

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.031

# 基于云模型的耕地土壤养分模糊综合评价

杨建宇<sup>1,2</sup> 欧聪<sup>1</sup> 李琪<sup>3</sup> 张欣<sup>1</sup> 张超<sup>1,2</sup> 朱德海<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193;  
3. 中国土地勘测规划院, 北京 100035)

**摘要:** 土壤养分综合评价在很大程度上存在着模糊性和随机性, 为有效解决评价中定性概念与评价指标按隶属函数定量描述这一不确定转换问题, 基于云理论及模糊数学原理, 构建了基于云模型的耕地土壤养分模糊综合评价方法。以吉林省大安市为研究对象, 选取耕作层中有机质等 7 个土壤养分元素的含量作为评价指标, 利用熵权法确定各指标权重, 计算得到评价对象的土壤养分模糊云综合指数 (Cloud fuzzy comprehensive index, CFCI), 并对 CFCI 进行 COK 插值, 形成土壤养分 CFCI 等级分布图。结果表明: 从评价结果的数据特征来看, 研究区域 CFCI 范围在 2.43 ~ 4.89 之间, 平均值为 3.78, 标准差为 0.45, 变异系数为 11.85%, 属于中等变异程度; 从评价结果的空间分布格局来看, 大安市耕地土壤养分综合水平呈现由北向南逐渐下降的趋势, 且呈现耕地集中连片度越高的地方, 土壤养分综合水平越高的特点。

**关键词:** 耕地; 土壤养分; 云模型; 模糊评价; 不确定性

**中图分类号:** S158.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0251-07

## Fuzzy Synthetic Evaluation of Soil Nutrients in Cultivated Land Based on Cloud Model in Da'an City, Jilin Province

YANG Jianyu<sup>1,2</sup> OU Cong<sup>1</sup> LI Qi<sup>3</sup> ZHANG Xin<sup>1</sup> ZHANG Chao<sup>1,2</sup> ZHU Dehai<sup>1,2</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality Monitoring and Control, Ministry of Land and Resources, Beijing 100193, China

3. China Land Surveying and Planning Institute, Beijing 100035, China)

**Abstract:** There are randomness and fuzziness to a large extent in soil nutrient synthetic evaluation. In order to effectively solve the uncertain transformation problem between the qualitative concepts and evaluation indexes, which are described by membership function, based on the cloud theory and fuzzy mathematics theory, a fuzzy synthetic evaluation method was presented based on the cloud model. Taking Da'an City in Jilin Province as the research object, totally 7 soil nutrient elements contents were selected such as organic matter in the cultivated layer as evaluation, and the weight of each index was determined by using entropy method. The cloud model was applied to the comprehensive evaluation of soil nutrients, and the soil nutrient fuzzy comprehensive index of each evaluation unit was obtained (cloud fuzzy comprehensive index, CFCI). In addition, COK was used to get the interpolation of CFCI, and a distribution map of soil nutrients CFCI grade was formed. The results showed that the evaluation results from the data characteristics of the study area, CFCI was in the range of 2.43 ~ 4.89, the average value was 3.78, the standard deviation was 0.45, coefficient of variation was 11.85%, which was in moderate degree of variation; from the perspective of spatial distribution pattern of the evaluation results, the comprehensive level of soil nutrients in Da'an City was decreased gradually from north to south, and the higher concentration of cultivated land was, the higher the level of soil nutrient comprehensive was.

**Key words:** cultivated land; soil nutrients; cloud model; fuzzy evaluation; uncertainty

收稿日期: 2017-06-05 修回日期: 2017-06-27

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项 (201511010-06)

作者简介: 杨建宇 (1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事 GIS 与遥感在农业与土地应用中的研究, E-mail: ycjy@cau.edu.cn

通信作者: 朱德海 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事 3S 技术在农业和国土资源管理中应用研究, E-mail: zhudehai@cau.edu.cn

## 0 引言

耕地质量安全是国家粮食安全和农产品质量安全的重要保障,而耕地土壤质量作为耕地质量的基础,是耕地基础地力形成的重要来源<sup>[1]</sup>。随着经济发展和城市化进程的加速,农户土地利用行为已经成为一定区域内耕地质量变化的决定性指标,其对耕地的种植行为选择和经营投入行为直接影响耕地土壤质量<sup>[2]</sup>。土壤养分作为土壤特性的综合反映,也是揭示土壤条件动态最敏感的指标,能够体现人类活动对土壤质量的影响<sup>[3]</sup>。对耕地土壤养分做出合理的评价,有利于了解耕地土壤质量的状况,为保持、培肥以及合理利用耕地提供重要的依据。

