

奉节县脐橙果园用地时空演变特征与驱动因子分析

王 斌^{1,2} 何丙辉¹ 林 娜³ 王 伟³ 李天阳¹ 安丽超²

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市地理信息和遥感应用中心, 重庆 401147;
3. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 为研究脐橙果园用地时空演变规律和驱动力机制, 制定三峡库区可持续土地利用政策, 维持区域经济发展与生态环境保护的良性平衡, 以三峡库区脐橙主产区重庆市奉节县为研究区, 利用地理国情、遥感影像等多源数据, 在自然、社会经济 2 个类别基础上引入政策类因子, 选择像元、乡镇 2 个尺度的 26 个潜在因子, 利用随机森林回归方法定量分析脐橙果园用地变化驱动因子的相对重要性以及主要因子的边际依赖性, 探究 2000—2019 年期间奉节县脐橙果园的时空演变格局。结果表明: 2000—2019 年期间奉节县脐橙果园呈快速扩张态势, 总体规模增幅达 150%, 年均增长达 7.5%, 主要沿长江与梅溪河、大溪河、草堂河、朱衣河等主要水系呈带状分布, 顺着流域峡谷方向逐步扩张; 像元尺度的与水源地距离、与城区距离、土壤 pH 值和乡镇尺度的平均坡度、平均高程、脐橙产业扶贫专项资金数额、现代农业柑橘专项资金数额、脐橙产业科技项目资金数额以及坡向等驱动因子的相对重要性位居前 9 位, 政策因子在脐橙果园扩张中的贡献较为显著, 说明需要制定更适宜的政策来引导脐橙产业健康发展; 脐橙果园扩张对各主要驱动因子的边际依赖性较强, 不同空间层级之间存在差异性。总体而言, 脐橙果园扩张倾向于发生在平均坡度 15°~25°、平均高程 200~450 m、距离水源 3 km 内、土壤 pH 值为 5.5~7.6, 有资金支持、区位条件好的区域。本研究可为制定引导脐橙产业健康可持续发展的土地利用政策提供有效的技术参考依据。

关键词: 脐橙果园; 时空演变; 随机森林回归; 驱动因子; 土地利用/覆被; 奉节县

中图分类号: F301.24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)06-0204-11

OSID: 

Spatial and Temporal Evolution of Navel Orange Orchard Land and Its Driving Factors in Fengjie County

WANG Bin^{1,2} HE Binghui¹ LIN Na³ WANG Wei³ LI Tianyang¹ AN Lichao²

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

2. Chongqing Geomatics and Remote Sensing Center, Chongqing 401147, China

3. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To study the temporal and spatial evolution law and driving force mechanism of navel orange orchard land, and formulate sustainable land use policy and maintain a good balance between economic development and ecological environment protection in the Three Gorges Reservoir area, Fengjie County of Chongqing, the main production area of navel orange, was selected as the research area, the temporal and spatial evolution pattern of navel orange orchard in Fengjie County from 2000 to 2019 was explored by using multi-source data such as geographical national conditions data and remote sensing images. On the basis of natural and socio-economic categories, policy category was introduced, totally 26 potential factors of pixel and township scales were selected, and then the random forest regression method was used to quantitatively analyze the relative importance of driving factors of land use change in navel orange orchard, and the marginal effects of main factors were also analyzed. The results showed that the navel orange orchard in Fengjie County was expanded rapidly from 2000 to 2019, with an overall scale increase of 150% and an average annual growth of 7.5%. They were mainly distributed along the Yangtze River,

收稿日期: 2021-02-20 修回日期: 2021-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771312)和重庆市教委科技项目(KJQN201800747)

作者简介: 王斌(1979—), 男, 博士生, 重庆市地理信息和遥感应用中心教授级高级工程师, 主要从事 3S 技术研究, E-mail: 79603730@qq.com

通信作者: 何丙辉(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事 3S 技术及其在资源环境、水土保持应用研究, E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

Meixi River, Daxi River, Caotang River, Zhuyi River and other main water systems in a zonal distribution, and gradually expanded along the river valley direction. The relative importance of the following driving factors ranked in the top nine were as follows: distance from water source, distance from urban area, soil pH value at pixel scale, and average slope, average elevation, special fund for poverty alleviation of navel orange industry, special fund for modern agricultural citrus industry, science and technology project fund of navel orange industry at township scale and aspect. The contribution of policy factors in the expansion of navel orange orchard was significant, which indicated that more appropriate policies were needed to be formulated to guide the healthy development of navel orange industry. The marginal dependence of navel orange orchard expansion on the main driving factors was strong, and there were differences among different spatial levels. On the whole, the expansion of navel orange orchards tended to occur in areas with average slope of $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$, average elevation of 200 ~ 450 m, distance from water source less than 3 km, soil pH value of 5.5 ~ 7.6, financial support and good location conditions. The relative importance of the driving factors of land use/cover change (LUCC) in navel orange orchard was quantitatively analyzed, the driving mechanism of navel orange orchard expansion was explained, and effective technical reference for formulating land use policies was provided to guide the sustainable development of navel orange industry.

Key words: navel orange orchard; spatial-temporal evolution; random forest regression; driving factor; land use/cover change; Fengjie County

0 引言

大规模种植经济作物导致原有林地、耕地等被替代,这已成为全球范围内较为典型的土地利用/覆被变化(Land use/cover change, LUCC)过程,尤其在热带、亚热带地区比较多见^[1]。种植经济作物可为地区和农户带来比粮食作物更可观的经济收益,同时劳力投入也明显少于种植粮食作物。但是,经济作物扩张会影响生态系统服务的供给,带来诸如生物多样性降低、土壤肥力下降、CO₂排放增加以及水土流失加剧等生态环境问题,对农业可持续发展造成较大的威胁^[2-3]。

近年来,对经济作物用地变化驱动力的研究逐渐增多^[1,3-10]。大多研究认为,土地利用扩张内部驱动机制具有非线性和复杂性。目前,在建立驱动因子体系时大部分研究充分考虑了自然和社会经济2方面,但对政策因子的研究相对较少,可尝试将政策因子纳入驱动力因子范畴,以探索政策因子在经济作物扩张过程中的重要程度。以往研究采用的传统经验统计法(Empirical-statistical)依靠先验知识,不能很好地解释非线性和复杂要素的关联关系^[11]。而机器学习方法能更好地解释非线性要素之间的复杂关系,在LUCC建模中更具优势^[11-12]。随机森林回归模型作为新型机器学习算法,可对各变量的相对重要性进行排序,并定量分析某特定变量的边际依赖性,对经济作物土地利用驱动力因子有更强的分析和解释能力^[3],因此,可用来探讨奉节脐橙果园扩张的驱动力机制。

