

基于整体差异组合模型评价的南疆盐碱化棉田 滴灌淋洗量和淋洗时期研究

刘小强^{1,2} 张富仓^{1,2} 何 帅² 李云霞² 尹飞虎²

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 新疆农垦科学院农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室, 石河子 832000)

摘要: 为探讨不同滴灌淋洗模式对南疆盐碱化棉田的影响, 采取淋洗量和淋洗时期 2 因素交互设计, 淋洗量设置 4 个水平: W1 (75 mm)、W2 (150 mm)、W3 (225 mm) 和 W4 (300 mm), 淋洗时期设置 3 个处理: T1 (在苗期 1 次淋洗)、T2 (在苗期和蕾期 2 次淋洗) 和 T3 (在苗期、蕾期和花铃期 3 次淋洗), 及 1 个灌溉量为 85% ET_c (棉花生育期需水量) 无淋洗的对照组 (CK), 进行大田试验。试验结果表明: 在盐碱化棉田滴灌淋洗中, 可将盐分进行淋洗。与 CK 处理相比, W4 和 W3 在 2020、2021 年分别降低 0~100 cm 土壤含盐量 13.17% 和 26.57%, 增加产量 104.13% 和 59.36%。各处理地上部干物质质量 Logistic 拟合效果良好 (决定系数 $R^2 \geq 0.9654$, $P < 0.05$)。在相同淋洗时期下, 地上部干物质质量累积量、籽棉产量与淋洗量呈正相关, 而经济系数与淋洗量之间存在差异性。主成分分析法、基于组合赋权的理想点法模型、灰色关联度分析法和隶属函数分析法两两之间具有良好的相关性, 各模型之间相关系数为 0.92~0.99。基于整体差异组合评价模型得出 W4T2 处理最优。考虑到该地区干旱少雨, 盐碱化棉田生育期内淋洗量 225 mm、淋洗时期为苗期和蕾期, 棉田综合指标评价值为 1.3765, 为适宜的盐碱化棉田滴灌淋洗制度。本研究可为南疆盐碱化棉田生育期滴灌淋洗水盐科学管理提供理论指导。

关键词: 棉田; 滴灌; 淋洗; 盐碱化; 整体差异组合模型

中图分类号: S275.6; S562

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)04-0460-11

OSID:



Evaluation Drip Irrigation Leaching Amount and Period Based on Overall Difference Model for Salinized Cotton Fields in Southern Xinjiang

LIU Xiaoqiang^{1,2} ZHANG Fucang^{1,2} HE Shuai² LI Yunxia² YIN Feihu²

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,
Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Northwest Oasis Water-saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China)

Abstract: Soil salinity affects a range of physiological processes in the cotton fields and is key factor controlling cotton productivity and yield. Two-year experiments (2020 and 2021) were conducted to evaluate the effects of different leaching regimes on soil salinity, aboveground dry matter of cotton, and yield of seed cotton in Southern Xinjiang. There were four leaching amounts (W1: 75 mm, W2: 150 mm, W3: 225 mm and W4: 300 mm) and three leaching periods (T1: once at seedling period, T2: twice at seedling and budding periods and T3: thrice at seedling, budding and pollen setting periods) in addition to non-leaching treatment (CK: 85% crop evapotranspiration). During the experiment, soil salinity, aboveground dry matter accumulation, yield seed cotton and economic coefficient (ratio of yield to the total of dry matter accumulation and yield) were measured. The results showed that the leaching could leach the salinity in salinized cotton fields. Compared with the CK treatment, soil salinity in 0~100 cm was decreased by 13.17% and 26.57% and the yield was increased by 104.13% and 59.36% in 2020 W4 and 2021 W3, respectively. The results of the Logistic equation to fit the dry matter

收稿日期: 2024-03-11 修回日期: 2024-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979231)和新疆生产建设兵团科技项目(2021AB009、2024AB030)

作者简介: 刘小强(1995—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与农田水肥盐调控研究,E-mail: liuxiaoqiangyx@163.com

通信作者: 尹飞虎(1954—),男,研究员,博士生导师,中国工程院院士,主要从事节水农业和作物水肥一体化研究,E-mail: nkyfth@sohu.com

accumulation were satisfactory ($R^2 \geq 0.965\ 4$, $P < 0.05$) for each treatment. Aboveground dry matter accumulation and seed cotton yield were positively correlated with leaching amount, and there was a difference between the economic coefficient and leaching amount under the same leaching period. The principal component analysis, technique for order preference by similarity to an ideal solution model (TOPSIS), gray correlation analysis and membership function analysis were well correlated with each other, and the correlation coefficients among the models were ranged from 0.92 to 0.99. Based on the overall difference combination evaluation model, the W4T2 treatment achieved the optimum. Further comprehensive analysis, considering the drought and low rainfall in the region, the results suggested that when leaching amount was 225 mm and leaching periods at the seedling and budding stages during the reproductive period, the evaluations of comprehensive index (1.376 5) was suitable for salinized cotton fields in the drip irrigation. The research result can provide valuable information for improving management of salinized cotton fields in Southern Xinjiang.

Key words: cotton field; drip irrigation; leaching; salinized; overall difference model

0 引言

棉花是新疆维吾尔自治区(以下简称新疆)的主要经济作物,截至2020年种植面积达 $2.5 \times 10^6\text{ hm}^2$ ^[1],对保障纺织化工原料和提高棉农的经济收入具有重要意义。然而,由于地处我国西北地区,干旱少雨,蒸发量大,使新疆存在大量的盐碱土,占其可耕地面积的37%^[2]。在盐碱地棉花生产过程中,由于不合理的灌溉,导致棉田次生盐碱化现象依然普遍存在,这严重影响了棉田生产力^[3]。而采用大田试验研究灌溉制度对盐碱土作物生长、干物质累积和产量的影响是盐碱土制定高效节水控盐灌溉制度的重要途径。近年来,在棉花种植生产过程中,已不再只关注产量或者某个单一指标,也开始考虑经济系数、产量、干物质质量和土壤含盐量等综合因素^[4]。因此,对盐碱化棉田进行客观评价、借以优化水盐调控成为盐碱化棉田节水控盐高效生产的重要途径。

目前,国内外学者大多采用单一评价方法对棉花进行评价。如基于组合赋权的理想点法(Technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)^[5],主成分分析法^[6],灰色关联度分析法^[7],隶属函数分析法^[8]。然而,在实际评价和分析过程中,由于评价方法的原理不同,加之各评价对象的侧重点不同,导致评价结果不同^[9],使得各评价方法之间存在一定的差异性^[10],这不利于做出客观决策。为解决单一评价方法结果不一致的问题,有学者提出将多个评价模型通过恰当的规则进行组合综合分析,以消除单一方法产生的误差,使评价结果更为客观^[11]。但基于多种单一评价差异组合的综合评价方法在盐碱化棉田水盐调控与作物效应方面的研究相对较少。

本文探讨各评价方法下盐碱化棉田综合评价指标对滴灌淋洗的响应,选取土壤含盐量、棉花干物

质量、籽棉产量和经济系数为指标,研究不同滴灌淋洗量和淋洗时期对土壤含盐量、棉花干物质质量、产量和经济系数的影响。运用主成分分析法、基于组合赋权的理想点法、灰色关联度分析法和隶属函数分析法对棉田各指标进行独立评价。基于整体差异组合模型将单一评价模型的评价结果进行综合评价,按照综合分析的评价值选出最优处理,旨在提出适宜盐碱化棉田生育期的滴灌淋洗制度,为南疆盐碱化棉田生育期水盐调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2020年和2021年棉花生长季(4—9月)在新疆生产建设兵团第二师三十一团二连进行。该区域属于孔雀河流域,平均海拔900 m,年平均温度为10.9℃。试验区光热资源丰富,作物生长季年平均降雨量为30.6 mm;年平均蒸发量为2 417 mm,其中作物生育期蒸发量为2 083 mm。试验地土壤电导率为3.35 dS/cm(土水质量比1:5),属于盐碱土。2020、2021年棉花生育期内降雨总量分别为32.4 mm和13.8 mm(图1)。

