

金枕榴莲果实矿质元素与品质的相关性及通径分析

王远铭^{1#}, 许丹勇¹, 王宇洋¹, 李华东², 周俊磊³, 林电^{1*}

(1. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228 中国; 2. 中化(海南)农业生态有限公司, 海南三亚 572000 中国; 3. 广东海洋大学, 广东湛江 524088 中国)

摘要: 为了探索金枕榴莲果实矿质营养元素对果实品质的作用, 筛选影响果实品质的主要矿质元素因子, 以海南省种植的金枕榴莲品种为研究对象, 对果实的外在形态和内在品质指标及 11 种矿质元素进行相关性和通径系数分析。相关性分析结果表明, 可溶性固形物含量与硫(S)含量呈显著负相关; 总酸含量与钙(Ca)、硼(B)含量呈极显著正相关; 维生素 C 含量与镁(Mg)、S 含量呈显著正相关; 糖酸比与 B 含量呈显著负相关; 固酸比与 Ca、B 含量呈极显著负相关。通径分析结果表明, 果实各矿质元素对品质指标的影响存在一定差异, 其中对可溶性固形物主要影响元素有氮(N)、Mg、锌(Zn)、锰(Mn); 对可溶性糖含量主要影响元素有 B、Mn、Zn、N; 对果实总酸含量主要影响元素有钾(K)、N、Mg、Zn; 对维生素 C 含量主要影响元素有 S、铁(Fe)、Mg、Zn; 对糖酸比主要影响元素有 K、Zn、Mn、B; 对固酸比主要影响元素有 Mg、Zn、Fe、Mn。综上所述, K、N、Ca、Mg、Zn、B 等元素为影响榴莲果实品质的主要元素, 是各个矿质元素协同调控的综合结果。结合海南本地土壤及果实养分含量, 生产中可通过适当增施 K、Mg、Zn、B 肥, 同时协调各元素之间的施肥比例, 从而提升果实产量和品质。

关键词: 榴莲; 施肥; 矿质元素; 品质; 相关性分析; 通径分析

中图分类号: S667.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7054(2026)02-0337-10

王远铭, 许丹勇, 王宇洋, 等. 金枕榴莲果实矿质元素与品质的相关性及通径分析[J]. 热带生物学报(中英文), 2026, 17(2): 337–346. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240134 CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswwb.20240134



榴莲(*Durio zibethinus* Murr.), 又名韶子、麝香猫果, 锦葵目锦葵科榴莲属植物, 是东南亚特有的一种重要的特色水果, 原产于马来群岛的文莱、印度尼西亚等地, 是巨型热带常绿乔木, 有着“水果之王”的美誉, 是一种经济价值较高的热带水果^[1], 因其产生的强烈的硫酰基香味而闻名^[2]。榴莲果实中富含蛋白质氨基酸等营养物质, 以及丰富的矿质元素, 如氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、铁(Fe)、锌(Zn)等, 还具有很好的保健功能^[3]。此外, 榴莲具有极高的药用价值, 经常食用可以强身健体、补肾健脾、温通散寒、补血益气等功效^[4-5]。榴莲现为东南亚国家广泛种植的经济作物, 已成为各主产国的重要经济来源^[6-7]。据统计, 全世界种植的榴莲品种超过 300 个, 主要品种为

金枕、干尧、猫山王等。泰国是最大的榴莲生产国和出口国^[4]。从中国海关的统计数据看, 中国进口榴莲均主要来自泰国, 2023 年中国进口的鲜榴莲数量与金额均创历史新高, 分别达 142.59 万 t 和 67.16 亿美元^[8]。

作为热带岛屿省份, 海南省榴莲种植刚刚起步, 随着榴莲品种的不断引种栽培及海南本土榴莲产业的兴起, 果实的产量及品质等特征有待验证, 施肥管理技术尚未成熟, 存在的问题也逐渐凸显出来, 表现出畸形果、出肉率低、品质差等方面。果实的品质对于市场竞争力至关重要。果树在生长发育过程中, 矿质元素直接影响着果实产量和品质的形成。矿质元素的缺失或过量都会对果树的生理代谢、品质改善及产量产生影响, 若缺



收稿日期: 2024-08-24

修回日期: 2024-10-08

基金项目: 海南省自然科学基金面上项目(321MS009); 海南省自然科学基金高层次人才(421RC739); 国家重点研发计划(2017YFD0202102)

*第一作者: 王远铭(1998—), 男, 海南大学热带农林学院 2022 级硕士研究生。E-mail: 122479392@qq.com

*通信作者: 林电(1967—), 男, 博士, 教授。研究方向: 植物营养研究。E-mail: lindian5519@163.com

乏某种矿质元素,将导致果实生长受限、产量减少、品质下降^[9-10]。如 K、Ca 等能够促进果实的生长、色泽、口感等方面的改善。另外, Mg、硼(B)等矿质元素也是果实中不可缺少的元素,它们对果实的味道、糖分含量等方面有着重要作用,而糖酸组分是决定果实风味的关键因素。目前,主要有对不同榴莲品种进行品质差异性研究^[11-12],以及对果实中营养成分^[13-14]、挥发性成分^[15-16]和果皮的应用^[17-18] 等方面进行研究,且在苹果^[19]、梨子^[20]、葡萄^[21]、荔枝^[22-23] 等对矿质元素含量与品质之间的关系有相关研究,在榴莲果实上少有提及。本研究以金枕榴莲栽培品种为研究对象,分析比较果实品质与矿质元素含量的关系和差异,评价影响果实各项品质指标的主要矿质因子,为合理施用养分肥料、生产优质高效榴莲提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料 供试品种为金枕榴莲,果实样品于 2024 年 7 月分别采集于三亚、陵水、乐东、保亭 4 个市县的榴莲园,树龄 4~5 a, 树体长势良好,生长发育正常。

1.2 试验设计方法 每个果园选取 9 株榴莲树;在树冠分布的同一高度,每株树选择果实大小、成熟度一致的果实采摘;每 3 株为 1 重复、每株每次采 1 个果实,重复 3 次。