脐橙是奉节县乃至三峡库区的支柱性农业产业,近年来在乡村振兴、精准扶贫等相关背景下,发展较为迅速,已成为当地居民脱贫致富的产业。据奉节县年鉴、政府工作报告、脐橙官方公众号及相关资料显示,在2000—2020年短短的20年间,奉节县脐橙产业总体规模增长约150%,年均增长约7.5%,已成为奉节主导产业之一。同时,奉节地形地貌复杂,是典型的生态环境敏感区,近年来整体水土流失和滑坡等地质灾害愈发严重。因此,探讨当地脐橙果园扩张的态势和动因,对进一步分析其与生态环境之间的关联关系、制定更适宜的可持续土地利用政策、优化未来产业发展规划及生态环境保护规划等具有重要的现实意义。

本文基于Landsat影像、高分二号、地理国情监测等数据,利用随机森林回归方法对2000—2019年期间奉节县脐橙果园时空演变格局和驱动力因子进行定量分析,以期对脐橙产业的科学发展、区域土地可持续利用提供决策支持。

1 研究区概况

奉节县地处重庆市东部、三峡库区腹心地区,位于东经 $109^{\circ}1'17'' \sim 109^{\circ}45'58''$ 、北纬 $30^{\circ}29'19'' \sim 31^{\circ}22'33''$,东邻巫山县,南接湖北省恩施市,西连云阳县,北界巫溪县,幅员面积4 098.44 km²(《奉节年鉴·2020》),如图1所示。奉节属四川盆地东部山地地貌,海拔135 ~ 2 123 m,境内山地面积占总面积的88.3%,中山(海拔1 000 m以上)占总面积80.01%,北部为大巴山南麓的一部分,东部和南部为巫山和七曜山的一部分,长江横切七曜山形成著

名的瞿塘峡;地貌总体为东南、东北高而中部偏西稍平缓,南北约为对称分布,以长江为对称轴,离长江越远海拔越高,有少量平缓河谷平坦;境内长江干流41.5 km,有梅溪河、大溪河、草堂河、朱衣河等主要支流;县境属中亚热带湿润季风气候,四季分明,无霜期长,雨量充沛,日照时间长,年平均无霜期287 d,年平均湿度67%,年平均降水量1 132 mm,常年日照时数为1 639 h。

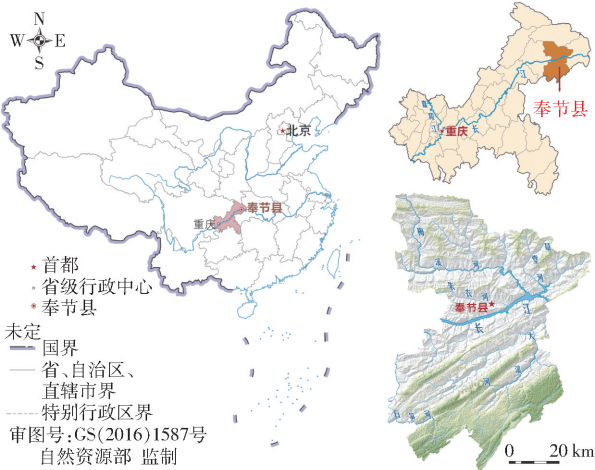


图1 研究区位置
Fig.1 Location map of study area

奉节县具有脐橙生产的“无台风、无冻害、无检疫性病虫害”的三大独特生态优势,是世界上少有的脐橙特产生态带。其脐橙品牌价值达182.8亿元,位居全国橙类品牌首位。目前,奉节脐橙核心产区主要分布在草堂镇、白帝镇、汾河镇、康乐镇、永安镇和永乐镇等地,大多以农户为单位进行种植和经营管理。

2 研究方法和数据来源

2.1 概念模型

本研究设计了一个概念模型(图2),以引导奉节县脐橙果园用地变化的驱动力分析。以往研究大多将驱动因子归结为2类:自然和社会经济。梁鑫源等^[13]认为农业政策始终是各驱动因素的主导,SU

等^[14]认为政策因子对经济作物种植和扩张有着显著影响,在制定政策时应在促进经济作物种植和保护自然资源之间取得平衡。本研究将脐橙驱动力因素划分为3类:自然、社会经济和政策,再细分为不同组别,然后选择相应的潜在因子。自然因素包括地形、土壤、水源和邻域情况;社会经济因素包括人口、可达性和经济发展情况;政策因子根据自然资源、生态环境、农业、水利等行业差异具有不同的特点,本研究为便于定量分析,主要选取农业领域与脐橙发展有关的资金因子。各类驱动因子的影响是非线性的,总体影响并不是个体效应简单的线性加权之和,而是复杂的融合、交互、积累和偏移的非线性耦合过程。

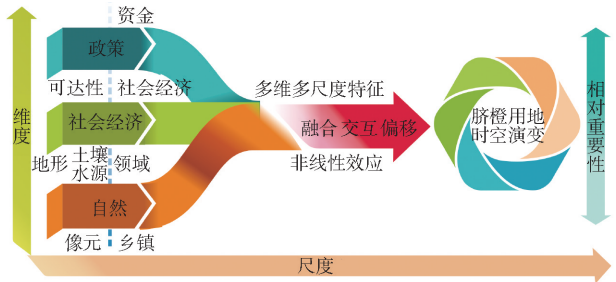


图2 概念模型
Fig.2 Conceptual framework

脐橙果园不仅受到多种维度的驱动因子影响,也受到不同空间层级的影响,其相对重要性与空间尺度、维度和时间周期等都有着一定的联系。根据研究区的特点,本研究设置像元和乡镇2个空间尺度,以更全面地分析脐橙果园土地利用变化的驱动机制。

2.2 采用的数据和来源

本研究主要利用 Landsat 系列卫星影像数据(<https://www.usgs.gov>)(表1)和高分2号影像数据,提取了2000、2006、2012、2019年4个时间节点的脐橙果园分布数据,分别使用地理国情监测数据和第三次全国国土调查数据、2012年度土地变更调查数据以及历史地理信息数据库对4年的解译结果

表1 Landsat 系列遥感数据

Tab.1 Remote sensing data of Landsat series

年份	卫星	传感器	行列号	成像时间	波段	多光谱空间分辨率/m	平均云量/%
2000	Landsat 5	TM	P126、R038	2000-09-11	1~7	30	6
			P126、R039				
2006	Landsat 5	TM	P126、R038	2006-08-02	1~7	30	2
			P126、R039				
2012	Landsat 7	ETM +	P126、R038	2012-09-27	1~8	30	10
			P126、R039				
2019	Landsat 8	OLI	P126、R038	2019-09-22	1~8	30	5
			P126、R039				

进行辅助校核,通过验证样本对脐橙果园提取结果进行了评价,4期影像提取精度均达到85%以上。遥感影像的辐射校正、大气校正、几何校正、镶嵌和裁剪等数据处理工作采用ENVI 5.3软件完成。水系、道路、城市建成区以及30 m分辨率的数字高程模型(DEM)等数据来自于奉节县基础地理信息数据库,用于提取高程、坡度、坡向等地形地貌数据以及可达性因子。脐橙果园样点土壤质地类别、土壤pH值和土壤有机质含量来自重庆市林业普查数据。

