

中国适宜发展生物液体燃料的边际土地资源分析

付晶莹^{1,2}, 杜金霜^{1,2}, 江东^{1,2*}, 王娣^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要 在能源短缺和环境污染压力日益紧迫的背景下,生物液体燃料以其清洁、低碳、可再生性逐渐成为重要的替代能源之一。中国人多地少,在边际土地上种植非粮能源作物是发展生物液体燃料的有效途径。以中国生物液体燃料的3种主要原料作物(燃料乙醇原料甜高粱、木薯和生物柴油原料油菜)为研究对象,利用多因子综合分析和动态阈值法评估适宜其发展的边际土地(包括宜能荒地和冬闲田)资源量并探究优化发展模式,为合理规划能源植物种植和产业布局提供数据支持。研究结果表明:2015年,中国适宜甜高粱和木薯种植的宜能荒地面积分别为3463.67万ha和1232.82万ha,适宜油菜种植的冬闲田面积为1995.16万ha;在优化发展模式下,中国适宜生物液体燃料原料作物种植的边际土地面积可达5997.71万ha。

关键词 边际土地;生物液体燃料;能源植物;冬闲田

化石能源短缺和环境问题是当前全球共同面临的两大主要挑战,发展生物液体燃料是解决上述问题的重要途径之一。生物液体燃料具有清洁、低碳等特点,在交通等行业将发挥重要作用。交通领域的能源消耗增长使得中国2/3以上的石油消费来自进口,而生物液体燃料可以规模化替代石油基液

体燃料,成为除了电气化之外主要的能源替代和减排方法^[1-2]。中国生物液体燃料研究起步较晚,已经产业化的生物液体燃料包括燃料乙醇和生物柴油,产业化尚处于发展初期。另外,受中美贸易争端的影响,2018年7月6日起自美国进口的改性乙醇关税高达70%,主要乙醇进口来源受到影响,因

收稿日期:2019-11-30;修回日期:2020-03-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0503507);西藏重大科技专项(Z2016C01G01)

作者简介:付晶莹,副研究员,研究方向为生态环境遥感应用、可再生能源资源潜力与效益时空模拟,电子信箱:fuyj@igsrr.ac.cn;江东(通信作者),研究员,研究方向为资源环境遥感监测、能源植物资源潜力与环境效益时空模拟,电子信箱:jiangd@igsrr.ac.cn

引用格式:付晶莹,杜金霜,江东,等. 中国适宜发展生物液体燃料的边际土地资源分析[J]. 科技导报, 2020, 38(11): 31-40; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.11.004

此提升中国自主解决燃料乙醇的原料供应能力尤为重要。目前中国有大量边际土地可用于种植生物液体燃料的原料作物,可应对上述问题。

根据中国农业部科技司的定义,边际土地包括非耕地的宜能荒地和近年来由于农村经济结构调整和劳动力转移在南方出现的冬闲田^[3]。目前国内已有许多关于边际土地评估的研究,但考虑冬闲田的较少。Stoof等^[4]量化了美国东北部7个州适于第二代纤维素能源植物生产的土地数量,上限为近250万ha。Milbrandt等^[5]将被遗弃的农田、荒地、棕地等纳入边际土地估算,算得美国48个州的边际土地占地面积约8.6亿ha。Saha等^[6]使用基于地理信息系统(GIS)的筛选模型、生物地球物理模型和阴影分析,估算出波士顿边际土地的总面积约2660 ha。庄大方等^[7]以能源植物菊芋、木薯、黄连木、麻疯树和油桐为例,识别中国宜能边际土地面积为4375万ha。张彩霞等^[8]根据雨养和灌溉、施肥、规模化种植等限制条件,认为中国有种植甜高粱潜力的土地面积达5919.1万ha。陈瑜琦等^[9]按物理、生物、生态及经济4个层级将中国可用于能源作物种植的边际土地逐层细分,认为中国边际土地最大数量为547.87万ha。关于冬闲田的提取研究较少,目前尚未有成熟的提取算法。翟孟源等^[10]利用SPOT-VEGETATION NDVI数据,根据农作物物候变化特征,算得长江中下游农业区冬闲田面积为2055万ha。李文梅等^[11]基于MODIS NDVI数据及其反映的物候信息,得到湖北省冬闲田总面积为55.643万ha。刘罗等^[12]利用SPOT-VEGETATION NDVI数据和GAEZ模型算得2010—2015年长江中下游地区适合冬油菜种植的冬闲田有2493万ha。

按照中国生物液体燃料发展路线图,2020、2030和2050年是发展生物液体燃料的3个重要时间节点(表1)^[2]。本研究主要考虑近期(2020年前后)已有较好研究基础、转化技术成熟、与化石燃料具有初步竞争力的1.5代生物液体燃料发展,重点评估非粮糖料、淀粉能源作物和油料能源植物发展的边际土地。燃料乙醇糖质非粮原料代表甜高粱抗逆性较强,种植范围广,技术比较成熟,成本较低,并且已有一些建成的种植基地和燃料制取基

