环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷　第1期
2023年1月15日

目　次

生态环境知识网
Eco-Environmental Knowledge Web
环境科学
Environmental Science
第44卷第1期 2023年1月
Vol.44, No.1 Jan., 2023

优化秸秆管理提高麦玉农田碳氮效率与经济效益

王良[1]，钱欣[1]，高英波[1]，张慧[1]，刘开昌[1]，陈国庆[2*]，李宗新[1*]
(1. 山东省农业科学院小麦玉米国家工程研究中心，济南 250100；2. 山东农业大学农学院，作物生物学国家重点实验室，泰安 271018)

摘要：优化周年秸秆管理，可促进小麦-玉米周年集约化种植系统增产增收和碳氮高效.基于2012年开始的大田定位试验，设置5种秸秆管理方式：C100(100%还田)、C75(75%还田+25%收获)、C50(50%还田+50%收获)、C25(25%还田+75%收获)和C0(100%收获)，分析不同秸秆管理下小麦-玉米周年农田碳氮投入量的差异，以及碳氮投入比对作物籽粒产量、碳氮效率和经济效益的影响.结果表明：① 小麦-玉米周年秸秆还田量不同导致碳氮投入量差异显著，每减少25%的秸秆还田量，来自作物的碳和氮的年均投入分别减少1.76 $t\cdot hm^{-2}$和34.28 $kg\cdot hm^{-2}$；碳氮投入比随小麦-玉米周年秸秆还田量减少而降低，C100处理到C0处理的周年碳氮投入比分别为18.62、17.03、15.64、12.54和9.61. ② 小麦、玉米及周年籽粒产量均随着碳氮投入比的降低先增加后降低，且秸秆管理对小麦籽粒产量的影响大于玉米；与C100和C0相比，C50的小麦和玉米籽粒平均产量分别高13.34%～13.67%和16.10%～17.71%，周年籽粒产量分别显著高14.98%和15.68%. ③ 碳氮投入比为15.64(C50处理)的条件下周年籽粒增产率和碳农学利用率最高，分别为15.71%和0.29 $kg\cdot kg^{-1}$；随着碳氮投入比降低，农田碳生产效率持续提高，且与碳氮投入比呈极显著负相关关系；农田氮生产效率随着碳氮投入比的降低呈先增后减的趋势，C50处理的氮生产效率最高(0.64 $kg\cdot kg^{-1}$)，较C100显著高32.63%. ④ C50处理的单位面积农田经济收益和净收益均最高，分别为4.62万元和3.34万元；其每公顷籽粒和秸秆饲料化获得的经济收益较C100分别高0.56万元和0.32万元.综上，统筹麦玉集约化种植系统的秸秆利用方式，周年秸秆50%还田+50%收获饲用，能够实现最佳碳氮投入比，促进碳农学利用率和氮生产效率的提升，获得最大籽粒产量和经济效益.

关键词：秸秆管理；碳氮比；碳氮效率；经济效益；籽粒产量
中图分类号：X144 **文献标识码**：A **文章编号**：0250-3301(2023)01-0463-10 **DOI**：10.13227/j.hjkx.202203005

Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System

WANG Liang[1], QIAN Xin[1], GAO Ying-bo[1], ZHANG Hui[1], LIU Kai-chang[1], CHEN Guo-qing[2*], LI Zong-xin[1*]
(1. National Engineering Research Center for Wheat and Maize, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 2. State Key Laboratory of Crop Biology, College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: The optimization of annual straw management can improve the yield, income, and carbon and nitrogen efficiency of wheat-maize double cropping systems. Based on a long-term positioning trial started in 2012, five straw management methods were considered, C100 (100% return), C75 (75% return +25% harvest), C50 (50% return +50% harvest), C25 (25% return +75% harvest), and C0 (100% harvest). We analyzed the effects of farmland carbon and nitrogen inputs and their ratios on crop yield, carbon and nitrogen use efficiency, and economic benefits in wheat and maize anniversaries with different straw managements. The results showed that: ① the amount of straw returning to the field resulted in a significant difference in carbon and nitrogen input. The annual carbon and nitrogen inputs from crop residues decreased by 1.76 $t\cdot hm^{-2}$ and 34.28 $kg\cdot hm^{-2}$, respectively, with a 25% reduction in straw returning. The C/N ratios under the C100-C0 treatment were 18.62, 17.03, 15.64, 12.54, and 9.61, respectively. ② Grain yield first increased and then decreased with the decrease in the C/N input ratio, and the effect of straw management on wheat yield was greater than that on maize. Compared with that under C100 and C0, the average grain yield of wheat and maize under the C50 treatment increased by 13.34%-13.67% and 16.10%-17.71%, respectively, and the total grain yield of wheat and maize increased by 14.98% and 15.68%. ③ The annual grain yield and carbon agronomy efficiency were the best with the C/N input ratio of 15.64 (in the C50 treatment), which were 15.71% and 0.29 $kg\cdot kg^{-1}$, respectively. The carbon production efficiency continued to increase with the decrease in the C/N input ratio, and there was a significant negative correlation between them. The nitrogen production efficiency increased first and then decreased with the decrease in the C/N input ratio. The nitrogen production efficiency of the C50 treatment was the highest (0.64 $kg\cdot kg^{-1}$), which was significantly higher than that of C100 by 32.63%. ④ The C50 treatment had the highest economic income and net income, which were 46 200 $yuan\cdot hm^{-2}$ and 33 400 $yuan\cdot hm^{-2}$, respectively. Compared with that of C100, the economic income of grain and straw feed increased by 5 600 $yuan\cdot hm^{-2}$ and 3 200 $yuan\cdot hm^{-2}$, respectively. In conclusion, the optimal C/N input ratio can be achieved by optimized straw management; 50% straw returning and 50% harvest in a wheat-maize double-cropping intensive production system can promote carbon agricultural efficiency and nitrogen production efficiency and obtain the maximum grain yield and economic benefits.

Key words: straw management; carbon and nitrogen ratio; carbon and nitrogen utilization efficiency; economic benefits; grain yield

近年来，随着农田集约化生产进程的推进和粮食产量水平不断提高，作物秸秆产量不断增加[1,2].

收稿日期：2022-03-01；**修订日期**：2022-04-20
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFD0300602)；山东省玉米产业技术体系岗位专家项目(SDAIT-02-07)；山东省重点研发计划项目(2021LZGC026)；山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2022A08，CXGC2021A34)
作者简介：王良(1988～)，男，博士，主要研究方向为农田耕作与生态，E-mail：wangliang11.04@163.com
* 通信作者，E-mail：gqchen@sdau.edu.cn；sdaucliff@sina.com

黄淮海平原是我国粮食主产区之一,小麦和玉米秸秆年均产量超过 1.8 亿 t[3,4]. 秸秆还田实现了养分再利用,同时也有保墒蓄水和平抑地温变幅的作用,促进了农田耕地质量提升[5~8]. 然而,本区域小麦-玉米一年两熟种植制度下,普遍采用周年秸秆全量还田管理方式,秸秆还田量大、处理不到位,易影响下茬作物播种质量,甚至引起农田病虫害频繁和加剧[9~11]. 同时,畜牧业对饲料的需求量日益增加背景下,作物秸秆饲料化是提高小麦-玉米周年种植制度经济效益的有效途径. 因此,优化秸秆管理方式对黄淮海平原小麦-玉米周年稳产增效和可持续发展具有重要意义.

