

## 3S 技术在药用植物资源调查研究中的应用

刘金欣<sup>1,2</sup>, 潘敏<sup>3</sup>, 李耿<sup>4</sup>, 马春虎<sup>1</sup>, 侯静怡<sup>1</sup>, 孟繁蕴<sup>2\*</sup>, 赵春颖<sup>1\*</sup>

1. 承德医学院 河北省中药研究与开发重点实验室, 河北 承德 067000

2. 北京师范大学 中药资源保护与利用北京市重点实验室, 北京 100875

3. 济南市妇幼保健院, 山东 济南 250001

4. 中日友好医院, 北京 100029

**摘要:** 3S 技术在药用植物适宜性评价中应用较多, 但在资源调查和储量估算方面研究较少, 只集中在大面积栽培品种或野生广布种如人参、甘草、红花等少数几种药用植物, 特别是在野生稀有药用植物资源调查方面的应用尚属空白。简述了中药资源普查的现状及近几年 3S 技术在栽培品种、野生广布种、野生稀有种、特殊生态环境药用植物资源调查及储量估算研究中的应用, 并对高光谱遥感在中药资源调查及储量估算进行案例介绍。随着我国高分辨卫星的发射以及高光谱遥感技术的发展, 使得利用 3S 技术对野生稀有药用植物资源调查成为可能。

**关键词:** 3S 技术; 中药资源; 遥感; 资源调查; 高光谱遥感

**中图分类号:** R282.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2016)04-0695-06

**DOI:** 10.7501/j.issn.0253-2670.2016.04.027

## Application of 3S technology in resources survey of medicinal plants

LIU Jin-xin<sup>1,2</sup>, PAN Min<sup>3</sup>, LI Geng<sup>4</sup>, MA Chun-hu<sup>1</sup>, HOU Jing-yi<sup>1</sup>, MENG Fan-yun<sup>2</sup>, ZHAO Chun-ying<sup>1</sup>

1. Hebei Key Laboratory of Study and Exploitation of Chinese Medicine, Chengde Medical College, Chengde 067000, China

2. Beijing Key Laboratory of Protection and Application of Chinese Medicinal Resources, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3. Maternal and Child Health Care in Shandong, Ji'nan 250001, China

4. China-Japan Friendship Hospital, Beijing 100029, China

**Abstract:** The authors introduced the current situation of resources survey in Chinese materia medica (CMM) and 3S technology applied in the investigation of medicinal plant resources, summarized the applications in cultivars, wild widespread species, rare species of wild special ecological medicinal plant resources, and reserves estimation research by 3S technology in recent years. Presenting the hyperspectral remote sensing in CMM resources survey and reserves estimates for a case. More about the 3S technology was in medicinal plant suitability assessment application, but fewer were studies in terms of resource survey and estimating reserves. Most are concentrated in a large area of cultivated or wild species widely distributed species such as ginseng, licorice, saffron, and a few of several medicinal plants. Especially the application of rare species of wild medicinal plant resources investigation is still blank. With the launch of high-resolution satellite and development of hyperspectral remote sensing technology, making use of 3S technology on rare species of wild medicinal plant resources investigating is possible.

**Key words:** 3S technology; Chinese materia medica resources; remote sensing; resources survey; hyperspectral remote sensing

中药资源是中药产业和中医药事业发展的重要物质基础, 是国家的战略性资源。中药资源调查是中药资源保护和利用的首要问题。实时准确地监测

药用植物种类和覆盖面积对药用植物物种多样性和生态环境的可持续发展具有重要意义。

新中国成立以来, 我国分别于 1958 年、1966

收稿日期: 2015-09-28

**基金项目:** 国家科技支撑子课题 (2012BA129B02); 河北省高校重点学科建设项目; 承德医学院博士基金项目 (201502); 河北省中医药管理局科研计划项目 (2015157); 河北省中药产业技术创新联盟项目

**作者简介:** 刘金欣 (1986—), 女, 河北承德人, 博士, 讲师, 主要从事中药资源调查及质量评价研究。E-mail: liujx\_23@163.com

**\*通信作者** 孟繁蕴, 教授, 研究方向为中药资源。E-mail: mfy@bnu.edu.cn

赵春颖, 教授, 研究方向为中药资源。E-mail: 810347813@qq.com

年及 1983 年进行过 3 次全国中药资源普查。目前大多采用 1983 年的中药资源普查数据。按照中药资源传统的调查方法,所需的人力、物力、财力等调查成本极高,并且由于中药资源的蕴藏量随时在发生变化,普查成果也将会很快失去可靠性。寻找新方法开展中药资源普查、储量估算和动态监测,已成为中药资源调查和保护的首要问题。

