

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23702

东北三省玉米产量和耕层土壤有机碳 对粪肥施用响应的 Meta 分析

赵 哲^{1, 2, 3}, 孙仕军^{1*}, 杨雅丽^{2, 3*}, 解宏图^{2, 3}, 张旭东^{2, 3}

(1. 沈阳农业大学水利学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 3. 辽宁省现代保护性耕作与生态农业重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 为了进一步合理施用粪肥以保障东北黑土质量与国家粮食安全, 采用 Meta 分析方法定量研究粪肥施用对东北三省 (辽宁省、吉林省、黑龙江省) 耕层 (0 ~ 20 cm) 土壤有机碳 (SOC) 含量和玉米产量的影响, 揭示不同管理措施、气候条件、土壤初始理化性质对粪肥增碳、增产效果的影响。结果表明, 不同管理措施对粪肥增碳、增产的影响存在显著差异。与不施肥相比, 化肥施加量不变且额外添加粪肥时能够显著提升耕层 SOC 含量 30.4% ~ 42.7% 和玉米产量 41.9% ~ 50.5%; 粪肥施用 10 ~ 20 年显著提升耕层 SOC 含量 43.7%, ≥ 20 年显著提升玉米产量 90.6%。与单施化肥相比, 牛粪与化肥配施、粪肥替代 50% ~ 80% 化肥 (总施用养分不变) 分别显著提高耕层 SOC 含量 61.2% 和 57.7%。粪肥与化肥总养分施用量直接影响玉米产量, 与不施肥相比, 在总施钾量 (K_2O) ≤ 300 kg/hm²、总施磷量 (P_2O_5) ≤ 200 kg/hm²、总施氮量 (N) 为 100 ~ 300 或 ≥ 400 kg/hm² 时显著提升玉米产量。气候条件的变化也影响着粪肥的改良效果, 年均气温 2 ~ 5℃、年均降水量 400 ~ 500 mm 时, 提升 SOC 效果更佳; 年均气温 5 ~ 8℃、年均降水量 500 ~ 600 mm 时提升玉米产量效果更佳。此外, 土壤初始养分偏低更有利于 SOC 增加, 初始 SOC ≤ 15 g/kg、总氮 ≤ 0.5 g/kg、碱解氮 ≤ 100 mg/kg、有效磷 ≤ 20 mg/kg、速效钾 100 ~ 200 mg/kg 时, 粪肥施用下 SOC 可显著增加 25.9% ~ 84.4%。综上, 施用粪肥对改善东北三省内农田 SOC 含量与玉米产量具有重要意义, 高效的粪肥施用措施需考虑气象条件和土壤性质, 长期在土壤初始性质较差的耕地配施粪肥与化肥是增碳、增产的重要举措。

关键词: 粪肥施用; 土壤有机碳; Meta 分析; 玉米种植; 东北三省

东北三省 (辽宁省、吉林省、黑龙江省) 作为我国重要的粮食生产基地, 其黑土资源一直是保障粮食安全的基石^[1]。然而, 随着多年来人们对东北三省黑土资源的高强度利用, 已经导致了黑土数量和质量的严重退化, 这使得保护黑土、提高土壤肥力迫在眉睫^[2-3]。土壤有机碳 (SOC) 是影响土壤肥力的重要因素之一, SOC 的储量对作物产量持续、稳定增长具有关键意义^[4-5]。近年来, 随着农业生产对化学肥料的过分依赖导致土壤退化严重, 而适当施用粪肥替代化肥可以起到提升土壤肥力的

作用^[6]。玉米是东北三省首要粮食作物^[7-8], 寻求合理利用粪肥提高 SOC 及玉米产量, 对解决东北三省黑土退化、保证国家粮食安全具有重要意义。

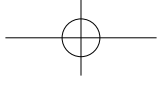
作为农业大国, 中国每年产生动物粪肥量达到世界之最, 两倍于美国与欧盟年均动物粪肥量的总和^[9]。相关研究表明, 粪肥部分替代化肥施用可遏制由过度使用化肥所引起的 SOC 下降问题, 且有助于 SOC 的固存^[10]。同时, 大量研究均已发现^[11-13], 适当采用粪肥替代传统化肥不仅可以增加 SOC 含量, 还会增强土壤固定氮、磷、钾等养分的能力。在增长作物产量方面, 一系列研究表明, 施用粪肥可有效提高粮食作物的产量^[6, 14-15]。但由于其缓慢分解的特性, 相比于化学肥料养分的快速释放, 单一且过量地施用粪肥反而会使得作物产量降低^[16]。此外, 有研究表明, 当年粪肥施用对 SOC 的影响并不明显^[17]。而粪肥与化肥配施时施加的不同养分含量也会对作物产量产生明显影响^[18]。

收稿日期: 2023-11-13; 录用日期: 2024-03-31

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1500302); 中国博士后科学基金面上项目 (2023M733673); 辽宁省应用基础研究计划项目 (2022JH2/101300195; 2023JH2/101300123)。

作者简介: 赵哲 (2001-), 博士研究生, 从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 2023200015@stu.syau.edu.cn。

通讯作者: 孙仕军, E-mail: sunshijun2000@syau.edu.cn; 杨雅丽, E-mail: yali_yang@iae.ac.cn。



粪肥施用对 SOC 和作物产量的影响也会随不同土壤性质、气候条件等环境因素的变化而变化^[19]。马子钰等^[20]研究发现,初始 SOC 含量较低的土壤,其固碳速率相对较高。当农田初始 SOC 含量远低于土壤饱和碳库时,农田 SOC 固定效应强于分解效应, SOC 含量增加速度较高;而当农田初始 SOC 含量较高甚至接近碳库饱和值时, SOC 固定与分解趋于接近,土壤固碳潜力变小, SOC 含量增速降低甚至达到平衡状态。肖广敏等^[21]通过 Meta 分析探究了在中国不同地区 SOC 含量对包括粪肥在内的有机物料施用的响应,发现东北地区 0 ~ 20 cm 土层深度的 SOC 增长率低于西北、南方、华东与华北 4 个区域。且指出土壤初始 pH 值 < 6.5 时,其有机物料施用后的 SOC 增长率显著低于土壤初始 pH 处于 6.5 ~ 7.5 与 > 7.5 时的增长率。

近年来,在“南养北移”的布局下,东北畜禽养殖规模不断扩大,粪污产生量逐年增加。据统计,2021 年东北地区年粪污产生量达 3.2 亿 t,折合养分可满足 660 万 hm² 的耕地用肥需求^[22]。然而,逐年增加的畜禽粪污却得不到合理的利用,仅辽宁省的年可利用畜禽粪污低于全省总产生量的 10%,由此催生了“种养脱节”的问题^[23]。此外,目前针对东北特定气候条件和土壤性质下粪肥施用效应的 Meta 分析较少,而全国范围内的 Meta 分析可能不会较好地结合东北地区特定背景给出合理的粪肥施用措施。因此,对东北三省进行 Meta 分析,不仅有益于寻找有效的粪肥施用措施来解决“种养脱节”的问题,更能最大化地提升黑土肥力、保障国家粮食安全。关于指标的选择,玉米、SOC 含量分别作为东北三省主要粮食作物与影响黑土肥力至至关重要的因素,该地区内粪肥施用下两种指标的相关研究性论文相对较多,满足进行 Meta 分析的样本量条件。此外,土壤初始性质与气候条件对粪肥施用增碳、增产效果具有显著影响,可作为粪肥施用效应的影响因素^[19-21]。本研究通过 Meta 分析方法,探求东北三省大田种植模式下粪肥施用管理措施对耕层 SOC 和玉米产量的影响,同时考虑环境因素对粪肥施用效应的影响。基于权威数据库内所查得的相关文献,整理归纳后进行 Meta 分析,以期明确粪肥施用类别、粪肥用量、粪肥施用年限;粪肥与化肥总施氮量、总施磷量、总施钾量;以及不同初始环境条件对在粪肥施用下东北三省耕层 SOC 及玉米产量的影响。

