

基于光谱特征的高寒山区森林生态系统水源涵养分布反演研究

牛腾^{1,3}, 卢杰^{1,2*}, 于佳鑫⁴, 武英达⁵, 龙芊芊³, 于强³

1. 西藏农牧学院高原生态研究所, 西藏 林芝 860000
2. 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000
3. 北京林业大学精准林业北京重点实验室, 北京 100083
4. 石家庄市林业局滹沱河国有林场, 河北 石家庄 050000
5. 中国消防救援学院森林草原防灭火研究中心, 北京 102202

摘要 森林生态系统水源涵养具有调节气候, 维持生态水平衡等生态功能。青藏高原作为高寒地区, 由于其高海拔, 环境恶劣的特征, 无法实地人工观测水源涵养量。为更好地获取高寒地区的水源涵养量, 通过遥感反演的方式得到特定地区的水源涵养价值量。以林芝巴宜区为研究区, 研究区内林芝云杉、高山栎、高山松和雪层杜鹃四种植被为主要树种, 遥感影像无法直接获得水源涵养信息, 但可以通过构建植被叶片光谱信息与水源涵养量之间的定量关系来反演水源涵养价值量。研究不同植被与水源涵养量的定量关系, 每种植被采集 10 个样点共 1 000 个叶片样本和光源涵养数据, 利用 ASD 光谱仪获取高光谱数据, 通过相关性选取拟合参数, 构建水源涵养回归模型。利用 Sentinel-2 遥感影像反演研究区内植被的水源涵养分布, 并对反演结果进行验证。结果表明, 四类植被叶片的反射光谱, 均呈现出相似的规律性, 在可见光波段差异不明显, 近红外到中红外波段呈现出明显四个水吸收带, 在红光到近红外波段(700~1 400 nm)反射率最高。光谱反射率大小表现为高山栎>高山松>林芝云杉≈雪层杜鹃。通过实验获取植被冠层截流量、枯落物持水量和土壤含水量, 三者之和代表植被的水源涵养量, 分析植被的光谱特征与水源涵养量的关系, 并通过 Pearson 系数评价波段参数与水源涵养的定量化关系, 确定 R_{540} , R_{1950} , NDWI 和 NDVI 四个参数与水源涵养量显著相关。根据上述参数与四类植被的水源涵养量构建水源涵养回归模型, 并通过模型反演研究区内植被水源涵养量, 检验模拟精度, 整体反演精度 R^2 大于 0.7, RMSE 基本小于 10, 说明预测模型反演效果较好, 模型可有效估算森林生态系统的水源涵养量。

关键词 高寒山区; 水源涵养; 高光谱; 预测模型; 遥感反演

中图分类号: S715 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)02-0530-07

引言

青藏高原作为典型的高寒山区, 是我国重要的生态功能调节区、气候变化敏感区和生物多样性高度集中区, 生态战略地位极为重要^[1-3]。高原高寒生态系统具有极其重要的水源涵养功能, 国家特别设立了国家级生态功能保护区, 以保障生态系统水源涵养功能的稳定持续发展。在未来气候变化背景下, 估算青藏高原生态功能保护区水源涵养功能的变化, 对保障区域和全国水资源安全和生态安全、制定适应气候变化策略和措施具有科学指导意义。由于高寒山区的高海

拔差异, 植被复杂多样, 受植被影响的森林生态系统水源涵养功能存在一定的特殊性。主流学者主要以森林生态系统水循环为出发点, 采用水量平衡、蓄水估算、径流系数等多种方法对水源涵养量进行核算^[4-8]。随着计算机、卫星遥感等技术的快速发展, 部分学者选取元胞自动机来研究植被涵养水源量, 提高了流域和景观尺度的涵养水源评估水准, 深化了人们对植被涵养水源空间异质性的认识^[9]。但对于水源涵养功能极其重要的青藏高原地区, 由于水源涵养功能监测存在一定的困难, 这方面的研究偏少。亟需建立一种能有效反映高海拔地区特征的模型用于计算水源涵养功能, 解决高海拔地区无法有效监测植被水源涵养量的困难, 目前, 遥感技

收稿日期: 2020-12-17, 修订日期: 2021-03-29

基金项目: 西藏高原森林生态教育部重点实验室开放研究基金项目(XZA-JYBSYS-2019-01)资助

作者简介: 牛腾, 1995年生, 北京林业大学林学院博士研究生 e-mail: niuteng21@bjfu.edu.cn

* 通讯作者 e-mail: tibetlj@163.com

术的迅猛发展对森林资源信息的获取带来了新的机遇，为森林资源调查提供了有力的方法，为森林资源变化监测带来了新的可能^[10]。遥感技术被用作当今森林资源调查的另一新的有力工具，但对于森林生态系统的遥感监测中，遥感影像无法直接反映水源涵养量，影像直接反映地表信息，即植被的反射信息。植被的光谱反射率能够表达叶片的特征，区域内水源涵养量影响植被的生长，进而影响到植被叶片的光谱特征，高光谱遥感影像可以采集大范围的光谱特征用于反演区域内的水源涵养量。

