

秸秆氮化还田对农田水分与夏玉米产量的影响

董勤各^{1,2} 李悦^{1,3} 冯浩^{1,2} 余坤⁴ 董文俊^{1,3} 丁奠元⁵

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;
4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065; 5. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225009)

摘要: 寻求秸秆资源的有效还田方式对于干旱半干旱区农业的可持续发展具有重要意义。本文于2014年和2015年在夏玉米全生育期设置2个秸秆氮化水平(A0:未氮化冬小麦秸秆,A1:氮化冬小麦秸秆)和2个秸秆长度水平(L0:粉碎为短秸秆,L1:大于50 mm冬小麦长秸秆)翻压还田,分析不同预处理秸秆还田条件下夏玉米全生育期株高、叶面积指数、地上部生物量、冠层覆盖度等生长指标以及土壤贮水量、耗水量、产量和水分利用效率的变化。结果表明,2年夏玉米氮化短秸秆翻压还田处理(A1L0)平均土壤体积含水率较未氮化长秸秆处理(A0L1)分别提高了10.7%和6.4%;氮化处理土壤体积含水率明显高于未氮化处理,但不同处理间耗水量差异较小;夏玉米灌浆期氮化短秸秆翻压还田处理(A1L0)的平均冠层覆盖度(CC)比其他处理高3.7%~10.7%;成熟期氮化短秸秆翻压还田处理(A1L0)的平均地上部干物质量比其他处理高2.1%~9.5%,平均产量比其他处理增加2.8%~9.1%,平均水分利用效率比其他处理增加1.7%~7.4%;氮化短秸秆翻压还田处理(A1L0)能显著提高夏玉米地上部生物量与籽粒产量。因此,氮化短秸秆翻压还田能有效促进夏玉米生长,保持较好的土壤水分条件,有助于提高夏玉米产量和水分利用效率。

关键词: 夏玉米; 秸秆还田; 冠层覆盖度; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)11-0220-10

Effects of Ammoniated Straw Incorporation on Soil Water and Yield of Summer Maize (*Zea mays* L.)

DONG Qin'ge^{1,2} LI Yue^{1,3} FENG Hao^{1,2} YU Kun⁴ DONG Wenjun^{1,3} DING Dianyuan⁵

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
4. Northwest Engineering Corporation Limited of Power China, Xi'an 710065, China
5. School of Hydraulic Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: It is of great significance for the sustainable development of agriculture in the arid and semi-arid region to seek effective straw resources returned to the farmland. A two-year field experiment was conducted to evaluate the effects of different pre-treated straw returned to the farmland on the dynamics of several eco-physical characteristics of plant shoot height, leaf area index (LAI), aboveground biomass, canopy cover (CC), corn yield, soil water content, evapotranspiration and water use efficiency (WUE) so as to investigate the optimal scheme of the pretreated straw practices in 2014 and 2015. The experiments included two ammoniated straw levels (A0: no ammoniated straw; A1: ammoniated straw) and two straw length levels (L0: wheat straw was crushed into straw debris; L1: length of wheat straw was greater than 50 mm). The results indicated that the average volumetric soil water contents of ammoniated short wheat straw (wheat straw was crushed into straw debris) plowed into the soil (A1L0) were significantly higher than those of long wheat straw (length of wheat straw was greater than 50 mm)

收稿日期: 2018-09-01 修回日期: 2018-09-29
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102904)
作者简介: 董勤各(1982—),男,助理研究员,主要从事水土资源高效利用、农田节水灌溉模拟研究,E-mail: qgdong2011@163.com
通信作者: 冯浩(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail: nercwsi@vip.sina.com

plowed into the soil (A0L1) by 10.7% in 2014 and 6.4% in 2015 during the summer maize growing season, respectively. Meanwhile, the treatment of ammoniated short wheat straw (wheat straw was crushed into straw debris) plowed into the soil (A1L0) could significantly increase average green canopy (CC) than other treatments by 3.7% ~ 10.7% during the filling stage in two years, consecutively. Compared with other treatments, the treatment of A1L0 could significantly enhance average biomass, average corn yield and water use efficiency (WUE) by 2.1% ~ 9.5%, 2.8% ~ 9.1% and 1.7% ~ 7.4% during the maturity stage in two years, respectively. The treatment of A1L0 could significantly increase the average corn yield and water use efficiency of summer maize. The average volumetric moisture content at 0 ~ 160 cm soil layers of ammoniated treatments were significantly higher than that of A0L0 and A0L1 treatments, and the ammoniated treatments (A1L0 and A1L1) significantly increased the crop water use efficiency in different growth periods. While the tendency between different treatments of water consumption was not significant, therefore, the treatment of ammoniated short wheat straw plowed into the soil (A1L0) can effectively promote the growth and yield of summer maize, which was a better measure for keeping soil water, promoting corn yields and enhancing water use efficiency (WUE).

Key words: summer maize; straw incorporation; green canopy cover; yield; water use efficiency

0 引言

水资源短缺严重威胁干旱半干旱地区作物生长^[1-2],制约着我国易旱地区农业可持续发展^[3]。我国西北地区属于干旱半干旱区,生态环境较为脆弱^[4],粮食产量易受干旱缺水、降雨年际分布不均影响。因此,如何提高自然降水利用效率,降低土壤水无效蒸发对该地区农业的可持续发展具有重要意义^[5]。

国内外多采用覆盖措施(秸秆覆盖、砂石覆盖、地膜覆盖等)节水保墒,提高作物产量。HUANG 等^[6]研究表明,秸秆覆盖物既能减少蒸散和土壤水分的消耗,又能提高水分利用效率。刘世平等^[7]发现秸秆直接还田能有效改良土壤,增加土壤有机质和速效养分的含量,改善土壤的透气性,增加水稻产量,并能合理利用秸秆资源。赵亚丽等^[8]提出秸秆覆盖还田降低了夏玉米和休闲期农田耗水量。秸秆还田也是提高土壤肥力和作物生产潜力的重要农艺措施之一^[9-11]。还有研究表明秸秆还田均能显著改善土壤水热状况、提高作物产量和水分利用效率^[12-13]。由于多年的耕作和种植习惯,秸秆覆盖存在着诸多问题,如农田作物秸秆直接丢弃或焚烧造成资源浪费及加剧环境污染,还造成土壤紧实、耕层变浅、地表裸露、土壤蓄水保墒能力降低,严重影响了该区粮食的稳产和高产^[14]、秸秆分解较缓慢且分解过程中与作物争氮、秸秆营养不能快速为作物所用^[15-17]。目前,国内外已有不少关于秸秆还田措施^[18-19]的研究,但相关研究的焦点多集中于秸秆直接覆盖还田对于作物的生长和产量的影响,并未深入考虑改变秸秆长度与自身碳氮比如何影响夏玉米各生育期生长与产量的问题。

