

基于生态位适宜度模型和 TOPSIS 模型的间作模式评价

王琳琳^{1,2} 于海业^{1,2} 张蕾^{1,2} 田东旭^{1,2} 张雨晴^{1,2} 赵国罡^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 基于生态位适宜度模型对生菜与小白菜、樱桃萝卜、豌豆苗和香菜间作4种模式下作物对生境条件的适宜程度进行了初步评价,并采用TOPSIS模型对评价结果进行优选,以揭示生菜各间作模式中的最优模式。结果表明:模式1、模式2和模式3的生态位适宜度值较高且较接近,其生境环境较能满足作物的需求,其中,生菜和樱桃萝卜的间作模式与理想方案的相对接近程度最大,即生菜与樱桃萝卜的间作模式为4种模式中最优间作模式。采用生态位适宜度模型和TOPSIS模型对间作模式进行优选的结果与实际栽培效果一致,通过限制因子分析确定生菜和樱桃萝卜间作模式的限制因子为营养液中钾元素含量。

关键词: 间作模式; 气雾培; 硝酸盐; 生态位适宜度模型; TOPSIS模型; 限制因子模型

中图分类号: S314; S317 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)04-0291-07

Evaluation of Intercropping Pattern Based on Niche-fitness Model and TOPSIS Model

WANG Linlin^{1,2} YU Haiye^{1,2} ZHANG Lei^{1,2} TIAN Dongxu^{1,2} ZHANG Yuqing^{1,2} ZHAO Guogang^{1,2}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on niche-fitness model, the suitability to habitat conditions of crops under four patterns was evaluated in order to reveal the optimal intercropping pattern of lettuce. And the four patterns were intercropping of lettuce with Chinese cabbage, radish, pea seedling and coriander, respectively. The niche-fitness values of intercropping patterns of lettuce with Chinese cabbage, radish and pea seedling were higher and closer, which showed that the habitat conditions of the three patterns can meet the needs of crops and the habitat conditions were more suitable for their growth. Then TOPSIS model was used to optimize the evaluation results. The relative approaching degrees of the three intercropping patterns with the ideal scheme were 0.557, 0.800 and 0.265, respectively. It was showed that the intercropping pattern of lettuce with radish was relatively close to the ideal scheme, which meant that the intercropping pattern of lettuce with radish was the best pattern among the four intercropping patterns. Considering the actual physiological indexes, it can be drawn that the intercropping pattern of lettuce with radish not only had better effect on the growth of aerosol cultured lettuce, but also had better effect on reducing the nitrate content in lettuce leaves. The combination of niche-fitness model and TOPSIS model had a certain practical significance and it can be used for the optimal selection of different intercropping patterns of lettuce. Limiting factor model was used to analyze, and the results showed that the limiting factor of the intercropping pattern of lettuce with radish was the content of potassium in nutrient solution. The results provided reference for the quantitative analysis of optimization of intercropping patterns.

Key words: intercropping pattern; aeroponics; nitrate; niche-fitness model; TOPSIS model; limiting factor model

引言

生菜(*Lactuca sativa* L.)作为常见叶菜类蔬菜,

深受消费者喜爱,但同时也是一种易富集硝酸盐的作物。气雾培作为无土栽培的一种,是未来农业发展的趋势,但是,由于在栽培中通常使用硝酸盐作为

收稿日期: 2016-12-21 修回日期: 2017-02-07

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA103005-04)

作者简介: 王琳琳(1989—),女,博士生,主要从事农业设施调控与节能技术研究,E-mail: linlinw14@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 张蕾(1979—),女,副教授,主要从事农业生物环境测控与生态农业研究,E-mail: z_lei@jlu.edu.cn

氮源,蔬菜中的硝酸盐含量往往较高。据统计,人体摄入硝酸盐的80%以上来自蔬菜^[1],而过量硝酸盐的摄入易致癌、致畸形以及诱发白血病和高铁血红蛋白症等^[2],对人体健康存在潜在威胁。目前,主要通过低硝酸盐积累品种的筛选、农艺手段、遗传育种和基因工程手段、合理进行蔬菜贮存和烹调^[3]以及间作等手段降低蔬菜硝酸盐含量,其中,间作是指在同一田地上于同一生长期内分行或分带相间种植两种或两种以上作物的种植方式^[4],是中国传统精细农艺的精华。间作可以降低蔬菜硝酸盐含量已经被有关研究^[5-6]证实,但相关研究还是以土培蔬菜为研究对象,对于气雾培蔬菜还未见报道,并且间作作物的选择还是以栽培经验为主,缺乏一定的定量分析依据。

