

文章编号: 1007-6301 (2003) 06-0607-11

# 国际草地资源遥感研究新进展

查 勇<sup>1</sup>, Jay Gao<sup>2</sup>, 倪绍祥<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210097;

2. School of Geography and Environmental Science, University of Auckland, Auckland, New Zealand)

**摘 要:** 系统地评论了国际上有关草地资源遥感研究的最近文献。首先, 分析了草地遥感的可行性, 确定了监测和评估草地资源最有效的光谱波段, 阐述了各种遥感影像在草地资源调查与评估中的实用价值。之后, 介绍了草地资源遥感的常用方法, 即植被指数和其他指数法, 对比和分析了各种指数在草地资源遥感应用中的有效性及应用范围。这些草地资源遥感的应用包括草地盖度监测与制图、生物量估算、草地退化监测及草地资源定量分析。最后, 探讨了草地资源遥感的发展趋势, 包括摄像遥感、高分辨率影像 (如 CASI, AVIRIS 和 IKONOS) 和 GPS 的运用。此外, GIS 的引入及其与数字影像处理的集合会使草地资源遥感由简单监测逐渐向动态预报和模拟过渡。这些研究新动向对国内相关科学家在选题时具有极大的参考意义。

**关 键 词:** 遥感; 草地资源; 植被指数; 生物量; GIS; 变化监测

**中图分类号:** D922.6; X87

草地资源在生态环境上有助于调节气候, 保持土壤水分, 减少水土流失, 促进生态平衡。在经济上它是畜牧业的支柱。它的巨大环境意义和经济效益已引起人们的高度重视。传统的草地资源研究方法为实地考察。它耗时长, 效率低, 尤其不适宜大范围和难以抵达地区的调查。相比之下, 遥感除了费用低、速度快外, 还能监测草地资源的现状及其变化、预测它的未来, 在草地资源研究中得到了广泛应用。Tueller 在 1989 年介绍了遥感在草地中的应用<sup>[1]</sup>。迄今为止, 这种应用在深度和广度上已有了更大发展。本文通过评述国际上草地资源遥感研究的最新文献, 试图揭示草地资源遥感的可行性, 探讨遥感在草地资源调查方面的研究现状和已取得的成果, 并指出草地资源研究的未来发展趋势。

## 1 草地资源遥感可行性分析

### 1.1 草地光谱特征

草地资源遥感的质量取决于它的光谱反射特性。草地的光谱特征为在绿色波长有个小峰值, 在红外波长有个大峰值。因此, 这些波长是研究草地生物量、覆盖率及草地健康状

收稿日期: 2003-04; 修订日期: 2003-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49971056)

作者简介: 查勇 (1963-), 男, 安徽铜陵人, 南京师范大学地理科学学院副教授, 主要从事遥感信息技术应用研究, 在国内外发表论 30 余篇, SCI 收录 4 篇。E-mail: yzha@njnu.edu.cn

态的理想选择。为更好地遥感草地特征,所用影像需含近、中、远红外波段。Schmidt 和 Skidmore 在室内量测了八种草种的光谱反射率<sup>[2]</sup>,发现它们的反射率间存在着明显的差异。这些差异为草地种类的遥感区分提供了理论依据。

Tueller 与 Bork 等发现草地光谱反射率也会随土壤水分及生长季节而有细微变化<sup>[1,3]</sup>。Mino 等发现草地的刈割也会引起它的光谱特征发生变化<sup>[4]</sup>。这些变化为利用遥感详细研究草地状况及质量、更合理地管理草地资源奠定了基础。

### 1.2 影像分辨率在草地遥感中的重要性

遥感草地资源成败的关键在于影像的光谱和空间分辨率。光谱分辨率是指每个波段的光谱宽度和所有波段的总光谱区域。波段的光谱分辨率越高,识别辐射差异的能力也越强。Bork 等发现窄波段在定量分析草地覆盖成份、区分不同放牧形式上比宽波段更具有优越性<sup>[3]</sup>。影像空间分辨率是指像元的地面覆盖面积,它在草地资源遥感中不特别重要<sup>[5]</sup>。例如,气象卫星影像 AVHRR 的空间分辨率极低,只有 1.1km,但却得到广泛应用,因为低空间分辨率的影像更适宜广泛的地理区域,只是获取的草地信息不详细。当光谱分辨率相同时,空间分辨率越高,在评估小范围内草地植被特征时所获结果也会越好<sup>[6]</sup>。

近来,多种高光谱影像相继问世,如 CASI 和 AVIRIS,它们都有一百多个波段。它们的出现使更精、更快、更省地研究草地成为可能。Lewis 等评估了航空高光谱影像在研究植被中的重要性<sup>[7]</sup>。数组植被群落在 5 米的可见光、近红外及短波红外影像上能被识别出来。CASI 影像将会使草地植被种类区分走上一个新台阶<sup>[8]</sup>。在这方面, Schmidt 和 Skidmore 的研究只起了个头<sup>[2]</sup>,而 AVIRIS 影像在草地研究中的潜力仍有待挖掘。

