中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

基于LUCC的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究

徐婕，潘洪义，黄佩

引用本文:
徐婕, 潘洪义, 黄佩. 基于LUCC的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 142−152.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180493

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

现代烟草农业的碳效应核算与分析——以陕西省烟草合作社为例

Carbon effect of modern tobacco agriculture: Based on tobacco cooperatives in Shaanxi Province

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(12): 1903−1915 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190402

四川省仁寿县土壤有机碳空间分布特征及其主控因素

Spatial variability of soil organic carbon and related controlling factors in Renshou County, Sichuan Province

中国生态农业学报. 2015(1): 34−42 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141034

生态文明视角下四川省资源环境压力的时空变化特征

Spatio−temporal changes in resource environment pressure due to eco−civilization in Sichuan Province, China

中国生态农业学报. 2016(1): 121−130 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150849

四川省土地整治项目时空分异格局分析

Spatio−temporal variation of land consolidation projects in Sichuan Province

中国生态农业学报. 2017, 25(12): 1858−1869 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170310

基于土地利用格局变化的生态风险与固碳功能评价——以河北省黄骅市为例

Evaluation of ecological risk and carbon fixation from land use change: A case study of Huanghua City, Hebei Province

中国生态农业学报. 2018, 26(8): 1217−1226 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170991

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180493

徐婕, 潘洪义, 黄佩. 基于 LUCC 的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 142−152
XU J, PAN H Y, HUANG P. Carbon emission and ecological compensation of main functional areas in Sichuan Province based on LUCC[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(1): 142−152

基于 LUCC 的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究*

徐 婕, 潘洪义**, 黄 佩

(四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室/四川师范大学地理与资源科学学院 成都 610068)

摘 要: 土地利用/土地覆被变化(LUCC)影响下的碳排放充分体现人类活动对生态环境的扰动程度, 由此切入的碳收支与补偿研究对区域低碳经济与平衡发展具有重要意义。本文以 2005 年和 2015 年四川省土地利用数据为基础, 参考 IPCC 假定构建碳排放模型, 借助 GIS 平台运用数学模型对四川省 5 个主体功能区碳排放及碳补偿率进行测度与分析, 采用造林成本法和碳税率法对生态补偿标准进行测算。结果表明: 1)研究期内四川省各主体功能区土地利用与主体功能区规划相符并按其功能定位优化发展。重点开发区域耕地占绝对优势, 建设用地面积的总量和增量最大; 重点生态功能区林地、草地占比最大。2)研究期内各主体功能区的总碳排放量大幅度增加。重点开发区域碳源量、总碳排放量及其增量均居首位; 重点生态功能区碳吸收的能力减弱。3)各主体功能区建设用地碳排放强度远大于总碳排放强度, 研究期内各主体功能区总碳排放强度均增加, 建设用地碳排放强度则有增有减。国家层面重点开发区域总碳排放强度最大, 建设用地碳排放强度很小。4)生态发展区碳补偿率高, 经济发达区低。国家层面限制开发区域(重点生态功能区)碳吸收补偿系数最高。5)碳源区应对作为碳汇区的甘孜藏族自治州按固碳价格进行生态补偿。碳排放量与各主体功能区功能定位高度相关, 生态补偿标准大致从成都平原向四周递减, 限制开发区域生态补偿标准偏低。基于碳排放的生态补偿标准建立横向财政转移支付政策, 有利于四川省节能减排和平衡发展。

关键词: 土地利用/土地覆被变化; 主体功能区; 碳排放; 碳源区; 碳汇区; 碳补偿率; 生态补偿
中图分类号: F301.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-6237(2019)01-0142-11

Carbon emission and ecological compensation of main functional areas in Sichuan Province based on LUCC*

XU Jie, PAN Hongyi**, HUANG Pei

(Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Sichuan Normal University / College of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)

Abstract: Carbon emissions under land use/cover change (LUCC) reflect the disturbance degree of environment by human activities.

* 国家自然科学基金项目(41371125)、四川省教育厅项目(16ZB0061)、四川省哲学社会科学规划项目(SC18B095)和教育部规划基金项目(18XJA630005)资助

** 通信作者: 潘洪义, 主要从事土地利用与评价研究。E-mail: panhongyi80@163.com
徐婕, 主要从事土地利用与生态补偿研究。E-mail: xxujie@foxmail.com

收稿日期: 2018-05-22 接受日期: 2018-08-14

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41371125), the Project of Department of Education of Sichuan Province (16ZB0061), Sichuan Philosophy and Social Science Planning Project (SC18B095) and the Planning Fund Project of Ministry of Education of China (18XJA630005).

** Corresponding author, E-mail: panhongyi80@163.com

Received May 22, 2018; accepted Aug. 14, 2018

Therefore, carbon budget and compensation research was of great significance to regional low-carbon economy and balanced development. Based on land use data for Sichuan Province in 2005 and 2015, this paper built a new local land use classification system and carbon emission model to quantitatively analyze carbon emission and carbon offset rate of land use in 183 counties in Sichuan Province. Taking into account regional differences at county level and breaking traditional administrative regional boundaries, the study based on the five main functional areas of Sichuan Province to measure ecological compensation standards with afforestation cost and carbon tax rate methods. The results showed that: 1) during the study period, land use in each main functional area in Sichuan Province was consistent with the main functional area planning and was optimized according to the functional orientation. Cultivated lands in the key development area had absolute advantage, while the total amount and increase in construction land area was the largest. Otherwise, cultivated land holding capacity in the main agricultural production area remained the strongest. Woodland and grassland accounted for 70%–80% in the key ecological function areas. 2) During the study period, total carbon emission in each main functional area increased significantly, and the construction land was the main carbon source, and forest land was the main carbon sink. Total carbon emissions and increments in the key development area ranked first, with carbon sinks in the key ecological functional area accounting for 63% of Sichuan Province, although the ability to absorb carbon gradually weakened. 3) Carbon emission intensity of construction land of each main functional area was much greater than total carbon emission intensity. Total carbon emission intensity of each main functional area increased during the investigated period, but carbon emission intensity of construction land showed increased or decreased. Total carbon emission intensity of the key development area at national level was largest, while that of construction land was smallest. 4) The rate of carbon compensation in the ecological development areas was high, with economic development area having the reverse trend. The compensation coefficient of carbon absorption was highest for the restricted development area at national level (key ecological function area). 5) Carbon source area provided ecological compensation for carbon sink area based on the scope of ecological compensation. Ecological compensation standard for Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture, which was a carbon sink area, was 5.82 billion to 20.56 billion Yuan. It indicated that carbon emission was correlated with functional location of each functional area. Ecological compensation standard generally decreased from Chengdu Plain to the surrounding areas, and ecological compensation standard of the restricted development areas were relatively low. On the basis of the ecological compensation standard for carbon emissions, a horizontal fiscal transfer payment policy was established as reference basis for energy conservation, emission reduction and balanced development of Sichuan Province.

