

流域多尺度土壤水分监测与模拟研究进展

朱青^{1,2}, 廖凯华^{1,2}, 赖晓明^{1,2}, 刘亚^{1,2}, 吕立刚³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南京财经大学公共管理学院, 南京 210023)

摘要: 土壤水分调控着陆地表层系统空间格局和过程, 作为地表不同圈层中物质和能量输移转化的关键纽带和驱动力, 连接着一系列的水文、生态、气候和地质学过程。论文首先介绍了流土壤水分静态特征(土壤含水量和基质势时空变化)在流域范围内不同空间尺度上监测方法的优缺点, 包括直接手动监测、直接自动监测、地球物理探测和遥感监测等; 同时介绍了其动态特征(土壤水分运动)监测方法(径流小区法、示踪剂法和地球物理探测)的局限性和模拟模型(动力波模型、水量平衡模型和水动力模型等)的关键参数和过程。在此基础上提出了: ① 加强土壤水分监测尺度与方法的集成; ② 消除土壤水分运动模型不确定性; ③ 耦合土壤水分与碳氮输移循环过程等3个方面的研究展望和建议, 从而为高时空分辨率和高精度的土壤水分数据获取, 以及土壤水分运动与分布及其驱动下的碳氮排放过程、机理的揭示和模拟提供新的研究视角与思路。

关键词: 地球关键带; 空间尺度; 水文土壤学; 土壤墒情

流域指由分水线所包围的河流集水区, 分地面集水区和地下集水区2类。如果地面集水区和地下集水区相重合, 称为闭合流域; 如果不重合, 则称为非闭合流域。流域基本特征包括流域面积、河网密度、形状、高度以及干流方向等。土壤水分是指存在于非饱和带(包气带)土壤中的水分含量。作为地球表层系统的重要组成部分和水文循环的核心, 土壤水分调控着最基本的陆地表层系统空间格局和过程, 连接着流域一系列的水文、生态、气候和地质过程以及物质能量的存储、运移和转化(Vereecken et al, 2015; Vereecken et al, 2016)。土壤水分影响地球表层系统空间格局和过程的途径有多方面。一方面, 土壤水分作为载体直接决定流域地球表层系统中物质输移的过程和通量, 从而控制着物质的迁移(Zhu, Schmidt et al, 2012)。另一方面, 土壤水分改变着土壤温度、含氧状况、离子数量等, 从而改变着土壤中各种元素的生物地球化学循环过程(David-

son et al, 2000)。此外, 土壤水分会对土壤的物理机械性(如粘结性、粘着性和可塑性)产生影响, 从而诱导着山体滑坡、泥石流等一系列地质灾害的发生(Talebi et al, 2007)。因此, 研究土壤水分对农业管理、流域污染防治、气候变化认识、自然灾害预测等均有重要的作用。

流域土壤水分特征可分为静态和动态2个方面(图1)。静态方面的研究主要关注土壤的含水量、基质势等的时空分异特征及其控制机制; 动态方面的研究主要关注土壤水分的运动过程、规律及其控制机制。土壤水分静态特征是研究流域农业干旱及作物干旱的重要指标, 也是农田灌溉管理和流域水分平衡计算的重要参量, 它不仅直接影响土壤特性和植被生长, 而且间接影响植被的空间分布, 并在一定程度上影响局部地区微气候变化, 研究土壤水分静态特征对于水资源合理利用和生态建设具有现实意义(张学礼等, 2005)。土壤水分动态特征是

收稿日期: 2018-06-12; 修订日期: 2018-11-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41622102); 中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDB-SSW-DQC038)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41622102; Key Research Program of Frontier Sciences of Chinese Academy of Sciences, No. QYZDB-SSW-DQC038.]

第一作者简介: 朱青(1980—), 男, 贵州安顺人, 研究员, 从事土壤水文过程与营养盐输移耦合研究。E-mail: qzhu@niglas.ac.cn

引用格式: 朱青, 廖凯华, 赖晓明, 等. 2019. 流域多尺度土壤水分监测与模拟研究进展 [J]. 地理科学进展, 38(8): 1150-1158. [Zhu Q, Liao K H, Lai X M, et al. 2019. A review of soil water monitoring and modelling across spatial scales in the watershed. Progress in Geography, 38(8): 1150-1158.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.08.004

土壤中水分在水势梯度驱动下运动的外在表现,受气候、植被、地形、土壤和人类活动等多因素的综合影响,它决定着物质和能量在地表各圈层的迁移、转化和存储,且深刻影响着流域内土壤-植物-大气连续体(SPAC)养分传输和循环,研究土壤水分动态特征是流域土壤养分管理和环境风险评估的重要前提(Zhu, Liao et al, 2012)。由于土壤水分存在很强的时空变异性,在过去的几十年开展了大量关于不同时空尺度的土壤水分监测、预测及运动和分布过程机制的研究(Zhu, Liao et al, 2012; Vereecken et al, 2016)。同时,土壤水分的静态和动态特征作为表征水文过程、生物地球化学过程和能量物质输移过程的关键参数,也被广泛引入相关的机理解释和模型构建中(Lai et al, 2016; Vereecken et al, 2016)。

