

小麦-天敌-农药-麦蚜 复合系统的多目标最优化研究

张文军 汪世泽 任志刚

(植保系)

摘要 运用多目标最优化理论——SWT法探讨了小麦-天敌-农药-麦蚜系统的优化问题,得到了使经济效益(小麦产量)、环境效益(农药浓度)和社会效益(天敌量)综合最佳的麦蚜种群最优动态参数。结论与决策结果及大田实际表现一致。SWT法结果准确、灵活性大、适用面广且对话性强,可作为专家系统中的一个有力的决策工具,文中给出了SWT法的通用BASIC程序,从而使大小规模的问题解决均成现实。

关键词 小麦,天敌,农药,麦蚜,系统,最优化

植物保护的方向是走系统工程之路,因此有害生物的综合治理不仅在保护对象、防治对象上是综合的,在目的和方法上是综合的,而且在理论基础和方法论上也要提高到生态学-经济学-社会学这一复合系统的系统观的新高度^[1]。然而在国内仅对极少部分病虫进行了这类初步的研究。鉴于此,本文欲针对小麦害虫复合系统进行最优化研究,一则供实际应用时参考,二则引入生态学中未曾应用过的非线性多目标最优化方法(SWT法),以此为进一步研究应用奠定基础。

1 材料和方法

1.1 原始资料来源

1989年4~6月间在西农一站麦区进行本项研究。选地力、品种(小偃六号)、长势等均匀一致的麦田,按常规设7个处理(喷药处理见表1)。每处理小区(长4m、宽8行),设4个重复(其中2个为网室重复)。麦蚜发生初期对各小区调查蚜量和天敌量。在一定虫口时对各处理喷不同浓度的等量氧化乐果液,喷后每两日调查各小区蚜量与天敌量。麦熟时考种,估算产量。

1.2 SWT法

为多目标最优化理论中较实用的算法之一^[2,3]。首先,设优化问题为

$$\min (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)), g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

其中, $g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m$ 为约束条件; $f_i(x) = 1, \dots, n$ 为目标函数。

则计算过程为

文稿收到日期: 1990-01-17

(1) 产生非劣解的有代表性子集。构造问题 $\min f_n(x), g_i(x) \leq 0, i=1, 2, \dots, m, f_j(x) \leq \varepsilon_j, j=1, \dots, n-1$, 其中 $f_n(x)$ 为最重要或计量单位最显明的目标函数,

$$\min_{x \in X} f_n(x) \leq \varepsilon_j \leq \max_{x \in X} f_n(x), j=1, \dots, n-1,$$

适当地选择若干组 $\varepsilon_j (j=1, \dots, n-1)$ 值 (见 (2)), 求得该问题的若干个非劣解 x^* 。

(2) 得到置换信息。计算各 x^* 点的 $f_1(x^*), f_2(x^*), \dots, f_n(x^*)$ 及偏置换率 $t_{nj}, j=1, \dots, n-1$, 应取适当的 $\varepsilon_j (j=1, \dots, n-1)$ 计算 x^* , 使 Kuhn-Tucker 条件 (用以计算 t_{nj}) :

$$\lambda_n \nabla f_n(x^*) + \sum_{k=1}^{n-1} \lambda_k \nabla f_k(x^*) - \sum_{i=1}^m \mu_i g_i(x^*) = 0$$

$$\mu_i g_i(x^*) = 0, i=1, \dots, m$$

$$\mu_i \geq 0 \quad i=1, \dots, m$$

中的 $\lambda_{nj} = \lambda_j / \lambda_n > 0, j=1, \dots, n-1$, 则偏置换率 $t_{nj} = -\lambda_{nj}$, 此时且有 $f_j(x^*) = \varepsilon_j, j=1, \dots, n-1$ 。

(3) 对 (2) 中的计算结果进行判断, 当其它目标函数值固定于 $f_\lambda(x^*) (\lambda=1, \dots, n, \lambda \neq n, j)$ 不变, 若 f_j 增加一个单位, f_n 减少 λ_{nj} 个单位, 对这种置换的满意程度规定为 +10 到 -10 中的一数, 愈正表示愈满意, 愈负表示愈反对, 0 表示适中, 对每一 x^* , 这些反应值记为 $W_{nj}(x^*), j=1, \dots, n-1$ 。

