

余志虹,徐潇,邹勇,等.成熟期烤烟钾积累量时空分布特征及光谱估算模型[J].华中农业大学学报,2025,44(1):113-119.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.01.012

成熟期烤烟钾积累量时空分布特征及光谱估算模型

余志虹¹,徐潇¹,邹勇²,陈建军³,叶晓青²,钟光华²,李军业²,关能创²

1. 深圳波顿香料有限公司,深圳 518051; 2. 深圳烟草工业有限责任公司,深圳 518109;
3. 华南农业大学烟草研究室,广州 510642

摘要 为实时无损监测大田烤烟钾素积累状况,以烤烟品种K326为试验材料,研究不同施氮量条件下成熟期烤烟叶层间钾积累量变化规律及其与冠层光谱参数间的相关关系。结果显示:烟株上层钾积累量除少数波段与光谱反射率相关外,大部分波段两者不相关,中下层钾积累量与可见光波段光谱反射率呈显著负相关,与近红外波段呈显著正相关。适用于不同叶层钾积累量估算的最优光谱参数并非完全一致,其中上层、中层、上中层钾积累量估算的最优光谱参数为比值植被指数RVI(810,680),而下层、中下层、上中下层植株钾积累量则与红边振幅(D_{ArEd})相关性最高。建立的烤烟中层、下层、上中层、中下层、植株叶钾积累量的估算模型分别为: $y = -0.002x^2 + 0.159x - 0.6531 (R^2 = 0.903^{**})$ 、 $y = 8.8736x^2 - 4.1032x + 0.5164 (R^2 = 0.618^{**})$ 、 $y = 0.0856x^{1.29} (R^2 = 0.744^{**})$ 、 $y = 6.6558x^2 + 0.5056x - 0.3657 (R^2 = 0.821^{**})$ 、 $y = 0.2803x^{0.5774} (R^2 = 0.938^{**})$,经检验模型稳定性较好。研究表明,利用光谱参数构建的估算模型可实现烤烟植株及中下层叶钾积累量的有效反演。

关键词 烤烟; 钾积累量; 时空分布; 冠层光谱; 估算模型

中图分类号 S572.01 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)01-0113-07

钾是烤烟生长发育必需的营养元素之一,能促进烤烟光合作用,提高植株的抗寒性、抗旱性及抗病虫害能力^[1-2]。适宜的钾素供应不仅有助于提升烟叶品质,还可以提高肥料的利用效率,降低农业面源的环境污染,具有显著的社会、经济及生态效益^[3-5]。快速准确获取田间烤烟钾素营养状况是实现钾肥精准运筹管理的基础,常规钾素化学分析方法需破坏性取样,且时效性不高,难以实现烤烟钾素营养的高效诊断。

随着光谱分析技术的发展,国内外研究者利用光谱技术实现了对苹果^[6]、柑橘^[7]、锦橙^[8]、蜜柚^[9]等农作物钾素含量的有效反演。目前,对烤烟营养元素光谱估算的研究大多数集中在氮素营养监测方面,并构建了相应的烤烟光谱氮素估算模型^[10-12],关于烤烟钾素估算方面研究则相对较少。李佛琳等^[13]研究指出,1420 nm吸收峰开始位置(λ_{s1420})可有效估算单叶钾含量,李梦竹等^[14]研究了水分胁迫下的烤烟叶片钾含量与光谱特征变化,并利用mSR705、

SDr、DVI、MSAVI2、 λg 、Dr、NDSI(2 275, 1 875)、RDVI等8个最佳敏感光谱指数构建烤烟单叶钾含量的BP神经网络模型。烤烟单叶光谱信息主要通过采摘叶片后进行室内采集^[13]或田间夹持叶片^[14]采集来获得,消除了田间土壤背景、大气及冠层结构等环境条件干扰,但所构建的光谱诊断模式是否适用于大田生产还需进一步验证,存在一定的局限性。

本研究考察打顶后烤烟钾积累量的时空分布特征,并分析烤烟各叶层钾积累量与冠层光谱参数间的相关关系,构建出烤烟不同叶层钾积累量的估算模型,旨在为大田烤烟各叶层钾素营养诊断及精准管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验分别于2010年和2021年在广东省烟叶主产区之一的始兴县马市镇进行,供试品种为烤烟

收稿日期:2024-01-06

基金项目:国家自然科学基金项目(31101108);国家烟草专卖局重点科技项目(110200902043);中国烟草实业发展中心科技项目(ZYSY201708);深圳烟草工业有限责任公司科技项目(SYGY202008)

