

# 理加快讯

2019【2】期 总第47期



LICA NEWSLETTER

2019年8月

An aerial photograph of a lush green landscape. A winding river flows through the center, with a paved path following its course. The terrain is a mix of vibrant green grass and some water-filled areas, possibly a wetland or a park. In the distance, there are rolling hills and a line of wind turbines under a clear sky.

Novel Instruments  
Provide New Opportunities





## 01. 理加新闻

祝贺2019年高光谱测量技术及应用学术交流会圆满成功…………… 1

祝贺2019年稳定同位素生态学测量技术及应用学术交流会圆满成功! …………… 6

## 02. 技术文献

中国西北地区荒漠植物在两种不同盐碱土中的水源和水分利用效率对比…………… 7

表征冬小麦倒伏强度敏感冠层结构参数筛选及光谱诊断模型…………… 18

利用近端遥感区分非病毒性和病毒性昆虫媒介

——数据抗干扰性的证明及重要性…………… 28

## 03. 安装案例

北京师范大学 HH2…………… 36

中国科学院大学 HH2…………… 36

山东建筑大学 FS4…………… 37

华为武汉研究所 Resonon…………… 37

内蒙古大学 水同位素分析仪…………… 38

中国科学院西双版纳热带植物园 土壤呼吸系统…………… 39

中国科学院地球环境研究所 涡度梯度…………… 40

新疆博尔塔拉蒙古自治州农药残留检测中心 Futura…………… 41

## 04. 遥感微气象与生态系统属性综合观测系统

EcoSpec System…………… 42

## 祝贺2019年高光谱测量技术及应用学术交流会圆满成功



2019年5月21日-5月30日，北京理加联合科技有限公司（以下简称：理加联合）再一次携手美国ASD公司（现隶属于Malvern Panalytical）、美国Resonon公司，分别在北京、郑州、南京、昆明举办了“2019年高光谱测量技术及应用学术交流会”。

### ASD地物光谱仪巡回培训会议足迹

2013-2019年

7年

20个城市

26次会议

**2019年高光谱测量技术及应用学术交流会——北京站**

北京师范大学 京师学堂 2019年5月21日

**2019年5月21日 北京站**

本次会议在北京师范大学京师学堂京师厅举办，由北京师范大学地理科学学部、遥感科学国家重点实验室主办，美国ASD公司（现隶属于Malvern Panalytical）、美国Resonon公司、北京理加联合科技有限公司协办。来自北京师范大学、北京林业大学、中科院遥感所、中科院植物所、中国科学院地理科学与资源研究所、中国农业大学、中国林业科学研究院等单位200余位老师参加了会议。

野外光谱测量，易受观测时间、光照条件、气象条件、仪器定标等多种因素影响，如何在测量过程中减小测量误差、获取更加真实的高光谱数据，并将这些数据应用于地物特征分析、定性地物表达、定量遥感研究、遥感地面验证等领域，是目前高光谱应用的一个挑战和难题。

## 2019年高光谱测量技术及应用学术交流会——郑州站

郑州市中州国际饭店 | 2019年5月23日



### 2019年5月23日 郑州站

本次会议在河南省郑州市中州国际饭店郑州博物馆店举办，由河南农业大学信息与管理科学学院主办，美国ASD公司（现隶属于Malvern Panalytical）、美国Resonon公司、北京理加联合科技有限公司协办。来自河南农业大学、河南省林业科学研究院、河南省科学院地理研究所、郑州大学、黄河水利科学研究院等单位的老师参加了会议。

通过参与此次会议，各位老师了解到，高光谱设备（如：ASD地物光谱仪、Resonon高光谱成像仪、Itres机载高光谱成像仪）在可见光-近红外区域光谱分辨率达到纳米级别，能够提供丰富的地球表面信息，已经成为地质制图、植被调查、海洋遥感、农业遥感、大气研究、环境监测等领域的有效技术手段。





## 2019年5月28日 南京站

本次会议在南京大学仙林校区昆山楼一楼报告厅举办，由南京大学国际地球系统科学研究所、南京大学地理与海洋科学学院、南京农业大学国家信息农业工程技术中心、南京农业大学智慧农业研究院主办，美国ASD公司（现隶属于Malvern Panalytical）、美国Resonon公司、北京理加联合科技有限公司协办。来自南京农业大学、南京大学、南京师范大学、华中师范大学、河海大学等单位的老师参与了会议。

作为ASD地物光谱仪、Resonon高光谱成像仪及Itres高光谱成像仪的代理商，以及美国ASD公司（现隶属于Malvern Panalytical）中国区售后服务中心，理加联合将在不断引进更优秀的光谱产品的同时，持续提升售前支持、售后服务水平，为您的光谱测量事业提供更便捷、更全面、更专业的服务。



## 2019年5月30日 昆明站

本次会议在云南大学资源环境与地球科学学院一楼会议大厅举办，由云南大学资源环境与地球科学学院主办，美国ASD公司（现隶属于Malvern Panalytical）、美国Resonon公司、北京理加联合科技有限公司协办。来自云南大学、云南农业大学、昆明理工大学、贵州省山地资源研究所等单位近80位老师参与了会议。

欢迎您加入“ASD地物光谱仪-认证交流QQ群”，一起探讨地物光谱仪的应用技巧

QQ群号：243178318

（为了方便管理员审核，请在加群时备注您的单位和姓名，多谢！）

欲下载本次巡回会议PPT，请关注理加联合公众号，在后台回复内容：PPT，即可下载哦





## 2019 年稳定同位素生态学测量技术及应用学术交流会

2019.06.25



2019年6月25日，2019年稳定同位素生态学测量技术及应用学术交流会在中国林业科学研究院学术报告厅成功召开。会议由中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所主办，中国林学会森林生态分会、加拿大ABB公司及北京理加联合科技有限公司协办。

众所周知，稳定同位素技术被广泛应用于生态、环境、水文、地质、农业、能源等众多研究领域，帮助科学家解决了诸多科学问题，现已逐步成为了解生物与其生存环境相互关系的强有力的工具。随着科研需求的发展，稳定同位素技术从实验室走向了野外。激光稳定同位素测量技术的出现，不仅在实验室可得到高精度的数据，同时使得快速获取高精度的连续在线同位素测量数据成为可能，该技术可以和传统的质谱相媲美，成为一种新型、有效的测量稳定同位素的方法之一，是经典的稳定同位素质谱技术的拓展和补充。

2019年稳定同位素生态学测量技术及应用学术交流会的成功举办，让参会老师充分了解了稳定同位素测量最新技术与应用，促进了不同学科领域学者间的交流，为我国稳定同位素技术的腾飞奠定了坚实的基础。理加联合作为专业的生态环境仪器供应商与技术服务商，会努力提升自己的销售、商务、售后服务和技术支持水平，为您的科研事业保驾护航。



**关注公众号，回复“资料”添加工作人员微信，进入此次同位素交流群，获取会议PPT。**



## 中国西北地区荒漠植物在两种不同盐碱土中的水源和水分利用效率对比

**摘要：**由各种盐分引起的土壤退化是一个严重的环境问题，特别是在干旱和半干旱地区。探讨有关盐生植物水分的生理特性，有助于了解盐耐机制，对恢复干旱区的土壤退化具有重要意义。

为了研究不同类型的盐度对自然环境中沙漠植物的水源和水分利用效率的影响，本文对以下植物进行了研究：花花柴 (*karelinia caspia*)、怪柳 (*tamarix hohenakeri*)、小果白刺 (*nitharia sibirica*)、芦苇 (*phragmites australis*)、骆驼刺 (*alhagi sparsifolia*)、小叶碱蓬 (*suaeda microphylla*) 和同齿樟味藜 (*kalidium folitum*)。分析上述植物在西北地区中性盐碱地 (NSS) 和碱性盐碱地 (ASS) 的叶气交换、及其叶片中碳同位素、木质部氧同位素组成和土壤中氧同位素组成。

研究植物具有不同的木质部水中氧同位素组成 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) 和叶片中碳同位素组成 ( $\delta^{13}\text{C}$ )，表明沙漠植物能够通过水分利用模式的分化而共存。ASS 试验点与 NSS 试验点相比，花花柴、骆驼刺和小叶碱蓬茎中  $\delta^{18}\text{O}$  贫化，说明在盐碱化和盐碱化环境胁迫下，植物可以从深层土壤层获得水分。骆驼刺在 ASS 的  $\delta^{13}\text{C}$  高于 NSS，而花花柴和小叶碱蓬的  $\delta^{13}\text{C}$  在 ASS 低于 NSS，这可能是由于植物耐碱性和耐盐性的种间差异所致。

研究结果表明，在盐度和碱度较高的情况下，植物可以利用较深的土壤水，以避免表层土壤中高浓度可溶性盐引起的离子毒性。在可管理土地上，因地制宜地选择和培育不同的耐盐或耐碱植物品种至关重要。

**关键词：**盐-碱性土壤、稳定同位素、水源、水分利用效率、光合作用

## 引言

盐分问题在干旱和半干旱地区收到越来越多的关注，在这些地区，土壤水资源利用率低，蒸发量高，降水不足导致盐渍化严重。在全球范围内，超过8亿公顷的土地受到盐分的影响，盐渍地占世界总土地面积的6%以上。根据盐渍土的酸碱值、电导率 (EC) 和钠吸附比 (SAR) 的不同，盐渍土一般可分为9类：盐渍土、酸性盐渍土、碱性盐渍土、酸性盐渍土、碱性盐渍土、酸性盐渍土、酸性盐渍土和碱性苏打土。这些受盐影响的土壤具有独特的物理和化学性质，对植物有不同的影响，导致植物水源和水分利用效率 (WUE) 存在差异。更好地了解盐生植物对不同类型盐渍土的生理反应将有助于干旱和半干旱生态系统的保护和管理。

植物吸收来自不同深度的土壤水、降水和地下水等，甚至一些物种根据环境条件的变化而改变在土壤中的吸水深度。根系分布的差异可能有助于多种生长形式的植物共存。与中性盐胁迫相比，碱性盐胁迫还涉及高pH的影响。植物根系周围的高pH环境可以直接抑制矿物质元素（如 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ ）的吸收，造成植物细胞离子平衡的破坏。碱性盐渍土也存在结构问题，如表面结皮和硬化。这些问题会影响水分运动、植物有效水分的保持能力和根系渗透，进而影响植物的水分利用。植物通过改变其根系分布，以获得可用资源并承受环境压力。因此，在干旱和半干旱环境中，植物可能会在盐度和碱胁迫增加的情况下转向使用深层土壤水。

高WUE是盐生植物耐盐性最重要的生理机制之一。通过降低气孔导度可以提高WUE，从而降低 $\text{CO}_2$ 同化率，减缓生长速度，但增加了单位蒸腾水的碳固定比率。定期测量稳定碳同位素组成 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 以评估C3植物中的植物WUE，之前的研究表明， $\delta^{13}\text{C}$ 值与盐度呈正相关和碱度。碱胁迫对某些盐生植物的毒性作用比盐胁迫更为严重；因此，在碱性盐碱土中的植物可能比中性盐碱土中的植物具有更高的WUE。迄今为止，对不同盐碱土（中性盐碱土与碱性盐碱土）荒漠植物的水源和水分利用效率的研究很少，尤其是在田间条件下。

研究了我国西北地区不同盐碱土旱季荒漠植物的水源和水分利用效率。选择两种盐碱土：中性盐碱土和碱性盐碱土。测定优势种木质部 $\delta^{18}\text{O}$ （研究植物水源）、叶片 $\delta^{13}\text{C}$ （研究植物WUE）、水势和叶气交换（研究植物生理特性）。由于所研究土壤的碱度差异以及植物改变其用水策略以应对环境压力的能力，我们假设：（1）与NSS站点相比，ASS站点的植物将调整其根系，以减少浅层土壤的水分吸收，并利用深层土壤水；（2）根据较高的盐度和碱度，ASS地的植物比NSS地的植物具有更高的WUE。



## 研究区

研究地点位于中国西北部新疆维吾尔自治区石河子市玛纳斯河下游（北纬44°18'18"、东经86°1'56"）。研究区具有典型的大陆性干旱气候。1949-2001年的年平均气温为6-8°C，同一年的年降雨量为110-200 mm。潜在蒸散量为1600-2000 mm。土壤为灰钙土，土壤表面出现盐结。植被贫瘠，稀疏。优势种为花花柴、小叶碱蓬和骆驼刺，灌木（小果白刺和多花怪柳）稀少。本研究选择了两个不同碱度的盐碱地（ASS：碱性盐碱土；NSS：中性盐碱土）。

**表1 两个盐碱地的信息，包括土壤类型、位置、海拔、植物种类和生命形式。**

| Soil type             | Location                     | Elevation (m) | Species                     | Families       | Life form                       |
|-----------------------|------------------------------|---------------|-----------------------------|----------------|---------------------------------|
| Alkaline saline-sodic | 85°25'49.1"E<br>44°39'29.7"N | 346           | <i>Nitraria sibirica</i>    | Zygophyllaceae | C <sub>3</sub> , Shrub          |
|                       |                              |               | <i>Tamarix hohenackeri</i>  | Tamaricaceae   | C <sub>3</sub> , Shrub          |
|                       |                              |               | <i>Karelinia caspia</i>     | Compositae     | C <sub>3</sub> , Perennial herb |
|                       |                              |               | <i>Suaeda microphylla</i>   | Chenopodiaceae | C <sub>4</sub> , Semi-shrub     |
|                       |                              |               | <i>Alhagi sparsifolia</i>   | Leguminosae    | C <sub>3</sub> , Semi-shrub     |
|                       |                              |               | <i>Kalidium foliatum</i>    | Chenopodiaceae | C <sub>3</sub> , Semi-shrub     |
| Neutral saline-sodic  | 85°22'42.8"E<br>44°43'03.9"N | 334           | <i>Karelinia caspia</i>     | Compositae     | C <sub>3</sub> , Perennial herb |
|                       |                              |               | <i>Suaeda microphylla</i>   | Chenopodiaceae | C <sub>4</sub> , Semi-shrub     |
|                       |                              |               | <i>Phragmites australis</i> | Gramineae      | C <sub>3</sub> , Perennial herb |
|                       |                              |               | <i>Alhagi sparsifolia</i>   | Leguminosae    | C <sub>3</sub> , Semi-shrub     |

## 叶气交换测量

采用LI-6400便携式光合作用系统（LI-6400, LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, USA）在北京时间9:00、12:00、15:00、18:00和21:00时对ASS地的小果白刺、怪柳、花花柴、小叶碱蓬、骆驼刺和同齿樟味藜植物进行了叶气交换测量（2009年7月23日），在NSS地对花花柴，小叶碱蓬，骆驼刺和芦苇进行叶气交换测量（2009年7月24日）。每种被研究植物随机选择5个个体进行重复测量。在两个研究地点，每株植物进行5次叶气交换测量。只使用12:00时的测量值来表示每日最大的叶碳同化。在完全照明的位置，从树冠顶部附近的幼叶，测量二氧化碳和水的交换。对于每次测量，叶室内的环境条件（即光合有效辐射、室内温度、相对湿度和二氧化碳浓度）设置为与环境条件相匹配。通过使用扫描仪扫描气体交换室中封闭的叶片，确定叶片面积。

## 土壤和植物采样

从每个采样点随机选择5个位置收集7个不同深度（0-5、5-10、10-20、20-40、40-60、60-80和80-100 cm）的土壤。在每个位置收集五个土芯，并混合在一起形成一个土壤样本。我们将每个深度的土壤分为三部分，分别用于测量土壤含水量（SWC）、pH、EC和离子含量以及同位素组成。为了测定SWC，将新鲜土壤储存在铝箔中，并烘干至恒重。然后将SWC计算为新鲜和干燥土壤样品之间的重量差。用于测量pH、EC和离子含量的土壤经过筛选和风干，用于氢和氧同位素分析的土壤储存在12ml的小瓶中。小瓶用封口膜密封防止失水，冷藏保存。用于同位素分析的土壤样品在早晨采集，在进行水样提取前储存在-20°C冷冻室中。

