

# 冬小麦冠层表面温度裂窗算法的筛选与土壤含水率监测

刘云<sup>1,2</sup>, 宇振荣<sup>1</sup>, 孙丹峰<sup>1</sup>, 侯世全<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2. 北京农学院园林系, 北京 102206)

**摘要:** NOAA 气象卫星的两个热红外通道可以用来反演地球表面温度, 而地球表面温度可用于监测土壤含水率。该研究于 2002 年冬小麦主要生育期, 应用 9 种裂窗算法反演了邯郸地区的地表温度, 并用这一时期冬小麦地面观测的冠层表面温度进行验证, 结果表明: 9 种方法中, UL92 法比较适合邯郸平原区地表温度的反演, 平均误差为  $-0.27^{\circ}\text{C}$ , 标准误差为  $2.66^{\circ}\text{C}$ ; 并建议: 对于山区和丘陵地带, 如能使裂窗算法结合数字高程模型 (DEM), 也能使山区和丘陵地带的地表温度反演精度提高, 最后以地面试验基础上所建立的冬小麦地表温度与土壤含水率间的回归拟合经验方程为基础, 用 UL92 法反演的地表温度监测不同土层的土壤含水率, 这是一种利用热红外遥感监测区域剖面土壤含水率的新方法的尝试, 证明地面基础试验所建立的经验方程与遥感数据结合能监测区域土壤剖面的土壤含水率。

**关键词:** 裂窗算法; 冠层表面温度; 土壤水; 冬小麦

**中图分类号:** S152.7; S512.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2006)11-0016-06

刘云, 宇振荣, 孙丹峰, 等. 冬小麦冠层表面温度裂窗算法的筛选与土壤含水率监测[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 16-21.

Liu Yun, Yu Zhenrong, Sun Danfeng, et al. Selecting split-window algorithm for retrieving canopy surface temperature of winter wheat and monitoring soil water content[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 16-21. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

地表温度的反演始终是研究的热点与难点, 其反演的难点主要表现在大气影响和地表本身的复杂性两方面<sup>[1]</sup>。实际应用中采用裂窗算法来消除大气的影 响, 因为该方法提供了在未知大气参数的条件下反演水面(或陆地)温度成为可能<sup>[2,3]</sup>, 它根据两个相邻光谱窗口不同吸收特性估测表面温度。裂窗算法最早应用于海平面地表温度的反演非常成功, Price<sup>[4]</sup>首次将裂窗法应用于陆地表面, 随后, 裂窗法在地表温度反演中得到广泛应用<sup>[5-10]</sup>, 但地表温度反演还受地表复杂性的影响, 因而各种裂窗算法适用于不同的下垫面, 要通过实际验证来筛选适合于该研究区的裂窗算法。自然界的许多信息都与温度有关, 作物冠层温度蕴含了作物水分和土壤水分信息<sup>[11]</sup>。20 世纪 60 年代就开始研究植被的冠层温度(叶温), 从 70 年代开始才有冠层温度来反映作物的水分状况方面的研究<sup>[12]</sup>。目前间接借助地表温度通过植被缺水指数法和热惯量法反馈区域作物旱情和土壤含水率的研究已经很多<sup>[13-20]</sup>, 但这两类方法分别在植被完全覆盖和地面完全裸露的情况下进行旱情监测的效果比较好, 目前直接用地表温度反馈土壤含水率的研究很少<sup>[21]</sup>。但自然界中地表更多是表现为植被和土壤都有的信息, 而不同的地表完全可以由其表面温度反馈信息, 尤其是地表的水分信息。

鉴于以上研究方向, 本研究首先在曲周县巩村进行地面试验建立冬小麦冠层表面温度与土壤含水率间的回归拟合模型, 然后采用 9 种不同裂窗算法反演该试验区的地表温度, 并从中筛选出最优的算法, 最后以最优的裂窗算法所反演的地表温度结合试验区所建立的回归拟合模型监测区域土壤含水率。

