

基于水-土要素匹配视角的农业碳排放时空分异及影响因素 ——以长江经济带为例

王若梅¹, 马海良², 王锦³

(1. 河海大学商学院, 南京 211100; 2. 河海大学低碳经济研究所, 常州 213022;
3. 安徽财经大学国际经济贸易学院, 蚌埠 233030)

【摘要】长江经济带水稻和马铃薯等传统农产品的生产规模约占全国 50%以上, 其农业碳排放直接影响长江经济带生态优先和绿色发展战略的实施。运用系统的观点综合考虑水、土、能、碳的相互作用, 并以此为基础考察长江经济带农业碳排放的时空分异及影响因素。首先对长江经济带 2009—2016 年农业碳排放进行测算, 并计算水土匹配情况, 借助 Kaya 恒等式和完全分解方法 LMDI 加法形式, 探讨农业碳排放各影响因素的贡献值情况, 主要研究结果如下: ①2009—2016 年长江经济带整体农业碳排放呈阶段式上升趋势, 从 2009 年 1208.7398 万 t 上升为 2016 年 1407.2846 万 t, 增长率达到 16.43%, 其中 2016 年湖南、江苏、浙江和湖北农业碳排放占比合计达 59.32%; ②农业碳排放强度、农业水土资源因素和人均耕地面积对农业碳排放表现为抑制因素, 而农业水资源的经济产出和人口因素则表现为促成因素。③从分省市层面看, 各因素对农业碳排放的影响不尽相同: 农业水土资源因素, 对湖南、四川、贵州和云南起促进作用, 而对上海、江苏、浙江、安徽、江西和湖北起抑制作用; 且农业水土资源匹配度越高的省市区, 农业水土资源因素对农业碳排放的抑制效果相对越好。据此提出, 制定低碳农业发展策略, 要综合考虑与农业发展密切相关的水、土、能要素, 将农业低碳发展与节水节能、保护性开发利用耕地等相结合等建议。

【关键词】农业碳排放; 水土资源匹配度; 时空分异; LMDI 完全分解模型; 长江经济带

1 引言

近年来, 为应对全球性气候变化问题, 世界主要国家积极协商力求降低碳排放峰值, 但全球碳排放形势依旧严峻。波恩气候大会的《2017 全球碳预算报告》^[1]指出: 到 2017 年底, 全球化石燃料及工业二氧化碳排放总量预计将比上年增长 2%, 全球碳排总量有上升反弹趋势。全球能源治理的碎片化特征使得能源安全面临挑战, 全球碳减排任务艰巨, 作为能源消费大国和负责任的大国, 中国高度重视节能减排工作^[2]。2017 年 8 月出台的《“十三五”节能减排综合工作方案》^[3]要求各地区落实节能减排工作, 推动绿色循环低碳发展。长江经济带包括上海、江苏、云南等 11 个省(直辖市), 其中人口、经济总量均超过全国的 40%, 农林牧渔业总产值约占全国的 40%, 水稻和马铃薯等传统农产品的生产规模约占全国 50%以上^[4]。由于中国农业生产方式仍以分散经营的个体化为主, 农业用地零散分布, 农业机械使用低效, 导致农业生产能源消耗较多, 并带来大量温室气体排放, 使得农业碳排放成为碳排放总量控制的重要方面。据测算, 长江经济带农业碳排量占全国 36%左右^[4], 是农业碳排放控制需要关注的重点区域。更何况长江经济带生态优先、绿色发展是重要的发展战略选择。因此, 以长江经济带为研究区域, 针对其农业碳排放问题开展研究, 对促进农业低碳发展, 保护长江经济带生态环境, 实现绿色可持续发展具有重要意义。关于农业碳排放的研

收稿日期: 2018-09-27; 修订日期: 2019-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301620); 中央高校业务基金项目(2019B22814); 河海大学常州校区研究生科技创新项目(XZX/15B001-06)。

作者简介: 王若梅, 女, 安徽淮南市人, 博士生, 研究方向为资源经济。E-mail: wrmeihh@126.com

通讯作者: 马海良, 男, 江苏常州市人, 博士, 副教授, 主要从事水资源经济与环境规制研究。E-mail: hilima@vip.sina.com

究，研究主题从单一考虑生产作物的碳排放向农业生态系统的多要素研究方面发展，研究内容和研究对象逐渐丰富。就单纯考虑农业碳排放的规律来看，Chen 等^[5]通过对 2005—2013 年中国农业碳排放变化及影响因素进行研究，发现经济发展、农业碳排放强度等是影响农业碳排放的重要因素；吴金凤等^[6]使用文献综述法和系数法对宁夏盐池县和山东平度市县域尺度的农业碳排放进行核算，探讨不同农业经济发展水平下农业碳排放的差异。吴贤荣等^[7]采用 DEA-Malmquist 指数方法对省域层面农业碳排放效率进行测算，发现农业碳排放存在省域差异，且变化趋势明显。以此为基础，学者们进一步探讨农业活动中的多要素关联作用，对水、土地和能源等要素的系统研究逐渐丰富。Mohtar 等^[8]强调在系统理论指导下分析水-能-粮食复杂关系框架问题，能够促使人类社会和全球气候变化对水、能源和粮食个体系统施加的复合压力得以缓解。Vandone 等^[9]认为目前对水和水相关产品需求的不断增加，主要是由农业和能源需求驱动，并运用计量模型方法考察水行业股票价格对农业和能源价格变化的反应，发现水、农业和能源是相互关联的，政策制定应充分考虑水-粮食-能源关系。Li 等^[10]在系统观点下，提出和开发 AWEFSM 模型，用于支持农业水-能-粮食系统的可持续管理，并应用于黑河流域。Silalertruksa 等^[11]评估农业活动时，认为必须在关联研究框架下将与农业密切相关的土地-水-能源关系同时考虑在内，并借助生命周期方法，量化不同生产系统的土地、水和温室气体排放情况。

梳理文献发现，现有关于农业碳排放的研究缺乏运用系统的观点从水、土、能、碳的相互作用角度综合分析农业碳排放的影响机理。此外，从国家层面或省级层面进行的碳排放影响因素研究较多，但缺乏区域层面的研究，如城市群、经济带的碳排放时空分析。因此，为贯彻习近平总书记在深入推动长江经济带发展座谈会上的讲话精神，真正把长江经济带建设成为生态更优美、交通更顺畅、经济更协调的黄金经济带，本文以长江经济带为研究区域，综合考察水、土、能、碳多要素作用下的农业碳排放问题，从而推动区域农业低碳化发展，为实现长江经济带农业的绿色发展提供理论支持。

