

# 基于模糊综合评价法的叶用莴苣壮苗指数模型建立与验证

张 斌 宫彬彬 边鑫宇 吴晓蕾 李敬蕊 吕桂云 高洪波\*

(河北农业大学园艺学院, 河北保定 071001)

**摘 要:** 叶用莴苣作为叶菜类蔬菜的主要种类之一, 其秧苗质量对提升产量和品质、机械化移栽和采收具有重要作用。本试验以结球莴苣射手 101 为试材, 在测定 16 项农艺性状指标的基础上, 利用模糊综合评价法计算秧苗的综合评价指数; 采用主成分分析法初步构建壮苗指数模型, 与综合评价指数进行相关分析, 得出相关性大且稳定的叶用莴苣壮苗指数; 并应用不同类型的 3 个叶用莴苣品种射手 101 (结球)、绿蝶 (半结球)、玻璃脆 (散叶) 进行验证。结果表明: 叶用莴苣秧苗综合评价指数分布在 0.215~0.958, 可以作为壮苗指数准确性的评价依据; 通过主成分分析法构建了 24 个壮苗指数模型, 并对 8 个相关性较大的模型进行验证, 其中模型 X15 (壮苗指数 = 总叶面积 × 根系平均直径 × 地下部鲜质量 × 宽长比) 的相关性最大 (0.749), 3 个叶用莴苣品种验证的相关性均最高, 证明该模型可用来准确评价叶用莴苣秧苗质量; 其他 7 个模型验证的相关性也明显高于对照, 其中模型 X19 (壮苗指数 = 地上部鲜质量 × 根系总长度 × 地下部鲜质量 × 宽长比) 的指标测定相对容易, 可作为生产应用的备选模型。

**关键词:** 叶用莴苣; 壮苗指数; 模糊综合评价法; 综合评价指数; 相关性分析

叶菜类蔬菜是我国蔬菜产业的重要组成部分, 占蔬菜生产的 30%~40% (张文斌 等, 2015)。近年来, 叶菜类蔬菜消费量稳定上升, 种植面积也逐渐扩大, 尤其是叶菜类蔬菜移栽和收获机械的研发和成功应用, 规模化生产对叶菜类蔬菜工厂化育苗的需求激增, 对秧苗的质量也提出了更高的要求。叶用莴苣 (生菜) 作为一类重要的叶菜类蔬菜, 主要包括结球、散叶和半结球等类型, 在我国栽培面积大、辐射范围广 (郝敬虹 等, 2014)。但在实际生产中, 缺乏秧苗的评价指标和方法, 种植者大多凭借主观经验或使用果菜类蔬菜秧苗的壮苗指数来评判叶用莴苣秧苗的健壮程度 (刘爽 等, 2014; 汤辉和钱春桃, 2015)。因此, 建立叶用莴苣秧苗科学、可靠的评价指标, 对提升其产量和品质、机

械化移栽和采收具有重要作用。

蔬菜秧苗质量的重要评价指标为壮苗指数, 陆帼一等在 1984 年就提出了番茄壮苗指数的计算方法: 壮苗指数 = (茎粗 / 株高) × 全株干质量 (陆帼一等, 1984)。随着工厂化育苗品种和育苗方式的变化, 该计算方法难以满足对所有蔬菜品种的科学评价。近年来, 不同学者针对不同种类蔬菜建立了壮苗指数, 如宫彬彬等 (2019) 采用模糊综合评价法和主成分分析法筛选出适于番茄幼苗评价的壮苗指数; 张菊平和张兴志 (1999) 采用通径分析和灰色关联分析法建立了辣椒幼苗的壮苗指数; 白岩等 (2014) 采用模糊综合评价法进行筛选并构建了烟草壮苗指数模型。这些对壮苗指数的研究主要以果菜类蔬菜幼苗作为研究对象, 而叶菜类蔬菜幼苗与果菜类蔬菜幼苗的形态差异较大, 不能完全沿用果菜类蔬菜的壮苗指数进行秧苗评价, 叶菜类蔬菜秧苗规模化生产迫切需要准确、可靠的秧苗评价方法。

