

森林生态系统立地指数的遥感分析

马明东¹, 江 洪^{2,3,*}, 刘世荣⁴, 朱春全⁵, 刘跃进¹, 王金锡⁶

(1. 四川农业大学, 都江堰市 611830; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京市 210093; 3. 西南大学教育部三峡库区生态环境重点实验室, 重庆市 400715; 4. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 5. 世界自然基金会中国分会, 北京 100006; 6. 四川省林业科学研究院, 成都市 610081)

摘要:森林生态系统立地指数分析和立地质量的评估是森林生态系统经营管理和造林营林的重要理论基础与规划方法,也是研究森林生态系统生产力的重要内容。由于技术的限制,迄今为止,还没有实现森林生态系统立地空间分布格局的分析和开展立地条件随时间动态变化的研究。卫星遥感为大面积研究森林生态系统的生产力及其空间分布格局和动态提供了一条重要的途径。以云杉为对象,利用卫星遥感为研究手段,在岷江上游的四川西北部松潘镇江关流域研究森林生态系统立地指数的空间分布特点,探索有关遥感反演模型的建立,并通过有关精度的评估分析这种高技术应用的价值和潜力。研究结果表明,遥感植被指数 NDVI 和 TNDVI 与野外实测云杉立地指数(SI)基本为线性相关。通过对模型模拟结果和实际测定结果的比较研究,发现在 1:1 比例的分析图中,NDVI 和 TNDVI 的遥感反演模型都有很好的拟合效果与较高的精度,说明通过遥感植被指数的方法测定森林立地指数具有较高的实用价值。

关键词:森林生态系统;云杉;立地指数;遥感植被指数;反演模型

文章编号:1000-0933(2006)09-2810-07 **中图分类号:**Q143,Q948,S718.5 **文献标识码:**A

The preliminary analysis of forest ecosystem site index using remote sensed data

MA Ming-Dong¹, JIANG Hong^{2,3,*}, LIU Shi-Rong⁴, ZHU Chun-Quan⁵, LIU Yue-Jian¹, WANG Jin-Xi⁶ (1. Sichuan Agriculture University, Dujiangyan 611830, China; 2. The International Institute of Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. The Key Lab. of Three Gorges in Southwest University, Chongqing 400715, China; 4. Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 5. WWF of China, Beijing 100006, China; 6. Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2810 ~ 2816.

Abstract: The estimating of Site index and site quality are fundamental theory and basic tools in forest ecosystem management and silviculture practice. The study on the spatial pattern and temporal dynamics of Site index and quality of forest ecosystem are still lack as the limitation of technology. It is a new approach of forest productivity estimating in large area using satellite remote sensed data. The Site index spatial distribution pattern of spruce (*Picea asperata*) forest was described through the remote sensing vegetation index application and inverse models establishment in Northwest Sichuan Province, Songpan Zhengjiangguan watershed, and evaluated the potential of methodology in broadly regions and forests through the accuracy assessment. The results show that Site index of spruce forest is linear correlation with remote sensed vegetation indices (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and soil adjust NDVI (TNDVI)), as well as these inverse models with high accuracy. This study demonstrated that this approach can be used in similar estimating of different forest ecosystems.

基金项目:四川省先导计划重点攻关资助项目(03~06);科技部国家基础理论研究规划资助项目(2002CB111504);科技部国家基础理论研究规划资助项目(2001CB309401);国家林业局四川森林生态与资源环境实验室资助项目

收稿日期:2006-02-24; **修订日期:**2006-07-12

作者简介:马明东(1958~)男,湖南常德人,副教授,主要从事森林生态、森林经营研究. E-mail: mmingdong@scf.edu

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianghong@nju.edu.cn; E-mail: liusr@forestry.ac.cn

Foundation item: The project was supported by Funding support partially from Sichuan province key project (No. 03-06); The State Key Fundamental Science Funds of China (No. 2002CB111504) and The information acquirement and fusion in complex environment (2001CB309401), as well as Sichuan Forest Ecology and Resources Lab. of State Bureau of Forestry

Received date: 2006-02-24; **Accepted date:** 2006-07-12

Biography: MA Ming-Dong, Associate Professor, mainly engaged in forest ecology and forest management. E-mail: mmingdong@scf.edu

