

# 甜瓜氮钾双高效资源综合评价与筛选

康利允, 李晓慧, 高宁宁, 王慧颖, 梁 慎, 常高正, 李海伦, 徐小利, 赵卫星\*

(河南省农业科学院园艺研究所, 郑州 450002)

**摘要:**【目的】探明不同甜瓜种质资源氮钾双高效遗传差异, 筛选氮钾双高效种质资源, 建立甜瓜苗期氮钾双高效评价体系, 为甜瓜氮钾双高效基因挖掘及新品种选育提供理论依据。【方法】以72个薄皮甜瓜品种(系)为材料, 采用苗期穴盘基质栽培试验, 设正常供氮钾(对照, N 4.88 mmol·L<sup>-1</sup>、K<sub>2</sub>O 2.50 mmol·L<sup>-1</sup>)、低氮(LN, N 0.01 mmol·L<sup>-1</sup>)、低钾(LK, K<sub>2</sub>O 0.01 mmol·L<sup>-1</sup>)、氮钾双低(LNK, N 0.01 mmol·L<sup>-1</sup>、K<sub>2</sub>O 0.01 mmol·L<sup>-1</sup>)4个处理, 通过分析苗期光合性能、农艺性状、氮效率及钾效率进行系统评价和分析。【结果】综合分析耐低氮、耐低钾、低氮钾双耐指数主成分分析结果, 最终确立地上部干质量、氮积累量、地上部鲜质量、钾积累量、茎粗、钾素利用效率、气孔导度、氮含量、胞间CO<sub>2</sub>浓度和叶片瞬时水分利用效率为甜瓜苗期氮钾双高效品种(系)的筛选指标。综合分析D值聚类分析结果, 最终确立TS-16、TS-19、阳春白雪、酥蜜、酥蜜三号、冰美人128是甜瓜氮钾双高效型品种(系)。【结论】综合分析了氮高效、钾高效、氮钾双高效筛选结果, 确定了筛选结果的准确性和可行性, 为甜瓜养分逆境栽培及育种提供科学依据。

**关键词:**甜瓜; 氮钾双高效; 筛选指标; 综合评价

中图分类号:S652

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2023)11-2340-19

## Screening and comprehensive evaluation of nitrogen-potassium efficient resources of melon

KANG Liyun, LI Xiaohui, GAO Ningning, WANG Huiying, LIANG Shen, CHANG Gaozheng, LI Hailun, XU Xiaoli, ZHAO Weixing\*

(Institute of Horticulture, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract:** 【Objective】 Nitrogen and potassium affect the growth, yield and quality of crops, and potassium is known as the “quality element”. In order to solve the problems of wasted resources and soil degradation caused by high water and fertilization, the research on “fertilizer reduction and efficiency enhancement” has been launched. As a nitrogen and potassium-loving crop, melon (*Cucumis melo* L.) is an important crop in the improvement of the efficiency of nitrogen and potassium utilization by tapping its own nitrogen and potassium absorption and utilization potential and by screening and cultivating nitrogen-potassium efficient varieties. The study aimed to investigate the genetic differences of the different melon germplasm resources with the efficiency of nitrogen and potassium, establish the evaluation system of the efficiency of nitrogen and potassium in melon seedlings, screen the germplasm resources with high efficiency of nitrogen and potassium, and provide theoretical basis for melon nitrogen and potassium gene mining and new variety selection. 【Methods】 The 72 thin-skin melon varieties (lines) were grown in cavity tray substrates with normal nitrogen and potassium supply (CK, N 4.88 mmol·L<sup>-1</sup>, K<sub>2</sub>O 2.50 mmol·L<sup>-1</sup>), low nitrogen (LN, N 0.01 mmol·L<sup>-1</sup>), low potassium (LK, K<sub>2</sub>O 0.01 mmol·L<sup>-1</sup>), and low nitrogen and potassium (LNK, N 0.01 mmol·L<sup>-1</sup>, K<sub>2</sub>O 0.01 mmol·L<sup>-1</sup>). The net photosynthetic rate, transpiration rate, intercellular CO<sub>2</sub> concentration, stomatal conductance, saturated vapor pressure

收稿日期:2023-05-15 接受日期:2023-08-03

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25);河南省西甜瓜产业技术体系建设项目(HARS-22-10-G1);河南省农业良种攻关项目(2022010503);河南省农业科学院自主创新项目(2023ZC033);河南省重大科技专项(221100110400)

作者简介:康利允,女,助理研究员,博士,主要从事西甜瓜土壤、营养生理研究。Tel:15890676887,E-mail:kangliyun2004@126.com

\*通信作者 Author for correspondence. Tel:13526790578,E-mail:wzxhao2008@163.com

difference, instantaneous water use efficiency, plant height, stem thickness, leaf area, root volume, root fresh weight, aboveground fresh weight, root dry weight, aboveground dry weight, root to crown ratio, nitrogen content, potassium content, nitrogen accumulation, potassium accumulation, nitrogen use efficiency, potassium use efficiency, nitrogen use index, and potassium use index were collected from the 72 melon varieties (lines). The coefficients of variation, low N tolerance index, low K tolerance index and low N and K tolerance index were calculated for each trait. The correlation analysis, principal component analysis and cluster analysis were conducted using the integrated affiliation function method to comprehensively analyze and evaluate the nitrogen and potassium efficiency types of the different melon varieties (lines). **【Results】** The net photosynthetic rate, instantaneous water use efficiency, plant height, stem thickness, leaf area, aboveground fresh weight, root dry weight, aboveground dry weight, potassium content, nitrogen and potassium accumulation, nitrogen use index were all significantly lower in the low nitrogen, low potassium, and low nitrogen-potassium treatments than those in the normal nitrogen-potassium treatment. The transpiration rate, stomatal conductance, root volume, root fresh weight and nitrogen content, were significantly lower in the low nitrogen and low nitrogen-potassium treatments than those in the normal nitrogen-potassium and low potassium treatments. The saturated vapor pressure and nitrogen use efficiency were significantly higher in the low nitrogen and low nitrogen-potassium treatments than those in the normal nitrogen-potassium and low potassium treatments. The intercellular CO<sub>2</sub> concentration was significantly lower in the low potassium treatment than that in the other treatments. The order of the root to crown ratio was low nitrogen > low potassium > normal nitrogen-potassium > low nitrogen-potassium treatments. The potassium utilization efficiency and potassium utilization index of the low normal potassium treatment were significantly higher than those of the other treatments. The variability of the 23 traits of the melon seedlings at different levels of nitrogen and potassium ranged from 9.73% to 56.44%, and the coefficients of variation of all traits were greater than 10% except for the potassium content of the CK treatment. The coefficients of variation of the low nitrogen tolerance index, low potassium tolerance index and low nitrogen and potassium tolerance index for all the 23 traits were over 10%. The principal component analysis was conducted on the low nitrogen tolerance index, low potassium tolerance index and low nitrogen and potassium tolerance index of the 23 traits and the results showed that the cumulative contribution of the six principal components was as high as 84.613%, 85.898% and 85.214%, respectively. The results of the principal component analysis of the low nitrogen tolerance index, low potassium tolerance index and low nitrogen and potassium tolerance index were analyzed together, and the aboveground dry weight, nitrogen accumulation, aboveground fresh weight, K accumulation, stem thickness, potassium utilization efficiency, stomatal conductance, nitrogen content, intercellular CO<sub>2</sub> concentration and instantaneous water utilization efficiency of leaves were finally established as screening indexes for the seedling nitrogen-potassium efficient varieties (lines) of the melon; The D values of the trait indicators determined by the principal component analysis were clustered to classify the 72 melon varieties (lines) into three categories of nitrogen (potassium) efficient, nitrogen (potassium) moderately efficient and nitrogen (potassium) sensitive varieties (lines). The results of D-value cluster analysis of nitrogen efficient, potassium efficient and nitrogen-potassium efficient varieties (lines) were comprehensively analyzed, and finally TS-16, TS-19, Yangchunbaixue, Sumi, Sumi No. 3 and Bingmeiren 128 were established as nitrogen-potassium efficient varieties (lines) of the melon, and Shijixingliangliguazi was a nitrogen and potassium sensitive variety (line). **【Conclusion】** In this experiment, the results of the principal component analysis of the low nitrogen tolerance index, low potassium tolerance index and low nitrogen-potassium tolerance index were ana-

lyzed, and the aboveground dry weight, nitrogen accumulation, aboveground fresh weight, potassium accumulation, stem thickness, potassium utilization efficiency, stomatal conductance, nitrogen content, intercellular CO<sub>2</sub> concentration and instantaneous water utilization efficiency of leaves were finally established as the evaluation indexes of melon seedling nitrogen-potassium efficient varieties (lines), and finally TS-16, TS-19, Yangchunbaixue, Sumi, Sumi No. 3, and Bingmeiren 128 were selected as nitrogen and potassium efficient varieties (lines), and Shijixingliangliguazi was a nitrogen-potassium sensitive variety (line). This study synthesized and analyzed the screening results of the nitrogen efficient, potassium efficient, and nitrogen-potassium efficient. The accuracy and feasibility of the screening results of this experiment were determined to provide scientific basis for melon cultivation under stresses and breeding.

**Key words:** Melon; Nitrogen-potassium efficiency; Screening index; Comprehensive evaluation

氮和钾均是影响作物生长发育、产量和品质形成的必需营养元素<sup>[1]</sup>。彭澎等<sup>[2]</sup>的调研结果显示,陕西设施土壤当季氮、钾施肥量分别高达1485~1893 kg·hm<sup>-2</sup>、1359~1930 kg·hm<sup>-2</sup>,山东分别高达1483~4670 kg·hm<sup>-2</sup>、1454~3623 kg·hm<sup>-2</sup>,河北分别高达1033~3297 kg·hm<sup>-2</sup>、512~1746 kg·hm<sup>-2</sup>。张艳霞等<sup>[3]</sup>的调研结果也表明,陕西设施土壤速效钾含量高达273~422 mg·kg<sup>-1</sup>,是当地大田土壤的1.48~2.00倍,位于极高水平。而甜瓜氮肥利用率仅有16%~36%<sup>[4]</sup>,钾肥利用率仅有15%~34%<sup>[5]</sup>,过量施用氮肥和钾肥不仅引起资源浪费,生产成本增加,还会影响作物对其他营养元素如铁、钙、镁的吸收<sup>[6-7]</sup>,提高土壤资源退化及环境污染的概率<sup>[8]</sup>。因此,利用甜瓜遗传多样性,筛选甜瓜氮钾双高效品种是提高甜瓜生产中氮、钾肥高效利用率最有效的方法。

