

不同种源酸枣表型多样性分析

曲凯伦¹, 张云程², 王海青², 李彪¹, 康莹¹, 董胜君^{1,①}

(1. 沈阳农业大学林学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 喀左县林业和草原局, 辽宁 朝阳 122300)

摘要: 以酸枣 [*Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow.] 19 个种源地的 211 份样本为研究对象, 对其表型性状 (包括 13 个质量性状和 29 个数量性状) 进行观测和变异分析, 并采用巢式方差分析、相关性分析、主成分分析研究数量性状的变异来源、与地理气候因子的关系及能够反映酸枣表型特征的主要数量性状。结果表明: 酸枣质量性状的变异系数和 Shannon-Weaver 多样性指数分别为 11.44%~55.21% 和 0.34~1.65; 数量性状的变异系数和 Shannon-Weaver 多样性指数分别为 4.57%~85.46% 和 0.24~2.09, 极值比为 1.67~14.06。陕西佳县、内蒙古元宝山和河北复兴种源的数量性状变异程度较高, 辽宁喀左、陕西延川和河北赞皇种源的数量性状多样性丰富。酸枣数量性状种源间和种源内的方差分量比例均值分别为 69.86% 和 14.88%, 表型分化系数均值为 0.82。叶长、叶形指数、可食率等 12 个数量性状与地理气候因子存在显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 相关性。主成分分析结果表明: 前 9 个主成分的累计贡献率为 79.74%, 叶形指数、叶柄长度、叶柄宽度等 17 个数量性状可作为评价酸枣种质资源的表型性状。基于数量性状可将 19 个种源分为 4 个类群, 类群 I 主要特征为叶片小、果实和果核小、出核率高; 类群 II 主要特征为果实和果核大、可食率高; 类群 III 主要特征为叶片长、枣吊长、枣吊叶片数多; 类群 IV 主要特征为二次枝长、直刺和弯刺短。综合上述研究结果, 酸枣表型多样性丰富, 种源间和种源内存在不同程度的变异, 种源间变异是主要变异来源, 不同种源酸枣可用于选育不同表型性状酸枣品种。

关键词: 酸枣; 表型性状; 表型多样性; 地理气候因子

中图分类号: Q944.5; S665.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)02-0058-13

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.02.07

Analysis on phenotypic diversity of *Ziziphus jujuba* from different provenances QU Kailun¹, ZHANG Yuncheng², WANG Haiqing², LI Biao¹, KANG Ying¹, DONG Shengjun^{1,①} (1. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Forestry and Grassland Bureau of Kazuo County, Chaoyang 122300, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(2): 58–70

Abstract: Taking 211 samples from 19 provenances of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow. as research objects, the observation and variation analysis on their phenotypic traits (containing 13 qualitative traits and 29 quantitative traits) were conducted, and the sources of variations of quantitative traits, their relationships with geographical-climatic factors, and the main quantitative traits that can reflect the phenotypic characteristics of *Z. jujuba* var. *spinosa* were studied by using nested analysis, correlation analysis, and principal component analysis. The results show that the coefficients of variation and Shannon-Weaver diversity indexes of qualitative traits of *Z. jujuba* var. *spinosa* are 11.44%–55.21% and 0.34–1.65, respectively; those of quantitative traits are 4.57%–85.46% and 0.24–2.09, respectively, and the extremum ratios are 1.67–14.06. The variation degrees of quantitative traits of provenances from Jiaxian of Shaanxi, Yuanbaoshan of Inner Mongolia, and Fuxing of Hebei are relatively high, while the diversities of quantitative traits of provenances from Kazuo of Liaoning, Yanchuan of Shaanxi, and Zanzhuang of Hebei are abundant. The means of percentage of variance component of

收稿日期: 2023-07-06

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2019YFD1001200)

作者简介: 曲凯伦 (1997—), 男, 山东青岛人, 硕士, 研究方向为经济林种质资源培育。

①通信作者 E-mail: dsj928@163.com

引用格式: 曲凯伦, 张云程, 王海青, 等. 不同种源酸枣表型多样性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(2): 58–70.

quantitative traits of *Z. jujuba* var. *spinosa* among provenances and within provenance are 69.86% and 14.88%, respectively, and the mean of phenotypic differentiation coefficient is 0.82. Twelve quantitative traits including leaf length, leaf shape index, edible rate, etc. show significant ($P < 0.05$) or extremely significant ($P < 0.01$) correlations with geographical-climatic factors. The principal component analysis result shows that the cumulative contribution rate of the first nine principal components is 79.74%, and 17 quantitative traits including leaf shape index, petiole length, petiole width, etc. can be used as the phenotypic traits for evaluating *Z. jujuba* var. *spinosa* germplasm resources. Nineteen provenances can be divided into four groups based on quantitative traits, and the main characteristics of group I are small leaves, small fruits and nutlets, and high nutlet rate; those of group II are large fruits and nutlets, and high edible rate; those of group III are long leaves, long bearing shoots, and a large number of bearing shoot leaves; those of group IV are long secondary branches, and short straight and bend thorns. Taken together, the phenotypic diversity of *Z. jujuba* var. *spinosa* is rich, there are different degrees of variations among provenances and within provenance, the variations among provenances are the main source of variations, and *Z. jujuba* var. *spinosa* from different provenances can be used for breeding *Z. jujuba* var. *spinosa* cultivars with different phenotypic traits.

Key words: *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow.; phenotypic trait; phenotypic diversity; geographical-climatic factor

酸枣 [*Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow.] 又称山枣, 为鼠李科 (Rhamnaceae) 枣属 (*Ziziphus* Mill.) 植物, 原产于中国, 主要分布于亚洲和美洲热带及亚热带地区, 在中国北方温带地区诸省均有分布。大量研究表明: 酸枣全身都是宝, 具有很高的经济价值和药用价值, 如叶具有促进胆酸合成、消炎等多种保健功能^[1], 果仁具有安神、抗焦虑、改善记忆、抗抑郁的作用^[2], 果肉含有大量的多糖、氨基酸、黄酮、维生素等营养元素, 可生食, 也可制成饮料^[3-4]。此外, 酸枣抗逆性强, 具有防风固沙、保持水土的作用。因此, 酸枣产业具有很好的发展前景。

表型多样性是植物进化的基础, 形态特征评估是确定植物遗传多样性和分类的第一步^[5]。通过研究植物表型性状能够挖掘植物资源, 有效利用现有种质资源^[6], 且植物表型性状能够简便、直接地反映植物的遗传特征^[7]。范英明等^[8]在华北落叶松 [*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (Mayr) Pilger] 研究中发现其球果表型存在广泛的遗传变异。张学超等^[9]通过对苹果 (*Malus pumila* Mill.) 表型性状进行评价鉴定筛选出特异种质, 发现多数性状具有丰富的遗传多样性。国内外学者对枣属的酸枣^{[10]1-97, [11]}、大枣 (*Ziziphus jujuba* Mill.)^[12]、滇刺枣 (*Ziziphus mauritiana* Lam.)^[13]等植物叶片和果实表型多样性展开了研究; Khadivi 等^[14]通过表型性状评估大枣野生种质的表型变异, 并通过聚类将供试材料分为 2 大类; 王博等^[15]比较了宁夏野生酸枣种群表型性状, 发现其叶片和果实相关性状间存在差异。

表型性状是植物基因型和环境适应性共同作用的结果^[16], 研究植物表型变异程度和地理变化规律能够揭示物种适应和进化的方式, 表型性状受不同生态因子的影响表现出不同的地理变异趋势^[17]。植物表型性状的地理变异规律与经度、纬度、海拔、气温、降水量等诸多因子有关^[18-20]。Liu 等^[21]发现温度是影响云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.) 胸径大小的主要因子, 朱弘等^[22]发现尾叶樱桃 [*Prunus dielsiana* (Schneid.) Yü et Li] 叶片表型性状的种群间表型分化在地理空间上呈以经度为主的变异模式。酸枣多处于野生状态, 尚未得到充分的开发和利用, 同时野生酸枣资源还面临人为砍伐造成的种群衰退风险, 加之遗传多样性信息缺乏, 这在一定程度上限制了酸枣产业的发展, 因此, 研究酸枣的表型性状多样性及变异情况对于酸枣种质的挖掘、保护和利用具有重要意义。鉴于此, 本研究以辽宁、山西、陕西、河北、山东、内蒙古地区 19 个种源地的 211 份酸枣样本为研究对象, 分析其表型性状特征, 探究表型性状变异来源和地理变异规律, 以期对酸枣种质资源的科学保存、高效利用、优良品种选育提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

于 2020 年 9 月和 2021 年 9 月酸枣果熟期调查辽宁、山西、陕西、河北、山东、内蒙古地区 19 个种源地的 211 份野生酸枣样本。通过走访调查确定调查

种源地,每个种源地选取生长正常、无明显病虫害的酸枣植株作为调查母树,种源地内调查母树间距在50 m以上,每株母树为1个样本,调查表型性状。各种源地的经度、纬度和海拔用手持GPS仪测定,年均

降水量、年均温、1月份均温、7月份均温数据来源于WorldClim世界气候数据库(<http://www.WorldClim.org/>),使用ArcGIS 10.6软件提取各种源地的详细气候数据。供试酸枣19个种源地的基本信息见表1。

表1 酸枣19个种源地的基本信息

Table 1 Basic information of 19 provenances of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow.