20世纪90年代以来,生态位(Niche)这一概念在生态学界受到关注^[7]。在生态位理论的进展中,最有影响的是HUTCHINSON提出的生态位多维超位积(n -dimensional hypervolume)模式,生态位适宜度理论则是在此基础上提出的新理论,它描述了一个物种居住地的现实生境条件与最适生境条件之间的贴近程度,表征了拥有一定资源谱系生物种对其生境条件的适宜性,即生境资源条件对物种特定需求的满足程度^[8]。目前,生态位适宜度理论多用于土地评价与利用^[9-11]以及产业研究^[12-13]方面。文献[8,14-17]针对春小麦和当归,将生态位适宜度理论应用到了作物生长系统中,建立了土壤温度、土壤含水率、土壤氮含量、土壤磷含量和土壤钾含量等环境资源因子对产量影响程度的定量分析方法。

TOPSIS模型为接近理想点模型(接近理想方案的排序模型)^[18],其基本思路是定义决策问题的正理想方案和负理想方案,然后在可行方案集中找到一个方案,使其既距离正理想方案最近,又距离负理想方案最远^[19]。TOPSIS模型是多属性决策分析中常用模型,对于原始数据有一定的客观性,且对样本数据没有特殊的要求,具有应用灵活和简便的优点,在农业生产中主要应用于作物水肥管理评价^[20-21]、抗虫性评价^[22-23]以及产量和品质评价^[24-25]等方面,具有一定的指导意义。文献[26-28]以溶解氧、总氮、总磷、氨氮、高锰酸盐指数等为评价指标,将TOPSIS模型应用到了水环境质量评价中,具有一定的可行性。

本文结合相关文献与气雾培实际实验条件,以营养液温度、空气溶解氧、营养液溶解氧、营养液中氮元素含量、营养液中磷元素含量和营养液中钾元素含量为生态因子,选取不同科、不同食用部位且生长期相近的4种常见蔬菜分别与生菜进行间作,采

用生态位适宜度模型和TOPSIS模型,对生菜与小白菜、樱桃萝卜、豌豆苗和香菜分别间作的4种模式进行优选,以期从模型计算的角度揭示生菜各间作模式中的最优模式。

1 模型介绍

1.1 生态位适宜度模型

目前,计算生态位适宜度的常用模型有加权平均模型、限制因子模型和希尔伯特空间模型^[8]等,其中限制因子模型为

$$F_i = \min \left\{ \frac{x''_{i1}}{x''_{a1}}, \frac{x''_{i2}}{x''_{a2}}, \dots, \frac{x''_{ij}}{x''_{aj}} \right\} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中 F_i ——第*i*种实验下的作物生态位适宜度
 x''_{ij} ——第*i*种实验下第*j*个生态因子的观测值
 x''_{aj} ——第*j*个生态因子的最适值
 n ——生态因子个数

但当各组实验条件下的每组观测值有较大变幅时,采用以上模型计算出的生态位适宜度在区间 $[0, 1]$ 上的分布范围较窄,因此,本文选用生态位适宜度的贴近度模型^[29]。

以气雾培蔬菜为研究对象,将生态位适宜度模型用于定量评价蔬菜对不同间作模式实验条件的适宜程度,其评价模型描述如下:

假设对作物进行了*m*种实验:生菜分别与小白菜、樱桃萝卜、豌豆、香菜等进行间作,在各种实验条件下,观测*n*个生态因子:营养液温度、空气溶解氧、营养液溶解氧、营养液中氮元素含量、营养液中磷元素含量和营养液中钾元素含量等,将各生态因子的量化指标分别记作 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$,则*t*种实验条件下的观测值可记作 $\mathbf{X}_t = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$, \mathbf{X}_t 表示作物在*t*种实验下的现实资源位。若*n*个生态因子相应的最适值分别记作 $x_1(a), x_2(a), \dots, x_n(a)$,则全部最适值构成的 $\mathbf{X}_a = (x_1(a), x_2(a), \dots, x_n(a))$ 即为作物的最适生态位。其数学模型的一般形式为

$$F = \Phi(\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_t) \quad (\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_t \in E^n) \quad (2)$$