壮苗指数建立的关键是选取合适的计算方法 (黄淑华 等, 2012)。模糊综合评价法是一种通过

张斌, 男, 硕士研究生, 专业方向: 设施园艺与无土栽培, E-mail: 1826278395@qq.com

\* 通信作者 (Corresponding author): 高洪波, 女, 教授, 博士生导师, 专业方向: 设施蔬菜与无土栽培, E-mail: hongbogao@hebau.edu.cn

收稿日期: 2021-06-02; 接受日期: 2021-08-27

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (20326902D)

多个指标隶属函数的构建对目标进行量化评价的方法, 目前已被广泛应用于土壤肥力水平测定(杨文娜等, 2019)、综合产量评价(Xu et al., 2021)、温室灌溉制度评价(龚雪文等, 2017)等农业生产领域, 并取得了较为理想的成果。本试验以结球莴苣射手 101 秧苗为试材, 在测定多个性状指标的基础上, 利用模糊综合评价法计算叶用莴苣秧苗的综合评价指数, 利用主成分分析法对指标进行筛选、组合, 初步构建叶用莴苣壮苗指数模型, 再运用相关分析法对综合评价指数与构建的壮苗指数模型进行相关分析, 筛选出相关性大且稳定的壮苗指数模型, 并应用不同类型叶用莴苣进行验证, 以期叶用莴苣秧苗的科学评价和生产筛选提供理论依据和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2020 年 7—9 月在河北省承德市沽源县三源食品科技有限公司进行。供试叶用莴苣品种为射手 101 (结球)、绿蝶 (半结球) 和玻璃脆 (散叶), 由上海惠和种业有限公司提供; 其中, 构建壮苗指数模型以射手 101 为试材, 验证壮苗指数模型稳定性以射手 101、绿蝶、玻璃脆为试材。育苗方式为穴盘漂浮育苗, 育苗基质为草炭: 蛭石 = 3 V: 7 V, 待秧苗长至四叶一心时取样, 清水洗净后进行各项指标的测定。

### 1.2 指标测定

随机选取 300 株不同大小、健壮的射手 101 秧苗, 分别测定根系指标、地上部和地下部鲜质量及干质量、总叶面积、叶片长、叶片宽、SPAD、茎粗等。采用直尺测定秧苗上大于 5 cm 的叶片长度和大于 2 cm 的叶片宽度, 分别取平均值作为叶片长和叶片宽, 宽长比 = 叶片宽 / 叶片长; 采用游标卡尺 (日本三丰 (Mitutoyo) 公司, IP67) 测定茎粗 (子叶偏上部位); 采用根系扫描仪 (GXY-A) 对根部进行扫描, 测定根系平均直径、总体积、表面积、总长度; 采用万分之一电子天平 (奥豪斯电子仪器有限公司, CP114) 测定地上部鲜质量、地下部鲜质量和全株鲜质量, 然后置于 105 °C 杀青 10 min, 80 °C 条件下烘干至恒重, 测定地上部干质量、地下部干质量和全株干质量; 采用平台扫描仪结合

Image J 软件测定总叶面积; 每株秧苗选取 3 片叶色浓绿、厚实的真叶, 采用叶绿素仪 SPAD-502 测定叶片 SPAD 值。

### 1.3 壮苗指数评判体系和模型的建立

1.3.1 单项指标隶属函数的选择 隶属函数的选择是模糊综合评价法中的首要关键环节。本试验考虑实际生产需求并参考秧苗指标与质量的相关程度确定了 3 种类型的隶属函数: 抛物线型、正 S 型和正态分布偏大型。根据现阶段叶用莴苣秧苗的壮苗标准, 并考虑到与机械移栽的适应性, 选定合适的隶属函数类型来匹配相应指标。其中, 叶片长在一定长度范围内时的秧苗质量最好, 过长或过短不仅会降低秧苗质量还会在移栽时造成拖苗或挂苗现象的发生, 影响栽植效率 (黄少华等, 2006; 刘明峰等, 2015), 符合抛物线型隶属函数特征; 茎粗在低于某一数值时与秧苗质量呈正相关, 大于该数值的则属于壮苗并在后期可以获得较为稳定的产量 (张杰和阮先乐, 2013), 符合正 S 型隶属函数特征; 鲜质量和干质量、总叶面积、根系指标、叶片宽、宽长比、SPAD 等与秧苗质量和后期产量均呈正相关关系并且没有明确的上下限 (张白鸽等, 2011; 鱼昭君等, 2017), 尤其是根系指标与机械移栽中秧苗散坨率有显著的相关性 (唐玉新等, 2017), 符合正态分布数据特征, 因此选择正态分布偏大型隶属函数。

