

ERS 卫星反演数据在黄土高原近地表土壤水分中的应用研究*

焦 俏¹ 王 飞^{1,2,3†} 李 锐^{1,2,3†} 张文帅²

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(3 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘 要 将黄土高原地区 1992—2000 年欧洲遥感卫星 (European Remote Sensing Satellites, ERS) 风散射计获取的土壤水分指数 (Soil Water Index, SWI) 与农田实测土壤水分数据进行对比, 并分析降雨、植被、土地利用和人工灌溉对反演数据的影响; 探讨其在近地表土壤水分时空变化中的应用情况。结果表明, 遥感反演的土壤水分数据 SWI 较好地反映了黄土高原地区土壤水分的时空变化规律, 总体上表现出南多北少、东高西低的空间特点和夏秋偏高、春季较低的季节变化趋势; 其次, 根据 SWI 转换得到的土壤体积含水量数据 W_{swi} 与 0~10 cm 农田实测土壤水分呈极显著相关, 表明该 ERS 反演土壤水分数据接近表层土壤水分实际情况, 可用于估测研究区表层土壤水分含量; 在农业集中的平原地区, W_{swi} 与农田表层实测土壤水分相关性较高; 而在农业、林业、牧业用地复合交叉地区其相关性较差。研究结果还发现, 在相对于旱季节农田实测水分普遍较卫星反演结果高, 主要是由于灌溉增加了农田水分含量。这说明在应用卫星遥感数据估算土壤水分时, 除了考虑气候、地貌、土壤、植被等自然因素, 同时也应充分考虑人为因素的影响。

关键词 欧洲遥感卫星; 风散射计; 土壤水分指数; 黄土高原

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

土壤水分是土壤—植物—大气中水分循环的重要组成部分^[1-3], 在靠自然降水进行旱作农业生产的北方旱区, 土壤水分变化及区域差异对气候变化、旱情监测、植物生长等非常重要^[4], 因此获取大尺度即时土壤水分信息显得非常必要。遥感手段弥补了传统点测量方法的不足而被广泛应用于监测大范围及全球尺度土壤水分^[5-6]。目前我国遥感反演土壤水分大多是被动微波原理, 尚未有人利用主动微波原理反演大尺度土壤水分数据并进行应用。欧洲遥感卫星 (European Remote Sensing Satellites, ERS) 搭载的风散射计 (Wind Scatterometer, WSC) 是一种非成像主动雷达传感器^[7-8], 其散射信

号对土壤的介电特性非常敏感, 而土壤水分又是决定土壤介电常数的一个关键参数, 因而常用于监测土壤水分。虽然星载散射计数据的空间分辨率很低 (几十 km), 但时间分辨率高、重访周期短, C 波段的微波对植被具有一定穿透力, 因此其在水文、气候模型中应用价值很高, 有助于解释大尺度及全球能量交换和水循环中的若干问题^[7-10]。维也纳工业大学遥感与摄影测量学院利用 ERS 数据反演土壤水分制作并发布第一个全球表层土壤水分数据集^[11-12], 该数据在欧洲、非洲等地广泛应用。有学者分别在不同地区对该数据使用精度^[13-14]和实用性^[15]进行评价。在中国地区, 对该数据的应用研

* 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目 (10502-Z12-9)、国家自然科学基金项目 (41171420)、中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-04) 共同资助

† 通讯作者, 王 飞 (1971—), 男, 陕西省户县人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事水土保持环境效应评价研究, E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn; 李 锐 (1946—), 男, 河北省磁县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事区域水土保持与遥感应用研究, E-mail: lirui@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 焦 俏 (1984—), 女, 陕西省西安市人, 博士研究生, 主要从事遥感信息与 3S 集成方面的研究。E-mail: jiaoqiao_1599@163.com

收稿日期: 2013-12-26; 收到修改稿日期: 2014-05-14

究很少,尤其在黄土高原地区,只有蒋冲等^[16]对该反演土壤水分数据(Soil Water Index, SWI)的适宜性进行了初步验证,指出该数据能较为准确地揭示黄土高原表层土壤水分的时空分布特征。随研究深入,发现在应用这种遥感反演数据表征黄土高原土壤水分的过程中,在一些地区其实际土壤水分状况与遥感反演数据之间差异较大,因而有必要进一步分析其原因和探讨解决途径。本文结合农田实测土壤水分数据、气候、土地利用等资料,从土地利用图斑破碎程度和农业措施角度出发着重分析 ERS 获取的表层土壤水分数据对黄土高原地区农业发展的影响,探讨 SWI 应用于黄土高原地区的适用性并对土壤水分监测和评价结果进行修正,旨在选择一种即时、快捷和准确探测土壤水分状况的技术和信息源,为黄土高原农业发展与环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原地区是中国主要旱作农业区之一,包括太行山以西、日月山以东,秦岭以北、长城以南广大地区^[17],东西长约 1 125 km,南北长约 845 km,总面积 $62.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该区属于半干旱半湿润气候区,多年平均降雨量约为 500 mm(1992—2000 年间),由东南向西北呈逐渐减少趋势,其中约 69.33%降雨量集中在 6—9 月;多年平均蒸发量 820~1 650 mm,远大于降雨量且时空分布不均;多年平均温度约为 9℃。地势西北高东南低,平均海拔 1 621 m。地表情况复杂,黄土塬、梁、峁是基本的地貌类型^[17]。主要土壤类型为褐土、黑垆土和黄绵土。虽然土层深厚疏松可以存贮大量水分,但是土壤毛管孔过大,易于蒸发,保水性差,加上水土流失严重^[18],致使土壤水分匮乏,土壤旱化日益严重。该区主要土地利用类型是草地和耕地,分别占黄土高原地区总面积的 41.75%和 34.14%。

