

# 应用隔年卫星遥感影像评估区域麦稻连作水平

孙玲<sup>1</sup>, 朱泽生<sup>2</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏南京 210014; 2. 海军指挥学院, 江苏南京 210016)

**摘要:** 为探讨利用稀疏或隔年卫星遥感影像估算大地理区域麦稻连作水平的可行性, 以江苏省常熟市为例, 利用隔年 TM 卫星遥感影像, 提取小麦和水稻种植面积并分析了麦稻连作水平。在解译隔年稻麦卫星遥感影像获取麦稻连作面积信息的基础上, 运用马尔可夫链建模方法构建麦稻连作水平评估模型来估算麦稻连作水平, 并用 GPS 实地取样调查对估算精度进行验证。结果表明, 常熟市麦稻连作指数为 0.76, 即有 76% 的小麦连作水稻, 估算精度在 95% 以上, 与传统的地面调查方法相比较, 统计麦稻连作指数或水平更能反映大地理区域麦稻连作的现状。

**关键词:** 麦稻连作; 卫星遥感; 连作指数; 连作水平评估

中图分类号: S157.4<sup>+</sup>32; S127 文献标识码: A 文章编号: 1009-1041(2011)04-0769-07

## Estimation of Regional Wheat-Rice Cropping Level with Satellite Remote Sensing Images in No-continuous Year

SUN Ling<sup>1</sup>, ZHU Ze-sheng<sup>2</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing, Jiangsu 210014, China;  
2. Naval Command College, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** The winter wheat and rice areas were extracted from two TM images of Changshu city of Jiangsu province in not continuous year, respectively; the wheat-rice cropping level in this city was estimated based on the information extracted to evaluate the feasibility of this technology for solving the similar problems. According to the extracted areas of winter wheat and rice production, a model based on Markov chains was built for computing the wheat-rice cropping index to evaluate the wheat-rice cropping level, the accuracy was verified by field sampling survey supported with GPS. The results showed that the wheat-rice cropping index in Changshu city was about 0.76, i. e 76% of wheat land was used for rice cropping, with accuracy at more than 95%. The wheat-rice cropping index based on this method was more accurate than the traditional field survey method for estimating the wheat-rice cropping status in large geographic area.

**Key words:** Wheat-rice cropping; Satellite remote sensing; Wheat-rice cropping index; Wheat-rice cropping level

在大地理区域范围内评估麦稻连作水平, 对于实施稻麦连作高产栽培技术<sup>[1]</sup>、防治与稻麦连作有关的水稻和小麦条纹叶枯病及杂草<sup>[2]</sup>都具有重要的意义。近年来, 卫星遥感技术在麦类作物的监测中得到广泛应用, 如冬小麦面积变化遥感

监测<sup>[3]</sup>、冬小麦生长高光谱遥感监测<sup>[4]</sup>、根据种植制度和遥感数据提取冬小麦种植面积<sup>[5]</sup>、冬小麦病虫害的高光谱识别<sup>[6]</sup>、基于 MODIS 数据的小麦株高遥感估算<sup>[7]</sup>等。此外, 卫星遥感技术在大地理区域范围内对农作物轮作水平评估的研究成

\* 收稿日期: 2011-01-26 修回日期: 2011-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(30030090, 39870534)。

作者简介: 孙玲(1960—), 女, 研究员, 主要从事农业信息技术研究。E-mail: sunl60@jlonline.com

果<sup>[8]</sup>,为运用统计学分析和卫星遥感方法评估大面积麦类作物的连作水平提供了可供借鉴的技术,并开辟了一个新的研究方向。但由于受到自然因素的影响以及可用卫星资源的限制,获得连续年份的卫星遥感影像有时相当困难,以江苏为例,到目前为止仍然无法获得可直接研究麦稻连作的连续年份的卫星遥感影像,因此不得不利用隔年的卫星遥感影像来研究麦稻连作,而上述对农作物轮作水平评估的研究成果并没有提供对使用隔年卫星遥感影像的支持。鉴于此,本研究通过建立基于卫星遥感的评估模型尝试评估大范围麦稻连作水平。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

