

基于SOC710VP高光谱成像仪的冬小麦 土壤含水率反演模型研究

刘晓静, 陈国庆*, 王良, 陈玉洁, 王兰, 刘肖瑜, 李学国

(山东农业大学农学院作物生物学国家重点实验室/山东省作物生物学重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要:【目的】实现小麦农田土壤含水率大面积快速监测。【方法】以冬小麦冠层高光谱数据为基础, 计算得到8种植被指数, 通过对关键生育时期(拔节期、抽穗期、灌浆期)不同水分处理下冬小麦不同土层(0~20、20~40、40~60 cm)土壤含水率与植被指数拟合状况进行分析和筛选, 分别构建了基于植被指数的不同土层土壤含水率反演模型, 并对模型进行检验。【结果】①各时期植被指数拟合效果有所差异, 拔节期0~20 cm土层以植被指数VOG1拟合效果较好, 相关系数为0.88, 20~40 cm土层以植被指数mNDVI705拟合效果较好, 相关系数为0.75, 40~60 cm土层以植被指数VOG3拟合效果较好, 相关系数为0.59; 抽穗期0~20 cm土层以植被指数mNDVI705拟合效果较好, 相关系数为0.70, 20~40 cm土层以植被指数mNDVI705拟合效果较好, 相关系数为0.72, 40~60 cm土层以植被指数mSR705拟合效果较好, 相关系数为0.57; 灌浆期0~20 cm土层以植被指数mNDVI705拟合效果较好, 相关系数为0.88, 20~40 cm土层以植被指数SARVI拟合效果较好, 相关系数为0.68, 40~60 cm土层以植被指数SARVI拟合效果较好, 相关系数为0.71; ②各土层土壤含水率与植被指数拟合效果有所差异, 其中利用VOG1和mNDVI705组合构建的模型反演0~20 cm土层, 决定系数 R^2 为0.743, 利用mNDVI705和SARVI组合构建的模型反演20~40 cm土层, 决定系数 R^2 为0.707, 利用VOG3、mSR705和SARVI组合构建的模型反演40~60 cm土层, 决定系数 R^2 为0.484; ③通过建立植被指数对土壤含水率的反演模型, 0~20 cm土层含水率反演效果好于20~40 cm和40~60 cm。【结论】高光谱植被指数反演模型中, 以0~20 cm土层的估算模型最佳, 植被指数组合为VOG1和mNDVI705。综上可知, 该研究方法进行土壤含水率的反演是可行的。

关键词:高光谱遥感; 植被指数; 反演; 冬小麦; 土壤含水率

中图分类号:S512

文献标志码:A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.20180062

刘晓静, 陈国庆, 王良, 等. 基于SOC710VP高光谱成像仪的冬小麦土壤含水率反演模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 35-42.

0 引言

土壤水分是影响作物生长的重要因素之一^[1], 水分管理也是作物栽培管理的重要措施^[2]。及时、快速、准确地获取大面积农田的土壤含水率对作物精准生产管理具有重要意义。

随着定量遥感技术的发展, 尤其是高光谱遥感技术的不断成熟和应用, 使之成为了一种实时高效地估算土壤含水率的手段^[3-4]。目前, 利用高光谱遥感技术, 国内外学者对土壤含水率进行了大量研究^[5-8]。由于地表大多情况下有植被覆盖, 反演土壤含水率大多采用植被指数模型, 常用的反演土壤含水率植被指数有: 温度植被干旱指数(TVDI)^[9]、植被供水指数(VSWI)^[10]、距平植被指数(AVI)^[11]、植被条件指数(VCI)^[12]、条件植被温度指数(VTCI)^[13]、作物水分胁迫指数(CWSI)^[14]等。不同植被指数有各自的优缺点, TVDI考虑了土壤的温度和干、湿边参数, 仅用单一遥感数据便可反演, 但在干季进行反演时存在误差, 对不同土地类型反演迟钝; VSWI对植被覆盖度高的区域反演模型较好, 过于理论化, 不适宜实际操作; AVI和VCI植被指数适宜反演大区域内、估算较长时间的土壤含水率, 但当发生干旱等极端天气时, 其适用性会降低; VTCI综合考虑了研究区域范围内的NDVI变化和土壤表面温度LST变化, 所以当某区域的NDVI受到当地环境的影响使之对植被覆盖率产生误差较大估计, 因此在实际应用中考虑的因素较多, 应用较为烦琐; CWSI将空气

收稿日期: 2018-01-19

基金项目: 山东省自主创新及成果转化专项(2014XGB01029)

作者简介: 刘晓静(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事基于模型的农田水分实时监测研究。E-mail: 753174696@qq.com

通信作者: 陈国庆(1979-), 男, 硕士生导师, 主要从事作物水氮高效利用模拟模型及生产智能管理研究。E-mail: gqchen@sdau.edu.cn

动力学阻力和冠层阻力等物理参数纳入计算,使之物理机理性较强,但计算时需要大量的遥感难以获取的参数,使其使用时受到阻碍。除此之外,也有研究发现基于改进红边比值植被指数($mSR705$)、土壤调整植被指数2($SAVT2$)、土壤和大气阻抗植被指数($SARVI$)和红边指数3($VOG3$)建立的组合植被指数反演0~10 cm 土层土壤含水率效果最优^[15],利用增强型植被指数(EVI)和地表温度(LST)构建特征空间,得到温度、植被干旱指数($TVDI$)也可以反演宁南山区的土壤含水率及早情^[16]。

