

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第10期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.10.004

论文标题： 环境因子对不同生长阶段油茶冠层高光谱特征的影响

作　　者： 张 超，寇幸子，苏久扬，等

收稿日期： 2025-09-23

引文格式： 张超,寇幸子,苏久扬,等.环境因子对不同生长阶段油茶冠层高光谱特征的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(10):50-60.

Zhang C, Kou X Z, Su J Y, et al. Impact of environmental factors on canopy hyperspectral characteristics of *Camellia oleifera* at different growth stages[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):50-60.

相关论文推荐

Recommended articles

油茶分子育种研究进展

Advances in the molecular breeding of *Camellia oleifera*

我国油茶科技进展与未来核心技术

Scientific and technological progress and future core technologies of oil tea *Camellia* in China

近红外光谱技术快速定量油茶籽含油率及脂肪酸组成

Rapid determination of oil content and fatty acid composition in *Camellia oleifera* seeds by near infrared spectroscopy (NIRS)

基于近红外光谱波段优选的针叶木材基本密度估测模型的优化研究

Estimation of softwood basic density based on near infrared spectral bands optimal selection

基于不同预处理的椴树木材基本密度近红外光谱估测及模型优化

Near infrared spectral estimation and model optimization of *Tilia tuan* based on different pretreatments

湿加松针叶儿茶素和表儿茶素总量近红外光谱预测模型的建立

Establishment of near infrared spectroscopy prediction model for total catechin and l-epicatechin in *Pinus elliottii* × *P.caribaea* needles

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.10.004
http: //qks.csuft.edu.cn

环境因子对不同生长阶段油茶冠层高光谱特征的影响

张　超[1, 2]，寇幸子[1, 2]，苏久扬[1, 2]，华松杰[1, 2]，张　研[1, 2]，唐雪海[1, 2]
（1. 安徽农业大学 林学与园林学院，安徽 合肥 230036；2. 安徽省林木资源培育重点实验室，安徽 合肥 230036）

摘　要：【目的】探讨油茶林在不同生长阶段的高光谱特征与环境因子之间的关系，以期为丘陵区油茶林磷素亏缺诊断提供光谱阈值，进而推动油茶林的精准施肥和科学管理。【方法】将研究区内 240 株油茶划分为 12 块样地，测定春梢期、果实膨大期和盛花期 3 个关键生长期的冠层高光谱数据及地形与土壤因子，并基于国家地球系统科学数据中心获取气候因子数据；选取并计算 13 个植被指数，结合环境因子构建结构方程模型，量化不同环境因子对油茶冠层光谱特征的影响，揭示其内在关系及空间分布特征。【结果】春梢期、果实膨大期和盛花期油茶冠层高光谱反射率分别为 0 ～ 0.413、0 ～ 0.532 和 0 ～ 0.683，各时期光谱波段与土壤养分因子之间均呈显著相关性。其中，归一化植被指数（NDVI）、光化学植被指数（PRI）、增强植被指数（EVI）、优化土壤调节植被指数（OSAVI）与植物衰老反射指数（PSRI）构建的 SEM 模型拟合度较好，拟合指数分别为 0.94、0.92、0.83、0.90 和 0.83。油茶冠层光谱特征主要受气候和土壤养分因子的显著直接影响，地形因子作用不显著，主要通过土壤养分因子产生间接效应；温度、降水量、蒸发量、氮素、磷素对油茶冠层光谱的影响显著。【结论】样地内气候、地形与土壤养分因子共同影响油茶冠层光谱特征，其中气候和土壤养分因子起核心作用，地形因子起间接作用。本研究可为油茶规模化种植与精准经营提供科学依据，为提升土壤养分利用效率与高效栽培技术推广提供实践参考。

关键词：油茶；高光谱；环境因子；结构方程模型
中图分类号：S794.4；S771.8　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)10-0050-11

Impact of environmental factors on canopy hyperspectral characteristics of *Camellia oleifera* at different growth stages

Zhang Chao[1,2], Kou Xingzi[1,2], Su Jiuyang[1,2], Hua Songjie[1,2], Zhang Yan[1,2], Tang Xuehai[1,2]

(1. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China;
2. Anhui Provincial Key Laboratory of Forest Resources Cultivation, Hefei 230036, Anhui, China)

Abstract:【Objective】To investigate the impact of environmental factors on the canopy hyperspectral characteristics of *Camellia oleifera* at different growth stages, aiming to provide theoretical support for precise fertilization and scientific management of *Camellia oleifera* plantations and to promote the sustainable development of the *Camellia oleifera* industry.【Method】A total of 240 *Camellia oleifera* plants were divided into 12 sample plots within the study area. Canopy hyperspectral data, topographic factors, and soil factors were measured during three key growth periods: spring shoot stage, fruit expansion stage, and full bloom stage. Climate factor data were obtained from the National Earth System Science Data Center. Thirteen vegetation indices were derived from the hyperspectral bands, and a structural equation model (SEM) was constructed to quantify the impact of different environmental factors on canopy spectral characteristics and to reveal their intrinsic relationships and spatial distribution patterns.【Result】The canopy hyperspectral reflectance values of *Camellia oleifera* during the spring shoot stage, fruit expansion stage, and full bloom stage were 0-0.413, 0-0.532, and 0-0.683, respectively. Significant correlations were found between spectral bands and soil nutrient factors across all periods. The structural equation models (SEMs) constructed with the normalized difference vegetation index (NDVI), photochemical reflectance

收稿日期（Received）：2025-09-23　　修订日期（Revised）：2025-11-13
基金项目：国家自然科学基金项目（32171783，32572046）。
第一作者：张超（chaozhang@stu.ahau.edu.cn），硕士研究生。
通信作者：唐雪海（tangxuehai@ahau.edu.cn），副教授，博士，硕士研究生导师。
引文格式：张超 , 寇幸子 , 苏久扬 , 等 . 环境因子对不同生长阶段油茶冠层高光谱特征的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(10):50-60.
Zhang C, Kou X Z, Su J Y, et al. Impact of environmental factors on canopy hyperspectral characteristics of *Camellia oleifera* at different growth stages[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):50-60.

index (PRI), enhanced vegetation index (EVI), optimized soil-adjusted vegetation index (OSAVI), and plant senescence reflectance index (PSRI) had good fit indices of 0.94, 0.92, 0.83, 0.90, and 0.83, respectively. The results indicated that canopy spectral characteristics of *Camellia oleifera* are significantly and directly influenced by climate and soil nutrient factors, while topographic factors have an insignificant direct effect but indirectly influence canopy spectra through soil nutrients. Temperature, precipitation, evaporation, nitrogen, and phosphorus were found to have significant impacts on canopy spectral characteristics.【Conclusion】Climate, topography, and soil nutrient factors collectively influence the canopy spectral characteristics of *Camellia oleifera*, with climate and soil nutrients playing a core role and topography having an indirect effect. This study provides important scientific evidence for large-scale planting and precise management of *Camellia oleifera*, as well as practical references for improving soil nutrient use efficiency and promoting efficient cultivation techniques.