地。淀粉质非粮原料代表木薯在中国南方已有广泛种植。木本油料能源作物黄连木和文冠果等尚缺乏作为能源植物利用的深入研究,但生物柴油另一主要原料油菜的化学组成与柴油相近,适宜在中国南方冬闲田上种植,可以规模化发展且不影响正常农耕,是生物柴油的理想原料,可作为木本油料作物的替代。

表1 生物液体燃料发展的分阶段侧重点

阶段	规模化发展的生物液体燃料	原料
2020年	1.5代生物液体燃料	非粮淀粉、糖料原料、木本油料能源植物
2020—2030年	2代生物液体燃料	农林业剩余物、木质纤维素植物
2030—2050年	2代生物液体燃料	农林业剩余物、木质纤维素植物

本研究除考虑国家鼓励发展的非粮能源植物代表甜高粱、木薯适宜种植的宜能荒地,还兼顾适宜种植油菜的南方冬闲田资源量和空间分布,并在综合发展的优化模式下评估可利用的总边际土地资源,对中国适宜发展生物液体燃料的边际土地资源进行全面评估,研究总体技术路线如图1所示。

1 研究区及数据

本研究宜能荒地提取的范围为全国,冬闲田提取的区域为中国南方地区(南方15省以及香港、澳门和台湾)。研究使用的时间序列遥感数据为TERRA-MODIS提供的16天合成的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)产品数据。选取2015年3月至2016年3月共24景MOD13Q1植被指数产品,空间分辨率250 m。土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心的2015年全国1 km土地利用现状遥感监测数据集。DEM数据来自CGIAR-CSI提供的全球SRTM 90 m数字高程模型数据,基于该数据通过GIS的空间分析功能计算全国坡度数据集。其他

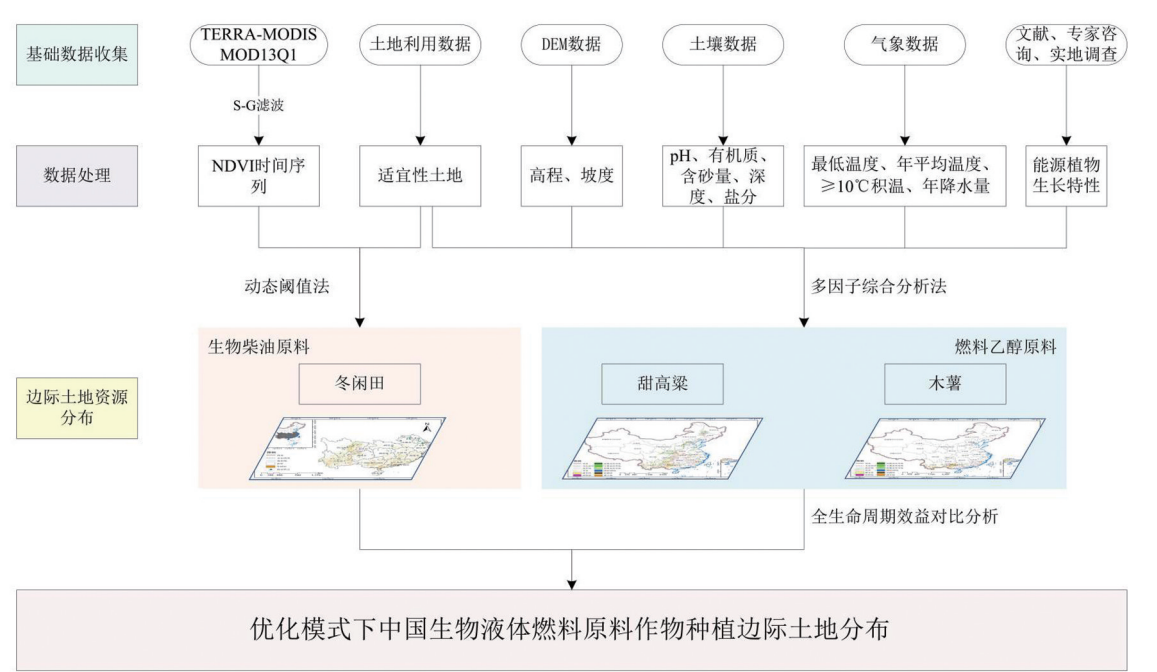


图1 边际土地资源分析的技术路线

自然条件数据还有土壤数据和气象数据(温度和水
分),源于中国科学院资源环境科学数据中心和中
国气象局。

NDVI数据受到卫星传感器性能、云、大气和气
溶胶等噪声的影响,会导致其时序曲线不规则波
动,影响趋势分析和冬闲田的提取。本文采用 Sav-
itzky-Golay 滤波(S-G滤波)对 NDVI 时间序列进行
去噪预处理。S-G 滤波是一种用最小二乘卷积拟
合方法来平滑和计算一组相邻值或光谱值的导数,
不受数据时间空间尺度和传感器类型的限制^[13]。
滤波公式表达为

