

基于模糊综合评判法的温室黄瓜种植 最优化施肥模式评判

俞丹萍¹, 覃 亚², 潘洪明³, 单立楠¹, 徐 捷¹, 李竺霖¹, 何云峰^{1*}

(1.浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2.杭州博盛环保科技有限公司, 杭州 310014; 3.浙江省乐清市环境保护局柳市分局, 浙江 温州 325600)

摘 要:为定量地综合评价不同施肥模式下温室黄瓜种植的效益,建立了包括社会、经济和生态环境3个方面共9项指标的多因素二级评价指标体系。本研究采用模糊评判的方法,定量评判6种施肥模式(不施肥、常规化肥、等养分专用肥、等养分有机肥、等养分专用肥减量20%、等养分专用肥减量40%)下温室黄瓜种植的社会效益、经济效益以及生态环境效益,以期受试地区温室黄瓜种植找到最优化的施肥模式。结果表明:仅考虑社会效益时,不施肥模式的社会效益最好,常规化肥施肥模式的社会效益最差;仅考虑经济效益时,不施肥模式的经济效益最差,而等养分专用肥减量20%模式和等养分专用肥模式的经济效益都较好;仅考虑生态环境效益时,不施肥模式和等养分专用肥减量40%模式的生态环境效益均较好,而常规化肥模式不具有好的生态环境效益;而考虑综合效益时,等养分专用肥减量20%模式的综合效益最好,6种施肥模式中综合效益最差的是常规施肥模式。因此,应在受试地区大力推广等养分专用肥减量20%施肥模式,减少常规化肥的施用,以期获得较好的社会效益、经济效益与生态环境效益。

关键词:模糊综合评判法;温室黄瓜;施肥模式;效益评判

中图分类号:S147.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)11-2200-07

Optimal Fertilization Mode of Greenhouse Cucumber Planting based on Fuzzy Comprehensive Evaluation

YU Dan-ping¹, QIN Ya², PAN Hong-ming³, SHAN Li-nan¹, XU Jie¹, LI Zhu-lin¹, HE Yun-feng^{1*}

(1.College of Environmental & Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2.Hangzhou Bosheng Environmental Protection Technology Co., LTD, Hangzhou 310014, China; 3.Environmental Protection Bureau of Yueqing, Wenzhou, Zhejiang Province, Wenzhou 325600, China)

Abstract: Based on the problems caused by the irrational fertilization, the effects of 6 modes of fertilizer application (none fertilization, chemical fertilizers, special fertilizers, organic manure, special fertilizers minus 20%, special fertilizers minus 40%) on the greenhouse cucumber were studied. The fuzzy comprehensive evaluation method was used to get the best social, economic and ecological benefits. The results obtained were as follows: none fertilization mode got the best social benefits, special fertilizers mode and special fertilizers minus 20% mode got better economic benefit than others, while none fertilization mode and special fertilizers minus 40% mode got better ecological benefit than other modes. In addition, the fuzzy comprehensive evaluation showed that the best mode of the fertilization was special fertilizers minus 20% mode, and the worst mode was chemical fertilizers. Therefore, the promotions should be made to practice the special fertilizers minus 20% mode of fertilization in the region in order to obtain better social, economic and environmental benefits to local farmers.

Keywords: fuzzy comprehensive evaluation; greenhouse cucumber; fertilizer modes; benefit judgment

近几年我国的蔬菜消费水平不断提高,无论是数量还是质量上的需求都持续增长。蔬菜产业也迅速发展,2004年太湖流域蔬菜播种面积占作物总播种面

积的比例达到26%,相比于1980年增长幅度达10倍以上^[1],且近几年内我国各主要流域蔬菜种植面积仍将大幅提高^[2]。随着蔬菜种植面积的逐渐扩大,加上蔬菜地复种指数高,年肥料施入量大^[3],以及频繁浇灌等原因,不仅使大量的氮磷进入水体,造成水体富营养化,氮磷渗透也成为地下水污染的重要源,而且使蔬菜体内硝酸盐大量积累,导致蔬菜品质下降,从而对

收稿日期:2012-04-18

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-006)

