

中国耕地利用净碳汇与农业生产的时空耦合特征

吴昊玥^{1,2}, 孟越³, 黄瀚蛟⁴, 陈文宽³

(1.西南科技大学农学院,四川 绵阳 621010;2.赫尔辛基大学农业与林业学院,赫尔辛基 00014;
3.四川农业大学商旅学院,四川 都江堰 611830;4.西北农林科技大学林学院,陕西 杨凌 712100)

摘要: 深入分析中国耕地利用碳源/汇,可为实现“双碳”目标提供耕地领域的的数据参考。以中国 30 省(市、自治区)作为研究范围(港、澳、台、西藏数据缺失过多,难以纳入分析),核算耕地利用碳排放、碳吸收量,根据二者差值分析净碳效应,刻画其时空演进特征,进而采用耦合协调度与改进的 Tapio 耦合指数探索净碳效应与农业产值的关系变化。结果表明:(1)20 年间,耕地利用碳排放量均值为 2.33×10^8 t,呈先升后降态势,于 2015 年达到峰值 2.63×10^8 t;碳吸收量则由 5.19×10^8 t 升至 7.86×10^8 t;净碳汇由 3.19×10^8 t 增至 5.40×10^8 t,表明中国耕地利用系统始终呈现为碳盈余,碳汇效应随时间推移不断增强。(2)就时序特征而言,净碳汇历经波动不定、高速增长、稳定增长 3 个阶段。从空间格局来看,净碳汇呈自东向西逐次递减的分布特征。(3)从数量角度而言,中国耕地利用净碳汇与农业生产的关系已由全局失调改善为部分协调;从速率角度而言,二者增速关系在多数年份体现为经济主导型耦合,省域状态由若干类型并存演进为以经济主导型耦合居多。据此,应加快耕地利用方式自农资驱动向技术驱动转型,促进种植业全产业链碳减排,分类分批推进排放大省减源增汇。

关键词: 耕地利用净碳汇;碳排放;时空特征;耦合协调度;Tapio 脱钩指数

中图分类号:F323.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2022)05-0360-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.044

Spatiotemporal Coupling Between the Net Carbon Sequestration of Cropland Use and Agricultural Production in China

WU Haoyue^{1,2}, MENG Yue³, HUANG Hanjiao⁴, CHEN Wenkuan³

(1.College of Agronomy, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010; 2.Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinki, Helsinki 00014; 3.College of Business and Tourism, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan, Sichuan 611830; 4.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: An in-depth analysis of China's cropland use carbon source / sink can provide data reference in the field of cropland for the realization of the “double carbon” goal. Taking mainland China as the study area while excluding Hong Kong, Macao, Taiwan, and Tibet because of data unavailability, the carbon emission and carbon sequestration of cropland use in 30 provinces (cities and autonomous regions) of China from 2000 to 2019 were calculated, and the net carbon effect was analyzed according to the difference between emissions and sequestration, then its spatial and temporal evolution characteristics were described. Furthermore, the coupling coordination degree and the improved Tapio coupling index were used to explore the relationship between net carbon effect and agricultural output value. The results showed that: (1) In the past 20 years, the average carbon emission of cropland use was 2.33×10^8 t, rising first and then falling, and reaching the peak of 2.63×10^8 t in 2015. The sequestration increased from 5.19×10^8 to 7.86×10^8 t. Accordingly, the net carbon sequestration rose from 3.19×10^8 to 5.40×10^8 t, indicating that the cropland use system in China always displayed an increasing carbon surplus, and the carbon sink effect increased over time. (2) In terms of the temporal characteristics, the net carbon sequestration experienced three stages fluctuating, high speed growth and stable growth. From the perspective of spatial pattern, the net carbon sequestration exhibited gradual decline from east to west. (3) In terms of quantity, the relationship between the net carbon seques-

tration and agricultural economy evolved from overall imbalance to partial coordination. From the perspective of speed, the growth relationship of the two was in economy-leading coupling in most years, and the provincial coupling status of the two evolved from coexistence of several types to the economy-leading coupling. Consequently, it's necessary to accelerate the transformation of cropland use mode from agricultural materials driven to technology driven. Besides, we should promote the carbon emission reduction of the whole industrial chain of the planting industry, and promote the emission reduction and the increase of sources in large emission provinces by categories and batches.

Keywords: net carbon sequestration of cropland use; carbon emission; spatiotemporal characteristics; degree of coupled coordination; Tapio decoupling index

温室气体减排、应对气候暖化是现阶段世界各国的重要议题。农地、林地利用作为仅次于工业生产的第 2 碳源,碳排放已达到全球人为排放总量的 23%^[1]。耕地利用既是重要的碳排放源,又是显著的碳吸收汇,若作物碳汇在抵消生产排放之外仍有剩余,将对全局温室气体减排形成正向贡献。区别于其他生产活动减排目标的单一性,耕地利用的双重碳效应使其在碳达峰、碳中和推进过程中扮演着独特角色。相较于“双碳”目标的时间节点,中国耕地利用碳排放处于何种阶段?生产系统内部碳抵消情况如何?如何提升其对温室气体减排增汇的贡献?回答上述问题,要求对耕地利用碳排放、碳吸收量进行全面核算,分析耕地利用系统的碳平衡情况,并探讨其净碳效应与农业生产的关系变化,为实现“双碳”愿景提供耕地利用层面的数据参考。

为把握耕地利用碳排放现状,学界采用田间实测、模型模拟和排放系数等多种方法展开核算研究,排放系数法因技术简单、便于地区横向对比而被广泛应用于全国、省域尺度的研究^[2],已有学者^[3]依托现已较为成熟的农业碳排放核算清单与系数对耕地利用碳排放进行核算。相关核算研究可归纳为 2 类角度:一是关注某类碳源,例如土壤氧化亚氮^[4]、农业废弃物处理^[5-6],有利于深入考察特定环节温室气体排放现状及减排方向^[7];二是测量多类碳源产生的排放总量^[8],可把握耕地利用全过程的碳效应,这类估算角度更加常见。李波等^[9]构建了包含化肥、农药、农膜、翻耕、灌溉、柴油 6 项排放因子的农业碳排放核算清单,逐渐被运用于耕地利用碳排放研究中^[10-11]。周思宇^[12]运用生命周期法确定核算边界,基于土壤管理、役畜管理、燃料燃烧、农用品投入、秸秆处理 5 类源头对东北地区耕地利用碳排放进行核算,清单较早期研究已有显著完善。除了排放属性之外,耕地土壤及覆被具有固碳功能^[13],已有研究^[14]多采用实测与模型 2 种手段探析土壤碳库变化过程,由于稳定土壤有机碳的形成时间较长,而农作物大多为一年生,相关研究较少同时分析农作物碳汇

与土壤碳储量变化,而是将作物的年净生物量所含碳量视作耕地利用固碳量^[15-16],采用单位面积法、质量平衡法和作物净初级生产力等方法进行测算,其中,作物净生产力法兼顾便易性和精确性,已被普遍应用于区域作物碳汇核算研究^[17]。

