

多时相 Sentinel-2 影像在浙西北茶园信息提取中的应用

李龙伟^{1,2}, 李楠^{1,3}, 陆灯盛^{1,4}

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 3. 南京林业大学 生物与环境学院, 江苏 南京 210037; 4. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007)

摘要: 利用 Sentinel-2 遥感影像研究一种快速、准确提取茶园空间分布的新方法, 可为茶园经济林资源及其动态变化的快速检测提供新的手段。以浙江省西北部为研究区, 根据实地调查选取 6 类典型植被, 基于 4 个季节的 Sentinel 多光谱影像分析不同植被物候及光谱特征。茶园在 5 月经历修剪后与其他植被区别较大, 根据红边与短波红外波段构建归一化茶园指数(NDTI)。基于新指数建立决策树模型提取茶园, 通过谷歌地球对结果进行验证。结果显示: 归一化茶园指数可以最大限度扩大茶园与其他植被之间的差距。基于该指数提取茶园的总精度达 93.83%, Kappa 系数为 0.917, 成功实现了浙西北茶园信息的提取, 证明了使用红边波段提取茶园的潜力。图 6 表 1 参 17

关键词: 森林经理学; 茶园; Sentinel-2; 红边波段; 归一化茶园指数; 浙西北

中图分类号: S771.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)05-0841-08

Mapping tea gardens spatial distribution in northwestern Zhejiang Province using multi-temporal Sentinel-2 imagery

LI Longwei^{1,2}, LI Nan^{1,3}, LU Dengsheng^{1,4}

(1. Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 4. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China)

Abstract: To develop a new method for accurately mapping the spatial distribution of tea gardens using Sentinel-2 remote sensing imagery, a new approach to the mapping of tea garden resources in Anji of northwestern Zhejiang Province was produced. First, six types of typical vegetation were selected according to a field survey, and their phenological and spectral characteristics were analyzed based on multi-temporal Sentinel imagery. Second, because tea gardens differed from other vegetation types after being pruned in May, a Normalized Tea garden Index (NDTI) was constructed based on the red edge and short-wave infrared bands. Third, a decision tree model based on the new index was used to identify the tea gardens, a total 600 validation points were obtained by field survey, the overall accuracy (OA) and Kappa coefficient were used to evaluate classification accuracy of tea gardens. The accuracy assessment result indicated an overall accuracy of 93.83% and a Kappa coefficient of 0.917. Spatial distribution of the tea gardens was accurately extracted demonstrating the potential to extract tea gardens using the red edge band. The tea gardens was extracted by constructing a normalized tea gardens index, which was easy to understand and realize, and it was easy to operate. [Ch, 6 fig. 1 tab. 17

收稿日期: 2018-09-30; 修回日期: 2018-12-28

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LQ19D010010); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KY-CX17_0819); 南京林业大学博士学位论文创新基金资助项目

作者简介: 李龙伟, 从事植被遥感研究。E-mail: xflilongwei@126.com。通信作者: 陆灯盛, 教授, 博士, 从事遥感研究。E-mail: ludengsh@msu.edu.cn

ref.]

Key words: forest management; tea garden; Sentinel-2; red edge band; Normalized Tea Garden Index (NDTI); northwestern Zhejiang Province

