

福州市人均三维生态足迹分析

薛若晗 (闽江学院地理科学系, 福建福州 350108)

摘要 基于三维生态足迹模型, 测算了 2011—2015 年福州市人均足迹广度、深度和三维生态足迹。结果表明, 2011—2015 年福州市的人均足迹广度、深度和三维生态足迹均呈现“减—增—减”的变化趋势。福州市人均足迹广度由 0.238 4 hm² 降低到 0.231 9 hm², 降低了 2.7%, 耕地是人均足迹广度的主要构成部分, 占比达到 40% 以上; 人均足迹深度由 7.890 7 降低至 6.948 0, 降低了 11.9%; 三维生态足迹由 1.881 0 hm² 降低到 1.610 9 hm², 降低了 14.4%。虽然 2011—2015 年福州市的生态赤字也有所下降, 但其数值依然较高。总体看来, 福州市的可持续状态发展仍不容乐观。最后结合该地区特点提出了一些科学合理的对策, 以维持福州市的可持续发展。

关键词 生态足迹; 三维模型; 足迹深度; 足迹广度; 福州市

中图分类号 S181.4 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)29-0041-04

Analysis of Per Capita Three-Dimensional Ecological Footprint in Fuzhou City

XUE Ruo-han (Department of Geographic Science, Minjiang University, Fuzhou, Fujian 350108)

Abstract The ecological footprint theory is an important way to analyze the regional ecosystem balance and sustainable development. Based on the Three-Dimensional Ecological Footprint Model, the per capita footprint size, footprint depth and three-dimensional ecological footprint of Fuzhou from 2011 to 2015 were calculated. The results show that: the per capita footprint size, footprint depth, and three-dimensional ecological footprint of Fuzhou city during 2011 to 2015 decreased first, and then increased, and decreased again. The per capita footprint size decreased from 0.238 4 hm² to 0.231 9 hm², decreased by 2.7%, the cultivated land was the main composition of per capita footprint size, accounted for more than 40%. The per capita footprint depth decreased from 7.890 7 to 6.948 0, decreased by 11.9%. The per capita three-dimensional ecological footprint decreased from 1.881 0 hm² to 1.610 9 hm², decreased by 14.4%. The ecological deficit of Fuzhou decreased in 2011-2015, but it was still high. The situation of sustainable development in Fuzhou was not optimistic. Finally, in order to maintain the sustainable development of Fuzhou, some scientific and reasonable countermeasures were put forward according to the local characteristics.

Key words Ecological footprint; Three-dimensional model; Footprint size; Footprint depth; Fuzhou City

生态足迹分析法把研究区域的生态消耗转化成区域内各类型生产性土地面积, 进而计算该区域的生态盈余或赤字, 用区域人口的生态需求与区域生态供给能力间的差值来衡量区域生态安全和可持续程度^[1]。该方法最早是由加拿大生态经济学家 William Rees 提出^[2]。近年来, 越来越多的国内外学者运用该方法开展了越来越多的研究工作, 对区域生态足迹的研究从理论和实践两方面拓展延伸。在理论方面, Niccolucci 等^[3-5]在对大量的二维生态足迹模型进行研究的基础上, 提出模型的改进, 建立了三维生态足迹模型。三维生态足迹模型作为传统模型的深化, 兼具空间属性和时间属性, 模型提出生态足迹广度和生态足迹深度 2 个概念, 用以更准确地反映区域的可持续状态和生态安全。在研究中发现, 基础三维生态足迹模型在实际运用中具有缺陷, 如不同土地类型的生态赤字和盈余可能在计算时相互抵消等, 因此, 方恺等^[6-9]提出了改进的三维生态足迹模型。

在实践方面, 方恺等^[7-8]将改进的三维生态足迹模型应用于全国及全球尺度核算分析; 杜悦悦等^[10]和张星星等^[11]分别以京津冀城市群和珠三角城市群为研究对象, 在城市群尺度上, 分析了区域三维生态足迹; 胡悦等^[12]和胡良文等^[13]分别对河北省和江西省自然资本动态利用和可持续状况变化进行研究; 马维斌等^[14]将三维生态足迹模型运用于福建省九龙江流域自然资本动态评估; 靳相木等^[15]和黄艳丽等^[16]分别以温州市和焦作市为研究对象, 对土地承载力、城市发展生态可持续性进行了评价。

