

## 利用大豆光谱特征判定地下封存 CO<sub>2</sub> 泄漏

蒋金豹<sup>1</sup>, Michael D Steven<sup>2</sup>, 何汝艳<sup>1</sup>, 蔡庆空<sup>1</sup>, 陈云浩<sup>3\*</sup>, 徐 谨<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)地测学院, 北京 100083; 2. School of Geography, University of Nottingham, Nottingham, NG7 2RD;  
3. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

**摘要:** 碳捕捉与储存 (carbon capture and storage, CCS) 技术可以减少 CO<sub>2</sub> 气体排放, 从而减缓全球气候变暖。但把 CO<sub>2</sub> 液化后进行地质封存具有泄漏的风险, 如何大面积、快速、高效地监测 CO<sub>2</sub> 泄漏点是一个技术难题。该文通过野外模拟试验, 以大豆为试验对象, 研究了地下储存的 CO<sub>2</sub> 轻微泄漏对地表植被及其遥感特征的影响。大豆在 2008 年 6 月 4 日播种, 自 7 月 4 日开始 CO<sub>2</sub> 气体以 1 L/min 的速度持续注入土壤中, 每天测量土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数 (土壤中 CO<sub>2</sub> 气体占土壤中总气体体积分数的百分比)、每周测量 1 次大豆叶片的 SPAD 值、光谱数据。试验结果表明, 当土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数小于 15% 时, 对照 (CK) 与 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫大豆 SPAD 值无显著性差异 ( $P > 0.1$ ), 当土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数大于等于 15% 时, CK 与 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫大豆 SPAD 值具有极显著性差异 ( $P < 0.001$ ), 随着胁迫进行大豆会早熟、落叶, 甚至枯死。利用连续统去除法对大豆的光谱数据进行处理, 发现随着土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数的增大, 在绿光区的光谱反射率逐渐增大, 而其他波段则无明显变化规律。根据 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫下大豆的光谱变化特征, 设计采用面积植被指数  $Area_{(510\sim590\text{nm})}$  (510~590 nm 光谱曲线所包围的面积) 识别遭受 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫的大豆。结果表明, 当土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数大于等于 15% 时,  $Area_{(510\sim590\text{nm})}$  指数可以较好地识别出遭受胁迫的大豆, 且具有较高的可区分性及稳定性, 但当土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数小于 15% 时, 该指数在整个生育期内无法准确识别出遭受胁迫的大豆。该研究结果对未来地表生态评估、高光谱遥感监测 CO<sub>2</sub> 泄漏点具有重要意义与应用价值。

**关键词:** 光谱分析, 叶绿素, 模型, CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫, 大豆

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.12.021

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-12-0163-07

蒋金豹, Michael D Steven, 何汝艳, 等. 利用大豆光谱特征判定地下封存 CO<sub>2</sub> 泄漏[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 163—169.

Jiang Jinbao, Michael D Steven, He Ruyan, et al. Judgment of CO<sub>2</sub> leaking in underground storage using spectral characteristics of soybean[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 163—169. (in Chinese with English abstract)

### 0 引言

随着全球气候变暖, 人们对温室气体的排放问题愈来愈关注。由于人类大规模使用化石燃料, 大气中 CO<sub>2</sub> 的体积分数从工业革命前的 280 逐步上升到现在的 384, 每年平均升幅达到 1.9%<sup>[1]</sup>。Carbon capture and storage (CCS) 技术可以作为一个有效的措施减少 CO<sub>2</sub> 气体的排放<sup>[2]</sup>。但是把 CO<sub>2</sub> 液化后进行地质储存具有泄漏的风险, 地下储存的 CO<sub>2</sub> 泄漏

后会对地表的植被、生态、环境造成影响<sup>[3-8]</sup>。为了确保地下储存 CO<sub>2</sub> 的安全, 需要研究一种有效的方法能够在储存区上方监测 CO<sub>2</sub> 的泄漏信息<sup>[9]</sup>。

地下储存的 CO<sub>2</sub> 泄漏进入地表会降低土壤中 O<sub>2</sub> 的体积分数, 从而抑制地表植物的正常生长或发育, 且扰乱植物的呼吸以及造成土壤水酸化<sup>[10-11]</sup>。高光谱遥感具有区分地物诊断性光谱特征的能力<sup>[12]</sup>, 黄木易等研究了小麦在条锈病胁迫下的光谱特征及识别方法<sup>[13]</sup>, 刘美玲等<sup>[14]</sup>、关丽等<sup>[15]</sup>分别研究了水稻在镉、镉污染胁迫下的光谱特征, 为利用高光谱遥感监测重金属污染提供参考依据, 而地下储存的 CO<sub>2</sub> 泄漏也会影响地表植物的正常生长及其遥感特征。Patil 等<sup>[16]</sup>发现草地在 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫下具有明显的胁迫症状且生物量与健康草地相比显著降低。Al-Traboulsi 等<sup>[17]</sup>研究发现在 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫下大豆发芽率、植株的茎叶干重、叶面积以及产量下降约 36%~65%。Jiang 等<sup>[18]</sup>研究了 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫下的甜菜含水量, 发现比值指数  $R_{1100}/R_{1300}$  可以较好地反