1 土壤水分静态特征监测方法

在流域范围内,土壤水分静态特征(含水量、基质势等)的测量方法可分直接法和间接法。直接法是指通过测定土壤中的水分或者由水分变化所引起的物理参数的改变,获取土壤的含水量和基质势等指标,包括烘干法、中子法、时域反射法(Time-Domain Reflectometry, TDR)、频域反射法(Frequency Domain Reflectometry, FDR)、张力计法(Zhu, Liao et al, 2012)等。其中烘干法是测定土壤含水量的标准方法,常作为其他测定方法精度的判别依据(邵明安等, 2006)。中子法在20世纪50年代就被用于

测定土壤含水量,该方法省时省力且不破坏原状土样,近来得到越来越多的关注。如杨德志等(2014)比较了中子法和烘干法测定的土壤水分,发现二者具有相当的精度。TDR和FDR作为一种利用土壤介电特性快速测定土壤水分的方法,在近20多年的发展里得到了非常广泛的应用(Brocca et al, 2010; Liao et al, 2017)。然而由于不同类型的土壤介电常数不尽相同,导致TDR和FDR对不同土质的测定结果会有一定差异。杨直毅等(2009)建议应该对TDR和FDR标定公式的参数进行定量的校正,提高土壤水分的测定精度。张力计法测定的是土壤基质势,在室内和田间均得到了较为广泛的应用(朱海清等, 2015)。但其测量范围较为局限,通常在水分饱和和至70~80 kPa吸力间,即适用于比较湿润状态下的土壤。

直接法实测可选用手动式测定以及安装自动监测探头来测量土壤水分。手动式测定方法具有探测深度广,数据精确,不受大气、植被的影响等优点,但其耗时耗力导致采样频率较低,无法获取高时间分辨率的土壤水分信息;自动监测方法可获得土壤水分变化的高频信息,具有便捷、数据连续性好等优点,但所需的实验设备价格昂贵,仅适合布设少量样点,难以形成较广的空间覆盖(Zhu et al, 2017)。手动和自动直接监测土壤水分的方法已经在剖面、坡面和流域尺度得到了广泛的应用,是目前探测土壤含水量和基质势最常用的方法(Brocca et al, 2010; Zhu et al, 2017)。在国外, Lin(2006)以美

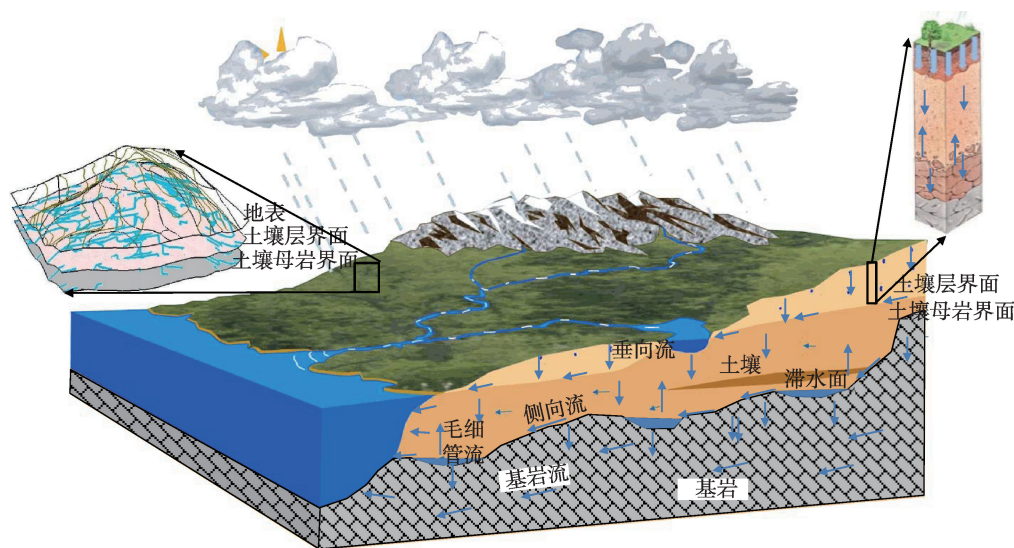


图1 流域不同空间尺度土壤水分运动分布过程

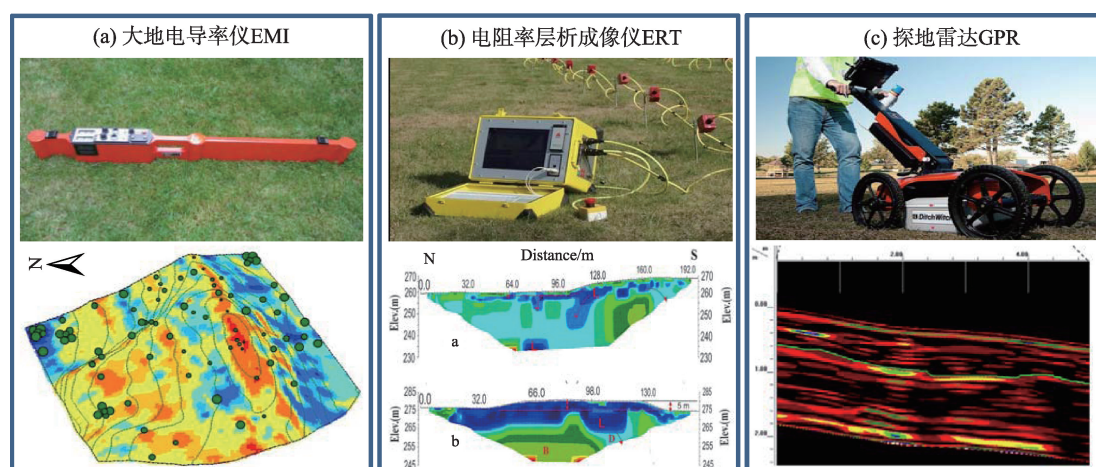
Fig.1 The pattern and pathway of soil water movement across spatial scales in the watershed

