



进展

星-地光学遥感信息监测水稻高温热害研究进展

张佳华^{①②*}, 姚凤梅^③, 李秉柏^④, 延昊^⑤, 侯英雨^⑤, 程高峰^{①④}, Vijendra BOKEN^⑥

① 中国气象科学研究院遥感与气候信息开放实验室, 北京 100081;

② 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094;

③ 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100049;

④ 江苏省农业科学院, 南京 210014;

⑤ 国家气象中心, 北京 100081;

⑥ Department of Geography and Earth Science, University of Nebraska at Kearney, Kearney, NE 68849, USA

* E-mail: zhangjh@cma.gov.cn

收稿日期: 2010-06-21; 接受日期: 2011-01-19

全球变化研究国家重大科学研究计划(编号: 2010CB951302)、公益类行业(气象)专项(编号: GYHY201106027)国家自然科学基金(批准号: 40771147)和“11.5”科技支撑重点项目(编号: 2006BAD04B04)资助

摘要 随着全球气候持续变暖, 水稻高温热害的发生频率已经显著加大, 这已引起科学家的广泛重视. 长江中下游地区水稻生长季受到高温热害的严重影响, 直接影响到该区乃至全国的粮食安全, 基于卫星遥感信息开展作物高温热害监测和评估具有重要意义. 本文重点论述了近年来基于光学遥感信息对水稻高温热害的监测研究进展, 包括采用光学卫星遥感信息对稻作区域气温的空间分布研究、基于混合象元分解信息的水稻田混合下垫面温度提取信息、发展野外高光谱和热红外观测试验和模型, 以及构建卫星-地面遥感耦合的水稻高温热害监测模型等, 最后探讨了基于遥感信息开展水稻高温热害监测的前景和进一步方向.

关键词星-地光学遥感
红外遥感
高光谱遥感
水稻
高温热害

IPCC 第 4 次评估报告指出, 1906~2005 年的 100 年间, 全球的变暖趋势为 0.74°C ; 其中 1956~2005 年这 50 年间全球变暖趋势为每 10 年升高 0.13°C , 几乎是过去 100 年的两倍^[1]. 气候变暖及其极端高温频率的显著增加对全球粮食安全带来了严重影响^[2~6]. 及时开展气候变暖对粮食安全影响的研究, 对于国家制定相应对策具有重要意义. 长江中下游地区包括湖北、湖南、江西、安徽、江苏和上海等省市, 是我国最大的水稻产区^[7,8]; 水稻种植面积占全国水稻总面积的 70% 左右, 总产量占全国粮食总产量的 30% 左右^[9]. 长江流域单季稻和双季早稻的开花灌浆期正值盛夏高温季节, 经常出现水稻高温热害, 降低水稻

光合能力, 造成水稻结实率下降及稻米品质变劣, 严重影响水稻生产^[10~14]. 每年夏季梅雨季节过后, 太平洋副热带高压北跳控制长江中下游地区, 天气晴热无雨, 出现持久高温天气, 严重影响水稻生长发育和产量形成^[15~20]. 加强高温热害的监测和预警预报技术研究已迫在眉睫.

近年来, 卫星遥感技术的发展, 对我国农作物监测取得了重要进展, 但目前大部分卫星遥感应用仍局限于作物长势、作物生理生化参数及遥感估产方面^[21~23], 而针对水稻高温热害的遥感监测研究才刚刚起步. 水稻高温热害的监测涉及到空气温度(T_a)、地表温度(T_s)和冠层温度(T_c)3 个重要指标. 卫星遥感

的红外通道资料可较准确地反演 T_s ^[24-36], 以用于监测高温的发生、强度以及高温热害的分布等, 弥补了地面站有限、温度分布不连续的缺点. 通过对影响水稻高温热害大田 T_c 和 T_a 的遥感反演, 可提高高温热害程度判识和预测精度. 随着遥感技术的发展及水稻高温热害遥感监测机理的研究, 利用地面高光谱信息结合卫星遥感监测水稻高温热害研究已成为重要的手段. 本文针对中国长江中下游高温热害, 重点评述基于光学遥感信息对水稻高温热害监测研究进展: 包括采用卫星遥感对水稻大田区域 T_a 的空间分布研究; 基于混合象元分解信息的水稻混合下垫面的温度提取; 基于野外高光谱和热红外观测试验和模型建立, 发展卫星-地面遥感耦合的高温热害监测模型, 并探讨基于遥感对水稻高温热害监测的前景和方向.

1 水稻高温热害的特征

1.1 水稻高温热害概念和气象指标

高温热害是指高温对作物的生长发育以及产量造成的危害. 具体对水稻来说, 就是指水稻处于孕穗后期和抽穗开花期, 在 7 月下旬至 8 月上旬, 日平均气温(T_{ave}) $\geq 30^{\circ}\text{C}$, 日最高气温(T_{max}) $\geq 35^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $\leq 70\%$ 的高温天气, 致使孕穗后期水稻的部分颖花发育畸形, 开花期影响花药开裂及花粉活力, 抑制花粉管伸长, 降低结实率, 造成水稻减产^[37-44]. 在研究长江中下游水稻高温热害时, 按照高温指标为 $T_{ave} \geq 30^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 32^{\circ}\text{C}$, $T_{max} \geq 35^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 37^{\circ}\text{C}$, 持续天数 3, 5 和 8 d, 日平均相对湿度 $\leq 70\%$ 等划分水稻高温热害为 4 个等级(见表 1), 按照这 4 个等级可研究高温发生的年代际变化、空间分布和变化趋势^[45].

1.2 水稻高温热害发生季节及危害性

抽穗开花和灌浆期是水稻易受高温危害的时期.

表 1 水稻高温热害等级指标

高温热害等级	日平均相对湿度		持续天数(d)
	$\leq 70\%$ 且日平均气温($^{\circ}\text{C}$)	$\leq 70\%$ 且日最高气温($^{\circ}\text{C}$)	
1	≥ 30	≥ 35	$3 \leq \text{天数} < 5$
2	≥ 30	≥ 35	$5 \leq \text{天数} < 8$
	≥ 32	≥ 37	$3 \leq \text{天数} < 5$
3	≥ 30	≥ 35	天数 ≥ 8
	≥ 32	≥ 37	$5 \leq \text{天数} < 8$
4	≥ 32	≥ 37	$8 \leq \text{天数}$

抽穗开花期遭遇高温主要导致花粉数量减少、花药不开裂以及花粉在柱头上不能萌发; 且随着温度的不断升高和胁迫时间的延长, 花粉不育度明显增加, 且结实率显著下降^[46-48]. 灌浆成熟期是水稻产量和品质形成的关键时期, 温度是影响水稻灌浆结实期稻米品质的首要因子^[49]. 高温会导致水稻灌浆速率明显下降, 籽粒的充实度受到影响, 使得产量和粒重都显著降低, 并且稻米品质下降^[50].

