

基于行业减排的森林碳汇需求空间测度与分类

朱梅钰, 龙飞, 祁慧博, 张哲

(浙江农林大学 经济管理学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】 对全国 28 个省级行政区域和深圳市的森林碳汇需求空间进行分类, 就提升各类地区未来的森林碳汇需求空间提出针对性建议, 为科学设计碳汇政策以及差异化开发森林碳汇需求空间提供客观依据。【方法】 以全国 28 个省级行政区域和深圳市为样本地区, 收集整理 2008-2017 年《统计年鉴》中工业行业的投入产出数据, 运用方向性距离函数模型测算各地区工业行业碳边际减排成本, 并采用需求空间模型, 对全国 28 个省级行政区域和深圳市 10 a 的森林碳汇需求空间进行测度, 对求得的需求空间数据进行聚类分析和判别分析。【结果】 各样本地区的碳边际减排成本和森林碳汇需求空间数据均存在一定的地区性波动。3 类地区碳边际减排成本与森林碳汇需求空间的皮尔逊相关系数为 0.999, 呈显著正相关。聚类结果发现: 1、2、3 类地区的碳边际减排成本平均值分别为 1.59、1.18、0.51 万元·t⁻¹; 1、2、3 类地区森林碳汇需求空间平均值分别为 571.91、374.93、174.15 万 t·a⁻¹。最终判别方程发现: 2011、2014 年的需求空间数据对地区分类的影响最为显著。【结论】 整体来看, 分类结果与中国东中西部地区的经济发展水平大致吻合。政策情景模拟显示: 差异化开发森林碳汇需求空间要将超排处罚率作为第 1、2 类地区的重要切入点, 同时优化配额发放模式; 第 3 类地区以鼓励引导为主。表 6 参 16

关键词: 森林碳汇; 边际减排成本; 需求空间; 聚类分析; 判别分析

中图分类号: S7-05 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)02-0377-10

Spatial measurement and classification of forest carbon sink demand based on industry emission reduction

ZHU Meiyu, LONG Fei, QI Huiibo, ZHANG Zhe

(College of Economics and Management, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: 【Objective】 This paper classifies the forest carbon sink demand space of 28 provincial administrative regions and Shenzhen City in China, and puts forward some suggestions for improving the future forest carbon sink demand space of various regions, so as to provide an objective basis for scientific design of carbon sink policy and targeted development of forest carbon sink demand space. 【Method】 Taking the above 29 areas as sample units, the input and output data of the industrial industries in 2008-2017 statistical yearbook were collected. The directional distance function model was used to calculate the carbon marginal emission reduction cost of the industrial industries in each region, and the demand space model was used to measure the forest carbon sink demand space of 29 areas in the past 10 years. Then cluster analysis and discriminant analysis were carried out on the obtained demand space data. 【Result】 There were some regional fluctuations in the marginal carbon emission reduction cost and the spatial data of forest carbon sink demand in each sample area. The Pearson correlation coefficient between marginal carbon emission reduction cost and forest carbon sink demand space was 0.999, showing a significant positive correlation. The clustering results showed that the

收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-12-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71473230); 浙江省自然科学基金青年基金资助项目(Q17G030042)

作者简介: 朱梅钰(ORCID: 0000-0002-3567-4043), 从事林业资源与环境经济研究。E-mail: 1571848969@qq.com.

通信作者: 龙飞(ORCID: 0000-0002-0464-2719), 教授, 博士, 博士生导师, 从事林业管理工程、资源与环境管理研究。E-mail: longf2007@163.com

average marginal carbon emission reduction cost in regions of Category 1, 2 and 3 was 15.9, 11.8 and 5.1 thousand yuan·t⁻¹ respectively. The average spatial value of forest carbon sink demand in Category 1, 2 and 3 was 5 719.1, 3 749.3 and 1 741.5 thousand t·a⁻¹, respectively. Through the final discriminant equation, it was found that the demand spatial data of 2011 and 2014 had the most significant impact on regional classification. [Conclusion] On the whole, the classification results are roughly consistent with the economic development level of the eastern, central and western regions of China. The policy scenario simulation shows that the penalty rate of over emission should be taken as an important entry point for the regions of Category 1 and 2, and the quota distribution mode should be optimized. The 3rd category should be encouraged and guided. [Ch, 6 tab. 16 ref.]

Key words: forest carbon sink; marginal emission reduction cost; demand space; cluster analysis; discriminant analysis