## 1 数据获取与研究方法

### 1.1 研究区概况

巩村位于中国农业大学曲周实验站的东北部, 距实验站约 3 km, 面积约 9 km<sup>2</sup>。在本项目调查阶段, 巩村 90% 的田地种植冬小麦, 余下田地以种植棉花为主。该村的土壤质地为壤土, 0~1 m 土层的土壤平均容重为 1.38 g/cm<sup>3</sup><sup>[22]</sup>。根据农户调查资料, 该村大部分农户采用淡水灌溉, 冬小麦返青后, 一般浇 3 次水, 即返青水(3 月 20 日左右)、拔节水(4 月 6 日左右)和灌浆水(5 月 4 日左右), 分别在浇返青水和拔节水时施肥(一般施尿素), 该村地下水深平均约为 20m<sup>[23]</sup>。为了能与 NOAA 气象卫星的数据在空间上对应起来, 用 GPS 对该村所属田地的边界进行了定位(见图 1)。



图 1 巩村边界图

Fig. 1 Boundary of gongcun village

收稿日期: 2004-12-29 修订日期: 2006-08-14

基金项目: 国家 863 课题(2003AA209030); 国家自然科学基金(30270776)和(40501029); 荷兰 SAIL 基金会的中荷合作项目“可持续土地管理(SULAMA)”(SAIL-SPP 299.399)资助

作者简介: 刘云(1971-), 女, 新疆库尔勒人, 博士, 主要从事农业遥感及土地可持续利用方面的研究。北京 北京农学院园林系, 102206。Email: liuyun\_bj@tom.com

1.2 地面试验设计与测定方法

地面试验于冬小麦主要生育期(2002 年 4 月~ 5 月底)在曲周县巩村(图 1 中\* 为调查样地点)位置进行,按照抽样论分层整群随机抽样<sup>[24]</sup>的方法设置抽样的样本单元数( $n$ ):根据中心极限定律,抽样样本的近似概率分布函数为  $p\{|y - \bar{Y}| \leq \epsilon\} \geq 1 - \alpha$ , 这里的  $\epsilon$  为估计精度,  $\delta$  为样本标准差,  $\alpha$  为检验的显著性水平,  $u_{\alpha/2}$  为标准正态分布水平  $\alpha$  的双侧分位数。如果给定  $\epsilon$ , 则有  $\epsilon \geq u_{\alpha/2} \delta / \sqrt{n}$ , 那么抽样的样本单元数必须满足:  $n \geq \left(\frac{u_{\alpha/2}}{\epsilon}\right)^2 \delta^2$ , 所以满足最小的抽样单元数  $n$  为  $n = \left\lceil \left(\frac{u_{\alpha/2}}{\epsilon}\right)^2 \delta^2 \right\rceil$ 。这里  $n$  为所有的样本单元数。所谓的分层是把巩村所要调查的地物分为作物、裸露的土壤这两个层次, 分别在这两个层次进行测定, 然后在作物层再分为作物长势好、中、差三个群体, 在这三个群体分配抽样单元(即总的样本单元数被分为  $n_1, n_2, n_3$ , 且满足  $n_1 + n_2 + n_3 = n$ ), 每个样本群体的样地面积为  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ , 每个群体测定 6 个样本点, 在晴天, 用红外测温仪测量冬小麦冠层表面温度(时间从早晨 8:00 到下午 6:00, 每隔两小时测一次, 与卫星过境时间同步加测一次); 同时用土钻法测定各观测点的土壤含水率(0~ 50 cm 的土层分两层, 0~ 20 cm 为一层, 20~ 50 cm 为另一层), 试验观测地土壤为中壤质潮土, 土壤质地比较均匀, 根据资料<sup>[25]</sup>知该试验观测地 0~ 100 cm 剖面平均容重为  $1.38 \text{ g/cm}^3$ 。试验地多年平均降雨量为 500 mm, 年变异系数 24%。

1.3 NOAA/AVHRR 数据获取及研究方法

在地面观测试验的同期时间内, 共收集了 10 d 晴天少云的 NOAA17 气象卫星 AVHRR 数据, 以该研究区(邯郸)的地形图为准, 将其中一天的 AVHRR 数据与之配准进行几何校正, 然后以此图像数据为准,