2 水稻高温热害的主要遥感信息及遥感机理

2.1 温度作为水稻高温热害指标的主要遥感信息及特征

水稻高温热害主要表现在抽穗开花和灌浆期的温度对水稻胁迫, 卫星遥感大范围反演水稻高温热害的主要气象指标-温度是高温热害检测的主要指标, 其中 T_a 是表示热量特征的重要指标之一, 是进行作物高温热害热量评估的关键参数. 其次是地表温度(T_s), T_s 不仅直接显示稻田受高温影响的地表温度状况, 还通过估算长波通量, 间接估算影响大气-稻田之间的潜热和显热交换. 此外水稻高温热害的主要特征是作物受温度胁迫, Chauhan 等^[51], Carrity 和 O'Toole^[52]研究表明, 土壤含水量下降时, 水稻 T_c 上升, 胁迫较重时可提高 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$; 扬花期 T_c 与稻谷产量和结实率均呈显著负相关. 因此, 用卫星遥感监测水稻高温热害主要指标可包括 T_a , T_s 和 T_c .

2.1.1 遥感反演水稻高温区空气温度的研究进展

目前利用遥感数据估算 T_a 方法进而探测作物高温热害已得到很大发展. 一是直接从遥感反演的 T_s 和 T_a 的统计关系来推算, 如 Chen 等^[53]和 Horiguchi 等^[54]利用静止气象卫星的热红外数据推算的 T_a 与实际 1.5 m 高观测 T_a 很接近. Green^[55]发现从 NOAA-AVHRR 反演的 T_s 与气象观测的月平均 T_a 有着显著相关性. 另一种方法主要是基于 T_s 和 NDVI 的梯形或三角形的空间特征关系. 由于作物在空间分布上是不均匀的, 因而观测的 T_s 将随作物的变化而变化^[56,57]. 在浓密植被覆盖条件下, 植被的 T_c 几乎接近其周围 T_a . 因此, 基于 T_s 和 NDVI 空间特征关系的 T_a 估算方法被提出来, 即 TVX(temperature vegetation index)方

法. 该方法对于覆盖度比较高的作物区域比较适用, 但对于稀疏植被区, 误差很大.

针对中国南方水稻高温热害, Yan 等^[58]发展了基于 MODIS 的偏差订正法反演 T_a 进行监测. 日最高温度($T_{\max}$)一般出现在午后 14 时, 这也是地面气象站在日 $T_{\max}$ 观测方面的规范. 而 Aqua 卫星是每日 14 时左右过境. $T_{\max}$ 的反演包括两步, 首先基于统计回归方程由 14 时 Aqua-MODIS 亮温数据和站点数据(包括经度、纬度和高度)计算 $T_{\max}$ 初猜值, 再由偏差订正方程反演出 $T_{\max}$ 估计值. 具体计算方程如下:

$$T_{\max}^{\text{Guess}} = 7.943 \times 10^{-2} X - 0.28 Y - 1.67 \times 10^{-3} Z + 2.542 T_{11 \mu\text{m}} - 2.25 T_{12 \mu\text{m}} - 63.517 \quad (1)$$

$$T_{\max} = T_{\max}^{\text{Guess}} - \Delta T_{\max} \quad (2)$$

式中 $T_{\max}^{\text{Guess}}$ 是 $T_{\max}$ 的初猜值($^{\circ}\text{C}$), X , Y 和 Z 分别是经度($^{\circ}$)、纬度($^{\circ}$)和高度(m), $T_{11 \mu\text{m}}$ 和 $T_{12 \mu\text{m}}$ 是 Terra-MODIS 的 11 和 12 μm 亮温(K). 偏差订正项 $\Delta T_{\max}$ 是纬度和时间的函数. 利用上述模型和 Aqua-MODIS 数据反演出下午 14 时 $T_{\max}$, 用于水稻高温热害监测. 分析表明, 2007 年 7 月底至 8 月初连续 $T_{\max} \geq 35^{\circ}\text{C}$ 的地区主要出现在长江中下游的水稻主产区(江苏、浙江、安徽、江西、湖南和湖北), 如 2007 年 7 月 26 日, 反演 $T_{\max}$ 和观测下午 14 时 $T_{\max} \geq 35^{\circ}\text{C}$ 的区域基本一致(图 1). 这表明 MODIS 卫星反演 $T_{\max}$ 方法在长江中下游水稻高温热害的定量监测方面可以发挥重要作用.

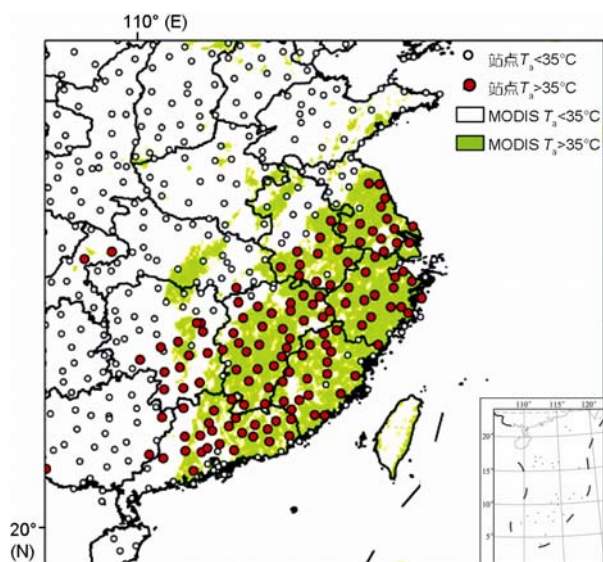


图 1 2007 年 7 月 26 日基于 Aqua-MODIS 反演 $T_{\max}$ 对南方水稻高温热害监测

基于遥感反演日平均气温(T_{ave}), 一般可用 MODIS 反演的日平均地表温度产品(MYD11A1)与 T_a 建立相应的统计关系. 另外, 若分析考虑从遥感反演的气温瞬时值($T_{a \text{ inst}}$)向 T_{ave} 的外推法的关系式, 要考虑基于标准的 T_a 日循环的存在, 同时依赖如高度、纬度和季节得到太阳辐照度的特征. 首先, 建立考虑这些条件的经验公式, 需构建包括每个站、每日和每月的 T_a 和 $T_{a \text{ inst}}$ 强相关关系; 其次, 再根据海拔高度(分为 0~500, 500~1000, 1000~1500, 1500~2000 m 和大于 2000 m)对相似关系进行细分. 侯英雨等^[59]发展了遥感反演 T_a 的新方法, 对于稀疏植被, 根据不同海拔建立了 T_s 和同步气象观测的 T_a ; 在高植被覆盖区, 利用 NDVI- T_s 方法进行 T_a 的遥感反演. 结果显示该方法对估算 T_a 有较高的精度, 可用于水稻高温热害监测.

