

遥感用于森林生物多样性监测的进展

徐文婷^{1,2}, 吴炳方¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院植物研究所, 北京 100093)

摘要:随着物种和栖息地的丧失,全球范围的生物多样性保护已经成为迫切的需要。航空航天技术的迅猛发展使遥感成为能提供跨越不同时空尺度监测陆地生态系统生物多样性的工具,这方面的研究在欧美等国已经有了小范围的开展,在国内刚刚起步。国外关于生物多样性遥感探测的方法基本有 3 种:1. 利用遥感数据直接对物种或生境制图,进而估算生物多样性;2. 建立遥感数据的光谱反射率与地面观测物种多样性的关系模型;3. 与野外调查数据结合直接在遥感数据上进行生物多样性指数制图。研究表明,物种直接制图法只能应用于较小的范围;生境制图的方法,应用广泛,技术相对成熟,研究范围局限于几百公里的范畴,但不能获取生境内部的多样性信息。光谱模型技术目前正处于探索阶段,对于植被复杂、生物多样性高的地域,具有较大的应用潜力。在遥感数据上直接进行生物多样性制图在加拿大已经得到了应用。

关键词:生物多样性;遥感;生境制图;光谱模型

文章编号:1000-0933(2005)05-1199-06 **中图分类号:**Q31,Q948,S718 **文献标识码:**A

Progress on measuring forest biodiversity with remote sensing technique

XU Wen-Ting^{1,2}, WU Bing-Fang¹ (1. *Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 2. *Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1199~1204.

Abstract: As the rates of habitat and species destruction continue to rise, the need for conserving biodiversity has become increasingly imperative worldwide during the last decade. With development of the space technology, remote sensing has been a useful tool for monitoring the land surface at different temporal and spatial scales. This paper reviews the application of remote sensing in assessing the forest biodiversity. The existing studies of species biodiversity using remote sensing could be categorized into three types: the first was direct mapping of individual plants or habitat with the remote sensing data, and predictions of species biodiversity based on these maps; the second technique involves establishing of direct relationships between spectral radiance values recorded by remotely sensed data and species biodiversity from field observations; and thirdly, using the classification technique to gain the biodiversity indices from remote sensing data based on the a priori model built upon the field observations, geographic factors and remote sensing. The first method was widely used and more suitable for biodiversity monitoring. Mapping habitat with remote sensing could be used at larger spatial scales, but mapping individual species has been restricted to the much smaller scales with the high-resolution remote sensing images. The relationship model may be useful for the higher levels of species diversity, and can be applied at the national scale. The improved method has been tested in Canada, with favorable outcomes.

Key words: bio-diversity; remote sensing; habitat mapping; spectral model

随着物种和栖息地的丧失,在过去的 10a 里,对生物多样性的保护已经成为迫切的需要^[1,2]。为了设计著有成效的保护战略,必须要充分了解种的分布以及分布随时间变化的信息。而单纯的依靠野外调查来估计和获取这样的信息即便是可能的也是十分困难的^[3~5]。在 20 世纪 90 年代初保护生物学^[6]和生态学家^[7]提出将生物多样性作为一个非常重要的科学研究时就提到了遥感将可能是非常有用的工具,Davis^[8]等提出了将遥感作为输入数据,利用 GIS 结合生境特征数据监测生物多样性的方法;这

基金项目:中国科学院知识创新重要方向资助项目(KZCX3-SW-334)

收稿日期:2004-06-30; **修订日期:**2005-03-12

作者简介:徐文婷(1973~),女,河南省镇平县人,博士,主要从事生态环境与生物多样性遥感研究。E-mail:tingwenxu@sohu.com

Foundation item: Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-334)

Received date: 2004-06-30; **Accepted date:** 2005-03-12

Biography: XU Wen-Ting, Ph. D., mainly engaged in remote sensing of eco-environment and biodiversity. E-mail:tingwenxu@sohu.com

些论文展示了遥感在交叉学科和资源管理方面的应用前景。国内外学者在应用遥感与生态学科相结合从而开展生物多样性的研究方面,已经做了许多尝试^[9~15],我国作为占《濒危野生动植物物种国际贸易公约》列出的 640 个世界性濒危物种总数 24% 的物种高丧失率大国更有理由加强开展这项工作;因此本文目的在于总结与回顾遥感在监测森林生物多样性方面的应用,从而更好的服务于今后的生物多样性保护和研究工作。

