

# 基于空间技术的烤烟种植生态环境综合评价分析

蒋样明<sup>1\*</sup> 崔伟宏<sup>1</sup> 董前林<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; <sup>2</sup>中国矿业大学地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

**摘要** 光照、气温、土壤类型、降水量、土壤含水量、海拔、坡度、重金属污染等自然生态环境对烤烟的分布、生长发育及品质有重要影响, 同时也是烤烟种植优化配置必不可少的基础信息。基于空间技术的烤烟种植生态环境综合评价分析的目的就是应用遥感、地理信息等空间技术, 实现烤烟种植区域生态环境信息的三维立体采集及烤烟种植生态环境适宜性空间分布信息评价。主要研究内容是分析影响烤烟种植及品质的生态因子, 应用ARCGIS空间分析功能获得海拔、坡度因子, 应用常规的遥感模型反演植被指数、地表温度、土壤含水量和太阳辐射因子, 应用Kriging插值加密地球化学数据建立烤烟种植生态环境综合评价指标体系。通过基于空间技术的烤烟种植生态环境适宜性等级空间分布优化分析结果与实验区烤烟种植示范基地和烤烟种植区域的调整结果进行对比, 可知该方法是有用的。

**关键词** 综合分析模型, 生态环境, 生态适宜性, 空间技术, 空间布局优化, 烤烟

## Comprehensive evaluation and analysis of tobacco planting environment based on space technology

JIANG Yang-Ming<sup>1\*</sup>, CUI Wei-Hong<sup>1</sup>, and DONG Qian-Lin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; and <sup>2</sup>College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

### Abstract

**Aims** Our objective is to provide a scientific basis for optimization of tobacco planting.

**Methods** First, we analyzed the ecological factors that impact tobacco's cultivation and quality. Second, we applied ARCGIS spatial analysis to obtain elevation and slope factors. Third, we obtained the vegetation index, surface temperature, soil moisture and solar radiation factor based on conventional remote sensing models. Fourth, we used Kriging interpolation to encrypt the geochemical data. Then we applied AHP analysis to establish a comprehensive evaluation system for tobacco cultivation.

**Important findings** Several environmental factors have a major impact on tobacco distribution, growth and quality. These include light, temperature, soil type, rainfall, soil moisture, altitude, slope and heavy metal pollution. These factors are also essential for optimizing allocation of tobacco cultivation. The spatial distribution of tobacco cultivation in the experimental area needs to be optimized.

**Key words** comprehensive analysis model, ecological environment, ecological suitability, space technology, spatial layout optimization, tobacco

烤烟是一种重要的经济作物。光照、气候、海拔、污染程度等生长环境对烤烟产量和质量影响显著。基于空间技术的烤烟的种植生态环境综合分析, 可以直观显示烤烟种植适宜性等级的空间分布与生态景观, 为优化烤烟种植空间配置和轮作提供依据, 是提高烤烟可持续发展能力的重要途径。目前, 常规的农业生态环境分析所使用的光、热、水等参数都是基于观测站的测量数据, 容易受观测站分布密度限制, 难以满足大范围高精度生态环境参数获取

的需要, 尤其是无法全面真实地反映山区气候资源的立体多样性(吕晓芳等, 2007; 翟文侠等, 2007; 陆魁东等, 2008), 无法满足烤烟种植生态环境综合分析的精度要求, 而应用遥感技术可以获取大区域高分辨率的地表参数和气候参数, 因此应用遥感数据能够更加客观地反映烤烟种植区域生态环境空间分布的真实性和科学性。

本文基于遥感数据模拟、反演地表温度、土壤水分, 应用海拔数据和数字高程模型计算的太阳辐

射、坡度、坡向等地表参数，并建立烤烟种植生态环境综合分析模型，对研究区的烤烟种植适宜性进行评价和分析，并以此为基础对烤烟种植空间优化配置和轮作提出相关建议，综合分析的处理流程如图1所示。

## 1 烤烟种植影响因子和研究方法

### 1.1 自然生态条件对烤烟种植的影响

温度、水分和光照等气候因子是影响烤烟生长发育、产量、品质的重要生态因素，它们在烤烟生长过程中所起的作用不同。烤烟生长最合适的光照条件是全年日照百分率大于50%，日照时数大于2 000 h；大田生长期日照百分率为40%左右，日照时数达到500–700 h。烤烟在9–38 °C能生长，最适宜的温度是20–28 °C。生产优质烟叶对温度的要求是前期较低、后期较高，烟株生长和叶片成熟要求日平均温度不低于20 °C，而在20–24 °C较理想。烤烟生长对水分的需求特点是前期少，中期多，后期少；大田期间平均月降水量以100–130 mm为宜；移栽期降水多利于还苗，还苗后雨水少利于生根，团棵后水分充足利于促进旺盛生长，成熟期间雨量少有

利于适时成熟和调制(董谢琼等, 2005; 邵岩, 2006)。

地形地貌导致热量、雨量在一定范围内的再分配，对土壤特性也有很大的影响，试验区地形地貌复杂，明显地分为田烟、地烟和山地烟。实践证明在海拔1 400–1 800 m的平地或缓坡梯地，丘陵坡地不大于15°，能生产高质量的烟叶。利用STRM数据获取研究区的海拔和坡度情况。

