

涝渍胁迫对棉花形态与产量的影响*

钱 龙¹ 王修贵¹ 罗文兵² 吴 琳¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 长江科学院农业水利研究所, 武汉 430010)

摘要: 为揭示棉花对涝渍胁迫的响应规律,于2008—2011年在武汉大学校园灌溉排水试验场开展了测坑试验研究,分析了涝渍胁迫不同形式(涝渍单一和涝渍综合)及不同生育期(蕾期、花铃期和吐絮期)对棉花形态(叶面积指数、茎粗和株高)和产量(籽棉和干物质)的影响,建立了“涝渍胁迫-形态特征-产量水平”结构方程模型,比较分析了各因子间的作用效果。结果表明:在形态响应方面,单渍胁迫即使历时更长,对棉花形态生长的影响仍小于单涝胁迫,而涝渍综合胁迫的抑制作用最大;蕾期和花铃期内遭遇涝渍综合胁迫均会显著($p < 0.05$)抑制棉花形态生长,而吐絮期内抑制作用很小;叶面积生长受涝渍胁迫的抑制作用最大,其余依次是茎粗和株高。在产量响应方面,单涝胁迫的减产作用大于单渍胁迫,与涝渍综合胁迫基本相同;花铃期内棉花遭受涝渍综合胁迫会导致显著减产,蕾期次之,而吐絮期内减产作用较小;籽棉产量受涝渍胁迫的减产作用比干物质产量大。涝渍胁迫对棉花产量的作用效果大于形态;在所选的涝渍胁迫单一和综合指标中,以涝渍时间单一指标(受涝期间累积地表受淹深度和累积超标地下水位 SWFDH、受渍期间地下累积超标地下水位 SEW₃₀)最适合描述涝渍胁迫对棉花形态及产量的影响。

关键词: 棉花 涝渍胁迫 形态 产量 结构方程模型

中图分类号: S271; S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0136-08

Effects of Waterlogging Stress on Morphology and Yield of Cotton

Qian Long¹ Wang Xiugui¹ Luo Wenbing² Wu Lin¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China
2. Department of Agricultural Water Conservancy, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to reveal the response of cotton to waterlogging stress, lysimeter experiments were conducted in the Irrigation and Drainage Experiments Station of Wuhan University during 2008—2011. Effects of different waterlogging forms (surface waterlogging, subsurface waterlogging and the combination of both) and different occurring growth stages (bud stage, flowering and boll setting stage or boll opening stage) on cotton morphology (leaf area index (LAI), stem diameter and plant height) and yield (seed cotton and dry matter) were discussed. Structural equation modelings (SEM) of yield and morphology characteristics related to waterlogging stress were established. Interactive relationships between these models were analyzed. The results showed that subsurface waterlogging stress inhibited the development of cotton morphology less than that of surface waterlogging stress, while the combination of surface and subsurface waterlogging stresses inhibited the growth most. Waterlogging stress occurred in bud stage, flowering and boll setting stage inhibited the development of morphology characteristics significantly ($p < 0.05$), while the inhibiting effect at boll opening stage was not significant. LAI, followed by stem diameter and plant height, was the most sensitive morphology index to describe the response of cotton morphology to waterlogging stress. The cotton yield reduction with subsurface waterlogging stress was less than that with surface waterlogging stress, while the reduction was almost the same when surface

收稿日期: 2014-11-17 修回日期: 2015-01-04
* 国家自然科学基金资助项目(51379153, 50979074)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD08B03)
作者简介: 钱龙, 博士生, 主要从事农田排水研究, E-mail: 2011202060121@whu.edu.cn
通讯作者: 王修贵, 教授, 博士生导师, 主要从事农田排水及水管理研究, E-mail: wangxg@whu.edu.cn

waterlogging stress or subsurface-surface waterlogging stress was occurred. Waterlogging stress occurred at flowering and boll setting stage reduced the yield most, followed by bud stage and boll opening stage in sequence. And the inhibiting effects of waterlogging stress on seed cotton yield were more than that on dry matter yield. According to SEM analysis, waterlogging stress effects on yield were more than that on morphology characteristics, and waterlogging temporal indices (SWFDH and SEW_{30}) were better than spatial indices (SFW and SEW_{30}) and $SFEW_{30}$ in describing waterlogging stress effects on growth and yield of cotton.

Key words: Cotton Waterlogging stress Morphology Yield Structural equation modeling

引言

受亚热带季风气候的影响,在我国南方平原地区,棉花生育期内降水集中、雨量大、历时长,由此导致的涝渍灾害严重制约棉花的生长与产量形成。因此,研究涝渍胁迫下棉花的响应规律对于合理制定棉田排水标准,科学管理田间水分和有效采取除涝减灾措施具有重要的现实意义。

棉花是一种耐涝性差的作物,涝渍胁迫对其生长及产量的影响受到多方关注。在形态响应方面,Christianson 等^[1]发现棉花受淹后叶片数量、茎生长率、株高生长率以及根系重量均会显著降低,而Rsicosky 等^[2]和 Meyer 等^[3]分别发现叶片生长率在受渍和受涝后均受到抑制;李秉柏等^[4]发现棉花在蕾期受淹后叶片和株高的生长均受到显著抑制,而花铃期内影响不大,Cao 等^[5]则认为蕾期、花铃期内涝渍胁迫均会抑制棉花叶片的生长。在产量响应方面,Hodgson^[6]发现棉花产量随受淹历时的增加而减小,Bange 等^[7]分析了不同受淹历时对棉花干物质质量、产量以及产量构成的影响,Cao 等^[5]和朱建强等^[8]分别论证了棉花产量与各生育期内涝渍综合指标和受涝时间呈显著线性关系;李慧伶等^[9]认为花铃期是棉花产量对涝渍胁迫最敏感的生育期,而杨云^[10]发现棉花在盛蕾期受渍后的减产较花铃期更严重,两者减产比例分别为 60% 和 30%。