作者简介:俞丹萍(1986—),女,浙江安吉人,硕士研究生,从事农业面源污染控制方面的研究。E-mail: xiaoyudanping@126.com

* 通信作者:何云峰 E-mail: yfhe@zju.edu.cn

人畜健康造成了潜在的威胁。过量施肥还会使土壤理化性质遭到破坏,严重影响作物的产量。

因此,研究找到能使蔬菜丰产、品质优且环境友好的施肥模式,是既从源头上控制菜地农业面源污染,又能保障蔬菜食品安全的重要举措。本研究运用二级模糊综合评判法来评判温室黄瓜种植中具有较好的社会、经济、生态环境效益的施肥模式,以期来指导受试地区合理施肥。

1 材料和方法

1.1 材料与实验设计

试验于2010年8月在浙江省杭州市余杭区宇航梦园农业科技有限公司老虎墩蔬菜基地进行,选择典型地块日光温室大棚为试验对象,试验所用日光温室占地面积约为560 m²(70 m×8 m),内设人行过道,喷灌装置,温湿度采集器。本试验灌溉均采用喷灌,共设6种不同施肥模式,每种施肥模式设3次重复,共设18个试验小区,每个试验小区按照3.5 m×6 m(21 m²)设置,每组重复内各处理随机排列,所有小区均位于一个日光大棚内。每个小区安置一根长2 m的PVC管,用于采集渗漏水,PVC管一端埋入地下1.8 m,上部开口,管道下部有小孔并用纱布包住,防止泥沙堵住小孔,PVC管上部用塑料薄膜盖实,仅取样时打开,以防止喷灌水和田间小动物进入管道影响试验结果。本试验所施用的肥料以等氮施用量为基础,兼顾磷钾养分平衡,设不施肥(CK,对照)、常规化肥(CF,根据试验地常年同种类蔬菜施肥量确定)、等养分专用肥(SF,由浙江省农科院与浙江大学联合研制瓜果菜类专用肥,根据等N施用量计算等养分施用)、等养分有机肥(OF,根据等N施用量计算等养分施用)、等养分专用肥减量20%(SF1)、等养分专用肥减量40%(SF2)6种不同施肥模式,3次重复。所用肥料品种为尿素(纯氮含量46.3%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)、硫酸钾(含K₂O 50%)、新型瓜果类专用肥(有机无机复混肥,N 13%、P₂O₅ 3%、K₂O 9%)和精制有机肥(N 1.53%、P₂O₅ 2.07%、K₂O 1.09%)。供试蔬菜为黄瓜,品种为“津优2号”,黄瓜种植株距30 cm,行距75 cm。2010年8月30日播种育苗,9月13日定植并施基肥,10月3日第一次追肥,10月30日第二次追肥,11月7日第三次追肥,11月30日采收,全生育期93 d。

1.2 样品采集与处理

渗漏水样品采集:由于本试验灌溉采用喷灌,无地表径流水产生,故试验周期只采集渗漏水。整个黄

瓜生长周期共施肥4次,每次施肥后5 d采集渗漏水水样,利用便携式水泵将PVC管道中的水全部抽出,置于500 mL干净的塑料纯净水瓶中,滴入一滴饱和氯化汞,立即运回实验室待分析。

黄瓜品质样品采集:共采集3次,分别在结果初期(11月1日)、结果中期(11月10日)和结果末期(11月28日),各小区每次取3条生长正常的商品成熟瓜送回实验室用于分析黄瓜中硝酸盐、可溶性糖和维生素C含量。

本实验一共设18个试验小区,黄瓜从10月29日开始采集,整个采集周期历时33 d,至11月30日结束,每隔1 d采集1次黄瓜,每次采集都记录下每个小区黄瓜的产量。

1.3 样品分析

渗漏水水样分析:水样处理和测定方法参考《水和废水监测分析方法》。水样分析前混匀,并分成3份,总氮测定采用GB 11894—1989的碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,总磷测定采用GB 11893—1989的钼酸铵分光光度法。水样过0.45 μm滤膜后测定氨态氮、硝态氮、亚硝态氮,其中氨氮的测定采用GB 7479—1987的纳氏试剂比色法,硝态氮直接测定双波长吸光度,亚硝态氮测定采用(1+9)盐酸比色法。

黄瓜品质分析:切取黄瓜的上、中、下部分各一小段混匀,然后分别称取等量3份做重复,可溶性糖含量测定用干样,其他均用鲜样。维生素C(Vc)采用2,6-二氯酚法,可溶性糖含量采用蒽酮比色法,硝酸盐含量采用紫外分光光度法测定。

