

# 土壤-植物-大气界面中水分迁移 过程及模拟研究进展

徐力刚,许加星,董磊,冯文娟,姜加虎

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室,江苏南京 210008)

**摘要:**介绍了水循环过程中界面水分迁移转化理论,及SPAC连续体的概念及其发展过程,阐明了一些国内外SPAC理论研究的主要成果;对国内外各种典型土壤-植物-大气界面模型的基本结构、适用范围、主要研究对象、优势以及局限性做了系统介绍和对比;在此基础上对土壤-植物-大气系统的相互作用过程以及系统模拟中存在的问题提出了展望。分析得出如何解决下垫面与土壤-植物-大气系统复杂的关系,以及尺度转化问题将是面临的主要挑战。认为借助于水分和能量交换过程中的模型参数优化,来实现界面中水分迁移过程的精确化和简化模拟是未来的重要研究方向。

**关键词:**土壤-植物-大气连续体;水分迁移;模拟;过程

**中图分类号:** Q945.17;S152.7;P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)01-0242-07

## Research advance in process and modeling of water transfer in soil-plant-atmosphere continuum

XU Li-gang, XU Jia-xing, DONG Lei, FENG Wen-juan, JIANG Jia-hu

(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology,  
Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** This paper introduces the theory of water transfer among the interfaces of water cycle process and the concept and development of soil-plant-atmosphere continuum (SPAC), and illustrates the main research achievements at home and abroad. Based on the investigation of various typical SPAC models, a systematic introduction and comparison about their basic structures, application scopes, main research objects, advantages and limitations are made. The difficulties and problems in the interaction process and simulation of soil-plant-atmosphere system are also proposed. It will be the main challenge in the future to deal with the complex relationship between underlying surface and soil-plant-atmosphere system as well as the problems of scale conversion. Furthermore, it will be an important research direction to achieve accurate and simplified modeling of water transfer process among different interfaces by means of parameter optimization in the models.

**Keywords:** soil-plant-atmosphere continuum (SPAC); water transfer; modeling; process

### 1 土壤-植物-大气连续体(SPAC) 概念的提出

#### 1.1 土壤-植物-大气连续体(SPAC)基本理论及其发展

18世纪, Stephen Hales 就开始定量研究土壤水分蒸发和植被蒸腾。19世纪, Vries 和 Pfeffer 提出了

渗透压理论。20世纪人们逐渐提出水势的概念<sup>[1-2]</sup>。Gardner 提出了土壤-植物-大气的水分运移系统, Cowan 对该系统做了描述, 认为尽管系统介质不同, 界面不一, 但在物理上却是一个连续的统一体系<sup>[3-4]</sup>。在前人研究的基础上, 1966年由澳大利亚土壤水文物理学家 Philips 首先提出了土壤-植物-大气连续体的概念, Philips 认为水在该系统中

收稿日期: 2012-05-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(2012CB417005); 国家自然科学基金(41271034); 中国科学院支持全国科学院联盟建设专项重大项目; 江西省科技支撑项目(20122BBG70160); 新疆干旱区水循环与水利用实验室开放课题(XIYS0907-2010-02)

作者简介: 徐力刚(1976-), 男, 四川仁寿人, 博士, 副研究员, 主要从事湖泊湿地生态水文过程方面的研究。E-mail: lgxu@niglas.ac.cn。

运动的各种流动过程,就像链环一样互相衔接,而且完全可以应用统一的能量单位——“水势”来定量地研究整个系统中各个环节能量水平的变化,并可以计算出水分运动的能量<sup>[5]</sup>。土壤-植物-大气连续体(Soil-Plant-Atmosphere Continuum, SPAC)是将土壤、植物、大气以及三者之间的介面过程联系在一起而形成的连续的、系统的、动态的整体。

在 SPAC 理论提出的基础上,国内外科学家对其进行了大量的理论发展和科学实验。20 世纪 60 年代以来,美国、英国等发达国家在 SPAC 系统领域开展了大量深入细致的研究,对 SPAC 的研究已不只局限于 SPAC 本身的基本理论,而是将这一理论应用到生产实践中。如解决根层中氮预告的问题,模拟根系吸水速率和蒸腾速率,以及在模拟田间土壤水分和作物蒸腾变化基础上进行灌水预报等<sup>[6-8]</sup>。我国不同学科的科学家对土壤-植被-大气系统过程进行了广泛深入的研究,主要有:干旱、半干旱地区 SPAC 系统内部水热交换及能量平衡;SPAC 系统中水分传输阻力(包括土壤-根系水分传输阻力和植物-大气系统水分传输阻力);SPAC 系统中蒸散发问题等<sup>[9-11]</sup>。

