

## 基于高光谱的草坪草叶绿素含量模拟估算

纪童<sup>1,2</sup>, 王波<sup>1,2</sup>, 杨军银<sup>1,2</sup>, 柳小妮<sup>1,2\*</sup>, 王洪伟<sup>3</sup>, 王彩玲<sup>4</sup>, 潘冬荣<sup>5</sup>, 徐君<sup>6</sup>

1. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070
2. 草业生态系统教育部重点实验室(甘肃农业大学), 甘肃 兰州 730070
3. 中国人民武装警察部队工程大学, 陕西 西安 710086
4. 西安石油大学计算机学院, 陕西 西安 710065
5. 甘肃省草原技术推广总站, 甘肃 兰州 730000
6. 西安航空学院, 陕西 西安 710077

**摘要** 草坪色泽是草坪观赏价值的最直接体现。探索基于高光谱的草坪草叶绿素含量的估算和反演对草坪质量评定具有重要意义。以3种常用草坪草种——“红象”高羊茅(*Festuca arundinacea cv. Hongxiang*)、“百灵鸟”多年生黑麦草(*Lolium perenne cv. Bailingniao*)和“肯塔基”草地早熟禾(*Poa pratensis cv. Kentucky*)为试样,通过盆栽实验,在草坪草生长旺盛期,使用SOC710VP成像光谱仪和TYS-A3500叶绿素仪分别测定了草坪草冠层光谱数据和叶绿素相对含量(SPAD),并通过Person相关系数分析了原始SPAD、1/SPAD和 $\log(1/SPAD)$ 与10个植被指数:GI(绿度植被指数)、ARVI(大气阻抗植被指数)、VARI(可视化气压阻抗指数)、NDVI<sub>705</sub>(归一化植被指数705)、MSR<sub>705</sub>(改进红边比值植被指数)、NDVI<sub>670</sub>(归一化植被指数670)、CI(叶绿素指数)、PSRI(植被衰减指数)、RGI(相对绿色指数)和EVI(增强植被指数)的相关性,筛选与叶绿素相关性较高的高光谱波段植被指数,构建植被指数反演叶绿素含量模型,最后通过精度检验,筛选最优草坪草叶绿素估算模型。研究结果如下:(1)不同草坪草光谱曲线整体趋势相差不大,但不同种间反射率(REF)还是有所区别。在730~1000 nm波段,“百灵鸟”多年生黑麦草与“红象”高羊茅REF差异不大,但“肯塔基”草地早熟禾REF较高,光谱特征更为明显;(2)10个植被指数中,VARI,RGI和PSRI与草坪草3个叶绿素指标极显著相关,相关系数 $R^2$ 绝对值均大于0.65,可作为首选植被指数进行草坪草叶绿素含量估算;(3)植被指数与叶绿素指标逐步回归分析发现,单因素回归模型中,利用VARI,RGI和PSRI估算1/SPAD的模型决定系数 $R^2$ 均在0.6以上,普遍高于SPAD与 $\log(1/SPAD)$ 的估算模型;而多元线性回归中,10个植被指数中,RGI与叶绿素指标1/SPAD所构建的模型决定系数 $R^2$ 同样最高,为0.817,说明SPAD倒数形式适用于草坪草叶绿素反演;(4)选择决定系数较高( $>0.7$ )的模型进行精度检验,筛选的最优的草坪草叶绿素指标反演模型为: $y_{1/SPAD} = 0.161x_{RGI} + 0.007x_{GI} - 0.054 (R^2 = 0.817, RMSE = 0.023)$ 。

**关键词** 高光谱; 草坪草; 叶绿素; 植被指数; 模型

**中图分类号:** P237 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)08-2571-07

## 引言

“草坪色泽”是评价草坪优劣的重要指标,草坪色泽的确定,主要有目测法和包括勒克斯计法、分光光度法和植物效能分析仪-PEA在内的实测法。目测法评定结果因人而异,

受主观影响较大。实测法虽然结果准确,但方法繁琐,在景观尺度上进行大范围测量较为困难。如何对草坪草进行快速、无损的估算对草坪业的发展尤为重要。

近年来,随着遥感技术的快速发展,高光谱技术已成为现代遥感技术的重要组成部分,如利用光谱仪进行植物光谱识别<sup>[1]</sup>,以及对植物含水量<sup>[2]</sup>、叶绿素含量<sup>[3]</sup>、土壤有机

收稿日期: 2019-07-19, 修订日期: 2019-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31160475, 61401439), 甘肃省农业财政项目“超低空微遥感技术在草原监测中的应用研究及推广示范(201647)”, 陕西省重点研发计划项目(2019GY-112), 陕西省教育科学“十三五”规划2018年度课题(SGH18H435)资助