本研究以林芝巴宜为研究区，林芝云杉、高山松、高山栎和雪层杜鹃为研究对象。通过实地采集样本点位的叶片，利用 ASD 光谱仪测定其多波段的光谱反射率，分析不同植被的光谱特征。同时，测定样本点标准株的冠层截流量、枯落物持水量和土壤含水量，代表植被的水源涵养量，将水源涵养量与光谱波段建立量化关系。根据波段参数构建水源涵养拟合模型，利用模型反演和预测研究区内植被生态系统的水源涵养量，并利用 R^2 和 RMSE 进行精度验证，评价模型的拟合度。

1 实验部分

1.1 研究区

巴宜区为西藏林芝地区下辖县，位于 $29^{\circ}21' - 30^{\circ}15'N$ ， $93^{\circ}27' - 95^{\circ}17'E$ ，地处西藏东南部、雅鲁藏布江北岸、尼洋河下游，雅鲁藏布江与尼洋河流经境内并在此相汇。巴宜区平均海拔为 3 300 m，海拔最高为 7 294 m，最低处仅为 1 190 m，境内多高山峡谷。因海拔落差较大，土壤特征呈寒、温、热带的垂直分布，海拔 4 800 m 以上为高山寒漠土，海拔高度浮动在 4 000~4 800 m 之间的主要是高山草原草甸土，山地灌丛草甸土分布的海拔高度是 3 600~4 200 m；山地灰棕壤和灰化土分布在海拔 2 400~4 000 m；黄棕壤分布在海拔 2 400 m 以下。林芝县森林植被受海拔和气候的影响，在分布上呈明显的规律性变化特点。在海拔 2 600 m 多处见有成片分布的乔松成林，以高山松、高山栎为主，在海拔 2 400~4 000 m 之间由于气候温凉湿润，主要分布的是亚高山温带针叶林，建群树种主要是林芝云杉、高山松等。高山寒温带灌丛草原带分布于海拔 4 000~4 800 m 之间，此带气候较寒冷湿润，以雪层杜鹃等灌木为主。本研究选取典型的高山松、高山栎、林芝云杉和雪层杜鹃作为研究对象。

1.2 实验设计及样本采集

选取巴宜区分布广泛的林芝云杉，高山栎，高山松和雪层杜鹃作为研究树种，此四类植被类型覆盖面积超过林芝县总植被分布的 80%。在巴宜区同一树种的土壤环境，海拔高程相差无几，因此各取 10 个样点(图 1)采集植物叶片。本研究通过测定不同植被类型的叶片光谱反射率，与实地测量该地区的水源涵养能力构建回归模型，利用叶片的光谱的信息定量表达在不同植被条件下的水源涵养能力。植被的光谱反射率在 400~2 500 nm 内包含多种植物特征信息，同时，遥感影像也能采集类似波段的特征信息。结合高光谱遥感影像，反演整个研究区内植被水源涵养能力。本实验于 2019 年

6 月中旬正午采集叶片，根据林分郁闭度和分布状况在每个样点内选择五株标准株，采集叶片 20 片，采样期间确定该样点采集的叶片为本实验设定的单一树种的叶片，不存在其他植被叶片，均匀采集健康成熟的叶片样本放入提前准备的干净的采集袋中，采集完成后立即带回实验室测定相关指标。

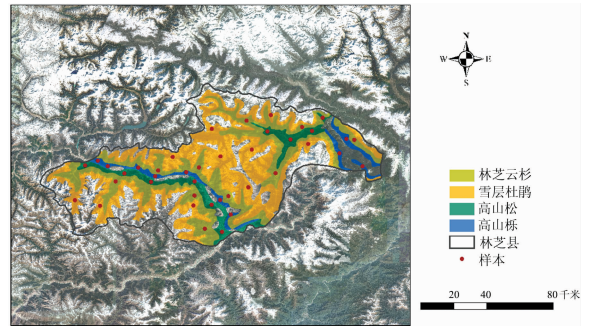


图 1 植被类型及采样点分布位置
Fig. 1 Vegetation type and distribution location of sampling points

1.3 叶片光谱反射率测定

叶片光谱反射率的测定采用 ASD 光谱仪 (Analytical Spectral Device)(如图 2 所示)，ASD 光谱仪的具体参数为：波长范围 300~2 500 nm，采样间隔为 1 nm，视场角为 30° 。光谱数据采集步骤依次为：优化光谱仪→扫描白板→调整透射模式→探头垂直于叶片表面上方 5 cm 处→开始运行→读数稳定后保存数值，每隔 15 min 重新优化校正。光谱仪扫描时间间隔为 0.1 s，输出曲线为 10 条原始光谱的自动平均(为避免环境光线折射影响操作过程中，采集人员身着浅色亚麻材质工作服进行)。