1.2 数据来源

1.2.1 ERS 反演土壤水分指数数据 Wagner 等^[10,19]结合变化检测方法和经验模型建立 TU-Wien 模型,计算出 0~5 cm 表层土壤水分参数(Surface Soil Moisture, SSM),再利用二层水模型由 SSM 推导出 0~100 cm 土壤水分指数 SWI。本文所使用的 SWI 代表 0~100 cm 土层的土壤水分相对湿度,单位为%。时间范围从 1992 至 2000 年,时间分辨

率为 10 d。原始空间分辨率为 50 km,经重采样后数据格网间距为 12.5 km^[10]。该数据仅考虑了裸露地表和有植被覆盖的地表土壤水分状况,对于有冰雪覆盖和冻土地区,由于卫星雷达无法测量土壤表面反射率,因此无法进行反演^[10]。在每年冬季 12 月到次年 2—3 月,数据存在不同程度的缺失。

1.2.2 农田实测土壤水分数据与气象数据 数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供的 1992—2000 年黄土高原地区 118 个国家农业气象观测站的农田实测土壤水分与降雨月值资料。其中农田实测土壤水分包括 0~10、10~20、40~50、60~70 以及 90~100 cm 各层土壤相对湿度数据。

1.2.3 其他数据 土地利用现状数据来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(<http://westdc.westgis.ac.cn>)中国 1:10 万和 1:25 万土地利用数据。植被数据包含 GIMMS(Global Inventory Modeling and Mapping Studies)和 SPOT VGT(SPOT Vegetation)2 种数据集的归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)数据。土壤数据包括土壤质地,来自联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)和维也纳国际应用系统研究所(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)构建的全球土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD)。其中,中国境内数据来源于中国科学院南京土壤研究所提供的第二次全国土壤普查 1:100 万土壤数据。

1.3 数据处理与计算方法

1.3.1 SWI 反映区域土壤水分分布特征应用分析 选择普通克里格插值方法,对黄土高原地区 1992—2000 年 SWI 各季节多年平均值进行插值,分析不同季节的土壤水分空间变化状况。

1.3.2 反演与实测土壤水分比较 本研究利用 ArcGIS10.2 软件中的“空间分析”模块,获取气象站对应的土壤水分相对湿度数据。然后分别将反演和实测值转换为体积含水量,并在 SPSS 软件中对其进行 Pearson 相关分析。

Scipal 等^[11]指出,由于缺乏中国地区详细的土壤物理性质参数资料,对中国地区的土壤体积含水量数据计算及验证存在较大误差。本研究通过土壤数据库(HWSD)和文献资料^[20-21]获取了田间持水量(Field Capacity, FC)、总含水量(Total Water Capacity, TWC)、凋萎湿度(Wilting Level, WL)等参数

并根据式(1),将土壤水分指数数据 SWI 转换为体积含水量(W_{swi})。农田实测土壤水分数据根据式(2),转换为质量含水量,再根据式(3)得到农田实测土壤水分体积含水量,分别计算出 0~10, 10~20, 40~50, 60~70 以及 90~100 cm 各层月平均土壤体积含水量。下文均使用 W_{swi} 表示根据 SWI 计算后的体积含水量。

$$W_{swi} = WL + SWI(t) \cdot \left(\frac{FC + TWC}{2} - WL \right) \quad (1)$$

式中, WL 为凋萎湿度; $SWI(t)$ 为土壤水分指数数据; FC 为田间持水量; TWC 为总含水量。

农业气象中土壤水分的计算公式:

$$\theta_m = R \times f_c \quad (2)$$

式中, θ_m 为土壤质量含水量, R 为土壤相对湿度, f_c 为田间持水量。

$$\text{体积含水量} = \text{质量含水量} \times \text{土壤密度} \quad (3)$$

1.3.3 土地利用对 W_{swi} 的影响 本研究以 SWI 点为中心,以重采样后的间距 12.5 km 为边长,在 Matlab 软件中绘制正方形的土壤水分分析单元。继而,将各气象站所在的土壤水分分析单元与土地利用图叠加,从各站点地类面积比例与土地利用类型对应的斑块密度(Patch Density, PD)^[22]两个角度统计与分析土地利用对 W_{swi} 的影响。

2 结果与讨论

2.1 应用 SWI 反映土壤水分的时空变化特征

黄土高原地区土壤水分主要来源于大气降水,由于气候存在地带性特征,因此,土壤水分也具有一定的地带性分布规律^[23]。图 1 a~图 1 c 反映出土壤水分的季节变化与空间变化规律,年内呈现出季节性动态变化,包括三个时期:春季失墒、夏季增墒、秋末冬季缓慢失墒。空间上呈现出由东南向西北逐渐减少的特点。其中陕西南部秦岭山区、北部子午岭林区以及青海东部等地土壤水分常年保持湿润;其次,山西大部分地区以及河套地区夏秋季节土壤水分随着降雨量补给变得湿润,春季相对干旱。内蒙古南部鄂尔多斯高原地区以及陕西北部榆林等地以及甘肃白银等地土壤水分常年偏低,这是由于该地区蒸发量远大于降雨量,加上农作物生长耗水,使得土壤水分表现十分干旱。值得一提的是,从春季到夏季再到秋季,在内蒙古西南部鄂尔多斯高原部分地区土壤水分减少明显。这是受该地区特殊地形条件影响的结果。在鄂尔多斯高原

地区,海拔地势高,降水少,出现罕见的外流区中嵌套内流区,加上春季气温偏低,蒸发小,使得土壤水分偏高;进入夏季,蒸发量远大于降水量,因此夏秋季节该地区土壤水分随蒸发而剧减。