Keywords: Land use/cover change; Main functional area; Carbon emission; Carbon sources area; Carbon sink area; Carbon offset rate; Ecological compensation

土地利用/土地覆被变化(LUCC)影响着陆地生态系统的分布和结构，改变着碳循环和碳储量，是控制碳积累速率的主导因子[1]。1850—1998 年间，LUCC 影响下的碳排放量约占同期人类活动影响的 CO_2 排放量的 1/3[2]，对生态系统的物质循环和能量流动扰动较大，生态系统的结构、过程、功能和生态系统碳变化随之改变[3]，已引起国际社会研究的广泛关注。中国承诺到 2030 年单位 GDP 的碳排放要比 2005 年下降 60%~65%[4]，十九大报告中也相应提出建立健全绿色低碳循环发展经济体系，均表明了中国发展低碳经济的态度与决心。随着低碳经济走向当前社会研究的热点，发展低碳经济、减少碳排放也成为新时期经济社会发展的必然。

国内外学者对 LUCC 的碳排放从多角度展开了研究。其中国外起步早，研究尺度普遍较大，研究成果集中于 1990—2010 年，为国内众多研究提供了数据与方法参考。1977 年 Bolin[5]研究发现全球林地面积变化较大引起碳排放量的变化，此后许多学者就 LUCC 引起碳排放展开了一系列研究。Houghton[6]对 1990 年全球土地利用变化进行相关研究，得出耕地的减少导致增加 3×10^9 t 的碳排放; Richards 等[7]受其研究成果的启发，比较研究南亚和东南亚的林业活动和化石燃料的碳排放，发现前者是后者的 2 倍; 随着技术进步研究不断深入，Guo 等[8]采用 meta 分析方法研究了 LUCC 产生的土壤碳库变化; Liu 等[9]通过集成生物圈模拟框架，采用低分辨率的 LUCC 数据分析加利福利亚森林、灌丛和草原的碳变化。而后研究逐渐引入人文经济，如 Ravindranath 等[10]通过碳排放效益研究了印度碳价格激励和减排潜力之间的关系。国内研究更为细化，众多学者着眼于全球、国家、区域等尺度上碳排放量的测算: 刘学荣等[11]分析了东北地区 2000—2014 年不同土地利用方式的碳排放效应; 也有学者从经济和社会发展角度探讨碳排放效益及其社会经济应用，如王刚等[12]结合土地利用遥感图像和社会经济发展现状，分析了 2014 年成都市县域单元碳收支空间分布特征，并通过建构回归模型探究其与经济发展的协同关系; 刘慧灵等[13]以低碳经济为导向研究福州市土地利用结构优化方案。随着 RS 与 GIS 的深入开发，研究逐渐偏向于特定生态系统或单一要素的复杂机理研究: 崔盼盼等[14]运用 LMDI-Ⅰ加法数量分解模型分析 2002—

2012 年中国大陆 30 个省的城镇居民隐含碳排放及其驱动机制; 黎孔清等[15]采用回归分析法、STIRPAT 和 GM(1,1)模型解析了湖南省农地投入碳排放增长机理。而碳排放无疑存在着外部性, 生态保护补偿则是一种外部性内部化的手段[16]。碳排放的外部性为 PES(payments for ecosystem services, 即生态系统服务付费)逻辑基础中生态服务系统的一部分, 论证了碳源区对碳汇区进行生态补偿的合理性。21 世纪开始, 随着国内生态补偿概念的明确提出, 国内学者也从碳排放存在的外部性切入论证生态保护补偿的应用, 如王雅敬等[17]采用碳排放评价模型估算长株潭经济圈碳排放及其生态补偿。

四川省是中国西南内陆的经济和人口大省, 也是西部与东部地区重要的生态屏障。2010 年四川省基本完成灾后重建, 2013 年四川省人民政府印发《四川省主体功能区规划》。2005—2015 年四川省城市化、工业化的迅猛发展, 土地利用/土地覆被变化显著, 省内区域经济发展不平衡的同时, 生态环境问题日益突出。本文从 LUCC 切入, 构建碳排放模型, 基于主体功能区对 2005 年、2015 年四川省碳排放及碳补偿率进行估算, 排除地震灾害特殊情况的波动性, 围绕四川省主体功能区的规划普遍性展开, 体现 10 年高速发展期四川省各主体功能区规划影响下土地利用碳排放角度的生态环境状态变化; 采用造林成本法和碳税率法测算 21 个市(州)的生态补偿标准, 响应国家主体功能区规划战略, 以基于碳排放的生态补偿标准做参考, 以建立横向财政转移支付政策做驱动, 为四川省节能减排和平衡发展提供建议, 促进生产系统和生活系统的循环链接。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

四川省(97°21′~108°31′E, 26°03′~34°19′N)位于中国西南内陆, 是青藏高原地区向长江中下游平原的过渡地带。中国大陆地势第一、二级阶梯分界线穿过四川省中部, 四川省整体地势呈西高东低。川西为高原藏区和大小凉山彝区, 地形以高原和山地为主, 海拔多在 3 000 m 以上, 经济落后, 是贫困县集中地区, 森林分布广, 人口密度小, 是重要的生态屏障。川东以丘陵和盆地地形为主, 海拔高度 500~2 000 m, 主要为经济发达的四川盆地、成都平原地区, 城市化水平高, 产业发达, 能源消耗量大, 人口密度大, 是经济的重点开发区域, 如成都市、德阳市、绵阳市等。四川总面积约 48.6×10^4 km^2, 辖 21 个市(州), 183 个县(市、区), 截至 2015 年底, 四川省常住人口 8 204 万人, GDP 达 30 053.1 亿元。

1.2 数据来源与处理

1)主体功能分区是依据《四川省主体功能区规划》, 将四川省划分为省级层面重点开发区域、国家层面重点开发区域、国家层面限制开发区域(农产品主产区)、省级层面限制开发区域(重点生态功能区)、国家层面限制开发区域(重点生态功能区)。2013 年调整的 3 个行政区主体功能归为原所属区划所对应的主体功能定位(图 1)。

2)2005 年与 2015 年四川省 LUCC 数据来源于中国资源与环境数据中心, 分辨率为 1 km。依据《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017), 参考中国科学院资源环境数据库中全国 1∶100 000 土地利用分类系统, 结合四川省土地利用实际和研究需要, 构建新的研究区土地利用分类系统, 将四川省土地利用类型划分为 6 个一级类和 28 个二级类(表 1)。

3)社会经济数据来源于 2006 年和 2016 年四川省统计年鉴、四川省各市(州)统计年鉴以及统计网站, 其中 183 个县(市、区)的能源消费总量由各县(市、区)的 GDP 及其 GDP 能耗系数计算得出。

1.3 研究方法

1.3.1 碳排放量测算

耕地的农作物进行光合作用吸收 CO_2, 在短期内绝大多数农作物又通过呼吸作用释放 CO_2, 耕地的碳汇效果不明显[18], 未利用地在研究区表现为微弱的碳吸收[19]。故本研究区主要表现为以林地、草地、水域、未利用地为主的碳吸收(碳汇)和以耕地、建设用地为主的碳排放(碳源)。碳排放测算模型可表达为:

$$E=\sum e=\sum_{i=1}^{5}T_i\cdot\delta_i+E_{\mathrm{b}} \tag{1}$$

式中: E 为总碳排放量, e 为土地利用方式产生的碳排放量, T_i 为第 i 种土地利用方式(耕地、林地、草地、水域、未利用地)的土地面积, δ_i 为对应土地利用方式的碳排放(吸收)系数, E_{b} 为建设用地碳排放量。

