

土壤镉污染对水稻叶片 光谱反射特性的影响

刘厚田 张维平 于亚平

(中国环境科学研究院)

郭世忠 田国良 汪水花

(中国科学院遥感应用研究所)

何长礼 南淳熙 董克虞

(北京市农林科学院农业环境保护研究所)

摘 要

水稻移栽于添加不同量镉(50、100、200和400 ppm)的土壤上,叶片反射光谱特性发生变化;可见光区反射率增加,其中550—680nm波段反射率的增加更突出;反射光谱的一次微分图和二次微分图上叶绿素吸收边缘明显蓝移。这些变化以分蘖期最为显著。镉害水稻可见光区反射特性的变化与叶片中叶绿素含量的降低相一致。初步确定几个波段可用于区分镉毒害的和正常的水稻的光谱反射特性。

本世纪六十年代起,人们开始利用遥感研究植被,集中于森林保护、农作物估产和探矿等方面。七十年代以来,在上述工作的基础上,开始探讨利用遥感监测植被伤害。1978年2月在美国西雅图曾由国际摄影测量协会召集了一个题为“植被伤害遥感评价”会议(Murtha, 1978),会议宣读的论文内容包括植被伤害遥感评价的理论、技术、基础研究和实际应用,标志着植被伤害遥感已开始成为一门独立的理论和技术。

环境污染对植物光谱反射特性的影响是应用遥感技术监测植被污染的基础。这方面的工作散见于大气污染(SO_2 (Williams, 1978)、 O_3 (Gausman *et al.*, 1978)等)和土壤重金属污染的影响上。关于重金属的影响,Horler等(1980)的论文中有较全面的评述。

我们从1981年起研究环境污染对植物光谱反射特性的影响,已经报道了 SO_2 (刘厚田等, 1983)和铜 (刘厚田等, 1984)的研究结果,本文报道土壤镉污染对水稻光谱反射特性的影响。

一、材料和方法

试验材料为“越富”品种梗稻。湿润育秧,5月2日播种。

试验用菜园土,土壤有机质含量为2.5—3%,pH 7.8—8.2,镉本底值平均为0.18毫克/公斤。栽培试验容器为陶制上釉圆筒盆,高27厘米,直径27厘米。每盆装土13公斤。过筛土

壤, 准确加入一定量的 CdCl_2 , 用拌土机充分摇匀, 使成所需镉处理的土壤。

试验设 5 种土壤处理, 加入镉量分别为: 0 (对照)、50、100、200 和 400 ppm. 每种处理 3 次重复, 每个重复为 5 盆。

6 月 8 日插秧。秧苗处于四叶一心期。每盆 5 穴, 每穴 2 株。

对各处理植株的生长发育状况进行观察和测定, 包括株高、分蘖数、叶片数和产量构成分析 (穗数、粒数和粒重)。

于分蘖期、拔节孕穗期、抽穗扬花期和灌浆期采取功能叶片测定光谱反射特性和色素含量, 测定方法同以前的报道 (刘厚田等, 1984)。

测定光谱反射特性的同时, 测定土壤不同层次的镉含量, 以及植物体各部分的镉含量。镉的定量采用原子吸收分光光度法。

二、结 果

1. 镉对水稻生长发育的影响

我们对镉处理的水稻的生长发育状况进行了系统的全面的观察和测定, 取得了大量数据。观测的项目包括: 株高增长、分蘖数消长、叶片生长速度、叶片光合作用强度、叶片的叶绿素含量、每株粒数和千粒重等。这些观测资料的分析结果拟专文报道。本文只就与光谱反射特性的研究有较密切关系部分作简略叙述。从各时期植物体内镉含量的测定结果中选择收获期的数据列于表 1。由表 1 可见, 植物体内的镉含量随土壤中镉的增加而增加。镉在水稻体内的分布以根部最多, 茎叶内其次, 籽粒中最少。

表 1 水稻收获时体内镉的分布
table 1 the distribution of Cd in rice plants at harvest

土壤加入镉量 ppm	植物含镉量 (毫克/公斤干重)		
	根	茎叶	籽粒
0	1.1	0.3	0.2
50	745.5	11.1	1.2
100	699.6	24.2	2.2
200	1,028.9	39.2	3.3
400	1,597.1	48.4	3.8