国内外对于土壤含水率的研究,大多数是基于土壤光谱,实际上,利用作物冠层光谱特征反演土壤含水率更具有研究意义。汪沛等^[17]通过对不同土壤水分处理下甘蔗苗期和分蘖期冠层光谱反射率的变化规律进行了分析,发现比值植被指数与甘蔗土壤含水率存在较好的正相关性。王宏博等^[18]通过研究拔节期至吐丝期干旱胁迫下春玉米高光谱发现,350~700 nm 波段的光谱反射率与20 cm 土壤湿度负相关,710~1 300 nm 波段光谱反射率与60 cm 深度以内的土壤湿度正相关。林毅等^[19]通过建立光谱参数对土壤水分的反演模型,发现玉米在七叶一拔节期受到干旱胁迫后750~1 400 nm 波段冠层光谱反射率出现降低,350~750、1 400~2 300 nm 反射率出现升高趋势,反演10 cm 土壤含水率的效果好于30 cm。此外,基于植被指数对冬小麦水分反演的研究也有大量报道。王纯枝等^[20]利用 $TVDI$ 反演了黄淮海平原2004年冬小麦4—5月的土壤湿度,发现 $TVDI$ 与土壤湿度显著相关,且反演的黄淮海平原土壤湿度的时空分布特征与农作物生育期规律、生长季总降雨量分布规律基本吻合,而且分别利用 $TVDI$ 和 $VSWI$ 光谱参数反演中国冬小麦旱情发现, $TVDI$ 比 $VSWI$ 更能体现区域旱情变化趋势^[21],此外, $VTCI$ 也能较理想地评价冬小麦越冬后生育时期的干旱状况^[22]。

因此,在综合分析前人相关研究的基础上,选择了具有红边、消除土壤背景影响和消除大气影响等优点的红边、增强和土壤大气阻抗类8种植被指数,设置冬小麦不同水分处理试验,同步测定冬小麦关键生育时期(拔节期、抽穗期、灌浆期)的冠层光谱信息、不同土层(0~20、20~40、40~60 cm)土壤含水率数据,分析冬小麦关键生育期不同土层土壤含水率与8种植被指数的相关性,并在此基础建立不同土层土壤含水率与植被指数之间的回归方程,以期构建出能够快速简洁估算不同土层土壤含水率的反演模型。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验于山东农业大学水肥耦合试验站(北纬36°09', 东经117°09')进行,试验地点属于典型温带大陆性季风气候,四季分明,光照充足。气温和降水数据从距离试验站不到500 m的气象站获得。全年降雨量为159.4 mm,主要集中在4、5月。最高气温24.7℃,最低气温-0.5℃,分别出现在6月和2月(图1)。试验田土壤为棕壤土,0~20 cm 土层土壤有机碳量12.53 g/kg,全氮量1.15 g/kg,速效磷量211.27 mg/kg,速效钾量88.9 mg/kg,土壤体积质量1.43 g/cm³,pH值为6.4。0~20、20~40、40~60 cm 土层播前质量含水率分别为15.32%、15.63%和16.12%。

1.2 试验设计

试验于2016年10月—2017年6月进行,池栽试验,供试品种为济麦22,采用随机区组设计。试验共设置2种方案,分别用于反演模型的构建和检验。模型构建试验共设W1、W2、W3、W4共4个水分处理,灌水量分别为0、30、60、90 mm,灌水时间在拔节期(追肥后)和孕穗期进行。条播种植,行距20 cm,小区面积为18 m²(5 m×3.6 m),播种密度为225株/hm²,采用人工点播。每小区底施纯氮112.5 kg/hm²、磷肥(P₂O₅)140.0 kg/hm²和钾肥(K₂O)120.0 kg/hm²,拔节期追施尿素112.5 kg/hm²,其他管理同高产田。模型检验独立试验设置W1、W2、W3、W4共4个水分处理,灌水量与用于模型构建的试验田相同,施肥量为纯氮225.0 kg/hm²、磷肥(P₂O₅)120.0 kg/hm²和钾肥(K₂O)105.0 kg/hm²,其中,尿素基肥和追肥各1/2,拔节期追肥。其他田间管理按照高产田的标准进行管理。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 冠层光谱数据

利用SOC710VP便携式高光谱成像仪(光谱范围400~1 000 nm,分辨率4.68 nm,波段为128个)测量拔



图1 2016—2017年气温降雨分布图

节期(4月1日)、抽穗期(4月21日)和灌浆期(5月4日)冬小麦的冠层光谱。冠层光谱的测定时间为09:00—15:00,选择在天气晴朗、无积云、无风或少风(最好不超过3级)时进行。测量人员应穿着无强反射的暗色衣物,在背光面操作仪器、进行测量。测量时镜头垂直向下,距离冠层垂直高度1.0 m。每小区测量3个点,每点重复3次,取平均值作为该样点光谱测量值。在相同的光照条件和环境状态下用参考版进行标定。