1 材料与方法

1.1 数据收集与整理

以“有机肥或粪肥 (organic fertilizer or manure)、土壤有机碳 (soil organic carbon)、玉米 (maize or corn)”等为关键词,在中国知网 (CNKI)、Web of Science 进行文献检索,基于权衡文献数量与数据时效性的原则,收集 2010 年 1 月至 2023 年 11 月公开发表的期刊论文。文献筛选按照以下标准来进行:(1) 试验地点在中国东北三省内且为大田试验;(2) 相关指标至少包括玉米产量或耕层 (0 ~ 20 cm) SOC 含量,且可以通过观测或计算得到;(3) 试验重复数 ≥ 2 ;(4) 处理包含不施肥处理,即控制处理 (CK) 作为试验对照;(5) 针对 SOC 的数据收集,种植作物为东北三省主要作物 (以玉米、小麦为主,其原因为已有研究表明,不论种植玉米还是小麦对 SOC 的影响规律一致^[19]。依据尽可能多收集文献的原则,因此收集了种植作物为小麦的试验中的 SOC 含量数据);(6) 无其他干扰因素,如地膜覆盖、秸秆还田等。基于以上标准,共筛选出合格文献 24 篇,提取相关数据共 137 条,数据来源、地区分布以及土壤、作物类型等见表 1。

选取管理因素 (肥料类别、粪肥替代化肥比例、额外粪肥施加量、粪肥施用年限;总施氮量、施磷量、施钾量)、气候因素 (年均降水量、年均气温)、土壤因素 (耕层内初始 SOC、总氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量和酸碱度) 3 个方面来阐述粪肥施用和不同环境条件对耕层 SOC 含量及玉米产量的影响;其中,气候因素与土壤因素将合并为环境因素进行阐述。在提取目标参数的平均值以及标准差上,对于以图表形式所呈现的数据,采用 Engauge Digitizer 进行信息数字化。对于文献中缺失标准差,但包含标准误的数据,采用公式计算;其中 SD 为标准差,SE 为标准误,n 为处理的重复次数^[43]。若文献同时缺乏标准误和标准差,则通过计算平均值的 10% 来估算标准差^[44]。当文献中仅出现土壤有机质值时,利用 Bemmelen 换算系数 0.58 得到 SOC 值^[45]。

1.2 数据处理与分析

通过 MetaWin 2.1 分析,在随机效应模型下以对数效应比法 (lnRR) 进行 Meta 分析。在得出效应值与案例间方差后,进行亚组分析获得累积效应

表 1 Meta 分析所采用的文献

编号	试验省份	试验地点经纬度	土壤类型	作物类型	文献数据量 (条)	参考文献
1	辽宁	122° 07' E, 42° 12' N	褐土	玉米	3	[24]
2	辽宁	123° 23' E, 41° 32' N	黄棕壤	玉米 / 大豆	2	[25]
3	吉林	124° 88' E, 42° 40' N	黑土	玉米	5	[26]
4	吉林	124° 48' E, 43° 30' N	黑土	玉米	10	[4]
5	吉林	124° 57' E, 42° 57' N	黑土	玉米	3	[27]
6	吉林	124° 48' E, 43° 30' N	黑土	玉米	6	[28]
7	吉林	124° 57' E, 42° 57' N	黑土	玉米	4	[29]
8	吉林	125° 00' E, 43° 30' N	黑土	玉米	8	[18]
9	吉林	124° 48' E, 43° 30' N	黑钙土	玉米	4	[30]
10	吉林	122° 02' E, 44° 13' N	盐碱土	玉米	1	[31]
11	黑龙江	126° 50' E, 45° 51' N	黑土	玉米	6	[17]
12	黑龙江	126° 36' E, 45° 43' N	黑土	玉米	5	[32]
13	黑龙江	126° 28' E, 45° 51' N	黑土	玉米	5	[14]
14	黑龙江	125° 27' E, 49° 33' N	黑土	小麦	4	[33]
15	黑龙江	125° 27' E, 49° 33' N	黑土	小麦	4	[15]
16	黑龙江	125° 03' E, 45° 39' N	盐碱土	玉米	6	[34]
17	黑龙江	125° 03' E, 45° 24' N	盐碱土	玉米	4	[35]
18	黑龙江	126° 38' E, 47° 26' N	黑土	玉米	5	[36]
19	黑龙江	126° 38' E, 47° 26' N	黑土	玉米 / 大豆	4	[37]
20	黑龙江	126° 38' E, 47° 26' N	黑土	小麦 / 玉米 / 大豆	4	[38]
21	黑龙江	126° 38' E, 47° 26' N	黑土	小麦 / 玉米 / 大豆	4	[39]
22	黑龙江	123° 23' E, 45° 25' N	黑土	玉米	10	[40]
23	黑龙江	126° 38' E, 47° 26' N	黑土	玉米 / 大豆	12	[41]
24	黑龙江	126° 55' E, 47° 27' N	黑土	小麦 / 玉米 / 大豆	18	[42]

值与 95% 置信区间。采用 Graphpad Prism 9.5 进行森林图绘制,森林图中, N 为样本数,样本数右侧为效应值 (%),若置信区间与 0 轴相交,则说明相比于不施肥处理,该因素条件下对耕层 SOC 含量或玉米产量的影响不显著;若置信区间不与 0 轴相交,说明影响显著^[46]。若置信区间与效应值均 >0,说明对比不施肥处理,该处理显著有利于增加玉米产量或耕层 SOC 含量^[47]。若亚组分析内同组不同处理效应值 95% 置信区间重叠,则表明处理间没有显著差异^[21]。进行组间异质性检测,以 Q 值代表异质性,若 $P<0.05$,则说明组间存在显著异质性^[48]。为保证 Meta 分析无发表偏倚,采用矢安全系数法进行发表偏倚性检验^[49]。基于矢安全系数法,若 $Nfs > 5N + 10$,则说明无发表偏倚性;其中 Nfs 为矢安全系数, N 为数据样本量。表 2 显示了所有影响因素对玉米产量和耕层 SOC 含量的矢安全系数,通过计算均满足要求,因此无发表偏倚。

表 2 矢安全系数

影响因素	玉米产量	耕层 SOC 含量
年均降水量	Nfs=1502 N=53	Nfs=1492 N=49
年均气温	Nfs=3169 N=50	Nfs=1527 N=49
初始 SOC	Nfs=1206 N=64	Nfs=2139 N=46
初始土壤总氮	Nfs=1115 N=59	Nfs=3096 N=46
酸碱度	Nfs=3291 N=64	Nfs=3348 N=42
初始土壤碱解氮	Nfs=1336 N=31	Nfs=616 N=29
初始土壤有效磷	Nfs=832 N=52	Nfs=1088 N=39
初始土壤速效钾	Nfs=783 N=50	Nfs=811 N=35
肥料类别	Nfs=3432 N=85	Nfs=3248 N=51
粪肥施用年限	Nfs=5668 N=84	Nfs=2150 N=52
额外粪肥施加量	Nfs=265 N=16	Nfs=306 N=21
粪肥替代化肥比例	Nfs=2885 N=69	Nfs=701 N=31
施氮 (N) 量	Nfs=3878 N=83	Nfs=1417 N=50
施磷 (P ₂ O ₅) 量	Nfs=3663 N=74	Nfs=921 N=39
施钾 (K ₂ O) 量	Nfs=3994 N=74	Nfs=742 N=37