建设用地的碳排放(E_{b})通过其利用过程中能源消耗的碳排放系数间接估算[20], 世界能源需求的 80%~85%来源于化石燃料, 80%~90%的碳排放来源于化石燃料能源消耗[21]。联系研究区实际化石能源消耗情况, 建设用地碳排放估算模型可表达为:

$$E_{\mathrm{b}}=C_{\mathrm{e}}\cdot\gamma_{\mathrm{e}}\cdot\delta_{\mathrm{e}}=C_{\mathrm{e}}\cdot\gamma_{\mathrm{e}}\cdot\frac{1}{3}(\delta_{\mathrm{c}}+\delta_{\mathrm{p}}+\delta_{\mathrm{n}}) \tag{2}$$

式中: E_{b} 为建设用地碳排放量, C_{e} 为能源消耗总量, γ_{e} 为标准煤换算系数, δ_{e} 为能源消耗碳排放系数, δ_{c}、δ_{p}、δ_{n} 分别是煤品燃料、油品燃料和天然气的碳排放系数。

各土地利用类型和能源的碳吸收(排放)系数根据已有研究联系四川省实际取最具参考价值多方经验数据的平均值(表 2)。

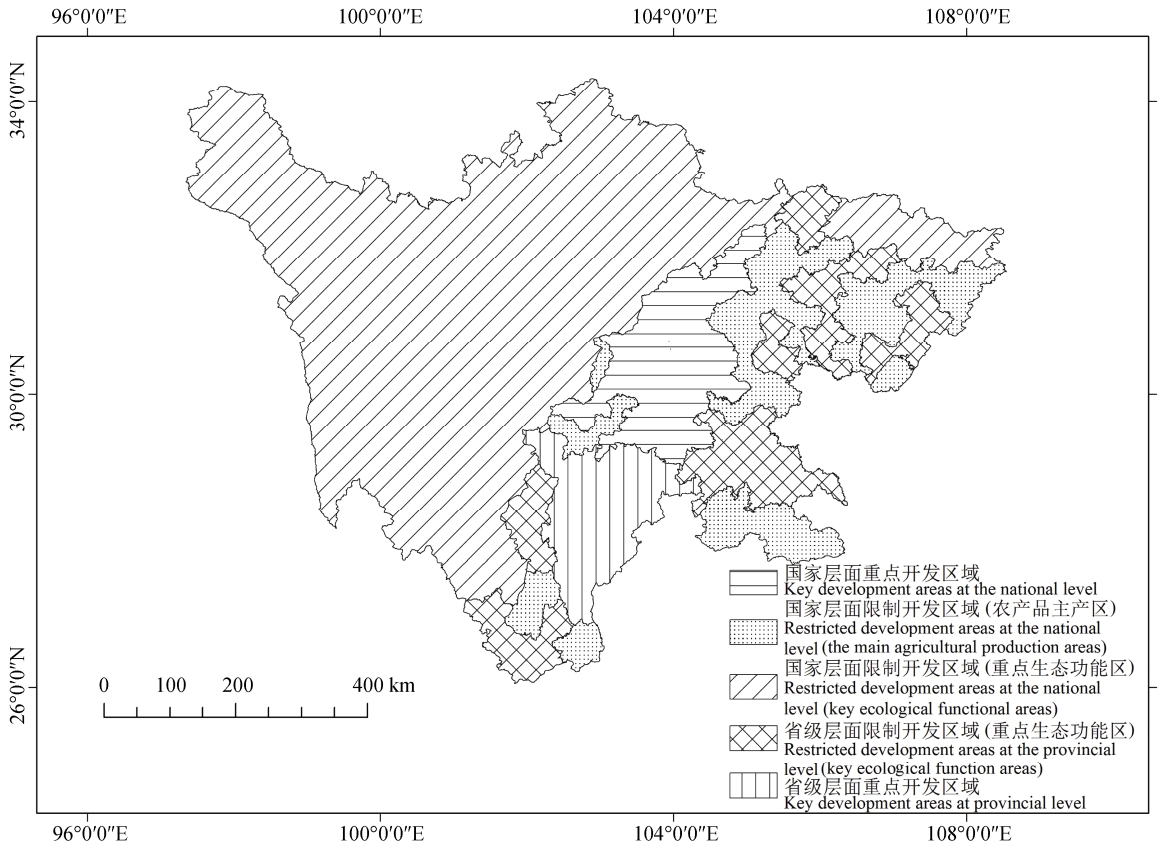

图 1　四川省主体功能分区

Fig.1　The main functional division of Sichuan Province

表 1　四川省土地分类系统

Table 1　Land classification system of Sichuan Province

一级类 First class	二级类 Secondary class
耕地 Cultivated land	旱地、水田 Dry land, paddy field
林地 Forest land	有林地、灌木林地、疏林地、其他林地 Forest land, shrubbery land, sparse woodland, other woodland
草地 Grassland	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地 High, medium and low coverage grassland
水域 Water	河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩地 Rivers, lakes, reservoirs, pits, permanent glacier snow, beaches
建设用地 Built-up land	城镇用地、农村居民点、其他建设用地 Urban land, rural residential areas, other construction land
未利用地 Unused land	沙地、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石砾地 Sand, saline-alkali land, marshland, bare land, bare rocky gravel

表 2　不同土地利用及化石燃料的碳源(汇)碳排放(吸收)系数

Table 2　Carbon source (sink) carbon emission (absorption) coefficients of different land use types and fossil fuels

项目 Item	参数值 Parameter value	单位 Unit	数据来源 Data sources
林地碳汇 Woodland carbon sink	–0.612 5	$kg(C)\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$	[22-23]
草地碳汇 Grassland carbon sink	–0.020 5	$kg(C)\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$	[22-23]
耕地碳源 Cultivated land carbon source	0.459 5	$kg(C)\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$	[22-24]
未利用地碳汇 Unused carbon sink	–0.000 5	$kg(C)\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$	[25-26]
水域碳汇 Water carbon sequestration	–0.025 3	$kg(C)\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$	[27]
煤炭碳源 Coal carbon source	0.740 2	$t(C)\cdot t^{-1}$	[28-29]
石油碳源 Petroleum carbon source	0.570 0	$t(C)\cdot t^{-1}$	[28-29]
天然气碳源 Natural gas carbon source	0.433 1	$t(C)\cdot t^{-1}$	[28-29]