式中 F ——作物生态位适宜度
 E^n ——表征作物生态位的*n*维空间中的区域
 $\Phi(\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_t)$ —— \mathbf{X}_a 和 \mathbf{X}_t 的相似性测度

其中, $F \in [0, 1]$,在区间 $[0, 1]$ 上*F*值越大,表示作物对生境条件的适宜程度越高。据此生态位适宜度的贴近度模型表示为

$$F_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\min \{ |x_{ij} - x_{aj}| \} + T \max \{ |x_{ij} - x_{aj}| \}}{|x_{ij} - x_{aj}| + T \max \{ |x_{ij} - x_{aj}| \}} \quad (i=1, 2, \dots, m; 0 \leq T \leq 1) \quad (3)$$

式中 x_{ij} ——第 i 种实验下第 j 个生态因子标准化后观测值

x_{oj} ——第 j 个生态因子标准化后最适值

T ——模型参数

关于参数 T 的估算,可以假定当 $W_{ij} = \bar{W}_{ij}$ 时 $F_i = 0.5$,即

$$W_{ij} = |x_{ij} - x_{oj}| \quad (4)$$

$$\bar{W}_{ij} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij} \quad (5)$$

$$\frac{W_{\min} + TW_{\max}}{W_{ij} + TW_{\max}} = 0.5 \quad (6)$$

式中 W_{ij} —— x_{ij} 与 x_{oj} 之间的绝对差

\bar{W}_{ij} —— W_{ij} 的均值 W_{\min} —— W_{ij} 的最小值

W_{\max} —— W_{ij} 的最大值 m ——实验个数

由此解出 T 值。

1.2 TOPSIS 模型

采用 TOPSIS 模型对间作模式进行优选,其模型描述如下:

设有 m 种实验和 n 个生态因子,则原始矩阵为

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (7)$$

经归一化处理

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (8)$$

得到新的矩阵

$$Y = (y_{ij})_{m \times n} \quad (9)$$

在 TOPSIS 法的运用中,权重的设计是一项重要的内容,对评价结果有重要影响,本文采用变异系数法确定各评价因子的权重,为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, w_n 为第 n 个评价因子权重,由规范化的矩阵 Y 和 W 计算加权规范化矩阵

$$Z = [WY]_{m \times n} = (z_{ij})_{m \times n} \quad (10)$$

式中 z_{ij} —— x_{ij} 经归一化和加权处理后的值

由于效益型指标是正向指标,越大越好;成本型指标是逆向指标,越小越好。因此,可确定评价问题的正理想方案 Z^+ 和负理想方案 Z^- 。然后计算每一个方案与正理想方案和负理想方案的距离 S^* 和 S^0 ,即

$$S^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

$$S^0 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

式中 z_j^+, z_j^- ——第 j 个评价因子的正、负理想值

最后计算每一个方案对理想方案的相对接近程度,即

$$S = S^0 / (S^* + S^0) \quad (13)$$

相对接近程度最大的为最优方案,即本文的最优间作模式。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料与设计

实验于 2015 年 1 月 9 日—2 月 8 日在吉林大学生物与农业工程学院玻璃温室 (43°51'05"N、125°19'51"E)内进行,由于实验是在北方的冬季进行,温室内白天温度控制在 (22 ± 4) °C,夜晚温度控制在 (15 ± 2) °C。补光采用人工 LED 补光系统,补光时间为 08:00—18:00,其中 11:30—14:30 光照强度可达 5.5 ~ 6.5 klx,其余时间段光照强度达 4.5 ~ 5.5 klx。营养液中大量元素配方采用日本园式配方,微量元素配方采用霍兰德通用配方。设置循环喷雾定时器,白天为每间隔 15 min 喷施 15 min,夜间为每间隔 60 min 喷施 5 min。实验过程中,每天测量并调节营养液的 pH 值和电导率 (EC),使营养液的 pH 值和 EC 值分别控制在 5.8 ~ 6.2 和 1 800 ~ 2 200 μS/cm 之间,以确保植株的正常生长。

供实验的生菜为意大利生菜,生菜种子与小白菜、樱桃萝卜、豌豆、香菜种子均购于吉林省科丰种业有限公司,其中豌豆仅作为芽菜类蔬菜进行栽培。将种子催芽后于培养箱内进行育苗,当生菜和小白菜、樱桃萝卜、香菜长出 3 ~ 4 片真叶,豌豆苗株高达 5 ~ 6 cm 时进行移苗。生菜与 4 种蔬菜分别以 1:1 模式间作,同时设置生菜的单作模式,定植于气雾栽培箱 (3 × 4 孔),用于实验。单作与间作模式如图 1 所示。

