

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200776

刘宝海, 聂守军, 高世伟, 刘晴, 刘宇强, 常汇琳, 马成, 唐铭, 薛英会, 白瑞. 基于压力-状态-响应模型的寒地粳稻杂交育种后代选择与实现[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(4): 738–750

LIU B H, NIE S J, GAO S W, LIU Q, LIU Y Q, CHANG H L, MA C, TANG M, XUE Y H, BAI R. Selection and realization of hybrid breeding progeny of Japonica rice in cold region based on pressure-state-response model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(4): 738–750

基于压力-状态-响应模型的寒地粳稻杂交育种 后代选择与实现*

刘宝海, 聂守军, 高世伟, 刘 晴, 刘宇强, 常汇琳, 马 成,
唐 铭, 薛英会, 白 瑞

(黑龙江省农业科学院绥化分院 绥化 152052)

摘 要: 为提高育种杂交后代选择效果, 引入压力-状态-响应(PSR)模型对影响寒地粳稻杂交育种后代的遗传、环境和选择因素进行探讨。构建1个目标、3个准则和18个指标组成的寒地粳稻杂交育种后代选择概念模型与评价体系, 并采用客观熵权和功效评分相组合方法进行综合指数评价。结果表明: 在PSR模型设计环境下, ‘绥粳18’杂交育种9个世代杂交后代均表现出穗颈瘟权重值最大, 其次是倒伏级别, 再次是空壳率, 寒地生态环境下抗穗颈瘟发病指数、抗倒伏级别和空壳率水平是水稻育种杂交后代选择最重要的考虑指标。PSR系统评价中, 各子系统的影响力大小依次是响应子系统(权重为0.6867)>状态子系统(权重为0.2651)>压力子系统(权重为0.0482); 各指标值变异系数为0~200.4%, 大范围变异利于提高后代选择育种效果。与目前多依据株型理论选择杂交后代系谱相比, 运用PSR模型理论与评价体系方法, 创建动态压力选择环境, 客观评价指标特征, 并引入专家决策管理, 能够有效克服单纯依靠育种经验、定性定量不结合、多注重性状选择以及响应决策不系统而导致多优性状聚合难、鉴定难、选择效率低等问题, 具有较好可行性、可靠性和实用性, 可以获得更加合理的寒地水稻育种杂交后代选择方案。本研究结果可为加快寒地优质高产多抗广适突破性水稻新品种选育提供有益参考和技术依据。

关键词: 寒地粳稻; 杂交后代; 压力-状态-响应(PSR)模型; 熵权; 选择概念模型

中图分类号: S511

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Selection and realization of hybrid breeding progeny of Japonica rice in cold region based on pressure-state-response model*

LIU Baohai, NIE Shoujun, GAO Shiwei, LIU Qing, LIU Yuqiang, CHANG Huilin, MA Cheng,
TANG Ming, XUE Yinghui, BAI Rui

(Suihua Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Suihua 152052, China)

Abstract: To improve the breeding of hybrid offspring, a stress-state-response (PSR) model was used to investigate the ge-

* 黑龙江省“百千万”工程生物育种重大科技专项(2020ZX16B01)和黑龙江省农业科学院“农业科技创新跨越工程”专项(HNK2019CX02)资助

刘宝海, 主要研究方向为水稻育种与栽培。E-mail: shslbh@163.com

收稿日期: 2020-09-25 接受日期: 2021-01-15

* This study was supported by Heilongjiang Province “Hundred-Thousand-Ten Thousand” Major Science and Technology Project of Engineering Biological Breeding (2020ZX16B01) and the Special Project of “Agricultural Science and Technology Innovation Leapfrog Project” of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences (HNK2019CX02).

Corresponding author, LIU Baohai, E-mail: shslbh@163.com

Received Sep. 25, 2020; accepted Jan. 15, 2021

netic, environmental, and selection factors affecting the progeny of japonica hybrid rice in cold regions. A conceptual model and evaluation system for the selection of progeny of japonica hybrid breeding in cold regions with 1 target, 3 criteria, and 18 indices was constructed, and the objective entropy weight and efficacy score were used to evaluate the comprehensive index. The results indicated that nine generations of hybrid offspring of ‘Suijing 18’ crossbreeding showed the highest weight of neck blast, followed by lodging level, and the lowest was seed setting rate. The indices of resistance to panicle blast, lodging level, and percentage of empty shell were the most important factors for selecting hybrid progenies in cold regions. In the PSR system evaluations, the order of influence was the response subsystem (0.6867) > the state subsystem (0.2651) > the pressure subsystem (0.0482). Meanwhile, the coefficient of variation of the index values ranged from 0 to 200.4%, which was beneficial for enhancing the breeding efficiency of progeny selection through a wide range of variation. The response, stress, and state subsystems were related. Dynamic changes in the environmental pressure conditions represented an important factor to promote changes in the response and state subsystems. The weight analysis of hybrid progeny showed that the order of influence of environmental pressure was neck blast > irrigation water temperature > planting density > fertilizer application. Compared with the current plant-type improvement theory and methods for hybrid offspring character selection, applying the PSR hybrid progeny selection theory and methods on rice breeding in cold regions effectively overcame the problems of multi-optimal trait aggregation, identification, and low selection efficiency due to the lack of breeding experience, qualitative and quantitative combinations, more emphasis on trait selection, and poor response decision making. Systematic, dynamic, and objective scientific planning, with accurate and efficient design, evaluation, and decision-making was realized by PSR, which was concise, practical, efficient, and operational. According to the ecological characteristics of rice farming in cold regions, the variety selection based on natural conditions in different regions differed. The state and response indices in the evaluation system should be adjusted when the theory and method presented here are used to select the hybrid offspring of rice. These principles and methods can also be used in soybean, corn, and other crops, all of which require further exploration. The results of this study provide a useful reference and technical basis for accelerating the breeding of new rice varieties with high quality, high yield, multi-resistance, and wide adaptability in cold regions.

Keywords: Japonica rice in cold region; Hybrid offspring; Pressure-state-response model; Entropy weight; Conceptual selection model

黑龙江稻作区是中国最北部的寒地稻作区,也是优质粳米生态区,具有明显的生态特殊性^[1]。黑龙江省寒地稻作区属大陆型季风气候区,年平均气温由北向南为 $-5\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,全省 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温为 $1900\sim 2800\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜冻期平均 $100\sim 150\text{ d}$ 。寒地稻作区适于光温钝感性早熟品种栽培。该地区水稻种植南北跨越7个纬度、5个积温带^[2],水稻生产主要分布在 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温为 $2100\sim 2800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的第1至第4积温带耕作地区^[3],水稻品种生物特性表达具有极强的生态环境选择性,选育品种的生态适应性将直接影响其推广应用效果。作为黑龙江主要粮食作物的水稻(*Oryza sativa*),2018年种植面积 378万hm^2 ,约占全国粳稻总种植面积50%,约占全国总面积的12.5%,水稻总产量2018年达 2685.5万t ,约占全国水稻总产量的12.7%,在粮食生产和保障国家粮食安全方面起到了举足轻重的作用^[4]。据统计,黑龙江省2000—2018年育成292个水稻品种^[5],这些品种在产量、品质、抗逆性等方面均有较大突破,形成了具有寒地特色的水稻种质资源群体。新品种的选育和应用为黑龙江水稻单产提高、总产持续增加、综合生产能力稳定提升做出了突出贡献^[1],是粮食安全生产的战略保障^[6],也是关系国计民生的重大战略性课题^[7]。为此,在黑

龙江寒地粳稻主产区,进一步发挥品种增产潜力,开展适应寒地稻作生态区种植的优质、高产、多抗水稻新品种选育工作,是促进黑龙江稻农增收、稻米产业发展和国家粮食安全的关键环节。

目前,从我国作物育种的效率和效果看,杂交育种依旧是主流方法^[8]。据统计,黑龙江2000—2018年育成的292个水稻品种中,采用杂交方法育成278个,占95.2%^[6]。杂交育种过程中的杂交后代选择是最重要环节之一,其方法恰当与否将直接影响新品种选育效果。目前,杂交育种后代选择主要采用系谱法、混合法和集团混合法等^[1],这些方法多采用如施肥、栽培密度、灌溉水温、病害诱发等与田间种植条件相对一致,没有全面考虑环境与遗传变异间协同关系,更没有考虑试验种植环境变化对水稻杂交后代定向环境选择作用的影响。目前应用最广泛的综合评价方法是隶属函数法、主成分分析法和聚类分析法。此外,模糊综合评价法、DTOPSIS和灰色关联分析等方法在作物品种选育中也有所应用。总体来看,现有的评价研究仍存在一定不足,相对缺乏从产量、品质、抗性等多维度、全面性评价^[9]。关于水稻杂交育种后代综合评价也仅限于常态环境条件下对育种目标^[10-11]及产量、品质、抗逆等^[12-15]某