余志虹,E-mail:yzhscau@126.com

通信作者:邹勇,E-mail:zouyongmail@126.com

K326,试验地为旱坡地,前作为花生,土壤pH 7.40,有机质15.03 g/kg,全氮0.98 g/kg,碱解氮84.04 mg/kg,全磷0.56 g/kg,速效磷6.70 mg/kg,全钾25.91 g/kg,速效钾100.03 mg/kg。

1.2 试验设计

设4个氮肥量处理,分别为纯氮0(N0)、105 kg/hm²(N1)、150 kg/hm²(N2)和195 kg/hm²(N3)。各处理均3次重复,随机区组排列,每个小区植烟100株左右,行距1.2 m,株距0.6 m,四周设保护行。各处理的磷、钾肥用量一致,磷肥全部基施,氮肥70%基施,追肥采用滴灌系统,将硝酸钾及碳酸氢铵溶解后,配制成质量分数为20%的溶液,按体积比1:100均匀施用。2月26日进行集中移栽,4月26日至5月1日进行现蕾打顶,留叶数为20~22片,5月7日进行

第1次采收,7月4日进行最后1次采收。其他栽培管理措施按照广东省韶关市优质烤烟生产技术规范进行。其中,2010年的试验数据主要用于构建估算模型,2021年试验数据用于模型验证。

1.3 测定项目和方法

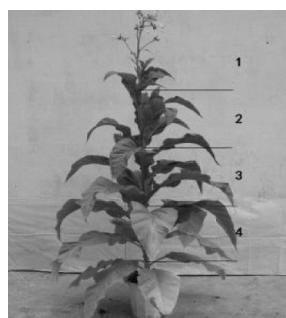
1)冠层光谱的测定。采用MSR-16R型多光谱辐射仪(美国Cropscan公司)测定冠层光谱,MSR-16R型多光谱辐射仪主要技术参数如表1所示。选择晴朗无云或少云的上午10:00—12:00采集烤烟冠层光谱反射率数据,光谱测量时辐射仪探头垂直向下,距离冠层的垂直高度约为1.5 m,每个小区测量10株,每株重复测量3次,共获得30组的光谱反射率数据,取平均值,即为该小区烤烟冠层的光谱反射率测量结果。

表1 MSR-16R型多光谱辐射仪的中心波长及其带宽

Table 1 The center wavelength and band width of MSR-16R multi-spectral radiometer

参数 Parameter	波段/nm Waveband															nm
	460	510	560	610	660	680	710	760	810	870	950	1 100	1 220	1 300	1 500	1 650
中心波长 Center wavelength	460.4	511.4	560.9	610.7	661.7	682.2	711.4	761.2	812.6	871.6	951.2	1 099.5	1 222.8	1 301.3	1 500.2	1 669.0
带宽 Band width	6.8	7.7	9.4	10.3	11.6	11.5	12.4	10.6	11.4	12.2	13.3	16.5	11.4	12.2	14.8	200.0

2)叶层的分层方法。于打顶定高后,参照王纪华等^[15]冠层分层方法将烤烟植株冠层平均分成3层,定义为上、中、下层,如图1所示。



1.打顶位置 Place of tip pruning;2.上层 Upper layer;3.中层 Middle layer;4.下层 Lower layer.

图1 烤烟叶层分层方法

Fig.1 Leaf layers of flue-cured tobacco

3)钾含量及钾积累量的测定。光谱测定后,每小区随机取3株烟,用园艺剪分别剪下各叶层叶片,经105℃杀青30 min,70℃烘至恒质量后,测定各叶层叶片干物质质量(L_{LDW})。粉碎机粉样,过孔径0.25 mm网筛,装入自封袋,用于钾含量(质量分数)的测定。采用火焰光度法^[4]测钾含量(L_{LKC}),并计算钾积累量(L_{LKA})。 L_{LKA} 计算公式:

$$L_{LKA} = L_{LKC} \times L_{LDW} \quad (1)$$

1.4 数据处理

参照前人植物光谱参数计算方法,结合辐射计波段构成(表1)计算可见光至近红外范围内的比值植被指数(RVI)、差值植被指数(DVI)、归一化植被指数(NDVI)、增强植被指数(EVI)、土壤调整植被指数(SAVI)、红边振幅($D_{\lambda Red}$)及优化土壤调整植被指数(OSAVI),计算方法如表2所示。

采用Excel 2010进行数据处理和图形绘制,采用Matlab 2012和SPSS 12.0统计软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 烤烟钾积累量的时空分布特征

