

# 基于光谱特征的雅鲁藏布大峡谷森林枯落物水源涵养能力反演研究

龙芊芊<sup>1</sup>, 周仁浩<sup>2</sup>, 岳德鹏<sup>1</sup>, 牛 腾<sup>1</sup>, 毛雪晴<sup>1</sup>, 王朋冲<sup>3</sup>, 于 强<sup>1\*</sup>

1. 北京林业大学精准林业北京重点实验室, 北京 100083
2. 成都信息工程大学网络空间安全学院, 四川 成都 610200
3. 北京林森生态环境技术有限公司, 北京 100085

**摘 要** 水源涵养是生态系统重要的服务功能, 森林作为一种复杂的生态系统, 其组成部分对于水源涵养的贡献率各不相同; 森林枯落物直接覆盖于地表, 既来自于林冠层也抑制土壤层的水分蒸散, 因此枯落物层在水源涵养功能中发挥了重要作用。遥感和高光谱技术为远距离识别面状区域的水源涵养能力提供了解决方案, 特别在高原地区, 遥感是获取地表信息的快速手段。以雅鲁藏布大峡谷为研究区, 用 ASD(便携式地物)光谱仪测定主要树种(高山松、林芝云杉和川滇高山栎)的叶片高光谱数据并构建植被指数, 同时, 通过样地采样获取枯落物样本并计算样本的持水拦蓄性能, 然后建立植被指数与有效拦蓄量的多元回归模型。在此基础上, 基于 Sentinel-2 影像反演大峡谷主要树种枯落物的水源涵养能力分布情况, 最后结合验证点对反演模型进行精度评价。结果显示: (1)三类树种的叶片反射率趋势相似, 川滇高山栎的反射率最高, 高山松次之, 林芝云杉最低; (2)枯落物的有效拦蓄量从大到小排序为: 林芝云杉( $48.36 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) > 川滇高山栎( $39.24 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) > 高山松( $32.32 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ )。林芝云杉枯落物的分解程度和蓄积量均最高, 因此持水拦蓄能力最强; 川滇高山栎的革质叶片不利于分解堆积, 进而限制蓄水能力; 高山松含有较多油脂, 不易被水浸湿, 导致持水能力较弱。(3)通过 Person 相关系数分析和多元线性回归模型得知, 叶片蜡质参数和衰减程度越高, 枯落物的水源涵养能力越弱; 植被生长态势越好、色素和叶片水分含量越高, 其水源涵养能力越强。(4)枯落物水源涵养能力反演模型的精度评价结果良好, 高山松、林芝云杉和川滇高山栎的样本检验点拟合优度  $R^2$  分别为 0.943, 0.815 和 0.812, 均方根误差 RMSE 分别为 1.597, 2.270 和 1.953, 表明模型可以用于大峡谷森林枯落物水源涵养能力的预测分布研究。

**关键词** 高光谱; 水源涵养; 枯落物; 遥感反演; 雅鲁藏布大峡谷

**中图分类号:** S715 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)01-0229-07

## 引 言

森林是发挥水源涵养功能的巨大储备库, 通过林冠层、枯枝落叶层和土壤层对到达地面的水分进行截留和贮存, 可以起到调节地表径流和滞洪补枯的作用<sup>[1]</sup>。枯枝落叶层由于直接覆盖于地表, 除与林冠层同样能截持降水外, 更在阻延地表径流、抑制土壤蒸发等水文过程中发挥作用, 因此, 枯枝落叶层截留是森林水源涵养的核心环节<sup>[2]</sup>。枯枝落叶层的水源涵养能力通过地表枯落物的持水拦蓄特性来体现<sup>[3-4]</sup>, 当森林的林分结构发生变化时, 其下层枯落物的累积过程、持水特征、阻滞径流等方面随之改变<sup>[5-7]</sup>。近年来, 有关地表

枯落物持水拦蓄性能的研究相继展开, 刘宇等<sup>[8]</sup>和邓继峰等<sup>[9]</sup>通过比较不同林分枯落物的持水拦蓄能力, 发现不同树种之间能力差异显著; 陈礼清<sup>[10]</sup>、何淑勤等<sup>[11]</sup>以植被恢复模式为依托探索了地表枯落物的水源涵养能力, 结果证实不同植被恢复模式下的枯落物持水拦蓄性能各有区别。值得关注的是, 上述研究均采用传统的样地采样法, 虽然结果准确但时效性和适用性无法保障, 也无法评估和表达水源涵养能力在面状区域上的空间分布情况。随着高光谱技术的发展和卫星遥感的应用, 以非接触方式获取大范围地表信息的方法被应用于叶片含水量监测、土壤含水量估算等领域, 表明利用高光谱数据间接反演地表水分信息是可行的<sup>[12]</sup>。高光谱技术作为一种探测手段, 为植被叶片反射率和枯落物属性搭

