农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

页岩气压裂返排液对小麦生长及生理特性的影响

李炎， 徐敏， 许瑶， 田冬梅， 伍钧

引用本文:
李炎, 徐敏, 许瑶, 等. 页岩气压裂返排液对小麦生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 944-952.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1192

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

UV-B辐射对元阳梯田稻田土壤活性有机碳含量与温室气体排放的影响
王灿, 李虹茹, 湛方栋, 李想, 李元, 祖艳群, 何永美, 郭先华
农业环境科学学报. 2018, 37(2): 383-391 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1060

模拟增温对华北农田土壤碳排放的影响
杜锟, 李发东, 涂纯, 李兆
农业环境科学学报. 2020, 39(4): 691-699 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1336

钼污染对冬小麦光合作用特性及产量的影响
李路, 胡承孝, 谭启玲, 史凯丽, 赵小虎, 孙学成
农业环境科学学报. 2016, 35(4): 620-626 https://doi.org/10.11654/jaes.2016.04.002

大气CO2浓度和温度升高对麦田土壤呼吸和酶活性的影响
刘远, 潘根兴, 张辉, 李峰, 王光利
农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1484-1491 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1588

硅酸盐提高番茄抗盐性的效应与生理机制
朱永兴, 李换丽, 胡彦宏, 张田田, 韩卫华, 宫海军
农业环境科学学报. 2015(2): 213-220 https://doi.org/10.11654/jaes.2015.02.002

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李 炎, 徐 敏, 许 瑶, 等. 页岩气压裂返排液对小麦生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 944-952.
LI Yan, XU Min, XU Yao, et al. Effects of shale gas fracturing fluid on wheat growth and physiological characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 944-952.

开放科学OSID

页岩气压裂返排液对小麦生长及生理特性的影响

李 炎, 徐 敏, 许 瑶, 田冬梅, 伍 钧*

(四川农业大学环境学院, 成都 611130)

摘 要: 为了探究页岩气开采产生的压裂返排液对农作物的影响,以冬小麦为材料,探究了小麦3个不同关键生育期(播种期、分蘖期、抽穗期)施入压裂返排液对小麦生长及旗叶、根部生理特性的影响。结果表明:随着返排液浓度升高,小麦株高、生物量、产量总体呈下降趋势,光合作用及抗氧化酶活性均呈先升高后降低的趋势,可溶性糖含量显著降低。播种期、分蘖期、抽穗期施入返排液浓度分别为≥50、50、150 g·kg^{-1}时,小麦株高显著降低;返排液浓度分别为≥200、150、200 g·kg^{-1}时小麦生物量明显降低;返排液浓度分别为≥200、150、100 g·kg^{-1}时,小麦产量、光合作用及抗氧化酶活性明显降低。研究表明,高含量的有机物及盐分离子是压裂返排液中的主要污染物。在播种期、分蘖期、抽穗期返排液泄漏进入农田土壤的浓度分别为≥200、150、100 g·kg^{-1}时,返排液通过诱导小麦氧化应激反应进而影响光合作用及植物生长,其中返排液于抽穗期进入土壤对小麦影响最大。

关键词: 页岩气;压裂返排液;小麦;光合参数;抗氧化系统

中图分类号: S512.1;X741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2020)05-0944-09 doi:10.11654/jaes.2019-1192

Effects of shale gas fracturing fluid on wheat growth and physiological characteristics

LI Yan, XU Min, XU Yao, TIAN Dong-mei, WU Jun*

(College of Environmental Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Here, we explored the effects of fracturing fluid obtained during shale gas extraction on crop growth. We used winter wheat as the research object to explore the effects of application of fracturing fluid on wheat growth, flag leaf, and root physiological characteristics at three key growth stages(i.e., sowing, tillering, and heading stages). The results revealed that with an increase in the fracturing fluid level, wheat height, biomass, and yield reduced; photosynthetic rate and antioxidant enzyme activity increased and then decreased; and soluble sugar content decreased significantly. In the sowing, tillering, and heading stages, the height of wheat significantly decreased in the soil treated with ≥50, 50, and 150 g·kg^{-1} fracturing fluid, respectively. Furthermore, the wheat biomass was significantly decreased when the concentration of fracturing fluid was 150, 200, and ≥200 g·kg^{-1}, respectively. The yield, photosynthesis, and antioxidant enzyme activity of wheat were significantly reduced when treated with ≥200, 150, and 100 g·kg^{-1} fracturing fluid, respectively. The results indicated that organic matter and salt at high concentrations were the main pollutants in fracturing fluid. During the sowing, tillering, and heading stages, fracturing fluid affected photosynthesis and plant growth by inducing wheat oxidative stress response when the concentration of fracturing fluid entering the soil was more than or equal to 200, 150, and 100 g·kg^{-1}, respectively. Among them, fracturing fluid released into the soil during the heading stage had the greatest effect on wheat.

Keywords: shale gas; fracturing fluid; wheat; photosynthesis parameters; antioxidant system

收稿日期: 2019-10-31 **录用日期:** 2020-01-10

作者简介: 李 炎(1994—),男,河南正阳人,硕士研究生,从事土壤重金属污染治理研究。E-mail:421484299@qq.com

***通信作者:** 伍 钧 E-mail:wuj1962@163.com

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2015SZ0007)

Project supported: The Scientific Research Foundation of the Education Department of Sichuan Province, China(2015SZ0007)

随着经济的发展,能源需求不断增长,使得以页岩气为代表的新型非常规能源在能源结构中的地位不断攀升。页岩气是一种蕴藏丰富、拥有有利开采基础条件、分布范围广、运输方便的新能源[1]。目前,国内外开发页岩气主要采用水力压裂的方法,即在高压条件下将压裂液(水和化学试剂组成的混合液)和固体颗粒支撑剂泵入地层深处的岩石,压裂页岩层,形成缝隙,使页岩气流畅地从岩石裂缝中释放[2]。压裂完成后,压裂液与页岩中的水混合作为返排液返回地面,压裂返排液含有压裂液中各种化学添加剂,如杀菌剂、破胶剂、黏土稳定剂、表面活性剂等化学物质[3],同时还含有压裂液在返排过程中从地层带出的悬浮有机物、油脂、盐分、重金属、酚类、酮类以及放射性物质等多种污染物[4-6],具有高化学需氧量、高矿化度、处理难度大的特点[7],因而是目前最具有挑战性的工业污水之一[8]。中国页岩气资源丰富,前景可观,但目前国内环境管理中尚未要求公开压裂液成分,供应商均以商业机密为由,对压裂液成分保密[9],因此一旦压裂返排液泄漏,将对周围水体及土壤造成未知严重程度的影响,若返排液进入农田,不仅会影响农作物生长,导致产量降低,还可能引发食品安全问题,危及人类健康安全。