1.3 试验采样、处理和各指标的测定方法 果实采摘后立即带回实验室进行处理。将果实分成果皮、果肉、果核,进行矿质元素分析和品质分析。方法:用电子天平测定单果、果皮、果肉及果核的质量,计算可食率和记录种子个数;用游标卡尺测量果皮厚度及果实纵横径并计算果形指数;用排水法测量果实体积。将果实分皮、肉、核处理后装袋并做好编号,再分别置于烘箱 105 ℃ 下杀青 30 min,再调至 75 ℃ 烘干至恒重,测量干质量,计算含水量,并将其粉碎装袋备用。

可食率(%)=(单果质量-果皮质量-种子质量)/单果质量×100

果形指数=纵径/横径

果实含水量(%)=(鲜质量-干质量)/鲜质量×100

N、P、K、Ca、Mg、硫(S)、Fe、锰(Mn)、铜

(Cu)、Zn、B 含量的测定参照土壤农化分析^[24],氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-纳氏试剂比色法;磷采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-钼锑抗比色法;钾采用干灰化-火焰光度法;钙、镁、铁、锰、铜、锌采用干灰化-原子吸收法;硼采用干灰化-姜黄素比色法;硫采用 HNO₃-HClO₄-HCl 消煮-硫酸钡比色法。将果实分皮、肉、核测定其含量,再计算果实含量。

果实含量=(用皮肉核各部位含量×其干物质量)/其总干物质量

可溶性固形物含量测定采用折射仪法^[25],可溶性糖测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[26],总酸含量测定采用酸碱指示剂滴定法^[27],维生素 C 含量测定采用 2,6-二氯酚酚滴定法^[28],糖酸比、固酸比以可溶性糖和可溶性固形物含量除以总酸含量的比值表示。

1.4 数据处理与分析 采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 26.0 对试验数据进行皮尔逊相关分析及线性回归分析,采用 Origin 2022 软件作图。

2 结果与分析

2.1 果实形态指标 从表 1 可见,果形指数在 1.17~1.41,趋于长圆形,变异系数为 5.44%;单果质量变幅为 1.44~2.84 kg,变异系数为 20.73%;果皮质量变幅为 0.90~1.77 kg,变异系数为 22.47%;果肉质量变幅为 0.40~0.88 kg,变异系数为 21.86%;果核质量变幅为 0.03~0.19 kg,变异系数为 47.15%;果体积变幅在 2.00~3.91 dm³,变异系数为 21.63%;果实密度变异系数最小,为 2.42%;种子个数变异系数最大,为 52.44%;果皮厚度变幅为 9.58~15.00 mm,变异系数为 20.16%,可见果核的变异系数较大。

2.2 果实内在品质指标 由表 2 可见,固酸比变异系数最大,其次为糖酸比,分别为 34.71%和 34.19%,变异系数最小的是含水量,为 3.17%。可溶性固形物含量变幅为 20.00%~29.15%,变异系数为 12.01%;可溶性糖含量变幅为 12.88%~18.54%,变异系数为 11.12%;总酸含量变幅为 0.13%~0.31%,变异系数为 32.23%;每 100 g 果实中 Vc 含量变幅为 33.41~52.76 mg,变异系数为 17.27%;可食率变幅为 23.63%~38.99%,变异系数为 14.57%。

表 1 果实外在形态指标

Tab. 1 Fruit externally morphological index

指标 Index	横径/cm Transverse Diameter	纵径/cm Longitudinal diameter	果形指数 Fruit shape index	单果质量/kg Fruit weight	果皮质量/kg Peel weight	果肉质量/kg Fruit flesh weight	果核质量/kg Stone weight	体积/dm ³ Volume	密度/cm ³ Density	种子个数/个 Number of seeds	果皮厚/mm Pericarp width
平均值 Average	18.52	23.76	1.28	2.15	1.40	0.65	0.10	2.91	0.74	7.33	12.52
标准差 Standard deviation	1.66	2.03	0.07	0.45	0.31	0.14	0.05	0.63	0.02	3.85	2.53
最大值 Maximum	21.63	27.54	1.41	2.84	1.77	0.88	0.19	3.91	0.76	14.00	15.52
最小值 Minimum	16.21	20.00	1.17	1.44	0.90	0.40	0.03	2.00	0.71	3.00	9.48
变异系数/% Coefficient of variation	8.95	8.54	5.44	20.73	22.47	21.86	47.15	21.63	2.42	52.44	20.16

表 2 果实内在品质指标

Tab. 2 Internal quality index of fruit

指标 Index	可溶性固形物含量/% Soluble solids content	可溶性糖含量/% Soluble sugar	总酸含量/% Total acid	每100 g果实中Vc含量/mg Vc Content per 100 g fruit	糖酸比 Sugar-acid ratio	固酸比 Solids-acid ratio	可食率/% Edible part rate	含水量/% Moisture content
平均值 Average	25.02	15.54	0.20	40.44	87.33	141.79	30.54	78.12
标准差 Standard deviation	3.00	1.73	0.06	6.99	29.86	49.22	4.45	2.48
最大值 Maximum	29.15	18.54	0.31	52.76	129.49	198.46	38.99	82.23
最小值 Minimum	20.00	12.88	0.13	33.41	45.19	66.98	23.63	73.93
变异系数/% Coefficient of variation	12.01	11.12	32.23	17.27	34.19	34.71	14.57	3.17

2.3 果实矿质元素含量 表 3 表明,与榴莲内在品质指标相比,果实的矿质元素含量差异较大,在所测元素中 P 含量的变异系数最小, Zn 含量的变异系数最大,变异系数分别为 7.34% 与 43.88%。大中量元素中, K 含量最高,变异系数为 20.79%;

N、S、Mg、Ca 含量次之, P 含量最低。微量元素中,以 Fe 含量最高,变异系数为 16.67%;而 Mn 和 B 含量居中,变异系数分别为 39.12% 与 25.13%。矿质元素中大中量元素含量由大到小排序为 K > N > Mg > Ca > P > S;微量元素含量由大到小排序