如图 2 所示,以 2000 年由东南向西北方向剖面线上的 SWI 点为例(点的位置分布见图 1),降雨、植被和 SWI 均呈下降趋势。在山西境内,首先经过太行、太岳、中条三大山系衔接处地区,SWI 急剧增加,成为全区一个峰值。之后逐渐降低。进入陕西省,由黄土高原沟壑区向毛乌素沙漠过渡,地表支离破碎,沟壑纵横交错,SWI 与降雨和植被均表现出明显的下降趋势。进入西北部内蒙古地区,跨越毛乌素沙漠和鄂尔多斯高原,气候干旱少雨,植被和 SWI 下降明显,且 SWI 下降至全区最低水平。随后 SWI 和植被突然急剧增加,这是由于地处黄河河套地区,该区虽然降雨量很少,但是黄河水流补给充足,SWI 达到全区另一个峰值。

综上所述,SWI 数据能很好地反映黄土高原区域土壤水分的时空变化特征,这与朱岩^[24]、韩仕峰等^[25]对该地区土壤水分规律的研究结果表现出很好地一致性。尤其能够较好地体现出某些特殊地形的土壤水分状况。

2.2 W_{swi} 与农田实测土壤水分的相关性

对研究区内气象站点对应不同土层 W_{swi} 与农田实测土壤水分进行相关性分析(由于篇幅限制,在表 1 中只列出 0~10 cm 土层相关系数按照从高到低排序的部分站点计算结果)。

经过对 118 个站点相关性分析结果统计发现,在 0~10 cm 土层中,54.1% 站点的 W_{swi} 与农田实测土壤水分呈极显著相关($p < 0.01$),16.4% 的站点呈显著相关($p < 0.05$),表明 W_{swi} 与农田实测土壤水分变化趋势非常一致。在 10~20 cm 土层中,50.8% 站点的 W_{swi} 与农田实测土壤水分呈极显著相关($p < 0.01$),8.2% 的站点呈显著相关($p < 0.05$),表明随着土层厚度不断增加, W_{swi} 与实测土壤水分的显著性不断降低。如陕西凤翔, W_{swi} 与实测土壤水分在土壤表层(0~10 cm)呈极显著相关,显著性随着土层深入不断降低,相关系数 r 从 0.7 下降至 0.42。这就证实了 W_{swi} 是由表层土壤水分(SSM)提取而来^[10],因而与表层实测土壤水分的相关性高于深层土壤水分。

由表 1 还可知,达到极显著性相关水平的站点大多分布在黄土高原地区的东南部,即暖温带半湿润地区,且 W_{swi} 较实测农田土壤水分偏低,这与韩仕

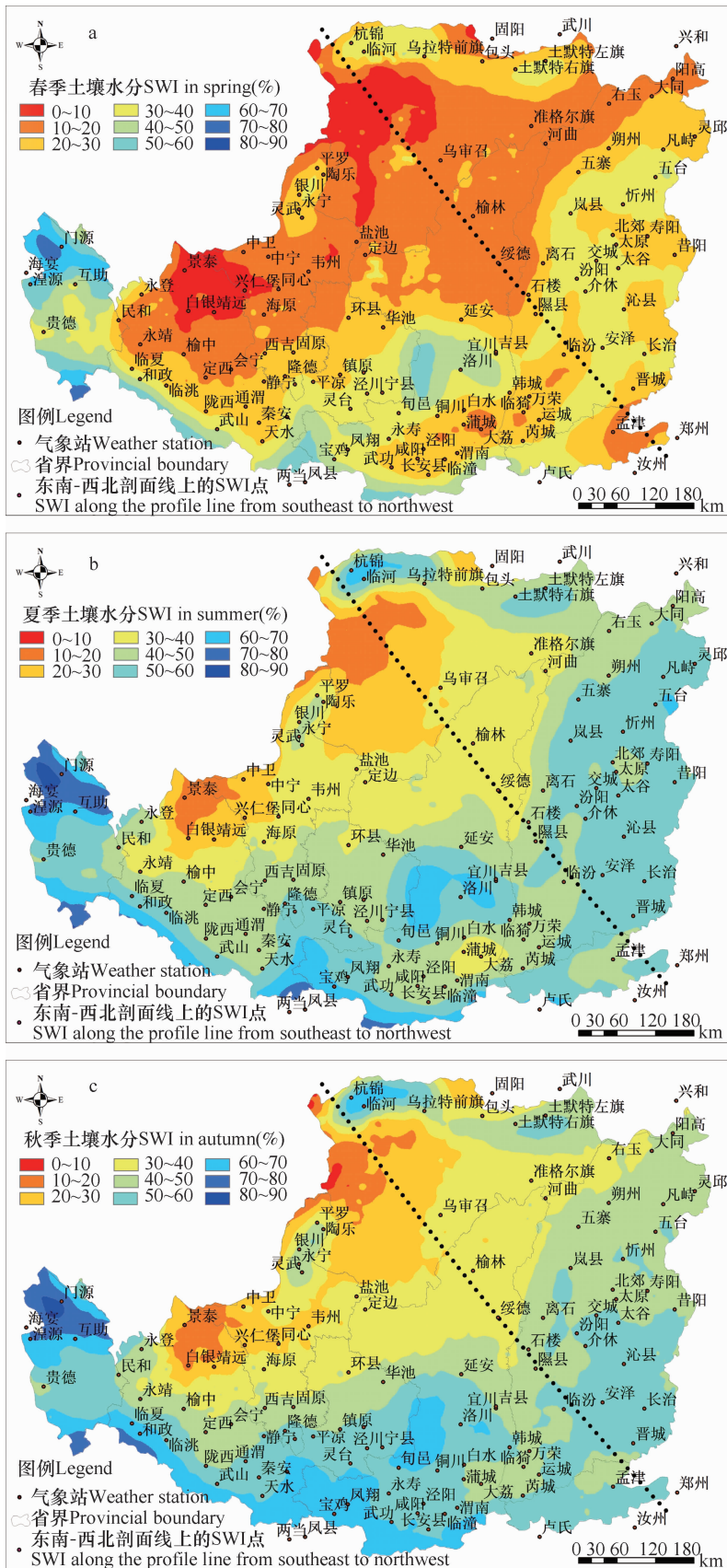
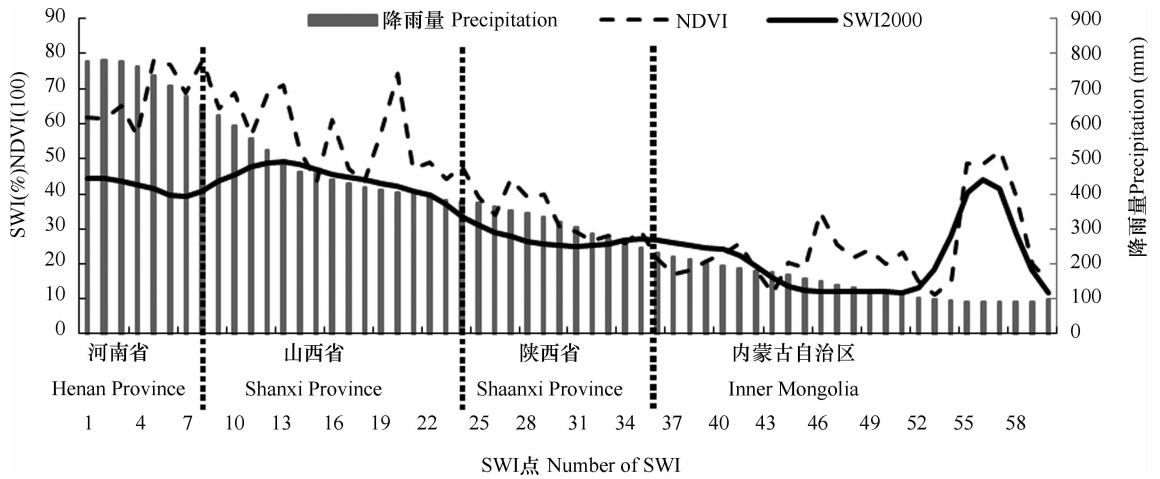


