

李亚杰, 徐文修, 苏丽丽, 等. 水氮管理对麦后复播大豆土壤固碳效应和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 524–531.

LI Ya-jie, XU Wen-xiu, SU Li-li, et al. Effects of water and nitrogen management on soil carbon sequestration and soybean yields in wheat–soybean cropping fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 524–531.

# 水氮管理对麦后复播大豆土壤固碳效应和产量的影响

李亚杰<sup>1</sup>, 徐文修<sup>1\*</sup>, 苏丽丽<sup>1</sup>, 王娜<sup>2</sup>, 张娜<sup>1</sup>, 王婷<sup>2</sup>, 郝维维<sup>1</sup>

(1.新疆农业大学农学院, 乌鲁木齐 830052; 2.新疆伊犁伊宁县农业技术推广中心, 新疆 伊犁 835100)

**摘要:**为探求伊犁河谷地区复播大豆高产低碳的水氮管理组合, 为建立高产固碳农业技术提供一定理论依据, 2012—2014年于伊宁县开展了不同水氮管理对复播大豆土壤总有机碳、碳库管理指数及产量影响的田间试验。采用水、氮二因素裂区试验设计, 设置4个灌水量处理: 3000(W1)、3600(W2)、4200(W3)、4800(W4) m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>; 设置3个施氮量处理: 0(N0)、150(N1)、300(N2) kg·hm<sup>-2</sup>。结果表明, 随着施氮量或灌水量的增加, 土壤有机碳、活性有机碳和非活性有机碳含量均呈现“先增后降”的趋势, 且均在W3N1组合处理下达到最大, 且其碳库管理指数和产量均达到最大。大豆产量与土壤有机碳、活性有机碳、碳库管理指数均存在正相关关系, 且与活性有机碳的相关系数最大, 达0.898, 说明W3N1组合处理不仅更有利于土壤有机碳的固定, 而且有利于复播大豆产量的提高。

**关键词:**水氮管理; 复播大豆; 土壤有机碳; 碳库管理指数

**中图分类号:** S153.6    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-2043(2016)03-0524-08    doi:10.11654/jaes.2016.03.016

## Effects of water and nitrogen management on soil carbon sequestration and soybean yields in wheat–soybean cropping fields

LI Ya-jie<sup>1</sup>, XU Wen-xiu<sup>1\*</sup>, SU Li-li<sup>1</sup>, WANG Na<sup>2</sup>, ZHANG Na<sup>1</sup>, WANG Ting<sup>2</sup>, HAO Wei-wei<sup>1</sup>

(1.Xinjiang Agricultural University, Agricultural College, Urumqi 830052, China; 2.Center of Spreading Agricultural Techniques of Yining County, Yili 835100, China)

**Abstract:** A field experiment was conducted to study the effects of different water and nitrogen management on soil organic carbon, carbon pool management index, and soybean yields in the wheat–soybean fields in Yining County from 2012 to 2014. Experimental design was water and nitrogen two factor split-plot design, with 4 irrigation levels, namely 3000(W1), 3600(W2), 4200(W3), and 4800(W4) m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, and 3 nitrogen levels: 0(N0), 150(N1), and 300(N2) kg·hm<sup>-2</sup>. Results showed that content of soil organic carbon and non-active organic carbon decreased with increasing soil depth. As nitrogen rates or irrigation water amount increased, soil organic carbon, organic carbon active and non-active organic carbon content showed "initial increase and then decrease" pattern, with the highest found at W3N1 combination treatment. Soybean yield was positively correlated with soil organic carbon, active organic carbon and carbon pool management index, with the greatest correlation coefficient found in active organic carbon. Our results suggest that the W3N1 combination would not only enhance soil organic carbon sequestration and reduce emissions, but could also improve soil fertility and increase soybean production.

**Keywords:** water and nitrogen management; soybean–wheat cropping; soil organic carbon; carbon pool management index

气候变暖已受到人们极大关注, 成为全球变化研究的三大热点之一, 而农田土壤有机碳(SOC)是全

球碳库中最活跃的一个组成部分, 受人为因素干扰最为强烈, 它不仅是引起温室效应的重要因素<sup>[1-3]</sup>, 也是农田土壤质量和肥力的重要指标<sup>[4-5]</sup>, 直接关系到农田的可持续利用, 在一定程度上决定着作物生长发育, 同时也是固碳减排的重要决策依据<sup>[6-7]</sup>。然而农田SOC的变化是一个较为复杂的问题, 不仅受自然因素的影响, 还受耕作措施、作物残体管理方

收稿日期: 2015-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31560372)

作者简介: 李亚杰(1989—), 男, 汉族, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为绿洲高效农作制度。E-mail: li317592684@qq.com