2 理论框架

农业生产活动是人类社会活动中直接消耗水资源、土地资源和能源的一项典型活动，水、土、能、碳四大要素分别为人类活动带来原料、场地、动力及影响^[12]。借鉴学者 Zhao 等^[13]观点，系统梳理水-土-能-碳关系，设计农业“Water-Land-Energy-Carbon (WLEC)”框架图（图 1），从而为下文构建水-土资源匹配度模型以及区域农业碳排放的测算提供理论支持。

根据图 1 可知，农业碳排放主要来源于农业生产活动中土地和水资源开发利用带来的直接和间接能源消耗。就农业水资源开发利用来看，通过抽水、供水、输送等环节，最终实现灌溉农田这一整个过程都离不开能源消耗，如农田灌溉需要使用农用水泵、喷灌设备等相应设备，这类灌溉设备需要以柴油、汽油等化石燃料或电机为动力，因而会产生相应的碳排放。就农业土地开发利用来看，通过土地平整、耕作、除草等环节，最终实现农作物收割整个过程同样需要消耗能源。如农作物收割需要使用农用收割机、割捆机和谷物脱粒机等，这类收割机械大多需要燃烧柴油、汽油等化石燃料，因而农作物收割过程会产生相应的碳排放。农业机械设备的发明和使用推动了农业的发展，改变了农业生产活动中土地和水资源的开发利用方式，但其使用伴随着柴油、汽油等化石燃料和电力消耗，由此产生的碳排放问题需要引起重视。因此，必须综合考虑水资源、土地资源和能源等多因素，推动农业低碳化发展，减轻碳排放对生态环境的压力。

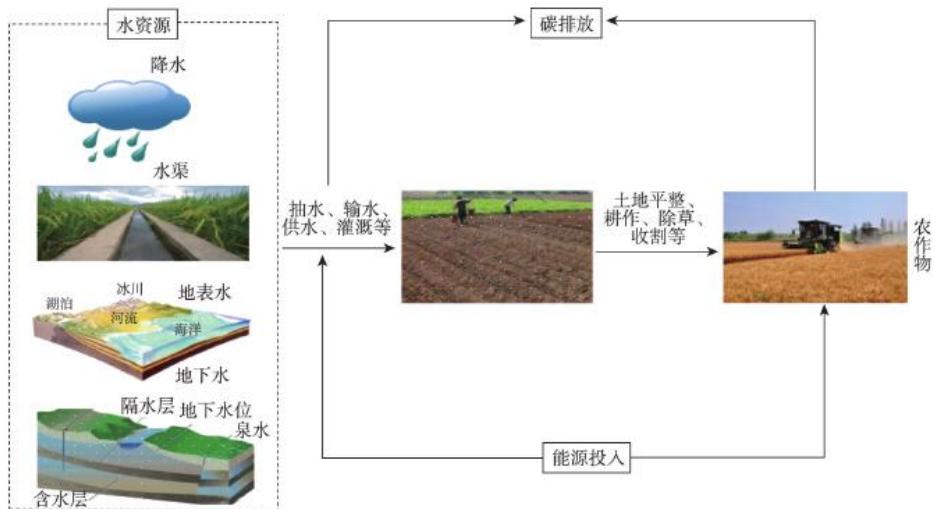


图1 农业水-土-能-碳关系(WLEC)框架图(根据Zhao等^[13]的设计绘制)

Figure 1 Agricultural water-land-energy-carbon (WLEC) relationship framework

3 模型构建和数据来源

3.1 碳排放测算模型

农业碳排放的测算采用国际气候变化专门委员会（IPCC）2006年国家温室气体清单指南^[14]提出的碳排放测算方法，采用农业生产活动中化石燃料使用产生的碳排放量进行估算。基于《中国能源统计年鉴》^[15]中能源平衡表关于农业活动各种类型能源消耗量的统计数据，同时考虑各地区不同类型农业能源消费数据存在缺失，且无法直接获得农业生产活动中的间接能源数据，因此本文仅考虑农业生产活动中能源使用产生的直接碳排放量。综上，基于前人研究^[16]和《中国能源统计年鉴》^[15]提供的能源折算标准煤系数及碳排放系数（表1），选取2009—2016年分地区原煤、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气6个能源品种进行估算，公式如下：

$$C_i = \sum_{j=1}^6 E_{ij} \times t_j \times c_j \quad (j=1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

式中： C_i 表示*i*地区碳排放量（104t）； j 表示能源类型，即化石燃料种类，包括原煤、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气共6种能源； E_{ij} 表示*i*地区某年份*j*类型能源的消费量（104t, 108m³）； t_j 表示*j*类型能源对应的能源折算标准煤系数(kgce/kg, kgce/m³)； c_j 表示*j*类型能源对应的碳排放系数(tC/tce)。

3.2 水-土资源匹配度模型

水-土资源匹配度模型常被用于评价区域农业生产活动中所需要的水资源和土地资源的匹配程度。一般来说，区域水资源与耕地资源分布的一致性与量比水平越高，其匹配度越高，农业生产的基础条件相对优越^[17]。运用水-土资源匹配度模型分析长江经济带及其各省市层面水资源和土地资源的匹配情况，能更详细地反映其水-土资源匹配的时空分布状态。长江经济带各省市水-土资源匹配度计算公式如下：

$$R_i = \frac{W_i \times a_i}{L_i} \quad (2)$$

式中: R_i 表示长江经济带 i 省市水-土资源匹配度; W_i 表示 i 省市水资源总量 ($10^6 m^3$); a_i 表示 i 省市农业用水比例; L_i 表示 i 省市耕地面积 (km^2)。

表1 能源折算标准煤系数及碳排放系数

Table 1 Energy conversion standard coal coefficient
and carbon emission coefficient

能源类型	折算标准煤系数($kgce/kg$ 或 $kgce/m^3$)	碳排放系数(tC/tce)
原煤	0.7143	0.7142
汽油	1.4714	0.5474
煤油	1.4714	0.5474
柴油	1.4571	0.5474
燃料油	1.4286	0.5474
天然气	1.2150	0.4214