诸多研究证明,作物的氮效率<sup>[9]</sup>和钾效率<sup>[10]</sup>存在较大的基因型差异。赵春波等<sup>[11]</sup>研究发现不同黄瓜品种苗期的氮效率差异很大,氮素利用效率差异高达1.81倍,氮素吸收效率差异高达3.11倍。顾焱明等<sup>[12]</sup>研究发现,不同油菜品系材料苗期氮效率的差异主要来源于氮吸收效率,且低氮条件下双高效型油菜在氮吸收累积方面更有优势。李俊杰等<sup>[13]</sup>基于主成分分析和隶属函数法将118份小麦种质资源的氮效率划分为5类,并认为植株干质量、茎叶干质量和根干质量可作为氮效率评价指标。Hu等<sup>[14]</sup>利用主成分分析和隶属函数法对BILs群体的耐低氮能力进行了综合评价,认为品系116、143和157的耐低氮能力最强,并筛选出株高、每穗实粒数、结实率、千粒质量和单株产量这5个性状的相对值,可作为耐低氮能力的综合评价指标。吴萍等<sup>[15]</sup>的研究表明,在低钾条件下,钾高效型西瓜品种能吸收积累较多

的钾素,对低钾环境适应性更强。李新峥等<sup>[16]</sup>的研究认为,在正常供钾和低钾处理下,不同种质资源南瓜苗期地上部鲜质量、根系钾积累量差异明显,可作为南瓜苗期钾高效品种筛选、评价指标。氮高效、钾高效作物既能对氮素、钾素有较高的吸收利用能力,还能平衡源库关系,使作物花后亦能保持较高的碳水化合物和干物质生产,从而形成高产<sup>[17]</sup>。

以上研究多为氮效率或钾效率筛选,关于氮钾双高效方面的研究却鲜见报道。笔者在本研究中以72个甜瓜品种(系)为试验材料,利用穴盘基质栽培方法研究不同供氮钾条件下不同甜瓜品种(系)苗期叶片光合性能、农艺性状、氮素和钾素吸收利用差异等指标,采用主成分分析和隶属函数法筛选出氮钾双高效甜瓜种质资源,为提高甜瓜氮肥、钾肥利用效率和培育氮钾双高效甜瓜新品种提供理论依据和基础材料。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料

供试的72个甜瓜品种(系)由河南省农业科学院园艺研究所提供(表1)。

### 1.2 试验设计

试验于2022年3—4月在河南省农业科学院温室进行。采用穴盘基质栽培,培养基质为草炭:蛭石=3:1。设正常供氮钾(对照, N 4.88 mmol·L<sup>-1</sup>、K<sub>2</sub>O 2.50 mmol·L<sup>-1</sup>)、低氮(LN, N 0.01 mmol·L<sup>-1</sup>)、低钾(LK, K<sub>2</sub>O 0.01 mmol·L<sup>-1</sup>)、氮钾双低(LNK, N 0.01 mmol·L<sup>-1</sup>、K<sub>2</sub>O 0.01 mmol·L<sup>-1</sup>)4个处理。挑选籽粒饱满、均匀一致的种子直播于32孔穴盘中,每处理播半盘(16孔),3次重复,待子叶完全展开后,浇pH为6.0的营养液,每个处理的营养液除氮、钾素

表1 供试甜瓜品种(系)的编号及名称  
Table 1 Number and name of the tested melon varieties (lines)

编号 Code	品种(系) Variety(line)	编号 Code	品种(系) Variety(line)	编号 Code	品种(系) Variety(line)	编号 Code	品种(系) Variety(line)
1	15-117	19	A40	37	TS-16	55	彩虹九号 Caihong No. 9
2	15-118	20	A43	38	TS-17	56	世纪星靓丽瓜姿 Shijixingliangliguazi
3	15-134	21	A45	39	TS-18	57	世纪星羊角酥 Shijixingyangjiaosu
4	15-135	22	A68	40	TS-19	58	阳春白雪 Yangchunbaixue
5	15-136	23	TS-1	41	TS-20	59	水糖绿宝 Shuitanglǔbao
6	15-142	24	TS-2	42	15-132	60	青玉3号 Qingyu No. 3
7	15-143	25	TS-3	43	豫甜金玉 Yutianjinyu	61	金酥二号 Jinsu No. 2
8	15-145	26	TS-4	44	青秀2号 Qingxiu No. 2	62	酥蜜 Sumi
9	15-146	27	TS-5	45	青秀1号 Qingxiu No. 1	63	神雪 Shenxue
10	15-154	28	TS-6	46	天佑甜宝 Tianyoutianbao	64	酥蜜三号 Sumi No. 3
11	15-155	29	TS-7	47	天佑翠宝 Tianyoucuibao	65	脆蜜 518 Cuimi 518
12	15-157	30	TS-8	48	金玲 Jinling	66	清甜 18 Qingtian 18
13	15-158	31	TS-9	49	绿宝石二号 Lübaoshi No. 2	67	冰美人 128 Bingmeiren 128
14	15-164	32	TS-10	50	加长9号 Jiachang No. 9	68	白露 Bailu
15	15-167	33	TS-11	51	菊城9号 Jucheng No. 9	69	花魁 Huakui
16	15-170	34	TS-12	52	菊城622 Jucheng 622	70	洛克 18 Luoke 18
17	15-171	35	TS-13	53	小黑妮 Xiaoheini	71	超凡 20 Chaofan 20
18	马泡瓜 Mapaogua	36	TS-14	54	菊城大九号 Jucheng Big No. 9	72	青蜜 Qingmi

外其他营养元素均相同,营养液由1/2 Hoagland和1/1000 Arnon微量元素组成。第一周用1/4浓度营养液,第二周用1/2浓度营养液,以后均用全量营养液。

### 1.3 测定项目与方法

待植株生长到五叶期(以氮钾双低处理为标准)时,每个重复取10株甜瓜苗分别测定最新完全展开叶净光合速率、蒸腾速率、胞间CO<sub>2</sub>浓度、气孔导度、饱和蒸气压差、叶片瞬时水分利用效率、株高、茎粗、叶面积、根体积、根鲜质量、地上部鲜质量等。将甜瓜苗分成地上部和根系两部分,分别进行105℃杀青30min后,75℃烘至恒质量,分别测量地上部干质量和根干质量。氮含量采用浓硫酸-过氧化氢法消煮、半微量凯氏定氮法测定,钾含量采用浓硫酸-过氧化氢法消煮、火焰光度法测定。

叶片瞬时水分利用效率=净光合速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )/蒸腾速率( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ );

根冠比=根干质量( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ )/地上部干质量( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ );

氮(钾)积累量( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ )=地上部干质量( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ ) $\times$ 地上部氮(钾)含量;

氮(钾)素利用效率/%=地上部干质量( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ )/氮(钾)积累量( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ ) $\times 100$ ;

氮(钾)利用指数=地上部干质量( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ )/地上部氮(钾)含量( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) $\times 100$ ;

胁迫系数/%=(正常供氮(钾)处理参数-低氮(钾)处理参数)/正常供氮(钾)处理参数 $\times 100$ 。

隶属函数值 $u(X_j)=(X_j-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$ 、权重 $w_j=\sum_{j=1}^n p_j$ 、综合氮(钾)效率评价值 $=\sum_{j=1}^n [u(X_j)\times w_j]$ 。

$X_j$ 表示第 $j$ 个筛选指标; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为筛选指标的最大值和最小值; $w_j$ 表示第 $j$ 个筛选指标在所有指标中所占的权重; $p_j$ 表示第 $j$ 个筛选指标的贡献率。

### 1.4 数据处理与分析

数据采用Excel 2007和SPSS 20.0统计分析软件处理,其中,主成分分析采用降维-因子分析法,相关分析采用Pearson法,聚类分析采用系统聚类法。

## 2 结果与分析

### 2.1 甜瓜苗期性状差异

不同氮钾水平对72个甜瓜品种(系)23个性状指标均有不同程度的影响(表2)。从各性状均值在不同氮钾水平下的变化来看,净光合速率、叶片瞬时水分利用效率、株高、茎粗、叶面积、地上部鲜质量、

表 2 不同氮、钾水平下甜瓜品种(系)各性状的差异

Table 2 Differences in traits of melon varieties (lines) under different nitrogen and potassium levels

性状 Traits	处理 Treatment	均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	标准差 Standard deviation	变异系数 CV/%
X1	对照 Control	6.05 a	12.70	1.57	2.44	40.35
	LN	2.19 c	6.80	0.53	1.23	56.28
	LK	5.38 b	12.00	1.67	2.23	41.46
	LNK	2.25 c	5.43	0.50	1.18	52.40
X2	对照 Control	3.43 a	7.07	1.04	1.28	37.29
	LN	2.01 c	4.33	0.74	0.76	38.00
	LK	3.40 a	7.19	1.37	1.28	37.55
	LNK	2.37 b	4.59	0.52	0.86	36.28
X3	对照 Control	147.17 a	288.00	20.67	64.56	43.87
	LN	135.23 a	305.00	16.33	60.45	44.70
	LK	119.84 b	193.33	22.00	46.57	38.86
	LNK	136.25 a	268.67	17.67	60.72	44.57
X4	对照 Control	96.09 a	258.67	23.67	48.40	50.37
	LN	44.68 c	140.67	15.67	20.88	46.74
	LK	86.36 a	177.33	33.00	33.55	38.85
	LNK	54.85 b	136.67	15.00	22.72	41.43
X5	对照 Control	3.87 b	5.60	2.00	0.90	23.17
	LN	4.56 a	6.43	2.93	0.83	18.30
	LK	4.00 b	5.23	2.80	0.55	13.70
	LNK	4.43 a	5.77	3.10	0.68	15.40
X6	对照 Control	1.89 a	6.70	0.93	1.00	53.03
	LN	1.13 c	2.90	0.43	0.48	42.28
	LK	1.68 b	3.77	0.73	0.70	41.61
	LNK	1.03 c	2.80	0.30	0.58	56.44
X7	对照 Control	5.68 a	9.74	2.95	1.61	28.25
	LN	2.73 c	4.96	1.54	0.59	21.65
	LK	4.75 b	8.90	2.24	1.37	28.79
	LNK	2.72 c	4.55	1.50	0.56	20.58
X8	对照 Control	4.36 a	5.96	2.88	0.71	16.23
	LN	2.86 c	3.71	1.89	0.41	14.50
	LK	3.99 b	5.97	2.80	0.71	17.76
	LNK	2.97 c	4.64	1.64	0.52	17.38
X9	对照 Control	10.25 a	20.53	1.72	3.27	31.91
	LN	4.04 c	6.95	2.44	0.85	21.06
	LK	9.27 b	19.58	1.72	3.41	36.83
	LNK	4.24 c	7.14	2.14	1.09	25.62
X10	对照 Control	1.20 a	2.20	0.40	0.40	32.88
	LN	0.57 b	1.25	0.30	0.15	26.54
	LK	1.16 a	2.35	0.55	0.37	32.05
	LNK	0.64 b	1.15	0.30	0.16	25.59

