

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.010

# 原地放袋振动间隔松土对羊草草地质量的影响\*

冯雨峰<sup>1</sup> 刘洪来<sup>1</sup> 吕进英<sup>1</sup> 董向前<sup>2</sup> 宋建农<sup>2</sup> 王堃<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学动物科学技术学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**【摘要】** 以河北坝上地区羊草草地为研究对象,采用野外取样与实验室分析相结合的方法研究了原地放袋振动间隔松土对羊草草地的影响。结果表明,羊草草地经过原地放袋振动间隔松土处理后,土壤容积密度降低、毛管持水力升高和土壤含水率增加,同时土壤养分也呈现不同程度的优化;植物高度、盖度、密度和地上、地下生产力提高,优良牧草所占的比例有所增加,草地群落的植物多样性得到提高;在草地处理3年内平均每公顷每年增加收入155元。

**关键词:** 原地振动间隔松土 羊草草地 植被特性 土壤性质 植物多样性 经济效益

**中图分类号:** S812 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0043-05

## Effect of Situ-vibration Spacing Scarifying Technique to *Leymus chinensis* Grassland

Feng Yufeng<sup>1</sup> Liu Honglai<sup>1</sup> Lü Jinying<sup>1</sup> Dong Xiangqian<sup>2</sup> Song Jiannong<sup>2</sup> Wang Kun<sup>1</sup>

(1. College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

### Abstract

Based on zone tillage theory, a paired-site design was adopted to qualitatively and quantitatively evaluate the effect of situ-vibration tillage on *Leymus chinensis* grassland, which would be applied to provide theoretical reference and technical support for restoring degraded *Leymus chinensis* grassland. Results showed that the soil bulk density decreased, soil water holding capacity and water content increased and the content of soil nutrient increase to some extent after the grassland scarified; the height, cover, density of grass vegetation, above- and below-ground yield, proportion of excellent and good forages and grassland plant diversity all increased, the yearly average economic benefit from the grassland soil scarifying was 155 RMB/hm<sup>2</sup> in next 3 year.

**Key words** Situ-vibration zone tillage, *Leymus chinensis* Grassland, Vegetation characteristics, Soil properties, Plant diversity, Economic benefit

### 引言

羊草草地是欧亚大陆草原区东部特有的一个群系,为欧亚草地区东端的一种优势草地类型<sup>[1]</sup>。由于长期以来人们对草地的经营管理不善,尤其是过度的放牧利用,使得羊草草地土壤板结紧实,其透

水、透气等物理性质变差,自然降水的入渗量减少,蒸发量增大;从而导致羊草根茎分布浅层化,草丛生长低矮、贫绿,草地生产力显著下降<sup>[2]</sup>。因此,改善已经变劣的土壤状况是管理退化羊草草地的根本所在。对退化羊草草地的主要改善措施有围栏封育和浅翻耕等。有研究表明,围栏封育和浅

收稿日期: 2009-12-28 修回日期: 2010-01-26

\* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10Z250)和“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD28B08)

作者简介: 冯雨峰, 博士生, 主要从事草地管理与农业机械化研究, E-mail: fengyufeng0335@163.com

通讯作者: 王堃, 教授, 博士生导师, 主要从事草地资源、生态与管理研究, E-mail: wangkun@cau.edu.cn

翻耕可以提高群落物种丰富度和群落生产力,羊草在群落中的优势地位得到增强<sup>[2-4]</sup>。但是围栏封育和浅翻耕也存在一定的缺陷:如围栏封育恢复时间较长,而且在封育期间要排除家畜的放牧干扰;浅翻耕处理后使得羊草草地在短期内因缺乏有效的植被覆盖而导致土壤裸露,春季大风期间极易成为沙尘暴的沙原而影响生态环境<sup>[5]</sup>。因此围栏封育和浅翻耕都不能成为恢复退化羊草草地的有效手段。

