

玉米冠层反射率及净辐射的估算*

吕厚荃

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

于贵瑞 中山敬一

(日本千叶大学园艺学部)

提 要

在1994-1996年3年田间试验的基础上,根据玉米生长状况及其冠层特征,选取包括植株高度、平均叶面积密度、农田覆被率等植物特征量组成的植物参数——综合植被系数来描述玉米冠层状况,并以此为因子来估算玉米冠层的反射率和净辐射,取得了良好的结果。

关键词: 玉米冠层 综合植被系数 反射率 净辐射

引 言

农田辐射状况的模拟是大气与下垫面之间能量传输、作物生长模拟、农田蒸散等研究的重要环节,其特性直接受制于作物冠层结构。而冠层结构则是由植株在地面上的分布、叶片的空间分布及其大小和方向来决定的^[1]。因此,植株高度、叶面积指数和叶倾角常被用来描述作物冠层的几何特征。在一般研究中,忽略了作物高度,假定叶面积在水平方向为均匀分布,采用叶面积指数来描述植被状况。由于作物种类及种植方式的不同,导致叶面积空间分布的差异,对冠层内部及其总体辐射状况产生了不同影响。研究表明叶面积相同的作物群体,当叶倾角不同时,叶层所截获的光能不同^[2]。翁笃鸣等人根据多种作物叶面积与田间照度实测资料,建立了利用相对叶面积函数计算作物群体内光能分布的半经验模型^[3],对作物冠层内辐射分布的估算十分有效;但目前对各种农作物下垫面辐射状况差异的研究还为数不多。玉米作为行栽高秆作物,与小麦等作物相比,其叶片大,层次多,叶面积的垂直密度小,叶倾角分布差异大,水平分布均一性较差,冠层几何特征也更为复杂。许多研究集中在玉米单株或群体的几何构造上,而利用其冠层特性描述农田下垫面辐射特征的研究较少。本文试图利用农田实际观测资料,采用统计方法模拟作物的生长过程,以作物高度、叶面积指数、农田覆被率等作物参数,探讨作物综合特征量与农田辐射的关系,简化玉米地辐射状况的模拟过程。

* 本文由日本国家科学基金“绿地再生的水分管理”项目资助。
1997-11-18 收到,1999-01-06 收到再改稿。

1 试验方法

试验于1994~1996年在日本千叶大学园艺学部的试验农场(35°47'N, 139°54'E)进行。玉米地的面积约600 m²(20 m×30 m),为火山灰土。玉米种植密度350株/hm²,行距70 cm,株距40 cm。1994年和1996年播期为5月21日,1995年为5月17日。玉米成熟期均为8月下旬。对照裸地小区设在玉米地南侧,面积约200 m²(20 m×10 m)。

观测时间为1994年6月30日~8月10日、1995年6月10日~8月14日和1996年6月27日~8月15日。1994年和1996年为少雨年,1995年为多雨年。各年观测起始时植株特征量分别为:植株高度55、20、40 cm,叶面积指数0.8、0.1、0.2,覆被率20%、10%、16%。

全天辐射和反射率用MR-21型总日射表测定,净辐射用CN-11型净辐射表测定。观测高度为2 m。测器与数字转换器连接,每分钟读数一次,由计算机记录到软盘上。本文的分析和计算采用日累加值。由于1996年测器出现故障,在分析、计算中将其测值舍去。

株高、叶面积指数等植物生长状况调查采用取样法,每周进行一次。叶面积指数采用比叶面积法,用植物病理调查钳进行采样。大田覆被率采用小区调查法,即:在观测地段设立两个0.7 m×1.2 m的小区,将其划分为若干个0.01 m²的网格,计算地面被叶片覆盖的网格数,将其百分率作为覆被率。