1.4 效益评判

1.4.1 评判方法确立

自上世纪60年代美国加州大学控制论专家Zadeh L A提出模糊集合的概念以来,以模糊数学为基础的模糊综合评判得到了长足的发展。模糊综合评判是在综合考虑评判对象各类指标,兼顾评判对象各种特征、各方面因素的基础上,将各类指标量化,并根据各指标对评判对象的影响程度来分配权系数,以得出各评判对象的综合评判值,通过比较该值的优劣选出最优对象^[4]。国内外有很多运用模糊综合评判的例子,例如:国外有Onkal-Engin G等^[5]运用模糊综合评判法来评判土耳其伊斯坦布尔市的空气质量;Dahiya S等^[6]采集印度南部哈尔亚纳邦15个村庄的42个地下水样品,测定这些样品的16个物理化学指标后运用模糊综合评判法来确定这些地下水是否可饮用。国内有石晓翠等^[7]运用单因素和加权平均两种

模糊数学模型对土壤重金属污染进行了评价;田成方等^[8]以浙江省金华市为例采用模糊数学法,对金华市的水资源价值进行了评价;吴应淑等^[9]将模糊综合评价运用在了评价四川达州市环境空气质量。

模糊综合评判方法具有客观性、准确性、包容信息量大3个优点^[10]。模糊综合评判主要有两类,一级模糊综合评判和多级模糊综合评判。一般评价因素较少时,运用一级模糊评判,反之,宜用多级模糊综合评判法^[11]。当因素很多时,若采用一级模糊综合评判模型,会遇到一些问题,首先是权数难以合理的分配,其次是权重中权数都很小,会出现“泯没”大量单因素评判信息的情况。在实际过程中,如因素很多时,一般采用多级模糊评判法。本研究评判指标较多,且在评判因子设定时,共设定了两层,故宜采用二级模糊综合评判法。

1.4.1.1 一级模糊评判法的步骤^[11]

(1)建立因素集,因素集是以影响评价对象的各因素为元素组成的集合 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 这些元素通常都具有不同程度的模糊性。

(2)建立判断集(评价集),判断集是以评判者对评判对象可能做出的各种总的评判结果为元素组成的集合 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 各元素 v_i 代表可能的总的评判结果。模糊综合评判的目的就是在考虑所有影响因素的基础上,从判断集得出最佳的评判结果。

(3)单因素模糊评判,对单个因素($i=1, 2, \dots, n$)的评判,得到 V 上的模糊集 $(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$, 所以其是一个从 U 到 V 的模糊映射。模糊关系的评判矩阵 R 为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

单因素评判集,实际上可视为因素集 U 和判断集 V 之间的一种模糊关系,因此,单因素评判矩阵 R 可视为从 U 到 V 的模糊关系矩阵。

(4)建立权重集,一般而言,各个因素的重要程度是不一样的,为了反映各个因素的重要程度,对各个因素应该赋予相应的权数,由各权数所组成的集合 $A=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 称为因素权重集。

通常各权数应归一化和满足非负条件,即:

$$\sum_{i=1}^n (a_i) = 1, a_i \geq 0$$

其中 a_i 可视为各个因素 u_i 对“重要”的隶属度,因

而权重 A 可视为因素集上的模糊集合。

(5)模糊综合评判,从单因素评判矩阵 R 可以看出: R 的第 i 行,反映了第 i 个因素影响评判对象各个判断元素的程度; R 的第 j 列,则反映了所有因素影响评判对象取第 j 个判断元素的程度。每个列元素之和为:

$$\sum_{i=1}^n (r_{ij}), r_{ij}=1, 2, \dots, m$$

因为用每列元素之和来反映所有元素的综合影响未考虑各元素的重要程度,所以当权重集 A 和单因素评判矩阵 R 已知时,便可作模糊变换来进行综合评判。

$$B=A \circ R = (a_1, a_2, \dots, a_n) \circ \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \\ = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (1)$$

式中:“ $\circ$ ”表示某种合成运算; B 为模糊综合评判集; b_j ($j=1, 2, \dots, m$) 称为模糊综合评判指标。

b_j 的含义为综合考虑所有因素影响时,评判对象对判断集中第 j 个元素的隶属度,显然,模糊综合评判集 B 为判断集 V 上的模糊集合。

1.4.1.2 多级模糊评判法的步骤^[11]

