文章编号:1000-7601(2016)03-0144-09 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2016.03.23

秸秆还田与氮肥配施对春玉米产量及水分利用效率的影响

张 哲[1,2],孙占祥[1,2],张燕卿[3],郑家明[2],杨 宁[2],冯良山[2],李开宇[2]

(1.沈阳农业大学,辽宁 沈阳 110161;2.辽宁省农业科学院耕作栽培研究所,辽宁 沈阳 110161;
3.中国农业科学院环境与可持续发展研究所,北京 100081)

摘 要:为了探讨长期玉米秸秆还田与氮肥配施对辽西风沙半干旱区春玉米产量和水分利用效率的影响,在农业部阜新农业环境与耕地保育科学观测实验站利用长期定位试验,设置了 4 个秸秆还田量水平(0,3 000 kg·hm^{-2},6 000 kg·hm^{-2},9 000 kg·hm^{-2})与两个施氮肥水平(210 kg·hm^{-2},420 kg·hm^{-2}),共 8 个处理。结果表明,连续秸秆还田与氮肥配施可以显著增加玉米的群体生物产量($P<0.05$)和经济产量($P<0.05$),2013 年(平水年)和 2014 年(枯水年)的产量均为 C3N1 处理最高,分别为 14 719.95 kg·hm^{-2}和 12 397.95 kg·hm^{-2},大小顺序为 C3N1 > C3N2 > C2N1 > C2N2 > C1N2 > C1N1 > C0N2 > C0N1;秸秆还田可以充分利用作物生育期降水,提高降水利用效率和作物水分利用效率,2 a 的研究结果显示,C3N1 处理的水分利用效率最高,在生物产量和子粒产量水分利用效率方面,2013 年与 2014 年分别比最低的 C0N1 处理高 26.83%、43.15%和 44.64%、70.55%,两年平均水分利用效率的大小顺序与生物产量相同。综合分析认为,秸秆量 9 000 kg·hm^{-2}、氮肥量 210 kg·hm^{-2}是提高该区域类型土地生产力和农田水分利用效率的较优方案。

关键词:秸秆还田;氮肥;春玉米;水分利用效率;产量

中图分类号:S141.4;S143.1 **文献标志码**:A

Effects of crop residues incorporation and N-fertilizer on yield and water use efficiency of spring maize

ZHANG Zhe[1,2], SUN Zhan-xiang[1,2], ZHANG Yan-qing[2,3], ZHENG Jia-ming[2], YANG Ning[2], FENG Liang-shan[2], Li Kai-yu[2]

(1. *College of Land and Environment*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang*, *Liaoning* 110161, *China*;
2. *Tillage and Cultivation Research Institute*, *Liaoning Academy of Agricultural Sciences*, *Shenyang*, *Liaoning* 110161, *China*;
3. *Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: In order to explore the effects of crop residues incorporation and N – fertilizer utilization on spring maize yield and water use efficiency in semi-arid area of western Liaoning Province, a long-term experiment was conducted in Fuxin Agricultural Environment and the Farmland Conservation Scientific Observation Station. Four quantities in straw returning (0 kg·hm^{-2}, 3 000 kg·hm^{-2}, 6 000 kg·hm^{-2}, and 9 000 kg·hm^{-2}) and two nitrogen levels (210 kg·hm^{-2} and 420 kg·hm^{-2}) were set up accounting for a total of eight treatments. The results showed that the continued crop residues incorporation and N – fertilizer utilization could significantly increase maize population biological yield ($P<0.05$) and output ($P<0.05$). The C3N1 treatment resulted in the highest yield in 2013 (normal year) and 2014 (dry year), reaching 14 719.95 kg·hm^{-2} and 12 397.95 kg·hm^{-2}, respectively. The influence on yield by different treatments followed the order of C3N1 > C3N2 > C2N1 > C2N2 > C1N2 > C1N1 > C0N2 > C0N1. The yield under C0N1 was the lowest. Straw returning could take fully use of precipitation during crop growth period and rainfall use efficiency and

收稿日期:2015-05-13
基金项目:农业部公益性行业科研专项资金项目(201303125 – 01);国家科技支撑计划项目(2012BAD09B02);辽宁省科技攻关项目(2014213004);农业部公益性行业科研专项资金项目(201103001);辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划项目(2014017);辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划项目(2014017);农业部公益性行业科研专项(201503119 – 06 – 02);辽宁省自然科学基金(2015020789)
作者简介:张 哲,男,辽宁开原人,助理研究员,博士生,主要从事旱作节水农业研究。E-mail:chick409@126.com。
通信作者:孙占祥,男,辽宁抚顺人,研究员,博士生导师,主要从事旱作节水农业研究。E-mail:sunzhanxiang@sohu.com。

crop water use efficiency could became enhanced. The results from two years showed that C3N1 treatment allowed the highest water use efficiency. As a result, biological and grain yields were 26.83% and 43.15% in 2013 and 26.83% and 43.15% in 2014 higher than those by the C0N1 treatment respectively. Same results in two years were obtained in average water use efficiency and biological yield size. In conclusion, the optimal solution is straw returning in amount of 9 000 kg·hm^{-2} and nitrogen is 210 kg·hm^{-2}, which can increase the land productivity and agricultural water use efficiency in this area.

Keywords: crop residues incorporation; N - fertilizer; spring maize; water use efficiency; yield

