

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0131

王生春,魏加华,万佳华,等. 基于 SMOS 数据的三江源土壤水分时空变化[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 20-27.
WANG S C, WEI J H, WAN J H, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture in the Three River Headwaters region based on SMOS data[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 20-27. (in Chinese)

基于 SMOS 数据的三江源土壤水分时空变化

王生春^{1,3}, 魏加华^{1,2,3}, 万佳华^{1,3}, 乔 禛^{1,3}

(1. 青海大学 三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016;

2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 3. 青海大学 水利电力学院, 西宁 810016)

摘要: 基于 SMOS 卫星和 GNSS-MET 地面土壤水分监测数据, 采用皮尔逊相关、滑动平均、反距离权重法等方法, 评估 SMOS 土壤水分数据在三江源地区的适用性, 分析土壤水分的变化特征及其影响因素。结果表明: SMOS 土壤水分数据能反应研究区(4—10月)基本规律, 其值略低于地面实测值; SMOS 卫星升轨土壤水分值大于降轨土壤水分值, 6—8月 SMOS 土壤水分值高于其它月份; 土壤水分季节性差异明显, 夏季显著高于春季; 三江源区土壤水分空间分布差异较大, 空间格局明显, 总体上澜沧江源区相对湿润, 长江源区相对干旱。

关键词: 土壤水分; SMOS 卫星; 三江源; NDVI

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spatiotemporal variation of soil moisture in the Three River Headwaters region based on SMOS data

WANG Shengchun^{1,3}, WEI Jiahua^{1,2,3}, WAN Jiahua^{1,3}, QIAO Zhen^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. School of Water Resources and Electric Power, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: In this paper, the Pearson correlation, overlapping averages method, and inverse distance weighting (IDW) were used to make a corresponding analysis based on the SM data from SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) satellite and in-situ GNSS-MET (Global Navigation Satellite System-Meteorology). We evaluated the applicability of SMOS SM data and analyzed the variety of SM and its influencing factors. The results showed that: The general dynamic trend of soil water movement in the study area (April to October) could be demonstrated by the SMOS SM data, however the SM from SMOS was slightly lower than that from the in-situ measured; The SM from SMOS satellite in the ascending orbit were higher than those in the descending orbit. The SM from SMOS during the period from June to August were higher than those in the other months. The seasonal variation in soil water was obvious, and the SM in summer was significantly higher than that in spring; The spatial SM was greatly different in the Three-River Headwaters region. Generally, the soil was relatively wet in the source area of Lantsang River, while it was relatively dry in the source area of the Yangtze River.

Key words: soil moisture (SM); SMOS satellite; the Three-River Headwaters region; NDVI

收稿日期: 2019-03-11 修回日期: 2019-05-30 网络出版时间: 2019-06-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190610.0901.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0403600); 国家自然科学基金(91847302)

作者简介: 王生春(1994—), 女, 青海德令哈人, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: 1476026091@qq.com

通信作者: 魏加华(1971—), 男, 陕西汉中, 教授, 博士, 主要从事水资源、水信息学方面的研究。E-mail: weijiahua@tsinghua.edu.cn

土壤水分是陆地与大气间水热能量相互交换的重要参量,也是陆面生态系统水循环的重要组成部分。尽管土壤水分仅占地球总水量的 0.01%^[1],但是它通过改变地球表面与大气间的水和能量的交换,从而影响水文和气候过程^[2]。因此,土壤水分对陆地生态、气象等具有重要意义。三江源地区生态极其脆弱,土壤水分是高寒草地生态过程、生态承载能力以及退化草地恢复和重建的主要影响因子之一^[3-4]。关于三江源地区土壤水分变化的系统研究还较少,严应存^[5]利用 1989—2005 年土壤和降水资料,研究了长江源区曲麻莱、黄河源区甘德县、河南县等典型地区的土壤水分动态变化规律;白晓兰等^[6]在水文气象资料的基础上,研究了三江源干湿、PER 时空分布的变化特征;王春敏^[7]基于 MODIS 数据,分析了 2000—2015 年植被生长变化情况;郭连云^[8]利用三江源区兴海县牧业气象站 1999—2016 年高寒草原土壤水分、牧草生育期资料,分析了土壤水分年、季变化特征以及牧草生长季不同生育期土壤水分的变化规律及与气候因子的关系。

由于三江源地区长序列的土壤水分监测资料稀少,对这一地区土壤水分时空变化规律的研究还不足。本文拟利用 SMOS 卫星数据分析该区土壤水分的时空变化规律。首先利用地面实测数据、降水、蒸发、NDVI 数据,对 SMOS 数据在三江源地区的探测精度和适用性进行评价;在此基础上,利用 SMOS 土壤水分监测数据,分析 2010—2018 年以来三江源土壤水分时空变化特征。

