DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2025.05.007 CSTR: 32214.14.tr202503090084
张建文, 杜健, 孙建好, 等. 长期施肥对灌漠土有机碳含量及碳储量的影响. 土壤, 2025, 57(5): 1004–1012.

长期施肥对灌漠土有机碳含量及碳储量的影响①

张建文[1], 杜 健[1], 孙建好[2], 吴海燕[1], 孙宁科[1], 索东让[1], 赵小宁[3], 许 依[4], 夏龙龙[5], 马煜卿[5], 张 盛[5*]

(1 张掖市农业科学研究院, 甘肃张掖 734000; 2 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070; 3 陕西理工大学生物科学与工程学院, 陕西汉中 723000; 4 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; 5 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135)

摘 要: 为阐明长期施肥对灌漠土剖面有机碳时空演变规律, 依托始建于 1982 年的甘肃张掖灌漠土长期定位试验, 系统分析了 2003 年(累计 22 年)与 2022 年(累计 41 年)3 种典型种植制度(小麦–小麦–玉米轮作、小麦∥玉米间作、玉米连作)下, 8 种施肥处理(CK: 不施肥; N: 单施氮肥; NP: 氮磷肥; NPK: 氮磷钾肥; M: 单施有机肥; MN: 有机肥+氮肥; MNP: 有机肥+氮磷肥; MNPK: 有机肥+氮磷钾肥)对 0 ~ 200 cm 剖面土壤有机碳含量及储量的调控作用。结果表明: ①施肥模式显著影响土壤有机碳储量, 其含量顺序为 MNP、MNPK > M、MN > N、CK > NP、NPK。其中, CK 与 N 处理土壤有机碳含量持续下降, 而 M 处理土壤有机碳提升显著, MNPK 配施增幅最高。②土壤有机碳垂直分布呈显著分层特征, 耕层(0 ~ 20 cm)土壤有机碳含量与储量最高(2003 年分别为 9.67 ~ 16.15 g/kg 和 28.7 ~ 45.5 t/hm^2; 2022 年分别为 10.47 ~ 15.70 g/kg 和 29.5 ~ 44.3 t/hm^2), 随土层加深呈递减趋势。③种植制度调控碳利用效率, 小麦–玉米轮作体系下, 有机肥碳固存率达 38.6%, 单位粮食产量有机碳消耗量为 132.2 kg/t; 而小麦∥玉米间作、玉米连作下碳固存率降至 24.7%, 碳消耗量增至 156.6 kg/t, 表明作物配置影响碳投入–封存平衡。综上, 有机无机配施可协同提升耕层碳库容量, 是干旱区灌漠土碳汇功能优化与粮食产能协同提升的核心策略; 此外, 建议在灌漠土区实行小麦–玉米轮作制度提升土壤碳汇功能。研究结果为区域农业碳中和路径提供了关键科学依据。

关键词: 长期施肥; 灌漠土; 有机碳; 有机碳储量; 土壤剖面
中图分类号: S158 **文献标志码:** A

Effects of Long-term Fertilization on Organic Carbon Content and Carbon Storage in Irrigated Desert Soil

ZHANG Jianwen[1], DU Jian[1], SUN Jianhao[2], WU Haiyan[1], SUN Ningke[1], SUO Dongrang[1], ZHAO Xiaoning[3], XU Yi[4], XIA Longlong[5], MA Yuqing[5], ZHANG Sheng[5*]

(1 *Zhangye Academy of Agricultural Sciences*, *Zhangye*, *Gansu* 734000, *China*; 2 *Institute of Soil*, *Fertilizer and Water-saving Agriculture*, *Gansu Academy of Agricultural Sciences*, *Lanzhou* 730070, *China*; 3 *Shaanxi Province Key Laboratory of Bio-resources*, *School of Biological Science & Engineering*, *Shaanxi University of Technology*, *Hanzhong*, *Shaanxi* 723000, *China*; 4 *College of Agronomy and Biotechnology*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100193, *China*; 5 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture*, *Institute of Soil Science*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 211135, *China*)

Abstract: To elucidate the spatiotemporal evolution of soil organic carbon (SOC) in irrigation desert soil under long-term fertilization, this study utilized a long-term field experiment established in 1982 in Zhangye, Gansu Province. The regulatory effects of eight fertilization treatments (CK: no fertilization; N: nitrogen; NP: nitrogen + phosphorus; NPK: nitrogen + phosphorus + potassium; M: manure; MN: manure + nitrogen; MNP: manure + nitrogen + phosphorus; MNPK: manure + nitrogen + phosphorus + potassium) on SOC content and storage across the 0–200 cm soil profiles under three cropping systems (wheat-wheat-maize rotation, wheat/maize intercropping, and maize monoculture) were systematically analyzed during two sampling periods (2003: after 22 years; 2022: after 41 years). The results showed that: 1) Fertilization regimes significantly influenced SOC accumulation efficiency, with SOC content ranked as MNP, MNPK>M, MN>N, CK>NP, NPK. SOC in CK and N