关于土壤养分综合评价的方法,传统的评价方法如经验判断指数和法,由于在指标选取、权重获取及综合结果计算等方面存在较大的主观随意性,其推广性较差。近年来,不少学者引进主成分分析法<sup>[4]</sup>、模糊综合评价法<sup>[5-9]</sup>、灰色关联度法<sup>[10-11]</sup>、物元分析法<sup>[12-15]</sup>、人工神经网络法<sup>[16-17]</sup>、TOPSIS法<sup>[18]</sup>及地统计分析方法<sup>[19-20]</sup>对土壤养分进行评价,使土壤养分评价逐渐向客观、定量的方向发展。但由于土壤养分这一自然事物具有一定的模糊性,采用明确的划分界限进行研究则容易遗漏一些有用的信息,导致评价结果不准确。模糊综合评价方法基于模糊数学理论,虽然能体现土壤养分评价的模糊性,但是往往采用精确的隶属函数来刻画模糊事物的亦此亦彼性,无法同时兼顾评价对象的模糊性与随机性<sup>[21-22]</sup>,同样容易造成评价结果不准确。

评价标准概念的整体特性可以用云的数字特征来反映,这是定性概念的整体定量特性,对理解定性概念的内涵和外延有着极其重要的意义,云模型用期望( $E_x$ )、熵( $E_n$ )和超熵( $H_e$ )3个数字特征来整体表征定性概念<sup>[23]</sup>。其中:期望 $E_x$ 是定性语言概念论域的中心值,最能代表这个定性概念的值;熵 $E_n$ 是定性概念模糊度的度量,反映了在论域中可被这个概念所接受的数值范围,体现了定性概念亦此亦彼性的度量;超熵 $H_e$ 是熵 $E_n$ 的熵,反映了云滴的离散程度。根据评价标准的上下限,采用由期望( $E_x$ )、熵( $E_n$ )和超熵( $H_e$ )的值来表征的云模型,用以替代模糊综合评价方法中的隶属函数<sup>[24]</sup>,把模糊性和随机性完全集成到一起,构成定性和定量相互间的映射,为定性与定量相结合的信息处理提供有力的手段,反映定性概念的定量特性,可以解决耕地土壤养分评价中模糊性与随机性共存的问题。

因此,本研究拟将人工智能中的云理论引入土

壤养分综合评价中,借助云模型的数字特征,以期实现各评价指标向土壤养分等级的不确定性映射,从而有效地兼顾评价指标量化与等级划分的随机性和模糊性。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区域概况

大安市位于吉林省西北部,地理坐标在东经 $123^{\circ}08'45'' \sim 124^{\circ}21'56''$ ,北纬 $44^{\circ}57'00'' \sim 45^{\circ}45'51''$ 之间,总幅员面积 $4\ 879\text{ km}^2$ ,分布在我国的黄金玉米带上,人均耕地面积大,是国家主要商品粮基地县。因此,选取大安市作为研究区域开展研究。

该市属于中温带季风气候,四季分明,全年日照时数平均为 $3\ 012.8\text{ h}$ ,年平均气温 $4.3^{\circ}\text{C}$ ,年平均积温 $2\ 921.3^{\circ}\text{C}$ ,年平均降雨量 $413.7\text{ mm}$ 。年平均蒸发量 $1\ 696.3\text{ mm}$ ,无霜期 $150\text{ d}$ ,年均大风 $26.5\text{ d}$ 。该市地处松嫩平原腹地,海拔 $120 \sim 160\text{ m}$ ,地貌差异不大,其中平川地占总面积的 $26.5\%$ ,低平地占 $48.8\%$ ,台地占 $15\%$ ,沙丘占 $9.7\%$ 。

### 1.2 主要数据源及预处理

本文以大安市2012年土壤采样化验数据为基础,并辅以 $1:10\ 000$ 耕地质量等级成果数据、行政区划图以及大安市相关统计资料。数据的预处理主要包括:将221个土壤采样化验数据与耕地质量等级成果数据叠加,得到146个位于耕地图斑上的采样点数据;将行政区划图与耕地图斑上的采样点数据叠加形成采样点分布图(图1)。

