

罗力兵, 刘湘南, 吴 伶, 等. 镉胁迫水稻潜热通量与冠层结构参数变化遥感分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5):832-838.

LUO Li-bing, LIU Xiang-nan, WU Ling, et al. Cadmium stress analysis based on the changes in latent heat flux and canopy structural parameter of rice using remotely sensed data[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5):832-838.

## 镉胁迫水稻潜热通量与冠层结构参数变化遥感分析

罗力兵, 刘湘南\*, 吴 伶, 刘美玲

(中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083)

**摘要:**为了更准确地监测农田水稻镉污染状况,结合水稻冠层能量平衡和结构参数 LAI(Leaf area index),构建水稻生理功能敏感指数  $P_f$ (Physiological function sensitivity index),分析水稻镉胁迫水平:首先利用遥感影像数据和实测数据,基于能量平衡模型模拟实验区水稻潜热通量 LE(Latent heat flux),然后结合 LE 与 LAI 构建水稻生理功能敏感指数  $P_f$ ,最后根据  $P_f$  识别水稻镉胁迫。结果表明,镉胁迫越重水稻 LE、LAI 和  $P_f$  值越小,LE 可将水稻镉胁迫区分为重度和轻度/中度两个水平;LAI 可将水稻镉胁迫区分为中度/重度和轻度胁迫两个水平; $P_f$  能更好地将水稻镉胁迫区分为轻度、中度和重度三个水平,其区分准确度分别为 70.59%、69.05%和 84.79%。 $P_f$  能有效诊断并定量分析水稻镉污染胁迫状况,为作物重金属污染监测提供重要参考。

**关键词:** 镉胁迫;能量平衡;潜热通量;LAI;胁迫指数

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)05-0832-07 doi:10.11654/jaes.2016-1583

### Cadmium stress analysis based on the changes in latent heat flux and canopy structural parameter of rice using remotely sensed data

LUO Li-bing, LIU Xiang-nan\*, WU Ling, LIU Mei-ling

(School of Information Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** A physiological function sensitivity index ( $P_f$ ), created by combining the rice canopy energy balance model and the structural parameter Leaf Area Index (LAI), is proposed in order to analyze the cadmium stress level of rice. Firstly, the latent heat flux (LE) of rice was simulated based on an energy balance model using remote sensing and in situ measured data, and then the  $P_f$ , which can reflect the physiological function of rice, was developed using LE and the LAI. Finally, the cadmium stress in rice was evaluated using the  $P_f$ . The results show that higher cadmium stress generally corresponds to smaller values of LE, the LAI, and the  $P_f$ . LE could only distinguish high cadmium stress from other levels (medium/low) and the LAI could only discriminate high and medium cadmium stress from low stress; however, the  $P_f$  could differentiate the three levels of cadmium stress of rice. The classification accuracies of  $P_f$  for high, medium, and low stress were 70.59%, 69.05%, and 84.79%, respectively.  $P_f$  can effectively discriminate different cadmium stress levels; therefore, it is an important reference for monitoring heavy metal stress of crops.

**Keywords:** cadmium stress; energy balance; latent heat flux; LAI; stress index

农业重金属污染是重大生态环境问题之一,直接影响着农业生产和粮食安全。如何准确快速获取某区域的水稻重金属污染信息,成为研究者目前关注的重点。传统获取水稻重金属污染信息的主要方法是采

样和化验,其成本高并且难以大面积获取。重金属胁迫会抑制水稻的生理生长,从而导致不同重金属胁迫下水稻生理功能特征和生理要素特征有所差异<sup>[1]</sup>。利用遥感方法可以大面积获取水稻的生理参量,从而实

收稿日期:2016-12-10

作者简介:罗力兵(1989—),男,贵州铜仁人,硕士研究生,主要从事遥感信息分析与地学应用研究。E-mail:cugbllb@163.com

\*通信作者:刘湘南 E-mail:liuxn@cugb.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41371407);中央高校基本科研业务费专项资金(2-9-2015-107)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41371407); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2-9-2015-107)

现重金属胁迫大面积监测。目前利用遥感监测水稻重金属胁迫的研究主要是基于可见光、近红外、微波和热红外构建水稻叶绿素含量、叶面积指数、生物量<sup>[2]</sup>和生理功能<sup>[3]</sup>等水稻重金属胁迫敏感指数来监测重金属污染,然而这些研究侧重从生理要素的角度监测水稻重金属胁迫,并未从水稻生长机理的角度结合生理过程和生化参数。为了准确获取水稻重金属胁迫程度和分布信息,本文通过结合水稻冠层能量平衡和结构参数 LAI(Leaf area index)的变化来分析水稻镉污染胁迫。

