

DOI: 10.11766/trxb201807240311

# 滨海盐碱地水盐时空变化特征及对棉花光合生产的影响\*

冯国艺 张 谦 祁 虹 雷晓鹏 王树林 王 燕 杜海英  
梁青龙 林永增<sup>†</sup>

(河北省农林科学院棉花研究所/农业部黄淮海半干旱区棉花生物学与遗传育种重点实验室, 石家庄 050051)

**摘 要** 为研究滨海盐碱地土壤水盐空间分布及运移变化对棉花光合生产和产量的影响, 并探讨棉田地形和土壤容重对滨海盐碱地水盐空间分布的影响方式, 在位置相近区域选取海拔和容重差异较大的4块棉田, 于4—10月份测定土壤0~200 cm深度水分、盐分和pH等空间分布特征, 分析其对棉花光合生产和产量的影响。研究表明, 轻度盐碱棉田海拔较高, 在141~160 cm处形成“高容重隔层”, 土壤盐分和pH较低, 雨季(7—8月份)土壤水分较低, 生育后期(9—10月份)土壤水分明显高于中度盐碱棉田, 棉花遭受盐碱胁迫较小, 光合生产与水热资源吻合度高, 长期处于物质积累活跃期; 中度盐碱棉田较高的海拔和容重阻滞了土壤盐分和pH上升, 在雨季盐碱胁迫得到解除, 但棉花生育早期(4—6月份)和后期仍有明显盐碱胁迫, 光合生产与光热资源丰富期吻合度较差; 重度盐碱棉田海拔较低, 容重差异未对水盐运移规律产生明显影响, 长期处于高度盐碱胁迫之下, 光合生产能力和产量水平低下。滨海盐碱地改良采用适当抬高地表高度并形成一定厚度的高容重“隔层”, 增强土壤蓄排水能力, 是一种效果持续并有利于作物光合生产的改良措施。

**关键词** 滨海盐碱地; 棉花; 水盐运移; 光合生产; 时空变化

**中图分类号** S562; S153.4 **文献标识码** A

盐碱地广泛分布于世界100多个国家, 据联合国粮食及农业组织(FAO)统计, 全世界盐渍土总面积约为10亿 $\text{hm}^2$ , 约占陆地总面积的3.1%<sup>[1]</sup>。盐碱地具有巨大的开发利用潜力, 我国具有农业利用潜力的盐碱地约占全国耕地面积的10%<sup>[2]</sup>, 盐碱地的开发利用已成为解决社会用地与耕地矛盾、实现农业可持续发展的重要途径之一。我国滨海盐碱地具有相当大的面积, 占全国盐碱地面积的40%<sup>[3-4]</sup>, 该区域一般年降水量均在500 mm以上, 农业生产

开发利用潜力巨大<sup>[5]</sup>。滨海盐碱地土壤盐碱化影响土壤的理化性质和植物生长<sup>[6]</sup>; 改造治理土壤盐碱化并合理开发利用滨海盐碱地资源, 是我国解决耕地资源锐减和保证粮食安全生产的重要途径之一。

滨海盐碱地土壤盐分主要来自于地下水, 其矿化度多少主要与海水的距离有关<sup>[7]</sup>。如何阻断滨海盐碱地地下潜水上升, 实现降低土壤盐分, 从而缓解对植物的盐碱胁迫成为滨海盐碱地改良的有效途径之一。众多学者采取了许多措施对滨海盐碱地

\* 国家自然科学基金项目(31701380)和河北省自然科学基金项目(C2015301051)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31701380) and the Natural Science Foundation of Hebei Province (No. C2015301051)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: 13503335757@163.com

作者简介: 冯国艺(1982—), 男, 河北邢台人, 博士, 副研究员, 主要从事盐碱地改良及植棉技术研究。E-mail: fgy\_2010@sina.com

收稿日期: 2018-07-24; 收到修改稿日期: 2018-11-29; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-01-08

进行改造, 并对盐碱地改良措施影响土壤理化性质及植物光合生产的作用机理进行了深入研究<sup>[8-11]</sup>, 并对不同盐碱程度耕层的盐分和养分季节性变化对产量的影响进行了分析<sup>[12]</sup>。但由于滨海盐碱地土壤盐分空间分布受地形<sup>[13]</sup>、土壤质地<sup>[14]</sup>和气候环境<sup>[15]</sup>等因素的差异影响, 生产实践过程中出现在同一地区地下水矿化度相同的情况下同一改良措施改良效果差异较大的现象。以往研究中滨海盐碱地土壤水盐空间分布变化多用来评价改良措施效果, 对土壤水盐运移情况的研究较多集中在某一时期或部分土层, 对作物生育期内地形和土壤质地情况对土壤水盐空间分布变化的影响以及土壤水盐空间分布变化对作物光合生产的影响关注较少, 从而导致据某一时期判定的土壤改良效果与作物生产情况不一致的情况。因此结合滨海盐碱地气候特点, 结合地形和土壤质地情况的差异, 研究作物生育期内滨海盐碱地水盐空间分布特征, 并分析其对作物光合生产和产量影响, 将为改良措施制定和判定的客观性和全面性提供一定理论依据。

棉花耐盐性较强, 被公认为是开发盐碱地的先锋作物<sup>[4]</sup>, 而且棉花是中国重要的经济作物, 种植面积约占世界的15%, 产量约占世界的25%<sup>[16]</sup>。

因此, 本研究选取滨海同一区域内自然状态下海拔和容重差异较大不同盐碱程度的棉田, 结合滨海地区棉花生产和气候降水情况, 分4—6月、7—8月和9—10月3个时段, 对盐碱棉田0~200 cm土层水盐空间分布规律进行研究, 并分析其对棉花光合生产和产量的影响, 探讨不同盐碱程度滨海盐碱地水盐运移规律及其影响因素, 阐明其对棉花光合生产的影响机制, 分析地形和容重复合效应对其作用机理, 并探讨不同土壤水盐空间分布特征下棉花光合生产特点, 为滨海盐碱地改良和利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验概况

试验于2015—2016年在河北省国营海兴农场(38° 21' N, 117° 31' E)进行。选取地形、海拔和土壤容重具有较大差异的4块棉田(面积均大于3.0 hm<sup>2</sup>), 各棉田土质为滨海盐渍土, 参考前人对滨海盐碱地的划分方法<sup>[17]</sup>, 根据4月下旬耕层(0~20 cm)含盐量将4块棉田划分3种盐碱程度, 各棉田地形及地下水情况如表1所示, 耕层土壤盐分状况如表2所示。

