应用生态学报 2020年4月 第31卷 第4期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Apr. 2020, 31(4): 1175-1184 DOI: 10.13287/j.1001-9332.202004.029

江西省油茶综合生产潜力与资源利用效率评估

王小军[1,2] 刘光旭[1*] 相爱存[1] 肖 彤[1,3]
([1]赣南师范大学地理与环境工程学院, 江西赣州 341000; [2]华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; [3]中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074)

摘 要 江西适合油茶生长,但开发利用程度不高,分析评估其生产潜力与资源利用效率,可为进一步优化油茶种植分区、提高产量、合理利用国土资源等提供依据。以江西省油茶综合生产潜力为研究对象,基于潜力衰减法逐级修订得到自然生产潜力,结合社会有效系数得到综合生产潜力,并进行资源利用效率评估。结果表明: 1)江西省油茶各级生产潜力平均值在10229~17724 kg·km^{-2},从赣南向赣西北递减,平均综合生产潜力为12550 kg·km^{-2},分级后具有较高潜力和高潜力类可利用土地面积达51656 km^2,占全省面积的31.1%;市级生产潜力中,赣州最高。2)江西省油茶生产潜力变幅为2223~3857 kg·km^{-2},各级潜力变化量的区域差异较小;油茶资源满足率为69.3%~122.7%,各级资源满足率区域差异较小;油茶资源组合利用效率为49.1%~85%,各级生产潜力利用率的区域差异较大。3)综合生产潜力评估结果与江西油茶实际产量较符合,资源利用效率评估结果与江西自然和社会条件相符,可以作为相关研究与政策制定的参考。

关键词 潜力衰减法; 社会有效系数; 生产潜力; 资源利用效率; 油茶

Evaluation of comprehensive potential productivity and resource utilization efficiency of *Camellia oleifera* in Jiangxi Province, China.

WANG Xiao-jun[1,2], LIU Guang-xu[1*], XIANG Ai-cun[1], XIAO Tong[1,3] ([1]*School of Geography and Environmental Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou* 341000, *Jiangxi, China*; [2]*School of Geographical Science, South China Normal University, Guangzhou* 510631, *China*; [3]*Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan* 430074, *China*).

Abstract: As an area suitable for the plantation of *Camellia oleifera*, Jiangxi had a low degree of development and utilization. Evaluating its potential productivity and resource utilization efficiency could provide reference for optimizing *C. oleifera* planting division, increasing yield and rationally utilizing land resources. Natural production potential of *C. oleifera* in Jiangxi was estimated by stepwise revised potential attenuation method. The comprehensive potential productivity was estimated by combined with social efficiency coefficient, with the resource utilization efficiency being evaluated. There were three main results. 1) Potential productivity of *C. oleifera* in Jiangxi varied from 10229 to 17724 kg·km^{-2}, which decreased from the south to the northwest, with an average potential of 12550 kg·km^{-2}. After classification, the area with higher and highest potential productivity reached 51656 km^2, accounting for 31.1% of the total area. Among the cities, Ganzhou had the highest potential productivity. 2) The changes of potential productivity of *C. oleifera* ranged from 2223 to 3857 kg·km^{-2}, with small regional difference for various levels. The resource satisfaction rate ranged from 69.3% to 122.7%, with small regional difference. The resource utilization efficiency varied from 49.1% to 85%. Regional utilization rate at all levels differed obviously. 3) The estimated comprehensive potential productivity was in line with the real production of *C. oleifera* in Jiangxi, and the assessed resource utilization efficiency was consistent with natural and social condi-

本文由国家自然科学基金项目(41561020)、江西省社会科学规划项目(19GL30)和国家级大学生创新创业训练计划项目(201710418003)资助
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41561020), the Social Science Planning Project of Jiangxi Province (19GL30), and the National Innovation and Entrepreneurship Training Program for University Students (201710418003).
2019-07-25 Received, 2020-02-14 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lg760411@126.com

tions. These results could be used as a reference for related research and policy making.

Key words: potential attenuation method; social efficiency coefficient; potential productivity; resource utilization efficiency; *Camellia oleifera*.

木本油料作物在食品、工业用途中具有重要作用。随着人口日益增长、经济快速发展,我国面临的资源环境压力加大,而可利用土地资源逐步减少,在此背景下进行木本油料作物生产潜力与资源利用效率的研究,对优化种植结构、合理开发利用区域资源,尤其是低山丘陵地区,具有重要意义。生产潜力是在一定条件下某作物的最大生产能力,揭示了作物产量与环境条件之间的相互作用机制[1],资源利用效率是各类因素作用下作物对资源的开发程度,体现了区域蕴含资源的优劣程度与作物对资源环境的需求情况,生产潜力与资源利用效率分析是作物生产研究的重要组成部分。潜力衰减法将生产潜力划分为光合、光温、气候和自然生产潜力 4 个依次衰减的层次[2-3],在灌溉和施肥等改良措施下,气候生产潜力是可实现的目标产能,因此是研究的重点[4-6]。农林业对气候变化较为敏感,基于情景数据分析气候变化对生产潜力的影响,模拟未来生产潜力的时空特征是该研究的趋势之一[7]。社会经济因素是生产活动中的最大变量,在水分、土壤肥力改善、病虫害防御、机械化劳动效率提高等方面具有明显作用[8],土地利用尤其是耕地变化对生产潜力有明显影响[9],而政策扶持对农户种植意愿的影响[10]、农户经营行为特征[11]、供给决策导向下的投入产出与种植潜力分析等对生产力的影响也逐渐受到重视[12-13]。但不同作物的社会经济因素指标各异,对社会因子的正负向作用也存在不同观点,部分学者遵循潜力衰减法,用社会有效系数修订自然生产潜力[10],也有学者将社会要素视为积极因素,在自然生产潜力基础上增产得到综合生产潜力[14],衰减与增产都有合理性,涉及到人类投入的方向、力度与具体效果。在生产潜力研究基础上,资源利用效率日益受到关注,从产量衰减量、各级生产潜力衰减率、现实产量的各级资源利用率[15-16]角度建立评价指标[17],以及从社会因子参与下的投入产出效率[18]等方面进行分析,也有从温度、降水限制角度进行生产潜力衰减分析[19-20],这与区域资源特征和作物生长需求密切相关。

