

一个植被双向反射模式的反演控制试验^{*}

温 刚

(中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心 北京 100029)

摘 要 利用地面遥感观测数据,对一个浑浊介质假定下的植被双向反射模式,增加了对太阳漫射辐射因素处理,在可见光波段上,进行了系列模式反演试验。这些试验有助于完善植被双向反射模式中物理过程的描述,了解模式反演过程的控制和选择合适遥感观测数据进行模式反演。分析试验结果发现:(1)对 LAI 进行初值预估有利于获得较好的植被双向反射模式反演结果。(2)加入植被对太阳漫射辐射的反射过程描述,可以使植被双向反射模式的反演结果更加合理。(3)使用在太阳天顶角不太大($<45^\circ$)和太阳方位角偏离 180° 不多($<45^\circ$)观测条件下得到的遥感数据,可以使植被双向反射模式的反演结果较好。(4)在 $31^\circ-61^\circ$ 的太阳天顶角范围和 $136^\circ-258^\circ$ 的太阳方位角范围内,多角度观测使太阳天顶角和方位角因素对 LAI 反演结果的影响不显著。(5)当太阳漫射辐射的份额不大时,对 LAI 反演结果的影响不显著。如果只针对 LAI,那么对反演植被双向反射模式所应用的地面遥感数据可以不进行大气校正处理,这样的结果虽然是从对地面遥感数据的处理中获得的,仍然对卫星遥感的观测时段选择和卫星遥感数据的选取和分析有一定的价值。

关键词 植被,双向反射模式,反演

1 引 言

植被对太阳光的反射具有显著的方向性特征。在定量处理和分析植被遥感信息时,应该考虑到辐射沿太阳—植被—遥感器传输路径的双向反射过程。特别是为了获得有关定量的植被冠层结构的光学参数,需要建立植被双向反射模式^[1-3]。结合地面观测,利用遥感数据进行植被双向反射模式的反演,可以训练模式参数,为进一步使用植被双向反射模式计算有关植被参数提供依据。为了得到稳定、可靠的植被双向反射模式反演结果,即模式中的待定参数,不但需要有合理的模式过程描述,也需要考虑遥感数据获取过程中的环境因素和反演试验的控制因素。本文考察3个因素。第1个因素是太阳漫射光的影响,因为双向反射过程通常是对植被反射太阳直射辐射而言,模式也基于此建立,但实际遥感数据的采集中,植被对太阳漫射辐射的反射也包含于遥感信息中。对于模式的反演,这一因素会有多大的影响,是值得考察的。第2个因素是不同太阳天顶角和方位角条件下获得的遥感数据对模式反演的影响。第3个因素是对模式反演的控制。对模式

的反演是通过模式计算结果对遥感观测数据的拟和实现的。模式待定参数的取值范围和初值设定会对反演结果产生什么影响,也应该引起注意。

2 植被双向反射模式

本文采用一个浑浊介质假定下的辐射传输模式作为反演控制试验使用的植被双向反射模式。该模式首先为研究天体表面的辐射反射过程而建立^[4],后被修改用于描述半无限厚度均匀植被冠层内辐射传输^[5],进而又被修改为针对有限厚度均匀植被冠层的植被双向反射模式^[6]。这个模式输出在植被冠层顶部的反射率由下列反射率组成:(1)植被冠层单次散射入射植被冠层的直射太阳辐射的反射率;(2)植被冠层顶获得的土壤层单次散射透过植被冠层的直射太阳辐射的反射率;(3)植被冠层多次散射入射植被冠层的直射太阳辐射的反射率;(4)植被冠层顶获得的土壤层多次散射透过植被冠层的直射太阳辐射的反射率。模式的待定参数有5个:植被冠层叶面积指数 LAI, 植被叶片的单次散射平均反射率 ω_v , Ross-Goudrian 叶角方向参数 λ_l , Legendre 多项式的两个展开系数 a_0 和 b_0 。关于这个模式的详细描述,可以阅读有关文献^[6]。

^{*} 本文得到“攀登计划”项目“我国未来生存环境变化趋势的预测研究”资助。地面遥感观测数据集由 NASA GSFC 地表物理实验室提供,特此感谢!