蒸腾作用是植被独有的生理机制,是植被与外界能量交换的主要生理方式,也是植被能量释放的关键途径。镉胁迫会干扰植被叶片气孔开放,抑制植被蒸腾速率,当植被蒸腾速率受到抑制则冠层辐射能量增加,反之则减少<sup>[4]</sup>。镉胁迫也会导致水稻 LAI 产生差异, LAI 是重要的水稻冠层结构参数,其可以表征水稻的生理活性和水稻冠层能量交换<sup>[5]</sup>。本研究基于研究区 Landsat-8 影像数据、实测数据和气象数据,利用能量平衡模型和经验模型分别模拟水稻潜热通量和反演水稻 LAI,最后结合水稻冠层结构对水稻生理功能的影响,构建水稻生理功能镉胁迫指数,进而分析水稻镉污染程度。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

我国湖南省湘江流域重金属污染严重,其中镉、锌、铜、镍、铅等均超出国家标准<sup>[6]</sup>,本研究区位于湘江流域典型重金属污染区——湖南省株洲地区。在研究区选取 A、B、C 三个实验区,每个实验区面积均为 200 m<sup>2</sup>,水稻品种为博优 9083,土壤为红壤,显酸性,母质为第四纪红土红壤,系亚热带季风气候,雨量充沛、光热充足,在人工管理下水田土壤肥沃,灌溉充足。野外重金属含量样本化验结果见表 1。实验区 A、B 和 C 土壤镉含量均超出国家二级标准,C 区最为严

重,根据化验结果将 A、B、C 依次定为轻度镉污染区、中度镉污染区和重度镉污染区。研究区与试验区地理位置如图 1 所示,其中 a 图为中国地理图,b 图为株洲市,c 图为研究区图,c 图中的 A、B 和 C 分别表示试验区地理位置分布。

### 1.2 实验数据

研究数据主要分为影像数据、环境数据和实测数据。影像数据为 2014 年 9 月 4 日株洲区域 Landsat-8 影像数据,包括可见光、近红外和热红外波段;环境数据为同日株洲气象站观测的气温值和风速值;实测数据为 2014 年 9 月所测成熟期水稻数据,主要包括 LAI、水稻株高、土壤重金属含量。LAI 数据采集:在研究区稻田中分别均匀采集 30 组 LAI 值,取其平均值作为样地 LAI 值,测量仪器为 AccuPAR LP-80 植被冠层分析仪,测量方式为垂直测量。土壤重金属含量是在野外试验区分别均匀采集多个土壤样本后,在实验室化验获取(原子吸收法)。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 基于能量平衡模型的水稻潜热通量模拟

基于能量平衡模型模拟地表蒸散的遥感方法,把遥感数据反演的地表参数以及大气参数输入模型中,计算潜热通量。目前基于能量平衡模型计算蒸散的方法主要有单层模型、双层模型<sup>[7]</sup>和多层模型<sup>[8]</sup>。本研究的重点是利用水稻生理功能的变化分析水稻镉污染胁迫,为突出水稻生理要素对水稻生理功能的影响,研究时段选择在水稻成熟期,能量平衡模型选用单层模型。水稻冠层能量平衡是水稻自身生理功能调节与外在环境因素共同作用的结果,其外在环境影响因素主要有湿度、气温和风速,内在影响因素主要有蒸腾作用和光合作用<sup>[9]</sup>。本研究的水稻品种、生长环境和管理措施均相似,主要差异为试验区之间土壤镉含量和水稻冠层结构差异。本文基于能量平衡模型,在典型环境条件下模拟水稻潜热通量,模拟镉胁迫对水稻生理过程的影响。能量平衡方程为:

表 1 实验区土壤重金属含量

Table 1 Heavy metal content in soil of experimental area

研究区	采样位置	Cd/mg·kg <sup>-1</sup>	Hg/mg·kg <sup>-1</sup>	Pb/mg·kg <sup>-1</sup>	As/mg·kg <sup>-1</sup>	污染级别
A	27°47'N, 113°12'E	0.881	0.249	76.7	7.79	轻度污染
B	27°40'N, 113°10'E	2.21	0.287	82.2	17.4	中度污染
C	27°50'N, 113°2'E	4.99	0.435	120	25.2	重度污染
土壤重金属二级标准		>0.3	>0.5	>300	>25	

注:土壤污染级别来自中国环境质量标准。

Note: Pollution level was classified based on environmental quality standard for soils of China.

