

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.025

矿化度对紫花苜蓿发芽率和株高的影响*

栗涛¹ 王全九¹ 张振华² 吴忠东³

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 鲁东大学地理与规划学院, 烟台 264025; 3. 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255049)

摘要: 为缓解黄淮海地区淡水资源短缺, 科学合理地开发利用微咸水, 提高紫花苜蓿的产量, 以中苜一号为供试材料, 以淡水(矿化度为 1 g/L)处理为对照, 分别采用矿化度为 3、5、7 g/L 的微咸水对苜蓿的发芽率和株高的影响进行分析。结果表明: 采用矿化度为 3 g/L 的微咸水进行灌溉时, 苜蓿的发芽率和株高与淡水灌溉无显著差异; 但采用矿化度为 5 g/L 和 7 g/L 的微咸水进行灌溉时则有显著差异, 对灌溉水矿化度和发芽率的分析表明, 要保证发芽率不低于 80%, 则需控制矿化度不高于 4.48 g/L。对矿化度和株高的分析表明, 要达到满意株高, 需控制灌溉水矿化度不高于 4.66 g/L, 否则长期的盐分胁迫对苜蓿的生长有明显抑制作用。

关键词: 微咸水 紫花苜蓿 矿化度 发芽率 株高

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0159-05

Effects of Mineralization Degree on Germination Percentage and Plant Height of Alfalfa

Li Tao¹ Wang Quanjiu¹ Zhang Zhenhua² Wu Zhongdong³

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Geography and Planning, Ludong University, Yantai 264025, China

3. College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In order to alleviate freshwater shortage in salinization area, use the saline water more scientifically and rationality, and improve the yield of alfalfa, taking Zhongmu No. 1 as the materials and freshwater (mineralization degree of 1 g/L) as contrast, the experiments were conducted to learn the effect of saline water (mineralization degree of 3 g/L, 5 g/L and 7 g/L) on germination percentage and plant height of alfalfa. The results showed that the germination percentage and plant height had no significant difference between 3 g/L and fresh water, but it showed great difference when the mineralization degree raised to 5 g/L and 7g/L. The results indicated that, in order to ensure the germination percentage more than 80%, the mineralization degree should be controlled to less than 4.48 g/L. When the satisfied plant height was attained, the mineralization degree should less than 4.66 g/L, otherwise, the growth of alfalfa would be inhabited by long-term salt stress.

Key words: Saline water Alfalfa Mineralization degree Germination percentage Plant height

引言

黄淮海平原是我国粮食主产区, 淡水资源紧缺,

科学合理地利用微咸水资源不仅有利于缓解区域水资源短缺与需求量增加的矛盾, 而且有利于地下水资源更新、淡水储存和环境生态建设和保护^[1-2]。

收稿日期: 2012-11-19 修回日期: 2013-04-25

* 国家自然科学基金资助项目(51239009, 41271236)、水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201301102)、山东省自然科学基金资助项目(ZR2010EM042)和山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(BS2011HZ004)

作者简介: 栗涛, 工程师, 博士生, 主要从事节水灌溉技术研究, E-mail: ltmz@sina.com

通讯作者: 吴忠东, 副教授, 博士, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: wuzhongdong@126.com

黄淮海平原还是我国的主要农业畜产品主产区,牧草的产量直接影响着畜牧业的发展。紫花苜蓿为豆科苜蓿属多年生草本植物,是我国栽培历史最悠久的优良牧草,栽培历史达2000多年^[3],也是一种较耐盐的豆科牧草,在我国华北地区广泛种植。研究其耐盐性不仅能够提高盐碱地的利用率,而且因其营养价值丰富,再生性强,除了可以提供大量优质的蛋白质饲草,还是改良土壤的绿肥^[4]。同时耐盐性较强的苜蓿可以提高微咸水的利用率,在不增加生产投入的情况下可以提高盐渍化地区农民收入及经济水平,因此对其耐盐性的研究可为这些地区发展畜牧业奠定物质基础^[5]。