基于黄淮海地区秸秆养分含量和肥料化利用率的研究表明,该区域每年通过秸秆还田投入到农田中的碳和氮分别约为3 046.0万 t 和45.6 万 t[12~14]. 秸秆本身的 C/N 较高,还田后的腐解过程一定程度上与作物竞争土壤有效氮素,不利于作物生长[15,16]. 另一方面,高 C/N 的秸秆投入农田后,前期吸附和固定促进土壤中铵态氮的积累,减少矿质氮淋溶和N_2O等气态氮损失,后期矿化等过程释放氮素供作物生长吸收,进而提高氮肥的利用效率[17~19]. 相关研究通过优化施氮,调节农田碳氮投入比,实现了作物增产和增效[20,21]. 秸秆还田与氮肥配施调控 C/N 驱动微生物群落变化,能够促进农田碳氮效益提升[22,23]. 适量减少秸秆还田是降低农田碳氮投入比和土壤固碳减排的有效措施[24]. 同时,秸秆饲料需求量随着畜牧业的发展日益增大,秸秆拾取打捆收获机械的投入使用降低了秸秆收获成本,有力推动秸秆饲料化,并促进了农田效益提升. 因此,优化秸秆管理,调控农田碳氮投入比,是实现小麦-玉米一年两熟集约化种植系统的碳氮效率和经济效益协同提升的有效途径.

近年来,有关秸秆种类、秸秆还田方式以及秸秆还田深度对土壤碳固存和作物产量影响的研究较多. 秸秆还田量是影响农田碳氮投入比的直接因素,并直接或间接影响了农田碳和氮的周转,进而影响作物产量. 前人研究普遍认为,增加秸秆还田量促进了土壤有机碳固存和作物增产[25]. 也有研究发现小麦和玉米秸秆全量还田降低了土壤耕层有机碳含量,而减少一季作物秸秆还田能够维持较高的土壤生产力,同时实现作物产量和碳效率的提升[26,27]. 相对而言,秸秆还田量和农田碳氮投入比对作物产量和农田碳氮效率影响的研究较少,从碳氮高效视角指导秸秆科学管理的理论尚显不足. 本研究基于秸秆还田长期定位试验,通过连续 3 a 监测,系统分析了不同秸秆管理方式下小麦-玉米轮作农田碳氮投入量及其投入比对作物产量、碳氮利用效率和经济效益的影响,以期为促进集约化周年种植系统绿色丰产增效提供理论依据和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

大田定位试验位于山东省泰安市岱岳区大汶口镇(35°58′N, 117°05′E). 试验田地处黄淮海平原,冬小麦-夏玉米一年两熟种植是本区域主要的种植制度. 本区域光温资源丰富,年总辐射为4 605 ~ 5 860 MJ·m^{-2},0℃以上积温为4 200 ~ 5 000℃,无霜期超过 180 d. 田间观测小麦生育期平均气温 8.26 ~10.74℃,总降水量 86.1 ~ 209.9 mm,玉米生育期平均气温 23.07 ~ 25.33℃,总降水量 399.3 ~ 486.3 mm. 土壤类型为黄潮土,0 ~ 20 cm 土层土壤的理化性状见表 1.

表 1 大田定位试验田开展前 0 ~ 20 cm 土层的土壤理化性状

Table 1 Soil physical and chemical properties of 0-20 cm soil layer before field experiment

物理性状		化学性状	
ω(砂粒)/%	37.00	ω(有机碳)/g·kg^{-1}	13.30
ω(粉粒)/%	48.00	ω(全氮)/g·kg^{-1}	0.82
ω(黏粒)/%	19.00	ω(全钾)/g·kg^{-1}	2.79
容重/g·cm^{-3}	1.32	ω(全磷)/g·kg^{-1}	8.98
pH 值	7.02	ω(速效磷)/mg·kg^{-1}	27.48
总孔隙度/%	50.37	ω(速效钾)/mg·kg^{-1}	129.70
毛管孔隙度/%	33.46		

1.2 试验设计

2012 年 10 月布设大田定位试验,小麦-玉米一年两熟轮作种植,并按照试验设计开始秸秆还田处理. 试验设置 5 种秸秆管理方式:①双季秸秆均不还田 +100% 收获(C0);②小麦、玉米季秸秆均 25% 还田 + 75% 收获(C25);③小麦、玉米季秸秆均 50% 还田 +50% 收获(C50);④小麦、玉米季秸秆均 75% 还田 +25% 收获(C75);⑤双季秸秆均还田(C100). 各小区面积为 10 ×20 m^2,周围均设有 2 m 宽的隔离带,每个处理 3 次重复. 采用机械收获各处理的小麦籽粒和玉米穗,随后用拾取打捆机按照各处理的设置对部分秸秆进行收获. 收获秸秆均作为饲料出售以获取经济收益. 玉米播种前仅进行灭茬,小麦秸秆粉碎后覆盖还田;小麦播种前进行灭茬、旋耕,玉米秸秆还田深度约 15 cm. 本研究于 2014 年开始进行连续 3 a 的田间观测试验.

选择本区域种植面积最大的小麦品种(济麦 22)和玉米品种(郑单 958)为供试材料. 冬小麦 10 月中旬播种,行距20 cm,播种量为180 kg·hm^{-2};夏玉米 6 月中旬播种,行距 60 cm,种植密度为75 000

株·hm^{-2}. 小麦和玉米播种前施用氮肥、过磷酸钙和硫酸钾等基肥，施用量分别为 90 kg·hm^{-2}(以 N 计)、150 kg·hm^{-2}(以 P_2O_5 计)和 150 kg·hm^{-2}(以 K_2O 计)；小麦拔节期和玉米大喇叭口期分别沟施尿素 135 kg·hm^{-2}. 小麦季灌水 180 mm，播种后、拔节期和开花期分别灌水 60 mm；玉米季仅在播种后灌水 60 mm. 作物生长期间控制病虫害和杂草，各处理的田间管理均保持一致.

1.3　样品采集与测定

小麦成熟期在各小区随机选取 3 个 1 m^2 双行的小麦植株，贴地收割，105℃杀青 30 min 后，继续 80℃烘干至恒重，以测定小麦地上部生物量. 在不受取样干扰的前提下，各小区随机收获 3 个 1 m^2 的小麦穗，风干后脱粒、测定籽粒含水量，以确定不同处理的小麦籽粒产量.

玉米成熟期各小区随机选取 3 处连续两株玉米，贴地收割，105℃杀青 30 min 后，继续 80℃烘干至恒重，以测定玉米的地上部生物量. 在不受取样干扰的前提下，各小区随机收获 3 个 5 m×6 m 玉米穗，风干后脱粒、测定籽粒含水量，以确定不同处理的玉米籽粒产量.

小麦和玉米植株的氮含量采用半微量凯式定氮法测定，小麦和玉米地上部的植株的碳含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定[28]. 每份样品均进行 3 次重复测定，以减少误差.

1.4　数据处理

1.4.1　碳投入

碳投入(C_{input})的主要载体包括作物秸秆、残茬和根系，计算如公式 (1)所示：

$$C_{input} = C_{straw} + C_{stubble} + C_{root} \tag{1}$$

式中，C_{straw}、$C_{stubble}$和 C_{root}分别为作物的秸秆、残茬和根的碳投入量(以 C 计，t·hm^{-2})，根据作物秸秆、残茬和根系的生物量及其碳含量计算. 小麦秸秆、残茬和根的生物量分别为地上部残体生物量的 74%、26% 和 24%；玉米秸秆、残茬和根的生物量分别为地上部残体生物量的 97%、3% 和 29%[29,30]. 室内试验测定秸秆含碳量，然后估算残茬和根的碳投入.

1.4.2　氮投入

氮投入(N_{input})主要由作物地上部残体氮投入和肥料氮投入组成，如公式 (2)所示：

$$N_{input} = N_{straw} + N_{stubble} + N_{root} + N_{fertilizer} \tag{2}$$

式中，N_{straw}、$N_{stubble}$和 N_{root}分别为作物的秸秆、残茬和根的氮投入量(以 N 计，kg·hm^{-2})，计算方法参照碳投入的计算. 室内试验测定作物地上部残体含氮量；$N_{fertilizer}$为小麦和玉米季的肥料氮投入(以 N 计)均为 225 kg·hm^{-2}.