2 植物参数模拟

2.1 植株高度

作物生长高度采用“S”型生长曲线模拟。利用3年的观测资料(样本数26,下同)得出玉米生长的基本高度(H)与播种以后日数(d)的关系式:

$$H = 210.1 / (1 + 68.21e^{-0.073d}) \quad (1)$$

式(1)相关系数为0.988,显著水平达1%。

温度是影响玉米生长速度的主要因素^[4],1994年与1995年5月下旬至8月上旬生长期的平均温度差高达2℃,积温相差150℃以上。以玉米生长期间≥20℃活动积温(ΣT_{20})为因子,修正式(1)计算出的基本高度 H ,得出各年实际植株高度(h)的计算式:

$$h = 0.71H + 0.17\Sigma T_{20} + 4.28 \quad (2)$$

式(2)复相关系数为0.969,达到1%的显著水平。

2.2 叶面积指数

叶面积指数(LAI)与播种后天数(d)的关系采用4次曲线拟合:

$$LAI = 2.4 \times 10^{-3}d - 2.4 \times 10^{-5}d^2 + 2.49 \times 10^{-5}d^3 - 2.59 \times 10^{-7}d^4 - 0.40 \quad (3)$$

式(3)相关系数为0.853,达到1%的显著水平。

利用式(3)计算出播种后不同生育天数玉米的基本叶面积指数。与生长高度类似,采用玉米生长期间≥20℃活动积温,修正式(3),模拟出的叶面积指数:

$$L = 0.74LAI + 0.0021\Sigma T_{20} + 0.03 \tag{4}$$

式(4)的复相关系数为 0.918, 显著水平达 1%.

2.3 覆被率

植被对地面的覆被率(C)与播种后日数间的关系采用 4 次曲线模拟:

$$C = 1.4d - 2.1 \times 10^{-4}d^2 + 2.2 \times 10^{-4}d^3 - 3.18 \times 10^{-6}d^4 - 37.81 \tag{5}$$

式(5)相关系数为 0.816, 达到 1% 的显著水平.

利用式(5)计算出玉米生长期间基本覆被率(见图 1), 并根据各年的叶面积指数对计算出的基本覆被率加以修正, 得出修正后的覆被率:

$$c = 0.14C + 23.38L + 3.87 \tag{6}$$

式(6)复相关系数为 0.846, 显著水平达到 1%. 由式(6)模拟的玉米覆被率见图 1 的估计值. 由图 1 可看出各年的实际覆被率与拟合曲线的偏离较大, 表明除了作物发育期和叶面积以外, 叶倾角等其他因素也影响覆被率, 还需要进一步的研究. 本试验未进行这方面的观测, 在此不作讨论.

为减少分析和计算误差, 采用各年播种后日数和覆被率的实际观测值模拟覆被率(c):

$$c_{94} = 4.56d - 1.87 \times 10^{-6}d^2 - 4.0 \times 10^{-4}d^3 - 123.71 \tag{7}$$

$$c_{95} = 7.3 \times 10^{-2}d - 4.6 \times 10^{-3}d^2 + 4.8 \times 10^{-4}d^3 - 4.5 \times 10^{-6}d^4 - 2.90 \tag{8}$$

$$c_{96} = 2.22d - 1.2 \times 10^{-3}d^2 + 1.3 \times 10^{-3}d^3 - 1.11 \times 10^{-5}d^4 + 58.58 \tag{9}$$

虽然各年样本数(7~ 11 个)较少, 但式(7)~ 式(9)相关系数分别为 0.989, 0.974, 0.966, 式(7)、式(8)均达 1% 的显著水平, 式(9)的显著水平为 5%. 由式(7)~ 式(9)模拟的覆被率见图 1 的计算值. 由图 1 可见, 这些计算值与观测值和式(6)的模拟值更接近.

