DOI：10.13718/j.cnki.xdzk.2015.01.018

蔬菜基地环境质量的多层次模糊综合评价
——以重庆市璧山县璧北蔬菜基地为例①

廖兴勇，　魏朝富，　骆云中

西南大学 资源环境学院，重庆 400716

摘要：通过对重庆市璧山县璧北蔬菜基地大气、灌溉水及土壤各污染指标的监测，采用多层次模糊综合评价方法和超标加权法，对该蔬菜基地的大气、灌溉水、土壤以及整体的环境质量进行了综合评价和分析. 研究发现：璧北蔬菜基地各单项环境质量和整体环境质量都属于“清洁”水平，符合当前国家规定的无公害蔬菜生产基地环境质量应当满足的要求；但该基地中灌溉水中总砷含量为“尚清洁”，因此需要加强对灌溉水环境质量的重点监测，避免砷进入食物链危害人体健康.

关　键　词：蔬菜基地；环境质量；多层次模糊综合评价；璧山县

中图分类号：X171.1　　**文献标志码：A**　　**文章编号：**1673-9868(2015)01-0118-10

蔬菜作为人们日常生活不可或缺的重要食品，关乎国计民生，其生产、供应的情况，直接关系到广大人民群众的切身利益与生活水平. 蔬菜质量安全更是关系到国民的身体健康、社会的安定团结甚至国家的可持续发展. 同时，蔬菜产业作为实施城乡居民“菜篮子”工程的重要组成部分，也是广大农民经济收入的主要来源，搞好蔬菜基地建设与产业化经营，对提高农民经济收入，加快蔬菜产业及农村经济发展具有重大的战略意义[1]. 但是，随着工业化、城市化进程的不断加快和农业的快速发展，环境污染加剧，我国农产品产地环境问题日益突出[2]. 近年来，工业“三废”的排放和农村生活垃圾等废弃物随意丢弃以及农业生产中农药、化肥的不合理使用，导致我国蔬菜产地的大气、灌溉水、土壤等环境质量下降甚至受到严重污染，难以保证蔬菜的质量安全，也给人体健康带来潜在的危害.

蔬菜产地环境对无公害蔬菜及绿色蔬菜的安全生产至关重要，而开展蔬菜基地环境质量评价是无公害蔬菜基地建设的基础工作，也是蔬菜安全生产的基础保障，还可以为农业和土地管理等相关部门科学利用、管理与保护蔬菜产地提供依据. 对于蔬菜基地环境质量评价，国内外已经展开了一些研究. 从评价内容来看，大部分学者关注的是蔬菜产地的土壤环境质量，并且集中在土壤的重金属(砷、镉，铬，铜，汞，镍，锌，铅等)污染评价[3-8]、土壤重金属与农药(滴滴涕、六六六等)污染评价[9,10]以及土壤重金属与土壤肥力(土壤质地、pH、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质、全盐含量等)评价[10-11]等方面；个别学者对设施蔬菜棚室内环境空气质量进行了评价，提出了每种污染物(可吸入颗粒物、二氧化硫、二氧化氮、氟化物等 10 种污染物)的最高允许浓度[12]；此外，还有部分学者对蔬菜生产基地的大气、灌溉水及土壤环境质量都进行了全面的监测和评价[1,13-15]. 从评价方法来看，绝大部分研究采用单项污染指数与综合污染指数(如内

① 收稿日期：2013-09-27
基金项目：国家科技支撑计划项目“乡村土地流转与资源整合关键技术与示范”(2013BAJ11B02).
作者简介：廖兴勇(1972-)，男，四川阆中人，讲师，博士，主要从事土地资源管理教学与研究.
通信作者：魏朝富，研究员，博士研究生导师.

梅罗综合污染指数法和几何均数指数法)相结合的方法[3-4, 8-9, 13-15]；王京文等在地理信息系统(GIS)技术支持下，对浙江省慈溪市周巷镇蔬菜基地进行环境质量评价及分级[11]，或者通过克里格插值法分析江干区蔬菜基地土壤-蔬菜重金属含量空间分布特征[16]；王春光等采用多种评价方法(单因子污染指数、内梅罗综合污染指数法及模糊数学综合评价法)进行土壤重金属污染综合评价[17].

生产出无污染、安全的蔬菜产品必然要求蔬菜基地大气、灌溉水以及土壤等生产环境都是清洁、安全的，因此，蔬菜基地选择也必然要求对蔬菜产地的大气、灌溉水及土壤环境质量的全面监测和评估. 然而，已有蔬菜基地环境(包括空气、水、土环境)质量评价普遍采用的单项污染指数与综合污染指数评价方法，未考虑到蔬菜基地环境质量及评价等级的模糊性，会因为采用标准的不同而得到差异很大的评价结果[18]，而且只能针对大气、灌溉水或土壤单项环境质量进行评价，无法综合评价蔬菜基地的整体环境质量. 模糊综合评价法由于具有处理各种难以用精确数学方法描述的复杂的环境评价问题的优越性[19]，在大气环境质量评价[20-22]、水环境质量评价[23-25]、土壤环境质量评价[26-28]以及粮食作物产地环境质量评价[19]等方面得到了广泛应用. 本文采用多层次模糊综合评价方法，对有利于带动渝遂高速公路沿线蔬菜产业、乃至全市蔬菜产业规范化和标准化发展的重庆市璧山县璧北蔬菜基地的大气、灌溉水、土壤以及整体环境质量进行综合评价，以期为重庆丘陵山区城郊的蔬菜基地建设和产业发展提供科学依据.