总体来看, 三维生态足迹应用于全球、国家尺度的研究相对较为丰富, 城市及更小区域尺度的研究分析仍有待深入研究^[11]。笔者运用改进的三维生态足迹模型, 对 2011—2015 年福州市的生态足迹广度、深度和人均三维生态足迹进行计算, 并对其变化进行分析, 评估福州市当前的生态可持续状况, 以期制定福州市可持续发展相关政策提供科学的理论参考和决策依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 福州市是福建省省会, 位于福建省中部东端, 东临台湾海峡, 拥有福建省三分之一的海岸线。全市总面积 12 251 km², 2015 年常住人口达 750 万人(包含平潭)。福州市属于亚热带海洋性季风气候, 温暖湿润, 年均气温 20~25℃, 降水充足, 年均降水量 900~2 100 mm, 闽江自西向东横贯市区而后入海。福州市是海上丝绸之路门户以及中国(福建)自由贸易试验区三片区之一, 经济增速快, 2015 年全市实现地区生产总值 5 618 亿元^[17-18]。

1.2 基础三维生态足迹模型 参照全球足迹网络的《国家生态足迹账户计算基本方法和框架(2011 版)》^[19]中的计算方法和参数, 计算传统模型生态足迹和生态承载力。生态足迹和生态承载力的单位是全球公顷, 1 全球公顷代表全球平均生产水平下 1 hm² 土地的生产能力^[1, 17-23]。生态承载力的计算结果应扣除 12% 的生物多样性保护面积^[17, 24-25]。

Niccolucci 等^[3]在对传统生态足迹模型进行大量研究和实践应用的基础上建立了基础三维生态足迹模型。与传统模型相比, 基础三维生态足迹模型引入了足迹广度和足迹深度。其中, 足迹广度表示在区域生态承载力限度内, 区域生态需求所实际占用的生态生产性土地面积, 该指标具有空间

基金项目 福建省中青年教育科研项目(JAT170465)。

作者简介 薛若晗(1978—), 女, 福建福州人, 讲师, 硕士, 从事生态环境研究。

收稿日期 2017-07-26

属性。而足迹深度则是表征区域人口对超出区域生态承载力的资源需求,可以理解为在理论上为了维持区域现有资源消费水平需要占用的区域土地面积的倍数,或者相同政策及技术条件下再生出区域1年资源消耗量所需的时间,该指标具有时间属性^[5-6]。

计算公式如下:

$$EF_{\text{depth}} = 1 + \frac{ED}{EC} = 1 + \frac{EF - EC}{EC} \quad EF_{\text{depth}} \geq 1 \quad (1)$$

$$EF_{3D} = EF_{\text{size}} \times EF_{\text{depth}} \quad 0 \leq EF_{\text{size}} \leq EC \quad (2)$$

$$EF_{3D} = |EF| \quad (3)$$

式中, EF_{depth} 为足迹深度,无量纲; EF_{size} 为足迹广度; EF_{3D} 为三维生态足迹; EF 、 EC 和 ED 分别表示用传统生态足迹模型计算出的生态足迹、生态承载力和生态赤字。 EF_{size} 、 EF_{3D} 的单位也是全球公顷。由公式可知: $EF_{\text{depth}} \geq 1$,其中,当 $EF \leq EC$ 时, $EF_{\text{depth}} = 1$,1表示足迹深度的自然原长。 EF_{depth} 越大,表示区域人口的生态消费越大,区域可持续性越弱; EF_{size} 的取值范围不超过区域生态承载力,表示区域生态系统供给上限为生态承载力^[3-7]。三维模型计算出的三维生态足迹在数值上仍与传统模型计算的生态足迹一致^[7]。

1.3 改进三维生态足迹模型 基础三维生态足迹模型是用区域总生态足迹与生态承载力相减来计算区域生态赤字,这种计算方法可能导致某一土地类型的生态赤字被其他土地类型的生态盈余所补偿,从而造成计算结果产生误差,足迹深度偏小,足迹广度偏大。因此,方恺^[8]对模型进行改进,提出区分不同土地类型生态赤字,修正计算区域生态赤字的方法,能更准确反映区域生态现状。