3.3 碳排放影响因素及分解模型

目前关于碳排放影响因素的研究较为丰富, 最早由学者 Yoichi^[18]提出 Kaya 恒等式, 将碳排放总量分解为 4 个因素的乘积, 分别是人口、人均 GDP、能源强度和碳强度。基于前人对碳排放及其影响因素的研究经验^[19, 20], 将水土因素加入 Kaya 恒等式, 探讨水-土资源因素对农业碳排放的影响, 构建农业碳排放影响因素模型, 公式如下:

$$C = \frac{C}{G} \times \frac{G}{W} \times \frac{W}{L} \times \frac{L}{P} \times P \quad (3)$$

式中: C 表示区域农业碳排放总量 ($10^4 t$); G 表示区域农业增加值 ($10^8 元$); W 表示区域农业用水量 ($10^8 m^3$); L 表示区域农业耕地面积 ($千 hm^2$); P 表示区域年末人口 ($万人$)。

令 $i = \frac{C}{G}$, $g = \frac{G}{W}$, $w = \frac{W}{L}$, $l = \frac{L}{P}$, 将区域农业碳排放量分解为 5 个因素的乘积, 公式如下:

$$C = i \times g \times w \times l \times p \quad (4)$$

式中: i 表示农业碳排放强度; g 表示农业水资源的经济产出; w 表示单位耕地面积的农业用水量 (农业水土资源因素); l 表示人均耕地面积; p 表示人口数量。总体上各因素对碳排放的影响如下: 一般而言, 伴随经济发展, 农业碳排放强度呈下降趋势, 农业碳排放的增速低于农业经济发展增速, 对碳排放起抑制作用; 水资源的农业经济产出增多, 一般农作物种植面积会扩大, 水资源、能源等投入增多, 会促进碳排放增加; 随着经济社会的发展, 采用节水技术, 可降低单位耕地的农业用水量, 水

资源开发利用的能源需求会减少，农业水土资源因素会对碳排放起抑制作用。伴随城市化快速推进，土地资源减少，人均耕地面积下降，农业能源需求会降低，可抑制农业碳排放；人口的快速增长，带来水资源短缺，用于资源开发利用的能源消耗增多，人口因素会对碳排放起促进作用。

指数分解方法（IDA）被广泛应用于区域能源消费和碳排放影响因素分析，国内外学者对 IDA 方法的发展和应用进行了总结和比较^[21, 22]。可以发现，LMDI 方法是一种完全分解方法，且实际操作方便，被广泛应用于分析区域和国家层面的碳排放影响因素^[23, 24]。根据 kaya 恒等式和式（3）、式（4），可以用加法分解形式计算碳排放各影响因素的贡献值，加法分解公式如下：

$$\begin{aligned} \Delta C &= C^T - C^0 = \Delta C_i + \Delta C_g + \Delta C_w \\ &\quad + \Delta C_l + \Delta C_p + \Delta C_{rsd} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta C_i &= \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} \times \ln \frac{l^T}{l^0}; \Delta C_g = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} \times \ln \frac{g^T}{g^0}; \\ \Delta C_w &= \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} \times \ln \frac{w^T}{w^0}; \Delta C_l = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} \times \ln \frac{l^T}{l^0}; \\ \Delta C_p &= \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} \times \ln \frac{p^T}{p^0}; \Delta C_{rsd} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中：C₀ 表示基期农业碳排放量；C_T 表示报告期 T 时期农业碳排放量；ΔC 表示从基期到报告期 T 时期的农业碳排放总变化量；ΔC_i、ΔC_g、ΔC_w、ΔC_l、ΔC_p 分别表示农业碳排放强度 i、农业水资源的经济产出 g、单位耕地面积的农业用水量 w、人均耕地面积 l 和人口数量 p 对农业碳排放总变化量 ΔC 的贡献值；ΔC_{rsd} 表示分解因素后的残余项。

3.4 数据来源

本文选取长江经济带作为研究区域，以 2009—2016 年作为研究区段，测算农业碳排放时采用的能源折算标准煤系数、能源平衡表中农业活动各种类型能源消耗量等数据来源于《中国能源统计年鉴》^[15]，由于自 2013 年起重庆农业能源消费的相关统计数据出现较大波动，考虑到研究结果的稳定性，在测算和分析长江经济带农业碳排放时将重庆剔除；计算长江经济带农业水-土资源配置度时采用的水资源总量、农业用水量、用水总量、耕地面积等数据来源于《中国统计年鉴》^[25]；对长江经济带农业碳排放影响因素分解时采用的农业增加值、人口等数据来源于《中国统计年鉴》^[25]。

4 长江经济带水-土匹配情况分析

根据 2009—2016 年长江经济带各省市耕地面积及全国耕地面积相关数据，计算可得 2009—2016 年长江经济带的平均耕地面积为 450792.75km²，与全国平均耕地面积（1351487.75km²）相比，占比为 33.36%；长江经济带的农业发展基础良好，是中国重要的粮食产地，其农业发展关乎中国粮食安全。

根据农业 WLEC 框架，水、土地资源的开发利用会对农业碳排放产生重要影响。因此，有必要进一步分析长江经济带各省市水土匹配情况。基于 2009—2016 年长江经济带水资源、农业用水比例、耕地面积等数据，根据式（2）计算长江经济带 2009—2016 年水土资源匹配度（表 2）。从长江经济带整体来看，2016 年长江经济带的农业水土资源匹配度数值最高，为 1.7788（106m³/km²）；而 2011 年最低，为 1.1233（106m³/km²），整体呈现波动上升趋势。从长江经济带各省（直辖市）来看，农业水土资源匹配度数值差异明显，其中江西最高，浙江和湖南紧随其后，上海最低。长江经济带各省市拥有的水资源和耕地面积决定

其农业水土资源匹配度的空间差异。西部地区一些省市农业水土资源匹配度数值也相对较高，如四川和云南，其耕地面积虽然较大，但其水资源总量相对丰富，且农业灌溉需求大，使得农业水土资源匹配度也相对较高。