1 研究区概况

璧山县璧北的蔬菜基地位于重庆市璧山县城区北部，总面积为 126.91 hm^2(图 1). 地貌类型主要为川东平行领谷区向斜丘陵，地势自西北向东南缓倾，海拔 294.13～322.98 m. 土壤为侏罗系沙溪庙组泥岩与砂岩发育形成的紫色土同紫色水稻土，该类型土层厚度为 0.3～1.0 m，pH 值介于 5.5～7.5 之间，土壤质地疏松，通透性好. 该区域属于中亚热带湿润季风气候，雨量充沛，气候湿润，四季分明，具有春旱、夏热、秋迟、冬暖、无霜期长以及风速小、湿度大、日照少、云雾绵雨多的特点. 年均温度 18.3 ℃，极端最高温度 39.7 ℃，极端最低温度 2.3 ℃，年平均降雨量达 1 231.2 mm，年均日照时数为 911.5 h；年均无霜期337 d. 主要种植的蔬菜类型有蕃茄、苕尖、茄子、莲藕、黄瓜、南瓜等. 璧北蔬菜基地南部有一条自然冲沟，多年平均水流量约为 0.253 m^3/s，干旱季节水流量约为 0.07 m^3/s，干旱季节每日最大可提供水量 6 048 m^3. 该河沟常年有水，且由于河流无工业和生活废水污染，可作为两岸耕地的灌溉水源. 大部分山坪塘现状较好，蓄水能力较强，能为周边水田和旱地提供有效的灌溉水源. 总体说来，无论是从土壤、海拔、气候等蔬菜立地条件来分析，还是从水源、交通、规模等产地环境来考虑，该研究区均适宜建设蔬菜基地.

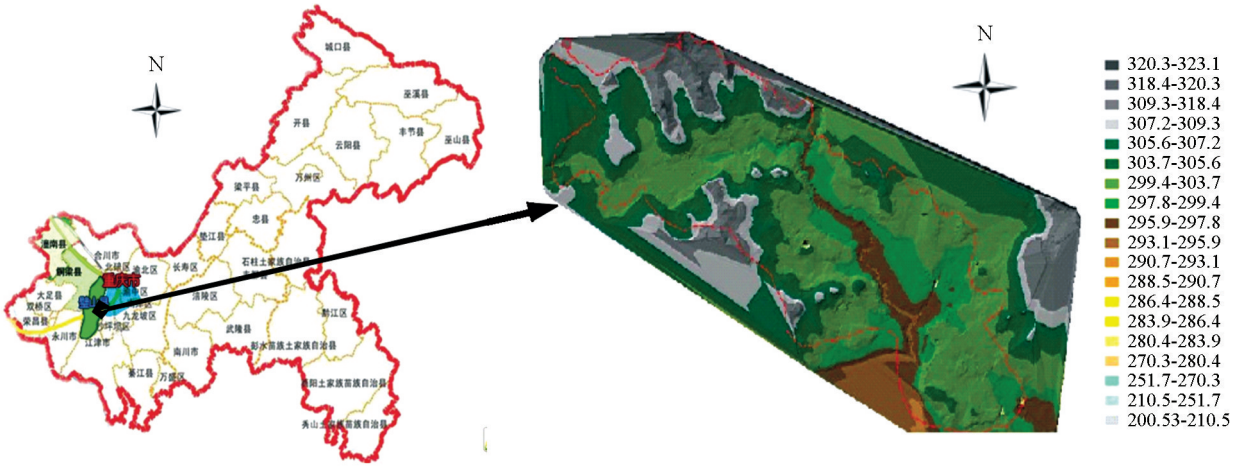

图 1 研究区示意图

2　材料与方法

2.1　样品的采集和处理

2.1.1　采样布点原则与采样方法

根据重庆市璧山县璧北蔬菜基地的自然环境状况，以控制整体为原则，参照中华人民共和国农业部《蔬菜标准园创建规范(试行)》、《无公害食品蔬菜产地环境条件》(NY5010-2002)的要求，以空气、灌溉水和土壤为监测对象，在最有可能产生污染的不利方位与区域布设空气、灌溉水及土壤采样点. 在蔬菜基地 5 km及主导风向 20 km 以内且周边没有工矿业污染的区域，布设空气监测点 1 个，采用动力学方法对空气的二氧化硫、氟化物、总悬浮颗粒物、二氧化氮进行两次采样；布设灌溉水监测点 2 个；采用非均匀性布点法布设土壤监测点 8 个，土壤样品为耕作层采样点附近若干点土壤均匀混合后形成的混合土样.