1 研究区概况

三江源区是黄河、长江、澜沧江三条江河的源头汇水区。根据《青海三江源国家生态综合试验区总体方案》^[9],三江源国家生态保护综合试验区总面积 39.5 万 km²,包括黄南、海南、果洛和玉树 4 个藏族自治州的 21 个县和格尔木市的唐古拉山镇(图 1)。全区以山地地貌为主,海拔 3 335~6 564 m。研究区属典型的高原大陆性气候,年平均气温 -5.6~3.8℃,多年平均降水量 404.1 mm,其中 5—9 月降水量约占全年降水量的 85.3%,年蒸发量 730~1 700 mm,年日照时数 2 300~2 900 h。

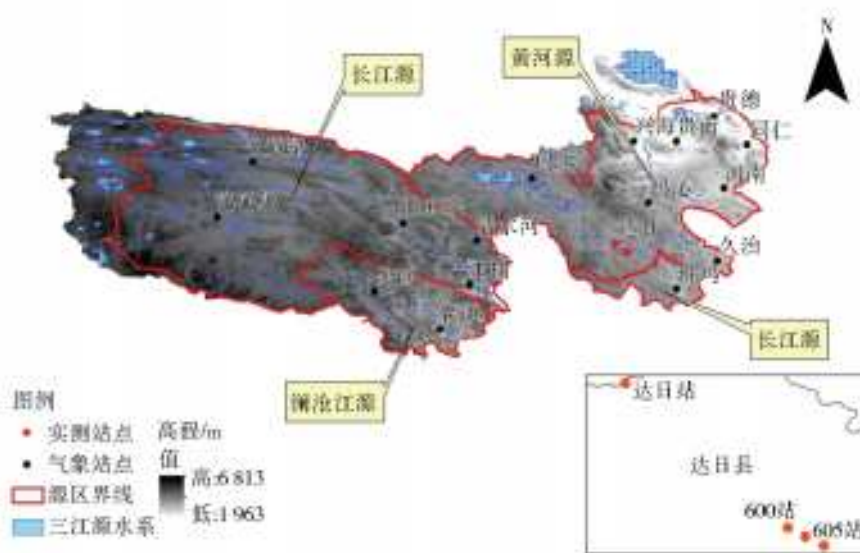


图 1 三江源地理位置及实测站点位置

Fig. 1 The spatial distribution of monitoring sites, rivers and the topography of the Three-River Headwaters region

2 数据与方法

2.1 数据来源

利用 SMOS 卫星 L2 级 MIR_SMUDP2 土壤水分数据产品,SMOS 卫星升轨过境时间为 11:00—12:30,降轨过境时间为 22:00—00:00,可利用数据为 2010 年 6 月 16 日至 2018 年 12 月 31 日。土壤水分探测深度距离地表 5 cm,空间分辨率 0.26°,时间分辨率 1~3 d。SMOS 采用国际通用的体积分

数方式(m³/m³)表达土壤水分,其目标精度为 0.04 m³/m³^[10-11]。与 SMMR、SMM/I、AMSR-E、MWRI 等反演土壤水分相对成熟的微波遥感土壤水分卫星传感器相比,SMOS 的最突出的地方是使用了更低频率的 L 波段观测全球土壤水分^[12]。目前,土壤水分微波反演的主要波段为 C 波段和 L 波段,有研究发现 L 波段反演的土壤水分效果较好,尤其是在植被覆盖地区^[13];SMOS 卫星 0~5 cm 的探测深度对土壤水分更为敏感,不会轻易被植被覆盖和大气影

响^[14];此外,SMOS 卫星还综合了 0~55°多角度、双/全极化、二维综合孔径干涉探测技术,与上一代探测器相比,在硬件方面有了全新的改变^[15]。

地面实测数据来自青海大学、清华大学在三江源区(达日县)联合共建的 4 个 GNSS-MET 站点,土壤水分探测深度为 5、10、15 和 20 cm,30 s 更新一次。本文选取 2016 年 6 月至 2018 年 3 月 5 cm 的土壤水分数据与卫星数据进行对比验证。

气象数据来源于中国国家气象数据服务网,选取青海省内 34 个站点的降水、蒸发数据,辅助验证 SMOS 数据在三江源区的精度。

植被指数(NDVI)数据采用 2015 年 MODND 1M 合成数据集(<http://www.gscloud.cn/>)月尺度的 NDVI,空间分辨率 500 m。

SMAP 土壤水分数据来源于美国宇航局,时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 36 km,采用体积分数方式(m^3/m^3)表达土壤水分。文中选取 2017 年土壤水分数据与 SMOS 土壤水分数据作对比分析。

2.2 研究方法

2.2.1 滑动平均法

利用 5 日滑动平均法^[16]分析升降轨土壤水分日变化。5 日滑动平均法是在一个长序列的逐日数据资料中,每连续 5 d 的数据计算其平均值。滑动平均法侧重于“重近轻远”原则的实现。通过减少数据的权重,短期数据的权重增加,长期数据的权重减少,其目的是增强短期数据的作用,削弱长期数据的影响^[17]。