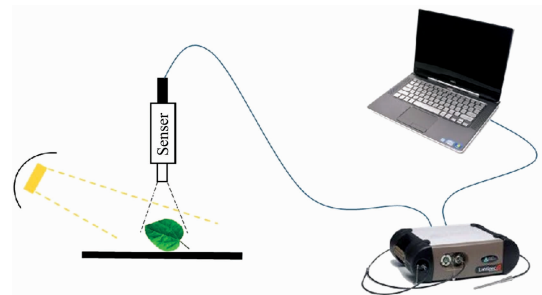


图 2 光谱仪测定叶片光谱示意图
Fig. 2 Schematic diagram of spectrometer measuring leaf spectrum

1.4 水源涵养能力测定

对不同植被类型水源涵养能力的测定包括：林冠层水源涵养能力测定、枯落物层含水量测定和土壤含水量测定^[11-12]。

1.4.1 林冠层截流量测定

大气降水量理论上是林内穿透降雨量、林冠层截流量和树干茎流量之和。大气降水在落到林冠层后的第一次再分配可以用式(1)表达

$$P = P' + G + I \quad (1)$$

式(1)中, P 为大气降水量; P' 为林内穿透雨量; G 为树干茎流量; I 为林冠截流量。

1.4.2 枯落物持水量测定

在样点内设置 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的枯落物调查样方, 在样方内随机选取 3 个点用以测定枯落物未分解层和半分解层的厚度和总厚度, 取其平均值。收集该单位面积的枯落物装入自封袋中, 带回实验室称重, 并取部分样本在 $95\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下烘干, 称重后求平均值推算 1 hm^2 的枯落物储量。

采用室内浸泡法测定枯落物的最大持水率、最大持水量、最大拦蓄量、有效拦蓄量和最大吸湿比。本研究以可以维持较长时间的水量——有效拦蓄量作为枯落物持水量。

1.4.3 土壤含水量测定

分别在样地内采用“机械分层取土法”对土壤剖面进行挖掘, 分别在 $0\sim 20$, $20\sim 40$ 和 $40\sim 60\text{ cm}$ 处采用容积为 100 cm^3 的环刀重复取原状土, 保证土壤各层结构不受破坏, 将采集的原状土带回实验室, 按照常规方法进行测量。利用环刀浸泡法测定土壤容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、土壤初渗速率等。计算土壤有效含水量公式

$$W = 1000ph \quad (2)$$

式(2)中, W 为土壤有效含水量, p 为非毛管孔隙度, h 为土层厚度。

除实验组 200 个标准株数据外, 随机选取四种植被各 30 个验证样点作为验证数据, 测定林冠层截流量、枯落物层含水量和土壤含水量。

1.5 遥感数据获取及处理

选取 2019 年 6 月的 Sentinel-2 影像进行遥感反演, 夏季植被覆盖度较高, 遥感影像能充分反映不同树种间的影像差异。Sentinel-2 影像有 13 个波段, 其中 4 个波段的分辨率分别为 10 m , 6 个波段的分辨率为 20 m , 3 个波段的分辨率为 60 m 。在获取影像信息时, 受到大气中水分、气溶胶等因素的影响, 导致波段噪声增大, 信息模糊。因此, 对影像进行了辐射定标、大气校正和几何校正, 以消除噪声, 减少相邻像素之间的辐射干扰, 最终得到与表面真实反射率相似的影像^[13]。

2 结果与讨论

2.1 植被叶片的光谱反射特征

2.1.1 植被原始光谱特征

如图 3 所示, 林芝县四种主要植被的反射光谱呈现出一定的规律性, 在近红外到中红外波段($1380\sim 3500\text{ nm}$), 具有两个明显的反射峰和三个吸收谷, 两个反射峰的波长在 $1650\sim 1700$ 和 $2200\sim 2300\text{ nm}$ 两个范围内, 反射峰中间即为三个吸收谷, 植被的反射光谱这段波长区间反映叶片自身的含水量, 三个吸收谷即为水吸收带。

对比四种植被的光谱反射特征, 杜鹃作为四种主要植被中唯一一个灌丛植物, 其光谱与另外三种植被相比, 波动范围更小, 反射峰的峰值和吸收谷的谷值波动较弱, 整体反射率分布在 $0.05\sim 0.35$ 之间, 没有较为明显的波动。高山栎作为高寒地带的落叶阔叶乔木, 反射率在四种植被中最大, 波

峰波谷间差异明显, 除可见光波段外, 大部分波段反射率在 $0.1\sim 0.6$ 之间。高山松和林芝云杉作为高寒山区的针叶林, 相比于高山栎, 波峰波谷的过度更加平滑, 且反射率比高山栎小, 其中林芝云杉的反射率为四种植被中最小。可见光波段中四种植被差异较小, 肉眼可见的色彩差别体现的并不明显, 在近红外波段, 高山栎和高山松的反射率明显大于其他两种植被, 说明高山栎作为落叶阔叶林, 其细胞结构对近红外波段具有较强的反射效果, 针叶林和灌木对于近红外光吸收能力较强。近红外到中红外波段, 反射光谱主要反映叶片对于水的吸收效果, 三个吸收谷是叶片中的水对该波段电磁波所形成的, 反射率越低, 则叶片中的水量越多, 因此此波段的反射率能充分体现叶片自身的含水量。

