

文章编号: 1007-4619(2000)增-0090-11

二向反射遥感中冬小麦植被组分和土壤特性的季相变化

项月琴¹, 王锦地², 李小文², 郑兰芬³,
林忠辉¹, 李俊¹, 莫兴国¹

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 北京师范大学遥感与地理信息系统研究中心, 北京 100875; 3. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要: 在二向反射物理模型的反演研究中, 李小文和 Strahler 等提出基于知识的反演, 强调了地面知识积累对反演的重要性。根据在北京、山东禹城和河北栾城等地不同年份积累的不同品种冬小麦实测数据, 按照二向反射理论模型及模型反演研究的要求, 分析了冬小麦群体植被组分的几何结构、光学特性和土壤光学特性等参数的季相变化特征。具体内容包括: (1) 叶面积指数的季相变化; (2) 叶、茎、穗面积在它们总面积中比例的季相变化; (3) 叶倾角分布的季相变化; (4) 叶茎穗光学特性的季相变化 (5) 土壤背景垂直向上反射率的季相变化, 文中各项季相变化特征覆盖的冬小麦生育期长。这是一份比较系统和有较好代表性的结果。

关键词: 二向反射遥感; 冬小麦; 群体组分和土壤背景; 几何结构和光学特性; 季相变化

中图分类号: TP722.4/S127 **文献标识码:** A

1 前言

随着多角度遥感卫星的陆续升空, 人们可以获得大量的多角度卫星遥感数据, 通过二向反射模型的反演来确定地表植被的结构参数是当前研究的热点, 也是植被定量遥感中一个根本性的问题。李小文等指出^[1-3]: 在对二向反射模型的反演研究中, 最好事先就有地面实况知识的积累。认为在 EOS 时代, 无定解仍然是遥感反演面临的主要困难, 因此先验知识的应用, 仍然是反演的主要希望之所在。并指出遥感反演中用到的先验知识可以分为两大类, 有关地物类型的先验知识和具体地面目标的先验知识, 提出了先验知识包括的 5 个方面的内容, 其中之一是可能的季相变化规律。美国计划于 2000 年底发射一颗名为“TRIANA”的热点卫星, 为便于对热点卫星数据的定量解译, 需要有地面实

况知识库的支持^[1]。

冬小麦是我国北方地区的主要粮食作物, 在冬小麦生长期, 大片麦田是遥感图像中一种主要的植被类型, 积累和分析对冬小麦田二向反射影响因子的季相变化规律, 是一项很有意义的工作, 它们将在多角度遥感数据的解译和应用研究方面发挥作用。本文根据多年积累的实测数据, 讨论我国一些冬小麦品种群体组分的几何结构、光学特性及麦田内土壤背景垂直向上光谱反射率的季相变化规律。

以上数据同时也可广泛应用于定量遥感的其它领域, 以及农业气象学、作物生态学和微气象学等有关领域的研究。

2 数据来源和实验概述

2.1 数据来源

收稿日期: 1999-12-20; 修改日期: 2000-08-10

基金项目: 国家“九五”攀登项目(95-预-38)和国家重点基础研究发展规划项目(G2000077900), 国家科委“九五”科技攻关项目(96-B02-04-01)和自然科学基金(批准号: 49771058 和 49771058)资助。

作者简介: 项月琴(1939—), 女, 1963年毕业于南京大学气象系。在中国科学院地理科学与资源研究所从事辐射气候学、农田辐射物理、二向反射遥感和高光谱遥感研究。

1) Triana Mission Selected, Release: 98-198.

数据来源包括两个方面:(1)二向反射(BRDF)农田实验;(2)其它农田实验。

(1) BRDF 农田实验

本文专门为研究冬小麦群体 BRDF 设计的农田实验有两次:(a)1997年4月11日至5月18日,在北京从冬小麦(品种为北农411)返青后到灌浆期共获得6天观测数据,测点设在北京市大屯乡原中国科学院北京农业生态系统试验站(116°24'E, 40°00'N, 海拔45m)。(b)1999年4月13日至18日,在山东省禹城市中国科学院禹城综合试验站(116°38'E, 36°57'N, 海拔23m),对冬小麦(品种为直选1)群体进行了为期3天(拔节后)的实验测量。

(2) 其它农田实验

自90年代初以来,我们先后在上述两个试验站和中国科学院栾城农业生态系统试验站(114°40'E, 37°50'N, 海拔50m, 位于河北省栾城县)进行的多项农田实验研究中,积累了多个冬小麦品种叶、茎、穗面积指数和它们的倾角分布(LAD)数据。这些数据对我们统观不同品种冬小麦群体结构参数的季相变化规律十分有用。

2.2 冬小麦群体 BRDF 的实验测量

这里仅阐述冬小麦群体 BRDF 实验的测点、仪器和观测项目。本文数据涉及的其它农田实验详见文献[4, 5]。

群体 BRDF 的测点

1997年4月-5月在北京冬小麦田的 BRDF 的测点,实验地面积约13hm²,土壤为壤质褐潮土。1999年4月在山东禹城冬小麦田 BRDF 的测点,整个实验场地面积为3000m²,土壤为褐化潮土和盐化潮土。两年的测点平整开阔,遮蔽度小,实验地均为中等肥力水平,及时灌溉施肥,冬小麦生长良好。

群体 BRDF 和植物组分光学特性测量设备

用于测量群体 BRDF 的仪器为 SE590 便携式野外光谱仪(Spectron Engineering Inc., USA),探测器型号为 CE390WB,波长范围400—1100nm,光谱分辨率约3nm,每组观测可提供252个光谱数据,该仪器经中国科学院安徽光学机械研究所光学室标定,在400—950nm之间各波段灵敏度稳定,线性度好。

BRDF 观测架按文献[6]的思路设计并作改进,观测架安装在小麦长势良好、冠层比较均匀的地块上,在整个观测期间不再搬动,靠观测架自身的转

动,对其周围麦地进行 BRDF 观测。SE590 光谱仪离冠层顶约105cm,当用1°和15°两种视场角(FOV)的光学透镜垂直向下观测时,在冠层顶视场的直径分别为1.8cm和27.6cm。

将 SE590 光谱仪探测器和外积分球(型号:1800-12S, External Integrating Sphere, LI-COR., USA)相连,组成一分光光度计系统,测量冬小麦各植物组分的光学特性。

2.3 观测项目和方法

为了便于将农田实测数据用于 BRDF 的理论模型和模型反演的验证之用,设计的观测项目主要包括:(1)群体的 BRDF;(2)入射到群体上方的环境辐射;(3)群体的几何结构,包括群体叶、茎、穗的面积指数和几何特征尺度,叶、茎、穗面积在它们的总面积中的比例,叶、茎、穗面积随冠层深度的变化和倾角分布函数等;(4)叶、茎、穗的光学特性;(5)土壤垂直向上光谱反射率。

群体 BRDF 和入射环境辐射的观测

为了获取稳定可靠的观测数据,对冬小麦群体 BRDF 的测量,均在晴朗少云的天气条件下进行,能见度好或较好,风力不大。在太阳主平面内的观测,均从太阳前向散射方向开始,观测高度角 h_v 为15°—165°,每10°为一间隔,当 $h_v=90^\circ$ 时垂直向下观测一次。在一组 BRDF 观测的前后,各测量1次参考板遮阴和不遮阴两种情况下垂直向上的反射光谱,以得到入射到冠层上方的太阳直接辐射和天空散射辐射光谱数据。