Key words: forest ecosystem; spruce; Site index; remote sensed vegetation index; inverse model

立地(Site)是指森林生态系统中体现气候、地质、地貌、土壤、水文、植被和其它生物等自然环境因子的综合作用,所形成的各种不同立地条件的宜林地段^[1~4]。森林生态系统生产力的等级通常用立地指数来表示^[5,6]。由于森林生态系统立地指数和立地质量的评估是森林生态系统经营管理和营林与造林的重要理论基础,上世纪以来,发展了法瑞学派、英美学派、芬兰学派、苏俄生物地理群落学派和德国巴登-符腾堡学派等多种重要的学术思想^[3,7,8],现在依然是现代森林生态系统经营管理的主要工具^[9,10]。随着现代数学方法和计算技术的发展,利用定量化的方法进行森林生态系统立地分类成为主要的方向^[11~13],其中立地指数表的编制是一个主要的内容^[4,6,9,14]。在实际工作中由于利用定量化的方法进行森林生态系统立地分类还存在许多困难^[3,4,6],例如野外样点的采集和调查非常耗时和耗力,许多森林类型缺乏长期定位观测的样地资料,大部分结果主要还是来源于以点为基础的小范围调查的工作,迄今为止,还没有实现点面结合、以及森林生态系统立地空间分布格局的分析,和开展立地条件随时间动态变化的研究^[6,9,15]。

卫星遥感为大区域研究森林生态系统的生产力和年龄及其空间分布格局和动态提供了一条重要的途径^[16,17]。从 20 世纪 70 年代以来,许多科学家一直致力于利用遥感的手段和数据研究植被的特征和变化,特别是研究遥感植被指数与叶面积指数、植被覆盖率、生物量和光合有效辐射等的关系^[17~20]。从遥感角度解释地表植被覆盖情况最有价值的是遥感植被指数^[18],其中最常用的遥感植被指数是归一化植被指数(NDVI)^[20]。20 世纪 80 年代以来,卫星资料在国内外宏观植被研究中已经得到广泛应用,例如利用 NDVI 研究叶面积指数的空间分布及其变化^[20~22],研究森林生态系统净初级生产力的空间分布等^[17]。利用各种典型的遥感植被指数和立地指数的关系估计和分析森林生态系统的立地指数及其时空动态变化将帮助人们深入认识和了解森林生态系统的生产力,对于制定合理的造林和经营管理措施具有十分重要的意义,但是由于理论、技术和人力与物力的限制,该领域一直还是空白,没有任何报道。

云杉(*Picea asperata*)又名粗枝云杉,为我国特有树种。该树种分布的主要区域为四川岷江上游和大小金川流域、陕西西南部、甘肃东部和白龙江流域、洮河流域,是长江上游重要的水源涵养林地区,是许多重要物种如大熊猫等的主要栖息地。因为该树种喜光耐旱又耐寒,适应性强且材质优良,在我国西部高山林区的生产经营中占有十分重要的地位,是四川西北部亚高山、甘肃白龙江与洮河林区主要更新造林树种,在实施天然林保护与退耕还林两大工程中发挥重大作用^[25,28]。对于该树种的立地指数已经开展了大量的调查和分析,积累了许多的数据^[4,24~28],为开展本研究提供了重要的前期工作基础。

本文以云杉森林生态系统为对象,利用卫星遥感为研究手段,在岷江上游的四川西北部松潘镇江关流域研究森林生态系统立地指数的空间分布特点,探索有关的遥感反演模型的建立,并通过有关精度的评估分析了这种高技术在该领域应用的价值和潜力。

1 研究方法

1.1 研究区域

研究区域位于云杉分布中心区域所在的四川省西北部的岷江上游松潘县镇江关流域(图 1,图 2)。该研究区域大致分为高山峡谷区和丘状高原区(海拔一般高于 3400m 以上,见数字海拔高程模型(DEM)图 3)两种地貌类型^[4,26,29],其森林植被是以云、冷杉为主的川西亚高山针叶林^[17](图 4)。

