

施氮和灌溉管理对麦田土壤团聚体组成及有机碳的影响

李彩霞¹, 陈津赛^{1,2}, 付媛媛³, 韩其晟¹, 宁慧峰¹, 王广帅¹

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所/农业农村部作物需水与调控重点实验室, 河南 新乡 453002;

2. 中国农业大学 农学院, 北京 100094; 3. 塔里木大学 植物科学学院, 新疆 阿拉尔 843300)

摘要:【目的】阐明灌溉和施氮管理对土壤结构稳定及土壤质量改善的重要性。【方法】设置施氮量为 0、180 kg/hm² 共 2 个水平(下称: N₀ 和 N₁₈₀)以及充分灌溉(F)和非充分灌溉(S) 2 个灌溉水平, 共 4 个处理, 采用随机区组设计, 研究施氮和灌溉对麦田土壤团聚体组成及有机碳影响。【结果】①非充分灌溉能够显著提升施氮土壤的水稳性大团聚体量。施氮使土壤有机碳提升 3.59%以上, 非充分灌溉使土壤有机碳提升 2.86%以上; ②土壤水直接影响土壤碳累积, 其直接效应占有机碳总量的 83.09%, 而土壤氮对土壤碳累积以间接效应为主, 其间接效应占有机碳总量的 46.89%; ③水稳性大团聚体对土壤碳累积的直接效应为负, 但其间接效应为正。【结论】施氮对土壤团聚体组成的影响受灌溉水平的制约, 灌溉及其与氮素交互作用显著影响水稳性大团聚体量; 施氮或非充分灌溉以及二者交互作用显著促进耕层(0~30 cm)土壤的有机碳累积。

关键词: 土壤团聚体; 灌溉; 氮肥; 土壤有机碳

中图分类号: S274.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021486

OSID:



李彩霞, 陈津赛, 付媛媛, 等. 施氮和灌溉管理对麦田土壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 59-64, 80.

LI Caixia, CHEN Jinsai, FU Yuanyuan, et al. Effects of Nitrogen Fertilization and Irrigation on Soil Aggregation and Soil Organic Carbon in Winter Wheat Field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 59-64, 80.

0 引言

【研究意义】团聚体是土壤的重要组成部分, 也是土壤结构的主要评价指标。耕层土壤团聚体中贮存近 90%的土壤有机碳, 土壤团聚体结构影响土壤碳的固存及矿化分解。因此, 土壤团聚体研究已成为评价土壤质量的重要途径。华北平原是我国的主要粮仓, 连年耕作导致土壤碳正在枯竭, 提升土壤质量已成为国家战略需求。2020 年 9 月习总书记在 75 届联合国大会上提出了“2060 年实现碳中和”的战略目标, 我国在协调生产与生态关系方面得到空前重视。在农田生产中, 灌溉和施肥是决定土壤生产能力的主要因素, 研究其对土壤团聚体结构和有机碳的影响, 对土壤质量评估与改善以及现状下农田生产生态功能的提高具有重要意义。

【研究进展】华北平原生产了全国产量约 79%的小麦和 27%的玉米^[1], 而土壤平均碳储量仅为

0.5%~0.8%^[2-3], 低于我国旱地平均水平(1.08%)^[4], 频繁耕作导致该地区土壤碳面临枯竭的险境。土壤团聚体的物理保护是碳稳定和固存的重要机制, 土壤大团聚体(≥ 0.25 mm)能够对有机碳提供较好的物理保护, 并对耕作管理和机械破坏很敏感^[4]。土壤碳的稳定性直接受到团聚体组成的影响^[5-6]。氮肥对土壤团聚体结构的影响研究在近年来关注度较高, 长期施无机氮肥, 团聚体的平均重量直径和几何平均直径减小^[1], 土壤微团聚体分散系数提高^[7]。同时, 过量施用氮肥使土壤中大团聚体分化为更小粒级团聚体, 破坏团聚体的稳定性^[8]。相比微团聚体, 由于大团聚体中含有更多初期不稳定的新形成的有机碳^[9], 所以减缓大团聚体的破坏或转化有利于其中更多微团聚体的产生, 从而提高团聚体的稳定性和土壤碳的固定^[10]。在干旱半干旱环境下, 土壤团聚体的整体粒径较小^[8], 灌溉后的土壤, 一方面呼吸强度提高, 有机质的矿化速率增加, 另一方面水化学条件改变黏土矿物收缩和膨胀^[11], 可能会导致部分土壤团聚体的碎裂, 使其内部的有机质被微生物分解^[12]。因此, 土壤团聚体受到物理、化学、生物等因素的综合影响, 土壤水为这些因素的变化提供了环境, 灌溉水平对土壤团聚

