

# 耕作模式与氮肥运筹对土壤主要理化性状 及作物产量的影响

张玉娥<sup>1</sup>, 杨习文<sup>1</sup>, 王 勇<sup>2</sup>, 周宏美<sup>3</sup>, 杜聪阳<sup>1</sup>, 贺德先<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学农学院, 省部共建小麦玉米作物学国家重点实验室, 河南粮食作物协同创新中心, 河南 郑州 450002;  
2. 河南省驻马店市农业科学院, 河南 驻马店 463000; 3. 河南省夏邑县农技中心, 河南 夏邑 476400)

**摘要:** 在冬小麦-夏玉米轮作条件下, 以小麦品种矮抗 58 和玉米品种郑单 958 为材料, 研究了不同耕作方式(小麦季深耕、玉米季免耕; 小麦季旋耕、玉米季免耕)及不同氮肥总量(540, 420, 300 kg·hm<sup>-2</sup>)和不同氮肥运筹方式(不同追肥比例及追肥时期)对豫东潮土和豫南砂姜黑土物理性状及氮含量的周年变化以及作物产量的影响。结果表明: 深耕能显著降低潮土和砂姜黑土 20~40 cm 土层土壤容重, 显著提高两类土壤 20~40 cm 土层土壤总孔隙度以及田间持水量, 且深耕处理下两类土壤周年作物产量分别比旋耕处理增加 4.30% 和 2.63%; 土壤全氮以及碱解氮含量均随着氮肥施用总量的增加而升高, 在氮肥施用量相同条件下, 追施氮肥前土壤全氮和碱解氮含量随着底施氮量的增加而升高, 追施氮肥后随着追氮量的增加而增加。研究认为, 本试验条件下, 考虑到经济效益, 建议采用小麦季隔年深耕而玉米季免耕直播的耕作方式, 在潮土区的 B1C3(小麦季 300 kg·hm<sup>-2</sup>纯氮, 按照底肥与拔节期追肥之比为 1:1 施入, 玉米季 240 kg·hm<sup>-2</sup>纯氮, 按底肥与拔节期追肥大喇叭口期追肥之比为 2:1:1 施入)施肥模式, 和砂姜黑土地区的 B2C1(小麦季 240 kg·hm<sup>-2</sup>全底施, 玉米季 180 kg·hm<sup>-2</sup>纯氮, 底肥与拔节期追肥之比 3:1 施入)施肥模式为两地最优的氮肥施用模式。

**关键词:** 耕作模式; 氮肥运筹; 潮土; 砂姜黑土; 土壤理化性状; 作物产量

**中图分类号:** S157.4; S141.3 **文献标志码:** A

## Effects of tillage and nitrogen fertilization regimes on main physicochemical properties of soil and crop yield

ZHANG Yu-e<sup>1</sup>, YANG Xi-wen<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, ZHOU Hong-mei<sup>3</sup>, DU Cong-yang<sup>1</sup>, HE De-xian<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University, State Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science, Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, Zhengzhou, Henan 450002, China;  
2. Zhumadian Academy of Agricultural Sciences, Zhumadian, Henan 463000, China;  
3. Xiayi Extension Center for Agricultural Techniques, Xiayi, Henan 476400, China)

**Abstract:** The effects of various tillage practices (including deep tillage and rotary tillage in wheat field, no tillage in maize field) and different nitrogen fertilization (including the rate and method of nitrogen application) on annual variation of soil physical characteristics and crop yield were investigated, by field experiments including fluvo-aquic soil and lime concretion black soil under the condition of winter wheat - summer maize rotation cropping system at the same time. Aikang 58 (wheat) and Zhengdan 958 (maize) were used as the test materials. The results showed that deep tillage decreased the soil bulk density whereas increased the soil porosity and field moisture in 20~40 cm soil layer significantly, and the annual crop yield were increased by 4.30% and 2.63% in both experiments of deep tillage compare to the rotary tillage. Soil total nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen were with the increase in nitrogen application rate. Soil total nitrogen and alkali-hydrolyzable N increased with the increase in base fertilizer application, and they increased with the increase in nitrogen topdressing rate. Considering the economic benefit, we suggest that deep tillage in winter wheat field

收稿日期:2016-12-14

修回日期:2017-02-17

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2013BAD07B07-4);河南省重点实验室项目(132300413207);旱区作物逆境生物学国家重点实验室开发课题资助计划(CSBAA2016013)

作者简介:张玉娥(1989—),女,河南南召人,硕士研究生,研究方向为小麦生理生态。E-mail: 1225538150@qq.com。

通信作者:贺德先(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事作物生理生态研究。E-mail: hedexian@126.com。

and no tillage in summer maize field is the most appropriate tillage methods in both experiments. Nitrogen application rate of  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and the ratio of base to jointing topdressing as 1:1 in winter wheat and Nitrogen application rate of  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and the ratio of base to jointing topdressing to bell stage as 2:1:1 in summer maize was the optimal nitrogen application model in fluvo-aquic soil. And nitrogen application rate of  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  as the base fertilizer in winter wheat and nitrogen application rate of  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and the ratio of base to jointing topdressing as 3:1 in summer maize was the optimal nitrogen fertilization model in lime concretion black soil.

