

基于 MODIS/EVI 的中国北方耕地复种指数提取

左丽君^{1,2}, 董婷婷^{2,3}, 汪 潇², 赵小丽², 易 玲²

(1. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室, 北京 100081; 2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101;
3. 辽宁省水利水电科学研究院, 沈阳 110003)

摘 要: 复种是区域粮食增产的重要途径之一, 也是中国粮食生产中一种重要的耕作模式。该文通过深入分析农作物的农时历和耕地的时间序列植被指数曲线的对应关系, 提取了反映作物种植模式的特征时相, 并以特征时相的 EVI (enhanced vegetation index) 值作为特征参量, 构建了提取耕地复种指数的决策树方法。该方法仅用了作物生长季中 7 个时相来提取复种指数, 减少了数据使用量, 缩短了提取时间, 提高了提取效率。最终, 采用 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer)/EVI 数据, 提取了 2005 年中国北方 15 个省市区耕地复种指数, 与之前的研究结果进行比较验证发现该方法具有较高的提取效率和精度。

关键词: 作物, 决策树, 耕作, 复种指数, 物候, 特征时相

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.08.026

中图分类号: S344

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-8-0141-06

左丽君, 董婷婷, 汪 潇, 等. 基于 MODIS/EVI 的中国北方地区耕地复种指数提取[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 141—146.

Zuo Lijun, Dong Tingting, Wang Xiao, et al. Multiple cropping index of Northern China based on MODIS/EVI[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 141—146. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

复种是区域粮食增产最简单直接并且行之有效的方式^[1-3]。一般来说, 能增加复种的耕地, 其水、热、肥条件都较好^[4], 与开荒相比, 增加复种指数的效益相对要高。因此, 实施复种对粮食增产至关重要。

复种指数是耕作制度研究中衡量耕地资源集约化利用程度的基础性指标, 也是宏观评价耕地资源利用基本状况的重要技术指标。它是指一块地一年内种植作物的次数, 一般来说, 在单产一定的情况下, 复种指数越高, 粮食产量也就越大^[5]。目前, 基于多时相遥感信息进行耕地复种指数的提取是一种非常普遍的研究手段。Panigrahy, S.^[6-7]利用印度发射的 IRS LISS-1 遥感数据 (72.5 m) 利用主成分分析结合最大似然法分类得到印度全国的复种指数。辜智慧^[8]采用 Savitzky-Golay 滤波的方法对 SPOT/VGT NDVI 时序数据进行平滑处理, 并建立熟制标准曲线库, 利用交叉拟合度检验法进行了中国农作物复种指数的提取。范锦龙^[9]提出了一种基于时间序列谐波分析法 (harmonic analysis of time series, HANTS), 通过提取平滑后的作物生长曲线的波峰频数得到地块复种指数的方法, 采用的同样是 SPOT/VGT NDVI 数据。闫慧敏^[10]也采取这种方法, 利用 NOAA/AVHRR NDVI 数据进行了全国复种指数的提取工作。这些研究的数据源分辨率都较低, 并且使用的方法所需数据量大, 大

多需要年内整个作物生长季内连续时相的植被指数数据。因此, 本文提出了基于决策树的复种指数提取方法, 并基于空间分辨率为 250 m 的 MODIS EVI 数据, 对 2005 年中国北方地区 15 个省市耕地复种指数进行了提取。

1 数据源与预处理

本文采用由 NASA USGS 提供的实验区内 MODIS NDVI/EVI MOD13Q1 数据, 空间分辨率为 250 m, 时间分辨率为 16 d。MODIS 植被指数数据产品属于 L3 级产品, 它由原始数据经过定标定位, 并对由遥感成像过程产生的边缘畸变 (Bowtie 效应) 进行校正以后形成的产品。本文采用 MODIS 站点提供的 MRT (MODIS reprojection tool) 投影转换工具对全国的数据进行拼接、投影和格式转换, 将其转成 Albers 投影、TIFF 格式的影像。

此外, 采用由中国科学院遥感应用研究所完成的 2005 年全国 1:10 万土地利用分类图中的耕地图斑, 对投影转换后的 MODIS 影像进行掩膜处理, 得到耕地区域内的 MODIS 影像。