植物茎在早晨收集并储存在12ml的小瓶中。小瓶用封口膜密封防止失水，在进行水样提取前储存在-20°C冷冻室中。

叶片取样后在65°C下用烘箱干燥48小时。将烘干后的叶子磨成粉末，储存在塑料瓶中，测量碳稳定同位素的组成。

## 水分提取和同位素分析

在中国林业科学院稳定同位素实验室对土壤和茎中的水分进行了低温提取。然后使用**液态水同位素分析仪（LWIA, DLT-100, Los Gatos Research Inc., Mountain View, CA, USA）测定氢和氧同位素组成**。用实验室工作标准重复测量， $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的精度分别为 $<1.5\%$ 和 $<0.2\%$ 。氢和氧同位素比值以相对于标准平均海水（SMOW）为 $\delta D$ 或 $\delta^{18}O$ （‰）=  $(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}-1)$ 。

植物木质部水的稳定氢和氧同位素组成常被用来量化不同水源的贡献。但是，在使用氦测定盐生植物和旱生植物的水源时，应注意在吸水过程中可能会发生氢同位素分馏。因此，本研究仅利用木质部 $\delta^{18}O$ 资料估算植物水源。

## 统计分析

利用SPSS 16.0单因素方差分析（ANOVA）测试不同地点和物种的同位素参数差异。采用混合效应方差分析方法，研究了盐分类型和土壤深度对两种土壤参数的影响。采用Pearson相关分析法，研究了0-100cm土壤水氢氧同位素组成与土壤SWC、EC、pH、 $Na^+$ 和 $Cl^-$ 含量的关系。



## 结果

### 钠吸附比、pH、EC和离子含量

在NSS场地，SAR随土壤深度从浅层到深层的下降趋势（图1a），但各土层之间的差异不显著（表2）。在ASS位点（图1a，表2）没有检测到SAR的系统变化模式，但在SAR中存在显著的位点差异，NSS位点的SAR值低于ASS位点的SAR值（表2）。两个研究地点的深度在pH值上没有显著差异，但NSS位置的pH值低于ASS位置的pH值（图1b，表2）。EC值也表现出随土壤深度从浅层到深层的下降趋势，ASS位点的EC值高于NSS位点（图1c，表2）。

ASS与NSS的 $\text{HCO}_3^-$ 含量均接近于零（图2a），两研究区之间或每个地点的土层之间的 $\text{HCO}_3^-$ 含量没有显著差异（图2b，表2）。两个研究区的Cl<sup>-</sup>含量随土壤深度的增加而降低，ASS地的Cl<sup>-</sup>含量大于NSS地（图2c，表2）。相比之下， $\text{SO}_4^{2-}$ 含量没有随土壤深度的变化，但NSS地土壤的 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量相对低于ASS地（图2d，表2）。研究地点之间和土壤深度之间的 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 含量存在显著差异，两个研究地之间或每个地点的不同土壤深度之间的 $\text{Ca}^{2+}$ 含量无差异（图2f）。ASS位点的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 含量大于NSS位点的含量（图2eg，表2）。相比之下，与NSS站点相比，ASS站点的土壤 $\text{K}^+$ 含量较低（图2h，表2）。

### 土壤含水量和土壤水同位素组成

两研究区的土层SWC不同，从0-5 cm土层的12%左右增加到80-100 cm土层的25%以上。然而，在SWC中没有发现显著的研究部位差异（图3a，表2）。

在这两个地点，土壤中氢（ $\delta^2\text{H}$ ）和氧（ $\delta^{18}\text{O}$ ）的水同位素组成沿土壤剖面呈明显的下降趋势（图3b和c，表2）。ASS地与NSS地相比，土壤水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别高9.0‰和3.3‰。

**表2 双向方差分析对盐分类型、土壤深度及其相互作用对土壤理化变量影响的结果**

|                                       | Salinity type |          | Soil depth |          | Salinity type × Soil depth |          |
|---------------------------------------|---------------|----------|------------|----------|----------------------------|----------|
|                                       | <i>F</i>      | <i>P</i> | <i>F</i>   | <i>P</i> | <i>F</i>                   | <i>P</i> |
| SAR                                   | 58.66         | <0.001   | 2.30       | 0.168    | 0.89                       | 0.508    |
| Soil pH                               | 29.92         | 0.002    | 0.30       | 0.917    | 1.09                       | 0.382    |
| EC                                    | 16.74         | 0.006    | 14.98      | 0.002    | 0.87                       | 0.525    |
| SWC                                   | 0.07          | 0.805    | 45.71      | <0.001   | 0.47                       | 0.831    |
| Soil water $\delta^2\text{H}$         | 33.12         | 0.001    | 32.21      | <0.001   | 2.33                       | 0.047    |
| Soil water $\delta^{18}\text{O}$      | 59.91         | <0.001   | 76.79      | <0.001   | 1.67                       | 0.149    |
| Na <sup>+</sup> content               | 55.03         | <0.001   | 15.52      | 0.002    | 0.91                       | 0.493    |
| K <sup>+</sup> content                | 6.67          | 0.037    | 36.10      | <0.001   | 0.69                       | 0.657    |
| Ca <sup>2+</sup> content              | 2.65          | 0.155    | 1.59       | 0.294    | 0.83                       | 0.553    |
| Mg <sup>2+</sup> content              | 37.23         | 0.001    | 46.12      | <0.001   | 0.29                       | 0.939    |
| Cl <sup>-</sup> content               | 21.19         | 0.004    | 17.34      | 0.001    | 0.58                       | 0.747    |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> content | 7.36          | 0.033    | 3.82       | 0.064    | 0.20                       | 0.977    |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> content | 0.14          | 0.717    | 1.63       | 0.283    | 0.44                       | 0.847    |

加粗为*p*值<0.05; 盐度类型, 土壤深度及其相互作用的自由度分别为1,6和6。

注: SAR-钠吸附率; EC-导电率 (dS m<sup>-1</sup>); SWC-土壤含水量 (%); 土壤水分 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$  (‰); 所有离子含量 (g Kg<sup>-1</sup>) 。

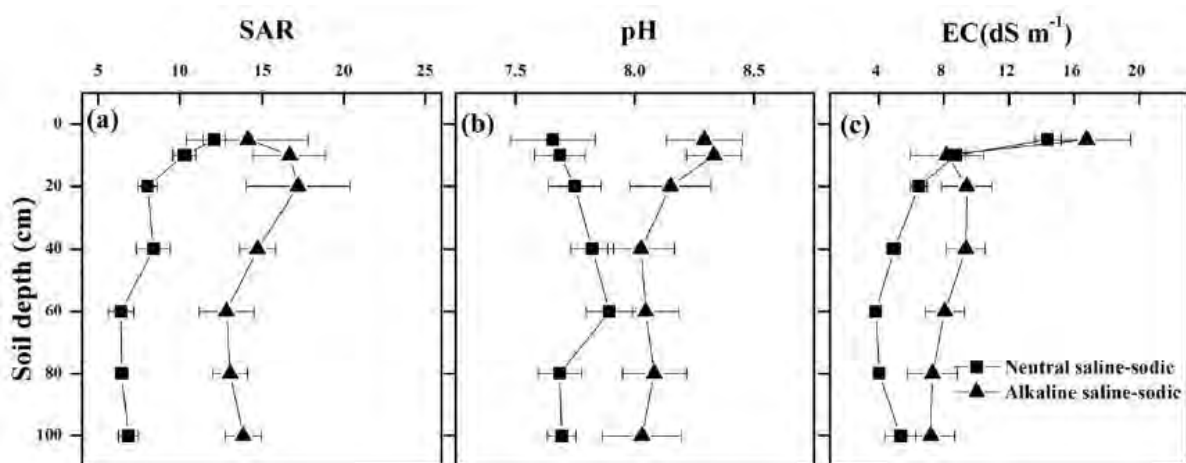


图1 两盐碱地中钠吸附比 (SAR)、酸碱度和电导 (EC) 随土壤深度的变化  
误差条代表平均值的标准误差 (n=5)



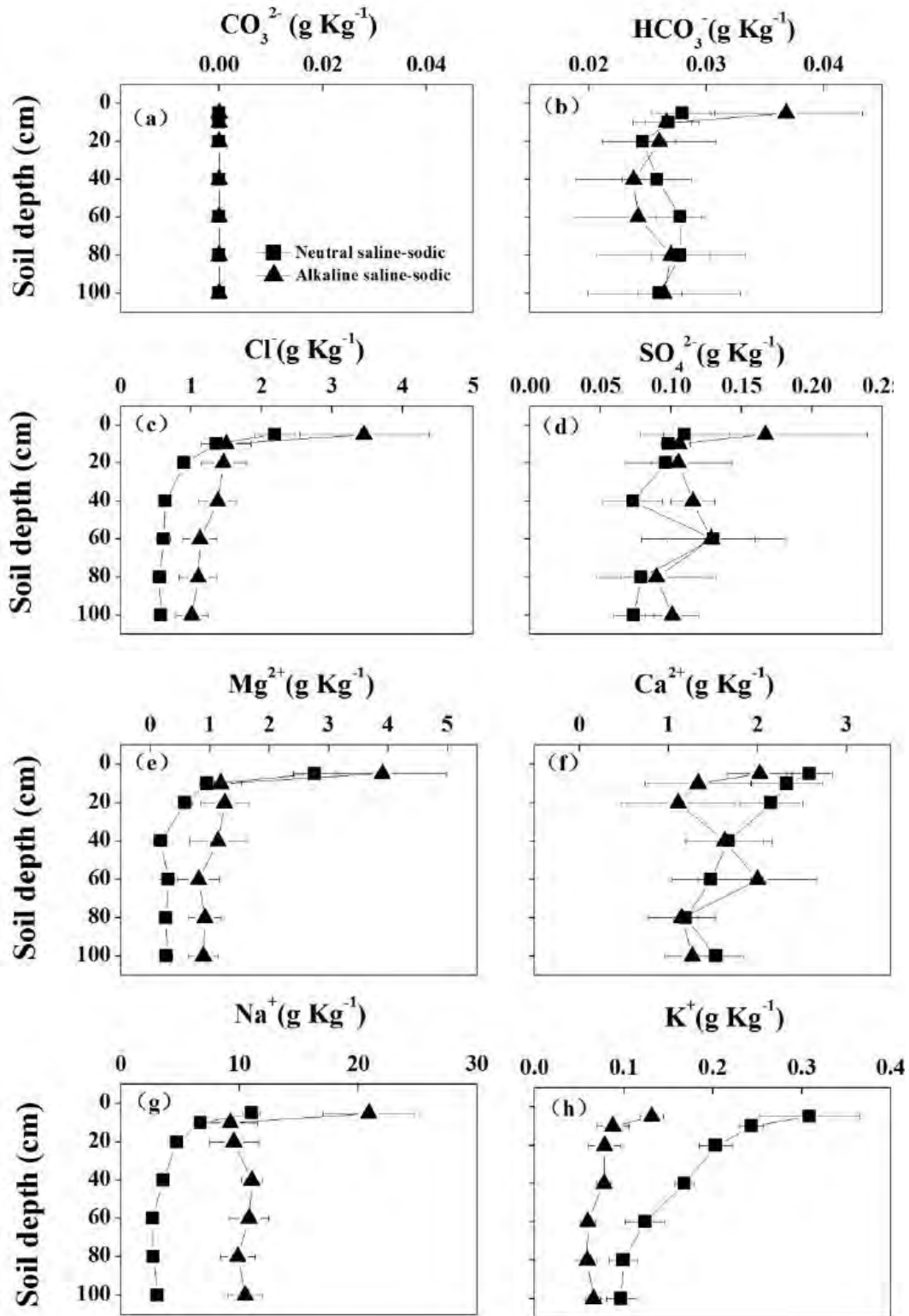


图2 两盐碱地中离子含量随土壤深度的变化  
 误差条代表平均值的标准误差 (S.E.) (n=5)

### 植物吸水深度和木质部水同位素组成

在NSS地植物水和土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在重叠，但在ASS地未出现重叠（图4）。在NSS现场，花花柴和芦苇从60-80 cm土层中提取了水，而骆驼刺则利用了相对较浅土壤深度（40-60 cm）的水。小叶碱蓬的吸水深度达到100cm（图4a）。在ASS地，所有植物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比土壤层中0-100cm的土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值更低，这表明所有植物对土壤水得主要利用深度大于100cm（图4b）。

木质部 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值在植物种类和两个研究地之间存在差异（图5）。在NSS地，骆驼刺的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显高于花花柴、小叶碱蓬和芦苇。在ASS地，骆驼刺的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最高，怪柳的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最低。NSS地的花花柴、小叶碱蓬和骆驼刺的木质部水分在 $\delta^{18}\text{O}$ 时分别比ASS地高2.10‰、1.88‰、3.43‰。

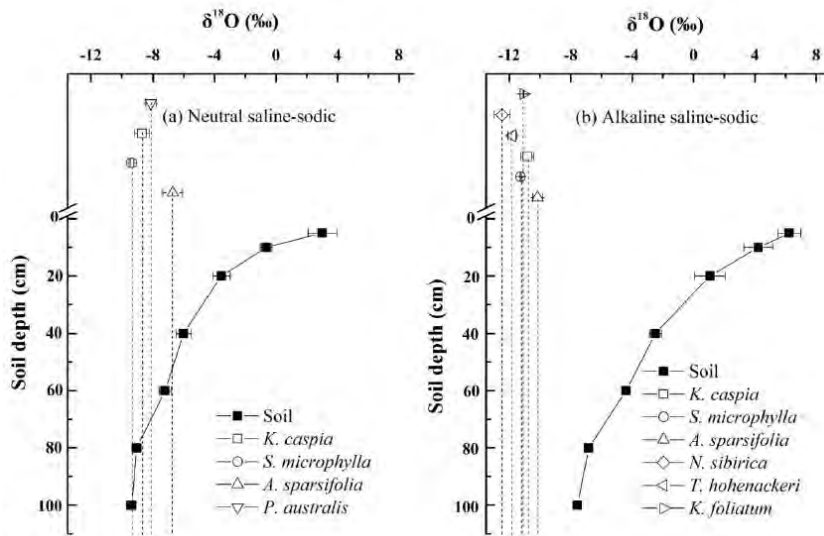


图4 NSS站点 (a) 和ASS站点 (b) 土壤水分和植物木质部的 $\delta^{18}\text{O}$ 值

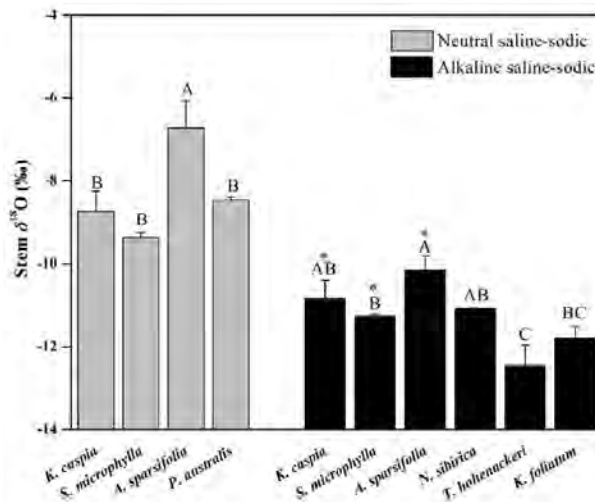


图5 NSS站点和ASS站点优势植物的茎中 $\delta^{18}\text{O}$ 值

不同字母表示一个地点内两个物种之间的显著差异。\*表明两个站点之间存在显著的内部差异。

## 叶碳同位素组成

两盐碱地的叶片碳同位素组成 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 存在显著的种间差异 (图7)。在ASS站点, 小叶碱蓬的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高, 花花柴的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低。在NSS位点, 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值按小叶碱蓬>芦苇>花花柴>骆驼刺的顺序排列, 存在显著差异。优势植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也表现出位置差异 (图7), 花花柴和小叶碱蓬的叶碳同位素含量分别比ASS高4.25‰和0.80‰, NSS骆驼刺比ASS站点高1.48‰。