涝渍胁迫的不同形式及不同生育期对棉花形态和产量的影响不同。现有研究多集中于单独描述受涝^[3,6-7]、受渍^[2,10-11]或涝渍综合胁迫^[5,12]下各生育期棉花形态及产量的响应规律,但针对涝渍单一和综合胁迫条件下的比较研究较少。同时,鲜见将形态和产量关联起来进行定量分析比较的研究。考虑到单涝、单渍和涝渍综合胁迫是可能存在于棉花各生育期内的几种涝渍致灾方式,且棉花形态和产量对涝渍胁迫的响应是一个密切相关、互相作用的过程,因此,本文分析棉花形态及产量对多种涝渍胁迫条件的响应规律,并定量描述“涝渍胁迫-形态特征-产量水平”关系中各因子的交互关系,这对于全

面揭示棉花对涝渍胁迫的响应规律,制定正确的涝渍控制策略具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2008—2011 年连续 4 a 在武汉大学校园灌溉排水试验场进行。试验场共有测坑 22 个,每个测坑的平面净尺寸 2 m × 2 m,深度为 3 m,底部设置 0.3 m 厚的反滤层,其余 2.7 m 装填扰动土,填土层表面距坑顶 0.1 m 左右。土质为轻壤土,干容重 1.41 g/cm³,饱和含水率 0.444 cm³/cm³,田间持水率 0.370 cm³/cm³。供试棉花品种为鄂抗棉 6 号,每年 5 月下旬每个测坑定植棉花 6 株。

1.2 试验设计

2008—2010 年开展棉花多生育期内涝渍综合胁迫试验,2011 年开展棉花单生育期内涝渍单一及综合胁迫试验。试验因素包括涝、渍。各因素的具体控制要求为:①涝:淹水深度 10 cm,2008—2010 年受淹历时为 1、3 d,2011 年受淹历时为 1、3、5 d。②渍:采用淹水后地面水完全排除后地下水位维持埋深 20 cm 的时间来控制,之后将地下水控制装置的水位迅速降至适宜埋深 80 cm。2008—2009 年控制时间为 3、5 d,2010 控制时间延长至 4、7 d,2011 年控制时间为 3、5、8 d。在非胁迫生育期,采用合理的灌溉制度对测坑中的棉花进行灌溉,以保证棉花不受旱,并利用活动遮雨棚使棉花不受雨涝。病虫害防治按照常规农田管理进行。2008—2010 年安排 8 个涝渍胁迫处理和 1 个对照处理,共 9 组方案,8 个处理组分别对应蕾期、花铃期、吐絮期及多生育期内的轻度和重度涝渍胁迫,因部分测坑维修或其他用途,2008 年采用 18 个测坑,2009 年采用 21 个测坑,2010 年采用 22 个测坑。2011 年为 9 个涝渍胁迫处理和 1 个对照处理,共 10 组方案,采用 22 个测坑。由于测坑数量有限,每个处理设置 2~3 个重复。2008—2010 年试验表明棉花花铃期为涝渍敏感时期,故 2011 年仅在花铃期内进行涝渍处理。具体试验设计见表 1。

表 1 2008—2011 年棉花涝渍胁迫试验设计

Tab.1 Waterlogging stress treatments of experiments on cotton during 2008—2011

处理序号	2008 年和 2009 年			2010 年			2011 年
	蕾期	花铃期	吐絮期	蕾期	花铃期	吐絮期	花铃期
1	(1,3)	(0,0)	(0,0)	(1,4)	(0,0)	(0,0)	(1,0)
2	(3,5)	(0,0)	(0,0)	(3,7)	(0,0)	(0,0)	(3,0)
3	(0,0)	(1,3)	(0,0)	(0,0)	(1,4)	(0,0)	(5,0)
4	(0,0)	(3,5)	(0,0)	(0,0)	(3,7)	(0,0)	(0,3)
5	(0,0)	(0,0)	(1,3)	(0,0)	(0,0)	(1,4)	(0,5)
6	(0,0)	(0,0)	(3,5)	(0,0)	(0,0)	(3,7)	(0,8)
7	(1,3)	(1,3)	(1,3)	(1,4)	(1,4)	(1,4)	(1,3)
8	(3,5)	(3,5)	(3,5)	(3,7)	(3,7)	(3,7)	(3,5)
9	—	—	—	—	—	—	(5,8)
对照	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)

注:括号内数值分别表示受淹深度为 10 cm 的受涝历时(d)和地面淹水完全排除后地下水位维持在 20 cm 的受渍历时(d)。“—”表示当年未设置涝渍处理,地下水位控制在适宜埋深。

1.3 试验观测项目

①地下水位:涝渍胁迫处理期间每 1 d 用地下水位计观测地下水位,直到地下水位达到正常埋深 80 cm 以下。②形态指标:全生育期内每 10 d 测量株高、茎粗、叶面积指数,在涝渍胁迫处理期间改为每 7 d 测量。株高和茎粗分别利用米尺和游标卡尺测量。叶面积指数利用 AccuPAR PAR/LAI ceptomete (model LP-80)测定。③产量:收获后测量每个测坑的籽棉产量与干物质产量。④在涝渍胁迫处理之前,测定测坑表土含水率。

1.4 数据分析

采用结构方程模型 (Structure equation modeling,SEM)描述“涝渍胁迫-形态特征-产量水平”关系,采用矩结构分析软件 (Analysis of moment structures,AMOS)作为结构方程模型的建模工具。模型适配性评价指标主要包括:①卡方值 χ^2 ,当其显著性概率 p 大于 0.05 时,表示模型的构建与实际数据不符的可能性较小。②卡方自由度比 (χ^2/df),其值越小,模型越匹配。若其值介于[1,3],表示模型适配良好。③渐进残差均方和平方根 RMSEA,其值越小,表示模型的适配度越佳,若其值介于[0.05,0.08]时,表示模型合理适配。④模型适配度指数 GFI,其值介于[0,1],越接近于 1,模型的适配度越高。一般 GFI 值大于 0.9 时,表示模型路径图与实际数据有良好的适配度。上述几个指标均为评判 SEM 适配度的常用指标^[13]。

采用 Microsoft Excel 软件进行数据处理和作图,应用 SPSS 统计分析软件进行试验数据的单因素方差分析,采用 Duncan 法进行数据差异显著性分析,并利用字母标记法^[14]对结果进行标注。

2 涝渍胁迫对棉花形态的影响

不同涝渍处理的影响差异可用形态(本文中分别采用叶面积指数、茎粗和株高)生长量 G 表示。 G 为计算期内某形态指标生长量的平均值,计算式为

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{e(i)} - X_{s(i)})}{n}$$

(1)

