

水体镜面反射的多角度偏振特性研究及应用

罗杨洁^① 赵云升^{②*} 吴太夏^③ 赵丽丽^②

(① 内江师范学院管理与资源环境系, 内江 641112; ② 东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024; ③ 北京大学遥感与地理信息研究所, 北京 100871)

摘要 基于水体样本的多角度偏振反射光谱, 对水体镜面反射的偏振特性和机理进行了系统地研究. 实验中, 通过改变光线入射角、探测角、探测方位角、偏振角等影响因子, 得出了水体样本的多角度偏振反射光谱的普适规律. 在多角度遥感与偏振光技术的物理基础上, 提出了基于多角度偏振反射的水体镜面反射消除方法和进行水体偏振遥感的适宜时间设计方法, 为多角度偏振技术在水体遥感中的应用提供了技术参考.

关键词 水体遥感 镜面反射 多角度 偏振 布儒斯特角 参考时间表

21 世纪人类社会面临着人口膨胀、资源短缺和环境恶化等问题, 而向海洋扩大活动空间、大力开发利用海洋、增加海洋资源的储备, 是保证人类社会可持续发展的最为可靠的途径. 但是随着人类的扩展, 也带来了诸如海洋污染、生态失衡等现象. 如何保护海洋环境, 是全球环境研究中极其重要的问题, 与国家形象、科技能力和社会的稳定直接相关.

水体遥感信号主要由以下三种光组成: (1) 经大气光子散射后到达传感器的光; (2) 太阳直射光到达水面后被直接反射的光; (3) 在水体中经后向散射后来自水表面的上涌光. 其中只有第三种光-上涌光能够反映水体的信息, 它包括丰富的水体信息, 几乎是水体可见光波段遥感唯一的信息源, 而前两种则构成了背景噪声, 必须加以纠正和消除^[1].

关于如何减弱和消除水体镜面反射影响, 中国和国外学者进行了大量研究, 这些研究结果已经广泛应用到各层次的遥感平台中. 季耿善等^[2]研究了引起水体镜面反射的太阳高度角范围, 认为对遥感时间、太阳高度、太阳方位与航向等相互关系进行周密

的设计可避免镜面反射. 毛志华等^[3]、李淑菁等^[4]讨论了影响镜面反射的主要因素. Fougnie 等^[5]提出测量辐射计应该从 45°方向观测, 并且太阳和探测器的方位角之差大于 90°, 最好为 135°. Anjum 等^[6]对 1996 年 11 月 7 日印度次大陆的 POLDER 数据进行了分析, 发现当观测天顶角为 55°时, 水体的偏振反射比最小. 目前, 避开或消除水面镜面反射最常见的方法主要有两种: 一是卫星 CET 尽可能移至中午 12:00, 最小化耀斑影响范围; 二是将传感器设计成垂直、前倾 20°和后倾 20°三种扫描状态, 通过拼接图像来消除耀斑区域, 如装载在美国“SeaStar”卫星上的 SeaWiFs 传感器^[7]. 摄影技术中, 在有太阳反射光存在的情况, 如拍摄汽车玻璃中的人物或水里的鱼, 常使用偏振镜来进行过滤处理. 另外, Cunningham 等^[8]用船载偏振辐射计从 53°方向观测海面, 最小化太阳反射光的影响, 来计算离水辐射率. 赵云升等^[9]对液体表面偏振特性进行了初步研究, 本文在已有研究基础上进一步阐述水体多角度偏振遥感机理, 为航空和航天遥感的实施提供技术参考.

收稿日期: 2006-05-15; 接受日期: 2006-09-11

中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX3-SW-338-1)和国家自然科学基金项目(批准号: 49771057)资助

* 联系人, E-mail: zhaoy975@nenu.edu.cn

1 水体镜面反射特征

1.1 水体镜面反射光学特征

一切物体的反射均遵循反射规律,即入射光线、法线、反射光线位于同一平面内,且入射角与反射角相等.因此,光滑的表面形成镜面反射,粗糙的表面因为有许多个反射面及各点法线方向不同而形成漫反射.水面(尤其是静水面)可以被近似地看作光滑的表面,当强光源入射时,在与入射线方向关于法线对称的反射线方向上形成强烈的反射辐射,这就是水体的镜面反射.当有风经过时,近似光滑的水面形成倾角而造成耀斑,或在海浪的顶端形成闪光点,这也是水体镜面反射造成的.

