

# 减氮配施有机肥对华北平原夏玉米 土壤水分及水氮利用的影响

李银坤<sup>1,2</sup>, 梅旭荣<sup>1,2</sup>, 夏旭<sup>1,2</sup>, 郝卫平<sup>1,2</sup>, 陈敏鹏<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所 农业部旱作节水农业重点实验室, 北京 100081; 2. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:**为实现华北平原夏玉米的高产及水氮的高效利用,基于 2 年田间小区试验研究了不施氮肥(CK)、习惯施氮(CN, 228 kgN/hm<sup>2</sup>)、氮肥减量(ON, 152 kgN/hm<sup>2</sup>)以及氮肥减量与有机肥等氮配施(ONM, 152 kgN/hm<sup>2</sup>)对夏玉米土壤贮水及水氮利用的影响。结果表明:夏玉米期间的 0—160 cm 土壤贮水量受降雨和灌水的影响大,而在夏玉米拔节—成熟期生长耗水是引起土壤贮水变化的重要原因。处理 ONM 增加了 0—160 cm 土壤贮水量,相比处理 CN 可提高 8.8%~10.5% ( $p < 0.05$ )。在 2012 夏玉米收获时,处理 ONM 和 CN 的 0—40 cm 土壤含水量相比播前分别降低了 14.5% ( $p < 0.05$ ) 和 5.7%。说明处理 ONM 消耗了更多的土壤水分。夏玉米的播种—苗期和拔节—抽雄期耗水量大,占到全生育期耗水量的 55.1%~66.0%。相比处理 CK 和 CN,处理 ONM 减少了播种—苗期的耗水,增加了拔节—成熟期的耗水,夏玉米水分利用效率均值也分别提高了 8.9% 和 7.4% ( $p < 0.05$ )。与处理 CN 相比,处理 ONM 的夏玉米产量和氮肥偏生产力分别提高了 11.8% ( $p < 0.05$ ) 和 58.9% ( $p < 0.05$ )。综上所述,在华北平原高产粮区,比习惯施氮减量 1/3 且与有机肥等氮配施不仅具有较高的土壤贮水,且增加了夏玉米产量,显著提高了水氮利用效率。

**关键词:** 氮肥减施; 有机肥; 夏玉米; 土壤贮水; 水氮利用效率

中图分类号: S513; S143.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)05-0054-07

## Effect of Nitrogen Reduction and Combined Application of Organic Fertilizer on Soil Water Dynamics and Water and Nitrogen Use Efficiency of Summer Maize in North China Plain

LI Yinkun<sup>1,2</sup>, MEI Xurong<sup>1,2</sup>, XIA Xu<sup>1,2</sup>, HAO Weiping<sup>1,2</sup>, CHEN Minpeng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS/Key Laboratory of Dryland Agriculture of ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;  
2. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** In order to achieve the high yield, and water and nitrogen efficient utilization, a 2-year field experiment was conducted in North China Plain to study the effects of various nitrogen application practices on soil water storage, and water and nitrogen utilization for summer maize. Four treatments were no nitrogen (CK), traditional nitrogen (CN, 228 kgN/hm<sup>2</sup>), reduced nitrogen (ON, 152 kgN/hm<sup>2</sup>) and combined nitrogen fertilizer and organic fertilizer (ONM, 152 kgN/hm<sup>2</sup>). The results indicated that the variation in seasonal soil water storage was affected by precipitation and irrigation, and was also mainly affected by summer maize growth from the jointing to mature stage; soil water storage in the 0~160 cm soil layer of the ONM treatment increased compared with the CN treatment, with increases of 8.8%~10.5% in both years ( $p < 0.05$ ); the soil water content was lower at the end of the growing season than at the beginning in the 0~40 cm soil

收稿日期: 2017-09-08

修回日期: 2017-11-09

资助项目: 农业部旱作节水农业重点实验室开发基金(2016KLDA01); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金(BSRF201504); 国家科技支撑计划课题(2015BAD22B03)

第一作者: 李银坤(1982—), 男, 山东菏泽人, 博士, 高级工程师, 主要从事农田水分和养分研究。E-mail: liyk@nercita.org.cn

通信作者: 郝卫平(1970—), 男, 内蒙古包头人, 研究员, 主要从事旱地农业节水研究。E-mail: haoweiping@ieda.org.cn

layer under ONM and CN treatments, with decreases of 14.5% ( $p < 0.05$ ) and 5.7%, respectively, demonstrating that treatment ONM has consumed much more soil water; the summer maize water consumption from sowing time to seeding stage and jointing to tasseling stage was higher, which had accounted for 55.1% ~ 66.0% of the total crop evapotranspiration; treatment ONM could decrease and increase water consumption during sowing time-seeding stage and jointing-mature stage, respectively, and the average of water use efficiency increased by 8.9% and 7.4% ( $p < 0.05$ ), compared with treatments CK and CN, respectively; for treatment ONM, the average of yield and nitrogen partial factor productivity was increased by 11.8% ( $p < 0.05$ ) and 58.9% ( $p < 0.05$ ), respectively, compared with treatment CN. In conclusion, reducing the rate of nitrogen at 1/3 based on traditional nitrogen and combined application organic fertilizer can improve soil water storage, and increase summer maize yield and water use efficiency significantly.