作者简介: 纪童, 1995年生, 甘肃农业大学草业学院硕士研究生 e-mail: 986462673@qq.com

\* 通讯联系人 e-mail: liuxn@gsau.edu.cn

质<sup>[4]</sup>、生物量等的估算和反演研究,这些成果有效解读了地物光谱特征规律,为遥感监测,生产生活提供了理论支撑与技术指导。

植被指数一直是研究植被特征最简单、最常用的方法之一。结合植被指数定量估测植被叶绿素含量成为当今研究热点之一。韩浩坤等<sup>[5]</sup>建立了糜子(*Panicum miliaceum* L.)冠层叶片叶绿素含量的高光谱反射率模型,使用植被指数 RVI, PSND<sub>b</sub> 和 GNDVI<sub>750</sub> 较为准确地预测了糜子冠层叶绿素含量。张玮等<sup>[2]</sup>发现反射率一阶微分构建的多元回归方程以及修正的绿色归一化植被指数(mGNDVI)对雷竹(*Phyllostachys praecox*)叶片叶绿素的拟合效果较好。窦志国等<sup>[6]</sup>发现高光谱数据全波段反演能较好地估算芦苇粉大尾蚜虫(*Hyalopterus pruni*)为害下芦苇(*Phragmites australis*)叶绿素相对含量。

近年来单因素线性回归模型与多元线性回归模型被广泛的应用于光谱模型建立,如周敏姑等<sup>[7]</sup>利用一元与多元线性回归建立了 SPAD-SAVI 模型,并作为无人机遥感快速、无损监测冬小麦叶绿素的技术手段;郑一立等<sup>[8]</sup>采用二元回归、多元回归、偏最小二乘法和基于主成分分析的 BP 神经网络方法建立了竹(*Bambusoideae*)叶片氮含量估测模型,发现基于主成分分析的 BP 神经网络方法估测效果较好。

目前高光谱技术测定叶绿素相对含量主要应用于农作物<sup>[9]</sup>、森林和部分天然草地<sup>[10]</sup>,尚未见针对草坪草的研究报道。本研究以 3 种常用的草坪草为研究对象,在草坪生长旺季(4 月—6 月)<sup>[11]</sup>,使用 TYS-A3500 叶绿素仪和 SOC710VP 光谱仪,采集不同草坪草冠层叶绿素含量和对应的光谱数据,对叶绿素含量(SPAD)进行倒数(1/SPAD)和倒数的对数(log1/SPAD)变换<sup>[12]</sup>,探寻 SPAD 及其相关变换值与高光谱波段拟合度较高的植被指数,并构建 SPAD 及其相关变换值的估算模型,旨在为使用高光谱进行草坪质量评价提供新的思路。

## 1 实验部分

### 1.1 材料

试验材料为 3 个常见的草坪草品种:“红象”高羊茅

(*Festuca arundinacea* cv. Hongxiang),“百灵鸟”多年生黑麦草(*Lolium perenne* cv. Bailingniao)和“肯塔基”草地早熟禾(*Poa pratensis* cv. Kentucky)。

### 1.2 方法

试验于 2017 年 4 月在甘肃农业大学培养室中进行,分为建模组( $n=50$ ),检验组( $n=15$ )。选择籽粒饱满的草坪草种子栽种于口径一致的花盆(20 cm×20 cm)中。土壤来自甘肃农业大学牧草试验站,有机质含量 0.84%,pH 7.5,速效氮 95.05 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 7.32 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 182.8 mg·kg<sup>-1</sup>。每盆施用磷酸铵 30 g·m<sup>-2</sup>后,约播种 100 粒种子。培养期间,隔 3 d 称重浇一次水,保证水量一致,水分恒定。苗期施尿素一次,施量为纯氮 5 g·m<sup>-2</sup>。1 个月取样测定叶片叶绿素(SPAD)含量,同时测定对应的光谱数据。

#### 1.2.1 光谱数据获取与校正

所用仪器:美国 SOC 公司 SOC710VP 便携式可见/红外成像光谱仪。光谱范围:400~1 000 nm;分辨率:4.687 5 nm;波段:128 个;Dynamic Range:12-bit;每行像素:696。

使用 SOC710VP 于暗室测定光谱,测量的结果为像素值,通过 SRAnalysis 软件进行反射率标准化,以获取原始光谱反射率。测定时采用仪器自带钨灯光源,镜头距材料上方 15 cm 目标物周围要有良好的通视条件,高度角 10°以上无近遮挡物,测量期间附近应无运动物体(避免外界自然光的影响)。使用反射参考板时,不应该接触光学面,参考板每次清洁后重新定标。取草坪草冠层 9 点光谱数据的平均值作为原始光谱反射率。