国 Shale Hills 流域为实验对象,开展了长期的流域土壤水分手动和自动监测研究,发现流域内不同地形单元土壤水分存在显著差异,主要受土壤类型和地形因素的控制。国内有关流域多尺度土壤水分监测研究的案例也有很多,如在西北黄土高原地区,胡伟等(2006)利用烘干法监测了坡面尺度土壤含水量,发现土壤水分沿坡长方向从坡顶到坡脚表现出先减小后增大的趋势,随后基于中子法开展了 20 hm^2 流域不同层次土壤水分的长期监测,发现土壤水分呈现强烈的空间相关性;在东南湿润地区,徐飞等(2014)基于 EC-5 探头长期监测了太湖流域平原区农田尺度土壤水分变化,并探讨了土壤水分对降水的响应特征,发现二者之间的关系受季节和土壤深度的影响较大。纵观现有研究,不同尺度上土壤水分的变化不尽相同,而且不同气候区(如干旱半干旱区、湿润区)土壤水分及控制因素差异也很大,土壤水分是气候、植被、地形和土壤属性等因素共同作用的结果。

间接法主要包括地球物理探测和遥感法等,两者原理类似,都是通过监测特定土壤的物理参数(如电导率、电磁波发射和反射特征、温度等),构建这些物理参数与土壤水分的经验模型或物理模型,从而反演土壤水分静态特征。在中小尺度(坡面或田间),现代地球物理探测方法(如大地电导率仪 EMI、电阻率层析成像仪 ERT 和探地雷达 GPR)在近年来获得了广泛的应用。EMI 的工作原理是发射线圈产生一个随时间变化并且强度随着深度增加而减弱的初级磁场,这个磁场诱导出次级磁场,

通过接受线圈接收次级电磁场信号,并计算土壤表观电导率(图 2a)。表观电导率与土壤水分、盐分、质地、土层深度等性质往往具有很好的相关性,因此可以通过 EMI 实现土壤水分的反演(Zhu et al, 2010)。ERT 的工作原理是通过在土壤中按照一定的模式(温纳或施伦贝格模式)插入一定数量的电极,通过测定电极之间不同深度电阻率的变化,并采用一定的算法进行信号处理,便可以得到不同维度的地下电阻率空间分布信息(图 2b)。同样,由于电阻率跟土壤水分、盐分、质地、土层深度等性质往往具有很好的相关性,因此 ERT 可以很好地反演不同深度土壤水分分布的状况(Vereecken et al, 2015)。GPR 发射的电磁波在土壤中传播时,如果遇到介电常数不同的物质,将发生散射,向地面传播的散射波将被接收,从而记录到土壤中的电磁波信号分布,经过数学处理和分析后可判断土壤中不同物质(如水分、岩石、根系等)的分布(Guo et al, 2014; Zhu, Liao et al, 2012)。这些地球物理探测工具可以在较短时间内实现研究区高密度的数据采集,因此可以用于土壤水分的高空间分辨率反演(图 2c)。

当针对全流域尺度时,遥感监测具有时效快、动态对比性强、长时期动态大区域监测等优点(史舟等, 2018; 杨大文等, 2018)。光学遥感主要利用土壤表面光谱反射特性、土壤表面发射率及表面温度来估算土壤水分,其空间分辨率相对较高,可供选择的卫星传感器也较多。土壤的介电特性与土壤水分含量有着密切的关系,水的介电常数大约为 80,而干土仅为 3,它们之间巨大的反差使得土壤的



注:部分图片来自 Appiah et al, 2018 和 Zhang et al, 2014。

图2 常用地球物理探测工具

Fig.2 The commonly used geophysical tools.

介电常数随土壤湿度的变化而变化,也成为遥感监测土壤水分的重要切入点(张甘霖等, 2018)。微波遥感法在监测土壤水分中应用较为广泛。如曾旭婧等(2017)基于欧洲哨兵1号(Sentinel-1)C波段雷达反演了北黑高速沿线地表土壤水分,取得了很好的效果。随着第一颗采用被动微波干涉成像技术的SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity)卫星的成功发射,L波段被动微波遥感成为大尺度土壤水分反演的主流方法。近来赵天杰(2018)对被动微波反演土壤水分的L波段研究进展作了综述,并提出应加强土壤水分多尺度转换方法的研究以促进遥感产品的真实性检验。另外值得一提的是,中国的高分三号(GF-3)卫星于2016年8月10日发射成功,这是中国首颗分辨率1 m的C频段多极化合成孔径雷达卫星,结合雷达数据和模拟数据,开展不同入射角和极化方式等在流域土壤水分反演的应用研究是一项重要而紧迫的工作。微波波段(1 mm~1 m)对云层和地表有较强的穿透力,不依赖太阳光,可以全天候工作,具有光学遥感不具备的优势。微波遥感法根据工作原理差异可以分为主动微波遥感法、被动微波遥感法及主被动微波结合遥感法等。被动微波遥感优点是不受云层、天气等条件的限制,但空间分辨率较低(Moran et al, 2004);而主动微波遥感的空间分辨率较高,但缺点在于对地表起伏和植被响应较为敏感(Petropoulos et al, 2015)。因此,主被动微波结合遥感逐渐成为土壤水分反演的有力工具(Shi et al, 2014)。然而,遥感反演土壤水分存在较大的不确定性和误差,遥感数据(尤其是微波遥感数据)时间分辨率较低,需要结合地面实测样点和其他辅助数据进行降尺度处理和验证(Verbeeck et al, 2015)。