2.2.2 逆距离加权法(IDW)

因子的空间特征分析,常用泰森多边形法、逆距离加权(IDW)、克里金法等空间插值方法。因 IDW 方法具有更高的精度和平滑性^[18],本文选择 IDW 分析空间特征,计算公式为

$$Z_P = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{1}{D_j^\beta} Z_j}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{D_j^\beta}} \quad (1)$$

式中: Z_P 为目标点的值; N 是经纬度点的数量; Z_j 是第 j 个经纬度点的土壤水分值; D_j 是第 j 个经纬度点到目标点 P 的距离; β 是 D_j 的指数。根据已有研究^[6],该指数应为 2,因此逆距离权重法也叫做逆距离平方法。

3 SMOS 土壤水分数据评价

3.1 SMOS 土壤水分数据验证

利用实测数据验证 SMOS 土壤水分数据时,拟使用点一点进行验证。SMOS 卫星土壤水分数据为

NC 格式,通过编程进行提取和处理,获得研究区内 SMOS 日尺度数据。在进行 SMOS 数据评价时,实测的 4 个 GNSS-MET 站点在 SMOS 数据的一个像元内,选择 4 个站点中经纬度最大的一个站点,以该站点为中心确定一个 $0.26^\circ \times 0.26^\circ$ 的矩形范围,以此为标准,筛选出在矩形范围内的 SMOS 土壤水分数据,用筛选的 SMOS 卫星土壤水分数据与地面实测点数据作对比。受卫星轨道和条件限制,SMOS 数据存在部分缺失,若当天同时捕获到升轨和降轨数据,则取平均值,否则以升轨或降轨数据的平均值作为当日数据;若两者均缺失,则不计入样本。

使用 GNSS-MET 综合观测站的实测数据与对应 SMOS 卫星栅格数据进行对比验证;同时利用 SMAP 土壤水分数据进行对比分析。SMOS 卫星采用国际通用的体积分数方式(m^3/m^3)表达土壤水分,而实测数据使用土壤重量含水量表示。经分析,它们之间的数值关系和土壤类型、密度和孔隙度等有关。本文选用相对误差 δ 、相关系数 r 为评价指标,对 SMOS 数据质量评估。

$$\delta = \left(\frac{Z_i^a - Z_i^b}{Z_i^a} \right) \times 100\% \quad (i=1,2,3,\dots) \quad (2)$$

式中: Z_i^a 和 Z_i^b 分别为第 i 天 GNSS-MET 地面站点实测值和 SMOS 土壤水分值。

相关性分析时选择 Spearman^[19] 简单相关系数,计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: n 为样本数; x_i 和 y_i 分别为 n 次地面实测站点的土壤水分值和 SMOS 土壤水分值; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为实测站点的土壤水分值和 SMOS 土壤水分值的平均值。

表 1 为 SMOS 监测和地面实测值土壤水分数据的相对误差和相关性,从表中可以看出,二者一致性高,误差较小,最大相对误差 6.36%(11 月),最小相对误差 -0.097%(7 月)。

同时对比 SMAP 土壤水分数据和 SMOS 土壤水分数据,结果见图 2。对 SMOS 和 SMAP 土壤水分数据作皮尔逊相关性分析,结果显示两者呈显著正相关,相关系数为 0.85,两者在时间序列上有很好的的一致性,Al-Yaari A 等^[20] 在全球范围内,通过均方根误差、偏差等指标利用实测土壤水分评价了 SMOS 土壤水分数据和 SMAP 土壤水分数据,其分析认为 SMOS 土壤水分数据和 SMAP 土壤水分数据一致性较高。

表 1 SMOS 卫星土壤水分与实测数据对比

Tab. 1 Comparison of soil moisture from SMOS satellite with the measured data

月	600 站		602 站		605 站		达日站	
	相对误差/%	相关系数	相对误差/%	相关系数	相对误差/%	相关系数	相对误差/%	相关系数
1	2.60	0.05	3.40	0.03	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	2.04	-0.05	2.50	-0.05	2.80	-0.030
4	2.03	0.94*	0.53	-0.33	2.33	0.99**	2.20	0.880**
5	0.38	0.52**	0.61	0.39**	0.64	-0.02	0.60	0.020
6	0.26	0.52**	0.20	0.43**	0.60	0.89	0.47	0.004
7	0.15	0.47**	0.19	0.51**	0.78	-0.07	0.06	-0.097
8	0.35	0.35**	0.08	0.53**	1.48	0.25**	0.60	-0.030
9	0.03	0.55**	0.18	0.67**	0.74	-0.32	0.30	0.270
10	1.12	0.50**	1.96	0.58**	1.05	0.15**	1.89	0.250
11	3.52	0.30	3.28	0.36*	3.30	0.50**	6.36	-0.360
12	3.31	—	3.57	-0.13	2.05	0.51*	0.14	—