在数据分组情况上,其中粪肥用量分成两组;包含粪肥替代原有化肥的养分比例和在原有化肥施加基础上额外添加粪肥用量。而总施氮量、施磷量、施钾量分别代表化肥与粪肥共同施加于田间的氮、磷、钾量,即 N、P₂O₅、K₂O。关于缩写,管理因素数据中,SR 代表粪肥替代化肥比例,即 Substitute ratio。

AR 代表粪肥额外添加量,即 Additional ratio。粪肥施用年限中 Y 代表年数,即 Year。施氮量中 N 代表氮,即 Nitrogen。施磷量中 P 代表磷,即 Phosphorus。施钾量中 K 代表钾,即 Potassium (表 3)。气候因素数据中,年均降水量中 R 代表降水量,即 Rainfall。年均气温中 T 代表年均气温,即 Temperature (表 4)。

表 3 管理因素数据分组

肥料类别	粪肥替代化肥比例 (%)	额外粪肥施加量 (t/hm ²)	粪肥施用年限	总施氮量 (kg/hm ²)	总施磷量 (kg/hm ²)	总施钾量 (kg/hm ²)
单施化肥	0	AR<30	Y<10	0<N ≤ 100	0<P ≤ 100	0<K ≤ 100
猪粪+化肥	0<SR ≤ 50	AR ≥ 30	10 ≤ Y<20	100<N ≤ 200	100<P ≤ 200	100<K ≤ 200
鸡粪+化肥	50<SR ≤ 80		Y ≥ 20	200<N ≤ 300	200<P ≤ 300	200<K ≤ 300
牛粪+化肥	80<SR ≤ 100			300<N ≤ 400	300<P ≤ 400	300<K ≤ 400
其他粪肥+化肥				400<N	400<P	400<K

表 4 气候因素数据分组

年均降水量 (mm)	年均气温 (℃)
400<R ≤ 500	-1<T ≤ 2
500<R ≤ 600	2<T ≤ 5
600<R ≤ 700	5<T ≤ 8

土壤因素数据中,初始土壤总氮中 TN 代表总氮,即 Total nitrogen。酸碱度中 pH 代表酸碱度,即 Potential of hydrogen。初始土壤碱解氮中 AN 代表碱解氮,即 Available nitrogen。初始土壤有效磷中 AP 代表有效磷,即 Available phosphorus。初始土壤速效钾中 AK 代表速效钾,即 Available potassium (表 5)。

表 5 土壤因素数据分组

初始土壤总氮 (g/kg)	初始土壤碱解氮 (mg/kg)	初始土壤有效磷 (mg/kg)	初始土壤速效钾 (mg/kg)	初始土壤有机碳 (g/kg)	初始土壤 酸碱度
0<TN ≤ 0.5	0<AN ≤ 100	0<AP ≤ 20	0<AK ≤ 100	0<SOC ≤ 15	pH<7
0.5<TN ≤ 1	100<AN ≤ 200	20<AP ≤ 40	100<AK ≤ 200	15<SOC ≤ 30	7 ≤ pH ≤ 8
1<TN ≤ 1.5		40<AP	200<AK ≤ 300		8<pH
1.5<TN			300<AK		

2 结果与分析

2.1 管理因素对 SOC 含量的影响

粪肥施用年限中,所有年限均正向显著影响耕层 SOC 含量;相比于<10 年,10~20 年显著提升耕层 SOC 含量 27.2%。肥料类别中除单施化肥,其余类别均显著提升耕层 SOC 含量;相比于其他肥料类别,牛粪配施化肥显著提升耕层 SOC 含量。肥料用量中,额外粪肥施加量<30 和≥30 t/hm²均正向显著影响耕层 SOC;除无有机肥替代(0%),其余粪肥替代化肥比例均显著增加耕层 SOC,相比

于其他替代比例,50%~80% 的替代比例显著提升耕层 SOC 含量(图 1)。

在粪肥与化肥总施加养分量上,总施钾量≤200 kg/hm²显著提升耕层 SOC 含量。总施磷量中除>300 kg/hm²,其余施磷量均显著提升耕层 SOC 含量。总施氮量>100 kg/hm²时耕层 SOC 提升效果显著;其中相比于≤100 kg/hm²,100~200 kg/hm²显著提升耕层 SOC 含量 28.5%(图 2)。

2.2 环境因素对 SOC 含量的影响

在气候条件的影响下,当年均降水量处于 400~600 mm 时粪肥施用可显著提升耕层 SOC 含量;

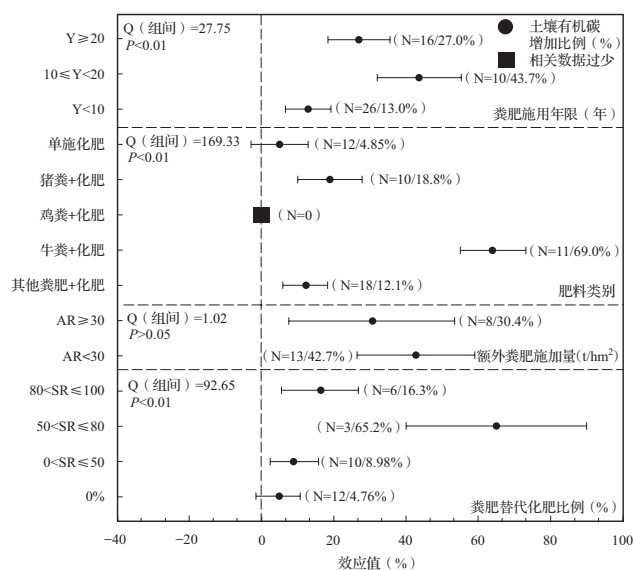


图1 耕层 SOC 含量对粪肥施用的响应

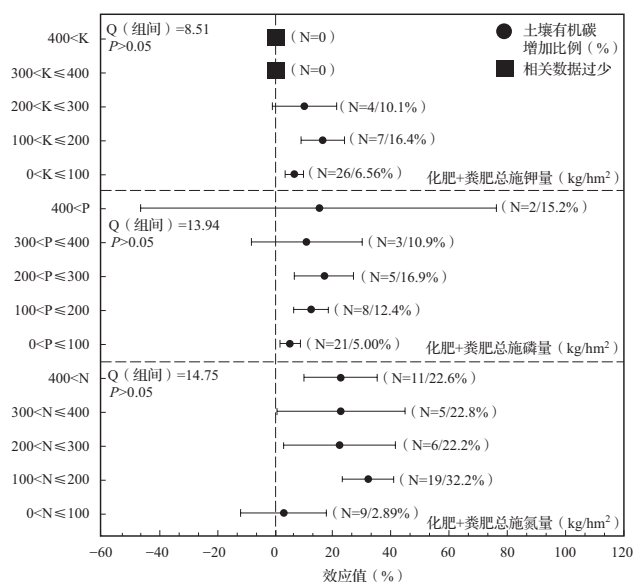


图2 耕层 SOC 含量对施肥总养分的响应

相比于 500 ~ 600 mm, 400 ~ 500 mm 下粪肥施用显著提升耕层 SOC 含量 16.9%。当年均气温处于 2 ~ 8℃ 时粪肥施用可显著提升耕层 SOC 含量; 相比于 -1 ~ 2 以及 5 ~ 8℃, 2 ~ 5℃ 下粪肥施用显著提升耕层 SOC 含量 22.7% ~ 32.8% (图 3)。

