

基于系统工程原理的作物化感潜力评价及其应用初探

左胜鹏^{1,2}, 马永清¹

¹中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 / 西北农林科技大学, 杨凌 712100;

²中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:【目的】探索作物化感潜力评价方法, 分析作物整体化感潜势, 理论评价黄土高原旱作小麦的综合化感潜势。【方法】建立作物化感潜力的系统工程评价模型, 提出作物植株整体评价的定量描述方法, 对黄土高原半干旱区 4 种普通小麦品种化感潜力进行理论上的整体评价和总体化感潜力比较。【结果】对黄土高原半干旱区 4 种普通小麦品种的化感潜力综合评价理论上得出其化感潜力总体处于较低水平, 其中化感潜力综合表现为小偃 22 号>宁冬 1 号>丰产 3 号>碧玛 1 号。【结论】系统工程评价模型的建立对于辅助快速有效地评价作物品种和单植株的化感潜力和培育具有抗草和高产优质及相关优良农艺特征作物新品种具有重要的科学指导意义。

关键词: 系统工程原理; 作物化感评价; 协调系数; 化感潜力综合指数; 化感遗传育种

A Preliminary Study on the Method Based on System Engineering Theory for the Evaluation of Allelopathic Potential in Crops and Its Application

ZUO Sheng-peng^{1,2}, MA Yong-qing¹

¹The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource / Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100; ²College of Graduate, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: 【Objective】To probe assessment methods in allelopathic potential of crops germplasm, and analyze the comprehensive allelopathic potential of crop cultivars, and in view of theory assay the whole allelopathic potential in winter wheat accessions from the Loess Plateau. 【Method】To build system-engineering model and evaluate the comprehensive allelopathic potential of crop cultivars, and propose the quantification method of the whole allelopathic potential in crop accessions was conducted in the present study. Allelopathic potential in a whole level of four winter wheat varieties from the Loess Plateau was estimated in view of system theory and compared. 【Result】The model assessed allelopathic potential in different parts of the plants from the time that wheat turned green in the spring until maturity. Results from these models indicated that the four wheat accessions had very weak allelopathic potential. Allelopathic potential declined in the order: Xiaoyan No 22 > Ningdong No 1 > Fengchan No 3 > Bima No 1. 【Conclusion】This system engineering evaluation method allows for the reasonable assessment of allelopathic potential among crop varieties. It will help plant breeders to select and develop allelopathic crop accessions that combine weed suppression properties with agronomic traits related to yield and quality.

Key words: Systemic engineering principle; Evaluation of crop allelopathic potential; Synergic indices of allelopathic potential; Comprehensive index of allelopathic potential; Genetic breeding of allelopathic crop accession

收稿日期: 2005-05-02; 接受日期: 2006-02-14

基金项目: 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目 (10501-95)

作者简介: 左胜鹏(1979-), 男, 江西丰城人, 博士研究生, 研究方向为小麦化感作用及其评价。Tel: 029-87001011; Fax: 029-87012210; E-mail: spzuo@mails.gscas.ac.cn。通讯作者马永清(1963-), 男, 甘肃榆中人, 研究员, 博士, 研究方向为植物间化感以及寄生植物生物学。Tel: 029-87001011; Fax: 029-87012210; E-mail: mayongqing@ms.iswc.ac.cn

0 引言

【本研究的重要意义】作物的化感潜力是当今持续农业研究中较为关注的问题，而农田杂草对作物生长和产量的影响巨大，并且杂草防治愈来愈依赖化学除草剂，但大量施用化学合成物质带来的环境污染等问题也日益突出，因此在生态安全的前提下合理控制农田杂草显得尤其重要^[1,2]。当前，多数作物经过数代的自然选择和人工驯化，作物品系的化感潜力大大减弱，甚至丧失^[3]，要从大量的作物品种中筛选出保留化感潜力性状的作物种质资源，如何客观、科学合理、快速定量地评价作物品种及单植株的化感潜力，对于选育作物化感新品种和开发特定功能的次生物质等意义重大^[2,4]。

【前人研究进展】目前大量的数学模型的建立用于化感模拟分析和化感潜力的评价。如基于竞争和化感的干扰模型^[5,6]，植物残体和活体化感模拟模型^[7,8]，基于化感作用影响因素的数学模型^[9]，运用这些数学模型，并结合化学生物学原理，可以更好地理解化感作用，明确化感物质的功能以及深入揭示化感现象的本质。目前，以作物特征次生物质为标记评价作物的化感潜力，主要基于作物的化感作用与品种显著相关^[4,10]，往往忽视了环境诱导在作物化感潜力的调控作用，而不同品种间产生和释放化感物质的能力更客观的归结于其是受环境诱导和基因的控制，也就是说植物不同品种表达不同程度的化感能力^[1,3,11]，所以，明确地测知和统计植物各组织器官在整体表达化感作用的贡献率和协调指数，对作物化感潜力的系统、全面和客观评价以及利用生物技术或传统的育种开发有益的化感品种有着重要的价值。

