不同耕作和灌溉方式对玉米光合特性的影响

刘战东，张 凯，黄 超，孙景生

（中国农业科学院农田灌溉研究所农业部作物需水与调控重点开放实验室，河南 新乡 453002）

摘要： 以旋耕畦灌（CK）为对照，探究不同耕作和灌溉方式处理夏深松畦灌（XS35）、秋深松畦灌（QS35）、秋深松微喷灌（QS35SI）和秋深松滴灌（QS35DI）对玉米光合特性的影响，以确定深松耕下的合理灌溉方式。结果表明：不同耕作方式下，QS35 处理 LAI、叶绿素相对含量、净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、产量较 CK 分别提高 20.7%，6.4%，17.8%，36.9%，40.1%，18.9%，9.6%，花前和花后 F_v/F_m 均无显著差异，花前和花后 qP、ETR、Y(Ⅱ)在不同光照强度下表现为 QS35＞XS35＞CK，NPQ 在花后表现为 QS35＜XS35＜CK；不同灌溉方式下，QS35SI 处理 LAI、叶绿素相对含量、净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、产量较 CK 分别提高 23.8%，11.2%，37.9%，69.1%，79.2%，38.7%，7.5%，花前和花后 F_v/F_m 均无显著差异，花前和花后 qP、ETR、Y(Ⅱ)在不同光照强度下表现为 QS35SI＞QS35DI＞QS35＞CK，花前和花后 NPQ 表现为 QS35SI＜QS35DI＜QS35＜CK。秋深松结合微喷灌能促进玉米光合作用，提高产量。

关键词： 深松；灌溉方式；光合作用；叶绿素荧光特性；玉米

中图分类号： Q945.11；S513　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1009-2242(2019)04-0213-08

DOI： 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.030

Effects of Different Tillage and Irrigation Methods on Photosynthetic Characteristics of Maize

LIU Zhandong, ZHANG Kai, HUANG Chao, SUN Jingsheng

(*Key Laboratory for Crop Water Requirement and Its Regulation*, *Ministry of Agriculture*, *Farmland Irrigation Research Institute*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Xinxiang*, *Henan* 453002)

Abstract: Taking rotary tillage combined with border irrigation as the control (CK), the effects of different tillage methods, including autumn subsoiling (QS35) and summer subsoiling (XS35) under border irrigation, and different irrigation methods, including autumn subsoiling with border irrigation (QS35), autumn subsoiling with microspray irrigation (QS35SI) and autumn subsoiling with drip irrigation (QS35DI), on photosynthetic characteristics of maize were studied to determine the rational irrigation methods under subsoiling. The results showed that the LAI, chlorophyll relative content, net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, transpiration rate and yield of QS35 were 20.7%, 6.4%, 17.8%, 36.9%, 40.1%, 18.9%, 9.6% higher than CK under different tillage modes, respectively. There were no significant differences in F_v/F_m before and after anthesis, the qP, ETR, Y(Ⅱ) before and after an thesis were QS35＞XS35＞CK, while NPQ was QS35＜XS35＜CK under different light intensities. Under different irrigation methods, the LAI, chlorophyll relative content, net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, transpiration rate and yield of QS35 SI treatment were 23.8%, 11.2%, 37.9%, 69.1%, 79.2%, 38.7%, 7.5% higher than CK, respectively. There were no significant differences in F_v/F_m before and after flowering, the qP, ETR, Y(Ⅱ) before and after flowering were QS35 SI＞QS35 DI＞QS35＞CK, while NPQ was QS35 SI＜QS35 DI＜QS35＜CK under different light intensities. Autumn subsoiling combined with microspray irrigation can promote photosynthesis and increase yield of maize.

Keywords: subsoiling; irrigation; photosynthesis; chlorophyll fluorescence characteristics; maize

收稿日期： 2019-01-20

资助项目： 公益性行业（农业）科研专项（201503117）；国家自然科学基金项目（51309226）；国家现代农业产业技术体系（CARS-02-14）

第一作者： 刘战东（1981—），男，博士，副研究员，主要从事作物生理与水分高效利用研究。E-mail：lzddragon@163.com

通信作者： 孙景生（1963—），男，博士，研究员，博士生导师，主要从事作物生理与水分高效利用研究。E-mail：jshsun623@163.com

黄淮海地区是我国的主要粮食产区之一，在保障国家粮食安全及促进河南经济发展等方面有着举足轻重的作用[1-2]。黄淮海平原豫北以潮土为主，同时也是我国水浇地主要分布区之一，该地区农作条件相对较好，但在长期农业生产实践中，传统的翻耕农作措施和灌溉方式造成土壤有机质减少、土壤蓄水保水及缓冲能力差、三相比不协调，不合理的耕作易造成土壤悬松、耕层变浅，致使土壤性能不断退化，严重制约着粮食及经济作物产能的提高[3-5]。合理的耕作是调整农田水热状况、构建合理耕层结构、改善作物对水分、养分利用效率及提升土壤生产能力的一种重要途径[6-8]。深松耕采用深松机具对土壤进行较大深度的疏松，但不对土层造成翻转，深松耕产生的耕层比较疏松，孔隙度明显提高，有利于土壤蓄水保墒，对于干旱地区来说，会产生良好的效果[9-10]。然而，由于土壤深松耕作相应水肥管理配套技术不完善，长时间不合理的灌溉方式易诱发涝渍和土壤盐碱化[11]，还可能加剧下层土壤沉积压实，犁底层不断加厚，土壤紧实度日益增大，消除深松改土效果。灌溉是农业获得高产稳产的重要手段，是保障作物高产、稳产的关键农田管理措施之一[12-13]。随着区域水资源供需矛盾的不断加剧，高效节水灌溉技术正在迅速地推广发展[14]。因此，合理的耕作和灌溉能够保证作物持续高产和稳产。光合作用是作物生长发育与物质形成的基础，同时对土壤水分反应较为敏感[15-16]。所以耕作和灌溉对光合作用的影响最终反映在产量上。此外，叶绿素荧光变化可用来研究光合机构受影响的部位与程度，为评价光合机构功能受环境的影响发挥重要作用[17]。有研究[18]表明，作物光合与叶绿素荧光指标的变化可以反映土壤水热状况对作物生长发育的影响，进而反映耕作与灌溉对玉米生长发育的影响。本试验采用不同耕作方式与灌溉技术相结合，研究不同耕作与不同耕作灌溉相结合处理对玉米光合和叶绿素荧光特性的影响，以期为优化黄淮海地区的土壤耕层结构和灌溉管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验选择在豫北地区新乡获嘉县(35.29°N，113.64°E)，海拔 78 m，面积约 8 hm^2。该区多年平均气温 14.6 ℃，无霜期 221 d，年日照时间 2 058.4 h，光热资源丰富，以一年两熟耕作制度为主；多年平均降水量 557.2 mm。试验地土质为砂壤土，0—100 cm 土壤容重 1.45 g/cm^3，田间持水率 25.6%，地下水埋深大于 5 m。该地区是潮土典型分布区，具有代表性。

