

54 种植被指数研究进展综述

敖登¹, 杨佳慧¹, 丁维婷¹, 安韶山², 何海龙^{1,3*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西咸阳 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西咸阳 712100; 3. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西咸阳 712100)

摘要 植被是生态系统的重要组成部分, 具有调节水文、气候和生态平衡的功能。植被指数是反映地表植被状况的重要指标之一, 包含着植被 90% 以上的遥感信息, 可以增强植被信息并削弱非植被信息的干扰。系统总结了全球 54 种主流植被指数的发展历程、影响因素以及分类体系, 描述了其计算公式, 并对其应用特点进行了评估和分析。指出未来植被指数的研究应该建立更加完善的汇总体系, 关注植被指数的应用特点及应用方向, 为生态研究、生产实践等提供理论基础。

关键词 植被指数; 遥感; 生态环境; 土地利用类型

中图分类号 Q 948 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)01-0013-09

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2023.01.004



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Review of 54 Vegetation Indices

AO Deng, YANG Jia-hui, DING Wei-ting et al (College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Xianyang, Shaanxi 712100)

Abstract Vegetation, as an important part of the ecosystem, has the role of regulating hydrology, climate and ecological balance. Vegetation index is one of the important indicators to reflect the vegetation status and contains more than 90% remote sensing information, which can enhance the vegetation information and weaken the interference of non-vegetation information. This paper systematically summarizes the development history, influencing factors and classification system of 54 global mainstream vegetation indexes, describes their calculation formulas, and evaluates and analyzes their application characteristics. It is pointed out that the study of vegetation index in the future should establish a more perfect summary system, pay attention to the application characteristics and direction of vegetation index, and provide a theoretical basis for ecological research and production practice.

Key words Vegetation index; Remote sensing; Ecological environment; Land use type

地球表面辐射通量的光谱组成能够反映物候环境中的土壤、水分、植被等的物理性质且具有显著的规律性^[1], 而遥感技术、模型以及指数就是为了将这些光谱信息转换成易于理解的形式^[2]。因此, 可根据植被的反射光谱特征来评价植被生长情况、生态效益等。关于植被研究的波段在气象卫星和地球观测卫星上都普遍存在, 这些波段的不同组合方式则定义为植被指数^[3-5]。植被指数作为无量纲, 是一种利用叶冠的光学参数提取的独特光谱信号, 旨在建立一种基于经验或半经验的、对地表大部分生物群体都适用的植被观测测量^[6-7]。

目前, 已有许多科学家开发出了与具体研究方向相关的指数, 其中一些指数已经能很好地反映包括林地、草地、耕地等不同土地利用类型的生物量、生产力等^[8-10]。这些植被指数广泛应用在旱地检测、森林火灾、植被覆盖、作物变化、生产力分析等多个领域^[11-12], 具有代表性的指数有归一化差异植被指数(NDVI)^[13]、叶面积指数(LAI)^[13-14]、增强型植被指数(EVI)^[15]等。卫星遥感作为研究植被指数的重要方法, 包含 90% 以上的植被信息, 因其不受自然因素和社会因素的影响, 能够迅速获得准确的大尺度观测资料, 为气候、作物变化研究和植被信息监测等提供了依据^[16-17]。NASA 的“监测自然植被的春季进退(绿色效应)”是植被指数相关领域的领军研究——利用遥感数据初步评价地表植被生物量和植被

状况在较短时间内的变化, 分析两个地点的单波段图像和数字数据可以很容易划定林地、草地和农田, 同时也促进了 Landsat-Mss 的发展^[3]。

植被指数由于自身对光谱综合利用的特性, 在多方面都有所应用。虽然在有据可循和控制环境变量的情况下可以确定各影响因素对植被指数的影响效果, 但是在遥感图像上观察到的信号通常很难进行已知参数的分解^[18]。相对于单波段, 在定量测量植被活力、生物量探测等方面, 植被指数有更好的灵敏性^[19]。植被指数不仅能提高遥感的解译能力, 而且大部分指标可以在专题测绘领域改善指数的分类^[20]。20 世纪 70 年代至今, 科学家利用各种先进方法, 不断完善不同情况下植被指数的表达。研究表明, 不同植被指数可以应对多变且复杂的自然状况, 使得植被指数更能准确地描述不同的植被情况^[19]。不同的植被覆盖情况可以依据它们相对于整体地面元素的独特光谱进行区分。例如: 叶绿素吸收红光, 叶片细胞结构反射近红外光波段, 红光和近红外光之间的偏差构成了对绿色植被敏感的变量; 红光对叶绿素浓度敏感, 而近红外光对叶面积指数和绿色植被密度敏感等。

自 20 世纪 70 年代起, 植被指数被开发应用, 到 80~90 年代得到了极大的发展, 进入 21 世纪后, 植被指数随着遥感卫星的发展不断改进。植被指数自被提出以来就在不断发展完善, 前期的指数适用的范围比较单一, 受限因素有很多, 而后期的指数主要是对指数进行标准化和调整, 也能适应更多的影响因素。田庆久等^[21]对早期的植被指数进行了总

作者简介 敖登(1998—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 硕士, 研究方向: 土壤学。* 通信作者, 副教授, 博士, 从事土壤物理学研究。

收稿日期 2022-02-28

结,之后尚无相关研究系统综述植被指数的研究进展。因此,该研究回顾植被指数发展历程,对近 50 年发展的植被指数进行汇总;并对几种常见植被指数的优缺点和应用方向做概述,以期对植被指数的应用提供更好更全面的理论依据,助力未来植被指数的发展。

1 植被指数的发展史

研究发现,在可见光波段(400~760 nm)的蓝色波段(450 nm)和红色波段(670 nm)这 2 个吸收带的中间,植被的反射光谱在绿色波段(550 nm)处有一个小反射峰(图 1)^[22-23]。由于叶片特殊组织结构中的空腔增大了反射表面,而且叶绿体的水溶胶状态,散射了大量的辐射能量,形成了高反射率,在近红外波段(700~800 nm)有一个反射的陡坡,至 1 100 nm 附近有一个峰值。受绿色植物含水率的影响,在中红外波段(1 300~2 500 nm),吸收率增大,反射率下降,特别是以 1 450、1 950 和 2 700 nm 为中心的波段是水的吸收带。近红外波段的反射陡坡、至 1 100 nm 附近的小峰值,是植被的独有特征^[24-25]。红色波段和近红外波段之间的反差是植被生物量的一种表征^[6]。植被覆盖度低的区域反差最小,中等植被覆盖区反差是红色和近红外波段的变化结果,而高植被覆盖区只有近红外波段对反差有贡献,红色波段已趋于饱和,不再变化。相对而言,在自然状态下土壤亮度区别不明显,土表的反射率没有明显峰值和谷值^[26]。因此,可以根据植物在不同波长下的反射率特点进行辨别分类。此外,近红外与红光光谱观测通道的不同组合得到的植被指数可以在一定程度上反映自然植被的演化信息^[27]。

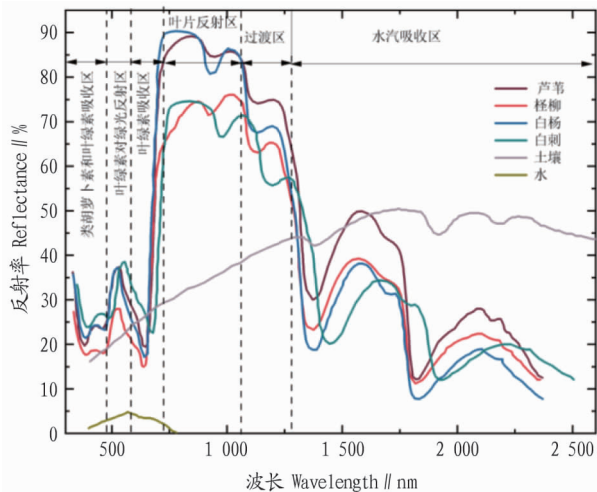


图 1 地物光谱反射特征曲线示例

Fig. 1 Spectral reflectance characteristic curves of ground objects

植被指数发展史上的先驱者 Pearson 和 Miller^[28]以比率的形式提出了比值植被指数(ratio vegetation index, RVI)和植被指数数字(vegetation index number, VIN),主要是用于估算和监测植被覆盖。比值植被指数作为被提出来的第一个指数,是使用原始卫星数字开发的,没有经过大气校正和传感器校正。但是该指数增强了地表与植被的对比,而且受照明