**Keywords:** soil tillage patterns; nitrogen fertilizer application regimes; physical & chemical properties; crop yield

潮土和砂姜黑土是河南省重要的土壤类型<sup>[1]</sup>,而豫东商丘和豫南驻马店两地区的土壤类型属于比较典型的潮土和砂姜黑土,同时两地区也是河南省重要的劳动力输出地区。随着农村城镇化步伐加快和农村劳动力大量涌入城市,农村劳动力结构发生很大的变化,同时农村机械化程度也快速增长,旋耕方式整地因其操作简单省时、省工而备受人们青睐。然而连年旋耕会导致耕层变浅犁底层加厚,对作物生长发育及产量会造成不良影响<sup>[2-3]</sup>。前人研究表明,相对于旋耕处理,深耕显著增加了小麦叶面积指数、千粒重、穗粒数、收获指数以及产量<sup>[4]</sup>。但也有研究指出,旋耕处理的土壤蓄水保墒能力高于翻耕,有利于提高小麦生育后期的土壤供水能力<sup>[5-7]</sup>。然而也有关于旋耕处理的水分利用效率低于翻耕<sup>[8]</sup>的研究报道。在土壤孔隙度和容重研究方面,孙利军等<sup>[9]</sup>研究则指出,少耕免耕通过减少大、中孔隙数量,增加小孔隙数量改善土壤的空隙状况,从而维持毛管孔隙度的相对稳定。雷金银等<sup>[10]</sup>研究发现,20~40 cm 土层免耕容重比翻耕增加 1.8%,而 40~60 cm 土壤容重基本不受耕作方式的影响。大量研究表明深耕能改变土壤的物理性质从而改善农作物的生长环境,为作物的增产打下基础<sup>[11-13]</sup>。作物的高产和超高产与土壤养分状况存在着密不可分的联系<sup>[14]</sup>,而土壤养分的高低则关键在施肥上,当前普遍存在农民施肥不合理的现象,具体表现在施肥量和施肥方式上,这不仅造成了肥料利用率降低,农民投入成本增加,而且还会对土壤及大气环境的质量造成威胁。例如,长期单施化肥或偏施无机肥会导致土壤孔隙度降低、容重增加,破坏土壤结构的稳定性<sup>[15-17]</sup>。氮肥对于促进作物的生长发育以及产量的提高和品质的提升具有至关重要的作用<sup>[18]</sup>。大量研究表明增施氮肥后各土层土壤硝态氮含量显著增加<sup>[19]</sup>。多数研究认为,在一定范围内小麦产量及氮肥利用效率均随着施氮量的增加而增加,而超过这一范围则呈现降低的趋势,只是在试验条件以及土壤肥力条件不同时这一临界值略有不同。在现阶段研究中,关于氮肥施用量对作物产量影响的研究

较多,综合当前研究进展,当施氮量达到  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  左右时小麦产量普遍在  $6000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  以下<sup>[20]</sup>,中等产量水平的小麦田氮肥用量多在  $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  左右<sup>[21]</sup>,而当氮肥用量达到  $280 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  左右时更有利于小麦田达到高产甚至超高产的水平<sup>[22]</sup>。

目前,关于不同耕作措施对土壤物理性状影响的报道较多,但大部分研究围绕以少免耕为主的保护性耕作措施<sup>[23-25]</sup>,而当前广大农民普遍接受和采用的依然为旋耕模式。而且关于不同耕作方式以及氮肥处理对小麦玉米两季作物整个生育期不同土层土壤的物理性质周年动态变化影响的系统研究较少,本试验在豫东潮土和驻马店砂姜黑土地区同时进行,以当前黄淮平原农民普遍采用的耕作制度、氮肥用量及追肥方式为对照,通过研究不同栽培措施对不同土壤类型不同土层土壤物理性状季节变化的影响,以期在小麦玉米一年两熟制条件下为土壤肥力的持续提升提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

试验分别在河南省商丘市夏邑县李集镇程集村和驻马店市驿城区水屯镇王庄村进行。商丘试验点位于东经  $116^{\circ}08'58''$ 、北纬  $34^{\circ}20'08''$ ,处在黄河故道决口平原区,是典型的平原冲积区,地势平坦,土质肥沃,土壤质地为潮土,多年平均降水量 726 mm。驻马店试验点位于东经  $113^{\circ}48'23''$ 、北纬  $32^{\circ}58'46''$ ,地处亚热带与暖温带的过渡地带,土壤质地为砂姜黑土。两个试验点土壤的主要物理性状和基础肥力状况见表 1。

### 1.2 试验设计

试验采用裂-裂区设计。主因子为耕作模式(A),深耕即经深翻之后加旋耕一遍,深翻深度约为 30 cm;旋耕即旋耕机旋耕一遍,深度约为 15 cm;玉米季免耕即小麦收获后直接播种玉米。副因子为施纯氮总量(B)。副副因子为氮肥施用方式(C),其中商丘潮土区小麦季底肥与拔节期比例为 7:3,6:4 和 5:5,驻马店砂姜黑土区设为全底施、底肥与越冬肥

比例 8:2 以及底肥与拔节肥比例 8:2 三种方式,玉米季底肥与大口期追肥比例为 7.5:2.5,4:6 以及底

肥:大喇叭口期:灌浆期为 5:2.5:2.5。共计 18 个处理,四次重复,小区面积为 64 m<sup>2</sup>。具体方式见表 2。

表 1 两个试验点土壤主要物理性状和基础肥力情况

Table 1 Main soil physical properties and soil fertility in the two experimental sites

土壤类型 Soil type	土层深度 Soil layer depth /cm	容重 Soil bulk density /(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度 Soil porosity /%	田间持水量 Field moisture capacity /%	有机质 Soil organic matter content /(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen content /(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkali hydrolyzable N content /(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P content /(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K content /(mg·kg <sup>-1</sup> )
潮土 Fluvo-aquic soil	0~20	1.29	52.9	27.4	9.08	1.05	108.2	23.1	209
	20~40	1.57	42.2	22.3	3.78	0.68	63.9	9.17	173
砂姜黑土 Lime concretion black soil	0~20	1.38	49.4	23.4	8.01	0.99	90.9	22.3	198
	20~40	1.58	44.4	20.8	5.79	0.67	59.7	8.93	164

