基于高分一号影像的江汉平原表层土壤湿度指数反 演研究*1

聂艳 贾付生 1 朱亚星 1 于雷 1 于靖 2*

(1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室,湖北武汉 430079;

2. 湖北大学资源环境学院,湖北武汉 430062)

【摘要】:土壤湿度指数遥感监测在农业生产中具有重要的作用。为探讨国产高分一号(GF-1)遥感数据在江汉平 原农情参数快速获取中的适用性,以潜江市 2017 年 3 月 8 日的 GF-1WFV 影像和 106 个采样点的土壤湿度实测数据 为数据源,选择垂直干旱指数(PDI)、改进型垂直干旱指数(MPDI)和植被调整垂直干旱指数(VAPDI),对土壤湿度指 数反演的效果进行比较和验证。研究结果表明:PDI、MPDI、VAPDI与土壤湿度实测含水量的决定系数分别达到 0.649、 0.802 和 0.821,实测土壤含水量验证精度评价也表明各模型均能满足反演的精度要求,说明基于 GF-1WFV 影像开 展江汉平原的大尺度土壤湿度反演是可行的;在植被覆盖中等区域,MPDI和 VAPDI 能够在一定程度上克服混合像元 对土壤湿度光谱信息的影响,反演的精度要比 PDI 高,但在高植被覆盖度区,采用垂直植被指数(PVI)修正的 VAPDI 不易出现植被覆盖饱和现象,具有更高的反演精度;基于 3 种指数模型反演的土壤湿度指数空间异质性基本一致, 但 MPDI、VAPDI 对土壤湿度变化更为敏感,能反映出不同植被覆盖类型下土壤湿度的实际水平。研究结果可为江汉 平原大范围和动态监测表层土壤湿度指数提供理论基础和实践参考。

【关键词】:高分一号;土壤湿度指数;PDI;MPDI;VAPDI;江汉平原

【中图分类号】:S127 【文献标识码】:A 【文章编号】:1004-8227(2018)05-1124-08

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201805019

土壤湿度即土壤含水量,是描述地/气能量变换和水循环的重要因素,在近地表水分循环和生态系统功能中扮演重要角色, 它的时空分布及演变对地表热量平衡、水分蒸散、农业墒情等都会产生显著的影响^[1]。遥感技术以及时、快速获取大面积地表 信息的能力著称,借助遥感数据开展土壤水、热等农情参数的反演一直是遥感技术应用的热点。自 20 世纪 80 年代起,就有很 多学者提出了基于不同遥感数据源及波段信息的土壤湿度反演模型和方法,其中最具代表性的有热惯量法^[2,3]、微波遥感监测 法^[4]、热红外遥感监测法^[5]、温度-植被综合指数法^[6,7]和光谱特征空间法^[8]等。但针对不同的遥感数据源和土地覆盖类型, 各反演模型和方法都有各自的限制条件,且大多数土壤湿度遥感反演研究一般采用中低分辨率的遥感影像作为数据源^[5,9],导 致反演结果的时、空间分辨率较低,很难实现大区域土壤湿度的动态监测。

¹ 收稿日期:2017-07-03; 修回日期:2017-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41401232);农业部农业遥感重点开放实验室(2016002);华中师范大学中央高校基本科研业 务费(CCNU18TS002)

作者简介:聂艳(1977~),男,博士,副教授,主要从事土壤地理、土地生态安全等研究. E-mail:nieyan@mail.ccnu.edu.cn ***通讯作者 E-mail:**yjing@hubu.edu.cn