在土壤初始理化性质条件变化下, 粪肥施用对耕层 SOC 含量的提升效果受到显著影响。当初始土壤速效钾含量为 100 ~ 200 mg/kg 时粪肥施用可显著提升耕层 SOC 含量; 其中相比于 200 ~ 300 mg/kg, 100 ~ 200 mg/kg 时粪肥施用显著提高了耕层 SOC 含量 20.5%。当初始土壤有效磷含量为 ≤ 40 mg/kg 时粪肥施用可显著提升耕层 SOC 含量; 相比于

20 ~ 40 mg/kg, ≤ 20 mg/kg 时粪肥施用显著提高了耕层 SOC 含量 18.3%。初始土壤碱解氮含量 ≤ 200 mg/kg 时粪肥施用可显著提升耕层 SOC 含量; 相比于 100 ~ 200 mg/kg, ≤ 100 mg/kg 时粪肥施用显著提升了耕层 SOC 含量 15.9%。在任意土壤 pH 下, 粪肥施用均可显著提升耕层 SOC 含量; 其中相比于 pH ≤ 8, 在 pH > 8 时施用粪肥可显著提升耕层 SOC 含量 42.5% ~ 74.9%。粪肥施用对耕层 SOC 的改良效果还受到土壤初始总氮与 SOC 含量的影响。土壤初始总氮含量 ≤ 0.5 g/kg、初始 SOC 含量 ≤ 30 g/kg 时, 粪肥施用可显著提升耕层 SOC 含量; 相比于 15 ~ 30 g/kg, ≤ 15 g/kg 时粪肥施用显著提升耕层 SOC 含量 33.8% (图 4)。

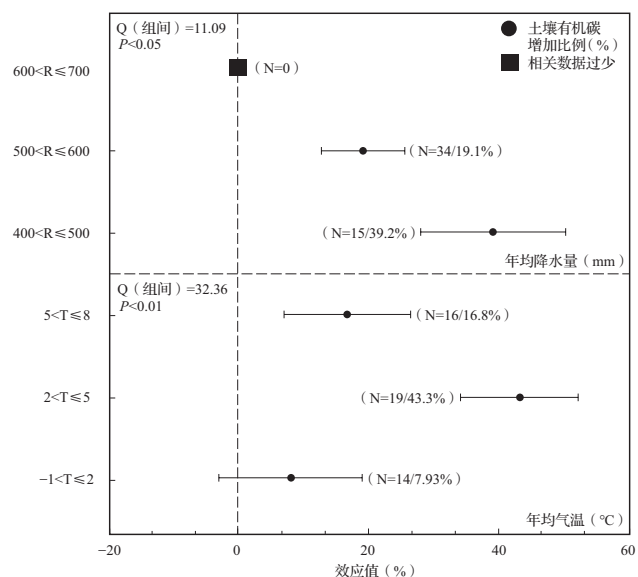


图3 耕层 SOC 含量对气候变化的响应

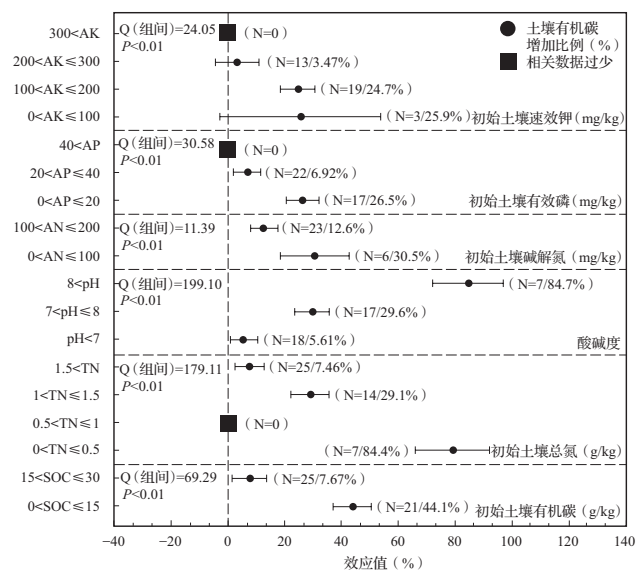


图4 耕层 SOC 含量对土壤初始理化性质变化的响应

2.3 管理因素对玉米产量的影响

粪肥施用年限中, < 10 年与 ≥ 20 年显著提升玉米产量; 相比于 < 10 年, 玉米产量在 ≥ 20 年时显著提升 28.3%。肥料类别中, 除鸡粪与化肥配施, 其余类别均显著提升玉米产量。肥料用量中, 额外粪肥施加量 < 30 和 ≥ 30 t/hm² 均正向显著影响玉米产量; 无有机肥替代 (0%) 与粪肥替代化肥比例 > 50% 时显著增加玉米产量, 其中相比于 $\leq 50\%$ 的替代比, 无有机肥替代 (0%) 显著增加玉米产量 42.5% (图 5)。

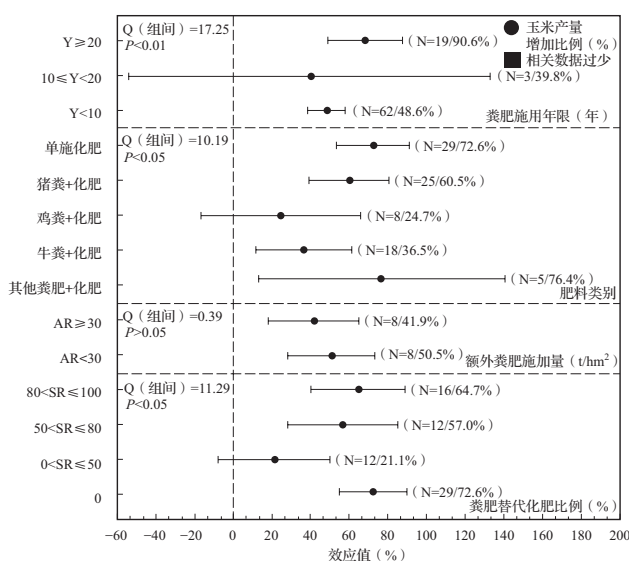


图 5 玉米产量对粪肥施用的响应

在粪肥与化肥总施加养分量上, 当总施钾量 ≤ 300 kg/hm², 总施磷量 ≤ 200 kg/hm², 总施氮量 100 ~ 300 与 > 400 kg/hm² 时均显著提升玉米产量 (图 6)。

2.4 环境因素对玉米产量的影响

气候条件的变化显著影响着粪肥施用对玉米产量的改良效果。当年均降水量处于 500 ~ 700 mm 时粪肥施用显著提升玉米产量; 其中, 相比于 600 ~ 700 和 400 ~ 500 mm, 500 ~ 600 mm 降水量下粪肥施用显著提升玉米产量 38.4% ~ 41.9%。在年均气温处于 -1 ~ 8 °C 时, 粪肥施用可显著提升玉米产量; 其中相比于 -1 ~ 2 °C 和 2 ~ 5 °C, 5 ~ 8 °C 下粪肥施用显著提升玉米产量 41.3% ~ 47.3% (图 7)。