收稿日期: 2021-10-12

基金项目: 中央级科研院所基本科研业务费项目(FIRI20210104); 国家自然科学基金项目(51879267)

作者简介: 李彩霞, 副研究员, 博士, 主要从事农田水-碳-氮循环过程与调控机制研究。E-mail: licaixia@caas.cn

体的影响非常值得关注。【切入点】本团队前期研究发现,长期定量施氮使耕层土壤水稳性团聚体的平均粒径随施氮量的增加而减小,并对土壤无机氮产生影响,表明施氮显著影响土壤团聚体结构和土壤养分有效性^[13]。土壤水分作为肥料有效性的必需载体,固然产生水与氮的交互作用,但目前在土壤结构的研究中,常弱化灌溉水的影响,灌溉水与氮素在土壤结构变化中发挥的作用尚不明晰。【拟解决的关键问题】因此,开展灌溉和施氮水平对土壤团聚体结构和土壤碳的影响研究,为土壤服务性能的改善提供技术参考。

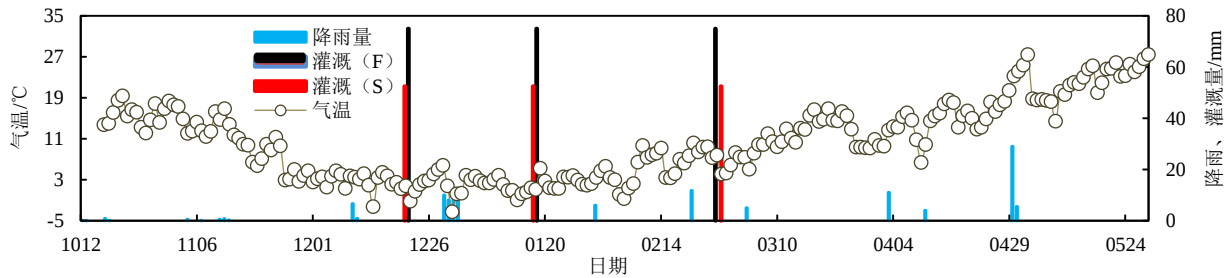


图1 2019—2020小麦生长季的降雨量、灌水及平均气温情况

Fig.1 Rainfall, irrigation and average temperature of wheat growing season in 2019—2020

1.2 试验设计

冬小麦品种为“周麦22”,于2019年10月17日足墒播种,2020年6月3日收获。由于施氮和灌溉是农田土壤结构和土壤质量的关键影响因素,在水资源紧缺、节水成为灌溉农业普遍选择的现状下,为了探明非充分灌溉和施氮对土壤团聚体组成和碳固持的影响,基于以往研究中广泛认可的适宜氮肥量和灌水定额^[14-16],设置本试验的灌溉和施氮处理。试验设置施氮(180 kg/hm², N₁₈₀)和不施氮(N₀, CK)2个氮素水平,充分灌溉(F, CK)和非充分灌溉(S: 70%充分灌溉)2个灌溉水平,共4个处理,每个处理3次重复。小区面积为10 m×5 m,12个小区随机排列。灌水处理在小麦返青后开始,灌水方式为畦灌。氮肥(尿素,含氮量46%)分2次施入,基追比为50%:50%,在拔节期追肥。播前基施K₂SO₄ 210 kg/hm²和P₂O₅ 103 kg/hm²。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤样品采集

小麦收获时,每小区按“S”型取6份原状土土样。每个点取样深度至30 cm,分0~10、10~20 cm和20~30 cm取样。将土壤样品沿自然断裂缝隙掰成不同大小的土块,除去植物残体及砾石,风干后进行土壤团聚体的测定。

1.3.2 土壤团聚体测定

团聚体分级采用萨维诺夫法^[17]。土壤团聚体机械稳定性测定:称取500 g风干土置于一组不同孔径(0.25~5.0 mm)土壤筛的顶部,进行干筛5 min,分离出直径≥5.0、3.0~5.0、2.0~3.0、1.0~2.0、0.5~1.0、

