

# 土壤水文过程与溶质迁移转化研究进展

向龙<sup>1,2</sup>, 余钟波<sup>2</sup>, 崔广柏<sup>2</sup>

(1. 河海大学水文学与水资源及水利工程国家重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学水文与水资源学院, 江苏南京 210098)

**摘要** 总结和概括了土壤水与溶质、能量研究的发展历程, 介绍了土壤水与溶质、土壤热耦合运移研究的基本理论和模型发展, 分析了当前水土系统理论和应用方面存在的难点和尚未解决的问题, 展望了在大气- 植被- 土壤系统研究基础上进一步在土水系统中研究水文质耦合理论, 提出构建分布式耦合模型系统亟待解决的关键技术问题。

**关键词** 土壤水; 溶质运动; 分布式耦合模型; 尺度问题; 非线性化

中图分类号 S156.1 文献标识码 A 文章编号 0517 - 6611(2008) 31 - 13743 - 05

## Study Progress on Soil Hydrological Process and Migration Transformation of Solute

XIANG Long et al (Key laboratory of Hydrology, Water Resources and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098)

**Abstract** The progress course of the soil water, solute and energy was summarized. The basic theories and models of coupling with water, solute and energy in soil was introduced. The existed and unfathomed problems in soil research methodology and application was analyzed, prospecting further research in coupling with soil water and solute based on atmosphere-plant-soil continuum (SPAC) system. The desired key technological problems in building distributed and coupled model system in future were put forward.

**Key words** Soil water; Solute fate; Distributed and coupled model; Scaling

土壤水指由地面向下至地下水潜水面间的土壤层水分, 也称为土壤非饱和带水分。从学科领域看, 土壤水为土壤学的一个分支, 但它又与多个学科与应用领域有着密切的关系。土壤水是四水(地表水、地下水、大气水、土壤水)转化的纽带<sup>[1]</sup>, 在水资源的形成、转化与消耗过程中, 它是不可缺少的环节。土壤水是土壤肥力的重要组成部分, 是植物水分循环的水源基地。灌溉或者降雨均需要转化成土壤水才能被植物所吸收; 土壤水的水分物理特性制约着植物对水分的有效利用<sup>[2]</sup>。水文学中最重要的产汇流理论也取决于下垫面的土壤水状况。当今国内外热门的环境污染问题涉及到的化肥、农药和重金属等对土壤与地下水的污染都是通过土壤水运动与溶质迁移研究来理解。研究农业污染物在多孔介质中迁移的规律、预测和控制污染物迁移的动态及过程, 对于掌握农业污染在土壤中的残留以及控制其对地下水、地水污染有极其重要的意义。

### 1 土壤水流运动研究进展

纵观土壤水分研究的历程, 学者们逐渐形成两种研究观点: 形态观和能量观。前者以土壤水的形态和数量为研究重点, 具有很强的实用价值。卡庆斯基在 20 世纪 30 年代对土壤水分物理性质及其标准进行了大量研究。罗戴于 1952 年发表的《土壤水》和 1965 年发表的《土壤水理论基础》对土壤水形态学进行了系统全面的总结<sup>[3]</sup>。后者以研究土壤水的能态为重点, 研究土壤水运动、不同介质中水分的转化等。1856 年 Darcy 通过饱和沙层渗透试验提出了达西定律<sup>[4]</sup>, 1877 年布利格斯提出毛管假说。1907 年 Buckingham 将毛管势的概念引入土壤水的研究<sup>[5]</sup>, 1920 年 Gardner 进一步完善了这个概念, 将不同形态土壤水势用能量观点联系起来<sup>[6]</sup>。1911 年 Green 和 Ampt 提出了毛管理论为基础的 Green-Ampt 渗流模型<sup>[6]</sup>。1931 年 Richards 利用张力计定量化土壤能态,

并在同年将达西定律拓展到适合非饱和水流的 Richards 方程。

Richards 方程是能量法研究土壤水流的基础, 其最基本的思路在于将达西定律和水分(势)连续方程联立, 构成了控制各向同性土壤和不可压缩液体条件下非饱和水流运动的基本微分方程式:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] \quad (1)$$

式中,  $\theta$  为土壤含水率;  $\psi$  为土水势;  $K(\theta)$  为非饱和导水率。

$\nabla$  为哈密顿算子。基本方程的一维、二维、三维以及在柱坐标、球坐标的表达式均可导出<sup>[7]</sup>。基本方程尚可随着应用需要, 改写成以基质势, 含水率, 位置坐标( $X$  或  $Z$ ) 或参变量( $u$  或  $v$ ) 为因变量的表达式。

