

引用格式: 程术希, 李文佑嘉, 何勇, 等. 稻田生物质炭投入下温室气体减排与净环境经济效益评估[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(4): 745–753. CHENG Shuxi, LI Wenyujia, HE Yong, *et al.* Evaluation of greenhouse gas emission reduction and net environmental and economic benefits from biochar application in paddy fields[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(4): 745–753.

## 稻田生物质炭投入下温室气体减排与净环境经济效益评估

程术希<sup>1</sup>, 李文佑嘉<sup>2</sup>, 何 勇<sup>2</sup>, 蒋茜静<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 科学技术研究院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 【目的】生物质炭因其碳封存与土壤改良功能, 被认为是一种可行的保产减排措施。对生物质炭的环境与经济效益进行研究, 为实现农业绿色转型、促进农田可持续发展和温室气体减排提供科学依据。【方法】整合中国稻田系统的多源数据, 构建混合效应模型, 结合 Meta 分析评估生物质炭对温室气体排放、作物产量和固碳能力的影响, 并且开展亚组分析, 展示了其他变量对生物质炭效应的影响。同时, 基于净环境经济效益, 纳入了作物产量收益、环境效益、农业成本和环境损耗, 系统量化了生物质炭投入的环境经济效益。【结果】生物质炭施用可提高 12.8% 的作物产量与 30.5% 的土壤固碳速率, 并提升净环境经济效益值, 但对甲烷和氧化亚氮排放的影响不显著。进一步分析表明: 不同生物质炭种类和施肥管理对其效应具有重要调控作用。【结论】在稻田种植中添加生物质炭不仅能通过改善土壤固碳能力间接促进温室气体减排, 而且也显著提高了净环境经济效益。图 6 表 2 参 28

**关键词:** 温室气体; 净环境经济效益; 生物质炭; Meta 分析; 成本效益; 农业绿色转型

**中图分类号:** S157.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2025)04-0745-09

## Evaluation of greenhouse gas emission reduction and net environmental and economic benefits from biochar application in paddy fields

CHENG Shuxi<sup>1</sup>, LI Wenyujia<sup>2</sup>, HE Yong<sup>2</sup>, JIANG Qianjing<sup>2</sup>

(1. Office of Scitech Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China; 2. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] Biochar is considered a feasible measure for maintaining production and reducing emissions due to its carbon sequestration and soil improvement functions. Research on the environmental and economic benefits of biochar, providing scientific basis for achieving green transformation of agriculture, promoting sustainable development of farmland, and reducing greenhouse gas emissions. [Method] Integrating multi-source data from China's rice paddy system, constructing a mixed-effects model, and combining meta-analysis to evaluate the impact of biochar on greenhouse gas emissions, crop yield, and carbon sequestration capacity. Subgroup analysis was also conducted to demonstrate the influence of other variables on the biochar effect. And based on the net environmental and economic benefits (NEEB), the environmental benefits of biochar input were systematically quantified by incorporating crop yield benefits, environmental benefits, agricultural costs, and environmental losses. [Result] Biochar increased crop yield by 12.8% and soil carbon sequestration by 30.5%, enhancing NEEB. CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O emissions showed no significant changes. Effects

收稿日期: 2025-04-14; 修回日期: 2025-05-27

基金项目: 浙江省尖兵计划重点研发项目 (2022C02014)

作者简介: 程术希 (ORCID: 0009-0009-5180-6921), 博士, 从事农业科技管理研究。E-mail: [kjccsx@zju.edu.cn](mailto:kjccsx@zju.edu.cn)。通信作者: 蒋茜静 (ORCID: 0000-0002-4889-132X), 副研究员, 博士, 从事农田碳氮循环和面源污染防治研究。E-mail: [jqj713@zju.edu.cn](mailto:jqj713@zju.edu.cn)

varied with biochar type and fertilization practices. [Conclusion] Biochar application enhances soil carbon sequestration and NEEB, supporting sustainable rice cultivation. [Ch, 6 fig. 2 tab. 28 ref.]

**Key words:** greenhouse gases; net environmental and economic benefits (NEEB); biochar; meta-analysis; cost-benefit analysis; agricultural green transformation

全球平均地表温度较工业化前(1850—1900 年平均值)上升约 1.15 °C,这与二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)等温室气体的排放密切相关<sup>[1]</sup>。2019 年大气 CO<sub>2</sub> 达 410 cm<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>, CH<sub>4</sub> 达 1 866 mm<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>, N<sub>2</sub>O 达 332 mm<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>, 这些气体的变化导致全球气候变化加剧,进而引发严重的环境问题<sup>[2]</sup>。农业生产中管理措施不当是诱发温室气体排放的重要原因。大量化肥中的氮素未被作物充分吸收或未被土壤固定,将会污染环境。若以 N<sub>2</sub>O 或氨气(NH<sub>3</sub>)的形式排放会造成空气污染;若以淋失或径流的形式流失会导致土壤酸化、水体富营养化等问题,从而影响农业生产<sup>[3]</sup>。因此,寻求保障产量且减少温室气体排放的农田管理措施已经刻不容缓<sup>[4]</sup>。

在碳中和战略驱动下,农业绿色转型已成为全球可持续发展的重要议题<sup>[5]</sup>。中国作为全球最大的水稻 *Oryza sativa* 生产国,稻田生态系统贡献了约 7%~17% 的农业温室气体排放,同时面临土壤有机碳流失与氮肥效率低下的双重挑战<sup>[6]</sup>。生物质炭具有独特的碳封存与土壤改良功能,在农田中添加生物质炭被认为是农业负排放技术的关键路径<sup>[7]</sup>,但生物质炭在稻田系统的环境-经济综合效益仍鲜有报道。