表 2 不同土壤类型的处理方式

Table 2 The different treatments of two soil types

处理 Treatments	潮土 Fluvo-aquic soil		砂姜黑土 Lime concretion black soil	
	小麦季 Winter wheat	玉米季 Summer maize	小麦季 Winter wheat	玉米季 Summer maize
耕作模式 Tillage method	A1	深耕 Deep tillage	免耕 No-tillage	深耕 Deep tillage
	A2	旋耕 Rotary tillage	免耕 No-tillage	旋耕 Rotary tillage
施氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Nitrogen level	B1	300	240	300
	B2	240	180	240
	B3	180	120	180
施肥方式(底肥:追肥) Method of nitrogen (base fertilizer:top application)	C1	7:3	3:1	1:0
	C2	3:2	2:3	4:1
	C3	1:1	2:1:1	4:1

试验于 2013 年进行,供试小麦品种为矮抗 58,前茬均为玉米,玉米秸秆还田后均匀散于试验田内,商丘潮土区于 2013 年 10 月 18 日播种,驻马店砂姜黑土区于 2013 年 10 月 12 日播种。播种量为 180 kg·hm<sup>-2</sup>,磷肥用量(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)为 150 kg·hm<sup>-2</sup>,钾肥用量(K<sub>2</sub>O)为 150 kg·hm<sup>-2</sup>,基肥与磷钾肥均在整地前施入,追肥在相应时期用手扶式化肥播种机施入。小麦收获后玉米免耕直播,小麦秸秆还田后均匀散于试验田内,供试玉米品种为郑单 958,商丘潮土区于 2014 年 6 月 9 日播种,驻马店砂姜黑土区于 2014 年 6 月 5 日播种,种植密度为 4 万株·hm<sup>-2</sup>,磷肥用量(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)为 120 kg·hm<sup>-2</sup>,钾肥用量(K<sub>2</sub>O)为 120 kg·hm<sup>-2</sup>,磷钾肥随着播种机一起施入,基肥与追肥用手扶式化肥播种机施入。两地小麦季均灌拔节水,玉米季降雨量适中所以未灌水。

### 1.3 测定项目及方法

分别于小麦季的分蘖期、越冬期、拔节期、开花期、成熟期以及玉米季的拔节期和成熟期采集土壤样品,土壤剖面环刀法测定土壤物理性质,土钻法“S”型采集每个小区 0~20 cm 和 20~40 cm 土层样

品,风干过筛备用。

1.3.1 土壤物理性质 环刀法测定土壤容重 = 环刀内湿土重 × 100/[环刀容积 × (100 + 样品含水量)];土壤总孔隙度(%) = 100 × (1 - 容重/比重);土壤田间持水量采用威尔科克斯法(环刀法)测定。

1.3.2 土壤氮素含量 全氮采用凯氏定氮法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定。

1.3.3 收获与计产 小麦、玉米收获时每个小区 64 m<sup>2</sup> 均采取实收测产。

### 1.4 数据处理与分析

采用 DPS 数据处理软件及 Excel 对数据进行处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕作模式及氮肥运筹对不同类型土壤主要物理性质的影响

由表 3 可知,耕作方式对潮土 0~20 cm 土层土壤容重和孔隙度以及砂姜黑土 0~20 cm 土层容重、孔隙度和田间持水量影响均未达到显著水平,对潮土 0~20 cm 土层田间持水量,以及 20~40 cm 土层

两种土壤下容重、孔隙度和田间持水量影响均达到显著或者极显著水平。氮肥施用总量以及氮肥施用方式以及互作效应对土壤物理性质影响不显著。具体而言,两类土壤容重随着土层加深呈现增加趋势。0~20 cm 土层,潮土与砂姜黑土土壤容重在旋耕与深耕处理间无明显差异;20~40 cm 土层中,相对于旋耕,深耕显著降低了潮土与砂姜黑土的土壤容重,

分别降低了 2.56% 和 1.94%。两种类型土壤孔隙度及田间持水量随着土壤土层的加深呈现降低趋势。深耕处理下两类土壤的土壤孔隙度及田间持水量均大于旋耕处理,且在 20~40 cm 土层中,相对于旋耕,深耕处理下潮土土壤孔隙度以及田间持水量分别提高了 3.29% 和 7.41%,砂姜黑土分别提高了 2.10% 和 5.97%。

表 3 耕作模式及氮肥运筹对不同类型土壤物理性质的影响

Table 3 Effects of different treatments on soil physical properties of two soil types