式中 n ——某处理对应的测坑数目

$X_{s(i)}$ ——计算期开始时某处理第 i 个测坑内代表棉株的形态指标测量值

$X_{e(i)}$ ——计算期结束时某处理第 i 个测坑内代表棉株的形态指标测量值

涝渍胁迫施加后,每 7 d 观测各形态指标的变化,由于若干涝渍处理的涝渍历时超过 7 d,因此选用涝渍胁迫开始后 14 d 作为计算期。考虑到不同年份试验设计差异和年际效应,对不同年份分别进行分析。

2.1 涝渍胁迫形式对棉花形态的影响

表 2 为涝渍单一胁迫开始后 14 d 内棉株 LAI、茎粗和株高的生长量。由表 2 可知,不同程度的单渍胁迫对 LAI、茎粗和株高的生长几乎无影响,而(3,0)单涝和(5,8)涝渍综合胁迫均会显著($p < 0.05$,下同)抑制各形态指标的生长。单涝、单渍和涝渍综合胁迫下, G_{LAI} 平均降低 22.60%、-18.3% 和 51.92%, G_j 平均降低 24.51%、17.12% 和 39.82%, G_z 平均降低 50.08%、6.84% 和 42.97% (其中 G_{LAI} 出现负值表示与正常处理相比叶面积指数有增长的情况)。由此可见,涝渍综合胁迫抑制形态生长的作用最为显著,单涝次之,而单渍的影响较小。

表 2 2011 年不同涝渍胁迫形式处理的形态指标
生长量 G

Tab.2 Morphology growth G of waterlogging stress
treatments of different forms in 2011

涝渍形式	涝渍历时/d	G_{LAI}	G_J/mm	G_Z/cm
单涝	(1,0)	0.93 ^{ab}	4.21 ^a	21.25 ^{abcd}
	(3,0)	0.48 ^{bc}	3.57 ^{ab}	16.54 ^{bed}
	(5,0)	0.20 ^c	2.23 ^{ab}	7.95 ^d
单渍	(0,3)	1.18 ^a	4.39 ^a	30.25 ^{ab}
	(0,5)	1.46 ^a	3.46 ^{ab}	26.60 ^{abc}
	(0,8)	1.05 ^a	3.14 ^{ab}	28.50 ^{abc}
涝渍综合	(1,3)	0.51 ^{bc}	4.62 ^a	22.75 ^{abc}
	(3,5)	0.47 ^{bc}	2.26 ^{ab}	15.00 ^{cd}
	(5,8)	0.52 ^{bc}	1.10 ^b	14.50 ^{cd}
对照组	(0,0)	1.04 ^{ab}	4.42 ^a	30.54 ^a

注: G_{LAI} 、 G_J 、 G_Z 分别指叶面积指数、茎粗和株高的生长量;括号内数值分别为受涝天数(d)和受渍天数(d);同一列形态指标生长量 G 中,若任意两处理的字母标注之间无任何相同小写字母(如 a 和 bc),则表示在 $p < 0.05$ 的显著性水平上存在差异。下同。

对比单涝和单渍的影响差异,可知单渍胁迫

对各形态指标的影响均小于单涝,尤其前者对 LAI 的抑制作用显著小于后者。单渍影响很小的原因主要在于地表并无积水,在地下水位以上(距地表 30 cm 以内)土壤水仍可与地表进行气体交换,因此棉花根系层的缺氧环境得到一定程度的缓解,棉花形态生长不会受到显著影响。与此同时渍水还会持续稳定地为形态生长提供充足水分。

2.2 涝渍发生生育期对棉花形态的影响

表 3 为涝渍综合胁迫开始后 14 d 内棉株 LAI、茎粗和株高的生长量。由表 3 可知,蕾期内较重程度的涝渍综合胁迫在不同程度上抑制叶面积指数、茎粗和株高的生长: G_{LAI} 在 (3,5) 涝渍综合胁迫下(2010 年为 (3,7)) 均显著降低,而 G_J 和 G_Z 仅在 1 a (3,5) 涝渍综合胁迫下(2009 年 G_J 和 2008 年 G_Z) 显著下降。可见蕾期内各形态指标的生长均受到 (3,5) 涝渍综合胁迫(2010 年为 (3,7)) 抑制,其中以叶面积指数的响应最为敏感。

表 3 2008—2010 年不同涝渍发生生育期处理的形态生长量 G

Tab.3 Morphology growth G of waterlogging stress treatments in different growth stages during 2008—2010