植物的耐盐性随生长阶段的变化而变化^[6-7],种子萌发期是对盐胁迫十分敏感的时期,这一时期的特性决定了该植物在某一地区是否能够成功建苗^[8]。牧草种子在不同的盐碱条件下发芽率是盐碱化草地牧草建植的关键问题之一,是牧草能否在盐碱环境中生存的基础^[9]。目前国内外对苜蓿耐盐性的研究主要集中在种子萌发期和幼苗期,采用NaCl或KCl溶液进行耐盐性研究^[10]。本研究从苜

蓿出苗到整个生育期进行盐分胁迫研究,以便全面了解其耐盐特征。

1 材料和方法

1.1 实验区概况

实验于2009年在中国科学院禹城综合试验站进行,该站位于山东省禹城县西南,116°36'E,36°57'N,海拔高度20 m,属暖温带,半湿润季风气候,年平均温度21℃,年降水量610 mm,土壤以潮土和盐化潮土为主^[11]。该站所在地区的自然条件和农业生产水平在黄淮海平原具有代表性和典型性,深度0~120 cm土壤主要离子含量如表1所示。地下水水质指标如表2所示。

表1 0~120 cm土壤含盐量和主要离子含量

Tab.1 Salt content and main ions content in soil of 0~120 cm

含盐量	主要离子质量摩尔浓度/mmol·kg ⁻¹						
/g·kg ⁻¹	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
0.830	2.948	2.743	3.175	1.318	2.057	5.448	0.521

表2 地下水水质指标

Tab.2 Quality index of irrigation water

水质指标	矿化度/g·L ⁻¹	电导率/mS·cm ⁻¹	Na ⁺ 质量浓度 /mg·L ⁻¹	Mg ²⁺ 质量浓度 /mg·L ⁻¹	Ca ²⁺ 质量浓度 /mg·L ⁻¹	Cl ⁻ 质量浓度 /mg·L ⁻¹
浅层地下水	7.99	10.11	1763	405	275	1065
深层地下水	1.03	1.66	483	41	10	568

1.2 研究方法

目前在评定苜蓿种子的耐盐能力时,所使用的测定指标一般包括:种子发芽势、种子发芽率、相对发芽率、相对发芽势、幼苗根长和幼苗株高^[12]。植物种子发芽率与植物本身的生物学特性有关,如种子的休眠、膜系统的修复和细胞膜透性以及酶的活性等,且与种子所处的外界环境间的关系更为密切^[13]。耐盐性较强的种子发芽率也较高,而耐盐性较弱的种子则较低。因此,种子的发芽率能够反映出苜蓿的耐盐作物苗期为整个生育期内的最敏感最脆弱时期,研究表明,在土壤含盐量过高时作物会出现发芽率低、出苗时间延迟、生长不整齐等问题^[14],该实验以发芽率达到80%为苜蓿苗期耐盐标准。种子发芽率计算公式为

$$R_s = \frac{S}{S_t} \times 100\%$$

式中 R_s ——种子发芽率, %

S ——发芽期全部种子发芽数

S_t ——供试种子数

为了研究苜蓿耐盐度特性,针对中国科学院禹城综合实验站土样,主要研究微咸水矿化度对苜蓿发芽率、生长过程及土壤水盐运移的影响,实验采用盆栽法。

1.2.1 实验设计

采用不同矿化度的微咸水对苜蓿进行灌溉,实验中矿化度设计4个水平:1、3、5、7 g/L,灌溉水质采用高矿化度与低矿化度的水配比而成。

1.2.2 实验材料和实验方法

实验所用种子为中苜一号,该品种具有抗盐、抗旱、耐瘠薄、耐盐碱和生长迅速等特点,适宜于我国西北、华北和东北等地区种植。

实验区域上空有遮雨棚。实验采用为塑料桶,桶高30 cm,桶口半径26 cm,桶底提前钻孔,本实验钻孔数目均为2排,每排3个,孔径为0.5 cm,以保持其透气、透水性,播种日期为2009年5月22日。每个桶内装满配置好的土壤并保持盆沿与地面持平埋置于实验田中,为了减少边壁效应,用土将桶四周空隙填实。盆栽实验区域有简易雨棚。播种时,严