本文基于 2 年田间试验,分析秸秆长度与氮化

对夏玉米关键生育期土壤体积含水率、叶面积指数、冠层覆盖度、产量和水分利用效率的影响,以期确定科学合理的秸秆还田方式,为优化干旱半干旱地区的夏玉米高产稳产及秸秆资源的合理利用提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2014 年和 2015 年 6—10 月在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站(34°20' N, 108°24' E, 海拔 521 m)开展。该区平均无霜期为 221 d,年平均气温为 12.9℃,平均光日照时间为 2 196 h,属于暖温带季风半湿润气候区。降雨量年际变化较大且年内分布不均,降水多集中在 7—10 月,易形成季节性干旱。供试土壤为中壤土(砂粒、粉粒和粘粒质量分数分别为 8%、73% 和 19%),0 ~ 100 cm 土层的平均田间持水率为 24%,凋萎含水率为 8.5% (均为质量含水率),pH 值为 8.4。播前测定耕层土壤(0 ~ 20 cm)养分含量为:有机碳质量比、全氮质量比、全磷质量比、全钾质量比、速效磷质量比和速效钾质量比分别为 8.14 g/kg、0.95 g/kg、0.83 g/kg、20.42 g/kg、20.91 mg/kg 和 287 mg/kg,地下水埋深较深,其向上补给量可忽略不计。气象资料由灌溉试验站提供,2 年夏玉米生育期内当地气温与降雨动态变化见图 1。

1.2 试验设计和田间管理

试验采用随机区组排列布置,设置秸秆长度与氮化 2 个因素,每个因素 2 个水平,具体见表 1。每个处理重复 3 次,小区面积为 20 m² (5 m × 4 m)。种植作物为夏玉米(品种“秦龙 11”),采用人工穴播,株行距 30 cm × 60 cm。各处理施肥水平相同,且所有肥料均作为基肥在播种时施入,基肥施用量为:N

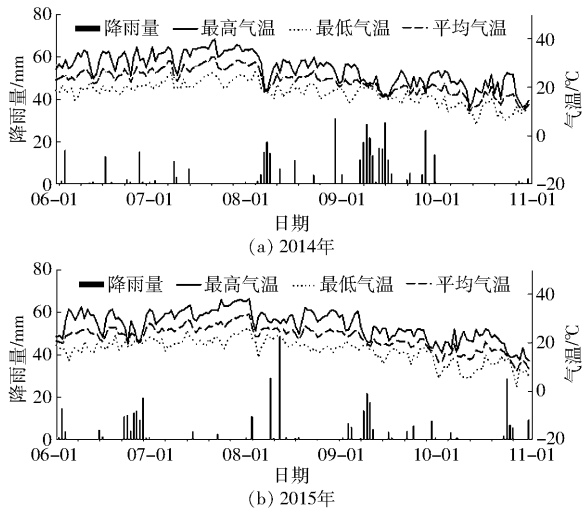


图1 2014年和2015年夏玉米生育期内降雨量和气温分布
Fig.1 Distribution of precipitation and temperature during growth seasons of summer maize in 2014 and 2015

表1 夏玉米田间试验处理

Tab.1 Experimental treatments for summer maize	
处理	秸秆还田方式
A0L0	未氮化短秸秆翻压还田
A0L1	未氮化长秸秆翻压还田
A1L0	氮化短秸秆翻压还田
A1L1	氮化长秸秆翻压还田

注:A0:未氮化秸秆;A1:已氮化秸秆;L0:短秸秆;L1:长秸秆(大于50 mm)。

120 kg/hm²(尿素),P 54 kg/hm²(磷酸二铵)。秸秆还田量均为4 000 kg/hm²。2014年6月20日、2015年6月15日播种,2014年10月12日、2015年10月7日收获。基肥与还田秸秆在播种前通过旋耕机一次性翻入耕层土壤内,其他管理措施同当地种植习惯保持一致。

1.3 氮化秸秆处理措施

试验用秸秆为上季冬小麦秸秆。试验前将冬小麦秸秆处理为长秸秆(大于50 mm)与短秸秆(粉碎为短秸秆)2个水平。将氢氧化钙(4%)和氮素(1.3%秸秆干质量)溶于水中(溶液总质量为0.3乘以秸秆干质量),然后将水溶液均匀喷洒在秸秆上并混合,在常温下(25℃)用塑料袋密封培养6~7 d备用^[20]。

1.4 观测项目和方法

1.4.1 土壤含水率

使用时域反射仪 Trim-TDR 测定土壤体积含水率,在各小区中心部位安装 TDR 管,测定土层深度为0~160 cm,其中0~100 cm 土层每10 cm 为一个测量深度间隔,100~160 cm 土层每20 cm 为一个测量深度间隔。所有小区每7 d 测定一次土壤体积含水率,且每次降水前后加测1次。

土壤贮水量的计算公式为

$$H = \sum_{i=1}^n 10h_i\theta_i$$

式中 θ_i ——第*i*层土壤体积含水率,%
H——土壤贮水量,mm
h_i——第*i*层土壤厚度,cm
n——所测土壤体积含水率时的层数,取13

1.4.2 株高、叶面积及冠层覆盖度

夏玉米生育期可划分为苗期(ES)、拔节期(JS)、抽雄期(HS)、灌浆期(FS)和成熟期(MS)^[21]。待夏玉米长出3片真叶后定苗,每个小区随机选取5株具有代表性植株并挂牌定株,于关键生育期准确观测并记录株高和植株所有绿叶的叶片长度和宽度。