在 SPAC 系统中,能量关系得到统一,分析和研究水分运移、能量转化的动态过程更加方便。SPAC 系统概念的提出不仅为水循环研究工作指明了微观的研究方向,而且加强了水文学与其他学科的联系。土壤-植被-大气系统物质能量传输转化过程对水资源利用、作物产量形成和环境变化等都有重要影响。在 90 年代初期,国际地圈生物圈计划(IGBP)的核心包括水文循环生物圈方面,其焦点之一是土壤-植被-大气的传输(Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer, SVAT)问题。在 90 年代,由世界气候研究计划(WCRP)开展的全球能量与水循环实验,通过设置通量观测项目来研究土壤-植物-大气界面的相互作用。因此,土壤-植物-大气连续系统中的水分运行研究是当今国际学术界的热点之一。

## 1.2 土壤-植物-大气连续体水分迁移的国内外研究进展

SPAC 概念被提出以来,田间水循环过程及规律研究广泛地开展,土壤水分和作物、大气间的有序、动态和量化关系不断探讨,下垫面湿度变化与蒸发过程之间的关系得到比较妥善的解决,为田间水肥调控原理和机制研究及节水农业各个环节提供了理论基础和应用依据。将单纯的农田根层水分与能量运动提升到水循环、水文要素和生态环境评价的高

度,在水热转化关系、系统各环节的节水胁迫评估、田间土壤水分和蒸发蒸腾量的模拟预测、覆膜水热效应、小气候的调控等问题方面,都有创新性研究。目前,SPAC 中的水分问题已经成为土壤物理、土壤化学、植物生理、水文地质、环境生态及盐碱地改良等研究的重要组成部分<sup>[12-13]</sup>。

对 SPAC 水分运动的研究,美国、澳大利亚等十个国家起步较早,研究比较深入。Gardner 等最早用数学物理法开创了根系吸水的定量研究<sup>[14]</sup>。很多学者围绕这一问题做了大量的工作,特别是 Molz 提出的吸水函数具有广泛的代表性和重要的参考价值<sup>[15]</sup>; Talor 和 Klepper 强调了根系空间分布在根系吸水中的重要性<sup>[16]</sup>。在 SPAC 水分传输阻力方面, Thom 应用扩散理论,提出了动量、热量、水汽和二氧化碳传输阻力之间的关系式,又经过大量田间试验,提出了大田风廓线函数<sup>[17]</sup>。在蒸散发方面, Blaney 和 Criddle 将月作物耗水量表示为生长阶段与月平均气温的函数<sup>[18]</sup>; Hargreaves 将潜在蒸散表示为温度和相对湿度的函数<sup>[19]</sup>; Samani 和 Hargreaves 将潜在蒸散表示为辐射、日平均气温和最高-最低温度差的函数<sup>[20]</sup>。

我国在 SPAC 水分运动方面的研究起步于 20 世纪 80 年代,至今已做了大量工作,在 SPAC 的主要基础理论方面也做出了重要的贡献。邵明安等<sup>[21]</sup>曾对植物根系吸收土壤水分进行了数学模拟,虽然采用较复杂的根系吸水函数,侧重于土-根系统,但包含较为复杂难测的参数,应用起来有困难。康绍忠等对冬小麦根系吸水分布进行了动态模拟,建立了冬小麦根系吸水模式<sup>[22]</sup>。刘昌明在华北平原运用水均衡法和水动力学法分别对土壤-植物-大气连续体的蒸散发计算、水分运动、界面水分过程与节水调控进行了研究<sup>[23]</sup>。李俊等根据 1996 年在栾城农业生态实验站观测的田间试验资料,分析了土壤水分和土壤-大气界面对麦田水热传输的抑制和加速作用<sup>[24]</sup>。卢振民等根据详细的田间实验研究,对 SPAC 水流运动进行了细致的研究分析,建立了比较完整的 SPAC 水流运动模型,该模型针对水流运动的主要环节,既考虑了气孔阻力的调节作用以及土壤温度对水流运动的影响,又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和作物体内的水分运动状况<sup>[25]</sup>。康绍忠等根据十余年的野外观测和实验室分析,从能量传输与转换、力能关系分析、植物根系吸水作用、SPAC 系统计算机仿真等方面叙述了 SPAC 系统水分传输问题,提出了