**Keywords:** nitrogen application reduction; organic fertilizer; summer maize; soil water storage; water and nitrogen use efficiency.

华北平原是我国重要的粮食生产基地,据统计,粮食播种面积和产量分别占全国的14.0%和12.4%左右<sup>[1]</sup>。玉米作为华北平原主要的粮食作物,其产量可占全国玉米总产的1/3左右<sup>[2]</sup>,该区的玉米生产对稳定国家的粮食安全起着非常重要的作用。氮肥的大量投入是当地人们追求高产的重要手段,研究表明,华北平原地区夏玉米产量最高时的施氮量平均只有190 kgN/hm<sup>2</sup><sup>[3]</sup>,而当地农民习惯的氮肥施用量在250 kgN/hm<sup>2</sup>左右<sup>[4-5]</sup>。施用氮肥能够促进作物生长和提高产量,但氮肥施用过量不仅无益于产量提高,且导致水肥利用效率的降低<sup>[6-8]</sup>。有机无机肥配施具有改善土壤微生物区系特征、增加土壤养分供应、提高土壤保墒能力以及促进作物生长发育等优点<sup>[9-10]</sup>。现有研究<sup>[11-12]</sup>也表明,化肥和有机肥等氮配施不仅能改善作物耗水特性,增加关键生育阶段的水分供应,而且能够提升作物产量的稳定性与可持续性,显著提高水分和氮的利用效率。可见通过合理施肥能够实现稳产及水肥的高效利用。山东省桓台县是我国重要的粮食产区,1990年就成为长江以北的第一个“吨粮县”<sup>[13]</sup>,化肥的大量投入为当地粮食的高产做出了很大贡献,但同时也带来了高昂的环境代价<sup>[14]</sup>。因此,合理减少氮肥投入,优化施肥结构,提高水肥利用效率,对于维护当地农田生态系统生态安全和粮食安全具有深远意义<sup>[15]</sup>。本文采用田间小区试验,通过研究氮肥减量及其与有机肥配施对夏玉米土壤水分及水氮利用的影响,旨在为华北平原高产粮区的合理施肥及水肥的高效利用提供科学理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验于2011—2012年在山东省淄博市桓台县华北集约化农业生态系统试验站进行,地理坐标为

117°58'E, 36°57'N;年平均气温12℃左右,多年年均降雨量543 mm,53%的降雨集中在7月、8月份,属于北温带大陆季风气候区。试验地土壤质地为冲积潮褐土,耕层(0—20 cm)土壤全氮1.13 g/kg,有机质19.1 g/kg,有效磷18.8 mg/kg,速效钾113.0 mg/kg。研究对象为夏玉米,供试品种为郑单958,2011年6月22日播种,9月29日收获;2012年6月16日播种,9月24日收获。

### 1.2 试验设计

试验设置4个处理:CK,不施氮;CN,习惯施氮;ON,2/3习惯施氮量;ONM,有机肥与氮肥1:1(含N量)配施,但与处理ON等氮量。每处理3重复,完全随机排列,试验小区面积为3.3 m×4 m,小区与小区之间用1.6 m深包裹双层薄膜的PVC板进行隔离。试验中习惯施氮量为228 kgN/hm<sup>2</sup>,氮肥为尿素(N 46%),磷肥为重过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 30%),钾肥为硫酸钾(含K<sub>2</sub>O 50%),有机肥为鸡粪,全氮含量11.5 g/kg(湿基)。氮肥的50%基施,剩余部分在夏玉米大喇叭口期追施,磷钾肥与有机肥均一次性基施。各处理的磷钾肥用量与灌水量均相同,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>为90 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O为90 kg/hm<sup>2</sup>;灌溉方式为管灌,2011夏玉米在6月30日灌水1次,2012夏玉米在6月18日和7月26日各灌水1次,灌水量为100 mm/次。

### 1.3 测定项目与方法

试验期间降雨量数据通过试验站气象自动观测站获取,土壤水分由TDR测定,测定深度为0—160 cm,间隔为20 cm,每7~10 d测定一次,若遇降雨或灌水进行加测。