隶属函数表达式及构建方式参考许明祥 (2003) 的方法, 将指标的测定值代入相应隶属函数公式, 计算隶属度, 组合成叶用莴苣 16 个指标的单因素评价矩阵  $A$ 。

$$A = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{m1} & \mu_{m2} & \cdots & \mu_{mn} \end{bmatrix}$$

式中,  $\mu$  代表单个指标隶属函数值,  $m$  为样本数,  $n$  为指标数。

1.3.2 权重系数和综合评价指数的计算 权重系数与综合评价指数的计算参考宫彬彬等 (2019) 的方法。

1.3.3 壮苗指数模型的建立 参考河北农业大学园艺学院设施蔬菜与无土栽培课题组前期构建番茄、草莓和西瓜壮苗指数的方法 (宫彬彬等, 2019), 采用主成分分析法筛选关键指标, 构建叶用莴苣壮

苗指数模型。

#### 1.4 壮苗指数模型的验证

以射手 101、绿蝶、玻璃脆为材料, 每品种随机选取 60 株, 测定指标和方法同 1.2; 根据相关性的大小验证壮苗指数模型的稳定性。

#### 1.5 数据处理

应用 Excel 2010 软件对试验数据进行多元回归分析和相关性分析, 应用 SPSS 22.0 软件对试验数据进行主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 单项指标的权重系数

由表 1 可知, 叶用莴苣秧苗根系指标、地上部和地下部鲜质量及干质量、总叶面积、叶片长、叶片宽和宽长比等指标的权重系数较为接近且偏低, 在 0.057~0.061 之间, 表明这些指标存在明显共线性, 相关性较大; 茎粗的权重系数为 0.074, 与其他指标间的共线性较差; 叶片 SPAD 的权重系数最大, 为 0.119, 与其他指标间的相关性较小。

表 1 叶用莴苣秧苗单项指标的权重系数

指标	权重系数	指标	权重系数
叶片长	0.058	地下部干质量	0.057
叶片宽	0.057	全株干质量	0.057
宽长比	0.058	总叶面积	0.060
茎粗	0.074	根系总体积	0.058
地上部鲜质量	0.057	根系总长度	0.058
地下部鲜质量	0.057	根系表面积	0.057
全株鲜质量	0.057	根系平均直径	0.061
地上部干质量	0.057	SPAD	0.119

### 2.2 单项指标的隶属函数

叶用莴苣秧苗单项指标隶属函数的选择与各指标的参数取值见表 2。其中, 叶片长在 8~10 cm (包括 8、10 cm) 范围内的隶属函数值最高, 超过或低于这一范围都会造成函数值的降低; 茎粗在 5 mm 以下与隶属函数值呈线性关系, 大于 5 mm (包括 5 mm) 的均为壮苗且隶属函数值最大; 地上部鲜质量、地下部鲜质量、全株鲜质量、地上部干质量、地下部干质量、全株干质量、总叶面积、根系总体积、根系总长度、根系表面积、根系平均