表2 2009—2016年长江经济带水-土资源匹配度情况

Table 2 Matching degree of water and land (MDWL) in the Yangtze River Economic Belt, 2009-2016 ($10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
上海	0.2935	0.2595	0.1461	0.2710	0.1968	0.3446	0.4653	0.4426
江苏	0.4742	0.4598	0.5936	0.4502	0.3240	0.4397	0.6181	0.7609
浙江	2.3060	3.2863	1.7434	3.3633	2.1824	2.6196	3.2367	2.9973
安徽	0.7233	0.8903	0.5847	0.6431	0.5450	0.6959	0.8491	1.1578
江西	2.4616	4.6462	2.1978	4.5257	3.0600	3.4391	4.0699	4.5281
湖北	0.8233	1.1468	0.6851	0.7528	0.8183	0.9455	1.0141	1.3874
湖南	1.9885	2.6329	1.5276	2.7421	2.2388	2.6119	2.7322	3.1265
重庆	0.4169	0.4365	0.5715	0.5906	0.5654	0.7723	0.6130	0.8354
四川	1.9202	2.1179	1.8291	2.5470	2.1089	2.3310	1.9469	2.0278
贵州	1.0094	1.0334	0.7111	1.0132	0.8756	1.4127	1.4161	1.3233
云南	1.7115	2.0110	1.5543	1.8549	1.8818	1.9231	2.1011	2.3568
长江经济带	1.2767	1.6286	1.1233	1.5941	1.3080	1.5238	1.5955	1.7788

5 长江经济带农业碳排放情况及影响因素分析

5.1 长江经济带农业碳排放情况分析

5.1.1 长江经济带整体农业碳排放测算及时序变化

根据式(1)，测算2009—2016年长江经济带各省市及整体的农业碳排放量(表3)。2009年长江经济带农业碳排放量为 $1208.7398 \times 104\text{t}$ ，2016年为 $1407.2846 \times 104\text{t}$ ，2015年达到最高，为 $1437.4032 \times 104\text{t}$ 。基于农业碳排放测算结果，为直观分析长江经济带农业碳排放的时序变化，绘制图2。可以看出，2009—2016年长江经济带农业碳排放总体上呈现阶段式上升走势，仅在2012到2013年出现略微下降，2015年到2016年出现下降趋势。2013年呈下降走势的主要原因为：经过2012年农业粗放式增长，2013年政府更加高度重视《“十二五”节能减排综合性工作方案》[26]的落实，加强农业和农村节能减排力度，淘汰老旧农用机具，推广农用节能机械设备，发展节水农业，使得2013年农业碳排放得以下降；2015年长江经济带农业碳排放出现峰值后2016年又有所下降的主要原因为：《2014—2015年节能减排低碳发展行动方案》[27]实施，要求确保全面完成“十二五”节能减排降碳目标，对农村、农业面源污染防治力度加强，实施有机肥替代化肥，减少化肥、农药等使用，提高农田水利化程度，农业节能减排力度加大，使得2016年农业碳排放开始出现下降。

表3 2009—2016年长江经济带各省市农业碳排放总量及分省情况

Table 3 Total and provincial agricultural carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt, 2009-2016 (10⁴ t)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
上海	24.1105	24.8596	25.4632	26.7494	28.4071	27.2042	26.4290	25.9675
江苏	160.8368	183.3240	200.1078	226.6756	175.1711	184.7212	205.7262	201.4956
浙江	161.8361	173.6265	177.6728	180.8789	185.5606	187.0194	190.7356	192.6016
安徽	88.2056	91.4322	98.7334	98.7212	106.9616	107.3732	100.9628	107.0222
江西	51.1971	55.6337	55.1314	50.4753	52.8759	61.3779	56.3126	58.9359
湖北	196.9057	185.2817	218.8486	228.1117	231.9927	241.4533	238.2608	190.3076
湖南	186.9928	179.4227	203.2128	219.4933	234.3851	233.5892	242.7312	250.4563
四川	122.1268	119.7062	116.9934	135.7664	140.1304	139.5349	136.5577	125.0845
贵州	86.1664	74.0387	59.3640	68.2037	80.7622	87.9281	92.5454	122.1312
云南	130.3619	132.1439	120.2034	122.3277	120.5847	130.2608	147.1418	133.2822
长江经济带	1208.7398	1219.4692	1275.7309	1357.4032	1356.8314	1400.4623	1437.4032	1407.2846

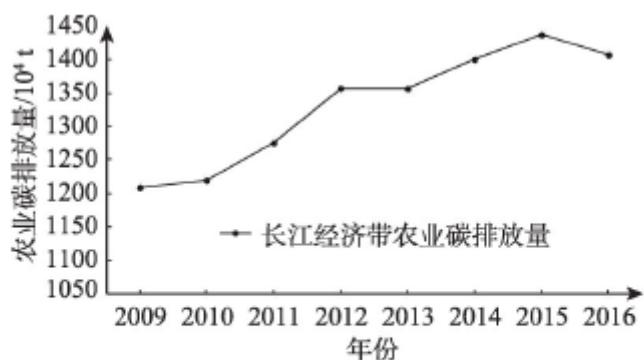


图2 2009—2016年长江经济带农业碳排放总量趋势

Figure 2 Trends of total agricultural carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt, 2009-2016

综上，农业节水、节能及节肥等方面政策方案对农业碳排放降低具有重要引导作用。当然，农业碳排放的变化是由多因素联合作用的结果。

5.1.2 长江经济带省际农业碳排放情况分析

2009—2016年期间，长江经济带分省市农业碳排放存在省际差异（图3）。首先，就各省农业碳排放对整个长江经济带的影响来看，湖南、江苏、浙江、湖北这4个省份的农业碳排放量较多，分别占整个长江经济带的17.80%、14.32%、13.69%、13.52%，共计59.32%，对长江经济带农业碳排放控制的影响较大。这4个省份农业生产相对发达，年粮食产量占比高，使得其农业碳排放高。上海农业碳排放量占整个长江经济带的比重最小，占比仅为1.85%。其次，从2009—2016年长江经济带各省市农业碳排放变化来看，总体上，湖南、贵州、浙江、江苏和安徽的农业碳排放上升趋势明显，湖北农业碳排放下降趋势显现，上海、江西、四川和云南总体保持平稳上升态势。综上，在对长江经济带各省市2009—2016年农业碳排放总体呈上升趋势，在碳排放增速没有明显下降的背景下，各省市农业碳减排工作仍需进一步加强。