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} c_i Y_{j+i}}{N} \tag{1}$$

式中, Y_j^* 是 NDVI 的拟合值, Y_{j+i} 为 NDVI 原始值,
 c_i 为第 i 个 NDVI 值滤波时的系数(权重), m 为半个
滤波窗口的宽度, N 是滑动滤波窗口的数据个数
($2m+1$)。

通常窗口宽度越大结果越平滑。平滑次数一

般为 2~4 次,次数较低结果比较平滑但会保留异常
值,次数较高可以去掉异常值,但可能过拟合产生
新的噪声。

2 宜能荒地提取

宜能荒地提取主要参考原农业部提出的边际
土地的评价标准^[3]及刘奇颀等提出的中国宜能非粮
地资源适宜性评价指标^[14]。土地利用类型选择灌
木林、疏林地、草地、滩涂与滩地、盐碱地、裸土地。
评估要素主要考虑自然环境条件,忽略灌溉、能源
消耗、经济效益等其他因素,评估中国所有有潜力
种植甜高粱和木薯的区域。通过对甜高粱、木薯生
长条件的文献查找、专家咨询并结合相关国家政
策^[15-20],建立了包括土地利用、地形、土壤、温度、水
分等因素在内的甜高粱宜能荒地和木薯宜能荒地
评价指标体系,如表 2 所示。

利用多因子综合评价法提取全国适宜甜高粱
和木薯种植的宜能荒地,结果如图 2 和图 3 所示。

表2 甜高粱和木薯宜能荒地评价指标体系

指标类别		土地利用		地形		土壤				温度			年降水量/mm	集中连片面积/hm ²
具体参数	土地利用类型	自然保护区	草地	坡度/°	高程/m	pH(H ₂ O)	有机质含量/%	含砂量/%	盐分含量/%	4~6月最低温度/℃	≥10℃积温/℃	年平均温度/℃		
甜高粱 木薯 阈值	灌丛、疏林地、草地、滩涂与滩地、盐碱地、裸土地	扣除自然保护区	扣除中国五大牧场所在省份(青海、新疆、内蒙古、西藏、宁夏)的高覆盖草地和中覆盖草地	<25	—	5.0~8.5	>1.5	≤85	≥30	<0.9	>15	≥1500	—	≥200
				<25	<2000	—	>1.5	≤85	≥30	—	—	≥2000	≥18	600~6000