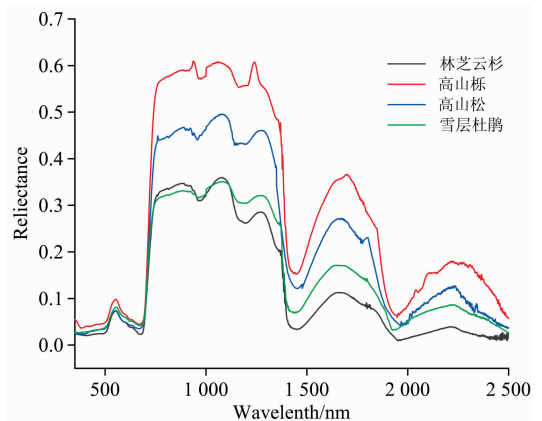


图 3 不同植被叶片反射光谱曲线

Fig. 3 Reflectance spectrum curve of different vegetation leaves

2.1.2 植被一阶导数光谱特征

研究表明, 一阶导数光谱可以较好地消除大部分背景噪声对光谱的影响, 减少光谱采集过程中大气对光的散射与吸收。“三边”参数是一阶导数光谱中的重要参量。红边、黄边、蓝边是植被光谱曲线的特征点和区域, 通过计算反射光谱的一阶导数得到三边参数, 光谱数据的一阶导数处理能够消除一些背景噪声。对于红边, 提取 $680\sim 750\text{ nm}$ 范围内反射率比一阶导数的最大值作为红边的斜率, 对应于最大值的波长代表红边位置。蓝色边缘($490\sim 530\text{ nm}$)和黄色边缘($550\sim 580\text{ nm}$)的定义与红色边缘的定义相似。

图 4 显示了在不同植被经过一阶导数处理的叶片平均光谱反射曲线的变化。不同植被在蓝边和黄边没有明显位置差异, 但在红边位置, 高山栎和高山松的红边斜率明显大于林芝云杉和雪层杜鹃, 说明高山栎和高山松叶片的叶绿素含量较高, 雪层杜鹃的红边位置相较于另外三种植被呈现出略微“蓝移”, 说明灌丛植物与乔木类植物相比, 红边位置有所差异。

2.2 植被反射光谱对水源涵养能力的响应

2.2.1 植被水源涵养特征分析

巴宜区四种植被通过实验获取的林冠截流量、枯落物持水量和土壤含水量如表 1, 由植被的水源涵养能力林冠层截流量, 枯落物持水量及土壤含水量三者求和得到。对比三种

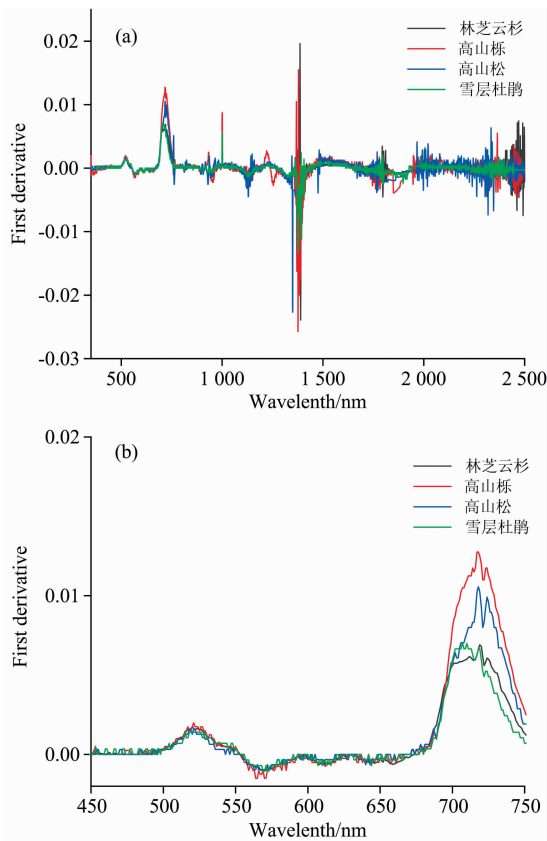


图 4 不同植被类型的一阶导数光谱曲线

(a): 一阶导数光谱曲线; (b): 反射光谱三边参数

Fig. 4 First derivative spectral curve of different vegetation types

(a): First derivative spectral curve;