3S 技术的特点是快速、经济、方便等,在资源调查、蕴藏量估算及动态监测方面显示出很大的优势,已在农、林、牧、渔业等领域得到了应用与推广<sup>[1-5]</sup>,为将 3S 技术应用于中药资源调查、蕴藏量估算及动态监测等方面提供了理论方法。

## 1 中药资源调查现状和存在问题

### 1.1 中药资源调查现状

新中国成立以来,我国分别于 1958 年、1966 年及 1983 年对中药资源进行过 3 次全国普查,第 1 次普查于 1960—1962 年开展,由卫生部发文,以常用中药为主,出版了《中药志》4 卷,其中收录 500 余种常用中药材,是建国后我国出版的第 1 部有关中药资源方面的学术专著。第 2 次中药资源普查是我国在 1969—1973 年开展的中草药群众运动,调查整理了各地的中草药,编辑出版了《全国中草药汇编》(上、下册)。1983—1987 年由国务院发文开展第 3 次中药资源普查,是由中国药材公司(北京)牵头完成,是目前规模最大的一次中药资源普查,调查发现我国中药资源已达 12 807 种,其中植物类中药 11 146 种,动物类中药 1 581 种,矿物类中药 80 种,编辑出版了《中国中药资源》《中国常用中药材》《中国中药资源志要》和《中国中药区划》等一系列科学著作。

### 1.2 中药资源调查存在的问题

中医药的传承与发展依赖于丰富的中药资源支撑,而中药具有明显的地域性特征,不同的地区拥有不同特色物种的中药资源。目前采用的中药资源数据来源于 1983 年的第 3 次资源普查,至今已时隔 20 多年,随着时间的推移,环境条件的变化,以及人类生产和社会活动的影响,我国的中药资源状况已经发生了很大的变化。中药资源的种类、分布、储量、质量和应用都是不断变化的,特别是近 20 年,随着我国中药产业的迅猛发展,对中药的市场需求量大量增长,掠夺式开发利用野生中药资源,加之生态环境的严重破坏,导致野生中药资源储量锐减。目前,我国中药资源总体处于家底不清、保

护及开发利用依据不足的状态。中药资源可持续利用及生物多样性保护已成为研究热点<sup>[6]</sup>。《国家中医药现代化发展纲要》已将全国中药资源普查列为重要内容,但缺乏定量可行的资源调查方法,这成为制约该项研究的瓶颈。《国务院(2009 年)关于扶持和促进中医药事业发展的若干意见》中第 6 条明确提出,我国将启动第 4 次全国中药资源普查,以加强我国中药资源动态监测和网络信息化建设,促进中药资源可持续发展利用,提升中药产业发展水平<sup>[7-8]</sup>。2011 年起,国家中医药管理局开展了中药资源普查试点工作,试点范围覆盖 31 个省。

中药资源调查主要集中在野外调查药材分布、现有种质资源情况分析和当前储量情况分析研究等。传统方法具有费时、费力而且调查周期长的缺点,往往根据药材的收购量进行推算和主观估算中药资源蕴藏量,容易受主观因素影响,缺乏客观的科学性<sup>[9-10]</sup>。调查的结果也仅限于静态的文字描述和地图展示等。因此单纯依赖我国传统的中药资源调查方法不能反映出中药资源的动态变化情况,随着遥感技术的成熟和推广应用,实现中药资源动态监测已成为可能<sup>[10]</sup>。

