

新疆‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期叶片 氮磷钾光谱特性研究

庄红梅^{1,2}, 卢春生^{1,2*}, 龚鹏^{1,2}, 徐叶挺^{1,2}, 谢辉^{1,2}, 樊丁宇^{1,2}

(1 新疆农业科学院园艺作物研究所, 乌鲁木齐 830091; 2 农业部新疆地区果树科学观测试验站, 叶城县 844900)

摘要:【目的】通过分析果实不同生育期叶片光谱反射率对 N、P、K 的响应, 探寻采用叶片光谱指数诊断 N、P、K 敏感时期, 为新疆莎车‘叶尔羌’扁桃简便快捷的非破坏性营养诊断提供最佳时间窗。【方法】采用“3414”肥料效应试验, 利用 Unispec-SC 光谱仪测定莎车‘叶尔羌’扁桃在不同 N、P、K 施肥水平下果实座果期、膨大期、硬核期、成熟期叶片的光谱反射率。【结果】‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期叶片光谱反射率波动取决于波长, 在可见光波段变异最小。光谱反射率总体上呈现硬核期 > 座果期 > 膨大期 > 成熟期。在不同 N、P、K 施肥水平下, ‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期光谱指数(ND_{705})之间均存在显著差异($P < 0.05$)或者极显著差异($P < 0.01$)。叶尔羌扁桃果实座果期、膨大期、硬核期、成熟期叶片氮素的敏感波段分别为 815 ~ 894 nm, 375 ~ 398 nm, 608 ~ 616 nm, 429 ~ 437 nm; 磷素的敏感波段为 766 ~ 802 nm, 1023 ~ 1063 nm, 708 ~ 713 nm, 1130 nm; 座果期、膨大期、成熟期叶片钾素的敏感波段分别为 815 ~ 894 nm, 345 ~ 368 nm, 475 ~ 491 nm。【结论】果实成熟期与硬核期是 N、P、K 叶片光谱营养诊断的敏感时期。叶尔羌扁桃果实座果期、膨大期、硬核期、成熟期叶片 N 素的敏感波段分别为 815 ~ 894 nm, 375 ~ 398 nm, 608 ~ 616 nm, 429 ~ 437 nm; P 素的敏感波段为 766 ~ 802 nm, 1023 ~ 1063 nm, 708 ~ 713 nm, 1130 nm; 座果期、膨大期、成熟期叶片钾素的敏感波段分别为 815 ~ 894 nm, 345 ~ 368 nm, 475 ~ 491 nm。

关键词: ‘叶尔羌’扁桃; 氮素、磷素、钾素; 光谱反射率; 果实生育期; 敏感期

中图分类号: S664.9 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2016)04-1079-12

Leaf spectral characteristics of ‘Yarkent’ almond and its sensitivity to N, P, K at different growth periods in Xinjiang

ZHUANG Hong-mei^{1,2}, LU Chun-sheng^{1,2*}, GONG Peng^{1,2}, XU Ye-ting^{1,2}, XIE Hui^{1,2}, FAN Ding-yu^{1,2}

(1 Institute of Horticultural Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091 China; 2 Scientific Observing and Experimental Station of Pomology (Xinjiang), Ministry of Agriculture, Yecheng County, Xinjiang 844900, China)

Abstract: 【Objectives】The sensitive period of leaf spectral index was studied by analyzing the leaf spectral reflectance in the response to nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) fertilizer at different growing stages of ‘Yarkent’ almond in Shache of Xinjiang aiming to provide a non-invasive, simple and rapid nutrition diagnosis of N, P, K. 【Methods】Using “3414” fertilizer experiment and ‘Yarkent’ almond as tested material, the leaf spectral reflectance was measured using Unispec-SC spectrometer at fruiting, expanding, stone hardening and maturing stages of almond tree under different N, P, K fertilizer levels. 【Results】The fluctuation of leaf spectral reflectance of ‘Yarkent’ almond depended on the wavelengths at all the growing stages, and the least variation was in the range of visible wavelength. The leaf spectral reflectance was generally in the order of stone hardening stage > fruiting stage > expanding stage > maturing stage. The leaf spectrum indexes (ND_{705}) of ‘Yarkent’ almond was significantly ($P < 0.05$) and extremely significantly ($P < 0.01$) different among different N, P, K fertilizer levels at all growing stages. The spectral sensitive band of foliar N concentration was 815–894 nm, 375–398 nm,

收稿日期: 2015-03-02 接受日期: 2015-07-07

基金项目: 自治区科技重大专项(201130102-2); 新疆维吾尔自治区科技计划(201111121); 公益性行业(农业)科研专项(201003043)资助。

作者简介: 庄红梅(1987—), 女, 江苏连云港人, 硕士, 助理研究员, 主要从事植物生理研究。E-mail: zhuanghongmei86@163.com

* 通信作者 E-mail: luchshxj@163.com

608–616 nm and 429–437 nm at fruiting stage, expanding stage, stone hardening stage and maturing stage, respectively. The spectral sensitive band of foliar P concentration was 766–802 nm, 1023–1063 nm, 708–713 nm and 1130 nm at above 4 stages. For foliar K concentration, the spectral sensitive band was 815–894 nm, 345–368 nm and 475–491 nm at fruiting stage, expanding stage and maturing stage, respectively. 【Conclusions】 The sensitive periods for leaf spectral nutrition diagnosis of N, P and K in ‘Yarkent’ almond are at mature stage and stone hardening stage. The spectral sensitive bands for N are 815–894 nm, 375–398 nm, 608–616 nm and 429–437 nm at fruiting stage, expanding stage, stone hardening stage and maturing stage, respectively; those for P are 766–802 nm, 1023–1063 nm, 708–713 nm and 1130 nm; and those for K are 815–894 nm, 345–368 nm and 475–491 nm at fruiting stage, expanding stage and maturing stage, respectively.

Key words: ‘Yarkent’ almond; nitrogen, phosphorus, potassium; leaf spectral reflectance; fruit growing stage; sensitive period

氮、磷、钾是作物生长发育所需的大量营养元素,不仅影响作物生长速度和产量,还影响植株体内多种生化成分的变化^[1]。探寻实时、快速、无损、精准的植物营养诊断方法是各国农业学者研究的热点之一^[2–4]。光谱分析技术速度快、效率高、重现性好、测试方便、成本低,已经用于探测和获取作物营养状况和长势信息^[5]。目前光谱分析诊断技术已经应用在玉米^[6–10]、小麦^[11–12]、水稻^[13–14]、番茄^[15–16]、棉花^[17]、黑麦草^[18]、紫叶稠李^[19]氮素营养的实时检测与诊断。已有研究发现,绿光、红边波段为利用叶片光谱估测全 N 含量的敏感波段,窄波段绿光、红边比值指数 $SR(R_{780}, R_{580})$ 和 $SR(R_{780}, R_{704})$ 可用于冠层全 N 含量的监测^[20]。贺冬仙等发现 560、650 和 720 nm 作为特征波长及 940 nm 作为参比波长适用于植物营养快速无损诊断, $(T_{940} - T_{560}) / (T_{940} + T_{560})$ 、 $\log(T_{940}/T_{560})$ 和 $\log(T_{940}/T_{650})$ 与植物 N 营养水平的相关性较好^[21]。Thomas 等通过测定甜椒叶片的反射率,发现 N 元素营养水平对甜椒叶片在 550 nm 和 670 nm 波段反射率的影响大^[22],胡珍珠等发现轮台白杏叶片的光谱反射率也在 550 nm 处^[23]。Osborne 等^[24]发现玉米叶片内 N 含量的预测在红光和绿光波段,具体波段不受生育期的影响。Al-Abbas 等^[25]发现不同营养 N、P、K 胁迫下不同位置叶片的光谱特性,其营养胁迫对 530 nm 波段处作物叶片光谱反射率有显著性影响,Daughtry 等^[26]提出可以利用作物叶片反射光谱率进行叶片叶绿素含量评价。这些研究结果表明,光谱指数通过反映作物叶绿素含量,可以间接反映作物 N 素营养状况。南疆扁桃 (*Amygdalus communis* L.) 由于缺少类似快速诊断技术,施肥依然主要靠经验。因此,研发自动化程度高、精确度

