



基于无人机图像的草地植被盖度估算方法比较

伏帅 冯琦胜 党菁阳 雷可欣 乔万鑫 梁天刚 潘冬荣 孙斌 姜佳昌

Comparison of grassland vegetation coverage extraction algorithms from UAV technology

FU Shuai, FENG Qisheng, DANG Jingyang, LEI Kexin, QIAO Wanxin, LIANG Tiangang, PAN Dongrong, SUN Bin, JIANG Jiachang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0363>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于无人机可见光图像的荒漠草地覆盖度估算

Estimation of vegetation coverage of desert grassland based on images from an unmanned aerial vehicle

草业科学. 2021, 38(8): 1432 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0712>

不同植被指数和无人机航高对草地盖度估测精度的影响

Influence of different vegetation indices and heights of UAVs on the accuracy of grassland coverage estimation

草业科学. 2021, 38(1): 11 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0115>

基于多光谱数据与小型无人机的甘南草地非生长季植被覆盖度

An analysis of fractional vegetation cover of the Gannan grassland in the non-growing season based on Multispectral data and small UAVs

草业科学. 2019, 36(11): 2742 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0013>

基于小型无人机与MODIS数据的草地植被覆盖度研究——以甘南州为例

Grassland fractional vegetation cover analysis using small UAVs and MODIS——A case study in Gannan Prefecture

草业科学. 2017, 11(1): 40 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0046>

基于无人机的草原毛虫监测初探

Preliminary exploration of monitoring *Gynaephora alpherakii* using unmanned aerial vehicles (UAV)

草业科学. 2020, 37(10): 2106 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0194>

基于无人机的东北鼯鼠种群数量调查最佳尺度选择

Optimal unmanned aerial vehicle (UAV) height and sampling area for aerial photography-based survey of the Manchurian zokor population

草业科学. 2021, 38(9): 1841 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0148>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0363

伏帅, 冯琦胜, 党菁阳, 雷可欣, 乔万鑫, 梁天刚, 潘冬荣, 孙斌, 姜佳昌. 基于无人机图像的草地植被盖度估算方法比较. 草业科学, 2022, 39(3): 455-464.

FU S, FENG Q S, DANG J Y, LEI K X, QIAO W X, LIANG T G, PAN D R, SUN B, JIANG J C. Comparison of grassland vegetation coverage extraction algorithms from UAV technology. Pratacultural Science, 2022, 39(3): 455-464.

基于无人机图像的草地植被盖度估算方法比较

伏 帅¹, 冯琦胜¹, 党菁阳¹, 雷可欣¹, 乔万鑫¹, 梁天刚¹,
潘冬荣², 孙 斌², 姜佳昌²

(1. 草地农业生态系统国家重点实验室 / 农业农村部草业创新重点实验室 / 草地农业教育部工程研究中心 / 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省草原技术推广总站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 植被盖度是反映植被基本情况的客观指标和重要参数。本研究在对比 8 种常用的可见光植被指数计算草地盖度精度的基础上, 发现这些植被指数对荒漠草地的植被盖度估测效果较差, 因此提出一种适用于荒漠草地植被盖度估测的荒漠植被指数 (DVI), 并评价了不同植被指数对不同草地类型的植被盖度估测效果, 分析了不同草地类型阈值取值的变化情况。结果表明: 1) 所选植被指数对草甸草地和典型草地的盖度估测效果均较好, 精度较高 (准确率 > 90%, F_1 得分 > 0.9)。草甸草地中超绿指数 (ExG) 的盖度估测效果最好 (准确率 > 93%, F_1 得分 > 0.95), 典型草地中各植被指数无明显差异, 但对荒漠草地植被盖度估测效果较差, 精度较低 (F_1 得分 $\leq$ 0.6)。2) DVI 对荒漠草地植被盖度估测精度较高 (准确率 > 93%, F_1 得分达到 0.71), 能够有效弥补上述植被指数的缺陷。3) 绿叶指数 (GLI) 和植被颜色指数 (CIVE) 的阈值对草地类型敏感性最弱; ExG、超绿超红差分指数 (ExGR)、植被因子指数 (VEG)、Woebbecke 指数 (WI) 等植被指数的阈值对草甸草地和典型草地的敏感性较弱, 但对荒漠草地的敏感性较强; 组合指数 (COM) 和 Lab 指数 (Lab) 对草地类型的敏感性最强。

关键词: 无人机; 可见光波段; 植被盖度; 植被指数; 荒漠; 草地; 阈值法

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)03-0455-10

Comparison of grassland vegetation coverage extraction algorithms from UAV technology

FU Shuai¹, FENG Qisheng¹, DANG Jingyang¹, LEI Kexin¹, QIAO Wanxin¹,
LIANG Tiangan¹, PAN Dongrong², SUN Bin², JIANG Jiachang²

(1. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems / Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Engineering Research Center of Grassland Industry, Ministry of Education / College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China;
2. Gansu Grassland Technical Extension Station, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Vegetation coverage is an objective index and an important parameter that reflects the basic extent of vegetation. In this study, we evaluated and analyzed the effectiveness of eight different visible-light-based vegetation indices for estimating the vegetation cover of different grassland types. Upon comparison of accuracy of these vegetation indices, we

收稿日期: 2021-06-16 接受日期: 2021-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41801191、41805086); 甘肃省农业财政项目 (2016276); 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-34); 中国工程院重点咨询项目 (2021-HZ-5、2020-XZ-29); 长江学者和创新团队发展计划 (IRT17R50); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金 (lzujbky2021-kb13)