土壤初始理化性质条件的变化显著影响着粪肥施用对玉米的增产效果。当初始土壤速效钾为

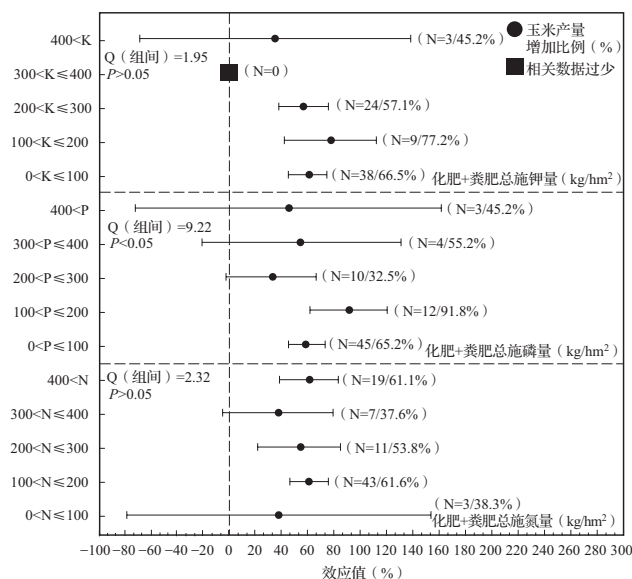


图 6 玉米产量对施肥总养分的响应

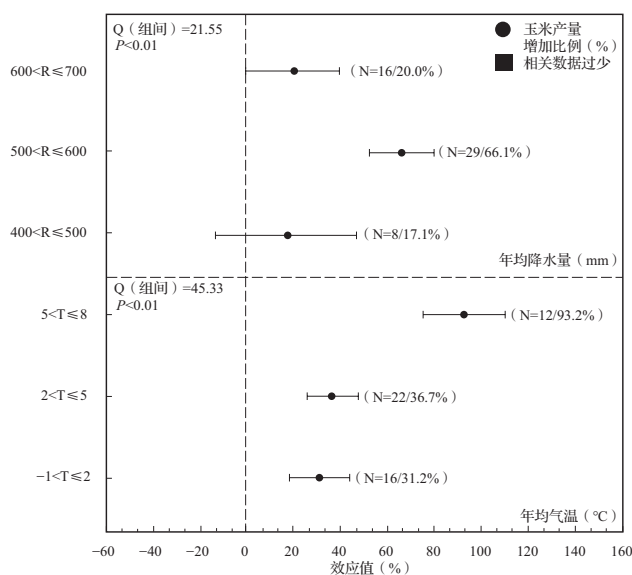


图 7 玉米产量对气候变化的响应

100 ~ 300 mg/kg 时粪肥施用可显著提高玉米产量。在任意初始有效磷含量下, 粪肥施用均可显著提高玉米产量。初始碱解氮为 100 ~ 200 mg/kg 时显著提高了粪肥施用的增产效果。当初始 pH 值 < 7 或 7 ~ 8 时, 粪肥施用显著提高了玉米产量; 其中相比于 pH 值 < 7, pH 值 7 ~ 8 时粪肥施用显著提高了玉米产量 53.2%。此外, 当初始总氮含量 > 1 g/kg, 初始 SOC 含量 ≤ 30 g/kg 时, 粪肥施用均可显著提高玉米产量 (图 8)。

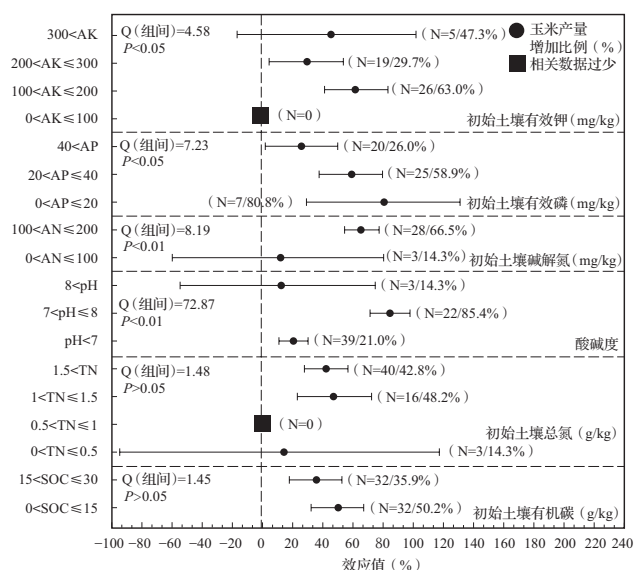


图8 玉米产量对土壤初始理化性质变化的响应

3 讨论

3.1 管理因素对 SOC 含量及玉米产量的影响

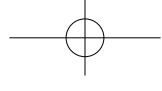
3.1.1 粪肥施用类型、用量和年限的影响

从本研究结果中可以发现,相比于单施化肥,牛粪配施化肥对提升耕层 SOC 具有显著正效应,不同类型的粪肥配施化肥对耕层 SOC 提高的效果也不同;对于玉米产量,相比于不施肥,除鸡粪与化肥配施以外,其余处理均对提升玉米产量具有显著正效应。通常情况下,不同粪肥类型对作物产量、SOC 的影响差异往往归因于粪肥本身不同的有机质以及养分含量^[50-51]。而在选择施用粪肥的类型时,可尽可能通过当前地力状况、培肥速度、经济效益等因素进行考虑。在粪肥用量上,Xia 等^[52]认为粪肥施用对于 SOC 的增长和固存不受土壤类型、粪肥类型或粪肥替代化学肥料比例的限制,且替代比为 50%~75% 时,对 SOC 增长和固存效果较好。李永平等^[50]通过田间试验,发现在施加传统化肥的基础上,相比于适度施用粪肥,过度施用对玉米产量无显著提升效果。根据本研究结果,与无有机肥替代(0%)相比,当粪肥替代化肥比例处于 50%~80% 或额外粪肥施加量 < 30 t/hm² 时,显著增长 SOC 含量。在粪肥施用年限上,Du 等^[19]通过对比 3 种不同粪肥施用年限(≤3、3~10、≥10 年),发现随施用年限的增加,SOC 的增长率愈高,且 3~10 与 ≥10 年具有显著差异。肖广敏等^[21]进一步探究了施用年限增加对 SOC 含量的

影响,发现施用 > 20 年时 SOC 增长率与 10~20 年相比无显著差异。根据本研究分析结果,与粪肥施用年限 < 10 年相比,当粪肥施用年限处于 10~20 年时耕层 SOC 含量显著提升,但与 ≥20 年相比无显著差异,这与肖广敏等^[21]的试验结果相似。其原因可能是本研究提取的相关试验地点均位于东北三省,土壤类型多为 SOC 含量高的黑土,而黑土本身的高 SOC 含量和长期的有机物质施用会导致土壤中的 SOC 含量趋于饱和^[53]。因此,在本研究中粪肥施用年限 ≥20 年时,相比于 10~20 年,耕层 SOC 含量并未出现进一步增加的现象^[54]。