高、简单快捷的扁桃营养光谱诊断技术,制定符合树体营养盈亏状况的科学施肥方案,是加快南疆扁桃产业提质增效的迫切需求。本项目采用“3414”肥料效应田间试验,分析‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期叶片光谱反射率对 N、P、K 的敏感性差异,探寻采用叶片光谱指数诊断 N、P、K 的敏感期,旨在为‘叶尔羌’扁桃快速、精准、非破坏性营养诊断提供最佳时间窗。

1 材料与方法

1.1 试验地点及土壤条件

试验地点位于新疆喀什地区莎车县阿热勒乡 14 村的扁桃园内 (N38°21'37.1", E77°17'11.5"), 品种为‘叶尔羌’。土壤质地为沙壤土,其理化性状为 pH 8.4、有机质 11.1 g/kg、碱解氮 50 mg/kg、有效磷 11.9 mg/kg、速效钾 102 mg/kg。试验所在地属暖温带大陆性干旱气候,四季分明,气候干燥,日照长,蒸发量大,昼夜温差大。年平均气温 11.4℃,日较差 12 ~ 15℃。≥0℃ 积温 4606℃, ≥5℃ 积温 4519℃, ≥10℃ 积温 4219℃。年日照时数 3056.7 h,是中国日照较长的地区之一^[29]。

1.2 试验设计

试验采用“3414”肥料效应田间试验设计,具体处理、编码和肥料用量见表 1。于 2014 年在扁桃果实座果期、膨大期、硬核期、成熟期采集扁桃新梢中部叶片,每个处理选取树体 5 株,每株树体大小一致。在树冠中部东、西、南、北方向随机选取生长健康的成熟叶片,每株选取叶片 12 片(带叶柄)带回实验室内,于 105℃ 恒温杀青 30 min 后 70℃ 烘至恒重,用不锈钢料理机粉碎后装入自封袋备用,分析氮磷钾含量。

表 1 叶尔羌扁桃施肥田间施肥方案
Table 1 The experimental scheme of fertilization for ‘Yarkent’ almond in field

序号 No.	处理 Treatment	因子编码 Factor code			施肥量 Nutrient input (kg/tree)					
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	尿素 Urea	TSP	硫酸钾 K ₂ SO ₄
1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	N ₀ P ₂ K ₂	0	2	2	0	0.4	0.25	0	0.87	0.50
3	N ₁ P ₂ K ₂	1	2	2	0.25	0.4	0.25	0.54	0.87	0.50
4	N ₂ P ₀ K ₂	2	0	2	0.5	0	0.25	1.09	0	0.50
5	N ₂ P ₁ K ₂	2	1	2	0.5	0.2	0.25	1.09	0.43	0.50
6	N ₂ P ₂ K ₂	2	2	2	0.5	0.4	0.25	1.09	0.87	0.50
7	N ₂ P ₃ K ₂	2	3	2	0.5	0.6	0.25	1.09	1.30	0.50
8	N ₂ P ₂ K ₀	2	2	0	0.5	0.4	0	1.09	0.87	0
9	N ₂ P ₂ K ₁	2	2	1	0.5	0.4	0.125	1.09	0.87	0.25
10	N ₂ P ₂ K ₃	2	2	3	0.5	0.4	0.375	1.09	0.87	0.75
11	N ₃ P ₂ K ₂	3	2	2	0.75	0.4	0.25	1.63	0.87	0.50
12	N ₁ P ₁ K ₂	1	1	2	0.25	0.2	0.25	0.54	0.43	0.50
13	N ₁ P ₂ K ₁	1	2	1	0.25	0.4	0.125	0.54	0.87	0.25
14	N ₂ P ₁ K ₁	2	1	1	0.5	0.2	0.125	1.09	0.43	0.25

注 (Note): TSP—重过磷酸钙 Triple superphosphate.

1.3 光谱数据采集

用美国 PP Systems 公司生产的 UniSpec-SC(单通道)便携式光谱分析仪进行光谱数据采集。该型号光谱分析仪自带光源,可在可见光/近红外 310 ~ 1130 nm 波长范围内进行连续测量,光谱分辨率在 λ/100,扫描波长 3.3 nm。试验光谱数据采集莎车县阿热勒乡 14 村扁桃‘叶尔羌’的 4 个生育期,即:座果期(5 月 10 日)、果实膨大期(6 月 6 日)、硬核期(7 月 15 日)、果实成熟期(8 月 6 日)。光谱仪每次数据采集前进行标准校正,活体健康叶片 3 次重复测定。在进行叶片光谱测定时,选取叶片的中上部(避免探头直接对着叶脉)进行光谱测定。为保证数据可比性,测定条件尽可能一致,选择晴朗无风或风力不大天气,北京时间为 10:30 ~ 13:00。可见光波段的叶片光谱反射率^[30],用于‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期叶片光谱特征及对 N、P、K 素的敏感性分析。

1.4 数据分析

叶片光谱指数的计算采用与叶绿素含量正相关性较好的公式:

$$ND_{705} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})^{[31]}$$

式中, R₇₅₀、R₇₀₅、R₄₄₅ 分别是测定叶片敏感波段 750 nm、705 nm、445 nm 的光谱反射率值。

叶片用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,全氮用凯氏定 N 法

测定,全磷用钒钼黄法在紫外可见分光光度计(UV-1800) 450 nm 处比色测定,全钾用原子吸收分光光度计(PE-Analysist100)测定^[23]。

数据分析采用 DPS v 9.5 统计软件与 Origin 9.0 软件。叶片光谱指数的差异性分析采用单因素方差分析(One-way ANOVA),多重比较采用最小显著方差法(LSD 方法)。

2 结果与分析

2.1 ‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期叶片光谱特性

‘叶尔羌’扁桃不施肥处理所测定的叶片光谱反射率显示,座果期、果实膨大期、硬核期、成熟期叶片光谱曲线起伏趋势相同(图 1)。但是在 310 ~ 350 nm 短波段范围内,光谱反射率由于光谱曲线的首端噪声导致变异较大,但随着波长的增加,变异逐渐减小。400 ~ 700 nm 范围内反射率较低,并呈现“低-高-低”的趋势,即:蓝紫波段低-绿波段高-橙红波段低,在 550 nm 附近出现第一个强反射峰,不同果实生育期表现出反射强度不同。在 680 nm 附近出现强吸收谷,即红谷。由此可见,在可见光范围内呈现出“蓝边”、“绿峰”、“黄边”、“红谷”等独特的光谱特性。在 700 ~ 780 nm 波段,红光波段强烈地吸收与近红外波段强烈地反射造成曲线出现一个陡峭的爬升脊,反射率迅速抬升。在近

红外 780 ~ 1050 nm 波段, 形成一个很强的反射平台, 在此波段内, 反射率较高且平稳。1050 ~ 1110 nm 波段范围, 叶片光谱反射率由于受大气吸收干扰和仪器噪声作用, 导致变异也比较大, 并随波长增加变异逐渐增大。在整个近红外区域, ‘叶尔羌’ 扁桃果实 4 个生育期叶片光谱反射率呈现硬核期 > 座果期 > 膨大期 > 成熟期。

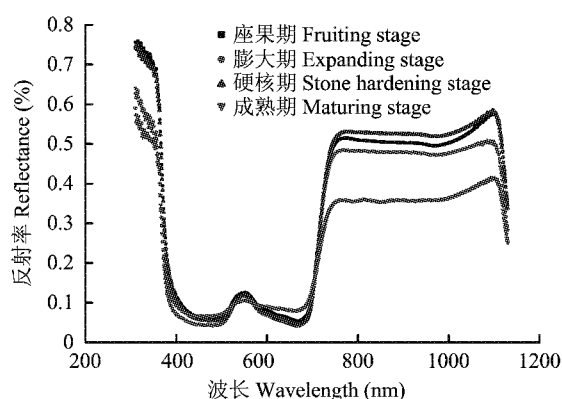


图 1 ‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期叶片光谱反射率
Fig. 1 The leaf spectral reflectance of ‘Yarkent’ almond at different growing stages