试验于2006—2008年在江苏省常熟市进行,常熟市总面积1 264 km<sup>2</sup>,辖35个乡镇,2007年耕地面积为5.85万hm<sup>2</sup>,其中水稻、小麦和油菜的面积分别为2.57、1.47和0.66万hm<sup>2</sup>,占整个耕地面积的80.18%;每公顷水稻、小麦和油菜产量分别为8 220.0、4 254.6和2 318.3 kg;年产水稻、小麦和油菜分别为21.1万、6.3万和1.6万吨;水稻、小麦和油菜的产值分别为37 000万、7 000万和4 200万元;与水稻、小麦同期生长的作物有玉米、大豆、山芋、蔬菜等。

### 1.2 研究方法

整个研究工作分为三个部分:获取遥感影像;精准解译遥感影像获取小麦和水稻的空间信息;建立数学模型计算麦稻连作指数,并且分析该区域的麦稻连作水平。作物连作是指在同一地块上一种作物收获后,在连续年份中种植同一种作物或同一年份中种植另一种作物的耕作栽培模式。在大多数情况下,连作是指在同一年份同一个地块上按时间先后种植不同作物,并且在连续年份中重复该模式,其本质上是一种序贯连续的种植方式,而轮作更多地强调不同作物在同一地块上周期性的种植来破坏作物连作的模式。因此,无论是连作还是轮作都可以采用按时间为周期考察同一个地块上种植的作物的方式来研究,即麦稻连作水平评估与作物轮作水平评估相类似,所以可以将评估作物轮作水平的方法应用到作物连作水平的评估上。

#### 1.2.1 获取和解译遥感影像

文献<sup>[8]</sup>详细介绍了应用遥感技术评估作物

轮作水平的方法,从原理上讲对该模型稍加修改可以用于作物连作水平的研究,但该模型需要连续年份的作物遥感影像。由于已运行26年的美国陆地5号卫星是唯一可用于对作物植被进行有效观测的专业化卫星,而气候条件的影响使获得连续年份的作物遥感影像本身就十分困难,不幸地是该卫星已于2009年12月暂停工作,在新的陆地8号卫星发射并投入正常运行之前,很难再有新的作物影像供使用。根据对研究区域过去10年的卫星影像数据的分析,发现由于云层干扰以及气候原因,在研究区域根本就没有符合作物轮作模型所要求的连续年份的影像,最好的结果是可以获得相隔一年的影像。因此,必须建立新的数学模型来克服困难,运用隔年影像完成对研究区域的麦稻连作水平的评估。

本研究使用了由国家遥感卫星地面站提供的两幅陆地5号卫星影像,其轨道号分别为11 938(2006年9月18日)和11 938(2008年5月2日),前者为水稻影像用于对水稻观测,后者为小麦影像用于对小麦观测,两者的分辨率均为30 m×30 m,采用ERDAS IMAGINE8.4软件<sup>[9]</sup>来解译两幅卫星影像。水稻和小麦影像的解译步骤为:首先对原始影像实施预处理,包括几何校正和线性拉伸增强等<sup>[10]</sup>;其次通过野外实地调查建立水稻和小麦的解译标志以及解译训练样区,用于水稻和小麦影像的解译分类;然后再利用ERDAS软件对水稻和小麦影像监督分类,提取水稻和小麦的植被信息,并且通过反复修正训练样区以及按乡镇进行监督分类等方法来提高分类精度,再用人工方法对监督分类的解译结果进行检验和修正<sup>[11]</sup>;最后生成包含水稻、小麦分类的矢量化解译图件,并通过地理信息系统对解译图件进行编辑处理以获得合格的水稻、小麦矢量图件及相关的空间信息数据。

#### 1.2.2 建立评估模型

统计及概率分析是构建麦稻连作评估模型的主要工具,在该模型构建过程中运用统计分析方法的依据与在文献<sup>[8]</sup>中对稻棉轮作周期的分析类同,在此基础上,麦稻连作评估模型构建过程简述如下:

应用隔年遥感影像估算区域麦稻连作水平是典型的时序分析问题<sup>[12]</sup>,而马尔可夫链又是用于为时序问题建模并解决时序问题的有效手段<sup>[13]</sup>,因此运用马尔可夫链建模的一般方法<sup>[14]</sup>,可建立

应用隔年遥感影像估算区域麦稻连作水平的时序分析模型如图 1 所示。

图 1 麦稻连作水平的估算分析模型

Fig. 1 Model for evaluating the wheat-rice cropping level

该时序分析模型与时间年份  $i$  有关的状态定义如下:

- $W_{(i)}$ :  $i$  年种小麦地块的面积;
- $\bar{W}_i$ :  $i$  年可种小麦而不种小麦地块的面积;
- $R_i$ :  $i$  年种水稻地块的面积;
- $\bar{R}_i$ :  $i$  年可种水稻而不种水稻地块的面积。

该时序分析模型各状态之间与时间年份  $i$  有关的状态转移概率定义如下:

- $P_{(i)w\bar{r}}$ :  $i$  年某地块在种小麦后连种除水稻之外的其他作物的概率;
- $P_{(i)\bar{w}r}$ :  $i$  年某地块在种除小麦之外的其他作物后连种水稻的概率;
- $P_{(i)w\bar{r}}$ :  $i$  年某地块在种小麦后连种水稻的概率;
- $P_{(i)\bar{w}\bar{r}}$ :  $i$  年某地块在种除小麦之外的其他作物后连种除水稻之外的其他作物的概率;
- $P_{(i)r\bar{w}}$ :  $i$  年某地块在种水稻后连种除小麦之外的其他作物的概率;
- $P_{(i)r\bar{w}}$ :  $i$  年某地块在种除水稻之外的其他作物后连种小麦的概率;
- $P_{(i)r\bar{w}}$ :  $i$  年某地块在种水稻后连种小麦的概率;
- $P_{(i)\bar{w}\bar{r}}$ :  $i$  年某地块在种除水稻之外的其他作物后连种除小麦之外的其他作物的概率。

当该时序分析模型的马尔可夫链处于平稳状态时,其状态转移概率满足下述方程:

$$\begin{aligned}
 P_{(i-1)wr} &= P_{(i)wr} = P_{(i+1)wr} = \dots = P_{wr}; \\
 P_{(i-1)r\bar{w}} &= P_{(i)r\bar{w}} = P_{(i+1)r\bar{w}} = \dots = P_{r\bar{w}}; \\
 P_{(i-1)r\bar{w}} &= P_{(i)r\bar{w}} = \dots = P_{r\bar{w}}; \\
 P_{(i-1)\bar{w}r} &= P_{(i+1)\bar{w}r} = \dots = P_{\bar{w}r}; \\
 P_{(i-1)w\bar{r}} &= P_{(i+1)w\bar{r}} = \dots = P_{w\bar{r}}; \\
 P_{(i-1)\bar{r}w} &= P_{(i)\bar{r}w} = \dots = P_{\bar{r}w}; \\
 P_{(i-1)\bar{w}\bar{r}} &= P_{(i)\bar{w}\bar{r}} = P_{(i+1)\bar{w}\bar{r}} \dots = P_{\bar{w}\bar{r}};
 \end{aligned}$$

$P_{(i-1)r\bar{w}} = P_{(i)r\bar{w}} = P_{(i+1)r\bar{w}} \dots = P_{r\bar{w}}$ ;  
其中在平稳状态与时间无关的状态转移概率定义如下:

- $P_{wr}$ : 某地块在种小麦后连种水稻的概率;
- $P_{r\bar{w}}$ : 某地块在种水稻后连种小麦的概率;
- $P_{r\bar{w}}$ : 某地块在种水稻后连种除小麦之外的其他作物的概率;
- $P_{\bar{w}r}$ : 某地块在种除小麦之外的其他作物后连种水稻的概率;
- $P_{\bar{w}\bar{r}}$ : 某地块在种小麦后连种除水稻之外的其他作物的概率;
- $P_{r\bar{w}}$ : 某地块在种除水稻之外的其他作物后连种小麦的概率;
- $P_{\bar{w}\bar{r}}$ : 某地块在种除小麦之外的其他作物后连种除水稻之外的其他作物的概率;
- $P_{r\bar{w}}$ : 某地块在种除水稻之外的其他作物后连种除小麦之外的其他作物的概率。

根据该时序分析模型和上述分析可得如下状态方程:

(1) 在  $i$  年种小麦地块的面积和不种小麦地块的面积分别为:

$$\begin{cases}
 W_{(i)} = W_{(i)r(i-1)} + W_{(i)\bar{r}(i-1)} \\
 \bar{W}_{(i)} = \bar{W}_{(i)r(i-1)} + \bar{W}_{(i)\bar{r}(i-1)}
 \end{cases}$$