(b): Reflectance spectrum trilateral parameters

类型的水源涵养能力，土壤含水量远大于林冠层截流量和枯落物持水量，枯落物持水量最小。其中，雪层杜鹃作为唯一的灌木植物，由于冠层高度无法与乔木类植物相比，林冠层截流量也远小于其他几种植物，雪层杜鹃的根系不够发达，也不能固定太多的土壤水分，因此雪层杜鹃的海拔水源涵养量为四种植被最小，雪层杜鹃密集分布的地区多处于海拔较高的雪山高原，无法生长高大乔木。林芝云杉和高山松为针叶林，相比于阔叶林高山栎，林冠层截流较大，枯落物持水量和土壤含水量较小，总体统计，水源涵养总量阔叶林大于针叶林。乔木林冠层的截流功能较灌木丛对森林水文过程的影响更大，一是由于乔木林冠具有较大的截流容量，二是由于乔木林冠具有较大的空气动力学阻力，从而具有较大的截流雨量蒸发速率，而针叶林林冠截流量大于阔叶林是由于针叶林树种郁闭度相对较大，且林冠枝叶空间分布均匀，林冠枝叶量多，与降水的接触面积大，针叶植物的枝叶间狭小的空隙有益于降水在表面张力和重力的均衡作用下被植被截留；另一方面，针叶林具有较大的单位面积枝叶质量，单位面积枝叶质量与最大容水量存在较为明显的正相关关系，单位面积枝叶质量大，森林群落郁闭度会更高，林冠结构一般会更复杂，立体的冠层结构就可能容纳更多的水分。阔叶

林枯落物持水量最大是由于落叶植物林下的灌草层盖度较大，能够稳定地提供一定数量的凋落物，同时阔叶植物的生长较快，因此枯落物持水量相对于针叶林较高。阔叶林土壤含水量大于针叶林是由于针叶的枯落物储量小且叶片内富含难以分解的单宁等物质，针叶林根系生长缓慢且以主根垂直生长为主，另外，针叶林内灌草植物覆盖度较低，种类单一也影响着非毛细空隙的形成。

表 1 植被水源涵养量

Table 1 Vegetation water conservation ($t \cdot hm^{-2}$)

植被类型	林冠层截流量	枯落物持水量	土壤含水量	水源涵养总量
雪层杜鹃	13.54±1.35	13.51±2.39	158.69±10.21	185.74±12.21
林芝云杉	54.72±3.21	15.36±1.22	309.33±28.97	379.41±21.65
高山松	49.86±2.53	17.74±2.31	287.61±15.88	355.21±25.36
高山栎	30.33±5.68	23.69±1.11	450.97±31.74	504.99±42.11

2.2.2 植被反射光谱参数与水源涵养相关性分析

植被光谱对于水源涵养的响应通过选取特定波段和组合指数进行计算，对于参数的筛选，主要选取以下三类：(1) 基础波段参数，可见光波段的七种色彩波段、反射光谱的一阶导数中的红边、黄边和蓝边；(2) 能反映叶片含水量的波段和参数，近红外到中红外的三个水吸收带、454 nm、668 nm、1 446 nm、1 664 nm、1 924 nm、归一化水体指数(NDWI)、NDII、WBI、MSI等；(3) 反映主要影响水源涵养的植物自身信息的波段和参数，反映植被自身生长情况的归一化植被指数(NDVI)、反映植物单宁的波段(500~700 nm)、反映植物表面蜡质的波段(500~675 nm)等。将 50 个水源涵养量样本与表 1 中的参数进行相关性分析，计算 Pearson 相关系数，分析结果如表 2。

表 2 植被反射光谱与水源涵养量相关性

Table 2 Correlation between vegetation reflectance spectrum and water conservation

参数	描述	雪层杜鹃	林芝云杉	高山松	高山栎
R_{100}	紫光波段	0.359	0.246	0.355	0.329
R_{140}	蓝光波段	0.243	0.237	0.298	0.267
R_{180}	青光波段	0.341	0.339	0.356	0.374
R_{540}	绿光波段，可见光绿峰	0.357	0.457*	0.442*	0.449*
R_{580}	黄光波段	0.389	0.391	0.361	0.312
R_{600}	橙光波段	0.277	0.324	0.339	0.341
R_{700}	红光波段	0.167	0.258	0.22	0.303
SD_r	红边	0.293	0.287	0.258	0.212
SD_y	黄边	0.333	0.368	0.305	0.357
SD_b	蓝边	0.316	0.289	0.226	0.303
R_{1450}	近红外波段水吸收带	-0.387	-0.355	-0.213	-0.372
R_{1950}	中红外波段水吸收带	-0.454*	-0.488*	-0.571*	-0.488*
R_{3450}	中红外波段水吸收带	-0.332	-0.371	-0.225	-0.301
NDWI	归一化水体指数	0.567*	0.49*	0.46*	0.467*
NDVI	归一化植被指数	0.487*	0.471*	0.459*	0.466*
LWI	叶面水含量指数	0.312	0.365	0.339	0.353

注：* 显著性水平达到 0.05

2.3 水源涵养能力预测模型的构建

结合 R_{540} 、 R_{1950} 、NDWI 和 NDVI 四个指数，对四种植被类型的水源涵养量分别进行多元线性回归。模型的建立可表述为将水源涵养量构建成一个或一组函数，并确定函数的各项参数^[14-15]。多元线性回归方程的一般表达为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3)$$