第一作者: 伏帅 (1999-), 男, 陕西渭南人, 在读硕士生, 研究方向为草地遥感。E-mail: fush21@lzu.edu.cn

通信作者: 冯琦胜 (1983-), 男, 甘肃镇原人, 高级实验师, 博士, 研究方向为草地遥感。E-mail: fengqsh@lzu.edu.cn

共同通信作者: 梁天刚 (1967-), 男, 甘肃崇信人, 教授, 博士, 研究方向为草地遥感与地理信息系统。E-mail: tgliang@lzu.edu.cn

found that these vegetation indices were less effective in estimating the vegetation cover of desert grasslands. Therefore, we have proposed a desert vegetation index (DVI) to estimate the vegetation cover of desert grasslands. The effects of different vegetation indices on the vegetation cover estimation of different grassland types were evaluated, and the changes in the threshold values of different grassland types were analyzed. The results showed that: 1) The common vegetation indices could estimate the vegetation coverage in meadow grasslands and typical grasslands with a high accuracy (accuracy > 90%, $F_1 > 0.9$). The ExG (excess green index) was the best in estimating the vegetation coverage in meadow grasslands (accuracy > 93%, $F_1 > 0.95$), and there was no significant difference among the estimation power of vegetation indices when estimating the coverage in typical grasslands. However, the common vegetation indices exhibited low accuracy of vegetation coverage estimation ($F_1 \leq 0.6$) in desert grasslands. 2) The DVI proposed in this study has a high estimation accuracy of vegetation coverage in desert grasslands (accuracy > 93%, F_1 score reached 0.71), which can effectively compensate for the defects of the above-mentioned vegetation indices. 3) The thresholds of GLI (green leaf index) and CIVE (color index of vegetation extraction) were the least sensitive to grassland types; the thresholds of ExG, ExGR (excess green minus excess red index), VEG (vegetative index), and WI (woebbecke index) were less sensitive to the effects of meadow grasslands and typical grasslands, but more sensitive to the effect of desert grasslands; and COM (combination index) and Lab (lab index) were the most sensitive to all the grassland types considered in this study.

Keywords: UAV; visible light band; vegetation coverage; vegetation index; desert; grassland; threshold method

Corresponding author: FENG Qisheng E-mail: fengqsh@lzu.edu.cn

LIANG Tiangang E-mail: tgliang@lzu.edu.cn

植被盖度通常指植被的茎、叶、枝等部分在地面的垂直投影面积占统计区面积的百分比,是反映植被基本情况的客观指标和重要参数,在水土保持、荒漠治理、植被资源调查等诸多方面的研究中具有重要意义^[1-2]。植被盖度的估测通常采用地面样方与遥感估测结合的方式进行植被盖度的监测^[3]。其中在遥感估测方面,无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 作为地面监测和高空遥感之间的有效补充手段,具有成本低廉、灵活度高、操作简便等突出优势,已被广泛应用于生态系统监测^[4]、工程测绘^[5]、农业生产^[6]等方面的研究中。而可见光遥感技术进一步降低了对遥感影像波段的要求、图像采集的难度和成本,尤其在区域范围的遥感作业中能发挥很大的作用^[7]。目前已有许多学者将无人机技术应用到各个领域的研究中,如基于最大类间方差法对无人机照片中的冬小麦 (*Triticum aestivum*) 进行的识别研究^[8];利用无人机获取草地影像,估算草地盖度和生物量的研究^[9];根据无人机影像中的可见光波段提取植被信息的研究^[10];使用无人机影像进行植被黄龙病的识别和监测^[11]。为了从遥感影像中精确提取植被信息,国内外诸多学者构建了一系列植被指数,并成为遥感监测生态系统生产力^[12]、生物量^[13]、植被盖度^[14]、植被识别^[7]、病理识别^[15]等研究的重

要技术手段。目前常用的植被指数多以可见光和近红外组合的形式构建,且缺乏对植被环境的考虑,对于西北干旱荒漠地区的植被调查研究相对较少^[16]。因此,迫切需要构建一种具有普遍适用性且适用于荒漠地区无人机可见光波段的植被指数。

为此,本研究以西北地区草地植被无人机影像作为研究对象,在分析荒漠草地无人机影像的地物可见光反射特点的基础上,提出了一种能够有效估测荒漠草地植被盖度的荒漠植被指数 (desert vegetation index, DVI),并对基于可见光波段的 8 种植被指数展开对比研究,从草甸草地、典型草地、荒漠草地 3 种草地类型出发分析不同植被指数估算植被盖度的效果,以期为无人机技术在植被资源调查、植被识别等方面的应用提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 数据获取

无人机图像获取于 2018 年 7 月 19 日至 8 月 10 日,主要对于典型草地、荒漠草地和草甸草地^[17]这 3 种类型的地势平坦的草地,使用大疆 Phantom 4 pro 无人机在天气晴朗、阳光充足的条件下于 20 m 航高垂直对地进行拍摄采样,调查地域涉及新疆维吾尔

自治区、内蒙古自治区和甘肃省, 研究地区海拔在 500 – 2000 m, 气候类型以温带大陆性气候为主。每个草地类型各调查 10 个样地, 总计调查样地 30 个。采样点分布情况如表 1 所列。