本文采用原地放堡振动间隔松土技术对退化羊草草地进行改良处理,分析间隔松土对羊草草地植被和土壤性质的影响,以期对退化羊草草地的改良与恢复提供理论基础和技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于河北省沽源县北部(41°46' N, 115°41' E,海拔 1 380 m),东部连接内蒙古太卜寺旗、正蓝旗、多伦县,南部是燕山和蒙古高原的衔接带,是内蒙古典型草地东南舌状延伸地带,其自然景观为干草地。无霜期 90 d,年均温 1℃,1月平均气温 -18.6℃,7月平均气温 17.6℃,大于或等于 10℃积温 1 900℃。年平均降水量 430 mm,主要集中于 7~9月,约占全年降水量的 80%,年均最高温度同时出现在雨季,这种雨热同期的效应有利于牧草的生长<sup>[6]</sup>。试验地设置在河北沽源草地生态系统国家野外科学观测站试验区,该试验区草地以羊草为建群种,主要伴生种为克氏针茅和杂类草,土壤类型属于栗钙土<sup>[7]</sup>。

### 1.2 试验设计

在野外站的东南方向,规划出了一块南北长 2 000 m,东西宽 500 m,面积为 100 hm<sup>2</sup> 的区域为原地放堡振动松土的试验区,该区域之外的广袤草地作为对照区。在 2007 年 5 月草地植被返青前,采用 9ST-460 型草地振动式间隔松土机进行切根松土作业试验。该机具应用振动式间隔松土机理,采用前导切割系统,振动式倒梯形松土部件和带齿镇压装置,实现高坚实度条件下草地土壤的虚实耕作和原地放堡<sup>[8]</sup>。试验配套动力采用 TN654 型拖拉机,作业速度为慢速 III 挡,约为 3.5 km/h。单组工作部件松土宽度 280 mm,采用 4 组工作部件,间距 600 mm,未松土部分宽度 320 mm,松土深度为 150~200 mm。

### 1.3 样品处理及测定方法

采用收获法于 2007 年 8 月和 2008 年 8 月在试验区 and 对照区测定草地生产力;于 2009 年 8 月在试

验区和对照区进行植被调查与取样。每个区域随机选择 5 个 1 m × 1 m 的样方,记录每个样方内的植物种类,各品种高度、盖度、密度。地上植被按品种齐地面剪割,在 85℃ 下干燥 24 h 后作为地上植被生物量。在剪割后的样方,取面积为 10 cm × 10 cm 深度为 0~20 cm 和 20~40 cm 的土柱 2 个,采用水洗法分离出地下根系,85℃ 下干燥至恒定质量作为地下各层生物量<sup>[9]</sup>。

植物多样性采用如下公式计算<sup>[10-11]</sup>:

重要值 (important value)

$$P_i = (R_H + R_C + R_D) / 3 \quad (1)$$

丰富度指数 (Margalef index)

$$M = (S - 1) / \ln N \quad (2)$$

均匀度指数 (Pielou index)

$$J = (-H) / \ln S \quad (3)$$

多样性指数 (Shannon-Wiener index)

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (4)$$

式中  $R_H$ ——相对高度  $R_C$ ——相对盖度

$R_D$ ——相对密度

$S$ ——样方内物种的总数

$N$ ——样方内植物个体数

采用土钻法在试验区和对照区取 0~20 cm, 20~40 cm 深的土壤样品,5 次重复间距超过 40 m,共计 20 个土样。每个样品分为 2 份,一份为鲜样,去除根系和杂质,然后过 2 mm 方孔筛,土壤混合均匀后按四分法取约 200 g 土样用无菌信封装好,放入 4℃ 保温箱中带回实验室分析土壤微生物碳和氮;另一份土样自然风干,过 2 mm 方孔筛后用于室内其他化学性质分析。用环刀(体积 100 cm<sup>3</sup>)取土芯测定土壤容积密度;容积密度测定后用环刀内的土样测定毛管持水率<sup>[12]</sup>。土壤含水率采用干燥法每旬测定 1 次,测定时间为 2009 年 4~9 月。