改进后的计算公式如下:

$$EF_{\text{size,region}} = \sum_{i=1}^n \min \{ EF_i, EC_i \} \quad (4)$$

$$EF_{\text{depth,region}} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^n \max \{ EF_i - EC_i, 0 \}}{\sum_{i=1}^n EC_i} \quad (5)$$

$$EF_{3D,region} = EF_{\text{size,region}} \times EF_{\text{depth,region}} \quad (6)$$

式中, i 表示生态生产性土地的类型; n 表示土地类型总数; $EF_{\text{size,region}}$ 为区域足迹广度; $EF_{\text{depth,region}}$ 为区域足迹深度; $EF_{3D,region}$ 为区域三维生态足迹。 EF_i 、 EC_i 分别为第*i*种土地类型的生态足迹、生态承载力。

1.4 数据来源 该研究计算生态足迹,是把区域生物资源和能源的消费量折算成生态生产性土地面积。其中,生物资源和能源消费数据来源于相关年份的《福州统计年鉴》^[25],主要农业产品全球平均产量参考联合国粮农组织(FAO)统计的相应生物资源世界平均产量资料^[26]。

生态承载力,是依据“第二次全国土地调查主要数据成果公报”中福州市相关数据成果^[27]计算得到。

2 结果与分析

2.1 人均生态足迹、生态承载力和生态赤字 参照《国家生态足迹账户计算基本方法和框架(2011版)》^[17]的计算模型和参数,计算基于传统生态足迹模型的2011—2015年福州市的生态足迹、生态承载力和生态赤字。

该研究参考了2012—2016年《福州统计年鉴》^[25]的相关数据、FAO有关生物资源的世界平均产量统计资料^[26]和《综合能耗计算通则》(GB 2589—2008)。福州市居民各类生物资源消费主要包括粮食、油料、鲜菜等12项消费项目,将2011—2015年消费量逐年转化为提供这些消费所需的生态生产性土地面积,得出区域生物资源消费足迹;福州市能源消费主要包括原煤、天然气、汽油、电力等13个项目,将2011—2015年福州每年的能源消费先折合成热量,而后折算成提供这些消费所需的当年生态生产性土地面积,得出区域能源消费足迹^[1,17,23];从而计算出福州市2011—2015年的生态足迹。由于该研究是用居民消费量而非生物量作为基础数据,因此没有用进出口贸易量进行调整。计算结果见表1。

依据福州市各类型生态生产性土地的人均占有量,计算得到可利用的人均生态承载力。具体计算结果见表2,表中数据已扣除12%生物多样性保护面积。

表1 2011—2015年福州市人均生态足迹

Table 1 Per capita ecological footprint in Fuzhou during 2011—2015

hm²

年份 Year	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grazing land	水域 Fishing ground	建设用地 Built-up land	化石能源用地 Carbon uptake land	合计 Total
2011	0.250 9	0.080 3	0.022 8	0.315 5	0.031 4	1.673 2	2.374 2
2012	0.258 8	0.080 4	0.021 2	0.326 4	0.033 4	1.492 0	2.212 2
2013	0.235 5	0.085 0	0.022 7	0.351 5	0.035 7	1.583 1	2.313 5
2014	0.257 3	0.078 7	0.024 0	0.554 0	0.038 2	1.553 1	2.505 2
2015	0.272 3	0.077 0	0.018 6	0.382 4	0.037 3	1.230 8	2.018 4

表2 2011—2015年福州市人均生态承载力

Table 2 Per capita ecological carrying capacity in Fuzhou during 2011—2015

hm²

年份 Year	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grazing land	水域 Fishing ground	建设用地 Built-up land	化石能源用地 Carbon uptake land	合计 Total
2011	0.111 0	0.128 2	0.000 5	0.015 2	0.055 1	0.000 0	0.310 0
2012	0.108 0	0.126 3	0.000 5	0.014 8	0.059 4	0.000 0	0.309 1
2013	0.107 0	0.125 1	0.000 5	0.014 7	0.058 9	0.000 0	0.306 1
2014	0.103 8	0.123 3	0.000 5	0.014 4	0.061 2	0.000 0	0.303 2
2015	0.102 8	0.122 2	0.000 5	0.014 2	0.060 6	0.000 0	0.300 4