1.4.3　碳氮效率

增产效率(YI)、碳农学利用效率(AEC)、碳生产效率(CPE)和氮生产效率(NPE)的计算方法见公式(3)～(6)[27]：

$$YI = (Y_{grain} - Y_0)/Y_0 \times 100\% \tag{3}$$

$$AEC = (Y_{grain} - Y_0)/C_{input} \times 100\% \tag{4}$$

$$CPE = C_{input}/Y_{grain} \times 100\% \tag{5}$$

$$NPE = N_{input}/Y_{grain} \times 100\% \tag{6}$$

式中，Y_{grain}和 Y_0 分别为某一秸秆管理方式和秸秆不还田处理下的作物籽粒产量，C_{input}和 N_{input}分别为不同秸秆管理方式下碳和氮投入量.

1.4.4　经济效益

经济收益(EI)、纯经济收益(NEI)、碳投入的经济效益(CB)和氮投入的经济效益(NB)的方法见公式(7)～(10)[31]：

$$EI = Y_{grain} \times P_{grain} + Y_{straw} \times P_{straw} \tag{7}$$

$$NEI = EI - EC \tag{8}$$

$$CB = C_{input}/Y_{grain} \tag{9}$$

$$NB = N_{input}/Y_{grain} \tag{10}$$

式中，Y_{grain}和 Y_{straw}分别为作物籽粒和秸秆产量. P_{grain}和 P_{straw}分别为作物籽粒和秸秆的单价，参照 2017 年当地市场行情，小麦和玉米籽粒的单价分别为 2.44 元·kg^{-1}和 1.98 元·kg^{-1}，秸秆单价分别为 370 元·t^{-1}和 390 元·t^{-1}. EC 为农田生产中种子、肥料、农药、机械和人工的成本，详见表 2.

表 2　农田生产成本1)

Table 2　Cost of farmland production

项目	成本/元·hm^{-2}		
	小麦	玉米	周年
种子	1 086.75	848.30	1 934.78
复合肥	2 400.00	2 400.00	4 800.00
尿素	787.50	787.50	1 575.00
杀虫剂	549.50	549.50	1 099.00
杀菌剂	315.25	315.30	630.55
灌溉	200.16	66.70	266.86
人工	440.00	360.00	800.00
旋耕机	675.00	0.00	675.00
播种机	375.00	300.00	675.00
收获机	1 050.00	975.00	2 025.00
灭茬机	525.00	675.00	1 200.00
秸秆收获机	1 050.00	975.00	2 025.00
共计	9 454.20	8 252.20	17 706.40

1)数据来源于实际农田生产记录

1.5　统计分析

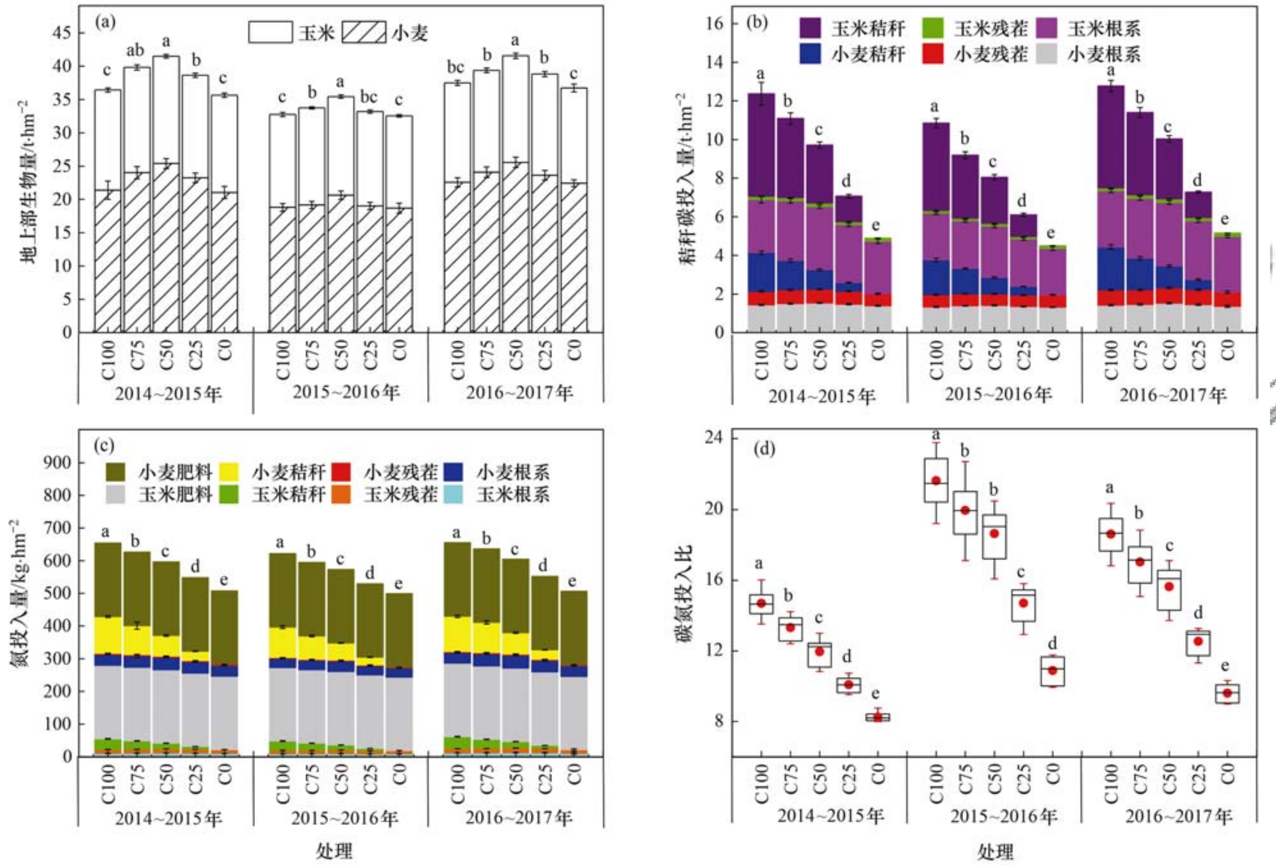
采用 Microsoft excel 2016 处理试验数据，Origin 9.8 作图，采用 SPSS 20.0 统计软件进行统计分析和差异显著性检验(LSD，P<0.05).

2 结果与分析

2.1 农田碳氮投入

2014 ~ 2017 年,不同秸秆管理方式对作物地上部生物量影响的趋势一致,均表现为:C50 > C75 > C25 > C100 > C0[图 1(a)]. C50 处理的地上部生物量 3 a 平均值为 39.50 $t\cdot hm^{-2}$,较 C100 和 C0 分别显著高 11.09% 和 12.74% ($P < 0.05$). 同时,各处理玉米季地上部生物量均大于小麦季,分别为 18.70 ~ 25.57 $t\cdot hm^{-2}$ 和 13.84 ~ 16.11 $t\cdot hm^{-2}$.

不同秸秆管理方式下,秸秆还田量不同是导致各处理碳氮投入量差异显著的主要原因[图 1(b) 和 1(c)]. 从 C100 处理到 C0 处理,每减少 25% 的秸秆还田量,来自作物的碳和氮的年均投入分别减少 1.76 $t\cdot hm^{-2}$ 和 34.28 $kg\cdot hm^{-2}$. 不同处理间来自残茬或根系碳的周年投入量均没有显著差异,分别为 0.82 ~ 0.87 $t\cdot hm^{-2}$ 和 4.03 ~ 4.57 $t\cdot hm^{-2}$; 自残茬或根系氮的年均投入量也均没有显著差异,分别平均为 15.00 $kg\cdot hm^{-2}$ 和 43.56 $kg\cdot hm^{-2}$. 碳氮投入比随着秸秆还田量的降低显著减小,C100 处理到 C0 处理的小麦-玉米周年碳氮比分别为 18.62、17.03、15.64、12.54 和 9.61[图 1(d)].



