
武汉城市圈土地利用空间关联 的碳排放效率及其收敛性分析

崔玮^{1,3} 苗建军² 邹伟^{3*}

(1. 江苏大学财经学院, 江苏 镇江 212013;

2. 南京航空航天大学经济管理学院, 江苏 南京 211100;

3. 南京农业大学公共管理学院, 江苏 南京 210095)

【摘要】通过测算武汉城市圈土地利用空间关联的碳排放效率及其收敛性, 为该城市群提供碳减排方案。通过运用结合Bootstrap技术的Malmquist指数方法测算了武汉城市圈土地利用空间关联的碳排放效率及其技术进步和技术效率, 并对该效率做 σ -收敛和 β -收敛分析。研究发现该城市圈土地利用空间关联的碳排放效率在2010年前呈上升趋势, 之后出现下降; 究其原因, 虽然技术进步是持续的, 但是不足以弥补技术效率的不断降低; 将武汉城市圈按照土地类型分为三类城市, 收敛性分析发现它们均出现了不同程度的收敛, 而且收敛于较高的碳排放水平。根据以上的分析结果, 结合该城市圈的产业布局, 提出了相应的减碳方案。

【关键词】碳排放效率; 收敛性分析; Malmquist指数; Bootstrap技术; 武汉城市圈

【中图分类号】 F301.2

【文献标识码】 A

【文章编号】 1004-8227(2016)12-1824-08

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201612005

中国新型城镇化是以城市群为具体形态, 以人为核心, 以提高城镇质量为目的的城镇化。虽然2013年年底, 中国城镇化率已经达到53.7%^①, 但是城市扩容导致大量农地非农化, 进而带来CO₂排放量激增。有研究发现, 1850~1998年农地非农化引起的

收稿日期: 2016-04-21; **修回日期:** 2016-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(71173112、71503105、171401051) [National Natural Science Foundation of China (71173112、71503105、171401051)]; 国家社会科学基金(16BGL210) [National Social Science Fund of China (16BGL210)]; 国家教育部项目(15YJA790046、15YJA630017) [The Ministry of Education Project (15YJA790046、15YJA630017)]; 江苏大学高级技术人才科研启动项目(15JGDG004) [Scientific Research Project of Senior Technical Personnel of Jiangsu University (15JGDG004)]; 江苏省高校自然科学基金(15KJD610001) Natural Science Foundation of Higher Education of Jiangsu (No. 15KJD610001)

作者简介: 崔玮(1983~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向土地利用效率. E-mail: mansircui@ujs.edu.cn

***通讯作者** E-mail: njauzw@126.com

¹ ①数据来自《中国城市统计年鉴》

碳排放量占碳排放总量的1/3,是化石能源产生碳排放量的1/2^[1]。CO₂产生的温室效应占总效应的63%,并且分解所需时间是温室气体中最长的,所以减少CO₂排放成为治理温室气体的重点^[2]。然而全球减排的重心在降低化石能源消耗,常忽视土地利用变化这个重要碳源。鉴于此,提升城镇化质量的渠道之一是以新城镇化为背景,提高土地利用空间关联碳排放效率,即最小化碳排放量的同时实现城镇经济的快速发展。这一问题的研究角度主要有两个。

(1)基于效率模型测算碳排放效率。部分研究着眼于区域,从能源消耗^[3]或者土地覆被碳排放角度测算城镇土地利用空间关联碳排放效率^[4, 5];部分研究着眼于城镇,利用超越对数SFA模型或超DEA模型评价土地利用空间关联碳排放效率^[6, 7];因为工业用地是城镇建设用地的主力,因此还有学者利用效率模型测算了工业用地的碳排放效率^[8, 9]。

(2)基于土地结构优化测算碳排放效率。有研究以碳蓄积最大化或碳排放最小化或碳氧平衡为目标设计土地利用结构最优化方案^[10];也可同时考虑碳源和碳蓄积双目标,构建土地结构优化模型^[11]。抑或从碳排放潜力出发,在估算陆地生态碳储量的基础上得出土地利用结构的总体优化^[12],还可以在建立碳排放平衡目标函数^[13]基础上,运用线性规划法^[14]、信息熵^[15]、Markov模型^[16]等优化土地利用结构。

武汉城市圈碳排放量呈上升趋势^[17],因此有文献关注了它的土地利用空间关联的碳排放效率^[18, 19]。这些研究对于武汉城市圈土地的科学配置有一定的指导作用,但是还有以下问题需深入讨论。已有文献将碳排放作为投入,并基于DEA技术测算土地利用空间关联碳排放效率,这不仅不符合二氧化碳是非期望产出的实际,而且存在高估效率的可能性。同时还缺乏效率的收敛性分析,导致无法判定相关政策的有效性。为弥补上述研究的缺陷,本文针对武汉城市圈,将碳排放作为非期望产出建立Malmquist指数,结合Bootstrap技术校准土地利用空间关联的碳排放效率值,并做收敛性分析,为制定差别化的土地保护政策提供参考。