土壤样品采用常规方法分析<sup>[12-13]</sup>。pH 值采用 1:2.5 土水比-酸度计法;有机碳采用重铬酸钾-浓硫酸油浴法;全氮采用硫酸、高氯酸-凯氏定氮法;微生物碳采用氯仿熏蒸浸提法;微生物氮采用重铬酸钾氧化滴定法<sup>[14]</sup>。

采用 Excel 2007 软件进行数据整理,SPSS 10.0 软件进行数据分析,表中不同字母代表 5% 水平下差异显著;采用 SigmaPlot 10.0 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质

羊草草地经原地放堡间隔松土处理后,土壤理化性质变化如表 1 所示。由表可知,其容积密度显著降低,0~20 cm 容积密度下降 13.71%,20~

40 cm 土层容积密度下降 14.38%。容积密度降低导致土壤孔隙度增加,土壤毛管持水力随之增加,增加幅度为 11%~13%。毛管持水力的增加使得羊草草地土壤含水率在各不同时段与对照相比均有所

提高,从牧草春季返青到秋季枯黄的整个生育期其土壤含水率平均增加 2.15%,相对增幅高达 24%;尤其是在 5 月中旬至 6 月期间,其含水率变化更为显著,如图 1 所示。

表 1 羊草草地松土后不同深度土壤理化性质的变化

Tab. 1 Soil quality change after grasslands scarified

参数	0~20 cm		20~40 cm	
	对照	处理	对照	处理
容积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$1.24 \pm 0.06^a$	$1.07 \pm 0.09^b$	$1.46 \pm 0.04^a$	$1.25 \pm 0.04^b$
毛管持水力	$0.37 \pm 0.03^b$	$0.50 \pm 0.08^a$	$0.27 \pm 0.02^b$	$0.38 \pm 0.03^a$
pH 值	$7.79 \pm 0.15^a$	$7.63 \pm 0.13^a$	$7.94 \pm 0.14^b$	$8.27 \pm 0.03^a$
有机质质量分数/%	$1.45 \pm 0.04^b$	$1.91 \pm 0.05^a$	$1.35 \pm 0.06^b$	$1.59 \pm 0.10^a$
全氮质量分数/%	$0.13 \pm 0.01^b$	$0.16 \pm 0.01^a$	$0.12 \pm 0.01^a$	$0.13 \pm 0.01^a$
微生物碳质量比/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$314.38 \pm 28.4^a$	$354.78 \pm 32.37^a$	$56.55 \pm 2.86^b$	$337.89 \pm 15.10^a$
微生物氮质量比/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$150.89 \pm 20.54^b$	$208.97 \pm 26.63^a$	$36.61 \pm 4.71^b$	$165.99 \pm 19.44^a$

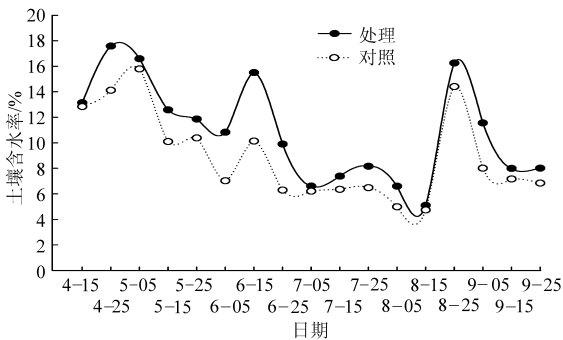


图 1 土壤含水率的变化

Fig. 1 Soil water content change after grassland scarified

羊草草地经过松土处理后,其土壤 pH 值呈现表层下降、底层上升的现象。这主要是由于羊草草地经过原地放袋振动松土处理后,其土壤的物理性状得到改善,土壤蓄水能力增强,进而减少了降水后产生的地表径流量和蒸发量,增加了水分的入渗率。土壤水分在入渗的同时携带溶质向下运移,由此导致表层土壤 pH 值降低,下层土壤 pH 值升高。羊草草地经过松土处理后,其土壤化学性质表现不同程度的好转。其中,土壤有机质和全氮质量分数分别增加 17.78%~31.72% 和 8.33%~23.08%,土壤微生物碳和微生物氮质量比也有不同程度的提高,土壤肥力显著提高。这主要是由于羊草草地经过松土处理后其土壤中植物根系的分解速率加快而导致的。

