DOI: 10.5846/stxb201905060916

包青岭,丁建丽,王敬哲,刘婕,马春玥.基于 VIC 模型模拟的干旱区土壤水分及其时空变化特征.生态学报,2020,40(9):3048-3059. Bao Q L, Ding J L, Wang J Z, Liu J, Ma C Y.Spatio-temporal variation of soil moisture in arid area based on VIC land surface model. Acta Ecologica Sinica,2020,40(9):3048-3059.

基于 VIC 模型模拟的干旱区土壤水分及其时空变化 特征

包青岭^{1,2,3},丁建丽^{1,2,*},王敬哲^{1,2},刘 婕^{1,2},马春玥^{1,2}

1 新疆大学资源与环境科学学院智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室,乌鲁木齐 830046
2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验,乌鲁木齐 830046
3 新疆财经大学,乌鲁木齐 830046

摘要:土壤水分在陆地水循环中起着十分重要的作用,大尺度、长时间及高精度的土壤水分监测是旱情预警、生态恢复与精准农业决策部署的重要指导依据,而陆面过程模式模拟在时空尺度上可获得更准确的土壤水分特征。以渭-库绿洲为目标靶区,结合 VIC 陆面过程模型和土地利用类型变化,探讨 2009—2016 年研究区年际间不同地类土壤水分时空变化规律,并用实测数据进行精度验证,结果表明:(1)东北区域土壤含水率模拟值较高,土壤含水量低值集中在研究区西部与南部区域。(2)盐渍土壤 表层含水量高于耕地,每年雨季,灌丛土壤含水量高于其他 3 种地类,由于大量荒地转为耕地,绿洲荒地土壤含水量与耕地土壤 相互接近,在 28.784—53.741 mm 之间。(3) 渭-库绿洲近 7 年耕地与盐渍地面积大幅度增加,耕地与盐渍地面积增幅达 35%以上,荒地面积相较 2009 年减少约 46%,灌丛面积增幅约 15%。(4) 荒地土壤含水量伴随面积大幅度下降,土壤含水量数值集中 在正态曲线 28.6 mm 以上区域。VIC 模拟值与实测值均方根误差(RMSE)范围在 1.4—2.80 之间,RE 范围在 0.90—2.20 之间, *R*²范围在0.40—0.60 之间,模拟效果较好。

关键词:土壤含水量; VIC 陆面过程模型; 土地利用类型; 时空变化

Spatio-temporal variation of soil moisture in arid area based on VIC land surface model

BAO Qingling^{1,2,3}, DING Jianli^{1,2,*}, WANG Jingzhe^{1,2}, LIU Jie^{1,2}, MA Chunyue^{1,2}

1 Xinjiang Common University Key Laboratory of Smart City and Environmental Stimulation, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, China

3 Xinjiang University of Finance & Economics, Urumqi 830046, China

Abstract: There is an increasing need of large-scale, long-term and high-precision soil moisture monitoring. Methods based on land use features, such as Variable Infiltration Capacity (VIC) land-surface process model, can obtain more accurate soil moisture characteristics in the spatio-temporal scale. It is of great significance to drought early warning, ecological restoration, and precision agriculture decision-making and deployment. This paper took Wei-Ku oasis as the target area, combined with VIC land surface process model and land use type change, to discuss the temporal and spatial changes of soil moisture of different types in the study area from 2009 to 2016, and verified the accuracy with the measured data. The results showed that: (1) the simulated value of soil moisture content in the northeast region was high, while the low value of soil moisture content was concentrated in the western and southern regions of the study area. (2) The surface moisture

收稿日期:2019-05-06; 网络出版日期:2020-03-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41771470,U1303381,41261090)

^{*} 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Ding_jl@ 163.com

content of saline soil was higher than that of cultivated land. In rainy season, the soil moisture content of shrub soil was higher than that of other 3 types of land. Due to a large number of wasteland being converted into cultivated land, the soil moisture content of oasis wasteland was close to that of the cultivated land, between 28.784 and 53.741 mm. (3) In the past 7 years, the area of cultivated land and salinized land in Wei-Ku oasis have been greatly increased, the area of cultivated land and salinized land increased by over 35%, the area of wasteland decreased by about 46% compared with that of 2009, and the area of shrub increased by about 15%. (4) The wasteland soil moisture content decreased significantly with the area, and the soil moisture content values were concentrated in the area above 28.6 mm of the normal curve. The VIC simulated value and measured value *RMSE* ranged from 1.4 to 2.80, *RE* ranged from 0.90 to 2.20, R^2 ranged from 0.40 to 0.60, and the simulation effect was good.