①基金项目: 张掖市市级科技计划项目(ZY2022KY04)和中央引导地方科技发展资金项目(24ZYQA053)资助。
* 通信作者(szhang@issas.ac.cn)
作者简介: 张建文(1967—), 男, 甘肃文县人, 本科, 研究员, 主要从事土壤肥料研究。E-mail: 694180381@qq.com

declined continuously, while M markedly enhanced SOC, with MNPK showing the greatest increase. 2) SOC exhibited distinct vertical stratification, with topsoil (0–20 cm) showing the highest SOC content and storage (2003: 9.67–16.15 g/kg, 28.7–45.5 t/hm^2; 2022: 10.47–15.70 g/kg, 29.5–44.3 t/hm^2), decreasing exponentially with depth. 3)Cropping systems modulated carbon use efficiency. Organic manure application achieved a carbon sequestration rate of 38.6% with 132.2 kg organic carbon consumed per ton of grain yield under wheat rotation, whereas the carbon sequestration rate decreased to 24.7% and the carbon consumption increased to 156.6 kg/t under maize intercropping/monoculture, highlighting the role of crop configuration in balancing carbon input and sequestration. In conclusion, organic-inorganic combined fertilization synergistically enhances topsoil carbon capacity and subsoil carbon stability, serving as a core strategy for optimizing carbon sequestration and grain productivity in arid irrigation-silted soils. In addition, it is recommended to implement a wheat maize rotation system in irrigated desert soil areas to enhance soil carbon sequestration function. These findings provide critical scientific insights for designing regional agricultural carbon neutrality pathways.

Key words: Long term fertilization; Irrigated desert soil; Organic carbon; Organic carbon storage; Soil profile

土壤碳库作为陆地生态系统最大的有机碳储库，在全球碳循环中占据核心地位[1]。土壤有机碳库的动态变化会显著影响大气中 CO_2 浓度，其储量每增加 1‰，相当于抵消全球年化石燃料排放量的 1/3[2]。而当前全球人为碳排放的 30% 通过土壤碳汇作用以土壤有机碳形式被固定。作为土壤肥力的核心指标，土壤有机碳含量直接决定土壤生产力和生态服务功能，因此，提升土壤有机碳固存能力并减少其损失已成为应对全球碳预算失衡、减缓气候变化的关键策略[3]。尽管已有大量研究探讨施肥措施对土壤有机碳储存的作用，但在长期定位的灌漠土系统中，不同施肥模式的碳封存效应及其与气候变化、农业管理措施的耦合机制仍缺乏系统认知，这极大制约了干旱区农田碳汇功能的精准调控。

农田管理措施中，施肥是调控土壤碳库动态的关键因子[4]。长期定位施肥试验因其时间序列完整、气候条件可重复等特征，能够系统揭示土壤肥力演变规律，并为施肥制度的生态效应评估提供科学依据[5-8]。研究表明，不同施肥模式对土壤有机碳消长的影响存在显著差异，长期单施有机肥可通过直接碳输入(如秸秆、粪肥)与增强有机–矿物复合体的物理化学保护机制，显著提升土壤有机碳含量，而单纯施用化肥则需结合有机替代策略(如 30% 有机氮+70% 化肥氮配施)，通过抑制激发效应与提升外源碳输入效率实现土壤有机碳积累[9-11]。此外，土壤类型与区域环境特征对施肥效应具有显著调控作用[12-18]：在黄土高原塿土区，长期有机肥施用可促进大团聚体形成及颗粒有机碳累积，配合秸秆还田能进一步增加大团聚体占比；黄壤与黑土区长期单施化肥则导致土壤有机碳及其活性组分(如可溶性有机碳)显著下降，甚至与无肥处理持平；而红壤与潮土区的部分研究显示，单施化肥或不施肥可能通过减少碳矿化损失或激发本地碳库稳定性，使土壤有机碳呈现微弱上升趋势。因此，有机–无机肥配施或化肥–秸秆协同模式不仅能提升土壤有机质总量，还可优化活性/稳定性碳组分比例，改善土壤结构并维持土壤有机碳动态平衡，这对制定区域差异化固碳策略具有重要指导意义。

灌漠土作为我国西北干旱区特有土壤类型(占全国耕地面积 0.66%)，承载着甘肃 70% 以上的粮食产能，其碳库稳定性直接关系区域粮食安全与生态屏障功能。鉴于土壤有机碳库组分的高度异质性和多因子耦合作用，其短期内的微弱波动往往难以通过常规监测手段捕捉。因此，基于长期定位试验揭示土壤有机碳动态演变规律，对评估灌漠土农田的土壤健康与固碳潜力具有重要科学价值。在全球碳中和战略背景下，本研究依托我国西北典型地区——张掖市农业科学研究院灌漠土长期定位试验(始建于 1982 年)，选取 3 种典型种植制度(小麦–小麦–玉米轮作、小麦∥玉米间作、玉米连作)，对比分析 8 种典型施肥处理下不同土层土壤有机碳含量及储量的时空变异规律，重点阐明：①长期施肥对深层土壤有机碳库(>100 cm)的激活效应；②有机无机协同调控对土壤碳饱和缺陷的补偿机制；③施肥模式与碳库稳定性间的耦合关系。研究成果可为干旱区农田碳汇精准管理及“双碳”目标实现提供关键参数与决策依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验设置在甘肃省张掖市甘州区新墩镇(38.6°N，100.3°E)，位于河西走廊中部平川灌区，海拔 1 530 m，年均气温 7 ℃ 左右，10 ℃ 活动积温 1 837 ~ 2 870 ℃，无霜期 165 d，年均降水量 127 mm，

主要集中在 7—10 月，年均蒸发量 2 345 mm。供试土壤为典型灌漠土，质地中壤，属于灌淤旱耕人为土。试验前(1982 年)0 ~ 20 cm 耕层土壤基本理化性状：有机质 20.80 g/kg，全氮 0.76 g/kg，全磷 0.82 g/kg，碱解氮 28.10 mg/kg，有效磷 21.70 mg/kg，速效钾 99.10 mg/kg。