图 1 黄土高原地区 SWI 空间分布与季节变化

g. 1 Spatial distribution of SWI on the Loess Plateau in spring (a), summer (b) and autumn (c)



NDVI: 归一化植被指数 Normalized differential vegetation index; SWI2000: 土壤水分指数 Soil water index

图 2 2000 年黄土高原地区土壤水分剖面图

Fig. 2 Soil moisture profile map of the Loess Plateau in 2000

表 1 W_{swi} 和不同土层农田实测土壤水分相关性统计结果

Table 1 Statistics of correlations between W_{swi} and measured field soil moisture contents relative to soil layer

省份 Province	气象站点 Weather station	土层 Soil layers (cm)				
		0 ~ 10	10 ~ 20	40 ~ 50	60 ~ 70	90 ~ 100
甘肃 Gansu	西峰镇 Xifengzhen	0.77 **	0.76 **	0.62 **	0.70 **	0.61 **
陕西 Shaanxi	凤翔 Fengxiang	0.71 **	0.70 **	0.64 **	0.53 **	0.42 **
陕西 Shaanxi	永寿 Yongshou	0.69 **	0.68 **	0.58 **	0.39 **	0.36 **
甘肃 Gansu	环县 Huanxian	0.68 **	0.54 **	0.38 **	0.42 **	0.24
甘肃 Gansu	天水 Tianshui	0.67 **	0.74 **	0.67 **	0.62 **	0.43 **
陕西 Shaanxi	延安 Yan'an	0.57 **	0.50 **	0.42 **	0.29	0.24
山西 Shanxi	安泽 Anze	0.56 **	0.54 **	0.45 **	—	—
宁夏 Ningxia	固原 Guyuan	0.48 **	0.33	0.01	-0.18	-0.15
内蒙古 Inner Mongolia	乌审召 Wushenzhao	0.08	-0.04	-0.34 *	-0.21	-0.06
山西 Shanxi	大同 Datong	-0.22	-0.04	-0.002	—	—

注: ** 和 * 分别代表相关性达到 0.01 和 0.05 显著性水平; - 代表数据缺失 Note: ** Signifies differences reaching 0.01 significance level, * 0.05 significance level; — represents N/A (not available)

峰等^[26]、穆兴民等^[27]的研究结果一致。然而该地区整体气候条件良好,降雨充沛、渭河汾河等河流流经该地,地形平坦开阔,大多数为农耕地,使得 W_{swi} 与实测土壤水分变化趋势基本一致,因而这些地区 W_{swi} 与实测土壤水分呈现极显著相关。说明 W_{swi} 能够很好地代表该地区特别是农业区的土壤水分变化情况。在黄土高原西部和北部地区,气候干旱,蒸发量远远超过降雨量,地形复杂,山地丘陵沟壑等纵横交错,农田面积比例较小,大多为草地和林地。实测土壤水分反映的土壤水分状况,与 W_{swi} 代表的 12.5 km × 12.5 km 区域土壤水分平均状况差异显著,使得该地区 W_{swi} 与实测土壤水分趋势各异,因而这些地区 W_{swi} 与实测土壤水分相关性较低。