注:同一性状同列数据后不同小写字母表示 0.05 水平差异显著( $p < 0.05$ )。X1. 净光合速率( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ); X2. 蒸腾速率( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ); X3. 胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ); X4. 气孔导度( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ); X5. 饱和蒸气压差(KPa); X6. 叶片瞬时水分利用效率; X7. 株高(cm); X8. 茎粗(mm); X9. 叶面积( $\text{cm}^2$ ); X10. 根体积( $\text{cm}^3$ ); X11. 根鲜质量( $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ ); X12. 地上部鲜质量( $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ ); X13. 根干质量( $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ ); X14. 地上部干质量( $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ ); X15. 根冠比; X16. 氮含量(%); X17. 钾含量(%); X18. 氮积累量( $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ ); X19. 钾积累量( $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ ); X20. 氮素利用效率(%); X21. 钾素利用效率(%); X22. 氮利用指数; X23. 钾利用指数。下同。

Note: Different small letters after the same column of data for the same trait indicate significant differences at the 0.05 level ( $p < 0.05$ ). X1. Net photosynthetic rate ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ); X2. Transpiration rate ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ); X3. Intercellular  $\text{CO}_2$  concentration ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ); X4. Stomatal conductance ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ); X5. Saturated vapor pressure difference (KPa); X6. Leaf instantaneous water use efficiency; X7. Plant height (cm); X8. Stem thickness (mm); X9. Leaf area ( $\text{cm}^2$ ); X10. Root volume ( $\text{cm}^3$ ); X11. Root fresh weight ( $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ ); X12. Aboveground fresh weight ( $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ ); X13. Root dry weight ( $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ ); X14. Aboveground dry weight ( $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ ); X15. Root to crown ratio; X16. Nitrogen content (%); X17. Potassium content (%); X18. Nitrogen accumulation ( $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ ); X19. Potassium accumulation ( $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ ); X20. Nitrogen use efficiency (%); X21. Potassium use efficiency (%); X22. Nitrogen use index; X23. Potassium use index. The same below.

表 2 (续) Table 2 (Continued)

性状 Traits	处理 Treatment	均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	标准差 Standard deviation	变异系数 CV/%
X11	对照 Control	1.11 a	1.95	0.35	0.32	28.64
	LN	0.56 b	0.85	0.30	0.13	23.45
	LK	1.13 a	1.95	0.55	0.30	26.80
	LNK	0.63 b	1.25	0.30	0.17	26.50
X12	对照 Control	3.25 a	6.44	1.58	0.89	27.31
	LN	0.98 c	1.74	0.48	0.27	27.35
	LK	2.80 b	5.06	1.32	0.93	33.39
	LNK	1.14 c	2.12	0.60	0.32	28.17
X13	对照 Control	0.08 a	0.12	0.03	0.02	25.20
	LN	0.04 c	0.09	0.02	0.01	26.07
	LK	0.07 b	0.11	0.03	0.02	26.09
	LNK	0.04 c	0.07	0.03	0.01	23.72
X14	对照 Control	0.51 a	0.97	0.28	0.13	25.38
	LN	0.17 d	0.28	0.09	0.04	24.51
	LK	0.42 b	0.72	0.23	0.12	27.68
	LNK	0.19 c	0.32	0.10	0.05	24.98
X15	对照 Control	0.15 c	0.28	0.07	0.04	22.95
	LN	0.24 a	0.46	0.11	0.07	30.50
	LK	0.17 b	0.36	0.10	0.04	26.40
	LNK	0.05 d	0.12	0.02	0.01	30.80
X16	对照 Control	1.20 a	1.74	0.93	0.14	11.74
	LN	0.84 b	1.24	0.35	0.15	18.08
	LK	1.24 a	1.72	0.85	0.20	16.25
	LNK	0.84 b	1.08	0.64	0.10	11.38
X17	对照 Control	1.78 a	2.15	1.34	0.17	9.73
	LN	1.72 b	2.42	1.18	0.23	13.65
	LK	1.20 d	1.58	0.83	0.17	13.82
	LNK	1.46 c	1.94	0.92	0.20	13.72
X18	对照 Control	0.61 a	1.68	0.30	0.19	31.60
	LN	0.14 c	0.25	0.06	0.03	22.02
	LK	0.53 b	0.94	0.28	0.17	32.44
	LNK	0.16 c	0.26	0.09	0.03	20.79
X19	对照 Control	0.90 a	2.08	0.45	0.27	30.43
	LN	0.29 c	0.54	0.14	0.07	25.74
	LK	0.51 b	0.90	0.26	0.15	29.51
	LNK	0.28 c	0.46	0.14	0.07	24.62
X20	对照 Control	84.09 b	108.08	57.47	9.40	11.18
	LN	123.09 a	288.17	80.65	28.78	23.38
	LK	82.64 b	117.88	58.22	13.75	16.64
	LNK	121.06 a	155.37	92.59	13.45	11.11
X21	对照 Control	56.87 c	74.42	46.51	5.92	10.41
	LN	59.34 c	84.79	41.32	8.52	14.36
	LK	84.81 a	119.97	63.09	12.41	14.64
	LNK	70.00 b	108.49	51.55	9.94	14.20
X22	对照 Control	42.49 a	69.24	21.83	11.55	27.19
	LN	20.87 d	49.85	8.82	8.27	39.62
	LK	35.05 b	59.47	14.72	10.98	31.34
	LNK	23.78 c	49.84	10.56	7.89	33.19
X23	对照 Control	28.47 b	44.91	16.37	7.15	25.12
	LN	9.88 d	17.89	5.02	2.94	29.71
	LK	36.15 a	73.64	16.88	12.42	34.36
	LNK	13.63 c	22.61	6.62	4.11	30.15

根干质量、地上部干质量、钾含量、氮和钾积累量、氮利用指数等 12 个性状指标均表现为低氮、低钾、氮钾双低处理显著低于对照,表明单一氮素、钾素钾供应不足或氮钾素均供应不足对甜瓜苗期上述性状抑制效果显著;蒸腾速率、气孔导度、根体积、根鲜质量、氮含量等 5 个性状指标均表现为低氮和氮钾双低处理显著低于对照和低钾处理,且对照和低钾处理差异均不显著,表明单一氮素供应不足或氮钾素均供应不足对上述 5 个性状抑制效果显著;饱和蒸气压和氮素利用效率均表现为低氮和氮钾双低处理显著高于对照和低钾处理,表明氮素供应不足或氮素和钾素均供应不足时反而促进饱和蒸气压和氮素利用效率的升高;胞间 CO<sub>2</sub> 浓度为低钾处理显著低于其他处理,表明仅有钾素供应不足时才会影响胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的产生;根冠比为低氮 > 低钾 > 对照 > 氮钾双低,表明氮或钾供应不足时根冠比会受到明显抑制,氮素和钾素均供应不足反而促进根冠比的升高;钾素利用效率和钾利用指数为低钾显著高于

其他处理,表明钾素供应不足对钾素利用效率和钾利用指数抑制效果更为显著。

不同氮钾水平下,甜瓜苗期的 23 个性状指标在品种(系)间的变异幅度均较大,为 9.73%~56.44%,除对照处理钾含量的变异系数小于 10%外,其他性状指标在不同氮钾水平下变异系数均大于 10%,说明不同甜瓜品种(系)的各性状对氮肥、钾肥处理较为敏感,具有显著的耐低氮、耐低钾遗传差异性,且难以采用单一性状来判断甜瓜品种(系)的耐低氮、钾能力,这为耐低氮甜瓜品种(系)的筛选提供了基础。

## 2.2 甜瓜苗期性状的耐低氮、耐低钾、低氮钾双耐指数

由甜瓜不同品种(系)各性状的耐低氮、耐低钾、低氮钾双耐指数可知(表 3),耐低氮指数均值最高的为根冠比,达 1.65,最低的为氮积累量,仅为 0.24;耐低钾指数均值最高的为钾素利用效率,达 1.50,最低的为钾积累量,仅为 0.61;低氮钾双耐指数均值最高的为氮素利用效率,达 1.45,最低的为氮积累量,

表 3 甜瓜不同品种(系)各性状耐低氮、耐低钾、低氮钾双耐指数的分布

Table 3 Distribution of low nitrogen index (LNI), low potassium index (LKI) and low nitrogen-potassium tolerance index (LNKI) of different melon varieties (lines)

性状 Traits	处理 Treatment	均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	标准差 Standard deviation	变异系数 CV/%
X1	LNI	0.42	1.66	0.07	0.30	72.31
	LKI	1.00	3.33	0.22	0.53	52.46
	LNKI	0.42	1.65	0.10	0.28	65.85
X2	LNI	0.65	1.50	0.23	0.32	48.73
	LKI	1.06	2.58	0.36	0.41	38.37
	LNKI	0.75	1.64	0.17	0.31	41.62
X3	LNI	1.02	3.07	0.26	0.53	51.77
	LKI	0.89	2.37	0.19	0.41	46.36
	LNKI	1.08	3.55	0.21	0.66	61.37
X4	LNI	0.59	1.92	0.11	0.40	68.54
	LKI	1.08	3.68	0.24	0.62	57.45
	LNKI	0.70	2.05	0.14	0.42	59.46
X5	LNI	1.21	1.73	0.85	0.22	18.29
	LKI	1.07	1.60	0.75	0.19	17.35
	LNKI	1.19	1.12	1.48	0.25	20.73
X6	LNI	0.66	1.55	0.12	0.28	42.35
	LKI	0.94	1.57	0.27	0.25	27.02
	LNKI	0.58	1.26	0.15	0.26	44.35
X7	LNI	0.50	0.87	0.30	0.13	26.34
	LKI	0.86	1.82	0.57	0.24	27.84
	LNKI	0.50	0.70	0.31	0.10	19.59

注:LNI. 耐低氮指数;LKI. 耐低钾指数;LNKI. 低氮钾双耐指数。下同。

Note: LNI. Low nitrogen index. LKI. Low potassium index. LNKI. Low nitrogen-potassium tolerance index. The same below.