格按照实验方案采用不同矿化度的微咸水进行灌溉,每桶灌水量为 2 L。

1.2.3 观测项目及方法

(1) 苜蓿出苗观测

每天 8:00 对出苗情况进行清点,直到出苗个数稳定不变则视为出苗结束。

(2) 土壤水盐观测

在分枝期、现蕾期和开花期灌溉相应的矿化度水 2 L。每次灌水前、后分 5 层取土,取土深度分别为 0~5、5~10、10~15、15~20 和 20~25 cm。观测项目主要包括土壤质量含水率、电导率和土壤主要离子含量。土壤含水率采用烘干法测定;采用 DDS-11D 型数字式电导率仪测定土水质量比 1:5 的土壤溶液电导率,采用络合滴定的方法测定主要离子的浓度。

(3) 苜蓿生理性状观测

每次灌水前和灌水隔天利用直尺测量株高,每 2 d 记录一次苜蓿的分枝个数,植株鲜、干质量,在盛花期收割,以干质量作为苜蓿的产量。

(4) 小区气象观测

站内设有小型气象站,观测内容包括每日 8:00、14:00 和 20:00 时的干球和湿球温度、日最高和最低温度、每天的水面蒸发量和降水量等。

2 结果与分析

2.1 盐分胁迫对苜蓿发芽率的影响

图 1a 显示了不同矿化度的水灌溉苜蓿后苜蓿发芽率和成苗率随时间的变化,图中的最大值处为发芽率,终点处为成苗率。由图 1a 可知,随着时间

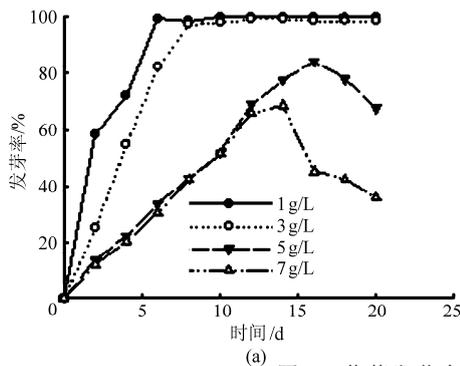


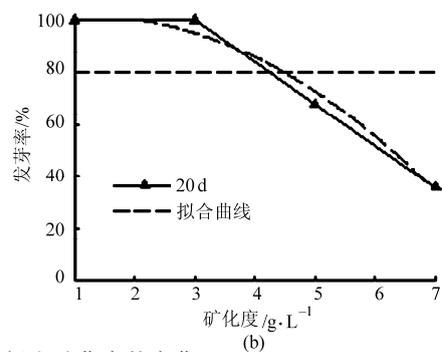
图 1 苜蓿发芽率随时间和矿化度的变化

Fig. 1 Alfalfa germination rate vs time and mineralization degree

由图 1a 可以看出,到播种后 20 d,苜蓿发芽率已基本稳定。统计最终出苗率后发现,随着矿化度由 1 g/L 升高到 7 g/L,苜蓿的发芽率有明显下降,趋势符合开口向下的抛物线(图 1b)拟合二者关系后得出

$$y_1 = -1.9975x_1^2 + 4.7517x_1 + 98.865$$

增加,苜蓿的出苗个数越来越多,在同一时间段内,苜蓿的发芽率与灌溉水中含盐量呈负相关。灌溉淡水条件下(矿化度为 1 g/L),种植后 10 d 苗出齐,发芽率达到 100%,且一直到后期均非常稳定,成苗率达到 100%。当灌溉水矿化度达到 3 g/L 时,12 d 之内苜蓿发芽率与淡水处理有一定差距,但到了 12 d 发芽率也达到 100%,出苗后无死苗现象,成苗率为 100%。当矿化度进一步增大到 5 g/L 时,种植后 16 d 最高发芽率虽然超过了 80%,但随后发生死苗现象,最终成苗率仅为 67.83%,当矿化度增大到 7 g/L 时,发芽率的最大值未达到耐盐标准 80%,且最终成苗率仅为 35.87%。这一结果说明灌溉水中矿化度增加到 3 g/L 时会延缓种子出苗时间,出苗时间推迟了 2 d,但发芽率和成苗率均未受显著影响,随着矿化度的进一步增大,不仅出苗时间推迟,且发芽率和成苗率与淡水灌溉相比均有明显下降,也即大部分种子被灌溉水中的盐分毒死,发芽的种子也会由于灌溉水中的盐分过多而丧失活力,最终未能成苗。由以上分析可知,在当地土壤条件下,从发芽率方面进行分析,灌溉水矿化度为 5 g/L 和 7 g/L 时,不仅造成苜蓿出苗推迟,而且发芽率低于 80%,因此从盆栽实验结果来看不宜在当地采用矿化度超过 3 g/L 的水进行灌溉。但由于实验区所处地理位置属于半湿润地区,年降水量超过 600 mm,而盆栽实验未考虑降水对土壤盐分的淋洗,因此盆栽实验结果仅为田间种植提供一定的参考,考虑到降水对耕层土壤盐分的淋洗作用,田间种植的灌溉水矿化度可能会适当提高。



