

## 植物叶片光谱角对土壤铀污染的指示作用

王卫红<sup>1,2\*</sup>, 罗学刚<sup>3</sup>, 武锋强<sup>1,2</sup>, 林玲<sup>1,2</sup>, 李俊杰<sup>1,2</sup>

1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010
2. 国家遥感中心绵阳科技城分部, 四川 绵阳 621010
3. 生物质材料教育部工程研究中心, 四川 绵阳 621010

**摘要** 通过在土壤中添加浓度为0(对照组), 25, 75, 125, 175, 275, 375和485  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的铀, 进行5种植物(苧麻、印度芥菜、酸模、甘蓝型油菜、玉米)的盆栽实验, 研究了不同生长期的叶片光谱角对土壤铀污染的定性和定量指示作用, 分析了定量指示作用与叶片铀含量的关系, 并筛选出来在苗期即能反演土壤铀含量的植物, 为通过野外实测植物叶片光谱快速、安全地进行土壤铀含量的本底调查和动态监测提供了有效的途径。更重要的是, 以该叶片尺度的研究为基础, 后续可以开展在冠层尺度采用遥感影像进行大面积土壤铀污染监测的相关研究。实验结果与主要结论如下: (1)以实验植物在不同生长期的实测叶片反射光谱为基础, 计算了土壤受到铀污染后, 在五个波段区间(表征叶片色素的350~716 nm、表征红边和近红外平台的717~975 nm、表征水分的976~1 265, 1 266~1 770和1 771~2 500 nm)的光谱角。以盆为单位统计5种实验植物在13个生长期的光谱角, 绝大多数情况下均大于阈值。叶片光谱角对铀产生了350~2 500 nm的全面响应, 可以定性指示土壤是否受到铀污染。(2)涵盖全部5种实验植物的8个生长期得到了以光谱角作为自变量、通过显著性检验的线性回归方程。其中7个线性回归方程的决定系数 $R^2 > 0.64$ , 3个(苧麻-苗期、印度芥菜-开花期和油菜-蕾薹期)的决定系数 $R^2 > 0.81$ 。综合其他反演效果评价指标, 可以认为叶片光谱角也能定量指示土壤铀污染程度, 但定量指示作用随植物种类、生长期的不同而不同, 其中苧麻、印度芥菜在苗期的叶片光谱角就可以比较好地反演土壤铀含量。(3)当叶片铀含量较高时, 其光谱角对土壤铀污染的定量指示作用较强。

**关键词** 叶片光谱; 光谱角; 土壤; 铀污染; 指示作用

**中图分类号:** X87 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)04-1313-05

### 引言

在铀矿资源的开采和利用过程中, 大量铀废石和铀尾矿的产生不可避免。铀尾矿及周边污染土壤平均含铀量比天然本底值高4~10倍, 其表面辐射剂量比一般土壤平均高5~70倍, 随着国防和核电工业对铀的需求不断增加, 铀尾矿库已成为一个不容忽视的放射性和重金属污染源。快速、安全地进行铀尾矿及周边土壤的放射性和重金属污染的本底调查和动态监测是推进生态环境保护、改善生态环境质量的现实需求。土壤中铀含量的高低, 是体现其对环境带来的污染风险最重要的指标之一。

广大科技工作者已经探索利用实测地物反射光谱监测土壤重金属含量, 目前主要有两类方法: 一是由土壤光谱直接

反演<sup>[1]</sup>; 二是根据重金属污染胁迫下植被的光谱信息间接预测<sup>[2-3]</sup>。由土壤光谱反演土壤的重金属含量, 精度比较高的方法还局限于在实验室特定条件下测量土壤高光谱数据, 选择适当的建模方法来完成<sup>[4-5]</sup>。实验室的特定条件在野外几乎不可能重现; 而且对于植被覆盖区域, 遥感影像主要反映的是植被光谱特征, 土壤一般仅作为背景因素出现, 所以如果要想实现利用遥感影像进行重金属的监测, 基于植物光谱的研究具有重大意义。