镉处理的水稻在镉剂量加大时植株生长受到阻抑: 植株较矮; 分蘖少或无, 高镉量处理的个别植株死亡; 植株缺绿发黄; 发育延缓, 成熟期推迟。这些症状随着土壤镉含量的增加而加重。镉毒害症状以分蘖期表现最为严重。分蘖期之后, 受害植株的生长逐渐恢复正常。

以前的研究结果表明, 作物生育初期加入土壤的镉到后期已大部分被土壤固定为难溶状态。进入植物体的镉也难于移动。因此较晚形成的器官中镉含量相对较低, 从而受害较轻或趋于正常。

镉毒害的水稻的产量, 包括生物学产量 (以地上部分的干重为代表) 和经济产量 (籽粒重), 都有所降低。土壤含镉量越大, 减产越多。

2. 镉对水稻光谱反射特性的影响

图 1、图 2、图 3 和图 4 分别是水稻分蘖期、拔节孕穗期、抽穗扬花期和灌浆期各处理植株叶片的光谱反射率曲线的比较。

水稻光谱反射率曲线的总趋势与一般绿色植物相似, 即: 在测量的 350—850 nm 波长范

围内, 550nm附近有个反射峰, 680nm附近有个反射谷, 700nm以上部分的反射率很高。镉毒害植株叶片的光谱反射特性发生了一定变化。

在分蘖期受害植株光谱反射率曲线(图1)的变化表现在: 350—680nm波长范围内(即可见光区)的反射率普遍增高, 而以550—680nm波长范围的反射率增高较多。在大于

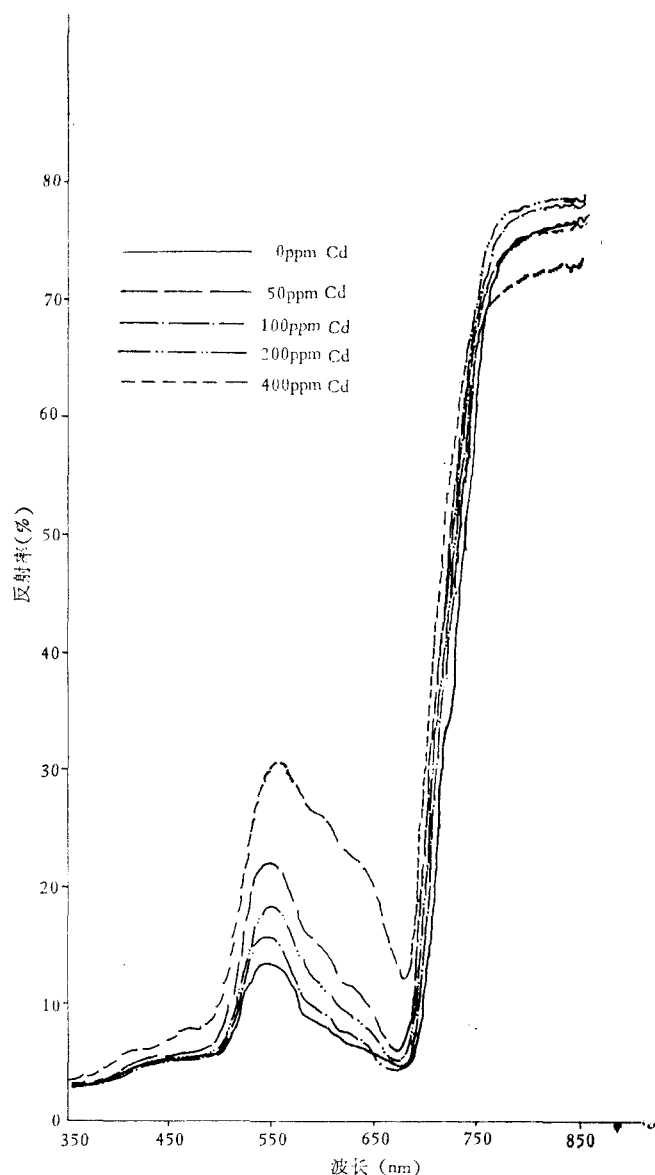


图1 土壤镉处理的水稻植株分蘖期光谱反射率的变化
fig. 1 the change of spectral reflectance of rice plants Cd-treated in soil at the tillering stage