辽宁省是中国的玉米生产大省之一,每年种植面积在 200 万 hm^2 以上,其中辽西旱作农业区每年种植面积占辽宁省的 2/3 以上[1],从作物秸秆去向来看,作物秸秆还田、秸秆饲用、秸秆燃烧以及其它去向所占比例分别为 24.3%、29.9%、35.3% 和 10.5%[2]。保守估计未来辽宁省每年可用于能源的秸秆的收集量将不会低于 1 300 万 t,其中玉米秸秆约占秸秆总量的 75.45%,而目前辽宁大部分秸秆仍直接在田间地头焚烧,由此带来了非常严重的空气污染和消防安全问题[3]。秸秆还田技术是改善农田生态环境、发展现代灌溉农业及旱作农业的重大措施,是节本增效型农业的重要技术支撑,也是促进绿色食品产业和农业可持续发展的有效手段[4]。而不同的秸秆施用方式则利于提高土壤对土壤水分的保蓄能力,显著增加 0 ~ 100 cm 土层土壤蓄水量[5]。在秸秆还田与氮肥配施方面,化学氮肥合理施用还决定于有机肥施用和秸秆还田状况,以维持土壤作物体系中氮素投入和输出平衡。所以在决定化学氮肥施用量的同时,也应考虑有机肥和秸秆带入氮量,从总需氮量中扣除有机肥供氮量[6]。霍竹、劳秀荣等[7-9]研究表明,秸秆与氮肥配施能延缓玉米叶片衰老,促进叶片合产物向子粒转移,增大玉米子粒体积,提高玉米产量。杨治平等[10]研究表明秸秆与氮肥配施能使水分利用效率提高 0.26 ~ 0.29 g·kg^{-1}。同时也有相关报道不合理的秸秆还田和施肥量会降低作物产量[11-12]。近年来关于单一秸秆还田方式对土壤物理性状、土壤养分和土壤酶活性的影响等方面报道较多[13],本研究利用农业部阜新农业环境与耕地保育科学观测实验站长期定位试验,设置了 4 个秸秆还田量水平和 2 个施氮水平共 8 个处理,探讨长期秸秆还田下不同年际间的玉米产量和水分利用效率异同,前期研究结果表明,秸秆还田配施氮肥对玉米生长前期和中、后期的影响差别较大,对玉米早期生长有一定的负面作用,中、后期秸秆还田正效应逐渐得到体现,玉米生长及水分利用效率以秸秆量 9 000 kg·hm^{-2}配施纯 N 420 kg·hm^{-2}和秸秆量 6 000 kg·hm^{-2}配施纯 N 420 kg·hm^{-2}效果较佳[14]。本试验的持续研究将为明确辽西旱作农业区秸秆还田与氮肥配施技术、提高土壤持续生产能力和作物水分利用效率,实现作物的持续增产提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

辽宁西部地区属温带季风大陆性气候区,全区土地面积约 3 万 km^2,耕地面积约 69 万 hm^2,年平均气温 7℃ ~ 8℃,5—9 月份日照时数为 1 200 ~ 1 300 h,10℃以上积温为 2 900 ~ 3 400℃·d,无霜期为 135 ~ 165 d,年降水量 300 ~ 500 mm。

2013 年和 2014 年试验区作物生育期内平均温度和降雨量如图 1 所示。2013 年生育期降水量为 359.8 mm,生育期内平均气温为 21.74 ℃;2014 年生育期降水量为 289.9 mm,生育期内平均气温为 21.54℃。

1.2　试验时间和地点

试验于 2010 年在农业部阜新农业环境与耕地保育科学观测实验站(辽西典型类型区)开始长期定位,本研究选取了 2013 和 2014 年 2a 数据进行了分析。试验土壤为褐土,耕作层含有机质 11.61 g·kg^{-1}、全氮 0.64 g·kg^{-1}、全磷 0.66 g·kg^{-1}、全钾 2.46 g·kg^{-1}、速效氮 72.58 mg·kg^{-1}、速效磷 136.13 mg·kg^{-1}、速效钾 62.19 mg·kg^{-1},地势平坦,无灌溉条件。

1.3　供试品种

供试品种为郑单 958,是由河南省农业科学院粮食作物研究所选育的品种。

1.4　试验设计

采用完全随机设计,试验设 8 个处理(见表 1),每个处理重复 3 次,每个小区面积为 32 m^2(4 m × 8 m)。2013 年 5 月 4 日播种、9 月 19 日收获;2014 年 4 月 28 日播种,9 月 16 日收获。种植密度为 60 000 株·hm^{-2},种植的行距为 50 cm,株距为 33 cm。具体操作:将前一年收获后的玉米秸秆切碎成 3 ~ 5 cm 小段,春播前按试验设计方案进行还田,同时在含有 N2 的试验处理中施入纯氮 100 kg·hm^{-2},春播时每

个处理施入 N 40 kg·hm^{-2}、P_2O_5 150 kg·hm^{-2}、K_2O 190 kg·hm^{-2},玉米拔节期含有 N1 的处理追施氮肥 170 kg·hm^{-2},含有 N2 的处理追施氮肥 280 kg·hm^{-2}。

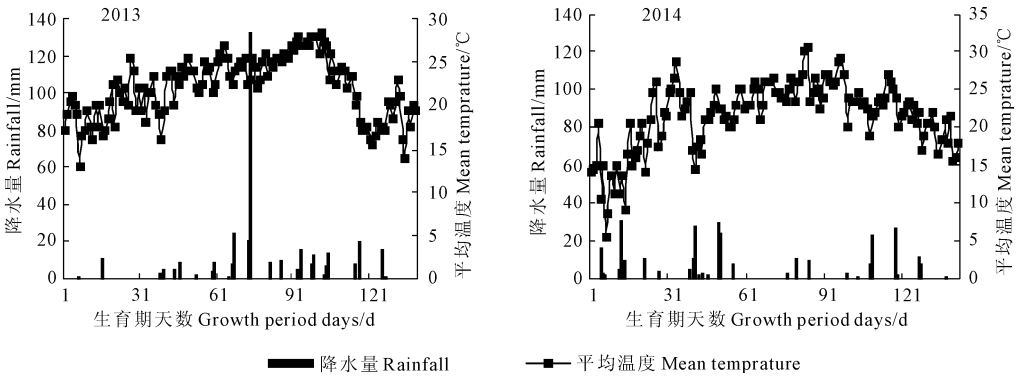


图 1 玉米生育期内降雨量和平均温度

Fig. 1 Daily rainfall and mean temperature during growth period at the experiment station

表 1 试验处理方案

Table 1 Experimental treatment scheme

处理编号 Treatment number	方案 Program
C0N1	秸秆量 0、氮肥量 210 kg·hm^{-2}
C0N2	秸秆量 0、氮肥量 420 kg·hm^{-2}
C1N1	秸秆量 3 000 kg·hm^{-2}、氮肥量 210 kg·hm^{-2}
C1N2	秸秆量 3 000 kg·hm^{-2}、氮肥量 420 kg·hm^{-2}
C2N1	秸秆量 6 000 kg·hm^{-2}、氮肥量 210 kg·hm^{-2}
C2N2	秸秆量 6 000 kg·hm^{-2}、氮肥量 420 kg·hm^{-2}
C3N1	秸秆量 9 000 kg·hm^{-2}、氮肥量 210 kg·hm^{-2}
C3N2	秸秆量 9 000 kg·hm^{-2}、氮肥量 420 kg·hm^{-2}

