for quantitative studies of stochastic soil moisture dynamic processes and be beneficial to the research on ecohydrology in China. This review also could promote a better understanding of interactions between hydrological cycle and the terrestrial ecosystem, and ultimately contribute to the knowledge base on the sustainable management of water resources and ecosystems.

Key words: terrestrial ecosystem; ecohydrology; soil water balance; soil moisture dynamics; stochastic modeling; research progress