

文章编号: 1008-2786-(2019)2-252-11

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000419

## 2000—2017 年湖南省土地耕作适宜性、气候生产潜力与 LUCC 过程动态特征

王继人<sup>1</sup>, 钟昌标<sup>1\*</sup>, 王玲玲<sup>1</sup>, 莫宏伟<sup>2</sup>

(1. 云南财经大学 城市与环境学院, 昆明 650221; 2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湘潭 411201)

**摘 要:** 定量分析土地耕作适宜性、气候生产潜力与土地利用/土地覆盖变化(LUCC)的动态特征是科学规划土地利用、有效保护耕地资源的基础。本文基于湖南省气候、土地覆被、地形等数据,采用气候生产潜力估算和趋势分析方法,以 300 m×300 m 栅格为计算单元,获得湖南省 2000—2017 年耕地气候生产潜力的变化趋势,并分析湖南省土地耕作适宜性、气候生产潜力与 LUCC 过程的关系。结果显示:湖南省最适宜耕作的土地主要分布在北部平原、中部和南部盆地、丘陵区,气候生产潜力为 19 530~40 375 kg/ha,整体呈现东南部高西北部低。北纬 28°以南的中部、中东部丘陵盆地,是土地耕作适宜性和气候生产潜力组合最好的区域。86.5% 的新增人造地表为最适宜耕作的耕地,说明新增人造地表主要以牺牲优良的耕地为代价。气候变化、气候生产潜力变化与 LUCC 过程密切相关,LUCC 过程中流向耕地多为气候生产潜力增加区,而耕地转为林地等土地类型则属于气候生产潜力下降区,指示气候变化在驱动不同类型土地相互转变中的作用。上述结果可望为湖南省土地规划整治及山地资源开发等提供决策参考。

**关键词:** 土地耕作适宜性;LUCC;气候生产潜力;湖南省

**中图分类号:** P964;P967

**文献标志码:** A

气候生产潜力是由光、温、水等主要气候要素所决定的作物生产潜力<sup>[1]</sup>,耕地的适宜性和气候生产潜力是农业发展的决定性因素。在当前气候变暖背景下,地表能量和水分循环加剧变化,改变农作物生长发育所需的光热、水分以及两者的匹配状态,引起土地生产潜力的变化<sup>[2-3]</sup>。另一方面,土地利用/土地覆盖变化(Land-use and Land-Cover Change, LUCC)被认为能改变地表能量和生物地球化学循环,进而导致气候和气候生产潜力变化<sup>[4-6]</sup>。因此,探讨气候变化背景下的气候生产潜力变化与 LUCC 过程的相互作用关系,对定量评价土地生产潜力及

其差异、科学规划土地利用具有重要意义。

早在上世纪 60 年代,研究者从太阳辐射、气温、降水等气候资源的角度探讨了我国粮食生产潜力<sup>[7]</sup>。之后,研究者基于气候、地形、土壤等因子,提出和不断修订了光温生产潜力、气候生产潜力、土地生产潜力估算模型<sup>[8-11]</sup>,结合 GIS 技术和遥感数据,计算和分析了区域农作物生产潜力及其时空异质性,计算单元从行政区逐渐转为规则的栅格(如 1 km×1 km)<sup>[2, 12-13]</sup>。自 1995 年国际地圈生物圈计划(IGBP)和国际全球变化人文因素计划(IHDP)执行土地利用/土地覆盖变化科学研究计划

**收稿日期**(Received date):2019-01-06;改回日期(Accepted date):2019-04-09

**基金项目**(Foundation item):国家自然科学基金项目(71673182);湖南省自然科学基金(2018JJ2115)。[National Natural Science Foundation of China (71673182); Hunan Natural Science Foundation (2018JJ2115)]

**作者简介**(Biography):王继人(1998-),男,湖南湘潭市人,本科生,研究方向为区域经济与规划。[WANG Jiren (1998-), male, born in Xiangtan, Hunan province, undergraduate, research on regional economies and planning] E-mail: zz1820@ynufe.edu.cn

**\* 通讯作者**(Corresponding author):钟昌标(1964-),男,江西兴国县人,教育部长江学者特聘教授,博士,研究方向为区域经济理论与政策。[ZHONG Changbiao (1964-), male, born in Xingguo, Jiangxi province, Distinguished Professor of Changjiang Scholar, Ministry of Education, Ph. D., research on regional economic theory and policy] E-mail: zhongcb@ynufe.edu.cn

(LUCC), LUCC 成为全球变化研究的热点, 从不同时空尺度分析和模拟 LUCC 过程、驱动因子及其影响, 在全球尺度上, 约 60% 土地变化直接与人类活动有关, 40% 的土地变化是气候变化等间接因子驱动的结果<sup>[14]</sup>。近年来, 在城镇化和工业化的进程中, 土地变化加速<sup>[15-16]</sup>, 不同区域多呈现耕地不断减少、人造地表持续增加的趋势<sup>[2, 17]</sup>, LUCC 过程对区域气温、降水、蒸发等气候要素变化有显著影响<sup>[18-21]</sup>。土地耕作适宜性研究是关系到耕地安全和粮食安全的重大课题<sup>[22]</sup>, 研究者在大区域开展了广泛的土地适宜性评价<sup>[23-24]</sup>, 对单一类型的土地耕作适宜性研究也持续深入<sup>[25]</sup>, 并开始采用 GIS 因素叠加分析方法和技术<sup>[26]</sup>对土地耕作适宜性进行综合评价。

湖南省位于长江中游, 云贵高原东延部分和东南山丘转折线南端, 地处东经 108°47′~114°15′, 北纬 24°38′~30°08′(图 1), 有平原、盆地、丘陵和山地等多种地貌, 其中以山地和丘陵为主, 山地面积占全省总面积的 51.2%。湖南为大陆性亚热带季风气候, 光、热、水资源丰富, 主要农作物有水稻、玉米、棉花、水果、烟草等。最近, 研究者发现湖南省气候变化加剧, 极端连续降水事件增多<sup>[27]</sup>。自 2000 年以来, 湖南省生态系统服务价值总体呈下降趋