1.5 测定指标及方法

1.5.1 *产量及其构成因素* 2013—2014 年玉米收获后,每个处理随机选取 10 m^2 样区测产,用水分仪测定水分,按 14% 含水率折合成公顷产量,重复 3 次。每个样区随机选取连续 15 株,按常规方法测定产量构成因素。

1.5.2 *群体生物产量* 产量收获后,取对应的 10 m^2 样区的生物产量称质量,随机连续植株 5 株,称质量后在烘箱 105℃杀青 60 min,85℃烘至恒质量称干质量,计算植株含水率,然后根据鲜质量和 5 株含水率的平均值折合成公顷生物产量。

收获指数:

$$HI = GY/BY \tag{1}$$

式中,HI 为作物收获指数;GY 为作物子粒产量(kg·hm^{-2});BY 为作物生物产量(kg·hm^{-2})。

1.5.3 *土壤含水率* 采用土钻取样烘干法,分别于 2013 年播种前(05 – 04)、收获期(09 – 19)及 2014 年播种前(04 – 28)、收获期(09 – 16)测定 0 ~ 100 cm 土壤含水率,每 10 cm 一个层次,3 次重复。

土壤蓄水量:

$$W = h \times a \times b \times 10/100 \tag{2}$$

式中,W 为土壤蓄水量(mm);h 为土层深度(cm);a 为土壤容重(g·cm^{-3});b 为土壤含水率(%)。

1.5.4 *生育期降水利用效率* 生育期降水利用效率[15]:

$$PUE = GY/R \tag{3}$$

式中,PUE 为作物生育期降水利用效率(kg·hm^{-2}·mm^{-1});GY 为作物子粒(经济)产量(kg·hm^{-2});R 为作物生育期降雨量(mm)。由试验区内雨量器连续定位观测记录。

1.5.5 *水分利用效率*

作物耗水量[16]:

$$ET = P + U - R - F - \Delta W \tag{4}$$

式中,ET 为作物耗水量(mm);P 为作物生育期降水量(mm);U 为地下水补给量(mm);R 为径流量(mm);F 为土壤水分渗漏量(mm);ΔW 为收获后和播种前土壤根层储水量的变化(mm),其中土壤储水量以 1 m 土层含水率计算;因为试验小区土地平坦,故地表径流和土壤水分渗漏量可以忽略不计;地下水埋深较大,多在几十米以下,地下水的补充可以忽略不计;据此,式(5)可简化为:

$$ET = P - \Delta W \tag{6}$$

水分利用利率[17]:

$$WUE_{gy} = GY/ET \tag{7}$$

$$WUE_{by} = BY/ET \tag{8}$$

式中,WUE_{gy} 为子粒(经济)产量水分利用效率(kg·hm^{-2}·mm^{-1});WUE_{by} 为生物产量水分利用效率(kg·hm^{-2}·mm^{-1})。

1.6 数据处理与分析方法

试验数据用 Excel 2003 进行整理分析并作图,

用 SPSS17.0 软件统计分析,采用 LSD 法进行多重比较,显著水平为 0.05。

2　结果与分析

2.1　秸秆还田与氮肥配施对春玉米产量及收获指数的影响

2.1.1　不同处理的产量构成因素　从表 2 可以看出,2013 年各处理间的穗行数、行粒数、粒长各处理之间均无显著差异($P > 0.05$),而 2014 年各处理间除穗行数无显著差异之外,包括行粒数和粒长均有或多或少的变化,具体表现为 C2N1 处理显著低于无秸秆还田的处理($P < 0.05$);在穗长方面,2013 年表现为 C2N1 显著大于其它处理($P < 0.05$),而到了 2014 年则表现为 C1N1 显著大于其它处理($P < 0.05$);通过比较各处理间的百粒重可以看出,2013 年表现为 C3N1 > C3N2 > C2N2 > C2N1 > C1N2 > C1N1 > C0N2 > C0N1,且总体来说随着秸秆还田量的增加,百粒重也显著增加($P < 0.05$)。而 2014 年,则表现为 C3N1 > C3N2 > C2N1 > C2N2 > C1N1 > C1N2 > C0N2 > C0N1,说明在 2014 的年情条件下,秸秆还田的处理氮肥施用过多反而引起玉米百粒重下降。通过产量分析表明,秸秆还田与氮肥配施可以显著提高玉米产量,且在 2013 年和 2014 年两个年情条件下,各处理间百粒重变化趋势与产量基本一致,由此表明,秸秆还田与氮肥配施产量构成因素主要受百粒质量的影响。

表 2　秸秆还田与氮肥配施对玉米产量及构成因素的影响

Table 2　Effects of crop residues incorporation and N-fertilizer utilization on maize yield and yield components