GF-1 遥感卫星作为中国高分辨率对地观测系统国家科技重大专项的首发星,在农业监测与评估应用方面具有独特的优势。 目前有学者基于 GF-1 遥感数据在农业信息获取研究方面取得了一定成果^[10,11],但在大范围、业务化的农情参数遥感反演,尤 其是土壤湿度反演方面的研究比较少见。自 1977 年 Richardson 等^[12]建立 Nir-Red 光谱特征空间提出基于土壤背景线的垂直植 被指数后,从遥感光谱特征空间提取土壤水分信息建立土壤湿度遥感反演模型的方法被学者们持续关注。秦其明等^[13] 根据遥感 像元在 Nir-Red 二维光谱空间中的分布规律,提出了垂直干旱指数 PDI,并以 ETM+为数据源在顺义和固原地区取得了较好的应 用效果;后又有学者探讨了 PDI 在南方湿润地区土壤湿度反演的适用性^[14];而针对遥感混合像元中植被信息的影响,GhulamA 等^[15]在 PDI 的基础上引入植被覆盖度,在对混合像元进行分解的基础上提出了改进型垂直干旱指数 MPDI;部分学者经过比较指 出 MPDI 具有更高的反演精度^[16];针对植被覆盖更丰富的区域,吴春雷等^[8]引入垂直植被指数 PVI 作为植被覆盖表征量,提出 了植被调整垂直干旱指数 VAPDI。前述研究虽然取得了不错的成果,但所采用的遥感数据源多为 TM、ETM+甚至中分辨率的 MDDIS 影像,而基于国产 GF-1 遥感数据的研究却很少,更没有研究对比不同指数在江汉平原农业区的反演效果和适用性。因此,有必 要发挥 GF-1 高空间、高时间分辨率和宽覆盖的特点,定量分析植被覆盖度较高的江汉平原农业区 PDI、MPDI、VAPDI 的反演精 度和适用范围,拓展国产高分系列遥感数据在精准农业、农业信息定量提取等方面的应用范围,为"天地网一体化"的现代农 业信息获取和农情信息遥感监测提供理论基础。

1研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

潜江市地处长江与汉水之间的江汉平原腹地,位于112°29'~113°01'E,30°04'~30°39'N之间(图1)。境内土地总面积2004km²,其中耕地111155hm²,地势平坦;受亚热带季风性湿润气候影响,四季分明,光照充足,雨水充沛,农业基础条件十分优越,是江汉平原的典型农业区,同时也是湖北省重要的粮棉油生产基地。潜江市常年耕地复种面积在15万hm²以上,种植类型以中稻、小麦、棉花、油菜、豌豆等农作物为主。



Fig. 1 Distribution of measured samples of soil moisture in study area

1.2 数据采集与处理

以潜江市后湖管理区等5个镇/农场为实验区,实测数据为0~10cm 土壤表层体积含水率(相对值),采用托普云农TZS-2X-G 土壤水分温度速测仪测量(理论相对误差小于3%),采样时间为2017年3月7日至8日,采样时点前后一个星期天气状况稳定。 采样时根据不同土地覆盖类型,选取面积大于16m×16m的规则地块,在地块中间位置选择1m×1m的样方,样方内随机测量3 次取平均值,同步记录GPS坐标;共采集106个样点,并随机平均分成回归样点和验证样点;样点覆盖类型包括小麦、油菜、 果园、豌豆、荒草地和裸土,以农田植被为主(图1)。抽取部分样点,使用环刀采集土壤表层土样,实验室内经铝盒烘干法测量 含水率,对土壤湿度速测数据进行比对验证。

遥感数据采用 GF-1WFV 多光谱影像,空间分辨率为 16m,成像时间 2017 年 3 月 8 日。本研究主要利用了红光波段(Band3) 和近红外波段(Band4)数据。在分析之前,对影像进行了预处理,主要包括影像裁剪、辐射定标、大气校正、几何精校正;然后借助 ArcGIS10.1 软件将实测样点数据与预处理后的影像进行地理配准。

1.3分析方法

1.3.1 垂直干旱指数(PDI)

由于水体对红光(Red)、近红外(Nir)波段的强吸收特点,导致土壤在这两个波段的反射率受到土壤含水率的影响,土壤含水率越高,Red和Nir波段的反射率越低,反之亦然。因此可以利用土壤在Red和Nir波段的光谱特征来估算土壤含水率。将研究区GF-1WFV遥感影像Nir-Red构成的二维光谱特征空间离散化,得到典型的三角形分布,且存在明显的土壤线(BC)(图2)^[13]。



图 2 中 A 为全植被覆盖区, B 为湿润裸土地表, C 为干燥裸土地表, BC 为土壤线, 从 B 到 C 表示土壤逐渐干燥, 含水率降低。 土壤线可以通过 ENVI5.1 拟合像元在 Nir-Red 光谱特征空间中的散点分布图计算得到。