1.2 研究方法

1.2.1 植被指数

本研究选取了基于可见光波段的 8 种植被指数 (表 2)。这些植被指数方法常用于植被识别、盖度计

表 1 采样点分布及其草地类型
Table 1 Distribution of sampling points and grassland types

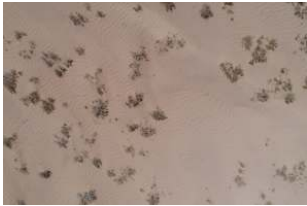
草原类型 Grassland type	地区 Region	地理位置 Geographic site	样点数 Number of sampling
 荒漠草地 Desert grassland	内蒙古鄂尔多斯市 Ordos, Inner Mongolia	108.75° E, 38.46° N	5
	内蒙古阿拉善盟 Alax, Inner Mongolia	101.78° E, 39.11° N	1
	甘肃武威 Wuwei, Gansu	102.83° E, 38.56° N	3
	新疆昌吉州 Changji, Xinjiang	88.94° E, 44.35° N	1
 草甸草地 Meadow grassland	新疆哈密市 Hami, Xinjiang	88.94° E, 44.35° N	6
	新疆阿勒泰地区 Aletai, Xinjiang	93.75° E, 43.32° N	3
	新疆昌吉州 Changji, Xinjiang	92.60° E, 43.60° N	1
 典型草地 Typical grassland	甘肃平凉市 Pingliang, Gansu	107.16° E, 35.18° N	1
	甘肃庆阳市 Qingyang, Gansu	107.32° E, 35.49° N	7
	内蒙古包头市 Baotou, Inner Mongolia	110.22° E, 40.94° N	2

表 2 植被指数公式表
Table 2 Formula table of vegetation index

植被指数 Vegetation index	全称 Full name	公式 Formulas	参考文献 Reference
VEG	植被因子指数 Vegetative index	$VEG = g \div (r^{0.667} \times b^{0.333})$	[18]
ExG	超绿指数 Excess green index	$ExG = 2g - r - b$	[19]
ExGR	超绿超红差分指数 Excess green minus excess red index	$ExGR = ExG - (1.4r - g)$	[20]
GLI	绿叶指数 Green leaf index	$GLI = (2g - r - b) \div (2g + r + b)$	[21]
CIVE	植被颜色指数 Color index of vegetation extraction	$CIVE = 0.441r - 0.811g + 0.385b + 18.78745$	[22]
COM	组合指数 Combination index	$COM = 0.25ExG + 0.3ExGR + 0.33CIVE + 0.12VEG$	[23]
WI	Woebbecke指数 Woebbecke index	$WI = (g - b) \div (r - g)$	[24]
Lab	Lab指数 Lab index	$Lab = a$	[25]

公式中: r 、 g 、 b 分别为照片RGB颜色空间中的红、绿、蓝三通道灰度值的归一化值; a 为Lab颜色空间中的a通道灰度值。
The r , g , and b in the formula represent the normalized values of the gray values of the red, green, and blue channels in the RGB color space, and a represents the gray values of a channel in the Lab color space.

算等农业数字信息提取方面的研究,具有高效、可靠的优点。

常见的可见光颜色空间包括 RGB、Lab 以及 HSV 颜色空间。RGB 颜色空间由红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 3 个颜色通道组成,具有色彩表示原理简单,便于计算机实现等优点,常见的可见光植被指数多是基于 RGB 颜色空间构建的; Lab 颜色空间由亮度 (L) 以及 a、b 两个颜色通道组成; HSV 颜色空间由色调 (H)、饱和度 (S)、明度 (V) 组成,直接对应人眼视觉特性,更符合人类对颜色的认知^[26]。

为了提高无人机影像对荒漠草地植被和非植被的识别精度,考虑到归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 是常用的增强影像中植被信息的有效手段^[27],故借鉴其构建原理,在考虑荒漠草地植被可见光反射特点的基础上,提出一种基于可见光的植被指数。通常情况下,绿色植物在绿光波段有强反射,在蓝光和红光波段有强吸收,植被指数通过强化绿光反射的方式区别植被和非植被^[28]。在荒漠草地中,植被的绿光反射效果不佳,可能导致植被指数的绿光强化效果较差,进而导致植被识别效果较差^[29]。然而植被的可见光吸收率往往大于非植被,可以根据影像的明与暗、颜色的饱满程度区分植被与非植被,即通过强化 HSV 颜色空间的饱和度和明度的差异,更有效地区分植被与非植被。基于 HSV 颜色空间构建的荒漠植被指数 (DVI),其计算公式:

$$DVI = \frac{s-v}{s+v}。$$

式中: s 、 v 分别为 HSV 颜色空间的饱和度、明度灰度值。

1.2.2 草地盖度计算

采用阈值法计算草地无人机图像的盖度。首先进行植被指数计算,使影像中的每一个像元均得到一个植被指数值,然后设置一个阈值与每一个像元的植被指数值进行比较,若像元的植被指数值大于阈值,则该像元归为植被,否则归为非植被,将影像二值化得到二分像元模型,不断调整阈值大小直到得到最符合原影像植被分布情况的二分像元模型,最后将二分像元模型中的植被像元数量占总像元数量的百分比作为该影像的植被盖度值^[30-31]。因为植被指数阈值的确定是盖度计算的关键,本研究取

3 次阈值的平均值作为最终适用阈值。

1.2.3 参考数据

利用 Photoshop 2020 软件对草地无人机影像进行处理,勾勒出草地无人机图像中的植被与非植被部分,并将图像二值化构成二分像元模型,将二分像元模型中的植被像元数量占总像元数量的百分比作为该影像的植被盖度参考值。为减少主观性误差,植被盖度参考值取 3 次处理的平均值。图 1 为无人机影像处理流程图。