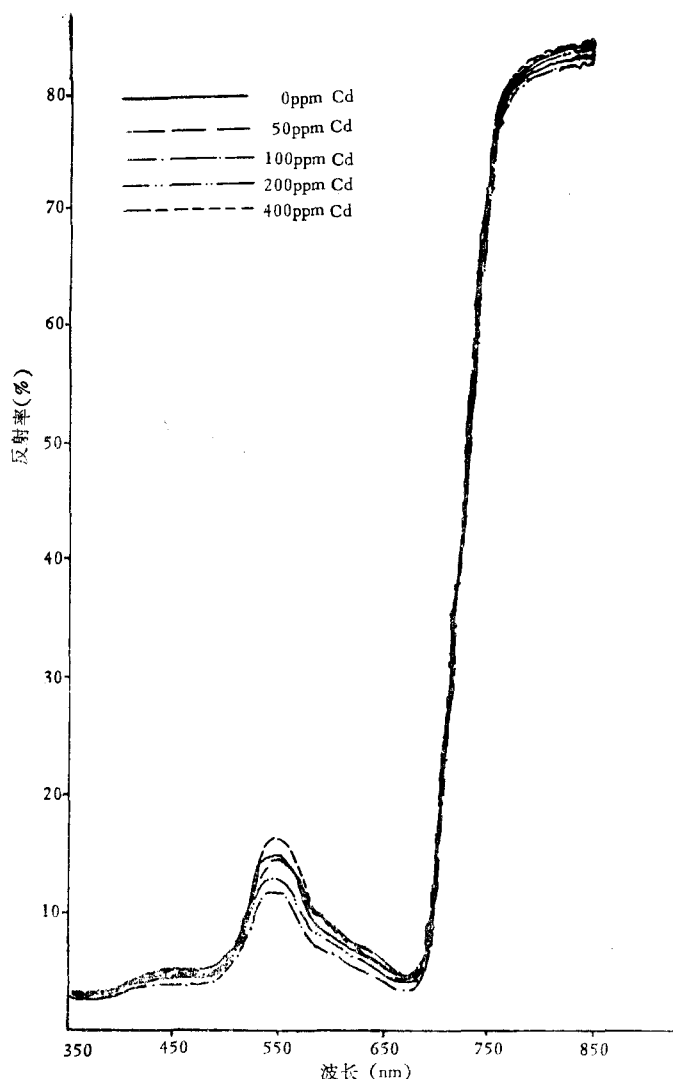


图2 镉土壤处理的水稻植株拔节孕穗期光谱反射率的变化
fig.2 the change of spectral reflectance of rice plants Cd-treated in soil at the jointing and boot stage

700nm 的近红外区, 镉处理植株的反射率变化不大, 只在高镉量处理的植株上这部分的反射率略有降低。

在拔节孕穗期(图2)和抽穗扬花期(图3)镉处理植株的光谱反射率与正常植株比较无变化, 曲线基本重合。

灌浆期光谱反射率变化的情况(图4)比较复杂。在可见光区, 低镉量(50、100ppm)处理植株的反射率较对照高, 而高镉量(200、400ppm)处理的植株的反射率却比对照低。

