微咸水膜下滴灌条件下南疆棉花水肥耦合规律研究

李发永，王兴鹏，王　龙，姚宝林，张志贤
(塔里木大学水利与建筑工程学院，新疆 阿拉尔 843300)

摘　要：为寻求劣质水(微咸水)滴灌施肥下的水肥耦合最优模型，通过正交实验设计，从水、肥、盐三个方面分析了不同生育期棉花耗水、土壤水分、土壤盐分、硝态氮等土壤因子的变化。结果表明：棉花耗水量与灌溉定额及土壤盐分有一定的相关关系。蕾期和花铃前期各处理土壤水分变异系数较大；花铃后期土壤硝态氮的积累量则逐渐增加；矿化度2～3 g·L^{-1}的微咸水与淡水混灌对棉田土壤盐分的积累影响较小；正交分析得出了最优水平为灌水量为600 mm，咸淡配比为2∶1，尿素施入量为80 kg·667m^{-2}。方差分析表明灌溉定额和施肥量两个因素对产量有显著影响，并利用SPSS软件建立了两者与产量的二次回归模型。

关键词：微咸水；滴灌；硝态氮；水肥耦合
中图分类号：S275.6　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-7601(2013)02-0146-06

Coupling effects of water and fertilizer with drip irrigation of brackish water under film for cotton in south Xinjiang

LI Fa-yong，WANG Xing-peng，WANG Long，YAO Bao-lin，ZHANG Zhi-xian
(*College of Water Resource and Architectural Engineering*，*Tarim University*，*Alare*，*Xinjiang* 843300，*China*)

Abstract：To find out an optimal model for the coupling effects of water and fertilizer under drip irrigation with low-quality water (brackish water)，an orthogonal experiment was conducted to analyze the changes of water consumption，soil moisture and soil salt in cotton field at different growth stages. The results showed that the water consumption of cotton was related with irrigation quota and soil salt. At bud stage and early flowering and boll stage，the coefficients of variation of soil moisture were relatively high，while at late flowering and boll stage，the accumulation of soil nitrate-N was gradually increased. The irrigation of brackish water with 2～3 g·L^{-1} salinity mixed with fresh water produced little impact on soil salt accumulation in cotton field. Based on orthogonal analysis，the optimal management scheme were made，in which the irrigation quota，ratio of salty to fresh water and urea application amount were 600 mm，2∶1 and 80 kg·667m^{-2}，respectively. Analysis of variance showed that the two factors of irrigation amount and fertilization affected the yield significantly. Furthermore，a quadratic regression model between these two factors and the yield was set up by using SPSS software.

Keywords：brackish water；drip irrigation；nitrate-N；coupling effect of water and fertilizer

新疆南疆地区由于受到气候、地形、水文、土壤(多为沙质土)、灌溉方式(漫灌、排碱)等的影响，地下水多为矿化度较高的微咸水或咸水[1]。由于该灌溉区地表水资源严重匮乏，随着南疆农业的不断扩张，棉花、果树种植面积不断扩大。水资源短缺日益严重。充分利用地下水和劣质水资源和改变传统的灌溉方式是解决南疆水资源危机的关键。滴灌以其优越的生态、经济、社会效益被广泛推广[2]。目前大量国内外学者对不同农作物在微咸水灌溉下的水盐运移规律进行了研究，特别是在小麦、苜蓿、蔬菜等大田作物方面[3-7]。Smith等[8]从1990到1991年对白花苜蓿研究发现盐度为2.4 dS·m^{-1}的微咸水灌溉与渠道水(0.07 dS·m^{-1})灌溉相比能够使生物固氮降低27%～47%。土壤盐分累积还能使作物根系产生盐分胁迫，影响棉花的出苗[9]，同时能够影响棉花对土壤营养成分的吸收从而影响棉花产

收稿日期：2012-09-14
基金项目：国家自然科学基金项目(51169024)；兵团水利局灌溉试验项目(兵水发[2009]199号)
作者简介：李发永(1982－)，男，讲师，河南开封人，现主要从事农业水土环境相关的科研工作。E-mail：lisen8279@163.com。
通信作者：王兴鹏(1978－)，男，副教授，宁夏吴忠人，主要从事农业水土工程方面的科研工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