生物质炭对稻田的影响呈现复杂性。在减排方面,短期施用生物质炭可抑制 CH<sub>4</sub> 排放达 6.80%~83.78%,长期施用生物质炭可能通过改变土壤氧化还原状态诱发 N<sub>2</sub>O 排放增加 27.00%<sup>[8]</sup>;在生产层面,生物质炭对旱作作物平均增产 12.00%~20.00%<sup>[9]</sup>,但不同研究对水稻产量的提升效应异质性很强,这与生物质炭特性和土壤初始肥力密切相关<sup>[10]</sup>。在减排过程中,净环境经济效益(NEEB)同时考虑了收益、农业成本和减排成本,是评估减排效益的重要指标<sup>[11]</sup>。在集约化蔬菜生产系统中,LI 等<sup>[12]</sup>、ZHOU 等<sup>[13]</sup>与 BI 等<sup>[14]</sup>分析了有机肥替代化肥和生物质炭添加对净环境经济效益的作用,WANG 等<sup>[15]</sup>探讨了有机肥替代化肥对烟草 *Nicotiana tabacum* 净环境经济效益的影响。以上研究均验证了一些农业行为对净环境经济效益的提升作用。然而,现有研究大多聚焦于单一的环境指标,如温室气体减排,或者土壤有机碳固存速率(SOCSR)提升;还有部分研究围绕净环境经济效益等。目前,缺乏对以上两者结果的结合与量化,导致政策制定者难以权衡生物质炭推广的边际成本与综合收益<sup>[16]</sup>。

本研究通过整合中国稻田系统的多源数据并建立混合效应模型,首次构建了生物质炭投入的 Meta-NEEB 评估框架,本研究旨在计算生物质炭投入对稻田的累积效应,分析它对温室气体、作物产量和固碳能力的影响,并基于生物质炭投入种类进行亚组分析,对重要变量(生物质炭施用量、土壤有机碳质量分数和施氮量)进行回归分析,再通过净环境经济效益分析,评估生物质炭投入的综合效益,为绿色农业提供实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 文献检索

通过对 Web of Science、中国知网文献数据库进行全面检索,筛选发表于 1995—2025 年的文献。检索关键词包括:“生物炭”“生物质炭”“温室气体排放”“作物产量”“土壤有机碳固存速率(SOCSR)”。纳入研究的变量包括施氮量、土壤有机碳质量分数、生物质炭基底类型和生物质炭施用量。研究应符合以下准则:①研究对象为中国范围内的稻田,排除建模仿真结果和实验室数据;②实验设计必须包含添加生物质炭的处理组和不添加生物质炭的对照组;③必须报道了 CH<sub>4</sub> 排放量、N<sub>2</sub>O 排放量、SOCSR 和作物产量四者之一;④应报道基本的土壤特性及施肥策略。

### 1.2 数据收集

数据直接从所选文献的表格及文字描述中提取,对于图像中的数据点,通过 GetData Graph Digitizer (Version 2.26.0.20) 进行提取。对于未提供标准差(SD)和标准误(SE)的研究,不纳入本研究,而对于仅提供标准误的数据点,可通过式(1)计算标准差。

$$S_D = S_E \times \sqrt{n}。 \quad (1)$$

式 (1) 中：\$S\_D\$ 表示标准差，\$S\_E\$ 表示标准误，\$n\$ 表示实验重复次数。

最终，筛选稻田 \$CH\_4\$ 排放量 (26 篇)、\$N\_2O\$ 排放量 (24 篇)、SOCSR (20 篇) 和作物产量 (45 篇) 的文献，分别提取到 90 个 (\$CH\_4\$)、77 个 (\$N\_2O\$)、49 个 (SOCSR)、247 个 (产量) 的观测值，同时包含添加生物质炭的处理组和不添加生物质炭的对照组。这些研究的实验地点分布于中国各地，其中大部分分布于长江三角洲和东北等地。纳入的解释变量包括各种生物质炭基底类型 (花生 *Arachis hypogaea* 壳基、木薯 *Manihot esculenta* 秸秆基、水稻秸秆基、小麦 *Triticum aestivum* 秸秆基、玉米 *Zea mays* 秸秆基、竹子 *Phyllostachys edulis* 基)、生物质炭施用量 (\$kg \cdot hm^{-2}\$)、土壤有机碳质量分数 (\$g \cdot kg^{-1}\$) 和施氮量 (\$kg \cdot hm^{-2}\$)。

### 1.3 Meta 分析

生物质炭对稻田 \$CH\_4\$、\$N\_2O\$、SOCSR 和作物产量的影响通过效应值 (\$y\_i\$) 来评估，效应值被定义为自然对数响应比 (\$lnR\$)，通过式 (2) 计算：

$$y_i = lnR = ln(Y_t/Y_c)。 \quad (2)$$

式 (2) 中：\$Y\_t\$ 和 \$Y\_c\$ 分别表示处理组和对照组的指标均值。

自然对数响应比 (\$lnR\$) 对应的研究内方差 (\$v\_i\$) 通过式 (3) 计算：

$$v_i = \frac{S_t^2}{N_t Y_t^2} + \frac{S_c^2}{N_c Y_c^2}。 \quad (3)$$

式 (3) 中：\$S\_t^2\$ 和 \$S\_c^2\$ 分别指处理组和对照组的方差；\$N\_t\$ 和 \$N\_c\$ 分别表示处理组和对照组的实验重复次数。