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在河南新乡(35°14' N, 113°76' E)中国农业科学院七里营综合试验基地进行。该地区年平均气温14 °C,年日照时间2 399 h,年均降雨量582 mm。研究区主要种植模式为冬小麦-夏玉米轮作,土壤类型为潮土,试验在小麦季开展,试验期间总降雨量为120.10 mm,灌溉3次,充分灌溉区的灌水定额为75.00 mm,非充分灌溉区的灌水定额为52.50 mm(图1)。

0.25~0.5 mm以及直径<0.25 mm的土壤团聚体,分别称质量,计算各级干筛团聚体占土样总量的百分率。

土壤团聚体水稳定性测定:由干筛法获取各粒级土壤团聚体,按比例配成50 g风干土样。按孔径大小排序套筛,放置于振荡架上,并置于水桶中。调整桶内水面高度,使水面处于最上层筛底部与土壤面之间震荡。将配好的土样放入最大孔径的筛子中,静止5 min,然后上下振荡3 min,振幅3 cm,频率50次/min。将各个筛子中的土壤洗出,在50 °C下烘干、称质量,即得到各粒级的土壤团聚体质量^[18]。

1.3.3 土壤有机碳量测定

土壤有机碳采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定,平行测定误差≤0.05%^[19]。

1.4 数据处理

能够反映土壤团聚体组成或结构的主要特征参数包括水稳性大团聚体占比($R_{0.25}$)、几何平均直径(GWD)、平均质量直径(MWD)和分形维数(D)。不同粒级土壤团聚体与有机碳结合,对土壤碳的固持和矿化速度影响不同,可导致有机碳功能和结构的不同^[20],常将粒径≥0.25 mm的团聚体称为大团聚体,其在团聚体中的占比用 $R_{0.25}$ 表示, $R_{0.25}$ 是土壤团聚体的定量评价指标,可以表征土壤疏松度、透气性等土壤结构性能和抗蚀性^[21]。土壤团粒结构的分布状态由 GWD 和 MWD 来反映,其值可以表征土壤团聚体的粒径团聚度、稳定性和抗蚀性^[22],土壤团粒结构具有分形特征,细粒量高,代表其分形维数大,当土壤团粒结构得到改善时,分形维数会降低,土壤团聚

体分形维数能够客观反映土壤团聚体的结构与稳定性^[23]。 MWD 、 GWD 、 D 用于表示土壤中团聚体的稳定程度，其计算方法为^[19]：

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n r_i w_i}{W}, \quad (1)$$

$$GWD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \ln \bar{d}_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right], \quad (2)$$

$$\lg \left[\frac{w_i(r < \bar{d}_i)}{W} \right] = (3-D) \lg \left[\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \right], \quad (3)$$

式中： MWD 、 GWD 、 D 分别为团聚体的几何平均直径（mm）、平均质量直径（mm）、分形维数； W_i 为第*i*粒级的团聚体质量（g）； w 为团聚体湿筛后所有粒级的质量（g）； r_i 为湿筛后第*i*粒级团聚体的平均直径（mm）； $d_{\max}$ 为湿筛后的最大粒级； $\bar{d}_i$ 为湿筛后某一粒级团聚体的平均直径（mm）； $W(r \geq \bar{d}_i)$ 为粒级 $< \bar{d}_i$ 的团聚体质量； $R_{0.25}$ 为 ≥ 0.25 mm的土壤水稳性团聚体量（%）； δ 为粒级； n 为 ≥ 0.25 mm粒级的分级数，本研究为7。

数据结果以平均值 $\pm$ 标准差的形式表示；利用DPS软件（DPS V18.10）进行差异显著性分析（ $P < 0.05$ ），多重检验采用最小显著极差法（LSD）。

2 结果与分析

2.1 灌溉和施氮对土壤团聚体水稳定性的影响

由表1可知，土壤团聚体的粒级组成因施氮和灌溉水平而存在差异，各处理的 $R_{0.25}$ 都在53.77%以上，表明耕层土壤中以大团聚体为主。非充分灌溉条件下，适量施氮（ SN_{180} ）会显著提高水稳性大团聚体量，使 $R_{0.25}$ 提高了12.20%（ $P < 0.05$ ）；与充分灌溉相比，非充分灌溉降低了水稳性大团聚体量；各处理的土壤团聚体机械稳定性无明显差异（表1）。方差分析表明，灌溉及其与氮素交互作用显著影响水稳性大团聚体量，团聚体机械稳定性不受施氮和灌溉水平的影响。