将其他各天的图像与之对应进行配准。

区域尺度上反演地表温度需考虑很多因素, 其中反演的难点是大气影响和地表本身的复杂性。有关大气影响的研究从遥感的初期就开始了, 目前这方面的物理机制已经较为清楚, 困难主要在于如何准确获取与遥感数据相配套的大气廓线参数。在遥感热红外领域劈窗算法提供未知大气参数的条件下, 使反演水面(或陆面)温度成为可能<sup>[2,4]</sup>, 它利用传感器在大气窗口的两个相邻热红外通道对大气水汽的吸收差异性实现大气纠正。相比较而言, 对于地表本身复杂性的研究还处在探索阶段, 这主要表现在: 1) 温度和发射率的分离问题; 2) 角度影响; 3) 混合像元问题; 4) 遥感数据与地面过程模型的综合方法<sup>[1]</sup>。

美国国家海洋和大气局(NOAA)极轨气象卫星系列的 AVHRR 探测器的两个热红外通道(CH4 通道为  $10.5 \sim 11.5 \mu\text{m}$ , CH5 通道为  $11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ )专门用来监测地球表面温度的变化。用来反演地表温度的裂窗算法以这两个热红外通道所观测到的热辐射数据为基础, 本研究利用荷兰国际航空测量和地球科学研究所研制的 AHAS(AVHRR Hydrological Analysis System)软件反演地表温度。根据各算法在实际应用中所需要的参数, 本研究所用的 9 种裂窗算法分为简单算法(PR84, KE92 和 OV92)和辐射率模型(CC97, BL90, PP91, VI91, UL92 和 UV95)两类。本软件将 9 种算法总结为如下公式

$$T_0 = C_{42}T_4^2 + C_4T_4 + C_{45}T_5T_4 + C_5T_5 + C_{52}T_5^2 + \text{off set} \tag{1}$$

式中  $T_0$ ——地表温度, K;  $T_4$ ——CH4 通道亮温, K;  $T_5$ ——CH5 通道亮温, K;  $C_i$ ——回归系数, 对大气水汽进行校正; *off set*——偏移量, 校正 AVHRR CH4、CH5 通道地面比辐射率及气体和气溶胶衰减。总结这 9 种裂窗算法方程的系数如表 1。

表 1 裂窗法方程系数  
Table 1 Coefficients of split window equations

方法	$C_{42}$	$C_4$	$C_{45}$	$C_5$	$C_{52}$	<i>Off set</i>	备注
PR84	0	$4.33 \times (5.5 - e_4)/4.5$	0	$-3.33 \times (5.5 - e_4)/4.5 - 0.75 \times d_e$	0	0	
BL90	0	$3.63 + 2.07 \times (1 - e)/e + 18.9 \times d_e/\text{sq}(e)$	0	$-2.63 - 1.9 \times (1 - e)/e - 19.4 \times d_e/\text{sq}(e)$	0	1.274	
PP91	0	$3.46/e$	0	$-2.46/e$	0	$40^* (1 - e)/e$	
VI91	0	3.78	0	-2.78	0	$50 \times (1 - e)/e - 300 \times d_e/e$	
KE92	0	$0.5 \times P_v + 3.1$	0	$0.5 \times P_v - 2.1$	0	$3.1 - 5.5 \times P_v$	$P_v$
OV92	0	3.218	0	-2.218	0	0.858	
UL92	0	2.8	0	-1.8	0	$48 \times (1 - e) - 75 \times d_e$	$w < 3$
UV95	0.58	$2 - d_e \times (0.1 \times w + 1.12)$	-1.16	-1	0.58	$40.51 - 40 \times e + (68 \times w + 163) \times d_e$	$w = 2$
CC97	0.39	2.34	-0.78	-1.34	0.39	$0.56 + a \times (1 - e) - b \times d_e$	$a = 40$ $b = 80$