### 1.3 遥感在草地资源调查中的价值

遥感分为太空、空中和地面。太空遥感包括地球资源卫星影像,如 MSS、TM 和 SPOT,它们涵盖了可见光及部分红外光谱。MSS 的四个波段分辨率只有 79m,却运用广泛。Paruelo 和 Golluscio 利用 MSS 影像快速地评估了阿根廷 Patagonia 西北部的草地<sup>[9]</sup>,发现遥感是评估植被单元分布不可多得的工具。Prince 和 Astle 发现<sup>[10]</sup>,MSS7 与 MSS5 的比率可用于建立其与草地覆盖、草地生物量之间的关系。Merrill 等发现 MSS 影像数据只能提供大范围内植被生物量<sup>[11]</sup>,但不能胜任精确估算。相比之下, TM 影像的七个波段涵盖了更宽广的光谱区域,大多数草地覆盖类型都可以从 TM 长光谱波段的雨季图像上区分出来<sup>[12]</sup>。Saltz 等评价了 TM 遥感影像在研究放牧影响中的作用<sup>[13]</sup>,断定 TM 影像可以探测植被随时间变化,但在超干旱区却并不能直接提供植被指数。

SPOT 1~3 影像光谱范围仅及红外波段,它们因缺少一个中红外波段而用得有限。Girard 等利用地面辐射数据及 SPOT 数据区分了草地质量<sup>[14]</sup>,显示了 SPOT 影像在评估草地质量及监测草地变化方面的潜力。

气象卫星影像如 AVHRR 的历史比地球资源卫星更长,得到的应用也更广。AVHRR 影像上获取的植被指数与草地的季节性初级产量紧密相关<sup>[15]</sup>。Prince 与 Tucker 发现绿色草地植被的盖度及生物量只能解释从 AVHRR 数据获取的 NDVI 中的 42% 和 56% 的变化<sup>[16]</sup>。可见, AVHRR 的成功应用,也是有局限性的。

雷达图像的运用十分有限。Hill 等发现草的高度与机载合成孔径雷达 (SAR) 影像的后向散射间存在着显著的关系<sup>[17]</sup>。SAR 影像的 C 和 L 波段的结合在监测草地方面具有广阔的前景。Smith 等发现不同的放牧处理在雷达后向散射上差别甚微<sup>[18]</sup>。可是借助于实测数

据, 他们建立起来了雷达后向散射与某些草种的多寡、冠部水分、土壤水分间的密切关系。这些关系表明 SAR 影像在评价草场特征中有一定作用。

航空遥感能快速地验证与校正从卫星影像数据获取的植被参数, 但它在草地资源调查中的运用十分有限, 只有 Lobo 等利用数字化的彩红外航片制作了详细的草地植被指数图<sup>[19]</sup>。Williamson 将航空与太空遥感结合起来<sup>[5]</sup>, 成功地估算了叶面指数、绿色生物量和绿色覆盖。

地面遥感的任务包括获取草地光谱信息、收集草地特征、验证太空和航空遥感结果。实地量测草地盖度的方法有数种, 如目估和剪块<sup>[20]</sup>。Hassett 等提出了一个新颖的“蜘蛛制图法”<sup>[21]</sup>, 用于快捷地收集大范围内草地生物量数据。Zhou 等分析比较了目估法、线性截取法、冠部覆盖模型法和数码相机影像法<sup>[22]</sup>, 发现它们获取的结果只是相对值互相吻合, 因而只适宜于定性而非定量遥感。

## 2 草地资源遥感的常用方法——植被指数

植被指数 (VI) 有多种表现形式, 其中最常用的是 DVI, 它是相同位置像元值在红外及可见光波段上的算术差分。为便于比较不同地区、不同时间的植被指数, 人们都对 VI 进行标准化处理, 得到 NDVI。下面将讨论 VI 的有效性和各种表现形式。

### 2.1 NDVI 的有效性

由于 VI 很容易从遥感影像数据中提取, 用起来方便, 它在草地资源研究中得到广泛应用。Muldavin 等对提取的 VI 进行了变换<sup>[23]</sup>, 得出了草地生物多样性指标。Paruelo 等对提取的 NDVI 校正后得出一综合指数<sup>[24]</sup>, 用于估算地上净初步产出 (ANPP)。Lobo 等发现以 VI 来衡量的绿色生物量与生态参数间存在着紧密关系<sup>[19]</sup>。然而, 在植被稀少、土壤反射率高的情况下, VI 与植被覆盖率之间的关系随地点而变<sup>[25]</sup>。为抑制土壤背景对 VI 的影响, Li 等提出了二次派生指数<sup>[26]</sup>, 发现在 0.69 和 0.74 $\mu\text{m}$  的两个二次派生“窗口”可用来估计植被特征。

