

刘梦红,张巩亮,李红宇,等. 基于 BP 人工神经网络的寒地水稻抗旱性综合评价[J]. 江苏农业科学,2023,51(10):91-99.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.10.013

基于 BP 人工神经网络的寒地水稻抗旱性综合评价

刘梦红^{1,2,3}, 张巩亮¹, 李红宇^{1,2,3}, 杜俊⁴, 赵海成^{1,2,3}, 吕坦¹, 钱永德^{1,2,3}

(1. 黑龙江八一农垦大学农学院,黑龙江大庆 163319; 2. 农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室,黑龙江大庆 163319;

3. 黑龙江八一农垦大学黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室,黑龙江大庆 163319;

4. 黑龙江省富裕牧场,黑龙江齐齐哈尔 161200)

摘要:为筛选适宜寒地水稻大田抗旱性的综合评价指标,并鉴定抗旱水稻种质资源,以分蘖期干物质量、拔节期株高、产量等 15 个性状的抗旱系数为指标,使用主成分分析法对 50 个参试材料的抗旱性进行综合评价。选取 45 个样本的抗旱系数作为输入,把对应的抗旱综合评价值作为输出,利用误差反向传播和神经网络的方法建立学习模型;剩余 5 个样本为验证样本,用于判断学习模型的预测准确性。改变 3 组学习样本来建立 3 个不同的学习模型并进行对比,比较其预测的准确度,进而验证该模型方法的合理性和稳定性。结果表明,采用主成分分析法可将 15 个单一抗旱系数转换成 6 个互相独立的综合性指标,方差累计贡献率达 84.013%。采用聚类分析法将 50 个参试材料分为 3 种类型:强抗旱型、中间抗旱型、干旱敏感型。强抗旱类型含有 24 个材料,中间抗旱型含有 18 个材料,干旱敏感型含有 8 个材料。根据各性状抗旱系数与抗旱综合评价值(D 值)的相关性分析结果,筛选出分蘖期干物质量、分蘖期叶面积、拔节期株高、最高分蘖数、穗粒数、结实率、千粒质量、产量、生物量、经济系数等 10 个适宜抗旱性评价指标。以特征指标值为输入层,综合评价值(D 值)为输出层,构建 BP 神经网络学习模型,定量预测抗旱指标特征。通过改变学习样本获得 3 个学习模型的预测值,预测值与实际值之间的误差小于 10%。把实际值和模型预测值进行线性拟合, $R^2 > 0.95$ 。本研究构建的 BP 神经网络学习模型可用于定量预测水稻种质资源的抗旱性,预测的准确度和稳定性均优于单一的回归分析;分蘖期干物质量、分蘖期叶面积、拔节期株高、最高分蘖数、穗粒数、结实率、千粒质量、产量、生物量、经济系数可作为水稻抗旱能力鉴定指标;稻坚强为抗旱性最强的种质资源。

关键词:寒地水稻;抗旱性;主成分分析;聚类分析;BP 神经网络

中图分类号:S511.024;S126 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)10-0091-09

当前,全球农业面临粮食需求持续增加和水资

源日益枯竭的双重挑战。水稻是全球超过一半人口的主食,也是耗水量最多的粮食作物,水生产效率低下,水资源浪费情况严重^[1-2]。抗旱水稻新品种的培育和推广是提高水分利用率的有效途径。水稻的抗旱性是多基因控制的复杂性状,作用机制极为复杂^[3]。品种的基因型及相同品种不同生育时期的抗旱机理也存在差异^[4-5]。前人在抗旱种质

收稿日期:2022-07-31

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0100506);黑龙江省重点研发计划(编号:GA21B002)。

作者简介:刘梦红(1980—),女,黑龙江讷河人,主要从事植物营养方面的研究。E-mail:ndsoil@163.com。

通信作者:李红宇,博士,副教授,主要从事水稻高产优质生理生态及遗传多样性研究。E-mail:ndrice@163.com。

photosynthesis in leaves of Pima cotton [J]. Journal of Plant Nutrition, 1996, 19(5): 755-770.

[31] Kircher S, Schopfer P. Photosynthetic sucrose acts as cotyledon-derived long-distance signal to control root growth during early seedling development in *Arabidopsis* [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(28): 11217-11221.

[32] Lilley J L, Gee C W, Sairanen I, et al. An endogenous carbon-sensing pathway triggers increased auxin flux and hypocotyl elongation [J]. Plant Physiology, 2012, 160(4): 2261-2270.

[33] MacGregor D R, Deak K I, Ingram P A, et al. Root system

architecture in *Arabidopsis* grown in culture is regulated by sucrose uptake in the aerial tissues [J]. The Plant Cell, 2008, 20(10): 2643-2660.

[34] Höglberg P, Höglberg M N, Göttlicher S G, et al. High temporal resolution tracing of photosynthate carbon from the tree canopy to forest soil microorganisms [J]. The New Phytologist, 2008, 177(1): 220-228.

[35] Menge D N L, Levin S A, Hedin L O. Evolutionary tradeoffs can select against nitrogen fixation and thereby maintain nitrogen limitation [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(5): 1573-1578.