随着茶叶价格飙升,茶农积极性高涨,大面积的山地被开发成茶园。茶叶大面积栽培,促进当地经济发展的同时引发了一系列生态环境问题。茶园面积过度扩张,种植面积明显超过理想面积,导致森林资源破坏,水土流失严重^[1]。茶园除草、施肥等经营措施,又导致土壤肥力下降、生物多样性降低、土地退化等系列问题。明确茶园的空间分布和栽培面积,是政府部门管理决策的关键。但茶园分布广泛,面积增加迅速,实地调查准确茶园面积及空间信息需耗费大量人力物力。遥感技术可有效地获取地表信息,既可以大面积、周期性的重复观测,也可以节省大量的人力、物力和时间^[2]。过去的几十年中,有学者利用遥感技术进行经济林专题信息提取等相关研究^[3-4]。梁守真等^[5]以 MODIS 和 Landsat 数据为基础构建分类模型,开展橡胶 *Hevea brasiliensis* 林提取研究。XI 等^[6]基于多时相 Landsat 影像使用混合像元分解方法提取山核桃 *Carya cathayensis* 分布范围,并检测其受干旱干扰程度。用传统 Landsat 等中等分辨率影像进行经济林信息提取,受空间分辨率限制,精度不高。随着遥感影像空间分辨率不断提高,高分辨率影像越来越多被应用于林业遥感中^[7]。WANG 等^[8]利用 GF-1 和 ZY-3 高分辨率影像,使用专家规则方法提取了香榧 *Torreya grandis* ‘Merrillii’ 在浙江的分布信息。梁文海等^[9]基于面向对象方法使用 GF-2 影像提取广西横县桉树经济林的分布。随着影像空间分辨率的提高,地物的空间信息更加丰富,但“同物异谱”现象也更加严重。由于高分辨率影像一般仅含红、绿、蓝、近红外等 4 个波段,受光谱分辨率限制,在区分植被类型时有一定的局限性。2015 年 12 月发射的 Sentinel-2 卫星包含 3 个红边波段,是绿色植物生长状况的敏感性波段。如 IMMITZER 等^[10]使用 Sentinel-2 数据对中欧农作物及树木进行分类,表明红边及短波红外波段可提取植被信息。茶园主要分布在景观复杂的丘陵山区,且茶园与灌丛等木本植被的光谱特征相似^[11],这些因素为茶园遥感提取带来一定困难,仅见个别学者应用遥感技术提取茶园信息^[11-13],尚无利用 Sentinel-2 数据提取茶园分布的研究。鉴于此,本研究以浙江西北部地区为研究区,基于 Sentinel-2 多光谱影像,结合茶园物候信息和经营管理模式,分析不同时间下茶园与其他地类的光谱特征,以红边波段构建归一化茶园指数,使用决策树方法对茶园信息进行提取,为 Sentinel-2 数据应用于植被提取及监测提供参考。

1 研究区概况

研究区位于浙江省西北部(30°39′~30°52′N, 119°30′~119°58′E)(图 1),东西距离为 46.43 km,南北距离为 28.77 km,总面积为 1 335.79 km²。研究区地形以山地丘陵为主,海拔为 0~700 m。该地属于亚热带季风气候区,光照充足、气候温和、雨水充沛、四季分明,适宜茶树生长。该地年降水量为 1 512.4 mm,年日照时数为 1 961.5 h,年平均气温为 16.9 °C。研究区内的茶园类型主要为白茶 *Koilodepas hainanense* 树,属灌木型,中叶类,主干明显,为安吉县所特有^[14]。根据安吉县森林资源规划设计调查成果报告,2016 年安吉县有白茶 12 058 hm²,占经济林面积的 60.13%,主要分布在梅溪、溪龙、递铺、天子湖、孝源、孝丰、杭垓镇等乡镇(街道)。白茶在 1998 年不足 100 hm²,2007 年增加到 5 958 hm²,2016 年增加到 12 058 hm²,增长迅速。

2 数据收集及预处理

2.1 数据收集

本研究使用的遥感数据是从欧洲太空局的 Copernicus Open Access Hub 网站上获取 Sentinel-2 卫星数据,是大气表观反射率一级产品(L1C),共 4 景无云数据,时间分别为 2017 年 10 月 31 日,2018 年 2 月 13 日,2018 年 5 月 4 日和 2018 年 7 月 18 日。Sentinel-2 卫星搭载多光谱影像仪(multi-spectral instrument, MSI),拍摄影像包含 13 个波段,其中蓝、绿、红和近红外波段空间分辨率为 10 m,3 个红边波段、窄波近红外波段、2 个短波红外波段空间分辨率为 20 m,沿海气溶胶波段、水蒸气波段和卷云波段的分辨率为 60 m。本研究选用分辨率为 10 和 20 m 共 10 个多光谱波段。数字高程模型(DEM)下载