油茶是我国乃至世界四大木本油料作物之一,在食用、医药和生态环境保护等方面都具有较高的利用价值。油茶喜温暖怕寒冷,适宜生长在年平均气温 14~21 ℃、花期平均气温 12~13 ℃、有较充足的阳光和水分、地形坡度和缓、侵蚀作用弱、深厚酸性土的地方。江西省位于亚热带地区,地形以低山丘陵为主;气候为中亚热带温暖湿润季风气候,雨热同期,年均温约 16.3~19.5 ℃,降水丰富,年降水量 1341~1943 mm;土壤以酸性红壤、黄壤为主。江西的自然条件较适宜油茶生长,2018 年江西省油茶林面积 101.67×10^4 hm^2,油茶籽产量 45.6×10^4 t,分别占全国的 22.7%和 17.3%,均居全国第二,但产量比重明显低于面积比重,而位居第一的湖南省,自然条件与江西省类似,却以全国 31.4%面积的油茶林产出了 38.4%的油茶籽。因此,评估江西省油茶潜在生产力,发挥应有的资源优势,提高资源利用率,可为区域农林业发展和农民增收脱贫提供必要的支撑。本研究以江西省油茶生产潜力分析为目标,基于气候、高程、土壤、土地利用和社会经济数据,通过潜力衰减法(机制法)逐级订正得到的自然生产潜力,然后选取指标构建社会有效系数,并视为积极因素增产得到综合生产潜力,最后从潜力变化量、资源满足率和资源组合利用率角度进行资源利用效率评估,以期为划分江西省油茶生产潜力优势区及相关产业政策的制定提供依据。

1 资料与方法

1.1 数据来源

油茶综合生产潜力和资源利用效率评估所需数据有:1)行政边界数据、人口分布数据和土地利用数据(2015),来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/),提取行政区划数据集的江西省域面、社会经济数据集的人口空间分布千米网格数据和 LUCC 数据集的 2015 年土地利用数据(30 m×30 m)。2)数字高程模型(DEM)数据,来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)的 ASTER GDEMV2 产品 30 m 分辨率数字高程数据集,并计算坡度。3)气候数据(1981—2015 年),来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/),获取年均日照时数、年均气温、年均降水量等。4)土壤类型空间分布数据(2009),来源于联合国粮农组织土壤门户网站(http://www.fao.org/soils-portal)的世界土壤数据库(HWSD),中国地区数据源为中国科

学院南京土壤研究所提供的 1995 年全国第二次土地调查获得的 1∶100 万土壤数据，提取江西范围内栅格（886 m×886 m 重采样为 1 km×1 km），关联 HWSD_SMU 获得分类属性。5）油茶产量数据、油茶林种植面积数据（2014—2016 年），来源于江西省统计年鉴[21]。

1.2　生产潜力模型

生产潜力是在一定自然和社会条件下的作物生产能力，自然生产潜力是光、热、水、土等达到最佳状态时，作物充分利用自然因子在理论上可达到的最高生产量，可运用潜力衰减法（机制法）逐步修订光合生产潜力、光温生产潜力、气候生产潜力等得到自然生产潜力，经社会系数修订得到综合生产潜力[22]。

1）光合生产潜力（photosynthetic potential productivity，PPP）：在理想状态下由光能资源和植物光合效率所决定的植物最高生产力。其形成生物量的基本能量是能够被绿色植物利用进行光合作用的那部分辐射，即光合有效辐射。光合生产潜力与太阳总辐射量的计算公式为：

$$Y(Q)=KF\frac{EQ}{Z(1-C)} \tag{1}$$

$$Q=Q_0(a+bS) \tag{2}$$

式中：$Y(Q)$ 为光合生产潜力（kg·km^{-2}·a^{-1}）；K 为单位转换系数，$K=1000000$；F 为经济系数，油料作物较低，一般为 0.3～0.4，本研究取 $F=0.3$；E 为作物的光能利用率，$E=10\%$；Q 为太阳总辐射量（MJ·m^{-2}），利用气候学方法计算；Q_0 为天文辐射量；a、b 为经验系数，取 $a=14.31$，$b=0.585$[23]；S 为日照百分比；Z 为能量转换系数，$Z=10.224$ kJ·g^{-1}；C 为作物灰分率，$C=0.3$。

2）光温生产潜力（light and temperature potential productivity，LTPP）：温度条件影响光合生产潜力的发挥，不同作物对生育期的最适温度要求不同，需通过温度有效系数来修正。光温生产潜力和温度有效系数的计算公式为：

$$Y(Q,T)=Y(Q)\cdot f(T) \tag{3}$$

$$f(T)=\begin{cases}0 & (T\leqslant T_m)\\ T/(T_M-T_m) & (T_m<T\leqslant T_M)\\ 1 & (T>T_M)\end{cases} \tag{4}$$

式中：$Y(Q,T)$ 为光温生产潜力；$f(T)$ 为温度有效系数订正函数，$0<f(T)<1$；T_M 为作物生育所需的上极限温度，$T_M=31$ ℃；T_m 为作物生育所需的下极限温度，$T_m=10$ ℃[24]；T 为作物生育期间的平均温度（℃）。

3）气候生产潜力（climatic potential productivity，ClimPP）：气候生产潜力是在光、温条件保持最适宜状态时，自然降水条件下区域可能达到的最高作物产量。通过水分有效系数来修正光温生产潜力得到气候生产潜力。气候生产潜力与水分有效系数的计算公式为：

$$Y(Q,T,C)=Y(Q,T)\cdot f(W) \tag{5}$$

$$f(W)=\begin{cases}\dfrac{r}{E_0} & (r\leqslant E_0)\\ 1-\dfrac{r-E_0}{3E_0} & (E_0<r\leqslant 4E_0)\\ 0 & (r>4E_0)\end{cases} \tag{6}$$

式中：$Y(Q,T,C)$ 为气候生产潜力；$f(W)$ 为水分有效系数订正函数，$0<f(W)<1$；r、E_0 分别为降水量和潜在蒸发量（mm）。

4）自然生产潜力（natural potential productivity，NatPP）：土地属性及其组成，尤其是土壤，是作物及其生长必须的矿物营养和水分的载体，在气候生产潜力条件下，因土地限制所能实现的生产能力就是自然生产潜力。研究选取海拔、坡度、土壤质地、土壤总有机碳含量和土壤阳离子交换能力 5 个方面作为土地系数指标，参考前面有效系数在 0.7～0.9，将 5 个土地指标的有效系数等距划分为 5 级，采用专家打分赋予权重，土壤属性是影响土地系数的重要因素，故权重较大（表 1），综合 5 个指标得到土地系

