

土壤溶质运移模型的研究及应用

李保国 胡克林 黄元仿 刘刚

(中国农业大学资源与环境学院 北京 100094)

摘要 土壤溶质运移的研究已成为土壤学、生态学、水资源学以及资源与环境科学等相关学科的基础和前沿研究领域。本文系统地论述了不同尺度下土壤溶质运移模型的研究进展, 对其在农业生产、资源利用 and 环境保护方面的应用进行了简要综述, 并就其未来发展趋势进行了展望。

关键词 不同尺度; 土壤; 溶质运移; 模型; 应用

中图分类号 S152; S153

土壤溶质即土壤溶液中溶质, 包括无机和有机两个部分。自然条件下无机部分包括各类离子, 如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} , 还有一些少量的其他离子, 如 Fe、Mn、Zn、Cu 等盐类化合物; 有机部分包括可溶性有机物如氨基酸、腐殖酸、糖类和有机-金属离子的络合物。此外, 尚有一些悬浮的有机无机胶体、“活胶体”即某些细菌和病毒、以及溶解的气体。由于人类的活动, 溶质也可能是一些有机或无机污染物、重金属元素、农药等。

土壤溶质运移所研究的是溶质在土壤中的过程、规律和机理。上世纪 60 年代初, Nielson 和 Biggar^[1~5]从实验和理论上进一步说明了土壤溶质运移过程中质流、扩散和化学反应的耦合性质, 并应用数学模型来说明和解释溶质运移过程, 确立了土壤溶质运移的对流-弥散方程 (Convection Dispersion Equation: 简称 CDE, 或 Advection Dispersion Equation: 简称 ADE), 作为土壤溶质运移研究的经典和基本方程的主导地位。

目前, 土壤溶质运移的研究已成为土壤学、生态学、水资源学以及资源与环境科学等相关学科的基础和前沿研究领域, 越来越得到重视^[6~9]。近十几年取得的进展有目共睹, 其研究成果促进了土壤学科和相关学科的发展, 在农业生产、资源利用和环境保护方面也得到了广泛应用。

1 土壤溶质运移模型的研究

1.1 室内和田间“点”尺度下土壤溶质运移模型

根据模型的构成原理, 可分为 3 类^[10]: 确定性机理模型、确定性函数模型和随机模型。

1.1.1 确定性的机理模型 该类模型实质是体现了过程的最基本的机理。通常非稳态、伴有吸附或分解的一维对流-弥散溶质运移方程一般可表述为:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} + \rho \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \theta D(\theta, q) \frac{\partial C}{\partial z} - qC \right\} - \varphi(z, t) \quad (1)$$

式中, C : 土壤溶质浓度, θ : 土体含水率, ρ : 土壤干体积质量 (容重), S : 溶质在吸附相中的浓度, $D(\theta, q)$: 弥散系数, q : 达西流速, t : 时间, z : 土壤深度坐标, $\varphi(z, t)$: 包括土壤溶质的各个转化过程及植物根系吸收在内的源汇项。

该模型是经典的溶质运移机理性模型, 是诸多溶质运移转化模型的主体构成, 比如 LEACHM^[11]; RZWQM^[12]; HYDRUS-1D^[13]等。Coats 和 Smith^[14]对该方程进行了进一步的修正, 建立了可动与不可动相“两域” (two-regions) 的 CDE。考虑到土壤颗粒表面物理化学反应特征的不同, van Genuchten 和 Wagenet^[15]据此建立了结构土壤中的两域/双点位 (two-sites) 的土壤溶质运移模型。

近 10 年来许多学者还注意到土壤结构体之间因大孔隙的存在等产生优先流。Gerke 和 van Genuchten^[16]提出了优先流双孔隙体系的概念模型。Ahuja 等^[17]和 Cameira^[18]应用 RZWQM 模型模拟了化学溶质在大孔隙中的运移。

1.1.2 确定性的函数模型 确定性函数模型对溶质和水流进行了简化处理, 大多用质量守恒原理来估算土壤溶质的行为^[19, 20]。常见的函数模型如活塞流、半解析模型、分层平衡模型和其他简单方法等^[21, 22]。分层平衡模型简单易于求算, 模拟结果相对较准确, 许多土壤养分运移转化模型都以该模型