(4) 寻求最佳调和解。若 $W_{nj}(x^*) = 0, j=1, \dots, n-1$, 则 x^* 为最佳调和解; 若否, 则建立多重回归方程组 $W_{nj}(f_1, \dots, f_{n-1}) = 0, j=1, \dots, n-1$, 解之得 $e^* = (f_1^*, \dots, f_{n-1}^*)^T$ 代入 (1) 中的问题求解, 则得最佳调和解 x^* 。

2 结果和分析

2.1 优化目标和变量的选取

在本文的分析中, 小麦产量为经济效益; 农药稀释倍数愈大, 则环境污染愈小, 故视之为环境效益; 天敌累积量愈大, 则对翌年及同年其它地方的小麦增产有利, 因而视为社会效益。我们的目的是要求社会效益、环境效益及经济效益同时最佳, 故选择小麦产量 (f_1)、农药稀释倍数 (f_2)、天敌累积量 (f_3) 为优化目标, 而麦蚜累积量 (x_1)、高峰量 (x_2) 为优化变量。因此须将试验所得的时间序列数据进行转换。首先, 根据调查到的各种天敌瓢虫、食蚜蝇、蚜茧蜂、食蚜蜘蛛等的数量, 按其食蚜量大小统一折算为标准天敌单位量 (1 标准天敌单位 = 日食 120 头蚜)。

根据分析, 除浓度为 2080 倍与 2500 倍下的天敌量情形外, 各处理的天敌量动态与蚜量动态均符合指数衰减律, 故分别用方程 $y = ae^{rt}$ 进行拟合 (其中 y 为蚜量或天敌量, t 为时间 (日), a, r 为常数), 由此可得各处理的麦蚜累积量和天敌累积量

$$\int_0^T ae^{rt} dt$$

其中 0 表示喷药日, T 表示天敌或麦蚜消失日, 麦蚜高峰量为 $y = ae^{x_1}$ 于 $[0, T]$ 中的最大值。2080 倍与 2500 倍下的天敌累积量用线性内插法求各调查间隔日的数量, 而后累加即得。由此得到 7 个处理的各指标值见表 1 (单位: 产量为 25kg; 农药浓度 500 倍; 累积蚜量为 1000 头日; 高峰蚜量为 1000 头; 累积天敌量为 500 头日)。

2.2 多目标最优化问题的建立

分别以 f_1 、 f_2 及 f_3 为因变量, x_1 与 x_2 为自变量, 以表 1 的数据, 用多元回归方法建立关系式, 可得

$$f_1 = -0.795214869x_1 - 0.254627402x_2^2 + 1.5468406x_2 + 18.4639811$$

$$f_2 = 1.45799321x_1 - 1.71827799x_2 + 3.51900526$$

$$f_3 = -0.0749106199x_1 - 0.0947402299x_2 + 0.58230405$$

显然, 麦蚜累积量 x_1 与高峰蚜量 x_2 均不可能为负, 故约束条件为 $x_i \geq 0, i = 1, 2$ 。我们的目的是在此约束条件下使 f_1 、 f_2 与 f_3 综合地达到最大。取 f_1 、 f_2 与 f_3 之负值, 则多目标最优化问题的标准形式为 (现 $f_i = -\text{原}f_i$)

$$\min (f_1, f_2, f_3)$$

$$-x_i \leq 0, i = 1, 2$$

2.3 求解与结果

选 $f_1(x)$ 为参考目标函数, 构造问题为

$$\min f_1(x) = 0.795214869x_1 + 0.254627402x_2^2 - 1.5468406x_2 - 18.4639811$$

$$f_2(x) = -1.45799321x_1 + 1.71827799x_2 - 3.51900526 \leq \varepsilon_2$$

$$f_3(x) = 0.0749106199x_1 + 0.0947402299x_2 - 0.58230405 \leq \varepsilon_3 - x_i \leq 0, \\ i = 1, 2$$