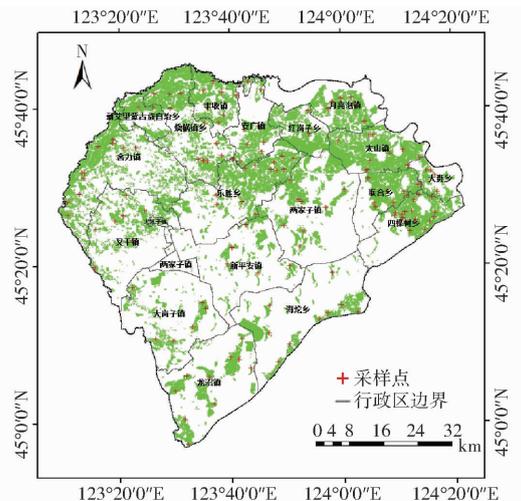


图1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of sampling sites

## 2 研究方法

### 2.1 评价指标及标准

针对大安市土壤理化性质,同时遵循选取评价指标的主导指标原则、稳定性原则和相对独立性原

则,选取 7 个耕作层土壤养分元素(有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾)的含量作为评

价指标。采用全国第二次土壤普查土壤养分分级标准作为评价标准(表 1)。

表 1 土壤养分含量分级标准

Tab.1 Standard of soil nutrient contents classification

参数	极缺乏(I)	很贫乏(II)	缺乏(III)	中等(IV)	丰富(V)	很丰富(VI)
有机质质量比 $F_1/(g \cdot kg^{-1})$	0 ~ 6	6 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	> 40
全氮质量比 $F_2/(g \cdot kg^{-1})$	0 ~ 0.5	0.5 ~ 0.75	0.75 ~ 1	1 ~ 1.5	1.5 ~ 2	> 2
全磷质量比 $F_3/(g \cdot kg^{-1})$	0 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	0.8 ~ 1	> 1
全钾质量比 $F_4/(g \cdot kg^{-1})$	0 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25	> 25
碱解氮质量比 $F_5/(mg \cdot kg^{-1})$	0 ~ 30	30 ~ 60	60 ~ 90	90 ~ 120	120 ~ 150	> 150
有效磷质量比 $F_6/(mg \cdot kg^{-1})$	0 ~ 3	3 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 40	> 40
速效钾质量比 $F_7/(mg \cdot kg^{-1})$	0 ~ 30	30 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 150	150 ~ 200	> 200

2.2 基于熵权法的评价指标权重确定

信息论中“熵”的概念反映了信息的无序程度,某项指标的信息量越大,其熵值越小(即系统的无序度越小),对结果的影响程度越大,熵权法正是依据这一理论被提出来的<sup>[25]</sup>。作为客观定权法,熵权法主要根据各指标所携带的信息量来确定权重,有效地克服了传统主观定权法由于人为指标带来的不确定性。所以本文采用熵权法确定土壤养分评价中各指标的权重。主要计算步骤如下:

(1)假定有  $m$  个评价单元,  $n$  个评价指标,构建归一化判断矩阵

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (1)$$

式中  $x_{ij}$ ——第  $i$  个评价单元第  $j$  个评价指标的采样值

(2)定义各评价指标的熵  $H_j$  为

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (2)$$

其中

$$f_{ij} = \frac{1 + x_{ij}}{\sum_{i=1}^m (1 + x_{ij})} \quad (3)$$

(3)计算第  $j$  个评价指标的熵权  $W_j$

$$W_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)} \quad (4)$$

根据上述计算步骤,得到大安市耕地土壤养分评价指标权重,如表 2 所示。

表 2 大安市耕地土壤养分评价指标权重

Tab.2 Weight of soil nutrient in cultivated land evaluation factors in Da'an City

指标	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$
权重	0.175	0.123	0.171	0.163	0.117	0.139	0.112

2.3 云模型

设  $Y$  是一个普通集合  $Y = \{y\}$ ,称为论域。 $C$  是论域  $Y$  上的定性概念。关于论域  $Y$  中的模糊集合  $C$

是指对任意元素  $y$  均存在一个有稳定倾向的随机数  $\mu_c(y)$ ,称为  $y$  对  $C$  的隶属度<sup>[26]</sup>。可以看出论域  $Y$  中某一个元素与它对概念  $C$  的隶属度之间的映射是一对多的转换,而不是传统的模糊隶属函数中的一对一的关系,即论域上某一点的隶属度不是恒定不变的,而是始终在细微变化着。

如果给定论域  $Y$  中的一个特定点  $y$ ,通过前件云发生器可以生成这个特定点属于概念  $C$  的确定度(即模糊隶属度)分布<sup>[27]</sup>。前件云发生器是从定性到定量的映射,它根据云的 3 个数字特征(即期望( $E_x$ )、熵( $E_n$ )和超熵( $H_e$ )值)产生云滴(图 2)。

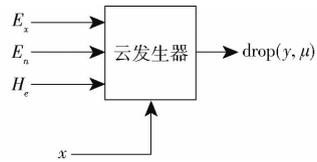


图 2 前件云发生器示意图

Fig.2 Diagram of antecedent cloud generator

其具体算法为:

(1)生成以  $E_n$  为期望值,  $H_e^2$  为方差的一个正态随机数  $E'_n$ 。

$$\exp\left(-\frac{(x_{ij,1} - x_{ij,2})^2}{8E_{nij}^2}\right) = 0.5 \quad (5)$$

其中  $E_{nij} = \frac{x_{ij,1} - x_{ij,2}}{2.355} \quad (6)$

式中  $x_{ij,1}$ ——指标  $f_i$  对应等级  $v_j$  的上边界值  
 $x_{ij,2}$ ——指标  $f_i$  对应等级  $v_j$  的下边界值

(2)利用特定输入值  $x$  和期望值  $E_x$  计算确定度  $\mu_c(x)$ 。

$$E_{xij} = (x_{ij,1} + x_{ij,2})/2 \quad (7)$$

$$\mu_c(x) = e^{-\frac{x - E_x}{2E_n^2}} \quad (8)$$

2.4 评价方法运行流程

根据云理论及传统模糊数学的原理,建立基于云模型的模糊综合评价方法,其具体运行流程为:

(1)建立指标集  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ ,评语集  $V =$

$\{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ , 形成评价等级标准。

(2) 将指标集  $F$  第  $i$  个指标  $f_i$  对应评语集  $V$  中第  $j$  个等级  $v_j$  这一定性概念用云模型的 3 个数字特征表示, 形成评价云标准。

(3) 计算云模型隶属度矩阵  $G$ 。将每个评价指标量化数据作为特定输入值, 利用前件云发生器, 确定出每个评价指标对应每个等级的云模型隶属度矩阵  $G = (g_{ij})_{n \times p}$ 。为提高评价的可信度, 需要重复运行正向云发生器  $N$  次, 计算在不同隶属度情况下的平均综合评估值

$$G_{ij} = \left( \sum_{l=1}^N g_{ij}^l \right) / N \quad (9)$$

式中  $G_{ij}$ ——指标  $f_i$  对应等级  $v_j$  的平均隶属度  
 $g_{ij}$ ——指标  $f_i$  对应等级  $v_j$  在正向云发生器计算一次的隶属度  
 $l$ ——正向云发生器运行的次数

(4) 采用熵权法获取指标权重  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 。

(5) 将权重集  $W$  与模糊隶属度矩阵  $G$  进行模糊转换, 得到评价集上的模糊子集  $B$

$$B = WG = (b_1, b_2, \dots, b_p) \quad (10)$$

式中  $b_j$ ——待评价对象对第  $j$  条评价等级隶属度,  $j = 1, 2, \dots, p$

(6) 判断最大隶属度原则的有效度

通常模糊评价采用最大隶属度原则, 即选取  $b_1, b_2, \dots, b_p$  中的最大值作为该评价对象对该评价等级的隶属度。但最大隶属度原则也有其适用范围, 当超过一定阈值则会掩盖事物本身界限的模糊性, 对模糊隶属度矩阵进行最大隶属度原则有效性检验, 能够有效避免损失过多信息<sup>[28-29]</sup>, 有效度范围如表 3 所示, 具体判断法则为

$$\alpha = \frac{p \left( \frac{\max b_j}{\sum_{j=1}^p b_j} \right) - 1}{\frac{2 \sec b_j}{\sum_{j=1}^p b_j} (p - 1)} \quad (11)$$

式中  $\alpha$ ——模糊子集  $B$  最大隶属度原则的有效度

表 3 有效度范围

Tab. 3 Range of availability

有效度	完全有效	非常有效	比较有效	最低效	无效
$\alpha$	$+\infty$	$1 \sim \infty$	$0.5 \sim 1.0$	$0 \sim 0.5$	0

当满足条件则采用最大隶属度原则确定其隶属度, 若不满足条件, 可以采用加权平均原则确定其隶属度, 具体算法为

$$b_i = \sum_{j=1}^p b_j^k A_j / \sum_{j=1}^p b_j^k \quad (12)$$

式中  $b_i$ ——第  $i$  个指标  $f_i$  对于评价集  $V$  最终的隶属度

$A$ ——等级标准向量,  $A^T = (1, 2, \dots, p)$

$k$ ——待定系数, 取 1

方法流程图如图 3 所示。

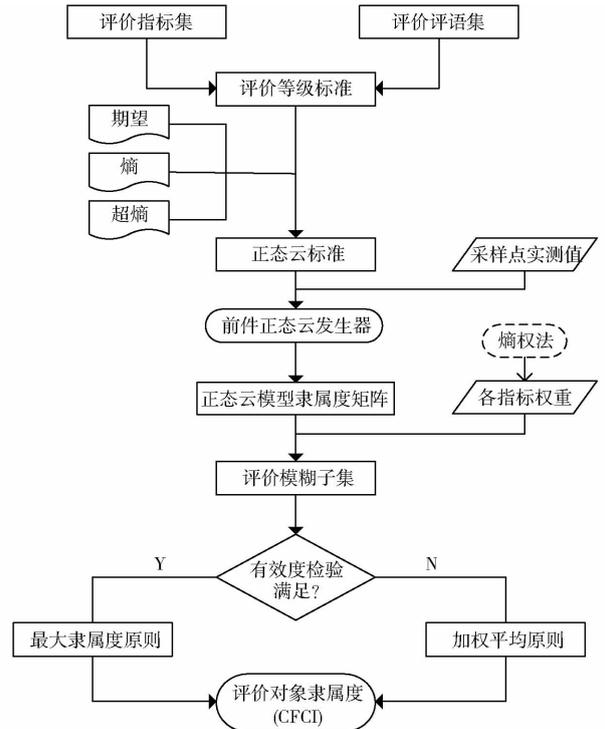


图 3 基于云模型的模糊综合评价方法流程图

Fig. 3 Flow chart of fuzzy synthetic evaluation based on cloud model

### 3 结果与分析

#### 3.1 大安市耕地土壤养分评价结果

根据所建立大安市耕地土壤养分评价体系、评价标准, 利用云模型的数字特征将各个指标所对应的等级用相应的云模型表示 (表 4, 表中数据采用  $(E_x, E_n, H_e)$  表示)。利用前件云发生器, 在 Matlab 9.0 软件中重复计算 100 次, 得到评价集上的模糊子集。经检验, 结果不符合最大隶属度原则, 故采用加权平均原则, 以  $A^T = (1, 2, \dots, 6)$  为等级标准向量, 最终得到评价样点的土壤养分模糊云综合指数 (CFCI)。

