

常学尚,常国乔.干旱半干旱区土壤水分研究进展[J].中国沙漠,2021,41(1):156-163.

干旱半干旱区土壤水分研究进展

常学尚,常国乔

(高台县水务局,甘肃 高台 734300)

摘要: 土壤水分调控着陆表-大气相互作用过程,是土壤-植物-大气连续体水分和能量交换的重要影响因子,也是影响生态系统水文、生物和生物化学过程的关键因素,是陆地生态系统中不可或缺的组成部分。本文简要回顾和评述了土壤水分点、面尺度的监测、分析方法,系统阐述了干旱半干旱区土壤水分的国内外研究进展,并结合目前的研究进展,提出了未来干旱半干旱区土壤水分研究展望,以期促进深入理解和准确预测干旱半干旱区土壤水分变化的生态与水文效应,为制定科学合理的干旱半干旱区水资源经营管理方案奠定理论基础。

关键词: 土壤水分; 尺度; 研究进展; 展望; 干旱半干旱区

文章编号: 1000-694X(2021)01-156-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00067

中图分类号: S153

文献标志码: A

0 引言

土壤水分调控着陆表-大气相互作用过程,影响着气候和天气过程^[1-3],是土壤-植物-大气连续体水分和能量交换的重要影响因子^[4],也是影响生态系统水文、生物和生物化学过程的关键因素^[5],还是决定径流潜力的关键参数^[6]。因此,深入研究和了解生态系统的土壤水分时空变化规律,对提高模拟与预报水文过程^[7]、植物生长和生态过程^[8]、流域降水-径流响应过程^[9]和气候变化^[2]等的精度具有重要意义。然而,由于受大气作用、土壤特性、成土母质、地形、土地利用方式、植被类型等因素的影响,土壤水分在时间和空间上的变化非常大^[10],因此准确理解和表征土壤水分的时空变化不仅是水文学和土壤学研究面临的重大挑战之一^[11],同时也是干旱区退化生态系统恢复和生态植被建设以及生态系统管理的重要基础。

早在19世纪初,国际上就已经开始了对土壤水分的研究,并于20世纪60年代提出了SPAC概念^[12]。目前国内外学者在土壤水分方面已取得了大量的研究成果,因而亟需对土壤水分的研究进行全面的认识与总结,以期全面认清土壤水分变化对

水文过程的作用关系,这对于深入理解干旱区水分利用效率时空演变规律,了解水循环过程和流域水文模型的开发,准确预测干旱区土壤水分变化的生态与水文效应显得至关重要和尤为迫切,同时对于制定科学合理的干旱区水资源经营管理方案也具有十分重要的意义。

1 土壤水分监测与分析方法

1.1 土壤水分概念

土壤水分是存贮于土壤中供植物吸收利用的水分,主要来源于大气降水和灌溉。但由于研究者受专业、用词习惯等的影响,土壤水分并没有统一的表述用词,常见的有土壤水分^[13-14]、土壤含水量^[15-16]、土壤含水率^[17-18]、土壤湿度^[19-20]、土壤墒情^[21]及土壤水^[22]等。对于土壤水分,3个重要的指标分别是土壤饱和含水量、田间持水量和萎蔫系数。土壤饱和含水量是土壤最多能拥有的水分。田间持水量是土壤饱和含水量减去重力水后土壤所能保持的水分。萎蔫系数是植物萎蔫时土壤保持且能被植物吸收利用的水分。植物只能利用田间持水量与萎蔫系数之间的土壤水分。

收稿日期:2020-06-09; 改回日期:2020-07-07

作者简介:常学尚(1965—),男,甘肃高台人,高级工程师,主要从事水资源管理与研究。E-mail: 2497552883@qq.com

通信作者:常国乔(E-mail: 490801195@qq.com)

1.2 土壤水分监测方法

1.2.1 点尺度的监测方法

在点尺度上,土壤水分测量方法有土壤烘干法、土壤水势法、中子仪法和介电常数法。土壤烘干法是早期的土壤水分数据的采集方法,即将土壤样品置于105℃下烘干至恒重,此时土壤有机质不会分解,而土壤中的自由水和吸湿水全被驱除,然后计算土壤水质量与烘干土质量的比值,即为质量含水量,以百分数或小数表示。此法操作方便、设备简单、精度高,但采样费时费工,且在采样、包装和运输过程中应保持密封状态以免水分丢失造成误差。随着技术和材料科学的发展,半自动与全自动监测的中子仪^[23]、介电常数法^[24-27]的出现,大大降低了采样的工作强度。

土壤水势法。土壤水势也称为土壤水分张力,是土壤水具有的势能。土壤水分与土壤水势存在一定的函数关系。因此通过测量土壤水势,可以间接得到土壤水分数据,主要仪器有张力计、露点水势仪等。