土壤对烤烟的分布及烟叶品质有重要影响，质地疏松、结构良好、通透性好、保水保肥的土壤适宜种烟，如红、黄、紫色的轻黏壤土、中壤、沙壤土。

砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、镍(Ni)、铜(Cu)、汞(Hg)等为烟叶中的主要有害成分。Pb、As、Cd和Cu主要来自土壤，并且严重影响着烤烟的质量及人体健康，因此在科学、合理、有效地利用自然资源，优化和改进烤烟种植空间结构时，必须考虑重金属污染的影响。

### 1.2 应用空间技术获取生态环境评价因子

1:50 000比例尺的土壤类型、耕地分布、历年烟田分布等数据，野外GPS调查数据和统计数据可以从项目组基础数据库获得；海拔、坡度因子可以由

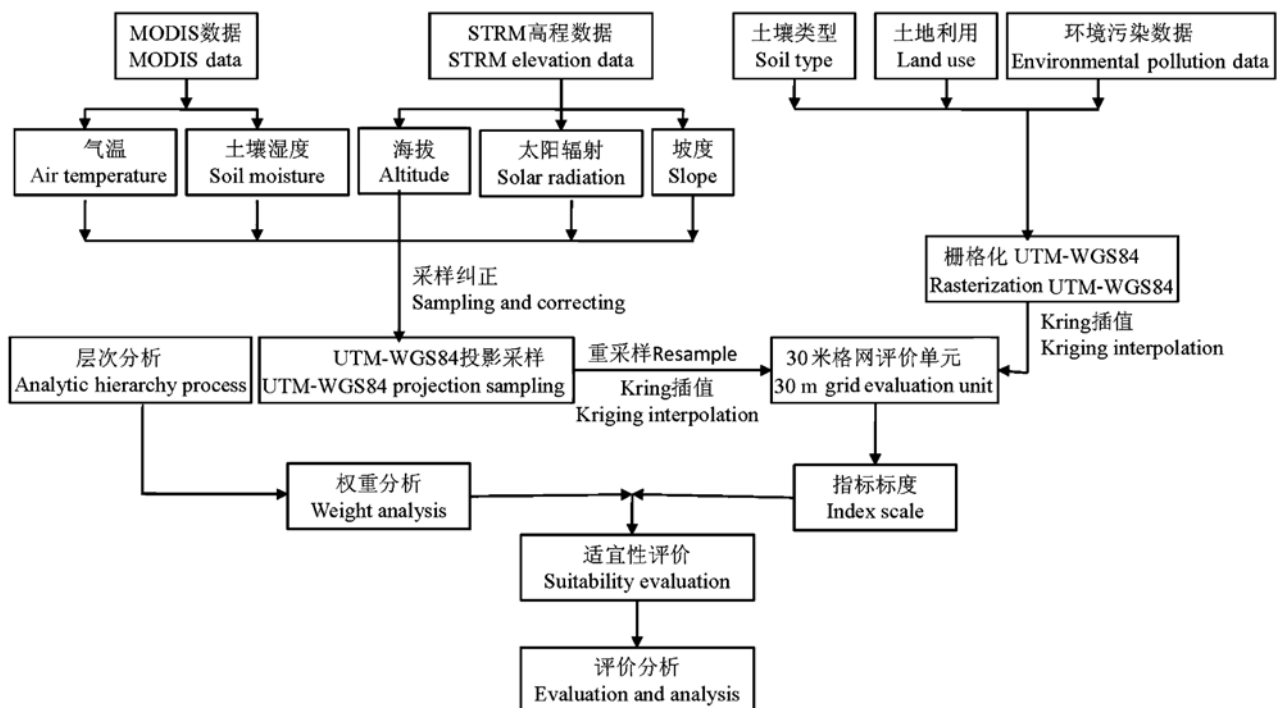


图1 基于空间技术的烤烟种植生态环境综合分析流程。

Fig. 1 Ecological environment comprehensive evaluation process of tobacco planting based on space technology. MODIS: moderate-resolution imaging spectroradiometer; SRTM: Shuttle Radar Topography Mission.

SRTM数字高程通过空间分析处理获得; 反演植被指数、地表温度、土壤含水量和太阳辐射因子等遥感数据来源于NASA的MODIS数据共享网站(<http://modis.gsfc.nasa.gov/data>); 重金属污染数据由中国地质资料馆提供的1:20万的36种地球化学采样数据, 通过Kriging插值进行加密, 获得空间分辨率为30 m的各类重金属空间分布数据。本文基于试验区2000到2010年间烤烟生长期(5-7月)的MODIS数据与STRM数据, 采用经典的遥感方法和模型结合ARCGIS空间分析功能, 计算试验区11年来烤烟生长期的平均气温、土壤含水量、太阳辐射、重金属污染等地表参数, 计算方法的准确性和有效性已在相关文献中进行了广泛的论证和检验(Gillies *et al.*, 1997; Fu, 2000; Guérif & Duke, 2000), 同时根据气象台站的直接观测获取的气温、土壤含水量、太阳辐射等地表参数, 对计算获得的参数进行纠正。