注：* 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著；** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著；— 表示数据缺失。

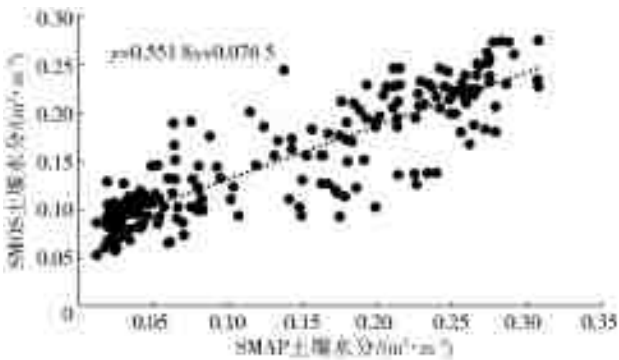


图 2 SMOS-SMAP 土壤水分散点图

Fig. 2 Scatter plot of soil moisture from SMOS and SMAP

为进一步分析 SMOS 卫星土壤水分数据在三江源的适用性,整合 NDVI、降水、蒸发等数据作为辅助验证,利用公式(3)算出 2015 年 NDVI 平均值,并得出分布规律^[21-23]。

$$NDVI_x = \frac{\sum_{i=1}^{12} NDVI_i}{12} \quad (4)$$

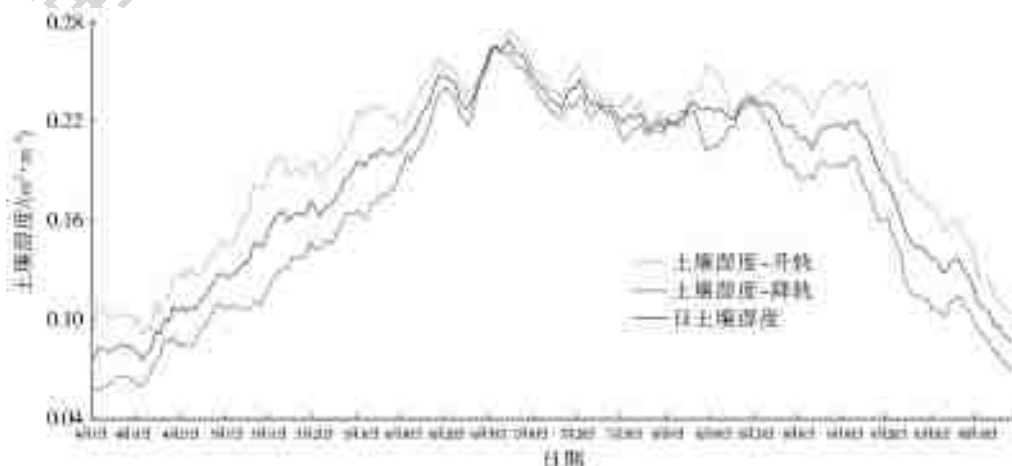


图 3 多年升/降轨及五日滑动平均土壤水分变化

Fig. 3 The 5-day sliding average value of soil moisture in the ascending/descending orbit and the averaged value based on the data during 2010-2018

式中:NDVI_x 为 2015 年年平均植被指数;NDVI_i 为 2015 年第 i 月的植被数据。

结果显示,三江源区 NDVI 和土壤水分在空间分布上具有较好的一致性,降水和土壤水分在空间上变化趋势也较为一致,其中长江源区降水和土壤水分的空间分布特征一致性最高,在黄河源区和澜沧江源区有一定的差异,而蒸发和土壤水分的空间分布特征在长江源区内表现的高度一致,在黄河源区和澜沧江源区内有一定的差异。

3.2 SMOS 数据评价

图 3 为多年 SMOS 升/降轨及五日滑动平均土壤水分变化情况。从图中可以看出,2010—2018 年 4 至 10 月,SMOS 卫星反演的土壤水分日升/降轨数据并无明显区别,总体变化趋势基本一致;升/降轨五日滑动平均土壤水分最大差值为 0.07 m³/m³,最小差值为-0.01 m³/m³。图 4 是多年平均升轨(图 4(a))、