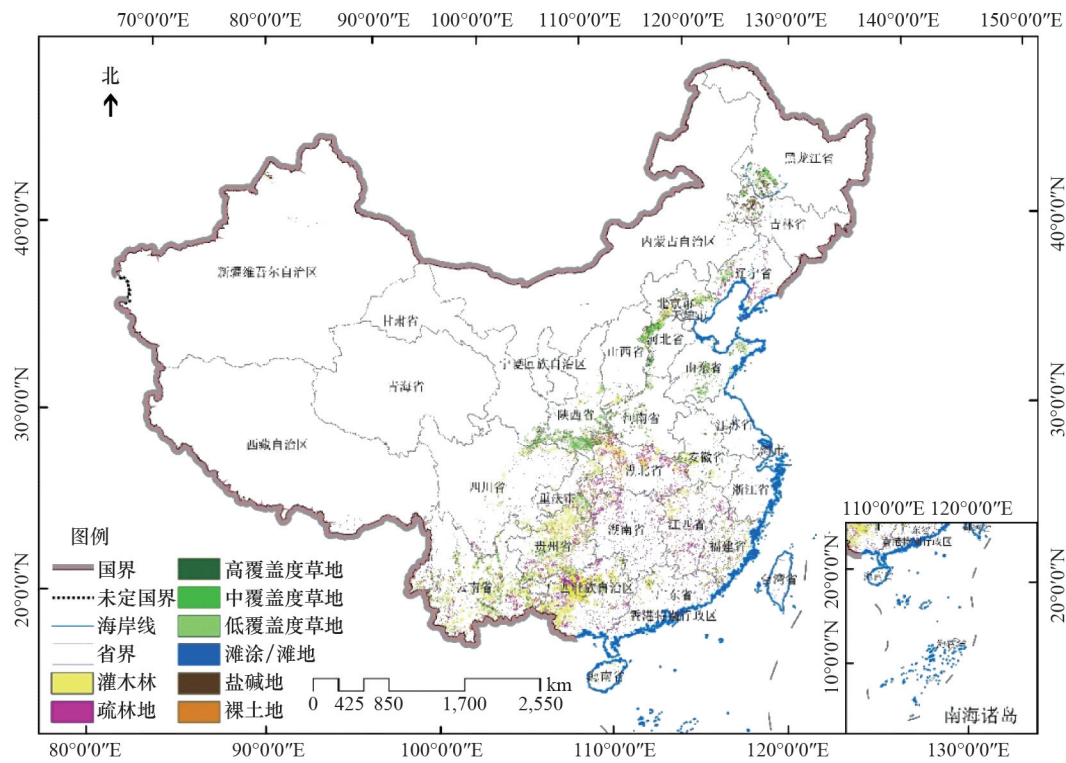


图2 适宜甜高粱种植的宜能荒地资源

3 冬闲田提取

冬闲田是指秋收以后至次年播种前,可种至少一季作物但闲置的耕地。南方农业区冬季农业薄弱,有大量可利用的冬闲田。根据相关文献资料,

研究区主要种植水稻、玉米、冬小麦、棉花等作物。农作物多为一年两熟,部分地区为一年一熟(表3)^[21]。

依据研究区农作物物候规律和遥感数据时序曲线,确定农作物物候期,提取重要时间节点:出苗

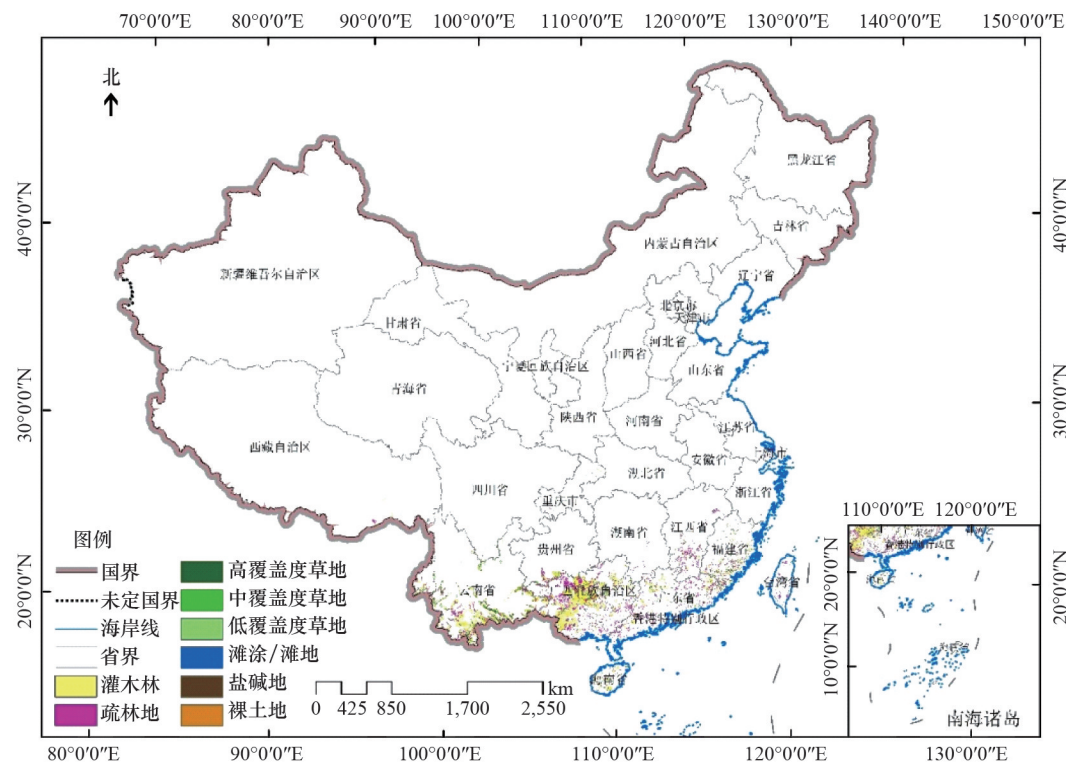


图3 适宜木薯种植的宜能荒地资源

表3 南方农业区农作物种植制度

种植制度		出苗期/返青期	成熟期
一年二熟制	夏熟	2月上旬至3月下旬	5月下旬至6月中旬
	秋熟	6月中旬至7月	10月上旬至12月上旬
一年一熟制		3月上旬至4月下旬	9月下旬至12月中旬

期、返青期和成熟期。本研究采用研究植物的物候特征的常用方法——动态阈值法确定作物物候期。动态阈值法不以绝对阈值判定作为植物生长的开始与结束,而是以植被指数的季节曲线的振幅作为阈值,以克服土地覆盖类型不同及植被指数曲线年份不同的干扰^[22]。动态阈值 $NDVI_{lim}$ 的计算公式为

$$NDVI_{lim} = (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \cdot C \tag{2}$$

式中, $NDVI_{max}$ 为生长期内 $NDVI$ 最大值, $NDVI_{min}$ 为最小值, C 为系数。

结合已有研究和研究区农作物物候及 $NDVI$ 变化特征,本研究中 C 取 20%^[21, 23]。表示在 $NDVI$ 时序曲线上上升部分和下降部分,和最小值距离为最大

