#### DOI: 10.5846/stxb201707201304

王颖,娄运生,石一凡,郑泽华,左慧婷.夜间增温对稻田甲烷排放的影响及其高光谱估算.生态学报,2018,38(14): - . Wang Y, Lou Y S, Shi Y F, Zheng Z H, Zuo H T.Methane emission in response to nighttime warming and its hyperspectral estimation in a paddy field. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): - .

## 夜间增温对稻田甲烷排放的影响及其高光谱估算

### 王 颖,娄运生\*,石一凡,郑泽华,左慧婷

南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室,南京 210044

**摘要:**昼夜不对称增温是全球气候变化的主要特征之一,有关夜间增温对稻田甲烷(CH<sub>4</sub>)排放影响的报道尚不多见。通过田间 模拟试验,研究了被动式夜间增温下水稻田 CH<sub>4</sub>排放及高光谱的特征,并用高光谱数据对稻田甲烷排放进行定量模拟。田间试 验设夜间增温(NW)和对照处理(CK),夜间增温即在整个水稻生育期的夜间(19:00—6:00)用铅箔反射膜覆盖水稻冠层。结 果表明,夜间增温显著促进水稻拔节期和抽穗期-灌浆期 CH<sub>4</sub>排放。水稻冠层近红外光谱反射率表现为,在分蘖期和拔节期时, NW>CK;而在抽穗-灌浆期和成熟期时,CK>NW。水稻冠层光谱反射率、一阶导数光谱及光谱特征值均与 CH<sub>4</sub>排放通量显著相 关,相关系数最大可达 0.8(*P*<0.01),其中以"蓝边面积"(*SD*<sub>6</sub>)构成的二次多项式模型模拟精度和检验精度综合最佳,决定系 数*R*<sup>2</sup>分别为 0.70 和 0.72。研究结果对稻田 CH<sub>4</sub>排放通量遥感监测的可行性提供了理论依据和技术支持。 **关键词:**夜间增温;甲烷;排放通量;高光谱估算;水稻田

# Methane emission in response to nighttime warming and its hyperspectral estimation in a paddy field

WANG Ying, LOU Yunsheng\*, SHI Yifan, ZHENG Zehua, ZUO Huiting

Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

**Abstract:** Asymmetric diurnal warming is one of the main features of global climate change, but the effects of nighttime warming on CH<sub>4</sub> emission from paddy fields is unclear. A field experiment with rice was conducted at the Station of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, China, to investigate the effects of passive nighttime warming on CH<sub>4</sub> emission in a paddy field and rice canopy hyperspectral characteristics. CH<sub>4</sub> emission flux was estimated with hyperspectral data. The tested rice was hybrid rice cv. Y Liangyou 3399. The tested paddy soil was classified as a Typic Stagnic Anthrosol. The experiment was designed with two levels of warming, i.e., nighttime warming (NW) and control(CK). NW was created by covering the rice canopy with an aluminum foil reflective film at night (19:00–6:00).CH<sub>4</sub> emission was measured by the closed chamber method at one-week intervals during the rice-growing period. The results showed that NW significantly increased CH<sub>4</sub> emission at the rice jointing and heading-grain filling stages. Compared to CK, NW increased the reflectance of the near-infrared spectrum on the canopy at the tillering and jointing stages, but decreased at the heading-grain filling and maturity stages. Positive correlations were observed in the relationships of CH<sub>4</sub> emission with spectral reflectance and the first derivative and the characteristic value of the spectrum. After comparing correlation coefficients ( $R^2$ ) of the fitting models and prediction models, the quadratic polynomial model by 'Area of Blue Edge' ( $SD_b$ ) was found to be the best model (fitting model  $R^2 = 0.70$ , prediction model  $R^2 = 0.72$ ) for

收稿日期:2017-07-20; 网络出版日期:2018-00-00

基金项目:国家自然科学基金(41375159);江苏省自然科学基金(BK20131430)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yunshlou@163.com

estimating  $CH_4$  emission. The results of this study provide a theoretical basis for and demonstrate the feasibility of nondestructively monitoring of  $CH_4$  emission in paddy fields.

#### Key Words: nighttime warming; methane; flux; hyperspectral estimation; paddy field

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告<sup>[1]</sup>指出,1800年到 2012年,全球海陆表面平均温度 升高了 0.85℃,并预估 2046年至 2965年最高升温区域分布于南亚(包括中国南部),升温幅度为 2—3℃。全 球平均温度的上升呈现非对称性,其中夜间增温幅度高于白天。CH<sub>4</sub>是仅次于 CO<sub>2</sub>的第二大温室气体,其增 温潜势是 CO<sub>2</sub>的 25倍,占全球温室效应的 20%,而稻田是 CH<sub>4</sub>重要排放源,占全球 CH<sub>4</sub>排放量的 7%—17%。 温度是影响稻田 CH<sub>4</sub>排放的重要因素<sup>[2-3]</sup>,开展稻田夜间增温大田模拟试验研究,对在全球和区域尺度上预测 稻田未来 CH<sub>4</sub>排放趋势有积极意义。

密闭静态箱法是测定稻田 CH<sub>4</sub>排放通量的常用方法,但测定过程对作物生长具有一定的干扰,且费时费力,因而如何快速测定稻田 CH<sub>4</sub>排放通量成为人们关注的问题。水稻植株是影响稻田 CH<sub>4</sub>产生、氧化和输送的重要因素<sup>[4]</sup>。水稻输送甲烷的能力主要取决于生育期和品种。在水稻孕穗期和成熟期,88%—99%的稻田 CH<sub>4</sub>通过植株输送排向大气<sup>[5]</sup>;在水稻整个生长期内,通过植株输送排放的甲烷约占稻田总排放量的90%<sup>[6-7]</sup>。研究表明,稻田甲烷排放与水稻地上部生物量、分蘖数、株高和叶面积等呈正相关<sup>[8-11]</sup>。