表 2 叶用莴苣秧苗单项指标的隶属函数和临界值

指标	隶属函数类型	隶属函数	隶属函数参数				
			$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$s$
叶片长/cm	抛物线型	$\mu_1(x) = \begin{cases} 1.0 & x_2 \leq x \leq x_3 \\ 0.9 \frac{x-x_1}{x_2-x_1} + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 0.9 \frac{x_4-x}{x_4-x_3} + 0.1 & x_3 < x < x_4 \\ 0.1 & x_1 \leq x_1, x \geq x_4 \end{cases}$	4	8	10	14	—
茎粗/mm	正 S 型	$\mu_2(x) = \begin{cases} 1.0 & x_4 \leq x \leq x_5 \\ 0.9 \frac{x-x_1}{x_4-x_1} + 0.1 & x_1 < x < x_4 \\ 0.1 & x \leq x_1 \end{cases}$	2	—	5	6	—
地上部鲜质量/g	正态分布偏大型	$\mu_3(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x-x_1}{s}\right)^2} & x_1 < x \\ 0 & x \leq x_1 \end{cases}$	1.74	—	—	—	1.530
地下部鲜质量/g			0.25	—	—	—	0.210
全株鲜质量/g			2.14	—	—	—	1.650
地上部干质量/g			0.12	—	—	—	0.082
地下部干质量/g			0.01	—	—	—	0.015
全株干质量/g			0.14	—	—	—	0.088
总叶面积/cm <sup>2</sup>			42.47	—	—	—	28.270
根系总体积/cm <sup>3</sup>			0.08	—	—	—	1.240
根系总长度/cm			29.17	—	—	—	43.020
根系表面积/cm <sup>2</sup>			4.09	—	—	—	18.490
根系平均直径/mm			0.39	—	—	—	0.190
叶片宽/cm			1.90	—	—	—	0.860
宽长比			0.23	—	—	—	0.090
SPAD (无量纲)			20.10	—	—	—	3.930

注:  $\mu(x)$  为函数值,  $x_1$  表示数值下限,  $x_2$  表示最优数值下限,  $x_3$  表示最优数值上限,  $x_4$  表示数值上限,  $s$  为指标标准差。

直径、叶片宽、宽长比和 SPAD 等指标与秧苗质量均呈正态相关, 并且没有明确的上下限, 隶属函数选择正态分布偏大型。

2.3 综合评价指数和各指标主成分分析

300 株大小存在明显差异的叶用莴苣秧苗的综合评价指数集中在 0.215~0.958, 涵盖的范围较大, 表明综合评价指数能够作为壮苗指数准确性的评价依据。通过对 16 个单项指标进行主成分分析, 共提取到 4 个主成分, 第 1 主成分贡献率为 41.273%, 第 2 主成分贡献率为 22.665%, 第 3 主成分贡献率为 10.838%, 第 4 主成分贡献率为 7.933%, 累积贡献率 82.709% (表 3), 叶用莴苣

表 3 主成分分析的特征值及累积贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	6.604	41.273	41.273
2	3.626	22.665	63.938
3	1.734	10.838	74.776
4	1.269	7.933	82.709

秧苗质量评判时需包含 4 个主成分中的主要指标。由表 4 可知, 第 1 主成分主要包括地上部鲜质量、

表 4 叶用莴苣秧苗指标的主成分分析

指标	主成分			
	PC1	PC2	PC3	PC4
地上部鲜质量	0.949			
全株鲜质量	0.928			
总叶面积	0.920			
地上部干质量	0.872			
全株干质量	0.861			
叶片宽	0.779			
叶片长	0.778			
茎粗	0.706			
根系表面积		0.982		
根系总体积		0.927		
根系平均直径		0.916		
根系总长度		0.822		
地下部干质量			0.897	
地下部鲜质量			0.850	
宽长比				0.959
SPAD				0.383

表 5 叶用莴苣壮苗指数模型

编号	壮苗指数公式	相关性
CK1	(茎粗/株高) × 全株干质量	0.596**
CK2	(茎粗/株高 + 地下部干质量/地上部干质量) × 全株干质量	0.630**
X1	地上部鲜质量 × 根系表面积 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.657**
X2	全株鲜质量 × 根系表面积 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.641**
X3	总叶面积 × 根系表面积 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.647**
X4	茎粗 × 根系表面积 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.604**
X5	地上部干质量 × 根系表面积 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.625**
X6	全株干质量 × 根系表面积 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.622**
X7	地上部鲜质量 × 根系总体积 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.466**
X8	全株鲜质量 × 根系总体积 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.452**
X9	总叶面积 × 根系总体积 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.446**
X10	茎粗 × 根系总体积 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.398**
X11	地上部干质量 × 根系总体积 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.414**
X12	全株干质量 × 根系总体积 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.415**
X13	地上部鲜质量 × 根系平均直径 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.737**
X14	全株鲜质量 × 根系平均直径 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.732**
X15	总叶面积 × 根系平均直径 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.749**
X16	茎粗 × 根系平均直径 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.732**
X17	地上部干质量 × 根系平均直径 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.725**
X18	全株干质量 × 根系平均直径 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.724**
X19	地上部鲜质量 × 根系总长度 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.683**
X20	全株鲜质量 × 根系总长度 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.666**
X21	总叶面积 × 根系总长度 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.677**
X22	茎粗 × 根系总长度 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.654**
X23	地上部干质量 × 根系总长度 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.678**
X24	全株干质量 × 根系总长度 × 地下部鲜质量 × 宽长比	0.669**