量[10-11]。Sharma 等[12]认为降低棉花产量的起始盐度(即耐盐阈值)为 7.7 dS·m^{-1}(1 dS·m^{-1}相当于 NaCl 的质量分数 0.064%),每超过耐盐阈值 1 dS·m^{-1},产量降低 5.2%。还有大量学者对土壤滴灌条件下作物的水肥耦合规律进行了研究[13-15],但是这些研究大多集中于淡水滴灌。在微咸水滴灌方面鲜有深入研究。

1　材料和方法

1.1　实验区基本情况

棉花试验地位于塔克拉玛干沙漠南缘,塔里木大学水利与建筑工程学院节水灌溉试验基地东南角,属沙漠绿洲区,干旱少雨,年平均气温 11.3℃,年平均降水量 45.7 mm,蒸发量 2000 mm 左右。土壤质地为砂壤土,土壤容重为 1.34 g·cm^{-3},田间持水率为 25%。地下水平均埋深为 3 m。灌区内地下水水质为微咸水(2~3 g·L^{-1})。土壤初始盐分及水分、养分含量见表 1。

表 1　土壤初始水分、盐分、养分含量

Table 1　Basic soil water, salt and nutrient content

土壤深度 Soil depth /cm	质量含水率 Soil water content/%	总盐 Total salt /(g·kg^{-1})	碱解氮 Available N /(mg·kg^{-1})	硝态氮 Nitrate N /(mg·kg^{-1})	总有机碳 Total organic C /(mg·kg^{-1})
0~10	2.7	3.8	40.6	32.2	10.7
10~20	3.6	2.9	35.6	39.6	11.5
20~40	4.3	1.6	34.0	16.7	7.2
40~60	4.9	0.8	27.3	18.2	6.4
60~80	7.9	0.6	27.3	16.2	7.2

1.2　试验设计

2010 年 4 月中旬建立实验小区,小区大小 30 m×20 m,植前进行小区土地平整与布置,控制方式为一膜四行两管,宽行行距 60 cm,窄行行距 25 cm,膜间距 40 cm,滴头间距 15 cm,株间距 10 cm。具体布置方式见图 1。微咸水和淡水不同配比混灌,灌溉方式为膜下滴灌,实验采用正交实验三因素三水平 L9(33),具体的试验方案设置见表 2、表 3。

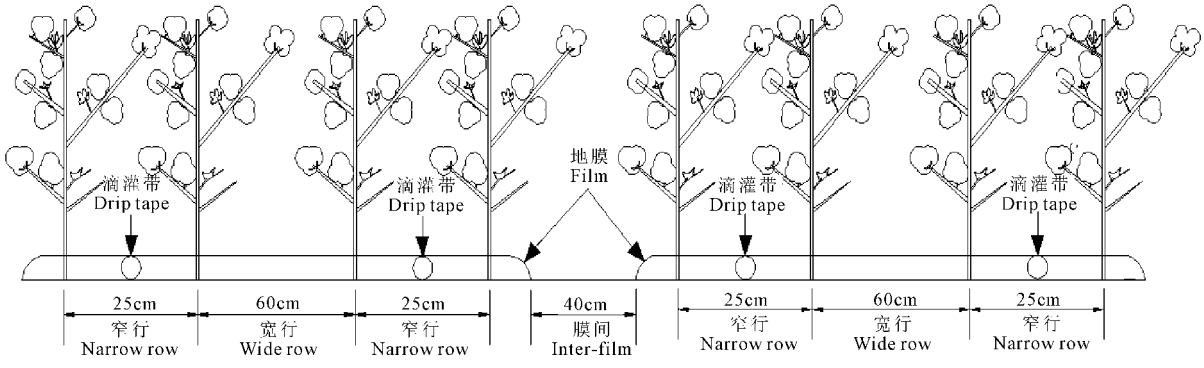

图 1　大田棉花微咸水滴灌布置方式

Fig.1　Cotton field layout with brackish water drip irrigation

表 2　棉花微咸水滴溉因素水平表 L9(33)

Table 2　Factors and levels for the drip irrigation experiment L9(33)