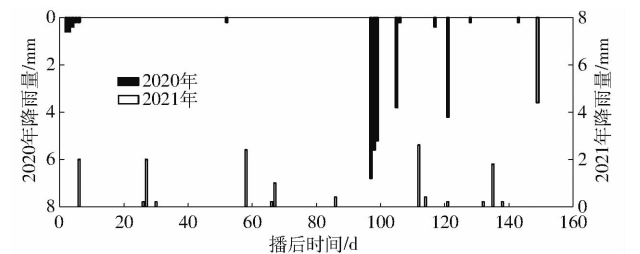


图1 2020年和2021年棉花生育期降雨量
Fig.1 Rainfall during cotton growth period in 2020 and 2021

1.2 试验设计

试验供试棉花为“新陆中67”。于2020年4月16日和2021年4月18日播种,2020年9月28日

日和2021年9月30日收获。生育期为:苗期(2020年4月16日—6月16日和2021年4月18日—6月18日)、蕾期(2020年6月17日—7月18日和2021年6月19日—7月20日)、花铃期(2020年7月19日—8月30日和2021年7月21日—8月31日)和吐絮期(2020年8月31日—9月28日和2021年9月1—30日)。试验小区面积为4.3 m×15 m。肥料分别选用尿素(N质量分数为46%)、磷酸一铵(P₂O₅质量分数为53%)和硫酸钾(K₂O质量分数为51%)。采用膜下滴灌技术进行灌溉。棉花采用宽窄行种植方式,宽行和窄行间距分别为66 cm和10 cm,株距为10 cm。滴灌带布置在宽行

内,距棉花10 cm,1条滴灌带控制2行棉花。滴灌带滴头间距30 cm,滴头流量2.4 L/h。在盐碱化棉田中开展棉花生育期灌溉淋洗试验,设置淋洗量和淋洗时期2因素,设4个淋洗量:W1(75 mm)、W2(150 mm)、W3(225 mm)和W4(300 mm),3个淋洗时期:T1(淋洗量在苗期1次淋洗)、T2(淋洗量在苗期和蕾期平均后进行2次淋洗)和T3(淋洗量在苗期、蕾期和花铃期平均后进行3次淋洗)。以生育期不设置灌溉洗盐处理(CK)为对照,共计13个处理,每个处理重复3次(表1)。生育期除洗盐定额外,各处理棉花生育期需水量按照85%ET_c(生育期需水量)进行灌溉。

表 1 2020 年和 2021 棉花生育期灌溉洗盐制度

Tab.1 Scheme of irrigation and leaching during cotton growth period in 2020 and 2021														mm
灌水时间		灌水定额												
灌溉	淋洗	CK	W1T1	W2T1	W3T1	W4T1	W1T2	W2T2	W3T2	W4T2	W1T3	W2T3	W3T3	W4T3
6月3日/6月6日		28/20	28/20	28/20	28/20	28/20	28/20	28/20	28/20	28/20	28/20	28/20	28/20	28/20
	6月9日/6月11日	0/0	75/75	150/150	225/225	300/300	37.5/37.5	75/75	112.5/112.5	150/150	25/25	50/50	75/75	100/100
6月13日/6月18日		35/32	35/32	35/32	35/32	35/32	35/32	35/32	35/32	35/32	35/32	35/32	35/32	35/32
6月23日/6月28日		36/38	36/38	36/38	36/38	36/38	36/38	36/38	36/38	36/38	36/38	36/38	36/38	36/38
7月3日/7月8日		54/55	54/55	54/55	54/55	54/55	54/55	54/55	54/55	54/55	54/55	54/55	54/55	54/55
7月13日/7月18日		51/49	51/49	51/49	51/49	51/49	51/49	51/49	51/49	51/49	51/49	51/49	51/49	51/49
	7月17日/7月14日	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	37.5/37.5	75/75	112.5/112.5	150/150	25/25	50/50	75/75	100/100
7月25日/7月28日		51/46	51/46	51/46	51/46	51/46	51/46	51/46	51/46	51/46	51/46	51/46	51/46	51/46
8月4日/8月7日		50/47	50/47	50/47	50/47	50/47	50/47	50/47	50/47	50/47	50/47	50/47	50/47	50/47
	8月9日/8月14日	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	25/25	50/50	75/75	100/100
8月14日/8月17日		29/27	29/27	29/27	29/27	29/27	29/27	29/27	29/27	29/27	29/27	29/27	29/27	29/27
8月24日/8月27日		26/26	26/26	26/26	26/26	26/26	26/26	26/26	26/26	26/26	26/26	26/26	26/26	26/26

注:/左边为2020年数据,/右边为2021年数据。

棉花生育期需水量(ET_c,mm/d)由试验田气象站提供的数据计算所得,计算式为

$$ET_c = K_c ET_0 \tag{1}$$

式中 K_c——棉花作物系数,棉花现蕾前期取0.75、花铃期取1.15、吐絮期取0.70^[12]

ET₀——棉花参考作物蒸发蒸腾量,计算公式见文献[13]

1.3 测定内容与方法

1.3.1 土壤含盐量测定

为了解棉田淋洗下土壤剖面盐分变化情况,使用土钻(内径为5 cm,钻头长20 cm,钻身长100 cm)分别在膜中(距膜边53 cm)、滴灌带正下方(距膜边30 cm)、窄行(距膜边15 cm)和膜边区域深度0~100 cm按照间隔20 cm收集土样。将收集的土样经自然风干和研磨,过2 cm筛,按土水质量比为1:5提取土壤可溶性盐分,使用雷磁 DDS-307A 型电导率仪测定电导率,根据电导率和含盐量率定函数,换算成土壤含盐量,计算式为

$$SC = 3.4665EC \tag{2}$$

式中 SC——含盐量,g/kg
EC——电导率,dS/m

1.3.2 地上部干物质累积量测定和 Logistic 非线性拟合

2020 年和 2021 年分别在棉花播种后 41、73、108、133、150 d 和 41、74、104、137、149 d 取样,于每个试验小区选取有代表性的植株 3 株,将茎基部与地上部分离,去除表面污垢后,放入干燥箱 105℃ 杀青 2 h,并继续 75℃ 下干燥至恒定质量,采用电子天平称量并计算单株地上干物质质量,最后换算成群体生物量(kg/hm²)。

将测定的干物质质量用 Logistic 函数进行非线性拟合,Logistic 函数表达式为^[14]

$$f(t) = \frac{k}{1 + ae^{-bt}} \tag{3}$$

式中 f(t)——地上部干物质累积量,kg/hm²
k——相应的潜在最大值,kg/hm²
a——与干物质有关的阻滞系数

b ——干物质增长率
 t ——生长时间,d

对方程(3)求一阶导数,可得生育期干物质累积速率,对方程求二阶导数,并求其特征值方程可得累积持续时间。特征值方程和平均累积速率 v 分别为^[15]

$$t_1 = (\ln a - 1.317)/b \tag{4}$$

$$t_2 = (\ln a + 1.317)/b \tag{5}$$

$$v = (f(t_1) - f(t_2))/(t_1 - t_2) \tag{6}$$

式中 t_1 ——地上部干物质快增期开始时间
 t_2 ——地上部干物质快增期结束时间

根据 t_1 和 t_2 可将干物质累积过程分为渐增期、快增期和缓增期^[16]。

1.3.3 棉花产量和经济系数测定

棉花收获期,于试验小区中挑选3个长势均一的区域,在该区域测定株数、单株有效铃质量、总铃数。然后在该区域植株的上中下3层拾取100个有效铃计算单铃质量进而估算籽棉产量。经济系数为籽棉产量(kg/hm²)与地上部干物质累积量(kg/hm²)比值。