我国页岩气勘查开发处在起步阶段,关于页岩气压裂返排液对土壤及植物的影响研究鲜有报道,而且小麦是我国农业生产中的主要粮食作物及试验常用高等植物之一,常被用于监测土壤污染程度,从生态学角度衡量土壤健康状况,评价土壤质量。因此本文通过小麦盆栽试验,探究不同浓度压裂返排液于小麦不同生育期进入土壤后,对小麦生长发育及生理生化特性的影响,旨在探究压裂返排液泄漏对常见农作物产生的影响,对保护农业生态环境,以及页岩气产业的可持续发展都具有重大现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验土壤

土壤采自四川省大邑县,土壤类型为紫色土。采集0~20 cm耕层土壤带回实验室,一部分土壤经自然风干,挑除植物根系、石块等杂质后,研磨过20目及100目筛,用于测定土壤基本理化性质,另一部分经自然风干后过2 mm筛,用作盆栽试验。土壤为粉砂质黏壤土,pH 7.28,有机质19.92 g·kg^{-1},全氮0.78 g·kg^{-1},碱解氮98.03 mg·kg^{-1},速效磷7.32 mg·kg^{-1},速效钾181.89 mg·kg^{-1},阳离子交换量8.20 cmol·kg^{-1}。

1.1.2 试验压裂返排液

压裂返排液取自四川省某页岩气开采井场。返排液成分见表1。

表1 返排液基本成分

Table 1 Basic ingredients of fracturing fluid

指标 Indicator	数值 Numerical	指标 Indicator	数值 Numerical
pH	6.81	Mg^{2+}/mg·L^{-1}	5 076.20
总溶解固体 Total dissolved solids(TDS)/mg·L^{-1}	629.00	Ca^{2+}/mg·L^{-1}	4 723.60
悬浮物 Suspended solids/mg·L^{-1}	67.00	Cd/mg·L^{-1}	0.047
化学需氧量 Chemical oxygen demand(COD)/mg·L^{-1}	1 635.50	Cr/mg·L^{-1}	0.61
总磷 Total phosphorus(TP)/mg·L^{-1}	0.074	Cu/mg·L^{-1}	0.028
总氮 Total nitrogen(TN)/mg·L^{-1}	104.03	Fe/mg·L^{-1}	53.17
氨氮 Ammonia nitrogen(NH_3-N)/mg·L^{-1}	86.58	Mn/mg·L^{-1}	5.03
F^-/mg·L^{-1}	3 087.70	Ni/mg·L^{-1}	0.014
Cl^-/mg·L^{-1}	10 827.80	Pb/mg·L^{-1}	0.10
SO_4^{2-}/mg·L^{-1}	8 766.40	Zn/mg·L^{-1}	0.075
Na^+/mg·L^{-1}	1 620.10	As/mg·L^{-1}	0.005 4
K^+/mg·L^{-1}	2 186.65	Hg/mg·L^{-1}	0.000 69

1.1.3 试验小麦

以冬小麦为供试植物,品种为蜀麦691。

1.2 试验方法

盆栽试验于塑料遮雨大棚内进行,以口径25 cm、高30 cm的塑料桶为培养容器,每桶装土6.5 kg。以溶液的形式于小麦3个生育期(播种期、分蘖期、抽穗期)一次性向土壤中添加压裂返排液,使之与土壤完全混匀,其中播种期指添加返排液7 d后播种,分蘖期及抽穗期为使返排液与土壤完全混匀,使用小木棍在盆中土壤上插出多个均匀分散的小洞后再倒入返排液。试验共设7个处理,每处理3个重复,压裂返排液施入浓度按照返排液占土比:0、50、100、150、200、300、350 g·kg^{-1},分别用CK、F50、F100、F150、F200、F300、F350表示。每盆种植15粒籽粒饱满的小麦种子,待小麦五叶期进行匀苗,每盆5株。根据生长需要进行水肥管理,保持田间持水量为60%左右。

1.3 样品采集与测定

光合参数测定:在小麦灌浆后期,采用Li-6400型光合测定仪,在晴天上午9:00—11:00测定每盆5

片均匀一致的未枯萎旗叶的净光合速率、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速度。

生理指标测定：在小麦灌浆后期，采集新鲜小麦根部及旗叶叶片，测定小麦生理指标。过氧化物酶（POD）活性测定采用愈创木酚法，超氧化物歧化酶（SOD）活性测定采用核黄素-氮蓝四唑显色法，可溶性糖含量采用蒽酮比色法，具体方法步骤参照《植物生理学实验指导》[10]。

小麦成熟期每盆单独收获，测定株高及产量。分别收集植株地上部及根，于鼓风干燥箱内105 ℃杀青30 min，然后于80 ℃烘至恒质量，即得地上部生物量及根干质量。

1.4 数据分析

由Excel 2013和SPSS 22.0软件完成数据分析，采用单因素方差分析方法和LSD法进行数据统计，用Origin 9.0软件完成制图。

2 结果与分析

2.1 小麦生长

实际种植情况显示，返排液于小麦不同生育期施入土壤对小麦生长影响各不相同。播种期F350处理小麦种子无法发芽生长；分蘖期F300和F350处理小麦无法生长而死亡；抽穗期F200~F350处理小麦叶片逐渐变黄枯萎，旗叶于灌浆期全部枯萎，最终导致植株死亡。

