

文章编号: 1007-4619(2007)01-0009-11

植株冠层几何形状对草地反射率的影响

张 娜, 赵英时

(中国科学院 研究生院 资源与环境学院, 北京 100049)

摘 要: 本研究建立了一个反映植被辐射传输和几何光学特性的混合模型, 以模拟半干旱地区天然草地的多波段反射率值。该模型引入一个几何相似性参数, 用以描述植株冠层的几何形状对叶/枝角分布、阴影地面比例、冠层和地面各光学分量、冠层反射率和总反射率的影响。模型模拟值与研究区 3 个不同退化程度羊草草地的实测值较为吻合, 而且退化程度越轻的草地, 模拟效果也越好。对于中度退化草地, 在高度与冠幅之比 (chw) 不变的情况下, 当 $45^\circ \leq \text{太阳天顶角 } sza \leq 75^\circ$ 时, 不同几何形状植株的总反射率之间无显著差异; 当 $0^\circ \leq sza < 45^\circ$ 或 $75^\circ < sza \leq 90^\circ$ 时, 锥体与球体和柱体植株的总反射率之间有较显著差异; 而球体和柱体植株的总反射率之间始终无显著差异。当 chw 由小到大变化时, 以上结论基本不变。

关键词: 辐射传输; 几何光学; 反射率模型; 几何相似性参数; 植株冠层的几何形状; 半干旱天然草地

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

Effects of Plant Crown Shape on Reflectance of Grassland

ZHANG Na ZHAO Ying-shi

(College of Resources and Environment Graduate University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China)

Abstract The study established an integrated model combining radiative transfer and geometric optical properties in order to simulate multi-spectral reflectance of semi-arid natural grassland. The model introduced a geometrical similarity parameter, which describes the influences of plant crown shape on leaf/branch angle distribution, frequencies, fraction of shadowed or illuminated canopy and background, canopy reflectance, and finally scene reflectance. The simulated results agreed with the measured values in the three *Leymus chinense* grasslands with different degradation degree, and the lower was degradation degree, the better were simulated results. For the moderately degraded grasslands, if plant crown height-to-width ratio (chw) was invariant, when $45^\circ \leq \text{solar zenith angle (sza)} \leq 75^\circ$, no significant differences occurred in scene reflectance (R) for different plant crown shapes, and when $0^\circ \leq sza < 45^\circ$ or $75^\circ < sza \leq 90^\circ$, there existed significant differences in R between conic plant crown and spherical and cylindrical plant crown, but no significant differences between spherical and cylindrical plant crown in all cases. If chw was changed, the above conclusions were still agreed.

Key words radiative transfer; geometric optics; reflectance model; geometrical similarity parameter; plant crown shape; semi-arid natural grassland

1 引 言

国内外对反射率模型的研究已有很多。在森林

中较多使用辐射传输模型和几何光学模型, 而在草地中则以辐射传输模型为主, 对植株的几何光学特性考虑较少, 尤其是常常忽略植株冠层的几何形状对反射的影响, 主要原因可能是草地植株冠层的几何形状不

收稿日期: 2005-07-07; 修订日期: 2005-12-26

基金项目: 国家重点基础研究规划项目“973”课题“定量遥感在西部生态环境建设中的应用示范研究”(编号: G200077907)和中国科学院研究生院院长基金项目“景观尺度生态系统生产力过程模型研究——以内蒙古地区天然草地为例”(编号: yzjj200205)。

作者简介: 张 娜 (1973—), 女, 博士, 副教授, 2001 年毕业于中国科学院地理科学与资源研究所生态学专业。现为中国科学院研究生院资源与环境学院教师, 主要从事景观生态学、全球变化和定量遥感应用等研究工作, 已发表论文 18 篇。

很明显,因此不易判断。实际上,草地植被的类型比森林更多,其冠层几何形状也各异。因此,要较真实而准确地反映草地植被的反射状况,更好地将遥感信息与小尺度生态学变量相联系,就有必要区分不同植被类型及其植株冠层的几何形状。本研究结合半干旱地区植株生长、植被分布和地表覆盖的特征,试图建立一个反映天然草地辐射传输和几何光学特性的混合模型,以模拟多波段的反射率值。

2 研究区概况

研究区位于内蒙的中部偏北,自然地理位置为 $114.50^{\circ}\text{E}-117.17^{\circ}\text{E}$, $42.95^{\circ}\text{N}-44.98^{\circ}\text{N}$,包括锡林河流域及其西部地区。在生态区划上位于温带典型草原区,具有高度的生态地理代表性。海拔高度一般为 $1000-1350\text{m}$;坡度很小,一般为 $0-1.6^{\circ}$,最大仅达 4.364° 。该地气候属温带半干旱草原气候,季节变化显著,冬季寒冷干燥,夏季较为暖湿。年平均气温 1.7°C 左右,最冷月(1月)的平均气温约 -22.3°C ,最热月(7月)约 18.8°C 左右, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温大约 1600°C ,年降水量 350mm 左右^[1,2]。土壤以栗钙土和风沙土为主,土壤质地以中壤土和砂土为主。地带性植被为典型草原,主要包括温带丛生禾草原和温带禾草、杂类草草原,以羊草(*Leymus chinense*)+丛生禾草群落和大针茅(*Stipa grandis*)+禾草+杂类草群落为主^[3]。土地利用类型主要为不同覆盖度的草地,其次为沼泽滩地、灌丛和沙地。

3 半干旱天然草地多波段反射率遥感模型

3.1 模型描述

与森林相比,半干旱地区草地植被和地表状况具有其特殊性:(1)受该地区自然气候条件以及长久以来过度放牧和土地退化的影响,植物种类比较单一,植株生长很稀疏,地面裸露较多而明显,这意味着不同植株冠层之间的相互重叠和相互遮阴可被忽略,同时背景地面的状况非常值得考虑;(2)假设植株冠层都具有理想的几何形状,而且同类植被的冠层几何形状相似;(3)研究区内草地的空间异质性较低,可以假设同一像元中植被类型或土地利用类型相同,整个研究区的植被是具有草冠和间隙的非连续性冠层,植株在空间上呈随机分布。

本模型是一个辐射传输与几何光学相耦合的模

型,包括3个子模块(图1): Geolim, PROSA IL^[4-8]和 SOILSPECT^[9,10]。其中, PROSA IL子模块融合了辐射传输模型(Scattering from Arbitrarily Inclined Leaves SA IL)^[11-13]和 PROSPECT模型^[14,15], PROSA IL和 SOILSPECT子模块基本保持原模型的表达。Geolim子模块则综合了森林光合作用模型(Forest Light Interaction Model FLIM)^[16], GeoSA IL模型^[17], Jasinski几何光学模型^[18-20]和作物几何光学模型(Crop Geometry Interaction CGI)^[21],并进行了部分改进,以下将详细论述以上各模型被综合和改进的部分。模型模拟的总反射率可表示为:

$$R(\lambda) = R_c(\lambda)C + R_g(\lambda)G \quad (1)$$

式(1)中, $R(\lambda)$ 为传感器所接收的总反射率, $R_c(\lambda)$ 为 λ 波段的植被冠层反射率, $R_g(\lambda)$ 为 λ 波段的地面反射率, C 和 G 分别为冠层和地面对 $R(\lambda)$ 的贡献因子。