2.1.2 基于卫星遥感反演陆表温度的水稻高温监测研究进展

水稻田直接和间接地与作物冠层-大气界面进行热量交换, 并通过 T_s 加剧热聚集和扩散^[60], 使作物的高温热害程度发生时空变异; 同时地表的热吸收特征使得水稻田更易增温, 进而加剧水稻的高温热害.

目前主要利用中红外和热红外遥感数据反演 T_s , 进而用于作物高温热害监测^[61]. T_s 反演的方法主要有两大类: 1) 实验方法是利用地面定标, 实测卫星传感器过境时的 T_s , 建立图像灰度值和 T_s 的回归方程, 获得 T_s 图像. 2) 理论方法是求解辐射传输方程, 消除大气影响, 进行精确的大气修正和地表发射率(ε , emissivity)修正后, 可得到 T_s 的空间和时间值. 早期的单一红外通道方法, 需要已知地表 ε , 还要有一个高精度的大气红外辐射传输模型, 且需已知大气温、湿和压廓线. 第二种是广泛用于各种多通道 T_s 估算的分裂窗算法. 根据 11 和 12 μm 分裂窗通道对红外波段水汽吸收的差异, 将地表发射率作为输入变量进行大气和地表发射率订正, 取得较好的反演结果^[61~63]; 或采用 MODIS 的 7 个热红外通道的白天和夜晚时间同时反演 T_s 和通道平均发射率^[64]. 目前 MODIS 的 T_s 反演产品包括白天和夜间 1 km 空间分辨率的逐日全球 T_s 产品, 可用于反演水稻高温区 T_s , 进而探测水稻高温热害.

2.1.3 卫星遥感反演高温区水稻冠层温度

目前大都是用日 $T_{\max}$ 作为高温热害指标; 然而,

有研究表明水稻高温热害主要是农作物高温胁迫^[65]. 为了更好地评价高温热害对水稻的影响, 利用卫星反演 T_s , T_a 和 T_c 来构造水稻高温热害的遥感监测指标是可行的. 然而对于复杂下垫面, 准确提取 T_c 和裸土温度 (T_{soil} , soil temperature) 是重要的. Lambin 和 Ehrlich^[66] 发现植被的蒸腾速率远大于土壤表面的蒸发速率, 因为根系吸水的速度远大于土壤水分向土壤表层的扩散速率, 因而植被覆盖高的水稻田的 T_c 往往低于无植被覆盖的裸土 T_{soil} ; 因此植被覆盖对 T_s 有重要影响^[67], 有必要区分 T_c 和 T_{soil} .

(1) 作物冠层温度 (T_c) 的计算方法. 有研究表明, 象元的辐射温度与组分温度存在近似的线性关系; 辐射温度与视场中的植被面积比例基本上成线性关系. 我们采用线性混合模型方法来估算混合象元中作物的冠层温度, 表达式如下:

$$T_{surface} = T_c \times f_c + T_{soil} \times (1 - f_c), \quad (3)$$

式中, T_c 和 T_{soil} 分别是冠层温度和裸土的温度, $T_{surface}$ 是地表的混合温度, f_c 是作物覆盖度. 通过式(3)可以得到 T_c 的计算公式:

$$T_c = [T_{surface} - T_{soil} \times (1 - f_c)] / f_c. \quad (4)$$

假定植被指数 NDVI 与植被覆盖度 f_c 为线性相关^[68], 即:

$$f_c = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}, \quad (5)$$

式中, $NDVI_{min}$ 和 $NDVI_{max}$ 分别对应植被覆盖 5% (值为 -0.001) 和 98% (值为 0.5) 的 NDVI.

(2) 裸土温度 T_{soil} 的计算方法. 基于植被指数 (VI) 和 T_s 组合方法称为 VI- T_s 方法^[69,70]. VI- T_s 图 (见图 2) 表明了 VI 和 T_s 呈负相关关系的线性或三角形分布特征^[71,72]. 首先假设实验区既包含干燥的区域也包含湿润的区域, 这样可以通过 VI- T_s 组成的三角形 ACB (图 2) 的关系来推算裸土可能存在的最大和最小温度以及裸土的实际温度.

具体算法如下: 在设定的研究区域内, 首先求出 VI 范围从 $NDVI_{min}$ 至 $NDVI_{max}$ 间每一个 $NDVI_i$ 值所对应象元的温度最大值 $T_{sNDVI,max}$ 和最小值 $T_{sNDVI,min}$, 然后分别用 $NDVI_i$ 与 $T_{sNDVI,max}$, $NDVI_i$ 和 $T_{sNDVI,min}$ 进行线性拟合, 建立直线 AB 和 BC 的方程形式如下:

$$T_{sNDVI,max} = a_1 + b_1 \times NDVI_i, \quad (6)$$

$$T_{sNDVI,min} = a_2 + b_2 \times NDVI_i. \quad (7)$$

当 $NDVI_i = NDVI_{min}$ 时, 计算得到的 $T_{sNDVI,max}$ 和 $T_{sNDVI,min}$ 分别对应 $T_{soil,max}$ 和 $T_{soil,min}$. 根据三角形的几

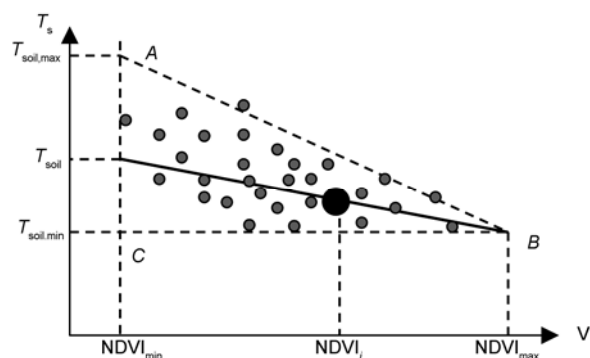


图 2 VI- T_s 三角形空间特征示意图

何关系, 可以求算 VI 值为 $NDVI_i$ 的某一象元中裸土组分的温度 T_{soil} , 具体表达式如下:

$$\frac{T_{soil,max} - T_{soil}}{T_{soil,max} - T_{soil,min}} = \frac{T_{sNDVI,max} - T_{sNDVI}}{T_{sNDVI,max} - T_{sNDVI,min}}, \quad (8)$$

$$T_{soil} = T_{soil,max} - \frac{T_{sNDVI,max} - T_{sNDVI}}{T_{sNDVI,max} - T_{sNDVI,min}} \times (T_{soil,max} - T_{soil,min}). \quad (9)$$

图 3 是 2007 年 7 月下旬长江中下游地区地表参数遥感反演. 在白天, 像元的裸土组分温度要高于像元的混合温度 (即地表温度 T_s), 像元的综合温度要高于像元的冠层温度 T_c , 但三个温度空间分布特征一致. 另外从图 3 可以看出, 2007 年 7 月下旬, 长江中下游大部地区 T_c 分布在 32~34℃ 之间, 安徽南部、湖南和江西部分地区 T_c 在 34~36℃ 之间, 其中浙江大部地区 T_c 为 34~36℃, 部分地区到 36~38℃. 此时, 正值我国长江中下游地区早稻灌浆、乳熟和一季稻的灌浆阶段, 高温热害将对水稻生长和产量形成造成不同程度的影响.

