

# 土壤中镉、铜伤害对水稻光谱特性的影响\*

田国良、包佩丽、李建军、王连琴、王乙欣

(中国科学院遥感应用研究所)

刘厚田、张维平、沈英娃、杜晓明、邢冠华

(中国环境科学院生态研究所)

1989年2月11日收稿

## 摘 要

本文讨论了水稻受重金属镉和铜污染伤害后的光谱反射特性的变化,为遥感监测污染提供基本依据。使用高分辨率光谱辐射计在自然状态下实地测量了受污染的水稻光谱特性,比采集叶片在室内测量更接近于实际情况,便于结合遥感图像进行定性和定量分析研究。

结果表明,镉和铜拌土生长的水稻在分蘖期受到的影响最明显,无论是在生理上还是在反射光谱方面变化都比较显著。因此,对水稻受重金属污染的遥感监测最佳时间为分蘖期,有效波段为 0.54—0.58, 0.64—0.69, 0.74—0.80 微米。综合对水稻光谱的各种分析方法,如波形分析,微分光谱,绿度指数和主成分变换等技术,水稻在分蘖期,对高浓度的监测效果较好,而对低浓度效果不甚明显。

**关键词** 光谱反射比 污染 水稻

## 一、前 言

环境污染监测手段有物理的、化学的和生物的。物理和化学监测只能获得瞬间的环境信息。而要得知污染物的长期生态效应,就必须进行生物监测。在生物监测中,植物有很多优点。它固定在一个地方,只要有污染物存在,就无时无刻不在经受着污染物的影响,因此适合于长期污染的监测。

植物受到有害气体或土壤中有害物质污染后,它们的生理效应发生变化,影响气孔开放。叶绿素遭受破坏,光合作用能力减弱等<sup>[1]</sup>,相应地使植物的波谱特性发生不同程度的变化。

在津渤环境遥感实验中我们研究了污染了的植物,水体和土壤光谱特性,选择出津渤地区多光谱的有效工作波段<sup>[2]</sup>。1981年中国科学院遥感应用研究所和中国环境科学研究院生态室协作开展了SO<sub>2</sub>及重金属镉、铜等物质对植物光谱特性的影响的基础研究。在密封式熏气箱中对植物进行SO<sub>2</sub>熏气试验,采用高浓度、短时间处理,在实验室用分光光度计测量了植物叶片的反射和微分光谱、色素含量等,初步摸清了高浓度SO<sub>2</sub>和重金属

\* 此文是国家自然科学基金项目的研究课题。

镉、铜等污染了的植物与未污染植物的光谱特性的差异及其变化规律, 发表了专题论文<sup>[3-6]</sup>。

但是, 单个叶子和植物冠层间的光谱响应是有差别的。由于遥感探测到的是植物冠层的光谱信息, 为了能用遥感技术大面积监测污染, 必须研究受污染的植物冠层的光谱特征。本文是上述研究的延续和深化, 其目的是研究慢性污染伤害对植物光谱特性的影响。在接近自然状态下用镉、铜对水稻进行污染伤害处理, 并在野外以太阳光为光源用高分辨率光谱辐射计直接测量植物冠层的光谱特性, 以多种分析技术进一步探讨大自然中慢性污染伤害下植物光谱特性的变化规律。

## 二、实验方法和测量仪器

### 1. 实验材料

试验材料为“77—170”品种粳稻, 湿润育秧, 1986年4月28日播种。

试验用环境科学院内果园土, 栽培试验容器为塑料圆桶(高28厘米, 直径27厘米), 每盆装土13公斤, 土壤过筛, 准确加入  $\text{CdCl}_2$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 手工充分拌匀, 便成所需镉、铜处理的土壤。处理浓度镉为0, 1, 10, 50, 100ppm, 铜为0, 10, 50, 150ppm, 每种处理均为5盆。

5月23日插秧, 秧苗处于三叶一心期, 每盆5穴, 每穴2株。灌溉用自来水, 实验盆栽置网室中, 降雨时加上透明塑料薄膜遮挡。对水稻生长发育状况进行定期观察和测定, 包括株高、叶面积, 分蘖数、生物量和产量分析等。视生长情况, 每周测量1—2次反射光谱特性。每周进行一次多光谱和彩色红外摄影。

### 2. 测量仪器和方法

野外测量各种植物光谱反射用的仪器为美国光谱工程公司的 SE-590 便携式光谱辐射计, 它可在1/60—64/60秒内同时通过阵列获得256个波段的光谱数据, 并通过以微处理器为基础的控制将数据记录在内装小型盒式磁带上, 通过 RS-232 接口将测量数据输入 IBMPC 机内, 通过自编的软件进行回放、处理和分析。

