

防治技术

# 苗期玉米对黄河泥沙充填薄覆土条件下改良剂的响应

李星宇,李文玉,邵芳,刘俊廷,付亚洁,樊廷立

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院土地复垦与生态重建研究所,北京 100083)

**摘要:**本试验选择当地的表土和黄河泥沙为研究对象,在 20 cm 覆土条件下进行室内种植试验,采用 PVC 管土柱模型,在不同改良剂及用量(CK:无改良;JG:秸秆施于表土;DF:堆肥施于表土;BSJ:施于底沙)条件下,监测苗期玉米的生长指标(株高、基径、叶面积、SPAD 值)和抗逆性指标(PDO 活性、SOD 活性、CAT 活性)。结果表明:苗期玉米改良组各项指标均优于对照组,不同改良剂及用量的改良效果不同,SOD、POD、CAT 等活性物质具有抵抗外界胁迫的作用,且与玉米的生长状况存在一定的相关关系。根据试验结果,适宜苗期玉米生长并抵抗外界胁迫作用的最佳改良措施为施用 45 g/Kg 秸秆改良剂于表土中。本研究为进一步探索黄河泥沙充填复垦技术,优化复垦改良材料,减少表土覆盖用量,节约土壤和保障耕地提供了一定的参考价值。

**关键词:**充填复垦;黄河泥沙;薄覆土;改良措施;玉米

中图分类号:TD88

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2016)01-0051-06

## RESPONSE OF CORN AT SEEDING STAGE OF LAND RECLAMATION FILLED WITH YELLOW RIVER SEDIMENT COVERED WITH THIN OVERSOIL WITH DIFFERENT IMPROVING TREATMENTS

LI Xing-yu, LI Wen-yu, SHAO Fang, LIU Jun-ting, FU Ya-jie, Fan Ting-li

(Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Topsoil and Yellow River sediment in the researched area were selected to sample and analysis, different improving agent and usage were used in the experiment, no improving agent (CK), straw application in topsoil (JG), organic compost application in topsoil (DF) and super absorbent polymers in sediment (BSJ), measured phenotypic growth index (height, diameter, leaf area, SPAD, etc.), active resistance indicators (POD, SOD, CAT, etc.). The results showed that: every indicators of improved group was better than the control group, different improving agent and usage caused different improvement effect. For phenotypic

收稿日期:2015-11-08

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目  
(2012BAC04B03)

第一作者简介:李星宇(1989-),女,山东济南人,中国矿业大学(北京)硕士研究生,主要从事土地复垦与生态重建研究。

growth index, the improvement effect of straw application on the height, diameter, leaf area is better than other improving agent, and the JG3 group has the best effect. But for the SPAD of leaves, the treatments of super absorbent polymers in sediment seems to be better. The response of straw application groups make better results on active resistance indicators. SOD, POD and other active substances can resistant to external stress effect, and there are some certain correlations between the growth status of corn. Based on the test results, the best improvement measures which suitable for corn growth and resistant to external stress effect is administering 45 g/Kg straw improver in the topsoil. This research certain references for further studies on the technique Yellow River sediment filling reclamation, optimizing improving agent and reducing the topsoil covered in the process of reclamation construction so as to achieve the aim of saving soil, safeguard cultivated land resource.

**Key words:** filling land reclamation, the Yellow River sediment, covered thin soil, improvement measures, corn

煤炭作为我国的最主要能源, 约占我国一次性能源消耗量的 74%。煤炭业在促进经济发展的同时, 也对环境和土地造成了严重破坏<sup>[1]</sup>。由于我国 96% 以上的煤炭产量来自于井工开采, 且多采用走向长壁开采, 导致地表沉陷, 耕地破坏<sup>[2]</sup>。据统计, 我国采煤沉陷土地面积已超过 86 万  $\text{hm}^2$ <sup>[3]</sup>, 损失了大量耕地。特别是在东部高潜水位平原矿区<sup>[4]</sup>, 采煤沉陷深度普遍较大, 造成大范围积水, 农田受涝无法耕作, 耕地损失率在 50% 以上, 由于东部地区人口密度大, 导致人地矛盾尤为突出。

