

冬小麦不同生育期最小冠层阻力的估算

袁国富¹, 罗毅¹, 唐登银¹, 于强¹, 於²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 安徽农业大学农学系, 合肥 230036)

摘要:作物最小冠层阻力是研究农田蒸发和作物缺水的一个重要参数。使用作物的冠层红外温度信息, 将作物在充分灌溉情况下冠层温度与空气温度之差与空气的饱和水汽压差的经验关系同其理论解释相结合, 通过实验数据, 估算了在华北平原气候条件下的冬小麦(*Triticum aestivum* L.) 的平均最小冠层阻力, 为基于这种阻力的应用提供基础。研究表明冬小麦最小冠层阻力随发育期而不同, 并且抽穗前后差异明显, 给出了冬小麦不同生育阶段的平均最小冠层阻力。

关键词:冬小麦(*Triticum aestivum* L.); 冠层阻力; 最小冠层阻力

Estimating Minimum Canopy Resistances of Winter Wheat at Different Development Stages

YUAN Guo-Fu¹, LUO Yi¹, TANG Deng-Yin¹, YU Qiang¹, YU Li² (1. *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101*, 2. *Anhui Agricultural University, Hefei 230036*). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 930~934.

Abstract: Crop minimum canopy resistance is the crop canopy bulk stomatal resistance to vapor transfer at potential transpiration. It is an important parameter for studying energy balance and vapor transfer in agricultural ecosystem. In practice, crop canopy is generally treated as a complete homogeneous canopy with the properties of a single "big leaf". The minimum canopy resistance can therefore be estimated indirectly through simple spatial scaling from minimum leaf stomatal resistance, or via the inversion of energy balance model. In current paper, we used field measurements and the method presented by O'Toole^[4] to estimate the mean minimum canopy resistances of Northern China winter wheat at four different development stages. Our analyses gave different estimates for different development stages. The mean minimum canopy resistances we obtained for Northern China winter wheat under clear sky condition will find wide applications in calculating canopy-surface-temperature-based CWSI and some other water-transfer-related parameters.

The application of O'Toole's method involves combining the empirical relationship between canopy - air temperature difference and air vapor pressure deficit with its theoretical explanation, and the information of crop canopy temperature. The mean minimum canopy resistance during a certain period can be expressed as:

$$\bar{r}_{cp} = \frac{\rho C_p A}{(R_n - G)} \left(\frac{1}{B\gamma} + \frac{1}{1 + B\Delta} \right)$$

where A (intercept) and B (slope) are the linear regression coefficients of canopy-air temperature difference of the potential transpiring crop under air vapor pressure deficit, R_n is the net radiative flux density ($W \cdot m^{-2}$), G is the soil heat flux density ($W \cdot m^{-2}$), ρC_p is the volume heat capacity of air ($JK^{-1} m^{-3}$), γ is the psychrometric constant ($Pa \cdot C^{-1}$), Δ is the slope of the saturated vapor pressure vs. temperature curve ($Pa \cdot C^{-1}$), and r_{cp} is the minimum canopy resistance ($s \cdot m^{-1}$).

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(49890330)

收稿日期: 2001-02-04

作者简介: 袁国富(1971~), 男, 湖北洪湖人, 博士生。主要从事农田生态和农业气象研究。E-mail: yuangf@ig.nrr.ac.cn

All experimental measurements were collected from a well-irrigated field plot between about 0900 and 1500 h Beijing time when clear sky condition prevailed. The field soil water volume content was maintained above 80% of field capacity to ensure that the crop was fully irrigated and transpiring at its potential rates under this condition. Mean R_n and Δ were calculated from the measurements collected during the diurnal experimental period at the same plot.

Our analyses show that the empirical relationships between canopy - air temperature difference of the potentially transpiring winter wheat and air vapor pressure deficit are different at different development stages. Thus, the estimation gives different mean minimum canopy resistances for different development stages of winter wheat. The minimum canopy resistances of winter wheat are respectively 13.01, 18.03, 16.85 and 23.22 $s\ m^{-1}$ from four different growing stages; from reviving to elongation, from elongation to heading, from heading to filling, and from filling to mature. The calculated canopy - air temperature differences using the estimated r_{cp} were comparable with the measured canopy - air temperature differences under well-watered conditions for winter wheat.