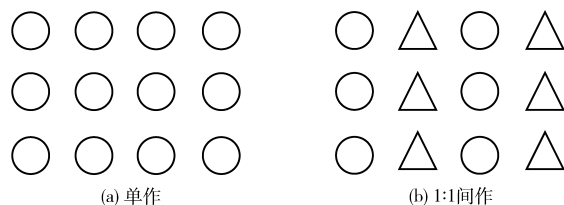


图 1 单作与间作模式示意图

Fig. 1 Sketches of sole cropping and intercropping patterns

2.2 测量指标及方法

以下指标于每日 12:00 进行测量,记录值为各指标 30 d 内的平均值。

(1) 营养液温度:使用上海雷磁 JPB - 607A 型便携式溶氧仪进行测量,测量部位为膜帽顶端距离营养液液面下 6 cm 高度处。

(2) 空气溶解氧:使用便携式溶氧仪进行测量,测量部位为膜帽顶端距离营养液液面上 5 cm 高度处。

(3) 营养液溶解氧:使用便携式溶氧仪进行测量,测量部位为膜帽顶端距离营养液液面下 6 cm 高度处,测量时用手捏住电极帽以 20 ~ 30 cm/s 的速度水平晃动电极。

以下指标均于植株定植 30 d 后进行测定,记录值为各指标重复测定 3 次的平均值。

(4) 营养液中氮元素含量:采用过硫酸钾氧化法^[30]测定。

(5) 营养液中磷元素含量:采用钼锑抗分光光度法^[30]测定。

(6) 营养液中钾元素含量:送样至中国科学院(长春)应用化学研究所进行测量。

(7) 生长指标:对植株的地上部分鲜质量、地上部分干质量、叶面积和叶片个数进行测定。其中叶面积的测定采用 EU-88 型 WinRHIZO 图像分析软件进行分析处理。

(8) 植物体内硝酸盐含量:采用水杨酸法^[31]测定,测量部位为生菜植株的叶片。

2.3 数据分析与数据计算

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据整理与计算,采用 SPSS 17.0 进行相关性检验和差异显著性检验。

采用实际观测值与观测的最大值之比对变量进行无量纲化处理,即

$$x'_{ij} = x_{ij} / \max x_{ij} \quad (14)$$

式中 x'_{ij} ——无量纲化后的变量值

数据标准化处理计算式为

$$x_{ij} = x'_{ij} / \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x'_{ij} \right) \quad (15)$$

3 结果与分析

3.1 基于生态位适宜度模型计算的最优化间作模式

3.1.1 确定评价因子

生态位适宜度评价因子的选取要遵循差异性、主导性、综合性和可操作性原则^[32]。具体应用中,评价因子应先通过显著性水平 $P < 0.05$ 及相关系数 $R < 0.7$ 的相关性检验^[32-33]。本文采用特尔菲法与实际实验相结合确定生菜的评价因子为营养液温度、空气溶解氧、营养液溶解氧、营养液中氮元素含量、营养液中磷元素含量和营养液中钾元素含量。

3.1.2 确定生态因子最适值

各生态因子最适值的估算对于生态位适宜度的计算起着重要作用。作物对各生态因子作用和反应具有明显特征——三基点,即上限值、最适值和下限值。参照文献^[34],结合实际实验条件和文献^[16],确定营养液温度、空气溶解氧和营养液溶解氧的最适值为实际实验条件下所能测定的最大值,同时,确定营养液中氮元素含量、营养液中磷元素含量和营养液中钾元素含量的最适值为营养液原始配方中相应元素含量。

3.1.3 数据标准化

数据标准化处理主要包括数据同趋化处理和无量纲化处理,主要解决不同性质数据问题以及消除量纲影响和变量自身变异的影响。

定义生菜与小白菜、樱桃萝卜、豌豆和香菜间作分别为模式 1、模式 2、模式 3 和模式 4,生菜单作为模式 5。

评价因子的观测变量分别为营养液温度、空气溶解氧、营养液溶解氧、营养液中氮元素含量、营养液中磷元素含量和营养液中钾元素含量,分别用 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 和 x_6 表示以上各变量经无量纲化和标准化处理后的变量,则各变量和相应最适值经标准化后的值如表 1 所示。