1.2 试验设计

夏玉米供试品种为“登海 605”，于 2018 年 6 月 10 日播种，2018 年 9 月 30 日收获。试验区内每畦长 50 m，宽 2.7 m，畦埂宽 40 cm，埂高 20 cm，面积 135 m^2。试验区周围设有保护行。考虑深松方式(秋深松 35 cm 是指夏玉米收获后深松耕层 35 cm；夏深松 35 cm 是指夏玉米播种前深松耕层 35 cm)和灌溉技术(畦灌、微喷灌和滴灌)2 个方面，共设置 5 个处理，分别为：旋耕＋畦灌(CK)、秋深松 35 cm＋畦灌(QS35)、夏深松 35 cm＋畦灌(XS35)、秋深松 35 cm＋微喷灌(QS35SI)、秋深松 35 cm＋滴灌(QS35DI)，每个处理 3 个重复。除耕作方式和灌水技术外，每个处理都作秸秆还田，其他田间管理措施均相同。

1.3 测定项目与方法

(1)光合指数的测定：选择晴朗少云无风的天气，每天 9:00—11:00 采用 Licor－6400 型便携式光合测定仪测定夏玉米花前、花后 2 个时期穗位叶光合参数，包括净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度。将样品室二氧化碳浓度设置为 400 μmol/mol，每个叶片测 3 次数据，取平均值，每个处理测 3 株，每株取上穗位叶测定，随机取样。采用 LAI－2200 冠层分析仪测量夏玉米的叶面积指数；采用便携式 SPAD 测定仪测定玉米穗位叶叶绿素相对含量，随机取样测定直接读取夏玉米花前、花后 2 个个时期的叶面积指数和叶绿素相对含量，进行记录。

(2)荧光的测定：采用德国 WALZ 公司生产的便携式调制叶绿素荧光仪 PAM－2500 测定。测定时间为 9:00—11:00，测量前先将暗适应叶夹直接夹在穗位叶上，让其暗适应 20 min。测定夏玉米花前、花后 2 个时期的慢速动力学曲线和光响应曲线，每个处理测 3 株，每株取上穗位叶测定，随机取样，对叶片最大荧光 F_m、基础荧光 F_o、实时荧光 F、实际最大荧光 F_m'、PSⅡ最大光化学转换效率 F_v/F_m、光化学淬灭系数 qP、非光化学淬灭系数 NPQ、PSⅡ的电子传递效率 ETR 及实际光化学量子产量 Y(Ⅱ)等进行分析。

1.4 数据分析

采用 WPS Excel 2019 软件对试验所取得的数据进行分析和作图，采用 SAS 软件对不同处理间的差异在 0.05 水平上进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 耕作和灌溉方式对玉米叶面积及叶绿素含量的影响

5 个处理玉米花前和花后叶面积指数、叶绿素相对含量的大小及差异见图 1。不同耕作方式下，花前 QS35 处理 LAI 较 CK 提高 12.4%，花后 QS35、XS35 分别提高 30.7%和 18.8%，说明秋深松更有利于提高玉米叶面积指数；不同灌溉方式下，花前 QS35 处理 LAI 较 CK 提高 12.4%，花后 QS35、QS35SI、QS35DI 处理的

LAI 均有提高,其中 QS35SI 提高幅度最大,为 60.9%,说明微喷灌对提高玉米叶面积指数的优势主要在花后。不同耕作方式下,花前 QS35 处理的叶绿素相对含量较 CK 提高 5.4%,花后 QS35、XS35 分别提高 7.4%和 6.0%,说明秋深松能显著提高玉米花前和花后叶绿素相对含量;不同灌溉方式下,花前和花后 QS35、QS35SI、QS35DI 处理的叶绿素相对含量均有显著提高,其中 QS35SI 提高幅度最大,分别为 5.8%和 16.2%,说明微喷灌对提高玉米叶绿素相对含量效果最佳。

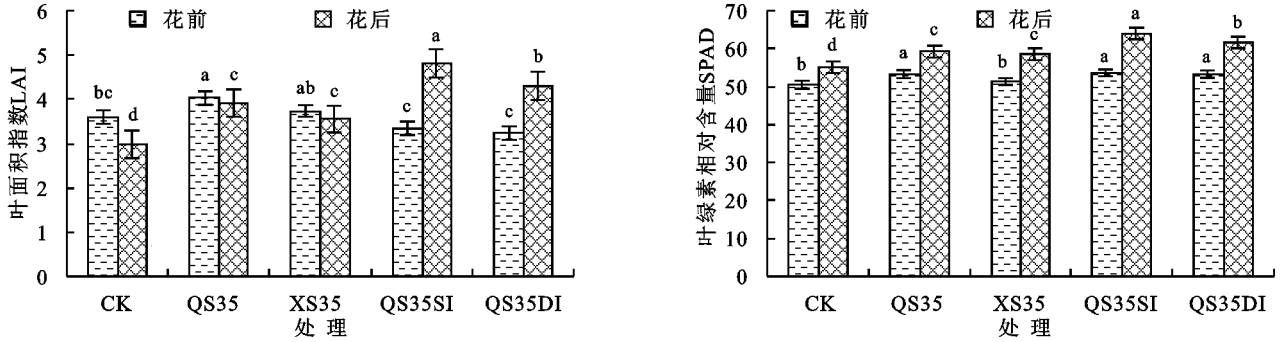

图 1　耕作和灌溉方式对玉米叶面积指数和叶绿素相对含量的影响

2.2　耕作和灌溉方式对玉米叶片光合参数的影响

5 个处理玉米拔节期叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)等光合参数见图 2。不同耕作方式下,花前 QS35、XS35 处理的净光合速较 CK 分别提高 18.0%,8.9%,花后无显著差异,说明花前秋深松能显著增大玉米叶片的净光合速率(图 2a);不同灌溉方式下,花前和花后 QS35、QS35SI、QS35DI 处理的玉米叶片净光合速率均有提高,其中 QS35SI 提高幅度最大,分别为 31.6%和 45.2%,表明微喷灌能够显著增大玉米叶片的净光合速率。

