

DOI: 10.5846/stxb202203210685

初鼎晋, 贺康宁, 林莎, 左亚凡, 陈笑. 基于遥感与实地调查对潜在可造林区乔木林和灌草地的比较. 生态学报, 2022, 42(18): 7362-7371.

Chu D J, He K N, Lin S, Zuo Y F, Chen X. Comparison of forest and shrublands in potentially afforested areas based on remote sensing and field surveys. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7362-7371.

基于遥感与实地调查对潜在可造林区乔木林和灌草地的比较

初鼎晋^{1,2,3}, 贺康宁^{1,2,3,*}, 林莎^{1,2,3}, 左亚凡^{1,2,3}, 陈笑^{1,2,3}

1 北京林业大学水土保持学院, 水土保持国家林业局重点实验室 北京 100083

2 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083

3 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083

摘要: 气候变化引起祁连山东部地区可适植被类型改变, 探究植被类型转换的效果对生态环境可持续发展十分重要, 但其转换方式及效果仍有待研究, 此外传统植被调查的方法有诸多局限性, 不能满足大尺度持续的监测, 而遥感监测可以弥补这一劣势。基于遥感和样地调查以祁连山生态交错区甘沟小流域为研究地点, 对原有灌草地和植树造林的乔木林进行比较, 探究二者土壤理化性质、草本植物多样性及植被归一化指数 (NDVI), 增强植被指数 (EVI), 植被水分指数 (NDMI), 水分胁迫指数 (MSI), 叶绿素红外指数 (CI), 陆地叶绿素指数 (MTCI) 的差异。结果表明仅有水分相关指标有显著性差异, 其中造林造成浅层土壤水分显著降低 ($P < 0.01$), 4—5 月份 MSI 和 NDMI 造林区植被水分高于灌草地 ($P < 0.01$), 7—8 月份两种植被类型水分指数以及其余指数无显著性差异, 另外造林后的土壤有机质出现了轻微下降 ($P > 0.05$)。遥感指数和样地调查指标相关性分析中, 土壤有机质和 Shannon 多样性指数与 CI 成正相关 ($P < 0.05$), 植被覆盖度与 NDMI 成负相关 ($P < 0.05$), 由于覆盖度较低的灌草地 EVI 和 NDVI 被高估, 覆盖度和 EVI 与 NDVI 相关性不显著。综合遥感指数和实地调查分析, 短时间造林时间内乔木林牺牲了部分土壤水分, 提高了植被盖度, 且目前造林并未对当地环境产生胁迫, 但对生态环境的改善并不明显。基于遥感和样地调查揭示了潜在植被类型转换区原有灌草地和植树造林区的差异, 并探讨遥感在小尺度范围内植被监测上的适用性, 为植被建设和遥感监测植被状况提供借鉴。

关键词: 生态修复; 植被指数; 哨兵 2 (sentinel-2); Google earth engine (GEE); 灌草地

Comparison of forest and shrublands in potentially afforested areas based on remote sensing and field surveys

CHU Dingjin^{1,2,3}, HE Kangning^{1,2,3,*}, LIN Sha^{1,2,3}, ZUO Yafan^{1,2,3}, CHEN Xiao^{1,2,3}

1 School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China

2 Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China

3 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing 100083, China

Abstract: Climate change has shifted adaptable species in Qilian Mountains, and it is necessary to explore the effect of conversion of vegetation types. In addition, the limitations of traditional vegetation survey methods are that they can not continuously monitor at large-scale, while remote sensing monitoring can go over this disadvantages. Based on remote sensing and plot survey, this paper explored the differences of soil properties, herb diversity and normalized difference vegetation index (NDVI), enhanced vegetation index (EVI), normalized difference moisture index (NDMI), moisture

基金项目: 2020 年度青海省科技厅成果转化专项《祁连山林草植被结构调整与功能提升试验示范》(2020-SF-144)

收稿日期: 2022-03-21; **采用日期:** 2022-05-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hkn@bjfu.edu.cn

stress index (MSI), chlorophyll index (CI), meris terrestrial chlorophyll index (MTCI) between the initial shrublands and the forest afforested in the Gangou Watershed. In the short-period afforestation areas, the results showed that only the index related to water were significantly different. The soil moisture was decreased ($P < 0.01$) after afforestation. The MSI and NDMI detected from April to May proved that the water of forest was higher ($P < 0.01$) than shrublands. The water related index in July to August and remaining index without significant difference between the two vegetation types. Soil organic matter decreased slightly after afforestation ($P > 0.05$). In the correlation between vegetation index and field index, soil organic matter and Shannon index were positively correlated with CI ($P < 0.05$), vegetation cover was negatively correlated with NDMI ($P < 0.05$), and the rest of the correlation was poor, the biomass of shrublands was overestimated relative to the tree on EVI and NDVI. In conclusion, the current afforestation didn't significantly improve the ecological environment and has consumed water to support tree to grow without pressure. Results of this study reveal the effect of afforestation in the initial shrublands and we discuss the applicability of remote sensing on vegetation monitoring, providing guide for the plantation and monitoring of remote sensing on vegetation in a small scale.