Keywords: *Camellia oleifera*; hyperspectral; environmental factors; structural equation model

油茶 *Camellia oleifera* 是我国重要的木本油料树种，主要适生于南方亚热带地区的山地和丘陵地带 [1]。油茶籽油作为四大木本油之一，其营养成分与橄榄油十分相似，有“亚洲橄榄油”之称 [2]。近年来，国家高度重视油茶产业的发展，相继出台多项扶持政策，旨在扩大种植面积，提升茶油供给能力，优化食用油结构，促进乡村振兴，保障国家粮油安全 [3]。然而，我国油茶产业目前仍面临单位面积产量低的突出问题，在种植规模持续扩大的背景下，若不能建立精准高效的集约化管护体系，将难以实现油茶高产、稳产的可持续经济效益发展目标。受地形因素限制，油茶林的集约化经营管护难度较大、成本较高，传统机械手段难以实现全面精细的田间管理。尤其在施肥调控投入方面，盲目依赖大规模施肥不仅经济投入巨大，还可能带来环境污染与生态风险。除此之外，油茶具有花果同期的生物学特性，树体对养分元素需求量大且营养调控机制复杂，易受自然条件影响出现产量大小年现象，严重时形成低产林，制约着产业效益的稳定性。

高光谱技术为油茶生产提供了一种无损、快速、高精度和低代价的养分含量估算手段。该技术突破了传统测土配方技术在大田作业指导中的局限性，能够直接监测油茶单株的养分状态，同时避免实验室化学分析方法对叶片的破坏，省时省力，提高监测时效，为未来油茶林生长监测和养分动态调控提供可能。高光谱数据具有极窄波长间隔（通常＜ 10 nm），其反射率分布状态蕴含了光在物体内部多次无规则的反射、折射、透射或吸收后所携带的从微观至宏观尺度下丰富的组成与结构信息 [4]。植物高光谱数据拥有独特的响应特征区间：如色素主导的可见光、具有指示意义的“红边”、细胞构造主导的近红外高反射平台，以及干物质与水分协同的短波红外 [5]。植物的生化组分和形态结构共同决定其高光谱响应特征，可以精细地反映植株在环境适应过程中的生长发育状态。此外，油茶林养分的变化受气候、土壤和施肥等多重因子的交互影响，目前这些驱动机制尚未得到充分研究。不同气候条件、土壤类型以及施肥措施可能导致油茶林冠层光谱响应呈显著差异。在季节尺度上，不同生长期的油茶在生理状态和结构特性上存在明显区别 [5]，导致光谱特征呈现出随物候变化的趋势；而在日尺度上，光谱变化则反映了植株对光照、温度和水分等环境条件的瞬时响应 [6]。传统统计方法在解析此类复杂系统时存在局限，如多元回归分析难以捕捉变量间的复杂交互效应，简单路径分析无法处理潜变量关系 [7]。结构方程模型（Structural equation modeling，SEM）又称“协方差结构分析”“因果建模”或“线性结构方程”，是一种用于分析多变量关系的统计建模方法。相较于传统数学方法，SEM 的优势在于能够对无法直接测量的变量进行估计，并可同时处理多因子之间的复杂关系。近年来，该方法在相关领域已广泛应用，如蔡秋阳等 [8] 基于 SEM 分析了园林博览园内游客满意度的影响因素；姚雪松等 [9] 基于 SEM 构建了包含 5 个维度共 25 个影响因子的居民公园游憩空间满意度模型，揭示了影响满意度的关键因子及内在因果关系，进而总结出公园空间优化设计的影响机制，并提出提升公园游憩空间品质的适应性策略。本研究将 SEM 引入高光谱领域，旨在探究环境因子与冠层光谱波段之间的影响机制，基于 3 个不同时期油茶冠层高光谱数据，结合 13 项植被指数及生长环境数据构建响应模型，揭示并定量刻画多因子协同作用对光谱响应的驱动路径。结构方程模型为这一问题提供了新的研究思路，SEM 整合了因子分析、路径分析和潜变量建模的优势，能够同时处理多层级变量间的直接和间接效应，适用于生态系统复杂关系的解析 [10-11]。厘清和探讨上述影响因子对提升光谱技术在油茶林养分监测

中的应用效果具有重要意义。本研究通过结合高分辨率光谱技术和高效的数据分析方法，创新性地构建并验证了适用于丘陵区油茶林的“气候 - 地形 - 土壤 - 冠层光谱”因果网络模型，可实现油茶生长状态的精准监测与评估，不仅有助于提高养分高光谱监测的精度，也为精准施肥与科学管理提供系统化的理论支撑，进一步推动油茶产业的高质量发展，为经济林技术体系创新和乡村振兴注入新动力提供技术保障。

1　材料和方法

1.1　研究区域和研究对象

试验地位于安徽省潜山市黄铺镇经汇油茶专业合作社（116°45′55.79″ E，30°05′46.123″ N）油茶种植基地（图 1），该基地地处仙源镇西北部，由原岘村与原叶家合并而成，东与龙山村相连，南与越山村相接，西与甘棠镇接壤，北依龙门乡和新明乡。试验地属亚热带季风湿润性气候，四季分明，雨热同期，年平均气温 16 ℃，年均降水量 1 500 mm，全年无霜期超过 230 d。研究区大部分位于山坡阳面，呈梯田状，自西北至东南逐渐高低变化，土壤类型以黄棕壤为主。

供试油茶为 2012 年统一栽植的长林系列品种，株行距为 2 m×3 m，样地内树势均匀。为减少地面采样的盲目性，首先利用无人机（DJI Matrice 300 RTK）对研究区进行低空全覆盖航拍，生成高分辨率数字正射影像（Digital orthophoto map，DOM）。再使用 ArcMap 软件生成与 DOM 范围配套的渔网图（网格尺寸 3 m×3 m），结合油茶样地的空间分布特征，在坡面中部随机选取网格，布设 12 个 20 m×20 m 的固定样地，各样地之间设有 2 ～ 3 行缓冲带，在选择样本时避开路旁、屋旁、堆肥区等干扰明显的区域。对 12 个样地内 240 株油茶进行编号挂牌，每 20 株为一组。分别于 2023 年 3 月（春梢期）、2023 年 8 月（果实膨大期）和 2023 年 12 月（盛花期）采集冠层高光谱反射率数据及土壤样品，各时期数据采集方法保持一致。