注: \*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。



全株鲜质量、总叶面积、地上部干质量、全株干质量、叶片宽、叶片长和茎粗, 这些指标主要与秧苗地上部有关; 第2主成分主要包括根系表面积、根系总体积、根系平均直径和根系总长度, 这些指标主要代表着根系形态; 第3主成分主要包括地下部干质量和地下部鲜质量, 这2个指标主要与根系质量有关; 第4主成分主要包括宽长比和SPAD, 这2个指标主要与秧苗叶片形态和光合色素有关。说明叶用莴苣秧苗的质量评价应充分考虑秧苗的地上部质量、叶片形态指标、地下部质量及根系形态指标等方面。

## 2.4 壮苗指数模型的建立及相关分析

根据各指标贡献值的大小以及测定的复杂程度, 筛选出贡献值较大且容易测定的指标共12项, 其中PC1中去掉叶片长和叶片宽指标, PC3中去掉地下部干质量指标, PC4中去掉SPAD指标; 然后从每类主成分中分别选取1项指标进行完全随机排列组合, 得到了24个壮苗指数模型, 并选择传统的壮苗指数 = (茎粗 / 株高) × 全株干质量 (陆帼一 等, 1984) 和壮苗指数 = (茎粗 / 株高 + 地下部干质量 / 地上部干质量) × 全株干质量 (Ma et al., 2018) 作为对照 (表5)。对壮苗指数模型与综合评价指数进行相关性分析, CK1、CK2和构建的24个壮苗指数与综合评价指数的相关性均达极显著水平, 其中X15 (壮苗指数 = 总叶面积 × 根系平均直径 × 地下部鲜质量 × 宽长比) 与综合评价指数的相关性最大, 为0.749; 其他相关性较大的模型为X13、X14、X16、X17、X18、X19、X23。这8个模型与综合评价指数的相关性均明显大于对照, 故留待后续验证。

## 2.5 壮苗指数模型验证

不同类型叶用莴苣的形态特征有所差异, 为确保得出的壮苗指数具有较高的稳定性, 本试验同时利用3种不同类型的叶用莴苣对壮苗指数模型进行验证。从表6可知, X15在3个品种中的相关性均最大, 分别为0.749、0.825和0.894, 表现出较好的一致性, 可作为评价叶用莴苣秧苗质量的壮苗指数。此外, 其他壮苗指数的相关性也均大于CK1和CK2, 可根据实际生产情况进行选择使用。

表6 不同类型叶用莴苣壮苗指数与综合评价指数的相关性分析

壮苗指数模型编号	相关性		
	射手 101	绿蝶	玻璃脆
CK1	0.596	0.698	0.733
CK2	0.630	0.642	0.742
X13	0.737	0.784	0.823
X14	0.732	0.778	0.864
X15	0.749	0.825	0.894
X16	0.732	0.813	0.839
X17	0.725	0.756	0.834
X18	0.724	0.762	0.829
X19	0.683	0.743	0.812
X23	0.678	0.725	0.801