邻域林地占比、农田占比等土地利用数据主要来自于地理国情普查和监测、国土调查以及基础地理信息数据库,部分历史数据采用卫星影像进行解译提取,邻域统计范围为90 m缓冲区。乡镇尺度年末总人口、国民生产总值及农民人均纯收入等数据源自奉节县年鉴,脐橙产业专项资金源自奉节县脐橙产业发展中心,社会经济等数据来自于奉节县年鉴、官方网站、官方公众号等。各驱动因子采用ArcGIS 10.6软件进行数据处理和计算,对应的统计特征见表2。

表2 脐橙果园扩张潜在驱动因子描述性统计

Tab.2 Statistics of selected potential determinants of orange orchards expansion

尺度	维度	分类	潜在驱动因子	均值	标准差	最小值	最大值
像元	自然	地形	高程/m	1 047.45	614.99	135.00	2 123.00
			坡度/(°)	12.35	9.68	1.99	46.32
			坡向	175.62	50.66	0	360.00
	自然	土壤	土壤有机质含量/%	0.62	0.41	0	1.21
			土壤pH值	6.79	2.35	5.5	8.00
			土壤质地类别	6.23	1.53	0	8.00
	像元	邻域情况	像元层级邻域林地占比/%	90	15	0	95
			像元层级邻域农田占比/%	32	12	0	80
	社会经济	水源	与水源距离/m	2 969.36	1 699.69	5.00	9 157.08
		可达性	与国道距离/m	9 959.67	6 099.26	10.00	31 780.50
			与省道距离/m	10 672.49	7 953.31	8.00	26 556.80
			与县道距离/m	5 859.76	4 198.69	3.00	18 552.60
			与乡道距离/m	5 697.62	3 956.67	5.00	11 732.40
			与城区距离/m	7 216.33	5 523.25	103.20	15 308.70
乡镇	自然	地形	平均高程/m	922.39	499.69	407.30	1 453.34
			高程标准差/m	85.62	66.67	46.23	256.31
			平均坡度/(°)	12.22	6.99	4.21	32.52
			坡度标准差/(°)	5.94	2.31	2.16	11.63
	邻域情况		乡镇层级邻域林地占比/%	89	16	0	93
			乡镇层级邻域农田占比/%	34	13	0	75
	社会经济	社会经济	年末总人口/人	35 120	8 563.21	4 576	77 240
			国民生产总值/亿元	10.39	8.11	2.30	40.24
			农民人均纯收入/元	11 559.61	9 568.37	9 000.00	13 993.00
	政策	资金	脐橙产业扶贫专项资金数额/万元	2 970.00	1 960.00	0	9 600.00
			脐橙产业科技项目资金数额/万元	200.00	150.00	0	500.00
			现代农业柑橘专项资金数额/万元	360.00	280.00	0	900.00

注:土壤质地类别有壤土、砂壤土、重壤土、粘壤土、粘土这5类,分别用0、2、4、6、8编码表示。

2.3 潜在因子选择

根据图2所示的概念模型,涉及像元、乡镇2个尺度,自然、社会经济和政策3个维度,地形、土壤、水源、可达性、资金、社会经济、邻域情况等类别,一共选择26个潜在驱动因子,如表2所示。由于研究区空间范围和研究期有限,气温、降水等气候因素变化幅度非常小,对脐橙果园LUCC的影响可以忽略不计,因此本研究未选择气候因子。

本研究像元尺寸为30 m×30 m,在该空间尺度下,政策因素影响作用有限,因此,该尺度主要包含

自然、社会经济2个维度。在自然因素方面,脐橙果园的生长与地形、土壤、水源等自然条件密切相关^[15-16]。根据奉节县山地地貌的特点,本研究选择高程、坡度、坡向等地形因子作为潜在驱动因子。土壤的类别、酸碱度及有机质含量对脐橙果园的生长和产量有着重要影响^[17-18],选取土壤质地类别、土壤pH值和土壤有机质含量作为潜在驱动因子。另外,考虑到经济作物LUCC与水源可达性和邻域土地利用状况有一定关联^[19],选取了水源可达性、邻域林地和农田占比等潜在驱动因子。社会经济条件

是目前土地利用变化的重要影响因素之一^[20-21],像元尺度下,交通可达性是主要社会经济条件。三峡库区交通不太便利,交通可达性对脐橙生产、管理以及销售的物流成本和经济效益有重要影响。由于奉节县高速公路数量少、里程短,对于脐橙发展的影响较小,因此本研究选择与国道距离、与省道距离、与县道距离、与乡道距离、与城区距离这 5 项潜在驱动因子。

在乡镇尺度下,从自然、社会经济和政策 3 方面分别选取潜在因子。在自然方面,选取平均高程、高程标准差、平均坡度、坡度标准差作为潜在驱动因子。在社会经济方面,选取乡镇年末总人口、国民生产总值、农民人均纯收入作为潜在驱动因子。奉节地处三峡库区,经济基础弱、底子薄,脐橙种植基本是以农户为单位从事经营管理,因此,产业帮扶、扶贫等政策因素在脐橙产业发展过程中起到了重要的引导和推动作用,是一类重要影响因子。

以往很多研究当中,对于政策因子考虑较少,或者仅仅停留在定性分析层面。鉴于政策因子的重要性,本研究在概念模型中引入了政策维度,并选取脐橙产业扶贫专项资金、现代农业柑橘专项资金和脐橙产业科技项目资金作为潜在驱动因子,将 3 类资金数据进行空间化处理,导入到随机森林模型当中作为自变量参与回归运算,尝试对政策因子开展定量分析,为后续政策研究制定提供客观和精确的技术参考依据。

2.4 果园样点抽样策略

已有研究发现,LUCC 在空间上表现出典型的自相关性,可能会与独立性假设相冲突^[1,22]。本研究 Moran's *I* 指数为 0.2,可以确定脐橙果园扩张存在显著的空间自相关性,需要采用系统随机抽样的方法来加以解决,通过设置系统抽样阈值以保证脐橙果园样点具有代表性和合理性,规避偏态分布^[3]。经测试得出,当 *X*、*Y* 方向抽样距离均为 90 m 时,脐橙果园样点空间自相关性大大降低,Moran's *I* 指数降低为 0.08,所以将脐橙果园样点抽样阈值设置为 3 个像元。抽样点编码为 1 表示为扩张点,编码为 0 表示为不变点,2 类样点采集数量基本趋于一致。本研究 2000—2019 年脐橙果园样点总数为 1 890 个。

2.5 随机森林回归分析

传统的经验-统计方法表现出较大的局限性,如过拟合、依赖性强、无法有效处理多维数据等,难以满足本研究的需求。随机森林回归方法(Random forest regression, RFR)最先由 BREIMAN^[23]提出,是一种基于分类与回归决策树(Classification and regression decision tree)的新型机器学习算法,其主要思想是聚