#### 1.2.2 草坪草叶片叶绿素含量测定

所用仪器:TYS-A 手持叶绿素仪。测量最小间隔:小于 2 s;测量范围:0.0~99.9 SPAD;精度:±1.0 SPAD(室温下,SPAD 值介乎 0~50);重复性:±0.3 SPAD 单位以内(SPAD 值介乎 0~50);重现性:±0.5 SPAD 单位以内(SPAD 值介乎 0~50)。测定时不必损伤植物叶片,可直接检测,工作效率更高。

为减少试验误差,每测一组光谱数据后,立即使用 TYS-A 手持叶绿素仪进行草坪草叶绿素含量的测定。随机选取叶片,在距叶尖 3 cm 处、叶中、距叶尾 3 cm 处各测一次叶绿素 SPAD 含量值,最后取平均值作为样品 SPAD 值。

表 1 光谱指数  
Table 1 Spectral index

光谱指数	名称	计算公式
GI <sup>[13]</sup>	绿度植被指数	$R_{554}/R_{667}$
ARVI <sup>[13]</sup>	大气阻抗植被指数	$(R_{810} - (2R_{680} - R_{480})) / (R_{810} + (2R_{680} - R_{480}))$
VARI <sup>[13]</sup>	可视化气压阻抗指数	$(R_{555} - R_{680}) / (R_{555} + R_{680} - R_{480})$
NDVI <sub>705</sub> <sup>[13]</sup>	归一化植被指数 705	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$
MSR <sub>705</sub> <sup>[14]</sup>	改进红边比值植被指数	$(R_{705} - R_{445}) / (R_{705} + R_{445})$
NDVI <sub>670</sub> <sup>[14]</sup>	归一化植被指数 670	$(R_{800}/R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$
CI <sup>[15]</sup>	叶绿素指数	$(R_{750}/R_{705}) - 1$
PSRI <sup>[15]</sup>	植被衰减指数	$(R_{680} - R_{500}) / R_{750}$
RGVI <sup>[15]</sup>	相对绿色指数	$R_{690}/R_{550}$
EVI <sup>[15]</sup>	增强植被指数	$(2.5 \times (R_{782} - R_{675})) / (R_{782} + 6R_{675} - 7.5R_{445} + 1)$

### 1.2.3 数据处理与分析

选择 10 个植被指数<sup>[13-15]</sup>(表 1), 采用 Person 相关分析方法, 进行 10 个植被指数和草坪草叶片的 3 个叶绿素指标: SPAD, 1/SPAD, log(1/SPAD)的相关分析。

10 个植被指数中, GI, CI 和 RGI 对植物自身叶绿素含量变化较敏感, EVI, RVI 和 VARI 可以有效矫正大气溶胶影响, NDVI<sub>670</sub>, NDVI<sub>705</sub> 和 MSR<sub>705</sub> 对冠层结构非常敏感, PSRI 可用于植被健康的监测与检测。

以叶绿素指标为因变量, 选择相关分析中系数最大的光谱指数为自变量, 运用单因素回归和多元逐步线性回归法, 建立草坪草叶片 SPAD 相关指标值的反演模型。为确定最优模型, 用验证样本对模型进行检验, 筛选最优模型。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同草坪草的光谱反射率(REF)

图 1 为 3 种草坪草在 400~1 000 nm 波段的光谱反射率(REF)。

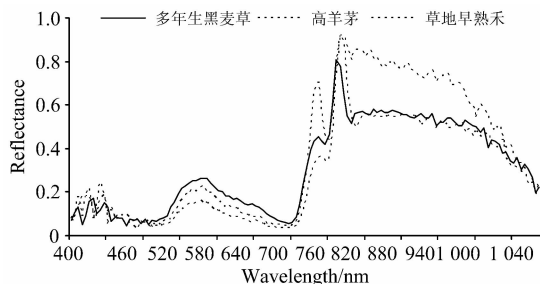


图 1 不同草坪草光谱反射率(REF)

Fig. 1 Spectral reflectance of different turf grasses(REF)

由图 1 可以看出, 3 种草坪草光谱曲线变化趋势相似, 波峰、波谷等出现的位置基本一致。在可见光波段(400~760 nm), 3 种草坪草在 400~530 nm 波段内反射率近乎一致且变化平稳。在 420~450 nm 波段, 高羊茅、多年生黑麦草和草地早熟禾都出现了 2 个小的反射波峰, 随之又迅速降