## 3 讨论与结论

近些年, 越来越多的研究采用数学算法来分析筛选壮苗指标, 黄淑华等 (2012) 采用相关分析和灰色关联分析方法筛选出适于丹参幼苗的壮苗指数; 张菊平和张兴志 (1999) 应用通径分析和灰色关联分析法得到辣椒幼苗的壮苗指数; 王广龙等 (2014) 采用聚类分析和通径分析筛选出番茄幼苗质量评价指标。但以上方法对指标均采用线性相关的分析方法, 对作物的某些指标并不适用。模糊综合评价法可以根据指标类型选择合理的隶属函数 (林晓辉, 2002), 目前已在作物品种抗性评价 (金艳 等, 2018)、基质配方筛选 (王飞 等, 2020)、幼苗抗旱性评价 (藺豆豆 等, 2021) 和烟草壮苗评价 (白岩 等, 2014) 等农业领域得到了广泛应用, 将传统的定性评价转化为精准的定量评价。本试验尝试采用模糊综合评价法构建了叶用莴苣壮苗指数模型, 通过计算指标权重和构建非线性隶属函数, 得到了准确的综合评价指数, 为壮苗指数的筛选提供了可靠的依据。

目前许多专家针对不同作物建立了秧苗壮苗指数, 例如宫彬彬等 (2019) 采用 (总叶绿素含量 / 株高) × 全株干质量作为番茄秧苗的壮苗指数; 张硕等 (2015) 以壮苗指数 = (茎粗 / 株高 + 地下干质量 / 地上干质量) × 单株干质量来评价黄瓜秧苗; 高玉红等 (2018) 利用 (根鲜质量 / 地上部鲜质量 + 茎粗 / 株高) × 全株鲜质量作为甜瓜的壮苗指数。但由于叶菜类蔬菜秧苗与果菜类蔬菜秧苗在形态上存在较大差异, 使得这些壮苗指数不能在叶菜

类蔬菜上进行通用。本试验筛选出的叶用莴苣壮苗指数模型：总叶面积 $\times$ 根系平均直径 $\times$ 地下部鲜质量 $\times$ 宽长比，包含叶片形态、根系形态、根系质量等指标，与传统壮苗评价方法（壮苗指数=（茎粗/株高） $\times$ 全株干质量）相比，着重考虑了地上部及地下部形态发育和秧苗质量的关系（明村豪等，2011；Kang et al., 2016；Bella et al., 2021），同时充分考虑到叶面积、宽长比和根系指标等对秧苗机械化移栽的影响（刘明峰等，2015；唐玉新等，2017；胡乔磊等，2019），能够作为叶用莴苣秧苗健壮程度科学、可靠的评价方法。

蔬菜壮苗指标的筛选和评价需要考虑到品种的适应性，因此模型的验证要采用不同品种进行。王广龙等（2014）以番茄品种合作906（有限生长型）为试材，以合作908（无限生长型）为验证材料筛选番茄幼苗质量评价指标；宫彬彬等（2019）在建立番茄壮苗指数时选用金棚1号、东圣和美颜1319等品种作为验证；宫彬彬等（2021）在建立草莓壮苗指数时选用红颜、香野和甜查理等品种作为验证。叶用莴苣虽然品种较多，但主要分为结球、半结球和散叶3种类型（陈青君等，2011），为确保壮苗指数的适应性，本试验选用了3种不同类型叶用莴苣秧苗进行验证，证明不同类型叶用莴苣秧苗在苗期的壮苗指数差异较小，因此构建的壮苗指数具有较好的适应性，可以用于评价不同类型的叶用莴苣秧苗。

本试验建立的叶用莴苣秧苗的壮苗指数模型X15（壮苗指数=总叶面积 $\times$ 根系平均直径 $\times$ 地下部鲜质量 $\times$ 宽长比），提高了壮苗指数的精准度，可以作为叶用莴苣秧苗的科学、可靠的评价方法；但从指标测定难易程度考虑，模型X19（壮苗指数=地上部鲜质量 $\times$ 根系总长度 $\times$ 地下部鲜质量 $\times$ 宽长比）也可作为生产应用的参考方法，为叶菜类蔬菜优质秧苗的科学评价和生产选用提供理论依据。

#### 参考文献

- 白岩，史万华，邢小军，王勇，靳义荣，张良，宋毓峰，董连红，刘好宝. 2014. 烟草壮苗指数模型研究. 中国农业科学, 47 (6): 1086-1098.
- 陈青君，韩莹琰，谷建田，范双喜. 2011. 叶用莴苣种质资源的主要农艺性状鉴定与耐热性评价. 中国蔬菜, (20): 20-27.