不同耕作方式下,花前 QS35、XS35 处理的气孔导度较 CK 分别提高 30.0%,16.9%,且处理间差异显著,花后无显著差异,说明秋深松能够显著增大花前玉米叶片的气孔导度(图 2b);不同灌溉方式下,花前和花后 QS35、QS35SI、QS35DI 处理气孔导度较 CK 均有提高,其中 QS35SI 提高幅度最大,分别为 92.9%和 54.6%,表明微喷灌能够显著增大玉米叶片的气孔导度。

不同耕作方式下,花前 CK、QS35、XS35 处理胞间二氧化碳浓度无显著差异,花后 QS35 显著提高 34.7%,说明秋深松能显著增大花后玉米叶片的胞间二氧化碳浓度(图 2c);不同灌溉方式下,花前和花后 QS35、QS35SI、QS35DI 处理胞间二氧化碳浓度都有提高,其中 QS35SI 提高幅度最大,分别为 121.9%和 64.2%,差异显著,说明微喷灌能显著增大玉米叶片胞间二氧化碳浓度。

不同耕作方式下,花前 QS35 处理蒸腾速率较 CK 提高 13.3%,花后 QS35、XS35 处理蒸腾速率分别提高 24.2%,17.3%,表明秋深松耕能显著增大花前及花后玉米叶片的蒸腾速率(图 2d);不同灌溉方式下,花前和花后 QS35、QS35SI、QS35DI 处理蒸腾速率均有显著提高,其中 QS35SI 提高幅度最大,分别为 30.2%和 47.0%,说明微喷灌对增大玉米叶片的蒸腾速率效果最佳。

2.3　耕作和灌溉方式对玉米叶片荧光参数的影响

最小荧光产量 F_o表示玉米叶片暗适应之后的荧光产量,此时 PSⅡ反应中心处于完全开放状态;最大荧光产量 F_m表示在饱和脉冲照射下 PSⅡ反应中心处于完全关闭时的荧光产量;F 表示进行饱和脉冲前测得的实时荧光产量;F_m'表示光下实际最大荧光产量。各处理间荧光参数的大小及显著性差异见表 1。不同耕作方式下,XS35 处理花前 F_o值较 CK 显著减少,花前 F、F_m'、F_m及花后 F_o、F、F_m'、F_m均无显著差异;不同灌溉方式下,QS35SI、QS35DI 处理花前 F、F_m'较 CK 均显著减少,QS35DI 处理花前 F_m显著减少,花前 F_o值以及花后各处理间均无显著差异。

F_v/F_m表示 PSⅡ最大光合量子产量,反映植株的最大光合潜能。由图 3 可知,不同处理间花前、花后玉米叶片 F_v/F_m无显著性差异。

2.4　耕作和灌溉方式对玉米叶片光化学荧光淬灭系数 *qP* 和非光化学荧光淬灭系数 NPQ 的影响

光化学淬灭系数 qP 表示 PSⅡ吸收的光能用于光化学电子传递的份额。qP 值越高,PSⅡ的电子传递活性愈大,表明 PSⅡ反应中心处于开放的状态。由图 4 可知,随着光照强度的增大,qP 值呈下降趋势。不同耕作方式下,花前和花后 qP 在不同光照强度下表现为 QS35>XS35>CK。可见,秋深松耕能有效加速玉米叶片电子传递速率,进而促进玉米生长;不同灌溉方式下,花前和花后不同光照强度下 qP 值表现为 QS35SI>QS35DI>QS35>CK,可见秋深松耕与微喷灌结合下玉米叶片吸收的光能更多地参与光合传递系统的光同化,光能利用效率高,促进玉米生长。