在夏玉米成熟期每个小区随机选取3株生长发育基本一致的植株,分成根、茎、叶和穗等几部分,首先将植株样品105℃杀青30 min,然后75℃烘干至恒重,称干重,得到夏玉米的生物量。

夏玉米成熟时对各小区进行单独收获、脱粒、晒干和测产,各处理产量为3个重复小区产量的平均值。

夏玉米耗水量计算公式为:

$$ET=W_1-W_2+R+I$$

式中:ET为夏玉米生育期耗水量(mm); $W_1$ 为播种时土壤剖面初始贮水量(mm); $W_2$ 为收获后土壤剖面贮水量(mm);R为降雨量(mm);I为灌溉量(mm)。

水分利用效率计算公式为:

$$WUE=Y/ET$$

式中:WUE为夏玉米水分利用效率(kg/mm);Y为夏玉米产量(kg/hm<sup>2</sup>)。

氮肥偏生产力计算公式为:

$$PFp=Y/F$$

式中:PFp为氮肥偏生产力(kg/kg);F为氮肥用量(kgN/hm<sup>2</sup>)。

#### 1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Office Excel 2007 和

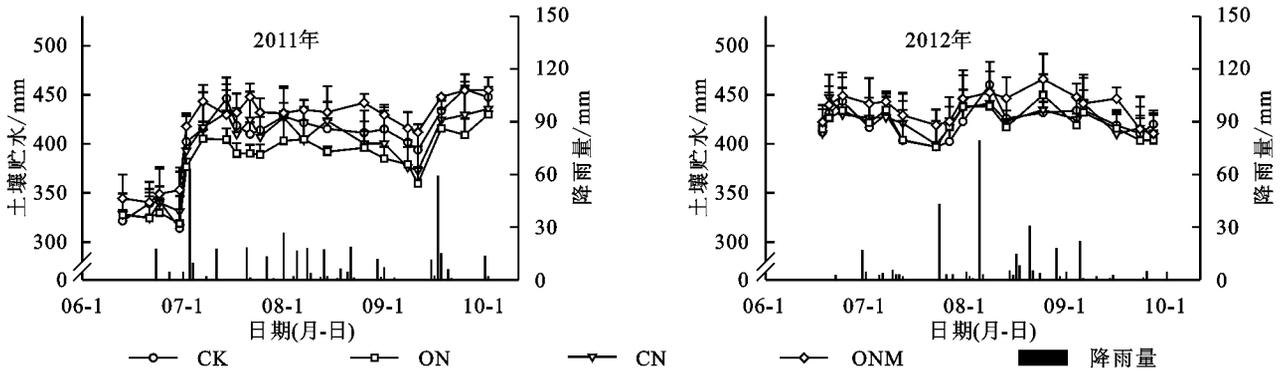


图1 土壤贮水(0—160 cm)季节动态变化(2011,2012)

2012年夏玉米的土壤贮水变化幅度相对较小,仅为396.9~466.1 mm。该季夏玉米的灌水量达200 mm,分布在6月18日与7月28日,是引起6—7月份0—160 cm土壤贮水波动的重要原因。8月份降雨量有170.2 mm,占夏玉米生育期降雨总量的58.4%,0—160 cm土壤贮水量相对较高,各处理在440 mm左右波动。而9月份的降雨量只有33 mm,各处理0—160 cm土壤贮水呈下降趋势。处理ONM具有相对较高的土壤贮水,其在2011年9月8日与2012年9月13日的0—160 cm土壤贮水量分别为411.93 mm与446.2 mm,比处理CN分别提高了10.5%和8.8% ( $p<0.05$ ),相比处理ON也分别增加了14.5%和7.3% ( $p<0.05$ )。处理ONM充足的土壤贮水确保了夏玉米生长需求。

#### 2.2 土壤剖面水分变化

图2可以看出,2011夏玉米播前的剖面土壤含水量较低,0—40 cm土壤含水量变动幅度在12.5%~18.2%。在夏玉米收获时,0—160 cm剖面土壤水分相

SAS 9.1 统计分析,并用LSD多重比较法比较分析数据差异的显著性( $p<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤贮水动态变化