经统计, CFCI 的范围在 2.43 ~ 4.89, 平均值为 3.78, 标准差为 0.45, 变异系数为 11.85%, 属于中等变异水平。

#### 3.2 结果分析

##### 3.2.1 土壤养分指标一般性统计描述

对 146 个采样点的土壤养分各指标测定值进行

表 4 土壤养分评价指标云标准

Tab. 4 Cloud standards for soil nutrient evaluation

指标	极缺乏 ( I )	很贫乏 ( II )	缺乏 ( III )	中等 ( IV )	丰富 ( V )	很丰富 ( VI )
$F_1$	(3, 2.55, 0.1)	(8, 1.70, 0.1)	(15, 4.25, 0.1)	(25, 4.25, 0.1)	(35, 4.25, 0.1)	(45, 4.25, 0.1)
$F_2$	(0.25, 0.21, 0.02)	(0.625, 0.11, 0.02)	(0.88, 0.11, 0.02)	(1.25, 0.21, 0.02)	(1.75, 0.21, 0.02)	(2.25, 0.21, 0.02)
$F_3$	(0.1, 0.08, 0.01)	(0.3, 0.08, 0.01)	(0.5, 0.08, 0.01)	(0.7, 0.08, 0.01)	(0.9, 0.08, 0.01)	(1.25, 0.21, 0.01)
$F_4$	(2.5, 2.12, 0.1)	(7.5, 2.12, 0.1)	(12.5, 2.12, 0.1)	(17.5, 2.12, 0.1)	(22.5, 2.12, 0.1)	(35, 8.49, 0.1)
$F_5$	(15, 12.74, 0.2)	(45, 12.74, 0.2)	(75, 12.74, 0.2)	(105, 12.74, 0.2)	(135, 12.74, 0.2)	(175, 21.23, 0.2)
$F_6$	(1.5, 1.27, 0.15)	(4.0, 0.85, 0.15)	(7.5, 2.12, 0.15)	(15.0, 4.25, 0.15)	(30.0, 8.49, 0.15)	(50.0, 8.49, 0.15)
$F_7$	(15, 12.72, 0.25)	(40, 8.49, 0.25)	(75, 21.23, 0.25)	(125, 21.23, 0.25)	(175, 21.23, 0.25)	(250, 42.46, 0.25)

一般性统计描述(表 5),结果表明:研究区域内 7 项土壤养分指标的变异系数均在 10% ~ 60%, 总体呈现中等变异。7 项指标的变异系数由大到小顺序为全钾、全磷、有机质、有效磷、全氮、速效钾、碱解氮的含量,可以看出分布差异最明显的指标为全钾,其变

异系数为 51.79%;依据全国第二次土壤普查养分分级标准,整个区域除有机质的平均含量属于三级以外,其他养分指标均属于四级,表明该区域有机质含量总体水平偏低,需要调整耕地土壤的培肥结构。

表 5 土壤养分指标一般性统计描述

Tab. 5 Statistical results of soil nutrient contents

指标	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$
变化范围	5.25 ~ 24.92	0.77 ~ 1.98	0.12 ~ 1.33	3.33 ~ 36.24	60.00 ~ 137.83	6.21 ~ 16.94	79.23 ~ 199.60
平均值	14.05	1.38	0.73	17.92	95.54	11.25	135.56
标准差	5.75	0.31	0.36	9.28	18.58	2.85	28.57
变异系数/%	40.93	22.46	49.32	51.79	19.45	25.33	21.08

### 3.2.2 土壤养分 CFCI 空间分布特征

利用 COK 法对土壤养分模糊云综合指数(CFCI)进行插值分析,从而对研究区域土壤养分综合评价结果的空间分布特征进行分析。其主要过程如下:

#### (1) 数据探索

COK 法被广泛应用于分析土壤养分综合评价指数的空间相关结构和格局<sup>[30-31]</sup>,在进行 COK 插值分析之前,首先要对实验数据进行正态分布检验,本文采用  $k-s$  检验对 CFCI 进行正态分布检验<sup>[32]</sup>。结果表明: $k-s$  检验结果双尾显著性为 0.2,大于 0.05,符合正态分布;此外,其偏度系数为 -0.027 0,峰度系数为 3.000 2,与标准正态分布(偏度系数为 0,峰度系数为 3)接近,所以原始结果基本符合正态分布,无需进行变换。