如图 3 所示,经过坐标原点作法线 0 垂直于土壤线 BC,Nir-Red 光谱空间中任一点(E)到 0 的距离可以描述该点的土壤湿度状况,即垂直干旱指数 PDI,PDI 值越大,像元点距离 0 越远,说明土壤越干旱,反之越湿润。PDI 的计算公式为^[13]:

$$PDI = (R_{red} + R_{nir}) / \sqrt{M^2 + 1}$$
(1)

1.3.2 改进型垂直干旱指数(MPDI)

PDI 没有考虑地表植被覆盖对红光和近红外波段的强散射作用,因此主要适用于低植被覆盖或裸土地区土壤湿度的遥感反演^[15,16]。针对此局限性,引入植被覆盖度 fv 对在 Nir-Red 光谱特征空间的混合像元进行分解,获取与土壤湿度有关的纯土壤信息,得到改进型垂直干旱指数 MPDI^[15],计算公式如下:

$$MPDI = \frac{R_{red} + M \cdot R_{nir} - f_v (R_{red,v} + M \cdot R_{nir,v})}{(1 - f_v)\sqrt{M^2 + 1}}$$
(2)

式中:R_{red}, v、R_{nir}, v为植被在 Red 和 Nir 波段的反射率; M 为土壤线斜率; 植被覆盖度 f_v的计算公式如下^[15]:

$$f_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s}\right)^2 \tag{3}$$

式中 NDVI,、NDVI。分别代表研究区中植被和裸土的归一化植被指数。

在 GF-1WFV 影像的 Nir-Red 光谱特征空间中,平行于土壤线的方向表示土壤湿度随 MPDI 的变化,垂直于土壤线的方向则表示植被覆盖度随 MPDI 的变化,土壤湿度和植被覆盖度的增加都会使 MPDI 的值降低。

1.3.3 植被调整垂直干旱指数(VAPDI)

为进一步提高高植被覆盖区土壤湿度的反演精度,有学者引入垂直植被指数(PVI)代替f_v,作为植被覆盖表征量,在PVI-PDI 二维空间对 PDI 模型进行修正,提出了适用于高植被覆盖区土壤湿度反演的植被调整垂直干旱指数 VAPDI^[8]。



如图 4 所示,三角形 ABC 内所有土壤湿度等值线近似为直线,且交于 A 点。在 PVI=0 的裸土区,三角形 ABC 内任一点 E 的 PDI 可以近似用土壤湿度等值线 AE 与横坐标轴的交点 F 的 PDI 代替,0F 的长度即为 E 点修正后的 PDI,即 PVI 趋于 0 时,VAPDI 等于 PDI。根据三角形相似原理得到任意 X 点的 VAPDI 计算公式如下:

$$VAPDI(X) = PDI(A) - \frac{|PDI(A) - PDI(X)| * PVI(A)}{PVI(A) - PVI(X)}$$
(4)

其中,垂直植被指数 PVI 的计算公式如下:

$$PVI = |R_{nir} - M \cdot R_{red} - I| / \sqrt{M^2 + 1}$$
 (5)

2 结果与分析

2.1 土壤湿度反演模型构建

2.1.1 土壤实测湿度的描述性统计

106 个土壤湿度实测数据的描述性统计结果见表 1。各覆盖类型土壤湿度的均值和中值接近,说明研究区土壤湿度整体分布 较为均匀;裸土的中值和均值存在差异,且变异系数达到 39%,说明裸土的干、湿度存在一定差异;土壤湿度最大值和最小值分 别为 0.485 和 0.074,对应的覆盖类型分别为小麦和裸土;106 个实测样点的土壤湿度平均值和标准差分别为 0.277 和 0.081。

覆盖类型	样点数	最大值	最小值	中值	均值	标准差	变异系数
小麦	36	0. 485	0.202	0.344	0.368	0.090	0.245
油菜	28	0.352	0.238	0.295	0.310	0.091	0.294
豌豆	12	0.305	0.203	0.254	0.263	0.076	0.289
荒草地	11	0.315	0.219	0.267	0.284	0.081	0.285
果园	7	0.305	0.193	0.249	0.257	0.075	0.292
裸土	12	0.223	0.074	0.149	0.182	0.071	0.390