根据 Kuhn-Tucker 条件得 $\lambda_{12} = -0.142960101x_2 + 0.716564169, \lambda_{13} = -2.782446865x_2 + 3.331047287$, 由 f_2 与 f_3 可知, 可取 $-\infty \leq \varepsilon_2 < \infty, -0.58230405 \leq \varepsilon_3 < \infty$ 且使满足 $\lambda_{12} > 0, \lambda_{13} > 0$, 选择一组 $\varepsilon_i (i = 2, 3)$ 值, 得一组非劣解如表 2 所示, 综合我们与植保专家的意见得到了表 2 中的反应值 W_{12} 与 W_{13} , 现建立 W_{12} 、 W_{13} 与 f_2 及 f_3 的关系为

$$W_{12} = -1.126505106f_2 - 9.985825327f_3 - 7.449778992$$

$$W_{13} = -0.06379447542f_2 - 14.6809091f_3 - 4.890277568$$

令 $W_{12} = W_{13} = 0$, 得 $\varepsilon_2 = f_2 = -3.80704, \varepsilon_3 = f_3 = -0.31656$, 将 ε_2 与 ε_3 代入原问题, 可求得 $x_1 = 1.56418, x_2 = 1.15961, f_1 = -18.6715, f_2 = -3.81, f_3 = -0.35$, 此即优化变量值及各目标函数值。由此可知, 当麦蚜累积量为 $1000 \times 1.56418 = 1564.18$ 头日, 高峰量为 1000×1.15961 头时, 产量 ($50 \times 18.67 = 466.7\text{kg}$), 农药浓度 ($500 \times 3.81 = 1905$ 倍) 及天敌累积量 ($500 \times 0.35 = 175$ 头日) 综合地达到最优。显然此最优值是客观存在的。

由于目前未曾出现过上述方法的计算机程序,我们将SWT法的计算过程编制为通用BASIC程序(见文后),并在PC-1500电子计算机上运行通过,以便进一步推广应用。

2.4 决策结果验证

根据表1的数据,用多目标决策-层次加性加权法^[2]进行决策评价,评价目标为产量、农药稀释倍数及天敌累积量,评价对象为7种药剂倍数。原始数据为 y_{ij} , $i=1, 2, \dots, 7$, $j=1, 2, 3$, 由于3个目标均为效益型(愈大愈好),故规范化决策矩阵为 $B_3 = (b_{ij})_{7 \times 3}$, $b_{ij} = y_{ij} / \max_j y_{ij}$, 决策向量为 $W^3 = B_3 B_2 W^1$, 其中 $W^1 = 1$ 、 $B_2 = W$ 为3个目标的权向量。根据专家意见,得平均权向量为 $B_2 = (9, 4, 4)^T$, 对应有7个倍数的决策值为(11.00661, 11.57057, 11.92144, 12.51767, 14.77332, 12.86962, 12.45841), 显然, 结果以倍数4.16即2080倍最佳, 1730倍及2500倍也好。该结果部分地证明了SWT法得到的结论(1905倍)。

表1 多目标最优化各指标数据

产 量	19.4014	19.1460	19.4280	19.2760	19.764	16.9880	17.1980
农药倍数	2.00	2.4	2.88	3.46	4.16	5.00	6.00
累 积 蚜	1.38412	0.21531	0.59193	2.18895	0.77383	1.513392	1.51946
累积天敌	0.20824	0.31096	0.39984	0.35596	0.99348	0.44718	0.15570
高 峰 蚜	2.15811	0.24625	1.12721	1.36481	0.50415	0.37090	0.45547

2.5 大田试验结果

1987~1988年于陕西乾县下丁家村进行了大田示范试验,供试浓度分别为500倍、1000倍、1500倍、2000倍及3000倍。从增产率,天敌保护效果及污染程度综合来看,最佳浓度值是在1500~3000倍之内,该结果也与SWT最优化结论基本一致,说明优化结果符合实际。