1.3.2 碳排放强度与碳吸收补偿系数计算

碳排放强度即单位面积的碳排放, 表示土地利用的碳排放状况[30]。碳吸收补偿系数表示碳汇吸收能力, 能表达某区域碳补偿率的大小[31]。计算方法如下:

$$\mathrm{Ce}_j = \mathrm{Ct}_j / \sum S_j \quad (3)$$

$$D_n = \mathrm{Cabs}_n / \mathrm{Cemi}_n \quad (4)$$

式中: Ce_j为第 j 种土地利用类型的碳排放强度, Ct_j为对应土地利用类型的碳排放量, S_j为对应土地利用类型的面积, D_n为 n 区域碳吸收补偿系数, Cabs_n为对应区域碳汇用地吸收量, Cemi_n为对应区域碳源用地排放量。

1.3.3 碳排放的生态补偿计算

碳排放生态补偿标准的定量化主要依据碳汇价格[32]。常用的计算方法是造林成本法和碳税率法。结合中国种植森林的实际情况, 取多种较准确的中国造林成本法单位价格的平均值获得较合理的碳汇价格, 即 272.65 元·t^{-1}(C)[33], 以此为研究区碳排放生态补偿标准的下限; 上限标准则采用国际常用的瑞典碳税率 150 美元·t^{-1}(C)[34], 以 2015 年的平均汇率换算, 即 934.52 元·t^{-1}(C)。

2 结果与分析

2.1 四川省主体功能区土地利用变化

根据 2005 年和 2015 年四川省的土地利用/覆被数据, 对 5 个主体功能区的 6 个一级地类面积进行分区统计, 得到四川省各主体功能区土地利用情况(表 3)。

表 3 2005 年和 2015 年四川省主体功能区土地利用

Table 3 Land use types in main function areas of Sichuan Province in 2005 and 2015

主体功能区 Main function area	年份 Year	耕地 Cultivated land		林地 Forest land		草地 Grassland		水域 Water		建设用地 Built-up land		未利用地 Unused land	
		面积 Area (km^2)	比例 Proportion (%)	面积 Area (km^2)	比例 Proportion (%)	面积 Area (km^2)	比例 Proportion (%)	面积 Area (km^2)	比例 Proportion (%)	面积 Area (km^2)	比例 Proportion (%)	面积 Area (km^2)	比例 Proportion (%)
A	2005	36 374.06	58.77	17 962.41	29.02	5 598.89	9.05	1 155.81	1.87	744.57	1.20	59.01	0.10
	2015	36 078.31	58.29	17 752.84	28.68	5 408.25	8.74	1 205.70	1.95	1 390.59	2.25	59.06	0.10
B	2005	26 509.03	62.39	10 572.68	24.88	2 404.27	5.66	690.17	1.62	2 295.68	5.40	18.99	0.04
	2015	25 587.95	60.22	10 420.10	24.52	2 338.98	5.50	744.44	1.75	3 289.66	7.74	109.67	0.26
C	2005	38 050.42	58.93	20 453.73	31.68	5 087.24	7.88	645.12	1.00	309.29	0.48	27.91	0.04
	2015	37 599.34	58.23	20 838.34	32.27	4 700.84	7.28	809.96	1.25	603.63	0.93	21.61	0.03
D	2005	7 107.84	22.37	15 385.29	48.42	9 064.49	28.53	101.41	0.32	44.75	0.14	70.36	0.22
	2015	6 971.09	21.94	15 693.24	49.39	8 763.82	27.58	199.38	0.63	76.96	0.24	69.65	0.22
E	2005	13 094.59	4.57	101 158.01	35.29	153 625.23	53.60	1 256.58	0.44	219.58	0.08	17 267.33	6.02
	2015	13 057.29	4.56	104 216.29	36.36	150 033.17	52.35	1 693.40	0.59	419.46	0.15	17 201.61	6.00

A 为省级层面重点开发区域; B 为国家层面重点开发区域; C 为国家层面限制开发区域(农产品主产区); D 为省级层面限制开发区域(重点生态功能区); E 为国家层面限制开发区域(重点生态功能区)。A: key development areas at provincial level; B: key development areas at the national level; C: restricted development areas at the national level (the main agricultural production areas); D: restricted development areas at the provincial level (key ecological function areas); E: restricted development areas at the national level (key ecological functional areas).

由表 3 可知, 两个重点开发区域研究期内土地利用结构相似, 表现为耕地占绝对优势, 达到各自主体功能区面积的 50%以上, 其次是林地。这是由于它们囊括的 89 个县级行政区主要分布在成都平原、川南和川东北。成都平原地形平坦开阔, 土壤肥沃, 农业发达; 川南丘陵在保持原有林地的同时也发展梯田农业; 川东北临秦巴山区, 森林广布。此外, 重点开发区域在研究期内建设用地面积的总量和增量均远大于其他主体功能区, 国家层面重点开发区域又大于省级层面。原因是重点开发区域包括成都、绵阳、德阳、攀枝花等四川省大部分经济发达地区, 自身城市化水平高, 再加上国家和四川省的重点开发支持; 且国家层面比省级层面开发支持力度大, 这一趋势符合四川省主体功能区定位。

国家层面限制开发区域(农产品主产区)分布在四川省盆地边缘和浅丘、河流流域的 5 大农产区, 研究期内也表现为耕地占绝对优势、林地次之。省级和国家层面限制开发区域(重点生态功能区)林地、草地约占各自主体功能区面积的 70%~80%, 为川西高原藏区和大小凉山彝区, 多高原山区, 是四川省和长江中下游地区的重要生态屏障, 因交通不便等导致经济落后, 开发成本高, 贫困县集中, 规划定位为生态功能区, 限制开发, 保护生态。

综上所述, 10 年来, 在各主体功能区建设用地面积增加、耕地面积减少的大背景下, 重点开发区域建设用地面积增量居于首位, 占用耕地、林地面积最多; 农产

品主产区耕地面积持有量保持力度最大, 基本持平; 重点生态功能区林地、草地总量增大, 且远大于其他主体功能区。由此可看, 四川省主体功能区规划符合四川省各主体功能区土地利用情况, 10 年来, 各主体功能区土地利用均按其功能定位优化发展。其中, 重点生态功能区碳汇用地占比大, 其余均为碳源用地占比大。

2.2　四川省主体功能区的土地利用碳排放

2.2.1　四川省主体功能区的碳排放量

根据碳排放模型, 计算得到 2005 年和 2015 年四川省 5 个主体功能区的土地利用碳排放量(表 4), 为综合分析四川省各主体功能区的碳排放情况, 对计算结果进行空间表达(图 2)。

表 4　2005 年和 2015 年四川省主体功能区的土地利用碳排放

Table 4　Land use carbon emissions in main functional areas of Sichuan Province in 2005 and 2015　　$\times 10^4$ t