根区土壤水分动态模拟、作物根系吸水蒸发蒸腾模拟三个子系统的 SPAC 水分传输模拟模型<sup>[26]</sup>。刘昌明等集成了 GIS 技术,自主开发生态水文模拟系统 EcoHAT,该系统以基本的生态水文过程为基础,实现了区域尺度的分布式生态水文模拟,为水资源的持续利用提供了新思路<sup>[27]</sup>。

## 2 SPAC 系统中水分迁移与转化过程

### 2.1 水循环理论和“五水”转化理论

SPAC 系统中水分迁移与转化理论的研究是基于水循环的理论基础之上的。水循环是指地球上的水分在太阳辐射、地心引力等作用下,通过蒸发、水汽输送、降水、下渗以及径流等过程不断地转化、迁

移的现象。从全球整体角度来说,这个循环过程可以设想从海洋的蒸发开始,蒸发的水汽升入空中,并被气流输送至各地,大部分留在海洋上空,少部分深入内陆,在适当条件下,这些水汽凝结降水。其中海面上的降水直接回归海洋,降落到陆地表面的雨雪,在太阳能、重力势能和土壤吸力的驱动下,经植被冠层截留、地表洼地储留、地表径流、蒸发蒸腾、入渗、壤中径流和地下径流等迁移转化过程,一部分成为地面径流补给江河、湖泊,另一部分渗入岩土层中,转化为壤中流与地下径流。各种径流成分通过河流等多种途径最后流入海洋,构成全球性统一的、连续有序的动态大系统,如图 1 所示。

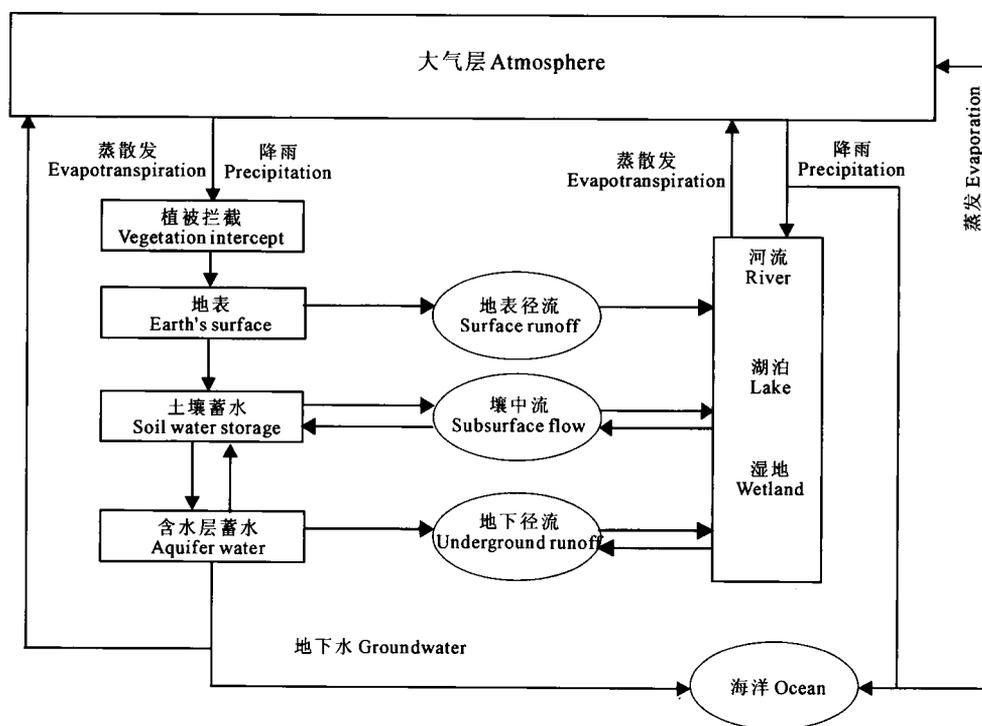


图 1 水循环过程示意图

Fig.1 The process of water cycle

刘昌明基于水循环原理结合实际应用提出了“五水”转化的问题。农田水分运行、存贮的系统包括大气、土壤、植物、地表与地下岩层五个系统,称为“五水”系统。水分在各系统中,受热力、重力和分子力的驱动,不断地循环运行,在农田上展现了自然界中主要水循环过程,包括主要的相、态的变化<sup>[28]</sup>。农田中的水分运行的空间,按“五水”系统,有大气中的水、地表水、土壤水、植物体内的水以及地下水。这五水可分别用以下符号来表示:P、R、S、V、G。各系统间的交互关系可用下面的矩阵来表示(表 1)。

