

冬小麦田午时冠层温度与气温和地温的关系*

段永红 李本纲 陶澍

(北京大学环境学院,北京 100871)

摘 要

基于野外实测数据,分晴日、阴日及不区分阴晴3种情况,研究了湿润与较干冬小麦田午时冠层温度、气温和地温间的定量关系。结果表明:湿润麦田晴日使用气温预测冠温效果最好,基于最终模型估算冠温的平均误差仅 1.03°C ,标准差为 1.26°C 。较干麦田晴日与阴日用地温估算冠温效果最佳,基于最终模型估算冠温的平均误差分别为 $1.64,1.54^{\circ}\text{C}$;其估算冠温的标准差分别为 $2.05,1.89^{\circ}\text{C}$ 。用本文统计建模法预测结果的误差低于目前用NOAA影像反演冠温时 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 的均方根误差。研究结果也说明使用气温和地温预测麦田冠温是切实可行的。这就为冠温数据的获取提供了廉价有效的新方法;同时也使利用遥感影像与地面气象站常规观测资料相结合的方法,在较大的区域范围内进行冬小麦需水预测成为可能。

关键词:小麦 冠层温度 气温 地温

引 言

作物冠层温度(简称“冠温”)与气温的差异可用作预测作物需水与指示作物干旱的重要指标^[1~4]。Hurtado等也曾尝试使用地温代替冠温进行作物需水的预测^[5]。目前,利用气象卫星过境所获午时地面热红外数字图像反演作物冠温,并结合卫星(如Landsat)遥感获得的作物种植面积、种植结构和叶面指数,从而预测作物需水,已经成为农业需水研究中的重要手段^[6,7]。无论用卫星反演冠温所必须进行的繁琐的地面同步定标,还是直接测定冠温,二者都需用较贵重的红外测温仪;为进行大范围作物需水预测与水分状况监测而大量使用它,目前尚有困难。

另一方面,用NOAA影像反演地表温度晴天才能取得较好的效果,且预测陆地表面植物冠层温度的均方根误差高达 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ^[8];有报道用TM6波段影像反演地面温度,在参数估计有适度误差时,反演精度可达 1.1°C ^[9];然而,TM影像价格较高,时间分辨率低,且受天气状况影响,重复获得同一地区高质量影像的时间间隔就更长,难以满足实时估计作物需水的要求。相比之下利用常规方法测定气温与地温却较容易且廉价,而且普通气象站也都有其长期观测记录,如能利用此丰富的资料,再结合各地农业气象站和典型地段试验获取的某作物特定天气状况和发育阶段冠温与气温和地温间的定量关系,就可以在大范围内进行作物水分状况和需水预测,还可反推历史时期作物水分状况的波动情

* 国家自然科学基金(40031010,40024101)资助。

2002-02-21收到,2002-04-25收到修改稿。

况。此外,由于地面植被层温度、气温和地温的变化本质上都源于太阳辐射的季节与日变化,它们之间也必然存在某种内在的联系。本文的目的就是利用有关试验资料,探求 3 种温度间的数量关系,以实现用廉价的成本达到大面积作物需水宏观预测与水资源合理利用的目的。

1 研究方法

1.1 数据来源与选择

从有关文献中收集到 1985 年 3 月下旬至 6 月中旬,处于春季分蘖末期、起生期、拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、灌浆期和成熟期各生长发育期的北京冬小麦田午时的冠温、气温(在麦田距地表 2 m 高处用百叶箱测得)和地温(指“试验麦田土表温度,用玻璃地面温度表观测”)的 222 个成对实测数据^[10]。冬小麦冠温定义为小麦作物层不同高度叶和茎表面温度的平均值。冠温的测定使用了日本松下公司生产的 ER-2008 型红外测温仪;其透镜响应波长 8~10 μm ,温度测量范围 -30 $^{\circ}\text{C}$ ~+300 $^{\circ}\text{C}$,在 -10 $^{\circ}\text{C}$ ~+150 $^{\circ}\text{C}$ 间分辨率为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。在观测小麦冠层温度时,红外测温仪以 45°的俯角指向冠层扫描一圈,然后取其平均值作为冠温。