种源地 ¹⁾ Provenance ¹⁾	样本数 Sample number	经度 Longitude	纬度 Latitude	平均海拔/m Mean altitude	年均降水量/mm Mean annual precipitation	年均温/℃ Mean annual temperature	1月份均温/℃ Mean temperature in January	7月份均温/℃ Mean temperature in July
P1	40	E119°50'21"	N41°24'07"	407.3	499.1	8.7	-9.6	24.1
P2	3	E119°16'17"	N42°09'57"	512.3	387.8	7.8	-10.7	24.2
P3	6	E111°12'57"	N35°05'23"	538.8	590.1	12.8	-0.3	27.0
P4	11	E111°17'08"	N34°49'15"	328.7	605.8	13.8	0.5	27.7
P5	13	E110°29'43"	N38°04'21"	777.5	507.2	10.7	-6.7	25.3
P6	9	E110°27'57"	N37°44'04"	1 041.0	528.5	10.4	-6.9	24.2
P7	19	E110°19'42"	N36°52'31"	631.3	530.1	10.6	-4.4	25.1
P8	5	E110°27'41"	N36°04'45"	466.2	549.3	9.9	-2.5	26.2
P9	12	E114°18'44"	N36°34'48"	177.4	613.1	13.5	-1.5	27.6
P10	4	E114°09'41"	N36°47'16"	355.1	635.3	14.5	-1.9	27.1
P11	14	E114°18'23"	N37°02'38"	198.9	601.2	14.6	-1.6	27.3
P12	4	E114°22'48"	N37°14'41"	168.0	583.4	14.5	-1.6	27.6
P13	3	E114°32'41"	N37°24'21"	101.3	560.4	13.5	-1.6	27.8
P14	16	E114°26'26"	N37°38'15"	110.1	548.6	13.3	-1.7	27.5
P15	9	E114°23'21"	N37°48'55"	137.2	538.8	12.6	-1.9	27.3
P16	4	E114°14'45"	N38°49'51"	258.3	447.7	12.7	-3.4	26.7
P17	12	E115°03'06"	N38°52'42"	117.7	489.1	12.7	-2.8	27.2
P18	12	E116°52'46"	N36°29'50"	117.6	535.3	13.8	-2.9	27.5
P19	15	E119°11'08"	N41°58'43"	599.8	404.3	6.5	-10.5	24.0

¹⁾ P1: 辽宁喀左 Kazuo of Liaoning; P2: 辽宁建平 Jianping of Liaoning; P3: 山西夏县 Xiaxian of Shanxi; P4: 山西平陆 Pinglu of Shanxi; P5: 陕西佳县 Jiaxian of Shaanxi; P6: 陕西绥德 Suide of Shaanxi; P7: 陕西延川 Yanchuan of Shaanxi; P8: 陕西宜川 Yichuan of Shaanxi; P9: 河北复兴 Fuxing of Hebei; P10: 河北武安 Wu'an of Hebei; P11: 河北信都 Xindu of Hebei; P12: 河北内丘 Neiqiu of Hebei; P13: 河北临城 Lincheng of Hebei; P14: 河北赞皇 Zanhuan of Hebei; P15: 河北元氏 Yuanshi of Hebei; P16: 河北阜平 Fuping of Hebei; P17: 河北顺平 Shunping of Hebei; P18: 山东长清 Changqing of Shandong; P19: 内蒙古元宝山 Yuanbaoshan of Inner Mongolia.

1.2 方法

参考《枣种质资源描述规范》(NY/T 2927—2016)和孙亚强^{[10]11-14}的方法对酸枣的13个质量性状进行特征描述和赋值,使用数显游标卡尺(精度0.01 mm)、电子天平(精度0.001 g)对酸枣的29个数量性状进行测定。

二次枝弯曲度分为小、中、大,针刺分为无、不发达、发达,叶片颜色分为浅绿、绿、深绿,叶片形状分为椭圆形、卵圆形、卵状披针形,叶基形状分为圆形、心形、截形、圆楔形、偏斜形,叶尖形状分为锐尖、急尖、钝尖、尖凹,叶缘形状分为锐锯齿、钝齿,叶片状态分为合抱、平展、反卷,果实形状分为圆形、扁圆形、卵圆形、长圆形、倒卵圆形、圆柱形、葫芦形,果顶形状分为凹、平、尖,果核形状分为圆形、椭圆形、卵圆形、圆锥形、纺锤形、倒纺形,果核纹路分为不明显、浅短纹、深

短纹、深长纹、浅长纹,果仁饱满度分为无、瘪、不饱满、饱满。

选择树冠外围中下部9个健壮二次枝,测量长度并统计节数,测量二次枝1~5节上的直刺、弯刺长度。选择树冠外围东、南、西、北4个方位的2年生枣股上生长健壮的枣吊,每个方位选择3~4个枣吊,测量枣吊长度(枣吊基部至顶端生长点的长度)并统计枣吊叶片数。从选择的枣吊中选取中部成熟叶片,测量叶长(叶尖至叶基的长度)、叶宽(叶片最宽处的长度)、叶柄长度(叶基至叶柄基部的长度)、叶柄宽度(叶柄中部的宽度),计算叶形指数(叶长与叶宽的比值)。每个指标9次重复。

在果实脆熟期选择树冠外围东、南、西、北4个方位2年生枣股上发育正常的90个果实,称量单果质量(称量10个果实总质量取平均值)并测量果横径

(果实最宽处的长度)和果纵径(果顶至果肩的长度);将果实晾干后进行果核、果仁表型性状测定:称量单核质量(称量 10 个果核总质量取平均值)、单仁质量(称量 10 个果仁总质量取平均值)并测量果核横径(果核最宽处的长度)、果核纵径(果核两端的距离)、果仁横径(果仁最宽处的长度)、果仁纵径(果仁两端的长度)和果仁侧径(果仁横截面最大处的直径),计算果形指数、可食率、核形指数、出核率、仁形指数、出仁率、含仁率、双仁率,计算公式分别为果形指数=果纵径/果横径,可食率=[(单果质量-单核质量)/单果质量]×100%,核形指数=核纵径/核横径,出核率=(单核质量/单果质量)×100%,仁形指数=仁纵径/仁横径,出仁率=(单仁质量/单核质量)×100%,含仁率=(含仁个体数/总个体数)×100%,双仁率=(含双仁个体数/总个体数)×100%。每个指标 9 次重复。

1.3 数据处理与分析

使用 EXCEL 2010 软件计算表型性状的平均值、标准差、变异系数、频率分布、表型分化系数^[22]、Shannon-Weaver 多样性指数^[23],使用 SPSS 20.0 软件对表型性状进行巢式方差分析、主成分分析、聚类分析,对表型性状与地理气候因子进行 Pearson 相关性分析;聚类方法选择 Ward 法,遗传距离选用平方欧氏距离。

2 结果和分析

2.1 酸枣种质资源表型性状变异及多样性分析

2.1.1 质量性状分析 研究表明:不同种源酸枣的二次枝弯曲度小、中、大分别占 21.3%、27.0%、51.7%,针刺无、不发达、发达分别占 0.5%、9.5%、90.0%,叶片浅绿、绿、深绿分别占 12.8%、84.4%、2.8%,叶片椭圆形、卵圆形、卵状披针形分别占 12.8%、82.9%、4.3%,叶基圆形、心形、截形、圆楔形、偏斜形分别占33.2%、7.1%、3.3%、3.3%、53.1%,叶尖锐尖、急尖、钝尖、尖凹分别占 0.9%、0.5%、37.0%、61.6%,叶缘锐锯齿、钝齿分别占 5.2%、94.8%,叶片合抱、平展、反卷分别占 14.2%、76.3%、9.5%,果实圆形、扁圆形、卵圆形、长圆形、倒卵圆形、圆柱形、葫芦形分别占23.7%、13.7%、31.3%、19.0%、5.7%、6.2%、0.5%,果顶凹、平、尖分别占 74.9%、19.0%、6.2%,果核圆形、椭圆形、卵圆形、圆锥形、纺锤形、倒纺形分别

占 9.5%、44.6%、8.5%、2.8%、34.1%、0.5%,果核纹路不明显、浅短纹、深短纹、深长纹、浅长纹分别占 26.1%、55.0%、14.2%、3.8%、0.9%,果仁无、瘪、不饱满、饱满分别占 0.0%、4.3%、34.6%、61.1%。

质量性状的变异系数和 Shannon-Weaver 多样性指数分析结果(表 2)显示:酸枣 13 个质量性状的变异系数在 11.44%~55.21%之间,均值为31.17%,其中叶基形状、果实形状、果核形状、果顶形状、果核纹路的变异系数均大于 40%,变异程度较高;叶缘形状、叶尖形状和针刺的变异系数较小。13 个质量性状的 Shannon-Weaver 多样性指数在 0.34~1.65 之间,均值为 0.83,其中果实形状、果核形状、果核纹路、叶基形状的 Shannon-Weaver 多样性指数较大,具有丰富的遗传多样性;叶缘形状、针刺的 Shannon-Weaver 多样性指数较小。

表 2 不同种源酸枣质量性状分析
Table 2 Analysis on qualitative traits of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow. from different provenances

质量性状 Qualitative trait	变异系数/% Coefficient of variation	Shannon-Weaver 多样性指数 Shannon-Weaver diversity index
二次枝弯曲度 Secondary branch bending degree	34.76	1.02
针刺 Thorn	15.87	0.34
叶片颜色 Leaf color	20.19	0.51
叶片形状 Leaf shape	21.15	0.55
叶基形状 Leaf base shape	55.21	1.12
叶尖形状 Leaf tip shape	15.48	0.74
叶缘形状 Leaf margin shape	11.44	0.20
叶片状态 Leaf state	24.86	0.71
果实形状 Fruit shape	50.42	1.65
果顶形状 Fruit top shape	44.39	0.70
果核形状 Nutlet shape	48.69	1.29
果核纹路 Nutlet striation	40.37	1.12
果仁饱满度 Kernel plumpness	22.43	0.80

2.1.2 数量性状分析 结果(表 3)显示:29 个数量性状的变异系数在 4.57%~85.46%之间,均值为 25.01%,其中双仁率的变异系数最大,单果质量、出核率、直刺长度、叶长、叶柄长度、弯刺长度的变异程度较高,变异系数均大于 30%;出仁率的变异系数最小,仁横径、核横径和仁形指数的变异程度较低,变异系数均小于 10%;枝、刺、叶数量性状的变异系数均值为27.11%,果实、果核、果仁数量性状的变异系数均值为23.73%。29 个数量性状的 Shannon-Weaver

多样性指数在 0.24~2.09 之间,均值为 1.94,其中仁纵径的 Shannon-Weaver 多样性指数最大,且除出仁率外,其余 28 个数量性状的 Shannon-Weaver 多样性指数集中在 1.84~2.09 之间。29 个数量性状的极值比在 1.67~14.06 之间,其中,单果质量的极值比最大,直刺长度、出核率、出仁率的极值比较大(均大于

8);出仁率和仁纵径的极值比最小。

2.2 不同种源酸枣数量性状的变异系数分析

结果(表 4)显示:不同种源酸枣各数量性状的变异系数在 0.00%~151.44% 之间,其中,河北武安(P10)种源双仁率的变异系数最大,而多个种源含仁率的变异系数为 0.00%。各数量性状的平均变异系

表 3 不同种源酸枣数量性状分析¹⁾

Table 3 Analysis on quantitative traits of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow. from different provenances¹⁾