## 2 3S 技术概述

3S 技术是指遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)3 种对地观测新技术及其相关技术有机地集成在一起,又称为 3S 集成技术<sup>[11]</sup>。遥感(RS)是指不直接接触物体本身,从远处通过传感器探测和接收来自目标物体的信息(如电场、磁场、电磁波、地震波等),经过信息的传输及其处理分析,识别物体的属性及其分布等特征的技术<sup>[12]</sup>。全球定位系统(GPS)可在无需任何地面参照物的情况下精确测出地面上任何一点的三维坐标,具有全天候、全球化、自动定位、速度快、精度高的特点,目前已经成为最具优势的空间定位导航系统<sup>[13]</sup>。地理信息系统(GIS)可以对空间数据按地理坐标或空间位置进行各种分析处理,以及在空间要素的叠置过程中能够产生与这些要素相关的综合新信息,可以迅速地获取满足应用需要的信息,并能以地图、图形或数据的形式表达处理结果。3S 集成技术可以对空间数据实时进行采集、更新、处理、分析,并为各领域研究提供科学决策的强大技术平台<sup>[14]</sup>。利用数字化平台,地球上每一个点都有其一定的空间信息和自然因子信息,而自然条件和地理环境是道地药材形成的必要条件,所以 3S 技

术是中药资源调查、蕴藏量估算所要获取地理环境、批量处理、综合分析的重要手段。

### 3 3S 技术在药用植物资源调查中的应用

3S 技术已广泛应用于全球气候变化<sup>[15]</sup>、海平面变化<sup>[16]</sup>、荒漠化<sup>[17-18]</sup>、生态与环境变化<sup>[19]</sup>、土地利用变化<sup>[20-21]</sup>的监测等。随着地学、土壤学、生态学、农学、植物生理学等与 3S 技术相结合,可以实现对农作物、土壤在农业生产全过程中从宏观到微观的实时监测<sup>[22-23]</sup>。3S 技术以其快速、经济、方便等特点,在资源调查及监测方面显示出极大的优势。一些从事中药资源研究的学者,逐渐意识到 3S 技术在中药资源及道地药材研究中的重要价值。利用 3S 技术可以实现中药资源调查、野生储量估算、道地药材生产区划、人工种植面积测算和估产等,为中药资源研究提供了新的发展契机。

#### 3.1 3S 技术在栽培中药资源调查及储量估算的应用

利用遥感对中药资源进行调查,能减少传统人工野外资源调查中的人为误差,并可以提高调查数据的客观性、科学性和准确性。2001 年以来,中国医学科学院药用植物研究所首次运用遥感技术对人参等中药资源进行了调查方法学上的研究,取得了一定进展。陈士林等<sup>[24]</sup>运用遥感技术以人参为栽培品种的代表,对种植区域的人参种植面积进行调查,建立了人参资源遥感调查的技术路线和方法,并通过抽样调查对研究区进行了人参种植面积测算和估产,野外验证点与图像判读结果对比分析表明,地面分辨率为 15 m 时人参调查样区的人工判读精度达 90%,地面分辨率为 5 m 时达 97%,地面分辨率为 0.61 m 时达 100%。

朱寿东等<sup>[25]</sup>以贵州省黔南州龙里县内人工栽培的川续断为研究对象,就如何选择最优样方的面积和数目来估算川续断地上部分体积进行了研究,首先运用球缺模型计算栽培川续断的地上体积,然后利用基于套状样方的样带调查法研究估算川续断体积时的最优样方面积,最后利用方差法计算最优采样数目,并估算了储量。

孙志群等<sup>[26]</sup>以伊犁贝母种植品种为研究对象,基于 Worldview-2 影像采用多种方法提取伊犁贝母信息,通过实地调查其物候特性、生长状况及分布特点,探讨遥感技术在伊犁贝母调查中的可行性;利用遥感影像的信息提取结果表明,受其分布及生长特点影响,常用的最大似然、支持向量机、决策树、面向对象等计算机分类法对伊犁贝母的提取存

在一定局限性,无法获得有效结果,仅目视解译能有效提取,该研究为遥感技术在伊犁贝母栽培种调查中的应用提供了参考。

#### 3.2 3S 技术在野生中药资源调查及储量估算的应用

野生中药资源是指在一定的区域范围内分布的非人工种植的中药。野生中药资源是中药产业发展和利用的物质基础,我国野生中药资源种类繁多,生境各异,根据中药资源的不同生长环境和不同的生长习性将野生中药资源分为野生广布种药用植物资源、野生稀有种药用植物资源和特殊生态环境药用植物资源,因此需要采用不同的调查方法进行研究。