表1 不同盐碱程度棉田地形水文状况

Table 1 Terrain and hydrology status of the cotton fields different in saline-alkali level

棉田代号 Code name	耕层含盐量 Salt content of plow-layer (g·kg <sup>-1</sup> )	盐碱程度 Saline-alkali level	海拔 Elevation/m	地下水 Groundwater	
				水位 Table/m	矿化度 Salinity / (g·L <sup>-1</sup> )
A	A1	重度Severe	4.48 ± 0.02b	1.14 ± 0.05b	7.20 ± 0.35a
	A2			1.18 ± 0.06b	7.14 ± 0.32a
B	3.0 ~ 5.0	中度Moderate	6.13 ± 0.03a	2.78 ± 0.14a	7.18 ± 0.30a
C	1.0 ~ 3.0	轻度Mild	6.19 ± 0.04a	2.73 ± 0.13a	7.04 ± 0.31a

注: 同一列不同字母表示在0.05水平上差异显著 Note: Different letters in the same column mean significant difference at the 0.05 probability level

前茬作物均为棉花, 一年一熟制。棉花品种为冀棉228, 2015年4月21日、2016年4月23日抢墒播种, 行距配置为(90+45) cm, 播种时将地表5cm土层拨到膜间, 并在开沟器犁出的10 cm左右深的窄沟中播种, 并在宽行中间开施肥沟(15 cm左

右深)施入底肥; 播种时施入尿素450 kg·hm<sup>-2</sup>, 过磷酸钙750 kg·hm<sup>-2</sup>。采用宽膜覆盖栽培, 1膜2行, 先点播后铺膜。7月20日完成打顶, 雨季追肥1次(尿素150 kg·hm<sup>-2</sup>), 简化整枝, 化控、病虫害防治等田间管理同当地农业生产传统措施。对各

棉田进行生育时期调查, 将50%棉苗子叶展平的日期记为出苗期, 将50%棉株现蕾、开花、吐絮的日期分别记为现蕾期、开花期和吐絮期。各棉田棉花生育进程情况如表3所示。

表2 不同盐碱程度棉田土壤养分状况

Table 2 Soil nutrient status of the cotton fields different in saline-alkali level

棉田代号 Code name	有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkali hydrolysable nitrogen/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg·kg <sup>-1</sup> )
A A1	7.67 ± 0.31c	0.44 ± 0.02c	20.06 ± 1.00c	3.88 ± 0.15c	215.54 ± 9.27a
A A2	7.33 ± 0.28c	0.42 ± 0.02c	19.64 ± 0.92c	3.73 ± 0.16c	218.26 ± 8.87a
B	8.88 ± 0.44b	0.71 ± 0.03b	25.71 ± 1.26b	9.62 ± 0.38b	198.63 ± 9.31b
C	10.27 ± 0.50a	0.82 ± 0.03a	35.43 ± 1.47a	11.71 ± 0.48a	173.88 ± 6.69c

注: 同一列不同字母表示在0.05水平上差异显著Note: Different letters in the same column mean significant difference at the 0.05 probability level

表3 棉花生育进程调查

Table 3 Monitoring of growing processes of the cotton

年份 Year	棉田代号 Code name	播种日期 Sowing date (mm-dd)	出苗期 Germinating stage (mm-dd)	现蕾期 Squaring stage (mm-dd)	开花期 Flowering stage (mm-dd)	吐絮期 Boll opening stage (mm-dd)	
2015	A	A1	04-21	05-01	06-08	07-05	08-22
		A2	04-21	05-01	06-08	07-06	08-23
	B	04-21	04-30	06-09	07-09	08-30	
	C	04-21	04-28	06-11	07-07	08-25	
2016	A	A1	04-23	05-03	06-10	07-06	08-22
		A2	04-23	05-03	06-09	07-04	08-20
	B	04-23	05-01	06-11	07-10	09-02	
	C	04-23	04-29	06-13	07-08	08-26	

## 1.2 测试项目与方法

(1) 海拔和土壤容重。用GPS对取样棉田进行海拔定位, 每块棉田测定10次后取平均值。将棉田0~200 cm等分为10个土层, 通过环刀法测定不同层次容重; 每个棉田选6个点测定。具体方法为: 将环刀托放在已知重量的环刀上, 环刀内壁涂上少量凡士林, 将环刀刃口向下垂直压入土中, 直至环刀筒中充满样品为止。把装有样品的环刀两端立即加盖。随即称重(精确至0.01克), 并记录。土壤容重计算公式为:  $R_s = G \times 100 / (V \times (100 + W))$ , 式中,  $R_s$ 为土壤容重,  $G$ 为环刀内湿样重,  $V$ 为环刀容积;  $W$ 为样品含水率(%)。

(2) 土壤水盐含量、pH。在棉花整个生育期(4到10月), 将棉田0~200 cm等分为10个土

层, 每月通过取土方法对土壤中水分和盐分进行测定, 为减小土壤中的水盐分布随时间的变异性对取样的影响, 每次取土在一天内完成。取样后称量, 105℃烘干至恒重(6~8h), 干燥器内冷却30 min, 然后称量测定土样的质量含水率; 将烘干土与水按1:5配置成浸提液; 利用PHS-3型pH酸度计测定pH, DDS2307型电导仪测定电导值, 按照公式 $y = 2.8311x + 0.2932$ 换算获得土壤含盐量, 其中 $y$ 为含盐量(g·kg<sup>-1</sup>),  $x$ 为电导率(ms·cm<sup>-1</sup>)。每个棉田选6个点测定。

(3) 干物质积累分配和产量。在各个棉田选取生长发育具有代表性的棉株6株, 分解并在105℃下杀青30 min, 80℃下完全烘干后称重; 用Logistic方程 $y = a / (1 + be^{-cx})$ 对棉株光合物质积累过程进行模拟。

(4) 测产。收获前各个棉田随机选取6个点，每个取样点面积30 m<sup>2</sup>，调查各样点全部株数和铃数，折算出单株结铃数和单位面积总铃数，以实收籽棉产量计产；每个点随机选取窄行相邻2行，每行逐株调查混收10棵，风干测定平均铃重，并轧花后测定衣分，并据其与衣分计算皮棉产量。