1.2　土壤养分的采集与测定

在每个样地内，采用五点法选取树冠滴水线位置，清除土壤表面的杂草和碎石，挖取深约 60 cm 的土壤剖面，使用环刀分别取 0 ～ 20 cm、

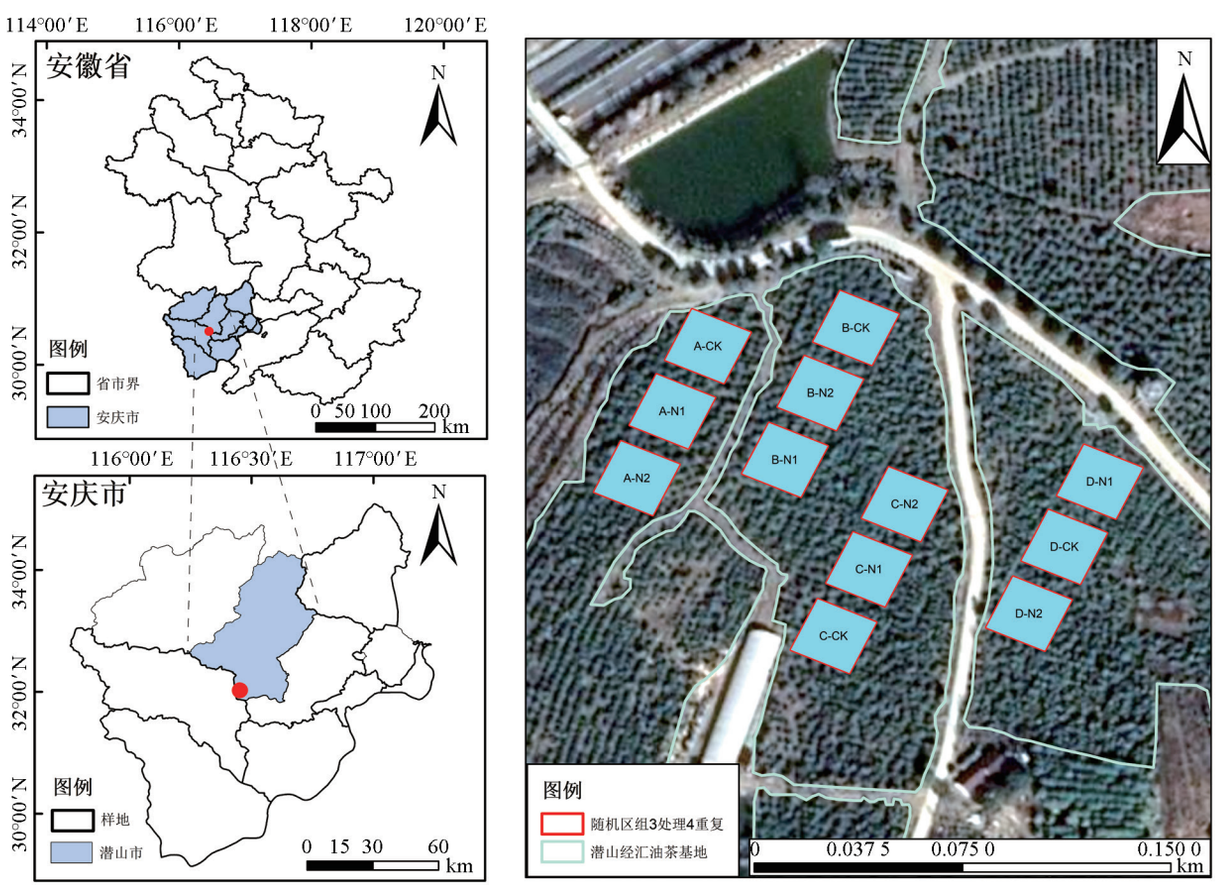


图 1　研究区样地布设图

Fig. 1　Layout of sampling sites in the study area

20 ～ 40 cm、40 ～ 60 cm 深处的土壤，带回实验室后将土壤混合均匀，按四分法取 1 kg 左右土样置于室内阴凉通风处风干，去除砂砾等杂物，研磨制样过 0.150 mm 孔径筛，加热消煮，装瓶待测。分别采用重铬酸钾氧化 - 外加热法测定土壤有机碳（Soil organic carbon，SOC）含量；硫酸 - 凯氏法测定土壤全氮（Total nitrogen，TN）含量；NaOH 碱熔 - 钼锑抗分光光度法测定土壤全磷（Total phosphorus，TP）含量；碳酸氢钠 / 氟化铵盐酸浸提 - 钼锑抗比色法测定土壤有效磷（Available phosphorus，AP）含量；NaOH 碱熔 - 火焰光度计法测定土壤全钾（Total potassium，TK）含量；碱解扩散法测定土壤碱解氮（Alkali-hydrolyzed nitrogen，AN）含量；乙酸铵溶液浸提 - 火焰光度法测定速效钾（Available potassium，AK）含量。

1.3　油茶林冠层光谱数据采集

油茶冠层高光谱使用全波段地物光谱仪（ASD FieldSpec4 Wide-Res, Analytical Spectrum Devices Inc., 美国）采集，采样间隔为 1 nm，波长采集范围为 350 ～ 2 500 nm。因油茶冠层高度（约 2.0 ～ 2.5 m）超出原装 1.5 m 光纤的作业范围，本试验通过光纤适配器连接了一条 3 m 长的延长线，并将探头固定于伸缩杆顶端。采集时使探头垂直悬于冠层中心上方 2.0 m 处，从而形成一个直径约 0.9 m（依据 25° 视场角计算）的圆形观测区，足以覆盖单株冠层的主要部分，具体采集时间见表 1。

表 1　油茶不同生长期数据获取及采样日期
Table 1　Data acquisition and sampling date of *Camellia oleifera* at different growing stages

采样地点 Sampling site	生长期 Growth stage	数据获取及采样时间 Data acquisition and sampling time
潜山 Qianshan	春梢期	2023 年 3 月 20—23 日
	果实膨大期	2023 年 8 月 15—18 日
	盛花期	2023 年 12 月 6—9 日

1.4　气候因子数据采集

气象条件是油茶生长的最主要影响因素之一，且不同区域的气候影响因素有所不同 [12]。本研究选取植物生长发育最重要的 3 个气象条件，数据来源于国家地球系统科学数据中心（https://www.geodata.cn），进一步提取研究区内各样地的月平均温度（MATM）、月平均降水量（MAPM）和月平均蒸发量（MAE）3 个气候因子数据，数据描述见表 2。

表 2　不同时期气象参数描述性统计
Table 2　Descriptive statistics of meteorological parameters at different periods

生长期 Growth stage	月平均温度 MATM (℃)	月平均降水量 MAPM /mm	月平均蒸发量 MAE /mm
春梢期	13.9	923	891
果实膨大期	29.5	2 649	1 816
盛花期	6.1	773	392

1.5　地形因子数据采集

本研究中所用地形因子由 DJI Matrice 300 RTK 无人机实测得出实验区域影像。利用 ArcGIS 10.8 等软件提取分析 DEM 数据，计算得到各研究区内各样地的坡度（Slope）、坡向（Aspect）、海拔（Elevation）和地形湿度指数（TWI）4 个地形因子数据，详细信息如表 3 所示。

表 3　研究区样地地形因子描述性统计
Table 3　Descriptive statistics of topographic factors for sample plots in the study area

样地 Sample plot	海拔 Elevation /m	坡度 Slope /(°)	地形湿度指数 TWI	坡向 Aspect
1	38.96	3.5	109	西北坡
2	38.56	2.2	89	东南坡
3	37.25	14.6	62	东南坡
4	40.80	5.8	109	东南坡
5	39.48	3.1	78	西坡
6	38.07	1.4	109	西坡
7	42.30	5.4	118	南坡
8	42.67	14.9	140	东坡
9	41.75	5.7	135	西北坡
10	44.63	4.0	109	东北坡
11	43.00	3.5	24	东北坡
12	40.72	2.6	24	东北坡

1.6　植被指数

植被指数是通过多个原始光谱波段反射率进行线性或非线性计算获得的高光谱参数，主要用来进行植被覆盖度、含水量和叶绿素等植物生理生化参数的反演，简化光谱信息，降低水汽与土壤等因素的影响，增强植被信息，提高遥感光谱信息的精度。本研究选取 13 个常用的与植被长势相关的植被指数，旨在筛选出油茶高光谱的最优特征波段和植被指数，具体植被指数如表 4 所示。

2　结果与分析

2.1　不同时期油茶冠层高光谱反射率描述性分析

3 个时期的油茶冠层高光谱反射率特征见图

2。在剔除水汽吸收的异常波段区间后，各时期光谱反射曲线呈现出典型的植被响应规律，并存在一定差异。春梢期冠层高光谱反射率值分布在 0 ～ 0.413 之间，反射率在 350 ～ 400 nm 波段随波长增加迅速下降，于 548 ～ 556 nm 处出现第一个反射峰，随后反射率自 550 nm 波长起开始下降，在 665 ～ 670 nm 附近形成吸收谷。油茶冠层反射率从 700 nm 左右开始急剧上升，形成一个反射“陡坡”，并在 780 ～ 1 000 nm 区间形成一个高反射率平台，光谱反射率变化趋于稳定，在 1 000 ～ 2 500 nm 短波红外范围内，反射率受室外水蒸气影响显著并表现出 5 个明显的吸收区间。果实膨大期油茶冠层高光谱反射率整体升高，范围扩大至 0 ～ 0.532，绿峰出现在 545 ～ 558 nm 之间，从 555 nm 起反射率迅速下降，于 671 ～ 678 nm 处形成吸收谷，在 687 nm 附近反射率急剧增加，形成一个急剧爬升的反射“陡坡”，红边特征明显，至 760 nm 后进入高反射平台，光谱趋于平稳。盛花期油茶冠层高光谱反射率值在 0 ～ 0.683 之间，所有样本在 559 ～ 569 nm 范围先后达到绿峰，从 565 nm 起反射率逐渐降低，于 678 ～ 684 nm 处形成红谷，自 720 nm 左右起反射率急剧上升，形成陡峭“红边”，至 765 nm 后进入高反射平台。