- 高玉红，闫生辉，邓黎黎. 2018. 逆境胁迫对甜瓜幼苗生长的影响及综合抗逆鉴定指标的筛选. 江苏农业科学, 46 (15): 116-118.
- 宫彬彬，王宁，章铁军，吴晓蕾，吕桂云，褚新培，高洪波. 2019. 综合形态与叶片叶绿素含量的番茄壮苗指数筛选. 农业工程学报, 35 (8): 237-244.
- 宫彬彬，吴晓蕾，张斌，陈一卓，边鑫宇，纪日翟，高洪波. 2021. 草莓种苗壮苗指数模型的构建与质量评价. 应用生态学报, 32 (8): 2809-2817.
- 龚雪文，刘浩，刘东鑫，王湾湾，孙景生. 2017. 基于模糊算法的温室番茄调亏滴灌制度综合评判. 农业工程学报, 33 (14): 144-151.
- 郝敬虹，景睿，苏贺楠，刘慧，韩莹琰，刘超杰，范双喜. 2014. 不同类型叶用莴苣类胡萝卜素含量的差异性分析. 北京农学院学报, 29 (3): 30-32.
- 胡乔磊，廖庆喜，王洋. 2019. 油菜机械移栽栽苗基质块力学与生物学特性分析. 农业工程学报, 35 (24): 58-65.
- 黄少华，王增春，刘胜环. 2006. 不同植物生长调节剂浸种对油菜壮苗的效果比较. 江苏农业科学, (3): 49-51.
- 黄淑华，徐福利，王渭玲，杜俊波，汝梅，王静，曹鲜艳. 2012. 丹参壮苗指数及其模拟模型. 应用生态学报, 23 (10): 2779-2785.
- 金艳，王英哲，陈晶晶，郭强，徐博. 2018. 14个紫花苜蓿杂交组合耐盐性比较. 草业科学, 35 (12): 2931-2939.
- 藺豆豆，赵桂琴，琚泽亮，宫文龙. 2021. 15份燕麦材料苗期抗旱性综合评价. 草业学报, 196 (11): 108-121.
- 林晓辉. 2002. 一种确定联系度的新方法——隶属函数法. 统计与决策, (1): 16.
- 刘明峰，胡先朋，廖宜涛，廖庆喜，万星宇，冀牧野. 2015. 不同油菜品种适栽期机械化移栽植株形态特征研究. 农业工程学报, 31 (增刊): 79-88.
- 刘爽，王宇欣，刘志丹. 2014. 生物氢烷工程沼渣用于油菜及菠菜育苗的效果. 农业工程学报, 30 (11): 225-232.
- 陆幅一，张和义，周存田. 1984. 番茄壮苗指标的初步研究. 中国蔬菜, (1): 13-17.
- 明村豪，蒋芳玲，胡宏敏，周学超，詹锋华，吴震. 2011. 幼苗徒长程度对黄瓜植株生长发育及产量品质的影响. 中国蔬菜, (4): 29-34.
- 汤辉，钱春桃. 2015. 水芹菜水培营养液配方的筛选. 安徽农业科学, 43 (27): 58-60.
- 唐玉新，曲萍，陆岱鹏，李辉，易中懿. 2017. 适合机械化移栽的番茄穴盘育苗基质配方筛选. 江苏农业学报, 33 (6): 1342-1348.
- 王飞，王波，郁继华，颜建明，冯致，廖伟彪，吕剑. 2020. 基于隶属函数法的油麦菜栽培基质综合评价. 西北农业学报, 29 (1): 117-126.
- 王广龙，魏猷刚，章鸥，杨泽恩，蒋芳玲，吴震. 2014. 利用多元统计方法筛选确定番茄幼苗质量评价指标. 西北农业学报, 23 (6): 147-155.

