

# 基于 MIKESHE 的流域表层土壤含水量时空变化特征分析

雷凯文<sup>1,2</sup>, 卢宏伟<sup>2\*</sup>

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要** 基于气象站点实测资料、MODIS 植被产品数据集 LAI (leaf area index) 及世界土壤数据库 (HWSD) 土壤数据, 结合气象插值软件 ANUSPLIN、土壤水分特征曲线拟合软件 RETC、空间信息处理软件 ArcGIS 分别对气象、土壤、植被数据进行计算; 使用 MIKESHE 分布式水文模型对拉萨河流域内 2008—2017 年 3、7 月及典型年 (丰水年、中水年、枯水年) 生长季 (3—10 月) 内的表层 1 m 土壤含水量进行模拟。结果表明, 在空间分布上, 拉萨河流域表层土壤含水量自西南向东北呈递减趋势, 流域中部拉萨河上层的高山地区土壤含水量相对较低; 相较于中下游河谷及西部盆地地区, 中部高山地区土壤水分变化更为剧烈。在时间分布上, 典型年生长季内不同月份土壤含水量变化量在 33%~37%; 总体而言, 土壤含水量年内变化大于年际变化。拉萨河谷平原、澎波盆地、流域西部念青唐古拉山脉以东的洪积宽谷、羊八井盆地及流域东北部麦地卡湿地植被覆盖度和土壤水分含量较高、变化幅度小, 农业适宜性较强。

**关键词** 土壤含水量; MODIS; MIKESHE; 时空演变; 拉萨河流域

中图分类号 P 334<sup>\*</sup>.92 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)06-0050-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.06.015



开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

## Spatial and Temporal Variation of Surface Soil Moisture Content Based on MIKESHE

LEI Kai-wen<sup>1,2</sup>, LU Hong-wei<sup>2</sup> (1. North China Electric Power University, Beijing 102206; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101)

**Abstract** Based on meteorological site data, MODIS vegetation product dataset LAI (leaf area index) and soil data of the world soil database (HWSD), soil moisture content in the March and July during 2008–2017 in Lhasa River Basin was simulated and analyzed by the MIKESHE model, a distributed hydrology model. The results showed that in the spatial distribution, the surface soil water content across the Lhasa River Basin gradually decreased from the southwest to northeast, and the water content in the alpine region on the east and west sides of the middle stream was lower. Compared with the valley locate in the middle-lower stream, the change of soil moisture in the central alpine area was more obvious. In terms of time distribution, the soil water content of the typical annual growth season changes in different months, varied between 33% and 37%; comparatively, the actual changes in soil moisture content were more obvious during the year. The basins and valley areas in the study area had higher vegetation coverage and higher soil moisture content, i.e. the Libo Basin and the Lhasa Valley Plain locate at middle-lower stream of Lhasa River, Hongji Kuangu and Yangbajing Basins in the east of the Nyainqentanglha Mountains in the western part of the basin, and the Medica wetland in the northeastern part of the basin. The resulting agricultural suitability is stronger in these areas.

**Key words** Soil moisture; MODIS; MIKESHE; Temporal and spatial variation; Lhasa River Basin

土壤含水量是气候变化、水文循环、生态平衡过程中的一项重要参数, 了解土壤含水量时空分布特征对区域旱涝预报<sup>[1-2]</sup>、农牧业生产决策<sup>[3-4]</sup>与水资源调控<sup>[5-6]</sup>具有重要意义。目前常用的研究土壤含水量分布变化的方法主要包括实地测量法、遥感反演法、分布式水文模型模拟 3 种。刘雅莉等<sup>[7]</sup>通过在 4 种不同地形下设置采样点并进行长期监测与采样, 分析了微尺度下土壤水分的时空分布格局变化特征及其驱动因子; 杨凯悦等<sup>[8]</sup>利用 EM50 数据采集器连续记录监测土壤体积含水量, 对高寒沙区人工林在不同生长阶段的土壤水分分布特征进行了研究。传统的实地测量方法虽然可获得精度更高的数据, 但同时也存在数据获取周期长、人工成本高的缺点, 且站点网络密度的限制使得传统的站点监测方法在区域尺度上的应用被限制, 难以用于大范围区域土壤含水量的监测<sup>[9]</sup>。随着观测技术与手段的不断革新发展, 基于卫星遥感的土壤含水量反演技术获得了很大发展, 产生了以微波遥感法、热惯量法、温度-植被干旱指数法等土壤含水量的反演方法, Kolassa 等<sup>[10]</sup>以 ISMN 站点监测数据为基