势<sup>[28-29]</sup>, 湖南省土地生态安全水平不高, 大部分市州土地处于较不安全状态<sup>[30]</sup>, 土壤生产潜力总体上呈现由湘东北向湘西南逐渐降低的趋势, 湘东北地区土壤开发和粮食增产空间较湘西南更广阔<sup>[31]</sup>, 耕地面积在减少、建设用地增加, 林地、耕地、建设用地等不同土地类型间的转化强度加大<sup>[16, 28]</sup>。但是当前对湖南省气候变化、气候生产潜力、土地利用/覆被变化综合变化及其影响研究较少, 因此, 本文以湖南省为研究样区, 利用 Python、ArcGIS 技术, 以 300 m×300 m 栅格为计算单元, 在对湖南省土地耕作适宜性分类的基础上, 分析土地耕作适宜性、气候生产潜力与 LUCC 过程的关系, 为湖南省土地规划整治及山地资源开发等提供决策参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

本文使用的数据主要包括气象数据、土地覆被数据和地形数据等。气象数据源于湖南省气象局, 包括湖南省 97 个气象站 2000—2017 年逐日辐射、日照、气温、降水、风速、相对湿度和气压等数据(图 1)。土地覆被数据为欧洲航天局(ESA)发布的 2000 和 2015 年两期数据(Climate Change Initiative

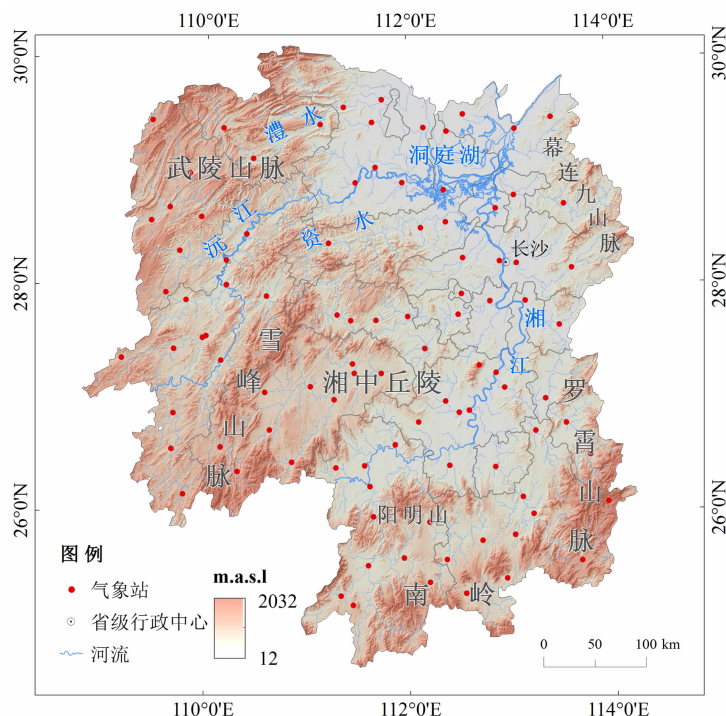


图 1 研究区概况

Fig. 1 Study area

Land Cover, CCI-LC, <https://www.esa-landcover-cci.org/>),数据空间分辨率为 300 m,基于野外实地调查的精度评价显示,相对其他土地覆被产品来说,CCI-LC数据的总体精度、制图精度和用户精度均较高<sup>[32]</sup>。地形数据为 SRTMDEM (Shuttle Radar Topography Mission digital elevation model),精度为 1 弧秒(30 m,<https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>)。河网数据基于 SRTMDEM,并利用 ArcGIS 10.0 中的水文分析模块获得。

## 1.2 方法

### 1.2.1 土地利用分类

参照国内《土地利用现状分类标准》<sup>[33]</sup>,并结合湖南省实际的土地利用情况,对本文使用的 ESA 土地覆被数据进行了分类归并,结果包括耕地和林地等 7 个类型(表 1)。

### 1.2.2 耕作适宜性分类

土地能否适合耕作主要取决于地面坡度、水分和热量。首先,本文在总结已有研究成果的基础上<sup>[31, 34]</sup>,结合湖南省的实际情况,基于公式(1)~(4)将湖南省土地(不考虑水体)分为最适合( $Y_s=1$ )、较适合( $0<Y_s<1$ )和不适合( $Y_s=0$ )耕作三类。

$$Y_s = \mu(g) \times \mu(e) \times \mu(p) \quad (1)$$

$$\mu(g) = \begin{cases} 1 (g \leq 7^\circ) \\ 1 - 2.35\sin(g - 7) (7^\circ < g < 25^\circ) \\ 0 (g \geq 25^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu(e) = \begin{cases} 1 (e \leq 100 \text{ m}) \\ 0.6 (100 \text{ m} < e \leq 300 \text{ m}) \\ 0.2 (300 \text{ m} < e \leq 500 \text{ m}) \\ 0 (e > 500 \text{ m}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu(p) = \begin{cases} 1 (p \geq 5300 \text{ }^\circ\text{C}) \\ p - 4800/500 (4800 \text{ }^\circ\text{C} < g \leq 5300 \text{ }^\circ\text{C}) \\ 0 (p < 4800 \text{ }^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $g$  为地面坡度, $g \leq 7^\circ$ 为最佳可耕地, $g \geq 25^\circ$ 为不可用于耕地; $e$  为距离最近水源(河流/湖泊)高差,反映水分再分配和灌溉保证率参数,以 100 m、300 m 和 500 m 为界限; $p$  为正积温,以年 5300  $^\circ\text{C}$  为农作最佳生长的低限,4800  $^\circ\text{C}$  为最低热量界限。

### 1.2.3 气候生产潜力估算

本研究根据潜力衰减法中的光温阶乘模型,采取逆向修正因子法,以作物截光特征和光合作用为切入点,通过其能量转换和产量形成的过程进行逐步“衰减”估算气候生产潜力。将流域内各气象站点逐日的辐射、气温、降水量、蒸发量等数据进行 Kriging 内插,获得各气候因子逐日 300 m  $\times$  300 m 的栅格数据;在 Python、ArcGIS 工具的支持下,依据温度、水分修正系数模型,获得光合生产潜力、光温生产潜力和气候生产潜力分布图。具体测算模型如下:

(1) 光合生产潜力是指作物在温度、水分、养分等条件完全保证,光合器官以最大速率摄取太阳能的条件下,根据光合理论计算的单位面积上能获得的产量<sup>[35]</sup>,即光合生产潜力:

$$Y = \frac{\varepsilon \times (1 - \alpha) \times (1 - \beta) \times (1 - \gamma) \times (1 - \omega) \times (1 - \rho) \times \psi \times \sum Q}{h \times (1 - CA) \times (1 - CM)} \quad (5)$$

式中: $Y$  为光合生产潜力 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ); $\varepsilon$  为光合有效辐射(0.49); $\alpha$  为植物叶面光合有效反射率(0.14); $\beta$  为透过率(0.06); $\gamma$  为光饱和限制率(0); $\omega$  为植

表 1 土地利用数据分类归并

Tab. 1 Classification and consolidation of land use data

归并 类型	ESA (CCI-LC)		GB/T 21010-2017
	编码	类型	类型
耕地	10 (11/12)/20	旱作农田/灌溉农田	耕地
林地	30/40/50/60 (61)/70	农田镶嵌类型/自然植被镶嵌类型/常绿阔叶林/落叶阔叶林/常绿针叶林	林地
草地	100/110/120 (121)/130/180	灌木草本镶嵌类型/灌丛/草原	草地
水体	210	水体	水域及水利设施用地
人造地表	190	城市地区	商服/住宅/建设/交通运输用地等
裸地	150	稀疏植被 (<15%)	其他土地
湿地	170	沼泽湿地	湿地类

物呼吸作用损耗率(约为0.33); $\rho$ 为植物非光合器官的无效吸收(0.1); $\psi$ 为量子效率(约为0.224); $h$ 为每形成1 g干物质所需要的能量,平均值为4.25 Kcal; $\Sigma Q$ 为逐日太阳总辐射( $\text{cal}/\text{cm}^2$ ); $CA$ 为植物体中无机养分含量(约为0.08); $CM$ 为植物体的含水率(约为0.14)。各参数的取值参考文献<sup>[10, 36-40]</sup>。

(2)光温生产潜力是指作物在其他自然条件适宜的状况下,以光能和温度作为作物产量的决定因素时,所产生的干物质能力;它是灌溉区土地生产潜力的上限值,是在光合潜力的基础上,经温度有效系数修正后得到;本文选用喜温作物模型计算温度修正系数<sup>[10, 13]</sup>:

$$Y_t = Y \times f(t) \quad (6)$$

$$f(t) = \begin{cases} 0.0027t - 0.162 & (6 \leq t < 21) \\ 0.086t - 1.41 & (21 \leq t < 28) \\ 1 & (28 \leq t < 32) \\ -0.083t - 3.67 & (32 \leq t < 44) \\ 0 & (t < 6 \text{ 或 } t > 44) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Y_t$ 为光温潜力, $f(t)$ 为温度修正系数, $t$ 为日平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )。

(3)气候生产潜力是由光、温、水等主要气候要素所决定的作物生产潜力<sup>[1]</sup>;对于非灌溉地区而言,气候生产潜力是其土地生产潜力的理论上限值;在光温生产潜力基础上,经水分有效系数修正后得到;本文选择适用于南方地区的龙玉斯水分修正系数公式<sup>[9]</sup>和彭曼公式计算气候潜力:

$$Y_w = Y_t \times f(w) \quad (8)$$

$$f(W) = \begin{cases} R/E_0 & (R \leq E_0) \\ 1 - \frac{R - E_0}{3E_0} & (E_0 < R < 4E_0) \\ 0 & (R \geq 4E_0) \end{cases} \quad (9)$$

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (10)$$

式中: $Y_w$ 为气候潜力, $f(W)$ 为水分修正系数, $R$ 日降水量(mm), $G$ 为土壤热通量( $\text{MJm}^{-2}/\text{d}$ ,取 $G=0$ ), $E_0$ 为日蒸发力(mm), $R_n$ 为净辐射( $\text{MJm}^{-2}/\text{d}$ ), $T$ 为日均气温( $^{\circ}\text{C}$ ), $U_2$ 为2 m 高风速( $\text{ms}^{-1}$ ), $E_s$ 和 $E_a$ 分别为饱和水气压和实际水气压(kPa), $\Delta$ 为饱和水气压曲线斜率( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ), $\gamma$ 为干湿表常数( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ )。

#### 1.2.4 趋势分析

在Python工具的支持下,采用一元线性回归方法,分析湖南省2000—2017年每个栅格气候生产潜力的变化趋势:

$$Sl = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times Y_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (11)$$

式中: $Sl$ 为气候生产潜力的趋势, $Y_i$ 表示第*i*年的气候生产潜力值, $n$ 为监测年数( $n=17$ )。文章采用*t*检验分析每个栅格线性回归模型的显著性。

## 2 结果

### 2.1 LUCC过程

湖南省主要土地利用类型为耕地、林地、草地、水体、人造地表、裸地和湿地7种类型。2000—2015年湖南省土地变化最突出的特征是草地、水体和耕地面积减少,人造地表面积显著增加。15年间,不同类型土地转变过程中,耕地、草地和人造地表面积变化剧烈(表2,图2)。耕地总体减少了0.3%,其中有1340.91  $\text{km}^2$ (占2000年总耕地面积的2.4%)的耕地变为人造地表,但也有1170.7  $\text{km}^2$ 的林地和草地转变为耕地(占2000年总耕地面积的2.1%);草地面积减少最为显著,15年来总体减少了17.9%,其中转变为林地的面积为1251.4  $\text{km}^2$ (占2000年总草地面积的21.1%),转变为耕地的面积为546.1  $\text{km}^2$ (占2000年总草地面积的9.2%);人造地表呈现出惊人的扩张速度,15年来人造地表增加了146.9%,且其增量中84.1%的人造地表面积(1340.91  $\text{km}^2$ )由耕地转化而来。