鉴于分蘖期镉对水稻毒害效应最显著, 我们重点介绍此时期光谱反射率曲线和微分

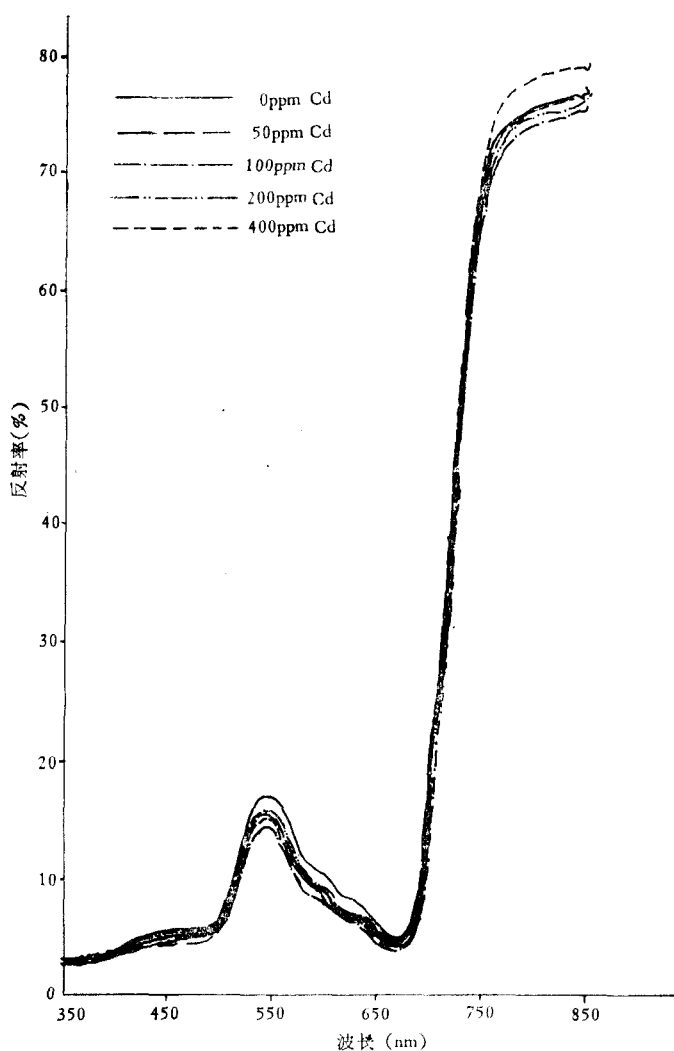


图3 镉土壤处理的水稻植株抽穗扬花期光谱反射率的变化
 fin. 3 the change of spectral reflectance of rice plants Cd-treated in soil at the heading and flowering stage

析, 以便进一步认识镉引起的光谱反射特性的变化。为清晰起见, 光谱反射率曲线微分图上只绘出最高镉量(400ppm)处理的曲线与对照曲线的比较。

图5是植株光谱反射率曲线的一次微分图。可以清楚地看到, 镉害植株反射率曲线的一次微分曲线在690—720nm波段(即曲线斜率变化最大的区域)有明显蓝移(10—30nm)。

从图6可见, 镉处理植株的光谱反射率二次微分曲线也出现蓝移现象。在680—690nm波段的极大值有小的蓝移; 在700—740nm波段的极小值有较大蓝移(最大达44nm)。