资源筛选与鉴定方面已做了大量研究工作,并且多采用苗期反复干旱存活率、形态发育、逆境生理生化、产量及相关性状等指标进行综合评价。张鸿等采用有效穗数、穗实粒质量和结实率等指标的相对值综合评价了 10 个杂交籼稻新组合的抗旱性^[6]。丁国华等通过幼苗存活率和抗衰度来评价杂草稻幼苗期的耐旱性^[7]。袁杰等认为,可以采用发芽率指标、芽长指标、根长指标评价来自新疆的粳稻在种芽期间的耐寒程度^[2]。利用多个指标构建抗旱综合评价体系并使用隶属函数进行综合分析,综合指标法能够全面衡量不同指标的贡献率大小,且去除了重复信息,更加科学全面,准确度较高^[8-9],已经普遍用于作物复杂性状的抗性鉴定与评价^[10-11]。另外,传统的耐旱性预测模型多采用线性逐步回归筛选自变量,建立多元线性回归模型,该方法存在多重相关等诸多弊端。人工神经网络的运算模型由多个比较简易的处理单元连接在一起,这一模型广泛地应用在了农学研究中。刘敏洁等在进行人工神经网络建模时,运用 13 个物理方面的指标,用于甜玉米种子生活力检测^[12]。孙小香等采用 BP (bank propagation) 人工神经网络建立了水稻叶片氮素浓度的冠层光谱估算模型^[13]。由于利用逐步回归

分析筛选抗旱性评价适宜指标的准确性和稳定性不足,而利用线性模型关联作物生育性状与抗旱能力也存在模型关联性和预测准确性较差的问题,本研究拟通过构建 BP 神经网络学习模型来定量预测水稻的抗旱性,筛选寒地水稻抗旱性评价的特征指标,以期为水稻种质资源抗旱性综合评价提供方法与依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

50 份试验材料经 2017—2018 年初步筛选得到,均为普通型粳稻(表 1)。

1.2 试验设计

试验于 2019、2020 年在黑龙江省大庆市高新区的试验基地遮雨棚中开展。盆栽试验,每个品种设置常规灌溉对照和干旱胁迫 2 个处理。常规灌溉按照当地大田生产水分管理方法进行。干旱胁迫在水稻返青后开始处理,运用负压土壤湿度(湿度计插入土表 10 cm 以下的地方)测量土壤的水势情况,保持全生育期土壤水势在 -30 ~ -35 kPa。每份材料的处理和对照分别种植 5 盆,每盆移栽 4 穴,每穴 4 苗。其他管理方法同常规。

表 1 参试材料名称

品种代号	品种名称	品种代号	品种名称	品种代号	品种名称	品种代号	品种名称
H01	龙粳 29	H14	齐粳 10	H27	龙粳 48	H40	农丰 3027
H02	龙粳 43	H15	长白 9 号	H28	东稻 4	H41	农丰 3035
H03	龙粳 46	H16	庆盐 1 号	H29	SR - 824 - 14	H42	农丰 3056
H04	龙粳 47	H17	庆盐 2 号	H30	白粳 1 号	H43	农丰 3062
H05	龙粳 39	H18	庆盐 3 号	H31	农丰 1 号	H44	农丰 3156
H06	龙粳 52	H19	庆盐 4 号	H32	农丰 7 号	H45	农丰 3161
H07	龙粳 59	H20	庆盐 11 号	H33	农丰 3085	H46	农丰 3221
H08	龙粳 65	H21	农丰 13G280	H34	农丰 3068	H47	农丰 3226
H09	龙粳 1624	H22	农丰 13C245	H35	农丰 3055	H48	垦研 017
H10	龙粳 3001	H23	14S - 902 - 2	H36	稻坚强	H49	垦稻 90
H11	绥 607 - 5206	H24	松 98 - 131	H37	DPB120	H50	垦稻 42
H12	绥 117463	H25	龙粳 42	H38	DPB15		
H13	垦粳 8 号	H26	龙稻 9	H39	绥粳 21		

1.3 调查与测定

水稻返青后,每 5 d 调查 1 次长势均匀的 12 穴植株的分蘖数,直至分蘖数稳定,计算最高分蘖数。拔节期测定 12 穴植株的株高。分蘖期各品种常规灌溉和干旱胁迫分别取代表性植株 4 穴,从基部切除根系,分叶和茎鞘 2 个部分,测量叶面积(长 ×

宽 × 0.75),将叶片和茎鞘分开包装,于 105 ℃ 杀青 30 min,80 ℃ 烘干至恒质量,计算分蘖期每穴干物质量和叶面积;齐穗期各品种按灌溉和干旱胁迫分别取代表性植株 4 穴,从基部切除根系,分叶、茎鞘、穗 3 个部分,测量叶面积(长 × 宽 × 0.75),分别包装,烘箱设置 105 ℃,杀青 30 min,并在 80 ℃ 下烘

干,计算穴叶面积和穴干物质量。

齐穗期采用日本 MINOLTA 生产的叶绿素 SPAD-502 仪器来测定主茎剑叶中部区域的 SPAD 数值,每处理测定 16 张叶,测定时注意避开叶脉和有损伤的叶片。

成熟期每处理选取长势均匀的植株 8 穴,带回室内考察农艺性状和产量性状,分穗、茎鞘、叶 3 个部分称质量。具体包括株高、穗长、穗数、穗粒数、每穗实粒数、千粒质量等指标性状,分别计算结实率、生物量、经济系数和理论产量。

1.4 数据处理及统计分析

1.4.1 抗旱系数 (DTC) 水稻抗旱系数 (drought tolerant coefficients, DTC), 即各抗旱指标的相对值进行抗旱性综合分析。

抗旱系数 (DTC) = 干旱胁迫性状值 / 非干旱胁迫性状值。 (1)