由植物光谱特征反演土壤重金属含量的研究, 主要集中在以表征植被叶绿素和水吸收特征的中心波长对应的反射率<sup>[6]</sup>或光谱位置参数、光谱面积参数、植被指数等<sup>[8]</sup>参数作为自变量来进行。可能由于上述参数不足以全面反映植物的光谱响应, 在土壤重金属含量较低时, 反演效果还不够理想。另外, 对采用什么种类、什么生长期的植被有利于土壤

收稿日期: 2021-03-27, 修订日期: 2021-06-02

基金项目: 国家国防基础科研项目(16ZG6101)资助

作者简介: 王卫红, 女, 1971年生, 西南科技大学环境与资源学院教授

e-mail: wangweihong@swust.edu.cn

\* 通讯作者

重金属反演, 已往研究也鲜有涉及。而关于通过植物光谱监测土壤中铀的污染程度, 还未发现相关文献报道。

作为冠层光谱的基础, 植物叶片光谱的野外测量手段已经很成熟。为了在植物生长过程中, 尽可能早地从叶片反射光谱中监测到铀污染的反应, 研究中通过在土壤中添加不同浓度的铀进行盆栽实验, 从苗期开始测量不同生长期的叶片反射光谱, 计算出光谱角, 研究了光谱角对土壤铀污染的定性和定量指示作用, 并探讨了该指示作用与叶片中铀含量的关系。

## 1 实验部分

实验植物共选择了苎麻(*Boehmeria nivea*)、印度芥菜(*Brassica juncea*)、酸模(*Rumex acetosa* L.)、甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)、玉米(*Zea mays* L.) 5 种。其中苎麻和酸模是通过在某铀尾矿库及其周边铀污染土壤进行实地调研发现的优势植物; 油菜和玉米是我国普遍种植的农作物, 对于研究由农作物叶片光谱角推演其所生长的土壤铀污染程度有较好的代表性; 印度芥菜与油菜同为芸薹属植物, 亲缘关系比较近, 而亲缘关系近的植物对铀污染的反应可能相近。

盆栽实验在西南科技大学校内的温室进行, 取温室旁边农田的紫色壤土, 过 1.4 cm 筛, 每盆土壤 2 kg 干重。实验所添加的<sup>238</sup>U 来源于分析纯乙酸双氧铀, 浓度梯度为 0(对照组), 25, 75, 125, 175, 275, 375 和 485  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。采用饱和和持水量法配制实验土壤, 每个浓度 3 个重复。配制好的土壤放置四周, 使所添加的铀经土壤充分吸附后播种。在实验植物发芽后生长至 4 片真叶时, 定苗 2 株·盆<sup>-1</sup>, 5~6 d 浇水

1 次, 每次每盆 250 mL, 保持土壤湿度在田间持水量的 20%~30%, 各处理一致。

在不同生长期用美国 Spectral Evolution 公司生产的 PSR-2500 地物光谱仪配合接触式探头(探头自带光源和叶片夹持器)对活体叶片测量反射光谱。测量光谱的生长期和地物光谱仪主要技术参数分别如表 1 和表 2 所示。测量反射光谱时, 从上往下每棵植株选择相同叶位的 3 片叶片, 每片采集 4 个光谱数据, 每株共采集 12 个光谱数据。为了尽可能减小偶然误差的影响, 将 12 个光谱数据中对应波长的反射率取平均值并进行小波去噪, 作为该植株的反射率; 对于同一盆两棵植株的反射率再次取均值。为了方便提取光谱的局部细节, 对于取均值后的反射率经过线性内插, 重采样至 1 nm。

表 1 测量光谱选择的生长期

Table 1 The selected growth periods of measuring spectra

实验植物	实验设计时选择的生长期		
苎麻	苗期	开花期	成熟期
印度芥菜	苗期	开花期	成熟期*
酸模	苗期	旺盛期	成熟期
油菜	苗期	蕾薹期	成熟期
玉米	苗期	开花期	成熟期*

注: 实验实施过程中, 印度芥菜在成熟期受到了病虫害的影响, 玉米在成熟期时叶片已经明显发黄, 采集的叶片反射光谱很不理想, 故在数据处理和分析阶段, 没考虑这两种植物成熟期的光谱数据(在表 1 中用 \* 进行了标记)

表 2 PSR-2500 地物光谱仪的主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of PSR-2500 spectrometer