(1)建立层次结构模型,对所评判的问题认真分析,将问题中所包含的因素划分为不同的层次,每一层次均含有互不相干的若干因素。

(2)由最底层开始,对所包含的因素进行单层次综合评判,所得评判结果应该作为上一层模糊评判矩阵的一个行向量。

(3)根据本层权重向量和由下层评判结果构成的评判矩阵,可得本层的综合评判结果,其又可作为上一层评判矩阵的一个行向量。

(4)重复上一步骤,直至获得最高层次的综合评判结果。

1.4.2 评判指标体系的建立

本次试验共有6种不同的施肥模式,寻找最优化的施肥模式以实现肥料的高效利用,防止肥料浪费而引起的环境污染问题,并创造良好的社会、经济、生态环境效益,要求达到社会可接受、经济可行、生态合理的目标。

温室黄瓜种植最优化施肥模式的评判,不能用少数几个指标来描述,需要通过建立指标体系,但是目前针对不同施肥模式的效益评价,国际和国内均无专

门统一的指标体系,故本研究参考了于春燕^[12]的农作物秸秆综合利用评价指标体系并结合本研究的实际情况及指标数值的可取性,把评判指标划分为 3 类:社会效益、经济效益、生态环境效益。在构建指标体系时,关于黄瓜种植社会效益指标的选用,目前还未有定值,主要可以从营养品质、卫生品质和商业品质来判断。本研究选用黄瓜果实 VC 含量、可溶性糖含量和硝酸盐含量以定量表征黄瓜种植的社会效益,主要考虑黄瓜的品质;经济效益方面主要考虑黄瓜产量和肥料价格,并以此计算出黄瓜的收益;生态环境效益方面主要考虑不同施肥模式下渗漏水氮磷流失的浓度。具体的指标体系框架图见图 1。

根据综合评价指标体系确定评价的因素集为:

$U=\{U_1, U_2, U_3\}=\{\text{社会效益, 经济效益, 生态环境效益}\}$

$U_1=\{u_{11}, u_{12}, u_{13}\}=\{\text{VC 含量, 可溶性糖含量, 硝酸盐含量}\}$

$U_2=\{u_{21}\}=\{\text{黄瓜收益}\}$

$U_3=\{u_{31}, u_{32}, u_{33}, u_{34}, u_{35}\}=\{\text{硝态氮浓度, 氨氮浓度, 亚硝态氮浓度, 总氮浓度, 总磷浓度}\}。$

1.4.3 评判因子权重的建立

权重指评判指标在评判系统中的重要程度,用区间 $[0, 1]$ 中的数值来表示,数值越大,表明更重要。

根据指标信息的出处,权重的确立可以分为两大类^[13]:一类是客观法,主要有综合指数法,最优化权重法,主成分分析法以及变异系数法等;另一类是主观法,源信息主要来自对专家的咨询,有层次分析法和专家评判法等。

本研究中温室黄瓜种植综合效益的评判指标采用专家评判法来确定,而利用变异系数法确定社会效益、经济效益和生态环境效益因子权数。

变异系数法^[14]是指若某项指标数值能明确区分各评价对象,即给该指标较大的权数,当各评价指标在某项指标的数值差异较小时,则给该指标较小的权数。计算各指标的变异公式如下:

$$\theta_i=s_i/|\bar{x}_1| \tag{2}$$

其中: $|\bar{x}_1|=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n a_{ij}$ 为第 i 项指标的平均值; $s_i^2=\frac{1}{n-1}$

$\sum_{j=1}^n (a_{ij}-\bar{x}_1)^2$ 是第 i 项指标值的方差。

对 θ_i 进行归一化处理,即得到各指标的权数

$$\omega_i=\frac{\theta_i}{\sum_{i=1}^m \theta_i} \tag{3}$$

1.4.4 综合评判指标隶属度函数的建立

王彦梅等^[15]指出,为了计算上的简便和推广的容易,对于确定性因素采用线性插值法来确定隶属度函数 R ,而不确定性的评价因素则通过等级法来构造隶属度函数 R 。本研究中社会效益、经济效益、生态环境效益中的指标因素均为确定性因素,故采用线性插值法来确定其隶属度函数 R ,具体如公式(4)、(5)。

指标值越高效益越好的指标计算公式:

$$\mu(u_{ij})=\begin{cases} 0 & u_{ij}=\min \\ \frac{u_{ij}-\min}{\max-\min} & \min < u_{ij} < \max \\ 1 & u_{ij}=\max \end{cases} \tag{4}$$