2.1.2　样品处理的原则与方法

空气样品的处理原则与方法：采集的空气样品及时放入样品箱进行避光保存，并且在采样结束后及时进行测定分析；灌溉水样品采集结束后立刻采取避免水质变化的措施，及时在实验室进行检测与分析.

土壤样品的处理原则与方法：为了保证土壤样品的准确性和代表性，样品风干后选用白色瓷研钵、木棒、木滚、木捶、有机玻璃板、有机玻璃棒等研磨，并用尼龙筛过 20，60 和 100 目，分装于聚乙烯塑料瓶，置于通风干燥区保存待测.

空气及灌溉水的处理原则与方法：空气的监测项目为二氧化硫、氟化物、总悬浮颗粒物和二氧化氮等 4 项指标，灌溉水的监测项目为总汞、总镉、总铅、总砷、铬(六价)和氰化物等 6 项指标，土壤的监测项目为总汞、总镉、总铅、总砷和总铬等 5 项指标. 空气、灌溉水和土壤监测项目分别严格按照《环境空气质量标准》(GB3095-1996)、《农田灌溉水质标准》(GB5084-2005)和《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2004)等相关规定和要求执行.

2.2　多层次模糊综合评价法

模糊综合评价法是在模糊环境下，以模糊数学为基础，通过隶属度将环境质量变化的不确定性、随机性以及模糊性加以量化，应用模糊变换原理进行复合运算得到综合评价结果[27, 29]. 模糊综合评价分为单层次综合评价模型和多层次综合评价模型，前者是指评价要素只有一个层次，后者是指评价要素具有层次结构[30]，如评价总要素蔬菜基地环境质量是由大气环境质量、灌溉水环境质量、土壤环境质量等 3 个次级单要素组成，而 3 个单要素评价结果又分别通过不同监测时点或监测点的多个评价因子汇总而来(图 2).

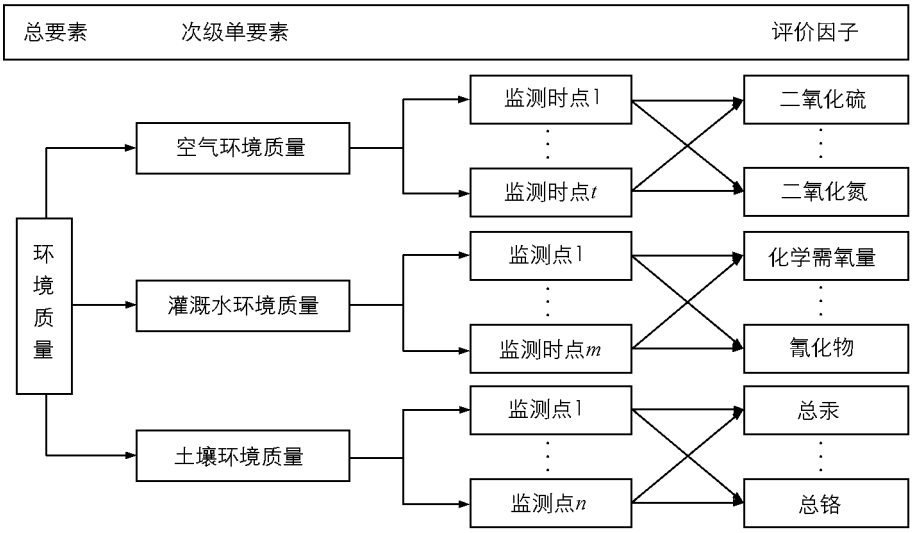

图 2　蔬菜基地环境质量多层次模糊综合评价体系图

模糊综合评价的一般步骤是[31]：

1) 建立评价因素集 $U=\{u_1, u_2, \cdots, u_n\}$，其中 $u_i(i=1, 2, \cdots, n)$ 为评价因子，比如大气环境质量评价因素集 $U=\{$二氧化硫，氟化物，总悬浮颗粒物，二氧化氮$\}$.

2) 确定评价等级集 $V=\{v_1, v_2, \cdots, v_m\}$，其中 $v_j(j=1, 2, \cdots, m)$ 是评价等级，m 是评价等级数或评语档次数，具体等级可以依据评价内容用适当的语言描述[19]，比如评价大气环境质量可取 $V=\{$清洁，尚清洁，轻污染，中污染，重污染$\}$.