### 1.2.1 气温因子

利用MODIS热红外波段探测通道24、25、27、28、29、30、31、32、33、34、35、36的观测组合, 联合统计回归算法和非线性物理迭代算法反演获得研究区5-7月的平均气温, 并应用气象台观测数据进行纠正。应用MODIS数据反演地表温度的可靠性已经有相关的论证(蒋样明等, 2010)。

### 1.2.2 土壤含水量

土壤水分是影响植被冠层温度的重要因素, 且一定植被覆盖条件下的冠层温度能够间接反映土壤供水情况(齐述华等, 2003)。基于归一化植被指数(NDVI)和地表温度( $T_s$ )的关系可以建立温度植被旱情指数(temperature/vegetation dryness index, TVDI), 可以由公式(1)计算(Sandholt *et al.*, 2002; 杨曦等, 2009)。

$$TVDI = \frac{[T_s - (a_1 + b_1 \times NDVI)]}{[(a_2 + b_2 \times NDVI) - (a_1 + b_1 \times NDVI)]} \quad (1)$$

式中 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 和 $b_2$ 分别是旱边和湿边拟合方程的系数, 它们的获取算法如下: NDVI从0到1, 以 $0.01 + 0.02 \times n$  ( $n = 1, 2, \dots, 49$ )为中心, 取0.02宽度的区间中地表温度(LST)的最大值和最小值, 分别与其对应的NDVI值组成点对, 最后采用最小二乘线性拟合方式将点对拟合, 获得湿边和干边值。TVDI能够反映土壤水分变化趋势的合理性已经有相关的论证(齐述华等, 2003; 吴孟泉等, 2007)。本文利用空间分辨率为250 m的植被指数和地表温度计算得到研究

区自2000年来5-7月TVDI的平均值, 应用TVDI值反映土壤含水量的相对高低程度和空间分布格局。TVDI取值范围在0到1之间, TVDI越大, 土壤含水量越低; 反之土壤含水量越高。以TVDI为指标将土壤含水量划分成5级: 潮湿( $0 < TVDI < 0.2$ )、正常( $0.2 < TVDI < 0.4$ , 最适宜种植烤烟)、轻旱( $0.4 < TVDI < 0.6$ , 适宜种植烤烟)、干旱( $0.6 < TVDI < 0.8$ , 次适宜种植烤烟)和重旱( $TVDI > 0.8$ , 不适宜种植烤烟)。

### 1.2.3 太阳辐射

基于ArcGIS9.3的太阳辐射计算模块, 利用空间分辨率为30 m的SRTM高程数据, 计算了研究区自2000到2010年5-7月的太阳辐射值。并应用中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)云南省内丽江、腾冲、昆明、景洪、蒙自等地的太阳辐射监测站点获得的中国辐射国际交换站气候标准值数据集对SRTM高程数据计算的太阳辐射进行验证分析。研究发现高程数据模拟计算的年度总太阳辐射, 经站点太阳辐射观测值纠正后的值能反映研究区域的光照条件分布。

## 1.3 烤烟种植生态环境评价指标体系

依据地域性、相似性与差异性、综合性、主导性和可操作性等原则, 选取土壤类型、耕地类型、海拔、坡度、坡向、气温、土壤含水量、太阳辐射、重金属污染等9个有代表性、能体现区域生态环境差异的指标因子构建烤烟种植生态环境评价指标体系。

### 1.3.1 指标体系与层次分析法权重分析

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是一种多指标多因素综合评价法, 它包括递阶层次结构模型、判断矩阵的构建及其求值、一致性检验和综合指数计算等运算过程(Saaty & Bennett, 1997)。由于它是基于系统论中的系统层次性原理建立起来的, 并遵循认识事物的规律, 有意识地将复杂问题分解成若干有序的、条理化的层次, 在比原问题简单的层次上逐步分析比较, 把人的主观判断用数量的形式表达和处理, 是一种定性和定量分析相结合的多因素评价方法。运用层次分析法解决问题, 大体可以分为4个步骤: 1)自上而下建立问题的递阶层次结构, 即首先分析第二层B中各因素相对A而言的相对重要性, 构成A-B判断矩阵; 2)构造两两比较判断矩阵, 判断矩阵是邀请数位有关从事该领域的专家, 结合烤烟种植的实际情况, 构建各层之间的

判断矩阵(表1); 3)由判断矩阵计算被比较元素相对权重; 4)计算各层次元素的组合权重。用层次分析法确定烤烟种植适宜性的环境因子及各因子权重时, 首先需要将自然环境因子按照目标层次进行排列, 建立起层次结构的综合评价体系(图2)。

用Matlab编写程序计算得到各层的最大特征根及其归一化特征向量, 计算结果见表2。

1.3.2 一致性检验及评价指标总权重的确定

一致性检验公式为:  $CR = CI/RI$ ,  $CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$ , ( $n > 2$ )。其中 $RI$ 为平均随机一致性指标,  $CR$ 为随机一致性比值。当 $CR \leq 0.1$ 时, 则判断矩阵的一致性符合要求, 否则重新调整判断矩阵。通过计算获得以上构造的5个判断矩阵的 $CR$ 值(表3), 由表3可知判断矩阵全部满足一致性要求。