表 3 果实矿质元素含量

Tab. 3 Contents of mineral elements in fruit

指标 Index	矿质元素含量 Mineral element/(g·Kg ⁻¹)										
	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
平均值 Average	4.21	1.52	16.98	2.24	2.40	1.13	66.52	18.23	10.30	5.14	17.36
标准差 Standard deviation	0.86	0.11	3.53	0.27	0.36	0.22	11.09	7.13	1.69	2.25	4.36
最大值 Maximum	5.70	1.66	22.23	2.66	2.87	1.42	78.26	30.59	13.94	8.25	24.96
最小值 Minimum	3.19	1.32	10.98	1.87	1.67	0.86	45.21	8.81	8.15	1.72	10.70
变异系数 Coefficient of variation/%	20.37	7.34	20.79	12.04	15.10	19.31	16.67	39.12	16.39	43.88	25.13

为 Fe > Mn > B > Cu > Zn。

2.4 果实矿质元素与内在品质指标的相关性 矿质元素含量与果实指标之间的相关性分析结果(图 1)表明,可溶性固形物与 K、Ca、Fe、Zn、B 及 S 呈显著负相关;总酸与 Ca、B 呈极显著正相关;Vc 与 Mg、S 呈显著正相关;糖酸比与 B 呈显著负相关。由此可知,不同矿质元素对果实内在品质

存在一定的影响。

2.5 果实品质和矿质元素之间的通径分析 果实矿质元素与可溶性固形物的通径分析结果(表 4)表明,对可溶性固形物的主要影响因子有 K、N、P、Ca、Mg、S、Fe、Mn、Cu、Zn、B。对果实可溶性固形物含量直接作用的最大影响因子为 Mg (0.686),各元素对可溶性固形物影响的大小依次

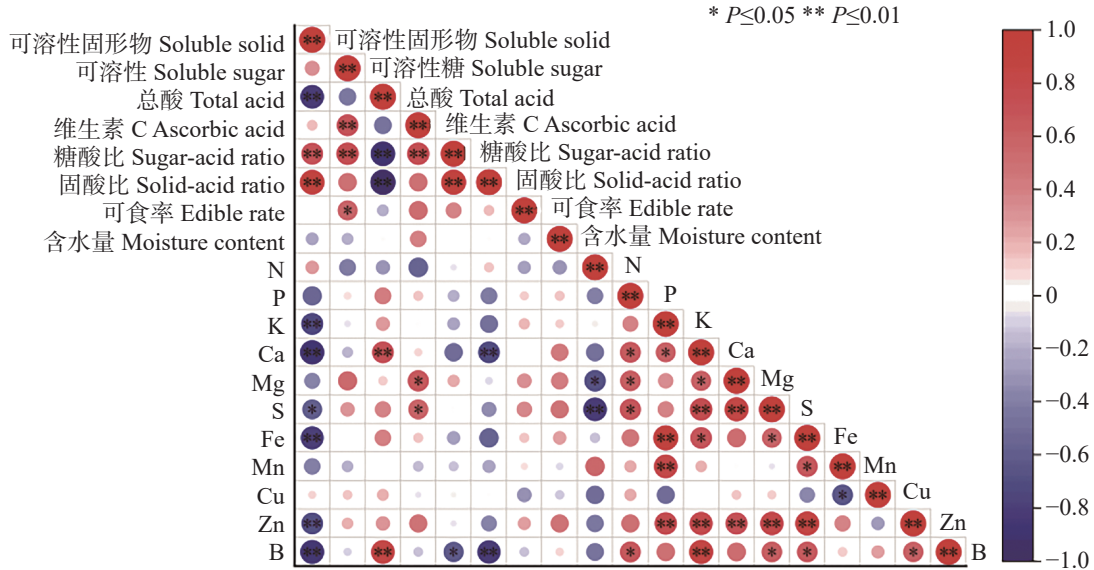


图 1 果实矿质元素与内在品质指标的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis between fruit mineral elements and internal quality indexes

注: *, 显著相关($P < 0.05$); **, 极显著相关($P < 0.01$)。

Note: *, significant correlation ($P < 0.05$); **, highly significant correlation ($P < 0.01$), respectively.

表 4 果实矿质元素与可溶性固形物含量的通径分析

Tab. 4 Path analysis of fruit mineral elements and soluble solids content

作用因子 Contribution factors	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient										总计 Total	
		通过K Through K	通过N Through N	通过P Through P	通过Ca Through Ca	通过Mg Through Mg	通过S Through S	通过Fe Through Fe	通过Mn Through Mn	通过Cu Through Cu	通过Zn Through Zn		通过B Through B
K	-0.502		-0.007	-0.004	-0.243	0.330	0.119	-0.484	0.002	0.064	0.464	-0.082	0.159
N	-0.081	-0.041		0.005	0.235	-0.421	-0.234	0.068	0.002	0.055	-0.255	0.068	-0.518
P	-0.015	-0.141	0.025		-0.278	0.291	0.141	-0.204	0.000	-0.018	0.266	-0.073	0.010
Ca	-0.473	-0.258	0.040	-0.009		0.426	0.214	-0.278	0.000	0.004	0.420	-0.118	0.442
Mg	0.686	-0.241	0.050	-0.006	-0.294		0.256	-0.334	0.000	-0.007	0.481	-0.084	-0.180
S	0.299	-0.200	0.063	-0.007	-0.339	0.587		-0.309	0.000	-0.019	0.491	-0.101	0.166
Fe	-0.548	-0.444	0.010	-0.006	-0.240	0.418	0.168		0.002	0.039	0.529	-0.100	0.377
Mn	0.003	-0.408	-0.043	-0.002	-0.053	0.039	-0.018	-0.344		0.081	0.229	-0.022	-0.541
Cu	-0.134	0.239	0.033	-0.002	0.014	0.036	0.042	0.161	-0.002		-0.161	-0.040	0.320
Zn	0.625	-0.372	0.033	-0.006	-0.318	0.528	0.235	-0.464	0.001	0.034		-0.096	-0.425
B	-0.162	-0.254	0.034	-0.007	-0.344	0.355	0.187	-0.339	0.000	-0.033	0.371		-0.030