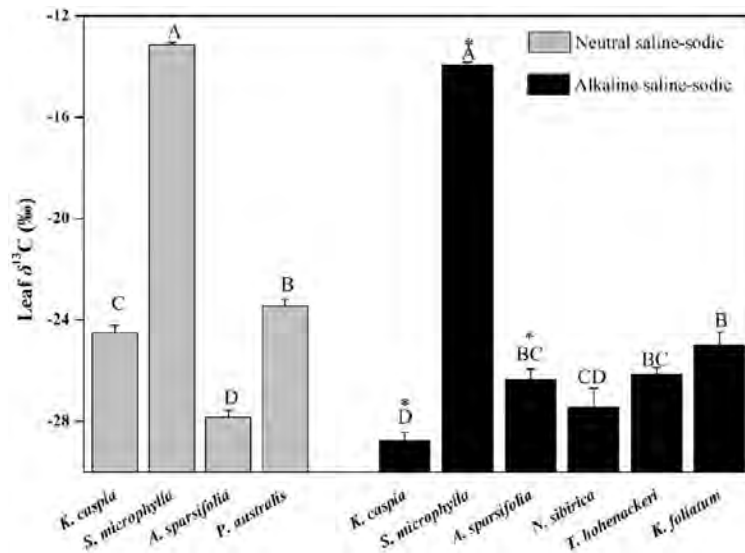


图7 NSS站点和ASS站点优势植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

不同字母表示一个地点内两个物种之间的显著差异。\*表明两个站点之间存在显著的内部差异。

## 讨论

### 木质部 $\delta^{18}\text{O}$ : 环境和遗传差异

植物水和土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在某些深度范围内重叠, 尽管NSS场地土壤的同位素梯度随土壤深度严重耗尽, 这推断NSS场地内的所有植物主要利用相对较浅土壤深度 (0-100cm) 的水。对于ASS位点, 虽然木质部 $\delta^{18}\text{O}$ 值与0-100cm的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值没有重叠, 但根据土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的趋势, 木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征值可能与1m以下的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值发生重叠。因此, 我们可以推断, 与NSS站点相比, ASS站点中的植物更多地依赖于深层土壤水 (低于1 m), 而较少依赖于浅层土壤水。研究表明, 尽管植物木质部 $\delta^{18}\text{O}$ 的位置略有差异, 但研究区域常见的三种物种 (花花柴、骆驼刺和小叶碱蓬) 主要利用ASS地的深层土壤水 (盐度和碱度高于NSS位置)。这支持了我们的假设, 即植物可以调整其根系, 以减少从浅层土壤中吸收水分, 并在较高盐度和碱度下利用较深的土壤水。这与在沼泽生态系统和沿海生态系统中研究结果类似, 木本植物在水分吸收模式上能够通过空间分配和时间转移, 以避免盐的吸收。



在本研究中，土壤中的钠离子、氯离子和EC随着深度的增加而降低（图1-2），土壤盐分也随深度的增加而呈降低趋势。盐分在土壤中的积累可以土壤质地发生改变，使土壤的多孔性，通气性和导水性降低。此外，土壤盐分和碱度过高会导致土壤中形成一个低水势区，使植物越来越难以获得水和养分。因此，植物在受到盐碱化的环境胁迫时，会从深层土壤中获取水分。此外，在干旱生态系统中，骆驼刺在盐渍土中对土壤水的利用深度大于沙质土。干旱胁迫下的植物也能改变其根系，维持其功能和生长。由于生根功能和生态可塑性程度的不同，不同物种间植物向深层水分的利用转移能力也不同。先前的一些研究表明，骆驼刺是一种潜水植物，进化出了深根，在沙漠环境中完全依赖地下水。在本研究中，骆驼刺确实比花花柴和小叶碱蓬（图4）在处理土壤盐碱度方面显示出更高的水分利用模式可塑性。

在ASS站点的优势植物中，木质部 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在差异，这意味种间可能存在着水源差异。吸水深度的变化可导致生态位分化和资源的互补利用，进而促进物种共存和生态系统功能。值得注意的是，植物木质部 $\delta^{18}\text{O}$ 特征的差异不如土壤水分 $\delta^{18}\text{O}$ 特征的差异大，这可能会降低我们推断的可信度。但由于土壤蒸发量较低，深部土壤水分 $\delta^{18}\text{O}$ 特征波动较小，因此，尽管植物木质部水分特征的变化实际上很小，但不同植物的水源可能不同。ASS站点的植物主要利用深层土壤水。据悉，小果白刺会在春季依赖上层的土壤水分，夏季由于存在双根系统而转入深层土壤水分。这一结果与我们的研究结果相似，小果白刺主要在夏季使用深层土壤水。怪柳是一种地下水湿生植物，其根系主要分布在深层土壤层中，并依赖于地下水。相比之下，多年生草本植物（花花柴和芦苇）和半灌木（骆驼刺和小叶碱蓬）主要在NSS站点提取浅层土壤水。花花柴提取水分的主要土壤层是沙漠河岸森林中的50-100 cm层，这与我们从NSS现场得出的结果类似。但奇怪的是，我们发现同齿樟味藜主要使用深水（低于100厘米）。然而，这一结果与它的根系分布模式不一致（直根穿透到70-80cm深）。尽管我们的研究没有证实这一点，但我们推测同齿樟味藜可能利用露水。事实上，有一些证据表明地中海植物可以吸收0-2cm土层上部的露水，而露水大约占一些沙漠植物吸收水分的50%。

### 不同盐分环境下叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和WUE

叶片碳同位素组成（ $\delta^{13}\text{C}$ ）取决于环境条件和物种特性。在本研究中，两盐碱地相距不远，因此具有相似的气候条件。此外，两研究地点的SWC没有显著差异。因此，叶片碳同位素组成主要受土壤盐度和碱度的影响（表2，s1）。

叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 提供了长期WUE信息，被广泛用于植物碳-水关系研究。此外，C4植物和C3植物的全球平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为-14‰和-28‰。本研究中，C3植物的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-26.19‰，C4种植物的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-13.53‰，说明石河子地区的植物具有较高的WUE值。

两种盐渍土的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值也存在明显差异，其中骆驼刺在ASS站点的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于NSS站点。ASS站点的土壤盐度高于NSS站点的土壤（图1）。这一结果与之前在棉花叶片、大麦、小麦暴露于盐碱生长条件后的高 $\delta^{13}\text{C}$ 值的结果一致。 $\delta^{13}\text{C}$ 增加的原因是盐胁迫下气孔对光合作用的限制。然而，本研究中，气孔限制并不能解释骆驼刺茎中 $\delta^{13}\text{C}$ 的增加。气孔导度的降低导致环境胁迫下细胞间二氧化碳浓度（ $C_i$ ）的降低，最终导致叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的增加。当气孔导度降低间接降低 $\text{CO}_2$ 同化率（A）时， $C_i$ 降低，而 $\delta^{13}\text{C}$ 应升高。相反，A直接被叶片代谢影响而降低，导致 $C_i$ 增加， $\delta^{13}\text{C}$ 减少。后者可以解释在NSS站点骆驼刺中 $\delta^{13}\text{C}$ 的较低值。

与此相反，小叶碱蓬的 $\delta^{13}\text{C}$ 在ASS部位比在NSS部位低（图6）。本研究选取了两个气候条件相似，但盐碱等土壤性质不同的研究地点。盐度增加C4植物的束鞘泄漏，导致植物 $\delta^{13}\text{C}$ 降低。由于是C4双子叶植物，因此，小叶碱蓬叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 在ASS部位被耗尽，这可能是由于和气孔导度增加所致。在较高的盐度下，有些物种表现为WUE增加，而其他物种则表现为WUE减少。植物对盐和碱胁迫下气体交换的气孔和生化调节存在差异，这导致了两个研究地点的常见物种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在差异。本研究中，盐度对叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的不一致影响可能是由于盐和碱耐受性的物种差异造成的。

## 结论

本研究中常见沙漠植物在不同的盐分环境下，能够采用不同的水分利用策略来应对盐分胁迫。三种常见物种（花花柴、小叶碱蓬和骆驼刺）在NSS站点利用浅层土壤水，而在ASS站点利用深层土壤水，表明植物有调节根系功能的能力，以应对土壤盐碱度。鉴于沙漠植物在两个盐碱地的用水模式存在差异，在通过植物修复解决含盐问题时，必须考虑含盐类型。碱性盐碱环境可能需要有潜水植物（罗望子）或耐碱盐生植物（地肤子），以提高土壤碱度；这些植物能够避免表面盐胁迫，利用深层土壤水。然而，除盐生植物外，如骆驼刺（通过排除 $\text{Na}^+$ 而在其叶片中积累 $\text{Ca}^{2+}$ ，显示出较高的离子选择性），对于恢复盐碱环境也是必要的。

“

## 表征冬小麦倒伏强度敏感冠层结构参数筛选及光谱诊断模型

**摘要：**针对倒伏胁迫下冬小麦冠层结构变化规律不清、冠层光谱响应机理不明的问题，以灌浆期倒伏冬小麦为研究对象，分析不同倒伏强度下冬小麦冠层结构参数变化规律，通过光谱探测视场内的茎、叶、穗面积比率与倒伏角度的相关性分析，筛选出表征倒伏强度的敏感冠层结构参数，采用传统光谱变换方法与连续小波变换方法对倒伏冬小麦冠层高光谱数据进行处理分析，筛选冠层结构参数的敏感波段和小波系数，采用偏最小二乘法构建冠层结构参数与高光谱特征参量的响应模型，并利用野外实测样本验证模型精度（建模集样本 28 个，验证集样本 13 个）。研究结果表明：倒伏后的冬小麦茎叶比与倒伏角度的相关性最高（ $-0.687$ ， $P < 0.01$ ），能较好地表征冬小麦倒伏强度，且茎叶比随着倒伏角度的减小而增加；基于连续小波变换的冬小麦倒伏灾情诊断模型优于常规光谱变换方法，检验样本的决定系数为  $0.632$ （ $P < 0.01$ ）；以冠层茎叶比预测结果进行倒伏灾情等级划分的精度可达  $84.6\%$ 。因此，不同倒伏强度的冠层茎叶比与冬小麦冠层光谱之间的响应规律可以有效区分倒伏灾情等级，有助于为区域尺度的冬小麦倒伏灾情遥感监测提供先验知识。

**关键词：**作物；灾害；预测；倒伏；冬小麦；高光谱；茎叶比；连续小波变换



## 引言

近年来由于全球气候变暖引起的极端天气事件频发，导致作物倒伏发生概率也逐渐增加。倒伏成为限制小麦高产优质的主要灾害胁迫之一。小麦倒伏后植株水分、养分的运转及光合作用都会降低，易诱发各种病虫害，进而对籽粒灌浆造成严重影响，严重影响冬小麦籽粒产量、品质和机械收获能力。因此，客观、快速和定量地监测小麦倒伏的发生范围和灾情程度尤为重要。

近年来发展迅速的遥感技术为小麦倒伏灾情监测及产量减损评估提供了科学的技术手段，可为小麦品种改良、田间水肥决策、农业保险快速理赔提供可靠的信息支撑。目前许多学者在利用遥感技术进行农作物倒伏监测方面从不同角度进行了探索研究。Kendall 等利用航空影像分析了不同倒伏时间和角度对英国油菜产量和含水量的影响，并在全国范围内评估倒伏对作物的综合影响。Liu 等分析了倒伏水稻在无人机数码影像上的颜色和纹理特征，构建了粒子群算法和支持向量机相结合的水稻倒伏识别监测模型。Berry 等通过设置不同倒伏角度分析倒伏强度对小麦冠层光合作用的影响，构建小麦倒伏减产损失模型。Zhang 等利用地面高光谱数据和小波变换评估了倒伏对玉米品质的影响。郭翠花等研究分析了不同产量水平下小麦倒伏与茎秆力学特性的关系，最终筛选出了“弯曲强度”和“弹性模量”2 个能作为抗倒育种的参考指标。刘忠阳等通过设置与竖直方向成 30°、60°、90° 共 3 种倒伏情况探索了冬小麦后期倒伏对其干物质分配及产量的影响，发现灌浆初期发生倒伏小麦产量降低最明显。梁玉超等研究施氮量对滴灌冬小麦茎部特征及其抗倒伏性的影响，发现茎秆基部的机械强度和抗倒伏指数随着施氮量的增加逐渐降低，随生育期的推进呈降低的趋势。在作物倒伏雷达监测方面，杨浩等利用 Radarsat-2 全极化影像数据，提出用雷达极化指数监测小麦倒伏的方法。韩东等利用 Sentinel-1 雷达数据基于后向散射系数研究构建能有效评价玉米倒伏程度的倒伏监测模型，并取得了较高精度，准确度可达 100%。目前这些研究多集中于区域尺度上监测作物倒伏受灾范围和灾情程度，倒伏对作物品种、产量及经济收益造成的影响，对于作物倒伏遥感监测大多为经验回归模型为主，缺乏对作物倒伏后的冠层光谱响应机理研究。倒伏胁迫导致冬小麦冠层结构产生较大改变，探测视场中的茎、叶、穗面积比率及各组分受光条件的变化直接反映于冠层光谱反射率，解析不同倒伏强度下的冬小麦冠层结构变化及其冠层光谱响应机理，有助于提升光学遥感技术在冬小麦倒伏灾情监测中的实际应用能力。

本文以 2018 年河北省藁城区实发倒伏冬小麦为研究对象，获取不同倒伏强度的冬小麦样本冠层高光谱数据，通过人工目视解译勾画方法提取各样本冠层结构参数信息，将其与倒伏角度进行相关性分析，筛选表征倒伏强度的最佳冠层结构参数；基于连续小波变换等多种算法对冠层高光谱数据进行数学变换，筛选敏感光谱参量，利用偏最小二乘法构建冬小麦倒伏光谱诊断模型；利用野外实测样本验证模型精度，并根据冠层结构参数光谱预测结果进行冬小麦倒伏灾情等级划分。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于河北省藁城区，地理坐标为北纬  $37.85^{\circ} - 38.31^{\circ}$ ，东经  $114.64^{\circ} - 114.98^{\circ}$ 。藁城区耕地面积约  $549 \text{ km}^2$ ，属暖温带半湿润大陆性季风气候，四季分明，表现为夏热冬寒的特点，年平均气温和年平均降水量分别为  $12.5^{\circ}\text{C}$  和  $494 \text{ mm}$ ，土壤类型主要为褐土和潮土。藁城区是典型的冀中平原冬小麦-玉米轮作区，也是河北省粮食生产大县。

### 1.2 数据获取与处理

2018 年 5 月中旬藁城区出现了季节性暴风雨，导致研究区内发生了大面积冬小麦倒伏。野外观测试验于 2018 年 5 月 29 日进行，时属小麦灌浆期，共计采集了 41 个冬小麦倒伏样本。采用**美国 ASD Fieldspec Pro FR2500 光谱仪**测定小麦冠层光谱数据，其波谱覆盖范围为  $350 \sim 2500 \text{ nm}$ ，光谱分辨率为  $1 \text{ nm}$ ，仪器质量约为  $8.5 \text{ kg}$ ，其最快采集速度为  $100 \text{ ms}$ 。测量时间为  $10:00 - 14:00$ ，天气晴朗、无云无风。测量时探头垂直于冠层上方  $1 \text{ m}$  处，测定前后均用白板进行标定，每个样本区测量 10 次，取平均值作为该样本的冠层光谱反射率。**采用 ASD 数据处理软件 ViewSpecPro 进行高光谱数据预处理**，剔除光谱反射率大于 1 的异常值（3 个水汽吸收带  $1350 \sim 1400 \text{ nm}$ 、 $1800 \sim 1950 \text{ nm}$ 、 $2450 \sim 2500 \text{ nm}$ ）。