础, 对常用的土壤含水量反演产品 SMOS、SMAP、MetopA 及 ESA CCI 在不同区域及气候条件下数据集的精度进行了评价。

使用遥感技术反演估算土壤含水量具有观测快速、覆盖区域广的优点, 但同时观测结果受云雨与复杂地表覆盖类型的影响, 通常难以获得高精度、连续性强的土壤含水量<sup>[11]</sup>。由于遥感反演技术在高空间分辨率土壤含水率模拟方面的局限性, 在利用卫星遥感获取的气象、土地利用类型、LAI 及 DEM 有效数据基础上, 使用分布式水文模型模拟目标区域的土壤含水量在缺少观测资料的地区具有广泛的应用前景。如 Khan 等<sup>[12]</sup>利用卫星获取非洲维多利亚湖某流域的气象、土地利用类型等遥感数据, 以此为基础使用水文模型 CREST (coupled routing and excess storage) 对该流域的水文过程进行了模拟; Mason 等<sup>[13]</sup>基于 TerraSAR-X 合成孔径雷达 (SAR) 遥感数据, 估测英国 Tewkesbury 城区的洪水淹没区, 研究认为遥感获取的洪水范围能够为水文模型的验证提供较为可靠的信息。遥感技术为水文模型提供了大量基础的地表水文信息, 为缺乏实测资料区域的水文模拟提供了数据基础, 提高了定量描述流域地貌、水文过程的可能性。基于遥感数据的水文模拟在未来具有广泛的应用前景<sup>[14-15]</sup>。

该研究利用气象站点监测数据、HWSD 土壤数据库数据及 MODIS 遥感数据, 结合分布式水文模型 MIKESHE 对拉萨

**基金项目** 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) “丝路环境” 子课题 (XDA20040301)。

**作者简介** 雷凯文 (1993—), 男, 新疆昌吉人, 硕士研究生, 研究方向: 流域水土资源变化。\* 通信作者, 研究员, 博士, 从事水土资源管理工作。

**收稿日期** 2019-09-17

河流域表层土壤含水量进行模拟,获得 2008—2017 年流域表层土壤含水量,并对模拟结果与流域 31 个采样点实测数据进行皮尔逊相关分析;选取各年枯水期与丰水期的空间分布结果,分析拉萨河流域表层土壤水在不同情景下各年的空间分布状况及其变化。

## 1 资料与方法

**1.1 研究区概况** 拉萨河流域地处雅鲁藏布江流域中游左岸,面积 33 823 km<sup>2</sup>,约占雅鲁藏布江流域面积的 13.5%。干流拉萨河全长约 551 km,主要支流包括堆龙曲、墨竹马曲、麦曲、拉曲、桑曲、和玉年曲等。拉萨河流域气候以半干旱、半湿润气候为主,太阳辐射强烈,日照强烈,降水主要集中于夏季,气候变化分明,从西南向东北大致分为温和半干旱区、温凉半干旱区、湿凉半湿润区、冷凉半湿润区 4 个气候类型区<sup>[16]</sup>,流域内旱涝并存,土壤水分空间分布存在较明显差异。流域内主要分布 7 种土类,分别为高山寒漠土、高山草甸土、亚高山草甸土、灌丛草原土、草甸土、潮土、新积土。中下游河谷区内土壤类型主要为草甸土、草原土,土壤石砾含量较高。流域内主要植被类型为高山沼泽草甸、高山灌丛草甸及少量高山灌丛<sup>[17-18]</sup>。

该研究区域位于 29°20′~31°15′N、90°05′~93°20′E,主要包括拉萨市、墨竹工卡县、林周县、当雄县、嘉黎县等主要县市。其中拉萨河河谷区位于流域拉萨河中下游地区,是青藏高原最重要的农业产粮地,主要产出粮食作物包括青稞、小麦、油菜等,表层土壤水分是当地农业生产的重要制约因素。因此,对拉萨河流域内土壤水分分布的研究对该地区农业发展具有重要意义。

**1.2 数据来源** 气象降水数据来自青藏高原地区 317 个气象站监测数据,使用 Anusplin 42 插值得到;叶面积指数数据(LAI)来自于美国航天局(NASA)MODIS15 产品,时间分辨率为 8 d,空间分辨率为 500 m;流域土壤性质数据来自联合国粮农组织(FAO)的 HWSO 土壤数据库,使用基于 Van-Genuchten 模型的土壤水分特征曲线拟合软件 RETC 处理后得到;流域内土地利用类型数据来自中国科学院资源环境科学数据中心的基于 Landsat-TM/ETM 影像的中国多时期土地覆盖遥感数据监测数据集(CNLUCC);DEM 数据来自中国科学院资源环境数据中心的全国 1 km DEM 数据产品。