1 研究区域概况与数据选取

1.1 研究区域概况

武汉城市圈由武汉、黄石、鄂州、孝感、黄冈、咸宁、仙桃、潜江和天门构成,地处湖北省东部,长江中游南岸,属于亚热带季风气候,总面积5.78万平方公里。到2013年底,城市群总人口达到3 196.1万人,GDP达到15 876.67亿元^②,三次产业的比重为9.03:46.74:44.23,固定资产投资额达到6 922.23亿元,人均绿地面积33.51平方米^③。

武汉城市圈各城市土地类型的比重如表1所示。如果从各城市内部看,那么作为中国的粮食基地,耕地比重最大;如果城市之间做比较,那么土地类型结合主导产业和空间距离,可将该城市圈划分为三类城市。武汉作为城市圈的领头羊,具有石化、钢铁等优质的基础产业,汽车制造等先进的制造业,以及与之配套的现代服务业和高技术产业,与其他城市相比,作为碳源的建设用地比重更大,作为第Ⅰ类城市;黄石、鄂州、黄冈和咸宁大致处于武汉市的东部,前三个城市交界,咸宁紧邻黄石。前两个城市主要产业为冶金、钢铁和建材等。后两个城市主要产业为建材、农产品加工、食品等,这四个城市与其他城市相比,主要是作为碳汇的林地和园林,作为第Ⅱ类城市;孝感、仙桃、天门和潜江大致处于武汉的西部,仙桃和天门分别与其他两个城市交界。主导产业是农产品生产加工,这四个城市与其他城市相比,以在农业生产活动时是碳源,在农作物生长时又是碳汇的耕地为主,作为第Ⅲ类城市。

1.2 数据选取

² ①人口总量、经济总量数据来源:《中国城市统计年鉴》汇总得到

②产业比重依据《中国城市统计年鉴》计算获得,固定资产投资额和人均绿地面积源于《中国城市统计年鉴》

基于数据的科学性,以 2004~2013 年武汉城市圈 9 个城市为研究对象,选择劳动力(L)、资本(K)和土地(A)为投入,GDP(Y)为期望产出,土地利用产生的二氧化碳为非期望产出(C)。其中,资本投入应选择资本存量数据,但现有统计资料只有资本增量数据,参照雷辉等^[20]的研究,采用永续盘存法以 1952 年不变价格折算资本存量,单位是亿元;劳动力选取各城市年初和年末劳动力总量的平均,单位是万人;土地投入指标选取各城市的土地面积,包括了作为碳源和碳汇的各类土地^[21],单位是公顷;期望产出选用每个城市的 GDP,并折算成 1952 年的价格水平,单位是亿元。各城市不同类型土地历年产生的 CO₂ 数量可参照张俊峰等^[22]的计算结果。除了 CO₂ 数据,其他数据均来自于历年《中国城市统计年鉴》、历年《中国县域统计年鉴》和《新中国六十五年统计资料汇编》。相关数据的统计描述如表 2。

表 1 武汉城市圈各类型土地比例(单位 %)

Tab.1 Ration of Land Use Types in Wuhan Metropolitan Area (unit %)

城市	耕地	园地	林地	草地	其他农用地	居民点及工矿用地	交通运输用地	水域	未利用土地
武汉	44.97	1.18	8.73	0.61	10.83	12.17	2.31	16.66	2.54
鄂州	34.63	0.80	11.33	0.00	11.82	9.14	1.53	28.39	2.35
黄石	27.02	1.97	25.53	0.00	7.87	8.34	1.65	9.59	18.03
黄冈	23.18	4.37	39.50	0.49	9.08	7.24	0.98	7.67	7.48
咸宁	21.19	2.99	42.65	0.00	6.28	5.31	0.94	7.70	12.94
孝感	39.39	1.14	17.38	0.06	11.92	8.97	1.21	10.30	9.62
仙桃	53.87	0.83	1.94	0.00	16.41	9.58	1.84	14.44	1.09
潜江	58.62	0.81	3.57	0.01	16.12	8.77	1.85	9.74	0.51
天门	62.45	0.54	1.75	0.00	13.59	10.12	1.29	9.66	0.60

数据来源:国土资源部门提供的1997~2012年土地变更数据

表 2 2004~2013年武汉城市圈投入产出指标的统计描述

Tab.2 Summary Statistics about Input-Output of Wuhan Urban Agglomeration from 2004 to 2013