式中 y_1 ——发芽率,%

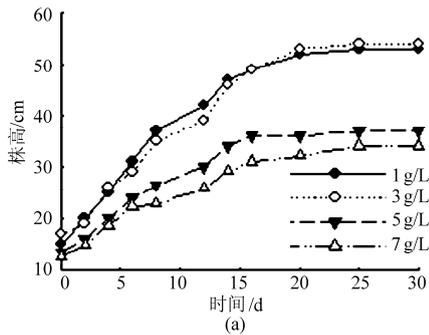
x_1 ——灌溉水矿化度,g/L

令 $y_1 = 80$,可以得出对应的 x_1 为 4.48。因此矿化度不高于 4.48 g/L 才能保证苜蓿的发芽率达到 80% 的满意结果。该结果与前述分析矿化度不宜超过 3 g/L 有一定差距,主要原因有两个方面,一是由

于实验条件的限制,矿化度只有 1、3、5、7 g/L,拟合时会存在一定的误差;二是苜蓿发芽不一定能代表苜蓿最终的成苗,在发芽之后的成长过程中,如果继续采用高矿化度的微咸水进行灌溉,有可能会造成死苗现象,因此实际生产中矿化度应低于理论值 4.48 g/L 才能保证苜蓿的正常生长。

2.2 灌溉水矿化度对苜蓿株高的影响

灌溉水盐分胁迫对植物个体发育的影响非常显



著,主要表现为植物组织和器官的生长和分化受到不同程度的抑制,且生长在盐渍土壤的作物再灌溉咸水更易使植物生长和生殖受限,但灌溉水矿化度对不同植物种类以及同种植物不同生长阶段影响各异。

从苜蓿种植后 25 d(6月15日)开始测量株高,直到7月20日结束,共60 d,这段时间内不同矿化度的水灌溉苜蓿后的株高变化如图2所示。

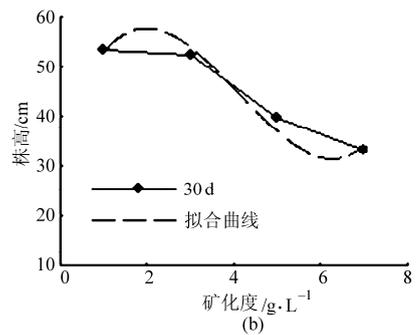


图2 苜蓿株高随时间和水矿化度的变化

Fig. 2 Plant height of alfalfa vs time and mineralization degree

由图2可以看出,苜蓿在整个营养生长阶段,无论矿化度如何,株高均随着种植时间的增长而呈升高趋势,但随着灌溉水中含盐量的增大,盐分胁迫对株高的抑制作用逐渐显示出来。当灌溉淡水(1 g/L)和3 g/L微咸水时,苜蓿株高无显著差异,分枝期苜蓿每天生长多于1 cm,现蕾期生长缓慢,之后慢慢停止生长,苜蓿最后均为53 cm;而矿化度为5 g/L和7 g/L时,苜蓿从初期生长开始速度明显低于矿化度1 g/L和3 g/L的处理,且生长缓慢,据观察,在苜蓿距地面10 cm处出现大量黄叶和叶片脱落现象,这说明矿化度过高,导致土壤含盐量升高,从而使苜蓿根系周围的土壤溶液浓度过高,抑制苜蓿根系对水分的吸收,造成植株萎蔫,另外,当土壤溶液浓度较高时,会导致铵态氮在土壤中的累计,使植株被迫吸收铵态氮,导致叶片卷缩、叶片增厚等症状,并阻碍苜蓿对Ca²⁺的吸收,直接影响到苜蓿的品质。