作为生产活动的副产品,碳排放与经济发展的关系同样是研究热点。对于环境指标与经济指标的关系分析,最为常用的方法是脱钩模型。脱钩原指 2 个或多个物理量之间的相互关系减弱的现象,世界经合组织(OECD)^[18]将其引入到农业政策发展研究中,Tapio^[19]则进一步提出包含强脱钩、弱脱钩等 8 种类型的脱钩指数。在耕地利用碳效应研究领域,李波^[20]、田云等^[21]运用 Tapio 环比脱钩指数分别对中国和湖北省耕地利用碳排放与农业经济的年际关系展开分析;吴昊玥等^[22]采用 Tapio 弧弹性脱钩指数检视 2000—2019 年中国粮食主产区耕地利用碳排放与粮食生产的中长期关系,杨果等^[17]、陈柔等^[23]则将 Tapio 环比脱钩指数应用于作物碳汇与经济增长之间的年际关系探讨。

综观现有研究,耕地利用碳源/汇核算清单不断扩充完善,碳排放与农业生产的关系也已有大量探索,但尚存改进空间:将碳排放、碳吸收有机衔接的核算研究相对较少,区域耕地利用系统碳平衡的客观状态有待揭示,净碳效应和农业生产的互动关系也尚待检验。在讨论作物碳汇与经济发展的耦合关系时,现有研究往往选用 Tapio 脱钩指数分类展开分析。然而,Tapio 脱钩指数旨在验证一定时期内资源环境指标与经济增长之间关系是否呈稳定持续的减弱趋势,适用对象为 2 个反向指标,而作物碳汇与经济产值为同向指标,若忽略耦合状态的内在含义而直接沿用 Tapio 脱钩指数分类,将导致对应解释较为牵强,也难以勾勒二者关系的实际特征。同时,脱钩是一个长期趋势概念,而非短期意义上的随机波动和偏离,然而较多研究采用环比形式进行年际脱钩指数测算,与脱钩过程的长期性和趋势性要求相悖。

鉴于此,本文在核算 2000—2019 年中国省域(限于数据可获取性,港、澳、台、西藏除外)的耕地利用碳排放、碳吸收量的基础上,基于二者差值判断净碳效应,探索其时空演进过程,再采用耦合协调度模型对耕地利用净碳汇和农业产值的数量关系变化展开探讨,根据拓展后的 Tapio 耦合指数对净碳汇与农业产值的增速协调程度进行分析。本文的边际贡献为:(1)兼顾耕地利用碳源/汇双重属性,考虑农用物资、稻田甲烷、土壤排放和秸秆燃烧 4 类排放源和作物固碳 1 类吸收源,判断中国耕地利用净碳效应演进过程及发展趋势,以完善既有耕地利用净碳汇核算研究。(2)从数量与速度双重角度出发,考察省域耕地利用净碳汇与农业产值之间的耦合状态与变化过程,对净碳效应视角下的耕地利用与经济产出的关系研究予以补充。(3)将弧弹性 Tapio 脱钩指数拓展为耦合指数,针对净碳汇与经济产出的变化特征重新定位 8 种耦合类

型,使其更加契合 2 个同向指标的长期内在关系,可推广应用于生态指标与经济指标的长期关系探讨。

1 材料与方法

1.1 耕地利用净碳汇核算

耕地利用净碳汇即为碳吸收量与碳排放量之间的差值,计算公式为:

$$C=S-E$$

(1)

式中: C 为耕地利用净碳汇量(t); S 和 E 分别为碳吸收量(t)与碳排放量(t)。若 $C>0$,耕地利用系统呈碳汇效应;若 $C<0$,则为碳源效应;当 $C=0$ 时,作物碳吸收量刚好抵消耕地利用过程造成的碳排放,实现碳平衡。碳排放源主要包含农用物资、稻田甲烷、土壤氧化亚氮和秸秆燃烧 4 类,将各类源头的排放量加总,即为耕地利用碳排放量。碳吸收源主要来自作物在生命周期中通过光合作用从大气中吸收并固定 CO_2 所形成的有机碳量。具体核算方式见表 1。

表 1 耕地利用碳效应来源、核算公式及所需数据说明

类别	测算公式	公式说明	来源
农用物资 碳排放	$E_{\text{material}}=\sum_{i=1}^I\sum_{m=1}^ME_{im}=\sum_{i=1}^I\sum_{m=1}^Mh_{im}\cdot\delta_m\quad(2)$	式中: E_{material} 为农用物资碳排放量(t); E_{im} 、 h_{im} 分别为省份 i 因子 m 的碳排放量(t)与各类农用物资使用量(t); δ_m 为因子 m 的碳排放系数(kg ce/kg)	文献[9]
稻田甲烷 排放	$E_{\text{rice}}=\sum_{i=1}^IE_{\text{rice},i}=\sum_{i=1}^Iq_i\cdot f_i\quad(3)$ $E_{\text{soil}}=E_{\text{sd}}+E_{\text{si}}\quad(4)$ $E_{\text{sd}}=(N_{\text{fer}}+N_{\text{straw}})\times ef_{\text{sd}}\quad(5)$ $N_{\text{straw}}=\sum_{i=1}^I\sum_{k=1}^KN_{\text{straw},i,k}$	式中: E_{rice} 为稻田碳排放总量(t); $E_{\text{rice},i}$ 、 q_i 、 f_i 依次为省区 i 的稻田碳排放(t)、水稻种植面积(hm^2)和稻田甲烷排放因子(kg/hm^2) 式中: E_{soil} 为土壤氧化亚氮排放总量(t); E_{sd} 为直接排放(t); E_{si} 为间接排放(t) 式中: N_{fer} 为化肥氮输入量(t); N_{straw} 为秸秆还田氮输入量(t); ef_{sd} 为直接排放因子($\text{kg N}_2\text{O}/\text{kg}$) 式中: N_{straw} 为秸秆还田氮输入量(t); K 为农作物种类数; $N_{\text{straw},i,k}$ 、 Y_{ik} 分别表示省区 i 作物 k 的秸秆还田氮输入量(t)和经济产量(t); J_i 为省区 i 的秸秆还田率(%); H_k 、 g_k 、 b_k 、 r_k 依次为作物 k 的经济系数、根冠比、秸秆含氮量、经济产品部分的干重比	文献[24]
土壤氧化 亚氮排放	$= \sum_{i=1}^I\sum_{k=1}^K\left(\left(\frac{Y_{ik}}{H_k}-Y_{ik}\right)\times r_k\times J_i\times b_k\right.\\ \left.+\frac{Y_{ik}}{H_k}\times r_k\times g_k\times b_k\right)\quad(6)$ $E_{\text{si}}=E_{\text{atmos}}+E_{\text{leach}}=(N_{\text{fer}}+N_{\text{straw}})\times V\times\\ ef_{\text{atmos}}+(N_{\text{fer}}+N_{\text{straw}})\times L\times ef_{\text{leach}}\quad(7)$	式中: E_{atmos} 为大气氮沉降氧化亚氮排放(t); V 为 NH_3 和 NO_x 挥发率(%); ef_{atmos} 为对应排放因子($\text{kg N}_2\text{O}/\text{kg}$); E_{leach} 为土壤氮淋溶氧化亚氮排放(t); L 为氮淋溶和径流的氮量损失率(%); ef_{leach} 为对应排放因子($\text{kg N}_2\text{O}/\text{kg}$)	
秸秆燃烧 碳排放	$E_{\text{straw}}=\sum_{i=1}^I\sum_{k=1}^KE_{\text{straw},i,k}\\ =\sum_{i=1}^I\sum_{k=1}^K(Y_{ik}\times s_k\times o_{ik}\times l_k\times ef_k)\quad(8)$	式中: E_{straw} 为秸秆燃烧碳排放量(t); $E_{\text{straw},i,k}$ 、 Y_{ik} 、 o_{ik} 依次为省区 i 作物 k 的秸秆燃烧碳排放量(t)、经济产量(t)、秸秆露天焚烧比例(%); l_k 、 s_k 、 ef_k 为作物 k 的燃烧效率、草谷比、秸秆露天焚烧排放因子(g/kg)	文献[25]
作物固碳量	$S=\sum_{i=1}^I\sum_{k=1}^KS_{ik}=\sum_{i=1}^I\sum_{k=1}^Kc_kY_{ik}(1-r'_k)/H_k\quad(9)$	式中: S 为作物固碳总量(t); S_{ik} 为省区 i 作物 k 的碳吸收量(t); c_k 为作物 k 的碳吸收率(kg ce/kg); r'_k 为含水系数; K 、 Y_{ik} 、 H_k 的含义与公式(6)中相同	文献[26]