1.2 试验设计

采用裂区设计，主处理为不施有机肥和施用有机肥，副处理为氮、磷、钾化肥配合，共计设 8 个施肥处理：①不施肥(CK)；②单施氮肥(N)；③氮磷肥(NP)；④氮磷钾肥(NPK)；⑤有机肥(M)；⑥有机肥＋氮肥(MN)；⑦有机肥＋氮磷肥(MNP)；⑧有机肥＋氮磷钾肥(MNPK)。小区面积 33.3 m^2，重复 3 次，在田间布设处理时，进行区组控制，随机排列，区间筑有永久性地埂和灌水渠道。

1.3 水肥管理

1.3.1 施肥　试验中氮肥用尿素，施 N 量小麦为 120 ~ 180 kg/hm^2，玉米为 240 ~ 360 kg/hm^2；磷肥和钾肥按 N∶P_2O_5∶K_2O=1∶0.5∶0.5 施用，磷肥用重过磷酸钙或磷酸二铵，钾肥用硫酸钾；有机肥为腐熟农家肥，施用量 7.5 ~ 15 t/hm^2，有机碳平均含量为 30.52 g/kg，全氮平均 18.4 g/kg，全磷 3.33 g/kg，全钾 11.34 g/kg。氮肥总量的 30% 基施；40% 用于玉米拔节期追施，30% 于玉米大喇叭口期进行追肥，有机肥、磷肥、钾肥全部基施。

1.3.2 灌溉　采用大水漫灌的方式，小麦生育期灌水 3 ~ 4 次，玉米生育期灌水 5 ~ 6 次。

1.4 田间管理

种植制度、灌溉制度、施肥制度以及土壤管理与当地农业生产保持一致。试验田间种植制度：1982—2006 年为小麦–小麦–玉米轮作制，一年一作；2007—2015 年为小麦∥玉米带田，一年两作；2016—2022 年为玉米单作。供试作物品种与当地大田生产主栽品种一致，栽培措施与大田生产技术发展同步。小麦于每年的 3 月中旬播种，播量为 300 kg/hm^2；玉米于每年的 4 月中旬或下旬播种，密度为 75 000 株/hm^2。

1.5 样品采集与测定方法

土壤样品于收获期按“S”形多点采样，分别取 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100、100 ~ 150、150 ~ 200 cm 土壤样品，混合均匀，风干过筛后进行土壤理化性质的测定。土壤有机碳采用浓硫酸重铬酸钾外加热–硫酸亚铁滴定法测定；土壤容重采用环刀法测定，具体方法参考文献[19]。

有机碳储量 S(t/hm^2)=10×D×BC×OC

式中：D 为土层厚度(m)；BC 为土壤容重(g/cm^3)；OC 为不同土层的土壤有机碳含量(g/kg)。

有机碳固存率 $P(\%)=(S_M-S_0)/O_i\times100$

式中：S_M 为增施有机肥处理的有机碳储量(t/hm^2)；S_0 为不施有机肥处理的有机碳储量(t/hm^2)；O_i 为有机碳总投入量(t/hm^2)。

生产吨粮消耗有机碳指数(kg/t)=(投入总碳量–固存碳量)/施有机肥作物总产量[20]

有机肥增产量消耗碳指数(kg/t)=(投入总碳量–固存碳量)/(增施有机肥总产量–不施有机肥总产量)[21]

1.6 数据统计分析

采用 Excel 2016 对数据进行处理，运用 SPSS 27.0 统计软件进行方差分析(LSD 法)，处理之间的显著性分析均为 P<0.05 水平，应用 Origin2024 软件作图。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥方式对耕层土壤有机碳含量的影响

表 1 为长期定位试验不同阶段作物平均产量，可以看出各施肥处理第二阶段的产量水平比第一阶段提高了 0.6% ~ 82.4 %，产量的增加对土壤有机碳含量有很大影响。不施有机肥的化肥高产组合(NP，NPK)处理 2003 年耕层有机碳比初始年(12.05 g/kg)平均下降了 15.4%；2022 年比初始年平均下降了 11.04%。两个年份的下降速率虽然稍有差异，但连续 40 年年均递减 0.28%。说明长期单施化肥虽然对作物产量有较大贡献，但还是消耗土壤有机碳的过程。有机肥与化肥配合施用的最佳措施(MNP，MNPK)处理，土壤有机碳 2003 年比初始年平均增加 31.16%，2022 年比初始年平均增加了 29.80%，增幅持平略有下降(下降 1.36%)。说明增施有机肥持续输入的有机碳未提高土壤有机碳含量，只能平衡高产对土壤有机碳的消耗。

不同施肥处理间耕层(0 ~ 20 cm)土壤有机碳含量存在显著差异。从表 2 可以看出，CK、N、NP 和 NPK 处理土壤有机碳不断减少。与试验前(12.05 g/kg)相比，试验第 22 年(2003 年)CK 和 N 处理土壤有机碳是稳中有降，差异不明显，变幅为 –2.8% 和 0.9%；NP 和 NPK 处理降幅较大，分别为 11.0% 和 15.7%。增施有机肥处理土壤有机碳呈提高的趋势，不同施肥措施的增幅不同，MNP 和 MNPK 处理土壤有机碳含量增加最显著，比试验前提高了 28.3% ~ 34.2%；M 和 MN 处理增幅相近，比试验前提高 5.6% ~ 6.0%。

试验第 41 年(2022 年)，与 1982 年相比，CK 处理耕层土壤有机碳含量降低 10.0%，年均递减 0.24%，比 2003 年降低了 7.4%；N 处理比 1982 年降低 11.3%，年均递减 0.67%，比 2003 年降低 12.8%；NP 和 NPK 处理，土壤有机碳也是减少的过程，较 1982 年降低 8.9% 和 13.1%。结果表明，长期不施肥和化肥单施土壤有机碳库均为碳“源”状态，这和 Zhang 等[12]研究结论一致。说明在灌漠土上单施化肥虽提高作物产量，但也消耗一部分土壤有机碳。化肥施用时间延长，土壤有机碳下降速率下降。