条件影响小,对地面光学特性敏感^[29]。但也存在一定的局限性,比值植被指数对大气的透明度要求很高,当植被覆盖率低于 50%时,其辨别力也会下降^[30],因此该植被指数适合应用在植被覆盖度较高的情况下,但是对于浓密植物的红光波段反射率很小,会导致 RVI 无限增大。

比值植被指数公式如下:

$$RVI = R/NIR \quad (1)$$

式中, R 为红光波段的平均反射率; NIR 为近红外波段的平均反射率。

叶面积指数(leaf area index, LAI)定义为单位土地面积上的总植物叶面积。自 1947 年提出以来,就已作为重要植物学参数和评价指标,在农林果业以及生物、生态学等领域应用广泛^[3]。LAI 利用植被冠层的光谱特征来遥感定量统计。叶面积指数与各种冠层活动过程密切相关,例如,叶片的蒸散过程、叶片枯落过程等,因此该指数被广泛用于描述植物冠层的光合和叶面蒸腾。

归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)作为反映农作物长势和营养信息的重要参数,是应用率最高的指数^[13-14]。利用该指数,能够得到农作物在不同季节的需氮量,可以指导合理施用氮肥^[31]。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (2)$$

NDVI 与 LAI 相比, LAI 与叶面积的相关性更好,而且对土壤亮度和大气衰减的敏感性也更低。同时 NDVI 也是评估如 LAI、植被覆盖度、生物量等各种生物物理参数的中介^[32]。NDVI 能够部分消除与太阳高度角、卫星观测角、地形、云影等与大气条件有关的辐射变化的影响^[33]; NDVI 的值, -1 表示可见光高反射; 0 表示有裸土等, NIR 和 R 近似相等; 正值, 表示有植被覆盖, 且随覆盖度增大而增大^[34-35]。相对其他的植被指数, NDVI 是一种应用价值很高的指数, 因为它足够稳定, 能够减少各种因素的影响, 可以对植被生长活动中的季节变化和年际变化进行有意义的比较。NDVI 对叶绿素很敏感, 又被称为“连续性指数”^[36], 所以它对绿色植被的存在很敏感, 对于干旱地区的农作和降雨有很好的预测性。NDVI 应用领域广泛, 包括土地覆盖分类、干旱监测、土地退化等。该指数也是各种局部、区域和全球尺度模型的一个重要参数, 它的时间序列也已被成功地用于许多关于全球植被活动的年际变化研究中^[37]。

目前, NDVI 依然是比较流行的植被指数^[38], 但其也存在一些不可忽视的缺点, NDVI 的局限性表现在, 用非线性拉伸的方式增强了 NIR 和 R 的反射率的对比度^[39]。利用相同数据分别求 RVI 和 NDVI, RVI 值增加的速度高于 NDVI 增加速度, 即 NDVI 对高植被区具有较低的灵敏度; NDVI 会过度估计生长季节开始时的植被覆盖度和季节结束时的覆盖度^[40]。

1974 年, Rouse 和其他学者为了避免 NDVI 的负值, 转换了 NDVI, 重新定义了一种植被指数——转换植被指数(transform vegetation index, TVI):

$$TVI = \sqrt{NDVI + 0.5} \quad (3)$$

之后,在有学者的试验数据中,仍然出现了负值,为了解决这一问题,Perry 和 Lautenschlager 在 1984 年又提出了新版本的转换植被指数^[41]:

$$TVI=[(NDVI+0.5)/(1NDVI+0.5)]\sqrt{NDVI+0.5}\quad(4)$$

1992 年,Daughtry 和一些学者根据 NDVI 提出了绿色归一化植被指数 (green normalize difference vegetation index, GNDVI)^[42]:

$$GNDVI=(NIR-G)/(NIR+G)\quad(5)$$

式中, G 为绿光波段的平均反射率。

绿色归一化植被指数与氮元素的相关性最好,该指数也可作为遥感监测的特征指标,是表征处于拔节期和抽穗阶段植物的最佳指数^[43]。同年,Pinty 等^[44]提出了在高密度覆盖情况下仍保留相当于 NDVI 指数的较大动态范围的全球环境监测指数 (global environment monitoring index, GEMI):

$$GEMI=\mu(1-0.25\mu)-(R-0.125)/(1-R)$$
$$\mu=[2(NIR^2-R^2)+1.5NIR+0.5R]/(NIR+R+0.5)\quad(6)$$

该指数可以相对最小化大气的影响,并且适合于干旱地区植被监测^[45-46]。

Roujean 和 Breon 利用归一化差异植被指数和差值植被指数 (difference vegetation index, DVI) 开发了修正比值植被指数 (renormalized difference vegetation index, RDVI):

$$DVI=NIR-R\quad(7)$$

$$RDVI=\sqrt{NDVI+DVI}\quad(8)$$

在整个植被指数的发展过程中,许多指数都是对上一代指数的发展和完善,有些是对受限制因素控制的指数的替代,而有的指数是对原有在某方面研究较为片面的指数的补充^[47-48]。例如,随后提出的归一化差异水指数 (normalized difference water index, NDWI)^[49],除了可以反映图像中的水信息、植被含水量等,与 NDVI 相比,它还可以有效地提取植被冠层的水分。NDWI 指数可以及时响应植被冠层的水分胁迫,它对植被冠层中液态水含量的变化敏感,这对于干旱监测具有重要意义^[50]。除此之外,它还可以描述开放水域

的特征,并使用了反射的近红外光和可见光来增强其在遥感数字图像中的存在,还能估算水的浊度。

进入 21 世纪后,相继出现了很多 NDVI 的优化版本。例如,Gitelson 等^[51]提出的大动态范围植被指数 (wide dynamic range vegetation index, WDRVI),该指数主要是克服了中高密度绿色植被覆盖时 NDVI 灵敏度下降的问题。2007 年,汪卓琦等^[52]提出高光谱植被指数 (hyperspectral vegetation index, VIUPD),该指数可以提取植被生物物理参数的定量信息,并且监测植被的生长情况。该指数在反映植被某些生物物理特征的细微变化方面有独特的作用,而且 VIUPD 的性能优于 NDVI,处理高光谱遥感数据简单实用,是一种与传感器无关的植被指数算法。VDVI (visible-band difference vegetation index, VIDI) 也是基于 NDVI 的构造原理提出的一种植被指数,该指数具有基于绿光带的强反射特性以及红蓝光吸收特性,其提取精度最高,忽略了土壤背景变化对光谱的影响:

$$VDVI=[2G-(R+B)]/[2G+(R+B)]\quad(9)$$

式中, B 为蓝光波段的平均反射率。

2016 年,根据 NDVI 演化出了归一差异指数的重整指数 (renormalized difference vegetation index, RNDVI),该指数可以判断植物的生长期^[53],目前有许多关于水稻的研究会应用到 RNDVI,当 RNDVI<0 时表明作物处于生长期,而当 RNDVI>0 时表明作物处于衰老期。

此外,还有一系列其他植被指数,表 1 列举了现有文献中 54 种主流植被指数的名称、公式、文献来源和应用特点。由典型植被指数 NDVI 的发展历程,可以把植被指数的发展史大体分成 2 个阶段:首先,第一发展阶段就只是基于线性组合 (差、和或比值),而不考虑其他外部因素,即不考虑土壤植被的相互作用;其次,第二阶段以解释电磁辐射、大气、植被和土壤背景之间相互作用的物理现象的知识为基础,第二阶段是获取知识和理论方法的起点,可以利用遥感技术或相关学科来解决植被指数的问题。

表 1 植被指数汇总
Table 1 Summary of vegetation index

序号 No.	植被指数 Vegetation index	简称 Abbreviation	公式 Formula	特点 Characteristic	名称 Name	来源 Source
1	Atmospheric Resistance Vegetation Index	ARVI	$(NIR-RB)/(NIR+RB)$	使用蓝色波长来纠正大气散射的影响,ARVI 通常用于大气溶胶浓度较高的地区	大气阻抗植被指数	[54]
2	Adjusted Soil Brightness Index	ASBI	2.0YVI	允许逐个像素处理整个图像以产生大气效果	调整土壤亮度植被指数	[55]
3	Agricultural Vegetation Index	AVI	2.0MSS7-MSS5	特定期时植被指数的比较,正向植被生长好于同期	农业植被指数	[56]
4	Vegetation Color Index	CIVE	$0.441R-0.881G+0.385B+18.78745$	避免负值	植被颜色指数	[57]
5	Difference Vegetation Index	DVI	2.4MSS7-MSS5	更好地识别植被和水	差值植被指数	[48]
6	Enhanced Vegetation Index	EVI	2.5(NIR-R)	①添加蓝光波段,纠正土壤背景、气溶胶散射的影响;②取值范围为-1~1,一般绿色植被面积范围为0.2~0.8;③EVI 减少了基于黑色目标的大气校正 (DTAC) 方法的残留气溶胶效应;④经过优化后的植被指数,EVI 将植被冠层背景信号解耦,对高生物量区域的敏感性有所提高,植被监测能力效果显著提升	增强型植被指数	[15]