由上面“五水”转化研究的内容可以看出,SPAC 系统已经内含在“五水”系统中了,SPAC 可以视为

表 1 “五水”系统交互关系矩阵<sup>[23]</sup>

Table 1 The Interactive relationship matrix of “Five Water” system

	P	R	S	G	V
P	1	P/R	P/S	P/G	P/V
R	R/P	1	R/S	R/G	R/V
S	S/P	S/R	1	S/G	S/V
G	G/P	G/R	G/S	1	G/V
V	V/P	V/R	V/S	V/G	1

“五水”耦合系统中的一个特例,显然,“五水”转化的研究扩充了 SPAC 理论的内涵。根据前面叙述的五水转化理论,土壤-植物-大气系统中的流通首先

遵循的基本物理规律是水量平衡,即在该系统中水分流通是连续的;其次,在 SPAC 系统中水分流通的界面具有双向流通的特性,既有由大气降水转化成的地表水、地下水、土壤水,又有由地表水、地下水、土壤水以及植物水在蒸发或蒸腾作用下转化而来的大气水<sup>[29]</sup>。

## 2.2 SPAC 中水分运转阻力和水势梯度分布研究

水分传输的势能——水势是研究农田 SPAC 系统水分运行的核心问题,水从土壤到根再到叶的液态水流传输是维持作物正常生长的基础。叶水势是植物水分状况的最好量度,从叶至大气的传输形式则转变为气态水分传输,无论液态还是气态水分传输过程均分别受到不同的传输阻力,降低水分传输的阻力可以维持作物较好的水分状态。因此,研究 SPAC 系统中水分传输势能及其变化过程可为改善不同环节的势能分布及调控传输阻力提供依据,达到调控水分和节水的目的。

研究 SPAC 系统中水分运转阻力和水势梯度分布的相关文章很多,张喜英通过计算冬小麦和夏玉米在土壤-作物-大气系统中液态水传输阻力和日变化过程,提出了通过改良土壤环境来减少根系吸水阻力,提高作物对水分的利用效率的一些措施<sup>[30]</sup>。余冬立依据田间试验和生长箱实验开展了黄土高原典型植被覆盖下 SPAC 系统水量平衡模拟研究<sup>[31]</sup>。杨晓光等通过测定华北平原夏玉米农田 SPAC 系统不同界面的水势并计算水流传输阻力,结果表明,水流在 SPAC 系统传输过程中不同界面间存在明显的水势梯度和较大的阻力,并且证明了从叶片至大气阻力对限制与调节作物水分散失强度和数量具有关键作用<sup>[32]</sup>。何兴东等提出植物水势系数 SWPC,即植物水势系数是植物水势占大气水势和土壤水势对植物水势产生直接影响力那部分水势之和的比值,结果表明,在自然状态下,植物水势系数可作为衡量植物对环境胁迫反映强弱的一个指标<sup>[33]</sup>。

## 2.3 SPAC 水热传输与生态过程研究

近年来,很多科学家对土壤-植物-大气系统内部能量物质传输过程进行了广泛深入的研究,我国在这方面的主要研究进展包括:农田生态系统能量平衡及实验研究、大范围陆面过程模式研究和遥感在地表能量平衡研究中的应用等多方面的研究。20 世纪 80 年代我国相继建立了北京大屯农业生态系统试验站和山东禹城综合试验站,开始了农田生态系统中水热运动的综合实验研究,其内容包括农田生态系统的能量收支、农田水分循环和水量平衡

的实验研究,以实验为基础的水热通量测定方法和计算方法,对系统内各界面上水分与能量的交换过程及规律等方面,目前已经取得了较大进展。刘苏峡等研究了土壤水分和 LAI 对麦田波文比的影响因素<sup>[34]</sup>;王会肖等利用大型称重式蒸渗仪和田间蒸发器对冬小麦生长期田间蒸发和植株蒸腾对总蒸散的贡献进行了研究,结果表明,越冬前植株蒸腾和棵间蒸发的贡献相差不大,越冬期以土壤蒸发耗水为主,返青期后则以作物蒸腾耗水为主<sup>[35]</sup>。另外,康绍忠等提出叶面积蒸腾与棵间蒸发分摊系数的计算方法<sup>[36]</sup>;李胜利等运用波文比-能量平衡法和空气动力学梯度法分析了麦田、谷田、大豆田和稻田等不同农田生态系统的微气象特征,探讨了半干旱地区农田生态系统热量平衡各分量的分配特点<sup>[37]</sup>。