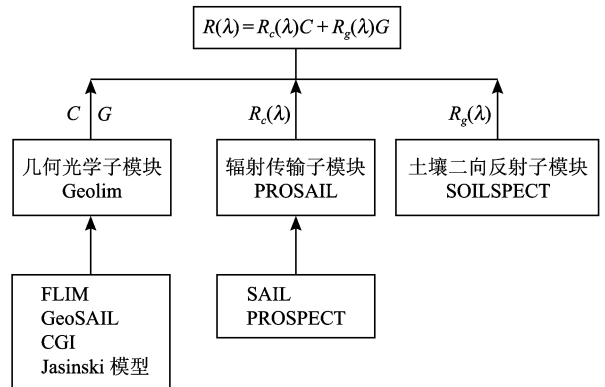


图 1 反射率模型建立的框架

Fig 1 Framework of developing reflectance model

本模型的主要改进之处在于:根据 Jasinski模型和 GeoSA IL模型的原理,引入几何相似性参数 η ,以描述不同的植株冠层几何形状。 η 实际上是植被投射于地面的平均阴影面积与平均冠层面积的比例。使用 η 可将相关冠层面积与阴影地面面积的所有几何因子归结为一个变量,从而使问题得到简化^[17]。

植株冠层的几何形状决定其截获的总光能量,并限制叶在冠层上的生长位置^[17,22],从而影响不同时期叶枝角分布、阴影地面比例、冠层和地面各光学分量、冠层和地面对总反射率的贡献因子,最终影响总反射率。尽管植株冠层的几何形状千变万化,但实际上许多景观只有几个优势物种,可将植株冠层的几何形状简单地标准化,以达到用最少的变量来参数化冠层形状的目的^[19]。根据研究区的草地植被类型,模型考虑了3种几何形状:球体、柱体和

锥体。如果不考虑相互重叠的影响, 那么决定 η 的主要因素是植株冠层本身的几何特征 (如高度与冠幅之比 chw) 和太阳天顶角 (sza)^[19]:

$$\text{对柱体: } \eta = chw \tan(sza) \quad (2)$$

对锥体: 设锥体的向角 (aspect angle) 为 ψ (图 2)。若 $\psi \leq sza$, 则可用下式表示 η :

$$\begin{aligned} \eta &= (\tan\beta - \beta) / \pi \\ \beta &= \arccos(\tan\psi / \tan(sza)) \\ \psi &= \arctan(1 / (2chw)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{对球体: } \eta = \tan(sza) \sin(sza) \quad (4)$$

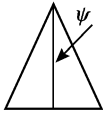


图 2 锥体植株的向角

Fig 2 Aspect angle of conic plant crown

3.1.1 不同时期叶/枝角分布

具有不同几何形状的植株冠层, 其不同时期

叶/枝角分布也不尽相同。本研究选取 $0-90^\circ$ 之间的 13 个倾角, 对应于各倾角的具体叶/枝角分布见表 1。不同几何形状植株冠层在生长季初期、中期和末期的叶/枝角分布型见表 2。通过叶角分布频率函数可实现生长季不同时期叶/枝角分布的线性内插^[21]。首先, 设 $lang[0][il]$ 、 $lang[1][il]$ 和 $lang[2][il]$ 分别为生长季第一天、当中天和最后一天的叶角分布频率函数; il 为叶倾角数; day 为以生长季初期为起点的天数; s 为生长季持续时间 (天数)。分两种情况考虑叶/枝角分布 $f[day][il]$ 随时间 (day) 的变化:

若 $day \leq 0.5s$ 则

$$f[day][il] = \{ lang[0][il] \times (0.5 \times s - day) + lang[1][il] \times day \} / (0.5 \times s) \quad (5)$$

若 $day > 0.5s$ 则

$$f[day][il] = \{ lang[1][il] \times (0.5 \times s - (day - 0.5 \times s)) + lang[2][il] \times (day - 0.5 \times s) \} / (0.5 \times s) \quad (6)$$

表 1 内蒙研究区植株的叶/枝角分布

Table 1 Leaf/branch angle distribution frequencies of plants in Inner Mongolia study region

倾角 / ($^\circ$)	5.0	15.0	25.0	35.0	45.0	55.0	65.0	75.0	81.0	83.0	85.0	87.0	89.0
1	0.0152	0.0451	0.0737	0.1000	0.1233	0.1428	0.1580	0.1684	0.0345	0.0346	0.0348	0.0349	0.0349
2	0.0022	0.0154	0.0401	0.0733	0.1111	0.1489	0.1822	0.2068	0.0434	0.0438	0.0441	0.0443	0.0444
3	0.2200	0.2068	0.1822	0.1489	0.1111	0.0733	0.0401	0.0154	0.0011	0.0007	0.0003	0.0001	0.0000
4	0.0088	0.0567	0.1300	0.1945	0.2200	0.1945	0.1300	0.0567	0.0043	0.0026	0.0014	0.0005	0.0001

注: “1”表示球型; “2”表示喜直型; “3”表示喜平型; “4”表示喜斜型 (引自 SA II 模型的说明文档)。

表 2 不同几何形状植株冠层在生长季不同时期的叶/枝角分布型

Table 2 Leaf/branch angle distributions of plant crowns with different geometrical shapes during the different periods of growing seasons

叶/枝角分布型	球体	柱体	锥体
生长季初期	喜直/喜直型	喜直/喜直型	喜直/喜平型
生长季中期	球/喜直型	球/喜直型	喜平/喜平型
生长季末期	喜斜/喜直型	喜斜/喜直型	喜斜/喜平型

3.1.2 阴影地面比例

阴影地面比例是植株的空间分布、冠层几何形状、太阳天顶角和观测天顶角 (vza) 的函数。首先,

若不考虑植株冠层的几何形状, 则根据植株在空间上呈随机分布的假设, 并综合植株盖度 c_0 的表达式, 可以得到阴影地面的比例 c_s ^[16]:

$$c_s = 1 - (1 - c_0)^{\frac{\cos(vza)}{\cos(sza)}} \quad (7)$$

若考虑植株冠层的几何形状, 则上式可改进为:

$$c_s = 1 - (1 - c_0)^{\cos(vza) \times (\eta+1)} \quad (8)$$

式 (8) 中, η 的引入对于阴影地面比例的估算非常有利, 为估算不同太阳天顶角下阴影地面的比例提供了一种便利的分析机制^[20]。

对于草类和灌木, 植株盖度 c_0 的估计使用“Dutch”关系式。该关系式是根据小麦的叶面积指数 (LAI) 与盖度之间的关系得出的^[21, 23]:

$$c_0 = 1 - \exp\left(-\frac{LAI}{L_{max}} \times \sec(vza)\right) \quad (9)$$

式(9)中 c_{max} 为最大盖度(%)。

3.1.3 冠层和地面光学分量

在本模型中,将冠层分量和地面分量分别考虑,即将冠层分为被覆盖的部分(c_0)和不被覆盖的部分(开阔空间)($1-c_0$),将地面分为冠层下的部分和开阔空间中的部分。