文献中报道的 NDVI 的有效性有矛盾的地方。一方面, 在估算植被覆盖方面, NDVI 尤其适宜于低盖度及裸露土壤的估算<sup>[27]</sup>。Hassett 发现<sup>[21]</sup>, NDVI 值与实测上层叶面积投影盖度的关系密切。Hobbs 分析对比了多种 VI<sup>[28]</sup>, 发现背景因素调整过的最大 NDVI 能用来方便地估计区域范围内的草产量。另一方面, 常规的植被指数在预测半干旱区下层叶子时仍有局限性<sup>[29]</sup>。Anderson 等发现并不是所有的 VI 都能与所估算的参数相关<sup>[30]</sup>, 只有在把样本重新分类后这样的关系才存在。

这样的矛盾可以归咎于所用波段的光谱区域差异、不同地域和不同影像波段对植被状况有不同的敏感度等。在研究植被盖度与波段比率、波段线性组合的关系时, Ringrose 等发现预测绿色植被盖度在亚热带地区的波段组合与半干旱区、干旱区的组合迥然不同<sup>[31]</sup>。因此, 相同的 VI 不应不加区分地应用于不同地区。

### 2.2 纷繁多样的植被指数

除 NDVI 外, 还有繁多的 VI, 如光谱植被指数 (SVI), 垂直植被指数 (PVI), 土壤调节 VI (SAVI)。其中, 绿色度 SVI 要比亮度 SVI 更敏感地反映灌丛草地类别<sup>[32]</sup>。Purevdorj 等还对 SAVI 作了变换<sup>[27]</sup>, 提出了 TSAVI 和 MSAVI 两个新指数。其它指数还有绿度植被

指数 (GV I)、亮度指数 (BI)、湿度指数 (WI)、红色指数。对放牧过的草地, 这些指数与生物量之间的关系并不十分密切<sup>[33]</sup>, 这样脆弱的关系在未放牧过的草地也不存在。Zhuang 等发现<sup>[34]</sup>, 松弛植被指数 (relaxation VI) 在预测植被盖度时较 NDVI 好。Li 等用比值植被指数 (ratio VI) 估算了草地产量<sup>[35]</sup>。为了克服灌丛冠部的不对称所产生的不同反射特征, Chehbouni 等将一个阴影参数引入 MSAVI<sup>[36]</sup>。修正后的多向植被指数模型在所有观察方向及太阳高度角下都能产生相同的反射率。

不同的 VI 在草地资源遥感中的功能各有千秋。TSAVI、SAVI 和 MSAVI 比 NDVI 更能精确地减小因土壤亮度而引起的估算误差<sup>[37]</sup>。在估算植被覆盖方面, TSAVI 和 NDVI 的精确性最高。Saltz 等发现 TSAVI 和 NDVI 比其它 VI 更能产生与实测数据相吻合的结果<sup>[13]</sup>。Schmidt 和 Karnieli 发现在众多 VI 中, SAVI 和 MSAVI 对裸露地的反应类似<sup>[37]</sup>。SAVI 和 NDVI 在大气作用很小时都能满足需要<sup>[38]</sup>。尽管各种 VI 已被提出, 但 Davidson 与 Csillag 发现<sup>[39]</sup>, 只要使用的卫星影像空间分辨率在 10~50m 间, 选用哪个 VI 对 C4 种类的植被盖度来说都没有什么明显区别。

### 3 草地资源遥感应用领域

遥感在草地资源中的应用主要包括资源调查与评估、产草率估算、变化监测、退化跟踪和定量分析。

#### 3.1 草地资源调查与评估

草地资源幅员辽阔, 适宜用卫星影像来调查<sup>[40]</sup>。调查的范围涵盖草地类型、草产量、覆盖度、空间分布、与其它环境因子的关系等<sup>[27]</sup>。量测植被盖度最有效的指数为 PD54, 红波段亮度和基于红-绿波段、蓝色波段总和的垂直指数<sup>[41]</sup>。Paruelo 和 Golluscio 依据主要覆盖类型及主导草种划分出草地单元<sup>[9]</sup>。Ritchie 等利用了激光来快速而准确地量测草地覆盖分布<sup>[42]</sup>, 结果与地面获取的极其吻合。Ringrose 等发现草地特征的区分度随季节而变<sup>[12]</sup>, 在雨季要比干旱季节容易。

除单时相数据外, Ringrose 等利用多时相 TM 数据识别和区分了草地特征和季节变化<sup>[12]</sup>。同样, Langley 等也用了多时相 TM 影像数据制作了植被分布图<sup>[43]</sup>。结果, 单时相影像分类的结果比多时相更精确, 而多时相影像只在某种景观中效果更好。

在草地资源调查和评估中, 很少的研究成果是以地图的形式来表达的, 只有少数几人例外。Justice 和 Hiernaux 制作了六、七、八和九月的生物量分布图来显示它的发展变化<sup>[44]</sup>。Hirata 等作了迄今为止最为详细的草地分布图<sup>[45]</sup>。野外验证表明, 这种制图方法可以推广到植被群落这样的细节水平。