注: PR84 法在理论分析基础上, 由图像自身提取系数, 并订正比辐射率的影响, 首次用于农田<sup>[4]</sup>; BL90 法: 为该模型根据辐射传输理论, 线性化推导出, 适于局部地区<sup>[2]</sup>; PP91 法: 根据辐射传输理论, 并利用探空资料得到半经验模型<sup>[8]</sup>; VI91 法: 经验回归模型, 适于局部地区<sup>[9]</sup>; KE92 法: 半经验模型, 适于局部地区<sup>[6]</sup>; OV92 法: 根据辐射传输理论, 对不同大气状况, 由统计回归推导系数得到<sup>[7]</sup>; UL92 法: 理论模型, 系数由模拟获得,  $w < 3 \text{ g/cm}^2$ <sup>[10]</sup>; UV95 法: 根据辐射传输理论推导, 由模拟和实测值利用回归方法确定系数<sup>[3]</sup>; CC97 法: 理论模型<sup>[5]</sup>。其中:  $e_4$  为 CH4 通道比辐射率;  $e_5$  为 CH5 通道比辐射率;  $e = (e_4 + e_5)/2$ ;  $d_e = e_4 - e_5$ ;  $\text{sq}(e)$  为  $e$  开平方;  $P_v = (NDVI - NDVI_{\text{soil}})/(NDVI_{\text{veg}} - NDVI_{\text{soil}})$  为植被覆盖率,  $NDVI$  为对应像元的归一化植被指数,  $NDVI = (CH5 - CH4)/(CH5 + CH4)$ ,  $CH4$  为 NOAA 卫星第四通道,  $CH5$  为 NOAA 卫星第五通道,  $NDVI_{\text{soil}}$  为对应土壤像元的归一化植被指数,  $NDVI_{\text{veg}}$  为对应植被像元的归一化植被指数;  $w$ : 为大气水汽含量,  $\text{g/cm}^2$ (0~ 6);  $a, b$  由大气水汽含量决定, 可查表获得。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 地面试验冬小麦冠层表面温度监测土壤含水率经验模型的建立

判定土壤旱情的干旱指标一般将土壤分成两层(0~20 cm 和 20~50 cm)来进行评价, 所以将地面试验所观测的各点的冬小麦冠层表面温度和土壤含水率进行平均化处理后, 建立冬小麦各生育期冠层温度(用  $X$  表示, 为自变量) 与这两层土壤重量含水率(用  $Y$  表示, 为因变量) 间的回归拟合关系基本上为二次或三次方程的形式, 即  $Y = A_0 + A_1X + A_2X^2 + A_3X^3$ , 结果如表 2 所示, 可以看出在拔节和挑旗期, 二者的相关性只在 0~20 cm 土层的相关性显著, 而到抽穗期和灌浆期, 二者在 0~20 cm 和 20~50 cm 的土层都达到了显著性相关关系, 灌浆后期, 仅 20~50 cm 的土层二者的相关性

显著, 但总体看来冬小麦冠层表面温度能反映土壤含水率的信息, 因而可以以此模型为基础利用裂窗法反演的地表温度监测区域土壤含水率。

### 2.2 裂窗算法的筛选

用表 1 中 9 种裂窗算法计算得到 10 d 9 种不同方法反演的地表温度的图像, 在对应于地面试验区(巩村)的位置处开辟了  $3 \times 3$  的像元, 对 9 个像元求平均后与实测值比较, 结果见表 3。从平均误差来看, 有 4 种方法(OV92、BL90、KE92 和 UL92 法)反演的地表温度总体上要低于实测温度, 而其他 5 种反演的方法(CC97、PP91、PR84、UV95 和 VI91 法)要高于实测温度; 从标准误差来看, UL92 法反演地表的标准误差最低, 是否能说明这种方法反演地表温度的精度最高, 还得从反演的整个生育期的地表温度和实测的温度的变化趋势作进一步的分析。

表 2 巩村冬小麦各生育期冠层温度与两个土层土壤质量含水率间相关关系

Table 2 Correlation between canopy temperature and soil mass water content in two soil layers at various growth stages of winter wheat in Guocun village

日期	不同土层/cm	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	复相关系数	$F$ 值	$R^2$
4月10日	0~20	-36.92	5.70	0	-0.01	0.55	0.87	0.30*
拔节期	20~50	-21.79	4.52	0	-0.01	0.41	0.40	0.17
4月20日	0~20	54.94	0	-0.23	0.01	0.83	2.21	0.69*
挑旗期	20~50	103.23	0	-0.47	0.01	0.42	0.21	0.17
4月27日	0~20	80.98	-6.85	0.17	0	0.52	0.73	0.27*
抽穗期	20~50	63.38	-3.096	0	0.002	0.67	1.62	0.45*
5月18日	0~20	302.00	-22.96	0.47	0	0.64	1.38	0.41*
灌浆期	20~50	100.35	0	-0.43	0.01	0.66	1.54	0.43*
5月24日	0~20	-240.97	19.31	-0.36	0	0.44	0.47	0.19
灌浆期	20~50	-28.59	2.28	0	-0.001	0.64	1.41	0.41*