高光谱遥感可提供精细化的光谱信息,具有简便快捷、非破坏性等优点,被广泛用于作物长势监测及生理 生化参数估算<sup>[12-17]</sup>。王秀珍等利用光谱变量对水稻地上部鲜生物量进行了估算<sup>[18]</sup>;杨峰等用高光谱数据估 算了稻麦叶面积指数和叶绿素密度<sup>[19-20]</sup>;也有学者利用光谱参数建立了小麦分蘖状态和株高的估算模 型<sup>[21-22]</sup>。但是,利用光谱数据估算水稻甲烷排放却鲜有研究,光谱数据包含了水稻植株的生长及生理(包括 胁迫特征)信息,而稻田甲烷排放与水稻生长及生理参数有密切关系。因此,利用光谱数据反演稻田甲烷排 放通量具有可行性。开展本研究的主要目的在于,①研究夜间增温对稻田 CH<sub>4</sub>排放通量及光谱特征的影响; ②评价高光谱数据及其变换形式用于估算稻田 CH<sub>4</sub>排放通量的潜力,并检验模型估算的可行性。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 试验设计

田间试验于 2016 年在南京信息工程大学农业气象试验站(32.0°N,118.8°E)进行。该站地处亚热带湿润 气候区,年均降水量 1100 mm,年均气温 15.6℃。供试土壤是潴育型水稻土,灰马肝土属,质地为壤质粘土,粘 粒含量为 26.1%。供试水稻品种为杂交稻 Y 两优 3399。试验处理设常温对照(CK)和夜间增温(NW)2 种处 理。夜间增温处理,即在小区四周架设可调式钢架(2 m×2 m×2 m),用透明塑料薄膜围在钢架四周,夜间将铝 箔反射膜覆盖水稻冠层,根据水稻生长进程对铝箔反射膜的高度进行调整,使铝箔反射膜与水稻冠层间保持 在 0.3 m 左右。为避免夜间盖膜影响降水的接纳,降雨天不覆盖铝箔反射膜。此外,为避免增温设施被破坏, 风速大于 10 m/s 时也不覆盖铝箔反射膜。夜间增温时间为 19:00—次日 6:00,用温度记录仪记录水稻冠层 和 5 cm 土层温度。前期试验表明,该被动式夜间增温设施夜间增温效果较好<sup>[23]</sup>。每处理重复 6 次,随机排 列,小区面积为 2 m×2 m=4 m<sup>2</sup>。

水稻于 2016 年 5 月 9 日育苗,2016 年 6 月 11 日移栽。移栽前一天施肥,每小区施用复合肥料(15—15—15)315 g。幼苗移栽前将密闭静态箱底座置于土壤中,底座内移入长势一致的幼苗 1 丛。2016 年 8 月 4 日至 8 月 13 日进行排水晒田,灌水期间水层厚度保持约 5 cm,根据水层变化及降雨情况进行合理灌溉;2016 年 9 月 15 日停止灌水,稻田自然落干。大田常规管理,病虫害防治等依据田间实际情况处理。

#### 1.2 气样采集与分析

采用密闭静态箱-气相色谱法测定稻田 CH<sub>4</sub>排放通量。从水稻分蘖期(7月8日,第一次取样)到完熟期

3

(9月23日,最后一次取样)每周采样1次。所用密闭静态箱由透明 PVC 材料制成,箱底面半径为8.5 cm,箱高100 cm。采样时间为8:00—10:00 之间。采样时将静态箱底部置于事先固定于土壤中的底座上,通过淹水密封保证静态箱气密性,箱体密封后,分别于0、15、30 min 用带有三通阀的针筒分别采集50 mL 气样,将所采 气样注入事先抽成真空的采样瓶中。

所采气样带回实验室用带有氢火焰离子检测器(FID)的气相色谱仪(Agilent 7890B GC)检测甲烷气体浓度。色谱柱选用 Porapak Q 填充柱,型号为 G3591-81013;载气 N<sub>2</sub>(流量校正不会影响尾吹气或燃气流量);柱 箱温度 50℃,FID 检测器温度为 200℃,空气和 H<sub>2</sub>流量分别为 400 mL/min 和 45 mL/min。

甲烷排放通量计算公式[24]:

$$F = \rho \times H \times 60 \times \frac{273.15}{273.15 + t} \times \frac{dc}{dt}$$

式中,F为气体排放通量(mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), $\rho$ 为标准状态下气体密度(kg/m<sup>3</sup>),H为采样箱的净高(m), $\frac{dc}{dt}$ 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率,273.15为气态方程常数,t为采样过程中采样箱内的平均温度( $\mathbb{C}$ )。

水稻各生育期内平均排放通量计算公式:

$$\overline{F} = \sum F_i / n$$

式中,F<sub>i</sub>为生育期内每次采气的平均排放通量。模拟 CH<sub>4</sub>排放通量为生育期平均排放通量。

1.3 光谱测定与分析

在水稻主要生育期,即分蘖期、拔节期、抽穗-灌浆期和成熟期,采用美国 ASD 公司生产的 Field Spec Pro FR 光谱辐射仪测定水稻冠层光谱,其光谱范围是 350—2500 nm,采样间隔在 350—1000 nm 为 1.4 nm,1000—2500 nm 范围内为 2 nm;光谱分辨率在 350—1000 nm 为 3 nm,1000—2500 nm 范围内为 10 nm,视场角为 25°。

