

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.01.007

基于 GF-5 高光谱数据的昆崙山区域森林胁迫研究

黄宝华^{1,2,3}, 周利霞³, 武娟⁴

(1. 山东交通学院 交通土建工程学院, 济南 250357; 2. 山东省数据开放创新应用实验室, 济南 250357;
3. 山东星屹时空信息科技有限公司, 山东 烟台 264003; 4. 烟台市城市规划展示馆, 山东 烟台 213167;
5. 北京九五益品科技信息有限公司, 北京 101100)

摘要:为更好地分析森林植被胁迫的生理过程,建立有效的森林监测系统,使用 GF-5 号高光谱数据对昆崙山区域植被应力进行遥感健康度估测,GF-5 号高光谱数据能够使非破坏性监测叶绿素、类胡萝卜素和花青素含量等叶片色素等重要指标反映植被健康成为可能,适用于当前研究区域的动态健康监测。结果显示,混交林健康度均值最高,其次为落叶阔叶林,常绿针叶林和落叶针叶林健康度均值相当;阳坡森林健康度均值最高,其次为半阴坡与半阳坡的森林健康度均值相当,阴坡森林健康度最低;植被健康度与土壤类型呈现一定相关性,与砂土呈现正相关,与粉砂土、黏土呈现负相关关系。研究表明使用与植被冠层中不同类型与胁迫有关的遥感指数来定量表示植被特殊状态、生物物理和生物化学特性,使森林资源的调查监测和管理得以实现。

关键词:GF-5 高光谱; 昆崙山; 森林健康度; 胁迫; 植被指数

中图分类号:S771.8; S762; S763

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)01-0055-09

Study on Forest Stress in Kunyu Mountain Area Based on GF-5 Hyperspectral Data

HUANG Baohua^{1,2,3}, ZHOU Lixia³, WU Juan⁴

(1. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China; 2. Shandong Data Open Innovation Application Laboratory, Jinan 250357, China; 3. Shandong Xingyi Spacetime Information Technology Co. Ltd, Shandong, Yantai 264003, China; 4. Yantai Urban Planning Exhibition Hall, Shandong Yantai 213167, China;
5. Beijing 95 Yipin Technology Information Co., LTD., Beijing 101100, China)

Abstract: In order to better analyze the physiological process of forest vegetation stress and establish an effective forest monitoring system, remote sensing health estimation of vegetation stress in the Kunyu Mountain area was carried out using GF-5 hyperspectral data. GF-5 hyperspectral data enables non-destructive monitoring of important indicators such as chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin content to reflect vegetation health, making it possible for the dynamic health monitoring system applicable to the current research area. The results showed that the average health level of mixed forests was the highest, followed by deciduous broad-leaved forests, and the average health level of evergreen and deciduous coniferous forests was equivalent. The average health level of forest on the sunny slope was the highest, followed by the average health level of forest on the semi shaded and semi sunny slopes, with the lowest health level of forest on the shaded slope. There was a certain correlation between vegetation health and soil type, a positive correlation with sandy soil, and a negative correlation with silt and clay. Research had shown that the use of remote sensing indices related to different types and stresses in vegetation canopy can quantitatively represent the special state, biophysical, and biochemical characteristics of vegetation, enabling the investigation, monitoring, and management of forest resources.

Keywords:GF-5 hyperspectral; Kunyu Mountain; forest health; stress; vegetation Index

0 引言

森林能够起到制造氧气、净化空气、过滤尘埃、

收稿日期:2023-04-10

基金项目:山东省交通运输厅科技计划(2022B106);山东交通学院博士科研启动基金(BS2021007)。

第一作者简介:黄宝华,博士,副教授。研究方向为遥感技术与森林生态研究。E-mail: huangbaohua78@126.com

引文格式:黄宝华,周利霞,武娟. 基于 GF-5 高光谱数据的昆崙山区域森林胁迫研究[J]. 森林工程, 2024,40(1):55-63.

HUANG B H, ZHOU L X, WU J. Study on forest stress in Kunyu Mountain area based on GF-5 hyperspectral data[J]. Forest Engineering, 2024, 40(1):55-63.

涵养水源和保持水土调节气候等多方面作用,因此森林资源保护变得十分重要^[1]。随着社会经济的发展 and 人类活动的加剧,空气污染、气候变化因素导致森林健康状况下降^[2],迫切需要建立一个有效的森林监测系统来监测其健康变化情况,以便采取有效手段进行调节。但是由于森林胁迫评估复杂,一种类型的胁迫可能由多种类型的胁迫引起,评估受到技术手段等多方面影响,因此此项工作一直未能很好开展。随着遥感技术,尤其是高光谱技术的发展,由于该技术具有波段多且具连续、光谱范围窄和信息量大等特点,能够产生许多生化估计值^[3],如冠层中的叶绿素、氮、木质素和水含量等^[4]。森林植被胁迫是一个非常复杂的生理过程,

会导致光合活性下降、叶绿素含量减少、叶片干物质含量高和非绿色色素增加等^[5]。植被中的胁迫也可能由如氮、磷、钾、钙、镁、铁和锌等营养供应的下降引起,可以通过叶绿素含量、叶色素和落叶等遥感手段来估计森林胁迫状况。植物的种类和环境不同会导致植物营养成分和含量的差异,但大部分植物仍是由叶黄素、叶绿素、胡萝卜素、木质素和纤维素等组成。这些成分变化会导致植物光谱变化,植物光谱重要因素在不同波长范围内有所不同。色素在可见光(0.35~0.7 μm)范围内占据主要地位^[6];0.7~1.3 μm 波长范围内植物光谱的变化受细胞构造如冠层结构及海绵状叶肉细胞主导^[7];植物光谱在1.3~2.5 μm 波长范围内主要受叶片内水含量的影响。植物健康或存在胁迫变化总是反映在植被冠层中,通常表现在叶片颜色(叶片变黄/萎蔫)、叶片脱落等方面^[8]。使用与植被冠层中不同类型与胁迫有关的遥感指数来定量表示植被特殊状态、生物物理和生物化学特性,使森林