作为首选模型,可以说该模型是目前水肥管理研究中比较实用的工具。

1.1.3 随机模型 随机模型其一是在确定性模型中引入随机参数,例如 Amoozegar 等^[23]应用偏斜斜率分布拟合孔隙水流速率和扩散系数以代替 CDE 中使用单一 v 和 D 值。杨金忠等^[24]对均匀和非均匀多孔介质中水分及溶质运移的随机理论进行了详细介绍,在理论上将溶质的宏观弥散与介质的统计特征相联系,克服和解决了宏观弥散系数的求解问题。其二是完全随机模型,也就是说当制约溶质迁移的机理不清楚时,在某一时刻从给定土壤容积输出的溶质质量速率可看作是前一时刻 t' 输入的随机函数^[25]。设 $Q_{in}(t')$ 和 $Q_{out}(t)$ 分别是溶质输入和输出的标准(除以总质量输入)质量速率,则有:

$$Q_{out}(t) = \int_0^t g(t-t'|t')Q_{in}(t')dt \quad (2)$$

式中, $g(t-t'|t')$ 是溶质在迁移体积中存留时间的条件概率密度函数(pdf)。White^[26]应用完全随机的传递函数模型(Transfer Function Model: TFM)模拟了施 NH_4NO_3 肥料后, N 素的淋失情况。Jury^[27]应用 TFM 随机分析了在土壤类型和气候变化条件下农药对地下水的污染潜力。Zhang^[28]同时应用确定性机理模型和 TFM 预测了溶质运移,并比较了它们的结果。任理^[29-31]应用 TFM 分别模拟了非均质饱和和土柱中的盐分、土壤剖面中的 NO_3^- -N、均质饱和和土柱中的农药阿特拉津的运移以及冬小麦生长条件下土壤 NO_3^- -N 的淋失。

也有研究者将马尔可夫过程理论运用于土壤非饱和和流条件下溶质运移过程^[32]。

1.2 区域尺度下土壤溶质运移模型

溶质运移模型与 GIS(地理信息系统)的结合研制区域尺度下的土壤溶质运移模型,可将土壤溶质运移的研究工作从室内、点位或田间扩展到区域,为解决土壤或环境中的实际问题提供了有利条件。

然而,要将已有的 GIS 系统和溶质运移模型直接结合是非常困难的。为使二者协调统一,可采用将 GIS 植入溶质运移模型中,或将溶质运移模型植入 GIS 内,也可将二者所需空间数据的传输由同一界面完成。GIS 与溶质运移模型的结合方式可分为 3 种类型:松结合、紧结合和完全结合^[33-35]。

目前国内外研究区域溶质运移问题,以紧结合方式居多。采用紧结合方式将水质模型与 GIS 相结合研究区域非点源污染问题已有报道^[34]。近年来应

用面向对象的编程方法使模型和 GIS 容易实现完全结合。

1.3 微域尺度下土壤溶质运移模型

在当前的土壤科学中,现有的土壤溶质运移工作仍然主要是基于传统多孔介质输运的理论而展开的。对于多孔介质中通道的分形特性的影响目前仍主要停留在唯象的构造一些满足自相似变换的输运系数。为了解释弥散系数的尺度依赖关系,最近引入了分数阶导数的随机输运方程。Benson^[36]和 Pachepsky 等^[37]建立了能够描述不同土壤含水量并体现介质分形特性的对流-弥散方程(Fractional Advection Dispersion Equation: 简称 FADE):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{1}{2} D_{sf} \left\{ \frac{\partial^\alpha C}{\partial x^\alpha} + \frac{\partial^\alpha C}{\partial (-x)^\alpha} \right\} \quad (3)$$

式中, C : 土壤溶质浓度, D_{sf} : 分形弥散系数, a : 分数阶导数, $0 < a \leq 2$ 。

Benson 等^[38]应用 FADE 模拟了不同含水量,不同分形维数的多孔介质中溶质及气体的运移。Jacques 等^[39]应用多孔介质分形理论校准了 Richards 方程,模拟了降雨条件下溶质的运移特征。

这类处理方法虽然能在一定条件下解释实验现象,但是突出的问题是物理意义不清楚。

另一类处理方法是基于统计物理的随机行走理论和分形及无序体系的输运理论来构造相应的方程。如分形介质扩散方程:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D_t^{1-\alpha} K_\alpha \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (4)$$

该方程中的各项参数的物理意义清晰,相应的动力学参数如:扩散系数,弥散系数和体系的结构参数(分形维数,化学维数,孔隙率等)之间存在量化的关系。可以用来解释溶质运移中的拖尾现象,以及土壤中关于气体扩散系数的经验公式中各个拟合参数的物理意义^[40]。