2.2 ‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期叶片光谱反射率对氮、磷、钾肥的响应

2.2.1 不同生育期叶片光谱反射率对氮肥的响应

根据施肥试验设计, 处理 $N_0P_2K_2$ 、 $N_1P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_2$ 和 $N_3P_2K_2$ 的磷和钾施用量处于同一水平, 施氮量依次增加。‘叶尔羌’扁桃果实 4 个生育期 $N_0P_2K_2$ 、 $N_1P_2K_2$ 、 $N_3P_2K_2$ 和 $N_2P_2K_2$ 处理的叶片光谱反射率呈现基本一致的规律 (图 2)。在可见光波段 (350 ~ 780 nm) 不同处理的叶片光谱反射率均在成熟期较高, 这是由于成熟期生殖生长旺盛, 营养生长受抑制, 体内 N 素大部分供给生殖生长, 叶片内叶绿素含量降低导致的结果; 而在硬核期均表现出较低的反射率, 可能是由于硬核期 N 营养主要被叶片吸收, 叶绿素含量升高所致。成熟期之前, 随着果实生长的发育, 350 ~ 680 nm 波段, 叶片光谱反射率随着果实的生长发育而降低。

2.2.2 不同生育期叶片光谱反射率对磷肥的响应

$N_2P_0K_2$ 、 $N_2P_1K_2$ 、 $N_2P_2K_2$ 和 $N_2P_3K_2$ 处理的氮和钾施用量处于同一水平, 施磷量依次增加。不同磷营养水平下, ‘叶尔羌’扁桃果实 4 个生育期的叶片光谱反射率变化趋势与不同 N 营养水平下叶片光谱

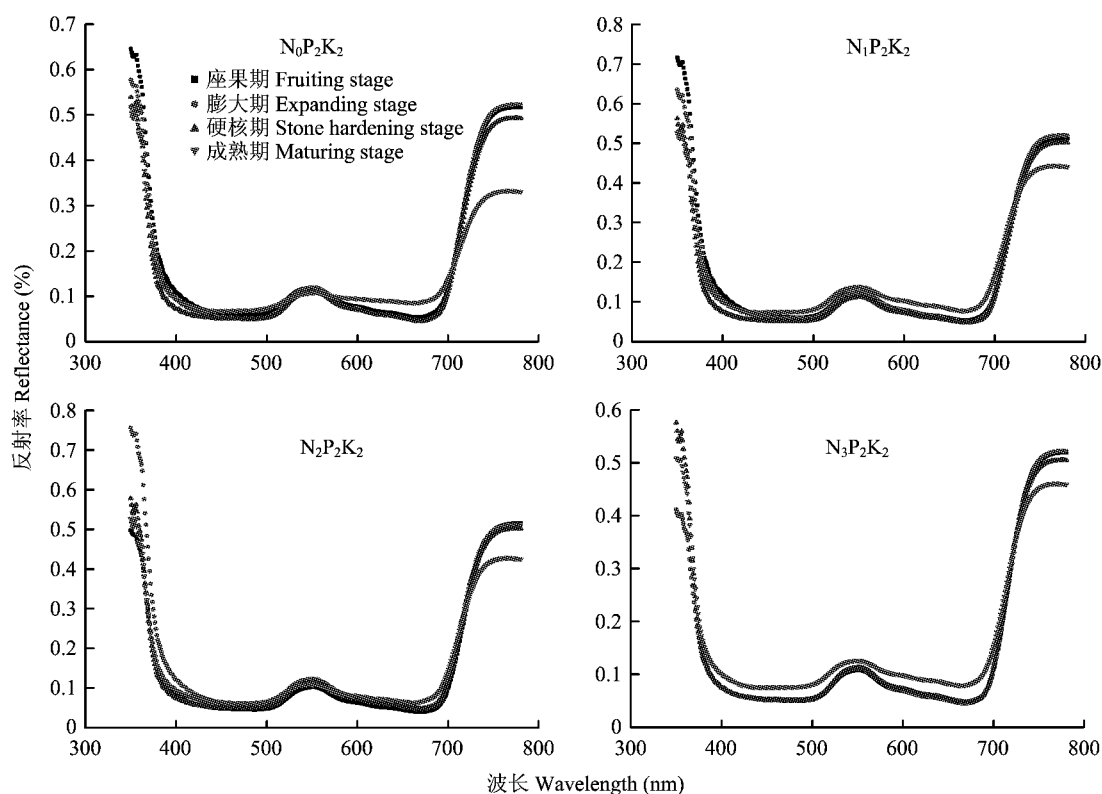


图 2 不同氮素水平下‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期可见光波段叶片光谱反射率
Fig. 2 The leaf spectral reflectance of ‘Yarkent’ almond at visible wavelength under different N levels at different growing stages

反射率变化趋势相同,除了成熟期以外,在 520 ~ 680 nm 波段光谱反射率均随着果实的生长发育而降低,在 P 素的 4 个不同营养水平下,果实成熟期的叶片光谱反射率高于其他 3 个果实生育期,尤其以

$N_2P_3K_2$ 处理最为明显(图 3)。这可能是由于果实成熟期为‘叶尔羌’扁桃养分最大需求期,需吸收大量的磷素(图 3)。

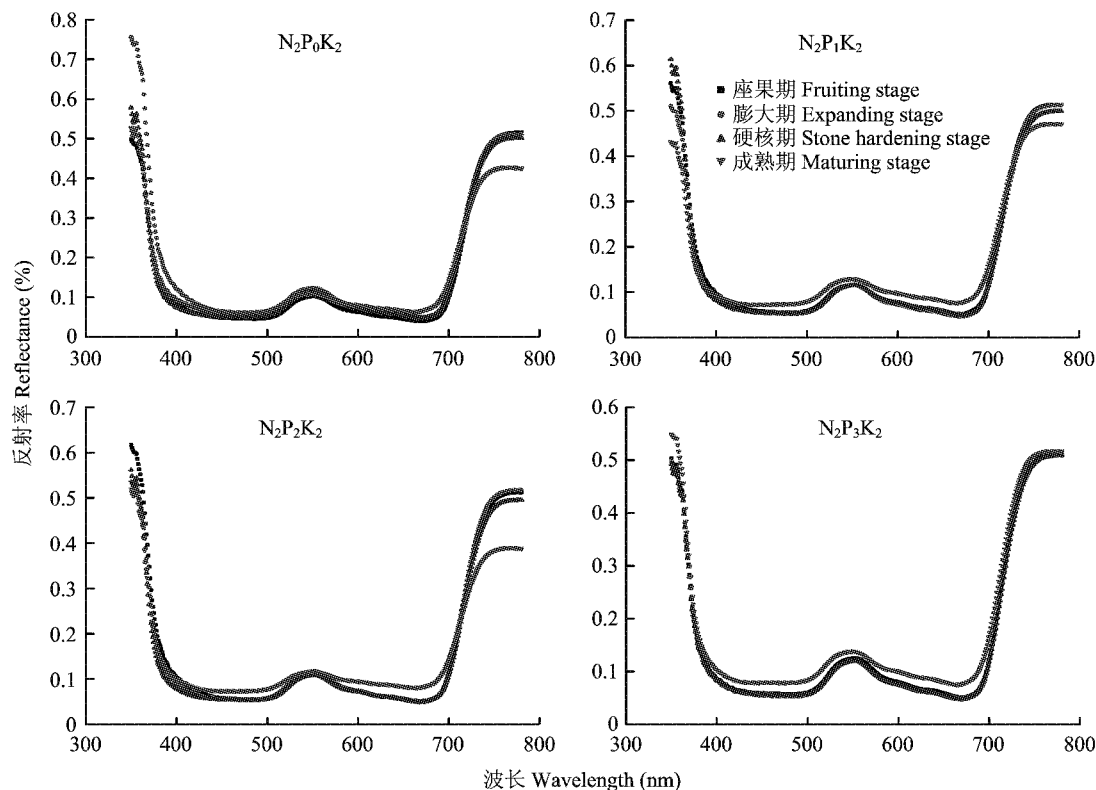


图 3 不同磷素水平下‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期可见光波段叶片光谱反射率
Fig. 3 The leaf spectral reflectance of ‘Yarkent’ almond at visible wavelength under different P levels at different growing stages