### 2.2 耕作适宜性分类

湖南省最适宜耕作、较适宜和不适宜的土地面积分别占湖南省总土地面积的31.6%、49.1%和19.4%(表3)。最适宜土地主要分布在北部平原、中部和南部盆地、丘陵区,较适宜的土地广泛分布于西部、南部山区,不适宜土地主要分散于南部、西部、西北部海拔较高的山区(图1,图3(a))。当前湖南省不适宜耕作的土地主要是山区林地(34747.8  $\text{km}^2$ ),占不适宜耕作土地总面积的95.1%,其次是草地(1347.9  $\text{km}^2$ ),占3.7%。现有土地中有58.6%林地和42.6%草地属于较适宜耕作

的土地,具有转变为耕地的潜力,而 85.7% 人造地  
表(2308.1 km<sup>2</sup>)属于最适宜的耕地。裸地和湿地  
面积小,主要位于水体周围或沿线,基本属于理论上的  
适宜耕地。

表 2 2000—2015 年不同土地覆被类型的转变  
Tab.2 Convert status of the different land cover types

		2015 年							2000 年合计
		耕地	林地	草地	水体	人造地表	裸地	湿地	
2000 年	耕地	53 945.8	19.4	2.5	6.6	1340.91	10.89	22.1	55 348.2
	林地	624.6	143 273.3	653.4	31.7	180.4		10.5	144 773.9
	草地	546.1	1251.4	4065.8	18.1	39.0		3.9	5924.3
	水体	79.4	31.5	143.7	4439.3	34.5	13.7	6.8	4748.9
	人造地表					1086.1			1086.1
	裸地				2.9		37.8		40.7
	湿地	0.7	2.4	0.6		0.3		71.8	75.9
2015 合计		55 196.6	144 578.1	4866.1	4498.6	2681.11	62.39	115.0	211 997.9

注:横向依次表示 2000 年的土地类型转变到 2015 年土地类型的面积,单位:km<sup>2</sup>。

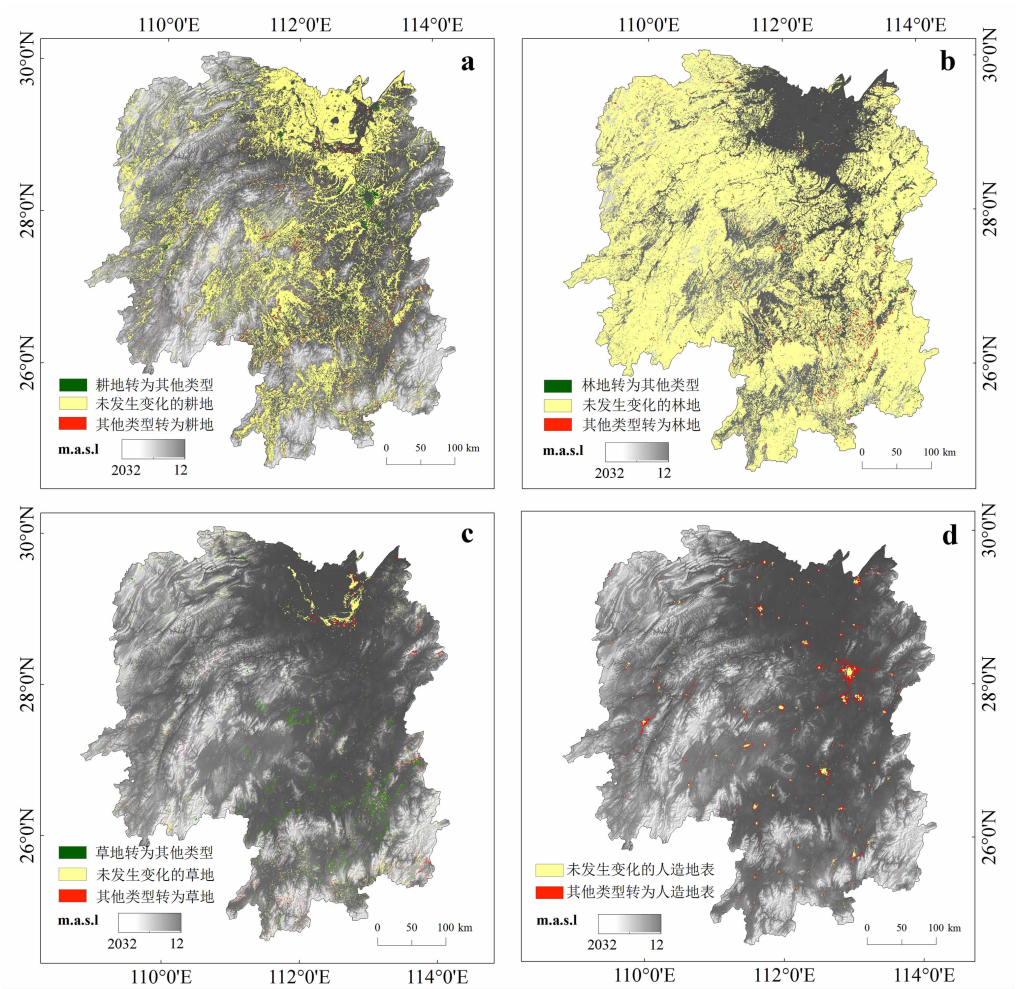


图 2 2000—2015 年湖南省不同土地覆被类型转换的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land cover conversion of different types from 2000 to 2015 in Hunan province, China



表 3 2015 年湖南省不同土地利用类型耕作适宜性分类

Tab. 3 Suitability of cultivation land classification of different land use types in Hunan province in 2015

适宜性分类	耕地	林地	草地	人造地表	裸地	湿地	合计
不适宜/%	0.8	24.0	27.7	0.1	0.0	8.8	19.4
较适宜/%	30.4	58.6	42.6	14.1	0.5	46.5	49.1
最适宜/%	68.8	17.4	29.7	85.7	99.5	44.7	31.6