指标值越低效益越好的指标计算公式:

$$\mu(u_{ij})=\begin{cases} 0 & u_{ij}=\max \\ \frac{\max-u_{ij}}{\max-\min} & \min < u_{ij} < \max \\ 1 & u_{ij}=\min \end{cases} \tag{5}$$

1.4.5 综合评判合成运算的选择

式(1)中的合成运算“ $\circ$ ”,主要有以下几种评判模型^[16](表1)。

表 1 中 $M(\wedge, \vee)$ 模型不适合用于因素过多或

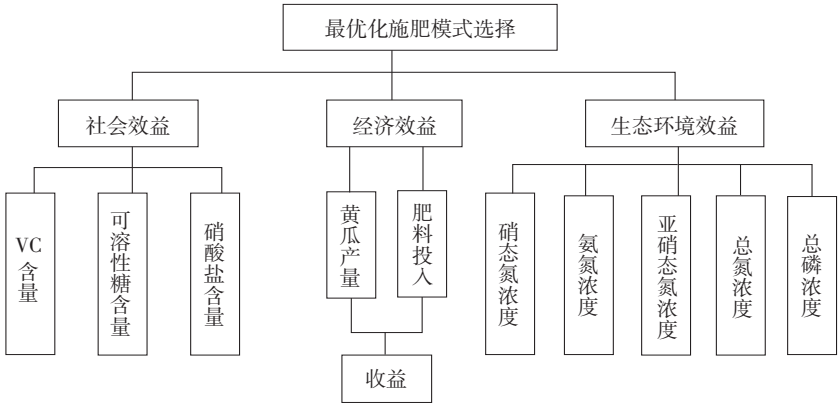


图 1 评判指标体系框架图

Figure 1 The frame diagram of index system

表 1 合成运算“·”评判模型
Table 1 Evaluation model of synthetic operation“·”

项目	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 4'
形式	$M(\wedge, \vee)$	$M(\cdot, \vee)$	$M(\wedge, \oplus)$	$M(\cdot, \oplus)$	$M(\cdot, +)$
公式	$b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij})$ $j=1, 2, \dots, m$	$b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i r_{ij})$ $j=1, 2, \dots, m$	$b_j = \bigoplus_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij}) \quad j=1, 2, \dots, m$ $\alpha \oplus \beta = \min(1, \alpha + \beta); \bigoplus_{i=1}^n$ 为对 n 个数 在 $\oplus$ 运算下求和, 即 $b_j = \min[1, \sum_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij})]$	$b_j = \bigoplus_{i=1}^n (a_i r_{ij})$ $j=1, 2, \dots, m$ 或 $b_j = \min[1, \sum_{i=1}^n (a_i r_{ij})]$	$b_j = \sum_{i=1}^n (a_i r_{ij})$ $j=1, 2, \dots, m$ 其中 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$

过少的情况; $M(\cdot, \vee)$ 模型能较好的反应单因素的评判结果和因素的重要程度; $M(\wedge, \oplus)$ 模型进行取最小运算时,会丢失大量有价值的信息; $M(\cdot, \oplus)$ 模型对所有因素依权数的大小均衡兼顾,比较适用于要求整体的指标的情形; $M(\cdot, +)$ 模型不仅考虑了所有因素的影响,而且保留了单因素评判的所有信息。故本文所有效益评判均选用 $M(\cdot, +)$ 模型进行运算。

1.5 数据处理

数据处理选用模糊数学法^[14],相关性分析及方差分析采用 SPSS15.0 实现。

2 结果与分析

2.1 以社会效益为单一目标的施肥模式优选

表 2 给出了不同施肥模式下黄瓜果实 VC、可溶性糖、硝酸盐的含量。

表 2 不同施肥模式下黄瓜果实 VC、可溶性糖、硝酸盐含量
Table 2 Effects of different fertilization modes on the content of

VC, soluble sugar, nitrate			
处理	VC/mg·kg ⁻¹	可溶性糖/%	硝酸盐/mg·kg ⁻¹
CK	98.53	1.85	161.45
CF	108.91	1.95	439.48
SF	121.11	2.25	370.41
OF	122.60	2.46	356.61
SF1	118.57	2.24	336.18
SF2	115.04	2.17	309.99