3) 构建隶属度矩阵. 根据半梯形分布函数建立各评价因子对评价等级的隶属函数[18, 23, 26]，对第 i 个评价因子 u_i 进行单因素评价，确定其对评价等级 $v_j(j=1, 2, \cdots, m)$ 的隶属度 $R_i=(r_{i1}, r_{i2}, \cdots, r_{im})(i=1, 2, \cdots, n)$，进而构建所有评价因子对各评价等级的隶属度矩阵：

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix}_{n\times m} \tag{1}$$

其中，r_{ij} 是相对于第 i 个评价因素 u_i 给予评价等级 v_j 的隶属度($j=1, 2, \cdots, m$)，且 $0\leqslant r_{ij}\leqslant 1$.

4) 建立权重集 $W=\{w_1, w_2, \cdots, w_n\}$，其中 w_i 为第 i 个评价因子对应的权重，且

$$\sum_{i=1}^{n} w_i=1 \qquad w_i\geqslant 0$$

5) 构建模糊综合评价模型. 因需要依权重大小均衡兼顾所有评价因子，本文故运用加权平均形式构建模糊综合评价数学模型：

$$B=W\times\boldsymbol{R}=(w_1, w_2, \cdots, w_n)\times\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix}=(b_1, b_2, \cdots, b_n) \tag{2}$$

若评价因素集 U 仅有一个层次，则为单层次模糊综合评价；若 U 中评价因素有多个层次，则为多层次模糊综合评价，即根据上述模糊综合评价过程首先建立低层次因素评价模型，结合相应权重向量进行各次级单要素评价，然后将次级单要素评价结果作为上一层评价的原始数据，构建相应评价模型进行综合评价，并根据阶梯结构逐级向上汇总即可得到总要素的评价结果[32].

3 评价结果与分析

根据无公害蔬菜对空气、灌溉水和土壤等环境质量的要求，参照《无公害食品蔬菜产地环境条件》(NY5010-2002)、《环境空气质量标准》(GB3095-1996)、《农田灌溉水质标准》(GB5084-2005)以及《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2004)，建立璧山县璧北蔬菜基地环境质量评价因子集和评价等级集(表1).

3.1 蔬菜基地大气环境质量评价

3.1.1 选取隶属函数，构建模糊隶属度矩阵

鉴于空气环境评价因子与空气环境质量成负相关关系，本文选取降半梯形分布函数作为隶属函数，此函数为分段函数，分段界限值即为相应的蔬菜基地大气环境质量标准等级数. 以二氧化硫为例，根据表1中大气环境质量等级标准建立其五级标准的隶属函数为：

$$r_{t1s1}=\begin{cases} 1 & x_i\leqslant 0.05 \\ \dfrac{0.15-x_i}{0.15-0.05} & 0.05<x_i<0.15 \\ 0 & x_i\geqslant 0.15 \end{cases} \tag{3}$$

$$r_{t1s2}=\begin{cases} \dfrac{x_i-0.05}{0.15-0.05} & 0.05<x_i<0.15 \\ \dfrac{0.25-x_i}{0.25-0.15} & 0.15<x_i<0.25 \\ 0 & x_i\leqslant 0.05,\ x_i\geqslant 0.25 \end{cases} \tag{4}$$

$$r_{t1s3}=\begin{cases}\dfrac{x_i-0.15}{0.25-0.15} & 0.15<x_i<0.25\\ \dfrac{0.50-x_i}{0.50-0.25} & 0.25<x_i<0.50\\ 0 & x_i\leqslant 0.15,\ x_i\geqslant 0.50\end{cases}\tag{5}$$

$$r_{t1s4}=\begin{cases}\dfrac{x_i-0.25}{0.50-0.25} & 0.25<x_i<0.50\\ \dfrac{1.00-x_i}{1.00-0.50} & 0.50<x_i<1.00\\ 0 & x_i\leqslant 0.25,\ x_i\geqslant 1.00\end{cases}\tag{6}$$

$$r_{t1s5}=\begin{cases}1 & x_i>1.00\\ \dfrac{x_i-0.50}{1.00-0.50} & 0.50<x_i<1.00\\ 0 & x_i\leqslant 0.50\end{cases}\tag{7}$$

式中：x_i 为污染物二氧化硫的实测浓度值. 将璧山县璧北蔬菜基地 2 个采样时点($t1$ 和 $t2$) 的二氧化硫日平均检测结果(表 2) 分别代入上述隶属函数，即可得到时点 $t1$ 的评价因子二氧化硫对五级标准的隶属度

$$R_{t1s}=(r_{t1s1},\ r_{t1s2},\ r_{t1s3},\ r_{t1s4},\ r_{t1s5})=(0.400,\ 0.600,\ 0,\ 0,\ 0)$$