1.4.2 综合指标值 综合指标值计算公式为:

$$Z_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)。 (2)$$

式中: α_i 代表某一个指标的特征值相对应的特点向量; x_i 是指该指标的相对值。

1.4.3 隶属函数分析 参试材料各主成分的隶属函数值依据公式(3)计算。

$$\mu(Z_i) = (Z_i - Z_{i\min}) / (Z_i - Z_{i\max}) (i=1, 2, 3, \dots, n)。 (3)$$

式中: $\mu(Z_i)$ 是各样本第 i 个主成分的隶属函数值; Z_i 是各样本第 i 个综合指标值; $Z_{i\min}$ 、 $Z_{i\max}$ 分别是各样本第 i 个综合指标的最小值、最大值。

1.4.4 各综合指标的权重 依据不同的主成分贡献率的不同,采用公式(4)来计算不同的主成分在权重方面的数值。

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i (i=1, 2, 3, \dots, n)。 (4)$$

式中: W_i 是各样本第 i 个综合指标的权重; P_i 是各样本第 i 个综合指标的贡献情况。

1.4.5 参试材料的综合抗旱 D 值 参试材料综合抗旱 D 值按公式(5)计算。

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(Z_i) \times W_i] (i=1, 2, 3, \dots, n)。 (5)$$

D 值代表在干旱胁迫条件下,各材料主成分评价的抗旱性综合分值。

1.4.6 BP 神经网络建模思路 为构建水稻抗旱性状与抗旱性综合评价关联模型,本研究选用 45 个水稻参试材料样本采用 BP 神经网络算法构建学习模

型,其中输入层为抗旱力特征指标值,输出层为抗旱综合评价值,其余 5 个样本是用于评估学习模型预测准确性的验证样本。为了优化建模样本并验证建模方法的稳定性,将 3 组学习样本(45 个)转化为 3 个学习模型,并比较了 3 个模型的预测准确性。如果预测精度在合理范围内,则意味着建模方法是合理且稳定的。

1.4.7 数据处理与统计分析 数据整理、权重和抗旱综合评价 D 值的计算都运用了 Excel 2010。利用 DPS 7.05 软件进行主成分分析、聚类分析、BP 神经网络模型构建并计算指标预测值。

2 结果与分析

2.1 参试材料的抗旱系数及相关分析

表 2 结果表明,干旱胁迫条件下 50 个参试材料的 15 个性状的抗旱系数平均值为 0.694,数值分布在 0.309 ~ 1.100 之间,拔节期株高、结实期株高、齐穗期 SPAD 值、千粒质量等 4 个性状的抗旱系数大于 0.8,产量性状的抗旱系数小于 0.5。

从变异系数 (CV) 方面看,变异系数最大的为产量 (44.02%),分蘖期叶面积 (38.29%) 次之,结实率 (34.40%) 再次之;变异系数最小的为齐穗期 SPAD 值 (5.97%),结实期株高 (6.32%) 次之,拔节期株高 (8.47%) 再次之。

如表 3 所示,在干旱胁迫条件下,对 15 个性状进行相关分析发现,不同的性状之间存在相关性,这些相关性程度各不相同,这些性状之间的相关性可能会让信息出现重叠,如果直接运用会对抗旱性能的真实情况产生影响。为了避免信息的重叠,采用主成分分析方法评价水稻的抗旱性。

2.2 参试材料抗旱性的主成分分析

如果主成分累计起来的贡献率超过 80%,那么就可以看作该信息是有代表性的。根据表 4,前 6 个主成分的贡献率分别是 31.578%、16.168%、14.595%、9.025%、7.354%、5.293%。这 6 个主成分累计起来的贡献率是 84.013%。也就是说,前面 6 个主成分所代表的 15 个不同的性状变异信息是 84.013%。

第 1 主成分的贡献率为 31.578%,该主成分以与产量密切相关的每穴生物产量 (0.349)、结实率 (0.357)、产量 (0.408)、最高分蘖数 (0.334)、齐穗期每穴干物质量 (0.330)、经济系数 (0.320) 的载荷较高,可以把主成分 1 当做产量因子;第 2 主成分的

表 2 参试材料抗旱系数的描述性分析

指标	抗旱系数				CV (%)	分布区间
	2019 年	2020 年	平均	标准差		
分蘖期每穴干物质质量	0.673 81	0.640 19	0.657	0.199	30.30	0.246 ~ 1.093
分蘖期叶面积	0.754 53	0.619 47	0.687	0.263	38.29	0.248 ~ 1.263
拔节期株高	0.982 66	0.817 34	0.900	0.076	8.47	0.733 ~ 1.052
结实期株高	0.858 86	0.767 14	0.813	0.051	6.32	0.711 ~ 0.968
齐穗期每穴干物质质量	0.494 11	0.419 89	0.457	0.116	25.47	0.147 ~ 0.757
齐穗期叶面积	0.674 88	0.661 12	0.668	0.174	26.08	0.293 ~ 1.063
最高分蘖数	0.689 25	0.638 75	0.664	0.135	20.33	0.409 ~ 0.929
齐穗期 SPAD 值	1.113 60	1.086 40	1.100	0.066	5.97	0.948 ~ 1.273
每平方米穗数	0.840 12	0.757 88	0.799	0.165	20.69	0.500 ~ 1.213
穗粒数	0.709 36	0.592 64	0.651	0.108	16.56	0.426 ~ 0.983
结实率	0.689 78	0.678 22	0.684	0.235	34.40	0.100 ~ 1.179
千粒质量	1.000 64	0.827 36	0.914	0.146	15.98	0.767 ~ 1.686
产量	0.316 15	0.301 85	0.309	0.136	44.02	0.038 ~ 0.663
每穴生物产量	0.542 38	0.457 62	0.500	0.110	21.94	0.315 ~ 0.803
经济系数	0.620 35	0.589 65	0.605	0.188	31.15	0.096 ~ 0.958