1.3.4 基于整体差异组合模型的盐碱化棉田综合指标评价

(1)将 n 个评价对象(即试验处理数)和 m 个评价方法(主成分分析法、TOPSIS 模型和隶属函数分析法、灰色关联度分析法)的评价值构建原始矩阵 A (不失一般性,设 $n \geq 3, m \geq 3$),表达式为

$$A = [f(x_i, y_j)]_{n \times m} = \begin{bmatrix} f(x_1, y_1) & f(x_1, y_2) & \cdots & f(x_1, y_m) \\ f(x_2, y_1) & f(x_2, y_2) & \cdots & f(x_2, y_m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(x_n, y_1) & f(x_n, y_2) & \cdots & f(x_n, y_m) \end{bmatrix} \tag{7}$$

(2)为确保多方法评价结论间的可比性,需对原始矩阵进行规范化处理得到矩阵 B ,公式为

$$B = \frac{f(x_i, y_j) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i, y_j)}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(f(x_i, y_j) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i, y_j) \right)^2}} \tag{8}$$

$(i = 1, 2 \cdots, n; j = 1, 2 \cdots, m)$

(3)将规范化处理得到的矩阵 B ,构建实对称矩阵 $C = B^T B$,并利用 Matlab 求解 C 的最大特征值及其相应的特征向量 λ' 。根据特征向量中各分量取值确定组合权向量 λ_i ,计算公式为

$$\lambda_i = \frac{\lambda'_i}{\sum_{i=1}^m \lambda'_i} \tag{9}$$

(4)将权向量代入,可求评价值 y_i ,计算公式为

$$y_i = \lambda_1 f(x_i, y_1) + \lambda_2 f(x_i, y_2) + \cdots + \lambda_m f(x_i, y_m) \tag{10}$$

$(i = 1, 2, \cdots, n)$

整体差异组合模型评价价值越大,评价对象越优,对评价对象按评价值进行排序^[17-18]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 对试验数据进行汇总、分析和计算。采用 SPSS 22.0 软件进行主成分分析和对试验数据进行方差分析(ANOVA)。隶属函数分析法、灰色关联度分析法、TOPSIS 均在 Microsoft Excel 2016 中实现。整体差异组合评价模型的最大特征值及其相应的特征向量在 Matlab - 2015b 中计算。采用 Surfer - 15.0 和 SigmaPlot - 14.0 软件作图。

2 结果

2.1 不同淋洗模式土壤含盐量

由图 2、3 可知,棉花收获期各淋洗量处理土壤盐分存在一定差异,表现为土壤含盐量与淋洗量成反比。在 2020 年和 2021 年同一淋洗时期中,土壤盐分主要在 0 ~ 60 cm 土层形成了累积,其两年在 0 ~ 100 cm 占比分别为 55.91% ~ 78.94% (2020 年)和 44.19% ~ 69.38% (2021 年)。在滴头正下方含盐量低,表明盐分被有效地淋洗至深层,且随着淋洗量的增加该现象尤为明显,如 W3T2、W4T2、W3T3 和 W4T3。另外,在同一土层深度处,各处理土壤含盐量在水平方向上与距滴头距离成正比。此外,棉花收获期土壤盐分分布表明,在 2020 年和 2021 年最佳淋洗量分别为 W4 和 W3,与 CK 处理相比,其可有效降低 0 ~ 100 cm 土壤含盐量 13.17% 和 26.57%。试验结果显示,在盐碱化棉田滴灌淋洗中,低淋洗量处理的盐分累积主要集中在土壤表层,随着淋洗量的增加,土壤中的盐分会随着水分垂直运动,使更多的盐分往深层土壤移动。

2.2 不同淋洗模式棉花地上部干物质质量

表 2 为不同淋洗模式的棉花地上部干物质质量与播后时间的 Logistic 函数拟合方程,对其求一阶导数可得棉花地上部干物质累积速率(图 4)、求二阶导数可得棉花地上部干物质累积持续时间(表 3)。由表 2 可知,两年各处理拟合方程效果良好 ($R^2 \geq 0.9654, P < 0.05$)。由图 4 可知,地上部干物质累积速率均随播后时间递进呈“慢-快-慢”单峰曲线,各处理之间的差异随着播后时间的推进而变化。在 2020 年和 2021 年相同淋洗时期中,T2 地上部干物质累积速率均随淋洗量增加先增加后减小,而在 2021 年的 T3 淋洗时期地上干物质累积速率随淋洗量增加而增加(图 4b)。

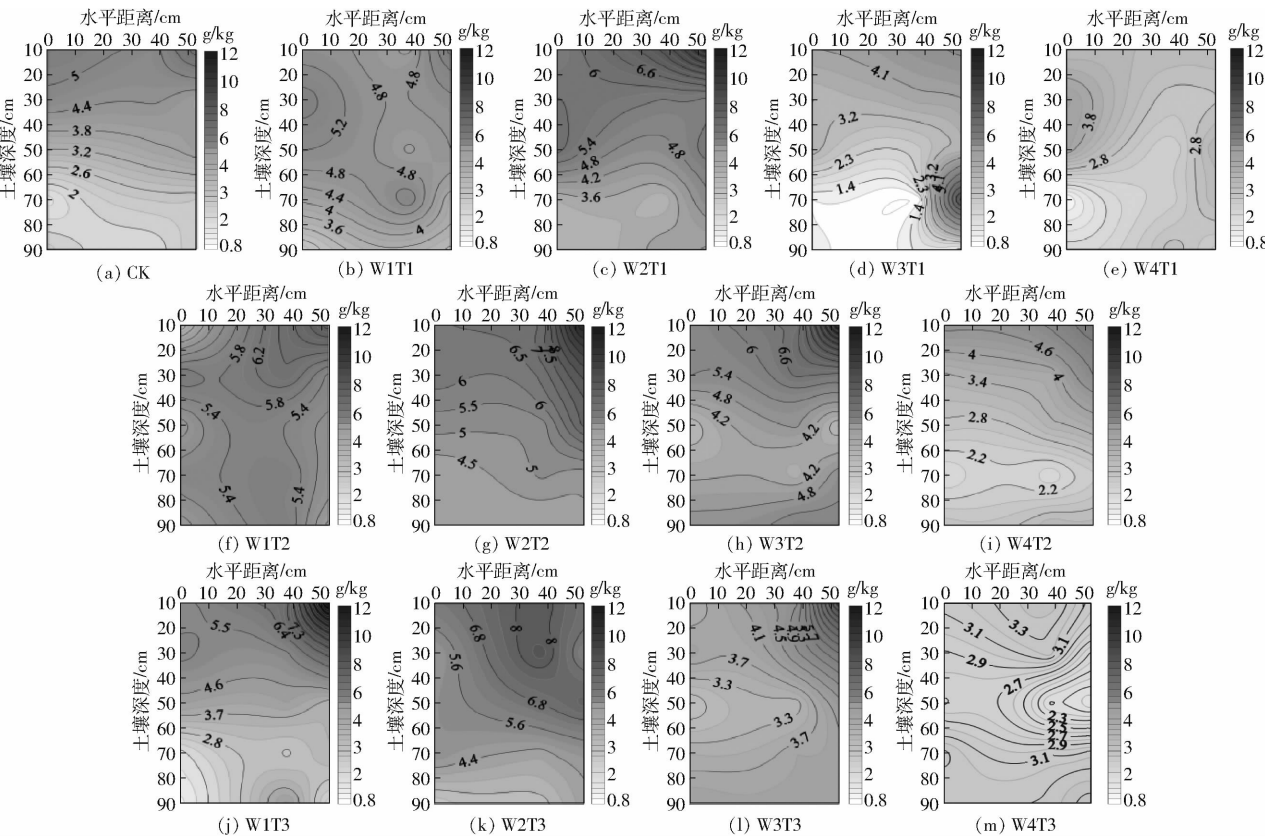


图2 滴灌淋洗条件下2020年棉花收获期土壤盐分分布

Fig.2 Distributions of soil salinity in harvest period of cotton under leaching treatments in 2020