3.1.2 肥料总施加氮、磷和钾量的影响

此外,本研究对于粪肥与化肥总施加养分(氮、磷、钾)量进行了探究,发现耕层 SOC 含量与玉米产量的响应程度随施加不同养分量而变化。在玉米产量上,易镇邪等^[55]认为,施氮量 180 kg/hm² 有利于玉米生长和氮素吸收,且施氮量 180 kg/hm² 与施氮量 270 kg/hm² 处理下的玉米产量无显著差异。高文龙等^[56]发现施磷量 100 kg/hm² 时,玉米产量显著提升且根系生长活跃。张业猛等^[57]研究指出,施钾量处于 112.5~150 kg/hm² 时,有利于玉米产量和品质的提高。谭德水等^[58]基于东北黑土研究,发现相比于不施钾,在施钾量处于 112.5 kg/hm² 时,辽宁、黑龙江、吉林 3 个省试验点的玉米籽粒产量均显著提高;而进一步加大施钾量至 225 kg/hm² 时,与 112.5 kg/hm² 相比,玉米籽粒产量并未进一步提高。根据本研究结果得出,与不施肥相比,当总施氮量、施钾量、施磷量处于 100~200 kg/hm² 时显著提升玉米产量,这与他人研究结果相一致^[55-57];此外,本研究中设置的总施加氮、磷、钾量中其他施加量组与 100~200 kg/hm² 下的玉米产量增长率之间无显著差异。对于 SOC 含量,姚俊红等^[59]认为, SOC 含量受土壤全氮、碳氮比等因素的影响,在不同施氮量下,相比于 160 kg/hm² 氮量,240 与 280 kg/hm² 显著提升 SOC 含量。这与本研究结果不同,可能是由于上述试验采用化学氮肥,而本研究中施氮量为化肥与粪肥的总量,粪肥养分释放速度与化肥具有显著差异^[60]。在施磷量上,孙志朋等^[61]研究发现,在同等有机肥施加量的情况下,施磷量 180 与 360 kg/hm² 对 SOC 含量的影响无显著差异;随着施磷量的增加,有利于减缓 SOC 固存率的降低趋势。



张婷婷等^[62]研究发现,在粪肥与化肥配施后总施钾量提升至 170 kg/hm²,土壤有机质含量显著提高。根据本研究结果,相比于不施肥,当施氮量、施磷量、施钾量处于 100 ~ 200 kg/hm²时显著提升耕层 SOC 含量;而相比于 100 ~ 200 kg/hm²施加量,进一步提高施加量并不会显著提升耕层 SOC 含量。综上,根据本研究结果,结合他人研究发现,在尽可能节省肥料资源的基础上,控制总施氮量、施钾量、施磷量在 100 ~ 200 kg/hm²时,有助于玉米产量和耕层 SOC 含量的提高。

3.2 环境因素对 SOC 含量及玉米产量的影响

3.2.1 气候条件的影响

一系列研究表明,环境因素如土壤理化性质、气候条件等对 SOC 含量与作物产量具有显著影响^[19, 21, 63]。在气候条件方面,对玉米产量的影响分为年均降水量和年均气温两部分,玉米作为喜光作物,需水量较大,对年均降水量、年均气温等气象因素较为敏感^[64]。本研究结果表明,年均降水量为 500 ~ 600 mm 时,在粪肥施用下玉米产量增长率较年均降水量为 400 ~ 500 与 600 ~ 700 mm 时显著提升;年均气温为 5 ~ 8℃时,其玉米产量增长率较年均气温为 2 ~ 5℃时显著提升。刘栩辰等^[65]研究发现,东北地区玉米需水量多年平均值在 538 ~ 685 mm。在耕层 SOC 含量方面,本研究结果表明,年均降水量为 400 ~ 500 mm 时,在粪肥施用下耕层 SOC 增长率较年均降水量 500 ~ 600 mm 时显著提高;年均气温为 2 ~ 5℃时,耕层 SOC 增长率较年均气温 5 ~ 8℃时显著提升。马子钰等^[20]研究发现相比于年均气温 ≥ 9℃, < 9℃时的 SOC 年净变化量在粪肥配施化肥下更高,这与本研究结果相符;并指出温度升高可明显提高微生物的呼吸作用强度,促进 SOC 的分解。此外,不同年均降水量之间 SOC 增长率的差异可能是由于土壤含水率变化而导致微生物氧气源减少或充足,使得其分解 SOC 作用减弱或增强而引起的^[20]。

3.2.2 初始土壤理化性质的影响

在土壤理化性质条件方面,本研究发现, pH、初始土壤总氮、SOC、速效养分含量等均对粪肥提高作物产量具有影响。本研究结果显示, pH 达到 7 ~ 8 时最有利于玉米作物生长,这与前人研究结果相符^[63]。其原因可能是玉米为喜硝作物^[66]。在 pH 5.6 ~ 8.0 时硝化速率随土壤 pH 的升高而增

大^[67],有助于玉米的生长。此外,若 pH < 6 时,固氮菌的活性降低;而 pH > 8 时,硝化作用又受到抑制。但在 pH 7 ~ 8 时,固氮菌的活性较高,且硝化速率升高,有利于粪肥中氮的矿化,为玉米提供充足养分^[68]。土壤养分,尤其是速效养分如碱解氮、有效磷、速效钾可快速补充作物生长所需养分,有利于作物产量的增加^[69-70]。因此,初始土壤养分含量高时,作物生长不受养分有效性的限制,粪肥增产的效果有限。在本研究中得到相似的结果,施用粪肥时土壤初始养分偏低,玉米增产则达到较高效应值。表明在粪肥利用中应充分考虑土壤初始条件,合理选择粪肥施用方式和数量。在耕层 SOC 含量增长率方面,本研究结果表明,当土壤初始养分偏低时,耕层 SOC 增长率显著提高。在本研究结果中,初始 SOC 含量 ≤ 15 g/kg 时,土壤未达到 SOC 饱和状态,具有较大提升空间^[21];因此相比于 15 ~ 30 g/kg,粪肥施用对耕层 SOC 的增长率显著提高。此外,土壤初始总氮含量 ≤ 0.5 g/kg 时,相比于其他总氮含量,粪肥施用对耕层 SOC 的增长率显著提高。初始 pH > 8 时,相比于其他 pH 范围,粪肥施用对耕层 SOC 的增长率显著提高,这均与 Du 等^[19]的研究结果较为相符。对于初始 pH 对 SOC 含量的影响, Ren 等^[71]提出土壤 pH 与土壤有机质呈负相关关系,在高 pH 值下由粪肥输入的外源碳易于被分解,而这可能使得 SOC 较少,未达到碳饱和状态时易于被提升^[21]。除上述因素外,本研究发现速效养分偏低时,即碱解氮含量 ≤ 200 mg/kg、有效磷含量 ≤ 40 mg/kg、速效钾含量 100 ~ 200 mg/kg 时,粪肥施用对耕层 SOC 增长率的提升也具有显著的促进作用。

4 结论

(1) 在东北三省,适当粪肥施用可显著增加耕层 SOC 含量,同时有利于保障玉米稳产增产。

(2) 采用牛粪配施化肥、50% ~ 80% 的粪肥替代比例、10 年以上的施用年限以及总施加氮、磷、钾量控制在 100 ~ 200 kg/hm² 时,粪肥施用增碳、增产效果较好。

(3) 年均气温与年均降水量较低时,粪肥施用提升耕层 SOC 含量的效果较好;而年均气温与年均降水量较高时,玉米产量的提升效果较好。土壤初始养分含量较低时,粪肥施用增碳、增产效果更显著。

本研究面向当前国内保护黑土地与国家粮食安全的需求,以结合实际情况、因地制宜制定农田管理措施为前提进行 Meta 分析,可为东北三省合理利用粪肥进行培肥地力和化肥减施提供一定的理论依据与指导。基于分析结果,可通过加大粪肥施用替代比例,坚持长期施用粪肥来固碳培肥从而推动可持续农业的发展。未来随着东北三省内相关研究的不断积累,可就粪肥施用对其他作物、土壤性质的影响实施更全面的分析。

参考文献:

[1] 贺美,王迎春,王立刚,等. 深松施肥对黑土活性有机碳组分及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57 (2): 446-456.