在AHP权重分析中, 总权重需要从最高层到最低层逐层计算, 其计算方式如公式(2)所示。式中 $B_{i(k)}$

为上层的单权重,  $C_{i(k)}$ 为各评价指标在该层的单权重, 当指标 $C_{i(k)}$ 与上层无关时, 则定义 $C_i^* = 0$ 。

$$C_i^* = \sum_1^k B_{i(k)} C_{i(k)} \quad (2)$$

评价指标总权重 $C_i^*$ 如表4所示, 其中 $CR_{\text{总}} = CI_{\text{总}}/RI_{\text{总}} = 0.0316/1.4100 = 0.0224 \leq 0.1$ , 由此可知判断矩阵总的一致性检验符合要求。

1.3.3 评价指标标准化

由于各评价指标的含义不同, 既有定量化的指标, 也有一些定性的指标, 为了综合使用不同来源、不同尺度、不同量纲的指标, 对选取的各类指标进行标准化。参考已有的研究成果(董谢琼等, 2005; 邵岩, 2006; 陆魁东等, 2008; 许自成等, 2008), 结合实验区烤烟种植的实际情况, 将每个生态环境评价因子划分为不适宜、次适宜、适宜和最适宜4个级

表1 层次分析判断矩阵

Table 1 Hierarchy analytic process matrix

A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>
B <sub>1</sub>	1	4	3	2	C <sub>1</sub>	1	2	C <sub>3</sub>	1	3	3	C <sub>6</sub>	1	5	C <sub>8</sub>	1	2	3	5
B <sub>2</sub>	1/4	1	2	1	C <sub>2</sub>	1/2	1	C <sub>4</sub>	1/3	1	2	C <sub>7</sub>	1/5	1	C <sub>9</sub>	1/2	1	2	3
B <sub>3</sub>	1/3	1/2	1	1/2				C <sub>5</sub>	1/3	1/2	1				C <sub>10</sub>	1/3	1/2	1	2
B <sub>4</sub>	1/2	1	2	1											C <sub>11</sub>	1/5	1/3	1/2	1

1表示两个因素具有同等重要性; 3表示前者比后者稍重要; 5表示前者比后者明显重要; 7表示前者比后者强烈重要; 9表示前者比后者极端重要; 2、4、6、8表示重要性介于1、3、5、7、9之间。若因素 $i$ 与因素 $j$ 的重要性之比为 $a_{ij}$ , 那么因素 $j$ 与因素 $i$ 重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。A表示目标层; B表示准则层, B<sub>i</sub>表示准则层的第 $i$ 个元素; C表示指标层, C<sub>i</sub>表示指标层的第 $i$ 个元素。

1 indicates that the two factors are same importance; 3 indicates that the former factor is slightly important than the latter; 5 indicates that the former factors is significantly important than the latter; 7 indicates that the former factor is strongly important than the latter; 9 indicates that the former factor is extremely important than the latter; 2 means the importance is between 1 and 3; 4 means the importance is between 3 and 5; 6 means the importance is between 5 and 7; 8 means the importance is between 7 and 9. If the importance ratio of factor  $i$  and factor  $j$  is  $a_{ij}$ , then the importance ratio of factor  $j$  and factor  $i$  is  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ . A refers to the target layer, B refers to the rule layer, and the B<sub>i</sub> means the  $i$ -th element of rule layer; C refers to the index layer and the C<sub>i</sub> means the  $i$ -th element of index layer.

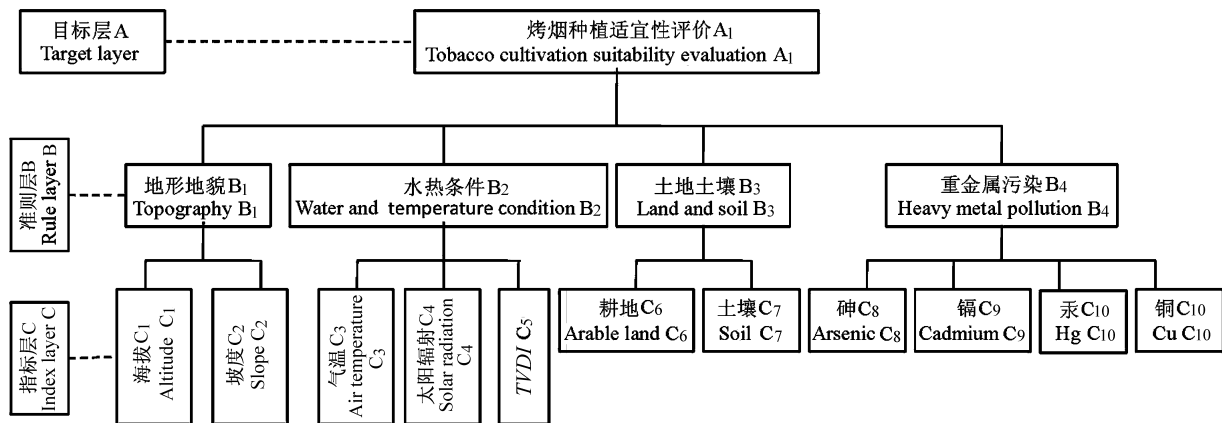


图2 烤烟种植适宜性评价指标体系的层次结构。TVDI, 温度植被旱情指数。

Fig. 2 Hierarchy of tobacco planting suitability evaluation index system. TVDI, temperature/vegetation dryness index.