排序为 Mg(0.686) > Zn(0.625) > Fe(0.548) > K(-0.502) > Ca(-0.473) > S(0.299) > B(-0.162) > Cu(-0.134) > N(-0.081) > P(-0.015) > Mn(0.003)。其中, Mg、S、Mn 和 Zn 对可溶性固形物的影响为正值; K、N、P、Ca、Fe、Cu 和 B 对可溶性固形物的影响为负值。间接通径系数表明, 对果实可溶性固形物间接影响最大因子为 Mn(-0.541), 其次为 N(-0.518) 和 Ca(0.442), P 和 B 的间接通径系数较小。由此表明, 对果实可溶性固形物影响较大的为 N、Mg、Zn 和 Mn。

由表 5 可知, 果实矿质元素与可溶性糖含量的直接通径系数由大到小为 B(-0.683) >

Mn(-0.621) > Zn(0.370) > Mg(-0.260) > Fe(-0.257) > N(0.183) > K(0.126) > P(-0.114) > Cu(0.105) > S(0.097) > Ca(0.079)。其中, K、N、Ca、S、Cu、Zn 对可溶性糖的直接贡献为正值; P、Mg、Fe、Mn、B 对可溶性糖的直接贡献为负值。Zn 对果实可溶性糖的间接影响最大为(-1.257)且影响作用为负值, 其次为 N(-0.711)。P 和 S 对果实可溶性糖的间接影响也比较大, 为 P(-0.538) 和 S(-0.537)。Mn 和 B 对可溶性糖间接通径系数比较小。K、Mg、Fe 和 Cu 居中。因此, 对果实可溶性糖影响较大的矿质元素为 B、Mn、Zn、N。

表 5 果实矿质元素与可溶性糖含量的通径分析

Tab. 5 Path analysis of fruit mineral elements and soluble sugar content

作用因子 Contribution factors	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient											总计 Total
		通过K Through K	通过N Through N	通过P Through P	通过Ca Through Ca	通过Mg Through Mg	通过S Through S	通过Fe Through Fe	通过Mn Through Mn	通过Cu Through Cu	通过Zn Through Zn	通过B Through B	
K	0.126		0.015	-0.032	0.041	-0.126	0.039	-0.227	-0.504	-0.050	0.275	0.288	-0.283
N	0.183	0.010		0.035	-0.039	0.161	-0.076	0.032	-0.332	-0.043	-0.151	-0.307	-0.711
P	-0.114	0.035	-0.056		0.046	-0.111	0.046	-0.096	-0.077	0.014	0.157	-0.497	-0.538
Ca	0.079	0.065	-0.091	-0.067		-0.163	0.069	-0.131	-0.069	-0.003	0.249	-0.353	-0.493
Mg	-0.262	0.061	-0.112	-0.048	0.049		0.083	-0.157	-0.035	0.005	0.285	-0.426	-0.296
S	0.097	0.050	-0.143	-0.054	0.057	-0.224		-0.145	0.038	0.015	0.291	-0.422	-0.537
Fe	-0.257	0.111	-0.023	-0.042	0.040	-0.160	0.055		-0.389	-0.031	0.313	-0.094	-0.220
Mn	-0.621	0.102	0.098	-0.014	0.009	-0.015	-0.006	-0.161		-0.063	0.136	-0.168	-0.082
Cu	0.105	-0.060	-0.076	-0.015	-0.002	-0.014	0.014	0.075	0.373		-0.095	-0.405	-0.205
Zn	0.370	0.093	-0.075	-0.048	0.053	-0.201	0.076	-0.217	-0.228	-0.027		-0.683	-1.257
B	-0.683	0.064	-0.077	-0.051	0.057	-0.135	0.061	-0.159	-0.086	0.026	0.219		-0.081

果实矿质元素与总酸含量的通径分析表明(表 6), 各矿质元素对果实总酸含量的直接通径系数由大到小依次为 Mg(-0.476) > K(0.461) > Zn(-0.277) > Fe(0.271) > Mn(0.271) > B(0.157) > Cu(-0.156) > N(0.089) > S(-0.042) > Ca(0.036) > P(0.010)。其中, K、N、P、Ca、Fe、Mn 和 B 对总酸的间接作用为正值; Mg、S、Cu 和 Zn 对总酸的间接作用为负值。Mn 元素对总酸含量间接作用影响最大, 其次为 N、Cu 和 Zn, P、Ca 和 B 元素对总酸含量的间接通径系数影响较小。由此可知, 对总酸含量影响较大的是 K、N、Mg 和 Zn。

果实矿质元素与维生素 C 含量的通径分析结果(表 7)表明, 各矿质元素对维生素 C 含量直接影响的大小顺序为 S(-0.553) > Fe(-0.403) > Mg(0.379) > Cu(0.359) > K(-0.348) > B(-0.150) > Zn(0.127) > N(0.095) > Mn(0.084) > Ca(-0.062) > P(0.048)。其中, N、P、Mg、Mn、Cu、Zn 对维生素 C 含量的影响为正值; K、Ca、S、Fe、B 对维生素 C 含量的影响为负值。Zn 对维生素 C 含量的间接贡献影响最大, 其间接通径系数为-0.953, 其次为 Mg(-0.919) 和 Mn(-0.620)。S 和 Cu 对果实维生素 C 的间接通径系数比较小。因此, S、Fe、