- 许明祥. 2003. 黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及调控 (博士论文). 杨凌: 西北农林科技大学.
- 杨文娜, 任嘉欣, 李忠意, 徐义, 李振轮, 何丙辉. 2019. 主成分分析法和模糊综合评价法判断喀斯特土壤的肥力水平. 西南农业学报, 32 (6): 1307-1313.
- 鱼昭君, 张淑娟, 闫芳芳, 惠麦侠. 2017. 不结球白菜不育系组合产量性状杂种优势分析. 西北农业学报, 26 (4): 603-608.
- 张白鸽, 陈琼贤, 王金祥, 杨秋, 曹健, 赫新洲. 2011. 不同酸调节溶液 pH 对生菜漂浮幼苗根系形态及产量的影响. 农业科学与技术, 12 (7): 985-989.
- 张杰, 阮先乐. 2013. 莴菜芽苗菜生物学性状及营养变化研究. 北方园艺, (3): 9-12.
- 张菊平, 张兴志. 1999. 辣椒壮苗指数与苗期性状的关系分析. 河南农业大学学报, 33 (增刊): 120-122.
- 张硕, 余宏军, 蒋卫杰. 2015. 发酵玉米芯或甘蔗渣基质的黄瓜育苗效果. 农业工程学报, 31 (11): 236-242.
- 张文斌, 张龙全, 黄裕飞. 2015. 叶菜类蔬菜主要生产环节机械化发展现状与对策分析. 江苏农机化, (1): 53-56.
- Bella E L, Baglieri A, Rovetto E I, Stevanato P, Puglisi I. 2021. Foliar spray application of chlorella vulgaris extract: effect on the growth of lettuce seedlings. Agronomy, 11 (2): 308-320.
- Kang W H, Park J S, Park K S, Son J E. 2016. Leaf photosynthetic rate, growth, and morphology of lettuce under different fractions of red, blue and green light from light-emitting diodes (leds). Horticulture Environment & Biotechnology, 57 (6): 573-579.
- Ma C X, Liu K, Zhang Y M, Wang J Q. 2018. Effect of different combined treatments on tomato seedling growth in high-temperature season. Agricultural Biotechnology, 7 (3): 32-35, 40.
- Xu X B, Nie C W, Jin X L, Li Z H, Zhu H C, Xu H G, Wang J W, Zhao Y, Feng H K. 2021. A comprehensive yield evaluation indicator based on an improved fuzzy comprehensive evaluation method and hyperspectral data. Field Crops Research, 270: 1-16.

## Establishment and Verification of Lettuce Strong Seedling Index Model Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation

ZHANG Bin, GONG Binbin, BIAN Xinyu, WU Xiaolei, LI Jingrui, LYU Guiyun, GAO Hongbo\*

(College of Horticulture, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China)

**Abstract:** Lettuce as one of the main varieties of leaf vegetables, its seedling quality plays an important role in promoting the yield and quality, mechanized transplanting and harvesting. This experiment took head lettuce ‘Sheshou 101’ as test material; on the basis of measuring 16 trait indexes, calculated the comprehensive evaluation index of seedlings by fuzzy comprehensive evaluation method; preliminarily constructed the strong seedling index model by principal component analysis method; carried out correlation analysis on comprehensive evaluation index; and obtained a large correlation but stable lettuce strong seedling index. This experiment also conducted verification using 3 different types of lettuce varieties ‘Sheshou 101’ (head lettuce), ‘Lyudie’ (half head lettuce), and ‘Bolicui’ (loose leaf lettuce). The results showed that the comprehensive evaluation index of lettuce seedlings was distributed on 0.215-0.958, which could be used as evaluation basis for precision of strong seedling index. 24 strong seedling index models were constructed by principal component analysis method, and 8 models with greater correlation were verified. Among them, the correlation of model X15 “leaf area  $\times$  average root diameter  $\times$  underground fresh mass  $\times$  width-length ratio” was the largest (0.749). The verified correlation of these 3 lettuce varieties all were the highest, proving that this model could be used for accurate evaluation of seedling quality. Correlations of the other 7 models were also significantly higher than those of the contrast, but model X19 “above ground fresh mass  $\times$  total length of root system  $\times$  underground fresh mass  $\times$  width-length ratio” index measurement was relatively easy, which could be used as an alternative model for production application.

**Keywords:** lettuce; strong seedling index; fuzzy comprehensive evaluation; comprehensive evaluation index; correlation analysis