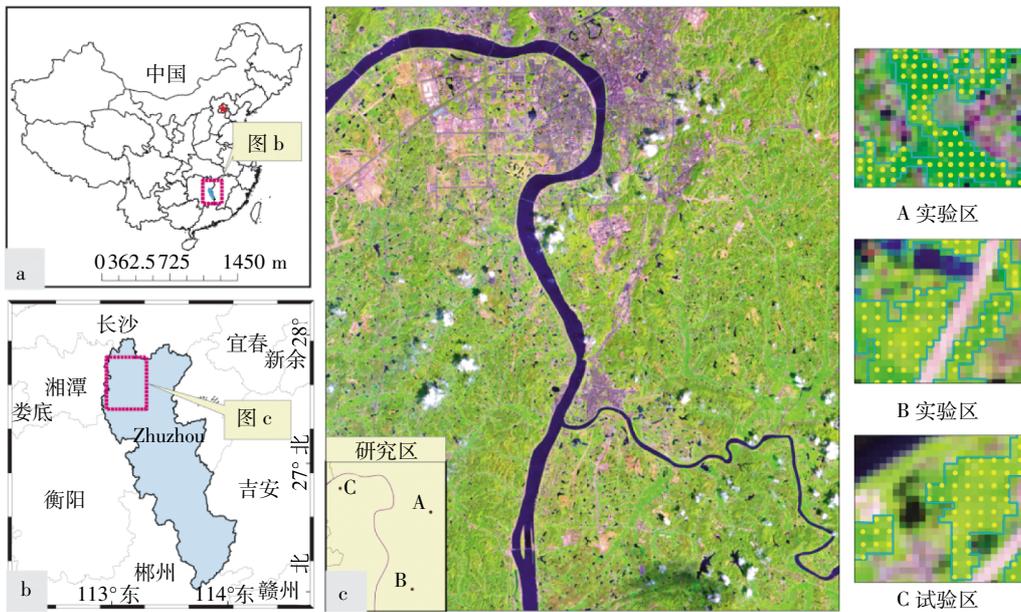


图1 研究区地理位置和实验区分布

Figure 1 Location of the study area and the distribution of experimental site

$$LE=R_n-H-G, \quad (1)$$

式中:LE表示潜热通量; $R_n$ 代表地表净辐射能量,是各种波长的辐射能在地表的收支平衡; $H$ 表示显热通量; $G$ 表示土壤热通量。

吸收的能量主要来源于太阳辐射和太阳散射辐射,释放的能量主要是植被自身辐射、显热通量、土壤热通量和潜热通量。存储的能量占总能量比例小,一般可以忽略。

$R_n$ 与冠层辐射能量求取方程为:

$$R_n=S_d(1-\alpha)+\varepsilon_s L_{d\downarrow}-L_{d\uparrow}, \quad (2)$$

$$L_{d\uparrow}=\varepsilon_s \sigma T_s^4, \quad (3)$$

$$L_{d\downarrow}=\varepsilon_a \sigma T_a^4, \quad (4)$$

式中: $S_d$ 是太阳总辐射, $S_d=G_{sc} \times \cos \theta \times d_r \times \tau_{sw}$  ( $G_{sc}$ 是太阳常量  $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\cos \theta$ 表示太阳天顶角余弦值; $d_r$ 为日地距离因子,数值可以在Landsat-8头文件中获取; $\tau_{sw}$ 为大气透过率); $\alpha$ 是地表反照率<sup>[10]</sup>; $\varepsilon_s$ 是地表比辐射率; $L_{d\downarrow}$ 是地表下行辐射; $L_{d\uparrow}$ 水稻冠层辐射能量或称地表上行辐射; $\sigma$ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数; $\varepsilon_a$ 是空气比辐射率<sup>[11]</sup>; $T_s$ 是水稻冠层温度,K,由于温度是本研究的主要参数,反演方法将在下文详细介绍; $T_a$ 为空气温度,本文取值为株洲气象站观测的日平均气温  $299.15 \text{ K}$ 。