2 提取方法与流程

复种指数提取的研究中, 大多以年内植被指数时间序列数据为基础。这种方法所需数据量较大, 步骤较为复杂。中国的华北、西北以及东北地区, 受气候条件的限制, 耕地复种模式比较简单, 基本都是一年一熟或者一年两熟。这一地区作物种植以冬小麦、春小麦、春玉米、夏玉米、棉花、水稻和大豆为主。一年一熟的种植模式以春小麦/春玉米/棉花/水稻为主, 一年两熟的种植模式以冬小麦-夏玉米/水稻/大豆为主^[11]。对于这些地区, 若采用各种去噪拟合的方法重构作物生长曲线来提取复

收稿日期: 2009-02-19 修订日期: 2009-07-21

基金项目: 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室 2008 年开放课题 (RDA0802); 中科院知识创新工程重大项目 (KSCX-YW-09)

作者简介: 左丽君 (1982—), 女, 江西人, 博士研究生, 主要从事国土资源遥感, 耕地资源研究。北京 中科院遥感应用研究所国土资源室, 100101。Email: lefillion_g@126.com

种指数, 需要作物整个生长季的数据, 无论是在数据获取、数据处理还是最终复种指数提取的实现都需要耗费较长时间。因此, 本文提出了一种复种指数提取的决策树方法。

2.1 农作物种植模式与时序 EVI 曲线

作物在某一地区都具有比较稳定的物候期。如在华北地区, 冬小麦于 3 月上旬开始返青, 4 月上旬开始拔节, 5 月上旬开始抽穗, 5 月下旬就开始成熟; 夏玉米则在 6 月中旬播种, 8 月中旬开始抽穗。研究^[12-13]表明, 农作物

从播种起, 作物进入绿色生长期, 其 EVI 值不断升高, 直到作物抽穗时 EVI 值达到最大; 此后, 作物进入生殖生长期, EVI 值逐渐减小, 直到收获。因此, 不同种植模式地块的年内时间序列 EVI 曲线就形成了其特定的形状。

在中国北方地区, 主要有一年两熟、一年一熟以及休耕地 3 种熟制模式。一年一熟中由于生长期长短差异, 又有夏季作物和棉花两种类型。因此, 形成了 4 种不同形状的 EVI 时间序列曲线类型, 图 1 为华北平原区不同种植模式下的农作物生长曲线。

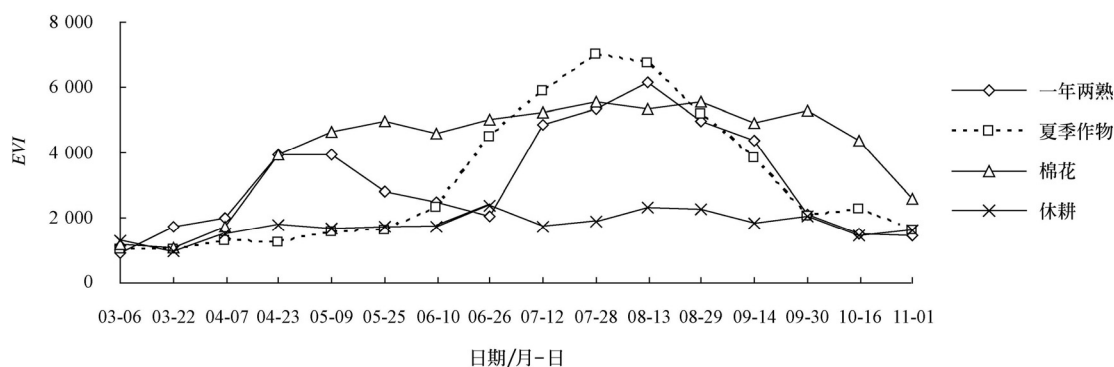


图 1 华北平原区不同种植模式下时间序列 EVI 曲线

Fig.1 Multi-temporal moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) enhanced vegetation index (EVI) profiles of the major crop patterns in Huabei Plain