图1为夏玉米0—160 cm土壤贮水动态变化。各处理土壤贮水量随着时间的延长变化趋势一致,其中2011年的0—160 cm土壤贮水变化幅度达313.8~455.7 mm。尽管在2011年夏玉米播种后的6月23日有100 mm的灌水,但各处理在6月的0—160 cm土壤贮水依旧低于350 mm;7月份降雨量达149.5 mm,各处理的0—160 cm土壤贮水均有显著增加( $p<0.05$ ),变动幅度为374.4~447.9 mm。8月降雨量有108.7 mm,各处理0—160 cm土壤贮水在400 mm左右波动,变化相对稳定。降雨量在9月份也有108.8 mm,但降雨较为集中(仅9月14日降雨量就达58.7 mm),各处理0—160 cm土壤贮水为359.8~455.7 mm,波动幅度增大。

比播前均有明显增加,其中0—20 cm的土壤含水量增加幅度最大,增幅达77.8%~107.7% ( $p<0.05$ ),20—40 cm的土壤含水量也有40.5%~56.3%的增加( $p<0.05$ );随着土层深度的进一步增加,增幅呈减少趋势,至140—160 cm土层时含水量的增加平均只有12.1%。可见,2011夏玉米期间的灌水和降雨(488.7 mm)不仅能够满足其生长需求,还主要补充了表层土壤水分(0—40 cm)。其中对处理ONM的表层土壤水分增加最为显著,与处理CK,CN和ON相比,夏玉米收获后0—20 cm土壤含水量分别增加了10.6%,13.7% ( $p<0.05$ )和5.5%。

与2011夏玉米相比,2012夏玉米播前与收获后的剖面土壤水分变化相对较小,其中收获后的0—20 cm土壤含水量相比播前降低了8.6%~16.8%,20—40 cm土壤含水量相比播前也降低了2.7%~12.2%。这主要是由于2012年9月份的降雨量仅有33 mm,且夏玉米生长对水分的需求量大,导致在收获时0—40 cm土壤含水量下降。处理ONM的下降

幅度最大,与播前相比,收获时 0—40 cm 土壤含水量平均降低了 14.5% ( $p < 0.05$ ),处理 CK, CN 和 ON 分别降低了 8.5%, 5.7% 和 6.0%。收获后 40—100 cm 的土壤含水量相比播前有所增加,而在 100—160 cm 土层,播前与收获后的土壤水分差异相对较小。

可见,0—40 cm 剖面土壤的水分在夏玉米生长期间变化较大,且主要受到降雨或灌水的补给以及夏玉米生长耗水的双重影响,其中在降雨或灌水不足时处理 ONM 的夏玉米生长耗水引起了 0—40 cm 土壤含水量的显著下降。