生育期	胁迫方式	涝渍历时/d	2008 年			2009 年			涝渍历时/d	2010 年		
			G_{LAI}	G_J/mm	G_Z/cm	G_{LAI}	G_J/mm	G_Z/cm		G_{LAI}	G_J/mm	G_Z/cm
蕾期	单生育期	(1,3)	1.25 ^{ab}	9.57 ^a	15.25 ^a	1.52 ^{ab}	9.20 ^a	34.25 ^a	(1,4)	0.39 ^a	8.05 ^a	50.50 ^a
		(3,5)	1.20 ^b	9.58 ^a	21.50 ^a	1.24 ^b	6.28 ^b	20.75 ^a	(3,7)	0.28 ^a	4.95 ^b	49.75 ^a
	多生育期	(1,3)	1.91 ^{ab}	10.36 ^a	14.75 ^a	2.24 ^a	9.78 ^a	25.17 ^a	(1,4)	0.29 ^a	5.65 ^{ab}	57.05 ^a
		(3,5)	0.70 ^b	7.69 ^a	1.75 ^b	0.82 ^b	6.14 ^b	25.17 ^a	(3,7)	0.08 ^b	7.20 ^{ab}	57.60 ^a
	对照	(0,0)	2.77 ^a	13.03 ^a	21.75 ^a	2.54 ^a	9.37 ^a	39.70 ^a	(0,0)	0.36 ^a	7.07 ^{ab}	61.20 ^a
花铃期	单生育期	(1,3)	1.26 ^{ab}	5.35 ^a	0.25 ^c	0.45 ^b	-1.06 ^b	2.95 ^a	(1,4)	1.13 ^{ab}	7.00 ^a	21.00 ^b
		(3,5)	-0.98 ^c	4.08 ^a	-5.50 ^d	0.81 ^{ab}	2.36 ^a	1.17 ^a	(3,7)	-0.63 ^b	5.90 ^a	17.93 ^b
	多生育期	(1,3)	1.00 ^{ab}	2.71 ^a	5.50 ^{ab}	0.70 ^{ab}	3.86 ^a	-2.10 ^a	(1,4)	1.49 ^a	2.55 ^b	43.20 ^a
		(3,5)	0.40 ^{bc}	4.23 ^a	8.00 ^a	0.40 ^b	4.00 ^a	4.75 ^a	(3,7)	0.73 ^{ab}	2.97 ^b	33.93 ^b
	对照	(0,0)	2.20 ^a	3.32 ^a	0.75 ^{bc}	2.38 ^a	3.42 ^a	5.00 ^a	(0,0)	1.70 ^a	6.20 ^a	36.55 ^a
吐絮期	单生育期	(1,3)	2.52 ^a	3.30 ^a	1.00 ^b	-1.36 ^a	2.18 ^{ab}	3.90 ^a	(1,4)	-1.45 ^a	-1.75 ^a	0.01 ^{ab}
		(3,5)	3.04 ^a	9.04 ^a	0.01 ^b	-0.06 ^a	4.19 ^a	0.01 ^a	(3,7)	-1.23 ^a	-2.10 ^a	2.00 ^a
	多生育期	(1,3)	2.56 ^a	4.55 ^a	9.50 ^{ab}	-0.39 ^a	1.78 ^b	0.75 ^a	(1,4)	-1.56 ^a	-1.60 ^a	0.75 ^{ab}
		(3,5)	0.83 ^a	4.97 ^a	24.00 ^a	-1.18 ^a	1.85 ^{ab}	0.01 ^a	(3,7)	-1.51 ^a	-0.90 ^a	-4.50 ^b
	对照	(0,0)	1.66 ^a	3.49 ^a	1.50 ^b	-2.44 ^a	2.03 ^{ab}	4.00 ^a	(0,0)	-1.35 ^a	-0.07 ^a	-0.50 ^{ab}

花铃期内遭受较重程度的涝渍综合胁迫后,各处理的 G_{LAI} 均受到不同程度的抑制,2008 年单生育期 (3,5)、2010 年单生育期 (3,7) 以及 2008、2009 年多生育期 (3,5) 涝渍综合胁迫均显著抑制叶面积生长。 G_J 变化规律并不明显,仅在 2010 年出现了显著抑制现象。 G_Z 在 3 a 内无明显规律,主要原因是花铃期对棉株进行打顶处理后株高生长基本停滞,此后影响棉花株高的首要因素不再是涝渍胁迫。由此可见,花铃期内遭受涝渍综合胁迫,仅叶面积生长在

所有年份均受到显著影响,茎粗生长只在个别年份受到显著影响,而株高的生长规律不明显,主要是因为株高生长在打顶后变得极为缓慢,这与其他研究者试验结果相似^[15]。

吐絮期内涝渍综合胁迫不会对棉花形态生长产生显著影响,这表明吐絮期内棉花形态对涝渍胁迫不敏感。该结论与 Sojka 等的研究结论相似,其认为棉花在生育晚期时器官已成熟甚至趋于老化,对涝渍胁迫的反应不如前期^[16]。

3 涝渍胁迫对棉花产量的影响

3.1 涝渍胁迫形式对棉花产量的影响

如图 1 所示,(5,0)单涝、(0,8)单渍和(5,8)涝渍综合胁迫均会导致籽棉产量显著减少,但不会造成干物质显著减产,单涝、单渍和涝渍综合胁迫平均造成 37.64%、28.24% 和 33.40% 的籽棉减产,和 29.65%、22.45% 和 27.67% 的干物质减产。由此可见,即使单渍历时(3、5、8 d)较单涝历时更长(1、3、5 d),单渍造成的籽棉减产效应仍不及单涝。另外,干物质减产效应不及籽棉产量,主要是因为棉花在涝渍胁迫解除后出现营养生长恢复现象,干物质质量同步呈现恢复过程,但生殖生长受到营养生长的抑制,导致籽棉产量进一步减小。

3.2 涝渍发生生育期对棉花产量的影响

如图 2a 所示,2008 年花铃期(3,5)和 2010 年花铃期(3,7)涝渍综合胁迫均显著降低籽棉产量,蕾期和吐絮期内处理无显著减产作用。2008 年蕾期、花铃期和吐絮期内涝渍综合胁迫分别导致籽棉产量下降 29.36%、38.33% 和 -5.02%,2009 年和

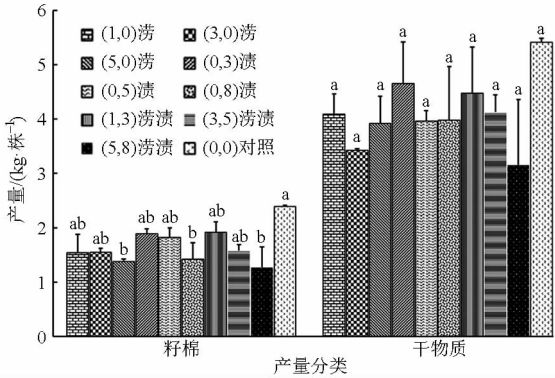


图 1 2011 年不同涝渍胁迫形式对产量的影响

Fig. 1 Effects of different waterlogging stress forms on yield in 2011

2010 年同项指标分别下降 2.54%、22.21%、-3.90% 和 5.43%、21.01%、9.66%。以上结果表明各生育期内涝渍综合胁迫均会造成籽棉不同程度的减产,花铃期内减产效应最为显著,而吐絮期内减产效应并不明显,甚至出现不减产现象。这与 Bange 等^[7]研究所得结论相似,其认为当涝渍胁迫发生在棉花生育期晚期时,掉落的棉桃比例更少,减产效应不甚明显。