水平 Levels	灌溉定额/mm Irrigation quota	咸淡配比 Ratio of salty to fresh water	尿素施入量 /(kg·667m^{-2}) Urea application
1	800	1∶1	80
2	700	2∶1	100
3	600	3∶1	120

灌溉咸水取自当地浅层地下水(电导率为 2.75 mS·cm^{-1}),淡水取自水库灌溉水(电导率为 1.17 mS·cm^{-1})。表 1 中咸淡配比表示咸水和淡水混合配比分别为 1∶1、2∶1、3∶1。肥料施入采用随水滴施,灌水主要集中在苗期、蕾期、花铃期。全生育期灌水 8 次,每个处理每次灌水定额相同,分别为:100、87、75 mm,其中苗期 2 次,蕾期 3 次,花铃期 3 次,试验处理区未进行冬灌,2010 年初春灌 1 次,灌溉方式采用漫灌,灌水量为 1 600 m^3·hm^{-2}。

表 3　正交实验设计表

Table 3　Orthogonal design

处理号 Treatments	因子水平 Levels		
	灌溉定额 A Irrigation quota	咸淡配比 B Ratio of salty to fresh water	尿素施入量 C Urea application
M1	1	1	1
M2	1	2	2
M3	1	3	3
M4	2	1	2
M5	2	2	3
M6	2	3	1
M7	3	1	3
M8	3	2	1
M9	3	3	2

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.3 试验取样及数据统计分析

试验采用烘干法测定土壤水分，每次灌水前后各取土一次，常规取土周期为7 d，降雨后(≥8 mm)加密取土一次。取土深度为15、30、45、60 cm。采用水量平衡原理计算棉花耗水[16-17]：

$$E_T = R + B - F \pm Q + \Delta W_s$$

$$\Delta W = SW_1 - SW_2$$

式中，E_T 为棉花耗水量；R 为降水量，采用小型气象站观测资料；B 为灌溉水量；F 为土壤水分横向扩散量，本实验只考虑重力影响，视 $F = 0$；Q 为地下水上移或下渗量，由于试验地地下水位埋深3 m以下，所以不存在地下水上移或下渗，$Q = 0$；ΔW 为土壤贮水量的变化，SW_1 为播种时土层平均贮水量，SW_2 为棉花停止生长时土层平均贮水量。

土壤盐分测定采用烘干法：1∶5浸提液，吸取液100 mL在水浴锅内恒温蒸干。土壤不同生育期土壤水分、盐分、养分变异系数计算[18]：

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i}$$

式中，CV 为变异系数；S 为样本标准差；X 为样本平均值；x_i 为样本值；n 为样本数量。

2 结果分析

2.1 不同处理全生育期棉花耗水分析

根据棉花不同处理全生育期的灌水量及土壤水分变化情况计算土壤耗水。不同处理的耗水规律见图2。图2中全生育期最大耗水量为828.8 mm，对应处理为M3，其次为M1，耗水量为826.2 mm，耗水量最少的为M9，其耗水量为625.1 mm。由于南疆沙漠绿洲区全年降雨量较少，棉花耗水量 ET 和棉花灌水量 B 密切相关[16]，灌水量越大耗水量也越大。但同时对比M3、M6、M9(三者咸淡配比均为3∶1)发现耗水量又与灌溉水的矿化度有一定的关系，矿化度越大，棉花越容易受到盐分胁迫，从而阻碍水分的运输。

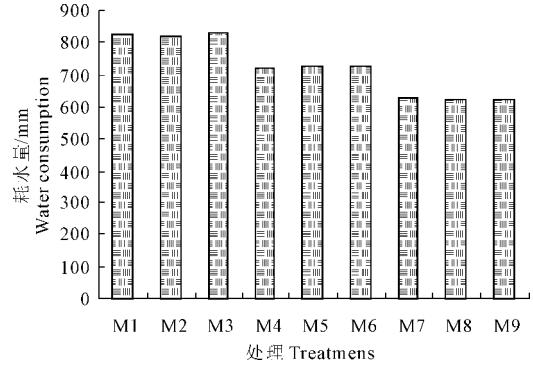

图2 棉花不同处理全生育期内耗水量

Fig.2 Diffident of treatments for water consumption of cotton at the whole growth period