显热通量( $H$ )计算公式如下:

$$H=\frac{\rho \times C_p \times \Delta T}{r_a}, \quad (5)$$

式中: $\rho$ 是空气密度,取值  $1.131 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; $C_p$ 表示空气定

压比热容,其值为  $1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , $\Delta T$ 表示冠层温度和空气温度之差,K; $r_a$ 为空气动力学阻抗<sup>[12-14]</sup>, $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

土壤热通量( $G$ )计算公式如下:

$$G=R_n[f_c+(1-f_c)(T_s-T_c)]. \quad (6)$$

式中: $T_c=0.315$ , $T_s=0.05$ ,分别表示裸土和完全植被覆盖时潜热通量占净辐射的比例; $f_c$ 表示植被覆盖度。

### 1.3.2 温度反演

目前地表温度反演方法主要有单窗算法、劈窗算法和辐射传输方程法,其中辐射传输方程法比较适用于水温反演,由于Landsat-8热红外波段定标系数仍不稳定,美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)提倡用单波段来反演温度。本文温度计算采用由Jimenez-Munoz等<sup>[16]</sup>提出的单通道算法SC(Single-channel Method),主要方程如下:

$$T_s=\gamma\left[\frac{\psi_1 L_{sen}+\psi_2}{\varepsilon}+\psi_3\right]+\delta \quad (7)$$

$$\gamma \approx T_{sen}^2/b_\gamma L_{sen} \quad (8)$$

$$\delta \approx T_{sen} - \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma} \quad (9)$$

$$L_{sen}=\text{DN} \times G_{ain}+h \quad (10)$$

$$T_{sen}=k_2/\ln(1+k_1/L_{sen}) \quad (11)$$

式中: $L_{sen}$ 为卫星高度上传感器所测辐射强度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ; $\text{DN}$ 为影像灰度值; $h$ 为偏移量,取值  $0.1$ ; $G_{ain}$ 为绝对定标系数增益,取值  $3.342 \times 10^{-4}$ , $T_{sen}$ 为亮温,其中10波段  $k_1=774.89$ , $k_2=1321.08$ ; $b_\gamma=c_2(\frac{\lambda^4}{c_1}+1/\lambda)$  ( $\lambda$ 为10波段中心波长,取值  $10.9 \mu\text{m}$ ; $c_1$ 为  $1.922 \times 10^8$ )

$10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ;  $c_2=14\ 387.7 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ );  $\varepsilon$  为比辐射率;  $\psi_1$ 、 $\psi_2$  和  $\psi_3$  为大气功能参数<sup>[17]</sup>。

$$\psi_1=0.040\ 19\omega^2+0.029\ 16\omega+1.0152 \quad (12)$$

$$\psi_2=-0.383\ 33\omega^2-1.502\ 94\omega+0.203 \quad (13)$$

$$\psi_3=0.009\ 18\omega^2+1.360\ 72\omega-0.275\ 1 \quad (14)$$

$\omega$  为大气含水量,取值  $2.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,参考覃志豪等<sup>[18]</sup>大气估算研究结果。

### 1.3.3 水稻 LAI 反演

遥感反演 LAI 的主要方法有经验模型、半经验模型和物理模型等。本文采用经验模型,首先将地面实测 LAI 与相应试验区 Landsat-8 影像植被指数 GBNDVI 进行指数函数拟合,再根据拟合方程反演 LAI<sup>[9]</sup>,主要公式如下:

$$\text{GBNDVI}=[\text{NIR}-(\text{Green}+\text{Blue})]/[\text{NIR}+(\text{Green}+\text{Blue})] \quad (15)$$

$$y=0.261\ 4e^{4.6472x} \quad (16)$$

式中:NIR 表示近红外波段,Green 表示绿波段,Blue 表示蓝波段;y 表示 LAI 的值,x 表示指数 GBNDVI 的值。

### 1.3.4 水稻生理功能敏感指数构建

水稻生理功能敏感指数的构建主要是基于水稻 LE 和 LAI。在水稻生长过程中,镉污染胁迫会抑制水稻生理功能,影响水稻能量平衡,导致水稻能量吸收减少,从而抑制水稻营养器官的生长,具体体现在 LAI、叶绿素含量和生物量等生理要素。水稻生理要素又会影响水稻生理功能,镉污染越重,则水稻的生理功能越弱,生理要素越小,随着水稻的生长其差异越明显<sup>[2]</sup>。由于 LAI 是水稻重要的冠层结构参数,其可以表征水稻的生理活性和影响水稻冠层能量交换<sup>[5]</sup>。蒸腾作用是水稻与外界能量交换的重要方式,能很好地表征水稻生理功能强弱。针对镉胁迫特性,结合水稻 LE 与 LAI 构建水稻生理功能镉胁迫指数  $P_t$ ,根据该指数差异可区分不同镉胁迫,其计算式如下:

$$P_t=\frac{\text{LAI} \times \text{LE}}{\text{LAI}_{\text{max}} \times \text{LE}_{\text{max}}} \quad (17)$$