比较生态足迹和生态承载力,得出2011—2015年生态

赤字变化情况,2011—2015年的人均生态赤字分别为

2.064 2、1.903 1、2.007 4、2.202 0、1.718 0 hm^2 。

由表 1 可知,2011—2015 年福州市的人均生态足迹呈波动状态,从 2011 年的 2.374 2 hm^2 下降到 2012 年 2.212 2 hm^2 ;而后又逐渐上升到 2014 年的 2.505 2 hm^2 ,但 2015 年又有较大幅度下降,降到了 2.018 4 hm^2 ,比 2011 年下降了 15%。人均生态足迹的变化主要是由于其中占比权重较大的化学能源用地足迹的变化,2015 年较大幅度的下降在一定程度上说明福州近年来的节能和生态可持续发展策略初现成效。此外,在这 5 年内耕地足迹和水域足迹仍呈波动上升状态,草地足迹和林地足迹有所下降。

由表 2 可知,2011—2015 年福州市人均生态承载力逐年缓慢减少,5 年内共下降 3.2%,耕地、林地、水域都有所减少,其中以耕地的降幅最为明显,达到 7.4%,草地基本持平,建设用地则略有增加。这表明随着人口增长、城市化的加快和土地类型的转变,福州市生态系统的供给能力呈下降趋势,生态环境对发展的制约呈增加趋势。

2011—2015 年福州市一直处于生态赤字状态,其中,只

有建设用地每年略有生态盈余,其他土地类型均存在生态赤字。虽然总体生态赤字数值有所波动,2015 年比 2011 年下降了 16.8%,但可以明显看出区域消耗的资源一直超过区域生态供给能力,5 年内福州市的区域生态始终处于不可持续状态,生态可持续的前景不容乐观。

2.2 区域人均生态足迹广度、深度、三维生态足迹 结合表 1 数据,运用改进的三维生态足迹模型,由式(4)计算得出 2011—2015 年福州市人均区域足迹广度,结果见表 3 和图 1。

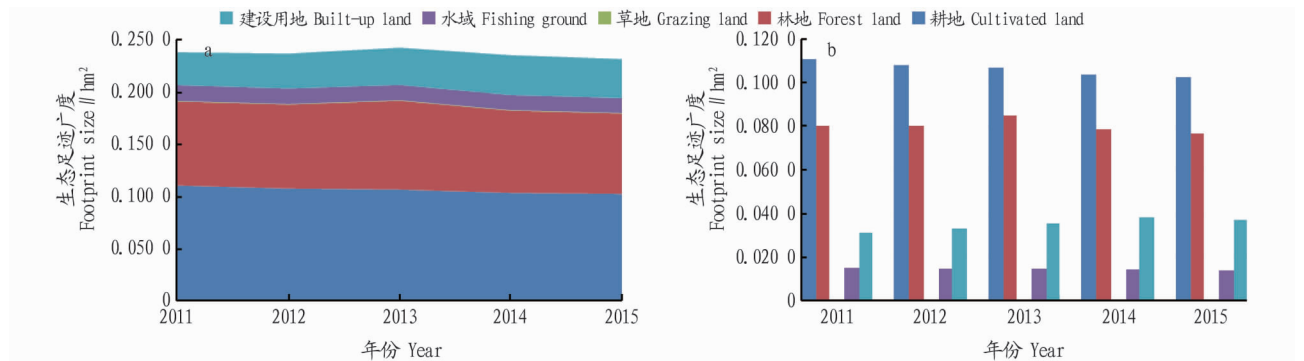
由表 3 和图 1 可见,2011—2015 年福州市人均区域足迹广度呈现“减—增—减”趋势,但是起伏不大,2012 比 2011 年略有减少,2013 年稍微上升,2014 和 2015 年逐步下降,2015 年比 2011 年下降 2.7%。分析 2011—2015 年福州市人均区域足迹广度构成可知,占比前三的土地类型分别是耕地、林地和建设用地,尤其是耕地,在历年人均区域足迹广度的占比均在 40%以上。从时间序列上看,2011—2015 年福州市人均区域足迹广度的构成中,草地变化不大,耕地和水域逐年减少,建设用地呈增加趋势。