标称测量范围	实际测量范围	波长准确度	光谱分辨率	仪器采样间隔
350~2 500 nm	334.3~2 535.9 nm	5 nm	$\leq 3.5$ nm(350~1 000 nm); $\leq 22$ nm(1 000~2 500 nm)	0.2~1.6 nm(350~1 000 nm), 平均 1.5 nm 6~6.4 nm(1 000~2 500 nm)

在测量光谱的同时, 采集植物叶片样本。用自来水和超纯水清洗后, 用吸湿纸吸去表面水分, 烘至恒重, 粉碎成细小粉末, 每份样本称取约 0.15 g, 加入 5 mL 分析纯硝酸、2 mL 30% 双氧水, 用意大利 MILESTONE 公司生产的 E-THOS UP 型微波消解仪消解为液体, 用美国 Agilent 7700x ICP-MS 等离子发射光谱质谱仪测定铀含量。

## 2 结果与讨论

试验组与对照组的植物向量在空间形成的夹角, 叫做光谱角。通过与阈值的比较, 光谱角可识别健康植物与受胁迫植物, 不少学者已经成功利用光谱角识别了植物是否受重金属污染<sup>[8-9]</sup>。但相关工作主要研究叶片光谱角与叶片中重金属含量的关系, 研究叶片光谱特征与土壤中重金属含量之间的关系比较少。为了探讨植物叶片反射光谱的宏观变异情况与土壤铀含量的关系, 本工作对 5 个波段区间(表征叶片色

素的 350~716 nm、表征红边和近红外平台的 717~975 nm、表征水分的 976~1 265, 1 266~1 770 和 1 771~2 500 nm) 采用式(1)进行光谱角计算

$$T = \cos^{-1} \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} (\gamma_{\lambda,c} \gamma_{\lambda,s})}{\sqrt{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} (\gamma_{\lambda,c})^2 \sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} (\gamma_{\lambda,s})^2}} \quad (1)$$

式(1)中,  $T$  为不同污染水平下的光谱角,  $\gamma_{\lambda,s}$  和  $\gamma_{\lambda,c}$  分别为污染组和对照组叶片在波长  $\lambda$  的反射率,  $\lambda_1$  和  $\lambda_n$  分别为起止波长。当受重金属污染后的光谱角大于对照组的光谱角阈值  $T_0$  时, 认为光谱发生变异。阈值的计算式如式(2)

$$T_0 = \cos^{-1} \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} (\gamma_{\lambda,j} \bar{\gamma}_{\lambda})}{\sqrt{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} (\gamma_{\lambda,j})^2 \sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} (\bar{\gamma}_{\lambda})^2}} \quad (2)$$

式(2)中,  $\gamma_{\lambda,j}$  为对照组第  $j$  次测量的叶片反射光谱在波长  $\lambda$  处的反射率,  $\bar{\gamma}_{\lambda}$  为对照组叶片在波长  $\lambda$  处的反射率均值。

表 3 列出了以盆为单位统计的实验植物在不同生长期光谱角大于阈值的比例。表 3 显示：除了成熟期的苕麻在表征

水分的三个区间的光谱角大于阈值的比例比较低之外, 实验植物其他生长期的光谱角在绝大多数情况下都对铀污染产生了 350~2 500 nm 的全面响应。可见, 叶片光谱角能定性指示土壤铀污染。

**表 3 土壤铀污染下实验植物光谱角大于阈值的比例 (%)**  
**Table 3 Proportions of spectral angles greater than threshold values of experimental plants under soil uranium pollution (%)**

实验植物	生长期	波段区间				
		350~716 nm	717~975 nm	976~1 265 nm	1 266~1 770 nm	1 771~2 500 nm
苕麻	苗期	100%	100%	100%	100%	100%
	开花期	81.0%	90.5%	90.5%	95.2%	100%
	成熟期	95.2%	90.5%	23.8%	23.8%	28.6%
印度芥菜	苗期	95.2%	95.2%	90.5%	90.5%	90.5%
	开花期	90.5%	90.5	81.0%	95.2%	95.2%
酸模	苗期	100%	81.0%	95.2%	81.0%	85.7%
	旺盛期	100%	81.0%	100%	90.5%	95.2%
	成熟期	90.5%	100%	90.5%	100%	100%
油菜	苗期	95.2%	100%	90.5%	90.5%	100%
	蕾薹期	100%	95.2%	95.2%	95.2%	100%
	成熟期	90.5%	95.2%	81.0%	100%	90.5%
玉米	苗期	90.5%	95.2%	100%	81.0%	100%
	开花期	90.5%	95.2%	100%	81.0%	90.5%