处理 Treatments	潮土 Fluvo-aquic soil						砂姜黑土 Lime concretion black soil					
	0~20 cm			20~40 cm			0~20 cm			20~40 cm		
	容重 Soil bulk density /(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度 Soil porosity /%	田间持 水量 Field moisture capacity/%									
A1B1C1	1.24a	52.9a	27.9a	1.53a	43.5a	23.0a	1.32a	50.4a	23.6a	1.53a	43.6 a	22.1a
A1B1C2	1.21a	54.1a	28.1a	1.48a	45.3a	23.1a	1.30a	51.2a	22.9a	1.53a	44.3a	21.3a
A1B1C3	1.23a	53.4a	28.1a	1.51a	44.2a	23.1a	1.30a	51.1a	23.4a	1.50a	43.4a	20.9a
A1B2C1	1.21a	54.1a	28.7a	1.53a	43.6a	22.9a	1.30a	51.1a	22.6b	1.51a	44.2a	21.7a
A1B2C2	1.21a	54.1a	28.3a	1.52a	43.6a	23.3a	1.31a	50.7a	22.8b	1.53a	43.6a	21.2a
A1B2C3	1.21a	54.0a	28.3a	1.51a	44.1a	23.5a	1.31a	50.8a	23.6a	1.52a	43.7a	21.8a
A1B3C1	1.23a	53.5a	28.7a	1.56a	42.6a	23.1a	1.33a	50.0b	22.9a	1.51a	44.0a	21.6a
A1B3C2	1.21a	53.9a	28.2a	1.51a	44.1a	23.0b	1.30a	51.0ab	23.5a	1.54a	43.3a	20.5a
A1B3C3	1.21a	54.1a	28.6a	1.52a	44.0a	23.8a	1.28a	51.7a	23.4a	1.54a	43.3a	20.8a
$\bar{x}$	1.22a	53.8a	28.3a	1.52b	43.9a	23.2a	1.31a	50.9a	23.2a	1.52b	43.7a	21.3a
A2B1C1	1.23a	53.5a	26.5a	1.55a	42.9a	21.7a	1.32a	50.5a	23.8a	1.54a	43.3a	20.0a
A2B1C2	1.21a	54.1a	26.4a	1.57a	42.1a	21.7a	1.30a	51.0a	23.7a	1.55a	43.0 a	20.1a
A2B1C3	1.23a	53.4a	26.5a	1.56a	42.6a	21.4a	1.30a	51.0a	23.7a	1.56a	42.6a	20.2a
A2B2C1	1.25a	52.6a	26.4a	1.56a	42.6a	21.6a	1.29a	51.3a	23.9a	1.54a	43.0a	20.2a
A2B2C2	1.24a	53.1a	26.2a	1.56a	42.6a	21.8a	1.31a	50.8a	23.5a	1.55a	42.7a	19.7a
A2B2C3	1.22a	53.6a	25.9a	1.56a	42.6a	21.4a	1.33a	50.1a	23.5a	1.53a	43.4a	21.0a
A2B3C1	1.22a	53.6a	26.3a	1.56a	42.7a	21.6a	1.29a	51.3a	23.3a	1.55a	42.9a	20.3ab
A2B3C2	1.20a	54.5a	25.7a	1.56a	42.5a	21.8a	1.31a	50.7a	23.0a	1.58a	41.93a	19.2b
A2B3C3	1.22a	53.7a	25.6a	1.56a	42.4a	21.6a	1.32a	50.4a	23.6a	1.56a	42.6a	20.6a
$\bar{x}$	1.22a	53.6a	26.2b	1.56a	42.5b	21.6b	1.31a	50.8a	23.6a	1.55a	42.8b	20.1b

F 值 F - value

A	2.79	2.79	206.3**	81.34*	81.3*	1892.1**	0.07	0.07	16.93	101.2**	101.2**	29.8*
B	0.65	0.65	0.23	0.61	0.61	0.54	0.03	0.03	1.39	1.13	1.13	2.25
A × B	2.32	2.32	2.82	0.72	0.72	0.27	0.05	0.05	1.96	0.07	0.07	0.51
C	2.55	2.55	0.65	0.57	0.57	0.70	0.12	0.12	2.65	1.34	1.34	2.97
A × C	0.04	0.04	0.17	1.96	1.96	2.63	2.65	2.65	2.02	0.76	0.76	1.98
B × C	0.50	0.50	0.39	0.16	0.16	0.74	1.46	1.46	0.91	1.16	1.16	1.12
A × B × C	0.65	0.65	0.09	0.61	0.61	0.42	1.15	1.15	2.75	0.44	0.44	0.21

注:多重比较在同一耕作方式相同施氮量条件下三个施氮方式间进行比较,数值后不同字母代表不同处理间差异达 5% 显著水平。 $\bar{x}$  中不同小写字母表示两种耕作方式的所有氮肥运筹处理平均值之间的差异显著 ( $P < 0.05$ )。\*、\*\* 分别表示差异达到 0.05、0.01 显著水平,下同。

Note: Multiple comparisons were performed between N application methods in the same N application rate and the same tillage practice, and values followed by different letters mean significant among different treatments at the 5% level. The two line  $\bar{x}$  data, lowercase letters mean significant difference ( $P < 0.05$ ) between the average of all the different treatments in one tillage practice. \* and \*\* significant difference at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively, and the same below.

## 2.2 耕作模式及氮肥运筹对不同类型土壤氮素含量的影响

由表 4 可知,不同处理以及各因素间的交互作用对两种土壤全氮和碱解氮含量影响达到显著或极显著水平。不同耕作模式对两种土质土壤不同土层全氮以及碱解氮含量影响呈现出一致规律。其中 0~20 cm 土层全氮含量和碱解氮含量表现为深耕 < 旋耕,旋耕处理下潮土土壤的全氮以及碱解氮分别比深耕处理高出 5.61% 和 3.18%,砂浆黑土分别高

6.86% 和 6.48%;20~40 cm 土层全氮含量和碱解氮含量则表现为深耕 > 旋耕,深耕处理下潮土全氮及碱解氮含量分别比旋耕处理高 7.59% 和 1.77%,砂浆黑土分别高 12.66% 和 17.75%。可见,相对旋耕处理,深耕处理能降低土壤表层氮素含量,增大 20~40 cm 土层氮素含量。但无论深耕与旋耕,两种类型土壤全氮以及碱解氮含量影响均随施氮量增加而增加。说明增施氮肥可增加土壤全氮含量以及碱解氮含量。