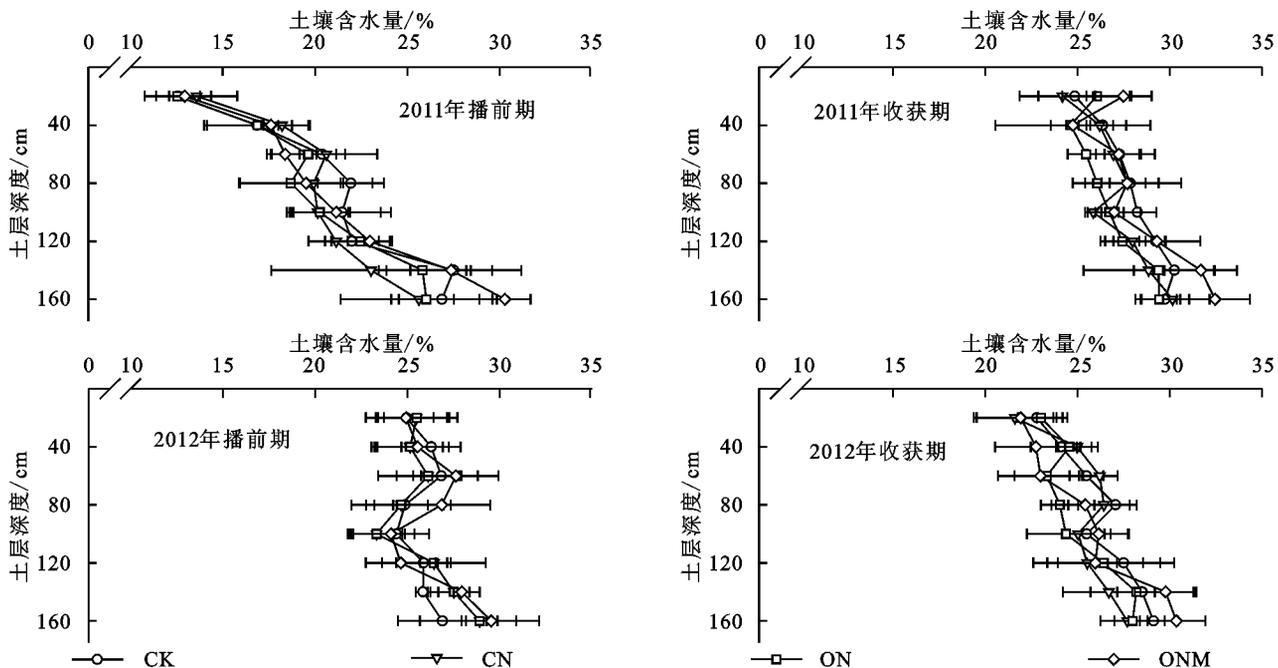


图 2 2011—2012 年剖面(0—160 cm)土壤含水量变化

### 2.3 夏玉米耗水特征

表 1 为夏玉米的生育期耗水量变化。可以看出,随着生育期的推进,夏玉米耗水量呈先降低后升高继而再下降的趋势。其中,2011 年夏玉米播种—苗期的阶段耗水量最高,其次为拔节—抽雄期,2 个阶段的夏玉米耗水量可占整个生育期的 55.1%~55.8%;而苗期—拔节以及灌浆—成熟期的耗水量均较低,分别占到整个生育期耗水量的 7.5%~13.4%

和 12.3%~17.9%。2012 夏玉米耗水表现出同样的规律,阶段耗水量最大的时期位于拔节—抽雄和播种—苗期,耗水量占到全生育期的 60.9%~66.0%;而苗期—拔节以及灌浆—成熟期的耗水量分别占该季夏玉米总耗水量的 7.8%~9.1%和 9.6%~13.9%。由此说明,播种—苗期和拔节—抽雄期是夏玉米耗水量较大的阶段,期间水分的充足供给显得尤为重要。

表 1 夏玉米不同生育阶段耗水量

年际	生育期	CK	CN	ON	ONM
2011	播种—苗期	119.5±12.9a	116.8±10.4a	118.3±5.93a	99.2±20.1a
	苗期—拔节	43.0±5.18ab	29.6±9.31b	52.3±13.9a	32.9±12.5b
	拔节—抽雄	94.3±10.4a	100.8±30.3a	98.1±7.60a	115.4±13.6a
	抽雄—灌浆	65.9±16.5b	99.3±8.67a	65.0±15.2b	68.5±15.3ab
	灌浆—成熟	61.2±17.1a	48.5±15.7a	56.7±20.1a	68.7±6.77a
	全生育期	383.8±13.4a	395.0±15.7a	390.3±11.8a	384.5±19.9a
2012	播种—苗期	114.7±5.93a	103.9±3.77a	112.7±23.2a	100.6±20.3a
	苗期—拔节	37.7±7.11a	45.0±12.0a	42.8±14.2a	39.9±11.1a
	拔节—抽雄	203.3±7.35a	208.6±19.6a	212.2±25.1a	205.1±13.1a
	抽雄—灌浆	79.9±9.25a	86.0±5.37a	85.9±13.8a	86.7±7.66a
	灌浆—成熟	46.5±0.58b	49.5±6.88b	48.0±11.2b	69.8±7.25a
	全生育期	482.1±9.13b	492.9±8.33ab	501.6±12.7a	502.0±5.04a

注:相同行不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

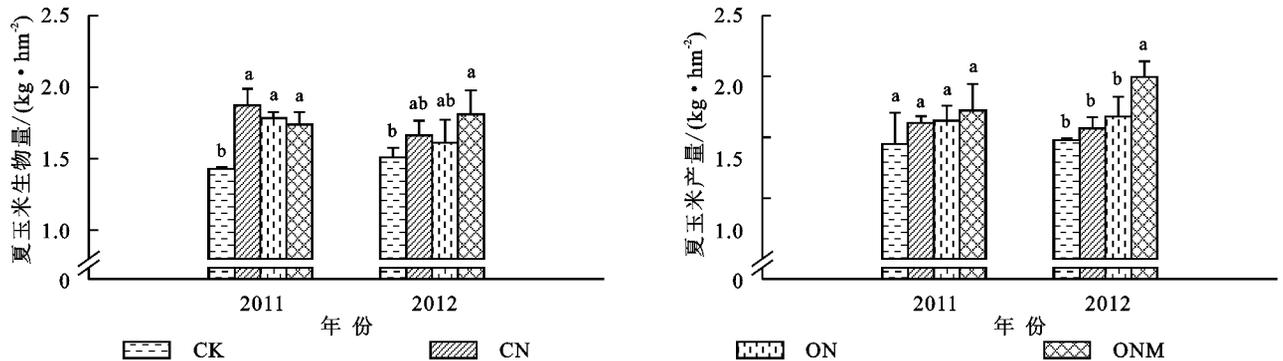
各处理的夏玉米总耗水量在 2011 年并没有显著性差异,2012 年夏玉米总耗水量则以处理 ONM 的