Key Words: soil moisture; Variable Infiltration Capacity (VIC) land surface model; land use type; spatiotemporal variation

土壤水分是气候与陆地系统中一个重要变量,它控制着陆地边界以及地球表面和大气之间的能量和水的 交换^[1-5]。土壤水分对气候系统及其未来气候变化的影响尤为重要^[6]。土壤水分在陆地水循环中起着关键 作用,并且负责通过渗透将地表水和储存水分开,表面和根区土壤水分控制着陆地表面上的入射辐射,分别为 显热和潜热(蒸发)通量,研究土壤水分是农业,生态学,水文学甚至岩土工程等各个领域的关键^[7-9]。土壤水 分调节植物生长过程,并对全球水循环产生重大影响,驱动土壤水分的气象参数受到土壤水分的大规模变化 的影响,从而产生反馈机制,可对气候和土地利用变化产生相当大的影响^[10]。中国新疆塔里木河流域渭-库 绿洲属于典型大陆性气候,气候干燥,年降水量少且蒸发量大,更容易导致大规模干旱和灾害,水资源短缺已 经成为制约当地农业生产的一个重要因素^[11]。近年来,为了适应社会经济的可持续发展,该地区对农业、工 业和生活用水的需求不断增加,此外,随着全球气候变暖和人类活动等影响,干旱地区的生态环境质量日益下 降和严重,使其水资源短缺问题愈加严重^[12]。因此对干旱地区土壤水分的时空变化研究显得尤为重要,关系 到未来生态安全和农业可持续发展,也是生态水文模型研究的重点。

近几十年来,国际组织开展了许多土壤水分研究计划,如全球能源和水循环测试(GEWEX, the Global Energy and Water Cycle Experiment)、美国国家航空航天局土壤水分(SMAP, Soil Moisture Active Passive)卫星和欧洲空间局土壤水分和海盐(SMOS, Soil Moisture and Ocean Salinity)等的研究项目促进了土壤水分研究的发展^[13],以上项目主要围绕以遥感手段对土壤水分信息进行监测,虽然遥感技术与微波卫星对于观测土壤水分具有实时、动态、大面积等特点,并为土壤水分的研究提供了新的思路和方法,但是由于天气等因素影响,难以获得长时间序列数据,或者是地表植被类型覆盖,导致难以获取高精度土壤水分信息^[14-20]。随着土壤水分监测技术的迅速发展,陆面生态水文过程模拟的类型受到越来越多关注^[21],典型的模型如 CLM、VIC、SiB2 和 Noah 等可以获得连续时空序列的土壤水分,陆面水文过程模型在有效的数据基础上,具有模拟大规模、高时间分辨率土壤水分的能力,是一种观测和研究土壤水分变化的行之有效的方法,同时在干旱监测与水文观测等问题的应用中,陆面过程模型模拟的土壤水分信息非常有用^[22-23]。然而,这些已有的陆面生态水文过程模式在干旱地区的适用性仍不得而知。此外,如何充分利用多源数据并将其应用于时序干旱区土壤水分信息的获取当中也是一个亟待解决的科学问题。

基于此,本研究以渭干河-库车河绿洲为研究区,通过分析近10年研究区土地利用类型的变化,结合VIC 陆面过程模型和土地利用类型对土壤含水量进行时空变化研究,通过实测土壤水分数据,验证模拟结果,揭示 土壤水分变化规律,以期为实现绿洲旱情监测与盐渍化动态预报提供科学参考。

1 研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区南部的塔里木盆地北边区域,范围在纬度 41°25′—42°15′N,经度 82°—

82°30′E之间,又称渭干河库车河绿洲(简称渭-库绿洲),外表酷似扇形,由于受大陆干旱性气候和盆地间 地形格局的影响,发展为典型且完整的扇形洪冲积扇倾 斜平原,气候上夏季干热,冬季干冷,常年缺乏降水,年 平均蒸发量达到1100 mm,但是年平均降水量不足200 mm,属于典型中纬度干旱区^[24]。如图1所示。

1.1 土壤特征

研究区土壤类型主要为石灰性灰褐土、灌淤土。石 灰性灰褐土母质为残坡积物,剖面为 As-Ai-Ah-AB-Bk-Ck型,表层枯枝落叶较少,多和林下杂草草根盘结在一 起,分布在研究区北边区域。灌淤土母质为灌溉淤积 物,剖面为 A11-Ab-C型,颜色和质地较均一,多为棕灰 色粘壤土,粘粒含量 20%左右,普遍有炭屑、瓦片等侵 入物,有机质含量可达 1.0%以上,pH 值在 8.2—8.5 之