单株叶面积计算公式为^[22-23]

$$L_A = \sum_{k=1}^m aL_kW_k$$

式中 *L_A*——单株叶面积,m²
L_k——第*k*片叶片叶领到叶尖的长度,m
W_k——第*k*片叶片最宽处的宽度,m
a——与叶片形状有关的叶面积回归系数,取0.75

叶面积指数计算公式为

$$LAI = 0.0001\rho L_A$$

式中 *LAI*——叶面积指数,m²/m²
 ρ ——种植密度,株/hm²

冠层覆盖度计算公式为^[24]

$$C_c = 1.005(1 - \exp(-0.6LAI))^{1.2}$$

式中 *C_c*——冠层覆盖度

1.4.3 考种测产及地上部干物质量

夏玉米成熟后,每个小区选取中间两行植株并考种,风干后手动脱粒,测定百粒质量和果穗长等产量性状。

夏玉米关键生育期,每个小区分别选取5株生长状况良好、代表平均长势的植株,齐地切断得完整植株,将植株茎、叶等器官分开,干燥法杀青(105℃)30 min,然后干燥(70℃)至恒定质量并称量,记录其地上部干物质量为各部分之和。

1.4.4 蒸散量和水分利用效率

夏玉米耗水量(*ET*)采用农田水量平衡公式计算。作物实际蒸散发量(*ET_c*)依据参考作物蒸发蒸腾量(*ET₀*)和作物系数(*K_c*)而定^[25-27]。

本文将降水量与作物蒸腾量之差称为土壤水分平衡量,其计算公式为

$$B = P - ET_c$$

式中 *B*——土壤水分平衡量,mm
P——降雨量,mm

夏玉米水分利用效率 (Water use efficiency, WUE) 计算公式为

$$WUE = Y/ET_c \tag{6}$$

式中 WUE——水分利用效率,kg/(hm²·mm)
Y——产量,kg/hm²

1.5 统计分析方法

试验数据采用 Excel 2016 进行数据整理和处
理,所有数据均为各重复测定的平均值, SigmaPlot
12.5 软件作图,运用 SPSS 20.0 统计分析软件对数
据进行单因素方差分析,采用 LSD 法检验差异显著
性($P < 0.05$)。

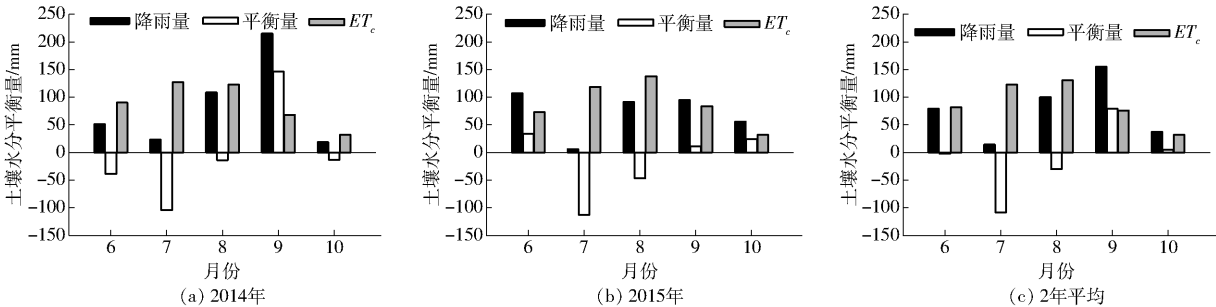


图2 2014 年和 2015 年夏玉米生长季作物实际蒸散量与降雨量的变化

Fig.2 Changes of crop evapotranspiration and precipitation in summer maize growing periods during 2014 and 2015

2.1.2 各处理对土壤体积含水率的影响

图 3 为不同生育期土壤体积含水率的分布特
征。2014 年和 2015 年夏玉米生育期降雨量分别为
379.5 mm 和 277.5 mm (图 1)。2014 年夏玉米拔节
期 A1L0 处理 0~40 cm 土层的土壤体积含水率比
A0L0、A0L1 和 A1L1 分别高 5.30%、4.54% 和
2.06%,40~160 cm 土层土壤体积含水率比 A0L0、
A0L1 分别高 6.62%、7.07%,但比 A1L1 低 2.73%。
2015 年夏玉米生育期降水量较均匀,各处理 0~
160 cm 土壤贮水量变化趋势与 2014 年基本趋势相
似。拔节期各处理 0~40 cm 土层平均土壤体积含
水率均有相同变化趋势,A1L0 处理 0~40 cm 土层
土壤体积含水率比 A0L0、A0L1 和 A1L1 分别高
6.01%、10.39% 和 4.59%;40~160 cm 土层平均土
壤体积含水率比 A0L0、A0L1 和 A1L1 分别高
2.87%、6.46% 和 1.20%。成熟期,不同处理 0~
160 cm 土层土壤贮水量由大到小依次为 A1L0、
A1L1、A0L0、A0L1。2 年夏玉米 A1L0 平均土壤体
积含水率较 A0L1 分别提高了 10.7% 和 6.4%。

2.2 夏玉米生长发育动态变化

2.2.1 夏玉米株高和叶面积指数动态特征

2014 年和 2015 年夏玉米株高和叶面积指数动
态变化见图 4。株高和叶面积指数动态变化趋势总
体先迅速增大然后呈平缓的趋势,且叶面积指数变
化趋势大致呈倒“L”型,均为拔节期至抽雄期迅速

2 试验结果

2.1 土壤水分动态变化

2.1.1 土壤水分平衡

夏玉米生育期内(2014 年和 2015 年),土壤水
分整体不足(图 2)。2014 年夏玉米实际蒸散发量
在 6—8 月 3 个月高于降雨量,土壤水分平衡量呈现
不足,至夏玉米生育后期(9 月)降雨量高于实际蒸
散发量;相比于 2015 年夏玉米整个生育期间,仅 7
月和 8 月土壤水分平衡量呈现不足,而 6、9、10 月降
雨量较实际蒸散发量相差不大,土壤水分平衡量充足。

增长,抽雄期至成熟期变化平缓且有下降。2014 年
各处理株高迅速生长发生在拔节期至抽雄期之间,
且所有处理中 A1L0 株高均最高,整个生育期间
A0L0、A0L1、A1L0 和 A1L1 各处理株高平均增高速
率为 14.78、16.0、16.08、16.01 mm/d;相比于 2015
年夏玉米整个生育期间 A0L0、A0L1、A1L0 和 A1L1
各处理株高平均增高速率为 20.99、20.55、21.11、
21.01 mm/d。