根据多年降雨量的值,采用国内常用的分析枯水年、平水年、丰水年标准:①丰水年, $P_i > \bar{P} + 0.33W$ ,其中  $P_i$  为第  $i$  年降水量, $W$  为均方差;②枯水年, $P_i < \bar{P} - 0.33W$ ;③ $P_i$  与  $\bar{P} \pm 0.33W$  结果相近时为平水年。以此为依据计算得到 2008 年为丰水年,2015 年为枯水年,2012 年为平水年。

**1.3 ANUSPLIN 气象数据插值** ANUSPLIN 允许引入多元协变量线性子模型,拥有平稳处理二维以上样条的功能,可引入多个气象空间要素作为协变量,为考虑多要素下气象数据的空间插值提供了可能。薄盘光滑样条原型中扩展了局部薄盘光滑样条(partial thin plate smoothing splines)部分<sup>[19]</sup>,允许引入海拔、降水、海岸线关系等线性协变量因子,扩展了模型功能。这种模型的表述如下:

$$Z_i = f(x_i) + b^T y_i + e_i (i = 1, \dots, N) \quad (1)$$

式(1)中, $x_i$  为独立变量矢量, $f$  为要估算的关于  $x_i$  的未知平滑函数; $y_i$  为  $p$  维独立协变量矢量; $Z_i$  为空间上第  $i$  点的因变量; $b$  为  $y_i$  的  $p$  维系数; $N$  为观测值个数。当  $p=0$  时(即协变量不存在时)即为普通薄盘样条模型;当不存在独立自变量  $f(x_i)$  时,模型变为多元线性回归模型。

由最小二乘估计来确定函数  $f$  和系数  $b$ :

$$\sum_{i=1}^N \left[ \frac{z_i - f(x_i) - b^T y_i}{w_i} \right]^2 + \rho J_m(f) \quad (2)$$

式(2)中, $J_m(f)$  定义为函数的  $m$  阶偏导数; $\rho$  为光滑参数(正值),在数据保真度与曲面的粗糙度之间起平衡作用。

**1.4 RETC 拟合土壤水分特征曲线** 土壤水分特征为影响土壤含水量的重要因素,同时,土壤水分特征曲线也是分析土壤水分迁移的重要基本资料<sup>[20]</sup>。对缺乏资料地区,利用数值模拟方法对土壤水分运动进行预测,对于干旱程度、农牧业适宜性评价等领域具有重要意义<sup>[21-22]</sup>。在推求土壤水分运动过程及拟合土壤水分特征曲线的研究中, Van Genuchten、Gardner、Gardner-Russo、Broods-Corey 等土壤水分特征曲线拟合模型被广泛用于描述水分在土壤中的入渗、迁移、蒸发等过程。其中 Van Genuchten 模型适用范围广、拟合效果好、采用最为广泛,其水分特征曲线方程为:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad h < 0 \quad (3)$$

$$\theta(h) = \theta_s \quad h \geq 0$$

式(3)中, $\theta(h)$  为土壤含水量, $h$  为压力水头(cm); $\theta_r$  为土壤剩余含水量; $\theta_s$  为土壤饱和含水量; $\alpha$  和  $n$  为经验拟合系数(或称为土壤水分曲线形状参数); $m = 1 - 1/n$ 。

RETC 软件基于 Broods-Corey 模型和 Van Genuchten 模型对土壤水分特征曲线进行拟合,常用于非饱和带土壤水力传导特性和土壤水分的分析计算<sup>[23]</sup>。

**1.5 MIKESHE 分布式水文模型** MIKESHE(MIKE system hydrological european)模型是丹麦水利研究所在 SHE 模型基础上研发而成。MIKESHE 在湿地修复、洪水预报、水资源管理、水源地保护等领域具有广泛的应用。MIKESHE 主要包括蒸散发(ET)、融雪(SM)、非饱和带(UZ)、坡面流(OL)、河流湖泊(OC)、饱和带(SZ)6 个模块,每个模块模拟不同的水文过程,不同模块间可以独立作用也可相互作用<sup>[24]</sup>。MIKESHE 模型可根据需要选择单一模块或耦合多个模块进行建模<sup>[25]</sup>。该研究选用 ET 与 UZ 模块对拉萨河流域地表土壤含水量进行模拟。近年来,对于缺乏资料地区的水文模拟逐渐成为国际水文水资源研究领域的难点与热点<sup>[25]</sup>。这使得水文模型在缺乏资料地区的模拟应用变为可能。

MIKESHE 蒸散发模块及非饱和带下渗模块计算基于以下算法:

(1) Kristensen-Jensen 模型。采用 Rutter 模型模拟水循环中截留过程,该过程可计算蒸散发量、冠层实际蓄水量和到达地面的净雨量。使用气候与植被资料直接计算潜在蒸散发能力。Rutter 模型的实质功能是计算冠层蓄水量,其公

式如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = Q - Ke^{b(c-s)} \quad (4)$$

$$\text{其中 } Q = \begin{cases} P_1 P_2 \left( P - \frac{E_p C}{S} \right) & C \leq S \\ P_1 P_2 (P - E_p) & C > S \end{cases} \quad (5)$$

式(4)、(5)中, $P$ 是雨强(mm/s), $S$ 是冠层蓄水容量(mm), $C$ 是冠层实际含水量(mm), $K$ 、 $b$ 是冠层蓄水参数, $P_1$ 是地表植被覆盖率, $P_2$ 是总的叶片面积与植被覆盖的地表面积之比, $t$ 是时间(s), $E_p$ 为土壤潜在蒸发能力。

(2) 植被实际蒸腾量。具体计算公式如下:

$$E_{at} = f_1(\text{LAI}) f_2(\theta) (\text{RDF}) E_p \quad (6)$$

式(6)中,RDF为根系分布函数, $f_1(\text{LAI})$ 为叶片面积指数的函数, $f_2(\theta)$ 为土壤含水量函数。

对于发生在表层的土壤蒸发量,包括表层土壤蓄水量的蒸发量和基本蒸发量 $E_{\nu} f_3(\theta)$ 两部分,其计算公式如下:

$$E_s = E_{\nu} f_3(\theta) + [E_p - E_{at} - E_{\nu} f_3(\theta)] f_4(\theta) [1 - f_1(\text{LAI})] \quad (7)$$

函数 $f_3(\theta)$ 和 $f_4(\theta)$ 的表达式如下:

$$f_3(\theta) = \begin{cases} 0 & \theta \geq \theta_M \\ C_2 (\theta / \theta_w) & \theta_M \leq \theta < \theta_w \\ 0 & \theta > \theta_w \end{cases} \quad (8)$$

$$f_4(\theta) = \begin{cases} 0 & \text{其他} \\ \frac{\theta - 0.5(\theta_w + \theta_F)}{\theta_F - 0.5(\theta_w + \theta_F)} & \theta \geq 0.5(\theta_w + \theta_F) \end{cases} \quad (9)$$

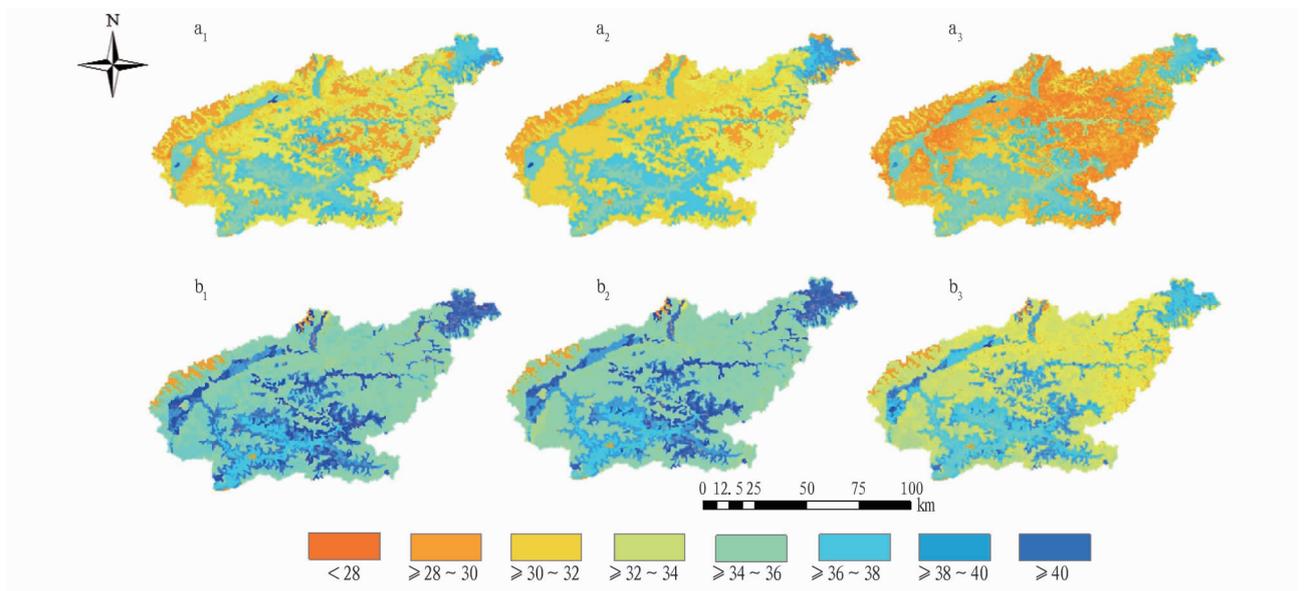
公式(8)、(9)中, $\theta_p$ 为土壤田间持水量, $\theta_w$ 为植物凋萎含水量, $\theta_M$ 为土壤剩余含水量; $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 为经验常数。