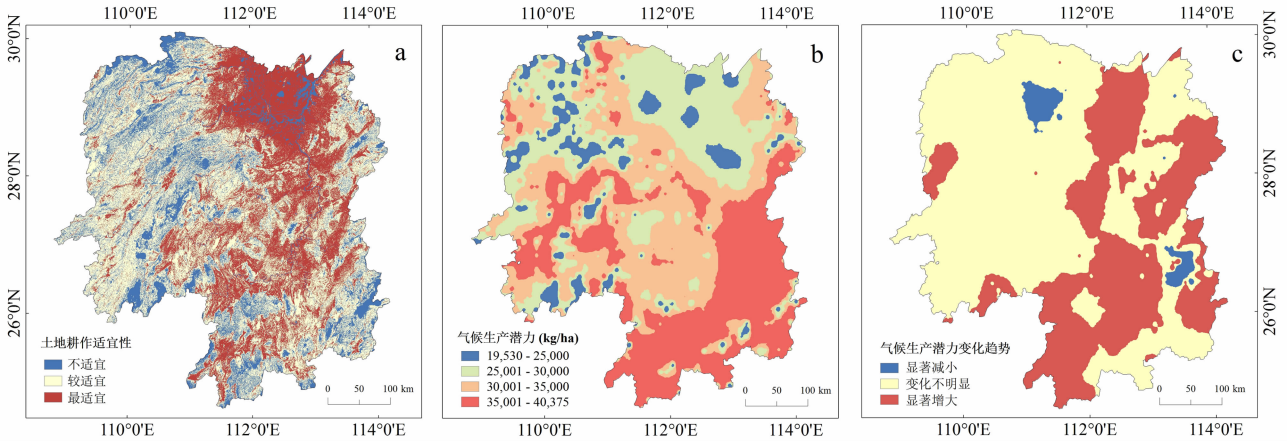


图 3 土地耕作适宜性与生产潜力分布变化图

(a) 土地耕作适宜性, (b) 气候生产潜力分布, (c) 气候生产潜力变化趋势

Fig. 3 Suitability types of cultivation land, distribution status and changes of potential productivity in Hunan province

(a) Suitability types of cultivation land, (b) Distribution status of potential productivity, (c) Changes of potential productivity in Hunan province

2.3 气候生产潜力变化

湖南省气候生产潜力为 19 530 ~ 40 375 kg/ha, 平均为 31 859.5 kg/ha, 可大致分为 4 级(表 4、图 3 (b))。湖南省气候生产潜力整体呈现东南部高西北部低的特征, 一级区和二级区主要分布在北纬 28°以南, 三级区主要分布在北纬 28°以北, 四级区主要零散分布在西部和西北部; 分布面积方面, 二级区和一级区面积比重最大, 两者合计超过湖南省总土地面积的 65%, 四级区面积最小, 仅占湖南省总面积的 7.2%。

2000—2017 年湖南省气候生产潜力, 平均每年增加 209.6 kg/ha, 气候生产潜力变化不明显的区域占湖南省面积的 62.6%, 35.1% 的区域的的气候生产潜力呈显著增加的趋势(显著性水平  $\alpha \leq 0.1$ ), 平均线性增率为 586.4 kg/(ha · yr), 仅有 2.3% 的区域呈显著减少的趋势(−692.7 kg/(ha · yr), 显著性水平  $\alpha \leq 0.1$ )(图 3(c))。空间上, 气候生产潜力显著增加的区域呈条带状分布在东部及湘中平原和丘陵区, 湘中及西部广大区域气候生产潜力变化不显

著(图 1、图 3(c))。

表 4 2000—2017 年湖南省平均气候生产潜力

Tab. 4 Mean climatic potential productivity of cultivation land in Hunan province, 2000—2017

范围 /(kg · ha <sup>−1</sup> )	分级	平均值 /(kg · ha <sup>−1</sup> )	面积 /km <sup>2</sup>	面积比重 /%
35 001 ~ 40 375	一级	36 926.9	63 975.5	30.2
30 001 ~ 35 000	二级	32 528.5	74 205.6	35.0
25 001 ~ 30 000	三级	27 657.6	58 616.1	27.6
19 530 ~ 25 000	四级	23 470.2	15 202.4	7.2

3 分析与讨论

3.1 耕作适宜性与 LUCC 过程

研究显示, 近 15 年来, 湖南省土地生态安全处于“中警”(黄灯)状态, 这与城市化快速扩张、土地利用方式不合理特别是建设占用耕地等因素有重要联系<sup>[30]</sup>, 分析土地耕作适宜性与 LUCC 过程合理性, 对评价湖南省土地生态安全、土地生态系统服务

价值等具有重要意义。对比土地动态转变与耕作适宜性发现,15 年来不同类型土地动态变化显示:首先,草地向耕地的动态转变是朝着耕作适宜性增加的方向转化的,546.1 km<sup>2</sup> 的草地转变为耕地的区域中,59.8% 为最适宜耕作的土地,39.4% 为较适宜耕作的土地,两者合计超过 99%;其次,624.6 km<sup>2</sup> 林地转变为耕地的区域中,28.3% 为最适宜耕作的土地,66.4% 为较适宜耕作的土地,两者合计为 94.74%。这说明 LUCC 过程中,其他非耕地土地类型流向耕地类型绝大部分为最适宜和较适宜耕作的土地,反映土地类型转化呈现良性态势的一面。

从耕地转变为其他土地的耕作适宜性来看,转变为草地、林地和湿地的部分中分别有 53.6%、29.2%、12.5% 是不适宜耕作的,反映土地耕作适宜性对 LUCC 过程的影响明显。从耕作适宜性来看,湖南省土地类型的结构趋于优化,然而 15 年来有 1185.8 km<sup>2</sup> 的最适宜性耕地转变为其他类型,其中 98.6% 转变为人造地表,说明新增人造地表主要以牺牲优良的耕地为代价,未来守住耕地红线,严控建筑用地规模的任务仍然十分艰巨。

进一步分析湖南省现有耕地耕作适宜性发现,2015 年有 419.5 km<sup>2</sup> 的耕地为不适宜耕作的土地。其中,88.7% (371.9 km<sup>2</sup>) 不适宜耕作的耕地是因为坡度超过 25°,其次是在高海拔区,温度低,年正积温不足 4800 °C,占不适宜耕作耕地的 6.8%,而灌溉保证率低,距离最近水源(河流/湖泊)高差超过 500 m 的占 4.5%。