工业革命以后, 经济社会发展与环境承载力之间的矛盾日益突出, 控制和减少大气二氧化碳含量, 避免气候变化带来的灾难性后果, 已成为全球关注的焦点问题。国际社会对此高度重视并积极采取各种应对措施。联合国气候变化大会多哈会议正式确定启动《京都议定书》(1997) 第二承诺期 8 年期计划, 并在 2015 年巴黎会议上达成了全球 2020 年后应对气候变化行动的协定, 即《巴黎协定》^[1], 该协定是人类历史上应对气候变化的第 3 个里程碑式的国际法律文本。2020 年后的全球气候治理格局由此形成^[2]。森林作为陆地生态系统中最大的碳库, 在稳定全球碳循环和缓解全球变暖方面发挥着十分重要的作用。《联合国气候变化框架公约》已将森林碳汇作为一种新型森林经营产品纳入到《京都议定书》的清洁发展机制框架中。中国也将森林碳汇作为应对气候变化的重要途径, 早在各试点省(市) 碳交易市场成立之初, 国家发展和改革委员会就对各试点市场开展的森林碳汇项目抵消政策颁布了一系列激励措施, 并认为森林碳汇项目抵消政策有助于实现不同地区之间的资源优势互补, 扩大试点碳交易市场跨行业、跨地区的影响力^[3]。截至 2019 年 12 月 31 日, 8 个碳市场配额现货累计成交量为 3.95 亿 t, 累计成交额为 91.6 亿元, 国家核证自愿减排量 (CCER) 累计交易量为 2.05 亿 t。整体来看, 碳价格低廉, 且由于理性经济人抉择等因素的干扰, 中国当前碳汇需求不足, 难以充分实现森林生态价值的市场补偿。国内外学者在碳汇需求空间方面也开展了不同角度的研究, VASS^[4] 表示: 科学设计碳交易市场机制可提高交易活动的活跃度, 实现森林碳汇生态价值资本化。PETHIG 等^[5] 认为: 碳排放权交易制度的优势非常显著, 市场开展碳排放的调节机制除了可以拉动碳需求、实现减排目标, 还能降低成本。赵红梅等^[6] 以环境政策理论为前提, 对激励政策下各行业的减排行为进行了研究。沈洪涛等^[7] 认为: 碳交易政策是促使重点排放单位开展碳减排的有效手段, 有关部门可将碳价稳定在某一合理区间来引导企业通过碳交易进行减排, 利于长期减排。张颖^[8] 认为: 若将森林碳汇的比例提高到 10% 再分配给森林碳汇市场进行交易, 森林碳汇的市场需求将会大幅上涨。杨虹等^[9] 认为: 各行业对森林碳汇的需求价格, 随政府允许碳汇抵消比例的提高和碳汇补贴额度的增加而上升, 随碳税征收率的提高而下降。童慧琴等^[10] 认为: 超排处罚率、技术减排补贴、产业提升政策及碳排放权配额发放强度等因素对减排行业森林碳汇需求空间均有影响。这些研究表明: 目前碳交易市场的森林碳汇还存在较大的需求空间。工业行业是中国最大的碳汇需求者, 研究其森林碳汇的内在需求并进行分类, 对未来差异化开发森林碳汇需求空间, 促进森林碳汇产业的可持续发展具有重要的理论及现实意义, 但与之相关的研究比较薄弱。鉴于此, 本研究将以全国 28 个省级行政区域和深圳市 (以下称 29 个样本地区) 工业行业的减排现状和碳边际减排成本为基础, 对 2008–2017 年的森林碳汇需求空间数据进行科学测算, 并对所求数据进行分类研究, 以期对相关科学设计减排政策, 更具差异化开发各类地区森林碳汇需求空间提供客观依据。

1 研究方法与模型构建

1.1 方向性距离函数参数法

方向性距离函数对处理含非合意性产出的问题具有明显优势。普通距离函数只考虑合意性产出的增

加, 而方向性距离函数在考虑了合意性产出增加的同时, 还兼顾了非合意性产出的减少。具体处理过程如下: 假设 y 为生产的合意性产出 (好产出), 且 $y \in R_+^D$ 表示合意性产出向量; c 为非合意性产出 (坏产出), 且 $c \in R_+^U$ 表示非合意性产出向量; x 表示工业行业的投入, 且 $x \in R_+^N$ 表示投入向量; 则生产集为 $P(x) = \{(y, c) : x \rightarrow (y, c)\}$ 。 $P(x)$ 是描述所有可行的投入产出向量。当投入 $x=0$ 时, 产出 (合意性产出、非合意性产出) 也为 0。本研究把生产合意性产出定义为工业行业的产值, 非合意性产出定义为工业行业二氧化碳的排放量^[1]。投入指标包括: 工业行业固定资产、工业行业从业人员和工业行业能源消耗。现假定 $P(x)$ 满足下面的性质: ①投入 x 是具有强可处置性的, 当投入 x 增加了, 产出 $P(x)$ 不会减少, 即是说, 当具体投入数 $x' \in x$, 那么 $P(x') \supseteq P(x)$ 。②合意性产出 y 和非合意性产出 c 具有联合性, 即坏产出是创造好产出过程中不可规避的副产品, 也就是说如果 $(y, c) \in P(x)$, 且 $c=0$, 则 $y=0$ 。③合意性产出 y 和非合意性产出 c 具有联合弱可处置性, 即工业行业同等比例同时缩减 y 和 c 的产出是可能的, 即在既定投入水平 x 下, 若要减少坏产出 c , 则好产出 y 也必须随之减少。也就是说, 如果 $(y, c) \in P(x)$, θ 表示变化因子, 且 $0 \leq \theta \leq 1$, 那么 $(\theta y, \theta c) \in P(x)$, 这表示要减少非合意性产出就必须减少合意性产出。④合意性产出 y 具有强可处置性, 对好产出产量的减少没有限制, 即可以在其他条件都不变的条件下降低好产出 y 的产量。如果 $(y, c) \in P(x)$, 且 $(y_0, c) \leq (y, c)$, 那么 $(y_0, c) \in P(x)$ 。

设定方向向量 $g=(g_y, g_c)$, $g \neq 0$ 。基于以上假设, 我们可以得出产出方向性距离函数为:

$$\vec{D}_0(x, y + ag_y, c - ag_c, g_y, -g_c) = \vec{D}_0(x, y, c, g_y, -g_c) - a, a \in R. \quad (1)$$

产出方向性距离函数的值可以反映出工业行业的生产效率。如果 $\vec{D}_0(x, y, c, g_y, -g_c) = 0$, 可以说明该行业在 $(g_y, -g_c)$ 方向上是有效率的; 如果 $\vec{D}_0 > 0$, 则说明该行业在该方向上存在一定程度的无效性。据此, 我们可以计算出非合意性产出也就是坏产出 (二氧化碳) 的边际减排成本:

$$P_c = P_y \left[\frac{\partial \vec{D}_0(x, y, c, g_y, -g_c)}{\partial c} \middle/ \frac{\partial \vec{D}_0(x, y, c, g_y, -g_c)}{\partial y} \right]. \quad (2)$$

式 (2) 中: P_c 表示二氧化碳影子价格, 即工业行业二氧化碳边际减排成本 (MAC), P_y 表示工业行业好产出的市场价格, x 表示工业行业的投入, y 表示工业行业好产出的产量, c 表示工业行业坏产出的产量, D_0 表示工业部门投入产出向量, g 表示产出变量。

1.2 森林碳汇需求空间测算模型构建方法

森林碳汇的需求空间受多种因素影响, 而减排成本尤为关键, 它将直接对各减排行业的后续经济选择起决定性作用。根据相关文献及其对影响森林碳汇需求空间的各因素关系分析^[12-13], 本研究拟将采用 logistic 算法来自动实现包括碳减排行业减排成本在内的不同影响因素与森林碳汇需求空间之间的关系模型。转换形式如下:

$$D_{st} = \frac{1}{1 + \exp\{-[d + T_i(1+p)/G_i(1+g)]\}} \times M_i(1+s) / [P_{st}(1+m)]. \quad (3)$$