(a)、(b)、(c)和(d)分别为不同秸秆管理模式下地上部生物量、秸秆碳投入量、氮投入量和碳氮投入比,
不同的小写字母表示处理间差异显著; 箱线图内横线和红点分别表示中位数和平均值,箱线图外的红色横线表示极值

图 1 不同秸秆管理下农田碳氮投入及其投入比

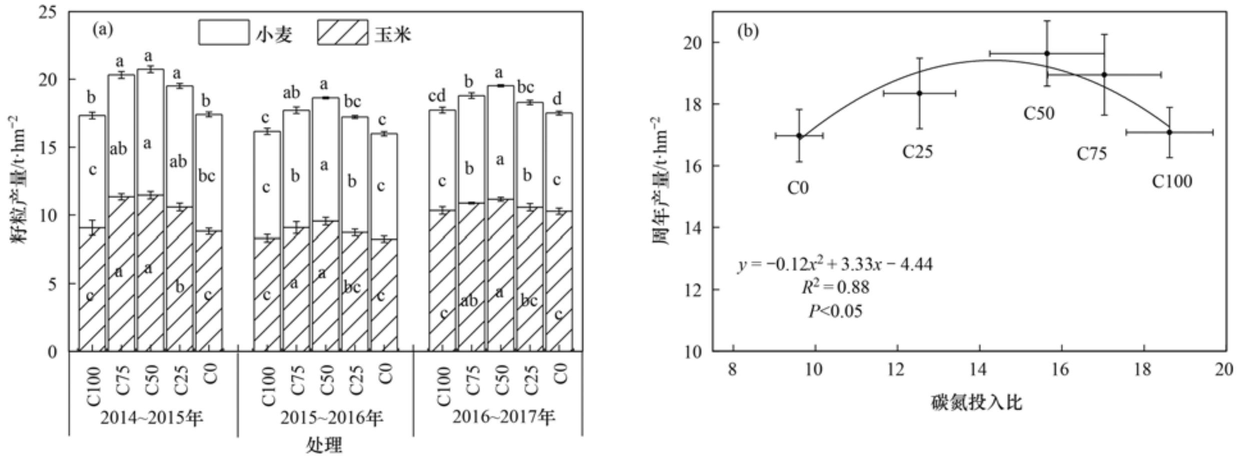
Fig. 1 Carbon and nitrogen input and input ratio under different straw managements

2.2 作物籽粒产量及其对农田碳氮投入比的响应

不同秸秆管理方式下,作物籽粒产量随着秸秆还田量的降低呈现先增后减的趋势[图 2(a)]. 2014 ~ 2017 年,C50 处理的小麦籽粒平均产量为 8.91 $t\cdot hm^{-2}$,较 C100 和 C0 分别显著高 13.67% 和 13.34%; 玉米籽粒平均产量为 10.73 $t\cdot hm^{-2}$,较 C100 和 C0 分别显著高 16.10% 和 17.70%. C50 处理小麦-玉米周年籽粒产量较 C100 和 C0 分别显著高 14.98% 和 15.68%. 回归分析表明,周年籽粒产量与碳氮投入比显著相关,且符合二次曲线: $y = -0.12x^2 + 3.33x - 4.44$ ($R^2 = 0.88$, $P < 0.05$).

2.3 农田碳氮效率

随着秸秆还田量的降低,作物籽粒增产率和碳农学利用率均先增加后降低,C50 处理的周年籽粒增产率和碳农学利用率分别平均为 15.71% 和 0.29 $kg\cdot kg^{-1}$,较 C100 处理分别显著高 15.09% 和 0.28 $kg\cdot kg^{-1}$ [图 3(a) 和 3(b)]. 碳生产效率随着秸秆还田量的降低持续上升,C50 和 C0 处理的碳生产效率分别比 C100 处理显著高 49.26% 和 145.08% [图 3(c)],且农田碳生产效率与碳氮投入比呈极显著

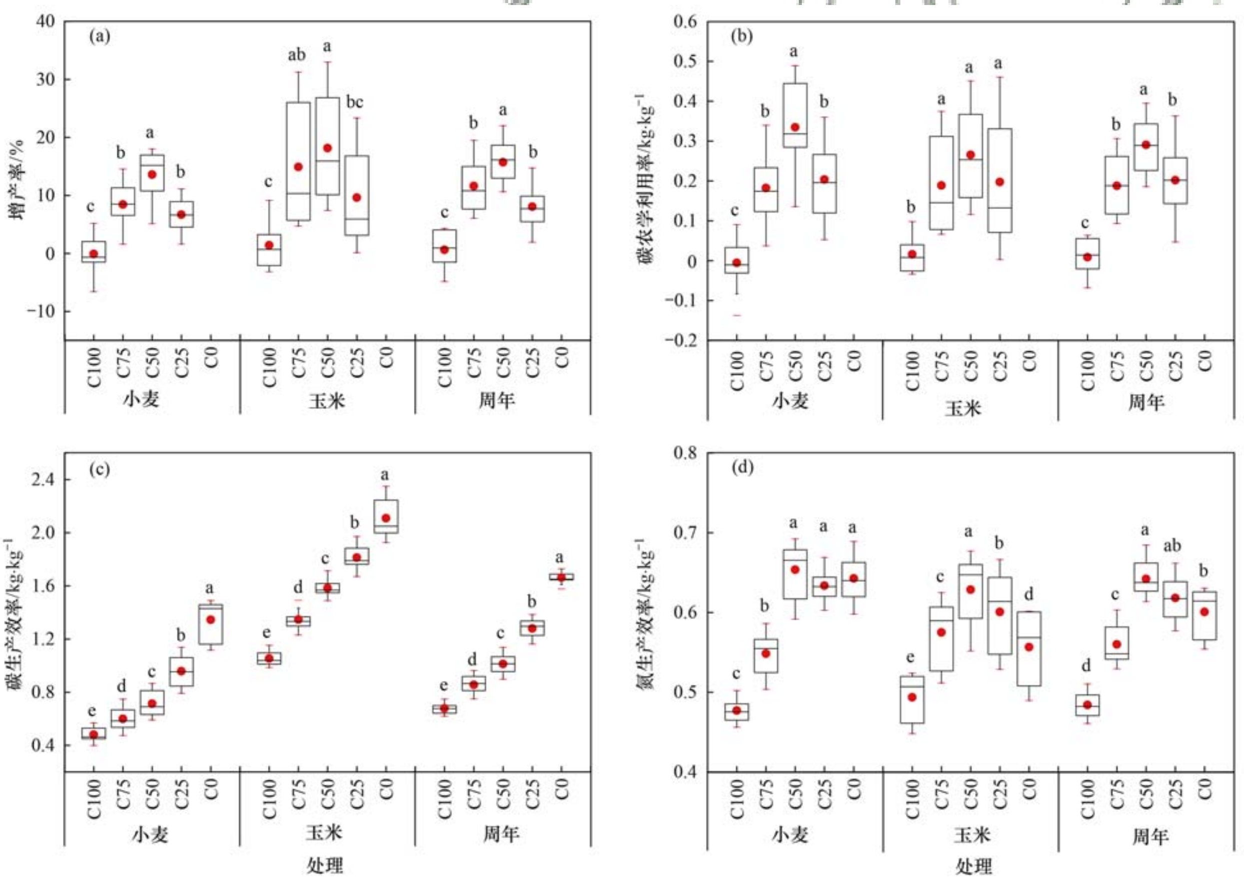


(a)为不同秸秆管理下作物籽粒产量,不同小写字母表示不同处理下小麦、玉米和周年籽粒产量差异显著性;(b)为不同秸秆管理下作物籽粒产量与碳氮投入比的关系,横纵误差线分别表示不同周年的碳氮投入比和籽粒产量的误差

图 2　不同秸秆管理下作物籽粒产量及其对农田碳氮投入比的响应

Fig. 2　Crop grain yield and its response to carbon and nitrogen input ratio in farmland under different straw managements

负相关关系(图 4). 小麦-玉米周年的氮生产效率随着秸秆还田量的减少呈现先增后减的趋势,C50 处理的氮生产效率最高(0.64 kg·kg^{-1}),较 C100 显著高 32.63%[图 3(d)].