个方面研究,或者在特定环境下对低温胁迫^[16-17]、倒伏^[18]、施肥^[19-20]、稻瘟病^[21]等某个方面研究。

压力-状态-响应模型(简称 PSR 模型)是由经济合作开发组织与联合国环境规划署提出的一项反映可持续发展的理论概念模型^[22-23]。目前,该模型已被广泛应用在土地质量评价^[24-25]、生态安全评价^[26]、水资源安全评价^[27]、畜牧业系统评估^[28]、海洋生物多样性评价^[29]等领域研究,并取得显著成效。PSR 模型以因果关系为基础,分析系统内在因果关系,明确系统因素相互影响的因果链,进而介入针对性的调控措施,实现系统的可持续性。水稻杂交育种后代选择是一个环境影响、遗传表达和育种家决策相互关联的动态系统,属于新品种选育可持续发展框架内容。然而在寒地稻作区,人为设计环境压力条件,综合客观评价杂交育种后代,并对其行为进

行有效管理和系统决策的研究与实践,却鲜见报道。因此,本研究立足寒地水稻育种实践需要,利用 PSR 理论模型作为粳稻杂交后代选择评价的理论基础,构建简明、实用和可操作的压力设计-状态表达-响应决策黑龙江粳稻杂交育种后代选择模式,客观准确高效地选择优良粳稻杂交后代,借此完善黑龙江粳稻杂交后代选择理论与方法,为加快寒地优质、高产、多抗、广适水稻新品种选育提供有益参考和技术依据。

1 思路与方法

1.1 构建寒地粳稻杂交后代选择 PSR 概念模型

本着以压力为依据、性状为反映、响应为决策的可持续发展理念,创制寒地粳稻杂交后代选择 PSR 概念模型(图 1)。

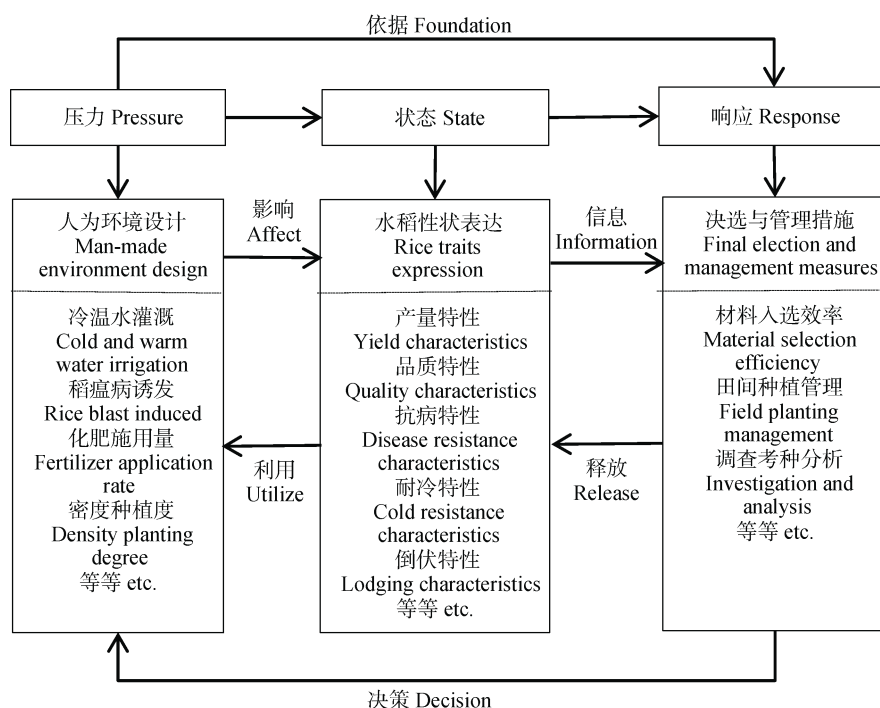


图 1 黑龙江粳稻杂交后代选择的压力-状态-响应(PSR)概念模型

Fig. 1 Pressure-state-response (PRS) conceptual model for selection of hybrid progenies of Japonica rice in Heilongjiang Province

1.2 寒地粳稻杂交后代选择技术路线

采用动态评价指标体系,按照杂交育种系谱法开展寒地水稻杂交后代各世代(F_2 - F_n 代)材料的选择处理,即根据杂交 F_2 - F_n 代性状遗传力特点,设计人为压力环境,采集性状考核指标,执行管理决策措施。

1.2.1 评价指标种植环境设计

设两种种植环境,分别为农民习惯种植环境条件(当地水稻种植生产过程中通常采用的田间管理方法)和优化种植环境条件(人为设计的利于杂交育

种后代不良性状充分表达的田间管理方法)。

1.2.2 性状指标采集

根据杂交各世代性状遗传特性与实践经验,设定产量、品质及抗逆性性状考核指标,并对其进行田间调查记录和室内考种分析等工作。

1.2.3 管理决策执行

根据育种目标和种植方案,对杂交育种后代选择的育种实践和田间管理执行情况采用专家打分方式进行评定。

1.3 建立寒地粳稻杂交后代选择 PSR 评价体系

本着科学优化、动态实用、系统有效、简明准确和可操作等指标体系构建原则, 建立集目标层、准则层、指标层 3 个项目层为一体的寒地粳稻杂交后代选择 PSR 评价指标体系, 设定目标层为寒地粳稻杂交育种后代选择的 PSR 评价指标体系, 准则层分为压力、状态和响应 3 组, 指标层包括但不限于产量、胶稠度和直链淀粉等指标。

1.3.1 准则层评价指标

压力是指人为设定种植环境, 有利于产量增加、品质提高和抗逆性增强等农艺性状表达的为正向压力设计, 反之为负向压力设计。状态是指水稻生长过程中各表型性状的数据表达。响应是指育种者对育种实施过程中的决策管理措施。

1.3.2 指标层评价指标

压力指标是指通过灌溉水温度、化肥施用量、穗颈瘟发病指数和种植密度等量化指标调整, 人为设定生态压力环境。状态指标是指倒伏级别、产量、胶稠度、直链淀粉、整精米率、穗颈瘟发病指数、分蘖力等 k 个考核性状。响应指标是指育种实践中, 对杂交后代材料入选率及田间管理、调查考种完成程度等量化指标的评定。

1.4 寒地粳稻杂交后代性状指标数据来源

在相应的试验环境条件下种植杂交各世代材料, 并进行田间调查和室内考种, 对各状态指标数据进行采集汇总。根据评价指标体系设定内容, 按照黑龙江省种子管理局《水稻田间调查标准与技术规程》和中华人民共和国国家标准《优质稻谷》(GB/T 17891—2017)等有关方法和标准, 对杂交各世代产量、品质和抗逆等性状进行田间鉴定与室内考种数据的采集汇总。

1.5 计算寒地粳稻杂交后代指标综合指数

而采用熵权法^[30-31]与功效评分法^[32]相组合的综合指数分析方法, 对杂交后代产量、品质、抗逆等多维度性状指标进行计算, 以避免主观误差, 达到全面客观科学反映各类信息的目的。

假设给定了 m 个评价对象, k 个评价指标, 评价各指标原始数据矩阵可表示为(1)式, 标准化数据计算如式(2), 确定标准化数据 P :

$$X = \{x_{ij}\}_{m \times n} \quad (i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, k) \quad (1)$$

式中: x_{ij} 表示第 i 个评价对象第 j 个指标值。

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (2)$$

式中: P_{ij} 表示第 i 个评价对象第 j 个指标的综合标准化值, m 为评价单元数量。

$$P = (p_{ij})_{m \times k} \quad (i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, k) \quad (3)$$

式中: p_{ij} 表示第 i 个评价对象第 j 个标准化后指标值。

评价指标的信息熵可表示为式(4):

$$e_j = -\frac{\sum_{i=1}^m p_{ij} \times \ln p_{ij}}{\ln m} \quad (4)$$

式中: e_j 表示第 j 个指标的信息熵。

采用式(5)计算各指标的权重, 即熵权(w_j)。可表示为:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^k e_j} \quad (5)$$

采用式(6)(指标均为正效益)和式(7)(指标均为负效益)计算各指标隶属函数系数值, 从而确定功效矩阵 B 。

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (6)$$

$$b_{ij} = \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (7)$$

$$B = \{b_{ij}\}_{m \times k} \quad (i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, k) \quad (8)$$

式中: b_{ij} 表示第 i 个评价对象第 j 个指标功效价值系数值。

功效综合指数计算公式为:

$$CI_i = \sum_{j=1}^k W_j \times b_{ij} \quad (9)$$

式中: CI_i 表示第 i 个评价对象的综合指数值。

利用 MATLAB (R2017a)软件编辑源代码, 对原始数据根据式(1)至式(9)次序进行熵权权重和功效综合指数值计算, 按照计算结果对各世代入选材料进行排序选择。根据综合指数值大小, 筛选优良杂交后代材料, 综合指数值越大的杂交育种后代综合性状越优良, 反之亦然。据此对供试杂交后代进行选择与鉴定, 最终筛选出综合性状优良的苗头品系进行品种审定。