间,呈微碱性,主要分布在绿洲内部^[25]。土壤容重变化范围在 1.39—1.61 g/cm³,粉粒含量占土壤机械组成 70%,其次是砂砾含量,占 20%。研究区实测土壤水分,2008—2016 年样本土壤含水量变异系数均低于 0.5,属于中等变异。如表 1 所示。

表 1 2008—2016 年研究区内部土壤样本含水量统计特征

 时间 Date	数量 Samples	平均值 Mean	标准偏差 SD(standard deviation)	最大值 Max	最小值 Min	变异系数 CV(coefficient of variation)
2008-09	102	9.536	3.515	29.417	1.151	0.369
2010-10	53	20.121	8.221	59.400	1.300	0.409
2011-11	50	7.198	2.354	36.570	0.110	0.327
2013-08	37	7.135	3.541	27.409	0.205	0.496
2015-07	36	5.576	1.245	29.787	0.515	0.223
2016-04	39	4.070	1.210	23.941	1.954	0.297

1.2 植被类型

研究区植被类型包括自然植被与人工作物。自然植被以盐生植被为主,分布在绿洲外围与夹杂在绿洲内部,主要包括盐爪爪(Kalidium foliatum)、花花柴(Halocnemum strabilaceum)、盐穗木(Halosttachys caspica)、骆 驼刺(Alhagi sparsifolia)、胡杨(populus euphratica)、芦苇(Phragmites communis)、怪柳(Tamarix taklamakannesis)等,人工作物包括但不限于,棉花、玉米、冬小麦等^[26]。

2 研究资料与方法

2.1 数据获取

选取 2008—2016 年分布于研究区具有代表性的 58 个土壤采样点,均匀分布在绿洲、绿洲荒漠交错带以 及荒漠带区域。采用五点法进行土壤样本采集,使用 W.E.T 型传感器、Hydra 型号土壤测试仪测量土壤含水 率及介电常数等数据。土壤容重使用环刀法进行测定。使用美国 Onset 公司生产的 HOBO 型自动记录水位 计(以下简称水位计)记录地下水埋深数据,该仪器可根据实验的要求设定水位计的记录周期,水位计产生的 误差最大为 1 cm,降低了实验误差。土壤粒径采用美国 Microtrac 公司生产的 S3500 型激光粒激光粒度仪测 定(量程 0.01—2000 µm)。

2.2 土地利用类型转移矩阵

土地利用转移矩阵是研究区域内各个土地利用类型转移的去向、数量以及来源的一种方法,是马尔可夫 模型在土地利用变化方面的应用,此模型可以定量的表明不同土地类型相互转化的情况,还能揭示不通地类 之间的转移速率。土地利用转移矩阵通用形式为:

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1} & \cdots & S_{mn} \end{pmatrix}$$
(1)

式中,n代表转移前后土地利用类型数目;S为面积;i、j(i, j=1,2,…,n)代表转移前后的地类;S_{ij}代表转移前 类型变换为j后类型的面积。矩阵中的每个行元素表示转移前的i地类到转移后的j地类的流向信息^[27]。采 用 ArcGIS 软件进行操作。

2.3 VIC-3L 模型

VIC-3L模型的关键特征是具有植被异质性、可变 渗透多个土层和非线性基流,是一种基于 SVATS(Soil Vegetation Atmospheric Transfer Schemes)思想的空间分 布网格化的大尺度分布式水文模型^[28-30]。VIC 模型的 成功运行,需要输入以下 5 种文件,全局控制文件、气象 驱动文件、土壤参数文件、植被库文件、植被参数文件。 植被参数文件选用马里兰大学发布的全球 1 km 辨率的 土地覆盖类型数据;研究中的土壤参数分类参照 FAO 世界粮农组织提供的土壤质地分类图;本次研究选择 CMADS(China Meteorological Assimilation Datasets for SWATS)系列数据集作为气象驱动数据,数据格式为: 时间分辨率逐日;空间分辨率 1/4°;时间尺度,2008— 2016。此数据集为 CLDAS 数据同化系统的驱动数 据^[31]。图 2 为 VIC 模型运行流程图。

2.4 模型模拟结果精度验证

采取决定系数(*R*²)、均方根误差(RMSE)与相对误 差(RE)指标对 VIC 水文模型进行精度验证。分别利用 不同年份的野外实测土壤含水量数据对模型的精度进 行评价,其中 *R*²代表实测土壤含水量与 VIC 模拟值符 合程度、RE 表示实测含水量与 VIC 模拟值的相对误 差、RMSE 表示实测含水量与 VIC 模型的绝对误差的平 均程度^[32]。