我国矿区沉陷地复垦从上世纪 80 年代开始得到重视, 进行了一系列的研究与实践, 试验和推广了许多复垦技术, 积累了大量经验, 形成了具有中国特色的采煤沉陷地复垦技术<sup>[4-5]</sup>。利用煤矸石、粉煤灰等固体废弃物进行充填复垦恢复耕地在许多地方得以应用<sup>[6]</sup>, 但复垦后的土地存在潜在污染, 影响粮食安全, 限制了推广。黄河泥沙作为一种十分重要的生产资源, 已有学者验证了黄河泥沙作为采煤沉陷地充填复垦材料是有效且可行的。黄河泥沙质地属于砂土, 营养含量处于较低水平, 且保水保肥性差, 用作充填材料时需要覆盖一定表土层并加以改良<sup>[7-8]</sup>。由于优质耕地资源紧缺且剥离覆盖成本较高, 在薄覆土条件下探究适合农作物生长的改良方式, 以节约土壤、保障耕地资源, 有重大的生产意义。

因此, 本试验选择了堆肥、秸秆和保水剂三种改良剂, 在 20 cm 覆土条件下进行室内种植试验, 以期优选出经济有效的土壤改良剂并确定其用量。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料准备

供试黄河泥沙充填层上覆盖用土取自黄河附近长期耕种农田表层土壤, 室内风干过筛, 测定其基本理化性质。其比重为  $2.79 \text{ g/cm}^3$ , pH 值为 8.03, 电导率为  $104.67 \mu\text{s/cm}$ , 全氮含量为  $0.96 \text{ g/kg}$ , 全磷含量为  $1.12 \text{ g/kg}$ , 全钾含量为  $1.75 \text{ g/kg}$ , 碱解氮含量为  $30.33 \text{ mg/kg}$ , 有效磷含量为  $98.41 \text{ mg/kg}$ , 速效钾含量为  $227 \text{ mg/kg}$ , 有机质含量为  $24.81 \text{ g/kg}$ ; 供试黄河泥沙取自输送至充填造地现场的泥沙, 室内测定其比重为  $2.45 \text{ g/cm}^3$ , pH 值为 8.27, 电导率为  $48.27 \mu\text{s/cm}$ , 全氮含量为  $0.01 \text{ g/kg}$ , 全磷含量为  $0.23 \text{ g/kg}$ , 全钾含量为  $1.08 \text{ g/kg}$ , 碱解氮含量为  $4.96 \text{ mg/kg}$ , 有效磷含量为  $20.48 \text{ mg/kg}$ , 速效钾含量为  $54.33 \text{ mg/kg}$ , 有机质含量为  $4.09 \text{ g/kg}$ 。改良剂的选择考虑到易获取且经济有效, 选择了当地村民收获、堆存的玉米秸秆(熟化后)和有机堆肥以及市面常见的保水剂。试验选用的玉米品种为当地种植较为广泛的“农华 101”。

### 1.2 试验设计

试验于 2013 年 4 月在中国矿业大学(北京)温室内进行, 选用直径 16 cm 的 PVC 管构建设计土柱模型, 黄河泥沙充填高度为 60 cm, 覆土 20 cm。玉米种子经过浸水催芽后, 每个土柱播种 3 粒。肥料作为底肥施入, 尿素  $2.23 \text{ g/kg}$ , 磷酸二氢钾  $1.5 \text{ g/kg}$ , 施用方法为将土柱 0-20 cm 表土取出与肥料混匀后再施入, 种植期间不再追肥。

试验共设秸秆、堆肥和保水剂 3 种改良剂梯度施肥处理和一个对照处理(不施加任何改良

剂), 在不同改良剂用量条件下每组设置 3 个重复。其中, 秸秆和堆肥改良剂施用于 20 cm 的表土层, 保水剂则施用于土柱下层的底沙之中, 改良剂施加情况如表 1。