IN ²⁾	l_l /mm	b_l /mm	I_l	l_p /mm	b_p /mm	l_{sb} /cm	n_{sbn}	l_{bs} /cm	n_{bs}	l_{st} /mm	l_{bt} /mm	m_{st} /g	d_{fv} /mm	d_{fh} /mm	I_f
Min	10.15	6.55	1.03	1.07	0.43	9.68	4.0	5.22	6.1	4.38	1.34	0.33	8.85	7.28	0.82
Max	53.42	26.73	3.55	6.19	1.06	34.60	16.7	26.60	22.3	38.85	7.87	4.64	23.66	20.23	1.71
M	26.77	13.73	1.98	2.37	0.70	17.77	8.4	12.62	12.7	17.01	3.67	1.43	14.28	13.02	1.11
<i>SD</i>	8.94	4.07	0.42	0.79	0.11	3.99	1.8	3.45	3.4	5.77	1.20	0.82	3.03	2.75	0.14
ER	5.26	4.08	3.45	5.79	2.47	3.57	4.17	5.10	3.64	8.87	5.87	14.06	2.67	2.78	2.09
<i>CV</i> / <i>%</i>	33.40	29.64	21.05	33.34	16.00	22.48	21.14	27.36	27.10	33.94	32.77	57.59	21.22	21.10	12.65
<i>H'</i>	2.02	1.98	2.00	1.96	2.04	2.00	2.02	2.00	1.96	2.06	2.00	1.84	1.99	2.04	2.00

IN ²⁾	R_n / <i>%</i>	m_{sn} /g	d_{nv} /mm	d_{nh} /mm	I_n	R_k / <i>%</i>	m_{sk} /g	d_{kv} /mm	d_{kh} /mm	I_k	d_{ks} /mm	C_k / <i>%</i>	R_{dk} / <i>%</i>	R_e / <i>%</i>
Min	6.24	0.09	6.91	5.52	0.76	3.75	0.01	4.91	3.67	0.93	1.38	60.0	0.0	44.63
Max	55.37	0.45	16.58	9.75	2.53	31.03	0.07	8.19	6.36	1.65	3.47	100.0	90.0	93.76
M	20.08	0.23	10.20	6.97	1.48	16.39	0.04	6.50	5.08	1.28	2.50	99.1	24.4	79.92
<i>SD</i>	8.89	0.06	1.79	0.67	0.27	4.10	0.01	0.67	0.44	0.13	0.35	4.5	20.9	8.89
ER	8.87	5.00	2.40	1.77	3.33	8.27	7.00	1.67	1.73	1.77	2.51	1.67	—	2.10
<i>CV</i> / <i>%</i>	44.29	25.93	17.58	9.68	18.62	25.00	29.44	10.36	8.69	9.91	13.91	4.57	85.46	11.13
<i>H'</i>	1.91	2.05	2.00	2.05	1.96	2.05	2.05	2.09	2.04	2.08	1.99	0.24	1.92	1.95

¹⁾ l_l : 叶长 Leaf length; b_l : 叶宽 Leaf width; I_l : 叶形指数 Leaf shape index; l_p : 叶柄长度 Petiole length; b_p : 叶柄宽度 Petiole width; l_{sb} : 二次枝长度 Secondary branch length; n_{sbn} : 二次枝节数 Secondary branch node number; l_{bs} : 枣吊长度 Bearing shoot length; n_{bs} : 枣吊叶片数 Leaf number of bearing shoot; l_{st} : 直刺长度 Straight thorn length; l_{bt} : 弯刺长度 Bend thorn length; m_{sf} : 单果质量 Single fruit mass; d_{fv} : 果实纵径 Fruit vertical diameter; d_{fh} : 果实横径 Fruit horizontal diameter; I_f : 果形指数 Fruit shape index; R_n : 出核率 Nutlet rate; m_{sn} : 单核质量 Single nutlet mass; d_{nv} : 果核纵径 Nutlet vertical diameter; d_{nh} : 果核横径 Nutlet horizontal diameter; I_n : 核形指数 Nutlet shape index; R_k : 出仁率 Kernel rate; m_{sk} : 单仁质量 Single kernel mass; d_{kv} : 果仁纵径 Kernel vertical diameter; d_{kh} : 果仁横径 Kernel horizontal diameter; I_k : 仁形指数 Kernel shape index; d_{ks} : 果仁侧径 Kernel side diameter; C_k : 含仁率 Kernel content; R_{dk} : 双仁率 Dual kernel rate; R_e : 可食率 Edible rate. —: 无数据 No datum.

²⁾ IN: 指标 Index. Min: 极小值 Minimum; Max: 极大值 Maximum; M: 均值 Mean; SD: 标准差 Standard deviation; ER: 极值比 Extremum ratio; CV: 变异系数 Coefficient of variation; H': Shannon-Weaver 多样性指数 Shannon-Weaver diversity index.

表 4 不同种源酸枣数量性状的变异系数分析

Table 4 Analysis on coefficients of variation of quantitative traits of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow. from different provenances

种源 ¹⁾	各数量性状的变异系数/% ²⁾ Coefficient of variation of each quantitative trait ²⁾														
Provenance ¹⁾	l_l	b_l	I_l	l_p	b_p	l_{sb}	n_{sbn}	l_{bs}	n_{bs}	l_{st}	l_{bt}	m_{sf}	d_{fv}	d_{fh}	I_f
P1	16.91	19.78	10.52	26.83	11.28	19.00	16.01	25.14	18.57	24.62	19.78	36.09	14.30	14.17	11.75
P2	11.06	19.53	8.78	23.50	4.45	12.49	23.59	31.15	19.84	13.75	17.24	49.16	16.23	16.75	2.91
P3	15.98	9.53	14.39	21.66	13.24	24.49	15.37	20.26	10.68	17.01	26.90	37.12	9.60	8.69	5.75
P4	25.70	23.98	7.57	26.34	7.84	15.89	13.80	16.41	19.09	27.77	19.38	70.60	17.92	22.85	7.76
P5	23.66	27.14	11.89	16.83	9.63	21.34	24.65	14.89	22.87	24.93	17.71	50.40	23.56	19.66	6.33
P6	21.48	20.36	12.59	26.26	11.07	14.97	10.62	18.67	14.41	24.69	31.49	40.59	16.10	13.22	4.42
P7	20.43	16.90	10.66	32.40	17.77	16.14	9.88	15.04	13.61	14.04	17.08	47.35	13.21	13.52	9.88
P8	15.30	18.25	5.90	40.37	5.58	17.27	11.51	22.34	30.06	7.40	11.56	36.26	15.36	15.59	10.73
P9	28.42	22.51	9.98	26.26	23.83	20.11	23.47	25.17	26.28	34.64	34.87	49.09	24.20	18.30	12.32
P10	10.90	24.54	17.64	24.76	13.71	15.37	16.61	24.55	9.49	35.50	32.40	33.97	12.76	17.70	9.26
P11	20.93	21.97	16.62	24.61	8.08	19.80	15.73	21.20	22.96	25.77	21.28	37.21	13.64	13.79	14.29
P12	18.92	22.52	8.49	12.37	14.46	15.63	19.33	34.32	41.06	18.89	25.69	30.44	11.17	11.65	9.01

续表4 Table 4 (Continued)

种源 ¹⁾ Provenance ¹⁾	各数量性状的变异系数/% ²⁾ Coefficient of variation of each quantitative trait ²⁾															
	l_1	b_1	I_1	l_p	b_p	l_{sb}	n_{shn}	l_{bs}	n_{hs}	l_{st}	l_{bt}	m_{sf}	d_{fv}	d_{fh}	I_f	
P13	29.01	38.16	16.48	9.31	11.93	8.91	9.61	3.15	21.83	45.99	54.87	23.88	3.67	12.39	9.91	
P14	22.84	20.04	15.05	25.63	20.83	17.50	14.24	23.28	27.44	47.64	26.44	21.12	9.93	9.04	14.60	
P15	19.81	14.97	21.76	15.22	10.70	18.36	12.10	20.37	25.91	13.42	20.40	38.44	13.36	16.26	7.06	
P16	23.68	31.58	8.17	32.10	8.22	4.91	13.32	12.61	18.84	12.90	26.44	33.95	13.82	14.26	7.22	
P17	20.27	21.67	20.88	22.44	5.49	28.10	24.68	25.19	26.32	21.14	27.17	40.79	21.91	13.81	8.93	
P18	18.26	22.47	15.63	10.53	9.14	12.74	14.27	34.86	19.05	31.74	18.68	33.70	18.82	19.67	12.89	
P19	23.06	21.89	12.15	55.94	9.92	14.85	10.78	20.57	16.13	41.39	46.02	43.42	23.75	14.65	17.14	
均值 Mean	20.35	21.99	12.90	24.91	11.43	16.73	15.77	21.54	21.29	25.43	26.07	39.66	15.44	15.05	9.59	
种源 ¹⁾ Provenance ¹⁾	各数量性状的变异系数/% ²⁾ Coefficient of variation of each quantitative trait ²⁾															
	R_n	m_{sn}	d_{nv}	d_{nh}	I_n	R_k	m_{sk}	d_{kv}	d_{kh}	I_k	d_{ks}	C_k	R_{dk}	R_e	M	
P1	29.79	18.59	10.32	8.49	13.23	23.48	29.11	8.19	7.40	11.00	12.72	1.58	64.41	4.99	18.21	
P2	43.34	6.90	11.78	6.86	19.27	17.01	17.75	5.57	7.01	12.95	14.70	0.00	108.24	6.94	18.92	
P3	17.65	20.74	9.95	14.30	9.84	22.29	29.51	9.71	15.62	10.59	5.51	8.75	117.38	8.79	19.01	
P4	46.08	17.88	9.33	7.74	8.29	25.30	37.27	8.21	8.68	4.11	11.13	0.00	63.52	12.71	20.11	
P5	67.41	22.88	16.67	5.56	13.87	20.29	19.12	10.68	5.85	7.46	6.49	0.00	131.64	13.28	22.64	
P6	20.97	23.21	11.34	6.55	11.74	19.04	28.80	9.48	7.78	6.16	9.83	3.37	79.53	10.07	18.24	
P7	35.00	23.59	13.08	9.87	14.41	28.36	25.59	9.03	11.12	10.26	11.67	0.00	108.34	14.39	20.09	
P8	35.97	27.57	16.59	11.12	13.03	18.10	13.69	9.75	9.89	4.21	11.44	0.00	81.65	20.72	18.52	
P9	37.05	16.68	21.36	4.78	23.28	19.53	21.20	11.96	6.13	12.30	11.97	0.00	69.28	7.02	22.14	
P10	6.65	28.51	3.19	8.73	10.03	43.38	42.75	8.88	4.30	7.77	8.97	5.13	151.44	1.21	21.73	
P11	25.16	21.46	15.71	13.45	21.30	21.23	27.59	7.94	8.13	8.53	16.32	13.54	47.47	6.04	19.03	
P12	23.08	6.97	20.03	4.60	20.21	28.85	27.95	15.32	8.27	6.79	14.81	0.00	40.83	6.57	17.87	
P13	22.43	31.95	5.71	16.08	12.24	45.84	10.17	10.25	19.54	11.49	3.83	0.00	57.27	6.98	19.07	
P14	22.52	20.15	12.86	6.68	15.32	25.11	29.28	6.20	7.49	6.08	16.96	0.00	97.98	5.05	20.25	
P15	23.40	35.94	8.41	9.20	6.98	22.64	41.12	6.64	6.89	7.52	13.61	3.37	85.60	5.31	18.79	
P16	17.87	43.51	13.05	15.14	5.99	32.29	50.05	13.73	14.26	7.66	20.71	0.00	75.90	5.67	19.93	
P17	40.70	24.50	16.71	8.99	18.06	19.08	20.53	9.82	8.91	9.54	10.72	2.91	70.80	6.40	20.57	
P18	22.84	20.38	13.24	7.20	12.88	31.11	29.18	7.10	6.29	7.45	17.74	8.88	62.27	5.21	18.77	
P19	28.20	25.20	23.85	7.81	25.72	24.76	28.48	9.67	7.99	10.25	18.18	0.00	56.41	7.53	22.27	
均值 Mean	29.80	22.98	13.33	9.11	14.51	25.67	27.85	9.37	9.03	8.53	12.49	2.50	82.63	8.15	19.80	