1.3.2 土壤含水率

采用烘干法测定土壤含水率。与光谱测量同步,取铝盒在105℃烘箱中放置2 h,称质量(即铝盒质量,记做 m_0);土钻分别取0~20、20~40、40~60 cm土层的土样装盒,称鲜土质量(即鲜土加铝盒质量,记做 m_1);然后在105℃烘干至恒质量,再称质量(即干土加铝盒质量,记做 m_2),计算土壤质量含水率(soil water content, SWC)。取3次重复的平均值。

1.4 植被指数及拟合模型的选择

根据植被指数特征,选取8种植被指数建立冬小麦土壤含水率光谱反演模型。各植被指数计算公式及来源见表1。其中实测光谱数据的近红外波段、红外波段和蓝波段分别采用800、680和450 nm的反射率。

表1 土壤含水率估算选取的植被指数

植被指数	计算公式	参考文献
EVI 增强型植被指数	$2.5 \times (R_{\text{NIR}} - R_{\text{red}}) / (R_{\text{NIR}} + R_{\text{red}} - 7.5 \times R_{\text{blue}} + 1)$	[23]
SAVI2 土壤调整植被指数 2	$R_{\text{NIR}} / (R_{\text{red}} + b/a)$	[24]
SARVI 土壤和大气阻抗植被指数	$(1+L)(R_{\text{NIR}} - R_{\text{red}}) / (R_{\text{NIR}} + R_{\text{red}} + L)$	[25]
mSR705 改进红边比值植被指数	$(R_{750} - R_{445}) / (R_{705} + R_{445})$	[26]
mNDVI705 改进红边归一化植被指数	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2 \times R_{445})$	[26]
VOG1 红边指数 1	R_{740} / R_{720}	[27]
VOG2 红边指数 2	$(R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{726})$	[27]
VOG3 红边指数 3	$(R_{734} - R_{747}) / (R_{715} - R_{720})$	[27]

注 R_{NIR} 、 R_{red} 、 R_{blue} 分别表示近红外波段、红波段、蓝波段的反射率; L 是一个盖度背景调节因子, 设为 0.5; a 、 b 表示土壤线系数, 分别设置为 1.0、0.5。

1.5 数据处理与分析

将试验数据,依据不同灌水处理、不同生育时期将不同土层土壤含水率和冠层光谱反射率数据分别汇总。用SRAnal软件对冠层光谱反射率进行预处理,利用ENVI4.7进行平均反射率的提取。以2016—2017年用于模型构建的全部数据汇总,按4个不同灌溉水平、同一生育时期不同土层土壤含水率与相应植被指数进行相关性分析,筛选出不同生育时期冬小麦农田不同土层土壤含水率拟合度较高的植被指数,再通过多元回归分析建立不同土层土壤含水率反演模型。以2016—2017年用于反演模型检验的独立试验数据对不同土层反演模型进行验证,分析平均相对误差(MRE)和均方根误差(RMSE),对预测值和实测值进行检验。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}, \quad (1)$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: x_i 为土壤含水率预测值; y_i 为土壤含水率实测值; i 为样本序数, $i=1,2,\dots,n$; n 为样本数。

2 结果与分析

2.1 不同水分处理下土壤含水率的变化趋势

由图2可知,不同水分处理对冬小麦农田各土层土壤含水率影响显著($P < 0.05$),总体呈现趋势为W4处理、W3处理 > W2处理 > W1处理。灌水条件下,0~20 cm土层含水率均显著高于20~40 cm和40~60 cm土层。在0~20 cm土层,与W1处理相比,W2、W3、W4处理土壤含水率显著提高,拔节期、抽穗期、灌浆期分别提高了122.12%、103.50%和125.97%,随着生育时期进行,二者含水率差幅有逐渐减小趋势。在20~40 cm和40~60 cm土层,生育时期不同,各水分处理土壤含水率变化趋势有所不同,其中在拔节期,W3处理土壤含水率显著高于其他水分处理,变化趋势为W3处理 > W4处理 > W2处理 > W1处理,而在抽穗期和灌浆期,随着灌水量增加,土壤含水率逐渐增大,最大值均出现在W4处理。灌浆期,与不灌水处理相比,灌水处理能显

著提高40~60 cm土层土壤含水率,W2、W3、W4处理分别提高了4.30%、6.56%和9.85%,但是与上层土壤相比,40~60 cm土层各处理之间土壤含水率差幅有所减小。