小麦不同生育期施入返排液对小麦株高及生物量的影响如表2所示。小麦3个生育期随返排液施入量升高，地上部生物量、根干质量、株高及产量总体呈下降趋势。播种期F200、F300处理地上部生物量显著低于CK（$P<0.05$），F100~F300处理根干质量显著低于CK（$P<0.05$），F50~F300处理株高显著低于CK（$P<0.05$），F200、F300处理籽粒产量显著低于CK（$P<0.05$）。分蘖期F150、F200处理地上部生物量显著低于CK（$P<0.05$），F50~F200处理根干质量、株高和籽粒产量均显著低于CK（$P<0.05$）。抽穗期F200~F350处理地上部生物量显著低于CK（$P<0.05$），F150~F350处理株高显著低于CK（$P<0.05$），F100~F350处理籽粒产量显著低于CK（$P<0.05$），各返排液处理根干质量与CK差异均不显著（$P>0.05$）。分蘖期F50、F100处理小麦产量显著低于CK，但与播种期F100、F150处理产量相近且与CK相比下降并不明显，而分蘖期F150处理小麦产量下降较为明显，与CK相比下降了51.11%，表明分蘖期施入返排液浓度≥150 g·kg^{-1}时对小麦产量影响相对较为明显。小麦3个不同生育期施入返排液后，地上部生物量及根干质量受影响的程度表现为分蘖期>播种期>抽穗期，株高表现为播种期>分蘖期>抽穗期，籽粒产量表现为抽穗期>分蘖期>播种期。

表2 小麦3个生育期施入返排液对小麦株高、生物量及产量的影响

Table 2 Effects of fracturing fluid on wheat plant height, biomass and yield during three growth stages of wheat

时期 Period	处理 Treatment	地上部 Shoot/ g·pot^{-1}	根部 Root/ g·pot^{-1}	籽粒产量 Grain yield/ g·pot^{-1}	株高 Plant height/ cm
播种期 Sowing stage	CK	24.94a	2.17a	11.72a	61.29a
	F50	28.14a	1.86a	11.71a	53.46b
	F100	23.14a	0.69b	9.47a	52.40b
	F150	22.07a	0.67b	9.09a	46.51b
	F200	10.75b	0.24b	4.70b	46.15b
	F300	5.28b	0.08b	2.54b	38.52c
	F350	—	—	—	—
分蘖期 Tillering stage	CK	24.94a	2.17a	11.72a	61.29a
	F50	22.67a	1.51b	9.03b	54.38b
	F100	25.21a	1.10bc	9.20b	52.84b
	F150	16.47b	0.98c	5.73c	52.61b
	F200	11.38c	0.69c	3.05d	51.75b
	F300	—	—	—	—
	F350	—	—	—	—
抽穗期 Heading stage	CK	24.94ab	2.17a	11.72a	61.29a
	F50	26.86a	2.21a	11.62a	59.60ab
	F100	22.78ab	2.27a	7.61b	56.81ab
	F150	19.99bc	1.87a	4.50c	55.35bc
	F200	16.73cd	1.82a	1.49d	50.38c
	F300	17.25cd	1.86a	0.64d	50.04c
	F350	14.26d	1.89a	0.25d	44.27d

注："—"表示无小麦植株。同时期同列数字后不同小写字母表示处理间差异达显著水平（$P<0.05$）。

Note: "—" means no wheat plants. The different lowercase letters after the same period with the column numbers indicate significant differences（$P<0.05$）among different treatments.

2.2 光合参数

由图1可知，小麦各生育期施入返排液，旗叶净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间二氧化碳浓度均于F50处理达到最大值并显著高于CK（$P<0.05$），且随着返排液浓度增加呈下降趋势。

播种期施入返排液，各返排液处理旗叶净光合速率均显著高于CK（$P<0.05$）；F50、F100处理旗叶蒸腾速率显著高于CK（$P<0.05$），F150~F300处理显著低于CK（$P<0.05$）；F50~F200处理旗叶气孔导度显著高于CK（$P<0.05$），F300处理显著低于CK（$P<0.05$）；

F50~F200处理旗叶胞间二氧化碳浓度显著高于CK(P<0.05),F300处理与CK无显著差异(P>0.05)。

分蘖期施入返排液,F50、F100处理旗叶净光合速率均显著高于CK(P<0.05),F150、F200处理显著低于CK(P<0.05);F50处理旗叶蒸腾速率显著高于CK(P<0.05),F150、F200处理显著低于CK(P<0.05);F50、F100处理旗叶气孔导度显著高于CK(P<0.05),F150、F200处理显著低于CK(P<0.05);F50~F200处理旗叶胞间二氧化碳浓度显著高于CK(P<0.05)。

抽穗期施入返排液,F50处理旗叶净光合速率显著高于CK(P<0.05),F100、F150处理显著低于CK(P<0.05);F50处理旗叶蒸腾速率显著高于CK(P<0.05),F100、F150处理显著低于CK(P<0.05);F50~F150处理旗叶气孔导度与CK无显著差异(P>0.05);F50~F150处理旗叶胞间二氧化碳浓度与CK无显著差异(P>0.05)。