1 遥感用于生物多样性监测的方法

生物多样性是指所有来源的活的生物体中的变异性,是地球生命经过几十亿年发展进化的结果,是人类赖以生存和持续发展的物质基础,是地球生命支持系统的重要组成部分,具有巨大的经济和社会价值^[53]。

遥感可以系统地提供地表覆盖的定时信息,Stom、Soule 等的研究表明这些信息对生物多样性的研究是极为有益的^[6,9]。遥感与地理信息系统结合,更扩展了遥感在这一领域的应用潜力^[16~18]。目前大多数遥感用于物种多样性的研究集中在陆地上,对海洋、淡水生态系统的研究极少,有文献记载的仅有 Albertoranza 等少数学者的研究^[19~22]。由于动物种的移动性较大,所以用遥感很难研究动物种的多样性,这样遥感用于陆地生态系统生物多样性的研究就主要针对最大的植被生态系统——森林生态系统了。纵观国内外的研究,目前利用遥感估计物种的多样性,大致可以归纳为 3 种类型:①直接利用遥感数据对单个种或生境制图,从而预测种的分布^[10,23];②通过统计学方法建立遥感数据的光谱辐射值与野外调查得到的种的分布格局间的关系模型,从而估计一定区域的多样性^[24,25];③与野外调查数据结合直接进行生物多样性描述指标制图^[26]。

1.1 遥感数据直接用于单个树种或生境制图

1.1.1 单个树种或同质群落制图 卫星有规律的覆盖大面积的地域,这一点对于生物多样性的研究是非常理想的。研究表明在遥感数据的空间分辨率允许的情况下,占据较大的空间范围的物种,用卫星遥感数据可以很容易区分,如同质纯林或农作物^[27]。目前大多数此类研究都集中在欧洲、澳洲和美国,主要也是因为这些国家的森林基本上都是由少量优势种构成的简单林分^[28,29]。由于不同物候期植物叶片组成成份的差异,植物在不同的季节有不同的光谱反应,在电磁波谱的可见光范围,这种差异更明显。根据植物的这一特征,利用多时相的遥感数据不但可以进一步区分种群而且可以提高分类精度^[30~33]。

随着林分异质性的增加,分类级别增多,直接利用遥感数据来制图也就相当困难。遥感图像上的每个像元覆盖了树的不同部分,如树皮、枝、叶以及土壤背景等,这些不同的要素亮度值变化很大,从而影响到整个像元的光谱反射率,因此即便是利用高时间、空间分辨率的遥感数据进行单个树种制图也是很困难的。对于单个树种的遥感判别,高光谱数据由于其具有很多很窄的电磁波段而有着得天独厚的优势,能大大地改善对植被的识别与分类精度。单就充分利用植被的光谱信息而言,可以从众多的窄波段中筛选出光谱差异极为明显的波段,利用少数几个波段对植被类型进行识别与分类^[34,35]。Hurcom 和 Cochrane 分别利用光谱分解和光谱间的差异对树种进行分类均取得了较好的效果^[36,37]。然而对于下层种的识别仍然很困难, Dietz 和 Steinlein 1996^[38] 年对欧洲中部的植物群落的研究表明,对于多层的植被或高密度植被来说,这种方法会导致种间的混淆,主要取决于树冠的密度、树冠与下层树冠的距离以及树冠间的重叠度。

在没有人为干扰或人为干扰较小的情况下,物种的分布主要受环境变量如地形、降雨、土壤类型等的影响^[39]。这些空间分布变量对遥感来说是有用的^[40,41]。研究表明结合 DEM、坡度、坡向和水源的状况等这些辅助数据可以提供有关物种分布的更详细的信息^[42~44,40]。