表2 多目标最优化的计算值表

$\varepsilon_1 = f_2$	$\varepsilon_3 = f_3$	f_1	x_1	x_2	λ_{12}	λ_{13}	W_{12}	W_{13}
-3.80	-0.33	-18.67531	1.56078	1.16082	0.55061	0.10111	0	-1
-4.00	-0.35	-18.56553	1.66573	1.13348	0.55452	0.17719	1	0
-4.30	-0.38	-18.37830	1.57992	0.88607	0.58989	0.86559	1	1
-4.50	-0.40	-18.23604	1.52216	0.72067	0.61353	1.32581	2	1
-4.80	-0.43	-17.99645	1.43526	0.47233	0.64903	2.01679	2	2
-5.00	-0.54	-17.81944	1.37773	0.30712	0.67265	2.47647	3	2

3 讨 论

3.1 研究植保系统乃至生态系统的目的实质为一多目标优化问题,然而这方面的报道至今甚少,非线性多目标最优化的应用研究更是没有。本文的研究为这方面提供了初步的素材,对此仍有必要进一步大力推广应用。

3.2 SWT法由于具有对话性强、适用面广等特点,因而为生态工程和植保工程中的计算机专家系统提供了一种有力的决策工具。利用本文的计算机程序不仅可解决复杂的问题,也可直接做为专家系统的应用软件。

3.3 生态系统中的农药问题是环境污染的重要问题, 农药污染来自于植物保护,在植保领域中, 减少农药污染的主要途径是选择剂型、减少施药次数, 改进施药方式及减少施药总量; 但关于减少施药浓度的研究还不多见, 而在很多情况下, 减小浓度的作用大于减少施药次数及施药总量的作用。本研究关于施药浓度优化的分析也有其它深刻的实际依据, 即: *a.* 过去各种农药的使用浓度多为区间值, 不甚确切。 *b.* 许多农药出现较早, 至今农药-环境-病虫的固有关系已发生变化, 故不宜固守原来的浓度值。 *c.* 施药浓度常受环境条件 (如天敌、气象因子、作物品种和长势等) 的影响而变化, 因而固守原来规定的区间不甚科学。而且该类研究应用对扭转农药紧俏局面也有一定的实际意义。

参 考 文 献

- 1 曾士迈. 从综合防治到植保工程. 植物保护, 1987, 13(1): 36~39
- 2 陈延著. 决策分析. 北京: 科学出版社 1987
- 3 Chankong V, Haimes Y Y. Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology. North Holland Amsterdam, 1983

多目标最优化——SWT法通用BASIC程序

```

640 READ N, B, L, C                                NEXT I
642 P = B + L - 1                                679 PRINT
643 NP = N                                          684 FOR I = 1 TO L - 1
645 DIM C (C, L - 1), E (C, L - 1),              685 E (CU, I) = -G (I + B) + AS (CU, I + B)
      X (N + L), V (N + L), D (N + L),              686 NEXT I
      G (P), Q (L - 1), L (C)                      687 NEXT CU
647 DIM AS (C, P), W (N + L), R (N + L),          688 FOR CQ = 1 TO C
      H (N + L), T (N + L), M (N + L), Z (C)        689 VP = 0
648 MAX = 15                                       690 FOR CU = 1 TO L - 1
649 PR = 1E - 06 : A = 1 : NU = 0                691 INPUT C (CQ, CU)
650 FOR I = 2 TO L : PRINT "f(", I, ")",          692 IF C (CQ, CU) = 0 THEN LET
      " ", : NEXT I : PRINT "f(1)",              VP = VP + 1
652 FOR I = 1 TO N : PRINT " ", "X(",           693 NEXT CU
      I, ")", : NEXT I                             694 IF VP = L - 1 THEN GOTO 708
654 FOR I = 2 TO L : PRINT " ", "LMD1",          695 NEXT CQ
      I, : NEXT I : PRINT                          697 CL = 1 : N = L
658 FOR CU = 1 TO C                                698 FOR CQ = 1 TO L - 1
660 FOR DG = B + 1 TO P                            699 X (1) = 1 : X (2) = 1 : X (3) = 8
661 READ AS (CU, DG)                               700 GOSUB 720
662 NEXT DG                                         701 FOR I = 1 TO L : PRINT "X(", I, "
      = ", X (I), " ", : NEXT I : PRINT          "F = ", F
665 X (1) = 1 : X (2) = 1                          705 NEXT CQ
672 GOSUB 720                                       708 CU = 1
674 GOSUB 3100                                     709 FOR I = 1 TO L - 1
675 FOR I = B + 1 TO P : PRINT -G (I) +           711 INPUT AS (CU, I + B)
      AS (CU, I), " ", : NEXT I, : PRINT          712 NEXT I
      F,                                           714 CL = 0 : N = NP : X (1) = 2 : X (2) = 1
676 FOR I = 1 TO N : PRINT " ", X (I), :         715 GOSUB 720
      NEXT I
677 FOR I = 1 TO L - 1 : PRINT " ", Q (I), :