植株冠层的几何形状不同,地面各光学分量所占的面积比例也不同。对于柱体和球体形状的植株,可近似认为冠层均被光照(所占比例即为植株盖度 c_0),没有阴影面。根据冠层和地面几何光学特性及两者之间的关系,可将地面分为 4 个光学分量,它们所占的面积比例分别为: F_{cd} (冠层下的阴影地面)、 F_{cs} (冠层下的光照地面)、 F_{od} (开阔空间中的阴影地面)、 F_{os} (开阔空间中的光照地面)(图 3)。 F_{cd} 、 F_{cs} 、 F_{od} 和 F_{os} 可用下式计算^[16]:

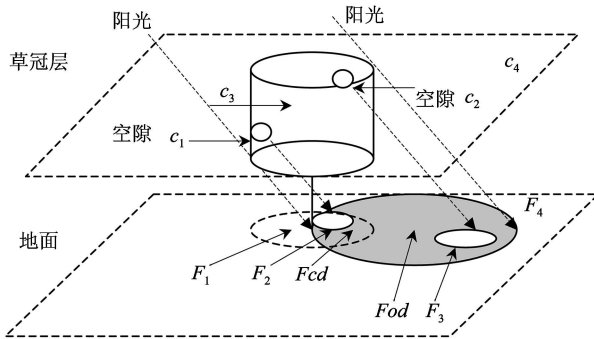
$$F_{cd} = c_0 c_s + \rho [c_0 (1 - c_0) c_s (1 - c_c)]^{0.5} \quad (10)$$

$$F_{cs} = c_0 (1 - c_s) - \rho [c_0 (1 - c_0) c_s (1 - c_c)]^{0.5} \quad (11)$$

$$F_{od} = (1 - c_0) c_s - \rho [c_0 (1 - c_0) c_s (1 - c_c)]^{0.5} \quad (12)$$

$$F_{os} = (1 - c_0) (1 - c_s) + \rho [c_0 (1 - c_0) c_s (1 - c_c)]^{0.5} \quad (13)$$

式(10)~式(13)中, ρ 为 c_s 与 c_0 之间的相关系数。 $F_{cd} + F_{cs} + F_{od} + F_{os} = 1$ (总地面面积比例), $F_{cd} + F_{cs} = c_0$ (冠层面积比例), $F_{cd} + F_{od} = c_s$ (阴影地面面积比例), $F_{cs} + F_{os} = 1 - c_s$ (光照地面面积比例)。



c_1 和 c_2 为草冠层中的空隙面积比例, c_3 为整个草冠层的面积比例(包括空隙), c_4 为草冠层以外的开阔空间比例, 则 $c_0 = c_3 - c_1 - c_2$, $1 - c_0 = c_1 + c_2 + c_4$ 。 F_2 为空隙 c_1 在冠层下的地面光斑, F_3 为空隙 c_2 在开阔空间中的地面光斑, 则 $F_{cs} = F_1 + F_2$, $F_{os} = F_3 + F_4$ 。

图 3 圆柱体植株的冠层和地面分量

Fig 3 Crown and ground surface fractions for cylindrical plant crown

对于锥体形状的植株,若 $\psi \leq \theta_s$, 则冠层部分被光照(所占比例为 $c_0(1 - c_{sh})$), 部分为阴影(所占比

例为 $c_0 c_{sh}$)。 c_{sh} 为阴影冠层在所有冠层中所占的比例,可用下式表示:

$$c_{sh} = \beta \cos(vza) / \pi \quad (14)$$

根据冠层和地面几何光学特性及两者之间的关系,可将地面分为 6 个光学分量,它们所占的面积比例分别为: F_{cd} (光照冠层下的阴影地面)、 F_{cs} (光照冠层下的光照地面)、 F_{sd} (阴影冠层下的阴影地面)、 F_{ss} (阴影冠层下的光照地面)、 F_{od} (开阔空间中的阴影地面)、 F_{os} (开阔空间中的光照地面)。 F_{cd} 、 F_{cs} 、 F_{od} 和 F_{os} 可用下式计算:

$$F_{cd} = c_0 (1 - c_{sh}) c_s + \rho [c_0 (1 - c_0) c_s (1 - c_c)]^{0.5} \quad (15)$$

$$F_{cs} = c_0 (1 - c_{sh}) (1 - c_s) - \rho [c_0 (1 - c_0) c_s (1 - c_c)]^{0.5} \quad (16)$$

$$F_{sd} = c_0 c_{sh} c_s + \rho [c_0 (1 - c_0) c_s (1 - c_c)]^{0.5} \quad (17)$$

$$F_{ss} = c_0 c_{sh} (1 - c_s) - \rho [c_0 (1 - c_0) c_s (1 - c_c)]^{0.5} \quad (18)$$

$$F_{od} = (1 - c_0) c_s - \rho [c_0 (1 - c_0) c_s (1 - c_c)]^{0.5} \quad (19)$$

$$F_{os} = (1 - c_0) (1 - c_s) + \rho [c_0 (1 - c_0) c_s (1 - c_c)]^{0.5} \quad (20)$$

其中, $F_{cd} + F_{cs} + F_{sd} + F_{ss} + F_{od} + F_{os} = 1$ (总地面面积比例), $F_{cd} + F_{cs} = c_0 (1 - c_{sh})$ (光照冠层面积比例), $F_{sd} + F_{ss} = c_0 c_{sh}$ (阴影冠层面积比例), $F_{cd} + F_{sd} + F_{od} = c_s$ (阴影地面面积比例), $F_{cs} + F_{ss} + F_{os} = 1 - c_s$ (光照地面面积比例)。

3.1.4 地面对总反射率的贡献

设 $T_c(\lambda)$ 为对太阳光的冠层透射率(地面光照透射率), $T_o(\lambda)$ 为对射向观测方向的冠层透射率。 $R_g(\lambda)$ 和 $T_c(\lambda)$ 可分别从 SOILSPECT 和 SA IL 子模块的输出结果中得到,对 $T_o(\lambda)$ 可通过下式计算^[16]

$$T_o(\lambda) = T_c(\lambda) \frac{\cos(\theta_{sm})}{\cos(vza)} \quad (21)$$

对柱体和球体形状的植株,地面各光学分量对 $R(\lambda)$ 的贡献分别为^[16]: G_{cd} (冠层下的阴影地面): $F_{cd} T_c(\lambda) R_g(\lambda) T_o(\lambda)$; G_{cs} (冠层下的光照地面): $F_{cs} R_g(\lambda) T_o(\lambda)$; G_{od} (开阔空间中的阴影地面): $F_{od} T_c(\lambda) R_g(\lambda)$; G_{os} (开阔空间中的光照地面): $F_{os} R_g(\lambda)$ 。地面对 $R(\lambda)$ 的贡献因子 G 为:

$$G = F_{cd} T_c(\lambda) T_o(\lambda) + F_{cs} T_o(\lambda) + F_{od} T_c(\lambda) + F_{os} \quad (22)$$