中子仪法。也称中子水分测定仪法,将中子源利用探测管插入待测土壤中,通过测定土壤中慢中子的密度,再将慢中子密度与土壤含水量建立相关关系,然后确定土壤中的水分含量,测定误差约为±1.0%。中子仪法能够周期性地反复测定不同深度上土壤水分,但是测量结果的垂直分辨率较差,而且表层测量因快中子容易在空气中散逸而误差较大,因此测量时需有专用的屏蔽设备或用其他方法校准。

介电常数法。主要利用土壤中水的介电常数比土壤中固体颗粒和空气的介电常数高而得到土壤水分,主要有时域反射仪法^[25]和频域反射仪法^[26]。时域反射仪(TDR)法首先测定土壤中高频电磁脉冲沿波导棒的传播时间,然后再计算出电磁脉冲的传播速度,进而获得土壤水分数据^[25]。由于该方法得到的是整个探针长度范围内的平均含水量,因此,同一土体中不同的埋置方式得到的土壤水分数据差异很大。为了避免造成不必要的误差,在使用TDR时要选择适宜的方式埋置探针。该方法无论是垂直分辨率,还是测量精度都高于中子仪法,而且拥有测量时速度快、无任何辐射隐患、可以自动控制和连续测量等优点,在土壤水分测量时被广泛用。频域反射仪(FDR)测量土壤水分的原理与TDR类似,主要通过测量电磁波在土壤中传播频

率,然后利用传播频率与土壤水分呈非线性反比关系,最终得到土壤水分^[26]。

1.2.2 面尺度上的监测方法

在面尺度上,土壤水分测量主要有电磁感应法^[28-29]、电阻率层析成像法^[30]、宇宙射线中子法^[31]、无线环境传感器网络法^[32]、探地雷达法^[33-34]和遥感法^[35-38]等方法。

电阻率层析成像法使用多通道数据采集系统,利用电极结构得到土壤电阻率在土层中的变化情况,然后利用土壤水分与土壤电阻率的定量关系,将电阻率分布状况转换为土壤水分分布情况^[30]。这种方法可以测定较深土层的土壤水分,数据的分辨率高、探测灵敏度高。这种方法使用由电极转换器、测量主机、控制软件、至少25个永久电极阵列和电缆系统5部分组成的多道直流电测系统获取电阻率数据。

宇宙射线中子法就是通过测量慢化了的快中子的强度来计算源区内土壤水分的方法,是对一定区域内的土壤水分进行被动、非接触测量的一种方法,具有便利、准确、无污染的特性,能够连续、自动地监测半径300 m范围内土壤水分动态变化^[31]。

无线环境传感器网络法是利用土壤水分传感器组成网络监测土壤水分^[32]。土壤水分监测网络由协调器、路由器和传感器3个组件组成的。协调器可以启动网络内的无线链路、存储网络的相关信息,并提供到其他网络的链接。每个网络只有一个协调器。路由器充当中继站,传递来自传感器测量的数据。传感器测量点尺度上的土壤水分,它应该有足够的功能来与协调器或路由器通信,并允许传感器在相当长的时间内处于睡眠状态,以节省能源。在选择传感器时,首先传感器必须在能源使用方面非常经济,而且耐用,不易损坏;其次,由于传感器网络中有大量的测量数据,传感器信号的解释必须是简单明了;最后,为了最大化传感器节点的数量,传感器必须尽可能便宜,如电容传感器^[39]。无线环境传感器网络能够实时观测土壤水分在空间和时间上的变化。它们将在新兴的陆地环境观测站中发挥重要作用,因为它们能够在小尺度(例如,蒸渗仪)和区域尺度测量(例如,遥感)之间架起一座桥梁^[32]。

电磁感应法是利用电磁感应传感器非侵入性测量土壤电导率,然后结合土壤电导率模型、土壤电导率与土壤水分关系,确定田块尺度的土壤水

分^[28]。探地雷达法利用探地雷达测定土壤介电常数的变化规律,然后根据构建的包气带土壤水分与介电常数的定量关系,进而获得土壤水分时空变化^[33-34]。该方法具有快速、连续、不破坏土壤结构等特点。遥感法是基于土壤水分的变化会引起土壤可见光波段反射率特征的变化,利用卫星或无人机获得土壤的光学反射率特征,进而监测土壤水分变化^[35-38]。利用遥感法监测土壤水分,具有成本低、高效率、高分辨率等优点。

1.3 土壤水分分析方法

土壤水分数据的分析方法有地统计分析^[40-41]、小波分析^[42-43]、经验正交函数分析^[44]、模型模拟和过程分析^[43,45-46]等。

地统计分析通过变异函数分析随机变量与位置相关的随机函数,研究土壤水分的空间分布与变异规律。常用的变异函数如下:

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2}{2N(h)} \quad (1)$$

式中: $Z(x)$ 是土壤水分 Z 在空间位置 x 处的值; $Z(x_i)$ 为一区域化随机变量,满足二阶平稳假设; h 为两样本点空间分隔距离; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别是土壤水分在空间位置 x_i 和 x_i+h 处的实测值。地统计学将变异函数理论模型分为有基台值模型、无基台值模型和孔穴效应模型^[40]。

小波分析亦称多分辨分析,它把时间序列的土壤水分数据分解为时间和频率的贡献,分析时间序列在不同尺度上的演变特征,研究土壤水分时间序列在不同时间尺度上周期结构和异常变化的规律,准确揭示时间序列的频率结构随时间的变化。对时间序列 $x(t)$,小波变换系数如下^[43]:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

式中: W_f 是根据 $f(t)$ 计算得出的小波变换系数; $\bar{\psi}(a, b)$ 为基本小波; a 是频率参数; b 是时间参数。

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (3)$$

经验正交函数分析(EOF)将土壤水分数据集分解为可以与区域特征相关联的一系列正交空间模式,以确定特征是否对土壤水分数据的最重要趋势的影响程度,以获得某区域中土壤水分变量的时间演变规律^[44]。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$C_{m \times n} = X \times X^T,$$

$$C_{m \times n} \times V_{m \times n} = V_{m \times n} \times \Lambda_{m \times n}$$

式中: X 为土壤水分变量的时间序列; n 为时间序列长度; $V_{m \times n}$ 为特征向量; Λ 为 $m \times n$ 维矩阵,即,

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

每1个特征向量值都有对应的特征根,即EOF。

EOF通过对观测数据的统计自然生成基函数,不用事先人为给定,更能反映数据资料的固有特点;而且收敛度快,用较少的EOF级数就能全面地表征参量的变化特征,使复杂问题简化^[47]。

长期以来,研究人员对土壤水分模拟和预测研究开展了大量的工作,建立了许多土壤水分模拟模型,定量描述土壤水分动态变化。常见的模型有随机函数模型^[48]、三层水文模型VIC-3L^[43,49]、人工神经网络模型^[50]、滞后变量模型^[51]、支持向量机(SVM)模型^[52]、土壤水动力学模型等^[45-46]。

三层水文模型VIC-3L是基于水量平衡方程的宏观尺度模型,以土壤水分、地表植被、降水和地形高程为参数。VIC-3L模型将土壤分成3层,第1层为10 cm,第2层为30 cm,第3层为100 cm。地表径流在上层两层通过可变的入渗曲线产生,底层产生基流。VIC-3L模型允许不同类型的植被和土地覆盖。地表覆盖类型按 $n=1, 2, 3, \dots, N, N+1$ (N 代表不同类型的植被, $N+1$ 代表裸露的土壤)。土地覆盖类型以叶面积指数(LAI)、冠层阻力、根系深度和土壤性质为特征。各层具体的模型如下^[49]:

$$W_1^+(N+1) = W_1^-(N+1) + (P - Q_d(N+1) - Q_{12}(N+1) - E_1) \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$W_2^+(N+1) = W_2^-(N+1) + (Q_{12}(N+1) - Q_b(N+1) - E_2) \cdot \Delta t \quad (7)$$

式中: $W_1^+(N+1)$ 是在每一个时间阶段结束时土壤层1的土壤水分; $W_1^-(N+1)$ 是在每一个时间阶段开始时土壤层1的土壤水分; $Q_d(N+1)$ 是裸土类型 $N+1$ 的直接径流; $Q_{12}(N+1)$ 从土壤层1向土壤层2的渗漏量; $W_2^+(N+1)$ 是在每一个时间阶段结束时土壤层2的土壤水分; $W_2^-(N+1)$ 是在每一个时间

阶段开始时土壤层2的土壤水分; $Q_b(N+1)$ 是地下径流; P 是降水量; E 是蒸散量。

Milly 模型假设降水事件瞬时完成并服从泊松过程,而且忽略潜在蒸散发在时间上的变化。对于植物根系充分发育、渗透能力较高且有一定容水体积的土壤水分动态可以表述如下^[48]:

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = 0 & (p > e_p) \text{ 并且 } (s = s_1) \\ \frac{ds}{dt} = 0 & (p < e_p) \text{ 并且 } (s = 0) \\ \frac{ds}{dt} = p - e_p & (\text{否则}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: s 为土壤水分; s_1 为田间持水量; p 为降水率($1/T$); e_p 为潜在蒸散发率(L/T)

人工神经网络模型结构普遍采用3层前馈网络模型,主要包括输入层、隐含层和输出层,具体的模型如下^[50]:

设 x_1, x_2, \dots, x_n 为神经元 i 的 n 个输入,神经元的输出方程为:

$$y_i = f\left(\sum_{j=1}^n (w_{ij}x_j - \theta_i)\right) \quad (9)$$

式中: w_{ij} 为连接权值,表示神经元 i 与神经元 j 之间的结合强度; θ_i 为神经元的阈值。

网络的收敛过程就是网络全局误差趋向极小值的过程。全局误差平方和为 E :

$$E = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^q \left[\frac{(y_i^k - c_i^k)^2}{2} \right] \quad (10)$$

式中: q 为输出节点数; m 为样本模式对数。

滞后变量模型主要分析相同时间间隔的数据序列。对于时间间隔相同的序列 X 和 Y ,序列变量 Y 受到自身或另一个序列变量 X 的前几期值的影响,这种现象称为滞后效应,变量 X 称为滞后变量。滞后变量模型包括分布滞后模型和自回归分布滞后模型^[51]。分布滞后模型为:

$$Y_t = T + U_0 X_t + U_1 X_{t-1} + U_2 X_{t-2} + \dots + U_s X_{t-s} + \varepsilon \quad (11)$$

式中: U_0 称为短期乘数; U_s 称为延迟乘数; ε 为误差项。

自回归分布滞后模型为:

$$Y_t = U_0 + U_1 Y_{t-1} + U_2 Y_{t-2} + \dots + U_p Y_{t-p} + W_1 X_{t-1} + W_2 X_{t-2} + \dots + W_q X_{t-q} \quad (12)$$

式中: Y_{t-p} 为变量 Y 的第 p 期滞后; X_{t-q} 为变量 X 的第 q 期滞后。

支持向量机(SVM)模型把寻求最优线性超平面的算法归结为求解一个凸规划问题,然后以Mercer核展开定理为基础,通过非线性映射 ϕ ,将样本空间映射到一个高维甚至无穷维的特征空间,最后在特征空间中应用线性学习机方法进行线性逼近即 $f(x) = [w \cdot \psi(x) + b]$,从而使线性最优化问题转变为一定约束条件下的最大化函数,求解这个函数后得到回归函数,最终解决样本空间中高度非线性问题^[52]。求解得到的回归函数形式如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^k (\alpha_i + \alpha_i^*) K(X_i X_j) + b \quad (13)$$

土壤水动力学模型是以Darcy定律和连续流方程为基础,考虑水分蒸发与根系吸水过程建立的土壤水动力学方程。比较成熟的土壤水动力学模型有SWAT和HYDRUS^[45]模型。这里仅介绍HYDRUS模型。HYDRUS模型有1维和2维模型,即HYDRUS-1D和HYDRUS-2D,在适当的初始和边界条件下,它们均以Richards方程对土壤水运动进行描述^[45]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} - S(h) \quad (14)$$

式中: θ 是土壤水分; t 为时间; x 为水平坐标; z 为空间坐标; $K(h)$ 为土壤不饱和水导率; h 为土壤水势; $S(h)$ 为根系吸水函数。

HYDRUS模型中的土壤水分 θ 与土壤水势 h 的关系采用van Genuchten方程表示:

$$\theta(h) = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (-\alpha|h|)^n \right]^m} + \theta_r \quad (15)$$

式中: θ_s 是土壤饱和含水量; θ_r 为残余土壤水分; α 、 n 和 m 是经验参数 $\left(m = 1 - \frac{1}{n} \right)$ 。

土壤不饱和水导率 $K(h)$ 为:

$$K(h) = K_s S_e^{0.5} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (16)$$

式中: K_s 是土壤饱和水导率; S_e 是有效饱和度。

根系吸水函数 $S(h)$ 为:

$$S(h) = \beta(h) S_p \quad (17)$$

式中: S_p 是潜在吸水率; $\beta(h)$ 为水胁迫响应函数。

2 国内外研究进展

过去几十年来,围绕土壤水分的监测与研究取

得了重要进展。监测与研究土壤水分的空间尺度也从样地或坡面尺度^[53-55]扩展到了流域尺度^[29],甚至扩展到了区域尺度^[37,56]。

2.1 土壤水分时空变化特征

对于土壤水分时空变化特征,已有大量的研究工作。大多数研究发现,土壤水分的时空变化明显。Lauzon等^[57]利用小波分析法分析了法国布里地区时间尺度不同深度的土壤水分变化特征,发现土壤水分的季节变化明显:冬季,土壤水分含量相对较高;即使在夏季发生大的降水事件时,也没有出现较高的土壤水分。Perry等^[58]用经验正交函数法分析了澳大利亚维多利亚州南部 Tarrawarra 流域的土壤水分的时空变化模式,发现土壤水分呈现明显的干湿季节变化。Jawson等^[44]用经验正交函数法分析了大平原南部土壤水分的时空变化模式,发现土壤水分高值出现在研究区的北部与中心区域,而低值出现在研究区的南部,而且土壤水分的这种空间变化在整个研究期间都能被观测到。Tang等^[42]利用小波分析法分析了美国科罗拉多河上游流域的土壤水分时空变化特征,发现在19个干旱年中,有15个干旱年超过50%的流域土壤水分距平值低于-10 mm;而正常条件下,土壤水分距平值-10—10 mm,潮湿条件下,土壤水分距平值>10 mm。包青岭等^[59]对新疆渭干河库车河绿洲土壤水分时空变化特征研究发现,土壤水分低值集中在研究区西部与南部区域,盐渍土壤表层水分高于耕地,绿洲荒地土壤水分与耕地土壤相互接近,为28.8—53.7 mm。马晓东等^[60]对塔里木河下游2002—2006年土壤水分的时空变化的研究发现,土壤水分水平空间分布随离水源地距离增加而降低,垂直分布随土层深度的增加而增加。