2.2 特征时相的选择

由于农作物生长的节律性, 耕地的 EVI 时间序列曲线随之呈现出一系列波峰与波谷交替的状态。若将 EVI 时间序列曲线看作是光谱曲线, 则 EVI 的波峰处对应于地物的强反射峰, 而波谷处则对应于地物的强吸收谷。对于高光谱影像, 往往通过特征选择来强化那些最具可分性的光谱波段。其中, 光谱特征位置搜索是其中一个有效手段, 其方法就是选择高光谱曲线的特征吸收波段。对于 EVI 时间序列曲线来说, 也即是选择曲线的波峰时相和波谷时相。对于一年一熟的曲线来说, 通常具有一个波峰和两个谷, 我们称其为 P_1 、 V_{11} 、 V_{12} ; 对于一年两熟的曲线来说, 它有两个波峰和一个波谷, 本文分别称其为 P_{21} 、 P_{22} 、 V_2 。此外, 休耕地的 EVI 值整年都是比较平稳的低值, 因此, 作物生长季的最大值可以作为区分休耕地的特征参量, 本文用 EVI_{max} 来表示。

非常明显, 从一年两熟曲线 3 个特征时相的组合在 3 种作物曲线中的表现来看, 不仅存在阈值上的差异, 还有变化趋势上的差异 (图 2a)。对一年两熟地块来说, 呈现先降低后升高的态势; 而一年一熟的两种曲线则保持升高的趋势, 只是升幅有所不同; 休耕地的 EVI 值则一直较低, 变化不大。这对区分休耕地、一年一熟与一年两熟的种植模式较为有利。而对于一年一熟的两个特征时相来看 (图 2b), 一年两熟与单季棉花的表现相似, EVI 值有所升高, 但幅度不明显; 而对于夏季作物来说则升幅较大; 休耕地的 EVI 值则一直保持较低的状况。这两个特征时相对于区分夏季作物比较有利。

综合来看, 最终本文采用一年两熟模式中前茬作物抽穗期、后茬作物播种期及抽穗期作为进行耕地复种指

数提取的 3 个特征时相。并且将这些特征时相的 EVI 值以及这些特征时相 EVI 的最大值, 作为区分休耕地、一年一熟以及一年两熟的特征参量。

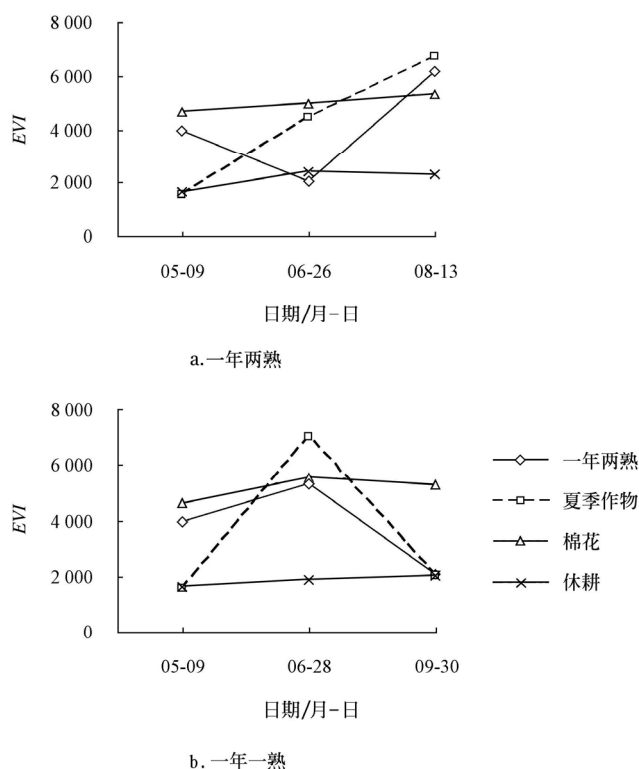


图 2 一年两熟和一年一熟的夏季作物的特征时相 EVI 的表现图

Fig.2 EVI values in characteristic phases of double cropped pattern and summer crop pattern

此外，为了增强特征参量的区分能力，本文还提出了一个差量参数 EVI_d ：

$$EVI_d = EVI_{p21} - EVI_{v11} \tag{1}$$

式中： EVI_{p21} —— P_{21} 时相的 EVI 值； EVI_{v2} —— V_2 时相的 EVI 值。

遥感数据在采集和处理的过程中存在着各种各样的误差，如太阳高度角、观测角度的影响，以及云、水汽、气溶胶和传感器精度变化干扰等，这都将严重影响数据的质量。虽然我们选择的 MODIS EVI 数据经过了 CV-MVC 的处理，在一定程度上去除了噪音，但是局部地区仍受云等因素的影响^[14]。因此，常常会出现我们所选择的峰值时相的 EVI 值并不是作物生长季内 EVI 的最大值。在这里，我们将峰值时相进行扩展，即添加其前