收稿日期: 2012-11-13 修订日期: 2013-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41101397); 教育部博士点基金项目 (20100023120007); 国土资源部地学空间信息技术重点实验室开放基金 (KLGSIIT2013-05); 北京市大学生创新计划项目 (J121203) 联合资助。

作者简介: 蒋金豹 (1978—), 男, 安徽砀山人, 副教授, 博士, 研究方向为高光谱遥感在农业及环境监测中的应用。北京 中国矿业大学 (北京) 地测学院, 100083。Email: ahdjsjb@126.com

\*通信作者: 陈云浩 (1974—), 男, 教授, 博士生导师。研究方向为热环境遥感与灾害遥感。北京北京师范大学资源学院, 100875。

Email: cyh@bnu.edu.cn

演其叶片含水量。Noomen 等<sup>[19]</sup>研究表明在不同 CO<sub>2</sub> 体积分数胁迫下, 玉米的 REP (red edge position)、YEP (yellow edge position) 及 REP-YEP 具有明显的变化。陈云浩等<sup>[20]</sup>研究结果表明可以利用 R<sub>550</sub>/R<sub>680</sub> 识别健康与 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫的甜菜。Smith 等<sup>[21]</sup>研究了多种植被在天然气泄漏下的光谱特征, 发现 725 与 702 nm 处的一阶微分比值指数能够较好地识别健康与胁迫植被。Keith 等<sup>[22]</sup>发现在 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫下植物的光谱在 650~750 nm 出现明显的变化。Noomen 等<sup>[23]</sup>发现在天然气泄漏源 0.5 m 范围内的植物光谱特征都会发生变化。植被在气体泄漏胁迫下, 地表植被生长发育会受到影响, 其光谱特征也会发生变化, 因此以地表植物作为指示剂, 利用高光谱遥感能够监测地下储存 CO<sub>2</sub> 泄漏点。但目前相关研究主要利用少数几个波段信息, 用其构建的识别模型普适性较差。本文通过野外试验, 实测 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫下大豆的光谱数据, 分析在 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫下其遥感特征的变化规律, 为利用高光谱遥感监测地下储存 CO<sub>2</sub> 泄漏点提供理论依据与方法支持。

## 1 试验与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2008 年 5—8 月在英国诺丁汉大学 Sutton Bonington 校区 (52.8°N, 1.2°W) 完成。诺丁汉大学建立了人工土壤气及响应探测装置, 可以定量控制注入土壤中 CO<sub>2</sub> 的量, 以便模拟研究地下储存的 CO<sub>2</sub> 泄漏进入土壤对地表生态的定性定量影响。试验共设 8 个 2.5 m×2.5 m 小区, 每个小区之间间隔为 0.5 m, 其中 4 个为对照区, 4 个为 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫区。

以大豆 (*Vicia faba cv Clipper*) 为试验对象, 该豆类属于生长期较短的植物, 在英国适合 3—7 月进行野外播种, 约 10~12 周成熟。所有试验小区均在人工翻地后于 2008 年 6 月 4 日进行播种, 其行距为 30 cm, 株距为 23 cm, 每个试验小区约播种 80 株。

### 1.2 地下储存 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫及土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数测量

在每个 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫试验小区均安装 CO<sub>2</sub> 泄漏管道, 其泄漏口位于试验小区中央 60 cm 深处, 通过计算机控制 CO<sub>2</sub> 的泄漏量, 对于通气良好的土壤气体成分与外部气体成分基本一致。本次试验通气时间为 2008 年 7 月 4 日, CO<sub>2</sub> (British Oxygen Company, Windleham, UK) 气体以 1 L/min 的速度 24 h 不间断地泄漏进入土壤, 该速度可以确保在试验小区中心区表层土壤气体中 CO<sub>2</sub> 体积分数始终

大于 45%。在每个 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫试验小区离中心点 15 cm 与 70 cm 处分别插入土壤 2 根长 1 m、内径 19 mm 的塑料管, 插入深度为 30 cm, 管道插入土壤部分周围钻一些小孔, 以便周围土壤中气体进入管道, 管道顶端安装一个气阀, 利用气体成分测量仪器测量管道处土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数, 最后通过空间差分方式获取土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数的空间分布图。