由于这个模式只包括了对太阳直射辐射的处理,为了考虑太阳漫射辐射对模式反演的影响,下面在辐射传输二流近似下,建立一个有限厚度植被冠层反射太阳漫射光的计算方案,并将其纳入上述植被双向反射模式中。

利用 Schuessel 等^[6]简化的 Dickinson 等^[5]提出的二流近似的植被冠层辐射传输模式,令 $K_i = \frac{G_i}{\mu_i}$, $G_i = \mu_i \mu_v$, μ_i 是太阳辐射的入射天顶角的余弦, μ_v 是叶片法线方向和垂直方向夹角的余弦。 $K = \frac{1}{\mu_v}$, μ_v 是遥感器观测视角的余弦。 $ratio$ 是到达植被冠层顶部的太阳直射辐射通量与太阳总辐射通量的比值,而 $1-ratio$ 则是太阳总辐射通量中太阳漫射辐射通量占有的部分。 L_T 为其植被冠层的总叶面积指数。 ρ_s 为土壤反射率。

这里给出植被冠层多次散射入射植被冠层的漫射太阳辐射的反射率 r_{vm} 的表达形式:

$$r_{vm}(\mu_v) = \frac{\omega_v}{4\pi} \frac{K}{K + \gamma_v} \frac{1 - \gamma_v}{a} h_1 [1 - e^{-(K + \gamma_v)L_T}] + \frac{\omega_v}{4\pi} \frac{K}{K - \gamma_v} \frac{1 + \gamma_v}{a} h_2 [1 - e^{-(K - \gamma_v)L_T}] - \frac{\omega_v}{4\pi} \frac{K}{K + K_i} \frac{2aK_i}{K_i^2 - \gamma_v^2} [1 - e^{-(K + K_i)L_T}] \quad (1)$$

其中, $h_1 = -\frac{Ee^{-K_i L_T} + SF}{S - T}$; $h_2 = \frac{Ee^{-K_i L_T} + TF}{S - T}$; $h_3 = -\frac{aK_i(1 + K_i)}{K_i^2 - \gamma_v^2}$; $h_4 = -\frac{aK_i(1 - K_i)}{K_i^2 - \gamma_v^2}$; $S = \left[\frac{1 - a + \gamma_v}{a} - \rho_s \right] e^{\gamma_v L_T}$; $T = \left[\frac{1 - a - \gamma_v}{a} - \rho_s \right] e^{-\gamma_v L_T}$; $E = \rho_s h_3 - h_4$; $F = h_3 - (1 - ratio)$; $\gamma_v = \sqrt{1 - \omega_v}$; $a = \frac{\omega_v}{2}$

3 遥感数据

反演植被双向反射模式使用的遥感数据采用美国普渡大学遥感应应用实验室于 1980 年 8 月 27 日对大豆植被进行地面遥感试验采集的数据集^[7]。该数据集因质量高,常用于植被双向反射模式的测试。

用于数据采集的遥感仪器为 Exotech Radiometer。它在可见光和近红外波段具有与 Landsat MSS 相同的观测通道。在本文的反演试验中,只使用了 0.6-0.7 μm 可见光通道的观测数据。数据共 12 组,每一组包括在同样太阳光照条件下对 0°-360°

方位角范围内,从 0°开始,每 45°方位角间隔,以 0°, 7°, 15°, 22°, 30°, 45°和 60°为观测视角,得到大豆植被 56 个观测值。每组数据同时伴有大气中的太阳漫射辐射观测。当日天空晴朗,云量为零,天气状况非常适合进行遥感观测。观测的起始时间是当地上午 10:00 左右,结束时间是下午 4:00 左右。

观测时的大豆植被背景信息为:植被平均高度 104cm,植被冠层总的叶面积指数 2.9,植被覆盖度 99%,接近闭合。这样的大豆植被接近于理想的有限厚度均匀植被。

表 1 列出了 12 组数据的太阳天顶角、太阳方位角、植被冠层顶部太阳直射光与太阳总辐射之比 $ratio$ 和土壤反射率 ρ_s 。

表 1 1980 年 8 月 27 日大豆植被地面遥感观测的环境条件

Table 1 The observational conditions of ground remote sensing on soybean canopy in August 27, 1980

	太阳天顶角/(°)	太阳方位角/(°)	ratio*	土壤反射率
1	38.0	136.0	0.8144	0.1431
2	35.0	145.0	0.7820	0.1458
3	32.0	163.0	0.8090	0.1488
4	31.0	174.0	0.8133	0.1508
5	31.0	196.0	0.8207	0.1498
6	33.0	206.0	0.8197	0.1490
7	36.0	217.0	0.8088	0.1465
8	38.0	225.0	0.8088	0.1461
9	44.0	237.0	0.7866	0.1436
10	48.0	243.0	0.7831	0.1364
11	55.0	251.0	0.7497	0.1331
12	61.0	258.0	0.7004	0.1299