后各一个紧邻的时相组成时相域，挑选域中 EVI 的最大值时相作为实际特征值。

$$EVI_r = \max(EVI_{p-}, EVI_p, EVI_{p+}) \tag{2}$$

式中： EVI_p ——某峰值； EVI_{p-} ——峰值前一时相的 EVI 值； EVI_{p+} ——峰值后一时相的 EVI 值。

2.3 决策树的建立

将华北平原作为试验区，随机选择一块 400×400 像元的地块作为训练样本（图 3）。像元的熟制属性通过对其年内时间序列曲线波峰数的判读得到，即单峰曲线为一年一熟，双峰曲线为一年两熟，平缓低值的曲线为休耕地。结果显示，这一区域中属于一年两熟的像元有 72 828 个，占 45.52%；属于一年一熟的像元有 31 694 个，占 19.81%；属于裸地的像元占 0.33%；剩下的为非耕地。

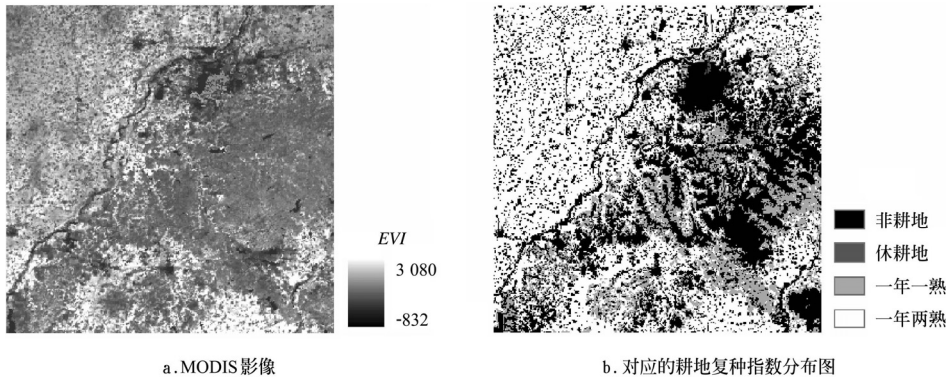


图 3 训练区 8 月 13 日的 MODIS 影像及其对应的耕地复种指数分布图
Fig.3 MODIS EVI image of training sample in 13th August and multiple cropping index (MCI) distribution map

采用 SPSS 16.0 中 Tree 模块的 CART 算法构建决策树，将 EVI_{p21} 、 EVI_{p22} 、 V_2 、 EVI_d 和 EVI_r 作为特征参数输入模型，结合作物的生长曲线修剪整理得到图 4 所示的决策树一般模式。

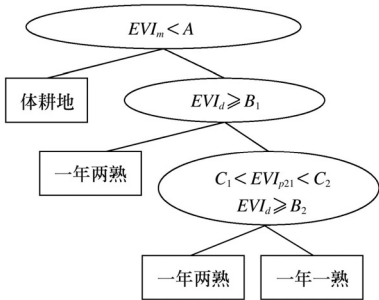


图 4 一年两熟区耕地复种指数提取决策树
Fig.4 Decision tree developed by features selected in double cropped area

在中国，不同省份作物的物候期通常存在细微差别，因此，各省份进行耕地复种指数提取时的特征时相也有所差异。本文根据中国农业信息网统计的农时历数据库^[15]

提供的作物物候期进行不同省份特征时相的确定。此外，在不同的耕作区，阈值也有所差别。将中国北方地区分为华北、西北和东北 3 个区，采用上述方法，在不同的地区选择样本，由 CART 算法确定阈值得到：华北地区，A 为 2 500， B_1 为 1 000， B_2 为 700， C_1 为 2 500， C_2 为 3 500；西北地区，A 为 2 000， B_1 为 1 000， B_2 为 700， C_1 为 2 000， C_2 为 3 500；东北地区，耕地基本上是一年一熟，当 A 为 2 500 时可将休耕地和一年一熟区分。