### 1.3 试验样本采集

所有样本均沿着试验小区对角线从西北到东南方向进行采集, 每个小区分成边缘、中间及中心区域 (如图 1 所示)。根据 Al-Traboulsi<sup>[17]</sup>测量结果, 边缘区域土壤平均 CO<sub>2</sub> 体积分数小于 15%, 中间区域土壤平均 CO<sub>2</sub> 体积分数大于等于 15%~35%, 而中心区域土壤平均 CO<sub>2</sub> 体积分数大于 35%, 最高甚至大于 50%。在边缘与中间区域间有个空白区域没有进行采样, 主要原因是通气管道从小区的北边缘斜着插入地下, 致使土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数并不完全呈同心圆分布, 导致在空白区的西北部与东南部的土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数差异较大, 所以没有采样。每次采样在每个区域均采集 1 个叶片样本, 每个小区共采集 5 个样本 (边缘区 2 个, 中间区域 2 个, 中心区域 1 个), 4 个对照区共采集 20 个样本, 4 个胁迫区共采集 8 个边缘区样本、8 个中间区样本、4 个中心区样本, 每周采样 1 次, 共采样 6 次。

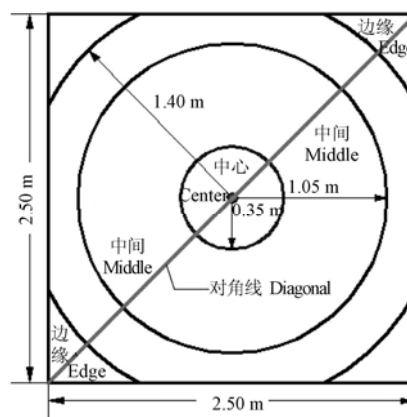


图 1 野外采样点空间分布图

Fig.1 Distribution map of collecting sample points in fields

### 1.4 叶片光谱测量

大豆叶片光谱测量采用美国 ASD Fieldspec FR spectroradiometer (ASD, Boulder, USA) 光谱仪进行测量, 在室内利用人工光源测量单叶光谱, 为了避免叶片的卷曲对光谱测量结果的影响, 每个叶片测量 4 次, 每次旋转叶片 90°, 每次旋转后测量 50 次, 每个叶片共测量 200 次, 取均值作为该叶片的光谱值。为防止底板对光谱的影响, 特把叶片放置在一块黑色粗糙的橡胶布上, 每测量叶片前都用

白板对光谱仪进行校正。

### 1.5 叶片 SPAD 值测量

测量过叶片光谱后立即用 SPAD (soil and plant analyzer development) 仪器测量大豆叶片 SPAD 值, 每个叶片选择 7~11 个点进行测量, 取其均值。

### 1.6 光谱预处理

首先采用 5 点平滑法对光谱数据进行平滑预处理<sup>[24]</sup>。连续统去除法 (continuum removal) 是一种有效增强感兴趣吸收特征的光谱分析方法, 可以把光谱值进行归一化处理, 使数据间具备可比性, 且其值也反映不同交换方式的光谱在吸收特征波段区间所携带的信息量差异<sup>[25]</sup>。对光谱进行连续统去除的方法参见文献<sup>[26]</sup>。本文利用自行编制的计算机程序进行相关计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 大豆在 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫下的症状

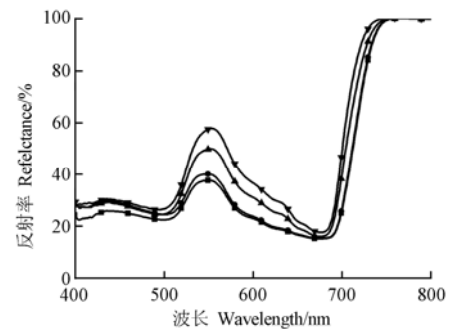
当 CO<sub>2</sub> 气体注入土壤 11 d 后, 中心区大豆叶片开始轻微变黄, 随着胁迫持续进行, 大豆叶片出现衰老、落叶甚至死亡。在整个生育期内边缘区域大豆长势与对照区无明显差异, 中间区域叶片轻微变黄, 长势与对照区相比有轻微的影响, 中心区域的中心位置由于土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数较高, 致使大豆逐渐枯死, 其他大豆在植株高度、叶片数量等与对照区相比也具有显著性差异。土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数中心区在空间上形成一个 0.5~1 m 直径的圆形区域, 在该区域内大豆具有明显的胁迫症状, 这与已有研究结果一致<sup>[27-28]</sup>。

通过实测大豆叶片 SPAD 值发现, 边缘区域 SPAD 值 ( $52.42 \pm 4.15$ ) 与对照区的大豆 SPAD 值 ( $52.58 \pm 4.00$ ) 没有显著区别 ( $p > 0.1$ ), 即当土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数小于 15% 时, 土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化并没有对大豆的生长发育造成显著性影响。但中间区域 SPAD 值 ( $37.93 \pm 4.84$ )、中心区域的大豆 SPAD 值 ( $27.88 \pm 4.59$ ) 与对照区大豆 SPAD 值相比具有显著性差异 ( $p < 0.001$ ), 说明当土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数大于 15% 时, 大豆的生长发育就会受到影响, 且土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数越高, 对植物生长发育影响越严重, 这与肉眼观察的结果一致。