2 土壤水分动态特征监测与模拟研究方法

土壤水分运动的研究方法主要分为监测法和模型法。监测法主要针对剖面 and 坡面等中小尺度,如径流小区法、地球物理探测法、示踪剂法等等。径流小区法的研究最初是在1915年由美国密苏里农业试验站Miller教授开展的,随后该方法得到了众多学者的推广和应用。如丁文峰等(2008)、李恒鹏等(2008)及何淑勤等(2014)都采用该方法在中国不同区域研究坡面和地块尺度地表径流与壤中流

的产流过程及通量。该方法的优点是可以直接获取土壤水分运动通量的变化特征,但对土壤扰动较大、监测成本高,且黑箱化处理土壤内部的水分运动过程。此外,前文中提到的地球物理探测作为一种不扰动原状土壤观测新技术,也得到了越来越多的关注(Zhu et al, 2010; Guo et al, 2014)等。在较短的时间内,其他影响地球物理探测信号的土壤性质,如有机质、质地、母岩等并不会发生显著变化,而土壤水分分布的变化则较为剧烈。因此通过对比同一点位不同时间点地球物理探测工具探测的数据,即可获取土壤水分运动的过程,打开土壤水分运动的“黑箱”。但是地球物理探测方法的误差和不确定性较大,虽然可以打开土壤水分运动的“黑箱”,但难以估算其通量。示踪剂法在小尺度土壤水分运动的研究中也得到了大量的应用,它包括染色剂(Kaushal et al, 2005; 盛丰等, 2009)和氢氧同位素示踪法(Scholl et al, 2015)。染色剂示踪主要用于直观地展示土壤水分运动的路径,但是对土体会产生破坏,而且不能获取土壤水分运动的通量。而同位素示踪,如氢氧同位素等,由于在自然界存在分馏作用,因此不同深度土壤水、地下水、地表水、降雨、蒸散发中D和 ^{18}O 的浓度存在着不同的特征。因此通过测定不同深度土壤水中D和 ^{18}O 的浓度,可以用于壤中流通量估算及径流组分分割。

由于实验监测土壤水分运动费时费力,无法获取时空连续变化的水分动态特征和运动通量,模型成为研究土壤水分运动的重要工具。根据物理机理的不同,土壤水分运动模型可以分为动力波模型、水量平衡模型和水动力模型。动力波模型基于动力波方程原理构建,忽略基质势作用,仅考虑重力作用下土壤水分运动,它适用于孔隙结构粗糙的土壤排水以及大孔隙流排水过程的模拟,无法直接求解如根系吸水引起根区下方向根区迁移的水分通量(Singh, 2001)。采用动力波模型的有UZFI(Unsaturated Zone Flow)模型和MIKE-SHE(Système Hydrologique Européen)模型等。水量平衡模型不考虑达西定律描述的水势梯度作用下的水分运动过程,具有计算速度快、模型稳定等优点,但由于不再遵循达西定律,无法考虑非饱和带水分运动的物理过程,普适性较差。采用水量平衡模型的有SWAT(Soil & Water Assessment Tool)模型、HSPF(Hydrological Simulation Program - FORTRAN)模型、VIC(Variable Infiltration Capacity)模型等。水动力模型

是基于数值求解土壤水分运动方程(如 Richards 方程)构建的,它能够完整描述土壤水分运动物理机制,但模型所需参数多,对计算机的计算效率要求高,目前主要应用在较小的空间尺度上。采用水动力模型的有 HYDRUS 模型、ParFlow(Parallel physically-based flow model)模型、PAWS(Process-based Adaptive Watershed Simulator)模型等。虽然3类模型的原理和结构不同,但是均有一定程度的参数的要求。如许多研究发现,蒸散发相关参数和土壤水力性质相关参数对模型模拟土壤水分运动的影响最为显著(Guber et al, 2006; Beisman et al, 2015; Lai et al, 2016)。因此,目前很多相关研究都集中在如何更好的获取相关参数上。例如引入通量塔实测的蒸散发数据,通过构建更具有局地意义的土壤转换函数反演土壤水力性质参数等(Feng et al, 2015; Vereecken et al, 2015)。另外,卫星遥感也为全球和区域的模型参数率定及优化提供了新途径。比如,Shellito等(2016)利用 SMOS 卫星遥感反演的地表土壤水分校正了 Noah 陆面模型中的土壤水力学参数,取得了很好的效果。赵天杰(2018)提出土壤水分卫星遥感产品可作为陆面水文模型的初始条件或直接插入变量,从而优化水文过程模型的状态估计,或者在模型动力框架内同化微波观测或土壤水分产品,利用遥感反演调整模型运行轨迹、校正模型参数,可显著减小模型参数的不确定性,提高模型的模拟精度。同时,针对各自研究区的特点,改进相关模型中的部分模块以及耦合不同过程模型也成为目前研究中的热点。如 Fu 等(2014)将土壤-基岩界面产流引入到 SWAT 模型中,构建了加拿大版的 SWAT-CS 模型,获得了很好的应用效果;Fang 等(2015)耦合 HYDRUS、ParFlow 和 CLM(Common Land Model)陆面模型,实现了小流域土壤水分运动的三维模拟。