1.1.2 以生境图为基础绘制物种分布图 生物地理的基本概念就是每个种对资源和外部环境有一些要求,以便它们能够生存和繁殖,而这些要求就被定义为“生境”^[45]。种与生境关系模型是由生物学家给定的一系列等级;如二值(合适和不合适)、一般(高、中、低)或比值(指标值)。种的分布图可以通过对生态环境因子制图来获得,如 BioClim 模型就是利用温度与降雨数据来模拟物种的分布。但实际上生物与生态因子如捕食与竞争也影响种的分布,这样仅仅由温度、降雨数据并不能准确估计种的出现,在许多情况下可能会过高估计种的分布以及丰富度^[46]。Diamond^[47]指出生境多样性和结构复杂性是资源质量的重要成分,因为空间异质性是一个最通用的解释种的丰富度格局的假设。空间格局的量测包括多样性指数,它来自于以植被或土壤类型数量和比例为基础的信息理论^[48,49]。

遥感具有获取空间异质性信息这方面的优势,因为它可以提供什么要素,如何排列以及其时间动态^[50]。由于物种组成、结构特点、物候的不同在遥感影像上的光谱特征也不相同,而基于这些光谱可以区分出不同的生境类型,因此它可以用来监测植被动态、干扰以及空间异质性。大多数景观水平的空间异质性与生境异质性指数是遥感数据的产品,特别是土地覆盖图或生境图^[51,52]。利用遥感数据获得的生境图来模拟单个种的分布和计算各种丰富度指数(如 Shannon 指数、Simpson 指数等)已经有了很多研究,前提是要获得有关生境的详细信息^[23,54~59]。如目前国内外广泛应用的 GAP(a Geographic Approach to Protect Biological Diversity)分析方法。GAP 分析使用利用遥感资料获得的植被型的分布图,将脊椎动物或植物群丛作为生物多样性保护的指示种,利用地理信息系统(GIS)中的数字地图层来确定单个物种的分布、物种丰富度高的热点地区以及现存生物多样性保护区中有和没有的植被型;GAP 分析是在较大的空间尺度上进行的^[73]。一些指数对空间分辨率和土地覆盖种类敏感^[60],目

前建立种的丰富度与它们的一般性关系还比较困难。因此应该在这方面开展一些研究工作^[62]。

以生境图为基础的遥感制图,结合种与生境的相关信息可以获得种的分布信息^[63],然而这一技术的主要局限是其应用的尺度。物种多样性不仅在生境间变化,而且在生境内部也变化。在两地点间的种类组成的变动就是通常所说的 β 多样性^[64]。在一个景观内,给定的生境与一系列种密切相关。当研究的尺度变大时,给定种与生境的相关关系可能就不存在了^[50]。 β 多样性的测定方法在广泛应用时一定要注意其尺度变化^[65,66]。一般说来,生境制图来估计生物多样性局限于几十公里^[67]。

1.2 生物多样性与遥感数据间的关系模型

有研究表明物种丰富度可以通过与遥感数据的关系模型获得,其优点是可以用于动物物种多样性的监测。这一方法是基于统计学原理的,虽然在结果验证上有较大的争议,但目前仍是国内外学者研究的热点问题。

在喀拉哈里沙漠,Verlinden 等^[68]1997 年验证了这一假设,用 NOAA-AVHRR NDVI 数据估计的草地绿度与有蹄类动物的幼仔的种群数量相关。

在黄石公园,利用 TM 数据对森林种群进行过类似的研究^[69],由 70 个林分的 TM 数据与种群调查数据建立的多元回归模型,只能解释上层种或下层种的 31% 的变动。Nøhr 和 Jørgensen^[70]研究了塞内加尔地区景观尺度上的灌木和萨瓦那生境鸟类的多样性;用监督分类对 TM 数据分出 16 个土地覆盖类型,计算出景观多样性与 1991~1993 年的 12 个 200m 宽 3000m 长的样带估计种的丰富度、Shannon 指数和 Simpson 指数来表示样地实测的鸟类的物种多样性,研究表明这两者是正相关的。Oindo^[23]由多年的 NDVI 数据获得的景观多样性与物种的丰富度呈负相关,以这种相关性为基础,使用遥感数据制作了鸟类分布图。Lavers 等^[60]年得出了近红外波段与滨鹬(高沼地的一种鸟)密度的高相关性。这种相关是由于这种鸟的分布受该地区的优势植被梯度的影响,而植被的分布在近红外得到了体现。然而在设得兰群岛附近,优势植被分布梯度并有影响这种鸟的丰度。因此在这个地区近红外与鸟的分布并没有相关性。很显然,反应光谱反射与种的分布间的关系不仅取决于种的问题,而且也与研究区有关。