表4对比了棉花不同生育期内土壤水分变异系数，由表可以看出：苗期时，由于气温较低，土壤蒸发和棉花耗水较少，土壤水分变化较小，各个处理土壤水分变异系数也相对较小。而蕾期和花铃前期各处理土壤水分变异系数较大，最大值达到了80.4%，这两个阶段由于温度升高，棉花生长迅速，耗水及土壤蒸发较强烈，土壤水分日均值变化较大。而花铃后期，随着棉花进入旺盛生长期的末段，棉花耗水出现拐点，并急剧下降。对土壤水分的需求量逐渐降低。土壤水分变化较小。这与淡水处理基本相似[19]。

表4 各个处理在不同育期内土壤水分变异系数

Table 4 Coefficients of variation (CV) of soil moisture during different growth stages of cotton

生育期 Growth stage	不同处理土壤水分变异系数/% CV of soil moisture under different treatments								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
苗期 Seedling stage	41.2	47.7	36.4	39.5	36.4	34.5	31.2	31.6	33.9
蕾期 Bud stage	47.5	80.4	64.8	72.9	68.7	67.2	51.3	75.6	66.9
花铃前期 Early flowering and boll stage	64.9	58.7	56.2	52.1	41.4	62.9	53.3	60.9	35.9
花铃后期 Late flowering and boll stage	31.1	50.8	33.4	33.1	27.4	29.6	30.1	26.8	22.1

2.2 棉花生长关键期内土壤盐分变化规律

图3为不同试验处理在蕾期和铃期土壤盐分变化情况，整体上不同咸淡配比的微咸水滴灌对棉花生长关键期土壤盐分的累积影响不大。土壤盐分的变化范围为0.7～4.5 g·kg^{-1}。其中处理M4、M6、M7前期土壤含盐量稍高，后期土壤盐分含量逐渐降

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

低并基本趋于稳定。处理 M9 整个关键期土壤盐分含量基本保持恒定,没有太大的变化。而处理 M2 和 M8 初始含盐量较低,随着微咸水的滴灌,表现出先增大后降低,再增长又降低的变化趋势,最高土壤含盐量分别达到了 3.5 g•kg^{-1}和 4.5 g•kg^{-1}。M1 则在中期盐分含量稍低,在前期和后期含量较高。表 5 反映了棉花在微咸水滴灌条件下的关键期土壤盐分变异系数大小,其中处理 M9 变异系数最小为 7.5%,处理 M4 变异系数最大为 50.3%。灌溉方案 M9 对土壤盐分积累影响不大,而 M1、M4、M8 滴灌水肥组合方式则对土壤盐分有较大的影响。

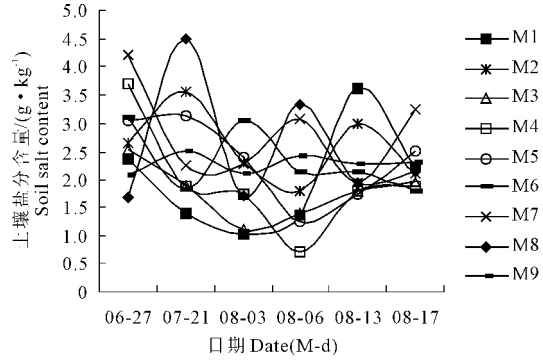

图 3　棉花生长关键期内土壤盐分的累积量

Fig.3　Soil salt accumulations at cotton key growing period

表 5　棉花生长关键期不同处理土壤盐分变异系数/%

Table 5　Coefficients of variation (CV) of soil salt at key growing period of cotton

处理 Treatments	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
变异系数 CV	47.6	25.1	28.3	50.3	31.5	25.5	29.5	44.4	7.5