\* 通信作者: 徐文修 E-mail: xjwxw@sina.com

式、施肥制度、灌溉制度等农田管理措施的制约<sup>[8-11]</sup>,因此通过合理的农田管理措施可以实现农田土壤碳汇功能。

大量研究表明,施有机肥能增加 SOC 的含量,且化肥和有机肥配施效果更好<sup>[12-14]</sup>。陈文婷等研究了施肥对农田黑土活性有机碳含量(AOC)和土壤结构的影响,结果表明施用化肥能够提高 SOC 和 AOC 的含量<sup>[15]</sup>。但有些学者认为,单施化肥加速 SOC 分解矿化,不利于其在土壤中的积累<sup>[16]</sup>;少数学者认为,施用化肥对 SOC 含量的变化没有显著促控作用<sup>[17]</sup>;而灌水量对 SOC 含量变化的影响也不尽相同<sup>[18-20]</sup>。大量研究认为,秸秆还田可以增加 SOC 的积累,但不同的耕作措施下秸秆还田效果不一<sup>[21-22]</sup>。目前,国内有关农田管理影响 SOC 固定和积累的研究多集中在耕作措施、有机肥配施等农田管理措施方面,而有关灌溉影响的研究较少,对水氮管理体系下 SOC 积累和矿化的研究更少,俞华林等<sup>[20]</sup>研究了灌溉和施氮对免耕留茬春小麦农田 SOC、全氮和籽粒产量的影响,表明随着灌水量和施氮量的增加,SOC 的含量呈先增后降的趋势。

随着全球气候变暖,伊犁河谷地区已实现一年两熟<sup>[23-24]</sup>,光、热、水、土等资源得到充分利用,使北疆麦后复播大豆和玉米的种植模式有不断扩大的趋势<sup>[25]</sup>,这样不仅需要增加水和肥的投入,也会加大夏季作物之间的争水矛盾和土壤肥力的消耗,与单季作物相比势必对农田 SOC 造成一定的影响。寻求合理的水氮管理措施,增加土壤中碳的固定和积累、进而提高土壤肥力是目前迫切需要解决的问题。因此,本试验在前人研究的基础上,研究水氮管理措施对复播大豆农田土壤固碳效应的影响和大豆生长发育与固碳的相互关系,进而提出复播大豆高产固碳的水氮管理技术措施,为新疆应对气候变化、发展低碳农业提供一定理论依据和实践经验。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2012—2014 年在伊犁哈萨克自治州伊宁

县农业科技示范园(81°33'E,43°56'N)进行。该示范园位于天山西段,属温带大陆性半干旱气候,冬春温暖湿润,夏秋干燥高温,昼夜温差明显,年均日照可达 2800~3000 h, 年均降水量约 257 mm,60%~70%的降雨集中在 6—9 月,全年无霜期 169~175 d。该地区是新疆粮食作物主产区,小麦常年种植面积  $6.51 \times 10^5$  hm<sup>2</sup>,主要是小麦-大豆或小麦-玉米复种连作。试验区土壤类型为灰钙土,0~30 cm 土层有机质含量 23.5 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 85.2 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷 21.8 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 116 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤容重 1.36 g·cm<sup>-3</sup>。

### 1.2 田间试验设计

前茬作物为冬小麦,滴灌冬小麦水氮管理措施为灌水量 3900 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>、施氮量(尿素)270 kg·hm<sup>-2</sup>。小麦收获后复种大豆,试验采用二因素裂区试验设计。灌水量为主因子,共设 4 个灌水梯度:3000(W1)、3600(W2)、4200(W3)、4800(W4)m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>;施氮量(含 N 46%的尿素用量)为副因子,均以追肥形式施入,共设 3 个施氮水平:0(N0)、150(N1)、300(N2)kg·hm<sup>-2</sup>。结合整地各处理均深施基肥尿素 75 kg·hm<sup>-2</sup>,磷酸二铵 150 kg·hm<sup>-2</sup>,自花期开始追施氮肥,每次 150 kg·hm<sup>-2</sup>,N1 处理花期追施一次,N2 处理花期和结荚期各追施一次。各处理重复三次,共计 36 个小区,小区面积 18 m<sup>2</sup>(3.6 m×5 m)。大豆品种为黑河 43,种植密度 52.5 万株·hm<sup>-2</sup>,30 cm 等行距播种(株距 6.3 cm),每小区播种 12 行,灌溉方式为膜下滴灌,毛管铺设采用 1 管 2 行,结合整地各处理均深施基肥尿素 75 kg·hm<sup>-2</sup>,磷酸二铵 150 kg·hm<sup>-2</sup>,毛管间距 60 cm。每小区进水口均由水表控制进水量,各处理每次的灌水定额依次为 375、450、525、600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,全生育期共计灌水 8 次,具体灌水方案见表 1。

### 1.3 样品采集与指标分析方法

#### 1.3.1 采样方法

分别于 2012 年大豆播种前、2012—2014 年大豆收获后第 2 d 取土样 4 次。每个小区采用“S”取样法取 0~30 cm 土层的混合土样,将土样充分混匀后剔除动植物残体、石块等后压碎,放置于洁净白色搪瓷

表 1 不同处理各阶段的滴灌量(m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)