Key Words: ecological restoration; vegetation index; sentinel-2; google earth engine; shrublands

受气候变化影响,祁连山东部温度和降雨均逐年上升^[1],为适应其引起的立地条件变化,在立地条件改善区进行植树造林十分必要^[2]。目前已有研究揭示在耕地和裸地进行造林的效果差异^[3-6],但鲜有在灌木林地上进行植树造林的研究,本次研究区位于祁连山甘沟小流域,原有土地利用类型为灌草地,成为潜在的灌草转为森林的区域,为探究该地区植被转换生态环境效益,本研究对造林地和原有灌草地两种植被类型进行比较。

传统造林效果评价的研究方法集中在相同区域造林地与未经造地土壤理化性质、物种多样性、生物量等指标的比较^[3, 5-10],此方法需要耗费大量人力和物力且无法形成长时间大尺度观测,而遥感技术的发展弥补了传统调查的不足,以其高时空分辨率、全球尺度监测的优势被广泛应用于植被调查^[1, 11-12],植被水分监测^[13, 14]。特别是具有高时空分辨率以及其易于监测植被健康的红边波段^[15, 16]的哨兵 2 号 (Sentinel-2) 数据的出现,促进了遥感在高精度植被健康状况监测的应用^[11, 13, 16-18]。目前已有大量用于监测植被状况的遥感指数如归一化植被指数 (NDVI), 增强植被指数 (EVI), 水分胁迫指数 (MSI), 植被水分指数 (NDMI), 另外由哨兵数据红外波段衍生的准确度较高的陆地叶绿素指数 (MTCI)^[17, 19], 和叶绿素红外指数 (CI)^[18] 也被验证和应用。但传统手段对遥感数据下载、处理等环节较为繁琐,限制其广泛应用,近年来随着 Google earth engine (GEE) 遥感云处理平台的发展,其以海量数据库、云端处理数据无需下载及可重复的优势^[20],加速了遥感在植被监测中的应用。

本文基于 GEE 平台的高精度 sentinel-2 数据计算获取的植被指数并结合传统实地调查方法对门源地区灌草地造林与未造林地两种植被类型在短时间内生态环境状况进行比较,揭示短时间造林地与原有灌草地之间的差异,为森林植树管理及监测提供借鉴,并探讨遥感在森林监测中的应用不足和前景。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本次研究位于青海省东部门源县甘沟小流域 (37.5°—38°N, 101°—102°E), 海拔 2 800—3 100 m, 属高原大陆性气候, 光照时间长, 日照强烈, 多年平均气温 2.8—7.9°C、降水量 360—540 mm (集中在 6—9 月)、蒸发量 1100—1800mm。土壤垂直地带分布以栗钙土为主。甘沟地区原先有稀疏乔木, 但被当地居民破坏形成灌草地用于放牧, 为改善当地生态环境, 于 2019 年开始对灌木地区进行幼苗栽植造林, 造林树种有青海云杉 (*Picea crassifolia*), 白桦 (*Betula platyphylla* Suk), 小叶杨 (*Populus simonii*); 原有灌木种类为金露梅 (*Potentilla fruticosa*), 银露梅 (*Potentilla glabra*), 沙棘 (*Hippophae rhamnoides*), 小檗 (*Berberis thunbergii*), 金银忍冬

(*Lonicera maackii*), 鲜卑花(*Sibiraea laevigata*)。

1.2 样地调查

本次调查于 2021 年 7 月份进行,共调查 13 个样方,6 个灌草地和 7 个乔木林地(见表 1),样地大小为 24m×24m。所有样地均设置在阴坡,并用 GPS 定位每一个样地的坐标、海拔、坡向且以 5m 等高线进行校准,地理坐标系为 WGS1984(EPG:4326)。每个样地随机取两个 5m×5m 的灌木样方对灌木的体积进行测算,五个 1m×1m 样方进行草本植物多样性调查并测定土壤水分,一个区域对 0—20,20—40,40—60cm 三层取土分别测量其有机质含量。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic Information of plots

植被类型 Vegetation type	样地号 Plot code	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect/(°)	海拔 Altitude/m	灌木		胸径 DBH/cm	高度 Height/m	冠幅 Crown area/m ²	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)
					盖度 Cover/%	高度 Height/m				
乔木林 Forest	T1	15.28	333.42	2880.88	35.52	0.50	2.17	1.40	0.59	937.50
	T2	29.56	276.64	2890.00	74.40	0.92	2.89	1.66	1.17	260.42
	T3	22.87	15.97	2927.42	59.54	0.58	2.37	1.71	0.33	954.86
	T4	28.74	355.40	2874.54	74.84	0.66	3.00	2.03	1.11	2777.78
	T5	32.90	27.74	2895.96	50.02	0.67	4.05	2.44	2.16	468.75
	T6	36.53	30.53	2923.00	52.06	0.69	3.24	2.02	1.59	746.53
	T7	22.55	3.15	2897.39	75.22	0.80	8.42	5.07	3.81	1041.67
灌草地 Shrublands	G1	13.65	347.23	2973.00	12.27	0.27	/	/	/	/
	G2	15.97	357.95	2961.72	24.11	0.24	/	/	/	/
	G3	15.36	341.38	2857.31	19.63	0.32	/	/	/	/
	G4	34.29	277.82	3015.24	87.69	0.92	/	/	/	/
	G5	30.84	12.13	2945.13	27.78	0.43	/	/	/	/
	G6	36.79	30.60	2983.20	71.32	0.88	/	/	/	/