2014 年和 2015 年 2 年试验中,前期的 LAI 从
苗期到抽雄期各处理 A0L0、A0L1、A1L0、A1L1 增长
速率约为 0.039、0.042、0.041、0.034 d⁻¹ 和 0.011、
0.012、0.015、0.011 d⁻¹。而后期的 LAI 从抽雄期
到成熟期的各处理 A0L0、A0L1、A1L0、A1L1 衰减速
率分别为 0.030、0.027、0.032、0.029 d⁻¹ 和 0.008、
0.014、0.015、0.014 d⁻¹。2 年的夏玉米灌浆期平均
叶面积指数 A1L0 较 A0L1 和 A0L0 增加 13.3%、
8.0%。

2.2.2 夏玉米冠层覆盖度

2014 年和 2015 年夏玉米各处理生育期冠层覆
盖度动态变化呈先增高后略有下降的趋势(图 5)。
各处理冠层覆盖度差异显著,其中 A1L0 冠层覆盖
度较 A1L1、A0L0、A0L1 大,2014 年夏玉米成熟期冠
层覆盖度由小到大依次为 A0L0、A0L1、A1L1、
A1L0;相比于 2015 年夏玉米各处理冠层覆盖度动
态变化趋势也是呈先增加后减少的“厂”型,至成熟

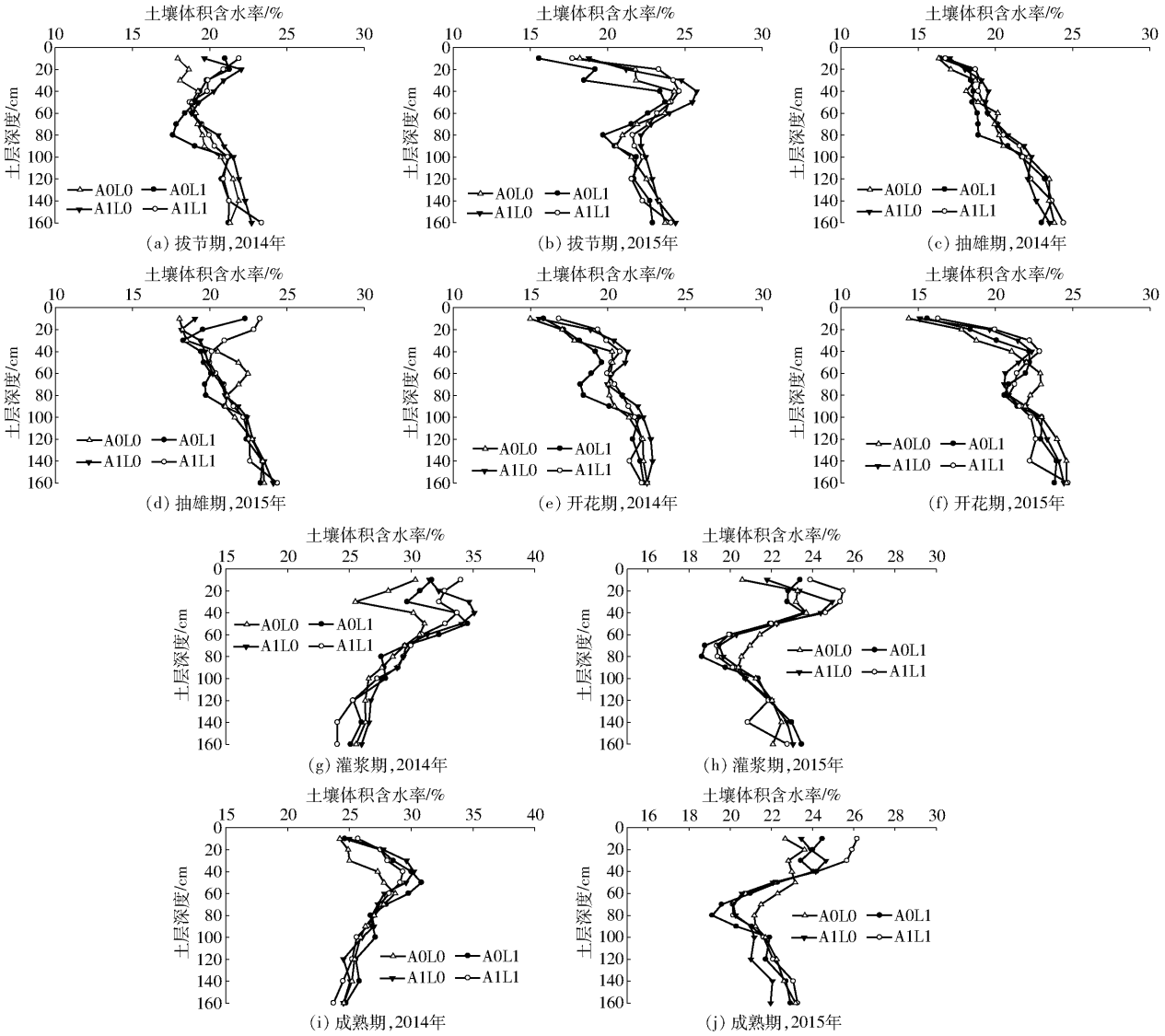


图3 2014年和2015年不同处理夏玉米不同生育期0~160 cm土壤体积分水率动态变化

Fig. 3 Dynamics of soil water content of 0 ~ 160 cm soil layers at different growth stages of summer maize under different treatments in 2014 and 2015

期有所下降;2年平均冠层覆盖度 A1L0 较 A0L0、A0L1、A1L1 分别增加 6.2%、4.8%、4.4%,A1L0 和 A1L1 之间无显著差异。夏玉米灌浆期氮化短秸秆翻压还田处理(A1L0)的平均冠层覆盖度(CC)比其他处理高 3.7%~10.7%。