2 试验与验证

2.1 试验区概况

试验设于松嫩平原腹地黑龙江省绥化市北林区秦家镇试验区。该区域是黑龙江省知名“老”稻区, 主要以水稻种植为主, 稻瘟病发生较重。常年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 2500~2700 $^\circ\text{C}$ 。平均降水量 483 mm, 有呼兰河

水系, 水资源丰富。土壤为碳酸盐草甸黑土, pH 6.9, 含有机质 $37.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $20.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $162.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $16.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $156.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2 试验设计

2.2.1 试验材料

供试材料为‘绥粳 18’水稻品种 2002—2010 年的 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6 、 F_7 及鉴定第 1 年、第 2 年、第 3 年共 9 个世代的杂交后代单株或株系群体。‘绥粳 18’水稻品种是本科课题组选育并于 2014 年通过黑龙江省品种审定委员会审定, 2015—2019 年累计推广 275 万 hm^2 , 2018 年种植 68.2 万 hm^2 , 是全国推广面积最大常规水稻品种, 获 2018 年度黑龙江省科技进步一等奖。

2.2.2 田间设计

1) 田间施肥方法。采用农民习惯施肥管理(FFP: famers fertilization practice)和利于育种选择的优化施肥管理(OFP: optimal fertilization practice)。化肥为尿素(含 N 46%)、磷酸二铵(含 P_2O_5 46%, 含 N 18%)和硫酸钾(含 K_2O 33%)。FFP: 施纯 N $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氮肥 40%作基肥, 60%作追肥, 磷、钾肥全部作基肥施入。OFP: 氮肥较 FFP 增加 10%, 即施纯 N $165 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 量不变, 不施钾肥, 其他管理同 FFP。

2) 田间种植密度。采用农民习惯密度管理(FDP: famers densities practice)和利于育种选择的优化密度管理(ODP: optimal densities practice)。FDP: 25 穴 $\cdot \text{m}^{-2}$ (30 cm $\times$ 13.2 cm), 每穴 3 株; ODP: 38 穴 $\cdot \text{m}^{-2}$ (26.3 cm $\times$ 10 cm), 每穴 1 株。

3) 田间灌溉采用农民习惯水灌溉管理(FWP: famers water irrigation practice)和利于育种选择的优化水灌溉管理(OWP: otimal water irrigation practice)。FWP: 水稻生育期全部利用自然水正常灌溉, 幼穗分化期至始穗抽出水温一般在 24°C 左右; OWP: 水稻幼穗分化期起用 $17\sim 18^\circ\text{C}$ 水灌溉到始穗抽出期(约 20 d 左右, 每天 6: 00—17: 50, 水深 25 cm 左右), 其他时期同 FWP 相同。

4) 田间稻瘟病管理。采用农民习惯稻瘟病管理(FRP: famers rice blast practice)和利于育种选择的优化稻瘟病管理(ORP: optimal rice blast practice)方法。FRP: 稻瘟病易发期采用药剂预防措施, 穗颈瘟发病指数为 1 级以下; ORP: 不采用任何药剂预防, 同时将试验区四周栽插感病品种‘伊 79-5’, 并对其喷洒含量为 1×10^5 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$ 的诱病混合菌种孢子悬浮液。

5) 各世代材料田间种植方案。 F_2 代, 共种植 24 个株系, 每株系 200 株(4 行, 行长 5 m), 单株插秧, 田间采用 OFP+ODP+ORP+FWP 管理方法。 F_3 、 F_4 、 F_5 和 F_6 代, 按株系种植, 共 482 个株系, 每株系 80 株(2 行, 行长 4 m), 单株插秧, 分别采用 OFP+ODP+ORP+FWP、OFP+ODP+ORP+OWP、OFP+ODP+ORP+OWP 和 ODP+ORP+OWP+OFP 田间管理方法。 F_7 代共 43 个株系, 按株系种植, 每株系 500 株(4 行, 行长 10 m), 采用 ORP+OWP+FDP+FFP 田间管理方法。鉴定第 1 年、第 2 年和第 3 年, 按株系混种, 小面积种植鉴定, 20 行, 行长 15 m, 每穴 3 株, 分别采用 ORP+OWP+ODP+OFP、ORP+OWP+ODP+OFP 和 FFP+FWP+FDP+FRP 田间管理方法。

2.3 评价体系

2.3.1 评价指标

结合寒地稻作区特点和育种实践经验, 构建了黑龙江粳稻杂交后代选择评价体系, 如表 1 所示。目标层为寒地粳稻育种杂交后代材料选择, 准则层为压力、状态和响应准则, 指标层选取 18 个指标, 其中压力指标 4 个, 状态指标 11 个, 响应指标 3 个。

2.3.2 指标测定

1) 状态指标测定。 F_2 代田间主要选择单株, 以后各世代首先选择优良株系, 然后从优良株系中选择优良单株。测定指标有: 活动积温, 以 2500°C 为基准(‘绥粳 10’水稻品种成熟活动积温 2500°C), 比‘绥粳 10’成熟晚或早 1 d, 则活动积温则 $\pm 25^\circ\text{C}$; 千粒重, 以 g 表示的 1000 稻谷充实籽粒的重量; 分蘖力, 按照分蘖力=(高峰苗-基本苗)/基本苗计算; 产量, F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6 、 F_7 考种单株穗粒重, 鉴定第 1 年、第 2 年、第 3 年测定小区实收稻谷产量, 并折算成 14%标准含水量的产量; 倒伏, 包括倒伏率和倾斜角度, 其中倒伏率是指倒伏面积占群体的百分率, 倾斜角度分为 1 级($61^\circ\sim 90^\circ$)、2 级($46^\circ\sim 60^\circ$)、3 级($40^\circ\sim 45^\circ$)、4 级($39^\circ\sim 0^\circ$); 空壳率, 单株秕籽粒占单株籽数总数的百分率; 穗颈瘟, 采用 1996 年国际水稻研究所发布的《Standard Evaluation System for Rice》评价体系, 按穗颈瘟发病面积百分率计算, 分为 0 级(无病)、1 级($< 5\%$)、3 级($5.1\%\sim 15\%$)、5 级($15.1\%\sim 30\%$)、7 级($30.1\%\sim 50\%$)、9 级($\geq 50.1\%$); 根据 GB/T 17891—1999《优质稻谷》国家标准测定稻米品质, 使用浙江托普 JMNJ 食味测定直链淀粉、胶稠度, 浙江托普 TP-JLG 磨谷机和德安特 ES-E120A 分析天平测定糙米率, 浙江托普 LTJM 精米机和佩克昂 PMWT 外观品质测定仪测定整精米率。

表 1 黑龙江粳稻育种杂交后代选择的压力-状态-响应(PSR)评价指标体系

Table 1 Pressure-state-response (PSR) evaluation index system for breeding hybrid offspring of Japonica rice in Heilongjiang Province

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	指标说明 Index definition
寒地粳稻育种杂交后代材料选择 Selection of hybrid offspring materials for Japonica rice breeding in cold region	压力 Pressure	X_1 灌溉水温度 Irrigation water temperature ($^{\circ}\text{C}$)	灌溉水分冷水(温度为 $17\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$)和温水(河流自然水) Irrigation water includes cold water ($17\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$) and warm water (natural river water).
		X_2 化肥施用量 Fertilizer application rate ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	氮肥、磷肥和钾肥的施用量 Application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers
		X_3 穗颈瘟诱发 Panicle blast ($10^5\cdot\text{mL}^{-1}$)	试验区喷施诱发稻瘟病的孢子悬浮液 The spore suspension was sprayed in the test area to induce panicle blast.
		X_4 种植密度 Planting density ($\text{holes}\cdot\text{m}^{-2}$)	密度=单位面积/(株距 $\times$ 行距) Density = unit area / (plants spacing $\times$ rows spacing)
		X_5 倒伏级别 Lodging level	根据倾斜植株群体面积占群体总面积的百分率和单株倾斜度共同确定。 Determined by percentage of the tilted plant population area to the total population area and the tilt of the individual plant
		X_6 活动积温 Active accumulated temperature ($^{\circ}\text{C}$)	水稻生育时期内 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动温度的总和 Sum of temperature above $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ during the growth period of rice
		X_7 产量 Yield ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	按稻谷 14%标准含水量折算的实测产量 Calculated with actually measured yield and 14% standard water content
		X_8 胶稠度 Gel consistency (mm)	评价大米食味淀粉胶体特性的一项指标 An index to evaluate the colloidal properties of rice starch gelatine
		X_9 直链淀粉含量 Amylose content (%)	影响稻米糊化过程中食味黏度的变化 Affect the change of taste and viscosity during rice gelatinization
		X_{10} 整精米率 Whole rice rate (%)	精米占稻谷重量的百分率 Weight percentage of polished rice to total rice
	状态 State	X_{11} 穗颈瘟发病指数(级) Panicle disease index (level)	按国际水稻研究所“Standard Evaluation System for Rice”(1996 年)评价 Evaluate according “Standard Evaluation System for Rice” released in 1996 by the International Rice Research Institute
		X_{12} 千粒重 1000-grain weight (g)	以克表示的 1000 粒稻谷充实籽粒的重量 Weight of a thousand grains of rice with full grain expressed in gram
		X_{13} 空壳率 Empty shell rate (%)	水稻结实度情况 Indicate the rice seed setting
		X_{14} 糙米率 Brown rice rate (%)	糙米重量占稻谷重量的百分率 Weight percentage of brown rice in total rice
		X_{15} 分蘖能力 Tillering ability ($\text{ear}\cdot\text{plant}^{-1}$)	表明基本苗成熟后分蘖的能力 Indicate the ability of tillering after the basic seedling matures
	响应 Response	X_{16} 后代材料入选率 Selection rate of offspring materials (%)	入选后代数(F_2 - F_6 单株、 F_7 及以后世代株系)数量占相应种植总数的百分率 Percentage of selected descendants to the total number of plantings (individual plants of F_2 - F_6 , strains of F_7 and later generations)
		X_{17} 田间管理程度 Field management level (fraction)	种植方案实施完成效果 Effect of the implementation of planting plan
		X_{18} 调查考种程度 Survey test level (fraction)	各性状指标田间测定和实验室考种分析完成效果 Results of field determination and laboratory test analysis of various traits