Key words: winter wheat (*Triticum aestivum* L.); canopy resistance; minimum canopy resistance

文章编号:1000-0933(2002)06-0930-05 中图分类号:S181, S512.1 文献标识码:A

植被的最小冠层阻力是指植被处于潜在蒸发状态下的阻力。尽管对潜在蒸发的定义在学术界存在差异^[1],但是大部分研究仍然认为植物处于潜在蒸发状态时对水蒸气的输送是存在一个最小阻力的。获取作物的最小冠层阻力对于研究农田蒸发和作物缺水等都有重要的意义。

与叶片气孔阻力不同,作物的冠层阻力难以用仪器直接测得,一般采用间接方法推导,目前使用的方法主要有 3 种,一种是根据能量平衡原理,使用 Penman-Monteith 公式反推^[2],一种则使用叶片气孔阻力结合叶面积指数空间垂直分布计算得到^[3],还有一种通过结合冠层温度和能量平衡原理进行估算^[4]。这 3 种方法各有特点,第一种方法可以使用麦田瞬时能量平衡数据估算冠层阻力,这种方法可以分析冠层阻力的日变化特征和季节变化特征,但所需变量较多,第二种方法简单易用,应用广泛,但叶片气孔阻力不易获得且变化复杂,第三种方法则仅用于估算作物的平均最小冠层阻力,通过给出一个唯一值近似地作为作物的最小冠层阻力。

作物的最小冠层阻力是研究农田蒸发和作物缺水的重要参数,在许多方面应用广泛。在土壤充分供水的条件下,某种作物在某一时刻的最小冠层阻力主要受到空气湿度(影响蒸发势)和光照条件(影响光合作用从而影响气孔的开闭程度)的影响。在不同发育阶段,则还受到作物生理机制(主要是气孔大小、叶片形状和分布等)的制约,因此可以近似地认为,在某一发育阶段同一气候区内典型天气条件下白昼作物的最小冠层阻力基本不变。本研究的目的是:使用冠层红外温度信息与能量平衡原理相结合的方法,估算我国华北平原冬小麦(*Triticum aestivum* L.)在不同发育阶段最小冠层阻力,为基于这种阻力的应用提供基础。

1 方法和实验设计

用作物表面温度信息估算作物的最小冠层阻力是基于 Idso 提出的一个重要的经验关系:作物在潜在蒸发状态下冠层温度与空气温度的差(简称冠气温差)与空气的饱和水汽压差成线性关系^[5],即:

$$(T_c - T_a)_{ll} = A + B \cdot VPD \quad (1)$$

式中, T_c 指作物冠层温度($^{\circ}C$), T_a 指空气温度($^{\circ}C$), $(T_c - T_a)_{ll}$ 是作物在潜在蒸发状态下的冠气温差,是冠气温差的下限, A, B 分别为线性回归系数, VPD 为空气的饱和水汽压差(hPa)。

方程(1)称冠气温差的下限方程的经验表达式,根据冠层能量平衡单层阻力模型,作物冠气温差下限方程的理论表达式为^[6]:

$$(T_c - T_a)_{ll} = \frac{r_a(R_n) - G}{\rho C_p} \cdot \frac{\gamma(1 + r_{cp}/r_a)}{\Delta + \gamma(1 + r_{cp}/r_a)} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma(1 + r_{cp}/r_a)} \quad (2)$$

这里, R_n 为净辐射通量密度($W \cdot m^{-2}$), G 为土壤热通量密度($W \cdot m^{-2}$), ρ 为空气密度($kg \cdot m^{-3}$), C_p 为