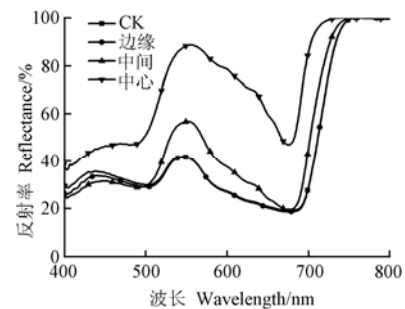
### 2.2 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫下大豆的光谱特征

经过平滑及连续统去除法处理后的大豆光谱 (如图 2 所示)。当 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫 11 d 后 (7 月 14 日), CK、边缘、中间及中心区域的大豆光谱在可见光波段就具有较为明显的差异, 见图 2a, 特别是以 550 nm 为中心的区域, 不同胁迫区域光谱的反射率具有下列关系: 中心 > 中间 > 边缘 > CK, 而在其他波段, 差异性并不明显。当 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫 25 d 后 (7 月 28 日), 在 550 nm 处不同胁迫

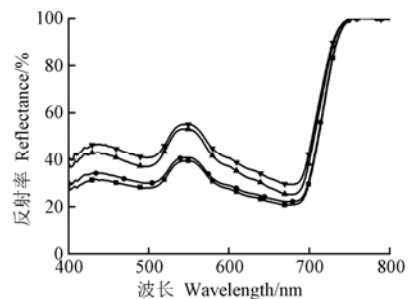
区域的光谱仍具有显著性差异, 见图 2b。当泄漏胁迫 46 d 后 (8 月 18 日), 大豆已经处于生育期的后期, 在 550 nm 处不同胁迫程度下大豆的光谱差异仍十分明显, 见图 2c, 且与胁迫 11 d 后的光谱特征一致。以上结果表明以 550 nm 为中心的可见光波段对大豆遭受 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫较为敏感, 且在整個生育期内该波段的规律性保持一致。尽管在试验中后期 1 450 与 1 930 nm 波段也有显著性差异, 但该波段的变化规律在整个生育期并不恒定, 且该波段处于水分吸收特征波段, 不利于航天遥感传感器所利用。



a. CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫 11 d  
a. 11<sup>th</sup> day of CO<sub>2</sub> leakage stress



b. CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫 25 d  
b. 25<sup>th</sup> day of CO<sub>2</sub> leakage stress



c. CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫 46 d  
c. 46<sup>th</sup> day of CO<sub>2</sub> leakage stress

注: 图中边缘代表土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数 < 15%; 中间代表 15% ≤ CO<sub>2</sub> 体积分数 ≤ 35%; 中心代表土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数 > 35%。下同。

Note: Edge region indicated soil CO<sub>2</sub> concentration < 15%; Middle region indicated 15% ≤ CO<sub>2</sub> concentration ≤ 35%; Core region indicated soil CO<sub>2</sub> concentration > 35%. The same below.

图 2 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫下大豆不同生育期连续统去除后的光谱曲线

Fig.2 Spectral features of bean under CO<sub>2</sub> leakage stress in different growth stages for Continuum removal processing

### 2.3 面积指数 $Area_{(510-590nm)}$ 的定义

通过上述分析可见,以 550 nm 为中心的可见光波段为  $CO_2$  泄漏胁迫下大豆的敏感波段,随着胁迫程度的增加,光谱反射率逐渐增加,且在整个生育期内规律一致。考虑到单波段光谱信息易受外界因素的影响稳定性较差,而在 510~590 nm 区间范围内反射率的大小均保持着中心 > 中间 > 边缘 > CK 的规律, (如图 2 所示)。因此 510~590 nm 区间范围内光谱曲线所包围的区域面积定义为面积指数 ( $Area_{(510-590nm)}$ ) (如图 3 所示),该指数包含多波段信息,比单波段光谱信息的稳定性好。

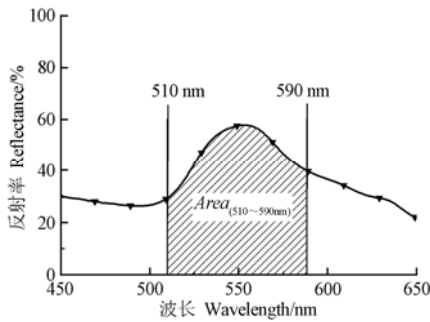


图 3 面积指数  $Area_{(510-590nm)}$  的定义  
Fig.3 Definition of  $Area_{(510-590nm)}$  index