表 1　土地有效系数指标分级与权重

Table 1　Classification and weight of land effective coefficient indicators

指标 Indicator	1(0.7)	2(0.75)	3(0.8)	4(0.85)	5(0.9)	权重 Weight
海拔 Elevation（m）	>1000	801～1000	<50，601～800	51～200，401～600	201～400	0.15
坡度 Slope（°）	>25	≤2	15～25	2～6	6～15	0.15
质地 Soil texture	砂质 Sandy	砂壤质 Sandy loam	黏质 Clay	黏壤质 Clay loam	壤质 Loam	0.24
总有机碳含量 Total organic carbon content（g·kg^{-1}）	0.41～0.75	0.76～1.09	1.1～1.45	1.46～2.41	2.42～6.74	0.23
阳离子交换量 Cation exchange capacity（cmol·kg^{-1}）	1～7	8～10	11～14	15～21	22～30	0.23

数,然后修正气候生产潜力得到自然生产潜力。自然生产潜力和土地有效系数计算公式为:

$$Y(Q,T,C,L)=Y(Q,T,C)\cdot f(L) \quad (7)$$

$$f(L)=\sum_{i=1}^{n} W_i A_i \quad (8)$$

式中:$Y(Q,T,C,L)$为自然生产潜力(kg·km^{-2}·a^{-1});$f(L)$为土地有效系数订正函数,$0<f(L)<1$;W_i为第 i 个指标的权重系数;A_i为第 i 个指标的评分值。

5)综合生产潜力(comprehensive potential productivity, CPP):生产潜力的社会系数,现有研究多考虑灌溉、化肥、机械化等作为修订系数的指标[8,25],油茶适宜在丘陵地带种植,灌溉要求不高,机械化条件有限,本研究选择人口密度、种植潜力和开发潜力作为油茶社会有效系数的指标(表 2)。其中,人口密度用江西省人口空间分布公里网格数据表示;种植潜力用海拔 50~600 m、坡度 0°~25°范围内林地比重表示,通过渔网工具计算林地在 10 km×10 km 网格的比重得到;开发潜力用海拔 0~1000 m、坡度 0°~30°范围内人均土地资源表示,通过渔网工具计算比重后除以空间化的人口数据得到。指标评分与土地系数一致,考虑到社会要素增产作用在当前技术条件下有限,以 0.7~0.9 之间划分为 5 级后的 30%作为社会有效系数评分,采用专家打分赋予权重,综合 3 个指标得到社会系数。考虑到油茶生长与生产过程中人类直接和间接活动综合效果是改善自然条件,因此将社会系数作为积极因子增产自然生产潜力得到综合生产潜力。综合生产潜力和社会有效系数的计算公式为:

$$Y(Q,T,C,L,S)=Y(Q,T,C,L)\cdot f(S) \quad (9)$$

$$f(S)=1+\sum_{i=1}^{n} W_i A_i \quad (10)$$

式中:$Y(Q,T,C,L,S)$为综合生产潜力(kg·km^{-2}·a^{-1});$f(S)$为社会有效系数订正函数,$0<f(S)<1$;W_i为第 i 个指标的权重系数;A_i为第 i 个指标的评分值。

1.3 资源利用效率评价

资源利用效率即开发利用资源过程中投入与产出的关系,效率高则资源浪费少。目前常用比值分析法、生产函数法、包络分析法、能量效率评价法、因子-能量评价法、能值评价法和指标体系评价法等评价农业资源利用效率[26]。本研究从资源对作物生长的满足程度(潜力变化量、资源满足率)和作物对资源的利用效率(资源组合利用率)两个角度进行江西省油茶资源利用效率评价[17]。

$$\Delta P_i = P_{i-1}-P_i \quad P_i \in [PPP, LTPP, ClimPP, NatPP, CPP, RP] \quad (11)$$

$$Cr_i = P_i/P_{i-1} \quad P_i \in [PPP, LTPP, ClimPP, NatPP, CPP, RP] \quad (12)$$

$$R_i = RP/P_i \quad P_i \in [PPP, LTPP, ClimPP, NatPP, CPP] \quad (13)$$

式中:ΔP_i、Cr_i和 R_i分别表示潜力变化量、资源满足率和资源组合利用率;PPP、LTPP、ClimPP、NatPP、CPP、RP 分别代表光合、光温、气候、土地、综合生产潜力和现实产量。潜力变化量是用前一级生产潜力减去后一级生产潜力(现实产量)依次得到热量衰减量、水分衰减量、土地衰减量、社会增加量和现实衰减量,潜力变化量反映了自然限制因子与社会增产因子作用下的具体变化量;资源满足率是用后一级生产潜力(现实产量)除以前一级生产潜力依次得到热量、水分、土地、社会和现实满足率,其中社会有效系数增产作用使综合生产潜力高于自然生产潜力,故社会满足率大于 100%,为了便于分析,引入纯社会满足率,即社会满足率减去 100%得到,资源满足率反映了自然限制因子与社会增产因子的高低,其变化方向与潜力变化量相反;资源组合利用率是用现实产量除以各级生产潜力,依次得到光合、光温、气候、自然和综合生产潜力利用率,资源组合利用率反映了实际生产对各级资源的利用效率,生产潜力越高,资源组合利用率越低。潜力变化量、资源满足率体现了资源对作物生长的满足程度,资源组合利用率体现了作物对资源的利用效率。

1.4 数据处理

将数据导入 ArcGIS 10.2 平台后,利用其空间分析功能,运用克里金法(Kriging)将气候数据插值到 1 km×1 km空间上,通过栅格计算器计算各级生产

表 2 社会有效系数指标分级与权重

Table 2 Classification and weight of social effective coefficient indicators

指标 Indicator	分级 Classification					权重 Weight
	1(0.7)	2(0.75)	3(0.8)	4(0.85)	5(0.9)	
人口密度 Density of population (×10^3 person·km^{-2})	0~1.37	1.38~4.01	4.02~7.47	7.48~20.01	20.02~43.00	0.35
种植潜力 Potential planting capacity (%)	0~14	15~32	33~45	46~57	68~82	0.35
开发潜力 Potential development capability (km^2/1000 person)	2~272	272~431	432~590	591~782	783~1232	0.30

潜力，运用自然间断分级法（Natural breaks）划分栅格数据等级，通过分区统计（Zonal statistics）功能统计各地级市生产潜力，最后通过制图功能绘制各数据的分布图，坐标为 WGS_1984_UTM_Zone_50N。