贡献率是 16.168%。其中,穗粒数是 0.466 所代表的正载荷比较高,每平方米穗数是 -0.508 的负载荷较高,可以看作穗数因子;第 3 主成分的贡献率为 14.595%,以拔节期株高(0.493)、分蘖期叶面积(0.476)、分蘖期干物质质量(0.480)的载荷较高,称为拔节期株高因子;第 4 主成分的贡献率为 9.025%,以齐穗期 SPAD 值(0.569)的载荷较大,称为齐穗期 SPAD 值因子;第 5 主成分的贡献率为 7.354%,以千粒质量(0.785)具有较大的正载荷,结实期株高(-0.511)具有较大的负载荷,故称为千粒质量因子;第 6 主成分的贡献率为 5.293%,以齐穗期叶面积(-0.422)的负载荷较大,称为齐穗期叶面积因子。

2.3 抗旱性综合评价

依据公式(2)计算各参试材料的综合指标值,进一步利用公式(3)计算各参试材料在干旱胁迫条件下,不同主成分所从属的函数值。根据主成分不同的贡献率,结合公式(4)将前面 6 个主成分的权重分计算出来,结果依次是 0.376、0.192、0.147、0.107、0.088、0.063。利用公式(5)对各综合指标隶属函数值和相应权重进行线性加权,计算得到抗旱综合评价值 *D*。表 5 结果表明,50 个参试材料平均 *D* 值为 0.449 7,分布区间在 0.183 1 ~ 0.655 9。品种 H37(DPB120)的 *D* 值为 0.5804,排位第 5 名。排名前 4 的品种为 H36(稻坚强)、H35(农丰 3055)、H31(农丰 1 号)、H26(龙稻 9),其 *D* 值分别

为 0.655 9、0.589 3、0.588 9、0.581 7,可作为抗旱种质资源使用。H02(龙粳 43)的 *D* 值(0.1831)最小,即抗旱能力最差,H08(龙粳 65) *D* 值次之,为 0.232 1,H04(龙粳 47) *D* 值再次之,为 0.237 7。

2.4 参试材料抗旱性的聚类分析

如图 1 所示,对 50 份水稻材料使用 WPGMA 法,在欧氏距离 0.59 处分为强抗旱型、中间抗旱型、干旱敏感型 3 个抗旱等级。第 I 类为由 H03、H30、H39、H25、H32、H26、H37、H31、H35、H36、H13、H33、H49、H19、H38、H45、H29、H42、H34、H17、H18、H44、H41、H43 等 24 个材料组成的强抗旱型类群,占总材料数的 48%;第 II 类由 H05、H16、H15、H14、H23、H22、H06、H46、H11、H10、H24、H09、H21、H27、H40、H20、H50、H28 等 18 个材料组成的中间抗旱型类群,占总材料数的 36%;第 III 类由 H01、H12、H07、H48、H47、H02、H04、H08 等 8 个材料组成的干旱敏感型类群,占总材料数的 16%。

2.5 水稻抗旱鉴定指标的筛选

表 3 相关分析结果表明,*D* 值与分蘖期每穴干物质质量、分蘖期叶面积、拔节期株高、最高分蘖数、穗粒数、结实率、千粒质量、产量、每穴生物产量、经济系数等指标的抗旱系数极显著正相关,与结实期株高、齐穗期每穴干物质质量、齐穗期叶面积 3 个鉴定指标的抗旱系数显著正相关,*D* 值与齐穗期 SPAD 值和每平方米穗数指标的抗旱系数无显著相关性,可能与其变异系数小、各品种间测量值差异不大有

表 3 参试材料 15 个性状抗旱系数的相关分析

性状	D 值	相关系数														
		分蘖期 每穴干 物质质量	分蘖期 叶面积	拔节期 株高	结实期 株高	齐穗期 每穴干 物质质量	齐穗期 叶面积	最高 分蘖数	齐穗期 SPAD	每平方米 穗数	穗粒数	结实率	千粒质量	产量	每穴 生物产量	经济系数
D 值	1.00															
分蘖期每穴干物质质量	0.66**	1.00														
分蘖期叶面积	0.62**	0.80**	1.00													
拔节期株高	0.47**	0.59**	0.48**	1.00												
结实期株高	0.31*	0.02	0.08	0.12	1.00											
齐穗期每穴干物质质量	0.30*	0.25	0.10	0.14	-0.05	1.00										
齐穗期叶面积	0.29*	0.22	0.02	0.08	0.03	0.85**	1.00									
最高分蘖数	0.60**	0.63**	0.41**	0.60**	-0.09	0.51**	0.48**	1.00								
齐穗期 SPAD 值	-0.01	-0.01	-0.08	0.02	0.09	0.17	0.19	0.13	1.00							
每平方米穗数	-0.22	0.11	0.03	-0.08	-0.35*	0.46**	0.28*	0.21	0.05	1.00						
穗粒数	0.47**	0.02	0.01	0.09	0.41**	-0.12	0.05	0.05	-0.07	-0.59**	1.00					
结实率	0.74**	0.22	0.25	0.09	0.33*	0.36*	0.29*	0.36**	-0.08	-0.10	0.23	1.00				
千粒质量	0.40**	0.12	0.04	0.09	-0.12	0.05	0.07	0.11	0.06	-0.07	0.23	0.03	1.00			
产量	0.69**	0.27	0.21	0.06	0.24	0.56**	0.46**	0.44**	-0.06	0.24	0.20	0.89**	0.11	1.00		
每穴生物产量	0.43**	0.23	0.06	0.16	0.22	0.59**	0.52**	0.40**	0.08	0.46**	0.06	0.56**	0.11	0.79**	1.00	
经济系数	0.71**	0.20	0.25	-0.02	0.21	0.29*	0.23	0.33*	-0.16	-0.10	0.30*	0.91**	0.08	0.84**	0.35*	1.00