¹⁾ P1: 辽宁喀左 Kazuo of Liaoning; P2: 辽宁建平 Jianping of Liaoning; P3: 山西夏县 Xiaxian of Shanxi; P4: 山西平陆 Pinglu of Shanxi; P5: 陕西佳县 Jiaxian of Shaanxi; P6: 陕西绥德 Suide of Shaanxi; P7: 陕西延川 Yanchuan of Shaanxi; P8: 陕西宜川 Yichuan of Shaanxi; P9: 河北复兴 Fuxing of Hebei; P10: 河北武安 Wu'an of Hebei; P11: 河北信都 Xindou of Hebei; P12: 河北内丘 Neiqiu of Hebei; P13: 河北临城 Lincheng of Hebei; P14: 河北赞皇 Zanhuan of Hebei; P15: 河北元氏 Yuanshi of Hebei; P16: 河北阜平 Fuping of Hebei; P17: 河北顺平 Shunping of Hebei; P18: 山东长清 Changqing of Shandong; P19: 内蒙古元宝山 Yuanbaoshan of Inner Mongolia.

²⁾ l_1 : 叶长 Leaf length; b_1 : 叶宽 Leaf width; I_1 : 叶形指数 Leaf shape index; l_p : 叶柄长度 Petiole length; b_p : 叶柄宽度 Petiole width; l_{sb} : 二次枝长度 Secondary branch length; n_{shn} : 二次枝节数 Secondary branch node number; l_{bs} : 枣吊长度 Bearing shoot length; n_{hs} : 枣吊叶片数 Leaf number of bearing shoot; l_{st} : 直刺长度 Straight thorn length; l_{bt} : 弯刺长度 Bend thorn length; m_{sf} : 单果质量 Single fruit mass; d_{fv} : 果实纵径 Fruit vertical diameter; d_{fh} : 果实横径 Fruit horizontal diameter; I_f : 果形指数 Fruit shape index; R_k : 出核率 Nutlet rate; m_{sn} : 单核质量 Single nutlet mass; d_{nv} : 果核纵径 Nutlet vertical diameter; d_{nh} : 果核横径 Nutlet horizontal diameter; I_n : 核形指数 Nutlet shape index; R_k : 出仁率 Kernel rate; m_{sk} : 单仁质量 Single kernel mass; d_{kv} : 果仁纵径 Kernel vertical diameter; d_{kh} : 果仁横径 Kernel horizontal diameter; I_k : 仁形指数 Kernel shape index; d_{ks} : 果仁侧径 Kernel side diameter; C_k : 含仁率 Kernel content; R_{dk} : 双仁率 Dual kernel rate; R_e : 可食率 Edible rate; M : 均值 Mean.

数在 2.50%~82.63%之间,其中,双仁率、单果质量、出核率、单仁质量、弯刺长度、出仁率、直刺长度的平均变异系数较大,均在 25%以上。各种源数量性状的平均变异系数在 17.87%~22.64%之间,其中,陕西佳县(P5)种源的平均变异系数最大,内蒙古元宝山(P19)和河北复兴(P9)种源的平均变异系数较大,分别为 22.27%和 22.14%。

2.3 不同种源酸枣数量性状的 Shannon-Weaver 多样性指数分析

结果(表 5)显示:不同种源酸枣各数量性状的 Shannon-Weaver 多样性指数在 0.00~2.07 之间,其中,辽宁喀左(P1)种源叶柄长度的 Shannon-Weaver 多样性指数最大,而多个种源含仁率的 Shannon-Weaver 多样性指数为 0.00。各数量性状的平均

Shannon-Weaver 多样性指数在 0.18~1.56 之间,含仁率的平均 Shannon-Weaver 多样性指数明显低于其他数量性状。各种源数量性状的平均 Shannon-Weaver 多样性指数在 0.93~1.86 之间,其中,P1 种源的平均 Shannon-Weaver 多样性指数最大,陕西延川(P7)和河北赞皇(P14)种源的平均 Shannon-Weaver 多样性指数较大,以上 3 个种源地可作为酸枣种质资源收集以及优良品种选育的重点关注区域。

2.4 不同种源酸枣数量性状的方差分量及表型分化系数分析

结果(表 6)显示:酸枣种源间的方差分量占 69.86%,种源内的方差分量占 14.88%,说明供试酸枣的种源间变异是主要变异来源。酸枣的表型分化系数在 0.59~0.94 之间,均大于 0.5,其中叶长的表型分化系数最高,叶形指数、可食率、出核率、弯刺长度、二次枝节数的表型分化系数较高。

表 5 不同种源酸枣数量性状的 Shannon-Weaver 多样性指数分析

Table 5 Analysis on Shannon-Weaver diversity index of quantitative traits of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow. from different provenances

种源 ¹⁾	各数量性状的 Shannon-Weaver 多样性指数 ²⁾							Shannon-Weaver diversity index of each quantitative trait ²⁾							
Provenance ¹⁾	l_i	b_i	I_i	l_p	b_p	l_{sb}	n_{sbn}	l_{bs}	n_{bs}	l_{st}	l_{bt}	m_{sf}	d_{fv}	d_{fh}	I_f
P1	1.96	1.93	1.91	2.07	1.91	1.98	1.98	1.70	1.88	1.95	1.63	1.92	1.95	2.03	1.72
P2	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	0.64	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
P3	1.24	1.24	1.33	1.33	1.33	1.01	1.01	1.24	1.01	1.24	1.33	0.87	1.33	1.56	1.79
P4	1.24	1.41	1.72	1.47	1.64	1.72	1.54	1.85	1.89	1.50	1.72	1.12	1.64	1.54	1.85
P5	1.74	1.67	1.59	1.78	1.59	1.84	1.70	1.67	1.22	1.99	1.84	1.82	1.46	1.63	1.84
P6	1.89	1.58	1.83	1.74	1.43	1.83	1.74	1.27	1.58	1.31	1.74	1.30	1.68	1.15	1.43
P7	1.66	1.81	1.69	1.74	1.78	1.88	1.79	1.78	1.84	1.73	1.94	1.72	1.84	2.04	1.84
P8	1.33	1.33	0.95	1.61	1.61	1.61	1.33	0.95	1.33	1.33	1.61	1.33	1.33	1.33	1.61
P9	1.70	1.66	1.70	1.68	1.56	1.82	1.70	1.63	1.47	1.59	1.63	1.36	1.91	1.66	1.79
P10	0.69	1.39	1.04	1.04	1.04	1.39	1.04	1.39	1.04	1.39	1.04	1.04	1.04	1.39	1.04
P11	1.81	1.75	1.87	1.49	1.57	1.67	1.67	1.75	1.63	1.97	1.63	1.49	1.73	1.81	1.57
P12	1.04	1.04	1.04	1.04	1.39	1.04	1.04	1.04	1.04	1.39	1.04	1.04	1.04	1.04	0.69
P13	1.10	1.10	0.64	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	0.64	1.10	1.10	0.64	1.10
P14	1.77	1.89	1.58	1.63	1.60	1.60	1.87	1.54	1.79	1.93	1.86	1.58	1.75	1.66	1.84
P15	1.68	1.21	1.15	1.52	1.15	1.37	1.83	1.68	1.52	1.52	1.74	1.43	1.52	1.52	1.58
P16	1.04	1.04	1.04	1.04	1.39	1.39	1.04	1.04	1.04	1.39	1.39	1.04	1.04	1.04	1.39
P17	1.47	2.02	1.70	1.82	1.82	1.70	1.35	1.86	1.91	1.66	1.70	1.86	1.58	1.68	1.82
P18	1.68	1.91	1.70	1.79	1.63	1.86	1.63	1.63	1.63	1.86	1.47	1.79	1.70	1.63	1.47
P19	1.56	1.77	1.93	1.34	1.66	1.68	1.97	1.64	1.77	1.77	1.77	1.71	1.55	1.96	1.68
均值 Mean	1.46	1.52	1.45	1.49	1.49	1.56	1.50	1.47	1.46	1.54	1.52	1.40	1.49	1.50	1.53