表 4　植被指数计算公式
Table 4　Vegetation index caluculation formulas

植被指数 Vegetation indices	公式 Formula
归一化植被指数 NDVI[13]	(R800-R670)/(R800+R670)
光化学植被指数 PRI[13]	(R531-R570)/(R531+R570)
增强植被指数 EVI[14]	2.5(R800-R670)/(1+R800+6R670+7R479)
优化土壤调节植被指数 OSAVI[15]	(1+0.16)(R800-R670)/(R800+R670+0.16)
改进土壤调节植被指数 MSAVI[16]	0.5[2R800+1- √ (2R800+1)2-8(R800-R670)]
水分波段指数 WBI[17]	R900/R970
归一化水分指数 DNWI[18]	(R860-R1240)/(R860+R1240)
结构不敏感色素指数 SIPI[19]	(R800-R445)/(R800-R680)
红边位置指数 REP[20]	700+40[(R670+R780)/2-R700]/(R740-R700)
归一化氮指数 NDNI[21]	[log(1/R1510)-log(1/R1680)]/[log(1/R1510)+log(1/R1680)]
植物衰老指数 PSRI[22]	(R680-R500)/R750
修正三角植被指数 MTVI2[20]	1.5[1.2(R800-R500)-2.5(R670-R550)]/ √ (2R800+1)2-(6R800-5 √ R670)-0.5
三角形植被指数 TVI[22]	0.5[120(R750-R550)-200(R670-R550)]

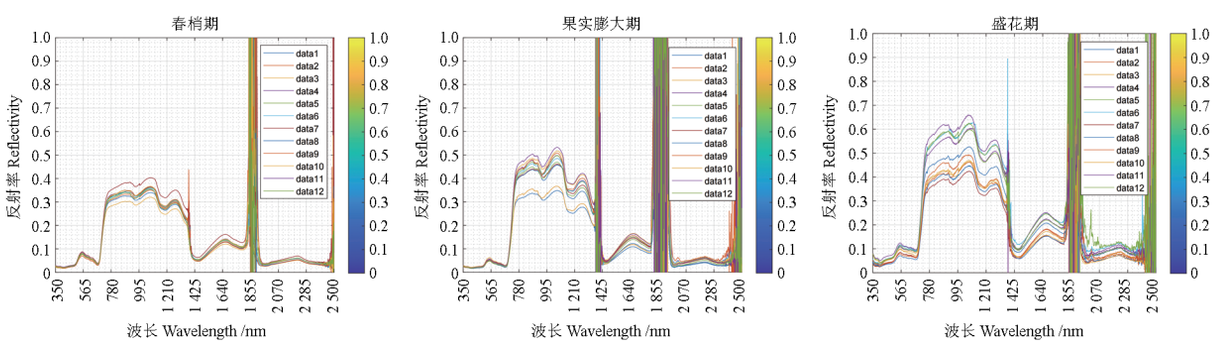


图 2　不同时期油茶冠层高光谱反射率曲线
Fig. 2　Canopy hyperspectral reflectance curves of *Camellia oleifera* at different phenological stages

2.2　油茶冠层高光谱相关性分析

3 个时期油茶冠层高光谱反射率的 Pearson 相关系数矩阵见图 3。相关系数大于 0.8 的强相关区域沿对角线分布，呈现出大小不一的块状，对应紫外光、可见光、近红外和短波红外谱区，其余谱区相关系数普遍低于 0.8，说明不同波段之间具有一定的独立性。以 1 400、1 850 和 2 400 nm 波长为中心的水汽吸收波段范围表现出明显的弱相关，其中盛花期（12 月）冠层光谱在 1 420 nm 附近表现出一定程度的相关性，可能归因于冬季水气扰动较弱。

2.3　土壤因子数据描述性统计

3 个时期的 8 个土壤参数（pH 值、SOC、

TN、TP、TK、AN、AP、AK）特征统计见表 5。春梢期土壤 pH 值、SOC、TN、TP、TK、AN、AP、AK 的含量范围分别为 4.92 ～ 5.38、1.81 ～ 10.37 g/kg、0.33 ～ 0.75 g/kg、0.08 ～ 0.46 g/kg、10.59 ～ 15.43 mg/kg、19.35 ～ 64.70 mg/kg、0.15 ～ 56.06 mg/kg、43.60 ～ 134.93 mg/kg，变异系数依次为 2.98%、42.24%、23.27%、57.95%、10.00%、39.60%、269.71%、33.11%。果实膨大期土壤 pH 值、SOC、TN、TP、TK、AN、AP 含量、AK 的含量范围分别为 5.05 ～ 5.76、2.05 ～ 8.66 g/kg、0.41 ～ 0.75 g/kg、0.64 ～ 0.94 g/kg、13.79 ～ 17.73 mg/kg、10.56 ～ 50.68 mg/kg、0.19 ～ 7.69 mg/kg、55.14 ～ 123.33 mg/kg，变异系数依次为 4.30%、30.76%、17.55%、13.23%、8.76%、31.91%、147.64%、29.25%；盛花期土壤 pH 值、SOC、TN、TP、TK、AN、AP、AK 的含量范围分别为 5.10 ～ 5.50、3.59 ～ 11.55 g/kg、0.34 ～ 0.74 g/kg、0.07 ～ 0.17 g/kg、10.21 ～ 13.75 mg/kg、17.12 ～

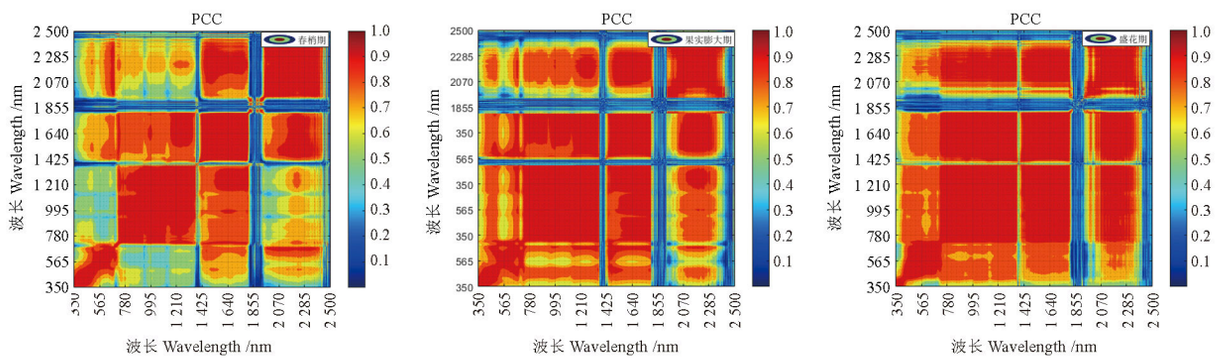


图 3　不同时期油茶冠层光谱反射率 Pearson 相关系数矩阵

Fig. 3　Pearson correlation matrix of canopy spectral reflectance of *Camellia oleifera* at different phenological stages