接下表

续表 1

序号 No.	植被指数 Vegetation index	简称 Abbreviation	公式 Formula	特点 Characteristic	名称 Name	来源 Source
7	Excess Green Index	EXG	$2G-R-B$	用于检测小范围的植物	过绿指数	[58]
8	Excess Green Minus Red Index	EXGR	$2G-2.4R$	用于检测小范围的植被	过绿减过红植被指数	[59]
9	Excess Red Index	EXR	$1.4R-B$	土壤背景为淡红色,用于小范围提取土壤背景	过红指数	[60]
10	Global Environment Monitoring Index	GEMI	$\mu(1-0.25\mu)-(R-0.125)/(1-R)$ $\mu=[2(NIR^2-R^2)+1.5NIR+0.5R]/(NIR+R+0.5)$	在全球范围内,植被监测的覆盖范围大于 NDVI,适用于干旱地区的植被监测	全球环境监测指数	[44]
11	Normalized Green Difference Vegetation Index	GNDVI	$(NIR-G)/(NIR+G)$	NDVI 改良后,与氮的相关性最好。该指标在拔节和抽雄阶段是最好的,可作为遥感监测的特征指标	绿色归一化植被指数	[42]
12	Bare Soil Vegetation Index	GRABS	$GVI-0.09178SBI+5.58959$	使用短波红外波段参与计算	裸土植被指数	[61]
13	Green Vegetation Index	GVI	$-0.283MSS4-0.66MSS5+0.577MSS6+0.388MSS7$	外界条件对 GVI 影响很大,它是每个波段的大气、太阳、环境辐射值的综合的加权结果	绿度植被指数	[62]
14	Green Soil Vegetation Index	GVSBI	GVI/SBI	对绿色敏感	绿度土壤植被指数	[63]
15	Leaf Area Index	LAI	$S/A, A$ 为土地总面积, S 为植物叶片总面积	反映植物群落的生长指标,多用于指导生产,与产量相关	叶面积指数	[14]
16	Modified Chlorophyll Absorption Reflectance Index	MCARI	$[(RE-R)-0.2(RE-G)]/(RE/R)$	该指标对叶绿素含量的变化具有较好的敏感性,但对其他成分的变化不敏感;该指标不能线性表达植被的冠层结构参数	改进叶绿素吸收指数	[64]
17	Misra Green Vegetation Index	MGVI	$-0.386MSS4-0.53MSS5+0.535MSS6+0.532MSS7$	基于独立频带的线性变换或比率,通过正交变换。对应于 GVI 的光谱作用指数是在对多光谱扫描数据进行特定正交变换后获得的 4 个新成分的第 2 个成分。不受土壤背景的影响	Misra 绿度植被指数	[65]
18	Misra Nonesuch Vegetation Index	MNSI	$0.404MSS4-0.039MSS5-0.505MSS6+0.762MSS7$	与 Kauth 和 Thomas 所确定的因素之间相似	Misra 典范植被指数	[65]
19	Modified Soil Adjustment Vegetation Index	MSAVI	$[2NIR+1-\sqrt{(2NIR+1)^2-8(NIR-R)}]/2$	更好地消除土壤影响的植被指数	修改型土壤调整植被指数	[66]
20	Misra Soil Brightness Index	MSBI	$0.406MSS4+0.60MSS5+0.645MSS6+0.243MSS7$	与 Kauth 和 Thomas 所确定的因素之间相似	Misra 土壤背景亮度指数	[65]
21	Modified secondratio index	MSRI	$(NIR/R-1)/\sqrt{NIR/R+1}$	MSRI 校正 SR 指数并补偿 NIR 和 R 波段之间的差异,可用于评估植被生长和种群变化,该指数和 NDVI 指数在不同植物反射光谱中的应用	第二修正比值植被指数	[67]
22	Moisture Vegetation Index	MVI	$\sqrt{(NIR-R)/(NIR+R)+0.5}$	它不仅可以反映叶片的属性,还可以反映植被的冠层结构	湿度植被指数	[68]
23	Misra Yellowness Vegetation Index	MYVI	$0.723MSS4-0.597MSS5+0.206MSS6-0.278MSS7$	与 Kauth 和 Thomas 所确定的因素之间相似	Misra 黄度植被指数	[65]
24	Normalized difference green degree index	NDGI	$(G-R)/(G+R)$	主要研究其与光能转化之间的关系	归一化差异绿度指数	[69]
25	Normalized Difference Index	NDI	$(NIR-MIR)/(NIR+MIR)$	尝试增加土壤和农作物残茬之间的光谱差异	归一化差异指数	[70]
26	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$(NIR-R)/(NIR+R)$	它利用植被的特殊光谱特征,被广泛应用。可用于监测植被生长状况;但当植被覆盖度较高时,NDVI 敏感性降低。该指数也可用于地表分类;可以区分不同的树种等	归一化差异植被指数	[71]
27	Normalized Difference Water Index	NDWI	$[\rho(0.86\mu m)-\rho(1.24\mu m)]/[\rho(0.86\mu m)+\rho(1.24\mu m)]$	它是对 NDVI 的补充,而不是对 NDVI 的替代;可以及时响应植被冠层的水分胁迫,用于干旱监测;它描述了开放水域的特征,并使用了反射的近红外辐射和可见光来增强其在遥感数字图像中的存在,并消除了土壤和土地植被的存在;还可以估算水的浊度	归一化差异水指数	[49]
28	Normalized Green - Blue Difference Index	NGBDI	$(G-B)/(G+B)$	植被与非植被之间的区别是明显的	归一化绿蓝差异指数	[72]
29	Normalized Green - Red Difference Index	NGRDI	$(G-R)/(G+R)$	植被和部分非植被灰色几乎被混淆,植被覆盖提取的效果不如 NGBDI	归一化红绿差异指数	[59]
30	Chorophyll Normalized Vegetation Index	NPCI	$(R-B)/(R+B)$	NPCI 是反演叶绿素含量的植被指数,该指数可用于作物生长监测	归一化色素比值指数	[73]
31	Optimization Of Soil Regulatory Vegetation Index	OSAVI	$1.16(NIR-R)/(NIR+R+0.16)$	它可以适应高土壤本底值带来的巨大变异性	土壤调整植被指数的优化	[74]
32	Physiological Reflectance Index	PRI	$(R_{ref}-R_{531})/(R_{ref}+R_{531})$	PRI 是一种敏感的、间接的、非破坏性的水分胁迫指数,可以应用于遭受严重干旱的植物	生理反射植被指数	[75]