合若干回归树,每个树使用独立选择的样本,最终集成众多决策树的结果对回归任务进行统筹分析。该方法首先采用随机且有放回的方式从原始样本中抽取多个样本(又称为 bootstrap 法),再对每个 bootstrap 样本构建决策树,然后将所有决策树组成随机森林,最终通过投票或平均的方式确定预测结果^[24]。决策树构建过程中,根据节点随机分裂法从 *M* 个原始变量中随机选择 *m* 个特征变量,后据方差不纯度指标对这 *m* 个特征变量进行建树,共生成 *N* 棵决策树,回归过程中决策树数量 *N* 和随机选取的特征变量数 *m* 需优化来得出最佳拟合结果^[23-25]。

相对于其他回归模型而言,随机森林具有精确度高、不易过拟合、高维数据处理能力强等优点^[26],可以对特征变量进行重要性评分和排序,还可以通过边际依赖性分析来定量评估每个因素的边际相对重要性、累积效应和变化阈值,但是其计算量和复杂度偏高、运算时间较长,不太适合实时化的数据分析和模拟。随机森林回归模型的可以定量评估特征重要性和边际依赖性的特点,适用于开展 LUCC 驱动因子的量化分析,尤其是在研究经济作物扩张的非线性和复杂的驱动机制上具有一定优势,所以,采用随机森林回归算法对奉节脐橙果园扩张的驱动因子进行定量分析,探讨其内在机理和规律。

对于本研究而言,计算时间长短可以不作重点考虑,但需要采取有效的精度控制策略。为尽量避免小样本场景中可能存在的样本异常和数据噪声的影响,首先对随机森林回归模型进行参数配置实验,发现在回归树总数在 800 ~ 1 200 区间、特征子集个数为 5 ~ 10 区间时,OOB(Out of bag)误差较低并保持稳定,同时解耦和降维效果较好,然后对回归树和子集数量进行离散化处理,分别取 800、1 000、1 200 棵和 5、8、10 个进行组合,共形成 9 套参数组合方案,并在此基础上进行了 9 次模型回归运算,最终发现基于参数组合(1 000、10)的运算结果 OOB 误差达到最优,所以最终将回归树总数设定为 1 000 棵,将特征子集个数设定为 10 个(图 3)。此外,为

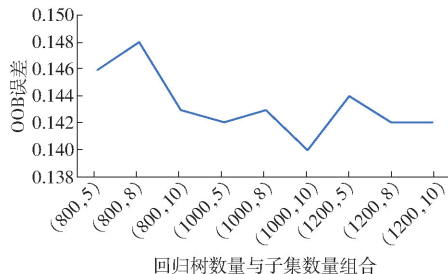


图 3 随机森林回归模型参数优化实验曲线
Fig. 3 Parameter optimization experiment of random forest regression model

削弱随机性的负面影响,累计进行了25次随机森林回归运算,取每个因子相对重要性的均值作为最终结果开展相对重要性和边际依赖性分析,以确保模型的精度和可解释性。研究过程中,采用EnMAP-BOX软件和Python 3.7开发语言进行随机森林回归模型构建、数据处理和精度分析。

3 结果分析

3.1 精度和误差分析

ROC(Receiver operating characteristic)曲线适用于评估和可视化回归模型的表现性能,ROC曲线下面积(Area under the ROC curve, AUC-ROC)适合定量测算回归模型精度参数,故本研究采用ROC、AUC-ROC来分析实验结果的精度。为对比随机森林和其他主流回归模型的精度情况,采用多元线性回归模型(Multivariable linear regression, MLR)、逻辑回归模型(Logistic regression, LR)分别进行了实验,并测算了AUC-ROC精度。AUC-ROC取值范围为0~1,值越大表明回归模型性能越好,根据常用的等级划分方案,AUC-ROC大于0.90为优秀;在(0.80,0.90]区间为较好;在(0.70,0.80]区间为一般;在(0.60,0.70]区间为较差;小于等于0.60则表示失败。本研究采取了交叉验证策略,交叉验证重复了25次并对AUC-ROC取平均值,以准确掌握模型精度指标,经测算,随机森林回归模型(RFR)、多元线性回归模型(MLR)、逻辑回归模型(LR)的AUC-ROC精度分别为0.81、0.78、0.80(图4),可见随机森林回归模型在本研究中具有

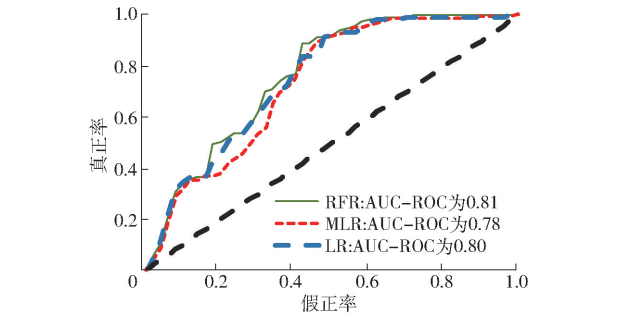


图4 AUC-ROC精度分析和对比

Fig. 4 Accuracy analysis and comparison of AUC-ROC

研究过程中,将回归树的数量逐步放大进行实验,发现在回归树数量达到800以上时OOB误差基本收敛,在800~1200区间维持在0.14左右,且趋于稳定,如图5所示。

3.2 脐橙果园扩张时空格局分析

根据2000、2006、2012、2019年奉节县脐橙果园分布图(图6)可以发现,2000—2019年期间,奉节

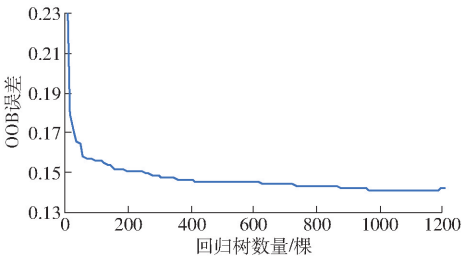


图5 OOB误差分析

Fig. 5 OOB error analysis

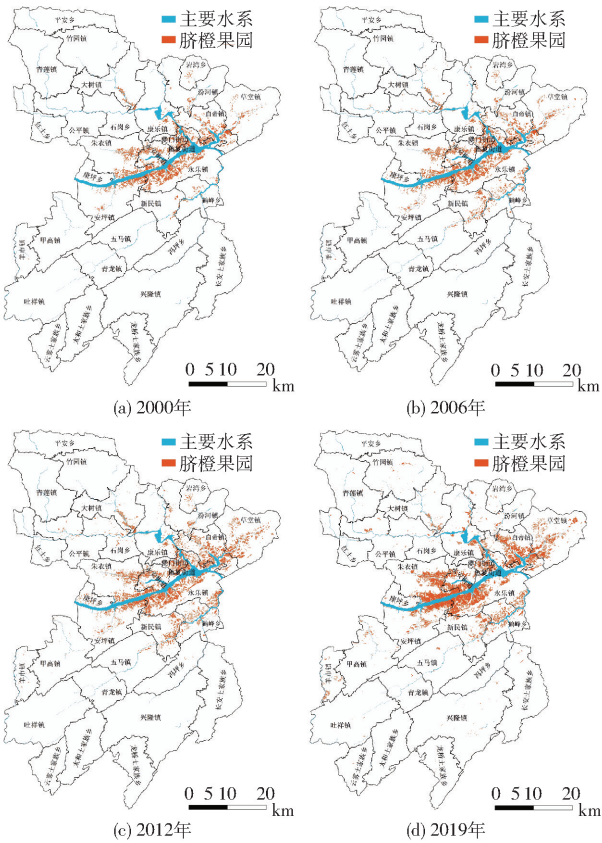


图6 2000、2006、2012、2019年奉节县脐橙果园空间分布
Fig. 6 Orange orchards of Fengjie County in 2000, 2006, 2012 and 2019