注: 样本数为 60, \* 为显著相关(置信水平  $\alpha = 0.05$ )。

表 3 曲周农田冠层温度与遥感温度及误差

Table 3 Temperature comparison between RS values and field observation values in Quzhou farmland

日期/月-日	时间	实测值	OV92	BL90	CC97	KE92	PP91	PR84	UL92	UV95	VI91
04-09	14:41	11.94	5.90	11.90	10.70	6.10	10.00	11.70	10.30	10.60	11.90
04-10	14:30	16.39	21.58	23.01	21.21	18.53	21.89	22.53	21.00	21.18	22.23
04-11	14:19	20.14	23.38	25.06	23.27	20.73	23.79	24.82	22.89	23.13	24.15
04-12	14:24	16.81	14.94	16.75	14.85	12.35	15.35	17.05	14.15	14.75	16.15
04-13	14:16	24.39	26.20	28.65	26.95	23.15	27.75	28.65	26.65	26.85	28.25
04-20	14:08	23.24	21.85	23.05	21.39	19.03	21.77	22.54	20.98	21.20	21.95
05-03	13:57	24.06	25.15	28.36	26.76	23.06	27.16	30.26	24.46	27.46	28.46
05-11	13:47	27.89	27.20	30.99	29.39	25.19	30.09	33.39	26.89	30.19	31.59
05-18	13:57	24.51	21.17	24.58	22.75	19.53	22.94	25.91	21.14	22.53	24.58
05-22	13:33	29.81	30.52	35.45	46.45	30.15	33.85	40.85	28.05	54.35	36.55
	平均误差		-0.13	-0.13	2.58	-2.14	1.54	3.85	-0.27	3.31	2.66
	标准误差		3.26	3.26	4.95	2.70	2.84	3.69	2.66	7.90	2.88

首先对各裂窗法反演的地表温度和实测值间进行回归分析, 则得到的分析结果见表 4。按回归分析的原理, 如果该方法反演地表温度与实测值很接近, 则回归平方和应该很高, 而残差平方和应该越小越好, 从表 4 可

以看出各方法与实测值的相关系数都很高, 在 0.82 以上, 其中 BL90、KE92、PP91、PR84 和 VI91 法可靠性程度几乎达到了 100%, 相关系数都在 0.92 以上; 而 CC97、OV92 和 UL92 法的可靠性程度也达到了 99%,

相关系数都在 0.86 以上。

表 4 遥感方法反演的地表温度与实测值的回归分析

Table 4 Regression analysis between measured values and retrieved values by remote sensing

模型	回归标准误	相关系数	回归平方和	残差平方和	F 值	显著性水平
BL90	2.21	0.93	237.36	39.11	48.55	0
CC97	2.97	0.86	205.69	70.77	23.25	0.001
KE92	2.31	0.92	233.90	42.56	43.97	0
OV92	2.69	0.89	218.61	57.86	30.28	0.001
PP91	2.28	0.92	235.04	41.42	45.40	0
PR84	2.16	0.93	239.14	37.32	51.26	0
UL92	2.71	0.89	217.81	58.65	29.71	0.001
UV95	3.37	0.82	185.70	90.77	16.37	0.004
VI91	2.16	0.93	239.12	37.34	51.23	0

进一步比较分析各裂窗法反演的地表温度和实测值在生育期内的变化趋势。因为随着冬小麦生育期时间的推移,冠层表面温度逐渐增高,但到灌浆后期温度开始稍微降低,即其趋势线在末端向下弯曲。按照这种变化趋势,符合这种规律的方法只有 OV92、KE92、PP91 和 UL92 法(见图 2),但 KE92 和 PP91 法二者的趋势线相差较大,再综合考虑这两种方法的标准误差(见表 3),则认为 UL92 法是反演本研究区最好的方法,事实上该法是根据热辐射传导理论模拟卫星高度所观测到的地表热辐射确定了方程中的系数,因而该方法具有外推性。该方法对下垫面比较均一且水汽含量变化不大的地区比较适用,用 NOAA 卫星反演的地表温度的误差能控制在 0.5℃之内。本研究区在试验期间(4~5 月)水汽含量变化不大,而且大面积种植的都是冬小麦,这些特点恰好符合 UL92 法的适用条件。