##### 3.2.1 3S 技术在野生广布种药用植物资源蕴藏量估算中的应用

野生广布种药用植物是指野生状态下分布面积比较大的药用植物资源。由于该种药用植物分布量大,可以利用农业和林业资源调查的成功经验,根据要研究的中药分布特征和生长特点,确立解译标志,直接利用遥感技术估算其资源的储量。

2008 年,李梦菊等<sup>[27]</sup>利用 3S 技术,采用美国陆地卫星 Landsat-7 ETM 数据作为其调查的数据源,对宁夏中部干旱带(约  $1 \times 10^4 \text{ km}^2$ )甘草的分布面积、资源储量等信息进行了调查,首先确定遥感图像中甘草不同群落的识别标志,然后统计出甘草所在群落面积,抽样调查其在不同群落中所占的比例,即盖度,最后计算出其总面积,并基本上掌握了宁夏中部干旱带甘草的生存状况,但未给出判读精度。张本刚等<sup>[28]</sup>应用遥感技术对野生甘草资源进行调查,采用中等分辨率的卫星影像 ETM 量测,计算出甘草分布的面积和蕴藏量,判读精度高于 90%,表明遥感调查方法用于甘草的野生资源调查也是可行的。李永宁等<sup>[29]</sup>以桃山林场金莲花为研究对象,通过 GPS 与 GIS 技术获得资源分布图与面积,采用对一级单位分层的二阶抽样方法调查单位面积产量与总产量;并通过逐步回归确定影响金莲花产量的光照与土壤因子。结果表明,不同生境类型的金莲花面积与平均单位面积产量差异较大,不同生境类型的金莲花平均单位面积产量由大到小为荒坡 > 沼泽草甸 > 林中空地 > 沟谷 > 林下,通过估算总体单位面积产量为  $5.530 \text{ kg/hm}^2$ ,研究区域的金莲花总产量为 434.543 kg,影响金莲花产量的环境因子主要为直射率、土壤含水量与容重。

为分析比较哪种数据源更适合生长状况较复杂的野生药用植被遥感识别,娜仁花等<sup>[30]</sup>以阿勒泰阿

拉哈克乡野生罗布麻自然保护区为研究对象, 采用中低分辨率的国产卫星资源 3 号影像和高分辨率影像 Worldview-2 分别对罗布麻进行遥感识别提取, 对 2 种数据源采用了同种分类体系, 在传统分类方法中加入主成分分析和纹理特征作为辅助数据来提高分类精度; 研究发现对于生长状况较复杂的野生药用植物罗布麻, 高分辨率影像 Worldview-2 更适合对其进行遥感识别, 而国产中低分辨率卫星资源 3 号影像只适合识别分布密集的罗布麻, 对于零星分布的罗布麻基本不能识别。因此, 在选取遥感数据源的时候要根据具体工作区目标物分布状况, 如果研究区内目标物分布较密集且规模较大, 既人工种植型或生长单一的药用植物, 采用资源 3 号或中低分辨率的遥感数据便可很好地识别目标物, 没必要购买高分辨率的数据, 以免造成资源浪费; 对于分布零散且伴生有其他野生植被的目标物, 认为采用高分辨率卫星影像数据才能很好地识别目标物。

**3.2.2 3S 技术在野生稀有种药用植物资源蕴藏量估算中的应用** 野生稀有种药用植物资源的地理分布不是单一种群或优势种群的集中分布, 而是分布在不同的植物群落中, 野生稀有种药用植物资源的这些特殊性使得利用遥感研究其蕴藏量具有一定难度, 多光谱遥感数据一般不能直接获取稀有种药用植物的信息, 但可以通过野外调查, 监测该种中药生长地的生境情况, 估算稀有种的蕴藏量。目前, 利用 3S 技术对野生稀有药用植物资源调查及储量估算的研究比较少, 主要是因为野生稀有中药与生境之间的关系研究的较少。

孙宇章等<sup>[31]</sup>首次利用了遥感技术对野生中药资源进行调查, 以稀有野生茅苍术为研究对象, 对影响茅苍术生长的主要因子进行筛选和分类, 根据不同地物在反射光谱特征上的差异, 对江苏茅山地区的 TM 影像进行了解译反演, 结合野外实地调研数据, 建立野外数据、遥感数据和茅苍术生境数据之间的相互关系, 获得了茅苍术生长密度相关的地物类别, 对茅山大茅峰、二茅峰和小茅峰苍术的生长环境进行分级, 在此基础上估算了茅山苍术资源量。