【本研究切入点】研究表明植物化感作用首先是对膜的伤害，通过细胞膜上的靶位点，将化感物质胁迫的信息传送到细胞内，从而对激素、离子吸收等产生影响。而激素、离子吸收以及水分状况等变化必然引起植物细胞分裂、光合作用等的变化，从而对植物的生长产生影响^[12]。因此，应当从系统工程的角度看待作物对受体多层次的化感潜力，“作物化感潜力”应是作物的根、茎、叶和种子等器官或组织子系统综合调控的过程。采用系统工程评价作物品系化感潜力的定量研究和实践较为缺乏。【拟解决的关键问题】本文从系统工程角度评价作物化感潜力及其在小麦化感评价中的应用，试图构建完善合理的科学化感评价体系，这对抗草作物材料的科学筛选和农业可持续发展

具有重要的理论和现实意义。

1 作物品系化感潜力的系统工程评价

作物化感潜力是针对一定时间和空间(器官组织)而言的，特别是化感涉及到作物的空间异质性问题，因而将系统工程的一般概念落实到化感潜力的表达过程中去尤为重要^[13,14]。可以肯定地说，各器官组织是化感潜力的落脚点。在整体评价作物的化感能力时，必须把作物的根、茎、叶和种子视为密不可分的复合系统。作物的化感作用作为植物在环境调控下能动地调节生物之间关系的能力，即逆境诱导下通过根、茎、叶和种子各系统协同效应，从而影响受体(植物、微生物)或害虫的生理、生化以及分子生物学指标，但各子系统协同合作，相互适应，以一种合理的比例关系调节化感潜力，这也是化感遗传育种应普遍追求的目标^[14,15]。因此，比较各时期根、茎、叶和种子的化感协调状况，评价根、茎、叶和种子协调程度和化感能力，推导作物化感潜力综合指数，这对全面客观评价作物品系的化感潜力和化感遗传育种的监测具有十分重要的意义。

1.1 化感作用指数的确立

根据 Williamson 等^[16]提出的化感作用评价方法，用处理与相应对照的 T/C 作为衡量指标，得出化感作用指数 RI。RI=T/C-1，其中 C 是对照值，T 是处理值。当 RI>0 时，表示促进作用；当 RI<0 时，表示抑制作用。RI 的绝对值代表化感作用强度的大小。

1.2 化感指标体系的建立

作物的根、茎和叶各子系统的化感潜力是其中的化感物质影响受体的生理、生化以及分子生物学一系列的统计指标反映出来的^[17-20]。在研究作物化感潜力时，各子系统指标体系的选择应注意：作物各组织器官子系统的化感特性、受体影响的关键指标等，以保证评估的全面性、代表性要求等。主要运用主成分分析方法，对反映各子系统化感能力的指标体系进行评估，确定作物化感潜力综合水平。

把系统的 P 个指标 $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ ，采用线性组合方式表示为另一组随机变量 $y = (y_1, y_2, \dots, y_r)$ ，即

$$y_i = \sum_{j=1}^p l_{ij} x_j \quad (i = 1, 2, \dots, r; j = 1, 2, \dots, p)$$

设主成分 y_i 的方差 $V(y_i) = K_i$ ， $(i = 1, 2, \dots, r)$

$$\text{令 } g_i = K_i / \sum_{i=1}^r K_i$$

即 g_i 为第 i 个主成分的贡献率, 该指标越大, 则表明指标概括 x_1, x_2, \dots, x_p 的能力越强。 $\sum_{i=1}^r g_i$ 则为前 i 个主成分的累积贡献率。在实际应用中, 当累积贡献率达到 90% 左右时, 即若 $\sum_{i=1}^r g_i > 90\%$, 则令

$$F = g_1 y_1 + g_2 y_2 + \dots + g_k y_k$$

F 即为某一子系统的综合化感潜力。

1.3 建立系统工程评价模型

依据作物综合化感潜力, 建立系统工程评价模型, 即利用计量经济学中回归分析方法, 确定各系统化感协调的比例关系^[12-14]。其原理为:

假定变量 X, Y, Z, H 之间的关系可表示为回归方程

$$H = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z$$

即表明要做到 X, Y, Z, H 之间的协调, 就要在 X, Y 不变的情况下, Z 每变化一个单位要求 H 同方向变化 b_3 个单位。同理, 可计算出 X 和 Y 与 H 之间的协调变化规律。

1.4 运用模糊数学中贴近度的概念定义协调系数

采用区域协调发展模型计算出的系统间的比例关系, 再计算出的区域各子系统协调值与实际化感潜力值进行比较, 计算出协调系数, 说明子系统间的协调程度, 进而表明该系统的化感潜力水平。本文采用相对海明距离 (relative hamming distance)^[21] 来定义协调系数, 即:

$$X(A, B) = 1 - c [D(A, B)]^a$$

其中, c 与 a 是两个适当选取的参数。

$$D(A, B) = 1 - \frac{1}{n} d(A, B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_A(x_i) - u_B(x_i)|$$