室内测量叶片的反射光谱和叶绿素含量的仪器为 UV-360 型分光光度计。

野外光谱测量采用相对测量法, 参考板选用安徽光机所生产的  $\text{BaSO}_4$  灰板。一般在日间无云情况下测量, 为保证测量精度, 用一台照度计来监视照度的变化。每次测量4盆, 每盆测一次, 取其平均值进行分析。

多光谱和彩色红外摄影采用长城120单镜头反光式相机。滤光片波段为0.4—0.5, 0.496—0.587, 0.596—0.721, 0.680—0.90微米, 胶片为1075, 彩红外片为1821。摄影机安装在遥感车上, 为保证较好的重迭精度, 采用单相机更换滤光片的方法。

## 三、慢性镉、铜污染对水稻生长发育和色素含量的影响

镉、铜拌土处理的水稻症状首先反映在叶片上。叶片伤害症状在分蘖期较明显, 此

后,随着植物生长发育,症状逐渐消失,趋于正常,但高浓处理组后期贪青,生长期滞后。

在分蘖期,对照组和浓度低于 10ppm 处理组,植株长势一致,叶色浓绿,叶片宽大。镉浓度在 50ppm 以上,铜在 150ppm 以上,对水稻生长有抑制作用,抑制程度随浓度加大而加重。表现为分蘖数减少,叶片淡绿,个别叶片有黄色小枯斑。拔节期,各处理组植株与对照组比较,已明显表现出从被抑制状态转向正常状态,叶色呈绿色,抽穗扬花期,对照与低浓度处理组无明显差异,而高浓度处理水稻叶色却更深绿,说明物候期滞后。灌浆期,对照组及低浓度处理组的植株逐渐衰老,高浓度处理组贪青,生长期明显滞后,成熟期与对照组相比推迟约 10 天。镉、铜对水稻生长发育的影响主要是使分蘖数减少,植株高度降低,叶面积、生物量和产量等都不同程度的减少。这方面已有许多论文发表<sup>[3-6]</sup>,本文不再详述。

表 1 说明,大于 50ppm 的处理组在分蘖期引起水稻叶片中色素含量有下降的趋势,而在拔节孕穗期变化不大,在抽穗扬花期以后,色素变化的趋势是增加。色素变化的趋势与作物生长发育状况是相符合的,生长后期由于植株贪青,而使叶绿素增加。

表 1 镉、铜拌土水稻叶片色素含量 (mg/g 鲜重)  
Table 1 Pigment content in rice leaves (mg/g, f. w)

| 生育期                 | 色素种类  | 镉 处 理 (ppm) |      |      |      |      | 铜 处 理 (ppm) |      |      |      |
|---------------------|-------|-------------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|
|                     |       | 0           | 1    | 10   | 50   | 100  | 0           | 10   | 50   | 150  |
| 分蘖期<br>(6.28)       | 叶绿素 a | 1.33        | 1.41 | 1.37 | 1.21 | 1.26 | 1.29        | 1.31 | 1.22 | 1.23 |
|                     | 叶绿素 b | 0.47        | 0.60 | 0.49 | 0.40 | 0.38 | 0.45        | 0.44 | 0.40 | 0.39 |
|                     | 类胡萝卜素 | 1.00        | 1.07 | 0.99 | 0.84 | 0.88 | 0.88        | 0.88 | 0.84 | 0.82 |
| 拔节<br>孕穗期<br>(7.25) | 叶绿素 a | 1.22        | 1.26 | 1.24 | 1.26 | 1.29 | 1.25        | 1.26 | 1.23 | 1.14 |
|                     | 叶绿素 b | 0.72        | 1.03 | 1.05 | 0.93 | 0.98 | 1.09        | 0.84 | 0.72 | 0.57 |
|                     | 类胡萝卜素 | 0.63        | 0.62 | 0.61 | 0.62 | 0.62 | 0.63        | 0.63 | 0.63 | 0.64 |
| 抽穗<br>扬花期<br>(8.23) | 叶绿素 a | 1.26        | 1.38 | 1.30 | 1.26 | 1.31 | 1.22        | 1.29 | 1.35 | 1.36 |
|                     | 叶绿素 b | 0.37        | 0.40 | 0.39 | 0.39 | 0.40 | 0.40        | 0.37 | 0.38 | 0.40 |
|                     | 类胡萝卜素 |             |      |      |      |      |             |      |      |      |
| 成熟期<br>(10.7)       | 叶绿素 a | 0.36        | 0.57 | 0.54 | 0.74 | 0.72 | 0.39        | 0.50 | 0.43 | 0.62 |
|                     | 叶绿素 b | 0.13        | 0.18 | 0.16 | 0.22 | 0.21 | 0.12        | 0.18 | 0.14 | 0.18 |
|                     | 类胡萝卜素 | 0.30        | 0.43 | 0.40 | 0.57 | 0.53 | 0.34        | 0.41 | 0.33 | 0.46 |

