· 土地保障与生态安全 ·

中国粮食主产区耕地绿色低碳利用转型指数构建及分区

符海月[1,2,3]，吴树东[1]，姜朋辉[1,2※]

（1. 南京农业大学公共管理学院，南京 210095；2. 南京农业大学中国资源环境与发展研究院，南京 210095；
3. 自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室，深圳 518034）

摘 要：探究耕地绿色低碳转型方法与对策对于解决耕地环境本底问题，助推农业可持续发展，确保国家粮食安全、生态安全以及“双碳”目标的实现具有重要意义。该研究建立耕地绿色低碳利用投入-产出分析模型，基于“现状-目标”对比分析，构建耕地绿色低碳利用转型指数，划分耕地绿色低碳利用转型管控区，提出相应管控路径，并以粮食主产区 171 个地级市为对象进行实证研究。研究结果表明：1）2000—2020 年间，粮食主产区耕地绿色低碳利用水平趋升，呈北高南低态势；2）预测 2030 年耕地绿色低碳水平会有所提高，但区域间增幅差异明显；3）降污减碳严控区、管控区、防护区和防污固碳保护区各占粮食主产区的 9.36%、39.77%、10.52% 和 40.35%，主要分布在南部、中南部、山东省烟台市及东部沿海、内蒙古以及四川省等市；结合各区社会经济条件，提出相应强化耕地生产要素高效配置、创新耕地固碳减排技术、加强落实生产绿色低碳实践及建立耕地碳汇系统的差别化绿色低碳转型导向建议。研究结果对于拓展耕地绿色低碳利用转型理论与方法研究具有一定借鉴意义，也可为探索耕地绿色低碳转型路径，提出差别化管控建议，推动耕地可持续利用和农业绿色转型提供决策支持。

关键词：耕地；土地利用；绿色低碳转型指数；分区管控；粮食主产区；可持续发展
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.202304087
中图分类号：F301.24 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-6819(2023)-23-0238-09

符海月，吴树东，姜朋辉. 中国粮食主产区耕地绿色低碳利用转型指数构建及分区[J]. 农业工程学报，2023，39(23)：238-246. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202304087 http://www.tcsae.org
FU Haiyue, WU Shudong, JIANG Penghui. Index and zoning for green and low-carbon transition of cultivated land utilization in main grain-producing areas of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(23): 238-246. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202304087 http://www.tcsae.org

0 引 言

随着农业生产技术水平提升，耕地产出效益不断提高，以牺牲生态环境为代价提高耕地产出效益所带来的负面影响也日益凸显。研究表明，中国每公顷耕地施用化肥的量是世界平均水平的 4 倍，每年农药施用量高达 180 万吨，其中高毒农药占比达到 70%，农药和化肥使用方式导致了耕地地力退化、耕层变薄以及耕地污染等问题[1]。耕地资源作为农业发展的基础性资源和粮食生产的主要载体，其利用状态对于国家农业绿色低碳转型发展、粮食安全和社会稳定至关重要[2]。在“碳达峰、碳中和”双碳目标、生态文明建设以及农业绿色可持续利用的现实要求下，耕地绿色低碳转型成为当务之急。

目前耕地绿色低碳利用（cultivated land green and low-carbon use，CLGLCU）相关研究主要围绕提高耕地利用效率及实现耕地利用转型管制两方面，主要关注耕地利用效率在环境约束下的基本含义[3-4]、度量体系确立[5]以及时空变化特征[6]和影响因素[7]等方面，通常从耕地利用的技术出发，将耕地利用效率定义为当耕地资源投入一定时实际农业产出可达到的预期最大产出程度，或者当耕地资源投入一定时实际农业产出可达到预期的最小投入[8]。随着粮食产量和农业产值的大幅增长以及耕地生态问题的凸显，耕地利用的生态效率（即生产要素投入不变时耕地利用使社会经济产出最大化、环境污染产出最小化的程度）[9]开始受到关注。为应对日益严峻的气候暖化问题，有学者从低碳视域出发，探索耕地低碳利用绩效（即耕地系统在给定生产技术和要素投入组合下，实际农业产出、作物碳排放与碳汇水平与最优水平的相对比率）[10]，但当前的耕地利用效率度量体系研究主要关注耕地利用过程中的碳排放，而忽视了耕地的碳汇功能。实际上，耕地的碳汇功能在粮食安全和气候变化方面发挥着关键作用[11]，忽略耕地碳汇功能难以客观反映“可持续发展”和“双碳”目标战略下 CLGLCU 的真实水平。此外，当前研究在非期望产出指标的选择方面多考虑耕地利用的碳排放[12]，而忽略了面源污染等因素；在期望产出指标的选择方面，仅将农业的经济产出纳入其中[7]，无法全面反映耕地的价值。在效率测量方法方面，大部分学者使用基于传统 DEA（data envelopment

收稿日期：2023-04-12 修订日期：2023-09-15
基金项目：国家自然科学基金项目（41871319；42171395）；江苏省自然科学基金优秀青年基金项目（BK20220126）；国家重点研发计划项目子课题（2022YFC380080401）；自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室开放基金资助课题（KF-2022-07-026）
作者简介：符海月，博士，副教授，主要研究方向为土地利用变化与社会-生态系统，国土空间治理。Email：fuhaiyue@njau.edu.cn
※通信作者：姜朋辉，博士，博士生导师，教授，研究方向为数字国土空间规划，土地系统建模。Email：jiangph@njau.edu.cn

analysis）模型的非径向、非角度的 SBM-Undesirable（undesirable slacks-based measurement）模型[13]。然而，SBM-Undesirable 模型存在多个决策单元间无法充分比较的问题。将松弛变量纳入目标函数的超效率 SBM（super-slack based model）模型为解决此问题提供了新技术。随着耕地利用效率含义的不断拓展，全国、地区、省域等不同空间尺度的耕地利用效率时空变化特征与影响因素研究也随之展开，研究重点也逐渐从侧重于耕地面源污染的耕地利用效率转向碳排放与面源污染“双重”约束下的耕地“绿色低碳”利用效率分析[6,14]。

耕地利用转型管制研究主要集中在耕地转型的测度体系[15-16]、形态[17]、特征[18]、路径[19]以及转型对生态环境等的影响等方面。在测度体系的建立上，已有研究将耕地绿色低碳转型视为“投入-产出”系统，尝试通过静态的转型效率体现转型的动态特征[16]；对于耕地利用转型形态，有研究将耕地利用转型分为显性形态和隐性形态两种形式，包含空间转型、功能转型和模式转型三个子系统，其中，空间转型是显性转型，是耕地利用转型的直接表现，而功能转型和模式转型则是隐性转型，是耕地利用转型的本质要求[15]。也有学者对耕地绿色利用转型的路径进行思考，提出要贯彻落实耕地数量、质量、生态“三位一体”保护策略[20]。从耕地转型对其他领域的影响来看，各学者立足于不同的视角，认为耕地利用形态转型与生态环境[21]、粮食安全[22]、社会保障[23]以及经济发展[24]等方面关系密切。