表1 不同处理的耕层土壤团聚体结构

Table 1 Soil aggregate structure in plough layer under different treatment

处理	水稳性大团聚体/%			微团聚体/%		机械稳定性/%	
	≥ 5 mm	2~5 mm	0.25~2 mm	$R_{0.25}$	< 0.25 mm	$R_{0.25}$	< 0.25 mm
SN_0	22.19 $\pm$ 8.02a	8.13 $\pm$ 2.29a	23.65 $\pm$ 1.65b	53.77 $\pm$ 10.18b	46.03 $\pm$ 7.05a	90.97 $\pm$ 20.61a	9.03 $\pm$ 3.43a
SN_{180}	22.48 $\pm$ 8.01a	8.43 $\pm$ 2.40a	29.42 $\pm$ 1.94a	60.33 $\pm$ 8.17a	39.67 $\pm$ 1.35b	92.96 $\pm$ 22a	7.04 $\pm$ 0.46a
FN_0	31.17 $\pm$ 1.51a	9.45 $\pm$ 2.87a	25.14 $\pm$ 1.27ab	65.76 $\pm$ 10.90a	34.24 $\pm$ 0.83b	92.82 $\pm$ 21.69a	7.18 $\pm$ 1.11a
FN_{180}	27.16 $\pm$ 2.66a	9.66 $\pm$ 2.85a	25.56 $\pm$ 3.18a	62.38 $\pm$ 8.68a	37.62 $\pm$ 4.32b	93.53 $\pm$ 22.31a	6.47 $\pm$ 0.72a
灌溉	**	**	/	**	**	/	/
施氮	/	/	**	/	/	/	/
灌溉 $\times$ 施氮	/	/	**	*	*	/	/

注 同一列数据后不同字母表示差异显著（ $P < 0.05$, LSD）；*和**分布表示显著（ $P < 0.05$ ）和极显著（ $P < 0.01$ ），下同。

从团聚体的分层特征看，0~20 cm为水稳性大团聚体的主要贡献层（ $R_{0.25} \geq 56.60\%$ ）。其中 ≥ 5 mm和0.25~2 mm大粒径团聚体分别贡献了20.62%~44.48%

和20.02%~40.84%。表明，0~20 cm为土壤团聚体水稳性的主要影响层，灌溉显著影响土壤团聚体组成（表2）。

表2 各处理不同粒径团聚体的土层间分布

Table 2 Distribution of soil water-stable aggregates in different soil layers in different treatments

处理	土层/cm	不同粒径团聚体的水稳性占比/%				
		≥ 5 mm	2~5 mm	0.25~2 mm	$R_{0.25}$	< 0.25 mm
SN_0	0~10	20.62de	7.92defg	22.06def	50.60efg	49.40abc
	10~20	31.79c	9.19bcdef	21.82def	62.80bcd	37.20de
	20~30	14.16ef	7.27efg	27.07c	48.51fg	51.49ab
SN_{180}	0~10	24.36d	9.89abcd	24.17cd	58.43cde	41.57d
	10~20	34.70bc	8.55cdefg	23.25de	66.50abc	33.50ef
	20~30	8.38fg	6.84fg	40.84a	56.05def	43.95bcd
FN_0	0~10	44.48a	9.56abcde	19.35f	73.40a	26.60f
	10~20	41.57ab	11.19ab	20.02ef	72.78a	27.22f
	20~30	7.46fg	7.58defg	36.06b	51.10efg	48.90abc
FN_{180}	0~10	40.16ab	11.81a	20.03ef	72.01ab	27.99f
	10~20	36.60bc	10.92abc	21.96def	69.48ab	30.52ef
	20~30	4.71g	6.25g	34.69b	45.65g	54.35a
0~20 cm		灌溉 **	施氮 /	灌溉 $\times$ 施氮 /		因素间 /

2.2 灌溉和施氮对土壤团聚体特征参数的影响

湿筛下 MWD 与 GMD 这2个指标更能够反映土壤结构的稳定程度，相同施氮水平下，非充分灌溉使 MWD 和 GMD 减小，分形维数增大；非充分灌溉下，

施氮使 MWD 、 GMD 增大， D 降低，表明土壤具有较好的团粒结构，而施氮对土壤结构的影响因灌溉水平而异，灌溉水平是影响土壤团聚体结构的显著性因素（表3）。 $R_{0.25}$ 与土壤团聚体破坏率存在显著的负相关

关系, 非充分灌溉提高了团聚体破坏率(表3)。

表3 不同处理下土壤团聚体的特征参数值比较

Table 3 Comparison of characteristic value of soil aggregates under different treatments