2.3　花铃后期土壤硝态氮变化规律

棉花对氮素的需求量很大,但是普通的灌溉施肥方式下对氮素的吸收利用效率并不高。当季吸收利用一般为 30%～50%,氮素损失可达 20%～60%,土壤中残留约 25%～35%。而硝态氮作为小分子无机氮对棉花的生长有重要作用[20—21],但是有关学者研究发现土壤硝态氮容易受到灌溉条件和土壤质地的影响,发生流失。本实验考察了花铃后期土壤硝态氮的残留量。图 4 反映了花铃后期土壤硝态氮的变化规律,试验未考虑灌水和土壤交换作用引起的硝态氮流失量。从曲线图可以看出,各个处理土壤硝态氮的变化大致是呈现逐渐增高的总体趋势,这种变化趋势一个原因是受到了灌水和施肥的影响,另一个原因是由于棉花花铃后期对硝态氮的吸收和利用逐渐降低,导致了土壤硝态氮的积累。处理 M6 在花铃后期土壤硝态氮的残留量相对较少,残留量值为 42.7 g•kg^{-2},而处理 M7 后期土壤硝态氮残留量最高达到了 90.6 g•kg^{-2}。表 6 为花铃后期土壤硝态氮累积的变异系数,可以看出处理 M5 变异系数最大达到了 39.5%,其次是 M7 为 37.2%,M8 最少为 7.5%。表明试验方案 M8 对土壤硝态氮的累积影响最小,而 M7 影响最大。

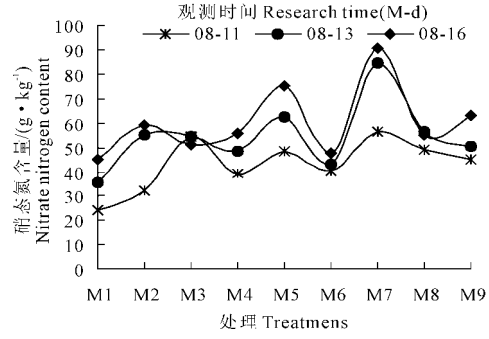

图 4　花铃后期土壤硝态氮的变化规律

Fig.4　Variation of soil nitrate-N at later of flowering-bolling stage

表 6　花铃后期土壤硝态氮变异系数/%

Table 6　Coefficients of variation (CV) of soil nitrate—N at late flowering and boll stage

处理 Treatments	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
变异系数 CV	30.9	33.4	3.5	13.9	39.5	34.0	37.2	7.5	19.6

2.4　正交试验结果分析及土壤水肥耦合模型构建

表 7 和表 8 分别为正交试验结果统计及方差分析。方差分析结果表明,灌水量(A)和尿素施入量(C)F 值均大于 $F_{0.05}$,两个因子对产量的影响均达到极显著水平,而咸淡配比(B)因子 F 值小于 $F_{0.05}$,说明灌溉水矿化度区间在 2～3 g•L^{-1}微咸水和淡水混灌对棉花产量的影响不大,未达到显著水平。最优组合为:灌水量 A3、咸淡配比 B2、施肥量 C1,即灌水量为 600 mm、咸淡配比为 2∶1、尿素施入量为 80 kg•667m^{-2}。

通过对自变量灌水量(X_1)、施肥量(X_2)和因变量棉花产量(Y)三个个因子进行回归分析,考虑灌

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

水量和施肥量之间的交互作用利用SPSS软件进行回归分析得到如下模型：

$$Y = 34368.944 - 31.923X_1 - 0.008X_1^2 - 306.783X_2 + 0.492X_2^2 + 0.318X_1X_2 \quad R^2 = 0.752$$

包含交互项 X_1X_2 的值为0.318表明微咸水灌溉和肥料的投入存在着一定的协同作用，在一定的范围内两者的投入有利于棉花的增产。但是 X_1^2 和 X_2 的系数为负值，表明过度的灌溉微咸水和施肥在一定的程度上将会降低棉花的产量，在实际生产管理中要注意水肥的投入量。在最优组合水平：灌水量为600 mm、咸淡配比为2∶1、尿素施入量为80 kg·667m^{-2}条件下。求得产量为6 205.3 kg·hm^{-2}。由于受到试验条件和试验误差的影响，模型精度有待进一步验证。

表7 棉花正交实验结果计算表

Table 7 Computation of orthogonal experimental results for cotton

处理号 Treatments	灌溉定额 A/mm Irrigation quota	咸淡配比 B Ratio of salty to fresh water	尿素施入量 C/(kg·667m^{-2}) Urea application	产量/(kg·hm^{-2}) Yield
M1	800	1∶1	80	2910
M2	800	2∶1	100	3638
M3	800	3∶1	120	4820
M4	700	1∶1	100	3820
M5	700	2∶1	120	5730
M6	700	3∶1	80	5275
M7	600	1∶1	120	5184
M8	600	2∶1	80	5820
M9	600	3∶1	100	6821
T1	11368	14825	17825	T=44018
T2	11914	15188	16916	
T3	14005	14279	15734	
$\overline{x_1}$	3789.33	4941.67	5941.67	
$\overline{x_2}$	3971.33	5062.67	5638.67	
$\overline{x_3}$	4668.33	4759.67	5244.67	