以上研究多侧于重耕地利用效率的时空特征、影响因子及耕地利用转型路径等的探讨，对于如何实现国家“耕地保护”“生态安全”“粮食安全”及“双碳”目标导向下的耕地绿色低碳转型区域进行差别化管控体现不足。基于此，本研究基于耕地的“碳源+碳汇”双重功能，将“绿色”“低碳”发展融入耕地利用效率的评价体系中，建立 CLGLCU 投入－产出分析体系，构建耕地绿色低碳转型数值模型，提出基于“现状-目标”对比分析的 CLGLCU 转型管控分区思路，并采用 2000—2020 年中国粮食主产区 171 个地级市的面板数据进行实证分析，探索耕地绿色低碳转型路径，助力农业“绿色可持续发展”“粮食安全”与“双碳”战略目标的实现。

1　机理分析

1.1　耕地绿色低碳利用内涵

耕地绿色低碳利用转型是土地利用效率提升和环境协调发展实现的有效措施[16]，本研究将耕地利用视为土地资源利用系统中“投入＋产出”的动态过程[10]，基于现有研究[9,25]，结合绿色可持续发展、粮食安全、生态安全和“双碳”目标对耕地利用的要求，界定 CLGLCU 为：在降污减排增汇目标约束下，通过控制生产要素投入，科学提高粮食生产产值和碳汇等期望产出，尽可能降低耕地碳排放和面源污染等非期望产出，从而实现耕地利用向“绿色化”“低碳化”转型。其中，耕地利用的“绿色化”取决于农药、化肥、农膜和机械等生产要素的合理投入以及面源污染的减少；耕地利用的“低碳化”强调碳排放的减少以及耕地碳汇功能的加强。

1.2　耕地绿色低碳转型指数构建及分区管控

结合 CLGLCU 的内涵，构建基于“投入+期望产出+非期望产出”的 CLGLCU 评价体系，通过耕地绿色低碳利用效率（cultivated land green and low-carbon use efficiency，CLGLCUE）反映耕地绿色低碳利用的程度。针对当前耕地利用面源污染严重与碳排放过量问题，基于耕地保护、粮食安全以及“双碳”目标对耕地利用的要求，建立基于“现状-目标”导向的耕地绿色低碳转型指数 I，并依此划分耕地利用绿色转型分区。耕地利用低碳转型指数 I 如式（1）所示。

$$I=(\rho_{\mathrm{t}}^{*}-\rho_{\mathrm{b}}^{*})/\rho_{\mathrm{b}}^{*}\times 100\% \qquad (1)$$

式中 ρ_{t}^{*} 为耕地战略实施目标年耕地绿色低碳利用转型效率，ρ_{b}^{*} 表示基准年的耕地绿色低碳利用转型效率，I 值越大表示现状离调控目标差距越大，耕地绿色低碳利用效率相对较低，非期望产出比较高。根据 I 值大小将研究区划分为降污减碳严控区、降污减碳管控区、降污减碳防护区和防污固碳保护区 4 个转型治理区。图 1 为耕地绿色低碳转型分区管控思路。

耕地绿色低碳利用转型分区规则详见表 1 。

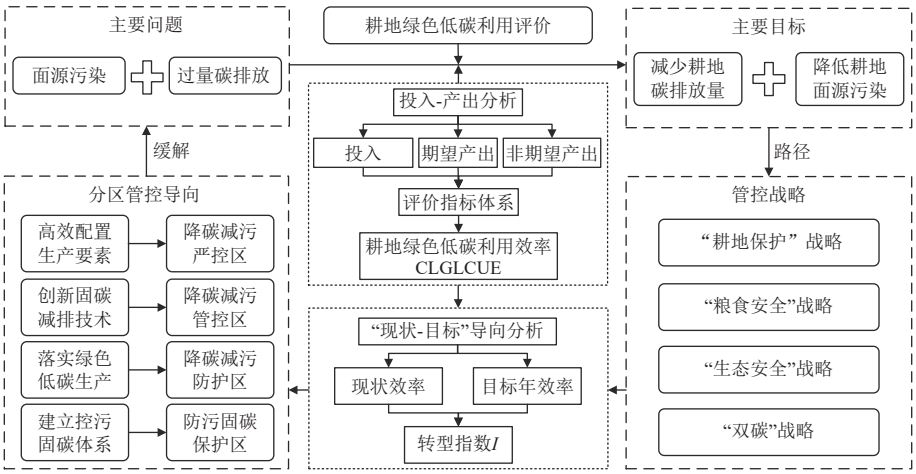

图 1　耕地绿色低碳转型分区管控思路

Fig.1　Illustration of zoning governance for green low-carbon transition of cultivated land

表 1 耕地绿色低碳利用转型分区规则

Table 1 Zoning rules of cultivated land utilization towards green low-carbon transition

管控分区 Type of governance zone	分区规则 Zoning rules	管控转型导向 Governance and transition principles
降污减碳严控区 Strict control area for pollution and carbon reduction	$\bar{I}+\delta\leqslant I$	强化区域耕地生产要素高效配置，探索提升耕地绿色低碳利用水平的差异化路径
降污减碳管控区 Control area for pollution and carbon reduction	$\bar{I}-\delta\leqslant I<\bar{I}+\delta$	加强耕地减排的技术创新，探索耕地污染治理的技术方法
降污减碳防护区 Protection area for pollution and carbon reduction	$0\leqslant I<\bar{I}-\delta$	实现耕地绿色低碳利用相关措施有效落地
防污固碳保护区 Conservation area for pollution prevention and carbon sequestration	$I<0$	以控污、碳汇能力提升为导向，探索建立耕地控污碳汇系统，提高污染治理与增汇固碳能力

注：$\bar{I}$为研究区耕地绿色低碳转型指数 I 的平均值，δ 为 I 的标准差。

Note: $\bar{I}$ is the mean value of I in the green low-carbon transition index of cultivated land in the study area, and δ is the standard deviation of I.