种源 ¹⁾	各数量性状的 Shannon-Weaver 多样性指数 ²⁾							Shannon-Weaver diversity index of each quantitative trait ²⁾							
Provenance ¹⁾	R_n	m_{sn}	d_{nv}	d_{nh}	I_n	R_k	m_{sk}	d_{kv}	d_{kh}	I_k	d_{ks}	C_k	R_{dk}	R_e	M
P1	1.97	1.98	2.03	1.78	1.98	2.06	1.82	1.97	2.01	1.94	1.95	0.12	1.94	1.96	1.86
P2	1.10	1.10	1.10	0.64	1.10	0.64	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	0.00	0.64	1.10	1.00
P3	1.56	1.33	1.24	1.33	1.56	1.24	1.56	1.24	1.24	1.56	1.33	1.01	0.87	1.56	1.29
P4	1.29	1.64	1.54	1.72	1.54	1.67	1.54	1.72	1.47	1.41	1.47	0.00	1.04	1.42	1.49
P5	1.38	1.63	1.78	1.82	1.41	1.52	1.70	1.78	1.59	1.63	1.69	0.00	1.16	1.38	1.58
P6	1.52	1.52	1.83	1.30	1.52	1.30	1.58	1.52	1.52	1.52	1.74	0.35	1.27	1.52	1.50
P7	1.84	1.73	1.69	1.73	1.96	1.94	1.89	1.86	1.79	1.69	1.92	0.00	1.26	1.84	1.73
P8	1.33	1.33	1.33	1.33	0.67	1.61	1.33	1.33	1.33	1.05	1.61	0.00	1.33	1.33	1.29
P9	1.52	1.75	1.86	1.70	1.68	1.14	1.42	1.63	1.98	1.82	1.86	0.00	1.63	1.52	1.60
P10	1.04	1.04	1.04	1.04	1.39	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	0.56	1.04	1.04	1.08
P11	1.64	1.77	1.91	1.38	1.77	1.61	1.81	1.81	1.77	1.77	1.83	0.51	1.39	1.64	1.66
P12	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.39	0.56	1.04	1.04	1.39	0.00	1.04	1.04	1.02
P13	0.64	1.10	1.10	0.64	1.10	1.10	1.10	1.10	0.64	0.64	1.10	0.00	1.10	0.64	0.93
P14	1.84	1.86	1.93	1.96	1.89	1.75	1.99	1.84	1.66	1.67	1.72	0.00	1.81	1.84	1.71

续表 5 Table 5 (Continued)

种源 ¹⁾	各数量性状的 Shannon-Weaver 多样性指数 ²⁾							Shannon-Weaver diversity index of each quantitative trait ²⁾							
Provenance ¹⁾	R _n	m _{sn}	d _{hv}	d _{nh}	I _n	R _k	m _{sk}	d _{kv}	d _{kh}	I _k	d _{ks}	C _k	R _{dk}	R _e	M
P15	1.52	1.68	1.68	1.52	1.74	1.74	1.74	1.83	1.68	1.68	1.68	0.35	1.31	1.52	1.52
P16	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.39	1.04	1.04	1.04	1.04	0.00	1.39	1.04	1.09
P17	1.45	1.75	1.70	1.42	1.52	1.91	1.70	1.82	1.24	1.70	1.56	0.29	1.36	1.70	1.62
P18	1.98	1.52	1.86	1.86	1.82	1.68	1.63	1.68	1.86	1.33	1.63	0.29	1.52	1.98	1.66
P19	1.89	1.53	1.34	1.88	1.34	1.77	1.71	1.89	1.66	1.64	1.86	0.00	1.77	1.89	1.65
均值 Mean	1.45	1.49	1.53	1.43	1.48	1.46	1.55	1.51	1.46	1.44	1.55	0.18	1.31	1.47	1.44

¹⁾ P1: 辽宁喀左 Kazuo of Liaoning; P2: 辽宁建平 Jianping of Liaoning; P3: 山西夏县 Xiaxian of Shanxi; P4: 山西平陆 Pinglu of Shanxi; P5: 陕西佳县 Jiaxian of Shaanxi; P6: 陕西绥德 Suide of Shaanxi; P7: 陕西延川 Yanchuan of Shaanxi; P8: 陕西宜川 Yichuan of Shaanxi; P9: 河北复兴 Fuxing of Hebei; P10: 河北武安 Wu'an of Hebei; P11: 河北信都 Xindou of Hebei; P12: 河北内丘 Neiqiu of Hebei; P13: 河北临城 Lincheng of Hebei; P14: 河北赞皇 Zanhuan of Hebei; P15: 河北元氏 Yuanshi of Hebei; P16: 河北阜平 Fuping of Hebei; P17: 河北顺平 Shunping of Hebei; P18: 山东长清 Changqing of Shandong; P19: 内蒙古元宝山 Yuanbaoshan of Inner Mongolia.

²⁾ l_1 : 叶长 Leaf length; b_1 : 叶宽 Leaf width; I_1 : 叶形指数 Leaf shape index; l_p : 叶柄长度 Petiole length; b_p : 叶柄宽度 Petiole width; l_{sb} : 二次枝长度 Secondary branch length; n_{sbn} : 二次枝节数 Secondary branch node number; l_{bs} : 枣吊长度 Bearing shoot length; n_{bs} : 枣吊叶片数 Leaf number of bearing shoot; l_{st} : 直刺长度 Straight thorn length; l_{bt} : 弯刺长度 Bend thorn length; m_{sf} : 单果质量 Single fruit mass; d_{fv} : 果实纵径 Fruit vertical diameter; d_{fh} : 果实横径 Fruit horizontal diameter; I_f : 果形指数 Fruit shape index; R_k : 出核率 Nutlet rate; m_{sn} : 单核质量 Single nutlet mass; d_{nv} : 果核纵径 Nutlet vertical diameter; d_{nh} : 果核横径 Nutlet horizontal diameter; I_n : 核形指数 Nutlet shape index; R_k : 出仁率 Kernel rate; m_{sk} : 单仁质量 Single kernel mass; d_{kv} : 果仁纵径 Kernel vertical diameter; d_{kh} : 果仁横径 Kernel horizontal diameter; I_k : 仁形指数 Kernel shape index; d_{ks} : 果仁侧径 Kernel side diameter; C_k : 含仁率 Kernel content; R_{dk} : 双仁率 Dual kernel rate; R_e : 可食率 Edible rate. M: 均值 Mean.

表 6 不同种源酸枣数量性状的方差分量及表型分化系数
Table 6 Variance components and phenotypic differentiation coefficients of quantitative traits of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow. from different provenances

性状 ¹⁾ Trait ¹⁾	方差分量 Variance component			方差分量比例/% Percentage of variance component			表型分化系数 Phenotypic differentiation coefficient
	种源间 Among provenances	种源内 Within provenance	机误 Random error	种源间 Among provenances	种源内 Within provenance	机误 Random error	
l_1	536.11	34.32	32.91	88.86	5.69	5.45	0.94
b_1	87.60	9.80	9.23	82.16	9.19	8.65	0.90
I_1	1.15	0.09	0.08	87.68	6.46	5.86	0.93
l_p	2.18	0.69	0.39	66.94	21.25	11.81	0.76
b_p	0.06	0.01	0.01	78.38	10.81	10.81	0.88
l_{sb}	71.73	13.21	9.73	75.77	13.95	10.28	0.84
n_{sbn}	16.34	1.76	1.83	82.00	8.83	9.16	0.90
l_{bs}	44.40	10.33	8.58	70.14	16.31	13.56	0.81
n_{bs}	48.65	7.57	8.26	75.46	11.74	12.80	0.87
l_{st}	140.20	20.45	24.31	75.80	11.06	13.14	0.87
l_{bt}	7.85	0.83	0.82	82.60	8.75	8.65	0.90
m_{sf}	2.81	0.53	0.41	74.76	14.23	11.01	0.84
d_{fv}	36.94	6.88	6.28	73.73	13.74	12.53	0.84
d_{fh}	34.35	5.63	3.80	78.47	12.85	8.68	0.86
I_f	0.05	0.01	0.02	63.86	15.66	20.48	0.80
R_n	396.65	35.94	47.57	82.61	7.49	9.91	0.92
m_{sn}	0.01	0.00	0.00	70.59	11.76	17.65	0.86
d_{nv}	13.28	1.69	2.45	76.24	9.68	14.08	0.89
d_{nh}	1.08	0.40	0.38	57.89	21.48	20.62	0.73
I_n	0.27	0.04	0.06	72.73	10.43	16.84	0.87
R_k	20.68	14.61	16.86	39.66	28.01	32.33	0.59
m_{sk}	265.96	142.68	96.94	52.61	28.22	19.17	0.65
d_{kv}	1.44	0.29	0.37	68.74	13.79	17.47	0.83
d_{kh}	0.30	0.19	0.18	43.83	28.83	27.34	0.60
I_k	0.05	0.01	0.01	62.16	18.92	18.92	0.77
d_{ks}	0.27	0.13	0.10	53.88	25.45	20.68	0.68

续表6 Table 6 (Continued)

性状 ¹⁾ Trait ¹⁾	方差分量 Variance component			方差分量比例/% Percentage of variance component			表型分化系数 Phenotypic differentiation coefficient
	种源间 Among provenances	种源内 Within provenance	机误 Random error	种源间 Among provenances	种源内 Within provenance	机误 Random error	
C _k	30.70	9.89	21.99	49.05	15.81	35.14	0.76
R _{dk}	1 032.00	428.88	354.38	56.85	23.63	19.52	0.71
R _e	396.44	35.85	47.58	82.61	7.47	9.91	0.92
均值 Mean	109.98	26.99	23.98	69.86	14.88	15.26	0.82

¹⁾ l_1 : 叶长 Leaf length; b_1 : 叶宽 Leaf width; I_1 : 叶形指数 Leaf shape index; l_p : 叶柄长度 Petiole length; b_p : 叶柄宽度 Petiole width; l_{ss} : 二次枝长度 Secondary branch length; n_{ss} : 二次枝节数 Secondary branch node number; l_{bs} : 枣吊长度 Bearing shoot length; n_{bs} : 枣吊叶片数 Leaf number of bearing shoot; l_{st} : 直刺长度 Straight thorn length; l_{bt} : 弯刺长度 Bend thorn length; m_{sf} : 单果质量 Single fruit mass; d_{fv} : 果实纵径 Fruit vertical diameter; d_{fh} : 果实横径 Fruit horizontal diameter; I_f : 果形指数 Fruit shape index; R_n : 出核率 Nutlet rate; m_{sn} : 单核质量 Single nutlet mass; d_{nv} : 果核纵径 Nutlet vertical diameter; d_{nh} : 果核横径 Nutlet horizontal diameter; I_n : 核形指数 Nutlet shape index; R_k : 出仁率 Kernel rate; m_{sk} : 单仁质量 Single kernel mass; d_{kv} : 果仁纵径 Kernel vertical diameter; d_{kh} : 果仁横径 Kernel horizontal diameter; I_k : 仁形指数 Kernel shape index; d_{ks} : 果仁侧径 Kernel side diameter; C_k : 含仁率 Kernel content; R_{dk} : 双仁率 Dual kernel rate; R_e : 可食率 Edible rate.