### 2.4 $CO_2$ 泄漏胁迫下大豆的遥感识别模型构建

如图 4 所示,CK 与胁迫边缘区域大豆的  $Area_{(510-590nm)}$  指数值无显著性差异 ( $p > 0.05$ ),即该指数识别 CK 与边缘区域大豆的能力不足,也就是说当土壤中  $CO_2$  体积分数低于 15% 时,该指数无法通过地表大豆光谱特征变化有效识别泄漏区。CK 与胁迫中间区域大豆的  $Area_{(510-590nm)}$  指数具有极显著性差异 ( $p < 0.001$ ),因此当土壤中  $CO_2$  体积分数介于 15%~35% 时,该指数完全可以识别出遭受  $CO_2$  泄漏胁迫的大豆。对照区与胁迫中心区大豆的  $Area_{(510-590nm)}$  指数也具有极显著性差异 ( $p < 0.001$ ),同理,当土壤中  $CO_2$  体积分数大于 35% 时,  $Area_{(510-590nm)}$  指数也可以完全识别出遭受  $CO_2$  泄漏胁迫的大豆。

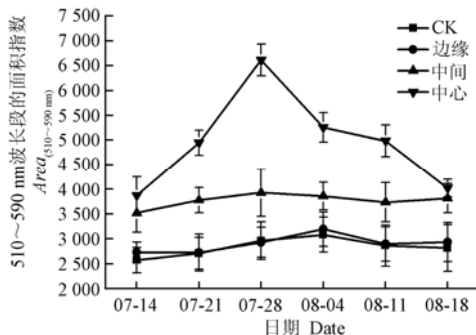


图 4  $Area_{(510-590nm)}$  指数识别不同  $CO_2$  泄漏胁迫程度的大豆  
Fig.4 Identification bean under different  $CO_2$  leakage stressed level by using  $Area_{(510-590nm)}$  index

### 2.5 面积指数 $Area_{(510-590nm)}$ 与叶片 SPAD 值之间的关系

如图 5 所示,  $Area_{(510-590nm)}$  指数与大豆叶片 SPAD 值具有极显著负相关关系,随着  $Area_{(510-590nm)}$  指数的增大,SPAD 值逐渐减小。与图 2 所示结果一致,当大豆处于无胁迫状态时,连续统去除后的光谱反射率在绿光区较低,而遭受胁迫的大豆光谱反射率却比较大。

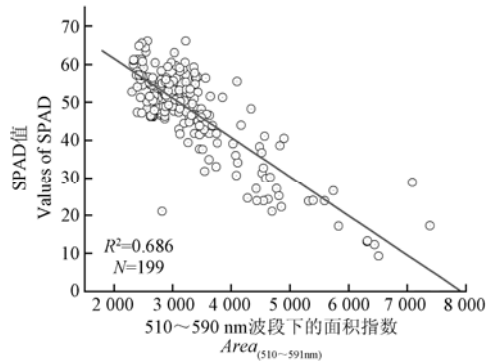


图 5  $Area_{(510-590nm)}$  指数与 SPAD 值之间的关系  
Fig.5 Correlation between  $Area_{(510-590nm)}$  indices and SPAD values

### 2.6 面积指数 $Area_{(510-590nm)}$ 的敏感度分析

通过计算不同  $CO_2$  泄漏胁迫程度下大豆  $Area_{(510-590nm)}$  指数之间的 J-M 距离,可以判别该指数识别不同胁迫程度大豆的能力。由于 J-M 距离  $J_{ij}$  的最大值为  $\sqrt{2}$ 。为了更好对比分析,本文表 1 中 J-M 距离采用  $J_{ij}^2$  来表达<sup>[29]</sup>。

表 1 不同  $CO_2$  泄漏胁迫程度下大豆  $Area_{(510-590nm)}$  指数之间的 J-M 距离

Table 1 J-M distance of $Area_{(510-590nm)}$ indices of bean under different $CO_2$ leakage stressed level				
日期 Date	状态 State	CK Health	边缘 Edge	中间 Middle
2008-07-14	边缘	2		
	中间	2	2	
	中心	2	2	2
2008-07-28	边缘	0.590		
	中间	2	2	
	中心	2	2	2
2008-08-11	边缘	0.540		
	中间	2	2	
	中心	2	2	2
2008-07-21	边缘	0.211		
	中间	2	2	
	中心	2	2	2
2008-08-04	边缘	1.977		
	中间	2	2	
	中心	2	2	2
2008-08-18	边缘	1.965		
	中间	2	2	
	中心	2	2	2

注: J-M 距离为  $J_{ij}$  的值。  
Note: J-M distance is the value of  $J_{ij}$ .

J-M 距离具有收敛性, 其判别标准如下: 当  $0 < J_{ij}^2 \leq 1.0$  时, 类别之间不具备光谱可分性; 当  $1.0 < J_{ij}^2 \leq 1.8$  时, 类别之间具有一定的光谱可分性, 但存在较大程度的重叠; 当  $1.8 < J_{ij}^2 < 2.0$  时, 类别之间具有很好的光谱可分性<sup>[30]</sup>。