Table 1 Amount of drip irrigation under different treatments during different stages(m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)

| 处理<br>Treatment | 出苗水<br>Emergence | 苗期-开花期<br>Seedling-flowering stage | 开花期-结荚期<br>Flowering-podding stage | 结荚期-鼓粒期<br>Podding-graining stage | 鼓粒期-成熟期<br>Graining-maturing stage | 总计<br>Total |
|-----------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------|
| W1              | 375              | 750                                | 750                                | 750                               | 375                                | 3000        |
| W2              | 450              | 900                                | 900                                | 900                               | 450                                | 3600        |
| W3              | 525              | 1050                               | 1050                               | 1050                              | 525                                | 4200        |
| W4              | 600              | 1200                               | 1200                               | 1200                              | 600                                | 4800        |

托盘中,室内自然风干,按四分法取干土样研磨,过0.25 mm 筛,用于 SOC、AOC 的测定和碳库管理指数(CPMI)的计算。

### 1.3.2 土壤碳指标测定方法

SOC 测定采用重铬酸钾氧化分光光度法<sup>[26]</sup>。AOC 的测定采用 333 mmol·L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub> 氧化法<sup>[27]</sup>。非活性有机碳(NAOC)为 SOC 与 AOC 测定值之差<sup>[27]</sup>。

### 1.3.3 CPMI 的计算

以 2012 年大豆播前 0~30 cm 土壤为参照,其 SOC 平均含量为 11.28 g·kg<sup>-1</sup>,AOC 平均含量为 1.94 g·kg<sup>-1</sup>,土壤 CPMI 计算方法<sup>[28]</sup>如下:

碳库指数=样品全碳含量(g·kg<sup>-1</sup>)/参考土壤全碳含量(g·kg<sup>-1</sup>)

碳库活度=活性碳含量/非活性碳含量

碳库活度指数=样品碳库活度/参照土壤碳库活度

CPMI=碳库指数×碳库活度指数×100%

### 1.3.4 产量及产量构成因素的测定

在大豆成熟后进行实收测产,并计算出每公顷的产量;同时在每处理每重复选取具有代表性样点连续 10 株大豆进行室内考种,测单株荚数、单株粒数、单株粒重、百粒重。

## 1.4 数据处理与分析方法

采用 SPSS 17.0 与 Excel 2007 软件进行方差分析和多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 水氮管理对复播大豆农田 SOC 的影响

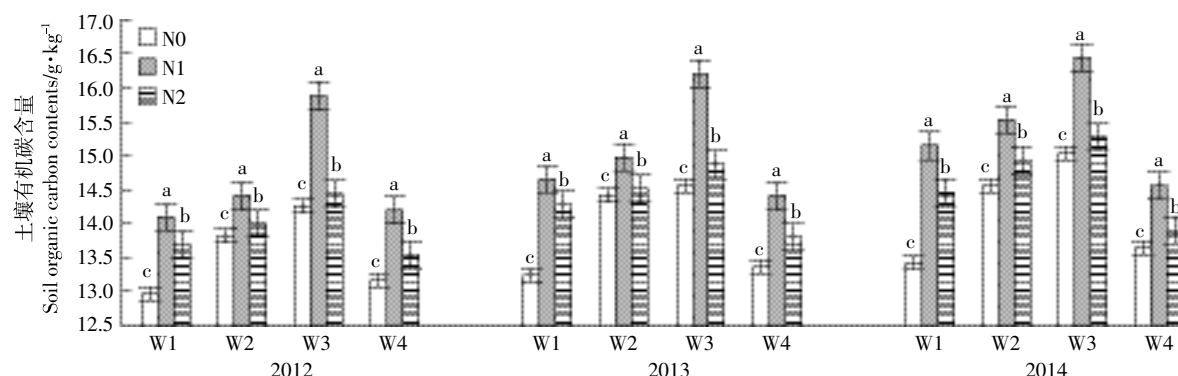
施肥和灌水直接或间接地调控农田土壤有机质

的含量,在一定程度上影响 SOC 的积累和矿化<sup>[8]</sup>。由图 1 可知,2012—2014 年各处理 SOC 的含量变化趋势相同,各年份在同一灌水量水平下,SOC 含量均随着施氮量的增加呈“先增后降”的趋势,且均在 N1 处理达到最大,N0 处理最小,处理间差异显著( $P<0.05$ ),三年平均 N1 处理的 SOC 含量分别比 N0、N2 处理增加了 8.43%、5.12%,说明滴灌条件下适量增施氮肥可以增加 SOC 的含量。与其他处理相比,N1 处理更能增加 SOC 的积累,但 N2 处理 SOC 的含量不增反降,可能是由于氮肥过多会降低土壤中的碳、氮比例,导致土壤微生物的活性提高,加剧有机碳的分解和矿化,不利于 SOC 的积累。

在同一施氮量条件下,随着灌水量的增加,三年各处理 SOC 的含量均呈现抛物线型变化趋势,其中灌水量为 W3 时达最高,且处理间差异显著( $P<0.05$ ),W3 处理三年平均的 SOC 含量分别比 W1、W2 和 W4 处理增加了 8.70%、4.42%、9.90%。这也说明在同一施氮水平条件下,在大豆生长期过少量灌水或过大量灌水都会导致土壤 SOC 含量降低,而相对适量的灌水量能够提高 SOC 含量,W3N1 组合处理最有利于增加大豆农田 SOC 的积累。