2.4 提取速度对比研究

对于基于 HANTS 的耕地复种指数方法来说，一般分为两步进行：首先，对时间序列植被指数进行去云重构；之后再对去云重构后的曲线进行波峰数提取。为了定量描述两种方法的运行速度，我们将 3 个地区分别采用两种方法所需的运行时间进行了统计。

由表 1 可看出，基于决策树方法所需时间远远小于基于 HANTS 方法所需时间，且当图像区域面积增大时，这种差异越明显。即区域越大，采用基于决策树方法节省的时间越多。

表 1 基于 HANTS 的耕地复种指数和决策树的耕地复种指数耗费的对比

Table 1 Comparison of the time consuming of MCI by the HANTS method and decision tree method						
地点	图像大小 (像元数)	基于 HANTS 方法 第一步耗费时间	基于 HANTS 方法 第二步耗费时间	基于 HANTS 方法 的总耗费时间	决策树方法的 总耗费时间	基于 HANTS 方法与基于决策树 方法的总耗费时间之比
北京	495 504	10.91"	32.30"	43.21"	4.28"	10.10
河南省开封地区	563 832	13.17"	41.35"	54.70"	5.16"	10.60
山东省	4 606 881	8'32"	6'25"	14'57"	42"	21.36

3 提取结果及精度分析

3.1 中国北方地区耕地熟制的空间分布

图 5 是采用决策树方法反演得到的 2005 年中国北方地区复种指数分布的空间格局。若以一年为周期来看, 东北地区和黄土高原地区基本上都采用一年一熟的耕作模式; 西北地区的南疆和关中平原以及甘肃的东南部分布有一年两熟的种植方式; 而华北平原在长城以北地区和山东半岛的东部以及山东与河南交界处分布着一年一熟的耕作方式, 其余大部分地方均以一年两熟为主。总的来说, 中国北方地区耕地以一年一熟的种植模式为主, 占 72.92%, 相当于两熟耕作面积的近 2.7 倍。

3.2 精度分析

图 6 是闫慧敏^[10]和范锦龙^[9]分别基于 8 km 的 NOAA/AVHRR 和 1 km 的 SPOT 遥感影像进行反演得到的 2000 年全国耕地复种指数分布图, 将本文的提取结果与它们比较来进行精度分析。虽然他们所提取的复种指

数与本文的结果并非同一年份, 但复种指数的格局是受气候影响, 在长期耕作下逐步形成的, 短时间内不会发生较大变化。因此, 虽然相差 5 a, 3 者在复种指数的分布趋势上还是具有可比性的。

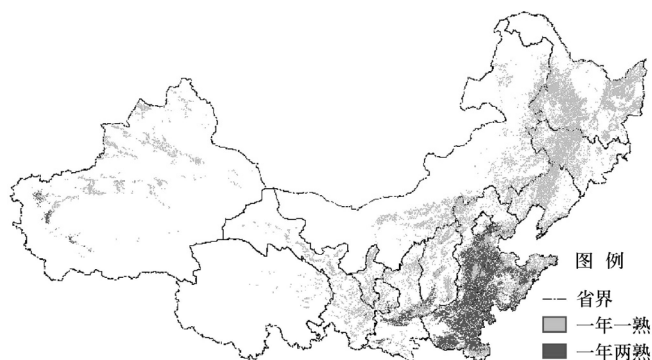
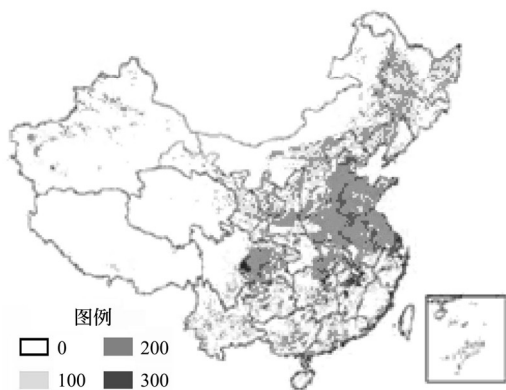
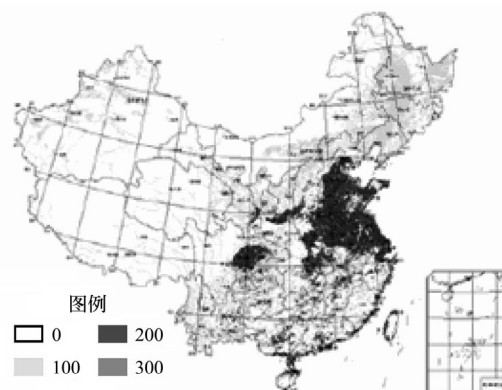