根据全球增温潜势系数,1 kg CH_4 和 N_2O 产生的温室效应相当于 9.272 7,81.272 7 kg 标准碳^[27],将统一按照对应比例进行折算,以便后续比较与分析。

1.2 耦合协调度

参考田云等^[28]的研究,耦合协调度可刻画多要素或多系统之间的协调发展水平。据此,构建耕地利

用净碳汇与农业生产的耦合度模型,公式为:

$$W=2\sqrt{C\times A}/(C+A)$$

(10)

式中: W 为耦合度; C 表示耕地利用净碳汇量; A 表示农业产出,采用农业总产值来衡量。为消除量纲不统一的影响,对 C 和 A 采用极差法进行标准化。以公式(10)为基础,进一步构建耦合协调模型,公式为:

$$H=\sqrt{W\times D}\tag{11}$$
式中: H 为耦合协调度; D 为净碳汇与农业生产的综合发展度, $D=aC+bA$,考虑到生产与生态同等重要,对 a 和 b 取值均为 0.5。 H 的取值处于 $[0,1.0]$,若 H 趋近于 1.0,则系统间协调度越优,反之越差。当 $H\in[0,0.4)$ 时,系统间关系属于严重失调; $H\in[0.4,0.5)$ 时,属于初级失调; $H\in[0.5,0.6)$ 时,属于初级协调;当 $H\in[0.6,0.8)$ 时,属于良好协调;而当 $H\in[0.8,1.0]$ 时,属于优秀协调。

1.3 基于 Tapio 脱钩思想的耦合指数

脱钩指 2 个或多个变量之间的相互关系减弱的现象,现多被用于反映环境危害与经济绩效之间的联系,根据分类不同,包括 OECD、Tapio 脱钩指数等类型。其中,Tapio 脱钩指数所包含的指数分类最为详尽,可全面反映变量之间的细微变动状态^[19],其公式为:

$$\epsilon=\frac{\delta E/E}{\delta A/A}=\frac{(E_i-E_0)/E_0}{(A_i-A_0)/A_0}\tag{12}$$

式中: ϵ 为环境污染指标的经济增长弹性,即脱钩指数; δE 为环境污染指标变化量; E_i 和 E_0 分别为当期和基期的环境污染指标变化量; δA 为经济产值变化量; A_i 和 A_0 分别为当期和基期的经济产值。脱钩指数为一定期间内当前和基期环境污染变化率与经济产值变化率之比,反映环境污染变化对于经济产值变化的敏感程度。根据指数取值与经济含义,可划分为 8 种脱钩状态(图 1)。

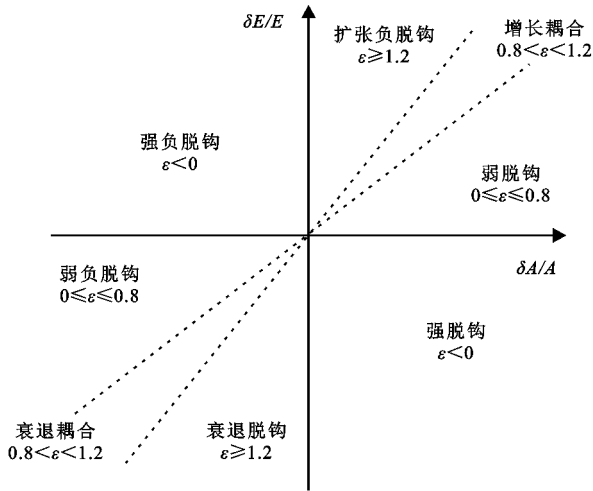
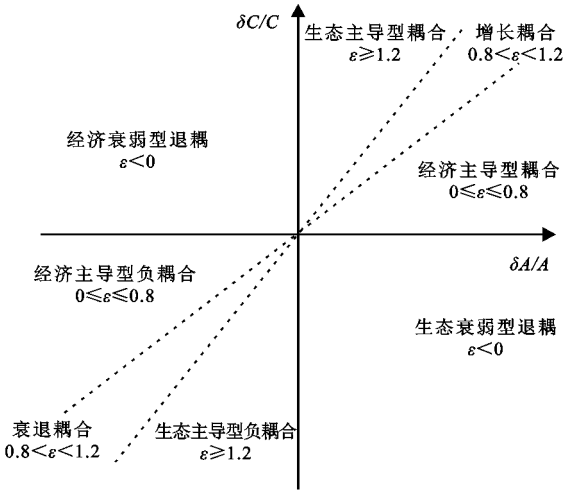


图 1 反向指标之间的脱钩关系类型划分

Tapio 脱钩类型中,强脱钩(第 4 象限)是最为理想的状态,即环境指标减少而经济指标增加。由于 Tapio 脱钩指数关注 2 个反向指标的关系,而净碳汇与农业产值为同向指标,不宜直接照搬 Tapio 脱钩指数概念及类型划分标准,因此,本文在原 Tapio 脱钩指数的基础上重新定义耕地利用净碳汇与经济产值的耦合指数,计算公式为:

$$\epsilon=\frac{\delta C/C}{\delta A/A}=\frac{(C_i-C_0)/C_0}{(A_i-A_0)/A_0}\tag{13}$$

式中: ϵ 为耕地利用净碳汇的农业产值增长弹性,即耦合指数; δC 表示耕地利用净碳汇变化量; C_i 和 C_0 分别为当期和基期的净碳汇; δA 为农业产值变化量, A_i 和 A_0 分别为当期和基期的产值。耦合指数为一定时期内当前和基期净碳汇变化率与农业产值变化率之比,反映二者发展过程的耦合程度,定义耦合状态见图 2。



注:经济主导型耦合表示净碳汇增速明显慢于农业产值增速;增长耦合表示净碳汇增速与农业产值增速较为一致;生态主导型耦合表示净碳汇增速明显快于农业产值增速;经济衰退型退耦表示净碳汇增长而农业产值衰退;经济主导型负耦合表示净碳汇降速明显慢于农业产值降速;衰退耦合表示净碳汇与农业产值降速较为一致;生态主导型负耦合表示净碳汇降速明显快于农业产值降速;生态衰退型退耦表示农业产值增长而净碳汇衰退。

图 2 同向指标之间的耦合关系类型划分

区别于反向指标,2 个同向指标的理想关系为同步增加,即正向耦合关系。因此,第 2、第 3、第 4 象限的状态劣于第 1 象限(图 2)。不过,尽管第 1 象限表示净碳汇和经济产值均在增加,但该象限内的耦合类型之间依然存在细微差别:生态优先型耦合 $\epsilon\in[1.2,+\infty]$ 和经济优先型耦合 $\epsilon\in[0,0.8]$ 均表明生态和经济之间的增速存在失衡,对比而言,当且仅当 $\epsilon\in(0.8,1.2)$,净碳汇增速与经济产值增速较为一致时为最佳状态,即增长耦合。