式中: $\text{LAI}_{\text{max}}$  表示轻度镉胁迫下最大叶面积指数值, $\text{LE}_{\text{max}}$  表示轻度镉胁迫下最大潜热通量值。

## 2 结果分析

### 2.1 镉胁迫对水稻 LE 的影响

根据能量平衡模型模拟三个试验区水稻 LE,结果如图 2 所示。轻度胁迫与中度胁迫下水稻 LE 分布

范围相近,但轻度胁迫水平的均值、中位数、下四分位数和上四分位数的统计值比中度胁迫高,说明在本研究的观测尺度下中度镉胁迫对水稻 LE 响应并不明显,而重度胁迫对水稻 LE 的影响比较明显,从而可以很好区分水稻重度胁迫与其他胁迫。据此将图 2 中虚线值定为重度胁迫与其他胁迫阈值,LE 值为  $375 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从试验区 LE 整体分布规律可知,镉胁迫越高水稻 LE 越小,证明镉胁迫会抑制水稻蒸腾作用,从而导致蒸腾散热减少。由于受镉胁迫的影响,水稻冠层能量平衡中其他组分能量会有所差异,其中冠层辐射能量如图 3 所示,其与镉胁迫正相关,主要源于蒸腾受到抑制,水稻要以辐射的方式散失多余的热量。

### 2.2 镉胁迫对 LAI 与指数 $P_t$ 结果的影响

试验区 LAI 与镉胁迫敏感分析如图 4 所示。中度胁迫与重度胁迫下水稻 LAI 值不易区分,但中度胁迫的统计值高于重度胁迫 LAI 值,轻度胁迫下水稻的 LAI 值高于中度与重度胁迫,说明在本研究观测尺度下基于 LAI 能很好区分轻度镉胁迫与其他镉胁迫,将图 4 中虚线值定为轻度胁迫与其他胁迫的阈值,LAI 值为 4.51。从试验区 LAI 整体分布规律可知,镉胁迫