## 2.2 植物群落

长期放牧或割草的羊草草地,其土壤紧实度大,导致羊草的根茎在土壤表层形成密实的根系网状聚集区,不利于根系的伸长扩展。经过振动松土后,羊草草地土壤理化性质得到改善,草地生物量显著增加。

其中,地下 0~20 cm 生物量由原来的  $95.5 \text{ g/m}^2$  增加到  $152.8 \text{ g/m}^2$ ,增加幅度为 61.10%;地下 20~40 cm 生物量由原来的  $14.5 \text{ g/m}^2$  增加到  $33.3 \text{ g/m}^2$ ,增加幅度为 130.18%。羊草草地经松土处理后,其土壤水分状况、理化性质的变化,促使植物群落发生变化,其明显的表现就是草地地上生物量的增加,3 年内平均从未处理的  $105.23 \text{ g/m}^2$  增加  $137.57 \text{ g/m}^2$ ,增幅达 33.35%。

羊草草地经过原地放袋松土处理第 3 年,草地群落发生变化,群落中减少了鸢尾科植物,增加了木贼科、伞形科、十字花科、石竹科、蓼科、报春花科和藜科植物。其中,羊草所占群落比例明显增加,分盖度由 35.0% 增加到 43.2%,营养枝高度由 22.3 cm 增加到 35.6 cm,密度由  $935 \text{ 株/m}^2$  增加到  $1098 \text{ 株/m}^2$ ;豆科、唇形科、蔷薇科和瑞香科植物在群落中的重要值有所提升。由于松土处理而引起的植物群落伴生种的变更,导致了群落物种多样性的变化,如表 2 所

表 2 羊草草地经处理后物种多样性变化

Tab. 2 Species diversity change after grassland scarified

样本	丰富度指数	均匀度指数	多样性指数
对照	$1.20 \pm 0.36^b$	$0.58 \pm 0.02^a$	$1.28 \pm 0.13^b$
处理	$1.87 \pm 0.29^a$	$0.57 \pm 0.03^a$	$1.49 \pm 0.11^a$

示。由表可以看出,羊草草地经过松土处理后,其物种丰富度呈现显著增高。这主要是由于羊草草地经过振动松土,草地理化性质得到改善的同时使土壤种子库中的种子得到了萌发机会,从而增加了草地中物种数目,草地植物多样性也随之升高,但草地的均匀度并没有改变。

草地牧草饲用价值的评定,是根据牧草的经济

性,将草地中的植物归分为:优、良、中、低和劣类牧草<sup>[15]</sup>。羊草草地经过原地放袋振动松土处理后,优类牧草产量增加 23.17 g/m<sup>2</sup>,盖度增加 10.4%,增加幅度分别为 23.19% 和 28.42%;良、中类牧草产

量和盖度分别为对照的 2.24 倍和 3.55 倍;而低、劣类牧草在处理样地基本消失(表 3)。由此可见,经过原地放袋振动松土的羊草草地不仅生物量有显著增加,而且牧草的饲用品质也得到增强。

表 3 羊草草地松土处理后饲用价值的变化

Tab. 3 Feeding value change after grassland scarified

样本	优类牧草		良类牧草		中类牧草		低类牧草		劣类牧草	
	产量/g·m <sup>-2</sup>	盖度/%	产量/g·m <sup>-2</sup>	盖度/%	产量/g·m <sup>-2</sup>	盖度/%	产量/g·m <sup>-2</sup>	盖度/%	产量/g·m <sup>-2</sup>	盖度/%
对照	99.93	36.6	0.29	0.4	4.42	1.8	0.58	0.8	0.05	0.2
处理	123.10	46.2	5.49	2.4	9.77	7.6	<0.01	<0.1	<0.01	<0.1