接下表

续表 1

序号 No.	植被指数 Vegetation index	简称 Abbreviation	公式 Formula	特点 Characteristic	名称 Name	来源 Source
33	Plant Senescence Reflectance Index	PSRI	2.0YVI	PSRI 用于最大化类胡萝卜素与叶绿素比例的敏感性。指数增加表明冠层压力增加,植被开始衰老,植物果实成熟。该指数可用于监测植被健康,植被生理压力和作物产量分析。植被区域的范围是-0.1~0.2	植物衰老反射指数	[76]
34	Perpendicular Vegetation Index	PVI	$(\text{NIR}-\alpha R-b)/\sqrt{a^2+1}$	植被像素与“土壤线”之间的垂直距离定义为 PVI,它可以代表土壤背景中植被生物量的差异	垂直植被指数	[77]
35	Renormalized Difference Vegetation Index	RDVI	$\sqrt{\text{NDVI}+\text{DVI}}$	根据候选水稻品种处于生长期 (RDVI <0) 或衰老 (RDVI > 0),使用 RDVI 区分 SCR 和 DCR RDVI 可以判断植物的生长期	修正比值植被指数	[47]
36	Redness Index	RI	$(R-G)/(R+G)$	土壤颜色对植被指数影响的校正因子	红色植被指数	[78]
37	Renormalized Difference Vegetation Index	RNDVI	Based on NDVI	基于 2 个时期,提出了单一和早(或晚)稻的 NDVI 值呈现负变化的时态差异植被指数(RNDVI)的重新归一化指标,然后将其应用于判别稻作系统。2 个时期之间水稻生长的差异导致 NDVI 值的变化	归一化差异指数的重整指数	[53]
38	Ratio Vegetation Index	RVI	R/NIR	提高准确性	比值植被系数	[28]
39	Source Address Validation Improvement	SAVI	$(\text{NIR}-R)/(\text{NIR}+R+L)$	高 FVC 为 0,低 FVC 为 1。当 L 为 0.5 时,SAVI 在消除土壤反射率方面具有更好的效果。由于对植被密度知之甚少,因此难以优化该指数	土壤调整植被指数	[79]
40	Soil Brightness Index	SBI	$-0.283\text{MSS}4-0.66\text{MSS}5+0.577\text{MSS}6+0.388\text{MSS}7$	使用 Landsat-MSS 传感器的 4 个通道	土壤亮度指数	[62]
41	Soil Background Line index	SBL	$\text{MSS}7-2.4\text{MSS}5$	—	土壤背景线指数	[48]
42	Structure-Independent Pigment Index	SIPI	$(\text{NIR}-B)/(\text{NIR}+B)$	当冠层结构(例如叶面积指数)降低时,它可以使类胡萝卜素(例如 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素,对叶绿素比率最敏感)指数增加,冠层应力增加。可监测植被健康,检测植物生理胁迫以及分析作物产量	结构不敏感指数	[80]
43	Simple Ratio Pigment Index	SRPI	B/R	在颜色含量的估计中,颜色比率指数是最广泛使用的形式,因为它不仅结构简单,而且与颜色含量有线性关系	简单比值色素指数	[81]
44	Spectral Vegetation Index	SVI		—	光谱植被指数	[82]
45	Transform Chlorophyll Absorption Index	TCARI	$3[(\text{RE}-R)-0.2(\text{RE}-G)/(\text{RE}/R)]$	该指数改善了 CARI 指数易受土壤本底反射率影响的缺点。与其他指标相比,具有较强的敏感性和通用性,可适用于各种植被类型。叶绿素含量较高时,MTCARI 效果更好	转换叶绿素吸收指数	[83]
46	Temperature Vegetation Dryness Index	TVDI	$(T_s-T_{s_{\min}})/(T_{s_{\max}}-T_{s_{\min}})$	它可以补充 NDVI 和 LST,提高精度。可用于监测干旱,研究干旱程度的空间变异性。该指标在实践中很少使用,主流遥感软件没有相关工具,需要编程	温度植被干旱指数	[84]
47	Triangle Vegetation Index	TVI	$60(\text{NIR}-G)-100(R-G)$	发展为红边三角植被指数(RTVI)和修正三角植被指数 II(MTVIII)等。该指数可以表明植被吸收的辐射能量与红色、绿色和近红外波段反射率的关系,可用于监测作物生物量	转换植被指数	[85]
48	Transformed Vegetation Index	TVI	$\sqrt{\text{NDVI}+0.5}$	将 NDVI 转换为“变形植被指数”(TVI),以避免出现负值	转换叶绿素吸收指数	[71]
49	Visible Atmospherically Resistant Index	VARI	$(G-R)/(G+R-B)$	作为一种多带植被指数,结构复杂、参数过多、高特异性限制了其在生产和实践中的应用。对土壤的识别能力有所提高,抗大气干扰能力也有所提高	抗大气指数	[51]
50	Visible-band Difference Vegetation Index	VDVI	$[2G-(R+B)]/[2G+(R+B)]$	VDVI 是基于绿光波段的强反射特性,红光、蓝光的吸收特性以及 NDVI 的构造原理和形成。VDVI 的值为[-1,1]。与其他可见光带的植被指数相比,VDVI 的提取精度最高。该指数忽略了土壤背景的变化对光谱的影响	可见光波段差异植被指数	[86]
51	The vegetative index	VEG	$G/[R^\alpha B^{(1-\alpha)}], \alpha=0.667$	该指标是基于 RGB 通道信息的植被指标,用于估计草地植被覆盖范围。VEG 估计误差随着覆盖范围的增加而增加。VEG 阈值设置不需要考虑光变化的影响,并且比其他方法具有更好的通用性	植被指数	[87]
52	The hyperspectral vegetation index	VIUPD	$(C_V-0.1 * C_S-C_4)/(C_W+C_V+C_S)$	该指标可提取植被生物物理参数的定量信息,监测植被生长。该指数在反映植被生物物理特征轻微变化方面的独特作用。与传感器无关,处理高光谱数据简单实用	高光谱植被指数	[52]
53	Vegetation Temperature Condition Index	VTCI	$(\text{LST}_{\text{NDVI}_{\max}}-\text{LST}_{\text{NDVI}})/(\text{LST}_{\text{NDVI}_{\max}}-\text{LST}_{\text{NDVI}_{\min}})$	土壤水分被反映在 α 和 b 之间的负相关性上。该值的范围从 0 到 1。值越小,土壤越干旱。该指数通常用于检测特定地区的干旱程度	植被温度条件指数	[88]
54	Wide Dynamic Range Vegetation Index	WDRVI	$(\text{NIR}-R)/(\text{NIR}+R)$	克服中高密度绿色生物量下 NDVI 敏感度的降低	大动态范围植被指数	[89]

2 植被指数的影响因素

植被指数应用广泛,不仅计算便捷而且时间序列长,但是植被指数又受很多因素的限制,在“大气—土壤—植被”的系统中,主要是受到大气对反射波的吸收反射、土壤背景的干扰、冠层结构的影响,此外还会受到卫星观测角度、太阳高度角、传感器类型等的限制。波长范围、土壤特性、大气质量、湿度温度等则是影响植被指数的物理因素。以往研究表明,影响植被指数的因子大致可以归属于 2 个相互独立又相互补充的领域:生物领域和物理领域^[21]。在考虑植被覆盖随时间演替的光学特性时,植被的含水率、矿物质含量、叶片分布、生物入侵等都是影响植被指数的生物因素。因此,在完善植被指数的发展之路上,必须要研究植被指数的影响因素^[90]。

2.1 土壤背景 随着科学技术的进步,遥感在不断发展,基于遥感影像的植被指数也得到了发展,但是遥感上的植被指数有很多影响因素,其中土壤背景的影响尤为重要。因为在不同光谱的遥感影像上,自然状态下植被和土壤亮度区别不明显,土壤的反射率没有明显峰值和谷值^[27],所以由于土壤背景带来的干扰很难用校正的办法来消除。为了控制土壤背景的影响,目前主要发展了两类削弱土壤背景的植被指数。

2.1.1 基于土壤线计算的植被指数。土壤在可见光红波段(R)与近红外波段(NIR)的反射率具有线性关系。在 NIR-R 通道的二维坐标中表现为一个由近于原点发射的直线,称为“土壤线(soil background line,BIL)”^[91]。土壤线是在二维光谱空间中土壤纯像元光谱反射率按照大小排列而成的直线,它综合反映了具有不同水分条件的土壤含水状况,对于了解土壤和植被的理化性质和生态特征有着重要意义^[92],其方程式为^[93]:

$$\text{NIR} = \alpha R + b \quad (10)$$

式中, α 、 b 分别为土壤线的斜率和截距。

基于土壤线提出了垂直植被指数(perpendicular vegetation index,PVI),地物的反射率组成的点到土壤线的距离定义为 PVI。如图 2 所示,土壤线左上方的点的 PVI 值取正,右下方的点的 PVI 值取负^[13]:

$$\text{PVI} = (\text{NIR} - \alpha R - b) / \sqrt{\alpha^2 + 1} \quad (11)$$

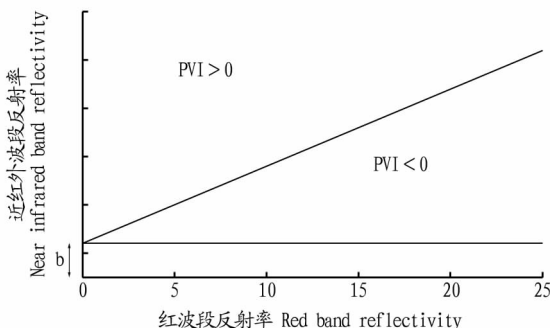


图 2 垂直植被指数 PVI

Fig. 2 Perpendicular vegetation index

PVI 指数运算简单,也因此得到了广泛应用,主要运用在计算叶面积指数、植被识别和分类等方向。PVI 在低覆盖植被的信息提取时具有优势,例如,应用于水稻的估产、对荒漠半荒漠草地地区进行植被识别与区分。