降污减碳严控区的耕地利用存在过量碳排放和较为严重的面源污染，应优先调整投入产出比，强化该区域耕地生产要素高效配置。

降污减碳管控区的耕地投入与产出较降污减碳严控区域合理，但非期望产出碳排放量和面源污染仍较严重，在调整生产资料配置的基础上，应加强耕地生态固碳减排技术的投入，强化耕地治理与污染治理。

降污减碳防护区的耕地投入与产出相对较合理，非期望产出碳排放和面源污染接近目标年要求，耕地绿色低碳转型的关键在于相关措施的有效落地[26]，即农户是否选择绿色低碳的耕地利用方式。因此该区域需要确保耕地利用绿色低碳行动落实到生产实践中。

防污固碳保护区的耕地投入产出比合理，耕地利用期望产出与非期望产出达到耕地利用战略的目标要求，该区耕地利用以防污固碳为主，加强建立耕地防污固碳增汇系统，进一步提高其防止面源污染和固碳增汇的能力。

2 实证分析

2.1 研究区域

根据 2013 年财政部《关于改革和完善农业综合开发政策措施的意见》[27] 确定粮食主产区，基于行政区划调整和数据的可获得性，本研究剔除山东省莱芜市、河南省济源市、安徽省巢湖市、湖北省神农架林区、天门市、潜江市、仙桃市、恩施土家族苗族自治州、四川省眉山市、资阳市及湖南省的湘西土家族苗族自治州，最后确定粮食主产区的 13 个省、自治区的 171 个地级市为研究区域。

2.2 研究方法

2.2.1 耕地绿色低碳利用效率测算

本研究采用超效率 SBM 模型测算 CLGLCUE。该模型融合 SBM 模型和超效率 DEA 模型的优点，考虑非期望产出，并且区别比较有效决策单元，可避免信息损失。假定有 n 个耕地利用决策单元，每个耕地利用决策单元包括 1 个投入向量及期望产出和非期望产出 2 个产出向量。设投入要素 m 种，期望产出 s_1 种，非期望产出 s_2 种，$\boldsymbol{x}\in R^m$、$\boldsymbol{y}^g\in R^{s_1}$、$\boldsymbol{y}^g\in R^{s_2}$ 分别为投入、期望产出和非期望产出向量，并定义矩阵 $X=[\boldsymbol{x}_1,\cdots,\boldsymbol{x}_n]\in \mathrm{R}^{m\times n}$，$Y^g=[\boldsymbol{y}_1^g,\cdots,\boldsymbol{y}_n^g]\in \mathrm{R}^{s_1\times n}$，$Y^b=[\boldsymbol{y}_1^b,\cdots,\boldsymbol{y}_n^b]\in \mathrm{R}^{s_2\times n}$ 且满足 $\boldsymbol{X}>0$、$Y^g>0$、$Y^b>0$，x_{i0}、y_{r0}^g、y_{k0}^b 为相对应决策单元某阶段的投入产出值，将不变规模报酬（constant returns to scale，CRS）下系统生产可能集定义为 $P=\{(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}^g,\boldsymbol{y}^b)|\boldsymbol{x}\geqslant \boldsymbol{X\lambda},\boldsymbol{y}^g\geqslant \boldsymbol{Y}^g\boldsymbol{\lambda},\boldsymbol{y}^b\leqslant \boldsymbol{Y}^b\boldsymbol{\lambda},\boldsymbol{\lambda}\geqslant 0,\boldsymbol{\lambda}\in \mathrm{R}^n\}$，$\boldsymbol{\lambda}$为权重向量，包含非期望产出的超效率 SBM（slacks-based measure）模型为

$$\rho^*=\min\frac{1+\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{D_i^-}{x_{i0}}}{1-\frac{1}{s_1+s_2}\left(\sum_{r=1}^{s_1}\frac{D_r^g}{y_{r0}^g}+\sum_{k=1}^{s_2}\frac{D_k^b}{y_{k0}^b}\right)} \tag{2}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\boldsymbol{x}_0=\boldsymbol{X\lambda}+D^-;\boldsymbol{y}_0^g=\boldsymbol{Y}^g\boldsymbol{\lambda}-\boldsymbol{D}^g;\boldsymbol{y}_0^b=\boldsymbol{Y}^b\boldsymbol{\lambda}+\boldsymbol{D}^b\\ \boldsymbol{D}^-\geqslant 0,\boldsymbol{D}^g\geqslant 0,\boldsymbol{D}^b\geqslant 0,\boldsymbol{\lambda}\geqslant 0\end{cases} \tag{3}$$

式（2）～（3）中，ρ^*为耕地决策单元的 CLGLCUE，ρ^*值小于 1 说明该决策单位无效；反之则有效，ρ^*值越大 CLGLCUE 越高。D为投入松弛变量；D_r^g为期望产出松弛变量；D_k^b为非期望产出松弛变量；D^-为投入松弛矩阵；D^g为期望产出松弛矩阵；D^b为非期望产出松弛矩阵。

2.2.2 耕地绿色低碳利用测算指标体系建立

基于耕地绿色低碳利用的内涵，结合已有研究[10,12]，本研究构建的 CLGLCUE 的测算指标体系主要包含投入、期望产出和非期望产出 3 类，如表 2。

表 2 粮食主产区耕地绿色低碳利用投入-产出分析体系

Table 2 Input-output analysis system of green low-carbon utilization of cultivated land in major grain-producing areas

准则层 Criteria layer	要素层 Factors	指标层 Indicators	指标说明 Indicator description
投入 Input	劳动力投入	种植业从业人口/×10^4 人	反映耕地劳动力投入程度
	土地投入	粮食播种面积/×10^{3}hm^2	反映耕地规模
	化肥投入	化肥施用量/×10^{4}t	反映耕地化肥、农膜、农药的施用程度
	农药投入	农药使用量/×10^{4}t	
	农膜投入	农膜使用量/×10^{4}t	
	灌溉投入	有效灌溉面积/×10^3 hm^2	反映耕地灌溉水平
	机械投入	农业机械总动力/×10^4 kW	反映耕地利用技术水平
期望产出 Expected output	经济产出	农业总产值/×10^8 元	反映农民收益情况
	社会产出	粮食总产量/×10^4 t	反映粮食生产水平
	环境产出	碳汇总量/×10^4 t	反映耕地碳汇能力
非期望产出 Unexpected output	碳排放	碳排放总量/×10^4 t	反映耕地碳排放程度
	面源污染	化肥、农药、农膜流失量/×10^4 t	反映化肥、农膜、农药对耕地的污染程度

耕地利用投入主要包括劳动力、灌溉、机械、化肥、农药及农膜 7 类投入[12]。为了准确反映耕地的实际利用情况，本文选用粮食播种面积代替耕地面积作为土地投入的量化指标。在劳动力投入方面，采用狭义农业（种植业）从业人口量化耕地的劳动力投入，通过乡村总人口×（农业总产值 / 农林牧渔业总产值）计算。机械投入的量化指标为农业机械总动力，灌溉投入的量化指标为有效灌溉面积，农药投入的量化指标为农药使用量，化肥投入的量化指标为化肥施用量，农膜投入的量化指标为农膜使用量。

耕地利用期望产出包括经济、社会和环境指标[10]。经济指标采用农业总产值，并将其统一到 2000 年的基准，以消除物价影响。社会指标选取粮食作物总产量。以耕

地碳汇总量衡量耕地利用的环境期望产出。耕地碳汇量是指粮食作物通过光合作用吸收 CO_2，同时因自身生长释放 O_2 后的净固碳量[28]，耕地碳汇总量通过粮食作物碳吸收总量计算，计算式为[29]。

$$Q=\sum_{i=1}^{v}Q_i=\sum_{i=1}^{v}\{[C_i\times S_i\times(1-W_i)]/E_i\} \quad (4)$$