1.2 立地数据的收集和立地指数的计算

在岷江上游松潘县镇江关流域的云杉分布区,按统一的技术要求,以林分面积 3%~5%比例典型抽样,共调查样地 210 个,解析木 300 株,样地面积一般为 1200m²(图 1)^[24,25,19]。样地调查包括生境因子、林分树木平均胸径、平均树高、平均年龄、林分蓄积量、优势木年龄和高度、样木解析及林分内地被物等。在评价生境生产力时,国内外多采用林分上层木高作为生产力指标(因变量)与生境因子(自变量)来建立生境潜在生产力预测模型,如 5 株优势木平均高^[3,9]。本文的云杉林的立地指数计算采用 5 株优势木平均高的方法^[26]。导向曲

线是一条反映林分优势木平均高随年龄变化的曲线^[6],采用了多个数学模型进行了拟合,发现以理查德(Richard)生长模型的效果最好,其回归剩余标准差最小,相关指数最高^[26]。

1.3 遥感数据的收集和遥感植被指数的计算

研究使用的遥感影像是与野外调查时段(1980年代后期和1990年代初期)比较接近的1992年6月26日摄取的Landsat-5 TM (Path130 Row37)影像,影像云覆盖率低。研究采用的DEM垂直分辨率为1m,水平空间分辨率为90m。对Landsat-5 TM影像,选取野外实地获取的40个GPS点进行精确几何校正,误差小于0.5个像元。为了提高精度,还对影像进行了地形校正和大气校正。采用Civco提出的地形校正方法^[18],基于90m分辨率DEM对影像进行地形校正以剔除地形影响。

本研究利用美国陆地资源卫星5(LANDSAT TM)的遥感影像,计算有关的遥感植被指数,主要选用的是归



图1 研究区域示意图

Fig. 1 The study area in Sichuan Province of China

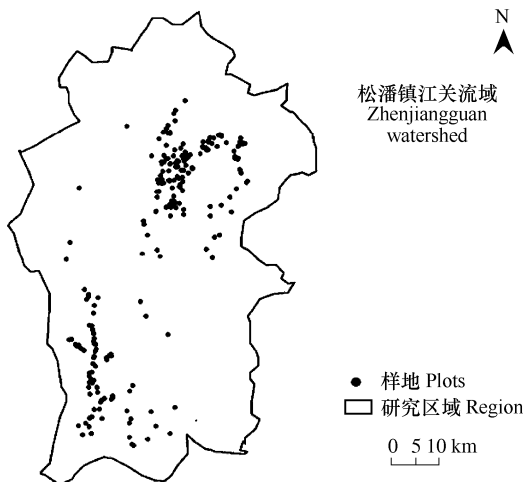


图2 野外调查样地分布示意图

Fig. 2 The sampling plots in the study area

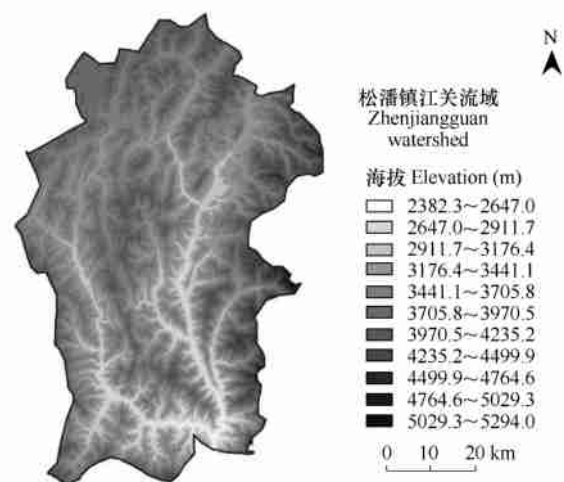


图3 研究区域地形条件示意图(DEM)

Fig. 3 The topography (DEM) of study area

一化植被指数(NDVI)。同时,因为研究区植被类型多样,植被覆盖稀疏程度不均,影像混合像元比重大,土壤背景对植被指数提取会产生较大影响,因此除归一化植被指数(NDVI)外,文中还采用土壤调整植被指数(TNDVI,又叫SAVI)以使土壤影响最小。利用TM影像的波段3(红波 ρ_r)、波段4(近红外 ρ_n)提取有关的遥感植被指数如下:

$$\text{归一化植被指数} \quad \text{NDVI} = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r} \quad (1)$$

$$\text{土壤调整植被指数} \quad \text{TNDVI} = \frac{(\rho_n - \rho_r)(1 + L)}{(\rho_n + \rho_r + L)} \quad (2)$$