现有的知识还不能建立起水力传导度与土壤含水量的理论关系, 土壤含水率与进水吸力的关系也正在研究。一些学者在实际工作中曾提出了一些经验公式, 总结起来常见的形式为:

$$K = a \psi^b \quad (2)$$

式中,  $a, b$  是经验常数。Brooks and Corey, van Genuchten 先后提出具体的土壤水分特征方程, 推动了土壤水流参数的估计和模型的应用<sup>[8-10]</sup>。我国的张永强等也建立了类似的经验公式, 简化了我国华北地区土壤水储存状态和水量的计算方法<sup>[11-12]</sup>。然而, 这些模型中均未出现温度因子, 尽管温度对土壤水吸力(土壤水势)的影响早已被证实<sup>[13]</sup>。Philip 等提出土水势相对系数的概念, 并提出了相对系数的求解方法, 但还只是对土壤温度和土壤水势进行研究, 没有将温度作为影响因子引入土壤特征曲线模型中<sup>[14]</sup>。在国内, 阎安成等人研究表明, 土壤温度增大时, 土壤水势由小变大; 土壤温度降低时, 土壤水势由大变小, 同时对土壤水势与温度的关系建立方程<sup>[15-16]</sup>。Milly 等认为, 一般来说, 水汽受基质势的影响和温度对液态水的影响可以忽略不计, 在壤土和砂土中, 热液流仅产生 1% 的净水流<sup>[17]</sup>。温度通过改变土壤物理学性质对液态水产生的影响不可忽略, 这方面的研究结果进展不大。Nassar 认为其原因之一是模型中使用的水热运移参数确

**基金项目** 国家自然科学基金“流域水文过程与农业非点源污染物迁移转化相互作用机理研究(50679018)”；教育部长江学者和创新团队发展计划“大气-陆面-水文过程耦合机理研究”(IRT0717) 共同资助。

**作者简介** 向龙(1982-), 男, 四川资阳人, 博士研究生, 研究方向: 水文学与溶质运移机理研究与应用。

**收稿日期** 2008-09-04

定的不可靠性<sup>[18]</sup>。土壤水热参数及变量的确定很大程度上决定模型模拟的结果,目前的模型中很多是由经验公式获得的,以便利用前人的实践经验快速、经济、简便地得到影响水热运移状况的运动参数<sup>[19]</sup>,但迄今为止的水热参数经验公式还不完善,还没有完全解决其机理性问题。如,简化的容积热容量可以用 De Vries 的经验公式<sup>[20]</sup> 计算:

$$C_m = 1.92(1 - s) + 4.186 v \quad (3)$$

式中,  $s$  是饱和体积含水量;  $v$  是体积含水量。土壤导热性能的强弱取决于各微粒相互接触的形态、性质以及土壤含水量的多少。De Vries<sup>[19]</sup> 提出的土壤热导率公式为:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n r_i X_i + r_w X_w + r_a X_a}{\sum_{i=1}^n r_i X_i + r_w X_w + r_a X_a} \quad (4)$$

式中,  $X_i$ 、 $X_w$  和  $X_a$  分别指单位体积土壤中第  $i$  种固相物质、水和空气所占的体积;  $r_i$ 、 $r_w$  和  $r_a$  指相应的导热率,  $W \text{ cm} \cdot K$ ;  $r_i$ 、 $r_w$  和  $r_a$  指各项的加权系数,取决于土壤颗粒的形状、排列以及各组成物质导热率的比值。

根据热流的连续方程和热传导定律<sup>[21]</sup>, 可以推导出热流垂向一维(或者二维)的基本方程:

$$C_m \frac{T}{t} = - \frac{1}{z} \frac{dT}{dz} \quad (5)$$

式中,  $s_1$  是  $z_1$  土层内的平均导热率;  $T_1$  是在深度(常取为 1 m) 处的地温。上述方程存在解析解, 是一个以振幅和位相为特征的弦振动表达式:

$$T(z, t) = T_0 - \sum_n A_{0n} e^{-z \frac{n}{KP}} \sin\left(\frac{2n}{P}t + \theta_n - z \frac{n}{KP}\right) \quad (6)$$

该土壤热传导模型考虑了土壤水和土壤颗粒的物理特性, 为研究土水耦合的热迁移提供了很好的研究思路。

随着计算水平和能态测定技术的日趋完善, 能量观研究方法体现出越来越显著的优越性。土壤水分的研究从静态走向动态、从定性描述到定量化研究、从经验率定参数逐步跨向机理的揭示。Durner 将多孔介质划分为多层, 每层应用 van Genuchten-Malem 模型再线性叠加, 并结合 Malem 的毛管分布模型, 得到多层土壤的水分特征曲线方程<sup>[22-23]</sup>。Philip 和 van Genuchten 将土壤水划分成动水和不动水两部分, 两水区之间的质量交换量用一级动力学方程来考虑, 建立了双区模型<sup>[24-25]</sup>。Gerke 等考虑两区中水流均可再流动, 并各区中运用 Richards 方程建立了新的双流区模型<sup>[26]</sup>。20 世纪 70、80 年代, 学术界普遍重视土壤特性和土壤水状态的时空变异性研究, 逐步将室内试验研究拓展到野外试验和流域试验, 提出由“点”到“面”, 进而拓展到区域上的尺度效应问题。分布式水文模型处理土壤水分尺度问题的基本思路是在不同尺度间的状态变量、模型参数和输入数据等信息进行转换。如, Crow 利用 TOPLATS 模型对地面观测数据进行尺度转换<sup>[27]</sup>。Warick 等研究得出饱和导水率对土壤质地、容重、空隙分布以及有机质含量等空间变量的影响响应明显<sup>[28]</sup>。Zavattaro, L. 等在研究水动力弥散系数方面, 又将恒定常数扩展为随时空变化的动态参数<sup>[29]</sup>。Western 用“尺度三元关系(Scale triplet)”分析了土壤取样间隔、幅度和取样空间大小的关系, 把定点测量的数据上推到模型预测尺度<sup>[30]</sup>。