对锥体形状的植株,若 $\psi \leq \theta_s$, 则地面各光学分量对 $R(\lambda)$ 的贡献分别为: G_{cd} (光照冠层下的阴影地面): $F_{cd} T_c(\lambda) R_g(\lambda) T_o(\lambda)$; G_{cs} (光照冠层下的光照地面): $F_{cs} R_g(\lambda) T_o(\lambda)$; G_{sd} (阴影冠层下的阴影地面): $F_{sd} T_c(\lambda) R_g(\lambda) T_o(\lambda)$; G_{ss} (阴影冠层下的光照地面): $F_{ss} R_g(\lambda) T_o(\lambda)$; G_{od} (开阔空间中的阴影地

面): $F_{od} T_c(\lambda) R_g(\lambda)$; G_{os} (开阔空间中的光照地面): $F_{os} R_g(\lambda)$ 。地面对 $R(\lambda)$ 的贡献因子 G 为:

$$G = F_{od} T_c(\lambda) T_o(\lambda) + F_{cs} T_o(\lambda) + F_{sd} T_c(\lambda) T_o(\lambda) + F_{ss} T_o(\lambda) + F_{od} T_c(\lambda) + F_{os} \quad (23)$$

3.1.5 冠层对总反射率的贡献

对柱体和球体形状的植株, 冠层均被光照, 冠层对 $R(\lambda)$ 的贡献因子 C 为:

$$C = (1 - T_c(\lambda) \times T_o(\lambda)) \times c_s c_o \quad (24)$$

上式右边乘 c_s 和 c_o 是因为: c_s 控制冠层所截获的光能, c_s 越大说明冠层所截获的光能越多; c_o 则控制可见冠层对 $R(\lambda)$ 的贡献^[16]。

对锥体形状的植株, 若 $\psi \leq sza$, 则冠层部分被光照, 部分为阴影。冠层对 $R(\lambda)$ 的贡献因子 C 分为光照冠层和阴影冠层的贡献因子 C_{co} 和 C_{csh} :

$$C = C_{co} + C_{csh} \quad (25)$$

$$C_{co} = (1 - T_c(\lambda) \times T_o(\lambda)) \times c_s c_o (1 - c_{sh}) \quad (26)$$

$$C_{csh} = (1 - T_c(\lambda) \times T_o(\lambda)) \times c_s c_o c_{sh} \quad (27)$$

3.1.6 总反射率

一个像元的 $R(\lambda)$ 由植冠透射和反射、地面反射, 以及光照和阴影冠层、冠层下的光照和阴影地面、开阔空间中的光照和阴影地面各分量的比例来共同决定, 因此, 可以通过对冠层和地面反射率与其对 $R(\lambda)$ 贡献的乘积的线性组合进行估计^[16] (见式(1))。

3.2 模型的主要参数

表 3 列出了反射率模型中各子模型的主要参数, 参数的取值来源, 以及研究区 2001 年 7 月 28 日中度退化羊草草地的参数值。

3.3 模型的验证

首先, 选取内蒙研究区 2001 年 7 月 28 日 3 个不同退化程度 (轻度、中度和重度退化) 的羊草草地作为验证反射率模拟值的样地。然后, 将不同草地的参数值分别代入模型, 得出不同波段的反射率模拟值 ρ_{mod} , 并与 2001 年 7 月 10 日 MODIS 图像第 1-7 波段的中心波段的反射率实测值 ρ_{meas} 进行比较。模型模拟的结果用平方根误差 (Root Mean Square Error RMSE) 来评价:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_{meas}(\lambda) - \rho_{mod}(\lambda))^2}{n}} \quad (28)$$

一般地说, 若 $RMSE < 0.02$, 则模拟效果较好。所选 3 个样地的反射率模拟效果均较好, $RMSE$ 约为 0.020, 而且退化程度越轻的草地, 模拟效果也越好 (图 4)。其中, 在可见光波段模拟值与实测值很吻合, 在近红外波段模拟值偏高, 而在中红外波段模拟值偏低, 第 5 波段 (约 1240nm 处) 是转折点。对不同退化程度的草地均呈现此类似规律。

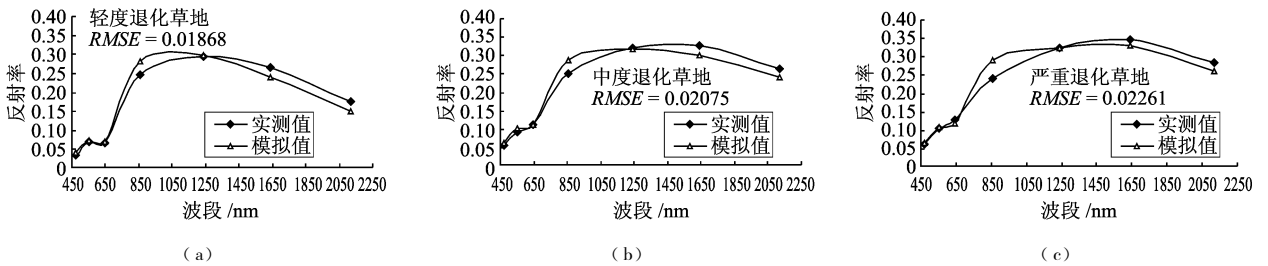


图 4 反射率模型模拟值与实测值的比较

Fig 4 Comparison between modeled and measured reflectance

4 几何相似性参数和阴影地面比例的变化

在草类植株的高度与冠幅之比 chw 不变的情况下, 几何相似性参数 η 随着 sza 的增大呈指数增长。相应地, 阴影地面的比例 c_s 随着 sza 的增大呈幂律增长, 趋向于最大值 1 (图 5)。

当 chw 为 1.2 时, 对不同几何形状的植株, 其 η 和 c_s 的大小关系均为: 柱体 > 球体 > 锥体。对 η , sza

越大, 不同几何形状植株之间 η 的差异也越大, 当 $sza = 0^\circ$ 时, η 均为 0。对 c_s , 当 sza 为 30° 时, 不同几何形状植株之间 c_s 的差异最大; 当 sza 为 0° 或 90° 时, c_s 均相等, 特别地, 当 sza 为 90° 时, c_s 均为 1, 也即当太阳入射方向与地平线平行时, 不论植株的几何形状如何, 其阴影地面的比例为最大 (100%) (图 5)。

当 chw 增大时 (如为 3.5 时), 对不同几何形状的植株, 其 η 和 c_s 的大小关系均为: 柱体 > 锥体 > 球体, 与前者不同。球体形状植株的 η 和 c_s 均不随 chw 变化, 而柱体和锥体形状植株的 η 和 c_s 随着

表 3 天然草地多波段反射率遥感模型的参数

Table 3 Parameters in integrated multispectral reflectance model for natural grassland