选择晴朗无风的天气,于当天 10:00—14:00(太阳高度角大于 45°)测定冠层光谱反射率时,传感器探头 垂直向下,距水稻冠层约 0.6 m。每个小区内不同点测定 5 次(共 15 条光谱曲线),取平均值作为该小区的两 个光谱反射值,每个小区测定前、后都立即进行白板校正。

所用的高光谱变量<sup>[25]</sup>主要有,原始光谱反射率、一阶导数光谱、从原始光谱和一阶微分光谱提取的基于 高光谱位置变量(包括"三边"位置及幅值、绿峰和红谷的位置及反射率)、基于高光谱面积变量(包括三边的 面积)、基于高光谱植被指数变量的3种类型的特征参数,表达式见表1。

Table 1 The definitions of hyper-spectral variables used in this study			
光谱变量	表达式		
Hyperspectral variables	Expression		
原始光谱反射率数值 Spectral reflectance	$R_i$		
一阶导数光谱数值 First derivation of spectrum	$R'_i$		
蓝边幅值 Blue edge amplitude	$D_b$		
蓝边位置 Blue edge position	$\lambda_{b}$		
黄边幅值 Yellow edge amplitude	$D_y$		
黄边位置 Yellow edge position	$\lambda_y$		
红边幅值 Red edge amplitude	$D_r$		
红边位置 Red edge position	$\lambda_r$		
绿峰反射率 Green peak reflectance	$R_{g}$		
绿峰位置 Green peak position	$\lambda_{_g}$		
红谷反射率 Red vale reflectance	$R_r$		
红谷位置 Red vale position	$\lambda_{o}$		
蓝边面积 Blue-edge integral areas	$SD_b$		

表 1 高光谱特征变量

续表	
光谱变量	表达式
Hyperspectral variables	Expression
黄边面积 Yellow-edge integral areas	SD <sub>y</sub>
红边面积 Red-edge integral areas	$SD_r$
绿峰反射率 $(R_g)$ 与红谷反射率 $(R_r)$ 的比值	D /D
Ratio of the Green $\operatorname{peak}(R_g)$ and and the red vale $\operatorname{reflectance}(R_r)$	$\kappa_g/\kappa_r$
绿峰反射率 $(R_g)$ 与红谷反射率 $(R_r)$ 的归一化值	(P - P) / (P + P)
Nomalization of the Green $\operatorname{peak}(R_g)$ and the red vale $\operatorname{reflectance}(R_r)$	$(\mathbf{n}_g \ \mathbf{n}_r)/(\mathbf{n}_g \ \mathbf{n}_r)$
红边面积 $(SD_r)$ 与蓝边面积 $(SD_b)$ 的比值	SD /SD.
Ratio of the red-edge integral ( $S\!D_r)$ areas and the blue-edge integral $\mathrm{areas}(S\!D_b)$	$SD_r, SD_b$
红边面积( $SD_r$ )与黄边面积( $SD_y$ )的比值	SD /SD
Ratio of the red-edge integral areas $(SD_r)$ and the yellow-edge integral areas $(SD_y)$	$\sum_{y}$
红边面积 $(SD_r)$ 与蓝边面积 $(SD_b)$ 的归一化值	$(SD - SD_{1})/(SD + SD_{1})$
Normalization of the red-edge integral areas $(SD_r)$ and the blue-edge integral areas $(SD_b)$	$(D_r D_b), (D_r D_b)$
红边面积 $(SD_r)$ 与黄边面积 $(SD_y)$ 的归一化值	(SD - SD)/(SD + SD)
Normalization of the red-edge integral areas $(SD_r)$ and the yellow-edge integral areas $(SD_y)$	r = y

#### 2 结果与分析

4

#### 2.1 夜间增温对稻田 CH<sub>4</sub>排放通量的影响

由图 1 可见,在水稻生育期内,夜间增温和对照两种处理下的稻田甲烷排放通量,在晒田前后均有一个排 放峰。研究发现,CH<sub>4</sub>排放趋势在整个生育期有呈单峰的,也有多峰型的,不同的排放趋势可能与不同的水稻 品种和田间管理有关<sup>[26-30]</sup>。在移栽后的 23—30 d 内 CH<sub>4</sub>排放通量开始上升并很快达到一个峰值,在晒田前 虽有波动但一直保持在较高水平。移栽后的第 50—58 天为晒田时间,稻田 CH<sub>4</sub>排放通量迅速下降至最低值, 接近 0 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>。稻田灌溉覆水后,CH<sub>4</sub>排放通量呈现一个峰值后很快降低并维持在较低水平,直至水稻成 熟收获。

移栽后的 23—43 d(分蘖期)内,两种处理下稻田 CH<sub>4</sub>排放通量差异不明显;移栽后 44、51 d(第 44—57 天为拔节期),增温处理(NW)的 CH<sub>4</sub>排放通量分别高 于对照(CK) 28.44%、28.17%。晒田后地面干涸龟裂, NW 和 CK 处理的 CH<sub>4</sub>排放通量分别为0.31和-0.07 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,灌溉覆水后(第 65 天,第 58—86 天为抽穗-灌 浆期),NW 的 CH<sub>4</sub>排放通量很快达到全生育期最大值, 比 CK 处理高 93.78%。

#### 2.2 夜间增温对水稻冠层高光谱的影响

由图 2 可见,夜间增温和对照处理的水稻冠层光谱 变化趋势,在不同生育期基本一致。在可见光波段 (460—760 nm)区域,冠层光谱在 550 nm 附近出现强 反射区,表现为"绿峰",之后反射率又下降,约在 670 nm 处达到最小值,表现为"红谷"。分蘖期时,夜间增 温处理的水稻冠层光谱反射率,在可见光波段内明显小