#### 四、镉、铜污染伤害对水稻光谱特性的影响

##### 1. 光谱特性分析

植物的光谱特性是在生长过程中和环境相互作用的综合反映,因此受污染植物的光谱特性也会相应的发生变化。图 1 为分蘖期镉、铜污染的水稻光谱特性。它们表现了相似的变化规律。在 6 月 28 日水稻分蘖期,生长旺盛,对于低浓度(低于 10ppm)处理的水稻光谱反射率与对照组相似,变化不明显,而对于高浓度(大于 50ppm)处理组光谱反射率与对照组相比却显示了很大的变化。在可见光部分,高浓度处理的反射率高于低浓度

处理组。在可见光部分高浓度处理组水稻叶绿素含量主要决定了它的反射率, 叶绿素降低, 导致反射率的增高。这与测量的水稻叶片中叶绿素含量相一致。在近红外区, 由于细胞组织受到抑制, 其水分含量、空气间隙等都发生了变化, 从而使反射率降低。在 0.7—0.74 微米区域内, 光谱的陡坎部分发生了一定变化。这种光谱变化随污染程度不同, 也显示了差异。

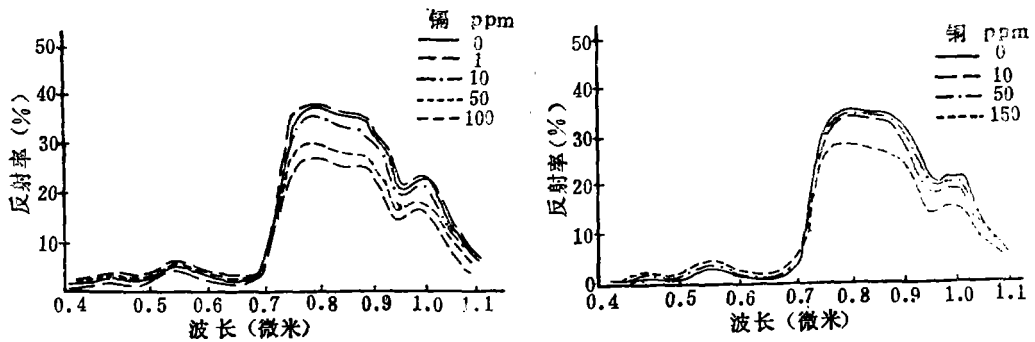


图 1 镉、铜处理的水稻在分蘖期的光谱特性

Fig. 1 Spectral Signature of stressed rice by Cadmium and Copper in soil

多光谱摄影的彩色合成图像证明了上述特征。图 2a (见图版 I) 是水稻拌铜和镉在分蘖期的假彩色合成图像。采用了红外→赋予绿色, 红→蓝, 红外/红→红色的赋色方式。图上部为镉处理, 下部为铜处理, 左边为对照组, 依次向右镉浓度为 10、50、100ppm, 铜处理的浓度为 10、50、150ppm。合成图中深红色表明比值密度和红外贡献较大, 向右呈现的淡红色表明比值减少或者红外成分降低。从植物生长的形态上和合成图像的色调上都可以看出对高浓度处理的水稻与对照组有较大的差异, 可以监测出来。

图 2b (见图版 I) 是同一种植物同状态下红外负片的密度分割, 按密度等级从高向低依次赋红、黄、绿、蓝四色, 其色调的差异显示了合成片类似的结果。

## 2. 绿度指数的变化

由前面的分析可知, 植物受污染后光谱特性的变化主要是高浓度处理组较明显, 因此, 以下主要分析对照组和高浓度组间光谱特性的变化规律。

为了探讨用陆地卫星监测污染的可能性, 我们分析了陆地卫星 TM 波段内慢性污染伤害的植物波谱的变化。

因为绿度指数和植物生长过程中的许多参量存在着很好的关系。同时经过绿度指数变换还可以部分地消除大气和阴影的影响。所以我们用 TM3 波段和 4 波段比值和归一化差组成绿度指数来进行分析。

图 3 为镉、铜高浓度处理组和对照组的水稻的绿度指数季节变化。

在水稻的分蘖期(6月6日—6月底)和拔节期(7月初—30日), 铜浓度为 150ppm 试验组, 镉浓度为 100ppm 组的  $R_T$ 、 $ND_T$  值均低于对照组。这是由于该季节植物生长旺盛, 生理活动强, 受污染后叶绿素遭受破坏, 0.63—0.69 微米吸收减弱。近红外波段反射降