表 1 标准化值

Tab.1 Standardized values

因子	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
模式 1	1.042	1.006	1.017	0.966	0.974	0.994
模式 2	0.995	1.022	1.021	0.975	1.022	0.965
模式 3	1.022	1.030	1.054	1.054	0.859	0.980
模式 4	1.036	1.030	1.068	1.008	0.790	1.068
最适值	0.812	0.812	0.812	1.102	1.081	1.381

3.1.4 生态位适宜度计算结果

根据表 1 标准化值及相关公式,经计算得各间作模式下生菜的生态位适宜度分别为 0.544、0.585、0.548 和 0.503。其中模式 2 的生态位适宜度最高,模式 1 和模式 3 的生态位适宜度较高且较接近,说明这 3 种间作模式下的生境环境较能满足作物的需求,较适合其生长。

3.2 基于 TOPSIS 模型计算的最优化间作模式

由生态位适宜度模型对各间作模式进行初选,可以看出模式 1、模式 2 和模式 3 是较适宜的间作模式,同时,采用 TOPSIS 模型对这 3 种间作模式进行进一步优选。

采用变异系数法确定各评价因子的权重,得到 $W = (0.062, 0.070, 0.048, 0.136, 0.553, 0.131)$,进而通过计算得到加权规范化矩阵,如表 2 所示。由于实验是在冬季的温室内进行,温度较低,所以营养液温度越高越好;而溶解氧和营养元素含量尤其在实验的最后阶段也应越高越好,因此正理想方案为对应列的最大值,而负理想方案则为对应列的最小值,结果如表 3 所示。

计算每一个方案与理想方案的相对接近程度,模式 1、模式 2 和模式 3 分别为 0.557、0.800 和 0.265,可见模式 2 的相对接近程度最大,即生菜与樱桃萝卜的间作模式为备选模式中的最优间作模式。

表2 备选模式加权规范化矩阵

Tab.2 Weighted normalized matrix of alternative patterns

备选模式	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6
模式1	0.062	0.002	0.001	0.001	0.414	0.045
模式2	0.009	0.070	0.046	0.050	0.553	0.028
模式3	0.001	0.025	0.048	0.136	0.159	0.001

注: $z_1 \sim z_6$ 表示相应模式下各评价因子观测值经归一化和加权处理后的值。

表3 正理想方案和负理想方案取值

Tab.3 Values of positive ideal scheme and negative ideal scheme

备选模式	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6
Z^+	0.062	0.070	0.048	0.136	0.553	0.045
Z^-	0.001	0.002	0.001	0.001	0.159	0.001

3.3 限制因子分析

采用限制因子模型对最优间作模式进行限制因子分析,结果如表4所示,表中数值为生态因子观测值与该生态因子最适值之比,由限制因子模型可知,比值越小,该生态因子对作物需求的满足程度越低,则该生态因子为限制因子,由此可知,模式2的限制因子为营养液中钾元素含量。模式2中樱桃萝卜的很大部分是其肉质根,而根的生长又与钾元素密切相关,因此,营养液中钾元素含量为模式2的限制因子是有依据可循的。

表4 限制因子分析

Tab.4 Analysis of restriction factors

因子	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
模式2	0.974	1.000	0.999	0.702	0.751	0.555

3.4 最优间作模式硝酸盐控制效果评价

不同间作模式对生菜生长和硝酸盐含量的影响如表5所示,可以看出,模式1和模式2对生菜生长有良好的促进作用,模式3次之,而模式4表现较差,但均优于模式5。可以说,生菜与所选择的间作物间表现出竞争作用小于促进作用,即间作优势^[35-36],显示出较好的增产增收效益。

植物体内硝酸盐含量是衡量蔬菜品质的重要指

标^[37]。由表5可以看出,模式1、模式2和模式3在降低生菜叶片硝酸盐含量方面较模式5表现出了间作优势,与文献[5-6]表明的间作有降低蔬菜中硝酸盐含量的趋势相符。其中,模式2和模式3均与模式5差异显著,从降低生菜叶片硝酸盐含量方面考虑,是较优的间作模式。

表5 不同间作模式对生菜生长和品质的影响

Tab.5 Effects of different intercropping patterns on growth and quality of lettuce