指标	单位	最大值	最小值	中值	均值	标准差
资本存量(K)	亿元	1 721.61	296.5	2 256.02	4 423.17	3 044.14
劳动力(L)	万人	129.85	33.42	75.64	85.32	30.23
土地(A)	公顷	174.57	15.04	45.83	64.55	50.96
GDP(Y)	亿元	90.51	0.94	4.40	10.51	20.53
二氧化碳(C)	吨	1 786.756	-72.05	402.93	246.44	391.95

数据来源:《中国城市统计年鉴》计算所得

数据中,2004~2005年鄂州土地利用碳排放量为负值,代入距离函数计算的处理方法可参考Matin等^[23]的研究。因受后续内容中表格容量所限,故以2004年表示2003~2004年,其他年份的含义与之相同。

2 模型理论与方法

2.1 Malmquist指数与距离函数

研究武汉城市圈土地利用空间关联的碳排放效率变化可参考崔玮等^[6]构建 Malmquist 动态绩效方程式(1)。MCI 表示土地利用空间关联碳排放效率指数,进一步将其分解为技术进步指数(TEI)和技术效率指数(EFFI),分别如式(2)和(3)表示。

$$MCI(t, t+1) = \frac{D^{t+1}(K^{t+1}, L^{t+1}, A^{t+1}, Y^{t+1}, C^{t+1})}{D^t(K^t, L^t, A^t, Y^t, C^t)} \left[\frac{D^t(K^{t+1}, L^{t+1}, A^{t+1}, Y^{t+1}, C^{t+1}) \cdot D^t(K^t, L^t, A^t, Y^t, C^t)}{D^{t+1}(K^t, L^t, A^t, Y^t, C^t) \cdot D^{t+1}(K^{t+1}, L^{t+1}, A^{t+1}, Y^{t+1}, C^{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$TEI = \left[\frac{D^t(K^{t+1}, L^{t+1}, A^{t+1}, Y^{t+1}, C^{t+1}) \cdot D^t(K^t, L^t, A^t, Y^t, C^t)}{D^{t+1}(K^t, L^t, A^t, Y^t, C^t) \cdot D^{t+1}(K^{t+1}, L^{t+1}, A^{t+1}, Y^{t+1}, C^{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$EFFI = \frac{D^{t+1}(K^{t+1}, L^{t+1}, A^{t+1}, Y^{t+1}, C^{t+1})}{D^t(K^t, L^t, A^t, Y^t, C^t)} \quad (3)$$

上述指数需要结合式(4)求解。分别以四个时期技术为参考，求得四个距离函数。其中，p和q表示时期，且 $p, q \in (t, t+1)$ 。

$$\begin{aligned} [D^p(K_i^q, L_i^q, A_i^q, Y_i^q, C_i^q)]^{-1} &= \min \rho \\ s.t. \sum_{i=1}^I \lambda_i K_i^p &\leq K_i^q; \sum_{i=1}^I \lambda_i L_i^p \leq L_i^q; \sum_{i=1}^I \lambda_i A_i^p \\ &\leq A_i^q; \sum_{i=1}^I \lambda_i Y_i^p \geq Y_i^q; \sum_{i=1}^I \lambda_i C_i^p = \rho C_i^q \\ \lambda_i &\geq 0, i = 1, 2, \dots, I \end{aligned} \quad (4)$$

距离函数的实质是DEA技术。因为DEA模型的假设之一是每个决策单元都处于对自身最有利的条件下，所以模型所得的是最乐观的结果，与实际相比有偏差，需要利用Bootstrap技术修正。

2.2 Bootstrap技术

Simar 和 Wilson 首次利用 Bootstrap 方法修正 DEA 的测算偏差，具体步骤可参考他们的研究^[24]，并利用式(5)修正 DEA 模型的误差。

$$Bias(\hat{\omega}_k) = E(\omega_k^*) - \hat{\omega}_k \quad (5)$$

式中： ω_k^* 是第k个模拟样本的效率值，修正后的效率值为：

$$\tilde{\omega}_k = \hat{\omega} - Bias(\hat{\omega}_k) = 2\hat{\omega}_k - 1/B \left(\sum_{b=1}^B \omega_{kb}^* \right) \quad (6)$$

3 实证分析

3.1 武汉城市圈土地利用空间关联碳排放效率测算

首先, 利用式(4)计算各城市在不同时期技术条件下的距离函数值, 然后根据式(5)~(6)对这些值做Bootstrap技术修正^③。其次, 将修正后的距离函数值代入式(1)计算不同时期武汉城市圈各城市土地空间关联的碳排放效率变化指数, 计算结果如表3所示。最后, 利用式(2)和(3)分别分析各城市土地空间关联碳排放效率变化的原因, 如表4和表5所示。MCI、EFFI和TEI大于1分别表示土地利用空间关联碳排放效率和技术效率提高, 技术相对进步。