主体功能区 Main function area	年份 Year	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Built-up land	未利用地 Unused land	碳汇 Carbon sink	碳源 Carbon source	碳排放 Carbone mission
A	2005	167.138 8	−110.019 8	−1.147 8	−0.292 4	2 568.331 0	−0.000 3	−111.460 3	2 735.469 7	2 624.009 5
	2015	165.779 8	−108.736 2	−1.108 7	−0.305 0	4 197.231 4	−0.000 3	−110.150 2	4 363.011 3	4 252.861 1
B	2005	121.809 0	−64.757 7	−0.492 9	−0.174 6	2 962.805 9	−0.000 1	−65.425 2	3 084.614 9	3 019.189 6
	2015	117.576 6	−63.823 1	−0.479 5	−0.188 3	5 237.508 6	−0.000 5	−64.491 5	5 355.085 2	5 290.593 7
C	2005	174.841 7	−125.279 1	−1.042 9	−0.163 2	1 130.000 7	−0.000 1	−126.485 3	1 304.842 4	1 178.357 1
	2015	172.769 0	−127.634 8	−0.963 7	−0.204 9	1 938.635 8	−0.000 1	−128.803 5	2 111.404 8	1 982.601 3
D	2005	32.660 5	−94.234 9	−1.858 2	−0.025 7	138.919 5	−0.000 4	−96.119 1	171.580 1	75.460 9
	2015	32.032 1	−96.121 1	−1.796 6	−0.050 4	249.992 6	−0.000 3	−97.968 5	282.024 7	184.056 3
E	2005	60.169 6	−619.592 8	−31.493 2	−0.317 9	255.536 5	−0.086 3	−651.490 2	315.706 1	−335.784 1
	2015	59.998 2	−638.324 8	−30.756 8	−0.428 4	629.894 9	−0.086 0	−669.596 0	689.893 1	20.297 1

A 为省级层面重点开发区域; B 为国家层面重点开发区域; C 为国家层面限制开发区域(农产品主产区); D 为省级层面限制开发区域(重点生态功能区); E 为国家层面限制开发区域(重点生态功能区)。A: key development areas at provincial level; B: key development areas at the national level; C: restricted development areas at the national level (the main agricultural production areas); D: restricted development areas at the provincial level (key ecological function areas); E: restricted development areas at the national level (key ecological functional areas).

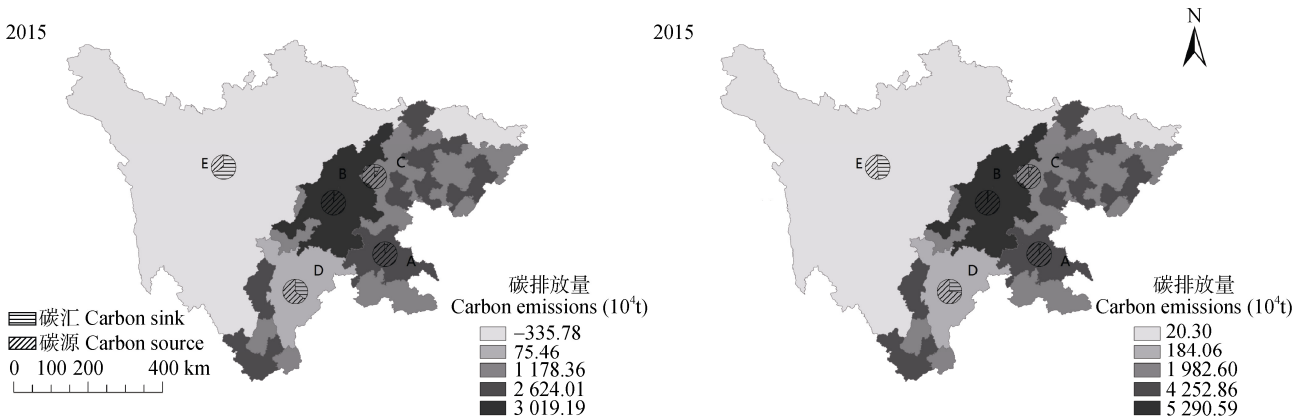

图 2　2005 年和 2015 年四川省主体功能区碳排放格局

Fig. 2　Carbon emission distribution of main functional areas in Sichuan Province in 2005 and 2015

A 为省级层面重点开发区域; B 为国家层面重点开发区域; C 为国家层面限制开发区域(农产品主产区); D 为省级层面限制开发区域(重点生态功能区); E 为国家层面限制开发区域(重点生态功能区)。A: key development areas at provincial level; B: key development areas at the national level; C: restricted development areas at the national level (the main agricultural production areas); D: restricted development areas at the provincial level (key ecological function areas); E: restricted development areas at the national level (key ecological functional areas).

由表 4 可知, 各主体功能区均表现为建设用地是主要碳源, 其次是耕地; 林地的碳汇效应最为显著, 草地次之。10 年来, 各主体功能区的总碳排放量大幅度增加, 这是由于碳源量的大幅度增加, 尤其是建设用地的碳排放量增加所致。表明城市化和工业化中能量消耗量的增加是引起四川省土地利用总碳排放增加的重要原因。

重点开发区域碳源量、总碳排放量及其增量均居首位, 其中国家层面重点开发区域总碳排放量大于但增量小于省级层面重点开发区域, 国家层面限制开发区域(农产品主产区)次之。三者总的碳排放量高达全省的 90%。但就空间格局来看, 碳源碳汇比

例变化不明显(图 2)。重点开发区域在国家和四川省的支持下, 大力发展二、三产业, 进行城市化建设, 发展经济, 能耗量巨大, 作为主要碳源的建设用地占用具有碳汇效应的林地、草地。省级层面重点开发区域开发潜力更大, 10 年来碳排放量增长尤甚。

重点生态功能区碳汇量最大, 达 669.596×10^4 t, 占四川省碳汇量的 63%, 对抑制区域的总碳排放量有着重要作用。研究期内碳源和碳汇比例发生了明显变化, 碳汇所占比重减少 20%~30%。国家层面限制开发区域(重点生态功能区)甚至从 2005 年的碳汇区转变为 2015 年的碳源区。说明生态功能区在保持生态林地、草地的同时更加重视城镇建设和经济发展, 建设用地的碳排放增速快于林地、草地的碳吸收增速, 对生态功能区的主体功能定位不够重视。由此可知, 建设用地在各主体功能区碳减排中具有重要意义, 故减排应将重点放在保持林地, 降低建设用地的碳排放。

2.2.2 四川省及其主体功能区的碳排放强度

为反映四川省及其 5 个主体功能区土地利用碳排放能力的强弱, 引入碳排放强度指标。土地利用的碳排放中建设用地是最主要的碳源, 单位面积建设用地碳排放量的大小能更好地反映一个区域第二、第三产业碳排放的水平和区域差距[35], 故此计算四川省及其 5 个主体功能区的建设用地碳排放强度(表 5)。

表 5 2005 年和 2015 年四川省及其主体功能区碳排放强度

Table 5 Carbon emission intensity of Sichuan Province and its main functional areas in 2005 and 2015 10^4 t·km^{-2}

主体功能区 Main function area	2005		2015	
	总碳排放强度 Total carbon emission intensity	建设用地碳排放强度 Carbon emission intensity of construction land	总碳排放强度 Total carbon emission intensity	建设用地碳排放强度 Carbon emission intensity of construction land
A	0.042 4	3.449 4	0.068 7	3.018 3
B	0.071 1	1.290 6	0.124 5	1.592 1
C	0.018 2	3.653 6	0.030 7	3.211 6
D	0.002 4	3.104 2	0.005 8	3.248 2
E	–0.001 2	1.163 8	0.000 1	1.501 7
四川省 Sichuan Province	0.013 5	1.952 4	0.024 1	2.119 8

A 为省级层面重点开发区域; B 为国家层面重点开发区域; C 为国家层面限制开发区域(农产品主产区); D 为省级层面限制开发区域(重点生态功能区); E 为国家层面限制开发区域(重点生态功能区)。A: key development areas at provincial level; B: key development areas at the national level; C: restricted development areas at the national level (the main agricultural production areas); D: restricted development areas at the provincial level (key ecological function areas); E: restricted development areas at the national level (key ecological functional areas).