2 国内外土壤溶质运移模型的应用进展

目前国内外土壤溶质运移模型的应用主要集中在以下几个方面。

2.1 盐碱土的改良及水盐运动的监测预报

国外从 20 世纪 70 年代就开始了土壤盐分运移的研究,并建立了盐化与碱化模型。Bresler^[41]所著《盐化与苏打化土壤》一书总结了有关盐分运动的原理和模型,代表了当时国际上在盐碱土的改良及

盐渍土的监测预报方面的成果。自从上世纪 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^[11] 和美国盐渍土实验室推出的一维盐分运移模型软件 HYDRUS-1D、WATSUIT, 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、CHAIN2D、UNSATCHEM-2D、UNSATCHEM 等^[13]。

国内从 20 世纪 80 年代才开始土壤溶质运移的研究。张蔚榛^[42]提出了土壤水盐运移模型的初步研究结果。李韵珠^[43]研究了非稳定蒸发条件下夹粘土层的水盐运动。左强^[44], Chen 等^[45]分别对饱和-非饱和条件, 排水条件及多离子的水盐运动规律进行了研究。石元春、李保国等^[46, 47]建立了黄淮海平原区域水盐运动监测预报的模型, 并开发了相应的 PWS1.0 软件。

2.2 土壤成土过程的模拟分析

土壤溶质运移理论应用于土壤形成过程的模拟, 可定量地揭示环境作用的影响, 反演或重建过去的气候与环境变化, 从而有助于预测土壤发育的未来趋势。Hoosbeek 和 Bryant^[49]从土壤发生学的角度对已有的成土过程模型根据其空间尺度和复杂性进行了分类。土壤 CaCO₃ 的淋溶淀积过程是成土过程中物质运移和转化的一个非常重要的过程。Mayer^[48]考虑了土壤中 CaCO₃ 的溶解和沉淀反应以及 CO₂ 和 pH 的影响建立了 CALSOIL 模型。

国内周志军^[50]研究了北京地区褐土和潮土中 Ca 的运移和 CaCO₃ 淋溶淀积的规律。Li Xuyong 和 Li Baoguo 等^[51]建立了土壤 CaCO₃ 动态平衡的分层模型, 对末次间冰期洛川剖面土壤 CaCO₃ 淋溶的过程进行了反演。段建南和李保国等^[52]建立了以土壤 CaCO₃ 化学热力学平衡体系和 CaCO₃ 变化量模型为主的土壤 CaCO₃ 淋溶淀积过程模型, 对干旱地区土壤剖面 CaCO₃ 的长期动态变化进行了预测, 并针对黄土高原不同地形部位的 CaCO₃ 剖面分布状况及成因做了探讨, 建立了人类活动作用下的土壤发育变化过程的定量化模拟系统 SOLDEP^[53]。

2.3 土壤养分管理

从 20 世纪 80 年代开始, 土壤 N 素转化与运移的研究就成为了一个热点, 并且建立了许多模型如 GLEAMS^[54], HYDRUS-1D^[13], LEACHM^[11], DAISY^[55], NLEAP^[56], RZWQM^[12]等。de Willigen^[57]比较了土壤-作物系统中 14 种 N 转化的模型。比较

内容包括涉及到的模型的程序、实现方法以及在相同的数据设定下运行的模拟结果。

国内虽然从 90 年代中期才开始土壤 N 素运移的研究, 但进展很快, 黄元仿和李韵珠^[58]研究了不同灌水条件下土壤 N 素的淋洗渗漏。另外一些学者分别就室内土柱, 旱地农田, 菜地以及稻田排水条件下的土壤 N 素转化和运移规律进行了研究^[59-61]。王凤仙等^[62]考虑了作物生长过程, 对土壤水氮资源的利用、损失和周年利用效率进行了分析与模拟。王凤仙等^[63]应用了非线性目标规划模型, 对冬小麦-夏玉米种植制度下, 不同降雨年型的水氮管理措施进行了优化。胡克林^[64]考虑了表层土壤饱和和导水率空间变异性的影响, 随机模拟了农田水分渗漏和 N 素淋失的特征。

另外, Gachter 等^[65]研究了 P 在优先流的作用下从土壤流失到地表水中的情况。

2.4 环境污染过程与控制

国外对污染物农药、重金属、细菌和病毒在土壤中的运移已经进行了系统的研究。Wagenet 和 Huston^[66]研究了非挥发性和挥发性农药在非饱和土壤中的转化和运移。Ahuja 等^[17]应用 RZWQM 模型预报了农药在田间土壤中的运移。