通过对比发现黄土高原地区东南部 W_{swi} 与农田实测土壤水分相关性及趋势变化与西北部地区存在差异。根据图 2 综合剖面图信息,在不同地区使用该数据时,应考虑特殊地形地区的区域特点,分析造成这种差异的原因,利用气象站点的表层 10 cm 数据和 W_{swi} 进行拟合,建立更加适合黄土高原地区的 W_{swi} 模型,以更好地进行量化应用。

2.3 人工灌溉措施对 W_{swi} 变化的影响

根据 2.2 节分析结果与黄土高原地区农业分区范围^[28],选择 W_{swi} 与实测土壤水分呈显著相关的山西运城气象站(位于汾渭谷地农业区内东南部灌区)及甘肃天水气象站(位于雨养农业区)进行分析。

运城站位于黄河流域汾渭平原地区,1992—2000 年间,年降雨量 488mm,年蒸发量 1 337mm。地形开阔平坦。主要土壤类型为褐土,该土壤土层深厚、上虚下实、保水保肥性好,光照充足。作为传统的农业大区,实施集约农业措施,如完备的灌溉设施、充分的灌溉条件等,以及自然降雨的补给,土壤水分处于均衡补偿状态。天水站位于黄土高原雨养农业区,实施旱作农业措施,仅靠自然降水供给农作物生长。1992—2000 年间,年降雨量 433mm,年蒸发量 1 521mm。耕地土壤以黄绵土为主。土体疏松,加上地形复杂,梁峁交错,山脉纵横,雨量集中,易导致水土流失。

如图 3 所示,两站点农田实测土壤水分整体高于反演土壤水分,是因为其栅格像元代表的土壤水分状况受土地利用类型的影响,因此土壤水分的反演结果略低于农田。该结果与韩仕峰等^[26]、穆兴

民等^[27]研究结果一致。其次,反演土壤水分变化趋势与降雨量一致,表明 W_{swi} 代表的 0 ~ 100 cm 土层土壤水分变化受气候条件影响显著,年内变化呈现“低—高一低”趋势,该尺度下,忽略海拔、地形等因素对土壤水分的影响,只能观测到由气候因素引起的土壤水分的变化状况^[29-30]。运城站位于灌溉农业区内,农田实测土壤水分与反演土壤水分的变化趋势不同,在春、秋季二者差别较大,夏季随降雨量增加趋于一致。天水站与运城站差异明显,农田实测土壤水分全年高于反演土壤水分,主要原因是运城站降雨丰沛,加上灌溉措施充分,土壤水分得到充足补给,因此夏季时实测与反演土壤水分达到一致;天水站只靠降水补给土壤水分,且降雨量低于运城,蒸发量大于运城,使得实测土壤水分与反演土壤水分之间产生明显的差异。根据 Wagner 等^[19]反演原理可知,反演土壤水分与气象因素(降雨量)密切相关。在黄土高原地区,根据农业区划,2/3 地区为雨养农业,降水成为土壤水分的唯一来源,因此反演结果更接近实际地表。然而,在剩余 1/3 的灌溉农业区内,除了降雨,土壤中的大部分水分来自人工灌溉补给,因此出现了春秋二季反演值与实测值相差较大的结果。为更好地利用该数据指导农业生产,应针对不同地区,考虑农业措施(如人工灌溉等)对土壤水分反演结果的影响,对 SWI 进行修正,在反演模型中增加灌溉因素,使反演土壤水分数据更接近实际地表水分状况,从而使该数据能更好地服务于农业生产。

2.4 土地利用景观破碎程度对 W_{swi} 的影响

表 2 列出部分站点地类面积比例和斑块密度以及与该站点对应 W_{swi} 与农田实测 0 ~ 10 cm 土层土壤水分的相关系数。以甘肃西峰和陕西榆林为例,西峰地处董志塬腹地,地形平坦开阔,43.85% 面积为耕地,44.02% 为草地,地表覆盖较为一致,对应其破碎程度很小, W_{swi} 与农田实测土壤水分相关性达到极显著水平 ($r = 0.77, p < 0.01$);榆林位于黄土高原与毛乌素沙漠交接处,黄土丘陵沟壑与风沙草地的过渡地带,水土流失严重,虽然其地表破碎情况与西峰类似,但是土地利用类型面积差别很大,主要包括 20.05% 耕地、43.22% 草地以及 21.8% 未利用土地,致使 W_{swi} 与农田实测土壤水分不存在显著相关关系。