资源的调查监测和管理得以实现。植被参数可以为相关研究提供大量有效信息,基于遥感影像的森林植被参数已经成为森林健康状况数量化表达的重要途径^[9]。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域

昆嵛山位于胶东半岛东部,横跨牟平、乳山和文登等几地交界处,东西 50 km,南北 35 km,有大小山峰 72 个,海拔 923 m 的泰礴顶为胶东半岛东部最高峰,素有“仙山之祖”的美誉。同时也是中国赤松(*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.)的原生地 and 全球赤松林面积最大和保护最完好的天然分布中心。昆嵛山国家级自然保护区为森林生态系统,生态环境优越,是生物多样性全球同纬度最丰富的地区之一。昆嵛山森林分布主要以泰礴顶为中心向外分层发展,泰礴顶周边主要以落叶阔叶林为主,中间为混交林,其余区域以常绿针叶林为主,如图 1 所示。

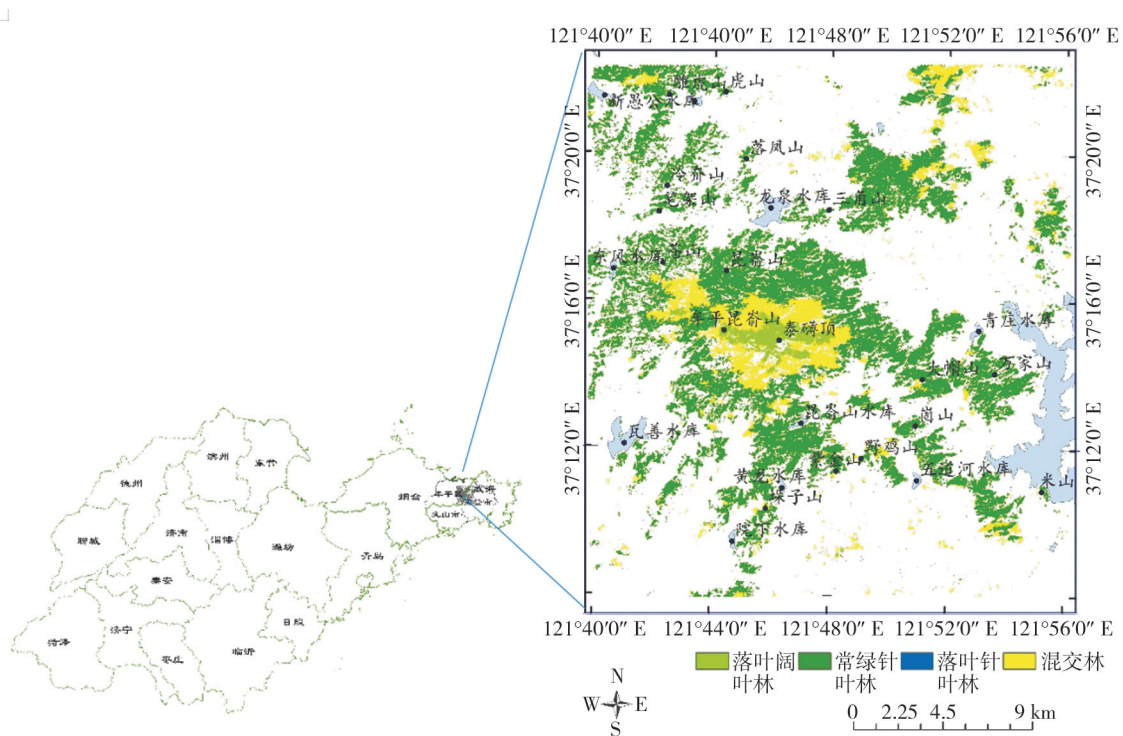


图 1 烟台市昆嵛山森林分布类型图

Fig. 1 Forest distribution types of Kunyu Mountain in Yantai City

1.2 数据处理及技术路线

利用 GF-5 号高光谱成像仪(AHSI)的 L1 级产品数据包括 Geotiff 数据文件、xml 说明文件、RPC 参

数文件、浏览图文件、覆盖矢量文件、观测几何角度文件和定标系数文件。对昆嵛山地区 2019 年 4 月 26 日和 10 月 3 日 2 期 GF-5 号高光谱影像进行辐

射校正、大气校正、正射校正、地形校正处理,植被指数计算和分析,利用衍生植被指数(NDVI₇₀₅、CAR1、NDII)结合,定量评估昆崙山区域的森林健康状况,作为植物健康的指标。利用 2017 年 10 m 分辨率 FROM-GLC 的 6 类植被覆盖数据(<http://data.starcloud.pcl.ac.cn/zh>)进行植被类型划分,现昆崙山区域植被类型为落叶阔叶林、落叶针叶林、常

绿针叶林和混交林。结合 2019 年 MODIS 月 1 km 分辨率 NDVI 数据(<https://www.resdc.cn/>)对研究区森林生长情况进行掩膜分析。根据坡向划分,即阴坡(0°~45°)、半阴坡(45°~135°)、阳坡(135°~225°)、半阳坡(225°~315°)、阴坡(315°~360°)^[10]。利用研究区域土壤质地空间分布数据,分析其与森林长势胁迫性关系,如图 2 所示。