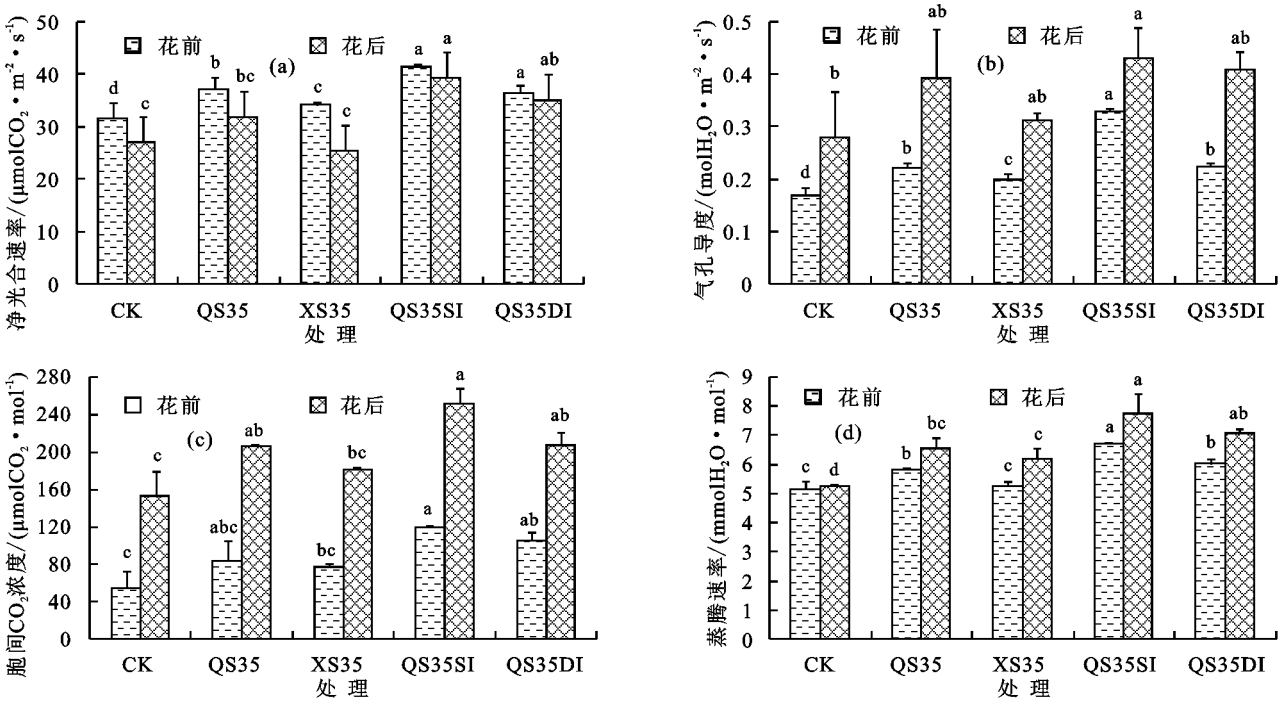

图 2 耕作和灌溉方式对玉米不同处理光合参数的影响

表 1 对玉米叶片 F_o、F_m、F 和 F_m' 的影响

测定时期	处理	F_o	F	F_m'	F_m
花前	CK	0.303a	0.521a	0.605a	1.289a
	QS35	0.280ab	0.517a	0.604a	1.295a
	XS35	0.261b	0.470ab	0.556ab	1.213ab
	QS35SI	0.281ab	0.412b	0.501b	1.191ab
	QS35DI	0.284ab	0.396b	0.471b	1.148b
花后	CK	0.302a	0.519a	0.603a	1.242a
	QS35	0.303a	0.503a	0.592a	1.282a
	XS35	0.318a	0.504a	0.591a	1.251a
	QS35SI	0.317a	0.449a	0.572a	1.178a
	QS35DI	0.315a	0.492a	0.582a	1.201a

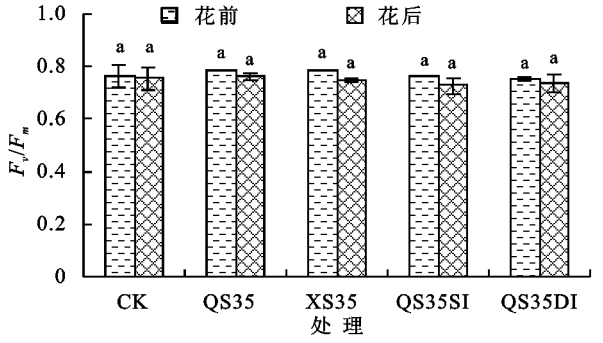

图 3 耕作和灌溉方式对玉米叶片 F_v/F_m 的影响

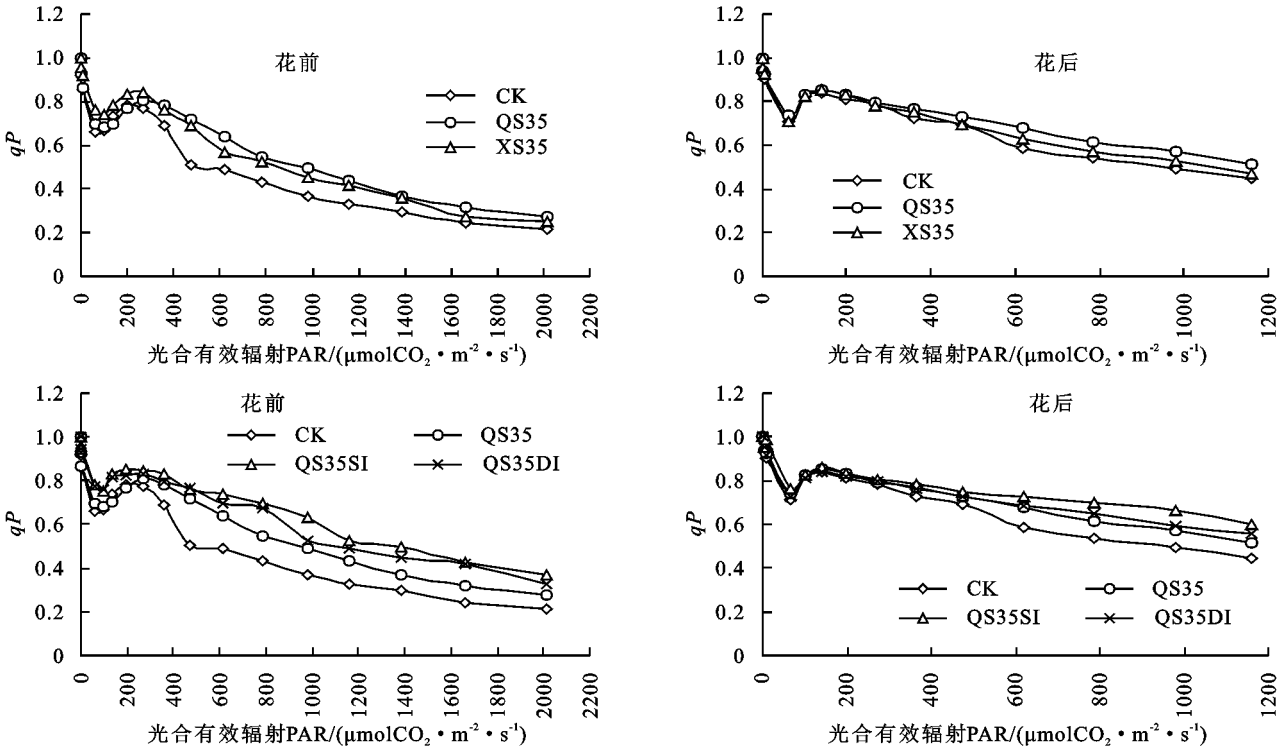

图 4 耕作和灌溉方式对玉米叶片光化学荧光淬灭系数 qP 的影响

非光化学淬灭 NPQ 反映植株光合系统吸收过饱和光能而以热能的形式耗散掉的能量。由图 5 可知,随着光照强度的增大,NPQ 呈上升趋势。不同耕作方式下,花前和花后 NPQ 值在不同光照强度表现为 QS35＜XS35＜CK,可见秋深松耕能有效降低玉米叶片的热耗散;不同灌溉方式下,花前和花后 NPQ 值在不同光照强度下表现为 QS35SI＜QS35DI＜QS35＜CK。可见,秋深松耕与微喷灌结合下叶片吸收的光能以荧光形式或热耗散形式散发的较少,这也是植物本身在逆境条件下自我调节的保护机制。