其中: A, B 是论域 U 上的两个模糊子集; $X(A, B)$ 为论域 U 上的两个模糊子集 A 和 B 的协调系数; n 是论域中元素的个数。

1.5 计算作物化感潜力综合指数 (Comprehensive Index of Allelopathic Potential, CIAP)

依据可持续发展综合指数计算作物化感潜力综合指数^[14,22], 说明作物之间的化感力差异。作物化感潜力综合指数是作物在生长过程中化感作用总体水平的集中体现, 本文依据作物各组织器官以及生长时期的

化感特征, 采用递阶多层次综合评价法来计算, 即:

$$CIAP = \prod_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^k w_{ij} I_{ij} \right] W_{i0}$$

其中: I 为元素指标量化值, W_{ij} 元素指标的权重, W_{i0} 是基本指标的权重。

2 应用研究——黄土高原半干旱区普通小麦化感潜力的评价及分析

2.1 根、茎、叶各子系统化感潜力的确定

依据黄土高原半干旱区推广的普通小麦状况, 选取不同年代的冬性小麦代表性品种: 碧玛 1 号、丰产 3 号、宁冬 1 号和小偃 22 号, 认为从返青期到成熟期这段时间根、茎、叶的化感数据最能反映作物的实际化感能力。因此, 本研究按照时间先后顺序选取了 3 月 5 日至 5 月 25 日的 4 个品种根、茎、叶方面对受体 [一年生黑麦草 (*Lolium rigidum*)] 的指标, 具体生物测定见 Zuo 描述^[23], 其中指标体系由 12 个指标组成: 对受体根长、苗长、根冠长比、根数、根平均长、根鲜重、根干重、茎叶鲜重、茎叶干重、根冠比、发芽率、植株水分含量。这些指标从不同的侧面反映了作物根、茎、叶各子系统综合化感潜力水平。应用主成分分析方法, 确定 4 个品种的根、茎、叶各子系统综合化感潜力综合指标值如表 1 所示。

2.2 根、茎、叶各子系统之间的化感潜力数学协调模型的建立

由表 1 中 X, Y, Z 的数据, 建立协调发展模型 (表 2)。

通过表 1、2 及数学模型笔者得出以下结论:

(1) 4 个品种根、茎、叶子系统对受体的化感作用按时间序列 3 月 5 日至 5 月 25 日呈明显的先上升后下降趋势, 根、茎、叶各子系统综合化感指数在平均水平 0 之下, 为八形抑制。4 个品种根、茎、叶三子系统化感潜力基本同步, 说明具有大致相同的变化趋势。在 4 月 15 日 (抽穗期), 碧玛 1 号、丰产 3 号和小偃 22 号植株的化感抑制作用最强, 宁冬 1 号提前 (3 月 25 日) 达到化感作用高峰值。各子系统的化感峰值出现时间也存在差异 (表 1)。这说明小麦化感抗逆性状可通过遗传选育获取, 只是需要以生理消耗为代价。

(2) 4 个品种根、茎、叶子系统间具有很强的线性关系 (表 2)。建立的数学模型通过统计总体检验表明按碧玛 1 号、丰产 3 号、宁冬 1 号和小偃 22 号小

表 1 黄土高原半干旱区普通小麦从返青期到成熟期的根、茎、叶各子系统的综合化感潜力

Table 1 Comprehensive allelopathic potential of root, stem and leaf from growth recovery stage to mature stage of four accessions common wheat grown in semiarid regions of Loess Plateau

	生育期	根	茎	叶		生育期	根	茎	叶
	Growth period	Root (X)	Stem (Y)	Leaf (Z)		Growth period	Root (X)	Stem (Y)	Leaf (Z)
丰产 3 号	3-5	-0.16	-0.28	-0.45	碧玛 1 号	3-5	-0.47	-0.31	-0.28
<i>T. aestivum</i> var.	3-25	-0.65	-0.44	-0.43	<i>T. aestivum</i> var.	3-25	-0.55	-0.60	-0.38
Fengchan No 3	4-15	-0.17	-0.74	-0.62	Bima No 1	4-15	-0.24	-0.66	-0.83
	5-5	-0.15	-0.32	-0.90		5-5	-0.22	-0.44	-0.55
	5-25	-0.10	-0.14	-0.08		5-2	-0.12	-0.15	-0.30
宁冬 1 号	3-5	-0.29	-0.58	-0.40	小偃 22 号	3-5	-0.07	-0.29	-0.08
<i>T. aestivum</i> var.	3-25	-0.59	-0.79	-0.46	<i>T. aestivum</i> var.	3-25	-0.10	-0.40	-0.49
Ningdong No 1	4-15	-0.30	-0.67	-0.68	Xiaoyan No 22	4-15	-0.10	-0.56	-0.69
	5-5	-0.20	-0.28	-0.86		5-5	-0.12	-0.43	-0.65
	5-25	-0.18	-0.15	-0.18		5-25	-0.10	-0.10	-0.16