式 (3) 中: D_{st} 表示森林碳汇需求空间, M_i 代表工业行业样本期的碳边际减排成本; P_{st} 代表当前碳汇价格一般水平 (以国内相关试点成交价为例), d 为自动系数, 取 2.7; T_i 为不同行业年度碳排放总量, G_i 为不同行业年度产值, i 为年数。 s 代表超排处罚率, m 代表技术减排补贴率, p 代表产业激励政策, g 代表碳配额发放强度。以需求空间模型测度求得的森林碳汇需求空间数据, 为 29 个样本地区森林碳汇需求空间的分类研究的铺垫。

1.3 聚类分析与判别分析

本研究将根据 2008-2017 年全国 29 个样本地区的森林碳汇需求空间数据, 采用经典数据挖掘算法之一的 K-Means 算法, 对各地区的森林碳汇需求空间进行聚类分析, 以寻求森林碳汇需求空间的变化规律。

判别分析 (discriminant analysis) 是由分类变量作因变量, 多个连续判别变量作为自变量的多变量分析方法^[14]。基本原理是按照一定的判别准则, 建立一个或多个判别函数, 用研究对象的大量资料确定判别函数中的待定系数, 并计算判别指标。据此即可确定某样本属于何类^[15]。判别分析的基本模型为:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i \quad (4)$$

式(4)中： y 表示判别函数值； x_i 表示判别变量； b_i 表示相对应的判别系数； $i=1, 2, 3, \dots, k$ ， k 表示判别变量的个数。

2 数据来源与 29 个样本地区边际减排成本的测度分析

数据为 2008–2017 年全国 29 个样本地区《统计年鉴》中规模以上工业行业的投入产出数据，部分地区的缺失数据由推算得来，最后根据《综合能耗计算通则》里的折算系数对不同能源进行折算。经过收集整理，运用方向性距离函数的环境生产函数求偏导，解得二氧化碳的影子价格，即边际减排成本(表 1)。

横观表 1 数据发现：29 个样本地区工业行业二氧化碳的边际减排成本平均值存在一定的波动，整体没有明显规律。青海省、新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区等西部欠发达地区减排成本较低，广东省、深圳市等工业较发达地区的减排成本偏高，其中：新疆维吾尔自治区工业行业 10 a 间二氧化碳边际减排成本平均值为 0.369 1 万元·t⁻¹，这说明新疆维吾尔自治区减少 1 t 二氧化碳排放需支付的减排成本为 0.369 1 万元；广东省工业行业的碳边际减排成本较高，10 a 的平均值为 1.650 3 万元·t⁻¹，说明 10 a 间广东省平均减少 1 t 二氧化碳需要支付的减排成本是 1.650 3 万元，是新疆维吾尔自治区的 4.47 倍之多。这也从侧面证明经济实力与工业行业二氧化碳减排成本之间存在一定的联系。

纵观表 1 数据发现：2008–2017 年，29 个样本地区的二氧化碳边际减排成本整体呈稳步下降趋势，这种情形充分体现了低碳减排、技术创新及环保意识增强等因素带来的积极影响。深圳市、湖北省等少数地区仍有个别年份出现轻微增长，由于此种波动幅度处于正常范围且对整体结果无显著影响，故此处不再赘述。

3 29 个样本地区森林碳汇需求空间的测度分析

本研究采取近年碳交易价格的平均数表示当前碳价格的一般水平。根据整理和计算得出 [式(3)] P 值为 26.44 元·t⁻¹。各年度工业行业的碳边际减排成本数据 M_i 见表 1，不同行业年度碳排放总量 T_i 和不同行业年度产值 G_i 均为为各地区《统计年鉴》中收集的原始数据， N 为行业年度总数。鉴于当前各地相关政策均未出台，这里假设政策值 s 、 m 、 p 与 g 皆为 0，以具体讨论其他相关非政策性市场因素对森林碳汇需求空间的影响。根据森林碳汇需求空间测算模型 [式(3)]，求得 2008–2017 年全国 29 个样本地区的森林碳汇需求空间数据(表 2)。

横观表 2 数据可见：29 个样本地区森林碳汇需求空间的平均值差距明显，波动较大，无明显规律。其中：广东省、深圳市等二氧化碳边际减排成本较高的地区对森林碳汇的需求空间依然较大，而青海省、新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区等减排成本较低的西部地区对森林碳汇的需求空间较小。皮尔逊相关性分析表明：样本地区 10 a 间工业行业的碳边际减排成本与森林碳汇需求空间两者的相关系数为 0.999，显著性水平为 0.000 < 0.05，存在显著的正相关关系。

4 29 个样本地区森林碳汇需求空间的聚类分析与判别分析

4.1 聚类分析

为进一步探寻样本期内各地区森林碳汇需求空间的变动规律，对表 2 的数据进行 K-means 算法聚类发现：10 a 间 29 个样本地区的森林碳汇需求空间分为 3 类较为合适，即 $k=3$ 。此时，Kaiser-Meyer-Olkin 值为 0.841 > 0.5，巴特利特球体检验值为 0.000 < 0.05，说明该分类合适，适合进行聚类分析和判别分析。聚类结果见表 3。

聚类分析的方差分析(ANOVA)结果表明(表 4)：各变量均通过显著性水平检验，说明聚类分析结果合理，真实反映了各地区森林碳汇需求空间的变化情况。

4.2 判别分析

目前本研究只收集整理了信息比较完备的 29 个样本地区的投入产出数据，其他地区由于客观因素

表 1 2008—2017 年全国 29 个样本地区工业行业二氧化碳边际减排成本

Table 1 Marginal CO₂ emission reduction cost of 29 sample areas in China from 2008 to 2017