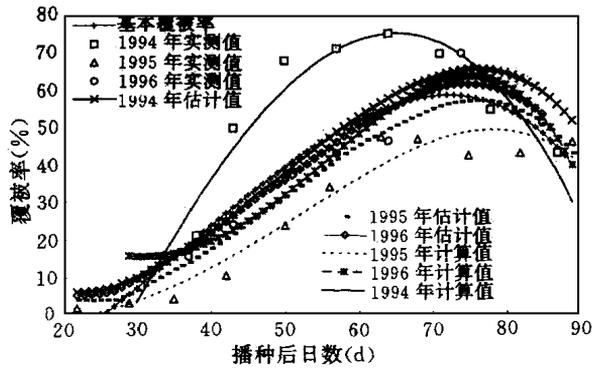


图 1 玉米覆被率模拟值与实测值

3 玉米冠层的反射率

图 2 显示了 1994 和 1995 年生长季内玉米地和裸地反射率的变化. 1994 年观测的起始期较晚, 玉米地和裸地的反射率均较大, 在 7 月中旬左右达 14%~ 20% (图 2a). 1995 年观测开始较早, 在生长期开始时期玉米地与裸地之间的反射率无明显差异, 均在 4%~ 10% 的范围内. 随着时间的推移, 玉米地与裸地间的差异逐渐增大(图 2b), 这与其他学者的试验结果相一致^[3,5]. 表明在生长季刚刚开始的一段时间内, 由于叶面积指数小, 植被对反射率无显著影响, 可以忽略. 本文将主要考察玉米经过一段时间, 植被对辐射状况产生明显影响时的情况. 比较两年的状况, 可看出在玉米旺盛生长阶段(6 月 20 日~ 7 月 30 日), 多雨年(1995 年)玉米地的反射率低于干旱年(1994 年). 而在正常年份, 当玉米群体达到稳定时期, 农田的反射率保持在 17%~ 19% 的范围内^[6,7], 低于矮秆作物和草地

(20%以上)^[8]. 由于本试验中的行栽玉米, 在其发育的全盛时期覆被率不能象花生等低矮作物那样达到100%^[5], 加之玉米冠层具有一定的高度, 使进入冠层的太阳辐射在不同高度的叶片间及叶片与土壤表面之间发生多次反射和吸收, 使其反射率低于矮杆作物. 中山敬一等人^[9]曾考察了几种矮杆作物(高度低于45 cm), 发现这些作物的反射率与农田的覆盖程度有一定关系, 并建立了以农田覆被率、晴天指数(实际太阳辐射与大气外太阳辐射之比)及土壤表面的干燥度为因子的经验方程. 我们考察了玉米地反射状况, 发现即便是在与矮杆作物相同的叶面积指数和覆被率的情况下, 也呈现出了与之不同的反射特性. 也许是由于玉米冠层的叶密度与矮杆作物不同, 并且土壤表面的反射辐射对整个冠层总反射率的贡献不同所致. 为了描述玉米冠层三维立体结构特征, 引入一个能反映叶面积密度与农田覆盖状况的参数——综合植被系数(V), 即: 平均叶面积密度与覆被率的函数 $V = f(l, h)c(d)$. 其中, f 为平均叶面积密度 $f = l(d)/h(d)$, c 为农田覆被率(%), 它们均为生长日数(d)的函数.

图3为1994年和1995年观测期间综合植被系数的变化, 显示了两年之间观测开始时期作物生长状况的差异以及年度间玉米植被的差别.

取综合植被系数(V)及晴天指数(CI)作为因子, 计算玉米地的反射率 α , 得出:

$$\alpha = 2.16CI + 13.6V + 3.85 \quad (10)$$

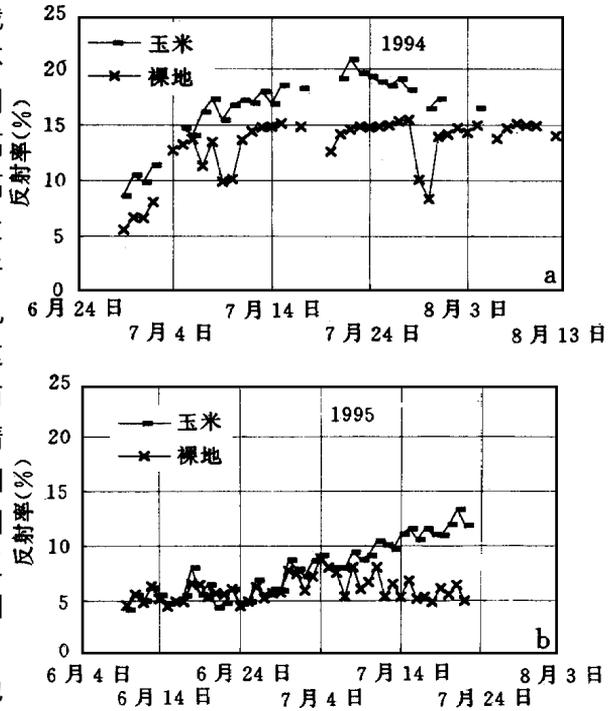


图2 不同年份玉米地与裸地的反射率的对比

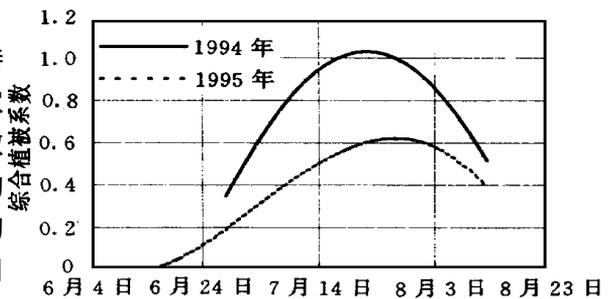


图3 不同年份综合植被系数的变化

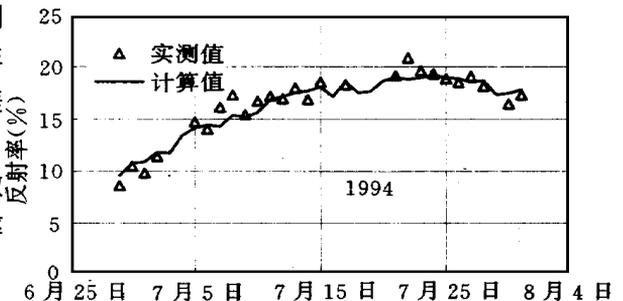


图4 玉米地反射率的拟合值与实测值

式(10)的复相关系数为 0.988, 达 0.1% 的显著水平. 式中 $CI = S/S_0$, S 为观测高度的太阳辐射, S_0 为大气外太阳辐射. S_0 的计算见文献[10]. 式(10)计算的结果如图 4 所示, 与实测结果十分吻合.

4 玉米地的净辐射

净辐射主要取决于来自太阳的净短波辐射和地面的净长波辐射, 为了将其与后两者区分开, 将净辐射称为净全辐射. 图 5 显示了 1994 年和 1995 年生长季玉米地及裸地的净全辐射状况. 在干旱的 1994 年作物旺盛生长期, 玉米地的净全辐射大于裸地; 而在多雨的 1995 年, 由于作物个体偏小, 无论在作物生长初期或是在中期, 玉米地的净全辐射均小于裸地.

图 6 显示了净全辐射与太阳辐射间的关系. 由图 6a 可见, 1994、1995 年的净全辐射与太阳辐射间的相关关系存在较大差异. 考虑到两年间反射率的差别, 将净全辐射与净短波辐射(太阳辐射与反射辐射之差)之间的关系也作了比较(图 6b). 结果表明, 尽管干旱年份的反射率远大于多雨年, 但其净全辐射仍比多雨年要大, 基本与净短波辐射相同, 在其它少雨的年份也曾观察到同样的现象^[11], 说明在不同的环境和植被条件下, 玉米地的