表1 不同覆盖类型土壤湿度实测样点统计

2.1.2 土壤湿度反演模型与检验

借助 ENVI5.1,从经预处理的实验区 GF-1WFV 遥感影像中提取每个土壤湿度实测点像元在近红外和红光波段的反射率,将 106 个实测样点的反射率在 Nir-Red 构成的二维光谱特征空间中进行离散化,然后进行趋势线拟合得到实验区的土壤线方程如公式 6。

$$y = 1.3201x + 375.14, R^2 = 0.949$$
 (6)

由此可以得出土壤线斜率值 M 为 1.3201。根据公式 (3) 和公式 (5) 计算出实验区各采样点的 f_v和 PVI, 然后分别计算实验区 每个采样点的 PDI、MPDI、VAPDI 值。选用随机确定的 53 个回归样点,对土壤湿度实测值和对应的 PDI、MPDI、VAPDI 值分别进 行线性拟合,结果如图 5 所示。



Fig. 5 Correlation between PDI/MPDI /VAPDI and measured soil moisture data

图 5 可以看出,基于实验区 GF-1WFV 遥感影像得到的 PDI、MPDI、VAPDI3 种指数与土壤湿度实测值均呈显著负相关,且 PDI、 MPDI、VAPDI 与土壤湿度实测值之间的决定系数 R2 分别达到了 0.64、0.802 和 0.821,说明 3 种指数与实验区表层土壤湿度之 间存在很强的线性关系; MPDI、VAPDI 的拟合效果要明显优于 PDI,这是因为在 Nir-Red 二维光谱特征空间中,各像元的反射率 由土壤、植被甚至其他地物信息共同决定,PDI 指数没有考虑到植被覆盖对土壤光谱信息的影响,因此无法完全反映出表层土壤 湿度的实际水平。而 MPDI 和 VAPDI 分别利用了不同的植被覆盖表征量对混合像元的光谱信息进行修正,因而所表达的土壤湿度 信息更精确,与土壤湿度实测值之间的相关性高于 PDI。对 PDI、MPDI、VAPDI3 种指数与土壤湿度实测值构建的回归方程进行 F 检验,MPDI、VAPDI 的回归方程通过 P=0.01 的显著性检验,PDI 的回归方程通过 P=0.05 的显著性检验,说明基于这 3 种指数构 建土壤湿度指数反演模型都具有一定的精度,能够模拟和监测更大范围的土壤湿度的空间变化。

2.2 反演模型精度验证与评价

2.2.1 验证样点的反演结果对比

借助前述分别建立的土壤湿度指数反演模型(图 5)和土壤线斜率,基于预处理后的 GF-1WFV 遥感影像,经反演分别获取 53 个验证样点集的 PDI、MPDI和 VAPDI 指数所对应的土壤湿度值,将反演值与对应验证样点的实测土壤湿度值进行对比分析,并 计算每个样点 3 种模型的反演值与实测值间的相对误差(表 2)。

				反演值			相对误差	
样点	覆盖类型	实测值	PDI	MPDI	VAPDI	PDI	MPDI	VAPDI

表 2 验证样点土壤湿度反演结果对比(部分)

1	小麦	0.34	0.297	0.361	0.367	0.126	0.062	0.079
2	小麦	0.202	0.251	0.227	0.219	0.243	0.124	0.084
3	荒草地	0.292	0.27	0.308	0.312	0.075	0.055	0.068
4	油菜	0.258	0.227	0.279	0.268	0.12	0.081	0.039
5	裸土	0.169	0.153	0.19	0.187	0.095	0.124	0.107
6	油菜	0.238	0.285	0.271	0.264	0.197	0.139	0.109
7	荒草地	0.314	0.278	0.346	0.364	0.115	0.102	0.159
8	小麦	0.217	0.264	0.203	0.236	0.217	0.065	0.088
9	裸土	0.165	0.132	0.197	0.135	0.2	0.194	0.182
10	裸土	0.223	0.204	0.251	0.247	0.085	0.126	0.108
11	豌豆	0.246	0.203	0.259	0.261	0.175	0.053	0.061
12	果园	0.305	0.227	0.271	0.274	0.256	0.111	0.102