影响 COK 插值的另外一个指标就是协同变量与主变量之间的相关性大小,相关性越高,其插值精度越好。利用 SPSS 23.0 的双变量相关性分析对 CFCI 值与土壤养分各指标值进行相关性分析,得到其 Pearson 相关系数(表 6)。由表 6 可知,全氮与 CFCI 的相关性最显著,故选取全氮为协同变量进行插值。

#### (2) 模型比较及选择

选取平均误差(ME)、均方根误差(RMSE)、标准平均值(MESD)、标准均方根误差(RMSSD)、平均

表 6 CFCI 与各指标 Pearson 相关系数

Tab. 6 Correlation between CFCI and each index

指标	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$
CFCI	0.357	0.575	0.541	0.568	0.248	0.359	0.212
显著性级别	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05

标准误差(ASE)和 DABS(RMSE 与 ASE 的相差绝对值)这 6 项误差参数作为模型精度判断依据。从交叉验证的结果来看(表 7):指数模型的 ME、RMSE、MESD、DABS 相较于其他模型更接近于零,同时指数模型的 RMSSD 相较于其他模型更接近于 1。上述结果表明指数模型的变异函数拟合效果最佳,因此选择指数模型作为此次 COK 插值变异函数模型。

表 7 变异函数模型的交叉验证精度比较

Tab. 7 Comparison of cross validation accuracy among variogram models

模型	ME	RMSE	MESD	RMSSD	ASE	DABS
球面	0.005 6	0.386 3	0.013 5	1.075 1	0.359 3	0.027
指数	0.002 2	0.38	0.004 5	1.048 4	0.362 8	0.017 2
高斯	0.004	0.4	0.008	1.122	0.357 2	0.042 8

#### (3) 空间插值结果

根据自然断点法并参考全国第二次土壤普查标准将 CFCI 插值结果分为 6 级,分别为 I:极缺乏(2.98 ~ 3.41)、II:很缺乏(3.41 ~ 3.60)、III:缺乏(3.60 ~ 3.76)、IV:中等(3.76 ~ 3.93)、V:丰富

(3.93 ~ 4.14)、VI:很丰富(4.14 ~ 4.60)。并统计各等级面积占研究区比例及累计面积比例(表8),由表8可以看出,大安市耕地土壤养分综合水平总体处于中等偏下的水平,其中隶属于II、III和IV等级的耕地数量最多,占研究区域总面积的71.85%。

表8 土壤养分模糊云指数分级

Tab.8 Grading of CFCI

等级	分级区间	面积占研究区	面积累计
		比例/%	比例/%
I	2.98 ~ 3.41	3.94	3.94
II	3.41 ~ 3.60	21.18	25.12
III	3.60 ~ 3.76	26.92	52.04
IV	3.76 ~ 3.93	23.75	75.79
V	3.93 ~ 4.14	16.15	91.94
VI	4.14 ~ 4.60	8.06	100

从耕地土壤养分模糊云综合指数的空间分布特征来看(图4),大安市耕地土壤养分综合水平呈现由北向南逐渐下降的趋势,且呈现出耕地连片度越高的地方,土壤养分综合水平越高的特点。从区域分布来看,大安市耕地土壤养分综合水平处于中等以上的耕地集中分布西北区域(新艾里蒙古族自治乡、烧锅镇乡、丰收镇)、中部区域(安广镇、乐胜乡)和东北区域(月亮泡镇、太山镇、联合乡、四棵树乡和大赉乡);处于中等以下的耕地主要分布在大安市中南部区域(新平安镇、大岗子镇、海坨乡和龙沼镇一部分)、西北少部分区域(舍力镇、叉干镇、烧锅镇乡一部分和丰收镇一部分)和东北少部分区域(红岗子乡)。

## 4 结论

(1)研究区域内土壤养分各指标空间分布不均

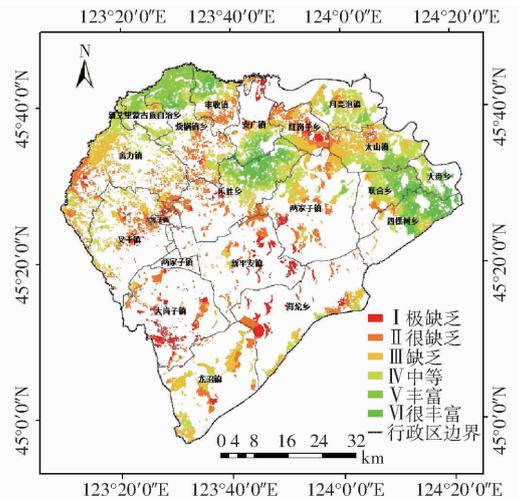


图4 大安市耕地土壤养分模糊云综合指数空间分布  
Fig.4 Distribution of CFCI of soil nutrients in cultivated land in Da'an City

匀,总体呈现中等变异,其中全钾的分布差异性最大,全磷次之;依据全国第二次土壤普查养分分级标准,除有机质含量属于III级之外,其他指标均属于IV级。因此,需要合理调整区域内耕地土壤培肥比例。