### 1.3 数据处理

试验数据用SPSS11.0进行统计分析，用SigmaPlot 10.0作图。

## 2 结 果

### 2.1 不同盐碱程度棉田土壤容重空间变化特征

土壤容重是最重要的土壤物理性质之一，反映土壤入渗性能、持水能力和溶质迁移潜力等。2015年和2016年对不同类型棉田0~200 cm土层容重测定表明，不同类型棉田土壤容重除在个别层次明显增大外，土壤容重均自上而下存在逐渐增大趋势；除“隔层”外，0~140 cm土层重度盐碱A1和轻度盐碱棉田较小且无明显差异，重度盐碱A2和中度盐碱棉田较大且无明显差异；重度盐碱A2较A1棉田高5.2%~22.7%，中度盐碱较轻度盐碱棉田高7.0%~20.7%；161~200 cm各类型棉田容重无明显差异。重度盐碱A1棉田121~140 cm土层容重为1.58 g·cm<sup>-3</sup>，较相邻层次高13.6%~19.5%，

较其他类型棉田同层次高8.9%~16.5%；中度盐碱棉田21~40 cm土层容重为1.49 g·cm<sup>-3</sup>，较相邻层次高7.1%~13.2%，较其他类型棉田同层次高9.4%~33.3%；轻度盐碱棉田141~160 cm土层容重为1.61 g·cm<sup>-3</sup>，较相邻层次高10.7%~19.1%，较其他类型棉田同层次高10.2%~16.2%。

### 2.2 不同盐碱程度棉田土壤水分时空变化特征

对不同类型棉田0~200 cm土层含水率测定表明（图1），不同类型棉田不同层次土壤含水率自上向下逐渐增大，不同月份之间，4—6月份最低，7—8月份最高。不同盐碱棉田之间，重度盐碱棉田土壤含水率最高。土壤含水率轻度盐碱棉田4—6月份0~80 cm土层为12.6%~19.8%，与中度盐碱棉田差异不明显，较重度盐碱地低11.4%~30.5%；7—8月份0~140 cm土层为14.1%~24.5%，较中度盐碱棉田低4.6%~15.5%，较重度盐碱棉田低9.6%~33.7%；9—10月份0~140 cm土层为13.9%~24.4%，较中度盐碱棉田高4.7%~12.8%，较重度盐碱棉田低4.2%~29.8%。土壤含水率4—10月份轻度盐碱棉田141~160 cm土层为21.6%~23.8%，较相邻土层低2.6%~13.6%，较相同层次不同类型棉田低2.7%~26.3%；重度盐碱A1和A2棉田0~200 cm土层变化规律较为一致，含水率差异不明显。

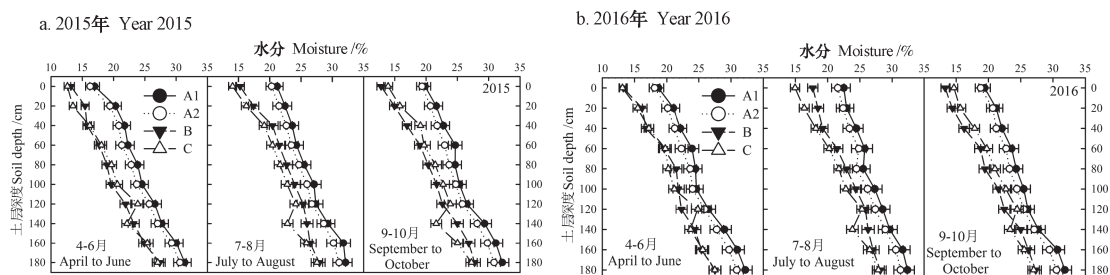


图1 不同盐碱程度棉田生育期内土壤水分垂直分布及变化

Fig. 1 Vertical distribution and variation of soil moisture in the cotton field during the cotton growth period relative to soil saline-alkali level

### 2.3 不同盐碱程度棉田土壤盐分时空变化特征

土壤盐分是表征盐碱化程度高低的重要指标。对不同类型棉田0~200 cm土层含盐量测定表明（图2），不同类型棉田不同层次土壤含盐量自上向下逐渐增大。不同月份之间，4—6月份最

高，7—8月份最低。不同盐碱棉田之间，含盐量重度盐碱棉田最高，各土层均不低于5.0 g·kg<sup>-1</sup>；轻度盐碱棉田0~140 cm各土层均不高于3.0 g·kg<sup>-1</sup>；中度盐碱棉田0~100 cm土层4—6月份在3.0~5.0 g·kg<sup>-1</sup>之间，7—8月份不高于3.0 g·kg<sup>-1</sup>，9—

10月份不高于 $4.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；轻度和中度盐碱棉田7—8月份0~140 cm土层差异较小，4—10月份141~200 cm土层无明显差异。各土层含盐量4—6月份重度较轻度盐碱棉田高47.0%~255.2%，较中度盐碱棉田高44.4%~87.2%；7—8月份重度较轻度盐碱棉田高46.1%~335.3%，较中度盐碱棉田高59.5%~323.3%；9—10月份重度较轻

度盐碱棉田高58.7%~179.7%，较中度盐碱棉田高54.7%~87.0%。0~140 cm中度较轻度盐碱棉田4—6月份高38.5%~105.1%，9—10月份高35.3%~66.1%。重度盐碱A1和A2棉田在4—9月份0~200 cm土层变化规律较为一致，4—6月份和9—10月份A1略高于A2，7—8月份略低于A2，土壤含盐量差异不明显。

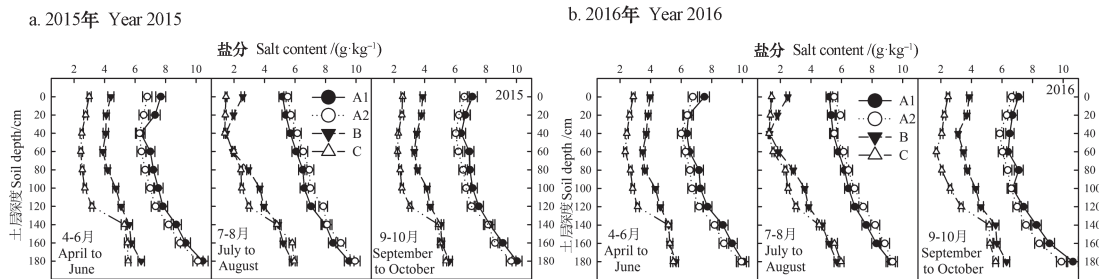


图2 不同盐碱程度棉田生育期内土壤盐分垂直分布及变化

Fig. 2 Vertical distribution and variation of soil salt content in the cotton field during the cotton growth period relative to soil saline-alkali level