2.2 基于地面遥感的水稻高温热害监测作物光谱指标进展

高光谱遥感信息包括地物光谱仪等已广泛应用于水稻长势监测、遥感估产、水稻品质监测和灾害评估中得到^[73,74]. 但应用于光谱分析技术监测作物高温研究很少^[74]. 通过高温控制实验, 野外作物光谱测定, 对光谱特征参数与水稻生理生化参数变化进行分析, 连续的地面观测数据可用于进行精度验证, 最终建立水稻高温热害生理生态定量监测子模型. 在大田进行高温控制试验, 采用高温持续 3 d, 不同的高温控制温度 (35, 38 和 41℃), 获取了高温热害下水

稻冠层高光谱反射率变化(图 4).

光谱反射率主要选取始穗期和开花期. 从图 4 可以看出, 不同温度处理条件下水稻冠层光谱反射率存在差异, 主要表现为可见光区的反射率随温度的增高而上升, 而近红外范围的反射率随温度增高是下降的^[75]. 结果显示 35℃ 处理 3 d 已使水稻受到高温热害, 可定义为水稻高温伤害的阈值; 这与有关学者的研究结果一致^[8,43,76], 而 41℃ 是高温热害的极端

温度.

2.3 基于地面-卫星遥感作物水分反演的高温热害特征温度信息

作物发生高温后, 其蒸腾速率显著增强, 导致叶片失水严重, 作物叶片水分下降. 通过地面-卫星遥感对叶片水分的监测, 可以间接反映作物叶片受高温影响的程度.

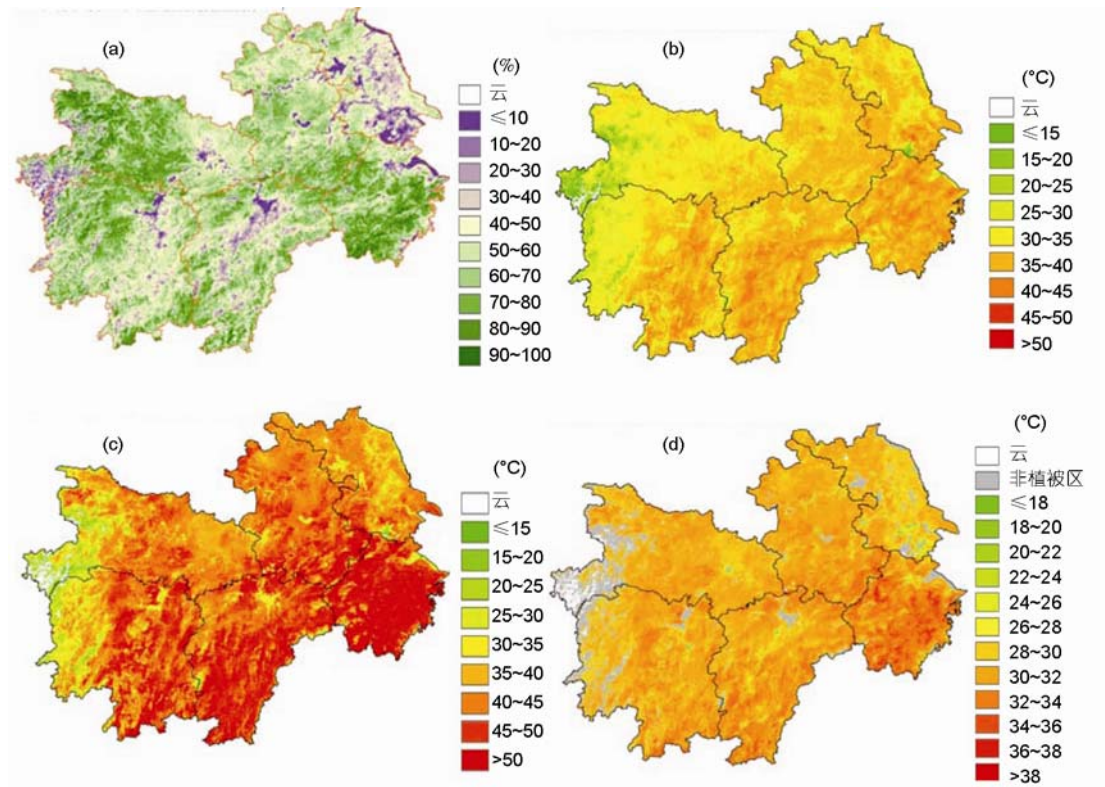


图 3 基于卫星遥感的长江中下游 2007 年 7 月水稻高温热害的组分温度反演

(a) 冠层覆盖度; (b) T_s ; (c) T_{soil} ; (d) T_c

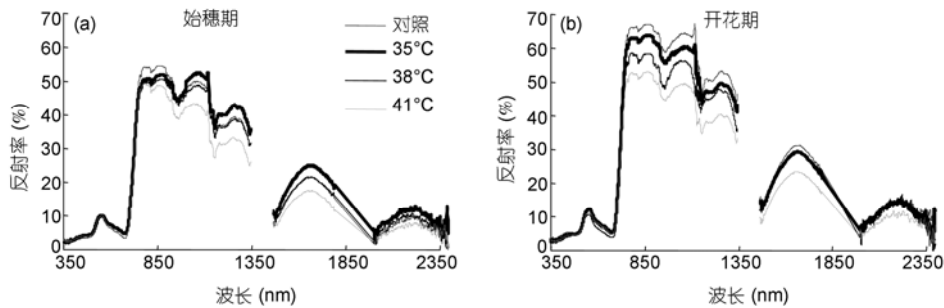


图 4 不同高温胁迫下水稻冠层高光谱反射率的变化

2.3.1 作物冠层温度与作物水分的关系模型发展

基于遥感数据获取的光谱指数, 如归一化水分指数(NDWI)或简单比值指数(SRWI)可反演叶片等效水厚度 EWT^[77-82]. 首先通过光谱指数 SRWI 反演 EWT, 再建立 EWT 与温度间的关系, 最终反演水稻冠层温度. 图 5 显示了 2007 年水稻不同生育期叶绿素浓度(Chl)和冠层温度(T)与 EWT 之间的关系散点图($P < 0.05$).