2)响应指标测定。包括: 后代材料入选率, 入选单株或株系占当年种植单株或株系百分率, 即通过育种家田间调查进行初步选择, 然后运用功效综合分析法对初选单株或株系的田间和室内考种数据进行计算分析, 根据功效综合分值或位次, 最终确定入选单株或株系; 田间管理完成程度, 实施完成田间种植要求的情况, 按专家打分为优良(90~100

分)、良好(80~89 分)、良(60~79 分)、差(50 分以下); 调查考种完成程度, 对状态指标完整度、准确性的测定完成情况, 按专家打分为优良(90~100 分)、良好(80~89 分)、良(60~79 分)、差(50 分以下)。

2.3.3 数据来源与处理

本研究数据来源主要是 2002—2010 年试验地田间管理和田间调查、室内考种及育种家打分的数据

记录,按照 1.5 评价流程进行数据处理。数据计算利用 MATLAB (R2017a)软件完成。

3 结果与分析

3.1 评价指标体系统计分析

水稻品种‘绥粳 18’选育, F_2 – F_7 和鉴定 1~3 年共 9 个世代的杂交后代受遗传特性和田间设计压力环境互作影响,产量、品质、抗病、耐冷、倒伏等特征获得充分表达。育种家通过田间选择,初步确定入选单株或株系。设定倒伏级别(X_5)、直链淀粉(X_9)、穗颈瘟(X_{11})和空壳率(X_{13})指标性状为负效益,活动积温(X_6)、产量(X_7)、胶稠度(X_8)、整精米率(X_{10})、千粒重(X_{12})、糙米率(X_{14})和分蘖力(X_{15})指标性状为正效益,综合公式(1)–(7),计算初选单株或株系状态指标(S)权重值(表 2)和功效综合分值(表 3),根据功效综合分值或位次最终确定入选单株或株系(由于篇幅所限,仅列出 F_2 – F_6 入选前 5 和后 5 位数据, F_7 仅列出决选数据),获得响应指标(R)后代材料入选率(X_{16})。同时,根据专家综合打分,获得田间管理程度(X_{17})和调查考种程度(X_{18})分值。

田间种植和田间选择过程中, F_2 代田间共种植 4800 株,田间选择单株 498 个; F_3 代田间种植 266 个株系 21 280 个单株,田间选择 30 个株系 134 个单株; F_4 代田间种植 100 个株系 8000 个单株,田间选择 24 个株系 113 个单株; F_5 代田间种植 57 个株系 4560 个单株,田间选择 20 个株系 98 个单株; F_6 代田间种植 59 个株系 4720 个单株,田间选择 20 个株系 90 个单株; F_7 代田间种植 43 个株系 21 500 个单株,田间选择 4 个株系 400 个单株(剩余单株混收);参加鉴定材料共 10 个杂交组合,每个组合 2 个株系,活动积温 2450 °C 左右,生育期相近,每个株系进行田间调查并选取 10 个单株进行室内考种,鉴定 1~3 年田间选择无淘汰。根据专家综合打分, F_2 、 F_3 田间管理和调查考种完成程度分值分别为 95 分、95 分, F_4 – F_7 和鉴定 1~3 年田间管理和调查考种完成程度分值分别为 95 分、97 分。

从表 2 可知, F_2 – F_7 和鉴定第 1~3 年 9 个世代杂交后代均表现出穗颈瘟(X_{11})权重值最大,分别为 0.5047、0.6929、0.7530、0.7229、0.7778、0.8482、0.7969、0.8481 和 0.8463,均占各世代总权重的 50% 以上,且呈现出随世代增加而增大趋势,说明穗颈瘟对杂交后代材料综合性状影响最大,穗瘟病诱发压力对淘汰 F_2 – F_7 代不抗病杂交后代材料有主导影响,无穗瘟病诱发压力对鉴定 1~3 年综合优良性状

正向表达也具有主导作用,穗颈瘟测定是杂交后代选择过程中最重要衡量指标。其次是倒伏级别(X_5),权重值分别为 0.2575、0.1845、0.1537、0.1782、0.1551、0.1053、0.1499、0.1126 和 0.1124,其中 F_2 代权重值最大,其他世代权重值虽有波动但总体呈下降趋势,说明大量不抗倒伏材料经过 F_2 代施肥和密度压力影响被淘汰后,其他世代抗倒伏材料选择也是较重要衡量指标。再次是空壳率(X_{13}),权重值分别为 0.1573、0.0630、0.0493、0.0473、0.0387、0.0290、0.0407、0.0269 和 0.0260,其中 F_2 代权重值最大,且与其他世代权重值差距较大,并呈现出随世代增加而下降趋势,说明 F_2 代施肥和密度等压力条件对结实率敏感的材料影响较大。 F_2 – F_6 代权重值后 3 位是糙米率(X_{14})、千粒重(X_{12})和活动积温(X_6), F_7 代是糙米率(X_{14})、千粒重(X_{12})和产量(X_7),鉴定 1~3 年权重值后 3 位是千粒重(X_{12})、活动积温(X_6)和直链淀粉(X_9),表现出这些性状受环境压力影响较小遗传性强,相应世代田间选择和室内考种有关指标要求可以适当放宽。以上结果说明,田间人为环境压力设计,完全能够影响杂交后代状态指标表达程度,具有较强的可操作性和目的性,育种家可以通过田间调查,大量淘汰状态指标不佳的材料,有效减少田间选择和室内考种工作量,提高了杂交后代选择效率。

从表 3 可知, F_2 代 498 个单株中,功效综合分值 0.5 以上单株共 266 个,入选率约为 5.5%; F_3 代 134 个单株中,功效综合分值 0.6 以上共 100 个,入选率约为 0.5%; F_4 代 113 个单株中,功效综合分值 0.6 以上共 57 个,入选率约为 0.7%; F_5 代 98 个单株中,功效综合分值 0.6 以上共 59 个,入选率约为 1.3%; F_6 代 90 个单株中,功效综合分值 0.8 以上共 43 个,入选率约为 0.9%; F_7 代 43 个株系,决选 4 个株系中,功效综合分值前 2 位入选,入选率约为 4.7%;鉴定第 1 年共种植 10 个杂交组合 20 个株系,功效综合分值 0.7 以上共 10 个株系,株系入选率 50.0%;鉴定第 2 年共种植 10 个株系,功效综合分值 0.7 以上共 8 个株系,株系入选率 80.0%;鉴定第 3 年共种植 8 个株系,功效综合分值 0.9 以上 2 个株系,株系入选率 25.0%。根据鉴定第 3 年入选结果,并结合 3 年平均效果,决定将入选株系 jd10-003 (即 F_7 代决选株系 07-078)申报参加 2011 年至 2013 年黑龙江省品种审定区域试验。试验过程中,株系 jd07-078 特征特性^[33]表现优良,适应区出苗至成熟需 ≥ 10 °C 活动积温 2450 °C 左右,3 年平均产量 8213.7 kg·hm⁻²;品质优、香味清淡、适口性好,出糙率 80.9%~82.2%,整精米

表 2 ‘绥粳 18’水稻选育过程中 F₂-F₇ 及鉴定第 1~3 年杂交后代的 11 个评价指标权重值Table 2 Weights of 11 evaluation indicators of hybrid offspring materials of F₂-F₇ and the first to third years of appraisal during breeding and selection of rice cultivar ‘Suijing 18’