2　结果与分析

2.1　油茶综合生产潜力

基于太阳总辐射量和各类参数，在确定各系数基础上，运用潜力衰减法逐步计算各级生产潜力得到自然生产潜力，在社会系数增产作用下修订得到综合生产潜力。利用 GIS 平台插值得到各级生产潜力的空间分布，并参考自然断点法对综合生产潜力重分类为低潜力（9500 ~ 12000 kg）、较低潜力（12001~13000 kg）、较高潜力（13001~14500 kg）和高潜力（14501~17000 kg）4 类，且以地级市为单位，计算区内平均值得到分区值（图 1），并以市为单位，统计平均生产潜力和现实产量（表 3）。

根据计算结果，江西省油茶生产潜力总体较高，自赣南向赣西北递减，赣北潜力最低。其中，光合生产潜力分布特征与太阳总辐射的分布密切相关。江西省光合生产潜力为 16372~18811 kg·km^{-2}，赣南最高，赣北大部次之，赣西最低；地市均值中，最高为赣州（18376 kg·km^{-2}），最低为萍乡（16841 kg·km^{-2}），全省平均为 17724 kg·km^{-2}（表 3）。光温生产潜力为 13643~17554 kg·km^{-2}，赣南最高，赣西最低；市均值最高为赣州（16737 kg·km^{-2}），最低为萍乡（14199 kg·km^{-2}），全省平均为15278 kg·km^{-2}；由于温度条件呈南高北低、东高西低的趋势，形成的温度系数南部、东部较高，修订光合生产潜力使赣北大部衰减明显。气候生产潜力在 10753 ~ 15580 kg·km^{-2}，赣南最高，赣西北大部较低；市均值最高为赣州（14353 kg·km^{-2}），最低为萍乡（11604 kg·km^{-2}），次低为九江（11730 kg·km^{-2}），全省平均为 12452 kg·km^{-2}；由于降水东多西少，蒸发东部、南部多，西北少，形成的水分系数赣西南大部较高，南昌次之，修订光温生产潜力使东北、西北大部衰减明显。自然生产潜力在 7948~13329 kg·km^{-2}，赣南最高，赣西北较低；市均值最高为赣州（11833 kg·km^{-2}），最低为萍乡（9538 kg·km^{-2}），次低为九江（9596 kg·km^{-2}），全省平均为 10299 kg·km^{-2}；由于海拔、坡度、质地、有机碳含量和阳离子交换量等土地指标在区域内差异较小，形成的土地系数修订气候生产潜力使区域差异不明显。综合生产潜力在 9772~16526 kg·km^{-2}，赣南最高，赣西北较低；市均值最高为赣州（14588 kg·km^{-2}），最低为萍乡（11655 kg·km^{-2}），次低为九江（11763 kg·km^{-2}），全省平均为 12550 kg·km^{-2}；由于人口数量北部平原多，西、南部丘陵少，种植潜力和开发潜力与人口数量大致呈反向变化，形成的社会系数平原低、丘陵高，修订自然生产潜力使赣北鄱阳湖平原增产不明显。

综合生产潜力分类后，高潜力区面积 28664 km^2，占比 17.3%，较高潜力区面积 22992 km^2，占比 13.9%，较低潜力区面积 79538 km^2，占比 47.9%，低潜力区面积 34738 km^2，占比 20.9%。市级生产潜力中，高潜力有赣州，较高潜力有吉安、抚州、南昌、上饶和景德镇，较低潜力有宜春、新余和鹰潭，低潜力有萍乡和九江。现实产量与生产潜力有差距且各市发展不均，结合现实产量分类结果，高产量有赣州（9428 kg·km^{-2}）、吉安（9860 kg·km^{-2}）和上饶（9881 kg·km^{-2}），较高产量有景德镇（9192 kg·km^{-2}）和萍乡（9286 kg·km^{-2}），较低产量有抚州（7340 kg·km^{-2}）、新余（8627 kg·km^{-2}）和宜春（8812 kg·km^{-2}），低产量有鹰潭（4490 kg·km^{-2}）、九江（4967 kg·km^{-2}）和南昌（5746 kg·km^{-2}），总体上与潜力分析结果较一致。

表 3　江西各市油茶生产潜力

Table 3　Potential productivity of *Camellia oleifera* in cities of Jiangxi（kg·km^{-2}）

城市 City	光合潜力 PPP	光温潜力 LTPP	气候潜力 ClimPP	自然潜力 NatPP	综合潜力 CPP	现实产量 RP
九江 Jiujiang	17849	14761	11730	9596	11763	4967
景德镇 Jingdezhen	18024	15322	12189	10117	12470	9192
上饶 Shangrao	18125	15547	12403	10188	12482	9881
南昌 Nanchang	18288	15693	12974	10545	12791	5746
宜春 Yichun	17500	14746	11926	9832	12045	8812
鹰潭 Yingtan	17693	15594	12368	10085	12347	4490
抚州 Fuzhou	17702	15409	12532	10319	12736	7340
新余 Xinyu	17019	14545	11836	9763	11963	8627
吉安 Ji'an	17550	15502	13061	10705	13206	9860
萍乡 Pingxiang	16841	14199	11604	9538	11665	9286
赣州 Ganzhou	18376	16737	14353	11833	14588	9428
平均 Average	17724	15278	12452	10229	12550	8693

PPP：Photosynthetic potential productivity；LTPP：Light and temperature potential productivity；ClimPP：Climatic potential productivity；NatPP：Natural potential productivity；CPP：Comprehensive potential productivity；RP：Real production. 下同 The same below.

2.2　资源对油茶生长的满足程度

资源对作物生长的满足程度反映了区域资源的优劣。由 GIS 中统计模型计算得到各市各级生产潜力结果，结合 2014—2016 年实际单产，利用式（11）~（12）方法计算资源对油茶生长的满足程度，得到