由表 1 可知, 中间和中心区域的大豆与 CK 大豆之间的 J-M 距离达到 2, 因此,  $Area_{(510\sim 590\text{ nm})}$  指数完全可以把 CK 与胁迫中间和中心区域的大豆识别出来, 也就是当土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数达到 15% 以上, 在胁迫发生 11 d 后就能够利用遥感识别出 CO<sub>2</sub> 泄漏区域。但胁迫边缘区域与 CK 大豆的 J-M 距离的平方值在整个生育期内并不总大于 1.8, 因此  $Area_{(510\sim 590\text{ nm})}$  指数无法在整个生育期内正确识别 CK 与胁迫边缘区域的大豆, 即当土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数低于 15% 时, 利用该指数无法准确地识别出 CO<sub>2</sub> 泄漏区域。

### 3 讨论

根据上述研究结果可知, CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫使大豆叶片的 SPAD 值变化, 致使其光谱特征发生变化, 而在野外有多种因素可以降低植物的 SPAD 值, 例如水涝及土壤压实等<sup>[20]</sup>, 致使植物光谱发生变化; 而植物病害<sup>[13]</sup>、营养缺乏<sup>[31]</sup>、干旱<sup>[32]</sup>等因素也可以使叶片 SPAD 值降低, 从而导致植物光谱特征发生变化。因此, 仅根据光谱特征的变化无法判断该点是否出现 CO<sub>2</sub> 泄漏现象。但仍可以首先利用  $Area_{(510\sim 590\text{ nm})}$  指数识别出 CO<sub>2</sub> 疑似泄漏区, 然后结合 CO<sub>2</sub> 埋藏区地形图、土壤质量图、地质图等资料划定 CO<sub>2</sub> 高度疑似泄漏区, 再对高度疑似泄漏区进行野外实地考察, 可以大大减少野外工作量, 能够及时、高效地寻找到 CO<sub>2</sub> 泄漏点。本研究成果对于未来利用高光谱遥感评估 CO<sub>2</sub> 储存区陆面生态环境也具有一定的理论意义与应用价值。

### 4 结论

本文研究表明, 地下储存的 CO<sub>2</sub> 泄漏会对地表植物生长发育造成严重影响, 致使其 SPAD 值及光谱特征发生变化, 并得到如下结论:

1) 当土壤中的 CO<sub>2</sub> 体积分数小于 15% 时, 对大豆的影响较小, 其 SPAD 值与 CK 大豆的 SPAD 值无显著性差异 ( $P > 0.1$ ); 当土壤中的 CO<sub>2</sub> 体积分数大于等于 15% 时, 大豆会出现明显的胁迫症状, 严重时大豆会枯死, 其 SPAD 值明显降低, 与 CK 大豆的 SPAD 值相比具有显著性差异 ( $P < 0.001$ )。

2) 连续统去除法处理后的大豆叶片光谱, 随着胁迫程度的增加, 在绿光区的光谱反射率逐渐增大, 而其他波段在整个生育期内无明显统一的规律。

3) 面积指数  $Area_{(510\sim 590\text{ nm})}$  可在 CO<sub>2</sub> 泄漏发生 11 d 后就能够较好地识别出土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数大于等于 15% 区域的大豆, 且具有较高的可区分性及稳定性, 但该指数无法在整个生育期内完全识别 CK 与土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数小于 15% 区域的大豆。

4) 面积指数  $Area_{(510\sim 590\text{ nm})}$  与大豆 SPAD 值之间具有极显著负相关关系。

5) 高光谱遥感可以识别出土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数大于 15% 的区域, 但当土壤中 CO<sub>2</sub> 体积分数低于 15% 时, 面积指数  $Area_{(510\sim 590\text{ nm})}$  识别能力及敏感度尚显不足。

致谢: 感谢国家留学基金委的资助; 感谢 Al-Taboulsi 博士, 允许我在其试验基地采集样本。

#### [参 考 文 献]

- [1] Solomon S, Qin D, Man-ning M, et al. (Eds.), Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change[R]. UK: Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [2] Male E J, Pickles W L, Silver E A, et al. Using hyperspectral plant signatures for CO<sub>2</sub> leak detection during the 2008 ZERT CO<sub>2</sub> sequestration field experiment in Bozeman, Montana[J]. Environment Earth Science, 2010, 60(2): 251–261.
- [3] Celia M A, Peters C A, Bachu S. Geological storage of CO<sub>2</sub>: leakage pathways and environmental risks[C]// American Geophysical Union, Spring Meeting, 2002.
- [4] Stephens J C, Hering J G. Comparative characterization of volcanic ash soils exposed to decade-long elevated carbon dioxide concentrations at Mammoth Mountain, California[J]. Chemical Geology, 2002, 186(3/4): 301–313.
- [5] Cotrufo M F, Raschi A, Lanini M, et al. Decomposition and nutrient dynamics of Quercus pubescens leaf litter in a naturally enriched CO<sub>2</sub> in Mediterranean ecosystem[J]. Functional Ecology, 1999, 13(3): 343–351.
- [6] Macek I, Pfanz H, Francetic V, et al. Root respiration response to high CO<sub>2</sub> concentrations in plants from natural CO<sub>2</sub> springs[J]. Environmental and Experimental Botany, 2005, 54(1): 90–99.
- [7] Bergfeld D, Evans W C, Howle J F, et al. Carbon dioxide emissions from vegetation-kill zones around the resurgent dome of Long Valley caldera, eastern California, USA[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2006, 152(1/2): 140–156.
- [8] Beaubien S E, Ciotoli G, Coombs P. The impact of a naturally occurring CO<sub>2</sub> gas vent on the shallow ecosystem and soil chemistry of a Mediterranean pasture (Latera, Italy)[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008, 2(3): 373–387.
- [9] Pickles W L, Cover W A. Hyperspectral geobotanical remote sensing for CO<sub>2</sub> storage monitoring. In: Thomas DC, Benson S(eds) Carbon dioxide capture for storage in