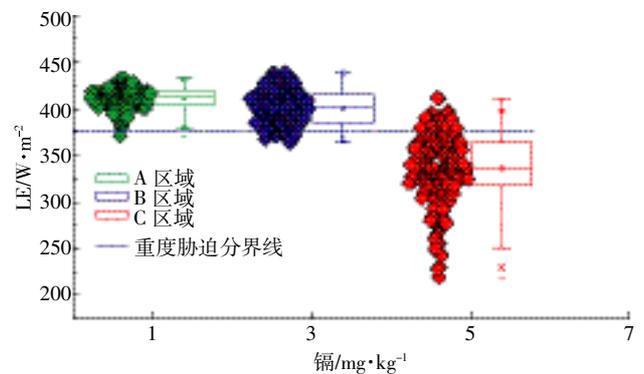


图 2 LE 与镉胁迫敏感性分析

Figure 2 Sensitivity analysis of LE to cadmium stress

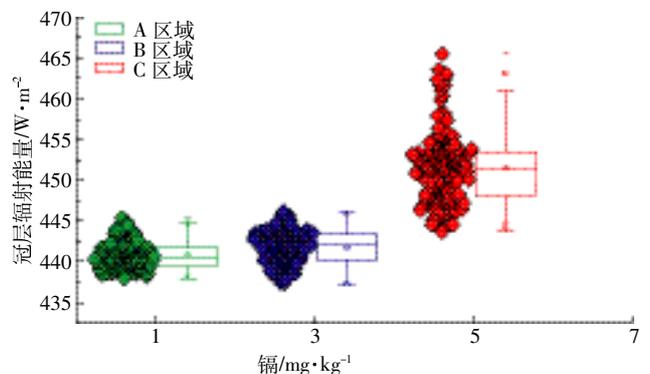


图 3 冠层辐射与镉胁迫敏感性分析

Figure 3 Sensitive analysis of canopy radiation to cadmium stress

越重 LAI 值越低。由于试验区之间主要差异为镉含量,故 LAI 的差异能间接反映镉长期胁迫的结果。

根据 LE 与 LAI 求取水稻生理功能镉胁迫敏感指数  $P_i$ ,结果如图 5 所示。不同镉胁迫下试验区指数分布差异比较明显,能较好区分不同镉胁迫。根据试验区之间  $P_i$  的分布,将该图中线 c 和 d 的值定为不同胁迫水平之间的阈值(分别为 0.44 和 0.61),则胁迫水平范围为  $P_i$ (重度胁迫) $<0.44<P_i$ (中度胁迫) $<0.61<P_i$ (轻度胁迫),根据划分的区间范围计算得轻度胁迫、中度胁迫和重度胁迫的区分准确度分别为 70.59%、69.05%和 84.79%。从试验区  $P_i$  整体分布规律可知,镉胁迫越高,指数  $P_i$  值越小,基于指数  $P_i$  能很好区分不同镉胁迫。

### 2.3 镉胁迫对研究区水稻 LE、LAI 和 $P_i$ 的影响

为实现镉胁迫大面积监测,先将研究区遥感影像进行监督分类,统计得水稻区域为 15.81%。根据能量平衡模型模拟整个研究区水稻 LE,根据试验区不同胁迫 LE 阈值(图 2),将胁迫水平划分为 LE(重度胁迫) $<375 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}<\text{LE}$ (轻度/中度胁迫),面积分别占研

究区总面积的 4.15%和 11.66%。研究区 LE 分布如图 6a 所示,其中重度镉胁迫主要分布在湘江附近。根据拟合方程计算研究区水稻 LAI,根据试验区所得不同胁迫 LAI 阈值(图 4),将胁迫水平划分为 LAI(中度/重度胁迫) $<4.51<\text{LAI}$ (轻度胁迫),其面积分别占研究区总面积的 10.71%和 5.10%,分布如图 6b 所示,其中轻度镉胁迫区域主要分布在远离湘江的区域。根据研究区水稻 LE 与 LAI 计算指数  $P_i$ ,根据试验区指数  $P_i$  所得不同胁迫阈值(图 5),将胁迫水平划分为  $P_i$ (重度胁迫) $<0.44<P_i$ (中度胁迫) $<0.61<P_i$ (轻度胁迫),其面积分别为研究区总面积的 3.79%、6.28%和 5.73%,分布如图 6c 所示,与 LE 与 LAI 值相比,指数  $P_i$  对区域的识别更加清晰,其中重度镉胁迫区域主要分布在湘江附近,随着与湘江距离变大,水稻由重度镉胁迫渐变为轻度镉胁迫。

## 3 讨论

本研究中研究区水稻品种相同、生长环境和管理措施均相似,所以实验区之间主要差异为土壤镉含量和水稻冠层结构差异。目前 Liu 等<sup>[3]</sup>从水稻冠气温差的角度说明镉胁迫对水稻生理功能变化的影响,但没有从能量平衡的角度深入分析镉胁迫对水稻蒸腾散热的影响。镉胁迫会干扰植被叶片气孔开放,从而抑制植被蒸腾速率,在植被冠层能量平衡中主要体现为蒸腾散热减弱,本研究通过模拟不同镉胁迫下水稻 LE,发现镉胁迫越重水稻 LE 越小(图 2),证明镉胁迫会抑制水稻蒸腾作用。如今很多学者通过水稻冠层温度来间接感应水稻生理功能强弱<sup>[3-4]</sup>,其原理主要是水稻生理功能受到抑制,水稻要以辐射的方式散失多余的热量,所以镉胁迫越重,冠层辐射越强(图 3),符合水稻蒸腾作用被抑制的能量平衡规律。

镉胁迫会抑制水稻生理生长,从而导致水稻的生理参数发生改变,所以试验区镉胁迫越重 LAI 值越小(图 4)。由于 LAI 也是水稻重要的冠层结构参数,可以表征水稻的生理活性和影响水稻冠层能量交换。本研究基于水稻冠层结构差异与土壤镉含量差异构建水稻生理功能镉胁迫指数  $P_i$ (图 5),镉胁迫越高,该指数值越小,并能很好区分不同镉胁迫。研究区指数  $P_i$  值空间分布如图 6c 所示,湘江是镉胁迫水源污染的重要来源,所以镉胁迫区域主要分布在湘江附近,随着与湘江距离变大,水稻由重度镉胁迫渐变为轻度镉胁迫。