最高,与处理 CN, ON 相比无显著差异,但比处理 CK 提高了 4.13% ( $p < 0.05$ )。由表 1 还可明显看出,与

处理 CK 相比,处理 ONM 在播种—苗期的耗水量降低了 12.3%,而在拔节—成熟期的耗水量增加了 9.3%。其中在 2012 夏玉米的灌浆—成熟期,处理 ONM 的耗水量相比处理 CN 和 ON,也分别增加了 40.9%和 45.2% ( $p < 0.05$ )。说明处理 ONM 降低了夏玉米播种—苗期的耗水,提高了拔节—成熟期的耗水量。

## 2.4 夏玉米生物量及产量

2011,2012 年夏玉米生物量及产量如图 3 所示。施



注:不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平,下同。

图 3 夏玉米生物量与产量

## 2.5 夏玉米水氮利用效率

由表 2 可以看出,施氮提高了夏玉米水分利用效率,但各处理在 2011 年无显著差异,2012 年夏玉米水分利用效率以处理 ONM 的最高,且比处理 CK 提高了 10.4% ( $p < 0.05$ )。从 2 年均值看,施氮处理比不施氮处理(CK)的夏玉米水分利用效率提高了 1.4%~8.9%,相比习惯施氮处理(CN),减氮处理的水分利用效率均有提高,其中处理 ONM 比处理 CN

氮显著提高了夏玉米生物量,与处理 CK 相比,处理 CN, ON 和 ONM 的夏玉米生物量(2011)分别增加了 31.1% ( $p < 0.05$ ), 24.8% ( $p < 0.05$ ) 和 21.8% ( $p < 0.05$ )。处理 ONM 在 2012 的夏玉米生物量也比处理 CK 增加了 19.8% ( $p < 0.05$ )。但处理 CN, ON 和 ONM 的夏玉米生物量并无显著性差异。相比处理 CK,施氮处理的 2011 夏玉米产量均有所提高,但无显著差异。2012 的夏玉米产量以处理 ONM 的最高,比处理 CK 和 CN 分别提高了 15.0%和 11.8% ( $p < 0.05$ )。

提高了 7.4% ( $p < 0.05$ )。处理 ONM 的夏玉米氮肥偏生产力最高,其次为处理 ON,习惯施氮处理 CN 的最低,说明氮肥减量提高了夏玉米的氮肥偏生产力。与处理 CN 相比,处理 ONM 和 ON 的氮肥偏生产力均值分别提高了 58.9%和 50.4% ( $p < 0.05$ )。由此可见,在习惯施氮的基础上减量 1/3 且配施有机肥能够显著提高夏玉米的水氮利用效率。

表 2 夏玉米水分利用效率和氮肥偏生产力

处理	水分利用效率/(kg·mm <sup>-1</sup> )			氮肥偏生产力/(kg·kg <sup>-1</sup> )		
	2011	2012	均值	2011	2012	均值
CK	17.9±0.87a	14.4±0.32b	16.0±0.22b	—	—	—
CN	18.3±0.99a	14.5±0.57b	16.2±0.70b	32.2±0.51b	31.8±0.80c	32.0±0.63c
ON	18.6±0.67a	14.7±0.96b	16.4±0.84ab	47.8±1.65a	48.3±2.12b	48.1±1.52b
ONM	19.4±0.87a	15.9±0.37a	17.4±0.57a	49.0±2.84a	52.6±1.68a	50.8±2.01a

## 3 讨论与结论

本试验条件下,2011,2012 夏玉米 0—160 cm 土壤贮水量变化幅度分别为 313.8~455.7 mm 和 396.9~466.1 mm。2011 夏玉米的土壤贮水量在 7 月有显著的增加,主要受到降雨和灌水的影响。与 2011 夏玉米相比,2012 夏玉米在 8 月的土壤贮水量较高(图 1),这与同时期分别有 108.7 mm 和 170.2 mm 的降雨有关。Liu 等<sup>[16]</sup>研究也表明,降雨显著影响到土壤贮水量变化,其中在丰水年的土壤贮水量相对较高。另外,夏玉米耗水也是影响土壤贮水量变化

的重要因素,处理 ONM 的 0—160 cm 土壤贮水量(2012 夏玉米)在 8 月份最高可达 466 mm,而在 9 月份最低已下降至 410 mm(图 1),主要是因为期间(拔节—成熟期)的夏玉米生长加快、需水量增大(表 1),进而引起土壤贮水的波动下降。王红丽等<sup>[17]</sup>研究也表明,生长耗水是夏玉米抽雄至成熟期间土壤贮水量下降的主要因素。由此可见,夏玉米生长期间的 0—160 cm 土壤贮水变化受降雨或灌水的影响大,而在夏玉米拔节—成熟期的生长耗水则是引起土壤贮水变化的重要原因。