```

```

716 FOR I=1 TO N
717 PRINT "X( ", I, " ) = ", X(I),
718 NEXT I
719 END
720 GOSUB 748
722 IF CL=1 THEN GOTO 950
724 GOSUB 2800
726 FOR I=1 TO P
728 IF -G(I) > =PR THEN GOTO 734
730 NEXT I
732 GOTO 950
734 A = A * 8
736 NU = NU + 1
738 IF NU > =10 THEN GOTO 950
740 GOTO 720
748 FN = 0
750 IF CL=1 THEN GOTO 756
754 GOSUB 2000
755 GOTO 758
756 GOSUB 3300
758 FU = F
759 FOR I=1 TO N
760 D(I) = 2.0
762 NEXT I
776 GOSUB 1500
777 FN = FN + 1
780 IF FN > =MAX THEN GOTO 940
781 IF FV > FU THEN GOTO 920
782 FOR I=1 TO N
783 X(I) = V(I) + 2 * (W(I) - V(I))
786 R(I) = X(I)
790 NEXT I
791 IF CL=1 THEN GOTO 795
793 GOSUB 2000
794 GOTO 798
795 GOSUB 3300
798 FU = F
799 IF FU < FV THEN GOTO 776
803 FOR I=1 TO N
808 X(I) = W(I)
810 M(I) = W(I)
812 NEXT I
814 GOSUB 1500
820 TF FV < FL THEN GOTO 782
822 FOR I=1 TO N
823 H(I) = D(I)
824 NEXT I
825 K = 0
827 FOR I=1 TO N
829 D(I) = 2/3 * H(I)
833 T(I) = D(I) - H(I)
836 K = K + T(I) ^ 2
838 X(I) = M(I)
840 NEXT I
845 K = SQR(K)
850 IF K < PR THEN GOTO 940
855 GOSUB 1500
858 GOTO 820
920 FOR I=1 TO N
923 X(I) = R(I)
926 NEXT I
929 GOSUB 1500
935 GOTO 820
940 RETURN
950 NU = 0 : A = 1
960 RETURN
1500 IF CL=1 THEN GOTO 1505
1502 GOSUB 2000
1503 GOTO 1507
1505 GOSUB 3300
1507 FL = F
1509 FOR I=1 TO N
1512 V(I) = X(I)
1515 NEXT I
1518 FOR I=1 TO N
1521 X(I) = V(I) + D(I)
1523 IF CL=1 THEN GOTO 1527
1525 GOSUB 2000
1526 GOTO 1528
1527 GOSUB 3300
1528 FA = F
1531 IF FA < FL THEN GOTO 1564
1533 X(I) = V(I) - D(I)
1535 IF CL=1 THEN GOTO 1539
1337 GOSUB 2000 : GOTO 1540
1539 GOSUB 3300
1540 FC = F
1543 IF FL < FA AND FL > FC THEN GOTO
1574
1548 X(I) = V(I)