### 2.3 经济效益分析

通过原地放袋间隔松土作业的羊草草地,经过连续 3 年的效果观察与分析,经济效益概算如表 4 所示。由表可以看出,羊草草地经过作业后的第 2 年所得增产直接效益就可以收回作业所需费用。若 3 年后综合计算,每改良 1 hm<sup>2</sup> 羊草草地

则可以获益 466.0 元,年均获益 155 元。参照内蒙古草地有关报道,松土改良草地提高生产力可持续 8~10 年<sup>[2]</sup>。总之,原地放袋间隔松土改良羊草草地投资小、见效快,是一次投资多年受益的培育改良措施,对大面积改良低质、低产的羊草草地有重要意义。

表 4 原地放袋振动松土经济效益概算

Tab. 4 Economic benefits evaluation after grassland scarified

年度	费用 /元·hm <sup>-2</sup>	对照产草量 /kg·hm <sup>-2</sup>	处理后产草量 /kg·hm <sup>-2</sup>	增产 率/%	净增干草量 /kg·hm <sup>-2</sup>	当年草价格 /元·kg <sup>-1</sup>	新增收益 /元·hm <sup>-2</sup>	累计新增收益 /元·hm <sup>-2</sup>
2007	300	1 165.7	1 304.8	11.93	139.1	0.70	97.3	-202.7
2008	300	1 203.8	1 599.5	32.87	395.7	0.70	277.0	74.3
2009	300	787.8	1 223.0	55.24	435.2	0.90	391.7	466.0

### 3 讨论

研究表明,该区域羊草草地经过浅翻耕处理后与对照相比其表层土壤含水率增加 19.15%,有机质质量分数减少 12.28%,全氮质量分数增加 9.15%<sup>[3-4]</sup>。羊草草地经过原地放袋振动间隔松土处理后与对照相比其表层土壤含水率增加 24.15%,土壤有机质质量分数增加 31.72%,全氮质量分数增加 23.08%。与同一区域的浅翻耕处理研究结果相比,土壤含水率增加 5%,土壤有机质质量分数增加 44%,全氮质量分数增加 13.93%。经过浅翻耕处理后的羊草草地,其表层土壤为全疏松耕层,具有渗水快、蓄水多的作用,使水分呈表润底湿、水分深蓄的分布特点<sup>[16]</sup>。其上层透水、通气好,容积热量小,导热慢,增温快,造成一个好气性土壤环境,加强了土壤微生物的好气性分解,增加了作物所需的速效养分供应,起到了用地好作用;然而却不利于嫌气土壤微生物的生长活动和作物根系发育<sup>[17]</sup>。这种管理措施的草地其养分分解太快、太多,导致植被因不能完全吸收而造成非生产性消耗太多;而且创造疏松耕层需全部耕动的土壤,一遇透

雨又易回实,后效小,因而经济效益低,成本高。

采用原地放袋振动间隔松土作业,在不破坏草地植被的条件下,实现了高坚实度土壤的间隔深松,处理后的羊草草地创造出虚实并存耕层。虚实并存耕层的虚部底层深蓄水、蓄肥、蓄热,成为耕层内的“土壤水库、热库、肥库”;实部毛管浸润提墒供水,具有“抽水机”的作用;协调了水分贮与供的矛盾,可以抗春旱,防夏涝,秋墒春用<sup>[18]</sup>。虚部上层孔隙度增加,成为好气性环境,微生物矿化分解活动加强,提供植被生长发育所需的养分,起到用地的作用;实部成为嫌气性环境腐殖化合成活动相对加强,提高有机质含量,起到养地的作用。间隔松土措施只虚在虚部动土,局部耕作,一方面省工、高效、利于深耕;另一方面,由于有实部做“骨架”,不易回实,又增强了后效。因而具有高效、低耗,动土量小,利于深耕,后效作用长<sup>[19]</sup>。以虚实并存耕作理论为基础的原地放袋振动松土措施,充分协调了耕层土壤中水、肥、气、热。对于水,虚部贮存,实部供应,增加了有效水;对于热,虚部上层供,下层蓄,实部稳定增温供热;对于气,虚部供气,实部抑气;对于肥,虚部分解释放供应,实部保存,减少消耗;创造了一个独