表 3 2011—2015 年福州市人均足迹广度

Table 3 Per capita footprint size in Fuzhou during 2011—2015

hm^2

年份 Year	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grazing land	水域 Fishing ground	建设用地 Built-up land	合计 Total
2011	0.111 0	0.080 3	0.000 5	0.015 2	0.031 4	0.238 4
2012	0.108 0	0.080 4	0.000 5	0.014 8	0.033 4	0.237 1
2013	0.107 0	0.085 0	0.000 5	0.014 7	0.035 7	0.242 8
2014	0.103 8	0.078 7	0.000 5	0.014 4	0.038 2	0.235 6
2015	0.102 8	0.077 0	0.000 5	0.014 2	0.037 3	0.231 9



注:a 人均足迹广度构成;b. 人均足迹广度变化

Note:a. Components of per capita footprint size;b. Change of per capita footprint size

图 1 2011—2015 年福州市人均生态足迹广度构成及其变化

Fig. 1 Components and changes of per capita footprint size in Fuzhou during 2011—2015

由式(5)、(6)计算得出 2011—2015 年福州市人均区域足迹深度和人均三维生态足迹,结果见表 4。从表 4 可以看出,2011—2015 年福州市人均区域足迹深度同样经历了“减—增—减”的发展变化,由 2011 年的 7.890 7 减少到 2012 年 7.390 3,然后又增加到 2014 年的 8.486 0,2015 年又大幅减少到 6.948 0。与 2011 年相比,2015 年福州市人均区域足迹深度下降了 11.9%,5 年内人均区域足迹深度不但始终大于 1,而且一直维持在较高水平。2011—2015 年福州市人均三维生态足迹从 2011 年的 1.881 0 hm^2 减少到 2012 年的

表 4 2011—2015 年福州市人均足迹广度、足迹深度和三维生态足迹
Table 4 Per capita footprint size, footprint depth and 3D ecological footprint in Fuzhou during 2011—2015

年份 Year	人均足迹广度 Per capita footprint size// hm^2	人均足迹深度 Per capita footprint depth	人均三维生态足迹 Per capita 3D ecological footprint// hm^2
2011	0.238 4	7.890 7	1.881 0
2012	0.237 1	7.390 3	1.752 4
2013	0.242 8	7.763 8	1.884 9
2014	0.235 6	8.486 0	1.998 9
2015	0.231 9	6.948 0	1.610 9

1.752 4 hm²,然后又增加到2014年的1.998 9 hm²,而后又减少到2015年的1.610 9 hm²,这5年间总体下降了14.4%。将人均三维生态足迹和表2的人均生态承载力进行对比可知,2011—2015年福州市处于生态赤字较大的状态。

3 结论与建议

3.1 结论 该研究运用改进的三维生态足迹模型,对2011—2015年福州市的足迹深度、足迹广度和人均三维生态足迹进行计算,并对计算结果进行分析,结论为以下两点:

2011—2015年福州市足迹广度和足迹深度均呈现“减—增—减”的变化趋势。从人均区域足迹广度的构成来看,耕地、林地是其主要组成部分,5年内前者逐年略有减少,后者呈现起伏波动;建筑用地在人均区域足迹广度的构成中所占比例也不低,而且在这5年内逐年增加。这说明福州市自然资本利用方式仍以农业生产为重,但由于城市人口与经济的迅速增长、快速的城市化进程以及居民消费结构的变动,造成了足迹广度构成的变化。2011—2015年福州市人均区域足迹深度在6~9变动,始终远大于1,峰值出现在2014年,达8.486 0,即在2014年福州市的消费量需要将近8.5倍的福州市土地面积才能支撑。虽然在2015年这个数字回落到6.948 0,但是经济发展的巨大需求和与之形成的供给压力仍是福州可持续发展的巨大威胁,其中起主要作用的是化石能源消费。福州市依靠流量资本占用已难以满足日益膨胀的资源消费需求,一直在消耗存量自然资本来维持自身发展,区域存量资本的长期消耗对代际公平性带来负面影响,对可持续发展而言是一个巨大的不利。