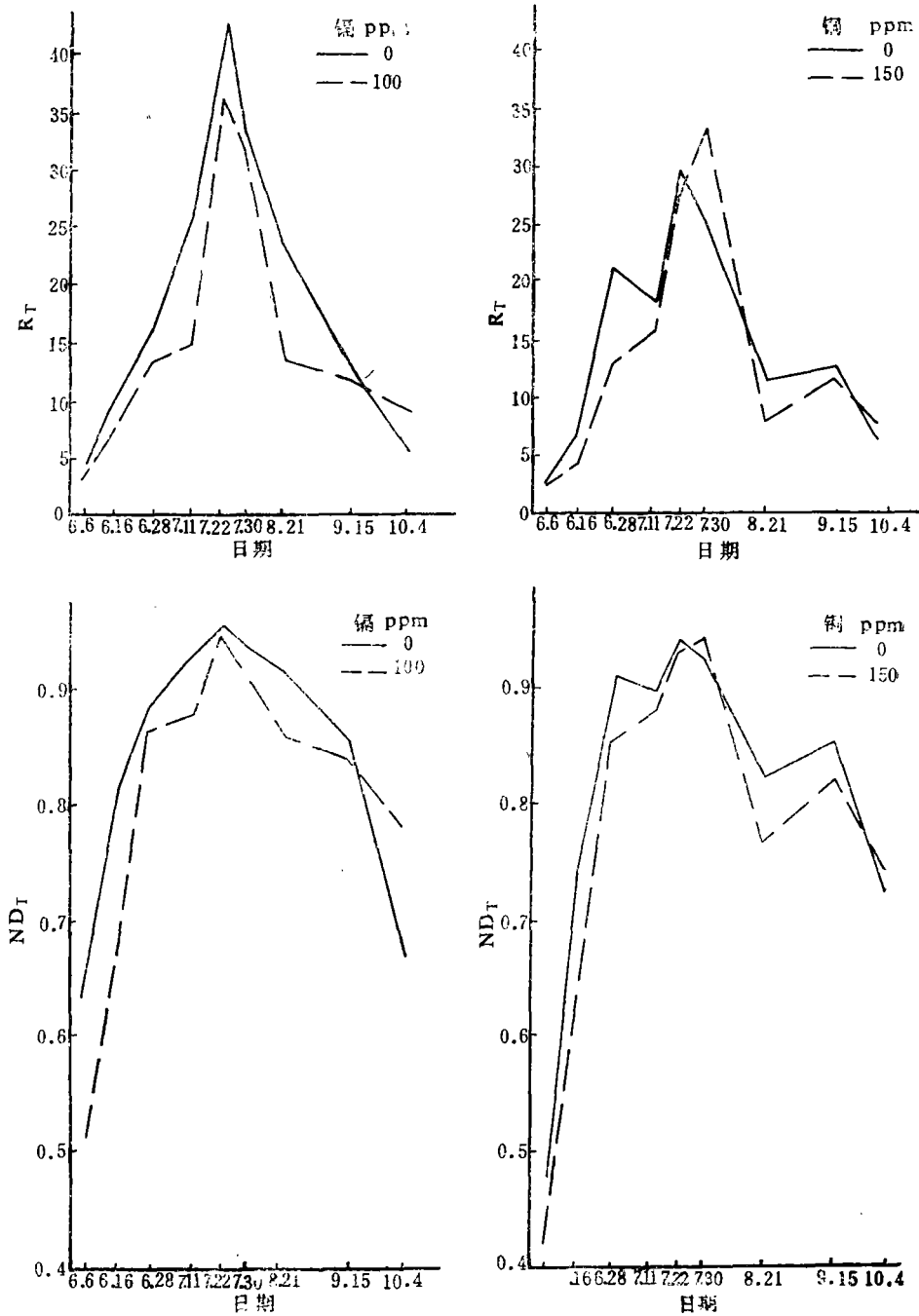


图 3 镉、铜处理的水稻绿度指数的季节变化

Fig. 3 Seasonal Change of greenness indices for stressed rice by Cadmium and Copper

低,致使 TM4、3 波段的比值和归一化差明显降低。由此可见,绿度指数能反映受污染植物的变化情况。

Jackson<sup>[7]</sup> 曾指出,没有一个绿度指数能最佳地评价整个生长季的植物,需要两个或更多的绿度指数。由图 2 可知在分蘖初期(6月6日—16日),用归一化差监测污染状况较好,镉处理与对照组间存在较大的差别。而在拔节期(7月11日—30日)用比值绿度指数较好,在以后,两个绿度指数的效果差不多。但到了9月15日,镉处理的水稻绿度指数几乎与对照组无差别。铜处理组,在7月30日的绿度指数却超过了对照组。由于归一化差的范围为0—1,而比值的动态范围很大,从总的看,比值要比归一化差好些。