式中:  $W_{(i)r(i-1)}$  为  $i-1$  年种水稻后在  $i$  年种小麦地块的面积,  $W_{(i)\bar{r}(i-1)}$  为在  $i-1$  年不种水稻在  $i$  年种小麦地块的面积,  $\bar{W}_{(i)r(i-1)}$  为  $i-1$  年种水稻后在  $i$  年不种小麦地块的面积,  $\bar{W}_{(i)\bar{r}(i-1)}$  为在  $i-1$  年不种水稻在  $i$  年不种小麦地块的面积。

(2) 在  $i$  年种水稻地块的面积  $R(i)$  和不种水稻地块的面积  $\bar{R}(i)$  分别为:

$$\begin{cases}
 R_{(i)} = R_{(i)w(i)} + R_{(i)\bar{w}(i)} \\
 \bar{R}_{(i)} = \bar{R}_{(i)w(i)} + \bar{R}_{(i)\bar{w}(i)}
 \end{cases}$$

式中:  $R_{(i)w(i)}$  为  $i$  年种小麦后种水稻地块的

面积,  $R_{(i)\bar{w}}$  为在  $i$  年不种小麦后种水稻地块的面积,  $\bar{R}_{(i)w(i)}$  为  $i$  年种小麦后不种水稻地块的面积,  $\bar{R}_{(i)\bar{w}(i)}$  为在  $i$  年不种小麦后不种水稻地块的面积。

(3) 在  $i-1$  年种水稻后在  $i$  年种小麦地块的面积  $W_{(i)r(i-1)}$  和在  $i-1$  年种水稻后在  $i$  年不种小麦地块的面积  $\bar{W}_{(i)r(i-1)}$  分别为:

$$\begin{cases} W_{(i)r(i-1)} = P_{rw} \times R_{(i-1)} \\ \bar{W}_{(i)r(i-1)} = P_{r\bar{w}} \times R_{(i-1)} \end{cases}$$

(4) 在  $i-1$  年不种水稻后在  $i$  年种小麦地块的面积  $W_{(i)\bar{r}(i-1)}$  和在  $i-1$  年不种水稻后在  $i$  年不种小麦地块的面积  $\bar{W}_{(i)\bar{r}(i-1)}$  分别为:

$$\begin{cases} W_{(i)\bar{r}(i-1)} = P_{r\bar{w}} \times \bar{R}_{(i-1)} \\ \bar{W}_{(i)\bar{r}(i-1)} = P_{r\bar{w}} \times \bar{R}_{(i-1)} \end{cases}$$

(5) 马尔可夫链处于非稳态状态转移概率的关系为:

$$\begin{cases} P_{(i)wr} + P_{(i)w\bar{r}} = 1 \\ P_{(i)\bar{w}r} + P_{(i)\bar{w}\bar{r}} = 1 \\ P_{(i)rw} + P_{(i)r\bar{w}} = 1 \\ P_{(i)\bar{r}w} + P_{(i)\bar{r}\bar{w}} = 1 \end{cases}$$

(6) 马尔可夫链处于稳态状态转移概率的关系为:

$$\begin{cases} P_{wr} + P_{w\bar{r}} = 1 \\ P_{\bar{w}r} + P_{\bar{w}\bar{r}} = 1 \\ P_{rw} + P_{r\bar{w}} = 1 \\ P_{\bar{r}w} + P_{\bar{r}\bar{w}} = 1 \end{cases}$$

(7) 某地块在种小麦后连种水稻的概率  $P_{wr}$  为:

$$P_{wr} = \frac{R_{(i)w(i)}}{W_{(i)}} = \frac{R_{(i+1)w(i+1)}}{W_{(i+1)}}$$

(8) 某地块在种水稻后连种小麦的概率  $P_{rw}$  为:

$$P_{rw} = \frac{W_{(i)r(i-1)}}{R_{(i-1)}} = \frac{W_{(i+1)r(i)}}{R_{(i)}}$$

进一步, 根据(1)~(8)和时序分析模型中的通路  $R_{(i-1)} \rightarrow W_{(i)} \rightarrow R_{(i)} \rightarrow W_{(i+1)}$  和通路  $R_{(i-1)} \rightarrow \bar{W}_{(i)} \rightarrow R_{(i)} \rightarrow W_{(i+1)}$  可得下述方程:

$$R_{(i-1)} \times P_{rw} \times P_{wr} \times P_{rw} + R_{(i-1)} \times P_{r\bar{w}} \times P_{\bar{w}r} \times P_{rw} = W_{(i+1)r(i-1)};$$

$$P_{rw}^2 \times P_{wr} + P_{r\bar{w}} \times P_{\bar{w}r} \times P_{rw} = \frac{W_{(i+1)r(i-1)}}{R_{(i-1)}};$$