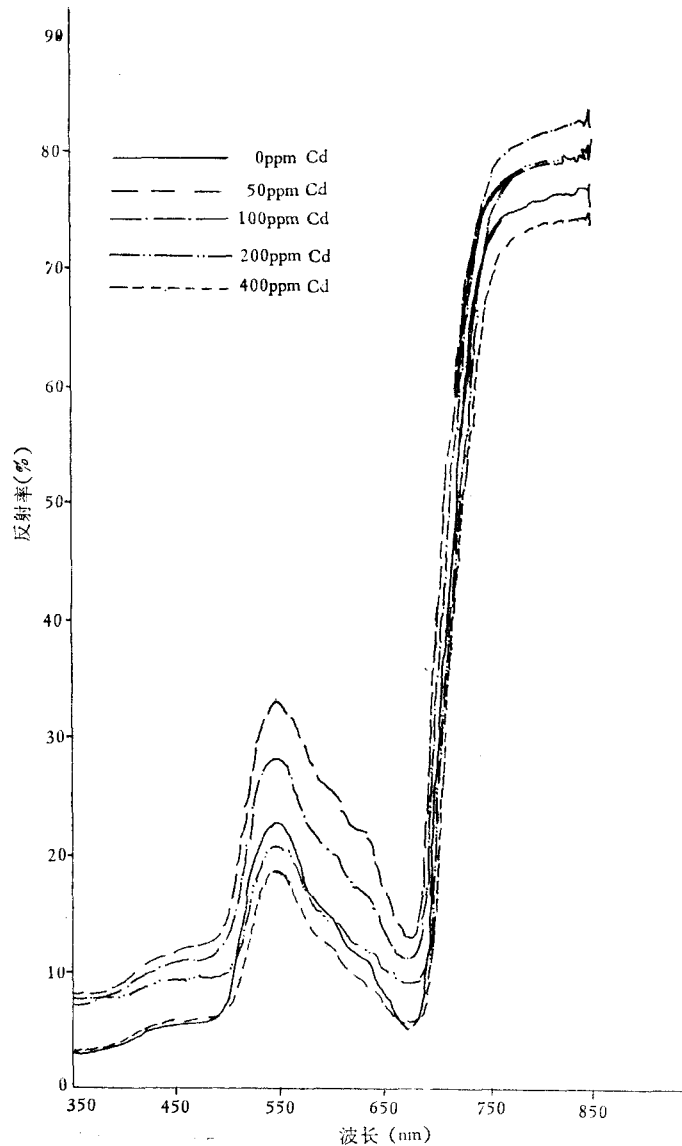


图4 镉土壤处理的水稻植株灌浆期光谱反射率的变化
Fig.4 the change of spectral reflectance of rice plants Cd-treated in soil at the milking stage

3. 镉对水稻叶片色素含量的影响

为了分析镉引起植株叶片光谱反射特性变化的原因,我们系统地测定了不同镉处理植株叶片的色素含量,包括叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素(表2)。结果表明,在分蘖期镉引起叶片色素含量的变化最为明显。在这时期,镉处理植株的叶绿素含量下降,其中叶绿素b含

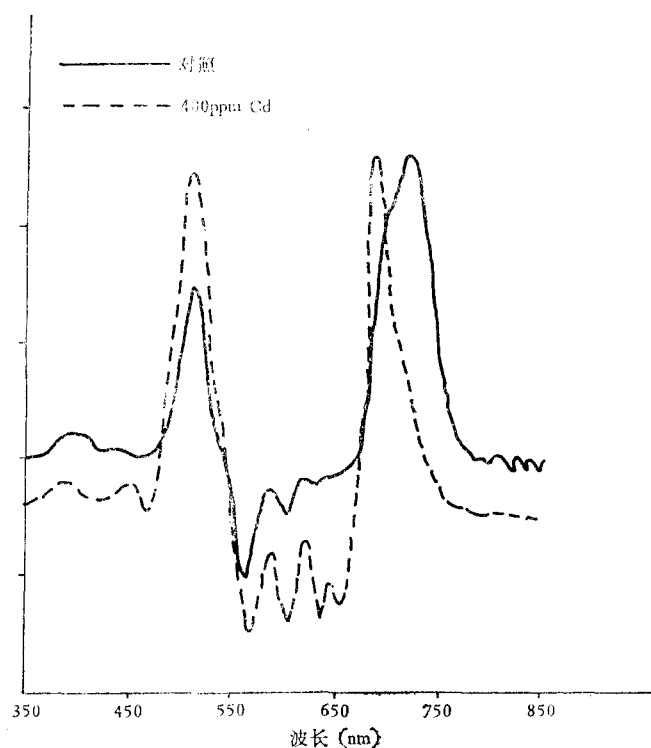


图5 水稻分蘖期叶片反射的一次微分光谱
Fig.5 the first-derivative spectra reflectance of leaves at stillering stage

量降低的比例大于叶绿素a。类胡萝卜素的含量与对照接近。

从植株各部分生长的调查和镉含量分析可知，叶绿素含量的下降是整体受高浓度镉为害的表现，主要是根部镉中毒的结果，当然也有叶内较高含量的镉对叶绿素合成和破坏的直接影响。