### 3.2 气候生产潜力与 LUCC 过程

湖南省气候承载力较高,平均气候生产潜力达 31 859.5 kg/ha,在全国属于较高区域<sup>[2]</sup>。全省除北部和西北山区外,大部地区特别是中部平原盆地、中东部丘陵区气候承载力的剩余空间富裕,光温水等条件配合较好,能够很好地保障农作物生长所需的气候条件。总体而言,西部和西北部山区气候生产潜力相对较低,土地耕作适宜性低,耕地分布相对少且零散。北纬 28°以北的中东部平原区是湖南省土地耕作最适宜的集中分布区,是湖南省主要粮食生产区,但由于地理位置相对偏北,平均气候生产潜力多在 25 000 ~ 30 000 kg/ha,是气候生产潜力三

级区的主要分布区。北纬 28°以南的中部、中东部丘陵盆地区为气候生产潜力较高的一级和二级集中分布区,其中 29.98% 为土地耕作最适宜区,这部分土地是湖南省土地耕作适宜性和气候生产潜力组合最好的区域,发展农业生产潜力巨大。

土地利用变化通过改变地表能量平衡和生物化学循环影响区域气候变化<sup>[14]</sup>,如建设用地扩张和水域面积减少,可能导致气温升高以及年降水量、相对湿度和平均风速的减小;耕地转化为草地会导致蒸发量减少,反之则蒸发量增加<sup>[18, 41]</sup>。地表潜在的生物物理效应受土地利用状态、生物地理自然变迁和背景气候等的综合影响,模拟显示因土地利用变化引起的地表生物物理影响可能导致未来季风区降水量减少约 30%<sup>[19]</sup>。湖南省土地利用变化剧烈,2000—2015 年间,约 4.9% 的土地发生地表覆被类型转化,这些转化(特别是人造地表增加了 147.8%)无疑会在一定程度上影响区域地表径流、蒸散发、土壤湿度、云量以及局地环流,从而引起区域气候和气候生产潜力的变化<sup>[18, 20]</sup>。

因此,LUCC 过程与气候变化、气候生产潜力变化密切相关,LUCC 过程通过影响光、温、水等气候要素来影响气候生产潜力,而气候生产潜力变化也能够反过来驱动 LUCC 过程,湖南省不同土地覆被类型的植被净初级生产量的差异性变化及其对气候因子的响应关系便是例证<sup>[42]</sup>。2000—2015 年,林地、草地、水体类型土地转变为耕地的过程中,依次有 27.7%、53.0% 和 93.7% 的土地属于气候生产潜力显著增大的区域,如考虑气候生产潜力弱增大区域,则 95% 以上转变为耕地的土地属于气候生产潜力增大区,这说明气候生产潜力增大是驱动林地、草地、水体等土地类型转变为耕地的主要因素之一。另一方面,15 年来全省有 10.9 km<sup>2</sup> 的耕地转化为裸地,均为气候生产潜力下降区,另有 81% 耕地转为林地的土地属于气候生产潜力下降区,说明尽管政策调控和经济驱动是导致耕地转化的决定性因素<sup>[15]</sup>,气候生产潜力下降也是促使耕地转化为其他类型的原因之一。

## 4 结论

(1) 2000—2015 年湖南省人造地表面积增大近

1.5倍。15年来新增1351.8 km<sup>2</sup>的人造地表中,86.5%为最适宜耕作的耕地,说明新增人造地表主要以牺牲优良的耕地为代价,未来守住耕地红线,严控将最适宜耕作的耕地转变为人造地表的任

务仍然十分艰巨。

(2)湖南省最适宜耕作的土地主要分布在北部平原、中部和南部盆地、丘陵区,不适宜耕作土地主要分散于南部、西部及西北部海拔较高的山区。15年来,不断有适宜耕作的土地转为耕地和不适宜耕作的耕地转为林地、草地等,从耕作适宜性来看,土地类型的结构趋于优化。

(3)湖南省气候生产潜力为19530~40375 kg/ha,平均为31859.5 kg/ha,整体呈现东南部高西北部低的特征,15年来平均以每年209.6 kg/ha的增率增加。北纬28°以南的中部、中东部丘陵盆地区,是湖南省土地耕作适宜性和气候生产潜力组合最好的区域。气候变化、气候生产潜力变化与LUCC过程密切相关,LUCC过程中流向耕地多为气候生产潜力增加区,而耕地转为林地等土地类型则属于气候生产潜力下降区,指示气候变化在驱动不同类型土地相互转变中的作用。