充沛的土壤贮水是促进夏玉米生长及高产的重

要保证<sup>[18]</sup>。本试验中,氮肥减量与有机肥等氮配施(ONM)可以提高土壤贮水,相比处理CN,0—160 cm土壤贮水量最大可增加8.8%~10.5%。这与高洪军等<sup>[19]</sup>研究表明的有机无机配施处理较化肥处理显著增加了剖面土壤贮水量的结论一致。合理配施有机与无机肥可降低土壤容重,增加土壤总孔隙度,增强土壤保水蓄水能力,并能提高作物对深层土壤水分的利用<sup>[20]</sup>。本试验条件下,处理ONM不仅增加了土壤贮水量,同时提高了夏玉米耗水量。2012夏玉米收获时ONM处理在0—40 cm平均土壤含水量相比播前降低了14.5%( $p < 0.05$ ),而处理CK,CN和ON的降低幅度分别只有8.5%,5.7%和6.0%(图2)。可见,相比其他处理,处理ONM消耗了更多的土壤水分,夏玉米耗水也相对较高。其中,处理ONM的2012夏玉米总耗水量比处理CK增加了4.13%( $p < 0.05$ ),但与处理CN和ON无显著差异。从夏玉米生育期的耗水特征看,夏玉米阶段耗水量最大的时期是拔节—抽雄和播种—苗期,可占全生育期耗水量的55.1%~66.0%。处理ONM在播种—苗期的耗水相对较低,而在拔节—成熟期的耗水相对较高(表1)。已有研究表明,夏玉米播种—苗期的耗水以土壤蒸发为主,可占阶段耗水量的90%以上,而在夏玉米进入拔节期后田间耗水以植株蒸腾耗水为主<sup>[21]</sup>。由此说明,处理ONM能够减少夏玉米生育初期的耗水,增加生育中后期的耗水,更有利于水分的高效利用。与处理CK和CN相比,处理ONM的产量水分利用效率(2 a均值)分别提高了8.9%和7.4%( $p < 0.05$ )。

氮是作物生长及高产的重要影响因素<sup>[22-23]</sup>,施氮显著增加了夏玉米生物量,提高了夏玉米产量(图3)。与不施氮处理(CK)相比,施氮处理的2011夏玉米生物量增加了21.8%~31.1%( $p < 0.05$ ),2012夏玉米产量以处理ONM的最高,比处理CK增加了15.0%( $p < 0.05$ )。相比习惯施氮(CN),减氮处理(ON与ONM)不仅有利于增加夏玉米生物量和产量(图3),而且显著提高了氮肥偏生产力(表2)。相关研究<sup>[24-25]</sup>也表明,在农民习惯施氮基础上合理减少施氮量对夏玉米根际土壤氮素水平无影响,可保证玉米稳产,实现减氮增效。本试验条件下的处理ONM相比处理CN,夏玉米产量可增加11.8%( $p < 0.05$ ),氮肥偏生产力提高58.9%。其原因与氮肥配施有机肥不仅能够提升土壤化学因子,而且通过增加土壤微生物的碳源和土壤酶的底物,促进了微生物繁殖和土壤酶活性的提高,为作物生长发育提供了良好的土壤环

境等因素有关<sup>[26-27]</sup>。综上所述,在华北平原高产粮区,比习惯施氮减量1/3且与有机肥等氮配施提高了土壤贮水、增加了夏玉米关键生育期耗水,并增加了夏玉米产量和显著提高了水氮利用效率。

