

雪的热辐射偏振特性定量研究

张 霞 赵云升 孙天琳 张丽莉

(东北师范大学城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024)

摘要 雪作为衡量全球气候变化有效的信息源之一,其热辐射存在偏振特性,且这一偏振特性会受到多因素的影响。为了定量分析单一因素及其交互作用对雪的热辐射偏振特性的影响,在传统分析的基础上,设计了三因素三水平的正交实验。结果表明,探测角、方位角和波段均对雪的热辐射偏振特性产生影响;探测角对雪的热辐射偏振度产生显著的影响;探测角与其他两因素的交互作用以及波段均对雪的热辐射偏振度产生显著影响;方位角对雪的热辐射偏振度有一定的影响,而它与波段的交互作用不会对雪的热辐射偏振度产生影响。因此,在研究中,既要考虑单因素本身对雪的热辐射偏振特性的影响,还要考虑交互作用的影响。

关键词 光谱学;热辐射;多角度;偏振;交互作用;雪

中图分类号 TP72 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.1128001

Quantitative Research on the Thermal Radiation Polarization Properties of Snow

Zhang Xia Zhao Yunsheng Sun Tianlin Zhang Lili

(College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130024, China)

Abstract As one of the valid sources to measure the global climate changes, snow has its own thermal radiation polarization properties, which are affected by multi-factors. For quantitative analysis of the effects of single factor and the interactions between factors on the thermal radiation polarization properties of snow, on the basis of traditional analysis, we design a three-factor and three-level orthogonal test. The results show that the detecting angle, azimuth angle and bands have impact on the thermal radiation polarization properties of snow. The detecting angle has high significant impact on the thermal radiation polarization degree of snow. The bands and the interactions of the detecting angle and other two factors significantly affect the thermal radiation polarization degree of snow. The azimuth angle has certain impact on the thermal radiation polarization degree of snow, and its interactions with the bands have no impact on the thermal radiation polarization degree of snow. Therefore, the effects of each single factor and their interactions on the thermal radiation polarization degree of snow should be considered in the research.

Key words spectroscopy; thermal radiation; multi-angle; polarization; interactions; snow

OCIS codes 300.6340; 260.3090; 260.5430; 280.4991; 280.6780

1 引 言

可见光、近红外、中红外、热红外与微波是遥感最主要的探测波段。该电磁波区间比较宽,不同波长的电磁波与地物相互作用的关键辐射特征有所不同,因此采用的辐射特征参数也随之改变。可见

光-近红外区采用太阳辐照下的地物反射辐射强度为参数,即反射率(反射比)或反照率;热红外区主要探测地物的热辐射特性,参数为热发射率(辐射率)或亮温;微波主要探测地物微波热发射率或者亮温,以及微波源照射下地物的散射特性。

收稿日期: 2012-05-07; **收到修改稿日期:** 2012-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(40971190,40771153)资助课题。

作者简介: 张 霞(1985—),女,博士研究生,主要从事热红外偏振遥感方面的研究。E-mail: zhangx396@nenu.edu.cn

导师简介: 赵云升(1948—),男,教授,博士生导师,主要从事偏振光与定量遥感等方面的研究。

E-mail: zhaoy975@nenu.edu.cn

红外辐射是一种在自然界广泛存在的电磁波能量,一切温度高于绝对零度的物体都在不断地辐射红外能量。自1800年英国天文学家赫歇尔发现红外辐射的热效应以来,红外探测技术取得了长足发展^[1],由于红外探测技术具有精度高、抗干扰能力强和全天候工作等一系列优势,已被广泛应用于军事、医疗和科研等诸多领域^[2]。

遥感技术的迅速发展,使其在雪研究方面取得了许多成果,并被人们所应用^[3]。目前的遥感传感器对雪的探测主要集中在可见光-近红外波段,经过长期的研究积累,理论和实践方面都已日趋成熟,包括雪的反射波谱特性、辐射传输过程及各种雪遥感产品等,而对雪在热红外通道发射辐射的研究开展的相对较少^[4]。