3 研究展望

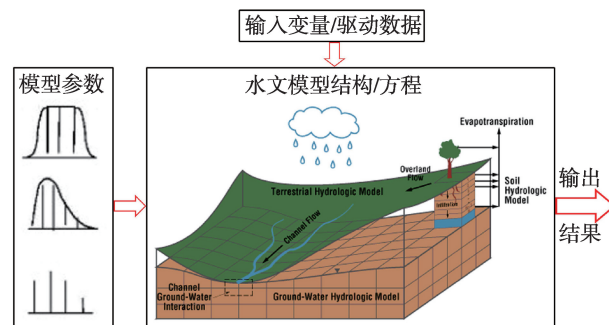
3.1 加强土壤水分监测尺度与方法的集成研究

在中小尺度上,土壤水分监测方法主要以手动和自动观测为主,然而这2种观测方法均具有一定的局限性。手动观测费时耗力,难以获得高时间分辨率的观测数据;而自动观测由于成本较高,很难在研究区内大量布设观测设备,无法获得高空间分辨率的观测数据。因此,亟需发展新的方法和手段,有效集成手动和自动观测。Zhu 等(2017)尝试

通过线性和非线性方法集成手动监测和自动监测的土壤水分数据,获得了坡面高时空分辨率的坡面土壤水分动态分布。此外,不同监测技术也具有各自的优劣性,比如地球物理探测可视化程度高,可间接获得深层数据,但精度往往不高;直接监测精度高,但测定的点位非常有限且空间覆盖率低;而遥感可用于大尺度研究,但缺点是精度有限且只能获得表层数据(Dobriyal et al, 2012; Zhu, Liao et al, 2012)。未来亟需基于数据挖掘技术(如支持向量机、随机森林、自适应提升决策树),定量构建不同监测方法获得的表层和深层观测数据之间的定量关系,并通过地理空间数据尺度转换技术(如变异函数、分形分维、小波分析)将这种关系拓展至不同空间尺度,从而精确反演出流域多尺度土壤水分运动过程及其通量。

3.2 消除土壤水分运动模型不确定性

作为土壤水分分布和运动研究的重要手段,模型通常存在显著的不确定性(图3)。根据来源不同,可分为参数和模型结构的不确定性(Guber et al, 2006; Song et al, 2015)。在不同的时空尺度,2种不确定性来源对模型不确定性的贡献会有较大差别。如何量化识别出模型不确定性的主要来源,对于优化和改进模型至关重要。之前的研究中,通常采用蒙特卡洛随机抽样和贝叶斯方法定量解析模型参数和结构的不确定性(董磊华等, 2011)。前人在模型参数不确定性消除方面已作了一定的工作。如 Guber 等(2006)和 Liao 等(2014)通过对土壤水力性质参数预测模型的集合预报,消除土壤水力性质参数的不确定性,从而获取更好的模拟精度。在模型结构不确定性消除方面,Sándor 等(2017)也利用多模型方法将9个数值模型模拟的土壤水分进行集成,获得了非常满意的结果。然而识别不确定



注:改自 Song et al, 2015。

图3 水文模型不确定性来源

Fig.3 The sources of the uncertainty of hydrological model

性来源和针对性消除不确定性的方法仍然需要进一步的深入挖掘(Vereecken et al, 2015)。这需要将数据挖掘、人工智能、地球物理探测和遥感等新方法和手段引入到该方面的研究中。例如通过数据同化技术,遥感土壤水分已开始被应用到相关模型优化中(Flores et al, 2012);借助地球物理探测技术获取更高时空分辨率和更精确的模型参数也获得了极大的关注(Vereecken et al, 2015)。

3.3 耦合土壤水分与碳氮输移循环过程

从生物地球化学的角度,土壤含水量、基质势等静态特征通过改变电子的供体和受体分布从而决定着土壤的氧化还原特性和碳氮元素的转化;从物理的角度,土壤水分的运动是碳氮元素迁移的驱动力(Zhu, Schmidt et al, 2012) (图4)。因此,土壤水分的静态和动态特征的时空变化在一定程度上决定了碳氮输移和转化的时空热点(Keiluweit et al, 2017)。然而在之前的研究中,由于土壤水分过程难以直观地描述,因此其对土壤碳氮输移循环的影响通常被黑箱化处理,或以简化的指标(如排水条件、土壤含水量、地下水位等)和线性关系来刻画(Poblador et al, 2017),其中的过程和时空分异常常被忽略。此外,传统的土壤水文模型和碳氮生物地球化学模型存在各自的缺陷。土壤水文模型基于严格的水分和溶质运移物理机制,往往碳氮生物地球化学循环过程薄弱,简化了生物地球化学过程参数的确定和计算过程(Beisman et al, 2015);而碳氮

生物地球化学模型深刻描述硝化、反硝化、矿化等生物地球化学循环过程,但其土壤水分和溶质运移模块的物理机制往往很简单。因此,将相关的模型进行集成与耦合,是解决该问题的有效和快捷办法(Vereecken et al, 2016)。