表2 各层的最大特征根及其特征向量

Table 2 Largest eigenvalue and eigenvectors of Matrix

A-B	B <sub>1</sub> -C <sub>i</sub>	B <sub>2</sub> -C <sub>i</sub>	B <sub>3</sub> -C <sub>i</sub>	B <sub>4</sub> -C <sub>i</sub>
B <sub>i</sub>	C <sub>i</sub> (K)	C <sub>i</sub> (K)	C <sub>i</sub> (K)	C <sub>i</sub> (K)
0.487 2	0.666 7	0.593 6	0.833 3	0.482 9
0.183 3	0.333 3	0.249 3	0.166 7	0.272 0
0.116 4		0.157 1		0.157 0
0.213 1				0.088 1

$\lambda_{max} = 4.096 8$   $\lambda_{max} = 2.000 0$   $\lambda_{max} = 3.053 6$   $\lambda_{max} = 2.000 0$   $\lambda_{max} = 4.014 5$

A-B表示由目标层与准则层组成的特征矩阵的特征向量; B<sub>j</sub>-C<sub>i</sub>表示由准则层元素B<sub>j</sub>与相应指标层元素C<sub>i</sub>(K)组成的特征向量;  $\lambda_{max}$ 为特征值。

A-B is the feature matrix of the eigenvectors which are composited by target layer and rule layer; B<sub>j</sub>-C<sub>i</sub> is the feature matrix of the eigenvectors which are composited by rule layer's element B<sub>j</sub> and the index layer's elements C<sub>i</sub>(K).  $\lambda_{max}$  is eigenvalue.

表3 各层的随机一致性比值(CR)

Table 3 Random consistency ratio (CR) of the layers

A-B	B <sub>1</sub> -C <sub>i</sub>	B <sub>2</sub> -C <sub>i</sub>	B <sub>3</sub> -C <sub>i</sub>	B <sub>4</sub> -C <sub>i</sub>
B <sub>i</sub>	C <sub>i</sub> (K)	C <sub>i</sub> (K)	C <sub>i</sub> (K)	C <sub>i</sub> (K)
CI = 0.032 3	CI = 0	CI = 0.026 8	CI = 0	CI = 0.004 8
RI = 0.890 0	RI = 0	RI = 0.520 0	RI = 0	RI = 0.890 0
CR = 0.036 3	$n \leq 2$	CR = 0.051 5	$n \leq 2$	CR = 0.005 4

A-B表示由目标层与准则层组成的特征矩阵; B<sub>j</sub>-C<sub>i</sub>表示由准则层元素B<sub>j</sub>与相应指标层元素C<sub>i</sub>(K)组成的特征矩阵。RI为平均随机一致性指标; CI为一致性指标。

A-B is the eigenvectors which are composited by target layer and rule layer; B<sub>j</sub>-C<sub>i</sub> is the feature matrix of the eigenvectors which are composited by rule layer's element B<sub>j</sub> and the index layer's elements C<sub>i</sub>(K). RI is the average random consistency ratio; CR is the random consistency ratio.

表4 烤烟种植适宜性评价指标的总权重

Table 4 Total weight of tobacco planting suitability index

评价因子 Evaluation factor	权重 Weight B <sub>1</sub> 0.487 2	权重 Weight B <sub>2</sub> 0.183 3	权重 Weight B <sub>3</sub> 0.116 4	权重 Weight B <sub>4</sub> 0.213 1	评价指标总权重 Total weight of suitability index (C <sub>i</sub> *)
海拔 Altitude C <sub>1</sub>	0.666 7	0	0	0	0.324 8
坡度 Slope C <sub>2</sub>	0.333 3	0	0	0	0.162 4
气温 Air temperature C <sub>3</sub>	0	0.593 6	0	0	0.108 8
太阳辐射 Solar radiation C <sub>4</sub>	0	0.249 3	0	0	0.045 7
TVDI指数 TVDI index C <sub>5</sub>	0	0.157 1	0	0	0.028 8
土地利用 Land use C <sub>6</sub>	0	0	0.833 3	0	0.097 0
土壤类型 Soil type C <sub>7</sub>	0	0	0.166 7	0	0.019 4
砷污染 Arsenic pollution	0	0	0	0.482 9	0.102 9
镉污染 Cadmium pollution	0	0	0	0.272 0	0.058 0
汞污染 Mercury pollution	0	0	0	0.157 0	0.033 5
铜污染 Cu pollution	0	0	0	0.088 1	0.018 8
一致性指标 Consistency index (CI <sub>i</sub> )	0	0.026 8	0	0.004 8	CI <sub>total</sub> = 0.031 6
随机一致性指标 Random consistency index (RI <sub>i</sub> )	0	0.52	0	0.890 0	RI <sub>total</sub> = 1.410 0

别, 并将1、2、3和4分别赋给这4个等级。综合多位烤烟种植专家的意见, 利用专家打分法确定了每个评价指标烤烟种植适宜性的标度范围和分值, 及AHP权重分析结果, 获得烤烟种植适宜性的评价指标(表5)。