土壤调整植被指数(TNDVI)中 L 为土壤调整因子,通常给定常数 $0.5^{[18]}$ 。

1.4 用不同遥感植被指数估计云杉立地指数的结果

对经过预处理TM影像依据经纬度坐标提取150个野外实测值对应的NDVI、TNDVI值,各种植被指数均采用地面对应点相邻 3×3 像元均值。运用Origin软件对不同遥感植被指数估计的森林立地指数进行回归分析。

1.5 精度评估

随机抽取森林立地指数测定的结果大约 60 个点,不参加回归建模,以保证数据的相对独立性。然后将模拟结果与实测结果进行精度分析,建立 1:1 的精度分析图,定性判断模拟的总体效果。

2 结果和讨论

2.1 遥感植被指数与云杉立地指数的关系

利用下面得到的模型和遥感影像分别反演了岷江上游镇江关集水区森林(云杉林为主)的立地指数(图 5 A 和 B)。

图 6A 和 B 分别显示遥感植被指数 NDVI 和 TNDVI 与野外实测云杉立地指数(SI)间相关分析的结果。通过统计分析,发现 NDVI 和 TNDVI 与云杉立地指数间基本为线性相关。

$$\text{云杉立地指数(Site index)} = 6.006 + 22.045 \text{ NDVI} \quad (3)$$

$$R = 0.448; p < 0.0001$$

$$\text{云杉立地指数(Site index)} = -5.421 + 23.723 \text{ TNDVI} \quad (4)$$

$$R = 0.457; p < 0.0001$$

森林生态系统结构和功能的许多指标中,生产力一直是一个核心的变量。因为它关系到生态系统的能量利用和对大气层二氧化碳通量的固定,在生态系统的持续稳定地增长和全球变化等重要的议题中扮演了十分重要的角色。森林立地指数因为定量的反映了不同年龄阶段森林生态系统生产能力的大小,与森林的生长发育状态具有密切的关系,森林立地指数的高低具有明显的光谱特点。Miller 等研究表明“叶绿素可以作为反映森林立地条件的一个指标”,前人的大量研究已经揭示出叶绿素的含量与森林的生长和植物的光谱特征密切相关^[10,18,29],本文的研究结果证明了森林立地指数的与植物光谱特点关系密切的特点。发现了遥感植被指数 NDVI 和 TNDVI 与云杉森林立地指数具有显著的相关关系,两个遥感植被指数(NDVI 和 TNDVI)都有较好的效果,其中,TNDVI 的相关程度略高于 NDVI,达到 0.457,初步表明土壤调整植被指数(TNDVI)因为抑制了土壤噪声的影响,反映的森林立地条件的光谱效果比 NDVI 有一些改进。

2.2 不同遥感植被指数估计云杉立地指数的精度

模拟结果的精度分析可以帮助判断模型的优劣,发现进一步改进的方向^[30,31]。通过对模型模拟结果和实际测定结果的比较研究,发现在 1:1 比例的比较分析图(图 7 A 和 B)中,NDVI 和 TNDVI 都有很好的拟合效果,说明通过遥感植被指数的方法测定森林立地指数可以得到较高的精度,具有很高的实用价值。

2.3 云杉立地指数的空间分布特点

在研究区域所在的岷江上游松潘县镇江关流域中,大致分为高山峡谷区和丘状高原区(海拔一般高于 3400m 以上)两种地貌类型(图 3)^[4,26,29]。从研究结果可以看出,位于研究区域南部的高山峡谷区通常具有较高的立地指数,说明其生长条件和状况要优于丘状高原区。岷江上游松潘县镇江关流域的森林植被是以云、冷杉为主的川西亚高山针叶林,具有十分重要的生态功能,包括涵养水源、保持水土、调节区域性气候和维持过渡地带植被相对稳定,以及为中国西部高海拔地区珍稀濒危动、植物提供栖息环境,保障下游地区得天独厚的绿色保护屏障等。高山峡谷区较高的森林立地指数和较好的生境条件为其重要的生态系统服务功能的发挥提供了重要的基础。