2.3 不同处理夏玉米产量与水分利用效率

2.3.1 不同处理夏玉米产量构成

各处理对2年的夏玉米果穗长、果穗粗和百粒质量有显著影响(图6)。在相同的秸秆长度水平下,A1处理夏玉米的果穗长、果穗粗和百粒质量均大于A0处理。在短秸秆(L0)水平下,A1处理夏玉米的产量构成显著大于A0处理,且夏玉米A1处理的果穗长、果穗粗和百粒质量较A0增加4.6%、9.9%、1.1%和2.2%、4.5%、5.1%。氮化水平(A1)下L0处理夏玉米产量构成均大于L1,2014年夏玉米L0处理果穗粗、果穗长和百粒质量较L1增

加1.2%、1.1%和2.6%;2015年夏玉米L0处理果穗粗、果穗长和百粒质量较L1增加2.9%、1.4%和2.8%。

2.3.2 不同处理夏玉米产量、生物量 and 水分利用效率

不同处理夏玉米的产量、生物量 and 水分利用效率如表2所示。A0L1处理的夏玉米产量、生物量 and 水分利用效率均低于A1L0处理和A1L1处理,A1L0处理产量较高,A0L0处理耗水量较高,A1L1处理水分利用效率较高。

在相同氮化水平下,2014年和2015年各处理夏玉米成熟期的地上部干物质积累量随秸秆长度的增加而减少(表2)。A1条件下具体表现为:L0处理夏玉米成熟期均显著大于L1处理,L0处理夏玉米的地上部干物质质量与L1相比,成熟期增加1.2%和3.0%;在相同的秸秆长度水平下,A1处理夏玉米成熟期的地上部干物质质量明显大于A0处理,L0

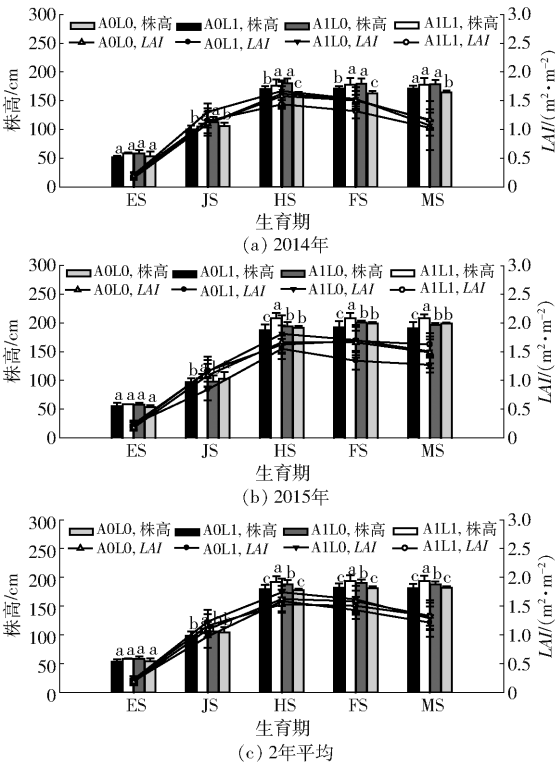


图 4 不同处理夏玉米株高和叶面积指数随生育期的动态变化

Fig. 4 Dynamics of summer maize plant height and leaf area index (LAI) under different treatments at different growth stages

条件下 A1 处理夏玉米地上部干物质质量与 A0 处理相比,成熟期分别增加了 7.7% 和 11.3%。由表 2 分析可知,氮化秸秆处理夏玉米能有效增加地上部

干物质积累,各处理存在显著差异。

2014 年和 2015 年夏玉米 A1L0 处理产量较 A0L0 处理、A1L0 处理及 A1L1 处理分别增加 6.2% 和 9.4%, 8.1% 和 10.0%, 1.7% 和 3.9%; 2 年的夏玉米平均水分利用效率 (WUE) A1L0 处理较 A0L0 处理、A1L0 处理及 A1L1 处理分别增加 7.4% 和 6.6%, 4.6% 和 7.3%, 2.0% 和 1.4%。夏玉米成熟期氮化短秸秆翻压还田处理 (A1L0) 的平均地上部干物质质量比其他处理高 2.1% ~ 9.5%, 平均产量比其他处理增加 2.8% ~ 9.1%, 平均水分利用效率比其他处理增加 1.7% ~ 7.4%。

3 讨论

3.1 不同处理条件下土壤体积含水率动态变化

农田水分是决定夏玉米产量和品质的关键因素之一^[28-29]。本研究 2 年夏玉米对不同处理条件下农田水分动态变化表现出一定的阶段性和层次性,秸秆翻压还田下 (A0 和 A1), L0 较 L1 土壤体积含水率大,特别是在夏玉米生育后期。这说明粉碎秸秆施入土壤后增大了土壤与秸秆的接触面积,土壤团聚体内部孔隙得到了改善,使土壤持水能力显著提高。粉碎秸秆施入土壤降低了土壤容重,改善了土壤的含水率,与孙荣国等^[30]和卢金伟等^[31]的研究结果一致。王珍等^[32]认为秸秆粉碎后还田较秸秆直接还田具有更好的节水效果。本研究 2 年夏玉米秸秆氮化处理还田 0 ~ 160 cm 土壤体积含水率在

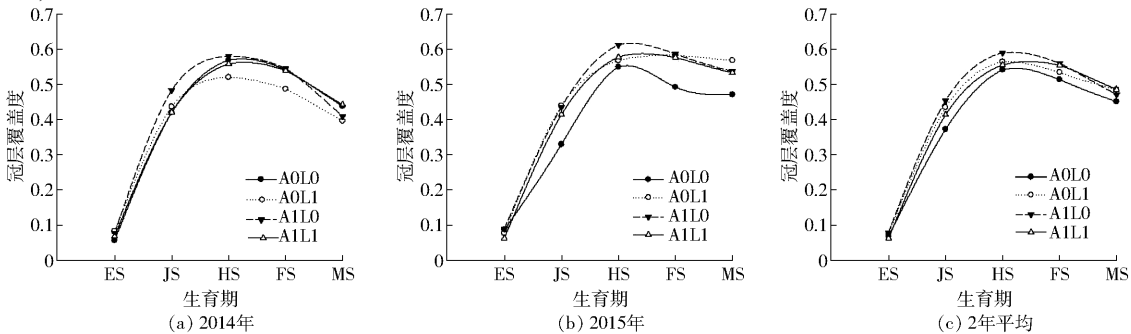


图 5 2014 年和 2015 年夏玉米生育期内不同处理冠层覆盖度的动态变化

Fig. 5 Dynamics of canopy cover (CC) under different treatments during growing seasons in 2014 and 2015