值与最小值之差的 20% 的时间点分别为耕地生长季的开始期和结束期,即出苗期/返青期和成熟期 (图 4)。

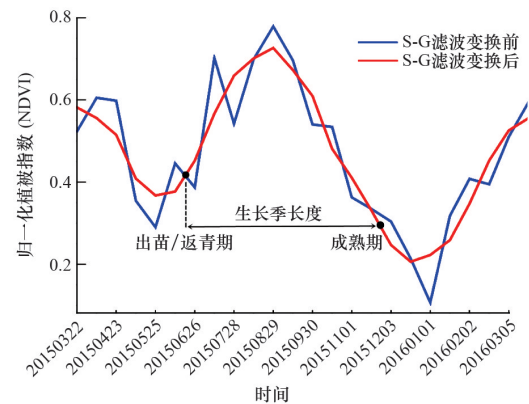


图4 动态阈值法提取作物物候期示意

根据研究区作物物候,秋粮成熟期集中在9、10、11月,收获一般在12月中旬结束。冬小麦、油菜等越冬作物快速生长期为2、3月,主要农作物最早播种时间为3月下旬^[24]。据此对MODIS NDVI数据逐像元提取越冬作物返青期,识别越冬作物的

分布,即非冬闲田,进而得到冬闲田的分布。在研究区内随机选取101个耕地样点,使用相同时间段内的高分辨率谷歌历史影像对提取的冬闲田进行精度验证(图5)。提取结果正确的点有73个,精度为72.28%。

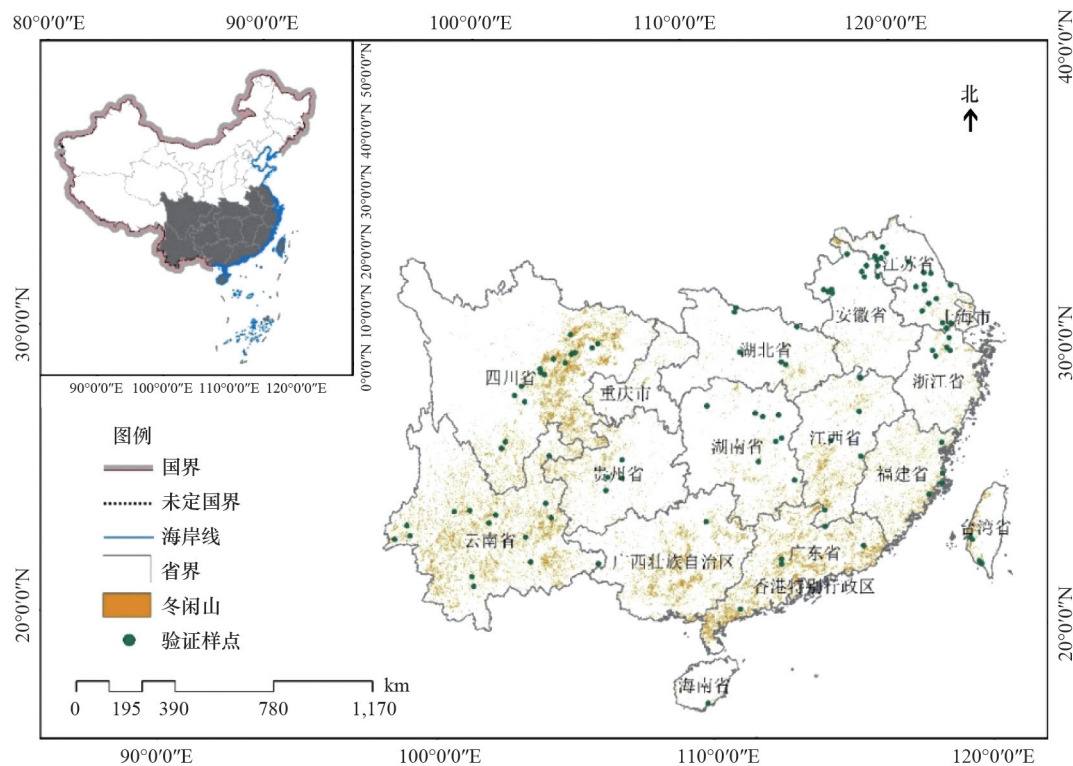


图5 南方冬闲田分布

4 结果与分析

对宜能荒地提取结果进行分析,2015年全国适宜甜高粱和木薯种植的宜能荒地面积分别为3463.67万ha和1232.82万ha。由图2和图6可看出,中国适宜种植甜高粱的宜能荒地资源较为丰富,但地区分布不均衡,主要分布在中国东部、中部和南部地区,大致以胡焕庸线为界。从土地利用类型看,宜能荒地主要由灌木林、疏林地和草地组成,滩涂和滩地、盐碱地、裸土地面积很少,占宜能荒地总量不到1%。从各省分布看,全国13个省份适宜甜高粱种植,宜能荒地资源面积超过100万ha,适

宜规模化发展甜高粱。其中,宜能荒地资源最多的地区为广西壮族自治区、云南省、贵州省和湖北省,占全国适宜甜高粱发展的宜能荒地资源总面积的45%左右。

从图3和图7中可看出,中国适宜种植木薯的宜能荒地地区分布极不均衡,主要集中在西南地区。木薯对自然环境的要求较高,特别是要求年均温至少达到18℃,是造成这种分布的主要原因。宜能荒地主要土地利用类型为灌木林、疏林地和高覆盖度草地。由于木薯生长受温度影响较大,因此全国适宜木薯种植的宜能荒地资源约有65%都集中在年均温较高的广西壮族自治区和云南省,广西壮