叶、茎、穗几何结构和光学特性的测量

叶、茎、穗3种组分的面积指数分别指它们的面积与植被所占据的地表面积之比,叶片以单面叶面积计(LAI),茎干和穗的面积,以其纵截面积计算。叶倾角分布函数(LAD)指对叶片沿方位均匀分布的群体而言,在叶倾角为 θ_L 到 $\theta_L+d\theta_L$ 内的叶面积之和在总叶面积中占的比例。叶倾角 θ_L 为叶片面元法线方向与垂直方向间的夹角。对一弯曲度大的叶片,通常取4—5个面元,分别测量每一面元的倾角和长宽,然后计算得到 LAD 值。测量工作直接在农田中进行,测量时尽量不随意扰动群体的自然结构。茎、穗倾角分布的测量方法与叶片的相同。

冬小麦群体叶、茎、穗光学特性的测量工作,通常在群体 BRDF 观测结束后的当天或第二天上午进行。对叶片(包括绿叶、黄绿叶和黄叶),一般测4—8个样本,茎测4个样本,穗测2个样本。

土壤光谱反射率的测量

土壤, 作为作物的背景也是对冠层 BRDF 有影响的一个要素, 土壤垂直向上光谱反射率的测点设在 BRDF 测点附近较开阔踩踏较少的田埂上, 尽量使被测土面的状况与冠层内土面的状况接近, 在 BRDF 观测当天, 测点位置不变。对每一组土面和参考板反射光谱的测量, 均在相同的入射光环境下进行, 并在一组群体的 BRDF 观测完成后立即进行。

3 冬小麦群体几何结构的季相变化

由于叶面积指数, 叶、茎、穗面积分别在它们的总面积中的比例及它们的倾角分布是表征冬小麦群体几何结构的重要参数, 因此, 本文仅讨论这 3 种参数的季相变化规律。

3.1 冬小麦群体叶面积指数的季相变化

叶面积指数 (LAI) 是表征作物群体生长进程最重要的特征量。本文根据禹城站 1990/1991 年和 1991/1992 年、栾城站 1995 年共 6 个品种的实测数据讨论冬小麦叶面积指数的季相变化特征。禹城站 1990/1991 年的冬小麦品种为鲁麦 8、冀麦 84-5418、烟鲁 1604、晋麦 30 和泰山 10, 1991/1992 年的为鲁麦 8 和冀麦 84-5418, 栾城站 1995 年的为高优 502, 其中鲁麦 8 和高优 502 为中晚熟品种, 其余的均为早熟品种, 这些都是中高产水平的群体。

图 1 采用两种方式表达冬小麦叶面积指数随生育期的动态变化。图 1(a)为叶面积指数随出苗后天数

数的变化, 该图表明, 从出苗后第 50 天—160 天左右 (即大约从分蘖后第 20 天到起身), 叶面积指数大体为 1.1 左右。从起身后, 叶面积指数迅速增长, 到抽穗时达到最大, 然后又开始下降。就现有的这些实测结果而言, LAI 的最大值变动在 4.6 (禹城 90/91 年泰山 10) — 8.3 (禹城 91/91 年鲁麦 8) 之间, 变化范围大。按董振国的调查^[7], 在本文研究的地区内, 高产水平和平均产量水平的农田, 最大叶面积指数分别为 5 和 4。图中还表明, 冬小麦从抽穗后—成熟阶段, 叶面积指数在下降过程中各群体间的差异比从返青—抽穗的旺盛生长阶段内各群体间的差异要大得多。

为了更好地考虑作物本身的生长发育进程, 可以用相对积温 (DVS) 来表示作物生长发育的时间变量^[8] (见图 1(b)), DVS 的定义为:

$$DVS = \begin{cases} \sum_{i=1}^t (T_i - T_b) / A_1 & \text{出苗 - 开花} \\ 1 + \sum_{i=t_1+1}^t (T_i - T_b) / A_2 & \text{开花 - 成熟} \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中, i 为从出苗日算起的天数, T_i 为日平均气温, T_b 为作物生长下限温度, 对冬小麦取 $T_b=3^{\circ}\text{C}$, 当 $(T_i - T_b) < 0$ 时, 按 0 计算, t_1 和 t_2 分别为从出苗—开花和出苗—成熟经历的天数。 A_1 和 A_2 分别为从出苗—开花和开花后第 1 天—成熟时段的有效积温。由定义可见, 出苗时的 $DVS = 0$, 开花时为 1, 成熟时为 2。纵坐标为相对叶面积指数,

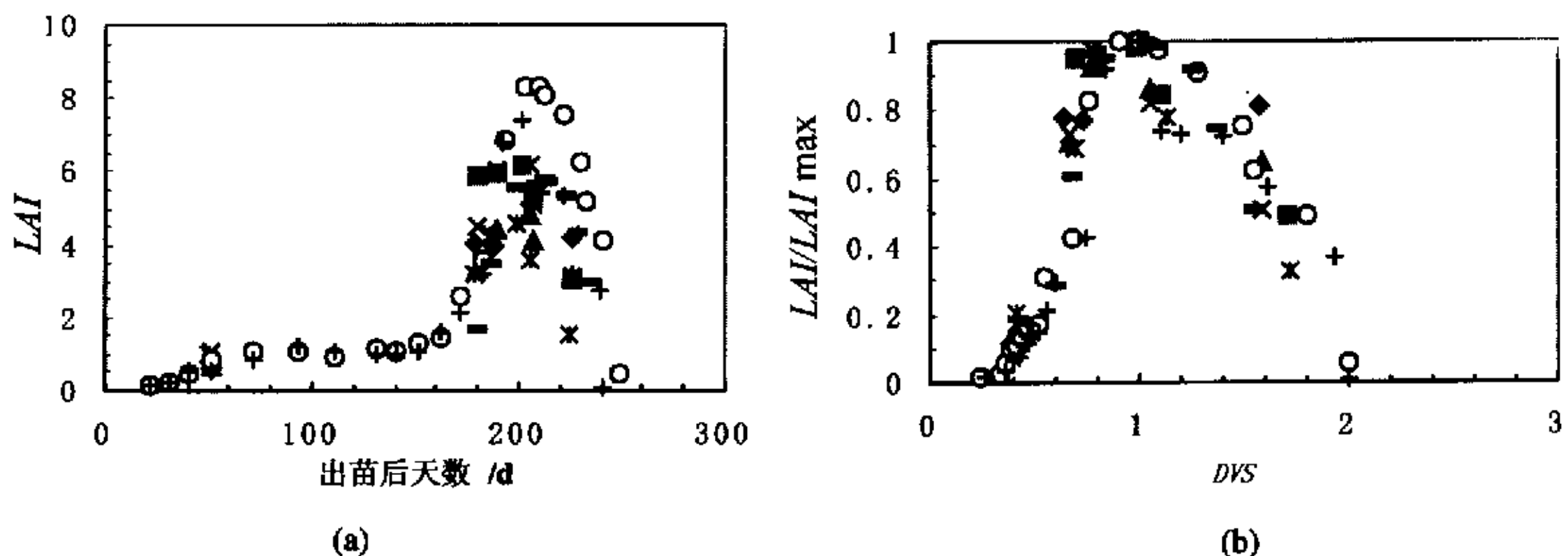


图 1 冬小麦叶面积指数的季相变化

注: (a)冬小麦叶面积指数随生育期的变化; (b)冬小麦相对叶面积指数(RLAI=LAI/LAI_{max})随相对积温的变化
 ◆: 鲁麦 8 优系, ■: 冀麦 84-5418, ▲: 烟鲁 1604, ×: 晋麦 30, *: 泰山 10, 以上为 1990/1991 禹城实验;
 ○: 鲁麦 8 优系, +: 冀麦 84-5418, 以上为 1991/1992 禹城实验; -: 高优 502, 1994/1995 栾城实验。