年份 Year	处理 Treatment	穗长 Ear length /cm	穗行数 Lines per ear	行粒数 Kernels per line	粒长 Length of kernel /mm	百粒重 Weight of 100-kernel /g	产量 Yield /(kg·hm^{-2})
2013	C0N1	18.06 ± 0.47b	16.2 ± 0.55a	39 ± 1.93a	12.31 ± 0.38a	35.05 ± 0.04f	10140 ± 151.05g
	C0N2	18.16 ± 0.49b	15.6 ± 0.5a	39.3 ± 0.99a	11.9 ± 0.64a	36.13 ± 0.07e	10980 ± 124.95f
	C1N1	17.81 ± 0.31b	15.6 ± 0.58a	38.9 ± 0.75a	12.575 ± 0.21a	37.98 ± 0.07d	11960 ± 19.55e
	C1N2	18.54 ± 0.34b	15.4 ± 0.52a	38.3 ± 0.88a	13.1 ± 0.4a	38.29 ± 0.12cd	12560 ± 19.55d
	C2N1	22.25 ± 1.84a	15.4 ± 0.52a	38.7 ± 1.64a	12.6 ± 0.46a	38.80 ± 0.04bc	13040 ± 111.3c
	C2N2	17.67 ± 0.51b	16 ± 0.3a	37.3 ± 1.45a	12.625 ± 0.64a	38.57 ± 0.06cd	12780 ± 69.3cd
	C3N1	17.92 ± 0.35b	15.8 ± 0.47a	37.8 ± 0.93a	12.65 ± 0.64a	40.59 ± 0.23a	14720 ± 327.45a
	C3N2	17.75 ± 0.61b	16.2 ± 0.47a	38.3 ± 1.1a	12.825 ± 0.68a	39.41 ± 0.14b	14100 ± 124.95b
2014	C0N1	16.95 ± 0.55b	15.2 ± 0.49a	39.6 ± 1.50a	13.19 ± 0.73b	30.44 ± 0.59f	8536 ± 44.25f
	C0N2	17.37 ± 0.347b	16 ± 1.27a	37.4 ± 1.631ab	11.45 ± 1.168bc	32.64 ± 0.3e	8990 ± 106.8e
	C1N1	20.13 ± 1.429a	14.4 ± 0.75a	41 ± 0.548a	15.89 ± 1.098a	36.28 ± 0.157cd	11470 ± 93.75c
	C1N2	16.12 ± 0.337b	16 ± 0.63a	34.8 ± 1.393b	12.7 ± 0.511bc	35.31 ± 0.106d	10967 ± 82.2d
	C2N1	15.57 ± 0.337b	14.4 ± 0.4a	34 ± 1.049b	10.8 ± 0.33c	37.02 ± 0.072c	12031 ± 22.5b
	C2N2	16.46 ± 0.326b	14.8 ± 0.49a	39.4 ± 1.249a	11.96 ± 0.431bc	36.44 ± 0.231c	11582 ± 59.55c
	C3N1	16.25 ± 0.324b	15.2 ± 0.49a	38 ± 1.761ab	12.26 ± 0.513bc	39.57 ± 0.182a	12398 ± 31.05a
	C3N2	16.21 ± 0.379b	14.4 ± 0.75a	38 ± 2.345ab	11.3 ± 0.644bc	38.3 ± 0.403b	11998 ± 65.04b

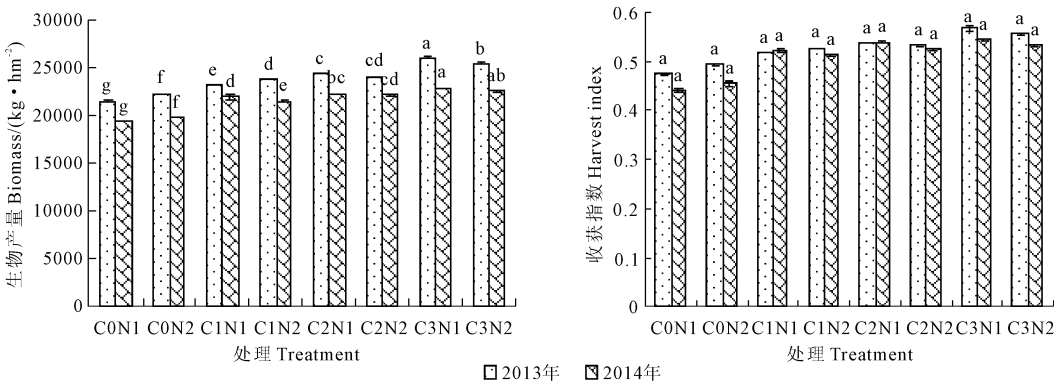
注:数据为平均值 ± 标准误,不同小写字母表示处理在 5% 水平上差异显著,下同。

Note: Date is mean ± SE. Values followed by a different letter within a column for treatments are significantly different at $P < 0.05$, same as below.

2.1.2　群体生物产量及收获指数间的差异　通过对玉米生物产量和收获指数的分析表明(图 2),不同秸秆还田与氮肥配施对春玉米群体生物产量影响显著,并且各个处理在 2013 年的生物产量要显著高于 2014 年($P < 0.05$)。2013 年各处理生物产量的顺序为 C3N1 > C3N2 > C2N2 > C2N1 > C1N2 > C1N1 > C0N2 > C0N1,而 2014 年的顺序为 C3N1 > C3N2 > C2N1 > C2N2 > C1N1 > C1N2 > C0N2 > C0N1,两年综合生物产量均为 C3N1 的值最大,较最少的 C0N1 处理分别增产 21.38% 和 17.73%,并且各个处理均表现出随着秸秆还田量的增加,玉米生物产量呈增加的趋势。所有处理的收获指数在 0.440 ~ 0.566 之间,且 2013 年与 2014 年各处理间差异均不显著($P > 0.05$),但总体来看 2013 年的玉米收获指数是高于 2014 年的。

2.2　秸秆还田与氮肥配施对土壤含水率及蓄水量的影响

2.2.1　土壤含水率　土壤含水率的高低反映土壤持水能力和供水能力的高低。2014 年不同时期各处理土壤含水率测定结果如图 3 所示。总体上来看,



注:不同小写字母表示处理在 5% 水平上差异显著,下同。

Note: Values followed by a different letter within a column for treatments are significantly different at $P < 0.05$, and hereinafter.

图 2 玉米秸秆还田与氮肥配施对玉米生物产量及收获指数的影响

Fig.2 Effects of crop residues incorporation and N – fertilizer utilization on maize biomass and harvest indexes

各生育时期秸秆还田量越多的处理,其 0 ~ 100 cm 的土壤平均含水率越高,且各处理平均含水率基本表现为 C3N2 > C3N1 > C2N2 > C2N1 > C1N2 > C1N1 > C0N2 > C0N1,说明秸秆还田疏松了土壤,增加了雨水入渗的能力,显著提高了土壤的含水率。玉米苗期的土壤含水率各处理之间变化较小,变幅为 12.31% ~ 20.54%,但在 50 cm 处秸秆还田处理的含水率有明显的增加,且还田量越多,含水率越高;拔节期是玉米生长的关键时期,土壤含水率变幅为 11.65% ~ 16.37%,随着玉米根系的生长,对土壤浅层水分消耗较大,在根系分布比较密集的耕层(0 ~ 50 cm)水分变化趋势基本一致,但在 50 cm 以下变化较为剧烈;正常雨量充沛年份,灌浆期表层土壤含水率较高,但在 2014 年出现了严重的伏旱,所以土壤含水率普遍较低,各处理平均土壤含水率的变幅为 8.02% ~ 16.59%,这说明秸秆还田与氮肥配施处理,在干旱年份对提高土壤含水率效果明显,且各处理间 0 ~ 50 cm 土壤含水率变化剧烈,各处理均呈增加趋势,在 50 ~ 100 cm 各处理的土壤含水率随着深度的增加而逐渐减少;成熟期随着植株需水量的减少,土壤水分在趋于平稳,各处理总体趋势与灌浆期基本一致,但变幅为 10.02% ~ 16.59%。

