

室内几何测试条件对土壤高光谱数据离散性的影响

周 清^{1,2}, 周 斌¹, 王人潮¹, 张扬珠²

(1 浙江大学 农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江 杭州 310029; 2 湖南农业大学 资源环境学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 利用方差分析方法, 研究了光源照射角度、探头距离、光源距离 3 个几何测试条件对室内土壤高光谱数据离散性的影响。结果表明, 探头距离对室内高光谱样本曲线的离散性影响不明显, 而光源照射角度、光源距离对室内高光谱样本曲线离散性影响的显著性与选取的研究波段范围有关, 除 $B1$ 波段(400~900 nm)外, 都达到了极显著水平。在该试验研究条件下, 15° 的光源照射角度、15 cm 的探头距离和 30 cm 的光源照射距离是较理想的室内测试几何条件组合。

关键词: 土壤; 光谱; 几何测试条件; 光谱数据离散性; 方差分析
中图分类号: S153. 6 文献标识码: A 文章编号: 1001-411X(2005)01-0031-05

Effect of geometric conditions on soil hyperspectral data scatter characteristic in laboratory test

ZHOU Qing^{1,2}, ZHOU Bin¹, WANG Ren-chao¹, ZHANG Yang-zhu²

(1 Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;
2 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The scatter characteristic of soil hyperspectrals is studied by variance analysis of geometric conditions, i. e., the angle of the beam, the distance between sensor and soil surface, and the distance between lamp and soil surface in laboratory test. The results show that the effect of the distance between sensor and soil surface on soil hyperspectral scatter characteristic is not significant, while the angle of the beam and the distance between lamp and soil surface have most significant effect on soil hyperspectral scatter characteristic, except $B1$ (400—900 nm) of the selected bands. And 15° , 15 cm, and 30 cm are recommended as the optimal values of beam angle, sensor distance, and lamp distance.

Key words: soil; hyperspectral; geometric conditions; spectral scatter characteristic; variance analysis

土壤是农业生产的基地, 迅速、准确地获取土壤信息并据此进行现代农业生产管理是土壤工作者面临的重大课题。土壤遥感光谱技术因其获取数据的时效性及波谱特性等传统方法不可比拟的优势而得以广泛地应用于农业生产和土壤资源环境评价中, 室内土壤光谱测试更因其影响因子较野外光谱获取容易控制而日益受到重视。国内外学者对室内光谱数据影响较明显的因素如土壤水分含量、土壤粒径等对土壤光谱的影响进行过研究, 得到一些经

验统计模型, 用于预测土壤的某些理化性质和进行土壤分类等^[1~6]。由于室内土壤光谱测试中对几何条件控制的不一致, 加上土壤前处理的差异^[7~9], 不仅可能导致不同研究之间的高光谱数据无共享性, 同时也可能导致同一研究中不同时间测试的高光谱数据无可比性, 从而限制土壤性质光谱量化研究。本研究主要探求几何测试条件对室内土壤高光谱样本曲线离散性的影响规律, 以找到减小光谱样本曲线离散性的室内几何测试条件的控制方法, 并确定较

理想的室内土壤高光谱几何测试条件, 获取能共享的室内土壤高光谱数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

用美国 ASD (Analytical Spectral Device) 公司生产的 ASD FieldSpec Pro FRTM 型光谱仪作为试验光谱测试设备, 光源是光谱仪配套的功率为 50 W 的卤素灯, 探头视场角为 8°。

为避免因土壤类型差异而可能导致的土壤光谱曲线离散性差异, 选择取自浙江省嘉善县陶庄农场相邻稻田土壤的表层 (0 ~ 15 cm)、土壤理化特性相差不大的 5 个土壤作为供试土样。光谱测试前, 将适量过 1 mm 标准土壤筛的土样先在 40 °C 条件下烘 24 h, 再放在干燥器中干燥 24 h^[7], 密封于容器中, 备光谱测试之用。

1.2 试验设计与方法

在对室内高光谱数据有影响的光源照射角度、光源到被试土壤表面的距离、探头的角度及其到被试土壤表面的距离以及盛装土样器皿的深度和直径等几何测试条件中, 盛样器皿的深度 (即被测试土样厚度) 达到和超过 1.5 cm、盛样器皿的直径大于探头的视场, 便不会对土壤高光谱数据造成影响^[7], 因此, 在基于野外传统波谱测量方式, 探头的角度保持垂直被试土样表面不变、固定盛样器皿的深度为 1.5 cm、直径为 10 cm (远大于探头的视场) 的前提下, 主要研究光源照射角度 (A)、探头距离 (H) 和光源距离 (L) 3 个几何因素对土壤光谱的影响 (图 1)。