为了探讨能否通过叶片光谱角定量反演土壤铀含量, 分析了光谱角与土壤铀含量的相关性。表 4 列出的是通过显著性检验、且相关系数绝对值大于 0.7 的光谱角。将表 4 的光谱角作为备选自变量, 利用线性回归统计模型反演土壤中的铀含量。统计模型的拟合程度用决定系数  $R^2$  表示。当人为

向系统中添加过多的自变量时, 残差平方和会减少, 从而  $R^2$  变大, 不能真实地反映拟合精度。因此优先采用单变量线性回归, 其次采用逐步多元线性回归。表 5 列出了  $p$  值小于等于 0.05(采用  $t$  检验)的反演模型, 而反演精度采用 F 值和均方根误差(简称 RMSE, 单位为  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )来进行综合评价。

**表 4 实验植物光谱角与土壤铀含量的相关性**  
**Table 4 Correlations between spectral angles of experimental plants and uranium contents in soil**

实验植物	生长期	波段区间				
		350~716 nm	717~975 nm	976~1 265 nm	1 266~1 770 nm	1 771~2 500 nm
苕麻	苗期	0.921**	0.935**	0.760*		0.709*
	开花期	0.798*		0.862**		
印度芥菜	苗期					
	开花期		0.902**			
酸模	旺盛期	0.842**				
	成熟期			0.771*		0.751*
油菜	苗期	0.917**	0.740*			0.755*
	蕾薹期	0.804*	0.835**			0.909**
玉米	苗期	0.768*			0.795*	
	开花期		0.763*	0.835**	0.730*	

注：有 \* 标记的表示通过 0.05 显著性检验的相关系数；有 \*\* 标记的表示通过 0.01 显著性检验的相关系数

与土壤铀含量显著强相关的光谱角涵盖了全部 5 种实验植物的 9 个生长期、21 个波段, 其中 8 个生长期得到了通过显著性检验的线性回归方程。有 7 个回归方程的决定系数  $R^2 > 0.64$ , 其中 3 个(苕麻-苗期、印度芥菜-开花期和油菜-蕾薹期)的决定系数  $R^2 > 0.81$ , 其他参数也显示回归效果好。可以认为, 叶片光谱角也能定量指示土壤铀污染, 但定量指示作用随植物种类、生长期的不同而不同。虽然 5 种实验植物、

13 个生长期的叶片光谱角都可以定性指示土壤铀污染, 但只有 7 个生长期得到了综合效果比较好的回归方程。

表 6 列出了不同处理浓度下各生长期实验植物叶片的铀含量平均值, 以探讨叶片光谱角对土壤铀污染的定量指示作用与对应的叶片铀含量是否有关。表 6 显示, 苕麻、印度芥菜和油菜叶片中的铀含量, 相对酸模和玉米而言比较高, 反演的整体效果也好。酸模叶片的铀含量比较低, 反演效果相

对较差；而玉米叶片的铀含量最低，反演效果也最差。可见，叶片光谱角对土壤铀污染的定量指示作用强弱与其叶片的铀含量高低呈现出一致性。

土壤中重金属污染对人体的危害，主要是通过植物直接或间接传递给人。不同种类的植物或者相同植物的不同器官，对土壤中不同元素重金属或者相同元素但不同浓度的重金属，响应均有可能不同。根据植物地上部分的重金属含量对土壤重金属含量的响应，Baker 将地上部分重金属含量与土壤重金属含量基本呈现正比关系的植物定义为指示型，与