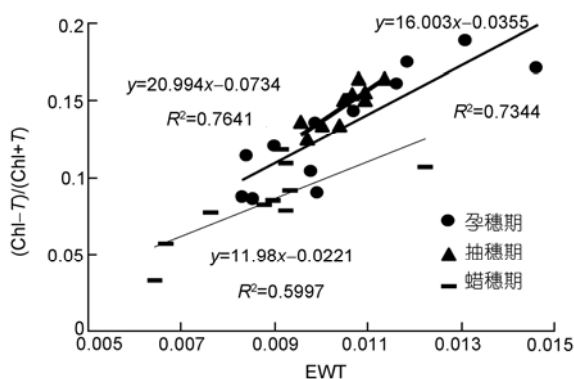


图 5 水稻不同生育期 EWT 与叶绿素浓度和冠层温度散点图

2.3.2 构建用于冠层温度反演的 EWT 与作物水分指数关系模型

400~2500 nm 光谱区域叶反射率和叶片水分含量之间存在显著相关. 利用 PROSAIL 模型来模拟水稻冠层光谱反射率, 通过实测光谱进行验证(图 6(a)~(d)). 模拟值与实测值之间的相关性较高, 说明 PROSAIL 模型可以较好地模拟冠层光谱, 可用于建立基于 MODIS 数据的水稻冠层高温反演模型^[83]. 提取 MODIS 的第 2 波段(858 nm, 近红外波段)和第 5 波段(1240 nm, 短波红外波段)的组合来构建植被水分指数 SRWI. 利用实测数据建立基于 SRWI 的 EWT 监测模型, 结果显示相关系数 R 均大于 0.6.

2.3.3 利用高温光谱模型与卫星数据的高温热害空间制图

对 2007 年覆盖江苏省的 MODIS 遥感图像进行处理, 得到 MODIS1~7 通道的反射率数据, 最后通过波段组合计算水分光谱指数 SRWI(858 和 1240). 利用 EWT 与温度之间的关系得到水稻冠层温度 T_c 与 SRWI 的统计模型, 制成基于 MODIS 数据的水稻冠层高温分布(图 7). 图 7 显示 2008 年 8 月 8 日, 水稻

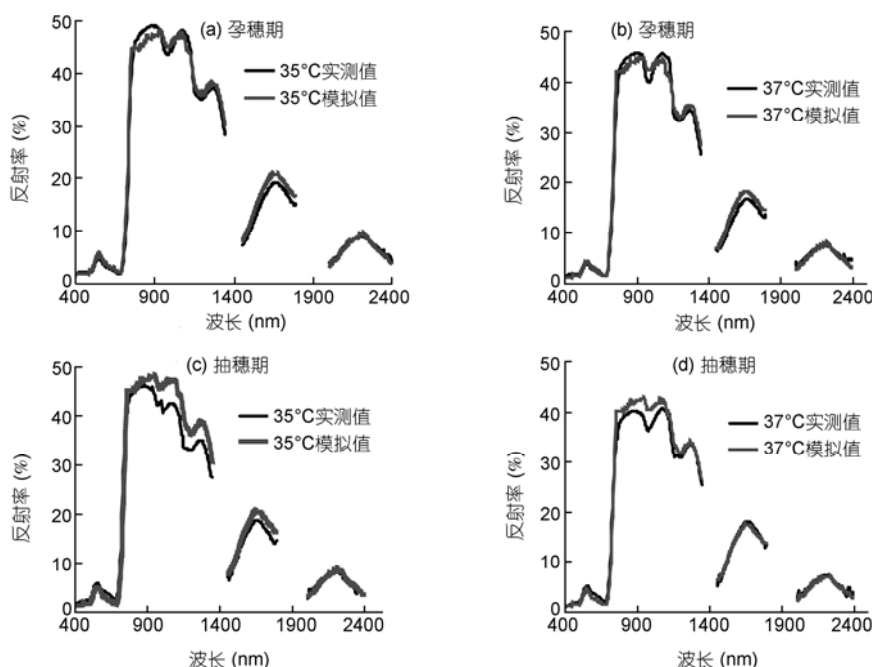


图 6 2007 年水稻冠层反射率 PROSAIL 模型模拟值与实测值比较

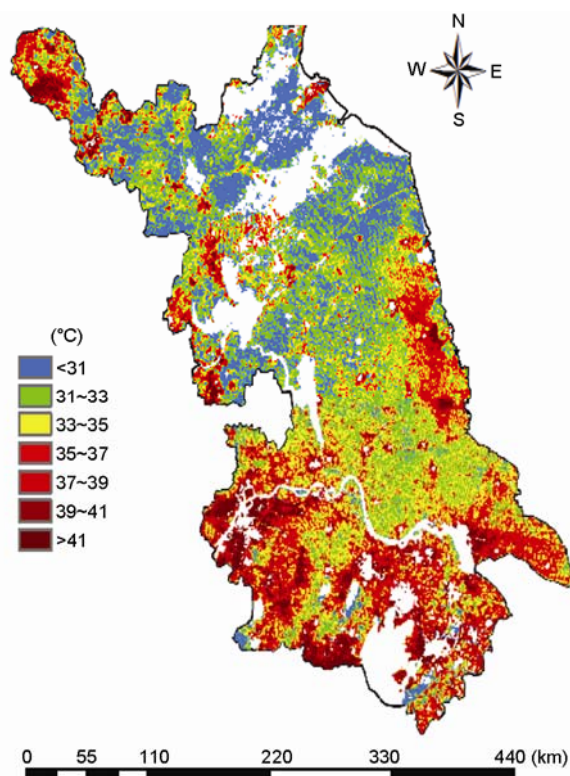


图7 江苏省2007年8月8日水稻冠层温度分布

冠层温度分布大体上南高北低. 通过卫星过境当日地面实测冠层温度值与反演得到的冠层温度值误差在 1°C 以内.

2.4 水稻高温热害遥感的作物生理指标及监测

2.4.1 基于水稻叶绿素遥感监测高温热害对水稻的影响

光合作用过程中叶绿素是吸收光能的主要的物质. 高温时水稻叶绿素失去活性, 阻碍光合作用正常进行, 降低光合速率^[84]. 当空气温度高于 32°C 时, 水稻叶片中叶绿素含量下降, 导致光合作用下降, 呼吸作用增强, 同化产物受到抑制, 造成结实率明显下降^[85]. 实验证明, 高温显著降低热敏感水稻品种的叶绿素含量、净光合速率和气孔导度^[86-88]. 因此, 一个有效途径是, 可以用作物冠层和叶片的反射光谱来估算其生化参数, 特别是色素含量, 进而基于卫星遥感通过反演作物叶绿素含量分布, 分析高温对水稻的影响^[83,89,90].

2.4.2 水稻荧光遥感监测反映高温热害对水稻的影响

叶绿素荧光也可作为研究高温对水稻光合作用影响的生理指标. 高温实验研究表明, 42°C 高温胁迫后水稻叶片的光合系统II原初光能转化效率(F_0)等下降; 叶绿素荧光参数如初始荧光明显上升, PS II的潜在活性(F_v/F_0)和 PS II的最大光能转化效率(F_v/F_m)均呈下降趋势^[91,92]. 近年来, 发展起来的基于叶绿素荧光的遥感反演技术将有助于分析高温热害对水稻的影响^[93-96].