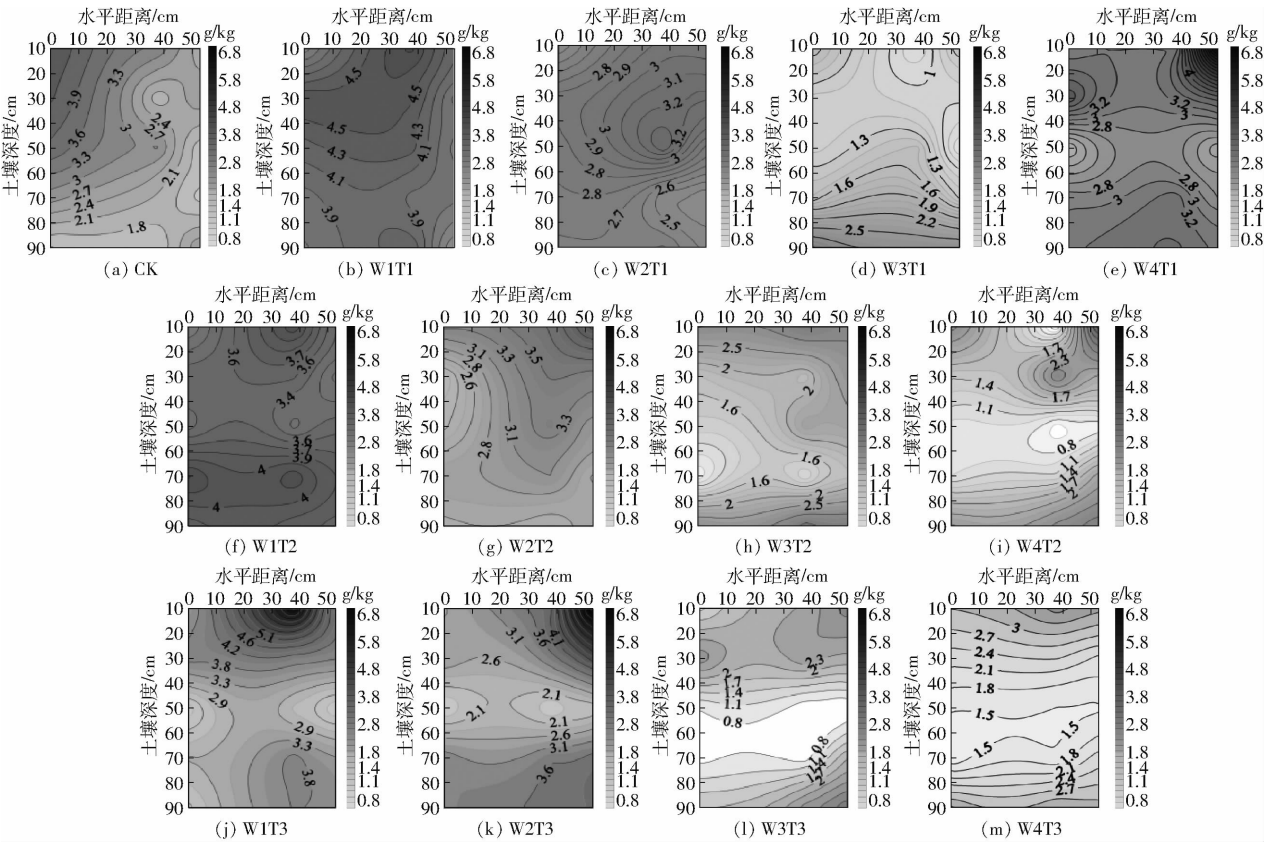


图3 滴灌淋洗条件下2021年棉花收获期土壤盐分分布

Fig.3 Distributions of soil salinity in harvest period of cotton under leaching treatments in 2021

表 2 地上部干物质质量与生长时间 Logistic 函数拟合

处理	2020 年			2021 年		
	回归方程	R^2	P	回归方程	R^2	P
CK	$f(t) = 9\,685 / (1 + 1\,888.86e^{-0.076\,2t})$	0.993\,9	<0.05	$f(t) = 11\,796 / (1 + 28\,721.09e^{-0.110\,8t})$	0.975\,5	<0.05
W1T1	$f(t) = 11\,332 / (1 + 687.11e^{-0.065\,7t})$	0.985\,5	<0.05	$f(t) = 14\,904 / (1 + 4\,725.39e^{-0.088\,0t})$	0.992\,4	<0.05
W2T1	$f(t) = 12\,050 / (1 + 16\,127.94e^{-0.098\,3t})$	0.997\,7	<0.05	$f(t) = 15\,075 / (1 + 12\,353.24e^{-0.099\,5t})$	0.999\,5	<0.01
W3T1	$f(t) = 16\,250 / (1 + 1\,123.34e^{-0.071\,3t})$	0.985\,3	<0.05	$f(t) = 20\,811 / (1 + 224.57e^{-0.051\,3t})$	0.996\,7	<0.05
W4T1	$f(t) = 16\,468 / (1 + 3\,813.72e^{-0.090\,0t})$	0.992\,1	<0.05	$f(t) = 20\,870 / (1 + 207.38e^{-0.051\,8t})$	0.998\,0	<0.01
W1T2	$f(t) = 13\,518 / (1 + 305.99e^{-0.049\,3t})$	0.999\,8	<0.01	$f(t) = 11\,777 / (1 + 7\,736.00e^{-0.096\,3t})$	0.979\,4	<0.01
W2T2	$f(t) = 13\,692 / (1 + 1\,619.71e^{-0.072\,1t})$	0.968\,9	<0.05	$f(t) = 15\,391 / (1 + 5\,228.70e^{-0.088\,3t})$	0.965\,4	<0.05
W3T2	$f(t) = 28\,883 / (1 + 11\,624.78e^{-0.092\,2t})$	0.990\,2	<0.05	$f(t) = 21\,811 / (1 + 1\,141.98e^{-0.064\,5t})$	0.998\,3	<0.01
W4T2	$f(t) = 24\,998 / (1 + 9\,881.22e^{-0.090\,7t})$	0.987\,2	<0.05	$f(t) = 22\,997 / (1 + 523.81e^{-0.061\,4t})$	0.998\,9	<0.01
W1T3	$f(t) = 12\,930 / (1 + 30\,945.48e^{-0.100\,1t})$	0.972\,6	<0.05	$f(t) = 13\,510 / (1 + 4\,277.26e^{-0.087\,2t})$	0.989\,5	<0.05
W2T3	$f(t) = 11\,791 / (1 + 2\,879.12e^{-0.083\,4t})$	0.968\,2	<0.05	$f(t) = 13\,765 / (1 + 2\,699.18e^{-0.079\,7t})$	0.996\,3	<0.05
W3T3	$f(t) = 17\,776 / (1 + 4\,473.43e^{-0.083\,6t})$	0.969\,9	<0.05	$f(t) = 14\,404 / (1 + 456.54e^{-0.063\,7t})$	0.998\,6	<0.01
W4T3	$f(t) = 18\,648 / (1 + 5\,657.94e^{-0.087\,7t})$	0.969\,3	<0.05	$f(t) = 19\,921 / (1 + 1\,460.94e^{-0.070\,7t})$	0.987\,7	<0.05