年份	边际减排成本/(万元·t ⁻¹)									
	上海市	天津市	北京市	重庆市	深圳市	广东省	湖北省	山西省	海南省	青海省
2008	1.174 3	1.087 1	0.720 3	1.741 4	2.455 1	2.295 2	1.229 8	1.234 8	0.798 8	0.665 5
2009	1.090 2	1.070 4	0.600 3	1.631 8	2.384 0	2.094 5	1.172 9	1.095 0	0.794 6	0.553 4
2010	0.996 8	1.008 9	0.519 1	1.479 0	0.718 9	1.928 5	1.168 1	0.975 3	0.658 9	0.512 6
2011	0.852 6	0.872 0	0.425 1	1.317 0	0.752 8	1.744 5	1.029 2	0.806 1	0.551 1	0.362 3
2012	0.815 7	0.811 6	0.367 9	1.216 9	1.787 6	1.669 0	0.998 7	0.732 9	0.487 2	0.324 5
2013	0.725 6	0.742 1	0.305 8	1.130 2	1.340 7	1.551 1	0.980 6	0.633 1	0.425 7	0.267 1
2014	0.653 2	0.711 7	0.273 4	1.040 4	1.688 2	1.456 4	0.952 8	0.565 9	0.333 7	0.238 1
2015	0.563 4	0.666 2	0.178 0	0.956 1	1.551 5	1.359 0	0.879 5	0.520 8	0.243 2	0.241 8
2016	0.486 2	0.498 6	0.085 8	0.830 0	1.421 7	1.248 2	0.794 8	0.474 0	0.155 2	0.251 7
2017	0.422 9	0.407 0	0.030 3	0.644 0	1.237 7	1.156 1	0.852 9	0.411 3	0.132 9	0.265 8
平均	0.778 1	0.787 6	0.350 6	1.198 7	1.533 8	1.650 3	1.005 9	0.744 9	0.458 1	0.368 3

年份	边际减排成本/(万元·t ⁻¹)									
	山东省	浙江省	江苏省	安徽省	宁夏回族自治区	新疆维吾尔自治区	吉林省	内蒙古自治区	广西壮族自治区	黑龙江省
2008	1.722 1	1.736 1	1.728 3	1.497 8	0.901 9	0.776 1	1.187 6	0.825 3	1.255 0	1.379 3
2009	1.562 2	1.564 4	1.519 6	1.406 3	0.739 3	0.678 4	1.183 2	0.759 2	1.353 7	1.303 2
2010	1.400 1	1.475 1	1.425 3	1.280 4	0.629 2	0.548 5	1.053 0	0.689 5	1.369 2	1.050 9
2011	1.187 4	1.146 0	1.212 9	1.118 5	0.502 8	0.420 5	0.913 0	0.533 0	1.198 9	0.862 8
2012	1.114 6	1.131 6	1.154 6	1.071 6	0.420 3	0.361 2	0.854 8	0.453 5	1.148 1	0.829 0
2013	1.026 0	1.058 3	1.099 7	1.005 3	0.356 3	0.243 9	0.767 0	0.370 1	1.061 6	0.765 7
2014	0.904 8	1.015 8	1.078 1	0.955 1	0.252 1	0.215 5	0.717 2	0.284 4	1.005 1	0.688 3
2015	0.825 1	0.961 9	0.964 7	0.855 2	0.169 8	0.188 9	0.662 7	0.205 3	0.976 5	0.630 5
2016	0.755 6	0.909 8	0.886 0	0.801 9	0.082 7	0.145 3	0.609 8	0.159 3	0.912 4	0.555 2
2017	0.683 6	0.857 7	0.809 9	0.722 6	0.030 4	0.112 5	0.511 3	0.082 7	0.839 5	0.621 6
平均	1.118 2	1.185 6	1.187 9	1.071 5	0.408 5	0.369 1	0.846 0	0.436 2	1.112 0	0.868 7

年份	边际减排成本/(万元·t ⁻¹)									
	辽宁省	云南省	甘肃省	湖南省	河北省	河南省	陕西省	四川省	贵州省	
2008	1.206 0	0.920 7	1.196 7	1.417 2	1.343 0	1.640 8	1.057 9	1.476 5	1.229 7	
2009	1.185 6	0.875 3	1.054 7	1.424 6	1.212 3	1.573 7	0.891 3	1.376 0	1.148 7	
2010	1.089 1	0.766 3	0.910 0	1.476 4	1.114 4	1.456 6	0.818 2	1.276 8	1.068 5	
2011	0.940 2	0.646 8	0.638 9	1.361 9	1.067 9	1.383 1	0.724 9	1.202 6	1.026 0	
2012	0.942 3	0.610 8	0.559 7	1.284 7	0.949 7	1.276 8	0.632 4	1.097 9	0.993 1	
2013	0.847 6	0.494 6	0.454 6	1.234 9	0.918 5	1.162 4	0.520 6	0.942 1	0.887 7	
2014	0.775 7	0.417 6	0.434 5	1.193 0	0.884 3	1.100 6	0.458 3	0.873 5	0.847 4	
2015	0.640 2	0.364 6	0.373 7	1.153 9	0.941 0	1.058 0	0.409 9	0.790 2	0.801 3	
2016	0.422 3	0.306 5	0.330 4	1.081 6	0.966 6	1.015 6	0.346 1	0.730 1	0.816 2	
2017	0.374 1	0.258 5	0.274 5	1.005 6	1.017 9	0.955 0	0.301 9	0.661 8	0.830 9	
平均	0.842 3	0.566 2	0.622 8	1.263 4	1.041 6	1.262 3	0.616 1	1.042 8	0.965 0	

未能一同研究，因此判别方程能够在数据完整之后，较准确地判别某一新样本地区(不仅限于国内)属于何类，为差异化开发其森林碳汇需求空间打下基础。根据上述结果，进一步采用判别分析的方法定量给出 3 类地区森林碳汇需求空间的判别方程 [式 (5)]。首先，通过强入法进行判别分析，检验结果见表 5。从表 5 可以看出：方程 1 和方程 2 的 Wilks' Lambda 值为 0.068，接近于 0，其显著性检验值为 $0.000 <$

表2 样本期内全国29个样本地区工业行业的森林碳汇需求空间

Table 2 Forest carbon sink demand space of industrial industries in 29 sample areas in the sample period