本文的研究为利用遥感进行森林立地指数的估计,合理评估森林生态系统的生产能力和生态服务功能提出了一个新的研究方法,具有较大的实用价值。同时需要指出的是,影响利用遥感技术来高精度地估计大范围森林立地指数的主要限制因子在于地面数据的质量^[18],例如优势木高度和年龄的准确估计。与此同时还要根据统计建模的要求考虑样本分布的代表性和样本的数量。另外,选择合适的遥感影像与遥感植被指数,建立适宜的遥感反演模型等也是一些关键因素。概括起来,大面积估测和动态分析森林立地条件及其变化,对于研究森林生态系统结构和功能的动态过程,了解森林生态系统的生产力,合理地确定适地适树的造林与管理方案,都是十分重要的基础。利用现代高科技的航天定量遥感分析开展这个方面的研究,无疑是一个非

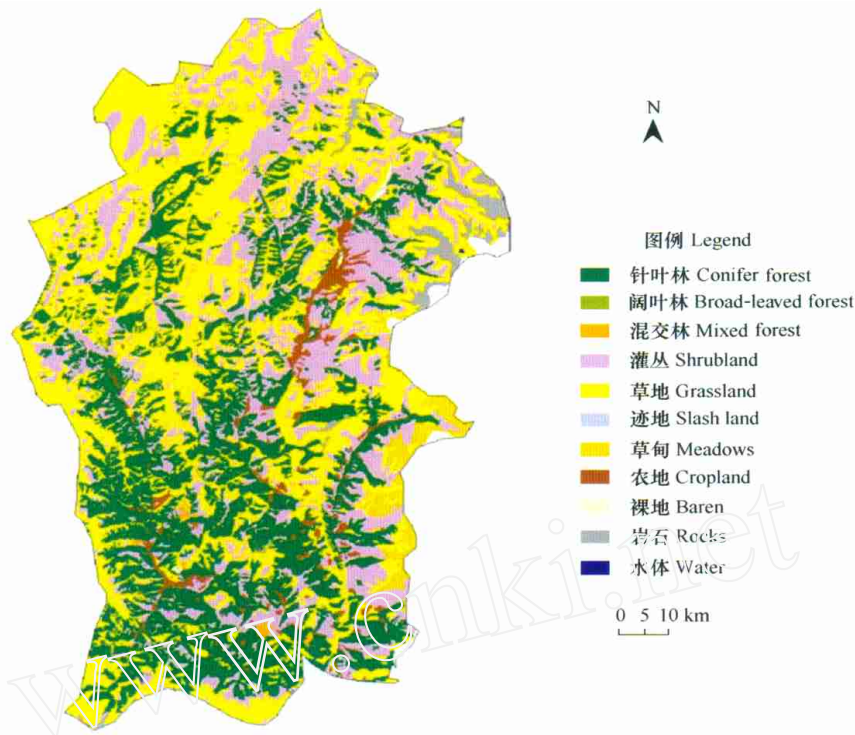