开始 初始化VIC水文过程模型 初始化输入参数 初始化网格点参数 计算网格点下一个时刻 </tr

Fig.2 Schematic diagram of modelling approach

3 结果与分析

3.1 研究区土地利用面积变化

由表 2 可得,7 年间,研究区耕地面积从 2346.38 km²增加至 4071.09 km²,主要由荒地与灌丛转变而来, 其中,荒地转移面积为 461.45 km²,灌丛转移面积为 1322.22 km²。盐渍地面积由 2009 年的 921.27 km²增加至 2016 年的 1220.98 km²,变化量 299.70 km²,其中荒地贡献面积最大,为 1031.44 km²。水域面积增加 249.08 km²,水域面积增加主要由灌丛与荒地贡献,分别贡献了 116.62 km²和 129.66 km²。这 7 年间,荒地面积减少 了 2808.12 km²,其主要面积转移方向是灌丛、盐渍地与耕地,转移面积分别为 1333.53 km²、1031.44 km²和

461.45 km²。灌丛地面积增加了将近 100 km²,主要由荒地地贡献而来。

	2016					
2009	荒地	建筑用地	耕地	盐渍地	灌丛	水体
	Wasteland $/km^2$	Built-up/km ²	Cultivated/ km^2	Salinized/ km^2	Shrub covered/ $\rm km^2$	Water/km ²
荒地 Wasteland/km ²	3149.78	10.50	461.45	1031.44	1333.53	129.66
建筑用地 Built-up/km ²	0.75	30.51	3.45	0.00	7.84	0.46
耕地 Cultivated/km ²	7.59	10.67	2066.54	2.69	254.59	6.13
盐渍地 Salinized/km ²	92.98	1.05	212.96	134.83	440.98	39.09
灌丛 Shrub covered/km ²	48.70	12.21	1322.22	44.32	1881.39	116.62
水体 Water/km ²	10.45	0.04	4.48	7.30	20.58	52.02

	表 2	2009—2016 年渭-库绿洲土地利用类型面积转移矩阵
Table 2	Transition	martrix of land use areas in Ugan-Kuga River Delta in 2009-2016

3.2 VIC 模型不同月份土壤含水量时空变化

基于上述土壤参数、植被与植被库参数和气象驱动数据,将气象驱动数据输入到 VIC 水文模型中,编译运行,提出结果文件中的表层土壤含水量数据,得到图 3 与表 1,其中 1 至 3 月平均值为 a,4 至 6 月平均值为 b,7 至 9 月平均值为 c,10 至 12 月平均值为 d。图 3 与表 3 表示 2009 年至 2016 年研究区表层土壤含水量空间变化情况和统计特征,从年际变化来看,研究区自 2009—2016 年,1 至 3 月份,西南地区土壤含水量范围在 14.814—25.214 mm 内,低于东北区域土壤含水量普遍在 35.98 以上,说明研究区西南地区 1—3 月份为相对 干旱区域;4—6 月份,土壤含水量为普遍较高,平均值达到 41.512,最高年份 2012 年达到 64.823 mm,最低年份 2009 年为 30.658 mm,研究区东北区域含水量普遍高于 35.210 mm,空间上,干旱区域集中在西南、西北和 南部区域;10—12 月份,土壤含水量平均值为 37.887 mm,最低年份 2009 年为 29.890 mm,最高年份 2012 年为 58.677 mm,空间上,西南区域普遍比东北区域土壤含水量低 13%。从年内变化来看,2009 年,由 a 至 d,土壤 含水量平均值从 24.051 mm 升至 30.658 mm,最后降至 29.890 mm,变异系数自 0.179 持续降至 0.096,土壤含水量变化符合气候降雨年内变化规律,变异系数降低,代表 VIC 模型模拟精度随时间提高;2012 年,由 a 至 d,平均土壤含水量达到 9 年内最高值,分别为 54.241、53.907、64.823、58.677 mm;其余年份,随着模拟时间增加,整体平均土壤含水量有升高趋势。2009—2016 年模拟期间,以 2014 年为例,变异系数由 0.095 至0.110,最后 降至 0.092。其余年份与之类似,由此可得土壤含水量变水量变量系数呈正弦曲线变化。