1.4 数据来源

研究需要 2000—2019 年中国 30 省份(港、澳、台、西藏地区除外)的耕地利用碳排放、碳吸收所涉及活动数据、核算系数和狭义农业总产值数据,活动数据源于历年《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》和各省统计年鉴,系数来自前文所列相关文献。基于 2000 年不变价格对农业总产值进行平减,以剔除通货膨胀带来的影响。

2 结果与分析

2.1 中国耕地利用净碳汇时空特征分析

2.1.1 中国耕地利用净碳汇时序演进过程 基于所

建清单对 2000—2019 年中国耕地利用碳源/汇进行核算,绘制时序演进图。由图 3 可知,就总量而言,中国年均耕地利用碳排放、碳吸收分别为 2.33×10^8 t 与 6.61×10^8 t。20 年间,碳排放总量由 2.00×10^8 t 增长至 2.46×10^8 t,碳吸收总量则由 5.19×10^8 t 增长为 7.86×10^8 t,增幅分别为 22.9%和 51.3%。碳吸收基数与增速均高于碳排放,使得净碳汇由 2000 年的 3.19×10^8 t 增至 2019 年的 5.40×10^8 t,年均达 4.28×10^8 t。根据时序特征,可将净碳汇发展历程划分为波动不定(2000—2003 年)、高速增长(2004—2015 年)、平稳增长(2016—2019 年)3 个阶段,碳汇功能不断凸显,为“双碳”承诺的兑现形成有益贡献。

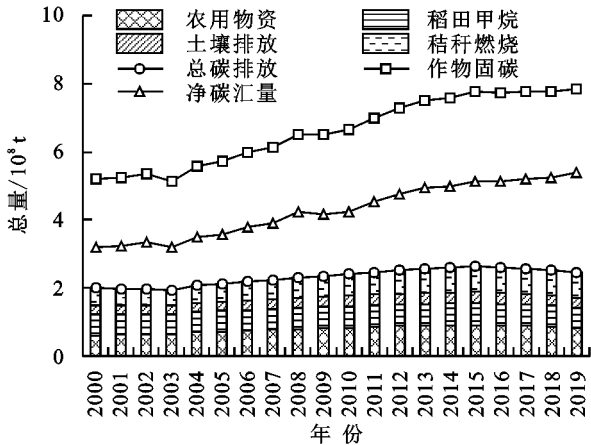


图 3 2000—2019 年中国耕地利用碳排放、碳吸收与净碳汇的时序演进过程

从细分结构来看,各排放源贡献不一,发展趋势异同并存。20 年间,各排放源平均占比从大到小依次是农用物资(33.7%)、稻田甲烷(26.7%)、秸秆燃烧(26.6%)、土壤氧化亚氮(13.0%)。就各源头发展趋势而言,农用物资碳排放整体表现为上升态势,2000 年为 6.00×10^7 t,此后不断增长,于 2015 年达到峰值 9.08×10^7 t,转而开始下降,至 2019 年降为 8.09×10^7 t,其演变轨迹折射出我国典型的农资投入驱动型农业增长方式。稻田碳排放发展轨迹波动明显,从 2000 年的 6.38×10^7 t 降至 2003 年的 5.63×10^7 t,其后转而上升,同样于 2015 年达到峰值 6.43×10^7 t,继而逐年下降,2019 年降至 6.17×10^7 t。土壤排放基数较小但波动剧烈,由基期的 2.67×10^7 t 平稳增至 2014 年的 3.32×10^7 t,自 2015 年起逐年回落,2019 年降为 2.92×10^7 t。秸秆燃烧碳排放早期演进轨迹与稻田甲烷较为相似,2000—2003 年呈下降趋势,自 4.95×10^7 t 降至 4.53×10^7 t,2004 年出现回弹,高速增长至 2015 年的 7.45×10^7 t,此后稳定在该水平附近。综合而言,除秸秆燃烧碳排放稳定在峰值之外,其余 3 类碳源均在 2015 年达峰后平稳下降。考虑到国家对绿色生产、温室气体减排的日益重视,

对农业的低碳约束将日趋严格,可以判断耕地利用碳排放已于 2015 年达峰,峰值为 2.63×10^8 t。

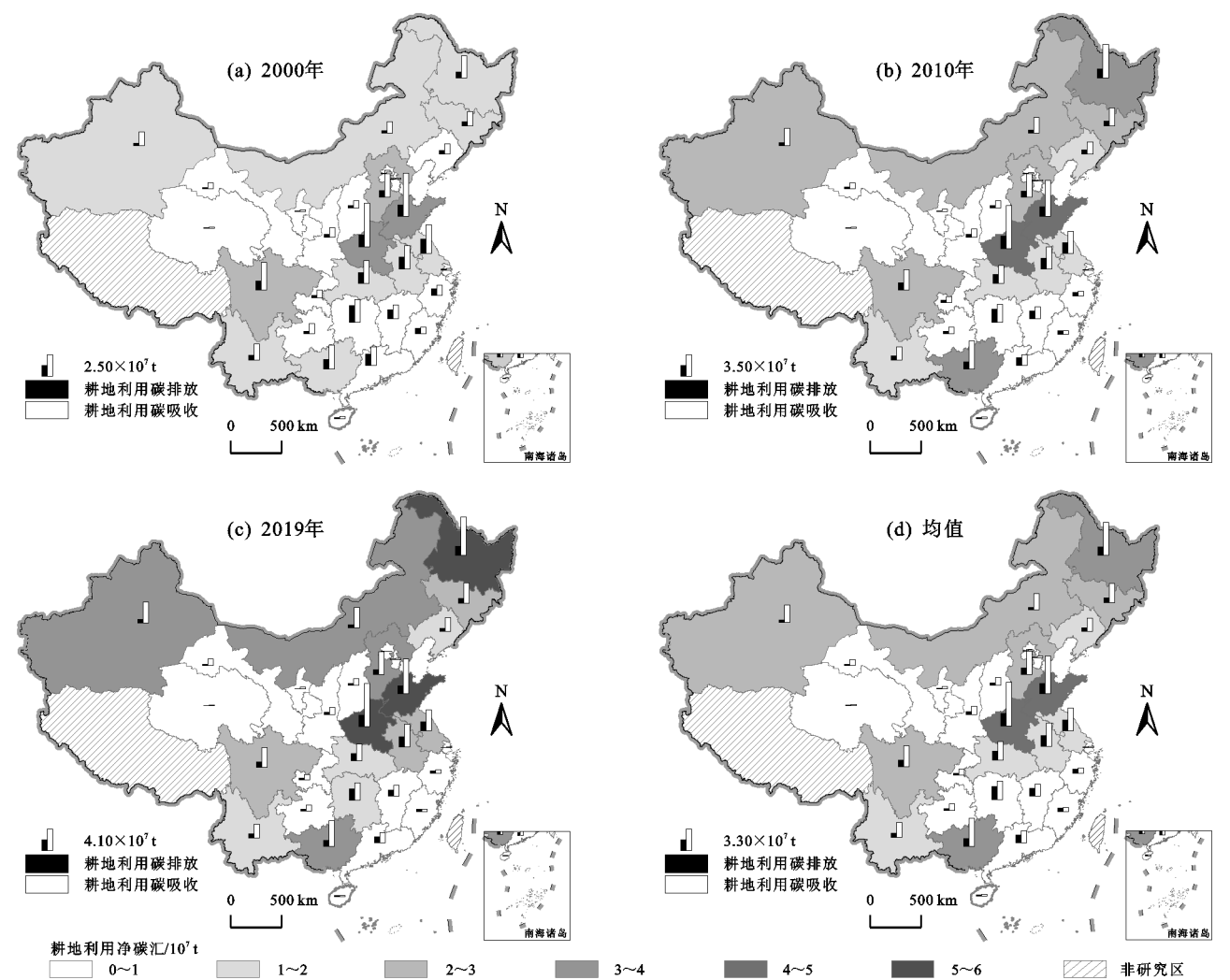
2.1.2 中国耕地利用净碳汇空间分布格局 基于 2000 年、2010 年、2019 年和 2000—2019 年均值,根据研究区域对应年份的耕地利用碳排放、碳吸收和净碳汇绘制分布图(图 4),以直观展示空间格局。