Bosch 分析比较了 5 种国际上常用的空间内插法, 指出地统计学的块状克里格(Block Kriging) 是目前应用最广泛的最优内插法<sup>[31]</sup>。20 世纪 90 年代, 优先流的研究将土壤水运动机理由均质推向非均质<sup>[32]</sup>。目前, 对优先流已有一些理论研究和实验成果, 包括运用“CT 技术”, 借助于计算机图像处理方法分析图像得到含水量。还有运用地面渗透雷达测绘层状土及土壤夹层状况用计算机软件处理和分析, 在理论上亦推导出一些模型, 如, Gerke 等提出了优先流双孔隙体系的概念模型, 但优先流的机理及其定量化仍在探索阶段<sup>[33]</sup>。

## 2 土壤内的溶质运动研究进展

土壤水流的研究历程一直伴随着溶质运移的研究, 溶质存在于土壤, 它与土壤发生吸附或者解吸附的相互作用, 同时土壤水分的运动又提供了溶质运移的驱动力和化学反应环境。Lapidus 等提出了一个类似于对流弥散方程的模型<sup>[34]</sup>; 随后, Scheidegg 又将 Lapidus 的方程扩展到三维的情况, 并在均质土壤、稳态流的条件下推导出了反映溶质迁移的概率密度函数, 同时考虑了溶质迁移的水动力弥散作用, 使溶质迁移理论向前推进了一步; 到 1960 年, Nelson 和 Bggar 从理论上推导建立了对流弥散方程, 并根据实验结果, 对 Lapidus、Scheidegg 和 Nelson 的模型进行了比较分析, 结果表明, 所建的对流弥散方程能较好地描述保守物质在多孔介质中的迁移规律, 系统地论述了对流弥散方程的科学性和合理性。J·弗里德研究了在宏观孔隙连续介质前提下的经典模型和对流弥散方程, 提出了在固体物质与孔隙分界上浓度与浓度梯度跳跃变动的水动力弥散模型。随着全球化和工业化的发展, 工业和农业污染物质进入地表环境系统的强度剧增。污染物质进入水土系统后产生一系列的物理、化学和生物作用, 包括吸附与解吸附、挥发、光解和生物降解等。降解、吸附与挥发作用很大程度上决定着土水系统污染的持续性<sup>[35]</sup>。如, 土壤中生物降解作用直接控制着有机化合物的转化过程。Alexander 等研究了一些方程来反应生物降解的动力学过程, 它们是 Zero-order 方程、Half-order 方程、Three-half-order 方程、Mixed-order 方程、Logistic 方程、Logarithmic 方程、Michaelis-Merton 方程和 Monod(包括生长过程) 方程等<sup>[36]</sup>。这些方程都有一定的理论基础, 但是需要通过试验数据机型进行经验拟合才能应用。其中 Zero-order 和 First-order 方程比较简单, 而且容易嵌入溶质运动模型, 因此广泛应用于描述有机降解的过程。Alexander 等深入研究了这两个方程的适用条件<sup>[35]</sup>。但是一些溶质(如 N、P 的化合物) 的降解反应属于链式降解过程。在土壤和地下水系统中溶质运移又伴随着连续的一级降解反应。如放射性元素的衰变、氮元素迁移转化过程、有磷元素的迁移, 还有一些杀虫剂及其降解物的运移研究、卤化烃的生物降解过程和激素的运移转化过程<sup>[37-51]</sup>。在杀虫剂研究方面, 认为其不存在挥发过程, 但最近的研究表明挥发作用对杀虫剂的转化过程有很大影响<sup>[52-53]</sup>, 另外, 吸附态和溶质态的杀虫剂间的互动过程仍是研究的热点, 如, 液相和固相的分子扩散、对流扩散运移、吸附态溶质不反应而液相溶质反应等引起的分配失衡问题。Rignatello 等研究表明, 一些有机物的降解过程仅仅发生在液相的溶质, 另一方面, 吸附态和溶质态的放射性衰减作用几

乎相同,但是其他形式的转化作用却主要发生在吸附态<sup>[54]</sup>。许多学者对考虑连续降解反应的溶质运移系统进行了简化,获取了一些解析解<sup>[39,45,55-57]</sup>。但是,这些解析解不能表达更加复杂的情况,如瞬时脉冲水流、非线性反应的溶质迁移转化过程。国外学者在处理非饱和带的迁移转化规律时,考虑土壤液相和固相浓度的分配系数,并借助于 Henry, Freundlich 和 Langmuir 的等温吸附模式来表示液相和固相浓度吸附和解吸问题。在此基础上,发展了众多溶质非线性模型<sup>[58]</sup>。