图4 研究区域植被类型分布图
Fig.4 The vegetation of study area

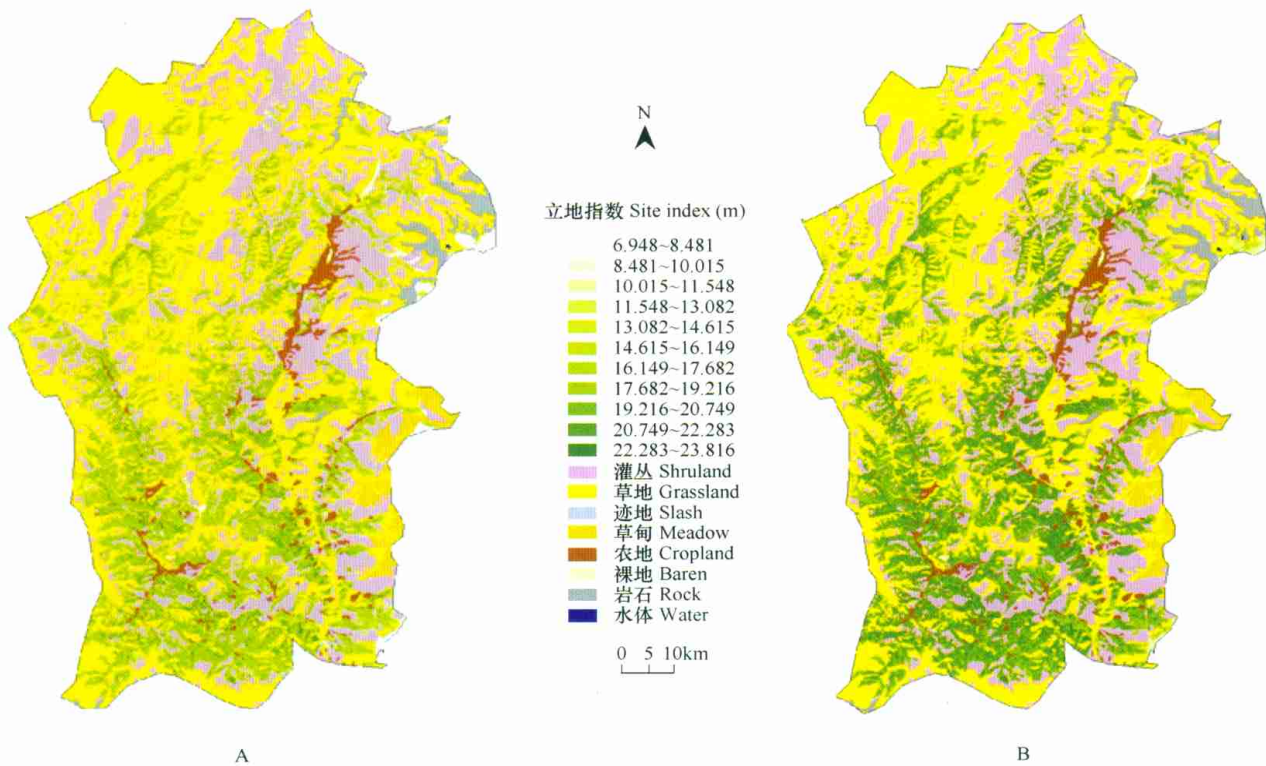


图5 通过遥感植被指数 NDVI (A) 和 TNDVI (B) 指数模拟的 SI
Fig.5 The spatial distribution of Site Index simulated by NDVI (A) and TNDVI (B)

常广阔的领域。

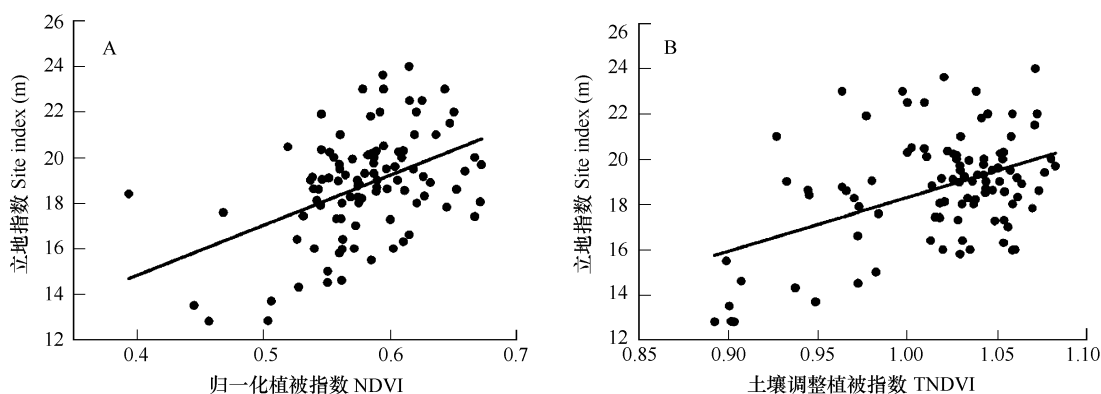


图6 NDVI(A)和TNDVI(B)与SI的回归统计分析

Fig. 6 The regression analysis of NDVI (A) and TNDVI (B) with Site Index (SI)