子模型	参数	取值来源	中度退化羊草样地取值(举例说明)
SA IL	波段	MODIS 图像 ^[24]	前 1—7 波段
	太阳天顶角 /($^{\circ}$)	从经校正的 8 天合成 MODIS 遥感图像获取	29.39
	观测天顶角 /($^{\circ}$)	同上	52.95
	相对方位角 /($^{\circ}$)	同上	35.42
	叶枝倾角(个数)	根据 SA IL 模型设置	13 个: 5.0, 15.0, 25.0, 35.0, 45.0, 55.0, 65.0, 75.0, 81.0, 83.0, 85.0, 87.0, 89.0
	叶枝角分布	已知生长初、中和末期的值, 通过叶角分布频率函数实现生长季不同时期叶角分布的线性内插	球形 磨直型
	枝的光谱半球反射率	参考 GeoSA IL 模型(依波段而变化)	0.1986, 0.4851, 0.0699, 0.1458, 0.3837, 0.3720, 0.3115
	枝的光谱半球透射率 LAI/(cm^2/m^2)	同上 实测	均为 0.0 1.307
PROSPECT	叶肉界面物质的折射指数	参考 PROSPECT 和 NK 模型 ^[25] (依波段而变化)	1.4476, 1.4346, 1.4924, 1.4721, 1.4031, 1.3499, 1.3033
	叶绿素特定吸收系数 /($\text{cm}^2/\mu\text{g}$)	同上	0.02700, 0.04254, 0.01159, 0, 0, 0
	叶水特定吸收系数 /(cm^{-1})	同上	0.0478, 0, 0, 1.4100, 7.5030, 27.9800
	叶干物质特定吸收系数 /(cm^2/g)	同上	3.624, 1.957, 6.859, 5.184, 2.763, 5.784, 23.798
	白化和干叶的基本层的吸收系数	同上	0, 0, 0.000651, 0, 0, 0, 0
	叶肉结构参数 /(N)	参考文献数据 ^[14, 15]	1.5
	叶绿素 a 和 b 的含量 (Cab) /($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	参考文献数据 ^[26]	68.732(0.0—300.0)
	叶干物质含量 (Cm) /(g/cm^2)	根据草地群落植物地上生物量(干重值)的测定, 以及叶干重在地上总干重中所占的比例估算	0.002644(0.0001—0.0150)
叶水含量 (Cw) /(cm 或 g/cm^2)	根据草地群落植物地上平均鲜重和干重的测定估算	0.0020(0.0001—0.050)	
SOILSPECT	土壤砂质、壤质和粘质含量 /%	根据土壤质地图和卡钦斯基制土壤质地基本分类规则确定	半固定风沙土, 砂粒、壤(粉)粒和粘粒各占 91%, 4% 和 5%
	土壤含水量 /%	实测	12.412
	土壤田间持水量 /土壤萎蔫系数 /%	根据土壤质地确定	12/3
	土壤单次散射反照率 /($\omega(\lambda)$)	根据土壤质地和含水量对不同波段 $\omega(\lambda)$ 的影响确定(依波段而变化) ^[9]	0.557, 0.662, 0.487, 0.486, 0.721, 0.615, 0.399
	散射相函数参数 b, o, b', c'	参考 SOILSPECT 模型(依土壤湿度状况而变化)	1.297, 0.380, 0.242, -0.004
土壤粗糙度参数 h	同上	0.123	
Geolim	植株冠层几何形状	实地观察	方柱体
	冠层高度与冠幅之比 (chw)	根据实测数据估算	2.682
	最大植被盖度 /%	参考文献数据 ^[1, 27, 28]	70

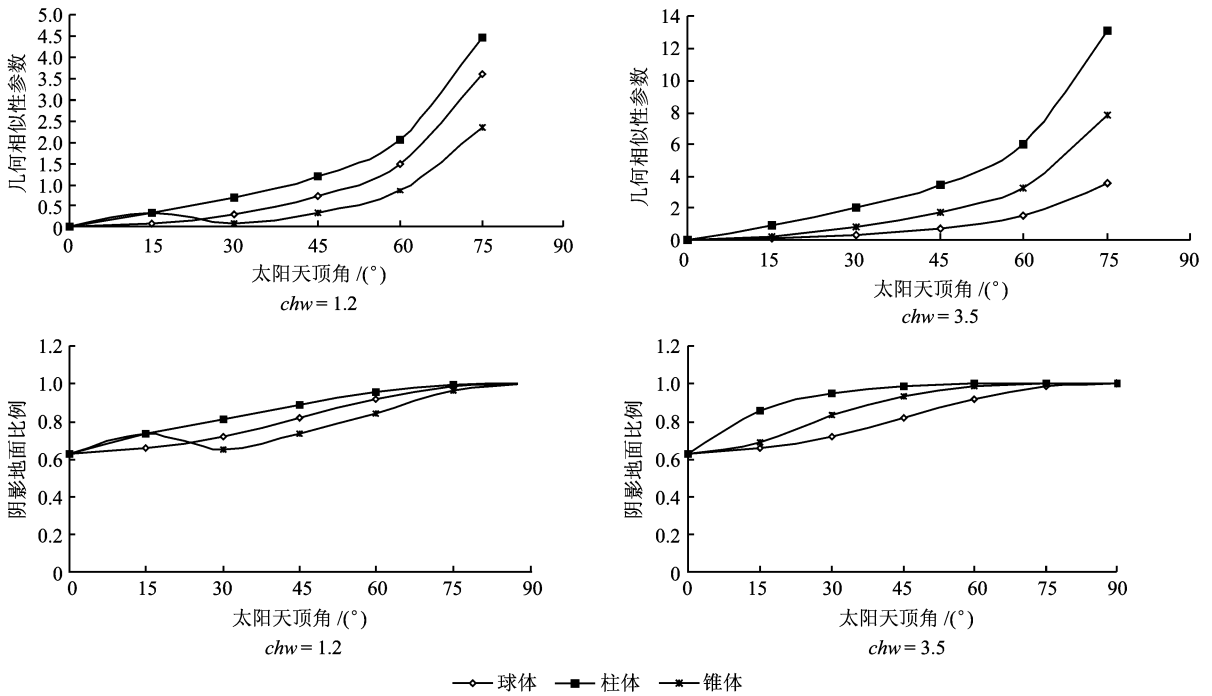


图 5 几何相似性参数和阴影地面比例的变化

Fig 5 Variations of geometrical similarity parameter and fraction of shadowed background

chw 的增大均呈现增大的趋势 (图 5)。

5 不同几何形状植株反射率比较

模型的模拟结果表明,在其他条件均相同的情况下,植株冠层的几何形状不同, η 和 c_s 不同,这将影响冠层和地面各光学分量对总反射率的贡献和冠层反射率,并最终造成总反射率的差异。以下以研究区中度退化羊草草地为例,分析植株冠层几何形状的影响。