空气定压比热($J \cdot (kg \cdot C)^{-1}$), γ 为干湿表常数($hPa \cdot C^{-1}$), r_a 为空气动力学阻力($s \cdot m^{-1}$), r_{cp} 为潜在蒸发条件下的冠层阻力($s \cdot m^{-1}$), 即最小冠层阻力, Δ 为饱和水汽压随温度变化的斜率($hPa \cdot C^{-1}$), 其他符号同上。

方程(2)是对方程(1)经验关系的理论解释, 比较方程(1)、(2)有:

$$A = \frac{r_a(R_n - G)}{\rho C_p} \cdot \frac{\gamma(1 + r_{cp}/r_a)}{\Delta + \gamma(1 + r_{cp}/r_a)} \quad (3)$$

$$B = \frac{-1}{\Delta + \gamma(1 + r_{cp}/r_a)} \quad (4)$$

从方程(3)和(4)可以看到, 经验关系的成立其实是将特定时刻净辐射、土壤热通量、空气温度、风速和作物的冠层阻力视为常定数值的结果, 在实际的田间条件下这种情况是不存在的。事实上, 作物在潜在蒸发条件下冠气温差随空气的饱和水汽压差的变化离散分布于一个狭长的区域之内^[4]。但是在晴朗天气条件下, 在 9:00~15:00 之间的时段内, 净辐射和气温变化较小, 这时冠气温差的变化更多地受饱和水汽压的制约, 它们之间的线性关系就会更加明显; 如果在获取冠气温差与空气的饱和水汽压差之间线性关系的观测时段内, 使用平均的净辐射和空气温度, 就可以得到观测时段的平均冠层最小阻力。联立方程(3)、(4)有:

$$\bar{r}_{cp} = -\frac{\rho C_p A}{(R_n - G)} \left(\frac{1}{B\gamma} + \frac{1}{B\Delta} \right) \quad (5)$$

通过实验, 用回归方法确定 A 、 B 值后, 解方程(5)就可以得到作物的最小冠层阻力。对于方程(5)为什么能代表作物的最小冠层阻力作如下解释: 首先这种方法基于冠气温差与空气饱和水汽压差的经验关系, 这是客观存在的, 在上面所说的情况下是合理的, Idso 曾建立多种作物的冠气温差下限方程的经验关系^[7], 其次, 作物的最小冠层阻力在晴朗天气条件下的白昼是一个变化幅度较小的值, 获取的平均冠层最小阻力能够代表作物的最小冠层阻力, 同时在本文后面对这一阻力值作进一步的验证中亦能说明其合理性。

实验于 2000 年 3 月至 6 月在中国科学院禹城综合试验站进行, 试验站位于华北平原东缘, 属典型的暖温带气候, 是我国主要的小麦产区, 具有代表性。实验地土壤为壤土, 供试的小麦品种为农大 4564, 土壤水分含量始终保持在田间持水量的 80% 以上, 在这种情况下可以近似地认为作物处在潜在蒸发状态, 土壤水分由中子水分仪 5d 观测一次, 在冠层上方 0.5m 处分别用 CN-11 型净辐射表观测净辐射, 温湿度用阿斯曼仪观测, 土壤表层埋设土壤热通量板两个, 取平均值作为土壤热通量, 风速取自架设于实验地附近麦田上方的自动气象站 2m 高处的观测数据, 冠层温度用手持式红外测温仪观测, 红外测温仪的比辐射率设为 0.98, 其观测视角为 8°, 观测时仪器与水平面成 45° 夹角, 以避免观测视野内裸露土壤, 观测在东北、东、东南、西南、西和西北六个方向上取数, 以尽量消除热红外辐射的双向反射造成的影响, 然后取平均, 观测前后用黑体源进行标定。观测选晴朗无云的天气进行, 从 9:00 至 15:00(北京时), 间隔 0.5h 或 1h 观测 1 次。

2 结果分析

选用冬小麦不同生育期典型的晴朗天气下的 3~4d 的数据分析冠气温差与空气饱和水汽压差的关系, 实验数据表明, 在充分供水条件下冬小麦的冠气温差与空气的饱和水汽压差之间表现出的线性经验关系在不同生育阶段各不一样, 图 1 显示了冬小麦在充分供水条件下不同生育期的冠气温差与 VPD 的关系, 其中抽穗至灌浆阶段和灌浆至成熟阶段冠气温差和饱和水汽压的关系基本相同, 但由于两个时期农田小气候状况有差异, 仍然将它们分别拟合曲线, 以反映不同生育阶段的冠层阻力。