注:表内数据为 3 次采样数据的均值。

根据表 2 各指标值以及公式(2)、(3),计算得到社会效益三项评价指标的权重为 $\omega_1(\text{VC})=0.171$, $\omega_2(\text{可溶性糖})=0.221$, $\omega_3(\text{硝酸盐})=0.608$ 。

根据公式(4)、(5)求得隶属度矩阵,即单因素的评判矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.431 & 0.938 & 1 & 0.833 & 0.686 \\ 0 & 0.164 & 0.656 & 1 & 0.639 & 0.525 \\ 1 & 0 & 0.248 & 0.298 & 0.371 & 0.466 \end{bmatrix}$$

将隶属度矩阵 R 与权重矩阵 W 进行模糊复合运算,模糊数学评价结果为:

$$B_1 = A \circ R_1$$
$$= [0.171 \quad 0.221 \quad 0.608] \circ$$
$$\begin{bmatrix} 0 & 0.431 & 0.938 & 1 & 0.833 & 0.686 \\ 0 & 0.164 & 0.656 & 1 & 0.639 & 0.525 \\ 1 & 0 & 0.248 & 0.298 & 0.371 & 0.466 \end{bmatrix}$$
$$= [0.608 \quad 0.110 \quad 0.456 \quad 0.573 \quad 0.509 \quad 0.517]$$

由评判结果可得,6 种施肥模式中社会效益最高的是不施肥模式,社会效益最低的是常规化肥模式,这两种施肥模式评判结果的差值达到了 0.498;等养分有机肥模式的社会效益仅次于不施肥模式,社会效益较好;等养分专用肥减量 40%模式、等养分专用肥减量 20%模式综合评判的得分分别为 0.517 和 0.509,排在 6 种施肥模式的第 3 位和第 4 位;对于 6 种施肥模式来说,等养分专用肥模式社会效益综合评判得分为 0.456,社会效益较差。

2.2 以经济效益为单一目标的施肥模式优选

本研究考虑经济效益的两个变量,即黄瓜的产量和肥料的价格,折算 6 种施肥模式的收益,见表 3。

本研究经济效益只考虑黄瓜的收益,于是经济效益一项评价指标的权重为 $\omega_1=1$ 。

根据公式(3),计算得:
$$R_2 = [0 \quad 0.759 \quad 0.979 \quad 0.695 \quad 1 \quad 0.428]$$

模糊综合评判的结果为:
$$B_2 = A_2 \circ R_2 = [1] \circ [0 \quad 0.759 \quad 0.979 \quad 0.695 \quad 1 \quad 0.428]$$
$$= [0 \quad 0.759 \quad 0.979 \quad 0.695 \quad 1 \quad 0.428]$$

6 种不同施肥模式温室黄瓜种植中经济效益从高到低的排列顺序为等养分专用肥减量 20%模式>等养分专用肥模式>常规化肥模式>等养分有机肥模式>等养分专用肥减量 40%模式>不施肥模式。

2.3 以生态环境效益为单一目标的施肥模式优选

6 种施肥模式下黄瓜种植的生态环境效益评判因子主要是渗漏水氮磷浓度,具体数值见表 4。

生态环境效益 5 项评价指标的权重为 ω_1 (硝态

表 3 不同施肥模式下黄瓜种植收益

Table 3 Effects of different fertilization modes on the profit of cucumbers

项目	CK	CF	SF	OF	SF1	SF2
产量/kg·hm ⁻²	15 023.81	20 174.60	20 680.95	19 841.27	20 444.44	17 849.21
肥料价格/元·hm ⁻²	0.00	4 039.29	3 240.00	3 904.76	2 592.00	1 944.00
收益/元·hm ⁻²	30 047.62	36 309.91	38 121.90	35 777.66	38 296.88	33 574.42

注:黄瓜价格以试验期销售价格 2 元·kg⁻¹ 计。

表 4 不同施肥模式下菜地渗漏水中氮磷浓度

Table 4 Effect of fertilization modes on the concentration of N,P in seepage waters

浓度均值/mg·L ⁻¹	CK	CF	SF	OF	SF1	SF2
硝态氮	0.38A	8.91E	5.39D	4.89D	4.08C	3.24B
亚硝态氮	0.01A	0.07C	0.05B	0.04B	0.04B	0.04B
氨氮	0.08A	1.01E	0.83D	0.72C	0.62B	0.56B
总氮	0.67A	10.72F	7.48E	6.42D	5.58C	4.38B
总磷	0.18A	1.88E	1.06d	1.02D	0.80C	0.70B