1.3 土壤分析

土壤水分用 TRIME-PICO 64/32 TDR 便携式土壤水分测量仪测量,采样土壤采用 GB7858-87 标准进行土壤有机质测量。

1.4 遥感数据获取及处理

基于 Google Earth Engine(GEE)平台获取的 Sentinel-2 数据 ID:(COPERNICUS/S2_SR),具有 5 天的重返周期,且大部分波段精度为 10m(见表 2),为小尺度范围内监测提供了更多可能。数据经 CFMask 算法^[21]生成的 QA 波段进行掩膜去云。该地区 7—8 月为植物生长季降水和温度均最高,4—5 月为植物发芽季,因此采用 NDMI 和 MSI 在每年 4—5 月最小和最大值,在 7—8 月最大和最小值的三年六个值对植物水分状况进行监测,其余指数均采用最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)消除误差获取 2019、2020、2021 三年的年最大值。

表 2 哨兵 2 数据基本信息

Table 2 Basic information of sentinel-2

波段 Band	波段宽度 Band width/μm		空间分辨率 Resolution	波段 Band	波段宽度 Band width/μm		空间分辨率 Resolution
	Sentinel-2A	Sentinel-2B			Sentinel-2A	Sentinel-2B	
B02-Blue	0.440—0.538	0.438—0.532	10m	B07-Red edge	0.769—0.797	0.766—0.794	20m
B03-Green	0.537—0.582	0.536—0.582	10m	B08-NIR	0.760—0.908	0.774—0.907	10m
B04-Red	0.646—0.684	0.646—0.685	10m	B8A-Narrow NIR	0.848—0.881	0.848—0.880	20m
B05-Red edge	0.694—0.713	0.694—0.714	20m	B11-SWIR	1.539—1.682	1.538—1.679	20m
B06-Red edge	0.731—0.749	0.730—0.748	20m	B12-SWIR	2.078—2.320	2.065—2.303	20m

1.5 数据计算及分析

1.5.1 草本多样性计算

首先计算草本 Margalef 丰富度指数、Shannon 多样性指数与 Pielou 均匀度指数用来指示 α 多样性的分布,计算公式如下:

Margalef 丰富度指数

$$R = \frac{(S - 1)}{\ln N}$$

Shannon 多样性指数

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

Pielou 均匀度指数

$$E = \frac{H'}{\ln S}$$

R 为 Margalef 丰富度指数, H' 为 Shannon 多样性指数, E 为 Pielou 均匀度指数, N 为样地内个体数量, S 为样地内的总物种数, p_i 为第 i 物种所占比例。

1.5.2 遥感指数计算

在 GEE 平台上基于地理坐标系为 WGS1984 (EPSG:4326) 获取的实地勘测的坐标进行掩膜取值, 获得 15 个样地的三个类别 6 个植被指数, 分别为用以表征植被覆盖情况的结构指数: 植被归一化指数 (NDVI)^[22], 增强植被指数 (EVI)^[23]; 用以表征植被水分状况的水分指数: 植被水分指数 (NDMI)^[24], 水分胁迫指数 (MSI)^[25]; 用以表征植被健康状况的红外波段衍生的理化指数: 叶绿素红外指数 (CI) 用于观测冠层内的叶绿素含量^[18, 26] 和用以观测绿素含量的陆地叶绿素指数 (MTCI)^[19], 计算公式见表 3。

表 3 植被指数及其计算公式

Table 3 Vegetable indices and their formulas

指数类型 Index type	植被指数 Vegetation index	计算公式 Formula	哨兵 2 适用波段 S-2 bands used
结构指数 Structural index	NDVI	$(\rho\text{NIR} - \rho\text{R}) / (\rho\text{NIR} + \rho\text{R})$	(B6-B4)/(B6+B4)
	EVI	$2.5 \times (\rho\text{NIR} - \rho\text{R}) / (1 + \rho\text{NIR} + 6 \times \rho\text{R} - 7.5 \times \rho\text{Blue})$	$2.5 \times (B08 - B04) / (1 + B08 + 6 \times B04 - 7.5 \times B02)$
水分指数 Mositure index	NDMI	$(\rho\text{NIR} - \rho\text{SWIR2}) / (\rho\text{NIR} + \rho\text{SWIR2})$	(B08-B11)/(B08+B11)
	MSI	$\rho\text{SWIR2} / \rho\text{NIR}$	B11/B08
叶绿素指数 Chlorophyll index	CI	$(\rho\text{NIR} - \rho\text{Red1}) / (\rho\text{NIR} - \rho\text{R})$	(B08-B05)/(B08-B04)
	MTCI	$(\rho\text{NIR} - \rho\text{Red1}) / (\rho\text{Red1} - \rho\text{Red})$	(B6-B5)/(B5-B4)

NDVI: 归一化植被指数; EVI: 增强植被指数; NDMI: 植被水分指数; MTCI: 陆地叶绿素指数; MSI: 水分胁迫指数; CI: 叶绿素红外指数

1.5.3 数据分析

分别比较乔木林地和灌草地在土壤含水量, 土壤有机质含量, 草本植物多样性, NDVI, EVI, NDMI, MSI, CI, MTCI 上的差异性 ($P < 0.05$), 利用 Shapiro ($P > 0.05$) 检验其正态性, 通过检验使用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 未通过使用 Wilcoxon 分析, 数据以箱线图和柱状图并标有 P 值和使用方法呈现。以上数据的处理及画图和数据分析均在 R 中 stats 包^[27] tidyverse 包^[28] 中进行。

2 结果

2.1 灌草地与乔木林的植被指数的差异

比较灌草地和乔木林近三年的植被指数算术平均值, 仅有水分指数在两种植被类型比较中出现显著性差异, 其中 4—5 月份 MSI 灌木林大于 ($P < 0.01$) 乔木林, 分别为 1.69, 1.55; NDMI 指数中乔木林大于灌草地 ($P <$