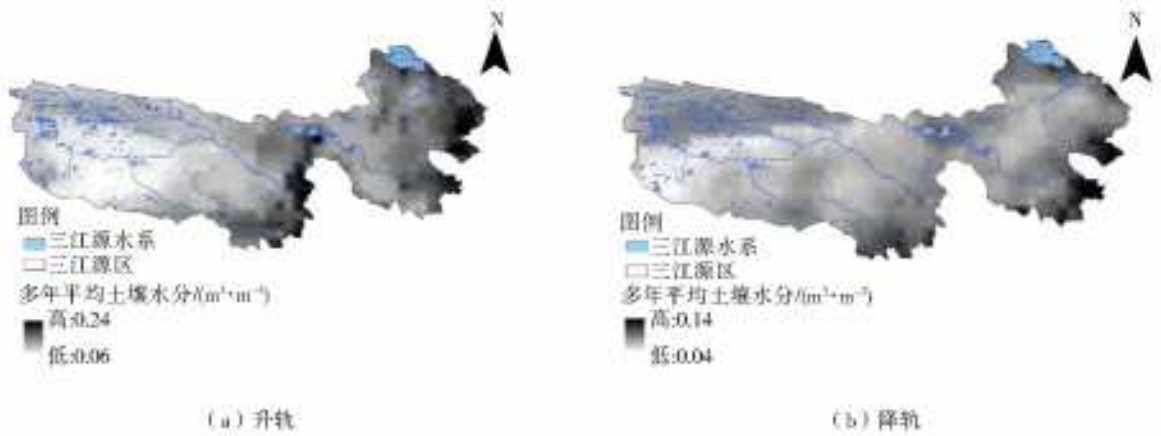


图 4 多年平均土壤水分分布
Fig. 4 The distribution of multi-year averaged soil moisture

降轨(图 4(b))土壤水分空间分布,升轨测得的土壤水分变化为 $0.06 \sim 0.24 \text{ m}^3/\text{m}^3$,降轨为 $0.04 \sim 0.14 \text{ m}^3/\text{m}^3$;升轨数据高于降轨数据的比例介于 65%(2013 年)至 86%(2015 年)。

结合上述分析发现 SMOS 土壤水分数据在研究区内(4—10 月)是可信的,但其值略低于实测土壤水分值,向怡衡^[24]等利用祁连山区内布设的实测站点的实测土壤水分数据,借助相关系数、偏差系数和均方根误差作为评价指标对其进行质量评估,

其结果为 SMOS 土壤水分值整体低估了研究区土壤水分值。

4 SMOS 土壤水分时空变化

4.1 SMOS 土壤水分年内变化

图 5 和 6 是白天和夜晚土壤水分变化规律图,据统计白天卫星过境时间为 10:00—13:00,其中,11:00—12:00 占到 61.7%;夜间过境时间为 21:00—00:00,22:00—23:00 过境占到 61.3%。总

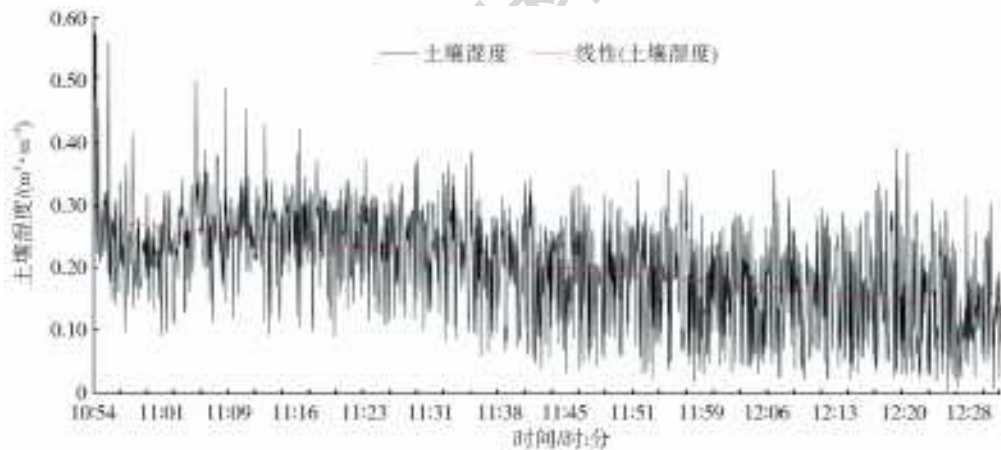


图 5 SMOS 白天土壤水分分布
Fig. 5 The variation of soil moisture from SMOS in daylight

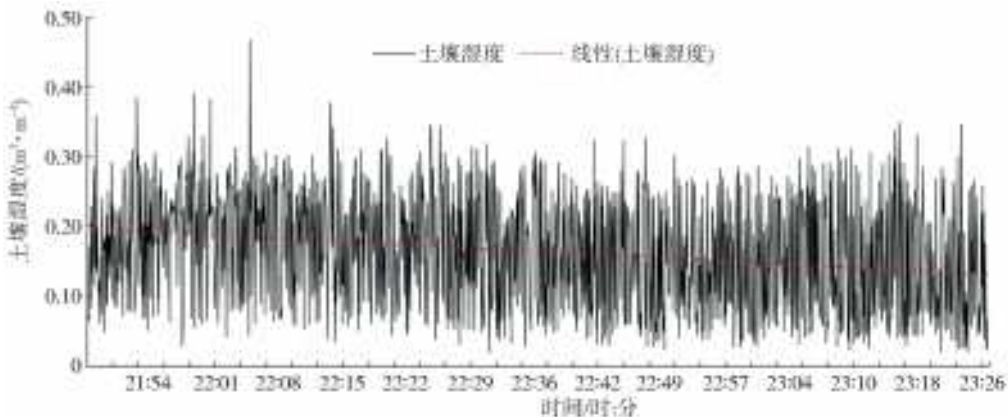


图 6 SMOS 夜晚土壤水分分布
Fig. 6 Distribution of SM in night The variation of soil moisture from SMOS in night