由于该区域稻麦连作水平远远高于水稻与其他作物以及其他作物与水稻的连作水平, 因此有:

$$P_{r\bar{w}} \ll P_{rw}, P_{\bar{w}r} \ll P_{rw}, P_{r\bar{w}} \times P_{\bar{w}r} \times P_{rw}$$

$\approx 0$ ;

为了简化分析, 可认为该区域稻麦连作水平与麦稻连作水平大致相同, 即有:

$$R_{wr} \approx P_{wr};$$

综合上述分析有该区域麦稻连作概率或水平指数为:

$$P_{wr} = \sqrt[3]{\frac{W_{(i+1)r(i-1)}}{R_{(i-1)}}};$$

第  $j$  个乡镇在种小麦后连种水稻的概率  $P_{jwr}$

或麦稻连作水平指数为:  $P_{jwr} = \sqrt[3]{\frac{W_{j(i+1)r(i-1)}}{R_{j(i-1)}}};$

式中:  $W_{j(i+1)r(i-1)}$  为第  $j$  个乡镇在  $i-1$  年种水稻后在  $i+1$  年种小麦地块的面积,  $R_{j(i-1)}$  为第  $j$  个乡镇在  $i-1$  年种水稻地块的面积。

常熟市所有  $n$  个乡镇在种小麦后连种水稻的概率  $P_{mwr}$  或麦稻连作水平指数为:

$$P_{mwr} = \frac{\sum_{j=1}^n W_{j(i+1)}}{W_{n(i+1)}} \sqrt[3]{\frac{W_{j(i+1)r(i-1)}}{R_{j(i-1)}}};$$

式中:  $W_{j(i+1)}$  为第  $j$  个乡镇在  $i+1$  年种小麦地块的面积,  $W_{n(i+1)}$  为常熟市所有  $n$  个乡镇在  $i+1$  年种小麦地块的面积。常熟市麦稻连作水平指数  $P_{mwr}$  实际上是由各乡镇的麦稻连作水平指数  $P_{jwr}$  加权求和的结果, 即每个乡镇的麦稻连作水平指数均乘上与该乡镇的小麦面积在整个常熟市小麦面积中的权重再求和, 采用加权求均值, 而不是直接用所有乡镇的麦稻连作水平指数的平均值作为常熟市的麦稻连作水平指数, 主要是考虑各个乡镇的小麦面积差异较大时, 使小麦面积大的乡镇的麦稻连作水平指数对常熟市的麦稻连作水平指数的贡献更大, 这样加权处理得到麦稻连作水平指数在统计学上更加合理, 更具有科学性。根据计算的麦稻连作水平指数即可评估麦稻连作水平: 麦稻连作水平指数高(最大值为 1), 则麦稻连作可能性大、水平高; 麦稻连作水平指数低(最小值为 0), 则麦稻连作可能性小、水平低。

### 1.2.3 验证评估模型

对评估模型正确性验证包括理论分析和实地调查验证两个方面。理论分析方面的主要工作是从理论上证明评估模型的正确性, 在上述建立评估模型的过程中, 严格的理论分析已经保证了评估模型在理论上的正确性。实地调查验证方面的主要工作是: 根据农业部遥感调查结果地面验证技术规范的要求, 在研究区域中建立 6 个地面调查样方, 用全球定位系统 (GPS, Trimble