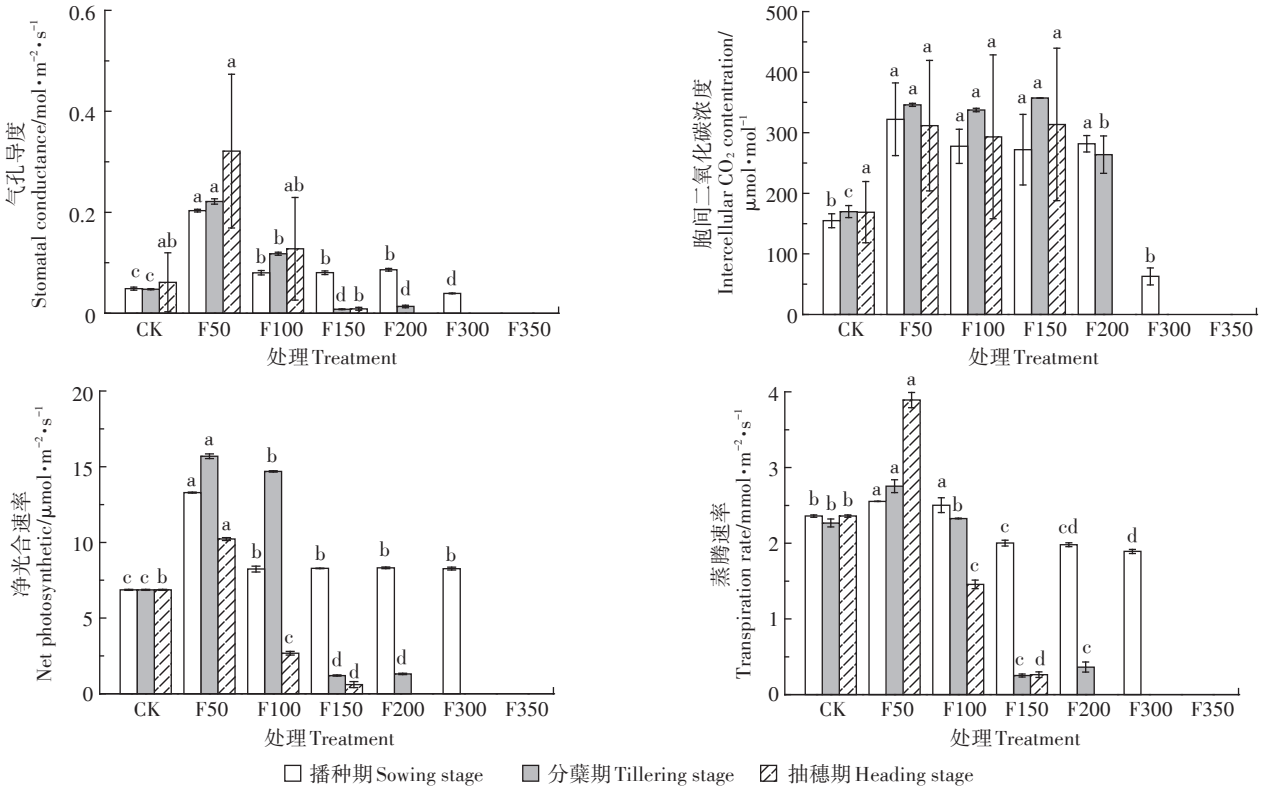
2.3 旗叶及根部生理特性

2.3.1 过氧化物酶

由图2可知,播种期随施入返排液浓度增加,旗叶POD活性呈下降趋势,F100~F300处理酶活性显著低于CK(P<0.05);根部POD活性呈先升高后降低趋势,F100~F300处理酶活性显著高于CK(P<0.05),F50处理与CK无显著差异(P>0.05)。分蘖期随施入返排液浓度增加,旗叶POD活性呈先升高后降低趋势,F50、F100处理旗叶POD活性与CK无显著差异(P>0.05),F150处理酶活性达到最大值且显著高于CK(P<0.05),是CK处理的1.15倍,F200处理酶活性显著低于CK(P<0.05);根部POD活性呈升高趋势,F50处理酶活性与CK无显著差异(P>0.05),F100~F200处理酶活性显著高于CK(P<0.05)。抽穗期施入返排液,旗叶酶活性于F50处理显著高于CK(P<0.05),F100、F150处理显著低于CK(P<0.05);根部POD活性随着返排液浓度增加呈下降趋势,F100处理与CK无显著差异(P>0.05),F150~F350处理显著低于CK(P<0.05)。

2.3.2 超氧化物歧化酶

由图3可知,播种期随施入返排液浓度增加,旗叶SOD活性呈下降趋势,F50~F300处理酶活性显著



不同小写字母表示同一时期施入返排液各处理间差异达显著水平(P<0.05)。下同

Different lowercase letters indicate a significant differences among the treatments of fracturing fluid during the same period(P<0.05). The same below

图1 小麦3个生育期施入返排液对旗叶光合参数的影响

Figure 1 Effect of fracturing fluid on flag photosynthetic parameters in three growth stages of wheat

低于CK（$P<0.05$）；根部SOD活性呈先升高后降低趋势，与CK相比，F100、F150处理酶活性显著升高（$P<0.05$），F200、F300处理酶活性显著下降（$P<0.05$）。分蘖期随施入返排液浓度增加，旗叶SOD活性呈下降趋势，F200处理酶活性显著低于CK（$P<0.05$）；根部SOD活性呈升高趋势，F150、F200处理酶活性显著高于CK（$P<0.05$）。抽穗期随施入返排液浓度增加，旗叶SOD活性显著下降，各返排液处理间SOD酶活性无显著差异（$P>0.05$），但均显著低于CK（$P<0.05$）；根部酶活性呈下降趋势，F350处理SOD活性显著低于CK（$P<0.05$），其余各返排液处理与CK无显著差异（$P>0.05$）。

2.3.3 可溶性糖

由图4可知，播种期及分蘖期随施入返排液浓度增加，旗叶及根部可溶性糖含量均显著低于CK（$P<0.05$），且呈现出先降低后升高的趋势，播种期、分蘖期旗叶及根部可溶性糖分别于F200、F150处理含量达到最低值。抽穗期随施入返排液浓度增加，旗叶可溶性糖含量呈下降趋势，各返排液处理均显著低于CK（$P<0.05$）；根部可溶性糖含量呈先下降后升高的趋势，F50处理与CK无显著差异（$P>0.05$），F100~F350处理显著低于CK（$P<0.05$），根部可溶性糖含量于F200处理达到最低值。

3 讨论

从表1可以看出，返排液中含有大量的盐分离子及有机化合物，虽然含有重金属元素，但其含量较低，均未超过《污水综合排放标准》（GB 8978—1996）第一类污染物最高允许排放浓度，因此主要针对返排液中的盐分离子及有机化合物进行讨论。

光合特性作为反映光合作用强弱的重要指标，包括净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、叶绿素含量、蒸腾速率等[11]。小麦叶片净光合速率反映了小麦光合产物的生产情况，适宜的光合速率更利于植株