蒸发和植物蒸腾过程是影响浅层地表水和溶质分布的又一重要因素。它们通过减少土壤中的水分而积累土壤中溶质,尤其是在干旱区。我国大规模季节性旱涝和土地盐渍化的综合治理,推动了土壤水分和溶质运移特别是水盐运动的研究。通过土壤水分运动方程、CDE 与数值模拟技术相结合,一些学者研究了地下水与土壤盐渍化定量关系<sup>[59-60]</sup>,给出了土壤盐分动态发展趋势的中、长期预测预报<sup>[61-62]</sup>。

### 3 土壤水热、溶质运移耦合研究进展

水土系统是一个复杂的耦合系统,一方面它受到水文循环作用、生物系统作用和人类活动的影响;另一方面,水土系统对运行其中的水流、热流、溶质流的交互作用也非常明显。例如,土壤水、溶质的非等热转换周期性(如日变化、季节变化)地发生在靠近地表的土壤中。温度梯度影响水势场并能诱导土壤水的运动、水的运动输送热和溶质,从而导致溶质浓度梯度和新的温度梯度的产生,它们又能推动水的运动。温度和土壤水分的改变直接影响生物系统的新陈代谢作用,反过来作用于土壤中的溶质分布。“牵一发而动全身”,研究土壤科学必须从一个系统角度去理解和认识它。这样的耦合机理正在日益受到学术界的重视,前人也在这方面做了大量的研究工作,并建立了模型。

土壤水热耦合运移数值模型是在水分等温模型的基础上建立和发展起来的,Gur 等将等温方程改进为非等温扩散方程,在此基础上发展了两类耦合的数值模型:质能平衡基础上的模型和不可逆热力学基础上的线性模型。Nassar-Horton 进行了稳态条件下热和物质迁移的土柱试验,发现溶质浓度影响不等温条件下非饱和土壤的水分迁移,由此提出了一个同时考虑含水量、温度和溶质浓度影响并描述稳态条件下多孔介质中液相和气相水分迁移的理论<sup>[63]</sup>。该理论对水分分布的预测值和实测值基本一致,而使用 Philip DeVries 的水流方程得到的盐化土稳态条件下水分分布的预测值则明显偏离了实测值<sup>[64]</sup>。进一步的研究表明,在由微观方程向宏观连续方程的转化中,线性模型缺乏严密的考虑,应用较少。Bear-Glman 考虑到溶质浓度对水汽流的影响,把分子扩散和对流作为盐分迁移的主要动力,描述了一个非饱和带土壤水、热和化学物质的运动模型,该模型只考虑到盐分滤渗和热扩散对溶质运移的作用,而忽视了溶质浓度对液体流的影响<sup>[65]</sup>。最初的质能平衡模型是以含水量和温度为未知函数,Milly 等对模型进行改进,采用基质势梯度代替含水量梯度,使修正后的模型适用于非均质土壤,并可忽略水分滞后现象的影响。Nassar 等在质能平衡模型基础上,利用水、热、盐运移方程(即 Darcy, Fourier, Fick 定律)和连续方程,建

立了封闭土柱水、热、溶质三者耦合运移的模型。Chung 等研究了部分植被覆盖下的土壤热流与水流运动耦合过程<sup>[66]</sup>。国内土壤水热耦合数值模型的研究起步于20世纪80年代的林家鼎等,主要集中在室内试验拟合、田间试验拟合等,大部分是垂向一维模型,少数涉及到二维建模<sup>[67]</sup>。

土壤水与溶质运移的耦合研究取决于溶质特性。根据溶质的物理作用(吸附、温度响应等)、化学反应(反应平衡、反应时间等)和生物作用(降解作用、氧化还原作用等),发展不同的耦合模型。Nelson 等对对流扩散模型进行了理论推导并加以试验验证。Golay 将 Taylor 分析方法应用到平衡条件下的化学反应系统中,通过线性等温过程描述了表面吸附性质<sup>[68]</sup>。Starr 等用试验验证了 Golay 的研究结果,并将 Golay 的表达式推广应用到非线性等温吸附过程中<sup>[69]</sup>。Singh G. W 等对土壤非饱和水流的溶质吸附分配系数和解吸附过程进行了深入研究<sup>[70]</sup>。Nkedi-Kizza P. 等考虑离子的交换过程并建立数值模型<sup>[71]</sup>。van Genuchten 运用一阶动力方程考虑溶质的自然降解作用<sup>[72]</sup>。Schaerlaekens 等进一步发展了多组分溶质的链式反应模型<sup>[73]</sup>。Kamra S. K 和 imurek 等分别利用室内土柱研究了非线性溶质运移过程<sup>[74-75]</sup>。由于在田间条件下,土壤的空间结构变异性比较大,土壤中水流的速度也存在空间变异,是一个不确定系统,因而不完全服从 CDE 方程。Jury 提出随机转移函数模型(Transfer Function Model, TFM),用来研究非饱和土体中溶质运移过程<sup>[76]</sup>。自从20世纪80年代以来,陆续研制了一系列水盐运动模型和软件,包括 LEACHM 和美国盐渍土实验室推出的一维盐分运移模型软件 HYDRUS 1D<sup>[77]</sup>、WISUT, 二维盐分运移模型软件 HYDRUS 2D、SWMS 2D、SWMS 3D, 以及多组分反应性溶质运移模型软件 CHAIN、UNSATCHEM 2D、CHAIN2D 和 UNSATCHEM 等<sup>[77-78]</sup>。张世熔利用 COM 技术将土壤水热氮的联合模拟模型组件嵌入到 GIS 平台上,并根据其模拟结果分析了水氮损失及利用效率的空间分布特征及影响因素<sup>[78]</sup>。