Selim 和 Amacher^[67]系统地应用各种模型(平衡模型、动水-不动水模型、两点模型、多离子组分竞争交换模型等)模拟了 Cr, Cd, Pb, Hg, Cu, Zn 等重金属在土壤中的运移与转化过程。Selim 和 Amacher^[68]等研究了多组分的重金属(Cu, V, Zn)在室内土柱中的竞争运移。McGowen 和 Basta^[69]研究了在采矿和冶炼区被重金属污染的土壤对周围地表水和地下水的迁移污染潜力。

对于细菌在土壤中的运移, 除少数研究者提出随机-对流模型和动力波模型外, 绝大多数研究者采用双点位的 CDE 方程来描述细菌运移^[70, 71]。

由于病毒与土壤胶体大小相当, 又称为“活胶体”, 它们的运移与其所处的环境条件密切相关。很多学者分别研究了病毒的种类, 土壤类型, 土壤含水量, 温度, pH, 离子强度等对病毒运移的影响^[71, 72]。一些研究者发现土壤胶体微粒在病毒的运移中起到辅助的作用^[73]。

国内从 80 年代中期逐渐开展了这方面的研究, 陈秋芳^[74]模拟了农药在土壤中的移动和降解。杨大文和杨诗秀^[75]研究了杀虫剂在室内土柱中的迁移及其影响因素, 结果表明: 对流、弥散、吸附作用对

农药运移影响大、而降解作用影响小。任理和毛萌^[31, 76]开展了农药阿特拉津在室内饱和土柱中运移和田间非饱和情形下运移建模与模拟的研究。李桂花等^[77]研究了生长和死亡条件下, 大肠杆菌在室内饱和和砂土柱中的运移。

2.5 区域尺度下非点源污染的评价

国外 90 年代初实现了溶质运移模型与 GIS 的结合, Wylie 等^[78]将 N 淋洗和经济分析模型包 (NLEAP) 与 GIS 结合, 指出了 N 淋洗发生的高风险区。Shaffer 等^[20]同样是联合 NLEAP/GIS 技术, 评估了区域内可能出现 N 淋失的“潜在危险区”, 通过制订最佳的管理措施, 来减少潜在危险区 N 淋失风险。Jordan 等^[79]利用 GIS 数据库, 评估了农业生产活动、当地污水排放及降雨对单元内 B 淋失的贡献。Christiaens 等^[80]将模型与 GIS 技术相结合对 N 肥施用的区域环境效应进行了评估, 并确定了一定区域内的最大施肥量。de Paz 和 Ramos^[81]将 GLEAMS 与 GIS 结合对一块面积为 230 km² 的西班牙农场进行了 N 淋失的风险分析。Kurt 等^[82]在 N 素模型与 GIS 的紧密结合研究中, 考虑了输入参数的空间变异特点。

国内黄元仿^[83]将水氮联合模型应用于区域土壤 N 素行为的模拟计算并与 GIS 技术结合, 在考虑区域土壤类型和气候类型基础上评价华北平原区域的水氮利用效率。张世熔^[84]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。

3 土壤溶质运移模型的发展趋势

3.1 模型功能不断完善和软件化

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大量实际应用的过程。为了更好地将模型进行推广应用, 一方面模型的功能在不断地扩展, 另一方面为了适应不同层次人员的使用需求, 提供了方便快捷的用户界面。国外开发的模型软件主要有: HYDRUS-1D, HYDRUS-2D, NLEAP, DAISY, LEACHM, RZWQM、UNSATCHEM 等, 这些软件系统还在不断完善。

而国内很少见到比较成熟的模型软件, 这是今后研究的方向。

3.2 模型类型向随机模型方向发展

由于土壤性质的空间变异以及土壤本身结构的

复杂性 (如大孔隙) 导致了确定性模型的预测结果令人失望, 因此, 确定性模型必须由随机性模型代替, 至少应在确定性模型中引入随机参数。目前对于土壤水力学参数空间变异性的研究较多, 但对其时间变异性的研究较少, 今后应加强土壤水力学参数的时空变异性及其获取方法的研究, 如采用土壤传递函数 (PTFs) 的方法或遥感技术等。