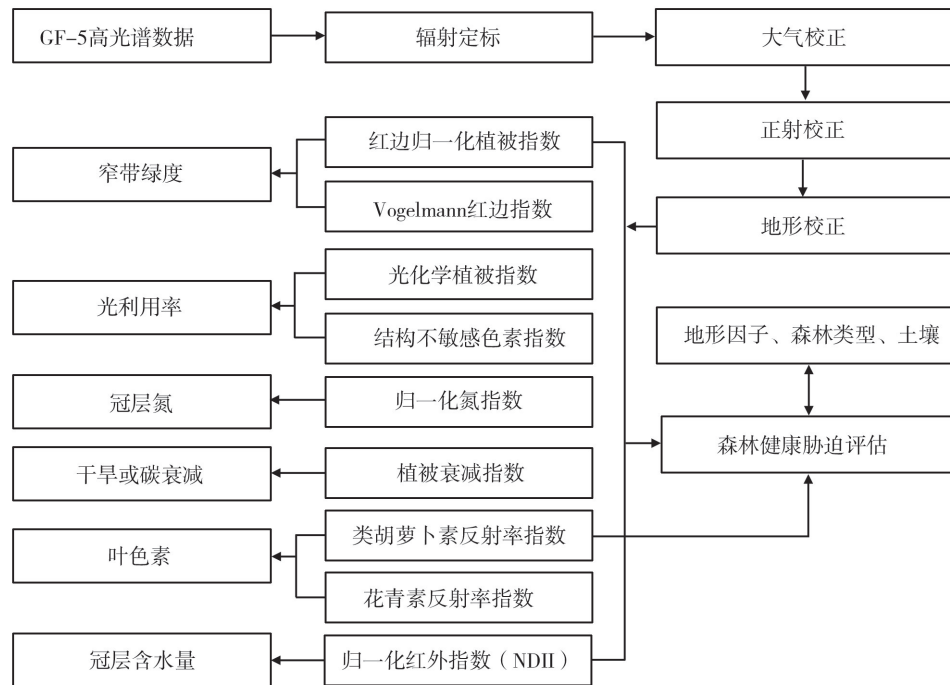


图 2 技术流程图

Fig. 2 Technical flowchart

1.3 植被指数健康度监测模型

利用植被指数来表征植被活动,植被活动随绿叶的季节性、空间变化而变化。该分析方法还消除了土地覆盖类型、土壤类型或气候条件引起的误差^[9]。因此,植被指数在结构和功能方面适合监测植被冠层的空间变异性,即绿色度指数(用于评估植被间隙)、叶色素指数(作为色素的衡量标准)和光利用效率(用于估计植物功能),提供有关植被健康的重要信息^[11]。根据 GF-5 的光谱分辨率,选取能够反映昆崙山区域植被健康情况的植被指数,利用衍生的植被指数经加权叠加绘制该区域植被胁迫及健康图,见表 1。

2 结果和讨论

2.1 昆崙山森林光谱特点及长势分析

健康树木冠叶叶绿素含量多,近红外波段反

射率高,蓝、红外波段吸收率高,红边位置清晰。当植被健康出现状况时,叶面首先呈现黄蓝相间,蓝、红波段吸收率降低,绿、红波段反射率也降低,红边向长波方向位移。随着健康度的持续下降,后期由于水分和叶绿素的缺乏,叶面枯黄,近红外峰值近乎消失,整个反射光谱曲线呈现平缓,如图 3(a)所示。

由 2019 年 MODIS 月 NDVI 数据获取昆崙山地区森林生长变化情况可知,针叶林、阔叶林生长情况总体相适,即 6—8 月为森林生长的最茂盛期,其后开始下降。其中,针叶林的 NDVI 值由 6 月开始的 0.9 缓慢下降至 10 月的 0.79,10 月后开始快速下降至 2 月的最低值 0.31;阔叶林的 NDVI 值 6 月开始至 8 月为高值稳定区,值范围在 0.8 左右的,8 月后开始快速下降至最低值 1 月的 0.26,如图 3(b)所示。