中国耕地利用净碳汇呈高值点状散乱分布、低值片状集聚分布的空间格局。就年均净碳汇量而言(图 4d),河南以 4.76×10^7 t 在所有省份中独占鳌头,其次为山东(4.27×10^7 t),黑龙江、广西处于 $3.00\times 10^7\sim 4.00\times 10^7$ t,河北、新疆、吉林、四川、内蒙古 5 省(自治区)位于 $2.00\times 10^7\sim 3.00\times 10^7$ t,而安徽、江苏、云南、湖北、辽宁 5 省则处于 $1.00\times 10^7\sim 2.00\times 10^7$ t,其余 16 省份均低于 1.00×10^7 t。随着时间推移,多地耕地利用碳吸收量呈增长态势,碳排放量呈先增后降趋势,由于碳吸收量增幅大于碳排放量,导致净碳汇量整体有所增加。2000 年(图 4a),仅山东、河南 2 省的净碳汇量高于 3.00×10^7 t,其余 17 省均低于 3.0×10^7 t。到 2010 年(图 4b),除上海、北京、福建等个别省份的净碳汇量有所下降之外,其余地区增幅不一,尤其是河南、山东,已跃升至 4.0×10^7 t 以上。到 2019 年(图 4c),河南、黑龙江、山东 3 省将最高等级突破至 $5.00\times 10^7\sim 6.00\times 10^7$ t。总体而言,处于净碳汇高值区间的省份数量不断增加,绝对水平也有所上升,表明中国耕地利用系统的碳盈余优势日益凸显。

2.2 中国耕地利用净碳汇与农业生产的协调性分析

2.2.1 中国耕地利用净碳汇与农业生产的耦合协调度 根据省域净碳汇与经济产值的耦合协调度,按照分级标准将 30 省(市、自治区)划分为 5 种类型,并绘制 2000 年、2010 年和 2019 年的对应分布图(图 5)。

经过 20 年演进,中国耕地利用净碳汇与农业生产实现了由全局失调向多数协调的优化,二者关系呈逐渐改善态势。考察期初(图 5a),仅山东、河南 2 省处于良好协调阶段,河北、江苏、四川 3 省为初级协调,黑龙江、安徽、广东等 6 地则为初级失调,而其余 19 个省份处于严重失调,该时点的特征为全局失调。到考察中期(图 5b),绝大多数省份的耦合协调度有所提高,山东、河南已自良好协调顺利过渡到优秀协调,河北、黑龙江、江苏 3 省成为良好协调类型的新梯队,初级协调覆盖面扩大至吉林、湖北等 6 个省份,初级失调省份同样增加到 6 个,而严重失调类型缩减到北京、天津、上海等 13 个地区,这一时点的特征为部分协调。到考察期末(图 5c),优秀协调等级仍为山东、河南 2 省,四川、吉林、新疆、安徽、广西等地加入良好协调行列,初级协调省份依然是 6 个,江西、贵州、陕西、甘肃 4 省则从严重失调改善到初级失调,仅有 10 个省份保持严重失调状态。在该时间节点,失调省份与协调省份呈分庭抗礼格局。



注:基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1699的标准地图制作,底图无修改。下同。

图 4 主要年份中国耕地利用碳排放、碳吸收与净碳汇的空间分布

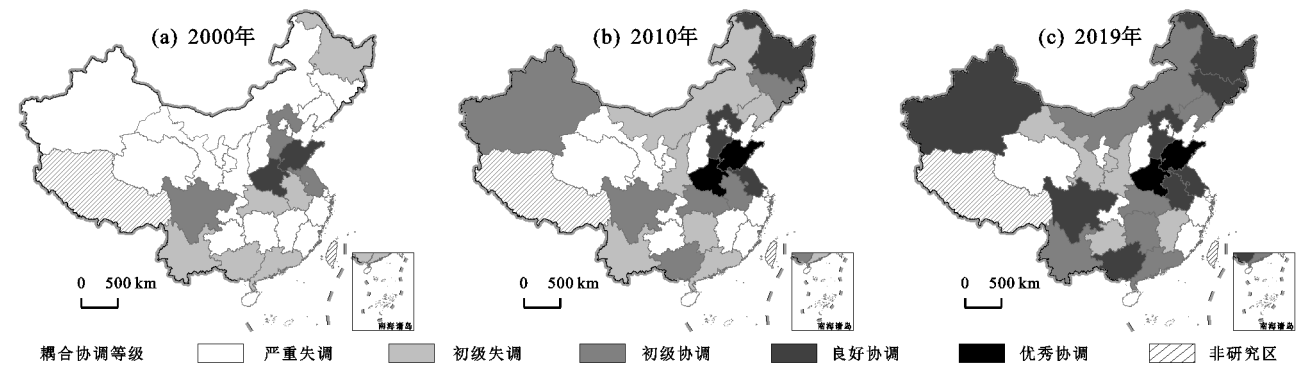


图 5 主要年份中国省域耕地利用净碳汇与农业产值的耦合协调度

2.2.2 中国耕地利用净碳汇与农业生产的 Tapio 耦合指数 根据 2000—2019 年中国耕地利用净碳汇变化率与农业产值变化率的演进情况,判断其 Tapio 耦合状态(图 6)。

研究期间,耦合指数散点多位于第 1 象限。2003 年,净碳汇负向增长而农业产值正向增长,呈生态衰弱型退耦;2008 年,二者增速较为一致,呈增长耦合态势;在其余年份,二者关系均体现为经济主导型耦合。20 年来,我国农业总产值年均增速高达 4.34%,

而净碳汇增速仅为 2.80%,农业经济系统整体发展领先于耕地碳汇系统。从 2010 年起,散点演进趋势愈发偏向于横轴,表明农业产值变动率大于净碳汇变动率,逐渐偏离增长耦合这一最优状态,呈现出典型的经济主导型耦合特征。

为判断不同阶段各省耕地利用净碳汇量与农业产值增速的耦合程度,以 10 年为界,分别对 2000—2009 年和 2010—2019 年的弧弹性 Tapio 耦合指数进行测算,对应象限图见图 7。