收稿日期: 2021-04-13, 修订日期: 2021-07-21

基金项目: 西藏林芝色季拉山森林生态系统水源涵养服务功能评估及辐射效应研究项目(XZA-JYBSYS-2019-01)资助

作者简介: 龙芊芊, 1998年生, 北京林业大学林学院硕士研究生 e-mail: longqianqian@bjfu.edu.cn

\* 通讯作者 e-mail: yuqiang@bjfu.edu.cn

建了关系桥梁, 卫星遥感数据源又可以反演大范围的地表信息; 二者结合, 为枯落物水源涵养能力分布情况的探测提供了一种新的思路。

雅鲁藏布大峡谷位于西藏自治区的东南部, 森林覆盖度高, 林内乔木树龄大, 枯落物储蓄十分丰富。此外, 受印度洋北上水气的强烈影响, 大峡谷气候温暖湿润, 充足的水热条件为地表枯落物创造了极好的水源涵养环境。本工作以雅鲁藏布大峡谷为研究区, 首先在样地采集森林主要乔木类型的叶片和林木下方的枯落物, 用高光谱探测仪获取叶片反射率信息, 采用浸泡法计算枯落物持水拦蓄的各项参数, 并建立枯落物有效拦蓄量与植被特征光谱参数的定量回归方程; 在此基础上, 以 Sentinel-2 影像数据为底图反演枯落物层的水源涵养能力, 以期得到一种快速有效的森林地表枯落物水源涵养能力分布情况的计算方法。

## 1 实验部分

### 1.1 研究区

雅鲁藏布大峡谷位于藏东南地区, 北起林芝市米林县, 经排龙乡的雅鲁藏布江大拐弯, 南到林芝市墨脱县。选取以雅鲁藏布江大拐弯(94°52'E, 29°30'N)为中心的 3 200 km<sup>2</sup> 范围为研究区(图 1), 该区域海拔 673~7 198 m, 原始森林覆盖率达到 56% 以上, 其中, 高山松、林芝云杉和川滇高山栎是分布最广泛的树种, 分别占森林总面积的 54.11%, 35.14% 和 10.74%。由于大峡谷地区几乎未受到人为活动的干扰, 且乔木树龄大, 林分郁闭度高, 枯落物丰富, 再加以充足的水汽条件, 使得该地森林具有极高的水源涵养价值。

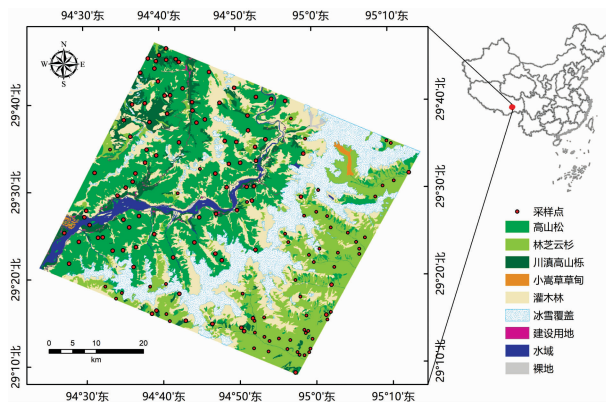


图 1 研究区地表概况及采样点位置分布

Fig. 1 Surface profile and sampling points distribution in the study area

### 1.2 样本采集

高山松和林芝云杉属于常绿针叶树种, 主要分布在雪线灌丛以下较高海拔区域, 川滇高山栎为常绿硬叶阔叶树种, 多分布于高山松林的下坡位。为保证枯落物的蓄积量保持在较高水平, 于 2020 年 8 月下旬正午 12:00—14:00, 在雅鲁藏布大峡谷对高山松、林芝云杉、川滇高山栎纯林进行野外采样。样本采集过程如下, (1)建模组: 按照地势条件和土壤类型均相当的原则在高山松林和林芝云杉林选择 60 棵成年

乔木, 在川滇高山栎林选择 30 棵成年乔木, 剪取每棵乔木不同高度处的健康叶片 5 张(针叶为 5 丛)。在已被采集叶片的乔木下设置小样方采集枯落物样本, 将未分解层和半分解层分开置于取样箱, 准确标记样本编号以确保叶片与枯落物一一对应。(2)验证组: 在高山松林和林芝云杉林设置 15 个 20 m×20 m 的大样方, 川滇高山栎林设置 10 个 20 m×20 m 的大样方, 每个样方内随机剪取 10 张(丛)健康成熟的叶片, 在样方四角及中间位置设置 20 cm×20 cm 的小样方采集 5 个枯落物样本, 最后以叶片和枯落物的平均值代表该大样方的实际水平。

### 1.3 光谱信息获取

#### 1.3.1 叶片高光谱反射率测定

使用 ASD Fieldspec 3 多功能光谱仪测定叶片光谱, 波长范围为 350~2 500 nm, 光谱分辨率 3 nm, 光谱采样间隔为 1 nm。采样时, 模拟正午太阳入射光设置线性光源, 视场角为 30°, 探头垂直于叶片, 距离约 5 cm; 为尽量降低环境和仪器系统误差的干扰, 每 15 min 对光谱仪进行一次白板校正。