本研究提供了一种结合遥感热红外、可见光和近

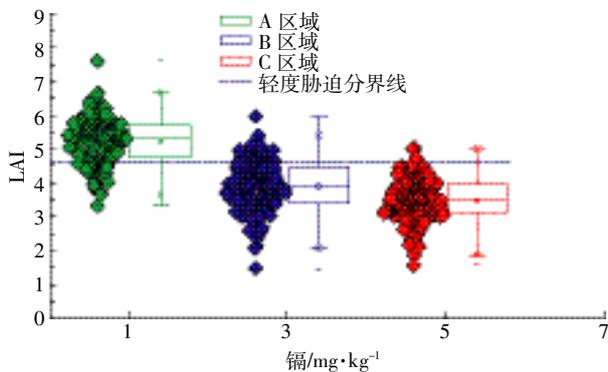


图 4 LAI 与镉胁迫敏感性分析

Figure 4 Sensitive analysis of LAI to cadmium stress

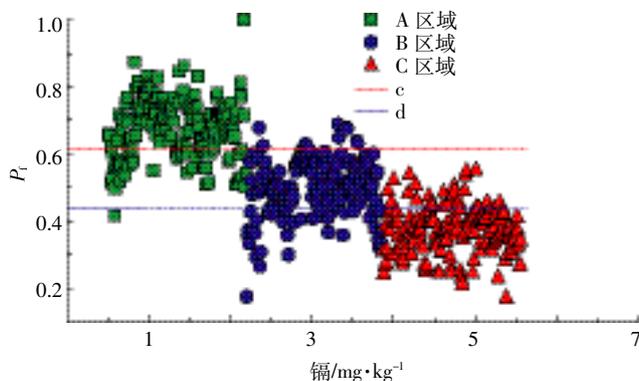


图 5  $P_i$  与镉胁迫敏感性分析

Figure 5 Sensitive analysis of  $P_i$  to cadmium stress

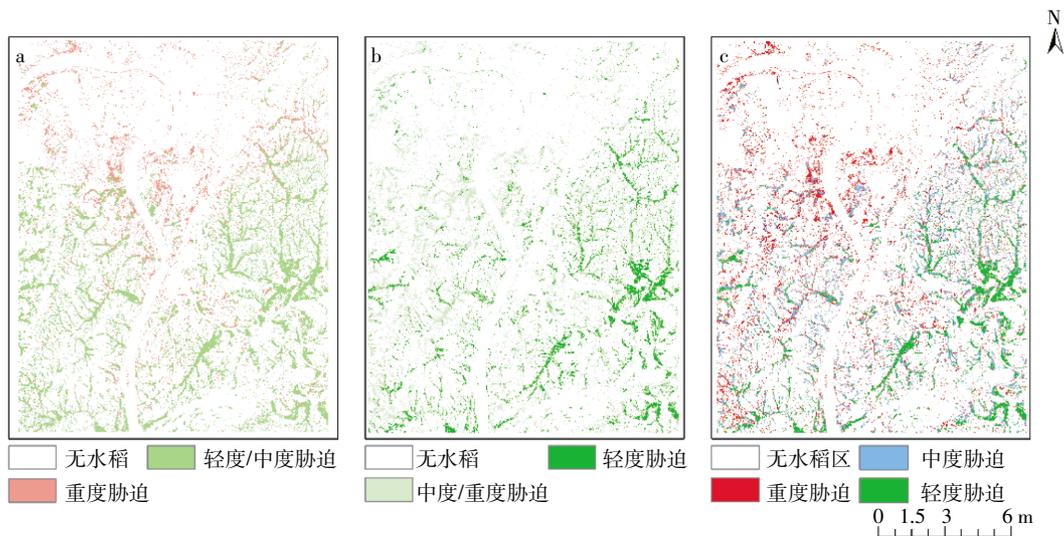


图6 研究区水稻镉胁迫水平的LE、LAI和 $P_i$ 分级结果

Figure 6 Cadmium stress level of rice estimated by LE, LAI and  $P_i$

红外从水稻生理功能的角度分析水稻镉污染胁迫的新思路。研究中温度和LAI的反演误差主要来源于遥感数据和反演方法,后续研究中将从遥感反演方法和数据方面研究如何提高温度与LAI反演精度。本文研究方法适合于环境因素差异不大的水稻镉胁迫监测,在自然条件下,环境因素对水稻生理功能的影响较大,环境因素与镉胁迫对水稻生理功能的影响关系还需进一步研究。