## 2 结果与分析

### 2.1 表层土壤含水量空间变化特征

拉萨河流域按地貌可分为和园区、高山盆地及河谷区3类,流域内气候类型属于高原温带-寒温带半湿润季风气候,年内降水分布极不均匀,雨季一般为6月中旬之后开始,8月中旬左右结束,雨季降水量约占全年降水量的90%。利用拉萨河流域2008—2017年各年3月(枯水期)、7月(丰水期)降水、蒸散发、LAI数据,计算得到各年典型月(3、7月)表层土壤体积含水量及2008、2012、2015年的生长季3—9月表层土壤含水量。

由2008—2017年模拟结果可知,拉萨河流域表层土壤含水量自西南向东北呈逐渐减少趋势,流域内盆地地区平均土壤表层含水量相对较高,包括位于拉萨河中游林周县境内的澎波盆地、下游拉萨市、墨竹工卡县中部境内拉萨河谷平原地区,其含水量在雨季为36%~40%,旱季为34%~36%;流域西部当雄县境内,念青唐古拉山脉以东的中部洪积宽谷盆地、南部羊八井盆地,其含水量在雨季为38%~40%,旱季为34%~36%;流域东北地区嘉黎县北部麦地卡湿地,其含水量在雨季。流域中部自拉萨河上游两岸向东西两侧的高山地区平均土壤含水量相对较低,其含水量在雨季为34%~36%,旱季为30%~34%。各典型年旱季和雨季表层土壤平均含水量见图1。



注: $a_1$ 、 $b_1$ 为2008年; $a_2$ 、 $b_2$ 为2012年; $a_3$ 、 $b_3$ 为2015年

Note: $a_1$  and  $b_1$  are 2008; $a_2$  and  $b_2$  are 2012; $a_3$  and  $b_3$  are 2015

图1 典型年旱季(a)和雨季(b)表层土壤平均含水量(单位:%)

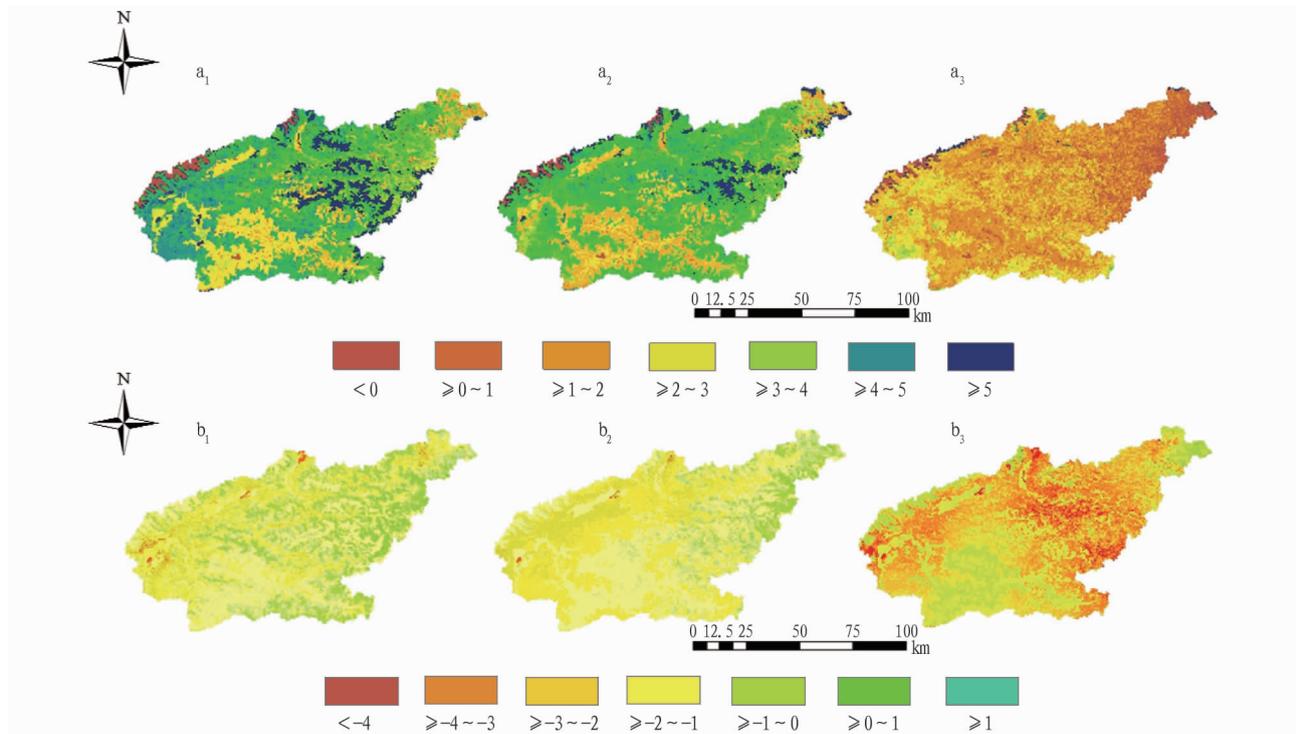
Fig.1 Average water content of surface soil in dry season (a) and rainy season (b) in typical years