[2] 吕付泽,杨雅丽,鲍雪莲,等. 免耕不同秸秆覆盖量对黑土微生物群落及其残留物的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34 (4): 903-912.

[3] 吴瑞娟,王迎春,朱平,等. 长期施肥对东北中部春玉米农田土壤呼吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (1): 44-52.

[4] 张秀芝,高洪军,彭畅,等. 长期有机培肥黑土有机碳、全氮及玉米产量稳定性的变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (9): 1473-1481.

[5] Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, et al. Changes in soil characteristics and maize yield under straw returning system in dryland farming[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 11-17.

[6] 袁梦,邢稳,罗美玲,等. 东北稻田有机肥替代部分氮肥措施下土壤酶群分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40 (1): 123-130.

[7] 李瑞平,谭化,谢瑞芝,等. 东北玉米耕作制度存在的主要问题与新型耕作制度展望[J]. 玉米科学, 2021, 29 (6): 105-111.

[8] 张鑫,隋世江,于涛,等. 不同量秸秆还田对玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 湖北农业科学, 2014, 53 (19): 4581-4583.

[9] Su G C, Ong H C, Zulkifli N W M, et al. Valorization of animal manure via pyrolysis for bioenergy: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 343 (1): 130965.

[10] He H, Peng M, Lu W, et al. Organic fertilizer substitution promotes soil organic carbon sequestration by regulating permanganate oxidizable carbon fractions transformation in oasis wheat fields[J]. Catena, 2023, 221: 106784.

[11] Guo Z, Han J C, Li J, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon mineralization and microbial community structure[J]. PloS One, 2019, 14 (4): e0216006.

[12] Salehi A, Fallah S, Sourki A A. Organic and inorganic fertilizer effect on soil CO₂ flux, microbial biomass, and growth of *Nigella sativa* L. [J]. International Agrophysics, 2017, 31 (1): 103-116.

[13] Sarma B, Farooq M, Gogoi N, et al. Soil organic carbon dynamics in wheat-green gram crop rotation amended with

vermicompost and biochar in combination with inorganic fertilizers: a comparative study[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 201: 471-480.

[14] 姜佰文,刘丽红,刘俊辉,等. 液体牛粪与化肥配施对东北春玉米农田土壤磷素平衡的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41 (10): 2232-2240.

[15] 刘亦丹,迟凤琴,谷思玉,等. 有机肥替代部分化学氮肥对春小麦产量与氮肥利用率的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51 (2): 442-448.

[16] Ma Y J, Shen S Z, Wan C, et al. Organic fertilizer substitution over six years improves the productivity of garlic, bacterial diversity, and microbial communities network complexity[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 182: 104718.

[17] 崔继文,徐新朋,何萍,等. 氮素有机替代对东北黑土区土壤微生物碳磷资源限制的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (11): 1953-1966.

[18] 刘占军,李书田,周卫,等. 不同施氮方式对春玉米产量、氮素吸收及经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012 (3): 59-64.

[19] Du Y D, Cui B J, Zhang Q, et al. Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: a meta-analysis[J]. Catena, 2020, 193 (5): 104617.

[20] 马子钰,马文林. 施肥对中国农田土壤固碳影响效应研究[J]. 土壤, 2022, 54 (5): 905-911.

[21] 肖广敏,刘蕾,赵诣,等. 有机物料投入对中国农田土壤有机碳含量影响的整合分析[J]. 中国土壤与肥料, 2023 (8): 23-32.

[22] 徐鹏翔,沈玉君,丁京涛,等. 中国东北地区畜禽粪污处理技术与资源化利用模式分析[J]. 农业工程学报, 2023 (39): 199-206.

[23] 张玉兰,孙彩霞,强者,等. 辽宁省畜禽养殖粪污处理的种养关系现状及影响因素[J]. 生态学杂志, 2023 (5): 1234-1242.

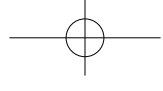
[24] 赵玉皓,张艳杰,李贵春,等. 长期不同施肥下褐土有机碳储量及活性碳组分[J]. 生态学杂志, 2016, 35 (7): 1826-1833.

[25] Ning C C, Ma Q, Yuan H Y, et al. Mineral fertilizers with recycled manure boost crop yield and P balance in a long-term field trial[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2020, 116 (3): 271-283.

[26] 魏宇轩,蔡红光,张秀芝,等. 不同种类有机肥施用对黑土团聚体有机碳及腐殖质组成的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (3): 258-263.

[27] Jiao X G, Gao C S, Sui Y Y, et al. Effects of long-term fertilization on soil carbon and nitrogen in Chinese Mollisols[J]. Agronomy Journal, 2014, 106 (3): 1018-1024.

[28] Feng X M, Gao H J, Lal R, et al. Nitrous oxide emission, global warming potential, and denitrifier abundances as affected by long-term fertilization on Mollisols of Northeastern China[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65 (13):