从表2可以看出,在植被覆盖较低或者无植被覆盖的3、5、9和10号验证样点,PDI、MPDI和VAPDI3种模型的反演值与实测值间的相对误差基本一致;而对于其他植被覆盖度相对较高的样点,MPDI和VAPDI模型的反演值比PDI更接近实测值,相对误差更小。说明PDI指数比较适合于裸土或稀疏植被区域的土壤湿度反演,而MPDI和VAPDI指数在高植被覆盖区也具有较高的反演精度,适用范围更广。进一步分析PDI、MPDI和VAPDI指数随土壤湿度实测值的变化趋势,可以看出3种指数总体变化趋势一致,即都与土壤湿度值的变化趋势呈负相关;但MPDI与VAPDI指数值变化幅度相对较PDI指数大,说明在植被覆盖较为丰富的区域,这两种指数对表层土壤湿度的变化更敏感,同样也能更准确地反映表层土壤湿度信息。

2.2.2 反演模型精度评价

将基于 PDI、MPDI 和 VAPDI3 种指数模型得到的反演值分别与对应的 53 个验证样点的土壤湿度实测值进行相关分析,并计 算验证样点土壤湿度反演值与实测值的相关系数(R)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)和均方根误差(RMSE)等模型精度 评价指标,来验证和定量评价 3 种反演模型的精度(表 3)。

表 3	各土壤湿度反演模型精度评价指标值

遥感十年指数 R MAE(%) MRE(%) RMSE(%)

PDI	0.694 3	5.12	11.4	5.19
MPDI	0.816 1	4.03	7.69	3. 45
VAPDI	0.844 0	3.92	7.41	3.27

由表 3 可知,基于 3 种模型得到的土壤湿度反演值与实测值间的相关系数分别为 0.694、0.816 和 0.844,均方根误差分别 为 5.19%、3.45%和 3.27%,从精度评价指标值来看,各模型反演值与实测值间的误差均在合理的范围内,即 3 种反演模型都能 满足一定的精度要求,说明利用 GF-1WFV 遥感影像的 PDI、MPDI、VAPDI 指数建立模型进行实验区的表层土壤湿度反演具有一定 的可行性。

由表3发现基于 VAPDI 与 MPDI 两种指数模型所得到的反演值与实测值间的相关系数、平均绝对误差、平均相对误差和均方 根误差值相当,但都显著优于 PDI 指数模型,其中 VAPDI 指数模型的反演精度最高。由于 PDI 指数在构建时将遥感影像中各像 元反射率视为单一裸土反射率,忽视了混合像元的影响,因而从遥感机理上来说其反演结果的误差较大,主要适合于裸土或者 植被稀疏的地区,在土地覆盖类型以农田植被为主的江汉平原农业区反演精度不高,不具有普适性。而经 fv 和 PVI 修正的 MPDI 和 VAPDI 指数建立的土壤湿度反演模型,通过对遥感影像中的混合像元进行不同程度的分解,使用植被和裸土像元二者的综合 反射率进行拟合,就能更加精确地反演出表层土壤的湿度信息,反演结果更接近实测值,也更适用于植被覆盖度较高的区域。

2.3 研究区土壤湿度反演结果分析

以经过预处理的潜江市 GF-1WFV 遥感影像为基础,在 ENVI/IDL 中计算出了各像元的 PDI、MPDI 和 VAPDI 指数值,然后利用 前述构建的 3 种土壤湿度反演模型计算出每个像元的土壤湿度值,得到潜江市 2017 年 3 月 8 日的土壤湿度空间分布格局(图 6), 图中白色部分为掩膜掉的水体与主城区,红色表示土壤湿度最低,由红色到深蓝色土壤湿度逐渐增高。



Fig. 6 Distribution of soil moisture retrieval in Qianjiang based on GF-1 WFV image

通过图 6 可以看出,基于 16m 空间分辨率的 GF-1WFV 遥感影像所反演出的潜江市土壤湿度图,能够表达较为丰富的土壤湿度空间分布信息,效果优于 MODIS、NOAA/AVHRR 等中低分辨率影像^[5]。3 种模型反演出的潜江市土壤湿度的空间分布格局基本