2.2.3 不同生育期叶片光谱反射率对钾肥的响应
处理 $N_2P_2K_0$ 、 $N_2P_2K_1$ 、 $N_2P_2K_2$ 和 $N_2P_2K_3$ 的氮和钾施用量处于同一水平,施钾量依次增加。 $N_2P_2K_0$ 、 $N_2P_2K_1$ 和 $N_2P_2K_3$ 处理下,‘叶尔羌’扁桃果实成熟期在可见光波段叶片形成的光谱反射峰均强于其他果实生育期,随着施 K 量的增加,各生育期在可见光波段的反射率呈现升高的趋势。而在钾素 0 水平下,果实膨大期在可见光波段叶片形成的光谱反射峰低于其他 3 个果实生育期。 $N_2P_2K_2$ 处理下,膨大期在 350 ~ 550 nm 波段形成的光谱反射值大于其他果实生育期(图 4)。

2.3 果实不同生育期叶片光谱指数(ND_{705})的差异性

由于氮素能直接影响叶绿素,因此可以通过可见光以及近红外波段特定波长区域的反射率的光谱指数,区分叶片氮含量的高低。

通过多重比较,可以看出,随着 N 元素含量的

升高,各处理叶片光谱指数(ND_{705})之间无显著性差异(表 2)。不同果实发育期存在显著性差异。座果期叶片光谱指数(ND_{705})与膨大期、硬核期的光谱指数不存在显著性差异,但与成熟期存在显著性差异;膨大期、硬核期的光谱指数与成熟期光谱指数存在显著性差异,硬核期光谱指数与成熟期光谱指数存在显著性差异。可见,果实成熟期、硬核期是叶尔羌扁桃氮素叶片光谱营养诊断的敏感时期。

随着磷元素含量的升高,各处理叶片光谱指数(ND_{705})之间无显著性差异(表 2)。不同果实发育期存在显著性差异。座果期叶片光谱指数(ND_{705})与膨大期、硬核期的光谱指数不存在显著性差异,但与成熟期存在显著性差异;膨大期、硬核期的光谱指数与成熟期光谱指数存在显著性差异,硬核期光谱指数与成熟期光谱指数存在显著性差异。可见,果实成熟期与硬核期是‘叶尔羌’扁桃磷素叶片光谱营养诊断的敏感时期。

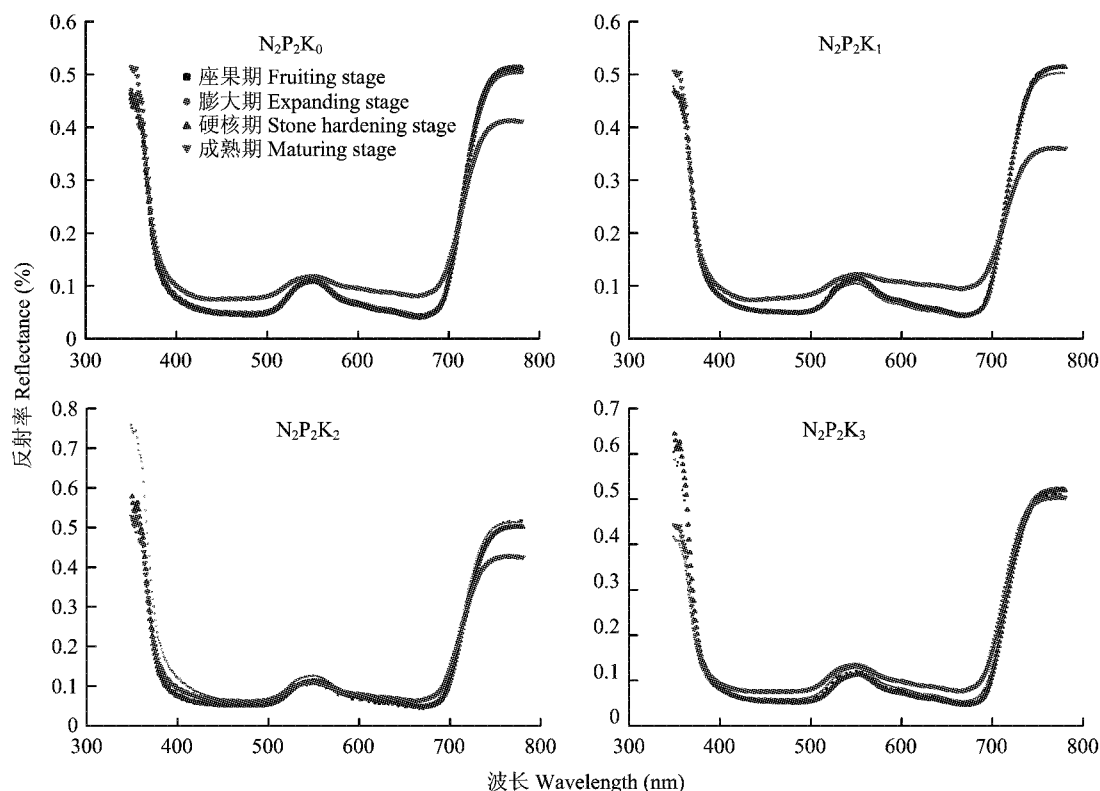


图4 不同钾素水平下‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期可见光波段叶片光谱反射率

Fig.4 The leaf spectral reflectance of ‘Yarkent’ almond at visible wavelength under different K levels at different growing stages

随着钾元素含量的升高,各处理叶片光谱指数 (ND_{705}) 之间无显著性差异 (表 2)。不同果发育期存在显著性差异。座果期叶片光谱指数 (ND_{705}) 与膨大期、硬核期的光谱指数不存在显著性差异,但与成熟期存在显著性差异;膨大期、硬核期的光谱指数与成熟期光谱指数存在显著性差异,硬核期光谱指数与膨大期光谱指数不存在显著性差异。可见,果实成熟期与硬核期是‘叶尔羌’扁桃钾素叶片光谱营养诊断的敏感时期。

2.4 叶尔羌扁桃叶片氮、磷、钾含量与不同波段光谱反射率的相关性

2.4.1 叶片氮含量与不同波段光谱反射率的相关性

果实座果期,叶尔羌扁桃叶片氮含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 750 nm 呈正相关关系,在 682 ~ 703 nm (红光) 波段相关性较强。在 751 ~ 1082 nm 波段呈负相关关系,在 750 ~ 778 nm 波段范围内,相关性最弱。在 815 ~ 894 nm 波段,负相关系数达到 0.71,相关程度高于可见光波段 (682 ~ 703 nm)。1083 ~ 1130 nm 波段呈正相关关系,相关性较弱。因此,815 ~ 894 nm 波段可作为叶尔羌扁桃果实座果期叶片氮含量的指示波段。

表2 不同 N、P、K 素处理果实不同生育期叶片光谱指数 ND_{705} 差异分析

Table 2 The One-way ANOVA of leaf spectral index ND_{705} of ‘Yarkent’ almond under different N, P and K levels at different growing stages