表 5　不同时期土壤养分参数描述性统计

Table 5　Descriptive statistics of soil nutrient parameters at different periods

	类型 Type	平均值 Mean	范围 Range	标准差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 Coefficient of variation /%
pH 值 pH value	春梢期	5.15	4.92 ～ 5.38	0.15	0.088	-1.23	2.98
	果实膨大期	5.29	5.05 ～ 5.76	0.23	1.15	0.21	4.30
	盛花期	5.26	5.10 ～ 5.50	0.10	1.06	3.84	1.83
土壤有机碳 SOC	春梢期	5.80 g/kg	1.81 ～ 10.37 g/kg	2.45	0.25	-0.24	42.24
	果实膨大期	6.36 g/kg	2.05 ～ 8.66 g/kg	1.96	-0.61	0.87	30.76
	盛花期	7.50 g/kg	3.59 ～ 11.55 g/kg	2.65	-0.167	-1.25	35.35
全氮 TN	春梢期	0.48 g/kg	0.33 ～ 0.75 g/kg	0.11	0.73	2.65	23.27
	果实膨大期	0.52 g/kg	0.41 ～ 0.75 g/kg	0.09	0.678	-0.03	17.55
	盛花期	0.58 g/kg	0.34 ～ 0.74 g/kg	0.12	-0.16	0.25	20.63
全磷 TP	春梢期	0.17 g/kg	0.08 ～ 0.46 g/kg	0.10	2.68	8.30	57.95
	果实膨大期	0.77 g/kg	0.64 ～ 0.94 g/kg	0.10	0.21	-1.36	13.23
	盛花期	0.12 g/kg	0.07 ～ 0.17 g/kg	0.03	0.12	-0.11	23.79
全钾 TK	春梢期	13.52 mg/kg	10.59 ～ 15.43 mg/kg	1.35	-0.78	0.75	10.00
	果实膨大期	14.31 mg/kg	13.79 ～ 17.73 mg/kg	1.25	2.07	5.05	8.76
	盛花期	12.65 mg/kg	10.21 ～ 13.75 mg/kg	1.16	-0.53	0.60	9.16
碱解氮 AN	春梢期	37.16 mg/kg	19.35 ～ 64.70 mg/kg	14.71	0.74	-0.38	39.60
	果实膨大期	31.14 mg/kg	10.56 ～ 50.68 mg/kg	9.94	-0.17	1.49	31.91
	盛花期	34.40 mg/kg	17.12 ～ 48.99 mg/kg	11.55	-0.21	-1.56	33.57
有效磷 AP	春梢期	5.89 mg/kg	0.15 ～ 56.06 mg/kg	15.88	3.40	11.67	269.71
	果实膨大期	1.46 mg/kg	0.19 ～ 7.69 mg/kg	2.16	2.59	7.07	147.64
	盛花期	3.05 mg/kg	0.50 ～ 20.40 mg/kg	5.58	3.23	10.75	182.66
速效钾 AK	春梢期	95.05 mg/kg	43.60 ～ 134.93 mg/kg	31.47	-0.12	-1.47	33.11
	果实膨大期	74.63 mg/kg	55.14 ～ 123.33 mg/kg	21.83	1.21	0.87	29.25
	盛花期	72.10 mg/kg	36.46 ～ 118.25 mg/kg	24.16	0.41	-0.48	33.51

48.99 mg/kg、0.50 ～ 20.40 mg/kg、36.46 ～ 118.25 mg/kg，变异系数分别为 1.83%、35.35%、20.63%、23.79%、9.16%、33.57%、182.66%、33.51%。通常认为，变异系数小于 10% 为弱变异，10% ～ 100% 为中等强度变异，大于 100% 为强变异。本研究中，土壤 TP 含量表现出较强的空间变异性，变异系数显著高于其他环境因子，表明不同样地间 TP 含量具有较明显的空间变异性。

2.4 环境因子与油茶冠层光谱相关性分析

春梢期、果实膨大期和盛花期油茶冠层光谱反射率与土壤养分之间的 Pearson 相关系数如表 6 所示。可以看出，春梢期冠层光谱对土壤 pH 值的敏感波段主要位于 780 ～ 985 nm、868 ～ 926 nm 和 1 002 ～ 1 080 nm 范围，其中最大相关系数出现在 1 016 nm 处（r=0.49），与果实膨大期和盛花期相比，最大相关系数对应的波段位置略有偏移。土壤 SOC 与 3 个时期的油茶冠层光谱的最大相关系数波段均位于 NIR 谱区，其中盛花期的敏感波段处于 SWIR 谱区，可能与冬季水汽扰动所引起的光谱响应有关。土壤 TN 含量与春梢期（r=0.71）和果实膨大期（r=0.64）的冠层光谱反射率表现出较强的相关性，其中盛花期的敏感波段出现在 1 215 ～ 1 255 nm 和 1 646 ～ 1 709 nm，最大相关系数出现在 1 236 nm 处（r=0.31），相关性较弱。土壤 TP 含量与春梢期油茶冠层光谱反射率最大相关系数出现在 921 nm（r=0.76），相关性较高；而在盛花期，最大相关系数出现在 403 nm 处（r=0.19），位于 UV 和 Visible 谱区，相关性较弱。土壤 TK 含量与 3 个时期油茶冠层光谱均呈现强相关性，盛花期的部分敏感波段位于 SWIR 谱区。土壤 AN 含量与 3 个时期光谱最大相关系数都出现在 NIR 谱区，春梢期最大相关系数出现在 1 118 nm（r=0.26），果实膨大期出现在 1 061 nm 处（r=0.60），盛花期出现在 1 152 nm 处（r=0.49），相关性较强。土壤 AP 含量与春梢期油茶冠层光谱敏感波段分布于 759 ～ 812 nm、864 ～ 928 nm 和 1031 ～ 1 130 nm 范围，最大相关系数出现在 924 nm（r=0.82），相关性强。土壤 AK 含量与春梢期光谱的相关系数较低（r=0.26），但与果实膨大期（r=0.64）和

表 6 不同生长期油茶反射率与环境因子相关系数

Table 6 Correlation coefficients between *Camellia oleifera* reflectivity and environmental factors at different growth stages

类型 Type		敏感波段 Sensitivity bands	最大相关系数波段 Maximum correlation coefficient band	相关系数 Correlation coefficient
pH 值 pH value	春梢期	780 ～ 985、868 ～ 926、1 002 ～ 1 080	1 016	0.49
	果实膨大期	515 ～ 737、1 445 ～ 1 493、2 031 ～ 2 038	694	0.43
	盛花期	440 ～ 515、585 ～ 697	678	0.67
土壤有机质 SOC	春梢期	811 ～ 838、890 ～ 897、918 ～ 930	925	0.49
	果实膨大期	837 ～ 889、1 022 ～ 1 097、1 214 ～ 1 297	1 239	0.53
	盛花期	1 465 ～ 1 645、2 065 ～ 2 135	1 528	0.62
全氮 TN	春梢期	755 ～ 781、819 ～ 856、861 ～ 893、896 ～ 929、1 006 ～ 1 103	891	0.71
	果实膨大期	1 026 ～ 1 093、1 222 ～ 1 293、2 268 ～ 2 496	1 058	0.64
	盛花期	1 215 ～ 1 255、1 646 ～ 1 709	1 236	0.31
全磷 TP	春梢期	796 ～ 829、854 ～ 891、903 ～ 931、1 001 ～ 1 115	921	0.76
	果实膨大期	529 ～ 647、691 ～ 733、1 324 ～ 1 346、1 446 ～ 1 544	1 479	0.55
	盛花期	375 ～ 423、745 ～ 920	403	0.19
全钾 TK	春梢期	1 139 ～ 1 213、1 271 ～ 1 304、1 311 ～ 1 346	1 155	0.60
	果实膨大期	353 ～ 414、515 ～ 617、694 ～ 747	729	0.63
	盛花期	1 152 ～ 1 189、1 305 ～ 1 335、2 193 ～ 2 267	1 321	0.47
碱解氮 AN	春梢期	925 ～ 998、1 104 ～ 1 159	1 118	0.26
	果实膨大期	840 ～ 897、993 ～ 1 103、1 225 ～ 1 292　2 251 ～ 2 326	1 061	0.60
	盛花期	1 130 ～ 1 167、1 312 ～ 1 345、1 446 ～ 1 499	1 152	0.49
有效磷 AP	春梢期	759 ～ 812、864 ～ 928、1 031 ～ 1 130	924	0.82
	果实膨大期	1 017 ～ 1 102、2 032 ～ 2 085	1 028	0.36
	盛花期	488 ～ 520、583 ～ 697	677	0.62
速效钾 AK	春梢期	929 ～ 1 002、1 102 ～ 1 158	1 125	0.26
	果实膨大期	766 ～ 812、833 ～ 894、985 ～ 1 103	1 030	0.64
	盛花期	1 151 ～ 1 164、1 319 ～ 1 345、1 447 ～ 1 790	1 788	0.60