表 1 土柱模型中试验材料用量表

处理组 Treatment	秸秆 Straw(g/kg)	堆肥 Compost(g/kg)	保水剂 Water-retaining Agent(g/kg)
CK	0	0	0
JG1	15	0	0
JG2	30	0	0
JG3	45	0	0
DF1	0	15	0
DF2	0	30	0
DF3	0	45	0
BSJ1	0	0	7.5
BSJ2	0	0	15
BSJ3	0	0	30
BSJ4	0	0	45

### 1.3 测定指标与方法

本次试验分析待玉米幼苗种植 20 d(5 叶期)左右进行, 测试的常规生长指标包括植物株高、基径、叶面积和叶片叶绿素(SPAD 值), 抗性指标包括过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性, 测定方法如下。

#### 1.3.1 常规性生长指标

玉米的株高采用卷尺直接量测法, 基径测定每株近地面处的茎粗, 采用游标卡尺测量法, 叶面积采用间接系数法, 用直尺测量全部展开叶的叶片长度, 叶片的最大宽度, 然后按 Monlgomory (1911)方法计算, 得到叶面积的近似值。叶片的叶绿素用 SPAD-502 型叶绿素测定仪进行测定, 同种处理多次测量取平均值。

#### 1.3.2 抗性指标

采得不同处理组间同一叶位叶片, 经浸提、研磨、离心, 制成粗酶制剂。POD 活性采用愈创木酚染色法测定, SOD 活性采用氮蓝四唑染色法测定, CAT 活性采用愈创木酚染色法测定<sup>[9]</sup>。

### 1.4 数据统计分析

采用 SPSS19.0 统计分析软件对试验数据进行方差分析和多重比较, 方差分析用 one-wayANOVA, 多重比较用 Duncan 法 ( $\alpha=0.05$ )进

行, 利用 Origin Pro8.5 软件绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同改良处理对苗期玉米生长状况的影响

#### 2.1.1 对株高、基径、叶面积的影响

图 1 为不同改良处理对苗期玉米株高、基径、叶面积和叶绿素的影响。可以看出, 施加改良剂可以改善苗期玉米的生长状况, 改良处理组的玉米株高、叶面积基本大于 CK 组, 不同处理组间玉米基径无明显变化趋势, 改良组生长指标总体上随着改良剂用量的增加而增大。

JG3 组株高显著高于 CK 组 ( $P<0.05$ ), 其他改良组株高与 CK 组无显著差异 ( $P>0.05$ ), 其中 BSJ2 组株高显著低于其他改良组 ( $P<0.05$ )。JG3 组株高改良效果最佳, 较 CK 组提高了 11.79%, DF3 组和 BSJ4 组紧随其后, 分别提高了 7.42% 和 6.99%, 总体来看, JG 组对玉米株高的改良效果较为明显, 但除 JG3 组以外, 苗期玉米株高对三种改良剂的不同梯度处理无明显响应。

改良组中 JG2、BSJ1-3 等 4 个改良处理组基径较 CK 组有所减小, 不同改良剂组中 JG3、DF3、BSJ4 对苗期玉米基径的改良效果较为明显, 分别增大了 6.20%、4.41% 和 1.50%, 但不同处理组间玉米基径差异并不显著, 表明这三种改良剂对苗期玉米的基径无显著作用。

不同处理组间的苗期玉米叶面积差异性比较明显, 叶面积改良响应最明显的是 JG3、DF3 和 BSJ4 组, 相较于 CK 组叶面积分别增大了 9.40%、5.12% 和 6.40%, 均显著大于其他改良处理组 ( $P<0.05$ ), JG 组对玉米叶面积改良作用最为显著, DF 组次之。

#### 2.1.2 对 SPAD 值的影响

由图 1 可知, 改良剂的施加可以有效提高苗期玉米 SPAD 值, 其中 BSJ2、DF3 改良效果最为显著 ( $P<0.05$ ), 各改良处理组相较于 CK 组 SPAD 值的增长率普遍较高, 增长率最大的为 BSJ2、DF3 和 JG3 组, 分别增大 38.03%、28.47% 和 24.55%, 总体改良效果以 BSJ 组最为突出。除 BSJ2 组外, 苗期玉米 SPAD 值对 3 种改良剂的不同梯度处理并没有明显的响应。