#### 1.3.2 曲线平滑与降噪

光谱信息在采集过程中受大气水分和环境噪声的影响, 使光谱曲线出现波动, 采用移动平均法对光谱曲线进行降噪和平滑处理, 见式(1)

$$R'_i = \frac{1}{2k+1}(R_{i-k} + R_{i-k+1} + \dots + R_i + \dots + R_{i+k-1} + R_{i+k}) \quad (1)$$

式(1)中,  $R'_i$  为经过平滑处理后的光谱信息值;  $R_i$  为原始采集的光谱信息值;  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ;  $k=5$ 。经过上式的运算后, 光谱曲线的每一个点都由该点前后共 10 个点的平均值代替, 从而达到降低偶然误差和平滑曲线的目的。

### 1.4 遥感影像处理

哨兵 2 号(Sentinel-2)卫星携带的 MSI 多光谱成像仪包含可见光至短波红外共 13 个光谱波段, 波段空间分辨率分别为 10, 20 和 60 m, 过境周期为 5 d。相对于其他成像卫星产品而言, 哨兵 2 号数据在红边范围有三个窄波段, 对于植被信息的提取非常有利。从欧空局哥白尼数据中心(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)下载大峡谷地区 2020 年 8 月下旬的遥感影像, 经拼接裁剪、辐射定标、大气校正、几何校正和重采样得到可用于计算研究区植被指数的图像。此外, 为消除不同树种枯落物持水过程的差异性对反演精度的影响, 分别建立高山松、林芝云杉和川滇高山栎的枯落物有效拦蓄量反演模型, 最后将三类树种的反演结果进行拼接得到大峡谷地区森林枯落物水源涵养能力的空间分布。

### 1.5 植被指数计算

考虑到叶片的组织结构、自身含水量和易分解程度是影响枯落物持水性能的主要因素<sup>[8-11]</sup>, 筛选出能反映上述特征的植被指数进行 Person 相关系数分析: (1)归一化植被指数(NDVI)、增强植被指数(EVI)、红边指数(VOG): 表征植被长势、健康状态、环境胁迫程度等; (2)叶面叶绿素指数(LCI): 反映叶片叶绿素含量; (3)全球植被水分指数(GVMI): 监测叶片含水量; (4)氮素比值植被指数(NRI): 反映

叶片氮素密度；(5)植物蜡质参数(PWP)：与叶片表皮蜡质含量相关性高；(6)植被衰减指数(PSRI)：最大限度地提高胡萝卜素与叶绿素比率的灵敏度，预示植被衰老的程度。上述植被指数的计算方法如表 1，建模时采用 ASD 光谱仪采集的高光谱数据，并取各波段中心波长处的反射率计算植被指数。

表 1 植被指数计算方法

Table 1 Characteristic spectral parameters and calculation method

植被指数	计算方法
NDVI	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$
EVI	$2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + (6 \times \rho_R - 7.5 \times \rho_B) + 1}$
VOG	$\frac{\rho_{RE2}}{\rho_{RE1}}$
LCI	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RE1}}{\rho_{NIR} - \rho_R}$
GVM1	$\frac{(\rho_{NIR} + 0.1) - (\rho_{MIR} + 0.02)}{(\rho_{NIR} + 0.1) + (\rho_{MIR} + 0.02)}$
NRI	$\frac{\rho_G}{\rho_R}$
PWP	$\frac{\rho_G}{\rho_G - \rho_R}$
PSRI	$\frac{\rho_R - \rho_B}{\rho_{RE2}}$

注： $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_R$ 、 $\rho_B$ 、 $\rho_{RE1}$ 、 $\rho_{RE2}$ 、 $\rho_{MIR}$ 和 $\rho_G$ 分别代表近红外波段、红光波段、蓝光波段、红边第一个窄波段、红边第二个窄波段、中红外波段和绿光波段

## 1.6 枯落物属性测定

取回枯落物样本立即称其自然鲜重，然后放入 85 °C 恒温箱中烘干并称其干重，计算蓄积量和自然含水率；将烘干后的枯落物装入垫有尼龙布的土壤筛后浸水，完全浸泡 24 h 后取出悬挂，待其不再滴水时迅速称重，计算最大持水率(量)和有效拦蓄率(量)，计算公式如式(2)一式(6)。

$$R_0 = (M_0 - M) / M \times 100\% \quad (2)$$

$$R_m = (M_{24} - M) / M \times 100\% \quad (3)$$

$$H_m = R_m \times M \quad (4)$$

$$R_u = 0.85 \times R_m - R_0 \quad (5)$$

$$S_u = R_u \times M \quad (6)$$

式中， $M_0$ 为枯落物单位面积的自然鲜重( $t \cdot ha^{-1}$ )， $M$ 为烘干后单位面积的干重( $t \cdot ha^{-1}$ )，即蓄积量； $R_0$ 为自然含水率， $R_m$ 为最大持水率， $H_m$ 为最大持水量( $t \cdot ha^{-1}$ )； $R_u$ 为有效拦蓄率， $S_u$ 为有效拦蓄量( $t \cdot ha^{-1}$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 叶片光谱特征