通过回归分析得到了不同生育阶段的 A 、 B 值, 结合观测到的其他微气象变量, 计算出了冬小麦不同生育阶段的平均最小冠层阻力。表 1 给出了实验结果的主要数据, 其中平均的 Δ 值是按冠层温度与空气温度的平均温度确定的。

从表 1 可见, 冬小麦最小冠层阻力随发育期呈逐渐增大的趋势, 这可能是因为随着天气转暖, 气温升高导致冠层上方蒸发势加大; 另外最小冠层阻力在抽穗前后差异明显, 这与冬小麦在抽穗前后由主要

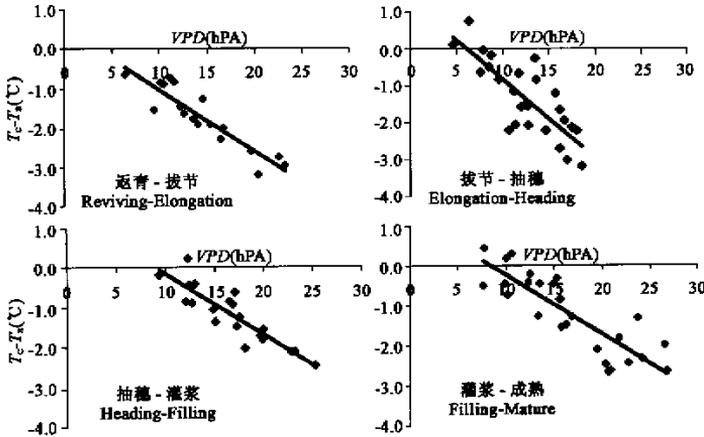


图1 充分灌水条件下冬小麦田不同生育阶段冠气温差($T_c - T_a$)与空气饱和水汽压差(VPD)的关系

Fig. 1 The relationships between ($T_c - T_a$) and VPD in different development stages of winter wheat under full irrigation in North China Plain

是营养生长转变为生殖生长的生理变化过程有关,随着生殖生长阶段茎叶营养物质向籽粒转移,叶片最大净光合速率下降^[8],与之相耦合的冠层阻力会随之升高;另外抽穗至成熟阶段冠层阻力呈略微下降趋势,这可能是由于叶面积指数下降使得冠层下部的叶片能接受更多的光照,从而整个冠层气孔开启面积加大,因而阻力减小。

表1 冬小麦不同生育阶段的冠气温差下限方程和最小冠层阻力

Table 1 The non-water-stressed baselines and minimum canopy resistances in different development stages of winter wheat in North China Plain

生育期	Mean ($R_n - G$) ($W \cdot m^{-2}$)	Mean Δ ($hPa \cdot C^{-1}$)	A (C)	B ($C \cdot h \cdot Pa^{-1}$)	R^2	Mean r_{cp} ($s \cdot m^{-1}$)
返青~拔节	411.34	1.37	0.52	-0.16	0.84**	13.01
拔节~抽穗	500.69	1.37	1.27	-0.21	0.64**	18.03
抽穗~灌浆	528.65	1.75	1.36	-0.15	0.79**	26.85
灌浆~成熟	580.17	1.79	1.25	-0.15	0.73**	23.22

**0.01 水平显著

为了进一步检验估算的作物最小冠层阻力的可行性,将冬小麦最小冠层阻力回代方程(2),判断预测的冠气温差与实测的冠气温差的吻合程度,其中空气动力学阻力按以下方程计算:

$$r_a = \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2 / k^2 u \quad (6)$$

其中, z 为参考高度(m),设为2m, d 为零平面位移(m),设为0.75h, h 为作物高度(m), z_0 为粗糙长度(m),设为0.13h, k 为 von Karman 常数, u 为参考高度的风速。当风速小于 $2m \cdot s^{-1}$ 时,计算出的 r_a 偏大,采用 Thom 和 Oliver 的半经验公式^[9]进行修正。