### 2.2 水氮管理对复播大豆土壤 AOC 的影响

农业生产措施引起土壤碳库的最初变化主要是易分解、矿化的那部分碳,即 AOC 部分。因此,AOC 常常作为土壤潜在生产力以及由土壤管理措施引起土壤碳库变化的早期指标<sup>[8]</sup>。由图 2 可知,各处理各年份 AOC 含量的变化趋势与 SOC 相同,且处理间差异显著( $P<0.05$ )。三年土壤 AOC 的含量均以 W3 和 N1 组合处理最好,比其他组合增加 1.79%~27.26%,说明



图中不同字母表示在 5% 水平差异显著。下同

Different letters above bars indicate significant difference at 5% level

图 1 不同水氮组合条件下土壤有机碳含量

Figure 1 Effects of water and nitrogen management on soil organic carbon

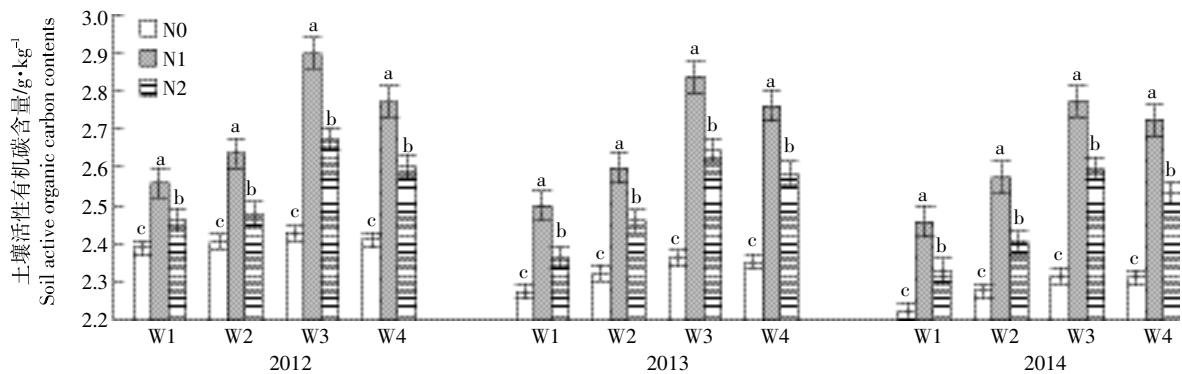


图 2 在不同水氮组合条件下的土壤活性有机碳变化

Figure 2 Effects of water and nitrogen management on soil active organic carbon

施氮肥会增加土壤中 AOC 含量。与其他处理相比, N1 处理更有利于土壤中 AOC 含量的积累, 但 N2 处理可能增强土壤中微生物活性, 导致土壤中 AOC 矿化、分解, 不利于 AOC 的积累, W3N1 组合处理更有利于土壤 AOC 的增加, 从而提高土壤肥力, 为作物的生长发育奠定基础。

### 2.3 水氮管理对复播大豆土壤 NAOC 的影响

土壤有机碳组分中不易分解和氧化、具有惰性的那部分为 NAOC, 因其决定着 SOC 的储备而在 SOC 稳定性研究中备受重视。由图 3 可知, 各年份各处理土壤的 NAOC 含量变化均随着施氮量和灌水量的增加呈抛物线型变化趋势, 且与 SOC 和 AOC 的变化趋势一致, 均在 W3N1 组合处理达到最大。

### 2.4 水氮管理对复播大豆土壤 CPMI 的影响

土壤碳库动态平衡与作物营养、土壤管理关系密切, 直接影响作物产量和土壤肥力的高低<sup>[28]</sup>。由于三年的土壤 CPMI 的变化趋势相同, 均以 W3N1 组合处理为最高, 且 2013 年的表现最好, 因此以 2013 年测定的 CPMI 分析水氮管理对其的影响。由表 2 可知, 各处理

表 2 不同水氮管理土壤碳库管理指数的变化

Table 2 Effects of water and nitrogen management on soil carbon management index

| 处理<br>Treatment | 碳库指数<br>Carbon pool index | 碳库活度<br>Lablity | 碳库活度指数<br>Lablity index | 碳库管理指数<br>Carbon pool management index |
|-----------------|---------------------------|-----------------|-------------------------|----------------------------------------|
| W1              | N0                        | 1.18Cc          | 0.21Aa                  | 118.81±0.04Cc                          |
|                 | N1                        | 1.30Aa          | 0.21Aa                  | 129.36±0.04Aa                          |
|                 | N2                        | 1.26Bb          | 0.20Aa                  | 122.71±0.02Bb                          |
| W2              | N0                        | 1.27Cc          | 0.20Aa                  | 119.40±0.04Cc                          |
|                 | N1                        | 1.33Aa          | 0.21Aa                  | 134.89±0.07Aa                          |
|                 | N2                        | 1.29Bb          | 0.20Aa                  | 126.02±0.01Bb                          |
| W3              | N0                        | 1.30Cc          | 0.19Aa                  | 120.87±0.04Cc                          |
|                 | N1                        | 1.44Aa          | 0.21Aa                  | 146.92±0.05Aa                          |
|                 | N2                        | 1.32Bb          | 0.22Aa                  | 137.24±0.14Bb                          |
| W4              | N0                        | 1.19Cc          | 0.21Aa                  | 122.40±0.03Cc                          |
|                 | N1                        | 1.28Aa          | 0.24Aa                  | 145.67±0.08Aa                          |
|                 | N2                        | 1.23Bb          | 0.23Aa                  | 135.43±0.01Bb                          |