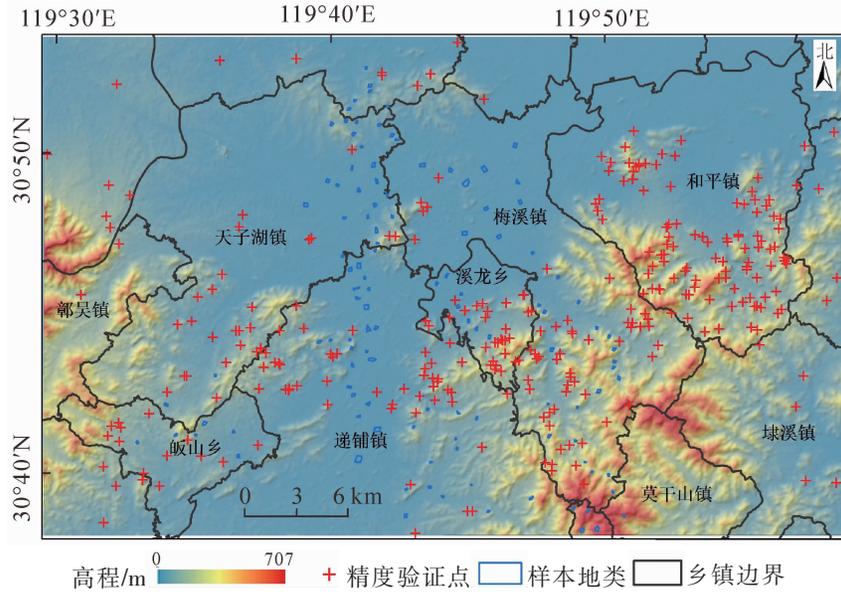


图 1 研究区位置及验证样点分布示意图

Figure 1 Location of study area and validation points

于美国航空航天局(NASA)官网, 空间分辨率为 12.5 m。

2016–2018 年通过野外调查收集了研究区内主要绿色植被类型的地面数据, 如茶园、毛竹 *Phyllostachys edulis* 林、阔叶林和针叶林等, 其中的毛竹林被分为大年和小年分别调查。通过佳能 D7000 GPSCAMERA, 获取了带有坐标信息的地类照片 300 张。同时, 通过野外调查和室内勾绘的方法在奥维互动地图上标定了 517 个不规则多边形地块, 将调研获取的真实地块信息转化为矢量格式, 以此作为本研究使用的样本数据。

2.2 数据预处理

数据预处理主要包括投影系统转换、大气校正、几何校正、地形校正 4 部分。首先将本研究的空间数据统一转换为 UTM 50N 投影坐标系统, 大地基准为 WGS 1984。使用欧洲太空局的 SNAP 软件中的 Sen2Cor 插件对原始数据进行大气校正, 获取地表反射率数据^[15]。基于双 3 次卷积插值法, 将校正后的 10 个波段重采样到 10 m。在 Sentinel-2 影像和 DEM 上选取均匀分布的 30 个控制点, 采用 3 次卷积多项式模型进行几何校正, 均方根误差控制在 0.5 个像元之内。

为了减少地形对分类的影响, 基于 DEM 数据, 采用分坡度的 C 校正模型^[16]对 Sentinel-2 影像进行地形校正。 C 校正模型是基于影像像元值与太阳入射角余弦值构建线性关系, 并加入经验参数对影像进行校正。其计算公式如下:

$$\rho_m = \rho \times \frac{\cos\beta + c}{\cos i + c}; \quad (1)$$

$$\cos i = \cos\theta \cos\beta + \sin\theta \sin\beta \cos(\lambda - \omega)。 \quad (2)$$

式(1)~(2)中: ρ_m 为校正后像元值; ρ 为校正前像元值; c 为校正系数; i 为太阳入射角; β 为太阳天顶角; λ 为太阳方位角; θ 为坡度; ω 为坡向。