虽然2011—2015年福州市的人均三维生态足迹、足迹广度和足迹深度在时间上有相似的“减—增—减”变化趋势,但相比较而言,人均三维生态足迹和足迹深度的变化更具一致性。这说明福州市的人均三维生态足迹虽然受到足迹深度和足迹广度的共同作用,但足迹深度的影响更大一点。2011—2015年福州市人均三维生态足迹和人均生态承载力相差较大,生态赤字严重,发展处于不可持续状态。其中,化石能源的大量消耗导致生态足迹数值居高不下,因此,优化产业结构和降低居民生活能源消费是缓解目前福州市生态压力的重点。人均生态承载力主要受制于自然资源禀赋、人口增长和城市化进程,2011—2015年数值波动不大,但呈现缓慢减少趋势,因此,采用合理利用土地等措施来提升生态承载力是很必要的。

必须指出,该研究难以获得全部消费和能源的统计资料,对于均衡因子和产量因子的选取与该地区的实际情况有所差异,三维生态足迹模型将研究区域认为是封闭的,未考虑区域间自然资源流动,这些因素均会对结果造成一定影响。

3.2 建议 随着国家“一带一路”战略的展开,福州市将在巨大的推动作用下快速发展,与此同时,生态赤字却成为制约福州市发展的瓶颈,福州的可持续状况不容乐观。基于此形势,提出以下建议:

(1)拓宽福州市生态足迹广度的可取值范围。虽然足迹

广度受限于自然资源禀赋,但也可以通过加大环境投入,提高区域再生资源的再生能力等措施加以改善。如保护土地并切实提高区域生产力,尤其是在生态足迹中占比重较大的耕地和对提高区域碳排放承载力有着举足轻重作用的林地。根据福州市的发展状况,制定符合当地实际情况的可持续耕作制度,提高农业科技含量,发展生态农业,还要特别加强农业生态环境保护,多管齐下,努力提高区域生态承载力。

(2)降低福州市生态足迹深度。目前福州生态足迹深度数值过大,要降低生态足迹深度、控制生态足迹,尤其是其中占比重较大而现有生态承载力又较小的化石能源足迹。首先要加强生态环境保护宣传和教,提高全社会的环保意识和责任感,坚持发展低碳型生态城镇化。同时,一方面,要继续优化能源结构,不但工业企业能源结构需要优化,居民能源消费结构更需要优化,减少碳排放量大的传统能源的使用,增加清洁能源的使用;另一方面,要进一步集约利用能源和资源,推广低碳的社会经济发展模式,引导低碳的居民生活消费方式;节能减排,减少社会生产和居民生活对资源和能源的需求与消耗,以努力实现降低生态足迹,实现生态盈余。

参考文献

- [1] 薛若晗. 基于生态足迹的福州仓山区生态安全评价[J]. 环境科学导刊, 2013, 32(1): 82-85.
- [2] WACKERNAGEL M, REES W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective [J]. Ecological economics, 1997, 20(1): 3-24.
- [3] NICCOLUCCI V, BASTIANONI S, TIEZZI E B P, et al. How deep is the footprint? A 3D representation [J]. Ecological modelling, 2009, 220(20): 2819-2823.
- [4] VAN DEN BERGH J, GRAZI F. On the policy relevance of ecological footprints [J]. Environmental science & technology, 2010, 44(13): 4843-4844.
- [5] NICCOLUCCI V, GALLI A, REED A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography [J]. Ecological modelling, 2011, 222(16): 2939-2944.
- [6] 方恺, HEIJUNGS R. 自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1700-1707.
- [7] 方恺. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 267-274.
- [8] 方恺. 基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析: 选取11个国家为数据源[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3766-3777.
- [9] 靳相木, 柳乾坤. 自然资源核算的生态足迹模型演进及其评论[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 163-176.
- [10] 杜悦悦, 彭建, 高阳, 等. 基于三维生态足迹的京津冀城市群自然资本可持续利用分析[J]. 地理科学进展, 2016, 35(10): 1186-1196.
- [11] 张星星, 曾辉. 珠江三角洲城市群三维生态足迹动态变化及驱动力分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 771-778.
- [12] 胡悦, 王琳琳. 基于三维生态足迹模型的河北省自然资本利用研究[J]. 发展研究, 2017(4): 52-57.
- [13] 胡良文, 彭泰中, 金志农. 基于三维生态足迹模型自然资本时空演变: 以江西省为例[J]. 江西科学, 2017, 35(3): 460-468.
- [14] 马维航, 刘斌, 杨德伟, 等. 基于三维生态足迹模型的流域自然资本动态评估: 以福建省九龙江流域为例[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 871-880.
- [15] 靳相木, 柳乾坤. 基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究: 以温州市为例[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 2982-2993.
- [16] 黄艳丽, 乔卫芳. 焦作市人均三维生态足迹的动态分析[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(2): 156-159.
- [17] 薛若晗. 福州市2010年生态足迹和生态承载力研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(28): 13960-13962.
- [18] 《福州年鉴》编纂委员会编. 福州年鉴2016[M]. 福州: 方志出版社, 2016.