式中 Q 为粮食作物碳吸收总量，kg；Q_i 为主要粮食作物 i 的碳吸收量，kg；v 为粮食作物种类（主要包括稻谷、小麦、玉米、豆类、薯类）；C_i、S_i、W_i 及 E_i 分别为粮食作物 i 的碳吸收系数（%）、粮食产量（kg）、水分系数（%）及经济系数（%）[30]，详见表 3。

表 3　主要粮食作物经济系数、水分系数及碳吸收系数

Table 3　Economic coefficient,water coefficient and carbon absorption coefficient of main grain crops　（%）

系数 Coefficient	稻谷 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize	豆类 Beans	薯类 Tubers
经济系数 Economic coefficient	45	40	40	34	70
水分系数 Water coefficient	12	12	13	13	70
碳吸收系数 Carbon absorption coefficient	41	49	47	45	42

耕地利用非期望产出从碳排放和污染排放两方面衡量[6]。农业生产过程中，化肥、农药和农用地膜的生产和使用以及农机作业过程产生的碳排放、农业灌溉消耗电能（尤其是火力发电）间接产生的碳排放，耕作有机碳损失是碳排放的主要来源，其中，农药、化肥、农膜按照折纯后用量计算，农机碳排放按当年农机总动力计算，农业灌溉碳排放按有效灌溉面积计算，翻耕碳排放以当年农作物的实际播种面积计算[31]。耕地利用碳排放计算式如下：

$$E=\sum_{i=1}^{n}E_i=\sum_{i=1}^{n}T_i\times\delta_i \quad (5)$$

式中 E 为耕地利用的碳排放总量，kg；E_i 是第 i 个碳源的碳排放量，kg；T_i 为各碳排放源的用量或总量，kg，δ_i 为各碳排放源的碳排放系数，参照已有研究[31-35] 确定 6 种碳排放源的碳排放系数，详见表 4。

表 4　耕地利用过程中主要碳源以及系数

Table 4　Main carbon sources and coefficient in the process of cultivated land utilization

碳源 Carbon source	碳排放系数 Carbon emission coefficient	来源 Source
化肥 Chemical fertilizer	0.895 6 $kg\cdot kg^{-1}$	WEST 等[31-32]
农药 Pesticide	4.934 1 $kg\cdot kg^{-1}$	POST 等[31,33]
农膜 Agricultural film	5.18 $kg\cdot kg^{-1}$	李波等[31,34]
农业机械总动力 Total power of agricultural machinery	0.18 $kg\cdot kg^{-1}$	WEST 等[31-32]
灌溉 Irrigation	0.25 $kg\cdot hm^{-2}$	DUBEY 等[31,35]

2.2.3　目标年耕地绿色低碳利用指标的预测

基于“自下而上”的耕地固碳能力提高和耕地面源污染减少以及“自上而下”的碳排放约束和绿色可持续发展目标预测目标年研究区 CLGLCU 指标，从而推测其耕地低碳利用效率。2030 年为“碳达峰”战略目标年，因此本研究将 2030 年作为目标年。CLGLCUE 投入、期望产出和非期望产出的 12 个指标详见表 5。

表 5　2030 年耕地绿色低碳利用指标预测依据

Table 5　Prediction basis of green and low-carbon cultivated land use index in 2030

准则层 Criteria layer	指标层 Indicators	预测依据 Prediction basis
投入 Input	种植业从业人口	《国家人口发展规划（2016–2030 年）》《城市蓝皮书：中国城市发展报告 No.12》
	粮食播种面积	《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》
	化肥施用量	《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》
	农药使用量	《“十四五”全国农业绿色发展规划》
	农膜使用量	《关于加快推进农用地膜污染防治的意见》
	有效灌溉面积	《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》
	农业机械总动力	全国农业机械化工作会议的工作部署（2022 年）
期望产出 Expected output	农业总产值 粮食总产量	党的十八届三中全会要求《中国农业展望报告（2023—2032）》
	碳汇总量	基于粮食作物播种面积预测及式（4）计算
非期望产出 Unexpected output	碳排放总量	《2030 年前碳达峰行动方案》及式（5）计算
	化肥、农药、农膜流失量	《农业源产排污核算方法和系数手册》（2021）

耕地利用投入指标预测：根据《国家人口发展规划（2016—2030）年）》和《城市蓝皮书：中国城市发展报告 No.12》预测 2030 年各地级市种植业从业人口数；根据《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》预测 2030 年粮食作物种植面积不增加；根据《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》和《“十四五”全国农业绿色发展规划》和相关文献[28] 预测 2030 年肥料和农药施用量：2020 年利用效率已达到 43% 的地级市至 2030 年施用量不变，未达到 43% 的地级市按利用效率 43% 推算 2030 年施用量；根据《关于加快推进农用地膜污染防治的意见》确立地膜覆盖面积不变；根据粮食种植面积和有效灌溉面积相关关系确定有效灌溉面积恒定；基于全国农业机械总动力现状[36]，预测 2030 年农业机械总动力在 2020 年基础上增长 10 个百分点。

耕地利用期望产出指标预测：根据十八届三中全会要求设定 2020—2030 年农林牧渔业总产值和农业生产总值均按 7% 稳定增加；依据《中国农业展望报告（2023—2032）》[37] 设定 2020—2030 年粮食总产量年均增长 1.2%；基于粮食播种面积不变设定碳汇总量不变。

耕地非期望产出指标预测：参照《2030 年前碳达峰行动方案》设定 2030 年单位农业总产值 CO_2 排放降低 65%；根据化肥、农药、农膜的相关损失系数及使用总量计算耕地面源污染。

基础数据来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》以及粮食主产区 2000—2020 年 13 个省和 171 个地级市的统计年鉴。化肥、农药、农膜的流失系数参考《农业源产排污核算方法和系数手册》(2021)。

2.3　结果与分析

2.3.1　粮食主产区耕地绿色低碳利用效率时空演变特征

计算结果表明，2000—2020 年间粮食主产区的 CLGLCUE 总体呈上升趋势（图 2），平均效率值从 2000 年的 0.50 上升到 2020 年的 0.60。2000、2010 和 2020 年，分别有 20、21 和 55 个市的 CLGLCUE 达到最优值 1，

分别占达到有效率地级市总数的 11.63%、12.21% 和 31.98%。预测 2020—2030 年，粮食主产区的耕地绿色低碳利用效率会持续上升，CLGLCUE 值域将由 2020 年的 0.09～1.76 变化为 2023 年 0.17～1.60，均值由 2020 年的 0.67 增至 2030 年的 0.78，说明未来粮食主产区耕地的低碳绿色利用效率会有所提高，地域间差距会逐渐减小。至 2030 年，研究区内将有 81 个地级市的 CLGLCUE 值大于 1，有效率地级市占研究区总数的 47.37%。