4 结论

土壤水分是流域地表不同圈层中物质和能量输移转化的关键纽带和驱动力,其时空分布和运动特征在不同的研究领域都具有重要的意义。本文将土壤水分分为静态(土壤含水量和基质势时空变化)和动态(土壤水分运动)2个方面,在总结其在流域范围内不同空间尺度的监测和模拟等进展的基础上,指出了土壤水分研究在① 监测尺度与方法的集成,② 模型不确定性的确定与消除和③ 土壤水分-碳氮输移循环耦合等方面存在的问题和不足,并提出了可能的解决方法。因此,本文对于土壤水分数据获取,土壤水文过程、机制与模拟,以及与土壤水分相关的生态环境过程的揭示和模拟均具有一定的参考和借鉴价值。

参考文献(References)

- 丁文峰, 张平仓, 王一峰. 2008. 紫色土坡面壤中流形成与坡面侵蚀产沙关系试验研究 [J]. 长江科学院院报, 25(3): 14-17. [Ding W F, Zhang P C, Wang Y F. 2008. Experimental study on runoff and sediment yield characteristics on purple soil slope. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 25(3): 14-17.]
- 董磊华, 熊立华, 万民. 2011. 基于贝叶斯模型加权平均方法的水文模型不确定性分析 [J]. 水利学报, 42(9): 1065-1074. [Dong L H, Xiong L H, Wan M. 2011. Uncertainty analysis of hydrological modeling using the Bayesian model averaging method. Journal of Hydraulic Engineering, 42(9): 1065-1074.]
- 何淑勤, 宫渊波, 郑子成. 2014. 紫色土区坡耕地壤中流磷素流失特征研究 [J]. 水土保持学报, 28(2): 20-24. [He S Q, Gong Y B, Zheng Z C. 2014. Phosphorus loss via interflow from sloping cropland of purple soil region. Journal of Soil and Water Conservation, 28(2): 20-24.]
- 胡伟, 邵明安, 王全九. 2006. 黄土高原退耕地土壤水分空间变异性研究 [J]. 水科学进展, 17(1): 74-81. [Hu W, Shao M A, Wang Q J. 2006. Study on spatial variability of soil moisture on the recultivated slope-land on the Loess Plateau. Advances in Water Science, 17(1): 74-81.]
- 李恒鹏, 金洋, 李燕. 2008. 模拟降雨条件下农田地表径流与