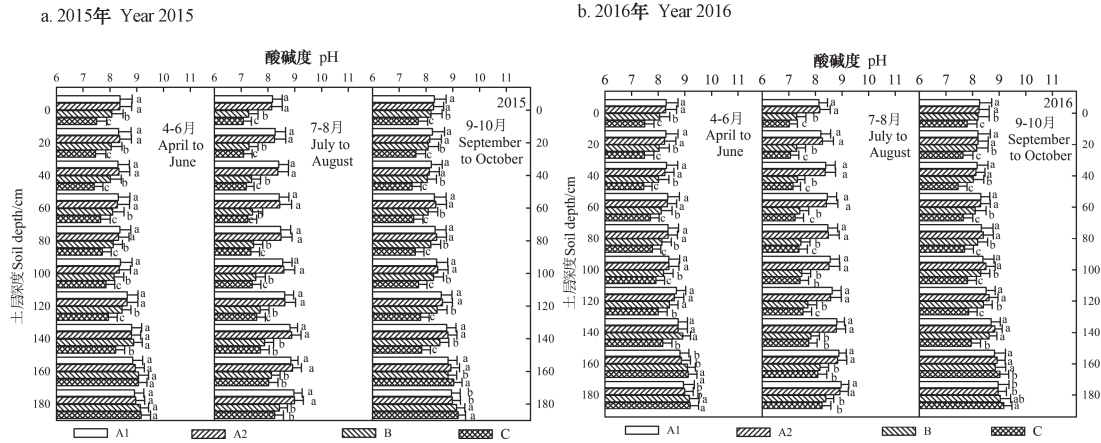
#### 2.4 不同盐碱程度棉田土壤pH时空变化特征

对不同类型棉田0~200 cm土层pH测定表明(图3)，重度盐碱棉田高于其他类型棉田；0~140 cm土层轻度盐碱棉田低于中度盐碱棉田，其他土层无明显差异。不同月份之间，4—6月份最高，7—8月份最低。各土层pH重度盐碱棉田在测定时期内均高于8.0。0~140 cm土层pH 4—6月份轻度盐碱棉田在7.4~8.0之间，较中度盐碱棉田低3.5%~7.6%，较重度盐碱棉田低5.8%~11.1%；7-8月份轻度盐碱棉田保持在7.0~7.5之间，较中度盐碱棉田低1.4%~3.7%，较重度盐碱棉田低12.2%~17.2%；9—10月份轻度盐碱棉田保持在7.5~7.8之间，较中度盐碱棉田低5.0%~7.2%，较重度盐碱棉田低5.0%~9.9%；中度盐碱棉田保持在8.0~8.4之间，重度盐碱棉田保持在8.2~8.6之间。重度盐碱A1和A2棉田在4—9月份0~140 cm土层变化规律较为一致，土壤pH差异不明显。141~160 cm土层4—10月份轻度盐碱棉田pH范围在7.7~8.2之间，较重度盐碱棉田低6.6%~14.3%，较中度盐碱棉田低2.0%~8.4%；161~200 cm土层轻度盐碱棉田pH范围4—6月和9—10月在9.0~9.2之间，较重度盐碱棉田高1.5%~3.5%，较中度盐碱棉田高

1.1%~2.9%；7—8月在8.0~8.3之间，较重度盐碱棉田低7.5%~10.3%，较中度盐碱棉田低1.0%~2.1%。

#### 2.5 不同盐碱程度棉田棉花光合物质积累特征

对不同类型棉田棉株光合物质积累测定并结合出苗日期表明(表4)，总光合物质积累量随盐碱程度降低而增高，轻度较重度盐碱棉田增高226.3%~236.0%，较中度棉田增高43.9%~48.4%。对其积累特征分析表明，总光合物质积累重度盐碱棉田直线增长期开始时间(6月20日左右)和结束时间(7月15日左右)早，持续时间短，最大增长速率( $V_{max}$ )出现在7月1日左右。中度和轻度盐碱棉田直线增长期开始时间差异不大(6月25日左右)，但结束时间和最大增长速率出现时间差异较大，中度盐碱棉田在8月8日左右结束，最大增长速率出现在7月15日左右；轻度盐碱棉田在8月22日左右结束，最大增长速率出现在7月23日左右。总光合物质积累直线增长期、最大增长速率和物质积累活跃期(P)轻度较重度盐碱棉田分别高98.7%~119.3%、51.6%~71.3%和98.7%~119.3%，较中度盐碱棉田分别高25.1%~33.0%、16.2%~53.5%和25.1%~33.0%。



注：同一土层深度不同字母表示在0.05 水平上差异显著 Note: Different letters in the same column of soil depth mean significant difference at the 0.05 probability level

图3 不同盐碱程度棉田土壤pH垂直分布及变化

Fig. 3 Vertical distribution and variation of soil pH in the cotton field during the cotton growth period relative to soil saline-alkali level

表4 不同盐碱程度棉田棉花光合物质积累特征

Table 4 Characteristics of the accumulation of photosynthesizing substance in the cotton relative to soil saline-alkali level

年份 Year	棉田代号 Code name	拟合方程 Fitting equation	R	TPA /(kg·hm <sup>-2</sup> )	T <sub>1</sub> /d	T <sub>2</sub> /d	T <sub>3</sub> /d	V <sub>max</sub> /(kg·hm <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	T <sub>0</sub> /d	P /d
2015	A	$y=2295.2/(1+956.9e^{-0.1108x})$	0.9983**	2355.6c	50b	74c	24c	64c	62c	54c
	B	$y=5245.8/(1+142.2e^{-0.0633x})$	0.9956**	5339.3b	58a	99b	42b	83b	78b	95b
	C	$y=7628.7/(1+70.8e^{-0.0506x})$	0.9989**	7685.3a	58a	110a	52a	96a	84a	119a
2016	A	$y=2343.1/(1+268.6e^{-0.0928x})$	0.9986**	2399.8c	46b	74c	28c	54c	60c	65c
	B	$y=5339.3/(1+125.3e^{-0.0633x})$	0.9956**	5434.4b	55a	97b	42b	61b	76b	97b
	C	$y=7974.0/(1+53.9e^{-0.0467x})$	0.9970**	8064.5a	57a	114a	56a	93a	85a	128a