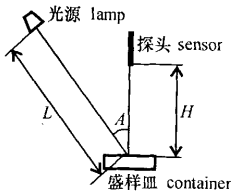


图 1 几何因素示意图

Fig. 1 Geometric factors

3 个因素各水平的确定主要根据已有研究结果和本试验光源条件及所做预备试验结果, 其中 A 因素主要根据前人研究中出现较多的一些测试光源入射角度设置为 15、30、45° 3 个水平; H 因素主要考虑探头视场角范围的土壤表面相对于样品表面的代表性, 同时考虑盛样器皿的表面积和需样量, 设置 10、15、20 cm 3 个水平; L 因素设置时, 主要考虑样品表

面辐射强度和能量在被试土样表面分布的均匀性, 预备试验显示, 当 $L > 50$ cm 时, 白板标准曲线在 1 000 ~ 2 500 nm 出现明显的波动, 当 $L < 30$ cm 时, 土壤样品表面的辐射强度和能量出现较明显的不均匀分布, 故设置 30、40 和 50 cm 3 个水平。

光谱测试按光谱测试手册 [ASD 技术手册 (第 3 版), USA: Analytical Spectral Devices, Inc, 1999. 1—10] 的要求操作。考虑到由土壤表面平整状况和土样本身组成物质的结构可能引起土样光谱各向异性的情况, 水平转动被试样品 3 次, 每次约 90°, 测试土样 4 个方向的光谱曲线, 每个方向取 5 条样本线, 共 20 条样本线。

利用方差分析方法分析样本光谱曲线的离散性^[10], 具体分析过程用 SPSS 10.0 中的方差分析功能模块实现, 并据分析结果确定较理想的几何测试方案。

2 结果与分析

2.1 几何测试条件对土壤高光谱离散性的影响及原因分析

光谱仪在土壤光谱采集过程中, 土样的一条高光谱曲线通常是由在很短时间间隔内采集的一组样本曲线平均而成, 所以, 土壤高光谱样本线组的离散性是衡量土壤高光谱质量的重要指标, 样本曲线的离散性越小, 光谱数据的质量越好, 可信度越高; 反之, 光谱数据质量越差, 可信度越低, 土壤光谱的离散性可用每组样本曲线的方差衡量。

根据 ASD FieldSpec Pro FRTM 型光谱仪的构造和物理参数, 避开光谱仪 3 组光纤的结合波段 (1 000、1 700 nm) 和测试范围两头 (350、2 500 nm) 附近光谱数据不稳定区域, 选取 400 ~ 900 nm ($B1$)、1 100 ~ 1 600 nm ($B2$)、1 800 ~ 2 300 nm ($B3$) 3 个波段范围作为数据分析期间。为避免非几何因素对光谱曲线离散性的影响, 先分别求每个数据点对应的单个方向所测试的 5 条光谱样本的方差, 然后对 4 个方向的方差平均, 得与每个数据点对应的样本组光谱数据方差, 再经对每个区间内所有数据点的方差平均, 得平均方差。为保证数据的正态性, 对所得平均方差先进行对数运算后, 再进行方差分析。

表 1 和表 2 是各处理高光谱曲线样本在所选波段期间的平均方差 (对数) 与 A 、 H 、 L 3 个因素的方差分析及多重比较结果。数据说明, 试验因素对样本曲线波段反射系数平均方差 (对数) 影响的显著程度

及每个因素 3 个水平之间的差异显著性不仅与试验因素有关, 也随研究波段的不同而有一定的差异. H 因素对土壤样本曲线方差的影响不显著, A 、 L 2 个因素, 除 A 因素中的 $B1$ 波段外, 对土壤样本曲线的方差都有极显著的影响, 且 2 个因素样本曲线波段

反射系数方差(对数)平均值从第 1 水平到第 3 水平逐渐增加, 水平之间差异性的大小也因波段的不同而有所差异. 3 个因素的所有交互作用中, 只有 A 和 L 2 个因素的交互作用在 $B2$ 、 $B3$ 波段极显著, 其他均不显著.