1.2 水体镜面反射偏振特征

地表的偏振光辐射主要在以下两种情况下产生:一是地球-大气系统中辐射传输过程的偏振效应,主要是受到大气分子、气溶胶及云层反射及散射的影响.二是地球表面的反射所造成的偏振,其特性取决于其表面的固有属性,如其结构特征、介质特性、粗糙度、光照方向、观察角等条件.沙和土壤、岩石、植被、水体、人造物等,均能够产生不同的偏振效应.偏振效应与波长有关,在大气系统中近红外的辐射较易产生偏振效应.我们使用较长波长的光来观测大气效应,而使用较短波长的光来进行地表目标观测^[10].

自然光以非布儒斯特角入射光滑水面,反射和折射光均变成部分偏振光,而且反射光的主要振动方向一定与入射面垂直,折射光的主要振动方向则在入射平面内.如果入射角为布儒斯特角,则反射波为线偏振光,折射波为部分偏振光^[11].

1.3 反射光的偏振度所传递的信息

通过比较卫星通过赤道时(CET)不同时间的全轨道辐射模拟图像发现,水面耀斑的中心位置、范围和辐射度大小受卫星CET的支配.当卫星CET从上午逐渐向中午 12:00 变化时,耀斑的中心位置由图像东边缘渐渐向图像中心偏移,耀斑覆盖范围由大变小,分布形状由长的瓜子形逐渐变成椭圆形,并且椭圆面积逐渐变小,到中午 12:00 变成一小点;当卫星CET从中午 12:00 往后推迟时,则恰好相反,耀斑中心向图像西边缘偏移,图像受太阳影响渐渐增大.由于卫

星与太阳所作的是相对运动,所以太阳高度角是影响水面耀斑的产生、大小与分布形状的主要因子之一^[12].

偏振度是描述偏振光偏振程度的物理量,它定量表示了线偏振光占全部光的比例,其原始定义为

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}}, \quad (1)$$

式中, $I_{\perp}$ 为反射光中电矢量垂直于入射面的光强, $I_{\parallel}$ 为反射光中电矢量平行于入射面的光强^[13].

根据菲涅耳公式,对偏振度函数作进一步的分析.由于光强为电矢量振幅的平方,则

$$P = \frac{\left| \frac{E_{\perp}^2 \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} - E_{\parallel}^2 \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)} \right|}{\left| \frac{E_{\perp}^2 \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} + E_{\parallel}^2 \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)} \right|}, \quad (2)$$

式中, $E_{\perp}$ 为入射光的电矢量垂直于入射面的分量, $E_{\parallel}$ 为入射光的电矢量平行于入射面的分量, α 为入射角, β 为折射角.

当入射光是自然光时, $E_{\perp}^2 = E_{\parallel}^2$, 用折射率消去(2)式中的折射角,得

$$P = \frac{2 \sin \alpha \tan \alpha \sqrt{N^2 - \sin^2 \alpha}}{N^2 - \sin^2 \alpha + \sin^2 \alpha \tan^2 \alpha}, \quad (3)$$

由于清洁的水的折射率为 1.33, 故

$$P = \frac{2 \sin \alpha \tan \alpha \sqrt{1.769 - \sin^2 \alpha}}{1.769 - \sin^2 \alpha + \sin^2 \alpha \tan^2 \alpha}. \quad (4)$$

对 P 函数求导,当 $P'=0$ 时, $\alpha = 53.1^\circ$, 此时该函数存在极大值,即反射光为完全线偏振光,此时的入射角 α 为布儒斯特角.

图 1 为偏振度随入射角的变化规律曲线.当入射角 α 由 0° 逐渐增大时,反射光的偏振程度也逐渐增大.到达布儒斯特角时,此时偏振度最大,随后又逐渐减小.也就是说,越接近布儒斯特角,反射光线的线偏振性越好.

根据上述讨论,我们可以得出:经水体反射后,反射光存在偏振现象,这时水体实际上是起偏器.当太阳的入射角为布儒斯特角 53° ,即太阳高度角为 37° 时,则平静的水面将使太阳光的反射光线 100% 偏振,在传感器前使用检偏器,调节检偏器的方位角,让偏振角与光线反射光的偏振方向相互垂直,此时