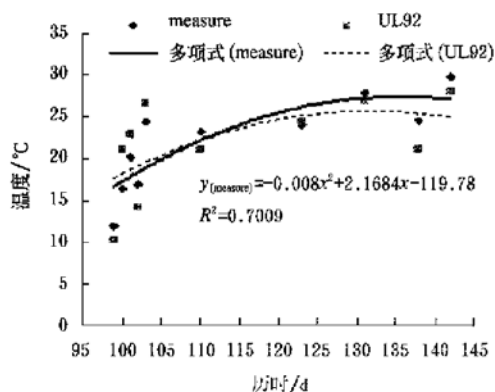


图 2 UL92 裂窗法反演的地表温度和实测值在生育期内的变化趋势

Fig. 2 Change trend between measured values and retrieved values by UL92 methods

### 2.3 UL92 算法反演邯郸地区地表温度的结果分析

根据 UL92 方法反演了邯郸地区地表温度如图 3 (图中以 4 月 21 日标记了各县的边界)所示。从整个反

演的结果来看,山区和丘陵地带(包括涉县、武安、峰峰矿区以及永年、磁县和邯郸市的左边小部分)在整个时期反演的地表温度都比平原区(包括鸡泽、曲周、邱县、肥乡、成安、临漳、广平、魏县和大名)要高且相差较大,这是因为冬小麦生长发育的这段时期山区和丘陵地带的植被(尤其是树木)仅刚刚开始发芽,所以地面大多数表现为裸露土壤的信息,而且受地形的影响,卫星传感器接收到地面的信号为多个辐射面发来的信息,因而使得这个地区反演的地表温度增高,所以此模型最好用于平原地区。就平原地区来看,在起身期,邱县和馆陶两个县温度较高,鸡泽和永年两个县温度较低;在拔节期,邱县地表温度较高,而其他县的地表温度的差异不大;在抽穗期,曲周、邱县、馆陶和肥乡的地表温度稍微比其他各县地表温度要高一些。在灌浆期,各县地表温度整体要高于其他各生育期,且各县地表温度差异不大。这些结果表明到了冬小麦的灌浆期,平原地区的地表温度在各县差异都不大,而在灌浆期前,各县的地表温度有明显差异。

### 2.4 裂窗算法反演的地表温度监测土壤含水率的结果分析

在中国北方农民把土壤水分状况称为墒情,通常把土壤墒情分为:汪水、黑墒(速效水)、黄墒(弱效水)、潮干土(迟效水)和干土(无效水),一般把旱地土壤 1 m 深度内的墒情分为三层,即表墒、底墒和深墒。表墒指 0~20 cm 的土层,底墒指 20~50 cm 的土层,深墒指 50~100 cm 的土层。本试验区土壤为潮土,则根据研究华北地区潮土和墒情下的土壤含水率的分级标准<sup>[25]</sup>。本研究采用地面实验所建立的冬小麦各个生育期冠层温度与两层(0~20 cm 和 20~50 cm)土层土壤质量含水率间的回归模型(见表 2),得到邯郸区域两个土层的土壤含水率结果见图 4(0~20 cm 土层)和图 5(20~50 cm 土层)(以 4 月 21 日标记了各县的边界)。结果表明:在 0~20 cm 的土层,在返青期,平原区各县仅鸡泽、永年和大名县的中部地带以及临漳县的西部和南部地区的土壤含水率达到了 23%~28%,说明这些地带的土壤墒情表现为黑墒,即速效水,而其他各县的土壤含水率仅在 14%~19% 左右,表现的土壤墒情为黄墒,即弱效水;而此后的各生育期,平原区各县的土壤含水率仅为 14%~19% 左右,表现的土壤墒情为黄墒,即弱效水;在 20~50 cm 的土层,也有类似的结果。在返青期,即平原区各县仅鸡泽、永年和大名县的中部地带以及临漳县的西部和南部地带的土壤含水率达到了 27%~31%,说明这些地带的土壤墒情表现为黑墒,即速效水,而其他各县的土壤含水率在 22%~26% 左右,表现的土壤墒情也为黑墒;在此后的各生育期,平原区各县的土壤含水率基本上都为 22%~26% 左右,表现的土壤墒情也为黑墒。