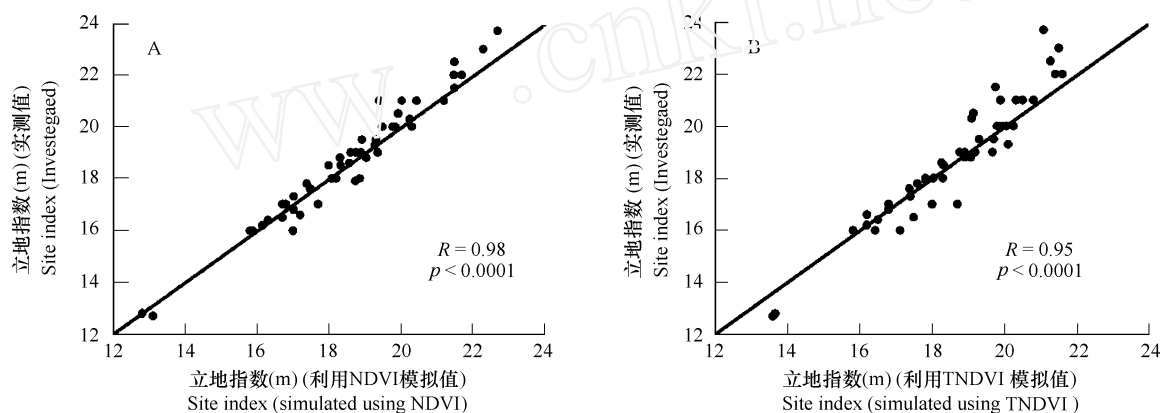


图7 NDVI(A)和TNDVI(B)与SI的模拟精度分析

Fig. 7 The accuracy assessment of NDVI (A) and TNDVI (B) with Site Index (SI)

References:

- [1] Hampt, Frederick E. Site index curves for some forest species in the eastern United States. United States. Forest Service. Eastern Region. Upper Darby, Pa., 1965.
- [2] Lamson N I. Estimating northern red oak site-index class from total height and diameter of dominant and codominant trees in central Appalachian hardwood stands. USDA Forest Service Research Paper NE-RP-Northeastern Forest Experiment Station, Aug, 1987. (605), 3.
- [3] The editing group of Forest Site Classification of China. The forest site classification of China. Beijing: Chinese Forestry Press, 1989.
- [4] Carvalho J P, Parresol B R. A site model for Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica*) stands using a dynamic algebraic difference equation. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35 (1): 93 ~ 99.
- [5] Carmean, Willard H. A comparison of site index curves for northern hardwood species. North Central Forest Experiment Station (Saint Paul, Minn.); United States. Forest Service. North Central Forest Experiment Station, Forest Service, U. S. Dept. of Agriculture, 1979.
- [6] Ingrid Seynave, Jear-Claude Gegout, Jear-Christophe Herve, Jear-Francois Dhote, Jacques Drapier. *Picea abies* site index prediction by environmental factors and understory vegetation: a two-scale approach based on survey databases. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(1): 1669 ~ 1678.
- [7] Clatterbuck W K. Height growth and site index curves for cherrybark oak and sweetgum in mixed, even-aged stands on the minor bottoms of central Mississippi. Southern Journal of Applied Forestry, 1987, 11 (4): 219 ~ 222.
- [8] Jokela E J, Jack S B, Nowak C A. Site index curves for unthinned Norway spruce plantations in New York. Northern Journal of Applied Forestry, 1988, 5 (4): 251 ~ 254.
- [9] Boyer W D. A generational change in site index for naturally established longleaf pine on a South Alabama Coastal Plain site. Southern Journal of Applied