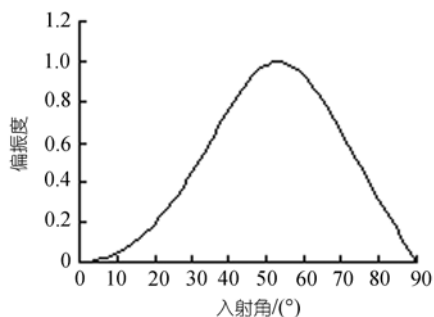


图1 偏振度随入射角的变化曲线

由于偏振片的阻光作用, 反射光全部不能通过偏振片, 传感器接收到的信息为大气散射和水体体散射, 水体镜面反射的强度可以忽略, 这样就可以在不受太阳反射光影响的情况下, 利用大气和水体的辐射传递方程推算水体的水质指标。

2 实验设计

被测的样品水采自长春市居民饮用的自来水, 水质清澈透明, 无污染, 各项指标符合中华人民共和国 1985 年颁布的《生活饮用水卫生标准》。

实验使用中国科学院长春光学机械研究所研制的地物二向性反射比测量装置^[14]。该仪器主要由三大部分组成: 包括光源系统、二向反射光度计系统和控制系统。可从多个观测点全方位地测量地物反射辐射, 光谱范围为 630~690 nm, 数据的快速采集与处理均有电子控制板与微机自动完成, 数据以表格或曲线等形式输出, 并可做各种统计分析。

由于实验要求, 需分别测量地物和标准白板在三态下: 无偏(即不加偏振片), 0°偏振和 90°偏振(偏振片的光轴方向为通过偏振片后的光线振动方向, 也就是透振方向, 透振方向与水面光轴方向垂直的偏振片方位为 0°偏振方向, 与水面光轴方向平行的偏振片方位为 90°偏振方向)时的空间反射光谱值, 仪

器软件会自动计算每次测量的偏振反射比。测量过程中, 改变入射角就得到多角度光谱值, 每一组数据包括被测物和标准白板在一种偏振态、一种入射角、不同探测角状态下的数值。

3 结果分析与讨论

为了方便表示, 特作以下说明: 在所有图中纵轴表示方向反射比 ρ ; θ_i 表示光线入射角; θ_r 表示探测角(以天顶角 0°算起); ϕ_r 表示探测方位角; α 表示偏振角, 其取值范围为 0°, 90°和无偏。

3.1 方向反射比

地物反射光谱的空间分布主要取决于物体的表面状态, 常用方向反射比 ρ 来描述它的空间分布, 其是入射光源的天顶角 θ_i 、入射光源的方位角 ϕ_i 、观测仪器的天顶角 θ_r 、观测仪器的方位角 ϕ_r 的函数。对于单光路光谱仪, 用具有良好朗伯性的灰板作为标准板, 把仪器分别对准标准板与地物, 读出两组数值 $V_s(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ 和 $V_g(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$, 即可求出地物的方向反射比 $\rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ ^[15]。本文中, 使用偏振器后测量求得的地物方向反射比称为偏振反射比。

3.2 数据分析

图2为不同条件下水的反射光谱, 图2(a)是自来水在光线入射角 30°, 无偏状态, 探测方位角 0°~350°, 探测角 0°~60°时的反射光谱曲线; 图2(b)是自来水在光线入射角 40°, 0°偏振状态, 探测方位角 0°~350°, 探测角为 0°~60°时的反射光谱曲线。

由图2(a)可以看出, 光线由30°方向入射, 0°, 10°, 20°, 40°, 50°和 60°探测方向光谱曲线都比较平缓, 近乎直线, 但是 30°探测方向的光谱曲线, 在探测方位角 180°附近凸起, 我们称这种较其他探测角和其他

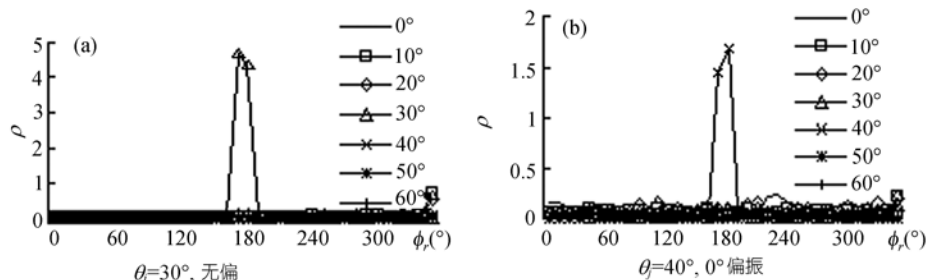


图2 不同条件下的水的反射光谱

探测方位角数值大的方向反射比值为反射峰值; 同样, 由图 2(b)可以看出, 在入射角为 40° , 探测角为 40° , 探测方位角为 180° 时自来水的方向反射比达到反射峰值. 由此我们可以得出, 对于光滑平面, 反射峰值都会出现在入射角等于探测角, 探测方位角为 180° 处. 因此, 我们在分析水体镜面反射光谱时, 只需考虑光谱中入射角等于探测角、探测方位角为 180° 时的反射峰值.