由表 5 可知, 各主体功能区建设用地碳排放强度远大于总碳排放强度, 但 10 年来, 各主体功能区总碳排放强度均增加, 建设用地碳排放强度则有增有减。

国家层面重点开发区域总碳排放强度最大, 达 0.124 5 万 t·km^{-2}, 远高于四川省 0.024 1 万 t·km^{-2} 的平均水平, 分别是省级层面重点开发区域、国家层面限制开发区域(农产品主产区)的 2 倍、4 倍(表 5)。但其建设用地碳排放强度却很小, 低于四川省平均水平, 仅高于国家层面限制开发区域(重点生态功能区)。这说明国家层面重点开发区域经济发展趋于成熟, 处于城市转型和产业结构的优化升级新阶段, 区域经济发展更为注重技术引进和自主研发, 积极创新以求建立低能耗、高效率、低排放的科学发展模式。

省级层面重点开发区域、国家层面限制开发区域(农产品主产区)建设用地碳排放强度有明显减少, 而国家层面重点开发区域、国家层面限制开发区域(重点生态功能区)明显增加。在总碳排放量随着经济增长、产业和城市发展、能源消耗而增加的大局势下, 却可以通过内部产业结构调整和转型升级, 发展循环经济, 降低能耗和资源利用效率来提升碳排放水平, 控制建设用地碳排放强度, 这也将拉大区域差距。

2.3 碳吸收补偿系数与碳排放的生态补偿测算

2.3.1 碳吸收补偿系数

四川省主体功能区的碳排放有着巨大差异, 碳排放的外部性和 PES 逻辑基础论证了建立补偿机制的合理性。碳吸收补偿系数表示某区域碳汇吸收能力和碳补偿率的大小。根据 2015 年四川省 5 个主体功能区的碳汇和碳源量计算各主体功能区的碳吸收补偿系数, 并对其进行空间表达(图 3)。

由图 3 可知, 四川省碳吸收补偿系数 D 值大致呈现西高东低的特征, 生态发展区碳补偿率高, 经济发达区低。国家层面限制开发区域(重点生态功能区)碳吸收补偿系数最高, 接近 1%, 说明其林地、草

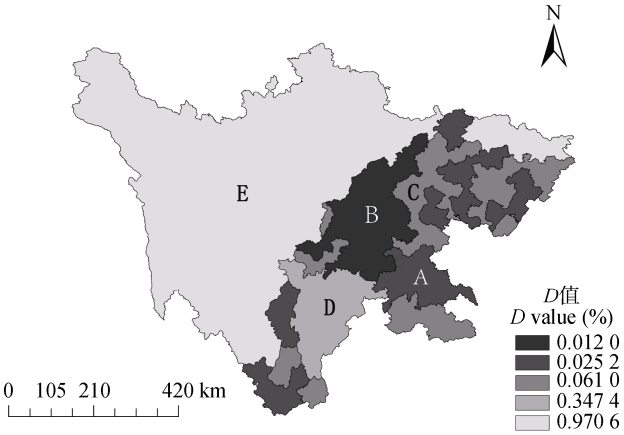

图 3　2015 年四川省主体功能区碳吸收补偿系数(*D*)

Fig. 3　Spatial distribution of compensation coefficient of carbon absorption (*D*) in main functional areas of Sichuan Province in 2015

A 为省级层面重点开发区域; B 为国家层面重点开发区域; C 为国家层面限制开发区域(农产品主产区); D 为省级层面限制开发区域(重点生态功能区); E 为国家层面限制开发区域(重点生态功能区)。A: key development areas at provincial level; B: key development areas at the national level; C: restricted development areas at the national level (the main agricultural production areas); D: restricted development areas at the provincial level (key ecological function areas); E: restricted development areas at the national level (key ecological functional areas).

地碳汇吸收高, 抵消碳源量大, 碳补偿率高。省级层面限制开发区域(重点生态功能区)、国家层面限制开发区域(农产品主产区)、省级层面重点开发区域、国家层面重点开发区域依次递减。重点开发区域 *D* 值最低, 这是由开发强度高、经济总量大、建设用地多所致。国家层面限制开发区域(农产品主产区)*D* 值大小则与耕地数量与农产品生产有一定程度的关系。碳吸收补偿系数高低值差距为四川省各主体功能区节能减排和平衡发展提供参考, 督促优化单位 GDP 能耗、节能减排, 发展低碳经济; 也一定程度上反映了各区域生态保护补偿的力度。

2.3.2　碳排放的生态补偿测算

生态补偿的实行需要通过财政转移支付的形式实现, 各主体功能区目前没有相关机构有权执行, 故根据 2015 年四川省 21 个市(州)的碳排放量和不同固碳价格估算四川省各市(州)生态补偿标准(区间表示), 并按市级行政区划大部分面积所属主体功能区, 同等条件下优先考虑市级行政单位政府所在的主体功能区进行归类(表 6)。

表 6　2015 年四川省各市(州)生态补偿标准区间

Table 6　Intervals of ecological compensation standards of cities and states in Sichuan Province in 2015　　$\times 10^8$ ¥

主体功能区 Main function area	生态补偿标准 Ecological compensation standard
A	攀枝花市(22.49, 79.39)、内江市(18.22, 64.34)、宜宾市(18.11, 63.94)、南充市(16.50, 58.23)、自贡市(10.31, 36.41)、遂宁市(9.71, 34.27)。Panzhihua City (22.49, 79.39), Neijiang City (18.22, 64.34), Yibin City (18.11, 63.94), Nanchong City (16.50, 58.23), Zigong City (10.31, 36.41), Suining City (9.71, 34.27).
B	成都市(71.54, 252.56)、乐山市(22.81, 80.52)、绵阳市(17.75, 62.67)、德阳市(17.56, 61.99)、眉山市(12.92, 45.61)、资阳市(11.36, 40.11)。Chengdu City (71.54, 252.56), Leshan City (22.81, 80.52), Mianyang City (17.75, 62.67), Deyang City (17.56, 61.99), Meishan City (12.92, 45.61), Ziyang City (11.36, 40.11).
C	达州市(18.66, 65.88)、泸州市(17.12, 60.43)、广安市(11.55, 40.78)、广元市(5.95, 20.99)。Dazhou City (18.66, 65.88), Luzhou City (17.12, 60.43), Guang'an City (11.55, 40.78), Guangyuan City (5.95, 20.99).
D	凉山州(9.69, 34.22)。 Liangshan Yi Autonomous Prefecture (9.69, 34.22).
E	雅安市(5.93, 20.94)、巴中市(5.01, 17.70)、阿坝州(2.45, 8.65)、甘孜州(−5.82, −20.56)。Ya'an City (5.93, 20.94), Bazhong City (5.01, 17.70), Aba Tibetan Autonomous Prefecture (2.45, 8.65), Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture (−5.82, −20.56).