县脐橙果园规模快速增长,增幅达150%,呈现出显著的扩张态势。由图6可知,奉节县脐橙果园主要沿长江与梅溪河、大溪河、草堂河、朱衣河等水系呈带状分布,分布于河谷两岸一、二级阶地区域,并沿流域方向逐步扩张。2000—2006年期间,大溪河沿岸扩张较快,主要集中在五马镇、新民镇、永乐镇、鹤峰乡等地,另外,在草堂河流域白帝镇、草堂镇,梅溪河流域康乐镇、石岗乡,以及朱衣河流域朱衣镇有少量扩张。2006—2012年期间,长江与各支流附近都有一定规模扩张,主要顺着流域方向朝纵深发展,其中,在长江附近沿朱衣镇、安坪镇、康坪乡向西扩张,大溪河流域沿鹤峰乡、新民镇、五马镇向西南发展,草堂河流域沿白帝镇、草堂镇、汾河镇、岩湾乡朝东北方向扩张,梅溪河流朝康乐镇、大树镇、石岗乡及

西北方向扩张。2012—2019 年期间,向长江流域和各支流流域延伸速度变缓,但各乡镇内部脐橙扩张速度较快,尤其是朱衣镇、安坪镇、永乐镇、康乐镇、白帝镇、草堂镇等乡镇脐橙种植规模增长迅猛,部分乡镇增长率超过 40%。目前,奉节县脐橙果园主要分布在长江和各支流附近的平坝和浅山地带,其中长江沿岸占据了主导地位,是奉节脐橙的核心产区。

从时间维度上来看,2000—2006 年增速较缓,为 28.5%;2006—2012 年增速有所提高,达到 33.3%;2012—2019 年增速最快,达到 41.7%,在总增长规模当中占比达到 51%,属于奉节脐橙的高速发展阶段,如图 7 所示。

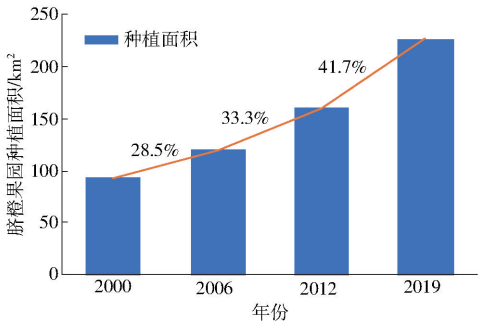


图 7 2000—2019 年奉节县脐橙果园增长的时间分布
Fig. 7 Time distribution of growth of Fengjie County navel orange orchard from 2000 to 2019

3.3 脐橙果园扩张驱动力因子分析

采用随机森林回归方法对各潜在因子的相对重要性进行定量分析,结果如表 3 所示,近 20 年脐橙果园扩张过程中排在前 8 位的驱动因子是平均坡度、平均高程、与水源地距离、脐橙产业扶贫专项资金、现代农业柑橘专项资金、脐橙产业科技项目资金、与城区距离和土壤 pH 值,表明脐橙果园扩张对地形、水源、土壤条件和政策因素较为敏感。乡镇尺度平均坡度、平均高程和像元尺度与水源地距离、土壤 pH 值等自然条件因子排序靠前,说明自然因子是脐橙果园扩张的主要驱动力。

与以往一些研究不同,本研发发现乡镇层级的脐橙产业扶贫专项资金、现代农业柑橘专项资金、脐橙产业科技项目资金这 3 项政策相对重要性数值均排序靠前,由此可见,奉节县脐橙扩张过程中明显受到了政策因子的影响。奉节经济基础相当薄弱,近年来,在产业扶贫、对口帮扶、乡村振兴等政策带动下,脐橙产业获得的资金支持力度越来越大,也因此得到更快的发展。以朱衣镇、白帝镇、草堂镇等为 例,在 2013、2017 年分别获得了 518、600 万元资金支持,使 2012—2016 年、2016—2019 年 2 个阶段扩张非常迅速。

像元层级邻域林地占比、邻域农田占比相对重

表 3 2000—2019 年各驱动因子相对重要性
Tab.3 Relative importance for determinants of orange orchards for periods of 2000—2019

排序	驱动因子	相对重要性
1	平均坡度	0.985
2	平均高程	0.891
3	与水源地距离	0.812
4	脐橙产业扶贫专项资金数额	0.771
5	现代农业柑橘专项资金数额	0.751
6	脐橙产业科技项目资金数额	0.694
7	与城区距离	0.621
8	土壤 pH 值	0.513
9	坡向	0.501
10	土壤质地类别	0.497
11	像元层级邻域农田占比	0.475
12	土壤有机质含量	0.459
13	像元层级邻域林地占比	0.428
14	与县道距离	0.424
15	坡度	0.390
16	农民人均纯收入	0.361
17	国民生产总值	0.313
18	乡镇层级邻域林地占比	0.289
19	与乡道距离	0.279
20	乡镇层级邻域农田占比	0.261
21	高程标准差	0.219
22	高程	0.211
23	与省道距离	0.122
24	年末总人口	0.113
25	坡度标准差	0.065
26	与国道距离	0.049

要性比较靠前,说明脐橙果园扩张对邻域土地利用类型较为敏感。与县道距离、与乡道距离等因子相对重要性较高,但与省道距离、与国道距离等因子相对重要性较低,这与奉节县境内交通条件有关,奉节县境内国道、省道规模较小,所以脐橙更依赖通达性更好的县道、乡道等公路。年末总人口相对重要性偏低,表明人口总规模对于脐橙果园扩张的影响力并不明显。

3.4 驱动力因子的边际依赖性

部分依赖图(Partial dependence plots)适用于可视化呈现复杂回归模型中因变量对某个自变量的依赖程度^[1]。选取表 3 中排序位于前 9 位的驱动因子进行边际依赖性分析,定量评估这些驱动因子对脐橙果园扩张的影响。