2.5 酸枣数量性状与地理气候因子的相关性分析

结果(表7)显示:酸枣叶长与经度呈显著($P < 0.05$)正相关,与平均海拔呈极显著($P < 0.01$)负相关;叶形指数与经度和7月份均温呈显著正相关,与平均海拔呈极显著负相关;叶柄长度与1月份均温呈显著负相关;二次枝节数与年均降水量呈显著正相

关;枣吊长度和枣吊叶片数均与平均海拔呈显著负相关,且枣吊叶片数还与年均温和7月份均温呈显著正相关;弯刺长度和出核率与经度分别呈显著和极显著负相关;果实横径与纬度呈显著正相关;双仁率和可食率与经度呈极显著正相关;果仁横径与年均降水量、年均温和1月份均温均呈显著负相关。

表7 酸枣数量性状与地理气候因子的相关性

Table 7 Correlations between quantitative traits of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow. and geographical-climatic factors

GCF ¹⁾	与数量性状的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient with quantitative traits ²⁾														
	l_1	b_1	I_1	l_p	b_p	l_{ss}	n_{ss}	l_{bs}	n_{bs}	l_{st}	l_{bt}	m_{sf}	d_{fv}	d_{fh}	I_f
Long	0.51 *	0.33	0.47 *	0.31	0.06	0.04	-0.25	0.36	0.16	-0.39	-0.54 *	0.29	0.28	0.32	0.02
Lat	0.24	0.31	0.03	0.44	-0.01	-0.15	-0.42	0.11	-0.08	-0.15	-0.35	0.37	0.34	0.46 *	-0.23
Alt	-0.68 **	-0.30	-0.77 **	0.10	0.10	-0.09	-0.08	-0.52 *	-0.56 *	-0.06	0.28	0.02	-0.16	-0.15	-0.08
P _a	0.03	0.01	-0.01	-0.40	0.09	0.30	0.52 *	0.20	0.39	0.03	0.00	-0.26	-0.20	-0.27	0.16
t_a	0.31	0.08	0.44	-0.34	-0.04	0.27	0.39	0.32	0.50 *	0.15	-0.14	-0.21	-0.09	-0.18	0.21
t_1	0.07	-0.15	0.30	-0.47 *	-0.13	0.18	0.44	0.08	0.32	0.16	0.14	-0.39	-0.22	-0.28	0.10
t_7	0.36	0.06	0.54 *	-0.35	-0.10	0.18	0.33	0.31	0.48 *	0.16	-0.04	-0.22	-0.05	-0.13	0.18
GCF ¹⁾	与数量性状的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient with quantitative traits ²⁾														
	R_n	m_{sn}	d_{nv}	d_{nh}	I_n	R_k	m_{sk}	d_{kv}	d_{kh}	I_k	d_{ks}	C_k	R_{dk}	R_e	
Long	-0.64 **	-0.11	0.29	0.04	0.31	0.23	0.02	0.29	0.20	0.16	-0.29	0.14	0.65 **	0.64 **	
Lat	-0.46	0.05	0.20	0.18	0.15	0.29	0.24	0.25	0.39	-0.04	0.04	0.38	0.38	0.46	
Alt	0.43	0.20	-0.27	0.15	-0.37	-0.03	0.20	-0.06	0.14	-0.18	0.44	0.01	-0.42	-0.43	
P _a	0.16	-0.20	-0.19	-0.26	-0.09	-0.24	-0.37	-0.14	-0.47 *	0.19	-0.16	-0.40	-0.13	-0.16	
t_a	-0.08	-0.24	0.03	-0.34	0.18	-0.26	-0.41	-0.12	-0.55 *	0.29	-0.33	-0.36	-0.14	0.08	
t_1	0.22	-0.25	-0.12	-0.30	0.00	-0.22	-0.38	-0.25	-0.46 *	0.08	-0.24	-0.34	-0.19	-0.22	
t_7	-0.08	-0.23	0.09	-0.31	0.22	-0.11	-0.32	-0.11	-0.42	0.21	-0.37	-0.24	0.03	0.08	

¹⁾ GCF: 地理气候因子 Geographical-climatic factor. Long: 经度 Longitude; Lat: 纬度 Latitude; Alt: 平均海拔 Mean altitude; P_a: 年均降水量 Mean annual precipitation; t_a : 年均温 Mean annual temperature; t_1 : 1月份均温 Mean temperature in January; t_7 : 7月份均温 Mean temperature in July.

²⁾ l_1 : 叶长 Leaf length; b_1 : 叶宽 Leaf width; I_1 : 叶形指数 Leaf shape index; l_p : 叶柄长度 Petiole length; b_p : 叶柄宽度 Petiole width; l_{ss} : 二次枝长度 Secondary shoot length; n_{ss} : 二次枝节数 Secondary shoot node number; l_{bs} : 枣吊长度 Bearing shoot length; n_{bs} : 枣吊叶片数 Leaf number of bearing shoot; l_{st} : 直刺长度 Straight thorn length; l_{bt} : 弯刺长度 Bend thorn length; m_{sf} : 单果质量 Single fruit mass; d_{fv} : 果实纵径 Fruit vertical diameter; d_{fh} : 果实横径 Fruit horizontal diameter; I_f : 果形指数 Fruit shape index; R_n : 出核率 Nutlet rate; m_{sn} : 单核质量 Single nutlet mass; d_{nv} : 果核纵径 Nutlet vertical diameter; d_{nh} : 果核横径 Nutlet horizontal diameter; I_n : 核形指数 Nutlet shape index; R_k : 出仁率 Kernel rate; m_{sk} : 单仁质量 Single kernel mass; d_{kv} : 果仁纵径 Kernel vertical diameter; d_{kh} : 果仁横径 Kernel horizontal diameter; I_k : 仁形指数 Kernel shape index; d_{ks} : 果仁侧径 Kernel side diameter; C_k : 含仁率 Kernel content; R_{dk} : 双仁率 Dual kernel rate; R_e : 可食率 Edible rate. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

2.6 酸枣数量性状的主成分分析

对酸枣数量性状进行主成分分析,结果(表 8)显示:特征值大于 1 的主成分有 9 个,累计贡献率为 79.74%。第 1 主成分的贡献率为 28.19%,其中果实纵径、单果质量、果核纵径、果仁纵径、果实横径、出核率、可食率、叶宽、叶长、核形指数、单核质量的特征向量绝对值较大,主要反映叶片、果实和果核大小。第 2 主成分的贡献率为 12.23%,其中果仁横径、果核横径、仁形指数、果形指数、果仁侧径、核形指数的特征向量绝对值较大,主要反映果实、果仁和果核形状及果仁大小。第 3 主成分的贡献率为 8.57%,其中弯刺长度、枣吊长度、枣吊叶片数的特征向量绝对值较大,主要反映枝刺性状。第 4 主成分的贡献率为 7.40%,其中出仁率、枣吊叶片数、单仁质量、果仁侧径的特征

向量绝对值较大,主要反映叶片数量和果仁相关性状。第 5 主成分的贡献率为 6.49%,其中二次枝长度的特征向量绝对值最大,主要反映枝性状。第 6 主成分的贡献率为 4.93%,其中二次枝节数的特征向量绝对值最大,主要反映枝性状。第 7 主成分的贡献率为 4.34%,其中直刺长度的特征向量绝对值最大,主要反映刺的性状。第 8 主成分的贡献率为 3.99%,其中叶柄宽度的特征向量绝对值最大,主要反映叶片性状。第 9 主成分的贡献率为 3.60%,其中出仁率的特征向量绝对值最大,主要反映产量相关性状。

对 9 个主成分得分进行归一化处理,以贡献率计算的各主成分权重系数分别为 0.35、0.15、0.11、0.09、0.08、0.06、0.05、0.05、0.05。9 个主成分得分与其相对应的权重乘积之和为各酸枣种质数量性状的综合

表 8 酸枣数量性状的主成分分析¹⁾
Table 8 Principal component analysis on quantitative traits of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow.¹⁾

主成分 Principal component	各数量性状的特征向量 Eigenvector of each quantitative trait															
	l_1	b_1	I_1	l_p	b_p	l_{sb}	n_{sb}	l_{bs}	n_{bs}	l_{st}	l_{bt}	m_{sf}	d_{fv}	d_{fh}	I_f	R_n
1	0.66	0.70	0.14	0.51	0.27	-0.15	-0.53	0.33	-0.03	0.05	-0.12	0.89	0.90	0.81	0.17	-0.76
2	-0.26	-0.01	-0.42	0.00	0.19	0.03	0.00	-0.18	-0.16	0.23	0.35	0.17	-0.07	0.28	-0.60	0.16
3	-0.45	-0.28	-0.35	0.15	0.15	-0.08	-0.08	-0.52	-0.50	0.19	0.57	0.04	0.14	-0.16	0.48	0.23
4	-0.11	-0.19	0.08	-0.23	-0.34	-0.10	0.11	0.36	0.58	0.08	-0.11	-0.03	0.02	-0.05	0.07	-0.42
5	0.02	0.06	-0.03	0.16	0.32	0.69	0.41	-0.16	-0.23	-0.06	0.23	0.17	0.05	0.21	-0.31	-0.06
6	-0.13	-0.03	-0.18	-0.46	-0.34	0.48	0.54	0.09	0.07	0.31	0.10	0.07	0.14	0.08	0.07	0.05
7	-0.12	-0.36	0.33	0.06	0.11	0.34	0.24	-0.07	0.00	-0.67	-0.25	-0.03	-0.01	-0.11	0.22	0.05
8	0.00	0.16	-0.22	0.17	0.50	0.17	0.02	0.50	0.36	-0.05	0.17	0.00	0.04	-0.07	0.18	0.18
9	0.01	-0.12	0.22	-0.02	0.06	-0.07	-0.13	-0.18	-0.18	-0.18	0.05	0.01	-0.01	0.05	-0.05	-0.03

主成分 Principal component	各数量性状的特征向量 Eigenvector of each quantitative trait														E/%	CR/%	CCR/%
	m_{sn}	d_{nv}	d_{nh}	I_n	R_k	m_{sk}	d_{kv}	d_{kh}	I_k	d_{ks}	C_k	R_{dk}	R_e				
1	0.62	0.85	0.35	0.64	-0.01	0.50	0.84	0.41	0.47	0.17	0.02	0.17	0.76	8.18	28.19	28.19	
2	0.46	-0.21	0.67	-0.55	0.07	0.47	0.01	0.70	-0.62	0.59	0.09	-0.18	-0.16	3.54	12.23	40.42	
3	0.14	0.26	-0.28	0.39	0.15	0.24	0.20	-0.16	0.38	0.16	0.01	-0.35	-0.23	2.49	8.57	49.00	
4	-0.16	0.05	-0.27	0.18	0.79	0.53	-0.01	0.04	0.00	0.50	0.27	-0.20	0.06	2.15	7.40	56.39	
5	-0.38	-0.17	-0.31	-0.01	0.24	-0.11	-0.16	-0.18	-0.01	0.18	-0.01	-0.19	0.42	1.88	6.49	62.88	
6	0.24	0.16	0.09	0.10	-0.25	0.01	0.12	0.00	0.14	-0.12	0.15	0.37	-0.05	1.43	4.93	67.81	
7	0.16	0.16	0.21	0.06	-0.06	0.08	0.15	0.24	-0.05	0.11	-0.13	-0.12	-0.05	1.30	4.34	72.15	
8	0.10	0.06	-0.05	0.06	-0.24	-0.13	-0.13	-0.09	-0.08	0.06	0.30	-0.22	-0.18	1.16	3.99	76.14	
9	0.05	0.02	-0.07	0.04	-0.03	0.01	-0.12	-0.06	-0.09	0.04	0.83	0.35	0.03	1.04	3.60	79.74	