一致,即潜江市北部和南部土壤湿度相对较低,这与上述区域地势较高、耕地类型以旱地为主、覆盖类型以油菜为主等因素有 关;中部大部分区域土壤湿度相对较高,这与该区域地势低洼,周边多水田、坑塘和湖泊等水体有关,如掩膜掉的白色区域分 布较多。进一步对比3种指数反演的土壤湿度结果可以发现,受植被覆盖类型的影响,3幅图存在一定的差异:图6(a)中以中等 湿度的黄色和绿色像元为主,红色与蓝色像元少;而图6(b)和图6(c)则颜色差异更大,尤其是图6(c)存在不少土壤湿度较低的 红色和黄色,也存在较多土壤湿度较高的深蓝色,土壤湿度的高低层次更加分明。结合遥感影像和潜江市土地利用现状图,可 知土壤湿度差异较大的区域主要为农田植被区,而在农田植被区土壤的光谱信息会受到植被覆盖的影响,使PDI指数不能精确 地反映土壤湿度的实际水平,土壤湿度信息区分能力较差,出现实际土壤湿度较低时反演结果偏大、实际土壤湿度较高时反演 结果却偏小的现象^[8],导致以PDI指数建立的模型反演出的潜江市土壤湿度空间分异较小、以中等湿度分布为主。

基于 MPDI 与 VAPDI 指数建立的反演模型考虑了植被覆盖的影响,能够在一定程度上克服了混合像元对土壤湿度信息的影响, 因此能够更详细的表达土壤湿度的空间异质性。进一步对比 MPDI 与 VAPDI 的反演结果,在高植被覆盖区域,如图中西北角,采 用 PVI 修正的 VAPDI 指数所反演的土壤湿度的变化要比 MPDI 更为敏感,而在植被覆盖度中等或者较小的区域,两者的反演结果 相当。这是因为 PVI 在表征植被覆盖信息时较好地消除了土壤背景的影响,且相比 fv 不易出现植被覆盖饱和现象,更能精确地 表达植被覆盖信息,因此在高植被覆盖度区域,VAPDI 比 MPDI 更具有优势。因此,在植被较为密集的区域,选用 VAPDI 指数反 演效果较好,而在稀疏或者中度植被覆盖区域,采用 MPDI 指数进行表层土壤湿度的反演,既能够保持一定的反演精度而且计算 过程相对简单、易于实现。

3 结果

(1)基于 GF-1WFV 遥感影像的 PDI、MPDI 及 VAPDI3 种指数与土壤湿度实测值间的决定系数分别达到了 0.649、0.802 和 0.821, 说明 GF-1WFV 遥感影像在农田植被区开展土壤湿度反演具有一定的可行性,在农业信息定量提取等方面具有较大应用前景。

(2)相比 PDI 指数模型, MPDI 与 VAPDI 反演精度更高,能更清晰的表达土壤表层土壤湿度的内部空间分异,反演结果也更可 靠,同时具有快速、高效的特点。受植被覆盖饱和的影响,在高植被覆盖区宜采用 VAPDI,其它植被覆盖类型则可采用计算过程 相对简单的 MPDI。。

(3)在土壤-植被-大气系统中,土壤湿度的光谱信息不仅会受到植被覆盖的影响,还受大气状况、传感器差异、土壤背景等 复杂环境因素的影响,因此在后续的研究中,还需要进一步对不同遥感传感器、不同气候区的土壤湿度反演效果进行对比分析, 提取合适的因子对现有土壤湿度反演指数进行修正,以提高模型的反演精度,从而找到一套适用范围广、精确度高的土壤湿度 遥感反演方法。

参考文献:

[1] CARSTEN M, HAMID M, LUTZ W, et al. Hydraulic parameter estimation by remotely-sensed top soil moisture observations with the particle filter [J]. Journal of Hydrology, 2011, 399(3-4): 410-421.

[2] 王艳姣, 闫峰. 旱情监测中高植被覆盖区热惯量模型的应用 [J]. 干旱区地理, 2014, 37(3): 539-547.

WANG Y J, YAN F. Application of thermal inertia model in high vegetation coverage area for drought monitoring [J]. Arid Land Geography, 2014, 37(3) : 539-547.