#### **Fig.1 Effect of nighttime warming on CH<sub>4</sub> flux in paddy field** CK:对照组 Control;NW:夜间增温 Nighttime warming; \*表示处理

间差异显著(P<0.05)

于对照;在近红外波段(760—1056 nm),水稻冠层反射光谱出现一个反射高台,对照处理的拔节期后近红外 反射率开始显著上升,直至成熟期,而夜间增温处理的水稻冠层近红外反射率在拔节期有一个下降趋势,在抽 穗-灌浆期开始逐渐上升。夜间增温处理使水稻冠层近红外反射光谱区别于对照,分蘖期和拔节期时,近红外 波段反射率大小表现为 NW>CK,这种差异在分蘖期时最为明显,差值达到 0.05,到拔节期差异减小至 0.01; 拔节期、抽穗期和灌浆期反射率大小表现为 CK>NW,平均差值为 0.02。





#### Fig.2 Spectral reflectance of rice canopy at different growth stage under nighttime warming

a:分蘖期 tillering stage;b:拔节期 jointing stage;c:抽穗-灌浆期 heading-filling stage;d:成熟期 mature stage

2.3 CH<sub>4</sub>排放通量与高光谱变量的相关性分析

在分析 CH<sub>4</sub>排放通量与水稻冠层光谱间的相关关系及建立模型时,取各生育期内 CH<sub>4</sub>排放通量的平均值 与该生育期的光谱变量进行分析和估算。

相关系数计算公式:

$$R = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{N}}{\sqrt{\left(\sum X^2 - \frac{\left(\sum X\right)^2}{N}\right)\left(\sum Y^2 - \frac{\left(\sum Y\right)^2}{N}\right)}}$$

式中,X,Y分别为稻田冠层高光谱变量和 CH<sub>4</sub>排放通量,应用 Matlab R2012a 中 corrcoef(X,Y)程序,可以计算 出水稻冠层光谱反射率、一阶导数光谱及光谱特征值均与 CH<sub>4</sub>排放通量的相关系数和显著性值。

2.3.1 CH<sub>4</sub>排放通量与高光谱反射率及其一阶导的相关性分析

在增温处理下,水稻主要生育期冠层高光谱反射率及其变换形式与相应生育期平均 CH<sub>4</sub>排放通量进行相关分析,结果见图 3。

利用四个生育期平均甲烷排放通量与水稻冠层高光谱及其变换形式,分别求相关系数并进行显著性分析,提取相关系数绝对值大于 0.5 并且呈显著相关(P<0.05)的波段,该方法可以在寻找最佳模拟波段时避免数据冗余。结果表明,冠层光谱反射率在 350—1056 nm 波段内与,有 554 个波段的反射率值与通量呈显著相关,其中最大在 724 nm 处|R|可达 0.80,通过极显著水平(P<0.01)。共 354 个波段反射率的一阶导数与通量

呈显著相关,其中最大在 617 nm 和 711 nm 处 | *R* | 可达 0.80,通过极显著水平检验。

2.3.2 CH<sub>4</sub>排放通量与高光谱特征变量的相关性分析

由表 2 可见,高光谱特征变量与  $CH_4$ 排放通量之间 的相关系数,以蓝边幅值( $D_b$ )和蓝边面积( $SD_b$ )最大, 为-0.79,其次  $SD_r$ 、 $SD_r$ / $SD_b$ 、 $D_r$ 、 $\lambda_r$ 、 $R_g$ 、 $\lambda_g$ 、 $R_r$ 、 $SD_y$ 、 $R_g/$  $R_r$ 、( $R_g$ - $R_r$ )/( $R_g$ + $R_r$ )、( $SD_r$ - $SD_b$ )/( $SD_r$ + $SD_b$ )共13 个 光谱变量达到显著性检验水平,可用于模型拟合。

2.4 CH<sub>4</sub>排放通量的高光谱估算模型

回归模型采用单/双变量线性与非线性的拟合模型。包括:

单变量简单线性函数:y = ax + b;抛物线: $y = x^2 + bx + c$ ;对数函数: $y = a\ln(x) + b$ ;指数函数: $y = a \cdot e^x + b$ ;双变 量一次函数: $y = ax_1 + bx_2 + c$ ;二次函数: $y = ax_1^2 + bx_1 + cx_2^2 + dx_2 + e$ ;



图 3 水稻 CH<sub>4</sub>排放通量与冠层高光谱反射率及其一阶导的相关 系数

Fig.3 Correlation of  $CH_4$  emission flux with spectral reflectance and first derivation of spectrum

在单变量拟合模型中,使用不同的模型,对相关系数大于 0.5 并且显著相关(P<0.05)的波段逐一进行拟合,选取最优模型。在双变量拟合模型中,分别对可见光波段(460—760 nm)及近红外波段(760—1056 nm)的光谱反射率及其一阶导数每相隔 1 nm 进行两两组合,即(460,760),(460,761)……(760,1056),分别作为双变量模型中的两个变量,逐一拟合,选取最优模型。选取最佳光谱反射率即其一阶导的甲烷排放模型时,即要考虑两者相关系数的大小,又要考虑精度的大小,因而选择均相对系数较大而均方根误差较小的模拟方程作为最优方程。