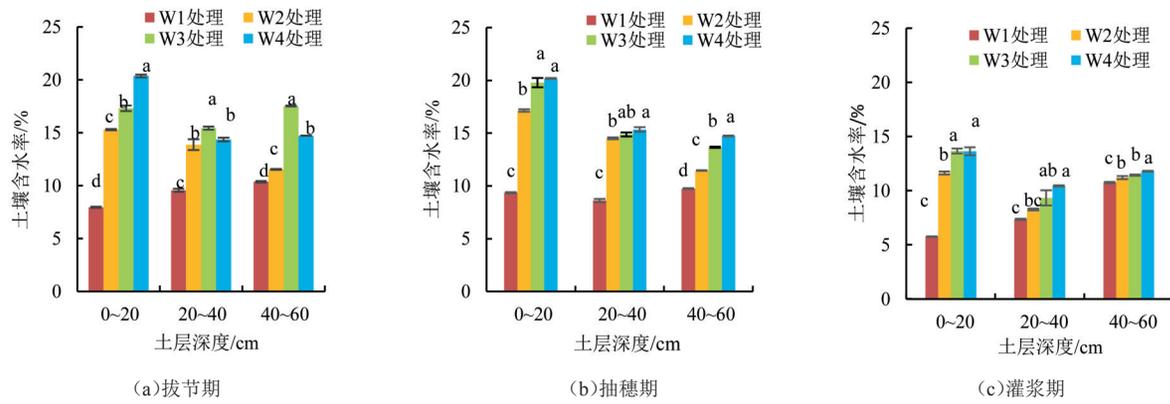


图2 各处理不同生育期各土层土壤含水率

2.2 植被指数与不同土层土壤含水率的相关性

将2016—2017年用于模型构建的试验数据,按照水分处理、同一生育时期不同土层土壤含水率与相应植被指数进行相关性分析($n=12$),分析相关性并排序,结果见表2。由表2可知,不同生育时期与各植被指数的相关性不同,而且随土壤深度变化,各层土壤含水率与各植被指数的大小也随之发生变化。其中,0~20 cm土层土壤含水率在拔节期排在前4的为VOG1、VOG2、mSR705、mNDVI705;抽穗期排在前4的为:mNDVI705、mSR705、VOG1、SARVI;灌浆期排在前4的植被指数为mNDVI705、mSR705、VOG2、VOG1。对20~40 cm土层土壤含水率与各植被指数的相关性进行分析发现,在拔节期排在前4的植被指数分别为mNDVI705、VOG2、VOG1、VOG3;抽穗期排在前4的为mNDVI705、VOG1、mSR705、VOG2;SARVI、SAVI2、VOG1、mNDVI705为灌浆期排在前4的植被指数,对所研究的最后一层土壤含水率进行相关性分析,在拔节期排在前4的植被指数分别为VOG3、VOG1、VOG2、mNDVI705;mSR705、mNDVI705、VOG1、SARVI为40~60 cm层土壤含水率抽穗期排在前4的植被指数;灌浆期排在前4的植被指数为SARVI、mSR705、mNDVI705、VOG1。

表2 不同土层植被指数与土壤含水率的相关性分析

生育时期	植被指数	0~20 cm		20~40 cm		40~60 cm	
		相关系数	排序	相关系数	排序	相关系数	排序
拔节期	mSR705	0.931**	3	0.747**	5	0.674*	5
	mNDVI705	0.925**	4	0.866**	1	0.678*	4
	EVI	0.421	6	0.288	6	-0.250	7
	SAVI2	-0.075	8	-0.257	7	0.199	8
	SARVI	0.202	7	0.003	8	0.417	6
	VOG1	0.937**	1	0.794**	3	0.704**	2
	VOG2	-0.933**	2	-0.804**	2	-0.691*	3
	VOG3	0.881**	5	0.759**	4	0.769**	1
抽穗期	mSR705	0.696*	2	0.657*	3	0.754**	1
	mNDVI705	0.837**	1	0.846**	1	0.712**	2
	EVI	-0.163	7	-0.315	7	0.172	7
	SAVI2	0.472	6	0.426	6	0.570	5
	SARVI	0.584*	4	0.533	5	0.665*	4
	VOG1	0.670*	3	0.658*	2	0.687*	3
	VOG2	-0.552	5	-0.569	4	-0.539	6
VOG3	0.161	8	0.216	8	0.134	8	
灌浆期	mSR705	0.923**	2	0.662*	5	0.828**	2
	mNDVI705	0.936**	1	0.725**	4	0.808**	3
	EVI	0.366	8	0.497	7	0.467	8
	SAVI2	0.556	7	0.797**	2	0.783**	5
	SARVI	0.665*	6	0.826**	1	0.844**	1
	VOG1	0.915**	4	0.738**	3	0.795**	4
	VOG2	-0.919**	3	-0.659*	6	-0.773**	6
VOG3	0.736**	5	0.232	8	0.534	7	

注 **和*分别表示在0.01和0.05水平上显著。

2.3 植被指数与不同土层土壤含水率回归分析

通过对关键生育时期植被指数与不同土层土壤含水率的相关性分析,将筛选出的每个关键生育时期相关性较高的4个植被指数分别与各土层土壤含水率进行回归分析(表3)。0~20 cm土层土壤含水率与3个生育时期拟合效果较好的植被指数分别为VOG1、mNDVI705、mNDVI705,决定性系数(R^2)分别为0.88、0.70和0.88;20~40 cm层土壤含水率拔节期、抽穗期、灌浆期效果较好的植被指数分别为mNDVI705、mNDVI705、SARVI,决定性系数(R^2)分别为0.75、0.72、0.68;VOG3、mSR705、SARVI为40~60 cm层土壤含水率与各生育时期拟合效果较好的植被指数,决定性系数(R^2)分别为0.59、0.57、0.71。