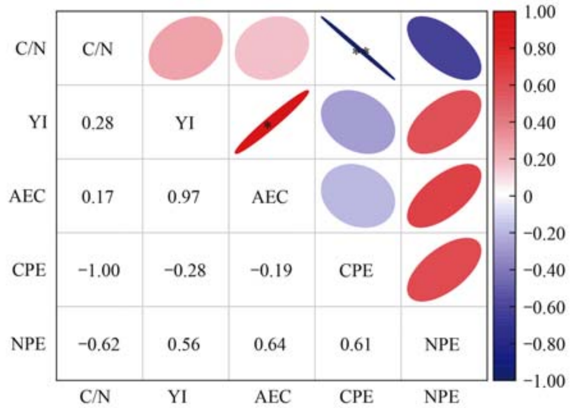
(a)、(b)、(c)和(d)分别为不同秸秆管理模式下籽粒增产率、碳农学利用率、碳生产效率和氮生产效率;箱线图内横线和红点分别表示中位数和平均值,箱线图外的红色横线表示极值;不同小写字母表示处理间差异显著

图 3　不同秸秆管理下农田碳氮效率

Fig. 3　Carbon and nitrogen efficiency of farmland under different straw managements

2.4　经济效益

C50 处理的每公顷农田经济收益和净收益均高于其他处理($P < 0.05$),且显著高于 C100,分别为 4.62 万元和 3.34 万元[表 2,图 5(a)和 5(b)]. 其中,C50 处理的每公顷作物籽粒产生的经济收益分别较 C100 和 C0 高 0.56 万元和 0.58 万元,每公顷作物秸秆产生的经济收益分别较 C100 和 C0 高 0.32 万元和 −0.31 万元.



* 表示 $P<0.05$，** 表示 $P<0.01$；形状方向表示正负，颜色和大小为对应系数；C/N、YI、AEC、CPE 和 NPE 分别表示碳氮投入比、籽粒增产效率、碳农学利用率、碳生产效率和氮生产效率

图 4 不同秸秆管理下碳氮投入比与增产效率、碳农学利用率、碳生产效率和氮生产效率的相关性分析

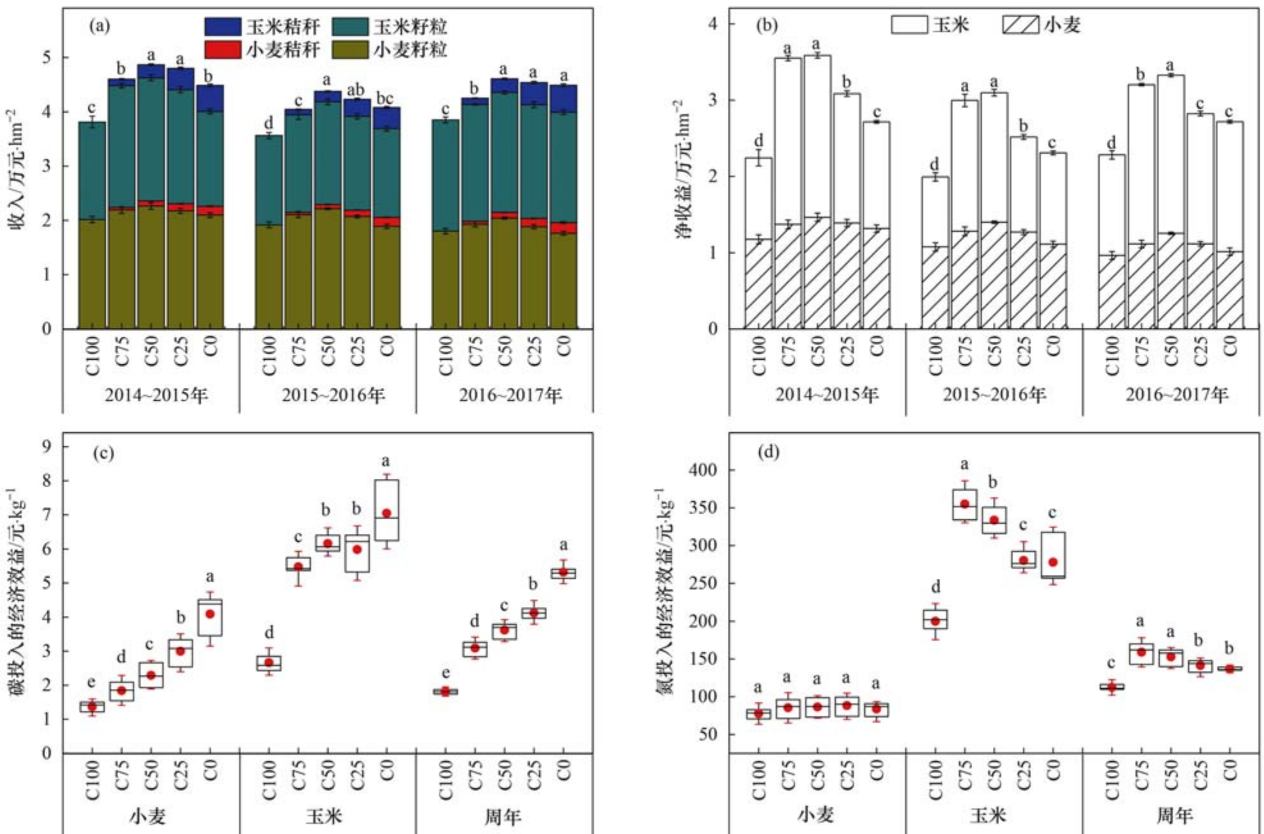
Fig. 4 Correlation analysis of carbon/nitrogen input ratio with yield increase efficiency, agricultural use efficiency, carbon production efficiency and nitrogen production efficiency with different straw managements

不同秸秆管理方式下，小麦季、玉米季和周年碳投入的经济效益均随着秸秆还田量的减少而显著增加，且与碳氮投入比显著负相关[图 5(c) 和图 6]. C0 处理周年碳投入的经济效益为 5.32 元·kg^{-1}，较 C100 显著高 193.14%（$P<0.05$）. 秸秆管理方式对小麦季氮投入经济效益没有显著影响，但显著影响玉米季氮投入经济效益，进而影响周年氮投入经济效益[图 5(d)]. C75 处理的周年氮投入经济效益分别较 C100、C50 和 C0 高 41.48%、4.15% % 和 16.46%，但与 C50 处理之间没有显著差异（$P<0.05$）.