### 2.2 不同改良处理对苗期玉米叶片抗逆性的影响

POD、SOD、CAT 等酶活性均与农作物的抗逆性之间显著性相关<sup>[10]</sup>, 这些酶的活性高低被广泛

用在显示农作物抵抗逆境伤害的方面<sup>[11]</sup>。

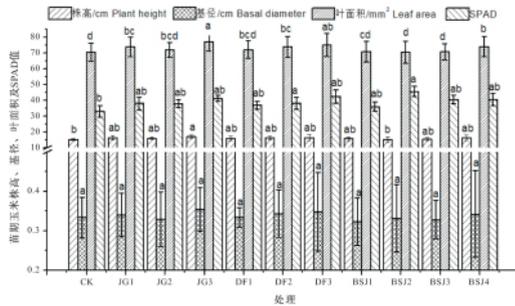


图1 不同改良处理对苗期玉米株高、基径、叶面积及叶绿素(SPAD)的影响

### 2.2.1 对 POD 活性的影响

POD 是植物体内重要的防御活性物质,可以减轻或消除植物细胞内过量的活性氧簇对生物大分子及质膜的破坏。POD 的数量和相对浓度因组织和发育阶段之间的差异而不同,对于同一组织内的 POD 而言,其数量和相对浓度主要与植物机体的活性与植物所受到的胁迫程度有关。

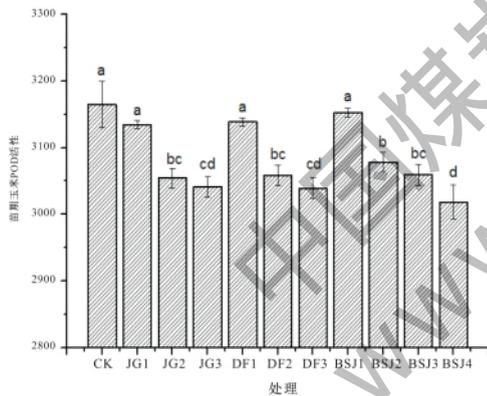


图2 不同改良处理对苗期玉米叶片 POD 活性的影响

图2 为不同改良处理条件下, 苗期玉米叶片 POD 活性的响应情况。可以看出,CK 组和 JG、DF、BSJ 改良处理组第一梯度的 POD 活性显著高于其他处理 ( $P<0.05$ ),BSJ4 组的 POD 活性最低,显著低于其他处理 ( $P<0.05$ ),并且随着改良处理剂施加量的增加,各改良剂组 POD 活性呈现明显的下降趋势。苗期玉米叶片 POD 活性对不同改良处理的响应比较明显,但需要保证一定的施用量才可显著降低,并且,总体来说,JG 组和 BSJ 组的改良效果较优。根据玉米植株的生长规律,结合 POD 酶促调节的特点,将上述变化特征作如下解释:苗期玉米可以在一定范围内,通过提高 POD

活性的方式抵抗不利的生长状况。CK 组不施加任何改良,故 POD 活性最大,改良组的 POD 活性较 CK 组均有所降低,说明玉米改良剂的施加可以一定程度上改善苗期玉米所受胁迫状况,且随着改良剂施用量的增加,玉米 POD 活性随着胁迫作用的缓解而降低。

### 2.2.2 对 SOD 活性的影响

SOD 是植物体内抵御氧化损伤的重要保护酶,其作用是清除植物体内氧自由基从而防止氧自由基在体内的过多积累对生物膜造成的损害<sup>[12]</sup>。通过测定苗期玉米叶片 SOD 的活性,可以了解其受到的胁迫程度,进而探究不同改良处理对苗期玉米抵抗能力的影响。