注:浓度均值指 4 次取样检测结果的均值;同行数值后大写字母表示 5%显著性水平。

氮)=0.230,ω₂(亚硝态氮)=0.157,ω₃(氨氮)=0.184, ω₂(经济效益)=0.326,ω₃(生态环境效益)=0.395。
ω₄(总氮)=0.210,ω₅(总磷)=0.219。

根据公式(5)来确定其隶属度函数 R,计算得:

$$R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.413 & 0.471 & 0.566 & 0.665 \\ 1 & 0 & 0.188 & 0.311 & 0.420 & 0.489 \\ 1 & 0 & 0.288 & 0.538 & 0.500 & 0.577 \\ 1 & 0 & 0.322 & 0.428 & 0.511 & 0.631 \\ 1 & 0 & 0.481 & 0.501 & 0.631 & 0.690 \end{bmatrix}$$

运用模型 M(·,+),根据公式(6)计算得:

$$B_3 = A_3 \circ R_3 = [0.230 \ 0.157 \ 0.184 \ 0.210 \ 0.219]$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.413 & 0.471 & 0.566 & 0.665 \\ 1 & 0 & 0.188 & 0.311 & 0.420 & 0.489 \\ 1 & 0 & 0.288 & 0.538 & 0.500 & 0.577 \\ 1 & 0 & 0.322 & 0.428 & 0.511 & 0.631 \\ 1 & 0 & 0.481 & 0.501 & 0.631 & 0.690 \end{bmatrix}$$

$$=[1 \ 0 \ 0.350 \ 0.456 \ 0.534 \ 0.620]$$

6 种不同施肥模式温室黄瓜种植中生态环境效益最高的是不施肥模式,其次分别是等养分专用肥减量 40%模式、等养分专用肥减量 20%模式、等养分有机肥模式和等养分专用肥模式,生态环境效益最差的是常规化肥模式。

2.4 以 3 种效益为综合目标的施肥模式优选

专家打分法是采用问卷调查的方式,邀请 31 位有关专家(共发出问卷调查表 40 份,收回有效问卷 31 份)对最优化施肥模式对社会、经济、生态环境效益指标进行判断,对其结果进行汇总取算术平均数。

3 项评价指标的权重为 ω₁(社会效益)=0.279,

根据 B₁、B₂、B₃,得到隶属度矩阵 R:

$$R = \begin{bmatrix} 0.608 & 0.110 & 0.456 & 0.573 & 0.509 & 0.517 \\ 0 & 0.759 & 0.979 & 0.695 & 1 & 0.428 \\ 1 & 0 & 0.350 & 0.456 & 0.534 & 0.620 \end{bmatrix}$$

运用公式(6)计算得:

$$B = A \circ R = [0.279 \ 0.326 \ 0.395]$$

$$\begin{bmatrix} 0.608 & 0.110 & 0.456 & 0.573 & 0.509 & 0.517 \\ 0 & 0.759 & 0.979 & 0.695 & 1 & 0.428 \\ 1 & 0 & 0.350 & 0.456 & 0.534 & 0.620 \end{bmatrix}$$

$$=[0.565 \ 0.278 \ 0.585 \ 0.567 \ 0.679 \ 0.529]$$

由此可得,6 种不同施肥模式黄瓜种植中综合效益最高的是等养分专用肥减量 20%模式,其次分别是等养分专用肥模式、等养分有机肥模式、不施肥模式和等养分专用肥减量 40%模式,综合效益最差的是常规化肥模式。

3 结论

(1)当只考虑社会效益时,我们提倡的施肥模式是不施肥模式和等养分有机肥模式,而不应该提倡施用常规化肥;仅考虑经济效益时,不施肥模式评判得分最低,经济效益最差,而等养分专用肥减量 20%模式和等养分专用肥模式的经济效益都较好;只考虑生态环境效益时,不施肥模式和等养分专用肥减量 40%模式分别排在了 6 种不同施肥模式中的第一位和第二位,两种施肥模式的生态环境效益均较好,而等养分专用肥模式和常规化肥模式不具有好的生态环境