[3] GEORGE P P, GARETH I, BRIAN B. Surface soil moisture retrievals from remote sensing: current status, products & future trends [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2015, 83-84:36-56.

[4] 丁建丽,姚远. 干旱区稀疏植被覆盖条件下地表土壤水分微波遥感估算[J]. 地理科学,2013,33(7):837-843.

JING J L, YAO Y. Evaluation of soil moisture contents under sparse vegetation coverage conditions using microwave remote sensing technology in Arid region [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(7) : 837-843.

[5] 张显峰,赵杰鹏,包慧漪,等. 基于 AMSR-E 与 MODIS 数据的新疆土壤水分协同反演与验证 [J]. 土壤学报,2012, 49(2): 205-211.

ZHANG X F, ZHAO J P, BAO H Y, et al. Co-inversion and validation of large-area soil moisture based on MODIS and AMSR-E data [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(2) : 205-211.

[6] 张月,王鸿斌,王一凡,等. 植被指数的藏北牧区土壤湿度反演 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(6):149-154.

ZHANG Y, WANG H B, WANG Y F, et al. Soil moisture inversion in pasture of northern Tibet based on vegetation index

[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(6) : 149-154.

[7] 高中灵,郑小坡,孙越君,等. 利用地表温度与LAI 的新型土壤湿度监测方法[J]. 光谱学与光谱分析,2015, 35(11): 3129-3133.

GAO Z L, ZHENG X P, SUN Y J, et al. A novel method of soil moisture content monitoring by land surface temperature and LAI [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(11) :3129-3133.

[8] 吴春雷,秦其明,李梅,等. 基于光谱特征空间的农田植被区土壤湿度遥感监测[J]. 农业工程学报,2014,(30) 16: 106-112.

WU C L, QIN Q M, LI M, et al. Soil moisture monitoring of vegetative area in farmland by remote sensing based on spectral feature space [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(16): 106-112.

[9] 胡佩敏, 熊勤学. 基于 ASAR GM 数据时序特征的农田表层土壤水分的反演[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 632-637.

HU P M, XIONG Q X. Retrieving surface soil moisture over crop fields based on time series characteristics of ASAR data [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(05) : 632-637.

[10] 程乾,陈金凤. 基于高分1 号杭州湾南岸滨海陆地土地覆盖信息提取方法研究[J]. 自然资源学报,2015,30(2):350-360.

CHENG Q, CHEN J F. Research on the extraction method of landcover information in southern coastal land of Hangzhou Bay Based on GF - 1 Image [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(2) : 350-360.

[11] 黄健熙,侯矞焯,苏伟,等. 基于 GF-1WFV 数据的玉米与大豆种植面积提取方法 [J]. 农业工程学报,2017, 33(7): 164-170.

HUANG J X, HOU Y Z, SU W, et al. Mapping corn and soybean cropped area with GF-1 WFV data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(7) :164-170.

[12] RICHARDSON A J, WIEGAND C L. Distinguishing vegetation from soil background information
[J]. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 1977, 43(12) : 1541-1552.

[13] GHULAM A, QIN Q, ZHAN Z. Designing of the perpendicular drought index [J]. Environ Geol, 2007, 52(6): 1045-1052.

[14] 李喆,谭德宝,崔远来,等. 基于 PDI 的湖北漳河灌区土壤含水量遥感监测 [J]. 人民长江,2010,41(1):92-95.

LI Z, TAN D B, CUI Y L, et al. Soil moisture monitoring by remote sensing for Zhanghe irrigation system based on PDI [J]. . Yangtze River, 2010, 41(1) : 92-95.

[15] GHULAM A, QIN Q, TEYIP T, et al. Modified perpendicular drought index(MPDI) : A real-time drought monitoring
method [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62(2) : 150-164.

[16] 杨学斌,秦其明,姚云军,等. PDI 与 MPDI 在内蒙古干旱监测中的应用与比较[J]. 武汉大学学报,2011,36(2): 195-198.

YANG X B, QIN Q M, YAO Y J, et al. Comparison and application of PDI and MPDI for drought monitoring in Inner Mongolia [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(2) : 195-198.