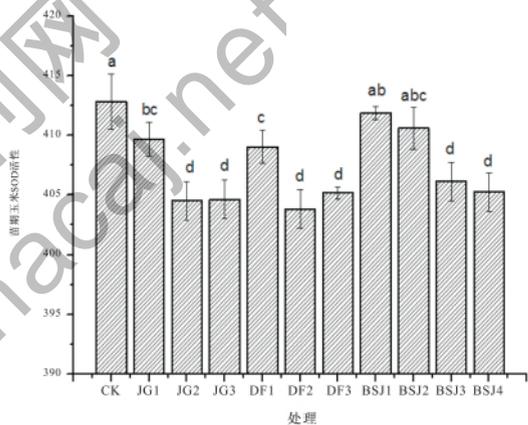


图3 不同改良处理对苗期玉米叶片 SOD 活性的影响

图3 为不同改良措施对苗期玉米叶片 SOD 活性的影响情况。由图3 可以看出,CK 组 SOD 活性最高,显著高于改良处理组 ( $P<0.05$ ),高用量改良剂处理组的 SOD 活性明显低于改良剂第一梯度施加处理组,DF2 和 JG2 的 SOD 活性最低,降低玉米所受胁迫作用最强,总体上讲,JG 组和 DF 组的改良效果较优。上述变化情况可以解释如下:改良剂的施加可以明显缓解玉米受外界环境胁迫的情况,一定施用量内改良剂用量的增加,可以降低苗期玉米所受到的胁迫作用。

### 2.2.3 对 CAT 活性的影响

CAT 作为作物体内活性氧的清除剂,对维持细胞膜稳定性<sup>[13]</sup>,增强植物抵抗环境胁迫能力,尤其是干旱胁迫有着重要作用。对不同改良处理条件下苗期玉米的叶片 CAT 活性进行测定,可以探讨不同改良措施与玉米抵抗环境胁迫能力的关系。

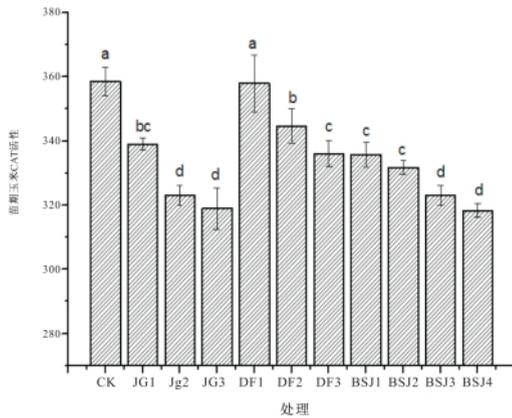


图 4 不同改良处理对苗期玉米叶片 CAT 活性的影响

图 4 为不同改良处理对苗期玉米叶片 POD 活性的影响。可以看出,苗期玉米 CAT 活性对不同改良处理比较敏感。CK 组和 DF1 组 CAT 活性显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ), 所受环境胁迫作用最为严重, JG3 处理 CAT 活性显著低于 CK 组, 降低  $39.60 \text{ u}/(\text{g} \cdot \text{min})$ 。同种改良剂处理中, 随着改良剂施加量的增加, 叶片 CAT 活性呈现明显的下降趋势, 表明苗期玉米叶片 CAT 活性受改良剂施用量影响较大。苗期玉米 CAT 活性对不同改良剂处理响应不同, 总体来看, 改良效果 JG 组  $>$  BSJ 组  $>$  DF 组。

### 2.3 玉米表型生长状况与抗逆性指标的相关性分析

表 2 为苗期玉米表型生长指标与抗逆性指标的相关性分析, 由表 2 可以发现苗期玉米的生长指标与抗逆性指标之间存有一定的相关性, 并且

表 2 表型生长指标与抗逆性指标的相关性

	株高	基径	叶面积	SPAD	POD	SOD	CAT
株高	1						
基径	.644**	1					
叶面积	.796**	.698**	1				
叶绿素	.251	.240	.366*	1			
POD	-.141	.054	-.111	-.482**	1		
SOD	-.275	-.006	-.274	-.376*	.816**	1	
CAT	-.079	.035	.054	.159	.463**	.160	1

注: \*\* 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关, \* 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关。