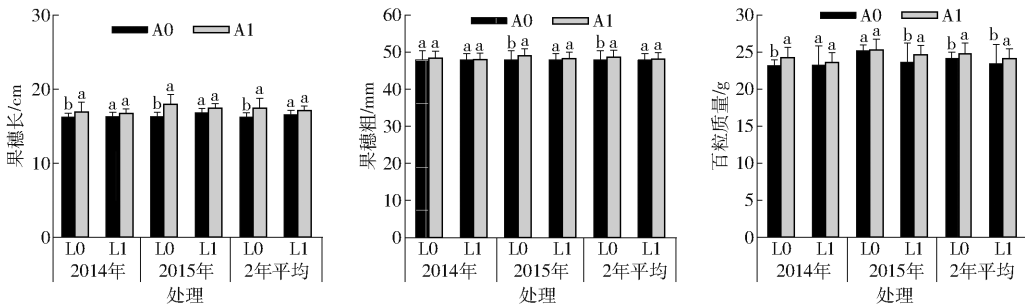


图 6 2014 年和 2015 年不同处理下夏玉米产量构成

Fig. 6 Yield composition of summer maize under different treatments in 2014 and 2015

表 2 不同处理对夏玉米产量、生物量 and 水分利用效率的影响

Tab. 2 Effects of different treatments on corn yield, biomass and WUE of summer maize

处理	2014 年				2015 年			
	ET/mm	生物量/ (kg·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	WUE/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	ET/mm	生物量/ (kg·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	WUE/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
A0L0	304.7 ^a	13 421 ^c	5 791 ^b	19.0 ^a	249.6 ^b	11 485 ^b	8 641 ^c	34.6 ^b
A0L1	292.5 ^b	13 894 ^b	5 691 ^b	19.5 ^a	249.9 ^b	11 620 ^b	8 596 ^c	34.4 ^b
A1L0	300.8 ^a	14 456 ^a	6 150 ^a	20.0 ^a	256.6 ^a	12 788 ^a	9 456 ^a	36.9 ^a
A1L1	301.6 ^a	14 288 ^a	6 049 ^a	20.4 ^a	249.2 ^b	12 412 ^a	9 094 ^b	36.4 ^a

注:同一年度中,每列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

夏玉米苗期较低,而在灌浆期之后较高,说明氮化秸秆还田后分解速率较快,秸秆分解过程中消耗水分较多,灌浆期自然降雨较多,氮化秸秆施入土壤能有效改善土壤结构,提高土壤持水能力,综合表现为土壤蓄水量有所增加。秸秆氮化可促使秸秆角质层外层的酯类化合物分解,增加粗蛋白含量,作物秸秆的碳氮比随之降低^[20,33]。YU 等^[34]认为,在秸秆还田后氮化措施能降低土壤的蒸发强度,有效促进秸秆的分解,结合粉碎措施后效果更加显著。有研究表明,秸秆还田可以明显调节土壤水分,且随土壤深度的增加调节作用有所减弱^[35]。周新国等^[36]和李荣等^[37]认为土壤水分是影响作物生长发育以及提高作物产量和水分利用效率的重要因素,不同的处理可不同程度地改变土壤水分状况从而影响作物的生长。

3.2 不同处理条件下夏玉米生长动态和产量

叶片是夏玉米进行光合作用的主要器官,而叶面积指数是影响光合速率的重要因子之一,其大小直接决定了产量^[38]。为调节土壤碳氮比,促进秸秆较快分解,本研究对秸秆进行氮化处理,发现各生育期夏玉米株高、叶面积指数和冠层覆盖度变化趋势相似,即先增大后平缓或稍有降低的趋势。由此可见,氮化秸秆还田施入土壤中对于微生物的活性和生长繁殖起到了促进作用,降低了土壤碳氮比,缓解了作物与微生物之间争夺氮素;同时氮化秸秆还田后能够分解释放一定量的营养元素,从而促进夏玉米生长^[39-40]。本研究发现,氮化秸秆翻压还田较未氮化秸秆翻压还田增加了夏玉米株高、叶面积指数和冠层覆盖度,并促进地上部干物质积累,说明氮化秸秆还田措施提高土壤贮水量的效果主要体现在作物生长后期,可保证作物生长后期干物质的积累及转化,进而为提高作物产量及水分利用效率奠定基

础。有研究表明秸秆还田能改善作物生长环境^[41]、提高作物水分利用效率和产量^[42-44]。高茂盛等^[45]和赵四申等^[46]研究发现,秸秆还田能够促进作物后期的光合作用并降低作物叶绿素的降解,从而提高了作物后期的叶面积指数。王兆伟等^[47]、CAI 等^[48]和白伟等^[49]认为秸秆还田导致土壤温度降低,作物物候期推迟并影响作物产量。本研究表明,氮化短秸秆翻压还田较未氮化秸秆翻压还田分别增产 8.7%~10.1%。氮化秸秆还田较传统秸秆还田方式能有效促进夏玉米生长,能较快地改善土壤结构,提高土壤持水能力,粉碎后还田效果更好,与余坤等^[50]和王增丽等^[51]研究结果一致。说明在夏玉米生育后期秸秆氮化和秸秆粉碎结合(A1L0)还田措施使得土壤有较高的水分,有利于植物生长,从而提高籽粒质量。

4 结论

- (1)氮化秸秆翻压还田处理具有良好的蓄水保墒能力,能显著增加 0~160 cm 土层的土壤体积含水率。氮化短秸秆处理 2 年夏玉米生长季平均土壤体积含水率较未氮化长秸秆处理分别提高了 10.7% 和 6.4%,但氮化长短秸秆之间差异不显著。
- (2)增产的主要途径是增加夏玉米叶面积指数和提高地上部干物质量。氮化短秸秆翻压还田处理能有效提高夏玉米叶面积指数,2 年的夏玉米灌浆期平均叶面积指数 A1L0 处理较 A0L1 处理增加 13.3%,较 A0L0 处理增加 8.0%。
- (3)氮化短秸秆翻压还田能够提高土壤贮水量,促进夏玉米生长,提高了水分利用效率和产量,为夏玉米的生长提供了较好的条件,氮化短秸秆处理为本研究条件下较优的夏玉米秸秆还田措施。

参 考 文 献

1 上官周平. 西北地区粮食生产及其持续发展[J]. 农业工程学报,1998,14(8):13-18.
SHANGGUAN Zhouping. Grain production and sustainable development in Northwest China[J]. Transactions of the CSAE,1998,14(8):13-18. (in Chinese)

2 石玉琼,李团胜. 陕西关中耕地粮食生产潜力研究[J]. 中国农学通报,2015,31(13):196-204.