分析采用混合效应模型，累积效应量通过加权平均各独立研究的效应量获得。权重 (\$w\_i\$) 同时考虑研究内方差 (\$v\_i\$) 和研究间方差 (\$\tau^2\$)，计算公式为：

$$w_i = \frac{1}{v_i + \tau^2}。 \quad (4)$$

整个建模过程使用 R 软件中的 Metafor 包完成。首先计算添加生物质炭对稻田指标的累积响应；随后通过引入解释变量构建混合效应模型并进行回归分析。在 Meta 分析过程中，纳入的不同研究之间可能存在大量的发表偏倚和较高的组间异质性，因此需要通过一些方法来评估本研所得到的结论是否可靠。对于失安全系数 (Nfs) 和漏斗图，若 Nfs 远大于 \$5k+10\$ (\$k\$ 为观测值个数)，漏斗图分布对称且 Egger 检验的 \$P>0.05\$，则认为该研究结果可靠<sup>[17]</sup>。

### 1.4 净环境经济效益指标

通常将净环境经济效益 (NEEB) 作为对稻田净环境经济效益分析的主要指标。NEEB 考虑了收益、成本和环境损耗，其核心计算公式为：

$$N = b_c + b_e - c_i - c_e。 \quad (5)$$

式 (5) 中：\$N\$ 为净环境经济效益值；\$b\_c\$ 为作物产量所得收益；\$b\_e\$ 为稻田的环境效益；\$c\_i\$ 为农业活动投入成本；\$c\_e\$ 为稻田的环境损失。在计算 NEEB 值时，应根据不同的研究侧重点对上述公式进行细化和拆解。在本研究中，作物产量收益计算应同时考虑大米价值和水稻秸秆价值，所纳入的环境污染指标包括温室气体 (\$CH\_4\$ 和 \$N\_2O\$) 排放和土壤氮流失 (\$NH\_3\$ 挥发、氮淋失和氮径流)，农业活动投入成本应考虑氮磷钾肥成本、有机肥成本、生物质炭成本、农药成本、耕作和灌溉等设备成本<sup>[18]</sup>。因此，\$b\_c\$、\$b\_e\$ 和 \$c\_e\$ 的计算如式 (6)：

$$b_c = b_r + b_s。 \quad (6)$$

式 (6) 中：\$b\_r\$ 为大米收益；\$b\_s\$ 为水稻秸秆收益。环境效益和损失的计算，应同时考虑温室气体排放和氮流失，将减排量或排放量统一为二氧化碳 (\$CO\_2\$) 当量，计算公式为：

$$b_e, c_e = \{[N_1 + 0.01N_2 + 0.0075(L + R)]273 + 27.9C\}0.15。 \quad (7)$$

式 (7) 中：\$N\_1\$、\$N\_2\$、\$L\$、\$R\$、\$C\$ 分别为 \$N\_2O\$、\$NH\_3\$、氮淋失、氮径流、\$CH\_4\$ 的排放量 (\$b\_e\$) 或减排量 (\$c\_e\$)。

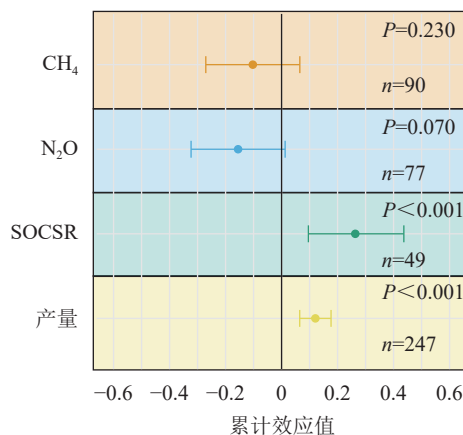
## 2 结果与分析

### 2.1 添加生物质炭的总体效应分析

如图1所示：在稻田种植过程中添加生物质炭能使 SOCSR 提高 30.5%，能为作物增产 12.8%，说明添加生物质炭对 SOCSR 和产量的提高作用显著 ( $P < 0.001$ )；而对温室气体的排放却无显著影响 ( $\text{CH}_4$ :  $P=0.230$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ :  $P=0.070$ )，但总体也呈现减排趋势。因此，后续的亚组分析及回归分析主要针对 SOCSR 和作物产量这 2 个指标进行。