表 1 不同几何条件下高光谱样本曲线方差(对数)变化
Tab. 1 Variance analysis between geometric factors and hyperspectral variance logarithm values

变异来源 source	波段 selected bands	波段均值 average variance logarithm values	SS	自由度 ν	S^2	$F^{1)}$
A	$B1$	-3.974 ± 0.05	0.308 5	2	0.154 2	1.636 7
	$B2$	-3.530 ± 0.01	1.000 3	2	0.500 2	140.226 3 **
	$B3$	-3.083 ± 0.01	0.879 3	2	0.439 7	229.659 1 **
H	$B1$	-3.974 ± 0.05	0.152 7	2	0.076 4	0.810 3
	$B2$	-3.530 ± 0.01	0.003 4	2	0.001 7	0.483 3
	$B3$	-3.083 ± 0.01	0.008 6	2	0.004 3	2.251 3
L	$B1$	-3.974 ± 0.05	3.265 0	2	1.632 5	17.323 8 **
	$B2$	-3.530 ± 0.01	3.512 4	2	1.756 2	492.384 2 **
	$B3$	-3.083 ± 0.01	3.526 4	2	1.763 2	921.012 4 **
$A \times H$	$B1$	-3.974 ± 0.05	0.108 2	4	0.027 1	0.287 1
	$B2$	-3.530 ± 0.01	0.010 0	4	0.002 5	0.702 4
	$B3$	-3.083 ± 0.01	0.005 3	4	0.001 3	0.691 3
$A \times L$	$B1$	-3.974 ± 0.05	0.411 9	4	0.103 0	1.092 9
	$B2$	-3.530 ± 0.01	0.207 1	4	0.051 8	14.514 2 **
	$B3$	-3.083 ± 0.01	0.151 6	4	0.037 9	19.791 2 **
$H \times L$	$B1$	-3.974 ± 0.05	0.154 9	4	0.038 7	0.410 8
	$B2$	-3.530 ± 0.01	0.008 9	4	0.002 2	0.626 6
	$B3$	-3.083 ± 0.01	0.007 3	4	0.001 8	0.950 3
$A \times H \times L$	$B1$	-3.974 ± 0.05	0.401 2	8	0.050 1	0.532 1
	$B2$	-3.530 ± 0.01	0.019 7	8	0.002 5	0.689 8
	$B3$	-3.083 ± 0.01	0.020 4	8	0.002 5	1.330 6
误差 error	$B1$	-3.974 ± 0.05	10.177 4	108	0.094 2	
	$B2$	-3.530 ± 0.01	0.385 2	108	0.003 6	
	$B3$	-3.083 ± 0.01	0.206 8	108	0.001 9	
总变异 total	$B1$	-3.974 ± 0.05	2 146.519 0	135		
	$B2$	-3.530 ± 0.01	1 687.167 0	135		
	$B3$	-3.083 ± 0.01	1 287.661 3	135		

1) $F_{0.05}(2, 108) = 3.09$, $F_{0.01}(2, 108) = 4.82$, $F_{0.05}(4, 108) = 2.46$, $F_{0.01}(4, 108) = 3.51$

A 因素的 3 个水平之间在 $B2$ 、 $B3$ 波段中, 第 3 水平与前 2 个水平的差异都达到极显著, 但第 1、2 两个水平之间差异不显著, 且除 $B2$ 波段外, 随着 A 的增大, 样本曲线方差(对数)呈一定函数增加的趋势. L 因素各水平之间, 除 $B1$ 波段中的第 2、3 两个水平之

间的差异不显著外, 其他全都差异极显著, 且随着 L 的增大, 样本曲线方差(对数)呈一定函数增加的趋势. 土壤光谱样本曲线的离散性随几何条件不同因素及水平变化显著性的差异性, 可以用噪音信号的影响解释. 一般情况下, 样本光谱曲线可表示为:

表 2 试验各水平之间的多重比较
Tab. 2 Multi-comparision between levels

变异来源 source	波段 selected bands	反射系数方差(对数)平均值 ¹⁾ average variance logarithm values	各水平样本曲线反射系数方差(对数)平均值 ²⁾ average variance logarithm values of every level		
			1	2	3
A	B 1	- 3.973±0.05	- 4.002±0.09aA	- 4.012±0.09aA	- 3.906±0.09aA
	B 2	- 3.530±0.01	- 3.609±0.02bB	- 3.570±0.02bB	- 3.410±0.02aA
	B 3	- 3.083±0.01	- 3.161±0.01bB	- 3.115±0.01bB	- 2.972±0.01aA
H	B 1	- 3.974±0.05	- 3.989±0.09aA	- 3.927±0.09aA	- 4.005±0.09aA
	B 2	- 3.530±0.01	- 3.537±0.02aA	- 3.525±0.02aA	- 3.527±0.02aA
	B 3	- 3.083±0.01	- 3.094±0.01aA	- 3.075±0.01aA	- 3.079±0.01aA
L	B 1	- 3.974±0.05	- 4.179±0.09bB	- 3.803±0.09aA	- 3.939±0.09aA
	B 2	- 3.530±0.01	- 3.737±0.02cC	- 3.508±0.02bB	- 3.344±0.02aA
	B 3	- 3.083±0.01	- 3.290±0.01cC	- 3.062±0.01bB	- 2.896±0.01aA