在拔节孕穗期和抽穗扬花期，镉处理植株的叶绿素含量与对照相近。这一结果，与此时期光谱反射率无变化相一致。

在灌浆期，镉处理植株的叶绿素含量都高于对照。这是因为正常植株（对照）此时叶绿素含量减少，而镉处理植株贪青的结果。

至于类胡萝卜素的含量，总的看来镉污染植株的含量与对照相近。说明镉对水稻的毒害并不表现在类胡萝卜素的含量上。

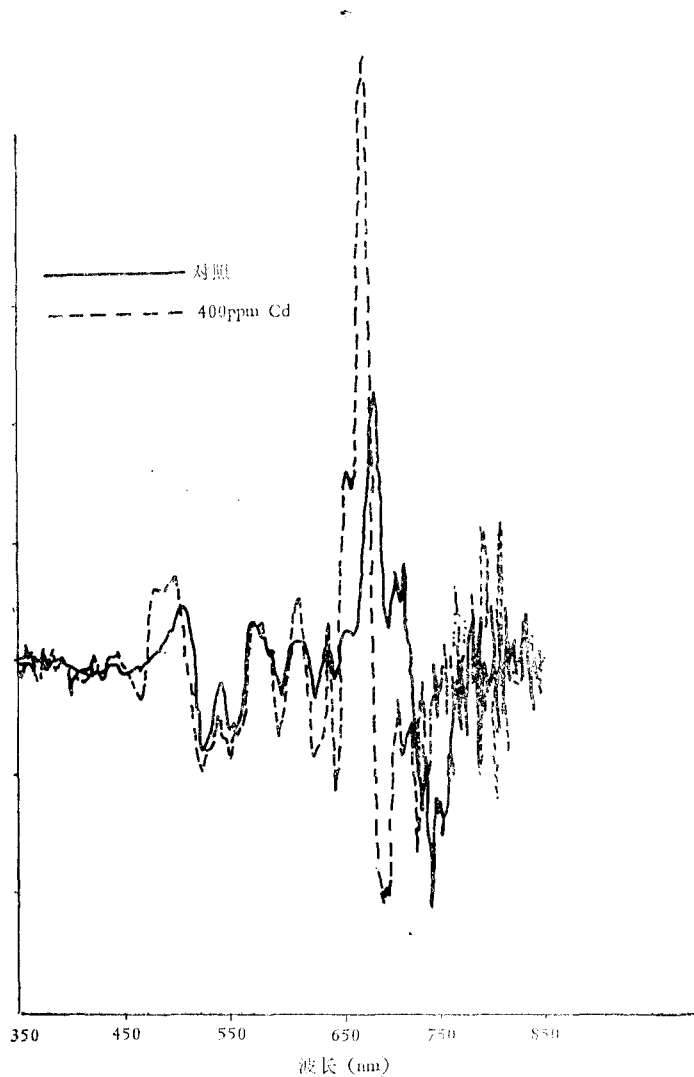


图 6 水稻分蘖期叶片反射的二次微分光谱
fig.6 the second derivative spectral reflectance of rice leaves at tillering stage

三、讨 论

从不同量镉土壤处理下的水稻叶片光谱反射特性的测定和分析可以看出：在分蘖期镉引起光谱反射特性的变化最为显著；从拔节孕穗期到抽穗扬花期镉处理植株的光谱反射特性与对照植株无差异；灌浆期由于镉处理植株贪青，光谱反射特性变化出现复杂情况，这可能是镉作用于生育前期（特别是分蘖期）的后果。总之对移栽水稻来说，镉害植株与正常植株光谱

表 2 水稻叶内色素含量 (毫克/克鲜重)
table 2 The content of pigments in rice leaves (mg/g.f.w)