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ); 不同大写字母表示差异极显著 ( $P<0.01$ )。下同。

Note: Capital and lowercase letters indicate significant difference at 0.01 and 0.05 level, respectively. The same below.

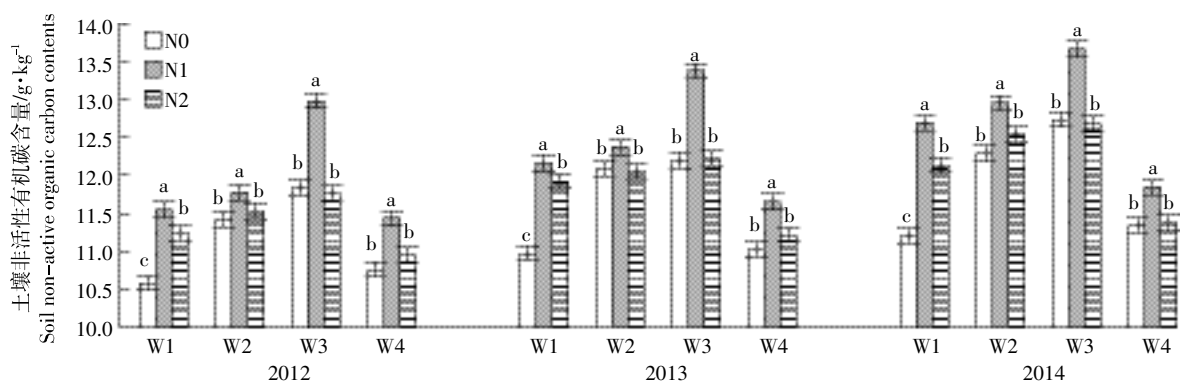


图 3 水氮管理对复播大豆土壤非活性有机碳的影响

Figure 3 Effects of water and nitrogen management on soil non-active organic carbon

间土壤碳库活度、碳库活度指数差异均不显著,但碳库指数和 CPMI 则存在极显著差异。在同一灌水量或同一施氮量水平下,碳库指数和 CPMI 均随着施氮量或灌水量的增加呈现先增后降的趋势,且 W3N1 组合处理达到最高。这说明适量的灌水量和施氮量组合改善了土壤环境,不仅有利于 SOC、NAOC 和 AOC 含量的积累,还可以增加土壤 CPMI,提高土壤肥力。

## 2.5 水氮管理对复播大豆产量的影响

灌水量和施氮量不仅影响 SOC 的含量变化,对复播大豆产量也有一定的影响。试验期间,2014 年大豆鼓粒期突遇霜冻,造成绝收。2012 年和 2013 年产量变化趋势相同,均为 W3N1 组合处理产量最高,且 2013 年产量表现最好,故以 2013 年产量进一步分析产量与 CPMI 的关系。由表 3 可知,在 W3 灌水量水平和 N1 施氮组合下,复播大豆的单株荚数、单株粒数、单株粒重、百粒重、产量均为最高,其产量分别比低水低肥(W1N0)和高水高肥(W4N2)提高 54.30%和 17.02%。

## 2.6 产量与 CPMI 的相关分析

进一步分析土壤 CPMI 与产量的关系(表 4)可知,农田土壤 AOC、SOC、CPMI 间均存在显著相关性,AOC 与 CPMI 存在极显著相关关系,说明碳库管理指数受土壤 AOC 含量影响更大。大豆产量与 SOC、AOC、CPMI 也均达显著相关,其与土壤 AOC 的相关关系最为密切,充分说明土壤 AOC 的高低不仅影响土壤质量的高低,还直接影响作物产量的高低。

## 3 讨论

### 3.1 施肥对 SOC、AOC 的影响

大量研究认为,施有机肥或有机肥与化肥配合施用,既补充输入有机碳源又改善土壤物理性状,不仅 SOC 总量增加,而且 AOC 含量也增加<sup>[29]</sup>,但施用无机肥对 SOC 影响的研究结果则各不相同<sup>[30]</sup>。一些学者认为长期单独施用化肥,会使 SOC 总量下降,而且轻组有机碳量的减少大幅超过重组碳,结果导致土壤中 NAOC 含量上升、土壤有机质老化<sup>[31]</sup>;但也