0.01)分别为-0.213,灌木为-0.253。7—8月份水分指数灌草地和乔木林基本相同,NDMI分别为0.322,0.325,MSI分别为0.514,0.510。结构指数和叶绿素指数中灌草与乔木林之间无显著差异($P>0.05$),乔木林和灌木林的NDVI分别为0.836,0.840,EVI分别为0.693,0.714,两植被类型的结构指数均属于植被覆盖高的范围,但乔木还有较大的生长空间,而灌草地基本饱和。叶绿素指数中,MTCI乔木林为-0.702,灌草地为-0.688,CI乔木为-0.879,灌木为-0.844。其分布见图1。

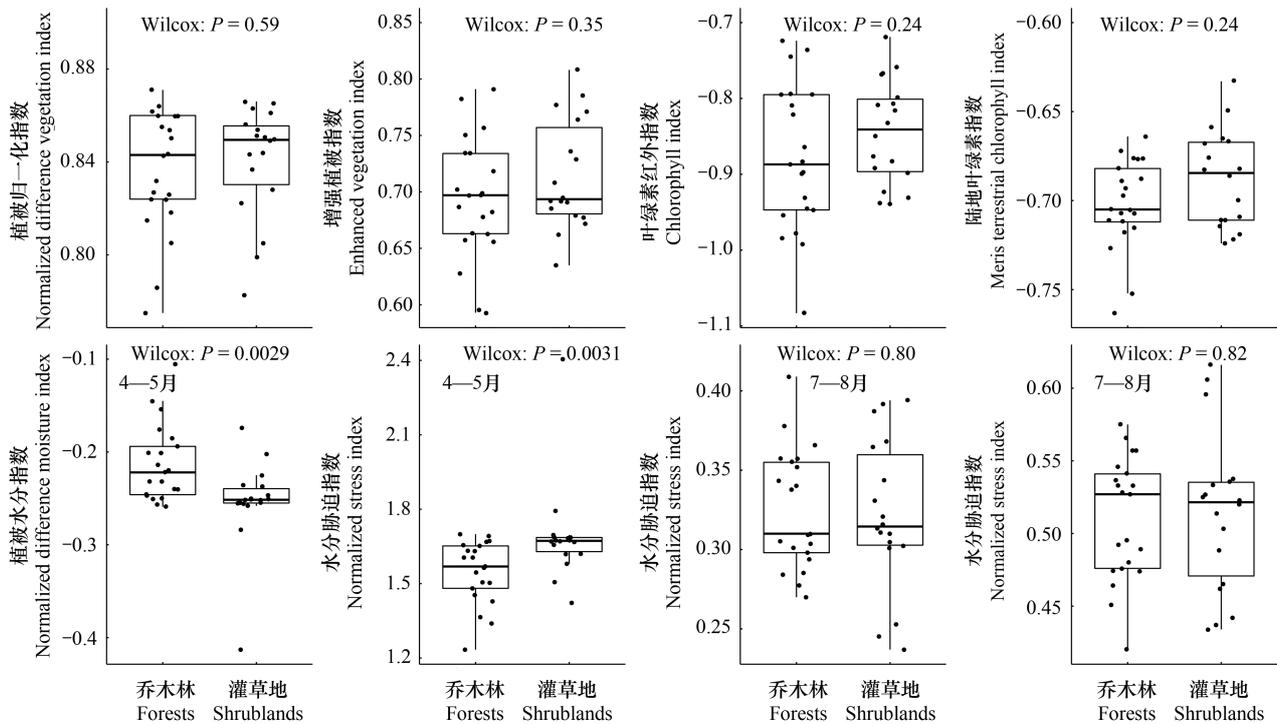


图1 灌草地与乔木林遥感指数

Fig.1 Vegetation index between forests and shrublands

2.2 灌草地与乔木林调查指标的差异

比较灌草地和乔木林的实地调查指标的算术平均值,含水率灌草地显著($P<0.01$)高于林地,林地和灌草地分别为33.35%,31.60%。土壤有机质灌草地略微高于乔木林($P>0.05$)灌草地和乔木林分别为114.48 g/kg,为93.51g/kg。两种植被类型土壤有机质在0—20cm,20—40cm,40—60cm分别为灌草地(137.43 g/kg,101.15 g/kg,81.69 g/kg)和乔木林(103.28 g/kg,101.15 g/kg,81.69 g/kg),灌草地均高于乔木林且均随着深度的增加而减小。Margalef丰富度指数,Shannon多样性指数和Pielou均匀度指数草地和灌草地均无显著差异,灌草地和乔木林的Margalef丰富度指数分别为1.76,1.80;shannon多样性指数分别为1.67,1.77;Pielou均匀度指数分别为0.69,0.73。其分布见图2。

2.3 植被指数与实地指标的相关性

所有指标相关性分析表明(图3),植被覆盖度与MSI成负相关与NDMI成正相关($P<0.05$)。另外CI指数与土壤有机质和Shannon多样性指数均显著正相关为0.61($P<0.05$)。Shannon多样性指数与MSI负相关为-0.60($P<0.05$),其余植被指数与实地指标不相关($P>0.05$)。通过筛查各指数发现,EVI和NDVI与植被覆盖度其相关系数较低是由于覆盖度较低的灌草地具有较高的植被指数值(图4)。