表 1　蔬菜基地环境质量评价指标体系及评价等级表

评价总要素	评价单要素	评价因子	等级标准				
			清洁(Ⅰ)	尚清洁(Ⅱ)	轻污染(Ⅲ)	中污染(Ⅳ)	重污染(Ⅴ)
蔬菜基地环境质量	大气环境质量	二氧化硫/(mg·m^{-3})	0.05	0.15	0.25	0.50	1.00
		氟化物/(μg·m^{-3})	5	7	10	15	20
		总悬浮颗粒物/(mg·m^{-3})	0.12	0.30	0.50	1.00	1.50
		二氧化氮/(mg·m^{-3})	0.08	0.12	0.15	0.30	0.50
	灌溉水环境质量	化学需氧量/(mg·L^{-1})	20	60	100	150	200
		总汞/(mg·L^{-1})	0.00005	0.0001	0.001	0.005	0.01
		总镉/(mg·L^{-1})	0.001	0.005	0.01	0.05	0.10
		总铅/(mg·L^{-1})	0.01	0.05	0.10	0.50	1.00
		总砷/(mg·L^{-1})	0.005	0.01	0.05	0.10	0.50
		铬(六价)/(mg·L^{-1})	0.01	0.05	0.10	0.50	1.00
		氰化物/(mg·L^{-1})	0.01	0.05	0.10	0.50	1.00
	土壤环境质量	总汞/(mg·L^{-1})	0.15	0.30	0.50	1.00	1.50
		总镉/(mg·L^{-1})	0.20	0.30	0.50	0.60	1.00
		总铅/(mg·L^{-1})	35	250	300	350	500
		总砷/(mg·L^{-1})	10	15	25	30	40
		总铬/(mg·L^{-1})	90	150	200	250	300

采用类似方法可以得到不同时点蔬菜基地的大气环境质量评价的模糊隶属度矩阵：

$$\boldsymbol{R}_{t1}=\begin{bmatrix}0.400 & 0.600 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{t2}=\begin{bmatrix}0.300 & 0.700 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

3.1.2 确定权重系数及模糊矩阵复合运算

表 2 空气样品检测结果

样本编号	采样时间	检测值			
		二氧化硫 /(mg·m^{-3})	氟化物 /(μg·m^{-3})	总悬浮颗粒物 /(mg·m^{-3})	二氧化氮 /(mg·m^{-3})
$t1$	9.00—10.00	0.11	2.0		0.04
	11.00—12.00	0.12	2.0		0.03
	15.00—16.00	0.10	2.0		0.02
	日平均	0.11	2.0	0.06	0.03
$t2$	9.00—10.00	0.12	2.0		0.03
	11.00—12.00	0.13	2.0		0.02
	15.00—16.00	0.11	2.0		0.01
	日平均	0.12	2.0	0.05	0.02

确定权重系数的方法很多，为了减少因个人知识、偏好或经验缺乏造成赋权的主观随意性，参考相关资料和已有研究[26,20,22]，采取超标加权法来确定权重集，即采用空气环境中各污染因子的实际测量浓度与相应的等级标准的比值来计算权重.

$$W_i = \frac{X_i}{S_i} \tag{8}$$

$$S_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} S_{ij} \tag{9}$$

式中：W_i，X_i，S_i 分别为第 i 种污染物的权重、浓度实测值和评价等级标准值的平均值，S_{ij} 为第 i 种污染物第 j 级的标准值，n 为标准等级数(在本文中取值 $n=5$).

模糊符合运算还需要将各单因子权重进行归一化，即

$$\overline{W}_i = \frac{\dfrac{X_i}{S_i}}{\dfrac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{S_i}} \tag{10}$$

根据式(8)—(10)即可得到不同时点蔬菜基地的大气环境质量评价因子的权重：

$$\overline{W}_{t1} = (0.417, 0.260, 0.130, 0.193)$$

$$\overline{W}_{t2} = (0.478, 0.273, 0.114, 0.135)$$

利用公式(2)，得到不同时点蔬菜基地的大气环境质量评价结果：

$$B_{t1} = \overline{W}_{t1} \times \boldsymbol{R}_{t1} = (0.750, 0.250, 0, 0, 0)$$

$$B_{t2} = \overline{W}_{t2} \times \boldsymbol{R}_{t2} = (0.665, 0.335, 0, 0, 0)$$

根据多层次模糊综合评价步骤，将 $t1$ 和 $t2$ 时点的评价结果作为大气环境质量评价的原始数据，并对两个时间点的结果赋予相同权重，向上汇总得到璧山县璧北蔬菜基地大气环境质量综合评价结果. 即

$$\boldsymbol{R}_t = \begin{bmatrix} 0.750 & 0.250 & 0 & 0 & 0 \\ 0.665 & 0.335 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

令两个时间点权重 $W_t=(0.500, 0.500)$，则蔬菜基地大气环境质量综合评价结果为 $B_t = W_t \times \boldsymbol{R}_t = (0.708, 0.292, 0, 0, 0)$.

结果显示，璧山县璧北蔬菜基地大气环境质量评价中“清洁”等级占 70.8%，“尚清洁”等级占 29.2%，“轻污染”、“中污染”、“重污染”3 个等级都为 0. 根据最大隶属度原则，0.708 为最大值，对应的等级为“清洁”，表明重庆市璧山县璧北蔬菜基地的大气环境质量属清洁，符合农业部要求的蔬菜基地标准.