肥料因素 Fertilizer factor	处理水平 Treatment level	平均值差 Mean difference	标准误差 SD	Prob > t
N	$N_0P_2K_2 - N_1P_2K_2$	0.00788	0.02469	0.98798
	$N_0P_2K_2 - N_2P_2K_2$	0.03268	0.02469	0.57199
	$N_0P_2K_2 - N_3P_2K_2$	0.12909	0.02469	0.00249
	$N_1P_2K_2 - N_2P_2K_2$	0.02479	0.02469	0.75106
	$N_1P_2K_2 - N_3P_2K_2$	0.12120	0.02469	0.00380
	$N_2P_2K_2 - N_3P_2K_2$	0.09641	0.02469	0.01559
P	$N_2P_0K_2 - N_2P_1K_2$	0.00768	0.02103	0.98228
	$N_2P_0K_2 - N_2P_2K_2$	0.03080	0.02103	0.49477
	$N_2P_0K_2 - N_2P_3K_2$	0.10931	0.02103	0.00259
	$N_2P_1K_2 - N_2P_2K_2$	0.02311	0.02103	0.69895
	$N_2P_1K_2 - N_2P_3K_2$	0.10162	0.02103	0.00422
	$N_2P_2K_2 - N_2P_3K_2$	0.07851	0.02103	0.02005
K	$N_2P_2K_0 - N_2P_2K_1$	-0.00675	0.02451	0.99220
	$N_2P_2K_0 - N_2P_2K_2$	0.01821	0.02451	0.87727
	$N_2P_2K_0 - N_2P_2K_3$	0.10302	0.02451	0.01012
	$N_2P_2K_1 - N_2P_2K_2$	0.02496	0.02451	0.74332
	$N_2P_2K_1 - N_2P_2K_3$	0.10977	0.02451	0.00686
	$N_2P_2K_2 - N_2P_2K_3$	0.08481	0.02451	0.03007

注 (Note): 肥料因素为氮 (N)、磷 (P)、钾 (K), 4 个水平分别为 0 (不施肥)、1 (常规施肥量的 0.5 倍)、2 (常规施肥量)、3 (常规施肥量的 1.5 倍) The fertilizer factors are N (nitrogen), P (phosphor), K (potassium), four levels are 0 (no fertilization), 1 (0.5 times of conventional fertilization), 2 (conventional fertilization), 3 (1.5 times of conventional fertilization). $n = 9$

果实膨大期,叶尔羌扁桃叶片氮含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 639 nm 波段呈负相关性,在 375 ~ 398 nm 波段相关性较强,在 383 nm 左右,相关系数达到最高位,为 0.8;在 640 ~ 687 nm 波段呈正相关性,相关性极小,均在 0.05 以下;688 ~ 848 nm 波段,呈负相关性,相关性较弱,均在 0.28 以下;849 ~ 1069 nm 波段,呈正相关性,相关性较弱,均在 0.15 以下;1070 ~ 1130 nm 波段,呈负相关性。因此,375 ~ 398 nm 波段可作为叶尔羌扁桃果实膨大期叶片氮含量的指示波段。

果实硬核期,叶尔羌扁桃叶片氮含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 715 nm 波段呈正相关性,在 608 ~ 616 nm 波段,相关系数达到最高值

0.5。在 716 ~ 1124 nm 波段呈负相关性,负相关系数最高值在 1026 ~ 1059 nm 波段出现,为 0.3,相关程度低于可见光 608 ~ 616 nm 波段;在 1125 ~ 1130 nm 波段呈正相关性,相关系数均在 0.1 以下;因此,608 ~ 616 nm 波段可作为叶尔羌扁桃果实硬核期叶片氮含量的指示波段。

果实成熟期,叶尔羌扁桃叶片氮含量与其光谱反射率在 310 ~ 1129 nm 波段呈负相关性。负相关系数最高值出现在 429 ~ 437 nm 波段,为 0.47;在 1130 nm 波段,出现唯一的正相关性,相关系数为 0.39;相比较 429 ~ 437 nm 波段正相关性较强;因此,429 ~ 437 nm 波段可作为叶尔羌扁桃果实成熟期叶片氮含量的指示波段(图 5)。

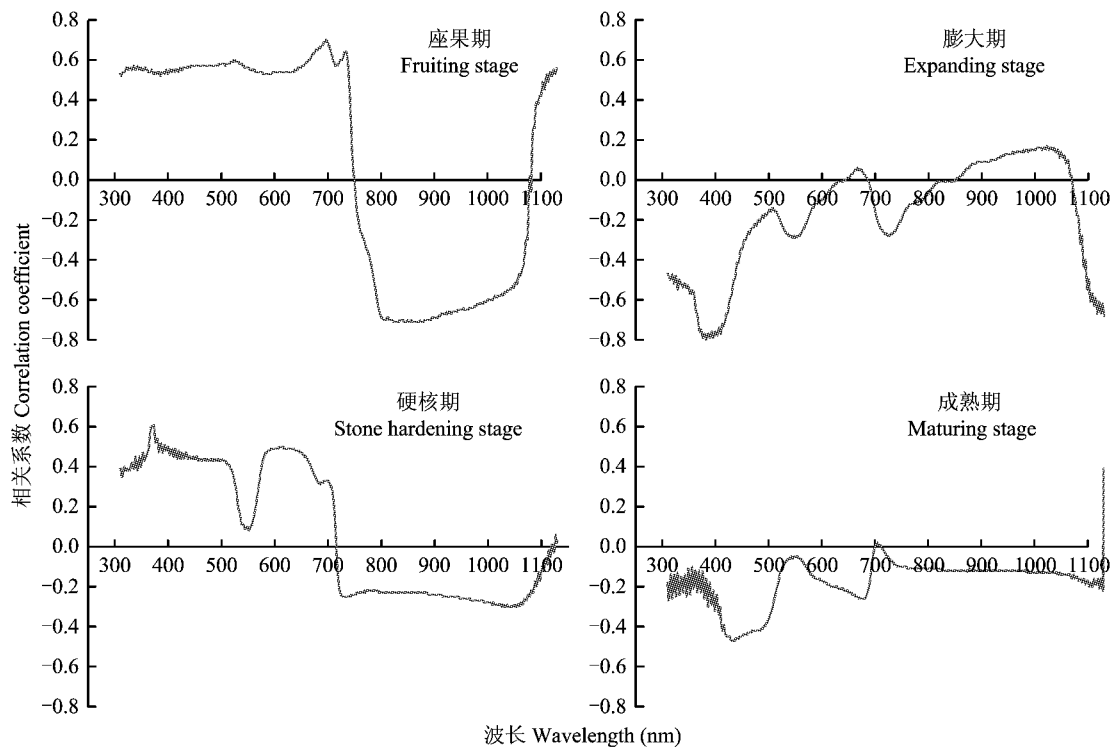


图 5 叶尔羌扁桃果实不同生长发育阶段叶片氮含量与光谱反射率的相关系数

Fig.5 Correlation coefficient between foliar N concentration and spectral reflectance of 'Yarkent' almond at different growing stages

2.4.2 叶片磷含量与不同波段光谱反射率的相关性

果实座果期,叶尔羌扁桃叶片磷含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 740 nm 波段呈正相关性,在 712 ~ 727 nm 波段相关系数较高,达到 0.67。1083 ~ 1130 nm 波段呈正相关性,相关系数均较低,在 0.39 以下。在 741 ~ 1082 nm 波段呈负相关性,在 766 ~ 802 nm 波段相关系数较高,在 790 nm 波段左右相关系数最高为 0.76。因此 766 ~ 802 nm 波段可作为叶尔羌扁桃果实座果期叶片磷含量的指

示波段。

果实膨大期,叶尔羌扁桃叶片磷含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 726 nm 波段呈正相关性,在 315 nm 附近相关系数达到最高值,为 0.48;在 727 ~ 1115 nm 波段呈负相关性,在 1023 ~ 1063 nm 波段,负相关系数达到最高值,为 0.6;在 1122 ~ 1130 nm 波段呈正相关性,相关系数逐渐升高,最高值仅为 0.16;因此 1023 ~ 1063 nm 波段可作为叶尔羌扁桃果实膨大期叶片磷含量的指示波段。

果实硬核期,叶尔羌扁桃叶片磷含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 367 nm 呈现负相关性,相关性较弱,均在 0.3 以下; 368 ~ 720 nm 处呈现正相关性,在 708 ~ 713 nm 处,正相关系数达到最高值,为 0.63; 在 721 ~ 1130 nm 波段,呈负相关性,相关程度较弱,758 ~ 881 nm 波段,负相关系数达到最高值,为 0.45; 因此 708 ~ 713 nm 波段可作为叶尔羌扁桃果实硬核期叶片磷含量的指示波段。