3 讨论

3.1 造林对水分的影响

水分是限制树木生长的重要因素,目前大量造林失败由于土壤水分的缺失^[1,3],本文通过遥感指数观测

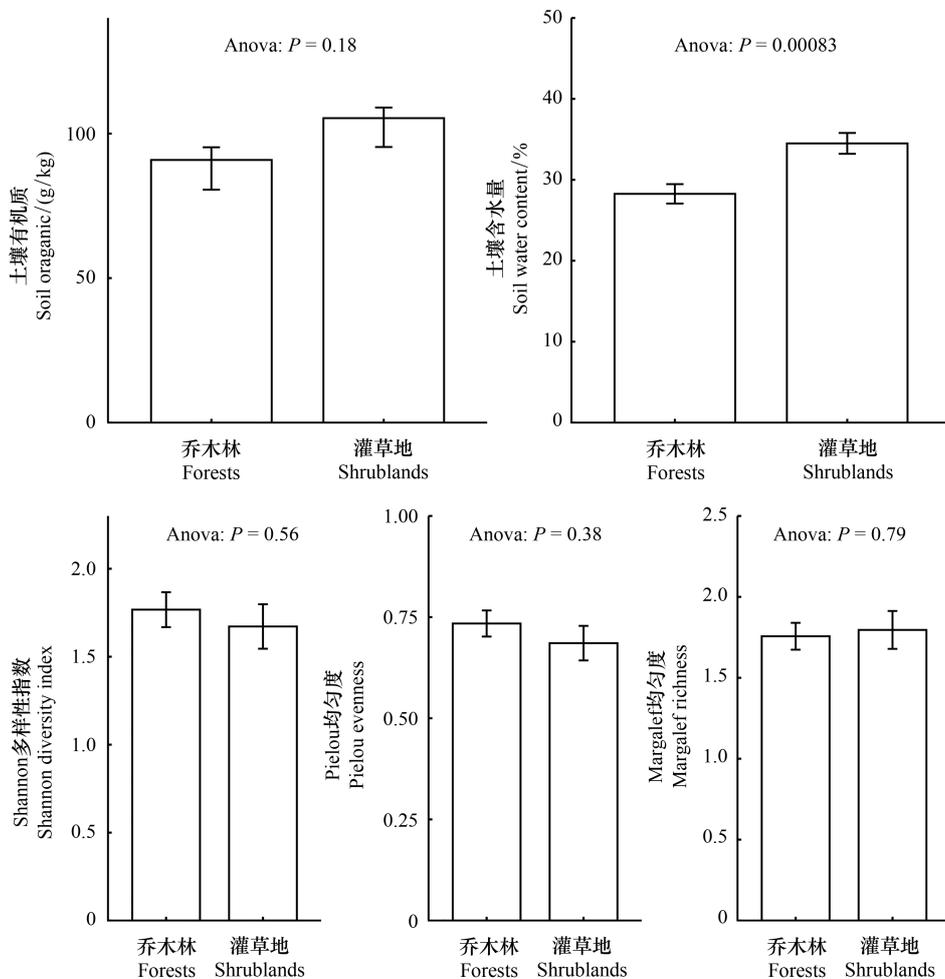


图2 灌草地与乔木林调查指标

Fig.2 Survey index between forests and shrublands

的植被水分发现,4—5月份,灌木的含水量显著低于乔木,而7—8月份两种植被类型水分基本相同,这可能是由于,4—5月份降雨不充沛条件下,灌草比乔木耗水少^[29]。7月份的实地调查发现灌木的土壤水分显著高于乔木林,但其植被水分基本相同,造成这种现象可能由于两个原因:一是灌丛相对于乔木林倾向于使用深层地下水^[30],而本次只对土壤浅层水分进行了测定,二是可能由于乔木相对于灌木需要更多水分生长或者是因为乔木林的盖度普遍高于灌木林,耗水较多,但王凯博等^[4]发现灌草地的土壤水分较乔木林更低,与本研究结果相悖,可能由于其研究的森林郁闭度较高蓄存更多的水分,而本次研究树木尚未郁闭,太阳辐射强,导致土壤水分较低。另外也有研究表明过度造林会造成土壤水分的干化并且随着时间推移效果会加剧^[3, 31],本次研究仅发现乔木林浅层土壤水较低,且并未发现干化现象,表明现有短时间造林下土壤水分并未成为造林区树木生长的限制条件,且植被也并未遭受水分胁迫。

3.2 造林对植被状况的影响

土壤是植物生长的基础,也是植物对其生长环境的反馈,良好的土壤环境能实现造林的健康生长。已有研究表明植树造林可以提高土壤有机质的含量^[5-6],但其研究多集中在原有农田或草地等土壤相对贫瘠地区。在天然的森林和灌木中两种植被类型土壤有机质含量并不明确且受诸多环境影响^[8, 32],Hong等^[7]发现植树造林对土壤有机质的效应由原有区域土壤有机质含量决定,一般表现为土壤贫瘠地区增加而土壤肥沃地区减少,本次研究区原有灌草地土壤有机质算术平均值为114.48g/kg属于有机质丰富地区,造林后出现有机质减少与其研究结果一致,但造林对土壤有机质的影响无法抵消其将来对整个生态环境的积极作用。