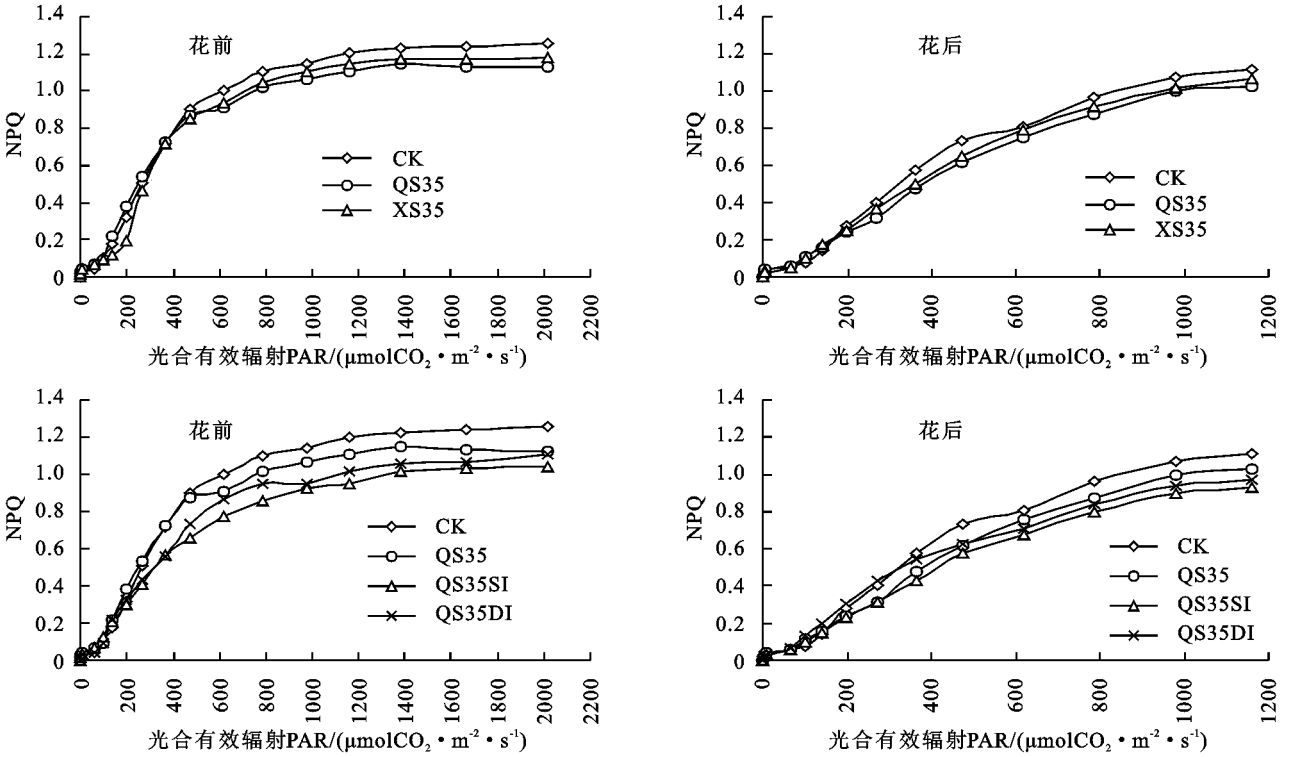

图 5　耕作和灌溉方式对玉米叶片非光化学荧光淬灭系数 NPQ 的影响

2.5　耕作和灌溉方式对玉米叶片光响应曲线的影响

ETR 表示通过 PSⅡ的电子传递效率,由图 6 可知,随着光照强度的增大,ETP 呈上升趋势。不同耕作方式下,花前 ETR 值在不同光照强度下表现为 XS35＞QS35＞CK,花后 ETR 值在不同光照强度下表现为 QS35＞XS35＞CK;不同灌溉方式下,花前和花后 ETR 值在不同光照强度下表现为 QS35SI＞QS35DI＞QS35＞CK。可见,秋深松耕与微喷灌结合更有利于玉米叶片中 PSⅡ电子传递效率,有利于玉米的生长。

实际光化学量子产量 $Y(Ⅱ)$ 表示 PSⅡ反应中心在部分关闭的情况下实际吸收光能的效率,可反映植物光合电子传递速率的快慢。由图 7 可知,随着光照强度的增大,$Y(Ⅱ)$ 呈下降趋势。不同耕作方式下,各处理在花前 $Y(Ⅱ)$ 值基本一致,花后 $Y(Ⅱ)$ 值在不同光照强度下表现为 QS35＞XS35＞CK;不同灌溉方式下,花前和花后 $Y(Ⅱ)$ 值在不同光照强度下表现为 QS35SI＞QS35DI＞QS35＞CK。可见,秋深松耕与微喷灌结合能够加快玉米叶片中 PSⅡ电子传递速率,促进玉米生长。

2.6　耕作和灌溉方式对玉米产量的影响

由图 8 可知,不同耕作方式下,QS35 处理玉米产量较 CK 显著提高 9.6%,XS35 处理无显著差异;不同灌溉方式下,QS35、QS35SI 处理较 CK 分别提高 9.6%和 7.5%,且差异显著,说明秋深松和微灌处理均能提高玉米产量。

3　讨论

叶片是植物利用光能、进行光合作用最重要的器官,叶面积指数是反映作物群体结构和生长发育状况的重要指标,也是群体光合特性的体现[19]。光合作用是作物获得籽粒产量的重要途径。因此,合理的群体结构有利于群体与个体协调发展,改善光合性能,经济有效地利用光能,最终达到高产[20]。本研究结果表明,不同耕作方式下,QS35 处理 LAI、净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率较 CK 分别提高 20.7%,17.8%,36.9%,40.1%,18.9%。这与许菁等[21-22]和穆心愿[23]的研究结果相似,深松可以提高玉米群体 LAI 及各生育时期的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率。有研究[24]表明,影响植物光合作用的自身因素分为气孔因素和非气孔因素。气孔限制是由于水分胁迫,气孔导度下降,CO_2 进入叶片受阻而使光合速率下降,非气孔限制是由自身光合器官与光合活性下降所引起。若胞间 CO_2 浓度变化趋势与光合速率和气孔导度一致,则影响光合速率的自身因素主