表 6 果实矿质元素与总酸含量的通径分析

Tab. 6 Path analysis of mineral elements and total acid content in fruit

作用因子 Contribution factors	直接通 径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient											总计 Total
		通过K Through K	通过N Through N	通过P Through P	通过Ca Through Ca	通过Mg Through Mg	通过S Through S	通过Fe Through Fe	通过Mn Through Mn	通过Cu Through Cu	通过Zn Through Zn	通过B Through B	
K	0.461		0.007	0.003	0.018	-0.229	-0.017	0.240	0.220	0.074	-0.206	0.079	0.191
N	0.089	0.037		-0.003	-0.018	0.292	0.033	-0.034	0.145	0.064	0.113	-0.066	0.564
P	0.010	0.129	-0.027		0.021	-0.202	-0.020	0.101	0.034	-0.021	-0.118	0.071	-0.032
Ca	0.036	0.236	-0.044	0.006		-0.296	-0.030	0.138	0.030	0.005	-0.186	0.114	-0.027
Mg	-0.476	0.222	-0.055	0.004	0.022		-0.036	0.165	0.015	-0.008	-0.213	0.081	0.199
S	-0.042	0.184	-0.070	0.005	0.026	-0.407		0.153	-0.017	-0.022	-0.218	0.098	-0.268
Fe	0.271	0.408	-0.011	0.004	0.018	-0.290	-0.024		0.170	0.046	-0.234	0.097	0.183
Mn	0.271	0.374	0.048	0.001	0.004	-0.027	0.003	0.170		0.094	-0.102	0.022	0.586
Cu	-0.156	-0.219	-0.037	0.001	-0.001	-0.025	-0.006	-0.079	-0.163		0.071	0.039	-0.419
Zn	-0.277	0.342	-0.036	0.004	0.024	-0.366	-0.033	0.229	0.099	0.040		0.093	0.397
B	0.157	0.233	-0.037	0.005	0.026	-0.246	-0.026	0.167	0.037	-0.038	-0.164		-0.044

表 7 果实矿质元素与维生素 C 含量的通径分析

Tab. 7 Path analysis of mineral elements and vitamin C content in fruit

作用因子 Contribution factors	直接通 径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient											总计 Total
		通过K Through K	通过N Through N	通过P Through P	通过Ca Through Ca	通过Mg Through Mg	通过S Through S	通过Fe Through Fe	通过Mn Through Mn	通过Cu Through Cu	通过Zn Through Zn	通过B Through B	
K	-0.348		0.008	0.013	-0.032	0.182	-0.221	-0.356	0.068	-0.171	0.094	-0.076	-0.490
N	0.095	-0.028		-0.015	0.031	-0.233	0.432	0.050	0.045	-0.148	-0.052	0.063	0.145
P	0.048	-0.097	-0.029		-0.036	0.161	-0.261	-0.150	0.010	0.048	0.054	-0.068	-0.369
Ca	-0.062	-0.179	-0.047	0.028		0.235	-0.396	-0.205	0.009	-0.011	0.085	-0.109	-0.588
Mg	0.379	-0.167	-0.058	0.020	-0.039		-0.473	-0.246	0.005	0.019	0.098	-0.078	-0.919
S	-0.553	-0.139	-0.074	0.023	-0.044	0.324		-0.227	-0.005	0.050	0.100	-0.094	-0.086
Fe	-0.403	-0.308	-0.012	0.018	-0.031	0.231	-0.311		0.053	-0.105	0.107	-0.093	-0.451
Mn	0.084	-0.283	0.051	0.006	-0.007	0.022	0.034	-0.253		-0.216	0.047	-0.021	-0.620
Cu	0.359	0.166	-0.039	0.006	0.002	0.020	-0.077	0.118	-0.050		-0.033	-0.037	0.075
Zn	0.127	-0.258	-0.039	0.020	-0.042	0.291	-0.435	-0.341	0.031	-0.092		-0.089	-0.953
B	-0.150	-0.176	-0.040	0.022	-0.045	0.196	-0.345	-0.249	0.012	0.088	0.075		-0.463

Mg 和 Zn 对果实维生素 C 含量影响较大。

果实矿质元素与糖酸比的直接通径系数(表 8)由大到小顺序为 B(-0.426) > Zn(0.419) > Mg(0.372) > Fe(-0.368) > K(-0.344) > Cu(0.305) > Mn(-0.265) > S(-0.164) > N(-0.030) > Ca(-0.018) > P(0.004)。其中, P、Mg、Cu、Zn 对可溶性糖的直接贡献为正值; K、N、Ca、S、Fe、

Mn、B 对糖酸比的直接贡献为负值。矿质元素 Zn 对糖酸比的间接影响最大(-0.836), 其次为 Mn(-0.585)、K(-0.487)且影响作用为负值。P、S、B 对糖酸比的间接通径系数较小, 为 P(-0.160)、S(0.108)、B(-0.023)。因此, 对榴莲果实糖酸比影响较大的为 Zn、Mn、B 和 K。

果实矿质元素与固酸比含量的通径分析表

表 8 果实矿质元素与糖酸比的通径分析

Tab. 8 Path analysis of fruit mineral elements and sugar-acid ratio

作用因子 Contribution factors	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient											总计 Total
		通过K Through K	通过N Through N	通过P Through P	通过Ca Through Ca	通过Mg Through Mg	通过S Through S	通过Fe Through Fe	通过Mn Through Mn	通过Cu Through Cu	通过Zn Through Zn	通过B Through B	
K	-0.344		-0.002	0.001	-0.009	0.179	-0.065	-0.325	-0.215	-0.145	0.311	-0.216	-0.487
N	-0.030	-0.028		-0.001	0.009	-0.228	0.128	0.046	-0.142	-0.126	-0.171	0.179	-0.334
P	0.004	-0.096	0.009		-0.011	0.158	-0.077	-0.137	-0.033	0.041	0.178	-0.192	-0.160
Ca	-0.018	-0.176	0.015	0.002		0.231	-0.117	-0.187	-0.029	-0.009	0.282	-0.310	-0.299
Mg	0.372	-0.165	0.018	0.002	-0.011		-0.140	-0.224	-0.015	0.016	0.322	-0.220	-0.419
S	-0.164	-0.137	0.023	0.002	-0.013	0.318		-0.207	0.016	0.043	0.329	-0.266	0.108
Fe	-0.368	-0.304	0.004	0.001	-0.009	0.227	-0.092		-0.166	-0.089	0.354	-0.263	-0.338
Mn	-0.265	-0.279	-0.016	0.000	-0.002	0.021	0.010	-0.231		-0.183	0.154	-0.059	-0.585
Cu	0.305	0.164	0.012	0.001	0.001	0.019	-0.023	0.108	0.159		-0.108	-0.105	0.228
Zn	0.419	-0.255	0.012	0.002	-0.012	0.286	-0.129	-0.311	-0.097	-0.078		-0.253	-0.836
B	-0.426	-0.174	0.013	0.002	-0.013	0.192	-0.102	-0.227	-0.037	0.075	0.248		-0.023

