

SO₂ 对水稻生理指标和光谱特征的影响

张金恒¹, 李曰鹏^{2,1}, 韩 超¹

(1.青岛科技大学生态环境与农业信息化研究所, 山东 青岛 266042; 2.青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109)

摘要:通过田间开顶式小区熏气试验,研究了 SO₂ 急性伤害对水稻叶绿素含量、叶液 pH 值、叶片含硫量和冠层光谱反射率及其相关性的影响,为遥感监测 SO₂ 污染环境下水稻长势提供基础研究。结果表明,随 SO₂ 熏气浓度的增大,叶绿素含量呈减少趋势,叶片含硫量呈增加趋势,叶液 pH 值相应地降低,光谱反射率曲线在绿光和红光波段、蓝光和绿光波段之间的吸收谷有变平的趋势。选取冠层光谱叶绿素反射峰(550 nm±10 nm 反射率)和近红外波段 770 nm±10 nm 反射率(反映叶片结构)与叶片含硫量、叶绿素含量和叶液 pH 值进行的相关分析表明,(550±10)nm 和 (770±10)nm 冠层光谱反射率与叶片含硫量呈负相关,与叶液 pH 值、叶绿素总量均呈正相关。

关键词:SO₂; 水稻; 生理指标; 冠层光谱

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)01-0026-04

Impact of Sulfur Dioxide upon Physiological Indices and Spectrum Characteristics of Rice

ZHANG Jin-heng¹, LI Yue-peng^{2,1}, HAN Chao¹

(1.Institute of Eco-environment & Agriculture Information, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;

2.College of Plant Science and Technology, Qingdao University of Agriculture, Qingdao 266109, China)

Abstract: Field experiment was carried out with a split plot design with rice variety named Lindao 10. Rice samples were exposed to sulfur dioxide at different concentrations inside fumigation chamber. After measuring visible and near infrared radiance of the canopies of rice, leaves of rice canopy were sampled to analyze sap pH, chlorophyll concentration and sulfur content of rice leaves. Chlorophyll content and sap pH of leaves reduced and sulfur content of leaves increased with the increased SO₂ fumigation concentration. Investigation on the characteristics of rice canopy spectral curves after sulfure dioxide fumigated indicated that the differences in SO₂ concentration influenced the spectral reflectance especially at the green reflectance peak and red absorption trough. The characteristic troughs between green and red wavelengths and between blue and green wavelengths on the curves almost disappeared at the higher SO₂ concentration treatment. The correlation between physiological indices (chlorophyll concentration, sulfur content and pH value) and the average spectral reflectance of (550±10)nm and (770±10)nm showed that the average reflectance of (550±10)nm and (770±10)nm had negative correlation with leaf sulfur content and positive correlation with chlorophyll concentration and pH value respectively. These results can provide a basic theory for monitoring growth of rice under air sulfur dioxide pollution environment using remote sensing.

Keywords: sulfur dioxide; rice; physiological indices; spectra

生长在污染环境里的植物,对大气污染的响应是多方面的,包括对污染物的累积性吸收,外部形态的伤害,生理生态指标的变化等^[1-3]。SO₂ 对农作物的生长、发育和产量都有明显的危害。研究表明,植物的叶

绿素含量、叶液 pH 值等均与大气 SO₂ 浓度有密切关系^[4-6]。高光谱遥感技术的兴起是 20 世纪 80 年代遥感技术的最大成就之一,其特点是在特定光谱域以高光谱分辨率同时获取连续的地物光谱,使得遥感应应用着重于在光谱维上进行空间信息展开。定量分析地球表层生物物理化学过程和参数,已成为地表植被地学过程对地观测的强有力的工具,近年来植物遥感监测得到迅速发展。由于高光谱遥感能提供更多的精细光谱信息,因此,在农业遥感中被广泛应用。作物的许多生

收稿日期:2008-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目(40601062); 863 计划课题(2007AA10Z205)