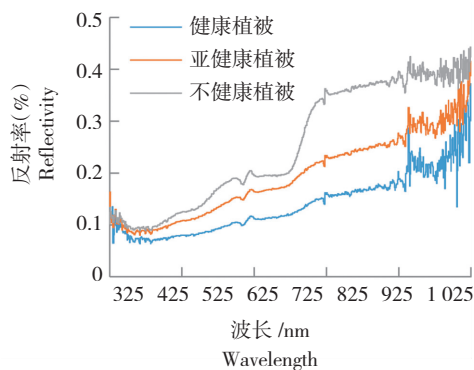
表1 植被指数及其计算公式

Tab. 1 Vegetation index and its calculation formula

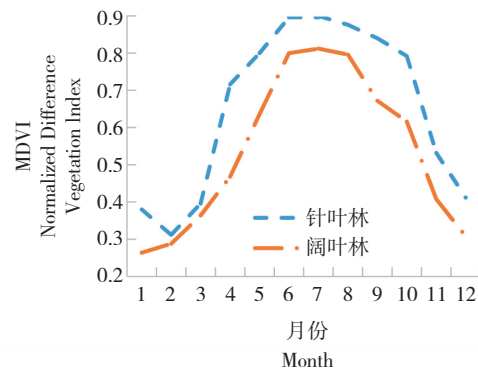
植被指数 Vegetation index	公式 Formula	值域范围 Range of values
窄带绿度 Narrowband greenness	红边归一化植被指数(NDVI ₇₀₅ ,式中记为 N_{DVI705}) ^[12] $N_{DVI705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}}$	-1~1,一般绿色植被 0.2~0.9
	Vogelmann 红边指数 1(VOG1,式中记为 V_{OG1}) ^[13] $V_{OG1} = \frac{\rho_{740}}{\rho_{720}}$	0~20,一般绿色植被 4~8
光利用率 Light use efficiency	光化学植被指数(PRI,式中记为 P_{RI}) ^[14] $P_{RI} = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}$	-1~1,一般绿色植被-0.2~0.2
	结构不敏感色素指数(SIPI,式中记为 S_{IPI}) ^[15] $S_{IPI} = \frac{\rho_{800} - \rho_{445}}{\rho_{800} - \rho_{680}}$	0~2,一般绿色植被-0.8~1.8
冠层氮 Canopy nitrogen	归一化氮指数(NDNI,式中记为 N_{DNI}) ^[16] $N_{DNI} = \frac{\text{Log}(1/\rho_{1510}) - \text{Log}(1/\rho_{1680})}{\text{Log}(1/\rho_{1510}) + \text{Log}(1/\rho_{1680})}$	0~1,一般绿色植被 0.02~0.1
干旱或碳衰减 Drought or carbon decay	植被衰减指数(PSRI,式中记为 P_{SRI}) ^[17] $P_{SRI} = \frac{\rho_{680} - \rho_{500}}{\rho_{750}}$	-1~1,一般绿色植被-0.1~0.2
叶色素 Chromophyll	类胡萝卜素反射率指数 1(CRII,式中记为 C_{RII}) ^[18] $C_{RII} = \frac{1}{\rho_{510}} - \frac{1}{\rho_{550}}$	0~15 以上,一般绿色植被 1~12
	花青素反射率指数 1(ARI,式中记为 A_{RI}) ^[19-20] $A_{RI} = \frac{1}{\rho_{550}} - \frac{1}{\rho_{700}}$	0~0.2 以上,一般绿色植被 0.001~0.1
冠层水分含量 Canopy water content	归一化红外指数(NDII,式中记为 N_{DII}) ^[21] $N_{DII} = \frac{\rho_{819} - \rho_{1649}}{\rho_{819} + \rho_{1649}}$	-1~1,一般绿色植被 0.02~0.6

注: ρ 为反射率。

Note: ρ is the reflectivity.



(a) 不同健康情况下的树木光谱
(a) Tree spectra under different health conditions



(b) 森林生长变化图
(b) Forest growth changes chart

图3 不同森林光谱和长势变化

Fig. 3 Spectra and growth changes of different forests

2.2 植被指数监测

利用2019年4月26日和10月3日2期具有森林生长典型特征的GF-5号的9个植被指数,分析昆嵛山的森林健康和量化胁迫情况,遥感衍生指数分别如图4和图5所示。结果表明光谱反射率随着植物材质、含水量、色素、碳含量和氮含量的不同而变化显著。

NDVI₇₀₅对叶冠层的微小变化、林窗片段和衰老非常灵敏,与叶绿素的相关性比红边参数好。NDVI₇₀₅的值范围是-1~1,健康植被介于0.2~0.9,

NDVI₇₀₅指数4月份为0~0.78,10月份为0~0.58。VOG1指数对叶绿素含量、叶冠层和水分含量的综合非常敏感。VOG1的值范围为0~20,健康植被介于4~8,VOG1指数4月份为0.63~3.73,10月份为0.68~2.29。

PRI、SIPI和NDNI等光利用率指数估算植被在光合作用中入射光的利用效率,结果表示植被健康程度。PRI指数反映类胡萝卜素色素,特别是活性叶片吸收的叶黄素色素(黄色)的变化,PRI值范围是-1~1,