果实成熟期,叶尔羌扁桃叶片磷含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 383 nm 处呈负相关性,

相关性较弱,相关系数均在 0.23 以下; 在 384 ~ 591 nm 波段呈现出较弱的正相关性,在 536 ~ 543 nm 处,相关系数达到最高值,为 0.42; 在 592 ~ 692 nm 波段呈负相关性,相关性较弱,在 667 ~ 677 nm 处,相关系数达到最高值,为 0.42; 在 693 ~ 1129 nm 波段呈正相关性,相关系数在 744 ~ 896 nm 波段达到最高值,为 0.58; 在 1130 nm 处,呈现显著的负相关性,相关系数为 0.96; 因此,1130 nm 处可作为叶尔羌扁桃果实成熟期叶片磷含量的指示波段(图 6)。

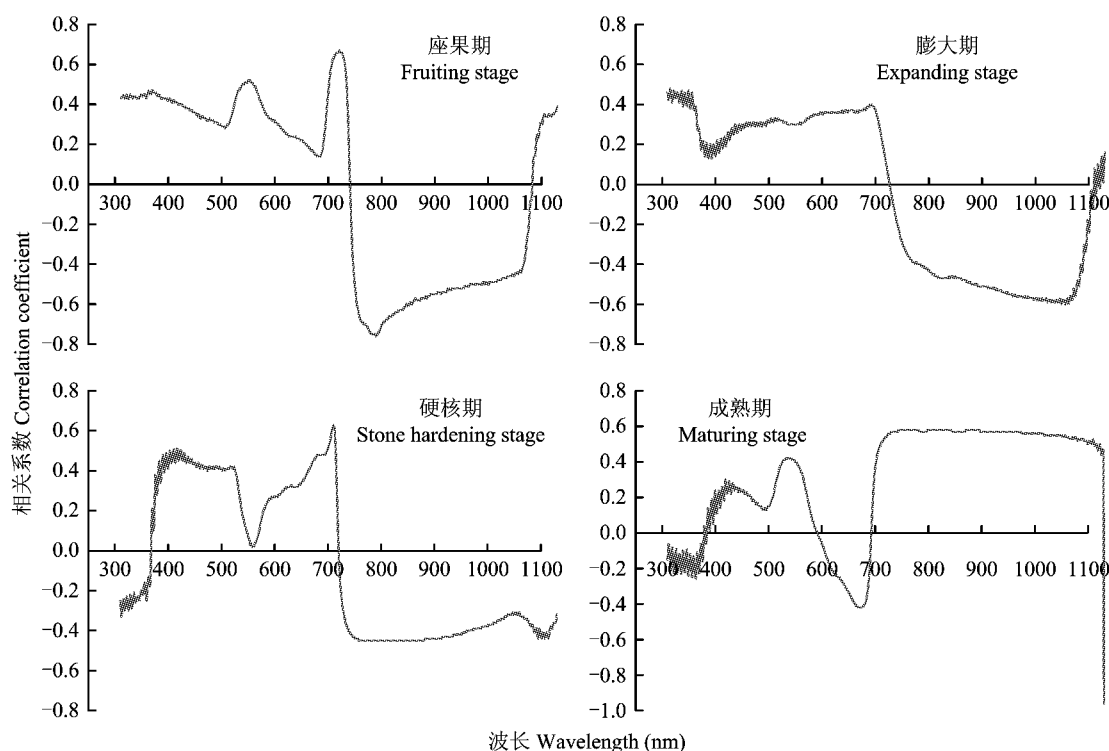


图 6 叶尔羌扁桃果实不同生长发育阶段叶片磷含量与光谱反射率的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficient between foliar P concentration and spectral reflectance of 'Yarkent' almond at different growing stages

2.4.3 叶片钾含量与不同波段光谱反射率的相关性

果实座果期,叶尔羌扁桃叶片钾含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 750 nm 波段呈正相关性,在 693 ~ 700 nm 波段,相关系数最高值达到 0.7; 在 751 ~ 1082 nm 波段呈负相关性,在 815 ~ 894 nm 波段,相关系数最高值达到 0.71; 在 1083 ~ 1130 nm 波段呈正相关性,相关系数呈上升趋势,但相关性不强; 因此,815 ~ 894 nm 波段可作为叶尔羌扁桃果实座果期叶片钾含量的指示波段。

果实膨大期,叶尔羌扁桃叶片钾含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 804 nm 波段呈正相关

性,在 345 ~ 368 nm 波段相关系数达到最高值,为 0.59; 在 807 ~ 1082 nm 波段呈负相关性,且相关性很弱,相关系数最大值仅为 0.32; 在 1083 ~ 1130 nm 波段,呈正相关性,随着波长的增加,相关系数逐渐增大,最大值为 0.55; 因此,345 ~ 368 nm 波段可作为叶尔羌扁桃果实膨大期叶片钾含量的指示波段。

果实硬核期,叶尔羌扁桃叶片钾含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 368 nm 波段,371 ~ 375 nm,713 ~ 1130 nm 波段呈较弱的负相关性,相关系数最高值仅为 0.2; 在 387 ~ 712 nm 波段呈较弱的

正相关性,相关系数最高值仅为 0.17;因此,没有合适波段可作为叶尔羌扁桃果实硬核期叶片钾含量的指示波段。

果实成熟期,叶尔羌扁桃叶片钾含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 704 nm 波段呈正相关性,在 475 ~ 491 nm 波段,相关系数最高值达到

0.63;在 705 ~ 1113 nm 波段与 1130 nm 波点处呈较弱的负相关性,相关系数最高值仅为 0.38;在 1114 ~ 1129 nm 波段,呈较弱的正相关性;因此,475 ~ 491 nm 波段可作为叶尔羌扁桃果实成熟期叶片钾含量的指示波段(图 7)。

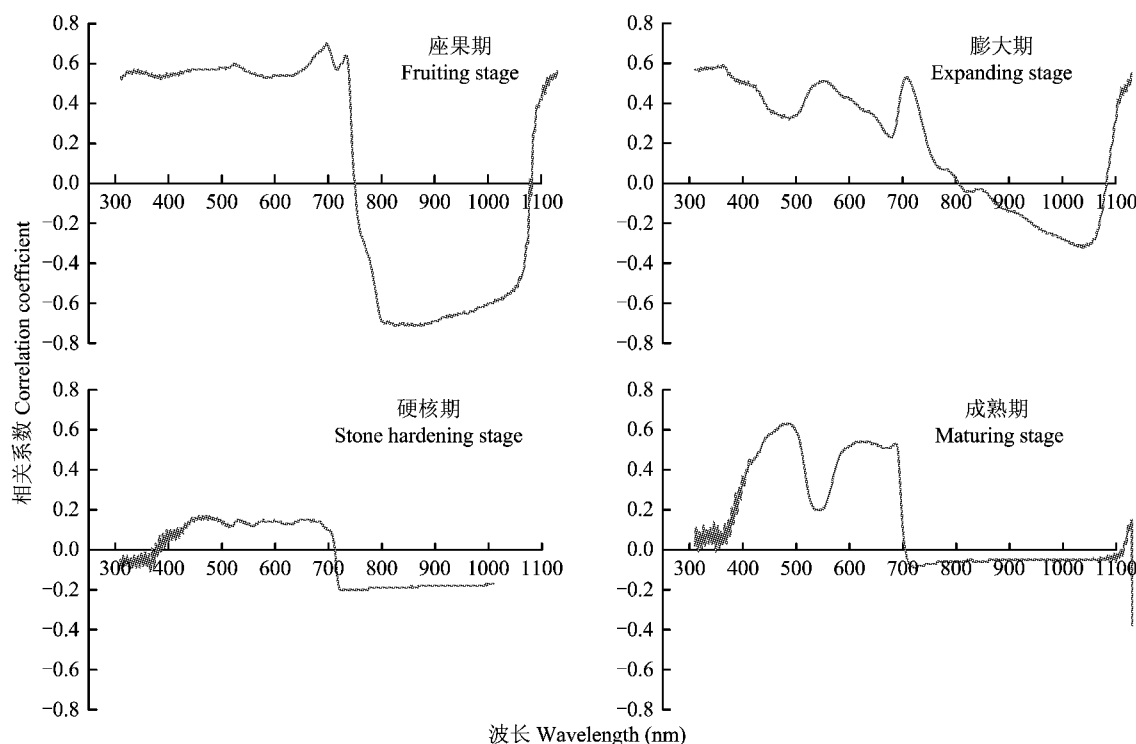


图 7 叶尔羌扁桃果实不同生长发育阶段叶片钾含量与光谱反射率的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficient between foliar K concentration and spectral reflectance of 'Yarkent' almond at different growing stages