表8 方差分析表

Table 8 Analysis of variance

变异来源 Source of variation	SS	df	MS	F	$F_{0.05}(2,2)$
灌溉定额 Irrigation quota (A)	−59515532.11	2	29757766.06	178.88	19
咸淡配比 Ratio of salty to fresh water (B)	2828122.89	2	1414061.44	8.50	
尿素施入量 Urea application (C)	68526331.89	2	34263165.94	205.97	
误差 Error	332296.22	2	166348.11		
总变异 Total variation	12171618.89	8			

3 结 论

1) 棉花滴灌条件下全生育期土壤耗水和灌水量及土壤盐分有一定的关系，蕾期和花铃前期各个处理土壤水分变异系数较大。这一时期应注意土壤水分的变化，防止棉花过度水分胁迫；

2) 花铃后期土壤氮素的积累量逐渐增加，棉花对硝态氮的吸收利用逐渐减少，这一时期应减少氮肥的施入量，防止土壤微生态环境的变化导致棉花减产。

3) 矿化度2～3 g·L^{-1}的微咸水与淡水混灌对棉田土壤盐分的积累没有太大影响，其中灌溉施肥方案M9对棉花关键期土壤盐分累积影响最小。M1、M4、M8滴灌水肥组合方式则对土壤盐分有较大的影响。合理的灌溉施肥方案有利于对土壤盐分的控制。

4) 正交试验结果分析表明灌溉定额和施肥量两个因素对产量的影响均达到了极显著水平，灌溉水矿化度区间在2～3 g·L^{-1}微咸水和淡水混灌对棉花产量的影响不大，这与盐分累积规律得出的结论一致。灌水量、施肥量及产量的具有交互作用的二次回归模型分析表明，咸水灌溉和肥料的投入存在

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

着一定的协同作用,这与胡顺军等[16]的研究结果一致。正交试验结果得出最优水平为灌水量为 600 mm、咸淡配比为 2∶1、尿素施入量为 80 kg·667m^{-2}。代入回归模型求得模拟产量为 6 205.3 kg·hm^{-2}。模型精度有待进一步试验验证,另外本研究只考虑了"产量"一个因变量,在实际生产中可能存在一定的误差,今后的研究中需要进一步完善,增加水分生产效率和养分生产效率两个指标。

参 考 文 献:

[1] 王艳娜,侯振安,龚　江,等.咸水滴灌对土壤盐分分布、棉花生长和产量的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2007,25(2):158-162.

[2] 徐飞鹏,李云开,任树梅.新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考[J].农业工程学报,2003,19(1):25-27.

[3] Pal B, Singh C, Singh H. Barley yield under saline water cultivation [J]. Plant and soil, 1984,81:221-228.

[4] 万书勤,康跃虎,王　丹,等.华北半湿润地区微咸水滴灌番茄耗水量和土壤盐分变化[J].农业工程学报,2008,24(10):29-33.

[5] Marisol Eggleton, Walter Zegada-Lizarazu. The effect of brackish water irrigation on the above-and below-ground development of pollarded Acacia saligna shrubs in an arid environment [J]. Plant Soil, 2007, 299:141-152.

[6] 王诗景,黄冠华,杨建国.微咸水灌溉对土壤水盐动态与春小麦产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(5):27-33.

[7] Flowers T J, Ragab R, Malash N, et al. Sustainable strategies for irrigation in salt prone Mediterranean: SALTMED[J]. Agricultural Water Management, 2005,78:3-14.

[8] Smith C J, Chalk P M, Noble C L. Nitrogen fixation in a white clover-grass pasture irrigated with saline groundwater[J]. Irrig Sci, 1993,13: 189-194.