随机属性是土壤水分动态的本质特征,土壤水分动态模型的解只有以概率密度函数描述才会有意义^[48,61]。刘鹄等^[48]简要回顾和评述了几个典型土壤水分动态随机模型,并基于这些模型的模拟结果就系统随机波动、气候因素、土壤特性、植被条件、地形特征对稳定状态土壤水分概率密度函数的影响分别进行了分析和讨论。刘鹄等^[62]研究了祁连山浅山区草地生态系统点尺度生长季土壤水分动态与土壤水分概率密度函数特征,发现2002—2006年生长季植物根际层土壤水分概率分布呈单峰状。Tague等^[63]发现河岸斑块的土壤水分概率密度函数

的偏度与土壤水分的均值呈负相关关系。Brocca等^[64]发现,土壤水分概率密度函数呈正态分布的概率是77%。

2.2 时间稳定性

土壤水分时间稳定性研究得到了相当大的重视。Vachaud等^[65]最早提出了土壤水分时间稳定性的研究方法 with 理论。在意大利中部, Brocca等^[64]分析了局部(几平方米到几平方千米)和流域尺度的土壤水分时间稳定性,研究了土壤水分的时空变化规律。Gao等^[54]利用斯皮尔曼等级相关系数和相对偏差分析了陕西省神木县六道沟流域的土壤水分时间稳定性,发现土壤水分时间稳定性与土壤深度呈正相关关系。Vanderlinden等^[66]综述了各种空间、时间尺度、土壤和植被类型的土壤水分时间稳定性研究成果。蔺鹏飞等^[67]从时间稳定性概念、研究方法、应用和影响因素等方面,系统阐述了土壤水分时间稳定性近年来的研究进展,探讨了代表性测点的选取标准以及土壤水分时间稳定性的影响因素。Martínez等^[68]选择了美国代表性的4个气候区,研究了土壤水分时间稳定性与土壤性质、气候的关系。Hu等^[23]利用中子土壤水分仪监测了黄土高原典型性坡地28个地点的土壤水分变化,分析了点及坡面尺度的土壤水分时间稳定性。但是,不同研究区土壤和环境条件下,土壤水分时间变异和稳定性差异很大。

2.3 土壤水分时空特征影响因素

一些学者还对土壤水分时空变化的控制因素进行了研究,但至于哪个因素主导土壤水分的时空动态变化,却因研究区域和研究对象的不同而有差异。Perry等^[58]对澳大利亚维多利亚州南部 Tarrawarra 流域的土壤水分的时空变化影响因素的研究发现,土壤水分时空变化影响因素是相当复杂的,不但受降水、蒸散量、土壤性质、气候和地形特征控制,而且与研究的分辨率有很大关系。Jost等^[69]对奥地利下奥地利州 Kreisbach 的挪威云杉(*Picea abies*)及欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)混交林的研究发现,树的空间分布格局影响着土壤水分的空间分布特征。Jawson等^[44]用经验正交函数法分析了大平原南部土壤水分的时空变化模式及其影响因素,发现降水与干旱是造成土壤水分时空变化的主要原因。Lawrence等^[70]对不同气候带土

壤水分时间变化研究,发现土壤水分的时间变化与大气条件和陆地表面的空间变化有关。姚雪玲等^[71]对黄土高原典型坡面土壤水分研究,发现植被是影响土壤水分空间分布的主要因素。Baroni等^[72]监测了土壤性质、地形、植被特性和土壤水分动态,研究了植被和土壤特性对土壤水分时空变化的影响,发现植被、土壤性质和地形特征对土壤水分时空动态的影响非常大。王瑾杰等^[73]对2008—2014年新疆艾比湖流域土壤水分时空分布特征的研究,发现土壤水分主要受气温、降水、地形、地表覆被及人类活动影响。

3 展望

由于土壤水分在土壤-植物-大气连续体生态、水文和能量过程中的重要作用,土壤水分的相关研究一直受到相当的重视,取得了很多重要进展。但由于影响土壤水分的影响因素较为复杂,时空尺度依赖性强,致使相关研究结果区域差异明显。根据研究中存在的问题,今后土壤水分研究要重视以下几个方面。