由图2可知,各处理植株烟叶钾积累量在打顶后均呈先增加后减少的规律。5月17日,中低氮处理(N0和N1、N2)钾积累量达到最大值后减小;而高氮处理(N3)推迟12 d,于5月29日才达到钾积累量的最大值,之后减小;N2、N3处理间的钾积累量最大值差异并不显著,但均显著大于低氮(N0、N1)处理;随着成熟期的推进,植株钾积累量的主导叶层发生变化,表现为成熟前期(5月17日之前)下层烟叶钾积累量占比60%以上,是整个烤烟植株钾积累量的主导叶层,成熟中后期(5月29日之后)烤烟

表2 光谱参数计算方法

Table 2 Algorithm of different multispectral indices

光谱参数 Spectral parameter	缩写 Abbreviation	计算方法 Calculation method
比值植被指数 ^[16] Ratio vegetation index	RVI	R_{NIR}/R_R
差值植被指数 ^[16] Differential vegetation index	DVI	$R_{\text{NIR}} - R_R$
归一化植被指数 ^[16] Normalized difference vegetation index	NDVI	$\frac{R_{\text{NIR}} - R_R}{R_{\text{NIR}} + R_R}$
增强植被指数 ^[17] Enhanced vegetation index	EVI	$\frac{2.5(R_{\text{NIR}} - R_{680})}{(1 + R_{\text{NIR}} + 6R_{680} - 7.5R_{460})}$
红边振幅 ^[18] Red edge amplitude	$D_{\lambda\text{Red}}$	$(R_{760} - R_{710})/50$
土壤调整植被指数 ^[19] Soil-adjusted vegetation index	SAVI	$\frac{1.5(R_{870} - R_{680})}{R_{870} + R_{680} + 0.5}$
优化土壤调节植被指数 ^[20] Optimized soil-adjusted vegetation index	OSAVI	$\frac{(1 + 0.16)(R_{810} - R_{680})}{(R_{810} - R_{680} + 0.16)}$

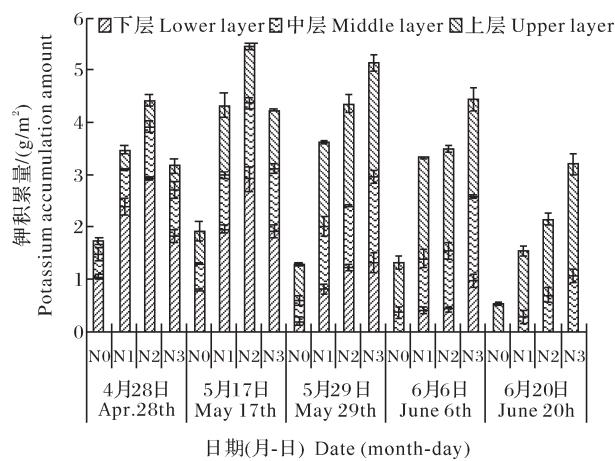


图2 施氮量对烤烟叶钾积累量时空分布的影响

Fig.2 The potassium accumulation spatial-temporal distribution of flue-cured tobacco leaf with different nitrogen application rate

中上层逐渐成为植株钾积累量的主导叶层。

施氮量对烟叶钾积累量有较大影响, 成熟前期不同施氮量下钾积累量表现为 $N_2 > N_3 > N_1 > N_0$; 成熟中后期(5月29日之后)烟叶钾积累量随施氮量的提高而增加。一般认为随着氮素量的提高, 烟叶中的钾含量呈升高趋势, 成熟前期出现 N_3 处理钾积累量小于 N_2 处理, 可能跟始兴烟区前期干旱(数据未列出)导致氮素效应推迟有关。

2.2 钾积累量时空分布与冠层光谱反射率的相关性

对烤烟叶层进行多种组合(上层、中层、下层、上中层、中下层和上中下层), 以便于分析烤烟钾积累量在不同叶层间的时空分布特征及其与冠层光谱反射率的相关性。如图3所示, 各叶层钾积累量与光谱反射率相关关系差异较大, 上层钾积累量除少数波段与光谱反射率相关外, 大部分波段两者不相关; 而

中下层钾积累量与大部分波段光谱反射率呈显著相关关系。在可见光波段, 中下层钾积累量与光谱反射率之间存在显著的负相关关系, 而在近红外波段则表现出显著的正相关关系。中层钾积累量与光谱反射率的相关关系和植株(上中下层)钾积累量与光谱反射率相关关系相似度最高, 即中层钾积累量能较好反映植株钾积累量与冠层光谱反射率间的关系。