本研究在北京大屯农业生态试验站进行,小麦品种为丰抗 2 号。冬小麦试验田分湿润麦田与较干麦田两大类,其土壤均为壤质褐潮土,田间持水量约为 23%。试验期间,湿润麦田土壤湿度范围保持在 17%~22%间,水分充足,小麦植株稠密,长势良好;较干麦田土壤湿度范围在 14%~19%间,植株稀疏,长势不好。考虑到天气状况的影响,进一步将每类麦田的温度资料划分为晴日、阴日及阴日或晴日(表中记为“阴或晴”,即不区分阴日与晴日,将二者的数据合在一起)3 种情况进行统计,分别讨论冠温与气温和地温间的共变关系。文中,晴日指测定时日面晴朗无云;阴日包括日面有云,但地上有日影;日面有云,可见日面轮廓,但地上无日影及见不到太阳轮廓的阴天 3 种情况。本文冠温、气温和地温依次分别用 T_L 、 T_a 和 T_s 表示。

研究时将湿润与较干麦田在晴日、阴日及阴日或晴日下的数据都通过随机抽样分为训练组(用于建立预测的初步模型)和检验组(用于初步模型的检验),一般检验组样本量为训练组的 1/3 左右。由于 14:30(北京时,下同)左右测定数据有限,本文首先通过对文献^[10]中 3 种温度日变化的特征的分析,发现干湿麦田在 3 种天气状况下,在午时 13:40,14:40 和 15:40 左右的观察时段,3 种温度测定值各自都呈显著正相关,且多数都呈极显著正相关水平。故本文将此 3 个时段的观察数据合在一起进行预测。

1.2 研究方案

为探求 T_L 与 T_a 和 T_s 间的关系,首先用湿润麦田和较干麦田的全部数据分别进行三者间初步的回归分析,发现二元回归分析因 T_a 与 T_s 间存在共线性问题,预测效果较一元回归差;且发现基于现有数据,湿润麦田用气温,而较干麦田用地温预测才能达到最佳效果。故本文仅探讨 3 种天气状况下湿润麦田 T_L 与 T_a 的关系,及较干麦田 T_L 与 T_s 的关系。

研究步骤:(1)据训练组数据,用一元线性和曲线回归方法,建立上述 6 种地类与天气

组合情况下的多种预测模型,并分析拟合结果,从中选出6种情况下各自最佳的预测冠温的初步模型;(2)用检验组数据验证初步模型;(3)在初步模型合理性得以验证的情况下,利用6种情况下各自全部的实测数据建立预测的最终模型,并分析其预测冠温的可行性。本研究用 Excel 建立温度数据库,用 Spss10.0 实现各回归模型的计算。

2 结果与讨论

2.1 T_L 预测模型的建立

表1列出了根据训练组的实测数据,进行一元线性与多种非线性回归分析,得到的数据点与回归曲线拟合最佳的预测方程,即初步模型;其反映拟合优劣的检验统计量 F 值都达到了极显著水平,故略去。

表1 训练组冠温预测的初步模型

温度单位: $^{\circ}\text{C}$

处理	回归方程	样本量	可决系数 (R^2)	平均误差	误差算术均值 \pm 标准差	误差绝对值小于等于 2°C 样本百分率 (%)	平均误差	误差绝对值大于 3°C 样本的概率 (%)
湿润麦田	晴日 $T_L = 13.8778(1.0261) T_a$	19	0.8753	0.83	0.02 ± 1.00	94.7	0.76	0
	阴日 $T_L = 9.6658(1.0407) T_a$	18	0.8275	1.37	0.06 ± 1.80	72.2	0.75	16.7
较干麦田	阴或晴 $T_L = 11.4209(1.0338) T_a$	37	0.8068	1.22	0.05 ± 1.56	83.8	0.87	5.4
	晴日 $T_L = e^{(4.2158 - 27.5866/T_g)}$	20	0.9260	1.68	0.05 ± 2.16	70	0.95	20.0
较干麦田	阴日 $T_L = -5.6435 + 1.3344 T_g - 0.0003 T_g^3$	19	0.7687	1.64	-0.003 ± 2.00	73.7	1.11	15.8
	阴或晴 $T_L = e^{(4.0613 - 22.9592/T_g)}$	39	0.8275	2.04	0.11 ± 2.73	66.7	1.11	20.5