3.3 不同土地利用类型土壤含水量时间变化

由于模型 2008 年为预热期,数值模拟不准确,不将其列入讨论。将土壤含水量模拟值共分 4 种地类进行 分析,分别为 a 盐渍地、b 荒地、c 耕地、d 灌丛。图 4 中,分别描述了 4 种地类从 2009-01-01 至 2016-12-31 期 间三层土壤水分波动变化与每日降水量,结合降雨量来看,每种地物土壤含水量变化波动呈正弦函数曲线,从 7 月份雨季开始,土壤水分含量增加,到 10 月份开始下降,呈现由 4 月份旱季至 7 月份雨季,由干到湿得规 律;每种地物第一层含水量小于后两层,第二层含水量为最大,模拟土壤含水量变化符合每日降雨量变化趋 势,在降雨量较少的 1—6 月、10—12 月,三层土壤含水量呈现下降趋势,直到 7—9 月雨季,随着降雨量的增 加,各层土壤含水量呈现大幅度波动上升的趋势,并达到最高值,其中盐渍地表层土壤含水量峰值为 38.157 mm 左右、荒地 45.214 mm 左右、耕地 43.524 mm 左右、灌丛 38.278 左右,各地物土壤含水量最低值均出现在 春季与秋冬季,盐渍地表层土壤含水量最低值为 21.213 mm 左右、荒地 28.963 mm 左右、耕地 26.745 mm 左 右、灌丛 28.985 左右。从根层与底层土壤含水量硬化来看,4 种地物土壤含水量均表现出根层土壤含水量总 体要高于底层土壤含水量,盐渍地与灌丛根层土壤含水量高于其他两种地类,灌丛根层土壤含水量与底层土 壤含水量在 2009 年雨季期间出现交点;荒地与耕地底层土壤含水量在每年雨季来时,均出现交叉现象。总体 来看,VIC 模型较好的模拟并区分了 4 种不同地物类型表层、根层与底层土壤含水量的变化。



a:1-3月平均值;b:4-6月平均值;c:7-9月平均值;d:10-12月平均值

http://www.ecologica.cn

	Table 3 Sta	tistical characteristics	s of surface soil moistu	re VIC simulation v	alues from 2009 to 20	16
年份	季节	平均数	标准偏差	最大值	最小值	变异系数
Year	Seasons	Mean	SD	Max	Min	CV
2009	1—3月	24.051	4.301	31.760	14.814	0.179
	4—6月	25.609	3.840	37.785	16.115	0.150
	7—8月	30.658	3.227	37.785	16.108	0.105
	10—12 月	29.890	2.876	36.086	16.100	0.096
2010	1—3 月	27.678	2.630	40.169	16.093	0.095
	4—6月	30.620	2.985	38.102	16.085	0.097
	7—8月	32.826	3.487	40.169	16.078	0.106
	10—12 月	31.069	2.909	39.618	16.071	0.094
2011	1—3月	33.961	3.083	43.247	19.276	0.091
	4—6月	33.202	3.086	42.038	19.268	0.093
	7—8月	37.559	3.690	45.612	19.259	0.098
	10—12 月	34.714	3.385	43.585	19.251	0.098
2012	1—3月	54.241	5.195	68.567	32.071	0.096
	4—6月	53.907	5.043	67.472	32.057	0.094
	7—8月	64.823	7.253	77.430	32.043	0.112
	10—12 月	58.677	5.972	72.598	32.030	0.102
2013	1—3月	32.719	3.206	40.988	19.210	0.098
	4—6月	35.467	3.512	43.929	19.202	0.099
	7—8月	38.771	3.725	49.959	19.194	0.096
	10—12 月	36.246	3.462	46.899	19.186	0.096
2014	1—3月	33.434	3.165	43.165	19.178	0.095
	4—6月	35.273	3.869	47.868	19.171	0.110
	7—8月	43.093	4.536	58.694	19.163	0.105
	10—12 月	38.494	3.526	49.787	19.155	0.092
2015	1—3月	34.469	3.234	43.959	19.148	0.094
	4—6月	41.248	4.374	54.528	19.140	0.106
	7—8月	40.143	3.756	50.098	19.133	0.094
	10—12 月	36.084	3.556	45.344	19.125	0.099
2016	1—3 月	35.477	3.728	44.974	19.118	0.105
	4—6月	38.419	4.398	50.410	19.111	0.114
	7—8 月	44.227	4.720	55.182	19.104	0.107
	10—12 月	37.925	3.653	48.355	19.096	0.096

表 3 2009—2016 表层土壤水分 VIC 模拟值统计特征

提取其中 2012 年数据,放大至图 5。由图 5 可得,从 1 月至 6 月,三层土壤含水量呈现缓慢下降趋势,直 到 6 月中旬开始,研究区进入雨季,随着降水量增加,土壤含水量也迅速增加达到最高值;盐渍地与灌丛地表 土壤含水量较高,同时整体含水量变化值也高于其他两类地物,可能是由于灌丛根系具有聚集水分得作用,盐 渍化土壤地下水位较高。