富集型和规避型相并列<sup>[10]</sup>。对于指示型植物，如果能找到植物地上部分重金属含量与相应的土壤重金属含量的定量关系，则可以用植物地上部分作为监测器来定量监测土壤重金属污染的程度。然而植物地上部分重金属含量与土壤重金属含量的关系实际上非常复杂，符合 Baker 定义的指示型植物非常少。针对植物的遥感探测，无论在叶片尺度，还是在冠层尺度，都是以叶片光谱为基础。本研究为从叶片光谱的角度定性甚至定量指示土壤铀含量提供了思路。

表 5 土壤铀含量与实验植物光谱角的线性回归方程

Table 5 Linear regression equations between soil uranium contents and spectral angles of experimental plants

植物-生长期	线性回归方程	$R^2$	$\rho$ 值	F 值	RMSE
苕麻-苗期	$Y = -52.038 + 62.037 \times T_{\text{波段1}} + 3592.58 \times T_{\text{波段2}} + 1832.4 \times T_{\text{波段3}}$	0.92	0.013	15.89	4.56
印度芥菜-苗期	$Y = -174.74 + 150.607 \times T_{\text{波段1}} + 11727.65 \times T_{\text{波段3}}$	0.74	0.033	7.27	8.18
印度芥菜-开花期	$Y = -82.38 + 7191.35 \times T_{\text{波段2}}$	0.81	0.002	26.32	9.70
酸模-旺盛期	$Y = -105.44 + 757.03 \times T_{\text{波段1}}$	0.71	0.008	14.58	7.35
酸模-成熟期	$Y = -205.45 + 384.44 \times T_{\text{波段3}} + 7743.83 \times T_{\text{波段5}}$	0.78	0.021	9.10	7.51
油菜-蕾薹期	$Y = -354.687 + 11914.16 \times T_{\text{波段5}}$	0.83	0.001	28.49	6.72
玉米-苗期	$Y = -264.94 + 10813.37 \times T_{\text{波段1}}$	0.59	0.023	8.60	10.70
玉米-开花期	$Y = -206.64 - 4536.73 \times T_{\text{波段2}} + 20491.2 \times T_{\text{波段3}}$	0.70	0.049	15.78	8.85

表 6 不同处理浓度下实验植物叶片的铀含量 ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )

Table 6 Uranium contents in leaves of experimental plants under different treatment concentrations

铀处理浓度	苕麻	印度芥菜	酸模	油菜	玉米
25	4.23±0.4	14.84±0.2	4.98±1.2	25.69±1.2	3.45±0.3
75	8.23±2.1	22.31±2.1	6.26±2.1	38.05±3.2	3.73±0.2
125	11.40±0.8	42.40±3.4	8.19±1.2	48.55±9.2	2.93±0.3
175	15.38±5.6	67.00±4.5	9.16±2.1	56.58±8.3	5.93±0.4
275	19.12±5.1	72.51±7.9	10.62±3.2	65.66±19.2	6.89±2.2
375	22.12±3.4	82.38±11.2	14.47±2.6	76.99±22.1	7.99±2.1
485	80.80±19.1	95.62±21.4	14.89±3.2	91.01±18.1	8.29±3.2

### 3 结 论

从叶片尺度光谱探测的角度衡量，植物光谱角对土壤铀污染有指示作用。绝大多数情况下，5 种实验植物(苕麻、印度芥菜、酸模、甘蓝型油菜、玉米)在不同生长期的叶片光谱角均可以定性指示土壤中低至  $25 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的铀污染。5 种实

验植物均能成功实现以光谱角为自变量定量反演土壤中的铀含量。对于叶片中铀含量相对较高的苕麻、印度芥菜、油菜，线性回归方程的决定系数  $R^2 > 0.81$ ，最高达 0.92，其他表征回归效果的参数也比较理想。表明植物叶片光谱角能定量指示土壤铀污染。其中苕麻、印度芥菜在苗期的叶片光谱角具有定量指示作用，尤其有利于尽早确定土壤的铀污染程度。