图3 邯郸地区冬小麦主要生育期 UL92 法反演地表温度分布

Fig. 3 Distribution of land surface temperature of winter wheat retrieved by UL92 method in Handan

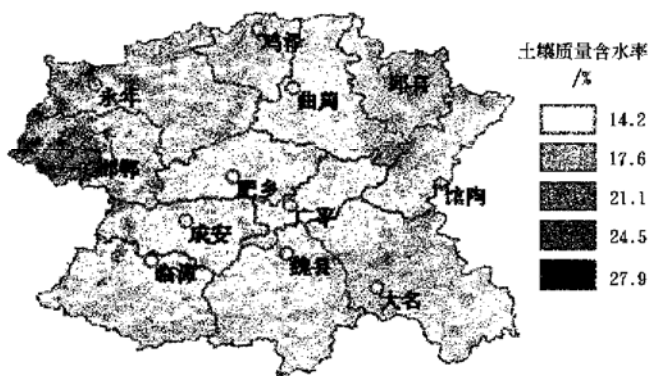


图4 邯郸地区 0~ 20 cm 土层土壤质量含水率

Fig. 4 Mass soil water content of 0~ 20 cm soil layer in Handan

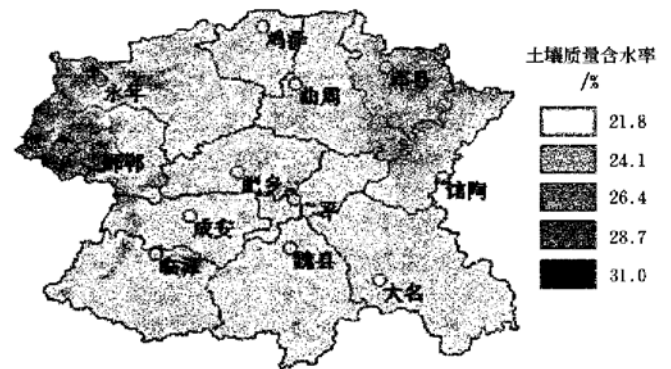


图5 邯郸地区 20~ 50 cm 土层土壤质量含水率

Fig. 5 Mass soil water content of 20~ 50 cm soil layer in Handan

### 3 结论

1) 在冬小麦拔节期后,基于 NOAA 的 AVHRR 数据采用 UL92 裂窗算法反演邯郸平原地区(主要是冬小麦地)的地表温度的精度还是很高的,平均误差为  $-0.27^{\circ}\text{C}$ ,标准误差为  $2.66^{\circ}\text{C}$ ,证明该方法比较适合邯郸平原地区地表温度的反演。

2) 在地面试验基础上,根据所建立冬小麦地表温度与不同土层的土壤含水率间的回归拟合经验方程,利用 UL92 裂窗法反演的地表温度监测不同土层的土壤含水率,这是一种利用热红外遥感监测区域剖面土壤含水率的新方法的尝试,证明地面基础试验所建立的经验方程与遥感数据相结合能监测区域不同土壤剖面的土壤含水率。

3) 本研究中,在用裂窗算法反演邯郸地区山区和丘陵地带的地表温度时,如能将数字高程模型(DEM)引入裂窗算法中,必能使反演山区和丘陵地带的地表温度的精度提高。

4) 在地面试验中分不同土壤质地分别建立冬小麦地表温度与不同土层的土壤含水率间的回归拟合经验方程,能使区域水平上利用裂窗法所反演的地表温度监测不同土层的土壤含水率的精度提高。

### [参考文献]

- [1] 刘 强. 地表组分温度反演方法及遥感像元的尺度结构 [D]. 中国科学院遥感应用研究所, 2002.
- [2] Becker F, Li Z L. Toward a local split window method over land surface[J]. Int J Re Sens, 1990, 1(3): 369-393.
- [3] Coll C, Caselles C, Sobrino J A, et al. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(1): 105-122.
- [4] Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1996, 34(4): 892-905.
- [5] Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 advanced very high resolution radiometer[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89: 7231-7237.
- [6] Coll C, Caselles V. A split-window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: Validation and algorithm comparison [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 697-713.
- [7] Kerr Y H, Lagouarde J P, Imbernon, J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use