效益;将社会效益、经济效益、生态环境效益三因素综合考虑时,得分最高的施肥模式是等养分专用肥减量20%模式,其次是等养分专用肥模式,而排在后两位的分别是等养分专用肥减量40%模式和常规化肥模式,受试地区最佳施肥模式是等养分专用肥减量20%和等养分有机肥模式,而最不适合受试地采用的施肥模式是常规化施肥模式。

(2)应用模糊综合评判的方法来评判温室黄瓜种植的施肥模式是切实可行的,本研究找到了适合温室黄瓜种植的最优化施肥模式,该模式高产质优且对环境的影响小,既从源头上控制了菜地农业面源污染,又保障了蔬菜食品安全,可以较好地指导受试地区合理施肥。

参考文献:

- [1] 冀宏杰, 张认连, 武淑霞, 等. 太湖流域农田肥料投入与养分平衡状况分析[J]. 中国土壤与肥料, 2008(5): 70-75.
JI Hong-jie, ZHANG Ren-lian, WU Shu-xia, et al. Analysis of fertilizer input and nutrient balance of farmland in Taihu watershed[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2008(5): 70-75.
- [2] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I: Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 Century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [3] 金相灿, 叶 春, 颜昌宙. 太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J]. 环境科学研究, 1999, 12(5): 1-5.
JIN Xiang-can, YE Chun, YAN Chang-zhou. Comprehensive treatment plan for key-polluted regions of lake Taihu[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, 12(5): 1-5.
- [4] 李林方. 火电厂烟气脱硫技术的模糊综合评判[D]. 重庆: 重庆大学, 2006: 33.
LI Lin-fang. The fuzzy comprehensive valuation of desulfurization technology in power plant fluegas[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006: 33.
- [5] Onkal-Engin G, Demir I, Hiz H. Assessment of urban air quality in Istanbul using fuzzy synthetic evaluation[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 3809-3815.
- [6] Dahiyas, Singh B, Gaur S, et al. Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 147: 938-946.
- [7] 石晓翠, 钱 翌, 熊建新. 模糊数学模型在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 334-336.
SHI Xiao-cui, QIAN Yi, XIONG Jian-xin. Application of fuzzy mathematics models in the evaluation of soil heavy metal pollution[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2): 334-336.
- [8] 田成方, 冯利华. 基于模糊数学模型的浙江省金华市水资源价值分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(7): 2827-2828, 2922.
TIAN Cheng-fang, FENG Li-hua. Analysis of water resources value of Jinhua City in Zhejiang Province based on the fuzzy mathematics model [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2009, 37(7): 2827-2828, 2922.
- [9] 吴应淑, 刘 鑫. 模糊综合评判在达州市环境空气质量评价中的应用[J]. 四川环境, 2011, 30(5): 63-66.
WU Ying-shu, Liu-xin. Application of fuzzy mathematical comprehensive evaluation for the air quality evaluation in Dazhou[J]. *Sichuan Environment*, 2011, 30(5): 63-66.
- [10] 戴 旭. 农业土地评价的理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
DAI Xu. The evaluation theory and method of agricultural land [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [11] 王 涛, 王艳平. 模糊数学及其应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2005: 101-114.
WANG Tao, WANG Yan-ping. Fuzzy sets and applications [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2005: 101-114.
- [12] 于春燕. 黑龙江作物秸秆不同利用模式下的效益评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.
YU Chun-yan. Benefit evaluation on different utilization modes of crop straw in Heilongjiang[D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2010.
- [13] 唐德昕. 基于模糊综合评判方法的小城镇污泥处置方案研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006: 41.
TANG De-xin. Study on the sludge disposal scheme in small towns-based on fuzzy comprehensive evaluation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006: 41.
- [14] 李柏年. 模糊数学及其应用[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2007: 103-115.
LI Bai-nian. Fuzzy mathematics and its applications [M]. Hefei: Press of Heifei University of Technology, 2007: 103-115.
- [15] 王彦梅, 李 松. 基于 AHP 和模糊评判的供应链合作伙伴的选择[J]. 企业经济, 2006, 7: 43-45.
WANG Yan-mei, LI Song. Based on AHP and fuzzy evaluation of supply chain partner selection[J]. *Enterprise Economy*, 2006, 7: 43-45.
- [16] 蔡敏琦. 模糊综合评判在清洁生产评价中的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008: 22-23.
CAI Min-qi. The application of fuzzy comprehensive valuation on clean production estimation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008: 22-23.