表3~表5汇总了武汉城市圈各城市的MCI、TEI、EFFI。对照这三个表, 可确定每个城市土地利用空间关联碳排放效率变化的数量及原因。以武汉为例, 2003~2004年MCI是1.1859, 这意味着土地利用空间关联碳排放效率提高了, 其原因可查看表4和表5。表中TEI是0.6325, EFFI是1.8750, 即虽然出现了技术相对退步, 但是技术效率提高了, 而且比前者大, 因此土地利用空间关联碳排放效率提高了。

表3 2004~2013年武汉城市圈各城市的MCI

Tab.3 MCI of Wuhan Urban Agglomeration from 2004 to 2013

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
武汉	1.185 9	1.851 6	0.950 2	0.942 8	1.354 0	0.838 4	2.101 0	0.906 1	0.254 4	1.193 7
黄冈	1.063 1	1.443 4	0.492 4	0.832 5	1.005 0	1.010 3	1.118 0	1.118 0	1.387 0	0.861 6
孝感	1.034 5	1.508 6	1.114 8	0.688 1	1.037 3	1.083 5	0.822 9	0.773 9	0.874 1	1.067 9
黄石	1.063 1	1.443 4	0.492 4	0.832 5	1.005 0	1.010 3	1.118 0	1.118 0	1.387 0	0.861 6
咸宁	0.878 6	0.911 0	0.670 8	2.604 9	0.884 3	0.821 6	0.995 0	0.900 0	0.678 2	1.264 0
鄂州	0.660 5	1.631 6	1.405 2	0.655 4	0.947 9	1.852 5	0.998 3	1.119 5	0.954 6	0.913 4
仙桃	1.194 1	1.747 7	1.369 3	0.935 4	1.000 0	0.752 5	0.977 8	0.888 5	0.986 0	0.925 0
潜江	1.317 1	1.897 4	1.579 9	0.843 2	0.942 8	0.983 5	0.963 9	1.095 9	0.909 7	0.658 9
天门	1.172 6	1.837 1	1.400 0	1.035 1	0.923 2	0.922 3	0.930 9	0.910 5	0.850 8	0.743 4
均值	1.063 3	1.585 8	1.052 8	1.041 1	1.011 1	1.030 5	1.114 0	0.981 2	0.920 2	0.943 3

数据来源: 计算整理获得

表4 2004~2013年的TEI

Tab.4 TEI of Wuhan Urban Agglomeration From 2004 to 2013

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
武汉	0.632 5	0.400 9	2.000 0	0.942 8	1.354 0	3.095 7	2.555 6	1.200 0	0.644 4	1.900 0
黄冈	1.181 2	0.471 4	2.031 0	0.840 9	1.005 0	1.010 3	1.118 0	1.118 0	0.651 9	0.971 6
孝感	1.200 0	2.000 0	1.858 1	0.605 5	1.131 7	2.889 3	0.861 4	0.716 1	1.550 0	1.666 7
黄石	1.660 3	0.990 5	1.789 4	3.454 5	1.438 4	2.286 2	1.059 6	0.838 4	2.357 1	1.000 0
咸宁	0.944 7	0.938 1	0.670 8	2.857 1	1.187 4	1.748 2	0.995 0	0.900 0	0.678 2	1.492 5
鄂州	1.200 8	0.425 9	3.487 0	0.978 1	0.947 9	1.741 3	1.132 5	1.317 5	1.657 9	1.583 3
仙桃	1.833 3	2.400 0	2.738 6	0.748 3	1.500 0	3.072 9	1.195 1	1.171 4	1.590 9	1.466 7
潜江	1.106 3	2.470 6	1.951 6	0.642 4	1.119 6	3.157 5	1.051 7	1.414 6	1.464 3	1.037 0
天门	0.639 6	0.441 0	3.000 0	0.690 1	1.477 1	2.997 5	1.155 6	1.184 2	1.357 1	1.166 7
均值	1.155 4	1.170 9	2.169 6	1.306 6	1.240 1	2.444 3	1.236 1	1.095 6	1.328 0	1.364 9