#### 2.1.1 光谱反射率特征

在 View Spectral Pro 软件中显示 ASD Fieldspec 3 多功能光谱仪测得的样本数据，对曲线进行降噪和平滑处理，而

后分别绘制三类树种反射率的平均值曲线，如图 2 所示。大峡谷地区高山松、林芝云杉和川滇高山栎的光谱反射率总体呈现一致的变化规律，但各树种的反射波峰(谷)、高反射平台等特征波段差异显著。400~700 nm 波段(可见光)是植物叶片的强吸收波段，三组树种的反射率都很低；但川滇高山栎在<400 nm 的紫外波段表现出较高的反射率，分析认为川滇高山栎在高海拔环境下生长出较厚的角质膜以抵御强辐射和水分的损失，角质膜的存在使得叶片对紫外线极为敏感；林芝云杉和高山松在 560 nm(绿光)处的反射峰值非常接近，但在 680 nm(红光)处林芝云杉的吸收性更强。700~780 nm 是植被的反射率红边，叶片光谱从强吸收红光波段过渡到高反射近红外波段。780~1 350 nm(近红外)的光谱特征由叶片细胞结构决定，大量透明的色素和纤维素使得反射率变高，形成“近红外反射肩”；川滇高山栎的反射肩最高，分析认为阔叶树种的叶片结构比针叶复杂，因此光线在叶片内部散射的次数越多反射率就越高。此外，在此波段出现的两个微弱的吸收谷(970, 1 200 nm)是叶片水分所致。1 350~2 500 nm(中红外)是植物叶片的水分强吸收带，三组样本均在水分吸收谷(1 450, 1 940 nm)表现出明显的吸收性。

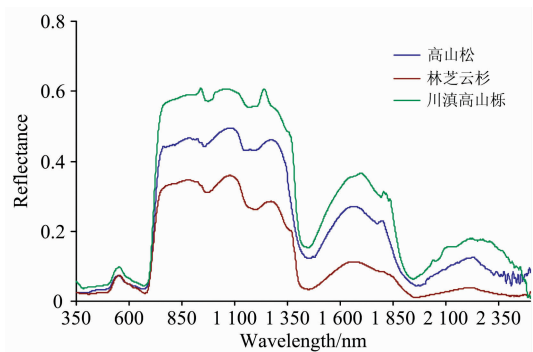


图 2 叶片光谱反射率

Fig. 2 Spectral reflectance of leaves

#### 2.1.2 光谱一阶导数特征

通过求导可见光范围的光谱曲线可以确定曲线的蓝边、黄边和红边等特征点，如图 3(a)所示。通常，蓝边是光谱反射率在 490~530 nm 区间内一阶导数峰值对应的波长，黄边对应的是 550~582 nm 波段内反射率一阶导数最小值的位置，红边是 680~750 nm 范围内反射率一阶导数最大值所在的波长。植被的蓝边、黄边和红边位置可以反映植被的生长态势和营养情况；对红边而言，植被长势越旺盛、健康状况越好，红边位置越向长波方向移动；反之，则越短波方向移动。从表 2 可以看出，高山松、林芝云杉和川滇高山栎的三边位置十分接近，说明三类树种在光谱反射率的特征点具有共性，且长势和健康状况处于同等水平。

如图 3(b)所示，由于植被在红边区域的光谱反射率变化最剧烈，且该波段蕴含的光谱信息最多，因此红边的应用还包含了以下几个参数：(1)红边斜率：红边区域内曲线斜率的最大值，与叶片叶绿素含量和叶面积指数呈显著正相关；(2)红边峰值面积：一阶导数曲线在红边范围内与坐标轴围

成的面积,主要受限于叶片叶绿素含量。结合表 2 的统计数值,尽管高山松、林芝云杉和川滇高山栎的红边位置区别不大,但红边斜率和红边峰值面积差异明显;川滇高山栎的红边斜率为 0.011 9,在三类树种中值最大,高山松次之为 0.009 5,林芝云杉的红边斜率最小,为 0.006 3。红边峰值面积与红边斜率表现出相同的趋势,这一趋势也与反射肩平台的反射率规律一致。