1989 年,Baret 提出基于土壤线的斜率和截距计算的转换型土壤调节植被指数(transformed soil-adjusted vegetation index,TSAVI),该指数同样可以削弱土壤背景对植被信息提取的影响^[13]。当土壤线的斜率为 1,截距为 0 时,TSAVI 与 NDVI 数值一样:

$$\text{TSAVI} = \alpha(\text{NIR} - \alpha R - b) / (\alpha \text{NIR} + R - \alpha b) \quad (12)$$

TSAVI 的应用主要是其与 LAI 之间的相关性研究。薛利红等^[94]的研究证明了它们之间呈显著相关;有研究验证了 TSAVI 对 LAI 的预测能力^[95]。

1994 年,有研究在 SAVI 的基础上提出了修改型土壤调整植被指数(modified soil-adjusted vegetation index,MSAVI),主要是将常量 L 改为变量^[50]:

$$\begin{aligned} \text{变量 } L &= 1 - 2\alpha \text{NDVI} \cdot \text{WDVI} \\ \text{WDVI} &= \text{NIR} - \alpha R \end{aligned} \quad (13)$$

国内目前对 MSAVI 的应用研究尚处于待开发阶段,该指数可以大大减少土壤背景的影响^[51]。

2.1.2 经验植被指数。为最大程度地减少土壤对冠层光谱的影响,通过将土壤调整因子 L 纳入 NDVI 方程的分母中,开发了土壤调整植被指数(soil-adjusted vegetation index,SAVI)^[96]:

$$\text{SAVI} = [(\text{NIR} - R) (1 + L)] / (\text{NIR} + R + L) \quad (14)$$

式中,L 为土壤调整因子。

L 的取值范围是[0, -1],实际取值取决于应用实践的具体情况,也是 SAVI 利用的最大难点。研究对象一定时,可以参照其他植被指数确定 L 值;也可以拟定几个 L 值,再根据研究对象的实测数据去决定适合 L 值的范围,最后用内插值确定最适 L 值^[66],通常植被覆盖度越大,L 的取值也越大。在理想状态下,L = 1,即表示土壤背景对植被信息的提取没有任何影响,这种情况在实际生活中几乎不会出现,只有在冠层覆盖密度很大的情况下才会发生^[53]。找到了随植物密度变化的最佳调节因子,通常把调整因子设置为 L = 0.5,因为这样可以在大范围内有效地降低土壤带来的影响。此外,使用 L = 0.5 会导致植被动态响应的损失,因为 0.5 通常大于红色反射率值,导致缓冲液反射率变化。

SAVI 是一种应用比较广泛的植被指数,而且不用计算土壤线的参数,该指数可以提取植被信息和植被覆盖度、反演叶绿素和氮含量、比较不同植被的差异、计算叶面积指数、监测旱情并修正模型。SAVI 消除土壤背景影响和适应植被变化的能力很强。

目前应用较广泛的指数——修改型二次土壤调节植被指数(modified soil-adjusted vegetation index,MSAVI2)是在修改型土壤调整植被指数(MSAVI)的基础上提出的^[74]:

$$\text{MSAVI2} = 0.5(2\text{NIR} + 1) - \sqrt{(2\text{NIR} + 1)^2 - 8(\text{NIR} - R)} \quad (15)$$

MSAVI2之所以能够广泛应用,主要是因为其不依赖于土壤线,算法简单,是所有需要考虑土壤背景的植被指数中较简单的一种。该指数主要用于分析植物的长势、荒漠化的研究、草地估产、计算 LAI、分析土壤有机质、监测旱情等方面。有研究曾利用 MSAVI2 监测湖北省的旱情、草地遥感估产。

有研究经过不断地模拟试验分析,确定了用来减少土壤背景影响的优化值 $X=0.16$,从而提出了优化土壤调节植被指数(optimization of soil-adjusted vegetation index, OSAVI),研究结果显示, X 取值 0.16,在无论高低的植被覆盖情况下都能有效减少土地噪声的影响^[97]:

$$OSAVI = (NIR - R) / (NIR + R + X) \quad (16)$$

虽然 OSAVI 的计算不依赖于土壤线而又受土壤背景的影响小,但是对该指数的应用还不是很多,主要是用于反演地表生物量、叶片氮含量等,也有将其用于指导变量施肥。

土壤背景是影响植被指数的主要因素,因此为了削弱土壤背景对植被指数提取信息的影响,应而生一系列控制土壤背景的植被指数,而这一系列指数根据其是否依赖于土壤线,分为两类。土壤线的提出对于植被指数的发展颇有意义,但是随着科技发展,不依赖于土壤线的植被指数运算更加简单,也因此应用更加广泛。利用影响因素的植被指数分类方法也不为一种很好的分类方法,当然在应用该类指数时也更要考虑到土壤线的影响和经验常数的影响。此外,控制土壤背景的植被指数只是纠正了土壤对植被指数的影响,并没有考虑到第二大影响因素——大气。同理,也会有很多控制大气的植被指数相继被提出。

2.2 大气 植被指数是由辐射强度表示的。太阳天顶角、测量方向和大气状况都会影响辐射强度的测量,从而影响植被指数的测量^[97]。因此,植被指数反映的就不仅是植物的光谱特性,同时也能反映太阳天顶角、测量方向和大气状况对测量的影响程度。植被、裸地、岩石、冰雪等不同的地表类型会有不同的光谱反射率,这种差异就为地表监测提供了可能。基于地表在可见光和近红外光区光谱反射特性的差别,NOAA/AVHRR 通道 1(可见光通道)和通道 2(近红外光通道)被广泛地用于各种实践应用^[98]。在大气窗口选择合适的遥感光谱段可以减小大气中水汽的吸收影响,标准差(NDVI 指数就是应用的标准差方法)本身是一种归一化的算法,它可以减小观测角度的影响以及减小部分气溶胶的吸收、散射效应,但是这种方法没有完全消除大气影响^[99]。

大气对植被指数的计算带来的影响主要有两个方面:①远程辐射带来的图像噪声的增加;②大气的吸收和散射作用造成的有效信号减少。太阳辐射要 2 次穿过大气,最终到达传感器感应元件,再经过处理才是人们看到的遥感图像,在辐射过程中大气的吸收、折射等特性会使得被地物反射的包含地物信息的重要辐射信号会被干扰。经试验验证,会发现大气的影会造成计算植被指数的获取值要小于实际值,虽然一般会采取若干天监测值得极大值来表示,但是不同的天气情况同样会对监测值带来影响。同时一般情况下,在地表

覆盖度的估算研究中就会造成估测误差。

大气对红光以及近红外波段有不同的吸收系数,红光波段反射的影响大于近红外波段反射率的影响,有研究曾发现大气对植被指数的影响甚至会超过植被指数自身的变化。为避免该影响,有学者提出了一种大气修正植被指数(atmosphere resistant vegetation index, ARVI),指数利用了蓝光波段和红光波段大气层辐射的相关性^[100]:

$$ARVI = (NIR - RB) / (NIR + R) \quad (17)$$

$$RB = R - \gamma(B - R)$$

式中, γ 为光学路径的效应因子,依赖于气溶胶的类型,通过红光和蓝光波段的自动调节获得。

相对于 NDVI,ARVI 对大气的敏感性降低了 40%,这是因为 ARVI 的应用效果取决于光学路径的效应因子,存在一定的局限性。除此之外,该指数在应用时操作难度较大。针对以上问题,有研究基于 ARVI,利用大气下行辐射的观测值以及大气传输方程,得出 NDVI 的校正系数,并且把校正系数的值控制在 0.65~1.21 范围内变动,利用辐射传输模型预处理,得到了新抗大气影响指数(IAVI)。

针对大气的影响,上文提到的全球环境监测指数(global environment monitor index, GEMI)^[44]是红光波段与近红外波段的非线性组合,可以对 AVHRR 数据进行自纠正。GEMI 在不影响植被信息提取的同时,可以降低大气的影响,能较好区别云斑和地表,并且相对于 NDVI 有更加宽泛的植被覆盖度检测区间,但是该指数的局限性在于它受裸土的亮颜色影响大,不适用于植被覆盖度低的区域^[99]。

综上,消除大气对植被指数的影响可总结为 2 种方法:一种是使用相关技术手段来消除大气影响,例如可以使用 5s 模型消除分子和臭氧带来的影响;另一种就是应用抗大气植被指数,利用蓝光波段和红光波段的线性组合来减少红光辐射增加部分带来的影响。