表 3 (续) Table 3 (Continued)

性状 Traits	处理 Treatment	均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	标准差 Standard deviation	变异系数 CV/%
X8	LNI	0.66	0.93	0.47	0.09	14.22
	LKI	0.92	1.27	0.70	0.13	13.83
	LNKI	0.69	0.98	0.49	0.11	15.48
X9	LNI	0.45	2.64	0.20	0.30	66.16
	LKI	0.93	1.82	0.52	0.29	30.54
	LNKI	0.48	2.66	0.22	0.32	67.69
X10	LNI	0.51	1.00	0.23	0.19	36.15
	LKI	1.05	3.00	0.41	0.45	43.04
	LNKI	0.59	1.88	0.21	0.27	46.05
X11	LNI	0.55	1.10	0.21	0.19	35.59
	LKI	1.09	3.29	0.46	0.43	39.23
	LNKI	0.63	2.29	0.20	0.31	49.03
X12	LNI	0.32	0.71	0.11	0.13	38.83
	LKI	0.89	1.64	0.34	0.30	33.17
	LNKI	0.37	0.66	0.16	0.12	33.38
X13	LNI	0.55	2.22	0.27	0.26	48.13
	LKI	0.98	3.35	0.33	0.41	42.06
	LNKI	0.60	1.83	0.27	0.25	41.69
X14	LNI	0.35	0.80	0.14	0.12	35.02
	LKI	0.87	1.42	0.45	0.24	27.90
	LNKI	0.40	0.70	0.19	0.12	29.78
X15	LNI	1.65	3.19	0.56	0.58	35.02
	LKI	1.17	4.55	0.43	0.51	43.40
	LNKI	0.31	0.88	0.12	0.12	38.33
X16	LNI	0.71	1.16	0.30	0.15	20.57
	LKI	1.04	1.55	0.68	0.18	17.10
	LNKI	0.70	0.88	0.49	0.09	12.85
X17	LNI	0.97	1.36	0.62	0.14	13.91
	LKI	0.68	1.03	0.39	0.12	16.90
	LNKI	0.83	1.32	0.55	0.13	16.03
X18	LNI	0.24	0.55	0.06	0.08	33.50
	LKI	0.90	1.93	0.45	0.31	34.02
	LNKI	0.27	0.49	0.14	0.07	27.06
X19	LNI	0.34	1.08	0.12	0.14	41.24
	LKI	0.61	1.26	0.22	0.24	39.29
	LNKI	0.33	0.70	0.13	0.12	34.86
X20	LNI	1.48	3.28	0.86	0.36	24.15
	LKI	0.99	1.48	0.64	0.17	16.89
	LNKI	1.45	2.04	1.14	0.20	13.49
X21	LNI	1.05	1.61	0.74	0.15	14.23
	LKI	1.50	2.57	0.97	0.25	16.71
	LNKI	1.24	1.83	0.76	0.19	15.43
X22	LNI	0.53	1.17	0.16	0.25	46.86
	LKI	0.86	1.54	0.36	0.27	31.86
	LNKI	0.59	1.35	0.26	0.23	38.37
X23	LNI	0.37	0.82	0.15	0.14	38.04
	LKI	1.29	2.25	0.59	0.35	26.88
	LNKI	0.50	1.03	0.23	0.17	34.88



仅为0.27。由表3还可知,23个性状的耐低氮、耐低钾、低氮钾双耐指数的变异系数均高于10%,且净光合速率、蒸腾速率、胞间CO<sub>2</sub>浓度、气孔导度、叶面积、根体积、根鲜质量、地上部鲜质量、根干质量、钾积累量、氮利用指数的耐低氮、耐低钾、低氮钾双耐指数的变异系数均高于30%,说明各性状对低氮、低钾、低氮钾双耐处理均敏感。

### 2.3 甜瓜苗期低氮钾双耐指数间的相关性分析

不同甜瓜品种(系)耐低氮指数相关分析结果(表4)表明,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、钾含量任何2个指标之间均呈显著或极显著正相关,相关系数0.241~0.907;株高、茎粗、地上部鲜质量、根干质量、地上部干质量、氮积累量、钾积累量、氮利用指数、钾利用指数任何2个指标之间均呈显著或极显著正相关,相关系数0.260~0.877;饱和蒸气压差与净光合速率、蒸腾速率、胞间CO<sub>2</sub>浓度、气孔导度、叶片瞬时水分利用效率、根鲜质量、氮含量、钾含量之间均呈显著或极显著负相关,相关系数-0.666~-0.233。

不同甜瓜品种(系)耐低钾指数相关分析结果(表5)表明,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、茎粗、根体积任何2个指标之间均呈显著或极显著正相关,相关系数0.238~0.914;叶面积、地上部鲜质量、地上部干质量、根干质量、钾含量、氮积累量、钾积累量任何2个指标之间均呈显著或极显著正相关,相关系数0.258~0.857;氮利用指数、钾利用指数分别与地上部鲜质量、地上部干质量、钾含量、氮积累量、钾积累量之间呈极显著正相关,相关系数0.437~0.840;饱和蒸气压差与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度之间均呈极显著负相关,相关系数-0.678~-0.487。

不同甜瓜品种(系)低氮钾双耐指数相关分析结果(表6)表明,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度任何2个指标之间均呈显著或极显著正相关,相关系数0.447~0.901;株高、茎粗、地上部鲜质量、根干质量、地上部干质量、氮积累量、钾积累量、氮利用指数、钾利用指数任何2个指标之间均呈显著或极显著正相关,相关系数0.290~0.935;饱和蒸气压差与净光合速率、蒸腾速率、胞间CO<sub>2</sub>浓度、气孔导度之间均呈极显著负相关,相关系数-0.620~-0.332。

### 2.4 主成分分析

从不同氮钾水平下23个性状的相关性可见,这

些性状间存在大量信息重叠,为消除影响,对不同氮钾水平下72个甜瓜品种(系)的23个性状指标的耐低氮、耐低钾、低氮钾双耐指数进行主成分分析,并确定主要筛选指标。由表7可知,耐低氮指数、耐低钾指数、低氮钾双耐指数主成分分析均提取了6个主成分,前6个主成分的累计贡献率分别高达84.613%、85.898%和85.214%,可反映原始数据信息的84.613%、85.898%和85.214%。耐低氮指数的第一主成分贡献率30.627%,主要由地上部干质量、氮积累量、氮利用指数、地上部鲜质量、钾积累量、钾利用指数、株高、茎粗决定;第二主成分贡献率22.350%,主要由钾含量、钾素利用效率、气孔导度、氮含量和饱和蒸气压差决定;第三主成分贡献率9.634%,主要由胞间CO<sub>2</sub>浓度决定;第四主成分贡献率8.122%,主要由叶片瞬时水分利用效率和净光合速率决定;第五主成分贡献率7.599%,主要由根冠比和根体积决定;第六主成分贡献率6.281%,主要由叶面积和根鲜质量决定。

耐低钾指数的第一主成分贡献率32.759%,主要由地上部鲜质量、氮积累量、钾积累量、地上部干质量、株高和茎粗决定;第二主成分贡献率16.850%,主要由气孔导度、净光合速率和根冠比决定;第三主成分贡献率14.660%,主要由氮含量和氮素利用效率决定;第四主成分贡献率9.988%,主要由叶片瞬时水分利用效率和胞间CO<sub>2</sub>浓度决定;第五主成分贡献率6.781%,主要由根干质量决定;第六主成分贡献率4.859%,主要由钾素利用效率和钾含量决定。

低氮钾双耐指数的第一主成分贡献率30.266%,主要由地上部干质量、氮利用指数、钾利用指数、氮积累量、地上部鲜质量、钾积累量和茎粗决定;第二主成分贡献率18.430%,主要由钾素利用效率、钾含量、气孔导度和氮含量决定;第三主成分贡献率13.837%,主要由根体积决定;第四主成分贡献率11.210%,主要由蒸腾速率和胞间CO<sub>2</sub>浓度决定;第五主成分贡献率6.679%,主要由叶片瞬时水分利用效率决定;第六主成分贡献率4.793%,主要由饱和蒸气压差决定。

综合分析耐低氮指数和耐低钾指数主成分分析结果,初步确立地上部鲜质量、氮积累量、钾积累量、地上部干质量、株高、茎粗、气孔导度、净光合速率、根冠比、氮含量、叶片瞬时水分利用效率、胞间CO<sub>2</sub>

表 4 耐低氮指数的相关分析  
Table 4 Correlation analysis of low nitrogen tolerance index

指标 Index	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	
X1	1																							
X2	0.541**	1																						
X3	-0.206	0.234*	1																					
X4	0.580**	0.907**	0.907**	1																				
X5	-0.429**	-0.530**	-0.530**	-0.666**	1																			
X6	0.589**	-0.082	-0.082	0.041	-0.269*	1																		
X7	-0.111	-0.007	-0.007	0.073	0.094	-0.132	1																	
X8	0.061	0.086	0.086	0.135	-0.061	0.092	0.596**	1																
X9	0.195	0.048	0.048	0.334**	-0.004	0.086	0.333**	0.291*	1															
X10	0.083	0.151	0.151	0.232	-0.227	0.110	0.067	0.328**	0.161	1														
X11	0.211	0.257*	0.257*	0.326**	-0.260*	0.188	0.111	0.377**	0.184	0.872**	1													
X12	0.078	0.123	0.123	0.214	0.067	-0.037	0.693**	0.721**	0.452**	0.280*	0.360**	1												
X13	0.151	0.097	0.097	0.360**	-0.111	0.072	0.274*	0.244*	0.749**	0.411**	0.468**	0.444**	1											
X14	-0.021	0.021	0.021	0.132	0.179	-0.120	0.760**	0.641**	0.501**	0.186	0.276*	0.804**	0.531**	1										
X15	0.112	0.039	0.039	0.166	-0.267*	0.190	-0.403**	-0.355**	0.188	0.284*	0.289*	-0.296*	0.497**	0.497**	1									
X16	0.258*	0.170	0.170	0.183	-0.233*	0.230	-0.218	-0.174	0.089	0.129	0.122	-0.116	-0.035	-0.035	0.373**	1								
X17	0.241*	0.380**	0.380**	0.492**	-0.349**	-0.047	0.008	0.078	0.394**	0.286*	0.269*	0.085	0.376**	0.376**	0.252*	0.350**	1							
X18	0.122	0.135	0.135	0.258*	0.062	-0.016	0.662**	0.578**	0.593**	0.312**	0.384**	0.799**	0.547**	0.547**	-0.215	0.185	0.287*	1						
X19	0.1	0.176	0.176	0.350**	0.009	-0.122	0.657**	0.575**	0.687**	0.276*	0.339**	0.742**	0.683**	0.683**	-0.203	-0.210	0.454**	0.833**	1					
X20	-0.209	-0.135	-0.135	-0.125	0.132	-0.090	0.161	0.149	-0.092	-0.120	-0.090	0.092	0.023	-0.286*	-0.926**	-0.345**	-0.240*	0.131	1					
X21	-0.226	-0.376**	-0.376**	-0.150**	0.321**	0.075	0.080	-0.009	-0.311**	-0.259*	-0.243*	-0.050	-0.309**	-0.309**	-0.257*	-0.378**	-0.976**	-0.242*	-0.384**	0.369**	1			
X22	-0.108	-0.052	-0.052	0.034	0.180	-0.113	0.645**	0.554**	0.311	0.061	0.152	0.627**	0.389**	0.389**	-0.429**	-0.720**	-0.147	0.472**	0.705**	0.698**	0.210	1		
X23	-0.144	-0.148	-0.148	-0.109	0.289*	-0.092	0.740**	0.600**	0.244*	0.042	0.116	0.679**	0.260*	0.260*	-0.532**	-0.503**	-0.360**	0.612**	0.617**	0.422**	0.427**	0.877**	1	