作者简介:张金恒(1973—),博士,副教授,硕士生导师。

E-mail: zhangjinheng@qust.edu.cn

理化指标的估测在宽光谱中很难或根本无法实现,但高光谱遥感使得大面积农作物的生理生化指标的适时监测和快速提取及定量反演成为可能,这弥补了常规检测方法的不足^[7-8]。因此,高光谱遥感技术成为植物监测的强有力的工具,并为遥感的进一步量化奠定基础,为环境监测提供了一种新的途径和方法,其中污染物的植物光谱效应日益引起人们的关注^[9-10]。通过监测 SO₂ 毒害水稻生育期内的光谱特征变化,研究反射光谱和生理指标之间的关系,可以为 SO₂ 胁迫水稻遥感长势监测和遥感估产提供依据。

本文以水稻为供试材料,通过田间小区试验设计,对不同生育期正常生长的水稻进行 SO₂ 熏气处理,研究 SO₂ 急性伤害条件下,叶片中部分生理指标的变化和不同 SO₂ 浓度水平下水稻叶片的反射光谱特征及其相关关系。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验区位于青岛市城阳区研究基地,土壤为棕壤,有机质含量 7.1 g·kg⁻¹、全氮 0.62 g·kg⁻¹、碱解氮 47.2 mg·kg⁻¹、速效磷 23.1 mg·kg⁻¹、速效钾 130.8 mg·kg⁻¹、有效硫 18.4 mg·kg⁻¹、全硫 181.7 mg·kg⁻¹。小区面积为 15.18 m²,共设 3 次重复,采用裂区设计小区。整个项目试验共 3 个品种水稻,本文选择一个试验水稻品种临稻 10,株行距为 0.15 m×0.22 m,按大田管理方式进行田间管理,统一施肥。于 2007 年 4 月 20 日播种,5 月 30 日移栽,9 月 28 日收获。

1.2 熏气方法

利用开顶式熏气装置模拟进行 SO₂ 急性伤害处理^[11]。设置 4 个 SO₂ 浓度梯度 C1(13.09 mg·m⁻³)、C2(26.18 mg·m⁻³)、C3(39.26 mg·m⁻³)、C4(52.35 mg·m⁻³) 和对照 CK(未经熏气处理),3 次重复。分别在分蘖期(6 月 29 日)、拔节期(7 月 14 日)、抽穗期(8 月 24 日)和灌浆期(9 月 7 日)对正常生长的水稻进行 1 h 熏气处理。

1.3 光谱测定方法

使用由美国 ASD 公司 (Analytical Spectral Devices 公司) 制造的 ASD 野外光谱辐射计 (ASD-Field Spec),其光谱范围为 350~1 050 nm,色散为 1.4 nm,光谱分辨率是 3 nm,有 512 个波段,视场角为 25°。选择晴朗无风天气于 10:00~14:00 测定水稻冠层光谱。传感器探头与冠层顶相距 0.75 m 左右,观测范围直径为 0.33 m。每个小区内不同点测定 10 次,取平均值作为该小区

的光谱反射值。同步采样测定水稻叶片的农学参数。

1.4 叶绿素含量、叶液 pH 值和叶片含硫量测定

叶片叶绿素含量测定:采用少量石英砂和碳酸钙粉及 95% 乙醇将水稻叶片研成匀浆至组织变白,再用 722 型分光光度计测定一定波长的光密度,计算叶绿素含量^[12]。采用氯化钡比浊法测定叶片含硫量^[13]。水洗净叶片,擦干后,以口径面积为 0.5 cm 打孔器钻取 30 个圆片,放入 50 mL 烧杯中,加去离子水 20 mL 搅拌,25 °C 恒温 2.5 h,在 25 °C 中恒温 2.5 h,用 pH 计测定叶片浸出液 pH 值^[14]。

2 结果与分析

2.1 SO₂ 急性伤害对叶绿素、叶片含硫量和叶液 pH 值的影响

正常生长的水稻不同生育期叶片含水量变化见图 1。在同一生育期内,随着 SO₂ 熏气浓度的增加水稻叶片中硫的含量呈现增加的趋势,且拔节期叶片含硫量明显高于其他 3 个时期,说明 SO₂ 熏气可以提高水稻叶片的含硫量,同时随着水稻由营养生长进入生殖生长,叶片的含硫量逐渐降低(图 2)。在同一生育期内,随着 SO₂ 熏气浓度的增加,水稻叶液 pH 值呈减小的趋势(图 3)。灌浆期叶液 pH 值明显高于其他 3 个生育期,随着 SO₂ 熏气浓度的升高,水稻叶片叶