3 讨论

影响植物对可见光波段光质吸收和反射的重要因素包括叶片颜色、结构、水分状况与长势等。其中叶绿素对光的吸收作用最大。叶尔羌扁桃在座果期、果实膨大期、硬核期、成熟期叶片光谱曲线呈现“蓝紫波段低-绿波段高-橙红波段低”的趋势,由于叶绿素在 550 nm 波段吸收很弱引起在此波段附近出现第一个强反射峰。叶绿素在红光与蓝紫光部分有两个强吸收区,在红光部分 680 nm 附近出现“红谷”,由于此波段是藻胆素中藻蓝蛋白的主要吸收带,“红谷”的出现是由于色素的强烈吸收形成的。由此可见,扁桃与轮台白杏叶片类似,在可见光波段范围内,具有“蓝边”、“绿峰”、“黄边”、“红谷”的光谱特性^[23]。在近红外 780 ~ 1050 nm 波段,反射率较高,叶肉内海绵组织结构的反射表面空

腔很大,并且细胞内叶绿素呈水溶胶状态,具有强烈的红外反射,较高的透射率,极低的吸收率。本研究表明,550 nm 和 680 nm 波段为‘叶尔羌’扁桃 N、P、K 营养诊断的敏感波段。Thomas 等^[22]通过测定甜椒叶片的反射率来预测 N 元素含量,发现 N 元素营养对甜椒叶片在 550 nm 和 670 nm 波段反射率的影响较大,这与胡珍珠等研究轮台白杏叶片光谱反射率在 550 nm 处差异显著的结果一致^[23]。

‘叶尔羌’扁桃树体 N、P、K 叶片光谱营养诊断的敏感时期为果实成熟期与硬核期。有关作物对 N、P、K 光谱诊断敏感期的研究较多。不同植物叶片光谱特性对 N、P、K 素的敏感期也不同。缺氮会导致叶片光谱反射率增加,在光谱特征曲线上表现为反射率上升^[6]。有研究学者发现夏玉米叶片近红外波段处叶片反射率随氮肥用量的增加而提高^[32];而在可见光波段,随着氮肥施用量的增加,

在绿光波段反射率明显降低^[30]。

由于光谱仪识别磷元素不敏感,国内外关于利用光谱反射率来估测作物磷元素的营养状况的研究相对较少。王磊等发现春玉米磷素营养的光谱响应敏感期是大喇叭口期,磷元素营养的光谱敏感波段为 350 ~ 730 nm 和 1420 ~ 1800 nm^[10]。由于影响磷素光谱反射率变化的因素较为复杂,关于植物磷营养元素的光谱诊断研究结果差异较大,不同磷营养水平下,影响作物反射率变化的内在生理、生化指标与光谱特征值之间的关系,以及最佳光谱波段和敏感期的筛选尚待深入研究。

钾营养元素对植物光谱响应特性,比氮素迟钝,比磷素敏感。不同钾施肥水平处理‘叶尔羌’扁桃的光谱反射率存在显著性差异。王珂等发现水稻冠层及叶片反射光谱在不同 K 营养水平下,均存在有规律的显著性差异^[33]。王磊等发现春玉米不同生育时期叶片光谱反射率与叶片钾含量的相关性之间存在显著性差异,春玉米喇叭口期反映钾营养状况的敏感波段为 730 ~ 930 nm 和 960 ~ 1100 nm^[34]。张俊华等发现 680 nm 和 810 nm 为夏玉米钾元素在可见光和近红外区域的敏感波段,拔节期为诊断钾元素的敏感时期^[35,36]。由于植物叶片的结构、水分含量等与钾的营养状况关系密切,间接影响近中红外的光谱特征值,因此钾营养元素所对应的敏感波段可以在近中红外波段进行筛选。Al-Abbas 等研究发现玉米钾营养元素不足会导致近红外光谱反射率在 830 nm、940 nm、1100 nm 波段处较低^[25]。

‘叶尔羌’扁桃果实座果期、膨大期、硬核期、成熟期叶片 N 素的敏感波段分别为 815 ~ 894 nm, 375 ~ 398 nm, 608 ~ 616 nm, 429 ~ 437 nm; P 素的敏感波段为 766 ~ 802 nm, 1023 ~ 1063 nm, 708 ~ 713 nm, 1130 nm; 座果期、膨大期、成熟期叶片 K 素的敏感波段分别为 815 ~ 894 nm, 345 ~ 368 nm, 475 ~ 491 nm。

4 结论

‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期叶片光谱反射率显著受到波长的影响,变异最小的波段位于可见光波段,在近红外区域。不同生长发育阶段叶片 N、P、K 素存在不同的光敏感波段。叶尔羌扁桃果实座果期、膨大期、硬核期、成熟期叶片 N 元素的敏感波段分别为 815 ~ 894 nm, 375 ~ 398 nm, 608 ~ 616 nm, 429 ~ 437 nm; 磷元素的敏感波段为 766 ~ 802 nm, 1023 ~ 1063 nm, 708 ~ 713 nm, 1130 nm;

座果期、膨大期、成熟期叶片钾元素的敏感波段分别为 815 ~ 894 nm, 345 ~ 368 nm, 475 ~ 491 nm。无论 N、P、K 施肥水平,果实不同生育期光谱指数 (ND₇₀₅) 之间均存在显著 ($P < 0.05$) 或者极显著差异 ($P < 0.01$), 光谱反射率呈现硬核期 > 座果期 > 膨大期 > 成熟期。因此,果实成熟期与硬核期是叶片 N、P、K 光谱营养诊断的敏感时期。

参考文献:

- [1] 李民赞. 光谱分析技术及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 176 ~ 180.
Li M Z. Technique and application of spectral analysis [M]. Beijing: Science Press, 2006: 176 ~ 180.
- [2] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 基于冠层反射光谱的水稻群体叶片氮素状况监测 [J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 807 ~ 812.
Xue L H, Cao W X, Luo W H, et al. Diagnosis of nitrogen status in rice leaves with the canopy spectral reflectance [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(7): 807 ~ 812.
- [3] Bronson K F, Chua T T, Booker J D. In-season nitrogen status in sensing irrigated cotton. II. Leaf nitrogen and biomass [J]. Soil Science Society of American Journal, 2003, 67: 1439 ~ 1448.
- [4] Racy M B, James S S, Garry V. Nitrogen deficiency detection using reflected short-wave radiation from irrigated corn canopies [J]. Agronomy Journal, 1996, 88: 1 ~ 5.
- [5] 蒋焕煜, 彭永石, 谢丽娟, 等. 扫描次数对番茄叶漫反射光谱和模型精度的影响研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(8): 1763 ~ 1766.
Jiang H Y, Peng Y S, Xie L J, et al. Studies on impact of scan times of tomato leaf diffuse reflection spectrum and model precision [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(8): 1763 ~ 1766.
- [6] 李敏霞. 苹果叶片光谱反射率与叶绿素和全氮含量的相关研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2009. 1 ~ 40.
Li M X. Correlation between apple leaf spectral reflectance and chlorophyll content and leaf total nitrogen [D]. Yanglin Shanxi: MS Thesis of Northwest Agriculture and Forestry Science and Technology University, 2009. 1 ~ 40.
- [7] 周丽丽, 冯汉字, 阎忠敏, 等. 玉米叶片氮含量的高光谱估算及其品种差异 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 195 ~ 199.
Zhou L L, Feng H Y, Yan Z M, et al. High spectral estimation and difference among varieties of maize in leaf nitrogen content [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 195 ~ 199.
- [8] 孙红, 李民赞, 张彦娥, 等. 不同施氮水平下玉米冠层光谱反射特征分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3): 715 ~ 719.
Sun H, Li M Z, Zhang Y E, et al. Spectral characteristics of corn under different nitrogen treatments [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(3): 715 ~ 719.