3.2 蔬菜基地灌溉水环境质量评价

采用与大气环境质量模糊综合评价类似的方法，根据公式(3)—(7)，结合璧山县璧北蔬菜基地灌溉水

样品监测结果(表 3)，计算得到蔬菜基地不同监测点($m1$、$m2$)灌溉水环境质量评价的模糊隶属度矩阵：

$$\boldsymbol{R}_{m1}=\begin{bmatrix}0.875 & 0.125 & 0 & 0 & 0\\ 0.800 & 0.200 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0.675 & 0.325 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{m2}=\begin{bmatrix}0.800 & 0.200 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0.775 & 0.225 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

根据公式(8)－(10)计算蔬菜基地不同监测点的灌溉水环境质量评价因子的权重：

$$\overline{W}_{m1}=(0.525,\ 0.042,\ 0.002,\ 0.020,\ 0.385,\ 0.013,\ 0.013)$$

$$\overline{W}_{m2}=(0.591,\ 0.035,\ 0.001,\ 0.013,\ 0.319,\ 0.027,\ 0.014)$$

利用公式(2)，得到蔬菜基地不同监测点的灌溉水环境质量评价结果：

$$B_{m1}=\overline{W}_{m1}\times\boldsymbol{R}_{m1}=(0.541,\ 0.334,\ 0.125,\ 0,\ 0)$$

$$B_{m2}=\overline{W}_{m2}\times\boldsymbol{R}_{m2}=(0.563,\ 0.365,\ 0.072,\ 0,\ 0)$$

进而得到璧山县璧北蔬菜基地灌溉水环境质量综合评价结果为：

$$B_{m}=W_{m}\times\boldsymbol{R}_{m}=(0.552,\ 0.350,\ 0.098,\ 0,\ 0)$$

根据最大隶属度原则，重庆市璧山县璧北蔬菜基地灌溉水环境质量等级为“清洁”，但数值 0.552 只是微弱超过一半，表明仍然需要重视对该蔬菜基地灌溉水的质量保护.

表 3　灌溉水样品检测结果

样本编号	检　测　值/(mg·L^{-1})						
	化学需氧量	总汞	总镉	总铅	总砷	铬(六价)	氰化物
$m1$	25	0.000 06	0.000 03	0.003	0.023	0.002	0.002
$m2$	28	0.000 05	0.000 02	0.002	0.019	0.004	0.002

3.3　蔬菜基地土壤环境质量评价

璧山县璧北蔬菜基地土壤采样样品监测结果(表 4). 从表中所列基地的 8 个土壤样品监测结果来看，总汞的浓度为 0.053～0.166 mg/L，总镉的浓度为 0.053～0.300 mg/L，总铅的浓度为 24.52～82.44 mg/L，总砷的浓度为 2.62～13.3 mg/L，总铬的浓度为 27.81～56.35 mg/L.

表 4　土壤环境质量样品检测结果

样本编号	检　测　值/(mg·L^{-1})				
	总汞	总镉	总铅	总砷	总铬
$n1$	0.067	0.063	51.62	8.88	27.81
$n2$	0.118	0.289	82.44	12.2	36.29
$n3$	0.145	0.284	63.98	12.4	32.60
$n4$	0.143	0.302	65.80	13.3	34.68
$n5$	0.090	0.304	37.22	6.90	29.06
$n6$	0.119	0.131	40.32	8.77	34.85
$n7$	0.166	0.285	31.96	4.61	56.35
$n8$	0.053	0.174	36.52	2.62	49.82

采用与大气环境质量及灌溉水环境质量模糊综合评价类似的方法，得到蔬菜基地8个土壤监测点的质量评价结果：

$$B_{n1}=\overline{W}_{n1}\times\boldsymbol{R}_{n1}=(0.985,0.015,0,0,0);\ B_{n2}=\overline{W}_{n2}\times\boldsymbol{R}_{n2}=(0.542,0.458,0,0,0)$$

$$B_{n3}=\overline{W}_{n3}\times\boldsymbol{R}_{n3}=(0.556,0.444,0,0,0);\ B_{n4}=\overline{W}_{n4}\times\boldsymbol{R}_{n4}=(0.439,0.558,0.003,0,0)$$

$$B_{n5}=\overline{W}_{n5}\times\boldsymbol{R}_{n5}=(0.542,0.449,0.009,0,0);\ B_{n6}=\overline{W}_{n6}\times\boldsymbol{R}_{n6}=(0.997,0.003,0,0,0)$$

$$B_{n7}=\overline{W}_{n7}\times\boldsymbol{R}_{n7}=(0.643,0.357,0,0,0);\ B_{n8}=\overline{W}_{n8}\times\boldsymbol{R}_{n8}=(0.999,0.001,0,0,0)$$

则

$$\boldsymbol{R}_n=(B_{n1},B_{n2},B_{n3},B_{n4},B_{n5},B_{n6},B_{n7},B_{n8})^T$$

令8个监测样本权重

$$W_n=(0.125,0.125,0.125,0.125,0.125,0.125,0.125,0.125)$$

则璧山县璧北蔬菜基地土壤环境质量综合评价结果为：

$$B_n=W_n\times\boldsymbol{R}_n=(0.713,0.286,0.001,0,0)$$

根据最大隶属度原则，0.713为最大值，对应的等级为“清洁”，表明重庆市璧山县璧北蔬菜基地土壤未受污染，因此璧山县璧北蔬菜基地土壤环境质量符合蔬菜基地的要求.