年份	森林碳汇需求空间/万t									
	上海市	天津市	北京市	重庆市	深圳市	广东省	湖北省	山西省	海南省	青海省
2008	425.530 7	395.142 1	261.231 0	645.974 1	880.597 1	832.525 9	457.635 1	463.993 3	295.125 0	250.854 9
2009	395.190 2	389.350 0	217.424 3	604.192 7	853.360 7	759.917 6	435.460 4	412.016 7	294.630 8	208.741 5
2010	360.497 9	366.513 3	187.543 5	540.441 4	257.265 7	697.876 1	431.230 0	365.914 4	243.005 1	192.837 9
2011	307.965 9	316.245 6	153.225 0	479.784 2	268.866 0	630.513 5	377.599 0	301.413 1	203.721 9	136.295 4
2012	294.599 7	294.125 4	132.439 5	442.521 5	637.229 3	603.287 7	365.503 7	274.105 8	179.870 9	122.023 6
2013	262.158 4	268.685 2	109.910 4	409.955 7	477.651 4	559.596 4	358.373 1	237.950 1	157.319 9	100.332 7
2014	235.778 9	257.541 2	97.986 5	376.492 9	601.341 9	524.559 7	347.685 7	212.396 4	123.276 2	89.466 7
2015	203.509 7	240.992 8	63.785 9	345.374 8	552.412 5	489.240 3	320.607 5	195.108 7	90.051 2	90.964 1
2016	175.615 2	180.356 6	30.754 7	299.338 8	506.162 7	448.900 7	289.405 9	177.294 9	57.396 8	94.494 6
2017	152.477 8	147.282 4	10.820 4	233.758 9	441.080 6	415.863 8	311.105 5	153.688 7	49.138 0	99.950 0
平均	281.332 4	285.623 5	126.512 1	437.783 5	547.596 8	596.228 2	369.460 6	279.388 2	169.353 6	138.596 1

年份	森林碳汇需求空间/万t									
	山东省	浙江省	江苏省	安徽省	宁夏回族自治区	新疆维吾尔自治区	吉林省	内蒙古自治区	广西壮族自治区	黑龙江省
2008	630.253 7	636.862 3	631.536 0	561.117 8	341.099 8	293.080 8	447.657 5	309.865 1	468.059 6	520.871 7
2009	570.442 4	574.530 3	554.929 5	526.258 2	279.604 9	256.392 3	444.933 7	284.253 1	504.069 6	484.984 5
2010	510.358 5	539.758 6	519.268 4	476.582 3	237.946 2	207.244 6	393.885 4	256.297 4	504.212 0	396.492 9
2011	432.256 1	419.122 5	441.849 0	414.075 9	190.128 3	158.851 7	340.667 0	198.503 5	439.809 6	324.935 1
2012	404.694 2	413.084 4	419.890 3	395.802 3	158.935 7	136.430 4	317.902 5	168.827 3	419.973 2	311.821 8
2013	371.902 1	386.086 0	398.849 8	370.895 3	134.723 5	92.130 3	284.560 5	137.679 0	387.779 7	287.227 6
2014	327.233 1	369.979 5	390.672 2	351.813 7	95.322 7	81.418 9	265.078 1	105.345 3	366.252 4	257.924 5
2015	298.444 0	350.371 1	349.241 5	314.428 1	64.194 4	71.117 1	244.464 9	76.513 6	354.816 7	236.649 9
2016	273.220 7	331.187 5	320.749 2	294.116 2	31.289 2	54.715 4	223.876 2	59.277 9	331.148 8	208.483 8
2017	247.480 8	312.980 6	293.207 2	264.811 9	11.487 0	42.332 1	187.970 0	31.045 5	304.477 8	233.843 9
平均	406.628 6	433.396 3	432.019 3	396.990 2	154.473 2	139.371 4	315.099 6	162.760 8	408.059 9	326.323 6

年份	森林碳汇需求空间/万t									
	辽宁省	云南省	甘肃省	湖南省	河北省	河南省	四川省	陕西省	贵州省	
2008	451.759 9	347.007 0	448.955 2	533.319 9	499.975 0	608.348 2	547.278 8	396.237 4	463.326 2	
2009	442.426 5	330.176 7	395.524 2	535.025 8	450.870 4	583.354 9	508.845 9	333.362 8	432.676 5	
2010	405.310 0	288.590 5	340.103 9	552.182 9	412.466 7	540.003 1	470.701 8	305.461 3	401.732 5	
2011	349.301 5	243.184 7	238.099 2	506.962 0	393.870 8	512.764 5	442.425 4	271.917 3	384.434 1	
2012	348.947 4	229.295 7	208.365 4	476.968 6	349.810 0	472.053 4	403.810 3	237.160 7	371.192 8	
2013	313.450 8	185.657 9	168.930 0	458.259 6	337.873 3	429.481 1	345.111 0	195.399 9	329.724 7	
2014	286.771 9	156.370 6	161.298 1	439.817 0	324.878 9	405.864 4	319.321 6	172.046 4	313.636 7	
2015	238.740 6	136.265 3	139.103 3	424.683 0	345.130 2	388.950 6	288.475 0	154.146 9	295.465 8	
2016	158.807 9	114.412 9	122.971 5	397.644 4	354.087 2	372.605 3	265.916 5	130.088 5	300.254 0	
2017	140.602 9	96.409 8	102.433 1	369.643 6	373.191 9	349.506 3	241.167 4	113.420 1	305.912 7	
平均	313.612 0	212.737 1	232.578 4	469.450 7	384.215 4	466.293 2	383.305 4	230.924 1	359.835 6	

0.05, 说明判别方程 1 和方程 2 均有统计学意义。方程 3 的 Wilks' Lambda 值为 0.536, 接近于 1, 其显著性检验值为 $0.145 > 0.05$, 说明该判别方程的统计学意义不大, 需要使用逐步判别进一步分析。

表 3 样本期内全国 29 个样本地区工业行业森林碳汇需求空间聚类结果

Table 3 Spatial clustering results of forest carbon sink demand of industrial industry in 29 sample areas in the sample period