### References

- [1] LIU Yan-ping, LUO Qing, CHENG He-fa(刘彦平, 罗 晴, 程和发). Journal of Agro-Environment Science(农业环境科学学报), 2020, 39(12): 2699.
- [2] YU Qing, WU Quan-yuan, YAO Lei, et al(于 庆, 吴泉源, 姚 磊, 等). Journal of Henan Agricultural Sciences(河南农业科学), 2018, 47(8): 54.
- [3] Seongjoo Kang, Keum-young Lee, Eui-ik Jeon, et al. Spatial Information Research, 2018, 26(2): 213.
- [4] LIU Xiao-qing, LIU Yun-long(刘晓清, 柳云龙). Environmental Science & Technology(环境科学与技术), 2019, 42(5): 230.
- [5] HE Jun-liang, CUI Jun-li, ZHANG Shu-yuan, et al(贺军亮, 崔军丽, 张淑媛, 等). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2019, 34(5): 998.
- [6] SHI Chao, HUANG Chao, LI Shu, et al(史 超, 黄 超, 李 书, 等). Bulletin of Geological Science and Technology(地质科技通报),

- 2020, 39(3): 202.
- [7] YANG Ling-yu, GAO Xiao-hong, ZHANG Wei, et al(杨灵玉, 高小红, 张威, 等). Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报), 2016, 27(27): 1775.
- [8] ZHU Ye-qing, QU Yong-hua, LIU Su-hong, et al(朱叶青, 屈永华, 刘素红, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2014, 18(2): 335.
- [9] YANG Ke-ming, SUN Tong-tong, ZHANG Wei, et al(杨可明, 孙彤彤, 张伟, 等). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2018, 37(1): 80.
- [10] Galal T M, Shedeed Z A, Hassan L M. International Journal of Phytoremediation, 2019, 21(14): 1397.

## Spectral Angles of Plant Leaves as Indicators of Uranium Pollution in Soil

WANG Wei-hong<sup>1,2\*</sup>, LUO Xue-gang<sup>1,3</sup>, WU Feng-qiang<sup>1,2</sup>, LIN Ling<sup>1,2</sup>, LI Jun-jie<sup>1,2</sup>

1. Environment and Resource College, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

2. Mianyang S&T City Division, the National Remote Sensing Center of China, Mianyang 621010, China

3. Engineering Research Center of Biomass Materials of Ministry of Education, Mianyang 621010, China

**Abstract** In this paper, five plants (ramie, Indian mustard, Rumex, Brassica napus and maize) were pot cultured with 0 (control group), 25, 75, 125, 175, 275, 375 and 485  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  uranium in the soil. The qualitative and quantitative indicating effects of leaf spectral angle on soil uranium pollution in different growth stages were studied, and the relationship between quantitative indicating effect and leaf uranium content was analyzed. It provides an effective way to quickly and safely carry out the background investigation and dynamic monitoring of soil uranium content through field measurement of plant leaf spectrum. The results and main conclusions are as follows: (1) Based on the leaf reflectance spectra of experimental plants in different growth stages, the spectral angles of soil polluted by uranium in five bands (350~716 nm for leaf pigment, 717~975 nm for red edge and near infrared platform, 976~1 265, 1 266~1 770 and 1 771~2 500 nm for water) were calculated. In most cases, the spectral angles of the five experimental plants were greater than the thresholds of the control group. The spectral angles of leaves have comprehensive responses of 350~2 500 nm to the uranium in soil, which can qualitatively indicate whether the soil is polluted by uranium or not. (2) Eight linear regression equations passing the significance test with spectral angles as independent variables were obtained, covering all five experimental plants. The coefficient of determination  $R^2$  of 7 linear regression equations were  $>0.64$ , and  $R^2$  of 3 linear regression equations (ramie-seedling stage, Indian mustard-flowering stage and rape-bud bolting stage) were  $>0.81$ . Combined with other inversion effect evaluation indexes, it can be considered that leaf spectral angles can quantitatively indicate the degree of soil uranium pollution, but the function of the quantitative indicator varies with plant species and growth period. (3) There was a positive correlation between leaf spectral angles and uranium contents in soil. (4) The leaf spectral angles of ramie and Indian mustard at the seedling stage can be used to retrieve soil uranium content, which is an outstanding characteristic for indicating soil pollution status as early as possible through plant spectrum.

**Keywords** Leaf spectrum; Spectral angle; Soil; Uranium pollution; Indicative effect

(Received Mar. 27, 2021; accepted Jun. 2, 2021)

\* Corresponding author