3.4 蔬菜基地整体环境质量综合评价

根据多层次模糊综合评价方法，将大气环境质量、灌溉水环境质量以及土壤环境质量的评价结果作为蔬菜基地环境质量评价的原始数据，并对3个单要素赋予一定权重，向上汇总即可得到璧山县璧北蔬菜基地环境质量综合评价结果. 即

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.708 & 0.292 & 0 & 0 & 0\\ 0.552 & 0.350 & 0.098 & 0 & 0\\ 0.713 & 0.286 & 0.001 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

由于无公害蔬菜生产过程中空气、灌溉水和土壤的质量需要得到同样的保证，取权重 $W=(1/3,1/3,1/3)$，则璧山县璧北蔬菜基地环境质量模糊综合评价结果为：

$$B=W\times\boldsymbol{R}=(0.657,0.310,0.033,0,0)$$

模糊综合评价结果显示，重庆市璧山县璧北蔬菜基地环境质量等级为“清洁”，而且各项单因素(空气、灌溉水和土壤)质量评价结果都属于“清洁”. 因此，该蔬菜基地达到了无公害食品蔬菜产地环境和质量标准的要求，适合蔬菜基地的选择和建立.

4 结 论

考虑到蔬菜基地环境质量及评价等级的模糊性，本文将多层次模糊综合评价模型应用于重庆市璧山县璧北蔬菜基地环境质量评价，较好地克服了单项污染指数与综合污染指数评价方法不具有模糊性和综合性的问题；同时，模糊评价过程中采用超标加权法，避免了确定权重时受主观因素的影响，保证了评价结果的准确性和可靠性，为重庆市璧山县蔬菜的安全和无公害生产提供科学的依据.

根据多层次模糊综合评价的结果，重庆市璧山县蔬菜基地的大气环境、灌溉水环境、土壤环境以及整体环境质量都处于“清洁”水平，符合目前我国农业部所规定的无公害食品蔬菜产地环境和质量标准的要求，具备生产无公害蔬菜产品的环境条件. 值得注意的是，该蔬菜基地的灌溉水环境质量处于“尚清洁”水平占到35.0%，甚至还有9.8%处于“轻污染”水平，主要是因为该地区灌溉水中总砷含量处于“尚清洁”水平，而砷及其含砷化合物是有毒且有致癌作用的化学物质，对人、畜的健康有较大影响. 因此，应该加强对璧山县璧北蔬菜基地的环境质量监测，尤其是对灌溉水环境质量的重点监测，严格执行灌溉水的质量标准，避免砷通过蔬菜产品进入食物链.

参考文献：

[1] 廖兴勇. 重庆丘陵山区土地整理模式及其关键技术研究 [D]. 重庆：西南大学，2012.

[2] 徐春霞，李博文，李志伟，等. 秦皇岛市蔬菜产地土壤环境质量评价与分析 [J]. 河北农业大学学报，2007，30(6)：16－20.

[3] 刘朝贵，唐阵武，王正银，等. 涪陵南沱茎瘤芥种植基地环境质量评价—土壤重金属 [J]. 西南农业大学学报：自然科学版，2004，26(2)：100－104.

[4] 田应兵，陈　锋，雷明江，等. 江汉平原城郊菜地土壤重金属的环境质量评价 [J]. 环境科学与技术，2005，28(4)：79－80.

[5] SHARMA R K，AGRAWAL M，MARSHALL F. Heavy Metal Contamination of Soil and Vegetables in Suburban Areas of Varanasi，India [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety，2007，66(2)：258－266.

[6] MALANDRINO M，ABOLLINO O，BUOSO S，et al. Accumulation of Heavy Metals from Contaminated Soil to Plants and Evaluation of Soil Remediation by Vermiculite [J]. Chemosphere，2011，82(2)：169－178.

[7] ZHONG L，LIU L，YANG J. Characterization of Heavy Metal Pollution in the Paddy Soils of Xiangyin County，Dongting Lake Drainage Basin，Central South China [J]. Environmental Earth Sciences，2012，67(8)：2261－2268.

[8] 刘　苹，杨　力，于淑芳，等. 寿光市蔬菜大棚土壤重金属含量的环境质量评价 [J]. 环境科学研究，2008，21(5)：66－71.

[9] 王　辉，董元华，安　琼. 南京市郊区蔬菜地土壤环境质量评价 [J]. 土壤，2005，37(3)：295－298.