Fig 1 Seasonal change of leaf area index (LAI) of winter wheat

(a) Change of LAI of winter wheat from emergence to maturity; (b) Change of relative LAI as relative effective accumulated temperature, DVS=1 and 2 for flowering and maturity, respectively

即 LAI/LAI_{max} , LAI_{max} 为最大叶面积指数。按现有品种平均, 返青、拔节、抽穗和灌浆各生育阶段的 DVS 值分别为 0.39 ± 0.05 , 0.56 ± 0.05 , 0.92 ± 0.02 和 1.27 ± 0.05 。用图 1 (b) 表示的优点是: 可以把不同品种、不同地点、不同播期和密度等情况下的群体统一在同一规律之下; 若确定了 1 个冬小麦群体的 LAI_{max} 值后, 则可以从该曲线的拟合方程获得整个生长过程中的 LAI 。

已有的研究表明, 逻辑斯谛方程可以作为一种普适函数来描述作物群体的生长进程, 如干物质重量的积累、叶面积的增长等^[9]。对图 1 (b) 中的数据, 本文拟将 $RLAI$ 随 DVS 的变化分两个生长阶段分别进行拟合。(1) 从冬小麦出苗—开花, 即当 $DVS \leq 1.0$ 时, 用逻辑斯谛方程拟合, 得:

$$RLAI = \frac{RLAI_{max}}{1 + \exp(a_0 + a_1 \times DVS)} \quad (2)$$

式中: $RLAI_{max}=1.0$, 为最大相对叶面积指数, 拟合系数 $a_0=0.3276$, $a_1=-11.07$, 相关系数 $R=0.92$ 。(2) 从开花—成熟, 即当 $1.0 < DVS \leq 2.0$ 时, 用多项式拟合, 得: $RLAI = a_0 + a_1 \times DVS + a_2 \times DVS^2$, 式中: $a_0 = 1.5264$, $a_1 = -0.38826$, $a_2 = -0.13324$ 。值得注意的是: 在实际应用中, 当用多项式拟合公式计算 $RLAI$ 时, 若出现 $RLAI$ 的计算值大于 1.0 的不合理情况时, 可将其计算值取为 1.0。

3.2 冬小麦叶、茎、穗面积在植株总面积中比例的季相变化

覃文汉^[10]的研究表明, 由于冬小麦茎干的反射率明显高于叶片, 而透射率很低, 有些波段几乎等于 0, 故随着茎干面积在植株总面积中比例的增加, 群体的前向散射越来越减弱, 而后向散射越来越增强, 致使群体的非朗伯散射特征越来越明显, 只要茎干面积在植株总面积中的比例超过 10%, 茎干的影响就不能忽略。此外, 冬小麦抽穗后, 麦穗位于冠层最上层, 它们对抽穗后冠层 BRDF 的影响也是显而易见的。因此, 我们认为全面考虑冬小麦群体叶、茎、穗面积在植株总面积中比例的季相变化, 对群体 BRDF 的研究也是十分必要的。这 3 种组分在总面积中的比例分别用 RLA 、 RSA 和 REA 表示, 分别称它们为相对叶面积、相对茎面积和相对穗面积。

根据已获得的 5 个品种叶、茎、穗面积的实测数据, 绘制了 RLA 、 RSA 和 REA 的季相变化图 (图 2)。图中的横坐标用 DVS 表示, 计算方法与图 1 (b)

的相同, 但所取的发育时段与该图不同。在图 2 中, 从返青日算起 ($DVS=0$), 抽穗时 $DVS=1$, 成熟时 $DVS=2$ 。按现有的实测结果看, 抽穗、开花和灌浆期的 DVS 分别为 0.41 ± 0.06 、 1.09 ± 0.02 、 1.31 ± 0.06 。

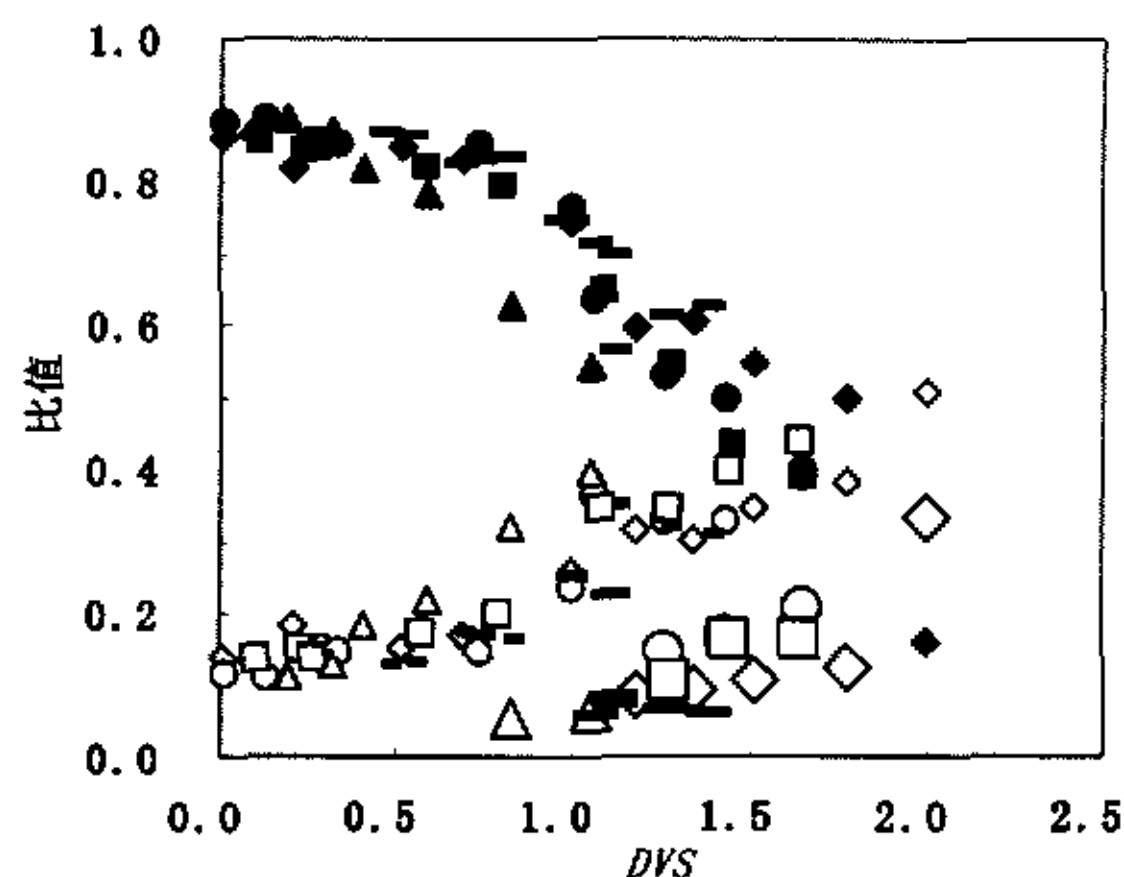


图 2 不同品种冬小麦叶、茎、穗面积在植株总面积中的比例 RLA 、 RSA 和 REA 随生育期的变化

注: ◆: 鲁麦 8 优系, ●: 冀麦 84-5418, ■: 泰山 10, 以上为 1991/1992 禹城实验; ▲: 北农 411, 1996/1997 北京实验; ▾: 高优 502, 1994/1995 杂城实验; 实心、空心和大空心符号和中、短、长横杠分别为 RLA 、 RSA 和 REA 的值。