2.3 冠层植被指数、红边振幅与烤烟各叶层钾积累量的相关关系

由表3可知, 上层叶钾积累量与 RVI(810, 680)、SAVI、DVI(810, 680) 表现出极显著的正相关关系, 与 NDVI(810, 680) 呈显著正相关, 其中与 RVI(810, 680) 相关性最大, 用 RVI(810, 680) 来估算上层钾积累量较好; 同时可以看出, 适用于中层、上中层叶钾积累量估算的最优光谱参数亦是 RVI(810, 680), 而下层、中下层、植株钾积累量则与 $D_{\lambda\text{Red}}$ 相关性最高, 说明下层、中下层、植株钾积累量用 $D_{\lambda\text{Red}}$ 来估算效果更好。

2010年试验烟叶成熟期5次采样获取的1800组光谱数据和540组钾积累量数据用于模型构建, 2021年于打顶后10、30 d随机选取了原试验田附近2块烟田各10株烟进行冠层光谱数据采集, 所获得120组光谱数据和36组钾数据用于模型验证。由表4可知, 除上层叶片外, 其余叶层及其组合的钾积累量与相应的最优光谱参数均能够建立较为有效的回归模型, 经过检验, 这些模型显示出良好的拟合效果, 可以有效地估算上述叶层的钾积累量。上层叶钾积累量与 RVI(810, 680) 多元线性回归不显著, 因此, 上层叶钾积累量的光谱估算方法仍需进一步研究。

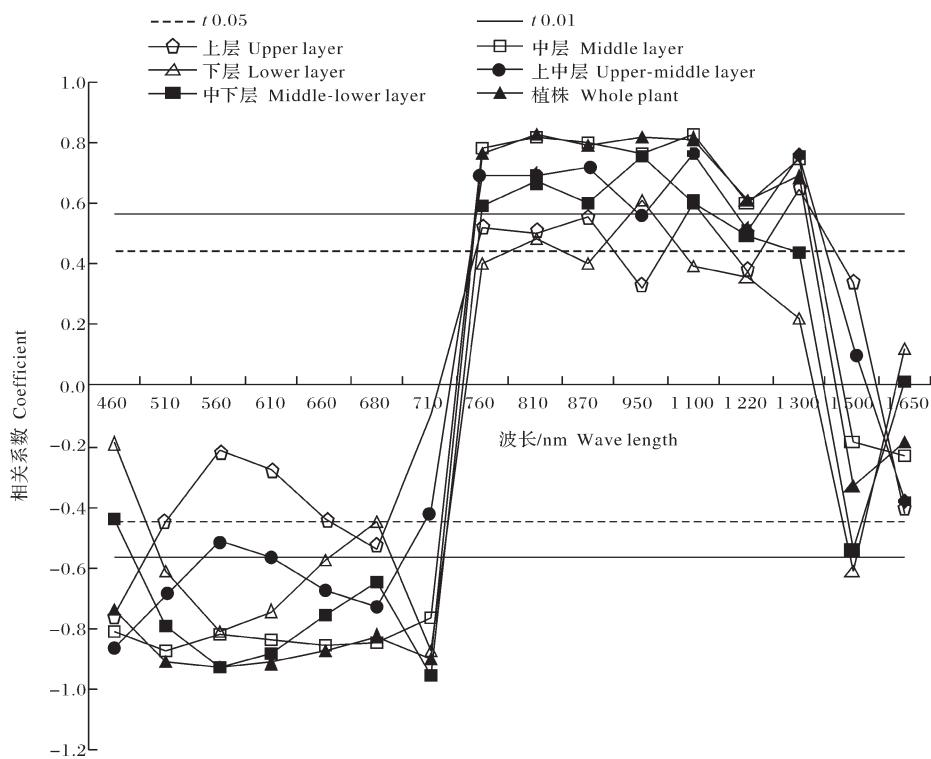


图3 烤烟各叶层钾积累量与冠层光谱反射率的相关关系

Fig.3 Correlation relation between potassium accumulation distribution at each layer and spectra reflectance of flue-cured tobacco leaf

表3 各叶层钾积累量与冠层植被指数、红边振幅的相关关系

Table 3 Correlation relation between potassium accumulation of each leaf layers and canopy spectra index, $D_{\lambda \text{Red}}$