1) 各波段 3 个水平平均值方差在 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.05$ 两个水平都不齐次, 用 Tamhane 方法检验;
2) 多重比较中同行数据后大、小写字母相同分别代表 $\alpha=0.01$ 、 $\alpha=0.05$ 水平差异不显著(Tamhane 法)

$\rho = (R_s + R_n + R_m)/(R_p + R_n + R_m)$, (1)
式中, ρ 为样本光谱反射系数, R_s 为光源经土壤表面反射进入探头的能量通量, R_n 为测试环境反射或散射的杂散光经土壤表面反射后进入探头的能量通量, R_p 为相同辐射条件下光源经朗伯反射面(白板)反射后进入探头的能量通量, R_m 为测试系统随机噪音. 因本试验中 R_m 相对于 R_s 、 R_n 、 R_p 来说极小, 可以近似地认为等于 0, 故式(1)可表述为:

$$\rho = (R_s + R_n)/(R_p + R_n).$$
 (2)

在土样光谱样本曲线采集过程中, 测试环境的改变会导致 R_n 的变化, 从而使样本曲线产生离散, 而 R_s 、 R_p 与 R_n 比值(即信噪比)的大小能反映 R_n 所占的比重, 信噪比越小, R_n 的影响越大, 样本曲线的离散性越大.

试验几何条件主要从以下方面影响信噪比, 光源照射角度 A 引起的土壤表面光能分布的余弦效应可用下式表示:

$$F_A = F_O \cdot \cos A,$$
 (3)

式中, F_A 和 F_O 分别为视场内光源照射角度为 A 时土样表面的能量密度和光源垂直照射土样表面时的能量密度. 随着 A 的增大, F_A 减小, R_n 所占比重相应增加, 信噪比降低, 从而使光谱样本曲线的离散性有增大的趋势. 另外, 由于土样表面的反射并不是标准的漫反射, 而具有一定的方向性, 进入探头的能量通量随着光源照射角度的变化而不同, 从而导致信噪比的变化, 进而影响到光谱曲线的离散性.

在其他条件不变的情况下, 光源距离 L 增大, 土样表面单位面积上的能量密度减小, R_n 所占比重相

应增加, 信噪比降低, 光谱曲线的离散性增大.
因素 H 对样本曲线离散性影响不显著的原因在于, 当光源角度和光源距离一定的情况下, 土壤表面视作一平面光源, 如果忽略短距离内空气对能量的衰减, 则进入探头的能量通量只是探头视场角的函数, 而与探头到被试样品表面的距离无关.
此外, 光源能量的本身分布特征引起的信噪比的变化、光源能量沿波长分布的不均匀性会引起信噪比在不同研究波段有所差异, 造成不同研究波段几何条件对离散性影响显著性差异.

2.2 室内土壤高光谱理想几何测试条件的确定
根据光谱样本曲线离散性的方差分析结果, 对于 A 和 L 2 个因素, 选择方差(对数)平均值较小的第 1 水平(即光源角度 15° , 光源距离 30 cm)作为试验光源入射角度及光源距离的测试条件较为理想; 对于 H 因素, 因该因素各水平之间方差(对数)平均值不显著, 故主要考虑探头感应面应当尽量能代表试样表面光谱特性状况, 另外还考虑被测样品盛装器皿的直径以及所需样品等因素, 选择 15 cm 探头距离(探头视场角 8° , 盛样皿的直径不小于 5 cm)作为最佳测试探头距离.

综上所述, 在采用功率为 50 W 卤素灯的条件下, 光源入射角度 15° 、光源距离 30 cm、探头距离 15 cm 为较理想的几何测试条件, 能较好地保证几何条件对土壤高光谱影响的一致性.