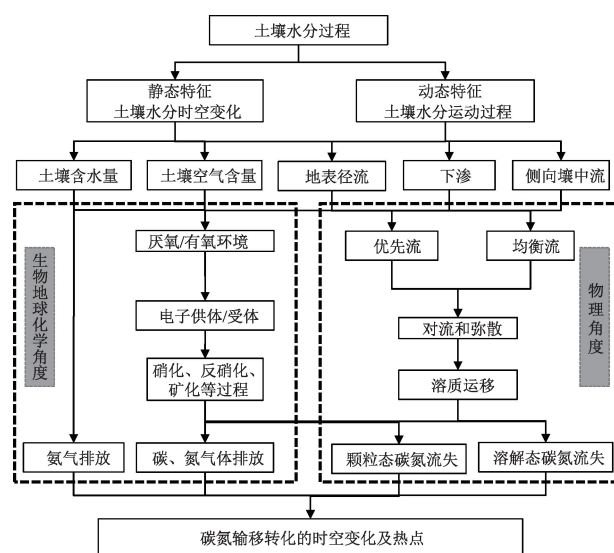


图4 土壤水分与碳氮输移循环耦合过程

Fig.4 The integrated processes of soil water, carbon and nitrogen

- 壤中氮素流失比较[J]. 水土保持学报, 22(2): 6-10. [Li H P, Jin Y, Li Y. 2008. Comparative study of nitrogen losses between surface flow and interflow of farmland under artificial rainfall conditions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 22(2): 6-10.]
- 邵明安, 王全九, 黄明斌. 2006. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社. [Shao M A, Wang Q J, Huang M B. 2006. *Soil physics*. Beijing, China: Higher Education Press.]
- 盛丰, 王康, 张仁铎, 等. 2009. 田间尺度下土壤水流非均匀运动特征的染色示踪研究[J]. 水利学报, 40(1): 101-108. [Sheng F, Wang K, Zhang R D, et al. 2009. Study on heterogeneous characteristics of soil water flow in field by dye tracing method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 40(1): 101-108.]
- 史舟, 徐冬云, 滕洪芬, 等. 2018. 土壤星地传感技术现状与发展趋势[J]. 地理科学进展, 37(1): 79-92. [Shi Z, Xu D Y, Teng H F, et al. 2018. Soil information acquisition based on remote sensing and proximal soil sensing: Current status and prospect. *Progress in Geography*, 37(1): 79-92.]
- 徐飞, 朱青, 史伯强, 等. 2014. 太湖流域平原区土壤水分动态分析[J]. 水土保持通报, 34(6): 54-58. [Xu F, Zhu Q, Shi B Q, et al. 2014. Dynamic analysis of soil water in plain area of Taihu Lake Basin. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 34(6): 54-58.]
- 杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 2018. 水文学研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 37(1): 36-45. [Yang D W, Xu Z X, Li Z, et al. 2018. Progress and prospect of hydrological sciences. *Progress in Geography*, 37(1): 36-45.]
- 杨德志, 李琳琳, 杨武, 等. 2014. 中子法测定土壤含水量分析[J]. 节水灌溉, (3): 14-19. [Yang D Z, Li L L, Yang W, et al. 2014. A study on using neutron method to measure soil water content. *Water Saving Irrigation*, (3): 14-19.]
- 杨直毅, 樊军. 2009. TDR 和 FDR 测定黄绵土土壤含水量的标定[J]. 土壤通报, 40(4): 740-742. [Yang Z Y, Fan J, 2009. Determination soil water content using TDR and FDR in the Loess Plateau. *Chinese Journal of Soil Science*, 40(4): 740-742.]
- 曾旭婧, 刑艳秋, 单炜, 等. 2017. 基于 Sentinel-1A 与 Landsat 8 数据的北黑高速沿线地表土壤水分遥感反演方法研究[J]. 中国生态农业学报, 25(1): 118-126. [Zeng X J, Xing Y Q, Shan W, et al. 2017. Soil water content retrieval based on Sentinel-1A and Landsat 8 image for Bei'an-Heihe expressway. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 25(1): 118-126.]
- 张甘霖, 朱阿兴, 史舟, 等. 2018. 土壤地理学的进展与展望[J]. 地理科学进展, 37(1): 57-65. [Zhang G L, Zhu A X, Shi Z, et al. 2018. Progress and future prospect of soil geography. *Progress in Geography*, 37(1): 57-65.]
- 张学礼, 胡振琪, 初士立. 2005. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 36(1): 118-123. [Zhang X L, Hu Z Q, Chu S L. 2005. Research progress in determination methods for soil water content. *Chinese Journal of Soil Science*, 36(1): 118-123.]
- 赵天杰. 2018. 被动微波反演土壤水分的L波段新发展及未来展望[J]. 地理科学进展, 37(2): 198-213. [Zhao T J. 2018. Recent advances of L-band application in the passive microwave remote sensing of soil moisture and its prospects. *Progress in Geography*, 37(2): 198-213.]
- 朱海清, 虎胆·吐马尔白, 热合木, 等. 2015. 干旱区盐碱土壤水分特征曲线模拟研究[J]. 新疆农业大学学报, 38(2): 168-172. [Zhu H Q, Hudan T, Rehemu, et al. 2015. Simulation analysis of Saline soil water retention curve in arid areas. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 38(2): 168-172.]
- Appiah I, Wemegah D D, Danuor S K, et al. 2018. Integrated geophysical characterisation of Sunyani municipal solid waste disposal site using magnetic gradiometry, magnetic susceptibility survey and electrical resistivity tomography[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 153: 143-153
- Beisman J J, Maxwell R M, Navarre-Sitchler A K, et al. 2015. ParCrunchFlow: An efficient, parallel reactive transport simulation tool for physically and chemically heterogeneous saturated subsurface environments[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19: 403-422.
- Brocca L, Melone F, Moramarco T, et al. 2010. Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales[J]. *Water Resources Research*, 46: W02516. doi: 10.1029/2009WR008016.
- Davidson E A, Keller M, Erickson H E, et al. 2000. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides[J]. *Bioscience*, 50: 667-680.
- Dobriyal P, Qureshi A, Badola R, et al. 2012. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management[J]. *Journal of Hydrology*, 458(3): 110-117.
- Fang Z F, Bogena H, Kollet S, et al. 2015. Spatio-temporal validation of long-term 3D hydrological simulations of a forested catchment using empirical orthogonal functions and wavelet coherence analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 529: 1754-1767.
- Feng H H, Liu Y B. 2015. Combined effects of precipitation and air temperature on soil moisture in different land covers in a humid basin[J]. *Journal of Hydrology*, 531: 1129-1140.
- Flores A N, Bras R L, Entekhabi D. 2012. Hydrologic data assimilation with a hillslope-scale-resolving model and L