A 为省级层面重点开发区域; B 为国家层面重点开发区域; C 为国家层面限制开发区域(农产品主产区); D 为省级层面限制开发区域(重点生态功能区); E 为国家层面限制开发区域(重点生态功能区)。21 个市(州)生态补偿标准均以开区间表示, 单位为 10^8 元, 正值为应提供的生态补偿, 负值为应得到的生态补偿。A: key development areas at provincial level; B: key development areas at the national level; C: restricted development areas at the national level (the main agricultural production areas); D: restricted development areas at the provincial level (key ecological function areas); E: restricted development areas at the national level (key ecological functional areas). The ecological compensation standards of 21 cities (states) are all expressed in the open interval, the unit is 10^8 ¥ RMB, the positive value is the ecological compensation that should be provided, and the negative value is the ecological compensation that should be obtained.

由表 6 可知, 2015 年甘孜藏族自治州属碳汇区, 其他区域属碳源区。就碳排放角度而言, 碳源区应对碳汇区进行生态补偿。成都市、乐山市、攀枝花市等碳源区应向周围碳汇区按生态补偿范围提供生态补偿; 甘孜藏族自治州作为碳汇区应接收的生态补偿标准范围是 5.82 亿~20.56 亿元。区域碳排放与建设用地能耗量相关性大, 建设用地能耗量又关系到区域的经济发展水平, 故以单位 GDP 为参考要求区域执行碳减排较合理, 如果不能完成减排目标, 则可通过资金补偿对碳汇区执行生态补偿。可以建立以政府为主导, 市场为导向, 第三方生态环境保护组织作监督, 通过横向财政转移支付等手段实现。

3 结论与讨论

3.1 结论

土地利用变化对碳排放量有重要影响，通过对四川省 5 个主体功能区土地利用的碳排放和生态补偿进行分析，得出以下结论:

1)研究期四川省各主体功能区土地利用实际与主体功能区规划相符并均按其功能定位优化发展。在各主体功能区建设用地面积增加、耕地面积减少的大背景下，重点开发区域建设用地面积的总量和增量均远大于其他主体功能区；农产品主产区耕地面积持有量保持力度最大；重点生态功能区林地、草地约占各自主体功能区面积的 70%~80%。

2)城市化和工业化是引起四川省土地利用总碳排放量增加的重要原因。研究期内各主体功能区均表现为建设用地是主要碳源，林地是主要碳汇。10 年来，各主体功能区的总碳排放量大幅度增加。重点开发区域碳源量、总碳排放量及其增量均居首位。重点生态功能区碳汇量最大，占四川省碳汇量的 63%，但研究期内，碳吸收的能力逐渐减弱。

3)各主体功能区建设用地碳排放强度远大于总碳排放强度，但 10 年来，各主体功能区总碳排放强度均增加，建设用地碳排放强度则有增有减。国家层面重点开发区域总碳排放强度最大，建设用地碳排放强度很小。省级层面重点开发区域、国家层面限制开发区域(农产品主产区)建设用地碳排放强度有明显减少，而国家层面重点开发区域、国家层面限制开发区域(重点生态功能区)明显增加。

4)生态发展区碳补偿率高，经济发达区低。国家层面限制开发区域(重点生态功能区)碳吸收补偿系数最高，省级层面限制开发区域(重点生态功能区)、国家层面限制开发区域(农产品主产区)、省级层面重点开发区域、国家层面重点开发区域依次递减。

5)碳源区应对碳汇区进行生态补偿。成都市、乐山市、攀枝花市等碳源区应向周围碳汇区按生态补偿范围提供生态补偿；甘孜藏族自治州作为碳汇区应接收的生态补偿标准是 5.82 亿~20.56 亿元，可通过横向财政转移支付等手段实现。

3.2 讨论

土地利用格局的变化影响着四大碳库，改变着区域固碳功能[36]。本文从 LUCC 切入，以 28 个二级地类为数据源，与较为常见的直接提取 6 个基本地类相比提高了结果的准确性。再根据研究区实际在现有土地利用分类的基础上建立新的土地分类系统，自下而上进行归总。并且充分考虑到县级层面的地区差异性，通过构建碳排放模型先测算四川省 183 个县(市、区)土地利用的碳排放，再从 5 个主体功能区视角进行定量分析。因此，从数据处理阶段就极大程度上提升了研究结果的可信度。

此外，本文突破了传统的行政区界线，选择从区域特定的性质定位出发，尊重自然规律，响应《四川省主体功能区规划》，划分 5 个主体功能区，将规划中各主体功能区定位及其生态热点问题相结合，在此基础上建立生态补偿标准，为促进研究区的充分均衡发展提供参考。目前，将土地利用碳排放与主体功能分区相结合的研究较为少见。文中还引入了碳吸收补偿系数指标，研究发现该指标与生态补偿标准具有高度正相关性，两者呈现的结果与各主体功能区碳收支结论也相符，这为以后碳补偿研究提供了借鉴。研究显示的各主体功能区的主要碳源、碳汇、总碳排放量趋势与四川省经济发展现状和众多研究结论一致。但值得注意的是，碳排放强度指标中，各主体功能区总碳排放强度均增加，建设用地碳排放强度却有增有减。特别是国家层面重点开发区域，总碳排放强度最大，建设用地碳排放强度却仅高于国家层面限制开发区域(重点生态功能区)，可以看出资金和技术对提升区域第二、第三产业碳排放水平有重要作用，进而对区域节能减排具有重要意义。

但是，在对土地利用碳排放的核算上，各类碳排放系数的取值来源于对邻近研究时限该区域研究成果的简单修订。今后应根据研究区域实际的经济发展水平和能源结构等进行修正，从而更加精确地核算研究区域的碳收支情况。再者，合理的补偿标准也应在参考固碳价格的基础上考虑到区域差异。

参考文献 References

[1] CANADELL J G. Land use effects on terrestrial carbon sources and sinks[J]. Science in China Series C: Life Sciences, 2002, 45(S1): 1–9

[2] HOUGHTON R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850–1990[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1999, 51(2): 298–313

[3] 李蓓蓓, 方修琦, 叶瑜, 等. 中国东北地区过去 300 年耕地开垦导致的碳收支[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(9): 1987–1996
LI B B, FANG X Q, YE Y, et al. Carbon emissions induced by cropland expansion in Northeast China during the past 300 years[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(9): 1987–1996

[4] 吴昊玥, 何艳秋, 陈柔. 中国农业碳排放绩效评价及随机性收敛研究——基于 SBM-Undesirable 模型与面板单位根检验[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1381–1391

WU H Y, HE Y Q, CHEN R. Assessment of agricultural carbon emission performance and stochastic convergence in China using SBM-Undesirable model and panel unit root test[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(9): 1381–1391

[5] BOLIN B. Changes of land biota and their importance for the carbon cycle[J]. Science, 1977, 196(4290): 613–615