体而言,白天 10:50—12:28 土壤水分呈逐渐减小趋势,夜晚 21:54—23:26 土壤水分同样呈逐渐减小趋势。

4.2 SMOS 土壤水分空间变化特征

图 7 和 8 分别是春季(4—5 月)和夏季(6—8 月)土壤水分空间分布,可以看出:三江源区夏季土壤水分值分布在 $0.14 \sim 0.33 \text{ m}^3/\text{m}^3$;春季土壤水分值分布在 $0.01 \sim 0.27 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。夏季与春季土壤水分平均值相差 $0.12 \text{ m}^3/\text{m}^3$,夏季有 97% 的土壤水分值高于春季土壤水分——春夏土壤水分空间分布规律差异较大。Lu Zhuo 等^[25]在美国伊利诺斯州,通过新安江模型、土壤水分亏损值等方法评价了 SMOS 土壤水分数据,其分析认为 SMOS 土壤水分数据具有很强的季节性。图 9 是三江源多年平均土壤水分空间分布图,从图中可以看出三江源土壤水分空间分布规律差异较大,格局明显;土壤水分从西北向东南逐渐增加;澜沧江源区土壤水分平均值高于黄河源区,黄河源区土壤水分平均值高于长江源区。

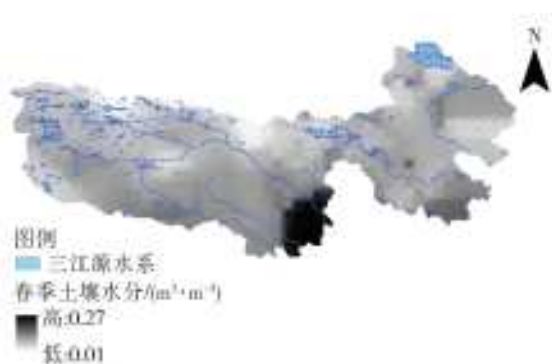


图 7 春季(4—5 月)土壤水分空间分布
Fig. 7 The spatial distribution of soil moisture in spring season (April-May)

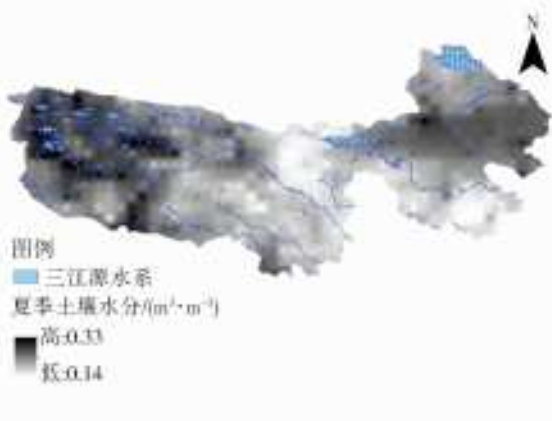


图 8 夏季(6—8 月)土壤水分空间分布
Fig. 8 The spatial distribution of soil moisture in the wet summer season (June-August)

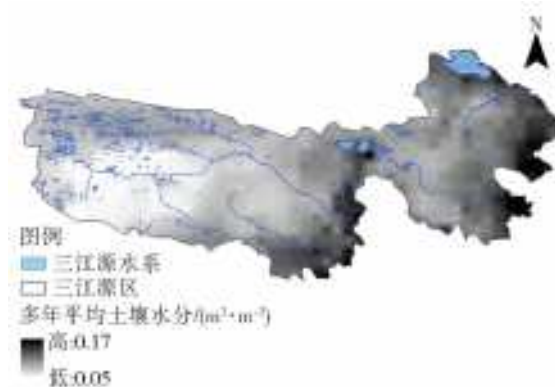


图 9 多年年平均土壤水分空间分布
Fig. 9 The spatial distribution of multi-year averaged soil moisture

5 结论

利用 2010 年 6 月至 2018 年 8 月 SMOS 土壤水分数据和地面实测等数据,在分析三江源地区 SMOS 土壤水数据精度基础上,研究了该区域土壤水分的适用性及时空变化规律,主要结论如下。