从影像头文件中获取太阳天顶角和高度角, 基于 DEM 计算坡度和坡向。将坡度分为 4 个等级, 分别对影像的像元值和太阳入射角余弦值进行拟合, 获取校正系数 c 。结果显示: 各波段的校正系数均小于 1, 校正后的影像凹凸立体感明显消除并趋于扁平(图 2), 阴坡和阳坡亮度值差异得到改善, 同时对校正前后影像的均值和标准差(表 1), 校正后各波段均值增加, 标准差减小, 地形校正效果较好。

3 研究方法

茶树属于灌木, 四季常绿, 与灌丛等植被的光谱特征相似。但研究区内茶树有其特殊性, 3–4 月是茶叶采摘期, 4 月下旬和 5 月初进行修剪, 受人为经营管理影响, 茶园结构单一, 林下无植被。这些特征为区分茶树与其他植被提供了可能。本研究分别对不同地类的光谱特征、季节特征、茶园指数构建和

表1 地形校正前后影像反射率的均值和标准差

Table 1 Mean and standard of image reflectivity before and after topographic

波段	原始影像反射率		校正后影像反射率	
	均值	标准差	均值	标准差
蓝	492.11	191.86	489.98	191.78
绿	798.48	202.09	778.50	199.13
红	567.06	295.34	561.42	292.03
红边 1	1 207.39	251.14	1 173.36	246.34
红边 2	2 775.97	523.29	2 619.06	484.50
红边 3	3 218.58	636.61	3 026.55	585.77
近红外	3 427.66	701.01	3 212.54	642.83
窄波近红外	3 406.25	657.24	3 202.82	604.11
短波红外 1	2 092.51	359.25	2 022.74	348.64
短波红外 2	1 158.88	318.39	1 142.87	315.91

茶园信息提取与精度验证进行分析。

3.1 光谱特征分析

综合考虑茶园的物候特征、人为干扰和遥感数据的可获取性,本研究选择了茶园生长减缓期(12月)、休眠期(2月)、修剪期(5月)和生长旺盛期(7月)4个时期的 Sentinel-2 数据的地表反射率图像,分别进行地物光谱特征分析。基于野外调查的样本数据,从 Sentinel-2 影像上选择 2017-2018 年没有变化的 6 类典型植被样本。其中毛竹林选取了小年 830 个像元,大年 960 个像元,阔叶林 940 个像元,针叶林 800 个像元,茶园 680 个像元,农田 780 个像元,每个像元大小为 10 m × 10 m。从影像上提取每个地类在不同光谱波段上的光谱反射率,绘制不同季节不同地类的光谱曲线图(图 3),对比分析茶园的物候特征,以及茶园与其他地类在光谱曲线上的差异。

在茶园生长减缓期(12月),茶园和其他植被类型均表现出健康植被的光谱特征,针叶林在各个波段上反射率均低于其他地类,茶园仅在第 3 个红边波段和 2 个近红外波段的反射率比其他植被略高,但差异不明显。在冬末春初的 2 月,针叶林和阔叶林在各个波段的反射率低于其他地类,而农田还未种植作物,呈现裸地光谱特征,即农田在红边和近红外的反射率明显降低,而在短波红外波段上的反射率则明显高于其他地类,而茶园和竹林在冬季常绿,光谱特征接近,这个时期的茶园与竹林易混淆。在春末夏初的 5 月,阔叶林、小年竹林开始换叶,它们在红边和近红外的反射率明显升高,而茶园由于统一修剪,枝叶减少,裸地露出,此时所表现出的光谱特征与冬季的农田类似,即茶园在红边和近红外波段的反射率明显下降。除此之外,茶园在红边 3 波段上的反射率低于其他所有植被地类,而在短波红外 2 波段上的反射率则高于其他所有植被。在 7 月,各个植被类型都表现出生长旺盛期的植被光谱特征,各个地类之间的光谱反射率差异较小。