如图 2b 所示,涝渍处理组干物质产量的减产现

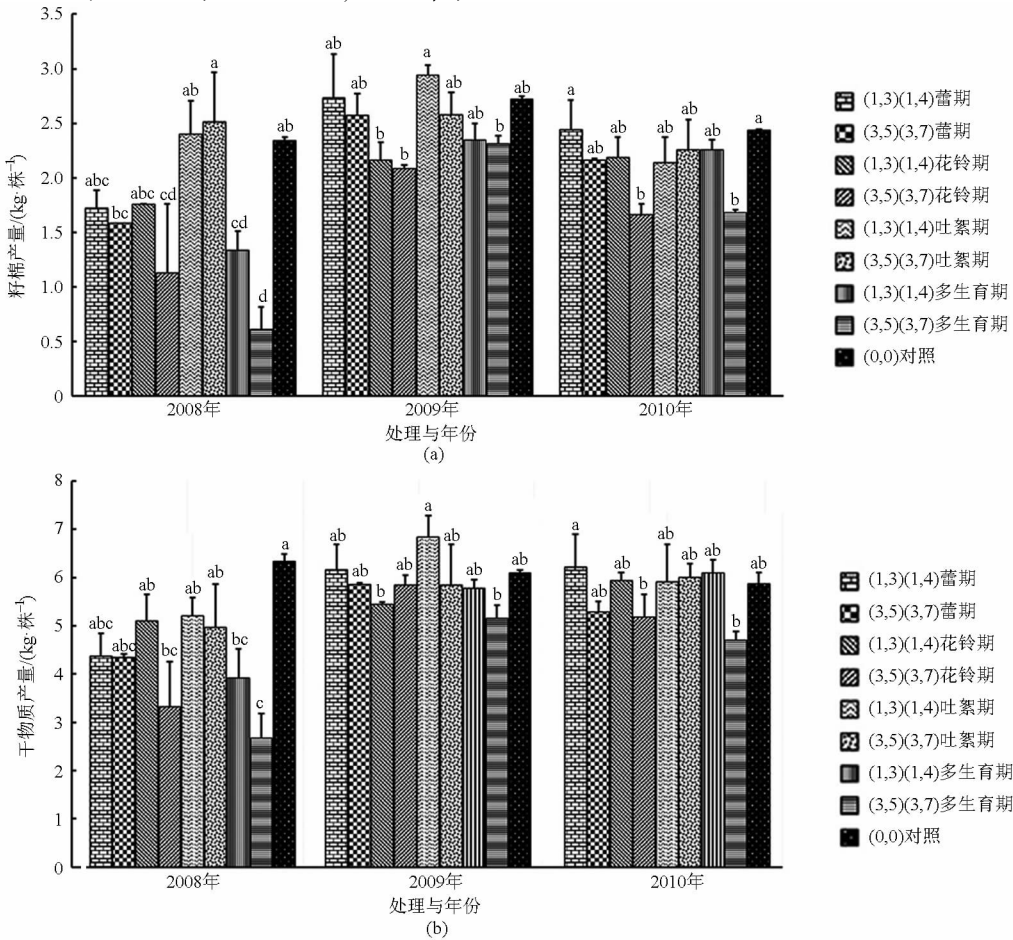


图 2 2008—2010 年不同涝渍发生生育期对产量的影响

Fig. 2 Effects of different waterlogging occurring stages on yield during 2008—2010

象并不明显,尤其在 2009 年和 2010 年内各涝渍处理组干物质产量与对照组差异不显著,并且干物质产量在涝渍胁迫条件下的减产率普遍低于籽棉产量,以上表明干物质产量对涝渍综合胁迫的敏感性不及籽棉产量。

4 “涝渍胁迫-形态特征-产量水平”关系模型建立

4.1 模型基本原理

涝渍胁迫抑制棉花的营养生长和生殖生长,进而影响形态特征及产量水平。同时,在涝渍解除后营养生长可能恢复,生殖生长受到抑制,进而影响产量形成。由此可见,棉花形态和产量对涝渍胁迫的响应是一个过程的两种表现形式,并且前者对后者有一定影响。因此模型中潜在变量间的因果关系可表述为:“涝渍胁迫”为因(自变量)时,“形态特征”与“产量水平”同时为果(因变量);“形态特征”为因(自变量)时,“产量水平”为果(因变量)。

4.2 模型建立

4.2.1 潜在变量和观测变量

在结构方程模型中,潜在变量是指无法直接测量或观察得到的变量,观测变量是指可直接测量或观察得到的变量^[13]。本文选用“涝渍胁迫”、“形态特征”以及“产量水平”作为潜在变量。

选用兼顾涝渍单一和综合胁迫的指标体系^[17]: ①涝渍空间单一指标(SFW、SEW₃₀)^[18-19]。②涝渍时间单一指标(SWFDH、SEW₃₀)^[20]。③涝渍综合指标 SFEW₃₀^[21]。其中 SFW 是指地面累积受淹深度(cm·d);SEW₃₀是指累积超标地下水位(cm·d);SWFDH 是指受涝期间累积地表受淹深度和累积超标地下水位之和(cm·d);SFEW₃₀是涝渍综合指标(cm·d),等于 SFW 和 SEW₃₀之和。将上述 3 类变量作为“涝渍胁迫”的观测变量。叶面积指数、茎粗和株高易于观测且贯穿全生育期,选作为“形态特征”的观测变量。籽棉产量和干物质产量均可以用来衡量棉花产量,选为“产量水平”的观测变量。

4.2.2 数据的选用

以 2008—2011 年涝渍综合胁迫处理测坑的数据作为基本数据单元,以棉花全生育期为研究期,模型输入数据包括各测坑的累积涝渍指标:(SFW、SEW₃₀)、(SWFDH、SEW₃₀)、SFEW₃₀以及棉花收获时的叶面积指数、茎粗、株高、籽棉产量和干物质产量。为消除年际效应的影响,所有作物指标均采用相对值,即原值与当年对照组的比值(%)。