表 2 根、茎、叶各子系统之间的化感潜力数学协调模型

Table 2 Mathematic models of allelopathic synergic effect from root, stem and leaf subsystems

	丰产 3 号 Fengchan No 3	碧玛 1 号 Bima No 1	宁冬 1 号 Ningdong No 1	小偃 22 号 Xiaoyan No 22
Y/X	$Y=-0.3291+0.2184X$ T=0.3908 R=0.2201 F=0.1527	$Y=-0.2903+0.4396X$ T=0.7176 R=0.3828 F=0.5149	$Y=-0.0692+1.3622X$ T=2.6772 R=0.8396 F=7.1672	$Y=-0.2148+1.4707X$ T=0.2782 R=0.1586 F=0.0774
X/Y	$X=-0.1597+0.2218Y$ T=0.3908 R=0.2201 F=0.1527	$X=-0.1764+0.3333Y$ T=0.7176 R=0.3828 F=0.5149	$X=-0.0561+0.5175Y$ T=2.6772 R=0.8396 F=7.1672	$X=-0.0899+0.0171Y$ T=0.2782 R=0.1586 F=0.0774
X/Z	$X=-0.2581-0.0273Z$ T=-0.0627 R=0.0362 F=0.0039	$X=-0.4415-0.2609Z$ T=-0.5959 R=0.3253 F=0.3551	$X=-0.3286-0.0333Z$ T=-0.0928 R=0.0535 F=0.0086	$X=-0.0783+0.0430Z$ T=1.4466 R=0.6410 F=2.0927
Z/X	$Z=-0.5072-0.0479X$ T=-0.0627 R=0.0362 F=0.0039	$Z=-0.5953-0.4056X$ T=-0.5959 R=0.3253 F=0.3551	$Z=-0.5418-0.0859X$ T=-0.0928 R=0.0535 F=0.0086	$Z=-0.5058+9.5551X$ T=1.4466 R=0.6410 F=2.0927
Y/Z	$Y=-0.2170+0.3341Z$ T=0.8618 R=0.4454 F=0.7426	$Y=-0.1234+0.6608Z$ T=1.7838 R=0.7174 F=3.1820	$Y=-0.4109+0.1603Z$ T=0.2785 R=0.1588 F=0.0776	$Y=-0.1373+0.5316Z$ T=2.8504 R=0.8546 F=8.1245
Z/Y	$Z=-0.2683+0.5940Y$ T=0.8618 R=0.4454 F=0.7426	$Z=-0.1298+0.7789Y$ T=1.7838 R=0.7174 F=3.1820	$Z=-0.4374+0.1572Y$ T=0.2785 R=0.1588 F=0.0776	$Z=0.0776+1.3738Y$ T=2.8504 R=0.8546 F=8.1245
X/YZ	$X=-0.1936+0.2969Y-0.1265Z$ T=0.3871/-0.2199 R=0.2663 F=0.0763	$X=-0.3050+1.1056Y-0.9915Z$ T=3.7401/-3.6416 R=0.9424 F=7.9402	$X=-0.1083+0.5362Y-0.1193Z$ T=2.3857/-0.5254 R=0.8607 F=2.8569	$X=-0.0997-0.1557Y+0.1258Z$ T=-6.4082/8.3227 R=0.9862 F=35.5529
Y/XZ	$Y=-0.1564+0.3405Z+0.2347X$ T=0.7430/0.3871 R=0.5043 F=0.3410	$Y=0.2259+0.8673Z+0.7913X$ T=5.1107/3.7401 R=0.9692 F=15.4732	$Y=0.0426+0.2063Z+1.3799X$ T=0.5729/2.3857 R=0.8640 F=2.9453	$Y=-0.6169+0.7951Z-6.1262X$ T=12.3966/-6.4082 R=0.9937 F=78.8461
Z/XY	$Z=-0.2981-0.1867X+0.6354Y$ T=-0.2981/0.6354 R=0.4662 F=0.2777	$Z=-0.2843-0.8764X+1.0710Y$ T=-3.6416/5.1107 R=0.9677 F=14.7239	$Z=-0.4945-1.0171X+0.6835Y$ T=-0.5254/0.5729 R=0.3787 F=0.1675	$Z=0.7725+7.7290X+1.2416Y$ T=8.3227/12.3966 R=0.9962 F=131.1324

X/Y 等为一系统对另一系统的协调模型 X/YZ 等为一系统对另二系统的协调模型；T 为回归方程中自变量与应变量之间的协调值。X/Y Synergic model of one system relative to the other one; X/YZ Synergic model of one system relative to the other two ones; T means the synergic value between independent variable and dependent variable