表 5 耐低钾指数的相关分析  
Table 5 Correlation analysis of low potassium tolerance index

指标 Index	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	
X1	1																							
X2	0.685**	1																						
X3	-0.128	0.283*	1																					
X4	0.638**	0.914**	0.374**	1																				
X5	-0.429**	-0.495**	-0.487**	-0.678**	1																			
X6	0.587**	-0.067	-0.493**	-0.023	-0.151	1																		
X7	0.138	0.130	-0.111	-0.012	0.408**	-0.039	1																	
X8	0.270*	0.301*	0.102	0.281*	-0.060	-0.017	-0.039	1																
X9	0.112	0.075	-0.147	-0.041	0.350**	-0.030	-0.030	-0.030	1															
X10	0.557**	0.371**	0.019	0.342**	-0.151	0.238*	0.238*	0.238*	0.193	1														
X11	0.516**	0.452**	-0.061	0.446**	-0.104	0.188	0.188	0.188	0.124	0.827**	1													
X12	0.217	0.188	-0.124	0.121	0.240*	0.059	0.059	0.059	0.457**	0.351**	0.426**	1												
X13	0.248*	0.183	0.009	0.319**	-0.014	0.107	0.107	0.107	0.258*	0.509**	0.641**	0.559**	1											
X14	0.136	0.184	-0.060	0.081	0.240*	-0.024	-0.024	-0.024	0.373**	0.371**	0.349**	0.823**	0.410**	1										
X15	0.128	0.023	0.017	0.230	-0.131	0.126	0.126	0.126	0.027	0.220	0.387**	0.069	0.755**	-0.258*	1									
X16	0.214	0.081	-0.188	0.058	0.078	0.135	0.135	0.135	0.425**	0.239*	0.222	0.241*	0.263*	-0.033	0.311**	1								
X17	-0.026	0.129	0.019	0.088	0.222	-0.185	-0.185	-0.185	0.349**	0.071	0.271*	0.525**	0.447**	0.329**	0.274*	0.312**	1							
X18	0.226	0.200	-0.150	0.085	0.281*	0.042	0.042	0.042	0.558**	0.437**	0.402**	0.855**	0.474**	0.852**	-0.081	0.477**	0.839**	1						
X19	0.066	0.178	-0.023	0.072	0.299*	-0.136	-0.136	-0.136	0.490**	0.307**	0.363**	0.857**	0.488**	0.890**	-0.089	0.123	0.839**	0.839**	1					
X20	-0.203	-0.087	0.161	-0.071	-0.051	-0.118	-0.118	-0.118	-0.388**	-0.252*	-0.240*	-0.238**	-0.247*	0.032	-0.294*	-0.976**	-0.465**	-0.465**	-0.103	1				
X21	0.031	-0.128	-0.048	-0.088	-0.170	0.187	0.187	0.187	-0.278*	-0.108	-0.279*	-0.495**	-0.387**	-0.337**	-0.199	-0.261*	-0.405**	-0.405**	-0.654**	0.206	1			
X22	0.000	0.107	0.044	0.041	0.144	-0.085	-0.085	-0.085	0.082	0.179	0.171	0.532**	0.214	0.840**	-0.363**	-0.544**	0.437**	0.437**	0.674**	0.553**	-0.182	1		
X23	0.133	0.066	-0.088	0.012	0.102	0.095	0.095	0.095	0.197	0.299*	0.166	0.546**	0.204	0.807**	-0.363**	-0.192	0.607**	0.607**	0.517**	0.155	0.229	0.746**	1	

注: \*表示显著相关, \*\*表示极显著相关。下同。

Note: \* indicates significant correlation, \*\* indicates extremely significant correlation. The same below.

表 6 低氮钾双耐指数的相关分析  
Table 6 Correlation analysis of low nitrogen-potassium tolerance index

指标 Index	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	
X1	1.000																							
X2	0.447**	1.000																						
X3	-0.164	0.262*	1.000																					
X4	0.556**	0.901**	0.350**	1.000																				
X5	-0.332**	-0.436**	-0.585**	-0.620**	1.000																			
X6	0.631**	-0.190	-0.317**	-0.062	-0.124	1.000																		
X7	-0.028	0.076	-0.032	0.037	0.072	-0.006	1.000																	
X8	0.062	-0.044	0.031	0.083	0.023	0.074	0.477**	1.000																
X9	-0.530	-0.021	0.012	0.126	-0.011	-0.045	0.398**	0.166	1.000															
X10	0.392**	0.023	-0.045	0.188	-0.114	0.344**	0.096	0.409**	-0.019	1.000														
X11	0.374**	0.103	-0.034	0.285*	-0.071	0.234*	0.178	0.478**	0.083	0.923**	1.000													
X12	0.038	-0.085	-0.194	-0.032	0.121	0.144	0.675**	0.603**	0.315**	0.300*	0.321**	1.000												
X13	0.224	-0.028	-0.061	0.185	0.023	0.174	0.290*	0.403**	0.583**	0.613**	0.688**	0.322**	1.000											
X14	-0.078	-0.155	-0.029	-0.117	0.138	0.092	0.513**	0.663**	0.351**	0.344**	0.352**	0.766**	0.429**	1.000										
X15	0.332**	0.132	0.010	0.322**	-0.111	0.141	-0.102	-0.022	0.209	0.467**	0.526**	-0.215	0.666**	-0.335**	1.000									
X16	0.182	-0.015	-0.049	0.108	-0.100	0.130	0.154	-0.303**	0.097	-0.096	-0.039	-0.244*	0.019	-0.437**	0.374**	1.000								
X17	0.115	0.321**	0.082	0.318**	-0.045	-0.071	0.323**	-0.067	0.196	-0.231	-0.081	-0.042	0.042	-0.058	0.075	0.503**	1.000							
X18	0.020	-0.204	-0.118	-0.099	0.129	0.205	0.657**	0.575**	0.469**	0.312**	0.347**	0.742**	0.475**	0.883**	-0.207	0.012	0.181	1.000						
X19	-0.012	0.070	0.021	0.114	0.054	0.026	0.625**	0.568**	0.479**	0.152	0.243*	0.661**	0.393**	0.845**	-0.260*	-0.167	0.422**	0.849**	1.000					
X20	-0.149	0.050	0.076	-0.060	0.070	-0.133	-0.155	0.320**	-0.091	0.138	0.090	0.235*	0.024	0.440**	-0.322**	-0.987**	-0.484**	-0.018	0.178	1.000				
X21	-0.120	-0.307**	-0.114	-0.311**	0.088	0.051	-0.263*	0.057	-0.216	0.226	0.095	0.038	-0.037	0.054	-0.073	-0.513**	-0.972**	-0.188	-0.419**	0.493**	1.000			
X22	-0.112	-0.070	0.060	-0.082	0.102	-0.004	0.334**	0.636**	0.210	0.342**	0.330**	0.669**	0.351**	0.935**	-0.354**	-0.693**	-0.217	0.663**	0.716**	0.712**	0.215	1.000		
X23	-0.140	-0.221	-0.044	-0.200	0.146	0.052	0.343**	0.614**	0.207	0.399**	0.350**	0.670**	0.351**	0.892**	-0.325**	-0.621**	-0.455**	0.662**	0.573**	0.623**	0.465**	0.925**	1.000	



浓度和钾素利用效率这 13 个性状指标既是甜瓜苗期氮高效又是钾高效品种(系)的筛选指标,结合低氮钾双耐指数主成分分析结果,最终确立地上部干质量、氮积累量、地上部鲜质量、钾积累量、茎粗、钾素利用效率、气孔导度、氮含量、胞间 CO<sub>2</sub>浓度和叶片瞬时水分利用效率这 10 个性状指标是甜瓜苗期氮钾双高效品种(系)的筛选指标。

### 2.5 聚类分析

以主成分决定的 6 个主成分的隶属函数值作为新指标进行聚类分析。由耐低氮指数主成分分析决定的地上部干质量、氮积累量、氮利用指数、地上部鲜质量、钾积累量、钾利用指数、株高、茎粗、钾含量、钾素利用效率、气孔导度、氮含量、饱和蒸气压差、胞间 CO<sub>2</sub>浓度、叶片瞬时水分利用效率、净光合速率、根冠比、根体积、叶面积和根鲜质量这 20 个性状指标的综合氮高效 D 值进行聚类分析(图 1),将 72 个甜瓜品种(系)的耐低氮能力分为 3 类, I 类为氮高效型品种(系),有 44 个,包括 15-118、15-134、15-143、15-145、15-146、15-157、15-158、15-164、15-167、15-171、A68、TS-5、TS-7、TS-8、TS-10、TS-11、TS-12、TS-13、TS-14、TS-16、TS-19、TS-20、15-132、豫甜金玉、青秀 2 号、天佑翠宝、金玲、绿宝石二号、加长 9 号、菊城 622、小黑妮、菊城大九号、世纪星羊角酥、阳春白雪、水糖绿宝、青玉 3 号、金酥二号、酥蜜、神雪、酥蜜三号、冰美人 128、白露、超凡 20、青蜜, II 类为氮中效型品种(系),有 9 个,包括 15-135、15-136、15-142、15-170、A40、A45、TS-4、青秀 1 号、天佑甜宝, III 类为氮敏感型品种(系),有 19 个,包括 15-117、15-154、15-155、马泡瓜、A43、TS-1、TS-2、TS-3、TS-6、TS-9、TS-17、TS-18、菊城 9 号、彩虹九号、世纪星靓丽瓜姿、脆蜜 518、清甜 18、花魁、洛克 18。

由耐低钾指数主成分分析决定的地上部鲜质量、氮积累量、钾积累量、地上部干质量、株高、茎粗、气孔导度、净光合速率、根冠比、氮含量、氮素利用效率、叶片瞬时水分利用效率、胞间 CO<sub>2</sub>浓度、根干质量、钾素利用效率和钾含量这 16 个性状指标的综合钾高效 D 值进行聚类分析(图 2),将 72 个甜瓜品种(系)的耐低钾能力分为 3 类。 I 类为钾高效型品种(系),有 24 个,包括 15-117、15-142、15-155、15-170、马泡瓜、A40、TS-1、TS-5、TS-9、TS-14、TS-16、TS-17、TS-18、TS-19、豫甜金玉、青秀 1 号、彩虹九