由表1可见,上述6种情况下反映回归方程对因变量变化解释程度的可决系数 (R^2) 都较高,其中有4种情况冠温预测误差的标准差 (RMS) 在 2°C 以内,其冠温预测平均误差也都在 2°C 以内。与较干麦田相比,湿润麦田冠温预测误差的标准差、平均误差及误差绝对值大于 3°C 的极端值出现的概率都较小,预测效果较好;其中又以湿润麦田晴日预测效果最好,平均误差仅 0.83°C ,估算冠温的 RMS 仅 1°C ,且误差绝对值小于等于 2°C 的样本占到 95% 左右,预测精度在 1°C 以内的还占到 68.3%,达到了非常好的预测效果。图1和图2正反映出此情况。较干麦田预测效果明显劣于湿润麦田,且其阴天预测效果稍好于晴日,这可能是由于湿润麦田含水量高,使得各种温度的变化更为和缓,阴天时较干麦田太阳辐射的变化也较和缓所至。图1~4表示出晴日湿润麦田和较干麦田的实测

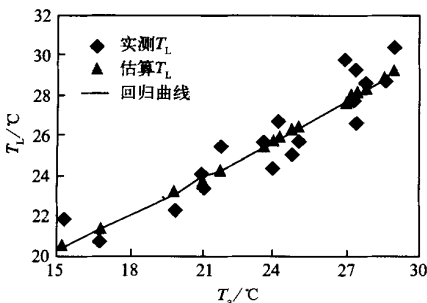


图1 晴日湿润麦田训练组 T_L 计算值与实测值随 T_a 的变化趋势

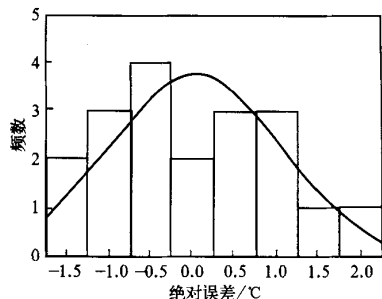


图2 晴日湿润麦田训练组估算 T_L 的误差分布

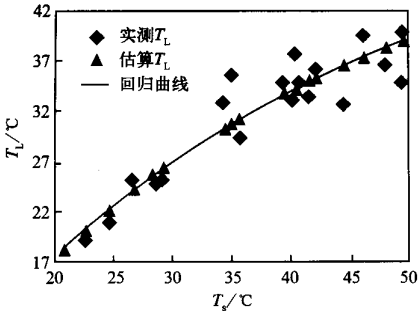


图3 晴日较干麦田训练组 T_L 计算
值与实测值随 T_s 的变化趋势

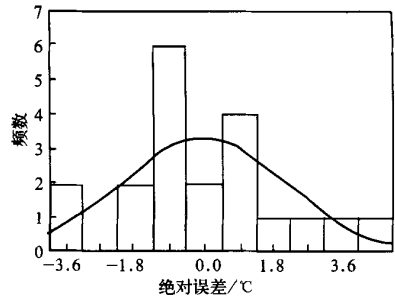


图4 晴日较干麦田训练组
估算 T_L 的误差分布

冠温与预测冠温分别随气温、地温的变化趋势及其误差的频数分布。综上所述,仅从训练组数据看,表1中除不区分阴晴的较干麦田预测误差偏高外,其余5个方程都较好地表述了 T_L 与 T_a 和 T_s 的定量关系;且误差算术均值都接近0,说明预测无系统偏差。

在计算中也发现误差较大时冠层温度与气温差一般也较大,这种情况可据平时在实验时观察到的各种不同水分状况麦田具体情况,采用一定的可疑值去除方法,对极端值加以排除,这样整体的预测精度还会有所提高。