## 3 SPAC 系统中水分过程模拟研究进展

### 3.1 SPAC 系统水分过程模拟方法探析

SPAC 系统水分的动态变化具有一定的尺度效应,一般可分为土体尺度、农田尺度和区域尺度。对土体尺度一般不考虑气象、土壤、作物等因素的空间变异性。在农田尺度下,气象因素变化不大,如果土壤、作物等的空间分布比较均匀,则可以用土体尺度的方法和模型来进行研究,而对于区域尺度,则需要考虑以上因素的空间变化,总体来看,SPAC 系统水分动态的模拟方法主要有两类,分别是确定性方法和随机性方法。

#### (1) 确定性方法

确定性方法是指从水分运移、转化所遵循的物理规律(如质量守恒、能量守恒)出发,建立水动态模型的方法。确定性模型主要包括概念性模型(水量平衡模型)、机理性模型(SPAC 水分传输模型、SPAC 水热传输模型)等。其中水量平衡模型是一种概念性模型,根据一定时段内土壤水分的输入和输出来确定土壤水分的变化,田间水量平衡要素主要包括降雨、径流、灌溉、腾发、根系层底部水分交换等。而水分传输模型是在 Darcy 定律和连续方程基础上建立土壤水运动的基本方程,如果同时考虑土壤蒸发、作物蒸腾与根系吸水等过程,便可建立土壤水动力模型(SPAC 水分传输模型)<sup>[38]</sup>。

SPAC 水分传输模型的关键是确定土壤蒸发与根系吸水,一般可以按照以下步骤确定:首先,利用公式或直接利用 Penman-Monteith 公式计算田间潜在蒸发量  $ET_p$ ;其次,根据作物叶面积指数(LAI)等因素,将  $ET_p$  分为潜在蒸发量  $E_p$  和潜在蒸腾量  $T_p$ ;

然后,考虑表层土壤含水量对土壤蒸发的影响,得到实际蒸发量;最后,由根系分布函数、吸水效率函数得到根系吸水速率。此外,SPAC 水热传输模型是在土壤水动力学模型的基础上发展起来的,这类模型根据下垫面能量平衡、微气象学原理,建立土壤、冠层与大气间的潜热、显热交换模式,将土壤水、热传输与蒸发、蒸腾作为一个整体来考虑,这样就能够描述农田水热迁移、蒸发、蒸腾的动态变化及其规律,但模拟中需要较多的土壤、作物、气象等参数<sup>[21]</sup>。

## (2) 随机性方法

影响农田水分动态变化的因素(气象、土壤、作物等)在时间、空间上均有一定的随机特性,从不同的角度考虑以上随机因素的影响,便可得到不同类型的随机性墒情预报模型,如数理统计模型、随机水量平衡模型与随机土壤水动力学模型。其中,数理统计模型依据土壤水分变化与其主要影响因素的统计关系或土壤水分自身的变化规律进行墒情预报,主要包括统计回归模型、时间序列分析模型、消退指数模型以及人工神经网络模型。而随机水分平衡模型与随机土壤水动力学模型是在水量平衡模型或土壤水动力学模型的基础上,考虑有关模型输入(降水、蒸发等)与参数(土壤特性等)的时域随机性与空间变异性,得到相应的随机性模型<sup>[39-40]</sup>。

## 3.2 SPAC 系统水分过程模拟常见模型介绍

土壤-植物-大气连续体理论最初被广泛应用于指导田间灌溉,对田间尺度土壤水分模拟的研究构成了 SPAC 系统的基础,对田间尺度水分过程的模拟促进了对 SPAC 系统模拟研究的进步。Bresler 于 1973 年提出了比较系统、完整的农田水文模型<sup>[41]</sup>。澳大利亚国家科工组织在 1993 年开发的生态水文模型 WAVES(water vegetation energy and solute model),能够模拟土壤-植物-大气系统中物质和能量通量关系。Kutilek 和 Nielsen 在 1994 年建立了适合于研究农田垂向一维水分剖面问题的水动力学模型,也可用于研究层状土壤,它是几十年来应用最普遍的模型,但受田间土壤物理性质和其他影响因子的空间变异性问题限制<sup>[42]</sup>。