```

```

1553 IF FL<FA AND FL<FC THEN GOTO      (1) + 0.127293 * X(2) ^ 2 + 1.414609 *
      1580                               X(2) - 3.4237327)
1558 GOTO 1585                             2820 G(4) = AS(CU, 4) - (0.1751871 * X
1564 FV = FA                               (2) ^ 2 - 0.3036184 * X(1) + 0.2607043 *
1568 GOTO 1585                             X(2) ^ 2 - 0.5169093 * X(2) - 0.21855
1574 FV = FC                               25)
1577 GOTO 1585                             2880 RETURN
1580 FV = FL                               3100 GF = 0.0892 * X(1) * X(2) + 0.495642 *
1585 NEXT I                               X(1) + 0.673491 * X(2) - 1.173811
1588 FOR I=1 TO N                           3105 Q(1) = (- 1.118611 * X(1) * X(2) +
1592 W(I) = X(1)                           1.444008 * X(1) + 1.743986 * X(2) -
1596 NEXT I                               2.019276) / GF
1599 RETURN                               3108 Q(2) = (0.59267 * X(1) * X(2) + 3.29
      2000 F = -1.1639885 * X(1) ^ 2 + 3.5030035
      * X(1) - 0.1358783 * X(2) ^ 2 - 0.686
      8511 * X(2) - 19.8744696
2003 GOSUB 2800                             3200 RETURN
2004 FOR J= 1 TO P                         3300 F=0
2007 IF G(J) >= 0 THEN GOTO 2015          3310 FOR CU=1 TO C
2012 GOTO 2018                             3312 S=0
2015 G(J) = 0                             3314 FOR BH=1 TO L-1
2018 F=F+A * G(J) ^ 2                     3315 S=S+X(BH) * E(CU, BH)
2022 NEXT J                               3317 NEXT BH
2080 RETURN                               3318 Z(CU) = S + X(L)
2800 G(1) = X(1)                           3320 F=F+(C(CU, CQ) - Z(CU) ^ 2
2810 G(2) = X(2)                           3330 NEXT CU
2815 G(3) = AS(CU, 3) - (-1.4399233 * X

```

程序说明:

1. N: 优化自变量数; B: 约束条件数; L: 目标函数数; C: 选取的 $\varepsilon_i (i=2, \dots, L)$ 组数。
2. 648句输入模矢法子程序最大迭代次数; 649句PR为求解的步长迭代精度; 660~662句读入 $\varepsilon_i (i=2, \dots, L)$; 675~677句打印 $f_i (i=2, \dots, L)$, f_1 , $X_i (i=1, \dots, N)$, $\lambda_{1i} (i=2, \dots, L)$; 688~695句输入反应值 $W_{1i} (i=2, \dots, L)$, 若有 $W_{1i}=0, i=2, \dots, L$ 则转向708句; 701句打印多重回归方程组中 $f_i (i=2, \dots, L)$ 的系数、回归系数及离差平方和 F ; 709~712句输入由多重回归方程求到的 $\varepsilon_i = f_i (i=2, \dots, L)$ 值; 716~718句打印最佳调和解。
3. 2000句输入参考目标函数 f_n ; 2800~2810句输入约束条件 $-g_i(X) \geq 0 (i=1, \dots, B)$; 2815~2820句输入 $\varepsilon_i - f_i (i=2, \dots, L)$; 3105~3108句输入 $\lambda_{1i} (i=2, \dots, L)$ 。
4. 3310~3318句建立多重回归方程

$$W_{1i} = \sum_{j=1}^{L-1} a_j^{(i)} f_j + 1 + a_L^{(i)}, \quad i=2, \dots, L$$

5. 759~762句输入模矢法子程序迭代求解的初始步长。

总之, 具体应用应改动的是1, 3, 5, 以及2中的648句、649句、660~662句、688~695句、709~712句。

A Multi-objective Optimization to Wheat-Natural Enemy-Insecticide-Wheat Aphids System

Zhang Wenjun Wang Shize Ren Zhigang

(Plant Protection Department, Northwestern Agricultural University)

Abstract This paper deals with the optimization of wheat-pest compound system using the multi-objective optimization theory--SWT method to get the optimal population dynamics parameters of wheat aphids which can optimize economic returns (wheat yields) , environment benefits (insecticide dosage) and social benefits (enemy numbers) . The conclusions and decisions were in agreement with actual field conditions. SWT method is characterized with accurate results, great flexibility, broad adaptability and fine conversation ability, and can also be used a powerful tool in computer system. Also, the BASIC programme of SWT method was suggested in the paper, thus, making the settlement of various problems possible.

Key words wheat enemy, wheat, wheat, aphids, insecticides, system, optimization