麦选育历程，根、茎、叶子系统间的线性关系更强，这符合人工选育优良抗草高产品种的理想目标。

(3) 叶子系统的化感作用在植株各组织器官中潜

力最高。从小偃 22 号普通小麦模型中可看出，根子系统化感潜力是地上部化感潜力提高的主要的动力，根子系统化感潜力的变化使得叶和茎子系统的化感作用

的变化速度超过自身的变化速度。根子系统化感潜力每增加一个单位, 导致叶子系统化感潜力增加 1.4707 个单位, 使得茎子系统化感潜力增加 9.5551 个单位。

(4) 在 4 个品种根、茎、叶三子系统间相互关联中, 丰产 3 号三子系统间, 宁冬 1 号根和叶、茎和叶等偏相关程度不大, 未通过 t 检验, 碧玛 1 号和小偃 22 号的三子系统间以及宁冬 1 号根和茎偏相关程度较大, 通过了 t 检验。

2.3 4 个小麦品种根、茎、叶各子系统之间化感潜力的协调分析

根据各子系统化感潜力的数据及其数学模型, 按照协调系数的确定方法, 计算出各种协调系数(表 3)。通过对 3 月 5 日~5 月 25 日生育期 4 个品种根、茎、叶各子系统之间化感潜力的协调分析, 得出以下几点结论:

表 3 4 个品种 3 月 5 日~5 月 25 日的根、茎、叶子系统化感作用协调系数

Table 3 Synergic indexes of root, stem and leaf in four wheat accessions from March 5 to May 25

生育期 Growth period		$W(X/Y)$	$w(Y/X)$	$w(X/Z)$	$w(Z/X)$	$w(Y/Z)$	$w(Z/Y)$
丰产 3 号 Fengchan No 3	3-5	0.854	0.809	0.895	0.866	0.882	0.951
	3-25	0.882	0.573	0.613	0.604	0.721	0.878
	4-15	0.968	0.923	0.901	0.879	0.896	0.957
	5-5	0.891	0.651	0.625	0.619	0.730	0.933
	5-25	0.966	0.920	0.914	0.946	0.945	0.950
碧玛 1 号 Bima No 1	3-5	0.984	0.831	0.835	0.931	0.933	0.953
	3-25	0.986	0.884	0.937	0.920	0.935	0.973
	4-15	0.974	0.883	0.938	0.917	0.928	0.982
	5-5	0.914	0.833	0.848	0.666	0.774	0.864
	5-25	0.991	0.939	0.935	0.807	0.859	0.962
宁冬 1 号 Ningdong No 1	3-5	0.903	0.952	0.956	0.711	0.814	0.891
	3-25	0.970	0.990	0.960	0.846	0.894	0.963
	4-15	0.849	0.880	0.896	0.957	0.969	0.889
	5-5	0.860	0.904	0.730	0.933	0.610	0.208
	5-25	0.949	0.906	0.945	0.950	0.959	0.895
小偃 22 号 Xiaoyan No 22	3-5	0.975	0.905	0.933	0.953	0.856	0.714
	3-25	0.876	0.938	0.935	0.973	0.872	0.968
	4-15	0.849	0.918	0.928	0.982	0.880	0.937
	5-5	0.655	0.956	0.774	0.864	0.769	0.790
	5-25	0.728	0.922	0.859	0.962	0.941	0.979

生育期 Growth period		$w(X/YZ)$	$w(Y/ZX)$	$w(Z/YX)$	$w(X,Y)$	$w(X,Z)$	$w(Y,Z)$	$w(X,Y,Z)$
丰产 3 号 Fengchan No 3	3-5	0.978	0.980	0.991	0.832	0.881	0.917	0.983
	3-25	0.924	0.999	0.982	0.728	0.609	0.800	0.968
	4-15	0.954	0.996	0.979	0.946	0.890	0.927	0.976
	5-5	0.996	0.923	0.929	0.771	0.622	0.832	0.949
	5-25	0.952	0.991	0.988	0.943	0.930	0.948	0.977
碧玛 1 号 Bima No 1	3-5	0.991	0.995	0.971	0.908	0.883	0.943	0.986
	3-25	0.991	0.997	0.985	0.935	0.929	0.954	0.991
	4-15	0.922	0.959	0.988	0.929	0.928	0.955	0.956
	5-5	0.971	0.889	0.913	0.874	0.757	0.819	0.924
	5-25	0.924	0.904	0.912	0.965	0.871	0.911	0.913
宁冬 1 号 Ningdong No 1	3-5	0.931	0.970	0.962	0.928	0.834	0.853	0.954
	3-25	0.939	0.961	0.906	0.980	0.903	0.929	0.935
	4-15	0.947	0.969	0.975	0.865	0.927	0.929	0.964
	5-5	0.941	0.947	0.876	0.882	0.832	0.409	0.921
	5-25	0.963	0.974	0.875	0.928	0.948	0.927	0.937
小偃 22 号 Xiaoyan No 22	3-5	0.938	0.974	0.939	0.940	0.943	0.785	0.950
	3-25	0.974	0.987	0.939	0.907	0.954	0.920	0.967
	4-15	0.937	0.952	0.952	0.884	0.955	0.909	0.947
	5-5	0.975	0.937	0.908	0.806	0.819	0.780	0.940
	5-25	0.999	0.935	0.805	0.825	0.911	0.960	0.913