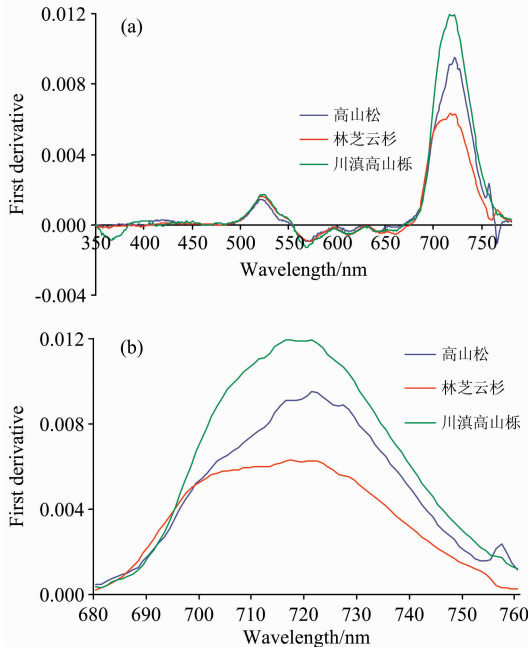


图 3 光谱一阶导数光谱

(a): 可见光波段; (b): 红边波段

Fig. 3 First derivative of spectrum

(a): The visible light band; (b): The red-edged band

表 2 蓝边、黄边、红边参数

Table 2 Parameter of blue edge, yellow edge and red edge

树种	蓝边位置/nm	黄边位置/nm	红边位置/nm	红边斜率	红边峰值面积
高山松	524	567	721	0.009 5	0.404 1
林芝云杉	522	572	717	0.006 3	0.307 6
川滇高山栎	524	568	721	0.011 9	0.523 0

## 2.2 枯落物水源涵养特性

### 2.2.1 枯落物蓄积量和自然含水率

将采集的样本按树种分类,计算每类树种枯落物的未分解层和半分解层占比、蓄积总量以及自然含水率的平均值。从表 3 看出,三类树种的半分解层占比由高到低次序为:林芝云杉>川滇高山栎>高山松,半分解层占比越高说明枯落物分解程度越高,反之,则越低。川滇高山栎作为阔叶树种却没有林芝云杉分解效率高,可能是因为高山栎叶片表面的蜡质膜阻碍了微生物的分解作用;高山松因自身含有较多油脂所以最不易分解。林芝云杉枯落物的蓄积总量(26.46 t·ha<sup>-1</sup>)和自然含水率(69.06%)在三类树种中最为突出,这是因为林芝云杉叶片易于分解且自身含水量较高,所以凋落物

在林下快速腐化并堆积;另外,经过分解的枯落物对水分的吸收和贮存能力大于未分解层,因此林芝云杉的自然含水率也最高。高山松的蓄积量最低,为 17.53 t·ha<sup>-1</sup>,分析认为未来得及分解的凋落物更易受到外力的冲刷而转移到别处,从而存有量偏少;此外,高山松林枯落物的自然含水率(30.84%)明显低于林芝云杉(69.06%)和川滇高山栎(62.89%),一方面是因为高山松作为针叶树种,其林冠层截留量大于阔叶树种,致使林内枯落物相对干燥,另一方面是高山松叶片的自身含水率低于同为针叶树种的林芝云杉,且相对低的分解程度不利于其保留水分。

表 3 枯落物蓄积量和自然含水率

Table 3 Litter Stock volume and natural water content

树种	蓄积量			自然含水率/%
	未分解层占比/%	半分解层占比/%	总量/(t·ha <sup>-1</sup> )	
高山松	53.68	46.32	17.53	30.84
林芝云杉	29.18	70.82	26.46	69.06
川滇高山栎	41.17	58.83	25.14	62.89

### 2.2.2 枯落物持水量和拦蓄量

根据枯落物浸水后的质量计算三类枯落物的最大持水量(率)和有效拦蓄量(率),如表 4。可见,林芝云杉的最大持水率和最大持水量均为最高,高山松和川滇高山栎最大持水率相当,但由于川滇高山栎的蓄积量更丰富,所以最大持水量高于高山松。但是,最大持水率和最大持水量只能说明枯落物持水能力的强弱,有效拦蓄率和有效拦蓄量才能表征枯落物对降水的实际拦蓄效果。对本研究的三类树种而言,有效拦蓄率和有效拦蓄量的排序分别为:高山松>林芝云杉>川滇高山栎,林芝云杉>川滇高山栎>高山松。高山松的枯落物在自然状态下最干燥,可以用来吸收外界水量的空间最大,造成其有效拦蓄率排名最靠前,但由于较少的蓄积量,导致有效拦蓄量排名滞后。分解程度最高的林芝云杉枯落物拥有和高山松相当的有效拦蓄率,自身蓄积量也大,因此对降水的有效拦蓄量最大。森林枯落物的水源涵养能力是对枯落物层整体功能的描述,包含对枯落物蓄积量和吸水性能的综合定量评价,因此,在描述持水拦蓄性能的各项参数中,有效拦蓄量最能直观地反映出枯落物的水源涵养能力。

表 4 枯落物持水拦蓄性能

Table 4 Water holding capacity of litter

树种	最大持水率/%	最大持水量/(t·ha <sup>-1</sup> )	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/(t·ha <sup>-1</sup> )
高山松	253.19	44.38	184.37	32.32
林芝云杉	296.25	78.39	182.75	48.36
川滇高山栎	257.61	64.76	156.08	39.24