图 3 是自来水在光线入射角 40° , 探测方位角 180° , 偏振角 0° , 90° 和无偏时的反射峰值比较图. 从图 3 中可以看出, 当偏振角为 0° 时, 反射峰值相较于该入射角方向其他偏振角的反射峰值都要小. 这是因为, 0° 偏振情况下, 入射光的振动方向与水体的透光轴正交, 为消光方向, 此时偏振反射比峰值最小; 无偏时水体反射为二向性反射, 此时反射比为二向性反射比; 90° 偏振时入射光的振动方向与水体的光轴平行, 即为透光方向, 此时偏振反射比峰值达到最大. 所以, 在探测器前加载一个偏振器, 并使偏振角为 0° , 可以有效地减少太阳反射光, 在入射角为 40° 时, 阻光程度为 71.75%.

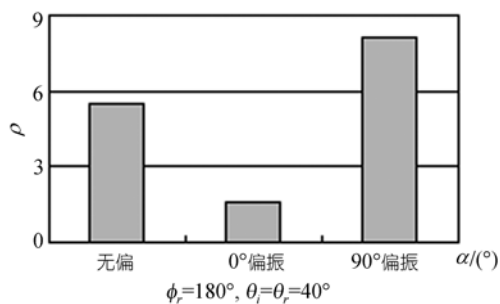


图 3 相同入射角、不同偏振角时水的反射峰值比较图

图 4 是自来水在 0° 偏振时不同入射角的反射峰值比较图, 可以看出随着入射角的改变, 水体的偏振反射峰值随之改变, 并且存在明显规律. 当入射角由 30° 逐渐增大到 60° 时, 反射峰值先减少后增大, 此结论和菲涅尔公式是相符的, 故必存在一角度使偏振反射比最小.

水的折射率为 1.33, 故其布儒斯特角为 53.1° . 图 5 是自来水在光线入射角和探测角均为 53° , 偏振角 0° , 90° 和无偏时的反射峰值比较图, 此时阻光率为 92.5%, 也就是只有 7.5% 的光辐射到达传感器, 大大减少了太阳反射光的影响, 避免了传感器饱和的情况.

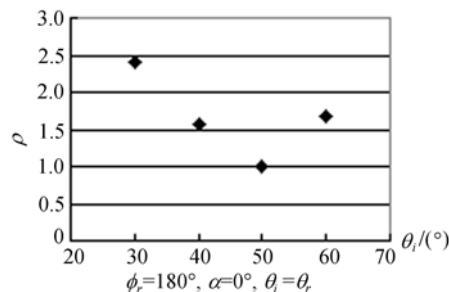


图 4 0° 偏振角、不同入射角时水的反射峰值比较图

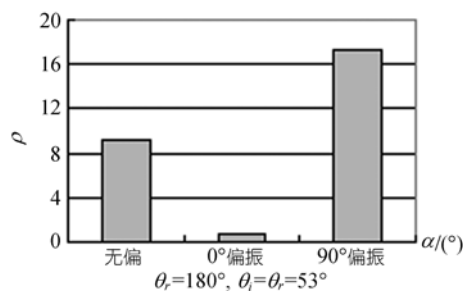


图 5 入射角为布儒斯特角、不同偏振角时水的反射峰值比较图

通过前面对水体表面的镜面反射进行的具体分析, 我们知道, 只有当多角度探测器在入射面内时才可能产生镜面反射, 其他方向的反射比值都很小. 因此, 在偏振角为 0° 偏振, 光线入射角从 30° 增加到 60° , 水体的偏振反射峰值先减少后增大, 又由布儒斯特定律知, 水在 53° 探测角方向的平行入射面的入射能量大部分被折射或吸收, 虽然遥感不同于常规的物理实验, 但是从图中也能看出这时的偏振反射比峰值比 90° 偏振和无偏时要小的多, 故, 当光线入射角为布儒斯特角, 偏振角 0° 时, 水体反射光为完全偏振光, 被偏振器完全吸收.

从图 5 也可以发现, 0° 偏振反射比还有一定的反射峰, 并不是理论上的零值, 这跟实验中有一定的杂光干扰以及布儒斯特角的角度控制的精度有一定的关系.