要为气孔因素，反之则主要为非气孔因素[25-26]。本试验中，胞间 CO_2 浓度变化趋势与光合速率和气孔导度相同，影响玉米光合作用的因素为气孔因素，即深松能够提高光合速率的原因是其降低水分胁迫对光合作用的限制。不同灌溉方式下，QS35SI 处理 LAI、净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率较 CK 分别提高 23.8%，37.9%，69.1%，79.2%，38.7%，这与史丽艳等[27]的研究结果相似，微灌能促进玉米叶片生长宽大，提高玉米群体叶面积，促进玉米光合作用。同时胞间 CO_2 浓度变化趋势与光合速率和气孔导度相同，即微喷灌提高光合速率的原因是其降低水分胁迫对光合作用的限制。

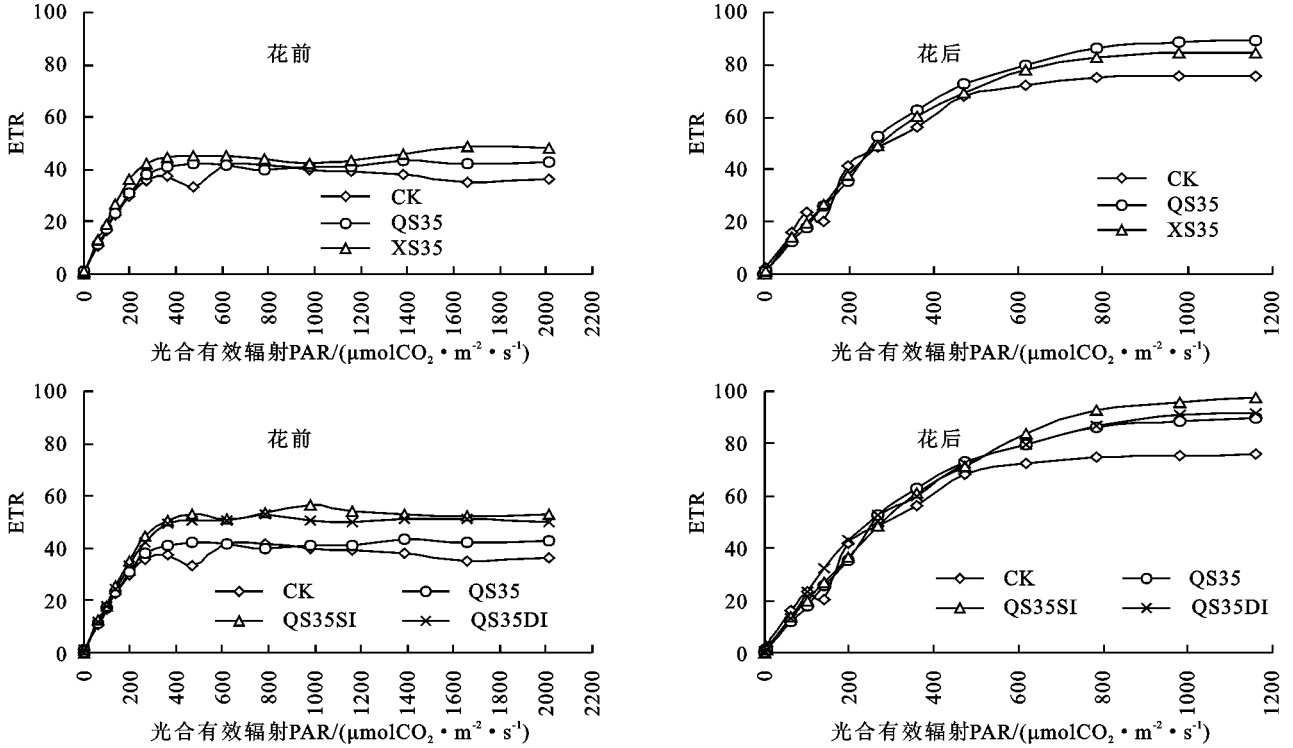

图 6 耕作和灌溉方式对玉米叶片 ETR 的影响

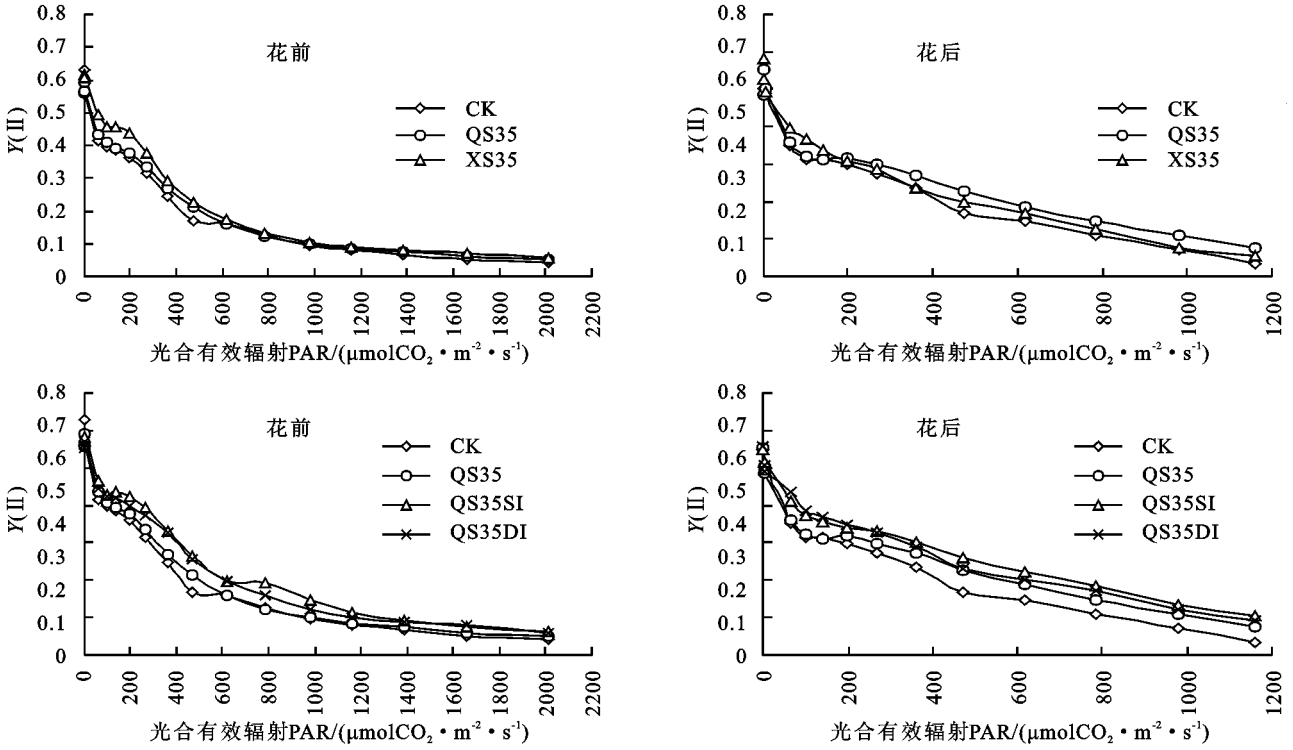

图 7 耕作和灌溉方式夏玉米叶片 Y(Ⅱ)的影响

叶片光合色素是叶片光合作用的物质基础，叶绿素是植物光合作用过程中吸收光能的主要物质，在光合作用的电子捕获和传递中起重要作用[28]。叶绿素荧光参数可以从光合作用机构内部变化的角度分析

环境对作物的影响,因此利用叶绿素荧光参数等指标可以客观地衡量耕作和灌溉方式对作物生长发育的影响[29-31]。本研究发现,不同耕作方式下,QS35 处理的叶绿素相对含量较 CK 提高 6.4%,花前和花后 F_v/F_m 均无显著差异,花前和花后 qP、ETR、Y(Ⅱ)在不同光照强度下表现为 QS35>XS35>CK,NPQ 在花后表现为 QS35<XS35<CK。这与前人[21-23]的研究结果相似,深松处理可以提高玉米穗位叶 SPAD 值及功能叶 Y(Ⅱ)和 ETR。光化学碎灭和非光化学碎灭是植物叶绿体耗散过剩能量的 2 种途径,也是作物本身的一种自我保护机制[32]。qP 值提高,NPQ 降低,说明玉米在生长期光合同化能力强,光能利用效率高,而以热能耗散掉的光能较少。而 F_v/F_m 反映 PSⅡ反应中心最大光能转换效率,在非胁迫条件下,F_v/F_m 的值很稳定[33]。本试验中 F_v/F_m 值无显著差异,说明作物并未受到胁迫,同时与胞间 CO_2 浓度结果一致。不同灌溉方式下,QS35SI 处理叶绿素相对含量较 CK 提高 11.2%,花前和花后 F_v/F_m 均无显著差异,花前和花后 qP、ETR、Y(Ⅱ)在不同光照强度下表现为 QS35SI>QS35DI>QS35>CK,花前和花后 NPQ 表现为 QS35SI<QS35DI<QS35<CK。