Tuble 2 Confemation of Orig emission with europy spectral characteristic value of file			
高光谱变量 Hyperspectral variables	相关系数(R) Correlation coefficient(R)	高光谱变量 Hyperspectral variables	相关系数(R) Correlation coefficient(R)
$D_b$	-0.79 **	SD <sub>b</sub>	-0.79 **
$\lambda_{b}$	0.17	SD <sub>y</sub>	0.71 **
$D_y$	0.19	SD <sub>r</sub>	-0.75 **
$\lambda_{y}$	-0.14	$R_g/R_r$	0.63 **
$D_r$	-0.55 **	$(R_g - R_r) / (R_g + R_r)$	0.61 **
$\lambda_r$	0.65 **	$SD_r/SD_b$	0.75 **
$R_g$	-0.68 **	$SD_r/SD_y$	-0.47 *
$\lambda_{g}$	-0.48 **	$(SD_r - SD_b) / (SD_r + SD_b)$	0.74 **
$R_r$	-0.63 **	$(SD_r - SD_y) / (SD_r + SD_y)$	-0.25
$\lambda_{o}$	NaN		

表 2 CH<sub>4</sub>排放通量与水稻冠层高光谱特征变量的相关系数 Table 2 Correlation of CH, emission with canony spectral characteristic value of rice

\* P<0.05, \* \* P<0.01

2.4.1 CH<sub>4</sub>排放通量的高光谱反射率及其一阶导的估算模型

水稻高光谱反射率及其一阶导的生育期 CH<sub>4</sub>排放模型,如表 3 所示。水稻冠层高光谱反射率及其一阶导均能较好地模拟 CH<sub>4</sub>排放通量,其中 *R'*<sub>620</sub>,*R'*<sub>793</sub>模拟出的双变量二次多项式方程得到的回归模型最优,*R*<sup>2</sup>达到 0.86,达到显著性检验水平,均方根误差(RMSE)最低可达 0.40。

2.4.2 CH<sub>4</sub>排放通量的高光谱特征值估算模型

回归模型采用单变量线性与非线性回归模型,分别对与 CH<sub>4</sub>排放通量显著相关的几种光谱特征变量进行 回归分析,提取拟合度较好(*R*<sup>2</sup>>0.6,*P*<0.01)的几个模型。如表 4 所示,其中红谷反射率的二次多项式模型 y

#### =1133.64 R<sub>r</sub><sup>2</sup>-168.49 R<sub>r</sub>+6.73 拟合效果最好, R<sup>2</sup>=0.75(P<0.01), 且 RMSE 最小达到 0.67。

高光谱变量 Hyperspectral variables	回归模型 Regression model	拟合 R <sup>2</sup> Estimated R <sup>2</sup>	拟合 RMSE Estimated RMSE
R <sub>742</sub>	-17.16 <i>x</i> +7.74	0.67 **	0.84
R <sub>618</sub>	$1004.78x^2 - 160.46x + 6.98$	0.76 **	0.63
R <sub>618</sub>	$-2.49 \ln (x) - 5.75$	0.75 **	0.65
R <sub>742</sub>	-12.17e <sup>x</sup> +19.06	0.66 **	0.88
<i>R</i> ′ <sub>720</sub>	-1060.41x + 8.80	0.67 **	0.84
<i>R</i> ′ <sub>658</sub>	$12170945.97x^2 + 16857.67x + 6.34$	0.77 **	0.60
<i>R</i> ′ <sub>720</sub>	$-1053.84e^{x}+1062.62$	0.67 **	0.84
$R_{554}$ , $R_{934}$	$-27.15x_1 - 6.82x_2 + 6.86$	0.70 **	0.80
$R_{504}$ , $R_{799}$	$2292.88x_1^2 + 233.61x_1 - 0.45x_2^2 - 8.54x_2 + 10.66$	0.81 **	0.55
$R'_{620}$ , $R'_{1018}$	$9958.82x_1 - 3853.36x_2 + 7.65$	0.80 **	0.53
$R'_{620}$ , $R'_{793}$	$49072906.37x_1^2 + 36062.32x_1 + 18337174.06x_2^2 - 16632.00x_2 + 10.77$	0.86 **	0.40

表 3 甲烷排放通量(v)与局光谱反射率及其一阶导(x)的天糸模型	高光谱反射率及其一阶导(x)的关系模型
-----------------------------------	---------------------

#### 表 4 CH<sub>4</sub> 排放通量(y) 与高光谱特征变量的关系模拟

Table 4 Regression model of  $CH_4$  emission (y) with characteristic value of spectrum

回归模型 Regression model	拟合 R <sup>2</sup> Estimated R <sup>2</sup>	拟合 RMSE Estimated RMSE	回归模型 Regression model	拟合 R <sup>2</sup> Estimated R <sup>2</sup>	拟合 RMSE Estimated RMSE
$-42.80R_g + 5.35$	0.64 **	0.92	$2810.26SD_b^2 - 283.40SD_b + 7.79$	0.70 **	0.79
$536.37R_g^2 - 126.35R_g + 8.13$	0.75 **	0.68	$-3.05 \ln(R_g)$ -6.03	0.73 **	0.70
$1133.64R_r^2 - 168.49R_r + 6.73$	0.75 **	0.67	$-2.40\ln(R_r) -5.72$	0.73 **	0.68