2.2 模型验证

为进一步验证各预测方程的可靠性,使用检验组数据,计算了上述6种情况下的冠温及其统计参数(见表2);图5、6还分别给出用检验组数据计算的湿润与较干麦田晴日冠

表2 检验组检验效果 温度单位: °C

处理	样本量	平均误差	误差算术均值 ± 标准差	误差绝对值小于等于 2 °C 样本		误差绝对值大于 3 °C 样本的概率(%)	
				百分率(%)	平均误差		
湿润麦田	晴日	10	1.43	-0.16 ± 1.74	70.0	0.98	0
	阴日	8	2.20	0.21 ± 3.05	37.5	0.34	37.5
	阴或晴	18	1.88	0.09 ± 2.45	55.6	0.85	22.2
较干麦田	晴日	9	1.65	1.05 ± 1.70	66.7	1.09	11.1
	阴日	8	1.74	1.14 ± 2.08	62.5	0.81	12.5
	阴或晴	17	1.91	0.62 ± 2.36	64.7	1.09	17.6

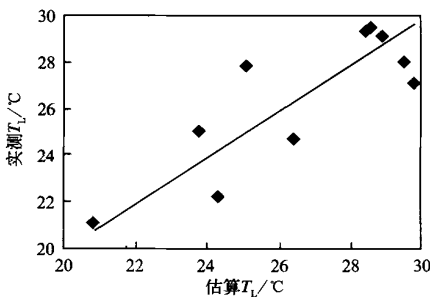


图5 晴日湿润麦田检验组估算和
实测 T_L 的比较

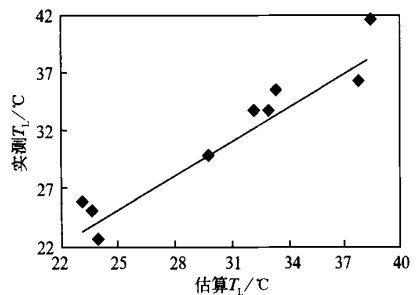


图6 晴日较干麦田检验组估算和
实测 T_L 的比较

温预测值与实测值的关系。可见,湿润麦田晴日的预测效果仍为最佳,而阴天和不区分阴晴时预测效果明显下降,表现为平均误差和误差绝对值大于 3 ℃ 极端值出现的可能性偏高。较干麦田,晴日的检验结果最好,平均误差为 1.65 ℃。检验结果说明,湿润麦田晴日,较干麦田晴日与阴日预测模型的效果较稳定,3 种情况下估算模型基本可靠;另外 3 种情况,效果不甚理想。

2.3 最终模型的确定

在验证由训练组数据建立的初步模型可靠性的基础上,为充分利用现有数据信息,提高模型的预测精度,将训练组和检验组数据合在一起,重新建立并从中选出 6 种情况下各自基于全部数据的最佳预测模型,也即最终模型,列于表 3。可见,各情况下的最终模型类型都未变,只是初步模型的拟合参数稍有变化,表明各情况下冠温与气温或冠温与地温间存在一定的内在的必然联系;且误差算术均值都接近 0,说明这些预测都无系统偏差。

由表 3 与图 7~10 可见最终模型的估算效果,晴日湿润麦田最好,估算冠温的平均误差仅 1.03 ℃,RMS 也仅 1.26 ℃;误差绝对值小于 2 ℃ 的概率达 86.2%,其平均误差仅 0.82 ℃。湿润麦田阴天的预测效果最差。与检验组不同,但与训练组一致,较干麦田阴天预测效果略好于晴日预测效果;而湿润麦田仍以晴日预测效果最佳。不区分阴天与晴天的预测效果,虽然在湿润麦田好于阴天,但此时较干麦田可能因原阴日与晴日土壤水分运移过程与温度变化差别较大,模型类型原本就不同,导致其最终模型预测精度降低。

表 3 反映的 6 种情况预测结果优劣比较与表 1 基本一致,但综合考虑检验组检验结果,基于本文有限的数据和实际需要,推荐采用晴日湿润麦田和较干麦田模型;在实际预测中,如需要,不区分阴晴的湿润麦田模型和阴天较干麦田的模型也可考虑采用,虽然,阴