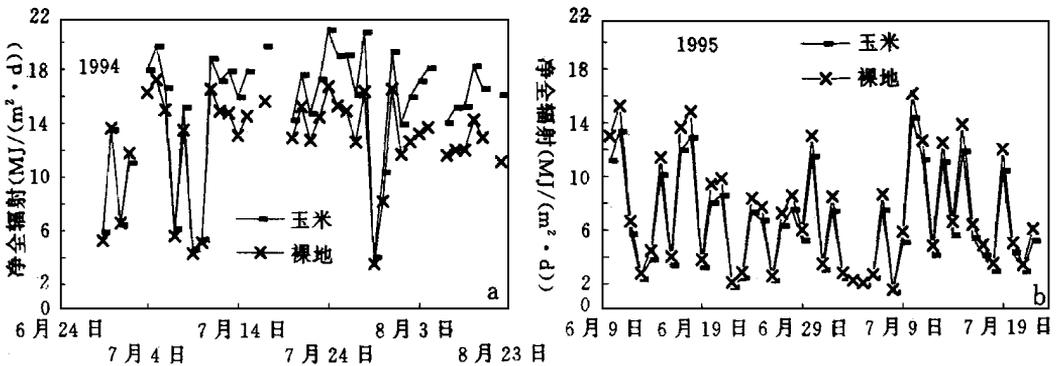


图 5 玉米地与裸地净全辐射的比较

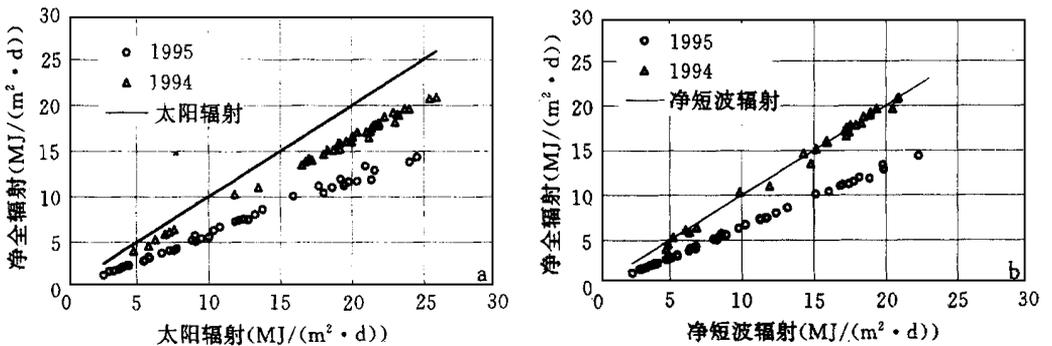


图 6 玉米地净全辐射与太阳辐射(a)及净短波辐射(b)的关系

净全辐射量有明显差异. 这一结果与其它低矮作物有所不同, 后者的净全辐射量与裸地的基本相同, 虽然其反射率大于裸地^[5,12]. 松岗延浩等人将花生地的植被状况划分成4个等级来考察玉米地的净全辐射, 结果表明各等级间无明显的差异, 指出由于植被的存在而引起的自地面向上的长波辐射量的减少, 补偿了因植被存在而引起的向上反射的短波辐射增量, 因而植被对净全辐射的影响可忽略.

从能量平衡的角度出发, 净全辐射应由太阳辐射(S)、反射率(α)和净长波辐射(F)决定, 即 $R_n = (1 - \alpha)S - F$. 1994年的反射率和决定表面净长波辐射的地面温度和叶面温度均高于1995年, 但其净全辐射却大于1995年, 表明地面的净长波辐射对作物面的净长波辐射贡献甚小. 比较1994、1995年作物旺盛生长期的环境因素和植被状况, 发现植株叶面及地面温差分别达 0.5°C 和 2°C , 叶面积指数的差为0.5, 覆被率的差为20%~30%, 在所有环境和植被要素中以植被覆被率的差异最大(见图1), 这可能是造成年间净全辐射差异的重要原因. 1994年覆被率和植株高度、叶面积指数均大于1995年, 玉米冠层有效地阻隔了地面和下部叶片的反射辐射及净长波辐射, 补偿了整个冠层反射辐射和净长波辐射的损失, 从而影响了冠层辐射平衡, 产生了与1995年不同的效果. 因此, 在推测玉米地的净全辐射时, 必须考虑植被要素.

本文采用太阳辐射和综合植被系数为因子, 建立计算净全辐射的方程:

$$R_n = 0.72S + 3.82V - 2.03 \quad (11)$$

式中, R_n 为净全辐射($\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$), S 为太阳辐射($\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$), V 为综合植被系数(无量纲). 该式复相关系数为0.976, 显著水平达0.1%.

图7给出了式(11)模拟的1994年净全辐射, 显示了模拟值与实测值良好的一致性, 仅在作物生长后期有一些差异, 可能与作物生长后期植被覆被率的计算误差有关.