- band radar observations: Synthetic experiments with the ensemble Kalman filter [J]. *Water Resources Research*, 48 (8): W08509, doi: 10.1029/2011WR011500.
- Fu C S, James A L, Yao H X. 2014. SWAT-CS: Revision and testing of SWAT for Canadian Shield Catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 511: 719-735.
- Guber A K, Pachepsky Y A, van Genuchten M T, et al. 2006. Field-scale water flow simulations using ensembles of pedotransfer functions for soil water retention [J]. *Vadose Zone Journal*, 5: 234-247.
- Guo L, Chen J, Lin H. 2014. Subsurface lateral preferential flow network revealed by time-lapse ground-penetrating radar in a hillslope [J]. *Water Resources Research*, 50(12): 9127-9147.
- Kaushal S S, Groffman P M, Likens G E, et al. 2005. Increased salinization of fresh water in the northeastern United States [J]. *PNAS*, 102(38): 13517-13520.
- Keiluweit M, Wanzek T, Kleber M, et al. 2017. Anaerobic microsites have an unaccounted role in soil carbon stabilization [J]. *Nature Communication*, 8: 1171, doi: 10.1038/s41467-017-01406-6.
- Lai X M, Liao K H, Feng H H, et al. 2016. Responses of soil water percolation to dynamic interactions among rainfall, antecedent moisture and season in a forest site [J]. *Journal of Hydrology*, 540: 565-573.
- Liao K H, Xu F, Zheng J S, et al. 2014. Using different multi-model ensemble approaches to simulate soil moisture in a forest site with six traditional pedotransfer functions [J]. *Environmental Modelling & Software*, 57: 27-32.
- Liao K H, Zhou Z W, Lai X M, et al. 2017. Evaluation of different approaches for identifying optimal sites to predict mean hillslope soil moisture content [J]. *Journal of Hydrology*, 547: 10-20.
- Lin H. 2006. Temporal stability of soil moisture spatial pattern and subsurface preferential flow pathways in the Shale Hills Catchment [J]. *Vadose Zone Journal*, 5(1): 317-340.
- Moran M S, Peters-Lidard C D, Watts J M, et al. 2004. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(5): 805-826.
- Petropoulos G P, Ireland G, Barrett B. 2015. Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83-84: 36-56.
- Poblador S, Lupon A, Sabate S, et al. 2017. Soil water content drives spatiotemporal patterns of CO₂ and N₂O emissions from a Mediterranean riparian forest soil [J]. *Biogeosciences*, 14: 4195-4208.
- Sándor R, Barcza Z, Acutis M. et al. 2017. Multi-model simulation of soil temperature, soil water content and biomass in Euro-Mediterranean grasslands: Uncertainties and ensemble performance [J]. *European Journal of Agronomy*, 88: 22-40.
- Scholl M A, Shanley J B, Murphy S F, et al. 2015. Stable-isotope and solute-chemistry approaches to flow characterization in a forested tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico [J]. *Applied Geochemistry*, 63: 484-497.
- Shellito P J, Small E E, Cosh M H, 2016. Calibration of Noah soil hydraulic property parameters using surface soil moisture from SMOS and basinwide in situ observations [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 17: 2275-2292.
- Shi J C, Guo P, Zhao T J, et al. 2014. Soil Moisture downscaling algorithm for combining radar and radiometer observations for SMAP mission [C]// *Proceedings of 2014 XXX-Ith URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*. Beijing, China: IEEE, doi: 10.1109/URSI-GASS.2014.6929704.
- Singh V P. 2001. Kinematic wave modelling in water resources: A historical perspective [J]. *Hydrological Processes*, 15 (4): 671-706.
- Song X, Zhang J, Zhan C, et al. 2015. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications [J]. *Journal of Hydrology*, 523: 739-757.
- Talebi A, Uijlenhoet R, Troch P A. 2007. Soil moisture storage and hillslope stability [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(5): 523-534.
- Vereecken H, Huisman J A, Franssen H J, et al. 2015. Soil hydrology: Recent methodological advances, challenges, and perspectives [J]. *Water Resources Research*, 51(4): 2616-2633.
- Vereecken H, Schnepf A, Hopmans J W, et al. 2016. Modeling soil processes: review, key challenges, and new perspectives [J]. *Vadose Zone Journal*, 15(5), doi:10.2136/vzj2015.09.0131.
- Zhang J, Lin H, Doolittle J. 2014. Soil layering and preferential flow impacts on seasonal changes of GPR signals in two contrasting soils [J]. *Geoderma*, 213: 560-569.
- Zhu Q, Liao K H, Xu Y, et al. 2012. Monitoring and prediction of soil moisture spatial-temporal variations from a hydrogeological perspective: A review [J]. *Soil Research*, 50: 625-637.
- Zhu Q, Lin H, Doolittle J. 2010. Repeated electromagnetic induction surveys for determining subsurface hydrologic dynamics in an agricultural landscape [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 74: 1750-1762.

Zhu Q, Schmidt J P, Bryant R B. 2012. Hot moments and hot spots of nutrient losses from a mixed land use watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 414: 393-404.

Zhu Q, Zhou Z W, Duncan E W, et al. 2017. Integrating real-

time and manual monitored data to predict hillslope soil moisture dynamics with high spatio-temporal resolution using linear and non-linear models [J]. *Journal of Hydrology*, 545: 1-11.

A review of soil water monitoring and modelling across spatial scales in the watershed

ZHU Qing^{1,2}, LIAO Kaihua^{1,2}, LAI Xiaoming^{1,2}, LIU Ya^{1,2}, LV Ligang³

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Public Management, Nanjing University of Finance & Economics, Nanjing 210023, China)

Abstract: Soil water controls the basic spatial patterns and processes in earth's surface system. As an important connection and driving force, it regulates a series of hydrological, ecological, climate and geological processes. In this review paper, we first introduced the advantages and disadvantages of different monitoring approaches (direct measurement, geophysical detection and remote sensing) for static soil water processes (soil water content and matric potential); and then introduced the research progress in measuring (runoff plot, tracer and geophysical detection) and modelling (dynamic wave, water balance and hydrodynamic models) dynamics soil water processes (soil water movement). Based on these, we proposed that the future researches should: 1) integrate the soil water monitoring techniques across spatial scales, 2) enhance the investigation in quantification and reduction of uncertainties in soil water modelling, and 3) coupling soil water processes with carbon and nitrogen transport and transformation. This review paper provides the new perspectives for researches and applications in acquiring high spatio-temporal resolution and accurate soil water data, and in revealing the processes and mechanisms and improving the modelling of soil water, carbon and nitrogen cycles.

Keywords: earth's critical zone; spatial scales; hydrogeology; soil moisture