## 2 烤烟种植生态环境综合评价

考虑到MODIS遥感数据、STRM数据、土壤类型等数据的空间分辨率, 我们将所有的生态环境评价因子通过重采样为空间分辨率为30 m × 30 m的栅格数据评价单元。烤烟种植的适宜性由适宜性评价指数(suitability index, SI)来度量, 其计算方法如公式(3)所示。

$$SI = \sum_{i=1}^n p_{ij} \times W_i \quad (3)$$

式中,  $P_{ij}$ 为海拔、坡度、干旱指数TVDI、土壤类型、土地利用类型、气温、太阳辐射、As、Cd、Hg、Cu污染程度等评价因子的指标标度;  $W_i$ 为评价因子 $P_i$ 对应的权重;  $n$ 为评价因子的数量。基于上述分析, 在ENVI + IDL 4.7环境中编写程序进行烤烟种植生态环境适宜性综合分析。

## 3 烤烟种植生态环境综合评价结果分析

根据烤烟SI的直方图, 结合实验区2005至2010年各年烤烟种植空间分布的遥感调查与实地调查资

料, 将试验区烤烟种植适宜性等级分为4个等级: 最适宜(*SI*为3.5–4.0)、适宜(*SI*为2.8–3.5)、次适宜(*SI*为2.0–2.8)和不适宜(*SI*为0–2.0)。表6为实验区及各县烤烟种植适宜性等级统计表, 图3为试验区烤烟种植适宜性等级空间分布图。由图3和表6可知实验区中泸西县、弥勒县、石屏县和建水县适宜烤烟种植的耕地多, 生态烟草农业发展空间大, 可以作为今后现代生态烟草基地重点选择区域。2010年泸西县根据烤烟种植适宜性等级分布分析结果, 通过对烤烟种植区域整顿, 并在白水乡生态环境良好的区域建立烤烟种植示范基地, 经公司提供的报告可知烟叶品质和产量有了较明显的提高。

基于多源遥感监测实地调查, 我们获取了2006至2010年实验区烤烟种植的空间分布数据。结合烤烟种植生态环境综合分析获得的烤烟种植适宜性等级分布图, 获得实验区2006至2010年烤烟种植空间

分布统计结果(表7)。

#### 4 结论

2009年泸西县位于最适宜区的烟田面积为2 023.7 hm<sup>2</sup>, 占烟田面积的22.3%, 位于次最适宜区的烟田面积为3 548.6 hm<sup>2</sup>, 占种烟面积的39.1%。经过2010年烤烟种植区域整顿后, 泸西县位于最适宜区的烟田面积为3 301.8 hm<sup>2</sup>, 占种烟面积的27.7%, 位于次最适宜区的烟田面积为4 883.7 hm<sup>2</sup>, 占种烟面积的51.4%, 即泸西县2010年有86.1%烤烟种植于生态环境良好的区域。由此可见, 试验区烤烟种植正根据烤烟种植适宜性评价结果进行优化调整, 而根据试验区提供的烤烟收购的资料显示2010年试验区烤烟的质量和亩产也有较明显的提高。证明了基于空间信息的烤烟种植生态环境综合评价分析方法的有效性。

表5 烤烟种植适宜性的评价指标

Table 5 Tobacco planting suitability evaluation index

评价指标 Evaluation index	权重 Weight	指标标度 Index scale			
		最适宜 Most appropriate 4	适宜 Suitability 3	次适宜 Relative suitability 2	不适宜 Inappropriate 1
C1 海拔 Altitude (m)	0.324 8	1 400–1 800	1 200–1 400 1 800–2 000	800–1 200 2 000–2 200	<800 >2 200
C2 坡度 Slope (°)	0.162 4	<15	15–20	20–25	>25
C3 气温 Temperature (°C)	0.108 8	>19	18–19	17–18	<17
C4 日均太阳辐射 Daily mean solar radiation (kJ·m <sup>-2</sup> )	0.045 7	>20 000	18 000–20 000	15 000–18 000	<15 000
C5 干旱指数 Drought index	0.028 8	0.2–0.4	0.4–0.6	0.6–0.8	>0.8
C6 土地利用类型 Land use type	0.097 0	水田 Paddy field	旱地 Nonirrigated farmland	–	–
C7 土壤类型 Soil type	0.019 4	红壤、紫色土 Red soil, purple soil	水稻土、黄壤 Paddy soil, yellow soil	黄棕壤 Yellow-brown soil	石灰土 Limestone soil
C8 砷污染 Arsenic pollution (mg·kg <sup>-1</sup> )	0.102 9	<15.01	15.01–20.00	20.00–22.50	>22.50
C9 镉污染 Cadmium pollution (mg·kg <sup>-1</sup> )	0.058 0	<0.32	0.32–0.50	0.50–0.70	>0.70
C10 汞污染 Mercury pollution (ng·kg <sup>-1</sup> )	0.033 5	<111	111–148	148–227	>227
C11 铜污染 Cu pollution (μg·g <sup>-1</sup> )	0.018 8	<50	50–75	75–150	>150

表6 试验区各县烤烟种植适宜性等级统计

Table 6 Tobacco planting suitability level statistics of the counties in the experimental area