叶层 Leaf layers	比值指数 RVI (810, 680)	差值指数 DVI (810, 680)	归一化植被指数 NDVI (810, 680)	增强植被指数 EVI ₈₁₀	土壤调整植被指数 SAVI	改进土壤调节植被指数 OSAVI	红边振幅 $D_{\lambda \text{Red}}$
上层 Upper layer	0.60**	0.55*	0.56*	0.38	0.57**	0.54*	0.29
中层 Middle layer	0.95**	0.89**	0.88**	0.85**	0.88**	0.88**	0.86**
下层 Lower layer	0.52*	0.51*	0.48*	0.62**	0.47*	0.51*	0.76**
上中层 Upper-middle layer	0.82**	0.76**	0.76**	0.63**	0.77**	0.75**	0.58
中下层 Middle-lower layer	0.75**	0.72**	0.69**	0.78**	0.68**	0.71**	0.90**
整株 Whole plant	0.93**	0.89**	0.87**	0.87**	0.87**	0.88**	0.94**

注: *表示显著相关($P<0.05$); **表示极显著相关($P<0.01$)。下同。Note: * indicates significant correlation at the level of 0.05; ** indicates significant correlation at the level of 0.01. The same as below.

表4 不同叶层钾积累量回归模型及模型验证

Table 4 Regression models and validation based upon spectra parameters against different leaf layers potassium accumulation

叶层 Leaf layers	光谱参数 Spectral parameter	模型建立 Model calibration		模型验证 Model validation	
		回归模型 Regression model	决定系数 R^2	决定系数 R^2	回归剩余残差 RMSE
上层 Upper layer	RVI(810, 680)	$y = -0.0019x^2 + 0.1445x - 0.1731$	0.357	/	/
中层 Middle layer	RVI(810, 680)	$y = -0.002x^2 + 0.159x - 0.6531$	0.903**	0.911**	0.213
下层 Lower layer	$D_{\lambda \text{Red}}$	$y = 8.8736x^2 - 4.1032x + 0.5164$	0.618**	0.632**	0.301
上中层 Upper-middle layer	RVI(810, 680)	$y = 0.0856x^{1.29}$	0.744**	0.739**	0.314
中下层 Middle-lower layer	$D_{\lambda \text{Red}}$	$y = 6.6558x^2 + 0.5056x - 0.3657$	0.821**	0.846**	0.272
整株 Whole plant	$D_{\lambda \text{Red}}$	$y = 0.2803x^{0.5774}$	0.938**	0.933**	0.216

3 讨 论

植物冠层的光谱特性在可见光波段主要受叶绿素影响^[21], 近红外区域则主要受冠层、地上生物量以及叶片结构等影响^[22]。可见光波段烤烟冠层光谱反射率与植株及中下层钾积累量均呈显著负相关, 近红外波段呈显著正相关, 与张俊华等^[23]在夏玉米、冬小麦上的研究结果类似。同时, 烤烟以成熟落黄叶片为收获对象, 成熟期烤烟下层烟叶的不断落黄、采收, 茎叶角度增大、叶片失绿以及叶片数减少, 而上层烟叶由于其开片度及生物量的增加, 导致不同叶层间的光谱特征发生较大变化^[18], 这可能是中层钾积累量与光谱反射率的相关关系和植株(上中下层)钾积累量与光谱反射率相关关系相似度最高的原因。

光谱特征参数将简单的单波段光谱信息转化为组合波段信息^[24], 可有效降低外界环境因素的影响, 尤其是离地面更近的下层烟叶, 一阶微分有利于限制土壤等环境低频噪音对目标光谱的影响^[25-26]。本研究中适用于中层、上中层钾积累量估算的最优光谱参数为 RVI(810, 680), 构建基于光谱特征参数 RVI(810, 680)的烤烟中层、上中层叶钾积累量的估算模型分别为: $y = -0.002x^2 + 0.159x - 0.6531$ ($R^2 = 0.903^{**}$)、 $y = 0.0856x^{1.29}$ ($R^2 = 0.744^{**}$); 而下层、中下层和植株钾积累量与基于一阶微分的红边振幅($D_{\lambda\text{Red}}$)之间的相关性最高, 这表明估算下层、中下层和植株钾积累量用 $D_{\lambda\text{Red}}$ 效果更佳, 基于此构建基于光谱特征参数 $D_{\lambda\text{Red}}$ 烤烟下层、中下层、植株叶钾积累量的估算模型分别为: $y = 8.8736x^2 - 4.1032x + 0.5164$ ($R^2 = 0.618^{**}$)、 $y = 6.6558x^2 + 0.5056x - 0.3657$ ($R^2 = 0.821^{**}$)、 $y = 0.2803x^{0.5774}$ ($R^2 = 0.938^{**}$), 模型经检验具有较好的反演效果, 可用于大田烤烟成熟期不同叶层钾积累量的估算。单叶光谱并不能完全解释植被冠层的光谱反射特性, 模型的通用性受影响, 难以应用于作物大面积遥感监测^[27], 本研究所构建的钾素估算模型综合考虑了田间外界环境因素及烤烟群体结构的影响, 并进行了大田验证, 表现出较好的反演效果。曹志洪等^[28]研究指出, 南方烤烟对钾的吸收高峰在移栽后9~11周, 而生产上烟农更习惯在移栽后的40 d内将钾肥施完, 这就造成了土壤供钾与植株需求的不匹配, 分叶层的烤烟钾积累量实时无损估算对成熟期烤烟钾肥精准运筹管理具有参考意义。当然, 需要指出的是研究仅在单一品种、同一生态条件下进行, 品种特性、栽培措施、生