处理	MWD/mm	GMD/mm	D	$R_{0.25}$ 与 团聚体 破坏率的 相关性/%
SN ₀	1.67±0.63b	0.80±0.30c	2.73±0.09a	-99a
SN ₁₈₀	1.72±0.73b	0.88±0.42bc	2.68±0.09b	-99a
FN ₀	2.15±0.87a	1.15±0.50a	2.62±0.12c	-97a
FN ₁₈₀	1.97±0.90ab	1.05±0.50ab	2.65±0.12bc	-98a
灌溉	**	**	**	/
施氮	/	/	/	/
灌溉×施氮	/	/	*	/

通过土壤团聚体机械稳定性和水稳定性对比分

表4 不同施氮和灌溉水平下土壤团聚体破坏率

Table 4 Destruction rate of soil aggregates under different levels of nitrogen and water

%

处理	≥1 mm		≥5 mm 占比		≥0.25 mm	<0.25 mm
	0~20 cm	0~30 cm	0~20 cm	0~30 cm	0~30 cm	0~30 cm
SN ₀	40.13±4.16a	47.12±16.77 a	69.62±8.83ab	74.92±14.02ab	37.00±2.11a	-37.00±3.40a
SN ₁₈₀	38.64±4.69a	48.60±18.59a	69.68±5.51ab	78.75±7.51ab	32.63±3.20ab	-32.63±2.31a
FN ₀	26.25±3.09a	39.23±20.27a	61.73±9.54b	71.84±20.05b	27.07±1.47b	-29.02±1.83b
FN ₁₈₀	31.32±3.93a	43.67±20.03a	78.33±4.96a	81.09±13.70a	27.84±2.59b	-31.90±4.07ab
灌溉	*	/	/	/	*	*
施氮	/	/	*	/	/	/
灌溉×施氮	/	/	*	*	/	/

2.3 灌溉和施氮对土壤有机碳的影响

相同灌溉水平下, 施氮正向影响土壤有机碳, 充分灌溉和非充分灌溉分别使施氮土壤的有机碳提高9.71%、3.59%; 与充分灌溉比较, 非充分灌溉分别提高施氮和不施氮土壤有机碳2.86%和8.94%, 非充分灌溉施氮显著提高土壤有机碳(图2)。

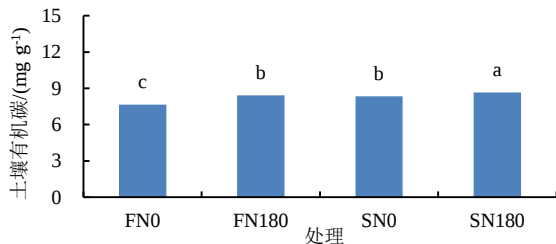
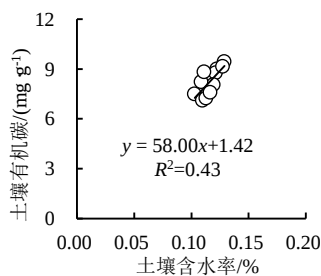


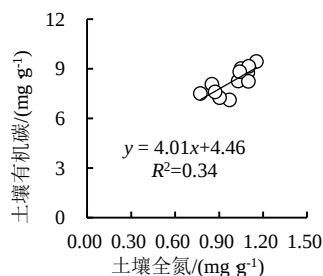
图2 不同水氮处理下土壤有机碳量

Fig.2 Soil organic carbon under water and nitrogen treatment

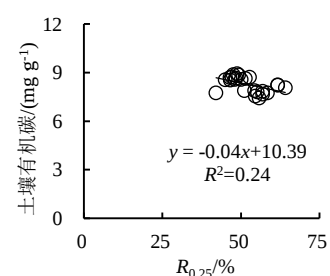
土壤水分决定氮肥的有效性, 而氮肥是土壤氮素的源, 土壤碳氮具有耦合效应, 二者具有相对稳定的



(a) 土壤有机碳与土壤含水率



(b) 土壤有机碳与全氮



(c) 土壤有机碳与 $R_{0.25}$

图3 土壤有机碳与土壤含水率、土壤全氮及 $R_{0.25}$ 的关系

Fig.3 The relationship between soil organic carbon and soil water content, soil total nitrogen and $R_{0.25}$