指标 Indicator	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	鉴定第 1 年 First year of appraisal	鉴定第 2 年 Second year of appraisal	鉴定第 3 年 Third year of appraisal
X ₅	0.2575	0.1845	0.1537	0.1782	0.1551	0.1053	0.1499	0.1126	0.1124
X ₆	0.0024	0.0020	0.0015	0.0009	0.0008	0.0006	0.0004	0.0003	0.0001
X ₇	0.0182	0.0084	0.0063	0.0019	0.0012	0.0003	0.0011	0.0004	0.0005
X ₈	0.0066	0.0035	0.0028	0.0041	0.0012	0.0006	0.0005	0.0003	0.0007
X ₉	0.0062	0.0055	0.0070	0.0083	0.0032	0.0016	0.0015	0.0002	0.0001
X ₁₀	0.0045	0.0028	0.0020	0.0028	0.0020	0.0014	0.0010	0.0003	0.0004
X ₁₁	0.5047	0.6929	0.7530	0.7229	0.7778	0.8482	0.7969	0.8481	0.8463
X ₁₂	0.0019	0.0005	0.0003	0.0006	0.0005	0.0003	0.0002	0.0002	0.0003
X ₁₃	0.1573	0.0630	0.0493	0.0473	0.0387	0.0290	0.0407	0.0269	0.0260
X ₁₄	0.0014	0.0006	0.0007	0.0005	0.0004	0.0003	0.0006	0.0003	0.0003
X ₁₅	0.0392	0.0363	0.0235	0.0326	0.0191	0.0126	0.0073	0.0104	0.0129

X₅: 倒伏级别; X₆: 活动积温; X₇: 产量; X₈: 胶稠度; X₉: 直链淀粉含量; X₁₀: 整精米率; X₁₁: 穗颈瘟发病指数; X₁₂: 千粒重; X₁₃: 空壳率; X₁₄: 糙米率; X₁₅: 分蘖能力。X₅: lodging level; X₆: active accumulated temperature; X₇: yield; X₈: gel consistency; X₉: amylose content; X₁₀: whole rice rate; X₁₁: panicle disease index; X₁₂: 1000-grain weight; X₁₃: empty shell rate; X₁₄: brown rice rate; X₁₅: tillering ability.

表 3 ‘绥粳 18’水稻选育过程中 F₂-F₇ 及鉴定第 1~3 年杂交后代材料功效综合指数与排序Table 3 Comprehensive indexes and ranking of the hybrid offspring materials of F₂-F₇ and the first to third years of appraisal of during breeding and selection of rice cultivar ‘Suijing 18’

代号 Code	综合指数 Composite index	排序 Order	代号 Code	综合指数 Composite index	排序 Order	代号 Code	综合指数 Composite index	排序 Order	代号 Code	综合指数 Composite index	排序 Order
02-2350	0.9184	1	04-4002	0.9652	4	06-6045	0.8153	40	jd08-009	0.0419	18
02-2161	0.8929	2	04-4077	0.9633	5	06-6049	0.8128	41	jd08-018	0.0395	19
02-2435	0.8844	3	04-4075	0.6545	53	06-6067	0.8101	42	jd08-016	0.0378	20
02-2057	0.8760	4	04-4010	0.6529	54	06-6060	0.8036	43	jd09-005	0.9956	1
02-2417	0.8751	5	04-4101	0.6509	55	07-7078	0.9988	1	jd09-010	0.9778	2
02-2223	0.5092	262	04-4050	0.6459	56	07-7051	0.9790	2	jd09-003	0.9736	3
02-2246	0.5051	263	04-4104	0.6350	57	jd08-007	0.9930	1	jd09-004	0.7098	4
02-2392	0.5033	264	05-5061	0.9833	1	jd08-014	0.9852	2	jd09-007	0.7055	5
022380	0.5022	265	05-5009	0.9698	2	jd08-020	0.9692	3	jd09-006	0.7048	6
02-2453	0.5002	266	05-5003	0.9686	3	jd08-003	0.7261	4	jd09-002	0.7043	7
03-3137	0.9548	1	05-5065	0.9662	4	jd08-013	0.7255	5	jd09-009	0.7033	8
03-3112	0.9402	2	05-5048	0.9639	5	jd08-011	0.7214	6	jd09-008	0.6851	9
03-3076	0.9341	3	05-5019	0.6315	55	jd08-002	0.7196	7	jd09-001	0.5923	10
03-3047	0.9336	4	05-5006	0.6298	56	jd08-010	0.7152	8	jd10-003	0.9944	1
03-3030	0.9181	5	05-5075	0.6275	57	jd08-019	0.7113	9	jd10-008	0.9908	2
03-3115	0.6246	96	05-5099	0.6259	58	jd08-012	0.7107	10	jd10-002	0.7117	3
03-3039	0.6210	97	05-5035	0.6246	59	jd08-004	0.6895	11	jd10-004	0.7089	4
03-3005	0.6167	98	06-6036	0.9853	1	jd08-017	0.5755	12	jd10-005	0.7071	5
03-3083	0.6122	99	06-6003	0.9827	2	jd08-007	0.5551	13	jd10-007	0.6925	6
03-3064	0.6081	100	06-6024	0.9819	3	jd08-006	0.1881	14	jd10-006	0.6845	7
04-4004	0.9757	1	06-6019	0.9811	4	jd08-015	0.1834	15	jd10-001	0.5783	8
04-4033	0.9684	2	06-6048	0.9797	5	jd08-008	0.1682	16			
04-4028	0.9657	3	06-6029	0.8176	39	jd08-005	0.0438	17			

表中“代号”表示杂交后代材料田间代码, 如 02-2350 表示 2002 年 F₂ 代第 350 号材料, 07-7078 表示 2007 年 F₇ 代第 78 号材料, Jd08-007 表示 2008 年鉴定第 1 年的第 7 号材料, jd10-003 表示 2010 年鉴定第 3 年的第 3 号材料。The “code” in the table shows the field code of the hybrid offspring materials, for example, 02-2350 is the No. 350 material of the F₂ generation in 2002, 07-7078 is the No. 78 material of the F₇ generation in 2007, Jd08-007 is the No. 7 material of the first year of appraisal in 2008, and Jd10-003 is the No. 3 material of the third year of appraisal in 2010.

率 67.2%~72.3%, 垩白米率 4%~10%, 垩白度 0.8%~2.6%, 直链淀粉含量(干基) 17.67%~19.11%, 胶稠度 70~73 mm, 食味品质 80 分, 各项指标均达到国家《优质稻谷》标准二级以上; 3 年抗病接种鉴定叶瘟 1 级, 穗颈瘟 1 级; 3 年耐冷鉴定处理空壳率 4.94%~8.59%; 抗倒性好, 2012 年受台风“布拉万”影响, 没有出现倒伏现象。

以上分析结果表明, ‘绥粳 18’不同世代杂交后代材料, 在田间初步选择基础上, 运用功效综合指数算法, 能够做到定性与定量有机结合, 对多个指标进行综合评价, 并根据功效综合分值或位次确定入选单株或株系, 避免了人为主观选择误差, 达到全面客观反映各类状态指标信息的目的, 具有较强的操作性、可靠性和有效性。

3.2 杂交后代选择 PSR 评价

根据各世代田间压力设计指标、状态指标值和响应指标分析结果, 综合公式(1)~(4)及有关公式计算获得 F_2 ~ F_7 代和鉴定第 1 年、第 2 年、第 3 年共 9 个世代 18 项指标性状值和权重值等, 如表 4 所示。PSR 指标系统各指标值变异系数取值在 0~200.4%之间, 说明评价准则层各项指标值具有较大差异, 构建的指标层体系比较合理。同时, 受准则层各指标表现的差异性影响, 杂交后代选择的 PSR 评价指标权重也表现出明显差异性, 其中压力指标子系统权重达 0.0482, 状态指标子系统权重达 0.2651, 响应指标子系统权重 0.6867。同时, 响应指标子系统的后代材料入选率(X_{16})权重最大(0.6867), 其次是状态指标子系统的穗颈瘟(X_{11} , 0.1733), 第 3 位是倒伏级别(X_5 , 0.0523), 第 4 位是压力指标子系统的穗颈瘟诱发(X_3 , 0.0329), 第 5 位是状态指标子系统的空壳率(X_1 , 0.0243)。权重值最小的是田间管理程度(X_{17})和调查考种程度(X_{18}), 均为 0.000。结果说明, 在不同水稻杂交世代, PSR 评价指标体系中影响力大小依次是响应子系统>状态子系统>压力子系统, 且各子系统指标间也存在较大差异。

压力指标子系统的各指标世代间变异系数在 4.5%~20.1%之间, 压力条件变化差异比较显著, 权重值在 0.0009~0.0329 之间, 压力条件所起作用也存在较大差异。4 个压力指标中变异系数和权重大小依次是穗颈瘟诱发(X_3)>灌溉水温度(X_1)>密度种植度(X_4)>化肥施用量(X_2)。其中, 穗颈瘟诱发(X_3)在 F_2 ~ F_7 、鉴定第 1 年、鉴定第 2 年均采用 ORP 管理, 鉴定第 3 年采用 FRP 管理, 取值范围为 $0\sim1\times10^5\cdot\text{mL}^{-1}$, 表现出变异系数和权重最大; 其次是灌溉水温度