## 2.3 枯落物有效拦蓄量预测建模

### 2.3.1 植被指数筛选

分别计算每类树种拟选定的 8 种植被指数(NDVI, EVI, VOG, LCI, GVMI, NRI, PWP 和 PSRI)与枯落物有效拦蓄量的 Person 相关系数,结果如表 5。

表 5 Person 相关系数分析

Table 5 Person correlation coefficient analysis

植被指数	Person 相关系数		
	高山松	林芝云杉	川滇高山栎
NDVI	0.481*	0.277	0.204
EVI	0.288	0.331*	0.231
VOG	0.345	0.312*	0.358*
GVMi	0.507*	0.546**	0.407*
LCI	0.396*	0.235	0.375*
NRI	0.194	0.363*	0.289
PWP	-0.623**	-0.437*	-0.565**
PSRI	-0.519**	-0.544*	-0.442**

注：\* 显著相关 ( $p < 0.05$ )，\*\* 极显著相关 ( $p < 0.01$ )

筛选出与有效拦蓄量显著相关和极显著相关的植被指数作为回归模型的自变量，按照系数由大到小的顺序排列，各种种参与回归的自变量如下：(1)高山松：PWP, PSRI, GVMi, NDVI, LCI；(2)林芝云杉：GVMi, PWP, PSRI, NRI, EVI, VOG；(3)川滇高山栎：PWP, PSRI, GVMi, LCI, VOG。从保留的植被指数中可以看出，三类树种林下枯落物的有效拦蓄量都与叶片蜡质参数(PWP)、植被长势(NDVI、EVI、VOG)、衰减程度(PSRI)、叶片含水量(GVMi)相关；此外，林芝云杉的拦蓄能力还与叶片氮素含量(NRI)相关，高山松和川滇高山栎的拦蓄能力还与叶绿素含量(LCI)相关。

2.3.2 水源涵养反演模型

将有效拦蓄量作为因变量，筛选后的植被指数作为自变量代入 SPSS22.0 软件中逐步回归，得到枯落物水源涵养能力的反演模型(表 6)。高山松、林芝云杉和川滇高山栎的模型拟合优度( $R^2$ )分别为 0.691, 0.779 和 0.743，表明模型拟合效果好，可以较好地反映枯落物水源涵养能力与植被指数的关系。此外，植被叶片蜡质参数和衰减指数与有效拦蓄量呈负向相关，说明叶片蜡质含量越高则越不易分解，因此蓄水能力越弱，同理，叶片衰老程度越高其细胞机能越低，吸水能力越弱。其余植被指数与有效拦蓄量呈正向相关，说明植被长势越好其枯落物的水源涵养能力越强。

表 6 各树种枯落物层水源涵养能力反演模型

Table 6 Inversion model of water conservation in litter layer of different tree species

植被类型	反演模型	$R^2$
高山松	$W_L = -13.78PWP^{**} - 10.69PSRI^{*} + 8.24GVMi^{*} + 5.51NDVI^{*} + 2.82LCI^{*} + 69.03$	0.691
林芝云杉	$W_L = 21.43GVMi^{**} - 15.77PWP^{**} - 10.81PSRI^{*} + 9.38NRI^{*} + 7.88EVI^{*} + 2.51VOG^{*} + 20.14$	0.779
川滇高山栎	$W_L = -15.16PWP^{**} - 12.73PSRI^{*} + 12.62GVMi^{*} + 9.64LCI^{*} + 6.79VOG^{*} + 72.11$	0.743

注： $W_L$  为枯落物层的水源涵养量 ( $t \cdot ha^{-1}$ )，\* 显著相关 ( $p < 0.05$ )，\*\* 极显著相关 ( $p < 0.01$ )

2.4 水源涵养能力空间分布反演与精度验证

以 Sentinel-2 影像为底图，基于上述模型分别反演高山松、林芝云杉和川滇高山栎的枯落物水源涵养能力，经空间拼接处理后得到图 4。水源涵养的高值主要出现在林芝云杉林区内部，少数出现在川滇高山栎林；从各林种内部来看，海拔越低，水源涵养能力越强，在近河谷的两侧，水源涵养