## 参考文献(References)

- [1] 王 一专. 农作层次生产潜力估算与分析系统的建立[D]. 南京: 南京农业大学, 2003. [WANG Yizhuan. Development cropping estimate and analysis system of potential production at different levels [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003]
- [2] 刘纪远, 徐新良, 庄大方, 等. 20世纪90年代LUCC过程对中国农田光温生产潜力的影响——基于气候观测与遥感土地利用动态观测数据[J]. 中国科学: 地球科学, 2005, 35(6): 483-492. [LIU Jiyuan, XU Xinliang, ZHUANG Dafang, et al. Influence of LUCC process on farmland light and temperature production potential in China in 1990s——based on climate observation data and land use dynamic observation data by remote sensing [J]. In Journal of Science in China Series D-Earth Sciences (in Chinese), 2005, 35(6): 483-492]
- [3] ZHAO M, RUNNING S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. Science, 2010, 329(5994): 940-943.
- [4] TURNER B, LAMBIN E F, REENBERG A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(52): 20666-20671.
- [5] ALKAMA R, CESCATTI A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover [J]. Science, 2016, 351(6273): 600-604.
- [6] PIAO Shilong, HUANG Mengtian, LIU Zhuo, et al. Lower land-use emissions responsible for increased net land carbon sink during the slow warming period [J]. Nature Geoscience, 2018, 11(10): 739-743.
- [7] 竺可桢. 论我国气候的几个特点及其与粮食作物生产的关系 [J]. 科学通报, 1964(3): 189-199. [ZHU Kezhen. Some characteristic features of Chinese climate and their effects on crop production [J]. Chinese Science Bulletin, 1964(3): 189-199]
- [8] 侯光良, 刘允芬. 我国气候生产潜力及其分区 [J]. 资源科学, 1985, 9(3): 52-59. [HOU Guangliang, LIU Yunfen. Climate production potential and its zoning in China [J]. Resources Science, 1985, 9(3): 52-59]
- [9] 龙斯玉. 江苏省农业气候资源生产潜力及区划的研究 [J]. 地理科学, 1985, 5(3): 218-226. [LONG Siyu. The survey for potential productivity of angoclimatic resources and its regionization in Jiangsu province [J]. Scientia Geographica Sinica, 1985, 5(3): 218-226]
- [10] 沈思渊, 席承藩. 淮北涡河流域农业自然生产潜力模型与分析 [J]. 自然资源学报, 1991, 6(1): 22-381. [SHEN Siyuan, XI Chengfan. Model and analysis of the natural productive potential of agricultural of the Guo river watershed in northern Anhui province [J]. Journal of Natural Resources, 1991, 6(1): 22-381]
- [11] 黄秉维. 中国农业生产潜力—光合潜力 [J]. 地理集刊(第17号), 1985: 15-22. [HUANG Bingwei. Agricultural production potential-photosynthetic potential in China [J]. Geography (No. seventeenth), 1985: 15-22]
- [12] 党安荣, 阎守邕, 周艺. 地理信息系统支持下的中国粮食生产潜力研究 [J]. 遥感学报, 1999, 3(3): 225-229. [DANG Anrong, YAN Shouyong, ZHOU Yi. A GIS based study on the potential grain productivity of China [J]. Journal of Remote Sensing, 1999, 3(3): 225-229]
- [13] 谢云, 王晓岚, 林燕. 近40年中国东部地区夏秋粮作物农业气候生产潜力时空变化 [J]. 资源科学, 2003, 25(2): 7-13. [XIE Yun, WANG Xiaolan, LIN Yan. Temporal and spatial variation of climatic potential productivity for grain crops in eastern China within forty years [J]. Resources Science, 2003, 25(2): 7-13]
- [14] SONG Xiaopeng, HANSEN M C, STEHMAN S V, et al. Global land change from 1982 to 2016 [J]. Nature, 2018, 560(7720): 639-643
- [15] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局 [J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14. [LIU Jiyuan, KUANG Wenhui, ZHANG Zengxiang



- et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(1): 3–14]
- [16] TANG Lingyi, DUAN Xiaofang, KONG Fanjing, et al. Influences of climate change on area variation of qinghai lake on qinghai-tibetan plateau since 1980s[J]. *Resources Science*, 2018, **30**(3): 348–353.
- [17] SCHNEIDER A, MERTES C M. Expansion and growth in chinese cities, 1978–2010[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, **9**(2): 024008.
- [18] LI G, ZHANG F, JING Y, et al. Response of evapotranspiration to changes in land use and land cover and climate in china during 2001–2013[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **596**–**597**: 256–265.
- [19] QUESADA B, DEVARAJU N A, ARNETH A. Reduction of monsoon rainfall in response to past and future land-use and land-cover changes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(2), 1041–1050.
- [20] WINCKLER J, REICK C H, PONGRATZ J. Why does the locally induced temperature response to land cover change differ across scenarios[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(8), 3822–3840.
- [21] 张丽娟, 于洋, 栗练灵, 等. 1960—2010 年黑龙江省土地利用变化对气温的影响[J]. *地理科学*, 2017, **37**(6): 952–959. [ZHANG Lijuan, YU Yang, SU Lianling, et al. Effect of land use change on air temperature of Heilongjiang province in 1960–2010[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, **37**(6): 952–959]
- [22] 方月, 程维明, 周成虎, 等. 新疆土地耕作适宜性的多自然地理要素评价方法[J]. *地球信息科学学报*, 2015, **17**(7): 846–854. [FANG Yue, CHENG Weiming, ZHOU Chenghu, et al. Suitability evaluation of land cultivation in xinjiang based on multiple natural geographical factors[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, **17**(7): 846–854]
- [23] 刘彦随. 山地土地类型的结构分析与优化利用——以陕西秦岭山地为例[J]. *地理学报*, 2001(4): 426–436. [LIU Yansui. Structural analysis and optimal use of land types in mountainous regions—taking Qinling mountains of Shanxi province as an example[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001(4): 426–436]
- [24] 黄威, 李淑杰, 王极, 等. 吉林省土地整治规划环境影响评价[J]. *吉林农业大学学报*, 2013, **35**(3): 334–339. [HUANG Wei, LI Shujie, WANG Ji, et al. Environmental impact assessment of land remediation planning in Jilin province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2013, **35**(3): 334–339]
- [25] 卫三平, 李树怀, 卫正新, 等. 晋西黄土丘陵沟壑区刺槐林适宜性评价[J]. *水土保持学报*, 2002(6): 103–106. [WEI Sanping, LI Shuhuai, WEI Zhengxin, et al. Evaluation on suitability of robinia pseudoscacia forests in hill and gully region of western Shanxi province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002(6): 103–106]
- [26] 杨勇, 任志远. 基于多因素分析决策的关中地区土地适宜性评价[J]. *测绘科学*, 2013, **38**(4): 37–39. [YANG Yong, REN Zhiyuan. Land suitability evaluation based on multi-factors analysis decision-making[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2013, **38**(4): 37–39]
- [27] 张剑明, 廖玉芳, 段丽洁, 等. 湖南近 50 年极端连续降水的气候变化趋势[J]. *地理研究*, 2012, **31**(6): 1004–1015. [ZHANG Jianming, LIAO Yufang, DUAN Lijie. Climate variations of extreme continuous rainstorms in Hunan during 1960–2009[J]. *Geographical Research*, 2012, **31**(6): 1004–1015]
- [28] 熊鹰, 张方明, 龚长安, 等. LUCC 影响下湖南省生态系统服务价值时空演变[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, **27**(6): 1397–1408. [XIONG Ying, ZHANG Fangming, GONG Chang'an, et al. Spatial-temporal evolvement of ecosystem service value in Hunan province based on LUCC[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(6): 1397–1408]
- [29] 刘永强, 廖柳文, 龙花楼, 等. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析——以湖南省为例[J]. *地理研究*, 2015, **34**(4): 691–700. [LIU Yongqiang, LIAO Liuwen, LONG Hualou, et al. Effects of land use transitions on ecosystem services value: a case study of Hunan province[J]. *Geographical Research*, 2015, **34**(4): 691–700]
- [30] 徐美, 朱翔, 刘春腊. 基于 RBF 的湖南省土地生态安全动态预警[J]. *地理学报*, 2012, **67**(10): 1411–1422. [XU Mei, ZHU Xiang, LIU Chunla. Early-warning of land ecological security in Hunan province based on RBF[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(10): 1411–1422]
- [31] 孙伟, 诸云强, 郭春霞. 湖南粮食生产潜力空间分异特征与农机总动力投入的关系[J]. *农机化研究*, 2014, **36**(9): 36–41. [SUN Wei, ZHU Yunqiang, GUO Chunxia. Spatial variation of crop production potential in Hunan province and preliminary study on the impact of the total power of agricultural machinery[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, **36**(9): 36–41]
- [32] 刘琼欢, 张镔铨, 刘林山, 等. 七套土地覆被数据在羌塘高原的精度评价[J]. *地理研究*, 2017, **36**(11): 2061–2074 [LIU Qionghuan, ZHANG Yili, LIU Linshan, et al. Accuracy evaluation of the seven land cover data in Qiangtang Plateau[J]. *Geographical Research*, 2017, **36**(11): 2061–2074]
- [33] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 土地利用现状分类: GB/T 21010–2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration. Current land use classification: GB/T 21010–2017[S].