利用 SPSS 软件中的多元线性回归模型对水源涵养能力预测模型进行构建，结果如表 3，林芝云杉、高山松和高山栎的水源涵养与 R_{540} 、 R_{1950} 、NDWI 和 NDVI 四个指数均相关性较高，而雪层杜鹃与 R_{540} 相关性不高，故此，雪层杜鹃的水源涵养预测模型仅考虑 R_{1950} 、NDWI 和 NDVI 三个指数。

表 3 不同植被水源涵养能力预测模型

Table 3 Prediction model for water conservation capacity of different vegetation

植被类型	拟合模型
林芝云杉	$W = 981.24R_{540} - 1457.66R_{1950} + 792.29NDWI + 506.25NDVI - 502.38$
高山松	$W = 803.77R_{540} - 1287.65R_{1950} + 578.92NDWI + 743.11NDVI - 556.67$
高山栎	$W = 1245.75R_{540} - 530.45R_{1950} + 638.21NDWI + 744.21NDVI - 634.77$
雪层杜鹃	$W = -878.66R_{1950} + 754.37NDWI + 375.92NDVI - 366.86$

2.4 空间内水源涵养能力的反演与验证

以下载的 2019 年 6 月的 Sentinel-2 影像为基础，利用水源涵养预测模型对同一时间内水源涵养量进行反演，确定巴宜区水源涵养特征分布情况。

将四类植被反演的水源涵养分布数据进行叠加，如图 5 所示，具有较为明显的分布规律，在海拔较低的雅鲁藏布江两侧和念青唐古拉山脚下的水源涵养量较高，随着海拔和气候的变化，植被的水源涵养能力逐步降低，雅鲁藏布江附近的水源涵养区分布的较为零散，区块化特征突出，而在念青唐古拉山脚的水源涵养区较为集中。

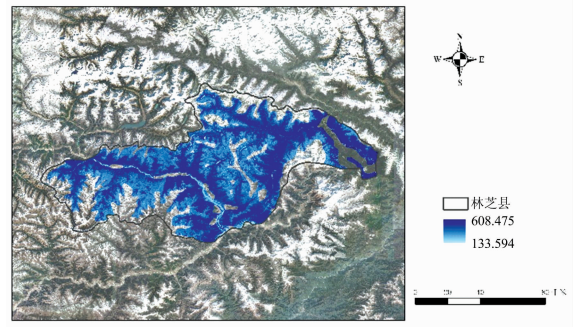


图 5 巴宜区森林生态系统水源涵养量分布
Fig. 5 Distribution of water conservation of forest ecosystem in Bayi district

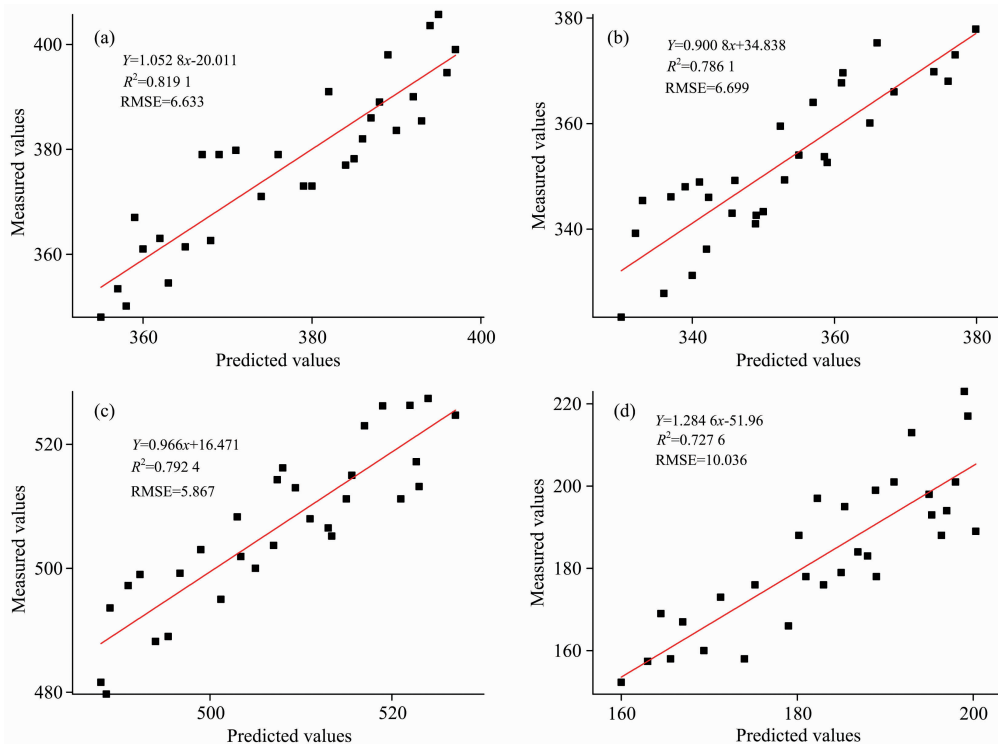


图 6 水源涵养量预测模型精度验证

(a): 林芝云杉反演精度验证; (b): 高山松反演精度验证; (c): 高山栎反演精度验证; (d): 雪层杜鹃反演精度验证

Fig. 6 Accuracy verification of water conservation forecast model

(a): Verification of picea likiangensis var. linzhiensis inversion accuracy; (b): Verification of Pimus densata inversion accuracy; (c): Verification of Quercus aquifolioides inversion accuracy; (d): Verification of Rhododendron nivale inversion accuracy