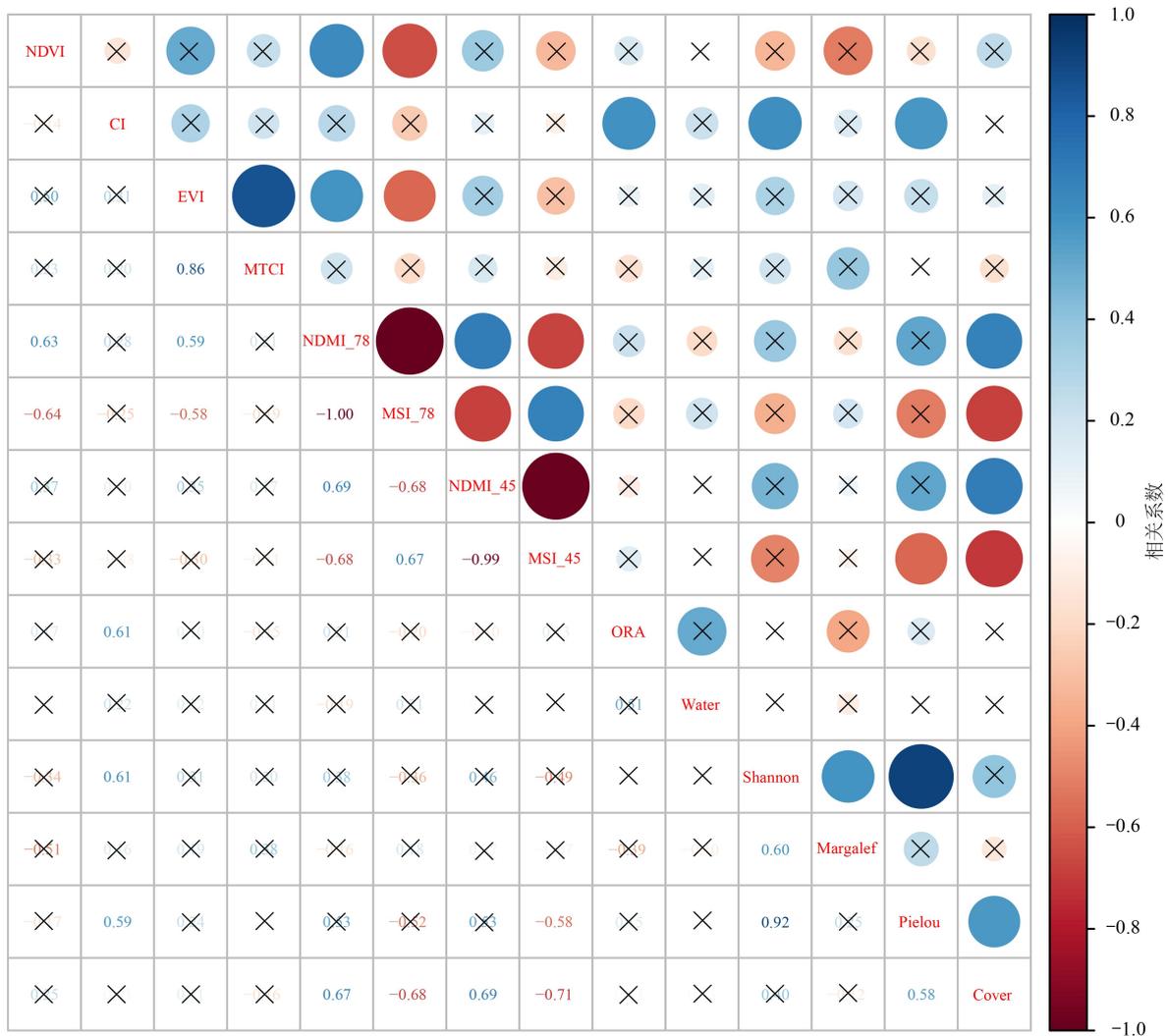


图 3 各指标之间相关系数矩阵

Fig.3 The correlation matrix between each index

×代表相关性不显著($P>0.05$),无×代表相关性显著($P<0.05$) Water 代表土壤含水量,ORA 代表土壤有机质, Shannon 代表 Shannon 多样性指数,Margalef 代表 Margalef 丰富度指数,Pielou 代表 Pielou 均匀度指数,Cover 代表植被覆盖度,NDVI 代表归一化植被指数;EVI 代表增强植被指数;NDMI_78 代表 7 到 8 月份植被水分指数;NDMI_45 代表 4 到 5 月份植被水分指数;MSI_45 代表 4 到 5 月水分胁迫指数;MSI_78 代表 7 到 8 月水分胁迫指数;MTCI 代表陆地叶绿素指数; CI 代表叶绿素红外指数

草本多样性受诸多因素影响,Bremer 等^[33]通过全球荟萃分析发现在非退化土地进行造林会降低其草本多样性,但其影响还受树木年龄、气候条件、造林措施等诸多因素影响。本研究树木尚处于幼林阶段未形成郁闭对草本获取资源的影响较小^[34],从而草本多样性未发生显著降低,这也从另一方面证明该地区目前资源条件可以支持乔木生长而不影响其他植被生长。遥感监测中,反应植被健康的遥感指数并未发生显著性差异,结构性指数中两者基本相同,而叶绿素灌草地略高于乔木林($P>0.05$),可能由于乔木林尚未郁闭木质部分占比过大影响监测效果。因此从以上结果可以得出现阶段短时间造林对原有植被和环境并未产生负效应。

3.3 遥感对森林的监测

遥感技术在森林状况监测的发展克服了传统森林调查的不足,能够实现及时大尺度的森林监测,如森林退化^[12]和水分的胁迫^[13],但由于遥感数据时空精度的问题限制其在大尺度范围的应用,但随着 GEE 的发展减化了遥感应用的繁琐步骤,以及 sentinel-2 高精度开源数据的出现提高了小尺度遥感监测的精确性,为小尺