在热红外通道,由于遥感器接收到的辐射能量主要是地面物体自身的发射辐射,太阳辐射可以完全忽略。物体的温度越高,接收到的辐射越大,反之越小^[5]。在热红外遥感应用中,雪的表面温度会受全球地气能量交换以及融雪过程的影响。在寒区地气能量交换中,雪表面温度扮演着极其重要的角色,是雪研究必不可少的参数之一。从以往的研究来看,对雪的热辐射测量主要集中在探测雪的辐射亮度和亮度温度方面,忽略了偏振这一重要的信息源。偏振完全可以作为一种新的手段,能提供更为详尽的信息^[6~8],通过解析目标的偏振信息可以更加容易的识别目标,提高目标识别的准确度^[9]。

国内外对雪在可见光-近红外波段偏振反射特性的研究已取得了一些成果^[10],而对雪在热红外通道发射偏振特性的研究还没有公开发表的文献报道。本文在传统分析的基础上,设计了一个三因素三水平的正交实验,从探测天顶角、探测方位角、波段三方面对雪的热辐射偏振特性进行综合比较研究,并验证这三个影响因素之间存在着对雪热辐射偏振特性的交互影响作用。

2 热红外偏振探测机理

偏振是矢量波的一种基本性质,指用一矢量来描述空间某一固定点所观测到的矢量波随时间变化的特征^[11]。各因素对热红外偏振特性的影响可用热辐射的偏振度来表示。一般情况下,描述光波偏振态的方法有两种:琼斯矢量表示法和斯托克斯矢量表示法。前者通过琼斯矢量表示某电场矢量的 x 、 y 分量,它与电场的振幅及相位相关。在偏振光

发生干涉效应时,通常选用琼斯矢量法计算。后者斯托克斯矢量与光强成正比,利用4个斯托克斯参量^[12]来描述光波的偏振态和强度。与琼斯矢量不同的是,斯托克斯参量均是光强的时间平均值,具有强度量纲,可以直接被探测器探测。由于斯托克斯矢量运算的穆勒矩阵元素均为实数,且其中有不少元素为零,运算也较简单。因此,本文中的偏振度和偏振方位角由斯托克斯矢量表示法计算而成。斯托克斯矢量的通用表达式为

$$\mathbf{S} = (S_0, S_1, S_2, S_3)^T, \quad (1)$$

式中 S_0 为非偏振强度; S_1, S_2 分别为光在两个方向的线偏振态; S_3 为光与圆偏振相关的量。斯托克斯矢量 $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$ 都是具有光强度的量纲。自然界偏振效应中,圆偏振极小,相对于仪器的误差来说,可以忽略不计,所以通常假设 $S_3 = 0$ 。偏振片透光轴相对于选定的参考坐标轴的夹角 α 的光强 $I(\alpha)$ 表示为

$$I(\alpha) = [S_0 + S_1 \cos(2\alpha) + S_2 \sin(2\alpha)]/2. \quad (2)$$

表征偏振态用偏振度 P 和偏振方位角 α ,计算方法分别为

$$P = (S_{12} + S_{22})/2S_0, \quad (3)$$

$$\alpha = [\arctan(S_2/S_1)]/2, \quad (4)$$

式中偏振度 P 是一个从0到1的无量纲数, $P = 0$ 表示非偏振光, $P = 1$ 表示全偏振光, $0 < P < 1$ 表示部分偏振光;偏振角 α 表示入射光的偏振方向相对于 x 轴的夹角,对于部分偏振光,就是能量最大的偏振方向与 x 轴的夹角。

只需获得雪在发射辐射偏振状态下的斯托克斯矢量 $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$,所以只测量三个角度即可。选取 α 分别为 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$,即有:

$$S_0 = \frac{2}{3}(I_0 + I_{60} + I_{120}), \quad (5)$$

$$S_1 = \frac{2}{3}(2I_0 - I_{60} - I_{120}), \quad (6)$$

$$S_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}(I_{60} - I_{120}), \quad (7)$$

式中 I_0, I_{60} 和 I_{120} 可由热红外偏振光谱仪直接获得,依据(5)~(7)式可计算出斯托克斯参量,代入(3)式和(4)式即可计算出雪的热红外偏振度。偏振度数据能反映出一些在传统辐射强度中难以获取的目标地物的信息。因偏振度是辐射值之比,所以偏振测量无需准确的辐射量校准就可以达到相当高的精度。