* $ratio$ 为植被冠层顶部太阳直射光与太阳总辐射之比。

4 植被双向反射模式的反演

令 r_i 为第 i 个实际观测的植被反射率, r' 为植被双向反射模式输出的植被反射率, N 为每一组的观测样本数目, p 为植被双向反射模式待定参数个数,则有均方根

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{N-p} \sum_{i=1}^N (r_i - r')^2} \quad (2)$$

利用遥感观测数据反演植被双向反射模式,就是要在 ϵ 取得最小值的条件下,通过确定模式的待定参数,实现 r_i 与 r 的拟和。

本文使用一个适用于非线性函数的准牛顿算法

下的函数最小值计算程序 E04JAF 进行 ϵ 的计算。这个程序由英国国家物理实验室发展,并被广泛使用^[5,6,8]。为了运行程序,需要固定函数待定参数的数值边界,并提供函数待定参数的初值。为避免单一初值对模式反演的影响,每一次反演试验均分别对 LAI , ω_v , χ_l , a_v 和 b_v 采取 50 个随机值;以这些随机值作为初值进行 50 个反演计算,最后将 50 个反演计算的平均值作为一次反演试验的结果。

由于 LAI 是我们最关心的参数,设计了 3 组偏重于 LAI 的反演控制试验。

试验 1。固定 ω_v , χ_l , a_v 和 b_v 的数值域和随机初值范围;考虑 LAI 的数值域和随机初值范围的变化对模式反演的影响。模式计算中包括了有关太阳漫射辐射的部分。数据为 1980 年 8 月 27 日第 4 组见表 1; ω_v , χ_l , a_v 和 b_v 数值域和随机初值范围见表 2; LAI 的数值域和随机初值范围见表 3。

表 2 试验 1 ω_v , χ_l , a_v 和 b_v 数值域和随机初值范围

Table 2 The values scopes of ω_v , χ_l , a_v and b_v and the random initial values in experiment 1

ω_v	χ_l	a_v	b_v
[0.01, 0.50]	[-1.0, 1.0]	[-1.0, 1.0]	[-1.0, 1.0]

表 3 试验 1 LAI 的数值域和随机初值范围

Table 3 The value scopes of LAI and the random initial value in experiment 1

1	2	3	4	5
[0.0, 4.0]	[0.0, 5.0]	[0.0, 6.0]	[0.0, 7.0]	[0.0, 8.0]

试验 2。固定 ω_v , χ_l , a_v 和 b_v 的数值域和随机初值范围;固定 LAI 的数值域;考虑 LAI 的随机初值范围的变化对模式反演的影响。模式计算中包括了有关太阳漫射辐射的部分。数据为 1980 年 8 月 27 日第 4 组见表 1; ω_v , χ_l , a_v 和 b_v 数值域和随机初值范围见表 4; LAI 的数值域为 [0.0, 6.0]; LAI 随机初值范围见表 5。

表 4 试验 2 ω_v , χ_l , a_v 和 b_v 数值域和随机初值范围

Table 4 The value scopes of ω_v , χ_l , a_v and b_v and those for their random initial values in experiment 2

ω_v	χ_l	a_v	b_v
[0.01, 0.50]	[-1.0, 1.0]	[-1.0, 1.0]	[-1.0, 1.0]

表 5 试验 2 LAI 的随机初值范围

Table 5 The random initial values of LAI in experiment 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
[0.0,1.0]	[0.0,2.0]	[0.0,3.0]	[0.0,4.0]	[0.0,5.0]	[0.0,6.0]	[0.0,7.0]	[0.0,8.0]	[0.0,9.0]

试验 3。在不同太阳天顶角和方位角条件下,研究考虑和不考虑太阳漫射辐射对模式反演的影响。考虑太阳漫射辐射时, $ratio$ 取实际值。不考虑太阳漫射辐射时, $ratio = 1$ 。数据为 1980 年 8 月 27 日共 12 组见表 1; LAI , ω_v , χ_l , a_v 和 b_v 数值域和随机初值范围见表 6。

表 6 试验 3 LAI , ω_v , χ_l , a_v 和 b_v 数值域和随机初值范围

Table 6 The value scopes of LAI , ω_v , χ_l , a_v and b_v and the random initial values in experiment 3

LAI	ω_v	χ_l	a_v	b_v
[0.0, 6.0]	[0.01, 0.50]	[-1.0, 1.0]	[-1.0, 1.0]	[-1.0, 1.0]