3.4 不同土地利用类型土壤含水量时间变化对比

选取典型 4 种地物,分析长时间序列与 2014 年土壤含水量 VIC 模拟值的差异,如图 6 与 7 所示。由图 6 所得,盐渍土壤表层含水量范围在 34.854—55.874 mm,相较于耕地 30.210—52.141 mm,大约高 0.06%,在 2010—2013 年期间,盐渍地土壤含水量高于耕地大约 0.10%,在 2014 年两者含水量持平,随后在 2015—2016 年高于耕地大约 0.08%,同时盐渍土与灌丛的土壤含水量在模拟期间变化波动保持在 34.587—53.414 mm 之间;在 2011—2014 年雨季时期,灌丛土壤含水量高于其他 3 种地类大约 0.02%,可能是由于自然植被天然的 涵养水源的功能,但是在其他季节,含水量变化与盐渍土壤地持平;荒地土壤含水量在旱季期间,处于所有地









类含水量最低 28.412 mm 左右,但是一到雨季,含水量迅速上升至最高值 56.784 mm 左右,并且在 2015 年与 2010 年雨季达到最顶峰 58.745 mm;耕地土壤含水量变化范围与荒地含水量相一致,在 28.784—53.741 mm 之间,根据近 7 年土地利用变化,大量荒地转化为耕地,绿洲荒地土壤含水量与耕地土壤相互接近。提取 2014 年数据,将其放大至图 7,由图可得,盐渍地与灌丛初始土壤含水量为 35.754 mm,同时波动幅度相似,在 模拟期间,土壤含水量都要高于其他两种地物大约 0.02%;荒地与耕地变化趋势相似,波动相较于其他两种地

物,变化幅度更大,同时初始含水量较低为 33.612 mm;4 种地物在雨季,土壤含水量迅速上升至 44.812 mm 左 右,并且波动幅度加大,至到 9 月恢复平缓在 32.854—39.547 mm;1—3 月含水量高于 10—12 月份含水量大约 0.23%,雨季含水量呈现大幅度盘旋上升,呈现出土壤含水量干湿季节变化规律,说明 VIC 模型良好的模拟了 研究区土壤含水量的季节变化规律。







3.5 土地利用类型面积变化对土壤含水量影响

图 8 从左至右分别为 2009—2016 年土地利用面积 变化图、2009—2016 年表层土壤含水量范围分布图。 由图可得,7 年内,盐渍地增加 299.705 km²,增加率 32%,表层土壤含水量范围在 41.40—34.50 mm,中位数 37.24 mm,正态曲线数值分布在 34.40 mm 以上;荒地减 少 2808.12 km²,减少率 46%,土壤含水量范围在 37.40—30.80 mm,中位数 34.25 mm,正态曲线数值分布 在 28.60 以上;耕地面积增加 1724.71 km²,增加率 73%,土壤含水量范围在 27.60—32.20 mm,中位数 28.90 mm,正态曲线数值分布在 24.20 mm 以上;灌丛面 积增加 514.94 km²,增加率 15%,土壤含水量范围在 31.52—36.80 mm,中位数 33.60 mm,正态曲线数值分布



content of four kinds of ground objects in 2014

在 30.40 mm 以上。2006—2016 年,除了荒地面积减少外,其余地类面积均明显增加。荒地土壤含水量伴随 面积大幅度下降,箱线图下边缘较其余地类短,土壤含水量分布低于盐渍地与灌丛;盐渍地与耕地面积增加幅 度最大,主要由荒地转化而来,盐渍地土壤含水量范围较耕地高 20%;灌丛面积增加次之,箱线图土壤含水量 上下限范围长度一致。荒地土壤含水量伴随面积大幅度下降,土壤含水量数值集中在正态曲线 28.6 mm 以上 区域;盐渍地、耕地土壤与灌丛表层土壤含水量伴随面积大幅度上升,土壤含水量数值分别集中在正态曲线 34.40 mm、24.20 mm 与 30.40 mm 以上区域。

3.6 土壤含水量模拟精度验证与效果

采用5个年份野外实测土壤含水量数据对 VIC 模拟表层土壤含水量进行验证,按照经纬度提取 VIC 模



图 8 土地利用面积变化与表层土壤含水量分布 Land use area change and surface soil water content distribution Fig.8