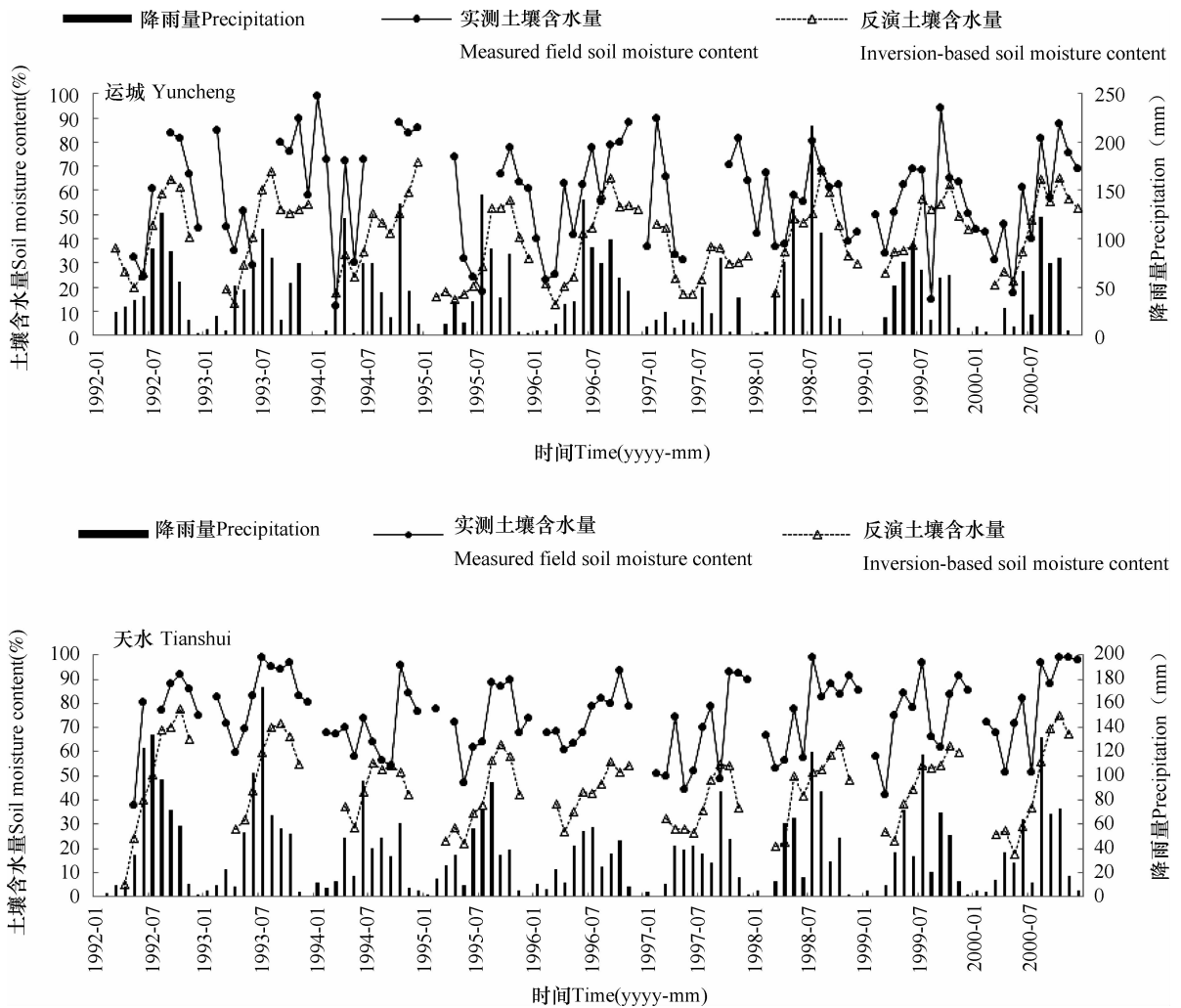


图3 典型气象站降雨量和0~100 cm土壤水分月值趋势图

Fig. 3 Monthly variation trend of precipitation and soil moisture in the 0~100 cm soil layer at typical weather stations

以上结果表明在土壤水分分析单元内,在平坦地区土地利用类型越单一,土壤水分反演结果越接近实际地表情况;土地利用景观斑块破碎度越高,尤其在特殊地形条件下,下垫面情况复杂,地形起伏多变,导致土地利用类型越复杂,土壤水分反演精度越差, W_{swi} 代表的土壤水分与地表实际状况差异越大。其他站点也有类似规律。根据ERS卫星风散射计获取后向散射系数的原理和反演算法,在裸露地表和有植被覆盖地区,散射计的多视角观测功能在一定程度上能够减少植被冠层覆盖对获取后向散射系数的干扰,其结果仅能较准确地反映平坦地势和单一植被覆盖类型地区的土壤水分状况。对于由复合图斑构成的不同土地利用类型对应的土壤水分,在解决较大比例尺的遥感监测中具有重要作用,因此在不同地区使用该数据时,应考虑每个栅格像元内部土地利用的构成比例,及区域间的

差异。今后在原有模型基础上增加土地利用因素,建立更加适合黄土高原地区的 W_{swi} 模型,从而可以定量解决由复合图斑引起的土壤水分估测问题。

3 结论

本文从区域和站点两个角度分析了主动雷达遥感反演土壤水分数据SWI在黄土高原地区的应用情况,并对出现的问题做了初步讨论。取得的主要结论如下:(1)1992—2000年遥感反演的SWI数据较好地反映了黄土高原地区土壤水分夏秋偏高、春季较低的季节变化趋势。空间分布呈现出由东南向西北逐渐递减的变化趋势;(2)遥感反演的土壤体积含水量 W_{swi} 和农田实测的表层0~10 cm的土壤水分呈极显著相关,且相关程度随土层深入而逐渐降低,表明该微波数据接近表层土壤水分实际

表 2 气象站点的地类面积比例和斑块密度及其对应 W_{swi} 与 0~10 cm 农田实测土壤水分的相关性统计结果Table 2 Statistics of correlations between W_{swi} and measured field soil moisture contents relative to proportion of land use in area and patch density at the weather stations

气象 站点 Weather station	地类面积比例 Proportions of land use in area (%)						斑块密度 Patch density (%)						r
	耕地 Farm land	草地 Grass land	林地 Forest	水体 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	耕地 Farm land	草地 Grass land	林地 Forest	水体 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused Land	
西峰镇 Xifengzhen	43.85	44.02	5.57	0.81	5.75	—	1.39	0.51	4.94	6.31	8.57	—	0.77**
运城 Yuncheng	37.22	9.81	10.73	6.87	31.76	3.61	0.15	0.39	0.47	0.22	0.18	0.79	0.66**
安泽 Anze	47.19	8	42.39	0.75	1.67	—	0.52	2.87	0.33	0.95	0.6	—	0.56**
大同 Datong	24.82	5.83	9.42	2.44	57.48	—	0.67	2.19	1.02	1.04	0.1	—	-0.22
榆林 Yulin	20.05	43.22	4.79	2.18	7.93	21.83	1.34	0.7	2.14	1.47	0.97	0.53	0.22
中卫 Zhongwei	49.05	10.86	5.24	5.18	11.57	18.1	0.12	1.71	2.07	2.46	3.37	0.5	-0.24