综上所述,土壤水流的概念模型发展经历了3个阶段:单一流态对流扩散模式;将土壤水概化成动水与不动水;将土壤水概化为慢速水流和快速水流。随着水流模式的发展,溶质运动过程经历了4个阶段:一般对流扩散模式;溶质被概化成团聚体内静止部分和空隙中的运动部分;溶质被概化为快速流部分和慢速流部分;溶质被钙化为快速流部分、慢速流部分和吸附部分。在水流模式的基础上,反应性溶质的交互过程研究经历了4个阶段:交互反应为瞬时完成模式;交互反应分为瞬时完成和依时渐变完成;交互反应分为快速反应和慢速反应;交互反应分为快速反应、慢速反应和吸附作用。根据研究的实际情况,前人对水流运动、溶质运动与溶质源与汇进行了一些组合研究,并将维界从一维拓展到二维、三维空间,由线性问题逐步发展到更结合实际的耦合非线性问题。随着研究的深入,耦合研究的难点也日益明显,如,概念模型参数估计问题、概念模型耦合后参数的适应性和多元非线性问题、模型的时空尺度效应等。

### 4 展望

溶质运移的研究经历了一个从室内的理论模型转向田

间和面积实际应用的过程。模型发展也经历着从室内和田间“点”尺度下土壤溶质运移模型转变到微域尺度、区域尺度下的土壤溶质运移模型。随着研究的继续,水土系统的研究逐渐走向各系统耦合机理的探索与应用。国际地圈-生物圈计划(IGBP)、国际水文计划(IHP)、世界气候研究计划(WCRP)、联合国环境计划(UNEP)和全球水量与能量平衡计划(GEWEX)均把各种尺度下通过大气-植被-土壤系统的水分输送过程和能量交换问题作为其重要内容,这进一步促进了水土系统耦合机理与模型的发展。在耦合过程中,土壤水与溶质迁移特性的时空变化、水土系统的特征尺度效应将是未来研究的热点。