#### 3.2 草地生物量估算

用遥感方式来估算草地生物量的实例有 Justice 与 Hiernaux、Wylie 等<sup>[44][20]</sup>。实际应用中, 草地生物量是用 NDVI 来代替的, 如 Weiss 等将月平均 NDVI 转换成生物量<sup>[46]</sup>。Prince 和 Tucker 利用了 MSS7 与 5 波段的比值来推算地上部分草地植被生物量<sup>[16]</sup>。绿色草地生物量也从 MSS 影像数据<sup>[11, 47]</sup>和 TM 影像<sup>[30, 33, 48]</sup>估算。与这些学者不同的是, Pickup 只从降雨和蒸发两个因子建立了估算草地产出率的模型<sup>[49]</sup>, 用从遥感影像中提取的植被指数对其进行校正。这样的模型可以在适当处理后很容易地应用到不同地区。

除了NDV I和TM 2/TM 3的比值影像外, Ikeda 等还用了植物生长模型<sup>[50]</sup>。此外, 他们还考虑了植物生长期的气温, 取得了与实测数据相吻合的结果。利用遥感方法来估算牧场的产草率依赖于植被吸收和反射率, 两者均随牧场的状况而变化, 不一定能在遥感图像上反应出来。故遥感在估算产出率中有局限性<sup>[51]</sup>。

草地生物量估算还包括确定干枯草比重。A irey 等预测了发生火灾的可能性以及发生火灾后应如何合理地调配资源<sup>[52]</sup>。Paltridge 监测了草地干燥性, 并依此来判断草地的燃烧量和湿度, 也即发生火灾的潜在性<sup>[53]</sup>。

### 3.3 草地动态监测

动态监测是指对同一研究区进行的反复观测, 以便发现它的时空变化。草地状况会随自然及人为因素而变化。监测这样的变化并及时调整草地管理策略对草地资源的保护及合理利用意义深远。遥感可运用于草地的实际监测<sup>[54]</sup>, 也是研究小范围内草地发展变化的有效方式<sup>[44]</sup>, 而卫星影像则更适合大范围内的草地变化监测<sup>[25]</sup>。草地动态监测需要对比分析多时相影像<sup>[46, 55]</sup>。多时相结果比单时相结果的精度更高<sup>[56]</sup>, 从多时相TM 影像上区分草地要比SAR 上的精度高<sup>[57]</sup>。如果将春、仲夏和末夏TM 影像结合起来分析, 则区分不同管理方法的草地精度还会得到提高<sup>[58]</sup>。草地监测可通过自动分类来完成, 将地物归化为几大类, 其中之一为草地<sup>[59]</sup>。此法只适用于监测草地范围, 不宜详细地识别它的状态<sup>[60]</sup>。对于所得的变化要作认真分析<sup>[61]</sup>。这些变化中, 有的反映了真实的草地变化, 而有的反映的可能是土壤或土壤水分的变化, 必须加以区分。

### 3.4 草地退化研究

草地退化指的是在自然与人为因素作用下草地生产率衰减, 优良草种枯竭, 杂毒草增加, 草盖度萎缩, 下垫面土壤裸露。这些变化大多可依靠NDV I影像数据来确定。草地退化的多种特征随气候及地点而变, 在半干旱的非洲南部, 表现为可食与不可食草种的比例降低<sup>[62]</sup>。Pickup 等讨论了可依遥感方式获取的一系列指标<sup>[63]</sup>。它们的混合使用为监测草地退化提供了可能。为了克服用生物和经济产出率来评价土地退化的困难, Pickup 提出了依草地产草率及消耗率来评估的方法<sup>[49]</sup>, 因为它们很容易从遥感数据获取。Eve 等从多年的AVHRR 影像制作了草场退化分布图<sup>[64]</sup>。通过对不同生态系统的NDV I与移动标准差指数(MSDI)的对比分析, Tanser 等发现MSDI在研究草地退化中是NDV I的有益补充<sup>[65]</sup>。

### 3.5 草地资源定量遥感

草地资源定量遥感是指从影像像元值推算草地的某种参数。这种推算是基于像元值与实测样本之间的回归方程或经验公式。式中的自变量为单(多)波段像元值或它的变换值, 因变量为所估参数。若引入环境和其它因子后, 回归方程含多项自变量。这种回归方程一经建立, 就可以运用到整幅影像上去。Van Kootwijk 等运用了多变量公式<sup>[66]</sup>, 估算了TM 像元中不同类型地表植被的多寡。Purevdorj 等用了两个植被指数来估算盖度<sup>[27]</sup>。除了NDV I外, Rasmussen 还用了地表月平均温度、光合有效辐射和树盖度<sup>[67]</sup>。这些环境与气候变量的引入使得所确定的回归关系更精确。除了NDV I和气象因子外, Ikeda 等还用了TM 影像及其比值<sup>[50]</sup>。与线性回归模型相比, 非线性模型在估算绿色草地产草量时更准确<sup>[35]</sup>。

精确的草地资源定量遥感要求将大气辐射和散射的影响考虑进去。现存的好几种绝对纠正大气辐射的方法需要输入众多参数, 实施起来困难。Pons 和 SoléSugrañes 提出了一

个简化的辐射修正模式<sup>[68]</sup>，它只需数字地面模型 (DEM) 及影像上没有云。这个模式可以纠正大气及太阳辐射的影响。定量遥感还要求实地采样与卫星成像同步。若不同步，则会影响精度<sup>[69]</sup>。一个补救的措施是按植被种群的生态原理对实测数据进行调整，提高精度。