虽然模型的发展方向是随机模型的研究和应用, 但随机模型 (如 TFM) 的研究尚处于起步阶段, 还不能很好地应用到一些反应性溶质 (特别是 N 素和 P 素) 运移过程的模拟, 也不能应用于多组分或具有链反应性溶质运移的模拟。因此, 加强随机模型理论的研究将是今后一项比较迫切的任务。

3.3 发展基于孔隙尺度土壤溶质运移模型

基于土壤孔隙尺度溶质运移模型的研究是近几年土壤物理和土壤物理化学前沿性的基础研究内容^[85]。根据非线性动力学 (分形或混沌动力学) 和流体力学最新研究成果, 通过多孔介质中的气体扩散试验、电导率的测量及应用 X-射线横断扫描、核磁共振成像 (NMR) 等新技术来测定孔隙几何无序结构, 在此基础上建立包含吸附-解吸并考虑不同流速条件下的土壤溶质运移模型, 是今后研究的一个新方向。

3.4 模拟模型系统的完善与综合

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。

目前对于农作体系下的研究较多, 而对于其他生态系统下土壤溶质运移研究较少, 而且模拟的系统中很少考虑作物生长与作物根系吸收水分、养分 (溶质) 及溶质运移的耦合关系。另外, 作物根系吸水、吸养是影响溶质在农田土壤中运移的关键因素, 对该问题的研究一直未有重大突破, 这是今后溶质运移理论急需解决的问题。

3.5 开展不同尺度下土壤溶质运移模型及应用的研究

在土壤孔隙尺度进行基于土壤孔隙尺度的溶质 (可扩展到气体、水) 运移模型的研究; 在室内土柱尺度进行土壤重金属、土壤微生物、土壤气体 (O₂, N₂, CO₂, CH₄, NO 和 N₂O 等) 运移模型研究与验证;

在土壤剖面与田间尺度对已有土壤-植物系统过程模型(土壤水、养分和热运移过程与植物生长过程耦合模型)进行完善和提高,加入土壤 C、N 转化与气体运移模块,改进根系生长模型;在田块尺度开展地统计学方法与土壤过程模型结合的研究;在流域或区域尺度研究基于 GIS 技术原理,与区域天气过程、水文过程、植物/作物生长过程和人为过程(各种土地管理措施)相结合,发展分布式的土壤过程模型,进行宏观的决策管理。

参考文献

- Nielsen DR, Biggar JW. Miscible displacement in soils: Experimental information, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1961, 25: 1 ~ 5
- Biggar JW, Nielsen DR. Miscible displacement: II: Behavior of tracers. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1962, 26 (2): 125 ~ 128
- Nielsen DR, Biggar JW. Miscible displacement is soil: III: Theoretical consideration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1962, 26: 216 ~ 221
- Nielsen DR, Biggar JW. Miscible displacement: IV: Mixing in glass beads. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1963, 27 (1): 10 ~ 13
- Biggar JW, Nielsen DR. Miscible displacement: V: Exchange processes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1963, 27 (6): 623 ~ 627
- Kutilek M, Nielsen DR. *Soil hydrology: Textbook for students soil science, agriculture, forestry, geoecology, hydrology, geomorphology or other related disciplines.* Catena-Verl., 1994
- 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移. 北京: 科学出版社, 1998
- Selim HM, Sparks DL. Physical and chemical processes of water and solute transport/retention in soils. SSSA Special Publication No.56. *Soil Sci. Soc. Am., Inc. Madison, Wisconsin*, 2001
- Dane JH, Topp GC (Co-editors). *Methods of soil analysis Part 4. Physical methods.* *Soil Sci. Soc. Am., Inc. Madison, Wisconsin, USA*, 2002. 1253 ~ 1531