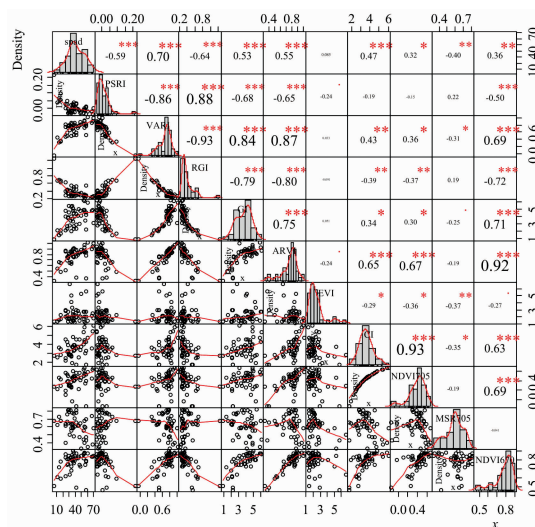
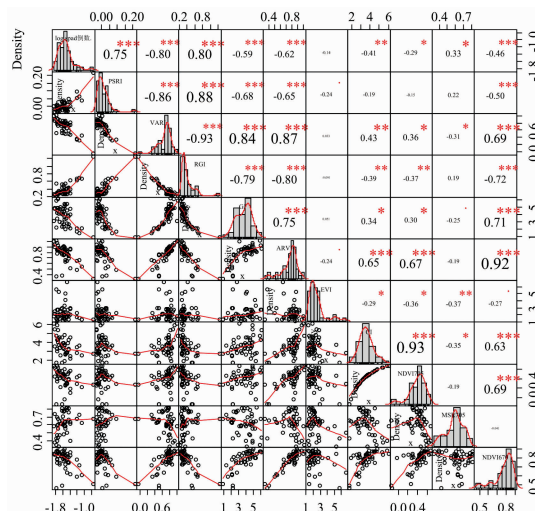


图 2 相关性矩阵

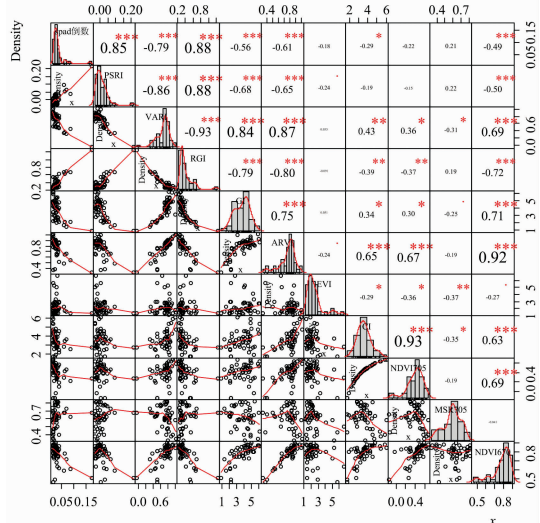
注: 图形分为两部分, 上三角为相关系数与显著性检验, 下三角为散点图与拟合曲线, 图中星号代表显著性检验 P 值, 无 \* 与 \* 代表差异性不显著, \*\* 与 \*\*\* 代表差异性显著, 各变量的相关关系可在两变量的行列交叉处找到

Fig. 2 Person correlation matrix

Note: The graph is divided into two parts, the upper triangle is the correlation coefficient and significance test, the lower triangle is the scatter diagram and fitting curve, in which the asterisk represents the significance test P value, no \* and \* represent the insignificant difference, \*\* and \*\*\* represent the significant difference, and the correlation of each variable can be found at the row and column intersection of the two variables

低出现第 1 个波谷。680 nm 处出现了第 2 个波谷, 之后在 760 nm 附近均形成植物所特有的“红边”, 这种红边现象虽然整体趋势相差不大, 但是不同植物之间 REF 还是有区别, 高羊茅、草地早熟禾在 765 nm 处 REF 达到最大值, 分别为 0.92, 0.91, 多年生黑麦草在 760 nm 处 REF 最大(0.80)。

在近红光波段(780~1 000 nm)内, REF 一直都保持较高水平, 在 895 nm 处出现了一个微小的吸收谷, 但整体趋



势是下降的,草地早熟禾的 REF 在 730~1 000 nm 波段明显大于高羊茅和多年生黑麦草。

## 2.2 叶绿素指标与不同光谱指数的相关性

经 Person 相关性矩阵分析(图 2), 植被指数 PSRI, VARI, RGI, GI, ARVI, CI 与叶绿素指标 SPAD 极显著( $p < 0.01$ )相关, MSR705 和 NDVI670 与 SPAD 显著( $p < 0.05$ )相关, 而 EVI 和 NDVI705 与 SPAD 不相关( $p > 0.05$ )。其中 VARI, RGI 和 PSRI 与 SPAD 的相关系数分别为  $0.7^{**}$ ,  $-0.64^{**}$  和  $-0.59^{**}$ , 绝对值均大于 0.59, 相关性较高。与叶绿素指标 1/SPAD 极显著相关的植被指数有 PSRI, VARI, RGI, GI, ARVI 和 CI, 而 EVI, NDVI705, MSR705 和 NDVI670 与 1/SPAD 的相关性不显著。RGI( $0.88^{**}$ ), PSRI( $0.85^{**}$ )和 VARI( $-0.79^{**}$ )与 1/SPAD 相关系数的绝对值均大于 0.79, 说明植被指数 RGI, PSRI 和 VARI 与