表 3 不同水氮处理对复播大豆产量及产量构成因素的影响

Table 3 Effects of different water and nitrogen treatments on yield and yield components of soybean

| 处理 Treatment |    | 单株荚数<br>Pods per plant/个 | 单株粒数<br>Seeds per plant/粒 | 单株粒重<br>Grain weight per plant/g | 百粒重<br>100-seed weight/g | 产量<br>Yield/kg·hm <sup>-2</sup> |
|--------------|----|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| W1           | N0 | 15.62±0.12Bb             | 34.05±1.05Bc              | 6.07±0.07Cc                      | 14.68±0.02Bc             | 2 424.70±15.36Cc                |
|              | N1 | 19.13±0.10Aa             | 39.76±1.10Aa              | 6.46±0.06Bb                      | 15.00±0.03Ab             | 2 711.88±16.24Bb                |
|              | N2 | 18.95±0.10Aa             | 37.29±1.20Ab              | 6.88±0.08Aa                      | 14.92±0.05Aa             | 2 876.93±17.42Aa                |
| W2           | N0 | 16.13±0.03Bb             | 35.93±1.03Bc              | 6.32±0.02Cc                      | 14.99±0.04Cc             | 2 612.09±15.48Cc                |
|              | N1 | 21.32±0.30Aa             | 43.27±1.07Aa              | 7.65±0.04Aa                      | 15.64±0.01Aa             | 3 282.39±10.46Aa                |
|              | N2 | 20.91±0.20Aa             | 40.47±1.23Ab              | 7.49±0.05Bb                      | 16.08±0.04Bb             | 3 156.17±20.13Bb                |
| W3           | N0 | 18.30±0.30Bb             | 39.85±0.85Bc              | 7.38±0.03Cc                      | 15.97±0.02Bc             | 3 086.41±9.89Cc                 |
|              | N1 | 22.54±0.40Aa             | 48.98±2.00Aa              | 9.25±0.02Aa                      | 16.17±0.04Aa             | 3 741.23±14.24Aa                |
|              | N2 | 21.84±0.10Aa             | 45.37±1.37Ab              | 8.43±0.07Bb                      | 16.01±0.03Bb             | 3 522.91±16.28Bb                |
| W4           | N0 | 17.98±0.08Bb             | 38.56±0.56Bc              | 7.04±0.40Cc                      | 15.79±0.03Bc             | 2 953.17±18.15Cc                |
|              | N1 | 21.16±0.06Aa             | 44.35±1.05Aa              | 8.48±0.06Aa                      | 16.04±0.05Aa             | 3 450.16±16.27Aa                |
|              | N2 | 20.08±0.12Aa             | 41.64±1.64Ab              | 7.39±0.01Bb                      | 15.83±0.03Bb             | 3 197.12±14.49Bb                |

表 4 产量与碳库管理指数的相关性

Table 4 Correlation between yield and carbon pool management index

| R                                   | 土壤有机碳<br>Soil organic carbon | 活性有机碳<br>Active organic carbon | 碳库管理指数<br>Carbon pool management index | 产量<br>Yield |
|-------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|-------------|
| 土壤有机碳 Soil organic carbon           | 1                            |                                |                                        |             |
| 活性有机碳 Active organic carbon         | 0.715*                       | 1                              |                                        |             |
| 碳库管理指数 Carbon pool management index | 0.634                        | 0.994**                        | 1                                      |             |
| 产量 Yield                            | 0.726*                       | 0.898**                        | 0.881*                                 | 1           |

注:\*表示显著相关;\*\*表示极显著相关。

Note:\* indicates a significant correlation,\*\* means a very significant correlation.

有研究认为,施用化肥可以增加 SOC 的含量<sup>[32-33]</sup>。亦有学者认为,施用化肥对 SOC 和 AOC 含量的变化没有显著促控作用<sup>[17]</sup>。本研究认为,追施氮肥可以增加 SOC 和 AOC 的含量,其中大豆花期追施氮肥(N1)更能增加 SOC 的积累,豆荚期继续追施氮肥(N2),SOC 的含量不增反降。

### 3.2 水氮管理对土壤有机碳库的贮量及作物产量的影响

目前关于水氮管理对作物产量的影响研究很多,多数研究表明节水灌溉模式下适宜的氮肥运筹对提高作物产量的作用显著,且水氮间存在显著的互作效应<sup>[34-36]</sup>。但关于水氮管理对 SOC 影响的研究较少,俞华林对滴灌冬小麦的研究表明,在 0~140 kg·hm<sup>-2</sup> 施氮范围,增施氮肥明显增加 SOC 含量;适量灌溉(261 mm)可以增加 SOC 含量,若少量或过量灌溉则降低 SOC 的含量<sup>[20]</sup>,与本研究结果相似。说明无论是冬播作物,还是夏复播作物,农田作物水氮管理措施均会影响农田土壤有机碳库的贮量,而且适宜的灌水量和施氮量组合可以实现农田土壤固碳和提高作物产量的目标。

## 4 结论

(1)在不同的水氮管理模式下,随着灌水量和施氮量的增加,土壤 0~30 cm 平均 SOC、AOC、NAOC 含量均呈现先增加后降低的趋势,且三年均以 W3N1 组合处理为最大。