注：*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

表 4 前 6 个主成分特征向量、主成分特征值、贡献率及累计贡献率

指标	产量因子	穗数因子	拔节期株高因子	齐穗期 SPAD 值因子	千粒质量因子	齐穗期叶面积因子
分蘖期每穴干物质量	0.263	-0.068	0.480	-0.081	-0.018	0.067
分蘖期叶面积	0.202	0.032	0.476	-0.234	-0.088	0.177
拔节期株高	0.172	-0.023	0.493	0.161	-0.107	-0.118
结实期株高	0.094	0.375	-0.040	0.254	-0.511	0.142
齐穗期每穴干物质量	0.330	-0.290	-0.169	0.164	-0.009	-0.265
齐穗期叶面积	0.297	-0.220	-0.170	0.322	0.005	-0.422
最高分蘖数	0.334	-0.149	0.259	0.099	0.058	-0.162
齐穗期 SPAD 值	0.020	-0.159	-0.031	0.569	-0.226	0.583
每平方米穗数	0.116	-0.508	-0.146	-0.234	-0.023	0.201
穗粒数	0.075	0.466	0.026	0.348	0.173	-0.287
结实率	0.357	0.281	-0.161	-0.192	-0.040	0.142
千粒质量	0.066	0.049	0.074	0.270	0.785	0.352
产量	0.408	0.120	-0.225	-0.152	0.037	0.131
每穴生物产量	0.349	-0.093	-0.214	0.064	-0.061	0.166
经济系数	0.320	0.306	-0.152	-0.268	0.106	0.067
特征值	4.737	2.425	2.189	1.354	1.103	0.794
方差贡献率	31.578	16.168	14.595	9.025	7.354	5.293
累计贡献率	31.578	47.746	62.341	71.366	78.720	84.013

表 5 50 个参试材料的 *D* 值及抗旱性排序

品种代号	<i>D</i> 值	排位	品种代号	<i>D</i> 值	排位	品种代号	<i>D</i> 值	排位
H01	0.290 3	47	H18	0.495 5	23	H35	0.589 3	2
H02	0.183 1	50	H19	0.525 0	15	H36	0.655 9	1
H03	0.543 8	9	H20	0.429 5	29	H37	0.580 4	5
H04	0.237 7	48	H21	0.449 0	27	H38	0.524 3	16
H05	0.384 5	36	H22	0.404 5	32	H39	0.546 2	8
H06	0.369 6	40	H23	0.400 2	33	H40	0.456 9	26
H07	0.332 1	44	H24	0.358 8	41	H41	0.509 2	21
H08	0.232 1	49	H25	0.568 7	6	H42	0.521 3	17
H09	0.442 0	28	H26	0.581 7	4	H43	0.513 5	20
H10	0.349 1	42	H27	0.461 8	25	H44	0.481 9	24
H11	0.375 3	38	H28	0.415 1	31	H45	0.525 9	14
H12	0.302 9	46	H29	0.520 5	18	H46	0.369 8	39
H13	0.528 3	13	H30	0.541 5	10	H47	0.325 4	45
H14	0.397 0	34	H31	0.588 9	3	H48	0.335 7	43
H15	0.390 0	35	H32	0.555 0	7	H49	0.534 1	11
H16	0.383 1	37	H33	0.530 4	12	H50	0.427 9	30
H17	0.501 1	22	H34	0.519 3	19			

关。综上可以得到分蘖期每穴干物质量、分蘖期叶面积、拔节期株高、最高分蘖数、穗粒数、结实率、千粒质量、产量、每穴生物产量、经济系数 10 项指标可作为农业抗旱力评价的指标。

2.6 水稻抗旱指标适宜性评价模型的构建

从 50 个试验样本中随机选出 45 个样本建立神经网络学习模型,另外 5 个样本当做预测的样本,来

检验模型是否准确。从图 2 可以发现,这个模型一共有 3 层,分别是输入层、隐含层、输出层。输入模型分别是分蘖期干物质量、分蘖期叶面积、拔节期株高、最高分蘖数等 10 项抗旱力特点的指标值,所以一共得到 10 个神经元。通过模型输出的是抗旱性的综合评价值 *D* 为输出层的 1 个神经元。在 BP 神经网络当中,处于隐含层当中的神经元是饰演特