研究随机选取四种植被各 30 个验证样点, 利用决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 检验预测模型的稳定性及预测精度。其中, R^2 是衡量变量间相关程度的指标, 一般来说 R^2 越大, 其相关程度就越大; RMSE 表征了预测值与实测值吻合度, 其值越小则模型的稳定性越高。结果如图 6(a)~(d) 所示, 其中林芝云杉(a)的 R^2 为 0.819, RMSE 为 6.633; 高山松(b)的 R^2 为 0.786, RMSE 为 6.699; 高山栎(c)的 R^2 为 0.792, RMSE 为 5.867; 雪层杜鹃(d)的 R^2 为 0.728, RMSE 为 10.036。结果反映水源涵养反演模型与实测数据具有较高的拟合度, 表明该模型能准确反映高寒地区植被水源涵养能力的空间分布。

3 结 论

以林芝巴宜区为研究区, 以林芝云杉、高山松、高山栎和雪层杜鹃为研究对象, 探讨了不同植被类型的水源涵养能力, 并分析其各自的光谱特征, 进一步研究植被叶片反射光谱与水源涵养量的相关关系, 构建水源涵养预测模型, 并利用 Sentinel-2 影像反演获取巴宜区内植被的水源涵养分布情况。

(1)对比四类植被叶片的反射光谱, 均呈现出相似的规律性, 在可见光波段差异不明显, 近红外到中红外波段呈现

出明显四个水吸收带, 在红外到近红外波段(700~1400 nm)反射率最高。四类不同植被在这个波段差异最为明显, 阔叶林高山栎的光谱反射率最大, 高山松次之, 林芝云杉反射率最低; 灌木丛雪层杜鹃的反射率也较低, 但起伏变化波动不明显。

(2)通过实验获取植被冠层截流量、枯落物持水量和土壤含水量, 三者之和代表植被的水源涵养量, 对比四类植被的水源涵养量, 高山栎 $504.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^2$ 最高, 针叶林林芝云杉和高山松次之, 水源涵养量在 $350 \sim 400 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 灌木丛雪层杜鹃最低, 水源涵养量为 $185.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。分析植被的光谱特征与水源涵养量的关系, 并通过 Pearson 系数评价波段参数与水源涵养的定量化关系, 确定 R_{540} , R_{1950} , NDWI 和 NDVI 四个参数与水源涵养量显著相关。

(3)根据 R_{540} , R_{1950} , NDWI 和 NDVI 参数与四类植被的水源涵养量构建水源涵养预测模型, 并通过模型反演研究区内植被水源涵养量, 随机选取 30 个样点, 分别检验四类植被的拟合模型, 并通过 R^2 和 RMSE 评价模型反演的精度, 其中, 高山栎和林芝云杉的反演精度最高, 雪层杜鹃最低。整体反演精度 R^2 大于 0.7, RMSE 基本小于 10, 说明预测模型反演效果较好, 模型可有效估算林芝云杉、高山松、高山栎和雪层杜鹃四类植被的水源涵养量。