3 实验材料与方法

3.1 实验仪器

将法国 CIMEL 电子仪器公司生产的热红外辐射计(CE312-1b)与中国科学院长春光学精密机械研究所研制的地物多角度测试平台(测量原理见图 1)进行结合改造,可从多个观测点全方位地测量地物的热辐射信息。热红外辐射计由三部分组成:光学探头;控制箱(数据采集控制、存储、阅读、传输);数据处理系统。温度范围: $-80\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$;响应时间:1 s;视场角: 10° ;操作环境温度: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$;光谱波段范围(可达到 4 个波段): $8.2\sim 9.2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10.3\sim 11.3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $11.5\sim 12.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$,该波段设置和多数遥感卫星上装载的测温传感器的波段相一致^[13]。实验中为该设备配备了红外偏振镜头(波段 $3\sim 15\text{ }\mu\text{m}$),可以在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 任意角度的进行旋转,精度为 1° ,改造后成为热辐射偏振光谱仪,可以探测地物的偏振辐射亮度和亮度温度。

地物多角度测试平台可以实现在 2π 空间控

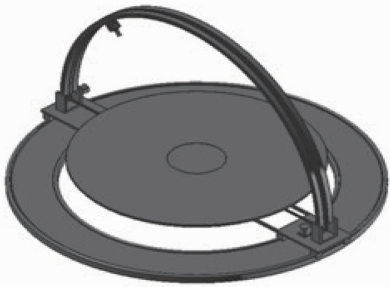


图 1 地物多角度测试平台测量原理

Fig. 1 Principle of multi-angle test platform of ground features

制探测天顶角和探测方位角,其中垂直方向运动变化探测天顶角,其变化范围 $0^{\circ}\sim \pm 90^{\circ}$,探测精度为 $12'$;水平方向运动变化探测方位角,其探测范围 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$,探测精度为 0.5° 。该仪器主要包括两部分:测试系统主机框架和电机驱动控制系统。平台的水平方位圆盘有效观测直径 1 m,分为 2 层,上下层圆盘可以 360° 正反两个方向旋转,方位角刻度最小分度为 0.5° 。

3.2 实验材料

实验所用雪于 2012 年 3 月 24 日在长春市东北师范大学校园内采集。由于无法测定雪的粒径的大小,因此选择自然年龄相同的雪进行实验。样品盒是由白色胶布均匀缠绕的圆柱形容器,可以有效避免测量时容器自身辐射带来的误差。

3.3 实验设计

实验共设置了三个因素,分别是探测天顶角(以下简称“探测角”)、探测方位角(以下简称“方位角”)和波段,每个因素设置了三个水平。该因素水平表如表 1 所示。

表 1 因素水平表

Table 1 Factors and levels

Factor	Detecting angle / ($^{\circ}$)	Azimuth angle / ($^{\circ}$)	Band / μm
Level 1	30	0	$8.2\sim 9.2$
Level 2	50	90	$10.3\sim 11.3$
Level 3	70	180	$11.5\sim 12.5$

在实验中要考虑各个因素之间的交互作用,为了科学地反映各个因素间的关系,需要进行正交实验,正交实验的表头设计方案如表 2 所示。

表 2 正交实验表头设计方案

Table 2 Header design of orthogonal test

CN	1	2	3	4	5	6	7	8	11
Factor	A	B	(A×B)1	(A×B)2	C	(A×C)1	(A×C)2	(B×C)1	(B×C)2

实验方案中每个因素和交互作用各占一列,在实验时只需在 A、B、C 所在的第一列、第二列、第五列安排实验,交互作用不安排实验。

严格按照实验设计,实验中对每一条件重复测量 5 次,同时对个别有较大实验异常的数据多次测量,最终取 5 次实验平均值,以减少实验中的随机误差,充分保证实验可信度。

实验进行于 2012 年 3 月 24 日,实验室温度 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量距离为 18 cm。实验时严格控制实验室内其他物体辐射对样品的干扰作用,每次样品摆放的位置固定准确。按照正交表 $L_{27}(3^{13})$ 的设计,共做了 27 组实验,每组实验分别对 0° 、 60° 、 120° 偏振角进行测量,依据(5)、(6)和(7)式可计算出斯托克斯参量,代入(3)式计算出的偏振度 P 作为最后的实际水平。