态条件等因素对烤烟冠层光谱特征都可能产生影响, 同时, 样本容量及氮素梯度等试验因素对模型的适用性也有一定影响, 因此, 研究结论还需在不同品种、生态、种植密度及水肥等条件下开展进一步研究和验证。

参 考 文 献 References

- [1] RAMAGE C M, WILLIAMS R R. Mineral uptake in tobacco leaf discs during different developmental stages of shoot organogenesis [J]. Plant cell reports, 2003, 21(11): 1047-1053.
- [2] 汪邓民, 周冀衡, 朱显灵, 等. 干旱胁迫下钾对烤烟生长及抗旱性的生理调节 [J]. 中国烟草科学, 1998, 19(3): 26-29. WANG D M, ZHOU J H, ZHU X L, et al. Physiological regulation of potassium on growth and drought resistance of flue-cured tobacco under drought stress [J]. Chinese tobacco science, 1998, 19(3): 26-29 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张士荣, 王军, 张德龙, 等. 有机肥C/N优化及钾肥运筹对烤烟钾含量及香气品质的影响 [J]. 华北农学报, 2017, 32(3): 220-228. ZHANG S R, WANG J, ZHANG D L, et al. The effect of K application on K content and aroma quality of leaves of flue-cured tobacco under the optimization of C/N with organic fertilizer [J]. Acta agriculturae boreali-sinica, 2017, 32(3): 220-228 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王根发, 张月华, 袁岐山, 等. 钾肥施用量对不同烤烟品种钾素吸收和积累的影响 [J]. 烟草科技, 2019, 52(4): 25-32. WANG G F, ZHANG Y H, YUAN Q S, et al. Effects of potassium application rate on its uptake and accumulation in flue-cured tobacco cultivars [J]. Tobacco science & technology, 2019, 52(4): 25-32 (in Chinese with English abstract).
- [5] 季璇, 陈熙卓, 宋文静, 等. 施钾量对不同生态区烤烟生长和钾肥利用率的影响 [J]. 中国烟草科学, 2020, 41(5): 36-42. JI X, CHEN X Z, SONG W J, et al. Effects of potassium application rate on growth and potassium use efficiency of flue-cured tobacco in different ecological regions [J]. Chinese tobacco science, 2020, 41(5): 36-42 (in Chinese with English abstract).
- [6] 朱西存, 姜远茂, 赵庚星, 等. 基于模糊识别的苹果花期冠层钾素含量高光谱估测 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 1023-1027. ZHU X C, JIANG Y M, ZHAO G X, et al. Hyperspectral estimation of potassium content in apple fluorescence canopy based on fuzzy recognition [J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2013, 33(4): 1023-1027 (in Chinese with English abstract).
- [7] 岳学军, 凌康杰, 王林惠, 等. 基于高光谱和深度迁移学习的柑橘叶片钾含量反演 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 186-195. YUE X J, LING K J, WANG L H, et al. Inversion of potassium content for citrus leaves based on hyperspectral and deep transfer learning [J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(3): 186-195 (in Chinese with English abstract).