(1)通过分析对比地面实测土壤水分和 SMOS 土壤水分数据,二者变化趋势和规律一致;SMAP 土壤水分数据与 SMOS 土壤水分数据在时间序列上具有较好的一致性;SMOS 升轨和降轨测得的土壤水分平均相差 $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 左右;根据 2011—2018 年的数据,统计发现,升轨数据高于降轨数据的比例介于 65%(2013 年)到 86%(2015 年)。

(2)三江源区 NDVI 与土壤水分在空间分布上具有较好的一致性;降水和土壤水分在空间上变化趋势较为一致;蒸发和土壤水分的空间分布特征在长江源区表现的高度一致,在黄河源区和澜沧江源区有一定的差异。

(3)SMOS 土壤水分数据在研究区内(4—10 月)是可信的,但其值略低于实测土壤水分值,可以利用 SMOS 土壤水分数据分析三江源区土壤水分时空变化。

(4)在时间序列上,白天 10:50—12:28 土壤水分呈逐渐减小趋势,夜晚 21:54—23:26 土壤水分同样呈逐渐减小趋势;在空间分布上,三江源地区夏季(6—8 月)与春季(4、5 月)土壤水分值相差 $0.12 \text{ m}^3/\text{m}^3$;夏季有 97% 的土壤水分值高于春季土壤水分值;6—8 月土壤水分空间分布规律差异较大,总体呈自西北向东南逐渐增加趋势;澜沧江源区土壤水分平均值高于黄河源区,黄河源区土壤水分平均值高于长江源区。

参考文献(References):

[1] PRIGENT C, AIRES F, ROSSOW W B, et al. Sensitivity

- of satellite microwave and infrared observations to soil moisture at a global scale; Relationship of satellite observations to in situ soil moisture measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(7). DOI:10.1029/2004JD005087.
- [2] SENEVIRATNE S I, CORTI T, DAVIN E L, et al. Investigating soil moisture - climate interactions in a changing climate: A review[J]. *Earth SCI. Rev.* 2010, 99:125-161. DOI:10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
- [3] 陈政妃, 曾辉, 王钧. 青藏高原高寒草地土壤水分生态特征研究现状[J]. *中国草地学报*, 2015, 37(2): 94-101. (CHEN M F, ZENG H, WANG J. The ecological characteristics of soil moisture in alpine grassland on the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(2): 94-101. (in Chinese))
- [4] 魏卫东, 李希来. 三江源区高寒草地生态研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2011, 36(8): 122-125, 136. (WEI W D, LI X L. Research progress of alpine grassland ecology in the Three River Headwaters region [J]. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(8): 122-125, 136. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1673-1212.2011.08.034.
- [5] 严应存, 颜亮东, 肖建设. 三江源地区土壤储水量动态变化规律[J]. *青海气象*, 2007(4): 17-20. (YAN Y C, YAN L D, XIAO J S. The dynamic change law of soil water storage in the Three River Headwaters region [J]. *Qinghai meteorology*, 2007(4): 17-20. (in Chinese))
- [6] 白晓兰, 魏加华, 解宏伟. 三江源区干湿变化特征及其影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 8397-8410. (BAI X L, WEI J H, XIE H W. Characteristics of wetness/dryness variation and their influences in the Three River Headwaters region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8397-8410. (in Chinese))
- [7] 王春敏. 基于 NDVI 的三江源植被变化及影响因素分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. (WANG C M. Analysis of vegetation changes and its influential factors in the Three-River Headerwater region based on NDVI [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018. (in Chinese))
- [8] 郭连云. 三江源区高寒草原土壤水分变化特征及与气候因子的关系[J]. *草业科学*, 2018, 35(1): 46-53. (GUO L Y. Changes of soil moisture and its relationship with climatic factors in alpine steppe in the Three River Headwaters region [J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(1): 46-53. (in Chinese))
- [9] 青海三江源国家生态保护综合试验区获批[J]. *西部大开发*, 2011(11): 13-13. (National ecological protection comprehensive test zone in the Three River Headwaters region of Qinghai Province ? was approved [J]. *West Development*, 2011(11): 13-13. (in Chinese))
- [10] 杨娜, 崔慧珍, 向峰. SMOS L2 土壤水分数据产品在我国农区的验证[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(2): 287-291. (YANG N, CUI H Z, XIANG F. Validation study on SMOS L2 soil moisture product in agricultural area of China [J]. *Journal of Henan university of technology (Natural Science)*, 2015, 34(2): 287-291. (in Chinese))
- [11] MOLERO B, MERLIN O, MALB? TEAU, Y, et al. SMOS disaggregated soil moisture product at 1km resolution; Processor overview and first validation results [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 180: 361-376. DOI:10.1016/j.rse.2016.02.045.
- [12] YEE M S, WALKER J P, R? DIGER, ET AL. A comparison of SMOS and AMSR2 soil moisture using representative sites of the OzNet monitoring network [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 195: 297-312. DOI:10.1016/j.rse.2017.04.019.
- [13] 陈书林, 刘元波, 温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(11): 1192-1203. (CHEN S L, LIU Y B, WEN Z M. A review of soil moisture retrieval by satellite remote sensing [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2012, 27(11): 1192-1203. (in Chinese))
- [14] 崔慧珍. SMOS 微波遥感土壤水分验证/校正研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2015. (CUI H Z. Validation/calibration of the SMOS microwave remote sensing soil moisture [D]. Jiaozuo: Institutes of Technology of Henan, 2015. (in Chinese))
- [15] 白瑜, 孟治国, 赵凯, 等. 像元尺度土壤水分监测网络及其对 L 波段土壤水分产品的初步验证结果[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(1): 78-87. (BAI Y, MENG Z G, ZHAO K, et al. Pixel-scale soil moisture monitoring network and its preliminary validation of L-band soil moisture products [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(1): 78-87. (in Chinese)) DOI:10.11873/J. ISSN.1004-0323.2018.33(1):78-87.
- [16] 高绍凤, 陈万隆, 朱超群, 等. *应用气候学* [M]. 北京: 气象出版社, 2004. (GAO S F, CHEN WAN L, ZHU C Q. *Applied climatology* [M]. Beijing: Meteorological Publishing, 2004. (in Chinese)) DOI: 10.11820/dlxjz.1984.02.007.
- [17] 刘吉余, 张靖. 应用加权滑动平均法定量预测砂体 [J]. *石油地质与工程*, 1997(4): 6-7. (LIU J Y, ZHANG J. The weighted sliding average method was used to predict sand volume quantitatively [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 1997(4): 6-7. (in Chinese))
- [18] GOOVAERTS P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall [J].