2.3 综合因素 植被指数的影响因素不单单是来自土壤或大气,植被—大气—土壤相互作用在植被指数的计算中是不可忽视的。Miura 等^[15]综合考虑了影响因素,提出了改进型土壤大气修正植被指数,又称增强型植被指数(enhance vegetation index, EVI):

$$EVI = [2.5(NIR - R)] / (NIR + 6R - 7.5B + 1) \quad (18)$$

EVI 通过添加蓝带增强植被信号来纠正土壤背景和气溶胶散射的影响,是一种优化的植被指数,通过解释植被冠层背景信号来减少大气影响,提高了对高生物量区域的敏感性和植被监测能力和效果。

4 结论与讨论

植被指数是评估植被的关键指标,可以反映大多数的植被信息。它应用广泛,不仅可以指导生产实践,监测干旱水文,同时对于水土流失的监测也具有重要指导意义。

(1)相比单波段,植被指数能更有效地表达植物的活力。植被指数可以广泛应用于叶面积指数的反演、旱区监测和土地利用类型变化情况。然而,植被指数并没有一个标准的普适值,不同的植被指数往往会有不同的研究结果。另外,

大气条件、土壤亮度、太阳高度角、传感器类型等都是制约植被指数的重要因素,从而影响计算结果。

(2) 植被指数的发展史就是下一代对上一代指数的限制因素的改进,为扩大适用范围植被指数在数值的正负、波段的选择等方面一直在不断发展完善。第一代植被指数完全是基于最简单的线性组合,或者是利用原始卫星数据。第二代是以解释电磁辐射、大气因素、土壤背景之间的相互作用的物理现象的知识理论为基础,解决植被指数应用的问题。但是,这些问题尚不明确。

(3) 目前有抗大气干扰的植被指数、抗土壤背景的植被指数,也有其他类型的植被指数,但是能够综合反映“大气—土壤—植被”系统的指数还是未来研究的重点。分析表明,在理想条件下第二代植被指数比一代能够更好地反映真实情况,是因为二代对大气效应和土壤亮度等干扰因素的敏感度降低了,对植被覆盖的敏感度升高了。

与前人研究相比,该研究统计的植被指数种类更加丰富,植被指数汇总相对完整,从植被指数的诞生到不断发展,各个阶段的不同方向的发展都有更加完善的论述,并且汇总了植被指数的应用特点,可以更好地为实践应用提供参考依据。鉴于目前针对不同植被指数性能的评估研究缺乏,对这些指数的系统评估是未来急需开展的工作。

参考文献

- [1] 梁萍萍. 喀斯特地区植被变化与地表反照率响应特征研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
- [2] XUE J R, SU B F. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications[J]. *Journal of sensors*, 2017, 2017: 1–17.
- [3] ROUSE J W, Jr, HAAS R H, DEERING D N, et al. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation [R]. NASA/GSFC, 1974: 1–88.
- [4] GOWARD S N, MARKHAM B, DYE D G, et al. Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer[J]. *Remote sensing of environment*, 1991, 35(2/3): 257–277.
- [5] GUZMAN M, DEL RIO A, SANCHEZ A, et al. Vegetative index and optimal range in horticultural crops[J]. *Communications in soil science and plant analysis*, 1992, 23(17/18/19/20): 2823–2836.
- [6] EVERITT J H, 陈怀顺. 利用近红外和中红外光谱参变量评估草地生物量[J]. 四川草原, 1992(1): 61–64.
- [7] 张时煌, 彭公炳, 黄玫. 基于遥感与地理信息系统支持下的地表植被特征参数反演[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(1): 80–91.
- [8] 杨标, 柏哈, 康重阳, 等. 基于时间序列遥感数据分析的典型钼矿区土地退化评价[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2020, 35(4): 60–66.
- [9] 王彩玲, 郭璞, 王波, 等. 基于高光谱的祁连山东段灌丛生物量估测模型构建[J]. 草原与草坪, 2020, 40(6): 39–45.
- [10] 曹中盛, 李艳大, 黄俊宝, 等. 基于便携式作物生长监测仪的花生叶片氮积累量和叶面积指数监测[C]//江西省作物学会. 江西省作物学会 2020 年学术年会论文摘要集. 南昌: 江西省作物学会, 2020.
- [11] 李向伟. 基于 MODIS 数据的北京市水土流失快速监测[J]. 人民长江, 2020, 51(S2): 41–44.
- [12] 李天驰, 杨福芹, 卢燕. 基于 Sentinel-2 影像的四川木里森林火灾监测[J]. 南方林业科学, 2020, 48(6): 49–53.
- [13] BARET F, GUYOT G, MAJOR D J. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation[C]//12th Canadian Symposium on Remote Sensing. Symposium: IEEE, 1989: 1355–1358.
- [14] MARKS P L, BORMANN F H. Revegetation following forest cutting: Mechanisms for return to steady-state nutrient cycling[J]. *Science*, 1972, 176(4037): 914–915.
- [15] MIURA T, HUETE A R, YOSHIOKA H. Evaluation of sensor calibration uncertainties on vegetation indices for MODIS[J]. *IEEE transactions on geoscience & remote sensing*, 2000, 38(3): 1399–1409.
- [16] 张峰, 吴炳方, 刘成林, 等. 利用时序植被指数监测作物物候的方法研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 155–159.
- [17] 张明伟. 基于 MODIS 数据的作物物候期监测及作物类型识别模式研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
- [18] HUETE A R. Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra [C]//ASRAR G. Theory and applications of optical remote sensing. New York: John Wiley and Sons, 1989: 107–141.
- [19] CAMPBELL J B. Introduction to remote sensing[M]. New York: The Guilford Press, 2002.
- [20] 宫丽玮, 闫利. 植被指数和纹理特征在影像解译中的应用[J]. 北京测绘, 2014(1): 91–95.
- [21] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(4): 327–333.
- [22] 李哲. 艾比湖湿地自然保护区不同季节盐生植物光谱特征研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- [23] 张芸, 张鹰, 王晶晶. 悬沙水体光谱反射率与质量浓度、粒径的相关关系[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(3): 340–346.
- [24] 王欢欢, 徐丽华. 基于通道划分的植物反射波谱分类研究[J]. 西南林业大学学报, 2014, 34(3): 51–56.
- [25] 王晓梅, 张玉钧, 刘文清, 等. 基于光谱特征的植被遥感探测及应用研究[C]//第十五届全国遥感技术学术交流会论文摘要集. [出版地不详]: [出版者不详], 2005: 33.
- [26] 杨娟, 黄燕. 岩矿高光谱测试及其特征研究[C]//安徽省地质学会. 安徽省 2014 年青年地质学术讨论会论文集. 合肥: 安徽省地质学会, 2014: 55–58.
- [27] 郭妮. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 71–75.
- [28] PEARSON R L, MILLER L D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado[C]//Proceedings of the 8th international symposium on remote sensing of the environment. Ann Arbor: Environmental Research Institute of Michigan, 1972: 1355–1379.
- [29] BARET F, GUYOT G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment[J]. *Remote sensing of environment*, 1991, 35(2/3): 161–173.
- [30] JACKSON R D, SLATER P N, PINTER P J, Jr. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres[J]. *Remote sensing of environment*, 1983, 13(3): 187–208.
- [31] YIN X H, MCCLURE A, TYLER D. Relationships of plant height and canopy NDVI with nitrogen nutrition and yields of corn[C]//Proceedings of the 19th world congress of soil science: Soil solutions for a changing world. Brisbane, Australia: International Union of Soil Sciences, 2010: 40–42.
- [32] NIDUMOLU U, SADRAS V, HAYMAN P, et al. Comparison of NDVI seasonal trajectories and modelled crop growth dynamics[C]//Proceedings of the 14th Australian Agronomy Conference. Adelaide, South Australia: Regional Institute Ltd, 2012: 1–4.
- [33] PETROPOULOS E A, TIMIRAS P S. Biological effects of high altitude as related to increased solar radiation, temperature fluctuations and reduced partial pressure of oxygen[J]. *Progress in biometeorology*, 1974, 1(1A): 295–328.
- [34] CHUAI X W, HUANG X J, WANG W J, et al. NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998–2007 in Inner Mongolia, China[J]. *International journal of climatology*, 2013, 33(7): 1696–1706.
- [35] DORIGO W A, ZURITA-MILLA R, DE WIT A J W, et al. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling[J]. *International journal of applied earth observation & geoinformation*, 2007, 9(2): 165–193.
- [36] 王晓飞, 李志洪, 袁家萍, 等. 玉米品种冠层 NDVI 与叶绿素的关系[J]. 中国农学通报, 2010, 26(16): 175–179.
- [37] 杨忠东, 杨虎, 谷松岩. 西北地区陆地生态系统植被状态参数业务化遥感研究[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(1): 54–64.
- [38] JIANG R G, XIE J C, HE H L, et al. Spatiotemporal variability and predictability of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Alberta, Canada[J]. *International journal of biometeorology*, 2016, 60: 1389–1403.
- [39] 黄伟娇, 黄敬峰, 王秀珍, 等. 不同传感器的光谱响应函数对红光波段和近红外波段反射率和 NDVI 的影响研究[C]//第二届全国成像光谱对地观测学术研讨会论文集. 南京: 国际数字地球学会中国国家委员会, 2013: 80–81.