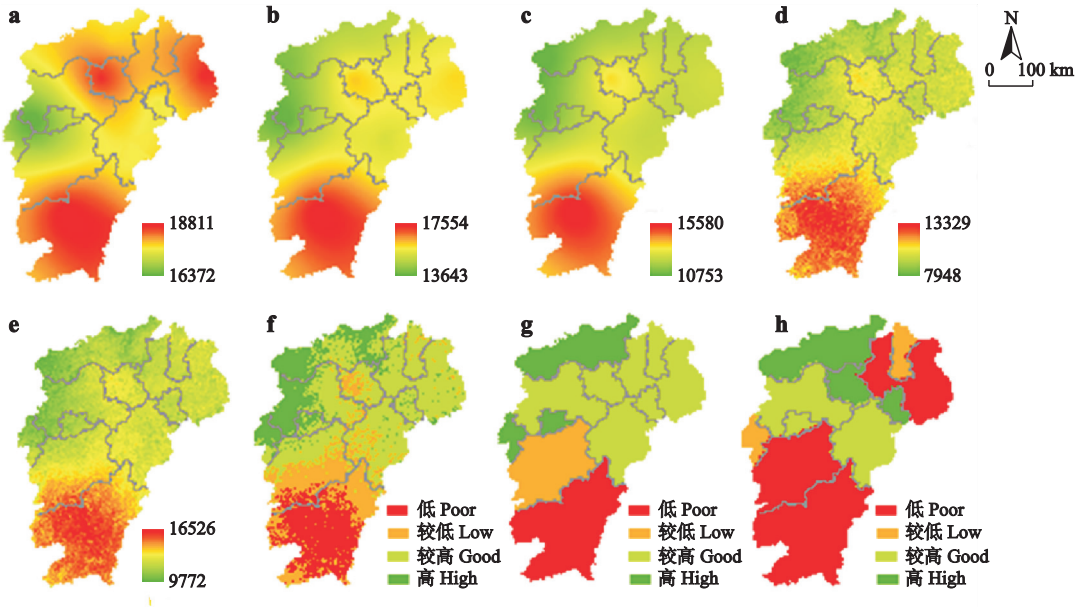


图 1 江西省油茶生产潜力

Fig.1 Potential productivity of *Camellia oleifera* in Jiangxi.

a) 光合生产潜力 Photosynthetic potential productivity, PPP; b) 光温生产潜力 Light and temperature potential productivity, LTPP; c) 气候生产潜力 Climatic potential productivity, ClimPP; d) 自然生产潜力 Natural potential productivity, NatPP; e) 综合生产潜力 Comprehensive potential productivity, CPP; f) 综合生产潜力(分级) CPP-based on classification; g) 综合生产潜力(分区) CPP-based on zones; h) 实际产量 Real production, RP.

江西各市油茶生产的潜力变化量和资源满足率。

江西油茶生产的潜力变化量总体较稳定(表 4),各级潜力变化量的区域差异较小,全省平均变幅为 2223 ~ 3857 kg · km^{-2}。热量衰减量变幅为 1639~3088 kg · km^{-2},最小是赣州、最大是九江。水分衰减量变幅为 2384 ~ 3226 kg · km^{-2},最小是赣州、最大是鹰潭。土地衰减量变幅为 2072 ~ 2520 kg · km^{-2},最小是景德镇、最大是赣州。社会增加量变幅为 2127 ~ 2755 kg · km^{-2},最小是萍乡、最大是赣州。现实衰减量变幅为 2379 ~ 7857 kg · km^{-2},最小是萍乡、最大是鹰潭。各级潜力变化量的区域差异与修订系数的空间分布差异有关,总体上,鹰潭、南昌、九江等潜力变化量较大,开发限制条件较多。

江西油茶生产的资源满足率总体较高(表 5),各级满足率的区域差异较小,全省平均满足率为 69.3%~122.7%,满足率累积变幅最低是鹰潭

表 4 江西各市油茶生产潜力变化量

Table 4 Variation of *Camellia oleifera* potential productivity in cities of Jiangxi (kg · km^{-2})

城市 City	热量衰减量 Decrement of heat	水分衰减量 Decrement of moisture	土地衰减量 Decrement of land	社会增加量 Increment of society	现实衰减量 Decrement of reality
九江 Jiujiang	3088	3031	2134	2167	6796
景德镇 Jingdezhen	2702	3133	2072	2353	3278
上饶 Shangrao	2578	3144	2215	2294	2601
南昌 Nanchang	2595	2719	2429	2246	7045
宜春 Yichun	2754	2820	2094	2213	3233
鹰潭 Yingtan	2099	3226	2283	2262	7857
抚州 Fuzhou	2293	2877	2213	2417	5396
新余 Xinyu	2474	2709	2073	2200	3336
吉安 Ji'an	2048	2441	2356	2501	3346
萍乡 Pingxiang	2642	2595	2066	2127	2379
赣州 Ganzhou	1639	2384	2520	2755	5160
平均 Average	2446	2826	2223	2321	3857

表 5 江西各市油茶生产潜力的资源满足率

Table 5 Resource satisfaction rate of *Camellia oleifera* potential productivity in cities of Jiangxi (%)

城市 City	热量满足率 Satisfaction of heat	水分满足率 Satisfaction of moisture	土地满足率 Satisfaction of land	社会满足率 Satisfaction of society	现实满足率 Satisfaction of reality
九江 Jiujiang	82.7	79.5	81.8	122.6	42.2
景德镇 Jingdezhen	85.0	79.6	83.0	123.3	73.7
上饶 Shangrao	85.8	79.8	82.1	122.5	79.2
南昌 Nanchang	85.8	82.7	81.3	121.3	44.9
宜春 Yichun	84.3	80.9	82.4	122.5	73.2
鹰潭 Yingtan	88.1	79.3	81.5	122.4	36.4
抚州 Fuzhou	87.1	81.3	82.3	123.4	57.6
新余 Xinyu	85.5	81.4	82.5	122.5	72.1
吉安 Ji'an	88.3	84.3	82.0	123.4	74.7
萍乡 Pingxiang	84.3	81.7	82.2	122.3	79.6
赣州 Ganzhou	91.1	85.8	82.4	123.3	64.6
平均 Average	86.2	81.5	82.2	122.7	69.3

(407.8%)、最高是吉安(452.6%),全省满足率平均累积变幅 441.8%。热量满足率变幅为 82.7%~91.1%,最低是九江、最高是赣州。水分满足率变幅为 79.3%~85.8%,最低是鹰潭、最高是赣州。土地满足率变幅为 81.3%~83%,最低是南昌、最高是景德镇。社会满足率变幅为 121.3%~123.4%,纯社会满足率为 21.3%~23.4%,最低是南昌、最高是抚州。现实满足率变幅为 36.4%~79.6%,最低是鹰潭、最高是萍乡。各级满足率的区域差异与修订系数的空间分布差异同向,总体上,吉安、萍乡等资源满足率较高,开发限制条件较少。