4 实验结果与分析

4.1 雪的热红外多角度偏振光谱特性分析

4.1.1 不同探测角下的雪的热辐射偏振特性分析

图2是雪在 0° 、 60° 和 120° 偏振状态时,当方位角固定为 0° ,波段 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 下的热辐射偏振亮度温度[单位为: $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$]随探测角的变化情况。这与传统的热红外亮度温度随探测角变化规律基本一致,即随着探测角的增大,雪的亮度温度增大。综

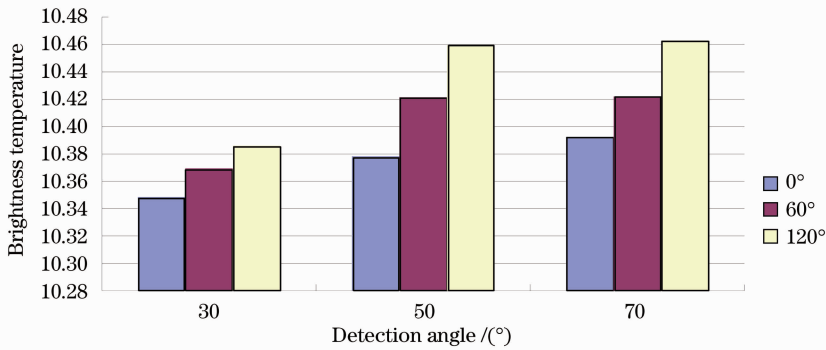


图2 雪的热辐射偏振亮度温度随探测角的变化

Fig. 2 Changes of thermal radiation polarized brightness temperature of snow with the detecting angle

4.1.2 不同方位角下的雪的热辐射偏振特性分析

图3为雪在 0° 、 60° 和 120° 偏振状态时,当探测角固定为 50° ,波段 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 下的热辐射偏振亮度温度随方位角的变化情况。从图中可以看出,雪在三种偏振状态下的热辐射偏振亮度温度大小为: $0^\circ < 60^\circ < 120^\circ$,且在方位角为 0° 和 180° 时较其在方

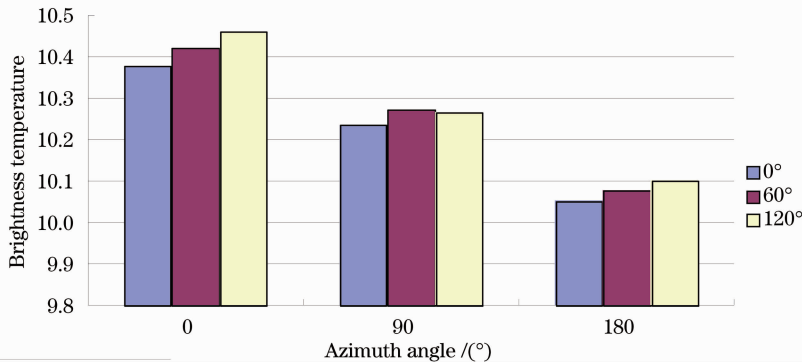


图3 雪的热辐射偏振亮度温度随方位角的变化

Fig. 3 Changes of thermal radiation polarized brightness temperature of snow with the azimuth angle

4.1.3 不同波段下的雪的热辐射偏振特性分析

图4为雪在 0° 、 60° 和 120° 偏振状态时,当探测角固定为 30° ,波段 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 下的热辐射偏振亮度温度随波段的变化情况。其中各通道对应的波段分别为:CH1: $8\sim 14\ \mu\text{m}$;CH2: $11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$;CH3: $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$;CH4: $8.2\sim 9.2\ \mu\text{m}$ 。从图中可以看出,雪在三种偏振状态下的热辐射偏振亮度温度

合比较雪在偏振角为 $0^\circ\sim 120^\circ$ 时的热辐射偏振亮度温度依次增大,且三种偏振状态下,雪的偏振亮度温度随探测角的变化趋势相似,在 $30^\circ\sim 50^\circ$ 范围内增长较快,在 $50^\circ\sim 70^\circ$ 范围内增长较慢。从图中可以看出,探测角为 50° 时,雪在不同偏振状态下的热辐射偏振亮度温度差异最大,最易区分。因此,探测角的变化会对雪的热辐射偏振特性产生影响。