盛花期（r=0.60）相关系数较高，盛花期相较于另外两个时期扩大了光谱间的细微差异，其最大相关系数的波段略有迁移。

2.5　环境因子与植被指数拟合分析

本研究共选取 15 个环境因子用于结构方程模型的拟合，为避免环境因子间高度相关性导致的回归系数估计不稳定，进而削弱模型的解释和预测能力，在构建 SEM 模型之前，先使用 SPSS 29.0 软件对自变量进行共线性诊断，排除 VIF 较高的变量，模型整体拟合的评价结果见表 7。

表 7　各环境因子对不同植被指数构建 SEM 模型的评价
Table 7　Evaluation of SEM models for different vegetation indices based on various environmental factors

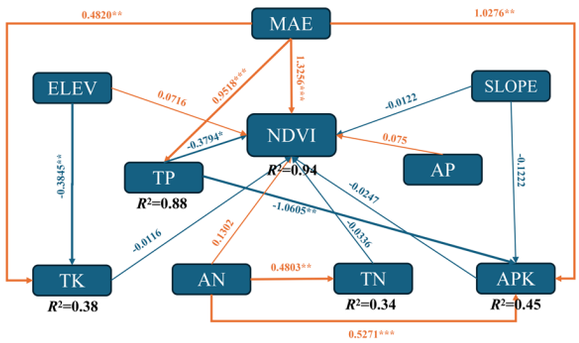
类型 Type	模型拟合度 R^2	费舍尔 C 统计量 Fisher's C	显著性水平 P value	自由度 df	赤池信息量准则 AIC
NDVI	0.94	38.744	0.085	28	451.488
PRI	0.92	30.727	0.329	28	266.587
EVI	0.83	27.026	0.517	28	362.793
OSAVI	0.90	28.193	0.454	28	448.638
MSAVI	0.60	18.266	0.570	20	354.106
WBI	0.74	29.088	0.408	28	426.594
DNWI	0.71	27.084	0.514	28	417.112
SIPI	0.70	29.323	0.396	28	441.395
REP	0.70	30.858	0.323	28	778.531
NDNI	0.40	28.299	0.449	28	425.609
PSRI	0.83	30.888	0.322	24	399.868
MTVI2	0.43	25.496	0.491	28	705.703
TVI	0.46	31.053	0.152	28	455.710

经检验，模型拟合的各项指标均达到评价标准，表明模型具有较好的结构与统计性能，其中归一化植被指数（NDVI）、光化学植被指数（PRI）、增强植被指数（EVI）、优化土壤调节植被指数（OSAVI）与植物衰老指数（PSRI）综合评价模型与各环境因子建模拟合较好，详细路径效应如图 4 所示。

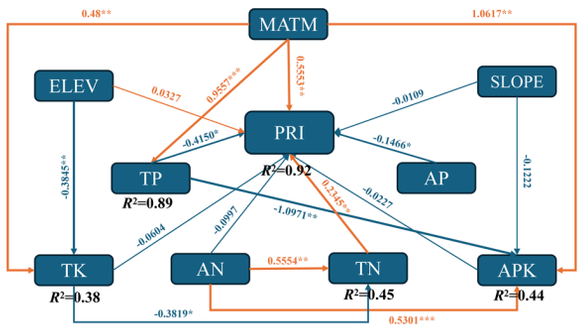
3　讨　论

气候、地形和土壤养分均对油茶冠层光谱的特征具有影响，其中气候因子和土壤养分因子的主导作用尤为显著。土壤因子在众多研究中被证实对植物生长具有关键作用，氮、磷、钾是植物从土壤中吸收、转运和同化的大量必需元素，维持着各阶段生长发育 [23]。本研究中，气候因子对 NDVI（1.325 6***）、PRI（0.555 3**）、EVI（0.556）与 OSAVI（1.257***）均呈现出显著的直接正效应，而对 PSRI（-1.652 5***）呈现显著负效应。研究区的气候变化导致土壤养分在短距离内发生显著变异，不仅直接影响 TK 和 AK 的空间分布，还通过调控其他土壤养分因子间接作用于油茶生长，进而反映在油茶冠层光谱反射率上，进一步表明气候因子对光谱波段变化具有主导作用。高温条件通常加快酶促反应，促进 SOC 分解与氮释放，从而影响 TN 的空间分布 [24]。降水量的变化则通过调节土壤湿度间接影响 C/N 的平衡 [25]。Deng 等 [26] 研究发现，气候因子通过调控凋落物输入、分解速率及微生物活动，间接影响土壤碳氮含量，是驱动油茶冠层光谱特征变化的主要因子之一。

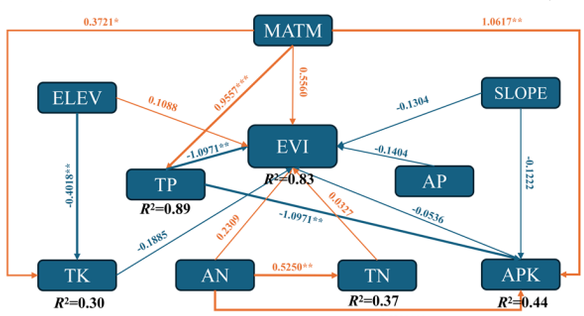
土壤因子对光谱特征变化的直接作用较小，其影响更多的是通过调控油茶植株的营养元素促进油茶生长发育，进而间接影响冠层光谱。氮含量对 PRI（0.234 5**）具有直接正效应，磷含量则 对 NDVI（-0.379 4*）、PRI（-0.415*）、EVI（-1.097 1**）及 OSAVI（-0.247 5）均呈现不同程度的负效应，对 PSRI（0.88**）则表现出显著正效应，其他土壤养分因子对光谱指数大多具有负效应。在上述基础之上，深入探究磷含量对油茶生长发育的影响，植被指数 PSRI 对衰老的植被和病变叶片的色素变化敏感 [27]，其值的升高通常与叶绿素降解和花青素、类胡萝卜素的相对积累有关。磷是能量代谢的核心元素，也是植物核酸与膜脂的关键组分。在缺磷条件下，植物光合作用受到抑制，光系统 II 的活性和稳定性下降，导致叶绿体结构受损和叶绿素合成受阻。已有对磷敏感的木本植物（如柑橘、杉木等）的研究证实，磷缺乏会导致叶片叶绿素 a、b 含量显著降低，出现“失绿”症状。而植物缺磷作为一种非生物胁迫，会导致植物体内活性氧的积累，引发氧化应激。作为一种保护机制，植物会激活其抗氧化防御系统，而花青素作为一种强大的天然抗氧化剂，其生物合成在此过程中被显著上调。分子生物学研究表明，磷胁迫信号能够通过调控转录因子激活花青素合成途径中的关键酶基因，从而驱动花青素在叶片中大量积累 [28]。这一内在的植物生理生化变化被冠层光谱遥感所捕获，最终在宏观尺度上表现为 PSRI 指数随土壤磷素降低而升高的“正效应”，本研究结果与这一被广泛接受的生理生态模型高度一致。此外，本研究中其他光谱指数的响应模式也为上述机制提供了有力的旁证，对叶黄素更为敏感的光谱指数 PRI 与土壤 TN（0.234 5**）呈显著正相关。已有研究表明，不同作物在物候期内光谱变化形态总体相似，反射



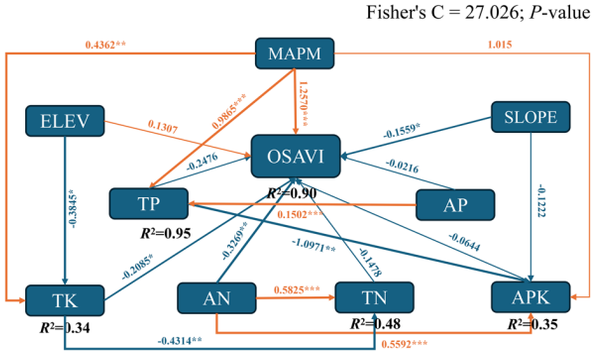
Fisher's C = 38.744; *P*-value = 0.085; *df* =28; AIC= 451.488