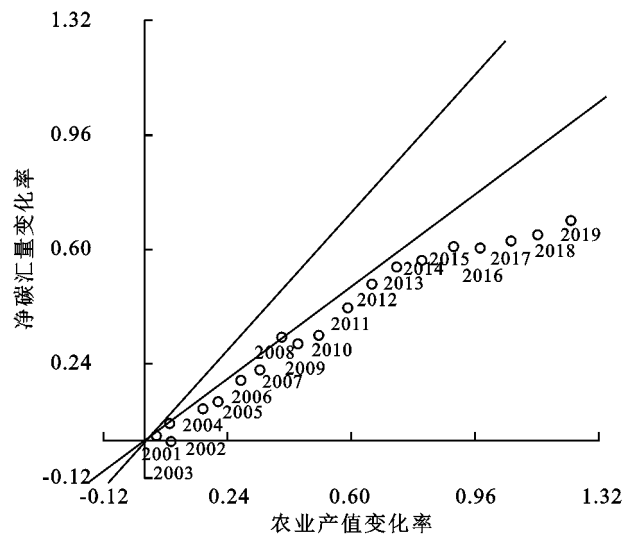
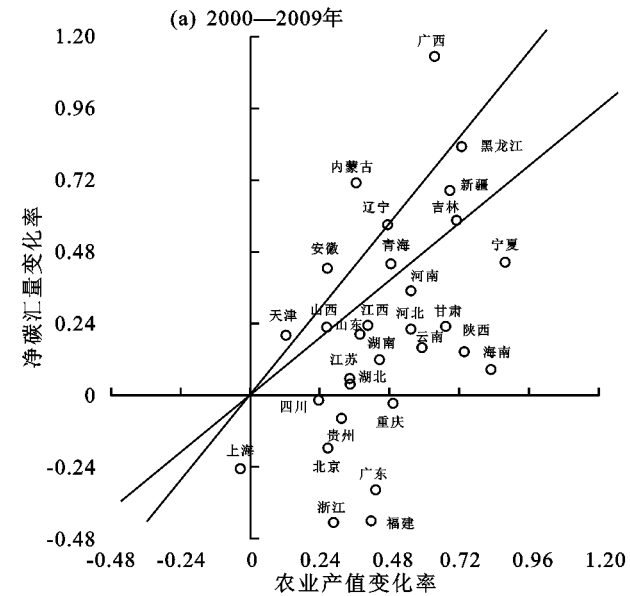


图 6 2000—2019 年中国耕地利用净碳汇与总产值的 Tapio 耦合指数

考察期前段(图 7a),关系类型较为多元,以经济主导型耦合为主,增长耦合与生态主导型耦合次之。具体而言,湖北、山东等 12 省属于经济主导型耦合;黑龙江、新疆、吉林、山西、青海 5 省属于增长耦合类



型,其中,黑龙江净碳汇与总产值增幅分别为 83.3% 和 73.0%,在省域间具有显著垂范作用;而天津、安徽、内蒙古、辽宁和广西属于生态主导型耦合,广西的净碳汇增幅高达 113.6%,在所有省份中遥遥领先;对比而言,四川、福建、贵州等 7 省属于生态衰弱型退耦,农业产值出现一定增长,但净碳汇量却出现下降;仅上海呈生态主导型负耦合,说明其耕地利用净碳汇与农业产值均有所下降,且前者降速快于后者,折射出上海农业生产整体规模不断缩减的发展历程。

考察期后段(图 7b),耦合格局发生明显变化,绝大多数省份汇聚于第 1 象限,且以经济主导型耦合居多。与考察期前半段相比,不再有属于生态主导型耦合的省份;原本表现为增长耦合的 5 省中,山西、吉林、新疆、黑龙江进入经济主导型耦合行列,青海与海南同属于生态衰弱型退耦;内蒙古、辽宁、广东、湖南、天津和江苏成为新的增长耦合梯队;上海、北京属于生态主导型负耦合,这与两市日益凸显的发展定位与功能导向息息相关。

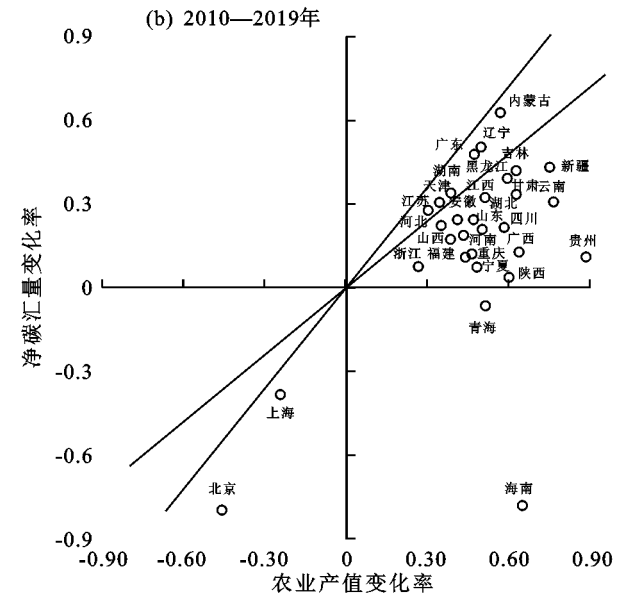


图 7 中国省域耕地利用净碳汇与经济产值的分段 Tapio 弧弹性耦合指数

3 讨论

本研究对 2000—2019 年中国省域(港、澳、台、西藏地区除外)耕地利用碳排放、碳吸收进行核算,基于二者差值判断各省净碳效应、探索其演进情况,采用耦合协调度与拓展后的 Tapio 耦合指数判断耕地利用净碳汇与农业生产的时空协调程度。研究表明,中国耕地利用系统具有较强碳汇效应,碳汇量总体呈上升态势,历经波动不定、高速增长、稳定增长 3 个阶段,表现为高值点状散乱分布、低值片状集聚分布。全国耕地利用净碳汇与经济产出的关系由全局失调优化为部分协调,在多数年份体现为经济主导型耦

合,表明减源增汇与作物增产的关系不断改善。本研究对现有耕地利用净碳汇核算研究有所完善,对净碳效应视角下的耕地利用与经济产出的关系研究有所丰富,可为我国“双碳”目标的实现提供耕地利用领域的的数据参考。

本研究发现,中国耕地利用系统呈碳盈余状态,这一判断与田云等^[25]的结论一致。具体而言,田云等^[25]以 1995—2010 年中国为研究对象发现,2010 年作物碳汇量为 6.68×10^8 t,农业碳排放量为 2.91×10^8 t,净碳汇量为 3.77×10^8 t,与本研究对应年份的核算结果较为接近。2 项研究所测碳排放、碳吸收和净碳汇的

年均规模存在区别,是源于核算范畴与研究时期差异。此外,笔者^[26]曾对2000—2018年中国耕地利用碳排放、碳吸收量进行核算发现,部分省份的净效应为碳源。究其原因,该研究在核算农用物资碳排放时涉及柴油、汽油、天然气等多种农用能源。然而,源于统计口径差异,农用能源消耗量不仅来自于种植业,也有部分产生于畜牧业、渔业等,基于能源消耗总量进行核算将高估耕地利用碳排放,进一步影响后续净碳效应评判。在优化核算清单后发现,尽管我国耕地利用过程涉及大量温室气体排放源,其仍能凭借自身强大的作物碳汇系统在短期温室气体减排进程中呈现出显著正外部性。但值得注意的是,尽管作物在生长周期中会通过光合作用吸收固定 CO_2 ,短期碳汇效益十分显著,对碳循环的长期影响仍显微弱,因其所形成的有机碳未来将通过作为食物或工业原料被消费、秸秆处理等途径返还到大气中。由于核算系数、消耗周期及消耗比例的不确定性,暂时无法对这部分碳排放量予以核算,但可以预计,若延续过去的高碳农资驱动型发展方式,不排除耕地利用系统在长期碳循环中成为碳源的可能性。