数据来源: 计算整理获得

³ ①未修正的结果与本研究的结论没有直接关系, 又限于篇幅, 所以没有列出, 有需要的读者可来信索取

表 5 2004~2013年的EFFI

Tab.5 EFFI of Wuhan Urban Agglomeration From 2004 to 2013

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
武汉	1.875 0	2.666 7	0.375 0	1.000 0	1.000 0	0.173 9	0.822 1	0.755 1	0.394 7	0.628 3
黄冈	0.900 0	0.471 4	0.242 4	0.990 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.651 9	0.886 8
孝感	0.862 1	0.454 9	0.600 0	1.136 4	0.916 7	0.375 0	0.955 2	1.080 6	0.563 9	0.640 7
黄石	0.770 8	1.297 3	0.973 7	0.703 2	0.333 3	0.589 3	0.861 5	0.984 8	0.460 6	0.903 2
咸宁	0.930 0	1.000 0	1.000 0	0.911 7	0.744 7	0.470 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.846 9
鄂州	0.550 0	3.703 7	0.403 0	0.670 0	1.000 0	1.063 8	0.881 5	0.849 7	0.621 0	0.640 1
仙桃	0.651 3	0.435 2	0.500 0	1.250 0	0.666 7	0.244 9	0.818 2	0.758 5	0.619 8	0.630 7
潜江	1.190 5	0.416 5	0.809 5	1.312 5	0.842 1	0.311 5	0.916 5	0.774 7	0.621 3	0.635 3
天门	1.833 3	2.571 4	0.466 7	1.500 0	0.625 0	0.307 7	0.805 6	0.768 8	0.626 9	0.637 2
均值	1.062 6	1.446 3	0.596 7	1.052 6	0.792 1	0.504 0	0.895 6	0.885 8	0.617 8	0.716 6

数据来源：计算整理获得

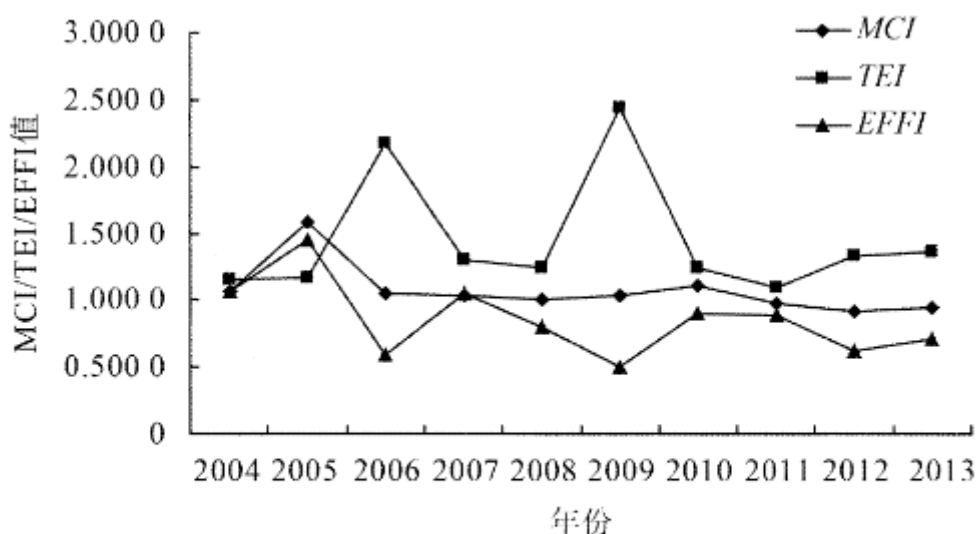


图 1 2004~2013年MCI、TEI与EFFI的均值

Fig.1 Average of MCI, TEI and EFFI from 2004-2013

为更直观地描述武汉城市圈土地利用空间关联碳排放结果的变化情况，将2004~2013年MCI、TEI和EFFI的均值变化以图1刻画。从图中可知，2010年之前，MCI均大于1，即连年提高，之后连年下降。究其原因，2004~2005年，TEI和EFFI提高共同带来碳排放效率的提升；2005~2010年，虽然EFFI不断下降，但是得益于TEI大于1，MCI仍保持上升。2010~2013年，虽然TEI仍然大于1，但是不足以弥补EFFI的减小，导致MCI降低。由图1还可知，从2005年之后，武汉城市圈碳排放的平均技术效率一直处于下降状态。

3.2 武汉城市圈土地利用空间关联碳排放效率的收敛性分析

虽然武汉城市圈土地利用空间关联碳排放效率呈先增后减，但是其效率是否收敛还需进一步检验，这也是检验国家相关政策实施效果的有效途径之一。以“研究区域概况”中武汉城市圈划分的3类城市为研究对象做收敛性分析。