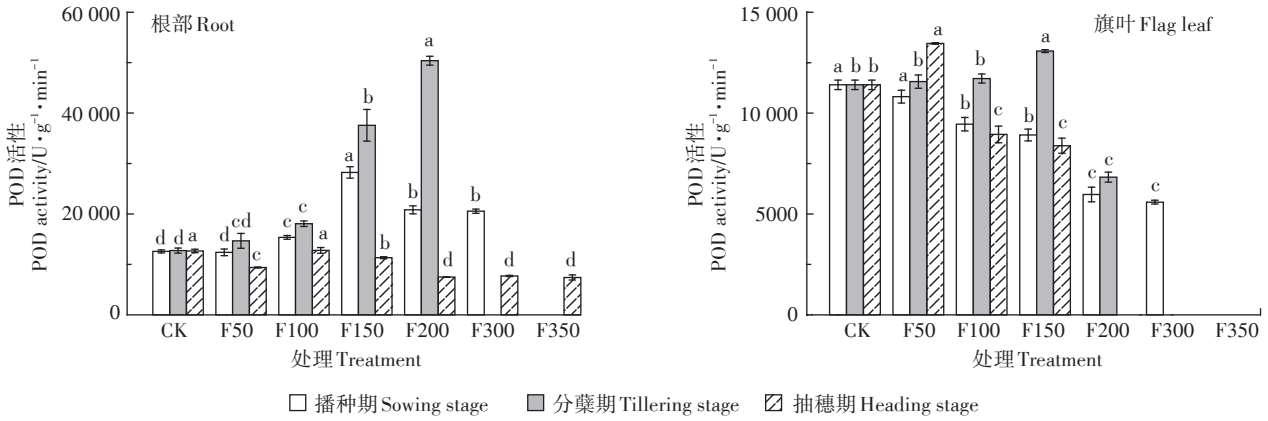


图2 小麦3个生育期施入返排液对旗叶及根部POD活性的影响

Figure 2 Effects of fracturing fluid on the activity of flag leaves and root POD enzymes in three growth stages of wheat

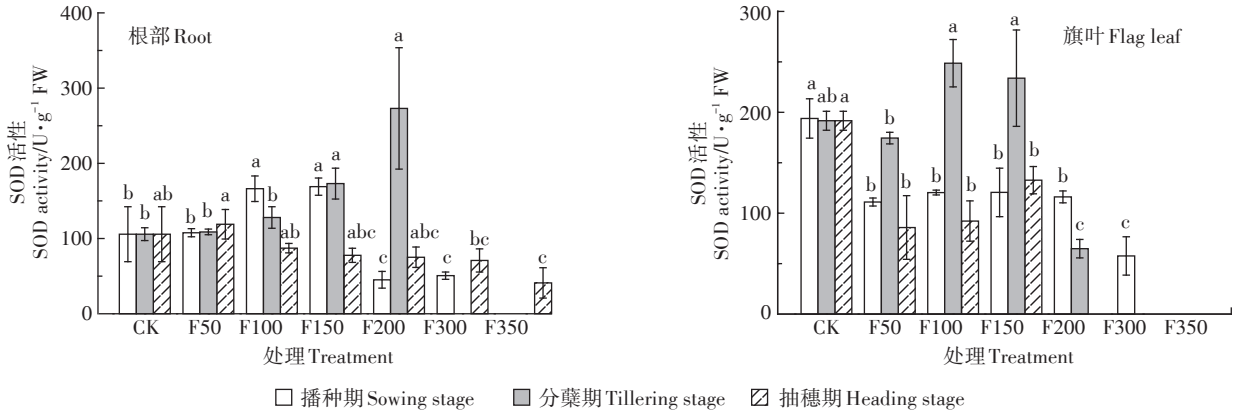


图3 小麦3个生育期施入返排液对旗叶及根部SOD活性的影响

Figure 3 Effects of fracturing fluid on the activity of SOD enzyme in three growth stages of wheat

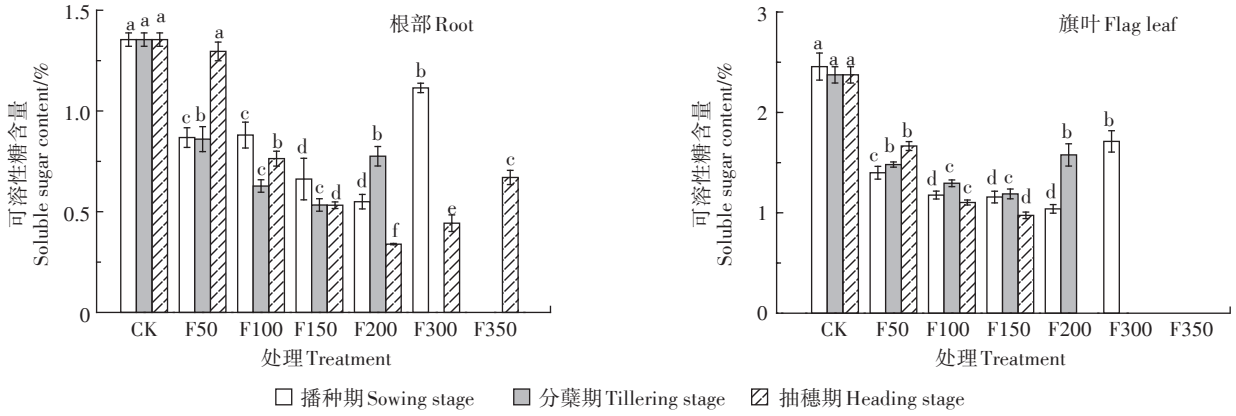


图4 小麦3个生育期施入返排液对旗叶及根部可溶性糖含量的影响

Figure 4 Effect of fracturing fluid on the content of soluble sugar in flag leaves and roots in three growth stages of wheat

相关生命活动的进行,是小麦获得高产的重要因素之一。本试验中,各生育期施入返排液,旗叶光合参数均在F50处理达到最大值,可能是因为返排液中的高盐及有机污染物引起小麦内源激素质量分数的变化,以此来减轻逆境造成的伤害[12],是其通过自身调节适应不良环境的一种表现。在逆境胁迫下,植物必须通过增加植物的净光合作用积累物质,促进能量转化从而修复受损的组织、保持细胞膜的完整性[13-14]。前人研究认为植物光合机构的发育与功能维持都有脱落酸、生长素和细胞分裂素的参与调控,提高内源激素含量可阻止光合蛋白复合体的降解[15],进而使叶绿体增大、基粒增多,提高了叶片叶绿素含量[16]。同时,返排液中含有大量水溶性盐分离子,返排液的施入提高了土壤水溶性盐分含量,而低盐胁迫可以在一定程度上增加小麦叶片净光合速率[13,17]。