草地资源定量遥感的应用有草地盖度分析、生物量估算。遥感是快速、准确地定量测算草地盖度的有效方法<sup>[42]</sup>。Purevdorj 等首先将 AVHRR 影像数据转换成多种植被指数<sup>[27]</sup>，然后将最准确的指数转换成地面植被覆盖率。他们发现影响估算精度的主要因素是叶面积指数，它能引起相同植被覆盖的光谱特征发生变化。Boyd 运用了从 MSS 获取的植被指数来研究草场密度<sup>[70]</sup>。结果表明，K-T 变换的绿度与亮度之比是估算草场密度的最佳指数。Friedl 等用 TM 数据并结合地面观测计算了各种植被指数<sup>[48]</sup>，从其中最准确的指数估算了草地生物量的变化。McCloy 和 Hall 利用数字方法处理了 MSS 数据<sup>[54]</sup>，制作了木质覆盖的反射贡献估值图，因缺乏影像与实际值的关系，他们未能产生植被覆盖密度图。

## 4 草地资源遥感发展趋势

未来草地资源遥感研究会出现两个新趋势：一是摄像遥感 (Videography)，二是影像分析的广泛使用和 GIS 的集合，朝着模拟和预测的方向发展。

### 4.1 摄像遥感的应用和推广

摄像遥感具有轻便、灵活的特点。遥感摄像机可以安放在飞机上，快速地获取大量草地信息，对小范围内的草地监测十分有效。虽说机载遥感摄像影像的空间分辨率要较航片为低，但它们的获取周期更短<sup>[71]</sup>。Pickup 等证实了机载摄像影像在研究放牧对景观碎散性的影响<sup>[41]</sup>，利用这种影像比野外考察能获取更多的地面样点信息<sup>[72]</sup>。Ludwig 等利用四个光谱的航空摄像遥感影像确定了两个草地景观功能的显示指标（小块植被及裸露土壤范围）<sup>[73]</sup>，并证明此法特别适合在这方面的应用。Everitt 等使用航空多光谱摄像遥感影像的假彩色合成图<sup>[71]</sup>，将草地中杂草和灌丛区分开来。他们发现摄像遥感是区分不同杂草种类的有效工具，且合成图像数字化后能够用来快速地确定这些杂草的面积。Pickup 等发现<sup>[41]</sup>，由高分辨率摄像数据获取的植被盖度与 TM 影像所获结果极其相近，航空摄像术在快速地验证与校正从其它卫星数据获取的植被覆盖指数上很有潜力。

### 4.2 遥感影像处理和 GIS 集成

应用于草地资源遥感中的影像处理方法包括波段差分 and 比值、自动分类等。波段差分和比值在获取植被指数中运用广泛<sup>[74]</sup>。自动分类的方法有非监督和监督两大类。Peters 等用非监督法把 NDVI 影像分为四大类<sup>[59]</sup>，Larsson 用监督分类中的最大相似法对 MSS 数据进行了分类<sup>[60]</sup>。Everitt 等使用计算机对多光谱摄像遥感数据进行了处理<sup>[71]</sup>，取得了良好结果。或许最复杂的影像处理方法是光谱分解。Sohn 和 McCoy 发现此法在植被稀少的草地<sup>[75]</sup>，能提供中等精确的估算。

草地资源的模拟离不开非遥感获取的信息，比如气象、环境数据。它们与遥感数据的结合可在 GIS 中实现。Li 等将各种遥感与环境数据存入 GIS<sup>[35]</sup>，得出了草地总产出率、草地面积和精度。Minor 等将 NDVI 输入 GIS<sup>[55]</sup>，结合其它数据得出了 NDVI 年均值。Smith 等利用 GRASS 将地面实测数据与遥感影像数据集合起来<sup>[18]</sup>，获取了两者之间的统计关系。

GIS 擅长于多时相卫星影像的迭合、几何配准、空间对比，在草地变化监测方面有着广

阔的前景。这种将遥感影像与 GIS 集合的自动方式, 完全可以成功地确定极端变化的规则和范围<sup>[74]</sup>。GIS 在草地资源研究中将会得到越来越广泛和深入的应用, 这些应用又会把草地资源研究引入一个模拟和预测的新阶段。

## 5 结论

多种资源卫星影像已被运用于草地资源研究, 如 MSS、TM 和 SPOT。气象卫星影像也得到了广泛应用, 但雷达图像、航片的应用还十分有限, 机载高分辨率 CASI 和 AVIRIS 数字影像的应用也匮乏, 热红外影像的应用尚未报道。今后这些影像将会与机载摄像遥感一样, 在小范围的草地资源监测中获得广泛应用。

遥感已成功地用于评估草地状况和产出率、估计草地生物量。通过多时相的对比分析, 可测定草地的变化, 特别是草地退化态势与过程。草地遥感中最具挑战性的应用是定量分析, 它的精度将会随着高分辨率影像数据的使用而得到提高。同时其它新技术 (如摄像遥感, GPS 和 GIS) 的引入, 将会使草地遥感研究变得更深入、更精确。GIS 在相关遥感及实测数据、监测草地变化中将扮演一个重要角色。GIS 的应用会使草地资源遥感研究向数理模拟和预测的方向发展。