1/SPAD 的相关性较高。与叶绿素指标  $\log(1/SPAD)$  极显著相关的植被指数有 PSRI, VARI, RGI, GI, ARVI 和 NDVI670; 显著相关的植被指数是 CI; 而 EVI, NDVI705 和 MSR705 与  $\log(1/SPAD)$  相关性不显著。其中 VARI( $-0.8^{**}$ ), RGI( $0.8^{**}$ )和 PSRI( $0.75^{**}$ )的相关系数的绝对值较高, 均大于 0.75。

## 2.3 反演模型的建立

运用单因素回归和多元逐步线性回归建立的草坪草叶片 SPAD 相关指标值的反演模型如表 2 所示。

表 2 表明, 利用 VARI, RGI 和 PSRI 这 3 个植被指数建立的叶绿素指标反演模型的拟合系数  $R^2$  均较高, 其中植被指数 RGI 非线性拟合叶绿素 SPAD 和 1/SPAD 指标的效果最好,  $R^2$  分别为 0.646 和 0.870; 而利用 VARI 非线性拟合  $\log 1/SPAD$  指标的效果也较好,  $R^2 = 0.657$ 。

表 2 单因素回归模型

Table 3 Single factor regression model

叶绿素指标	植被指数	模型	模型表达式	$R^2$	RMSE
	PSRI	线性	$y = -203.78x + 40.661$	0.360	0.155
		非线性	$y = 37.915e^{-8.748x}$	0.573	15.13
SPAD	VARI	线性	$y = 52.2x + 2.3014$	0.490	9.812
		非线性	$y = 9.08e^{1.945x}$	0.630	10.65
	RGI	线性	$y = 0.1228x - 0.0146$	0.420	9.450
		非线性	$y = 81.479e^{-2.157x}$	0.646	3.080
	PSRI	线性	$y = 0.51x + 0.029$	0.719	0.021
		非线性	$y = 0.209x^3 + 5.022x^2 - 13.134x + 0.025$	0.722	0.560
1/SPAD	VARI	线性	$y = -x + 0.103$	0.626	0.001
		非线性	$y = -0.403x^3 + 0.439x^2 - 0.172x + 0.154$	0.858	0.560
	RGI	线性	$y = 0.1228x - 0.0146$	0.772	0.009
		非线性	$y = 0.177x^3 + 0.382x^2 - 0.127x + 0.046$	0.870	0.032
	PSRI	线性	$y = 3.799x - 1.579$	0.600	0.178
		非线性	$y = 2.784x^3 + 55.08x^2 - 232.314x - 1.614$	0.610	9.980
Log(1/SPAD)	VARI	线性	$y = -0.8229x - 0.9725$	0.651	0.110
		非线性	$y = -1.757x^3 + 1.418x^2 - 0.608x - 0.186$	0.657	1.030
	RGI	线性	$y = 0.9668x - 1.92270.634$	0.103	
		非线性	$y = 0.035x^3 + 1.551x^2 - 0.745x - 1.7620.647$	0.211	

图 3 是植被指数与 3 个叶绿素指标多元逐步线性回归分析结果。即将 10 个植被指数分别代入多元逐步回归中, 得出的方程如下:

$$y_{SPAD} = 47.235x_{VARI} - 23.75x_{MSR705} + 20.481$$

$$(R^2 = 0.532, RMSE = 0.150)$$

$$y_{1/SPAD} = 0.161x_{RGI} + 0.007x_{GI} - 0.054$$

$$(R^2 = 0.817, RMSE = 0.023)$$

$$y_{\log(1/SPAD)} = 0.895x_{RGI} + 0.298x_{MSR705} - 2.08$$

$$(R^2 = 0.680, RMSE = 0.600)$$

其中多元回归方程:  $y_{1/SPAD} = 0.161x_{RGI} + 0.007x_{GI} - 0.054$  的拟合系数  $R^2$  最大, RMSE 最小。说明利用植被指数 RGI 和 GI, 通过多元线性回归, 可以很好的拟合叶绿素指标 1/