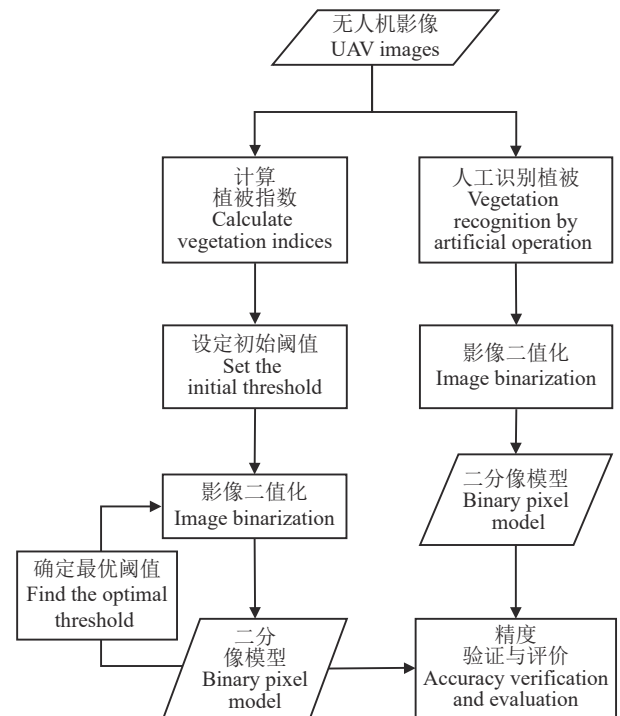


图 1 无人机影像处理流程

Figure 1 Processing flow of UAV images

1.3 精度评价

确定每张草地植被盖度参考值与估测值后,统计每一种植被指数估算结果的平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 和均方根误差 (root mean squared error, RMSE), 用来描述各种盖度估算方法的精度,以比较不同方法的优劣。

$$MAE = \frac{\sum_{i=0}^n |x_i - x'|}{n};$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x')^2}。$$

式中: x' 为草地盖度参考值, x_i 为草地盖度估测值,

n 为总样本数。

为了进一步客观评价各种植被指数的草地盖度计算精度, 本研究将 1.2.3 部分得到的二分像元模型和 1.2.4 部分得到的参考二分像元模型在像元水平上进行对比分析, 构建混淆矩阵。本研究以准确率 (accuracy, A)、精确率 (precision, P)、召回率 (recall, R)、特异度 (specificity, S) 以及 F_1 得分作为精度评价指标。

$$A = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN};$$

$$P = \frac{TP}{TP+FP};$$

$$R = \frac{TP}{TP+FN};$$

$$S = \frac{TN}{TN+FP};$$

$$F_1 = \frac{2 \times P \times R}{P+R}。$$

式中: TP 表示将正例划分为正例数; FP 表示将负例划分为正例数; TN 表示将负例划分为负例数; FN 表示将正例划分为负例数。 A 表示样本中所有正确划分的数量占总数的比例; P 表示在所有划分为正例的样本中, 将正例划分为正例数所占的比例; R 表示所有正例样本中, 将正例划分为正例数所占的比例; S 表示在所有反例样本中, 将反例划分为反例数所占的比例; F_1 得分表示模型输出的好坏。本研究中正例代表植被像元模型, 反例代表非植被像元模型。

2 结果与分析

2.1 误差统计

从总体上来看, 所有植被指数草地盖度估测值的误差较小, 大部分结果的平均相对误差 MAE 小于 5%, 其中 ExGR 和 COM 两种植被指数在 3 种草地类型下的草地盖度估测 MAE 总和均小于 5%; 每种植被指数的草地盖度估测误差的均方根误差 RMSE 与平均相对误差 MAE 表现一致, 即 MAE 较高的植被指数, 其 RMSE 也相对较高 (表 3)。

2.2 精度评价

各种植被指数构建的二分像元模型准确率大部

表 3 草地植被盖度估测误差表

Table 3 Estimation error table of grassland coverage

植被指数 Vegetation	草地类型 Grassland types	平均绝对误差 MAE/%	均方根误差 RMSE/%
ExG	草甸 Meadow	1.65	1.53
	典型 Typical	2.00	1.19
	荒漠 Desert	5.49	4.71
ExGR	草甸 Meadow	1.74	1.88
	典型 Typical	1.85	1.44
	荒漠 Desert	1.61	2.08
VEG	草甸 Meadow	2.81	4.60
	典型 Typical	4.57	3.88
	荒漠 Desert	1.52	1.13
CIVE	草甸 Meadow	2.53	3.48
	典型 Typical	2.83	3.42
	荒漠 Desert	1.52	1.68
COM	草甸 Meadow	1.65	1.97
	典型 Typical	2.60	4.55
	荒漠 Desert	1.51	5.81
LAB	草甸 Meadow	2.02	1.97
	典型 Typical	3.92	4.55
	荒漠 Desert	3.63	5.81
GLI	草甸 Meadow	1.64	1.29
	典型 Typical	5.64	6.46
	荒漠 Desert	2.97	4.28
WI	草甸 Meadow	3.85	7.62
	典型 Typical	4.54	3.76
	荒漠 Desert	2.36	2.77

植被指数全称如表1所列; 下同。
Full names of vegetation are the same as those in Table 1; this is applicable for the following figures and tables as well.