- deep geologic formations—results from the CO<sub>2</sub> capture project capture and separation of carbon dioxide from combustion sources[M]. 2005, 2: 1045—1070. (ISBN: 0-08-044570-5)
- [10] Arthur J J, Leone I A, Flower F B. The response of tomato plants to simulated landfill gas mixtures[J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 1985, 20(8): 913—925.
- [11] Adams R S, Ellis R. Some physical and chemical changes in the soil brought about by saturation with natural gas[J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1960, 24(1): 41—44.
- [12] 黄木易, 王纪华, 黄文江, 等. 冬小麦条锈病的光谱特征及遥感监测[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 154—158. Huang Muyi, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. Hyperspectral character of stripe rust on winter wheat and monitoring by remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2003, 19(6): 154—158. (in Chinese with English abstract)
- [13] 黄木易, 黄文江, 刘良云, 等. 冬小麦条锈病单叶光谱特性及严重度反演[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 176—180. Huang Muyi, Huang Wenjiang, Liu Liangyun, et al. Spectral reflectance feature of winter wheat single leaf infected with stripe rust and severity level inversion[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2004, 20(1): 176—180. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘美玲, 刘湘南, 李婷, 等. 水稻镉污染胁迫的光谱奇异性分析[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 191—197. Liu Meiling, Liu Xiangnan, Li Ting, et al. Analysis of hyperspectral singularity of rice under Zn pollution stress[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(3): 191—197. (in Chinese with English abstract)
- [15] 关丽, 刘湘南. 水稻镉污染胁迫遥感诊断方法与试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 168—173. Guan Li, Liu Xiangnan. Experimental research on remote sensing diagnosis method of Cd pollution stress in rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(6): 168—173. (in Chinese with English abstract)
- [16] Patil R H, Colls J J, Steven M D. Effects of CO<sub>2</sub> gas as leaks from geological storage sites on agro-ecosystems[J]. *Energy*, 2010, 35(12): 4587—4591.
- [17] Al-Traboulsi M, Sjögersten S, Colls J J, et al. Potential impact of CO<sub>2</sub> leakage from carbon capture and storage (CCS) systems on growth and yield in spring field bean[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 80(8): 43—53
- [18] Jiang J B, Steven M D, Chen Y H. Using hyperspectral remote sensing to estimate leaf relative water content of beetroot under CO<sub>2</sub> leakage stress[J]. *Sensor Letters*, 2012, 10(1/2): 501—505.
- [19] Noomen M F, Skidmore A K. The effects of high soil CO<sub>2</sub> concentrations on leaf reflectance of maize plants[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(2): 481—497.
- [20] 陈云浩, 蒋金豹, Michael D Steven, 等. 地下储存 CO<sub>2</sub> 泄漏胁迫下地表植被光谱变化特征及识别研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(7): 1882—1885. Chen Yunhao, Jiang Jinbao, Steven D Micheal, et al. Research on the spectral feature and identification of the surface vegetation stressed by stored CO<sub>2</sub> under ground leakage[J]. *Spectroscopy and spectral analysis*, 2012, 32(7): 1882—1885. (in Chinese with English abstract)
- [21] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(2): 207—217.
- [22] Keith C J, Repasky K S, Lawrence R L, et al. Monitoring effects of a controlled subsurface carbon dioxide release on vegetation using a hyperspectral imager[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009, 3(5): 626—632.
- [23] Noomen M F, Smith K L, Colls J J, et al. Hyperspectral indices for detecting changes in canopy reflectance as a result of underground natural gas leakage[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(20): 5987—6008.
- [24] 蒋金豹, 陈云浩, 黄文江. 利用高光谱红边与黄边位置距离识别小麦条锈[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(16): 1614—1618. Jiang Jinbao, Chen Yunhao, Huang Wenjiang. Using the distance between hyperspectral red edge position and yellow edge position to identify wheat yellow rust disease[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(16): 1614—1618 (in Chinese with English abstract)
- [25] 蒋金豹, 李一凡, 郭海强, 等. 不同病害胁迫下大豆的光谱特征及识别研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(10): 2775—2779. Jiang Jinbao, Li Yifan, Guo Haiqiang, et al. Spectral characteristics and identification research of soybean under different disease stressed[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(10): 2775—2779. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张良培, 张立福. 高光谱遥感[M]. 北京: 测绘出版社, 2011: 98—99.
- [27] Scholenberger C. Effect of leaking natural gas upon the soil[J]. *Soil Science*, 1930, 29(4): 261—266.
- [28] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Plant spectral responses to gas leaks and other stresses[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(18): 4067—4081.
- [29] Bruzzone L, Roli F, Serpico S B. An extension of the Jeffreys-Matusita distance to multiclass cases for feature selection[J]. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 1995, 33(6): 1318—1321.
- [30] 赵德刚, 占玉林, 刘翔, 等. 基于波段选择的 MODIS 全国土地覆盖分类[J]. *国土资源遥感*, 2010, 22(3):

108—113.