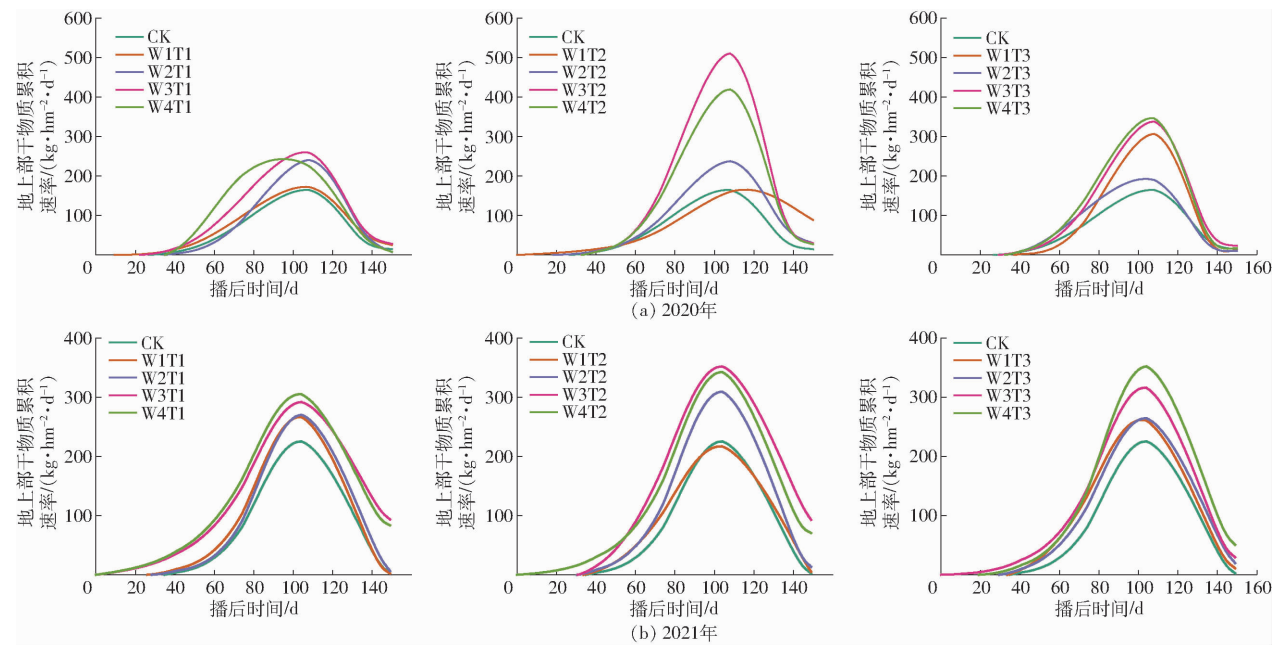


图 4 不同淋洗处理下地上部干物质累积速率变化曲线

Fig. 4 Variation curves of aboveground dry matter accumulation rate under different rinsing treatments

如表 3 所示,在 2020、2021 年,干物质快速累积期的起始时间(t_1)分别为播种后 76.99 ~ 90.14 d 和 75.46 ~ 88.74 d,干物质快速累积期的结束时间(t_2)分别为播种后 99.01 ~ 142.81 d 和 92.65 ~ 131.21 d。2020、2021 年渐增期平均累积速率分别为 24.83 ~ 62.98 kg/(hm²·d) 和 30.65 ~ 59.81 kg/(hm²·d)。快增期的同一淋洗时期内,2020、2021 年各淋洗量的地上部干物质平均累积速率最大的处理分别为 W4T1、W3T2、W4T3 和 W2T1、W4T2、W4T3,其中 W3T2 和 W2T1 处理地上部干物质平均累积速率分别在 2020、2021 年各淋洗处理中表现最大,分别为 574.21 kg/(hm²·d) 和 328.79 kg/(hm²·d),与其他两个处理相比两年分别提高 76.75%、60.18% 和

6.23%、6.50%。在 2020、2021 年,缓增期平均累积速率分别为 50.05 ~ 154.23 kg/(hm²·d) 和 46.30 ~ 163.22 kg/(hm²·d)。

2.3 不同淋洗模式籽棉产量和经济系数

由图 5a、5b(图中不同小写字母表示处理间显著差异($P < 0.05$))可知,两年籽棉产量与淋洗量均呈正相关。具体表现为在 T1 和 T2 处理中,籽棉产量随淋洗量的增加先增加后减小;而在 T3 处理中,籽棉产量却呈增加趋势。在低淋洗量 W1 中,2020 年各处理籽棉产量无显著差异,但 2021 年 T1 和 T2 处理显著高于 T3 处理($P < 0.05$);在淋洗量 W2 中,2020 年 T1 和 T3 处理籽棉产量无显著差异,但却显著低于 T2 处理,2021 年 T1 和 T2 处理籽棉产

表 3 不同处理棉花地上部干物质特征

Tab. 3 Accumulation of aboveground dry matter of cotton under different treatments							
年份	处理	渐增期		快增期		缓增期	
		持续时间/d	平均累积速率/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	持续时间/d	平均累积速率/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	持续时间/d	平均累积速率/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
2020	CK	81.58	24.83	17.42	161.48	60.99	77.86
	W1T1	79.38	29.96	40.09	163.19	40.53	53.96
	W2T1	85.16	29.89	26.80	259.64	48.04	52.41
	W3T1	80.04	42.72	36.94	253.97	43.01	75.18
	W4T1	76.99	45.14	29.27	324.88	53.74	64.11
	W1T2	89.38	31.47	53.43	146.08	17.19	85.19
	W2T2	84.23	34.25	36.53	216.39	39.24	68.30
	W3T2	87.24	62.98	28.57	574.21	44.19	154.23
	W4T2	86.90	60.76	29.04	496.99	44.06	117.10
	W1T3	90.14	30.31	26.31	283.70	43.55	61.73
	W2T3	79.72	31.21	31.58	215.55	48.70	50.05
	W3T3	84.80	44.25	31.51	325.74	43.70	83.16
	W4T3	83.51	47.15	30.03	358.48	46.46	83.00
2021	CK	80.67	30.65	11.98	285.97	67.35	87.47
	W1T1	81.18	38.76	29.93	287.49	48.89	63.32
	W2T1	81.45	39.09	26.47	328.79	52.07	60.74
	W3T1	79.87	53.91	51.35	234.02	28.79	111.08
	W4T1	77.56	55.57	50.85	236.97	31.59	106.85
	W1T2	79.30	31.36	27.35	248.60	53.35	46.30
	W2T2	82.05	39.60	29.83	297.89	48.12	66.37
	W3T2	88.74	41.35	40.84	291.08	30.43	163.22
	W4T2	80.52	59.81	42.90	309.51	36.58	115.52
	W1T3	80.78	35.30	30.21	258.23	49.01	57.22
	W2T3	82.61	35.15	33.05	240.47	44.35	63.19
	W3T3	75.46	39.92	41.35	201.12	43.19	64.86
	W4T3	84.44	49.69	37.26	308.72	38.31	100.77