表 4 不同处理对不同类型土壤氮素含量的影响

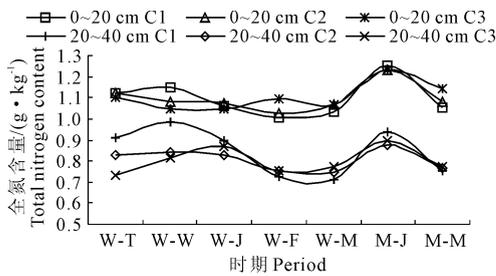
Table 4 Effects of different treatments on total nitrogen content and alkali-hydrolyzable N content of two soil types

处理 Treatments	潮土 Fluvo-aquic soil				砂浆黑土 Lime concretion black soil			
	0~20 cm		20~40 cm		0~20 cm		20~40 cm	
	全氮 Total nitrogen content /(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkali-hydrolyzable ncontent /(mg·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen content /(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkali-hydrolyzable ncontent /(mg·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen content /(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkali-hydrolyzable ncontent /(mg·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen content /(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkali-hydrolyzable ncontent /(mg·kg <sup>-1</sup> )
A1B1C1	1.10ef	99.63de	0.94a	69.83abcd	1.05g	108.63cde	0.97b	81.80ab
A1B1C2	1.06hi	104.67b	0.91b	73.60a	1.09e	112.37abc	0.99a	81.87ab
A1B1C3	1.16e	104.13bc	0.87c	72.83ab	1.06f	107.73def	0.98ab	83.80a
A1B2C1	1.06i	95.43f	0.84ef	64.53fgh	1.00i	100.83gh	0.91c	75.93abcd
A1B2C2	1.08g	101.53cd	0.83f	69.80abcd	1.07f	103.30fgh	0.91c	77.57abc
A1B2C3	1.04j	96.47f	0.81g	69.67abcd	0.99i	98.90hi	0.89d	77.50abc
A1B3C1	1.04j	92.17gh	0.78i	63.77gh	0.95k	98.83hi	0.80h	68.83cdef
A1B3C2	0.97k	95.17fg	0.84de	66.07defg	0.97j	99.60hi	0.81g	66.73cdef
A1B3C3	1.09fg	88.90i	0.83ef	65.07efgh	0.97j	95.40i	0.76i	68.43cdef
$\bar{x}$	1.07b	97.57b	0.85a	68.35a	1.02b	102.84b	0.89a	75.83a
A2B1C1	1.14 d	110.10a	0.87 c	66.83 cdefg	1.11d	113.23ab	0.85e	63.81ef
A2B1C2	1.22a	110.00a	0.75j	71.37ab	1.15a	114.13a	0.84ef	68.83cdef
A2B1C3	1.11e	100.93d	0.78i	70.87abc	1.12bc	108.87bede	0.83f	71.80 bede
A2B2C1	1.15c	100.20d	0.86cd	69.13 bcde	1.13b	110.90abcd	0.82g	61.73ef
A2B2C2	1.18b	96.07f	0.72k	68.80bcdef	1.11cd	109.67abcde	0.81g	66.10def
A2B2C3	1.18b	100.20d	0.74j	66.17defg	1.07f	105.23efg	0.79h	66.63cdef
A2B3C1	1.09fg	98.87d	0.79h	64.30gh	1.01h	108.73bede	0.70l	59.33f
A2B3C2	1.07h	96.70ef	0.78hi	65.40defgh	1.07f	108.13cde	0.75j	59.60f
A2B3C3	1.05ij	92.00h	0.78i	61.6h	1.01h	106.60def	0.72k	61.80ef
$\bar{x}$	1.13a	100.67a	0.79d	67.16a	1.09a	109.50a	0.79b	64.40b
<i>F</i> 值 <i>F</i> - value								
A	1792.52**	528.07**	945.72**	4.43	1591.37**	85.54*	9758.06**	19.67*
B	1916.66**	137.52**	915.90**	24.70**	919.40**	50.17**	3227.88**	91.32**
A × B	457.94**	3.84	354.23**	0.86	16.33**	10.41**	205.18**	8.10*
C	8.559**	19.46**	227.15**	7.05**	202.67**	18.43**	43.27**	11.12**
A × C	310.69**	22.56**	206.58**	3.12	12.61**	1.91	2.36	5.50*
B × C	87.81**	5.89**	136.28**	1.39	20.72**	0.67	12.25**	2.56
A × B × C	180.08**	10.36**	18.58**	1.75	38.90**	0.71	17.00**	0.32

注:多重比较在 18 个处理之间进行,数值后不同字母代表不同处理间差异达 5% 显著水平; $\bar{x}$  中不同小写字母表示两种耕作方式下所有氮肥运筹方式的平均值之间的差异显著( $P < 0.05$ )。\*、\*\* 分别表示差异达到 0.05、0.01 显著水平。

Note: Multiple comparisons were performed between 18 treatments, and values followed by different letters mean significant among different treatments at the 5% level. In different column of the two lines  $\bar{x}$  data, lowercase letters mean significant difference( $P < 0.05$ ) between the average of all the different treatments in one tillage practice.\* and \*\* stand for the difference reached a significant level at 0.05 and 0.01, respectively.