指标	叶面积/ cm ²	叶片 个数	地上部 鲜质量/ (g·株 ⁻¹)	地上部 干质量/ (g·株 ⁻¹)	硝酸盐含量/ (μg·g ⁻¹)
模式1	46.48 ^b	12.0 ^a	12.4824 ^a	0.4923 ^a	2088.43 ^b
模式2	48.28 ^a	11.7 ^a	11.7847 ^b	0.4878 ^a	1574.82 ^c
模式3	43.78 ^d	12.3 ^a	11.5903 ^{bc}	0.4846 ^a	1298.60 ^d
模式4	45.55 ^c	12.0 ^a	11.5189 ^c	0.4831 ^b	3140.62 ^a
模式5	43.08 ^d	12.0 ^a	11.4664 ^c	0.4824 ^b	2166.21 ^b

注:不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

综合考虑生菜生长指标和叶片硝酸盐含量可知,模式2是对于气雾栽培生菜生长和降低叶片硝酸盐含量均有较好影响的模式。因此,在实际生产中,建议选择模式2(生菜与樱桃萝卜间作)进行栽培。

4 结论

(1)采用生态位适宜度模型和TOPSIS模型,从间作蔬菜气雾栽培箱内环境资源因子角度,对生菜4种间作模式进行优选,结果表明模式2即生菜与樱桃萝卜间作为最优间作模式。生态位适宜度模型和TOPSIS模型对间作模式进行优选的结果与实际栽培效果一致,可用于生菜不同间作模式的优选。

(2)通过限制因子分析确定限制模式2中作物生产潜力发挥的主要因子为营养液中钾元素含量,这为以模式2方式进行无土栽培后期需要注意营养液中钾元素的补充提供了一定的理论依据。

(3)小白菜和樱桃萝卜与生菜间作是适宜的间作模式,其中樱桃萝卜作为根菜类蔬菜与叶菜类生菜间作具有更加良好的效果。

参 考 文 献

- EICHHOLZER M, GUTZWILLER F. Dietary nitrates, nitrites, and N-nitroso compounds and cancer risk: a review of the epidemiologic evidence[J]. Nutrition Review, 1998, 56(4):95-105.
- 王俊俐. 蔬菜中硝酸盐检测方法对比研究[J]. 食品科技, 2011, 36(2):304-308.
WANG Junli. Comparison of detection for nitrate in vegetables[J]. Food Science and Technology, 2011, 36(2):304-308. (in Chinese)
- 都韶婷,金崇伟,章永松. 蔬菜硝酸盐积累现状及其调控措施研究进展[J]. 中国农业科学, 2010, 43(17):3580-3589.
DU Shaoting, JIN Chongwei, ZHANG Yongsong. Current situations and research progress of nitrate pollution in vegetables and their regulating strategies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(17):3580-3589. (in Chinese)