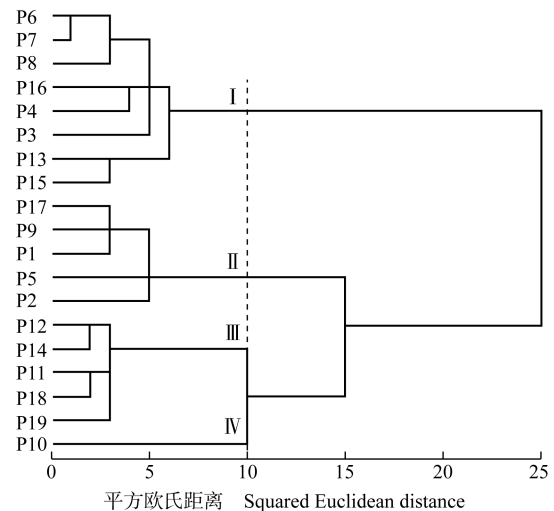
¹⁾ l_1 : 叶长 Leaf length; b_1 : 叶宽 Leaf width; I_1 : 叶形指数 Leaf shape index; l_p : 叶柄长度 Petiole length; b_p : 叶柄宽度 Petiole width; l_{sb} : 二次枝长度 Secondary branch length; n_{sb} : 二次枝节数 Secondary branch node number; l_{bs} : 枣吊长度 Bearing shoot length; n_{bs} : 枣吊叶片数 Leaf number of bearing shoot; l_{st} : 直刺长度 Straight thorn length; l_{bt} : 弯刺长度 Bend thorn length; m_{sf} : 单果质量 Single fruit mass; d_{fv} : 果实纵径 Fruit vertical diameter; d_{fh} : 果实横径 Fruit horizontal diameter; I_f : 果形指数 Fruit shape index; R_n : 出核率 Nutlet rate; m_{sn} : 单核质量 Single nutlet mass; d_{nv} : 果核纵径 Nutlet vertical diameter; d_{nh} : 果核横径 Nutlet horizontal diameter; I_n : 核形指数 Nutlet shape index; R_k : 出仁率 Kernel rate; m_{sk} : 单仁质量 Single kernel mass; d_{kv} : 果仁纵径 Kernel vertical diameter; d_{kh} : 果仁横径 Kernel horizontal diameter; I_k : 仁形指数 Kernel shape index; d_{ks} : 果仁侧径 Kernel side diameter; C_k : 含仁率 Kernel content; R_{dk} : 双仁率 Dual kernel rate; R_e : 可食率 Edible rate. E: 特征值 Eigenvalue; CR: 贡献率 Contribution rate; CCR: 累计贡献率 Cumulative contribution rate.

得分值,利用综合得分值和数量性状进行逐步回归分析,构建的最优回归方程为 $y = -0.333 - 0.012x_3 + 0.004x_4 + 0.065x_5 + 0.002x_6 + 0.002x_7 + 0.007x_{11} + 0.012x_{12} + 0.005x_{13} + 0.001x_{14} - 0.001x_{16} + 0.108x_{17} + 0.009x_{18} + 1.495x_{22} + 0.016x_{23} + 0.010x_{24} + 0.034x_{26} + 0.002x_{27}$, 其中 $x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{26}, x_{27}$ 分别为叶形指数、叶柄长度、叶柄宽度、二次枝长度、二次枝节数、弯刺长度、单果质量、果实纵径、果实横径、出核率、单核质量、果核纵径、单仁质量、果仁纵径、果仁横径、果仁侧径、出仁率, R 和 R^2 均为 0.999, F 值为 13 197.48, 达到极显著 ($P < 0.01$) 水平,说明这 17 个数量性状可以代表总变异的 99.9%,可作为评价酸枣种质资源的表型性状指标。

2.7 不同种源酸枣的聚类分析

基于数量性状对不同种源酸枣进行聚类分析,并计算各类群数量性状均值,结果见图 1 和表 9。由结果可见,在平方欧氏距离 10 处,酸枣 19 个种源可分为 4 个类群。类群 I 包括陕西绥德、陕西延川、陕西宜川、河北阜平、山西平陆、山西夏县、河北临城和河北元氏 8 个种源,主要特征为酸枣叶片小、枣吊短、弯刺长、果实和果核小、出核率高、可食率低。类群 II 包括河北顺平、河北复兴、辽宁喀左、陕西佳县、辽宁建平 5 个种源,主要特征为叶柄长、果实和果核大、出核率低、可食率高,该类群包含了供试酸枣种质的所有大果类型。类群 III 包括河北内丘、河北赞皇、河北信都、山东长清、内蒙古元宝山 5 个种源,主要特征为叶

片长、枣吊长、枣吊叶片数多。类群 IV 包括河北武安 1 个种源,主要特征为二次枝长、二次枝节数多、直刺和弯刺短、单核质量小。



P1: 辽宁喀左 Kazuo of Liaoning; P2: 辽宁建平 Jianping of Liaoning; P3: 山西夏县 Xiaxian of Shanxi; P4: 山西平陆 Pinglu of Shanxi; P5: 陕西佳县 Jiaxian of Shaanxi; P6: 陕西绥德 Suide of Shaanxi; P7: 陕西延川 Yanchuan of Shaanxi; P8: 陕西宜川 Yichuan of Shaanxi; P9: 河北复兴 Fuxing of Hebei; P10: 河北武安 Wu'an of Hebei; P11: 河北信都 Xindou of Hebei; P12: 河北内丘 Neiqiu of Hebei; P13: 河北临城 Lincheng of Hebei; P14: 河北赞皇 Zanhuan of Hebei; P15: 河北元氏 Yuanshi of Hebei; P16: 河北阜平 Fuping of Hebei; P17: 河北顺平 Shunping of Hebei; P18: 山东长清 Changqing of Shandong; P19: 内蒙古元宝山 Yuanbaoshan of Inner Mongolia.

图 1 基于数量性状的酸枣不同种源的聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow. from different provenances based on quantitative traits

表 9 不同类群酸枣数量性状均值¹⁾

Table 9 Means of quantitative traits of different groups of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow.¹⁾

类群 Group	l_l /mm	b_l /mm	I_l	l_p /mm	b_p /mm	l_{sb} /cm	n_{shn}	l_{bs} /cm	n_{bs}	l_{st} /mm	l_{bt} /mm	m_{st} /g	d_{fv} /mm	d_{fh} /mm	I_f
I	20.24	10.88	1.88	1.98	0.68	18.28	9.2	10.94	11.9	18.40	4.41	0.92	12.46	11.75	1.07
II	28.81	15.32	1.93	2.68	0.72	17.87	7.9	12.97	12.5	18.28	3.56	2.00	16.38	14.92	1.10
III	31.15	14.28	2.23	2.33	0.71	17.27	8.4	13.92	13.9	15.67	3.17	1.17	13.68	11.70	1.18
IV	23.79	12.53	1.96	1.96	0.65	29.70	13.5	13.06	14.6	9.67	2.30	0.94	12.62	11.80	1.08

类群 Group	R_n /%	m_{sn} /g	d_{nv} /mm	d_{nh} /mm	I_n	R_k /%	m_{sk} /g	d_{kv} /mm	d_{kh} /mm	I_k	d_{ks} /mm	C_k /%	R_{dk} /%	R_e /%
I	27.41	0.22	9.11	6.91	1.33	16.49	0.04	6.04	5.00	1.22	2.53	98.9	17.8	72.59
II	14.83	0.25	11.13	7.02	1.60	17.84	0.04	6.75	5.19	1.30	2.63	99.8	28.9	85.17
III	19.89	0.22	10.39	6.81	1.54	16.02	0.03	6.54	5.00	1.31	2.30	98.5	25.2	80.11
IV	15.44	0.14	8.78	6.05	1.46	17.11	0.02	6.16	4.53	1.36	2.47	97.5	25.0	84.56

¹⁾ l_l : 叶长 Leaf length; b_l : 叶宽 Leaf width; I_l : 叶形指数 Leaf shape index; l_p : 叶柄长度 Petiole length; b_p : 叶柄宽度 Petiole width; l_{sb} : 二次枝长度 Secondary branch length; n_{sh} : 二次枝节数 Secondary branch node number; l_{bs} : 枣吊长度 Bearing shoot length; n_{bs} : 枣吊叶片数 Leaf number of bearing shoot; l_{st} : 直刺长度 Straight thorn length; l_{bt} : 弯刺长度 Bend thorn length; m_{sf} : 单果质量 Single fruit mass; d_{fv} : 果实纵径 Fruit vertical diameter; d_{fh} : 果实横径 Fruit horizontal diameter; I_f : 果形指数 Fruit shape index; R_n : 出核率 Nutlet rate; m_{sn} : 单核质量 Single nutlet mass; d_{nv} : 果核纵径 Nutlet vertical diameter; d_{nh} : 果核横径 Nutlet horizontal diameter; I_n : 核形指数 Nutlet shape index; R_k : 出仁率 Kernel rate; m_{sk} : 单仁质量 Single kernel mass; d_{kv} : 果仁纵径 Kernel vertical diameter; d_{kh} : 果仁横径 Kernel horizontal diameter; I_k : 仁形指数 Kernel shape index; d_{ks} : 果仁侧径 Kernel side diameter; C_k : 含仁率 Kernel content; R_{dk} : 双仁率 Dual kernel rate; R_e : 可食率 Edible rate.