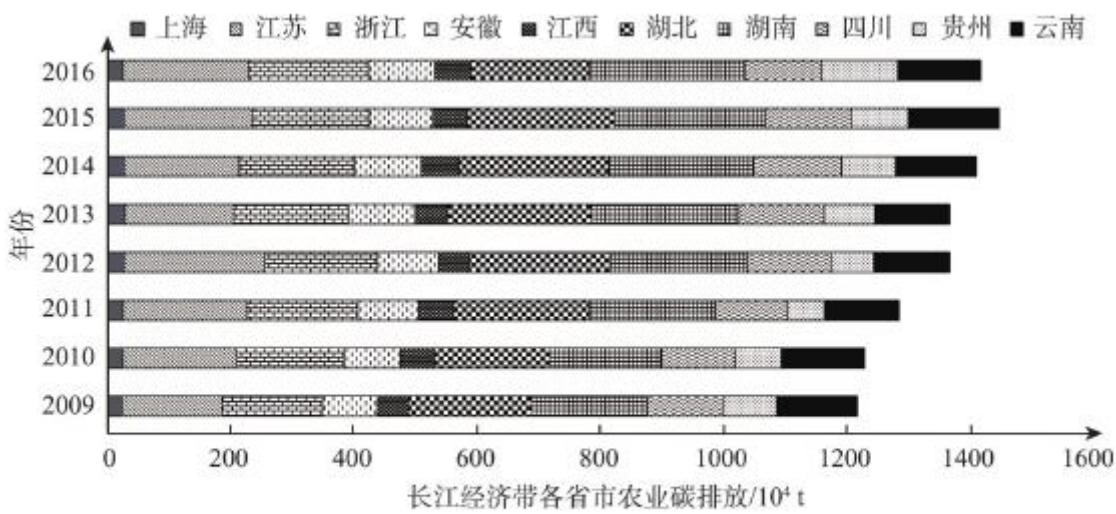


图3 2009—2016年长江经济带各省市农业碳排放情况

Figure 3 Provincial agricultural carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt, 2009-2016

5.1.3 长江经济带水-土资源利用的农业碳排放强度分析

基于上述长江经济带各省市农业碳排放测算结果,为更详细地分析水-土资源对农业碳排放的影响,分别计算2009年和2016年各省市农业水资源利用的碳排放强度和农业土地利用的碳排放强度(图4)。由图4可以发现:

第一,长江经济带整体水资源利用的碳排放强度从2009年的 $89.1934 \text{ t}/106\text{m}^3$ 上升到2016的 $106.9958\text{t}/106\text{m}^3$,上升幅度较大;土地利用的碳排放强度从2009年的 $28.3277 \text{ t}/\text{km}^2$ 上升到2016的 $32.2457 \text{ t}/\text{km}^2$,保持相对平稳态势。长江经济带农业水、土地资源利用的碳排放强度总体呈上升趋势,水资源利用的碳排放强度上升幅度高于土地资源。

第二,长江经济带各省市农业土地资源利用的碳排放强度变化不大,部分省市如上海、江苏、浙江、湖南及贵州等呈上升趋势;而各省市水资源利用的碳排放强度变化较为明显,大多数呈上升趋势,如贵州、浙江、上海、湖南、江苏、安徽等,四川呈小幅下降趋势。

第三,长江经济带各省市土地利用的碳排放强度和水资源利用的碳排放强度并不保持一致,各省市土地利用和水资源利用两者的碳排放强度不相匹配。一半以上省市土地利用的碳排放强度相对较低,而其水资源利用的碳排放强度相对较高,如贵州、云南和湖北等。结合表3和图4,2016年上海农业碳排放相对较低,为 25.9675 万 t ,但由于其耕地面积少(为 1907 km^2),使得上海农业土地利用的碳排放强度最高。2016年浙江农业碳排放较高,为 192.6016 万 t ,仅次于湖南、江苏,且其水资源总量为 1323.3 亿 m^3 ,使得浙江农业水资源利用的碳排放强度也较高。

5.2 长江经济带农业碳排放影响因素分析

5.2.1 长江经济带整体农业碳排放影响因素分析

为详细分析区域农业碳排放的影响因素,基于长江经济带农业碳排放测算结果,根据式(3)、(4)、(5)和(6),对其影响因素进行分解并计算各因素对农业碳排放的贡献值大小(表4)。根据2009—2016年长江经济带农业碳排放影响因素分解结果,

对各因素对农业碳排放增长的贡献程度进行排序为：农业水资源经济产出>人口数量>单位耕地面积的农业用水>人均耕地面积>农业碳排放强度。具体分析如下：

第一，针对各影响因素对长江经济带整体农业碳排放的贡献值来看，农业碳排放强度、农业水土资源因素和人均耕地面积贡献值均为负，这3个因素是对农业碳排放产生抑制作用的因素；农业水资源的经济产出和人口因素的贡献值均为正，这两个因素是对农业碳排放变化产生促进作用的因素。

第二，人口的增长会从不同角度对长江经济带农业碳排放产生相反的作用。一方面，人口因素是促进因素，伴随经济发展和人口增长，水资源短缺加重，并导致能源消耗增加，由此产生较多的碳排放；另一方面，与人口相关的另一因素——人均耕地面积则表现为抑制作用。人口增长将导致人均耕地面积减少，进而减少农业能源需求，人均耕地面积对农业碳排放起抑制作用。

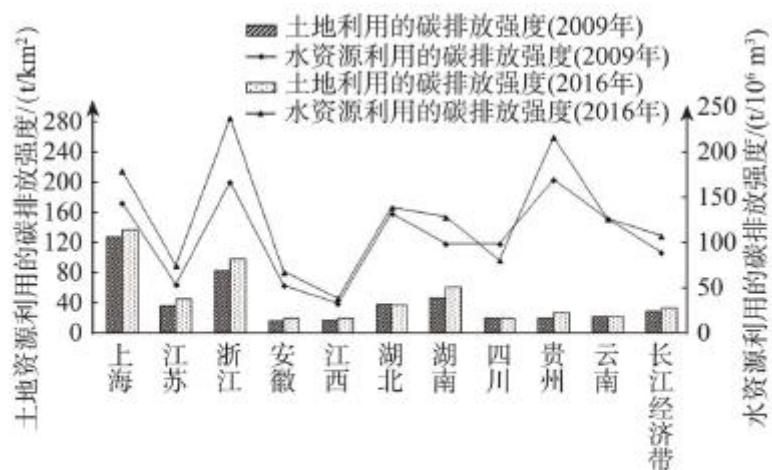


图4 2009年和2016年长江经济带各省市水/土地资源利用的农业碳排放强度

表4 长江经济带农业碳排放变化及影响因素分解

Table 4 Change and impact factor decomposition of agricultural carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt (10⁴ t)