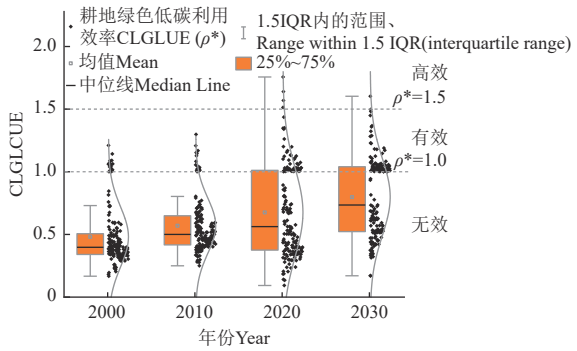

图 2 2000—2030 年粮食主产区 171 个地级市耕地绿色低碳利用效率变化趋势

Fig.2 Temproal trend of cultivated land green low-carbon use efficiency (CLGLCUE) of 171 prefecture-level cities in China's main grain producing areas from 2000 to 2030

2000—2020 年间，粮食主产区 13 个省域耕地绿色低碳利用效率并不呈现明显的线性变化趋势，总体上呈现递增状态（图 3）。

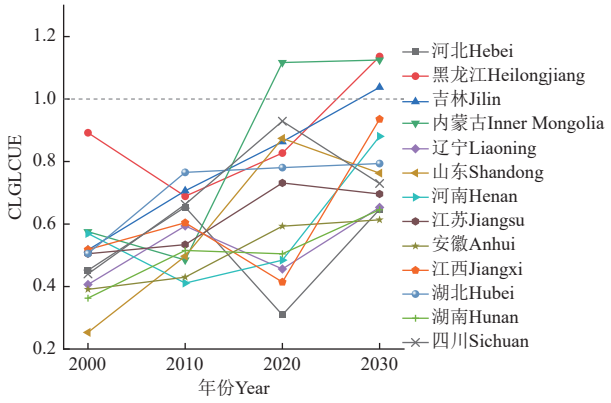

图 3 2000—2030 年 13 个粮食主产区的耕地绿色低碳利用效率

Fig.3 CLGLCUE in 13 China's main grain producing areas from 2000 to 2030

其中，2000—2010 年，河北、吉林、辽宁等 11 个省份整体呈现上升势态，个别城市如承德市、长春市、白城市和辽阳市等 12 个地级市，在 7.50%～10.11% 范围内以微小的幅度下降或基本持平；河南省和黑龙江省整体效率呈现下降趋势，河南省平均效率由 2000 年的 0.569 8 下降到 2010 年的 0.410 9，除了鹤壁市和济源市分别以 3.44%、8.01% 的微小幅度上升外，其他地级市效率值均减少，南阳市和信阳市超过了 50% 减幅。黑龙江省的平均效率由 2000 年的 0.892 1 下降到 2010 年的 0.689 0，大庆、宜春等 5 个地级市效率值增加，其中牡丹江市效率值增幅达到 30.80%，其他 7 个地级市以高于 20.1% 的幅度减小。2010—2020 年，黑龙江、吉林、内蒙古、山东等 9 个省份的平均效率值均出现上涨，且四川省平均绿色低碳利用效率值最高，达 0.929 1，与有效值 1.0 十分接近。河北省、辽宁省、湖南省和江西省的平均效率出现不同程度的降低，河北省 11 个地级市的减幅区间在 14.00%～74.09%，减幅明显。辽宁省 10 个地级市效率值减少，但抚顺、本溪和盘锦分别增加了 50.10%、49.57% 和 49.61%；湖南省整个省的平均效率以 0.1 的微小幅度由 0.515 4 下降到了 0.504 8，但长沙市和株洲市分别增长了 28.16%、94.52%；江西省仅有鹰潭市出现了 61.32% 大幅增长，其他地级市均出现下降，其中赣州市、吉安市、宜春市和抚州市效率值降低幅度较大，分别为 72.44%、39.22%、31.67% 和 62.14%。

总体来看，2000—2020 年粮食主产区 CLGLCUE 时序演变特征区域差异明显，北高南低，在黑龙江、吉林、内蒙古、山东、四川等地相对较高，河北、河南、江西等地相对较低。CLGLCUE 大于 1.0（即有效率）的地级市在省域空间集聚特征明显，在黑龙江、内蒙古等地分布最广。究其原因，西部大开发战略的实施，使得四川省等西部地区农业机械化、耕地规模化等农业现代化水平逐渐提高，促进了耕地低碳利用效率的提高；而黑龙江等东北地区则主要因为耕地资源自然禀赋条件较好，农业基础设施也相对比较完善，因而耕地低碳利用效率也较高。相对而言，江苏等长江中下游地区，耕地利用相对粗放，农业面源污染比较严重，因此，耕地绿色低碳利用效率相对较低[38-39]。

预测 2020—2030 年间，河北、黑龙江、辽宁等 7 个省份 GLGLCUE 均呈现增长趋势，其中河南省平均效率值增长幅度最大，由 2020 年的 0.484 5 上升至 2030 年的 0.880 7；吉林、江苏、四川等 6 个省份的地级市，虽 2020 年 CLGLCUE 较高，均大于 1.0，但 2030 年预测效率值出现小幅下降。至 2030 年，耕地绿色低碳利用效率较高的地级市在省域空间上集聚分布，总体呈“东北多西南少”“北高南低”特征，主要集中在东三省及内蒙古自治区的 9 个地级市，南部地区则零散分布。

2.3.2 粮食主产区耕地绿色低碳转型管控分区及对策建议

在测算 2020 年及 2030 年 CLGLCUE 的基础上，根据式（1）计算各地级市耕地绿色低碳转型指数 I 及平均值 $\bar{I}$ 和标准差 δ（$\bar{I}$=39.48%，δ=27.76%），进而根据表 1 规则将粮食主产区 171 个地级市划分为降污减碳严控区（$I\geqslant$67.25%）、降污减碳管控区（11.72%$\leqslant I<$67.25%）、降污减碳防护区（0$\leqslant I<$11.72 %）和防污固碳保护区（$I<$0），并结合管制区自然禀赋、社会经济特征以及耕地污染现状、耕地碳排放等现实条件提出相应差别化管控对策建议。

降污减碳严控区空间分布比较零散，主要分布在黑龙江北部、辽宁西部、河北北部、河南西部及江西南部的 16 个地级市，占粮食主产区的 9.36%。作为国家粮食重要产地，这部分地区耕地利用效率一直处于高水平，但非期望产出高，化肥、农药、农膜等生产要素的高投入阻碍了地区 CLGLCUE 的提升。针对耕地资源利用强度大但面源污染严重的问题，降污减碳严控区要加强农

业生产要素的合理分配，重点指导化肥、农药等生产要素在“重度碳源区”进行合理分配。一方面，在保证粮食产量、碳吸收能力等预期产出的前提下对碳排放、面源污染等非期望产出进行合理调控，从而达到“低量高效”；另一方面，加强耕地“绿色化”“低碳化”的区域联动作用，寻求 CLGLCUE 提升途径。