图2给出了预测的冠气温差与实测的冠气温差之间的关系,大部分都集中在1:1线附近 $\pm 0.7C$ 范围内,考虑到最小冠层阻力在白天有着一定的波动,以及观测上的误差,这一结果是完全可行的,说明所获得的冬小麦最小冠层阻力是合理的。

3 结论与讨论

本研究通过田间观测,估算了冬小麦不同生育阶段的平均最小冠层阻力,以代表在晴朗天气条件下华北平原冬小麦的最小冠层阻力,对于研究区域蒸发或作物缺水(如作物水分胁迫指数CWSI的计算),本研

究所得到的这一阻力值具有足够的精度,因而有较好的代表性。

Hatfield^[2]曾经根据能量平衡原理估算冬小麦的最小冠层阻力大约为 $20 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$,本研究获取的最小冠层阻力与其研究结果接近,但将冬小麦的最小冠层阻力估算更细化到不同生育阶段,是一个进展。

冠层阻力是一个变化十分复杂的变量,作物处在潜在蒸发时的冠层阻力亦会因冠层周围的微气象环境的变化以及作物生理的变化而变化,本研究得到的是冬小麦最小冠层阻力的平均值,可代表某段时间内某些典型天气条件下区域尺度最小冠层阻力的平均值,这一结果并不适合某些要求较精确微观尺度上进行研究时应用。

最小冠层阻力是作物的一个生理变量,反映了作物的水分消耗特征,不同作物其最小冠层阻力存在差异,与此同时,对于同一种作物,由于气孔阻力受到外界环境的影响,在气候特征差异明显的地区之间,最小冠层阻力亦会表现出不同,因此建议在与华北平原气候特征差异明显的地区应用本研究结果时,应对这一数值进行验证。同一作物的不同品种之间其最小冠层阻力亦可能存在差异,需要进一步的研究。

参考文献

- [1] Tang D Y(唐等银), Cheng W X(程维新), Hong J L(洪嘉琏). A review: Evaporation study in China. *Geographical Research* (in Chinese) (地理研究), 1984, **3**(3): 84~97.
- [2] Hatfield J L. Wheat canopy resistance determined by energy balance techniques. *Agronomy Journal*, 1985, **77**: 279~283.
- [3] Szeicz G and Long I F. Surface resistance of crop canopies. *Water Resource Research*, 1969, **5**: 622~633.
- [4] O'Toole J C and Real J G. Estimation of aerodynamic and crop resistances from canopy temperature. *Agronomy Journal*, 1986, **78**: 305~310.
- [5] Idso S B, Jackson R D, Pinter P J Jr, et al. Normalizing the stress degree day for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 1981, **24**: 45~55.
- [6] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 1981, **17**: 1133~1138.
- [7] Idso S B. Non-water-stressed baseline: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 1982, **27**: 59~70.
- [8] Lu P L(陆佩玲), Luo Y(罗毅), Liu J D(刘建栋), et al. Characteristic parameters of light response curves of photosynthesis of winter wheat in North China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*(in Chinese)(应用气象学报), 2000, **11**(2): 236~241.
- [9] Thom A S, Oliver H R. On penman's equation for estimating regional evaporation. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*, 1977, **103**: 345~357.

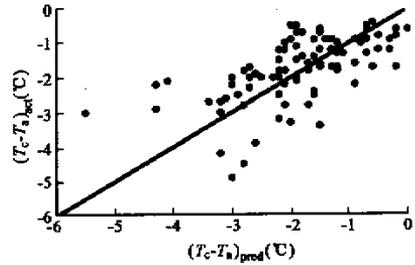


图2 预测的冠气温差 $((T_c-T_a)_{\text{pred}})$ 与实测的冠气温差 $((T_c-T_a)_{\text{act}})$ 的比较

Fig. 2 Comparison of predicted and actual canopy-air temperature difference