随着 3S 技术的发展, 尤其是地理信息系统在中药中的广泛应用, 可以将 RS、GIS 与 GPS 结合起来, 在野外抽样理论的指导下, 在调查区域内利用网格技术将自然因子及空间地理信息数字镶嵌入网格中, 每个网格具有查询自然条件、地理位置及空间叠加分析等功能, 同时实现了道地药材生境因

子的可视化。再结合中药的自然生境条件及土地利用等人为因素去掉不适宜区, 缩小区域范围, 从而得到适宜中药生长的目标区域。刘金欣等<sup>[32]</sup>以京津冀地区野生黄芩为研究对象, 根据不同的生境条件将目标区分层, 对不同生境类型随机抽样, 通过野外调查取样计算出野生黄芩在各生境类型中的单位面积储量, 并建立基于不同生境类型的野生黄芩储量计算模型, 利用部分野外实地测量的黄芩储量数据进行模型验证, 从而确定京津冀地区野生黄芩的储量。

**3.2.3 3S 技术在特殊生态环境药用植物资源调查及储量估算中的应用** 有许多药用植物生长在特殊的生态环境中, 如寄生或伴生植物; 某些特殊生态环境中的药用植物可以根据其独特的生态环境信息, 采用不同的遥感监测方法。

例如, 茯苓是一种寄生在红松类植物根部的一种菌类, 为常用野生药用植物, 在不同地区分布的海拔高度和生态环境也不同, 可以根据红松分布区域的地形、地貌等特征通过遥感反演将红松生长的地理信息进行描述, 根据遥感影像判断红松的分布区域, 结合传统的野外样方调查, 计算出茯苓在红松中接种的比例, 这样可以确定茯苓的生长分布区域并推算出茯苓的蕴藏数量。水生中药莲可以利用雷达遥感进行资源量估算, 沙漠里的寄生植物肉苁蓉及一些有伴生关系的植物的调查, 因其生态环境类型特殊, 可用遥感技术提取其特殊的生态环境进行资源量估算。不同种类的药用植物存在着不同的特殊性, 因此, 具体药用植物要根据其自身的特点进行分析, 采取合理、有效的资源遥感调查方法。

## 4 高光谱遥感在中药资源调查的应用

### 4.1 高光谱遥感概述

高光谱遥感是 20 世纪最后 20 年人类在对地观测方面取得的重大技术突破之一。高光谱遥感是指具有高光谱分辨率的遥感科学和技术, 在 300~2 500 nm (包括紫外、可见光、近红外) 的波长, 其光谱分辨率一般小于 10 nm。高光谱遥感是利用地物的分子光谱吸收和微粒散射特性获取地物信息, 包含了地物的辐射、空间分布和吸收光谱等方面大量的窄波段连续光谱 (图像) 数据, 它在成像过程中以极高的光谱分辨率用上百个连续窄光谱波段描述 1 个像元; 在提供每一波段区间图像的同时, 对每一像素产生 1 条完整而连续的光谱曲线, 高光谱遥感具有图谱合一、海量数据、数据冗余度

高和信噪比低等特点, 在相关领域具有广泛的应用和发展空间<sup>[33]</sup>。

高光谱以其高分辨率的优势为植被多样性及动态精细监测提供了新的思路。目前, 高光谱技术已经成功应用于农业、林业和国土等资源的调查和动态监测<sup>[34-38]</sup>, 并在资源调查方面显示出快速、经济和方便等优势, 为将其应用中草药资源的调查提供了理论支持和技术方法。

#### 4.2 高光谱遥感在药用植物资源调查的应用

由于植物光谱特征主要由其所含化学成分和组织机构等理化特性决定, 因此每种植物都有其特有的光谱特征。鉴于不同种类植物间的化学成分和结构差异, 使植物对波长选择性吸收和反射的特征也各不相同, 光谱特征的差异实质上是反映植物内部物质特性的差异, 这种差异正是应用高光谱遥感识别植被的基础<sup>[39]</sup>。