降污减碳管控区主要包括黑龙江东部、河北西部、河南、安徽西北部、湖南、江西北部等的 68 个地级市，占粮食主产区的 39.77%。这部分地区农业生产的发展从粗放型向集约型、效益型转变，在拥有相对合理的投入产出比前提下，降污减碳管控区应加强加生态固碳技术投资研发投入，强化耕地生态固碳减排及集成技术创新[26]。把提高生产资源利用效率和生态环境保护作为核心，以降低碳排放和减少耕地面源污染为重点，加强科技攻关和技术配套集成，推广减少耕地面源污染物的耕作、施肥、施药技术和耕地固碳增汇等绿色低碳技术。此基础上，积极引进各项技术、设备及人才，并积极向有关大学及研究机构寻求指导。

降污减碳防护区的空间分布比较零散，主要分布在内蒙古、山东东北部、江苏中部等 18 个地级市，占粮食主产区的 10.52%。降污减排防护区总体耕地绿色低碳利用效率较高，为进一步提高其 CLGLCUE，应当注重耕地绿色低碳转型的落实力度。农用地的绿色、低碳转型关键是要切实落实相应措施[16]，使农民使用绿色、低碳的耕作方式。农户对耕地的绿色、低碳利用行为受自身风险偏好、主观认知、家庭和农场特征等影响[40]。小型农户具有更高的避险需求，而小农户家庭经营仍是当前的主体，因此，对于降污减碳防护区，需要解决国家绿色低碳转型战略和农户行为之间的矛盾，一方面要培育农业经营主体模式，提高新型农业经营主体的自身素质和学习能力，意识到过量使用化肥、农药和农膜等生产资料对耕地生态系统的危害，进而对其生产行为进行规范。另一方面，小农户的经营决策受其风险偏好影响，耕地绿色化、低碳化转型所带来的环境效益呈现出明显的正外部性[41]，为此，需要政府制定相关政策将耕地固碳增汇的正外部性内部化，有效激励绿色低碳利用耕地措施的落实，真正将耕地绿色低碳利用策略落实到生产实践中。

防污固碳保护区不仅是重要的碳源，同时也是重要的碳汇空间，主要分布在内蒙古、吉林中部、山东中部、安徽东部和南部、江苏北部和南部、湖南东部以及四川等区域的 69 个地级市，占粮食主产区的 40.35%。对于防污固碳保护区，首先，以提高控污碳汇能力为导向，加强对耕地绿色低碳利用的监管，并重点保护生态绿色且高碳汇区域。二是加强对防污固碳保护区的耕地管制，聚焦防污固碳保护区的污染治理与碳汇保护。三是以污染、碳管控为切入点，探索建立耕地的碳汇体系，在此基础上，结合可持续发展、碳达峰、碳中和的国家战略部署，研究耕地利用方式对碳排放、碳汇等的影响，制定实现耕地绿色低碳转型的污染排放、碳排放和增汇固碳标准，从而将耕地的绿色低碳利用转型与“绿色可持续发展”“碳达峰”目标相结合，为实现碳中和目标提供制度保障。

3　结　论

本研究建立耕地绿色低碳利用效率（cultivated land green and low-carbon use efficiency，CLGLCUE）“投入-产出”分析体系，构建耕地绿色低碳转型指数，提出基于“现状－目标”对比分析的 CLGLCU 转型管控分区思路，并以粮食主产区 171 个地级市为对象进行实证研究，主要结论如下：

1）2000—2020 年间，研究区耕地绿色低碳利用水平总体上升，区域差异特征明显，呈北高南低态势；预测 2030 年粮食主产区的耕地绿色低碳水平呈现递增状态，各地级市间差距明显减小，且增幅差异明显，实现耕地绿色低碳转型的潜力较大。

2）降污减碳严控区、降污减碳管控区、降污减碳防护区和防污固碳保护区分别占研究区的 9.36%、39.77%、10.52%、40.35%，其中降污减碳严控区空间分布较为零散，主要分布在黑龙江北部，辽宁西部，河北北部，河南西部及江西南部等地级市；降污减碳管控区主要分布在黑龙江东部、河北西部、河南、安徽西北部、湖南、江西北部等地区；降污减碳防护区空间分布较为零散，主要分布在内蒙古、山东东北部、江苏中部等地区；防污固碳保护区主要分布在内蒙古，吉林中部，山东中部，安徽东部和南部，江苏北部和南部、湖南东部及四川等地区。

3）研究提出了相应耕地绿色低碳转型分区管控建议。对于降污减碳严控区，强化耕地生产要素高效配置，优先调整投入产出比；对于降污减碳管控区，加大耕地绿色低碳转型技术投入力度，强化耕地生态固碳减排与污染治理技术的创新与耕地治理技术的集成；对于降污减碳防护区应当强化耕地绿色低碳转型在农户层面的落实力度；对于防污固碳保护区，则以控污碳汇能力提升为导向，优先建立耕地控污碳汇系统，进一步提高其污染治理与增汇固碳能力。

耕地绿色低碳利用转型是一个复杂的动态变化过程，随着社会经济技术的发展，耕地利用绿色转型的内涵及其发展态势与影响机制也会随之改变， 因此，如何建立动态变化视角下的耕地绿色低碳利用测算指标体系并进行耕地绿色低碳利用转型分区的理论与实证研究，还有待进一步深入。

[参　考　文　献]

[1] 郧文聚，吴克宁，张小丹. 中国耕地健康问题及防治对策[J]. 中国发展，2019，19(4)：34-37.
YUN Wenju, WU Kening, ZHANG Xiaodan. Health problems and prevention countermeasures of cultivated land in China[J]. China Development, 2019, 19(4): 34-37. (in Chinese with English abstract)

[2] LU H, XIE H L, LV T G, et al. Determinants of cultivated land recuperation in ecologically damaged areas in China[J]. Land Use Policy, 2019, 81(1): 160-166.

[3] 张琳，张凤荣，安萍莉，等. 不同经济发展水平下的耕地利用集约度及其变化规律比较研究[J]. 农业工程学报，2008，24(1)：108-112.