析发现, 土壤团聚体的破坏主要发生在 ≥ 1 mm 粒级, 非充分灌溉使0~20 cm的土壤团聚体破坏率提高, 而充分灌溉提高了施氮土壤的团聚体破坏率。其中, ≥ 5 mm 团聚体破坏率在所有粒级中最高, 并受施氮和灌溉交互影响显著(表4)。团聚体破坏率受施氮和灌溉水平的影响, 0~20 cm 土层的团聚体破坏率占0~30 cm 的66.91%以上, 表明越靠上层的土壤团聚体机械稳定性越差, 并受灌溉水平影响显著, 其中施氮水平显著影响 ≥ 5 mm 团聚体的破坏率; 同一施氮水平下, 非充分灌溉不利于土壤团聚体的机械稳定性, 而同一灌溉水平下, 施氮不利于土壤团聚体的机械稳定性; 水氮协同作用显著影响较大粒径团聚体(≥ 5 mm)的机械稳定性(0~30 cm)(表4)。

化学计量关系。因此, 土壤有机碳与土壤水氮的关系能够间接反映灌溉和施氮水平的农田生态效应。由图3可知, 土壤含水率和土壤全氮对土壤有机碳均存在线性关系(图3(a)、图3(b)), 表明土壤水分和土壤氮可能是有机碳变化的主要解释因素。由于土壤有机碳与土壤含水率和土壤全氮的线性关系都存在截距, 并且图3(a)的截距小于图3(b), 表明土壤氮对土壤有机碳影响的间接效应更大, 大于土壤含水率, 而土壤含水率的直接效应更大, 经计算, 土壤含水率对土壤有机碳的直接效应为 6.85 ± 2.47 mg/g, 占有有机碳总量的82.82%; 土壤全氮的直接贡献为 3.81 ± 1.05 mg/g, 占有有机碳总量的比例为46.04%。而土壤有机碳与水稳定性大团聚体量($R_{0.25}$)存在负相关关系, 但水稳性大团聚体对土壤有机碳带来的间接效应为正(图3(c))。

3 讨论

3.1 灌溉和施氮水平对土壤结构的影响

对于耕作频繁的华北平原，农田用水和施氮管理对土壤结构的影响尤为突出，长期定量施氮引起大团聚体 ($\geq 5 \text{ mm}$) 的水稳性变弱^[13]，机械稳定性变差，使土壤微团聚体分散系数提高^[7]，而短期 ($\leq 2 \text{ a}$) 的施氮管理对团聚体水稳性和机械稳定性的影响差异并不明显 (表 1, 表 4)，这可能由于定量施氮管理对团聚体的分化或累积的影响存在时间效应。这个效应受灌溉水平的影响，非充分灌溉使大团聚体 ($\geq 5 \text{ mm}$) 破坏率明显提高，并且分化为较小粒级团聚体 (表 4)，这可能是引起非充分灌溉下水稳性大团聚体偏低、微团聚体偏高的主要原因，我国干旱半干旱区土壤的水稳性团聚体整体粒径较小^[9]，这表明受土壤水驱动下的土壤团聚体构成趋势研究的结论基本一致。

3.2 灌溉和施氮对土壤有机碳的影响

我国华北平原 0~20 cm 土壤有机碳储量逐年降低，长期的水肥精细管理造成温室气体排放增加，导致该地区农田生态系统处于持续碳损失状态^[25]。由于表层是肥料和秸秆聚集最集中的土层，干燥高温、灌溉湿润以及土壤蒸发等都使表层土壤碳处于不稳定状态，这使得 0~20 cm 土壤碳储量受水肥管理的约束性更强，存在更大的不确定性。非充分灌溉提高了作物生产力，从而导致土壤中更大的碳输入；而充分灌溉土壤可能刺激微生物活动^[26-27]，从而促进碳矿化^[28]，导致土壤碳的损失，作物生产和微生物呼吸对有机碳的累积起到相反的作用方向，当其中某种效应表现更强时，土壤产生碳固存增加或碳排放。非充分灌溉提高了施氮作物的产量和生物量 (图 4)，显著促进了土壤有机碳量 (图 2)，因此，作物生产力对土壤碳的累积效应可能超过了碳损失效应，使得非充分灌溉施氮土壤的碳量显著增加，这与相关研究结论一致^[26-27]。