如图 8 所示,当平均坡度在 5°~15°时,其相对重要性呈增加趋势,在 15°~25°区间趋于平稳,超过 25°之后呈下降趋势,说明坡度 25°以上不适宜种植脐橙。平均高程在 200 m 以下时,相对重要性上升较快,在 200~450 m 区间缓慢增长,超过 450 m 以后逐步下降,表明脐橙主要分布在高程 450 m 以

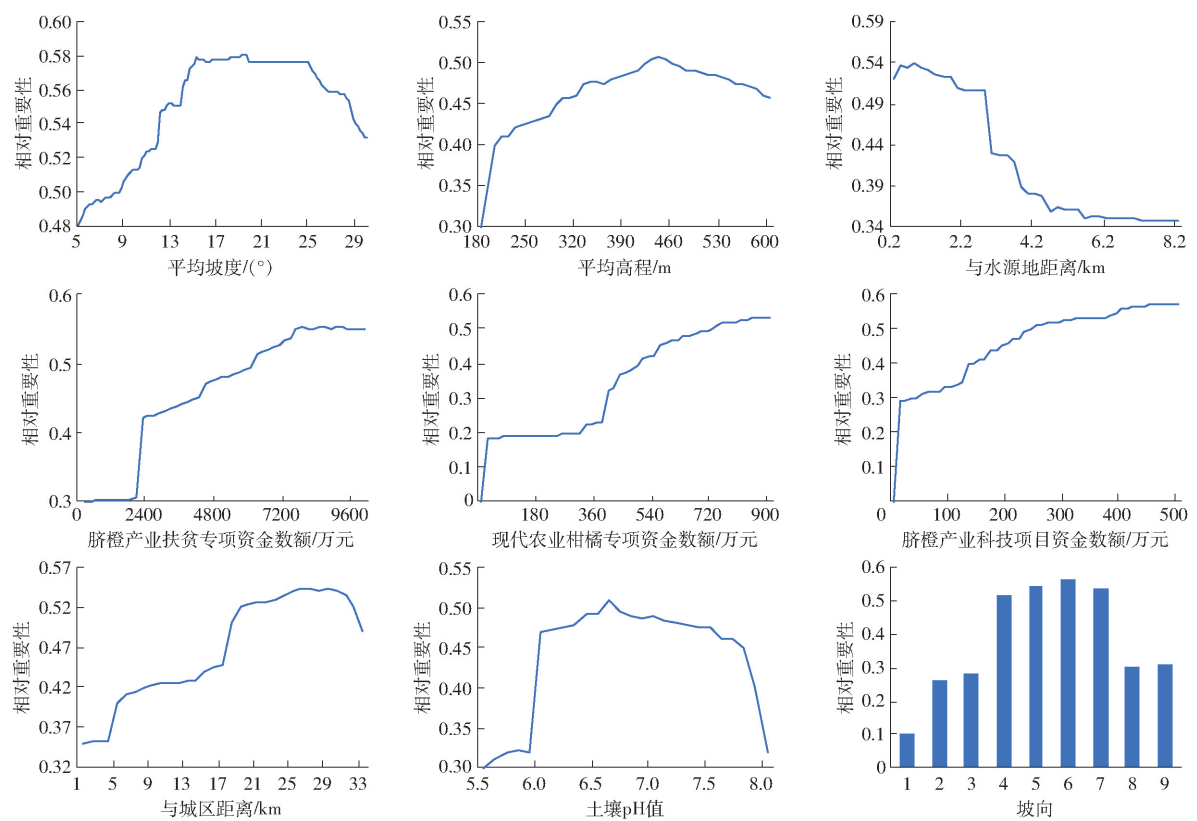


图8 2000—2019年脐橙果园扩张最具影响力驱动因子相对重要性的部分依赖图

Fig. 8 Partial dependence plots for the most essential determinants of orange orchards expansion in 2000—2019

下的低海拔地带。当脐橙果园与水源距离小于3 km时,其相对重要性维持在较高水平,大于等于3 km时相对重要性迅速下降到较低水平,可以看出脐橙种植对水源的依赖性较强。当土壤pH值在[5.5,6.6]区间时,其相对重要性呈上升趋势并在6.6处达到峰值,在(6.6,7.6]区间保持较高水平,大于7.6后迅速下降,表明脐橙种植适宜的土壤pH值范围为[5.5,7.6]。分别采用编码1~9表示平坡、北、东北、东、东南、南、西南、西、西北等坡向,当坡向为东南、南、西南、西的阳坡时,其相对重要性保持在较高水平,在北、东北、西北、西方向的阴坡时,相对重要性则明显较低,说明脐橙更倾向于在阳坡进行种植。

以乡镇场镇、县城建成区为城区中心,当脐橙果园与城区中心距离在5~20 km区间时,其相对重要性逐步上升,在20~30 km区间保持较高水平,大于30 km时,其相对重要性迅速下降,说明脐橙果园倾向于在距离城区30 km以内扩张。

当乡镇尺度脐橙产业扶贫专项资金小于2千万元时,其相对重要性较低,为2.0~2.5千万元时,其相对重要性迅速上升,上升至7.5千万元处达到峰值,在7.5~9.6千万元区间其相对重要性趋于稳定。现代农业柑橘专项资金相对重要性随资金规模增长而上升,在0~30万元和360~450万元区间上

升速度较快,在30~360万元和大于450万元两个区间缓慢增长。脐橙产业科技项目资金相对重要性与资金规模正相关,在资金规模达到10万元以前增长较快,超过10万元之后稳步增长。可以看出,乡镇层级的3项资金因子相对重要性均随着资金规模增加而呈上升趋势,并维持在较高水平,表明资金因子在脐橙扩张过程中具有显著的影响力。

4 讨论

研究发现,在自然因子中,脐橙果园倾向于发生在乡镇尺度平均坡度15°~25°,平均高程为200~450 m,距离水源3 km内,土壤pH值为[5.5,7.6],土壤质地为粘土的区域,这与奉节县脐橙果树的生长特性相符合。脐橙适宜在25°以下坡度进行种植,首选平地,其次为丘陵、山地,而奉节县境内山地面积占比较高,地形较为复杂,因此,在奉节县种植脐橙需要考虑的重要问题是尽量选择坡度较缓的区域,才能获得更好的经济效益。高程在一定程度上影响着温度、湿度、光照和风力,脐橙种植需要规避冻害、风害等风险,因此对高程有一定要求。脐橙对土壤条件要求较高,pH值适宜的粘土、壤土、沙壤土比较适合脐橙生长,因此,像元层级的土壤驱动因子相对重要性较高。由于脐橙经济效益高于附近其他经济林和农作物,因此脐橙果园扩张过程中存

在占用邻域林地、农田的现象,像元尺度的邻域林地占比、邻域农田占比等因子驱动作用力较强,这与 ZHANG 等^[1]研究结论部分类似。

在社会经济因素中,与城区距离、与乡道距离、与省道距离等可达性因子相对重要性较高,这是因为脐橙的运输、包装和销售需要集中的物流集散地,在互联网电子商务营销模式的支持下,由集散地面向全国辐射,以提高脐橙产业链的整体效率。