3.3 小结

通过以上讨论, 我们可以总结出以下几条规律:

- (1) 在不同光线入射角、不同探测角的条件下, 它们的偏振反射存在共性, 当光线入射角等于探测角时, 水体的偏振反射达到峰值, 并且出现在入射光与反射光所决定的主平面内, 即探测方位角 180° 处;
- (2) 偏振反射特征与观测的偏振状态密切相关,

90°反射峰值远远大于 0°反射峰值. 并且在 0°偏振时, 光线入射角从 30°逐渐增大到 60°时, 水体偏振反射峰值先逐渐减小然后增大;

(3) 当光线入射角为布儒斯特角、0°偏振时, 水体的偏振反射最弱, 这时多角度遥感获得的反射光谱在任何方向都不存在水体镜面反射.

4 现实意义

中国疆土辽阔, 共跨越纬度近 50°, 太阳高度及方位差异较大. 根据本研究提出的镜面反射偏振规律, 可以编制适宜进行水体偏振遥感的时间表, 确定合适的航测计划, 提高遥感图像的利用率和定量遥感的精度.

下面推导各地的太阳高度角计算公式:

(1) 太阳赤纬角 δ

地球中心与太阳中心的连线与地球赤道平面的夹角称为赤纬角, 用符号 δ 表示. 测量日的赤纬角大小为 [16]

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \times \frac{284 + n}{365} \right),$$

式中 n 为测量日在一年中的日期序号.

(2) 太阳时角 τ

太阳所在的时圈与通过南点的时圈构成的夹角称为太阳时角, 用符号 τ 表示. 规定正午太阳时角为 0, 上午太阳时角为负值, 下午太阳时角为正值. 因为天球在一天 24 h 内旋转 360°, 所以每小时相应的太阳时角为 15°. 在观察时刻太阳所处位置的太阳时角为

$$\tau = 15(t - 12),$$

式中, t 为当地标准时间.

(3) 太阳高度角 h

地球表面上某点和太阳的连线与地平面之间的夹角称为太阳高度角, 用符号 h 表示, 可用下式计算:

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau$$

式中 φ 是当地地理纬度.

将太阳赤纬角 δ 、太阳时角 τ 带入太阳高度角 h 公式中:

$$\sin h = \sin \varphi \sin \left[23.45 \sin \left(360 \times \frac{284 + n}{365} \right) \right] + \cos \varphi \cos \left[23.45 \sin \left(360 \times \frac{284 + n}{365} \right) \right] \cos [15(t - 12)],$$

根据此计算公式, 可计算出地球上任一地点在任一时刻的太阳高度角 [17]. 表 1 为世界各地正午时的太阳高度角.

表 1 中折线分界线上部区域为可以利用偏振遥感消除水体镜面反射的区域. 表 2 为春分日世界各地太阳高度角等于 37°时的时刻表. 因篇幅所限, 仅列出春分日表, 其他时节的数据可以依此类推(春分日 $\delta = 0^\circ$).

由表 2 我们可以看出, 春分日, 在超过南北纬 53°的地区即使正午时也不可能存在太阳高度角等于 37°的情况, 这时不能利用偏振遥感完全消除水面镜面反射. 结合以上两表, 南北纬 0°~30°地区一年中有 12 个月可以完全避免水面镜面反射; 南北纬 40°地区有 8 个月可以完全避免水面镜面反射, 1, 2, 11 和 12 四个月不适宜; 南北纬 50°地区有半年时间完全避免水面镜面反射; 依此类推, 到极地地区由于太阳高度角低于 37°, 所以全年都没有能完全避免水面镜面反射的时间. 在实施偏振遥感时, 可以根据上述计算方