$w(X, Y, Z)$ 为三系统间的协调系数; $w(X, Y)$ 为二系统间的协调系数; $w(X/Y)$ 为一系统对另一系统的协调系数; $w(X/YZ)$ 为一系统对另二系统的协调系数

$w(X, Y, Z)$ Synergic index of three systems; $w(X, Y)$ Synergic index of two systems; $w(X/Y)$ Synergic index of one system relative to the other one; $w(X/YZ)$ Synergic index of one system relative to the two other ones

(1) 如果协调系数 w 的界定范围为 0.600 以下为不协调状况, 0.600~0.800 为基本不协调, 0.800~0.950 为基本协调状况, 0.950 以上为协调状况的话, 4 个品种的三子系统在 5 月 5 日处于基本协调状况, 其余各生长期均处于协调状况。所以从整体来看, 4 个品种根、茎、叶各子系统之间化感潜力处于协调状况, 但从后期的生殖生长时期来看, 协调系数有下降的趋势, 说明 4 个品种根、茎、叶各子系统之间化感潜力的不协调程度有所增长。

(2) 4 个品种根、茎、叶各子系统之间化感潜力协调程度在 3 月 5 日~5 月 25 日这段生长期内比较均衡。丰产 3 号、碧玛 1 号、宁冬 1 号和小偃 22 号根、茎、叶各子系统间发展的平均协调系数分别为 0.971、0.954、0.942 和 0.943, 处于协调状况, 协调系数的极差只有 0.035, 最大的是丰产 3 号、碧玛 1 号和小偃 22 号、宁冬 1 号分别在 3 月 5 日 (0.983)、3 月 25 日 (0.991&0.967) 以及 4 月 15 日 (0.964)。协调系数最小的是丰产 3 号和宁冬 1 号、碧玛 1 号和小偃 22 号分别在 5 月 5 日 (0.949&0.921) 和 5 月 25 日 (均为 0.913)。

(3) 4 个品种根、茎、叶各子系统之间化感潜力协调程度两两系统间的协调状况, 不如 3 个系统间的协调发展状况。两两系统间的平均协调系数丰产 3 号、碧玛 1 号、宁冬 1 号和小偃 22 号分别为 0.838、0.904、0.872 和 0.887, 处于基本协调状况, 低于四品种的三子系统间的平均协调系数 0.971、0.954、0.942 和 0.943。其中, 丰产 3 号的根和叶两系统间的协调系数最低, 为 0.786, 处于基本不协调状况。说明了丰产 3 号叶部挥发与根区分泌对化感实施过程中存在一定矛盾。更值得注意的是, 随着小麦子粒的形成和产量的初步构成, 各种协调系数均有下降的趋势, 必须加以控制, 实现抗逆和稳定农艺性状的统一。

(4) 4 个品种根、茎、叶各子系统之间化感潜力协调程度在 5 月 5 日 (灌浆期) 中, 小麦的根、茎、叶子系统间, 根与茎、根与叶, 茎与叶协调系数均处于返青期以来的平均水平以下, 究其原因, 主要是作物抗逆能力不适应营养生长和生殖生长的要求。因此, 化感育种过程中一定应注意抗逆性状的培育, 尤其是不影响作物自身形态建成和最终产量指标。

2.4 小麦化感潜力综合指数 (CIAP)

首先利用植物组织器官生长特征以及不同生长期化感表现确定指标权重, 然后采用递阶多层次综合评价法, 计算黄土高原半干旱区 4 种普通小麦化感潜

力综合指数 (CIAP), 其时间变化曲线见图下。黄土高原半干旱区 4 种普通小麦化感潜力总体处于较低水平 (CIAP<0.40), 但 4 种普通小麦化感潜力综合指数表现为小偃 22 号>宁冬 1 号>丰产 3 号>碧玛 1 号, 说明了人工育种过程可能有利于整体提高普通小麦的化感潜力。

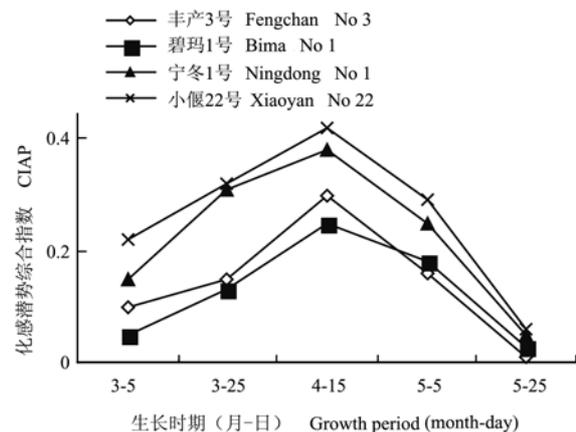


图 4 个品种 3 月 5 日至 5 月 25 日的综合化感潜力比较

Fig. Comparison of comprehensive allelopathic potential of four wheat accessions during some growth period