倒伏角度表示为倒伏冬小麦植株与地面的夹角，即植株倾斜程度，可表征倒伏胁迫强度。倒伏角度由量角器测得，其值越接近 0，表示倒伏强度越大。将  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  的样本框放置于倒伏小麦冠层，使用索尼 A6300 高清相机（有效像素为 2420 万）垂直小麦冠层  $50 \text{ cm}$  处拍摄样本框照片，每个样本地块随机布设 4 次样本框子区。采用人工目视解译勾画的方式提取每个样本框照片中的茎、叶、穗和阴影，统计 4 个样本子区内各组分面积，取其均值计算该样本茎叶穗所占比例。

### 1.3 研究方法与验证

本文内主要技术流程如图 1 所示。对去除噪声后的41 个倒伏小麦冠层光谱数据进行倒数、对数、微分、倒数的对数、倒数的微分、对数的微分、倒数的对数的微分、弓曲差、连续小波变换 (continuous wavelet transform, CWT) 9 种数学变换。小波变换是源于傅里叶算法的信号处理技术，可从时间与频率上同时开展数据分析，因此可从数据中分离出更多有效信息[22]。经过多年的发展，小波变换已在各行各业中有了广泛的应用，如信号处理、遥感影像纹理及高光谱数据降维等。连续小波变换技术可将倒伏小麦冠层高光谱数据分解为不同尺度的小波系数。

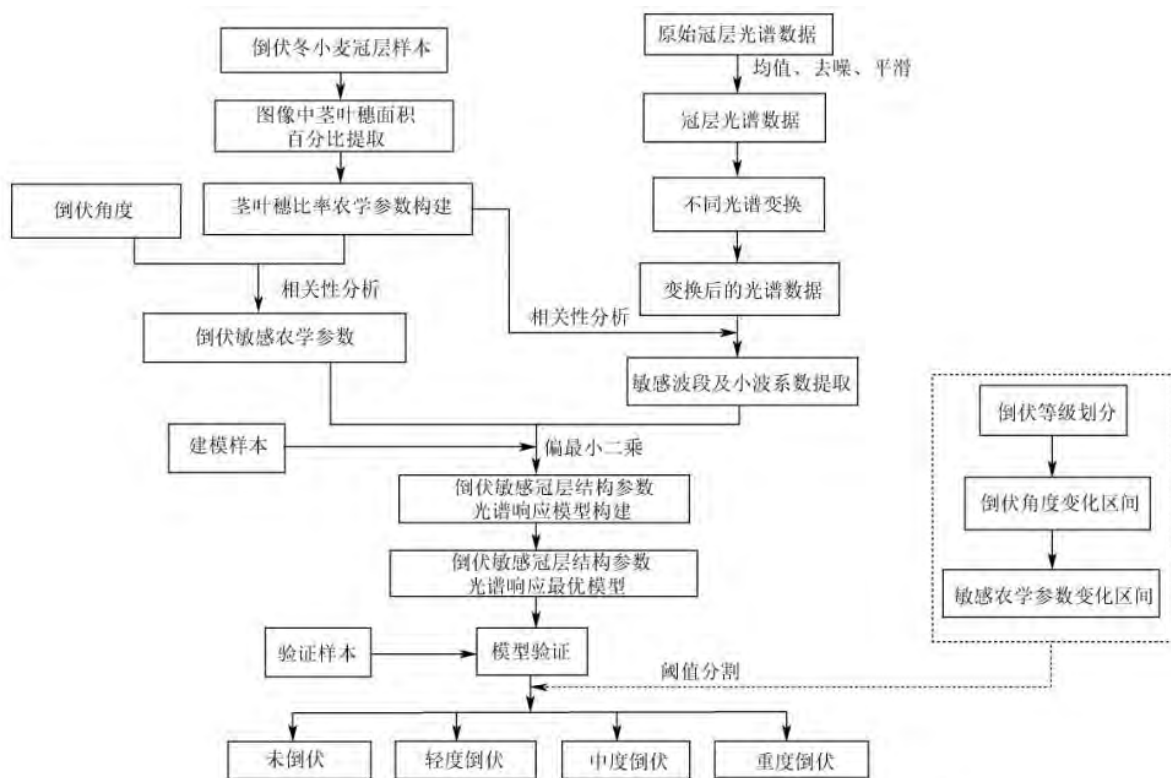


图 1 冬小麦倒伏强度敏感冠层结构参数筛选及光谱诊断模型构建

Fig.1 Selection of sensitive canopy structure parameters and spectral diagnostic model for lodging intensity of winter wheat

$$\varphi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{\lambda - b}{a}\right) \quad (1)$$

$$W_f(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\lambda) \varphi_{a,b}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中  $\varphi_{a,b}$  为小波母函数， $a$ 为伸缩系数， $b$ 为平移系数， $\lambda$ 为波段数。 $W_f(a,b)$ 为小波系数，其为由波长 (350 ~ 2500 nm) 和分解尺度构成的二维矩阵， $f(\lambda)$ 为冠层光谱数据。



针对 9 种数学变换后的冠层光谱数据，筛选倒伏冠层结构参数的敏感光谱参量，利用偏最小二乘回归法（partial least squares regression, PLSR）构建倒伏冠层结构参数的光谱诊断模型。采用随机抽样法将样本分为建模组与验证组，2/3 样本用于构建模型，共计 28 个样本，未参与建模的 1/3 样本用于模型精度检验，共计 13 个样本。采用决定系数和均方根误差评价模型的精度。

流程具体包括：1) 对野外样本框的茎、叶、穗、阴影进行人工目视解译勾画，根据茎、叶、穗面积比例构建倒伏冠层结构参数；2) 将各个倒伏冠层结构参数与倒伏角度进行相关性分析，筛出最适宜表征冬小麦倒伏强度的敏感冠层结构参数；3) 利用传统光谱变换及连续小波变换技术将冠层光谱数据进行处理，通过光谱特征参量与冠层结构参数的相关性分析，提取各光谱变换敏感于冠层结构参数的波段及小波系数；4) 采用偏最小二乘法构建倒伏冠层结构参数的光谱诊断模型，并验证模型精度；5) 基于冠层结构参数光谱预测结果进行冬小麦倒伏灾情等级划分。

## 2 结果与分析

### 2.1 倒伏胁迫下冬小麦冠层光谱特征分析

冬小麦灌浆期受到倒伏胁迫后冠层群体结构发生了明显改变，由于茎、叶、穗在光谱探测视场内的贡献比例发生变化，必然导致倒伏胁迫对小麦冠层光谱产生变化。选取倒伏胁迫下的原始光谱与光谱一阶微分变换进行不同胁迫强度的小麦倒伏光谱特征分析。

根据小麦实际倒伏情况，参照曹利萍等[28]的倒伏等级划分，将小麦倒伏划分为 4 个等级：重度倒伏（倒伏角度 $\leq 15^\circ$ ）、中度倒伏（ $15^\circ < \text{倒伏角度} < 45^\circ$ ）、轻度倒伏（ $45^\circ \leq \text{倒伏角度} < 70^\circ$ ）和未倒伏（倒伏角度 $\geq 70^\circ$ ）。

图 2a 为不同倒伏强度下冬小麦冠层光谱反射率，可以看出，不同倒伏强度的冬小麦光谱曲线具有相似的变化特征，波谷和波峰所在波段大致相同。倒伏后的冬小麦冠层光谱反射率较正常小麦整体增高，近红外波段（780 ~ 1300 nm）的反射率比可见光波段明显增加，且倒伏强度越大反射率越高，说明冬小麦受倒伏胁迫后，冠层光谱对于倒伏胁迫强度表现出较好的响应特征。在倒伏胁迫下，冬小麦冠层光谱的红边位置发生蓝移，红边（700 ~ 780 nm）幅值与红边面积（红边内一阶导数光谱的积分）呈增大趋势。由于水分在 1 450 及 1 940nm 的强吸收特征，在中红外波段形成 2 个主要反射峰，位于 1 650 和 2 200 nm 附近。在整个波段区间内，光谱反射率表现为：重度倒伏>中度倒伏>轻度倒伏>未倒伏。

有研究表明，对反射率进行微分变换有助于限制低频噪声对目标光谱的影响。考虑到作物受到胁迫时会在红边位置产生较大光谱变化响应，选取不同倒伏强度的 350 ~ 800 nm 波段的原始光谱进行一阶微分变换。从图 2b 可以看出，不同倒伏下的冬小麦一阶微分光谱反射率随倒伏程度增加而增大，说明倒伏越严重，冠层光谱原始反射率数据变化越显著。一阶微分值等于 0 对应的原始光谱位置为曲线的波峰或波谷。在可见光波段，一阶微分存在 3 个明显的波峰，波峰分别出现在 420、525 和 725 nm 处。

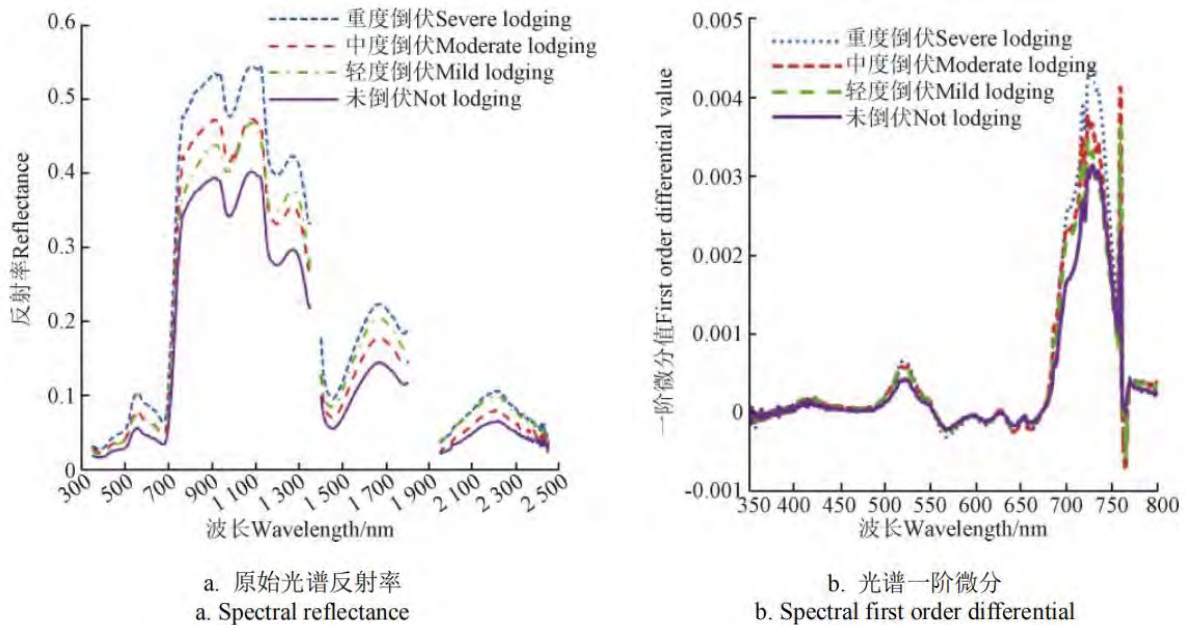


图 2 不同倒伏强度的冬小麦冠层光谱反射率与光谱一阶微分曲线

Fig.2 Curves of spectral reflectance and spectral first order differential on winter wheat with different lodging intensities

## 2.2 倒伏强度对小麦冠层结构参数的影响分析

采用人工目视解译勾画的方式提取各个倒伏样本的茎、叶、穗面积后，计算各个样本的茎面积占比、叶面积占比、穗面积占比、茎叶比率、茎穗比率、叶穗比率、茎穗之和与叶的比率等 7 个倒伏冠层结构参数，利用 SPSS 软件分析 7 个冠层结构参数与倒伏角度的相关性，结果如表 1 所示。根据相关系数的大小，并考虑到各参数之间的冗余问题，最终选取与倒伏角度相关性最高的参数茎叶比（相关系数  $R=-0.687$ ,  $P<0.01$ ），作为冬小麦倒伏光谱响应解析的敏感冠层结构参数。随着倒伏角度越小降低，倒伏强度越高，而冠层茎叶比也随着增加。

表 1 倒伏角度与各冠层结构参数相关性分析

Table 1 Correlation analysis between the lodging angle and canopy structure parameters

| 参数 Parameters           | 倒伏角度<br>Lodging angle | 茎叶比<br>Stem-leave ratio |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 茎面积占比 Stem area ratio   | -0.500**              | 0.897**                 |
| 叶面积占比 Leave area ratio  | 0.642**               | -0.904**                |
| 穗面积占比 Ear area ratio    | -0.625**              | 0.890**                 |
| 茎叶比 Stem-leave ratio    | -0.687**              | 1                       |
| 茎穗比 Stem-ear ratio      | 0.072                 | -0.933**                |
| 叶穗比 Leave-ear ratio     | 0.635**               | -0.863**                |
| (茎+穗)/叶(Stem+ear)/Leave | -0.626**              | 0.858**                 |

注: \*\*表示显著水平小于 0.01。下同。

Note: \*\* represents a significant level at 0.01. The same as below.

### 2.3 光谱诊断模型构建

将冠层光谱反射率及其各变换形式与倒伏样本茎叶比进行相关性分析, 提取冠层结构参数的敏感波段, 表 2 为各变换形式下与倒伏样本茎叶比的敏感波段及相关系数。并采用偏最小二乘回归法构建茎叶比光谱预测模型, 表 3 为不同倒伏强度下的茎叶比预测模型。

表 2 倒伏样本各光谱变换下的敏感波段及对应反射率与茎叶比的相关性分析

Table 2 Sensitive bands and correlation coefficient between reflectance of sensitive bands and stem-leaf ratio under spectral transformation for lodging samples

| 光谱变换形式<br>Spectral transformation | 敏感波段<br>Sensitive bands /nm | 相关系数<br>Correlation coefficient     |
|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| $R$                               | 353、737、999、1072            | -0.727**、-0.554**、-0.638**、-0.859** |
| $1/R$                             | 353、747、902、1071            | -0.547**、-0.649**、-0.583**、-0.721** |
| $\text{Log}(R)$                   | 353、852、902、952、            | -0.646**、-0.671**、-0.739**、-0.715** |
| $\text{Log}(1/R)$                 | 353、852、902、952             | -0.502**、-0.441**、-0.523**、-0.424** |
| $R'$                              | 373、654、1754、2280           | -0.727**、-0.818**、-0.905**、-0.874** |
| $(1/R)'$                          | 1679、2128、2241、2301         | -0.661**、-0.781**、-0.890**、-0.856** |
| $(\text{Log}(R))'$                | 672、1243、2193、2280          | -0.705**、-0.819**、-0.841**、-0.825** |
| $(\text{Log}(1/R))'$              | 1986、2182、2241、2292         | -0.596**、-0.698**、-0.854**、-0.868** |
| Gqc                               | 530、581、911、1320            | -0.641**、-0.675**、-0.773**、-0.681** |
| CWT                               | 355、684、907、1738            | -0.791**、-0.885**、-0.908**、-0.889** |

注:  $R$  表示冠层光谱反射率,  $R'$  表示光谱反射率的微分, Gqc 表示弓曲差, CWT 表示连续小波变换。

Note:  $R$  is canopy reflectance,  $R'$  is first order differential of reflectance, Gqc is gong qu cha and CWT is continuous wavelet transform