时空尺度土壤水分精确测量。时空尺度的土壤水分精确测量仍然是一项具有挑战性的任务^[29],特别是在空间(0.1—100 hm²)和时间(分钟到天)尺度上,数据缺口仍然限制了我们对所管理的小流域生态水文过程之间相互作用的理解^[73-74]。而对于较大的空间尺度,由于遥感技术的局限性,仅在地表附近(土壤深度<5 cm)对土壤水分进行了详尽的空间表征^[57],还不能开展更深层次的土壤水分监测。

土壤水分时空变化驱动的定量研究。虽然对土壤水分时空变化的控制因素进行了大量研究,但至于哪个因素主导土壤水分的时空动态变化,却因研究区域、研究对象和研究的时空尺度的不同而有差异,而且大多研究结果都是定性的,仍然缺乏综合性的定量结果。

植被恢复区和气候敏感区的研究与应用。在中国实施了很多的生态恢复工程,营建了大规模的植被,但植被和土壤水分之间存在何种协同匹配关系?受哪些因素影响?还存在认识不足的问题。研究植被和土壤水分之间存在的协同匹配关系,对于指导适宜的植被恢复重建,将是未来研究的热点。

参考文献:

[1] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the glob-

al land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. *Nature*, 2010, 467: 951-954.

- [2] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review [J]. *Earth Science Review*, 2010, 99: 125-161.
- [3] Mittelbach H, Lehner I, Seneviratne S I. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 430/431: 39-49.
- [4] Bogen H R, Huisman J A, Baatz R, et al. Accuracy of the cosmic-ray soil water content probe in humid forest ecosystems: the worst case scenario [J]. *Water Resource Research*, 2013, 49: 5778-5791.
- [5] Dobriyal P, Qureshi A, Badola R, et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 458/459: 110-117.
- [6] Hillel D. *Environmental Soil Physics* [M]. San Diego, USA: Academic Press, 1998: 771.
- [7] Massari C, Brocca L, Barbetta S, et al. Using globally available soil moisture indicators for flood modelling in Mediterranean catchments [J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2013, 10: 10997-11033.
- [8] Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics [J]. *Water Resource Research*, 2000, 36(1): 3-9.
- [9] Wei M Y. Soil Moisture: Report of a Workshop Held in Tiburon, California, 25-27 January, 1994 [R]. NASA Conference Publication, 1995: 3319.
- [10] Korres W, Reichenau T G, Fiener P, et al. Spatio-temporal soil moisture patterns: a meta-analysis using plot to catchment scale data [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 520: 326-341.
- [11] Vereecken H, Huisman J A, Bogen H, et al. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: a review [J]. *Water Resource Research*, 2008, 44: W00D06.
- [12] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [13] 李云飞, 谢婷, 石万里, 等. 腾格里沙漠东南缘人工固沙植被区表层土壤有机碳矿化对凋落物添加的响应 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 200-209.
- [14] 刘乐, 孙宏义, 蔡忠兰, 等. 兰州新区陡削边坡植被重建初期土壤水分动态研究 [J]. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1-12.
- [15] 吴丽丽, 刘丹一, 杨文斌, 等. 降雨量、土壤蓄水量对流动沙地土壤水分深层渗漏的影响 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(3): 210-218.
- [16] 罗维成, 赵文智, 孙程鹏, 等. 科尔沁沙地樟子松 (*Pinus sylvestris*) 人工固沙林演变过程中物种多样性和土壤水分特征 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(1): 126-132.
- [17] 丁聪, 王冬梅, 贺康宁, 等. 黄土高寒区坡面土壤水分的时间稳定性 [J]. *生态学报*, 2020, 40(1): 151-160.
- [18] 党宏忠, 却晓娥, 冯金超, 等. 土壤水分对黄土区苹果园土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 中水势梯度的影响 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 829-836.