综合图 1~图 4 可知,土壤全氮以及碱解氮含量在追肥施入之前各个时期整体表现为 C1 > C2 > C3,即底肥施入之前随着底施氮量的增加而升高,而在追肥施入后的小麦季扬花期和成熟期以及玉米季成熟期整体表现为 C3 > C2 > C1,即追肥施入之后随着追施氮量的增加而升高。其中,C1、C2 和 C3 处理下潮土区 0~20 cm 土层土壤全氮含量周年变化范围分别为 1.01~1.26、1.03~1.23 g·kg<sup>-1</sup>和 1.05~1.23 g·kg<sup>-1</sup>,20~40 cm 土层分别为 0.71~0.99、0.75~0.88 g·kg<sup>-1</sup>和 0.73~0.90 g·kg<sup>-1</sup>。C1、C2 和 C3 处理下砂姜黑土区 0~20 cm 土层土壤全氮含量周年变化范围分别为 0.89~1.16、0.96~1.20 g·kg<sup>-1</sup>和 0.98~1.11 g·kg<sup>-1</sup>;20~40 cm 土层分别为 0.71~0.99、0.75~0.97 g·kg<sup>-1</sup>和 0.73~0.95 g·kg<sup>-1</sup>。C1、C2 和 C3 处理下潮土区 0~20 cm 土层土壤碱解氮含量周年变化范围分别为 90.6~114.7、89.3~114.5 mg·kg<sup>-1</sup>和 91.9~102.5 mg·kg<sup>-1</sup>;20~40 cm 土层分别为 55.1~82.2、60.3~80.3 mg·kg<sup>-1</sup>和 58.2~78.2 mg·kg<sup>-1</sup>。C1、C2 和 C3 处理下砂姜黑土区 0~20 cm 土层土壤碱解氮含量周年变化范围分别为 95.6~124.3、96.3~119.5 mg·kg<sup>-1</sup>和 88.1~112.2 mg·kg<sup>-1</sup>;20~40 cm 土层分别为 58.2~83.3、54.5~79.0 mg·kg<sup>-1</sup>和 54.1~80.7 mg·kg<sup>-1</sup>。



注:W-T:小麦分蘖期;W-W:小麦越冬期;W-J:小麦拔节期;W-F:小麦扬花期;W-M:小麦成熟期;M-J:玉米拔节期;M-M:玉米成熟期。下同。

Note: W-T: wheat - tillage; W-W: wheat - winter; W-J: wheat - jointing; W-F: wheat - flowering; W-M: wheat - mature; M-J: maize - jointing; M-M: maize - mature. The same below.

图 1 不同追肥方式对潮土土壤全氮含量周年变化的影响  
Fig.1 Effects of different treatments on total nitrogen content of fluvo-aquic soil

### 2.3 不同耕作方式及氮肥运筹对两种类型土壤周年作物产量的影响

表 5 表明,相对于旋耕处理,深耕明显增加了两种土壤的周年作物产量,其中潮土区增加了 4.30%,砂姜黑土区增加了 2.63%。不同施氮量对潮土周年产量影响达到显著水平,表现为随着氮肥施用总量的增加而增加,即 B1 > B2 > B3,其中,B1 处理分

别比 B2 和 B3 增产 3.57% 和 6.72%。砂姜黑土区则表现为 B2 > B1 > B3,B1 和 B2 处理显著高于 B3 处理,且 B1 比 B3 高 12.35%,B2 比 B3 高 13.12%。氮肥追施方式对潮土区周年作物产量影响达到显著水平,以 C2 和 C3 表现出较高的产量,其中 C2 处理下比 C1 高 1.60%;C3 处理比 C1 高 3.79%。氮肥追施方式对砂姜黑土地区周年作物产量影响不显著,但以 C1 处理下产量最高。三因素之间两两交互作用或者三者交互作用效果未达到显著水平。故三因素各自最佳处理的组合即为最优处理组合,即对于潮土区最优组合为 A1B1C3,而砂姜黑土区为 A1B2C1。

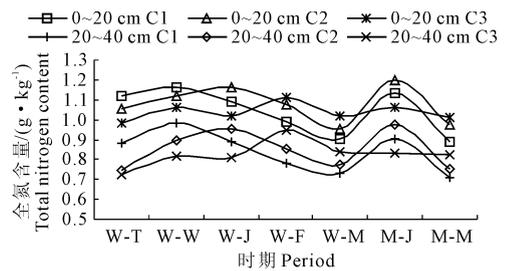


图 2 不同追肥方式对砂姜黑土土壤全氮含量周年变化的影响

Fig.2 Effects of different treatments on total nitrogen content of lime concretion black soil

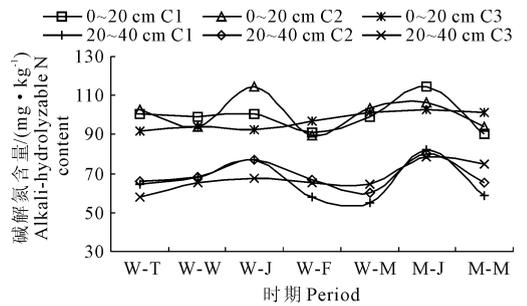


图 3 不同追肥方式对潮土土壤碱解氮含量周年变化的影响  
Fig.3 Effects of different treatments on alkali-hydrolyzable N content of fluvo-aquic soil

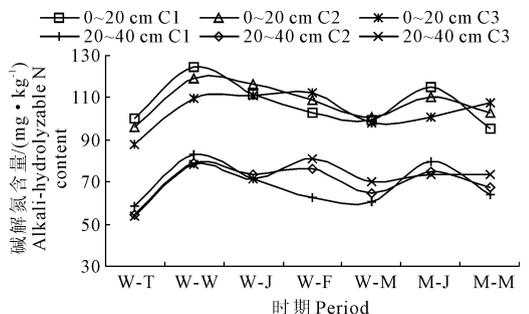


图 4 不同追肥方式对砂姜黑土土壤碱解氮含量周年变化的影响

Fig.4 Effects of different treatments on alkali-hydrolyzable N content of lime concretion black soil