在过去的几十年里,国内外研究工作者建立了大量的模拟土壤中水分和溶质运移行为的模型,如 WAVES、SWIM、SWAP、HYDRUS、Coup-Model、EcoHAT 模型等<sup>[43-47]</sup>。这些模型是在不同的试验条件下提出的,在模型的构成和过程考虑上各有侧重,具有严格的适用范围和限定条件。其中由美国盐渍土实验室开发的 HYDRUS 系列模型,以其广泛的适用性和良好的图形化界面得到了好评,它可用于模拟不同

土壤和环境条件下的水、溶质运移特征及其转化过程。此外,SWAP 模型在模拟田块尺度的非饱和带水流及盐分运移、热量传递和作物生长与产量方面也应用较多,在国内外关于主要旱作物的模拟应用上已有较多的成果。这些模型经过实践的检验以及自身的发展,逐渐成为比较完善的模拟工具,由于模拟机理、应用领域以及研究对象不同,各模型存在明显差别。表 2 介绍了国内外几种典型土壤-植物-大气模型,并对它们的主要研究对象、适用领域以及优势和缺点进行对比。

## 4 问题与展望

土壤-植物-大气界面过程中水分迁移过程及模拟研究经过不断地完善和发展,出现了很多经典的理论、模型,为田间水肥调控原理和机制及节水农业各个环节的作用的研究,提供了理论基础和应用依据。但在应用这些理论和模型进行模拟工作的同时,也出现了很多不足之处,需进一步完善。

1) 下垫面与土壤-植物-大气系统有复杂的关系,而土地利用方式、土壤和植被以及降水的空间不均匀性会造成下垫面的不均匀,如何有效地解决下垫面问题需要继续深入探究。

2) 尺度转换这一国际理论难题能使宏观与微观的水循环在尺度上得以衔接和综合,所以 SPAC 模型中尺度转换问题是面临的又一挑战;现有的 SPAC 模型含有的大量参数和经验常数(如植被参数、气候参数、土壤参数等)需要确定,但是即使是一个能完全控制植物环境、设施齐全的微型气象试验场地,也无法完整地提供这些常数的精确值;此外,SPAC 模型如何与应运而生的各种性能较好的模型进行耦合,借此以增强自身模拟的准确性和有效性,也是一个值得考虑的问题。

3) 今后的研究中要将一维的模型与区域和全球尺度的水分、热量模型耦合,进行尺度扩充,最终提出二维或三维的中尺度、具有良好验证性的参数化方案,以此来描述土壤-植物-大气的界面过程,并对一系列区域尺度生物群落的水、碳和能量循环进行定量。

4) 对于 SPAC 模型运行时需要大量参数和经验常数的难点,一个关键的问题是在复杂研究的基础上怎么合理地简化模型,找出水分和能量交换过程中的关键因子,从而得到一个既简单又能合理描述陆面过程的方案,有效地减少所需参数和经验常数。土壤-植物-大气系统模型要想得到更好更有效的模拟效果,需要借助于其他模型,来实现精确化和简

化,这也是未来的研究方向之一。例如:在应用模型进行模拟工作时,地表参数是很重要的一部分,地表参数的直接测量往往需要很大的人力物力,要逐渐

发展热交换的遥感监测。发展由遥感资料反演地表参数尤其是地表真实温度及水热通量的算法,进一步提高定量化监测方法的实时性及计算精度。

表 2 国内外代表性土壤-植物-大气系统模型对比

Table 2 Comparison of typical models of soil-plant-atmosphere system at home and abroad