- [19] 兰鑫宇,郭子祺,田野,等.土壤湿度遥感估算同化研究综述[J].地球科学进展,2015,30(6):668-679.
- [20] 李德帅,王金艳,王式功,等.陇中黄土高原土壤水分变化特征及其机理分析[J].中国沙漠,2014,34(1):140-147.
- [21] 哈建强,祝明,朱艳飞.沧州市土壤墒情变化规律研究[J].水文,2017,37(6):74-79.
- [22] 桂娟,李宗省,冯起,等.祁连山古浪河流域径流组分特征[J].冰川冻土,2019,41(4):918-925.
- [23] Hu W, Si B C. Can soil water measurements at a certain depth be used to estimate mean soil water content of a soil profile at a point or at a hillslope scale? [J]. Journal of Hydrology, 2014, 516: 67-75.
- [24] 龚元石.时域反射仪测定土壤水分的研究进展[J].灌溉排水,1997,16(1):40-41.
- [25] Trambly Y, Bouvier C, Martin C, et al. Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall-runoff modeling[J]. Journal of Hydrology, 2010, 387: 176-187.
- [26] Skierucha W, Wilczek A. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10-500 MHz frequency range [J]. Sensors, 2010, 10: 3314-3329.
- [27] Qu W, Boga H R, Huisman J A, et al. Calibration of a novel low-cost soil water content sensor based on a ring oscillator[J]. Vadose Zone Journal, 2013, 12(2): vzj2012.0139.
- [28] Martínez G, Vanderlinden K, Giráldez J V, et al. Field-scale soil moisture pattern mapping using electromagnetic induction [J]. Vadose Zone Journal, 2010, 9: 871-881.
- [29] Robinson D A, Abdu H, Lebron I, et al. Imaging of hill-slope soil moisture wetting patterns in a semi-arid oak savanna catchment using time-lapse electromagnetic induction [J]. Journal of Hydrology, 2012, 416/417: 39-49.
- [30] Loke M H, Chambers J E, Rucker D F, et al. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method [J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 95: 135-156.
- [31] 贾晓俊,施生锦,黄彬香,等.宇宙射线中子法测量土壤水分的原理及应用[J].中国农学通报,2014,30(21):113-117.
- [32] Boga H, Schulz K, Vereecken H. Towards a network of observatories in terrestrial environmental research [J]. Advances in Geoscience, 2006, 9: 109-114.
- [33] 赵贵章,闫永帅,闫亚景,等.介质含水率与探地雷达电磁波特征参数关系[J].灌溉排水学报,2020,39(3):85-90.
- [34] Bertoldi G, Chiesa S D, Notarnicola C, et al. Estimation of soil moisture patterns in mountain grasslands by means of SAR RADARSAT2 images and hydrological modeling [J]. Journal of Hydrology, 2014, 516: 245-257.
- [35] Albergel C, Calvet J C, de Rosnay P, et al. Cross-evaluation of modelled and remotely sensed surface soil moisture with in situ data in Southwestern France [J]. Hydrology and Earth System Science, 2010, 14: 2177-2191.
- [36] Brocca L, Tarpanelli A, Moramarco T, et al. Soil moisture estimation in alpine catchments through modeling and satellite observations [J]. Vadose Zone Journal, 2013, 12(3): 1-10.
- [37] Li B, Rodell M. Spatial variability and its scale dependency of observed and modeled soil moisture over different climate regions [J]. Hydrology and Earth System Science, 2013, 17(3): 1177-1188.
- [38] 王俊霞,潘耀忠,朱秀芳,等.土壤水分反演特征变量研究综述[J].土壤学报,2019,56(1):23-35.
- [39] Boga H R, Herbst M, Huisman J A, et al. Potential of wireless sensor networks for measuring soil water content variability [J]. Vadose Zone Journal, 2010, 9: 1002-1013.
- [40] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999.
- [41] Meerschman E, Van Meirvenne M, Van De Vijver E, et al. Mapping complex soil patterns with multiple-point geostatistics [J]. European Journal of Soil Science, 2013, 64(2): 183-191.
- [42] Tang C, Piechota T C. Spatial and temporal soil moisture and drought variability in the Upper Colorado River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2009, 379(1/2): 122-135.
- [43] 黄艳,丁裕国.东北地区夏季土壤湿度垂直结构的时空分布特征[J].气象科学,2007,27(3):259-265.
- [44] Jawson S D, Niemann J D. Spatial patterns from EOF analysis of soil moisture at a large scale and their dependence on soil, land-use, and topographic properties [J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(3): 366-381.
- [45] Yang T, Šimůnek J, Mo M, et al. Assessing salinity leaching efficiency in three soils by the HYDRUS-1D and 2D simulations [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194: 104342.
- [46] Wang R, Yuan Y, Yen H, et al. A review of pesticide fate and transport simulation at watershed level using SWAT: Current status and research concerns [J]. Science of Total Environment, 2019, 669: 512-526.
- [47] 周旭,万卫星,赵必强,等.基于CHAMP卫星观测数据对热层大气密度的经验正交分析[J].空间科学学报,2010,30(3): 228-234.
- [48] 刘鹄,赵文智.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,2006,17(6):894-904.
- [49] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes for general-circulation models [J]. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 1994, 99: 14415-14428.
- [50] 宰松梅,郭冬冬,韩启彪,等.基于人工神经网络理论的土壤水分预测研究[J].中国农学通报,2011,27(8):280-283.
- [51] 张丽丽,陈家宙,吕国安,等.利用土壤表层含水量序列预测深层含水量的研究[J].水土保持学报,2007,21(3):162-169.
- [52] 薛晓萍,王新,张丽娟,等.基于支持向量机方法建立土壤湿度预测模型的探讨[J].土壤通报,2007,38(3):427-433.
- [53] Atchley A L, Maxwell R M. Influences of subsurface heterogeneity and vegetation cover on soil moisture, surface temperature and evapotranspiration at hillslope scales [J]. Hydrogeological Journal, 2011, 19(2): 289-305.
- [54] Gao L, Shao M. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers [J]. Catena, 2012, 95: 24-32.