表 5 不同处理对冬小麦/夏玉米产量的影响/(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 5 Effects of different treatments on annual crop yield of two soil types

处理 Treatment	潮土 Fluvo-aquic soil		砂姜黑土 Lime concretion black soil		
	A1	A2	A1	A2	
B1	C1	15413b	15590a	20975a	17807a
	C2	16375ab	15719a	18917ab	18709a
	C3	16855a	16177a	18172b	18695a
	平均 Average	16022a		18879a	
B2	C1	15476a	14608a	18827a	18072a
	C2	16503a	14855a	18797a	19410a
	C3	16036a	15336a	19747a	19197a
	平均 Average	15469b		19008a	
B3	C1	15509a	14770a	17344a	16266a
	C2	14892a	14486a	16290a	17573a
	C3	15392a	15032a	17132a	16219a
	平均 Average	15013b		16804b	
	$\bar{X}$	15828a	15175b	18467a	17994b
F 值 F - value	A	27.27*		25.78*	
	B	11.59**		27.42**	
	A × B	1.53		0.7685	
	C	3.80*		0.0144	
	A × C	0.56		2.3137	
	B × C	1.69		0.6237	
	A × B × C	0.73		0.7171	

### 3 讨论

土壤耕作措施是影响土壤理化性状的主要因素之一,其通过改变土壤的理化性状调节土壤的水、肥、气、热等因子,为作物的根系生长创造适宜的环境条件,从而达到提高作物产量的目的。前人研究报道,耕作措施对 0~20 cm 土壤容重影响较大,深层影响较小<sup>[26]</sup>。本研究结果与前人不同,本试验中,在 0~20 cm 土层,土壤容重在旋耕和深耕处理间不明显,这可能是深耕处理中,在深耕之后又旋耕一遍,导致上层两处理间差异不显著。在 20~40 cm 土层,土壤容重、土壤孔隙度和田间持水量在深耕和旋耕处理间差异显著,相对于旋耕,深耕能降低作物周年各生育时期的土壤容重、增大土壤孔隙度和增加田间持水量等。但随着生育期的加快,不同处理的容重均呈现缓慢升高的趋势,而孔隙度、田间持水量呈降低的趋势,这与前人研究也有相似之处<sup>[27]</sup>。与长期施用有机肥相比,长期施用化肥会导致土壤

结构变差,降低土壤蓄水能力以及通气透水能力<sup>[28]</sup>。亦有研究结果提出长期施用化肥并未对土壤物理性质造成显著影响<sup>[29]</sup>。本研究表明氮肥施用量及追肥方式对两种土壤容重、孔隙度及田间持水量等物理性质影响不明显。

本试验中,较旋耕处理而言,深耕处理降低了 0~20 cm 土层全氮和碱解氮含量,增加了 20~40 cm 土层全氮以及碱解氮含量,打破了养分在土壤表层富集的现象。增加氮肥施用量能提高两种类型土壤氮素含量,且追肥时期的后移和后期追肥量的增加都有利于作物生长发育后期的土壤全氮以及碱解氮含量的增加。这也与聂良鹏等<sup>[30]</sup>得出深耕能增加土壤全氮含量,且增加施氮量能显著增加土壤氮素含量<sup>[20-21]</sup>的结论一致。

耕作方式的不同会导致土壤物理性质状况的改变,从而会造成小麦群体和产量结构的明显差异<sup>[31]</sup>。大量研究表明相对于旋耕而言,深耕能显著增加冬小麦和夏玉米的产量<sup>[5,8]</sup>,拔节期追施氮肥有利于作物生育后期的营养生长和生殖生长,继而达到增产之目的<sup>[32-33]</sup>。本研究结果表明小麦季深耕玉米季免耕直播能显著提高潮土和砂姜黑土周年产量。对于潮土区,作物产量随着施氮量的增加而增加,而小麦季重施拔节肥、玉米季增施穗肥则能显著提高作物周年产量,这与前人<sup>[32-33]</sup>研究结果有相似之处;而对于砂姜黑土区,作物产量随着施氮量的增加先升高后降低,以 B2(小麦季 240 kg·hm<sup>-2</sup>,玉米季 180 kg·hm<sup>-2</sup>)产量最高,之所以追肥方式之间差异不明显,可能是由于砂姜黑土年降水量较为充沛对养分的吸附作用较强,而商丘潮土区降水较少对氮肥的响应较为明显所致。

### 4 结论

深耕能降低土壤容重、增大土壤孔隙度以及田间持水量,起到打破犁底层疏松土壤的作用,增加土壤的通透性,提高土壤贮水能力,并且降低土壤表层养分富集使养分向下层土壤转移,从而为作物根系下扎提供条件,更好地促进作物生长发育并提高产量。增施氮肥、追肥时期的后移和后期追肥比例的增加均有利于培肥地力提高作物产量。对于砂姜黑土区而言,周年施氮量到达 540 kg·hm<sup>-2</sup>时反而使作物产量下降。在潮土区和砂姜黑土区采用小麦季深耕玉米季免耕直播的模式既有利于作物周年产量的提高和土壤主要理化状况的改善,同时由于旋耕模式省工节本,又不会耽误农时,建议采用小麦季隔年深耕玉米季直播的耕作模式进行农事生产。本条件

下,在潮土区采用 B1C3(小麦季  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  纯氮,按照底肥与拔节期追肥之比为 1:1 施入,玉米季  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  纯氮,按底肥与拔节期追肥大喇叭口期追肥之比为 2:1:1 施入)施肥模式;砂浆黑土地区采用 B2C1(小麦季  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  全底施,玉米季  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  纯氮,底肥与拔节期追肥之比 3:1 施入)施肥模式为宜。