4.3 模型结果与分析

4.3.1 以涝渍单一胁迫为基础的“涝渍胁迫-形态特征-产量水平”关系模型

以涝渍空间单一指标(SFW、SEW₃₀)和涝渍时间单一指标(SWFDH、SEW₃₀)分别作为“涝渍胁迫”的观测变量,研究涝渍单一胁迫与棉花形态及产量的关系。模型中各变量之间的作用关系如图 3 所示。图中椭圆形代表潜在变量,矩形代表观测变量,圆形 e 代表误差项,e1~e7 为观测变量误差项,e8、e9 为潜在变量误差项。观测变量到潜在变量以及两潜在变量间的箭头线旁的数值均为标准化回归系数值,在结构方程模型中即为直接效果值,表示箭头始端变量影响箭头终端变量的强度,其绝对值介于[0,1],越接近 1,影响强度越高;箭头始端是因,终端是果。图中数值为正表示正相关,为负则表示负相关。模型适配度检验:图 3a、3b 2 个模型的卡方值分别为 11.662 和 13.621(自由度均为 11),显著性概率 p 分别为 0.390 和 0.277,均大于 0.05,未达显著水平,接受虚无假设,即假设模型图与观察数据匹配^[13]。RMSEA 分别为 0.033 和 0.059,均小于 0.08,GFI 分别为 0.938 和 0.936,均大于 0.9,即模型适配良好。

4.3.2 以涝渍综合胁迫为基础的“涝渍胁迫-形态特征-产量水平”关系模型

以涝渍综合指标 SFEW₃₀作为“涝渍胁迫”的观测变量,研究涝渍综合胁迫与棉花形态及产量的关系。由于 SEM 分析中限定一个潜在变量必须以 2 个及以上的参考变量来估计,因此在以涝渍综合指标 SFEW₃₀单独表示“涝渍胁迫”时,需将“涝渍胁迫”由潜在变量调整为观测变量。模型最终输出结果如图 4 所示。模型适配度检验:卡方值为 7.591(自由度为 7),显著性概率 $p=0.370>0.05$,未达显著水平,接受虚无假设,即假设模型图与观察数据匹配。卡方自由度比为 1.084,介于 1~3 之间,RMSEA 为 0.038<0.08,GFI 为 0.957>0.9,即模型适配良好。

对比分析以上 3 个关系模型,可得出以下结论:

(1)“涝渍胁迫-产量水平”和“涝渍胁迫-形态特征”的直接效果值(图 3、图 4 中箭头旁数值)均为负值,且前者绝对值(在 3 个模型中分别为 0.52、0.64、0.53)大于后者(0.42、0.53、0.45),表明涝渍胁迫对棉花产量的影响大于对形态的影响,主要原因在于涝渍解除后旺盛的营养生长加速了形态指标的恢复。“形态特征”对“产量水平”具有较低的正向效果(0.18、0.19、0.20),表明形态特征能正向影响产量但效果有限。

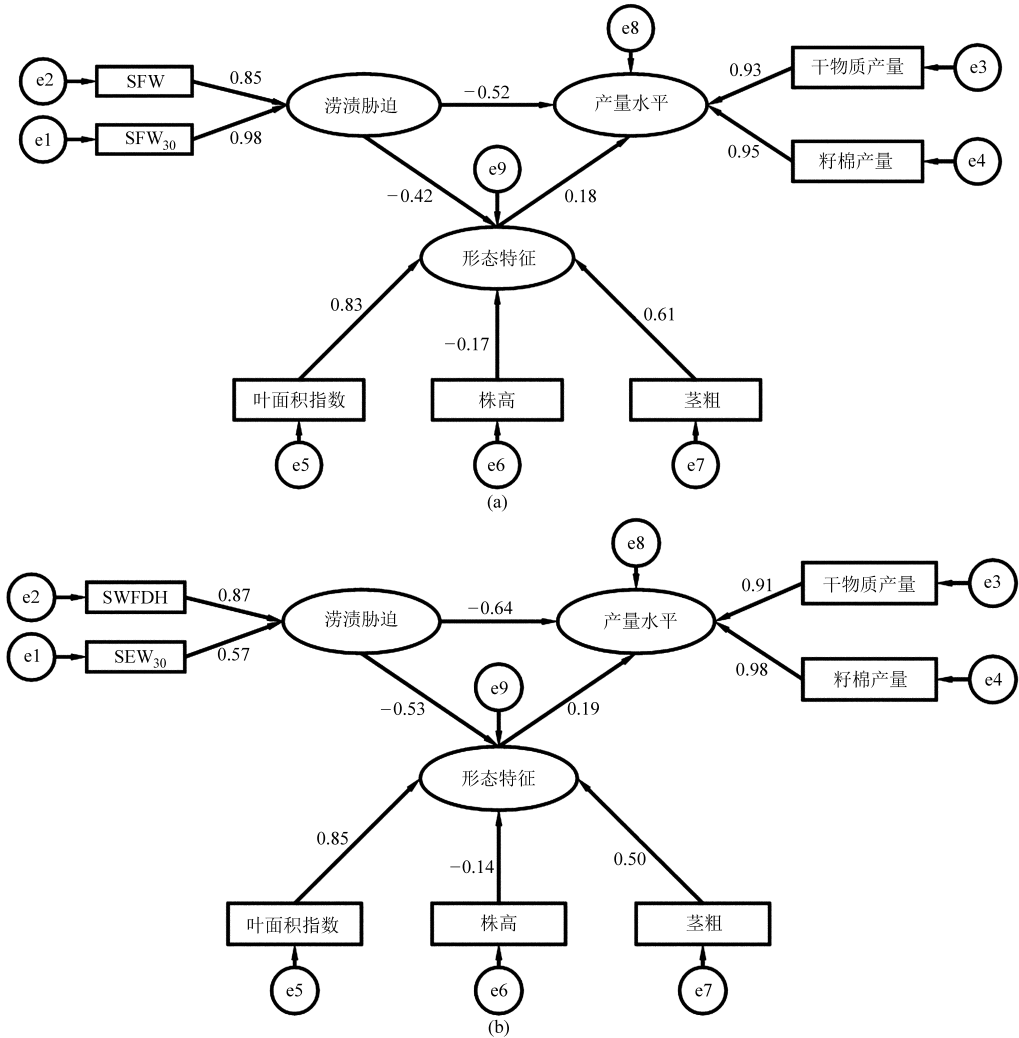


图 3 以涝渍单一胁迫为基础的“涝渍胁迫-形态特征-产量水平”关系模型

Fig. 3 Yield and morphology characteristics model related to single waterlogging stress