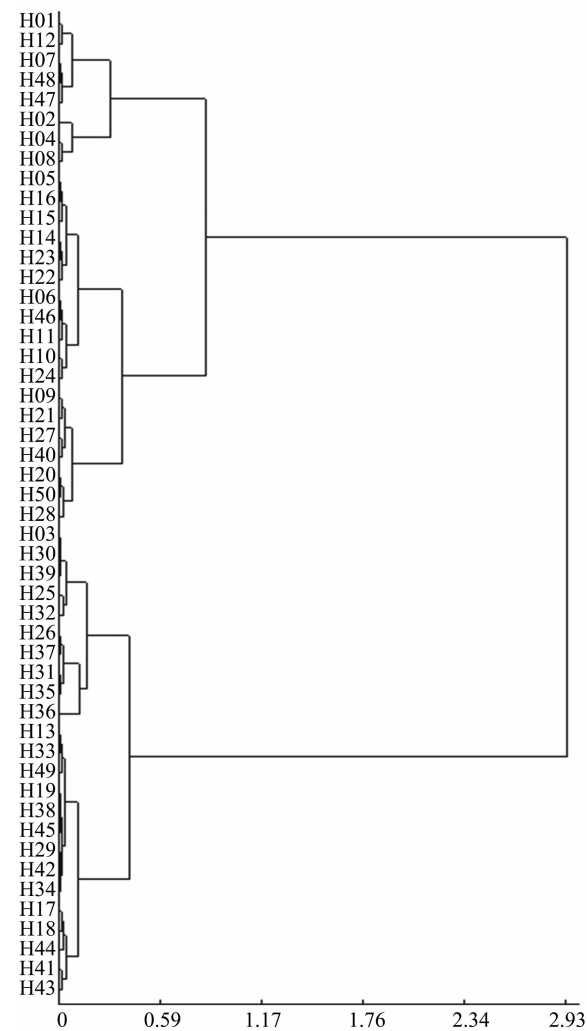


图1 50份参试材料抗旱能力的聚类分析

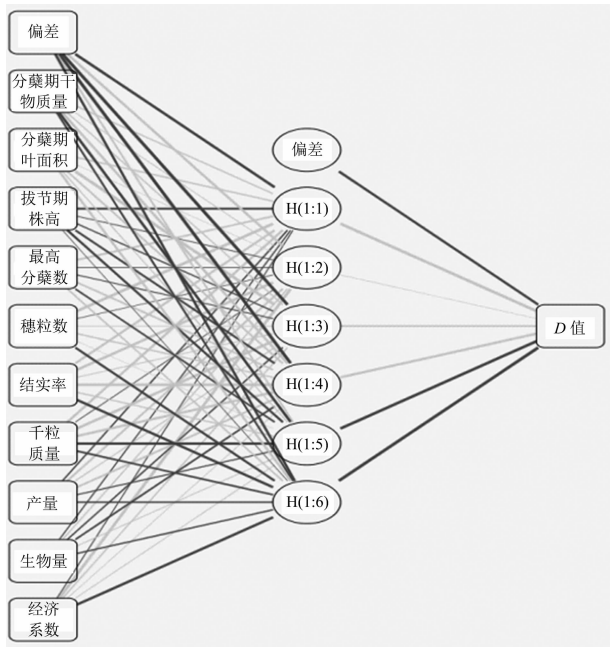


图2 BP神经网络结构

征检验算子的形象,发挥着决定性的功能。在隐藏层中,通常把节点数设置成输入层的1/2。在这个神经网络中,把隐藏层设置成6个节点。最后,建立一个包含了输入层(10)、隐藏层(6)、输出层(1)的神经网络。

从参加试验的50个样本中随机选45个样本来构建一个学习模型,剩余的5个样本进行抗旱指标适宜性得分预测。为了建模的方法和评价模型预测更加准确,改变了45个学习样本,建立了3个学习模型,表6即为得到的预测结果。表6结果表明,3个学习模型中包含了15个验证的样本预测得分和实际得分,其误差位于10%以下,最小的误差只有0.41%。说明构建的BP神经网络模型取得了较好的预测结果。将参试材料的实际得分和通过模型的预测得分做回归分析,横坐标是参试材料实际得分,纵坐标是通过模型得到的预测值,将二者进行线性拟合分析,3组预测结果的决定系数(r^2)分别为0.9946、0.9757、0.9608(图3)。预测值和实际值的相符合水平很高,证明BP神经网络模型可准确、稳定地评价水稻的抗旱性指标。不同水稻参试材料样本构建的学习模型预测效果存在较大差异,说明用于建立学习模型的样本数量仍较少,变换少量学习样本能对预测效果产生较大影响。同时,学习模型所需的样本应具有典型性与代表性,部分水稻参试材料样本与其他样本差异较大,也可能对预测效果产生较大影响。

表6 基于BP神经网络算法水稻抗旱指标适宜性预测结果

学习模型	验证样本	实际得分	预测得分	相对误差(%)
1	龙粳65	0.2321	0.2465	6.22
	龙粳42	0.5687	0.5633	-0.95
	龙粳59	0.3321	0.3615	8.86
	齐粳10	0.3970	0.4169	5.02
	白粳1号	0.5415	0.5368	-0.86
2	DPB15	0.5243	0.5327	1.61
	农丰3221	0.3698	0.3713	0.41
	SR-824-14	0.5205	0.5257	1.01
	农丰3055	0.5893	0.5711	-3.10
	绥607-5206	0.3753	0.4087	8.90
3	龙粳46	0.5438	0.5516	1.43
	农丰3062	0.5135	0.5039	-1.81
	14S-902-2	0.4002	0.3831	-4.28
	庆盐2号	0.5011	0.5132	2.42
	农丰3027	0.4569	0.4716	3.22