ZHANG Lin, ZHANG Fengrong, AN Pingli, et al. Comparative study of cultivated land use intensive degree and its change law at different economic levels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(1): 108-112. (in Chinese with English abstract)

[4] 张荣天，焦华富. 中国省际耕地利用效率时空格局分异与机制分析[J]. 农业工程学报，2015，31(2)：277-287.
ZHANG Rongtian, JIAO Huafu. Spatial-temporal pattern differentiation and its mechanism analysis of using efficiency for provincial cultivated land in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 277-287. (in Chinese with English abstract)

[5] 陈丹玲，卢新海，匡兵. 基于随机森林的耕地利用效率测度模型构建及其应用[J]. 自然资源学报，2019，34(6)：1331-1344.
CHEN Danling, LU Xinhai, KUANG Bing. Measurement of cultivated land utilization efficiency: Construction and application of random forest[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(6): 1331-1344. (in Chinese with English abstract)

[6] 封永刚，彭珏，邓宗兵，等. 面源污染、碳排放双重视角下中国耕地利用效率的时空分异[J]. 中国人口·资源与环境，2015，25(8)：18-25.
FENG Yonggang, PENG Jue, DENG Zongbing, et al. Spatial-temporal variation of cultivated land's utilization efficiency in China based on the dual perspective of non-point source pollution and carbon emission[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(8): 18-25. (in Chinese with English abstract)

[7] 王海力，韩光中，谢贤健. 基于 DEA 模型的西南地区耕地利用效率时空格局演变及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境，2018，27(12)：2784-2795.
WANG Haili, HAN Guangzhong, XIE Xianjian. Spatiotemporal pattern evolvement based on the DEA model and its driving factors of arable land utilization efficiency of the southwest region in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(12): 2784-2795. (in Chinese with English abstract)

[8] 刘蒙罢，张安录，文高辉. 长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率时空格局与演变趋势[J]. 中国土地科学，2021，35(2)：50-60.
LIU Mengba, ZHANG Anlu, WENG Gaohui. Temporal and spatial pattern and evolution trend of cultivated land use ecological efficiency in the main grain producing areas in the Lower Yangtze Region[J]. China Land Science, 2021, 35(2): 50-60. (in Chinese with English abstract)

[9] 吴昊玥，孟越，黄瀚蛟，等. 中国耕地低碳利用绩效测算与时空分异[J]. 自然资源学报，2022，37(5)：1148-1163.
WU Haoyue, MENG Yue, HUANG Hanjiao, et al. Estimation and spatio-temporal divergence of the low-carbon performance of cropland use in China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1148-1163. (in Chinese with English abstract)

[10] 柯楠，卢新海，匡兵，等. 碳中和目标下中国耕地绿色低碳利用的区域差异与影响因素[J]. 中国土地科学，2021，35(8)：67-76.
KE Nan, LU Xinhai, KUANG Bing, et al. Regional ifferences and influencing factors of green and low-carbon utilization of cultivated land under the carbon neutrality target in China[J]. China Land Science, 2021, 35(8): 67-76. (in Chinese with English abstract)

[11] ZOMER R J, BOSSIO D A, SOMMER R, VERCHOT L V. Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 15554.

[12] 匡兵，卢新海，韩璟，等. 考虑碳排放的粮食主产区耕地利用效率区域差异与变化[J]. 农业工程学报，2018，34(11)：1-8.
KUANG Bing, LU Xinhai, HAN Jing, et al. Regional differences and dynamic evolution of cultivated land use efficiency in major grain producing areas in low carbon perspective[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(11): 1-8. (in Chinese with English abstract)

[13] 杨朔，于文海，李世平. 基于 DEA 非有效改进的陕西省耕地生产效率研究[J]. 中国土地科学，2013，27(10)：62-68.
YANG Shuo, YU Wenhai, LI Shiping. Study on the non-effective improvement of productive efficiency of cultivated land in Shaanxi Province based on DEA[J]. China Land Science, 2013, 27(10): 62-68. (in Chinese with English abstract)

[14] XIE H L, CHEN Q R, WANG W , et al. Analyzing the green efficiency of arable land use in China[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2018, 133(3): 15-28.

[15] 柯善淦，崔海莹，卢新海，等. 耕地利用绿色转型的时空格局及其驱动机制研究——以湖北省为例[J]. 中国土地科学，2021，35(12)：64-74.
KE Shangan, CUI Haiying, LU Xinhai, et al. Research on the spatial-temporal pattern and mechanisms of green transition of farmland use: A case of Hubei Province[J]. China Land Science, 2021, 35(12): 64-74. (in Chinese with English abstract)

[16] 匡兵，范翔宇，卢新海. 中国耕地利用绿色转型效率的时空分异特征及其影响因素[J]. 农业工程学报，2021，37(21)：269-277.
KUANG Bing, FAN Xiangyu, LU Xinhai. Spatial-temporal differentiation characteristics of the efficiency of green transformation of cultivated land use and its affecting factors in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(21): 269-277. (in Chinese with English abstract)

[17] 张文慧，吕晓，史洋洋，等. 黄河流域土地利用转型图谱特征[J]. 中国土地科学，2020，34(8)：80-88.
ZHANG Wenhui, LV Xiao, SHI Yangyang, et al. Graphic characteristics of land use transition in the Yellow River Basin[J]. China Land Science, 2020, 34(8): 80-88. (in Chinese with English abstract)

[18] 李全峰，胡守庚，瞿诗进. 1990—2015 年长江中游地区耕地利用转型时空特征[J]. 地理研究，2017，36(8)：1489-

1502.
LI Quanfeng, HU Shougeng, QU Shijin. Spatiotemporal characteristics of cultivated land use transition in the Middle Yangtze River from 1990 to 2015[J]. Geographical Research, 2017, 36(8): 1489-1502. (in Chinese with English abstract)

[19] 龙花楼，戈大专，王介勇. 土地利用转型与乡村转型发展耦合研究进展及展望[J]. 地理学报，2019，74(12)：2547-2559.
LONG Hualou, GE Dazhuan, WANG Jieyong. Progress and prospects of the coupling research on land use transitions and rural transformation development[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2547-2559. (in Chinese with English abstract)

[20] 祖健，郝晋珉，陈丽，等. 耕地数量、质量、生态三位一体保护内涵及路径探析[J]. 中国农业大学学报，2018，23(7)：84-95.
ZU Jian, HAO Jinmin, CHEN Li, et al. Analysis on trinity connotation and approach to protect quality and ecology of cultivated land[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(7): 84-95. (in Chinese with English abstract)

[21] 杨忍，刘彦随，龙花楼，等. 基于格网的农村居民点用地时空特征及空间指向性的地理要素识别——以环渤海地区为例[J]. 地理研究，2015，34(6)：1077-1087.
YANG Ren, LIU Yansui, LONG Hualou, et al. Spatial-temporal characteristics of rural residential land use change and spatial directivity identification based on grid in the Bohai Rim in China[J]. Geographical Research, 2015, 34(6): 1077-1087. (in Chinese with English abstract)

[22] 廖柳文，龙花楼，马恩朴. 乡村劳动力要素变动与耕地利用转型[J]. 经济地理，2021，41(2)：148-155.
LIAO Liuwen, LONG Hualou, MA Enpu. Rural labor change and farmland use transition[J]. Economic Geography, 2021, 41(2): 148-155. (in Chinese with English abstract)

[23] 宋小青，李心怡. 区域耕地利用功能转型的理论解释与实证[J]. 地理学报，2019，74(5)：992-1010.
SONG Xiaoqing, LI Xinyi. Theoretical explanation and case study of regional cultivated land use function transition[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(5): 992-1010. (in Chinese with English abstract)