明(表 9), 各矿质元素对果实固酸比的直接通径系数按大小排序为 Mg(0.653) > Zn(0.517) > Fe(-0.512) > K(-0.390) > Ca(-0.268) > B(-0.266) > Cu(0.190) > N(-0.136) > Mn(-0.102) > S(-0.074) > P(0.441)。其中, P、Mg、Cu 和 Zn 对固酸比的

影响为正值; K、N、Ca、S、Fe、Mn、和 B 对固酸比的影响为负值。各矿质元素对固酸比间接作用影响由大到小为 Mn(-0.655) > Zn(-0.630) > N(-0.423) > Mg(-0.365) > S(0.321) > Cu(0.292) > K(-0.229) > Ca(0.121) > Fe(0.061) > P(-0.061) >

表 9 果实矿质元素与固酸比的通径分析

Tab. 9 Path analysis of fruit mineral elements and solid acid ratio

作用因子 Contribution factors	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient											总计 Total
		通过K Through K	通过N Through N	通过P Through P	通过Ca Through Ca	通过Mg Through Mg	通过S Through S	通过Fe Through Fe	通过Mn Through Mn	通过Cu Through Cu	通过Zn Through Zn	通过B Through B	
K	-0.390		-0.011	0.011	-0.137	0.314	-0.030	-0.453	-0.083	-0.090	0.384	-0.135	-0.229
N	-0.136	-0.032		-0.013	0.133	-0.401	0.058	0.063	-0.055	-0.078	-0.211	0.112	-0.423
P	0.041	-0.109	0.042		-0.157	0.277	-0.035	-0.190	-0.013	0.025	0.220	-0.120	-0.061
Ca	-0.268	-0.200	0.067	0.024		0.406	-0.053	-0.260	-0.011	-0.006	0.347	-0.193	0.121
Mg	0.653	-0.188	0.084	0.017	-0.166		-0.063	-0.312	-0.006	0.010	0.398	-0.138	-0.365
S	-0.074	-0.156	0.106	0.019	-0.192	0.558		-0.288	0.006	0.027	0.406	-0.166	0.321
Fe	-0.512	-0.345	0.017	0.015	-0.136	0.398	-0.042		-0.064	-0.056	0.437	-0.164	0.061
Mn	-0.102	-0.317	-0.073	0.005	-0.030	0.037	0.005	-0.321		-0.114	0.190	-0.037	-0.655
Cu	0.190	0.186	0.056	0.005	0.008	0.034	-0.010	0.150	0.061		-0.133	-0.065	0.292
Zn	0.517	-0.289	0.055	0.017	-0.180	0.502	-0.058	-0.433	-0.037	-0.049		-0.158	-0.630
B	-0.266	-0.197	0.057	0.018	-0.195	0.338	-0.046	-0.316	-0.014	0.047	0.307		-0.002

B(-0.002)。由此可知,对固酸比含量影响较大的是 Mg、Zn、Fe、Mn。

3 讨论

从榴莲果实的外在形态和内在品质分析表明,不同地方果园的果实品质和矿质养分存在一定的差异,原因可能是土壤条件、树体差异、施肥管理及栽培技术等的不一致,导致呈现的结果差异较大^[29-30]。本研究结果表明,果实外在形态中果实密度的变异系数最小,种子个数变异系数最大;内在品质中变异系数最大的是固酸比,这与在冰糖橙^[30]及苹果^[31]上的研究结果一致。糖酸是构成果实风味的重要物质。固酸比变异系数大是因为部分化合物与有机酸含量在果实中的积累不同。在所测元素中 P 的变异系数最小, Zn 的变异系数最大,这与王贵等^[32]对莱阳梨果实研究的结果一致。本研究发现榴莲果实 K 含量最高,这与陈艳秋等^[33]在苹果梨及谭梦怡等^[34]在火龙果的研究结果一致。榴莲果实品质和矿质养分的差异涉及多方面的因素,分析其内在关系,找出重要矿质因子,可为榴莲果实的优质生产提供有力支撑。

相关性研究结果表明,果实的矿质元素与果实品质指标存在一定的关系。可溶性固形物与 K、Ca、Fe、Zn、B 呈极显著负相关,这与冯建文等^[35]在苹果上的研究结果一致,这与宋少华等^[36]在甜柿上的研究结果却相反,说明不同果实矿质元素呈现的作用不同。相关研究表明,杨梅^[37]果实中 Ca 与可溶性固形物亦呈极显著负相关,这与本研究结果一致,可能是外源钙抑制了果实乙烯的释放^[38],从而抑制了糖类物质的合成。总酸与 Ca、B 呈极显著正相关,这与位杰等^[39]在香梨研究中,以及李智峰等^[40]在苹果上的研究结果一致, Ca、B 等元素可能会使总酸中部分有机酸结合,从而导致酸度升高,硼可能促进糖分的合成,同时影响有机酸的积累,从而改变糖分与酸的比例。相关研究表明,金煌芒果实^[41]中 Vc 含量与 Mg 含量呈显著正相关,这与本研究结果一致,说明 Mg 元素对维生素 C 含量具有较大的正向作用,镁是叶绿素的关键组成部分,促进光合作用有助于维生素 C 的合成^[42]。果实的生长发育与品质的形成是各矿质元素协同作用的结果。