水循环是提供土壤水分和溶质运动的主要驱动力之一,所以研究水文过程与土壤系统的交互过程显得尤为重要。从当初的物理过程模拟为主,逐步发展到包括物理、化学及生物过程的模拟;从模拟土-根系统中的溶质运移,发展到模拟土壤-作物-大气系统,进一步发展到模拟生态环境系统和全球物质循环及气候变化。从模拟简单的水、气、溶质等物质运移,发展到同时模拟物质运移和能量传递。因此,剖析水流与溶质、能量随水文循环在每个水流途径内的迁移转化规律以及季节变化规律,定量分析水-土界面溶质能量迁移转化规律、水文响应过程,建立具有物理机理基础的分布式水文-溶质迁移转化耦合模型,从而在流域或者区域范围进行溶质污染输出控制措施与环境评价,可以很好理解气候变化、人类活动条件下,点源与面源污染的发生、迁移、转化和沉积过程,也是耦合模型发展的重要研究方向。在耦合机理影响下,大气、水文和生物对土壤物理或化学特性的反馈,土壤中的水流、溶质与能量的二次平衡或者非线性化,也有待进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 张超,王会肖.土壤水分研究进展及简要评述[J].干旱地区农业研究,2003,21(4):117-120,125.
- [2] 施成熙,粟宗嵩,曹万金,等.农业水文学[M].北京:农业出版社,1984:169-208.
- [3] 张北赢,徐学选,李贵玉,等.土壤水分基础理论及其应用研究进展[J].中国水土保持科学,2007,5(2):122-129.
- [4] 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,1988:1-24.
- [5] 张超,王会肖.土壤水分研究进展及简要评述[J].干旱地区农业研究,2003,21(4):117-120,125.
- [6] 陈明亮.土壤水分研究动态[M].北京:农业出版社,1993:111-115.
- [7] 雷志栋,杨诗秀.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:276.
- [8] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[R]. Hydrology Paper No.3. Colorado State University, Fort Collins, 1964.
- [9] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44: 892-898.
- [10] SCHAAP M G, LEIJ F J, VAN GENUCHTEN M T. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions[J]. J Hydrol, 2001, 251: 163-176.
- [11] 张永强,刘昌明,于强.土壤-植被-大气系统水和热传输机理及区域蒸散模型(英文)[J].中国科学院研究生院学报,2004,21(4):562-567.
- [12] 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):543-549.
- [13] HOPMANS J, DANE J H. Temperature dependence of soil retention curve[J]. Soil Sci Soc Am J, 1986, 60: 562-567.
- [14] PHILIP J R, DE VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Trans Am Geophys, 1957, 38: 322-332.
- [15] 张一平,白锦麟,张君常,等.温度对土壤水势影响的研究[J].土壤学报,1990,27(4):454-458.
- [16] 阎安成,张一平,朱铭荻,等.田间土壤水势温度效应[J].土壤学报,1995,32(2):237-240.
- [17] MILLY C P D. Moisture and heat transport in hysteretic inhomogeneous porous media: A metric head-based formulation and a numerical model[J]. Water Resources Res, 1982, 18(3): 489-498.
- [18] NASSARI N, GLOBUS A M, ROBERT GORTON. Simultaneous soil heat and water transfer[J]. Soil Sci, 1992, 154(6): 465-472.
- [19] 王铁行,卢靖,岳彩坤,等.考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J].岩土力学,2008,29(1):4-8.
- [20] DE VRIES D A. Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media[J]. Trans Am Geophys Union, 1958, 39: 909-916.
- [21] 孙景生.夏玉米生长盛期土壤-作物-大气连续体水热耦合运移的数值模拟[M].杨凌:西北农业大学,1994.
- [22] DURNER W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure[J]. Water Resour Res, 1994, 32(9): 211-223.
- [23] MUALEM Y I. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resour Res, 1976, 12: 513-534.
- [24] PHILLIP J R. The theory of absorption in aggregated media[J]. Aust J Soil Res, 1968, 6: 1-19.
- [25] SIMONEK J, HOPMANS J W. Parameter optimization and nonlinear fitting [C]// DANE J H, TOPP G C. Methods of soil analysis, Part 1, Physical Methods, Chapter 1.7 Third edition, SSSA, Madison, WI, 2002: 139-157.
- [26] VAN DAM J C, STRICKER J N M, DROOGERS P. Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiment[J]. Soil Sci Soc Am J, 1994, 58: 647-652.
- [27] CROW W, RYU D, FANGIETI J. Upscaling of field-scale soil moisture measurements using distributed land surface modeling[J]. Advances in Water Resources, 2005, 28: 1-4.
- [28] WARRICK A W, NELSEN D R. Spatial variability of soil physics [C]// HETTEL D. Application of soil physics. New York: Academic Press, 1980: 319-344.
- [29] ZAVATTARO L, JARVIS N, PERSON L. Use of similar media scaling to characterize spatial dependence of near saturated hydraulic conductivity[J]. Soil Sci Soc Am J, 1999, 63: 486-492.
- [30] WESTERN A W, BLOSCHL G. On the spatial scaling of soil moisture[J]. Journal of Hydrology, 1999, 217: 203-224.
- [31] BLOSCHL G, WESTERN A W. Spatial observations and interpolation [C]// GRAYSON R. Spatial patterns in catchment hydrology: Observations and modeling. New York: Cambridge University Press, 2000: 17-50.
- [32] 刘亚平,陈川.土壤非饱和带中的优先流[J].水科学进展,1996,7(1):85-89.
- [33] GERKE H H, VAN GENUCHTEN M T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media[J]. Water Resour Res, 1993, 29(2): 305-319.
- [34] VARMA A, AMUNDSON N R. Stirred pots and empty tubes [C]// LAPIDUS L, AMUNDSON N R. Chemical reactor theory: A Review. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1952: 191.
- [35] CHOUCT. Theoretical consideration of the partition uptake of inorganic organic compounds by soil organic matter [C]// SAWHNEY B L, BROWN K. Reactions and movement of organic chemicals in soils. Soil Science Society of America, Madison, WI, 1989.
- [36] ALEXANDER M, SCOW K M. Kinetics of biodegradation in soil [C]// SAWHNEY B L, BROWN K. Reactions and movement of organic chemicals in soils. Soil Science Society of America, Madison, WI, 1989.
- [37] LESTER D H, JANSEN G, BURKHOLDER H C. Migration of radionuclide chains through an adsorbing medium [J]. AIChE Symposium Series, 1975, 71: 202-213.
- [38] GUREGHANA B. A two-dimensional finite element solution for the simultaneous transport of water and multi-solutes through a nonhomogeneous aquifer under transient saturated/unsaturated flow conditions [J]. Sci Total Environ, 1981, 21: 329-337.
- [39] GUREGHANA B, JANSEN G. LAYFLO: A one-dimensional semi-analytical model for the migration of a three-member decay chain in a multilayered geologic medium [M]. Available from NIELS, 1983.
- [40] CHD C M. Convective transport of ammonium with nitrification in soil [J]. Can Jour Soil Sci, 1971, 51(3): 339-350.
- [41] MSRAC, NELSEN D R, HIGGAR J W. Nitrogen transformations in soil during leaching: I. Theoretical Considerations [J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1974, 38(2): 289-293.
- [42] WAGENET R J, HIGGAR J W, NELSEN D R. Analytical solutions of miscible displacement equations describing the sequential microbiological transformations of urea, ammonium and nitrate [M]. Research Report 6001, Dept. of Water Science and Engineering, Univ. California, Davis, CA, 1976.
- [43] TILLOISON W R, ROBBINS C W, WAGENET R J, et al. Soil water solute and plant growth simulation, Bulletin 502 [M]. Utah Agricultural Experiment Station, 1980: 53.
- [44] CASTRO C L, ROLSTON D E. Organic phosphate transport and hydrolysis in soil: theoretical and experimental evaluation [J]. Soil Sci Soc Am J, 1977, 41(6): 1085-1092.
- [45] BROMLOW R H, LEISTRA M. Measured and simulated behavior of dicarb