图 5 2005 年中国北方地区耕地复种指数分布

Fig.5 Distribution of the multiple cropping index of Northern China in 2005



a. 基于 8 km NOAA/AVHRR 数据研究结果



b. 基于 1 km SPOT/VEGETATION 数据研究结果

图 6 基于 NOAA/AVHRR 和 SPOT 的全国 2000 年耕地复种指数分布

Fig.6 Distribution of the China multiple cropping index in 2000 based on NOAA/AVHRR and SPOT

整体来看, 本文的结果与闫慧敏和范锦龙的结果在一熟二熟分布轮廓上大致相同。3 种结果的二熟种植北界在华北平原上非常一致, 基本都以长城为界。但是在新疆, 本文研究和闫慧敏的研究在南疆地区均监测到有二熟制分布, 而范锦龙的研究则基本没有。此外, 在甘肃东南部, 范锦龙的提取结果中, 有较明显的二熟种植区, 而本文和闫慧敏的提取结果中却不明显。

将 2005 年中国北方地区耕地复种指数的提取结果进行分省平均耕地复种指数的计算, 将其与范锦龙提取的全国 1999—2002 年相应各省的耕地复种指数对比进行精度分析 (表 2)。两种结果的绝对误差在 -16.25~13.53 之间, 而相对误差位于 11.36%~13.53% 区间内。此外, 本文提取的结果基本上都接近或者落在范锦龙提取的 1999—2002 年间耕地复种指数的最小值和最大值之间。在华北平原区, 本文的结果均低于范锦龙的结果, 这是由于华北平原区属于一年两熟大范围分布的区域, 而范锦龙采用的数据源空间分辨率较低 (为 8 km), 产生混合像元的几率较大。当混合像元产生时, 结果一般都偏向

于面积较大的那一类, 即一年两熟。当然, 两者之间的差异也可能是因为时间的推移而产生。

表 2 中国北方地区耕地复种指数本文提取结果和范锦龙提取结果对比

Table 2 Comparison of MCI of Northern China obtained from this paper and Fan Jinlong's

省名	A	B	绝对差值	相对差值/%	C	D
河北	143	159.25	-16.25	-11.36	154	162
山东	159	176.25	-17.25	-10.85	165	183
山西	114	122	-8	-7.02	116	126
北京	130	137	-7	-5.38	113	158
河南	183	191.75	-8.75	-4.78	184	195
天津	132	137.25	-5.25	-3.98	128	145
陕西	125	127.5	-2.5	-2.00	112	143
辽宁	100	100	0	0	100	100
黑龙江	100	100	0	0	100	100
吉林	100	100	0	0	100	100
内蒙古	99	98	1	1.01	95	100

接上页

省名	A	B	绝对差值	相对差值/%	C	D
甘肃	104	102.6	1.4	1.35	100	104
青海	99	94.5	4.5	4.04	93	97
新疆	108	94.75	13.25	12.27	93	97
宁夏	85	73.5	11.5	13.53	62	89

注：A 表示 2005 年复种指数（本文结果）；B 表示 1999—2002 年平均复种指数（范锦龙结果）；C 表示范锦龙提取的结果中 1999—2002 年间最小值；D 表示范锦龙提取的结果中 1999—2002 年间最大值。

4 结论与讨论

1) 本文研究了中国农业生产中的重要耕作模式—复种，通过深入分析作物物候与 EVI 时间序列曲线的对应关系，提出了耕地复种指数的决策树提取方法。该方法通过选取作物生长季中 7 个特征时相，实现了以较少的数据量进行复种指数提取，提高了提取速度和效率。

该方法可应用在对空间分辨率较高，但时间分辨率不够高的遥感影像的复种指数提取，以获取区域小尺度的耕地复种指数信息。

但是，基于决策树的复种指数提取方法需对地块的作物种植模式认知较为清楚，因此，在中国南方种植结构相对复杂，地块也较为破碎的地区，若要采用该方法，需要进一步的对这一区域的作物种植模式进行探索确认。