效果较为优秀, 这与基础生长指标对不同改良剂的响应一致, 优选出施加秸秆  $30 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $45 \text{ g}/\text{kg}$  秸秆改良处理方法。秸秆改良剂易于获得, 经济性好, 可以进行推广使用。

不同指标间相关性程度并不一样。从分析结果来看, 苗期玉米株高与基径、叶面积呈极显著正相关, 基径与叶面积、叶面积与叶片 SPAD 值之间也呈现极显著正相关, 符合现有的研究成果。叶片 SPAD 值与 POD 活性呈极显著负相关, 与 SOD 活性呈显著负相关, 表明苗期玉米叶片叶绿素含量越高, 抵抗胁迫能力越强。叶片 POD 活性与 SOD、CAT 活性呈极显著正相关, 表明其在抵抗外界环境胁迫时起到了协同作用, 当外界胁迫影响变大时, 苗期玉米叶片可以通过合成三种酶来协同保护植株, 减少植株损伤, 这与现有研究成果保持一致<sup>[14]</sup>。

### 3 结论和讨论

随着改良剂的施用, 苗期玉米的株高、基径、叶面积等基础生长指标均有所增加, 总体上随着改良剂用量的增加而增大。秸秆改良对这三种生长指标的改良效果较优, 以施加  $45 \text{ g}/\text{kg}$  秸秆处理改良效果为最优。叶片叶绿素 SPAD 值随着改良剂的使用也有所提高, 总体改良效果以保水剂改良最为优秀, 施加  $15 \text{ g}/\text{kg}$  保水剂的处理为最优处理, 可能原因是叶绿素 SPAD 值与水分胁迫有一定的相关性, 符合胡颂平<sup>[15-16]</sup>等人的研究。

随着改良剂用量的增加, 各组改良剂抵抗养分与水分胁迫作用有所改善, 一定程度内, 同种改良剂施用量的增加可以有效缓解苗期玉米受胁迫的作用, 三种抗逆性酶的活性随着改良剂用量的增加而不断降低, 总体来说, 秸秆改良处理的改良

通过对比玉米表型生长状况与抗逆性指标间的相关性, 发现苗期玉米不同指标间的相关性程度不同, 叶片 SPAD 值也受到外界环境胁迫的影响, 与 POD、SOD 活性呈现显著负相关关系。叶片

POD 与 SOD、CAT 三种抗逆性酶可以协同抵抗外界环境胁迫作用,保护植株减少损伤。

## 参考文献

[1]胡振琪.土地复垦与生态重建[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.

[2]Wu Xiao, Zhenqi Hu, Yoginder. P. Chugh, Yanling Zhao. Dynamic Subsidence Simulation and Topsoil Removal Strategy in High - Groundwater Table and Underground Coal Mining Area - A Case Study in Shandong Province. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2014, 28(4): 250-263.

[3]Wu Xiao, Zhenqi Hu. GIS-based pre-mining land damage assessment for underground coal mines in high groundwater area. International Journal of Mining & Mineral Engineering, 2014, 5 (3): 245-255.

[4]肖武,王培俊,王新静,等.基于GIS的高潜水位煤矿区边采边复表土剥离策略[J].中国矿业,2014,23(4):97-100.

[5]胡振琪,肖武,王培俊,等.试论井工煤矿边开采边复垦技术[J].煤炭学报,2013,02:301-307.

[6]胡振琪,戚家忠,司继涛.粉煤灰充填复垦土壤理化性状研究[J].煤炭学报,2002,06:639-643

[7]王延贵,胡春宏.引黄灌区水沙综合利用及渠首治理[J].泥沙研究,2000,02:39-43.

[8]王培俊,胡振琪,邵芳,等.黄河泥沙作为采煤沉陷地充填复垦材料的可行性分析[J].煤炭学报,2014,06:1133-1139.

[9]李合生.现代植物生理学[M].第3版.北京:高等教育出版社,2012.

[10]Lee D H, Lee C B. Chilling stress -induced changes of antioxidant enzymes in the leaves of cucumber In gel enzyme activity assays [J].PlantScience,2000,159(1):75-85.