[10] 王京文，厉仁安，陆　宏. 慈溪市蔬菜地分等及环境质量评价 [J]. 土壤通报，2004，35(5)：550－552.

[11] 王京文，厉仁安，陆　宏，等. GIS 支持下的大比例尺蔬菜地环境质量评价及其分等研究 [J]. 浙江大学学报：农业与生命科学版，2004，30(2)：58－63.

[12] 高怀友，赵玉杰，师荣光，等. 蔬菜设施内环境空气质量评价指标及标准值的探讨 [J]. 农业工程学报，2005，21(3)：143－147.

[13] 黄国锋，吴启堂，容天雨，等. 无公害蔬菜生产基地环境质量评价 [J]. 环境科学研究，1999，12(4)：56－59.

[14] 孙丙寅，刘淑明，李利平，等. 凤县平木镇无公害蔬菜产地环境质量评价 [J]. 西北农业学报，2006，15(5)：214－217.

[15] 徐　冬，邹小南，王金爽，等. 遵义市董公寺镇无公害蔬菜基地环境质量评价 [J]. 工业安全与环保，2008，34(5)：50－53.

[16] 谢正苗，李　静，徐建明，等. 杭州市郊蔬菜基地土壤和蔬菜中 Pb、Zn 和 Cu 含量的环境质量评价 [J]. 环境科学，2006，27(4)：742－747.

[17] 王春光，张思冲，辛　蕊，等. 哈尔滨市东郊菜地土壤重金属环境质量评价 [J]. 中国农学通报，2010，26(2)：262－266.

[18] 王景伟，王海泽，王绍斌. 绿色食品生产基地大气环境质量的模糊综合评价 [J]. 安徽农业科学，2007，35(10)：3027－3028.

[19] 白银凤，钟　飞，余德鸿，等. 模糊综合评价在粮食作物产地环境质量评价中的应用 [J]. 浙江农业学报，2010，22(4)：527－532.

[20] 付红娜，陈天佑. 模糊综合评判在武汉市空气质量评价中的应用 [J]. 湖北大学学报：自然科学版，2007，29(3)：298－301.

[21] 罗根华，马云东，张　悦，等. 阜新市环境空气质量模糊综合评价 [J]. 地球与环境，2011，39(2)：242－245.

[22] 谢炳庚，刘智平. 模糊—物元综合评价法在环境空气质量评价中的应用研究 [J]. 经济地理，2010，30(1)：27－30.

[23] 侯英姿，陈晓玲，王方雄. 基于 GIS 的水环境价值模糊综合评价研究 [J]. 地理科学，2008，28(1)：89－93.

[24] 潘　峰，付　强，梁　川. 模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究 [J]. 环境工程，2002，20(2)：58－61.

[25] 孙清展，臧淑英，张囡囡. 基于模糊综合评价的湖水重金属污染评价与分析 [J]. 环境工程，2012，30(1)：111－115.

[26] 陈晓杰，何政伟，薛东剑. 基于模糊综合评价的土壤环境质量研究——以九龙县里伍铜矿区为例 [J]. 水土保持研究，2012，19(1)：130－133.

[27] 杜 艳，常 江，徐 笠. 土壤环境质量评价方法研究进展 [J]. 土壤通报，2010，41(3)：749－756.
[28] 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.
[29] 何 宏，刘 勇，郭柏栋，等. 基于模糊综合评价法的经济开发区土地评价研究 [J]. 中国人口·资源与环境，2012，22(S1)：158－161.
[30] 贾芳芳. 土地整理效益评价研究——以内蒙古乌审旗纳林河镇土地整理为例 [D]. 北京：北京林业大学，2007.
[31] 叶义成. 系统综合评价技术及其应用 [M]. 北京：冶金工业出版社，2006.
[32] 岳 波. 吉林省西部土地整理重大项目综合效益评价研究——以大安市为例 [D]. 长春：吉林大学，2009.

Multilevel Fuzzy Comprehensive Evaluation of Environmental Quality of a Vegetable Production Base

——A Case Study of a Vegetable Base in Bishan County, Chongqing

LIAO Xing-yong, WEI Chao-fu, LUO Yun-zhong

School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: Pollution indicators of atmosphere, irrigation water and soil in Bibei Vegetable Production Base in Bishan County, Chongqing were monitored, and multilevel fuzzy comprehensive evaluation and super-weighting method were used in a comprehensive evaluation and analysis of the atmosphere, irrigation water and soil and the overall quality of the environment. The results showed that all indicators and the overall quality of the environment of this vegetable production base were at the "clean" level, which was consistent with the requirements by the state of the environment quality for production bases of pollution-free vegetables. However, the arsenic concentration in the irrigation water in this area was at the "tolerably clean" level, which needs to be intensively monitored to avoid the hazard to human health by arsenic pollution.

Key words: vegetable production base; environmental quality; multi-level fuzzy comprehensive evaluation; Bishan County

责任编辑 陈绍兰