5 结 果

5.1 试验 1 和试验 2

试验 1 的结果列于表 7。5 次试验的植被双向反射模式计算值与遥感观测数据拟合的均方根误差都是 0.0032, 约为观测值为 10% 左右。当 LAI 的数值域和随机初值范围从 [0.0, 4.0] 变化到 [0.0, 8.0] 时, LAI , ω_v , a_v 和 b_v 的反演结果数值增加; χ_l 的数值减小。试验 1 中, LAI 的变化最大, 随 LAI 数值域和随机初值范围从 [0.0, 4.0] 到 [0.0, 8.0] 的增加, 基本呈现线性增长趋势。在 LAI 的数值域和随机初值范围是 [0.0, 6.0] 和 [0.0, 7.0] 时, LAI 的模式反演输出结果为 2.744 和 3.187, 最接近实测值 2.9。

试验 2 的结果列于表 8。9 次试验的植被双向反射模式计算值与遥感观测数据拟合的均方根误差也是 0.0032, 达到观测值的 10% 左右。随 LAI 的随机初值范围从 [0.0, 1.0] 到 [0.0, 9.0] 的增加, LAI , ω_v , a_v 和 b_v 的反演结果都存在数值增加趋势; 相反地, χ_l 则是减少趋势。当 LAI 的随机初值范围达到 [0.0, 6.0] 或更大时, ω_v , χ_l , a_v 和 b_v 的变化减小。 ω_v 增加, 使叶片反射增加; 同时, a_v 和 b_v 数值增加, 使植被的前向散射增加; 但 χ_l 减小, 使植被的叶片

表7 试验1反演结果

Table 7 Results of BRDF model inversion in experiment 1

	ϵ	LAI	ω_0	χ_l	a_0	b_0
1	0.0032	1.886	0.178	-0.179	-0.144	-0.248
2	0.0032	2.316	0.217	-0.251	-0.128	-0.227
3	0.0032	2.744	0.239	-0.274	-0.076	-0.199
4	0.0032	3.187	0.258	-0.287	-0.064	-0.179
5	0.0032	3.634	0.269	-0.296	-0.055	-0.186

分布的垂直性增加,反射减弱。LAI的变化是最显著的。随着随机初值范围的增加,始终保持一致增加的趋势。在LAI的随机初值范围是[0.0, 6.0]和[0.0, 7.0]时,LAI的模式反演输出结果分别为2.744和3.140,接近实测值2.9。

从上面结果可以看到,对LAI进行初值预估有利于获得较好的植被双向反射模式反演结果。在进行LAI的初值预估时,LAI的数值域是真实值2.9的2倍或略多于2倍,并且LAI的随机初值范围接近于LAI的数值域时,反演结果较为理想。

5.2 试验3

太阳天顶角和太阳方位角因素对反演结果存在一定影响。表9和表10第1-8组,即太阳天顶角不太大($<38^\circ$)和太阳方位角偏离 180° 不多($<45^\circ$)时,反演计算的均方根误差低于0.0047,即低于实际观测数值的15%。第9-12组,即太阳天顶角较大($>44^\circ$)和太阳方位角偏离 180° 较多($>57^\circ$)时,反演计算的均方根误差增加较快。同时,对于入射倾角偏斜最大的第11和12组结果,在表9和表10上, χ_l , a_0 和 b_0 的数值显著增加。因此,遥感观测中太阳辐射入射植被冠层的倾角过大,在这样条件下获

得的遥感数据不利于取得较好的模式反演结果。如果只关心LAI,可以注意到,随着入射倾角偏斜,LAI逐渐减小,但这种减少是非常不显著的。表9 LAI的变化范围仅在2.745和2.629之间,表10上LAI的变化范围仅在2.782和2.675之间。说明在 $31^\circ-61^\circ$ 的太阳天顶角范围和 $136^\circ-258^\circ$ 的太阳方位角范围内,多角度观测使太阳天顶角和太阳方位角的变化对LAI反演结果的影响不大。

考虑太阳漫射辐射时,LAI的结果比不考虑太阳漫射辐射时的结果略低; ω_0 稍高一些; χ_l 略有减少; a_0 , b_0 略增加。表9和表10最显著的对比是随太阳天顶角的增大和太阳方位角对 180° 偏离的增加,考虑太阳漫射辐射使 ω_0 表现出增加趋势。这一趋势在表10上不存在。从物理意义上解释,加入对入射冠层的太阳辐射中漫射辐射的处理,使模式可以考虑随太阳天顶角的增大和太阳方位角对 180° 偏离的增加,入射冠层的太阳辐射中直射辐射部分减少和散射部分增加,以及这种入射倾角的增加带来的叶片单次反射率 ω_0 的增加,对植被冠层中辐射传输过程的描述趋于合理。