注：同一列不同字母表示同年相同类别在0.05 水平上差异显著。 \*\*表示在0.01 水平上差异达显著水平。 T<sub>1</sub>、 T<sub>2</sub> 为光合物质积累增长直线期起止时间(出苗后天数), T<sub>3</sub> 为持续天数, T<sub>0</sub> 为最大增长速率(V<sub>max</sub>)出现的时间, P 为物质积累活跃期(大约完成总积累量的90%) Note:The implications followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level at same classification in same year within a column.\*\* means significant difference at P<0.01. T<sub>1</sub> and T<sub>2</sub> stands for beginning and ending date, respectively, of the photosynthesizing substance accumulation line, T<sub>3</sub> for number of the days the process lasted, T<sub>0</sub> for the date the highest growth rate appeared, and P for the active photosynthesizing substance accumulation period (up to 90% of the total accumulation)

2.6 不同盐碱程度棉田产量及构成因子

通过测产和产量实收统计(表5), 不同类型棉田产量差异显著, 轻度盐碱棉田籽棉产量超过了3 000 kg·hm<sup>-2</sup>水平; 平均皮棉产量达到1 200 kg·hm<sup>-2</sup>水平, 较重度盐碱棉田高91.0%~130.8%, 较中度盐碱棉田高36.0%~40.7%。 中度盐碱棉田皮棉产量达到900 kg·hm<sup>-2</sup>以上水平, 较重度盐碱棉田高

40.4%~64.0%。 进一步分析产量构成因子发现, 不同盐碱程度棉田收获株数和单位面积铃数差异显著, 盐碱程度越低, 收获株数和单位面积铃数越多; 重度和中度盐碱棉田铃重和衣分差异不明显, 显著低于轻度盐碱棉田。 两块重度盐碱棉田棉花产量及构成因子之间无明显差异。 可见, 单位面积铃数是造成重度盐碱棉田产量较低的主要原因, 铃重和衣分限制中度盐碱棉田产量进一步提高。

表5 不同类型棉田产量及构成因子

Table 5 Yield and yield components of the cotton relative to type of the cotton field								
年份	棉田代号	收获密度	单位面积铃数	铃重	衣分	子棉产量	皮棉产量	
Year	Code name	Plant No.	Boll density	Boll weight/g	Lint percentage	Seed cotton yield	Lint cotton yield	
		$/( \times 10^4 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2} )$	$/( \times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2} )$		%	$/( \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} )$	$/( \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} )$	
2015	A	A1	3.80 ± 0.17c	32.5 ± 1.53c	5.58 ± 0.20b	38.0 ± 1.86b	1733 ± 48.9c	658.5 ± 21.3c
		A2	3.76 ± 0.17c	32.3 ± 1.36c	5.54 ± 0.20b	38.2 ± 1.86b	1749 ± 46.2c	668.1 ± 31.4c
	B	4.57 ± 0.18b	47.5 ± 2.14b	5.51 ± 0.23b	38.2 ± 1.84b	2456 ± 74.6b	938.2 ± 31.9b	
	C	5.09 ± 0.22a	52.7 ± 2.48a	6.35 ± 0.28a	38.7 ± 1.91a	3298 ± 115.4a	1276.3 ± 42.8a	
2016	A	A1	3.48 ± 0.16c	28.8 ± 1.42c	5.36 ± 0.24b	37.8 ± 1.68b	1499 ± 49.8c	566.6 ± 24.7c
		A2	3.43 ± 0.16c	28.0 ± 1.36c	5.34 ± 0.20b	37.9 ± 1.76b	1456 ± 49.8c	551.8 ± 18.3c
	B	4.29 ± 0.18b	44.7 ± 2.15b	5.39 ± 0.21b	37.9 ± 1.74b	2388 ± 66.6b	905.1 ± 22.7b	
	C	5.04 ± 0.20a	52.8 ± 2.49a	6.37 ± 0.26a	38.5 ± 1.79a	3308 ± 103.6a	1273.5 ± 40.7a	

注：同一列不同字母表示同年在0.05水平上差异显著 Note: Different letters in the same column mean significant difference at the 0.05 probability level in the same year

### 3 讨论

#### 3.1 地形和容重对滨海盐碱地水盐空间分布的影响

滨海盐碱地土壤盐分主要来自浅层地下水；土壤盐分含量多少主要受地下水情况（水位及盐分）和水盐运移规律的影响<sup>[4-5]</sup>。地下水位的不同是土壤贮水量和盐分差异的主要因素<sup>[18]</sup>，土壤水盐运移受地形的影响。本研究表明，轻度和中度盐碱棉田海拔较重度盐碱棉田海拔高约1.6~1.9 m，拉大了地下水与地表的距离，使盐分上升阻力加大。土壤水盐运移直接受土壤导水率影响<sup>[19]</sup>；研究表明土壤容重对导水率具有重要影响<sup>[20]</sup>，土壤水分的移动能力、运动状态受土壤孔隙状况的直接影响，而土壤容重直接影响着土壤的孔隙状况<sup>[21]</sup>。同一质地不同容重的土壤，其孔隙度随容重增大递减，特别是大孔隙含量与容重更为密切相关。容重小的土壤，各种尺度孔隙均比较丰富，无论是降水对盐分的淋溶作用还是毛细作用的盐分表聚现象均很明显，土壤导水率较高；随容重增大，特大孔隙及大孔隙含量急剧下降，细小孔隙也逐渐减少，盐分迁移较为困难，土壤导水率较差。本研究表明，海拔较高的轻度和中度盐碱棉田容重差异对水盐空间分布影响显著。在冲积平原上的土壤内部有不同容重的夹层层状土，对土壤水盐运移的影响巨大<sup>[22]</sup>。本研究中轻度盐碱棉田土壤容重在140~160 cm