3 进一步讨论与展望

3.1 水稻高温热害监测对遥感信息空间和光谱分辨率的要求

从MODIS250, 500 m可见光和1000 m的红外卫星资料已直接提取作物的冠层、空气和水稻田温度用于水稻高温热害监测; 基于Landsat-TM的热红外波段($10.4\sim 12.5\ \mu\text{m}$)可以提供120 m(ETM)或60 m(ETM⁺)等更高分辨率的遥感信息用于反演冠层、空气和水稻田温度. 在光谱波段分辨率方面, 水稻高温热害遥感监测目前可用到36通道的MODIS资料, 并且发展了基于地面高光谱的冠层温度反演方法探测水稻高温热害信息^[83]. 但目前, 在利用遥感反演混合象元 T_s 时, 需要考虑非同温地表温度特性和行播作物热辐射的方向性规律^[97,98], 以便更加准确地反演 T_s , 同时多角度的观测方式非常有利于组分温度的反演^[34,35,99], 进而提高卫星遥感对作物高温热害的监测精度.

3.2 水稻高温热害遥感的沼泽性植被监测指标问题

值得一提的是, 水稻的高温热害一般发生在水稻的抽穗和灌浆期, 此时水稻基本封垄, 卫星主要探测到的是水稻植被冠层特征, 地表水体背景信息的影响弱. 因此, 卫星遥感探测高温热害集中在气温和水稻冠层温度上, 水体的温度反演信息不作为主要信息. 但观测全生育期水稻高温热害时, 则需要通过高温控制的地面观测试验, 以解决作物-水体-土壤组分温度反演问题, 进一步分析地表混合象元高温热害信息. 这一工作将成为研究稻田高温胁迫作物生

长发育和监测作物高温热害的重要领域.

3.3 水稻高温热害监测对遥感信息时间分辨率的进一步要求

由于水稻高温发生在抽穗到灌浆期, 高温热害识别的阈值是其日平均温度 $\geq 30^{\circ}\text{C}$, 累积日数 >3 d, 因此每天的 MODIS 和中国 FY-3 气象卫星资料可以得到每日的温度反演产品用于评价水稻高温热害. 特别是基于静止卫星资料 FY-2 和 Metrosat 卫星资料可以提取 1 h 的温度反演产品, 可以用于高温热害的监测.

值得一提的是, 晴空条件下, 可利用红外数据成功反演 T_s 和用于水稻高温监测. 但由于水稻高温常发生在抽穗到灌浆期, 多云多雨的天气条件影响了光学遥感反演温度的精度. 采用微波信息可以弥补光学水稻高温热害监测的不足. 近年来, 许多被动微波辐射计用于反演 T_s , 如 SMMR (Nimbus-7 Scanning

Multichannel Microwave Radiometer), SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) 和 AMSR-E 等可用于 T_s 的反演^[64,100~107]; 其中, 基于 AMSR-E 的微波通道的精度高于基于红外反演的精度^[106,107]. 当然, 目前被动微波资料反演地表 T_s 空间分辨率较之红外通道信息为低, 如 AMSR-E 和 TRMM/TMI (TRMM Microwave Imager) 的空间分辨率分别为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 和 $0.125^{\circ}\times 0.125^{\circ}$ ^[108~110]. 2009 年 11 月 ESA 发射的 SMOS (soil moisture and ocean salinity) 土壤湿度和海洋盐度卫星, 综合利用合成孔径技术的二维干涉微波成像辐射计 (MIRAS), 采用 1.4 GHz 的 L-波段微波信息可直接获取地表的亮度温度特征^[111]. ENVISAT 先进合成孔径雷达 (ASAR) 获取的后向散射信号与水稻的生长状况相关, 包括高度、密度、生物量和结构特征, 同时多时相的 ASAR 数据携带有受温度影响的数据, 可用于反演大气温度信息.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

- 1 IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability Summary for Policymakers Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 2 Rosenzweig C, Parry M L. Potential impact of climate-change on world food-supply. *Nature*, 1994, 367: 133–138
- 3 Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature*, 1997, 387: 484–485
- 4 Gifford R, Angus J, Barrett D, et al. Climate change and Australian wheat yield. *Nature*, 1998, 391: 448–449
- 5 Lobell D B, Asner G P. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yield. *Science*, 2003, 299: 1032
- 6 Tubiello F N, Soussana J F, Howden S M. Crop and pasture response to climate change. *Proc Natl Acad Sci*, 2007, 104: 19686–19690
- 7 中国农业科学院. 中国稻作学. 北京: 农业出版社, 1986
- 8 程式华, 李建. 现代中国水稻. 北京: 金盾出版社, 2007
- 9 姚凤梅, 张佳华. 气候变化对中国粮食产量的影响及模拟. 北京: 气象出版社, 2008
- 10 高亮之, 李林. 水稻气象生态. 北京: 农业出版社, 1992
- 11 Peng S, Huang J, John E, et al. Rice yield decline with higher night temperature from global warming. *Proc Natl Acad Sci*, 2004, 101: 9971–9975
- 12 赵海燕, 姚凤梅, 张勇, 等. 长江中下游水稻开花灌浆期气象要素与结实率和粒重的相关性分析. *中国农业科学*, 2006, 39: 1765–1771
- 13 Yao F M, Xu Y L, Lin E D, et al. Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China. *Clim Change*, 2007, 80: 395–409
- 14 谢晓金, 李秉柏, 申双和, 等. 高温胁迫对扬稻 6 号剑叶生理特性的影响. *中国农业气象*, 2009, 30: 84–87
- 15 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 162–192
- 16 Zhang J H, Fu C B, Yao F M. Study on response of ecosystem to East Asian Monsoon in eastern China using remote sensing data derived from remote sensing. *Prog Nat Sci*, 2004, 14: 279–283
- 17 尹洁, 张传江, 张超美. 江西 2003 年夏季罕见高温气候诊断分析. *南京气象学院学报*, 2005, 28: 855–861
- 18 尹东屏, 严明良, 裴海璞, 等. 副热带高压控制下的高温天气特征分析. *气象科学*, 2006, 26: 559–563
- 19 田小海, 松井勤, 李守华, 等. 水稻花期高温胁迫研究进展与展望. *应用生态学报*, 2007, 18: 2632–2636
- 20 王加龙, 陈信波. 水稻耐热性研究进展. *湖南农业科学*, 2006, 6: 23–26