- of an improved split window algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41: 197– 209.
- [8] Ottle C, Vidal-Madjar D. Estimation of land surface temperature with NOAA9 data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 40: 27– 41.
- [9] Prata A J, Platt C M R. Land surface temperature measurements from the AVHRR [A]. *Proceedings of the 5th AVHRR Data Users' Meeting* [C]. 1991, 24 – 28 June, 433– 438.
- [10] Vidal A. Atmospheric and emissivity correction of land surface temperature measured from satellite using ground measurements or satellite data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12( 12): 2449– 2460.
- [11] Ulivieri C, Castronuovo M M, Francioni R, et al. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites [J]. *Advances in Space-Research*, 1994, 14( 3): 59– 65.
- [12] 张仁华. 实验遥感模型及地面基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 83– 86.
- [13] 袁国富, 唐登银, 罗毅, 等. 给予冠层温度的作物缺水研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2001, 16( 1): 49– 54.
- [14] 申广荣, 田国良. 基于 GIS 的黄淮海平原旱灾遥感监测研究——作物缺水指数模型的实现 [J]. *生态学报*, 2000, 20( 2): 224– 228.
- [15] 裴浩, 敖艳青. 极轨气象卫星监测土壤干旱方法的研究 [J]. *中国草地*, 1996, 5: 40– 45.
- [16] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究 [J]. *遥感学报*, 1997, 1( 1): 24– 32.
- [17] 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, 26( 5): 412– 418.
- [18] 蔡焕杰, 熊运章, 李培德. 遥感红外温度估算农田土壤水分状况研究 [J]. *西北农业大学学报*, 1994, 22( 1): 113– 118.
- [19] 陈怀亮, 毛留喜, 冯定原. 遥感监测土壤水分的理论、方法及研究进展 [J]. *遥感技术与应用*, 1999, 14( 2): 55– 65.
- [20] 陆家驹, 张和平. 应用遥感技术连续监测地表土壤含水量 [J]. *水科学进展*, 1997, 8( 3): 281– 287.
- [21] 陈怀亮, 冯定原, 皱春辉, 等. 用遥感资料估算深层土壤水分的方法和模型 [J]. *应用气象学报*, 1999, 10( 2): 232– 237.
- [22] 张仁华, 苏红波, 李召良, 等. 地表受光面和阴影温差的潜在信息及遥感土壤水分的新途径 [J]. *中国科学( E 辑)*, 2000, 30( 增刊): 45– 53.
- [23] 张世熔. 基于 GIS 的区域水氮行为模拟与管理分析 [D]. 北京: 中国农业大学, 2002.
- [24] 欧阳进良. 农用土地持续利用机制及其农户生产行为研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2001.
- [25] 杨义群. 抽样调查与抽样检查: 理论、方法与应用 [M]. 北京: 学苑出版社, 1993.
- [26] 熊顺贵. 基础土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 132– 134.

## Selecting split-window algorithm for retrieving canopy surface temperature of winter wheat and monitoring soil water content

Liu Yun<sup>1,2</sup>, Yu Zhenrong<sup>1</sup>, Sun Danfeng<sup>1</sup>, Hou Shiquan<sup>1</sup>

(1. College of Recourse and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. Department of Landscape Architecture, Beijing Agriculture College, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Two thermal channels of NOAA can be used to retrieve land surface temperature, which can be used to monitor soil water content. Nine kinds of split-window algorithms were used to retrieve surface temperature of Handan during the winter wheat growing stage in 2002, and the results were validated by ground experiment. It indicates that UL92 method is the best one for land surface temperature retrieval in plain area of Handan with less average error and standard error. For the mountainous areas and highland, if digital elevation model was combined, split-window algorithm could retrieve land surface temperature more precisely. Based on the field experiment, functions between surface temperature of winter wheat and soil water content were established. The functions can be used along with UL92 method to monitor soil water content of different soil layers. That was a new method of using thermal remote sensing to monitor regional sectional soil water content. It was concluded that regional sectional water soil content can be monitored by combining the experiment function with remote sensing data.

**Key words:** split-window algorithm; canopy surface temperature; soil water content; winter wheat