3 讨论

植物化感潜力主要通过向环境释放特定次生物质化感物质来实现的, 但是这些化感物质的诱导、产生和协同效应与环境胁迫和基因调控紧密相关^[2,4,10,24]。因此采用系统工程原理作为作物化感潜力评价方法, 把一系统 (植株或品系) 分为多个子系统 (各组织器官), 多个子系统又影响受体的生理、生化和分子学一系列指标 (多层次), 对作物进行时空系统整体科学评价, 克服了传统评价的室内实验和田间水平的简单验证, 而且考虑到作物化感潜力的时空异质性, 充分把基因与环境动态互作联系起来^[10,13,24]。在指标较少评价中, 采用改进标准赋权法确定系统权重, 而多指标评价时可采用层次分析法确定权重^[25]。这种混合赋权既有规范性又有灵活性, 是一种非常有效的尝试。在此基础上采用主成分分析、相对海明距离以及递阶多层次综合评价法为解决多品种、多组织器官、多受体以及多指标的化感潜力综合评价提供了科学、全面和系统的方法选择。

本文以系统工程理论为基础, 从作物根茎叶系统角度研究作物各组织器官在整体动态发挥化感潜力的

协调状况,提出了简化化感指标体系,各器官组织在化感表达中存在协同效应、动态综合评价作物化感能力。这对以具有化感特性的恢复系和不育系进行杂交育种,得到具有强烈化感和竞争双重能力的杂交稻,并对其化感杂交优势评价意义巨大^[26]。目前,许多国家正在开展具有化感特性新品种的研究,如利用对不同杂草表现化感特性的水稻材料和其它具有抗病虫害、抗逆、竞争力强、高产和优质商业品种进行杂交育种^[1,2],因此有必要采用系统工程原理合理评价和监测化感育种。

基于系统工程原理在黄土高原半干旱区不同历史时期推广的4种普通小麦品种的化感潜力评价中,考虑到化感作用的多因素影响^[12],避免了化感物质结构活性、含量和协同效应的复杂性^[27],而且把作物各组织器官从整体把握、协同着手,动态分析,具有较强的科学性和指导性。然而受体指标及其数量的确定,主要借鉴系统工程评价标准、前人的田间观察和室内分析的研究结果。而目前的指标和化感受体的不统一,限制了作物之间的化感能力的差异性比较。故今后选择合理有效、一定数量的指标,在作物多个连续的生育期,进行系统评价。当然,系统工程原理评价法可作为快速评价作物的化感潜力的重要辅助手段,也可对作物化感品种资源的最终评价利用确定其可靠性和正确性,但还需要进一步完善,尽快能建立系统工程化感评价专家信息系统。

对黄土高原半干旱区四个种普通小麦品种化感潜力综合评价认为它们的化感潜力总体处于较低水平,但化感潜力综合表现为小偃22号>宁冬1号>丰产3号>碧玛1号。由于作物表达化感作用一般为在作物生长期和收割后残体^[7,8,12,23,24],而小麦的化感物质目前已经确定,主要为DIMBOA和(非)酚酸类等多种物质^[15,24]。因此,本研究直接选用作物化感潜力的效应指数进行各生长期系统学理论综合评价,考虑到是以植株浸提液的化感潜力建立系统评价模型,需要利用其中的化感物质含量为校正参数,通过调整适当参数和相应校正系数等对模型逐步完善。对于以小麦植株体内的总化感物质含量或向环境释放的可能含量的模型评价分析,目前需进一步通过大田实验进行理论评价和野外验证。

References

- [1] Gealy D R, Wailes E J, Estorninos L E, Chavez R S C. Rice cultivar differences in suppression of barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) and economics of reduced propanil rates. *Weed Science*, 2003, 51: 601-609.