F_v/F_m 值无显著差异,说明该处理下玉米并未受到胁迫,同时微灌能够提高玉米叶片 SPAD 值、Y(Ⅱ)和 ETR,提高玉米在生长期光合同化能力和光能利用效率,降低光能的热耗散。光合特性的变化最终会反映在籽粒产量上,试验中不同耕作方式下 QS35 处理玉米产量较 CK 提高 9.6%;不同灌溉方式下,QS35SI 处理玉米产量较 CK 提高 7.5%。

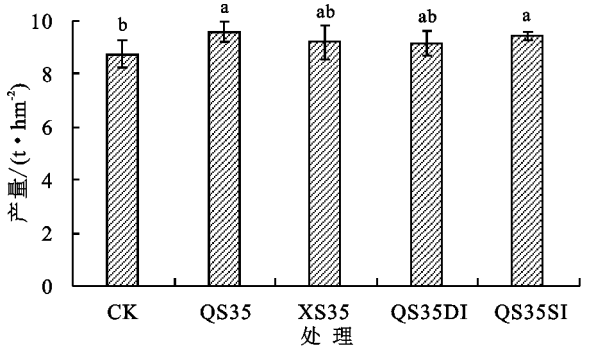

图 8　耕作和灌溉方式对玉米产量的影响

4　结 论

(1)深松处理玉米叶面积指数和叶绿素相对含量显著提高,且秋深松比夏深松效果较好;秋深松处理对花前玉米净光合速率、气孔导度、蒸腾速率及花后蒸腾速率均有显著提高,对花前胞间 CO_2 浓度及花后净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度影响不显著;秋深松处理能有效提高玉米叶片光化学淬灭系数 qP,降低非光化学淬灭系数 NPQ,提高 PSⅡ电子传递效率 ETR 和实际光化学量子产量 Y(Ⅱ)。

(2)秋深松微喷灌能有效提高玉米叶片花前及花后净光合速率、气孔导度、蒸腾速率;有效提高光化学淬灭系数 qP,降低非光化学淬灭系数 NPQ,提高 PSⅡ电子传递效率 ETR 和实际光化学量子产量 Y(Ⅱ)。

参考文献:

[1]　孟艳,孙晓涵,郑宾,等.有机物沟埋还田模式与花后灌水量对玉米光合特性和产量的影响[J].应用生态学报,2018,29(8):2541-2550.

[2]　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.

[3]　张凯,刘战东,强小嫚,等.豫北潮土水浇地合理耕层构建技术研究[C].中国农学会耕作制度分会 2018 年度学术年会论文摘要集.北京:中国农学会耕作制度分会,2018:63.

[4]　郭江峰.土壤耕作深度对冬小麦生长状况及产量的影响[J].中国农技推广,2016,32(8):64-70.

[5]　秦红灵,高旺盛,李春阳.北方农牧交错带免耕对农田耕层土壤温度的影响[J].农业工程学报,2007,23(1):40-47.

[6]　辛存岳,郭青云,魏有海,等.干旱地区农田浅耕对杂草控制及土壤水分、养分的影响[J].中国农业科学,2006,39(8):1697-1702.