表3 不同时期不同土层土壤含水率与植被指数回归分析

土层深度/cm	拔节期			抽穗期			灌浆期		
	植被指数	模型	R^2	植被指数	模型	R^2	植被指数	模型	R^2
0~20	VOG1	$y = 0.15x - 0.20$	0.88	mNDVI705	$y = 1.17x - 0.79$	0.70	mNDVI705	$y = 0.51x - 0.27$	0.88
	VOG2	$y = -0.49x - 0.01$	0.87	mSR705	$y = 0.04x - 0.01$	0.49	mSR705	$y = 0.04x - 0.02$	0.85
	mSR705	$y = 0.04x - 0.01$	0.87	VOG1	$y = 0.17x - 0.25$	0.45	VOG2	$y = -0.37x - 0.01$	0.85
	mNDVI705	$y = 0.62x - 0.33$	0.86	SARVI	$y = 0.42x - 0.08$	0.34	VOG1	$y = 0.12x - 0.15$	0.84
20~40	mNDVI705	$y = 0.29x - 0.09$	0.75	mNDVI705	$y = 0.74x - 0.48$	0.72	SARVI	$y = 0.13x + 0.02$	0.68
	VOG2	$y = -0.21x + 0.1$	0.65	VOG1	$y = 0.11x - 0.13$	0.43	SARVI	$y = 0.08x + 0.04$	0.64
	VOG1	$y = 0.07x - 0.02$	0.63	mSR705	$y = 0.03x + 0.03$	0.43	VOG1	$y = 0.04x - 0.001$	0.55
	VOG3	$y = 0.03x + 0.02$	0.58	VOG2	$y = -0.24x + 0.1$	0.32	mNDVI705	$y = 0.17x - 0.04$	0.53
40~60	VOG3	$y = 0.04x - 0.0003$	0.59	mSR705	$y = 0.02x + 0.04$	0.57	SARVI	$y = 0.04x + 0.09$	0.71
	VOG1	$y = 0.07x - 0.03$	0.50	mNDVI705	$y = 0.44x - 0.24$	0.51	mSR705	$y = 0.004x + 0.1$	0.69
	VOG2	$y = -0.22x + 0.06$	0.48	VOG1	$y = 0.08x - 0.07$	0.47	mNDVI705	$y = 0.05x + 0.07$	0.65
	mNDVI705	$y = 0.28x - 0.08$	0.46	SARVI	$y = 0.2x + 0.002$	0.44	VOG1	$y = 0.01x + 0.09$	0.63

2.4 冬小麦农田不同土层土壤含水率反演模型的构建

将不同土层的土壤含水率数据作为因变量,经单个关键生育时期与植被指数分析后筛选出的拟合度较高的植被指数作为自变量,运用多元回归分析建立实测高光谱植被指数的土壤含水率反演模型(表4)。

表4 不同土层土壤含水率与植被指数的定量关系反演模型

土层深度/cm	拟合方程	决定系数 R^2	显著性系数 P
0~20	$y = 15.628x_1 - 22.002$	0.734	<0.001
	$y = 64.31x_2 - 36.246$	0.699	<0.001
	$y = 10.940x_1 + 21.099x_2 - 27.697$	0.743	<0.001
20~40	$y = 29.425x_2 - 11.239$	0.669	<0.001
	$y = 19.133x_3 + 1.6579$	0.334	<0.001
	$y = 25.374x_2 + 7.438x_3 - 12.016$	0.707	<0.001
40~60	$y = 1.3851x_4 + 8.0379$	0.145	0.02
	$y = 1.5294x_5 + 6.2714$	0.447	<0.001
	$y = 9.068x_3 + 7.6674$	0.117	0.04
	$y = -1.128x_4 + 2.181x_5 - 2.774x_3 + 8.664$	0.484	<0.001

注 y 代表土壤含水率的模拟值(%); x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 分别代表植被指数VOG1、mNDVI705、SARVI、VOG3、mSR705的实测值。

由表4可以看出,基于3个生育期拟合效果较好的植被指数得到的冬小麦农田不同土层含水率拟合方程,拟合效果不同,其中,0~20 cm土层土壤含水率是基于植被指数VOG1和mNDVI705得到的拟合方程,拟合效果较好,决定系数 R^2 为0.743;20~40 cm土层土壤含水率是基于植被指数mNDVI705和SARVI拟合的方程,拟合度较高,拟合效果较好,决定系数 R^2 为0.707;但是基于最优植被指数VOG3、mSR705和SARVI对40~60 cm土层土壤含水率建立拟合方程却发现,此土层的拟合效果并不理想,决定系数 R^2 仅为0.484。

2.5 模型的检验

为了进一步分析所建冬小麦农田各土层土壤含水率反演模型的可靠性和普适性,利用同年山东农业大学农学试验站反演模型检验的独立试验数据,以平均相对误差(MRE)和均方根误差(RMSE)作为评价标准对上述建立的拟合方程进行检验。0~20 cm土层土壤含水率的MRE和RMSE分别为11.17%和1.83%,平均相对误差和均方根误差较小,拟合情况较好,所构建的反演模型精度较高,较为准确可靠(图3(a));对20~40 cm土层土壤含水率的反演模型进行检验发现(图3(b)):MRE和RMSE分别为13.18%和1.80%,平均相对误差和均方根误差较小,拟合情况较好,所构建的反演模型精度较高,较为准确可靠;对40~60 cm土层