- 21 孙九林. 中国农作物遥感动态监测与估产总论. 北京: 中国科学技术出版社, 1996
- 22 王人潮, 黄敬峰. 水稻遥感估产. 北京: 农业出版社, 1996
- 23 王纪华, 赵春江, 黄文江, 等. 农业定量遥感基础与应用. 北京: 科学出版社, 2008
- 24 Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 advanced very high resolution radiometer. *J Geophys Res*, 1984, 89: 7231–7237
- 25 Kerr Y H, Lagouarde J P, Imberon J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm. *Remote Sens Environ*, 1992, 41: 197–209
- 26 Prata A J. Land surface temperature derived from the Advanced Very High Resolution Radiometer and the Along-Track Scanning Radiometer 1. Theory. *J Geophys Res*, 1993, 98: 689–702
- 27 Ulivieri C, Castronuovo M M, Francioni R, et al. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. *Adv Space Res*, 1994, 14: 59–65
- 28 Norman J M, Divakarla M, Goel N S. Algorithms for extracting information from remote thermal-IR observations of the Earth's surface. *Remote Sens Environ*, 1995, 51: 57–68
- 29 Coll C, Caselles V. A split-window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: Validation and algorithm comparison. *J Geophys Res*, 1997, 102: 16697–16713
- 30 Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *Int J Remote Sens*, 2001, 22: 3719–3746
- 31 Dash P, Gottsche F M, Olesen F S, et al. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice current trends. *Int J Remote Sens*, 2002, 23: 2563–2594
- 32 Jimenez-Munoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4688. ACL 2-1-ACL 2-9
- 33 Sobrino J A, Jimenez-Munoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5. *Remote Sens Environ*, 2004, 90: 434–440
- 34 李小文, 汪骏发, 王锦地, 等. 多角度与热红外对地遥感. 北京: 科学出版社, 2001
- 35 田国良. 热红外遥感. 北京: 电子工业出版社, 2006
- 36 张佳华, 侯英雨, 李贵才, 等. 北京城市及周边热岛日变化及季节特征的卫星遥感研究与影响因子分析. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(增刊): 187–194
- 37 陶启波, 严昀, 石继权. 农作物高温热害及其防御措施浅析. *安徽农学通报*, 2004, 10: 56–57
- 38 杨纯明, Heilnan J L. 短期高温对水稻生长发育和产量的影响. *国外作物育种*, 1994, 2: 4–5
- 39 崔读昌. 气候变暖对水稻生育期影响的情景分析. *应用气象学报*, 1995, 6: 361–365
- 40 杨晓春, 林瑞坤, 吴振海. 水稻高温热害的研究进展. *福建农业科技*, 2006, 2: 68–69
- 41 Matsui T, Omasa K, Horie T. High temperature-induced spikelet sterility of japonica rice at flowering in relation to air temperature, humidity and wind velocity conditions. *Jpn J Crop Sci*, 1997, 66: 449–455
- 42 Matsui T, Omasa K, Horie T. The difference in sterility due to high temperatures during the flowering period among japonica rice-varieties. *Plant Prod Sci*, 2001, 4: 90–93
- 43 Matsui T, Kobayasi K, Yoshimoto M, et al. Stability of rice pollination in the field under hot and dry conditions in the Riverina Region of New South Wales, Australia. *Plant Prod Sci*, 2007, 10: 57–63
- 44 蒋之坝, 黄仲青, 杨惠成, 等. 关于江淮稻区 2003 年早中稻花期热害的调查研究. *安徽农业科学*, 2004, 32: 607–609
- 45 高素华, 王培娟. 长江中下游高温热害研究. 北京: 气象出版社, 2009
- 46 上海植物生理研究所人工气候室. 高温对早稻开花结实影响及其防治. *植物学报*, 1977, 19: 126–130
- 47 Matsui T, Omasa K, Horie T. High temperature at flowering inhibits swelling of pollen grains, a driving force for thecae dehiscence in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Prod Sci*, 2000, 3: 430–434
- 48 谢晓金, 李秉柏, 申双和, 等. 抽穗期高温胁迫对水稻花粉活力与结实率的影响. *江苏农业学报*, 2009, 25: 238–241
- 49 莫惠栋. 我国稻米品质的改良. *中国农业科学*, 1993, 26: 8–14
- 50 Yoshida S, Saktake T, MacKill D S. High temperature stress in rice. IRRI Research Paper Series, No. 67. Manila: IRRI, 1981
- 51 Chauham J S, Moya T B, Singh R K, et al. Influence of soil moisture stress during reproductive stage on physiological parameters and grain yield in upland rice. *Oryza*, 1999, 36: 130–135
- 52 Garrity D P, O'Toole J C. Selection for reproductive stage drought avoidance in rice using infrared thermometry. *Agron J*, 1995, 87: 773–779

- 53 Chen E, Allen L H, Bartholic J F, et al. Comparison of winter-nocturnal geostationary satellite infrared-surface temperature with shelter-height temperature in Florida. *Remote Sens Environ*, 1983, 13: 313–327
- 54 Horiguchi I, Tani H, Motoki T. Accurate estimation of 1.5 m-height air temperature by GMS IR data. *Proc 24th Int Cympt Rem Sens Environ*, Rio de Janeiro May 1991. 301–307
- 55 Green R. The potential of Pathfinder AVHRR data for providing surrogate climatic variables across Africa and Europe for epidemiological applications. *Remote Sens Environ*, 2002, 79: 166–175
- 56 Nemani R R, Running S W. Estimation of resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. *J Clim Appl Meteorol*, 1989, 28: 176–294
- 57 Saravanapavan T, Dye D G. *Satellite Estimation of Environmental Variables by the Contextual Analysis Method: Validation in Seasonal Tropical Environment*. Tokyo: Global Engineering Laboratory Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Japan, 1995
- 58 Yan H, Zhang J H, Hou Y Y, et al. Estimation of air temperature from MODIS data in East China. *Int J Remote Sens*, 2009, 30: 6261–6275
- 59 侯英雨, 张佳华, 延昊, 等. 利用卫星遥感资料估算区域尺度空气温度. *气象*, 2010, 36: 75–79
- 60 Zhang J H, Guo W J. Quantitative retrieval of crop water content under different soil moistures levels. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*, 2006
- 61 Becker F, Li Z L. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands. *Remote Sens Environ*, 1990, 32: 17–23
- 62 Becker F, Li Z L. Surface temperature and emissivity at various scales: Definition, measurements and related problems. *Remote Sens Rev*, 1995, 12: 225–253
- 63 Cresswell M P, Morse A P, Thomson M C, et al. Estimating surface air temperatures, from Meteosat land surface temperatures, using an empirical solar zenith angle model. *Int J Remote Sens*, 1999, 20: 1125–1132
- 64 Wan Z M, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from Eos/MODIS data. *IEEE Tran Geosci Remote Sens*, 1997, 34: 892–905
- 65 Kenny G J, Harrison P A, Olesen J E, et al. The effects of climate change on land suitability of grain maize, winter wheat and cauliflower in Europe. *Eur J Agron*, 1993, 2: 325–338
- 66 Lambin E G, Ehrlich D. The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis. *Int J Remote Sens*, 1996, 17: 463–487
- 67 Goetz S Z. Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *Int J Remote Sens*, 1997, 18: 71–94
- 68 Huete A R, Jackson R D. Soil and atmosphere influences on the spectra of partial canopies. *Remote Sens Environ*, 1988, 25: 89–105
- 69 Nemani R R, Running S W. Estimation of regional surface-resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. *J Appl Meteorol*, 1989, 28: 276–284
- 70 Moran M S, Clarke T R, Kustas W P, et al. Evaluation of hydrologic parameters in a semiarid rangeland using remotely-sensed spectral data. *Water Resour Res*, 1994, 30: 1287–1297
- 71 Gillies R R, Carlson T N, Cui J, et al. A verification of the ‘triangle’ method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *Int J Remote Sens*, 1997, 18: 3145–3166
- 72 Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sens Environ*, 2002, 79: 213–224
- 73 唐延林, 王人潮, 黄敬峰, 等. 不同供氮水平下水稻高光谱及其红边特征研究. *遥感学报*, 2004, 8: 185–192
- 74 程高峰, 张佳华, 李秉柏, 等. 不同温度处理下水稻高光谱及红边特征分析. *江苏农业学报*, 2008, 24: 573–580
- 75 谢晓金, 申双和, 李映雪. 高温胁迫下水稻红边特征及 SPAD 和 LAI 的监测. *农业工程学报*, 2010, 3: 183–190
- 76 郑建初, 盛婧, 汤日圣, 等. 南京和安庆地区高温发生规律及高温对水稻结实率的影响. *江苏农业学报*, 2007, 23: 1–4
- 77 Gao B C. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens Environ*, 1996, 58: 257–266
- 78 田庆久, 宫鹏, 赵春江, 等. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析. *科学通报*, 2000, 45: 2645–2650
- 79 Zarco-Tejada P J, Whiting M, Ustin S L. Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agron J*, 2005, 91: 641–653
- 80 Zhang J H, Guo W J. Studying on spectral characteristics of winter wheat with different soil moisture condition. *The 2nd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: RAQRS'II, Spain*. 2006
- 81 阿布都瓦斯提·吾拉木, 李召良, 秦其明, 等. 全覆盖植被冠层水分遥感监测的一种方法: 短波红外垂直失水指数. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 957–965