总体上,研究区内的植被在不同时期表现出明显的季节特征和光谱差异,茶园和其他典型植被在 12 月、2 月和 7 月表现的光谱特征较一致,区分性不大,而 5 月茶园与其他植被类型光谱曲线特征明显不一致,因此可确定茶园提取的最佳时间在 5 月。由于农田存在休耕期,因此在 5 月茶园最容易混淆的地类为农田和裸地。

3.2 季节指数构建与对比

归一化植被指数 N_{DVI} (normalized difference vegetation index)是反映植被生长状态的指示因子^[17]。本研究首先计算了各个月的归一化植被指数。计算公式为:

$$N_{DVI_m} = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (3)$$

A. 校正前影像 B. 校正后影像



图2 地形校正前后对比示意图

Figure 2 Images comparison before and after terrain correction

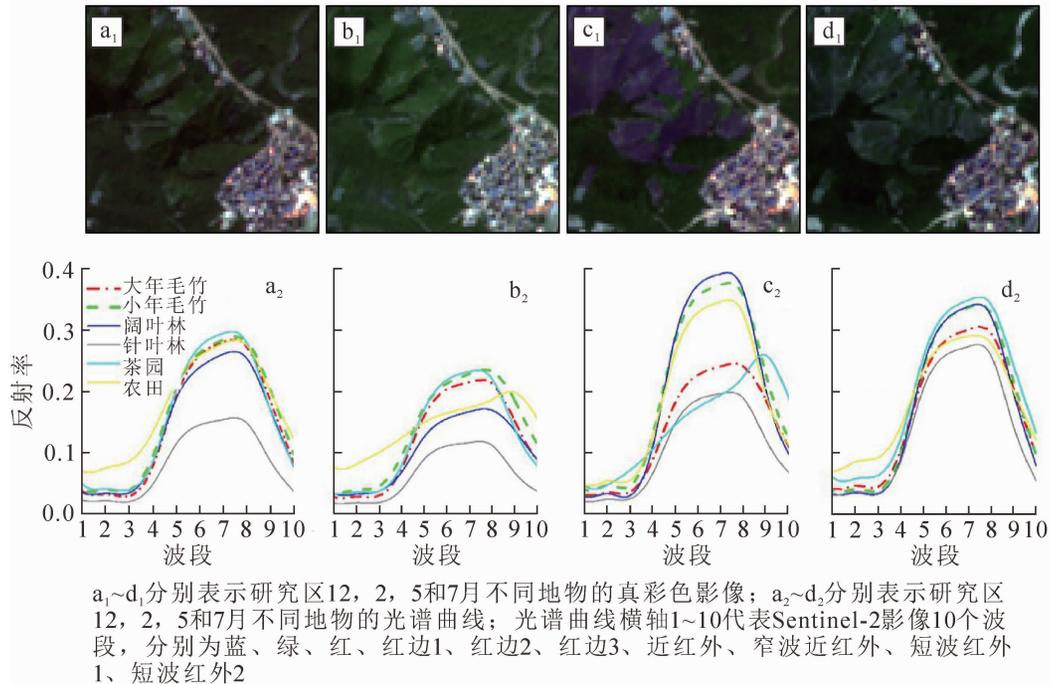


图 3 研究区内 Sentinel-2 影像真彩色组合图及主要植被类型光谱曲线示意图

Figure 3 True color combination of Sentinel-2 images and reflectance curves of vegetation

式(3)中: m 表示月份, 如 N_{DVI_5} 表示 5 月的归一化植被指数; ρ_{nir} 和 ρ_{red} 分别为 Sentinel-2 数据的近红外波段(中心波长 842 nm)和红波段(中心波长 665 nm)的反射率。

根据多时相 Sentinel-2 数据的光谱特征曲线分析结果, 在 2 和 5 月, 茶园和农田在红边波段、近红外以及短波红外波段与其他地类的明显差异。计算短波红外 2 和红边波段 3 的归一化指数时可以突出茶园和农田在 2 个波段上的差异, 因此构建归一化茶园指数 N_{DTI} (normalized difference tea garden index)。表达式如下:

$$N_{DTI_m} = \frac{\rho_{swir_2} - \rho_{red-edge_3}}{\rho_{swir_2} + \rho_{red-edge_3}} \quad (4)$$