将镉、铜处理的水稻 TM 四个波段分蘖期间不同浓度的反射率值进行主成分变换,得到新的变量,这些主成分是这四个波段的线性组合,也可以说是新的绿度指数。

经主成分变换后,铜和镉处理的水稻第一和第二主成分的累积贡献率分别为 0.99 和 0.98,即这两个变量可以反映全部的 99% 和 98%。我们用这两个主成分来分析镉、铜污染水稻在分蘖期的变化。

对于镉处理的水稻;

$$PC_1 = 0.524TM_1 + 0.538TM_2 + 0.549TM_3 - 0.366TM_4$$

$$PC_2 = 0.390TM_1 + 0.305TM_2 - 0.097TM_3 + 0.863TM_4$$

对于铜处理的水稻;

$$PC_1 = 0.526TM_1 + 0.538TM_2 + 0.540TM_3 - 0.378TM_4$$

$$PC_2 = 0.325TM_1 + 0.218TM_2 + 0.106TM_3 + 0.914TM_4$$

图 4 为镉、铜处理的水稻分蘖期间的第一和第二主成分分布图。由图中可知,三个不同分蘖期的主成分各自群集在一起,彼此间可以分出,而每个日期的高浓度处理的主成分值均能与其它剂量处理的区分开。从图中可知,凡高浓度组的都在其它组的左边。第一

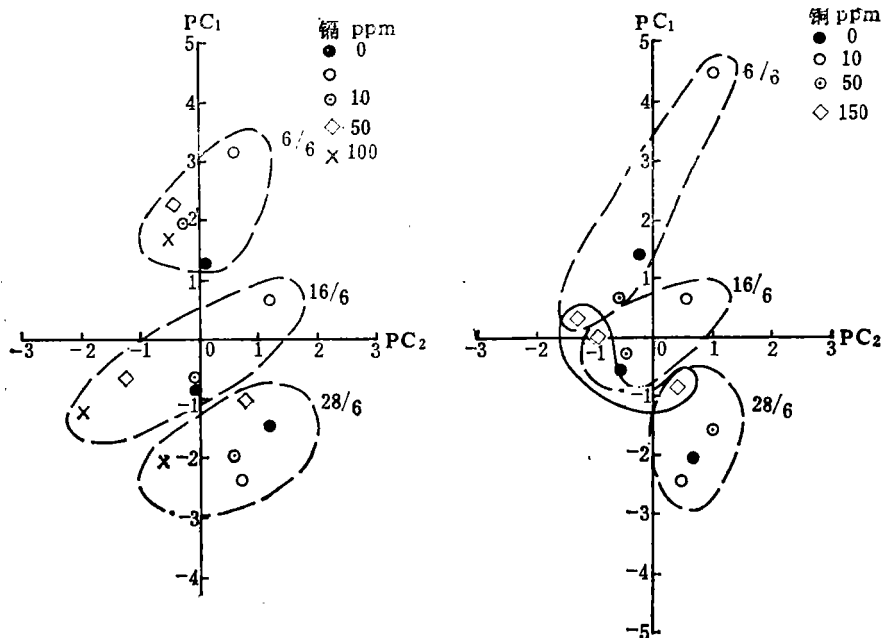


图 4 镉、铜处理的水稻分蘖期的主成份

Fig. 4 Principal Components of stressed rice by Cadmium and Copper at tillering stage

主成分主要区分水稻不同时期光谱的差别,而第二主成分主要区分不同处理组光谱的差别。由前面第一和第二主成分表达式可知,镉和铜处理的第一主成分系数差别很小,这说明,这两种处理的水稻,在不同生长期光谱的变化相类似,而它们的第二主成分却显示了差别,说明不同处理组的光谱差别较大。

### 3. 受污染植物微分光谱分析

我们对野外测量的植物光谱反射率曲线求其一阶和二阶导数,这样,正常生长和受污染植物在吸收边缘的光谱移动现象得到了较大的放大。一阶导数是光谱反射率曲线的斜率随波长的变化,从二阶导数可以找出反射率曲线的极大值和极小值。受污染植物相对于正常生长的植物在微分光谱中,它们对应于某些特征波长的值要发生位移。往短波移动称为“蓝移”,往长波移动称为“红移”。

在以前室内分析污染植物叶片微分光谱的过程中,发现受污染植物相对于正常生长植物微分光谱的某些值所对应的波长发生了“蓝移”<sup>[3-6]</sup>。本次试验在野外用高分辨率野外光谱辐射计获得的受污染植物的光谱反射率曲线的一阶和二阶导数,也得到了相似的结果(图5)。