### 2.2 解释变量的亚组分析

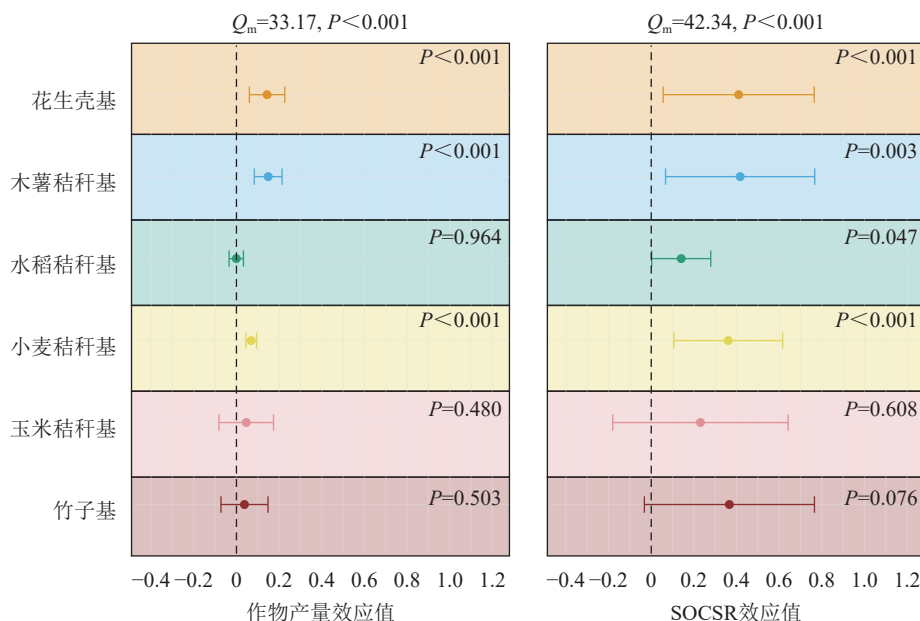
**2.2.1 生物质炭种类** 生物质炭的种类是生物质炭投入过程中的重要变量，因此对 6 种不同生物质炭的效应差异进行亚组分析，结果见图2。如图2所示：生物质炭种类对作物产量和 SOCSR 均具有显著影响 ( $P < 0.001$ )，其异质性检验指标 ( $Q_m$ ) 分别为 33.17 和 42.34。其中，花生壳基、木薯秸秆基和小麦秸秆基分别能使稻田增产 15.4%、16.1% 和 7.1%。同时，它们也能显著增加 SOCSR ( $P < 0.001$ ,  $P=0.003$ )，分别增加了 50.7%、51.7% 和 43.5%。而水稻秸秆基对 SOCSR 也有一定促进作用 ( $P=0.047$ )，提高了 15.1%。因此，花生壳基、木薯秸秆基和小麦秸秆基更有利于提高作物产量和土壤有机碳的固定，其中，木薯秸秆基的效果最优。



SOCSR为土壤有机碳固存速率； $n$ 代表观测值对数。

图1 添加生物质炭对稻田  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、SOCSR 和产量的总体效应

Figure 1 Overall effects of biochar addition on  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  emissions, SOCSR, and yield in paddy fields



$Q_m$ 表示异质性检验指标，其值越大表示该因素对累积效应的影响越大。SOCSR为土壤有机碳固存速率。

图2 生物质炭种类对稻田 SOCSR 和产量效应的亚组分析

Figure 2 Subgroup analysis of biochar types on SOCSR and yield effects in paddy fields

**2.2.2 土壤和田间管理** 在添加生物质炭的条件下纳入了常见的土壤和田间管理变量进行亚组分析，包括有机肥投入、土壤 pH、土壤总氮、翻耕、灌溉和残留物管理，结果如图3所示。可见，有机肥投入能显著提高稻田的作物产量 (增加 10.1%) 和 SOCSR (增加 10.1%)；中性或弱酸弱碱的土壤 ( $5 < \text{pH} \leq 8$ ) 对产量和 SOCSR 均有一定的提升作用，分别提高了 10.9% 和 8.7%；过高的土壤总氮 (土壤总氮  $> 2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 使稻田增产 9.5%，而适中的土壤总氮 ( $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} < \text{土壤总氮} \leq 2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 增加了 12.7% 的 SOCSR；翻耕有利于作物产量提高 (提高 24.5%)，却不利于 SOCSR 的提高，不翻耕使 SOCSR 提高了 12.7%；灌



溉对作物产量和 SOCSR 均有正向影响, 分别提高了 7.6% 和 5.5%, 秸秆还田处理可协同提升作物产量 (提高 14.1%) 与 SOCSR (提高 10.7%)。

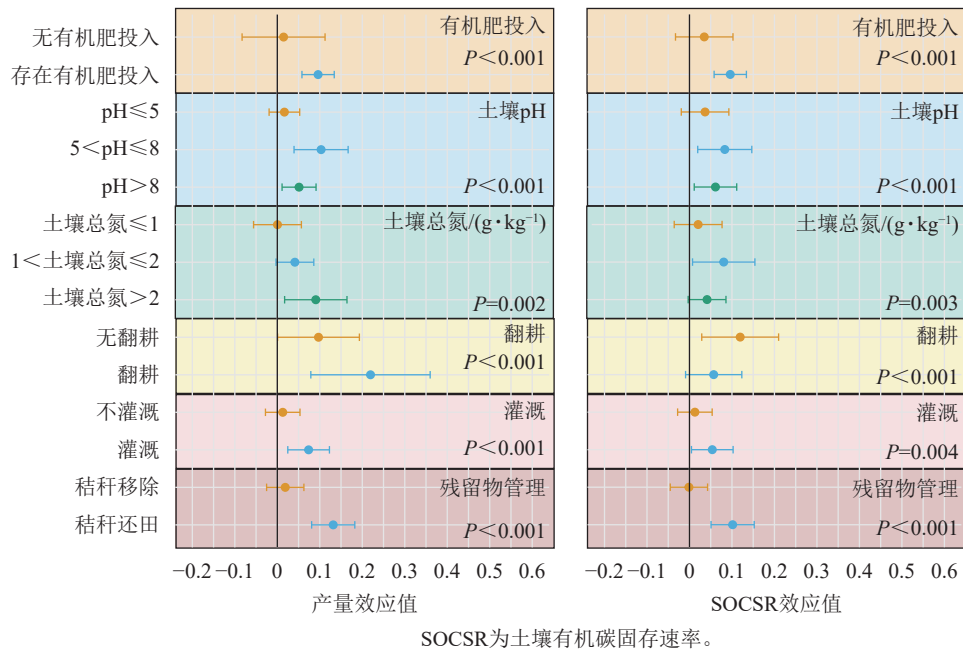


图 3 土壤和田间管理对稻田 SOCSR 和产量效应的亚组分析

Figure 3 Subgroup analysis of soil and field management variables on SOCSR and yield effects in paddy fields