就时序演进而言,耕地利用净碳汇表现出鲜明的阶段式演进规律。第1阶段,耕地利用净碳汇起伏不定,2002—2003年间还有明显降幅。这一阶段的波动原因已得到学界公认,即低效益、低水平的生产特征使得农业发展陷入瓶颈,作物种植规模年际波动剧烈,农用物资投入积极性低,耕地利用碳排放、碳吸收量同样波动不定。第2阶段表现为净碳汇高速增长。自2004年起,我国陆续颁布涉农中央一号文件,有效激发了农业生产积极性,农资投入密度不断提高,作物种植规模加速扩张,高碳排、高碳汇并存格局日益凸显,且碳排放于2015年达峰,碳吸收同样出现新高点。这一阶段,我国农资投入驱动型的粗放式农业发展特征愈发明显。自2016年起,碳排放逐渐显露下降趋势,而碳吸收稳居高位水平,二者差值继续扩大,导致净碳汇继续保持增长,不过增速较前一阶段有所放缓。总体而言,中国耕地利用系统始终体现为碳盈余,且碳汇功能不断增强,2019年净碳汇量为 $5.40 \times 10^8 \text{ t}$,折合二氧化碳当量为 $1.98 \times 10^9 \text{ t}$,可抵消全国当年近1/5的人为排放总量,在全球温室气体减排进程中表现为较为显著的正外部性。不过,碳吸收量始终呈上升态势,而耕地利用碳排放同样居高不下,这一“高碳汇、高碳排”格局是以高强度农资投入的粗放式生产模式换取高速增长的结果。作物的自然属性为耕地利用系统赋予了碳汇功能,但所固定的碳又会

通过消耗分解而返还给大气。由此,耕地利用系统内部碳盈余并不意味着可以松懈对碳减排的重视,未来可结合各地发展阶段与特征,因地制宜加快推进化肥农药减量、秸秆资源化利用进程,农资驱动下的“高碳汇、高碳排”模式应逐渐被技术驱动下的“高碳汇、低碳排”模式所取代。在关注耕地利用本身碳效应之余,还应继续将视角扩展至相关产业链,从高效节能农业机械、节水灌溉设施等低碳装备研发,到生物农药、节约型施肥等低碳生产技术的推广应用,再到后续农产品收储、转运、售卖、消费等环节,多领域、多方面着手,加快推进种植业全产业链温室气体协同减排。

从空间格局来看,河南、黑龙江、山东、四川、河北等地始终保持高净碳汇量,当地耕地利用规模较大,作物固碳量本身相对较高,加之其秸秆露天焚烧比例明显低于其他粮食主产省,生产方式已开始自要素投入型转向技术驱动型,高碳汇与低碳排的双重特征是以上地区得以保持高净碳汇的缘由所在。湖南、湖北、安徽、江西等水稻主产省则表现出高碳排与高碳汇的特性,其作物生产系统碳汇功能较强,但同时伴随大量稻田甲烷排放,加之对化肥、农药等高碳农资的依赖度较大、秸秆露天焚烧比例较高,导致碳排放量远超其他产粮大省,进而削减净碳汇量。青海、宁夏等地的耕地利用规模较小,难以在净碳汇量上有突出表现,但不能否认的是,在对应作物固碳量下,当地农药、化肥、农膜等农资的投入强度几乎在所有省份中处于最低水平,秸秆露天焚烧率同样远低于其他省份。上海、福建、北京等地的发展重心并非农业,呈碳排放、碳吸收和净碳汇的“三低”格局。

在碳效应与经济发展的关系方面,田云等^[28]以长江经济带为研究对象,探讨了农业碳排放与农业产值的耦合协调度,发现二者之间的关系不断优化,基本实现了由整体失调向整体协调的转变,与本文结论较为一致。杨果等^[17]更加关注作物碳汇与农业产值之间的耦合关系,发现二者之间的关系在强负耦合与弱耦合之间不断切替,状态较不稳定。这是因为该研究采用了相邻年份环比形式的Tapio耦合指数,实质为短期意义上的随机波动和偏离,未能反映一定时期内作物碳汇与经济增长的持续稳定关系,与耦合过程的长期性和趋势性要求相悖。单一排放或吸收视角仅能从特定方面反映出碳效应与经济发展的关系,相比而言,陈柔等^[23]考虑到农业生产的碳效应双重性,尝试对低碳生产系统与经济系统之间的协调性展开探索,但仍未将碳汇、碳排整合为净指标,而是分别对碳汇和碳排单独讨论。区别于相关研究,本文利用拓

展的弧弹性 Tapio 耦合指数对各年耕地利用净碳汇与总产值进行测度,发现二者关系已由全局失调改善为部分协调,二者增速关系也已由多种类型并存优化至以经济主导型耦合状态为主,表明耕地利用的经济与生态的关系已由整体失衡走向初步平衡,但距实现整体协调和增长耦合尚存一定差距。据此,应分重点、分批次推进排放大省抑源促汇,浙江、福建、山西等省份濒临经济主导型耦合与生态衰退型退耦的交界边缘,需警惕经济效益与生态效益背道相驰的局面。鼓励辽宁、广东等已率先实现增长耦合的地区继续优化生产结构、推广先进生产技术,为其他省份提供参考样本。对于河南、湖北、黑龙江等农业大省,虽其排放基数较大,但因其已进入经济主导型耦合行列,农业生产与生态环境的关系已初步协调,可通过优化农资利用结构、加强低碳技术应用,实现其耦合状态的继续优化。

本研究仍存在一些局限。一方面,研究尺度落足于中国省域,虽可为耕地利用净碳效应的整体判断提供参考,但仍较为宏观,后续研究可以将尺度精确至市州层面,结论将更加详尽、建议将更具针对性;另一方面,为确保核算结果可靠性,基础排放系数主要来源于我国发改委公布的《省级温室气体清单编制指南(试行)》和领域内广泛引用的文献,但相关结果仍存在不确定性。例如,秸秆燃烧碳核算涉及主要作物的燃烧效率和露天焚烧比例,由于我国对秸秆焚烧的禁令日益严格,秸秆焚烧比例将随着时间推移不断下降,随着技术进步,作物燃烧效率也可能出现变化。限于数据可得性,对近年秸秆燃烧碳排放量可能存在高估。随着今后相关核算系数的更新与完善,下一步可对耕地利用碳源/汇展开更加精确的估算。

4 结论

(1)中国耕地利用系统始终体现为碳盈余,净碳汇量由 3.19×10^8 t 增至 5.40×10^8 t,年均高达 4.28×10^8 t,在全局温室气体减排进程中表现为较为显著的正外部性。碳排放由 2.00×10^8 t 增至 2.46×10^8 t,碳吸收量则由 5.19×10^8 t 增长为 7.86×10^8 t。排放结构中,各排放源平均占比按照农用作物、稻田甲烷、秸秆燃烧、土壤氧化亚氮的顺序逐次递减。根据各源头发展趋势,判断耕地利用碳排放已于 2015 年达到峰值。