5 结 语

玉米植被对农田的辐射特征有较大影响, 其中覆被状况的影响较为显著, 因而在描述玉米等高杆作物冠层辐射特征时, 必须考虑垂直方向上的平均叶面积密度及农田覆被状况等因子; 采用综合植被系数作为描述玉米冠层三维结构特性的植被参数较为理想, 在估算玉米冠层的反射率和净全辐射时取得了较好的结果, 与理论计算方法比较, 涉及参数少, 计算简单, 便于应用.

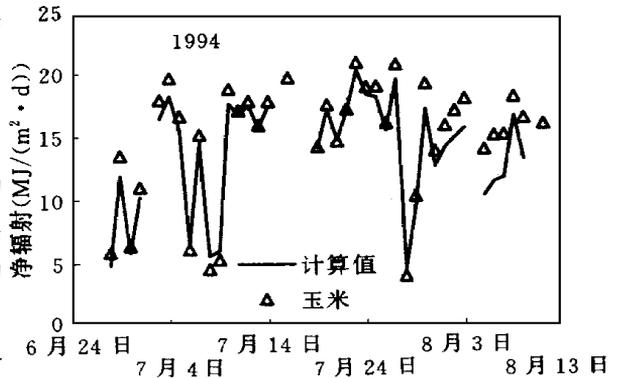


图7 玉米地净全辐射的计算结果
(Δ为实测值)

参 考 文 献

- 1 黄洪峰. 土壤-植被-大气相互作用原理及模拟研究. 北京: 气象出版社, 1997. 1~43.
- 2 董振国, 刘瑞文. 冬小麦夏玉米高产田群体结构参数. 中国农业气象, 1995, **16**(1): 9~12.
- 3 傅抱璞, 翁笃鸣, 虞静明, 等. 小气候学. 北京: 气象出版社, 1994. 1~37, 347~374.
- 4 霍仕平, 晏庆九, 黄文章, 等. 温度和日长对玉米植株性状的效应. 中国农业气象, 1996, **17**(5): 24~27.
- 5 松岡延浩, 野村誠治, 中山敬一, 等. 日射量測定値を用いたラッカセイ植被面の純放射量の推定. 千葉大学園芸学部学術公報, 1993, **47**: 177~181.
- 6 Graham W G and King K M. Short-wave reflection coefficient for a field of maize. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1961, **87**: 43~44.
- 7 吕厚荃, 中山敬一, 于贵瑞, 等. トウモロコシ畑の放射環境について. 日本農業気象学会 1994 年度大会要旨, 1994. 278~279.
- 8 Monteith J L. The reflection of short-wave radiation by vegetation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1959, **85**: 386~392.
- 9 中山敬一, 羽生寿郎, 今久. 马铃薯畑のアルベトの特性. 農業気象, 1986, **39**(4): 289~295.
- 10 近藤纯正. 水環境の気象学. 東京: 朝倉書店, 1994. 55~58.
- 11 吕厚荃, 中山敬一, 于贵瑞, 等. トウモロコシ植生が熱収支に及ぼす影響. 日本農業気象学会 1995 年度大会要旨, 1995. 122~123.
- 12 Firtschen Leo J. Net and solar radiation relations over irrigated field crops. *Agr. Meteor.* 1967, **4**: 55~62.

ESTIMATION OF ALBEDO AND NET RADIATION FOR MAIZE CANOPY

Lu Houquan

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Yu Guirui Nakayama Keiich

(Horticulture Faculty, Chiba University, Japan)

Abstract

According to the characteristics of maize canopy, the plant characteristics values including height of plant, mean leaf density and the rate of farm land coverage were chosen as the plant parameters, i.e. the multiple coefficient of vegetation to describe the feature of maize canopy based on the experiments in the maize fields for three summers from 1994 to 1996. By using the multiple coefficient of vegetation as a factor, an estimation method for albedo and net radiation of maize canopy was proposed, and the good results were obtained.

Key words: Maize canopy Multiple coefficient of vegetation Albedo Net radiation