**2.2.3 重要变量回归分析** 从稻田的生物质炭添加、土壤特性、施肥措施方面分别选取对产量和 SOCSR 具有重要作用的变量 (生物质炭施用量、土壤有机碳质量分数和施氮量) 进行 Meta 回归分析。如图 4 所示: 生物质炭施用量、土壤有机碳质量分数与作物产量和 SOCSR 均呈正相关 ( $P < 0.001$ )。施氮量对作物产量和 SOCSR 也有显著作用 ( $P < 0.001$ ), 在施氮量为  $0 \sim 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 施氮量与作物产量呈正相关, 而高施氮量则会降低 SOCSR。其中, 施氮量对产量的影响可能并非简单的线性关系, 过量施

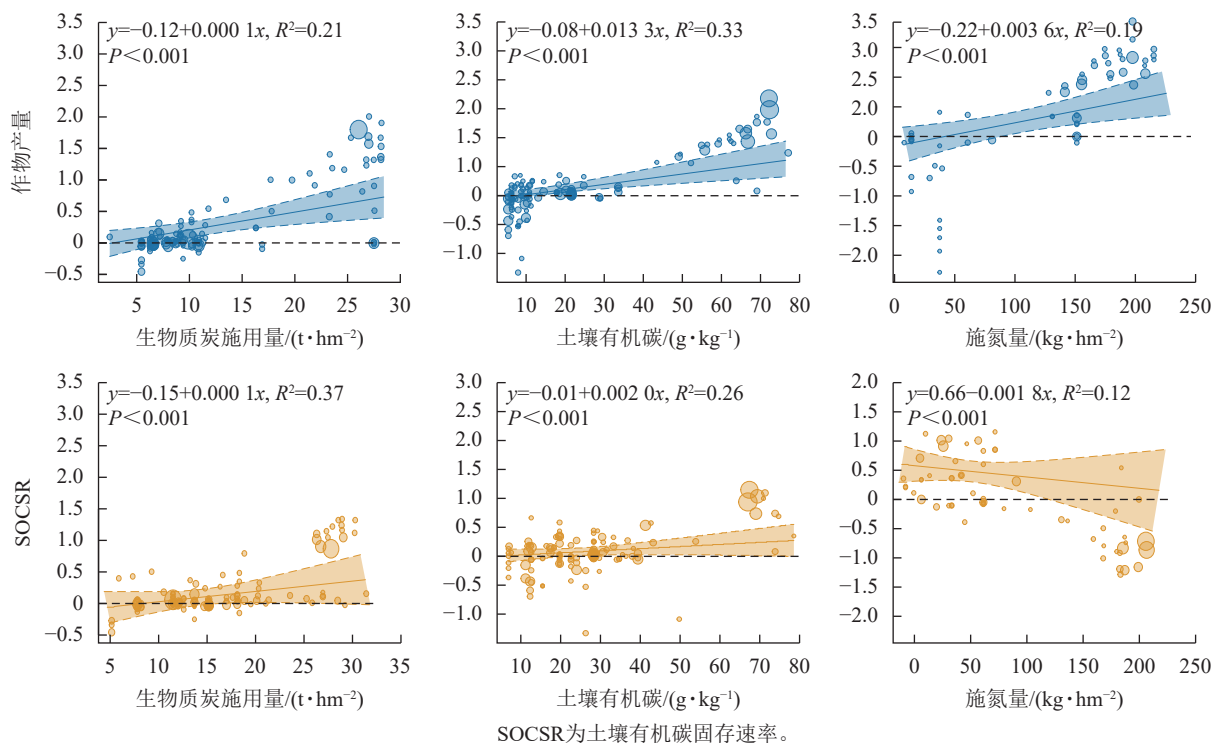


图 4 重要连续变量与作物产量和 SOCSR 的关系

Figure 4 Relationships between key continuous variables and crop yield/SOCSR

氮可能会引起作物减产，不同作物的适宜施氮量有所差异。

2.3 发表偏倚检验

对所得结果进行发表偏倚检验结果(表 1)表明：作物产量和 SOCSR 的失安全系数 (Nfs) 均远大于  $5k+10$ ，这代表现有研究结论的稳定性在添加很多不稳定因素后依然很难被破坏。从漏斗图(图 5)和其对应的 Egger 检测(表 1)可以看出：作物产量和 SOCSR 漏斗图的散点均呈现对称分布，Egger 检验中作物产量和 SOCSR 的  $P$  均大于 0.05。表明本研究所得到的结论是可靠且稳定的，不具有明显的发表偏倚，案例的组间异质性较小。

表 1 失安全系数和 Egger 检验结果

作物产量			SOCSR		
Nfs( $k=247$ )	$5k+10$	$P$	Nfs( $k=49$ )	$5k+10$	$P$
145 683	1 255	0.837 2	56 620	255	0.744 1