对株高和矿化度采用非线性回归进行拟合,有函数关系

$$y_2 = 0.6675x_1^3 - 8.2575x_1^2 + 24.8525x_1 + 35.7535$$

式中 y_2 ——株高,cm

如果以株高 y_2 达到最大值的80%为满意株高,即43.2 cm,则对应的矿化度 x_1 必须低于4.66 g/L。该理论值是保持苜蓿获得满意株高的最高矿化度,但如前所述,在实际生产中灌溉水矿化度高于3 g/L时就会出现出苗时间推迟和成苗率降低的结果,土壤中过多的盐分会导致苜蓿根系吸水困难,并由此造成苜蓿死苗的现象,仅从存活下来的苜蓿来分析

矿化度和株高的关系是片面的,应结合出苗率来分析矿化度对株高的影响,因此实际生产中矿化度应低于4.66 g/L的理论值才能保证苜蓿最终达到满意产量。

采用SPSS软件对株高进行显著性差异分析,首先对株高进行方差齐性检验,结果表明显著性为0.967,大于0.05,因此可以认为方差相等。对不同矿化度条件下株高进行方差分析,如表3所示。

表3 苜蓿株高的方差分析

Tab. 3 Analysis of variance for plant height of alfalfa

	平方和	自由度	均方	F	显著性
组间	986.833	3	328.944	108.354	0
组内	24.287	8	3.036		

由表3可见,组间差异显著,说明不同矿化度微咸水灌溉条件下的苜蓿株高存在着本质差别。

根据表4的显著性差异分析结果可知,采用微咸水灌溉苜蓿后,株高随着灌溉水矿化度的不同而有差异,3 g/L的处理株高均值最高,但与1 g/L灌溉的处理无显著性差异;当矿化度提高到5 g/L时,株高与1 g/L和3 g/L处理相比有明显降低,而且当矿化度进一步提高到7 g/L时,株高又有明显下降,因此,当淡水资源不足的时候,采用3 g/L的微咸水进行灌溉不会对苜蓿生长造成不利影响,但采用5 g/L和7 g/L的微咸水进行灌溉时,株高会受到明显抑制,即灌溉水中的盐分对苜蓿的生长有明显抑制作用。本实验中在苜蓿生长阶段一直采用微咸水进行灌溉,无降水和其他淋洗措施,导致微咸水灌溉

后耕层的积盐程度加剧,盐分无法排出耕层,会导致在灌溉水矿化度偏高(大于 3 g/L)时,桶中累积的盐分使土壤溶液中盐分浓度过高,对苜蓿根系产生了盐分胁迫作用,从而影响了苜蓿的生理特性。田间种植应考虑降水或淋洗措施,适当加大灌水量,将盐分淋洗到主根区以外,则盐分胁迫对苜蓿生长的不良影响会有所降低。

表 4 苜蓿株高的显著性差异分析

Tab.4 Significant difference analysis for plant height of alfalfa

矿化度/g·L ⁻¹	3	1	5	7
株高均值	54.10 ^a	53.01 ^{ab}	36.99 ^c	33.97 ^d

注:不同字母表示 0.5% 显著性差异。

3 结论

(1)在同一时段内,苜蓿盆栽实验的发芽率与灌溉水矿化度呈负相关关系,当灌溉水矿化度为 3 g/L 时,出苗时间比淡水灌溉略有推迟,但发芽率和成苗率均未受到显著影响,灌溉水矿化度为 5 g/L 和 7 g/L 时,不仅出苗时间推迟,且难以达到 80% 的

发芽率。对发芽率和矿化度的关系进行分析可知,矿化度不超过 4.48 g/L 才能保证苜蓿的发芽率达到 80% 的满意结果,但在实际生产中持续采用高矿化度的咸水进行灌溉最终会造成死苗现象,因此实际的矿化度应低于理论值 4.48 g/L 才能保证苜蓿正常生长。结合当地的气候条件和降水对耕层土壤盐分的淋洗作用考虑,田间种植苜蓿的矿化度应在 3 g/L 和 4.48 g/L 之间。