3 讨论和结论

表型性状研究是开展林木育种工作的基础^[21,24]。变异系数能够反映个体间的差异,变异系数越大,表明表型性状离散程度越高,表型多样性越丰富^[25-26]。本研究中,质量性状变异系数均值为31.17%,Shannon-Weaver多样性指数均值为0.83,性状各级占比差异大,说明供试酸枣质量性状变异丰富,能够用于优质种质资源的筛选和种质创新;数量性状变异系数均值为25.01%,说明供试酸枣数量性状离散程度高,表型变异程度大,枝、刺、叶数量性状的变异系数均值(27.11%)大于果实、果核、果仁数量性状的变异系数均值(23.73%),说明供试酸枣营养器官具有更广泛的变异。不同种源酸枣数量性状平均变异系数均在15%以上,其中陕西佳县、内蒙古元宝山、河北复兴种源的数量性状变异程度相对较高,表型变异丰富,这可能是因为植物所处的生境复杂多样,需要更高的表型可塑性适应生态环境的变化^[25]。数量性状的Shannon-Weaver多样性指数均值为1.94,说明这些数量性状的表型多样性较丰富,辽宁喀左、陕西延川和河北赞皇这3个表型多样性高的种源地可作为酸枣种质资源收集及优良品种选育的重点关注区域。此外,单果质量、单核质量、单仁质量、直刺长度、弯刺长度等性状的极值比大,说明酸枣刺和果实有着较高的表型进化和环境适应性。

本研究中酸枣种源间和种源内存在不同程度的变异,种源间的方差分量比例(69.86%)远大于种源内的方差分量比例(14.88%),说明种源间的变异是酸枣的主要变异来源,这与多数林木种群的表型变异来源不同,可能是因为供试酸枣种源地的环境差异大,存在长期的地理隔离。酸枣种源间表型分化系数均值为0.82,明显高于水青树(*Tetracentron sinense* Oliv.) (0.56)^[27]、格木(*Erythrophloeum fordii* Oliv.) (0.22)^[16]、青梅(*Vatica mangachapoi* Blanco) (0.18)^[28],表明酸枣表型分化系数在林木种群中处于较高水平,进一步证明了酸枣种源间的环境异质性增加了其表型性状的变异。

种源间的表型变异通常是植物对不同环境压力的反应^[29]。不同植物对外界环境适应能力的差异使得其具有不同的地理变异模式^[25,30],如石斛(*Dendrobium nobile* Lindl.)^[31]表型性状变异呈现以经

度和纬度为主导的地理变异模式,青杨(*Populus cathayana* Rehd.)^[18]叶片表型性状则呈现以海拔为主的地理变异模式,年降水量是影响闽楠(*Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang)种实表型性状变异的主要因子^[20]。叶片性状与海拔呈极显著负相关,这可能是因为海拔可以通过气温等来影响植物的性状^[32]。本研究中,酸枣叶形指数与海拔呈极显著($P<0.01$)负相关,与7月份均温呈显著($P<0.05$)正相关,这是由于海拔越低,环境温度越高,蒸腾速率越大,而叶片越细长,蒸腾面积越小,因此叶形指数大更有利于植物在高温环境下生存。

主成分分析通过降维将较多的指标转换为少量的综合指标^[18],诸多研究者通过主成分分析研究植物表型性状的遗传多样性,筛选表型性状。李晓兰等^[33]在酸枣8个果实性状中提取出2个主成分,累计贡献率为80.266%,可反映果实性状的大部分信息;刘青柏等^[34]在酸枣21个果实性状中提取出8个主成分,累计贡献率为81.581%,并在这些主成分中提取占主要地位的性状。本研究主成分分析结果表明:前9个主成分的累计贡献率为79.74%,说明前9个主成分能够代表211份酸枣样本数量性状的大部分信息,结合逐步线性回归分析从29个数量性状中筛选出17个可作为评价酸枣种质资源的表型性状指标,在今后的种质资源评价工作中应重点关注。

聚类分析能够显示具有相似特征的品种之间的联系^[35]。李晓兰等^[33]通过酸枣种质资源表型多样性分析,基于8个表型性状将26份酸枣样本分为2大类。相较而言,本研究基于29个数量性状对211份酸枣样本进行聚类分析,表型性状较多,样本量较大,研究结果更具有代表性。通过聚类分析得到4个类群,初步明确了酸枣各类群特征及其在良种选育中的利用价值,根据不同的目标可较大程度地提高酸枣的育种效率。其中类群Ⅰ可用于选育叶片小、果实和果核小、出核率高的品种;类群Ⅱ可用于选育果实和果核大、可食率高的品种;类群Ⅲ可用于选育叶片长、枣吊长、枣吊叶片数多的品种;类群Ⅳ可用于选育二次枝长、直刺和弯刺短的品种。此外,供试19个种源聚类结果与种源地地理分布并未完全吻合,说明酸枣表型性状变异存在不连续性,可能是不同分布范围内酸枣受到地理环境、气候、土壤等不同条件的影响,通过表型变化协调自身的生长发育与环境之间的关系来适应多样环境的结果。

参考文献:

- [1] 张颖, 郭盛, 朱邵晴, 等. 不同干燥方法对酸枣叶中核苷类、氨基酸类及黄酮类成分的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(9): 296-303.
- [2] 杜晨晖, 崔小芳, 裴香萍, 等. 酸枣仁皂苷类成分及其对神经系统作用研究进展[J]. 中草药, 2019, 50(5): 1258-1268.
- [3] 张璐. 酸枣果肉多糖的提取优化及抗氧化活性研究[J]. 中国酿造, 2015, 34(8): 92-96.
- [4] 张蕾, 何晓曦, 徐淑萍, 等. 酸枣果肉的镇静催眠作用[J]. 中药材, 2011, 34(8): 1263-1266.
- [5] KHADIVI A, SAFDARI L, HAJIAN M H, et al. Selection of the promising almond (*Prunus amygdalus* L.) genotypes among seedling origin trees[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 256: 108587.
- [6] 郭燕, 张树航, 李颖, 等. 燕山板栗种质资源叶片表型性状多样性研究[J]. 园艺学报, 2022, 49(8): 1673-1688.
- [7] 杨艳, 汤玉喜, 唐洁, 等. 南方型黑杨种质资源表型及生长性状遗传多样性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(7): 31-36.
- [8] 范英明, 董明亮, 党磊, 等. 华北落叶松全分布区天然群体的球果变异分析研究[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(6): 1531-1541.
- [9] 张学超, 任海龙, 唐式敏, 等. 伊犁天山160份野苹果种质资源表型性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(6): 1521-1530.
- [10] 孙亚强. 酸枣种质资源遗传多样性分析及其核心种质的构建[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2016.
- [11] ZHANG C M, HUANG J, YIN X, et al. Genetic diversity and population structure of sour jujube, *Ziziphus acidujubus* [J]. Tree Genetics and Genomes, 2015, 11: 809-809.
- [12] 陈武, 孔德仓, 崔艳红, 等. 枣核心种质表型性状多样性及裂果相关性[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(6): 78-84.
- [13] SHARIF N, JASKANI M J, NAQVI S A, et al. Exploitation of diversity in domesticated and wild ber (*Ziziphus mauritiana* Lam.) germplasm for conservation and breeding in Pakistan[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 249: 228-239.
- [14] KHADIVI A, MIRHEIDARI F, MORADI Y, et al. Identification of superior jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) genotypes based on morphological and fruit characterizations[J]. Food Science and Nutrition, 2021, 9(6): 3165-3176.
- [15] 王博, 严亮亮, 宋丽华. 宁夏5个野生酸枣种群遗传变异分析[J]. 西北农业学报, 2021, 30(12): 1824-1834.
- [16] 李洪果, 陈达镇, 许靖诗, 等. 濒危植物格木天然种群的表型多样性及变异[J]. 林业科学, 2019, 55(4): 69-83.
- [17] 王宁. 野生元宝枫资源调查及种子脂肪酸评价研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019: 27.
- [18] 曹德美, 张亚红, 成星奇, 等. 青杨不同种群叶片表型性状的遗传变异[J]. 林业科学, 2021, 57(8): 56-67.
- [19] 柳江群, 尹明宇, 左丝雨, 等. 长柄扁桃天然种群表型变异[J]. 植物生态学报, 2017, 41(10): 1091-1102.
- [20] 欧汉彪, 董利军, 李娟, 等. 闽楠种实性状表型多样性与环境地理因子的关系[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(8): 45-50.
- [21] LIU Z R, GAO C J, LI J, et al. Phenotypic diversity analysis and superior family selection of industrial raw material forest species-*Pinus yunnanensis* Franch[J]. Forests, 2022, 13(4): 618.
- [22] 朱弘, 朱淑霞, 李涌福, 等. 尾叶樱桃天然种群叶表型性状变异研究[J]. 植物生态学报, 2018, 42(12): 1168-1178.
- [23] 吴欣明, 郭璞, 池惠武, 等. 国外紫花苜蓿种质资源表型性状与品质多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2018, 19(1): 103-111.
- [24] 殷晓, 张春梅, 李新岗, 等. 陕北枣品种群遗传结构的SSR分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 152-160, 167.
- [25] 郭学斌. 山西省中国沙棘天然种群优树表型变异研究[J]. 林业科学研究, 2021, 34(4): 111-119.
- [26] 秦宇, 郝瑞鑫, 李若晴, 等. 山楂种质资源表型性状多样性分析及评价[J]. 果树学报, 2022, 39(10): 1759-1773.
- [27] LI Y, LI S, LU X H, et al. Leaf phenotypic variation of endangered plant *Tetracentron sinense* Oliv. and influence of geographical and climatic factors[J]. Journal of Forestry Research, 2021, 32: 623-636.
- [28] 尚帅斌, 郭俊杰, 王春胜, 等. 海南岛青梅天然居群表型变异[J]. 林业科学, 2015, 51(2): 154-162.
- [29] ALCÁNTARA-AYALA O, OYAMA K, RÍOS-MUÑOZ C, et al. Morphological variation of leaf traits in the *Ternstroemia lineata* species complex (Ericales: Pentaphragaceae) in response to geographic and climatic variation[J]. PeerJ, 2020, 8: e8307.
- [30] 何庆海, 杨少宗, 李因刚, 等. 枫香树种群种子与果实表型性状变异分析[J]. 植物生态学报, 2018, 42(7): 752-763.
- [31] 何涛, 樊小莉, 鲁璐, 等. 不同种源石斛表型性状多样性及其与地理因子的相关性[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(2): 1-11.
- [32] 张凯, 侯继华, 何念鹏. 油松叶功能性状分布特征及其控制因素[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 736-749.
- [33] 李晓兰, 丁雯, 段慧竹, 等. 基于表型性状的酸枣种质资源表型多样性分析[J]. 分子植物育种, 2023, 21(2): 666-672.
- [34] 刘青柏, 刘明国, 肖德平, 等. 辽西朝阳地区酸枣种质果实主要性状特征[J]. 林业科学, 2016, 52(4): 38-47.
- [35] BEDJAOU H, BENBOUZA H. Assessment of phenotypic diversity of local Algerian date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cultivars[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2020, 19(1): 65-75.

(责任编辑: 吴芯夷)