因此, 野生药用植物的物种识别的主要研究对象应该是野生药用植物的个体。关键技术环节需要采用地面光谱仪测量获取药用植物的光谱数据, 并对其进行分析和研究, 明确每种药用植物物种的光谱特征, 建立药用植物物种的标准光谱特征数据库。

花期是遥感识别物种的关键时期, 花期具有独特的光谱特征, 相比营养生长期通过花更容易识别物种。本课题组以新疆地区主要的经济和药用植物红花作为研究对象, 于 2011 年 7 月在新疆昌吉地区的红花栽培样地对红花冠层以及红花样地边缘进行高光谱测定, 得到红花冠层、采摘过后剩下的红花冠层、红花样地边缘及红花叶片光谱反应曲线。通过对其冠层光谱特征分析, 发现红花冠层以及采摘过后剩下的红花冠层有特征吸收峰, 且存在于 770 nm 附近; 通过光谱分析发现红花冠层光谱与红花地边缘的光谱存在显著差异。一阶导数以及反高斯模型研究表明红花冠层能满足植被光谱基本特征的同时又与红花样地边缘植被冠层存在显著的差异。该研究提出的方法旨在研究红花的高光谱特征, 为监测红花的生长状态和生理参数提供前期的理论基础, 为今后红花的分布面积估算及动态精细监测做铺垫。

#### 5 结语

3S 技术在药用植物适宜性评价中应用较多<sup>[40]</sup>, 但在资源调查和储量估算方面研究较少, 大多只集中在大面积栽培品种或野生广布种如人参、甘草、红花等少数几种药用植物。特别是野生稀有

种药用植物资源调查方面的应用尚属空白, 随着我国高分辨卫星的发射以及高光谱遥感技术的发展, 使得利用 3S 技术对野生稀有种药用植物资源调查成为可能。

#### 参考文献

- [1] 沙宗尧, 边馥苓. 3S 技术的农业应用与精细农业工程 [J]. 测绘通报, 2003(6): 29-31.
- [2] 杨 微, 周宏璐, 韩成伟, 等. 3S 技术在我国农业生产中的应用 [J]. 吉林农业科学, 2009, 34(6): 58-59.
- [3] 张金恒, 朱德柱. 基于 3S 技术构建农业灾害监测信息系统 [J]. 灾害学, 2002, 17(2): 76-81.
- [4] 肖化顺. 森林资源监测中林业 3S 技术的应用现状与展望 [J]. 林业资源管理, 2004(2): 53-58.
- [5] 谷 婧, 冯成强, 张文生. 3S 技术在中药资源研究和管理中的应用与展望 [J]. 中草药, 2014, 45(10): 1502-1506.
- [6] 黄璐琦, 郭兰萍, 崔光红, 等. 中药资源可持续利用的基础理论研究 [J]. 中药研究与信息, 2005, 7(8): 4-6.
- [7] 黄璐琦, 陆建伟, 郭兰萍, 等. 第四次全国中药资源普查方案设计与实施 [J]. 中国中药杂志, 2013, 38(5): 625-628.
- [8] 杨 光, 王永炎, 陆建伟, 等. 基于全国中药资源普查的中药基本药物供应预警方法探讨 [J]. 中草药, 2015, 46(1): 7-10.
- [9] 陈士林, 谢彩香, 姚 辉, 等. 中药资源创新方法研究 [J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2009, 10(5): 1-9.
- [10] 孙宇章, 黄璐琦, 郭兰萍, 等. 遥感技术在中药资源调查中的应用 [J]. 中国现代中药, 2006, 8(9): 7-10.
- [11] 刘金欣, 刘鑫欣, 高 路, 等. 数字地球技术在中药资源研究中的应用 [J]. 中国中药杂志, 2011, 36(3): 243-246.
- [12] 杨 微, 周宏璐, 韩成伟, 等. 3S 技术在我国农业生产中的应用 [J]. 吉林农业科学, 2009, 34(6): 58-59.
- [13] 黄璐琦, 郭兰萍. 中药资源生态学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2009.
- [14] 卢 颖, 王文全. 地理信息系统 (GIS) 在中药资源研究中的应用探讨 [J]. 北京中医药大学学报, 2006, 29(4): 246-249.
- [15] 宫辉力, 诸云强, 赵文吉, 等. 基于数字地球的全球变化研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(4): 53-55.
- [16] 王 约. 黔南独山泥盆纪海平面变化与生物群的关系 [J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2004, 33(2): 8-13.
- [17] 高志海, 魏怀东. 基于 3S 技术的荒漠化监测技术系统研究 [J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(6): 330-336.
- [18] 高会军, 谭克龙, 姜琦刚, 等. 3S 技术在沙质荒漠化土地动态监测中的应用 [J]. 地质灾害与环境, 2005,