[6] HOUGHTON R A. Changes in terrestrial carbon over the last 135 years[M]//HEIMANN M. The Global Carbon Cycle. Berlin, Heidelberg: Springer, 1993: 139–157

[7] RICHARDS J F, FLINT E P, DANIELS R C. Historic Land Use and Carbon Estimates for South and Southeast Asia: 1880–1980[R]. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 1994

[8] GUO L B, GIFFORD R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis[J]. Global Change Biology, 2002, 8(4): 345–360

[9] LIU J X, VOGELMANN J E, ZHU Z L, et al. Estimating California ecosystem carbon change using process model and land cover disturbance data: 1951–2000[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(14): 2333–2341

[10] RAVINDRANATH N H, MURTHY I K, CHATURVEDI R K, et al. Carbon forestry economic mitigation potential in India, by land classification[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2007, 12(6): 1027–1050

[11] 刘学荣, 杨琳, 王颖, 等. 基于土地利用变化的东北地区碳排放效应研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 107–114
LIU X R, YANG L, WANG Y, et al. Assessment of carbon emissions based on land use change in Northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 107–114

[12] 王刚, 张华兵, 薛菲, 等. 成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1170–1182
WANG G, ZHANG H B, XUE F, et al. Relations between land use carbon budget and economic development at county level in Chengdu City[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(7): 1170–1182

[13] 刘慧灵, 伍世代, 韦素琼, 等. 基于低碳经济导向的土地利用结构优化研究——以福建省福州市为例[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 202–208
LIU H L, WU S D, WEI S Q, et al. Optimization research of low-carbon economy oriented land use structure — A case study in Fuzhou City of Fujian Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 202–208

[14] 崔盼盼, 张艳平, 张丽君, 等. 中国省域隐含碳排放及其驱动机理时空演变分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 879–892
CUI P P, ZHANG Y P, ZHANG L J, et al. Analysis on the spatial and temporal evolution of indirect carbon emissions and its driving mechanism in China[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 879–892

[15] 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. Growth mechanism and trend forecast of carbon emission from farmland inputs in Hunan Province based on Stirpat and GM (1, 1) model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(2): 345–352

[16] 柳荻, 胡振通, 靳乐山. 生态保护补偿的分析框架研究综述[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 380–392
LIU D, HU Z T, JIN L S. Review on analytical framework of eco-compensation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 380–392

[17] 王雅敬, 谢炳庚, 李晓青, 等. 长株潭经济圈土地利用变化的碳排放量及生态补偿研究[J]. 生态科学, 2017, 36(4): 160–165
WANG Y J, XIE B G, LI X Q, et al. Research on benefit carbon emission and countervail ecological system of Chang-Zhu-Tan land exploit[J]. Ecological Science, 2017, 36(4): 160–165

[18] GREEN C. Potential scale-related problems in estimating the costs of CO_2 mitigation policies[J]. Climatic Change, 2000, 44(3): 331–349

[19] 彭文甫, 周介铭, 徐新良, 等. 基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7244–7259
PENG W F, ZHOU J M, XU X L, et al. Effect of land use changes on the temporal and spatial patterns of carbon emissions and carbon footprints in the Sichuan Province of Western China, from 1990 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7244–7259

[20] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804–812
FANG J Y, GUO Z D, PIAO S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981–2000[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(6): 804–812

[21] 王秋贤, 王登杰, 颜晓妹, 等. 基于脱钩理论的烟台市碳排放效应分析[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 313–318
WANG Q X, WANG D J, YAN X M, et al. An analysis on carbon emission effects in Yantai City based on decoupling theory[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 313–318

[22] 李颖, 黄贤金, 甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(S2): 102–107
LI Y, HUANG X J, ZHEN F. Effects of land use patterns on carbon emission in Jiangsu Province[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(S2): 102–107

[23] 苏雅丽, 张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 152–156
SU Y L, ZHANG Y F. Study on effects of carbon emission by land use patterns of Shaanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(1): 152–156

[24] 何勇. 中国气候、陆地生态系统碳循环研究[M]. 北京: 气象出版社, 2006
HE Y. Research on Carbon Cycle in Climate and Terrestrial Ecosystems in China[M]. Beijing: Meteorological Press, 2006

[25] 赖力, 黄贤金, 刘伟良, 等. 基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析——以 2002 年江苏为例[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1285–1292

LAI L, HUANG X J, LIU W L, et al. Adjustment for regional ecological footprint based on input-output technique: A case study of Jiangsu Province in 2002[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1285–1292

[26] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 463–469
DUAN X N, WANG X K, LU F, et al. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 463–469

[27] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2010
LAI L. Carbon emission effect of land use in China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2010

[28] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析: 1995—2004[J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(6): 158–161
XU G Q, LIU Z Y, JIANG Z H. Decomposition model and empirical study of carbon emissions for China, 1995–2004[J]. China Population, Resources and Environment, 2006, 16(6): 158–161

[29] 张秀梅, 李升峰, 黄贤金, 等. 江苏省 1996 年至 2007 年碳排放效应及时空格局分析[J]. 资源科学, 2010, 32(4): 768–775
ZHANG X M, LI S F, HUANG X J, et al. Effects of carbon emissions and their spatio-temporal patterns in Jiangsu Province from 1996 to 2007[J]. Resources Science, 2010, 32(4): 768–775

[30] TAO Y G, HUANG Z F. Review of accounting for carbon dioxide emissions from tourism at different spatial scales[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 246–254

[31] CAI Z C, KANG G D, TSURUTA H, et al. Estimate of CH_4 emissions from year-round flooded rice fields during rice growing season in China[J]. Pedosphere, 2005, 15(1): 66–71

[32] MA C B, STERN D I. China's changing energy intensity trend: a decomposition analysis[J]. Energy Economics, 2008, 30(3): 1037–1053

[33] 谢守红, 王利霞, 邵珠龙. 国内外碳排放研究综述[J]. 干旱区地理, 2014, 37(4): 720–730
XIE S H, WANG L X, SHAO Z L. Review on carbon emissions researches at home and abroad[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(4): 720–730

[34] 孙贤斌, 傅先兰, 倪建华, 等. 安徽省会经济圈碳排放强度与生态补偿研究[J]. 地域研究与开发, 2012, 31(1): 135–138
SUN X B, FU X L, NI J H, et al. Intensity of carbon emissions and ecological compensation in the city ecology circle in Anhui Province[J]. Areal Research and Development, 2012, 31(1): 135–138

[35] 王亮. 盐城市土地利用变化碳排放效益及影响因素分解研究[J]. 生态科学, 2015, 34(5): 122–128
WANG L. Research for decomposition results of impact factors about carbon emission by land use patterns in Yancheng City[J]. Ecological Science, 2015, 34(5): 122–128

[36] 刘建华, 许皞, 王耀, 等. 基于土地利用格局变化的生态风险与固碳功能评价——以河北省黄骅市为例[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(8): 1217–1226
LIU J H, XU H, WANG Y, et al. Evaluation of ecological risk and carbon fixation from land use change: A case study of Huanghua City, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(8): 1217–1226