一个值得注意的结果,是考虑太阳漫射辐射与否对LAI的影响很小。其原因在于LAI是植被冠层的光学厚度参数,它的反演结果主要受到进出植被

表8 试验2反演结果

Table 8 Results of BRDF model inversion in experiment 2

	ϵ	LAI	ω_0	χ_l	a_0	b_0
1	0.0032	1.001	0.025	0.022	-0.719	-0.574
2	0.0032	1.151	0.062	-0.038	-0.407	-0.353
3	0.0032	1.514	0.128	-0.177	-0.248	-0.266
4	0.0032	1.888	0.178	-0.180	-0.144	-0.248
5	0.0032	2.316	0.217	-0.251	-0.128	-0.227
6	0.0032	2.744	0.239	-0.274	-0.076	-0.199
7	0.0032	3.140	0.253	-0.256	-0.052	-0.171
8	0.0032	3.443	0.260	-0.247	-0.038	-0.176
9	0.0032	3.693	0.270	-0.240	-0.006	-0.167

表 9 试验 3 考虑太阳漫射辐射时模式反演的结果

Table 9 Results of BRDF model inversion in experiment 3 with consideration of solar diffuse radiation processing

	ϵ	LAI	ω_0	χ_l	a_0	b_0
1	0.0041	2.710	0.244	-0.290	-0.086	-0.081
2	0.0035	2.728	0.251	-0.291	-0.069	-0.181
3	0.0036	2.745	0.238	-0.290	-0.093	-0.209
4	0.0032	2.744	0.239	-0.274	-0.076	-0.199
5	0.0038	2.741	0.238	-0.288	-0.110	-0.201
6	0.0042	2.725	0.243	-0.280	-0.101	-0.194
7	0.0044	2.704	0.240	-0.272	-0.091	-0.194
8	0.0047	2.713	0.244	-0.293	-0.081	-0.181
9	0.0053	2.629	0.252	-0.300	-0.101	-0.163
10	0.0057	2.673	0.245	-0.283	-0.088	-0.152
11	0.0067	2.675	0.257	-0.205	-0.045	-0.122
12	0.0076	2.660	0.271	-0.143	-0.044	-0.103

表 10 试验 3 不考虑太阳漫射辐射时模式反演的结果

Table 10 Results of BRDF model inversion in experiment 3 without consideration of solar diffuse radiation processing

	ϵ	LAI	ω_0	χ_l	a_0	b_0
1	0.0041	2.773	0.226	-0.269	-0.093	-0.188
2	0.0035	2.745	0.226	-0.260	-0.081	-0.207
3	0.0036	2.749	0.219	-0.257	-0.120	-0.214
4	0.0032	2.776	0.228	-0.238	-0.091	-0.213
5	0.0038	2.782	0.230	-0.242	-0.089	-0.213
6	0.0042	2.736	0.225	-0.244	-0.095	-0.207
7	0.0044	2.730	0.221	-0.263	-0.096	-0.206
8	0.0047	2.731	0.226	-0.255	-0.076	-0.204
9	0.0053	2.702	0.225	-0.291	-0.082	-0.179
10	0.0057	2.683	0.218	-0.272	-0.079	-0.152
11	0.0067	2.678	0.221	-0.239	-0.045	-0.122
12	0.0076	2.675	0.227	-0.148	-0.067	-0.097

冠层的辐射通量总量影响,其次还受到通量总量中直射部分和散射部分的分配的影响。因为 LAI 对直射光的削弱作用更强些,当太阳漫射辐射的份额很小时,忽略太阳漫射辐射造成的直射辐射的增加量很小,由此在反演计算中获得的 LAI 增加也不大。当太阳漫射辐射的份额较大时,忽略太阳漫射辐射造成的 LAI 的增加可能会大一些。所以,当我们只关心 LAI 的反演结果时,如果太阳漫射辐射在入射辐射通量中的份额很小,在植被双向反射模式的反演计算中是否考虑太阳漫射辐射的辐射传输过程,对 LAI 的反演结果不会造成很大的影响。