2.2.2 土壤蓄水量 从图 4 中可以看出,2013 年—2014 年不同时期各处理间差异明显($P < 0.05$),均表现为 C0N1 > C0N2 > C1N1 > C1N2 > C2N1 > C2N2 > C3N1 > C3N2,两年各处理土壤需水量的平均值分别为 192.15、196.7、217.27、223.07、232.2、238.2、249.62、257.2 mm,总体来看 2013 年各处理的土壤蓄水量均要高于 2014 年的蓄水量($P < 0.05$)。

2.3 秸秆还田与氮肥配施对水分利用效率的影响

2.3.1 降水利用效率 通过对各处理生育期降雨利用效率分析结果表明(图 5),2013 年 C3N1 处理生育期平均降水利用率表现为最高,达到 40.91 kg·hm^{-2}·mm^{-1},C0N1 处理生育期平均降水利用率为最低,为 28.18 kg·hm^{-2}·mm^{-1},且各处理间存在显著差异($P < 0.05$),2014 年大小顺序为 C3N1 > C3N2 ≈ C2N1 > C2N2 ≈ C1N1 > C1N2 > C0N2 > C0N1($P < 0.05$)。总体来看,2014 年生育期内秸秆还田处理的降水利用率要高于 2014 年,这主要是由于在干旱年份下,秸秆还田处理可明显促进土壤蓄水保墒,为作物提供更多可利用水分。

2.3.2 作物水分利用效率 从表 3 可以看出,不同降雨年型、不同秸秆还田量、不同施氮量对作物耗水量和作物水分利用效率的影响不同。在作物耗水量方面,2013 年与 2014 年均表现为没有秸秆还田的处理耗水量较高,显著高于秸秆还田的处理($P < 0.05$),而相同秸秆还田量不同施氮水平之间差异不显著($P > 0.05$),但 2013 年和 2014 年秸秆还田处理的总体耗水量存在差异,其中 2013 年表现为 C0 > C1 > C3 > C2,而 2014 年秸秆还田的各处理差异不显著($P > 0.05$);在生物产量水分利用效率方面,2013 年与 2014 年 C3N1 处理均为最高,分别比最低的 C0N1 处理高 26.83% 和 43.15%,2013 年的生物产量水分利用效率各处理之间均存在着显著差异($P < 0.05$),大小顺序为 C3N1 > C3N2 > C2N1 > C2N2 > C1N2 > C1N1 > C0N2 > C0N1,这与不同处理间的产量差异基本一致,而在 2014 年虽然 C3N1 与 C0N1 处理的生物产量水分利用效率仍为最高和最低,但各处理间的大小差异与 2013 年略有不同,C1N1、C1N2、C2N1、C2N2 处理间差异不显著;在子粒产量水分利用效率方面,2013 年与 2014 年 C3N1 处理显

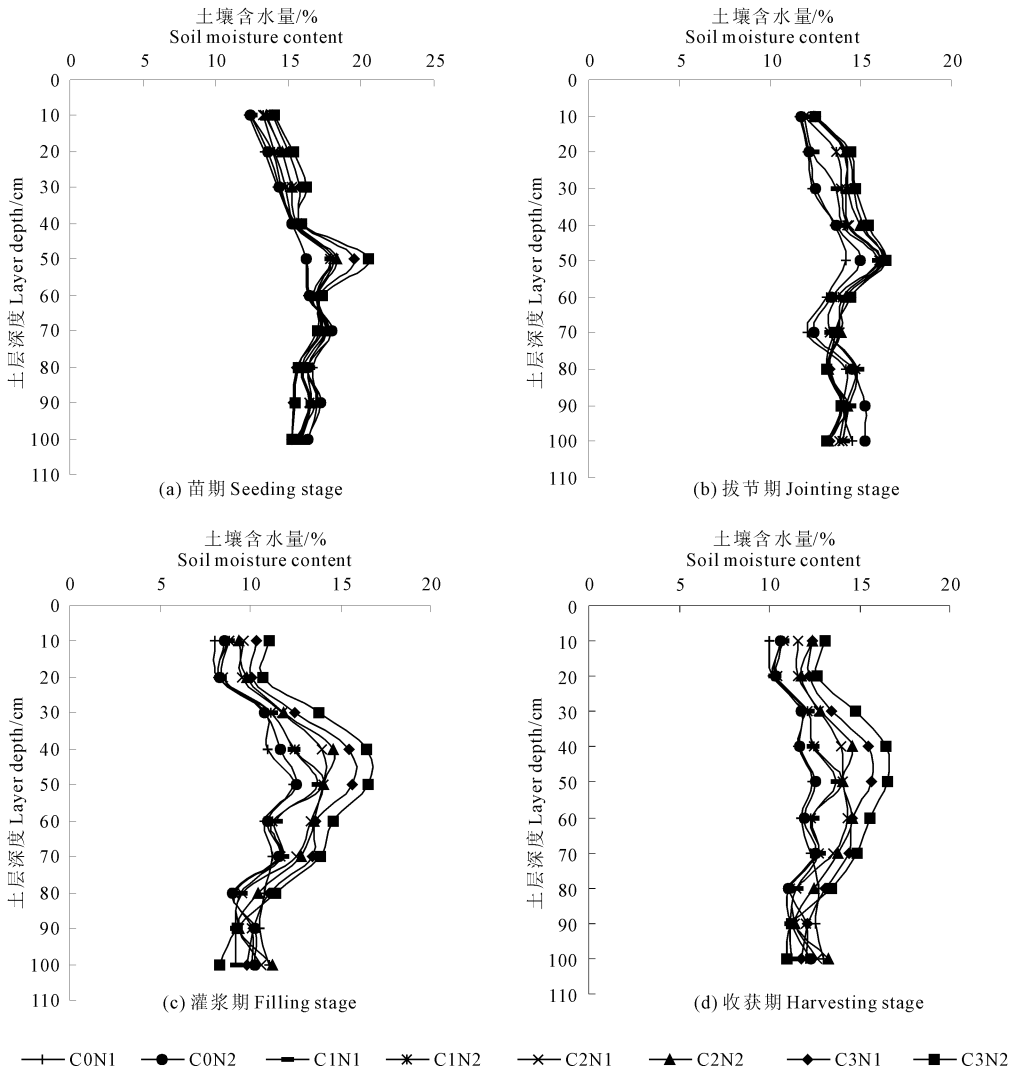


图 3　不同秸秆还田量与氮肥配施对玉米各生育时期 0 ~ 100 cm 分层土壤含水率的动态变化

Fig.3　Effects of crop residues incorporation and N – fertilizer utilization on soil moisture content during growth period at the 0 ~ 100 cm soil layer