[9] 王春霞,王全九,刘建军,等.灌水矿化度及土壤含盐量对南疆棉花出苗率的影响[J].农业工程学报,2010,26(9):28-33.

[10] Hoffman G J, Rawlins S L, Garger M J, et al. Water relation and growth of cotton as influenced by salinity and relative humidity[J]. Agronomy Journal, 1971,63(6):822-826.

[11] 董合忠,辛承松,李维江.山东滨海盐渍棉田盐分和养分特征及对棉花出苗的影响[J].棉花学报,2009,21(4):290-295.

[12] Sharma S K, Gupta I C. Saline Environment and Plant Growth[M]. India: Agro Botanical Publishers, 1986:172.

[13] 郑　重,马富裕,慕自新,等.膜下滴灌棉花水肥耦合效应及其模式研究[J].棉花学报,2000,12(4):198-201.

[14] MOLL R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J]. Agron J, 1982,74:562-564.

[15] 李楠楠,张忠学.黑龙江半干旱区玉米膜下滴灌水肥耦合效应试验研究[J].中国农村水利水电,2010,(6):88-94.

[16] 胡顺军,田长彦,王　方,等.膜下滴灌棉花水肥耦合效应研究初报[J].干旱区资源与环境,2005,19(2):192-195.

[17] 潘学标.作物模型原理[M].北京:气象出版社,2003:90.

[18] 陈　超,潘学标,张立祯,等.气候变化对石羊河流域棉花生产和耗水的影响[J].农业工程学报,2011,27(1):57-65.

[19] 岳晶晶,孙景生,徐建新,等.膜下滴灌棉花耗水规律研究[J].人民黄河,2011,33(3):73-75.

[20] 侯秀玲.棉田土壤硝态氮实时变化规律及氮素平衡初步研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2006.

[21] Halvorson A D J W, Brian L B. Alferd Tillage and nitrogen fertilization influence grain and soil nitrogen in an annual cropping system [J]. Agronomy Journal, 2001,93:836-841.

(上接第 110 页)

比较几种改良措施,可以看到草地松耙成本最低,但实验效果并不太明显;而草地松耙+补播+施肥虽然成本较高,但明显改善了植物群落及土壤性状,对当地会产生较高的经济效益。由于本试验只进行了一年的数据测定,其测定的结果还需要经过连续多年的实践来检验。

参 考 文 献:

[1] 李　博.我国草地资源现状、问题及对策[J].中国科学学院院刊,1997,(1):49-51.

[2] 赵成章,樊胜岳,殷翠琴,等.毒杂草型退化草地植被群落特征的研究[J].中国沙漠,2004,24(4):507-512.

[3] 宝音陶格涛,王　静.退化羊草草原在浅耕翻处理后植物多样性动态研究[J].中国沙漠,2006,26(2):232-237.

[4] 任继周.草业科学研究方法[M].北京:中国农业出版社,1998.

[5] 郭正刚,王根绪,沈禹颖,等.青藏高原北部多年冻土区草地植物多样性[J].生态学报,2004,24(1):149-155.

[6] West N E. Biodiversity of rangelands[J]. Journal of Rangeland Management, 1993,46:2-13.

[7] Tilman, D. Competition and biodiversity in spatially structured habitats [J]. Ecology, 1994,75:2-16.

[8] 赵哈林,张铜会,常学礼,等.科尔沁沙质放牧草地植物多样性及生态位的分异规律研究[J].中国沙漠,1999,19(S1):35-39.

[9] 殷振华,毕玉芬,李世玉.封育对云南退化山地草甸植物种类及盖度的影响[J].草业科学,2008,25(12):18-22.

[10] 史顺海,杨福屯,陆国泉.高寒矮蒿草草甸地上生物量与气象因子的关系[J].生态学杂志,1992,11(5):16-19.

[11] 高雪松,邓良基,张世熔.不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J].水土保持学报,2005,19(2):53-60.

[12] 陈恩凤.土壤肥力物质基础及其调控[M].北京:科学出版社,1990.

[13] 李瑜琴,赵景波.过度放牧对生态环境的影响与控制对策[J].中国沙漠,2005,25(3):404-408.

[14] 杨丽娜.不同改良措施对退化羊草草原的影响[D].呼和浩特:内蒙古大学,2008.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net