式(4)中: m 表示月份, 如 N_{DTI_5} 表示 5 月的归一化茶园指数, ρ_{swir_2} 和 $\rho_{red-edge_3}$ 分别为 Sentinel-2 数据的短波红外波段(中心波长 2 190 nm)和红边波段(中心波长 783 nm)的反射率。根据式(3)和式(4), 分别计算不同月份的归一化植被指数和归一化茶园指数, 统计分析研究区内主要地类的归一化植被指数和归一化茶园指数值, 对比分析茶园与其他地类的可区分性。如图 4 所示: 不透水地表和水体的归一化植被指数和归一化茶园指数表现出完全相反的指数值, 2 个指数都可以将不透水地表和水体与其他植被区分, 其中 N_{DVI_2} 对这 2 个地类的区分性更好, 而且合适的取值还可以将与茶园最易混淆的农田信息剔除。茶园与其他典型的植被在 10, 2 和 7 月的归一化茶园指数值比较接近, 区分度很低, 这是由于它们光谱特征接近, 而在 5 月, 茶园归一化茶园指数值明显大于其他植被, 因此 N_{DTI_5} 是区分茶园与其他植被的最优指数。

3.3 茶园信息提取与精度验证

本研究基于光谱特征分析和建立的归一化茶园指数, 计算了 4 个不同季节的归一化植被指数和归一化茶园指数, 对比了研究区内主要地类在不同季节指数上的特征, 最大程度地提高了茶园与其他地类的可分离度。最终基于归一化植被指数 N_{DVI_2} 和归一化茶园指数 N_{DTI_5} 构建决策树, 进行茶园信息的提取。

本研究精度验证的方法是混淆矩阵法。分类数据是基于 Sentinel-2 影像的决策树分类结果, 参考数据是空间分辨率为 0.6 m 的 2018 年谷歌地球数据和后续实地调查的真实地块数据。分类结果为 2 类: 一类是茶园; 另一类是其他地类, 主要有农田、不透水地表、植被和裸土等。为保证精度验证点的客观性, 从分类结果中分层随机选取 600 个验证点, 即茶园和其他地类各 300 个验证点, 结合谷歌地球影像数据和实地调查数据进行精度评价, 利用混淆矩阵和 Kappa 系数方法, 对茶园提取结果进行精度评价。

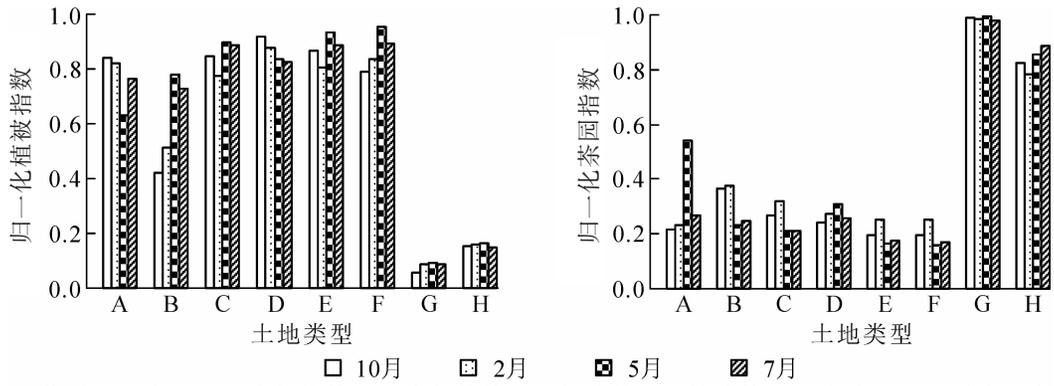


图4 研究区内主要地表类型的归一化植被指数(N_{DVI})与归一化茶园指数(N_{DTI})