- 16(2): 182-185.
- [19] 刘志丽, 陈 嘻. 利用 3S 技术综合研究新疆塔里木河流域中下游 11 年生态环境变化与成因 [J]. 遥感学报, 2003, 7(2): 146-152.
- [20] 刘慧平, 朱启疆. 应用高分辨率遥感数据进行土地利用与覆盖变化监测的方法及其研究进展 [J]. 资源科学, 1999, 21(3): 23-27.
- [21] 张显峰, 崔伟宏. 运用 RS, GPS 和 GIS 技术进行大比例尺土地利用动态监测的实验研究 [J]. 地理科学进展, 1999, 18(2): 137-146.
- [22] 武建军, 杨勤业. 干旱区农作物长势综合监测 [J]. 地理研究 2002, 21(5): 593-598.
- [23] 吴素霞, 毛任钊, 李红军, 等. 中国农作物长势遥感监测研究综述 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(3): 319-322.
- [24] 陈士林, 张本刚, 张金胜, 等. 人参资源储藏量调查中的遥感技术方法研究 [J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2006, 7(4): 37-43.
- [25] 朱寿东, 刘慧平, 黄璐琦, 等. 栽培药材川续断地上部分体积估算的最优样方选择 [J]. 植物生态学报, 2012, 36(2): 151-158.
- [26] 孙志群, 邓江华, 郭宝林, 等. 遥感技术在伊犁贝母调查中的应用 [J]. 中国现代中药, 2014, 16(2): 113-118.
- [27] 李梦菊, 王兴东, 王 俊, 等. 基于 3S 技术的宁夏甘草资源生存现状调查研究 [A] // 2008 年中国西部地区植物科学与开发研讨会论文集 [C]. 银川: 宁夏大学, 2008.
- [28] 张本刚, 陈士林, 张金胜, 等. 基于遥感技术的甘草资源调查方法研究 [J]. 中草药, 2006, 37(10): 1548-1551.
- [29] 李永宁, 程 旭, 黄选瑞, 等. 金莲花产量调查及其与环境因子的关系研究 [J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 75-78.
- [30] 娜仁花, 郑江华, 郭宝林, 等. 高分辨率影像在野生药用植物宏观监测中的应用评价——以罗布麻为例 [J]. 中国中药杂志, 2014, 39(10): 1777-1781.
- [31] 孙宇章, 郭兰萍, 黄璐琦, 等. 茅山地区苍术的分布现状分析 [J]. 中药材, 2008, 31(5): 641-645.
- [32] 刘金欣, 卢 恒, 曾 燕, 等. 基于 3S 技术的京津冀地区野生黄芩资源储量调查研究 [J]. 中国中药杂志, 2012, 37(17): 2524-2529.
- [33] 浦瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [34] 宋晓东, 江 洪, 余树全, 等. 亚热带典型常绿阔叶树种叶片叶绿素含量与其高光谱特征间的关系 [J]. 生态学报, 2008, 28(5): 1959-1963.
- [35] Carter G A, Knapp A K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration [J]. *Am J Bot*, 2001, 88(4): 677-684.
- [36] Carter G A. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress [J]. *Am J Bot*, 1993, 80(3): 239-243.
- [37] Smith K, Steven M, Colls J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks [J]. *Remote Sensing Environ*, 2004, 92(2): 207-217.
- [38] 蒋金豹, 陈云浩, 黄文江. 用高光谱微分指数监测冬小麦病害的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 27(12): 2475-2479.
- [39] 岳跃民, 王克林, 张 兵, 等. 高光谱遥感在生态系统研究中的应用进展 [J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(4): 471-477.
- [40] 陈士林, 索风梅, 韩建萍, 等. 中国药材生态适宜性分析及生产区划 [J]. 中草药, 2007, 38(4): 481-487.