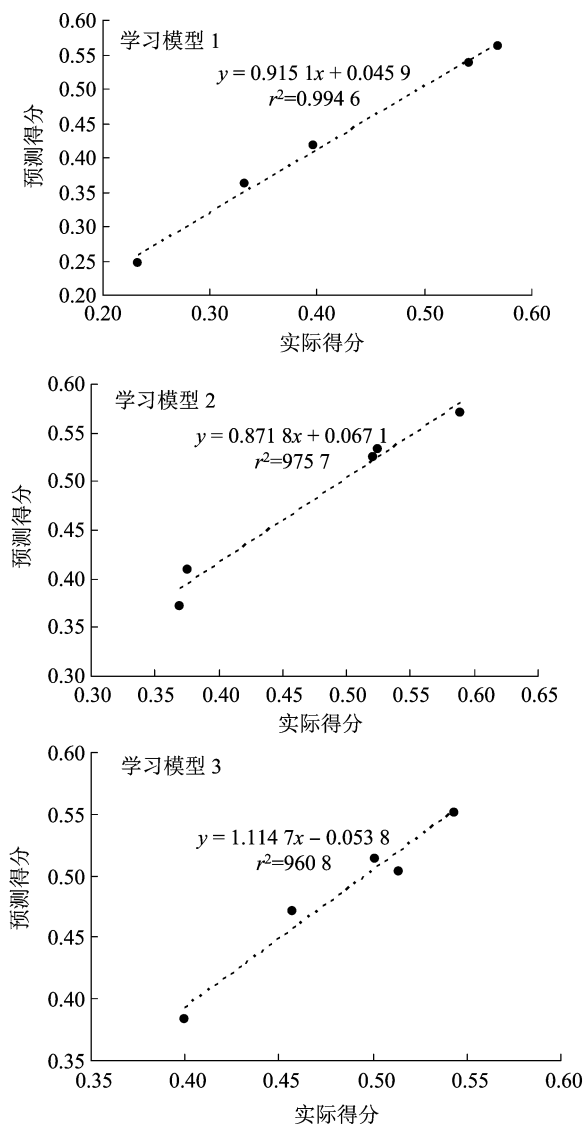


图3 水稻抗旱指标适宜性模型稳定性验证

3 讨论

水稻的抗旱性是由多个基因控制的复杂性状。植物水分胁迫的程度容易受到环境因素的影响,所以在确定抗旱性能时变得更难。一个具有可行性的抗旱鉴定体系是培育节水抗旱水稻的根基。鉴定水稻的抗旱性能主要依据水稻在抗旱方面的能力而进行选择、评估和归类,能够给水稻抗旱育种供应比较优秀的种质资源。另外,在品种培育过程中以及育成后,也需要进行品种抗旱鉴定^[14-15]。聂继云等通过相关性分析,分析了苹果汁的品质以及原料的相关指标,得出果实相关特征方面的指标,采用判别分析方法,把 122 个不同的苹果品种制作的果汁作适应性分类^[16]。张小燕等将 74 个马铃薯

品种原料通过逐步回归的方式,分析原料指标和制品品质之间的关联度,实现了用马铃薯原料指标来进行定量分析薯片品质的方法^[17]。荆瑞勇等以种子发芽指数与幼苗生长指数的相对值作为耐盐性评价指标,基于主成分分析方法,运用隶属度函数法和加权隶属度函数法,分析 11 种不同的水稻材料所具有的耐盐性能;根据聚类分析的数据,依据耐盐性能的区别,把这 11 个不同的水稻材料分成了 3 种^[18]。本研究采用主成分分析法得到产量、穗数、拔节期株高、齐穗期 SPAD 值、千粒质量、齐穗期叶面积 6 个彼此互不相关的因子,方差累计贡献率达 84.013%,50 份参试材料平均综合评价 D 值为 0.4497,分布区间在 0.1831~0.6559。采用欧氏距离离差平方和法,将 50 份参试材料分为强抗旱型、中间抗旱型、干旱敏感型。强抗旱类型品种稻坚强(0.6559)排在第 1 位;排在第 2、3 位的品种分别为农丰 3055、农丰 1 号,其 D 值分别为 0.5893、0.5889;排在第 4、5 位的品种分别为龙稻 9、DPB120,其 D 值分别为 0.5817、0.5804。以上 5 个种质资源可以作为抗旱育种的杂交亲本。

在水稻抗旱育种方面,产量的相关性有着较为重要的功能。由于产量性状的遗传性较低,产量构成比较繁杂,鉴定与评价比较困难,较大程度上受环境因素的影响^[19]。另外,在不同的生育期产量的构成因子对水分的敏感性有所不同,分蘖期水分胁迫有效穗数变少;幼穗分化期水分胁迫每穗粒数、千粒质量变少;开花期水分胁迫结实率与千粒质量降低^[20-21]。高世伟等通过研究发现,水稻品种在苗期卷叶数、分蘖速率、4 叶 1 心期根系活力、强势粒灌浆速率在遗传上的差异比较明显^[22]。将抗旱性状做相关性分析,这些指标与水稻抗旱性呈显著或极显著正相关。牛同旭等把苗期反复干旱的成活率这一指标当做标准,采用主成分分析、聚类分析的方法,将地上干质量指标、根长指标、株高指标、地下干质量指标作为鉴定寒地水稻苗期的抗旱性能指标^[23]。来长凯等通过研究发现,不管是单株分蘖数指标、株高指标、籽粒密度指标,还是单株有效穗数指标、单穗粒数指标,都和抗旱性呈现出显著的关系。这些指标可以用来评价宁夏水稻的抗旱性能^[24]。BP 神经网络是采用误差反向传播的算法进行训练的多层前馈网络^[25],是使用最广泛的神经网络模型之一。BP 神经网络在客观环境下,定量地追寻变量之间所存在的一种比较复杂

的非线性关系,准确性较高^[26]。张彪等根据苹果脆片核心指标与苹果果实品质指标之间的相关性分析结果,选出了 12 个指标作为评价果实干燥适宜性的特征指标,建立了 BP 神经网络学习模型来进行定量预测苹果原料是否适合干燥^[27]。林海涛等利用训练样本对发动机故障网络进行训练,得到最合适的 BP 神经网络方案为 11-11-8 结构,通过 LM 算法得到 BP 神经网络来进行故障诊断,诊断正确率为 94%^[28]。本研究通过逐步回归及相关分析,筛选得到分蘖期干物质质量、分蘖期叶面积、拔节期株高、最高分蘖数、穗粒数、结实率、千粒质量、产量、每穴生物产量、经济系数 10 项与 D 值显著或极显著相关的指标,可用于水稻抗旱筛选。