#### 参考文献:

- [1] 崔吉晓,檀海斌,吴佳迪,等.微喷灌水肥一体化对河北夏玉米生长及产量的影响[J].玉米科学,2017,25(3):105-110.
- [2] Liang W, Carberry P, Wang G, et al. Quantifying the yield gap in wheat-maize cropping systems of the Hebei Plain, China[J]. Field Crops Research, 2011,124(2):180-185.
- [3] 汪新颖,彭亚静,王玮,等.华北平原夏玉米季化肥氮去向及土壤氮库盈亏定量探索[J].生态环境学报,2014,23(10):1610-1615.
- [4] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009,106(9):3041-3046.
- [5] 潘家荣,巨晓棠,刘学军,等.水氮优化条件下在华北平原冬小麦夏玉米轮作中化肥氮的去向[J].核农学报,2009,23(2):334-340.
- [6] 栗丽,洪坚平,王宏庭,等.施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1358-1365.
- [7] Zhang X, Davidson E A, Mauzerall D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. Nature, 2015,528(7580):51-59.
- [8] 王宜伦,刘天学,赵鹏,等.施氮量对超高产夏玉米产量与氮素吸收及土壤硝态氮的影响[J].中国农业科学,2013,46(12):2483-2491.
- [9] 刘星,张影,靳亚果,等.有机无机肥配施对强筋小麦产量和植株生理特征及土壤性质的影响[J].华北农学报,2016,31(6):220-226.
- [10] Guo L, Wu G, Li Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in Eastern China[J]. Soil & Tillage Research, 2016,156:140-147.
- [11] 郑凤霞,董树亭,刘鹏,等.有机无机肥配施对冬小麦耗水特性和干物质生产的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):240-247.
- [12] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等.有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J].中国农业科学,2016,49(20):3934-3943.
- [13] 乔玉辉,吴文良,李花粉,等.华北高产粮区基于环境保

- 护的农产品安全生产服务体系现状及改进建议:以山东桓台县为例[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(1): 1-6.
- [14] 刘光栋, 吴文良, 刘仲兰, 等. 华北农业高产粮区地下水面源污染特征及环境影响研究:以山东省桓台县为例[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 125-129.
- [15] 赵桂慎, 姜浩如, 吴文良. 高产粮区农田生态系统可持续性的能值分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 318-323.
- [16] Liu Y, Li S Q, Chen F, et al. Soil water dynamics and water use efficiency in spring maize (*Zea mays* L.) fields subjected to different water management practices on the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(5): 769-775.
- [17] 王红丽, 张绪成, 宋尚有. 半干旱区旱地不同覆盖种植方式玉米田的土壤水分和产量效应[J]. 植物生态学报, 2011, 35(8): 825-833.
- [18] 李全起, 房全孝, 陈雨海, 等. 底墒差异对夏玉米耗水特性及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 93-96.
- [19] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 不同施肥方式对东北春玉米农田土壤水热特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 195-200.
- [20] 陈刚, 王璞, 陶洪斌, 等. 有机无机配施对旱地春玉米产量及土壤水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 139-144.
- [21] 孙景生, 康绍忠, 王景雷, 等. 沟灌夏玉米行间土壤蒸发规律的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 20-24.
- [22] 吴永成, 王志敏, 周顺利. <sup>15</sup>N 标记和土柱模拟的夏玉米氮肥利用特性研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(12): 2446-2453.
- [23] Yang X, Lu Y, Ding Y, et al. Optimising nitrogen fertilisation: A key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008—2014) [J]. Field Crops Research, 2017, 206: 1-10.
- [24] 彭正萍, 刘亚男, 李迎春, 等. 持续氮素调控对小麦/玉米轮作系统氮素利用和表观损失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 74-79.
- [25] 云鹏, 高翔, 陈磊, 等. 冬小麦—夏玉米轮作体系中不同施氮水平对玉米生长及其根际土壤氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 567-574.
- [26] 马冬云, 郭天财, 宋晓, 等. 尿素施用量对小麦根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5222-5228.
- [27] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5502-5511.

~~~~~

(上接第 53 页)

- [6] 林培松, 高全洲. 不同土地利用方式下紫色土结构特性变化研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 134-138.
- [7] 王艳玲, 王燕, 李凌宇, 等. 成土母质与利用方式双重影响下红壤团聚体的组成特征与稳定性研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 776-785.
- [8] 董莉丽. 不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征[J]. 林业科学, 2011, 47(4): 95-100.
- [9] 袁德玲, 张玉龙, 唐首锋, 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.
- [10] 袁俊吉, 蒋先军, 胡宇, 等. 不同植被覆盖对养分在土壤水稳性团聚体中分布特征的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 112-117.
- [11] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 天然林转换成人工林对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 177-182.
- [12] 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): 5067-5077.
- [13] 刘艳, 查同刚, 王伊琨, 等. 北京地区栓皮栎和油松人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 607-613.
- [14] 吕文星, 张洪江, 王伟, 等. 重庆四面山不同林地土壤团聚体特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 192-197.
- [15] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J]. 地理研究, 2002, 21(6): 700-706.
- [16] 毛艳玲, 杨玉盛, 荆世和, 等. 土地利用方式对土壤水稳性团聚体有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 132-137.
- [17] 徐灿, 张平仓, 丁文峰. 晋西黄土丘陵区不同农作物用地土壤团粒稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(3): 35-39.
- [18] 安韶山, 张扬, 郑粉莉. 黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应[J]. 中国水土保持科学, 2008, 1(2): 66-70.