(X_1), 在 F_4 ~ F_7 、鉴定第 1 年、鉴定第 2 年均采用 OWP 管理, 其他世代采用 FWP 管理, 取值范围为 $17\sim24\text{ }^{\circ}\text{C}$, 变异系数和权重分别达 17.0%和 0.0121; 第 3 位是密度种植度(X_4), 在 F_2 ~ F_6 、鉴定第 1 年、鉴定第 2 年均采用 ODP 管理, 其他世代采用 FDP 管理, 取值范围为 $25\sim38\text{ holes}\cdot\text{m}^{-2}$, 变异系数和权重分别达 7.0%和 0.0023; 第 4 位是化肥施用量(X_2), 在 F_2 ~ F_6 、鉴定第 1 年、鉴定第 2 年均采用 OFP 管理, 其他世代采用 FFP 管理, 取值范围为 $260\sim275\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 变异系数和权重分别达 4.5%和 0.0009。结果说明, 压力指标子系统不同压力元素和压力元素组合, 会对 PSR 评价指标体系产生不同影响, 在育种实践中, 根据区域生态特点和育种目标采用适宜的生态压力子系统, 具有简明和实用性。

状态指标子系统方面, 各指标世代间变异系数为 2.5%~58.7%, 性状指标变化差异较显著, 权重值为 0.0003~0.1733, 表现出对杂交后代综合性状优劣程度的影响力也不相同。11 个状态指标中, 穗颈瘟发病指数(X_{11})取值范围为 0~5.0%, 变异系数最大(58.7%), 权重也最大达 0.1733; 其次是倒伏级别(X_5), 取值范围为 1.0~3.0, 变异系数达 35.9%, 权重达 0.0523; 第 3 位是空壳率(X_{13}), 取值范围为 2.4%~28.1%, 变异系数达 24.0%, 权重达 0.0243; 第 4 位是分蘖力(X_{15}), 取值范围为 10.0~24.0 穗, 变异系数达 14.0%, 权重达 0.0080; 第 5 位是产量(X_7), 取值范围为 $5706.2\sim9800.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 变异系数 8.0%, 权重 0.0027; 权重值最小 6 个指标依次是千粒重(X_{12})、糙米率(X_{14})<活动积温(X_6)<整精米率(X_{10})<胶稠度(X_8)<直链淀粉含量(X_9), 权重值分别为 0.0003、0.0003、0.0004、0.0008、0.0012 和 0.0015, 变异系数分别为 2.5%、2.5%、3.3%、4.5%、5.3%和 6.1%。

结果说明, 在杂交后代性状表达中, 抗逆性状指标如穗颈瘟、倒伏、空壳性状变化幅度很大, 且对后代优劣材料选择影响最大, 抗逆性差的后代材料一定会被淘汰, 这也是压力生态环境设计所产生的最直接效果。同时, 品质性状指标如糙米率(X_{14})、整精米率(X_{10})、胶稠度(X_8)、直链淀粉含量(X_9)等变化幅度较小, 其对后代优劣材料选择影响有限, 这与其受遗传力影响较大、受环境影响较小有直接关系。产量性状指标变化幅度相对中等水平, 主要是受分蘖力(X_{15})的影响。在育种实践中, 应该根据育种目标, 对状态指标进行有侧重点的高效调查和选择。

响应指标子系统方面, 田间管理程度(X_{17})和调

查考种程度(X_{18})平均分为 95.0 分和 95.7 分, 达优良水平, 取值范围分别为 95.0~95.0 和 95.0~97.0, 变异系数均较小, 分别为 0 和 1.0%, 权重值也最小, 均为 0.000。后代材料入选率(X_{16})取值范围为 0.5~80.0, 变异系数达 200.4%, 选择或淘汰杂交后代材料变化幅度较大, 表现在 F_2 – F_6 代是以选择单株方法计算, 入选率分别为 5.5%、0.5%、0.7%、1.3% 和 0.9%; F_7 是以选择株系方法计算, 入选率为 4.7%; 鉴定 1 年—鉴定 3 年是所有生育期相似的杂交后代组合, 以株系为单元进行鉴定比较, 入选率分别为 50.0%、80.0%和 25.0%。后代材料入选率(X_{16})权重值达 0.6867, 这不仅是响应指标子系统权重最大的,

也是 PSR 评价指标系统权重最大的。结果说明, PSR 评价指标体系育种实践过程中, 田间管理和调查考种完全能够达到优良水平且年际间变化极小, 实际操作可行, 育种家实践判别和功效综合决策决定后代材料入选率(X_{16})科学高效。

因此, 在 PSR 评价体系育种实践中, 形成了以压力为依据、以性状为反映、以响应为决策的可持续发展方案, 能够创造和利用特定生态环境条件, 使杂交后代遗传特性充分表达, 并通过育种家实践判别和功效综合决策, 实现杂交后代选择的实用、高效和可操作, 是选育优质高产抗逆广适水稻新品种较科学、客观和精确的方法。

表 4 ‘绥粳 18’水稻选育过程中杂交后代压力-状态-响应(PSR)评价体系的 18 项性状的指标值、信息熵和权重
Table 4 Values, information entropies and weights of 18 indicators of pressure-state-response (PRS) evaluation system of hybrid offspring materials during breeding and selection of rice cultivar ‘Suijing 18’

准则层(权重) Criterion layer (weight)	指标 Indicator	单位 Unit	取值范围 Range	均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variance (%)	信息熵 Information entropy	权重 Weight
压力 Pressure (0.0482)	X_1	°C	[17, 24]	20.6	3.5	17.0	0.9979	0.0121
	X_2	kg·hm ⁻²	[260, 275]	282.9	12.7	4.5	0.9998	0.0009
	X_3	×10 ⁵ ·mL ⁻¹	[0, 1]	1.0	0.2	20.1	0.9942	0.0329
	X_4	穴·m ⁻²	[25, 38]	37.4	2.6	7.0	0.9996	0.0023
状态 State (0.2651)	X_5		[1.0, 3.0]	1.5	0.5	35.9	0.9908	0.0523
	X_6	°C	[2100, 2650]	2440.7	79.4	3.3	0.9999	0.0004
	X_7	kg·hm ⁻²	[5706.2, 9800.1]	7955.1	635.5	8.0	0.9995	0.0027
	X_8	mm	[60.1, 82.5]	73.5	3.9	5.3	0.9998	0.0012
	X_9	%	[14.6, 22.3]	17.5	1.1	6.1	0.9997	0.0015
	X_{10}	%	[61.1, 75.3]	68.9	3.1	4.5	0.9999	0.0008
	X_{11}		[0, 5.0]	2.3	1.4	58.7	0.9696	0.1733
	X_{12}	g	[24.0, 27.5]	26.0	0.7	2.5	1.0000	0.0003
	X_{13}	%	[2.4, 28.1]	14.3	3.4	24.0	0.9957	0.0243
	X_{14}	%	[72.3, 87.3]	81.4	2.0	2.5	1.0000	0.0003
响应 Response (0.6867)	X_{15}	ear·plant ⁻¹	[10.0, 24.0]	15.8	2.2	14.0	0.9986	0.0080
	X_{16}	%	[0.5, 80.0]	5.2	10.5	200.4	0.8795	0.6867
	X_{17}	fraction	[95.0, 95.0]	95.0	0.0	0.0	1.0000	0.0000
	X_{18}	Fraction	[95.0, 97.0]	95.7	1.0	1.0	1.0000	0.0000

X_1 : 灌溉水温度; X_2 : 化肥施用量; X_3 : 穗颈瘟诱发; X_4 : 密度种植度; X_5 : 倒伏级别; X_6 : 活动积温; X_7 : 产量; X_8 : 胶稠度; X_9 : 直链淀粉含量; X_{10} : 整精米率; X_{11} : 穗颈瘟发病指数; X_{12} : 千粒重; X_{13} : 空壳率; X_{14} : 糙米率; X_{15} : 分蘖能力; X_{16} : 后代材料入选率; X_{17} : 田间管理程度; X_{18} : 调查考种程度。 X_1 : irrigation water temperature; X_2 : fertilizer application rate; X_3 : panicle blast; X_4 : planting density; X_5 : lodging level; X_6 : active accumulated temperature; X_7 : yield; X_8 : gel consistency; X_9 : amylose content; X_{10} : whole rice rate; X_{11} : panicle disease index; X_{12} : 1000-grain weight; X_{13} : empty shell rate; X_{14} : brown rice rate; X_{15} : tillering ability; X_{16} : selection rate of offspring material; X_{17} : field management level; X_{18} : survey test level.