首先,根据整个研究区生长最盛期(6月下旬—8月下旬)的 sza 的变化范围(约 20° — 45°)和 chw 的变化范围(约 1.0—3.0),以 $sza = 30^\circ$, $chw = 2.0$ 的情况为例分析植株冠层几何形状的影响(图 6)。结果表明:(1)地面对总反射率的贡献 G 的大小关系为:球体 > 柱体 > 锥体,其中锥体植株显著低于球体和柱体植株,而球体和柱体植株之间并无显著差异。(2)冠层对总反射率的贡献 C 的大小关系大致为:锥体 > 柱体 > 球体,与 G 的大小关系正好相反,其中球体植株显著低于柱体和锥体植株,而柱体和锥体植株之间并无显著差异。(3)冠层反射率的大小关系为:锥体 > 球体 > 柱体,在 4 个红外波段处,锥体植株的冠层反射率显著高于球体和柱体植株,而球体和柱体植株的冠层反射率在所有波段处均无显著差异。(4)总反射率的大小关系与波段有关,

在 3 个可见光波段处为:球体 > 柱体 > 锥体,其中锥体植株显著低于球体和柱体植株,而球体和柱体植株之间并无显著差异;而在 4 个红外波段处,不同形状植株之间均无显著差异。

当考虑 sza 和 chw 的不同组合情况时,植株冠层几何形状的影响有所不同(限于篇幅,以下仅列出对 G 和总反射率的影响):(1)在 chw 不变的情况下,当 sza 约为 60° 和 90° 时,不同几何形状植株的 G 之间并无显著差异;当 $sza < 60^\circ$ 时,锥体植株的 G 显著低于球体和柱体植株,而当 $60^\circ < sza < 90^\circ$ 时,锥体植株的 G 显著高于球体和柱体植株, sza 与 60° 的差值越大,这种差异也趋向于越大;球体和柱体植株的 G 之间始终无显著差异(图 7(a))。(2)在 chw 不变的情况下,当 $45^\circ \leq sza \leq 75^\circ$ 时,不同几何形状植株的总反射率之间无显著差异;当 $0^\circ \leq sza < 45^\circ$ 时,在 3 个可见光波段处,锥体植株的总反射率较显著低于球体和柱体植株;当 $75^\circ < sza \leq 90^\circ$ 时,在 4 个红外波段处,锥体植株的总反射率较显著高于球体和柱体植株;球体和柱体植株的总反射率之间无显著差异(图 7(b))。当 chw 由小到大变化时,以上结论基本不变。

6 结论和讨论

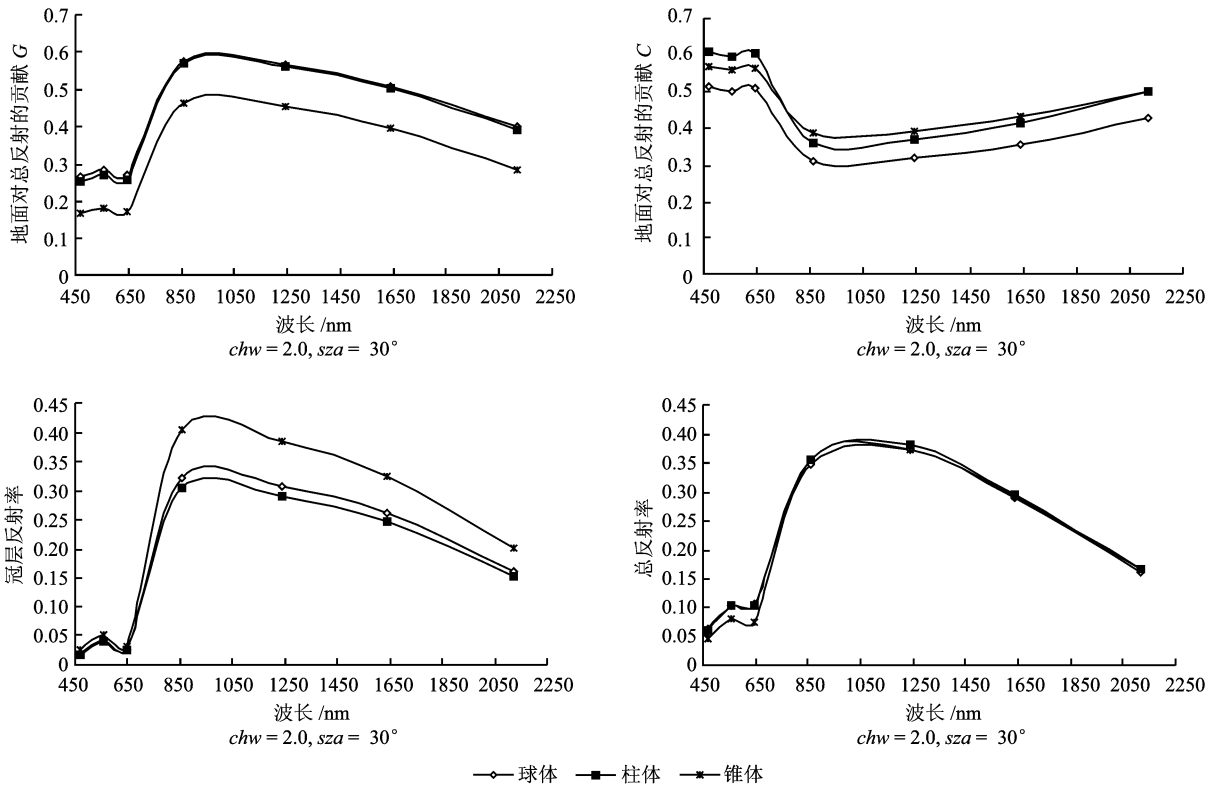


图 6 不同几何形状植株对反射影响的差异

Fig 6 Differences in reflectance among different plant crown shapes

地多波段反射率值的遥感模型。该模型综合了多个子模型,不仅反映草地植被的辐射传输特性,而且反映其几何光学特性。该模型通过引入一个几何相似性参数来反映植株冠层的几何光学特性,从而实现用较为简单的参数描述植株冠层几何形状对叶枝角分布、阴影地面比例、冠层和地面各光学分量、冠层反射率和总反射率的影响。植株冠层几何形状对反射影响的模型假设被研究结果证明成立。但当高度与冠幅之比(chw)和太阳天顶角(sza)取不同值时,冠层几何形状对以上各变量的影响不尽相同,甚至在有些情况下可忽略几何形状对总反射率的影响,尤其是,球体和柱体植株的总反射率之间始终无显著差异。