江西省自然与社会经济条件较好且区域差异较小。自然资源方面,资源供给水平较高,区域差异较小;潜力变化量总体上南少北多,土地、热量和水分衰减量依次增加;资源满足率总体上南高北低,水分、土地和热量满足率依次增加。总体上,水分是影响江西省油茶生长相对明显的因素,其次是土地因素,两者都可以在人类活动影响下改善。但与粮食作物生长于平原耕作区不同,油茶适宜生长于丘陵地区,灌溉能力有限,多靠雨养条件,土地改良程度弱于耕作土壤,因此水分和土地因素改良潜力较小。社会资源方面,社会增加量和纯社会满足率的水平较低,区域差异很小。自然条件是影响油茶生长的主导因素,有相近开发历史的同一区域,开发自然条件差异较小,这使江西省油茶生长的社会资源差异较小。现实衰减量和满足率方面,总体水平中等,区域差异较大;衰减量东北、中西部较少,西北、中北较多,中南部过渡;满足率西北和中北部较低,东北、中西部较高,中南部过渡。现实衰减量与满足率反映了不同区域最大生产潜力与目前实际产量的差距及目前技术水平下开发利用资源的程度。

2.3　油茶对资源的利用效率

资源利用效率反映了现实技术对自然条件的开发、改良水平,为生产水平评价、开发利用潜力评价等提供指标依据。根据模型计算结果和 2015 年实际单产,利用式(13)计算得到江西各市油茶的资源组合利用率(表 6)。

江西油茶生产的资源组合利用率中等,从光合到综合生产潜力利用率呈增加趋势,各级生产潜力利用率的区域差异较大,自然条件下生产潜力利用率区域差异由光合生产潜力利用率的 30.8%逐渐扩大至自然生产潜力利用率的 52.8%,在社会因素影响下,差异缩小至综合生产潜力利用率的 43.2%;全省平均利用效率为49.1%~85%,效率累积变幅最

表 6　江西各市油茶的资源组合利用率

Table 6　Resource combination utilization efficiency of *Camellia oleifera* in cities of Jiangxi (%)

城市 City	光合潜力 PPP	光温潜力 LTPP	气候潜力 ClimPP	自然潜力 NatPP	综合潜力 CPP
九江 Jiujiang	27.8	33.7	42.3	51.8	42.2
景德镇 Jingdezhen	51.0	60.0	75.4	90.9	73.7
上饶 Shangrao	54.5	63.6	79.7	97.0	79.2
南昌 Nanchang	31.4	36.6	44.3	54.5	44.9
宜春 Yichun	50.4	59.8	73.9	89.6	73.2
鹰潭 Yingtan	25.4	28.8	36.3	44.5	36.4
抚州 Fuzhou	41.5	47.6	58.6	71.1	57.6
新余 Xinyu	50.7	59.3	72.9	88.4	72.1
吉安 Ji'an	56.2	63.6	75.5	92.1	74.7
萍乡 Pingxiang	55.1	65.4	80.0	97.4	79.6
赣州 Ganzhou	51.3	56.3	65.7	79.7	64.6
平均 Average	49.1	56.9	69.8	85.0	69.3

高是鹰潭(171.4%)、最低是萍乡(377.5%),全省利用效率平均累积变幅 330%。光合生产潜力利用效率变幅为 25.4%~56.2%,最低是鹰潭、最高是吉安。光温生产潜力利用效率变幅为 28.8%~65.4%,最低是鹰潭、最高是萍乡。气候生产潜力利用效率变幅为36.3%~80%,最低是鹰潭、最高是萍乡。自然生产潜力利用效率变幅为 44.5%~97.4%,最低是鹰潭、最高是萍乡。综合生产潜力利用效率变幅为36.4%~79.6%,最低是鹰潭、最高是萍乡(表 6)。各级利用率区域差异与后期修订系数的空间分布有关,总体上,南昌、抚州、鹰潭、九江等赣中北地区资源利用效率中等偏低,开发潜力有较大提升空间。

油茶对江西自然与社会资源的利用效率中等,总体上区域差异较大。各级利用率对比可知,光合生产潜力利用率最低,光温生产潜力利用率次之,但光合、光温生产潜力利用率结果本身并不低,总体上属于中等,由于江西省地处低纬度,太阳高度角大,光能资源丰富,加上海陆位置等因素影响下形成的典型季风气候,热量资源丰富,光合、光温生产潜力利用率受人类活动影响较小,即农业改良效果有限。气候和自然生产潜力利用率分别反映了在光合、光温生产潜力充分开发且未受人类影响下,水分和土地条件对生产潜力的影响,而灌溉和土地改良是农业活动中常见的降低限制因素的方式,气候和自然生产潜力是人类可以接近的目标产量。综合生产潜力利用率反映了现实产量与社会因素影响下的综合生产潜力的关系,综合生产潜力已经纳入了人类对自然限制条件改良后的增产效果,比自然生产潜力高,故其资源利用率比自然生产潜力低,在社会条件下综合生产潜力利用率具备最大提升空间,即社会

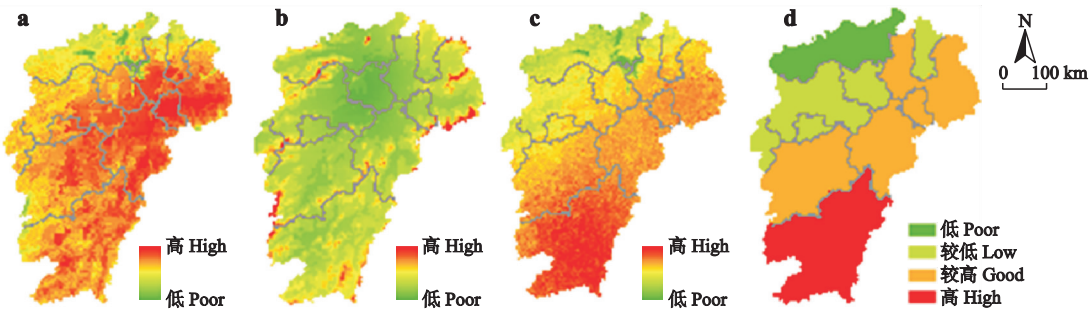


图 2 江西省油茶气候适宜性(a)、含油率(b)、种植适宜性(c)和适宜种植分区(d)

Fig.2 Climate suitability (a), oil content (b), planting suitability (c) and suitable planting divisions (d) of *Camellia oleifera* in Jiangxi.