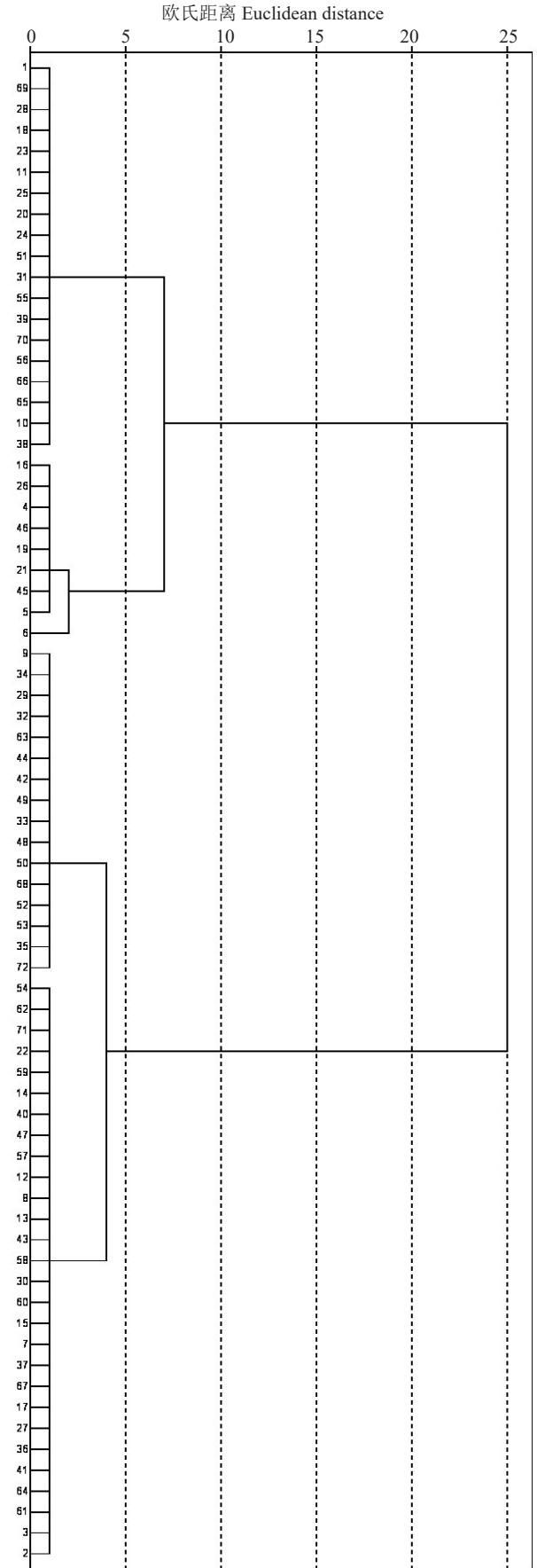


图 1 耐低氮聚类树形图

Fig. 1 Low nitrogen tolerance cluster tree

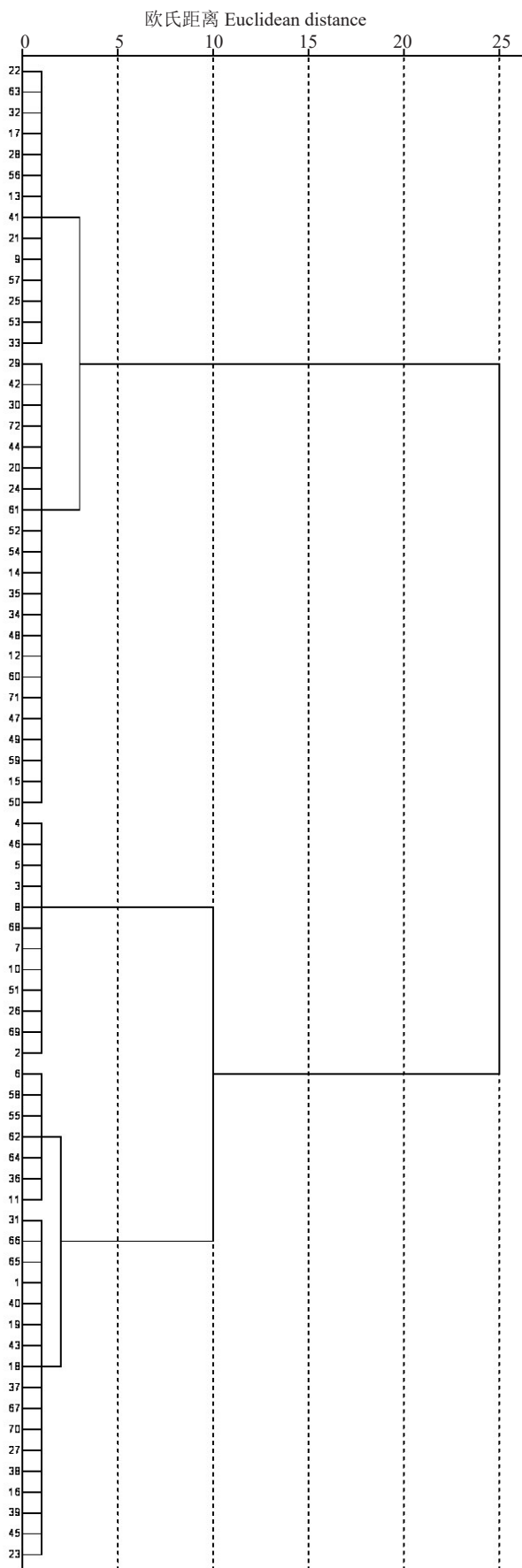


图 2 耐低钾聚类树形图

Fig. 2 Low potassium tolerance cluster tree

号、阳春白雪、酥蜜、酥蜜三号、脆蜜 518、清甜 18、冰美人 128、洛克 18；II 类为钾中效型品种(系)，有 12 个，包括 15-118、15-134、15-135、15-136、15-143、15-145、15-154、TS-4、天佑甜宝、菊城 9 号、白露、花魁；III 类为钾敏感型品种(系)，有 36 个，包括 15-146、15-157、15-158、15-164、15-167、15-171、A43、A45、A68、TS-2、TS-3、TS-6、TS-7、TS-8、TS-10、TS-11、TS-12、TS-13、TS-20、15-132、青秀 2 号、天佑翠宝、金玲、绿宝石二号、加长 9 号、菊城 622、小黑妮、菊城大九号、世纪星靓丽瓜姿、世纪星羊角酥、水糖绿宝、青玉 3 号、金酥二号、神雪、超凡 20、青蜜。

由低氮钾双耐指数主成分分析决定的地上部干质量、氮利用指数、钾利用指数、氮积累量、地上部鲜质量、钾积累量、茎粗、钾素利用效率、钾含量、气孔导度、氮含量、根体积、蒸腾速率、胞间  $\text{CO}_2$  浓度、叶片瞬时水分利用效率和饱和蒸气压差这 16 个性状指标的综合氮钾双高效 D 值进行聚类分析(图 3)，将 72 个甜瓜品种(系)的低氮钾双耐能力分为 3 类，I 类为氮钾双高效型品种(系)，有 34 个，包括 15-118、15-134、15-135、15-146、15-171、A68、TS-3、TS-6、TS-7、TS-10、TS-11、TS-12、TS-13、TS-16、TS-19、15-132、绿宝石二号、加长 9 号、菊城 9 号、菊城 622、小黑妮、菊城大九号、世纪星羊角酥、阳春白雪、水糖绿宝、青玉 3 号、酥蜜、神雪、酥蜜三号、脆蜜 518、冰美人 128、白露、超凡 20、青蜜；II 类为氮钾双中效型品种(系)，有 16 个，包括 15-117、15-143、15-167、A40、A43、TS-2、TS-5、TS-17、TS-18、TS-20、豫甜金玉、青秀 2 号、天佑翠宝、金玲、金酥二号、清甜 18；III 类为氮钾双敏感型品种(系)，有 22 个，包括 15-136、15-142、15-145、15-154、15-155、15-157、15-158、15-164、15-170、马泡瓜、A45、TS-1、TS-4、TS-8、TS-9、TS-14、青秀 1 号、天佑甜宝、彩虹九号、世纪星靓丽瓜姿、花魁、洛克 18。

综合分析氮高效和钾高效 D 值聚类分析结果，初步确立 TS-5、TS-14、TS-16、TS-19、豫甜金玉、阳春白雪、酥蜜、酥蜜三号、冰美人 128 既是氮高效又是钾高效型甜瓜品种(系)，A43、TS-2、TS-3、TS-6、世纪星靓丽瓜姿既是氮敏感型又是钾敏感型甜瓜品种(系)；结合氮钾双高效 D 值聚类分析结果，最终确立 TS-16、TS-19、阳春白雪、酥蜜、酥蜜三号、冰美人 128 是甜瓜氮钾双高效型品种(系)，世纪星靓丽瓜姿为氮钾双敏感型品种(系)。

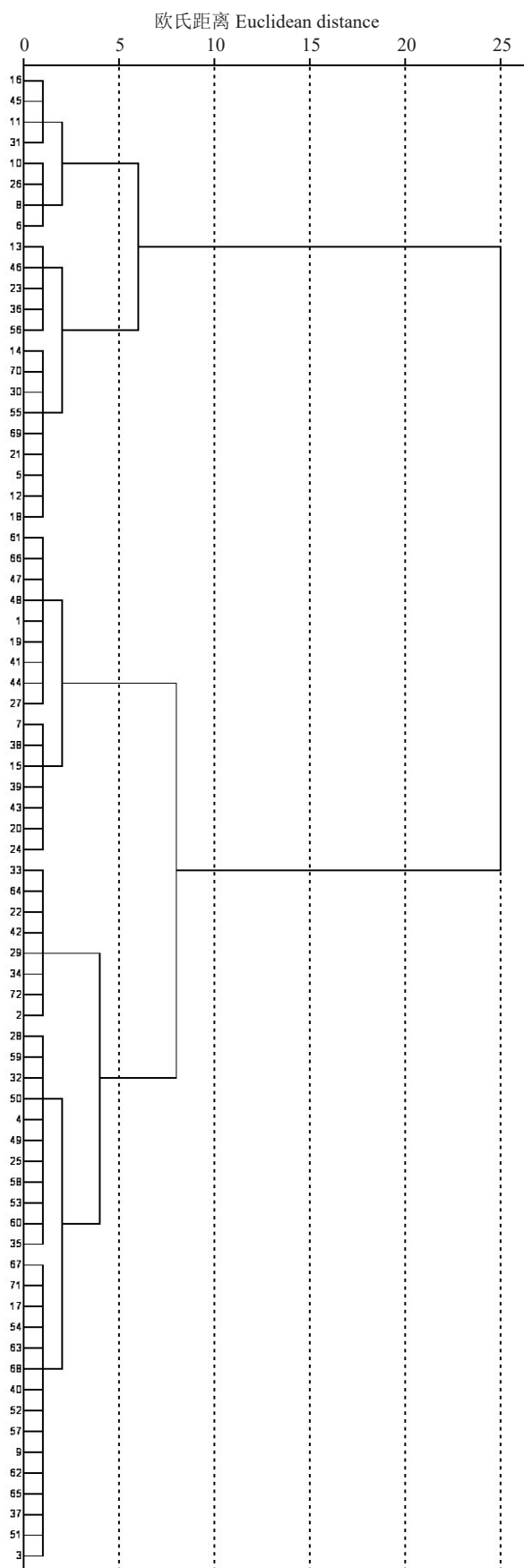


图 3 低氮钾双耐聚类树形图

Fig. 3 Low nitrogen-potassium tolerance cluster tree

### 3 讨论

氮素和钾素影响作物生长、产量和品质的形成<sup>[18]</sup>,且钾素有“品质元素之称”<sup>[19]</sup>。生产中往往过量施用氮肥、钾肥以追求高产优质,为了解决高水肥引起的资源浪费和土壤退化等问题,“减肥增效”的研究热潮持续不断<sup>[20-21]</sup>。甜瓜作为喜氮、钾作物<sup>[22]</sup>,挖掘其自身氮素和钾素的吸收利用潜力,筛选和培育氮高效、钾高效甜瓜品种是提高氮素利用效率和钾素利用效率的重要途径。