通径系数的绝对值大小能直接反映矿质元素

对果实品质的影响,直接通径系数显示直接作用大小,间接通径系数则表示通过其他元素间接影响的程度。通径分析研究结果表明,果实各矿质元素对品质指标的影响存在一定差异,其中对可溶性固形物主要受 N、Mg、Zn、Mn 影响;对可溶性糖含量主要受 B、Mn、Zn、N 影响;对果实总酸含量主要受 K、N、Mg、Zn 影响;对维生素 C 含量主要受 S、Fe、Mg、Zn 影响;对糖酸比主要受 K、Zn、Mn、B 影响;对固酸比主要受 Mg、Zn、Fe、Mn 影响。综上所述, K、N、Ca、Mg、Zn、B 等元素为影响榴莲果实品质的主要元素。相关研究表明,影响可溶性物较大的元素为 Mg,与本研究结果一致。周丹蓉等^[43]在研究芙蓉李果实矿质元素对品质影响的直接作用及与其他元素的间接作用,影响总酸的矿质元素主要为 Mn,影响可溶性糖矿质元素为 Zn,而朱振忠等^[44]研究结果认为 Ca 为影响总酸的主要矿质元素。影响金煌芒果^[42]维生素 C 含量为 B,而 Cu 对葡萄^[21]的维生素 C 含量的影响较大,与本研究结果存在一定差异,可能与品种不同、地域关系以及气候环境等均有关系。

4 结论

综上所述,矿质元素对果实品质的影响由大到小为 $K > N > Mg > Ca > P > S > Fe > Mn > B > Cu > Zn$;相关性分析中主要与 Ca、Mg、B 元素呈显著相关;通径分析表明 K、N、Mg、Fe、Zn、B 等元素为影响榴莲果实品质的主要元素,榴莲果实的生长发育和果实品质受多种矿质元素的共同作用。海南地区高温多雨,岩石风化作用和淋溶作用强烈,导致土壤镁含量较低,且大部分土壤对硼元素也较缺乏,加上矿质元素中 Zn 含量的变异系数较大,但土壤中 Fe 元素并不缺乏。结合海南本地土壤及果实养分含量,本团队建议在榴莲生产中可通过适当增施 K、Mg、Zn、B 肥,同时协调各元素之间的施肥比例,以实现优质果品的生产。此外,本试验选取金枕榴莲果实,不能完全代表榴莲植株及其他品种养分规律,需结合当地果园的土壤养分和施肥管理情况进一步探究。

参考文献:

- [1] 白娟. 全球榴莲贸易现状与前景展望[J]. 中国果业信息, 2022, 39(5): 26-38.

- [2] Pinnapat P, Kamonpan S, Thanyada R, et al. Sulfur metabolism in durian pulps: Factors contributing to the production of volatile sulfur compounds during fruit ripening [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 206: 112533. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112533>
- [3] 陈日益. 水果之王话榴莲 [J]. *保健医苑*, 2022, 21(1): 63.
- [4] 冯学杰, 华敏, 郭利军, 等. 海南榴莲产业的培育对策与发展建议 [J]. *中国热带农业*, 2019, 16(6): 12-14.
- [5] 戴玮, 周林, 他维亮, 等. 榴莲的药用价值及综合利用 [J]. *中国现代中药*, 2018, 20(4): 482-488.
- [6] Arneida H N, Sadequr R, Rohini K, et al. A review on the nutritional, medicinal, molecular and genome attributes of Durian (*Durio zibethinus* L.), the King of fruits in Malaysia [J]. *Bioinformation*, 2018, 14(6): 265-270. <https://doi.org/10.6026/97320630014265>
- [7] Tongon R, Soyotong K, Kanokmedhakul S, et al. Nanoparticles from *Chaetomium brasiliense* to control *Phytophthora palmivora* caused root rot disease in durian var Montong [J]. *International Journal of Agricultural Technology*, 2018, 14(7): 2163-2170.
- [8] 张放. 2023 年我国进口鲜榴莲情况简析 [J]. *中国果业信息*, 2024, 41(5): 36-43.
- [9] 覃杰凤. 果树矿质营养的研究进展 [J]. *安徽农学通报* (上半月刊), 2011, 17(7): 94-95.
- [10] 黄丽萍, 张倩茹, 尹蓉, 等. 矿质营养元素与果树生长发育的关系 [J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(4): 601-602.
- [11] 陈妹姑, 林兴娥, 李新国, 等. 基于主成分分析和聚类分析的榴莲品质综合评价 [J]. *食品工业科技*, 2023, 44(7): 278-286.
- [12] 毛海涛, 林兴娥, 丁哲利, 等. 9 个榴莲品种主要果实性状的比较分析 [J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(11): 2360-2361.
- [13] 张艳玲, 朱连勤, 杨欣欣, 等. 榴莲皮营养组分的检测与评价 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2015, 58(7): 138-140.
- [14] 刘冬英, 谢剑锋, 方少瑛, 等. 榴莲的营养成分分析 [J]. *广东微量元素科学*, 2004, 11(10): 57-59.
- [15] 张继, 刘阿萍, 姚健, 等. 榴莲果皮挥发性化学成分的分析 [J]. *食品科学*, 2003, 24(6): 128-131.
- [16] 牛敏行. 榴莲香气和味觉成分鉴定及相互作用研究 [D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023.
- [17] Che Z, Hongyuan C, Xiao W, et al. Exploiting the Waste Biomass of Durian Shell as a Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Production at Room Temperature [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(3): 1760-1760. <https://doi.org/10.3390/ijerph20031760>
- [18] Xuan W W, Binti N N Z, Indera L A A, et al. Bio-based succinic acid production from durian husk: A rising Southeast Asia agricultural waste [J]. *Industrial Crops & Products*, 2023, 206(15): 117624.
- [19] 徐慧, 陈欣欣, 王永章, 等. ‘富士’苹果果实矿质元素与品质指标的相关性与通径分析 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30(25): 116-121.
- [20] 朴哲虎, 石岩, 程金良, 等. 苹果梨果实矿质元素含量与品质的相关性分析 [J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(20): 159-161.
- [21] 和雅妮, 奚晓军, 查倩, 等. 葡萄果实矿质元素与品质的相关性及其通径分析 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(2): 154-160.
- [22] 朱永聪, 崔子霄, 徐晗, 等. 优新荔枝品种果实品质风味特征比较 [J]. *中国食品学报*, 2023, 23(6): 327-338.
- [23] 王思威, 孙海滨, 常虹, 等. 基于主成分分析综合评价白糖罍荔枝果实品质 [J]. *果树学报*, 2022, 39(4): 610-620.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 263-279.
- [25] 中华人民共和国农业部. 水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定—折射仪法: NY/T 2637—2014 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [26] 中华人民共和国农业部. 水果及制品可溶性糖的测定 3, 5-二硝基水杨酸比色法: NY/T 2742—2015 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [27] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 食品中总酸的测定: GB/T 12456—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [28] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准—食品中抗坏血酸的测定: GB 5009.86—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [29] Miqueloto A, Amarante C V T D, Steffens C A, et al. Relationship between xylem functionality, calcium content and the incidence of bitter pit in apple fruit [J]. *Scientia horticulturae*, 2014, 165(15): 319-323.
- [30] 寸待泽, 普金安, 高俊燕, 等. 云南冰糖橙果皮和果肉矿质元素含量与果实品质的关系 [J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(24): 207-214.
- [31] 王磊彬, 陈兴望, 李天宇, 等. 江苏丰县地区富士苹果果实矿质元素与品质的相关性及其通径分析 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(7): 146-151.
- [32] 王贵, 白娜, 邹宗峰, 等. 莱阳梨果实矿质元素含量与果实品质的关系 [J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(24): 178-183.
- [33] 陈艳秋, 曲柏宏, 牛广才, 等. 苹果梨果实矿质元素含量及其品质效应的研究 [J]. *吉林农业科学*, 2000, 41(6): 44-48. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-8701.2000.06.012>
- [34] 谭梦怡, 李华东, 王鸿浩, 等. 大红火龙果果实养分积累量动态变化及其相关性 [J]. *南方农业学报*, 2021, 52(7): 1816-1825. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1191.2021.07.010>
- [35] 冯建文, 韩秀梅, 宋莎, 等. 威宁糖心苹果矿质元素与果实品质的相关性及其通径系数 [J]. *贵州农业科学*, 2021, 49(3): 80-88.
- [36] 宋少华, 刘勤, 李曼, 等. 甜柿果实矿质元素与品质指标的相关性及通径分析 [J]. *果树学报*, 2016, 33(2):