4 结论

通过主成分分析、隶属度函数分析、聚类分析,利用 D 值对 50 份材料的抗旱性进行综合评价,获得强抗旱性材料有稻坚强、农丰 3055、农丰 1 号、龙稻 9、DPB120。通过逐步回归分析和相关分析,并构建 BP 神经网络预测抗旱力指标的准确性,从 15 个指标中筛选出分蘖期干物质质量、分蘖期叶面积、拔节期株高、最高分蘖数、穗粒数、结实率、千粒质量、产量、生物量、经济系数 10 项作为寒地水稻抗旱性筛选的鉴定指标,为高产、优质、抗旱水稻品种的选育提供材料,并筛选出抗旱的水稻品种以实现水稻旱作,研究结果具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 姚林,郑华斌,刘建霞,等. 中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J]. 生态学杂志,2014,33(5):1381-1387.
- [2] 袁杰,王奉斌,贾春平,等. 新疆主栽梗稻品种芽期抗旱性鉴定[J]. 分子植物育种,2019,17(16):5398-5405.
- [3] 杨瑰丽,杨美娜,李帅良,等. 水稻萌芽期抗旱指标筛选与抗旱性综合评价[J]. 华南农业大学学报,2015,36(2):1-5.
- [4] 程建峰,潘晓云,刘宜柏,等. 水稻抗旱性鉴定的形态指标[J]. 生态学报,2005,25(11):3117-3125.
- [5] 王麒,冯延江,张小明,等. 黑龙江省抗旱水稻品种(系)的筛选[J]. 黑龙江农业科学,2009(4):26-29,32.
- [6] 张鸿,朱从桦,谭杰,等. 杂交粳稻新组合抗旱性鉴定评价及预测研究[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(2):161-169.
- [7] 丁国华,马殿荣,马巍,等. 杂草稻幼苗期耐旱性的初步筛选与评价[J]. 北方水稻,2010,40(1):11-14,53.
- [8] 刘三雄,黎用朝,吴俊,等. 应用隶属函数法综合评价水稻主栽品种抗旱性的研究[J]. 杂交水稻,2015,30(1):74-78.
- [9] 汪灿,周棱波,张国兵,等. 薏苡种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 作物学报,2017,43(9):1381-1394.
- [10] 王兰芬,武晶,景蕊莲,等. 绿豆种质资源成株期抗旱性鉴定[J]. 作物学报,2015,41(8):1287-1294.
- [11] 汪灿,周棱波,张国兵,等. 酒用糯高粱资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 中国农业科学,2017,50(8):1388-1402.
- [12] 刘敏洁,许阳,王建华,等. 基于人工神经网络和二元逻辑回归的甜玉米种子生活力检测模型研究[J]. 中国农业大学学报,2018,23(7):1-10.
- [13] 孙小香,王芳东,赵小敏,等. 基于冠层光谱和 BP 神经网络的水稻叶片氮素浓度估算模型[J]. 中国农业资源与区划,2019,40(3):35-44.
- [14] 徐靖,唐清杰,朱红林,等. 水稻(*Oryza sativa* L.)干旱胁迫响应转录因子研究进展[J]. 基因组学与应用生物学,2015,34(11):2525-2531.
- [15] 杨瑰丽,杨美娜,陈志强,等. 水稻抗旱机理和抗旱育种研究进展[J]. 中国农学通报,2012,28(21):1-6.
- [16] 聂继云,毋永龙,李海飞,等. 苹果品种用于加工鲜榨汁的适宜性评价[J]. 农业工程学报,2013,29(17):271-278.
- [17] 张小燕,赵凤敏,兴丽,等. 不同马铃薯品种用于加工油炸薯片的适宜性[J]. 农业工程学报,2013,29(8):276-283.
- [18] 荆瑞勇,王丽艳,郑桂萍,等. 水稻萌发期和幼苗期耐盐性鉴定指标筛选及综合评价[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2019,31(6):1-6,19.
- [19] 童继平,吴跃进,郑乐娅,等. 水稻超高产育种若干问题的评述与讨论[J]. 种子,2003,22(2):60-64.
- [20] 郑秋玲. 不同生育阶段干旱胁迫下的水稻产量效应[J]. 河北农业科学,2004,8(3):83-85.
- [21] 王成媛,王伯伦,张文香,等. 不同生育时期干旱胁迫对水稻产量与碾米品质的影响[J]. 中国水稻科学,2007,21(6):643-649.
- [22] 高世伟,聂守军,刘宇强,等. 寒地水稻抗旱品种的筛选与鉴定[J]. 中国稻米,2018,24(3):114-117.
- [23] 牛同旭,郑桂萍,李志彬,等. 寒地水稻种质资源苗期抗旱性筛选与评价[J]. 安徽农学通报,2020,26(13):21-24.
- [24] 来长凯,张文银,贺奇,等. 宁夏水稻抗旱性鉴定指标的筛选研究[J]. 种子,2015,34(8):27-32.
- [25] Xia M, Fang J A, Tang Y, et al. Dynamic depression control of chaotic neural networks for associative memory [J]. Neurocomputing,2010,73(4/5/6):776-783.
- [26] 赵子皓,江晓东,杨沈斌. 孕穗至成熟期水稻冠层温度和土温水温的模拟[J]. 江苏农业科学,2022,50(13):187-199.
- [27] 张彪,刘璇,毕金峰,等. 基于 BP 人工神经网络算法的苹果制干适宜性评价[J]. 中国农业科学,2019,52(1):129-142.
- [28] 林海涛,朱宝全,马小涵. 基于 BP 神经网络的发动机故障诊断算法研究[J]. 科学技术创新,2020(16):73-74.