分高于 90% (图 2)。草甸草地类型中, ExG 植被指数的二分像元模型准确率最高, 为 93.21%, 其他的均高于 90%; 典型草地类型中, CIVE 植被指数的二分像元模型准确率最高, 为 92.18%, WI 植被指数的二分像元模型准确率低于 90%, 其他的均高于 90%; 荒漠草地类型中, 各植被指数的二分像元模型准确率均高于 90%, 无明显差异。草甸草地和典型草地下的二分像元模型精确率和召回率普遍高于荒漠草

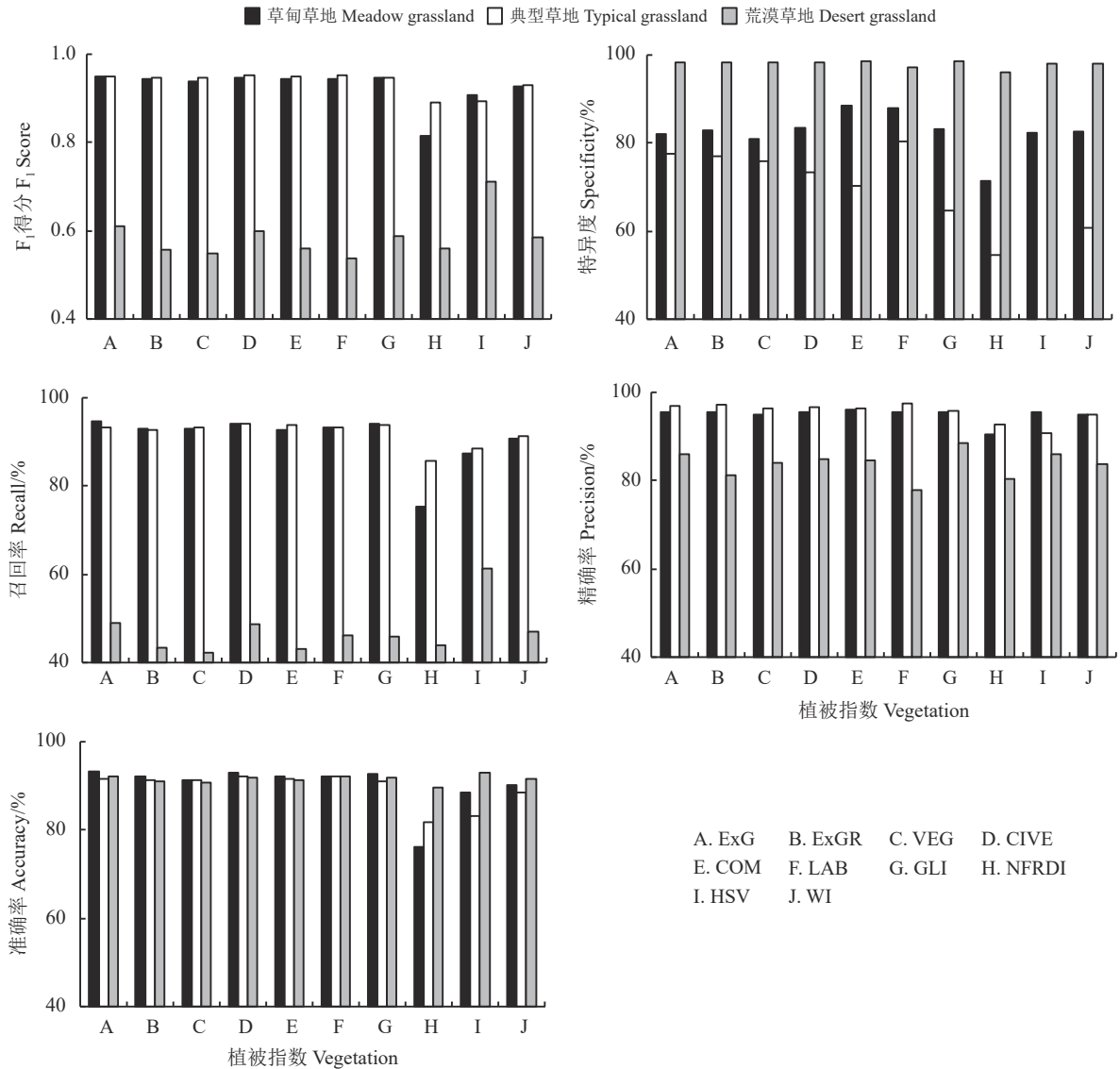


图 2 基于植被指数的像元二分模型的精度评价结果

Figure 2 The accuracy of the dimidiate pixel model based on vegetation index

地,说明这些植被指数对于荒漠草地的二分像元模型植被部分通常具有较差的估测性能。从草甸草地和典型草地类型来看,各植被指数构建的二分像元模型对于植被部分具有较高的精度,精确率均高于94%,召回率均高于90%。从荒漠草地类型来看,所有植被指数的二分像元模型对于植被部分的估测精度均偏低,精确率大部分在85%以下,召回率大部分在50%以下。对比另外两种草地类型,这表明现有的这些植被指数具有比较明显的缺陷,即具有较差的荒漠草地植被识别效果。植被指数关于荒漠草地类型的特异度非常高,特异度均在96%以上,最大达到98.4%,而关于草甸草地和典型草地两种类型的特异度均偏低,典型草地的特异度最低。

F_1 得分是精确率和灵敏度的调和平均数,能够对植被指数构建的二分像元模型的估测精度进行综合评价, F_1 得分越接近1,则说明这种方法的二分像元模型精度越高。草甸草地类型的 F_1 得分最高的为ExG植被指数,超过0.95,其他植被指数的 F_1 得分均在0.90以上;典型草地类型中,各植被指数的 F_1 得分均在0.93以上;荒漠草地类型中,各植被指数的 F_1 得分均处于较低的数值,大多的 F_1 得分低于0.6。