- SHI Yuqiong, LI Tuansheng. Farmland grain potential productivity of Guanzhong, Shaanxi Province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(13): 196–204. (in Chinese)
- 3 陈素英, 张喜英, 裴冬, 等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 171–173.
CHEN Suying, ZHANG Xiying, PEI Dong, et al. Effects of corn straw mulching on soil temperature and soil evaporation of winter wheat field[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 171–173. (in Chinese)
- 4 WANG Yajun, XIE Zhongkui, MALHI S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(3): 374–382.
- 5 LI R, HOU X Q, JIA Z K, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116(1): 101–109.
- 6 HUANG Y, CHEN L, FU B, 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.
- 7 刘世平, 聂新涛, 张洪程, 等. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 48–51.
LIU Shiping, NIE Xintao, ZHANG Hongcheng, et al. Effects of tillage and straw returning on soil fertility and grain yield in a wheat-rice double cropping system[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(7): 48–51. (in Chinese)
- 8 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(17): 3359–3371.
ZHAO Yali, XUE Zhiwei, GUO Haibin, et al. Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(17): 3359–3371. (in Chinese)
- 9 PIERCE F J, BURPEE C G. Zone tillage effects on soil properties and yield and quality of potatoes (*Solanum tuberosum* L) [J]. Soil and Tillage Research, 1995, 35(3): 135–146.
- 10 LI Shuo, LI Youbing, LI Xiushuang, et al. Effect of straw management on carbon sequestration and grain production in a maize-wheat cropping system in Anthrosol of the Guanzhong Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 157: 43–51.
- 11 李荣, 侯贤清. 深松条件下不同地表覆盖对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 115–123.
LI Rong, HOU Xianqing. Effects of different ground surface mulch under subsoiling on potato yield and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 115–123. (in Chinese)
- 12 冯浩, 刘匣, 余坤, 等. 不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 192–201.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161224&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.024.
FENG Hao, LIU Xia, YU Kun, et al. Effects of different mulching patterns on soil moisture, soil temperature and summer maize growth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 192–201. (in Chinese)
- 13 劳秀荣, 吴子一, 高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 49–52.
LAO Xiurong, WU Ziyi, GAO Yanchun. Effect of long-term returning straw to soil on soil fertility[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 49–52. (in Chinese)
- 14 朱启红. 浅谈秸秆综合利用[J]. 农机化研究, 2007, 29(6): 236–237.
ZHU Qihong. Complex utilization of straw[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(6): 236–237. (in Chinese)
- 15 SONNLEITNER R, LORBEER E, SCHINNER F. Effects of straw, vegetable oil and whey on physical and microbiological properties of a chernozem[J]. Applied Soil Ecology, 2003, 22(3): 195–204.
- 16 CABILES D M S, ANGELES O R, JOHNSON-BEEBOUT S E. Faster residue decomposition of brittle stem rice mutant due to finer breakage during threshing [J]. Soil & Tillage Research, 2008, 98(2): 211–216.
- 17 TARAFDAR J C, MEENA S C, KATHJU S. Influence of straw size on activity and biomass of soil microorganisms during decomposition[J]. European Journal of Soil Biology, 2001, 37(3): 157–160.
- 18 LIN W, LIU W, XUE Q. Spring maize yield, soil water use and water use efficiency under plastic film and straw mulches in the Loess Plateau[J]. Scientific Reports, 2017(7): 38995.
- 19 王同朝, 李小艳, 李仟, 等. 秸秆覆盖和土壤水分互作对夏玉米水分利用效率及产量的影响[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(3): 280–287.
WANG Tongchao, LI Xiaoyan, LI Qian, et al. Effect of straw mulches and water supply interaction on yield and water use efficiency of summer maize[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2014, 48(3): 280–287. (in Chinese)
- 20 毛华明, 朱仁俊, 冯仰廉. 饲喂复合化学处理大麦秸颗粒对泌乳牛生产性能的影响[J]. 云南农业大学学报, 1999, 14(2): 167–170.
MAO Huaming, ZHU Renjun, FENG Yanglian. Effects on the performances of holstein cows fed pelleted barley straw treated with urea and calcium hydroxide[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 1999, 14(2): 167–170. (in Chinese)
- 21 ZADOKS J C, CHAND T T, KONZAK C F. A decimal code for the growth stages of cereals[J]. Weed Research, 1974, 14: 415–421.
- 22 McKEE G W. A coefficient for computing leaf area in hybrid corn[J]. Agronomy Journal, 1964, 56(2): 240–241.