SPAD。

## 2.4 模型精度检验

为了进一步验证模型的准确性和稳定性, 选择  $R^2$  大于 0.7 的拟合模型进行精度检验, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 植被指数 RGI 多元线性回归拟合 1/SPAD 的  $R^2 = 0.9289$ , 而均方根误差  $RMSE = 0.002$ ; VARI 拟合 1/SPAD 的  $R^2 = 0.7823$ ,  $RMSE = 0.0577$ , RGI 拟合 1/SPAD 的  $R^2 = 0.8258$ ,  $RMSE = 0.03$ , PSRI 拟合 1/SPAD 的  $R^2 = 0.9084$ ,  $RMSE$  为 0.01。以上反演模型, 拟合系数都较大, 且拟合误差较小, 反演精度均较高。即利用植被指数 RGI, VARI 和 PSRI 可以很好的拟合叶绿素倒数(1/SPAD)。

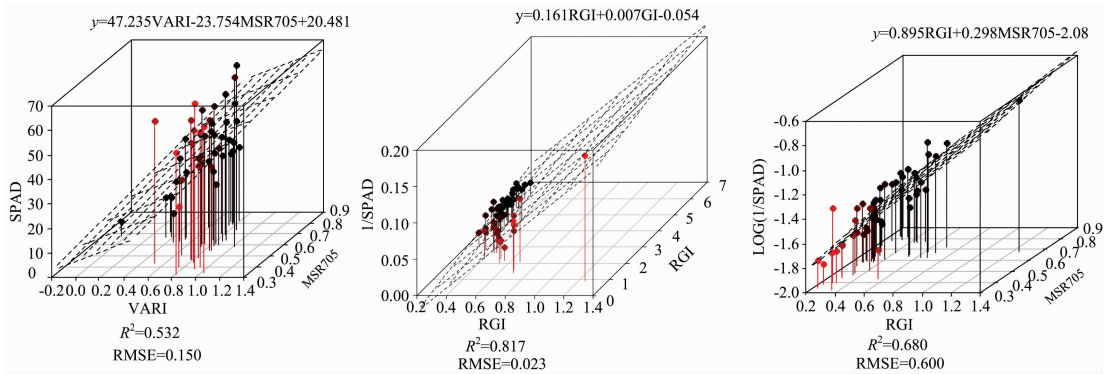


图 3 叶绿素指标的多元线性回归模型

注：虚线面代表的是预测值，图中的点是实际值；虚线面到点的垂直距离代表残差值

Fig. 3 SPAD multiple linear regression model

Note: The dot-line-plan represents predicted values, and the points in the graph represent actual values; The vertical distance from the dot-line-plane to the point represents the residual value

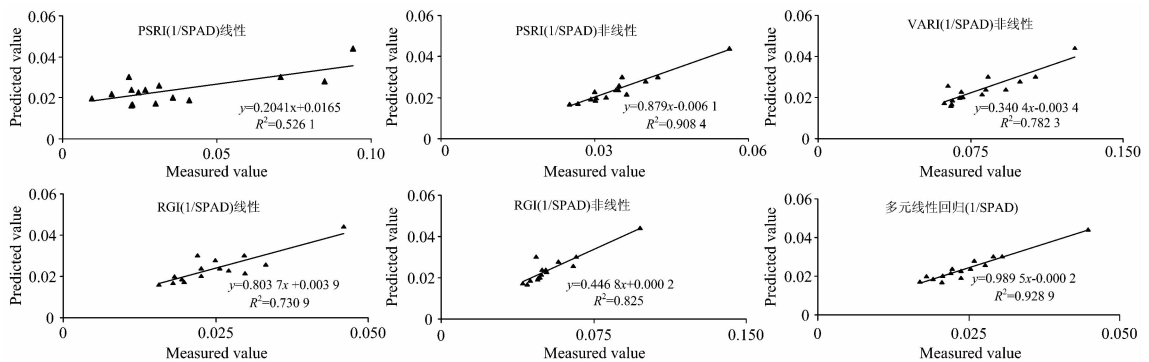


图 4 草坪草叶片 1/SPAD 实测值与预测值比较

Fig. 4 Comparison of measured and predicted SPAD values of Turfgrass blade

根据拟合系数筛选出  $R^2 > 0.8$  的 3 个拟合模型： $y_{1/SPAD} = 0.177x_{RGI}^3 + 0.382x_{RGI}^2 - 0.127x_{RGI} + 0.046$ ， $y_{1/SPAD} = 0.177x_{VARI}^3 + 0.382x_{VARI}^2 - 0.127x_{VARI} + 0.046$ ， $y_{1/SPAD} = 0.161x_{RGI} + 0.007x_{GI} - 0.054$ 。其中，植被指数 RGI 和 GI 多元线性回归拟合叶绿素指标 1/SPAD 的反演精度最高，为最优模型。