表 3 基于全部数据建立的最终模型及其参数 温度单位: ℃

处理	回归方程	样本量	可决系数 (R ²)	平均误差	误差算术均值 ± 标准差	误差绝对值小于等于 2 ℃ 样本百分率 (%)	平均误差	误差绝对值大于 3 ℃ 样本的概率 (%)
湿润麦田 晴日	$T_L = 14.3764(1.0245) T_a$	29	0.8096	1.03	0.03 ± 1.26	86.2	0.82	0
湿润麦田 阴日	$T_L = 10.4816(1.0371) T_a$	26	0.7264	1.62	0.10 ± 2.19	65.4	0.72	19.2
湿润麦田 阴或晴	$T_L = 12.1157(1.0311) T_a$	55	0.7360	1.41	0.07 ± 1.85	76.4	0.86	12.7
较干麦田 晴日	$T_L = e^{(4.2204 - 27.3910/T_s)}$	29	0.9211	1.64	0.05 ± 2.05	72.4	1.05	13.8
较干麦田 阴日	$T_L = -6.7783 + 1.3818 T_s - 0.0003 T_s^3$	27	0.8089	1.54	0.01 ± 1.89	74.1	1.01	11.1
较干麦田 阴或晴	$T_L = e^{(4.0780 - 23.3336/T_s)}$	56	0.8389	1.97	0.11 ± 2.61	69.6	1.13	17.9

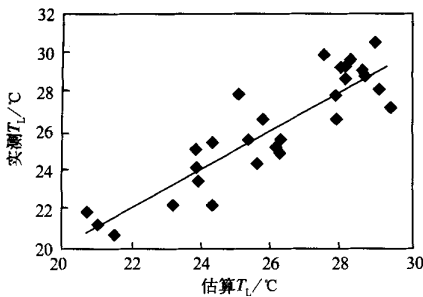


图 7 晴日湿润麦田基于全部数据的模型估算与实测 T_L 的比较

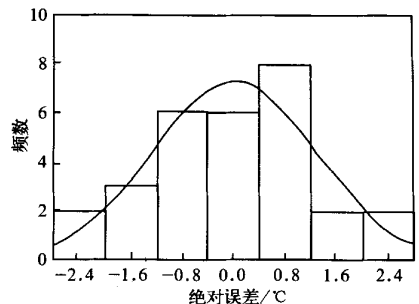


图 8 晴日湿润麦田最终模型估算 T_L 的误差分布

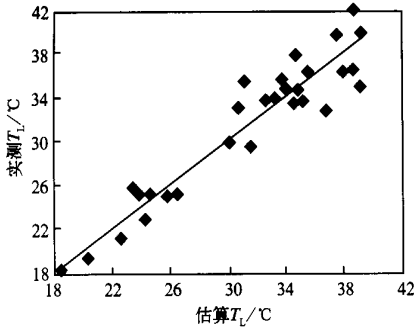


图9 晴日较干麦田基于全部数据的模型估算与实测 T_L 的比较

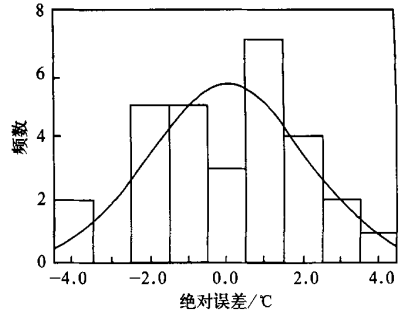


图10 晴日较干麦田最终模型估算 T_L 的误差分布

天反映的作物水分丰缺状况可能与实际剧烈程度有出入。

综合训练组、检验组和全部数据预测的效果可见,晴日湿润麦田预测模型的预测效果一贯表现最好;而进行区域作物需水的宏观估算也正好可以此灌溉良好晴日湿润麦田为基础进行。

3 结论与讨论

基于本文收集全部实测数据所进行的分析表明,湿润麦田晴日可以使用回归模型法用气温来预测冠温,它估算的平均误差仅 $1.03\text{ }^{\circ}\text{C}$,估算冠温的 RMS 为 $1.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑到目前卫星反演地表温度的精度和数据本身的误差,本文所建用于晴日湿润麦田的模型已达到了较高的估算精度。