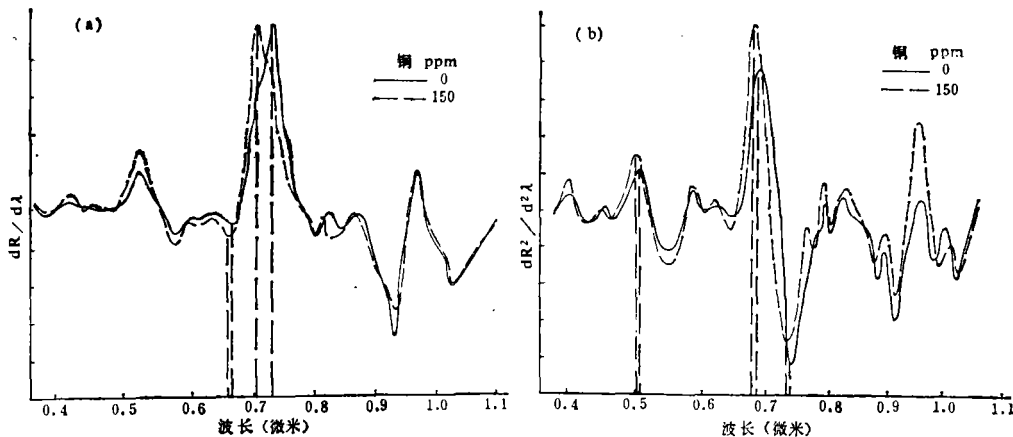


图 5 铜污染水稻在分蘖期的一阶(a)、二阶(b)微分光谱曲线

Fig. 5 The first-derivative (a) and second-derivative spectra of Copper stressed rice in the tillering stage

分蘖初期,从浓度为 150ppm 的铜处理的水稻和对照组的一阶微分光谱曲线上可以看出,在近红外陡坡 730 纳米附近蓝移了 20.8 纳米。到了分蘖后期,蓝移了 6 纳米。在二阶微分光谱曲线的 690 纳米附近的吸收峰,分蘖初期蓝移了 8.8 纳米,分蘖后期则蓝移了 16.4 纳米,在肩部拐点 740 纳米处,蓝移了 3 纳米(表 2)。

镉处理的(100ppm)的水稻与正常生长的相比分蘖初期的一阶导数光谱在 710 纳米陡坡中点附近蓝移了 5.9 纳米,二阶导数在 680 纳米附近的吸收峰处也向蓝波段方向位移了 2.9 纳米。在分蘖中期,二阶导数在 680 纳米附近蓝移了 7.3 纳米,拐点 740 纳米

表 2 铜污染水稻在分蘖期微分光谱峰值对应的波长变化  
Table 2 Wavelength shift of peak for differential spectra  
of copper stress rice at tillering stage

| 波<br>长<br>值<br><br>位<br>置 | 类别 | 铜含量(6月16日) |        | 铜含量(6月28日) |        |
|---------------------------|----|------------|--------|------------|--------|
|                           |    | 0          | 150ppm | 0          | 150ppm |
| 一次微分峰值<br>(红外吸收边缘)        |    | 726.3      | 705.5  | 732.3      | 726.3  |
| 二次微分极大值<br>(690 纳米附近吸收谷)  |    | 690.7      | 681.9  | 711.5      | 695.15 |
| 二次微分极小值<br>(740 纳米附近拐点)   |    | 739.7      | 736.8  | 750.1      | 747.1  |

附近也蓝移了 3 纳米(表 3)。

表 3 镉污染水稻(分蘖期)光谱反射率微分峰值对应的波长变化  
Table 3 Wavelength shift of peak for differential spectra  
of cadmium stress rice at tillering stage

| 波<br>长<br>值<br><br>位<br>置 | 类别 | 土 壤 中 镉 含 量 |       |          |       |
|---------------------------|----|-------------|-------|----------|-------|
|                           |    | 6 月 6 日     |       | 6 月 16 日 |       |
|                           |    | 0           | 100   | 0        | 100   |
| 一次微分峰值<br>(红外吸收边缘)        |    | 705.5       | 699.6 | 726.3    | 726.3 |
| 二次微分极大值<br>(690 纳米附近吸收峰)  |    | 681.9       | 679.0 | 690.7    | 683.4 |
| 二次微分极小值<br>(740 纳米附近的拐点)  |    | 738.2       | 735.3 | 739.7    | 736.7 |

## 五、监测污染植物的最佳波段的选择

多波段遥感是监测环境污染的有效手段之一, 通过地面波谱测量, 确定数个有效波

表 4 监测植物污染状况的有效波段  
Table 4 Bands for monitoring stressed rice

| 植物种类   | 置信度 | 区别波段 (微米) |
|--------|-----|-----------|
| 铜处理的水稻 | 95% | 0.69—0.73 |
|        | 90% | 0.72—0.80 |
|        | 90% | 0.54—0.62 |
| 镉处理的水稻 | 95% | 0.52—0.58 |
|        | 90% | 0.61—0.68 |
|        | 90% | 0.73—0.80 |