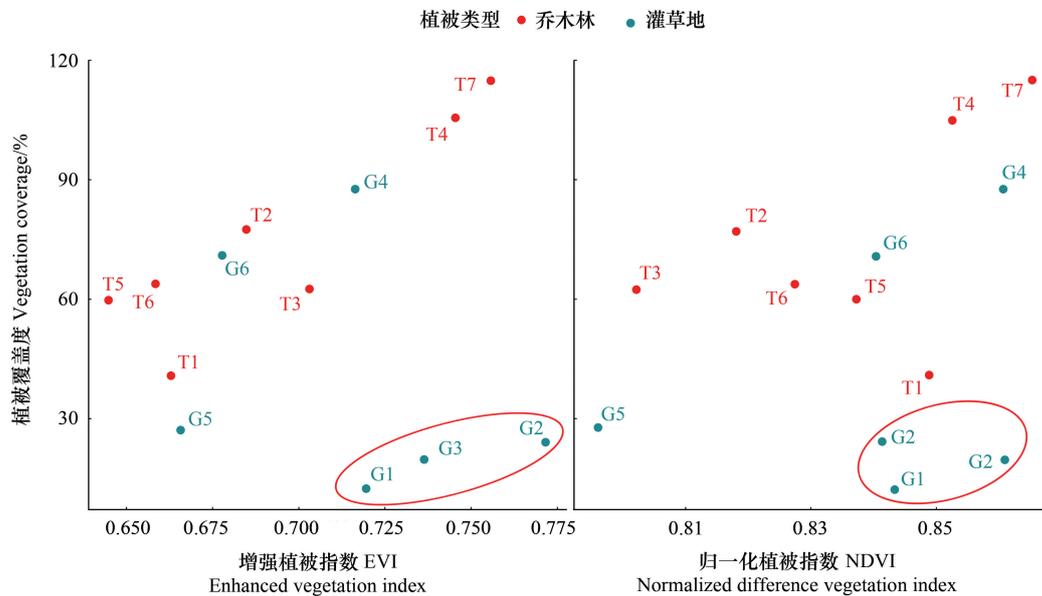


图 4 EVI 和 NDVI 分别与植被覆盖度的变化(红圈表指数值偏高)

Fig.4 Relationship between vegetation cover with EVI and NDVI (Red ellipse represent the value of index is higher)

度监测提供了便利。本次以单样地进行皮尔逊相关分析发现 CI 与土壤有机质和 Shannon 多样性指数均成显著正相关,可能由于土壤有机质和生物多样性能够为植被提供较好的生存环境因而植被具有较强的光合作用能力,但由于本次研究样本量和区域性限制其关系还需进一步验证。另外 EVI 和 NDVI 高估了灌草地植被盖度,可能由于两方面原因,一方面乔木年龄过小,叶面积指数较小,造成了其主要以树干为主的生物量难以被监测,另一方面本次研究对草本的生物量没有进行准确估测,灌草地内大量的草本造成 EVI 和 NDVI 偏大。NDVI 和 EVI 同为植被结构指数中两种植被类型比较发现,中位数表现有差异,这可能由于 NDVI 在植被茂密地区易发生过饱和现象,而 EVI 能在饱和区域发现差异^[23],灌草地的郁闭度较低,无法充分利用 EVI 的特点而造成此差异,因此在不同的植被类型和生长阶段应慎重考虑不同指数的应用特性再进行选择。在水分指数中均未发现土壤水分与遥感监测植被水分的关系,可能由于该地区目前水分条件较好,土壤水分的变化对植被水分影响较小^[25]。综上可得出,遥感指数对植被的监测受植被类型和土壤环境上及其他因素仍有较多的不确定性^[17, 35],在小尺度上的应用分析仍需进一步研究。

4 结论

本论文结合遥感指数和实地调查指标对灌草地和灌草地栽植的乔木林进行比较,为潜在植被类型转换地区植树造林提供了借鉴。研究区除水分相关的遥感指数和调查指标存在显著性差异外,其余指标基本相同,通过植被叶绿素和结构指数发现乔木林生长并没有受到影响,草本多样性未发生降低也证明该地区资源条件能够支持乔木生长,表明该地区短时间造林通过牺牲一部分土壤水分提高了植被盖度,并维持了生态系统的稳定,但其对生态环境改善并不明显。

本次研究验证了遥感技术在小尺度范围内监测植被状况的可行性,对于遥感监测的不确定性进行了分析,为后续遥感植被监测提供经验。以后遥感植被监测应充分发挥哨兵系列等高频率、高精度数据以及 GEE 等云处理平台,结合不同指标降低干扰以便能够更加准确的对植被进行监测。

参考文献 (References):

- [1] Wang F, Pan X B, Gerlein Safdi C, Cao X M, Wang S, Gu L H, Wang D F, Lu Q. Vegetation restoration in Northern China: A contrasted