#### 2.5 CH<sub>4</sub>排放通量的高光谱估算模型的精度分析

采用相关分析、单/双变量线性与非线性回归方法,确定与CH\_排放通量显著相关的高光谱波长位置及光 谱特征变量,据此估计 CH4排放通量。为避免过度拟合,可结合测试样本的精度综合评价。以测试组样本对 训练模型进行检验,结果如表5所示。以R<sub>618</sub>、R<sub>g</sub>、R<sub>r</sub>作为参数模拟的对数函数回归模型检验R<sup>2</sup>均未通过显著 性检验水平,说明以对数函数模拟 CH<sub>4</sub>排放通量时存在不稳定性。以高光谱反射率或其一阶导作为回归模型 变量时, R'<sub>620</sub>、R'<sub>793</sub>模拟出的二次多项式 y = 49072906.37R'<sub>620</sub><sup>2</sup> + 36062.32 R'<sub>620</sub> + 18337174.06R'<sub>793</sub><sup>2</sup> -16632.00R'793+10.77 回归模型效果最佳, 拟合 R<sup>2</sup>达到 0.86, RMSE 最小达 0.4, 检验 R<sup>2</sup>也达到 0.68 通过极显著 水平检验。以高光谱特征变量作为回归模型变量时, 蓝边面积  $SD_{b}$ 模拟的二次多项式  $\gamma = 2810.26SD_{b}^{2} -$ 283.40SD,+7.79回归模型效果最佳, 拟合 R<sup>2</sup>和检验 R<sup>2</sup>分别达到 0.70 和 0.71 均通过极显著水平, 并且拟合 RMSE 和检验 RMSE 分别为 0.79 和 0.76,都处于较低水平,能够较好的模拟出 CH<sub>4</sub>排放通量。

由图 4 可直观地对比出两种模型的模拟效果,其中图 a 为 R'600, R'793模拟出的二次多项式 y=49072906. 37R'<sub>620</sub><sup>2</sup>+36062.32R'<sub>620</sub>+18337174.06R'<sub>793</sub><sup>2</sup>-16632.00R'<sub>793</sub>+10.77,图b为蓝边面积 SD<sub>b</sub>模拟的二次多项式 y= 2810.26SD,<sup>2</sup>-283.40SD,+7.79,其中"蓝边面积"SD,模拟的二次多项式回归模型检验精度较高。分析两种定 量估算 CH<sub>4</sub>排放通量的模型可以看出,CH<sub>4</sub>排放通量较低时,模拟值最接近实测值,排放通量较高时,模拟值 偏离实测值较多。

Table 5 Comparing the estimated X and predicted X in the regression model of Cr <sub>4</sub> emission					
变量类型 Type of variable	回归模型 Regression model	拟合 R <sup>2</sup> Estimated R <sup>2</sup>	拟合 RMSE Estimated RMSE	估测 R <sup>2</sup> Predicted R <sup>2</sup>	估测 RMSE Predicted RMSE
高光谱反射率	$1004.78R_{618}^{2} - 160.46R_{618} + 6.98$	0.76 **	0.63	0.42 **	1.08
及其一阶导数	$-2.49 \ln (R_{618}) - 5.75$	0.75 **	0.65	0.20	1.40
Spectral reflectance and first	12170945.97 <i>R</i> ′ <sub>658</sub> <sup>2</sup> +16857.67 <i>R</i> ′ <sub>658</sub> +6.34	0.77 **	0.60	0.70 **	0.84
derivation of spectrum	$-27.15R_{554}$ $-6.82R_{934}$ $+6.86$	0.70 **	0.80	0.35 *	1.18
	$2292.88 R_{504}^{2} + 233.61 R_{504} - 0.45 R_{799}^{2} - 8.54 R_{799} + 10.66$	0.81 **	0.55	0.72 **	1.33
	$9958.82R'_{620} - 3853.36R'_{1018} + 7.65$	0.80 **	0.53	0.32 *	1.32
	49072906.37 $R'_{620}$ <sup>2</sup> + 36062.32 $R'_{620}$ + 18337174.06 $R'_{793}$ <sup>2</sup> - 16632.00 $R'_{793}$ +10.77	0.86**	0.40	0.68 **	0.91
高光谱特征变量	$1133.64R_r^2 - 168.49R_r + 6.73$	0.75 **	0.67	0.36 *	1.15
Spectral characteristic	$2810.26SD_b^2 - 283.40SD_b + 7.79$	0.70 **	0.79	0.72 **	0.76
value	$-3.05 \ln(R_g) - 6.03$	0.73 **	0.70	0.25	1.32
	$-2.40 \ln(R_r) - 5.72$	0.73 **	0.68	0.22	1.34







#### 3 讨论

夜间增温显著增加拔节期及抽穗-灌浆期 CH<sub>4</sub>的排放(图 1),其原因在于,(1)夜间增温促进了水稻夜间 呼吸作用,降低了根系附近的氧气浓度,引起根际土壤氧化还原电位(Eh)降低,促进稻田厌氧环境的形 成<sup>[4,31-32]</sup>。夜间增温使植株分蘖提前凋萎,脱落的有机物质为厌氧微生物的活动提供较多的碳源和能源,有 利于甲烷产生菌维持较强的活性,甲烷产生力较高<sup>[4,24]</sup>。(2)植物本身也可产生和释放 CH<sub>4</sub>,环境胁迫(高 温、UV-B 辐射,物理伤害等)会刺激植物体 CH<sub>4</sub>的产生和释放<sup>[33-34]</sup>。水稻生长中期对高温较为敏感,夜间增 温促进水稻中期 CH<sub>4</sub>排放可能与受高温胁迫植株本身产生和排放较多的 CH<sub>4</sub>有关。夜间增温对水稻生长前 期和后期 CH<sub>4</sub>排放的影响较弱(图 1)。水稻生长前期,稻田虽淹水但可能因闭蓄氧存在,土壤尚未形成厌氧 环境,水稻苗期植株生物量较低,CH<sub>4</sub>排放也较低。水稻生长后期,植株生长进入衰退期,根表皮层渗透性下 降,通气组织堵塞,运输 CH<sub>4</sub>的能力降低,随环境温度降低 CH<sub>4</sub>产生力也随之下降,稻田 CH<sub>4</sub>排放处于较低 水平<sup>[46,35]</sup>。