2) 文中提取了 2005 年中国北方 15 个省市区 250 m 耕地复种指数。结果表明，中国东北地区耕地复种指数基本为一年一熟；西北地区的南疆和关中平原以及甘肃东南部存在一年两熟；华北地区以一年两熟为主。

3) 与其他结果比较，本文提取的中国北方耕地复种指数的分布与之大体一致，局部差异主要是由空间分辨率和时间推移而产生。

【参 考 文 献】

- [1] Hayami Y, Ruttan V. Agricultural Development: an International Perspective[M]. Baltimore: Johns Hopkins Press, 1985.
- [2] Turner II B L, Hanham R Q, Portararo A V. Population pressure and agricultural intensity[J]. Annals of the Association of American Geographers, 1977, 67(3): 384—396.
- [3] Turner II B L, Doolittle W E. The concept and measure of agricultural intensity[J]. Professional Geographer, 1978, 30(3): 297—301.
- [4] 郭柏林. 我国复种指数变化特征，效益和潜力[J]. 经济地理, 1997, 17(3): 8—13.
Guo Bolin. The analysis for the change of multiple cropping index in China[J]. Economic Geography, 1997, 17(3): 8—13. (in Chinese with English abstract)
- [5] Cao Z, Dawson R. Modeling circulation function in agroecosystems[J]. Ecological Modelling, 2005, 181(4): 557—565.
- [6] Panigrahy S, Sharma S A. Mapping of crop rotation using multirate indian remote sensing satellite digital data[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1997, 52(2): 85—91.
- [7] Panigrahy S, Manjunath K R, Ray S S. Deriving cropping system performance indices using remote sensing data and GIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(12): 2595—2606.
- [8] 辜智慧. 中国农作物复种指数的遥感估算方法研究——基于 SPOT/VGT 多时相 NDVI 遥感数据[D]. 北京：北京师范大学, 2003.
Gu Zhihui. A Study of Calculating Multiple Cropping Index of Crop in China Using SPOT/VGT Multi-Temporal NDVI Data[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [9] 范锦龙. 复种指数遥感监测方法研究[D]. 北京：中国科学院遥感应用研究所, 2003.
Fan Jinlong. Study on Remote Sensing Methods for Monitoring Multiple Cropping Index[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, CAS, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [10] 闫慧敏. 基于遥感观测的土地利用对中国农田生态系统生产力和碳吸收的影响研究[D]. 北京：中国科学院地理科学与资源研究所, 2005.
Yan Huimin. Effects of Land Use on the Productivity and Carbon Sequestration of China's Agro-Ecosystems Based on Satellite Remote Sensing[D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [11] 韩湘玲. 中国耕作制度区划[M]. 北京：北京农业大学出版社, 1987.
- [12] Sakamoto T, Van N N. Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 109(3): 295—313.
- [13] Jakubauskas M E, Legates D R, Kastens J H. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 37(1/2/3): 127—139.
- [14] Roerink G J, Menenti M. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(9): 1911—1917.
- [15] 农业部种植业管理司. 农时数据库[EB/OL]. http://zzys.agri.gov.cn/nongshi_result.asp, 2005.

Multiple cropping index of Northern China based on MODIS/EVI

Zuo Lijun^{1,2}, Dong Tingting^{2,3}, Wang Xiao², Zhao Xiaoli², Yi Ling²

(1. Key Laboratory of Resources Remote Sensing and Digital Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;

2. Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy Sciences, Beijing 100101, China;

3. Research Institute of Water Resource and Hydropower of Liaoning province, Shenyang 110003, China)

Abstract: Multiple cropping is an important mean for increasing regional grain output and also a crucial cropping pattern in China's farming system. This study proposed a new method for extracting multiple cropping index (MCI) on pixel level with multi-temporal moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) enhanced vegetation index (EVI) data based on the crop phenology and decision tree (DT). The method could be divided into two steps. First of all, according to the local crop phenology, several features were put forward for discriminating the pixel-level MCI, which contained three types: fallow, single cropped and double cropped. Second, the threshold for each feature was brought up by using CART Algorithm. Finally, the multiple cropping index of 15 provinces of Northern China were extracted in 2005. Then, the result was compared with that of former researches, and it shows that DT method is more efficient.

Key words: crops, decision trees, tillage, multiple cropping index, phenology, characteristic phases