在植物光合作用研究中,叶片净光合速率在逆境胁迫下降低的原因可分为两种,即气孔和非气孔限制因素[18]。植物进行光合作用时,当叶片胞间二氧化碳浓度及气孔导度同时下降时,气孔因素是净光合速率降低的主要原因;当叶片净光合速率下降但细胞间二氧化碳浓度却升高时,通常非气孔因素是植物光合作用受到限制的主要原因[19]。本试验中各生育期随施入返排液浓度增加,旗叶净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间二氧化碳浓度均呈下降趋势,但胞间二氧化碳浓度下降趋势相对较小,可能是非气孔因素的影响,如叶片叶绿素含量、相关代谢酶活性等[20]。

在逆境胁迫下,植物细胞内平衡被打破,导致植物体内自由基含量升高,便会诱发膜脂不饱和脂肪酸发生连锁的过氧化反应,导致细胞膜结构及光合能力破坏、细胞功能失常,机体出现各种自由基综合症[21],为了防止自由基对细胞产生损伤,植物细胞内会产生清除自由基的物质。SOD是植物体内抗氧化系统的第一道防线,主要负责催化O^{2-}的反应生成H_2O_2,减少脂质发生氧化,使膜系统遭受伤害的程度降低[22]。SOD可催化O^{2-}生成H_2O_2,但H_2O_2过多的积累不仅会对细胞造成伤害,甚至会通过Harber-weiss反应生成更具破坏性的OH^-[23],而POD在逆境胁迫下,可以利用H_2O_2催化大量过氧化物氧化分解,是反映组织老化程度的一种生理指标[24]。旗叶作为小麦生育后期最重要的叶片,其叶片的光合能力对小麦产量和品质的提高有重要影响。根系是植物与土壤直接接触的重要功能器官,是植物与土壤中离子交换的重要结构,因此研究小麦旗叶及根系抗氧化酶活性具有重要意义。

植物体内保护系统酶活性是由多种综合因素决定的,在逆境胁迫下,低浓度污染物对保护系统酶活性有刺激作用,污染物的毒害作用小于植物的适应性,植物保护系统酶活性增强,可以及时清除活性氧,保护细胞膜不受损伤。当污染物超出一定浓度时,植物的适应性就小于污染物的毒害作用,活性氧清除系统代谢紊乱,细胞膜受损,表现出抑制和毒害作用[25]。本试验中播种期随着返排液施入浓度增加,旗叶POD、SOD活性均呈下降趋势;根部POD、SOD活性均呈先升高后降低趋势,于F150处理达到最大值。分蘖期随着返排液施入浓度增加,旗叶POD活性呈先升高后降低趋势,于F150处理达到最大值,SOD活性呈下降趋势;根部POD、SOD活性均呈上升趋势。抽穗期随着返排液施入浓度增加,旗叶POD活性呈先升高后降低趋势,于F50处理达到最大值;根部POD、SOD活性均呈下降趋势,研究结果与高芳等[26]的研究

结果一致。

可溶性糖是支配植物生长所需营养的重要物质，因此其含量可以体现植物营养状况，同时在逆境条件下植物体内的可溶性糖也是重要的保护性物质和渗透调节物质，是体现植株抗逆性强弱的重要指标[27]。在逆境胁迫下，可溶性糖作为调节保护物质，含量会有所上升，但孟自力等[22]研究发现高浓度镉胁迫处理下植物可溶性糖含量降低且显著低于CK，牛明功等[23]研究发现灌浆期渍涝胁迫下植物可溶性糖含量减少。本试验中小麦3个生育期施入返排液，旗叶及根部可溶性糖含量均显著下降，此结果与前人研究结果一致，可能是因为返排液的施入提高了土壤盐分含量，在盐分胁迫下植物体内的可溶性糖主要作为参与筛管向根部运输、参与渗透调节和合成其他有机渗透调节物质的能量来源[28]。同时根据返排液的高COD可以看出返排液中含有大量有机化合物，有相关研究表明，有机污染物会导致植物可溶性糖含量降低[29]。

高等植物是生态系统中的重要组成部分。高等植物可正常生长在一个稳定的生态系统中，反之，一个不稳定或受到外来污染的生态系统，对高等植物的生长可带来不利的负面影响，常会体现在植物形态上。本试验中，小麦3个生育期随施入返排液浓度增加，株高、生物量及产量总体呈下降趋势。小麦根系生长主要在出苗后到起身期前即分蘖期、越冬期及返青期，其中分蘖期是影响小麦分蘖数的重要时期，故分蘖期施入返排液对小麦根部生长影响最大。抽穗期后小麦的生长发育主要是生殖生长而不再是茎、叶等器官的生长发育，因此株高及生物量在抽穗期后基本不会再发生变化[30]，故抽穗期施入返排液对小麦株高及生物量影响最小。3个时期施入返排液对小麦产量的影响程度与对旗叶净光合速率的影响程度相一致，表现为抽穗期>分蘖期>播种期，可能是因为土壤对污染物有一定的缓冲及净化作用，早期返排液的施入对小麦的影响较小，而小麦生育中后期由于根系逐渐衰亡，其吸收、运输能力下降，逆境更加重了根系吸收的困难，不仅影响根系对N素的吸收，同时还影响N素在植株体内的运输和分配，导致功能叶片光合速率下降，影响功能叶片正常的光合作用和干物质的积累、运输和分配，最终导致产量下降[31]。同时有相关研究表明，在小麦不同生育期进行微咸水灌溉，其中抽穗期盐分胁迫会影响小麦穗数，进而影响小麦产量[17]。