体炭产率随反应进程出现高低变化,但整体来看 2 种气氛介质加压均未带来固体炭产率的显著变化,通过控制加压反应的进程,可得到相近的产率(44%左右)。

(2)增加稻秸水热反应体系的压力,对炭产物表面官能团组成及产物晶相结构无显著影响,但可加快水热炭化进程。对于不同的气氛介质,通过合理控制反应进程可以得到 IR、XRD 结构表征和产率相近的固相产物,但同等条件下,氮气更有利于缩短水热反应周期,空气更有利于保留炭产物表面的 OH 类含氧官能团。反应压力增加提高了体系中的底物浓度,使暴发聚合反应的饱和浓度提前出现,从而使水热炭化进程加快,而反应体系中氧浓度增加有利于 OH 类含氧官能团的形成,但延长了水热反应周期。

(3)增加稻秸水热反应体系的压力,不会显著改变炭产物的吸附性能。水热炭化过程中,化合物溶出、裂解等造成表面孔体积改变是造成比表面积改变主要原因。不同条件所制生物炭的吸附曲线均符合 Freundlich 模型,对亚甲基蓝表现为优惠型吸附。

参考文献

[1] KUBO S, DEMIR-CAKAN R, ZHAO L, et al. Porous carbohydrate-based materials via hard templating[J]. *Chem sus chem*, 2010, 3(2): 188–194.

[2] LU L, NAMIOKA T, YOSHIKAWA K. Effects of hydrothermal treatment on characteristics and combustion behaviors of municipal solid wastes[J]. *Appl Energ*, 2011, 88(11): 3659–3664.

[3] BERGE N D, RO K S, MAO J, et al. Hydrothermal carbonization of municipal waste streams[J]. *Environmental science & technology*, 2011, 45(13): 5696–5703.

[4] LIU Z G, ZHANG F S, WU J Z. Characterization and application of chars produced from pinewood pyrolysis and hydrothermal treatment[J]. *Fuel*, 2010, 89(2): 510–514.

[5] KUMAR S, LOUANATHAN V A, UPTA R B, et al. An assessment of U(VI) removal from groundwater using biochar produced from hydrothermal carbonization[J]. *J Environ Manage*, 2011, 92(10): 2504–2512.

[6] HOEKMAN S K, BROCH A, ROBBINS C. Hydrothermal carbonization (HTC) of lignocellulosic biomass[J]. *Energy & fuels*, 2011, 25(4): 1802–1810.

[7] SUN K, RO K, GUO M X, et al. Sorption of bisphenol A, 17 α -ethinyl estradiol and phenanthrene on thermally and hydrothermally produced biochars[J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(10): 5757–5763.

[8] 郭淑青,董向元,范晓伟,等.玉米秸秆水热炭化产物特性演变分析[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 180–185.

[9] YU G C, YANO S, INOUE H, et al. Pretreatment of rice straw by a hot-compressed water process for enzymatic hydrolysis[J]. *Applied biochem*

istry and biotechnology, 2010, 160(2): 539–551.

[10] WHITE R J, AANTONETTI M, TITIRICI M M. Naturally inspired nitrogen doped porous carbon[J]. *Journal of materials chemistry*, 2009, 19(45): 8645–8650.

[11] RILLIG M C, WAGNER M, SALEM M, et al. Material derived from hydrothermal carbonization: effects on plant growth and arbuscular mycorrhiza[J]. *Applied soil ecology*, 2010, 45(3): 238–242.

[12] MURSI TO A T, HIRAJIMA T, SASAKI K, et al. The effect of hydrothermal dewatering of Pontianak tropical peat on organics in wastewater and gaseous products[J]. *Fuel*, 2010, 89(12): 3934–3942.

[13] MURSI TO A T, HIRAJIMA T, SASAKI K. Upgrading and dewatering of raw tropical peat by hydrothermal treatment[J]. *Fuel*, 2010, 89(3): 635–641.