Fig. 2 Change of ratio of leaf area, stem area and ear area to sum area of the three components of winter wheat as relative accumulating temperature DVS ($DVS=0,1$ and 2 for re-green, heading and maturity, respectively)

图 2 表明, 从返青后—成熟期间, 冬小麦的相对叶、茎面积在前期变化平缓, RLA 明显高于 RSA , 当 $DVS=0-0.75$ (约抽穗前 8-10 天左右) 时, $RLA=0.85 \pm 0.03$, $RSA=0.15 \pm 0.03$, 当 DVS 接近 0.75 后, RLA 随生长进程有明显下降趋势, 而 RSA 则有明显上升趋势, 到抽穗时, RLA 、 RSA 和 REA 分别约为 0.67、0.26 和 0.07, REA 在始穗后随生长进程迅速增大, 当 $DVS > 1.25$ (约灌浆前几天) 后, 其值平缓上升。在冬小麦成熟前约 10 天左右时 (DVS 为 1.6-1.7), 平均而言 $RLA=0.44$ 、 $RSA=0.40$ 和 $REA=0.16$ 。到收获前 (仅禹城 1991/1992 年鲁麦 8 的一次观测数据), $RLA=0.16$ 、 $RSA=0.51$ 和 $REA=0.33$ 。 RLA 、 RSA 和 REA 的拟合公式分别为:

$$RLA = a_0 + a_1 \times DVS + a_2 \times DVS^2 + a_3 \times DVS^3;$$

$$RSA = a_0 + a_1 \times DVS + a_2 \times DVS^2 + a_3 \times DVS^3;$$

$$REA = a_0 + a_1 \times DVS + a_2 \times DVS^2。$$

计算 RLA 的拟合系数为: 0.8613, 0.10056, -0.31458

和 0.053263; 计算 *RSA* 的拟合系数为: 0.1300, -0.02449, 0.22166 和 -0.06264; 计算 *REA* 的拟合系数为: 0.1775, -0.2811 和 0.16996。值得注意的是: 对于 *RSA* 和 *DVS* 间关系的拟合公式, 仅适用于 *DVS* 的取值范围为 $0.8 \leq DVS \leq 2.0$ (即有实测数据) 的情况。

3.3 叶倾角分布 (*LAD*) 的季相变化

自 1991 年以来, 我们积累了 5 个冬小麦品种

共 12 组 *LAD* 实测数据, 其中有 3 个品种有不同生育期的 *LAD* 实测值, 覆盖的生育期为拔节后到开花前后; 这些数据将有助于对冬小麦 *LAD* 特性及其季相变化规律的讨论。本文以高优 502 (1995, 栾城)、北农 411 (1997, 北京) (冀麦 84-5418 的 *LAD* 几乎与北农 411 的一样) 的 *LAD* 为例, 讨论冬小麦 *LAD* 的变化特征 (图 3)。统观 5 个冬小麦品种的 12 组 *LAD* 数据, 得到如下结果。

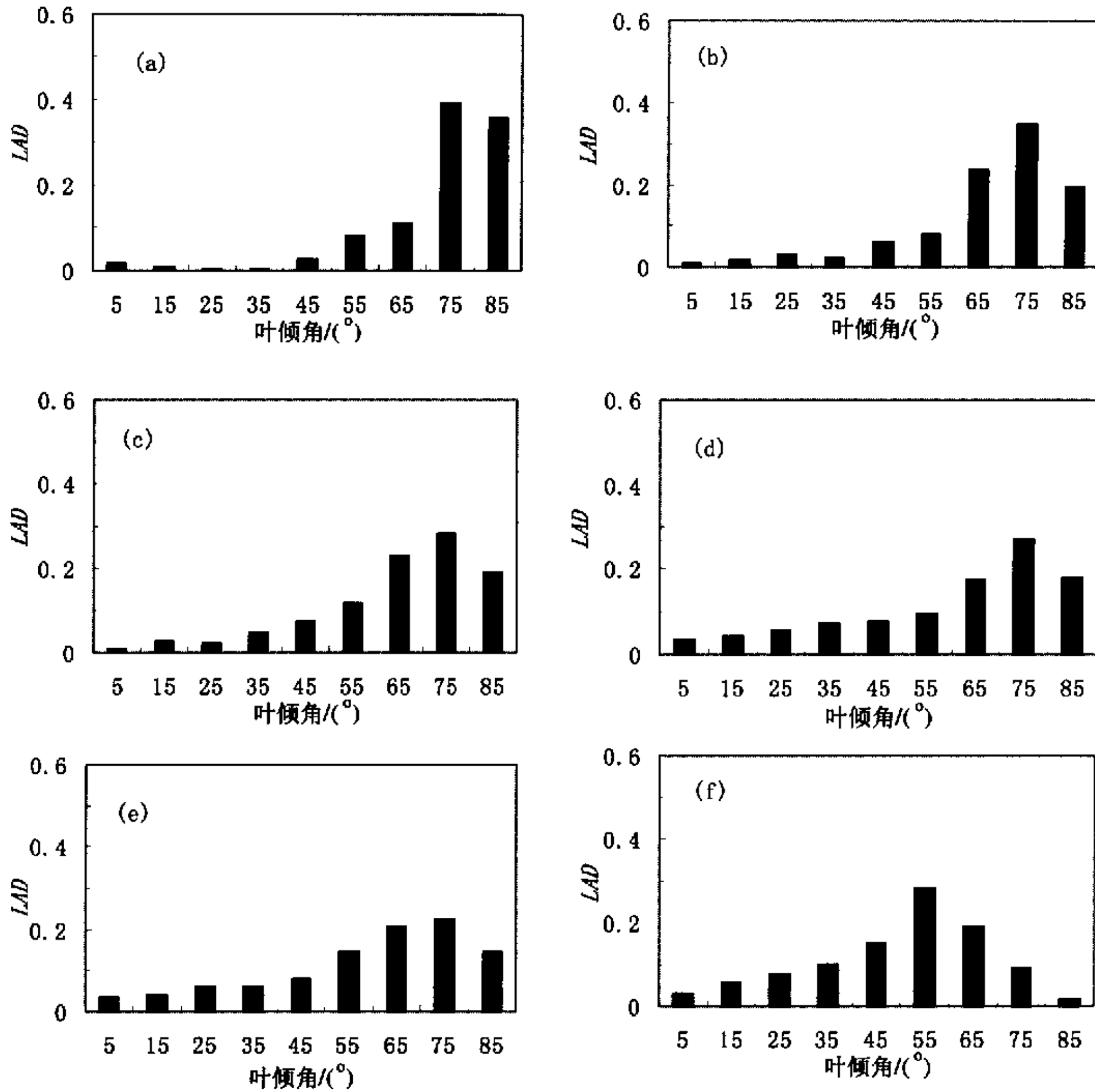


图 3 不同品种冬小麦叶倾角 (*LAD*) 特征和季相变化

注: 图(a)~(c)高优 502, 栾城实验, 测量日期分别为: 1995 年 4 月 14 日(拔节后)、4 月 30 日(抽穗前)和 5 月 8 日(开花初期); 图(d)~(f)北农 411, 北京实验, 测量日期分别为: 1997 年 4 月 21 日(拔节前)、5 月 2 日(拔节-抽穗间)和 5 月 11 日(抽穗前)