(2)基于云模型计算大安市耕地土壤模糊云指数 CFCI,统计分析得到:CFCI 的范围在 2.43 ~ 4.89,平均值为 3.78,标准差为 0.45,变异系数为 11.85%,属于中等变异水平。

(3)大安市耕地土壤模糊云指数 CFCI 空间分布特征分析显示,研究区域内土壤养分综合水平呈现由北向南逐渐降低的趋势,且集中连片的耕地土壤养分综合水平普遍高于破碎零散的耕地;此外,大安市耕地土壤养分综合水平总体处于中等偏下的水平,其中隶属于II、III和IV这3个等级的耕地数量最多,占到了研究区域总面积的71.85%。

## 参考文献

- 沈仁芳,陈美军,孔祥斌,等. 耕地质量的概念和评价与管理对策[J]. 土壤学报,2012,49(6):1210-1217. SHENG Renfang, CHEN Meijun, KONG Xiangbin, et al. Conception and evaluation of quality of arable land and strategies for its management[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1210-1217. (in Chinese)
- 吴玉红,田霄鸿,侯永辉,等. 基于田块尺度的土壤肥力模糊评价研究[J]. 自然资源学报,2009,24(8):1422-1431. WU Yuhong, TIAN Xiaohong, HOU Yonghui, et al. Preliminary study on the subject concerning fuzzy assessment method of soil fertility based on field scale[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(8): 1422-1431. (in Chinese)
- 杨国栋,王肖娟. 基于人工神经网络的土壤养分肥力等级评价方法[J]. 土壤通报,2005,36(1):30-33. YANG Guodong, WANG Xiaojuan. Soil fertility evaluation based on BP artificial neural network[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(1): 30-33. (in Chinese)
- 黄安,杨联安,杜挺,等. 基于主成分分析的土壤养分综合评价[J]. 干旱区研究,2014,31(5):819-825.
- 武伟,唐明华,刘洪斌. 土壤养分的模糊综合评价[J]. 西南农业大学学报,2000,22(3):270-272. WU Wei, TANG Minghua, LIU Hongbin. Fuzzy synthetic evaluation of soil nutrients[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2000, 22(3): 270-272. (in Chinese)
- 汤洁,赵凤琴,林年丰,等. 多种模型集成的方法在土壤养分评价中的应用[J]. 东北师大学报:自然科学版,2005,37(1):109-112. TANG Jie, ZHAO Fengqin, LIN Nianfeng, et al. Application of integrated models in evaluating soil nutrients[J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 2005, 37(1): 109-112. (in Chinese)
- 姚荣江,杨劲松,陈小兵,等. 苏北海涂围垦区耕层土壤养分分级及其模糊综合评价[J]. 中国土壤与肥料,2009,42(6):2019-2027.
- 王勇,常江. 安徽省水旱轮作区土壤养分综合评价方法研究[J]. 中国农学通报,2011,27(12):124-129. WANG Yong, CHANG Jiang. Research on soil nutrient comprehensive evaluation method of rice field-upland field rotation of Anhui

- Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(12): 124 - 129. (in Chinese)
- 9 曾翔亮,董希斌,宋启亮,等. 阔叶混交低质林诱导改造后土壤养分的模糊综合评价[J]. 东北林业大学学报, 2013(9): 50 - 53, 93.
- ZENG Xiangliang, DONG Xibin, SONG Qiliang, et al. Fuzzy evaluation of soil nutrients in broad-leaved mixed low-quality forest after induced transformation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013(9): 50 - 53, 93. (in Chinese)
- 10 韩春建,梁朝信,吴克宁,等. 基于 GIS 技术的灰色关联度法土壤肥力综合评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 1): 53 - 56.
- HAN Chunjian, LIANG Chaixin, WU Kening, et al. Comprehensive evaluation of soil fertility based on GIS technology and grey correlative degree method[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(Supp. 1): 53 - 56. (in Chinese)
- 11 魏志远,孙娟,李松刚,等. 海南中西部荔枝园土壤肥力的灰色关联度评价[J]. 热带作物学报, 2013, 34(10): 1883 - 1887.
- WEI Zhiyuan, SUN Juan, LI Songgang, et al. Application of grey system theory in evaluating soil fertility of central and western Hainan lychee orchard[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(10): 1883 - 1887. (in Chinese)
- 12 王晨野,汤洁,林年丰,等. 物元模型在区域土壤养分评价中的应用[J]. 土壤通报, 2009, 40(10): 1069 - 1075.
- WANG Chenye, TANG Jie, LIN Nianfeng, et al. Matter-element model in the regional soil nutrient evaluation application[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(10): 1069 - 1075. (in Chinese)
- 13 赵串串,安若兰,赵巧玉,等. 物元模型在玉树地区林地土壤养分评价中的应用[J]. 土壤, 2014, 46(6): 984 - 988.
- ZHAO Chuanchuan, AN Ruolan, ZHAO Qiaoyu, et al. Application of matter-element model in evaluation of forest soil nutrients in Yushu area[J]. Soils, 2014, 46(6): 984 - 988. (in Chinese)
- 14 靳宇蓉,鲁克新,李鹏,等. 甘肃省黄土区小流域土壤养分评价[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 121 - 126.
- JIN Yurong, LU Kexin, LI Peng, et al. Evaluation of soil nutrients in small watershed in loess area of Gansu Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(1): 121 - 126. (in Chinese)
- 15 刘蕾,姜玲彦,李庆照,等. 基于物元法的土壤重金属污染程度评价——以郑州黄河滩地为例[J]. 土壤, 2013, 45(3): 517 - 521.
- LIU Lei, JIANG Lingyan, LI Qingzhao, et al. Evaluation of soil heavy pollution based on matter-element method—a case study of yellow river beach in northern suburb of Zhengzhou[J]. Soils, 2013, 45(3): 517 - 521. (in Chinese)
- 16 韩磊,李锐,朱会利. 基于 BP 神经网络的土壤养分综合评价模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 109 - 115.
- HAN Lei, LI Rui, ZHU Huili. Comprehensive evaluation model of soil nutrient based on BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 109 - 115. (in Chinese)
- 17 万家山,吴云志,张友华,等. 基于 LM - BP 神经网络的耕地土壤养分等级划分模型——以皖南山区为例[J]. 中国农学通报, 2015, 31(26): 255 - 260.
- WAN Jiashan, WU Yunzhi, ZHANG Youhua, et al. Model of grading farmland soil nutrient based on LM - BP neural network: a case of south Anhui mountainous areas[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(26): 255 - 260. (in Chinese)
- 18 叶达,吴克宁,刘霏珈. 基于正态云模型与熵权法的景泰县耕地后备资源开发潜力评价[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(6): 22 - 28.
- YE Da, WU Kening, LIU Peijia. Developmental potentiality evaluation of cultivated land reserve in Jingtai based on normal cloud and entropy weight[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(6): 22 - 28. (in Chinese)
- 19 KUMAR S, SINGH R P. Spatial distribution of soil nutrients in a watershed of Himalayan landscape using terrain attributes and geostatistical methods[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(6): 1 - 11.
- 20 刘芬,王小英,赵业婷,等. 渭北旱塬土壤养分时空变异与养分平衡研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 110 - 119. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150217&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150217&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.017.
- LIU Fen, WANG Xiaoying, ZHAO Yeting, et al. Spatial and temporal variation of soil nutrient and nutrient balance status in Weiwei rainfed highland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 110 - 119. (in Chinese)
- 21 周启刚,张晓媛,王兆林. 基于正态云模型的三峡库区土地利用生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 289 - 297.
- ZHOU Qigang, ZHANG Xiaoyuan, WANG Zhaolin. Land use ecological risk evaluation in Three Gorges reservoir area based on normal cloud model[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 289 - 297. (in Chinese)
- 22 张杨,严金明,江平,等. 基于正态云模型的湖北省土地资源生态安全评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 252 - 258.
- ZHANG Yang, YAN Jinming, JIANG Ping, et al. Normal cloud model based evaluation of land resources ecological security in Hubei Province[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22): 252 - 258. (in Chinese)
- 23 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28 - 34.
- 24 沈进昌,杜树新,罗祎,等. 基于云模型的模糊综合评价方法及应用[J]. 模糊系统与数学, 2012, 26(6): 115 - 123.
- 25 龚艳冰. 基于正态云模型和熵权的河西走廊城市化生态风险综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(5): 169 - 174.
- GONG Yanbing. Comprehensive assessment on ecological risk of Hexi corridor urbanization based on normal cloud model and entropy weight[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(5): 169 - 174. (in Chinese)
- 26 李德毅,杜鹁. 不确定性人工智能[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- 27 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15 - 20.
- 28 邱东. 最大隶属原则的有效度与加权平均原则的应用——模糊统计评判中评判原则的比较分析[J]. 统计研究, 1989, 6(2): 50 - 54.
- 29 朱小飞,王永君,李大军. 模糊评价中最大隶属度原则有效性检验[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(5): 135 - 137.
- ZHU Xiaofei, WANG Yongjun, LI Dajun. The effectiveness test of the maximum membership principle in fuzzy comprehensive evaluation[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 39(5): 135 - 137. (in Chinese)
- 30 张彬,杨联安,冯武焕,等. 基于改进 TOPSIS 和 COK 的土壤养分综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 180 - 185.
- ZHANG Bin, YANG Lianan, FENG Wuhuan, et al. Comprehensive evaluation of soil nutrients based on improved TOPSIS and COK[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(7): 180 - 185. (in Chinese)
- 31 郭龙,张海涛,陈家赢,等. 基于协同克里格插值和地理加权回归模型的土壤属性空间预测比较[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 1037 - 1042.
- GUO Long, ZHANG Haitao, CHEN Jiaying, et al. Comparison between co-Kriging model and geographically weighted regression model in spatial prediction of soil attributes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(5): 1037 - 1042. (in Chinese)
- 32 张文彤,邝春伟. SPSS 统计分析基础教程[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 2011.