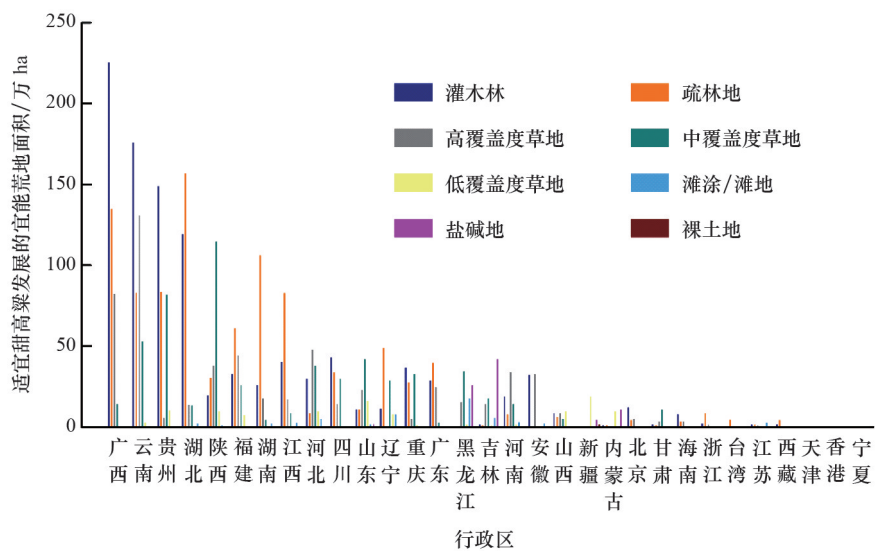


图6 中国适宜甜高粱发展的各土地利用类型宜能荒地资源分省统计

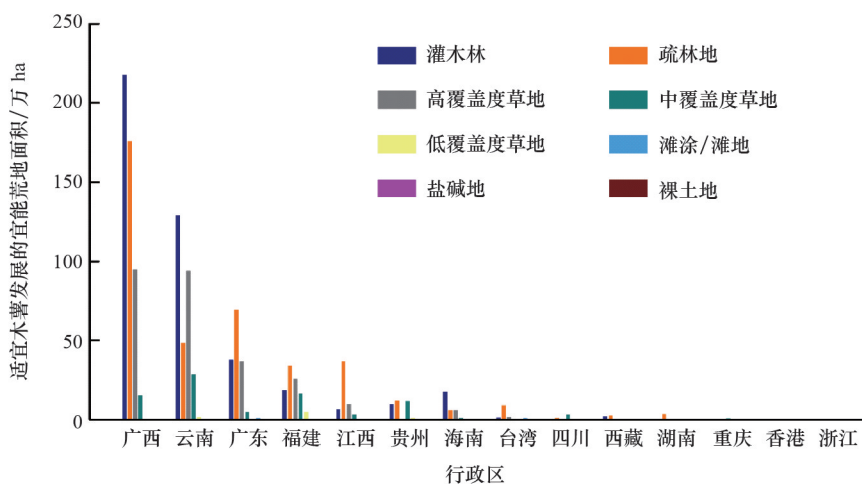


图7 中国适宜木薯发展的各土地利用类型宜能荒地资源分省统计

族自治区宜能荒地面积占总宜能荒地面积比例超过40%。另外,广东省、福建省、江西省等地宜能荒地资源也比较丰富。

冬闲田提取结果表明,中国冬闲田的面积为1995.16万ha,其中水田面积为908.88万ha。冬闲田分布最多的地区为云南省、四川省、广东省和广西壮族自治区,面积占到南方冬闲田总面积的2/3左右。

通过对比3种能源植物种植的土地,可以发现:甜高粱对生长条件要求较低,因此中国适宜种植甜高粱的宜能荒地资源量最大,分布也较广。而

适宜种植木薯的宜能荒地和适宜种植油菜的冬闲田资源量较小且分布集中,主要分布在中国南部和西南地区。

在提取单一能源植物适宜发展的宜能荒地和冬闲田的基础上,尝试提出一种生物液体燃料规模化综合发展的优化模式。由于油菜种植的冬闲田为耕地,与甜高粱、木薯种植的宜能荒地不冲突,而适宜甜高粱、木薯种植的宜能荒地则是有重叠的,因此,需要确定重叠区域甜高粱和木薯的发展优先级。根据已有研究,木薯生产燃料乙醇的能量效益、环境影响和经济性都要优于甜高粱^[25],且适宜

木薯种植的宜能荒地资源更集中,均分布在中国南部地区,大大节省了原料运输的成本,因此,建议优先发展木薯燃料乙醇。根据优先发展木薯,再发展甜高粱的燃料乙醇优化发展模式,即适宜甜高粱、木薯种植的宜能荒地的重叠区域建议种植木薯,优