土壤含水率的反演模型进行检验发现(图3(c)), MRE 和 $RMSE$ 分别为14.69%和2.39%, 拟合情况较理想值有一定的差距。

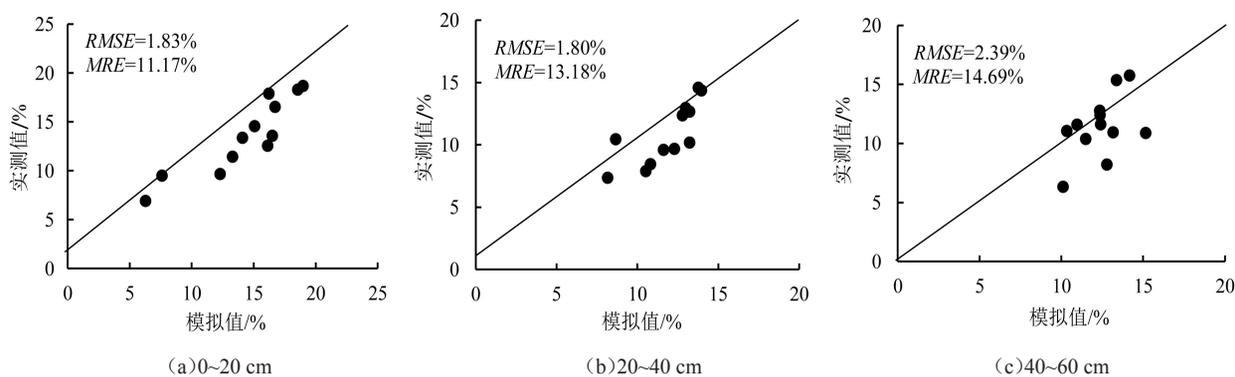


图3 冬小麦农田不同土层土壤含水率反演模型模拟值和实测值比较

3 讨论

在利用高光谱数据估算土壤含水率时, 植被生长状况以及动态环境因子是其重要的影响因素^[28]。对土壤含水率的变化进行分析发现, 除W1水分处理外, 0~20 cm 土层土壤含水率最高, 并且不灌水处理土壤含水率均低于灌水处理, 表明水分处理对表层的水分状况影响最大。前期土壤入渗速率是随着土壤含水率的增加而减小^[29]。灌浆期, 植株地表覆盖度大, 土壤蒸发量降低, 再加上雨季降水较多, 使0~20 cm 土层土壤含水率达到最大, 该结果与李淑文等^[30]和王晓迪等^[31]的研究结果一致。随着土层加深, 灌水与不灌水处理之间水分差幅逐渐减小, 表明外界条件对土壤含水率的影响是随土层深度的增加而减弱^[32]。

通过对8种植被指数进行相关性分析发现, 各关键生育时期及3层土壤含水率入选的植被指数中主要以红边植被指数为主, 这可能是由于土壤水分变化对小麦的生长发育的影响较为复杂, 除了影响叶片水分外, 还影响叶片叶绿素量、作物蒸腾等多方面^[33-37], 土壤不同水分处理可能通过影响小麦其他生物量和机能进而影响冠层的红边特征, 而红边植被指数使用了红色与近红外区域部一红边, 使得其对植被的反应更加敏感^[15]; 而土壤和大气阻抗植被指数可以把蓝色光和红色光通道的反射率的差值作为衡量大气影响的指标, 减少大气影响^[38], 因此土壤和大气阻抗植被指数也具有较好监测效果。不同水分胁迫处理下, 冬小麦长势有所差异, 引起各植被指数在不同生育期表现有所不同。在本研究中, 与抽穗期和灌浆期相比, 拔节期以红边指数拟合效果最佳, 可能原因是该时期 LAI 较小, 群体覆盖度较低, 冠层光谱反射率易受土壤背景影响, 该植被指数具有的红边特性与环境、作物生长发育等因素有直接的关系^[39-40], 而这些因素都显著影响作物的长势, 所以在该阶段有较好的反演效果。抽穗期, 3个土层土壤含水率拟合方程均以植被指数 $mNDVI705$ 效果最佳, 由于冬小麦在进入孕穗期和抽穗期后, LAI 逐渐增大, 冠层群体较为密闭, 各器官生物量逐渐累积, 此生育时期, 冠层反射情况很少受到土壤的影响, 而该植被指数考虑了叶片的镜面反射效应, 对作物冠层的微小变化都表现得非常灵敏, 所以该阶段以 $mNDVI705$ 进行拟合效果较好。开花后, 冬小麦由营养生长的旺盛时期开始向生殖生长期过渡, 叶片的养分开始向穗部转移, 之后下部叶片衰老、脱落, 作物受到水分胁迫时, 生长受到限制, 植被覆盖度降低^[41], 此时, 植被与土壤背景之间的光谱响应差异逐渐被拉大, 冠层光谱反射率易受土壤背景的影响^[42]。本研究表明, 在灌浆期, 除了红边指数, 土壤和大气阻抗植被指数拟合效果也比较理想, 分析其原因, 可能是该植被指数解释了背景的光学特征变化并修正其他植被指数对土壤背景的敏感, 而且增加了根据实际情况确定的土壤调节系数 L 。由于不同生育时期作物生长状况差异较大, 且各植被指数本身应用特点有所差异, 引起不同生育时期各种植被指数拟合效果相差较大, 所以基于单一植被指数很难精确地反演作物整个生育期土壤水分含量动态变化, 故本研究结合各生育时期拟合较理想参数, 构建作物生育期动态反演模型, 结果发现随着土层加深, 与相对应的植被指数拟合的效果随之降低, 这与林毅等^[19]、李相等^[15]、向红英等^[43]的研究结果一致。