从拉萨河流域不同年份雨季与旱季的表层土壤含水量变化量空间分布(图2)可以看出,在各不同年份雨季全流域土壤表层含水量呈增加趋势,旱季除东北部少量河源湿地地区外全流域土壤表层含水量呈下降趋势。在雨季,流域内除

西部念青唐古拉山脉地区外,全流域土壤呈变湿润态势,其中南部河谷地区及西部高山盆地区域内表层土壤含水量上升了2%~4%,流域东北部河源湿地地区表层土壤含水量上升了1%~3%,流域中部山地地区土壤含水量上升了3%~

5%, 相较而言流域中部山地地区湿润化程度更为明显; 在旱季, 除流域东北部少数区域外, 全流域呈变干旱趋势, 其中南部河谷地区土壤含水量下降了 1%~2%, 东北部河源湿地地

区下降基本小于 1%, 西部高山盆地地区下降了 1%~3%, 流域中部山地地区下降了 1%~4%。总体而言, 流域中部山地地区干旱化程度更为显著。



注:  $a_1, b_1$  为 2008 年;  $a_2, b_2$  为 2012 年;  $a_3, b_3$  为 2015 年

Note:  $a_1$  and  $b_1$  are 2008;  $a_2$  and  $b_2$  are 2012;  $a_3$  and  $b_3$  are 2015

图 2 典型年雨季 (a) 和旱季 (b) 表层土壤水分变化量空间分布 (单位: %)

Fig. 2 Spatial distribution of surface soil moisture variable quantity in rainy season (a) and dry season (b) in typical years

**2.2 表层土壤含水量时间变化特征** 计算得到 2008—2017 年各年平均含水量及各年生长季内土壤含水量变化量如图 3 所示, 结果显示, 各年雨季降水量充沛, 雨季、旱季表层土壤含水量变化趋势与年际间降水变化趋势大致相同, 在植物生长期各年 7 月末 8 月初平均表层土壤含水量最大, 各年 3、4 月表层土壤含水量最小; 在枯水年 7 月由于植被蒸腾作用茂盛而降雨量稀少, 导致水分支出失衡, 故表层土壤呈干旱化趋势。

从图 4 可以看出, 典型年内 3—10 月流域内表层土壤含水量变化趋势随枯水年、平水年、丰水年基本呈上升趋势。流域内 3—5 月为旱季, 降水较少, 此时土壤水分变化较小, 为 33%~34%; 7—8 月为雨季, 降水充沛, 土壤含水量主要依靠降水补给, 变化较大, 为 35%~37%。总体而言, 土壤含水量年内变化大于年际变化。

**2.3 土壤含水量与气象要素及 LAI 的相关性分析** 土壤含水量受多种影响因子如气象、植被覆盖类型、高程、土壤成分、土层厚度等共同影响, 作用机理复杂, 各影响因子间亦存在相互促进或削弱的作用。例如降水、蒸发、气温等气象因子直接影响流域内土壤的补给水量; 地表植被覆盖类型的不同影响土壤蒸发量、植物蒸腾量、冠层截留水量及根系截留水量; 高程及坡度影响流域内壤中流的走向<sup>[22]</sup>, 壤中流在重力作用下向海拔较低的地区汇流, 故往海拔较低的地区如