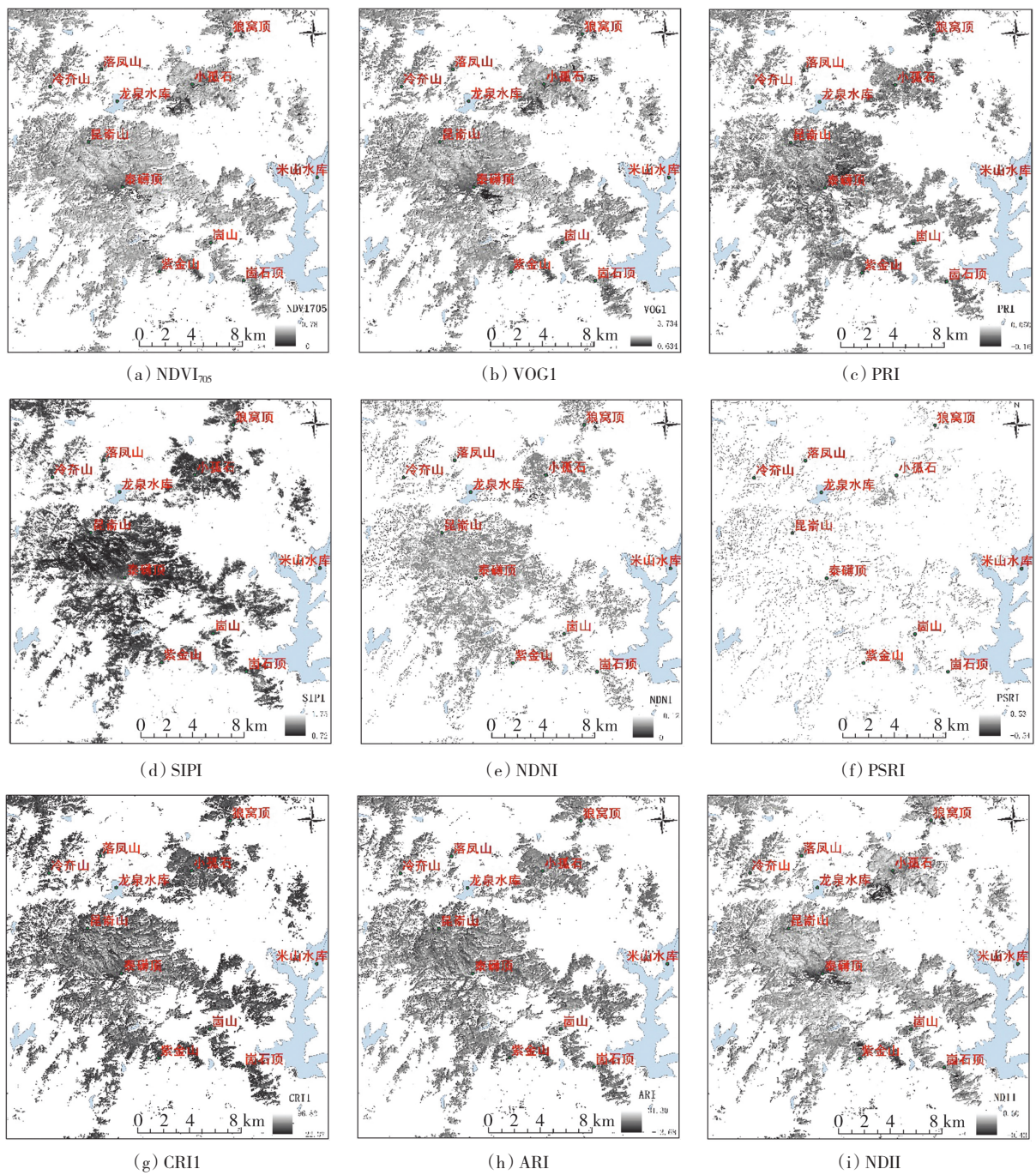


图 4 植被指数 NDVI₇₀₅、VOG1、PRI、SIPI、NDNI、PSRI、CRI1、ARI、NDII(2019 年 4 月)

Fig. 4 Vegetation index NDVI₇₀₅、VOG1、PRI、SIPI、NDNI、PSRI、CRI1、ARI、NDII (April 2019)

健康植被值通常介于 $-0.001 \sim 0.4$ ^[14],PRI 值 4 月份为 $-0.15 \sim 0.05$,10 月份为 $-0.18 \sim 0.05$ 。PRI 指数在这 2 个月份的值都较低,且变化较小。由于低类胡萝卜素含量不能保护叶绿素免受光损伤,导致吸收光能用于光合作用的能力下降。SIPI 指数适用于冠层结构高度不一致的区域,值的范围为 $0 \sim 2$,绿色植被介于 $0.8 \sim 1.8$ ^[15],SIPI 指数 4 月份为 $0.72 \sim 1.74$,10 月份为 $0.03 \sim 1.56$,这 2 期的 SIPI

指数值都较高。NDNI 指数对健康植被冠层的氮含量变化具有很强敏感性。NDNI 值范围为 $0 \sim 1$,绿色植被的常见范围为 $0.02 \sim 0.1$ ^[16],森林的 NDNI 指数 4 月份为 $0 \sim 0.12$,10 月份为 $0 \sim 0.15$,在 $0.1 \sim 0.15$ 范围内可以看到健康植被的孤立斑块。总体而言,昆嵛山区域森林显示出叶片中的氮含量低,树冠的整体叶生物量低,与生长旺盛植被相比,表明植物生长一般,叶绿素产生叶绿素一般。