生 育 期	色 素	镉 处 理 (ppm)				
		0	50	100	200	400
分 蘖 期	叶绿素a	1.56	1.36	1.25	1.06	0.91
	叶绿素b	0.69	0.77	0.56	0.42	0.34
	类胡萝卜素	0.44	0.35	0.40	0.42	0.41
拔 节 孕 穗 期	叶绿素a	1.23	1.42	1.47	1.24	1.57
	叶绿素b	0.48	0.51	0.61	0.44	0.60
	类胡萝卜素	0.44	0.51	0.52	0.48	0.60
抽 穗 扬 花 期	叶绿素a	0.94	0.85	1.07	0.96	1.07
	叶绿素b	0.34	0.30	0.41	0.35	0.39
	类胡萝卜素	0.34	0.31	0.39	0.35	0.39
灌 浆 期	叶绿素a	0.35	0.47	0.77	0.94	0.93
	叶绿素b	0.11	0.13	0.23	0.25	0.27
	类胡萝卜素	0.23	0.28	0.39	0.43	0.36

反射特性差异最显著的时期是分蘖期。

在分蘖期镉害植株叶片光谱反射特性变化的特点是：可见光区反射率增加，特别是550—680nm波段反射率增加最为突出；反射光谱的一次微分曲线在690—720nm波段内出现较大蓝移；二次微分曲线上的极小值（700nm附近）有较大蓝移。因此可以将550—680nm, 690—720nm和700—740nm做为区分镉害植株和正常植株光谱反射特性的特征波段。

镉害植株光谱反射特性的变化是与叶绿素含量的降低相平行的。镉对植物的毒害之一是妨碍叶绿素的合成和促进叶绿素的降解(Ernst,1980),这都会导致叶绿素含量的下降。叶绿素含量的变化直接影响叶子对光的吸收和反射。这就是镉使叶片光谱反射特性发生变化的主要原因。此外，了解叶片的含镉量和镉在叶片中存在的状态；以及镉在土壤中的转化，特别是活性镉的变化；对理解镉对叶绿素组成和数量的变化，进而对光谱反射特性的影响，是有意义的。

将我们已经报道的SO₂ (刘厚田等, 1983) 和铜 (刘厚田等, 1984)，以及本文报道的镉对植物光谱反射特性影响的研究综合起来，可以看出不同胁迫 (stress) 因子对植物光谱反射特性影响的共同点是：可见光部分反射率增高；近红外部分反射率降低；反射光谱蓝移，特别是曲线的陡坎(slope)部分(680—740nm波段，即叶绿素吸收带红区边缘)向短波光方向位移。

Horler *et al.* (1980)曾做了概括：在盐碱、干旱、营养缺乏、病害、衰老和矿化土壤等

条件下, 植被可见光区反射率高于正常植被。这种效应是一个共同的非特异性的对胁迫的响应。可见光区反射率的增高总是与外观缺绿相联系, 可能是由于叶绿素分解和不能合成引起的。Collins *et al.* (1978) 指出, 受胁迫的植物的反射光谱出现叶绿素吸收边缘向光谱蓝端的位移。

我们的研究与上述的结论基本一致。但是从我们的结果可以初步看出, 植物光谱反射特性变化因胁迫因子的不同和植物种的不同而有所差异。 SO_2 急性伤害引起棉花叶片可见光区反射率普遍增加和 700—850nm 波段近红外部分的反射率显著降低。长期铜土壤处理引起水稻可见光部分的 550—680nm 波段反射率显著增加和 700—850nm 波段反射率下降。镉长期土壤处理引起 550—680nm 波段反射率显著增加, 而 700—850nm 近红外波段的反射率变化不大。从反射光谱蓝移也可看出三者的差异。 SO_2 引起棉叶的叶绿素蓝吸收边缘和红吸收边缘的蓝移。铜引起稻叶蓝吸收边缘小的蓝移和红吸收边缘大的蓝移。镉只引起稻叶红吸收边缘的蓝移。从三者的一次微分光谱上峰值的位置和二次微分光谱上极大值和极小值的位置也可看出它们之间的差异。

总而言之, 环境污染对植物的损伤基本上可归纳为形态损伤和生理损伤, 多数情况下是二者兼而有之。损伤的影响之一是植物光谱特性的变化。形态损伤可以在反射光谱的近红外部分反映出来。生理损伤包括叶绿素合成受抑制和叶绿素分子的破坏, 结果是叶绿素含量降低, 导致反射光谱的可见光部分出现变化。从光谱反射率曲线的变化样式 (Pattern) 有可能确定植物的功能变化, 进而可以判断胁迫因子。当然, 要弄清光谱反射样式的变化——植物功能的损伤——外界胁迫因子的作用之间的相关关系还需要做大量的基础研究。