拟值相应的数据,对实测含水量与 VIC 模拟值进行相关性分析和散点图绘制,证明 VIC 模拟值的可靠性。图 8 给出了 2010 年 10 月、2011 年 11 月、2013 年 8 月、2015 年 7 月和 216 年 4 月模拟与实测土壤含水量的线性 拟合散点图,以实测含水量为横轴,VIC模拟值为纵轴。由图可得,对于表层土壤来说,实测含水量与 VIC模 拟值 R²范围在 0.30—039 之间,模拟结果较好。与实测土壤含水量相比, VIC 模型模拟的土壤含水量整体呈 现较高值,由此表明 VIC 模拟值存在高估现象。2010 年 10 月(秋)与 2016 年 4 月(春),表层土壤含水量 R² 达到了 0.34 以上; 2013 年 08 月与 2015 年 7 月, 表层土壤含水量 R²分别为, 0.3031、0.3053。由表 4 可知, VIC 模拟值 RMSE 范围在 1.40 至 2.80 之间, RE 范围在 0.90 至 2.20 之间, R²范围在 0.40 至 0.60 之间, 总体上 VIC 模型模拟值与实测土壤含水量相关性较好,其中盐渍地 R²最高、RMSE 与 RE 最低,接着为灌丛、耕地、荒地。

	Table 4 VIC model typical ground class simulation evaluation results				
地物类型 Land use type	RMSE	RE	R^2		
盐渍地 Salinized	1.440	0.923	0.598		
耕地 Cultivated	1.931	1.394	0.503		
荒地 Bareland	2.784	2.153	0.467		
灌丛 Shrubcovered	1.462	0.927	0.596		

表 4 VIC 模型不同地类模拟评价结果

. .

RMSE:均方根误差 Root Mean Squard Error; RE:相对误差 Relative error

结论 4

通过 VIC 模型土壤含水量模拟,发现其对干旱区土壤水分模拟效果较好,可以实现大面积、长时间序列 的旱情监测与分析;结合土地利用类型变化,分析土壤含水量时空模拟差异,结果表明:

(1) 渭-库绿洲近7年内,耕地与盐渍地面积增幅达35%以上,荒地面积相较2009年减少约46%,灌丛面 积增幅约 15%;其中荒地转为盐渍地面积为 1031.44 km²,荒地转为耕地 461.45 km²,表明研究区土地荒漠化 趋势得到逆转,整体生态环境得到改善。

(2) 通过分析不同月份 VIC 模拟表层土壤含水量空间分布,发现 1—6月,西南地区土壤含水量低于东北 区域;7—9月,研究区东北区域含水量普遍高于 35.21 mm,干旱区域集中在西南、西北和南部区域;10—12 月,西南区域普遍比东北区域土壤含水量低。



实测土壤水分与 VIC 模拟值散点图 图 9 Fig.9 Measured soil moisture and VIC simulated value scatter plot

(3) 通过分析不同地类 VIC 模拟土壤含水量时间分布,结合降雨量来看,每种地物土壤含水量变化波动 呈正弦函数曲线,盐渍土壤表层含水量相较于耕地约高0.06%;在每年雨季,灌丛土壤含水量高于其他3种地 类大约 0.02%;旱季期间,荒地土壤含水量,处于低值 28.41 mm 左右,在雨季,含水量上升至高值 56.78 mm 左 右;据近7年土地利用变化,大量荒地转化为耕地,绿洲荒地土壤含水量与耕地土壤相互接近,在28.784— 53.741 mm 之间; VIC 模型较好的模拟了研究区不同地类土壤含水量的季节变化规律。

(4)进一步分析 2009—2016 土地利用面积变化对土壤含水量变化的影响,荒地土壤含水量伴随面积大 幅度下降,含水量数值集中在正态曲线28.60以上区域;盐渍地、耕地土壤与灌丛表层土壤含水量伴随面积大 幅度上升,土壤含水量数值分别集中在正态曲线 34.40 mm、24.20 mm 与 30.40 mm 以上。VIC 模拟值与实测 值 RMSE 范围在 1.40 至 2.80 之间, RE 范围在 0.90 至 2.20 之间, R²范围在 0.40 至 0.60 之间, 模拟效果较好。

参考文献(References):