年份	碳排放贡献值					
	ΔC	ΔC_i	ΔC_g	ΔC_w	ΔC_r	ΔC_p
2009—2010	10.7294	-92.5900	126.0444	-24.2491	-2.5846	4.1088
2010—2011	56.2617	-268.6245	300.9216	24.7065	-5.4739	4.7321
2011—2012	81.6723	-50.7264	129.0541	4.4425	-6.7912	5.6934
2012—2013	-0.5718	-95.1455	61.2507	33.6412	-7.3197	7.0016
2013—2014	43.6309	-38.0369	106.5908	-22.8658	-8.1383	6.0812
2014—2015	36.9409	-54.2658	101.1349	-9.6784	-8.3405	8.0906
2015—2016	-30.1186	-128.4191	129.9518	-30.6589	-9.6653	8.6729
2009—2016	198.5449	-671.6192	895.9355	-22.1500	-46.5386	42.9172

第三，观察各因素2009—2016年变化情况，可以发现，农业水土资源因素对长江经济带农业碳排放的贡献存在正负方向变动。就农业水土资源因素而言，其贡献值在2009—2010年为负值，2010—2013年均为正值，2013—2016年均表现为负值。

这说明农业水土资源因素在 2009—2010 年是抑制因素，而在 2010—2013 年则是促进因素，2013—2016 年又变为抑制因素。农业水土资源因素作用的正负方向变动促使农业低碳化发展必须综合考虑水、土资源利用。

5.2.2 长江经济带省际农业碳排放影响因素分析

为进一步详细分析影响长江经济带各省市农业碳排放的驱动因素，对各省市农业碳排放影响因素的贡献值进行计算（表 5）。根据表 4 和表 5，观察 2009 年和 2016 年长江经济带各省市农业碳排放影响因素分解结果可以发现，不同省市之间各影响因素的贡献值差异显著，不仅表现在其贡献值的数值大小存在差异，更表现在各影响因素对农业碳排放的正负向作用上，具体分析如下：

第一，针对农业碳排放强度因素进行分析，长江经济带各省市农业碳排放强度因素 ΔC_i 对农业碳排放的影响各不相同。除上海外，其余省市农业碳排放强度因素对农业碳排放的贡献值为负，起抑制作用；上海农业碳排放强度因素贡献值为 1.9341 万 t，表现为促进作用。这与其自身耕地面积小且人口密度大有关，在少量耕地上要获得较多农业产出，需要投入大量机械设备和农用化学品等，农业碳排放强度增速超过农业经济发展增速，从而使农业碳排放增加。

第二，针对农业水土资源因素进行分析，长江经济带各省市农业水土资源因素 ΔC_w 对农业碳排放起到的作用不尽相同。上海、江苏、浙江、安徽、江西和湖北农业水土资源因素对农业碳排放的贡献值为负，起抑制作用；其余省市为正。如四川农业水土资源因素贡献值为 28.4184 万 t，与其地形特征和气候类型复杂，干旱等灾害风险大相关，农业灌溉需求高，需要投入更多农机设备和能源，促使农业碳排放增加。

第三，分析其他影响因素对长江经济带各省市农业碳排放的作用，首先，人口因素 ΔC_p 和农业水资源的经济产出因素 ΔC_g 对各省市的贡献值均为正，对农业碳排放起促进作用，但各省市贡献值差距较大。其中，湖北农业水资源的经济产出因素贡献值对整个长江经济带该因素的贡献程度最大（160.9251 万 t），湖南人口因素对整个长江经济带人口因素贡献值的贡献程度最大（13.6645 万 t）。其次，人均耕地面积因素 ΔC_l 对各省市的贡献值均为负，为抑制农业碳排放的因素，如湖南人均耕地面积因素的贡献值为 -12.9462 万 t，其人口增长较快，城市化快速推进及资源制约加剧，使得人均耕地面积下降较多，对农业能源需求减少，抑制农业碳排放。

表 5 长江经济带各省份市农业碳排放影响因素分解

Table 5 Impact factor decomposition of agricultural carbon emissions in various provinces of the Yangtze River Economic Belt (10⁴ t)

省份	碳排放		贡献值					
	2009	2016	$\Delta C'$	ΔC_r	ΔC_w	ΔC_u	ΔC_l	ΔC_p
上海	24.1105	25.9675	1.8570	1.9341	3.5779	-3.7734	-2.1535	2.2719
江苏	160.8368	201.4956	40.6588	-76.2217	135.4263	-16.9273	-5.9322	4.3137
浙江	161.8361	192.6016	30.7655	-65.0790	128.2195	-31.3040	-11.2904	10.2194
安徽	88.2056	107.0222	18.8166	-38.4313	62.3981	-6.1588	-0.0177	1.0262
江西	51.1971	58.9359	7.7388	-24.1499	32.9516	-0.9399	-2.0726	1.9497
湖北	196.9057	190.3076	-6.5981	-150.7106	160.9251	-13.9659	-8.3519	5.5052
湖南	186.9928	250.4563	63.4635	-74.9749	131.8267	5.8934	-12.9462	13.6645
四川	122.1268	125.0845	2.9577	-68.8414	43.1437	28.4184	-0.9203	1.1573
贵州	86.1664	122.1312	35.9647	-94.1811	119.3638	11.5146	-1.2559	0.5234
云南	130.3619	133.2822	2.9203	-94.8947	95.6165	2.9628	-6.4092	5.6449

5.2.3 长江经济带水土资源与农业碳排放关系讨论

2009—2016 年长江经济带各省市农业碳排放影响因素的测算结果表明，农业碳排放影响因素分解得出的农业水土资源因素对农业碳排放的贡献不是仅表现为单一方向作用，而且还表现为促进效应和抑制效应，即水土资源因素对不同省市农业碳排放量的贡献起到增加或减少两种不同作用。在一些沿海省市如上海、江苏、浙江及中部的安徽、江西和湖北等 6 个省市，农业水土资源因素对农业碳排放起抑制作用；而对湖南、四川、贵州和云南 4 省，农业水土资源因素对农业碳排放起促进作用。