表 1　长期定位试验不同阶段作物产量(kg/hm^2)

Table 1　Crop yields at different stages of long-term positioning experiment

年份	种植制度	CK	N	NP	NPK	M	MN	MNP	MNPK
1982—2003	小麦–小麦–玉米	3 316	4 396	6 881	7 462	5 501	7 344	7 997	8 028
2004—2022	小麦–小麦–玉米	2 052	2 102	8 015	8 428	5 993	8 422	9 469	9 993
	小麦//玉米带田	3 332	4 330	13 360	14 704	7 847	13 162	15 151	15 979
	高产玉米	3 981	7 953	13 599	13 490	8 000	13 095	14 530	14 004
	平均产量	3 335	5 166	12 549	13 253	7 589	12 350	13 997	14 323
2004—2022 年比 1982—2003 年增幅(%)		0.6	17.5	82.4	77.6	37.9	68.2	75.0	78.4

表 2　不同施肥处理剖面土壤有机碳含量(g/kg)

Table 2　Soil organic carbon contents in profiles under long-term different fertilization treatments

年份	处理	土层深度(cm)						
		0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	100 ~ 150	150 ~ 200
2003	CK	11.71 def	9.45 ab	9.24 a	9.94 a	7.49 ab	5.93 a	5.28 abcd
	N	12.16 de	8.88 abc	9.04 ab	8.92 abc	6.96 bc	6.14 a	4.83 bcd
	NP	10.73 ef	7.57 cd	7.49 bc	6.67 fg	5.56 de	4.79 ab	4.38 d
	NPK	9.67 f	6.89 d	6.93 c	6.32 g	5.10 e	5.26 ab	5.19 abcd
	M	12.73 cde	8.55 abcd	7.67 abc	7.91 cdef	8.00 a	5.59 ab	5.71 abcd
	MN	12.77 cde	10.02 a	7.82 abc	8.43 bcde	7.41 ab	5.97 a	5.48 abcd
	MNP	15.46 ab	9.78 ab	8.80 ab	9.33 ab	8.23 a	5.85 a	4.95 abcd
	MNPK	16.15 a	9.13 abc	8.39 abc	8.68 abcd	7.90 ab	6.38 a	4.91 abcd
2022	CK	10.84 ef	8.08 bcd	8.11 abc	7.22 efg	6.00 de	5.94 a	5.25 abcd
	N	10.69 ef	8.15 bcd	7.83 abc	7.14 efg	6.24 cd	5.41 ab	4.56 cd
	NP	10.98 ef	8.66 abc	8.04 abc	7.26 efg	5.80 de	5.29 ab	5.05 abcd
	NPK	10.47 ef	8.22 bcd	8.16 abc	7.12 efg	6.28 cd	4.04 b	5.13 abcd
	M	14.73 abc	9.69 ab	8.32 abc	7.38 defg	7.79 ab	6.44 a	6.58 ab
	MN	13.55 bcd	10.35 a	8.65 ab	7.67 cdefg	8.08 a	5.53 ab	5.74 abcd
	MNP	15.58 ab	9.25 abc	8.61 ab	8.04 bcdef	7.59 ab	6.18 a	6.70 a
	MNPK	15.70 ab	10.18 a	8.85 ab	8.00 bcdef	7.42 ab	5.90 a	6.38 abc

注：同列数据小写字母不同表示处理间差异显著(P<0.05)。

增施有机肥是提高土壤有机碳含量的有效途径，第 22 年(2003 年)耕层土壤有机碳含量大小顺序为 MNPK、MNP>MN、M>N、CK>NP、NPK；第 41 年(2022 年)为 MNPK、MNP>M、MN>NP、CK、N>NPK。与不施肥比较，两年测定结果 MNPK、MNP 处理土壤有机碳提高 32.0% ~ 44.7%；MN、M 处理提高 8.6% ~ 29.7%，且差异显著；NPK、NP 处理降低 1.2% ~ 13.2%；N 处理变化幅度为 –1.5% ~ 3.8%。其中，增施有机肥处理大于施用化肥处理。从各施肥处理对土壤有机碳的影响分析，在西北灌漠土上，长期不施肥作物生物学产量低，根茬残留少，土壤有机碳减少是必然。从初始值 12.05 g/kg 下降到第 41 年的 10.84 g/kg，下降了 10.0%；化肥组合长期施用也是减少的趋势，41 年减少了 8.9% ~ 13.1%，化肥处理差异不显著。有机肥与氮磷钾配施提高了土壤有机碳含量，连续 22 年增幅达 28.3% ~ 34.2%，连续 41