区域 Region	最适宜 Most appropriate		适宜 Suitability		次适宜 Relative suitability	
	面积 Area (hm <sup>2</sup> )	占耕地率 Arable land ratio (%)	面积 Area (hm <sup>2</sup> )	占耕地率 Arable land ratio (%)	面积 Area (hm <sup>2</sup> )	占耕地率 Arable land ratio (%)
泸西县 Luxi County	17 032.5	34.9	22 392.3	45.9	61 215	8.4
弥勒县 Mile County	26 671.7	24.2	27 864.5	25.3	96 525	5.8
石屏县 Shiping County	10 941.2	25.5	10 515.4	24.5	92 583	14.4
建水县 Jianshui County	27 042.1	34.2	19 870.6	25.2	52 483	4.4
个旧县 Gejiu County	2 936.2	15.2	9 079.0	47.0	48 452	16.7
蒙自县 Mengzi County	4 987.7	14.9	23 120.2	68.8	13 208	2.6
开远县 Kaiyuan County	15 909.3	18.4	15 627.8	18.0	100 554	7.7

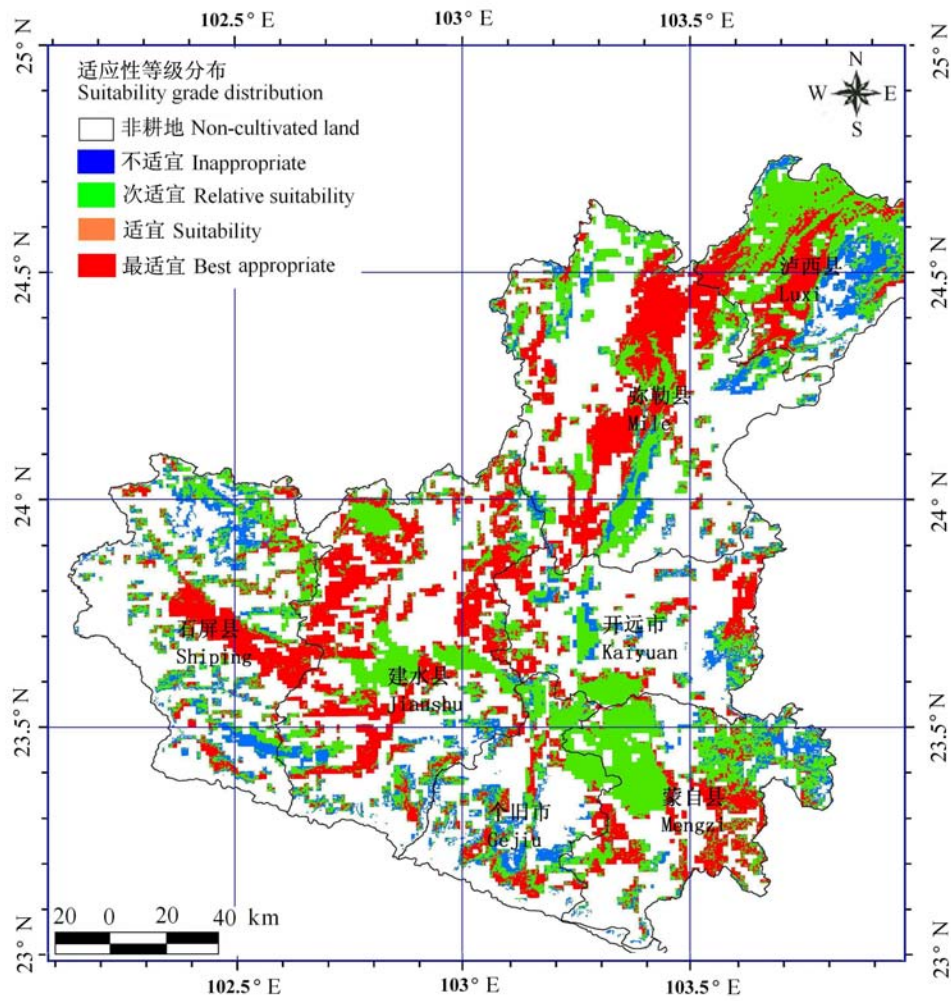


图3 试验区烤烟种植适宜性等级空间分布图。  
Fig. 3 Spatial distribution of tobacco planting suitability grade level in the experimental area.

表7 2010年烤烟种植空间分布适宜性统计表  
Table 7 Spatial distribution suitability of tobacco planting in 2010

区域 Region	最适宜 Most appropriate			适宜 Suitability			次适宜 Relative suitability		
	面积 Area (hm <sup>2</sup> )	A (%)	B (%)	面积 Area (hm <sup>2</sup> )	C (%)	D (%)	面积 Area (hm <sup>2</sup> )	E (%)	F (%)
泸西县 Luxi County	2 635.1	27.7	15.5	4 017.1	42.3	17.9	161.3	1.7	4.0
弥勒县 Mile County	2 963.3	28.4	11.1	1 947.1	18.7	7.0	258.2	2.5	4.0
石屏县 Shiping County	875.7	12.6	8.0	1 511.0	21.7	14.4	504.6	7.2	8.2
建水县 Jianshui County	1 918.2	27.8	7.1	631.3	9.1	3.2	173.2	2.5	5.0
个旧县 Gejiu County	338.8	28.7	11.5	175.5	14.8	1.9	44.1	3.7	1.4
蒙自县 Mengzi County	525.2	12.2	10.5	525.0	12.2	2.3	39.1	0.9	4.4
开远县 Kaiyuan County	658.6	25.7	4.1	322.7	12.6	2.1	94.0	3.7	1.4