根据表 2、表 4 和表 5 的结果，可以发现水土资源因素对农业碳排放影响的空间差异性与各省市的水-土资源匹配度情况存在密切关系。一方面，水土资源因素对东部沿海和中部一些省市农业碳排放是抑制因素，且水土资源匹配度相对较高的浙江、湖北等东中部的省份，水土资源因素对农业碳排放的抑制效果相对较好。这些省份的农业生产条件较好，不需要过多的能源用于水土资源开发利用，如抽水、灌溉、平整土地等，且资源配置效率相对较高，因此农业活动消耗的能源相对较少，对农业碳排放主要起抑制作用。另一方面，在湖南、四川、贵州和云南等中西部内陆省份，由于干旱灾害风险和频率相对较高，农业灌溉用水需求较高，农业活动需要更多的能源消耗才能达到相应的农业条件，由此产生较多的碳排放，因此使得水土资源因素对其农业碳排放的贡献值为正。此外，农业水土资源因素受农作物结构和农业用水效率的影响，如冬小麦生产带来的农业碳排放远大于夏玉米[28]；在气候相对干旱的地区，喷灌方式能更有效地降低用水，从而降低水土资源因素对农业碳排放的促进作用 [13]。

6 结论及建议

6.1 结论

基于农业 WLEC 框架，结合区域水-土资源匹配度模型，在考虑水-土-能-碳关联的前提下，将水-土因素引入 Kaya 恒等式，构建农业碳排放影响因素分解模型，分别从农业碳排放强度 i 、农业水资源的经济产出 g 、单位耕地面积的农业用水 w 、人均耕地面积 l 和人口数量 p 等对长江经济带农业碳排放的影响进行详细讨论，为其“生态优先、绿色发展”建设提供参考。综上所述，具体结论如下：

(1) 整体上，长江经济带农业碳排放量从 2009 年 1208.7398 万 t 增长到 2016 年 1407.2846 万 t，增长率达到 16.43%，期间呈现阶段式上升态势；从分省层面看，长江经济带各省市的农业碳排放差异显著，其中 2016 年湖南、江苏、浙江和湖北 4 个省份的农业碳排放量较多，合计占比为 59.32%，是农业碳减排需重点关注的省份。

(2) 针对长江经济带整体而言，农业碳排放强度、农业水土资源因素、人均耕地面积等是对农业碳排放起抑制作用的因素；农业水资源的经济产出和人口因素是对农业碳排放产生促进作用的因素。从分省层面看，各影响因素对长江经济带各省市农业碳排放的影响不尽相同。其中，农业水土资源因素对上海、江苏、浙江、安徽、江西和湖北农业碳排放起抑制作用，而对湖南、四川、贵州和云南省则起促进作用。除上海外，农业碳排放强度因素对长江经济带其他省市农业碳排放起抑制作用；农业水资源的经济产出和人口因素对长江经济带所有省市起促进作用，人均耕地面积因素对所有省市起抑制作用。

(3) 2009—2016 年长江经济带各省市农业水土资源匹配度存在明显省际差异，部分省份如江西、安徽等农业水土资源匹配度存在较大时序变化，其余大多数省份保持稳定态势。相比农业水土资源匹配度低的省份，农业水土资源匹配度高的省份，农业水土资源因素对农业碳排放的抑制效果更好，如湖北和安徽的水土资源匹配度分别为 1.3874 和 1.1578；农业水土资源因素对农业碳排放的贡献值分别为 -13.9659 万 t 和 -6.1588 万 t，需要重视改进农业灌溉方式，合理选择农作物种植类型，减少能源消耗，提高农业水资源利用效率，进而减少农业碳排放。

6.2 建议

基于对 2009—2016 年长江经济带农业碳排放测算及影响因素分析，探讨了水-土资源关系对农业碳排放的作用，为减少农

业碳排放，将长江经济带建设成为生态更优美、交通更顺畅、经济更协调的黄金经济带，推动长江经济带生态优先、绿色发展战略实施，提出相应建议：

第一，针对长江经济带整体，需要建立健全农业水土资源综合评价指标体系，优化区域水土开发利用，实现水土匹配并保持稳定状态，为农业低碳绿色发展提供新路径。重视区域水、土要素对农业碳排放的影响，在确保长江经济带发挥好对全国粮食安全保障作用基础上，发展节水农作物种植，降低高耗水农作物的种植面积，保护性开发利用耕地，实现各省市水土匹配度优化，为长江经济带绿色低碳农业发展提供更好的条件。

第二，针对长江经济带各省市，首先，应重视农业水土资源因素对农业碳排放贡献呈现的双向作用，通过改进农业水资源利用方式和技术，减少水土资源因素对这些省市农业碳排放的促进作用。关于农业水土资源因素对碳排放贡献为正向促进作用的湖南、四川、贵州和云南 4 省，建议通过采用喷灌等节水节能的灌溉方式，降低农业用水和能源消耗，从水土资源视角为农业碳减排提供合理化策略。其次，针对农业水资源的经济产出因素，江苏、浙江、湖北和湖南需要优化农业用水效率，努力提高农业水资源的经济产出效率和质量，减少农业水资源的经济产出带来的促进作用，降低农业碳排放；同时，针对人口因素，要合理引导区域人口增长和流动，尤其是浙江和湖南要合理控制人口数量，缓解人口增长带来的水资源短缺和土地资源紧张问题，减少对农业碳排放的促进作用，助力农业绿色低碳发展。