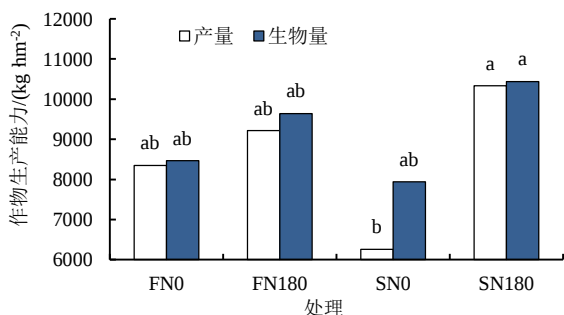


图 4 不同处理的小麦产量和生物量

Fig.4 Wheat yield and biomass under different treatment

土壤团聚体是容纳大量有机物质的微生境，对土

壤养分动态具有重要的调节功能^[29]。土壤有机碳量与大团聚体的稳定性直接相关，并主要分布于大团聚体中^[18,30]，本研究，土壤有机碳与水稳性大团聚体量 ($R_{0.25}$) 具有负相关关系，这可能由于施氮促进土壤有机碳增加 (图 2)，但同时也改变了不同团聚体对土壤微生物与作物间的作用，土壤大团聚体破坏使其中的有机物质暴露，加速了土壤碳损失^[31]，而与之相比，较强的物理保护以及真菌和酶活性优势使微团聚体中的有机碳更加稳定^[32-33]，这可能是引起本研究结果的主要原因。土壤有机碳固存的增加，能够增强土壤颗粒胶结作用，进而提高土壤保水性能^[7]，使土壤有机碳随土壤水分的增加呈正效应 (图 3 (a))，对土壤持水结构和作物生长都有利，这进一步强化了作物-土壤间的联系，对区域农田生态系统的健康评估具有重要的理论意义。

4 结论

1) 灌溉对土壤大团聚体结构影响显著，非充分灌溉降低了土壤大团聚体 ($\geq 0.25 \text{ mm}$) 量，但显著增强了施氮土壤的大团聚体水稳性。灌溉和施氮对土壤团聚体结构的影响具有交互效应。

2) 非充分灌溉减弱了土壤团聚体的机械稳定性，提高了土壤团聚体的机械破坏率。

3) 非充分灌溉能够提升小麦生产能力，显著促进施氮土壤的碳储量增加。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [2] PAN G X, XU X W, SMITH P, et al. An increase in topsoil SOC stock of China's croplands between 1985 and 2006 revealed by soil monitoring[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 136(1/2): 133-138.
- [3] CHENG K, ZHENG J, NAYAK D, et al. Re-evaluating the biophysical and technologically attainable potential of topsoil carbon sequestration in China's cropland[J]. Soil Use and Management, 2013, 29(4): 501-509.
- [4] LI T T, ZHANG Y L, BEI S K, et al. Contrasting impacts of manure and inorganic fertilizer applications for nine years on soil organic carbon and its labile fractions in bulk soil and soil aggregates[J]. Catena, 2020, 194: 104 739.
- [5] TOTSCHKE K U, AMELUNG W, GERZABEK M H, et al. Microaggregates in soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2018, 181(1): 104-136.
- [6] 曾希柏, 柴彦君, 俄胜哲, 等. 长期施肥对灌漠土团聚体及其稳定性的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 783-788.
ZENG Xibai, CHAI Yanjun, E Shengzhe, et al. Effects of long-term fertilization on soil aggregate and its stability in irrigated desert soil of China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(4): 783-788.
- [7] 郑凤君, 王雪, 李生平, 等. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 596-607.
ZHENG Fengjun, WANG Xue, LI Shengping, et al. Synergistic effects