- picture. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(6): 669-676.
- [2] Zhang L, Sun P S, Huettmann F, Liu S R. Where should China practice forestry in a warming world? *Global change biology*, 2022, 28(7): 2461-2475.
- [3] Deng L, Yan W M, Zhang Y W, Shangguan Z P. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration; Evidence from northern China. *Forest Ecology and Management*, 2016, 366:1-10.
- [4] 王凯博, 时伟宇, 上官周平. 黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 80-86.
- [5] Chen L F, He Z B, Zhu X, Du J, Yang J J, Li J. Impacts of afforestation on plant diversity, soil properties, and soil organic carbon storage in a semi-arid grassland of northwestern China. *Catena*, 2016, 147:300-307.
- [6] Shi S W, Han P F, Zhang P, Ding F, Ma C L. The impact of afforestation on soil organic carbon sequestration on the Qinghai Plateau, China. *PLoS One*, 2015, 10(2): e0116591.
- [7] Hong S B, Yin G D, Piao S L, Dybzinski R, Cong N, Li X Y, Wang K, Peñuelas J, Zeng H, Chen A P. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation. *Nature Sustainability*, 2020, 3(9): 694-700.
- [8] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems; New estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [9] Crouzeilles R, Curran M, Ferreira M S, Lindenmayer D B, Grelle C E V, Rey Benayas J M. A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success. *Nature communications*, 2016, 7(1): 11666.
- [10] Schrumpf M, Schulze E D, Kaiser K, Schumacher J. How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences*, 2011, 8(5): 1193-1212.
- [11] Puliti S, Breidenbach J, Schumacher J, Hauglin M, Klingenberg T F, Astrup R. Above-ground biomass change estimation using national forest inventory data with Sentinel-2 and Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 265:112644.
- [12] Chen S J, Woodcock C E, Bullock E L, Arévalo P, Torchinava P, Peng S Q, Olofsson P. Monitoring temperate forest degradation on Google Earth Engine using Landsat time series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 265:112648.
- [13] Sturm J, Santos M J, Schmid B, Damm A. Satellite data reveal differential responses of Swiss forests to unprecedented 2018 drought. *Global change biology*, 2022, 28(9): 2956-2978.
- [14] Zhao M, A G, Zhang J E, Velicogna I, Liang C Z, Li Z Y. Ecological restoration impact on total terrestrial water storage. *Nature Sustainability*, 2021, 4(1): 56-62.
- [15] Misra G, Cawkwell F, Wingler A. Status of Phenological Research Using Sentinel-2 Data; A Review. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2760.
- [16] Lin S R, Li J, Liu Q H, Li L H, Zhao J, Yu W T. Evaluating the Effectiveness of Using Vegetation Indices Based on Red-Edge Reflectance from Sentinel-2 to Estimate Gross Primary Productivity. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1303.
- [17] 帅爽, 张志, 吕新彪, 陈思, 马梓程, 谢翠容. 矿山恢复治理区植被物候与健康状况遥感监测. *农业工程学报*, 2021, 37(4): 224-234.
- [18] Li Y J, Ma Q M, Chen J M, Croft H, Luo X Z, Zheng T, Rogers C, Liu J. Fine-scale leaf chlorophyll distribution across a deciduous forest through two-step model inversion from Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 264:112618.
- [19] Dash J, Curran P J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(23): 5403-5413.
- [20] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202:18-27.
- [21] Zhu Z, Wang S X, Woodcock C E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm; Cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4—7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 159:269-277.
- [22] Rouse Jr J W, Haas R H, Schell J, Deering D. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation; Texas A&M University Remote Sensing Center, 1974.
- [23] Liu H Q, Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 457-465.

- [24] Gao B C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257-266.
- [25] Hunt Jr E R, Rock B N. Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 30(1): 43-54.
- [26] Datt B. A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using Eucalyptus leaves. *Journal of Plant Physiology*, 1999, 154(1): 30-36.
- [27] Team. T R D C. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [Z]. 2020
- [28] Wickham H, Averick M, Bryan J, Chang W, McGowan L D A, François R, Grolemond G, Hayes A, Henry L, Hester J, Kuhn M, Pedersen T L, Miller E, Bache S M, Müller K, Ooms J, Robinson D, Seidel D P, Spinu V, Takahashi K, Vaughan D, Wilke C, K, W, H Y. Welcome to the Tidyverse. *Journal of open source software*, 2019, 4(43): 1686.
- [29] Liu C C, Liu Y G, Guo K, Li G Q, Zheng Y R, Yu L F, Yang R. Comparative ecophysiological responses to drought of two shrub and four tree species from karst habitats of southwestern China. *TREES*, 2011, 25(3): 537-549.
- [30] 吴旭, 牛耀彬, 荀梦瑶, 金俊逸, 李娜艳, 唐亚坤, 陈云明. 黄土丘陵区优势造林树种水分来源对季节性干旱的响应. *生态学报*, 2022: doi: 10.5846/stxb202106221657.
- [31] Liu Y, Miao H T, Huang Z, Cui Z, He H H, Zheng J Y, Han F P, Chang X F, Wu G L. Soil water depletion patterns of artificial forest species and ages on the Loess Plateau (China). *Forest Ecology and Management*, 2018, 417:137-143.
- [32] 李斌, 方晰, 李岩, 项文化, 田大伦, 湛小勇, 闫文德, 邓东华. 湖南省森林土壤有机碳密度及碳库储量动态. *生态学报*, 2015, 35(13): 4265-4278.
- [33] Bremer L L, Farley K A. Does plantation forestry restore biodiversity or create green deserts? A synthesis of the effects of land-use transitions on plant species richness. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19(14): 3893-3915.
- [34] Swanson M E, Franklin J F, Beschta R L, Crisafulli C M, Dellasala D A, Hutto R L, Lindenmayer D B, Swanson F J. The forgotten stage of forest succession: early-successional ecosystems on forest sites. *FRONTIERS IN ECOLOGY AND THE ENVIRONMENT*, 2011, 9(2): 117-125.
- [35] Croft H, Chen J M, Zhang Y. The applicability of empirical vegetation indices for determining leaf chlorophyll content over different leaf and canopy structures. *Ecological Complexity*, 2014, 17: 119-130.