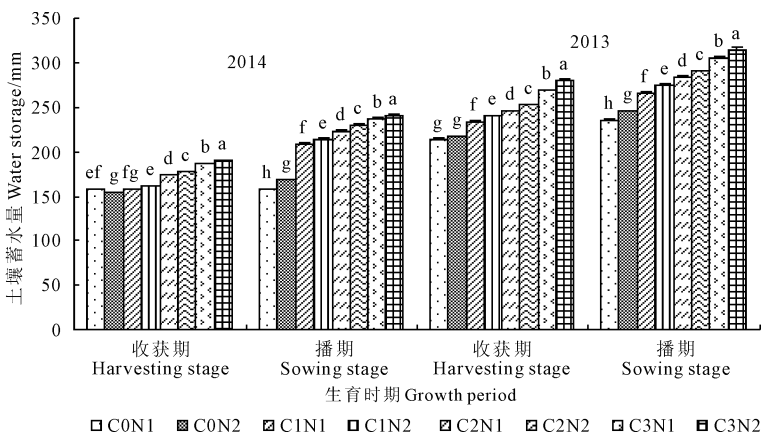


图 4　秸秆还田与氮肥配施对玉米不同时期 0 ~ 100 cm 蓄水量的影响

Fig.4　Effects of crop residues incorporation and N – fertilizer utilization on water storage during various growth periods (0 ~ 100 cm soil depth)

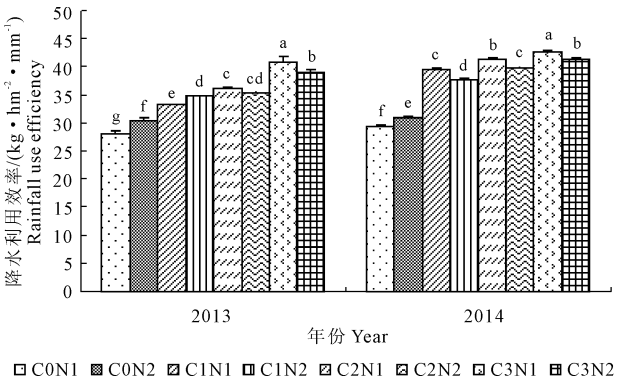


图 5 秸秆还田与氮肥配施对生育期内降水利用效率的影响

Fig.5 Effects of crop residues incorporation and N – fertilizer utilization on rainfall use efficiency during growth period

著高于其它处理($P < 0.05$),分别比最低的 C0N1 处理高 44.64%和 70.55%,且两年的均表现出 C3 > C2 > C1 > C0,这说明随着秸秆还田量的增加,提高了玉米的子粒产量水分利用效率。2013 年的子粒产量水分利用效率总体趋势为 C3N1 > C3N2 > C2N1 > C2N2 > C1N2 > C1N1 > C0N2 > C0N1($P < 0.05$),而 2014 年的趋势则与 2013 年不同,其中 C3N2 与 C2N1 处理的差异不显著。总体来看,2013 年比 2014 年秸秆还田处理的生物产量水分利用效率和子粒产量水分利用效率要低,这主要是由于秸秆还田提高了作物生物量,但在干旱年份(2014 年),作物耗水量差异不显著。

表 3 秸秆还田和氮肥配施对玉米耗水量及水分利用效率的影响

Table 3 Effects of crop residues incorporation and N-fertilizer utilization on maize water consumption and water use efficiency

年份 Year	处理 Treatment	生育期降水量 Rainfall in growth period/mm	作物耗水量 Crop water consumption/mm	生物产量水分利用效率 Biomass water use efficiency/(kg·hm⁻²·mm⁻¹)	子粒产量水分利用效率 Yield water use efficiency/(kg·hm⁻²·mm⁻¹)
2013	C0N1	359.8	338.63 ± 0.64a	63.26 ± 0.52g	29.95 ± 0.48g
	C0N2		330.85 ± 0.98b	67.28 ± 0.21f	33.19 ± 0.29f
	C1N1		327.27 ± 0.75bc	71.01 ± 0.17e	36.55 ± 0.10e
	C1N2		325.8 ± 0.35cd	73.18 ± 0.54d	38.56 ± 0.30d
	C2N1		321.88 ± 0.64d	75.56 ± 0.36c	40.51 ± 0.35c
	C2N2		321.65 ± 1.18d	74.81 ± 0.47cd	39.74 ± 0.34cd
	C3N1		324.15 ± 1.98cd	80.23 ± 1.43a	45.42 ± 1.24a
	C3N2		325.55 ± 2.58cd	77.98 ± 0.97b	43.32 ± 0.70b
2014	C0N1	289.9	290.26 ± 1.93a	66.84 ± 0.58d	29.41 ± 0.05f
	C0N2		276.23 ± 21.12b	71.72 ± 0.75c	32.55 ± 0.31e
	C1N1		238.5 ± 3.39c	92.26 ± 2.01ab	48.12 ± 1.05c
	C1N2		237.34 ± 4.50c	90.41 ± 1.75b	46.24 ± 0.84d
	C2N1		239.96 ± 2.81c	93.08 ± 1.23ab	50.15 ± 0.68ab
	C2N2		238.8 ± 2.12c	92.79 ± 0.76ab	48.50 ± 0.23bc
	C3N1		238.76 ± 2.38c	95.68 ± 1.24a	51.94 ± 0.64a
	C3N2		239.28 ± 3.35c	94.36 ± 1.29a	50.16 ± 0.50ab