Fig 3 Change of leaf inclination distribution (*LAD*) as developmental stages of winter wheat

这些地区的冬小麦, 从拔节-抽穗前后的时段内均与球面型分布^[11]比较接近。根据对高优 502、冀麦 84-5418、和北农 411 3 个品种数据的分析得到 *LAD* 随生育期的变化特征为: 从拔节-抽穗前后, *LAD* 的高值区位于叶倾角 θ_L 在 $60^\circ-90^\circ$ 间隔内, 即叶倾角大的叶片占优势, 群体叶片的直立性最

好, 随着生长进程, *LAD* 的高值区变宽, 并逐渐向较低叶倾角方向移动, 高值减小。到了抽穗后-开花前后这一阶段, *LAD* 的高值区进一步向较低叶倾角方向移动, 变成 θ_L 在 $40^\circ-70^\circ$ 间隔内的叶片占优势, 即整个群体叶片的直立性又有所下降, *LAD* 趋向于喜斜型分布。

4 冬小麦叶、茎、穗和土壤光学特性的季相变化

本文用于讨论冬小麦叶、茎、穗在可见和近红外(VNIR)波段光学特性季相变化的数据为：北京，1997年4月11日—5月18日(返青后—灌浆期)6次观测，北京1998年6月16日(收割前，群体大体呈枯黄色，品种为北农411)和山东禹城1999年4月16日的观测，以上两地3年共8天的实测结果，覆盖了冬小麦从开春后的迅速生长到成熟、枯黄这一重要时段内的变化过程，山东禹城的数据作对照用。用于讨论冬小麦田土壤垂直向上光谱反射率的数据是与1997年北京冬小麦田BRDF的配套观测数据。

4.1 冬小麦叶、茎、穗光谱反射率、透过率曲线特性

实测结果表明：绿叶、黄绿叶和黄叶它们各自正反面的光谱反射率值几乎相等，因此本文叶片的光谱反射率是叶片正反两面的平均值。为便于讨论冬小麦群体各组分光谱曲线的变化规律，图4给出了叶、茎、穗有代表性的实测光谱曲线。图4(a)为北京1997年5月1日(抽穗期)的结果，图4(b)为北京1998年6月16日(蜡熟期)的结果，图4(b)中还给出了1999年4月16日在山东禹城实测的冬小麦茎的反射率和透过率光谱曲线(拔节后)，以作比较。

不同颜色叶片光谱反射率和透过率曲线特征

图4表明，无论是绿叶、黄绿叶或黄叶，在可见和近红外光谱区(VNIR)，对同一种颜色的叶片而言，其光谱反射率和透过率曲线随波长的变化特征是一致的。因此，这里仅讨论它们的光谱反射率随波长的变化特性。在可见光波段，叶片反射率的变化主要受叶片内色素吸收特性的影响，主要是叶绿素、叶黄素和胡萝卜素。对绿色叶片而言，由于叶绿素的强烈吸收作用，掩盖了叶黄素和胡萝卜素的作用，叶绿素在450nm(蓝紫光)和680nm(红光)为中心波长的两个波段形成强烈吸收，因此光谱曲线上在蓝光和红光区的反射率较低，在550nm附近的绿波段有一个反射峰。在叶片变黄的过程中，随着叶绿素含量的降低，在叶片中早已存在的叶黄素和胡萝卜素的作用逐渐变得比较显著，致使在绿光和黄橙光谱区的反射率明显增高，但在550nm附近绿波段的反射峰仍清晰可见。对黄叶而

言，光谱曲线从400nm开始便呈上升趋势，在绿波段的反射峰已消失，代之而起的是在580—640nm的黄橙光区为一明显的高值区，但无论是绿叶、黄绿叶或黄叶，在680nm附近叶绿素的吸收峰均清晰可见，从680nm开始，叶片反射率均随波长的增加呈陡峭上升趋势，在近红外波段维持一平缓的高值区，这是由于叶片内部组织对入射光线的多次反射、折射和散射造成的^[12]。

茎、穗的反射率光谱曲线特征

在可见和近红外波段，茎和穗的光谱反射率曲线随波长的变化与黄绿叶的变化特征非常相似，在可见光波段，茎、穗反射率的高值区位于绿光和黄橙光区，且在550nm附近的绿波段的反射峰也清晰可见，在可见光谱区，茎、穗的反射率值非常接近。茎、穗的反射率光谱曲线在680nm附近也出现陡峭上升的现象，并在近红外光谱区形成一平缓的反射率高值区，但其值明显高于叶片的反射率。

茎的透过率光谱曲线

我们仅有2次冬小麦茎的光谱透过率实测数据，1次在冬小麦的拔节前(1999年4月16日，禹城，品种：直选1)，另一次在冬小麦的蜡熟期(1998年6月16日，北京，品种：北农411，群体已经枯黄)，见图4(b)。图中表明，这两个品种分别在两个差异极大的生育期，实测的茎的透过率光谱曲线的形状却非常接近，茎干的透过率在可见光谱区接近0，近红外光谱区约为0.1左右，虽然测量数据很少，但现有数据已能概括冬小麦茎的光谱透过率季相变化特性。

冬小麦收获前植物组分的光谱特性

图4(b)中列出了1998年6月16日北京冬小麦蜡熟期(临近收割)植物组分(仅有枯黄叶、茎和穗)的光谱反射率和透过率曲线，这时叶片已大体干枯，群体呈现枯黄色。该图表明，(1)对枯黄叶而言，其反射率和透过率曲线随波长的变化趋势是一样的，在整个VNIR光谱区，它们均随波长的增加而逐渐增加，表明叶片中原来的色素及细胞组织对绿叶、黄绿叶和黄叶等光谱曲线影响的作用已不复存在。(2)冬小麦穗的光谱反射率曲线与枯黄叶片的反射率曲线随波长变化的形状一致，且数值上也几乎相等。(3)冬小麦茎的反射率特性随波长的变化与黄叶的相似，表明这时的茎干还未完全干枯，其中尚存的有关色素和存活的细胞组织分别在可见光和近红外光谱区中的作用仍然存在。