#### 参考文献:

- [1] 杨 锋,吴克宁,吕巧灵.基于 1:20 万数据库的河南省土壤空间分异及其影响因素研究[J].中国农学通报,2008,24(1):425-430.
- [2] 刘 波,吴礼树,鲁剑巍,等.不同耕作方式对土壤理化性质影响研究进展[J].耕作与栽培,2010,(2):55-58.
- [3] 武 际,郭熙盛,张祥明,等.麦稻轮作下耕作模式对土壤理化性质和作物产量的影响[J].农业工程学报,2012,28(3):87-93.
- [4] 董文旭,陈素英,胡春胜,等.少免耕模式对冬小麦生长发育及产量性状的影响[J].华北农学报,2007,22(2):141-144.
- [5] 江晓东,李增嘉,侯连涛,等.少免耕对灌溉农田冬小麦/夏玉米作物水肥利用的影响[J].农业工程学报,2005,21(7):20-24.
- [6] 彭文英.免耕措施对土壤水分及利用效率的影响[J].土壤通报,2007,38(2):379-383.
- [7] Wang X B, Cai D X, Hoogmoed W B, et al. Potential effect of conservation tillage on sustainable land use: a review of global long-term studies[J]. Pedosphere, 2006,16:587-595.
- [8] 郑成岩,崔世明,王 东,等.土壤耕作方式对小麦干物质生产和水分利用效率的影响[J].作物学报,2011,37(8):1432-1440.
- [9] 孙利军,张仁陟,黄高宝.保护性耕作对黄土高原旱地地表土壤理化性状的影响[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):207-211.
- [10] 雷金银,吴发启,王 健,等.保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J].农业工程学报,2008,24(10):40-45.
- [11] 梁淑敏,谢瑞芝,汤永禄,等.成都平原不同耕作模式的农田效应研究 I.对土壤性状及产量的影响[J].中国农业科学,2010,43(19):3988-3996.
- [12] Kahlon M S, Fausey N, Lal R. Effects of long-term tillage on soil moisture dynamics and hydraulic properties[J]. Journal of Research, 2012,49(4):242-251.
- [13] 薛少平,闫小丽,朱瑞祥,等.关中一年两熟区不同耕作模式农田土壤及作物生物学效应的研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(12):112-118.
- [14] 王宜伦,李 慧,韩燕来,等.潮土区超高产田与高产田土壤肥力差异研究[J].华北农学报,2012,27(4):197-201.
- [15] Kaiser M, Ellerbrock R H. Functional characterization of soil organic matter fractions different in solubility originating from a long-term field experiment[J]. Geoderma, 2005,127(2-4):196-206.
- [16] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005,124(1-2):3-22.
- [17] 王慎强,李 欣,徐富安,等.长期施用化肥与有机肥对潮土土壤物理性质的影响[J].中国生态农业学报,2001,9(2):77-78.
- [18] 梁 斌,赵 伟,杨学云,等.小麦—玉米轮作体系下氮肥对长期不同施肥处理土壤氮含量及作物吸收的影响[J].土壤学报,2012,49(4):748-757.
- [19] 张海林,高旺盛,陈 阜,等.保护性耕作研究现状、发展趋势及对策[J].中国农业大学学报,2005,10(1):16-20.
- [20] 吴永成,周顺利,王志敏,等.华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留[J].生态学报,2005,25(7):1620-1625.
- [21] 郭天财,宋 晓,马冬云,等.施氮水平对 2 种穗型冬小麦品种产量及氮素吸收利用的影响[J].西北植物学报,2008,28(3):554-558.
- [22] 王爽,孙 磊,陈雪丽,等.不同施氮水平对玉米产量、氮素利用效率及土壤无机氮含量的影响[J].生态环境学报,2013,22(3):387-391.
- [23] 杜章留,高伟达,陈素英,等.保护性耕作对太行山前平原土壤质量的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(5):1134-1142.
- [24] 申丽霞,王 璞.保护性耕作对土壤综合特性的影响[J].中国农学通报,2011,27(8):265-268.
- [25] 赵泽松,黄 琰,马春梅,等.耕作方式对大豆田土壤水分及容重的影响[J].农机化研究,2010,32(7):181-184.
- [26] 刘世平,张洪程,戴其根,等.免耕套种与秸秆还田对农田生态环境及小麦生长的影响[J].应用生态学报,2005,16(2):393-396.
- [27] 李 娟,李 军,尚金霞,等.轮耕对渭北旱塬春玉米田土壤理化性状和产量的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(7):867-873.
- [28] 陈 祯,崔远来,刘方平,等.不同灌溉施肥模式对水稻土物理性质的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(5):38-41.
- [29] 李 强,许明祥,齐治军,等.长期施用化肥对黄土丘陵区坡地土壤物理性质的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):103-109.
- [30] 聂良鹏.小麦—玉米一年两熟农田高产高效轮耕模式研究[D].泰安:山东农业大学,2014.
- [31] 孙允超,刘志宏,王光禄,等.秸秆还田条件下耕作方式与施氮量对强筋小麦生长、产量与品质的影响[J].山东农业科学,2016,48(4):39-42.
- [32] 田纪春,陈建省,王延训,等.氮素追肥后移对小麦籽粒产量和旗叶光合特性的影响[J].中国农业科学,2001,34(1):101-103.
- [33] 朱云集,崔金梅,王晨阳,等.小麦不同生育时期施氮对穗花发育和产量的影响[J].中国农业科学,2002,35(11):1325-1329.