GeoXT2005 接收机)对样方内的小麦面积以及在小麦之后种水稻的面积进行测量,并用测量结果推算出地面样方的麦稻连作水平指数,再将此结果与评估模型的结果对比来验证评估模型的正确性。其中样方的布设要求应远离村庄、国道、省道、工矿用地、湖泊、水库、河流等非耕地区域,种植小麦的地块占样方总面积的 40%以上;以耕地自然边界(如水渠、公路、田间小径、田坎等)为样方边界。GPS 为测量精度达实时亚米级的。利用差分 GPS 进行样方定位调查,测绘样方内小麦和水稻地块的空间分布,最小测量地块为 2 m×6 m。对道路、水渠等永久线性地物的最小测量宽度为 1 m。在北京 1954 坐标系下将 GPS 数据投影为正轴等积双标准纬线割圆锥投影(ALBERS)后,进行 GPS 数据编辑处理。

## 2 结果与分析

根据上述研究方法,利用 2006 年的水稻卫星遥感影像数据和 2008 年的小麦卫星遥感影像数据,可得各乡镇及常熟市的 2008 年的麦稻连作水平指数计算式分别为:

$$P_{jwr} = \sqrt[3]{\frac{W_{j(2008)r(2006)}}{R_{j(2006)}}};$$

$$P_{mwr} = \sum_{j=1}^n \frac{W_{j(2008)}}{W_{n(2008)}} \sqrt[3]{\frac{W_{j(2008)r(2006)}}{R_{j(2006)}}};$$

根据上式可计算出常熟市 32 个乡镇中的 29 个乡镇(由于麦稻种植极少和云层的影响,碧溪、吴市和徐市等 3 个镇不予考虑)和整个常熟市的麦稻连作水平指数如表 1 所示。

表 1 常熟市 2008 年麦稻连作水平遥感调查表

Table 1 Remote sensing analysis of wheat-rice cropping level of Changshu city in 2008

代码 Code	乡镇名 Town name	2006 年水稻面积 Rice area in 2006/hm <sup>2</sup>	2008 年小麦面积 Wheat area in 2008/hm <sup>2</sup>	重叠面积 Overlapped area/hm <sup>2</sup>	连作指数 Continuous cropping index
1	昆承 Kuncheng	2.30	0.41	0.04	0.25
2	沙家 Shajia	347.28	68.05	30.90	0.45
3	浒浦 Xupu	64.15	142.76	36.69	0.83
4	虞山 Yushan	184.19	183.45	100.40	0.82
5	杨园 Yangyuan	587.92	135.60	115.06	0.58
6	沙家浜 Shajiabang	604.10	254.21	140.01	0.61
7	东张 Dongzhang	359.80	236.53	154.83	0.75
8	东南 Dongnan	444.85	281.43	175.06	0.73
9	梅李 Meili	460.09	242.17	177.78	0.73
10	辛庄 Xinzhuang	832.66	285.47	229.41	0.65
11	董浜 Dongbang	487.30	346.37	272.81	0.82
12	珍门 Zhenmen	469.77	336.73	283.00	0.84
13	周行 Zhouhang	728.75	449.34	372.52	0.80
14	淼泉 Miaoquan	788.72	485.53	396.42	0.80
15	谢桥 Xieqiao	742.57	566.94	409.40	0.82
16	古里 Guli	1 313.35	549.20	455.82	0.70
17	海虞 Haiyu	826.45	662.47	461.63	0.82
18	赵市 Zhaoshi	762.51	786.33	463.77	0.85
19	任阳 Renyang	1 083.77	721.05	531.58	0.79
20	张桥 Zhangqiao	1 102.03	644.74	536.72	0.79
21	莫城 Muocheng	1 113.79	676.84	561.59	0.80
22	尚湖 Shanghu	1 263.19	959.07	720.45	0.83
23	练塘 Liantang	1 463.49	883.71	723.04	0.79
24	白茆 Baimao	1 732.57	1 089.22	921.76	0.81
25	大义 Dayi	1 611.20	1 216.00	950.54	0.84
26	王庄 Wangzhuang	1 583.08	1 246.42	960.10	0.85
27	何市 Heshi	1 399.60	1 315.37	1 019.01	0.90
28	支塘 Zhitang	2 097.67	1 877.67	1 493.15	0.89
29	福山 Fushan	2 841.98	2 471.05	1 690.02	0.84
合计 Total		27 299.12	19 114.13	14 383.50	0.76