注: r 代表 W_{swi} 与 0~10 cm 农田实测土壤水分的相关系数; — 代表无数据 Note: r represents correlation coefficient between W_{swi} and measured field soil moisture in the 0~10 cm soil layer; — represents N/A

情况,能客观地反映土壤水分的真实分布;(3)在农业集中的平原地区,遥感反演的土壤体积含水量 W_{swi} 与实测的农田表层土壤水分值相关性较高;而在农业、林业、牧业用地复合交错地区其相关性较差;(4)现有的反演模型采用的参数主要是依据模型研发地区实际选择的,在应用于其他地区时需依据应用区域的土壤环境特征对反演模型的具体参数加以修正,并依据当地土壤环境观测数据建立适用的反演模型;(5)在应用该卫星数据估算农田土壤水分时,除了考虑地貌、土壤、植被、气候等自然因素,同时也应充分考虑农业措施(如灌溉措施)对土壤水分的影响。

致 谢 维也纳工业大学 Wolfgang Wagner 教授和 Richard Kidd 先生等在主动微波遥感反演原理和数据分析方面给予了指导,特此致谢!

参 考 文 献

[1] 孙瑞静,施建成,王永前. 基于 ERS 散射计数据的土壤水分反演方法. 国土资源遥感, 2010(4): 10—13. Sun R J, Shi J C, Wang Y Q. The improvement of soil moisture estimation using ERS scatterometer data (In Chinese). Remote Sensing for Land & Resources, 2010(4): 10—13

[2] 刘鑫,毕华兴,李笑吟,等. 晋西黄土区基于地形因子的土壤水分分异规律研究. 土壤学报, 2007, 44(3): 411—417. Liu X, Bi H X, Li X Y, et al. Variation of soil moisture in relation to topographic factors in loess region of west Shanxi (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 411—417

[3] 张继光,陈洪松,苏以荣,等. 喀斯特洼地表层土壤水分的空间异质性及其尺度效应. 土壤学报, 2008, 45(3): 544—549. Zhang J G, Chen H S, Su Y R, et al. Spatial variability of soil moisture in surface layer in depressed karst region and its scale effect (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(3): 544—549

[4] 邵晓梅,严昌荣,徐振剑. 土壤水分监测与模拟研究进展. 地理科学进展, 2004, 23(3): 60—68. Shao X M, Yan C R, Xu Z J. Progress in monitoring and simulation of soil moisture (In Chinese). Progress in Geography, 2004, 23(3): 60—68

[5] 张显峰,赵杰鹏. 干旱区土壤水分遥感反演与同化模拟系统研究. 武汉大学学报:信息科学版, 2012, 37(7): 794—799. Zhang X F, Zhao J P. System for soil moisture retrieval and data assimilation from remotely sensed data in arid regions (In Chinese). Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(7): 794—799

[6] 汪潇,张增祥,赵晓丽,等. 遥感监测土壤水分研究综述. 土壤学报, 2007, 44(1): 157—163. Wang X, Zhang Z X, Zhao X L, et al. A review of researches on monitoring of soil moisture by remote sensing (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 157—163