显增大，较中度盐碱棉田高12.5%，这种巨大反差容重极大地破坏了土壤的毛细作用，有效地阻碍了盐分上行，形成一个盐分上行“隔层”，隔层切断了土壤毛细通道，破坏了土体的连续性，使深层土壤水分不能通过毛管作用向土表运移，从而大大降低了土体的蒸发速率<sup>[23]</sup>。海拔较低的两块重度盐碱棉田容重虽然存在明显差异，但地下水位较低，长期的毛细作用导致大量盐分表聚，同时雨季降水经常导致土壤空隙水分与地下水相通，引起地下水位上升，导致盐分大量迁移滞留土壤，土壤水分和盐分长期保持较高数值。可见海拔较低是重度盐碱胁迫形成的主要原因之一，较高的海拔高度显著降低土壤盐分，而棉田土壤适当深度土层较高容重是保持土壤水盐及pH在棉花生长较为适宜范围内的关键。

滨海盐碱地土壤周年水盐运移和pH受地形和土壤导水性显著影响，同样受降水情况的影响。研究表明，不同盐碱棉田土壤水盐和pH均表现为4—6月份（春夏干旱少雨季）最高，7—8月份（夏秋雨季）显著下降，9—10月份（雨后秋季）又有所回升。由于海拔较高和土壤容重形成的“隔层”，增加了水盐运移上迁距离以及入渗水在隔层以上土层的停蓄时间，延缓了水分的入渗过程，促进了离子的交换、吸附和解析等作用，是轻度盐碱棉田的土壤水分、盐分和pH较低的原因；海拔和土壤容重较大，水盐上行阻力较大是重度盐碱棉田水分、

盐分和pH降低的主要因素; 而海拔较低, 地下水位高, 水盐上行阻力小, 导致重度盐碱棉田土壤水分、盐分和pH显著高于其他类型棉田。进入7—8月份, 轻度盐碱棉田由于海拔较高, 容重低, 土壤孔隙度较高, 排水较为方便, 土壤盐分的淋洗作用进一步降低了土壤盐分和pH。中度盐碱棉田土壤盐分和pH也受降水淋洗但作用明显降低, 这是由于较高的容重迟滞了水盐和pH下降。重度盐碱棉田由于海拔和土壤容重较低, 虽然降水淋洗降低了土壤盐分, 但是也提高了地下水位, 降雨结束后盐分很快又返回土壤, 因此土壤水分、盐分和pH长时间处于一个较高水平, 较高的土壤容重削弱了降水的淋洗作用, 导致重度盐碱棉田高容重地块水分、盐分和pH高于低容重地块。进入9—10月份, 轻度盐碱棉田土壤140~160 cm“隔层”不仅起到阻碍盐分上升的作用, 而且起到滞留水分的作用, 0~140 cm土壤含水量明显高于中度盐碱棉田, 而土壤pH增加不明显; 土壤140~160 cm“隔层”的缺失导致中度盐碱棉田土壤水分明显降低, 而盐分和pH明显增加; 重度盐碱棉田低海拔成为土壤水分、盐分和pH明显高于轻度和中度盐碱棉田的主要原因, 而容重较小导致水盐上行较快, 低容重地块水盐含量和pH略高于高容重地块。

### 3.2 滨海盐碱地土壤水盐运移对棉花光合生产和产量的影响

研究表明, 滨海盐碱地土壤水盐运移对棉花光合生产和产量具有直接影响。滨海盐碱地土壤4—6月份不同类型棉田棉花苗期叶片生长均受到盐碱胁迫影响, 不同类型棉田盐碱胁迫的差异主要体现在棉花收获株数上, 研究表明中度和重度盐碱棉田收获株数显著低于轻度盐碱棉田, 其中中度盐碱棉田为轻度盐碱棉田的85.1%~89.8%, 重度盐碱棉田为轻度盐碱棉田的68.1%~74.6%, 这对产量水平高低起到决定作用。同时较低盐分和pH有利于轻度盐碱棉田棉花叶片叶绿素含量的提高, 为生育后期棉花光合生产和产量的提高奠定了基础<sup>[24]</sup>; 而中度和重度盐碱棉田虽然土壤水分较高, 但是由于较高的盐分和pH等盐碱胁迫, 不仅对棉花生长具有较强的离子伤害, 而且会引起生理缺水, 因此不仅叶片生长受到抑制, 而且妨碍了叶片叶绿素的合成<sup>[25]</sup>。进入7—8月份(雨季)后, 轻度和中度盐碱棉田的盐碱胁迫显著解除, 叶片迅速生长, 叶

素含量也显著增加, 光合速率明显增高<sup>[26]</sup>, 表现出较强的光合生产能力。但是中度盐碱棉田由于早期生长受到明显抑制, 此时土壤水分较为丰沛, 营养生长尤为明显, 开花数和铃数明显增加; 到9—10月份(雨后秋季), 土壤水分迅速下降, 盐分和pH迅速提高, 受盐碱胁迫影响, 而且较高的土壤容重不利于根系发育, 因此叶片迅速发黄脱落, 光合速率明显下降, 棉铃发育受到光合底物不足的影响, 单铃重和衣分显著下降, 导致产量水平较低<sup>[27]</sup>。而重度盐碱棉田在整个生育期内盐碱胁迫程度较高, 因此, 光合能力显著减弱, 成铃数较少, 单铃重和衣分与中度盐碱棉田差异不大, 因此产量水平最低。轻度盐碱棉田苗期受到盐碱胁迫最小, 雨季不仅盐碱胁迫得到解除, 而且土壤水分适中, 光合生产较为稳健; 而且雨后秋季盐碱胁迫较轻, 且土壤水分较高, 叶片维持较长的生理期, 光合速率在较长时间内维持在一个较高水平; 因此单株成铃数较为适中, 棉铃发育较为充分, 单铃重和衣分较高。

滨海盐碱地不同盐碱胁迫对棉花的影响还体现在光合物质积累特征方面<sup>[28]</sup>。光合物质积累量随盐碱程度降低而显著增加; 而盐碱胁迫对光合生产进程的影响是造成光合物质积累量差异的主要原因。重度盐碱棉田由于受盐碱胁迫较重且持续时间长, 导致光合生产与光热资源吻合度低, 光合积累速率低<sup>[29]</sup>, 而且快速积累持续时间短, 因此光合物质积累量显著降低, 这是低产的主要原因之一; 中度盐碱棉田生育前期受盐碱胁迫程度较轻, 盐碱胁迫在一段时期内得到解除, 但是在生育后期盐碱胁迫再次加重, 因此光合生产与光热资源有一定吻合度, 但后期盐碱胁迫导致光合物质快速积累期过早结束(8月8日左右), 这对生殖器官生长发育极为不利, 导致棉铃发育不充分引起减产。轻度盐碱棉田生育中后期盐碱胁迫得到解除, 因此光合生产与光热资源极度吻合, 光合速率高, 活跃期长, 不仅较高的光合物质积累为高产奠定了物质基础, 而且与光热资源具有较高的吻合度, 棉铃发育充分, 为提高皮棉产量提供了进一步保障。