4 讨论与结论

4.1 讨论

PSR 模型强调了环境压力来源, 基本思想是人们进行活动时对生态环境造成压力, 反过来改变了环境状态, 人们再根据这些变化做出反应行动^[34]。育种杂交后代选择是一个细致复杂而又十分重要的

工作, 如何提高选择的可靠性与有效性, 是杂种后代处理的重要问题^[1]。本研究引入 PSR 概念模型和评价指标体系, 以水稻品种‘绥粳 18’选育实例进行验证, 通过动态设计 6 种育种试验环境, 能够促使杂交后代材料 11 个遗传性状特征充分表达; 采用熵权与功效相结合综合评价方法, 能够保障 3 个准则

层指标、18 个指标层指标和杂交后代选择结果的客观性和可靠性;规范专家 3 个打分决策响应指标,后代材料入选率权重值最大(0.6867),田间管理程度和调查考种程度权重值最小(0.0000),实践管理年间变化极小,育种家判别实际操作可行。这与多采用同一试验环境条件下,利用株型改良育种理论^[35-37]进行杂交后代系谱选择^[1]的方法相比,能够有效克服单纯依靠育种经验、定性定量不结合、多注重性状选择以及响应决策不系统而导致品种选育多优性状聚合难、鉴定难、选择效率低的问题,有效提高实践育种效果。同时,PSR 系统各指标变异系数取值为 0~200.4%,压力子系统权重达 0.0482,状态子系统权重达 0.2651,响应子系统权重 0.6867,较大指标差异保障了体系构建的合理性,成功完成‘绥粳 18’育种杂交后代选择,与 PSR 模型在指标选取上自由灵活、系统性强、逻辑关系上衔接紧密等优点得到广泛应用^[38-39]相印证。为此,基于 PSR 模型理论与方法实施黑龙江粳稻育种杂交后代选择方案,具有较好的可行性、可靠性和实用性。

高产、优质、高效是水稻育种的永恒主题^[40],杂交后代各世代农艺性状选择将直接影响新品种选育效果^[1]。本研究对‘绥粳 18’ F_2 - F_7 和鉴定第 1~3 年 9 个世代杂交后代 11 个状态指标统计分析表明,穗颈瘟发病指数权重值(0.5047、0.6929、0.7530、0.7229、0.7778、0.8482、0.7969、0.8481 和 0.8463)最大、变异系数也最大(58.7%),其次是倒伏级别权重值(0.2575、0.1845、0.1537、0.1782、0.1551、0.1053、0.1499、0.1126 和 0.1124)、变异系数(35.9%),再次是空壳率权重值(0.1573、0.0630、0.0493、0.0473、0.0387、0.0290、0.0407、0.0269 和 0.0260)、变异系数(24.0%),寒地生态环境下抗穗颈瘟发病指数、抗倒伏级别和空壳率水平是水稻育种杂交后代选择最重要的考虑指标,与提高水稻品种抗稻瘟病、抗倒伏和耐冷性等多抗性指标来保障黑龙江省水稻安全生产的研究结果^[14,17-18]相一致,与针对稻瘟病和低温冷害频发难以稳产、倒伏严重、品质和效益难以提高等问题,选育高产优质与抗病、抗冷、抗倒有机结合突破性水稻品种的研究结果^[41]相一致。同时, F_2 - F_6 世代杂交后代材料单株入选率分别为 5.5%、0.5%、0.7%、1.3% 和 0.9%, F_7 代株系入选率为 4.7%,总体呈现出逐渐降低又升高“两端高中间低”U 字型曲线低(<6.0%)入选率特征,与寒地水稻育种实践中选择淘汰力度低世代逐渐加强、高世代材料减弱的趋势研究结果^[1]相一致,与早期选择不宜太严格、一般选择率不低于 10% 的研究结果^[42]不同,鉴定第

1~3 年株系入选率 50.0%、80.0% 和 25.0%,呈现出高(25%~80%)入选率特征,与育种实践中高世代性状稳定材料低淘汰率的思路^[1]相似。

本研究课题组在育种实践中常年种植 F_2 代杂交组合在 120~150 个,各杂交组合后代选择与本文实例验证运用理论和方法相同,且影响更大,但由于数据量过大、篇幅所限,且验证实例具有典型性和代表性,故不再赘述。同时,不同世代的压力条件设计和状态指标调查、考种,可根据育种实践情况选择确定。由于寒地稻作区生态特点,不同区域自然条件和品种选育要求存在差异性,在运用本文理论和方法进行水稻杂交后代选择时,可对评价体系中状态和响应指标进行调整即可。另外,运用本文研究思路与方法,可运用在大豆(*Glycine max*)、玉米(*Zea mays*)等作物育种方面,这有待进一步研究。

4.2 结论

本研究基于 PSR 模型,构建 1 个目标、3 个准则和 18 个指标的寒地粳稻杂交育种后代选择评价体系,采用客观熵权与功效评分相组合方法进行杂交后代分析与选择,主要结论如下:

1)PSR 模型设计环境下,响应子系统(R)对杂交后代选择影响力最大,其次是状态子系统(S),再次是压力子系统(P)。其中,压力子系统指标影响大小依次是穗颈瘟诱发>灌溉水温度>种植密度>化肥施用量,状态子系统指标影响力前 3 位依次是穗颈瘟发病指数、倒伏级别和空壳率,响应子系统指标后代材料入选率权重值最大。寒地生态环境下抗穗颈瘟发病指数、抗倒伏级别和空壳率是水稻育种杂交后代选择最重要的考虑指标。

2)运用 PSR 模型理论与评价方法于寒地水稻育种杂交后代选择,2014 年成功选育出水稻新品种‘绥粳 18’,2017—2019 年种植面积连续达 67 万 hm^2 以上,已成为全国种植面积最大的优良粳稻品种^[33,43],与目前多依据株型理论对杂交后代系谱法选择相比,能够实现杂交后代多优性状高效聚合与客观选择、评价,具有可行、实用、高效和可操作性,可以获得更加合理的寒地水稻育种杂交后代选择方案。

参考文献 References

- [1] 潘国君. 寒地粳稻育种[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 14
- PAN G J. Japonica Rice Breeding in Cold Regions[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 14
- [2] 王秋菊, 张玉龙, 刘峰, 等. 黑龙江省水稻品种跨积温区种植的产量和品质变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1381-1386

- WANG Q J, ZHANG Y L, LIU F, et al. Changes of rice yield and quality in different accumulated temperature zones in Heilongjiang Province of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1381–1386
- [3] 刘宝海. 寒地生态条件下水稻育种方向分析[J]. 北方水稻, 2015, 45(2): 61–63
- LIU B H. Analysis of rice breeding in cold ecological conditions[J]. North Rice, 2015, 45(2): 61–63
- [4] 代滢芸. 2018 年黑龙江省水稻市场分析报告[J]. 黑龙江粮食, 2019, (5): 16–21
- DAI Y Y. Analysis report of rice market in Heilongjiang Province in 2018[J]. Heilongjiang Grain, 2019, (5): 16–21
- [5] 国家水稻数据中心. 中国水稻品种及其系谱数据库[EB/OL]. [2019-02-15]. http://www.ricedata.cn/variety/identified/hlj_1.htm
- China Rice Data Center. Database of rice varieties and genealogies in China[EB/OL]. [2019-02-15]. http://www.ricedata.cn/variety/identified/hlj_1.htm
- [6] 林海, 李婷婷, 童汉华, 等. 我国水稻主栽品种演替分析[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(6): 565–571
- LIN H, LI T T, TONG H H, et al. Analysis on evolution of major rice cultivars in China[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2018, 32(6): 565–571
- [7] 罗斌, 潘大宇, 高权, 等. 基于物联网技术的寒地水稻程控催芽系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 180–185
- LUO B, PAN D Y, GAO Q, et al. Design and experiment of rice program control germination system in cold region based on internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(12): 180–185
- [8] 吴比, 胡伟, 邢永忠. 中国水稻遗传育种历程与展望[J]. 遗传, 2018, 40(10): 841–857
- WU B, HU W, XING Y Z. The history and prospect of rice genetic breeding in China[J]. Hereditas, 2018, 40(10): 841–857
- [9] 纪龙, 申红芳, 徐春春, 等. 基于非线性主成分分析的绿色超级稻品种综合评价[J]. 作物学报, 2019, 45(7): 982–992
- JI L, SHEN H F, XU C C, et al. Comprehensive evaluation of green super rice varieties based on nonlinear principal component analysis[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(7): 982–992
- [10] 邹江石, 吕川根. 水稻超高产育种的实践与思考[J]. 作物学报, 2005, 31(2): 254–258
- ZOU J S, LYU C G. Practice and thinking on rice breeding for high yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(2): 254–258
- [11] 陈温福, 徐正进, 张龙步, 等. 北方粳型稻超高产育种理论与实践[J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 869–874
- CHEN W F, XU Z J, ZHANG L B, et al. Theories and practices of breeding japonica rice for super high yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(5): 869–874
- [12] 徐海, 宫彦龙, 夏原野, 等. 中日水稻品种杂交后代的株型性状与产量和品质的关系[J]. 中国水稻科学, 2016, 30(3): 283–290
- XU H, GONG Y L, XIA Y Y, et al. Relation of plant type traits with yield and quality in the RIL population derived from cross between Chinese rice variety and Japanese rice variety[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2016, 30(3): 283–290
- [13] 李红宇, 郑桂萍, 刘梦红, 等. 北方粳稻穗重指数及其与产量品质关系的研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(1): 175–181
- LI H Y, ZHENG G P, LIU M H, et al. Differences of panicle weight index among varieties and its relationship with yield and quality of japonica rice in northern China[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(1): 175–181
- [14] 李洪亮, 柴永山, 孙玉友, 等. 黑龙江省水稻稻瘟病研究现状及抗病育种[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(5): 25–33
- LI H L, CHAI Y S, SUN Y Y, et al. Resistance breeding and research status of rice blast in Heilongjiang Province[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(5): 25–33
- [15] 饶玉春, 杨窑龙, 黄李超, 等. 水稻耐冷胁迫的研究进展[J]. 分子植物育种, 2013, 11(3): 443–450
- RAO Y C, YANG Y L, HUANG L C, et al. Research progress on cold stress in rice[J]. Molecular Plant Breeding, 2013, 11(3): 443–450
- [16] 李亚非, 王连敏, 曹桂兰, 等. 不同低温胁迫下粳稻耐冷种质的孕穗期耐冷性比较[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(6): 691–697
- LI Y F, WANG L M, CAO G L, et al. Comparison of cold tolerance at the booting stage for cold tolerant japonica rice germplasm under different cold stress[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(6): 691–697
- [17] 王士强, 陈书强, 赵海红, 等. 孕穗期低温胁迫对寒地水稻产量构成与株型特征的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(2): 129–134
- WANG S Q, CHEN S Q, ZHAO H H, et al. Effects of booting stage cold stress on yield components and plant type characteristics of rice in cold region[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(2): 129–134
- [18] 张明聪, 刘元英, 罗盛国, 等. 养分综合管理对寒地水稻抗倒伏性能的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(21): 4536–4542
- ZHANG M C, LIU Y Y, LUO S G, et al. Effects of integrated nutrient management on lodging resistance of rice in cold area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(21): 4536–4542
- [19] 从夕汉, 施伏芝, 阮新民, 等. 氮肥水平对不同基因型水稻氮素利用率、产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1219–1226
- CONG X H, SHI F Z, RUAN X M, et al. Effects of nitrogen fertilizer application rate on nitrogen use efficiency and grain yield and quality of different rice varieties[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1219–1226
- [20] 薛欣欣, 李少坤. 施钾量对水稻干物质积累及吸钾规律的影响[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(5): 905–913
- XUE X X, LI X K. Effects of potassium application levels on the characteristics of dry matter accumulation and potassium uptake in rice[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(5): 905–913
- [21] 雷财林, 张国民, 程治军, 等. 黑龙江省稻瘟病菌生理小种毒力基因分析与抗病育种策略[J]. 作物学报, 2011, 37(1): 18–27
- LEI C L, ZHANG G M, CHENG Z J, et al. Pathogenic races and virulence gene structure of *Magnaporthe oryzae* population and rice breeding strategy for blast resistance in Heilongjiang Province[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(1): 18–27
- [22] FAO. Land quality indicators and their use in sustainable agriculture and rural development[R]. Rome: FAO, 1997
- [23] NERI A C, DUPIN P, SÁNCHEZ L E. A pressure-state-response approach to cumulative impact assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 126: 288–298. doi:

- 10.1016/j.jclepro.2016.02.134
- [24] 曲衍波, 朱伟亚, 郎文聚, 等. 基于压力-状态-响应模型的土地整治空间格局及障碍诊断[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 241–249
QU Y B, ZHU W Y, YUN W J, et al. Land consolidation spatial pattern and diagnosis of its obstacle factors based on pressure-state-response model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(3): 241–249
- [25] 王鹏, 王亚娟, 刘小鹏, 等. 基于 PSR 模型的生态移民安置区土地利用系统健康评价——以红寺堡区为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 270–276
WANG P, WANG Y J, LIU X P, et al. Evaluation of health of land use system in ecological resettlement area based on PSR model—A case study of Hongsibu area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 270–276
- [26] 刘畅, 冯宝平, 张展羽, 等. 基于压力-状态-响应的熵权-物元水生态文明评价模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 1–7
LIU C, FENG B P, ZHANG Z Y, et al. Evaluation model of water ecological civilization based on pressure-state-response matter element model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(16): 1–7
- [27] 马玲玲, 周林飞, 张婷婷, 等. 基于压力-状态-响应模型的大伙房水库水源地安全评价研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(1): 114–120
MA L L, ZHOU L F, ZHANG T T, et al. Water source security evaluation of Dahufang reservoir based on PSR model[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49(1): 114–120
- [28] BOCKSTALLER C, VERTÉS F, FIORELLI J L, et al. Tools for evaluating and regulating nitrogen impacts in livestock farming systems[J]. Advances in Animal Biosciences, 2014, 5(S1): 49–54
- [29] 黄备, 魏娜, 孟伟杰, 等. 基于压力-状态-响应模型的辽宁省长海海域海洋生物多样性评价[J]. 生物多样性, 2016, 24(1): 48–54
HUANG B, WEI N, MENG W J, et al. Marine biodiversity evaluation based on the pressure-state-response (PSR) model of Changhai county, Liaoning Province[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(1): 48–54
- [30] 雷勋平, 吴杨, 叶松, 等. 基于熵权可拓决策模型的区域粮食安全预警[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 233–239
LEI X P, WU Y, YE S, et al. Regional grain security pre-warning based on entropy weight extension decision model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 233–239
- [31] 余健, 房莉, 仓定帮, 等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 260–266
YU J, FANG L, CANG D B, et al. Evaluation of land eco-security in Wanjiang district base on entropy weight and matter element model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 260–266
- [32] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 10–30
DU D, PANG Q H, WU Y. Selection of Modern Comprehensive Evaluation Methods and Cases[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 10–30
- [33] 刘宝海, 晏守军, 高世伟. 寒地香梗水稻主栽品种绥梗 18 的选育难点与创新点[J]. 中国稻米, 2018, 24(5): 35–38
LIU B H, NIE S J, GAO S W. Analysis on the Breeding Difficulty and Innovation Points of New Aromatic Rice Suigeng 18[J]. China Rice, 2018, 24(5): 35–38
- [34] 张军以, 苏维词, 张凤太. 基于 PSR 模型的三峡库区生态经济区土地生态安全评价[J]. 中国环境科学, 2011, 31(6): 1039–1044
ZHANG J Y, SU W C, ZHANG F T. Regional land ecological security evaluation in the case of Chongqing Three Gorges Reservoir ecological economy area based on the PSR model[J]. China Environmental Science, 2011, 31(6): 1039–1044
- [35] 刘华招, 步金宝, 宋微. 寒地半直立耐密型早梗稻设计与原理[J]. 现代化农业, 2013, (9): 30–31
LIU H Z, BU J B, SONG W. Design and principle of semi-upright early Japonica rice in cold region[J]. Modernizing Agriculture, 2013, (9): 30–31
- [36] 徐正进, 陈温福. 中国北方粳型超级稻研究进展[J]. 中国农业科学, 2016, 49(2): 239–250
XU Z J, CHEN W F. Research progress and related problems on japonica super rice in northern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(2): 239–250
- [37] 徐海, 宫彦龙, 夏原野, 等. 中日水稻品种杂交后代株型性状的变化及其相互关系[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(4): 363–372
XU H, GONG Y L, XIA Y Y, et al. Variations in plant type traits and their relationship of progeny derived from the cross between Chinese rice variety and Japanese rice variety[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2015, 29(4): 363–372
- [38] 左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究[J]. 土壤, 2003, 35(1): 2–7
ZUO W, ZHOU H Z, WANG Q. Conceptual framework for selection of an indicator system for assessment of regional ecological safety[J]. Soils, 2003, 35(1): 2–7
- [39] 王玉图, 王友绍, 李楠, 等. 基于 PSR 模型的红树林生态系统健康评价体系——以广东省为例[J]. 生态科学, 2010, 29(3): 234–241
WANG Y T, WANG Y S, LI N, et al. The assessment system of mangrove ecosystem health applying the PSR model: A case study of Guangdong Province[J]. Ecological Science, 2010, 29(3): 234–241
- [40] 肖国樱, 肖友伦, 李锦江, 等. 高效是当前水稻育种的主导目标[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(4): 287–292
XIAO G Y, XIAO Y L, LI J J, et al. High efficiency is a dominant target for current rice breeding[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2019, 33(4): 287–292
- [41] 潘国君, 刘传雪, 张淑华, 等. 寒地早梗稻“一早三抗”新株型育种理论与实践[J]. 黑龙江农业科学, 2020, (12): 1–6
PAN G J, LIU C X, ZHANG S H, et al. Theory and practice for the “one early maturing and three resistances” new plant type breeding of early Japonica rice in cold region[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020, (12): 1–6
- [42] 姜长鉴, 莫惠栋. 自花授粉作物育种中分离世代的选择效应[J]. 江苏农学院学报, 1990, 11(1): 1–8
JIANG C J, MO H D. Selection effects in segregating generation of breeding population for self-fertilized crops[J]. Journal of Jiangsu Agricultural college, 1990, 11(1): 1–8
- [43] 全国各主要农作物推广面积前 5 的品种及分布图[EB/OL]. 智种网, [2020-03-25]. https://www.sohu.com/a/360321288_225946
The varieties and distribution map of the top 5 of the national main crops extension area[EB/OL]. Smartseed, [2020-03-25]. https://www.sohu.com/a/360321288_225946