与以往一些研究有所不同,本研究发现政策类因子在脐橙果园扩张中发挥了不可忽视的作用。乡镇层级的脐橙产业扶贫专项资金、现代农业柑橘专项资金、脐橙产业科技项目资金这 3 项政策因子相对重要性排序位于前 6 位,可见地方政府扶持脐橙产业的政策有力地刺激了脐橙果园的开发。从边际依赖图上可直观看出,脐橙扩张更趋向于专项资金和科技资金扶持力度大的地区,比如朱衣镇、康乐镇、白帝镇、永乐镇、草堂镇等。这些扶持资金可以帮助当地建设优质脐橙示范基地、加强农业科技研究、强化农户技术培训以及开发脐橙旅游业态等,能有效地吸引大型果品企业入驻和开发脐橙果园,在促进脐橙产业发展的同时实现脱贫增收。

上述结果表明,脐橙果园扩张受到自然、社会经济和政策因子的综合作用,这些作用在不同层级上有显著的空间异质性,同时具有复杂性和非线性的

特点^[27-29]。

5 结 论

(1)建立了涵盖自然、社会经济、政策 3 个维度和像元、乡镇 2 种尺度的概念模型,采用随机森林回归方法定量分析了脐橙果园扩张的驱动力因子和边际依赖性。结果表明,2000—2019 年,奉节县脐橙果园呈现出快速扩张的态势,主要向长江及其支流流域方向发展。

(2)根据随机森林回归分析的各因子相对重要性数值,平均坡度、平均高程、与水源地距离、脐橙产业扶贫专项资金数额、现代农业柑橘专项资金数额、脐橙产业科技项目资金数额、与城区距离、土壤 pH 值和坡向等因子排序靠前,说明脐橙果园扩张是自然、社会经济和政策因子综合作用的结果。其中,乡镇层级的脐橙产业扶贫专项资金、现代农业柑橘专项资金、脐橙产业科技项目资金这 3 项政策因子驱动力显著。

(3)根据边际依赖性分析结果,脐橙果园扩张倾向于发生在平均坡度为 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 、平均高程为 200 ~ 450 m、距离水源地 3 km 内、土壤 pH 值为 5.5 ~ 7.6,有资金支持、区位条件好的区域。

(4)随机森林回归模型具有直观、客观和高精度的优点,能定量分析脐橙果园扩张的驱动因素,是一种实用和有效的方法。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Qianwen, GAO Wujun, SU Shiliang, et al. Biophysical and socioeconomic determinants of tea expansion: apportioning their relative importance for sustainable land use policy[J]. Land Use Policy, 2017, 68: 438 - 447.
- [2] YAN Peng, SHEN Chen, FAN Lichao, et al. Tea planting affects soil acidification and nitrogen and phosphorus distribution in soil[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 254(1): 20 - 25.
- [3] 李雪柔,陈飞燕,林爱文,等. 基于随机森林回归的茶园扩张驱动机制分析[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1): 44 - 52.
LI Xuerou, CHEN Feiyan, LIN Aiwen, et al. Driving mechanism of tea plantation expansion using a random forest regression model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(1): 44 - 52. (in Chinese)
- [4] CHAUDHARY A, KASTNER T. Land use biodiversity impacts embodied in international food trade[J]. Global Environmental Change, 2016, 38: 195 - 204.
- [5] 陈优良,胡锦涛,王兆茹,等. 赣南柑橘果园面积动态变化分析——以寻乌县为例[J]. 江西理工大学学报, 2017, 38(5): 19 - 25.
CHEN Youliang, HU Jinjing, WANG Zhaoru, et al. Research on dynamic changes of Gannan citrus orchard areas—a case study in Xunwu County[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2017, 38(5): 19 - 25. (in Chinese)
- [6] XIAO Zhi, HUANG Xianjin, ZANG Zheng, et al. Spatio-temporal variation and the driving forces of tea production in China over the last 30 years[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(3): 275 - 290.
- [7] 高水练,雷郑延,户杉杉,等. 农户茶园生态建设行为驱动因素及其作用路径研究——基于安溪县样本数据的 SEM 实证[J]. 茶叶科学, 2018, 38(4): 372 - 384.
GAO Shuilian, LEI Zhengyan, HU Shanshan, et al. Driving factors and their acting path of farmers' ecological construction behavior in tea garden—analyzed on sample data of Anxi County by SEM[J]. Journal of Tea Science, 2018, 38(4): 372 - 384. (in Chinese)
- [8] 吴一凡,刘彦随,李裕瑞,等. 中国人口与土地城镇化时空耦合特征及驱动机制[J]. 地理学报, 2018, 73(10): 1865 - 1879.
WU Yifan, LIU Yansui, LI Yurui, et al. Spatio-temporal coupling of demographic-landscape urbanization and its driving forces in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(10): 1865 - 1879. (in Chinese)
- [9] 石晓丽,史文娇. 北方农牧交错带界线的变迁及其驱动力研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 1 - 11.