滨海盐碱棉田地形和土壤质地情况影响土壤水盐运移, 土壤不同层次水盐及pH时空分布对棉花光合生产和产量形成具有直接影响。海拔较高, 1 m左右深度的土层保持合理容重, 并在较深土层



土壤具有较高容重, 不仅使土壤具有有利于作物生长的持水性, 并且有效阻断潜水上升, 促进下行重力水对土壤盐分的淋洗, 这些特征有利于显著降低棉田盐碱程度, 提高棉花光合生产和产量; 轻度盐碱棉田地形及土壤质地及水盐时空分布特征为滨海盐碱地生态改良提供了理论依据。

## 4 结 论

轻度盐碱棉田的较高海拔以及土壤141~160 cm深处高容重隔层促使土壤盐分和pH降低, 土壤水分雨季较低而吐絮期较高; 棉花遭受盐碱涝害胁迫较小, 光合性能较高且光合生产与水热资源吻合度高, 长期处于物质积累活跃期; 中度盐碱棉田棉花生育前期和后期仍有明显盐碱胁迫, 产量形成期与光热资源丰富期吻合度较差; 重度盐碱棉田海拔低, 长期处于高度盐碱胁迫之下, 棉花光合性能受到严重抑制, 光合生产能力和产量水平低下。借鉴轻度盐碱棉田情况, 滨海盐碱地改良可采用铺垫盐碱隔层后将地表抬高一定高度, 并加强棉田土壤对水分的早蓄涝排能力。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Setia R, Gottschalk P, Smith P, et al. Soil salinity decreases global soil organic carbon stocks. *Science of the Total Environment*, 2013, 465: 267—272
- [ 2 ] 王佳丽, 黄贤金, 钟大洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述. *地理学报*, 2011, 66 ( 5 ): 673—684  
Wang J L, Huang X J, Zhong T Y, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land ( In Chinese ). *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66 ( 5 ): 673—684
- [ 3 ] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望. *土壤学报*, 2008, 45 ( 5 ): 837—845  
Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 ( 5 ): 837—845
- [ 4 ] 董合忠. 盐碱地棉花栽培学. 北京: 科学出版社, 2010  
Dong H Z. Cotton farming in saline soil ( In Chinese ). Beijing: Science Press, 2010
- [ 5 ] 岳耀杰, 张峰, 张国明, 等. 滨海盐碱地利用变化与优化研究——以黄骅市“台田-浅池”模式为例. *资源科学*, 2010, 32 ( 3 ): 423—430  
Yue Y J, Zhang F, Zhang G M, et al. Coastal saline-alkali land use change and its optimization: A case study on the “raised field -shallow pond” pattern in Huanghua County ( In Chinese ). *Resources Science*, 2010, 32 ( 3 ): 423—430
- [ 6 ] Zhang S J, Chao Y, Zhang C L, et al. Earthworms enhanced winter oilseed rape (*Brassica napus* L. ) growth and nitrogen uptake. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139: 463—468
- [ 7 ] Laversa D A, Hannahb D M, Bradleyb C. Connecting large-scale atmospheric circulation, river flow and groundwater levels in a chalk catchment in southern England. *Journal of Hydrology*, 2015, 523 ( 1 ): 179—189
- [ 8 ] 张金龙, 张清, 王振宇, 等. 排水暗管间距对滨海盐土淋洗脱盐效果的影响. *农业工程学报*, 2012, 28 ( 9 ): 85—89  
Zhang J L, Zhang Q, Wang Z Y, et al. Effect of subsurface drain spacing on elution desalination for coastal saline soil ( In Chinese ). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 ( 9 ): 85—89
- [ 9 ] 王琳琳, 李素艳, 孙向阳, 等. 不同隔盐措施对滨海盐碱地土壤水盐运移及刺槐光合特性的影响. *生态学报*, 2015, 35 ( 5 ): 1388—1398  
Wang L L, Li S Y, Sun X Y, et al. Application of salt-isolation materials to a coastal region: Effects on soil water and salt movement and photosynthetic characteristics of *Robinia pseudoacacia* ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 ( 5 ): 1388—1398
- [ 10 ] 于淑会, 韩立朴, 高会, 等. 高水位区暗管埋设下土壤盐分适时立体调控的生态效应. *应用生态学报*, 2016, 27 ( 4 ): 1061—1068  
Yu S H, Han L P, Gao H, et al. Ecological effects of soil salinity regulation through saline water irrigation and subsurface drainage in high water table level area ( In Chinese ). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 ( 4 ): 1061—1068
- [ 11 ] 王睿彤, 孙景宽, 陆兆华. 土壤改良剂对黄河三角洲滨海盐碱土生化特性的影响. *生态学报*, 2017, 37 ( 2 ): 425—431  
Wang R T, Sun J K, Lu Z H. Effect of soil ameliorants on the biochemical properties of coastal saline-alkali soil in the Yellow River Delta ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 ( 2 ): 425—431
- [ 12 ] 董合忠, 辛承松, 唐薇, 等. 东营滨海盐渍棉田盐分与养分的季节性变化及对棉花产量的影响. *棉花学报*, 2006, 18 ( 6 ): 362—366  
Dong H Z, Xin C S, Tang W, et al. Seasonal