表 3 基于各光谱变换形式的冬小麦倒伏冠层茎叶比光谱诊断模型

| 光谱变换形式<br>Spectral transformation | 模型公式<br>Model formula                                               | 建模集 Modeling set |       | 验证集 Verification set |       |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|-------|----------------------|-------|
|                                   |                                                                     | R <sup>2</sup>   | RMSE  | R <sup>2</sup>       | RMSE  |
| R                                 | $Y = -0.147 + 0.074x_1 - 0.002x_2 + 0.001x_3 + 0.003x_4$            | 0.338            | 0.047 | 0.600                | 0.037 |
| 1/R                               | $Y = 0.595 - 0.018x_2 - 0.072x_3 - 0.101x_4$                        | 0.318            | 0.048 | 0.448                | 0.041 |
| Log(R)                            | $Y = -2.756 + 0.092x_1 + 0.111x_2 + 0.132x_3 + 0.042x_4$            | 0.330            | 0.048 | 0.528                | 0.054 |
| Log(1/R)                          | $Y = 2.459 - 0.092x_1 - 0.111x_2 - 0.132x_3 - 0.042x_4$             | 0.330            | 0.048 | 0.116                | 0.171 |
| R'                                | $Y = -0.079 - 1.271.123x_1 - 497.165x_2 - 902.963x_3 - 187.603x_4$  | 0.603            | 0.035 | 0.639                | 0.032 |
| (1/R)'                            | $Y = 0.305 - 4273.297x_1 - 190.855x_2 - 168.691x_3 - 50.155x_4$     | 0.632            | 0.035 | 0.434                | 0.154 |
| (Log(R))'                         | $Y = 0.383 - 11315.297x_1 - 13070.14x_2 - 1851.319x_3 - 692.254x_4$ | 0.568            | 0.038 | 0.613                | 0.180 |
| (Log(1/R))'                       | $Y = 0.203 - 794.532x_1 - 1800.613x_2 - 1587.140x_3 - 1538.399x_4$  | 0.596            | 0.037 | 0.418                | 0.036 |
| Gqc                               | $Y = -0.17 + 0.023x_1 - 0.221x_2 - 0.078x_3 - 0.006x_4$             | 0.406            | 0.045 | 0.523                | 0.037 |
| CWT                               | $Y = 0.012 - 20.065x_1 - 17.142x_2 + 48.876x_3 + 9.54x_4$           | 0.654            | 0.034 | 0.632                | 0.032 |

注:  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  分别为敏感波段所对应的的光谱反射率及不同数学变换形式下的值,  $Y$  为冠层茎叶比,  $R^2$  为决定系数, RMSE 为均方根误差。  
 Note:  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , and  $x_4$  are the spectral reflectance and values in different mathematical transformation forms corresponding to sensitive bands, respectively;  $Y$  is canopy stem-leave ratio;  $R^2$  is the determination coefficient and RMSE is the root mean square error.

从表 3 中可以看出, 原始光谱、对数、倒数等变换形式所建模型的决定系数较低, 其中倒数的对数建立的预测模型精度最低 ( $R^2=0.116$ ), 故可视为无效模型。一阶微分构建的预测模型较好, 建模  $R^2=0.603$ , 验证  $R^2=0.659$ , 验证  $R^2$  结果略高于建模, 这可能是将样本随机分成建模组和验证组造成的。从模型的精度和稳定性综合来看, 基于连续小波变换构建的模型为最优模型, 精度较高, 且具有较好的稳定性, 建模样本的  $R^2$  为 0.654, RMSE 为 0.034。这是由于小波技术采用特定小波基对光谱信号从时域、频率 2 个视角进行分解, 时域信息为光谱随波长变化的规律, 主要包括均值、方差、峰度等。频域信息是信号在各个频率上的能量分布, 信息主要为频率与谱值。光谱信息经多尺度小波技术分解后, 原光谱信息被一分为多, 有助于原光谱信息内部信息的凸显。从模型分析可知多种微分变换的建模精度与验证精度均较高, 表明对小麦倒伏敏感的信息多为细微信息, 而小波技术又具有凸显细微信息的优势且基于小波变换的模型的建模精度最高, 综上可知小波技术具有凸显原光谱内细微信息的优势。小麦倒伏样本建模组与验证组的散点图为图 3 所示, 从图中可以看出, 建模样本与验证样本均分布 1:1 线两侧, 检验样本的  $R^2$  为 0.632, RMSE 为 0.034。

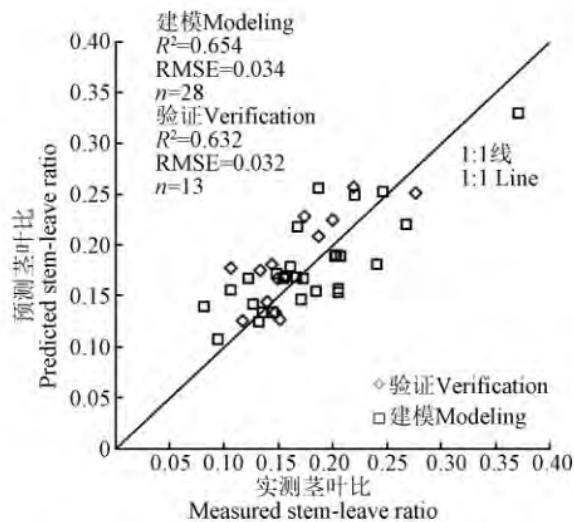


图 3 茎叶比实测图与预测图的散点图  
 Fig.3 Scatter plot of measured and predicted value of stem-leave ratio

## 2.4 基于茎叶比的倒伏等级评估与验证

倒伏角度可有效表征倒伏对冬小麦植株的胁迫程度，但倒伏角度不能直接进行光谱定量分析。冠层光谱反射率来自于探测视场内的茎叶穗组合贡献的反射光能量，而倒伏角度对于冠层光谱不提供直接贡献，无法用冠层光谱直接诊断倒伏角度。本文以冠层结构参数为中间量，来开展光谱响应解析，进而划分倒伏灾情等级。

以倒伏角度为自变量，以前文中野外建模样本的冠层茎叶比为因变量建立线性回归模型，如式 (3)，其中建模决定系数  $R^2=0.5$ ，均方根误差  $RMSE=0.039$ ，计算各倒伏等级的茎叶比阈值区间，确定倒伏等级划分范围。最终确定重度倒伏（茎叶比 $\geq 0.22$ ）、中度倒伏（ $0.13 < \text{茎叶比} < 0.22$ ）、轻度倒伏（ $0.06 < \text{茎叶比} \leq 0.13$ ）和未倒伏（茎叶比 $\leq 0.06$ ）。

$$y = -0.0028x + 0.26 \quad (3)$$

根据上述倒伏灾情程度的茎叶比划分区间，对茎叶比光谱预测结果进行倒伏灾情等级划分，并利用未参与建模的野外样本进行精度验证，如表 3 所示。

表 3 验证样本的倒伏等级预测

Table 3 Prediction of lodging level of test samples

| 样本号<br>Sample No. | 实测倒伏等级<br>Measured lodging level | 预测倒伏等级<br>Predicted lodging level |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1                 | 中度                               | 中度                                |
| 2                 | 中度                               | 中度                                |
| 3                 | 中度                               | 中度                                |
| 4                 | 重度                               | 重度                                |
| 5                 | 中度                               | 中度                                |
| 6                 | 重度                               | 重度                                |
| 7                 | 中度                               | 轻度                                |
| 8                 | 中度                               | 中度                                |
| 9                 | 重度                               | 重度                                |
| 10                | 中度                               | 中度                                |
| 11                | 轻度                               | 轻度                                |
| 12                | 重度                               | 重度                                |
| 13                | 轻度                               | 中度                                |

从表中 3 中可以看出，基于冠层茎叶比的倒伏灾情诊断模型的精度可达 84.6%，预测倒伏等级基本上与实测倒伏等级一致。说明基于茎叶比高光谱诊断方法可以有效诊断冬小麦灌浆期的伏强度等级。

## 3 讨论

由于冬小麦茎秆、叶片、麦穗具有较大光谱差异，当冬小麦正常生长时处于直立状态，光谱反射率主要由视场范围内的冠层叶片结构决定，当冬小麦植株发生倒伏时，冠层视场范围内的茎、叶、穗面积比例和重叠程度发生变化，促使倒伏冬小麦的冠层光谱也随着变化，且不同倒伏强度的光谱特征具有较好的响应规律。因此冬小麦倒伏冠层光谱变化特征与倒伏角度灾情程度密切相关，而倒伏严重程度可用倒伏角度来定量划分，采用冠层光谱数据可用来评估冬小麦倒伏冠层结构变化特征，进而划分灾情等级。卫星遥感直接监测与冬小麦倒伏受灾严重程度密切相关的倒伏

角度、类型及生育期等信息有较大的难度，如：有些遥感影像的空间分辨率和时间分辨率不能够满足倒伏灾情监测的精度和时间要求，但可以通过定量反演倒伏前后的作物冠层结构参量变化信息来间接实现倒伏灾情程度的监测。在叶绿素含量较高的生育期，如：返青期、孕穗期、开花期及灌浆初期，株高较低、茎秆柔韧性较好，冬小麦发生倒伏的可能性较低；在穗质量较大的灌浆后期，茎秆负荷较大，且大风暴雨天气增多，较易发生倒伏灾害，此时茎、叶中的叶绿素含量较低且较为稳定，冠层光谱变化主要来源于冠层结构变化，特别是茎叶比率的变化对冠层光谱具有较大贡献，因此本文暂未重点分析茎叶叶绿素浓度对倒伏胁迫冠层结构光谱响应的影响。

本文虽然在冬小麦倒伏冠层光谱响应机理解析方面取得了一定的进展，但仍存在不足之处。采用目视解译及人工数字化的方法来提取倒伏样本的茎叶穗各组分面积，该方法虽然精度较高，但工作量较大，在今后的研究中有必要探索一种高精度且方便快捷提取冠层结构参数的方法。本研究所构建的冬小麦倒伏灾情光谱诊断模型效果较好，但研究范围仅限河北省藁城地区，在更大范围内研究分析倒伏小麦冠层结构与倒伏强度、冠层光谱的响应关系，有助于提升冬小麦倒伏灾情高光谱诊断的稳定性和普适性。

#### 4 结论

通过对不同倒伏强度下冬小麦冠层结构特征变化的研究，发现不同倒伏强度下的冬小麦冠层光谱差异较大；将视场图像中茎、叶、穗面积所构建的冠层结构参数与倒伏角度进行相关性分析，发现冠层茎叶比与倒伏角度的相关性最佳，相关系数为 $-0.678$  ( $P < 0.01$ )；采用传统光谱技术与连续小波变换技术对冠层光谱进行处理，利用偏最小二乘法构建冠层茎叶比与冠层高光谱特征参量的响应模型，基于连续小波变换所构建的冬小麦倒伏光谱诊断模型的精度和稳定性最佳，建模  $R^2=0.654$ ， $RMSE=0.034$ ，验证  $R^2=0.632$ ， $RMSE=0.032$ ；以茎叶比划分的倒伏等级范围为：重度倒伏（茎叶比 $\geq 0.22$ ）、中度倒伏（ $0.13 < \text{茎叶比} < 0.22$ ）、轻度倒伏（ $0.06 < \text{茎叶比} \leq 0.13$ ）和未倒伏（茎叶比 $\leq 0.06$ ）；采用冠层茎叶比高光谱诊断结果进行倒伏灾情等级划分，识别精度为84.6%。本文对不同倒伏强度下冬小麦冠层结构变化及其光谱响应规律的探究，并建立的基于冠层茎叶比的冬小麦倒伏灾情光谱诊断模型，可为后续构建大范围遥感监测中的倒伏灾情指数提供先验知识，有助于客观、定量地表征小麦受倒伏胁迫的等级程度。



## 利用近端遥感区分非病毒性和病毒性昆虫媒介

### ——数据抗干扰性的证明及重要性

近端遥感作为昆虫病媒中植物病原检测的诊断工具，有两个基本假设。首先，通过昆虫媒介获得植物病原体会引起昆虫媒介的生理变化；也就是说，病原体可能只存在于非常特殊的组织或器官（如唾液腺），但它可能引起昆虫媒介对病原体的系统生理变化/反应。其次，根据体表反射特征，即使在杀死昆虫标本，并将其储存在70%的乙醇中以后，也能检测到病原体对昆虫生理学的影响。最近对后一种假设进行了调查，并证明建议将样本储存在70%乙醇（与50%或90%相比）中。这项研究表明，在70%乙醇中储存长达数周的时间对昆虫样品反射特性的影响微乎其微。这些技术细节非常重要，因为它们强调了昆虫标本可以在现场收集、储存在70%乙醇中，并可以在进行诊断成像测试之前装运，但是在开始广泛试验之前，应评估每种昆虫的这种效果是否可行。

越来越多的学者开始研究利用近端遥感技术来检测和诊断植物和昆虫病媒中的病原体，这说明这种基于反射的技术可用于改进检疫和检验工作以及区域作物疾病监测。也就是说，与商业诊断实验室目前提供的基于PCR和酶联免疫吸附试验的服务类似，反射的技术似乎也拥有提供此类服务的潜力，以便农业利益相关者能够将昆虫样本运送到这些实验室，并获得关于感染率的快速、可靠和经济有效的数据。

作为开发基于反射的诊断工具的一部分，还必须考虑输入反射数据的“抗干扰性”或重复性。低抗干扰性意味着在多个时间点、同一对象的不同部分或同一类别或类中的多个对象上从同一对象获取的数据具有高度的可变性。许多因素会引起数据的抗干扰性降低，包括与近端遥感条件（光强和光谱组成、环境温度等）的一致性、昆虫标本制备（投影角度、存储和处理等）和昆虫标本特征（年龄、性别、生长条件、品种/生物类型、寄主植物等）。此外，数据抗干扰性低意味着基于反射的分类算法的灵敏度（对疾病引起的压力的低水平进行差异检测的能力）和可重复性（对大范围数据集进行精确分类的能力）都受到了影响。简而言之，如果输入数据的抗干扰性很低，那么分类错误的风险就会增加（假阳性（I型）和/或假阴性（II型））。因此，在开发和测试植物病原昆虫媒介分类算法研究时，如需分类算法应用于具有不同程度抗干扰性数据，必须包括对分类算法的质量控制，以更好地了解其性能。

本研究基于近端遥感来获取和分析虫体反射特征，以准确区分甜菜叶蝉成虫的非病毒性和病毒性标本的假设。预测输入反射率数据的抗干扰性与基于反射率的成年甜菜叶蝉分类精度之间的负相关关系。分别分析了从处理过的昆虫标本（甜菜叶蝉取下的翅膀和小心地放在一边的）和未处理过的昆虫标本（完整的翅膀和随意放置的）获得的反射数据。作为量化输入反射率数据抗干扰性重要性的质量控制框架，通过添加随机噪声范围来模拟不同程度的输入反射率数据抗干扰性，对从甜菜叶蝉样品中获得的平均反射率曲线进行了实验操作。本文讨论了开发反射诊断工具对昆虫中重要植物病原病毒的检测潜力，并重点讨论了输入数据的抗干扰性。