- Addiscott TM, Wagenet RS. Concepts of solute leaching in soils: A review of modeling approaches. *Journal of Soil Science*, 1985, 36: 411 ~ 424
- [Http://www.es.flinders.edu.au/leachmdownload/leachweb.htm](http://www.es.flinders.edu.au/leachmdownload/leachweb.htm)
- [Http://www.gpsr.cocostate.edu/gpsr/products/rzwqm.htm](http://www.gpsr.cocostate.edu/gpsr/products/rzwqm.htm)
- [Http://www.ussl.ars.usda.gov/modelsmenu.htm](http://www.ussl.ars.usda.gov/modelsmenu.htm)
- Coats JC, Smith BD. Dead-end pore volume and dispersion in porous and unsaturated sandstone. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1964, 27: 258 ~ 262
- van Genuchten MTh, Wagenet RJ. Two-site/two-region models for pesticide transport and degradation; theoretical development and analytical solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, 53: 1303 ~ 1310
- Gerke HH, van Genuchten MTh. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resour. Res.*, 1993, 29 (2): 305 ~ 319
- Ahuja LR, Ma QL, Rojas KW, Boesten JJTI, Farahani HJ. A field test of RZWQM simulation model for predicting pesticide and bromide behavior. *J. Pesticide Sci.*, 1996, 48: 101 ~ 108
- Cameira MR. Simulation of water and nitrate movement in level basin fertigated corn (M. S. Thesis). *Univ. of Portugal. Lisbon*, 1995
- Wolf H, de Wit CT, van Keulen H. Modeling long-term crop response to fertilizer and soil nitrogen: I: Model description and application. *Plant & Soil*, 1989, 120: 11 ~ 22
- Shaffer MJ. Identification and mitigation of nitrate leaching hot spots using NLEAP-GIS technology. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1995, 20: 253 ~ 263
- Dyson JS, White RE. A simple predictive approach to solute transport in layered soils. *J. of Soil Sci.*, 1989, 40: 525 ~ 542
- Stoorvogel JJ. Optimizing land use distribution to minimize nutrient depletions: A case study for Atlantic Zone of Costa Rica. *Geoderma*, 1993, 60: 277 ~ 292
- Amoozegar-Fard A, Nielsen DR, Warrick AW. Soil solute concentration distributions for spatially varying pore water velocities and apparent diffusion coefficients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 3 ~ 8
- 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. 北京: 科学出版社, 2000
- Jury WA. Simulation of solute transport using a transfer function model. *Water Resour. Res.*, 1982, 18 (2): 363 ~ 368