说明： $k$  表示观测值的数量；Nfs 为失安全系数；SOCSR 为土壤有机碳固存速率。

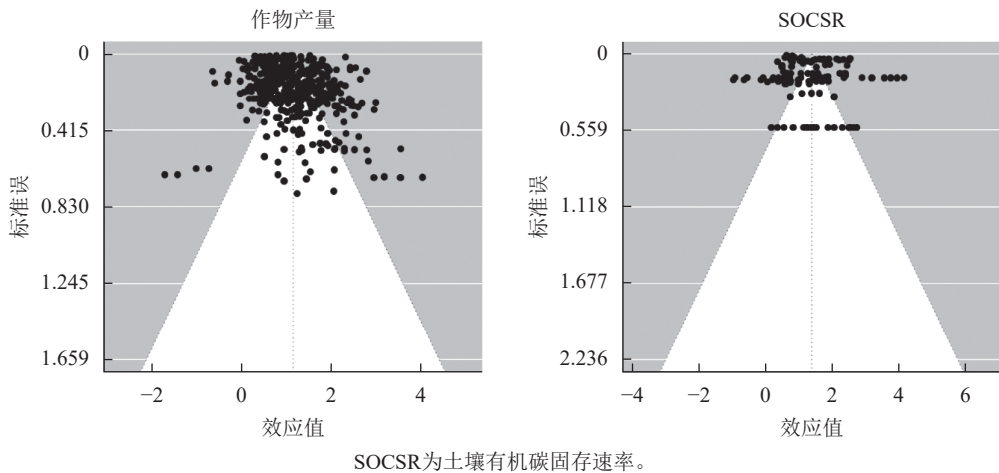


图 5 用于发表偏倚检验的漏斗图  
Figure 5 Funnel plots to test publication bias

2.4 净环境经济效益分析

在已有研究中选择同时报道了  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{NH}_3$  排放量，氮淋失和氮径流量的文献(6 篇研究 23 对观测点)，这 6 篇文献的田间实验均发生在 2016—2018 年。在计算成本或效益时，取 3 a 的平均价格，如表 2 所示。通过式 (5)、式 (6)、式 (7) 分别计算 23 组数据点对应的无生物质炭投入的对照组和有生物质炭投入的处理组的 NEEB 值。与 NEEB 计算相关的产量、投入量等信息均取自所选的 6 篇文献中。

由图 6 可以看出：有生物质炭投入的 NEEB 值 ( $6\,302\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) 要明显高于无生物质炭投入 ( $2\,927\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )，这说明在稻田耕作过程中添加生物质炭有利于提高收益，降低温室气体和氮流失造成的损耗，从而提高综合净环境经济效益。

表 2 2016—2018 年稻田产出和投入的平均价格

类别	商品	价格	参考文献
产量收入	大米	$2\,600\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$	[19]
	水稻秸秆	$200\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$	[19]
	稻种	$2\,250\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	[9]
投入成本	氮磷钾肥	$3\,800\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$	[20]
	有机肥(主要是粪肥)	$2\,500\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$	[20]
	生物质炭	$2\,000\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$	[20]
	农药	$2\,200\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$	[20]
	灌溉及耕种设备	$4\,800\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	[20]

3 讨论

3.1 添加生物质炭的总体作用

本研究结果显示：在稻田中添加生物质炭对作物增产和土壤固碳作用显著，而对温室气体 ( $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$ ) 排放有减排的趋势。生物质炭对稻田土壤有机碳储量和作物产量的提升作用可归因于其稳定的碳结构对土壤肥力的改良效应。生物质炭的高度芳香化碳能够延缓土壤矿化速率，长期提升 SOCSR，其多孔特性和表面官能团可吸附养分、改善土壤持水性、促进水稻根系发育与养分吸收，最终提高产量；

并且生物质炭为稻田添加了有机质，为微生物提供更丰富的养分从而提高其活性，进一步提高了作物的氮素利用率，影响产量和土壤固碳能力<sup>[21]</sup>。而对于  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放，生物质炭通过改善土壤通气性，抑制甲烷菌活性，其吸附铵根离子 ( $\text{NH}_4^+$ ) 的能力可能减少硝化-反硝化过程的氮损失，从而间接降低  $\text{N}_2\text{O}$  生成潜力，但这一过程需要相对较长的周期才会有较为明显的作用<sup>[22]</sup>。

### 3.2 其他变量对生物质炭效应的影响

**3.2.1 生物质炭种类的选择** 对于生物质炭种类，花生壳具有较高的全磷含量 ( $\geq 1.0\%$ )，其灰分中的磷元素可直接补充土壤速效磷，促进作物养分吸收。木薯秸秆的木质素含量较高，高温裂解后形成稳定的芳香化碳结构，延缓有机碳矿化，提高土壤微生物活性，从而显著提升 SOCSR 和产量。小麦秸秆在  $500\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$  制备时，比表面积显著增加，增强了对氮钾等养分的吸附能力，改善了土壤持水性和通气性，进而提高了作物产量<sup>[23]</sup>。总的来说，花生壳、木薯秸秆和小麦秸秆是较为优质的生物质炭基，更有利于作物的养分吸收和土壤固碳。

**3.2.2 其他非连续及连续变量对生物质炭效应的作用** 有机肥投入可以增加土壤有机质，促进微生物活性和酶分泌，从而加速碳氮磷的矿化-腐殖化循环<sup>[24]</sup>；中性至弱酸性土壤 ( $5 < \text{pH} < 8$ ) 是大多数土壤微生物最适宜的生存范围，其酶活性比强酸/强碱土壤高  $30\%\sim 60\%$ 。此范围内，淋失减少，磷、钙、镁的有效性显著提升 (如有效磷质量分数增加  $5\sim 20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )；灌溉通过维持土壤含水量，促进有机质分解与腐殖质形成。研究表明：灌溉条件下的碳固存效率可提高  $12\%\sim 18\%$ ，因水分促进了微生物-有机质相互作用<sup>[25]</sup>；秸秆还田每年可向土壤输入有机碳  $2\sim 4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，其纤维素和木质素经微生物分解后形成腐殖酸，直接提升 SCOSR。秸秆还田还能增加土壤大团聚体比例，改善通气性<sup>[26]</sup>。上述变量均能通过直接或间接的方式提高作物产量，加快碳的固存速率。与此同时，生物质炭施用量、土壤有机碳质量分数和施氮量均与稻田产量存在正相关关系，这是因为碳和氮是作物生长的关键营养元素，适宜的碳氮比 ( $25\sim 35$ ) 通过促进微生物-植物协同代谢来提升养分利用效率。过高的施氮量或过低的碳投入会使土壤碳氮比降低，引发微生物代谢策略转变，改变了土壤特性 (如 pH 降低等)，降低了微生物活性和养分利用效率，从而破坏了微生物和作物的平衡关系，直接导致 SOCSR 下降<sup>[27]</sup>。