位角为 90° 时差异更大;雪在这三种偏振状态下的热辐射偏振亮度温度随方位角的变化呈现出一致的规律:当方位角从 $0^\circ\sim 180^\circ$ 变化时,雪的各个偏振状态下的热辐射偏振亮度温度均呈下降趋势,最大差异达 $0.4\ \text{K}$ 。因此,不同方位角下雪的热辐射偏振特性不同。

大小为: $0^\circ < 60^\circ < 120^\circ$,且在第一通道时,三者差异最大,第二通道时三者最为接近。特别指出的是,在第三通道上, 60° 和 120° 偏振态下的亮度温度接近重合,因此不易区分。从整体上看,雪在这三种偏振状态下的热辐射偏振亮度温度随波段的变化呈现出一致的规律,即 $\text{CH1} > \text{CH4} > \text{CH2} > \text{CH3}$,最大差异达 $0.15\ \text{K}$ 。因此,波段的不同也会对雪的热辐射偏

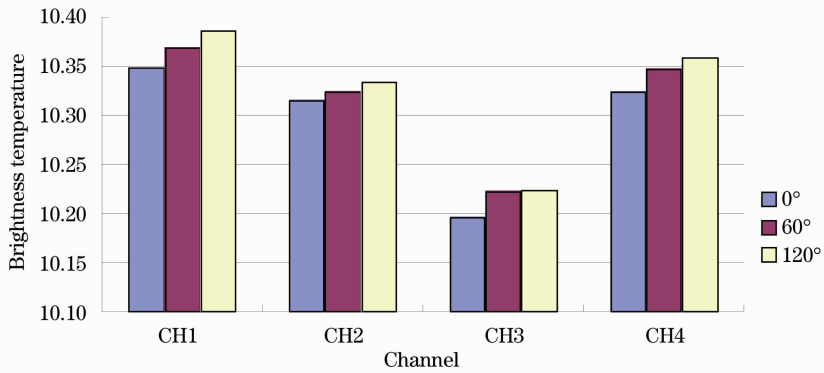


图 4 雪的热辐射偏振亮度温度随波段的变化

Fig. 4 Changes of thermal radiation polarized brightness temperature of snow with the bands

振特性产生影响。

4.2 单一因素及其交互作用影响的定量分析

组合下的热红外偏振辐射值,利用(5)~(7)式计算得到 S_0 、 S_1 和 S_2 ,最后代入(2)式得到相应的偏振度 P (如表 3 所示)。

4.2.1 正交实验结果

按照实验设计方案,测量了各因素在不同水平

表 3 不同探测角、方位角、波段条件下雪的热辐射偏振度

Table 3 Thermal radiation polarization degree of snow with different detecting angles, azimuth angles and bands

$L_{27}(3^{13})$ Orthogonal table										
CN	1	2	3	4	5	6	7	8	11	$P / \%$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.191
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0.175
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	0.102
4	1	2	2	2	1	1	1	2	3	0.166
5	1	2	2	2	2	2	2	3	1	0.194
6	1	2	2	2	3	3	3	1	2	0.208
7	1	3	3	3	1	1	1	3	2	0.291
8	1	3	3	3	2	2	2	1	3	0.345
9	1	3	3	3	3	3	3	2	1	0.114
10	2	1	2	3	1	2	3	1	1	0.372
11	2	1	2	3	2	3	1	2	2	0.333
12	2	1	2	3	3	1	2	3	3	0.464
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	0.334
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	0.078
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	0.268
16	2	3	1	2	1	2	3	3	2	0.342
17	2	3	1	2	2	3	1	1	3	0.070
18	2	3	1	2	3	1	2	2	1	0.271
19	3	1	3	2	1	3	2	1	1	0.342
20	3	1	3	2	2	1	3	2	2	0.257
21	3	1	3	2	3	2	1	3	3	0.483
22	3	2	1	3	1	3	2	2	3	0.422
23	3	2	1	3	2	1	3	3	1	0.152
24	3	2	1	3	3	2	1	1	2	0.488
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	0.557
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	0.425
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	0.863
M_1	0.198	0.302	0.235	0.333	0.335	0.276	0.329	0.301	0.286	
M_2	0.281	0.257	0.398	0.259	0.225	0.400	0.338	0.326	0.324	
M_3	0.443	0.364	0.279	0.331	0.362	0.247	0.256	0.296	0.312	
R	0.245	0.108	0.163	0.073	0.137	0.152	0.081	0.030	0.038	
			0.237			0.234		0.068		