- [8] 易时来,邓烈,何绍兰,等.锦橙叶片钾含量光谱监测模型研究[J].中国农业科学,2010,43(4):780-786.YI S L, DENG L, HE S L, et al. A spectrum based models for monitoring leaf potassium content of *Citrus sinensis* (L) cv. Jincheng orange [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2010, 43(4) : 780-786 (in Chinese with English abstract).
- [9] 栗方亮,孔庆波,张青.利用多种回归模型对比估算琯溪蜜柚叶片钾素含量[J].热带作物学报,2022,43(6):1191-1199. LI F L, KONG Q B, ZHANG Q. Comparative estimation of potassium contents in Guanxi honey pomelo leaves by multiple regression models [J]. *Chinese journal of tropical crops*, 2022, 43(6):1191-1199 (in Chinese with English abstract).
- [10] 孙志伟,王晓琳,张启明,等.基于无人机可见光谱平台的烤烟氮素营养诊断[J].光谱学与光谱分析,2021,41(2):586-591.SUN Z W, WANG X L, ZHANG Q M, et al. Diagnosis of nitrogen nutrition in flue-cured tobacco based on UAV visible spectrum platform [J]. *Spectroscopy and spectral analysis*, 2021, 41(2):586-591 (in Chinese with English abstract).
- [11] 叶晓青,邹勇,余志虹,等.烤烟冠层光谱参数与氮素垂直分布相关性研究[J].农业机械学报,2013,44(5):219-225. YE X Q, ZOU Y, YU Z H, et al. Correlation between nitrogen vertical distribution and spectral characteristics of flue-cured tobacco [J]. *Transactions of the CSAM*, 2013, 44 (5) : 219-225 (in Chinese with English abstract).
- [12] 谢晋,陈建军,吕永华,等.烤烟氮、碱量的冠层光谱检测[J].江苏农业学报,2013,29(4):766-771.XIE J, CHEN J J, LÜ Y H, et al. Monitoring for total nitrogen and nicotine contents of flue-cured tobacco based on canopy reflectance spectrum [J]. *Jiangsu journal of agricultural sciences*, 2013, 29(4):766-771 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李佛琳,赵春江,刘良云,等.烤烟成熟鲜烟叶生化组分高光谱估算方法筛选[J].农业工程学报,2006,22(3):88-94.LI F L, ZHAO C J, LIU L Y, et al. Selecting optimal hyperspectral method for estimation of biochemical concentration of FCV tobacco leaf at the maturity stage [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(3):88-94 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李梦竹,叶红朝,王惠,等.不同水分胁迫程度下烤烟叶片钾含量的光谱响应[J].中国烟草学报,2020,26(4):86-92.LI M Z, YE H C, WANG H, et al. Spectral response of potassium content in flue-cured tobacco leaves under different degree of water stress [J]. *Acta tabacaria sinica*, 2020, 26 (4) : 86-92 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王纪华,黄文江,劳彩莲,等.运用PLS算法由小麦冠层反射光谱反演氮素垂直分布[J].光谱学与光谱分析,2007,27(7):1319-1322.WANG J H, HUANG W J, LAO C L, et al. Inversion of winter wheat foliage vertical distribution based on canopy reflected spectrum by partial least squares regression method [J]. *Spectroscopy and spectral analysis*, 2007, 27 (7) : 1319-1322 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李达岁,阮思奇,胡青青,等.基于无人机遥感的果园冠层氮素估算及空间分析[J].华中农业大学学报,2023,42(4):158-166.LI D S, RUAN S Q, HU Q Q, et al. Nitrogen estimation and spatial analysis of orchard canopy based on UAV remote sensing [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(4):158-166 (in Chinese with English abstract).
- [17] JUSTICE C O, VERMOTE E, TOWNSHEND J R G, et al. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) : land remote sensing for global change research [J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1998, 36 (4):1228-1249.
- [18] 余志虹,邹勇,陈建军,等.成熟期烤烟叶面积指数的时空分布及其与冠层光谱参数的相关性[J].烟草科技,2022,55(9):29-35.YU Z H, ZOU Y, CHEN J J, et al. Spatial-temporal distribution of leaf area index for flue-cured tobacco at mature stage and its correlation with canopy spectral parameters [J]. *Tobacco science & technology*, 2022, 55 (9) : 29-35 (in Chinese with English abstract).
- [19] HUETE A R, JACKSON R D, POST D F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds [J]. *Remote sensing of environment*, 1985, 17(1):37-53.
- [20] RONDEAUX G, STEVEN M, BARET F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices [J]. *Remote sensing of environment*, 1996, 55(2):95-107.
- [21] THOMAS J R, GAUSMAN H W. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops [J]. *Agronomy journal*, 1977, 69(5):799-802.
- [22] GAUSMAN H W, ALLEN W A, CARDENAS R, et al. Relation of light reflectance to histological and physical evaluations of cotton leaf maturity [J]. *Applied optics*, 1970, 9 (3) : 545-552.
- [23] 张俊华,张佳宝.长期定位施肥条件下作物光谱特征及养分吸收量预测[J].农业工程学报,2014,30(7):173-181. ZHANG J H, ZHANG J B. Canopy spectral characteristics of crops and prediction on main nutrients uptake in long-term fertilization experiment [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30 (7):173-181 (in Chinese with English abstract).
- [24] 胡珍珠,潘存德,肖冰,等.基于光谱特征参量的‘温185’核桃叶片钾含量估测模型[J].应用生态学报,2016,27(5):1393-1400.HU Z Z, PAN C D, XIAO B, et al. Spectral characteristic parameters estimation models for potassium content of *Juglans regia* ‘Wen185’ leaves [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2016, 27(5):1393-1400 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李旭,石子琰,刘伟,等.基于高光谱的枣树叶片氮素表征方法[J].华中农业大学学报,2023,42(3):203-210.LI X, SHI Z Y, LIU W, et al. Method for characterizing nitrogen in jujube leaves based on hyperspectral analysis [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42 (3) : 203-210 (in Chinese with English abstract).