为进一步验证光源距离和探头距离对光谱质量的影响, 在光源角度为 30° (第 2 水平)、探头距离为 15 cm(第 2 水平)的条件下, 加测 60、80、100 cm 3 个

光源距离水平, 在光源角度为 30° (第 2 水平) 和光源距离为 40 cm (第 2 水平) 的条件下, 加测 5.25 cm 2 个探头距离水平. 结果如图 2 所示, 样本曲线各波段方差基本上不随探头距离的变化而变化, 方差的变化范围只有 0.000 7 左右 (即 0.000 2~0.000 9), 但

样本曲线各波段方差与光源距离却呈一定的函数关系 (非线性), 且函数关系因波段不同而有所差异, 方差变化范围也较大, 从 0.000 1 到 0.007 2, 原因如 2.1 中所述.

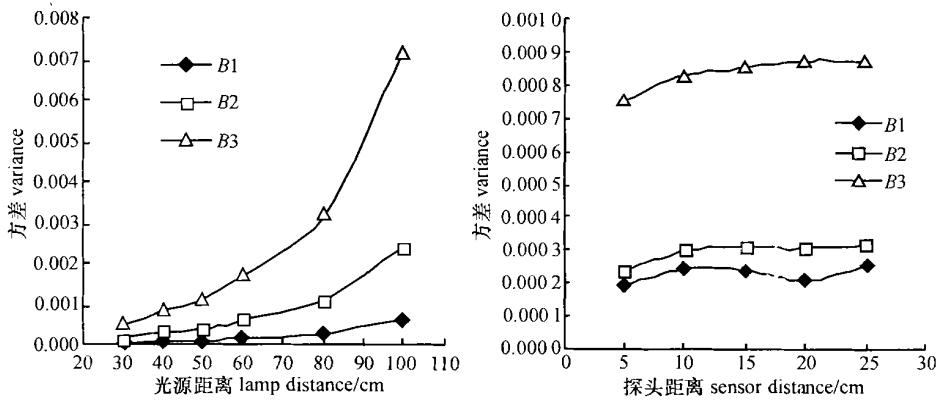


图 2 样本曲线方差与光源距离和探头距离的关系
Fig. 2 The relations between lamp distances, sensor distances and hyperspectral variance values

3 结论

室内土壤高光谱测试, 在光源功率为 50 W, 探头视场角为 8° 的条件下, 探头距离对高光谱曲线的离散性没有显著影响, 而光源入射角度和光源到被测试样品表面距离都对土壤高光谱曲线的离散性除 B1 波段外有极显著影响, 各因素不同水平之间差异的显著程度因波段不同而有一定的差异.

根据测试几何条件对室内土壤高光谱曲线离散性影响的规律, 在光源功率为 50 W, 探头视场角为 8° 的条件下, 建议选择光源入射角度 15° , 光源距离 30 cm、探头距离 15 cm 作为室内土壤高光谱测试的几何条件.

光源功率的变化可能会影响试验最优几何测试条件的选择. 由式(2)可知, 随着光源功率的增大, R_s 和 R_p 都增大, 光谱测试过程中的信噪比增加, 从而有可能改变各水平之间的显著性, 具体规律有待进一步研究.

参考文献:

[1] KRISHNAN P, ALEXANDER J D, BUTLER B J, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter [J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44: 1 282—1 285.
[2] STONER E R, BAUMGARDNER M F. Characteristic variations in reflectance of surface soil [J]. Soil Sci Soc Am J, 1981, 45: 1 161—1 165.
[3] 朱永豪, 邓仁达, 卢亚非, 等. 不同湿度条件下黄棕壤光

谱反射率的变化特征及其遥感意义[J]. 土壤学报, 1984, 21(2): 194—201.
[4] 季耿善, 徐彬彬. 土壤粘土矿物特性及其在土壤学上的应用[J]. 土壤学报, 1987, 24(1): 67—76.
[5] HUMMEL J W, SUDDUTH K A, HOLLINGER S E. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 32: 149—165.
[6] GALVAO L S, PIZARRO M A, EPIPHANIO J C N. Variations in reflectance of tropical soils: spectral-chemical composition relationships from AVIRIS data [J]. Remote Sens Environ, 2001, 75: 245—255.
[7] HENDERSON T L, BAUMGARDNER M F, FRANZMEIER D P, et al. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter [J]. Soil Sci Soc Am J, 1992, 56: 865—872.
[8] MATHIEU R, POUGET M, CERVILLE B, et al. Relationships between satellite based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of an acid environment [J]. Remote Sens Environ, 1998, 66: 17—28.
[9] LEONE A P, SOMMER S. Multivariate analysis of laboratory spectra for the assessment of soil development and soil degradation in the southern Apennines (Italy) [J]. Remote Sens Environ, 2000, 72: 346—359.
[10] 方开泰. 实用多元统计分析[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1989. 121—132.

【责任编辑 李晓卉】