## 参考文献

- [1] Tueller P T. Remote sensing technology for rangeland management applications. *Journal of Range Management*, 1989, 42 (6): 442~ 453.
- [2] Schmidt K S, Skidmore A K. Exploring spectral discrimination of grass species in African rangelands. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22 (17): 3421~ 3434.
- [3] Bork E W, West N E, Price K P, et al. Rangeland cover component quantification using broad (TM) and narrow ~ band (1.4 NM) spectrometry. *Journal of Range Management*, 1999, 52 (3): 249~ 257.
- [4] Mino N, Saito G, Ogawa S. Satellite monitoring of changes in improved grassland management. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19 (3): 439~ 452.
- [5] Williamson H D. Developing a methodology for estimating grassland variables with remotely sensed data. *Area*, 1992, 24 (1): 36~ 44.
- [6] McAdam J H. High and low resolution TM data for the assessment of herbage and sward characteristics in small fields. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18 (14): 3027~ 3037.
- [7] Lewis M, Jooste V, de Gasparis A A. Discrimination of arid vegetation with airborne multispectral scanner hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39 (7): 1471~ 1479.
- [8] Lewis M. Discrimination of arid vegetation composition with high resolution CASI imagery. *Rangeland Journal*, 2000, 22 (1): 141~ 167.
- [9] Paruelo J M, Golluscio R A. Range assessment using remote sensing in Northwest Patagonia (Argentina). *Journal of Range Management*, 1994, 47 (6): 498~ 502.
- [10] Prince S D, Astle W L. Satellite remote sensing of rangelands in Botswana: Landsat MSS and herbaceous vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7 (11): 1533~ 1553.
- [11] Merrill E H, Bramble-Brodah I M K, Marrs R W, et al. Estimation of green herbaceous phytomass from Landsat MSS data in Yellowstone National Park. *Journal of Range Management*, 1993, 46 (2): 151~ 157.
- [12] Ringrose S, Musisi Nkambwe S, Coleman T, et al. Use of Landsat Thematic Mapper data to assess seasonal rangeland changes in the Southeast Kalahari, Botswana. *Environmental Management*, 1999, 23 (1): 125~ 138.
- [13] Saltz D, Schmidt H, Rowen M, et al. Assessing grazing impacts by remote sensing in hyper-arid environments.

- Journal of Range Management, 1999, 52 (5): 500~ 507.
- [14] Girard C M, Benoit M, de Vaubernier E et al. SPOT HRV data to discriminate grassland quality. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11 (12): 2253~ 2267.
- [15] Prince S D. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981~ 1988. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12 (6): 1301~ 1311.
- [16] Prince S D, Tucker C J. Satellite remote sensing of rangelands in Botswana II NOAA AVHRR and herbaceous vegetation. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7 (11): 1555~ 1570.
- [17] Hill, M J, Donald G E, Vickery P J. Relating radar backscatter to biophysical properties of temperate perennial grassland. Remote Sensing of Environment, 1999, 67: 15~ 31.
- [18] Smith A M, Major D J, Hill M J et al. Airborne synthetic aperture radar analysis of rangeland revegetation of a mixed prairie. Journal of Range Management, 1994, 47 (5): 385~ 391.
- [19] Lobo, A, Moloney, K, Chico et al. 1998. Analysis of fine-scale spatial pattern of a grassland from remotely-sensed imagery and field collected data. Landscape Ecology, 1998, 13: 111~ 131.
- [20] Wylie B K, Harrington Jr. S D, Prince S D, Denda I. Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger. 1986~ 1988. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12 (6): 1281~ 1300.
- [21] Hassett R C, Wood H L, Carter J O et al. A field method for statewide ground-truthing of a spatial pasture growth model. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2000, 40: 1069~ 1079.
- [22] Zhou Q, Robson M, Pilesj? P. On the ground estimation of vegetation cover in Australian rangelands. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19 (9): 1815~ 1820.
- [23] Muldavin E H, Neville P, Happer G. Indices of grassland biodiversity in the Chihuahuan desert ecoregion derived from remote sensing. Conservation Biology, 2001, 15 (4): 844~ 855.
- [24] Paruelo J M, Epstein, H E, Lauenroth W K, et al. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. Ecology, 1997, 78 (3): 953~ 958.
- [25] Edwards M C, Wellens J A I-Eisaw i D. Monitoring the grazing resources of the Badia region, Jordan, using remote sensing. Applied Geography, 1999, 19: 385~ 398.
- [26] Li, Y, Demetriades-Shah H, Kanemasu, E T, et al. Use of second derivatives of canopy reflectance for monitoring prairie vegetation over different soil backgrounds. Remote Sensing of Environment, 1993, 44: 81~ 87.
- [27] Purevdorj T, Tateishi R, Ishiyama T, et al. Relationship between percent vegetation cover and vegetation indices. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19 (18): 3519~ 3535.
- [28] Hobbs T J. The use of NOAA-AVHRR NDVI data to assess herbage production in the arid rangelands of central Australia. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16 (7): 1289~ 1302.
- [29] Moleele N, Ringrose S, Arnberg W, et al. A assessment of vegetation indexes useful for browse (forage) prediction in semi-arid rangelands. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22 (5): 741~ 756.
- [30] Anderson G L, Hanson J D, Hass R H. Evaluating Landsat Thematic Mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semi-arid rangelands. Remote Sensing of Environment, 1993, 45: 165~ 175.
- [31] Ringrose S, Matheson W, Matlala C J S S et al. Vegetation spectral reflectance along a north-south vegetation gradient in northern Australia. Journal of Biogeography, 1994, 21 33~ 47.
- [32] Duncan J, Stow, D, Franklin, J, Hope A. A assessing the relationship between spectral vegetation indices and shrub cover in the Jornada Basin, New Mexico. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14 (18): 3395~ 3416.
- [33] Todd S W, Hoffer R M, Milchunas D G. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangeland using spectral indices. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19 (3): 427~ 438.
- [34] Zhuang H C, Shapiro M, Bagley C F. Relaxation vegetation index in non-linear modeling of ground plant cover by satellite remote-sensing data. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14 (18): 3447~ 2470.
- [35] Li J, Liang T, Chen Q. Estimating grassland yields using remote sensing and GIS technologies in China. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1998, 41 31~ 38.
- [36] Chehbouni A, Kerr Y H, Qi J et al. Toward the development of a multidirectional vegetation index. Water