(a) 以涝渍空间单一指标为观测变量 (b) 以涝渍时间单一指标为观测变量

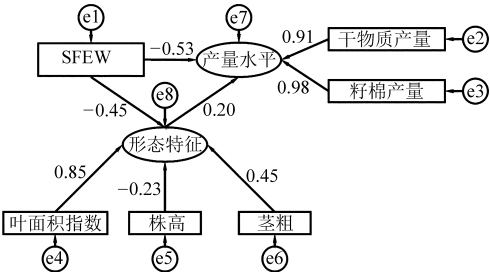


图 4 以涝渍综合胁迫为基础的“涝渍胁迫-形态特征-产量水平”关系模型

Fig. 4 Yield and morphology characteristics model related to surface-subsurface waterlogging stress

(2) 各形态指标中,叶面积指数对于“形态特征”的直接效果值(0.83、0.85、0.85)最高,表明叶面积指数对涝渍胁迫反应最为敏感,是用以描述棉株形态特征变化的最佳指标。茎粗对于“形态特征”的直接效果值(0.61、0.50、0.45)仅次于叶面积指数,表明茎粗也能较好地反映形态特征。株高对

于“形态特征”的直接效果值为负(-0.17、-0.14、-0.23),说明株高的响应与棉株形态特征的变化并不同步,主要是因为花铃期打顶后株高的生长变得非常缓慢,涝渍胁迫的影响难以体现。

(3) 籽棉产量对“产量水平”的直接效果值(0.95、0.98、0.98)大于干物质产量(0.93、0.91、0.91),表明涝渍胁迫下籽棉产量的变化比干物质产量更敏感,更能解释产量水平的下降。这是由于在涝渍胁迫解除后营养生长抢占生殖生长的养分,干物质减产得到一定程度的补偿而籽棉产量仍受影响。

(4) 涝渍时间单一指标与“形态特征”(0.53)和“产量水平”(0.64)的相关性在 3 个模型中均为最高,并且该指标中涝害的影响(0.87)要大于渍害(0.57),与前文试验结果分析结论吻合,表明该指标更适合描述涝渍胁迫对棉花形态特征和产量的负面效应。

5 结论

(1)棉花形态对涝渍胁迫的响应与涝渍胁迫的形式和发生生育期有关。涝渍综合胁迫的抑制作用最显著,其次是单涝胁迫,单渍胁迫影响较小,尤其单渍胁迫对叶面积生长的抑制作用显著低于单涝;蕾期和花龄期内涝渍综合胁迫对形态生长会产生较大影响,而吐絮期内作用较小。

(2)在 3 种形态指标中,按照对涝渍胁迫的敏感性从大到小依次为:叶面积指数、茎粗和株高。叶面积指数在各涝渍试验年份中均显著下降,且在 SEM 模型中对形态特征的直接效果值最大,表明在实践中可优先作为涝渍胁迫条件下棉花长势的监测指标。

(3)棉花产量对涝渍胁迫的响应与涝渍胁迫的形式和发生生育期有关。涝渍综合胁迫和单涝胁迫

的减产效应相近,均大于单渍胁迫;3 个生育期对于涝渍胁迫的敏感性从高到低依次为:花铃期、蕾期和吐絮期,花铃期内涝渍综合胁迫会导致籽棉产量显著减小。

(4)涝渍胁迫对干物质产量的抑制作用小于对籽棉产量的抑制作用,对形态特征的抑制作用小于对产量的抑制作用。主要原因可能在于涝渍胁迫解除后棉花在恢复生长中以营养生长为主,生殖生长受到一定限制,最终养分用以形成更多营养器官而非形成籽棉产量。

(5)在 3 个“涝渍胁迫-形态特征-产量水平”SEM 中,涝渍时间单一指标(SWFDH、SEW₃₀)对形态特征和产量水平的抑制作用最大,且涝渍综合胁迫中涝害的权重大于渍害,与前述试验结果分析吻合,表明该指标最适合描述涝渍胁迫对棉花形态特征和产量的影响。

参 考 文 献

1 Christianson J A, Llewellyn D J, Dennis E S, et al. Global gene expression responses to waterlogging in roots and leaves of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. Plant and Cell Physiology, 2010,51(1): 21 – 37.

2 Reicosky D, Meyer W, Schaefer N, et al. Cotton response to short-term waterlogging imposed with a water-table gradient facility [J]. Agricultural Water Management, 1985,10(2): 127 – 143.

3 Meyer W, Reicosky D, Barrs H, et al. Physiological responses of cotton to a single waterlogging at high and low N-levels[J]. Plant and Soil, 1987,102(2): 161 – 170.

4 李秉柏,陆景淮,吴金栋,等. 旱涝灾害对江苏棉花生产影响初探 I:旱涝灾害对棉花生长的影响[J]. 中国农业气象, 1995, 16(3): 23 – 26.

Li Bingbai, Lu Jinghuai, Wu Jindong, et al. A primary study on the effects of drought and waterlogging on cotton production in Jiangsu Province I. Effect of drought and waterlogging on cotton growing[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1995,16(3):23 – 26. (in Chinese)

5 Cao Guang, Wang Xiugui, Liu Yu, et al. Effect of waterlogging stress on cotton leaf area index and yield [J]. Procedia Engineering, 2012,28: 202 – 209.

6 Hodgson A. The effects of duration, timing and chemical amelioration of short-term waterlogging during furrow irrigation of cotton in a cracking grey clay[J]. Crop and Pasture Science, 1982,33(6): 1019 – 1028.

7 Bange M, Milroy S, Thongbai P. Growth and yield of cotton in response to waterlogging[J]. Field Crops Research, 2004,88(2): 129 – 142.

8 朱建强,刘会宁. 多次涝渍胁迫间歇作用对棉花产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2007,26(1): 22 – 25.

Zhu Jianqiang, Liu Huining. Influence of intermittent waterlogged stresses on cotton output [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2007,26(1):22 – 25. (in Chinese)

9 李慧伶,王修贵,程伦国,等. 多阶段受涝渍综合影响的农田排水指标试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2005,24(4): 1 – 4.

Li Huiling, Wang Xiugui, Cheng Lunguo, et al. Research on the criteria of farmland drainage under the influence of combined controlling of surface and subsurface water logging in several phases of cotton[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2005,24(4): 1 – 4. (in Chinese)

10 杨云. 蕾花期涝渍胁迫后棉花恢复生长的生理机制研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.