- [40] 钱铭杰. RVI 与 NDVI 在植被信息提取中的应用比较[C]//第七届 ArcGIS 暨 ERDAS 中国用户大会论文集. 北京:中国地理信息系统协会, 2010;662-666.
- [41] PERRY C R, Jr, LAUTENSCHLAGER L F. Functional equivalence of spectral vegetation indices[J]. *Remote sensing of environment*, 1984, 14 (1/2/3): 169-182.
- [42] DAUGHTRY C S T, GALLO K P, GOWARD S N, et al. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies[J]. *Remote sensing of environment*, 1992, 39(2): 141-152.
- [43] 周健. 基于中高分融合影像冬小麦播期遥感监测机理研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
- [44] PINTY B, VERSTRAETE M M. GEMI: A non-linear index to monitor global vegetation from satellites[J]. *Vegetatio*, 1992, 101(1): 15-20.
- [45] VARNOSFADERANI M K, KHARAZMI R, SAMANI A N, et al. Distribution changes of woody plants in Western Iran as monitored by remote sensing and geographical information system; A case study of Zagros forest[J]. *Journal of forestry research*, 2017, 28(1): 145-153.
- [46] 高志海, 李增元, 魏怀东, 等. 干旱地区植被指数(VI)的适宜性研究[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(2): 243-248.
- [47] ROUJEAN J L, BREON F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements[J]. *Remote sensing of environment*, 1995, 51(3): 375-384.
- [48] RICHARDSON A J, WIEGAND C L. Distinguishing vegetation from soil background information[J]. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1977, 43(12): 1541-1552.
- [49] MCFEETERS S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. *International journal of remote sensing*, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [50] 刘小磊, 覃志豪. NDWI 与 NDVI 指数在区域干旱监测中的比较分析: 以 2003 年江西夏季干旱为例[J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(5): 608-612.
- [51] GITELSON A A, KAUFMAN Y J, STARK R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. *Remote sensing of environment*, 2002, 80(1): 76-87.
- [52] 汪卓琦, 张立福, 晏磊. 高光谱植被指数 VIUPD 的 Matlab7.0 实现[J]. *影像技术*, 2007(3): 27-30.
- [53] LI P, JIANG L G, FENG Z M, et al. Mapping rice cropping systems using Landsat-derived Renormalized Index of Normalized Difference Vegetation Index(RNDVI) in the Poyang Lake Region, China[J]. *Frontiers of earth science*, 2016, 10(2): 303-314.
- [54] KAUFMAN Y J, TANRE D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS[J]. *IEEE transaction on geoscience and remote sensing*, 1992, 30(2): 261-270.
- [55] JACKSON R D. Spectral indices in N-Space[J]. *Remote sensing of environment*, 1983, 13(5): 409-421.
- [56] PLUMMER S E, NORTH P R J, BRIGGS S A. The angular vegetation index: An atmospherically resistant index for the second along track scanning radiometer (ATSR-2) [C]//Proceedings of the 6th International Symposium of Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing. Val D' Isere, France; [s. n.], 1994.
- [57] HUETE A R, LIU H, DE LIRA G R, et al. A soil color index to adjust for soil and litter noise in vegetation index imagery of arid regions[C]//1994 International Geoscience & Remote Sensing Symposium. Pasadena, CA, USA; IEEE, 1994; 1042-1043.
- [58] MEYER G E, MEHTA T, KOCHER M F, et al. Textural imaging and discriminant analysis for distinguishing weeds for spot spraying[J]. *Transactions of the ASAE*, 1998, 41(4): 1189-1197.
- [59] MEYER G E, NETO J C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications[J]. *Computers and electronics in agriculture*, 2008, 63(2): 282-293.
- [60] MEYER G E, HINDMAN T W, LAKSMI K. Machine vision detection parameters for plant species identification[J]. *Proceedings of spie the international society for optical engineering*, 1999, 3543: 327-335.
- [61] COLWELL R N, HAY C M. Development of AI procedures for dealing with the effects of episodic events on crop temporal spectral response and development of AI guidelines for corn and soybean labeling[J]. *Journal of thermal analysis & calorimetry*, 1979, 122(3): 1385-1394.
- [62] KAUTH R, THOMAS G. The tasselled cap: A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat [C]//Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed. West Lafayette, Indiana; Purdue University, 1976.
- [63] BADHWAR G D. The Use of Parameters to Separate and Identify Spring Small Grains[C]//Quarterly Technical Interchange Meeting. Houston, TX USA; NASA-JSC, 1981.
- [64] 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(2): 229-239.
- [65] MISRA P N, WHEELER S G, OLIVER R E. Kauth-Thomas brightness and greenness axes[R]. Contract NASA, 1977; 23-46.
- [66] QI J, CHEHBOUNI A, HUETE A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index[J]. *Remote sensing of environment*, 1994, 48(2): 119-126.
- [67] CHEN J M, CIHLAR J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images[J]. *Remote sensing of environment*, 1996, 55(2): 153-162.
- [68] 金一谔, 刘长盛, 张文忠. 利用气象卫星 GMS 和 AVHRR 资料推算地面水分含量的方法[J]. *应用气象学报*, 1998, 9(2): 197-204.
- [69] LYON J G, YUAN D, LUNETTA R S. A change detection experiment using vegetation indices[J]. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 1998, 64(2): 143-150.
- [70] MCNAIRN H, PROTZ R. Mapping corn residue cover on agricultural fields in Oxford County, Ontario, using thematic mapper[J]. *Canadian journal of remote sensing*, 1993, 19(2): 152-159.
- [71] ROUSE J W, HAAS R H, DEERING D W, et al. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation [R]. 1973.
- [72] VERRELST J, SCHAEPMAN M E, KOETZ B, et al. Angular sensitivity analysis of vegetation indices derived from CHRIS/PROBA data[J]. *Remote sensing of environment*, 2008, 112(5): 2341-2353.
- [73] CLAY D E, KIM K I, CHANG J, et al. Characterizing water and nitrogen stress in corn using remote sensing[J]. *Agronomy journal*, 2006, 98(3): 579-587.
- [74] RONDEAUX G, STEVEN M, BARET F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. *Remote sensing of environment*, 1996, 55(2): 95-107.
- [75] GAMON J A, PEÑUELAS J, FIELD C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. *Remote sensing of environment*, 1992, 41(1): 35-44.
- [76] MERZLYAK M N, 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(1): 135-141.
- [77] JACKSON R D, PINTER P J, Jr, REGINATO R J, et al. Hand-held radiometry: A set of notes developed for use at the Workshop on Hand-held radiometry[R]. Phoenix, Arizona, 1980; 25-26.
- [78] HUETE A R, ESCADAFAL R. Assessment of biophysical soil properties through spectral decomposition techniques[J]. *Remote sensing of environment*, 1991, 35(2/3): 149-159.
- [79] HUETE A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. *Remote sensing of environment*, 1988, 25(3): 295-309.
- [80] PENUELAS J, FREDERIC B, FILELLA I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance[J]. *Photosynthetica*, 1995, 31(2): 221-230.
- [81] CHAPPELLE E W, KIM M S, MCMURTREY J E III. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B, and carotenoids in soybean leaves[J]. *Remote sensing of environment*, 1992, 39(3): 239-247.
- [82] THENKABAIL P S, WARD A D, LYON J G, et al. Thematic Mapper vegetation indices for determining soybean and corn growth parameters[J]. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1994, 60(4): 437-442.
- [83] HABOUDANE D, MILLER J R, PATTEY E, et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture[J]. *Remote sensing of environment*, 2004, 90(3): 337-352.
- [84] SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. *Remote sensing of environment*, 2002, 79(2/3): 213-224.
- [85] TOMÁS A D, NIETO H, GUZINSKI R, et al. Multi-scale approach of the surface temperature/vegetation index triangle method for estimating evapotranspiration over heterogeneous landscapes [R]. EGU General Assembly, 2012.
- [86] 汪小钦, 王苗苗, 王绍强, 等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 152-159.