虽然小麦产量很大程度上由小麦光合作用决定，但小麦的根系活力及生长情况同样对小麦产量有不可忽视的影响。F50处理旗叶光合速率相较于CK有所增加，根部保护酶活性无明显变化，但可溶性糖含量显著降低，可溶性糖作为植物体内重要的渗透调节物质，其含量的下降会影响植物根系对营养物质的吸收，进而影响小麦产量。此外，小麦有效穗数、穗粒数等均会对小麦产量造成影响，虽然F50处理小麦产量与CK相比数值上有所下降，但并无显著变化，这是小麦光合作用、体内抗氧化酶活性、可溶性糖含量变化及生长情况共同作用的结果。

相关研究表明，土壤中水溶态和酸溶态有机污染物是生物有效态，其与土壤有机质含量呈负相关[32]。施肥、耕作、灌溉与排水等条件可影响土壤微生物活性、改变土壤通气性、影响土壤理化性状，进而在一定程度上改变土壤中有机污染物的降解速率[33]。同时土壤不同程度盐分胁迫及不同种类盐分胁迫对植物生长及生理情况均有不同影响。压裂返排液是一种成分复杂的污染物，本研究主要针对返排液中的无机成分对小麦这一主要粮食作物的生理及生长影响，并未检测返排液中具体的有机物质及返排液进入土壤后对土壤性质的影响，因此对返排液中的有机成分及返排液对土壤物理及化学性质的影响还有待进一步研究。

4 结论

（1）高含量的有机物及盐分离子是压裂返排液中的主要污染物。

（2）各生育期低浓度返排液进入土壤后植物通过自身调节刺激小麦光合作用强度及保护酶活性，播种期、分蘖期、抽穗期返排液进入土壤的浓度分别<200、150、100 $g\cdot kg^{-1}$时，小麦生长发育、光合作用及体内保护酶活性不会受到明显影响；当返排液浓度分别≥200、150、100 $g\cdot kg^{-1}$时，返排液通过诱导小麦氧化应激反应进而影响光合作用及植物生长；当返排液浓度分别≥350、300、200 $g\cdot kg^{-1}$时，小麦无法正常生长，最终导致死亡。

（3）返排液于小麦不同生育期进入土壤对小麦生长发育、光合作用及生理特性均有不同程度影响，由于土壤对污染物的缓冲及净化作用，返排液于抽穗期进入土壤对小麦影响最大。

参考文献：

[1] 岳　嘉，赵迪斐，潘　颖，等. 美国页岩气革命对我国页岩气发展的

启示[J]. 能源技术与管理, 2019, 44(5):24-26.
YUE Jia, ZHAO Di-fei, PAN Ying, et al. Enlightenment of American shale gas revolution on China's shale gas development[J]. *Energy Technology and Management*, 2019, 44(5):24-26.

[2] 黄 靓, 李慧强, 杨 平. 页岩气压裂返排液的组成及处理技术[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(增刊2):166-171.
HUANG Liang, LI Hui-qiang, YANG Ping. The components and treatment of shale gas fracturing flowback water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(Suppl 2):166-171.

[3] Mauter M S, Alvarez P J J, Burton A, et al. Regional variation in water-related impacts of shale gas development and implications for emerging international plays[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15):8298-8306.

[4] Wilson J M, Vanbriesen J M. Oil and gas produced water management and surface drinking water sources in pennsylvania[J]. *Environmental Practice*, 2012, 14(4):288-300.

[5] Barbot E, Vidic N S, Gregory K B, et al. Spatial and temporal correlation of water quality parameters of produced waters from devonian-age shale following hydraulic fracturing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(6):2562-2569.

[6] 贺 美, 陈文杰, 田 磊, 等. 页岩气压裂返排液的水生生态毒性效应研究[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(2):108-119.
HE Mei, CHEN Wen-jie, TIAN Lei, et al. Study on the aquatic ecological toxicity of shale gas fracturing fluids[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12(2):108-119.

[7] 王 兵, 王帮林. 压裂返排液回用处理技术研究及应用[J]. 江汉石油职工大学学报, 2019, 32(4):41-44.
WANG Bing, WANG Bang-lin. Research and application of fracturing backflow fluid recycling technology[J]. *Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers*, 2019, 32(4):41-44.

[8] Estrada J M, Rao B. A review of the issues and treatment options for wastewater from shale gas extraction by hydraulic fracturing[J]. *Fuel*, 2016, 182:292-303.

[9] 史聆聆, 李小敏, 马建锋, 等. 页岩气开发压裂返排液环境监管及对策建议[J]. 环境与可持续发展, 2015, 40(4):39-42.
SHI Ling-ling, LI Xiao-min, MA Jian-feng, et al. Environment regulation and suggestion of fracturing flowback fluids of shale gas development[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2015, 40(4):39-42.

[10] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 三版. 北京:高等教育出版社, 1990:154-160.
ZHANG Zhi-liang. Experimental guidance on plant physiology[M]. 3nd Edition. Beijing:Higher Education Press, 1990:154-160.

[11] 郑 听, 曹国璠, 李金玲, 等. 多效唑对太子参光合特性与产量的影响[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(2):142-145.
ZHENG Ting, CAO Guo-pan, LI Jin-ling, et al. Effects of paclobutrazol on photosynthetic characteristics and yield of radix pseudostellariae[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2017, 45(2):142-145.

[12] 杜召海, 汪宝卿, 解备涛, 等. 模拟干旱条件下植物生长调节剂对夏薯苗期根系生理生化特性的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(10):97-104.
DU Zhao-hai, WANG Bao-qing, XIE Bei-tao, et al. Effects of plant growth regulators on physiological and biochemical characteristics of roots in summer sweetpotato seedlings under simulated drought stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(10):97-104.

[13] 王美娥, 陈 明, 郎有忠, 等. 盐分胁迫对小麦光合生产及产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(4):727-733.
WANG Mei-e, CHEN Ming, LANG You-zhong, et al. Effects of salt stress on photosynthetic production and yield of wheat[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 29(4):727-733.

[14] 徐 静. 铯对菠菜和杨树光合作用及逆境生理指标影响的研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2015:71-73.
XU Jing. Effects of cesium on photosynthesis and the physiological parameters of stress resistance in spinach and populus[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015:71-73.