Yang Yun. Study on the recovery of growth and its physiological mechanisim of cotton after waterlogging during the bud stage and flowering and boll-forming stage[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2011. (in Chinese)

11 程伦国,朱建强,刘德福,等. 田间涝渍对棉花产量的影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2010,29(5): 42 – 45.

Cheng Lunguo, Zhu Jianqiang, Liu Defu, et al. Influence of waterlogging on cotton output in cropland[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2010,29(5):42 – 45. (in Chinese)

12 朱建强,欧光华,张文英,等. 棉花花铃期涝渍相随对棉花产量的试验研究[J]. 农业工程学报, 2003,19(4): 80 – 83.

Zhu Jianqiang, Ou Guanghua, Zhang Wenying, et al. Experimental research on effect of surface and subsurface waterlogging in stage of cotton flowering and boll set on yield[J]. Transactions of the CSAE,2003,19(4):80 – 83. (in Chinese)

- 20 马玉芳,王洪起,宋红梅,等. 红富士苹果幼树根系分布及年生长特性研究[J]. 中国果树,1993(3):1-4.
- 21 郝锋珍,孙西欢,郭向红,等. 蓄水坑灌与地面灌条件下果树吸水根系分布的对比研究[J]. 节水灌溉,2014(9):5-8.
Hao Fengzhen, Sun Xihuan, Guo Xianghong, et al. Comparative research on fruit tree water-uptake root distribution under the condition of water storage pit irrigation and surface irrigation[J]. Water Saving Irrigation,2014(9):5-8. (in Chinese)
- 22 任雪菲,李丙智,张林森,等. 苹果中间砧入土深度对根系生长及其激素含量和果实产量品质的影响[J]. 园艺学报,2013,40(11):2127-2136.
Ren Xuefei, Li Bingzhi, Zhang Linsen, et al. Effects of planting depth of apple dwarfing rootstock on root growth, hormone content, fruit yields and quality[J]. Acta Horticulturae Sinica,2013,40(11):2127-2136. (in Chinese)
- 23 张文锦,马娟娟,孙西欢,等. 蓄水坑灌条件下不同肥液浓度对果园土壤呼吸影响及水热关系分析[EB/OL]. 北京:中国科技论文在线[2014-12-29]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201412-887>.
Zhang Wenjin, Ma Juanjuan, Sun Xihuan, et al. Effects of different levels of fertilizer solution concentration on the orchard soil respiration and the analysis of soil temperature and moisture under water storage pit irrigation [EB/OL] Beijing: Science paper online, [2014-12-29]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201412-887>. (in Chinese)
- 24 孙文泰,张坤,刘小勇,等. 垄膜集雨对陇东旱塬苹果根系分布及土壤性状的影响[J]. 西北农业学报,2012,21(10):100-105.
Sun Wentai, Zhang Kun, Liu Xiaoyong, et al. Influence of plastic film mulching on ridge and rain harvesting on root distribution characteristics of apples and soil properties in dryland orchards of Longdong areas [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2012,21(10):100-105. (in Chinese)
- 25 张亚琼,孙西欢,郭向红,等. 不同覆盖方式下蓄水坑土壤温度日变化特征研究[J]. 节水灌溉,2013(1):1-5.
Zhang Yaqiong, Sun Xihuan, Guo Xianghong, et al. Daily variation of soil temperature in water storage pit under different covering means[J] Water Saving Irrigation,2013(1):1-5. (in Chinese)
- 26 高茂盛,温晓霞,黄灵丹,等. 耕作和秸秆覆盖对苹果园土壤水分及养分的影响[J]. 自然资源学报,2010,25(4):547-555.
Gao Maosheng, Wen Xiaoxia, Huang Lingdan, et al. The effect of tillage and mulching on apple orchard soil moisture and soil fertility[J]. Journal of Natural Resources,2010,25(4):547-555. (in Chinese)
- 27 员学锋,吴普特,汪有科. 秸秆覆盖桃树地生态效应及桃树的生长状况[J]. 农业工程学报,2007,23(1):91-94.
Yun Xuefeng, Wu Pute, Wang Youke. Physiological and ecological conditions of peach under the straw mulching treatment [J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(1):91-94. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 143 页)

- 13 吴明隆. 结构方程模型: AMOS 的操作与应用[M]. 重庆:重庆大学出版社,2009.
- 14 马玉华. 田间试验和统计方法[M]. 北京:中国农业出版社,1979.
- 15 陆景淮,李秉柏,吴金栋,等. 旱涝灾害对江苏棉花生产影响初探Ⅱ. 江苏棉花生产旱涝灾害分区评述[J]. 中国农业气象,1997,18(6):51-52.
- 16 Sojka R, Stolzy L. Soil-oxygen effects on stomatal response[J]. Soil Science, 1980,130(6):350-358.
- 17 钱龙,王修贵,罗文兵,等. 涝渍胁迫条件下 Morgan 模型的试验研究[J]. 农业工程学报,2013,29(16):92-101.
Qian Long, Wang Xiugui, Luo Wenbing, et al. Experimental study on Morgan model under waterlogging stress[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16):92-101. (in Chinese)
- 18 Sieben W H. Het verband tussen ontwatering en opbrengst bij de jonge zavelgronden in de Noordoostpolder [M]. The Netherlands: Van Zee Tot Land, 1964.
- 19 程伦国,王修贵,朱建强,等. 多过程连续涝渍胁迫对棉花产量的影响[J]. 中国农村水利水电,2006(8):59-61.
Cheng Lunguo, Wang Xiugui, Zhu Jianqiang, et al. Influences of multistage successive waterlogging on cotton yeild[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(8):59-61. (in Chinese)
- 20 朱建强,欧光华,张文英,等. 涝渍相随对棉花产量与品质的影响[J]. 中国农业科学,2003,36(9):1050-1056.
Zhu Jianqiang, Ou Guanghua, Zhang Wenying, et al. Influence of subsurface waterlogging followed by surface waterlogging on yield and quality of cotton[J]. Scientia Agricultura Sinica,2003,36(9):1050-1056. (in Chinese)
- 21 沈荣开,王修贵,张瑜芳,等. 涝渍排水控制指标的初步研究[J]. 水利学报,1999(3):72-75.
Shen Rongkai, Wang Xiugui, Zhang Yufang, et al. A study on the drainage index for combined control of surface and subsurface waterlogging[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999(3):72-75. (in Chinese)