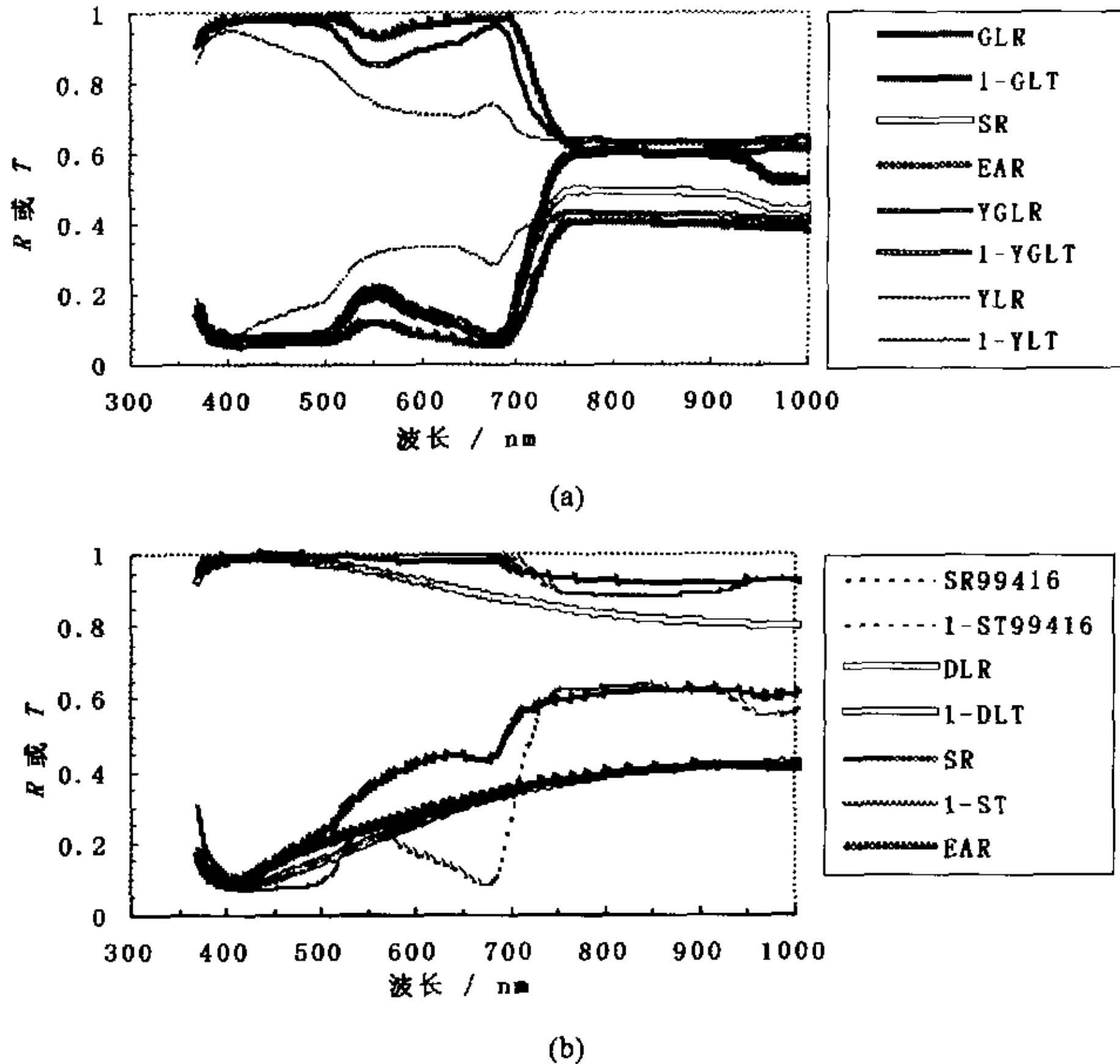


图4 冬小麦叶、茎、穗反射率, 透过率光谱曲线

(a) 1997年5月1日, 北京, 抽穗期, 品种为北农411; (b) 1998年6月16日, 北京, 蜡熟期, 品种为北农411, 以及1999年4月16日, 山东禹城, 茎的光谱反射率和透过率曲线, 品种为直选1, 拔节后(图例中已标上99416)

Fig. 4 Spectra of reflectance (R) and transmittance (T) of leaf, stem and ear of winter wheat

4.2 冬小麦叶、茎、穗光学特性的季相变化

表1为1997年北京冬小麦从返青后—灌浆期, MODIS 4个波段各组分反射率或透过率的平均值和均方差, 表中同时给出了1998年6月16日(收获前)北京和1999年4月16日(拔节后)山东禹城的实测值, 前者表征枯黄群体的情况, 后者拟与1997年北京的数据作比较用。采用季相平均值和均方差能很方便地显示每一种组分反射率或透过率在该生长期内的波动状况和比较它们的大小。由于在测量中靠目测选取黄绿叶和黄叶, 有很大随意性, 因此仅在表中列出它们的计算结果, 不作变化规律的分析。对1998年6月16日枯黄群体的实测结果, 由于篇幅的限制, 这里也不作变化规律的分析, 但我们相信本文提供的枯黄群体和绿色群体组分光学特性间有明显差异的数据, 对了解冬小麦群体BRDF的季相变化是十分有用的。

覃文汉在研究了植物组分光学特性对BRDF的

影响后指出, 组分反射率的大小完全决定了BRDF大小的量级, 而且, 与红光相比, 近红外波段的BRDF对反射率的变化更为敏感, 对组分的透过率也是如此^[13]。因此, 下面将从植被组分光学特性的变化对群体BRDF影响的角度来讨论它们的季相变化规律。对绿叶、茎和穗的反射率或透过率的季相变化特征而言, 有如下结果。(1)从表1我们认为: 在可见光波段, 除了茎的反射率在绿光区的季相平均值和均方差较大外, 其余各组分的反射率或透过率的均方差均很小, 因此这些组分的反射率或透过率从返青—灌浆期内均可分别取为常数值, 但对于在绿光区内茎的反射率而言, 若要取为常数的话, 则要注意因其反射率在该生长期内的波动较大而有可能对群体的BRDF造成的影响。同样在近红外波段, 除了穗的反射率的均方差很小, 其值在该生育期可以取为常数外, 绿叶的反射率和透过率, 以及茎的反射率的季相平均值很大, 其均方差也较大, 若要分别将它们取为常数的话, 则要注意因它

们的反射率或透过率在该生长期内的较大波动而有可能对群体的 BRDF 造成的影响。(2) 在蓝光区, 叶茎穗 3 者反射率的季相平均值很接近, 因此对反射率的取值可不区分这 3 种组分的作用。(3) 在绿光、红光和近红外波段, 茎、穗反射率的季相平均值均很接近, 且明显高于叶片的值, 因此可把茎、穗的反射率取相同的值, 在绿光、红光波段, 茎、穗的反射率平均比绿叶的约高 80%, 在近红外波段约高 40%。(4) 在蓝、绿、红 3 个波段, 禹城直选 1 品种的冬小麦的反射率或透过率, 在拔节期的光学特性分别与北京各有关组分的季相平均值非常接近, 因此在可见光的这 3 个波段内, 对生长良好

的绿叶、茎和穗的反射率和透过率而言, 似乎可以不考虑品种特性造成的差异。在近红外波段, 禹城直选 1 绿叶的反射率、透过率和茎的反射率在拔节后的值, 大体落在北京 1997 年实测数据均方差所表达的变化范围之内, 也就是说品种特性或管理措施的不同有可能造成绿叶的反射率、透过率和茎的反射率的差异。(5) 在可见光波段, 由于茎的透过率随波长的变化平缓、本身数值很小, 因此在此波段茎的透过率在该生育期内可取成一个常数或作不透明体处理, 在近红外波段, 茎的透过率可取为 0.10。

表 1 冬小麦叶茎穗反射率、透过率在 MODIS 4 个波段的季相平均值 (返青后—灌浆, 1997 年, 北京, 品种: 北农 411)