## 材料和方法

### 甜菜叶蝉

甜菜叶蝉的标本是从未感染甜菜植株（非病毒）或BCTV感染甜菜植株（病毒）上培育的菌落中获得的，该菌落已在加州大学戴维斯分校保存了24个月以上。甜菜叶蝉菌落保持在单独温室笼内的甜菜植株上。据推测，样本处理水平可能会受到身体反射区分非致命和致命样本的能力的影响。因此，对加工和未加工昆虫标本进行了单独分析。在第一组数据中，甜菜叶蝉通过移除翅膀并在近端遥感之前小心地将每只甜菜叶蝉放在一边进行处理（图1a）。取下翅膀的方法是将每个样本的翅膀轻轻地压在一条胶带上，然后取下翅膀。除了取下翅膀，所有的标本都仔细地放在一边，以便所有的标本都在同一位置成像。第二和第三组数据被称为未加工数据，因为没有移除机翼，而且在获取近端遥感数据期间，样本被随意放置（不在任何特定位置；图1b）。第一和第二组数据包括在两个不同日期采集的样本，以将随时间的变化纳入分析中。第一组数据包括70个成年甜菜叶蝉样本，35个样本分别来自未感染和BCTV感染的甜菜植株（在2017年4月10日从每个群体收集15个甜菜叶蝉，然后在2017年4月17日从每个群体收集20个）。第二组数据包括100个成年甜菜叶蝉标本，其中50个标本分别来自未感染和BCTV感染的甜菜植株（2016年12月7日和15日从每个群体收集25个甜菜叶蝉）。在第三组数据中，对5个时间点采集的甜菜叶蝉进行近端遥感和PCR检测：0（对照组，不暴露于BCTV感染的植株）和暴露于BCTV感染的甜菜植株后1、2、3和4天。本研究以未感染的甜菜植株为材料，将200株成株甜菜叶蝉转移到BCTV感染的甜菜植株上，0~4天后每天采集10个成株亚样本。作为阳性对照，从BCTV感染的甜菜植株（含毒甜菜叶蝉）上直接采集12份成株甜菜叶蝉标本。以5个时间点（0-4天）的2个时间序列和12个个体作为阳性对照，第三组数据共包括112个成年甜菜叶蝉样本。因此，本研究共分析了来自三组数据的282个成年甜菜叶

蝉样本，每组数据包括在两个不同日期采集的样本（第一组数据=70个样本，第二组数据=100个样本，第三组数据=112个样本）。

对于三组数据，将成年非致命和致命的样本直接转移到含有70%乙醇的小瓶中，因为之前在部署近端遥感用于昆虫研究时，发现70%乙醇浓度优于其他杀灭方法和乙醇浓度（Li等人，2017）。在获取近端遥感数据前，将成株甜菜叶蝉标本在70%乙醇中保存2-5天。因此，对甜菜叶蝉成虫标本进行了设计，以模拟现场取样，随后将样本运至诊断实验室进行分析。

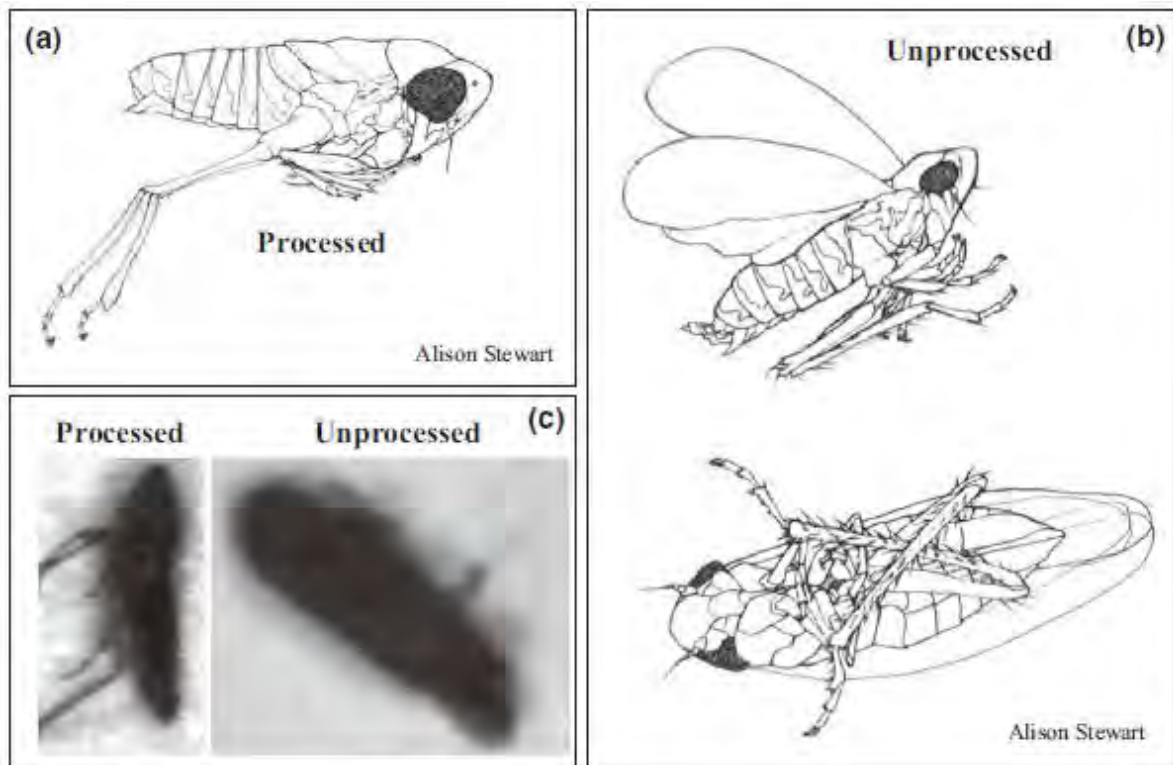


图1成年甜菜叶蝉已处理（a，叶蝉翅膀被移除，每个叶蝉被小心地放在其一侧）或与处理（b，翅膀没有被移除，样本随意放置，不在任何特定位置）。处理和未处理的成年甜菜叶蝉的代表性图像显示（c）。

使用先前发表的研究中描述的DNA提取方法。简单地说，将单个成年甜菜叶蝉磨碎在含有核糖核酸酶A（ $10 \mu\text{L ml}^{-1}$ ）的 $150 \mu\text{L}$  STE缓冲液（ $100 \text{ mM NaCl}$ ， $10 \text{ mM Tris-HCl}$ （ $\text{pH}8.0$ ）， $1 \text{ mM EDTA}$ ）中，放入 $1.5 \text{ ml}$  Eppendorf管中。加入 $350 \mu\text{L}$  STE缓冲液后，将试管在 $37^\circ\text{C}$ 下培养10分钟。然后，将 $2.5 \mu\text{L}$ 蛋白酶K（ $100 \mu\text{L mL}^{-1}$ ）和 $25 \mu\text{L}$  10%十二烷基硫酸钠（SDS）溶液添加到这些悬浮液中，试管在 $37^\circ\text{C}$ 下培养1小时。通过离心（5分钟， $12\ 000 \text{ g}$ ）澄清悬浮液，以及上清液。采用乙醇沉淀法回收核酸，悬浮于20毫升无菌蒸馏水中，2毫升用于PCR分析。



为了检测BCTV，采用引物对BGc396和BSCTVv2688，设计用于检测BCTV的严重菌株，指导c.0.7kb BCTV DNA片段的扩增，包括重叠的V2/V3和C1/C4基因的部分。整个晶间区域的Lanking。PCR参数如下：在94°C下初始变性步骤5分钟；随后在94°C下30个循环30秒（变性），61°C下40秒（退火），72°C下1分钟（延长）；最后在72°C下7分钟。用1%琼脂糖凝胶在1×TAE缓冲液（40 mM醋酸三酯，1 mM EDTA）中电泳分析PCR扩增的DNA片段，用溴化乙锭染色，紫外可见。

近端遥感数据是在与先前研究类似的环境条件下从单个成年甜菜叶蝉样本中获取的。成体样本的年龄、性别和交配状态未知，目的是模拟成体甜菜叶蝉在田间采样时遇到的变异。**使用安装在样本上方20 cm处的推扫式高光谱照相机（PIKA XC；Resonon公司）**，在人工照明（四个15 W 12 V灯泡，透镜两侧各有两个）下以约50像素mm<sup>-2</sup>的空间分辨率获取高光谱图像。高光谱相机的主要规格为FireWire IEEE 1394B接口、14位数字输出和7°角视场。物镜的焦距为17毫米（最大光圈为F1.4），对近红外和可见近红外光谱进行了优化。在383至1036 nm（光谱分辨率=2.1 nm）的240个光谱带中获得了反射率数据，包括435至1008 nm的210个光谱带。为避免低信噪比，将所获得频谱两端的频谱数据忽略。随着谱带数量超过样本数量（第一组数据=70个样本，第二组数据=100个样本，第三组数据=112个样本），主要关注的是由休斯效应或违反节俭原则而导致的模型过度拟合。因此，进行了光谱分块，将原始210个光谱带，转换为70个光谱带（光谱分辨率=6.3nm）。

### 数据分析

在获取近端遥感数据的过程中，相对湿度为30-40%，环境温度为19-22°C。使用一块白色Teflon（K-Mac塑料）进行白色校准，并将光饱和水平调整为白色Teflon。背景色已被证明会影响从昆虫样本（如成虫）获得的反射率数据。在这项研究中，将成株甜菜叶蝉放在白纸上，以最大限度地提高昆虫与背景之间在所有光谱带内的反射比差异。数据处理和分析在PC-SAS v.9.4（SAS研究所）中进行。与之前发表的研究类似，开发了一种二分辐射滤光片，以自动排除白背景。排除白色背景后，每个样本的平均像素数为510±16 SE。每一个甜菜叶蝉样本产生一个单一的平均反射剖面。

本研究的一个关键目标是评估输入反射率数据抗干扰性的影响，并通过实验添加随机噪声，即对每个谱带的平均反射率值进行实验操作。下面简要描述了如何添加随机噪声。假设从一株成年甜菜叶蝉获得的单个光谱波段的反射值为0.150000。如果随机噪声范围为0-0.5%，则加/减0.5%到0.5%的随机值。因此，通过加/减0-0.5%

噪声对实际反射率值0.150000进行实验操作，将产生0.14925–0.150075的新反射率值。对反射值进行了随机噪声的实验添加，使一个谱带中的操作与其他谱带中的反射值中的噪声无关。此外，在平均反射率剖面上，对反射率值的操作是独立的。对每组数据检查多个随机噪声范围。

根据线性判别分析，对甜菜成年叶蝉的非致命和致命样本进行分类，该分析已用于昆虫和种子的平均反射率剖面的类似分类研究。最初，逐步线性判别分析仅用于选择对线性判别分类模型有显著贡献的谱带（70个谱带中的谱带）。所选的解释变量子集用于生成线性判别分类模型。

本研究采用千斤顶刀交叉验证的方法，对加工样本的线性判别分类模型的准确性进行量化。为了量化未加工昆虫样本的线性判别分类模型的准确性，利用第二组数据建立了线性判别分类模型，第三组数据用于独立验证。

## 结果

### 加工过的昆虫标本

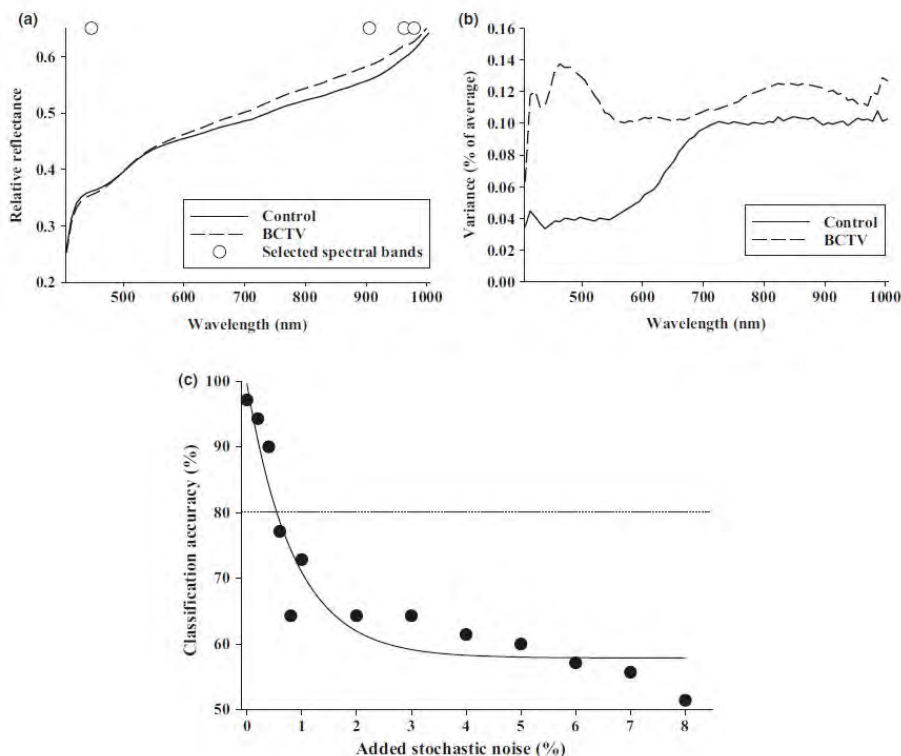


图2未感染甜菜（对照组）和感染甜菜曲顶端病毒（BCTV）的甜菜在435-1008nm的70个光谱带上生长的处理过的成年甜菜叶蝉的平均反射率曲线（a），以及方差占平均反射率值的百分比（b）。将随机噪声作为一种降低输入反射率数据抗干扰性的方法加入到平均反射率剖面中。采用线性判别分析法对反射数据进行了分析，检验了随机噪声范围与分类精度的关系（C）。虚线水平线代表80%的分类精度。（a）中的开环表示基于逐步向前选择的线性判别函数所选的光谱带。

为了研究昆虫标本制备的可能效果，包括高水平的标本处理，包括取下翅膀露出昆虫腹部，并在近端遥感之前小心地将每个标本放在其侧面（图1a、c）。如果将这项技术作为一项具有高处理量的商业和大规模操作来实施，那么这样一个处理级别可能是不可行的。平均反射率曲线表明，在大约600-1004nm的光谱带内，含病毒甜菜成虫叶蝉的反射率始终高于非含病毒同种植物（图2a）。图2b显示了以平均反射率值百分比表示的方差，并且可以看出，所有光谱带的方差相对较低（<0.14%的平均反射率值）。图2b还表明，从含毒甜菜成虫叶蝉获得的近端遥感数据与非含毒同种有着稍高的方差。由于平均反射率值存在较大差异，且类内方差较低，在逐步判别分析中只选择了四个谱带的组合（图2a中的圆圈表示），线性判别模型的分类精度高达97%。为了检验线性判别模型的抗干扰性，在数据中加入0-8%的噪声。分析表明，当随机噪声增加1%以上时，分类精度下降到80%以下（图2c）。

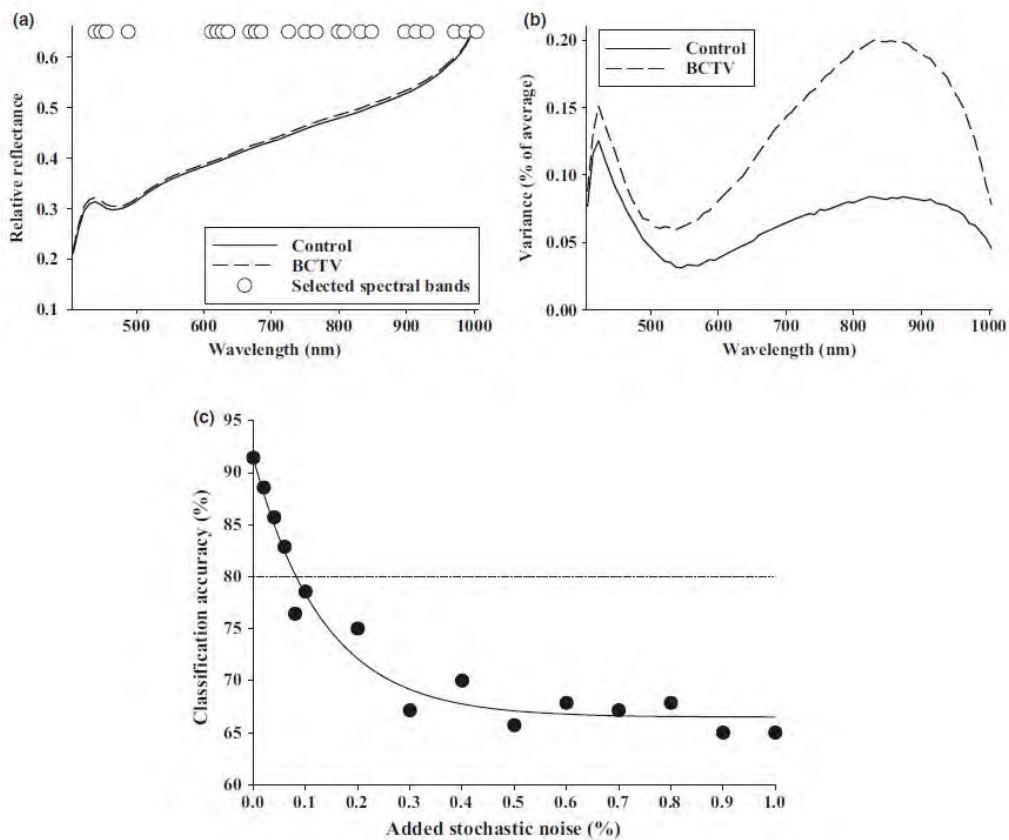


图3 未经处理的成年甜菜叶蝉在未受感染的甜菜（对照组）和感染甜菜曲顶病毒（BCTV）的甜菜上在435-1008nm的70个光谱带中的平均反射曲线（a），以及方差占平均反射率值的百分比（b）。将随机噪声作为一种降低输入反射率数据抗干扰性的方法加入到平均反射率剖面中。采用线性判别分析法对反射数据进行了分析，检验了随机噪声与分类精度的关系（c）。虚线水平线代表80%的分类精度，被认为是可接受分类精度的阈值。（a）中的开环表示基于逐步向前选择的线性判别函数所选的谱带