湿润麦田阴天和不区分阴晴 2 种情况虽然在初步模型与最终模型中表现尚可,但在用检验组数据检验时,预测效果表现不佳,需作进一步研究。

较干麦田阴天与晴天的预测效果在训练组、检验组和最终模型中虽互有优劣,但预测效果较接近。二者基于最终模型估算冠温的平均误差分别为 $1.54, 1.64\text{ }^{\circ}\text{C}$, RMS 分别为 $1.89, 2.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。用二者估算冠温,其误差绝对值小于等于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的数据都约占 70% 左右。较干麦田不分阴晴的估算效果明显下降,不宜使用。

本试验进行期间(1985-03-30~6-17),麦田小麦从春季分蘖末期到抽穗开花期逐渐长高,叶面积指数逐渐增大;之后至成熟期,叶面积指数又有一定回落。因单一的各个发育阶段的样本量较少,不足以对模型进行验证,故本文在探讨 3 种温度间的关系时,将前述全部发育阶段的资料放在一起进行研究,并没有考虑小麦高度变化的影响,但冠温与气温和地温间的回归关系尚较显著,可作为上述大约 80 天左右各发育期总的综合模型。

参考文献

- 董振国. 农田作物层温度初步研究——以冬小麦、夏玉米为例. 生态学报, 1984, 4(2): 141~148.
- 蔡焕杰, 张振华, 柴红敏. 冠层温度定量诊断覆膜作物水分状况试验研究. 灌溉排水, 2001, 20(1): 1~4.
- Jackson R D, Reginato R J, Idso S B. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements.

- Water Resources Research*, 1977, 13(3): 651 ~ 656.
- 4 董振国. 作物层温度与土壤水分的关系. 科学通报, 1986, 31(8): 608 ~ 610.
- 5 Hurtado E, Artigao M M, Caselles V. Estimating maize (*Zea mays*) evapotranspiration from NOAA AVHRR thermal data in the Albacete area, Spain. *Int. J. Remote Sens.* 1994, 15(10): 2023 ~ 2037.
- 6 Idso S B, Jackson R D, Reginato R J. Estimating evaporation: a technique adaptable to remote sensing. *Science*, 1975, 189: 991 ~ 992.
- 7 Seguin B, Itier B. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *Int. J. Remote Sens.* 1983, 4(2): 371 ~ 383.
- 8 Rao P K, 等编. 气象卫星——系统、资料及其在环境中的应用. 许健民, 等译. 北京: 气象出版社, 1994. 450 ~ 452.
- 9 覃志豪, Zhang M, Karnieli A, et al. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法. 地理学报, 2001, 56(4): 456 ~ 465.
- 10 中国科学院地理研究所编辑. 中国地理基础数据, 野外定位试验站卷(第 2 集), 辐射观测数据集. 北京: 科学出版社, 1989. 43 ~ 66.

RELATIONSHIPS AMONG WHEAT SURFACE TEMPERATURE, AIR TEMPERATURE AND SURFACE GROUND TEMPERATURE AT NOON IN THE WHEAT FIELDS

Duan Yonghong Li Bengang Tao Shu

(School of Environmental Science, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

The quantitative relationships among wheat surface temperature (T_L), air temperature (T_a) and soil-surface temperature (T_s) at noon in the wet and dry wheat fields were investigated based on field data. The data collected was divided into a training set and a validation set and three types of weather were categorized as clean, cloud and both. The results show that for the wet wheat field in clear days, the best results could be achieved using T_a to estimate T_L ; based on the final model, the average estimated error is 1.03 °C and the RMS of estimated T_L is 1.26 °C. For the dry wheat field in the clear or cloud days, T_L could be well estimated with T_s . The average estimated errors of the final model are 1.64 and 1.54 °C respectively and the RMS of estimated T_L are 2.05 and 1.89 °C respectively. The RMS errors achieved are generally lower than those derived from NOAA digital images (2 - 3 °C). The results of this research show that it is feasible to forecast wheat surface temperature with air temperature and soil-surface temperature, too. It provides a new cheap effective means to get wheat surface temperature; at the same time, it is also possible to combine satellite image data with measured data from ground weather stations to predict the water requirement of winter wheat over a larger region.

Key words: Wheat Wheat surface temperature Air temperature Soil-surface temperature