样本地区碳汇需求空间(b_i)	需求空间分类(C_k)	样本地区碳汇需求空间(b_i)	需求空间分类(C_k)	样本地区碳汇需求空间(b_i)	需求空间分类(C_k)	样本地区碳汇需求空间(b_i)	需求空间分类(C_k)	样本地区碳汇需求空间(b_i)	需求空间分类(C_k)
b_1	1	b_7	2	b_{13}	2	b_{19}	2	b_{25}	3
b_2	1	b_8	2	b_{14}	2	b_{20}	2	b_{26}	3
b_3	2	b_9	2	b_{15}	2	b_{21}	3	b_{27}	3
b_4	2	b_{10}	2	b_{16}	2	b_{22}	3	b_{28}	3
b_5	2	b_{11}	2	b_{17}	2	b_{23}	3	b_{29}	3
b_6	2	b_{12}	2	b_{18}	2	b_{24}	3		

说明：在聚类分析中，假设全国29个样本地区过去10 a的森林碳汇需求空间分别为 $b_i, i=1, 2, \dots, 29$ ，即 $b_i=b_1, b_2, \dots, b_{29}$ (1~29分别代表：深圳市、广东省、上海市、天津市、重庆市、湖北省、山东省、浙江省、江苏省、安徽省、吉林省、辽宁省、湖南省、河北省、河南省、贵州省、四川省、山西省、广西壮族自治区、黑龙江省、北京市、云南省、甘肃省、海南省、青海省、陕西省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区)，需求空间分类为 $C_k(k$ 为需求空间的分类数)

表 4 聚类分析的方差分析表

Table 4 ANOVA of cluster analysis

变量	聚类		误差		F值	显著性
	均方差	自由度	均方差	自由度		
P_{2008}	262 367.420	2	5 624.667	26	46.646	0.000
P_{2009}	259 582.928	2	4 342.022	26	59.784	0.000
P_{2010}	132 329.933	2	7 692.015	26	17.204	0.000
P_{2011}	132 612.742	2	6 034.394	26	21.976	0.000
P_{2012}	212 062.424	2	3 028.819	26	70.015	0.000
P_{2013}	178 662.663	2	3 036.332	26	58.842	0.000
P_{2014}	212 975.584	2	3 037.580	26	70.114	0.000
P_{2015}	200 772.893	2	3 184.382	26	63.049	0.000
P_{2016}	184 581.889	2	3 989.725	26	46.264	0.000
P_{2017}	166 137.990	2	4 388.282	26	37.859	0.000

表 5 判别分析的 Wilks' Lambda 检验

Table 5 Wilks' Lambda test for discriminant analysis

方程检验	Wilks' Lambda	卡方	自由度	显著性
方程 1	0.068	57.923	20	0.000
方程 2	0.068	57.923	20	0.000
方程 3	0.536	13.404	9	0.145

$$\begin{aligned}
 y_1 &= -100.502 + 0.106P_{2008} + 0.017P_{2009} + 0.003P_{2010} - 0.027P_{2011} + 0.452P_{2012} - \\
 &\quad 0.194P_{2013} - 0.324P_{2014} + 0.625P_{2015} - 0.753P_{2016} + 0.331P_{2017}; \\
 y_2 &= -40.323 - 0.003P_{2008} + 0.106P_{2009} + 0.038P_{2010} + 0.046P_{2011} + 0.221P_{2012} - \\
 &\quad 0.277P_{2013} - 0.047P_{2014} + 0.319P_{2015} - 0.529P_{2016} + 0.269P_{2017}; \\
 y_3 &= -19.596 + 0.004P_{2008} + 0.076P_{2009} + 0.055P_{2010} + 0.053P_{2011} + 0.221P_{2012} - \\
 &\quad 0.368P_{2013} + 0.026P_{2014} + 0.172P_{2015} - 0.378P_{2016} + 0.203P_{2017}。
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

采用逐步回归法求得样本单位的森林碳汇需求空间的最终判别方程如公式 (6)，其检验结果如表 6。

$$\begin{aligned}
 y_1 &= -53.269 - 0.002P_{2011} + 0.187P_{2014}; \\
 y_2 &= -20.768 + 0.034P_{2011} + 0.080P_{2014}; \\
 y_3 &= -4.765 + 0.025P_{2011} + 0.019P_{2014}。
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

表6 逐步回归的 Wilks' Lambda 检验

Table 6 Test of Wilks' Lambda for stepwise regression

Wilks' Lambda	自由度1	自由度2	自由度3	精确F值			
				统计	自由度1	自由度2	显著性
0.156	1	2	26	70.114	2	26.000	0.000
0.116	2	2	26	24.221	4	50.000	0.000

从判别方程检验结果可以看出：中国的森林碳汇需求空间可以明显分为3类：深圳市、广东省为第1类，需求空间较大；上海市、天津市、重庆市、湖北省、浙江省、山东省、江苏省、安徽省、吉林省、辽宁省、湖南省、河北省、河南省、广西壮族自治区、贵州省、黑龙江省、四川省、山西省为第2类，需求空间为中等水平；北京市、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、云南省、甘肃省、海南省、青海省、陕西省、内蒙古自治区为第3类，需求空间较小。由最终判别方程可见：2011和2014年的数据对该分类的影响最显著。另外，从判别方程的后验结果来看，3个方程的全部样点回代检验的准确度均为100%，说明该判别方程具有一定的可信度。同时，也一定程度上反映了中国各类地区森林碳汇需求空间的规律性。通过原始数据整理、方向性距离函数模型以及需求空间模型测度可知：第1类地区工业行业平均国内生产总值为62 899.24亿元·a⁻¹，工业二氧化碳平均排放量为18 436.36万t·a⁻¹，碳边际减排成本平均值为1.59万元·t⁻¹，森林碳汇需求空间的平均值为571.91万t·a⁻¹。整体规律为：工业行业平均产值高、二氧化碳平均排放量处于中等水平、碳边际减排成本高、森林碳汇需求空间较大。第2类地区工业行业平均国内生产总值为38 102.57亿元·a⁻¹，工业二氧化碳平均排放量为29 706.46万t·a⁻¹，碳边际减排成本平均值为1.18万元·t⁻¹，森林碳汇需求空间的平均值为374.93万t·a⁻¹。整体规律为：工业二氧化碳平均排放量高，碳边际减排成本、工业行业平均产值及森林碳汇需求空间处于中等水平。第3类地区工业行业平均国内生产总值为8 612.94亿元·a⁻¹，工业二氧化碳平均排放量为15 930.34万t·a⁻¹，碳边际减排成本平均值为0.51万元·t⁻¹，森林碳汇需求空间的平均值为174.15万t·a⁻¹。整体规律为：工业行业平均产值、二氧化碳平均排放量、碳边际减排成本及森林碳汇需求空间均处于较低水平。