### 3 结 论

#### 3.1 不同草坪草的光谱特征

植被叶片和冠层的光谱差异与植被叶片颜色、叶片中的叶绿素含量、冠层结构、植物长势等紧密相关。

530~650 nm 波段是绿光波段，草坪草叶片均呈绿色，3 种草坪草光谱曲线整体趋势相差不大，但不同种间反射率还是有区别。在 730~1 000 nm 波段，草地早熟禾光谱特征更为明显，这可能是因为草地早熟禾叶片狭长且枝叶茂盛、盖度大，叶与叶之间透射光反射导致近红外反射增强的结果。

#### 3.2 叶绿素指标与植被指数相关性分析

使用 GNDVI 能够较好的预测草坪草叶绿素含量，3 个叶绿素指标 SPAD, 1/SPAD, log(1/SPAD) 与选取的植被指

数相关性较强，其中 RGI, PSRI 和 VARI 与 3 个叶绿素指标均呈极显著相关，相关系数绝对值均大于 0.65。

利用相关性最高植被指数 RGI, PSRI 和 VARI，通过单因素回归与多元线性回归，建立草坪草叶绿素含量的估算模型，其中叶绿素 1/SPAD 与植被指数拟合程度最高，log(1/SPAD) 次之，原值 SPAD 最低，与李哲等<sup>[12]</sup>的研究结果类似。植被指数 RGI 在所有拟合模型中的  $R^2$  (0.870) 均高于其他植被指数。

#### 3.3 叶绿素估算模型

综合估算精度与预测效果，虽然多元逐步回归模型  $y_{1/SPAD} = 0.161x_{RGI} + 0.007x_{GI} - 0.054$  的模拟精度略低于 RGI(1/SPAD)，但模型拟合检验效果最好，预测值和实测值更接近，可据其模拟估算草坪草叶绿素含量。而多元线性模型的精度与预测效果较好，可能是因为综合考虑了多个植被指数，提高了回归模型预测效果。余蛟洋等<sup>[14]</sup>也发现了多元线性回归模型反演猕猴桃 (Actinidia Chinensis) 叶片 SPAD 值单因素回归模型效果更好，与本研究结果相似。

以上试验结果为草坪草叶绿素的快速估算提供了理论基础，后期拟进行大田草坪草叶绿素含量的反演研究，为草坪草质量评估提供更便利的方案。

## References

- [ 1 ] WEI Xiu-hong, JIN Gui-li, FAN Yan-min, et al(魏秀红, 靳瑰丽, 范燕敏, 等). Pratacultural Science(草业科学), 2016, 33(10): 1924.
- [ 2 ] ZHANG Wei, WANG Xin-mei, PAN Qing-mei, et al(张 玮, 王鑫梅, 潘庆梅, 等). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2018, 38(18): 322.
- [ 3 ] WANG Yong-min, LI Xi-can, TIAN Lin-ya, et al(王永敏, 李西灿, 田林亚, 等). Remote Sensing for Land and Resources(国土资源遥感), 2019, 31(1): 110.
- [ 4 ] FAN Yun-bao, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, et al(范云豹, 赵文吉, 宫兆宁, 等). Wetland Science(湿地科学), 2016, 14(5): 654.
- [ 5 ] HAN Hao-kun, MIAO Jia-yuan, ZHANG Jue-yu, et al(韩浩坤, 妙佳源, 张钰玉, 等). Agricultural Research In Arid Regions(干旱地区农业研究), 2018, 36(1): 164.
- [ 6 ] DOU Zhi-guo, CUI Li-juan, WU Gao-jie, et al(窦志国, 崔丽娟, 武高洁, 等). Chinese Journal of Ecology(生态学杂志), 2018, 37(10): 298.
- [ 7 ] ZHOU Min-gu, SHAO Guo-min, ZHANG Li-yuan, et al(周敏姑, 邵国敏, 张立元, 等). Water Saving Irrigation(节水灌溉), 2019, 44(9): 40.
- [ 8 ] ZHENG Yi-li, ZHAO Yan-dong, DONG Wei, et al(郑一力, 赵燕东, 董 玮, 等). Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报), 2018, 49(S1): 393.
- [ 9 ] YAO Yun-jun, QIN Qi-ming, ZHANG Zi-li, et al(姚云军, 秦其明, 张自力, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2008, 24(7): 301.
- [10] GAO Jin-long, LIU Jie, YIN Jian-peng, et al(高金龙, 刘 洁, 殷建鹏, 等). Acta Prataculturae Sinica(草业学报), 2020, 29(2): 172.
- [11] SUN Yan, ZHOU He, YANG Qing-chuan(孙 彦, 周 禾, 杨青川). Lawn Practical Technical Manual(草坪实用技术手册). Beijing: Chemical Industry Press(北京: 化学工业出版社), 2001.
- [12] LI Zhe, ZHANG Fei, CHEN Li-hua, et al(李 哲, 张 飞, 陈丽华, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(5): 211.
- [13] YASENJIANG Kahaer, NIJAT Kasim, NIGARA Tashpola, et al(亚森江·喀哈尔, 尼加提·卡斯木, 尼格拉·塔什甫拉提, 等). Journal of Wheat Crops(麦类作物学报), 2019, 39(2): 225.
- [14] YU Jiao-yang, CHANG Qing-rui, YOU Ming-ming, et al(余蛟洋, 常庆瑞, 由明明, 等). Journal of Northwest Forestry University(西北林学院学报), 2018, 33(2): 156.
- [15] TANG Peng, LIU Guang, XU Jun-feng(唐 鹏, 刘 光, 徐俊锋). Journal of Hangzhou Normal University · Natural Science Edition (杭州师范大学学报·自然科学版), 2014, 13(6): 634.