Table 1 Seasonal mean (re-growing-milking) of reflectance and transmittance of leaf, stem and ear of winter wheat in the four wave bands of MODIS, Beijing, 1997, variety: Beinong 411

波段 / μm	日期	绿叶反射率	绿叶透过率	茎反射率	茎透过率	穗反射率
0.459—0.479	1997	0.07±0.01	0.01±0.001	0.10±0.01	—	0.08±0.01
	99416	0.06	0.01	0.08	0.002	—
	98616	—	—	0.18	0.003	0.17
0.545—0.565	1997	0.12±0.01	0.08±0.01	0.24±0.04	—	0.19±0.02
	99416	0.11	0.09	0.25	0.005	—
	98616	—	—	0.36	0.013	0.25
0.620—0.670	1997	0.07±0.01	0.02±0.005	0.14±0.03	—	0.11±0.01
	99416	0.06	0.02	0.12	0.001	—
	98616	—	—	0.44	0.020	0.31
0.841—0.876	1997	0.42±0.06	0.41±0.04	0.56±0.08	—	0.62±0.02
	99416	0.45	0.51	0.64	0.11	—
	98616	—	—	0.62	0.08	0.41

波段 / μm	日期	黄绿叶反射率	黄绿叶透过率	黄叶反射率	黄叶透过率
0.459—0.479	1997	0.08±0.002	0.03±0.005	0.15±0.04	0.09±0.06
	99416	0.17	0.07	—	—
	98616	—	—	0.12	0.02
0.545—0.565	1997	0.21±0.01	0.18±0.02	0.28±0.09	0.20±0.13
	99416	0.38	0.24	—	—
	98616	—	—	0.21	0.05
0.620—0.670	1997	0.12±0.02	0.09±0.02	0.34±0.05	0.26±0.13
	99416	0.410	0.274	—	—
	98616	—	—	0.297	0.10
0.841—0.876	1997	0.44±0.03	0.43±0.06	0.47±0.06	0.37±0.11
	99416	0.53	0.38	—	—
	98616	—	—	0.40	0.18

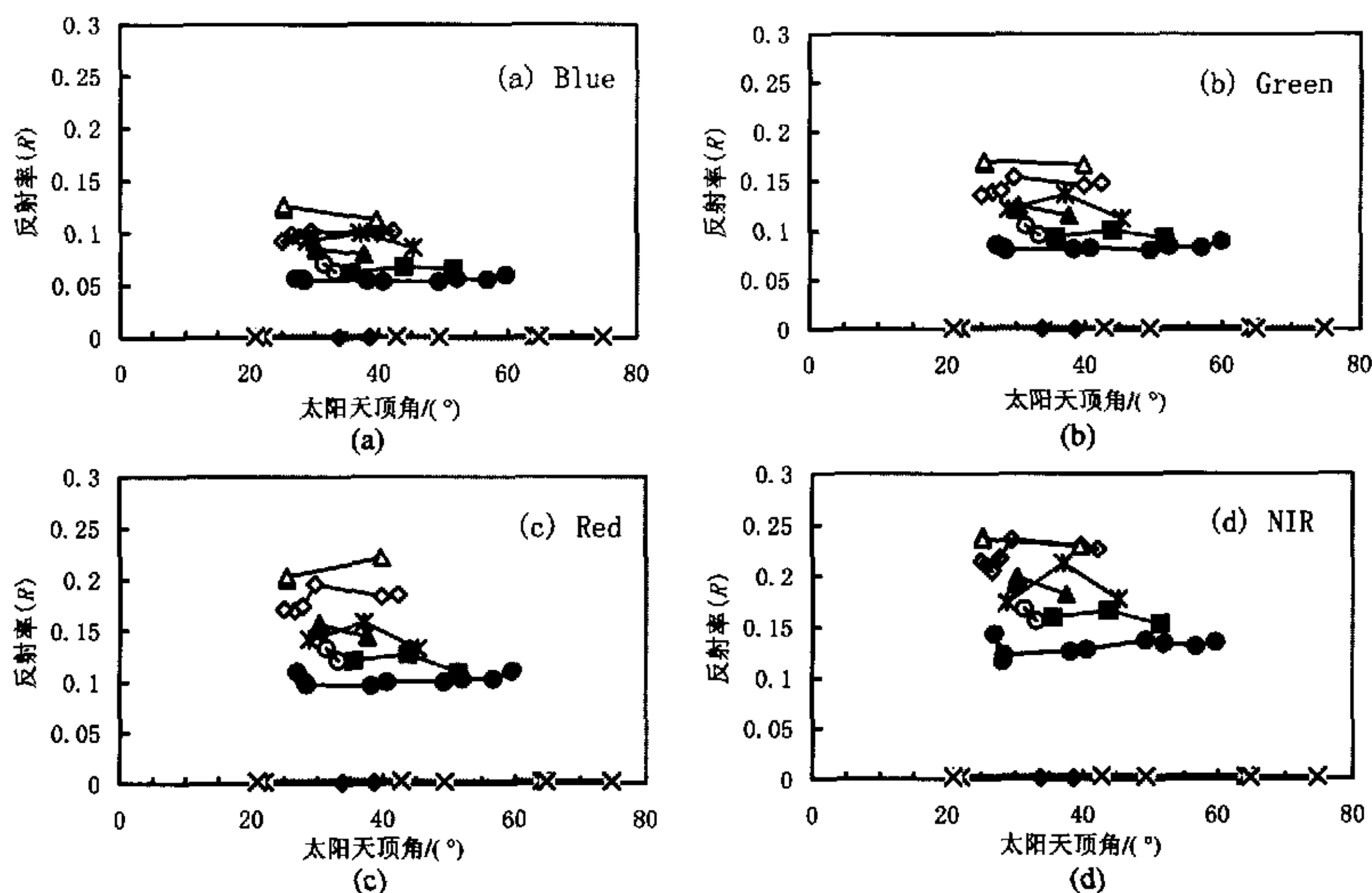


图5 1997年4—5月(返青前—开花前)北京冬小麦田在MODIS蓝、绿、红、近红外4个波段土壤垂直向上反射率的日变化

Fig 5 Change of upward reflectance of soil background of winter wheat field in the MODIS 4 wave bands: blue, green, red and NIR, as the sun zenith from before the re-green to before the flowering, 1997, Beijing

◆:9 Apr., ■:17 Apr., ▲: 18 Apr, ○: 22 Apr., *: 29 Apr.,●: 9 May, ×: 16 May, △: 17 May

4.3 冬小麦田土壤垂直向上光谱反射率的季相变化

这里用1997年北京冬小麦田的实测数据,按MODIS 4个波段的值来讨论土壤垂直向上反射率的季相变化。整个观测期间,0—5cm土层内含水量变化在6.4—11.6mm之间,平均值为 8.5 ± 2.2 mm。图5给出了1997年4—5月9天实测的在MODIS 4个波段土壤反射率的日变化曲线。

从图5看到:在MODIS的4个波段中,土壤反射率在近红外波段最大,其次为红光区、再次为绿光区,蓝光区最小。土壤垂直向上反射率的日变化比较小,按测量值较多的各天统计,日平均值的均方差与平均值之比大致在6%以内。1997年4月9日和5月16日两天4个波段的数据几乎接近于零,我们没有找到原因。除这两天之外,蓝光区在整个测量期间土壤反射率的变化范围为0.06—0.13,绿光区为0.09—0.17,红光区为0.11—0.21,近红外光谱区为0.14—0.24。