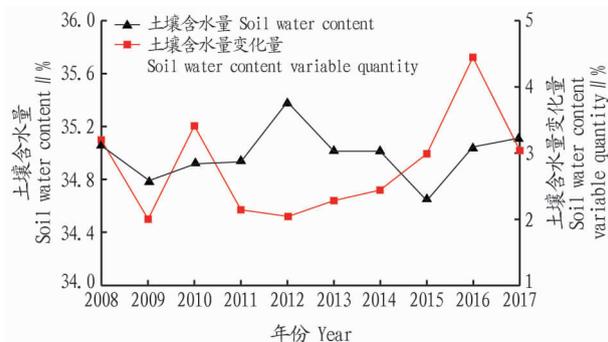


图 3 2008—2017 年土壤平均含水量及变化量

Fig. 3 Average soil water content and variable quantity from 2008 to 2017

流域内的河谷、盆地地区的土壤水分含量相对较高, 这也与该研究所得结果相吻合; 土壤类型、土壤成分(黏土、砾石组分)、土层厚度等因素则会影响土壤的蓄水能力与导水能力。土壤水分的分布结果是各类影响因子共同作用的结果, 该研究主要探索气象、植被覆盖对土壤水分含量分布的影响, 利用 SPSS 18 统计分析软件对拉萨河流域 2008—2017 年土壤水分含量与降水、蒸发、叶面积指数(LAI)进行皮尔逊相关分析(Pearson), 结果表明(表 1), 拉萨河流域内土壤水分含量与降水、LAI 呈正向关系, 置信度较高; 故可认为降水及植被覆盖度是流域内土壤水分含量的重要作用因子。

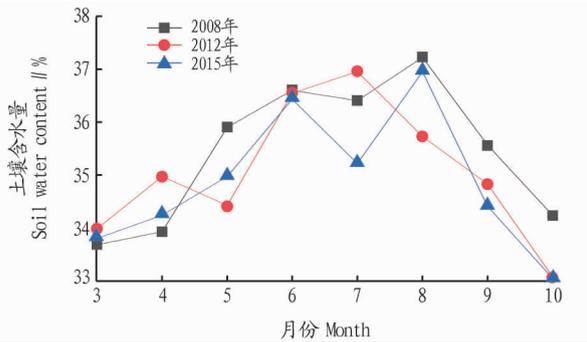


图4 各典型年内生长季表层土壤平均含水量

Fig.4 Average water content of surface soil in the growing seasons in typical years

表1 土壤水分与影响因子的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of soil moisture and impact factors

因子 Factor	均值 Mean	标准差 Standard deviation	相关系数 Correlation coefficient	置信度 Confidence
降水 Precipitation	143.297 790	41.476 894 7	0.727	0.05
蒸发 Evaporation	47.201 665	6.761 322 3	-0.549	0.10
LAI	1.432 978	0.414 768 9	0.981	0.01

### 3 结论与讨论

(1) 拉萨河流域表层土壤含水量自西南向东北呈逐渐减少趋势,流域内盆地地区平均土壤表层含水量相对较高,流域南部河谷、西部盆地及东北部湿地地区土壤水分含量高于流域中部山地地区;各年旱季中,中部山地地区干旱化趋势强于流域中河谷、盆地地区;各年雨季中,流域中部山地地区湿润化趋势强于流域中河谷、盆地地区。拉萨河流域河谷及盆地地区表层土壤砂石含量相对中部山地较高,植被覆盖度更高。因此造成的土壤蓄水、导水能力的不同,形成了土壤水分空间变化的差异。总体而言,高海拔的流域中部地区土壤湿度相对较低,更适宜安排耐旱作物或品种。

(2) 拉萨河流域各年雨季土壤平均含水量在 33.5%~35.5%。干旱年份雨季土壤水分含量增加较少。各典型年内 3—4 月土壤含水量相对较低,变化幅度较小;5—6 月降水充沛、植被相对茂盛的年份其土壤补给水量充沛,植被截留水量增加,相应的土壤水分含量升高;在 7 月末至 8 月初为植被最为茂盛的阶段,由于蒸腾作用剧烈导致土壤水分略有下降,8 月后降水减少,气温下降,植被覆盖度降低,蒸腾减弱,故流域内土壤水分含量略有上升后持续降低。总体而言,土壤水分含量的年内变化相较于年际变化更为剧烈,可将流域内表层土壤水分的旱涝差异作为安排旱涝作物的依据。

(3) 拉萨河流域尺度上土壤水分含量与降水、LAI 呈正相关关系 ( $P < 0.05$ ),与蒸发呈负相关关系 ( $P > 0.1$ ),可能是因为降水及植物覆被直接影响土壤水分补给量,关系较为简单,而蒸发受到地表植被蒸腾作用及土壤贮水、导水能力的影响,作用更为复杂,故而无明显相关关系。之后的研究中