- and its oxidation products in fallow soils[J]. *Pestic Sci*, 1980, 11(4): 389-395.
- [46] WAGENET R J, HUIJSON J L, LEACHM. Leaching estimation and chemistry model, A process-based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone, Continuum 2, Dept. of Agronomy, Cornell University, Ithaca, New York, NY, 1987.
- [47] SINGH G, SPENCER WF, CLATH MM, et al. Sorption behavior of s-Triazine and Thiocarbamate herbicides on soils[J]. *J Environ Qual*, 1990, 19(3): 520-525.
- [48] SCHAEERLAEKENS J, MALLANIS D, SIMUNEK J, et al. Numerical simulation of transport and sequential biodegradation of chlorinated diphenyl hydrocarbons using CHAIN2D[J]. *J of Hydrological Processes*, 1999, 13(17): 2847-2859.
- [49] CASEY F X M, SIMUNEK J. Inverse analyses of the transport of chlorinated hydrocarbons subject to sequential transformation reactions[J]. *J Environ Quality*, 2001, 30(4): 1354-1360.
- [50] CASEY F X M, LARSEN G L, HAKK H, et al. Fate and transport of 17-Estradiol in soil-water systems[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(11): 2400-2409.
- [51] CASEY F X M, LARSEN G L, HAKK H, et al. Fate and transport of testosterone in agriculturally significant soils[J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38(3): 790-798.
- [52] GLOIFELTY D E, SCHOMBURG C J. Volatilization of pesticides from soil [C]// SAWHNEY B L, BROWN K. Reactions and movement of organic chemicals in soils. Soil Science Society of America, Madison, WI, 1989.
- [53] SPENCER WF. Volatilization of pesticides from soil: processes and measurement[J]. *Pesticide Res J*, 1991, 3(1): 1-14.
- [54] HGNATELLO J J. Sorption dynamics of organic compounds in soils and sediments [C]// SAWHNEY B L, BROWN K. Reactions and movement of organic chemicals in soils. Soil Science Society of America, Madison, WI, 1989.
- [55] HARADA M, CHAMBRE P L, FOGIA M, et al. Migration of radionuclides through sorbing media, analytical solutions-I, Rep. no. LBL-10500 (UC-11) [M]. Lawrence Berkeley Laboratory, Univ. of California, Berkeley, CA, 1980.
- [56] HIGASHI K, HIGFORD T H. Analytical models for migration of radionuclides in geologic sorbing media[J]. *J Nucl Sci and Technol*, 1980, 7(9): 700-709.
- [57] SIMUNEK J, VAN GENUCHTEN MT. Convective dispersive transport of solutes involved in sequential first order decay reactions[J]. *Computers & Geosciences*, 1985, 11(2): 129-147.
- [58] FOX P J. Coupled large strain consolidation and solute transport. I: Model development[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2007, 133(1): 3-15.
- [59] 杨金忠, 蔡树英, 黄冠华, 等. 多孔介质中水分及溶质运移的随机理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [60] 任理, 秦耀东, 王济. 非均质饱和土壤盐分优先运移的随机模拟[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1): 104-113.
- [61] 陈启生, 戚隆溪. 有植被覆盖条件下土壤水盐运动规律研究[J]. *水利学报*, 1996(1): 38-46.
- [62] 陈亚新, 史海滨, 田存旺. 地下水与土壤盐渍化关系的动态模拟[J]. *水利学报*, 1997(2): 77-83.
- [63] NASSARI N, HORTON R. Simultaneous transfer of heat, water, and solute in porous media: I theoretical development[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56: 1350-1356.
- [64] NASSARI N, HORTON R. Water transport in unsaturated, nonisothermal, sandy soil: theoretical development[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1989, 53: 1330-1337.
- [65] BEAR J, GILMAN A. Migration of salts in the unsaturated zone caused by heating[J]. *Transp Porous Media*, 1995, 19: 139-156.
- [66] CHUNG S O, HORTON R. Soil heat and water flow with a partial surface mulch[J]. *Water Resour Res*, 1987, 23(12): 2175-2186.
- [67] 林家鼎, 孙菽芬. 土壤内水分流动、温度分布及其表面蒸发效应的研究——土壤表面蒸发阻抗的探讨[J]. *水利学报*, 1983(7): 1-8.
- [68] GOLAY MJ E. Theory of chromatography in open and coated tubular columns with round and rectangular cross-section[J]. *Gas Chromatography*, 1958, 5: 36-58.
- [69] STARR J L, SAWHNEY B L, FRANK C R. Diffusivity of solute in absorbing porous media in surface and subsurface hydrology[M]. Fort Collins: Water Resource Publ, 1979: 512-521.
- [70] SINGH G, SPENCER WF, CLATH MM, et al. Sorption behavior of s-Triazine and Thiocarbamate herbicides on soils[J]. *J Environ Qual*, 1990, 19(3): 520-525.
- [71] NKEI-KIZZA P, HIGGAR J W, SELIM H M, et al. On the equivalence of two conceptual models for describing ion exchange during transport through an aggregated oxid [J]. *Water Resour Res*, 1984, 20(8): 1123-1130.
- [72] VAN GENUCHTEN MT. Convective dispersive transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions[J]. *Computers & Geosciences*, 1985, 11(2): 129-147.
- [73] SCHAEERLAEKENS J, MALLANIS D, SIMUNEK J, et al. Numerical simulation of transport and sequential biodegradation of chlorinated diphenyl hydrocarbons using CHAIN2D[J]. *Hydro Processes*, 1999, 13: 2847-2859.
- [74] KAMRA S K, LENNARIZ B, VAN GENUCHTEN MT, et al. Evaluating non-equilibrium solute transport in small columns[J]. *J Contam Hydrol*, 2001, 48: 189-212.
- [75] SIMUNEK J, WENDROTH O, WYPLER N, et al. Non-equilibrium water flow characterized by means of upward infiltration experiments[J]. *Europ J Soil Sci*, 2001, 52: 13-24.
- [76] JURY W A, SPOSTO G, WHITE R E. A transfer function model of solute transport through soil: I Fundamental concepts[J]. *Water Resour Res*, 1986, 22: 243-247.
- [77] SIMUNEK J, VAN GENUCHTEN MT, EJNA M. The HYDRUS 1D software package for simulating the one dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Version 3.0. HYDRUS software series [M]. Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, 2005: 240.
- [78] 张世熔. 基于GIS的区域水氮行为模拟与管理分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.