3 讨论

3.1 碳氮投入与作物籽粒产量

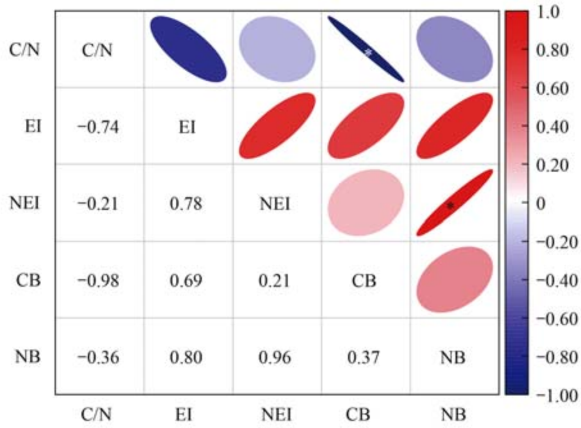
基于黄淮海地区作物秸秆养分含量的研究表明，小麦和玉米秸秆的平均碳含量分别为 42.5% 和 44.4%，氮含量分别为 0.64% 和 0.85%[32,33]. 这与本研究测定的小麦和玉米秸秆碳氮含量相近，解释了本研究不同秸秆还田量处理下碳氮投入量差异的合理性. 本研究不同秸秆还田处理作物根茬和根系中的碳氮投入和外源氮肥投入量基本一致，且小麦-玉米周年秸秆还田量每减少 25%（平均值为 4.09 t·hm^{-2}，以 C 计），碳和氮的投入量（以 C 或 N 计）分别减少 1.76 t·hm^{-2} 和 34.28 kg·hm^{-2}. 可见，秸秆



(a)、(b)、(c)和(d)分别为不同秸秆管理模式下经济收益、纯经济收益、碳投入的经济效益和氮投入的经济效益；不同的小写字母表示处理间差异显著；箱线图内横线和红点分别表示中位数和平均值，箱线图外的红色横线表示极值

图 5 不同秸秆管理的经济效益

Fig. 5 Economic benefits of different straw managements



* 表示 $P<0.05$；形状方向代表正负，颜色和大小为对应系数；C/N、EI、NI、CB 和 NB 分别表示碳氮投入比、经济收益、纯经济收益、碳投入的经济效益和氮投入的经济效益

图 6　不同秸秆管理下碳氮投入比与经济收益、纯经济收益、碳投入的经济效益和氮投入的经济效益的相关性分析

Fig. 6　Correlation analysis of carbon/nitrogen input ratio with Economic income, net economic income, economic benefit of carbon input and economic benefit of nitrogen input under different straw managements

还田量不同是导致农田碳氮投入量和碳氮投入比差异显著的关键因素.

基于不同样本量的 Meta 分析研究认为秸秆还田对籽粒产量增幅从 6.8% 到 12.3%[34~36]. 本研究发现,秸秆还田处理(C100 ~ C25)的小麦和玉米籽粒产量均高于秸秆不还田处理(C0),周年籽粒产量增产 0.61% ~ 15.68%,进一步佐证了秸秆还田有利于作物增产[37,38]. 考虑到本研究与前人研究的土壤类型、气候条件和农田管理措施差异[39~41],秸秆还田对作物籽粒产量影响不同是合理的. 同时,秸秆还田对作物的影响途径复杂交互,其影响结果也一定程度上取决于还田量[42]. 基于砂浆黑土农田秸秆还田的研究认为,麦-玉周年 60% 秸秆还田能够获得玉米最高产；而在气候相对干旱的区域,秸秆还田量为 6.0 ~ 9.0 $t \cdot hm^{-2}$ 最佳[43,44]. 本研究发现 50% 秸秆还田能够获得最高作物籽粒产量,略区别于他人研究的结果,主要是因为耕地质量、土壤的理化特性、区域的气候条件甚至是施肥等其他农田管理措施的不同.

本研究中,不同秸秆管理方式下碳氮投入比差异显著,对作物籽粒产量的增产幅度也不同. 相关研究也报道了调控农田碳氮投入比能够实现作物增产[20,21]. 与本研究不同的是,多数研究是在秸秆还田量一致的前提下,通过施氮量调控农田碳氮投入比. 可见,无论控碳调氮还是控氮调碳,优化农田碳氮投入比确实能够实现作物籽粒增产. 小麦-玉米周年实际生产中秸秆普遍全量还田,一定程度上导致了土壤 C/N 失调,不利于土壤健康、氮肥高效和作物生长[20,45,46]. 其主要原因是麦玉秸秆全量还田过大,一方面导致土壤 C/N 比失调,降低了土壤微生物数量和活性；另一方面大量的秸秆腐解与作物竞争土壤氮素[16]. 传统施氮条件下(225 $kg \cdot hm^{-2}$),麦玉秸秆均 50% 还田,农田碳氮投入比调节至 15.64 能够获得最高周年籽粒产量. 这一结果有助于从碳氮投入比的角度提出小麦-玉米周年秸秆管理的新策略.

3.2　碳氮效率

研究发现,周年作物籽粒增产率和碳农学利用率均随着秸秆还田量的减少而先增后减,C50 处理的作物周年籽粒增产率和碳农学利用率显著大于其他处理. 与 C50 相比,C25 和 C0 处理过低的秸秆还田量是导致作物籽粒产量低的主要原因[47~49],而 C100 和 C75 处理相对较高秸秆还田量与作物生长竞争土壤有效氮,不利于作物籽粒增产[50,51]. 因此,过低或相对较高的秸秆还田量均不利于周年作物籽粒增产率和碳农学利用率的提升. 同时,过低的秸秆还田量增产作用小,而相对过量的秸秆碳投入激活并使微生物活性增加,促进了农田土壤碳排放,不利于籽粒增产和碳高效[52~54]. 从 C100 到 C0 处理,氮生产效率随着秸秆还田量的减少和碳氮比的降低呈现先增加后降低的趋势. 这可能是由于过量还田条件下秸秆腐解需要固定氮素,而秸秆还田量少条件下土壤氮径流或淋溶损失较大[21,55]. 这可能是导致本研究中秸秆还田量对氮生产效率影响存在差异的原因所在,具体影响机制有待于进一步深入研究.

3.3　经济效益

畜牧业每年对秸秆饲料化的需求量超过1 500 万 t,小麦和玉米秸秆饲料化具有广大的发展空间和前景. 同时,秸秆收获饲用已经实现机械化,降低了难度和成本,有效推动了种养结合,提高小麦-玉米周年生产效益. C0 处理秸秆全部收获并出售每公顷可获得年均 0.63 万元·hm^{-2} 的收益,但其较低的籽粒经济收益,导致其总经济收益和净收益均显著低于 C50 处理. 小麦-玉米一年两熟集约化种植农田普遍通过收获籽粒获取经济收益,秸秆在籽粒收获的同时全部粉碎还田[56,57]. 本研究发现,过量秸秆还田不仅造成秸秆资源利用率低,也不利于作物籽粒产量增加,进而导致经济效益低于 C50 处理. 与传统的秸秆全量还田相比,麦玉秸秆均 50% 收获饲用能够增加 0.32 万元·hm^{-2} 的经济收益,且籽粒产量和经济收益最高. 可见,优化秸秆管理方式和机械化作业模式,统筹秸秆还田和饲料化收获,能够提升小麦-玉米周年生产的经济收益.

本研究明确了50%周年秸秆还田更适于小麦-玉米一年两熟集约化农田碳氮效率提升,50%周年秸秆收获饲用能够进一步增加经济收益.这一结论可为小麦玉米秸秆饲用化和种养结合增收提供理论依据.同时,也有研究通过在秸秆移除条件下增加留茬高度等措施适量减少秸秆还田量,促进了土壤固碳减排和农田作物增产[58].然而,这类措施成本高、作业难度大,且移除的秸秆不能够被合理利用,在生产中难以推广.因此,有必要进一步研究探寻更适用于小麦玉米周年全程机械化作业的秸秆管理方式,进一步推进秸秆还田培肥地力和小麦玉米集约化种植丰产增收的科学统筹.