- 26 White RE. A transfer function model for the prediction of nitrate leaching under field condition. *J. Hydrology*, 1987, 92: 207 ~ 222
- 27 Jury WA. A stochastic analysis of the influence of soil and climate variability on the estimate of pesticide groundwater pollution potential. *Water Resour. Res.*, 1989, 25 (12): 2465 ~ 2474
- 28 Zhang R. Prediction of solute transport using a transfer function model and the convection-dispersion equation. *Soil Science*, 1995, 160 (1): 18 ~ 27
- 29 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. *土壤学报*, 2001, 38 (1): 104 ~ 113
- 30 任理, 马军花. 考虑土壤硝态氮转化作用的传递函数模型. *水利学报*, 2001, (5): 38 ~ 44
- 31 任理, 毛萌. 应用传递函数模型预报农药阿特拉津在土壤中的运移. *水利学报*, 2002, (4): 39 ~ 45
- 32 崔剑波, 庄季屏. 田间非饱和流条件下土壤硝态氮的运移. *应用生态学报*, 1997, 8 (1): 49 ~ 54
- 33 Goodchild MF, Haining RP, Wise SM. Integrating GIS and spatial data analysis: Problems and possibilities. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 1992, 6: 407 ~ 423
- 34 Tim US, Jolly R. Evaluating agricultural non-point source pollution using integrated geographic information system and hydrologic/water quality modeling. *J. Environ. Aual.*, 1994, 23: 25 ~ 35
- 35 Tim US. Coupling vadose zone models with GIS: Emerging trends and potential bottlenecks. *J. Environ. Qual.*, 1996, 25: 535 ~ 544
- 36 Benson DA. The fractional advection-dispersion equation: Development and application (Ph.D. diss). Univ. Nevada, Reno, 1998
- 37 Pachepsky YA, Craeford JW, Rawls WJ. Fractal models in soil science. *Geoderma*, 1999, 88: 137 ~ 164
- 38 Benson DA, Wheatcraft SW, Meerschaert MM. Application of a fractional advection-dispersion equation. *Water Resour. Res.*, 2000, 36: 1403
- 39 Jacques D, Simunek J, Timmerman A, Feyen J. Calibration of Richards' and convection-dispersion equations to field-scale water flow and solute transport under rainfall conditions. *Journal of Hydrology*, 2002, 259 (1-4): 15 ~ 31
- 40 Metzler R, Barkai E, Klafter J. Anomalous diffusion and relaxation close to thermal equilibrium: A fractional fokker-planck equation approach. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82: 3563 ~ 3567
- 41 Bresler E, Mcneal BL, Carter DL. Saline and sodic soils (principles dynamics modeling). *Advanced Series in Agricultural Science*, 1982, 10
- 42 张蔚榛. 地下水非稳定流计算方法和地下水资源评价. 北京: 科学出版社, 1983
- 43 李韵珠, 陆锦文, 黄坚. 蒸发条件下粘土层与土壤水盐运移(国际盐渍土改良学术讨论会论文集). 北京: 北京农业大学出版社, 1985, 176 ~ 190
- 44 左强. 排水条件下饱和-非饱和水盐运动规律的研究(博士学位论文). 武汉: 武汉水利电力学院, 1991
- 45 Chen WL, Li YZ, van der Ploeg RP. Modeling multi-ion transport in saturated soil and parameter estimation. II: Experimental. *Z. pflanzenernahr. Bodenk.* 1990, 153: 175 ~ 179
- 46 石元春, 李韵珠, 陆锦文等. 盐渍土的水盐运动. 北京: 北京农业大学出版社, 1986
- 47 石元春, 李保国, 李韵珠等. 区域水盐运动监测预报. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1991
- 48 Mayer L. The distribution of calcium carbonate in soil: A computer simulation using program CALDEP. *U.S. Geol. Surv.* 975. Menlo Park, CA, 1985
- 49 Hoosbeek MR, Bryant RB. Towards the quantive modeling of pedogenesis—A review. *Geoderma*, 1992, 55: 183 ~ 210
- 50 周志军. 土壤中 Ca 的运移与化学过程的定量研究(博士学位论文). 北京: 中国农业大学, 1998
- 51 Li XY, Li BG, Lu HY, Duan JN, Shi YC. Modeling and simulation of carbonate deposition processes in a Loess-paleosol sequence. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (supp.): 211 ~ 217
- 52 段建南, 李保国, 石元春, 严泰来, 朱德海. 干旱地区土壤碳酸钙淀积过程模拟. *土壤学报*, 1999, 36 (3): 318 ~ 326
- 53 段建南, 李旭霖, 王改兰等. 黄土高原土壤变化及其过程模拟. 北京: 中国农业出版社, 2001
- 54 [Http://sacs.cpes.peachnet.edu/sewrl](http://sacs.cpes.peachnet.edu/sewrl)
- 55 [Http://www.dina.kvl.dk/~abraham/daisy](http://www.dina.kvl.dk/~abraham/daisy)
- 56 [Http://www.gpsr.cocostate.edu/gpsr/products/nleap.htm](http://www.gpsr.cocostate.edu/gpsr/products/nleap.htm)
- 57 de Willigen. Nitrogen turnover in the soil-crop system: Comparison of fourteen simulation models. *Fertilizer Research*, 1991, 27: 141 ~ 149
- 58 黄元仿, 李韵珠. 不同灌水条件下土壤氮素淋洗渗漏的研究. 见: 徐明岗主编. 现代土壤科学研究. 北京: 中国