模型名称 Models	开发单位 Development institutions	主要研究对象和应用领域 Main research objects and application areas	模型主要优势 Main advantages
Waves	澳大利亚国家科工组织 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in Australia	适用于研究由土地管理或气候变化引起的水文和生态的响应 Be suitable for studying the hydrological and ecological responses caused by land management and climate changes	数据易获取,应用范围广泛,如果气象数据足够则能进行长期的模拟工作 Be easy to obtain data; be adaptable widely; and be able to use for long-term simulation if enough meteorological data are available
Coup-Model	瑞典皇家工学院 Royal Institute of Technology in Sweden	最初应用于模拟森林土壤状况,现在可用来概括说明有植被覆盖的任何土壤类型的水分和热量过程 Be initially applied for simulating forest soil conditions, but now can be used for general illustration of moisture and heat process in any soils with vegetation covering	有相当大部分是由单个机理性模型构成的,具有较广的适用性;灵活的时间步长 Be adaptable widely because a large part of the models are individual mechanistic ones; and be flexible in time step
Eco-Hat	北京师范大学和中科院地理科学与资源研究所 Beijing Normal University and Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, CAS	实现了分布式的区域生态水文模拟,为生态效益评价、生态流域建设和生态设计等问题提供科学分析工具 Be used for distributed simulation of regional ecology and hydrology, and can provide scientific methodology for solving the problems of ecological benefit evaluation, ecological valley construction and ecological design.	与 RS 和 GIS 相结合,实现了遥感数据与地表参数反演结合;模块化设计 Be combined with RS and GIS, realizing the inverse combination of remote-sensing data with earth surface parameters; and be designed modularly
Hydrus-1d	美国国家盐改中心 Saline-alkali Soil Improvement Center in America	能够较好地模拟水分、溶质与能量在土壤中的分布、时空变化、运移规律,分析人们普遍关注的农田灌溉、田间施肥、环境污染等实际问题 Be used for simulating the distribution, temporal and spatial variation, and migration laws of water, solutes and energy in soils, and analyzing the practical problems of farmland irrigation, field fertilization and environmental pollutions	广泛的适用性;灵活的输入输出;大量可参考的参数数据库 Be adaptable widely; be flexible in input and output; and be able to use the existed databases
SWAP	荷兰瓦赫宁根大学 Wageningen University in Holland	用于田间尺度下土壤-植物-大气环境中水分运动、溶质运移、热量传输及作物生长模拟 Be used for simulating moisture movement, solute migration and heat transfer in soil-plant-atmosphere system and crop growth at field scale	对于在农业灌溉水的管理以及生态环境保护等领域的实际问题具有更加广泛的实用性和有效性 Be practical and effective in solving the problems of agricultural irrigation water management and ecological environment protection

## 参考文献:

- [1] Owen P C. The relations of germination of wheat to water potential[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1952, (3):188-203.
- [2] Slatyer R O, Taylor S A. Terminology in plant- and soil-water relations [J]. *Nature*, 1960, (187):922-924.
- [3] Gardner W R. Dynamic aspects of water availability to plants[J]. *Soil Science*, 1960, (89):63-73.
- [4] Cowan I R. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1965, (2):221-239.
- [5] Philip J R. Plant water relations: some physical aspects[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1966, (17):245-268.
- [6] Daniel H. "SPACE": A modified Soil-Plant-Atmosphere-Continuum electro analog[J]. *Soil Science*, 1991, 151(6):199-404.
- [7] Choudhury B J. Modeling the effects of weather condition and soil water potential on canopy temperature of corn[J]. *Agricultural Meteorology*, 1983, (29):169-182.
- [8] Viliam Novák. Evapotranspiration in the Soil-Plant-Atmosphere System[M]. Germany Berlin: Springer-Verlag, 2012:15-24.
- [9] 杨启良,张富仓,刘小刚,等.植物水分传输过程中的调控机制研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(15):4427-4436.
- [10] 刘昌明,孙睿.水循环的生态学方面:土壤-植物-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.
- [11] 康绍忠.土壤-植物-大气连续体水分传输动力学及其研究[J]. *力学与实践*, 1993, 15(1):11-19.
- [12] 丛振涛,雷志栋,胡和平,等.冬小麦生长与土壤-植物-大气连续体水热运移的耦合研究 II:模型验证与应用[J]. *水利学*