因素的不断优化为农业生产潜力的提高提供充足动力。

2.4 江西省油茶种植适宜性分区建议

种植分区是由自然条件与社会因素综合作用决定的,对合理规划栽培区域,确定适宜产区,发挥区域资源优势等具有重要作用。基于前期研究的油茶气候适宜性和含油率,结合本研究的综合生产潜力分析结果,运用最大熵(MaxEnt)模型得到江西省油茶种植适宜性分区[27]。油茶含油率基于油脂积累转化关键期的气温和降水数据得到。提取 1970—2000 年江西范围内气候适宜性和含油率数据,与综合生产潜力构成种植分区的 3 个维度,在 GIS 平台将 3 个维度的数据归一化、叠加,得到油茶种植适宜性数值在 0.09~0.67,参考自然断点法对种植适宜性结果重分类为低适宜性、较低适宜性、较高适宜性和高适宜性 4 类,得到江西省油茶种植分区(图 2)。

由江西省油茶气候适宜性、含油率可知,江西省油茶气候适宜性总体上较高,其中赣中、东部最高,赣北最低;含油率赣北最低,周边山地丘陵较高。结合综合生产潜力的南高、西北低分布特征可知,江西省油茶种植适宜性呈由南向北递减状态,赣中南大部较高,赣北较低,鄱阳湖区最低。对种植适宜性分市统计发现,高适宜性有赣州,较高适宜性有吉安、抚州、鹰潭和上饶,较低适宜性有萍乡、宜春、新余、南昌和景德镇,低适宜性有九江。种植适宜性分区与现实产量在整体上较符合,种植适宜性分级高于现实产量分级的有抚州、鹰潭、南昌等市;种植适宜性分级低于现实产量的有吉安、上饶、景德镇、萍乡等市;种植适宜性分级与现实产量分级相符合的有赣州、宜春、新余和九江等市。

3 结 论

以江西省油茶生产潜力为研究对象,基于潜力衰减法逐级修订得到自然生产潜力,结合社会有效系数得到综合生产潜力,并分析资源利用效率,主要结论如下:

江西省油茶生产潜力从赣南到赣西北递减,赣北衰减较明显;全省平均光合生产潜力 17724 kg·km^{-2}、光温生产潜力 15278 kg·km^{-2}、气候生产潜力 12452 kg·km^{-2}、自然生产潜力 10229 kg·km^{-2}、综合生产潜力 12550 kg·km^{-2};分级后高潜力、较高潜力、较低潜力和低潜力类面积分别为 28664、22992、79538 和 34738 km^2,占全省面积比例分别为 17.3%、13.8%、47.9%和 20.9%;市级生产潜力中,赣州为高潜力,吉安、抚州、南昌、上饶和景德镇为较高潜力,宜春、新余和鹰潭为较低潜力,萍乡和九江为低潜力。

江西省油茶生产资源利用效率评价方面,潜力变化量总体变幅较小,各级潜力变化量的区域差异较小,全省平均变幅为 2223~3857 kg·km^{-2},萍乡的潜力变幅最小,鹰潭的最大;资源满足率总体较高,各级满足率的区域差异较小,全省平均满足率为 69.3%~122.7%,鹰潭的满足率累积变幅最低,吉安最高;资源利用效率总体中等,各级生产潜力利用率的区域差异较大,全省平均利用效率为 49.1%~85%。

运用潜力衰减法计算油茶自然生产潜力,并得到综合生产潜力,结果与江西油茶实际产量较符合;资源利用效率评估结果与江西自然和社会条件相符,可以为资源环境可持续利用提供参考。

参考文献

[1] 杨昭明, 冯晓莉, 黄霞, 等. 1987—2017 年青海省东部农业区粮食作物生产潜力及产量差时空变化特征. 中国农学通报, 2019, **35**(3): 26-33 [Yang Z-M, Feng X-L, Huang X, *et al*. Grain crops in eastern agricultural region of Qinghai during 1987-2017: Spatio-

temporal variation characteristics of potential productivity and yield gaps. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, **35**(3): 26-33]

[2] 钟新科, 刘洛, 宋春桥, 等. 1981 年至 2010 年中国东北地区春玉米气候潜力时空变化分析. 资源科学, 2012, **34**(11): 2164-2169 [Zhong X-K, Liu L, Song C-Q, *et al*. Temporal-spatial variation of spring maize climatic productivity from 1981 to 2010 in Northeastern China. *Resources Science*, 2012, **34**(11): 2164-2169]

[3] 李忠武, 叶芳毅, 李裕元, 等. 基于逐级递减法的洞庭湖区晚稻生产潜力模拟与预测. 地理研究, 2010, **29**(11): 2017-2025 [Li Z-W, Ye F-Y, Li Y-Y, *et al*. Predictive analysis of late rice potential productivity in Dongting Lake Area (DLA) based on stepwise diminishing method. *Geographical Research*, 2010, **29**(11): 2017-2025]

[4] 杜国明, 张露洋, 徐新良, 等. 近 50 年气候驱动下东北地区玉米生产潜力时空演变分析. 地理研究, 2016, **35**(5): 864-874 [Du G-M, Zhang L-Y, Xu X-L, *et al*. Spatial-temporal characteristics of maize production potential change under the background of climate change in Northeast China over the past 50 years. *Geographical Research*, 2016, **35**(5): 864-874]

[5] Li ZH, Hu PC, Huang WH. Research on the dynamic climatic production potential of middle-season rice in Jiangxi Province. *Meteorological and Environmental Research*, 2010, **1**: 50-52

[6] Jones PG, Thornton PK. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change*, 2003, **13**: 51-59

[7] 刘文茹, 陈国庆, 曲春红, 等. RCP 情景下长江中下游麦稻二熟制气候生产潜力变化特征研究. 生态学报, 2018, **38**(1): 156-166 [Liu W-R, Chen G-Q, Qu C-H, *et al*. Variations in potential climatic productivity of wheat and rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River under RCP scenarios. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(1): 156-166]

[8] 孙晓丽, 石淑芹, 李正国. 黑龙江省气候与社会经济因素对生产潜力影响的研究. 中国人口·资源与环境, 2014(增刊 3): 349-353 [Sun X-L, Shi S-Q, Li Z-G. Study on impact of climate and social-economic factors on potential grain productivity in Heilongjiang Province. *China Population, Resources and Environment*, 2014(suppl.3): 349-353]

[9] Qin YW, Liu JY, Shi WJ, *et al*. Spatial-temporal changes of cropland and climate potential productivity in northern China during 1990 - 2010. *Food Security*, 2013, **5**: 499-512

[10] 时小琳, 刘伟平, 戴永务. 补贴政策对农户油茶种植决策行为影响的实证分析. 林业经济, 2017(9): 95-100 [Shi X-L, Liu W-P, Dai Y-W. Empirical analysis on the effect of the subsidy policy on farmers' planting decision-making behavior of the *Camellia oleifera* Abel. *Forestry Economics*, 2017(9): 95-100]