[11]王启明.干旱胁迫对大豆苗期叶片保护酶活性和膜脂过氧化作用的影响[J].农业环境科学学报,2006,04:918-921.

[12]王琰,陈建文,狄晓艳.水分胁迫下不同油松种源 SOD、POD、MDA 及可溶性蛋白比较研究 [J]. 生态环境学报,2011,10:1449-1453.

[13]邹聪明,王国鑫,胡小东,等.秸秆覆盖对套作玉米苗期根系发育与生理特征的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(3):496-500.

[14]Den Hollander NG, Bastiaans L, KropffMJ. Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design. I. Characteristic of several clover species [J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26(2): 104-112.

[15]胡颂平,梅捍卫,邹桂花,等.正常与水分胁迫下水稻叶片叶绿素含量的 QTL 分析[J].植物生态学报,2006,03:479-486.

[16]裴斌,张光灿,张淑勇,等.土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J].生态学报,2013,05:1386-1396.

(上接第 16 页)

[27] 冯连勇,邢彦娇,王建良,姜鑫民,翟圣佳.美国页岩气开发中的环境与监管问题及其启示[J].安全环保,2012,32(9):1-4.

[28] 朱景义,李冰,谢卫红,杨帆,翟圣佳.页岩气开发水管理对策分析[J].石油规划设计,2012,25(4):10-13.

[29] 钱伯章,李武广.页岩气井水力压裂技术及环境问题探讨[J].天然气与石油,2013,31(1):48-53.

[30] 许剑,李文权.页岩气压裂返排液处理工艺试验研究[J].石油机械,2013,41(11):110-114.

[31] 袁华江.环保视角下美国页岩气司法实践的启示 [J].国际石油经济,2013,33-40.

[32] 张鸿翔.页岩气:全球油气资源开发的新亮点-我国页岩气开发的现状与关键问题[J].战略与决策研究,2010,25(4):406-410.

[33] 王毅霖,李婷,张晓飞.页岩气开采中压裂废液处理技术的发展及应用[J].油气田环境保护,2012,22(6):53-56.

[34] 聂靖霜,王华平,王富渝.长宁威远地区页岩气大斜度水平井钻井技术研究[J].钻采工艺,2013,36(3):118-120.

[35] 赵常青,谭宾,曾凡坤,冷永红,段敏.长宁-威远页岩气示范区水平井固井技术[J].断块油气田,2014,21(2):256-258.

[36] 刘伟,伍贤柱,韩烈祥,谢意,陈炜卿,谭清明,陈东,张宇.水平井钻井技术在四川长宁-威远页岩气井的应用 [J].钻采工艺,

2013,36(1):114-115.

[37] 尹丛彬,叶登胜,段国彬,张俊成,邓素芬,王素兵.四川盆地页岩气水平井分段压裂技术系列国产化研究及应用[J].开发工程,2014,34(4):67-71.

[38] 杨德敏,李大华,夏宏,程方平.页岩气压裂反排液回用处理装置:中国,201320145527.4[P].2013-9-18.

[39] 杨德敏,夏宏,袁建梅,向祥蓉,王兵.页岩气压裂返排液处理方法探讨[J].环境工程,2013,31(6):31-36.

[40] 朱景义,李冰,谢卫红,杨帆.页岩气开发水管理对策分析[J].石油规划设计,2014,25(4):10-13.

[41] 王毅霖,李婷,张晓飞.页岩气开采中压裂废液处理技术的发展及应用[J].油气田环境保护,2012,22(6):53-56.

[42] 王玉春,岳建平,高庆鸽,张丽平,顾晓敏.绥靖油田油井压裂返排液处理技术研究[J].科学技术与工程,2011,11(13):2920-2924.

[43] 陈安英,王兵,任宏洋.压裂返排液预氧化-混凝-臭氧深度氧化复合处理工艺实验研究[J].化工科技,2011,19(3):26-30.

[44] 杨德敏.一种页岩气压裂返排废水的组合处理方法:中国,201210210209.1[P].2012-10-3.