- [26] 李旭,陈柏林,周保平,等.利用叶片高光谱反射率预测棉花叶绿素含量[J].华中农业大学学报,2023,42(3):195-202.
LI X, CHEN B L, ZHOU B P, et al. Predicting the content of chlorophyll in cotton using hyperspectral reflectance of leaves [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42 (3):195-202(in Chinese with English abstract).
- [27] 李向阳,于建军,刘国顺.利用光谱反射率预测烤烟叶片烟碱含量[J].农业工程学报,2008,24(8):169-173.LI X Y, YU J J, LIU G S. Predicting leaf nicotine content of flue-cured tobacco using hyperspectral reflectance [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24 (8) : 169-173 (in Chinese with English abstract).
- [28] 曹志洪,周秀如,李仲林,等.我国烟叶含钾状况及其与植烟土壤环境条件的关系[J].中国烟草,1990,11(3):6-13.CAO Z H, ZHOU X R, LI Z L, et al. Potassium content of tobacco leaves in China and its relationship with environmental conditions of tobacco-growing soil [J]. Chinese tobacco science, 1990,11(3):6-13(in Chinese).

Spatial-temporal distribution and spectral estimation model of accumulation of potassium at mature stage of flue-cured tobacco

YU Zhihong¹, XU Xiao¹, ZOU Yong², CHEN Jianjun³, YE Xiaoqing²,
ZHONG Guanghua², LI Junye², GUAN Nengchuang²

1. Shenzhen Boton Flavors & Fragrances Co., Ltd., Shenzhen 518051, China;

2. Shenzhen Tobacco Industry Co., Ltd., Shenzhen 518109, China;

3. Tobacco Laboratory, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract The flue-cured tobacco variety K326 was used to study the changes in the accumulation of potassium in interlayer of leaves at the mature stage of tobacco under different application dosage of nitrogen and its correlation with parameters of canopy spectrum to real-time and nondestructively monitor the accumulation of potassium in flue-cured tobacco in field. The results showed that the accumulation of potassium in the upper layer of tobacco plants was not correlated with spectral reflectance in most bands except for a few bands. The accumulation of potassium in the middle and lower layers of tobacco plants was significantly negatively correlated with the spectral reflectance in the visible light band, and significantly positively correlated with the near-infrared band. The optimal spectral parameters for estimating the accumulation of potassium in different layers of leaf were not completely consistent. The optimal spectral parameter for estimating the accumulation of potassium in the upper, middle, and upper middle layers of tobacco plants was the ratio vegetation index RVI(810, 680), while the accumulation of potassium in the lower, middle lower, and upper middle lower layers of tobacco plants was most correlated with the red edge amplitude ($D_{\lambda, \text{Red}}$). The established model for estimating the accumulation of potassium in the middle, lower, upper, middle, and lower layers of tobacco leaves was $y = -0.002x^2 + 0.159x - 0.6531$ with R^2 of 0.903**, $y = 8.8736x^2 - 4.1032x + 0.5164$ with R^2 of 0.618**, $y = 0.0856x^{1.29}$ with R^2 of 0.744**, $y = 6.6558x^2 + 0.5056x - 0.3657$ with R^2 of 0.821**, $y = 0.2803x^{0.5774}$ with R^2 of 0.938**, and the model was tested to be stable. It is indicated that the established model for estimating the accumulation of potassium with parameters of spectrum can effectively invert the accumulation of potassium in the middle and lower layers and the whole plant of flue-cured tobacco.

Keywords flue-cured tobacco; accumulation of potassium; spatial-temporal distribution; canopy spectral; estimation model

(责任编辑:陆文昌)