表 3 中, M_1, M_2, M_3 为各因素不同水平的均值, R 为极差, “1”、“2”和“3”分别代表各因素的水平。结合表 2 的正交实验表头设计方案, 需要指出的是, 虽然 $(A \times B)_1, (A \times B)_2, (A \times C)_1, (A \times C)_2, (B \times C)_1, (B \times C)_2$ 六列中的“1”、“2”和“3”没有实际意义, 但其计算出的极差 R 是有统计学意义的^[14]。极差 R 越大, 则该因素对雪的热辐射偏振特性的影响就越大。由表 3 得到探测角、探测角与方位角交互作用、探测角与波段交互作用、波段、方位角、方位角与波段交互作用的影响依次降低。

4.2.2 数据的方差分析

运用 SPSS13.0 软件对这三个因素及其交互作用结果进行方差分析。依参考文献[15], 一个因素(或交互作用)的 F 值, 如大于 $1\%F$ 表上的数值(即显著性检验 $P \leq 0.01$), 则该因素影响高度显著, 记作“**”; 如介于 5% 和 $1\%F$ 表上值之间(即显著性检

验 $0.01 < P \leq 0.05$), 该因素影响显著, 记作“*”; 如介于 $20\%F$ 和 $5\%F$ 表上值之间(即显著性检验 $0.05 < P \leq 0.1$), 该因素对偏振辐射有一定的影响, 记做“(*)”; 如小于 $20\%F$ 表上值(即显著性检验 $P > 0.1$), 可认为该因素对偏振辐射没有多大的影响。方差分析结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 探测天顶角对雪的热辐射偏振特性的影响高度显著; 其次是该因素与其它两因素的交互作用的影响, 最后是波段的影响, 三者对雪的热辐射偏振特性均会产生显著影响; 方位角的变化会对雪的热辐射偏振特性产生一定的影响, 但它与波段的交互作用不会产生影响。因此, 在选取最佳水平组合时, 只需依据正交表的综合可比性, 在表 3 中比较每个因素在三个水平下获得的偏振度的均值 M_1, M_2, M_3 的大小, 选择其中最大者, 得最佳水平组合为 A3B3C3。

表 4 方差分析结果

Table 4 Results of variance analysis

Variance sources	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	F	P	Significance
A	0.279	2	0.139	22.596	0.001	**
A * B	0.147	4	0.037	5.946	0.016	*
A * C	0.154	4	0.038	6.227	0.014	*
C	0.095	2	0.047	7.660	0.014	*
B	0.052	2	0.026	4.250	0.055	(*)
B * C	0.012	4	0.003	0.466		
Error	0.049	8	0.006			
Sum	3.343	27				

5 结 论

通过对雪的热辐射多角度多光谱偏振特性的分析和正交实验及方差分析可以得出以下结论:

1) 在探测方位角、波段固定的情况下, 雪在不同偏振状态下的热辐射偏振亮度温度均随着探测天顶角的增大而增大, 且 $0^\circ < 60^\circ < 120^\circ$ 。

2) 在探测天顶角、波段固定的情况下, 雪在不同偏振状态下的热辐射偏振亮度温度均随着探测方位角的增大而减小, 但减小的幅度有所不同。

3) 在探测天顶角、探测方位角固定的情况下, 波段的变化会对雪的热辐射偏振亮度温度产生影响, 不同波段下雪的热辐射偏振亮度温度差异较大。

4) 探测天顶角对雪的热辐射偏振特性会产生高度显著的影响; 探测天顶角与探测方位角、波段的交互作用均对雪的热辐射偏振特性产生显著影响; 波段的不同也会对雪的热辐射偏振特性产生显著影响; 探测方位角对雪的热辐射偏振特性会产生一定