- Resources Research, 1994, 30 (5): 1281~ 1286.
- [37] Schmidt H, Karnieli A. Sensitivity of vegetation indices to substrate brightness in hyper-arid environment: the Makhtesh Ramon Crater (Israel) case study. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 22 (17): 3503~ 3520.
- [38] Seen D L, Mougin E, Rambal S, et al. A regional Sahelian grassland model to be coupled with multispectral satellite data. II towards the control of its simulations by remotely sensed indices. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 52: 194~ 206.
- [39] Davidson A, Csillag F. The influence of vegetation index and spatial resolution on a two-date remote sensing-derived relation to C4 species coverage. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 75: 138~ 151.
- [40] Graetz R D. Satellite remote sensing of Australian rangelands. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 23: 313~ 331.
- [41] Pickup G, Bastin G N, Chewings V H. Measuring rangeland vegetation with high resolution airborne videography in the blue-near infrared spectral region. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21 (2): 339~ 351.
- [42] Ritchie J C, Everitt J H, Escobar D E, et al. Airborne laser measurements of rangeland canopy cover and distribution. *Journal of Range Management*, 1992, 45 (2): 189~ 193.
- [43] Langley S K, Cheshire H M, Humes K S. A comparison of single date and multitemporal satellite image classifications in a semi-arid grassland. *Journal of Arid Environments*, 2000, 49: 401~ 411.
- [44] Justice C O, Hiernaux P H. Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR data: Niger 1983. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7 (11): 1475~ 1497.
- [45] Hirata M, Koga N, Shinjo H, et al. Vegetation classification by satellite image processing in a dry area of north-eastern Syria. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22 (4): 507~ 516.
- [46] Weiss E, Marsh E, Pfiman E S. Application of NOAA AVHRR NDVI time-series data to assess changes in Saudi Arabia's rangelands. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22 (6): 1005~ 1027.
- [47] Williamson H D, Eldridge D J. 1993. Pasture status in a semi-arid grassland. *International Journal of Remote Sensing*, 14 (13): 2535~ 2546.
- [48] Friedl M A, Michaelsen J, Davis F W, et al. Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15 (7): 1401~ 1420.
- [49] Pickup G. A simple model for predicting herbage production from rainfall in rangelands and its calibration using remotely-sensed data. *Journal of Arid Environment*, 1995, 30: 227~ 245.
- [50] Ikeda H, Okamoto K, Fukuhara M. Estimation of aboveground grassland phytomass with a growth model using Landsat TM and climate data. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20 (11): 2283~ 2294.
- [51] Dyer M I, Turner C L, Seastedt T R. Remote sensing measurements of production processes in grazinglands: the need for new methodologies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1991, 34: 495~ 505.
- [52] Airey R S, Maktav D, Ellis G P. Using satellite data to monitor grassland drying for fire prevention purposes. *Earth Observations and Remote Sensing*, 1997, 14: 647~ 656.
- [53] Paltridge, G W. Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25: 381~ 394.
- [54] McCloy K R, Hall K A. Mapping the density of woody vegetative cover using Landsat MSS digital data. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12 (9): 1877~ 1885.
- [55] Minor T B, Lancaster J, Wade T G, et al. Evaluating change in rangeland condition using multitemporal AVHRR data and geographic information system analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1999, 59: 211~ 223.
- [56] Egbert S L, Price K P, Nellis M D, Lee R. Developing a land cover modeling protocol for the High Plains using multi-seasonal Thematic Mapper imagery. *ACSM/ASPRS '95 Annual Convention and Exposition*, Charlotte, NC, February 27~ March 2, 1995, pp. 836~ 845.
- [57] Price K P, Crooks T J, Martinko E A. Grasslands across time and scale: a remote sensing perspective.

- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67 (4): 414~ 420.
- [58] Guo X, Price K P, Stiles J M. Modeling biophysical factors for grasslands in Eastern Kansas using Landsat TM data. Transactions of the Kansas Academy of Science, 2000, 103 (3~ 4): 122~ 138.
- [59] Peters A J, Eve M D, Holt E H, et al. Analysis of desert plant community growth patterns with high temporal resolution satellite spectra. Journal of Applied Ecology, 1997, 34: 418~ 432.
- [60] Larsson, H. Analysis of variations in land cover between 1972 and 1990, Kassala Province, Eastern Sudan, using Landsat MSS data. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23 (2): 325~ 333.
- [61] Pickup G. Estimating the effects of land degradation and rainfall variation on productivity in rangelands: an approach using remote sensing and models of grazing and herbage dynamics. Journal of Applied Ecology, 1996, 33: 819~ 832.
- [62] Bosch, O J H. Degradation of the semi-arid grasslands of southern Africa. Journal of Arid Environments, 1989, 16: 165~ 175.
- [63] Pickup G, Bastin G N, Chewings V H. Remote sensing-based condition assessment for non-equilibrium rangelands under large-scale commercial grazing. Ecological Application, 1994, 4 (3): 497~ 517.
- [64] Eve M, Whiteford W G, Havstadt K M. Applying satellite imagery to triage assessment of ecosystem health. Environmental Monitoring and Assessment, 1999, 54: 205~ 227.
- [65] Tanser F C, Palmer A R. The application of a remotely-sensed diversity index to monitor degradation patterns in a semi-arid, heterogeneous, South African landscape. Journal of Arid Environments, 1999, 43: 477~ 484.
- [66] Van Kootwijk E J, van Der Voet H, Berdowski J M. Estimation of ground cover composition per pixel after matching image and ground data with subpixel accuracy. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16 (1): 97~ 111.
- [67] Rasmussen M S. Developing simple, operational, consistent NDVI-vegetation models by apply environmental and climatic information: Part I. Assessment of net primary production. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19 (1): 97~ 117.
- [68] Pons X, Solé-Sugrañes L. A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data. Remote Sensing of Environment, 1994, 48: 191~ 204.
- [69] Han L-C. A method of modifying error for non-synchronicity of grass yield remote sensing estimation and measurement. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22 (17): 3363~ 3372.
- [70] Boyd W E. Correlation of rangelands brush canopy cover with Landsat MSS data, Journal of Range Management, 1986, 39 (3): 268~ 271.
- [71] Everitt J H, Escobar D E, Alaniz M A et al. Distinguishing brush and weeds on rangeland using video remote sensing. Weed Technology, 1992, 6: 913~ 921.
- [72] Ludwig J A, Bastin G N, Eager R W, et al. Monitoring Australian rangeland sites using landscape function indicators and ground- and remote-based techniques. Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 64: 167 ~ 178.
- [73] Liu, Y S, Gao, J, Yang, Y F. A holistic approach towards assessment of severity of land degradation along the great wall in northern Shaanxi Province, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2003, 82 (2): 187 ~ 202.
- [74] Yool S R, Makai M J, Watts J M. Techniques for computer-assisted mapping of rangeland change. Journal of Range Management, 1997, 50 (3): 307~ 314.
- [75] Sohn Y, McCoy R M. Mapping desert shrub rangeland using spectral unmixing and modeling spectral mixtures with TM data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1997, 63 (6): 707~ 716.

## Most Recent Progress of International Research on Remote Sensing of Grassland Resources

ZHA Yong<sup>1</sup>, GAO Jay<sup>2</sup>, NI Shaoxiang<sup>1</sup>

(1. School of Geographic science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China;

2. School of Geography and Environmental Science, University of Auckland, Auckland, New Zealand)

**Abstract:** In this paper the progress of research on remotely sensing grassland is comprehensively reviewed through examination of the most recent international literature. First, the feasibility of using remotely sensed data to study grassland is discussed on the basis of its unique spectral reflectance. The most useful spectral bands for the monitoring and assessment of grassland resources are identified next. The common method of studying grassland through the use of vegetation index and other indices is assessed for their effectiveness. The applications of remote sensing in grassland studies, including monitoring and mapping of grassland cover, estimation of biomass, and degradation, are reviewed next. Of these applications, the most challenging is quantitative analysis of grassland resources. This paper then concentrates on the recent trends in remote sensing of grassland. They include use of videography and other air-borne high-resolution image data, digital image analysis, and GIS. It is anticipated that as remote sensing of grassland evolves from simple monitoring and assessment to dynamic modeling, GIS will play an increasingly important role in integrating diverse data into a common database to generate accurate results. The introduction of GIS will make remote sensing of grassland resources more predictive in nature.

**Key words:** remote sensing; grassland resources; vegetation index; biomass; GIS; change detection