对于相对同质的植被区,也开展了这方面的研究。Lewis^[71]试图使用 Landsat MSS 对澳大利亚一个小岛的植物组成进行研究,结果证明样地调查的聚类分析结果与光谱聚类的结果具有很高的相关性。这表明有可能获得植被组成与光谱反射数据的直接关系,而这种关系可以用来推广。然而,作者以为,这种显著相关受地面实测的影响很大,而且研究是在相对简单的岛屿群落中进行的,对于高异质性的植被群落,结论能否成立还有待研究。

建立光谱与多样性间关系模型的方法目前仍存在许多问题,在植被结构变化很大的地区,结构而不是种的差异占优势,因此以上这些方法不可能监测物种组成。给定区域的光谱值在不同图像间的差异也很大,这意味着对于每一景不同的图像来说,影像与种的组成间的关系模型都要重新计算,这一点不适于模型的广泛推广。Warren^[72]利用雷达数据结合 DEM 与水源数据得到的模型证明,使用辅助数据可以提高模型的精度,并且也有助于模型的推广,是大区域生物多样性建模型的发展趋势。

1.3 与野外调查数据结合直接进行生物多样性描述指标制图

加拿大西部的森林生物多样性遥感监测项目是利用野外调查数据、坡度以及遥感获得的树冠面积建立多元回归模型,由模型求得的物种丰富度作为 Landsat TM 影像监督分类的训练样地,对整个 Landsat TM 进行非监督分类,从而求得每个像元的丰富度指标^[26]。

2 结论

用遥感监测生物多样性是目前生态学家与遥感学家致力研究的问题,遥感数据直接用于物种判别,在方法上是可行的,但受研究区大小的影响,一般来讲,面积局限于几公顷范围的物种单一的林分,但对下层种和结构复杂的森林这一方法则是不可行的。

用遥感获取生境图从而获得 β 多样性方法相对成熟,且有较宽泛的应用。然而,研究局限在植物上,对移动性较大的动物这种方法是否可行目前还没有得到证明。而且由于植被组成、历史特征、结构等方面的较大的差异,而不能准确估计出生物多样性^[73]。

通过建立种的分布与光谱值间的关系模型,推测物种多样性的分布的方法,是目前的研究热点,但并没有得到广泛的应用。其最大的优点就是可以对动物种的多样性进行模拟,同时模型也可以反应出下层种的物种情况。

对于物种多的地方直接用光谱值估计是有效的,但是面积只能局限在几百平方公里。在大范围内,生境图能提供广布种的分布信息,但是它的空间尺度要求在几十平方公里。小一些的有限种的区域,直接制图可以提供树种分布或群落分布的详细信息。总之,选取何种技术将依赖于研究的地域,例如对印度热带雨林的监测与对非洲喀拉哈里沙漠的监测方法将是非常不同的。而且不论选取哪种方法都要有地面收集的信息和遥感数据结合,建立不同尺度上的这两种信息间的关系是必要的,中尺度的研究可能会有助于信息从地面调查到全球水平的外推。这也是全球生物多样性估计所倡导的^[3]。

References:

- [1] Wilson E O. *Biodiversity*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1988.
- [2] Kondratyev K Y. *Multidimensional Global Change*. Chichester: Wiley/PRAXIS Series in Remote Sensing, 1998.
- [3] Heywood V. *Global Biodiversity Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [4] Jeremy T K, Marsha Ostrovsky. From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, **18**(6): 299~305.
- [5] Jones K B, Riddle B R. *Regional scale monitoring of biodiversity*. In: Szaro R C and Johnston D W eds. *Biodiversity in managed landscapes: theory and practice*. New York: Oxford University Press, 1996. 193~209.
- [6] Soule M E, Kohm K A. *Research Priorities for Conservation Biology*. Washington, D.C.: Island Press, 1989.
- [7] Lubchenco J, Olson A M, Brubaker L B, et al. The sustainable biosphere initiative: an ecological research agenda. *Ecology*, 1991, **72**(2): 371~412.
- [8] Davis F W, Stoms D M, Estes J M, et al. An information systems approach to the preservation of biological diversity. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1990, **4**(1): 55~78.
- [9] Stoms D M, and Estes J E. A remote sensing research agenda for mapping and monitoring biodiversity. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**(10): 1839~1860.
- [10] Nagendra H. Review article: Using remote sensing to assess biodiversity. *Int. J. Remote Sensing*, 2001, **22**(12): 2377~2400.
- [11] Saxon E C, Dudzinski M L. Biological survey and reserve design by Landsat mapped ecoclines—a catastrophe theory approach. *Australian Journal of Ecology*, 1984, **9**(1): 117~123.
- [12] De Wulf R R, Goossens R E, MacKinnon J R, et al. Remote sensing for wildlife management: Giant Panda habitat mapping from Landsat MSS images. *Geocarto International*, 1988, **1**(1): 41~51.
- [13] Scott J M, Davis F W, Csuti B, et al. Gap analysis: a geographic approach to protection of biological diversity. *Wildlife Monographs*, 1993, **123**(1): 1~41.
- [14] YUE T X. Discussion on studying biodiversity by remote sensing. *Chinese Biodiversity*, 2000, **21**(8): 343~346.
- [15] Guo Z H W, Li D M, Gan Y L. The assessment of forest ecosystem biodiversity by remote sensing. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(8): 1369~1384.
- [16] Turner W, Spector S, Gardiner N, et al. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, **18**(6): 306~314.
- [17] Salem B B. Application of GIS to biodiversity monitoring. *Journal of Arid Environments*, 2003, **54**(1): 91~114.
- [18] Johnson D. Contemporary environmental correlates of endemic bird areas derived from meteorological satellite sensors. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B*, 1998, **265**(1400): 951~959.
- [19] Zacharias M, Neimann O, Borstad G. An assessment and classification of a multispectral bandset for the remote sensing of intertidal seaweeds. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1992, **18**(4): 263~274.
- [20] Brown C W, Podesta G P. Remote sensing of coccolithophore blooms in the western South Atlantic Ocean. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **60**(1): 83~91.
- [21] Pasqualini V, Pergent M C, and Pergent G. Use of remote sensing for the characterisation of the Mediterranean coastal environment: the case of *Posidonia oceanica*. *Journal of Coastal Conservation*, 1998, **4**(1): 59~66.
- [22] Albertoranza L, Brando V E, Ravagnan G, et al. Hyperspectral aerial images: a valuable tool for submerged vegetation recognition in the Ortello Lagoons, Italy. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**(3): 523~533.
- [23] Oindo B O, Skidmore A K. Mapping habitat and biological diversity in the Maasai Mara ecosystem. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(5): 1053~1069.
- [24] Oindo B O, and Skidmore A K. Interannual variability of NDVI and species richness in Kenya. *Int. J. Remote Sensing*, 2002, **23**(2): 285~298.
- [25] Giles M F, Mark E J. Tree biodiversity in protected and logged bornean tropical rain forests and its measurement by satellite remote sensing. *Journal of Biogeography*, 2003, **30**(7): 1053~1066.
- [26] Chipman S J, Johnson E A. *Understory vascular plant species diversity in the mixedwood boreal forest of Western Canada*. SFM Network Project, 2000. 1~26.
- [27] Ahern F J, Leckie D G, and Werle D. Applications of RADARSAT SAR data in forested environments. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1993, **19**(4): 330~337.