- [9] 梁惠平, 刘湘南. 玉米氮营养指数的高光谱计算模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 250–255.
Liang H P, Liu X N. Hyperspectral calculation model of corn nitrogen nutrition index[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 250–255.
- [10] 王磊, 白由路, 卢艳丽, 等. 基于光谱分析的玉米氮素营养诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 333–340.
Wang L, Bai Y L, Lu Y L, *et al.* Nitrogen nutrition diagnosis for corn based on spectral analysis[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 333–340.
- [11] 张俊华, 张佳宝. 冬小麦特征光谱对其全氮和硝态氮的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 104–110.
Zhang J H, Zhang J B. Response of the spectral reflectance to total N and NO_3^- -N of winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 104–110.
- [12] 胡昊, 白由路, 杨俐苹, 等. 不同氮营养冬小麦冠层光谱红边特征分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1317–1323.
Hu H, Bai Y L, Yang L P, *et al.* Red edge parameters of winter wheat canopy under different nitrogen levels[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1317–1323.
- [13] 覃夏, 王绍华, 薛利红. 江西鹰潭地区早稻氮素营养光谱诊断模型的构建与应用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 691–698.
Tan X, Wang S H, Xue L H. Nitrogen nutrition diagnosis of early rice with NDVI and its application for nitrogen topdressing recommendation at Yingtan, Jiangxi Province [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(4): 691–698.
- [14] 唐延林. 水稻高光谱特征及其生物理化参数模拟与估测模型研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2004: 1–64.
Tang Y L. Study on the hyperspectral characteristics and simulating and estimating models about biophysical and biochemical parameters of rice [D]. Hangzhou: PhD Thesis of Zhejiang University, 2004. 1–64.
- [15] 韩小平, 左月明, 李灵芝. 水培番茄施氮量近红外光谱预测模型的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(9): 2479–2483.
Han X P, Zuo Y M, Li L Z. Study on the near infrared spectral prediction model of hydroponic tomatoes[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(9): 2479–2483.
- [16] 李灵芝, 郭荣, 李海平, 等. 不同氮浓度对温室番茄生长发育和叶片光谱特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 965–969.
Li L Z, Guo R, Li H P, *et al.* Effects of nitrogen concentration in hydroponics on growth and development of tomato and spectral characteristics of leaf in greenhouse [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 965–969.
- [17] 王克如, 潘文超, 李少昆, 等. 不同施氮量棉花冠层高光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1868–1872.
Wang K R, Pan W C, Li S K, *et al.* Monitoring models of the plant nitrogen content based on cotton canopy hyperspectral reflectance[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(7): 1868–1872.
- [18] 杨红丽, 陈功, 吴建付. 施氮水平对多花黑麦草植株氮含量及反射光谱特征的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 239–244.
Yang H L, Chen G, Wu J F. Plant nitrogen content of annual ryegrass and spectral reflectance response to nitrogen application level[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(3): 239–244.
- [19] 李雪飞, 韩甜甜, 董彦, 等. 紫叶稠李叶片色素及氮含量与其光谱反射特性的相关性[J]. 林业科学, 2011, 47(8): 75–81.
Li X F, Han T T, Dong Y, *et al.* Relationships between spectral reflectance and pigment or nitrogen concentrations in leaves of *Padus Virginiana* ‘Schubert’ [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(8): 75–81.
- [20] 田永超, 杨杰, 姚霞, 等. 利用叶片高光谱指数预测水稻群体叶层全氮含量[J]. 作物学报, 2010, 36(9): 1529–1537.
Tian Y C, Yang J, Yao X, *et al.* Monitoring canopy leaf nitrogen concentration based on leaf hyperspectral indices in rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(9): 1529–1537.
- [21] 贺冬仙, 胡娟秀. 基于叶片光谱透过特性的植物氮素测定[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 214–218.
He D X, Hu J X. Plant nitrogen detection based on leaf spectral transmittance[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 214–218.
- [22] Thomas J R, Oerther G F. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements [J]. Agronomy Journal, 1972, 64: 11–13.
- [23] 胡珍珠, 潘存德, 王世伟, 等. 轮台白杏叶片氮磷钾含量光谱估算模型[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(2): 238–248.
Hu Z Z, Pan C D, Wang S W, *et al.* Models for estimating foliar NPK content of *armeniaca vulgaris* ‘luntaibaixing’ using spectral reflectance[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(2): 238–248.
- [24] Osborn S L, Schepers J S, Schlemmer M R, *et al.* Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements[J]. Agronomy Journal, 2002, 94: 1215–1221.
- [25] Al-Abbas A H, Barr R, Hall J D, *et al.* Spectra of normal and nutrient deficient maize leaves [J]. Agronomy Journal, 1974, 66: 16–20.
- [26] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, *et al.* Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74: 229–239.
- [27] Milton N M, Ager C M, Eiswerth B A, *et al.* Arsenic and selenium induced changes in spectral reflectance and morphology of soybean plants[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30(3): 263–269.
- [28] Milton N M, Eiswerth B A, Ager C M. Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 36: 121–127.

- [29] 杨波, 车玉红, 崔艳丽, 等. 扁桃叶片矿质元素质量分数的年周期变化[J]. 西北农业学报, 2013, 22(4): 114–119.
Yang B, Che Y H, Cui Y L, *et al.* Annual periodical variation for mineral element mass fraction of Almond leaves[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2013, 22(4): 114–119.
- [30] 高淑然, 潘存德, 王振锡, 等. 轮台白杏叶片光谱特征及对施肥的响应[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(11): 1961–1966.
Gao S R, Pan C D, Wang Z X, *et al.* The leaf spectral characteristics of *Armenica Vulgaris* 'Luntaibaixing' and its response to the fertilizer[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2011, 48(11): 1961–1966.
- [31] David W, Natalie T B, Matthew H T, *et al.* Photosynthesis and reflectance indices for rainforest species in ecosystems undergoing progression and retrogression along a soil fertility chronosequence in New Zealand[J]. *Oecologia*, 2005, 144(2): 233–244.
- [32] 程一松, 胡春胜, 郝二波, 等. 氮素胁迫下的冬小麦高光谱特征提取与分析[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 86–93.
Cheng Y S, Hu C S, Hao E B, *et al.* Analysis and extraction of hyperspectral information feature of winter wheat under nitrogen stress condition[J]. *Resources Science*, 2003, 25(1): 86–93.
- [33] 王珂, 沈掌泉, 王人潮. 不同钾营养水平的水稻冠层和叶片光谱特征研究初报[J]. 科技通报, 1997, 13(4): 211–214.
Wang K, Shen Z Q, Wang R C. Study on rice canopy and leaf spectral characteristics under different levels of potassium nutrition[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1997, 13(4): 211–214.
- [34] 王磊, 白由路, 杨俐苹. 春玉米磷素营养的光谱响应及诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 802–808.
Wang L, Bai Y L, Yang L P. Spectral response and diagnosis of phosphorus nutrition in corn[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5): 802–808.
- [35] 张俊华, 张佳宝, 钦绳武. 不同施肥长期定位试验地夏玉米冠层光谱特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 874–879.
Zhang J H, Zhang J B, Qin S W. Spectral reflectance characteristics of summer maize under long-term fertilization[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4): 874–879.
- [36] 王磊, 白由路. 不同钾素处理春玉米叶片营养元素含量变化及其光谱响应[J]. 遥感学报, 2007, 11(5): 641–647.
Wang L, Bai Y L. Nutrients change and spectral response of spring corn leaf for varying amounts of potassium fertilization[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(5): 641–647.