四、结 论

1. 镉对土壤污染引起移栽水稻光谱反射特性变化的最显著时期是分蘖期。换言之, 分蘖期是区别镉毒害植株和正常植株的光谱反射特性的最佳时期。

2. 受镉毒害的水稻分蘖期叶片光谱反射特性的变化是: 在可见光区, 特别是 550—680 nm 部分, 反射率增加; 反射光谱的一次微分图和二次微分图的 700nm 左右区域发生显著蓝移。因此, 下列波段适于区分镉毒害的和正常的水稻光谱反射特性: 550—680nm; 690—720nm; 以及 700—740nm。

3. 受镉毒害的植株光谱反射率的变化与土壤镉含量、植物体内镉含量和作物产量降低的趋势相一致。因此, 有可能通过对这些因子的相关分析, 把光谱反射特性的变化用于镉污染的监测和镉对作物产量影响的估价。

4. 镉害水稻植株的光谱反射特性的变化与叶片叶绿素含量的降低相平行。镉对水稻光谱反射特性的影响可能主要是通过降低体内叶绿素含量来起作用的。

5. 作为植物对不同胁迫因子响应的光谱反射特性变化有类似的样式, 但也有一定差异。为了找出特定植物种对特定的胁迫响应的光谱反射特异性, 尚需进行一系列的基础研究。

参 考 文 献

- 刘厚田等 1983 二氧化硫对棉花叶片光谱反射特性的影响。环境科学学报 3 (4):329—334.
- 刘厚田等 1984 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 4 (4):350—359.
- Collins, W. 1978 Remote sensing of crop type and maturity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 44(1):43—55.
- Ernst, W.H.O. 1980 Biochemical aspects of cadmium in plants. In: Cadmium in the Environment. Part I: Ecological Cycling, Ed. by Jerome O. Nriagu, John Wiley and Sons, Inc., New York 639—653.
- Gausman, H.W. et.al. 1978 Ozone damage detection in cantaloupe plants. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 44(4):481—485.
- Horler, D.N.H. et.al. 1980 Effects of heavy metals on the absorbance and reflectance spectra of plants. *Int. J. Remote Sensing* 1(2):121—136.
- Murtha, P.A. 1978 Remote sensing and vegetation damage: A theory for detection and assessment. Remote Sensing for Vegetation Damage Assessment. American Society of Photogrammetry 19—50.
- Williams, D.R. 1978 Application of remote sensing to vegetation injury caused by air pollution. Remote Sensing for Vegetation Damage Assessment. American Society of Photogrammetry 529—543.

EFFECTS OF CADMIUM CONTAMINATION IN SOIL ON PROPERTIES OF SPECTRAL REFLECTION OF RICE LEAVES

Liu Houtian Zhang Weiping Yu Yaping

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences)

Guo Shizhong Tian Guoling Wang Shuihua

(Institute of Remote Sensing Application, Academia Sinica)

He Changli Nan Chunxi Dong Keiyu

*(Institute of Agro-environmental Protection, Beijing Academy of Agricultural
and Forestry Sciences)*

Rice seedlings were planted on the soil treated with different amount of cadmium as CdCl_2 . There were five cadmium treatments in this study, i.e. O (control), 50, 100, 200 and 400 ppm of Cd. The growth and development of the treated plants were inhibited and their spectral reflection properties were changed. In the visible region of spectrum, the reflectance increased, among which in the 500—680 nm waveband, the increase of reflectance was remarkable. The first- and second—spectra showed a chlorophyll absorption edge shift toward the blue end of spectrum in the stressed rice plants. The results at visible wavelengths were consistent with lower chlorophyll concentration in the leaves of treated plants than the control. The most remarkable changes occur in the tillering stage of rice. Some wavebands may be used to distinguish the spectral reflection between normal and Cd-treated rice plants. This paper also gives a brief discussion about the specificity of spectral reflection as the responses of stressed plants to different pollutants.