以上述分类结果为对照，通过公式(3)测算 s 、 m 、 p 、 g 等4个政策变量各自对3类地区森林碳汇需求空间的影响：①假设政策值超排处罚率 $s=1$ ， m 、 p 、 g 均为0时，1、2、3类地区的森林碳汇需求空间的平均值分别为1 143.83、789.86、348.3万t·a⁻¹。由此可知，当其他参数均为0，超排处罚率每提高1单位，森林碳汇需求空间将会扩大至原来的2倍，这表明超排处罚率与森林碳汇需求空间呈正相关关系。②假设政策值技术减排补贴率 $m=1$ ， s 、 p 、 g 均为0时，1、2、3类地区的森林碳汇需求空间的平均值为285.96、187.47、87.08万t·a⁻¹。由此可知，当其他参数均为0，技术减排补贴率每提高1单位，工业行业技术减排倾向更明显，对森林碳汇的需求因而降低，这说明技术减排补贴率与森林碳汇需求空间呈负相关关系。③假设政策值产业激励政策 $p=1$ ， s 、 m 、 g 均为0时，1、2、3类地区的森林碳汇需求空间的平均值为577.73、379.98、175.49万t·a⁻¹。由此可知，当其他参数均为0，产业激励政策每提高1单位，1、2类地区的森林碳汇需求空间会有小幅提高，而第3类地区则出现轻微降低，这说明产业激励政策与对1、2类地区的需求空间呈正相关，对第3类地区的影响不显著。④假设政策值碳配额发放强度 $g=1$ ， p 、 s 、 m 均为0时，1、2、3类地区的森林碳汇需求空间的平均值为568.33、369.87、171.97万t·a⁻¹。由此可知，当其他参数均为0，碳配额发放强度每提高1单位，3类地区的需求空间均出现小幅降低，这说明碳配额发放强度与森林碳汇需求空间呈负相关关系。

从上述测算分析结果不难发现：超排处罚率对开发需求空间有极大的积极影响，激励政策积极影响较小，碳配额发放强度与技术减排补贴的消极影响较为显著。因此，应将超排处罚标准和激励政策作为开发森林碳汇需求空间的重要切入点，同时，相关部门也要对配额发放模式进行优化。事实上，资源禀赋、技术条件、地理位置及产业结构的差异，也在一定程度上造成了3类地区森林碳汇需求空间的不同。随着中国林业战略目标的实施和重点工程的推进，人工林面积将进一步扩大，这就意味着持续增加的森林碳汇将会对未来经济发展带来前所未有的机遇，也对二氧化碳减排做出重大贡献，而各类地区内

在的森林碳汇需求空间能否更充分地实现森林生态补偿也是需要持续关注的重要问题。

5 结论与建议

5.1 结论

本研究以基于方向性距离函数求得的全国 29 个样本地区工业行业的碳边际减排成本数据为基础, 通过森林碳汇需求空间测算模型求得各省区市 10 a 的森林碳汇需求空间数据, 并对该数据的变动路径进行聚类和判别分析。研究表明: 29 个样本地区的碳边际减排成本数据与森林碳汇需求空间数据均存在明显的地区性波动, 且波动幅度较大。聚类分析将 29 个样本地区的森林碳汇需求空间大致分为 3 类, 第 1 类地区需求空间较大, 第 2 类地区的需求空间为中等水平, 第 3 类地区需求空间较小。整理数据可知, 1、2、3 类地区的碳边际减排成本平均值分别为 1.59、1.18、0.51 万元·t⁻¹; 1、2、3 类地区森林碳汇需求空间平均值分别为 571.91、374.93、174.15 万吨·a⁻¹, 两者的皮尔逊相关系数为 0.999。由此可见, 3 类地区的碳边际减排成本变动路径与森林碳汇需求空间的变动路径基本一致, 两者呈显著正相关。最终判别方程显示 2011、2014 年的森林碳汇需求空间数据对地区分类的影响最为显著。总体来看, 地区分类情况与中国东中西部地区的经济发展水平基本一致, 另外, 超排处罚率、激励政策对开发需求空间均有积极影响, 碳配额发放强度与技术减排补贴对开发需求空间存在消极影响。该特性也为科学设计碳汇政策以及有针对性的开发森林碳汇需求空间提供了新的思路和有价值的参考。

5.2 建议

基于研究分析结论, 提出以下差异化开发各类地区森林碳汇需求空间的建议: ①第 1 类东部地区要严格超排处罚标准, 同时注重社会宣传。减排行业二氧化碳排放量如果超过配额, 必须接受相应处罚, 而减排行业为了规避处罚, 势必通过购买森林碳汇取得相应的排放权, 来继续进行排放行为, 从而进一步提高森林碳汇的需求空间; 社会宣传能够加强减排行业的社会责任感, 树立良好的社会形象, 增强其主动参与和自愿购买森林碳汇的行为。②第 2 类中东部地区应制定相应的激励政策, 优化碳配额发放模式, 合理规定超排处罚标准以及加强相关知识的普及。对关系国家战略的控排单位实施激励政策, 在激励减排的同时尽可能降低其减排压力。碳配额的发放强度直接决定了配额的稀缺程度和市场供需, 进而影响交易活跃度。通过对超过二氧化碳排放限额的行业进行规定, 要求其购买的减排产品须包含一定比例的森林碳汇, 用以提高森林碳汇的持续需求。加强碳汇知识普及和碳汇政策的宣传力度, 提高减排行业对森林碳汇的接受度, 充分发挥行业选择偏好对认购森林碳汇的正向影响, 制定灵活的森林碳汇自愿交易机制, 大力宣传森林碳汇多重效益, 扩大森林碳汇自愿交易规模^[16]。③第 3 类西部地区要以购买森林碳汇的补贴政策为主, 适度的激励政策为辅。受资源禀赋的限制, 西部地区经济发展较落后, 工业欠发达, 因此开发该类地区碳汇需求空间应以经济利益诱导为主, 并对在减排工作中表现突出的企业进行奖励, 尽量减小减排对经济发展的阻力; 设立碳汇基金专项措施, 为节能减排构建平台, 推动碳交易自愿市场的发展。政府的补贴和激励政策能够提高减排行业参与森林碳汇相关实践活动的积极性, 进而增强工业行业对森林碳汇的购买意愿, 提高森林碳汇需求空间。