段,为多波段遥感选择最佳波段提供依据,使其组合的遥感图像含有最多的信息,达到识别污染植物的目的。在本实验的研究中,我们采用  $T$  参数检验和鉴别指数法,然后用方差分析进行群体检验,最后找出区分正常生长植物与污染植物的最佳波段。

对三种方法获得的数据,进行综合分析,按波长分析其显著差异的频数,找出在置信度为 90% 和 95% 时能区分植物受污染与正常生长的光谱波段,结果如表 4 所示。

## 六、结 论

1. 使用野外光谱辐射计在自然状态下实地对污染植物进行光谱测试比野外采样、室内用分光光度计测试更接近实际情况,能进一步结合遥感图像进行定量分析研究。

2. 镉、铜拌土的水稻在分蘖期受到的影响最明显,对于高浓度处理,分蘖数、株高、叶面积、生物量,叶绿素含量等均比对照组减少。这时期其光谱反射率的变化也比较显著。因此,对水稻受重金属污染的监测最佳时间为分蘖期。

3. 水稻受重金属镉、铜毒害后,在较明显时期,均导致形态损伤和生理损伤。表现在波谱特性上则是:可见光区反射率增加,近红外波段有较大幅度的下降,且污染越严重,变化越明显。在本次试验中,镉、铜浓度大于 50ppm,水稻波谱特性有明显变化,因此,由红波段和近红外波段反射率构成的绿度指数也有较明显的变化,随着污染处理浓度的增加,其值递减。因而,绿度指数可以作为监测污染的一种手段。多光谱假彩色合成图像也证实了上述结果。

4. 植物的微分光谱可以使正常生长和受污染植物在吸收边缘的光谱移动现象得到较大的放大,它们对应的某些特征波长的峰值要发生波长位移。实验发现,对重金属镉、铜处理的水稻均发生了不同程度的“蓝移”现象,对一阶导数主要是在蓝吸收边缘的 520 纳米附近及红吸收边缘 700 纳米附近,而二阶导数的变化主要发生在 680 纳米附近的吸收峰和 740 纳米附近的肩部拐点处。微分光谱分析是一种波形分析,它可以用来监测污染的变化情况。

5. 根据测量的光谱反射率,利用统计检验方法,选择了监测植物受污染状况的有效波段为 0.54—0.58, 0.64—0.69 和 0.74—0.80 微米。

6. 综合植物光谱的各种分析,如波形分析,微分光谱,绿度指数,主成分变换,在接近于国家环境质量的浓度下处理的污染植物的遥感监测中,从总的综合指标看,在水稻的分蘖期,对高浓度效果较好,可以通过上述分析加以鉴别,而对低浓度效果较差,甚至无法与正常植物区分开。为进行遥感监测,必须选择合适的时期和波段,才能收到较好的效果。

## 参 考 文 献

- [1] Kenji Omasa et al., Image Instrumentation of Plant exposed to air pollutants(2) Relationship between  $SO_2$  or  $NO_2$  Sorption and their acute effects on plant leaves. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. stud. Jpu. No. 66, 1984.
- [2] 田国良,天津地区污染地物的波谱特性,天津—渤海湾地区环境遥感论文集. 科学出版社,1985.
- [3] 刘厚田、田国良等,二氧化硫对棉花叶片光谱反射特性的影响. 环境科学学报,第 3 卷,第四期,1983.
- [4] 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. 环境科学,第 5 卷第 6 期,

- 1984。
- [5] 刘厚田, 郭世忠, 南淳熙等, 土壤中过量铜对水稻叶片光谱反射特性的影响。环境科学学报, 第4卷第4期, 1984。
- [6] 刘厚田, 郭世忠, 何长礼等, 土壤镉污染对水稻叶片光谱反射特性的影响。生态学报, 第6卷第2期, 1984。
- [7] Jackson, R. D., Slater, P. N., and Pinter, P. J. Discrimination of growth and Water stress in wheat by Various Vegetation indices through clear and turbid atmospheres, Remote sensing of Environment 13. 187—208, 1983.

## Effects of Cadmium and Copper in Soil on Spectral Reflectance of Rice

Tian Guoliang Bao Peili Li Jianjun

(*Institute of Remote Sensing Application, Academia Sinica*)