2.3 DVI 精度评价

DVI 指数的植被盖度估测具有较小的误差(图3), MAE 和 RMSE 均为3%;准确率达到93%,为所有植

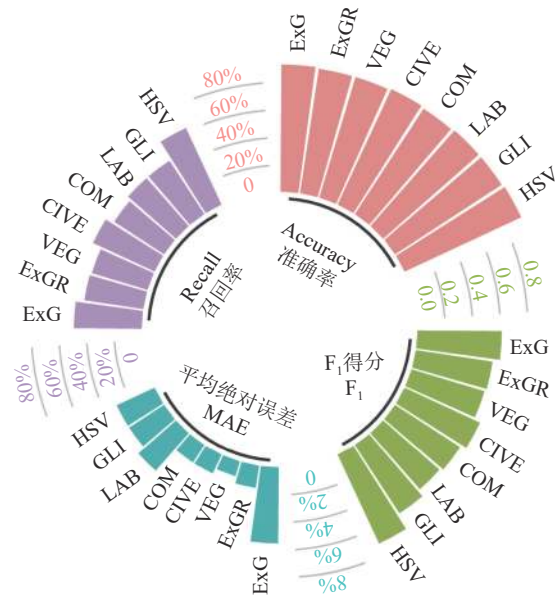


图 3 荒漠草地的植被盖度估测精度比较图
Figure 3 Comparison of accuracy of vegetation cover estimation in desert grasslands

被指数的最大值;精确率为 86%, 高于上述大多数植被指数;召回率高达 63%, 而其他植被指数均不及 50%, 与其他植被指数的差值最大达到 20%; F_1 得分达到 0.71, 而其他植被指数均在 0.60 以下。根据精度评价结果, DVI 植被指数相较于其他植被指数具有显著的荒漠草地植被盖度估测优势, 能够有效弥补传统植被指数对于荒漠草地植被盖度估测效果差的缺陷。

2.4 阈值分析

选取不同草地类型的所有图像, 分析各植被指数平均阈值差异, 结果如表 4 所列。草甸草地和典型草地类型的阈值比较接近。CIVE、GLI 植被指数的阈值相同, 变化幅度最小; ExG、ExGR、VEG 植被指数阈值波动在 0.01 以内, 变化幅度较弱; WI 植被指数的阈值变化为 0.03, 变化幅度弱; COM 植被指数的阈值变化为 0.06, 变化幅度较大; Lab 植被指数的阈值变化超过 1.00, 变化幅度最大。相对与其他两种草地类型, 荒漠草地类型的阈值差异较大。GLI 植被指数阈值差异为 0.01, 差异最小; CIVE 的阈值差异为 0.03, 差异较小; ExG 植被指数的阈值差异为 0.04~0.05, 差异较大; 其余植被指数阈值差异均大于 0.10, Lab 阈值差异最大, 超过 10。综上, 在进行阈值选取的过程中, GLI 和 CIVE 植被指数可以不必考虑草地类型的变化; ExG、ExGR、VEG、

表 4 不同草地类型阈值变化情况
Table 4 Changes of threshold under different types of grasslands

植被指数 Vegetation index	阈值 Threshold		
	草甸草地 Meadow	典型草地 Typical	荒漠草地 Desert
ExG	0.03	0.04	-0.01
ExGR	-0.04	-0.05	-0.26
VEG	1.11	1.10	0.97
CIVE	18.74	18.74	18.77
COM	6.37	6.31	6.23
Lab	-4.31	-2.95	8.17
GLI	0.02	0.02	-0.01
WI	-0.05	-0.02	0.18
DVI	—	—	-0.16

WI 等植被指数可以不考虑草甸草地和典型草地类型的变化, 但需要考虑荒漠草地类型的影响; COM 和 Lab 则需要考虑各种草地类型的影响。

3 讨论

本研究选取的 8 种植被指数对荒漠草地的植被盖度估测效果较差, 而 DVI 植被指数具有较高的估测精度, 这可能与植被指数的颜色空间特性和荒漠草地植被特征有关。通常, 植被指数是基于各自颜色空间, 组合运算各颜色通道以突显绿色与其他颜色的差异来达到分离绿色植被的效果^[28]。然而荒漠草地植被的绿度通常不如其他草地类型植被, 甚至一些植被呈现褐色或黄褐色, 同时荒漠草地非植被颜色更接近黄色, 植被和非植被部分难以从颜色层面区分^[29]。因此, 基于 RGB 颜色空间和 Lab 颜色空间的植被指数难以在荒漠草地发挥作用。基于 HSV 颜色空间构建的 DVI 植被指数避开了颜色通道这个难题, 从饱和度和明度两个通道区分植被与非植被区域, 更符合荒漠草地类型的植被特征。

本研究通过植被指数估测草地盖度, 将盖度估测结果与参考数据对比得到了不同植被指数的草地盖度估测效果差异。参考数据的可靠性是研究结果是否准确的关键因素之一, 传统的参考数据的获取方法主要有样方布设法, 即在样地区域内按照一

定规律或随机布设若干等大小的小样方框,取这些样方框内草地的平均盖度为参考数据,野外草地调查常用五点布样法布设样方。但是样方布设法终究只是获取了大范围草地区域的局部部位,样地的植被分布不均匀,则可能产生较大的误差,难以准确地代表整体样地的真实情况。故本研究对草地无人机图像整体进行人工处理,取最适结果作为参考数据。

误差统计反映了植被指数估测盖度值与参考盖度值之间的差异,能够一定程度上表示盖度估测效果的优劣。但是误差统计无法反映像元层面的估测效果,这样的评价是不全面的。如本研究中各植被指数的盖度估测误差均较小,但根据像元层面的精度评价结果来看,荒漠草地的盖度估测精度却很低。因此对各植被指数的盖度估测效果进行全面客观评价应综合考虑误差统计和二分类像元模型两个不同层面的结果。

综合误差统计和精度评价的结果来看,草甸草地和典型草地的结果较为一致,各植被指数均具有较高的植被盖度估测精度。草甸草地中,ExG 植被指数的盖度估测具有最高的精度和最小的误差,其 F_1 得分大于 0.95, MAE 为 1.65%, 其余植被指数 F_1 得分均大于 0.9, MAE 均小于 5%; 典型草地中,各植被指数的盖度估测精度均较高且无明显差异。各