(2)时序演进上,全国耕地利用净碳汇历经波动不定(2000—2003 年)、高速增长(2004—2015 年)、平稳增长(2016—2019 年) 3 个阶段。空间分布上,省域耕地利用净碳汇呈高值点状散乱分布、低值片状集聚分布特征。

(3)从数量角度而言,全国耕地利用净碳汇与经济产出的关系由全局失调优化为部分协调;从速率角度而言,全国尺度下的净碳汇与经济产出在多数年份体现为经济主导型耦合,省域尺度下的耦合状态由若干类型并存演进为以经济主导型耦合居多,表明各省份的耕地利用减源增汇与作物增产的关系不断改善。

参考文献:

- [1] 贾根锁. IPCC《气候变化与土地特别报告》对陆气相互作用的新认知[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 9-16.
- [2] 李彦旻, 沈育生, 王世航. 基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 182-188.
- [3] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203-208.
- [4] Guenet B, Gabrielle B, Chenu C, et al. Can N_2O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? [J]. Global Change Biology, 2021, 27(2): 237-256.
- [5] Wang P, Wang W, Zhang J. Carbon emission measurement using different utilization methods of waste products: Taking cotton straw resources of south Xinjiang in China as an example [J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2018, 17(2): 383-390.
- [6] 石祖梁, 贾涛, 王亚静, 等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(9): 32-37.
- [7] 田云, 陈池波. 市场与政府结合视角下的中国农业碳减排补偿机制研究[J]. 农业经济问题, 2021(5): 120-136.
- [8] Tubiello F N, Salvatore M, Rossi S, et al. The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture [J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(1): e15009.
- [9] 李波, 张俊熹, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80-86.
- [10] 丁宝根, 杨树旺, 赵玉, 等. 中国耕地资源利用的碳排放时空特征及脱钩效应研究[J]. 中国土地科学, 2019, 33(12): 45-54.
- [11] 独孤昌慧. 中国农地利用碳排放及影响因素研究: 1990—2016 年 [J]. 生态经济, 2020, 36(5): 19-23.
- [12] 周思宇. 东北地区耕地利用碳排放核算及驱动因素研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020.
- [13] Benbi D K. Carbon footprint and agricultural sustainability nexus in an intensively cultivated region of Indo-Gangetic Plains [J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 611-623.
- [14] Begum K, Kuhnert M, Yeluripati J, et al. Model based regional estimates of soil organic carbon sequestration and greenhouse gas mitigation potentials from rice croplands in Bangladesh [J]. Land, 2018, 7(3): e82.

- [12] 熊明明,陈海山,俞森.CLM3.0 对中国区域陆面过程的模拟试验及评估Ⅱ:土壤湿度[J].气象科学,2011,31(1):1-10.
- [13] 李沙沙,韦杰,徐文秀,等.不同温度下紫色土与黄壤的水分持续性耗散特征[J].水土保持通报,2019,39(3):51-56.
- [14] 唐柄哲,何丙辉,闫建梅.川中丘陵区土地利用方式对土壤理化性质影响的灰色关联分析[J].应用生态学报,2016,27(5):1445-1452.
- [15] 马生花,谢应忠,胡海英,等.荒漠草原 2 种典型群落类型下土壤含水量与土壤粒径分布的关系[J].中国水土保持,2019,40(7):61-65.
- [16] 吕刚,王磊,卢喜平,等.不同复垦方式排土场砾石对饱和导水率和贮水能力的影响[J].土壤学报,2017,54(6):1414-1426.
- [17] 李渊博,李胜龙,肖波,等.黄土高原水蚀风蚀交错区藓结皮覆盖土壤的蒸发特征[J].水土保持学报,2020,34(5):208-215.
- [18] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004:65-122.
- [19] 李艳,刘海军,黄冠华.麦秸覆盖条件下土壤蒸发阻力及蒸发模拟[J].农业工程学报,2015,31(1):98-106.
- [20] 潘全良,陈坤,宋涛,等.生物炭及炭基肥对棕壤持水能力的影响[J].水土保持研究,2017,24(1):115-121.
- [21] 苏彦尹,范兴科.基于称重法对影响蒸发蒸腾量的主要气象因子研究分析[J].干旱地区农业研究,2020,38(3):40-48.
- [22] 靳姗姗,汪星,汪有科,等.黄土丘陵枣林休眠期土壤水分损失及其剖面气态水分析[J].水土保持学报,2016,30(3):309-316.
- [23] 彭焕华,赵传燕,梁继.黑河上游高寒草地蒸散发日变化及其影响因子分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(1):46-53.
- [24] 穆家伟,查天山,贾昕,等.毛乌素沙地典型沙生灌木对土壤蒸发的影响[J].北京林业大学学报,2016,38(12):39-45.
- [25] Xiao B, Wang H F, Fan J. Biological soil crusts decrease soil temperature in summer and increase soil temperature in winter in semiarid environment [J]. Ecological Engineering, 2013, 58(5): 52-56.
- [26] 王丽丽,余海龙,黄菊莹,等.不同覆盖措施的土壤生态环境效应和作物增产效应述评[J].江苏农业科学,2016,44(7):11-15.
- [27] Wang Y J, Xie Z H, Malhi S S, et al. Effects of gravel-sand mulch, plastic mulch and ridge and furrow rainfall harvesting system combinations on water use efficiency, soil temperature and watermelon yield in a semi-arid Loess Plateau of northwestern China [J]. Agricultural Water Management, 2012, 101(1): 88-92.
- [28] 胥生荣,张恩和,马瑞丽,等.覆盖对枸杞根系土壤环境和水分利用的影响[J].草业学报,2019,28(2):12-22.
- (上接第 368 页)
- [15] 陈丽,郝晋珉,王峰,等.基于碳循环的黄淮海平原耕地固碳功能研究[J].资源科学,2016,38(6):1039-1053.
- [16] 尹钰莹,郝晋珉,牛灵安,等.河北省曲周县农田生态系统碳循环及碳效率研究[J].资源科学,2016,38(5):918-928.
- [17] 杨果,陈瑶.中国农业源碳汇估算及其与农业经济发展的耦合分析[J].中国人口·资源与环境,2016,26(12):171-176.
- [18] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth [R]. Paris: OECD, 2002.
- [19] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. Transport Policy, 2005, 12(2): 137-151.
- [20] 李波.我国农地资源利用的碳排放及减排政策研究[D].武汉:华中农业大学,2011.
- [21] 田云,张俊飏,李波.中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应[J].资源科学,2012,34(11):2097-2105.
- [22] 吴昊玥,黄瀚蛟,陈文宽.中国粮食主产区耕地利用碳排放与粮食生产脱钩效应研究[J].地理与地理信息科学,2021,37(6):85-91.
- [23] 陈柔,何艳秋,朱思宇,等.我国农业碳排放双重性及其与经济发展的协调性研究[J].软科学,2020,34(1):132-138.
- [24] 国家发展和改革委员会.省级温室气体清单编制指南[试行][R].北京:国家发展和改革委员会,2011.
- [25] 田云,张俊飏.中国农业生产净碳效应分异研究[J].自然资源学报,2013,28(8):1298-1309.
- [26] 程琳琳.中国农业碳生产率时空分异:机理与实证[D].武汉:华中农业大学,2018.
- [27] Cubasch U, Wuebbles D, Chen D, et al. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013: 121-155.
- [28] 田云,林子娟.长江经济带农业碳排放与经济增长的时空耦合关系[J].中国农业大学学报,2021,26(1):208-218.