6 参考文献

- [1] 龙飞, 沈月琴, 祁慧博, 等. 基于企业减排需求的森林碳汇定价机制[J]. 林业科学, 2020, 56(2): 164–173.
LONG Fei, SHEN Yueqin, QI Huibo, et al. Forest carbon sequestration pricing mechanism based on enterprises' demand for carbon emission reduction [J]. *Sci Silv Sin*, 2020, 56(2): 164–173.
- [2] 刘焰真, 李路路, 张斌亮. 《巴黎协定》的由来与发展[J]. 世界环境, 2019(1): 16–18.
LIU Yanzhen, LI Lulu, ZHANG Binliang. Origin and development of *Paris Agreement* [J]. *World Environ*, 2019(1): 16–18.
- [3] ATSALAKIS G S. Using computational intelligence to forecast carbon prices [J]. *Appl Soft Comput*, 2016, 43: 107–116.
- [4] VASS M M. Renewable energies cannot compete with forest carbon sequestration to cost-efficiently meet the EU carbon target for 2050 [J]. *Renewable Energy*, 2017, 107: 164–180.
- [5] PETHIG R, EICHNER T. EU-type carbon emissions trade and the distributional impact of overlapping emissions taxes [J].

- J Regul Econ*, 2010, **37**(3): 287 – 315.
- [6] 赵红梅, 王垒, 王松. 经济激励型环境政策与企业的减排行为研究综述[J]. 山东科技大学学报(社会科学版), 2016, **18**(4): 62 – 66, 83.
ZHAO Hongmei, WANG Lei, WANG Song. Reduction behavior of different types of enterprises under the environmental policy research constraints [J]. *J Shandong Univ Sci Technol Soc Sci*, 2016, **18**(4): 62 – 66, 83.
- [7] 沈洪涛, 黄楠, 刘浪. 碳排放权交易的微观效果及机制研究[J]. 厦门大学学报(哲学社会科学版), 2017(1): 13 – 22.
SHEN Hongtao, HUANG Nan, LIU Lang. A study of the micro-effect and mechanism of the carbon emission trading scheme [J]. *J Xiamen Univ Arts Soc Sci*, 2017(1): 13 – 22.
- [8] 张颖. 绿色经济视角下的森林碳汇供给和需求的市場变化分析[C]. 中国环境科学学会. 2016 中国环境科学学会学术年会论文集: 第 1 卷. 北京: 中国环境科学学会, 2016: 296 – 303.
- [9] 杨虹, 龙飞, 朱臻, 等. 抵消机制背景下企业森林碳汇需求价格模拟[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(1): 173 – 183.
YANG Hong, LONG Fei, ZHU Zhen, *et al.* Demand price simulation of forest carbon sink of enterprises based on offset mechanism [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2021, **38**(1): 173 – 183.
- [10] 童慧琴, 龙飞, 祁慧博, 等. 基于试点 7 省市减排的森林碳汇需求潜力预测与仿真研究[J]. 林业资源管理, 2019(4): 10 – 17, 68.
TONG Huiqin, LONG Fei, QI Huibo, *et al.* Prediction and simulation of the potential demand for forest carbon sequestration in seven pilot carbon markets [J]. *For Resour Manage*, 2019(4): 10 – 17, 68.
- [11] 王兵, 朱晓磊, 杜敏哲. 造纸企业污染物排放影子价格的估计: 基于参数化的方向性距离函数[J]. 环境经济研究, 2017, **2**(3): 79 – 100.
WANG Bing, ZHU Xiaolei, DU Minzhe. Estimating shadow price of papermaking enterprise pollutions: based on parametric directional distance function [J]. *Environ Econ Res*, 2017, **2**(3): 79 – 100.
- [12] KHANAL P, GREBNER D L, MUNN I A, *et al.* Evaluating non-industrial private forest landowner willingness to manage for forest carbon sequestration in the southern United States [J]. *For Policy Econ*, 2017, **75**: 112 – 119.
- [13] 李霞. 中欧国际航线市场需求的影响因素及预测分析[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2018.
LI Xia. *The Influence Factors and Forecast Analysis of the Demand of China and Europe International Route*[D]. Guanghan: China Civil Aviation Flight Academy, 2018.
- [14] 张颖, 张莉莉, 金笙. 基于分类分析的中国碳交易价格变化分析: 兼对林业碳汇造林的讨论[J]. 北京林业大学学报, 2019, **41**(2): 116 – 124.
ZHANG Ying, ZHANG Lili, JIN Sheng. Carbon trading price changes in China's carbon emission rights trading trials based on classification analysis: a discussion on forestry carbon sequestration afforestation [J]. *J Beijing For Univ*, 2019, **41**(2): 116 – 124.
- [15] 应里孟. 数据式审计常用的数据分析方法[J]. 中国农业会计, 2011(9): 14 – 15.
YING Limeng. Data analysis methods commonly used in data audit [J]. *Agric Acc China*, 2011(9): 14 – 15.
- [16] 陈丽荣, 曹玉昆, 朱震锋, 等. 企业购买林业碳汇指标意愿的影响因素分析[J]. 林业经济问题, 2016, **36**(3): 276 – 281.
CHEN Lirong, CAO Yukun, ZHU Zhenfeng, *et al.* Analysis of enterprises' intention and influence factors of forestry carbon sink purchase [J]. *Issues For Econ*, 2016, **36**(3): 276 – 281.