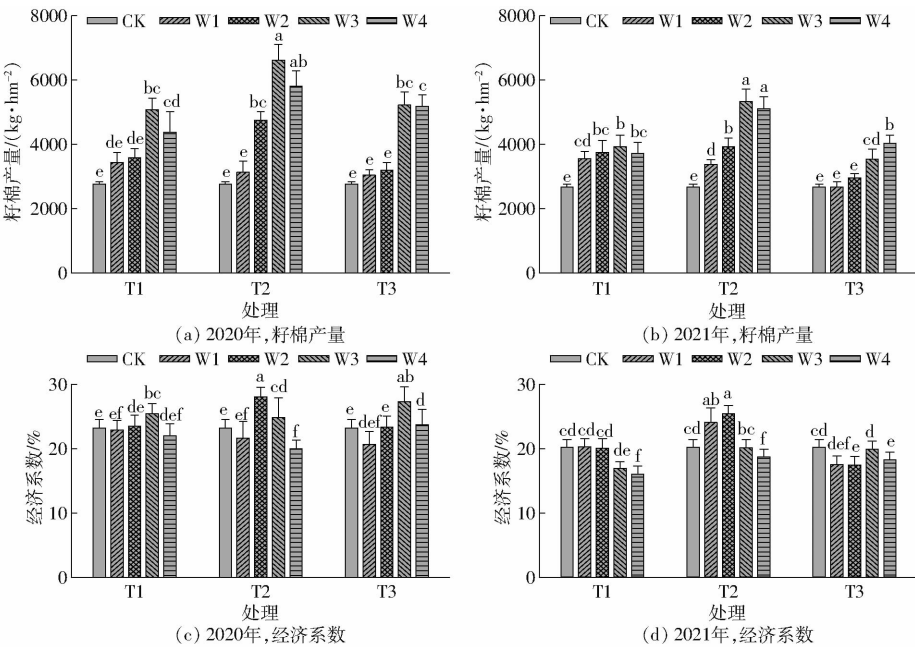


图 5 不同淋洗处理对棉花籽棉产量和经济系数的影响

Fig. 5 Effects of different leaching treatments on seed cotton yield and economic coefficient

量无显著差异,但显著高于 T3 处理 ($P < 0.05$);在淋洗量 W3 中,2020 年 T2 处理籽棉产量显著高于 T1 和 T3 处理,2021 年 T2 处理籽棉产量显著高于其他处理 ($P < 0.05$);在高淋洗量 W4 中,两年数据均显示 T2 处理籽棉产量显著高于其他处理 ($P < 0.05$),其他处理无显著差异。由两年结果可知,W3T2 处理籽棉产量最高,与 W3T1 和 W3T3 相比,2020、2021 年分别增加 30.12%、26.68% 和 35.63%、50.59%。

不同淋洗处理对棉花经济系数的影响见图 5c、5d。由图 5c、5d 可知,经济系数在不同的淋洗处理存在一定差异,表现为经济系数与淋洗量存在一定程度的负相关。具体为,在 T2 处理中,经济系数随淋洗量的增加先增加后减小。在低淋洗量 W1 中,2020 年各处理经济系数无显著差异,但 2021 年 T2 处理显著高于 T1 和 T3 处理 ($P < 0.05$);在淋洗量 W2 中,2020、2021 年 T2 处理经济系数均显著高于 T1 和 T3 处理 ($P < 0.05$);在淋洗量 W3 中,2020 年 T3 处理经济系数显著高于 T2 处理,2021 年 T3 处

理经济系数显著高于 T1 处理 ($P < 0.05$);在高淋洗量 W4 中,2020 年 T3 处理经济系数显著高于 T1 和 T2 处理,2021 年 T2 处理显著高于 T3 处理 ($P < 0.05$)。由两年结果可知,W2T2 处理经济系数最佳,与 W2T1 和 W2T3 相比,2020、2021 年分别增加 19.39%、20.00% 和 26.77%、45.68%。

2.4 基于综合模型的盐碱化棉田淋洗量和淋洗时期

进一步分析各指标间的相关性可知(图 6,PCA、GCA 和 MFA 分别表示主成分分析法、灰色关联度分析法和隶属函数分析法,*表示显著性 ($P < 0.05$),不同颜色扇形表示相关系数大小),产量与干物质累积量和经济系数显著正相关,经济系数与土壤含盐量呈显著负相关,其余各指标间无显著相关性,这进一步表明地上部干物质累积量是增产的重要因素。因此,以土壤含盐量、干物质累积量、棉花产量和经济系数为评价指标,分别采用主成分分析法、基于组合赋权的理想点法模型、灰色关联度分析法和隶属函数分析法 4 种单一评价方法对 13 个处理的盐碱化棉田进行综合评价(表 4)。

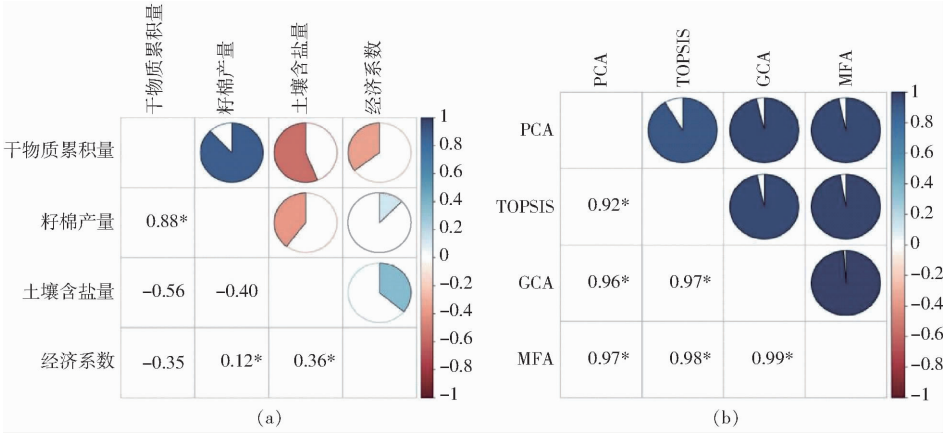


图6 棉田各指标间和评价模型评价价值间的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients between indicators in cotton fields and evaluation model values

表 4 各模型评价结果

Tab.4 Results of different evaluation models

处理	主成分分析法		TOPSIS		灰色关联度分析法		隶属函数分析法		整体差异组合评价模型	
	评价值	排名	评价值	排名	评价值	排名	评价值	排名	评价值	排名
CK	-0.969 2	11	0.298 1	9	0.296 4	10	0.261 6	9	-0.764 2	10
W1T1	-0.628 5	9	0.255 4	11	0.319 6	9	0.234 7	10	-0.732 3	9
W2T1	-0.419 6	8	0.303 0	8	0.362 2	8	0.294 4	8	-0.462 6	8
W3T1	0.755 2	4	0.534 2	3	0.605 2	3	0.598 6	3	0.967 1	3
W4T1	0.328 2	5	0.406 9	7	0.410 8	7	0.430 3	6	0.135 4	7
W1T2	-0.928 5	10	0.272 3	10	0.276 8	11	0.195 3	11	-0.906 3	11
W2T2	-0.189 2	7	0.492 6	6	0.449 9	6	0.412 9	7	0.169 5	6
W3T2	1.446 3	2	0.621 8	1	0.633 2	1	0.641 3	2	1.376 5	2
W4T2	1.623 6	1	0.578 6	2	0.625 2	2	0.692 3	1	1.409 4	1
W1T3	-1.087 7	13	0.109 7	13	0.224 8	13	0.097 8	13	-1.394 4	13
W2T3	-1.004 6	12	0.147 3	12	0.239 1	12	0.120 6	12	-1.265 2	12
W3T3	0.316 3	6	0.520 0	5	0.521 0	5	0.531 3	5	0.607 5	5
W4T3	0.757 7	3	0.524 5	4	0.564 2	4	0.578 1	4	0.859 7	4

从表 4 可得,13 个处理中,有 10 个处理(CK、W1T1、W1T2、W2T2、W3T1、W3T2、W3T3、W4T1、W4T2 和 W4T3)评价价值排名标准差介于 0~1 之间;3 个处理(W2T1、W1T3 和 W2T3)评价价值排名无标准差。可知,单一评价方法的评价结果存在差异性。而由图 6b 发现各单一模型相关系数为 0.92~0.99 之间,这表明单一模型结果之间存在良好的相关性。因此,在单一评价模型的差异性和相关性并存的条件下,需进一步探索综合评价方法。进一步采用整体差异组合模型对单一模型的评价价值进行综合评价,并按照评价价值越大评价对象越优的原则进行排序,由大到小依次为 W4T2、W3T2、W3T1、W4T3、W3T3、W2T2、W4T1、W2T1、W1T1、CK、W1T2、W2T3、W1T3。由表 4 可知,W4T2 评价价值仅比 W3T2 增加 2.38%,而淋洗水量却增加 75 mm(棉花生长季多年平均有效降雨量的 2.45 倍)。考虑到南疆地区干旱少雨,推荐 W3T2 为实现该地区盐碱化棉田生育期滴灌淋洗节水控盐高效生产模式。