特的内部环境,使好氧和嫌氧这两大相反的生物学过程并行不悖,也就使腐殖化和矿质化这一对积累与消耗对立的两大作用协调并进,从而达到养用结合。

## 4 结论

(1) 羊草草地经过原地放袋振动间隔松土处理后,表现出土壤容积密度降低、毛管持水力提高、土壤含水率增大的现象,土壤有机质和全氮含量也呈

现不同程度的增加,有利于干旱、半干旱地区草地植物的生长发育。

(2) 经过原地放袋振动间隔松土的羊草草地,其地上生物量产量的显著增加和牧草质量的提高有利于草地畜牧业的发展,地下生物量的增加可以增强干旱和半干旱地区草地的抗逆性。经过间隔处理后的羊草草地其植物多样性得到提高,这对于保护生物多样性具有积极意义。

## 参 考 文 献

- 1 贾慎修. 中国饲用植物志[M]. 北京:农业出版社,1987.
- 2 刘树强,史有财,李茂林. 羊草草地松土复壮效果研究[J]. 草业科学,1989,6(3):50~53.  
Liu Shuqiang, Shi Youcai, Li Maolin. A study on rejuvenation of *Leyums Chinensis* rangeland by soil loosening[J]. Pratacultural Science, 1989, 6(3):50~53. (in Chinese)
- 3 闫志坚,杨持,段新乔. 退化羊草草地生态恢复技术的研究[J]. 中国草地,2005,27(5):1~5.  
Yan Zhijian, Yang Chi, Duan Xinqiao. Study on ecological restoration to degenerated *Leymus Chinensis* pasture[J]. Grassland of China, 2005, 27(5):1~5. (in Chinese)
- 4 张建华. 不同翻耕深度对羊草根茎营养物的影响研究[J]. 草业科学,1993,10(5):45~47.  
Zhang Jianhua. Study on effect of different ploughing depths on nutrient in rhizome of *Aneurolepidium Chinese* [J]. Pratacultural Science, 1993, 10(5):45~47. (in Chinese)
- 5 刘库,谢应忠. 不同改良措施的研究综述[J]. 中国草地,2005,27(5):53~57.  
Liu Ku, Xie Yingzhong. Review on the research of different restorative measures for degraded vegetation[J]. Grassland of China, 2005, 27(5):53~57. (in Chinese)
- 6 刘洪来,张卫华,王堃,等. 华北农牧交错带农田-草地界面土壤水分影响域分析[J]. 应用生态学报,2009,20(3):659~664.  
Liu Honglai, Zhang Weihua, Wang Kun, et al. Edge influence of soil moisture at farmland grassland boundary in agriculture-pasturage ecotone of northern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3):659~664. (in Chinese)
- 7 刘洪来,张卫华,王堃. 开垦对农牧交错带地带性和非地带性草地土壤性质的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(10):272~277.  
Liu Honglai, Zhang Weihua, Wang Kun. Effect of reclamation on soil properties of zonal and intrazonal grasslands in agro-pastoral ecotone[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10):272~277. (in Chinese)
- 8 李永磊. 草原振动松土机的研制[D]. 北京:中国农业大学,2008.  
Li Yonglei. The development of meadow vibration scarifier[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 9 Bai Yongfei, Han Xinguo, Wu Jianguo, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the inner Mongolia grassland[J]. Nature, 2004, 431(7005):181~184.
- 10 王长庭,龙瑞军,王启兰,等. 放牧扰动下高寒草甸植物多样性、生产力对土壤养分条件变化的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(9):4144~4152.  
Wang Changting, Long Ruijun, Wang Qilan, et al. Response of plant diversity and productivity to soil resources changing under grazing disturbance on an alpine meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9):4144~4152. (in Chinese)
- 11 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法[J]. 生物多样性,1994,2(4):231~239.  
Ma Keping, Liu Yuming. Measurements of biology community diversity[J]. Chinese Biodiversity, 1994, 2(4):231~239. (in Chinese)
- 12 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- 13 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- 14 Barbhuiya A R, Arunachalam A, Pandey H N, et al. Dynamics of soil microbial biomass C, N and P in disturbed and undisturbed stands of a tropical wet-evergreen forest[J]. European Journal of Soil Biology, 2004, 40(3):113~121.
- 15 张英俊. 草地与牧场管理学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2009.