[14] SUWELACK K, WÜST D, ZELLER M, et al. Hydrothermal carbonization of wheat straw-prediction of product mass yields and degree of carbonization by severity parameter[J]. *Biomass conversion and biorefinery*, 2016, 102(3): 347–354.

[15] MAU V, QUANCE J, POSMANIK R, et al. Phases' characteristics of poultry litter hydrothermal carbonization under a range of process parameters[J]. *Bioresour technology*, 2016, 219: 632–642.

[16] LEE K K, BJÖRKMAN E, MORIN D, et al. Effects of hydrothermal carbonization conditions on the textural and electrical properties of activated carbons[J]. *Carbon*, 2016, 107: 619–621.

[17] LIN Y S, MA X Q, PENG X W, et al. A mechanism study on hydrothermal carbonization of waste textile[J]. *Energy fuels*, 2016, 30(9): 7746–7754.

[18] 卢洪波,戴惠玉,马玉鑫.生物质三组分燃烧特性及动力学分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 186–191.

[19] UROENLI MG V G, BLASIC D I. Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2002, 41(17): 4201–4208.

[20] LIBRA J, RO K S, KAMMANN C, et al. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis[J]. *Biofuels*, 2011, 2(1): 71–106.

[21] KUMAR S, KOTHARI U, KONG L Z, et al. Hydrothermal pretreatment of switch grass and corn stover for production of ethanol and carbon microspheres[J]. *Biomass & bioenergy*, 2011, 35(2): 956–968.

[22] SEVILLA M, FUERTES A B. The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose[J]. *Carbon* 2009, 47(9): 2281–2288.

[23] 刘娟,池涌,舒迪.过程参数对纤维素水热炭化的影响[J]. *化工学报*, 2015, 66(12): 4980–4986.

[24] KANG S M, LI X L, FAN J, et al. Characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of lignin, cellulose, D-xylose, and wood meal[J]. *Industrial and engineering chemistry research*, 2012, 51(26): 9023–9031.

[25] 汪君,时澜,高英,等.葡萄糖水热过程中焦炭结构演变特性[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 191–198.

[26] 李音,单胜道,杨瑞芹,等.低温水热法制备竹生物炭及其对有机物的吸附性能[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 240–247.

(上接第 44 页)

[19] Global Footprint Network. Accounting for demand and supply of the Biosphere's regenerative capacity: the National Footprint Accounts' underlying methodology and framework [EB/OL]. (2012-02-20) [2017-05-16]. http://www.footprintnetwork.org/images/uploads/Methods_Paper_Draft_2011.pdf.

[20] World Wide Fund for Nature. LIVING PLANET REPORT 2016 [EB/OL]. (2016-10-27) [2017-05-16]. http://www.wwfchina.org/content/press/publication/2016/LPR_2016_full%20report_spread%20low%20res.pdf.

[21] World Wide Fund for Nature. LIVING PLANET REPORT · CHINA 2015 [EB/OL]. (2015-11-12) [2017-05-16]. <http://www.wwfchina.org/content/press/publication/2015/Living%20Planet%20Report%20China%202015%20FIN.pdf>.

[22] 世界自然基金会(WWF).中国生态足迹与可持续消费研究报告[EB/

OL]. (2014-04-03) [2017-05-16]. <http://www.wwfchina.org/content/press/publication/2014/CN2014footprint.pdf>.

[23] 薛若晗.福建省 2011 年生态足迹分析与生态安全评价[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(14): 6427–6429.

[24] 世界环境与发展委员会编.我们共同的未来[M].王之佳,柯金良,译.长春:吉林人民出版社,1997:100–200.

[25] 福州市统计局.福州统计年鉴[EB/OL]. (2017-07-01) [2017-05-16]. <http://tj.fuzhou.gov.cn/zz/zwgk/tjzl/tjfx/>.

[26] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Statistical Databases [EB/OL]. (2015-11-11) [2017-05-16]. <http://faostat3.fao.org/home/index.html>.

[27] 福建省国土资源厅.福建省第二次全国土地调查主要数据成果公报[EB/OL]. (2014-07-04) [2017-05-16]. http://www.mlr.gov.cn/tzdt/tgdl/decdc/dccg/gscg/201407/t20140704_1322754.html.