Liu Houtian Zhang Weping Shen Yingwa

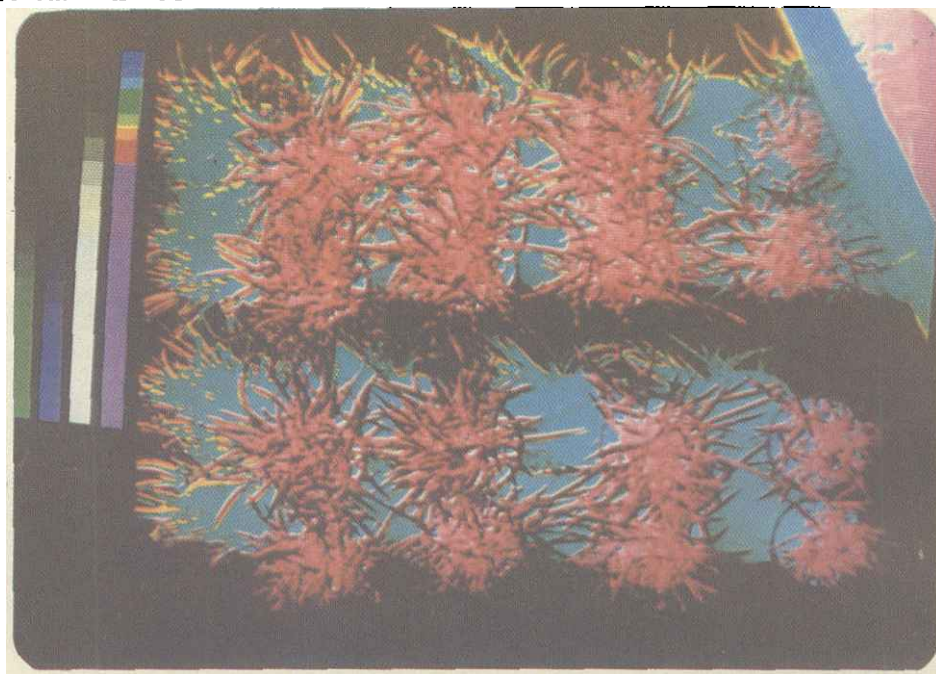
(*Chinese Research Academy of Environment Science*)

### Abstract

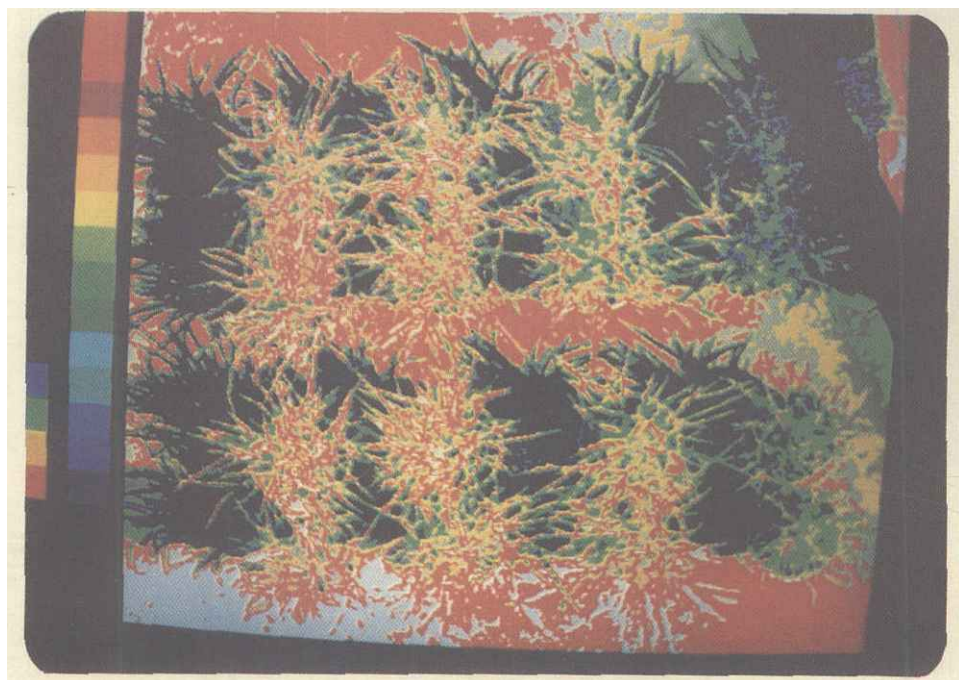
In this paper, spectral reflectance of stressed rice by cadmium and copper in soil was discussed. A high resolution spectroradiometer was employed to measure spectral reflectance of polluted rice at natural condition. It was closer to actual state than that of measurement of leaves in laboratory. It was also suitable to analysis with remotely sensed image.

The results indicated that effects of cadmium and copper in soil on physiological properties and spectral reflectance of rice were the most significant at tillering stage. Optimum time for monitoring polluted rice by heavy metal was tillering stage, and effective bands were 0.54—0.58, 0.64—0.69, 0.74—0.80 micrometers. Analysis methods for spectral reflectance of rice, such as wave shape analysis, differential spectra, greenness indices and principal component analysis etc., were discussed. It stated that these methods were more effective for monitoring polluted rice by high concentration of cadmium and copper, and not significant to lower concentration.

**Key words** spectral reflectance pollution rice



(a)



(b)

图2 镉和铜处理的水稻在分蘖期假彩色合成和红外波段密度分割图像