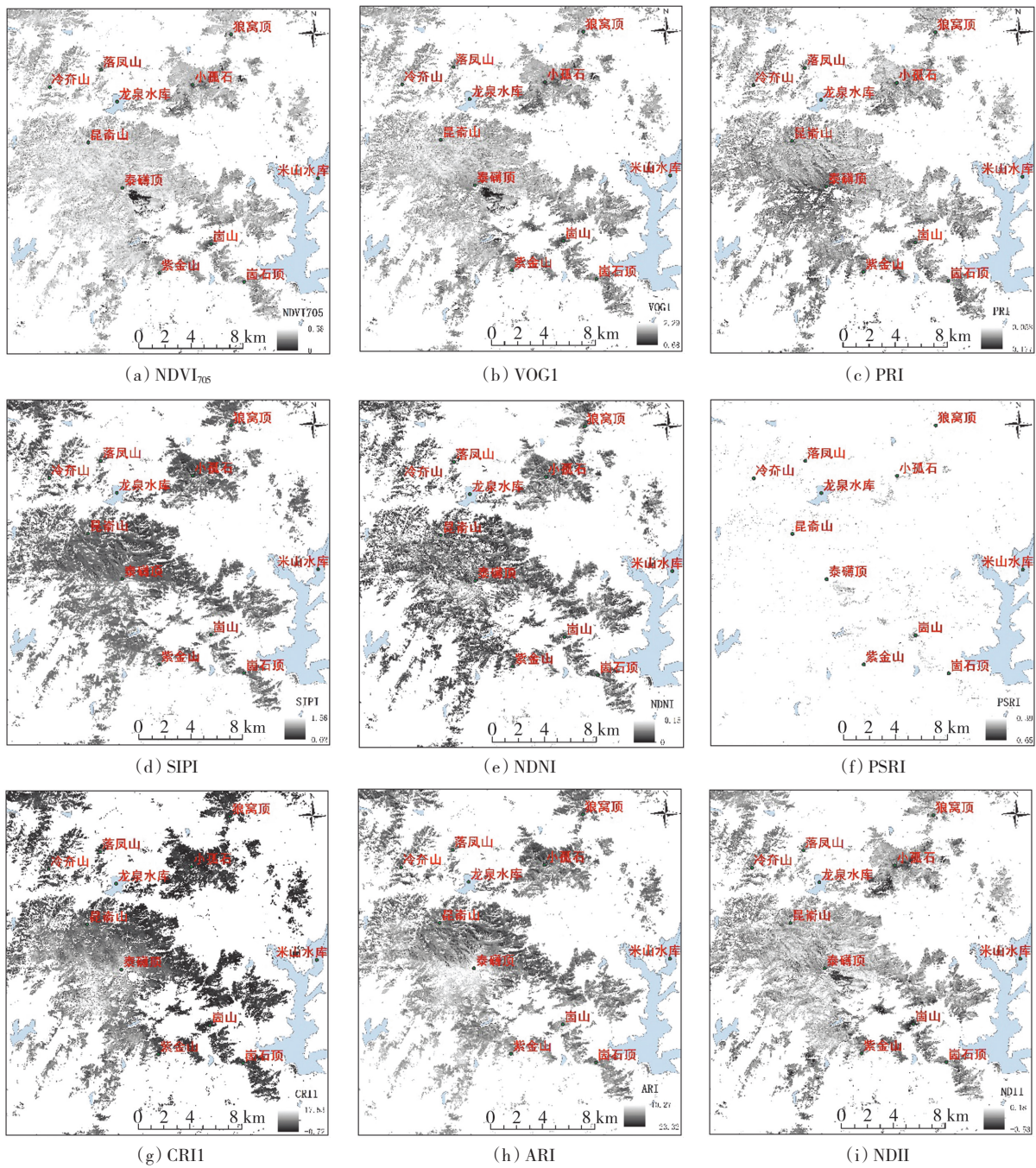


图5 植被指数 NDVI₇₀₅、VOG1、PRI、SIPI、NDNI、PSRI、CRI1、ARI、NDII (2019年10月)

Fig. 5 Vegetation index NDVI₇₀₅、VOG1、PRI、SIPI、NDNI、PSRI、CRI1、ARI、NDII (October 2019)

叶色素植被指数(如 CRI1 和 ARI1),表示植被中存在的与胁迫相关的色素(类胡萝卜素和花青素)的含量。较高的 CRI1 值意味着相对于叶绿素,类胡萝卜素含量较高,该指数的值范围为 0~15 以上,一般植被 CRI1 值为 1~12^[5]。CRI1 值 4 月份为-22~96.82,10 月份为-0.72~17.53。4 月昆嵛山保护区内的类胡萝卜素含量较高,周边区域类胡萝卜素含量降低。10 月含量相对 4 月高,表明 10

月昆嵛山区域森林健康状况下降。ARI1 是对植物叶片中花青素敏感的反射率参数,ARI1 的增加表明植物通过新的生长或死亡而发生变化,该指数的值范围为 0~0.2 以上。健康植被的常见范围为 0.001~0.5^[6],ARI1 指数 4 月份的值为-13.68~31.3,10 月份值为-23.32~10.27。昆嵛山北部指数的值范围明显高于正常值,因此表明植被处于亚健康状态。NDII 为植被冠顶含水量指数,衡量树叶树冠中的含

水量。该指数值范围为-1~1,NDII 指数健康植被的正常范围介于 0.02~1^[7]。NDII 值 4 月份为-0.43~0.6,10 月份为-0.53~0.18,10 月份森林植物含水量降低较多。含水量是森林的一个重要参数,含水量越高意味着植被越健康,生长速度越快,耐火性越强。

2.3 森林健康状况监测

利用 2019 年昆崙山 4 月 26 日和 10 月 3 日 NDVI₇₀₅、CAR1、NDII 3 个植被指数结合,定量评估昆崙山区域的区域森林生物物理和生物化学性质的时间和空间变化和森林健康状况。高光谱植被指数测量的植被特性可分为 3 大类,即结构、生物化学和植物生理/胁迫^[22]。对 GF-5 号 2 期数据 3 个主要类别中的 3 个植被指数(即总共 9 个植被指数)分析,了解昆崙山区域森林的健康状况。为了在结构和功能方面适当监测植被冠层的空间变异性,即绿色度指数(用于评估植被间隙)、叶色素指数(作为色素的衡量标准)和光利用效率(用于估计植物功能),提供了有关植被健康的重要信息。使用对森林树冠的状况更敏感的窄带绿度指数可以获得最佳效果,宽带绿度指数对于茂密的森林条件往往是不准确的,因为森林中有大量的绿色植被,这些植被可能会淹没和饱和和计算。

将昆崙山区域的森林健康度按由低至高划分为 0~9 共 10 个层级。从 4 月份和 10 月份的森林健康等级分布中可以看出,昆崙山地区森林健康度整体较好,4 月份的森林健康度从低到高占比依次

为:12.93%、3.92%、4.94%、6.21%、15.82%、10.35%、2.05%、12.76%、15.52%、15.50%,10 月份的森林健康度从低到高依次为:1.51%、1.37%、2.28%、3.43%、10.97%、8.84%、4.77%、18.79%、22.60%、25.44%,健康度在 5 以上的,4 月份占了 56.17%,10 月份占了 80.46%,10 月份的整体健康度要高于 9 月份,如图 6 所示。

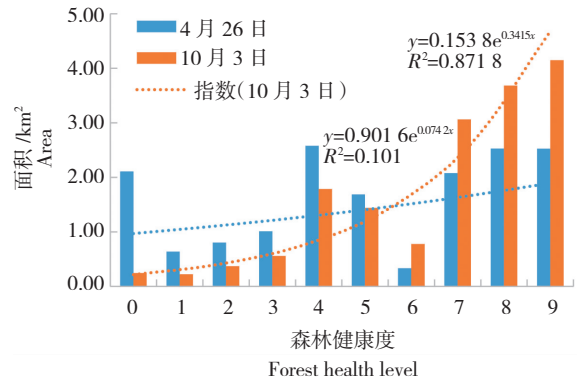


图 6 昆崙山地区森林健康度

Fig. 6 Forest health level in Kunyu Mountain area

由于 4 月和 10 月分别为森林生长和衰落期,可以较好地反映植被胁迫情况,如图 7 所示。通过 2 期健康度数据可以看出,健康度较高地区(健康度 8 级以上)主要分布在昆崙山自然保护区、小孤石、毛龙顶和大王顶等地区,其中屋脊顶、泰礴顶周边森林健康度较低。10 月份除屋脊顶周边小区域范围内,其余保护区内森林健康度都较高,且森林健康度整体好于 4 月份。