#### 3.1 甜瓜苗期光合相关生理指标、农艺性状及氮、钾效率相关性状的差异

苗期是作物生长发育的重要时期,在苗期筛选具有较强的氮素、钾素吸收利用能力的品种对氮效率和钾效率评价和育种具有重要的理论意义<sup>[23-24]</sup>。笔者在本研究中对甜瓜苗期氮效率、钾效率的研究结果显示,不同氮钾水平下,不同甜瓜品种(系)光合性能、农艺性状、氮效率及钾效率存在较大差异,与大豆<sup>[4]</sup>、甘薯<sup>[25]</sup>、水稻<sup>[26]</sup>等苗期研究结果基本一致。试验结果显示,净光合速率、叶片瞬时水分利用效率、株高、茎粗、叶面积、地上部鲜质量、根干质量、地上部干质量、钾含量、氮和钾积累量、氮利用指数等 12 个性状均表现为低氮、低钾、氮钾双低处理显著低于正常供氮钾处理,表明单一氮素、钾素供应不足或氮钾素均供应不足对甜瓜苗期上述性状抑制效果显著;蒸腾速率、气孔导度、根体积、根鲜质量、氮含量等 5 个性状均表现为低氮和氮钾双低处理显著低于正常供氮钾和低钾处理,表明单一氮素供应不足或氮钾素均供应不足对上述性状抑制效果显著;饱和蒸气压和氮素利用效率均表现为低氮和氮钾双低处理显著高于正常供氮钾和低钾处理,表明氮素供应不足或氮钾均供应不足时反而促进饱和蒸气压和氮素利用效率的提高;胞间 CO<sub>2</sub>浓度为低钾处理显著低于其他处理,表明仅有钾素供应不足时才会影响胞间 CO<sub>2</sub>浓度的产生;根冠比为低氮>低钾>对照>氮钾双低,表明单一氮素、钾供应不足时根冠比会受到明显抑制,氮钾均供应不足反而促进根冠比的提高;钾素利用效率和钾利用指数为低钾显著高于其他处理,表明钾素供应不足对钾素利用效率和钾利用指数的抑制效果更为显著。试验结果还表明,甜瓜苗期的 23 个性状指标在品种(系)间的变异幅度均较大,除正常供氮钾处理钾含量外,其他性状



在不同氮钾水平下变异系数均大于10%，表明不同品种间具有显著的耐低氮、耐低钾遗传差异性，且难以采用单一性状来判断甜瓜品种(系)的耐低氮、耐低钾能力，这为氮钾双高效甜瓜品种(系)的筛选提供了可能，与在油菜<sup>[12]</sup>、甘薯<sup>[27]</sup>、山羊草<sup>[28]</sup>中的研究结果相似。

### 3.2 甜瓜苗期氮钾双高效指标的筛选

不同作物对环境胁迫的反应不尽相同，不同研究者不同作物养分高效筛选和评价指标缺乏统一的标准。范文静等<sup>[29]</sup>利用水培试验，利用主成分分析的隶属函数法，发现甘薯叶片数、蔓长、根长、地上干质量、氮积累量、氮素生理利用效率可作为评价耐低氮能力的指标。李新峥等<sup>[16]</sup>的研究结果显示，南瓜苗期地上部鲜质量、根系鲜质量、根冠比、植株钾含量、地上部钾含量、根系钾积累量可作为耐低钾性的鉴定指标。徐顺莉等<sup>[30]</sup>研究发现，干物质积累量、钾含量、钾积累量可作为切花菊耐低钾特性的评价指标。刘明等<sup>[25]</sup>基于主成分分析，认为甘薯苗期根系干物质增加量、地上部干物质增加量、总干物质增加量、根钾积累量、地上部钾积累量、总钾积累量作为评价耐低钾能力的首选指标，钾生理利用效率、根冠比、根钾含量、地上部钾含量可作为次选指标。但目前对作物氮钾双高效筛选的研究相对较少，张宁<sup>[26]</sup>采用水培试验，通过低氮胁迫对8个钾高效水稻品种进行主成分分析和综合评价，将根冠比、根系氮素利用率、茎叶氮素利用率、植株氮素利用率作为氮钾双高效品种筛选的主要指标。笔者在试验中综合分析耐低氮指数、耐低钾指数、低氮钾双耐指数，最终确立地上部干质量、氮积累量、地上部鲜质量、钾积累量、茎粗、钾素利用效率、气孔导度、氮含量、胞间CO<sub>2</sub>浓度和叶片瞬时水分利用效率这10个性状为甜瓜苗期氮钾双高效品种(系)的筛选指标。

### 3.3 甜瓜氮钾双高效类型划分和综合评价

前人大多在已筛选的氮高效品种中再次进行钾高效品种筛选<sup>[26]</sup>，而忽略了单一供氮或供钾不足对作物生长发育、养分吸收能力的影响与氮钾素均供应不足时有明显差异<sup>[31]</sup>，评价指标不全面，可能会导致筛选出的氮钾双高效品种(系)在氮钾素均供应不足时不能综合表现出较高的氮效率和钾效率。试验在主成分分析基础上对获得的氮高效、钾高效、氮钾双高效的隶属函数值进行聚类分析，将72份甜瓜品种(系)氮效率初步划分为氮高效型、氮中效型和氮

敏感型3种品种类型，将钾效率初步划分为钾高效型、钾中效型和钾敏感型品种，将氮钾双高效初步划分为氮钾双高效型、氮钾双中效型和氮钾双敏感型品种。进一步综合分析氮高效和钾高效聚类分析结果，初步确立TS-5、TS-14、TS-16、TS-19、豫甜金玉、阳春白雪、酥蜜、酥蜜三号、冰美人128既是氮高效又是钾高效型甜瓜品种(系)，A43、TS-2、TS-3、TS-6、世纪星靓丽瓜姿既是氮敏感型又是钾敏感型甜瓜品种(系)，再结合氮钾双高效聚类分析结果，最终确立TS-16、TS-19、阳春白雪、酥蜜、酥蜜三号、冰美人128是甜瓜氮钾双高效型品种(系)，世纪星靓丽瓜姿为氮钾双敏感型品种(系)。笔者综合分析了氮高效、钾高效、氮钾双高效筛选结果，确定了本试验筛选结果的准确性和可行性，为甜瓜养分逆境栽培及育种提供了科学依据。

## 4 结论

不同氮钾水平下，不同甜瓜品种(系)光合性能、农艺性状、氮效率及钾效率存在较大差异。笔者在试验中综合分析耐低氮指数、耐低钾指数、低氮钾双耐指数，最终确立地上部干质量、氮积累量、地上部鲜质量、钾积累量、茎粗、钾素利用效率、气孔导度、氮含量、胞间CO<sub>2</sub>浓度和叶片瞬时水分利用效率这10个性状为甜瓜苗期氮钾双高效品种(系)的评价指标，最终筛选出TS-16、TS-19、阳春白雪、酥蜜、酥蜜三号、冰美人128是甜瓜氮钾双高效型品种(系)，世纪星靓丽瓜姿为氮钾双敏感型品种(系)。

### 参考文献 References:

- [1] INKHAM C, PANJAMA K, SEEHANAM P, RUAMRUNGSRI S. Effect of nitrogen, potassium and calcium concentrations on growth, yield and nutritional quality of green oak lettuce[J]. *Acta Horticulturae*, 2021(1312):409-416.
- [2] 彭澎, 梁龙, 李海龙, 赵桂慎. 我国设施农业现状、问题与发展建议[J]. *北方园艺*, 2019(5):161-168.  
PENG Peng, LIANG Long, LI Hailong, ZHAO Guishen. Status, deficiency and development suggestions of protected agriculture in China[J]. *Northern Horticulture*, 2019(5): 161-168.
- [3] 张艳霞, 陈智坤, 胡文友, 孙晓宇, 黄标, 田康. 陕西省设施农业土壤退化现状分析[J]. *土壤*, 2020, 52(3):640-644.  
ZHANG Yanxia, CHEN Zhikun, HU Wenyou, SUN Xiaoyu, HUANG Biao, TIAN Kang. Soil degradation in greenhouse vegetable production systems in Shaanxi[J]. *Soils*, 2020, 52(3):640-644.
- [4] 胡国智, 闫淼, 熊韬, 吴婷. 适宜有机肥氮替代化肥氮比例提高