[7] 陈权,李震,王磊,等. 用 ERS 风散射计数据估算土壤水分

- 方法的研究. 遥感学报, 2007, 11(6):803—810. Chen Q, Li Z, Wang L, et al. The study of estimating soil moisture using ERS wind scatterometer (In Chinese). Journal of Remote Sensing, 2007, 11(6):803—810
- [8] Zribi M, Pardé M, Rosnay P D, et al. ERS scatterometer surface soil moisture analysis of two sites in the south and north of the Sahel region of West Africa. Journal of Hydrology, 2009, 375(1/2): 253—261
- [9] 王建明. 基于 ERS 散射计数据的青藏高原土壤水分估算方法研究. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2005. Wang J M. Study on land surface soil moisture retrieval method with ERS wind scatterometer over Tibetan Plateau (In Chinese). Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2005
- [10] Wagner W. Soil moisture retrieval from ERS scatterometer data. Austria: Institute for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, 1998
- [11] Scipal K. Global soil moisture retrieval from ERS scatterometer data. Austria: Institute for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, 2002
- [12] Wagner W, Klaus S, Carsten P, et al. Evaluation of the agreement between the first global remotely sensed soil moisture data with model and precipitation data. Journal of Geophysical Research, 2003, 108: 1—15
- [13] Wagner W, Blöschl G, Pampaloni P, et al. Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications. Nordic Hydrology, 2007, 38(1): 1—20
- [14] Pellarin T, Calvet J C, Wagner W. Evaluation of ERS Scatterometer soil moisture products over a half-degree region in Southwestern France. Geophysical Research Letters, 2006, 33(17): 1—6
- [15] Scipal K, Scheffler C, Wagner W. Soil moisture-runoff relation at the catchment scale as observed with coarse resolution microwave remote sensing. Hydrology and Earth System Sciences, 2005, 9: 173—183
- [16] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 等. 土壤湿度指数在黄土高原的适宜性评价. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 31—36. Jiang C, Wang F, Mu X M, et al. Evaluation of the soil water index and surface soil moisture on the loess plateau (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(3): 31—36
- [17] 樊廷录. 黄土高原旱作地区径流农业的研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学农学院, 2002. Fan T L. Study on runoff agriculture of rainfed areas in the Loess Plateau of China (In Chinese). Yangling, Shaanxi: College of Agronomy, Northwest A&F University, 2002
- [18] 王力. 陕北黄土高原土壤水分亏缺状况与林木生长关系. 陕西杨凌: 西北农林科技大学资源环境学院, 2002. Wang L. The relation between soil water deficiency and vegetation growth in northern Shaanxi Loess Plateau (In Chinese). Yangling, Shaanxi: College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, 2002
- [19] Wagner W, Lemoine G, Rott H. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(2): 191—207
- [20] 朱显謨. 黄土高原土壤与农业. 北京: 农业出版社, 1989: 2—26, 342—365. Zhu X M. Soil and agriculture on Loess Plateau (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1989: 2—26, 342—365
- [21] 蒲金涌, 姚小英, 贾海源, 等. 甘肃陇西黄土高原旱作区土壤水分变化规律及有效利用程度研究. 土壤通报, 2005, 36(4): 483—486. Pu J Y, Yao X Y, Jia H Y, et al. Variation and effective utilization of soil water in Longxi loessial tableland Gansu Province (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(4): 483—486
- [22] 陈荣蓉. 重庆丘陵山区农村土地整治工程及其景观效应. 重庆: 西南大学资源环境学院, 2012. Chen R R. Rural land consolidation and its landscape ecological effect in hilly-mountainous region of Chongqing (In Chinese). Chongqing: College of Resources and Environment Science, Southwest University, 2012
- [23] 徐学选, 刘文兆, 高鹏, 等. 黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨. 生态环境, 2003, 12(1): 52—55. Xu X X, Liu W Z, Gao P, et al. The discussion on soil moisture distribution diversity in hilly Loess Plateau region (In Chinese). Ecology and Environment, 2003, 12(1): 52—55
- [24] 朱岩. 黄土高原土壤水分空间变异及模拟. 北京: 北京林业大学水土保持学院, 2011. Zhu Y. Spatial variation of soil moisture and soil moisture modeling on the Loess Plateau (In Chinese). Beijing: School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 2011
- [25] 韩仕峰, 李玉山, 张孝中, 等. 黄土高原地区土壤水分区域动态特征. 中国科学院水利部水土保持研究所集刊, 1989(12): 161—167. Han S F, Li Y S, Zhang X Z, et al. The regional dynamic characteristics of soil water on the Loess Plateau (In Chinese). Memoir of NISWC, Academia Sinica & Ministry of Water Resources, 1989(12): 161—167
- [26] 韩仕峰, 李玉山, 石玉洁, 等. 黄土高原土壤水分资源特征. 水土保持通报, 1990, 10(1): 36—43. Han S F, Li Y S, Shi Y J, et al. The characteristics of soil moisture resources on the Loess Plateau (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, 10(1): 36—43
- [27] 穆兴民, 徐学选, 王文龙, 等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响. 土壤学报, 2003, 40(2): 210—217. Mu X M, Xu X X, Wang W L, et al. Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on Loess Plateau (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 210—217
- [28] 朱银城, 吴怀荣. 黄土高原地区雨养农业初探. 干旱区地理, 1993, 16(1): 9—15. Zhu Y C, Wu H R. A study of runoff agriculture in Loess Plateau (In Chinese). Arid Land Geography, 1993, 16(1): 9—15
- [29] Zhao D M, Su B K, Zhao M. Soil moisture retrieval from satellite images and its application to heavy rainfall simulation in eastern China. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(2): 299—316
- [30] Parajka J, Naeimi V, Blöschl G, et al. Assimilating scatterometer soil moisture data into conceptual hydrologic models at the regional scale. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 10: 353—368

APPLICATION OF INVERSION OF EUROPEAN REMOTE SENSING SATELLITES DATA TO INVESTIGATION OF NEAR-SURFACE SOIL MOISTURE IN LOESS PLATEAU

Jiao Qiao¹ Wang Fei^{1, 2, 3†} Li Rui^{1, 2, 3†} Zhang Wenshuai²

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract A comparative analysis was done of the SWI (Soil Water Index) acquired by the ERS (European Remote Sensing Satellites) using scatterometers in 1992—2000 vs the data of farmland soil moisture in the Loess Plateau obtained through field investigations and in addition, effects of rainfall, vegetation, land use and irrigation on inversion of the data were analyzed. Results show that inversion of the remote sensed SWI reflects quite well the spatio-temporal variation of soil water in the Loess Plateau, displaying a general trend similar to that of soil moisture in actual distribution in the region, that is, spatially it is relatively high in the south and the east and low in the north and the west, and temporally high in summer and fall and low in spring. Besides, W_{swi} , soil volumetric water content converted from SWI, are found to be in an extremely significant positive relationship with the measured soil moisture contents in the 0 ~ 10 cm soil layer of farmland, which implies that the soil moisture data acquired through inversion of ERS data are very approximate to the actual conditions of near surface soil moisture, and hence the technique can be used to estimate surface soil moisture in the study area. Moreover, high correlation coefficients are found between W_{swi} and with measured values of soil moisture in the surface soil layer in intensive agricultural plain areas, whereas they are not so high in areas interlaced with farming, forestry and animal husbandry. It is also found in the study that the measured values of soil moisture tend to be higher than those from inversion of the ERS data in relatively dry seasons, mainly due to irrigation that increases soil moisture content in the field. This finding indicates that when using ERS data for estimation of soil moisture contents, it is also essential to take into account the factor of human activities in addition to natural environmental factors, such as landform, soil, vegetation, climate, etc.

Key words ERS; Wind Scatterometer; Soil Water Index; Loess Plateau

(责任编辑:檀满枝)