(2)产量及产量构成因素均为 W3N1 组合处理达到最好,说明适宜的水氮组合措施更有利于农田土壤固碳,而且有利于复播大豆产量的提高。

(3)大豆产量与 SOC、AOC、CPMI 均存在相关关系,且与 AOC 的相关系数最大,表明 AOC 的高低直接影响到产量的高低。

### 参考文献:

- [1] 齐 晔,李惠民,王 晓. 农业与中国的低碳发展战略[J]. 中国农业科学, 2012, 45(1):1-6.
- [2] QI Ye, LI Hui-min, WANG Xiao. Agriculture and low-carbon development strategy in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(1):1-6.
- [3] Zhang G S, Huang G B, Chen Y. Soil organic carbon sequestration potential in cropland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2):351-357.
- [4] 刘满强,胡 锋,陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(6):2642-2649.
- [5] LIU Man-qiang, HU Feng, CHEN Xiao-yun. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6):2642-2649.
- [6] 兰 延,黄国勤,杨滨娟,等. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13):146-152.
- [7] LAN Yan, HUANG Guo-qin, YANG Bin-juan, et al. Effect of green manure rotation on soil fertility and organic carbon pool[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13):146-152.
- [8] 张丽敏,徐明岗,姜翼来,等. 土壤有机碳分组方法概述[J]. 中国土壤与肥料, 2014(4):1-6.
- [9] ZHANG Li-min, XU Ming-gang, LOU Yi-lai, et al. Soil organic carbon fractionation methods[J]. *Soil and Fertilizer in China*, 2014(4):1-6.
- [10] Franz C, Jens L. A new facet of soil organic matter[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 185:186-187.
- [11] 何翠翠. 长期不同施肥措施对黑土土壤碳库及其酶活性的影响研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2014.
- [12] HE Cui-cui. Effects of long-term fertilization on soil carbon pools and enzymes activity of black soil in cropland of Northeast China[D]. Beijing: The Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [13] 张 国,曹志平,胡婵娟. 土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7):1921-1930.
- [14] ZHANG Guo, CAO Zhi-ping, HU Chan-juan. Soil organic carbon fractionation methods and their applications in farm land ecosystem research: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7):1921-1930.
- [15] 王发刚,王启基,王文颖,等. 土壤有机碳研究进展[J]. 草业科学, 2008, 25(2):48-54.
- [16] WANG Fa-gang, WANG Qi-ji, WANG Wen-ying, et al. Research progress on soil organic carbon[J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(2):48-54.
- [17] 周 莉,李保国,周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1):99-105.
- [18] ZHOU Li, LI Bao-guo, ZHOU Guang-sheng. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1):99-105.
- [19] 李小涵,郝明德,王朝辉,等. 农田土壤有机碳的影响因素及其研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(3):176-181.
- [20] LI Xiao-han, HAO Ming-de, WANG Zhao-hui, et al. Factors affecting soil organic carbon in cropland and their regulation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(3):176-181.
- [21] Wang C J, Pan G X, Tian Y G, et al. Changes in cropland topsoil organic carbon with different fertilizations under long-term agro-ecosystem experiments across mainland China[J]. *Science in China. Series C:Life Sciences*, 2010, 53(7):858-867.
- [22] 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.
- [23] ZENG Jun, DONG Bo, ZHANG Dong-wei, et al. Effect of long-term fertilization on organic, inorganic and microbial biomass carbon in irrigated desert soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(2):35-38.
- [24] 徐香茹,蔡岸冬,徐明岗,等. 长期施肥下水稻土有机碳固持形态与特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4):753-760.