(2)灌溉淡水和 3g/L 的微咸水,苜蓿的株高无显著差异,灌溉水矿化度增加到 5 g/L 和 7 g/L 时,在距地面 10 cm 处出现大量黄叶和叶片脱落现象,对株高和矿化度的关系采用非线性回归方法进行拟合,发现矿化度须低于 4.66 g/L 才能保证苜蓿达到 43.2 cm 的满意株高,但结合矿化度对成苗率的影响,实际生产中矿化度应低于理论值 4.46 g/L;经显著性差异分析,矿化度为 5g/L 和 7g/L 的处理株高比淡水和 3 g/L 处理有明显降低。综合以上分析结果,当地的土壤条件下,供试苜蓿的耐盐上限应低于 4.46 g/L。

参 考 文 献

- 1 吴忠东,王全九. 微咸水入渗水量对土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(11):67~71,78.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect on characteristics of soil water and salt movement about saline water infiltration with different infiltration amount[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):67~71,78. (in Chinese)
- 2 吴忠东,王全九. 黄淮海平原冬小麦对盐分胁迫的响应研究[J]. 农业机械学报,2010,41(12):99~104.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Response to salt stress about winter wheat in Huanghuaihai plain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(12):99~104. (in Chinese)
- 3 沈振荣,杨万仁,徐秀梅. 不同盐分胁迫对苜蓿种子萌发的影响[J]. 种子,2006,25(4):34~37.
Shen Zhenrong, Yang Wanren, Xu Xiumei. Effect of salt stress on germination of alfalfa seeds fengmei[J]. Seed, 2006, 25(4):34~37. (in Chinese)
- 4 Sergio L, de Paola A, Cantore V, et al. Effect of salt stress on growth parameters, enzymatic antioxidant system, and lipid peroxidation in wild chicory (*Cichorium intybus* L.)[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2012, 34(6):2349~2358.
- 5 贾春林,杨秋玲,吴波,等. 鲁苜 1 号紫花苜蓿选育及栽培技术[J]. 山东农业科学,2008(5):100~103.
Jia Chunlin, Yang Qiuling, Wu Bo, et al. Breeding of new alfalfa cultivar Lumu 1 and its cultivation technology[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2008(5):100~103. (in Chinese)
- 6 Pinaras V, Tshirintzis V, Petalas C, et al. Soil salinization in the agricultural lands of rhodope district, northeastern greece[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 166(1):79~94.
- 7 张俊鹏,曹彩云,冯棣,等. 微咸水造墒条件下植棉方式对产量与土壤水盐的影响[J]. 农业机械学报,2013,44(2):97~102.
Zhang Junpeng, Cao Caiyun, Feng Di, et al. Effects of different planting patterns on cotton yield and soil water-salt under brackish water irrigation before sowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(2):97~102. (in Chinese)
- 8 王玉祥,陈爱萍,张博. 不同苜蓿品种耐盐性初探[J]. 草业科学,2010,27(3):102~106.
Wang Yuxiang, Chen Aiping, Zhang Bo. The preliminary study on salt tolerance of different alfalfa varieties[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(3):102~106. (in Chinese)
- 9 Isla R, Aragués R. Response of alfalfa (*Medicago sativa* L.) to diurnal and nocturnal saline sprinkler irrigations. I: total dry matter and hay quality[J]. Irrigation Science, 2009, 27(6):497~505.
- 10 马进,刘志高,郑钢. 南方型紫花苜蓿耐盐细胞系的筛选及生理特性分析[J]. 中国草地学报,2011,33(4):68~72.
Ma Jin, Liu Zhigao, Zheng Gang. Selection and physiological characterization of salt-tolerant cell line of southern type alfalfa[J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(4):68~72. (in Chinese)

- Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(3): 197 ~ 207.
- 5 Guy H J. Offset grain loss sensor for combine harvesters: US, 4540003[P]. 1985-09-10.
- 6 Kotyk W M, Kirk T G, Wilson R J, et al. Unthreshed headgrain loss monitor: US, 4825146 [P]. 1989-04-25.
- 7 Glibert J, Strubbe I. Grain lossmonitors for harvesting machines: US, 5046362[P]. 1991-09-10.
- 8 van Quekelberg he, Eric P J. Grain sensor arrangement for an agricultural harvester: US, 6524183[P]. 2003-02-25.
- 9 李俊峰, 介战. 联合收割机谷物损失测试研究探讨[J]. 农机化研究, 2007(12): 248 ~ 250.
Li Junfeng, Jie Zhan. Analyses of combine harvester grainloss measurement [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(12): 248 ~ 250. (in Chinese)
- 10 周利明, 张小超, 刘阳春, 等. 联合收获机谷物损失测量 PVDF 阵列传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 167 ~ 171.
Zhou Liming, Zhang Xiaochao, Liu Yangchun, et al. Design of PVDF sensor array for grain loss measuring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 167 ~ 171. (in Chinese)
- 11 Zhao Zhan, Li Yaoming, Liang Zhenwei, et al. Optimum design of grain impact sensor utilising polyvinylidene fluoride films and a floating raft damping structure[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(3): 227 ~ 235.
- 12 Zhao Zhan, Li Yaoming, Chen Jin, et al. Grain separation loss monitoring system in combine harvester [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(2): 183 ~ 188.
- 13 王涛, 王晓东, 王立鼎. 压电陶瓷快速响应特性与应用研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(6): 785 ~ 789.
Wang Tao, Wang Xiaodong, Wang Liding. Study on fast response characteristic and application of piezoceramics[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(6): 785 ~ 789. (in Chinese)
- 14 张霖, 赵祚喜, 可欣荣, 等. 压电式种子计数系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 41 ~ 45.
Zhang Lin, Zhao Zuoxi, Ke Xinrong, et al. Seed-counting system design using piezoelectric sensor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 41 ~ 45. (in Chinese)
- 15 李金田. 压电传感器与前置放大器的配接[J]. 传感器与微系统, 2004, 23(1): 54 ~ 56, 59.
Li Jintian. Connection of piezoelectric sensor and preamplifier[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2004, 23(1): 54 ~ 56, 59. (in Chinese)
- 16 王正林, 王开胜, 陈国顺, 等. MATLAB/Simulink 与控制系统仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 56 ~ 64.
- 17 陈树人, 尹东富, 魏新华, 等. 变量喷药自适应神经模糊控制器设计与仿真[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(3): 272 ~ 276.
Chen Shuren, Yin Dongfu, Wei Xinhua, et al. Design and simulation of variable weed spraying controller based on adaptive neural fuzzy inference system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(3): 272 ~ 276. (in Chinese)
- 18 李耀明, 梁振伟, 赵湛, 等. 联合收获机籽粒损失监测传感器性能标定试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 79 ~ 83.
Li Yaoming, Liang Zhenwei, Zhao Zhan, et al. Calibration experiment of grain loss monitoring sensor in combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 79 ~ 83. (in Chinese)

(上接第 163 页)

- 11 徐海芳. 农田土壤入渗参数的空间统计特征[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- 12 王建伟, 贾文庆. 盐分胁迫下紫花苜蓿种子发芽特性的研究[J]. 浙江农业科学, 2008(2): 178 ~ 180.
Wang Jianwei, Jia Wenqing. The effect of salt stress on the seed germination of *Medicago sativa* [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2008(2): 178 ~ 180. (in Chinese)
- 13 秦峰梅, 张红香, 武祎, 等. 盐胁迫对黄花苜蓿发芽及幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2010, 19(4): 71 ~ 78.
Qin Fengmei, Zhang Hongxiang, Wu Yi, et al. Effects of salt stress on germination and seedling growth of *Medicago falcata* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(4): 71 ~ 78. (in Chinese)
- 14 高奔, 宋杰, 刘金萍, 等. 盐胁迫下囊果碱蓬出苗状况及苗期抗盐性[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6 131 ~ 6 135.
Gao Ben, Song Jie, Liu Jinping, et al. Seedling emergence and salt tolerance of *Suaeda physophora* Pall. under salt stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6 131 ~ 6 135. (in Chinese)