年后增幅稳定在 25.0% ~ 30.3%，且与其他处理差异显著，比化肥组合提高了 37.1% ~ 50.0%，是培肥土壤的最佳组合。

2.2 长期不同施肥方式对土壤剖面有机碳含量的影响

从表2列出的0 ~ 200 cm不同土层土壤有机碳含量分布状况来看，由于定位试验时间长，土壤有机碳含量形成了因施肥措施不同而不同的差异。这个差异在耕层土壤表现得很明显，而且也向下深入到 20 ~ 100 cm 土体，呈现出 MNPK、MNP>MN、M>N、CK>NP、NPK 的顺序。试验第 22 年(2003 年)有机肥区耕层土壤有机碳含量为 12.73 ~ 16.15 g/kg，化肥区为 9.67 ~ 12.16 g/kg；同一处理的耕层有机碳含量最高，随着土层加深有机碳含量均大幅度下降，耕层与其他土层有机碳含量差异达极显著水平。20 ~ 40 cm 犁底层有机肥区有机碳含量为 8.55 ~ 10.02 g/kg，化肥区为 6.89 ~ 8.88 g/kg，比耕层分别下降了 21.5% ~ 43.5% 和 19.3% ~ 32.2%；40 ~ 80 cm 心土层有机肥区有机碳含量为 7.67 ~ 9.33 g/kg，化肥区为 6.32 ~ 9.04 g/kg，均低于犁底层，但差异不显著；80 ~ 100 cm 土层有机碳含量均小于心土层，差异不均衡；100 ~ 200 cm 底土层因受施肥措施影响很小，有机碳含量最低，为 4.38 ~ 6.38 g/kg，各处理间、层次间无明显差别，但比耕层减少了 48.3% ~ 69.6%，且与 40 ~ 100 cm 各土层也有明显差异。试验第 41 年(2022 年)土壤剖面有机碳分布与第 22 年基本一致，由于这一时段种植带状间作和高产玉米作物，产量是前一时段的近 2 倍，土壤有机碳却无提高效应，与第 22 年保持相对持平，但缩小了不同处理间的差异。有机肥区、化肥区耕层有机碳含量分别为 13.55 ~ 15.70 g/kg 和 10.47 ~ 10.98 g/kg，有机肥处理大于化肥处理；20 ~ 40 cm 犁底层，有机肥区和化肥区比耕层分别下降了 20.9% ~ 38.6% 和 21.1% ~ 25.4%，达到显著水平；40 ~ 100 cm 土体各层次差别不显著，均小于犁底层；100 ~ 200 cm 底土层有机碳含量最低，比耕层下降了 49.4% ~ 62.4%，层次间、处理间无明显差别。土壤有机碳剖面分布状况说明，增施有机肥处理土壤有机碳含量大于化肥处理；有机肥区 MNPK、MNP 处理有机碳含量大于 MN、M 处理；化肥区内 N 处理有机碳含量大于 NPK、NP 处理。

2.3 长期不同施肥方式下土壤剖面有机碳储量的演变特征

由图 1 可见，土壤有机碳储量与土壤有机碳含量剖面分布趋势基本一致，随土层加深而下降，即表现为耕层>犁底层≥心土层>底土层。长期试验第 22 年(2003 年)耕层有机碳储量最高，为 28.7 ~ 45.5 t/hm^2；20 ~ 40 cm 犁底层下降为 20.4 ~ 29.7 t/hm^2，比耕层减少了 29.0% ~ 40.7%，差异显著；40 ~ 100 cm 土层为 14.9 ~ 26.8 t/hm^2，比耕层减少了 48.0% ~ 49.2%，但与犁底层差异不显著；底土层储量最低，为 13.0 ~ 18.9 t/hm^2，比耕层减少 57.1% ~ 58.4%，显著低于心土层。试验第 41 年(2022 年)结果相似，耕层有机碳储量最高，为 29.5 ~ 44.3 t/hm^2；犁底层下降到 24.2 ~ 30.6 t/hm^2，比耕层减少了 20.0% ~ 22.0%，且差异显著；40 ~ 100 cm 心土层比耕层减少了 33.2% ~ 51.0%；底土层比耕层减少了 48. 0% ~ 57.0%。

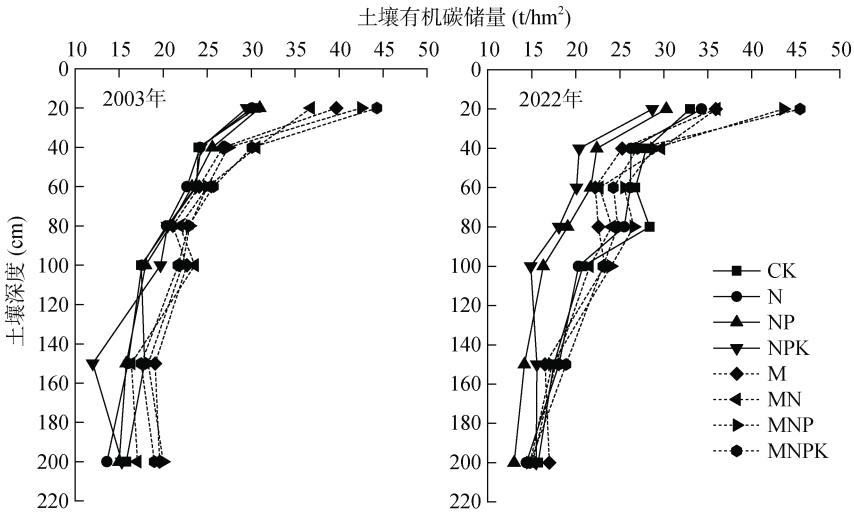

图 1 长期不同施肥方式下土壤有机碳储量

Fig.1 Soil organic carbon storages under long-term different fertilization methods

施肥措施对土壤有机碳储量影响很大，尤其是耕层的有机碳储量变化影响很明显，两个采样阶段结果都表现为增施有机肥提高了有机碳储量。MNPK、MNP、MN、M 处理比不施有机肥对应的化肥处理分别提高 8.8%～29.7%、5.0%～22. 3%、37.1%～43.9%和 50.2%～58.5%。此外，MNPK 处理有机碳储量比缺失 P、K 处理的 MN、M 两个有机肥处理提高 7.1% ～ 20.4% 和 21.4% ～ 26.4%；不施肥处理(CK)和单施氮肥处理(N)比氮磷钾化肥搭配组合处理(NP，NPK)有机碳储量提高 13.2～15.0%.