[24] 卢新海，唐一峰，易家林，等. 基于空间计量模型的耕地利用转型对农业经济增长影响研究[J]. 中国土地科学，2019，33(6)：53-61.
LU Xinhai, TANG Yifeng, YI Jialin, et al. Study on the impact of cultivated land use transition on agricultural economic growth based on spatial econometric model[J]. China Land Science, 2019, 33(6): 53-61. (in Chinese with English abstract)

[25] 杨斌，杨俊，王占岐，等. 长江经济带耕地绿色低碳利用的时空格局及其成因分析[J]. 中国土地科学，2022，36(10)：63-71.
YANG Bin, YANG Jun, WANG Zhanqi, et al. Spatial-temporal pattern and attribution of cultivated land green and low-carbon utilization in the Yangtze River economic belt[J]. China Land Science, 2022, 36(10): 63-71. (in Chinese with English abstract)

[26] 童锐，王永强. 农产品基地认证促进农户农药安全使用了吗?——基于陕西省苹果种植户的实证研究[J]. 生态经济，2019，35(11)：112-116.
TONG Rui, WANG Yongqiang. Does agro-product certification promote the use of unrestricted pesticides: Based on the empirical study of apple farmers in Shaanxi Province[J]. Ecological Economy, 2019, 35(11): 112-116. (in Chinese with English abstract)

[27] 中华人民共和国财政部. 关于改革和完善农业综合开发政策措施的意见[EB/OL]. （2014-08-20）[2016-10-20]. https://code.fabao365.com/law_162366.html.

[28] 李雪，顾莉丽，李瑞. 我国粮食主产区粮食生产生态效率评价研究[J]. 中国农机化学报，2022，43(2)：205-213.
LI Xue, GU LIli, LI Rui. Study on evaluation of eco-efficiency of grain production in major grain-producing areas of China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(2): 205-213. (in Chinese with English abstract)

[29] 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.
CHEN Li, HAO Jinmin, WANG Feng, et al. Carbon sequestration function of cultivated land use system based on the carbon cycle for the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Resources Science, 2016, 38(6): 1039-1053. (in Chinese with English abstract)

[30] 田云，张俊飚. 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.
TIAN Yun, ZHANG Junbiao. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1298-1309.

[31] 谢光辉，王晓玉，韩东倩，等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报，2011，16(1)：1-8.
XIE Guanghui, WANG Xiaoyu, HAN Dongqian, et al. Harvest index and residue factor of non-cereal crops in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)

[32] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon missions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2002, 91: 217-232.

[33] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential[J]. Global Change Biology, 2000, 6(3): 317-327.

[34] 李波，张俊飚，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.
LI Bo, ZHANG Junbiao, LI Haipeng. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(8): 80-86. (in Chinese with English abstract)

[35] DUBEY A, LAL R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India and Ohio, USA[J]. Journal of Crop Improvement, 2009, 23(4): 332-350.

[36] 中华人民共和国农业农村部. 张桃林副部长在全国农业机

械化工作会议上的讲话及典型发言材料[EB/OL]. [2022-03-21].
[37] 李晨. 未来十年我国粮食产量将年均增长 1.2%[N]. 中国科学报，2023-04-24(001).
[38] 张玥，代亚强，陈媛媛等. 中国耕地低碳利用效率时空演变及其驱动因素[J]. 农业工程学报，2022，38(8)：234-243.
ZHANG Yue, DAI Yaqiang, CHEN Yuanyuan, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of low-carbon use efficiency of cultivated land in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 234-243. (in Chinese with English abstract)
[39] 汪亚琴，姚顺波，侯孟阳，等. 基于地理探测器的中国农业生态效率时空分异及其影响因素[J]. 应用生态学报，2021，32(11)：4039-4049.
WANG Yaqin, YAO Shunbo, HOU Mengyang, et al. Spatial-temporal differentiation and its influencing factors of agricultural eco-efficiency in China based on geographic detector[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 4039-4049. (in Chinese with English abstract)
[40] 畅华仪，张俊飚，何可. 技术感知对农户生物农药采用行为的影响研究[J]. 长江流域资源与环境，2019，28(1)：202-211.
CHANG Huayi, ZHANG Junbiao, HE Ke. Technology perception and biological pesticides adoption[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(1): 202-211. (in Chinese with English abstract)
[41] TAN X P, WANG X Y, ZAIDI S H A. What drives public willingness to participate in the voluntary personal carbon-trading scheme? A case study of Guangzhou Pilot, China[J]. Ecological Economics, 2019, 165(3): 13-17.

Index and zoning for green and low-carbon transition of cultivated land utilization in main grain-producing areas of China

FU Haiyue[1,2,3], WU Shudong[1], JIANG Penghui[1,2※]

(1. *College of Public Administration*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *China*;
2. *China Resources & Environment and College of Public Administration Development Academy*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *China*;
3. *Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation*, *Ministry of Natural Resources*, *Shenzhen* 518034, *China*)

Abstract: The cultivated land environment has imposed the most serious constraints on national food and ecological security. The green and low-carbon transformation of cultivated land is of great significance to promote sustainable agriculture under the "dual carbon" goals. In this study, an input-output analysis model was established for the green and low-carbon utilization of cultivated land. The transition index was also constructed for the green and low-carbon utilization of cultivated land, according to a comparative analysis of the "status quo target". The governance areas were then grouped for the various regulation paths. A case study was conducted on 171 prefecture-level cities in the main grain-producing areas of China. Firstly, the temporal and spatial characteristics were analyzed for the green and low-carbon utilization efficiency of cultivated land from 2000 to 2020. Secondly, the indicators were predicted for the green and low-carbon utilization of cultivated land in 2030. Finally, 171 prefecture-level cities were grouped for the differentiated suggestions, according to the green and low-carbon index of cultivated land. The results indicate that there was an increasing trend in the green and low-carbon utilization level of cultivated land in the main grain-producing areas from 2000 to 2020, indicating a spatial pattern with the high in the north and the low in the south. The improved level was predicted in the green and low-carbon of cultivated land in 2030, but there were significant differences in the growth rates among regions. Strict control zones for pollution reduction and carbon reduction, control zones, and protection zones, as well as the pollution and carbon sequestration protection zones accounted for 9.36%, 39.77%, 10.52%, and 40.35% of the main grain production areas, respectively, which were distributed mainly in the southern, central and southern regions, Yantai city in Shandong Province, and cities along the eastern coast, Inner Mongolia, and Sichuan Province. Some suggestions were proposed to strengthen the efficient allocation of farmland production factors, according to the socio-economic conditions of each region. The farmland carbon sequestration and emission reduction technologies can be utilized to implement green and low-carbon production practices. Differentiated guidance of green and low-carbon transition was established for the carbon sink systems of farmland. The finding can provide strong reference and decision-making support to explore the path of green and low-carbon utilization transition of cultivated land. Differentiated regulation suggestions are also addressed to promote sustainable land use and green transition in modern agriculture.

Keywords: cultivated land; land use; index of green and low-carbon transition; zoning governance; main grain producing areas; sustainable development