4 结论

1) 随着土层加深, 土壤含水率有所减小, 0~20 cm 土层含水率显著高于20~40 cm 及40~60 cm 土层含水

率,且各土层总体呈现W4、W3处理 > W2 处理> W1 处理。

2)生育时期和土层不同,各植被指数的拟合效果也有所不同。0~20 cm 土层,拔节期、抽穗期、灌浆期拟合较好的植被指数分别为 $VOG1$ (R^2 为 0.88)、 $mNDVI705$ (R^2 为 0.70)和 $mNDVI705$ (R^2 为 0.88);20~40 cm 土层,分别为 $mNDVI705$ (R^2 为 0.75)、 $mNDVI705$ (R^2 为 0.72)和 $SARVI$ (R^2 为 0.68);而在 40~60 cm 土层,分别为 $VOG3$ (R^2 为 0.59)、 $mSR705$ (R^2 为 0.57)和 $SARVI$ (R^2 为 0.71)。

3)整合 3 个关键生育时期所筛选植被指数构建得到各土层最优拟合模型,0~20、20~40、40~60 cm 土层分别为 $y=10.940VOG1+21.099mNDVI 705-27.697$, $y=25.374mNDVI 705+7.438mNDVI 705-12.016$, $y=-1.128VOG3+2.181mSR 705-2.774SARVI+8.664$,且模型检验 MRE 和 $RMSE$ 均较小,尤其是 0~20 cm 土层,分别 11.17%和 1.83%,拟合效果较为理想。

参考文献:

- [1] 王宏博,李丽光,王笑影,等.基于MODIS数据的土壤含水率监测方法研究综述[J].土壤通报,2011,42(1):243-249.
- [2] 薛利红,罗卫红,曹卫星,等.作物水分和氮素光谱诊断研究进展[J].遥感学报,2003(1):73-80.
- [3] BEN-DOU E, PATIN K, BANIN A, et al. Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data a case study over clayey soils in Israel[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(6): 1 043-1 062
- [4] LU N, ZHANG Z, GAO Y. Recognition and mapping of soil salinization in arid environment with hyperspectral data[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005, 6: 4 520-4 523 .
- [5] 范梅凤,蔡焕杰,李志军.基于高光谱遥感水分指数的叶片与土壤含水率监测研究[J].灌溉排水学报,2014,33(Z1):213-217.
- [6] 白燕英,魏占民,刘全明,等.基于ETM+遥感影像的农田土壤含水率反演研究[J].灌溉排水学报,2013,32(4):76-78.
- [7] BACH H, VERHOEF W. Sensitivity studies on the effect of surface soil moisture on canopy reflectance using the radiative transfer model GeoSAIL[J]. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium 2004, 3: 1 679-1 681.
- [8] 姜雪芹,叶勤,林怡,等.基于谐波分析和高光谱遥感的土壤含水量反演研究[J].光学学报,2017,37(10):300-310.
- [9] SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2/3): 213-224.
- [10] 莫伟华,王振会,孙涵,等.基于植被供水指数的农田干旱遥感监测研究[J].南京气象学院学报,2006(3):396-401.
- [11] 陈维英,肖乾广,盛永伟.距平植被指数在1992年特大干旱监测中的应用[J].环境遥感,1994,9(2):106-112.
- [12] KOGAN F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(8): 1 405-1 419.
- [13] 王鹏新,龚健雅,李小文.条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2001(5):412-418.
- [14] JACKSON R D, JDSO S B, REGINATO R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1 133-1 138.
- [15] 李相,丁建丽.基于实测高光谱指数与HSI影像指数的土壤含水率监测[J].农业工程学报,2015,31(19):68-75.
- [16] 杨淑婷,张学俭.宁南山区土壤含水量遥感监测研究[J].宁夏农林科技,2015,56(10):26-28.
- [17] 汪沛,李就好,周志艳.不同土壤水分状况下甘蔗冠层光谱特征研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(1):34-37.
- [18] 王宏博,冯锐,纪瑞鹏,等.干旱胁迫下春玉米拔节-吐丝期高光谱特征[J].光谱学与光谱分析,2012,32(12):3 358-3 362.
- [19] 林毅,李倩,王宏博,等.干旱条件下春玉米高光谱特征及土壤含水率反演[J].生态学杂志,2016,35(5):1 323-1 329.
- [20] 王纯枝,毛留喜,何延波,等.温度植被干旱指数法(TVDI)在黄淮海平原土壤湿度反演中的应用研究[J].土壤通报,2009,40(5):998-1 005.
- [21] 孙丽,王飞,吴全.干旱遥感监测模型在中国冬小麦区的应用[J].农业工程学报,2010,26(1):243-249.
- [22] 李艳,王鹏新,刘峻明,等.基于条件植被温度指数的冬小麦主要生育时期干旱监测效果评价:II.改进的层次分析法和变异系数法组合赋权[J].干旱地区农业研究,2014,32(01):236-239.
- [23] LIU H Q, HUETE A R. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1995, 33(2): 457-465.
- [24] MAJOR D J, BARET F, GUYOT G. A ratio vegetation index adjusted for soil brightness[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11: 727-740.
- [25] KAUFMAN Y J, TANRE D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 261-270.
- [26] SIMS D A, GAMON J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2): 337-354.
- [27] VOGELMANN J E, ROCK B N, MOSS D M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(8): 1 563-1 575.
- [28] 王春梅,王鹏新,朱向明,等.区域蒸散和表层土壤含水量遥感模拟及影响因子[J].农业工程学报,2008,24(10):127-133.
- [29] MATSUI T, OMASA K, HORIE T. The difference in sterility due to high temperatures during the flowering period among japonica rice varieties[J]. Plant Production Science-Tokyo, 2001, 4(2): 90-93.
- [30] 李淑文,于淼,杜建云,等.不同灌水处理下土壤水分动态及玉米水分利用效率研究[J].河北农业大学学报,2010,33(4):17-21.