水稻植株冠层近红外光谱反射率可反映植株长势和冠层结构信息,健康旺盛、覆盖度高的植株在近红外

波段反射率较高,植株衰老或环境胁迫下,近红外波段反射率则较低<sup>[36]</sup>。本试验中,水稻抽穗-灌浆期和成熟期,植株冠层近红外光谱反射率表现为CK>NW,表明夜间增温对水稻中后期生长有一定抑制作用,使成熟期提前、易衰老。前人也有类似的结果,即夜间增温使水稻花后总绿叶面积及剑叶面积下降,引起花后干物质总量降低<sup>[37]</sup>。本试验中,水稻主要生育期(分蘖期、拔节期、抽穗-灌浆期和成熟期),植株冠层近红外波段光谱反射率处理间的平均差值(NW-CK),分别为0.05,0.01,-0.02,-0.02,呈减小趋势,即在水稻生长前期(分蘖期),夜间增温显著促进水稻生长,而从拔节期开始,夜间增温则抑制水稻植株生长。拔节-灌浆期是江苏沿江地区水稻高温热害多发期,拔节至孕穗期水稻高温热害发生次数最多,因此,夜间增温加剧了水稻中后期高温胁迫<sup>[38]</sup>。

稻田 CH<sub>4</sub>的产生、氧化、输送直接或间接受植株生长的影响,水稻冠层光谱特征也是植株生长及生理过程 (如胁迫)的反映<sup>[4,39]</sup>。本研究选取合适的参数,分别建立了以 R'<sub>620</sub>, R'<sub>793</sub>和以 SD<sub>b</sub>为参数的 CH<sub>4</sub>排放通量的 估算模型(图 4)。经分析,两个模型高光谱变量对水稻分蘖期 CH<sub>4</sub>排放通量的反演效果均较差,模拟值偏离 实测值最多,原因可能在于,水稻生长前期植株较小,对甲烷的产生、氧化及传输影响作用较小;相应地,水稻 前期冠层覆盖度较低,光谱特征受土壤及表层水面影响较大。在后续的研究中,可在不同生育期进行更精准 地建模。此外,考虑到经验统计方法的局限性,本文未针对特定水稻品种、田间管理方式、气候条件等建立经 验关系,影响因子比较单一,对光谱特性的捕捉不够全面,今后需针对不同稻田生态环境、水稻品种等进行广 泛检验和完善,实现模型估测的精确性和普适性的有效统一,从而促进模型估测在 CH<sub>4</sub>排放中的应用。

#### 4 结论

夜间增温促进稻田 CH<sub>4</sub>的排放,这种促进作用在水稻拔节期、抽穗-灌浆期尤为明显。夜间增温对水稻冠 层高光谱的影响,在生育期前期和后期表现不同,分蘖期与拔节期的光谱反射率在近红外平台表现为 NW> CK;抽穗-灌浆与成熟期表现为 CK>NW。水稻冠层高光谱反射率、一阶导数光谱及光谱特征值均与稻田 CH<sub>4</sub> 的排放呈显著相关,相关系数最大可达 0.80。以原始光谱或光谱一阶导为参数建立估算模型时,检验精度都 有不同程度的降低,说明以原始光谱或光谱一阶导为参数估算稻田 CH<sub>4</sub>排放通量稳定性较差。综合评价拟合 模型和预测模型的精度,最终选取稻田 CH<sub>4</sub>的排放通量估算的最佳模型为:2810.26*SD*<sup>2</sup>-283.40*SD*<sup>4</sup>+7.79,其 拟合 *R*<sup>2</sup>为 0.70,预测 *R*<sup>2</sup>和 RMSE 分别为 0.72 和 0.79。研究认为,通过水稻冠层光谱数据监测稻田 CH<sub>4</sub>排放是 可行的,为进一步开展区域稻田 CH<sub>4</sub>排放通量的无损监测提供了试验依据。

#### 参考文献(References):

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] 周超, 刘树伟, 张令, 张旭辉, 潘根兴, 邹建文. 温度和 CO<sub>2</sub>浓度升高对稻田 CH<sub>4</sub>排放的影响: T-FACE 平台观测研究. 农业环境科学学报, 2013, 32(10): 2077-2083.
- [3] 上官行健, 王明星, 沈壬兴. 温度对稻田 CH<sub>4</sub>排放日变化及季节变化的影响. 中国科学院研究生院学报, 1994, 11(2): 214-224.
- [4] 贾仲君, 蔡祖聪. 水稻植株对稻田甲烷排放的影响. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2049-2053.
- [5] Butterbach-Bahl K, Papen H, Rennenberg H. Impact of gas transport through rice cultivars on methane emission from rice paddy fields. Plant, Cell & Environment, 1997, 20(9): 1175-1183.
- [6] Banker BC, Kludze HK, Alford DP, DeLaune R D, Lindau C W. Methane sources and sinks in paddy rice soils: relationship to emissions. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1995, 53(3): 243-251.
- [7] Cicerone RJ, Shetter JD, Delwiche CC. Seasonal variation of methane flux from a California rice paddy. Journal of Geophysical Research, 1983, 88 (C15): 11022-11024.
- [8] 闫晓君,王丽丽,江瑜,邓艾兴,田云录,张卫建.长江三角洲主要超级稻 CH<sub>4</sub>排放特征及其与植株生长特性的关系.应用生态学报, 2013, 24(9): 2518-2524.
- [9] 傅志强,黄璜,朱华武,陈灿.水稻 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的排放及其与植株特性的相关性.湖南农业大学学报:自然科学版, 2011, 37(4):

356-360.