### 3.3 生物质炭对稻田净环境经济效益的影响

本研究结果表明：投入生物质炭后稻田的总体效益显著高于无生物质炭投入。添加生物质炭虽然提高了农业成本，但对作物产量的提升和对环境问题的修复价值则更为显著。如江苏省稻麦轮作区连续 11 a 施用生物质炭，使作物抗灾能力提高，从而增产  $23.5\%\sim 29.4\%$ ；对蔬菜大棚添加秸秆生物质炭改善了土壤性质及微生物活性，产量增加了  $19.5\%$ <sup>[28]</sup>。

### 3.4 农业管理优化策略

根据研究结论，对种植稻田的农户提出以下优化策略：①在稻田种植中投入适量的生物质炭并控制肥料施氮量，维持适宜的土壤碳氮比 ( $25\sim 35$ )，从而实现生物质炭-氮肥协同管理和保产减排。②生物质炭种类在产区附近择优，若稻田附近存在花生、木薯和小麦种植，则尽量以附近种植的作物作为生物质炭基底；若没有则选取水稻秸秆。③应强化财政补贴支持，以提高农户实践积极性，即对符合绿色农业政策的商品 (如生物质炭和有机肥) 进行适当的补贴，采取碳汇导向的动态奖励机制。针对土壤碳封存量达  $3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  的农户进行奖励，若施氮量高于  $220\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  则不予奖励。④在水稻主产区建立“生物质炭-控氮”集成示范区，配套村级炭化站，从而实现生物质炭推广。

## 4 结论

本研究显示：添加生物质炭对提高作物产量和土壤有机碳固存速率有显著影响，对温室气体也有一

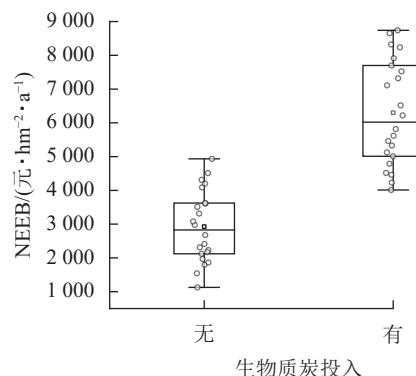


图 6 有无生物质炭投入的净环境经济效益 (NEEB)

Figure 6 Net environmental and economic benefits (NEEB) values with and without biochar application

定的减排趋势,这种趋势可能在长期的田间监测中会有更明显的体现。与此同时,多个田间变量也对生物质炭的效应有不同程度的影响,特定的生物质炭种类、有机肥的投入、适宜的施氮量、合理的翻耕和灌溉以及秸秆还田都对促进生物质炭投入的作用有正向的影响。

## 5 参考文献

- [1] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 ( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ ) 的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, **19**(4): 966–975.  
ZHANG Yuming, HU Chunsheng, ZHANG Jiabao, *et al.* Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in agricultural soils [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, **19**(4): 966–975.
- [2] 栾莉莉, 张光辉, 孙龙, 等. 黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J]. *中国水土保持科学*, 2015, **13**(6): 48–53.  
LUAN Lili, ZHANG Guanghui, SUN Long, *et al.* Spatial variation of typical plant litters in the Loess Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, **13**(6): 48–53.
- [3] CUBINO J P, BIURRUN I, BONARI G, *et al.* The leaf economic and plant size spectra of European forest understory vegetation [J]. *Ecography*, 2021, **44**(9): 1311–1324.
- [4] SETH P, SEBASTIAN J. Plants and global warming: challenges and strategies for a warming world[J/OL]. *Plant Cell Reports*, 2024, **43**(1): 27 [2025-04-01]. DOI: [10.1007/s00299-023-03083-w](https://doi.org/10.1007/s00299-023-03083-w).
- [5] XIE Jiangbo, WANG Zhongyuan, LI Yan. Stomatal opening ratio mediates trait coordinating network adaptation to environmental gradients [J]. *New Phytologist*, 2022, **235**(3): 907–922.
- [6] 徐广平, 滕秋梅, 沈育伊, 等. 香蕉茎叶生物炭对香蕉枯萎病防控效果及土壤性状的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(12): 2373–2384.  
XU Guangping, TENG Qiumei, SHEN Yuyi, *et al.* Effects of banana stems-leaves biochar on soil properties and control of banana *Fusarium* wilt [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(12): 2373–2384.
- [7] NANDA S, MOHANTY P, PANT K K, *et al.* Characterization of north American lignocellulosic biomass and biochars in terms of their candidacy for alternate renewable fuels [J]. *BioEnergy Research*, 2013, **6**(2): 663–677.
- [8] FAWZY S, OSMAN A I, YANG Haiping, *et al.* Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: a review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, **19**(4): 3023–3055.
- [9] EL-NAGGAR A, LEE S S, RINKLEBE J, *et al.* Biochar application to low fertility soils: a review of current status, and future prospects [J]. *Geoderma*, 2019, **337**: 536–554.
- [10] 蔚阿龙, 温慧, 丛日春, 等. 坝上地区不同森林类型凋落物层水文效应[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(5): 959–969.  
YU Along, WEN Hui, CONG Richun, *et al.* Hydrological effects of litter layers in different forest types in the Bashang region [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(5): 959–969.
- [11] 邵美红, 吴芊颖, 赵福建, 等. 我国农田碳排放现状及固碳减排技术分析[J]. *智能化农业装备学报 (中英文)*, 2025, **6**(1): 99–110.  
SHAO Meihong, WU Qianying, ZHAO Fujian, *et al.* A review of current GHG emissions in Chinese farmland and the carbon sequestration and emission reduction technologies [J]. *Journal of Intelligent Agricultural Mechanization*, 2025, **6**(1): 99–110.
- [12] LI B, FAN C H, ZHANG H, *et al.* Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **100**: 10–19.
- [13] ZHOU Jun, LI Bo, XIA Longlong, *et al.* Organic-substitute strategies reduced carbon and reactive nitrogen footprints and gained net ecosystem economic benefit for intensive vegetable production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **225**: 984–994.
- [14] BI Ruiyu, ZHANG Qianqian, ZHAN Liping, *et al.* Biochar and organic substitution improved net ecosystem economic benefit in intensive vegetable production[J/OL]. *Biochar*, 2022, **4**(1): 46 [2025-04-01]. DOI: [10.1007/s42773-022-00168-9](https://doi.org/10.1007/s42773-022-00168-9).
- [15] WANG Bingxue, DENG Xiaopeng, WANG Ruibao, *et al.* Bio-organic substitution in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) cultivation: optimum strategy to lower carbon footprint and boost net ecosystem economic benefit[J/OL]. *Journal of*