由表 1 的结果分析可知,在 2008 年的 29 个乡镇中,有 9 个乡镇的麦稻连作水平指数为 0.61,

低于常熟市的麦稻连作水平指数 0.76,占 31.03%,而高于这个值的 20 个乡镇的麦稻连作

水平指数为 0.83, 占 68.97%, 说明各乡镇的麦稻连作水平分布不均匀, 但分布大致呈正态分布。

为了验证卫星遥感评估结果的正确性, 2008年, 在所有 32 个乡镇中按估计精度最优原则, 利用有限选择模型<sup>[15]</sup>选择了沙家、浒浦、沙家浜、梅李、周行和赵市共布设了 6 个地面样方, 并对样方内的麦稻面积进行实测分析, 获得的麦稻连作水平指数为 0.73(表 2), 其与卫星遥感结果相比较误差仅为 3.95%。此外, 根据对常熟市农业局提

供的麦稻连作水平数据分析: 麦稻连作水平指数大约为 0.7, 这一数据与上述 0.76 也相当接近, 误差为 7.89%。因此, 有理由认为评估模型设计合理, 结果可信。显然, 无论是实地 GPS 小范围的实测分析, 还是根据当地实际数据分析, 所获得的结果的精度都不可能与基于遥感信息和统计学理论的大面积的科学估算结果相比, 后者应该更加准确、合理、可信。

表 2 常熟市 2008 年麦稻连作水平地面样方调查表

Table 2 Analysis of wheat-rice cropping level of ground survey samples of Changshu city in 2008

代码 Code	乡镇名 Town name	2008 年样方面积 Sample area in 2008/ km <sup>2</sup>	2008 年小麦面积 Wheat area in 2008/ km <sup>2</sup>	2008 年小麦后水稻面积 Rice-after-wheat area in 2008/ km <sup>2</sup>	连作指数 Continuous cropping index
2	沙家 Shajia	0.30	0.22	0.11	0.51
3	浒浦 Xupu	0.22	0.15	0.13	0.85
6	沙家浜 Shajiabang	0.27	0.13	0.08	0.64
9	梅李 Meili	0.33	0.24	0.19	0.80
13	周行 Zhouhang	0.21	0.11	0.09	0.80
18	赵市 Zhaoshi	0.21	0.13	0.11	0.85
合计 Total		1.54	0.98	0.71	0.73

1: 昆承 Kuncheng; 2: 沙家 Shajia; 3: 浒浦 Xupu; 4: 虞山 Yushan; 5: 杨园 Yangyuan; 6: 沙家浜 Shajiabang; 7: 东张 Dongzhang; 8: 东南 Dongnan; 9: 梅李 Meili; 10: 辛庄 Xinzhuang; 11: 董浜 Dongbang; 12: 珍门 Zhenmen; 13: 周行 Zhouhang; 14: 淼泉 Miaoquan; 15: 谢桥 Xieqiao; 16: 古里 Guli; 17: 海虞 Haiyu; 18: 赵市 Zhaoshi; 19: 任阳 Renyang; 20: 张桥 Zhangqiao; 21: 莫城 Mocheng; 22: 尚湖 Shanghu; 23: 练塘 Liantang; 24: 白茆 Baimao; 25: 大义 Dayi; 26: 王庄 Wangzhuang; 27: 何市 Heshi; 28: 支塘 Zhitang; 29: 福山 Fushan; 30: 碧溪 Bixi。

图 2 常熟市麦稻连作水平评估

Fig. 2 Analysis of wheat-rice cropping level of Changshu

### 3 讨论

到目前为止, 在大地理区域内对农作物轮作或连作水平进行评估的方法主要有统计调查法<sup>[16]</sup>和卫星遥感法<sup>[8]</sup>。在实施统计调查法时, 必须在被调查的大地理区域内, 对农户进行人工抽样调查, 而调查精度通常受到调查的样本数量以及被调查的农户提供信息准确程度的影响, 由于

很难保证调查样本数量足够大以及结果客观、准确, 所以精度通常不高。不仅如此, 由于统计调查通常是反映大地理区域内农作物轮作或连作水平的统计平均值, 并没有提供与具体田块轮作或连作水平有关的任何信息, 所以很难用这样的数值实施农作物生产的管理。与此形成鲜明对照的是卫星遥感法克服了统计调查法的所有缺点, 其主要特点是精度高, 可以准确反映空间每个田块的