#### 4 结论

(1)镉胁迫会抑制水稻蒸腾作用,水稻生理功能胁迫指数 $P_i$ 能较好区分不同镉胁迫,其对轻度、中度和重度镉胁迫区分的准确度分别为70.59%、69.05%和84.79%。

(2)研究区内重度镉污染区域主要分布在湘江附近,随着与湘江距离变大,水稻由重度镉污染渐变为轻度镉污染,说明镉的污染源主要来自湘江,符合镉污染分布规律。

#### 参考文献:

- [1] 张 军, 束文圣. 植物对重金属镉的耐受机制[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(1): 1-8.  
ZHANG Jun, SHU Wen-sheng. Studies on the tolerance mechanism of cadmium to plants[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(1): 1-8.
- [2] 赵利婷, 刘湘南, 丁 超, 等. 遥感同化WOFOST模型动态监测水稻重金属污染胁迫[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 248-256.  
ZHAO Li-ting, LIU Xiang-nan, DING Chao, et al. Study on dynamic monitoring of heavy metal pollution stress in rice by WOFOST model[J].

- Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 248-256.
- [3] Liu M L, Li X N, Zhang B Y, et al. Regional heavy metal pollution in crops by integrating physiological function variability with, spatio-temporal stability using multi-temporal thermal remote sensing[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2016, 51: 91-102.
- [4] 凌 军, 张控勤, 潘家亮, 等. 植物蒸腾作用对红外辐射特征的影响研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1775-1779.  
LING Jun, ZHANG Shuan-qin, PAN Jia-liang, et al. Effects of plant transpiration on infrared radiation characteristics[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 1775-1779.
- [5] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 246-263.
- [6] 陈咏淑, 吴甫成, 吕焕哲, 等. 近20年来湘江水质变化分析[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(5): 508-512.  
CHEN Yong-shu, WU Fu-cheng, LÜ Huan-zhe, et al. Analysis of Xi-angjiang River water quality change in recent 20 years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(5): 508-512.
- [7] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 213-238.
- [8] Shuttleworth W J, Gurney R J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1990, 116(492): 497-519.
- [9] 季劲钧, 胡玉春. 一个植物冠层物理传输和生理生长过程的多层模式[J]. 气候与环境研究, 1999, 4(2): 25-37.  
JI Jin-jun, HU Yu-chun. A Multilayer model of plant canopy physical transport and physiological growth processes[J]. *Climatic and Environmental Research*, 1999, 4(2): 25-37.
- [10] 刘昌明. 土壤-植物-大气系统水分运行的界面过程研究[J]. 地理学报, 1997, 52(4): 366-373.  
LIU Chang-ming. Interfacial processes of soil-plant-atmosphere water

- system[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(4):366-373.
- [11] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 212/213(1/2/3/4):198-212.
- [12] Brutsaert W. *Evaporation into the atmosphere*[M]. Netherlands: Springer, 1982.
- [13] Businger J A. A note on the businger-dyer profiles[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1988, 42(1):145-151.
- [14] Paulson C A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1987, 9(9):857-861.
- [15] Friedl M A. Modeling land surface fluxes using a sparse canopy model and radiometric surface temperature measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995, 100(D12):25435-25446.
- [16] Jimenez-Munoz J C, Cristobal J, Sobrino J A, et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from landsat thermal-infrared data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(1):339-349.
- [17] Jimenez-Munoz J C, Sobrino J A, Skokovic D, et al. Land surface temperature retrieval methods from landsat-8 thermal infrared sensor data[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10):1840-1843.
- [18] 覃志豪, LI Wen-juan, ZHANG Ming-hua, 等. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. *国土资源遥感*, 2003, 15(2):37-43.
- QIN Zhi-hao, LI Wen-juan, ZHANG Ming-hua, et al. Optimization method of single-channel algorithm for atmospheric parameters[J]. *Remote Sensing of Land and Resources*, 2003, 15(2):37-42.
- [19] Wang F M, Huang J F, Tang Y L, et al. New vegetation index and its application in estimating leaf area index of rice[J]. *Rice Science*, 2007, 14(3):195-203.