3 讨论

3.1 不同淋洗模式对土壤盐分的影响

降低土壤盐分可实现盐碱化棉田可持续发展^[19-20]。有学者根据滴灌土壤湿润体内盐分变化将土壤湿润体划分为积盐区和脱盐区^[21],而淋洗作为物理方式进行脱盐已广泛得到运用^[22]。本研究发现,在同一淋洗时期下,高淋洗量土壤含盐量较低,说明盐分可以被淋洗。此外,在盐分分布方面,滴灌带正下方盐分较少而水平方向上由于“盐随水动”,使盐分被淋洗至浸润体外缘,使根区土壤形成低盐区^[23]。加之南疆地区干旱少雨,蒸发强烈,覆膜可有效削弱土壤水分垂直方向的蒸发,能增强其侧向运移,导致盐分向作物生长行间裸露区域迁移。这使得膜边土层含盐量显著高于宽行与窄行,同时膜边因土壤蒸发和无覆膜,形成“膜外表聚型”^[24]。从本试验结果来看,淋洗量为 300 mm 对盐碱化棉田脱盐效果最好。

3.2 不同淋洗模式对棉花干物质质量、产量和经济系数的影响

干物质是棉花产量的基础,高干物质累积可实现高产^[15,25]。然而作物干物质受到诸多因素限制,包括灌溉^[26]、施肥^[27]和盐分^[28]。YAZAR 等^[29]发现棉花高干物质质量可通过合适的灌溉实现。本研究也发现了类似结果,表现为地上部干物质累积量随淋洗量增加呈增加趋势。此外,本研究发现籽棉产量与淋洗量呈正相关(图 5),相似结果也可从 XIAO

等^[30]研究发现。根据各指标间相关性可得,干物质累积量与产量之间的相关性最好(相关系数为 0.88)。经济系数可说明作物生物产量转运成经济产品的能力^[31]。本研究发现,在淋洗时期 T2 和 T3 处理下,经济系数表现为随淋洗量增加呈先增加后减小趋势,说明降低土壤盐分可提高干物质累积能力并同时将营养物质集中于棉铃以保障产量^[32]。因此,可通过在棉花生育期淋洗,进行土壤水盐调控,使棉花避免遭受盐分胁迫^[33],保障棉花干物质累积,从而提高棉花产量。从两年试验结果可得,225 mm 分两次在苗期和蕾期进行淋洗可实现棉花最优干物质累积量和产量。

3.3 基于综合模型的盐碱化棉田最佳淋洗模式优化

在盐碱化农田中,基于不同的作物生长指标构建评价模型和分析评价模型对不同淋洗模式的响应,可为盐碱化农田水盐调控提供理论依据。有学者采用评价模型对棉花品质进行综合评价^[34],然而盐碱土含盐量过高会限制作物生长^[33]。本研究利用主成分分析法、TOPSIS、灰色关联度分析法和隶属函数分析法以及综合评价模型对盐碱化棉田各处理的指标分析发现,各处理之间的单一评价结果存在一定差异性(表 4)。造成该结果的原因可能是各单一评价模型分析的角度和利用的信息不同^[35-36]。此外,本研究发现,4 种单一评价模型间的相关系数表明主成分分析法与其他 3 种单一评价模型相关性较弱(相关系数为 0.92~0.97),加之计算较复杂,因而不宜推荐使用。目前,针对单一评价模型法组合的实用性^[37],有研究提出在单一组合评价基础上进行二次组合^[38],但这增加了计算复杂度^[17],不利于实际运用。另外,有研究表明整体差异组合评价模型能最大限度利用评价结果,使组合结果更为精确^[18]。因此,本文采用整体差异组合评价模型将 4 种单一评价模型评价价值进行收集和评价发现,225 mm 在棉花苗期和蕾期进行盐分淋洗可实现盐碱化棉田水盐科学管理。

4 结论

(1)土壤含盐量与淋洗量成反比。在同一土层中,盐分随与滴头距离增加而增加。低淋洗量处理的盐分主要在土壤表层累积,随着淋洗量增加,土壤盐分往深层土壤移动。

(2)地上部干物质累积量与淋洗量成正比,且累积速率均随播后时间的递进呈“慢-快-慢”的单峰曲线。干物质快速累积期起始时间分别为播种后 75.46~90.14 d,干物质快速累积期结束时间分别

为播种后 92.65 ~ 142.81 d。

(3)主成分分析法、基于组合赋权的 TOPSIS 模型、灰色关联度分析法与隶属函数分析法之间的相关系数均值为 0.92 ~ 0.99。基于整体差异组合评

价模型得出 W4T2 处理评价价值最高。而综合考虑到南疆地区水资源短缺,推荐淋洗量 225 mm 和淋洗时期为苗期 + 蕾期为实现南疆盐碱棉田生育期滴灌淋洗最佳节水控盐高效生产模式。

参 考 文 献

[1] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2021.

[2] 李云霞,王国栋,刘瑜,等. 新疆典型绿洲灌区土壤理化性状与盐分离子分布特征[J]. 农业机械学报,2024, 55(7): 357 – 364, 414.
LI Yunxia, WANG Guodong, LIU Yu, et al. Distribution characteristics of soil physicochemical properties and salt ions in typical oasis irrigation areas of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(7): 357 – 364, 414. (in Chinese)

[3] MINHASA P, RAMOS T, BEN-GAL A, et al. Coping with salinity in irrigated agriculture: crop evapotranspiration and water management issues[J]. Agricultural Water Management, 2020, 227: 105832.

[4] 侯翔皓. 南疆盐碱化农田膜下滴灌棉花水氮耦合效应与高效利用模式研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022.
HOU Xianghao. Study on coupling effect of water and nitrogen and efficient utilization mode of cotton under mulched drip irrigation in salinized fields in South of Xinjiang[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[5] 姬清元,张富仓,肖超,等. 土壤水分调控对棉花生长和土壤水盐分布的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(1): 40 – 50,74.
JI Qingyuan, ZHANG Fucang, XIAO Chao, et al. Effects of soil water regulation on cotton growth and soil water-salt distribution[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science), 2023, 51(1): 40 – 50, 74. (in Chinese)

[6] 何平如,张富仓,范军亮,等. 土壤水分调控对南疆滴灌棉花生长、品质及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020,38(4):39 – 46.
HE Pingru, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Effects of soil moisture regulation on growth, quality and water use of cotton under drip irrigation in Southern Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 39 – 46. (in Chinese)

[7] LIN S D, WANG Q J, DENG M J, et al. Assessing the influence of water fertilizer, and climate factors on seed cotton yield under mulched drip irrigation in Xinjiang agricultural regions[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 152: 127034.

[8] 贵会平,董强,张恒恒,等. 棉花苗期耐低氮基因型初步筛选[J]. 棉花学报, 2018,30(4):326 – 337.
GUI Huiping, DONG Qiang, ZHANG Hengheng, et al. Preliminary screening of low nitrogen-tolerant cotton genotypes at seedling stage[J]. Cotton Science, 2018, 30(4): 326 – 337. (in Chinese)

[9] 柳玉鹏,李一军. 基于降维思想的客观组合评价模型[J]. 运筹与管理, 2009(4): 38 – 43.
LIU Yupeng, LI Yijun. Objective combined evaluation model based on dimension reduction[J]. Operations Research and Management Science, 2009(4): 38 – 43. (in Chinese)

[10] 洪霞,胡田田,刘杰,等. 基于方法集的番茄营养品质组合评价模型构建及其对水肥供应的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2019,37(3):129 – 138.
HONG Xia, HU Tiantian, LIU Jie, et al. Construction of comprehensive evaluation model for tomato nutrition quality based on method set and its response to water and fertilizer supply[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 129 – 138. (in Chinese)

[11] 陈国宏,李美娟. 基于方法集的综合评价方法集化研究[J]. 中国管理科学, 2004,12(1):102 – 106.
CHEN Guohong, LI Meijuan. The research on the comprehensive evaluation method integration based on method set[J]. Chinese Journal of Management Science, 2004,12(1): 102 – 106. (in Chinese)

[12] HOU X H, FAN J L, ZHANG F C, et al. Determining water use and crop coefficients of drip-irrigated cotton in South Xinjiang of China under various irrigation amounts[J]. Industrial Crops & Products, 2022, 176: 114376.