植被指数均具有较低的荒漠草地盖度估测精度, F_1 得分通常低于 0.6, 而这一缺陷未在误差统计中表现出来。本研究提出的 DVI 植被指数很好地弥补了上述植被指数的缺陷,其荒漠草地植被盖度估测精度较高。

4 结论

本研究对比分析了 8 种植被指数在不同草地类型下的植被盖度估测效果差异,并提出了适用于荒漠草地植被盖度估测的植被指数 DVI。研究结果表明: VER、ExG、ExGR、GLI、CIVE、COM、WI 和 Lab 8 种植被指数对草甸草地和典型草地的盖度估测效果较好,精度较高。草甸草地中 ExG 植被指数盖度估测效果最好,典型草地中各植被指数无明显差异。8 种植被指数对荒漠草地植被盖度估测效果较差,精度较低。DVI 具有较高的荒漠草地植被盖度估测精度,能够有效弥补上述植被指数的缺陷。GLI 和 CIVE 植被指数的阈值对草地类型敏感性最弱,阈值的确定可不必考虑草地类型的影响; ExG、ExGR、VEG、WI 等植被指数的阈值对草甸草地和典型草地的变化敏感性较弱,但对荒漠草地的敏感性较强; COM 和 Lab 植被指数对草地类型的敏感性最强。

参考文献 References:

- [1] 贾坤,姚云军,魏香琴,高帅,江波,赵祥. 植被覆盖度遥感估算研究进展. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 774-782.
JIA K, YAO Y J, WEI X Q, GAO S, JIANG B, ZHAO X. A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(7): 774-782.
- [2] 赵威成,张红华,马福义,叶欣. 基于像元二分模型的地表植被覆盖度估算模块化设计与实现. *北京测绘*, 2020, 34(3): 285-288.
ZHAO W C, ZHANG H H, MA F Y, YE X. Modular design and implementation of vegetation coverage estimation based on dimidiate pixel model. *Beijing Surveying and Mapping*, 2020, 34(3): 285-288.
- [3] 葛静,孟宝平,杨淑霞,高金龙,冯琦胜,梁天刚,黄晓东,高新华,李文龙,张仁平,王云龙. 基于 UAV 技术和 MODIS 遥感数据的高寒草地盖度动态变化监测研究: 以黄河源东部地区为例. *草业学报*, 2017, 26(3): 1-12.
GE J, MENG B P, YANG S X, GAO J L, FENG Q S, LIANG T G, HUANG X D, GAO X H, LI W L, ZHANG R P, WANG Y L. Dynamic monitoring of alpine grassland coverage based on UAV technology and MODIS remote sensing data: A case study in the headwaters of the Yellow River. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(3): 1-12.
- [4] 冯家莉,刘凯,朱远辉,李勇,柳林,蒙琳. 无人机遥感在红树林资源调查中的应用. *热带地理*, 2015, 35(1): 35-42.
FENG J L, LIU K, ZHU Y H, LI Y, LIU L, MENG L. Application of unmanned aerial vehicles to mangrove resources monitoring. *Tropical Geography*, 2015, 35(1): 35-42.
- [5] 王光彦,姚坚,李登富,赵培. 低空无人机遥感在水利工程测绘中的应用研究. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(5): 113-115, 118.

- WANG G Y, YAO J, LI D F, ZHAO P. Study on application of remote sensing by unmanned aerial vehicle in hydraulic engineering survey. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2016, 39(5): 113-115, 118.
- [6] 纪景纯, 赵原, 邹晓娟, 宣可凡, 王伟鹏, 刘建立, 李晓鹏. 无人机遥感在农田信息监测中的应用进展. *土壤学报*, 2019, 56(4): 773-784.
- JI J C, ZHAO Y, ZOU X J, XUAN K F, WANG W P, LIU J L, LI X P. Advancement in application of UAV remote sensing to monitoring of farmlands. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 773-784.
- [7] 徐朋, 徐伟诚, 罗阳帆, 赵祚喜. 基于无人机可见光遥感影像的耕地精准分类方法研究. *中国农业科技导报*, 2019, 21(6): 79-86.
- XU P, XU W C, LUO Y F, ZHAO Z X. Precise classification of cultivated land based on visible remote sensing image of UAV. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(6): 79-86.
- [8] 丁雷龙, 李强子, 杜鑫, 田亦陈, 袁超. 基于无人机图像颜色指数的植被识别. *国土资源遥感*, 2016, 28(1): 78-86.
- DING L L, LI Q Z, DU X, TIAN Y C, YUAN C. Vegetation extraction method based on color indices from UAV images. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2016, 28(1): 78-86.
- [9] 刘艳慧, 蔡宗磊, 包妮沙, 刘善军. 基于无人机大样方草地植被覆盖度及生物量估算方法研究. *生态环境学报*, 2018, 27(11): 2023-2032.
- LIU Y H, CAI Z L, BAO N S, LIU S J. Research of grassland vegetation coverage and biomass estimation method based on major quadrat from UAV photogrammetry. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(11): 2023-2032.
- [10] 汪小钦, 王苗苗, 王绍强, 吴云东. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 152-159.
- WANG X Q, WANG M M, WANG S Q, WU Y D. Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 152-159.
- [11] FRANCISCO G R, SINDHUJA S, JOE M M, WON S L, JESPER R, REZA E. Comparison of two aerial imaging platforms for identification of Huanglongbing-infected citrus trees. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 91: 106-115.
- [12] 郭健. 基于植被指数和叶绿素荧光的总初级生产力估算. *北京测绘*, 2019, 33(4): 427-432.
- GUO J. Estimation of gross primary productivity based on vegetation index and chlorophyll fluorescence. *Beijing Surveying and Mapping*, 2019, 33(4): 427-432.
- [13] 武红旗, 范燕敏, 靳瑰丽, 夏小伟. 伊犁绢蒿荒漠草地植物光谱特征. *草业科学*, 2019, 36(7): 1765-1773.
- WU H Q, FAN Y M, JIN G L, XIA X W. Spectral characteristics of main plant in *Seriphidium transiliense* desert grassland. *Pratacultural Science*, 2019, 36(7): 1765-1773.
- [14] 冷若琳, 张瑶瑶, 谢健全, 李芙凝, 胥刚, 崔霞. 基于多光谱数据与小型无人机的甘南草地非生长季植被覆盖度. *草业科学*, 2019, 36(11): 2742-2751.
- LENG R L, ZHANG Y Y, XIE J Q, LI F N, XU G, CUI X. An analysis of fractional vegetation cover of the Gannan grassland in the nongrowing season based on multispectral data and small UAVs. *Pratacultural Science*, 2019, 36(11): 2742-2751.
- [15] 鲁军景, 孙雷刚, 黄文江. 作物病虫害遥感监测和预测预警研究进展. *遥感技术与应用*, 2019, 34(1): 21-32.
- LU J J, SUN L G, HUANG W J. Research progress in monitoring and forecasting of crop diseases and pests by remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(1): 21-32.
- [16] 李鹏飞, 郭小平, 顾清敏, 张昕, 冯昶栋, 郭光. 基于可见光植被指数的乌海市矿山排土场坡面植被覆盖信息提取研究. *北京林业大学学报*, 2020, 42(6): 102-112.
- LI P F, GUO X P, GU Q M, ZHANG X, FENG C D, GUO G. Vegetation coverage information extraction of mine dump slope in Wuhai City of Inner Mongolia based on visible vegetation index. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(6): 102-112.
- [17] 徐大伟. 呼伦贝尔草原区不同草地类型分布变化及分析. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2019.
- XU D W. Dynamic change and analysis of different grassland types distribution in the Hulunber grassland. PhD Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [18] HAGUE T, TILLET N D, WHEELER H. Automated crop and weed monitoring in widely spaced cereals. *Precision Agriculture*,