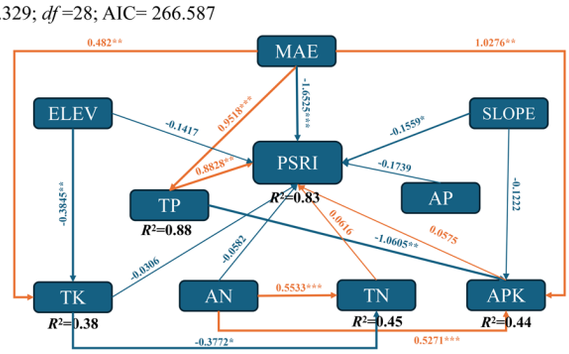
Fisher's C = 30.727; *P*-value = 0.325; *df* =28; AIC= 266.587



Fisher's C = 27.026; *P*-value = 0.329; *df* =28; AIC= 266.587



Fisher's C = 28.193; *P*-value = 0.454; *df* =28; AIC= 448.638



Fisher's C = 30.888; *P*-value = 0.322; *df* =24; AIC= 399.868

图中橙色实线箭头代表正效应，蓝色实线箭头表示负效应，线条粗细代表路径系数大小排序，箭头上的数字代表路径系数，R^2 代表模型拟合度。
In the figure, solid orange arrows represent positive effects, solid blue arrows represent negative effects, line thickness indicates the ranking of path coefficient magnitudes, numbers on arrows represent path coefficients, and R^2 represents model fit.

图 4 环境因子与植被指数的 SEM 模型

Fig. 4 Structural equation model (SEM) of environmental factors and vegetation indices

率在可见光波段随施氮量或叶片氮含量增加而降低，在近红外波段则升高 [29]。Klem 等 [30] 通过分析作物垂直梯度氮素分配和高光谱异质性响应特征，为优化垂直剖面的光合作用效率提供了依据。Curran[31] 较早地总结了与叶片氮素相关的特征波段，并建议短期内应聚焦叶片生化组分的光谱响应机制，长期则需实现从叶片辐射传输到冠层尺度的田间试验，这种光谱特征与土壤养分之间的协同变化，从光谱信息的角度进一步印证了磷胁迫下油茶叶片生化组分发生的上述生理响应。

地理因子对植被指数的影响较小，可能由于研究区内地势起伏较缓，海拔与坡度变化不明显。海拔对 NDVI、PRI、EVI 和 OSAVI 均呈现不同程度的正效应，对 PSRI 表现为较弱的负效应。坡度对各植被指数均呈现出不同程度的负效应。此外，海拔对钾素含量也呈现显著负效应。Lu 等 [32] 使用无人机遥感监测水稻钾积累时发现，低钾导致叶绿素含量减少，进而引起特定区间光谱反射率变化，并且钾素参与调控维持细胞的渗透压，间接影响植物水状态。这些特点主要表现在近红外波段，当前基于高光谱技术的钾素研究较少，相关研究结果也表明无论是可见光、近红外还是短波红外，虽都与钾含量能建立一定联系，却尚未系统揭示其光谱变化机制，因此钾的光谱响应规律仍有待深入探索。

4 结 论

本研究基于实测数据，采用 SEM 模型量化分析了气候因子、地形因子和土壤养分因子对油茶冠层光谱的影响机制，揭示了油茶冠层光谱特征变化

与环境因子之间的关系。通过对 350 ～ 2 500 nm 波段的多维数据降维处理并提取 13 种植被指数作为分析指标。研究结果表明：

1）不同样地间地形因子与气候因子的差异性较小，土壤养分因子差异较为明显。SEM 模型拟合结果显示，气候与土壤养分是影响油茶冠层光谱特征的主导因子，其中土壤养分中的氮、磷含量作用尤为突出，对植被指数则表现出不同程度的正负效应。

2）地形和气候因子对油茶冠层光谱特征均具有显著影响，主要通过调控土壤养分因子产生间接影响，其中海拔的影响程度略高于坡度，而温度、降水量和蒸发量对植被指数都有不同程度的正负效应。

本研究通过结合高分辨率光谱技术和高效的数据分析方法，首次构建并验证了适用于丘陵区油茶林的“气候 - 地形 - 土壤 - 冠层光谱”因果网络模型，系统揭示了各类环境因子对研究区内油茶冠层光谱特征的直接和间接作用机制，提升了油茶林养分监测的准确性，可为油茶林精细化经营管理提供理论支持。

参考文献：

[1] 陈永忠 . 我国油茶科技进展与未来核心技术 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(7):1-22.
Chen Y Z. Scientific and technological progress and future core technologies of oil tea *Camellia* in China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(7):1-22.

[2] Teixeira A M, Sousa C. A review on the biological activity of *Camellia* species[J]. Molecules,2021,26:2178.

[3] 谭新建 , 晏巢 , 钟秋平 , 等 . 我国油茶良种选育及推广应用 [J]. 世界林业研究 ,2023,36(2):108-113.
Tan X J, Yan C, Zhong Q P, et al. Breeding, promotion and application of improved oil-tea cultivar in China[J]. World Forestry Research,2023,36(2):108-113.

[4] 傅根深 , 吕海燕 , 燕李鹏 , 等 . 基于冠层高光谱特征的油茶叶片碳氮比估算模型构建 [J]. 光谱学与光谱分析 ,2023,43(11):3404-3411.
Fu G S, Lyu H Y, Yan L P, et al. A C/N ratio estimation model of Camellia oleifera leaves based on canopy hyperspectral characteristics[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2023,43(11):3404-3411.

[5] 陈泽鑫 , 葛晓宁 , 郭红艳 , 等 . 不同砧穗组合浙江红花油茶嫁接苗的生理生化特性比较 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(2):91-100.
Chen Z X, Ge X N, Guo H Y, et al. Comparison of physiological and biochemical traits of grafted *Camellia chekiangoleosa* seedlings with various combinations of rootstocks[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(2):91-100.

[6] Lin M, Liu Y, Zhang F X, et al. Design of multi-passband polymer multilayer film and its application in photovoltaic agriculture[J]. Chinese Optics Letters,2021,19(11):112201.

[7] 倪佳颖 , 丁锟奇 , 黄峰 , 等 . 基于深度学习模型的干旱区绿洲植被时空动态预测方法——以青土湖绿洲为例 [J]. 生态学报 ,2025,45(23):11810-11820.
Ni J Y, Ding K Q, Huang F, et al. Predicting spatiotemporal dynamics of oasis vegetation in arid regions using a CNN-GRU model: a case study of Qingtu oasis[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(23):11810-11820.

[8] 蔡秋阳 , 高翅 . 园林博览园游客满意度影响因素及机理分析 ——基于结构方程模型的实证研究 [J]. 中国园林 ,2016,32(8):58-64.
Cai Q Y, Gao C. A study on the influencing factors and mechanism of tourists’ satisfaction of garden expo based on structural equation model[J]. Chinese Landscape Architecture,2016,32(8):58-64.

[9] 姚雪松 , 冷红 . 基于结构方程模型的公园游憩空间满意度研究——以长春市为例 [J]. 建筑学报 ,2017(增刊 1):32-37.
Yao X S, Leng H. Study on satisfaction of park recreation space based on structural equation model: a case study of Changchun[J]. Architectural Journal,2017(S1):32-37.

[10] 吴金霏 , 张文元 , 殷佑斗 , 等 .28- 高芸苔素内酯对油茶果实经济性状及营养品质的影响 [J]. 经济林研究 ,2023,41(3):197-205.
Wu J F, Zhang W Y, Yin Y D, et al. Effects of 28-homobrassinolide on economic characters and nutritional quality of *Camellia oleifera* fruit[J]. Nonwood Forest Research,2023,41(3):197-205.