6 结论和讨论

本文利用地面遥感观测数据,对一个浑浊介质

假定下的植被双向反射模式,增加了对太阳漫射辐射因素处理,在可见光波段上,侧重于 LAI ,进行了关于模式待定参数的初值、模式中太阳漫射辐射因素的作用和遥感观测数据采集过程中太阳天顶角和方位角因素对模式反演影响的模式反演试验。分析试验结果得到如下结论。

(1) 对于本文采用的植被双向反射模式,对 LAI 进行初值预估有利于获得较好的植被双向反射模式反演结果。当 LAI 的数值域是真实值的 2 倍或略多于 2 倍,并且 LAI 的随机初值范围接近于 LAI 的数值域时,反演结果较为理想。

(2) 在本文中提出了一个形式简化的植被冠层反射太阳漫射辐射的计算方案。在植被双向反射模式中加入植被对太阳漫射辐射的反射过程描述,可

以使反演结果更加合理。

(3) 模式反演时, 遥感数据中的太阳天顶角和方位角因素的影响是存在的。对于本文使用的模式, 应使用在太阳天顶角不太大($<45^\circ$)和太阳方位角偏离 180° 不多($<45^\circ$)时观测获得的遥感数据进行模式反演。

(4) 在 $31^\circ-61^\circ$ 的太阳天顶角范围和 $136^\circ-258^\circ$ 的太阳方位角范围内, 多角度观测使太阳天顶角和方位角因素对 LAI 反演结果的影响不显著。

(5) 当太阳漫射辐射的份额不大时, 太阳漫射辐射因素对 LAI 反演结果的影响不显著。如果只针对 LAI, 那么对反演植被双向反射模式所应用的地面遥感数据可以不进行大气校正处理, 这样的结果虽然是从对地面遥感数据的处理中获得的, 对卫星遥感观测时段选择和卫星遥感数据的选取和分析仍可能有一定的指导意义。

应该注意到, 结论(1)是针对本文选择的用于植被双向反射模式反演的计算程序而言的。对于其它的同类型计算程序, 上述结论可能会有所调整。结论(2)~(4)适用于浑浊介质假定下的植被双向反射模式及其为获得 LAI 等植被参数而进行的模式反演。对于其它类型的植被双向反射模式和为其它目的进行的模式反演, 本文没有涉及。

另外, 以上结论只是根据一套针对大豆植被的高质量的、接近理想状况的地面遥感观测数据进行植被双向反射模式反演控制试验得出的。以后如有可能, 应该寻找针对其它种类植被的遥感观测数据, 进行类似的植被双向反射模式反演控制试验, 进一步验证上述结论。上述结论对卫星遥感数据处理的适用性, 也需要考察。

参 考 文 献 (References)

- 1 Goel, N.S. Models of vegetative canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sens. Rev.*, 1987, **3**: 1-212.
- 2 Deering, D.W. Field measurement of bidirectional reflectance, Chapt. 2 in *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. G. Asrar ed., John Wiley and Sons, New York, 1989.
- 3 Ross, J. K. The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands. W. Junk, The Hague, Netherlands, 1981.
- 4 Hape, B. Bidirectional reflectance spectroscopy, 1, Theory. *J. Geophys. Res.*, 1981 **86**: 3039-3054
- 5 Dickinson, R.E., B. Pinty, M.M. Verstraete. Relating surface albedos in GCMs to remotely sensed data. *Agric. Meteorol.*, 1990, **32**: 109-131.
- 6 Schluessel, G., R.E., Dickinson, J.L. Privette, W.J. Emery, K. Kokaly. Modelling the bidirectional reflectance distribution function of mixed finite plant canopies and soil. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 10577-10600.
- 7 Walthall, C. L., M.S. Kim, D.L. Williams, B.W. Meeson, P.A. Agbu, J. A. Newcomer, E. R. Levine. Data sets for modeling: a retrospective collection of bidirectional reflectance and forest ecosystems dynamics multisensor aircraft campaign data sets. *Remote Sens. Environ.*, 1993, **46**: 340-346.
- 8 Privette, J.L., R. B. Myneni, W. J. Emery, B. Pinty. Inversion of a soil bidirectional reflectance model for use with vegetation reflectance models. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 25497-25508.

作 者 简 介

温刚, 1987年于南京气象学院天气动力学专业获得学士学位, 1990年在中国科学院大气物理研究所获得硕士学位, 同年留所。1995年进入中国科学院全球变化东亚区域研究中心。现为助理研究员。主要研究领域是气候和全球变化研究中的遥感应用研究。