- 甜瓜养分吸收、产量和品质[J]. 植物营养与肥科学报, 2022, 28(2): 260-268.
- HU Guozhi, YAN Miao, XIONG Tao, WU Ting. Optimum chemical fertilizer N substitution with organic manure N improves nutrient uptake, yield, and quality of muskmelon in Xinjiang[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(2): 260-268.
- [5] 康利允, 李晓慧, 高宁宁, 梁慎, 常高正, 李海伦, 王慧颖, 徐小利, 赵卫星. 钾肥追施时期后移对甜瓜产量和品质及钾肥利用率的影响[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(6): 941-948.
- KANG Liyun, LI Xiaohui, GAO Ningning, LIANG Shen, CHANG Gaozheng, LI Hailun, WANG Huiying, XU Xiaoli, ZHAO Weixing. Effects of postponed the topdressing periods of potassium fertilization on yield & quality and potassium utilization efficiency of muskmelon[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(6): 941-948.
- [6] POURRANJBARI S S, SOURI M K, MOGHADDAM M. Characterization of nutrients uptake and enzymes activity in Khatouni melon (*Cucumis melo* var. *inodorus*) seedlings under different concentrations of nitrogen, potassium and phosphorus of nutrient solution[J]. Journal of Plant Nutrition, 2019, 42(2): 178-185.
- [7] 张春阁, 刘政波, 孙海, 吕林, 张亚玉. 施钾对人参氮、磷、钾、钙、镁含量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2020, 42(1): 77-83.
- ZHANG Chungu, LIU Zhengbo, SUN Hai, LÜ Lin, ZHANG Yayu. Effects of potassium application on nutrient content of N, P, K, Ca and Mg in *Panax ginseng*[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2020, 42(1): 77-83.
- [8] NCIBI K, HADJI R, HAJJI S, BESSER H, HAJLAOUI H, HAMAD A, MOKADEM N, BEN SAAD A, HAMDI M, HAMED Y. Spatial variation of groundwater vulnerability to nitrate pollution under excessive fertilization using index overlay method in central Tunisia (Sidi Bouzid Basin)[J]. Irrigation and Drainage, 2021, 70(5): 1209-1226.
- [9] BASHIR S S, SIDDIQI T O, KUMAR D, AHMAD A. Physio-biochemical, agronomical, and gene expression analysis reveals different responsive approach to low nitrogen in contrasting rice cultivars for nitrogen use efficiency[J]. Molecular Biology Reports, 2023, 50(2): 1575-1593.
- [10] LIU C K, WANG X, TU B J, LI Y S, LIU X B, ZHANG Q Y, HERBERT S J. Dry matter partitioning and K distribution of vegetable soybean genotypes with higher potassium efficiency[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2020, 66(5): 717-729.
- [11] 赵春波, 宋述尧, 赵靖, 张雪梅, 张越, 张松婷. 北方地区不同黄瓜品种氮素吸收与利用效率的差异[J]. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1569-1578.
- ZHAO Chunbo, SONG Shuyao, ZHAO Jing, ZHANG Xuemei, ZHANG Yue, ZHANG Songting. Variation in nitrogen uptake and utilization efficiency of different cucumber varieties in northern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(8): 1569-1578.
- [12] 顾焯明, 韩配配, 胡琼, 李银水, 廖祥生, 张志华, 谢立华, 胡小加, 秦璐, 廖星. 甘蓝型油菜苗期氮效率评价[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(6): 851-860.
- GU Chiming, HAN Peipei, HU Qiong, LI Yinshui, LIAO Xiangsheng, ZHANG Zhihua, XIE Lihua, HU Xiaojia, QIN Lu, LIAO Xing. Nitrogen efficiency evaluation in rapeseed (*Brassica napus* L.) at seedling stage[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(6): 851-860.
- [13] 李俊杰, 杜蒲芳, 石婷瑞, 侯沛佳, 柴新宇, 赵瑞, 汪好, 李红霞. 不同基因型小麦苗期耐低氮性评价及筛选[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(7): 21-32.
- LI Junjie, DU Pufang, SHI Tingrui, HOU Peijia, CHAI Xinyu, ZHAO Rui, WANG Yu, LI Hongxia. Screening and evaluation of low nitrogen tolerance from different genotypes wheat at seedling stage[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(7): 21-32.
- [14] HU B L, LI X, WAN Y, QIU Z, NIE Y Y, XIE J K. Index screening and comprehensive evaluation of phenotypic traits of low nitrogen tolerance using BILs population derived from Dongxiang wild rice (*Oryza rufipogon* Griff) [J]. The Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2346-2352.
- [15] 吴萍, 董亚, 王硕, 董彩霞, 任丽轩, 张勇, 沈其荣. 西瓜营养生长期钾素吸收效率的差异评价及钾高效基因型筛选[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(4): 602-609.
- WU Ping, DONG Ya, WANG Shuo, DONG Caixia, REN Lixuan, ZHANG Yong, SHEN Qirong. Evaluation of potassium absorption efficiency on watermelon in seedling stage and screening of efficient genotypes[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2015, 38(4): 602-609.
- [16] 李新峥, 李道涵, 申长卫, 袁敬平, 刘振威. 不同种质资源南瓜苗期耐低钾性鉴定及筛选[J]. 植物生理学报, 2023, 59(1): 231-245.
- LI Xinzheng, LI Daohan, SHEN Changwei, YUAN Jingping, LIU Zhenwei. Identification and screening of low potassium tolerance of pumpkin seedlings from different germplasm resources[J]. Plant Physiology Journal, 2023, 59(1): 231-245.
- [17] 吴紫薇, 蒲玮, 赵波, 魏桂, 孔凡磊, 袁继超. 不同耐低氮性玉米品种的花后碳氮积累与转运特征[J]. 作物学报, 2021, 47(5): 915-928.
- WU Yawei, PU Wei, ZHAO Bo, WEI Gui, KONG Fanlei, YUAN Jichao. Characteristics of post-anthesis carbon and nitrogen accumulation and translocation in maize cultivars with different low nitrogen tolerance[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(5): 915-928.
- [18] 包振兴, 陈欢, 景裕娜, 齐红岩, 刘义玲. 不同氮钾含量水溶肥对袋培甜瓜果期养分吸收及产量、品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(8): 90-97.
- BAO Zhenxing, CHEN Huan, JING Yuna, QI Hongyan, LIU Yiling. Effects of different nitrogen and potassium contents of water-soluble fertilizer on nutrient uptake, yield and quality of bagged muskmelon fruits[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2019, 32(8): 90-97.
- [19] RAMOS M C, ROMERO M P. Potassium uptake and redistribution in Cabernet Sauvignon and Syrah grape tissues and its rela-

- tionship with grape quality parameters[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(10):3268-3277.
- [20] 安祥瑞, 江尚焘, 李焕苓, 秦献泉, 胡小璇, 陈廷速, 谢昶琰, 徐阳春, 董彩霞, 沈其荣. 减施化肥配施有机肥对荔枝生长、产量品质及肥料利用率的影响[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1174-1184.
- AN Xiangrui, JIANG Shangtao, LI Huanling, QIN Xianquan, HU Xiaoxuan, CHEN Tingsu, XIE Changyan, XU Yangchun, DONG Caixia, SHEN Qirong. Effects of reduced chemical fertilizer with organic fertilizer application on growth, yield, quality and fertilizer utilization rate in *Litchi*[J]. Soils, 2021, 53(6): 1174-1184.
- [21] TIAN X Q, LI Z, LIU Z D, WANG Y F, LI B, ZHANG K P, XU Q W, WANG L C. Combined effect of biochar and nitrogen fertilizer reduction on rapeseed productivity and nitrogen use efficiency[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2022, 68(9): 1159-1174.
- [22] 康利允, 常高正, 高宁宁, 李晓慧, 李海伦, 梁慎, 徐小利, 赵卫星. 不同氮、钾肥施用量对甜瓜养分吸收、分配及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(9):1758-1770.
- KANG Liyun, CHANG Gaozheng, GAO Ningning, LI Xiaohui, LI Hailun, LIANG Shen, XU Xiaoli, ZHAO Weixing. Effects of different nitrogen and potassium fertilizing amount on nutrition absorption, nutrition distribution and yield of muskmelon[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(9): 1758-1770.
- [23] ZHANG H H, FU X Q, WANG X R, GUI H P, DONG Q, PANG N C, WANG Z, ZHANG X L, SONG M Z. Identification and screening of nitrogen-efficient cotton genotypes under low and normal nitrogen environments at the seedling stage[J]. Journal of Cotton Research, 2018, 1(1): 1-11.
- [24] 张艳霞, 赵艳艳, 郭营, 赵岩, 李斯深, 孔凡美. 小麦苗期钾效率相关性状的全基因组关联分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5):699-709.
- ZHANG Yanxia, ZHAO Yanyan, GUO Ying, ZHAO Yan, LI Sishen, KONG Fanmei. Genome-wide association analysis for wheat traits related to K-efficiency at seedling stage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(5):699-709.
- [25] 刘明, 范文静, 赵鹏, 靳容, 张强强, 朱晓亚, 王静, 李强. 甘薯耐低钾基因型苗期筛选及综合评价[J]. 作物学报, 2023, 49(4):926-937.
- LIU Ming, FAN Wenjing, ZHAO Peng, JIN Rong, ZHANG Qiangqiang, ZHU Xiaoya, WANG Jing, LI Qiang. Genotypes screening and comprehensive evaluation of sweetpotato tolerant to low potassium stress at seedling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(4):926-937.
- [26] 张宁. 氮钾双高效水稻品种筛选及其生理机制研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.
- ZHANG Ning. Study on screening for N and K efficiency rice genotype and its physiological mechanisms[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015.
- [27] 唐忠厚, 张允刚, 魏猛, 陈晓光, 史新敏, 张爱君, 李洪民, 丁艳锋. 耐低钾和钾高效型甘薯品种(系)的筛选及评价指标[J]. 作物学报, 2014, 40(3):542-549.
- TANG Zhonghou, ZHANG Yungang, WEI Meng, CHEN Xiaoguang, SHI Xinmin, ZHANG Aijun, LI Hongmin, DING Yanfeng. Screening and evaluation indicators for low potassium-tolerant and potassium efficient sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) varieties (lines)[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(3): 542-549.
- [28] 张正社, 牛娜, 宋瑜龙, 马守才, 张改生, 王军卫. 耐低钾山羊草基因型的筛选与鉴定[J]. 草地学报, 2017, 25(4):832-838.
- ZHANG Zhengshe, NIU Na, SONG Yulong, MA Shoucai, ZHANG Gaisheng, WANG Junwei. Screening and identification of *Aegilops* germplasm for tolerance to low potassium stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(4):832-838.
- [29] 范文静, 刘明, 赵鹏, 张强强, 吴德祥, 郭鹏宇, 朱晓亚, 靳容, 张爱君, 唐忠厚. 甘薯苗期耐低氮基因型筛选及不同氮效率类型综合评价[J]. 中国农业科学, 2022, 55(10): 1891-1902.
- FAN Wenjing, LIU Ming, ZHAO Peng, ZHANG Qiangqiang, WU Dexiang, GUO Pengyu, ZHU Xiaoya, JIN Rong, ZHANG Aijun, TANG Zhonghou. Screening of sweetpotato varieties tolerant to low nitrogen at seedling stage and evaluation of different nitrogen efficiencies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(10): 1891-1902.
- [30] 徐顺莉, 房伟民, 管志勇, 蒋甲福, 陈素梅, 廖园, 陈发棣. 耐低钾切花菊品种筛选及其苗期耐性生理研究[J]. 园艺学报, 2013, 40(12):2463-2471.
- XU Shunli, FANG Weimin, GUAN Zhiyong, JIANG Jiafu, CHEN Sumei, LIAO Yuan, CHEN Fadi. Screening cut *Chrysanthemum* varieties in low potassium tolerant and patience physiology in seedling[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2013, 40(12): 2463-2471.
- [31] 李陶. 氮、钾及氮钾互作对不同甘薯产量品质和养分吸收的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- LI Tao. Effect of nitrogen, potassium, nitrogen and potassium interaction on yield and quality and nutrient absorption of different sweet potatoes[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017.