- 农业科技出版社, 1994, 243 ~ 247
- 59 冯绍元, 张瑜芳, 沈荣开. 非饱和土壤氮素运移与转化试验及其数值模拟. 水利学报, 1995, 6: 16 ~ 22
- 60 黄元仿, 李韵珠, 陆锦文. 田间条件下土壤运移的模拟模型 I 和 II. 水利学报, 1996, 6: 9 ~ 23
- 61 张瑜芳, 张蔚榛等. 排水农田中氮素转化运移和流失. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997
- 62 王凤仙, 陈研, 李韵珠. 土壤水氮资源的利用与管理 III: 冬小麦-夏玉米水氮管理措施的优化. 植物营养与肥料学报, 2000, 6 (1): 18 ~ 23
- 63 王凤仙, 李韵珠. 土壤水氮资源的利用与管理 II: 土壤水氮资源的利用、损失和周年利用效率模拟. 植物营养与肥料学报, 1999, 5 (4): 297 ~ 306
- 64 胡克林. 农田尺度下土壤属性的空间变异性及硝酸盐淋洗的随机模拟(博士学位论文). 北京: 中国农业大学, 2000
- 65 Gachter R, Ngatiah JM, Stamm C. Transport of phosphate from soil to surface water by preferential flow. Environ. Sci. Tec., 1998, 32 (13): 1865 ~ 1869
- 66 Wagenet RJ, Hutson JL, Biggar JW. Simulating the fate of a volatile pesticide in unsaturated soil: A case study with DBCP. J. Environ. Qual., 1989, 18 (1): 78 ~ 83
- 67 Selim HM, Amacher MC. Reactivity and transport of heavy metals in soils. CRC press, Inc., 1997
- 68 Selim HM, Amacher MC. Sorption and release of heavy metals in soils: Nonlinear kinetics. In: Selim HM, Sparks DL. eds. Heavy Metals Release in Soils, Florida: CRC Press, 2001, 1 ~ 30
- 69 McGowen SL, Basta NT. Heavy metal solubility and transport in soil contaminated by mining and smelting. In: Selim HM, Sparks DL. eds. Heavy Metals Rrelease in Soils. Florida: CRC Press, 2001, 89 ~ 108
- 70 Bales RC, Li SM, Jim TC, et al. Bacteriophage and microsphere transport in saturated porous media: forced-gradient experiment at Borden, Ontario. Water Resour. Res., 1997, 33 (4): 639 ~ 648
- 71 Comegna V, Coppola A, et al. Effectiveness of equilibrium and physical non-equilibrium approaches for interpreting solute transport through undisturbed soil columns. J. Contaminant Hydrol., 2001, 50: 121 ~ 138
- 72 Jin Y, Chu YJ, Li YSH. Virus removal and transport in saturated and unsaturated sand columns. J. Contamin. Hydrol., 2000, 43:111 ~ 128
- 73 Jin Y, Ellen P, Marylynn VY. Effect of mineral colloids in virus transport through saturated sand columns. J. Environ. Qual., 2000, 29: 532 ~ 539
- 74 陈秋芳. 用计算机模拟农药在土壤中的移动和降解. 土壤学报, 1986, 23 (4): 375 ~ 381
- 75 杨大文, 杨诗秀. 农药在土壤中迁移及其影响因素的初步研究. 土壤学报, 1992, 29 (4): 383 ~ 391
- 76 阿特拉津在室内滴灌施药条件和农田尺度下运移的数值模拟(博士学位论文). 北京: 中国农业大学, 2004
- 77 李桂花. 大肠杆菌和沙雷菌在砂土和砂质壤土中的运移特性(博士学位论文). 北京: 中国农业大学, 2002
- 78 Wylie BK. Predicting spatial distribution of nitrate leaching in northeastern Colorado. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 49 (3): 288 ~ 293
- 79 Jordan C. Modelling of nitrate leaching on a regional scale using a GIS. J. Environ. Qual., 1994, 42 (3): 279 ~ 298
- 80 Christiaens K. Combining GIS and a dynamic nitrogen simulation model to assess nitrogen leaching susceptibility on a regional scale: A case study. In: Van Cleemput, Hofman G, Vermoesen A. eds. Progress in Nitrogen Cycling Studies. The Netherlands: Kluwer academic Publishers, 1996, 407 ~ 411
- 81 de Paz JM, Ramos C. Linkage of a geographical information system with the gleams model to assess nitrate leaching in agricultural areas. Environmental Pollution, 2002, 118 (2): 249 ~ 258
- 82 Kersebaum KC, Lorenz K, Reuter HI, Wendroth O. Modeling crop growth and nitrogen dynamics for advisory purposes regarding spatial variability. In: Lajpat L, Ahuja LR, Howell TA, Ma LW. eds. Agricultural System Models in Field Research and Technology Transfer. Lewis Publishers, 2002, 230 ~ 251
- 83 黄元仿, 李韵珠, 李保国, 陈德立. 区域农田土壤水和氮素行为的模拟. 水利学报, 2001, 11: 87 ~ 92
- 84 张世熔. 基于 GIS 的区域水氮行为模拟与管理分析(博士学位论文). 北京: 中国农业大学, 2002
- 85 Perfect ED, Michael CS. Models relating solute dispersion to pore space geometry in saturated media: A review. In: Selim HM, Sparks DL. eds. Physical and Chemical Processes of Water and Solute Transport/Retention in Soil. SSSA Special Publication No., 2001, 56: 77 ~ 146

ADVANCES IN MODELING AND APPLICATIONS OF SOIL SOLUTE TRANSPORT

LI Bao-guo HU Ke-lin HUANG Yuan-fang LIU Gang

(*College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094*)

Abstract The research on the soil solute transport has been a fundamental and cutting-edge field in soil and water sciences, ecology and other relevant disciplines in association with resources and environmental studies. The paper systematically discussed the research advances in modeling for soil solute transport given by multiple scales as well as its applications in agricultural production, resource management and environmental protection. The paper finally provided an outlook for its development trend in future.

Key words Soil, Solute transport, Model, Applications, Multiple scales