4 结论

小麦-玉米一年两熟种植制度下,基于秸秆还田长期定位试验研究发现,周年施氮225 $kg·hm^{-2}$条件下,小麦玉米秸秆均50%还田,能够优化农田碳氮投入比(15.64),进而实现:①小麦-玉米周年丰产增收,周年籽粒产量分别比麦玉秸秆全量还田和不还田显著高14.98%和15.68%,并分别增加经济收益高达1.16万元·hm^{-2}和0.76万元·hm^{-2};②碳氮效率协同提高,周年碳农学利用率和氮生产效率分别为0.29 $kg·kg^{-1}$和0.64 $kg·kg^{-1}$.因此,综合考量农田碳氮投入比、籽粒产量、碳氮效率及经济效益,小麦、玉米秸秆均50%还田+50%收获饲用是更适于黄淮海地区小麦-玉米一年两熟集约化种植的周年秸秆管理方式.

参考文献:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.

[2] 魏文良, 刘路, 仇恒浩. 有机无机肥配施对我国主要粮食作物产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(8): 1384-1394.
Wei W L, Liu L, Qiu H H. Effects of different organic resources application combined with chemical fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of main grain crops in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(8): 1384-1394.

[3] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(13): 218-224.
Huo L L, Zhao L X, Meng H B, *et al*. Study on straw multi-use potential in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(13): 218-224.

[4] Liu C, Lu M, Cui J, *et al*. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2014, **20**(5): 1366-1381.

[5] 孔培君, 郑洁, 栾璐, 等. 不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 6047-6057.
Kong P J, Zheng J, Luan L, *et al*. Effects of different types of straw returning on the bacterial community, organic carbon mineralization and maize yield in upland red soil[J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 6047-6057.

[6] 靳玉婷, 刘运峰, 胡宏祥, 等. 持续性秸秆还田配施化肥对油菜-水稻轮作周年氮磷径流损失的影响[J]. 中国农业科学, 2021, **54**(9): 1937-1951.
Jin Y T, Liu Y F, Hu H X, *et al*. Effects of continuous straw returning with chemical fertilizer on annual runoff loss of nitrogen and phosphorus in rice-rape rotation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, **54**(9): 1937-1951.

[7] Chen S T, Wang J, Zhang T T, *et al*. Warming and straw application increased soil respiration during the different growing seasons by changing crop biomass and leaf area index in a winter wheat-soybean rotation cropland[J]. Geoderma, 2021, **391**, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.114985.

[8] 李廷亮, 王宇峰, 王嘉豪, 等. 我国主要粮食作物秸秆还田养分资源量及其对小麦化肥减施的启示[J]. 中国农业科学, 2020, **53**(23): 4835-4854.
Li T L, Wang Y F, Wang J H, *et al*. Nutrient resource quantity from main grain crop straw incorporation and its enlightenment on chemical fertilizer reduction in wheat production in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, **53**(23): 4835-4854.

[9] 韩上, 武际, 李敏, 等. 深耕结合秸秆还田提高作物产量并改善耕层薄化土壤理化性质[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(2): 276-284.
Han S, Wu J, Li M, *et al*. Deep tillage with straw returning increase crop yield and improve soil physicochemical properties under topsoil thinning treatment[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(2): 276-284.

[10] 丛日环, 张丽, 鲁艳红, 等. 添加不同外源氮对长期秸秆还田土壤中氮素转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(7): 1107-1114.
Cong R H, Zhang L, Lu Y H, *et al*. Effect of adding different exogenous nitrogen sources on nitrogen transformation in long-term straw incorporated soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, **25**(7): 1107-1114.

[11] 王秋菊, 刘峰, 迟凤琴, 等. 秸秆还田及氮肥调控对不同肥力白浆土氮素及水稻产量影响[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(14): 105-111.
Wang Q J, Liu F, Chi F Q, *et al*. Effect of straw returning and nitrogen fertilizer regulation on nitrogen and rice yield in albic soil with different fertilities[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(14): 105-111.

[12] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(1): 1-21.
Song D L, Hou S P, Wang X B, *et al*. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, **24**(1): 1-21.

[13] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(6): 1462-1479.
Niu X S, Ju X T. Organic fertilizer resources and utilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(6): 1462-1479.

[14] 方放, 李想, 石祖梁, 等. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(2): 228-234.
Fang F, Li X, Shi Z L, *et al*. Analysis on distribution and use structure of crop straw resources in Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(2): 228-23.

[15] Fang Y Y, Nazaries L, Singh B K, *et al*. Microbial mechanisms of carbon priming effects revealed during the interaction of crop residue and nutrient inputs in contrasting soils[J]. Global Change Biology, 2018, **24**(7): 2775-2790.

[16] Wild B, Li J, Pihlblad J, *et al*. Decoupling of priming and microbial N mining during a short-term soil incubation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, **129**: 71-79, doi: 10.1016/j.soilbio.2018.11.014.

[17] 柴如山, 王擎运, 叶新新, 等. 我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(11): 2583-2593.
Chai R S, Wang Q Y, Ye X X, *et al*. Nitrogen resource quantity of main grain crop straw in China and the potential of synthetic nitrogen substitution under straw returning[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(11): 2583-2593.

[18] 麦逸辰, 卜容燕, 韩上, 等. 添加不同外源氮对水稻秸秆腐解和养分释放的影响[J]. 农业工程学报, 2021, **37**(22): 210-219.
Mai Y C, Bu R Y, Han S, *et al*. Effects of adding different exogenous nitrogen on rice straw decomposition and nutrient release[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, **37**(22): 210-219.

[19] 朱浩宇, 高明, 龙翼, 等. 化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1921-1929.
Zhu H Y, Gao M, Long Y, *et al*. Effects of fertilizer reduction and application of organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus nutrients and crop yield in a purple soil sloping field [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1921-1929.

[20] 王新媛, 赵思达, 郑险峰, 等. 秸秆还田和氮肥用量对冬小麦产量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2021, **54**(23): 5043-5053.
Wang X Y, Zhao S D, Zheng X F, *et al*. Effects of straw returning and nitrogen application rate on grain yield and nitrogen utilization of winter wheat [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, **54**(23): 5043-5053.

[21] Gao L, Li W, Ashraf U, *et al*. Nitrogen Fertilizer management and maize straw return modulate yield and nitrogen balance in sweet corn [J]. Agronomy, 2020, **10**(3), doi: 10.3390/agronomy10030362.

[22] 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 等. 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3985-3996.
Jin Y T, Li X P, Cai Y, *et al*. Effects of straw returning with chemical fertilizer on soil enzyme activities and microbial community structure in rice-rape rotation [J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3985-3996.

[23] Tao F L, Palosuo T, Valkama E, *et al*. Cropland soils in China have a large potential for carbon sequestration based on literature survey[J]. Soil and Tillage Research, 2019, **186**: 70-78.

[24] Liu Z, Gao T P, Liu W T, *et al*. Effects of part and whole straw returning on soil carbon sequestration in C3-C4 rotation cropland [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2019, **182**(3): 429-440.

[25] 王金洲, 卢昌艾, 张文菊, 等. 中国农田土壤中有机物料腐解特征的整合分析[J]. 土壤学报, 2016, **53**(1): 16-27.
Wang J Z, Lu C A, Zhang W J, *et al*. Decomposition of organic materials in cropland soils across China: A meta-analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(1): 16-27.

[26] Wang J B, Chen Z H, Chen L J, *et al*. Surface soil phosphorus and phosphatase activities affected by tillage and crop residue input amounts[J]. Plant, Soil and Environment, 2011, **57**(6): 251-257.

[27] 王良, 刘元元, 钱欣, 等. 单季麦秸还田促进小麦-玉米周年碳效率和经济效益协同提高[J]. 中国农业科学, 2022, **55**(2): 350-364.
Wang L, Liu Y Y, Qian X, *et al*. The single season wheat straw returning to promote the synergistic improvement of carbon efficiency and economic benefit in wheat-maize double cropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, **55**(2): 350-364.