- 1831–1844.
- [29] 贺美, 王立刚, 王迎春, 等. 长期定位施肥下黑土呼吸的变化特征及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 151–161.
- [30] Mei N, Zhang X Z, Wang X Q, et al. Effects of 40 years applications of inorganic and organic fertilization on soil bacterial community in a maize agroecosystem in northeast China[J]. European Journal of Agronomy, 2021, 130: 126332.
- [31] 黄梓源, 王天野, 王呈玉, 等. 不同施肥处理对半干旱区土壤理化性质、玉米光合特性和产量的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(S1): 234–240.
- [32] Liu M, Song F, Yin Z H, et al. Organic fertilizer substitutions maintain maize yield and mitigate ammonia emissions but increase nitrous oxide emissions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(18): 53115–53127.
- [33] 张久明, 匡恩俊, 刘亦丹, 等. 有机肥替代不同比例化肥对土壤有机碳组分的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(12): 1534–1540.
- [34] 秦永杰, 张娟, 王子华, 等. 长期有机培肥对苏打盐碱土壤有机氮组分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S1): 180–183.
- [35] Meng Q F, Sun Y T, Zhao J, et al. Distribution of carbon and nitrogen in water-stable aggregates and soil stability under long-term manure application in solonchic soils of the Songnen plain, Northeast China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(6): 1041–1049.
- [36] Chen Z M, Xu Y H, He Y J, et al. Nitrogen fertilization stimulated soil heterotrophic but not autotrophic respiration in cropland soils: a greater role of organic over inorganic fertilizer[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2018, 116: 253–264.
- [37] Jiang H, Han X Z, Zou W X, et al. Seasonal and long-term changes in soil physical properties and organic carbon fractions as affected by manure application rates in the Mollisol region of Northeast China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2018, 268: 133–143.
- [38] Qiao Y F, Miao S J, Han X Z, et al. The effect of fertilizer practices on N balance and global warming potential of maize-soybean-wheat rotations in Northeastern China[J]. Field Crops Research, 2014, 161: 98–106.
- [39] Ding X L, Yuan Y R, Liang Y, et al. Impact of long-term application of manure, crop residue, and mineral fertilizer on organic carbon pools and crop yields in a Mollisol[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(5): 854–859.
- [40] 姜佰文, 牛煜, 王春宏, 等. 应用液体有机肥减施氮肥对玉米氮素利用效率及产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(12): 24–31, 40.
- [41] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 66–71.
- [42] 邹文秀, 邱琛, 韩晓增, 等. 长期施用有机肥对黑土土壤肥力和玉米产量的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(4): 407–418.
- [43] Liu D T, Song C C, Xin Z H, et al. Agricultural management strategies for balancing yield increase, carbon sequestration, and emission reduction after straw return for three major grain crops in China: a meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 340: 117965.
- [44] Wang Y, Wu P, Mei F, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112391.
- [45] Wang J H, Wang X J, Xu M G, et al. Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 102(3): 371–381.
- [46] 张志毅, 范先鹏, 夏贤格, 等. 长三角地区稻麦轮作土壤养分对秸秆还田响应—Meta分析[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 401–406.
- [47] 李梦月, 胡田田, 崔晓路, 等. 基于Meta分析的关中平原冬小麦—夏玉米施氮/磷增产效应研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 300–311.
- [48] Fenoglio M S, Rossetti M R, Videla M. Negative effects of urbanization on terrestrial arthropod communities: a meta-analysis[J]. Global Ecology and Biogeography, 2020, 29(8): 1412–1429.
- [49] Rosenberg M S. The file-drawer problem revisited: a general weighted method for calculating fail-safe numbers in meta-analysis[J]. Evolution, 2005, 59(2): 464–468.
- [50] 李永平, 田艳, 史向远, 等. 施用畜禽粪肥对土壤呼吸和玉米产量的影响及其增效分析[J]. 华北农学报, 2017, 32(1): 193–200.
- [51] 张英, 武淑霞, 雷秋良, 等. 不同类型粪肥还田对土壤酶活性及微生物群落的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1175–1184.
- [52] Xia L L, Lam S K, Yan X Y, et al. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance? [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(13): 7450–7457.
- [53] 魏丹, 匡恩俊, 迟凤琴, 等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. 黑龙江农业科学, 2016(1): 158–161.
- [54] 裴浩, 苗宇, 侯瑞星. 全球黑土区有机物料还田对土壤有机碳固存影响的Meta分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 79–88.
- [55] 易镇邪, 吴小京, 张小平, 等. 施氮量对春玉米产量形成与氮肥利用率的影响[J]. 作物研究, 2010, 24(1): 22–24.
- [56] 高文龙, 崔浩, 冯木彩, 等. 不同磷素用量对玉米氮磷钾养分分配及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(12): 75–80.
- [57] 张业猛, 王君腾, 马斌, 等. 不同施肥水平和种植密度对青贮玉米农艺性状、产量及营养品质的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2023(21): 90–96.
- [58] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 东北地区黑土、草甸土长期施钾对玉米产量及耕层土钾素形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007(5): 850–855.
- [59] 姚俊红, 武俊男, 王呈玉, 等. 长期不同施氮量下黑土团

- 聚体稳定性及有机碳含量的变化[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43 (1): 102-110.
- [60] 崔永增, 姚海坡, 李谦, 等. 有机肥部分替代氮肥对优质麦生长、品质和氮效率的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38 (3): 158-166.
- [61] 孙志朋, 郭玉冰, 刘建玲, 等. 长期有机肥磷肥配施对潮褐土有机质固存效应的影响[J]. 河北农业大学学报, 2022, 45 (2): 67-75.
- [62] 张婷婷, 段玉, 梁俊梅, 等. 长期施肥对农牧交错区农田肥力因子及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29 (9): 1643-1653.
- [63] Ren K Y, Sun Y, Zou H Q, et al. Effect of replacing synthetic nitrogen fertilizer with animal manure on grain yield and nitrogen use efficiency in China: a meta-analysis [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1153235.
- [64] 曹永强, 李玲慧, 路洁, 等. 气候变化对辽宁省玉米产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2020 (11): 132-137.
- [65] 刘栩辰, 敬峰, 娄家熙, 等. 东北地区春玉米需水量与缺水量时空分布特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31 (10): 1626-1634.
- [66] 何文寿, 李生秀, 李辉桃. 六种作物不同生育期吸收铵、硝态氮的特性[J]. 作物学报, 1999, 25 (2): 221-226.
- [67] 余砾, 高明, 慈恩, 等. 不同耕作方式下土壤氮素矿化和硝化特征研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19 (3): 733-738.
- [68] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [69] 李欣伦, 屈晓泽, 李伟彤, 等. 有机肥与化肥配施对黑土理化性质及玉米产量的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2017 (4): 45-48.
- [70] 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.
- [71] Ren F L, Zhang X B, Liu J, et al. A synthetic analysis of livestock manure substitution effects on organic carbon changes in China's arable topsoil [J]. *Catena*, 2018, 171: 1-10.

Meta-analysis of maize yield and topsoil organic carbon response to manure application in Northeast China

ZHAO Zhe^{1, 2, 3}, SUN Shi-jun^{1*}, YANG Ya-li^{2, 3*}, XIE Hong-tu^{2, 3}, ZHANG Xu-dong^{2, 3} (1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang Liaoning 110866; 2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016; 3. Key Lab of Conservation Tillage and Ecological Agriculture, Liaoning Province, Shenyang Liaoning 110016)

Abstract: To further apply manure properly and ensure the quality of the Mollisol in Northeast China as well as national food security, this research conducted a meta-analysis to quantitatively investigate the effects of manure application on the soil organic carbon (SOC) content of the plow layer (0-20 cm) and maize yield in Northeast China. The impacts of different management measures, climatic conditions, and the initial physicochemical properties of the soil on the effect of manure on improving SOC and maize yield were revealed. Compared with no fertilization, the application of the SOC content was significantly increased by 30.4%-42.7% and maize yield was significantly increased by 41.9%-50.5% when the amount of chemical fertilizer remained unchanged and additional manure was added. The application of manure for 10-20 years significantly increased the SOC content by 43.7%, and application of manure for ≥ 20 years significantly increased maize yield by 90.6%. Compared with chemical fertilization alone, the combined application of cattle manure and chemical fertilizers significantly increased the SOC content by 61.2%; replacing 50%-80% of chemical fertilizers with manure (under the condition of unchanged total nutrient application) significantly increased the SOC content by 57.7%. The change of total nutrient application of manure with chemical fertilizer significantly affected maize yield, compared with no fertilization, the yield of maize was significantly increased when the total application amount of potassium (K_2O) was ≤ 300 kg/hm², total application amount of phosphorus (P_2O_5) was ≤ 200 kg/hm², and total application amount of nitrogen (N) was 100-300 or ≥ 400 kg/hm². The change in climatic conditions also affected the effect of manure, with an annual average temperature of 2-5°C and annual average rainfall of 400-500 mm, the application of manure had a better effect on increasing the SOC content; with an annual average temperature of 5-8°C and annual average rainfall of 500-600 mm, the application of manure had a better effect on increasing maize yield. In addition, when the initial nutrient content of the soil was low, that was beneficial to the increase of SOC; When the initial SOC ≤ 15 g/kg, total nitrogen ≤ 0.5 g/kg, available nitrogen ≤ 100 mg/kg, available phosphorus ≤ 20 mg/kg, and available potassium 100-200 mg/kg, the application of manure significantly increased the SOC content by 25.9%-84.4%. In conclusion, the application of manure was important to improve the SOC content and maize yield in Northeast China. Manure application measures need to be considered in combination with different meteorological conditions and soil properties, the long-term application of manure with chemical fertilizers in farmland with low initial soil nutrients is a feasible way to increase SOC and yield.

Key words: manure application; soil organic carbon; meta-analysis; maize cultivation; Three Northeast Provinces of China