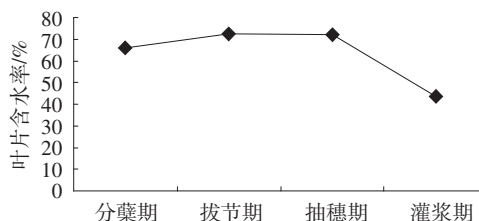


图 1 正常生长(CK)不同生育期叶片含水率变化

Figure 1 Content of water in rice leaves under normal conditions at four growth stages

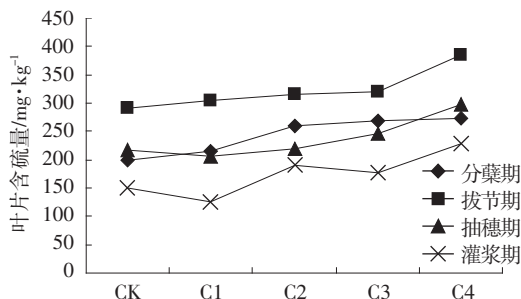


图 2 SO₂ 熏气条件下不同生育期水稻叶片含硫量

Figure 2 Contents of sulfur in leaves of rice under sulfur dioxide fumigation condition at four growth stages

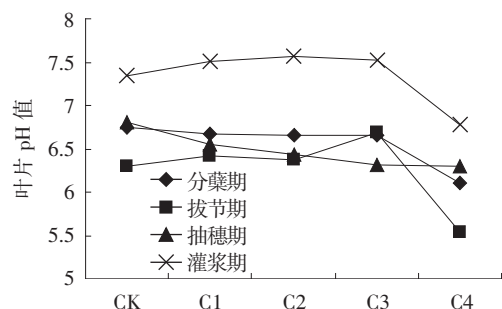
图 3 SO₂ 熏气条件下不同生育期水稻叶液 pH 值

Figure 3 Sap pH of rice leaf under sulfur dioxide fumigation condition at four growth stages

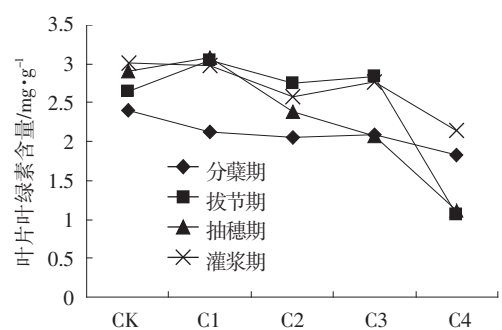
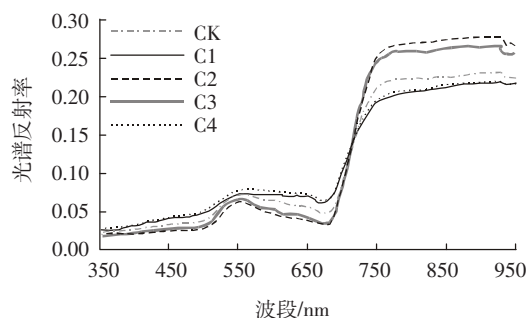
图 4 SO₂ 熏气条件下不同生育期水稻叶片叶绿素含量

Figure 4 Chlorophyll concentration of rice under sulfur dioxide fumigation condition at four growth stages

叶绿素含量呈下降趋势(图 4)。

2.2 SO₂ 急性伤害对水稻叶片反射光谱特征的影响

正常生长的水稻冠层光谱呈现明显的波峰和波谷特征,在绿光波段有一个反射峰,在蓝光和红光波段有一个明显的吸收谷,这主要是由于叶绿素强烈吸收蓝光和红光,反射绿光。在近红外区形成一个反射高原,这是因为叶片内部细胞结构对近红外光的反射导致(图 4-CK)。对水稻样本进行不同浓度 SO₂ 熏气处理之后,分析了 350~980 nm 光谱曲线变化特征发现不同 SO₂ 熏气浓度处理的光谱曲线形状发生显著的变化,特别是在绿光反射峰和红光吸收谷(图 4)。绿光和红光之间的吸收谷(680 nm 附近)与蓝光和绿光之间的吸收谷(560 nm 附近)均随着 SO₂ 浓度的增加而变得不明显(图 5)。本研究选取叶绿素反射峰绿光(550±10)nm 和反映叶片结构的红外波段(770±10)nm 光谱反射率与叶片含硫量、pH 值和叶绿素含量之间进行相关分析,结果表明,这两个波段的光谱反射率与叶片含硫量呈负相关,与叶液 pH 值、叶绿素总量均呈显著性正相关,部分情况下相关性达到极显著(表 1)。