[11] 洪燕真, 余韵, 刘伟平. 农户油茶经营行为特征研究——以福建省油茶种植户调查为例. 林业经济问题, 2011, **31**(6): 504-509 [Hong Y-Z, Yu Y, Liu W-P. Study on operating behavior characteristics of *Camellia oleifera* Abel farming households: A case study of Fujian *Camellia oleifera* Abel planters. *Problems of Forestry Economics*, 2011, **31**(6): 504-509]

[12] 余建辉, 洪燕真, 洪流浩, 等. 农户油茶供给潜力敏感性分析——基于福建省油茶地块投入产出调查数据. 中南林业科技大学学报: 社会科学版, 2012, **6**(2): 54-57 [Yu J-H, Hong Y-Z, Hong L-H, *et al*. The sensitivity analysis of farmers' *Camellia oleifera* Abel supply potentiality: Based on input-output survey data in Fujian. *Journal of Central South University of Forestry and Technology: Social Sciences*, 2012, **6**(2): 54-57]

[13] 洪燕真, 刘伟平. 中国油茶种植潜力分析——基于福建省农户调查数据. 林业经济, 2012(11): 66-69 [Hong Y-Z, Liu W-P. Analysis on cultivation potentiality of Chinese *Camellia oleifera* Abel: Based on survey data of farming household in Fujian. *Forestry Economics*, 2012(11): 66-69]

[14] 蒋勇军, 王青, 俞音, 等. 岷江上游杂谷脑河流域农业综合生产潜力研究. 江苏农业科学, 2012, **40**(4): 419-421 [Jiang Y-J, Wang Q, Yu Y, *et al*. Study on agricultural comprehensive potential productivity of Zagunao River Basin in the upper reaches of Minjiang River. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, **40**(4): 419-421]

[15] 戴尔阜, 王昊, 吴绍洪, 等. 东北温带旱作农业主要作物生产潜力及资源利用效率评价——以黑龙江海伦市为例. 地理研究, 2007, **26**(3): 461-469 [Dai E-F, Wang H, Wu S-H, *et al*. A method for calculating potential productivity of main crops in dry farming system as well as assessment of agricultural resources utilization in temperate zone, Northeast China: A case study of Hailun County, Heilongjiang Province. *Geographical Research*, 2007, **26**(3): 461-469]

[16] 马岩, 陈利顶. 海伦地区粮食生产资源利用系统分析. 地理科学进展, 2009, **28**(6): 998-1003 [Ma Y, Chen L-D. Systematical analysis on agricultural resources utilization in Hailun County based on crop potential productivity. *Progress in Geography*, 2009, **28**(6): 998-1003]

[17] 庞英, 李树超. 商品粮产区农户粮食生产资源利用效率研究. 资源科学, 2013, **35**(1): 82-90 [Pang Y, Li S-C. Resource utilization efficiency across commodity grain producing areas. *Resources Science*, 2013, **35**(1): 82-90]

[18] 张娜娜, 王海涛, 吴颖超, 等. 基于数据包络分析模型的江苏省农业水资源利用效率评价. 水土保持通报, 2015, **35**(4): 299-303 [Zhang N-N, Wang H-T, Wu Y-C, *et al*. Evaluation on agricultural water utilization efficiency of Jiangsu Province based on data envelopment analysis model. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, **35**(4): 299-303]

[19] Dercas N, Liakatas A. Water and radiation effect on sweet *Sorghum* productivity. *Water Resources Management*, 2007, **21**: 1585-1600

[20] 王晓煜, 杨晓光, 孙爽, 等. 气候变化背景下东北三省主要粮食作物产量潜力及资源利用效率比较. 应用生态学报, 2015, **26**(10): 3091-3102 [Wang X-Y, Yang X-G, Sun S, *et al*. Comparison of potential yield and resource utilization efficiency of main food crops in three provinces of Northeast China under climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(10): 3091-3102]

[21] 江西省统计局, 国家统计局江西调查总队. 江西统计年鉴(2015, 2016, 2017). 北京: 中国统计出版社, 2016, 2017, 2018 [Statistic Bureau of Jiangxi, Jiangxi Survey Team of National Bureau of Statistics. Jiangxi Statistical Yearbook (2015, 2016, 2017). Beijing: China Statistics Press, 2016, 2017, 2018]

[22] 王青, 李国蓉, 俞音, 等. 农业综合生产潜力指标体系及其模型改进. 地理科学进展, 2010, **29**(3): 273-278 [Wang Q, Li G-R, Yu Y, *et al*. Indicators and model on agricultural intergrated potential productivity. *Progress in Geography*, 2010, **29**(3): 273-278]

[23] 占明锦, 章毅之, 孔萍. 江西省太阳能资源评估研究. 能源研究与管理, 2010(3): 19-22 [Zhan M-J, Zhang Y-Z, Kong P. The assessment of solar energy resource in Jiangxi Province. *Energy Research and Management*, 2010(3): 19-22]

[24] 蒋元华, 廖玉芳. 油茶气象影响指标研究综述. 中国农学通报, 2015, **31**(28): 179-183 [Jiang Y-H, Liao Y-F. Research summary on meteorological influence indicators of oil tea *Camellia*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, **31**(28): 179-183]

[25] 许东红. 基于潜力衰减法的潜江耕地产能核算及驱动力分析. 硕士论文. 武汉: 华中师范大学, 2016 [Xu D-H. Accounting the Cultivated Land Productivity of Qianjiang City Based on Potential Decay Method and the Driving Force Analysis Factors. Master Thesis. Wuhan: Central China Normal University, 2016]

[26] 靳京, 吴绍洪, 戴尔阜. 农业资源利用效率评价方法及其比较. 资源科学, 2005, **27**(1): 146-152 [Jin J, Wu S-H, Dai E-F. Assessment on agricultural resources efficiency: Comparison on methods and integrated approaches. *Resources Science*, 2005, **27**(1): 146-152]

[27] 刘光旭, 王小军, 肖彤, 基于气候因子的油茶含油率时空特征与种植分区研究. 云南大学学报: 自然科学版, 2020, doi: 10.7540/j.ynu.20190483 [Liu G-X, Wang X-J, Xiao T. Study on temporal and spatial characteristics of oil content and planting divisions of *Camellia oleifera* based on climate factors. *Journal of Yunnan University: Natural Science Edition*, 2020, doi: 10.7540/j.ynu.20190483]

作者简介 王小军, 男, 1994 年生, 硕士研究生。主要从事环境演变与资源生态研究。E-mail: gwangxj@163.com

责任编辑 张凤丽

开放科学(资源服务)标识码(OSID):