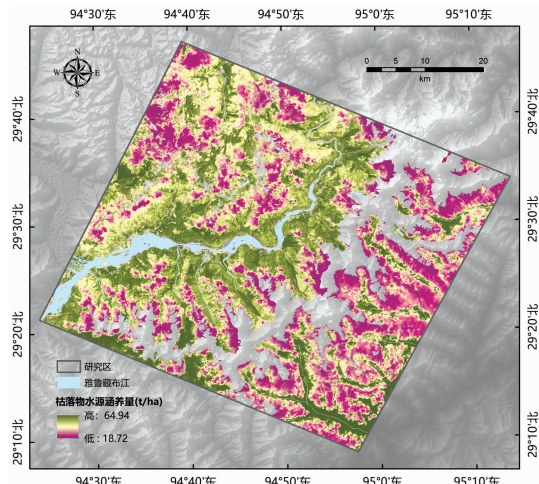


图 4 大峡谷森林枯落物水源涵养能力分布情况

Fig. 4 Water conservation and distribution of forest litter in Grand Canyon

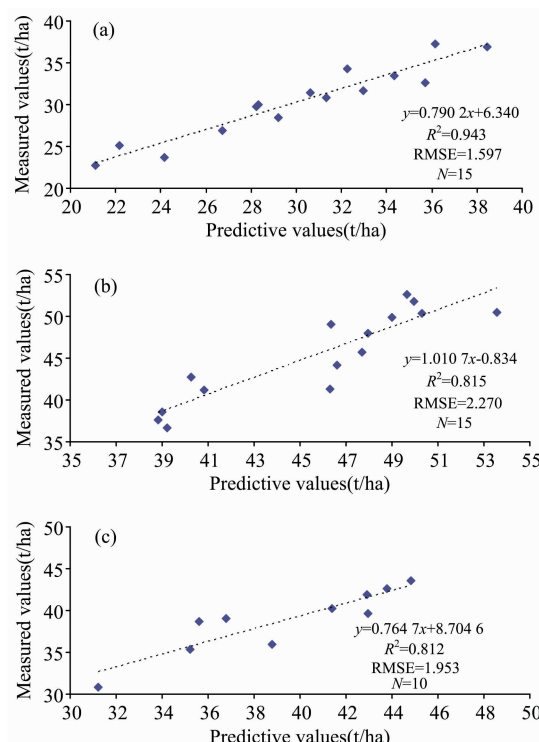


图 5 枯落物水源涵养能力反演模型精度评价

(a): 高山松; (b): 林芝云杉; (c): 川滇高山栎

Fig. 5 Precision evaluation of water conservation capacity for different species litter layer in model

(a): Pinus densata; (b): Picea Linzhi; (c): Quercus aquifolioides

值达到最高。总体而言,大峡谷研究区内森林枯落物层的水源涵养情况沿植被类型和地形大致呈带状分布,不同植被枯落物的水源涵养能力差异明显。

将验证组的叶片光谱反射信息代入各自树种的反演模型进行计算,得到枯落物的预测水源涵养量,并与实际测得的有效拦蓄量进行比对,模型的精度评价结果分别如图 5(a, b, c)所示。高山松、林芝云杉和川滇高山栎的检验点  $R^2$  分别为 0.943, 0.815 和 0.812, RMSE 分别为 1.597, 2.270 和 1.953, 表明模型的预测效果良好,可以用于大峡谷地区森林枯落物水源涵养能力的预测分布研究。

### 3 结 论

以高光谱技术为关系桥梁,探索了雅鲁藏布大峡谷地区高山松、林芝云杉、川滇高山栎的枯落物水源涵养能力与植被指数的相应关系;在此基础上,基于 Sentinel-2 影像定量反演了研究区水源涵养能力的空间分布情况,且反演模型的精度检验情况良好,可以为大峡谷地区的水资源保护提供决策依据和支持。

(1)高山松、林芝云杉、川滇高山栎三类树种的光谱反射率变化趋势大致相同,川滇高山栎的反射率总体最高,高山松次之,林芝云杉最低;川滇高山栎在紫外波段表现出明

显的反射特征,三类树种均在水分吸收谷表现出强吸收性。

(2)实测样本中,最能反映水源涵养能力的有效拦蓄量,从大到小排序均为:林芝云杉>川滇高山栎>高山松。原因在于林芝云杉的分解程度最高,枯落物蓄积量最大,因此对水分的贮存能力最强;川滇高山栎虽然是阔叶树种但其革质叶片不利于分解,因此枯落物的水源涵养能力不如林芝云杉突出;高山松含有较多油脂且枯落物蓄积量最低,导致持水拦蓄能力最弱。

(3)枯落物的水源涵养能力与表征植被生长状态、蜡质参数、叶绿素含量、氮素含量等信息的植被指数有明显的响应关系。总体而言,叶片蜡质参数和衰减程度越高,枯落物的水源涵养能力越弱;植被生长态势越好,水源涵养能力越强。

(4)雅鲁藏布大峡谷森林枯落物的水源涵养能力空间异质性显著,高值主要出现在林芝云杉林内,各林种内部呈现近谷两侧水源涵养能力最高的态势。

(5)枯落物水源涵养能力反演模型的精度评价结果良好,高山松、林芝云杉和川滇高山栎的检验点  $R^2$  分别为 0.943, 0.815 和 0.812, RMSE 分别为 1.597, 2.270 和 1.953, 表明模型可以用于大峡谷森林枯落物水源涵养能力的预测分布研究。