- Environmental Management*, 2024, **370**: 122654[2025-04-01]. DOI: [10.1016/j.jenvman.2024.122654](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122654).
- [16] 李鹏, 刘晓君, 刘苑秋, 等. 红壤侵蚀区不同植被恢复模式土壤碳储量特征及其影响因素[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(1): 12–21.
- LI Peng, LIU Xiaojun, LIU Yuanqiu, *et al.* Characteristics and influencing factors of soil carbon stocks in different vegetation restoration models in red soil erosion areas [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(1): 12–21.
- [17] 刘一霖, 温娅檬, 李巧玉, 等. 川西高山峡谷区 6 种森林枯落物的持水与失水特性[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(5): 151–156, 162.
- LIU Yilin, WEN Yameng, LI Qiaoyu, *et al.* Water-holding and water-loss characteristics of six types of forest litter in the alpine gorge region of western Sichuan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(5): 151–156, 162.
- [18] 王卫霞, 史作民, 罗达, 等. 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量[J]. *生态学报*, 2013, **33**(3): 925–933.
- WANG Weixia, SHI Zuomin, LUO Da, *et al.* Carbon and nitrogen storage under different plantations in subtropical south China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(3): 925–933.
- [19] HOU Jinbo, PUGAZHENDHI A, SINDHU R, *et al.* An assessment of biochar as a potential amendment to enhance plant nutrient uptake[J/OL]. *Environmental Research*, 2022, **214**: 113909[2025-04-01]. DOI: [10.1016/j.envres.2022.113909](https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113909).
- [20] MONA S, MALYAN S K, SAINI N, *et al.* Towards sustainable agriculture with carbon sequestration, and greenhouse gas mitigation using algal biochar[J/OL]. *Chemosphere*, 2021, **275**: 129856[2025-04-01]. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2021.129856](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129856).
- [21] WANG Duo, JIANG Peikun, ZHANG Haibo, *et al.* Biochar production and applications in agro and forestry systems: a review[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2020, **723**: 137775[2025-04-01]. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137775](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137775).
- [22] SUN Xiao, ATIYEH H K, LI Mengxing, *et al.* Biochar facilitated bioprocessing and biorefinery for productions of biofuel and chemicals: a review[J/OL]. *Bioresource Technology*, 2020, **295**: 122252[2025-04-01]. DOI: [10.1016/j.biortech.2019.122252](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122252).
- [23] MONGA D, SHETTI N P, BASU S, *et al.* Engineered biochar: a way forward to environmental remediation[J/OL]. *Fuel*, 2022, **311**: 122510[2025-04-01]. DOI: [10.1016/j.fuel.2021.122510](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122510).
- [24] 杜芳芳, 童根平, 郭瑞, 等. 浙江亚热带自然保护区土壤养分空间异质性及其影响因素[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(1): 145–154.
- DU Fangfang, TONG Genping, GUO Rui, *et al.* Spatial heterogeneity of soil nutrients and the influencing factors in Zhejiang subtropical nature reserve [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(1): 145–154.
- [25] 陈丽美, 李小英, 李俊龙, 等. 竹炭与有机肥配施对土壤肥力及紫甘蓝生长的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, **38**(4): 774–783.
- CHEN Limei, LI Xiaoying, LI Junlong, *et al.* Effects of combined application of bamboo charcoal and organic fertilizer on soil fertility and growth of *Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(4): 774–783.
- [26] LUO Wei, LI Wenyujia, LIU Shuling, *et al.* Measurement of four main catechins content in green tea based on visible and near-infrared spectroscopy using optimized machine learning algorithm[J/OL]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2025, **138**: 106990[2025-04-01]. DOI: [10.1016/j.jfca.2024.106990](https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106990).
- [27] MÖLLER K, SCHULTHEIB U. Chemical characterization of commercial organic fertilizers [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, **61**(7): 989–1012.
- [28] 段学军, 邹辉, 王磊. 长江经济带建设与发展的体制机制探索[J]. *地理科学进展*, 2015, **34**(11): 1377–1387.
- DUAN Xuejun, ZOU Hui, WANG Lei. Institutions and mechanisms for developing the Yangtze River economic belt [J]. *Progress in Geography*, 2015, **34**(11): 1377–1387.