2.4　长期不同管理措施对土壤固碳率的影响

与试验前相比，化肥处理耕层土壤有机碳储量 1982—2003 年减少了 3.7～5.3 t/hm^2，年均递减 168.3～240.9 kg/hm^2；1982—2022 年阶段减少 3.0～4.5 t/hm^2，平均递减 93.2 ～ 109.8 kg/hm^2。增施有机肥提高了耕层土壤有机碳储量，1982—2003 年提高了 9.6 ～ 11.5 t/hm^2，年均递增 436.4～520.2 kg/hm^2；1982—2022 年增加了 8.5 ～ 10.3 t/hm^2，年均递增 207.3 ～ 256.1 t/hm^2 (图 2)。1982—2003 年有机肥输入的有机碳为 39.0 t/hm^2，有机碳固存率为 34.1% ～ 43.1%；2004—2022 年有机肥输入的有机碳增加至 53.31 t/hm^2，有机碳固存率为 21.6% ～ 27.8% (图 3)。2004—2022 年种植制度为小麦∥玉米间作和高产玉米连作，作物产量比 1982—2003 年时段提高了 66.7% ～ 76.3%(表 3)，2004—2022 年时段碳固存率减少的结果证明提高了产量就会消耗土壤有机碳。由表 3 可见，河西走廊灌漠土上，小麦-小麦-玉米轮作种植制度下，生产 1 吨粮食消耗有机肥碳平均为 121.9 ～ 143.2 kg，增产 1 吨粮食平均消耗 1 220 kg；小麦∥玉米带状间作和高产玉米连作种植制度下，生产 1 吨粮食消耗有机肥碳 141.3 ～ 161.8 kg，增产 1 吨粮食平均消耗 1 742 kg。

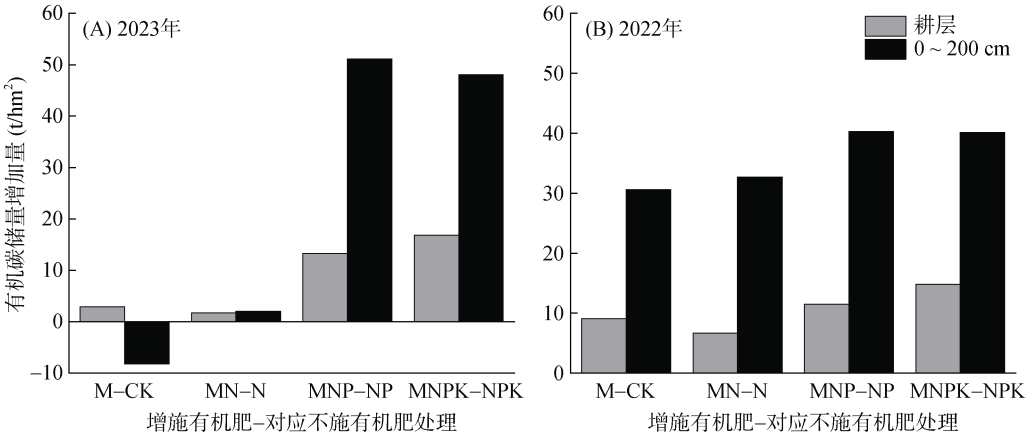

图 2　增施有机肥处理较不施有机肥处理的有机碳储量增加量

Fig.2　Increase in organic carbon storage by increasing organic fertilizer application compared to no organic fertilizer application

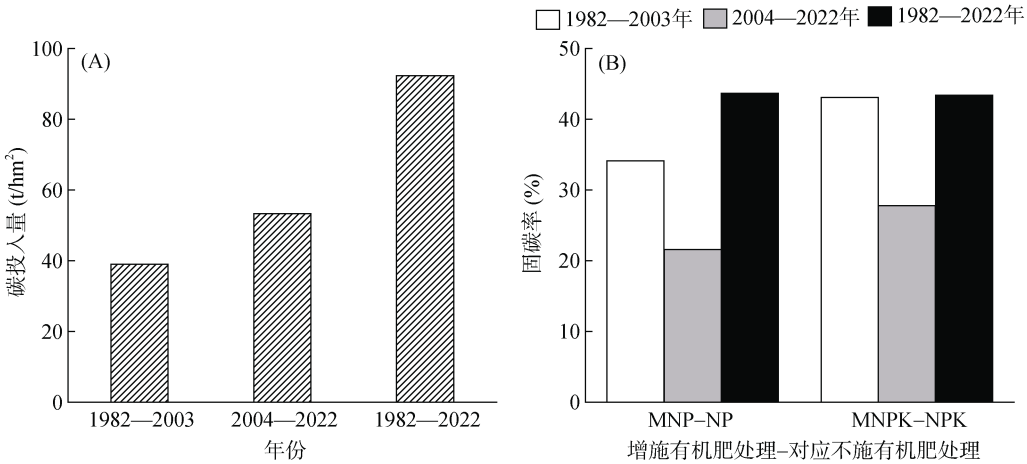

图 3　不同阶段有机肥输入的有机碳总量(A)和不同阶段增施有机肥处理较不施有机肥的有机碳固存率(B)

Fig.3　Total organic carbon input of organic fertilizers at different stages (A), and organic carbon sequestration rates of organic fertilizer treatment at different stages compared to no organic fertilizer application (B)

表 3 不同施肥处理碳消耗指数
Table 3 Carbon consumption indexes under different fertilization treatments