- SHI Xiaoli, SHI Wenjiao. Review on boundary shift of farming-pastoral ecotone in northern China and its driving forces[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(20): 1–11. (in Chinese)
- [10] 杨建宇, 张婷婷, 陈正, 等. 2013—2015 年京津冀新增耕地时空特征与来源分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 205–213.
- YANG Jianyu, ZHANG Tingting, CHEN Zheng, et al. Spatial-temporal characteristics and source analysis of newly increased cultivated land in Beijing – Tianjin – Hebei region from 2013 to 2015 [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 205–213. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180325&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.025. (in Chinese)
- [11] SU Shiliang, SUN Yifan, LEI Chaoran, et al. Reorienting paradoxical land use policies towards coherence: a self-adaptive ensemble learning geo-simulation of tea expansion under different scenarios in subtropical China[J]. Land Use Policy, 2017, 67: 415–425.
- [12] 孙玮建, 张荣群, 艾东, 等. 基于元胞自动机模型的土地利用情景模拟与驱动力分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 254–261.
- SUN Weijian, ZHANG Rongqun, AI Dong, et al. Driving force analysis and scenarios simulation of land use based on cell automata model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 254–261. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s039&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.039. (in Chinese)
- [13] 梁鑫源, 李阳兵. 三峡库区规模农地时空变化特征及其驱动机制[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1630–1646.
- LIANG Xinyuan, LI Yangbing. Spatio-temporal features of scaling farmland and its corresponding driving mechanism in Three Gorges Reservoir Area [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(9): 1630–1646. (in Chinese)
- [14] SU Shiliang, ZHOU Xiangcheng, WAN Chen, et al. Land use changes to cash crop plantations: crop types, multilevel determinants and policy implications [J]. Land Use Policy, 2016, 50: 379–389.
- [15] 王世东, 冯正英, 余洋, 等. 基于改进稳定映射法的土地利用/覆被变化轨迹分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 152–162.
- WANG Shidong, FENG Zhengying, YU Yang, et al. Land use/cover change trajectory analysis based on improved stable mapping method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 152–162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200817&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.017. (in Chinese)
- [16] 宫兴龙, 付强, 王斌, 等. 土地利用方式变化对水循环过程响应机制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 252–259.
- GONG Xinglong, FU Qiang, WANG Bin, et al. Mechanism of response of land use change to water cycle process [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 252–259. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180232&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.032. (in Chinese)
- [17] WANG Qi, REN Qingfu, LIU Jianfeng. Identification and apportionment of the drivers of land use change on a regional scale: unbiased recursive partitioning-based stochastic model application [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 217: 99–110.
- [18] 杨丽, 傅春. 赣南生态屏障区林地变化的空间驱动力分析[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(6): 58–62.
- YANG Li, FU Chun. Spatial driving force analysis of forest land change in Ganan ecological security zone [J]. Geography and Geo-information Science, 2018, 34(6): 58–62. (in Chinese)
- [19] 郑鹏, 林海荣, 占昕, 等. 基于 CA – Markov 模型的安溪县茶叶种植区动态变化[J]. 生态学杂志, 2018(9): 2776–2785.
- ZHENG Peng, LIN Hairong, ZHAN Xin, et al. Dynamics of tea planting areas in Anxi County based on CA – Markov model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018(9): 2776–2785. (in Chinese)
- [20] MARCOS M R, BRYAN B N, CONNOR J D, et al. Agricultural land-use dynamics: assessing the relative importance of socioeconomic and biophysical drivers for more targeted policy [J]. Land Use Policy, 2017, 63: 53–66.
- [21] 张运清, 谢作轮, 李秀珍, 等. 桥梁连陆对海岛土地利用变化的影响: 以朱家尖岛为例[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(7): 607–614.
- ZHANG Yunqing, XIE Zuolun, LI Xiuzhen, et al. Influence of connection with mainland via bridge on land use of islands: a case study of Zhujiajian island [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(7): 607–614. (in Chinese)
- [22] XIAO Rui, SU Shiliang, MAI Gengchen, et al. Quantifying determinants of cash crop expansion and their relative effects using logistic regression modeling and variance partitioning [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 34: 258–263.
- [23] BREIMAN L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5–32.
- [24] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(3): 32–38.
- FANG Kuangnan, WU Jianbin, ZHU Jianping, et al. A review of technologies on random forests [J]. Statistics & Information Forum, 2011, 26(3): 32–38. (in Chinese)
- [25] 陈媛媛, 郑加柱, 魏浩翰, 等. 基于不同特征的随机森林极化 SAR 图像分类[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(8): 183–189.
- CHEN Yuanyuan, ZHENG Jiazhu, WEI Haohan, et al. Tidal flat classification based on random forest model using different

- features of polarimetric SAR[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(8): 183 – 189. (in Chinese)
- [26] 侯蒙京, 殷建鹏, 葛静, 等. 基于随机森林的高寒湿地地区土地覆盖遥感分类方法[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 220 – 227.
HOU Mengjing, YIN Jianpeng, GE Jing, et al. Land cover remote sensing classification method of alpine wetland region based on random forest algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 220 – 227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200725&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.025. (in Chinese)
- [27] 马恩朴, 蔡建明, 林静, 等. 远程耦合视角下的土地利用/覆被变化解释[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 421 – 431.
MA Enpu, CAI Jianming, LIN Jing, et al. Explanation of land use/cover change from the perspective of tele-coupling[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 421 – 431. (in Chinese)
- [28] 孙忠祥, 李勇, 赵云泽, 等. 旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 255 – 262.
SUN Zhongxiang, LI Yong, ZHAO Yunze, et al. Analysis on spatial distribution characteristics and driving forces of soil organic carbon density in dry farming region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 255 – 262. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190128&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.028. (in Chinese)
- [29] 石小伟, 冯广京, YI Yang, 等. 浙中城市群土地利用格局时空演变特征与生态风险评价[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 242 – 251.
SHI Xiaowei, FENG Guangjing, YI Yang, et al. Temporal and spatial evolution characteristics and ecological risk assessment of land use landscape patterns in central Zhejiang urban agglomeration[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 242 – 251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200527&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.027. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 176 页)

- [19] 赵斌娟, 王瑜, 陈汇龙, 等. 离心泵尾流-射流现象及粗糙度对其影响的分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 138 – 142.  
ZHAO Binjuan, WANG Yu, CHEN Huilong, et al. Jet – wake flow in the channel of impeller and the effect of surface roughness on it[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 138 – 142. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140923&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140923&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.023. (in Chinese)
- [20] 谈明高, 刘厚林, 吴贤芳, 等. 粗糙度对离心泵性能数值预测的影响[J]. 中国农村水利水电, 2011(2): 131 – 134.  
TAN Minggao, LIU Houlin, WU Xianfang, et al. The effect of roughness on the numerical prediction of the characteristics of centrifugal pumps[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(2): 131 – 134. (in Chinese)
- [21] 徐维晖, 侯晓, 胡孟, 等. 粗糙度对离心泵空化过程的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(3): 197 – 203.  
XU Weihui, HOU Xiao, HU Meng, et al. Impact of wall roughness on cavitating process in centrifugal pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(3): 197 – 203. (in Chinese)
- [22] JI Bin, LUO Xianwu, WANG Xin, et al. Unsteady numerical simulation of cavitating turbulent flow around a highly skewed model marine propeller[J]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(1): 0111022.
- [23] 李晓俊, 袁寿其, 潘中永, 等. 离心泵边界层网格的实现及应用评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 67 – 72.  
LI Xiaojun, YUAN Shouqi, PAN Zhongyong, et al. Realization and application evaluation of near-wall mesh in centrifugal pumps[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 67 – 72. (in Chinese)
- [24] 郑小波, 刘莉莉, 郭鹏程, 等. 基于不同空化模型 NACA66 水翼三维空化特性数值研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2018, 33(2): 199 – 206.  
ZHENG Xiaobo, LIU Lili, GUO Pengcheng, et al. Numerical investigation of three-dimensional cavitating performance of NACA66 hydrofoil base on different cavitation models[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(2): 199 – 206. (in Chinese)
- [25] REBOUD J L, STUTZ B, COUTIER O. Two-phase flow structure of cavitation: experiment and modeling of unsteady effects[C] // Proceedings of the Third Symposium on Cavitation, Grenoble, 1998.
- [26] 赵伟国. 水翼云空化及其抑制机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [27] ZWART P J, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics[C] // Proc. of Fifth International Conference on Multiphase Flow. Yokohama, 2004: 152.
- [28] JI B, LUO X, WU Y, et al. Numerical analysis of unsteady cavitating turbulent flow and shedding horse-shoe vortex structure around a twisted hydrofoil[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 51: 33 – 43.