- 23 QI W Z, LIU H H, LIU P, et al. Morphological and physiological characteristics of corn (*Zea mays*, L.) roots from cultivars with different yield potentials[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 38: 54–63.
- 24 HSIAO C. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. parameterization and testing for maize[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 448–459.
- 25 JIANG X, KANG S, TONG L, et al. Crop coefficient and evapotranspiration of grain maize modified by planting density in an arid region of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2014, 142: 135–143.
- 26 宋同, 蔡焕杰, 徐家屯. 泾惠渠灌区冬小麦夏玉米连作需水量及灌水模式研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(1): 52–56.
SONG Tong, CAI Huanjie, XU Jiutun. Water requirement and irrigation schedule of winter wheat and summer maize in Jinghuiqu Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(1): 52–56. (in Chinese)
- 27 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[J]. FAO Irrigation & Drainage Paper, 1998: 56.
- 28 YAN Z, GAO C, REN Y, et al. Effects of pre-sowing irrigation and straw mulching on the grain yield and water use efficiency of summer maize in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2017, 186: 21–28.
- 29 赵引, 毛晓敏, 段萌. 覆膜和灌水量对农田水热动态和制种玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 275–284. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180832&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.032.
ZHAO Yin, MAO Xiaomin, DUAN Meng. Effects of film mulching and irrigation amount on farmland water-heat dynamics and growth of seed-maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 275–284. (in Chinese)
- 30 孙荣国, 韦武思, 王定勇. 秸秆-膨润土-PAM 改良材料对砂质土壤饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 89–93.
SUN Rongguo, WEI Wusi, WANG Dingyong. Effect of straw-bentonite-PAM improved material on saturated hydraulic conductivity of sandy soil[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 89–93. (in Chinese)
- 31 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81–84.
LU Jinwei, LI Zhanbin. Advance in soil aggregate study[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 81–84. (in Chinese)
- 32 王珍, 冯浩, 吴淑芳. 秸秆不同还田方式对土壤低吸力段持水能力及蒸发特性的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 533–539.
WANG Zhen, FENG Hao, WU Shufang. Effects of different straw-incorporation methods on soil water retention capacity and evaporation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(3): 533–539. (in Chinese)
- 33 余坤, 冯浩, 王增丽, 等. 氨化秸秆还田改善土壤结构增加冬小麦产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 165–173.
YU Kun, FENG Hao, WANG Zengli, et al. Ammoniated straw improving soil structure and winter wheat yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 165–173. (in Chinese)
- 34 YU K, DONG Q G, CHEN H X, et al. Incorporation of pre-treated straw improves soil aggregate stability and increases crop productivity[J]. Agronomy Journal, 2017, 109(5): 1–13.
- 35 LI S, WANG Z, LI S, et al. Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dryland areas of China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116(2): 39–49.
- 36 周新国, 李彩霞, 强小嫚, 等. 喷灌条件下液膜覆盖对玉米干物质积累及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 43–48.
ZHOU Xinguo, LI Caixia, QIANG Xiaoman, et al. Effects of liquid film mulching on dry matter accumulation and water use efficiency of maize with sprinkler irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 43–48. (in Chinese)
- 37 李荣, 王敏, 贾志宽, 等. 渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 106–113.
LI Rong, WANG Min, JIA Zhikuan, et al. Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 106–113. (in Chinese)
- 38 ZHENG J, FAN J, ZHANG F, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by maize canopy on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 195: 25–36.
- 39 梁天锋, 徐世宏, 刘开强, 等. 耕作方式对还田稻草氮素释放及水稻氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3564–3570.
LIANG Tianfeng, XU Shihong, LIU Kaiqiang, et al. Influence of tillage patterns on incorporated straw nitrogen release and nitrogen utilization of rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(10): 3564–3570. (in Chinese)
- 40 WANG J, BAKKEN L R. Competition for nitrogen during decomposition of plant residues in soil: effect of spatial placement of N-rich and N-poor plant residues[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29(2): 153–162.
- 41 蔡太义, 贾志宽, 孟蕾, 等. 渭北旱塬不同秸秆覆盖量对土壤水分和春玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 43–48.
CAI Taiyi, JIA Zhikuan, MENG Lei, et al. Effects of different rates of straw mulch on soil moisture and yield of spring maize in Weibei Highland area of China[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 43–48. (in Chinese)

- 42 高宗军,李美,高兴祥,等. 不同耕作方式对农田环境及冬小麦生产的影响[J]. 中国农学通报,2011, 27(1): 36–41.
GAO Zongjun, LI Mei, GAO Xingxiang, et al. Effects of different tillage on farmland environment and yield of winter wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(1): 36–41. (in Chinese)
- 43 LIMONORTEGA A, SAYRE K D, FRANCIS C A. Wheat nitrogen use efficiency in a bed planting system in Northwest Mexico [J]. Agronomy Journal, 2000, 92: 303–308.
- 44 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.
XIE Wenyan, FAN Guisheng, ZHOU Huaiping, et al. Effect of straw incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 60–67. (in Chinese)
- 45 高茂盛,廖允成,吴清丽,等. 麦秸翻压还田对隔茬冬小麦旗叶抗性的生理效应[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4197–4202.
GAO Maosheng, LIAO Yuncheng, WU Qingli, et al. Physiological effects of ploughing wheat straw under soil on flag-leaf resistance of winter wheat under wheat-summer corn rotation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4197–4202. (in Chinese)
- 46 赵四申,张西群,贾素梅,等. 玉米秸秆整株还田对小麦生长发育及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 145–147.
ZHAO Sishen, ZHANG Xiqun, JIA Sumei, et al. Influence of returning whole corn stalk into soil on wheat growth and its yield [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(1): 145–147. (in Chinese)
- 47 王兆伟,郝卫平,龚道枝,等. 秸秆覆盖量对农田土壤水分和温度动态的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 244–250.
WANG Zhaowei, HAO Weiping, GONG Daozhi, et al. Effect of straw mulch amount on dynamic changes of soil moisture and temperature in farmland[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(2): 244–250. (in Chinese)
- 48 CAI T, ZHANG C, HUANG Y, et al. Effects of different straw mulch modes on soil water storage and water use efficiency of spring maize (*Zea mays* L.) in the Loess Plateau of China[J]. Plant Soil & Environment, 2015, 61(6): 253–259.
- 49 白伟,安景文,张立祯,等. 秸秆还田配施氮肥改善土壤理化性状提高春玉米产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 168–176.
BAI Wei, AN Jingwen, ZHANG Lizhen, et al. Improving of soil physical and chemical properties and increasing spring maize yield by straw turn over plus nitrogen fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 168–176. (in Chinese)
- 50 余坤,冯浩,赵英,等. 氮化秸秆还田加快秸秆分解提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 103–111.
YU Kun, FENG Hao, ZHAO Ying, et al. Ammoniated straw incorporation promoting straw decomposition and improving winter wheat yield and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 103–111. (in Chinese)
- 51 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/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 114–119. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131219&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.019.
WANG Zengli, FENG Hao, YU Kun, et al. Effects of different straw utilization on farmland moisture and crop yield with rotation of summer maize and winter wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 114–119. (in Chinese)