个体成年甜菜叶蝉在放置在高光谱照相机下时，未考虑其位置，也未进行任何处理（即，在不小心放置昆虫个体的情况下，移除翅膀），而是接受近端遥感（图1b, c）。在甜菜叶蝉近端遥感诊断的商业应用中，这是最可行的方法。如图3a所示，非致命性甜菜叶蝉和致命性甜菜叶蝉的平均反射剖面之间几乎没有视觉分离。然而，这一趋势与处理过的成年甜菜叶蝉观察到的趋势相似：含病毒的标本比非含病毒的同种具有更高的反射率。图3b表明，在含毒甜菜叶蝉的个体光谱带中，作为平均反射率百分比的方差最高。此外，总体变异与处理过的甜菜叶蝉相似，但最高变异水平的位置不同（约600-900nm）。由于非致病性甜菜叶蝉和致病性甜菜叶蝉的平均反射率曲线具有较高的相似性，且变异性稍高，因此与已加工甜菜叶蝉（97%）相比，未加工甜菜叶蝉的准确分类能力略低（91%）。未加工样品的线性判别模型中包含的24个光谱带在图3a中以为圆表示，可见这些光谱带不局限于特定的光谱区域。换句话说，根据整个光谱范围内各个波段的光谱数据，可以对非致命和致命的甜菜成虫叶蝉进行准确分类。为了检验线性判别模型的抗干扰性，在数据中加入0-1%的噪声；当随机噪声超过0.1%时，分类精度降低到80%以下（图3c）。

### **BCTV在未加工昆虫标本中随时间的表达**

诊断工具的一个重要方面是确定昆虫载体在获得可检测到的病原体之前需要在受感染的植物上喂养多长时间。因此，对第三组数据进行了评估，其中非致命的成年甜菜叶蝉被转移到受BCTV感染的甜菜植株中，并且在0-4天后每天对甜菜叶蝉进行采样。作为阳性对照，从受BCTV感染的甜菜植株上培育的群体中也采集了12只成株甜菜叶蝉。PCR数据证实，所有12个甜菜成年叶蝉对BCTV均呈阳性，即病毒。从0天时间点采集的甜菜叶蝉，即从未受感染的甜菜植株上饲养的群体中采集的叶蝉，根据PCR试验，BCTV均为阴性（图4）。PCR数据还显示，BCTV阳性的甜菜叶蝉比例逐渐增加，3天后超过98%（图4）。根据近端遥感数据对BCTV存在的完全相同的成年甜菜叶蝉进行分类，结果表明：（i）第0天甜菜叶蝉约有25%的假阳性误差；（ii）在BCTV感染的植物上喂养1-3天后，BCTV阳性的甜菜叶蝉百分比逐渐增加；以及在BCTV感染的甜菜植株上饲喂4天后，预测的BCTV阳性甜菜叶蝉的抗胆碱降低（约40%）。据作者所知，图4所示的结果是第一份真正独立验证基于反射的昆虫媒介分类的报告，以确定其作为植物病毒的非致命或致命状态。也就是说，一组数据用作开发分类模型的数据，另一组数据用于验证。重要的是，数据是从两个在未受感染或BCTV感染的植物上培育的成年甜菜叶蝉群体中获得的数据，但采集的甜菜叶蝉的年龄和性别未知。尽管基于PCR和基于反射的诊断之间存在重要差异，但图4

所示的结果非常令人鼓舞，可以作为概念证明。为了获得更高的反射率诊断分类精度，需要更大的数据集。此外，由于寄主植物可能影响甜菜叶蝉的健康和寿命，因此应采用基于反射的方法研究寄主植物的影响。

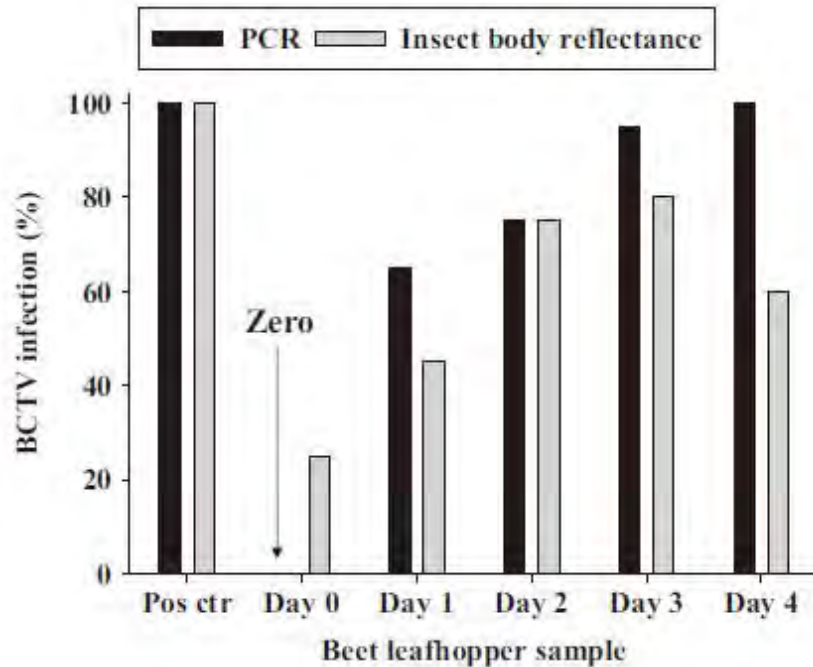


图4基于PCR和体反射（近端遥感）的甜菜叶蝉成虫是否存在甜菜曲顶病毒（BCTV）分析。将未感染甜菜植株上培育的群体中的成株甜菜叶蝉转移到BCTV感染的甜菜植株上，每天采集成株甜菜叶蝉亚样本0~4天。作为阳性对照，从受BCTV感染的甜菜植株上培育的一个群体中采集含病毒成虫标本。

## 讨论

本研究的结果表明，作为概念的证明，近端遥感技术可以用来诊断昆虫媒介是否携带重要的植物病原体。然而，这项技术的成功大规模商业应用将取决于最大限度地提高输入反射率数据抗干扰性的能力。一些文献强调了低反射率和不一致反射率数据的抗干扰性，这是对不同对象基于反射率分类精度产生不利影响的主要挑战（包括植物和昆虫样品）。然而，据我们所了解，这是第一个研究，其中反射数据的抗干扰性已被检验。由于与现有诊断方法相比，样本成本可能更低，处理时间也可能更短，因此区域性害虫管理组织可以开发具有高空间和时间分辨率的综合数据库，以便对新疾病暴发的时空流行病学进行特征化与控制。



## 北京师范大学 ASD HH2

Beijing Normal University



## 中国科学院大学 ASD HH2

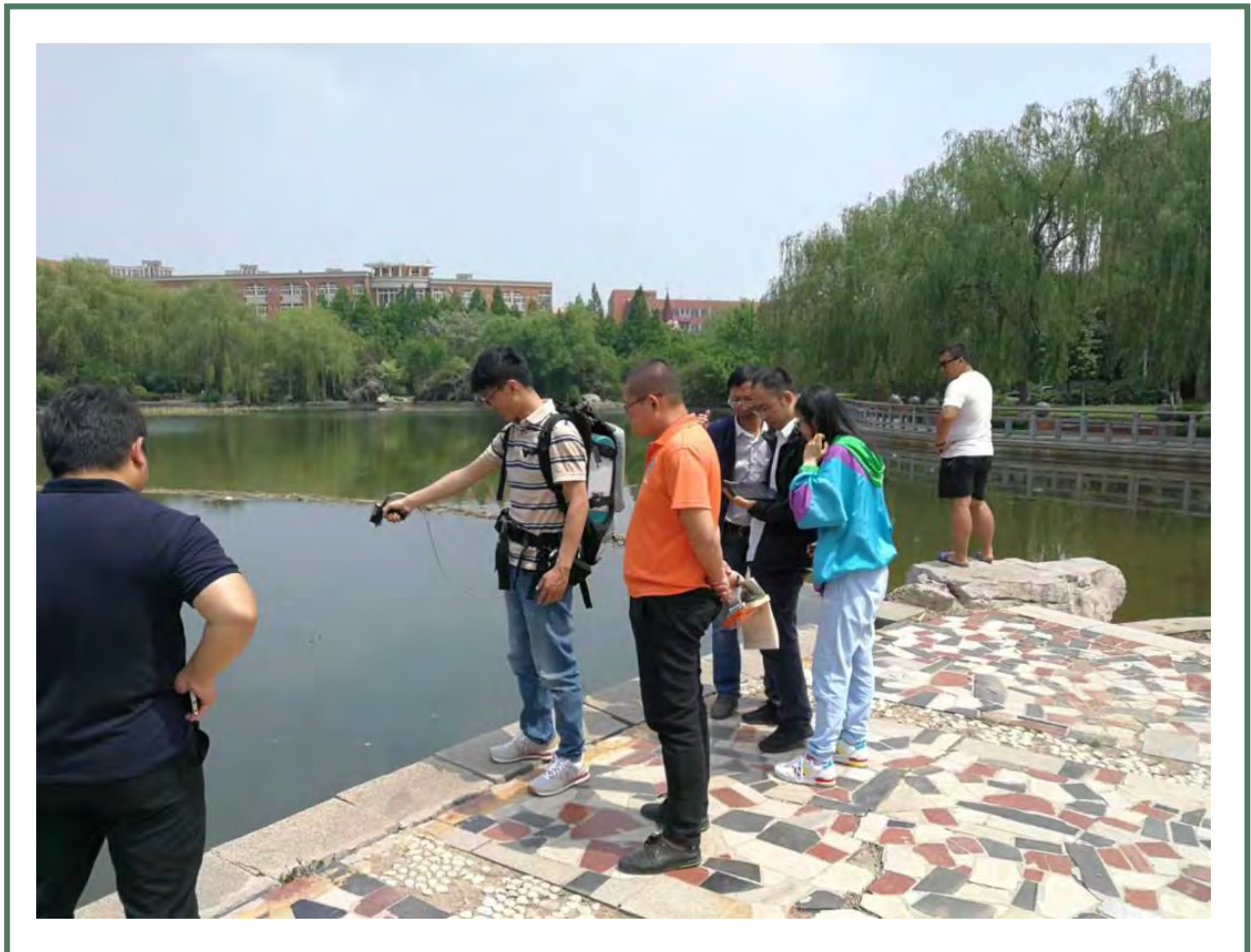
University of Chinese Academy of Sciences





## 山东建筑大学 ASD FS4

Shandong Jianzhu University



## 华为武汉研究所 RESONON XC2

### Pika XC2 (400–1000nm)

高性能的近红外成像  
高光谱成像仪，具有  
极高的光谱分辨率，  
图像质量更优秀。



## 内蒙古大学 水同位素分析仪

Inner Mongolia University



### 特点:

- 世界上第一台能同时测量 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{17}\text{O}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的设备
- 兼具液态水和气态水同位素连续测量功能
- 一键快速切换液态水 / 气态水两种测量状态
- 液态水测量继承了LWIA-912 的优点，更高的实际测量精度
- 理想的野外水汽同位素测量设备，集高精度、宽量程、快速响应、低能耗、高稳定性于一身
- LGR 的专利光谱诊断技术 (SCI)，可以对含有有机内溶物的样品数据进行有效的修正，同类产品中样品范围最广





## 中国科学院西双版纳热带植物园 土壤呼吸系统

Xishuangbanna Tropical Botanical Garden



### 呼吸室

测量面积: 298.5 (cm<sup>2</sup>)

气室固定体积: 3341 (cm<sup>3</sup>)

线缆长度: 1.5m

泵: 3.5L/min

工作温度: -20~45°C

气压检测: 测量范围: 15 ~115kPa,

测量精度: ±1.5%

温度检测: 测量范围: -25 ~85 °C ,

测量精度: ±0.5 °C

尺寸 (mm) : 245 (L) x 245 (W) x 590 (H)





## 中国科学院地球环境研究所 涡度梯度

Institute of Earth Environment



Campbell的IRGASON集成开路红外CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O分析仪与三维超声风速仪为一体，专为测定涡度相关通量而设计，专利设计较单独的传感器更易安装，提高测量精度。

IRGASON同步测量CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O，空气温度，大气压力，三维风速和超声空气温度。



新疆博尔塔拉蒙古自治州农药残留检测中心 Futura



**应用领域：**

水质监测(地表水、地下水、自来水、  
废水、海洋水、超纯水、锅炉水等)

酒类分析(白酒、啤酒、葡萄酒等)

食品分析(饮料、啤酒、乳品等流质  
或半流质)

土壤分析

植物萃取液分析

化肥分析、烟草分析和制药分析







## ECOSPEC PROJECT

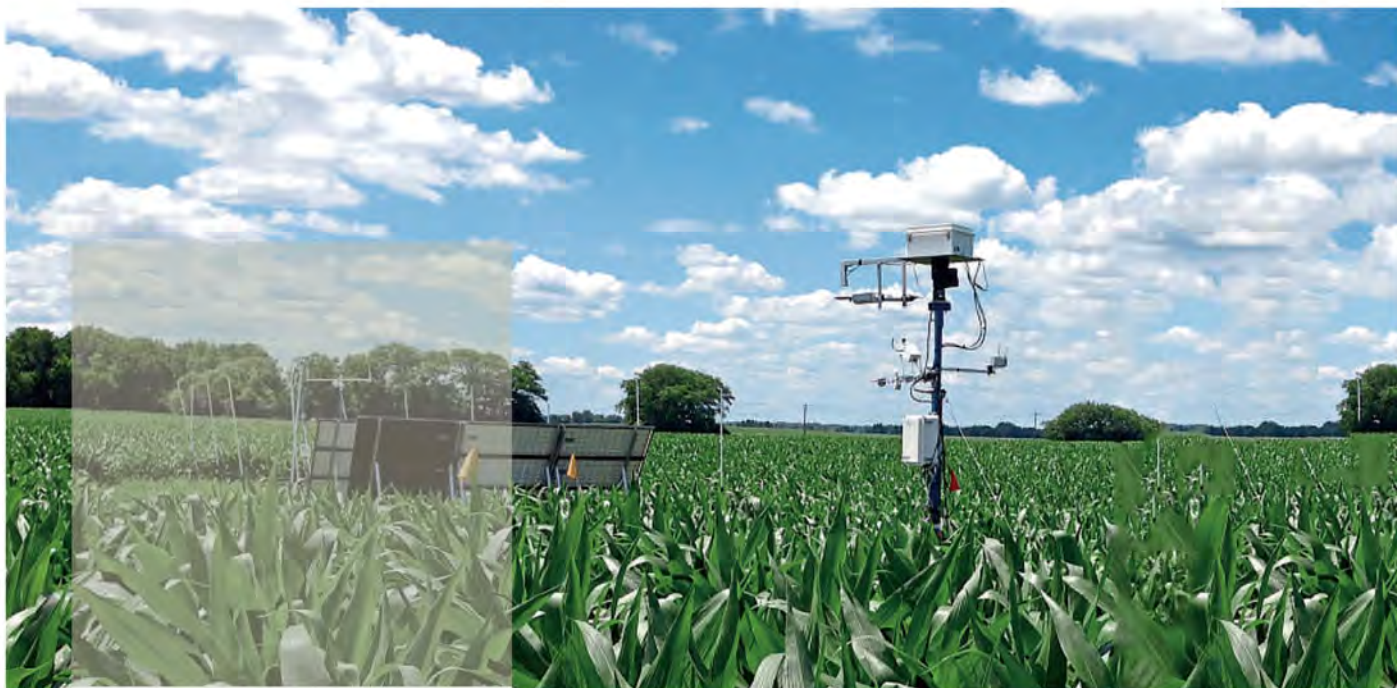
The EcoSpec project investigates patterns and associations between meteorological and biological measurements of the ecosystem corresponding to photosynthesis and respiration and hyperspectral data of the land surface. The patterns and associations will help us improve our understanding of the relationship between terrestrial ecosystems and climate.