- Beijing: Standards Press of China, 2017]
- [34] 叶芳毅. 中国南方红壤丘陵区脆弱生态系统水稻生产潜力模型研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010. [YE Fangyi. Research of rice potential productivity model in vulnerable ecosystem of soil hilly region of south-China [D]. Changsha: Hunan University, 2010]
- [35] 高文彬. 耕地生产潜力变化及其驱动机制研究——以山东省为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009. [GAO Wenbin. Changes of cultivated land potential productivity and its driving mechanisms—a case study in Shangdong province [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2009]
- [36] 于沪宁, 赵丰收. 光热资源和农作物的光热生产潜力——以河北省栾城县为例[J]. 气象学报, 1982, 40(3): 327–334. [YU Huning, ZHAO Fengshou. On the light and thermal resources and the crop potential productivity—taking Luancheng counth of Hebei province as an example [J]. Acta Meteorologica Sinca, 1982, 40(3): 327–334]
- [37] 侯光良, 陈沈斌. 根据瓦赫宁根方法估算黄土高原地区一些主要作物最大产量[J]. 资源科学, 1990, 14(4): 30–39. [HOU Guangliang, CHEN Shengbin. The maximum yield of some main crops in loess Plateau was estimated by wageningen method [J]. Resources Science, 1990, 14(4): 30–39]
- [38] BONNER-WEIR B, TANEJA M, WEIR G C, et al. In vitro cultivation of human islets from expanded ductal tissue. Proc natl acad sci USA 97: 7999–8004 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2000, 97(14): 7999–8004.
- [39] LOOMIS R S, WILLIAMS W A. Maximum crop productivity: an estimate [J]. Crop Science, 1963, 3(1): 67–72.
- [40] 刘扬, 贾树海, 那波. 土地生产潜力计算方法研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(12): 376–381. [LIU Yang, JIA Shuhai, NA Bo. Study of the calculating method of land potential productivity[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(12): 376–381]
- [41] 裴亮, 刘阳, 陈晨. 大凌河流域土地利用/覆被变化及其对气候变化的响应研究[J]. 地理科学, 2017, 37(9): 1403–1410. [PEI Liang, LIU Yang, CHEN Chen. Land use/cover change and its impact on climate change response in the Daling river basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(9): 1403–1410]
- [42] 陈晓玲, 曾永年. 亚热带山地丘陵区植被 NPP 时空变化及其与气候因子的关系——以湖南省为例[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 35–48. [CHEN Xiaoling, ZENG Yongnian. Spatial and temporal variability of the net primary production (NPP) and its relationship with climate factors in subtropical mountainous and hilly regions of china: a case study in Hunan province [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1): 35–48]

## The Dynamic Features of Land Cultivation Suitability, Climatic Potential Productivity and LUCC Process from 2000 to 2017 in Hunan Province, China

WANG Jiren<sup>1</sup>, ZHONG Changbiao<sup>1\*</sup>, WANG Lingling<sup>1</sup>, MO Hongwei<sup>2</sup>

(1. School of Urban and Environment, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China;

2. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Quantitative analysis on the dynamic features of land cultivation stability, climatic potential productivity and Land-use and Land-Cover Change (LUCC) is the foundation for scientific planning of land use and effective protection of cultivated land resources. Data including climate, land cover and Digital Elevation Model (DEM) with resolution pixel of 300m were used in this paper to acquire the change trend of climatic potential productivity in 2000–2017 and relationships between land cultivation suitability, climatic potential productivity and LUCC process in Hunan province. The calculation results suggested that the climatic potential production was about 19 530–40 375 kg/ha, which was higher in southeast and lower in northwest. The optimum cultivated land was mainly distributed in the northern plain, basin and hilly region in central and the south area of Hunan province.

The basin and hilly region in central and south area on the south of  $28^{\circ}\text{N}$ , were the region that owned the best combination of land cultivation suitability and climatic potential production. Additionally, 86.5% of the new artificial land surface were the most suitable cultivated land, which indicates that the artificial land surface mainly increased at the cost of cultivated land loss. Climate change and climatic potential production were closely correlated with LUCC progress, which faithfully indicated that climate change was a notable driver in mutual transformation of different types of land, as a result that climatic potential productivity decreased where cultivation land converted to other land type such as forests, and it increased on the contrary. Above all, we expect that above-mentioned achievements could be a valuable reference for land planning and management and mountain resources development in Hunan province.

**Key words:** suitability of land cultivation; LUCC; climatic potential productivity; Hunan province