化已计算的各作物适宜种植的土地资源,得到现在中国发展生物液体燃料可利用的总边际土地资源如图8所示。经优化后,中国适宜生物液体燃料原料作物种植的边际土地总面积达5997.71万 ha。

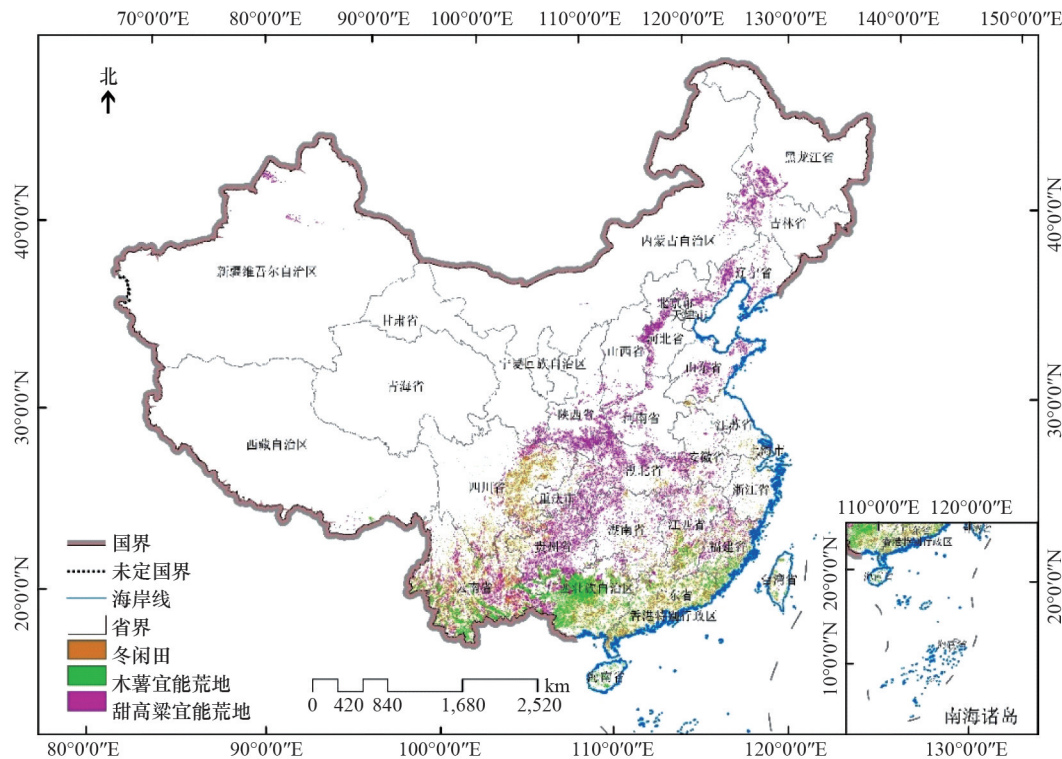


图8 优化模式下中国适宜发展生物液体燃料的边际土地资源分布

5 结论与讨论

本研究利用NDVI时间序列数据和动态阈值法提取冬闲田,结果比较理想。但也存在一定的局限性。由于南方易受大气和云层活动干扰,部分地区的NDVI时序数据可能波动频繁,尽管进行了去噪处理,但仍然很难还原到实际情况,可能给农作物物候期的确定带来误差,影响冬闲田提取精度。另外,本研究使用的MODIS NDVI数据空间分辨率为250 m,空间分辨率较低,像元为正方形。而实际中很多耕地范围没有这么大,形状也不规则,因此研究中涉及的很多像元实际上是混合像元,除耕地外还包含林地、建筑用地、水体等光谱信息,从而

对结果的判断造成一定的影响。高分遥感影像虽然能很好解决混合像元的问题,但也存在成本高、处理慢等新问题。因此如何平衡精度与效率,也是今后需要探讨的问题。

本文在提取单一能源植物适宜发展的宜能荒地和冬闲田的基础上,尝试提出了一种生物液体燃料规模化综合发展的优化模式,为合理规划非粮能源植物的种植和产业布局提供支撑。木薯生产燃料乙醇的能量效益、环境影响和经济性都要优于甜高粱,因此,甜高粱、木薯适宜发展的宜能荒地的重叠区域建议用于发展木薯。适宜甜高粱发展的宜能荒地总面积为3463.67万 ha,扣除与木薯适宜发展的宜能荒地的重叠部分,面积减少2769.73万 ha;

适宜木薯发展的宜能荒地和适宜油菜发展的冬闲田面积分别为1232.82万ha, 1995.16万ha。经优化后, 2015年中国适宜生物液体燃料原料作物种植的边际土地总面积达5997.71万ha。虽然利用边际土地资源种植能源植物发展生物液体燃料的空间是有限的, 但目前利用率还比较低, 发展潜力很大。