的影响, 但它与波段的交互作用不会对雪的热辐射偏振特性产生影响。

根据本实验的结果, 建议在进行雪的热辐射偏振特性的定量研究时, 要注意以上三种因素的影响作用, 特别注意这些因素之间的交互影响作用。

参 考 文 献

- Cheng Teng, Zhang Qingchuan, Gao Jie et al.. Analysis of optical readout sensitivity for uncolled infrared imaging based on optical readout[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0204002
程 腾, 张青川, 高 杰 等. 光学读出非制冷红外成像技术的光学灵敏度分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0204002
- Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie et al.. Design of a low F-number compact athermalizing infrared optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0322003
曲贺盟, 张 新, 王灵杰 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0322003
- Cao Meisheng, Feng Xuezhi, Jin Dehong. Numbers of spectral reflectance characteristics of snow[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1982, **27**(20): 1295~1261
曹梅盛, 冯学智, 金德洪. 积雪的若干光谱反射特征[J]. *科学通报*, 1982, **27**(20): 1295~1261

- 4 J. A. Shaw. Degree of linear polarization in spectral radiances from water-viewing infrared radiometers [J]. *App. Opt.*, 2011, **31**(15): 3157~3165
- 5 Tu Qiangang, Hao Zengzhou, Pan Delu *et al.*. Dust automatic detection over ocean using MTSAT data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1228001
涂乾光, 郝增周, 潘德炉等. 基于MTSAT卫星的海上沙尘自动监测[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1228001
- 6 Zhao Yunsheng, Wu Taixia, Hu Xinli *et al.*. Study on quantitative relation between multi-angle polarized reflectance and bidirectional reflectance[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2005, **24**(6): 441~444
赵云升, 吴太夏, 胡新礼等. 多角度偏振反射与二向性反射定量关系初探[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(6): 441~444
- 7 Wu Taixia, Yan Lei, Xiang Yun *et al.*. The multi-angle polarization spectral character of water and its applications in water color remote sensing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(2): 448~452
吴太夏, 晏磊, 相云等. 水体的多角度偏振波谱特性及其在水色遥感中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(2): 448~452
- 8 Sun Xiaobing, Qiao Yanli, Hong Jin. Review of polarization remote sensing techniques and applications in the visible and infrared[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, **5**(3): 175~188
孙晓兵, 乔延利, 洪津. 可见与红外偏振遥感技术研究进展及相关应用综述[J]. *大气与环境光学学报*, 2010, **5**(3): 175~188
- 9 Nie Jingsong, Wang zhen. Summarize of infrared polarization imaging detection technology [J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(2): 63~67
聂劲松, 汪震. 红外偏振成像探测技术综述[J]. *红外技术*, 2006, **28**(2): 63~67
- 10 Sun Zhongqiu, Zhao Yunsheng, Yan Guoqian *et al.*. Analysis of influencing factors of snow hyperspectral polarized reflections[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(2): 406~410
孙仲秋, 赵云升, 阎国倩等. 雪的偏振高光谱反射影响因素分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(2): 406~410
- 11 Liu Biliu, Shi Jiaming, Zhao Dapeng *et al.*. Mechanism of infrared polarization detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 777~781
刘必鑫, 时家明, 赵大鹏等. 红外偏振探测的机理[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(5): 777~781
- 12 Song Zhiping, Hong Jin, Qiao Yanli. Method acquiring the demodulation coefficients of intensity-modulated spectropolarimeter by measuring reference light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0412003
宋志平, 洪津, 乔延利. 强度调制偏振光谱仪解调系数参考光测量方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0412003
- 13 Zhang Jian, Qu Enshi, Cao Jianzhong *et al.*. Study on a multi-spectral-band infrared sea surface temperature radiometer system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0401003
张建, 屈恩世, 曹剑中等. 自动多波段红外海洋表面温度辐射系统研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0401003
- 14 Han Yang, Li Qian, Zhao Yunsheng *et al.*. Effects of three interactive factors on the multi-angle polarized hyperspectrum of vegetation leaves[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2010, **29**(4): 316~320
韩阳, 李潜, 赵云升等. 三因素及其交互作用对植物叶片多角度偏振高光谱特征的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, **29**(4): 316~320
- 15 Zhao Naizhuo, Zhang Jingqi, Zhao Yunsheng *et al.*. Quantitative analysis of interactions between factors influencing polarized reflection of loess [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(2): 380~383
赵乃卓, 张景奇, 赵云升等. 黄土偏振反射影响因子交互作用试验分析[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(2): 380~383

栏目编辑：李文喆