Figure 4 Normalized difference vegetation index(N_{DVI}) and normalized tea garden index(N_{DTI}) of typical land cover

4 结果与分析

4.1 各地类在植被指数上的特征

从图5可以看出：各个地类在不同季节的指数上反映的特征不同。在2月归一化植被指数图(图5A)上，水体呈现黑色，裸土、农田和不透水地表呈灰黑色，而茶园和植被呈亮白色。在2月归一化茶园指数图(图5B)上，茶园、部分植被和水体的值最低，呈黑色，裸土、农田、部分植被呈浅灰色，部分不透水地表呈白色。在5月归一化植被指数图(图5C)上，水体值最低，呈黑色，农田、茶园、裸地和不透水地表呈灰色，而植被呈亮白色。在5月归一化茶园指数图(图5D)中，水体和部分不透水地表的值最高，呈亮白色，茶园、部分不透水地表、裸地的值较低，呈灰色，而农田和植被类型呈黑色。

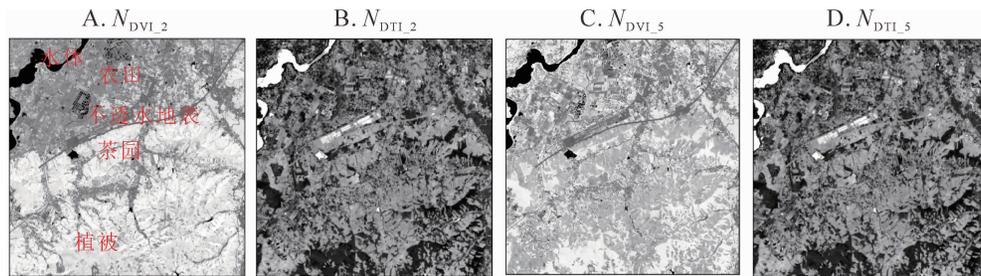


图5 各地类在指数上的特征示意图

Figure 5 Characteristic graphs of main land cover in index

4.2 茶园信息提取的指数选择

结合研究区植被类型和其他地类在2个归一化指数上的表现，茶园信息提取的关键在与找到它与其他植被类型的区别，因此本研究选取了冬季的归一化植被指数和5月的归一化茶园指数2个最优变量进行茶园信息的提取。首先，选用了冬季的归一化植被指数 N_{DVI_2} 区分植被和非植被地类，在决策树中选取阈值0.3，将植被和非植被区分开来，即当 $N_{DVI_2} > 0.3$ 的像元为植被地类，而 $N_{DVI_2} < 0.3$ 的像元则为其他地类，如裸土、不透水地表、水体等。结合图4和图5可知：5月归一化植被指数和茶园指数区分茶园与其他植被的效果较好，且5月归一化茶园指数优于5月归一化植被指数。因此，本研究选择基于归一化茶园指数对茶园与其他植被类型进行区分，选取阈值0.4，当 $N_{DTI_5} > 0.4$ 的像元皆为茶园信息，最终将决策树分类结果汇总为茶园和非茶园2个大类，并获取研究区的茶园空间分布数据。

4.3 茶园空间分布

图6可知：研究区内茶园主要分布在研究区的中下部，总体呈西南—东北方向，片状分布。结合研究区的地形图可以发现：茶园主要分布在山地与平原交界处的缓坡丘陵地带，坡度主要集中在 $5^\circ \sim 25^\circ$ ，这与茶园的的生长环境要求相符。利用空间自相关分析发现：茶园的空间范围与人类居住范围空间相关性较强，这是由于大多数茶园需要人工养护，适当的距离可以节约成本。研究区内茶园总面积 99.9 km^2 ，约占研究区总面积的7.7%，按行政区划统计，和平镇的茶园分布最广，达 31.32 km^2 ，其次为递铺镇和