- 报,2005,36(6):741-745.
- [13] Drexler J Z, Snyder R L, Spano D, et al. A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18: 2071-2101.
- [14] Gardner W R. Dynamic Aspects of Water Availability to Plants[J]. *Soil Science*, 1960, 89: 63-73.
- [15] Molz F J. Models of Water Transport in the Soil - plant - system: A review[J]. *Water Resources Research*, 1981, 18: 1245-1268.
- [16] Taylor H M, Klepper B. Water uptake by cotton root system: an examination of assumptions in the single root model[J]. *Soil Science*, 1975, 120(1): 57-60.
- [17] Thom A S. Momentum - Mass and Heat Exchange of Plant Communities[M]. London: Academic Press, 1975: 57-109.
- [18] Blaney H F, Criddle W D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data[M]. US: USDA Soil Conservation Service, 1950.
- [19] Hargreaves G H. Estimation of potential and crop evaporation[J]. *Transaction of ASAE*, 1974, 17(4): 701-704.
- [20] Samari Z A, Hargreaves G H. Water requirements, drought and extreme rainfall manual for the United States[M]. Salt Lake City, United States: International Irrigation Center, Utah State University, 1985.
- [21] 邵明安, 样文治, 李玉山. 植物根系吸收土壤水分的数学模型[J]. *土壤学报*, 1987, 24(4): 295-304.
- [22] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 冬小麦根系吸水模式的研究[J]. *西北农业大学学报*, 1992, 20(2): 5-12.
- [23] 刘昌明. 土壤 - 作物 - 大气界面水分过程与节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [24] 李俊, 于沪宁. 冬小麦水分利用效率及其环境影响因素分析[J]. *地理学报*, 1997, 52(6): 551-560.
- [25] 卢振民. 土壤 - 植物 - 大气系统 (SPAC) 水流动态模拟与分析[D]. 北京: 中科院地理研究所, 1989.
- [26] 康绍忠. 土壤 - 植物 - 大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1994.
- [27] 刘昌明, 杨胜天, 温志群, 等. 分布式生态水文模型 Eco - HAT 系统开发及应用[J]. *中国科学 E 辑: 科学技术*, 2009, 39(6): 1112-1121.
- [28] 刘昌明, 张喜英, 胡春胜. SPAC 界面水分通量调控理论及其在农业节水中的应用[J]. *北京师范大学学报*, 2009, 45(6): 447-451.
- [29] 刘苏峡, 李俊, 莫兴国, 等. 土壤水分及土壤 - 大气界面对麦田水热传输的作用[J]. *地理研究*, 1999, 18(1): 24-30.
- [30] 张喜英. 冬小麦、夏玉米叶水势、蒸腾和液态水流阻力的田间试验研究[J]. *地理学报*, 1997, 52(6): 543-550.
- [31] 余冬立, 邵明安, 俞双恩. 黄土高原典型植被覆盖下 SPAC 系统水量平衡模拟[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(5): 73-78.
- [32] 杨晓光. 夏玉米农田 SPAC 系统水分传输势能及其变化规律研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(3): 27-28.
- [33] 何兴东, 高玉葆. 植物水势系数及其应用实例[J]. *南开大学学报*, 2003, 36(4): 89-92.
- [34] 刘苏峡, 莫兴国, 李俊, 等. 土壤水分及土壤 - 大气界面对麦田水热传输的作用[J]. *地理研究*, 1999, 18(1): 24-30.
- [35] 王会肖, 刘昌明. 农田蒸散、土壤蒸发与水分有效利用[J]. *地理学报*, 1997, 52(5): 447-454.
- [36] 康绍忠, 张富仓, 刘晓明. 作物叶面蒸腾与棵间蒸发分摊系数的计算方法[J]. *水科学进展*, 1995, 6(4): 285-289.
- [37] 李胜功, 赵哈林, 何宗颖, 等. 灌溉与无灌溉大豆田的热量平衡[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1997, 33(1): 98-104.
- [38] 尚松浩. 土壤水分模拟与墒情预报模型研究进展[J]. *沈阳农业大学学报*, 2004, 35(5-6): 455-458.
- [39] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 205-219.
- [40] 尚松浩, 雷志栋, 杨诗秀. 冬小麦田间墒情预报的经验模型[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(5): 31-33.
- [41] Bresler E. Simultaneous transport of solutes and water under transient unsaturated flow conditions[J]. *Water Resource*, 1973, 9: 975-986.
- [42] Kutilek M, Nilsen D. Soil Hydrology[M]. Germany: Catena Verla, Cremlingen-Destedt, 1994.
- [43] Lu Z, Warrick D. WAVES: An integrated energy and water flow model[R]. Canberra, Australia: CSIRO Land and Water Technical Report, 1998: 98-31.
- [44] Per-Erik J, Louise K. Theory and Practice of Coupled Heat and Mass Transfer Model for Soil-plant-atmosphere System[M]. Beijing: Academic Press, 1991.
- [45] 何锦. 基于 SWAP 模型的农田水分动态模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [46] 卫三平, 王力, 吴发启. SWAT 模型的研究与应用[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(2): 113-120.
- [47] 王鹏, 宋献方, 袁瑞强, 等. 基于 Hydrus-1d 模型的农田 SPAC 系统水分通量估算[J]. *地理研究*, 2011, 30(4): 622-634.