- of soil moisture, aggregate stability and organic carbon distribution on wheat yield under no-tillage practice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(3): 596-607.
- [8] 冯夕. 地膜覆盖及施氮对菜地土壤团聚体及其碳氮组分的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- FENG Xi. Effects of application plastic film mulching and nitrogen fertilizer on soil aggregates and its carbon and nitrogen fractions from a vegetable fields[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [9] ANGERS D A, CARTER M R. Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020: 193-211.
- [10] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2 099-2 103.
- [11] 韩笑, 余冬立, 王洪德, 等. 滨海土壤团聚体分布和分形维数及其影响因子研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(5): 88-92, 113.
- HAN Xiao, SHE Dongli, WANG Hongde, et al. Fractal dimension of coastal soil aggregates and its relationship with physical and chemical soil properties[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(5): 88-92, 113.
- [12] 袁德玲, 张玉龙, 唐首峰, 等. 不同灌溉方式对保护地土壤水稳性团聚体的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 125-128, 134.
- YUAN Deling, ZHANG Yulong, TANG Shoufeng, et al. Effect on soil water-stable aggregates of different irrigation methods in protected field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 125-128, 134.
- [13] 陈津赛, 孙玮皓, 王广帅, 等. 不同施氮量对麦田土壤水稳性团聚体和 N_2O 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3 961-3 968.
- CHEN Jinsai, SUN Weihao, WANG Guangshuai, et al. Effects of different nitrogen application rates on soil water stable aggregates and N_2O emission in winter wheat field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3 961-3 968.
- [14] 王悦. 灌水和施氮对华北地区冬小麦-夏玉米产量和水氮利用的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- WANG Yue. Effects of irrigation and nitrogen application on winter wheat-summer maize yield and water and nitrogen use efficiency in North China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [15] 吕广德, 王超, 靳雪梅, 等. 水氮组合对冬小麦干物质及氮素积累和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2 593-2 603.
- LYU Guangde, WANG Chao, JIN Xuemei, et al. Effects of water-nitrogen combination on dry matter, nitrogen accumulation and yield of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2 593-2 603.
- [16] 侯宗建. 水氮耦合对华北平原典型区水氮利用率及作物产量的影响研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2015.
- HOU Zongjian. Studies on the influences of water and nitrogen coupling on water and nitrogen use efficiency and crop yield sat A typical region in North China Plain[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2015.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [18] 张秀芝, 李强, 高洪军, 等. 长期施肥对黑土水稳性团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(6): 1 214-1 223.
- ZHANG Xiuzhi, LI Qiang, GAO Hongjun, et al. Effects of long-term fertilization on the stability of black soil water stable aggregates and the distribution of organic carbon[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(6): 1 214-1 223.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [20] 朱锟恒, 段良霞, 李元辰, 等. 土壤团聚体有机碳研究进展[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(21): 86-90.
- ZHU Kunheng, DUAN Liangxia, LI Yuanchen, et al. Research progress of organic carbon in soil aggregates[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(21): 86-90.
- [21] 章明奎, 何振立, 陈国潮, 等. 利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J]. *土壤学报*, 1997, 34(4): 359-366.
- ZHANG Mingkui, HE Zhenli, CHEN Guochao, et al. Formation of water-stable aggregates in red soils as affected by land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(4): 359-366.
- [22] 唐骏, 党廷辉, 薛江, 等. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 5 067-5 077.
- TANG Jun, DANG Tinghui, XUE Jiang, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate characteristics of an opencast coal mine dump in the loess area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5 067-5 077.
- [23] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 340-347.
- QI Yingchun, WANG Yiquan, LIU Jun, et al. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 340-347.
- [24] HAN S, DELGADO-BAQUERIZO M, LUO X S, et al. Soil aggregate size-dependent relationships between microbial functional diversity and multifunctionality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 154: 108 143.
- [25] 王玉英, 李晓欣, 董文旭, 等. 华北平原农田温室气体排放与减排综述[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(2): 167-174.
- WANG Yuying, LI Xiaoxin, DONG Wenxu, et al. Review on greenhouse gas emission and reduction in wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2): 167-174.
- [26] DAVID C, LEMKE R, HELGASON W, et al. Current inventory approach overestimates the effect of irrigated crop management on soil-derived greenhouse gas emissions in the semi-arid Canadian Prairies[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 19-32.
- [27] DONG L L, YU D S, ZHANG H D, et al. Long-term effect of sediment laden Yellow River irrigation water on soil organic carbon stocks in Ningxia, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 145: 148-156.
- [28] HUANG W J, HALL S J. Elevated moisture stimulates carbon loss from mineral soils by releasing protected organic matter[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 1 774.
- [29] BACH E M, WILLIAMS R J, HARGREAVES S K, et al. Greatest soil microbial diversity found in micro-habitats[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 118: 217-226.
- [30] COLLIER S M, GREEN S M, INMAN A, et al. Effect of farm management on topsoil organic carbon and aggregate stability in water: A case study from Southwest England, UK[J]. *Soil Use and Management*, 2021, 37(1): 49-62.
- [31] HE Y T, ZHANG W J, XU M G, et al. Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 635-644.
- [32] YANG C, LIU N, ZHANG Y J. Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 444-452.
- [33] WANG R Z, WU H, SARDANS J, et al. Carbon storage and plant-soil linkages among soil aggregates as affected by nitrogen enrichment and mowing management in a meadow grassland[J]. *Plant and Soil*, 2020, 457(1/2): 407-420.