3 讨 论

3.1 作物产量与收获指数

作物产量和总生物量的增加是检验耕作措施好坏的重要指标,不同还田年限玉米子粒产量差异显著,反映出秸秆还田措施能够促进玉米子粒产量的提高,且与还田年限呈正相关[18]。霍竹[7]等研究表明:秸秆还田与氮肥配施,能使夏玉米的子粒体积最多增加 19.69%,穗粒数达到 598.19 粒·穗$^{-1}$,与秸秆不还田不施氮处理相比增加了 27.3%,秸秆还田传统施氮(纯 N 300 kg·hm^{-2})处理的千粒重达到 239.75 g,产量显著提高。还田还可以改善作物产量性状,进而提高作物产量,高旺盛等[19]研究发现长期秸秆还田可使玉米穗长增加 0.58 ~ 2.0 cm,穗粒数增加 4.8% ~ 14.1%,千粒重增加 2.0% ~ 13.1%,增产达 4.7% ~ 25.7%。秸秆还田和优化施氮可以提高华北平原夏玉米干物质日增长量和总积累量,子粒体积增加了 17.38% ~ 19.69%,高速灌浆持续期延长 5 ~ 7 d,产量和玉米叶面积指数显著提高[20]。本研究为长期定位试验,通过对 2013 和 2014 两年的结果分析,不同秸秆还田量与氮肥配施对春玉米产量影响显著,其中 2013 年与 2014 年秸秆还田处理显著提高了玉米百粒重和产量,这与前人的研究基本一致;但在不同年份下,相同秸秆还田

量不同施氮水平,表现出一定差异,这与年际间水分和温度差异有关。通过对玉米生物产量和收获指数进行分析,秸秆还田量的增加显著提高了玉米的生物产量,各个处理在 2013 年的生物产量要显著高于 2014 年($P < 0.05$),均表现为 C3 > C2 > C1 > C0,这与前人所研究的最高还田量基本一致。两年的所有处理收获指数在 0.440 ~ 0.566 之间,且 2013 年与 2014 年各处理间差异均不显著($P > 0.05$),但总体来看 2013 年进行连续秸秆还田的玉米收获指数是高于 2014 年的,可能是由于 2014 年伏旱严重,对灌浆期影响较大,进而影响其生物产量和子粒产量。

3.2　土壤水分与水分利用效率

秸秆还田可提高土壤的蓄水保水的能力,保证作物需水关键期的供水,缓解旱地作物水分供需矛盾,提高作物产量和水分利用效率。陈素英等[21]通过研究秸秆还田处理降雨前后不同土层(0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm)土壤含水量的变化得出:秸秆还田不仅增加了降水的入渗量,而且有利于降水向深层土壤下渗。马晓丽等[22]研究也认为,秸秆还田能有效增加土壤水分含量,蓄水保墒,改善作物水分供给状况,秸秆还田量越高,效果越好。本研究通过对 2013 年和 2014 年两年的研究数据进行分析表明,秸秆还田可以充分利用作物生育期降水,提高作物的降水利用效率,且秸秆还田量越大,其降水利用效率越高,这与与前人的研究结果一致。2013 年生育期内降水利用率要高于 2014 年,这主要是由于 2013 年生育期内降水量多。玉米不同生育时期的土壤蓄水效果与秸秆还田量、氮素水平有着密切的关系,2 a 的作物产量水分利用效率和子粒产量水分利用效率各处理间趋势不一致,这可能与 2014 年的伏旱有密切关系,对产量形成造成了一定的影响。

3.3　秸秆还田与氮肥配施

秸秆还田要配施适量速效性氮肥以调节 C/N,为了加速秸秆腐解,及时释放其中的养分供作物利用,否则出现氮素损失过大,即微生物与作物争氮,从而影响农作物正常生长发育,影响产量的提高,甚至导致减产[18]。本研究为 2010 年开始的长期定位试验,前期结果显示[14]:(1) 秸秆还田前期不利于保水,中后期保水效果较好;(2) 秸秆还田配施氮肥对玉米产量影响不显著,但由于秸秆还田处理玉米生育期耗水量小于不还田处理,因此水分利用效率较高;(3) 建议秸秆还田量 6 000 ~ 9 000 $kg \cdot hm^{-2}$ 配施纯 N 420 $kg \cdot hm^{-2}$,可达到较好效果。本文通过 2013 年和 2014 年两年的数据显示,不同处理间玉米产量存在显著差异,说明长期秸秆还田可明显提高玉米产量,而在氮肥配施方面,部分处理的高氮处理要低于低氮处理,这可能是由于多年的秸秆还田与氮肥配施会出现一个碳氮施用量平衡点。本文中在玉米产量和水分利用率方面证明了无论在平水年(2013 年)和枯水年(2014 年),均表现为 C3N1 处理是最为理想的秸秆还田量和施氮水平,这与前期结果有一定差异。并且,在枯水年份秸秆还田对玉米的水分效率有明显的提高,这说明 C3N1 处理的碳氮含量为目前 5 年定位试验中最佳量。但是本研究中,由于不同年际间生态环境差异,不同处理间的差异水平变化较大,而继续秸秆还田土壤内 C/N 值是否还会维持在现有范围内,则有待进一步研究。

4　结　论

1) 通过对 2013 年和 2014 年两年的产量数据分析得出,连续秸秆还田与氮肥配施可以显著增加玉米的群体生物产量($P < 0.05$)和经济产量($P < 0.05$),表现最好的为 N3C1 处理,两年的平均子粒产量为 14 719.95 $kg \cdot hm^{-2}$和 12 397.95 $kg \cdot hm^{-2}$,总体来说随着秸秆还田量的增加,主要是由于百粒重的增加造成的。

2) 两年的研究结果证明,秸秆还田可以充分利用作物生育期降水,提高降水利用效率和作物水分利用效率,C3N1 处理的水分利用效率最高,在生物产量水分利用效率方面,2013 年与 2014 年分别比最低的 C0N1 处理高 26.83% 和 43.15%,在子粒产量水分利用效率方面,2013 年与 2014 年分别比最低的 C0N1 处理高 44.64% 和 70.55%,两年平均水分利用效率大小顺序为 C3N1 > C3N2 > C2N1 > C2N2 > C1N2 > C1N1 > C0N2 > C0N1,尤其在干旱年份,适宜的秸秆还田量可以在显著提高作物水分利用效率的同时,显著增加玉米产量。

参 考 文 献:

[1] 白　伟,孙占祥,郑家明,等.辽西地区不同种植模式对春玉米产量形成及其生长发育特性的影响[J].作物学报,2014,40(1):181-189.