- 10 陈效鹏,董绍彤,程久生,等. 电雾化装置及雾化模型的研究[J]. 实验力学,2000,15(1):97~103.  
Chen Xiaopeng, Dong Shaotong, Cheng Jiusheng, et al. Electrostatic atomization and the spray modes in fluid atomization [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000,15(1):97~103. (in Chinese)
- 11 张军,闻建龙,王军锋,等. 毛细管环电极下的静电雾化模式的研究[J]. 农业机械学报,2006,37(6):124~127.  
Zhang Jun, Wen Jianlong, Wang Junfeng, et al. Investigation on modes of electrostatic spray under capillary-annular electrode configuration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6):124~127. (in Chinese)
- 12 Chen X P, Cheng J S, Yin X Z, et al. Measurements of drop velocity in electrostatic spray[C]// Optical Technology and Image Processing for Fluids and Solids Diagnostics 2002, Bellingham, Wash: SPIE 2003: 181~187.
- 13 Tang K, Gomez A. Generation of monodisperse water droplets from electrospray in a corona assisted cone-jet mode[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1996, 175(2):326~332.
- 14 张军,闻建龙,王军锋,等. 不同雾化模式下静电雾化的雾化特性[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006,27(2):105~108.  
Zhang Jun, Wen Jianlong, Wang Junfeng, et al. Droplets characteristics of electrostatic spraying at different modes of spraying [J]. Journal of Jiangsu University:Natural Science Edition, 2006,27(2):105~108. (in Chinese)
- 15 鲍重光. 静电技术原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1993.
- 16 王军锋,王贞涛,毛惠敏,等. 双流体荷电喷雾结构的 PIV 测量[J]. 农业机械学报,2009,40(9):107~111.  
Wang Junfeng,Wang Zhentao,Mao Huimin, et al. Measurement of twin-fluid electrostatic spray structure by using PIV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9):107~111. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 47 页)

- 16 陈敏,宝音陶格涛. 半干旱草原区退化草地改良的试验研究[J]. 草业科学,1997,14(6):27~30.  
Chen Min,Baoyin Taogetao. Improvement of regressive grassland in semi-arid steppe region[J]. Pratacultural Science,1997, 14(6):27~30. (in Chinese)
- 17 杨丽娜,宝音陶格涛. 不同改良措施对退化羊草草原的影响[J]. 中国沙漠,2008,28(2):312~317.  
Yang Lina,Baoyin Taogetao. Effect of different improving measures on degenerated steppe of *Leymus Chinensis*[J]. Journal of Desert Research,2008,28(2):312~317. (in Chinese)
- 18 丁元书. 虚实并存耕作技术推广研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.  
Ding Yuanshu. Study on the extension of spacing tillage technique[D]. Beijing: China Agricultural University,2005. (in Chinese)
- 19 马军华. 虚实并存(间隔)耕作与国外类耕作的比较研究[D]. 北京:中国农业大学,2006.  
Ma Junhua. Research on the compare of zone tillage and overseas similar tillage[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)