5 结论和讨论

积累和建立不同类型植被地面实况知识的数据库,是对植被多角度卫星遥感数据定量研究中一个重要和迫切需要解决的问题。本文根据我们多年来在北京、山东禹城和河北栾城三地的中国科学院农业生态试验站进行的农田实验研究中,积累的不同品种冬小麦的实测数据,讨论了冬小麦群体植被组分的几何结构、光学特性和土壤光学特性等参数的季相变化规律。具体内容包括:(1)叶面积指数的季相变化;(2)叶茎穗面积在这3种组分总面积中比例的季相变化;(3)叶倾角分布特征的季相变化;(4)叶茎穗光学特性的季相变化;(5)土壤垂直向上反射率的季相变化。它们覆盖的生育期,对叶面积指数而言,是冬小麦从出苗—成熟期内的动态过程,对其它4项内容,覆盖了冬小麦从返青后的迅速生长—成熟衰老这一重要生育阶段的动态过程。在对内容(1)和(2)的季相变化过程的讨

论中,我们用相对有效积温作为时间变量,这样能更好地反映作物本身生长发育的进程,而且对一个特定的地区而言,能把不同品种、不同耕作管理措施下群体的季相变化特征统一在同一规律之下,在本文的研究中这一尝试是成功的,这是一项有新意和特色的工作。在内容(2)和(4)中,将叶茎穗分别予以考虑,这样的工作并不多见,这些参数对更客观和有效地揭示冬小麦群体二向反射的变化特征是很有意义的。这是一份比较系统的结果,并具有较好的代表性。

最后还要指出的是,本文中叶面积指数的动态变化曲线是采用我们自己的实测结果得到的,若对大田而言,各群体间的差异还要大,尤其是在抽穗—成熟这段时间内。由于在以往的农田实验中,测量的仅仅是能进行光合作用的绿叶,因此,在对内容(1)和(2)的分析中,没能考虑黄叶或黄绿叶的影响,实际上在作物生长的后半阶段,黄叶和黄绿叶也是植株上的组成部分,它们对群体的BRDF是有影响的。因此,在将这些参数用于对冬小麦冠层BRDF的研究时,对以上这两点不足之处应予以注意。

参 考 文 献 (Refereneces)

- [1] Li, X., Strahler, A. H. A knowledge-based inversion of physical BRDF model and three examples [C], Proceedings of IGARSS'96, 1996, 2173—2175.
- [2] Li Xiaowen, Wang Jindi. Inversion of vegetation remote sensing (Chapter 7), Models of vegetation optics remote sensing and parameterize of vegetation geometry [M]. Science Press in China, 1995. [李小文、王锦地. 植被遥感模型的反演(第七章), 植被光学遥感模型与植被结构参数化. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [3] Li Xiaowen, Wang Jindi, Hu Baoxin, Alan, H. Strahler. On utilization of a priori knowledge in inversion of remote sensing models [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(1):67—72. [李小文, 王锦地, 胡宝新, A. H. Strahler. 论先验知识在遥感反演中的作用. 中国科学(D辑), 1998, 28(1):67—72.]
- [4] Xiang Yueqin, Zhou Yunhua, Cui Jingfang. Measurements of canopy geometry of winter wheat, experimental study of environment of field crops [C]. Meteorological Press, 1990, 92-103. [项月琴, 周允华, 崔景芳. 冬小麦群丛几何结构的测量, 农田作物环境实验研究. 气象出版社, 1990, 92—103.]
- [5] Zhou Yunhua, Xiang Yueqin, Lin Zhonghui *et al.* Simulation of winter wheat and summer maize production under optimum condition [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(3), 257-262. [周允华, 项月琴, 林忠辉, 栾禄凯. 一级生产水平下冬小麦, 夏玉米的生产模拟. 应用生态学报, 1997, 8(3):257—262.]
- [6] Zhang Renhua, Qin Wenhan. Collection of Bidirectional reflectance spectrum of main crops in north China, Volume on allocated field experimental station (No.4), Basic data of geography in China [C]. Science Press in China, 1991. [张仁华, 覃文汉. 中国地理基础数据, 野外定位实验站卷(第四集), 中国北方主要农作物双向反射光谱数据集. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [7] Dong Zhengguo, Yu Huming. Environmental ecology of field crops canopy [M]. Chinese Agriculture Science and Technology Press, 1994. [董振国, 于沪宁. 农田作物层环境生态. 中国农业科技出版社, 1994.]
- [8] Xiang Yueqin, Tian Guoliang. Estimating rice yield from remotely sensing data—relating yield to total intercepted radiation [J]. *Chinese Journal of Remote Sensing*, 1988, 3(4): 308—316. [项月琴, 田国良. 遥感估算水稻产量 I. 产量与辐射截获量间关系的研究. 环境遥感, 1988, 3(4): 308—316.]
- [9] Wang Xinli. How to use the Logistic equation reasonably in the simulation of dry matter accumulation of crops [J]. *Agriculture Meteorology*, 1986,7(1):14—19. [王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理利用 Logistic 方程. 农业气象, 1986, 7(1): 14—19.]
- [10] Qin Wenhan. Modeling bi-directional reflectance of multicomponent vegetation canopies [J]. *Remote Sensing Environ.*, 1993, 46:235—245.
- [11] De Wit, C. T. Photosynthesis of leaf canopies, Agricultural Research Reports [M]. Center for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen, 1965.
- [12] Horler D. N. H., M. Dockray, J. Barber. The red edge of plant leaf reflectance [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1983, 4(2): 273—288.
- [13] Qin Wenhan. Study of vegetation BRDF model and their primary application [D]. Institute of Geography, CAS, July 1992. [覃文汉. 植被双向反射的模型研究与应用初探. 博士论文, 中国科学院地理研究所, 1992.]

Seasonal Change of Features of Foliage Components of Winter Wheat and Soil Background Applied in BRDF Remote Sensing

XIANG Yue-qin¹, WANG Jin-di², LI Xiao-wen², ZHENG Lan-fen³,
LIN Zhong-hui¹, LI Jun¹, MO Xing-guo¹

(1. Institute of Geography Sciences and Natural Resources, CAS, Beijing, 100101, China;

2. Research Center of Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China;

3. Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing, 100101, China)

Abstract: In the study of inversion of BRDF physical models Li and Strahler presented an option of inversion based on the priori knowledge. They emphasized that to accumulate the knowledge of ground objects is important. For the purpose of the requirement of study of BRDF physical model and the model inversion, in this article, based on the data collected in the field experiments on different varieties of winter wheat, in Beijing, Luan Cheng of Hebei Province and Yu Cheng of Shandong Province in different years, the seasonal change of geometry and optics of foliage components and the optics of soil background are presented. It consists of the following five contents. (1) the seasonal change of leaf area index, (2) the seasonal change of ratio of leaf area, stem area and ear area to the sum area of these three foliage components, (3) the seasonal change of leaf inclination, (4) the seasonal change of optics of leaf, stem and ear, (5) the seasonal change of upward reflectance of soil background. It is a set of representative results in coverage of main growing period, of different varieties of winter wheat in the middle part of North China Plain.

Key words: BRDF; winter wheat; foliage components and soil background; geometry and optics; seasonal change