- and its countermeasures [J]. *J Huzhou Univ*, 2015, **37**(9): 10 – 13.
- [2] LU Dengsheng, WENG Qihao. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance [J]. *Int J Remote Sensing*, 2007, **28**(5): 823 – 870.
- [3] LIU Shanshan, WEI Xinliang, LI Dengqiu, *et al.* Examining forest disturbance and recovery in the subtropical forest region of Zhejiang Province using Landsat time-series data [J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(5): 479.
- [4] LI Nan, LU Dengsheng, WU Ming, *et al.* Coastal wetland classification with multiseasonal high-spatial resolution satellite imagery [J]. *Int J Remote Sensing*, 2018, **39**(23): 8963 – 8983.
- [5] 梁守真, 陈劲松, 吴炳方, 等. 应用面向对象的决策树模型提取橡胶林信息[J]. 遥感学报, 2015, **19**(3): 485 – 494.
- LIANG Shouzhen, CHEN Jinsong, WU Bingfang, *et al.* Extracting rubber plantation with decision tree model based on object-oriented method [J]. *J Remote Sensing*, 2015, **19**(3): 485 – 494.
- [6] XI Zhenyuan, LU Dengsheng, LIU Lijuan, *et al.* Detection of drought-induced hickory disturbances in western Lin'an county, China, using multi-temporal Landsat imagery [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(4): 345.
- [7] 周静平, 李存军, 胡海棠, 等. 森林植被遥感监测影像最佳分辨率选择[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(4): 716 – 723.
- ZHOU Jingping, LI Cunjun, HU Haitang, *et al.* Optimal resolution selection for monitoring forest vegetation using remote sensing images [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(4): 716 – 723.
- [8] WANG Yajie, LU Dengsheng. Mapping *Torreya grandis* spatial distribution using high spatial resolution satellite imagery with the expert rules-based approach [J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(6): 564.
- [9] 梁文海, 刘吉凯, 张伟, 等. 基于面向对象方法的 GF-2 影像桉树林信息提取[J]. 浙江农林大学学报, 2017, **34**(4): 721 – 729.
- LIANG Wenhai, LIU Jikai, ZHANG Wei, *et al.* Extracting *Eucalyptus* information using GF-2 images based on an object-oriented method [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2017, **34**(4): 721 – 729.
- [10] IMMITZER M, VUOLO F, ATZBERGER C. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in central Europe [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(3): 166.
- [11] 许光明. 基于面向对象和多源数据融合的茶园遥感提取研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
- XU Guangming. *Research on Remote Sensing Extraction of Tea Garden Based on Object-oriented and Multi-source Data Fusion* [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2016.
- [12] 刁亚芹, 韩莹, 李兆富. 2000 年以来天目湖流域茶园分布变化及趋势模拟[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 799 – 808.
- DIAO Yaqin, HAN Ying, LI Zhaofu. Spatio-temporal change of tea plantation since 2000 and model-based prediction in the Tianmuhu Reservoir watershed [J]. *J Lake Sci*, 2013, **25**(6): 799 – 808.
- [13] 朱泽润. 基于高分辨率遥感影像的茶园场景提取方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- ZHU Zerun. *Tea Garden Scene Detection from High-Resolution Remote Sensing Image* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [14] 陆文渊, 钱文春, 赖建红, 等. 安吉白茶品质的气候成因初探[J]. 茶叶科学技术, 2012(3): 37 – 39.
- LU Wenyuan, QIAN Wenchun, LAI Jianhong, *et al.* Preliminary studies for the climate causes on quality characteristics of Anji-baicha [J]. *Tea Sci Technol*, 2012(3): 37 – 39.
- [15] TOMING K, KUTSER T, LAAS A, *et al.* First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(8): 640.
- [16] RICHTER R, KELLENBERGER T, KAUFMANN H. Comparison of topographic correction methods [J]. *Remote Sensing*, 2009, **1**(3): 184 – 196.
- [17] TUCKER C J, PINZON J E, BROWN M E, *et al.* An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data [J]. *Int J Remote Sensing*, 2005, **26**(20): 4485 – 4498.