- [28] Nagendra H, Gadgil M. Satellite imagery as a tool for monitoring species diversity: an assessment. *Journal of Applied Ecology*, 1999, **36**(3): 388~397.
- [29] Coleman T L, Gudapati L, and Derrington J. Monitoring forest plantations using Landsat Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **33**(3), 211~221.
- [30] Kremer R G, and Running S W. Community type differentiation using NOAA/AVHRR data within a sagebrush-steppe ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **46**(3): 311~318.
- [31] Schriever J R, and Congalton R G. Evaluating seasonal variability as an aid to cover type mapping from Landsat Thematic Mapper data in the Northeast. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, **61**(4): 322~327.
- [32] Wolter P T, Mladenoff D J, Host G E, *et al.* Improved forest classification in the Northern Lake States using multi-temporal Landsat imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, **61**(9): 1129~1143.
- [33] Thomas K, Timothy A, Warner J B, *et al.* A Comparison of multispectral and multitemporal information in high spatial resolution imagery for classification of individual tree species in a temperate hardwood forest. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **75**(1):100~112.
- [34] Warner T A, and Shank M C. Spatial autocorrelation analysis of hyperspectral imagery for feature selection. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **60**(1): 58~70.
- [35] Gougeon F A. Comparison of possible multispectral classification schemes for tree crowns individually delineated on high spatial resolution MEIS images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1995, **21**(1): 1~9.
- [36] Hurcom S J, Harrison A R. The NDVI and spectral decomposition for semi-arid vegetation abundance estimation. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(16): 3109~3125.
- [37] Cochrane M A. Using vegetation reflectance variability for species level classification of hyperspectral data. *Int. J. Remote Sensing*, 2000, **21**(20): 2075~2087.
- [38] Dietz H, and Steinlein T. Determination of plant species cover by means of image analysis. *Journal of Vegetation Science*, 1996, **7**(1): 131~136.
- [39] Skidmore A J. An expert system classifies Eucalypt forests types using Thematic Mapper data and a digital terrain model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, **55**(10): 1449~1464.
- [40] Debinski D M, and Humphrey P S. An integrated approach to biological diversity assessment. *Natural Areas Journal*, 1997, **17**(4), 355~365.
- [41] Van Horssen P W, Schol P P, and Barendregt A. A GIS-based plant prediction model for wetland ecosystems. *Landscape Ecology*, 1999, **14**(3), 253~265.
- [42] White J D, Kroh G C, and Pinder J E. Forest mapping at Lassen Volcanic National Park, California, using Landsat TM data and a Geographical Information System. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, **61**(4): 299~305.
- [43] Franklin S E, Blodgett C F, Mah S, *et al.* Sensitivity of CASI data to anisotropic reflectance, terrain aspect and deciduous forest species. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1991, **17**(4): 314~321.
- [44] Franklin S E. Discrimination of subalpine forest species and canopy density using digital CASI, SPOT PLA, and Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1994, **60**(10): 1233~1241.
- [45] Brown J H, and Gibson A C, *Biogeography*. St Louis: The C. V. Mosby Company, 1983.
- [46] Airrola D A. *Guide to the California wildlife habitat relationships system*. Sacramento: California department of fish and game, 1988.
- [47] Diamond J. Factors controlling species diversity: overview and synthesis. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1988, **75**(1): 117~129.
- [48] Crowe T M, and Crowe A A. Patterns of distribution, diversity, and endemism of Afrotropical birds. *Journal of Zoology*, 1982, **198**: 417~442.
- [49] Miller R I, Stuart S N, Howell K M. A methodology for analyzing rare species distribution patterns utilizing GIS technology: the rare birds of Tanzania. *Landscape Ecology*, 1989, **2**(3):173~189.
- [50] Quattrochi D A, Pelletier R E. *Remote sensing for analysis of landscapes: an introduction*. In: Turner M. G. and Gardner R. H. eds. *Quantitative Methods in Landscape Ecology*, New York: Springer-Verlag, 1991. 51~76.
- [51] Mead R A, Cockerham L S, Robinson CM. Mapping Gopher Tortoise habitat on the Ocala National Forest using a GIS. Proceedings of GIS/LIS'88 held in San Antonio. TX. On 30 November-2 December, 1988. 395~400.
- [52] Short H L, Williamson S C. *Evaluating the structure of habitat for wildlife*. In: J. Verner, M. L. Morrison, and C. J. Ralph eds. *Wild life 2000: modeling habitat relationships of Terrestrial vertebrates*. Madison, WI: University of Wisconsin Press, 1986. 97~104.