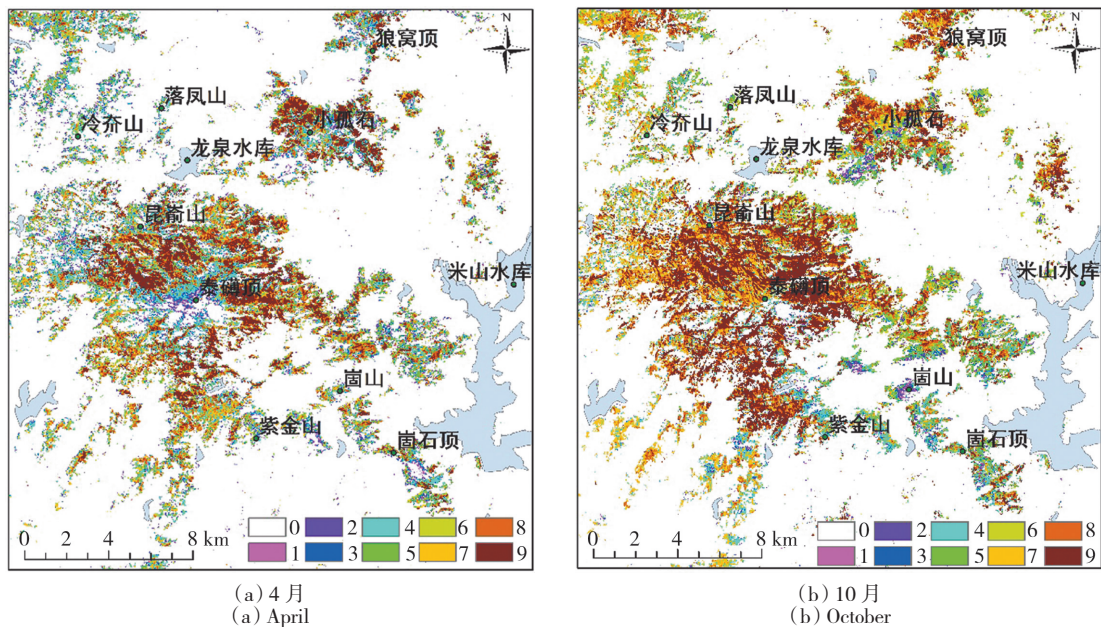


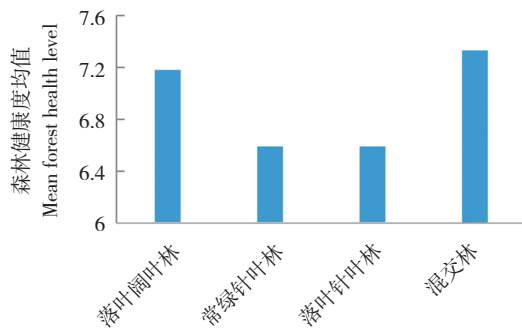
图 7 2019 年 4 月和 10 月植被健康度

Fig. 7 Vegetation health levels in April and October 2019

2.4 植被健康与相关因子胁迫关系分析

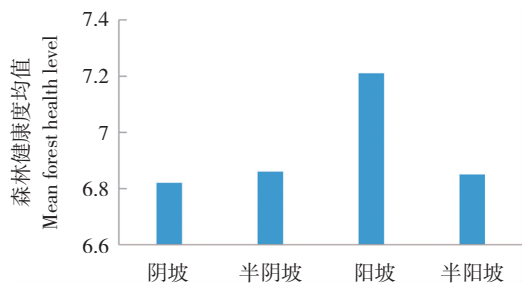
分析昆崙山森林健康和地形因子、植被类型和土壤等胁迫因子关系可以看出,10月份昆崙山区域整体健康度较高,均值在6.5以上。其中,混交林健康度均值最高,其次为落叶阔叶林,常绿针叶林和落叶针叶林健康度均值相当,如图8(a)所示。

在坡向与森林健康度关系中可以看出,阳坡森林健康度均值要远远高于其他坡向,半阴坡与半阳坡的森林健康度均值相当,森林健康度最低为阴坡。这是因为阳坡受到日照时间长,植被受到辐射较高,植被光合作用强,因此植被健康度高,如图8(b)所示。



(a) 不同森林类型与健康度均值关系

(a) Relationship between different forest types and mean forest health level



(b) 不同坡向与森林健康度均值关系

(b) Relationship between different aspect and mean forest health level

图8 不同森林类型和不同坡向与森林健康度均值关系

Fig. 8 Relationship between different forest types and different aspect surplus mean forest health levels

土壤质地是土壤物理性状之一,指土壤中不同大小直径的矿物颗粒的组合状况。土壤质地与土壤通气、保肥、保水状况及耕作的难易有密切关系;土壤质地状况是拟定土壤利用、管理和改良措施的重要依据。肥沃的土壤不仅要求耕层的质地良好,还要求有良好的质地剖面。虽然土壤质地主要决定于成土母质类型,有相对的稳定性。

中国土壤质地空间分布数据是根据1:100万土壤类型图和第二次土壤普查获取到的土壤剖面

数据编制而成,是根据砂粒、粉粒和黏粒含量进行土壤质地划分。数据分为砂土(Sand)、粉砂土(Silt)与黏土(clay)3大类,每一类数据均通过百分比来反映不同质地颗粒的含量。植被健康度与土壤类型呈现一定相关性,与粉砂土、砂土和黏土相关矩阵系数分别为-0.04、0.17、-0.02,见表3。协方差矩阵系数分别为-0.25、0.19、-0.21,见表4。

表3 相关矩阵

Tab. 3 Correlation matrix

	森林健康度 Forest health level	粉砂土 Sandy soil	砂土 Silt	黏土 Clay
森林健康度 Forest health level	1.21	-0.04	0.17	-0.12
粉砂土 Sandy soil	-0.04	0.31	-1.42	1.07
砂土 Silt	0.17	-1.42	6.34	-4.84
黏土 Clay	-0.12	1.07	-4.84	3.71