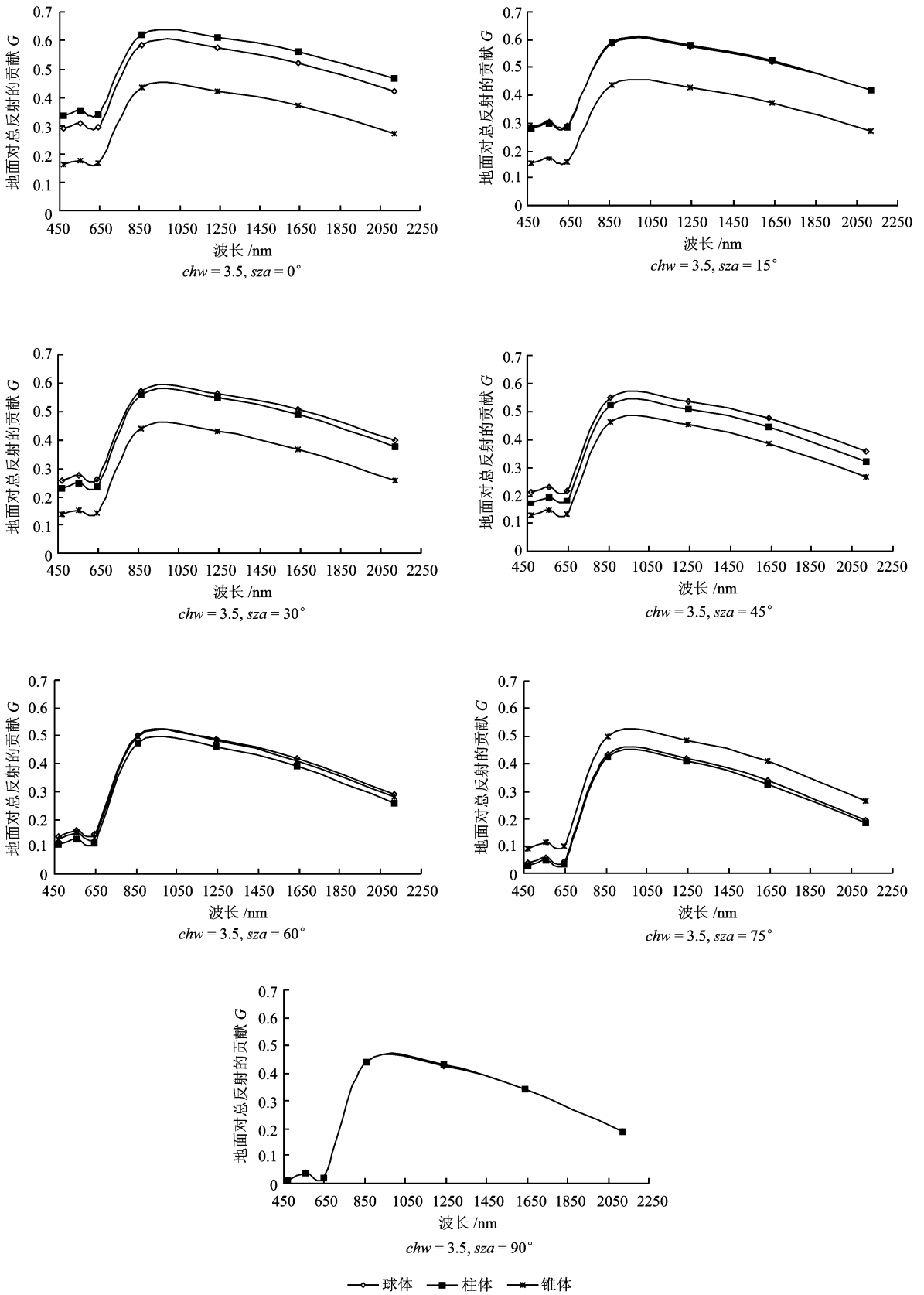
植株冠层几何形状的判断需要结合不同的植被类型,涉及小尺度上的更加细节的描述,例如, chw 随外界条件的变化而不断地被调整,在植株的生长过程中,随其不断增高和变宽, chw 也在不断变化,从而影响植株占据的空间和截获的阳光;而高度与冠幅生长之间的平衡决定于植株与其周边植株的生长机制、植株生长的环境以及资源的数量和分配。因此,遥感模型中对植株细节信息的考虑,有助于遥感信息与个体、种群和群落生态学

中的变量更好地衔接,从而更好地实现遥感技术在生态学中的应用,也为两者的结合开启一个新的研究思路。然而,本研究所建立的模型有其自身的缺陷:

(1)模型的理论性较强。尤其是,根据冠层和地面几何光学特性及两者之间的关系,将地面分为4个或6个光学分量,分别计算各个分量的面积比例及对总反射的贡献时,比一般几何光学模型更加复杂,考虑的分量和因素更多。因此,在一定程度上限制了其实际应用。

(2)模型仅考虑了3种比较理想化的植株冠层几何形状,在今后的模型中可以根据冠层的实际几何形状融入更多的类型,并且用更加确切的函数式表达几何相似性参数。另外,也可考虑与地理信息系统(GIS)中对植株冠层形状的动态模拟相结合,以求更好地反映冠层形状在不同季节和不同生长发育阶段的变化。

(3)在较大的尺度上是否需要考虑植株的几何形状这一细节信息,在什么情况下必须考虑,在什么情况下可以忽略,以及限制其必要性和重要性的因素,还需要有进一步的实例研究。



(a)