- [2] Jensen L B, Courtois B, Shen L, Li Z, Olofsdotter M and Mauleon R P. Locating genes controlling allelopathic effects against barnyard grass in upland rice. *Agronomy Journal*, 2001, 93: 21-26.
- [3] Putnam A R, Duke W B. Biological suppression of weeds: evidence for allelopathy in accessions of cucumber. *Science*, 1974, 185: 370-372.
- [4] 孔垂华,徐效华,胡飞,陈雄辉,凌冰,谭中文.以特征次生物质为标记评价水稻品种及单植株的化感潜力.科学通报,2002,47:203-206.
- Kong C H, Xu X H, Hu F, Cheng X H, Lin B, Tan Z W. Using specific secondary metabolites as markers to evaluate allelopathic potentials of rice varieties and individual plants. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47: 203-206. (in Chinese)
- [5] Mukhopadhyay A, Chattopadhyay J, Tapaswi P K. A delay differential equations model of plankton allelopathy. *Mathematical Biosciences*, 1998,149:167-189.
- [6] Dubey B, Hussain J. A model for the allelopathic effect on two competing species. *Ecological Modelling*, 2000, 129:195-207.
- [7] Aki Sinkkonen. A model describing chemical interference caused by decomposing residues at different densities of growing plants. *Plant and Soil*, 2003, 250: 315 - 322.
- [8] An M, Liu D L, Johnson I R, Lovett J V. Mathematical modelling of allelopathy: II. The dynamics of allelochemicals from living plants in the environment. *Ecological Modelling*, 2003, 161: 53 - 66.
- [9] An M, Johnson I R, Lovett J V. Mathematical modelling of residue allelopathy: the effects of intrinsic and extrinsic factors. *Plant and Soil*, 2002, 246:11-22.
- [10] 孔垂华,胡飞,陈雄辉,陈益培,黄寿山.作物化感品种资源的评价利用.中国农业科学,2002,35:1159-1164.
- Kong C H, Hu F, Chen X H, Chen Y P, Huang S S. Assessment and utilization of allelopathic crop varietal resources. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35: 1159-1164. (in Chinese)
- [11] Wu H, Pratley J, Lemerle D, Haig T. Crop cultivars with allelopathic capability. *Weed Research*, 1999, 39:171-180.
- [12] Peng S L, Wen J, Guo Q F. Mechanism and active variety of allelochemicals. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2004, 46: 757-766.
- [13] Mukhopadhyay A, Tapaswi P K, Chattopadhyay J. A space-time state-space model of phytoplankton allelopathy. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 2003, 4: 437-456.
- [14] 于瑞峰,齐二石,毕星.区域可持续发展状况的评估方法研究

- 及应用. 系统工程理论与实践, 1998, 5: 1-6.
- Yu R F, Qi E S, Bi X. Evaluation method of regional sustainable development Status and its application. *Theory and Practice of Systemic Engineering*, 1998, 5: 1-6. (in Chinese)
- [15] Wu H, Haig T, Pratley J, Lemerle D, An M. Distribution and exudation of allelochemicals in Wheat *Triticum aestivum*. *Journal of Chemical Ecology*, 2000, 26: 2141-2154.
- [16] Williamson G B, Richardson D. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls. *Journal of Chemistry Ecology*, 1988, 14(1): 181-187.
- [17] Baziramakenga R, Leroux G D, Simard R R. Effects of benzoic and cinnamic acids on membrane permeability of soybean roots. *Journal of Chemical Ecology*, 1995, 21: 1271-1285.
- [18] Holappa L D, Blum U. Effects of exogenously applied ferulic acid, a potential allelopathic compound on leaf growth, water utilization and endogenous abscisic acid levels of tomato, cucumber and bean. *Journal of Chemical Ecology*, 1991, 17: 865-886.
- [19] Mersie W, Singh M. Phenolic acids affect photosynthesis and protein synthesis by the isolated leaf cells of velvetleaf. *Journal of Chemical Ecology*, 1993, 19: 1293-1301.
- [20] Peñuelas J, Ribascarbo M, Giles L. Effects of allelochemicals on plant respiration and oxygen isotope fractionation by the alternative oxidase. *Journal of Chemical Ecology*, 1996, 22: 801-805.
- [21] 贺仲雄. 模糊数学及其应用. 天津: 天津科学技术出版社, 1983.
He Z X. *Fuzzy Maths and Its Application*. Tianjing: Tianjin Science and Technology Press, 1983. (in Chinese)
- [22] 曹利军, 王华东. 可持续发展评价指标体系建立原理与方法研究. 环境科学学报, 1998, 18: 526-532.
- Cao L J, Wang H D. Method and principle of evaluation indicators system on sustainable development. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18: 526-532. (in Chinese)
- [23] Zuo S P, Ma Y Q, Deng X P, Li X W. Allelopathy in different wheat genotypes during the germination and seedling stages. *Allelopathy Journal*, 2005, 15 (1): 21-30.
- [24] Wu H, Haig T, Pratley J, Lemerle D, An M. Allelochemicals in wheat (*Triticum aestivum* L.): production and exudation of 2,4-dihydroxy-7-methoxy-1,4-benzoxazin-3-one. *Journal of Chemical Ecology*, 2001, 27: 1691-1699.
- [25] 刘小军, 朱 艳, 姚 霞, 周治国, 田永超, 曹卫星. 基于 WebGIS 的农田生产环境质量评价系统研究. 中国农业科学, 2005, 38: 551-557.
Liu X J, Zhu Y, Yao X, Zhou Z G, Tian Y C, Cao W X. Study on WebGIS-based farming environment quality assessment system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38: 551-557. (in Chinese)
- [26] Brown B J, Mitchell R J. Competition for pollination: effects of pollen of an invasive plant on seed set of a native congener. *Oecologia*, 2001, 129: 43-49.
- [27] Liu D L, Lovett J V. Biologically active secondary metabolites of barley. I. Developing techniques and assessing allelopathy in barley. *Journal of Chemical Ecology*, 1993, 19: 2217-2230.

(责任编辑 王红艳)