- [10] Singh S, Kashyap A K, Singh JS. Methane flux in relation to growth and phenology of a high yielding rice variety as affected by fertilization. Plant and Soil, 1998, 201(1): 157-164.
- [11] 上官行健, 王明星, 陈德章, 沈壬兴. 稻田 CH<sub>4</sub>的传输. 地球科学进展, 1993, 8(5): 13-22.
- [12] 周晓双,姚霞,田永超,程涛,朱艳,曹卫星.基于高光谱的稻麦叶面积指数监测研究. 2014年中国作物学会学术年会论文集.北京:中国作物学会, 2014.
- [13] 唐延林,王秀珍,王福民,王人潮.农作物 LAI 和生物量的高光谱法测定.西北农林科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(11): 100-104.
- [14] Broge N H, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 156-172.
- [15] Meroni M, Colombo R, Panigada C. Inversion of a radiative transfer model with hyperspectral observations for LAI mapping in poplar plantations. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(2): 195-206.
- [16] Thenkabail P S, Smith R B, De Pauw E. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. Remote Sensing of Environment, 2000, 71(2): 158-182.
- [17] Card D H, Peterson D L, Matson P A, Aber J D. Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy. Remote Sensing of Environment, 1988, 26(2): 123-147.
- [18] 王秀珍,黄敬峰,李云梅,王人潮.水稻地上鲜生物量的高光谱遥感估算模型研究.作物学报,2003,29(6):815-821.
- [19] 杨峰, 范亚民, 李建龙, 钱育蓉, 王艳, 张洁. 高光谱数据估测稻麦叶面积指数和叶绿素密度. 农业工程学报, 2010, 26(2): 237-243.
- [20] 王秀珍,黄敬峰,李云梅,王人潮.水稻叶面积指数的高光谱遥感估算模型.遥感学报,2004,8(1):81-88.
- [21] 张猛,孙红,李民赞, Zhang Q, 郑立华. 基于4 波段作物光谱测量仪的小麦分蘖数预测. 农业机械学报, 2016, 47(9): 341-347.
- [22] 隋学艳,朱振林,朱传宝,杨丽萍,姚慧敏,郭洪海.基于 MODIS 数据的山东省小麦株高遥感估算研究.山东农业科学,2009,(2):5-7, 11-11.
- [23] 张祎玮, 娄运生, 朱怀卫, 肇思迪, 石一凡. 夜间增温对水稻生长、生理特性及产量构成的影响. 中国农业气象, 2017, 38(2): 88-95.
- [24] 王明星. 中国稻田甲烷排放. 北京: 科学出版社, 2001: 47-48.
- [25] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000: 123-227.
- [26] 徐华, 蔡祖聪, 八木一行. 水稻土 CH4产生潜力及其影响因素. 土壤学报, 2008, 45(1): 98-104.
- [27] 张岳芳,陈留根,王子臣,张传胜,朱普平,盛婧,郑建初.稻麦轮作条件下机插水稻 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的排放特征及温室效应.农业环境科学学报,2010,29(7):1403-1409.
- [28] 张文宣,于海洋,张广斌,马静,徐华.水稻品种对 CH4产生、排放及 δ<sup>13</sup>CH4的影响. 生态环境学报, 2015, 24(2): 196-203.
- [29] Wang M X, Shangguan X J. CH<sub>4</sub>Emission from various rice fields in P.R. China. Theoretical and Applied Climatology, 1996, 55(1/4): 129-138.
- [30] 郑循华, 王明星, 王跃思, 沈壬兴, 上官行健, 金继生, 李老土. 华东稻田 CH4和 N2O 排放. 大气科学, 1997, 21(2): 232-237.
- [31] Bahuguna R N, SolisC A, Shi W J, Jagadish K S V. Post-flowering night respiration and altered sink activity account for high night temperatureinduced grain yield and quality loss in rice (*Oryza sativa* L.). PhysiologiaPlantarum, 2017, 159(1): 59-73.
- [32] 董文军,邓艾兴,张彬,田云录,陈金,杨飞,张卫建.开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究.生态学报,2011,31(8): 2169-2177.
- [33] Keppler F, Hamilton J T G, Braß M, RöckmannT. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. Nature, 2006, 439(7073): 187-191.
- [34] 娄运生,周文鳞. UV-B 辐射增强对抗除草剂转基因水稻 CH4 排放的影响. 生态学报, 2012, 32(15): 4731-4736.
- [35] 傅志强,黄璜,何保良,谢伟,廖晓兰.水稻植株通气系统与稻田 CH4排放相关性研究.作物学报,2007,33(9):1458-1467.
- [36] 黄敬峰, 王福民, 王秀珍. 水稻高光谱遥感实验研究. 杭州: 浙江大学出版社, 2010: 36-94.
- [37] 张鑫,陈金,江瑜,邓艾兴,宋振伟,郑成岩,张卫建.夜间增温对江苏不同年代水稻主栽品种生育期和产量的影响.应用生态学报, 2014, 25(5):1349-1356.
- [38] 于堃,宋静,高苹.江苏水稻高温热害的发生规律与特征.气象科学,2010,30(4):530-533.
- [39] Xie X J, Li Y X, Li R Y, Zhang Y H, Huo Y T, Bao Y X, Shen S H. Hyperspectral characteristics and growth monitoring of rice(*Oryza sativa*) under asymmetric warming. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(23): 8449-8462.