- 4 崔雄维,吴伯志. 间作蔬菜研究进展[J]. 云南农业大学学报,2009,24(1):128-132.
CUI Xiongwei, WU Bozhi. Advances in research on vegetable intercropping[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2009, 24(1):128-132. (in Chinese)
- 5 吴琼,杜连凤,赵同科,等. 蔬菜间作对土壤和蔬菜硝酸盐累积的影响[J]. 农业环境科学学报,2009,28(8):1623-1629.
WU Qiong, DU Lianfeng, ZHAO Tongke, et al. Effect of vegetable intercropping on the nitrate accumulation in soil profiles and vegetables[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(8):1623-1629. (in Chinese)
- 6 王晓丽,李隆,江荣凤,等. 玉米/空心菜间作降低土壤及蔬菜中硝酸盐含量的研究[J]. 环境科学学报,2003,23(4):463-467.
WANG Xiaoli, LI Long, JIANG Rongfeng, et al. Effects of maize swamp cabbage intercropping on reduction of the nitrate content in soil profile and vegetables[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(4):463-467. (in Chinese)
- 7 金松岩,张敏,杨春. 生态位理论研究论述[J]. 内蒙古环境科学,2009,21(4):12-15.
JIN Songyan, ZHANG Min, YANG Chun. The Outline of ecological niche theory research[J]. Inner Mongolia Environmental Sciences, 2009, 21(4):12-15. (in Chinese)
- 8 李自珍,赵松岭,张鹏云. 生态位适宜度理论及其在作物生长系统中的应用[J]. 兰州大学学报:自然科学版,1993,29(4):219-224.
LI Zizhen, ZHAO Songling, ZHANG Pengyun. The niche-fitness theory and its application to the systems of crop growth[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 1993, 29(4):219-224. (in Chinese)
- 9 王瑞燕,赵庚星,于振文,等. 利用生态位适宜度模型评价土地利用环境脆弱性效应[J]. 农业工程学报,2012,28(11):218-224.
WANG Ruiyan, ZHAO Gengxing, YU Zhenwen, et al. Assessment of land use effects on environmental vulnerability by ecological niche suitability model[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11):218-224. (in Chinese)
- 10 张宗耀,董捷,闫旭亮. 基于生态位适宜度的武汉市土地利用功能分区研究[J]. 湖北农业科学,2015,54(13):3302-3306.
ZHANG Zongyao, DONG Jie, YAN Xuliang. Land utilization functional zoning based on the niche-fitness model in Wuhan City [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(13):3302-3306. (in Chinese)
- 11 NIE Yan, YU Jing, PENG Yating, et al. A comprehensive evaluation of soil fertility of cultivated land: a GIS-based soil basic niche-fitness model [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2016, 47(5):670-678.
- 12 吉亚辉,段荣荣. 生产性服务业与制造业双重集聚的协调度与生态位适宜度研究[J]. 中国科技论坛,2014,30(8):49-54.
JI Yahui, DUAN Rongrong. Coordination degree and ecological niche fitness of producer services and manufacture's co-agglomeration[J]. China Science and Technology Forum, 2014, 30(8):49-54. (in Chinese)
- 13 崔迎春. 城市游艇产业生态位适宜度模型的构建研究[J]. 科学技术与工程,2012,12(2):473-477.
CUI Yingchun. Study on niche-fitness model's construction of urban yacht industry [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(2):473-477. (in Chinese)
- 14 LI Wenlong, LI Zizhen, LI Weide. Effect of the niche-fitness at different water supply and fertilization on yield of spring wheat in farmland of semi-arid areas[J]. Agricultural Water Management, 2004, 67(1):1-13.
- 15 李自珍,林红. 春小麦生态位适宜度与产量关系的研究[J]. 自然科学进展,1998,8(2):137-141.
LI Zizhen, LIN Hong. Study on the relationship between ecological niche suitability and yield of spring wheat [J]. Progress in Natural Science, 1998, 8(2):137-141. (in Chinese)
- 16 李文龙,苏敏,李自珍. 集水灌溉和施肥对半干旱区春小麦生态位适宜度和产量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(4):42-48.
LI Wenlong, SU Min, LI Zizhen. Effects of irrigation and fertilization treatments for rainfall-harvesting agriculture on niche fitness and yield of spring wheat in semi-arid regions[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4):42-48. (in Chinese)
- 17 LIN Huilong, ZHUANG Qiming, FU Hua. Habitat niche-fitness and radix yield prediction models for *Angelica sinensis* cultivated in the alpine area of the southeastern region of Gansu Province, China[J]. Plant Production Science, 2008, 11(1):42-58.
- 18 杨保安,张科静. 多目标决策分析理论、方法与应用研究[M]. 上海:东华大学出版社,2008.
- 19 杨建波. 多目标决策方法与应用[M]. 长沙:湖南出版社,1996.
- 20 虞娜,吴昌娟,张玉玲,等. 基于熵权的 TOPSIS 模型在保护地番茄水肥评价中的应用[J]. 沈阳农业大学学报,2012,43(4):456-460.
YU Na, WU Changjuan, ZHANG Yuling, et al. Application of TOPSIS model method based on entropy weight to evaluate coupling effect of irrigation and fertilization of greenhouse tomato[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2012, 43(4):456-460. (in Chinese)
- 21 刘浩,段爱旺,孙景生,等. 温室番茄节水调质灌水方案评价[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(6):529-534,540.
LIU Hao, DUAN Aiwang, SUN Jingsheng, et al. Evaluation of irrigation scheme with high quality and efficiency for greenhouse grown tomato[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(6):529-534, 540. (in Chinese)
- 22 WANG Chunping, CHEN Qian, LUO Kun, et al. Evaluation of resistance in wheat germplasm to the aphids, *Sitobion avenae* based on technique for order preference by similarity to ideal solution) TOPSIS and cluster methods[J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(6):1592-1599.
- 23 李峰奇,孔令让,刘玉升,等. 用 TOPSIS 综合评价小麦种质资源对麦长管蚜的抗性[J]. 植物科学学报,2013,31(3):