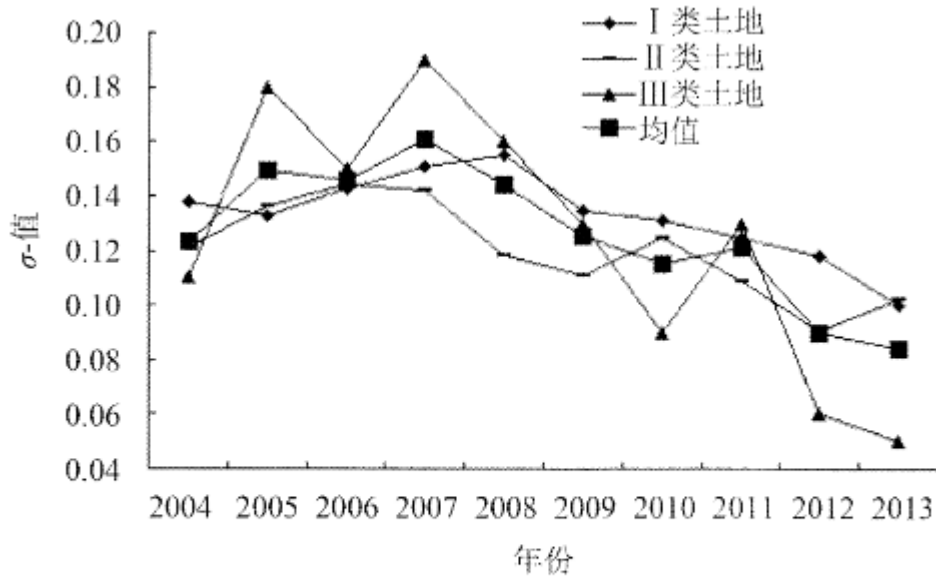


图2 2004~2013年 σ -收敛检验

Fig.2 σ -convergence test from 2004–2013

3.2.1 σ -收敛分析

武汉城市圈碳排放效率 σ -收敛是指3类城市的土地利用空间关联碳排放效率的差距随时间推移而逐步缩小,最终表现趋同。计算公式为:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{it} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{it})^2}{n-1}} \quad (7)$$

图2给出了三类城市的 σ -收敛的动态变化。第I和II类的MCI变化比较平缓;第III类城市的变化幅度大,较前两类城市有明显的收敛趋势。3类城市MCI变化有一个共同的特点,2008年之前呈增长的趋势,之后呈下降趋势,3类城市的MCI的差距有逐步缩小的趋势。

3.2.2 绝对 β -收敛分析

β -收敛是指相比城市土地利用空间关联碳排放效率高的地区,效率较低的地区具有更快的增长速度。 β -收敛可分为绝对 β -收敛与条件 β -收敛,绝对 β -收敛公式如式(8)。

$$\ln(I_{i,t+1}/I_{i,t}) = \alpha + \beta \ln I_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (8)$$

以2004年为基期，依据2004~2013年武汉城市圈MCI做面板数据分析，Hausman检验显示采用固定效应模型，结果如表6所示。可以看出，武汉城市群整体以及3类城市的β系数均为负，且均通过了1%的显著性水平检验，表明它们均存在绝对β-收敛，城市土地利用空间关联碳排放效率的差距在缩小，并趋同于一个共同的水平。

3.2.3 条件β-收敛性分析

影响城市土地利用空间关联碳排放效率的因素是多方面的，将这些影响因素作为控制变量加入到绝对β-收敛模型中，即为条件β-收敛模型，如式(9)。

$$\ln(I_{i,t+1}/I_{i,t}) = \alpha + \beta \ln I_{i,t} + \sum_{k=1}^m \lambda_k X_{k,i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (9)$$

依据经济理论并综合已有研究中MCI的影响因素，选取土地利用强度(X₁)、人均地区生产总值(X₂)、人口规模变化(X₃)、创新能力(X₄)四个因素作为控制变量，这四个变量分别以“资本存量/土地面积”，“GDP/就业人数”，“人口总量/土地面积”和“科研人员总量/总就业人数”进行面板数据分析，Hausman检验确定采用固定效应模型，回归结果见表7。

表6 城市土地利用空间关联碳排放效率绝对β-收敛回归结果

Tab.6 Absolute β Convergence Results of Urban Land Carbon Emission Efficiency

	α	β	R ²	F	D-W
城市群	-0.182 4*** (-11.215 8)	-0.431 5*** (-12.015 2)	0.653 2	4.761 5***	2.322 3
I类城市	-0.142 9** (-9.215 7)	-0.622 7** (-11.338 1)	0.683 3	8.641 7***	2.013 5
II类城市	-0.114 7* (-5.321 4)	-0.398 8*** (-4.652 4)	0.714 1	5.324 0**	2.317 5
III类城市	-0.159 9*** (-6.121 5)	-0.382 7*** (-6.086 9)	0.695 31	3.914 8***	1.992 1