- 5.

(上接第13730页)

仅受气候的影响,还与土壤所种植人参根系分泌物有关。

### 3 结论与讨论

(1) 栽参土、老参地与新林土相比,不同人参产地的微生物总数普遍降低。与新林土相比,栽参土壤中细菌总数降低了48.6%~63.7%,老参地降低了57.1%~82.9%,差异达到显著水平( $P < 0.05$ );放线菌的数量分别降低了60.0%~75.3%和42.1%~77.6%,差异达到显著水平( $P < 0.05$ );而与新林土相比,栽参土和老参地的土壤真菌总数均有不同程度的增加,栽参土真菌总数是新林土的1.6~3.9倍,老参地是新林土的2.8~6.3倍。

(2) 新林土中的细菌和放线菌数量在春季、夏季、秋季均高于栽参土壤和老参地土壤。

(3) 真菌的数量在春季、夏季、秋季均为老参地土壤数量最高,新林土壤数量最低。

### 参考文献

- [1] 李晓明. 老参地栽参问题的研究进展[J]. *吉林农业大学学报*, 1997(2): 21-23.
- [2] 韩东, 雷军, 杨继祥. 老参地问题的研究进展[J]. *人参研究*, 1998(2): 2
- [3] 王韵秋. 老参地栽参的初步调查[J]. *特产研究*, 1979(1): 13-15.
- [4] 张梦昌, 金玉姬, 马晶, 等. 老参地改良后微生物生态类群的变化[J]. *吉林农业大学学报*, 1990, 12(4): 42-46.
- [5] CHUNG Y R, KIM H J, CHH S H. Comparison of rhizosphere environments in soils suppressive and conducive to ginseng root rot[J]. *Korean Journal of Protection*, 1984, 23(3): 142-146.
- [6] SHNH S, LEE M W. Studies on the distribution of fungal and *Fusarium* spp. propagules in ginseng field soil[J]. *Korean Journal of Mycology*, 1986, 14(2): 102-119.
- [7] 冀森, 张晋京, 江源, 等. 栽参对土壤化学性质的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 1996, 18(3): 67-73.
- [8] 全国人参科技资料汇编编审委员会. 全国人参科技资料汇编 [C]. 1985: 526.
- [9] 郭淑华, 王玉香, 耿运琪, 等. 栽参对土壤微生物生态的影响[J]. *生态学报*, 1990, 10(3): 286-287.
- [10] 邢晓科, 李玉, DALPE Y. 吉林省参地中的10种VA菌根真菌[J]. *吉林农业大学学报*, 2000, 22(2): 41-46.
- [11] 杨靖春, 李治平, 酒井斐子, 等. 人参根系分泌物及其对人参根际微生物作用的研究[J]. *东北师范大学学报: 自然科学版*, 1982(3): 71-77.
- [12] 吉林省土壤肥料总站. *吉林土壤* [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [13] 许光辉, 郑洪元. *土壤微生物分析方法手册* [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [14] 唐咏, 梁成华, 刘志恒, 等. 日光温室蔬菜栽培对土壤微生物和酶活性的影响[J]. *沈阳农业大学学报: 自然科学版*, 1999, 30(1): 16-19.
- [15] 费颖恒, 黄艺, 严昌荣, 等. 大棚种植对农业土壤环境的胁迫[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 243-247.