- [1] 王加虎, 李丽, 李新红. "四水"转化研究综述. 水文, 2008, 28(4): 5-8.
- [2] 张军红, 吴波. 干旱、半干旱地区土壤水分研究进展. 中国水土保持, 2012, (2): 40-43.
- [3] 马成霞. 绿洲区域表层土壤水盐的时空异质性[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
- [4] 杨爱霞. 基于遥感和水文模型的新疆渭库绿洲荒漠过渡区土壤水分研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [5] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. Earth-Science Reviews, 2010, 99(3/4): 125-161.
- [6] Vivoni E R. Spatial patterns, processes and predictions in ecohydrology: integrating technologies to meet the challenge. Ecohydrology, 2012, 5 (3): 273-281.
- [7] Deardorff J W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. Journal of Geophysical Research; Oceans, 1978, 83(C4); 1889-1903.
- [8] Barnett T, Malone R, Pennell W, Stammer D, Semtner B, Washington W. The effects of climate change on water resources in the west: introduction and overview. Climatic Change, 2004, 62(1/3): 1-11.
- [9] Sellers P J, Hall F G, Asrar G, Strebel D E, Murphy R E. An overview of the First International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Field Experiment (FIFE). Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D17): 18345-18371.
- [10] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, Burges S J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1994, 99(D7): 14415-14428.
- [11] Wang L L, Qu J J. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. Frontiers of Earth Science in China, 2009, 3 (2): 237-247.
- [12] Ping Z, Bounoua L, Thome K, et al. Modeling Surface Climate in U.S. Cities Using Simple Biosphere Model SiB2[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2015, 41(6):525-535.
- [13] 陈书林, 刘元波, 温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1192-1203.
- [14] Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. International Journal of Climatology, 2005, 25(6): 693-712.
- [15] Al-Yaari A, Wigneron J P, Ducharne A, Kerr Y, De Rosnay P, De Jeu R, Govind A, Al Bitar A, Albergel C, Muñoz-Sabaterd J, Richaume P, Mialonc A. Global-scale evaluation of two satellite-based passive microwave soil moisture datasets (SMOS and AMSR-E) with respect to Land Data Assimilation System estimates. Remote Sensing of Environment, 2014, 149: 181-195.
- [16] Leavesley G H. Modeling the effects of climate change on water resources-a review. Climatic Change, 1994, 28(1/2): 159-177.
- [17] 杨涛, 宫辉力, 李小娟, 赵文吉, 孟丹. 土壤水分遥感监测研究进展. 生态学报, 2010, 30(22): 6264-6277.
- [18] 汪潇,张增祥,赵晓丽,谭文彬.遥感监测土壤水分研究综述.土壤学报,2007,44(1):157-163.
- [19] 吴黎,张有智,解文欢,李岩,宋静波.土壤水分的遥感监测方法概述.国土资源遥感,2014,26(2):19-26.
- [20] Zhao L, Yang K, Qin J, Chen Y Y, Tang W J, Lu H, Yang Z L. The scale-dependence of SMOS soil moisture accuracy and its improvement through land data assimilation in the central Tibetan Plateau. Remote Sensing of Environment, 2014, 152: 345-355.
- [21] Moradkhani H. Hydrologic Remote Sensing and Land Surface Data Assimilation. Sensors, 2008, 8(5): 2986-3004.
- [22] Yan F, Qin Z H, Li M S, Li W J. Progress in soil moisture estimation from remote sensing data for agricultural drought monitoring//Proceedings of SPIE 6366, Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology VI. Stockholm, Sweden: SPIE, 2006: 636601.
- [23] Robinove C J, Chavez P S, Gehring D, Holmgren R. Arid land monitoring using Landsat albedo difference images. Remote Sensing of Environment, 1981, 11: 133-156.
- [24] 邓辉,周清波.土壤水分遥感监测方法进展.中国农业资源与区划,2004,25(3):46-49.
- [25] Zhao Y S, Zheng H F, Ma X L, Jin R H, Wu G. Regenerative solar soil sterilizing system with the Fresnel lens concentrator. Applied Thermal Engineering, 2018: 674-682.
- [26] Han J Q, Mao K B, Xu T R, Guo J P, Zuo Z Y, Gao C Y. A soil moisture estimation framework based on the CART algorithm and its application in China. Journal of Hydrology, 2018: 65-75.
- [27] 古丽波斯坦・巴图,丁建丽,李艳菊.干旱区土地利用/覆盖变化与生态环境效应研究——以渭-库绿洲为例.草地学报,2018,26(1): 53-61.
- [28] Yuan F, Xie Z H, Liu Q, Yang H W, Su F G, Liang X, Ren L L. An application of the VIC-3L land surface model and remote sensing data in simulating streamflow for the Hanjiang River basin. Canadian Journal of Remote Sensing, 2004, 30(5): 680-690.
- [29] Xie Z H, Yuan F, Duan Q Y, Zheng J, Liang M L, Chen F. Regional parameter estimation of the VIC land surface model: methodology and application to river basins in China. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(3): 447-468.
- [30] Yang Y M, Yang Y H, Liu D L, Nordblom T, Wu B F, Yan N N. Regional water balance based on remotely sensed evapotranspiration and irrigation: an assessment of the Haihe Plain, China. Remote Sensing, 2014, 6(3): 2514-2533.
- [31] Sha S, Ni G, Li Y H, Hu D, Wang L J. Applicability of TVDI in monitoring drought in Longdong Area of Gansu, China. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 132-139.
- [32] Wang C B, Chen J G, Chen X, Chen J H. Identification of concealed faults in a grassland area in Inner Mongolia, China, using the temperature vegetation dryness index. Journal of Earth Science, 2018; 1-8.