注：***、**、*分别表示在1%、5%和10%的水平上显著，括号内数值为相应的t统计量

表7 城市土地利用空间关联的碳排放效率条件β-收敛回归结果

Tab.7 Conditional β Convergence Results of Urban Land Carbon Emission Efficiency

	武汉城市圈	I类城市	II类城市	III类城市
α	0.031 2*** (11.218 8)	0.014 3*** (9.824 5)	-0.142 2*** (-11.323 8)	-0.031 1*** (-10.311 4)
β	-0.042 4*** (-13.122 7)	-0.049 1** (-4.316 1)	-0.031 6*** (-11.837 4)	-0.020 7*** (-10.920 7)
X1	0.132 1*** (-12.141 3)	0.176 1*** (-11.986 2)	0.310 5** (-2.633 8)	0.381 8* (11.931 6)
X2	-0.041* (-1.984 2)	-0.003 3*** (10.623 1)	0.002 1** (12.015 5)	-0.002 7 (-2.036 9)
X3	-0.004 3** (2.258 8)	-0.001 1** (9.873 2)	-0.000 6*** (10.613)	-0.004 2*** (11.628 4)
X4	14.031 4 (-2.973 2)	7.328 1* (-10.032 6)	22.418 6 (11.169 3)	25.087 0 (-12.005 6)
R ²	0.776 3	0.780 6	0.641 7	0.715 3
F	5.241 8**	25.892 5**	23.127 3**	6.119 8***
D-W	1.821 2	1.933 6	1.853 7	2.267 1

注：***、**、*分别表示在1%、5%和10%的显著性水平，括号内数值为相应的t统计量

由回归结果可以看出，回归系数β均显著为负，说明武汉城市圈和三类城市的MCI存在条件β-收敛态势。四个控制变量中土地利用强度、人口规模均通过了显著性检验，而且前者对城市土地利用空间关联碳排放效率是正向影响，后者是负向影响。对于人均GDP，除了第III类城市外，其他均通过了显著性检验，只有第II类城市与碳排放效率呈正比，其他均是反比关系。除了第I类城市外，其他城市的创新能力与碳排放效率关系不显著。

4 结论与讨论

(1)利用Bootstrap-DEA技术结合Malmquist指数计算发现,武汉城市圈MCI在2004~2010年呈上升趋势,2010~2013年呈下降趋势。究其原因,2004~2005年由技术进步与技术效率共同上升致使其不断提升,虽然2005~2010年出现了技术效率下降,但由于技术进步的弥补,它仍处于上升趋势;然而,2010年之后,由于技术效率下降过快,导致土地利用空间关联碳排放效率下降。这表明投入的资源没有充分利用,即出现了浪费的现象。

(2) σ -收敛结合 β -收敛分析发现,武汉城市圈整体MCI存在收敛趋势,但该趋势不明显。因为只有以耕地为主的第III类城市在2008年后有收敛趋势,另两类城市收敛趋势较弱;武汉城市圈整体和三类城市均存在 β -绝对收敛,结合2010年后该区域碳排放效率呈下降趋势可知,武汉城市圈会收敛于一个较高的碳排放水平。若要改变这一收敛趋势,由条件 β -收敛机制可知,提高土地利用强度、减缓经济发展对土地的压力和合理优化人口结构是加快MCI收敛的重要手段。虽然创新能力对收敛性基本没有作用,但是创新能力可提高科技进步,后者是提高武汉城市圈各城市碳排放效率的关键。因此,创新能力对收敛性有间接作用。

提高武汉城市圈MCI具体可以从3个方面入手。(1)提升第I类城市武汉的技术效率。它的GDP在群中的占比高达60%以上,而且第二产业占比仍是最大,以钢铁、石化等高碳排放产业为主,因此加快环境技术和生产技术转化为现实生产力的速度,对碳减排企业实施补贴奖励政策,是集约利用生产要素和减少碳排放的重要途径,是脱离土地利用碳排放低效率路径的关键;(2)针对以林地为主的第II类城市,其主导产业是矿产、建材、造纸等。它的林地覆盖率超过了全国平均水平,这个区域提高MCI的途径是开发林地旅游资源,借助当地天然的温泉、湖泊等发展生态旅游业,协调好矿产开发与环境保护之间的关系。(3)对于以耕地为主的第III类城市,一方面在保证粮食生产率和产量提高的前提下,加大经济作物的种植比重,不仅增加了该区域的收入而且能提高农田系统的吸碳能力;另一方面,提高农业生产技术和管理水平,实行农林复合种植模式;鼓励农民成立农机合作社,在产生碳的耕作阶段,通过统一的机械化生产和统一的管理减少碳排放量。

(3)从政策方面分析,造成武汉城市圈2010年后土地利用空间关联碳排放效率降低的原因可能是,2008年至2010年,武汉城市圈为应对全球金融危机,确立177个投资项目,共投资近1.3亿,重点是乙烯、汽车、钢铁等产业的扩能。因为此次投资具有应急性质,一些项目未充分论证其可行性,而且政府过度干预,为了拉动经济增长,应淘汰的落后产能仍注资维持甚至扩容,所以造成经济结构失衡,土地利用空间关联的碳排放技术效率持续降低。因此,当前有必要进行供给侧改革,淘汰低效率企业,优化产业结构和土地利用结构,提升不同类型土地的利用效率,三类城市根据各自的比较优势发展产业,提高经济效益的同时降低土地利用空间关联的碳排放效率。

参考文献:

[1]WATSON R T, NOBLE I R, BOLIN B, et al. Land use, land-use change, and forestry: a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

[2]史新峰. 气候变化与低碳经济[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

[3]VÁZQUEZ-ROWE I, MARVUGLIA A, REGE S, et al. Applying consequential LCA to support energy policy: land use change effects of bioenergy production[J]. Science of the Total Environment, 2014, 472: 78 - 89.