- 228 - 241.
LI Fengqi, KONG Lingrang, LIU Yusheng, et al. TOPSIS based comprehensive evaluation of the resistance in wheat germplasm to English grain aphid[J]. Plant Science Journal, 2013, 31(3):228 - 241. (in Chinese)
- 24 姚入宇,陈兴福,艾莉,等. TOPSIS法综合比较不同采收期青川产北柴胡种子产量质量[J]. 中国中药杂志,2013,38(24):4271 - 4276.
YAO Ruyu, CHEN Xingfu, AI Li, et al. Comprehensive yield and quality comparison of bupleurum chinense, s seeds of different harvesting time from Qingchuan county with TOPSIS approach[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2013, 38(24):4271 - 4276. (in Chinese)
- 25 LIU Xiaogang, LI Fusheng, ZHANG Yan, et al. Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 172:1 - 8.
- 26 刘燕,张江山. 基于熵权的TOPSIS法在水环境质量评价中的应用[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2010,26(5):109 - 114.
LIU Yan, ZHANG Jiangshan. Application of TOPSIS method based on coefficient of entropy in water quality evaluation[J]. Journal of Fujian Normal University:Natural Science Edition, 2010, 26(5):109 - 114. (in Chinese)
- 27 陈强,杨晓华. 基于熵权的TOPSIS法及其在水环境质量综合评价中的应用[J]. 环境工程,2007,25(4):75 - 77.
CHEN Qiang, YANG Xiaohua. Comprehensive assessment of water environment quality by TOPSIS method based on entropy weight[J]. Environmental Engineering, 2007, 25(4):75 - 77. (in Chinese)
- 28 吴智诚,张江山,陈盛. TOPSIS法在水环境质量综合评价中的应用[J]. 水资源保护,2007,23(2):10 - 12.
WU Zhicheng, ZHANG Jiangshan, CHEN Sheng. Comprehensive evaluation of water environmental quality by TOPSIS method of multi-objective decision-making[J]. Water Resources Protection, 2007, 23(2):10 - 12. (in Chinese)
- 29 林红,李自珍. 半干旱区作物生态位适宜度模型及水肥调控试验结果的定量分析[J]. 兰州大学学报:自然科学版,1998,34(1):100 - 105.
LIN Hong, LI Zizhen. The niche-fitness model of crop in semi-arid regions and the quantitative analysis of the results of water - fertilizer regulation experiment[J]. Journal of Lanzhou University:Natural Sciences, 1998, 34(1):100 - 105. (in Chinese)
- 30 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- 31 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- 32 蒙莉娜,郑新奇,赵璐,等. 基于生态位适宜度模型的土地利用功能分区[J]. 农业工程学报,2011,27(3):282 - 287.
MENG Li'na, ZHENG Xinqi, ZHAO Lu, et al. Land-use functional regionalization based on niche-fitness model [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3):282 - 287. (in Chinese)
- 33 程龙,董捷. 基于生态位适宜度模型的城乡建设用地增减挂钩规划方法研究[J]. 中国人口·资源与环境,2012,22(10):94 - 101.
CHENG Long, DONG Jie. Planning method of "linking the increase in land used for urban construction with the decrease in land used for rural construction" based on niche-fitness model[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(10):94 - 101. (in Chinese)
- 34 张建国. 蔬菜花卉瓜果营养液栽培新技术[M]. 哈尔滨:黑龙江农业技术出版社,2003.
- 35 肖靖秀,郑毅. 间套作系统中作物的养分吸收利用与病虫害控制[J]. 中国农学通报,2005,21(3):150 - 154.
XIAO Jingxiu, ZHENG Yi. Nutrients uptake and pests and diseases control of crops in intercropping system [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(3):150 - 154. (in Chinese)
- 36 吕越,吴普特,陈小莉,等. 地上部与地下部作用对玉米/大豆间作优势的影响[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(1):129 - 136,142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140121&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.021.
LÜ Yue, WU Pute, CHEN Xiaoli, et al. Effect of above-and below-ground interactions on maize/soybean intercropping advantage [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):129 - 136, 142. (in Chinese)
- 37 杨成君,高严红. 营养液培莴苣硝酸盐含量的控制方式与效果[J]. 江苏农业科学,2011,39(1):176 - 178.
YANG Chengjun, GAO Yanhong. The control method and effect of the hydroponic lettuce nitrate content[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2011, 39(1):176 - 178. (in Chinese)