- Journal of Hydrology, 2000, 228(1): 113-129. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00144-X.
- [19] 张宇镭,党琰,贺平安. 利用 Pearson 相关系数定量分析生物亲缘关系[J]. 计算机工程与应用, 2005(33): 83-86,103. (ZHANG Y L, DANG Y, HE P A. Quantitative analysis of the relationship of biology species using pearson correlation coefficient[J]. Computer engineering and Applications, 2005(33): 83-86, 103. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1002-8331. 2005. 33. 026.
- [20] AL-YAARI A, WIGNERON J P, KERR Y, et al. Evaluating soil moisture retrievals from ESA's SMOS and NASA's SMAP brightness temperature datasets [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 193: 257-273. DOI:10.1016/j.rse. 2017. 03. 010.
- [21] SUN Q L, LI B L, ZHOU C H, et al. A systematic review of research studies on the estimation of net productivity in the Three-River Headwater region, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(2): 161-182. DOI:10.1007/s11442-017-1370-z.
- [22] 孙庆龄,李宝林,许丽丽,等. 2000—2013 年三江源植被 NDVI 变化趋势及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(12): 1707-1716. (SUN Q L, LI B L, XU L L, et al. Analysis of NDVI change trend and its impact factors in the Three-River Headwater region from 2000 to 2013 [J]. Geo-Information Science, 2016, 18(12): 1707-1716. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1047. 2016. 01707.
- [23] 耿晓平,铁吉新. 三江源区植被覆盖变化的气候效应初探[J]. 青海气象, 2018(2): 30-35 (GENG X P, TIE J X. Preliminary study on climate effect of vegetation cover change in the Three-River Headwater region [J]. Qinghai meteorological, 2018(2): 30-35. (in Chinese))
- [24] 向怡衡,张明敏,张兰慧,等. 祁连山区不同植被类型上的 SMOS 遥感土壤水分产品质量评估[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(5): 835-843. (XIANG H Y, ZHANG M M, ZHANG L H, et al. Validation of SMOS soil moisture product on different vegetation types in Qilian Mountain[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(5): 835-843. (in Chinese)) DOI:10.11873/j.issn.1004-0323. 2017. 5. 0835.
- [25] ZHUO L, DAI Q, HAN D. Evaluation of SMOS soil moisture retrievals over the central United States for hydro-meteorological application [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2015, 83-84: 146-155. DOI:10.10016/j.pce. 2015. 06. 002.

(上接第 9 页)

- [21] BENGIO Y, SIMARD P, FRASCONI P. Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult[J]. IEEE transactions on neural networks, 1994, 5(2): 157-166. DOI:10.1109/72.279181.
- [22] GERS F A, SCHMIDHUBER J, CUMMINS F. Learning to forget: continual prediction with LSTM[J]. Neural computation, 2000, 12(10): 2451-2471. DOI:10.1162/089976600300015015.
- [23] KINGMA D P, BA J. Adam: A method for stochastic optimization [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1412.6980>, 2014-12-22/2019-05-16
- [24] ZILL D, WRIGHT W S, CULLEN M R. Advanced engineering mathematics [M]. Jones & Bartlett Learning, 2011.
- [25] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. Journal of hydrology, 1970, 10(3): 282-290.