[4]崔玮, 苗建军, 杨晶. 基于碳排放约束的城市非农用地生态效率及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(7): 63 - 69.

[5]崔玮, 苗建军, 雷娜. 碳排放视角下城市非农土地利用绩效的空间差异分析[J]. 中国土地科学, 2013, 27(8): 33 - 38.

-
- [6]DEILMANN C, LEHMANN I, REIßMANN D, et al. Data envelopment analysis of cities - investigation of the ecological and economic efficiency of cities using a benchmarking concept from production management[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 798 - 806.
- [7]WANKE P, BARROS C P, FIGUEIREDO O. Efficiency and productive slacks in urban transportation modes: A two-stage SDEABeta Regression approach[J]. *Utilities Policy*, 2016, 41: 31 - 39.
- [8]RINANTI A, DEWI K, KARDENA E, et al. Biotechnology carbon capture and storage (CCS) by mix-culture green microalgae to enhancing carbon uptake rate and carbon dioxide removal efficiency with variation aeration rates in closed system photobioreactor[J]. *Jurnal Teknologi*, 2014, 69(6): 93-99.
- [9]RINANTI A, DEWI K, KARDENA E, et al. Biotechnology carbon capture and storage (CCS) by mix-culture green microalgae to enhancing carbon uptake rate and carbon dioxide removal efficiency with variation aeration rates in closed system photobioreactor[J]. *Jurnal Teknologi*, 2014, 69(6): 93-99.
- [10]赖 力, 黄贤金. 中国土地利用的碳排放效应研究[M]. 南京: 南京大学出版社, 2011.
- [11]KIVIMAA P, VIRKAMÄKI V. Policy mixes, policy interplay and low carbon transitions: the case of passenger transport in Finland[J]. *Environmental Policy and Governance*, 2014, 24(1): 28 - 41.
- [12]WENNERSTEN R, SUN Q, LI H L. The future potential for Carbon Capture and Storage in climate change mitigation - an overview from perspectives of technology, economy and risk[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 724 - 736.
- [13]MARTINS L D, EUGENIO F C, RODRIGUES W N, et al. A bitter cup: the estimation of spatial distribution of carbon balance in Coffea spp. plantations reveals increased carbon footprint in tropical regions[J]. *Plant Soil and Environment*, 2015, 61(12): 544 - 552.
- [14]杨宏玉. 区域经济低碳转型与土地利用结构优化研究——以重庆市为例[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2011.
- [15]HINTZ M, LENNARTZ-SASSINEK S, LIU S F, et al. Quantification of land-surface heterogeneity via entropy spectrum method[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(14): 8764 - 8777.
- [16] 余德贵, 吴 群. 基于碳排放约束的土地利用结构优化模型研究及其应用[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(8): 911 - 917.
- [17]杨 欣, 蔡银莺, 张安录. 武汉城市圈碳排放的时空格局及影响因素分解研究——基于2001~2009年市级面板数据的实证[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(11): 1389 - 1396.
- [18]余光英, 员开奇. 武汉城市圈土地利用碳排放效率评价研究[J]. *资源开发与市场*, 2014, 30(7): 801 - 805, 816.
- [19]董 捷, 张 雪, 张安录. 武汉城市圈农地城市流转效率测度——基于碳排放的视角[J]. *江汉论坛*, 2015(8): 23 - 29.

-
- [20]雷 辉, 张 娟. 我国资本存量的重估及比较分析: 1952-2012[J]. 经济问题探索, 2014(7): 16 - 21.
- [21]张 梅, 赖 力, 黄贤金, 等. 中国区域土地利用类型转变的碳排放强度研究[J]. 资源科学, 2013, 35(4): 792 - 799.
- [22]张俊峰, 张安录, 董 捷. 武汉城市圈土地利用碳排放效应分析及因素分解研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 595 - 602.
- [23]MATIN R K, AMIN G R, EMROUZNEJAD A. A modified semioriented radial measure for target setting with negative data[J]. Measurement, 2014, 54: 152 - 158.
- [24]SIMAR L, WILSON P W. Sensitivity analysis of efficiency scores: how to bootstrap in nonparametric frontier models[J]. Management Science, 1998, 44(1): 49 - 61.