年份	指标	NP	NPK	MNP	MNPK
1982—2003	总产量(t)	154.77	166.32	179.52	182.16
	生产吨粮消耗有机碳指数(kg/t)	–	–	143.20	121.90
	有机肥增产消耗碳指数(kg/t)	–	–	1 038.00	1 410.00
2004—2022	总产量(t)	235.65	249.24	258.46	272.55
	生产吨粮消耗有机碳指数(kg/t)	–	–	161.80	141.30
	有机肥增产消耗碳指数(kg/t)	–	–	1 832.00	1 652.00

3 讨论

3.1 长期有机无机配施提高土壤有机碳含量及碳储量

本研究表明,长期施肥模式显著影响灌漠土有机碳库动态,土壤有机碳含量及储量表现为有机肥与化肥配施大于化肥单施和不施肥处理。这一结果与灌漠土碳库调控机制密切相关[22-24]。单施氮肥处理及无肥对照因缺乏外源碳输入，导致土壤有机碳持续下降，这与前人研究发现的单施化肥加速有机碳矿化(矿化速率提升 15%～22%)[25]、同时通过诱导土壤酸化(pH 下降 0.3 ～ 0.8 单位)促进无机碳损失(12% ～ 18%)[26]的结论相吻合。而有机肥配施体系通过多重机制实现碳库协同增效：首先，外源有机碳输入直接提升有机碳储量(年均增幅 0.8～1.5 g/kg)，有机肥与氮磷钾配施处理土壤有机碳增幅显著高于其他处理[7]；其次，有机质功能基团通过质子络合作用缓解酸化(pH 降幅≤0.5 单位)[27]，抑制原生碳酸盐溶解，使得无机碳损失量控制在 5%～8%[26]。武威市白云试验站 18 年定位试验进一步证实[28]，有机无机配施通过次生碳酸盐形成和微生物代谢调控，在 0～20 cm 耕层实现土壤有机碳显著提升(增幅>30%)且总碳储量净增长。本研究结果还显示，耕层(0～20 cm)土壤有机碳含量最高，土壤有机碳含量与储量随土层加深呈递减趋势，但有机无机配施可缓解这一趋势。前人研究[17]也解释了这一结论,配施通过有机肥的高碳输入与化肥的速效养分协同作用,显著提高表层总有机碳和活性有机碳含量,另外有机肥的腐殖化作用与化肥促发的根系分泌物共同促进了碳的固定。长期配施通过有机碳的垂直迁移与微生物介导的碳转化，提升深层(20 ～ 50 cm)碳库活性。深层碳库的活化可能与配施促进的根系下扎及微生物代谢产物扩散有关[10]。然而，由于本研究中灌漠土黏粒含量低、保水能力差，深层碳的稳定性仍受限于团聚体保护不足,需进一步结合秸秆深翻或生物质炭添加进一步优化。

3.2 不同种植制度对有机碳固存率的影响

本研究揭示了西北灌漠土区不同种植制度对农田碳利用效率的显著调控效应。小麦-玉米轮作体系表现出更高的有机碳固存率(38.6%)与更低的单位产量碳消耗量(132.2 kg/t)，而小麦∥玉米间作与玉米连作体系的碳固存效率显著降低(24.7%)，碳消耗量增加至 156.6 kg/t。这一差异表明，作物配置通过调控碳输入与输出的动态平衡,深刻影响土壤碳库的稳定性。轮作模式下有机肥的高效固存可能得益于禾本科作物残留物与有机肥的协同作用[29]，其根系分泌物与微生物活动的耦合可能减缓碳矿化速率[30]。在小麦-玉米轮作系统中，小麦秸秆和根系残体的输入能减少土壤表层总有机碳的矿化量,这是由于小麦具有比玉米有机残体更低的土壤有机碳激发效应,降低了土壤基础有机碳的矿化水平[31]。相比之下，间作与连作体系中玉米主导的高生物量生产虽短期内提升产量，但玉米根系分泌物中易分解碳比例较高[32]，可能加速土壤有机碳的矿化损耗，导致碳投入-封存失衡。与黄土高原旱作区研究相比[33]，本研究中灌漠土区碳固存率对种植制度的敏感性更为显著,这可能与该区域土壤黏粒含量低(<20%)、物理保护能力较弱有关[34]。小麦-玉米轮作通过多样化作物残体输入与有机肥结合,可能促进微团聚体对有机碳的物理封存[35]，而连作玉米的单一残体输入则加剧了碳的氧化损失。尽管有机肥在轮作体系中表现出高效固碳能力,但其长期施用可能因碳氮比失衡而影响微生物代谢路径[36]，需结合秸秆深翻等保护性措施优化碳库管理。从区域农业可持续性视角，当前西北灌区普遍依赖玉米连作以维持高产,但本研究证实其碳消耗量显著高于轮作体系，可能导致土壤碳库持续衰退。因此，推广小麦-玉米轮作并结合有机肥与化肥配施，可在保障产量的同时提升碳利用效率,这与全球倡导的“4‰ 土壤增碳倡议”目标相契合[37]。未来需进一步量化不同作物配置下根际激发效应与微生物群落演替对碳周转的调控机制,为区域农田碳汇功能提

升提供理论支撑。

4 结论

在河西走廊灌漠土区干旱寒冷生态条件下，41年长期定位试验(1982—2022年)对0～200 cm土壤剖面有机碳动态的研究表明，不同施肥措施对土壤有机碳含量的提升效应呈显著差异，其排序为有机肥与氮磷钾配施>有机肥单施或与氮肥配施>氮肥单施和无肥处理>氮磷钾化肥组合；土壤有机碳主要集中在耕层，底土层有机碳含量较耕层显著减少 49.4%～69.6%；与小麦//玉米间作或玉米连作相比，小麦–小麦–玉米轮作制度下碳利用效率更高，表现为更高的碳固存率和更低的单位产量碳消耗。综上，有机无机配施可有效提升土壤碳库容量，建议在灌漠土区实行有机无机配施+小麦–小麦–玉米轮作模式。

参考文献：

[1] 徐均华, 黄国强, 菅攀峰, 等. 土壤有机碳研究进展及在农田生产中的应用[J]. 耕作与栽培, 2018, 38(2): 64–68, 23.