[13] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998.

[14] SEPASKHAH A R, FAHANDEZH-SAADI S, ZAND-PAR S. Logistic model application for prediction of maize yield under water and nitrogen management[J]. Agricultural Water Management, 2011, 99(1): 51 – 57.

[15] YANG G, TANG H, NIE Y, et al. Responses of cotton growth, yield, and biomass to nitrogen split application ratio[J]. European Journal Of Agronomy, 2011, 35: 164 – 170.

[16] 魏廷邦,柴强,王伟民,等. 水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应[J]. 中国农业科学,2019,52(3):428 – 444.
WEI Tingbang, CHAI Qiang, WANG Weimin, et al. Effects of coupling of irrigation and nitrogen application as well as planting density on photosynthesis and dry matter accumulation characteristics of maize in oasis irrigated areas[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(3): 428 – 444. (in Chinese)

[17] 胡田田,何琼,洪霞,等. 基于模糊 Borda 组合模型评价番茄产量及品质对水肥供应响应[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19):142 – 151.
HU Tiantian, HE Qiong, HONG Xia, et al. Response of tomato yield-quality evaluated by fuzzy Borda combined model to irrigation and fertilization supply[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 142 – 151. (in Chinese)

[18] 郭亚军,易平涛. 一种基于整体差异的客观组合评价法[J]. 中国管理科学, 2006,14(3):60 – 64.
GUO Yajun, YI Pingtao. Whole diversity-based reasoning for objective combined evaluation[J]. Chinese Journal of

- Management Science, 2006, 14(3): 60–64. (in Chinese)
- [19] YANG G, LI F D, TIAN L J, et al. Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under brackish water mulched drip irrigation[J]. Soil Tillage Research, 2020, 199: 104592.
- [20] LIANG J P, SHI W J. Cotton/halophytes intercropping decreases salt accumulation and improves soil physicochemical properties and crop productivity in saline-alkali soils under mulched drip irrigation: a three-year field experiment[J]. Field Crops Research, 2021, 262: 108027.
- [21] 王全九, 王文焰, 吕殿青, 等. 膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 54–57.
WANG Quanju, WANG Wenyan, LÜ Dianqing, et al. Water and salt transport features for salt-affected soil through drip irrigation under film[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(4): 54–57. (in Chinese)
- [22] LIU X Q, YAN F L, WU L F, et al. Leaching amount and timing modified the ionic composition of saline-alkaline soil and increased seed cotton yield under mulched drip irrigation[J]. Field Crops Research, 2023, 299: 108988.
- [23] 张伟, 吕新, 李鲁华, 等. 新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 15–19.
ZHANG Wei, LÜ Xin, LI Luhua, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under the plastic mulch in Xinjiang region[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 15–19. (in Chinese)
- [24] 陈文娟, 李明思, 秦文豹, 等. 水平翻耕措施对覆膜滴灌土壤水盐分布调控效果研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 276–286.
CHEN Wenjuan, LI Mingsi, QIN Wenbao, et al. Effect of horizontal tillage measures regulatory on soil water and salt distribution under mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 276–286. (in Chinese)
- [25] YANG G Z, CHU K Y, TANG H Y, et al. Fertilizer ¹⁵N accumulation, recovery and distribution in cotton plant as affected by N rate and split[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(6): 999–1007.
- [26] WANG H D, WU L F, WANG X K, et al. Optimization of water and fertilizer management improves yield, water, nitrogen, phosphorus and potassium uptake and use efficiency of cotton under drip fertigation[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106662.
- [27] 石洪亮, 张巨松, 严青青, 等. 氮肥对非充分灌溉下棉花产量及品质的补偿作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 134–145.
SHI Hongliang, ZHANG Jusong, YAN Qingqing, et al. Compensation effects of nitrogen fertilizer on yield and quality of cotton under insufficient irrigation[J]. Plant Nutrition Fertilizer Science, 2018, 24(1): 134–145. (in Chinese)
- [28] QIU Y, FAN Y Q, CHEN Y, et al. Response of dry matter and water use efficiency of alfalfa to water and salinity stress in arid and semiarid regions of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 254: 106934.
- [29] YAZAR A, SEZEN S M, SESVEREN S. LEPA and trickle irrigation of cotton in the Southeast Anatolia project (GAP) area in Turkey[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(3): 189–203.
- [30] XIAO C, LI M, FAN J L, et al. Salt leaching with brackish water during growing season improves cotton growth and productivity, water use efficiency and soil sustainability in southern Xinjiang[J]. Water, 2021, 13: 2602.
- [31] 赵洪亮, 于谦林, 卢合全, 等. 山东生态条件下纯作春棉的适宜密度研究[J]. 山东农业科学, 2010(12): 18–21.
ZHAO Hongliang, YU Qianlin, LU Hequan, et al. Optimal plant density of spring cotton under monoculture in Shangdong ecological conditions[J]. Shangdong Agricultural Science, 2010(12): 18–21. (in Chinese)
- [32] 赵鑫琳, 邢俊刚, 薛丽华, 等. 播种模式对新疆小麦干物质积累和产量及水分利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 44(5): 1–9.
ZHAO Xinlin, XING Jungang, XUE Lihua, et al. Effects of sowing patterns on dry matter accumulation, yield, and water use efficiency of wheat in Xinjiang[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 44(5): 1–9. (in Chinese)
- [33] ABDELRAHEEM A, ESMAEILI N, O'CONNELL M, et al. Progress and perspective on drought and salt stress tolerance in cotton[J]. Industrial Crops & Products, 2019, 130: 118–129.
- [34] HOU X H, FAN J L, HU W H, et al. Optimal irrigation amount and nitrogen rate improved seed cotton yield while maintaining fiber quality of drip-fertigated cotton in Northwest China[J]. Industrial Crops & Products, 2021, 170: 113710.
- [35] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 基于评价模型的宁夏沙土春玉米最佳灌水施氮量研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 258–265.
YAN Fulai, ZHANG Fucang, FAN Xingke, et al. Optimal irrigation and nitrogen application amounts for spring maize based on evaluation model in sandy soil area in Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 258–265. (in Chinese)
- [36] 严海欧, 鲁富宽. DTOPSIS 法在番茄品种综合评价中的应用[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 175–177.
YAN Haiou, LU Fukuan. Application of DTOPSIS in integrative evaluation of tomato varieties[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science), 2011, 32(3): 175–177. (in Chinese)
- [37] 林元庆, 陈加良. 方法群评价中权重集化问题的研究[J]. 中国管理科学, 2002, 10(增刊): 20–22.
LIN Yuanqing, CHEN Jialiang. Study on combination method of weighting set[J]. Chinese Journal of Management Science, 2002, 10(Supp.): 20–22. (in Chinese)
- [38] 彭张林, 张强, 王素凤, 等. 基于评价结论的二次组合评价方法研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(9): 156–164.
PENG Zhanglin, ZHANG Qiang, WANG Sufeng, et al. Research on a recombination evaluation approach based on the previous evaluation results[J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(9): 156–164. (in Chinese)