# 遥感微气象与生态系统属性综合观测系统 (EcoSpec System)

——基于光通量数据集成的小尺度生物圈及大气相互作用的研究系统





## 目的：

基于大数据理解大气和陆地表面之间在区域尺度上的相互作用以及其与全球尺度上的关系,在全球尺度地球系统模型的基础上更好地探究局域尺度的生物圈 - 大气相互作用。目标: 建立高频光学数据和近地表能量、水、二氧化碳及生物参数的识别模式和相互关系,从而研究区域尺度地球表面与大气表面之间的相互作用。



## 方法：

建立一个多光学传感器集成的通量观测塔系统——  
EcoSpec System

## 背景：

随着全球气温的不断攀升,气候变化及其对地球影响以及预测未来气候的研究已成为热点。大气圈、植物和土壤在地球碳水循环中起着重要作用,因此深入了解大气 - 生物圈相互作用对预测未来气候至关重要。学者在全球尺度的生态系统功能的研究已经趋于成熟,而区域尺度现象如: 水和碳通量的变化与大尺度现象之间的关系知之甚少。

## 项目概况：

ECOSPEC 项目: 由美国阿贡国家实验室发起,收集范围广泛的数据类型,包括高光谱遥感、气象测量和生物数据,使它们能够补充和加强现有的区域和全球尺度的气候模型。探究陆地表面与光合作用、呼吸相对应的气象、生态学参数和地表高光谱数据之间的模式和相关关系。

ARGONNE ECOSPEC 团队由遥感科学家、生态学家、电气和机械工程师以及环境科学、数学和计算机科学部门的计算机科学家组成。





## 美国阿贡国家实验室：

(Argonne National Laboratory, 简称 ANL) 是美国政府最早建立的国家实验室, 也是美国最大的科学与工程研究实验室之一。阿贡国家实验室和橡树岭国家实验室同属于美国国家能源部, 和橡树岭的地位不分伯仲。阿贡前身是芝加哥大学的冶金实验室, 现在隶属于美国能源部和芝加哥大学。诺贝尔物理学奖得主费米于 1942 年在此领导小组建立了人类第一台可控核反应堆, 完成了曼哈顿计划的重要一环, 并且使人类从此迈入原子能时代。



## 项目领头人介绍

**Yuki Hamada**

PH.D., Geography, University of California, Santa Barbara, and San Diego State University, 2010.



## 研究领域：

光学和红外遥感、地理信息建模方法和监测陆地生态系统功能和过程的应用；高光谱图像分析的植物光谱对陆地生态系统研究中的应用；地表水的特点和性能的新型图像处理的发展算法及特征提取；使用的数据插值外推框架开发地理空间信息技术, 精细的分辨率和缩放从本地规模粗分辨率的区域规模。





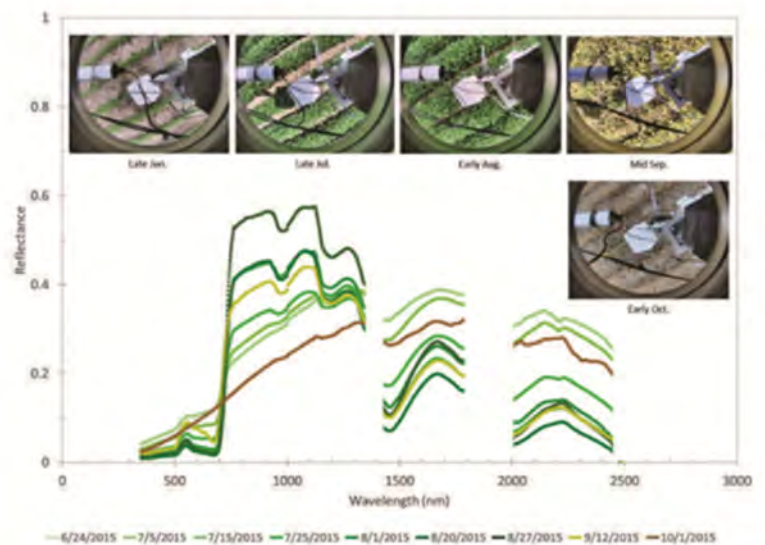
现场观测照片

## 系统功能

- A 采集多样的连续时间尺度高光谱遥感图像、气象参数和生物学指标等数据
- B 探究陆地表面与光合作用、呼吸相对应的气象、生态学参数和地表高光谱数据之间的模式和关联
- C 高频生态系统动态可视化及生态指标深度挖掘

## 特点

- 1 实时数据获取及远程传输
- 2 同时测量通量及光学数据
- 3 自动数据采集和过程处理
- 4 优秀的的数据准确性和稳定性
- 5 完备的数据分析统计模型
- 6 直观的可视化界面
- 7 在恶劣环境下完备的采集能力



现场连续采集的图像及高光谱数据



# 1 光谱传感器

地物光谱仪和多光谱相机

提供可见光和近红外高光谱数据及每个视野角度的图像信息。这些信息可以用于植物生态生理参数反演。

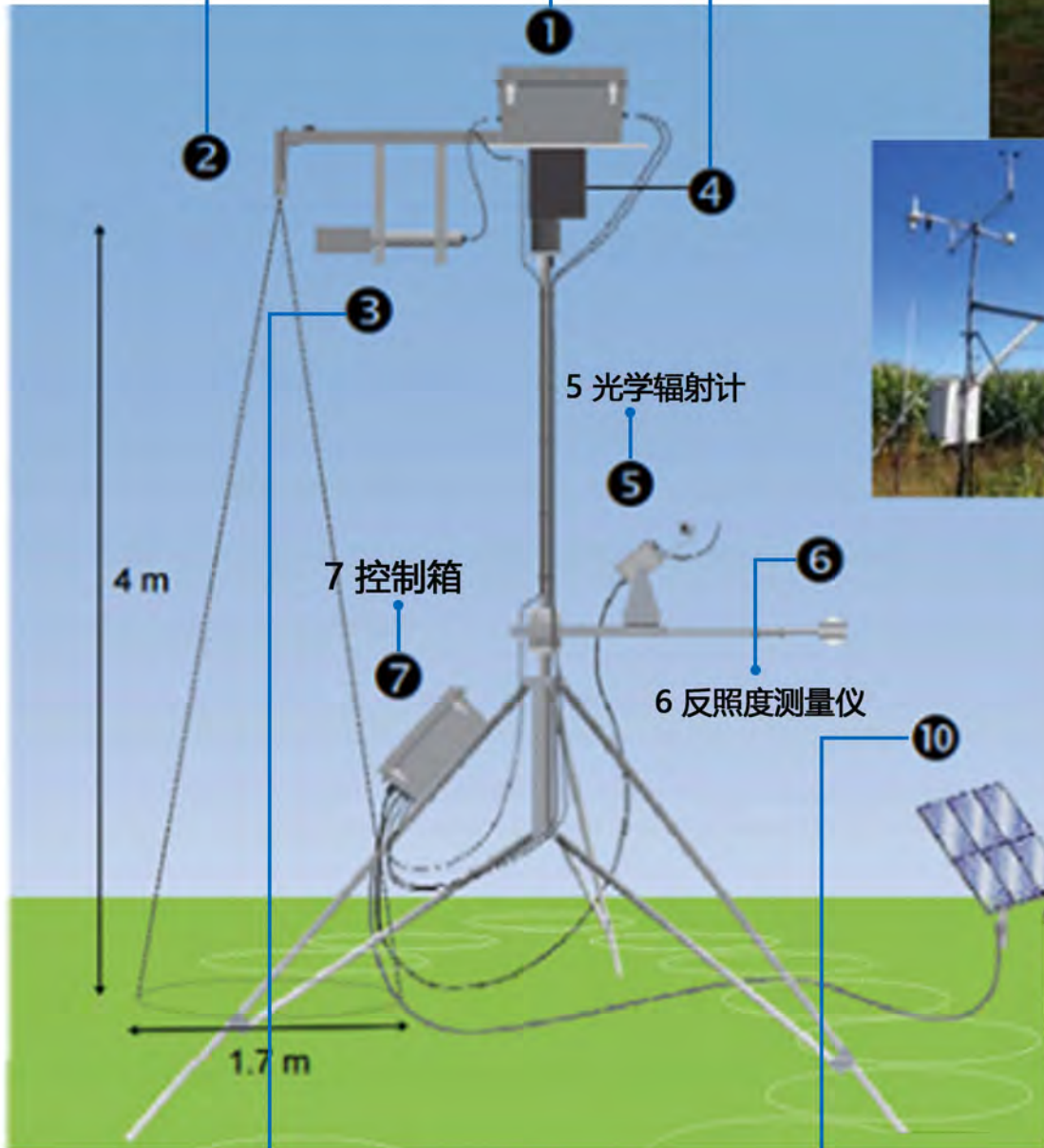
# 2 热红外温度传感器

供影响生态系统功能的冠层和表层土壤温度。

# 4 旋转平台

在生长季节，每天从黎明到黄昏，每10分钟旋转340度。一次旋转采集12个预先确定的地面采样区域的光学数据。

# 8 涡动测量



# 3 蓝菲白板 (可移动)

在每一个光学测量之前，搜集暗电流和校准白板数据，以减轻大气和太阳条件的变异性。

# 9 土壤CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>测量系统

实时测量12个区域的土壤呼吸状况。

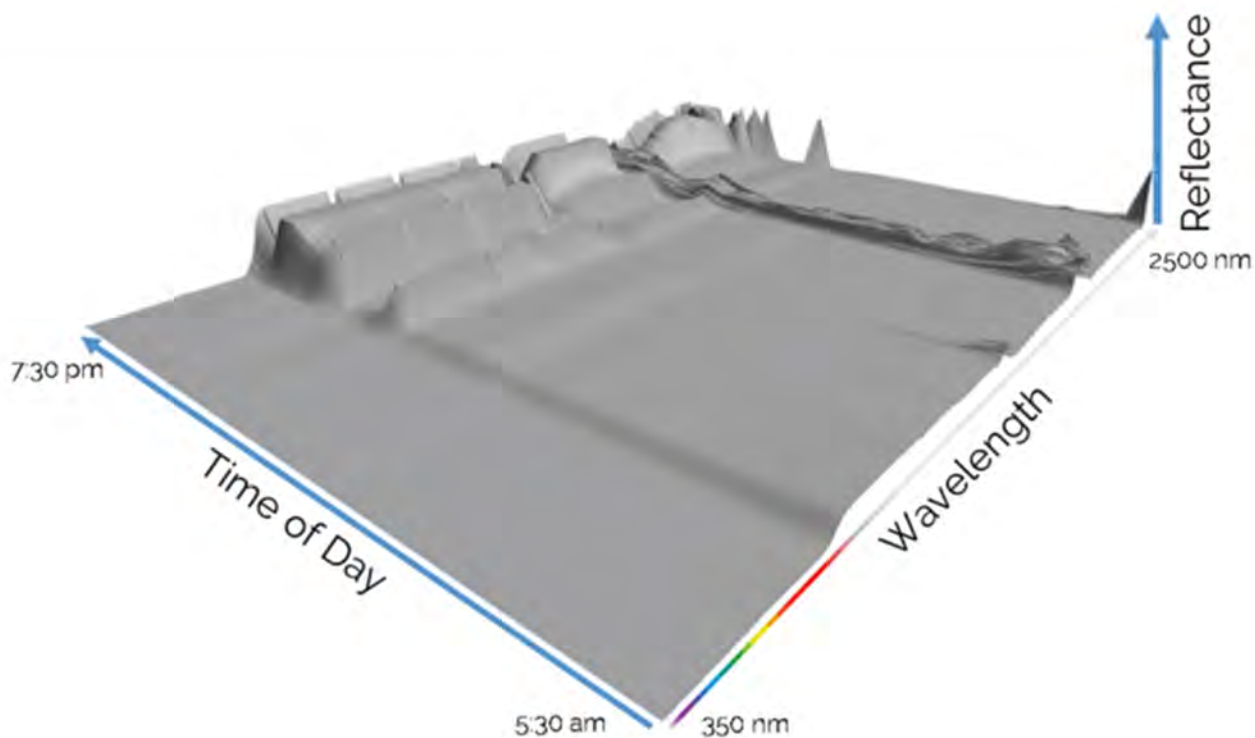
# 10 太阳能供电系统

## 可测量数据

收集了广泛的数据类型，包括遥感数据、气象测量和生物数据，以研究植物如何对周围环境做出反应，以及它们如何对气候做出贡献。

|         |                      |       |      |            |         |                 |
|---------|----------------------|-------|------|------------|---------|-----------------|
| 遥感传感器数据 | 地物高光谱数据 (400-2500nm) | 辐照度数据 | 反照率  | 天空和地表热红外数据 | 多光谱观测数据 | 大气颗粒物气散射数据 (可选) |
| 气象数据    | 空气 CO2 通量            | 热通量   | 空气温度 | 风向风速       | 土壤 C 通量 | 土壤温湿度           |
| 生物数据    | 植高                   | 叶面积   | 盖度   | NPK        | 叶绿素     | 生物量             |

我们收集来自陆地表面的不同类型的多时间尺度的大量数据，使用这个丰富的数据集来，进行生态时间序列数据的分析，以解决生态系统功能研究中一些最有趣的科学问题。



图：交互式可视化工具检查整体数据质量，识别有问题的数据点，高光谱反射率和物理测量之间的关联模式







## 系统配置:

|         | 名称                      | 产地与品牌          | 型号         |
|---------|-------------------------|----------------|------------|
| 光学传感器   | 高光谱传感器                  | 美国 ASD         | Fieldspec4 |
|         | 红外相机                    | 美国 Tetracam    | ADC        |
|         | 高光谱成像仪                  | 美国 resonnon    | PikaCX 2   |
|         | 热红外温度相机                 | 美国 Apogee      | IRTS-P     |
|         | 颗粒物浊度计                  | 美国 AIRPHOTO    | IN102      |
| 气象环境传感器 | 涡动系统<br>EC150(campbell) | 美国 campbell    | EC150      |
|         | 叶面积仪                    | 美国             |            |
|         | 叶绿素仪                    |                | SPAD       |
|         | 测高仪                     |                |            |
|         | 植物冠层分析仪                 | 中国             |            |
|         | 土壤水分剖面系统                | Campbell       | Cs655      |
|         | 土壤温室气体测量系统              | 美国 LGR&中国 LICA |            |
| 数据采集    | Cr1000                  | Campbell       |            |
| 供电系统    | LICA                    | 中国 LICA        |            |