参考文献(References)

- [1] 中国可再生能源展望2018[R]. 北京: 国家发展和改革委员会/中国宏观经济研究院能源研究所国家可再生能源中心, 2018.
- [2] 中国生物液体燃料发展路线图[R]. 北京: 国家可再生能源中心, 2018.
- [3] 寇建平, 毕于运, 赵立欣, 等. 中国宜能荒地资源调查与评价[J]. 可再生能源, 2008, 26(6): 3-9.
- [4] Stoof C R, Richards B K, Woodbury P B, et al. Untapped potential: Opportunities and challenges for sustainable bioenergy production from marginal lands in the north-east USA[J]. Bioenergy Research, 2015, 8(2): 482-501.
- [5] Milbrandt A R, Heimiller D M, Perry A D, et al. Renewable energy potential on marginal lands in the United States[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014 (29): 473-481.
- [6] Saha M, Eckelman M J. Geospatial assessment of potential bioenergy crop production on urban marginal land[J]. Applied Energy, 2015(159): 540-547.
- [7] Zhuang D F, Jiang D, Liu L, et al. Assessment of bioenergy potential on marginal land in China[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(2): 1050-1056.
- [8] Zhang C X, Xie G D, Li S M, et al. The productive potentials of sweet sorghum ethanol in China[J]. Applied Energy, 2010, 87(7): 2360-2368.
- [9] 陈瑜琦, 郭旭东, 刘俊杰, 等. 我国可用于能源作物种植的边际土地数量及空间分布研究[J]. 土地开发工程研究, 2017, 2(7): 1-7.
- [10] 翟孟源, 徐新良, 姜小三. 我国长江中下游农业区冬闲田的遥感监测分析[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(3): 389-397.
- [11] 李文梅, 覃志豪, 李文娟, 等. 基于MODIS-NDVI时序数据的南方冬闲田信息提取[J]. 中国农学通报, 2010, 26(7): 324-329.
- [12] Liu L, Xu X L, Hu Y M, et al. Efficiency analysis of bio-energy potential on winter fallow fields: A case study of rape[J]. Science of the Total Environment, 2018(628-629): 103-109.
- [13] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. Analytical Chemistry, 1964, 36(8): 1627.
- [14] 刘奇顺, 孙川东, 张宝贵, 等. 中国宜能非粮地资源研究方法 with 适宜性评价指标[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(2): 11-20.
- [15] 谢光辉, 庄会永, 危文亮, 等. 非粮能源植物: 生产原理和边际地栽培[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
- [16] 陆强, 赵雪冰, 郑宗明. 液体生物燃料技术与工程[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013.
- [17] Wu C W, Chen X B, Sun Y P, et al. Marginal land-based biomass energy production in Yellow River Delta [J]. Advanced Materials Research, 2013(860-863): 544-549.
- [18] 谢光辉, 郭兴强, 王鑫, 等. 能源作物资源现状与发展前景[J]. 资源科学, 2007, 29(5): 74-80.
- [19] 石元春. 中国生物质原料资源[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 16-23.
- [20] Li X F, Hou S L, Su M, et al. Major energy plants and their potential for bioenergy development in China[J]. Environmental Management, 2010, 46(4): 579-589.
- [21] 李正国, 杨鹏, 周清波, 等. 基于时序植被指数的华北地区作物物候期/种植制度的时空格局特征[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6216-6226.
- [22] Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8): 1824-1832.
- [23] 于信芳, 庄大方. 基于MODIS NDVI数据的东北森林物候期监测[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 111-117.
- [24] 王亚欣. 长江中下游地区冬闲田生物柴油发展潜力研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 中国科学院地理科学与资源研究所, 2012.
- [25] 付晶莹. 中国非粮燃料乙醇发展潜力评估[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.

Anglysis of the marginal land resources suitable for developing liquid biofuel in China

FU Jingying^{1,2}, DU Jinshuang^{1,2}, JIANG Dong^{1,2*}, WANG Di^{1,2}

1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In view of the shortage of fossil energy and the environmental pollution, the clean, low-carbon and renewable liquid biofuel offers as an important alternative of the fossil fuel. For the huge population and the limited cultivated land resources, it is necessary to develop non-grain energy crops on a marginal land to produce the liquid biofuel in China. The marginal land resources for three representative raw crops including the sweet sorghum, the cassava and the rape are estimated in this paper. The multi-factor analysis method and the dynamic threshold method are adopted to evaluate the marginal land resources. An optimized non-grain planting mode is to be adopted in order to provide an important support for planning the cultivation of the non-grain energy plants and the liquid biofuel industry. It is shown that the area of the marginal land resources suitable for the sweet sorghum, the cassava planting and the winter fallow fields suitable for the rape planting in China are about 34.69, 21.66, 19.95 million ha, respectively. The total area of the marginal land suitable for the development of the liquid biofuel is about 59.98 million ha.

Keywords marginal land; liquid biofuel; energy crops; winter fallow fields ●



(责任编辑 傅雪)