- [31] 王晓迪,王春堂,侯贺贺,等.管道均匀移动精准灌溉对夏玉米土壤水分变化及水分利用效率的影响研究[J].节水灌溉,2014(9):22-26.
- [32] 李洪建,王孟本,柴宝峰.黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J].应用生态学报,2003,14(4):515-519.
- [33] 冯晓钰,周广胜.夏玉米叶片水分变化与光合作用和土壤水分的关系[J].生态学报,2018(1):1-9.
- [34] 陆红飞,郭相平,王振昌,等.分蘖期早涝交替胁迫对水稻叶片性状的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(1):47-51.
- [35] 郭相平,王甫,王振昌,等.不同灌溉模式对水稻抽穗后叶绿素荧光特征及产量的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(3):1-6.
- [36] 陈歆,刘贝贝,彭黎旭.土壤水分对槟榔幼苗净光合速率和蒸腾速率的影响[J].热带作物学报,2015,36(11):2034-2038.
- [37] 袁宏伟,蒋尚明,汤广民,等.淮北平原冬小麦蒸发蒸腾量与不同土层土壤含水率关系初探[J].灌溉排水学报,2016,35(2):86-89.
- [38] HUETE A R. A soil adjusted vegetation index (SAVI)[J]. Remote Sensing Environment, 1988, 25: 295-309.
- [39] COLLINS W, CHANG S H, RAINES G, et al. Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits[J]. Economic Geology, 1983, 78: 737-749.
- [40] CHANG S H, COLLINS W. Confirmation of the airborne biogeophysical mineral exploration technique using laboratory methods[J]. Economic Geology, 1983, 78: 723-736.
- [41] 张俊华,张佳宝.不同生育期冬小麦光谱特征对叶绿素和氮素的响应研究.土壤通报,2008,39(3):586-592.
- [42] 咎亚玲.氮磷对旱地冬小麦产量、养分利用及籽粒矿质营养品质的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [43] 向红英,牛建龙,彭杰,等.棉田土壤水分的高光谱定量遥感模型[J].土壤通报,2016,47(2):272-277.

Estimating Soil Moisture Distribution in Winter Wheat Field Using SOC710VP Hyperspectral Imagery

LIU Xiaojing, CHEN Guoqing*, WANG Liang, CHEN Yujie, WANG Lan, LIU Xiaoyu, LI Xueguo

(State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Key Laboratory of Crop Biology, Agronomy College, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract:【Objective】Soil water controls crop growth and many soil physical and biochemical processes, and the purpose of this paper is to present how hyperspectral imagery can be used to estimate soil moisture distribution rapidly at large scale.【Method】Based on hyperspectral data of the canopy of winter wheat, we calculated eight vegetation indices and then linked them to soil water content at different depths (0~20, 20~40, 40~60 cm) during key growth stages (jointing stage, heading stage, filling stage) of a winter wheat field.【Result】①The fitting between soil moisture and the vegetation indices varied with growth season. At jointing stage, the indices *VOG1*, *mNDVI705* and *VOG3* were superior, whereas at heading and filling stages, *mNDVI705* and *mSR705*, and *mNDVI705* and *SARVI* worked better, respectively. ②The fitting between soil water content and vegetation indices varied with soil depth as well. For the 0~20 cm soil, the model using *VOG1* and *mNDVI705* gave the best result with the coefficient of determination (R^2) being 0.743, while for 20~40 cm soil, the model using *mNDVI705* and *SARVI* was most accurate with R^2 being 0.707. For the soil in 40~60 cm, the best vegetation indices for estimating the moisture was *VOG3*, *mSR705* and *SARVI*, with R^2 being 0.484. ③It was found that the fitting of the model for 0~20 cm soil was superior to that for 20~40 cm and 40~60 cm soil.【Conclusion】Using *VOG1* and *mNDVI705* indices calculated from the hyperspectral imagery can estimate the moisture in 0~20 cm soil reasonably well, and can thus help improve irrigation design and water resource management at regional and catchment scales.

Key words: hyperspectral remote sensing; vegetation index; retrieval; winter wheat; soil water content

责任编辑:白芳芳