References

- [1] LI Yang, WANG Gen-xu, RUI Peng-fei, et al(李 阳, 王根绪, 芮鹏飞, 等). Mountain Research(山地学报), 2020, 38(2): 190.
- [2] ZHANG Zhong-hua, ZHOU Hua-kun, ZHAO Xin-quan, et al(张中华, 周华坤, 赵新全, 等). Biodiversity Science(生物多样性), 2018, 26(2): 111.
- [3] CHEN Lin-lin, LIU Hua, LIU Yan-xu(陈琳琳, 刘 华, 刘焱序). Bulletin of Soil and Water Conservation(水土保持通报), 2018, 38(6): 277.
- [4] SONG Chun-lin, SUN Xiang-yang, WANG Gen-xu(宋春林, 孙向阳, 王根绪). Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报), 2015, 26(9): 2891.
- [5] TU Zhi-hua, PANG Zhuo, ZHAO Yang, et al(涂志华, 庞 卓, 赵 阳, 等). Science Circumstantiae(环境科学学报), 2015, 35(9): 2948.
- [6] LI Yang, WAN Fu-xu(李 阳, 万福绪). Journal of Soil and Water Conservation(水土保持学报), 2019, 33(2): 264.
- [7] LIU Lu-lu, CAO Wei, SHAO Quan-qin(刘璐璐, 曹 巍, 邵全琴). Scientia Geographica Sinica(地理科学), 2016, 36(4): 603.
- [8] ZHANG Hong-feng, YUAN Su-fen(张宏峰, 袁素芬). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2016, 36(24): 8120.
- [9] WANG Xiao-xue, LI Xu-yong, WU Xiu-qin(王晓学, 李叙勇, 吴秀琴). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2012, 32(3): 907.
- [10] HAO Long, ZHANG Ting, LI Xiang-yun, et al(郝 洸, 张 挺, 厉香蕴, 等). Journal of Central South University of Forestry and Technology(中南林业科技大学学报), 2021, 41(6): 31.
- [11] TANG Jie, LIN Xiao-sheng, HOU Ke-yi, et al(汤 洁, 林晓晟, 侯克怡, 等). Journal of Northeast Normal University(东北师范大学学报), 2014, 46(4): 139.
- [12] GUO Meng-jiao, ZHU Jiang, CHENG Xiao-qin, et al(郭梦娇, 朱 江, 程小琴, 等). Journal of Soil and Water Conservation(水土保持学报), 2016, 30(3): 279.
- [13] SU Kai, YU Qiang, HU Ya-hui, et al(苏 凯, 于 强, 胡雅慧, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(6): 1696.
- [14] JIANG Pei-pei, CAO Yang, CHEN Yun-ming(姜沛沛, 曹 杨, 陈云明). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2016, 36(19): 6188.
- [15] LIU Jia-yi, DENG Li-jiao, FU Guo-bin, et al(刘甲毅, 邓丽姣, 傅国斌, 等). Journal of Applied Meteorological Science(应用气象学报), 2018, 29(6): 737.

Research on Inversion of Water Conservation Distribution of Forest Ecosystem in Alpine Mountain Based on Spectral Features

NIU Teng^{1,3}, LU Jie^{1,2*}, YU Jia-xin⁴, WU Ying-da⁵, LONG Qian-qian³, YU Qiang³

1. Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China

2. Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet Plateau(Tibet Agriculture & Animal Husbandry University), Ministry of Education, Linzhi 860000, China

3. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4. Hutuohe State-Owned Forest Farm of Shijiazhuang Forestry Bureau, Shijiazhuang 050000, China

5. Forest and Grassland Fire Fighting Research of China Fire and Rescue Institute, Beijing 102202, China

Abstract Water conservation in forest ecosystems has ecological functions such as regulating climate and maintaining ecological water balance. As an alpine region, the Qinghai-Tibet Plateau cannot manually observe water conservation on the spot due to its high altitude and harsh environment. In order to better obtain water conservation in alpine regions, remote sensing technology is introduced, and the value of water conservation in a specific area is obtained through remote sensing inversion. This study takes Nyingchi Bayi District as the study area. The study area uses four types of vegetation: Nyingchi Spruce, Alpine Quercus, Alpine Pine and Snow Rhododendron as the main tree species. Remote sensing images cannot directly obtain water conservation information, but the value of water conservation can be inverted by constructing a quantitative relationship between vegetation leaf spectral information and water conservation. To study the quantitative relationship between different vegetations and water conservation, collect 1 000 leaf samples and water conservation data from 10 sampling points for each vegetation, use ASD spectrometer to obtain hyperspectral data, select fitting parameters through correlation, and build a regression model of water conservation. The Sentinel-2 remote sensing image was used to invert the water conservation distribution of vegetation in the study area, and the inversion results were verified. The results show that the reflectance spectra of the four types of vegetation leave all show similar regularities. The difference is not obvious in the visible light band, and there are four obvious water absorption bands in the near-infrared to the mid-infrared band (700~1 400 nm), and the reflectivity in the red to near-infrared band highest. The spectral reflectance showed the order of Alpine Quercus > Alpine Pine > Nyingchi Spruce ≈ Snow Rhododendron. Through experiments, the vegetation canopy interception, litter water holding capacity and soil water content are obtained. The sum of the three represents the water conservation capacity of the vegetation, and the relationship between the spectral characteristics of the vegetation and the water conservation capacity is analyzed. Moreover, through the Pearson coefficient to evaluate the quantitative relationship between band parameters and water conservation, it is determined that the four parameters R_{540} , R_{1950} , NDWI and NDVI are significantly related to water conservation. Based on the above parameters and the water conservation of the four types of vegetation, a regression model of water conservation was constructed. The vegetation water conservation in the study area was inverted through the model to verify the simulation accuracy. The overall inversion accuracy R^2 is greater than 0.7, and the RMSE is less than 10. It shows that the prediction model has a good inversion effect, and the model can effectively estimate the water conservation of the forest ecosystem.

Keywords Alpine mountain area; Water conservation; Hyperspectral; Prediction model; Remote sensing inversion

(Received Dec. 17, 2020; accepted Mar. 29, 2021)

* Corresponding author