- (7):1-13.
- [80] 孙茵峰. 龙眼核多酚的分离纯化及抗氧化性能的研究[D]. 无锡:江南大学, 2019.
- [81] 赵国建, 李桂峰, 董周永, 等. 石榴籽中多酚的提取及其抗氧化作用研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(12): 2532-2537.
- [82] DE SANTANA F C, DE OLIVEIRA TORRES L R, SHINAGAWA F B, et al. Optimization of the antioxidant polyphenolic compounds extraction of yellow passion fruit seeds (*Passiflora edulis* Sims) by response surface methodology[J]. Journal of food science and technology, 2017, 54(11): 3552-3561.
- [83] 王萍, 王宇鹤, 李辉, 等. 枇杷核不同极性萃取物总黄酮、总多酚含量与其抗氧化活性的相关性[J]. 化学试剂, 2020, 42(9): 1067-1072.
- [84] GÓMEZ-MALDONADO D, LOBATO-CALLEROS C, AGUIRRE-MAN-
DUJANO E, et al. Antifungal activity of mango kernel polyphenols on mango fruit infected by anthracnose[J]. LWT, 2020, 126: 1-9.
- [85] 王梦霞, 金建忠, 周恩牧, 等. 菠萝蜜种子多酚的超临界 CO₂ 萃取工艺研究[J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30(8): 1444-1448.
- [86] 徐颖, 樊明涛, 冉军舰, 等. 不同品种苹果籽总酚含量与抗氧化相关性研究[J]. 食品科学, 2015, 36(1): 79-83.
- [87] WEN L R, YANG B, CUI C, et al. Ultrasound-assisted extraction of phenolics from longan (*Dimocarpus longan* Lour.) fruit seed with artificial neural network and their antioxidant activity[J]. Food analytical methods, 2012, 5(6): 1244-1251.
- [88] 孙海燕. 樱桃核中类黄酮的提取工艺条件研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(17): 70-73.
- [89] 郭文娟, 王娜, 王娜娜, 等. 山楂核总黄酮的超声提取及抗氧化活性[J]. 精细化工, 2016, 33(2): 152-156.
- [90] 叶秋萍, 曾新萍, 郑晓倩. 膳食纤维的制备技术及理化性能的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 49(17): 212-217.
- [91] 郑文新, 刘占英, 石雅丽, 等. 可溶性膳食纤维提取的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(27): 107-109, 202.
- [92] 戴余军, 石会军, 李长春, 等. 菠萝皮可溶性膳食纤维提取工艺的研究[J]. 热带作物学报, 2013, 34(9): 1798-1802.
- [93] 张桂春, 刘玉静, 李延敏, 等. 火龙果果皮中可溶性膳食纤维的提取方法[J]. 植物学报, 2017, 52(5): 622-630.
- [94] 曾广琳, 张晶晶, 龚烨, 等. 番木瓜皮可溶性膳食纤维酸碱耦合法提取工艺的优化[J]. 热带生物学报, 2016, 7(4): 489-496, 537.
- [95] 彭章普, 龚伟中, 徐艳, 等. 苹果渣可溶性膳食纤维提取工艺的研究[J]. 食品科技, 2007, 32(7): 238-241.
- [96] 刘铭, 李秀婷, 潘凌风, 等. 芒果皮可溶性膳食纤维的提取及性质研究[J]. 中国食品添加剂, 2014(1): 81-87.
- [97] 谢婧. 响应面优化复合植物水解酶提取梅州金柚皮可溶性膳食纤维[J]. 食品科技, 2015, 40(4): 296-301, 308.
- [98] 孙艳, 房玉林, 张昂, 等. 葡萄皮渣中可溶性膳食纤维提取工艺研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(10): 145-151, 158.
- [99] KUMAR M, TOMAR M, POTKULE J, et al. Advances in the plant protein extraction: Mechanism and recommendations[J]. Food hydrocolloids, 2021, 115: 1-17.
- [100] 中国常驻联合国粮农机构代表处. FAO 发布《2020 年世界粮食及农业统计年鉴》[J]. 世界农业, 2020(12): 118-119.
- [101] 高蕾蕾, 李迎秋. 植物蛋白的研究进展[J]. 江苏调味副食品, 2018, 35(4): 6-10, 16.
- [102] 周歆. 菠萝蜜种子分离蛋白及其组分蛋白的功能性质与结构的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [103] 任继波. 葡萄籽蛋白质的提取及分离纯化研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2015.
- [104] 温小娟, 吴丹. 葡萄籽中蛋白质的提取[J]. 食品安全导刊, 2020(21): 102-104.
- [105] 杨海霞, 关文静, 邓建军, 等. 猕猴桃籽粕蛋白质的提取分离及抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(9): 205-209.
- [106] 王标诗, 曾亿均, 姜孟, 等. 番木瓜籽蛋白质的提取工艺及其功能性质[J]. 食品工业科技, 2017, 38(14): 181-187.
- [107] 谢明勇, 李精, 聂少平. 果胶研究与应用进展[J]. 中国食品学报, 2013, 13(8): 1-14.
- [108] 刘成梅, 刘琪, 陈军, 等. 果胶功能性质新进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(21): 344-351.
- [109] 高维. 苹果皮中果胶提取工艺的优化[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(8): 2074-2076.
- [110] 王锐, 邓仕英. 柑橘皮中果胶的提取及性能测定[J]. 化工管理, 2020(28): 165-166.
- [111] 赵凯. 柠檬果皮精油与果胶的联产工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [112] 沈锐, 李磊, 谢青松, 等. 柚子皮中果胶的提取工艺优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(13): 3327-3334.
- [113] 徐丹. 柠檬果皮果胶提取工艺的研究[D]. 成都: 西华大学, 2007.
- [114] 林丽静, 马丽娜, 黄晓兵, 等. 菠萝皮渣糯米果酒发酵过程中主要成分变化研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(11): 107-113.
- [115] 唐贤华, 张崇军, 隋明, 等. 枇杷果酒研究现状与展望[J]. 酿酒, 2020, 47(4): 36-38.
- [116] 朱晓琴, 熊智. 核桃壳与木屑栽培平菇的营养成分对比分析[J]. 中国食用菌, 2007, 26(6): 38-39.
- [117] 张云茹, 富继虎, 唐国发, 等. 柑橘皮渣栽培平菇及其营养安全评估[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(12): 140-144.
- [118] 臧玉红. 柑橘果皮在副食品加工方面的研究进展[J]. 食品工业科技, 2011, 32(6): 479-482.

(上接第 21 页)

- [87] NOVOZHILOV G N, DAVYDOV O V, MAZUROV K V, et al. The vegetative index of Kerdo as an indication of primary adaptation to hot climate conditions[J]. Voenno-meditsinskiizhurnal, 1969, 8: 68-69.
- [88] WAN Z, WANG P, LI X. Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA[J]. International journal of remote sensing, 2004, 25(1): 61-72.
- [89] GITELSON A A. Wide Dynamic Range Vegetation Index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation[J]. Journal of plant physiology, 2004, 161(2): 165-173.
- [90] 罗亚, 徐建华, 岳文泽. 基于遥感影像的植被指数研究方法述评[J]. 生态科学, 2005, 24(1): 75-79.
- [91] 池宏康, 陈维英, 张海蕾. 遥感数据的裸沙土壤线校正方法[J]. 地理学报, 1999, 54(5): 454-461.
- [92] BARET F, JACQUEMOUD S, HANOCQ J F. About the soil line concept in remote sensing[J]. Advances in space research, 1993, 13(5): 281-284.
- [93] 李开丽, 倪绍祥, 扶卿华. 垂直植被指数及其解算方法[J]. 农机化研究, 2005(2): 84-86, 89.
- [94] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究[J]. 植物生态学报, 2004(1): 47-52.
- [95] 李映雪, 朱艳, 戴廷波, 等. 小麦叶面积指数与冠层反射光谱的定量关系[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1443-1447.
- [96] 高志海, 魏怀东, 丁峰. TM 影像 VI 提取植被信息技术研究[J]. 干旱区资源与环境, 1998, 12(3): 98-104.
- [97] CHAIRPERSON C. In situ and solar radiometer measurements of atmospheric aerosols in Bozeman, Montana[D]. Bozeman: Montana State University, 2011.
- [98] 李昕. 对 NOAA/AVHRR 通道反照率和植被指数的大气影响订正试验[J]. 气候与环境研究, 1998, 3(2): 85-96.
- [99] 赵高祥, 汪宏七. 大气对植被指数的影响[J]. 应用气象学报, 1993, 4(2): 177-184.
- [100] 孙勇. 应用遥感数据对植被指数提取分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.