Zhao Degang, Zhan Yulin, Liu Xiang, et al. Land cover classification in China based on chosen bands of MODIS[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2010, 22(3): 108—113. (in Chinese with English abstract)

- [31] 谭昌伟, 郭文善, 朱新开, 等. 不同条件下夏玉米冠层反射光谱响应特性的研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(9): 131—135.

Tan Changwei, Guo Wenshan, Zhu Xinkai, et al. Canopy spectral reflectance characteristics of summer maize under different conditions[J]. *Transactions of the Chinese*

Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(9): 131—135. (in Chinese with English abstract)

- [32] 谷艳芳, 丁圣彦, 陈海生, 等. 干旱胁迫下冬小麦 (*Triticum aestivum*) 高光谱特征和生理生态响应[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2690—2697.

Gu Yanfang, Ding Shenyan, Chen Haisheng, et al. Ecophysiological responses and hyperspectral characteristics of winter wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2690—2697. (in Chinese with English abstract)

## Judgment of CO<sub>2</sub> leaking in underground storage using spectral characteristics of soybean

Jiang Jinbao<sup>1</sup>, Michael D Steven<sup>2</sup>, He Ruyan<sup>1</sup>, Cai Qingkong<sup>1</sup>, Chen Yunhao<sup>3\*</sup>, Xu Jin<sup>1</sup>

(1. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mine and Technology, Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Geography, University of Nottingham, Nottingham, NG7 2RD, UK; 3. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** To mitigate the global warming caused by the excessive emission of CO<sub>2</sub>, Carbon Capture and Storage (CCS) techniques have been proposed to reduce the concentrations of atmospheric CO<sub>2</sub> and to slow down the change of climate. However, everything has two sides for there is a risk of the CO<sub>2</sub> leakage from the stored sites that may impact the surrounding environment significantly. Therefore, the monitoring of CO<sub>2</sub> leaking spots has become a crucial issue to be solved in applying CCS. It is therefore needed to develop a large-scale, quick and highly efficient method for detecting the CO<sub>2</sub> leakage on the surface of the sequestering fields. Considering that the hyperspectral remote sensing technique can monitor the slight changes of surface vegetation by spectral feature analysis, this paper is dedicated to studying the impacts of the slight CO<sub>2</sub> leakage stress on the surface vegetation through simulating experiment in the field. The experiment was carried out from May 2008 to August 2008 at the Sutton Bonington Campus (52.8 N, 1.2W) of the University of Nottingham. Beans (*Vicia faba cv Clipper*) were sowed by hand on June 4th, 2008. From July 4th on, the controlled CO<sub>2</sub> was injected into the soil at a rate of 1L/min, and the concentrations of CO<sub>2</sub> in the soil were measured every day in the field. Additionally, the chlorophyll contents and spectral data of beans were measured one time every week in the laboratory. The results showed that when the concentrations of soil CO<sub>2</sub> was under 15%, there was no significant difference for chlorophyll contents between the control and stressed beans ( $P>0.1$ ). However, when the concentrations of soil CO<sub>2</sub> was above 15%, there was a great significant difference for chlorophyll contents between control and stressed beans ( $P<0.001$ ). As the time passed by, the experimented beans became premature senescent, experienced fallen leaves, and even died. The spectral data were processed by the continuum removal method and the results indicated that in the green bands the spectral reflectance gradually increased as the CO<sub>2</sub> concentrated in the soil; nevertheless, in other bands there were no apparent and stable rules that could be derived from the spectral analysis for the whole growth stage of beans. According to the spectral feature analysis of beans under the stress of CO<sub>2</sub> leakage, a new index ( $Area_{(510-590nm)}$ ) was designed to identify the beans. The experiment results showed that the  $Area_{(510-590nm)}$  index was able to identify the stressed beans when the CO<sub>2</sub> concentrations in the soil were above 15%. However, the index was unable to identify the stressed beans when the CO<sub>2</sub> concentration in the soil was fewer than 15%. It can be concluded that the research is of great importance and has application value for detecting the leakage spots, monitoring and evaluating land-surface ecology under CO<sub>2</sub> leakage stress.

**Key words:** spectral analysis, chlorophyll, models, CO<sub>2</sub> leakage stress, bean