[2] 高利伟,马　林,张卫峰,等.中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J].农业工程学报,2009,25(7):173-179.

[3] 于　彬.辽宁省秸秆能源化利用对策研究[D].北京:中国农业科学院,2013:13.

[4] 韩永俊,尹大庆,赵艳忠.秸秆还田的研究现状[J].农机化研究,2003,(2):39-40.

[5] 王增丽,冯　浩,余　坤,等.轮作条件下秸秆施用方式对农田水分及作物产量的影响[J].农业机械学报,2013,44(12):114-119.

[6] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物

营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
[7] 霍 竹.秸秆还田和氮肥施用对夏玉米生育及产量影响的研究[D].太谷:山西农业大学,2003.
[8] 霍 竹,王 璞,付晋峰.秸秆还田与氮肥施用对夏玉米物质生产的影响研究[J].中国生态农业学报,2006,14(2):95-98.
[9] 劳秀荣,孙伟红,王 真,等.秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J].土壤学报,2003,40(4):618-623.
[10] 杨治平,周怀平,李红梅.旱农区秸秆还田秋施肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2001,17(6):49-52.
[11] 刘巽浩.秸秆还田的机理与技术模式[M].北京:中国农业出版社,2001:14-15.
[12] 仲 爽,李严坤,任 安,等.不同水肥组合对玉米产量与耗水量的影响[J].东北农业大学学报,2009,40(2):127-129.
[13] 解文艳,樊贵盛,周怀平,等.秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2011,42(11):60-67.
[14] 高金虎,孙占祥,冯良山,等.秸秆与氮肥配施对玉米生长及水分利用效率的影响[J].东北农业大学学报,2011,42(11):116-120.
[15] Lpez – Fando C, Pardo M T. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment[J]. Soil & Tillage Research, 2009,104(2):278-284.
[16] Hemmat A, Eskandari I. Tillage system effects upon productivity of a dryland winter wheat-chickpea rotation in the northwest region of Iran [J]. Soil and Tillage Research, 2004,78(1):69-81.
[17] Huang Yilong, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: straw mulch and irrigation effects[J]. Agricultural Water Management, 2005,72(3):209-222.
[18] 慕 平.黄土高原农田综合地力及碳汇特征对连续多年玉米秸秆全量还田的响应[D],兰州:甘肃农业大学,2012.
[19] 高旺盛,梁志杰,崔 勇.美国农作制度可持续发展主要技术途径[J].中国农业信息,2004,(12):16.
[20] 罗珠珠,黄高宝,张国盛.保护性耕作对黄土高原旱地表土容重和水分入渗的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):7-11.
[21] 陈素英,张喜英,刘孟雨.玉米秸秆覆盖麦田下的土壤温度和土壤水分动态规律[J].中国农业气象,2002,23(4):34-37.
[22] 马晓丽,贾志宽,肖恩时,等.渭北旱塬秸秆还田对土壤水分及作物水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):59-64.

(上接第126页)

[4] 崔雯雯,高小丽,马瑞瑞,等.连作对糜子抽穗后光合特性和干物质积累的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(9):55-60.
[5] Bending G D, Putland C, Rayns F. Changes in microbial community metabolism and labile organic matter fractions as early indicators of the impact of management on soil biological quality[J]. Biology & Fertility of Soils, 2000,31(1):78-84.
[6] 刘建国,张 伟,李彦斌,等.新疆绿洲棉花长期连作对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J].中国农业科学,2009,42(2):725-733.
[7] 柴仲平,梁 智,王雪梅,等.连作对棉田土壤物理性质的影响[J].中国农学通报,2008,24(8):192-195.
[8] Aparicio V, Costa J L. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2007,96:155-165.
[9] 崔 瑞,李玉荣.花生重茬连作危害与合理轮作倒茬效果的调查研究[J].辽宁农业科学,2008,(1):18-20.
[10] 孙冰玉,于方玲,元 野,等.烤烟连作对耕层土壤理化性质和土壤脲酶的影响[J].安徽农业科学,2010,38(4):1826-1827.
[11] 唐江华,徐文修,王 娇,等.作物茬口对棉花生长发育及产量的影响[J].西北农业学报,2013,22(11):42-46.
[12] 马海燕,徐 瑾,郑成淑,等.非洲菊连作对土壤理化性状与生物性状的影响[J].中国农业科学,2011,44(18):3733-3740.
[13] 张甘霖,龚子同.土壤调查实验室分析方法[M].北京:科学出版社,2012.
[14] 关松荫.土壤酶及其研究方法[M].北京:中国农业出版社,1986.
[15] 严昶升.土壤肥力研究方法[M].北京:中国农业出版社,1988.
[16] 杨兰芳,曾 巧,李海波,等.紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J].土壤通报,2011,42(1):207-210.
[17] 周礼恺.土壤酶学[M].北京:科学出版社,1987.
[18] Allison V J, Condron L M, Peltzer D A, et al. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand [J]. Soil biology & biochemistry, 2007,39(7):1770-1781.
[19] 高 扬,高小丽,张东旗,等.连作对荞麦产量、土壤养分及酶活性的影响[J].土壤,2014,46(6):1091-1096.
[20] 孙光闻,陈日远,刘厚诚.设施蔬菜连作障碍原因及防治措施[J].农业工程学报,2005,21(S):184-188.
[21] Stella A E, Max D C. Effect of soybean plant populations in a soybean and maize rotation[J]. Agronomy Journal, 2001,93:396-403.
[22] 陈 慧,郝慧荣,熊 君,等.地黄连作对根际微生物区系及土壤酶活性的影响[J].应用生态学报,2007,18(12):2755-2759.
[23] 谷 岩,邱 强,王振民,等.连作大豆根际微生物群落结构及土壤酶活性[J].中国农业科学,2012,45(19):3955-3964.
[24] 高 扬,高小丽,马瑞瑞,等.轮作连作荞麦田主要微生物类群及土壤酶活性变化[J].中国农业大学学报,2014,19(4):47-53.
[25] 尚 杰,耿增超,陈心想,等.生物炭对土壤酶活性和糜子产量的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):146-158.
[26] 王 飞,李世贵,徐凤花,等.连作障碍发生机制研究进展[J].中国土壤与肥料,2013,(5):6-13.