- Forestry, 2001, 25 (2) : 88 ~ 92.
- [10] Kimmins J P. Forest Ecology (Third Edition). Prentice Hall, New Jersey, 2003.
- [11] Nigh G D. The geometric mean regression line : a method for developing site index conversion equations for species in mixed stands. Forest Science, 1995, 41 (1) : 84 ~ 98.
- [12] Chen H Y H, Klinka K, Kabzems R D. Site index, site quality, and foliar nutrients of trembling aspen : relationships and predictions. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28 (12) : 1743 ~ 1755.
- [13] Ung C H, Bernier P Y, Raulier F, Fournier R A, Lambert M C, Regniere J. Biophysical site indices for shade tolerant and intolerant boreal species. Forest Science, 2001, 47 (1) : 83 ~ 95.
- [14] O'Hara K L, Oliver C D. Three-dimensional representation of Douglas-fir volume growth : comparison of growth and yield models with stand data. Forest Science, 1988, 43 (6) : 724 ~ 743.
- [15] Walters D K, Sloan J P. Kurnis, Aspen site index as related to plant indicators. USDA Forest Service general technical report NC. North Central Forest Experiment Station, 1990, (140) : 337 ~ 341.
- [16] Jiang H, Strittholt James R, Frost P A, Slosser N C. The classification of late seral forests in the Pacific Northwest, USA using Landsat ETM+ imagery. Remote Sensing of Environment, 2004, 91 : 320 ~ 331.
- [17] Running S W, Peterson D L, Spanner M A, Teuber K B. Remote sensing of coniferous forest leaf area. Ecology, 1996, 67 : 273 ~ 276.
- [18] Jensen J R. Remote sensing of the environment. Prentice Hall. New Jersey, 2000.
- [19] Jiang H, Apps Michael J, Zhang Y L, Peng C H, Woodard Paul M. Modeling the spatial pattern of net primary productivity in Chinese forests. Ecological Modeling, 1999, 122 : 275 ~ 288.
- [20] Chen J M. Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. Remote Sens Environ, 2001, 80 : 1 ~ 20.
- [21] Chen J M, Gihlar J. Retrieving Leaf Area Index of Boreal Conifer Forests Using Landsat TM Images. Remote Sens Environ, 1996, 55 : 153 ~ 162.
- [22] Qi J. Leaf Area Index Estimates Using Remotely Sensed Data and BRDF Models in a Semiarid Region. Remote Sens Environ, 2000, 73 : 18 ~ 30.
- [23] Jiang H. Population ecology of Spruce. Beijing : Chinese Forestry Press, 1992.
- [24] Ma M D, Liu Y J. Comparative analysis on the environmental factors of Spruce stand through four mathematical methods. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14 (1) : 59 ~ 65.
- [25] Ma M D. A study on the site quality evaluation and site types classification in *Phyllostachys pubescens* stands. Journal of Bamboo Research, 1991, 10 (3) : 49 ~ 60.
- [26] Ma M D, Liu Y J. The establishment and application of site index of natural Spruce forests. Sichuan Forestry Science and Technology, 1986, 7 (3) : 10 ~ 16.
- [27] Hong J. The preliminary analysis of net primary productivity in natural spruce forests. Acta Botanica Sinica, 1986, 28 (5) : 538 ~ 548.
- [28] Jiang H, Ma M D. The relation between the natural spruce forest Productivity and the ecological environment Protection and management of mountain forests, Beijing : Science Press, 1992.
- [29] Pu R L, Gong P. The application of hyperspectram remote sensing. Beijing : Higher Education Press, 2000.
- [30] Shugart H H. Terrestrial Ecosystems in changing environments. Cambridge : Cambridge University Press, 1998.
- [31] Peng C H, Jiang H, Apps, Michael J, Zhang Y L. Simulating the Effects of harvesting regimes on carbon and nitrogen dynamics of boreal forests in Central Canada using a process model. Ecological Modeling, 2002, 155 : 177 ~ 189.

参考文献 :

- [3] 《中国森林立地分类》编写组. 中国森林立地分类. 北京 : 中国林业出版社, 1989.
- [23] 江洪. 云杉种群生态学. 北京 : 中国林业出版社, 1992.
- [24] 马明东, 刘跃进. 四种数学方法对暗针叶云杉林分生境属性比较分析研究, 中国生态农业学报, 2006, 14 (1) : 59 ~ 65.
- [25] 马明东. 楠竹林分地质量评价及类型划分研究. 竹子研究汇刊, 1991, 10 (3) : 49 ~ 60.
- [26] 马明东, 刘跃进. 云杉天然林地位指数表的编制与应用. 四川林业科技, 1986, 7 (3) : 10 ~ 16.
- [27] 江洪. 云杉天然林分生产力与生态条件的初步分析. 植物学报, 1986, 28 (5) : 538 ~ 548.
- [28] 江洪, 马明东. 云杉天然林分生产力及与生境条件的关系. 国际林联山地森林保护与管理学术会议论文集. 北京 : 科学出版社, 1992.
- [29] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京 : 高等教育出版社, 2000.