## Hyperspectral-Based Estimation on the Chlorophyll Content of Turfgrass

JI Tong<sup>1,2</sup>, WANG Bo<sup>1,2</sup>, YANG Jun-yin<sup>1,2</sup>, LIU Xiao-ni<sup>1,2\*</sup>, WANG Hong-wei<sup>3</sup>, WANG Cai-ling<sup>4</sup>, PAN Dong-rong<sup>5</sup>, XU Jun<sup>6</sup>

1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education/Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou 730070, China

3. Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China

4. School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

5. Grassland Technique Extension Station of Gansu Province, Lanzhou 730000, China

6. Xi'an Institute of Aeronautics, Xi'an 710077, China

**Abstract** Lawn color is the most obvious indicator of ornamental lawn value. It is of great significance to explore the relationship between chlorophyll content of turfgrass and the hyperspectral reflectance. This relationship can be used to develop models to calculate the chlorophyll content for lawn quality evaluation purpose. In this study, three common lawn grass species—*Festuca arundinacea* CV. Hongxiang, *Lolium perenne* CV. Bailingniao and *Poa pratensis* CV. Kentucky was cultivated in pots. Measurements of chlorophyll content and hyperspectral reflectance were made during active growth period by tys-a3500 chlorophyll meter and SOC710VP imaging spectrometer to determine the relative chlorophyll content (SPAD) and spectral data of turf grass canopy, respectively. Person correlation analysis for each of the SPAD, 1/SPAD and log(1/SPAD) was conducted with a group of variables including vegetation index—10 G (green vegetation index), ARVI (atmospheric impedance difference vegetation in-

dex), VARI (visual pressure impedance index), NDVI705 normalized difference vegetation index (705), MSR705 red edge ratio vegetation index (improved), NDVI670 normalized difference vegetation index (670), CI (chlorophyll index), PSRI attenuation (vegetation index), RGI (relatively green index) and EVI (Enhance the correlation of vegetation index). After screening the hyperspectral bands of vegetation index with the highest correlation with chlorophyll content, models were developed using the vegetation index based on these bands. After the best model was selecting through an accuracy test, the model was used to estimate the chlorophyll SPAD values change for turf grasses under different concentrations of heavy metals  $Pb^{2+}$  stress. The results are summarized as follows: (1) the overall trends of spectral curves of different turfgrass were not significantly different, but the reflectance (REF) of different species were different. At the band of 730~1 000 nm, there was no significant difference between “lark” perennial ryegrass and “red elephant” tallfestia REF, but the spectral characteristics of “Kentucky bluegrass” were unique with a higher REF. (2) among the 10 vegetation indexes, VARI, RGI and PSRI were extremely significantly correlated with 3 chlorophyll indexes of turfgrass, and the absolute value of correlation coefficient  $R^2$  was all greater than 0.65, indicating that it is feasible to estimate the chlorophyll content of turfgrass with these 3 vegetation indexes. (3) Stepwise regression analysis of vegetation index and chlorophyll index shows that in the single-factor regression model, the model determination coefficient ( $R^2$ ) of estimating 1/SPAD using vegetation index VARI, RGI and PSRI was above 0.626, which was generally higher than the estimation of SPAD and  $\log(1/SPAD)$ . In multiple linear regression, the model determination coefficient ( $R^2$ ) constructed by 10 vegetation indexes and chlorophyll index 1/SPAD was also the highest (0.817), showing that SPAD reciprocal form is applicable to be used the in model estimation of chlorophyll in turfgrass. (4) The best model selected from the models with a high determination coefficient ( $>0.7$ ) through accuracy test was  $y_{1/SPAD} = 0.161x_{RGI} + 0.007x_{GI} - 0.054$  ( $R^2 = 0.817$ , RMSE=0.023).

**Keywords** Hyperspectral; Turfgrass; Chlorophyll; Vegetation indices

(Received Jul. 19, 2019; accepted Nov. 22, 2019)

\* Corresponding author