- 82 Cheng Y B, Zarco-Tejada P J, Riaño D, et al. Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sens Environ*, 2006, 105: 354–366
- 83 程高峰. 高温胁迫下水稻生理及光谱特性的研究. 硕士学位论文. 江苏大学/中国气象科学研究院, 2009
- 84 张佳华, 符淙斌. 生物量估算模型中遥感信息与植被光和参数关系研究. *测绘学报*, 1999, 28: 128–132
- 85 任昌福. 高温影响杂交水稻开花结实的生理生化基础. *西南农业大学学报*, 1990, 12: 440–443
- 86 许大权, 沈允钢. 光合作用限制因素——植物生理与分子生物学. 北京: 科学出版社, 1998
- 87 王晨阳, 朱云集, 夏国军, 等. 后期高温条件下小麦旗叶光合参数的变化及其相关性分析. *华北农学报*, 2003, 18: 8–11
- 88 张桂莲, 陈立云, 张顺堂, 等. 抽穗开花期高温对水稻剑叶理化特性的影响. *中国农业科学*, 2007, 20: 1345–1352
- 89 谢晓金, 李秉柏, 程高峰. 高温对不同水稻品种剑叶生理特性的影响. *农业现代化研究*, 2009, 30: 484–486
- 90 Yasuyuki W. Infrared remote sensing for canopy temperature in paddy field and relationship between leaf temperature and leaf color. *J Agric Meteorol*, 2002, 58: 185–194
- 91 郭培国, 李荣华. 夜间高温胁迫对水稻叶片光合机构的影响. *植物学报*, 2000, 42: 673–678
- 92 滕中华, 智丽, 宗学凤, 等. 高温胁迫对水稻灌浆结实期叶绿素荧光、抗活性活力和稻米品质的影响. *作物学报*, 2008, 34: 162–166
- 93 Carter G. A, Freedman A, Kebabian P L. Use of a prototype instrument to detect short-term changes in solar-excited fluorescence. *Int J Remote Sens*, 2004, 25: 1779–1784
- 94 刘良云, 张永江, 王纪华, 等. 利用夫琅和费暗线探测自然光条件下的植被光合作用荧光研究. *遥感学报*, 2006, 10: 147–154
- 95 张永江, 刘良云, 王纪华, 等. 应用高光谱仪探测叶片反射光谱中的荧光. *光学技术*, 2007, 33: 119–123
- 96 Campbell P K, Middleton E M, Corp L A, et al. Contribution of chlorophyll fluorescence to the apparent vegetation reflectance. *Sci Total Environ*, 2008, 404: 433–439
- 97 李小文, 王锦地, Strahler A H. 非同温黑体表面上 Planck 定律的尺度效应. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 1999, 29: 422–426
- 98 Chen L F, Zhuang J L, Li Q H, et al. Study on the law of radiant directionality of row crops. *Sci China Ser E*, 2000, 43(Suppl): 70–82
- 99 范闻捷, 徐希孺. 论热红外多角度遥感数据的相关性及视角优选配置. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33: 809–815
- 100 McFarland M J, Miller R L, Neale C M U. Land surface temperature derived from the SSM/I Passive Microwave brightness temperatures. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1990, 28: 839–845
- 101 Pulliainen J T, Grandell J, Hallikainen M T. Retrieval of surface temperature in boreal forest zone from SSM/I data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35: 1188–1200
- 102 Weng F Z, Grody N C. Physical retrieval of land surface temperature using the special sensor microwave imager. *J Geophys Res-Atmos*, 1998, 103: 8839–8848
- 103 Basist A, Grody N C, Peterson T C, et al. Using the special sensor microwave/imager to monitor land surface temperatures, wetness, and snow cover. *J Appl Meteorol*, 1998, 37: 888–911
- 104 Goita K, Royer A. Combination of passive microwave and thermal infrared for the retrieval and analysis of microwave emissivities and temperature. *IEEE Int Geosci Remote Sens Sym*, 2002, 4: 2401–2403
- 105 Fily M, Royer A, Goita K, et al. A simple retrieval method for land surface temperature and fraction of water surface determination from satellite microwave brightness temperatures in sub-arctic areas. *Remote Sens Environ*, 2003, 85: 328–338
- 106 Brodzik M J. CLPX-Satellite: AMSR-E Brightness Temperature Grids. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center, Digital Media, 2003
- 107 Gao H L, Fu R, Dickinson R E, et al. A practical method for retrieving land surface temperature from AMSR-E over the Amazon forest. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 193–199
- 108 贾媛媛, 李召良. 被动微波遥感数据反演地表温度研究进展. *地理研究进展*, 2006, 25: 96–105
- 109 Ji Y, Stocker E. An overview of the TRMM/TSDIS fire algorithm and products. *Int J Remote Sens*, 2002, 23: 3285–3303
- 110 Went J, Su Z B, Ma Y M. Determination of land surface temperature and soil moisture from Tropical Rainfall Measuring Mission/Microwave Imager remote sensing data. *J Geophys Res*, 2003, 108: ACL2.1–ACL2.10
- 111 Corbella I, Torres F, Camps A, et al. Brightness-temperature retrieval methods in synthetic aperture radiometers. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 285–294