轮作或连作水平,对科学实施农作物生产管理提供了完整的信息支持,是目前在大地理区域内对农作物轮作或连作水平进行评估的先进方法。从图2可以清楚看出常熟市各乡镇的麦稻连作水平波动较大,结合卫星遥感影像还可以进一步确定每一个具体田块的麦稻连作水平并实施对相应的农作物的生产管理。尽管卫星遥感法应用广泛,但传统的卫星遥感法需要对年份上连续的卫星遥感影像进行分析,在卫星遥感影像资源稀缺的情况下,这种需求使其应用受到了很大限制。因此,本文提供的基于隔年卫星遥感影像的方法大幅度提高了现有卫星遥感影像利用率,是对传统卫星遥感法的继承、创新和发展,扩大现有卫星遥感法应用范围。

本研究的方法是在麦稻连作过程可以用平稳随机过程研究的前提下用马尔可夫链导出麦稻连作水平估算公式的,因此,在选择用于麦稻连作水平的估算的配对卫星遥感影像时,要尽量反映研究区域麦稻连作过程的平稳性特征,即应尽量避免选用那些由于市场需求而造成麦稻面积剧烈变化年份的卫星遥感影像,以保证估算的麦稻连作水平的精度。在有条件的地方,可以通过选择更多配对的卫星遥感影像分析麦稻连作水平求均值来提高分析精度。此外,采用GPS实测地面样方来评估应用卫星遥感方法对麦稻连作水平的估算精度通常也是必须的,以确保卫星遥感方法所有技术步骤的正确性。在进一步研究方面,要考虑问题是目前采用卫星遥感影像对研究区域全覆盖的做法由于受到卫星遥感影像资源的稀缺以及调查经费的限制在具体实施上面临不少困难,未来可考虑在研究区域内进行最优抽样,即用部分卫星遥感影像对整个研究区域的麦稻连作水平实施统计分析,需要克服的困难有抽样点的总数、每个抽样点的面积大小和具体地理位置的最优选择以

及对评估精度的分析。

#### 参考文献:

- [1]张青,章玉琴,梅从友,等. 稻麦连作高产示范栽培技术[J]. 现代农业科技,2007(4):81.
- [2]金银根,强胜,王庆亚,等. 江苏省不同稻麦连作区野燕麦群体的多样性分析[J]. 江苏农业学报,2003(1):18-22.
- [3]陈仲新,刘海启. 全国冬小麦面积变化遥感监测抽样外推方法的研究[J]. 农业工程学报,2000,16(5):126-129.
- [4]李映雪,谢晓金,徐德福. 高光谱遥感技术在作物生长监测中的应用研究进展[J]. 麦类作物学报,2009,29(1):174-178.
- [5]隋学艳,朱振林,李少昆,等. 基于种植制度利用MODIS数据提取冬小麦种植面积[J]. 农业工程学报,2010,26(S1):181-184.
- [6]乔红波,夏斌,马新明,等. 冬小麦病虫害的高光谱识别方法研究[J]. 麦类作物学报,2010,30(4):770-774.
- [7]隋学艳,朱振林,朱传宝,等. 基于MODIS数据的山东省小麦株高遥感估算研究[J]. 山东农业科学,2010(2):5-7,11.
- [8]朱泽生,孙玲. 基于卫星遥感的区域棉稻与稻棉轮作周期估算模型研究[J]. 作物学报,2006,32(1):57-63.
- [9]ERDAS Inc. ERDAS Field Guide[M]. Atlanta, GA, 1997: 5-183.
- [10]Kiefer W, Lillesand M. Remote Sensing and Image Interpretation[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1994: 35-128.
- [11]党安荣,王晓栋,陈晓峰,等. 遥感图像处理方法[M]. 北京:清华大学出版社,2004:100-200.
- [12]范剑青,姚琦伟. 非线性时间序列[M]. 北京:高等教育出版社,2005:21-67.
- [13]刘军. 科学计算中的蒙特卡罗策略[M]. 北京:高等教育出版社,2009:179-196.
- [14]Sheldon R. Introduction to Probability Models[M]. New York: Academic Press,2003:181-268.
- [15]Morris C. A finite selection model for experimental design of the health insurance study[J]. Journal of Econometrics, 1979,11(1):43-61.
- [16]Lehtonen R, Pahkinen E. Practical Methods for Design and Analysis of Complex Surveys[M]. New York: Wiley & Sons,2002:206-258.