[11] 董灵波 , 田栋元 , 陈莹 , 等 . 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林更新影响因素 [J]. 应用生态学报 ,2021,32(8):2763-2772.
Dong L B, Tian D Y, Chen Y, et al. Clarifying the factors affecting *Larix gmelinii* forest regeneration based on structural equation model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(8):2763-2772.

[12] 郭凌曜 , 蒋元华 , 李茂松 , 等 . 油茶丰产气候指标体系构建与区划——以湖南普通油茶为例 [J]. 中国油料作物学报 ,2023,45(5):1042-1052.
Guo L Y, Jiang Y H, Li M S, et al. Construction and zoning of climatic index system for *Camellia* abundance: example of ordinary *Camellia* in Hunan[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2023,45(5):1042-1052.

[13] 龚家国 , 常紫倩 , 赫晓慧 , 等 . 结合光谱分解与空间吸引模型的中低分辨率影像山区河流水体提取 [J]. 地球信息科学学报 ,2025,27(8):1936-1951.
Gong J G, Chang Z Q, He X H, et al. Mountain river waterbody extraction from medium and low-resolution imagery using spectral unmixing and spatial attraction modeling[J]. Journal of Geo-information Science,2025,27(8):1936-1951.

[14] 吴锦成 , 于坤霞 , 李雪 , 等 . 黄河流域植被时空变化及驱动因素 [J]. 环境科学 ,2026,47(4):2307-2317.
Wu J C, Yu K X, Li X, et al. Spatio-temporal changes and driving factors of vegetation in the Yellow River basin[J]. Environmental

Science,2026,47(4):2307-2317.

[15] 闫子岳 , 杜敏 , 孙文义 , 等 .1986—2023 年中国四大沙地扩张与萎缩的动态变化 [J]. 水土保持研究 ,2026,33(1):205-215.
Yan Z Y, Du M, Sun W Y, et al. Dynamic changes of expansion and shrinkage of the four major sandy lands of China from 1986 to 2023[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(1):205-215.

[16] 顾亚 , 张亚 , 段海川 , 等 . 基于 OSAVI-Albedo 特征空间的香格里拉市土地荒漠化时空动态监测 [J]. 生态学报 ,2025,45(13):6524-6543.
Gu Y, Zhang Y, Duan H C, et al. Spatio-temporal dynamic monitoring of land desertification in Shangri-La City based on OSAVI-Albedo feature space[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(13):6524-6543.

[17] 许政勇 , 孙斌 , 张王菲 , 等 . 基于优化三角形植被指数（TVI）的灌丛化草原植被地上生物量遥感估测方法研究 [J]. 草业学报 ,2023,32(10):1-14.
Xu Z Y, Sun B, Zhang W F, et al. An evaluation of a remote sensing method based on optimized triangular vegetation index (TVI) for aboveground shrub biomass estimation in shrub-encroached grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica,2023,32(10):1-14.

[18] 陈聪 , 于啸 , 宫琪 . 基于改进残差网络的苹果叶片病害识别研究 [J]. 河南农业科学 ,2023,52(4):152-161.
Chen C, Yu X, Gong Q. Apple leaf diseases identification based on improved residual networks[J]. Journal of Henan Agriculture Sciences,2023,52(4):152-161.

[19] 林秋云 , 谢振宇 , 胡伟 , 等 . 水稻亮绿叶突变体 bgl-2 的表型特征与遗传分析 [J]. 热带作物学报 ,2023,44(6):1091-1096.
Lin Q Y, Xie Z Y, Hu W, et al. Phenotypic characteristics and genetic analysis of *bgl-2*, a bright green leaf mutant *Oryza sativa* L.[J]. Chinese Journal of Tropical Crops,2023,44(6):1091-1096.

[20] 胡志辉 , 张梦琦 , 王亚文 , 等 . 适期追肥对 ‘ 江大紫豇 1 号 ’ 豇豆叶片光谱参数及产量的影响 [J]. 江汉大学学报 (自然科学版),2022,50(6):5-12.
Hu Z H, Zhang M Q, Wang Y W, et al. Effect of suitable topdressing on leaves spectral parameters and yield of Cowpea ‘Jiang Da Zi Jiang 1 Hao’[J]. Journal of Jianghan University (Natural Science Edition),2022,50(6):5-12.

[21] 张敏 , 郭涛 , 刘轲 , 等 . 基于高光谱植被指数的水稻 LAI 遥感估算 [J]. 西南农业学报 ,2022,35(11):2651-2658.
Zhang M, Guo T, Liu K, et al. Rice LAI estimation by remotely sensed hyperspectral vegetation index[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2022,35(11):2651-2658.

[22] 王瑾 , 陈书涛 , 丁司丞 , 等 . 大豆叶片呼吸与植被指数和叶片性状的关系 [J]. 光谱学与光谱分析 ,2022,42(5):1607-1613.
Wang J, Chen S T, Ding S C, et al. Relationships between the leaf respiration of soybean and vegetation indexes and leaf characteristics[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2022,42(5):1607-1613.

[23] 陆婷婷 , 闫文惠 , 苏新全 , 等 . 多年生稻产量品质抗逆响应形成的生理生态机制及其调控途径研究进展 [J]. 中国水稻科学 ,2025,39(5):586-600.
Lu T T, Yan W H, Su X Q, et al. Research progress on physiological and ecological mechanisms and regulation pathways of yield, quality and stress resistance response in perennial rice[J]. Chinese Journal of Rice Science,2025,39(5):586-600.

[24] 王小燕 , 廖立国 , 李金凤 , 等 . 广西亚热带人工林土壤碳氮含量及其驱动因素研究 [J]. 林业科学研究 ,2025,38(5):185-195.
Wang X Y, Liao L G, Li J F, et al. Soil carbon and nitrogen contents and their driving factors in subtropical plantation forests of Guangxi[J]. Forestry Research,2025,38(5):185-195.

[25] Zhang L M, Zheng Q F, Liu Y L, et al. Combined effects of temperature and precipitation on soil organic carbon changes in the uplands of eastern China[J]. Geoderma,2019,337:1105-1115.

[26] Deng X F, Ma W Z, Ren Z Q, et al. Spatial and temporal trends of soil total nitrogen and C/N ratio for croplands of east China[J]. Geoderma,2020,361:114035.

[27] 马爽 , 韩阳 , 黄梦雪 , 等 . 基于不同植被指数的植被 - 土壤混合像元高光谱偏振信息与模型研究 [J]. 光谱学与光谱分析 ,2017,37(11):3549-3556.
Ma S, Han Y, Huang M X, et al. Study on information and model of high polarization hyperspectral about vegetation-soil mixed pixels based on different vegetation indices[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2017,37(11):3549-3556.

[28] 吴娟娟 , 李先信 , 苑平 , 等 . 柑橘紫色酸性磷酸酶 *PAP* 基因的低磷胁迫表达特征 [J]. 分子植物育种 ,2020,18(21):6975-6980.
Wu J J, Li X X, Yuan P, et al. Expression characteristic of the *PAP* gene responses to phosphorus starvation in *Citrus*[J]. Molecular Plant Breeding,2020,18(21):6975-6980.

[29] 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.

[30] Klem K, Rajsnerova P, Novotna K, et al. Changes in vertical distribution of spectral reflectance within spring barley canopy as an indicator of nitrogen nutrition, canopy structure and yield parameters[J]. Agriculture (Polnohospodárstvo),2014,60(2):50-59.

[31] Curran P J. Remote sensing of foliar chemistry[J]. Remote Sensing of Environment,1989,30(3):271-278.

[32] Lu J S, Eitel J U H, Engels M, et al. Improving unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing of rice plant potassium accumulation by fusing spectral and textural information[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2021,104:102592.

[本文编校：吴 彬]