[15] 王金强, 李 欢, 刘 庆, 等. 干旱胁迫下喷施外源植物激素对甘薯生理特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1):189-198.
WANG Jin-qiang, LI Huan, LIU Qing, et al. Effects of exogenous plant hormones on physiological characteristics and yield of sweet potato under drought stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1):189-198.

[16] 王馨仪, 刘运泽, 孙小洁, 等. 几种杀虫剂对小麦幼苗根系的影响[J]. 农药科学与管理, 2015, 36(8):62-65.
WANG Xin-yi, LIU Yun-ze, SUN Xiao-jie, et al. Responses of wheat seedlings root to four insecticides stress[J]. *Pesticide Science and Administration*, 2015, 36(8):62-65.

[17] 王天宇. 微咸水灌溉下土壤水盐动态与冬小麦胁迫调节机制[D]. 济南:济南大学, 2018:31-61.
WANG Tian-yu. Soil salt dynamic and winter wheat stress regulation mechanism under brackish water irrigation[D]. Jinan: University of Jinan, 2018:31-61.

[18] 徐伟洲, 邓西平, 王 智, 等. 混播白羊草和达乌里胡枝子叶片光合生理特性对水分胁迫的响应[J]. 西北植物学报, 2017, 37(6):1155-1165.
XU Wei-zhou, DENG Xi-ping, WANG Zhi, et al. Leaf photosynthetic characteristics of bothriochloa ischaemum and lespedeza davurica in mixtures under water stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, 37(6):1155-1165.

[19] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annu Rev Plant Physiol*, 1982, 33(1):317-345.

[20] 姚春娟, 郭圣茂, 马英超, 等. 干旱胁迫对4种决明属植物光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(9):1880-1888.
YAO Chun-juan, GUO Sheng-mao, MA Ying-chao, et al. Effect of drought stress on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of four species of *Casssia*[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(9):1880-1888.

[21] 胡旭光, 杨兵兵, 石 磊, 等. 小麦拔节期淹水对叶片光合特性的影响[J]. 生态科学, 2018, 37(5):72-76.
HU Xu-guang, YANG Bing-bing, SHI Lei, et al. Effects of waterlog-

ging at jointing stage on photosynthetic characteristics of wheat leaves [J]. *Ecological Science*, 2018, 37(5):72-76.

[22] 孟自力, 贾 斌, 尹海燕, 等. 镉胁迫对小麦生长发育的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(23):26-32.
MENG Zi-li, JIA Bin, YIN Hai-yan, et al. Effects of cadmium stress on the growth and development of wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(23):26-32.

[23] 牛明功, 王 贤, 陈 龙, 等. 干旱、渍涝和低温胁迫对小麦生理生化特性的影响[J]. 种子, 2003(4):17-19.
NIU Ming-gong, WANG Xian, CHEN Long, et al. The effect of the stress of drought, waterlogging and low-temperature on wheat physiological and biochemical characteristics[J]. *Seed*, 2003(4):17-19.

[24] 姚新转, 刘 洋, 赵德刚. 高粱 Na^+转运蛋白基因*SbSKC1*的克隆及其在烟草中的抗盐功能鉴定[J]. 作物学报, 2017, 43(2):190-200.
YAO Xin-zhuan, LIU Yang, ZHAO De-gang. Cloning of *SBSKC1* encoding Na^+ transporter protein from sorghum and its function of salt-resistance in tobacco[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(2):190-200.

[25] 白英俊, 李国瑞, 黄凤兰, 等. 活性氧与植物抗氧化系统研究进展[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(36):1-3.
BAI Ying-jun, LI Guo-rui, HUANG Feng-lan, et al. Research progress of reactive oxygen species and plant antioxidant system[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(36):1-3.

[26] 高 芳, 张佳蕾, 王媛媛, 等. 镉胁迫对花生叶片衰老的影响[J]. 花生学报, 2011, 40(3):11-15.
GAO Fang, ZHANG Jia-lei, WANG Yuan-yuan, et al. Effect of Cd stress on leaf senescence of peanut[J]. *Journal of Peanut Science*, 2011, 40(3):11-15.

[27] 巴青松, 张根生, 马 畅, 等. NO对镉胁迫下小麦根系生长发育的生理影响[J]. 植物科学学报, 2017, 35(3):398-405.
BA Qing-song, ZHANG Gen-sheng, MA Chang, et al. Physiological effects of nitric oxide on the growth and development of wheat roots under cadmium stress[J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(3):398-405.

[28] 陈玉梅. 重金属低积累蔬菜种类筛选及盐胁迫下蔬菜对土壤重金属累积研究[D]. 杭州:杭州师范大学, 2016:63-64.
CHEN Yu-mei. Selection of low accumulation of heavy metals in vegetable varieties and accumulation of heavy matals in vegetable under salt stress[D]. Hangzhou:Hangzhou Normal University, 2016:63-64.

[29] 陈秋会, 席运官, 王 磊, 等. 产地环境中重金属和有机污染物对农产品质量的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(1):5-8.
CHEN Qiu-hui, XI Yun-guan, WANG Lei, et al. Summary of the effects of heavy metals and organic pollutants on the quality of agricultural products in the environment of origin[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(1):5-8.

[30] 李彦彬, 朱亚南, 李道西, 等. 阶段干旱及复水对小麦生长发育、光合和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8):76-82.
LI Yan-bin, ZHU Ya-nan, LI Dao-xi, et al. Effects of alternating drought and watering on growth, photosynthesis and yield of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(8):76-82.

[31] 王 清. 渍水及遮光逆境对南京冬小麦生长发育的影响[D]. 南京:南京信息工程大学, 2017:38-39.
WANG Qing. Effects of shading and waterlogging on growth and development of winter wheat in Nanjing[D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology, 2017:38-39.

[32] 吴 翔. 典型土壤有机污染物赋存形态及影响因素[D]. 杭州:浙江大学, 2018:56-63.
WU Xiang. The speciation organic contaminants in typical soil and its influencial factors[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2018:56-63.

[33] 徐秋桐. 土壤-蔬菜系统典型污染物的污染特征及抗生素的生理效应[D]. 杭州:浙江大学, 2019:107-117.
XU Qiu-tong. Pollution characteristics of typical contaminates and physiological effects of antibiotics in the soil vegetable system[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2019:107-117.