- [55] Wang S, Fu B J, Gao G Y, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2013, 101:122–128.
- [56] Zhao L, Yang K, Qin J, et al. Spatiotemporal analysis of soil moisture observations within a Tibetan mesoscale area and its implication to regional soil moisture measurements[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 482:92–104.
- [57] Lauzon N, Anctil F, Petrinovic J. Characterization of soil moisture conditions at temporal scales from a few days to annual[J]. *Hydrological Process*, 2004, 18(17):3235–3254.
- [58] Perry M, Niemann J. Analysis and estimation of soil moisture at the catchment scale using EOFs [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 334:388–404.
- [59] 包青岭, 丁建丽, 王敬哲, 等. 基于VIC模型模拟的干旱区土壤水分及其时空变化特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(9):3048–3059.
- [60] 马晓东, 李卫红, 朱成刚, 等. 塔里木河下游土壤水分与植被时空变化特征[J]. *生态学报*, 2010, 30(15):4035–4045.
- [61] Rodriguez-Iturbe I, Porporato A, Ridolfi L, et al. Probabilistic modeling of water balance at a point: the role of climate, soil and vegetation[J]. *Proceedings of the Royal Society of London (Series A)*, 1999, 455:3789–3805.
- [62] 刘鸽, 赵文智, 何志斌, 等. 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D辑(地球科学)*, 2007, 37(9):1212–1222.
- [63] Tague C, Band L, Kenworthy S, et al. Plot-and watershed-scale soil moisture variability in a humid Piedmont watershed[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(12):W12541.
- [64] Brocca L, Tullo T, Melone F, et al. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 422/423:63–75.
- [65] Vachaud G, Passerat De Silans A, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function[J]. *Journal of Soil Science Society of American*, 1985, 49:822–828.
- [66] Vanderlinden K, Vereecken H, Hardelauf H, et al. Temporal stability of soil water contents: a review of data and analyses[J]. *Vadose Zone Journal*, 2012, 11(4), DOI:10.2136/vzj2011.0178.
- [67] 蔺鹏飞, 朱喜, 何志斌, 等. 土壤水分时间稳定性研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(10):3403–3413.
- [68] Martínez G, Pachepsky Y, Vereecken H. Temporal stability of soil water content as affected by climate and soil hydraulic properties: a simulation study[J]. *Hydrological Process*, 2014, 28:1899–1915.
- [69] Jost G, Heuvelink G B M, Papritz A. Analysing the space-time distribution of soil water storage of a forest ecosystem using spatio-temporal kriging[J]. *Geoderma*, 2005, 128:258–273.
- [70] Lawrence J E, Hornberger G M. Soil moisture variability across climate zones[J]. *Geophysics Research Letters*, 2007, 34(20):L20402.
- [71] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. *生态学报*, 2012, 32(16):4961–4968.
- [72] Baroni G, Ortuani B, Facchi A, et al. The role of vegetation and soil properties on the spatio-temporal variability of the surface soil moisture in a maize cropped field[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 489:148–159.
- [73] 王瑾杰, 丁建丽, 张喆. 2008–2014年新疆艾比湖流域土壤水分时空分布特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(5):1784–1794.
- [74] Western A W, Grayson R B, Blöschl G. Scaling of soil moisture: a hydrologic perspective[J]. *Annual Review of Earth Planet Science*, 2002, 30:149–180.

Advances in research and prospect on soil moisture in arid and semi-arid areas

Chang Xueshang, Chang Guoqiao

(Water Bureau of Gaotai County, Gaotai 734300, Gansu, China)

Abstract: Soil moisture regulates the landing-surface-atmosphere interaction process, which is an important factor affecting the exchange of water and energy in the soil-plant-atmosphere continuum. Soil moisture is also a key factor affecting the hydrological, biological and biochemical processes of ecosystems and is an indispensable component of terrestrial ecosystems. This paper briefly reviews the monitoring at point and surface scale and analysis methods about soil moisture, systematically described the research progress of soil moisture in arid and semi-arid region, and put forward the prospect of soil moisture research based on the present research progress in arid and semi-arid region. All this is in order to promote in-depth understanding and accurately predict the ecological and hydrological effects of soil moisture changes in arid and semi-arid areas, and lay a theoretical foundation for the formulation of scientific and reasonable water resources management scheme in arid and semi-arid areas.

Key words: soil moisture; scales; research progress; prospect; arid and semi-arid areas