- changes of salinity and nutrients in the coastal saline soil in Dongying, Shandong, and their effects on cotton yield (In Chinese). *Cotton Science*, 2006, 18 (6): 362—366
- [ 13 ] Acal F. Sustainable management of coastal saline soils in the Saloum river Basin, Senegal. *International Journal of Biological & Chemical Sciences*, 2017, 11 (4): 1903—1919
- [ 14 ] 赵新风, 李伯岭, 王炜, 等. 极端干旱区8个绿洲防护林地土壤水盐分布特征及其与地下水关系. *水土保持学报*, 2010, 24 (3): 75—79  
Zhao X F, Li B L, Wang W, et al. Characteristic of soil moisture and salinity distribution in eight forests and its relationship with groundwater in extreme arid area (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (3): 75—79
- [ 15 ] 单奇华, 张建锋, 阮伟建, 等. 滨海盐碱地土壤质量指标对生态改良的响应. *生态学报*, 2011, 31 (20): 6072—6079  
Shan Q H, Zhang J F, Ruan W J, et al. Response of soil quality indicators to comprehensive amelioration measures in coastal salt-affected land (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (20): 6072—6079
- [ 16 ] 喻树迅. 我国棉花生产现状与发展趋势. *中国工程科学*, 2013, 15 (4): 9—13  
Yu S X. Present situation and development trend of cotton production in China (In Chinese). *Engineering Sciences*, 2013, 15 (4): 9—13
- [ 17 ] 董合忠, 辛承松, 李维江, 等. 山东滨海盐渍棉田盐分和养分特征及对棉花出苗的影响. *棉花学报*, 2009, 21 (4): 290—295  
Dong H Z, Xin C S, Li W J, et al. Characteristics of salinity and fertility in coastal saline cotton fields in Shandong and their effects on cotton emergence (In Chinese). *Cotton Science*, 2009, 21 (4): 290—295
- [ 18 ] Jordán M M, Navarro-Pedreno J, García-Sánchez E, et al. Spatial dynamics of soil salinity under arid and semi-arid conditions: Geological and environmental implications. *Environmental Geology*, 2004, 45 (4): 448—456
- [ 19 ] Fares A, Alva A K, Nkedi-Kizza P, et al. Estimation of soil hydraulic properties of a sandy soil using capacitance probes and guelph permeameter. *Soil Science*, 2000, 165 (10): 768—777
- [ 20 ] Zhao P, Shao M, Wang T. Spatial distributions of soil surface-layer saturated hydraulic conductivity and controlling factors on dam farmlands. *Water Resources Management*, 2010, 24 (10): 2247—2266
- [ 21 ] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 等. 半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响. *农业工程学报*, 2008, 24 (6): 14—20  
Zhao Y G, Zhao S W, Cao L H, et al. Soil structural characteristics and its effect on infiltration on abandoned lands in semi-arid typical grassland areas (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24 (6): 14—20
- [ 22 ] 李韵珠, 胡克林. 蒸发条件下粘土层对土壤水和溶质运移影响的模拟. *土壤学报*, 2004, 41 (4): 493—502  
Li Y Z, Hu K L. Simulation for the effect of clay layer on the transport of soil water and solutes under evaporation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (4): 493—502
- [ 23 ] Chan K Y, Oates A, Heenan D P, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage. *Soil & Tillage Research*, 2007, 92 (1): 122—128
- [ 24 ] Sun Y L, Hong S K. Effects of citric acid as an important component of the responses to saline and alkaline stress in the halophyte *Leymus chinensis* (Trin.). *Plant Growth Regulation*, 2011, 64: 129—139
- [ 25 ] Yang X Y, Genga J B, Li C L, et al. Combined application of polymer coated potassium chloride and urea improved fertilizer use efficiencies, yield and leaf photosynthesis of cotton on saline soil. *Field Crops Research*, 2016, 197: 63—73
- [ 26 ] Dong H Z, Li W J, Eneji A E, et al. Nitrogen rate and plant density effects on yield and late-season leaf senescence of cotton raised on a saline field. *Field Crops Research*, 2012, 126: 137—144
- [ 27 ] Dong H Z, Kong X Q, Luo Z, et al. Unequal salt distribution in the root zone increases growth and yield of cotton. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33: 285—292
- [ 28 ] Wang L L, Sun X Y, Li S Y, et al. Application of organic amendments to a coastal saline soil in North China: Effects on soil physical and chemical properties and tree growth. *PLoS One*, 2014, 9 (2): e89185
- [ 29 ] Stefanov M, Yotsova E, Markovska Y, et al. Effect of high light intensity on the photosynthetic apparatus of two hybrid lines of Paulownia grown on soils with different salinity. *Photosynthetica*, 2018, 56 (3): 832—840

## Temporal and Spatial Variation of Soil Moisture and Salinity and Its Effect on Photosynthetic Production of Cotton in Coastal Saline-Alkali Land

FENG Guoyi ZHANG Qian QI Hong LEI Xiaopeng WANG Shulin WANG Yan DU Haiying  
LIANG Qinglong LIN Yongzeng<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Cotton in Huanghuaihai Semiarid Area, Ministry of Agriculture/ Cotton Research Institute, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract** In order to study spatial distribution and movement of soil moisture and salt in coastal saline-alkali land and its effect on photosynthetic production and yield of cotton, and further discuss how elevation and soil bulk density affects spatial distribution of soil moisture and salt content in cotton fields of coastal saline-alkali soil, four cotton fields, quite different in elevation and soil bulk density were selected in a coastal saline-alkali area. Soil moisture and salt contents and soil pH in the 0 ~ 200 cm soil layers of the fields were monitored during the period of April ~ October and characterized for analysis of their influences on photosynthetic production and yield of cotton. Results show that in the cotton field, mild in soil salinity and alkalinity but high in elevation, a high-bulk-density interlayer was formed, 141 ~ 160 cm in depth, low in soil salinity and pH. In that cotton field, soil moisture content was low during the rainy season (July ~ August) and apparently higher than that in the cotton field moderate in soil salinity and alkalinity during the late cotton growing period (September ~ October). So the cotton in that field suffered less salt stress, and had its photosynthetic production highly coinciding with availability of prime hydrothermal resources and hence a long active dry matter accumulating period. In the cotton field, moderate in soil salinity and alkalinity and relatively high in elevation, higher elevation and bulk density inhibited rise of salt and pH, thus relieving the crop from salt stress during the rainy season, but salt stress was still quite obvious during the early and late cotton growth periods (April ~ June and September ~ October), so the crop did not have a good coincidence of its photosynthetic production with availability of prime hydrothermal resources. In the cotton field high in soil salinity and alkalinity and low in elevation, soil bulk density did not seem to have much impact on water and salt movement, and the crop was subjected to a long-term high soil stress and hence low in capacity and yield of cotton. Therefore in ameliorating the coastal saline-alkali fields, it is advisable to raise them in elevation properly and help them form a high bulk density interlayer of a certain thickness, to improve their water storage and drainage capacity, which is believed to be a soil ameliorating measure contributive to photosynthetic production.

**Key words** Coastal saline-alkali land; Cotton (*Gossypium hirsutum* L.); Water and salt movement; Photosynthetic production; Spatio-temporal variation

(责任编辑: 檀满枝)