- XU Xiang-ru, CAI An-dong, XU Ming-gang, et al. Characteristics of organic carbon stabilization in paddy soil under long-term different fertilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4):753-760.
- [15] 陈文婷, 刘晓冰, 隋跃宇. 施肥对梯度有机质含量农田黑土各类有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1403-1407.
- CHEN Wen-ting, LIU Xiao-bing, SUI Yue-yu, et al. Effect of fertilization on different types of active organic carbon along soil organic matter gradient in arable black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 1403-1407.
- [16] Powelson D S, Prookes P C, Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation[J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19(2):159-164.
- [17] 曾 骏, 郭天文, 包兴国, 等. 长期施肥对土壤有机碳和无机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(2): 11-14.
- ZENG Jun, GUO Tian-wen, BAO Xing-guo, et al. Effects of soil organic carbon and soil inorganic carbon under long-term fertilization[J]. *Soil and Fertilizer in China*, 2008(2): 11-14.
- [18] 韩 琳, 张玉龙, 金 烁, 等. 灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(8):625-633.
- HAN Lin, ZHANG Yu-long, JIN Shuo, et al. Effect of different irrigation patterns on soil dissolved organic carbon and microbial biomass carbon in protected field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(8): 625-633.
- [19] 王 成, 李 宁, 王兴鹏, 等. 不同生育阶段咸水滴灌对红枣根区土壤有机碳垂直分布特性的影响[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5):883-889.
- WANG Cheng, LI Ning, WANG Xing-peng, et al. Vertical distribution of soil organic carbon content in rhizosphere of jujube at its different growth stages under drip irrigation with salty water[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(5): 883-889.
- [20] 俞华林, 张恩和, 王 琦, 等. 灌溉和施氮对免耕留茬春小麦农田土壤有机碳、全氮和籽粒产量的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(3):227-233.
- YU Hua-lin, ZHANG En-he, WANG Qi, et al. Effects of irrigation and N supply levels on soil organic carbon, total nitrogen and grain yield of spring wheat on no-tillage farmland with standing stubble[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(3):227-233.
- [21] 魏燕华, 赵 鑫, 翟云龙, 等. 耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17):87-95.
- WEI Yan-hua, ZHAO Xin, ZHAI Yun-long, et al. Effects of tillage's on soil organic carbon sequestration in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(17): 87-95.
- [22] 姬 强, 孙汉印, Taraqqi A K, 等. 不同耕作措施对冬小麦-夏玉米复种连作系统土壤有机碳和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4):1029-1035.
- JI Qiang, SUN Han-yin, Taraqqi A K, et al. Impact of different tillage practices on soil organic carbon and water use efficiency under continuous wheat-maize binary cropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4):1029-1035.
- [23] 牛海生, 徐文修, 徐娇媚, 等. 气候突变后伊犁河谷两熟制作物种植区的变化及风险分析[J]. 中国农业气象, 2014, 35(5):516-521.
- NIU Hai-sheng, XU Wen-xiu, XU Jiao-mei, et al. Double cropping zone change and its risk analysis in Ili River basin under climate abrupton[J]. *Chinese Journal of Agro-Meteorology*, 2014, 35(5):516-521.
- [24] 徐娇媚, 徐文修, 李大平. 近51a伊犁河谷热量资源时空变化[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3):472-480.
- XU Jiao-mei, XU Wen-xiu, LI Da-ping. Spatiotemporal variation of heat resources in the Ili River basin in recent 51 years[J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(3):472-480.
- [25] 张占琴, 魏建军, 杨相昆, 等. 北疆“一年两作”冬小麦-复播青贮玉米模式物质生产及资源利用率研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6):28-33.
- ZHANG Zhan-qin, WEI Jian-jun, YANG Xiang-kun, et al. Dry matter production and resources use efficiency of double-cropping winter wheat-forage maize system in North Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(6):28-33.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Analysis methods for soil chemistry of agriculture[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [27] 徐明岗, 于 荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4):459-465.
- XU Ming-gang, YU rong, SUN Xiao-feng, et al. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4):459-465.
- [28] 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.
- ZHANG Gui-long, ZHAO Jian-ning, SONG Xiao-long, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon and carbon pool management index [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2):359-365.
- [29] 刘 骅, 佟小刚, 马兴旺, 等. 长期施肥下灰漠土矿物颗粒结合有机碳含量及其演变特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1):84-90.
- LIU Hua, TONG Xiao-gang, MA Xing-wang, et al. Content and evolution characteristics of organic carbon associated with particle-size fractions of grey desert soil under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1):84-90.
- [30] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5):931-938.
- GAO Hui-yi, GUO Sheng-li, LIU Wen-zhao, et al. Effect of fertilization on organic carbon distribution in various fractions of aggregates in caliche soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5):931-938.
- [31] 陈文婷. 施肥对不同有机质含量农田黑土土壤活性有机碳和土壤结构的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- CHEN Wen-ting. Fertilization effects on active organic carbons and soil structure in black soil farmland with different soil organic matter contents[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013.
- [32] 王 伟, 王晓君, 黄从德, 等. 施肥对梁山慈竹林土壤有机碳和微生物

- 物量碳的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3):269-272, 288.
- WANG Wei, WANG Xiao-jun, HUANG Cong-de, et al. Impact fertilization on soil organic carbon and soil microbial biomass carbon in *Dendrocalamus farinosus* forest[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3):269-272, 288.
- [33] 郭胜利, 高会议, 党廷辉. 施氮水平对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳、氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4):808-814.
- GUO Sheng-li, GAO Hui-yi, DANG Ting-hui. Effects of nitrogen application rates on grain yield, soil organic carbon and nitrogen under a rainfed cropping system in the loess tablelands of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2009, 15(4):808-814.
- [34] 孙永健, 孙园园, 徐 徽, 等. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(9):1639-1649.
- SUN Yong-jian, SUN Yuan-yuan, XU Hui, et al. Effects of water-nitrogen management patterns on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(9):1639-1649.
- [35] 吕丽华, 董志强, 张经廷, 等. 水氮对冬小麦-夏玉米产量及氮利用效应研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19):3839-3849.
- LÜ Li-hua, DONG Zhi-qiang, ZHANG Jing-ting, et al. Effect of water and nitrogen on yield and nitrogen utilization of winter wheat and summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(19):3839-3849.
- [36] 刘振香. 不同水肥处理对夏玉米田土壤理化性质及微生物特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- LIU Zhen-xiang. Effects of irrigation and nitrogen on physical and chemical properties and microbiologic properties of soil on summer corn field[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014.