[28] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[29] Wang J Z, Wang X J, Xu M G, *et al*. Contributions of wheat and maize residues to soil organic carbon under long-term rotation in north China[J]. Scientific Reports, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep11409.

[30] Bolinder M A, Janzen H H, Gregorich E G, *et al*. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, **118**(1-4): 29-42.

[31] 闫岩, 张钰石, 刘础荣, 等. 冬小麦-夏玉米轮作“双晚”种植模式下的品种匹配与资源效率[J]. 作物学报, 2022, **48**(2): 423-436.
Yan Y, Zhang Y S, Liu C R, *et al*. Variety matching and resource use efficiency of the winter wheat-summer maize “double late” cropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, **48**(2): 423-436.

[32] Zhang W J, Wang X J, Xu M G, *et al*. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China[J]. Biogeosciences, 2010, **7**(2): 409-425.

[33] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
Liu X Y. Study on nutrients balance and requirement in agricultural production in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.

[34] Qi G P, Kang Y X, Yin M H, *et al*. Yield responses of wheat to crop residue returning in China: a meta-analysis [J]. Crop Science, 2019, **59**(5): 2185-2200.

[35] Zhang J, Hu K L, Li K J, *et al*. Simulating the effects of long-term discontinuous and continuous fertilization with straw return on crop yields and soil organic carbon dynamics using the DNDC model[J]. Soil and Tillage Research, 2017, **165**: 302-314.

[36] Htun Y M, Tong Y N, Gao P C, *et al*. Coupled effects of straw and nitrogen management on N_2O and CH_4 emissions of rainfed agriculture in Northwest China[J]. Atmospheric Environment, 2017, **157**: 156-166.

[37] Zhao H, Sun B F, Lu F, *et al*. Straw incorporation strategy on cereal crop yield in China[J]. Crop Science, 2015, **55**(4): 1773-1781.

[38] Han X, Xu C, Dungait J A J, *et al*. Straw incorporation increases crop yield and soil organic carbon sequestration but varies under different natural conditions and farming practices in China: a system analysis[J]. Biogeosciences, 2018, **15**(7): 1933-1946.

[39] Sui P, Tian P, Lian H L, *et al*. Straw incorporation management affects maize grain yield through regulating nitrogen uptake, water use efficiency, and root distribution[J]. Agronomy, 2020, **10**(3), doi: 10.3390/agronomy10030324.

[40] 李昊昱, 孟兆良, 庞党伟, 等. 周年秸秆还田对农田土壤固碳及冬小麦-夏玉米产量的影响[J]. 作物学报, 2019, **45**(6): 893-903.
Li H Y, Meng Z L, Pang D W, *et al*. Effect of annual straw return model on soil carbon sequestration and crop yields in winter wheat-summer maize rotation farmland [J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, **45**(6): 893-903.

[41] 李涛, 何春娥, 葛晓颖, 等. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, **24**(12): 1633-1642.
Li T, He C E, Ge X Y, *et al*. Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, **24**(12): 1633-1642.

[42] 马想, 黄晶, 赵惠丽, 等. 秸秆与氮肥不同配比对红壤微生物量碳氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(6): 1574-1580.
Ma X, Huang J, Zhao H L, *et al*. Straw and nitrogen fertilizer ratios influence microbial biomass carbon and nitrogen in red soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, **24**(6): 1574-1580.

[43] 折翰非, 杨祁峰, 牛芬菊, 等. 不同秸秆还田量对旱地全膜双垄沟播土壤水分及玉米生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, **32**(6): 138-142.
Zhe H F, Yang Q F, Niu F J, *et al*. Effect of different straw treatments on soil water and growth of maize with film mulched double-furrow sowing in dry land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, **32**(6): 138-142.

[44] 郭静, 周可金, 刘芳, 等. 小麦秸秆还田量和还田方式对砂姜黑土地玉米生长发育的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, **29**(4): 521-527.
Guo J, Zhou K J, Liu F, *et al*. Effects of returning amount and manner of wheat straw on maize growth in lime concretion black soil field[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017, **29**(4): 521-527.

[45] 杨竣皓, 骆永丽, 陈金, 等. 秸秆还田对我国主要粮食作物产量效应的整合(Meta)分析[J]. 中国农业科学, 2020, **53**(21): 4415-4429.
Yang J H, Luo Y L, Chen J, *et al*. Effects of main food yield under straw return in China: A Meta-analysis [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, **53**(21): 4415-4429.

[46] Zhao X, Liu B Y, Liu S L, *et al*. Sustaining crop production in China's cropland by crop residue retention: A meta-analysis[J]. Land Degradation & Development, 2020, **31**(6): 694-709.

[47] Li Y, Song D P, Dang P F, *et al*. Combined ditch buried straw return technology in a ridge-furrow plastic film mulch system: Implications for crop yield and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2020, **199**, doi: 10.1016/j.still.2020.104596.

[48] 吴玉红, 王吕, 崔月贞, 等. 轮作模式及秸秆还田对水稻产量、稻米品质及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, **27**(11): 1926-1937.
Wu Y H, Wang L, Cui Y Z, *et al*. Rice yield, quality, and soil fertility in response to straw incorporation and rotation pattern [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, **27**(11): 1926-1937.

[49] 叶新新, 王冰清, 刘少君, 等. 耕作方式和秸秆还田对砂姜黑土碳库及玉米小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(14): 112-118.
Ye X X, Wang B Q, Liu S J, *et al*. Influence of tillage and straw retention on soil carbon pool and maize-wheat yield in Shajiang black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(14): 112-118.

[50] 李旭, 董炜灵, 宋阿琳, 等. 秸秆添加量对土壤生物固氮速率和固氮菌群落特征的影响[J]. 中国农业科学, 2021, **54**(5): 980-991.
Li X, Dong W L, Song A L, *et al*. Effects of straw addition on soil biological N_2-fixation rate and diazotroph community properties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, **54**(5): 980-991.

[51] 陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 等. 秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1613-1621.
Chen S, Ding X Q, Zhu Z K, *et al*. Effect of straw application on the dynamics of exogenous nitrogen and microbial activity in paddy soil[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1613-1621.

[52] Shahbaz M, Kumar A, Kuzyakov Y, *et al*. Priming effects induced by glucose and decaying plant residues on SOM decomposition: A three-source $^{13}C/^{14}C$ partitioning study[J]. Soil Biology Biochemistry, 2018, **121**: 138-146.

[53] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, *et al*. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis [J]. Journal of Environmental Management, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112391.

[54] 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 等. 秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 569-576.
Wan X N, Zhao K Y, Wu X W, *et al*. Effects of stalk incorporation on soil carbon sequestration, nitrous oxide emissions, and global warming potential of a winter wheat-summer maize field in Guanzhong plain [J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 569-576.

[55] 南雄雄, 田霄鸿, 张琳, 等. 小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(3): 626-633.
Nan X X, Tian X H, Zhang L, *et al*. Decomposition characteristics of maize and wheat straw and their effects on soil carbon and nitrogen contents[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, **16**(3): 626-633.

[56] Liang G P, Wu H J, Houssou A A, *et al*. Soil respiration, glomalin content, and enzymatic activity response to straw application in a wheat-maize rotation system[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, **18**(3): 697-707.

[57] Li S, Hu M J, Shi J L, *et al*. Integrated wheat-maize straw and tillage management strategies influence economic profit and carbon footprint in the Guanzhong Plain of China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **767**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145347.

[58] 刘振. 耕作与秸秆还田方式对农田土壤碳来源与作物光合碳截获的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
Liu Z. Effects of tillage and straw returning on soil carbon source and crop photosynthetic carbon intercept in farmland [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019.

HUANJING KEXUE Vol. 44 No. 1

Environmental Science (monthly) Jan. 15, 2023

CONTENTS