表4 协方差矩阵

Tab. 4 Covariance matrix

	森林健康度 Forest health level	粉砂土 Sandy soil	砂土 Silt	黏土 Clay
森林健康度 Forest health level	1.00	-0.25	0.19	-0.21
粉砂土 Sandy soil	-0.25	1.00	-1.01	0.95
砂土 Silt	0.19	-1.01	1.00	-0.99
黏土 Clay	-0.21	0.95	-0.99	1.00

3 结论

使用GF-5号高光谱数据对昆崙山区域植被应力进行遥感健康度估测,与其他同期传感器相比,GF-5号高光谱数据具有更好的空间、光谱和辐射分辨率,适用于当前研究区域的动态健康监测。高光谱遥感能够使非破坏性监测反映植被健康的重要指标叶片色素成为可能,如叶绿素、类胡萝卜素和花青素含量。监测到昆崙山区域森林的胁迫和健康状况,能够准确估计植物水平的绿色或衰老状态,这是通过现有的多光谱观测无法做到的。因此,用于高光谱遥感的GF-5数据可有效用于昆崙山区域的森林健康保护和监测。混交林健康度均值最高,其次为落叶阔叶林,常绿针叶林和落叶针叶林健康度均值相当。阳坡森林健康度均值最高,其次为半阴坡与半阳坡的森林健康度均值相当,阴坡森林健康度最低。植被健康度与土壤类型呈现一定相关性,与砂土呈现正相关,与粉砂土、黏土呈现负相关关系。

【参 考 文 献】

- [1] 吴月圆,舒立福,王明玉等. 近年世界森林火灾综述[J]. 温带林业研究,2022,5(4):49-54.
WU Y Y, SHU L F, WANG M Y, et al. A review of forest fires worldwide in recent years[J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2022, 5(4):49-54.
- [2] 刘国华,傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响[J]. 自然资源学报,2001,16(1):71-78.
LIU G H, FU B J. Effects of global climate change on forest ecosystems[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1):71-78.
- [3] 李哲,张飞,陈丽华,等. 光谱指数的植物叶片叶绿素含量估算模型[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(5):1533-1539.
LI Z, ZHANG F, CHEN L H, et al. Research on spectrum variance of vegetation leaves and estimation model for leaf chlorophyll content based on the spectral index[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(5):1533-1539.
- [4] 祁敏,张超. 森林理化参数高光谱遥感反演研究进展[J]. 世界林业研究,2016,29(1):52-57.
QI M, ZHANG C. Research progress on hyper-spectral remote sensing retrieval for forest physical and chemical parameters[J]. *World Forestry Research*, 2016, 29(1):52-57.
- [5] 马保东,徐奥,方丹梅,等. 不同胁迫条件下茄子叶片理化参数与光谱特征差异研究[J]. 地理与地理信息科学,2016,32(2):17-20.
MA B D, XU A, FANG D M, et al. Differences of bio-parameters and spectral characteristics of eggplant leaves under different stress type[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, 32(2):17-20.
- [6] TURNER W, SPECTOR S, GARDINER N, et al. Remote sensing for biodiversity science and conservation [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18(6):306-313.
- [7] KERR J, OSTROVSKY M. From space to species-ecological applications for remote sensing[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18(6):299-305.
- [8] CHAUBE N R, LELE N, MISRA A, et al. Mangrove species discrimination and health assessment using AVIRIS-NG hyperspectral data [J]. *Current Science*, 2019, 116(7):1136-1142.
- [9] SANJEREHEI M M. Assessment of spectral vegetation indices for estimating vegetation cover in arid and semiarid shrublands[J]. *Range Management & Agroforestry*, 2014, 192(1-2):91-100.
- [10] 胡玉福,蒋双龙,刘宇,等. 基于 RS 的安宁河上游植被覆盖时空变化研究[J]. 农业机械学报,2014,45(5):205-215.
HU Y F, JIANG S L, LIU Y, et al. Three-dimensional localization method of agriculture wireless sensor networks based on crossover particle swarm optimization [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2014, 45(5):205-215.
- [11] RRZALI S M, NURUDDIN A A, LION M. Mangrove vegetation Health Assessment Based on Remote Sensing Indices for Tanjung Piai, Malay Peninsular[J]. *Journal of Landscape Ecology*, 2019, 12(2):26-40.
- [12] SIMS D A, GAMON J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2-3):337-354.
- [13] VOGELMANN J E, ROCK B N, MOSS D M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14:1563-1575.
- [14] GAMON J A, SERRANO L, SURFUS J S. The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types and nutrient levels[J]. *Oecologia*, 1997, 112:492-501.
- [15] PENUELAS J, BARET F, FILELLA I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance[J]. *Photosynthetica*, 1995, 31:221-230.
- [16] SERRANO L, PENUELAS J, USTIN S L. Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS Data: Decomposing biochemical from structural signals[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81:355-364.
- [17] MERZLYAK J R, GITELSON A A, CHIVKUNOVA O B, et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening[J]. *Physiologia Plantarum*, 1999, 106:135-141.
- [18] GITELSON A A, ZUR Y, CHIVKUNOVA O B, et al. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2002, 75:272-281.
- [19] GITELSON A A, MERZLYAK M N, CHIVKUNOVA O B. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2001, 71:38-45.
- [20] 景维鹏,张明伟,林敬博. 一种神经网络架构搜索遥感图像分类方法[J]. 哈尔滨理工大学学报,2021,26(1):25-29.
JING W P, ZHANG M W, LIN J B. A network architecture search remote sensing image classification method [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2021, 26(1):25-29.
- [21] JACKSON T L, CHEN D, COSH M, et al. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92:475-482.
- [22] SANCHEZ-ARIAS L E, RODRIGUEZ J P, CABALLER M, et al. Diagnostic of health status in mangrove ecosystems[J]. *Advanced in Environmental Research*, 2011, 3:235-262.