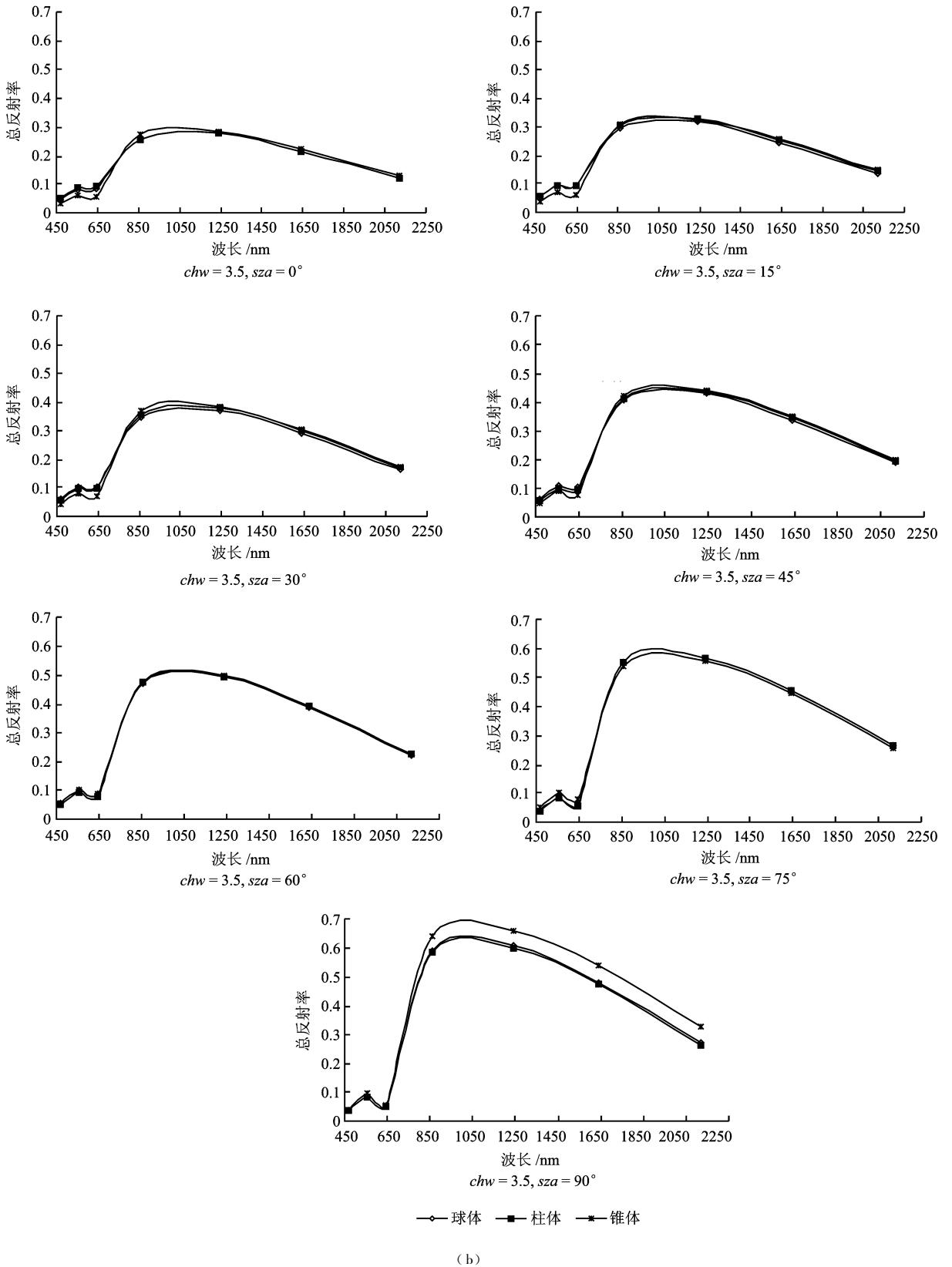


图 7 不同几何形状植株
(a)地面对总反射贡献的差异; (b)总反射率的差异

Fig 7 Differences in

参 考 文 献 (References)

- [1] Jiang S. An Introduction on the Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station. Academia Sinica [A]. Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station. Academia Sinica. Research on Grassland Ecosystem No. 1 [C]. Beijing: Science Press, 1985. [姜恕. 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站的建立和研究工作概述 [A]. 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究 (第 1 集) [C]. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [2] Chen Z Z. Topography and Climate of Xilin River Basin [A]. Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station. Academia Sinica. Research on Grassland Ecosystem No. 3 [C]. Beijing: Science Press, 1988. [陈佐忠. 锡林河流域地形与气候概况 [A]. 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究 (第 3 集) [C]. 北京: 科学出版社, 1988.]
- [3] Du Z C, Yang Z G, Cui Y Y. A Comparative Study on Leaf Area Index of Five Plant Communities in Typical Steppe Region of Inner Mongolia [J]. Grassland of China, 2001, 23 (5): 13—18. [杜占池, 杨宗贵, 崔晓勇. 内蒙古典型草原地区 5 类植物群落叶面积指数的比较研究 [J]. 中国草地, 2001, 23 (5): 13—18.]
- [4] Jacquemoud S. Inversion of the PROSPECT + SAIL Canopy Reflectance Model from AVIRIS Equivalent Spectra: Theoretical Study [J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 44: 281—292.
- [5] Jacquemoud S, Baret F, Andrieu B, et al. Extraction of Vegetation Biophysical Parameters by Inversion of the PROSPECT + SAIL Models on Sugar Beet Canopy Reflectance Data. Application to TM and AVIRIS Sensors [J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 52: 163—172.
- [6] Andrieu B, Baret F, Jacquemoud S, et al. Evaluation of an Improved Version of SAIL Model for Simulating Bidirectional Reflectance of Sugar Beet Canopies [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 60: 247—257.
- [7] Jacquemoud S, Bacour C, Poilve H, et al. Comparison of Four Radiative Transfer Models to Simulate Plant Canopies Reflectance: Direct and Inverse Mode [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74: 471—481.
- [8] Bacour C, Jacquemoud S, Toubier Y, et al. Design and Analysis of Numerical Experiments to Compare Four Canopy Reflectance Models [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79: 72—83.
- [9] Jacquemoud S, Baret F, Hanocq J F. Modeling Spectral and Bidirectional Soil Reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41: 123—132.
- [10] Liang S, Townshend J R G. A Modified Hapke Model for Soil Bidirectional Reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55: 1—10.
- [11] Verhoef W. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: the SAIL Model [J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 6: 125—184.
- [12] Gao W. A Simple Bidirectional-reflectance Model Applied to a Tallgrass Canopy [J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 45: 209—224.
- [13] Gao W, Lesht B M. Model Inversion of Satellite-measured Reflectances for Obtaining Surface Biophysical and Bidirectional Reflectance Characteristics of Grassland [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 59: 461—471.
- [14] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra [J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34: 75—91.
- [15] Jacquemoud S, Ustin S L, Verdebout J, et al. Estimating Leaf Biochemistry Using the PROSPECT Leaf Optical Properties Model [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 56: 194—202.
- [16] Rosema A, Verhoef W, Noorbergen H, et al. A New Forest Light Interaction Model in Support of Forest Monitoring [J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 42: 23—41.
- [17] Huemmrich K F. The GeoSail Model: A Simple Addition to the SAIL Model to Describe Discontinuous Canopy Reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75: 423—431.
- [18] Jasinski M F, Eagleson P S. The Structure of Red-infrared Scattergrams of Semivegetated Landscapes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1989, 27 (4): 441—451.
- [19] Jasinski M F, Eagleson P S. Estimation of Subpixel Vegetation Cover Using Red-infrared Scattergrams [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28 (2): 253—267.
- [20] Jasinski M F. Estimation of Subpixel Vegetation Density of Natural Regions Using Satellite Multispectral Imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34 (3): 804—813.
- [21] Vonder O W, Clevers J G P W, Desprats J F, et al. Modelling Crop Geometry Using Multiple View Angles [A]. Amsterdam: IAPRS [C], XXXIII, 2000.
- [22] Hom H. The Adaptive Geometry of Trees [M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1971.
- [23] Bouman B A M, van Kasteren H W J, Uenk D. Standard Relations to Estimate Ground Cover and LAI of Agricultural Crops from Reflectance Measurements [J]. European Journal of Agronomy, 1992, 4: 249—262.
- [24] Liu Y J, Yang Z D, et al. Principles and Algorithms of Processing MODIS Remote Sensing Information [M]. Beijing: Science Press, 2001. [刘玉洁, 杨忠东等. MODIS 遥感信息处理原理与算法 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [25] Kuusk A, Nilson T. Forest Reflectance and Transmittance FRT User Guide [A]. Tartu Observatory [C], 2002.
- [26] Song Y C. Vegetation Ecology [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2001. [宋永昌. 植被生态学 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.]
- [27] Chen Z Z, Wang S P, et al. Typical Grassland Ecosystems in China [M]. Beijing: Science Press, 2000. [陈佐忠, 汪诗平等. 中国典型草原生态系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [28] Jiang S, Qi Q H, Kong D Z. A Comparative Study on Production of *Aneurolepidium Chinense* and *Stipa Grandis* Steppe Communities at Bainsile Livestock Farm in Inner Mongolia Region [A]. Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station. Academia Sinica. Research on Grassland Ecosystem No. 1 [C]. Beijing: Science Press, 1985. [姜恕, 戚秋慧, 孔德珍. 羊草草原群落和大针茅草原群落生物量的初步比较研究 [A]. 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究 (第 1 集) [C]. 北京: 科学出版社, 1985.]