参考文献(References)：

- [1] Le Quéré C, Andrew R M, Friedlingstein P, et al. Global carbonbudget 2017[J]. Earth System Science Data, 2018, 10: 405–448.
- [2] 王礼茂, 屈秋实, 牟初夫, 等. 中国参与全球能源治理的总体思路与路径选择[J]. 资源科学, 2019, 41(5): 825–833. [Wang L M, Qu Q S, Mou C F, et al. Strategic considerations and path selection for China's participation in global energy governance[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 825–833.]
- [3] 国务院 . “十三五”节能减排综合工作方案 [EB/OL]. (2017-01-05) [2018- 09- 27]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm. [The State Council. The Comprehensive Work Plan on Energy Conservation and Emissions Reduction for the 13th Five- Year Plan Period[EB/OL]. (2017- 01- 05) [2018-09-27]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm.]
- [4] 吴传清, 宋子逸. 长江经济带农业绿色发展报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2018. [Wu C Q, Song Z Y. Report on Agricultural Green Development in the Yangtze Economic Belt[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2018.]
- [5] Chen J D, Cheng S L, Song M L. Changes in energy-related carbon dioxide emissions of the agricultural sector in China from 2005 to 2013[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94: 748–761.
- [6] 吴金凤, 王秀红. 不同农业经济发展水平下的碳排放对比分析: 以盐池县和平度市为例[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1909–1917. [Wu J F, Wang X H. Comparative analysis of agricultural carbon emissions at different agricultural economic development levels in Yanchi County and Pingdu City[J]. Resources Science, 2017, 39(10): 1909–1917.]
- [7] 吴贤荣, 张俊飚, 田云, 等. 中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究: 基于 DEA-Malmquist 指数分解方法

与 Tobit 模型运用 [J]. 资源科学, 2014, 36(1): 129–138. [Wu X R, Zhang J B, Tian Y, et al. Provincial agricultural carbon emissions in China: Calculation, performance change and influencing factors[J]. Resources Science, 2014, 36(1): 129–138.]

[8] Mohtar R H, Lawford R. Present and future of the water-energy food nexus and the role of the community of practice[J]. Journal of Environmental Studies and Sciences, 2016, 6(1): 192–199.

[9] Vandone D, Peri M, Baldi L. The impact of energy and agriculture prices on the stock performance of the water industry[J]. Water Resources & Economics, 2018, 23: 14–27.

[10] Li M, Fu Q, Singh V P, et al. An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty [J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 1416–1434.

[11] Silalertruksa T, Gheewala S H. Land-water-energy nexus of sugarcane production in Thailand[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 182: 521–528.

[12] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水-土-能-碳”耦合作用机制分析[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1613–1628. [Zhao R Q, Li Z P, Han Y P, et al. The coupling interaction mechanism of regional water- land- energy- carbon system[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1613–1628.]

[13] Zhao R Q, Liu Y, Tian M M, et al. Impacts of water and land resources exploitation on agricultural carbon emissions: The waterland-energy-carbon nexus[J]. Land Use Policy, 2018, 72: 480–492.

[14] Eggleston H S, Buendia L, Miwa T, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

[15] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010–2017. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Energy Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2010–2017.]

[16] 蒋金荷. 中国碳排放量测算及影响因素分析[J]. 资源科学, 2011, 33(4): 597–604. [Jiang J H. An evaluation and decomposition analysis of carbon emissions in China[J]. Resources Science, 2011, 33(4): 597–604.]

[17] 刘彦随, 甘红, 张富刚. 中国东北地区农业水土资源匹配格局[J]. 地理学报, 2006, 61(8): 847–854. [Liu Y S, Gan H, Zhang F G. Analysis of the matching patterns of land and water resources in Northeast China[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(8): 847–854.]

[18] Yoichi K. Impact of Carbon Dioxide Emission on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios[R]. Paris: Presentation to the Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, 1989.

[19] 黎孔清, 陈俭军, 马豆豆. 基于 STIRPAT 和 GM(1, 1)模型的湖南省农地投入碳排放增长机理及趋势预测[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2): 345–352. [Li K Q, Chen J J, Ma D D. Growthmechanism and trend forecast of carbon emission from farmlandinputs in Hunan province based on Stirpat and GM (1, 1) model[J]. Resources and Environment in the

Yangtze Basin, 2018, 27(2):345–352.]

- [20] 魏玮, 文长存, 崔琦, 等. 农业技术进步对农业能源使用与碳排放的影响: 基于 GTAP-E 模型分析[J]. 农业技术经济, 2018, (2):30–40. [Wei W, Wen C C, Cui Q, et al. The impacts of technological advance on agricultural energy use and carbon emission: Ananalysis based on GTAP- E model[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2018, (2): 30–40.]
- [21] 程郁泰, 张纳军. 碳排放 IDA 模型的算法比较及应用研究[J]. 统计与信息论坛, 2017, 32(5): 10–17. [Cheng Y T, Zhang N J. Algorithm comparison and application of carbon emission IDA model[J]. Statistics & Information Forum, 2017, 32(5): 10–17.]
- [22] Ang B W. LMDI decomposition approach: A guide for implementation[J]. Energy Policy, 2015, 86: 233–238.
- [23] Li J X, Chen Y N, Li Z, et al. Quantitative analysis of the impactfactors of conventional energy carbon emissions in Kazakhstan based on LMDI decomposition and STIRPAT model[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(7): 1001–1019.
- [24] 刘博文, 张贤, 杨琳. 基于 LMDI 的区域产业碳排放脱钩努力研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(4): 78–86. [Liu B W, Zhang X, Yang L. Decoupling efforts of regional industrial development on CO₂emissions in China based on LMDI analysis[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(4): 78–86.]
- [25] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010–2017. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing:China Statistics Press, 2010–2017.]
- [26] 国务院. “十二五”节能减排综合性工作方案 [EB/OL]. (2011-09-07) [2018-09-27]. http://www.gov.cn/zwgk/2011-09/07/content_1941731.htm. [The State Council. The Comprehensive Work Plan for Energy Conservation and Emissions Reduction for the 12th Five-Year Plan Period[EB/OL]. (2011-09-07) [2018-09-27]. http://www.gov.cn/zwgk/2011-09/07/content_1941731.htm.]
- [27] 国务院办公厅. 2014–2015 年节能减排低碳发展行动方案 [EB/OL]. (2014- 05- 26) [2018- 09- 27]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014- 05/26/content_8824.htm. [General Office of the State Council. Action Plan for Energy Conservation and Emissions Reduction and Low Carbon Development in 2014–2015[EB/OL]. (2014-05-26) [2018-09-27]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-05/26/content_8824.htm.]
- [28] Zhang X Q, Pu C, Zhao X, et al. Tillage effects on carbon footprint and ecosystem services of climate regulation in a winter wheatsummer maize cropping system of the North China Plain[J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 821–829.