- 2006, 7(1): 21-32.
- [19] WOEBBECKE D M, MEYER G E, VON BARGEN K, MORTENSEN D A. Color indexes for weed identification under various soil, residue, and lighting condition. American Society of Agricultural Engineers Meeting, 1994, 38(1): 259-269.
- [20] CAMARGO N, JOAO. A combined Statistical-soft Computing Approach for Classification and Mapping Weed Species in Minimum-Tillage Systems. Lincoln: The University of Nebraska, 2004.
- [21] LOUHAICHI M, BORMAN M M, JOHNSON D E. Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. *Geocarto International*, 2001, 16(1): 65-70.
- [22] KATAOKA T, KANEKO T, OKAMOTO H, HATA S. Crop growth estimation system using machine vision. Kobe: Proceedings 2003 IEEE / ASME International Conference on Advanced Intelligent Merchatronics, 2003.
- [23] GUIJARRO M, PAJARES G, RIOMOROS I, HERRERA P J, BURGOSARTIZZU X P, RIBEIRO A. Automatic segmentation of relevant textures in agricultural images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 75(1): 75-83.
- [24] WOEBBECKE D M, MEYER G E, VONVARGEN K. Color indexes for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1995, 38: 259-269.
- [25] 牛亚晓, 张立元, 韩文霆. 基于 Lab 颜色空间的棉花覆盖度提取方法. 农业机械学报, 2018, 49(10): 240-249.
- NIU Y X, ZHANG L Y, HAN W T. Extraction methods of cotton coverage based on Lab color space. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(10): 240-249.
- [26] 许高建, 沈杰, 徐浩宇. 基于 Lab 颜色空间下的小麦赤霉病图像分割. 中国农业大学学报, 2021, 26(10): 149-156.
- XU G J, SHEN J, XU H J. Image segmentation of wheat scab based on Lab color space. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(10): 149-156.
- [27] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究. 北京: 中国科学院研究生院硕士学位论文, 2003.
- LI M M. The method of vegetation fraction estimation by remote sensing. Master Thesis. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [28] 周涛, 胡振琪, 韩佳政, 张浩. 基于无人机可见光影像的绿色植被提取. 中国环境科学, 2021, 41(5): 2380-2390.
- ZHOU T, HU Z Q, HAN J Z, ZHANG H. Green vegetation extraction based on visible light image of UAV. *China Environmental Science*, 2021, 41(5): 2380-2390.
- [29] 万炜, 肖生春, 陈小红, 滕泽宇, 丁爱军, 韩超, 颜长珍. 无人机遥感在野外植被盖度调查中的应用: 以阿拉善荒漠区灌木为例. 干旱区资源与环境, 2018, 32(9): 150-156.
- WAN W, XIAO S C, CHEN X H, TENG Z Y, DING A J, HAN C, YAN C Z. Application of unmanned aerial vehicles to field vegetation coverage survey: A study of shrubs on Alxa desert. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(9): 150-156.
- [30] CHEN J J, ZHAO X N, ZHANG H Z, QIN Y, YI S H. Evaluation of the accuracy of the field quadrat survey of alpine grassland fractional vegetation cover based on the satellite remote sensing pixel scale. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(11): 497.
- [31] CHEN J J, YI S H, QIN Y, WANG X Y. Improving estimates of fractional vegetation cover based on UAV in alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(8): 1922-1936.

(责任编辑 王芳)

如有印装质量问题, 请将原杂志寄回本刊编辑部, 由本部负责调换。