[7]　Jagadamma S, Lal R, Rimal B K. Effects of topsoil depth and soil amendments on corn yield and properties of two Alfisols in central Ohio[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2009,64(1):70-80.

[8]　白伟,孙占祥,郑家明,等.耕层构造对春玉米产量形成及生长发育特征的影响[J].华北农学报,2015,30(5):205-213.

[9]　李洪文,陈君达,李问盈.保护性耕作条件下深松技术研究[J].农业机械学报,2000,31(6):42-45.

[10]　李裕元,邵明安.土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J].农业工程学报,2003,19(1):46-50.

[11]　许迪,李益农,龚时宏,等.面向可持续灌溉农业发展的涝渍盐碱管理[J].排灌机械工程学报,2019,37(1):63-72.

[12]　刘晶晶,张阿凤,冯浩,等.不同灌溉量对小麦—玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J].应用生态学报,2017,28(1):169-179.

[13]　Zhang X, Shao L, Sun H, et al. Incorporation of soil bulk density in simulating root distribution of winter wheat and maize in two contrasting soils[J]. Soil Science Society of America Journal,2012,76:638-647.

[14]　Gao Y, Yang., Shen X, et al. Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): Crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency[J]. Agricultural Water Manage,2014,146:1-10.

[15]　李洪勋,吴伯志.不同耕作措施玉米高产光合指标的研究[J].玉米科学,2007,15(2):94-97.

[16] 白向历,孙世贤,刘明,等.玉米叶片光合生理与抗旱性关系研究[J].种子,2009,28(8):4-8.

[17] 徐爱东,邱念伟,娄苑颖.判断玉米幼苗缺氮程度的叶绿素荧光动力学指标[J].植物营养与肥料学报,2010,16(2):498-503.

[18] 宋振伟,郭金瑞,任军,等.耕作方式对东北雨养区玉米光合与叶绿素荧光特性的影响[J].应用生态学报,2013,24(7):1900-1906.

[19] 刘仲发,勾玲,赵明,等.遮荫对玉米茎秆形态特征、穿刺强度及抗倒伏能力的影响[J].华北农学报,2011,26(4):91-96.

[20] 于振文.作物栽培学各论[M].北京:中国农业出版社,2013.

[21] 许菁.耕作方式与秸秆还田对冬小麦—夏玉米光合特性及周年产量形成的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2017.

[22] 许菁,贺贞昆,冯倩倩,等.耕作方式对冬小麦 - 夏玉米光合特性及周年产量形成的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):101-109.

[23] 穆心愿.耕作方式与秸秆还田对黄淮潮土性质及小麦玉米生长的调控效应[D].郑州:河南农业大学,2016.

[24] Zlatev Z S, Yordanov I T. Effects of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants[J]. General and Applied Plant Physiology, 2004,30(3/4):3-18.

[25] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等.不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(2):419-425.

[26] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology,2003,33:317-345.

[27] 史丽艳,牛文全,张俊.灌水方式对轻度盐化土壤玉米生长及土壤水分的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):152-156.

[28] Girma A, Skidmore A K, Bie C A J M D, et al. Photosynthetic bark: Use of chlorophyll absorption continuum index to estimate Boswellia papyrifera bark chlorophyll content[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013,23:71-80.

[29] Jiang G M, Sun J Z, Liu H Q, et al. Changes in the rate of photosynthesis accompanying the yield increase in wheat cultivars released in the past 50 years[J]. Journal of Plant Research,2003,116(5):347-354.

[30] 王正航,武仙山,昌小平,等.小麦旗叶叶绿素含量及荧光动力学参数与产量的灰色关联度分析[J].作物学报,2010,36(2):217-227.

[31] 宋振伟,郭金瑞,任军,等.耕作方式对东北雨养区玉米光合与叶绿素荧光特性的影响[J].应用生态学报,2013,24(7):1900-1906.

[32] 李潮海.土壤物理性质对玉米的生态生理效应及其调控[D].郑州:河南农业大学,2002.

[33] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: Aprobe of photosynthesis in vivo[J]. Annual Review of Plant Biology,2008,59:89-113.

(上接第 118 页)

[18] Fryear D W, Ali S, Bilbro J D, et al. Revised Wind Erosion Equation (RWEQ). Wind erosion and water conservation research unit, USDA-ARS, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory [J]. Technical Bulletin, 1998 (1).

[19] 江凌,肖燚,欧阳志云,等.基于 RWEQ 模型的青海省土壤风蚀模数估算[J].水土保持研究,2015,22(1):21-25.

[20] 中华人民共和国水利部.SL190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.

[21] Colazo J C, Buschiazzo D E. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina[J].Geoderma,2010,159(1):228-236.

[22] 王仁德,邹学勇,赵婧妍.北京市农田风蚀的野外观测研究[J].中国沙漠,2011,31(2):400-406.

[23] Meng Z J, Dang X H, Gao Y, et al. Interactive effects of wind speed,vegetation coverage and soil moisture in controlling wind erosion in a temperate desert steppe, Inner Mongolia of China[J]. Journal of Arid Land, 2018,10(4):1-14.

[24] 肖巍强.水分对风沙土抗风蚀性影响的风洞模拟研究[D].西安:陕西师范大学,2018.

[25] Labiadh M, Bergametti G, Kardous M, et al. Soil erosion by wind over tilled surfaces in South Tunisia[J]. Geoderma,2013,202(7):8-17.

[26] 范围,吴景贵,李建明,等.秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质及玉米产量的影响[J].土壤学报,2018,55(4):835-846.

[27] Gao Y, Dang X H, Yu Y, et al. Effects of tillage methods on soil carbon and wind erosion[J]. Land Degradation and Development,2015,27(3):583-591.

[28] 康日峰,任意,吴会军,等.26 年来东北黑土区土壤养分演变特征[J].中国农业科学,2016,49(11):2113-2125.

[29] 李晓丽,申向东,苏雅,等.裸露耕地土壤风蚀物化学组分的分布特征[J].农业工程学报,2012,28(5):114-119.

[30] 苑依笑,王仁德,常春平,等.风蚀作用下农田土壤细颗粒的粒度损失特征及其对土壤性质影响[J].水土保持学报,2018,32(2):104-109.

[31] 刘目兴,刘连友.农田休闲期作物留茬对近地表风场的影响[J].农业工程学报,2009,25(9):295-300.