- [53] Ma K P. Discuss the concept of biodiversity. *Chinese Biodiversity*, 1993, **1**(1): 20~22.
- [54] Li X, and Strahler AH. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. I. E. E. E. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **23**(5), 705~721.
- [55] Jorgensen A F, Nohr H. The use of satellite images for mapping of landscape and biological diversity in Sahel. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**(1): 91~109.
- [56] Fuller R M, Groom G B, Mugisha S, *et al.* The integration of field survey and remote sensing for biodiversity assessment: a case study in the tropical forests and wetlands of Sango Bay, Uganda. *Biological Conservation*, 1998, **86**(3): 379~391.
- [57] Gratto-Trevor C L. Use of Landsat TM imagery in determining important shorebird habitat in the Outer Mackenzie Delta, Northwest Territories. *Arctic*, 1996, **49**(1): 11~22.
- [58] Tucker K, Rushton S P, Sanderson R A, *et al.* Modelling bird distributions-a combined GIS and Bayesian rule-based approach. *Landscape Ecology*, 1997, **12**(1): 77~93.
- [59] Weishampel J F, Knox R G, Ranson K J, *et al.* Integrating remotely sensed spatial heterogeneity with a three-dimensional forest succession model. In: Gholz H L, Nakane K and Shimoda H eds. *The Use of Remote Sensing in the Modeling of Forest Productivity*. Dordrecht; Kluwer Academic Publishers, 1997. 109~134.
- [60] Lyon J G, Heinen J T, Mead R A, *et al.* Spatial data for modeling wildlife habitat. *Journal of Surveying Engineering*, 1987, **113**(2): 88~100.
- [61] Lavers C, Haines-Young R. The use of satellite imagery to estimate Dunlin (*Calidris alpina*) abundance in Caithness and Sutherland and in the Shetland Islands. *Bird Study*, 1997, **44**(2): 220~226.
- [62] Hunsaker C T, Carpenter D E, eds. *Ecological indicators for the environmental monitoring and assessment program*. EPA 600/3-90/060. Research triangle park, NC: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 1990.
- [63] Ravan S A, Roy P S, Sharma C M. Space remote sensing for spatial vegetation characterization. *Journal of Bioscience*, 1995, **20**(3): 427~438.
- [64] Magurran A E. *Ecological Diversity and its Management*. London: Croom Helm, 1998.
- [65] Jha C S, Udayalakshmi V, Dutt C B S. Pattern diversity assessment using remotely sensed data in the Western Ghats. *Tropical Ecology*, 1997, **13**(2): 273~283.
- [66] Nagendra H, Gadgil M. Ecological analysis and modelling: issues and challenges. ISPRS Commission VII; Working Group 2. Applications of Remote Sensing and GIS for Sustainable Development (Hyderabad, India: ISPRS Working Group VII/2 and National Remote Sensing Agency, Department of Space, Government of India), 1999. 8~13.
- [67] He H S, Mladenoff D J, Radeloff V C, *et al.* Integration of GIS data and classified satellite imagery for regional forest assessment. *Ecological Applications*, 1998, **8**(4): 1072~1083.
- [68] Verlinden A, Masogo R. Satellite remote sensing of habitat suitability for ungulates and ostrich in the Kalahari of Botswana. *Journal of Arid Environment*, 1997, **35**(3): 563~574.
- [69] Jakubauskas M E, Price K P. Empirical relationships between structural and spectral factors of Yellowstone Lodgepole Pine forests. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, **63**(12): 1375~1381.
- [70] Nohr H, Jorgensen A F. Mapping of biological diversity in the Sahel by means of satellite image analysis and ornithological surveys. *Biodiversity and Conservation*, 1997, **6**(4): 545~566.
- [71] Lewis M M. Species composition related to spectral classification in an Australian spinifex hummock grassland. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, **15**(16): 3223~3239.
- [72] Innes J L, Koch B. Forest biodiversity and its assessment by remote sensing. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 1998, **7**(6): 397~419.
- [73] Li D Q, Song Y L. Review on hot spot and GAP analysis. *Chinese Biodiversity*, 2000, **8**(2): 208~214.

参考文献:

- [14] 岳天祥. 生物多样性遥感研究方法浅议. 生物多样性, 2000, **21**(8): 343~346.
- [15] 郭中伟, 李典谟, 甘雅玲. 森林生态系统生物多样性的遥感评估. 生态学报, 2001, **21**(8): 1369~1384.
- [53] 马克平. 试论生物多样性的概念. 生物多样性, 1993, **1**(1): 20~22.
- [73] 李迪强, 宋延龄. 热点地区与 GAP 分析研究进展. 生物多样性, 2000, **8**(2): 208~214.