表 1 世界各地正午时的太阳高度角

日期	05-01	04-02	06-03	05-04	06-05	06-06	07-07	07-08	07-09	06-10	06-11	06-12
北纬	0°	67°24'	73°20'	83°36'	95°36'	106°22'	112°36'	112°36'	106°22'	95°36'	83°36'	73°20'
	10°	57°24'	63°20'	73°36'	85°36'	96°22'	102°36'	102°36'	96°22'	85°36'	73°36'	63°20'
	20°	47°24'	53°20'	63°36'	75°36'	86°22'	92°36'	92°36'	86°22'	75°36'	63°36'	53°20'
	30°	37°24'	43°20'	53°36'	65°36'	76°22'	82°36'	82°36'	76°22'	65°36'	53°36'	43°20'
	40°	27°24'	33°20'	43°36'	55°36'	66°22'	72°36'	72°36'	66°22'	55°36'	43°36'	33°20'
	50°	17°24'	23°20'	33°36'	45°36'	56°22'	62°36'	62°36'	56°22'	45°36'	33°36'	23°20'
	60°	7°24'	13°20'	23°36'	35°36'	46°22'	52°36'	52°36'	46°22'	35°36'	23°36'	13°20'
	70°	-2°36'	3°20'	13°36'	25°36'	36°22'	42°36'	42°36'	36°22'	25°36'	13°36'	3°20'
	80°	-12°36'	-6°40'	3°36'	15°36'	26°22'	32°36'	32°36'	26°22'	15°36'	3°36'	-6°40'
	90°	-22°36'	-16°40'	-6°24'	5°36'	16°22'	22°36'	22°36'	16°22'	5°36'	-6°24'	-16°40'

表 2 春分日世界各地太阳高度角等于 37°的时间(当地时间)

	0°	N10°	N20°	N30°	N40°	N50°	N53°	N60°	N70°	N80°	N90°
适宜时间	8:28, 15:32	8:30:41, 15:29:19	8:39:18, 15:20:42	8:56:05, 15:03:55	9:27:07, 14:32:53	10:37:44, 13:22:16	12:00	—	—	—	—
	0°	S10°	S20°	S30°	S40°	S50°	S53°	S60°	S70°	S80°	S90°

法得出最佳的季节和最佳的时段，来消除水体镜面反射信号，提高遥感图像的利用率和定量遥感的精度。

5 结论

实验表明，水体镜面反射存在偏振现象，并且其偏振特性随着入射角的改变而改变，将多角度遥感与偏振遥感相结合，发挥两者各自的优势消除水面镜面反射是可行的。通过对遥感时间、探测角度、观测方位、偏振状态等相互关系进行周全的设计可以最小化太阳反射光的影响，对提高水体遥感的定量精度有着重要意义。

参 考 文 献

1 丛丕福. 水色遥感机理与悬浮物的卫星遥感信息识别研究. 硕士学位论文. 大连: 大连海事大学, 2002. 10—13

2 季耿善, 杨静, 傅江, 等. 水体遥感的镜面反射特征研究. 环境遥感, 1994, 9(3): 195—202

3 毛志华, 郭德方, 潘德炉. 航空水色遥感中太阳耀光信息提取及消除方法的研究. 遥感技术与应用, 1996, 11(4): 15—20

4 李淑菁, 毛天明, 潘德炉. 太阳反射光对海洋水色卫星遥感的影响研究. 热带海洋, 1997, 16(4): 76—82

5 Fougnie B, Frouin R, Lecomte P, et al. Reduction of skylight reflection effects in the above-water measurement of diffuse marine

reflectance. Appl Opti, 1999, 38(18): 3844—3856

6 Anjum V N S, Ghosh R. Angular and polarization response of vegetation, bare soil and water from ADEOS POLDER data over India. INT J Remote Sens, 2000, 21(4): 805—810^[DOI]

7 黄韦良, 张鸿翔. 美国 SeaStar 海洋水色卫星简介. 国土资源遥感, 1995, 23(1): 41—44

8 Cunningham A, Wood P, McKee D. Brewster-angle measurements of sea-surface reflectance using a high resolution spectroradiometer. J Opti A, 2002, 4: 29—33

9 赵云升, 金伦, 宋开山, 等. 液体表面偏振反射特性研究. 东北师大学报, 2000, 32(4): 103—106

10 孙玮, 刘政凯, 单列. 利用偏振技术识别人造目标. 光学技术, 2004, 30(3): 267—269

11 徐希儒. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社, 2005. 176—179

12 潘德炉, Doerffer R, 毛天明, 等. 海洋水色卫星的辐射模拟图像研究. 海洋学报, 1997, 19(6): 43—55

13 张之翔. 光之偏振. 北京: 高等教育出版社, 1985. 10—14

14 金锡峰, 乔德林, 周素香. 中国专利, 96239489.0, 1998-03-04

15 梅安新, 彭望禄, 秦其明. 遥感导论. 北京: 高等教育出版社, 2001. 41—44

16 王章野, 陆艳青, 彭群生, 等. 基于气象学和传热学的城市建筑物逐时变化红外成像模型. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 517—523

17 谈小生, 葛成辉. 太阳角的计算方法及其在遥感中的应用. 国土资源遥感, 1995, 7(2): 48—57