(CK 为对照;C1-C4 为 4 个浓度,X 和 Y 轴分别代表波长(nm)和反射率)

图 5 暴露在 SO₂ 环境下冠层反射光谱曲线(350~980 nm)

Figure 5 Reflectance spectral curves of rice canopy under sulfur dioxide fumigation condition(350~980 nm)

表 1 不同生育期生理指标与光谱反射率相关系数

Table 1 The correlation coefficients between the physiological indices and spectral reflectance at four growth stages

	波段/nm Wave bands	叶片含硫量 Sulfur content of rice leaves	叶液 pH 值 Sap pH of rice leaves	叶绿素含量 Chlorophyll concen- tration of rice leaves
分蘖期	550±10	-0.442	0.197	0.164
Tiller stage	770±10	-0.384	0.565*	0.593**
拔节期	550±10	-0.566*	0.598*	0.516*
Jointing stage	770±10	-0.739**	0.539*	0.293
抽穗期	550±10	-0.568*	0.323	0.284
Heading stage	770±10	-0.433	0.031	0.299
灌浆期	550±10	-0.056	0.013	0.135
Filling stage	770±10	-0.535*	0.583*	0.538*

注:*,** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著。

Note:*,** indicate significant at 0.05 and 0.01 level respectively.

3 讨论与结论

3.1 结论

(1)SO₂ 急性伤害对水稻叶片含硫量、叶液 pH 值和叶绿素含量的影响表现在同一生育期内,随着 SO₂ 熏气浓度的增加水稻叶片中硫含量呈现增加的趋势,水稻叶液 pH 值呈减小的趋势,水稻叶片叶绿素含量呈下降趋势。

(2)和正常生长的水稻冠层光谱比较,不同浓度 SO₂ 熏气处理之后的水稻冠层反射光谱曲线形状发生显著的变化,其中绿光和红光之间的吸收谷(680 nm 附近),蓝光和绿光之间的吸收谷(560 nm 附近),反映叶绿素强烈反射绿光的绿峰均随着 SO₂ 浓度的增加而变得不明显。

(3)光谱反射曲线绿峰(550±10)nm 和近红外平

台(770±10)nm 光谱反射率与叶片含硫量呈负相关,与叶液 pH 值、叶绿素总量均呈正相关。

3.2 讨论

SO₂ 熏气处理导致水稻部分理化指标和光谱反射发生上述变化的原因主要是因为 SO₂ 对水稻的危害与 HSO₃⁻、SO₃²⁻和 H⁺等 3 种离子有关。这 3 种离子的形成过程是 SO₂ 经气孔进入叶肉,逐渐扩散到海绵组织和栅栏组织,溶于浸润细胞壁的水分中,形成亚硫酸,亚硫酸离解成 HSO₃⁻和 H⁺,重亚硫酸离子再进一步离解生成 SO₃²⁻和 H⁺[10,15]。在这一反应过程中,随着熏气浓度的增加,水稻叶片含硫量增加,H⁺含量增加,pH 值减小,叶绿体遭受破坏,叶绿素含量下降。由于叶绿体遭受破坏,叶绿素含量下降,叶绿素对蓝光和红光的吸收能力以及对绿光的反射能力均下降,导致绿峰(550±10)nm 和近红外平台(770±10)nm 光谱反射率与叶片含硫量呈负相关,与叶液 pH 值、叶绿素总量呈正相关,并且和正常生长的水稻冠层光谱比较,不同浓度 SO₂ 熏气处理之后的水稻冠层反射光谱曲线形状发生显著的变化,其中叶绿素反射峰和吸收谷均随着 SO₂ 浓度的增加而变得不明显。

参考文献:

- [1] 黄 芳,王建明,徐玉梅. SO₂ 对不同抗性植物几种酶活性的影响[J]. 山西农业科学, 2005, 33(3): 26-28.
HUANG Fang, WANG Jian-ming, XU Yu-mei. Effects of sulfur dioxide to some enzymes in different resistant plants[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2005, 33(3): 26-28.
- [2] 孔国辉,陈宏通,刘世忠,等. 广东园林绿化植物对大气污染的反应及污染物在叶片的积累[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(4): 297-315.
KONG Guo-hui, CHEN Hong-tong, LIU Shi-zhong, et al. Responses of garden greening plants to air pollution in Guangdong Province and the accumulation of pollutants in leaves [J]. *Journal of Tropical and Sub-tropical Botany*, 2003, 11(4): 297-315.
- [3] 温达志,陆耀东,旷远文,等. 39 种木本植物对大气污染的生理生态反应与敏感性[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(4): 341-347.
WEN Da-zhi, LU Yao-dong, KUANG Yuan-wen, et al. Ecophysiological responses and sensitivity of 39 woody species exposed to air pollution[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11(4): 341-347.
- [4] Bacic T, Popovic Z. Preliminary report on epicuticular wax surface condition on stomata of *Abies alba* Mill. needles from Risnjak National Park in Croatia[J]. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 1998, 40: 25-31.
- [5] Kula E, Hrdlicka P. Monitoring of nutrient and extraneous elements in the foliage of birch-tree growing in an air pollution area[J]. *Lesnictvi Prague*, 1998, 44(1): 1-9.
- [6] 刘艳菊,丁 辉,王 辉. 首钢邻山和植物园植物叶片含硫量的对比[J]. 中国环境科学, 2001, 21(6): 498-502.
LIU Yan-ju, DING Hui, WANG Hui. Comparisons of leaf sulfur content from trees near steel factory and Botanical Garden of Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2001, 21(6): 498-502.
- [7] Curran P J. Remote sensing of foliar chemistry[J]. *Remote Sens Environ*, 1989, 30: 271-278.
- [8] Fourty Th Baret F, Jacquemoud S, et al. Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition direct and inverse problems[J]. *Remote Sensing Environ*, 1996, 56: 104-117.
- [9] 郭世忠,田国良,汪水花. 二氧化硫和重金属镉、铜等物质对植物光谱特性的影响[J]. 环境科学, 1984, 5(6): 13-18.
GUO Shi-zhong, TIAN Guo-liang, WANG Shui-hua. Effects of sulfur dioxide and heavy metal(Cd & Cu) to spectra features of plants[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1984, 5(6): 13-18.
- [10] 刘厚田,季德清,单素云,等. 二氧化硫对棉花叶片光谱反射特性的影响[J]. 环境科学学报, 1983, 3(4): 329-334.
LIU Hou-tian, JI De-qing, SHAN Su-yun, et al. Effects of sulfur dioxide on leaf spectral reflectance features of cotton[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1983, 3(4): 329-334.
- [11] 李曰鹏,张金恒,刘树堂. 水稻田间开顶式SO₂熏气装置[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1649-1652.
LI Yue-peng, ZHANG Jin-heng, LIU Shu-tang. Open-top SO₂ fumigation device designed for rice field experimentation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1649-1652.
- [12] 杨敏文. 快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨[J]. 光谱实验室, 2002, 19(4): 478-481.
YANG Min-wen. Study on rapid determination of chlorophyll content of leaves[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2002, 19(4): 478-481.
- [13] 杨 玲,郭晓东. 农作物植株全硫测定方法的探讨[J]. 甘肃农业科技, 1995(11): 34-36.
YANG Ling, GUO Xiao-dong. The method study on determination of sulphur content in the crop plants[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 1995(11): 34-36.
- [14] 周文彬,邱保胜. 植物细胞内 pH 值的测定[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(6): 724-728.
ZHOU Wen-bin, QIU Bao-sheng. Measurement of intracellular pH in plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 2004, 40(6): 724-728.
- [15] 易 秀,张洪生,郑泽群. 二氧化硫对小麦玉米的急性慢性伤害研究[J]. 西北农业大学学报, 1997, 25(4): 45-50.
YI Xiu, ZHANG Hong-sheng, ZHENG Ze-qun. Studies on chronic and acute injury of SO₂ to wheat and corn[J]. *Acta Univ Agric Boreali-occidentalis*, 1997, 25(4): 45-50.