### References

- [ 1 ] ZHANG Biao, LI Wen-hua, XIE Gao-di, et al(张彪,李文华,谢高地,等). Journal of Ecology(生态学杂志), 2009, 28(3): 529.
- [ 2 ] WU Qin-xiao, ZHAO Hong-yan, LIU Xiang-dong, et al(吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation(土壤侵蚀与水土保持学报), 1998, (2): 3.
- [ 3 ] WEI Xiao-cha, ZHOU Qiu-wen, CUI Xing-fen, et al(韦小茶,周秋文,崔兴芬,等). Ecological Science(生态科学), 2017, 36(4): 120.
- [ 4 ] ZHU Jin-zhao, LIU Jian-jun, ZHU Qing-ke, et al(朱金兆,刘建军,朱清科,等). Journal of Beijing Forestry University(北京林业大学学报), 2002, (z1): 30.
- [ 5 ] Neris J, Tejedor M, Rodríguez, et al. Catena, 2013, 108: 50.
- [ 6 ] Dabney S M. Journal of Soil & Water Conservation, 1998, 53(3): 207.
- [ 7 ] Li Xiang, Niu Jianzhi, Xie Baoyuan. PLOS ONE, 2013, 8(7): e70328.
- [ 8 ] LIU Yu, ZHANG Hong-jiang, ZHANG You-yan, et al(刘宇,张洪江,张友焱,等). Bulletin of Soil and Water Conservation(水土保持通报), 2013, 33(6): 69.
- [ 9 ] DENG Ji-feng, DING Guo-dong, WU Bin, et al(邓继峰,丁国栋,吴斌,等). Journal of Beijing Forestry University(北京林业大学学报), 2014, 36(2): 108.
- [ 10 ] CHEN Li-qing, SUN Ze-ping, LI De-wen, et al(陈礼清,孙泽平,李德文,等). Resources and Environment of Yangtze River Basin(长江流域资源与环境), 2014, 23(7): 1048.
- [ 11 ] HE Shu-qin, GONG Yuan-bo, ZHENG Zi-cheng(何淑勤,宫渊波,郑子成). Resources and Environment of Yangtze River Basin(长江流域资源与环境), 2020, 29(9): 1986.
- [ 12 ] MA Jian-wei(马建威). Acta Geodaetica et Cartographica Sinica(测绘学报), 2017, 46(5): 666.

# Research on Inversion of Water Conservation Capacity of Forest Litter in Yarlung Zangbo Grand Canyon Based on Spectral Features

LONG Qian-qian<sup>1</sup>, ZHOU Ren-hao<sup>2</sup>, YUE De-peng<sup>1</sup>, NIU Teng<sup>1</sup>, MAO Xue-qing<sup>1</sup>, WANG Peng-chong<sup>3</sup>, YU Qiang<sup>1\*</sup>

1. Beijing Key Research Office of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Cyberspace Security Academy, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610200, China

3. Beijing Linmiao Ecological Environment Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China

**Abstract** Water conservation is an important part of the ecosystem service function. As a complex ecosystem, forests have different contributions to water conservation. The forest litter plays an important role in the water conservation function, for it directly covers the ground surface. Remote sensing and hyperspectral technology provide a solution for the long-distance detection of water conservation in planar areas. Especially in plateau areas, remote sensing is the most effective way to obtain surface information. In this paper, the hyperspectral data of main tree species were measured by ASD spectrometer in the Grand Canyon research area of Yarlung Zangbo. The litter samples were obtained by sampling on the plot and the water holding capacity of the samples was calculated. Use leaf spectrum information to construct vegetation index related to litter water conservation capacity, then establish multiple regression model of vegetation index and effective retention capacity, and invert the water conservation capacity distribution of main tree species in the Grand Canyon based on Sentinel-2 images. In the end, the accuracy of the inversion model is evaluated based on the verification points. The results showed that: (1) The reflectance of *Quercusaqui folioides* was the highest, the lowest was the *Picea Linzhi*, and the total reflectance trend of the three species was similar; (2) The effective interception amount of litter is sorted from large to small as follows: *Picea Linzhi* ( $48.36 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) > *Quercusaqui folioides* ( $39.24 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) > *Pinus densata* ( $32.32 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). *Picea Linzhi* leaves are easy to decompose and store, *Quercusaqui folioides*' leathery leaves and *Pinus densata*'s oily leaves are not conducive to decomposition. Therefore, the litter of *Picea Linzhi* has the highest effective interception amount. (3) Through the Person correlation coefficient analysis and the multiple linear regression model, it is found that the higher the wax parameters and attenuation degree of leaves, the weaker the water conservation capacity of litter; the better the vegetation growth trend, the higher the pigment and the water content of leaves, the stronger the water conservation capacity. (4) The results of the accuracy evaluation of the inversion model of the water conservation capacity of litter are good.  $R^2$  of the test points of *Pinus densata*, *Picea Linzhi* and *Quercusaqui folioides* is 0.943, 0.815 and 0.812, and RMSE is 1.597, 2.270 and 1.953. It shows that the model can be used for the prediction and distribution of the water conservation capacity of forest litter in Grand Canyon.

**Keywords** Hyperspectral; Water conservation; Litter; Remote sensing inversion; Yarlung Zangbo Grand Canyon

(Received Apr. 13, 2021; accepted Jul. 21, 2021)

\* Corresponding author