A, 位于最适宜区的烟田面积占种烟面积的百分比; B, 位于最适宜区的烟田面积占最适宜区面积的百分比; C, 位于适宜区的烟田面积占种烟面积的百分比; D, 位于适宜区的烟田面积占适宜区面积的百分比; E, 位于次适宜的烟田面积占种烟面积的百分比; F, 位于次适宜的烟田面积占次适宜区面积的百分比。

A, the percentage of the tobacco area in the most suitable area of the tobacco area; B, the percentage of the tobacco area in the most suitable area of the most suitable area; C, the percentage of the tobacco area in the suitable area of the tobacco area; D, the percentage of the tobacco area in the suitable area of the suitable area; E, the percentage of the tobacco area in the relative suitability area of the tobacco area; F, the percentage of the tobacco area in the relative suitability area of the relative suitability area.

泸西县烤烟平均有70%分布在生态环境良好的区域,但目前烤烟种植面积仍仅占适宜发展生态烟草农业耕地面积的33.4%,具有很大的发展空间;弥勒县、石屏县、建水县、个旧县、蒙自县和开远县烤烟种植面积超过一半分布在生态环境适宜性较差的区域,而且这些县有超过75%的适合种植烤烟的土地资源没有得到充分利用,因此这些县烤烟种植的空间结构有待进一步优化。

**致谢** 国家科技支撑项目(2008BAK50B01)和中国博士后科学基金(20080430586)资助。感谢云南省实验区烤烟专家和烟草公司相关人员在实地采样考察工作中给予的帮助。

### 参考文献

- Dong XQ (董谢琼), Xu H (徐虹), Yang XP (杨晓鹏), Yang Y (杨勇), Zhou GC (周桂春) (2005). GIS-based study of a method of flue-cured tobacco planting suitability regionalization in Yunnan Province. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 26(1), 16–19. (in Chinese with English abstract)
- Fu P (2000). *A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Landscape Ecology*. PhD dissertation, Department of Geography, University of Kansas, Lawrence. 75–82.
- Gillies RR, Carlson TN, Gui J, Kustas WP, Humes KS (1997). A verification of the ‘triangle’ method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the normalized difference vegetation index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3145–3166.
- Guérif M, Duke CL (2000). Adjustment procedure of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81, 57–69.
- Jiang YM (蒋祥明), Cui WH (崔伟宏), Dong QL (董前林), Peng GX (彭光雄) (2010). Study on the 60-year’s temperature variation in China on multiple time scales. *Ecology and Environment* (生态环境学报), 19, 2017–2022. (in Chinese with English abstract)
- Lu KD (陆魁东), Huang WH (黄晚华), Xiao HQ (肖汉乾), Zhang C (张超), Xie BC (谢佰承) (2008). Application of climatic factors’ gridding technology in tobacco-planting regionalization in Hunan Province. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 27, 290–294. (in Chinese with English abstract)
- Lü XF (吕晓芳), Wang YL (王仰麟), Zhang YL (张懿翎), Shen YC (申元村) (2007). Research on agricultural functions regionalization and sustainable development strategy of ecologically vulnerable environment in the west of China—a case of Yanchi County in Ningxia Hui Autonomous region. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 22, 177–184. (in Chinese with English abstract)
- Qi SH (齐述华), Wang CY (王长耀), Niu Z (牛铮) (2003). Evaluating soil moisture status in China using the temperature/vegetation dryness index (TVDI). *Journal of Remote Sensing* (遥感学报), 7, 420–427. (in Chinese with English abstract)
- Saaty TL, Bennett JP (1997). A theory of analytical hierarchies applied to political candidacy. *Behavioral Science*, 22, 237–245.
- Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of soil moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79, 213–224.
- Shao Y (邵岩) (2006). *Research on Tobacco Rotation Planning in Yunnan Province* (云南省烤烟轮作规划研究). Science Press, Beijing. 2–6. (in Chinese)
- Wu MQ (吴孟泉), Cui WH (崔伟宏), Li JG (李景刚) (2007). Monitoring drought in mountainous area based on temperature/vegetation dryness index (TVDI). *Arid Land Geography* (干旱区地理), 30, 30–35. (in Chinese with English abstract)
- Xu ZC (许自成), Li YY (黎妍妍), Xiao HQ (肖汉乾), Wang L (王林) (2008). Evaluation of ecological factors and flue-cured tobacco quality in tobacco-growing areas in southern Hunan, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), 32, 226–234. (in Chinese with English abstract)
- Yang X (杨曦), Wu JJ (武建军), Yan F (闫峰), Zhang J (张洁) (2009). Assessment of regional soil moisture status based on characteristics of surface temperature/vegetation index space. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 29, 1205–1216. (in Chinese with English abstract)
- Zhai WX (翟文侠), Wang S (王舒), Huang XJ (黄贤金), Du WX (杜文星), Zhong TY (钟太洋) (2007). Applicability evaluation on the natural resources of organic agriculture—a case studies from Lishui County, Jiangsu Province. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 15, 169–172. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 朴世龙 责任编辑: 李敏