- 202–209.
- [37] 赵双, 黄颖宏, 郗红丽. 30 个杨梅品种果实品质分析与综合评价[J]. 果树学报, 2024, 41(3): 392–402.
- [38] 刘会超, 韩振海, 许雪峰. 外源钙对苹果果实乙烯生成的影响[J]. 园艺学报, 2002, 41(3): 258–260. <https://doi.org/10.3321/j.issn:0513-353X.2002.03.014>
- [39] 位杰, 蒋媛, 林彩霞, 等. 6 个库尔勒香梨品种果实矿质元素与品质的相关性和通径分析[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 259–265.
- [40] 李智锋, 孙鲁龙, 刘振中, 等. 不同矮化中间砧对‘长富 2 号’果实品质和矿质元素的影响[J]. 陇东学院学报, 2023, 34(5): 93–99. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1730.2023.05.017>
- [41] 黄海, 段军娜, 刘荣, 等. 金煌芒果果实矿质元素与品质的相关性分析及通径分析[J]. 江苏农业科学, 2022, 5019: 197–203.
- [42] 吴自明, 张欣, 万建民. 叶绿素生物合成的分子调控[J]. 植物生理学通讯, 2008, 44(6): 1064–1070.
- [43] 周丹蓉, 林炎娟, 方智振, 等. 福建 10 个不同产地‘芙蓉李’果实品质与矿质元素含量的相关性与通径分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(4): 1176–1184. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0381.2022.4.spaqzljcs202204021>
- [44] 朱振忠, 周兆禧, 陈妹姑, 等. 榴莲果实品质与矿质元素的灰色关联度和通径分析[J]. 中国南方果树, 2024, 53(06): 76–82. <https://doi.org/10.13938/j.issn.1007-1431.20230637>

Correlation and path analysis between mineral elements and quality of Jinzhen durian fruit

Wang Yuanming^{1#}, Xu Danyong¹, Wang Yuyang¹, Li Huadong², Zhou Junlei³, Lin Dian^{1*}

(1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Sinochem (Hainan) AgroEcology Co., LTD., Sanya, Hainan 572000, China; 3. Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China)

Abstract: In order to explore the effect of mineral nutrient elements on fruit quality and screen the main mineral element factors affecting fruit quality, fruit of durian (*Durio zibethinus* Murr.) Jinzhen planted in Hainan Province were selected for correlation and path coefficient analysis of the external morphology and internal quality indexes of the fruit as well as 11 mineral elements. The correlation analysis showed that there was a significantly negative correlation between soluble solids content and sulfur (S) content. The total acid content was significantly positively correlated with calcium (Ca) and boron (B) contents. There was a significantly positive correlation between vitamin C content and magnesium (Mg) and S contents. There was a significantly negative correlation between sugar-acid ratio and B content. The solid-acid ratio was significantly negatively correlated with Ca and B contents. The path analysis showed that there were some differences in the effects of mineral elements on fruit quality indexes. The main elements influencing soluble solids content were nitrogen (N), Mg, zinc (Zn) and manganese (Mn). The main factors influencing soluble sugar content were B, Mn, Zn and N, and the main elements affecting the total acid content of the fruit were potassium (K), N, Mg and Zn. The main elements affecting the content of vitamin C were S, iron (Fe), Mg and Zn. The main elements affecting the ratio of sugar to acid are K, Zn, Mn and B, and the main elements influencing solid acid ratio were Mg, Zn, Fe and Mn. In summary, K, N, Ca, Mg, Zn and B are the main elements affecting the quality of the durian fruit, and are the comprehensive results of the synergistic regulation of various mineral elements. Considering the local soil and fruit nutrient content in Hainan, the fruit yield and quality can be improved through application of K, Mg, Zn and B fertilizers at a slightly higher rate and a coordinated ratio.

Keywords: *Durio zibethinus* Murr.; fertilizer application; mineral elements; quality; correlation analysis; path analysis

(责任编辑:叶 静)