[2] Minasny B, Malone B P, McBratney A B, et al. Soil carbon 4 per mile[J]. Geoderma, 2017, 292: 59–86.

[3] Amelung W, Bossio D, de Vries W, et al. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy[J]. Nature Communications, 2020, 11: 5427.

[4] 张江周, 王光州, 李奕赞, 等. 农田土壤健康评价体系构建的若干思考[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 879–891.

[5] 任军, 郭金瑞, 边秀芝, 等. 土壤有机碳研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2009(6): 1–7, 27.

[6] 邵兴芳, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 326–335.

[7] 蒋如, 宁诗琪, 隋宗明, 等. 长期轮作施肥处理对植烟土壤有机碳组分和酶活性的影响[J]. 土壤, 2024, 56(3): 510–516.

[8] Zhang S, Xue L H, Liu J, et al. Biochar application reduced carbon footprint of maize production in the saline−alkali soils[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2024, 368: 109001.

[9] Zhang S, Zamanian K, Raza S, et al. A balance among irrigation and fertilization regimes to reduce greenhouse gases emissions from saline and alkaline soils[J]. Land Degradation & Development, 2024, 35(1): 168–182.

[10] Wu L, Wang J, Xu H, et al. Soil organic carbon priming co-regulated by labile carbon input level and long-term fertilization history[J]. Science of the Total Environment, 2023, 902: 166175.

[11] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 等. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 359–365.

[12] Zhang S, Xue L H, Liu J, et al. One–third substitution of nitrogen with cow manure or biochar greatly reduced N_2O emission and carbon footprint in saline–alkali soils[J]. Field Crops Research, 2024, 316: 109517.

[13] 赵红, 吕贻忠, 杨希, 等. 不同配肥方案对黑土有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3164–3169.

[14] 霍琳, 武天云, 蔺海明, 等. 长期施肥对黄土高原旱地黑垆土水稳性团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 545–550.

[15] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3565–3574.

[16] 张敬业, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤有机碳及其颗粒组分对不同施肥模式的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 868–875.

[17] 周珺, 王莹, 孙德龙, 等. 长期施肥对设施土壤活性有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. 土壤, 2024, 56(4): 760–768.

[18] 马俊永, 曹彩云, 郑春莲, 等. 长期施用化肥和有机肥对土壤有机碳和容重的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 38–42.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[20] 路昌, 王之语, 郭沁林, 等. “动–静”结合视角下黄河中下游粮食生产全周期碳平衡测度及分区[J]. 中国土地科学, 2024, 38(8): 109–123.

[21] Li S P, Zhao L, Wang C, et al. Synergistic improvement of carbon sequestration and crop yield by organic material addition in saline soil: A global meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2023, 891: 164530.

[22] 刘盈锐, 王西和, 程军回, 等. 灰漠土长期定位施肥方式对农田土壤有机碳含量及作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(6): 1647–1656.

[23] 刘骅, 佟小刚, 许咏梅, 等. 长期施肥下灰漠土有机碳组分含量及其演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 794–800.

[24] Liu E K, Zhou J, Yang X, et al. Long-term organic fertilizer-induced carbonate neoformation increases carbon sequestration in soil[J]. Environmental Chemistry Letters, 2023, 21(2): 663–671.

[25] 马欣, 魏亮, 唐美玲, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5680–5686.

[26] Raza S, Miao N, Wang P Z, et al. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands[J]. Global Change Biology, 2020, 26(6): 3738–3751.

[27] Li J N, Zhao J, Liao X H, et al. Pathways of soil organic carbon accumulation are related to microbial life history strategies in fertilized agroecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2024, 927: 172191.

[28] 曾骏, 董博, 张东伟, 等. 不同施肥方式对灌漠土土壤有机碳、无机碳和微生物量碳的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 35–38.

[29] Kuhlemann J, Kempf O. Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics[J]. Sedimentary Geology, 2002, 152(1/2): 45–78.

[30] Colombi T, Chakrawal A, Herrmann A M. Carbon supply-consumption balance in plant roots: Effects of carbon use efficiency and root anatomical plasticity[J]. The New Phytologist, 2022, 233(4): 1542–1547.

[31] Kan Z R, Chen Z, Wei Y X, et al. Contribution of wheat and maize to soil organic carbon in a wheat-maize cropping system: A field and laboratory study[J]. Journal of Applied Ecology, 2022, 59(11): 2716–2729.

[32] Liao L S, Zhao C K, Li X, et al. Towards low carbon development: The role of forest city constructions in China[J]. Ecological Indicators, 2021, 131: 108199.

[33] Zhang W H, Zhang Y H, Han X G. Major advances in plant ecology research in China (2020)[J]. Journal of Plant Ecology, 2021, 14(5): 995–1001.

[34] Zhang H F, Chen B Z, van der Laan-Luijk I T, et al. Estimating Asian terrestrial carbon fluxes from CONTRAIL aircraft and surface CO_2 observations for the period 2006–2010[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(11): 5807–5824.

[35] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141–163.

[36] 田慎重, 管西林, 宁堂原, 等. 多样化种植对提升耕地质量的作用: 进展与展望[J]. 土壤学报, 2024, 61(3): 619–634.

[37] Tao F, Huang Y Y, Hungate B A, et al. Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage[J]. Nature, 2023, 618(7967): 981–985.