可进一步加强对土壤水分及其主要影响因子的长时间序列监测,以揭示更稳定的土壤水分变化规律,这对调整布局农作物生产具有积极意义。

### 参考文献

- [1] 郭焱,于红博,马梓策,等.基于 MODIS 的土壤含水量时空变化及干旱化程度分析[J].水土保持研究,2019,26(4):185-189.
- [2] BRONSTERT A, CREUTZFELDT B, GRAEFF T, et al. Potentials and constraints of different types of soil moisture observations for flood simulations in headwater catchments[J]. Natural hazards, 2012, 60(3): 879-914.
- [3] 张淑芳,柴守玺,常磊,等.冬小麦不同播期对土壤水分及产量的影响[J].中国农学通报,2018,34(29):13-19.
- [4] 连玉珍,曹丽花,刘合满,等.西藏农牧交错带农田与相邻草地土壤含水量空间分布特征[J].西南农业学报,2019,32(5):1092-1097.
- [5] 高海峰,白军红,王庆改,等.霍林河下游典型洪泛区湿地土壤 pH 值和土壤含水量分布特征[J].水土保持研究,2011,18(1):268-271.
- [6] BROCCA L, TULLO T, MELONE F, et al. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability[J]. Journal of hydrology, 2012, 422/423: 63-75.
- [7] 刘雅莉,杜剑卿,李锋,等.微尺度下城市公园人造绿地土壤水分的时空分异格局及其驱动机制[J].生态学报,2019,39(18):6794-6802.
- [8] 杨凯悦,贾志清,张立恒,等.高寒沙区典型人工林土壤水分空间分布特征研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(5):88-94.
- [9] 汪倩倩,汪权方,王新生,等.地面资料稀缺区域的农田土壤水分微波与光学遥感协同反演方法研究[J].中国农学通报,2018,34(36):117-123.
- [10] KOLASSA J, REICHLER R H, LIU Q, et al. Estimating surface soil moisture from SMAP observations using a Neural Network technique[J]. Remote sensing of environment, 2017, 204: 43-59.
- [11] WANG L L, QU J J. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review[J]. Frontiers of earth science in China, 2009, 3(2): 237-247.
- [12] KHAN S I, HONG Y, WANG J H, et al. Satellite remote sensing and hydrologic modeling for flood inundation mapping in Lake Victoria Basin: Implications for hydrologic prediction in ungauged basins[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010, 49(1): 85-95.
- [13] MASON D C, SPECK R, DEVEREUX B, et al. Flood detection in urban areas using terraSAR-X[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010, 48(2): 882-894.
- [14] GASHAW T, TULU T, ARGAW M, et al. Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia[J]. Science of the total environment, 2018, 619/620: 1394-1408.
- [15] 徐宗学,程涛,洪思扬,等.遥感技术在城市洪涝模拟中的应用进展[J].科学通报,2018,63(21):2156-2166.
- [16] GUO D L, FAN J, MI M X. Scale-dependency of spatial variability of surface soil moisture under different land use types in Heihe Oasis, China[J]. Chinese journal of applied ecology, 2013, 24(5): 1199-1208.
- [17] 李筱金,徐琳瑜.拉萨河流域水电开发带来的河岸带土壤特征变化研究[J].环境科学与技术,2015,38(5):148-156.
- [18] 王庆海,李翠,庞卓,等.中国草地主要有毒植物及其防控技术[J].草地学报,2013,21(5):831-841.
- [19] HONG Y, NIX H A, HUTCHINSON M F, et al. Spatial interpolation of monthly mean climate data for china[J]. International journal of climatology, 2005, 25(10): 1369-1379.
- [20] 刘贯群,孙蓓蓓,朱良超,等.内蒙李井灌区包气带土壤水分特征研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2011,41(Z1):107-112.
- [21] 王全九,邵明安,郑纪勇.土壤中水分运动与溶质迁移[M].北京:水利水电出版社,2007.
- [22] 陈雪,宋娅丽,王克勤,等.基于 Van Genuchten 模型的高反坡阶下土壤水分特征[J].水土保持研究,2019,26(5):45-52.
- [23] MA L, HE C G, BIAN H F, et al. MIKE SHE modeling of ecohydrological processes: Merits, applications, and challenges[J]. Ecological engineering, 2016, 96: 137-149.
- [24] QIU Y, FU B J, WANG J, et al. Spatial prediction of soil moisture content using multiple-linear regressions in a gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of arid environments, 2010, 74(2): 208-220.
- [25] 胡胡明,赵艳云,程积民,等.云贵山自然保护区环境因素对土壤水分空间分布的影响[J].生态学报,2008,28(7):2964-2971.