

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.023

水肥耦合对棉花产量、收益及水分利用效率的效应^{*}

吴立峰¹ 张富仓^{1,2} 范军亮¹ 周罕觅¹ 梁飞³ 高志建³

(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. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;
3. 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 石河子 832000)

摘要: 研究滴灌施肥条件下水肥耦合对棉花籽棉产量、水分利用效率和净收益的影响,并运用多元二次回归与归一化及3种不同目标值组合方式相结合的方法,探索满足多目标综合效益最大化的滴灌水肥用量。采用田间试验的方法,于2012年和2013年棉花生长季,设置5个N-P₂O₅-K₂O施肥水平150-60-30、200-80-40、250-100-50、300-120-60、350-140-70 kg/hm²(分别记为F₁₅₀、F₂₀₀、F₂₅₀、F₃₀₀、F₃₅₀)和3个灌溉水平(60%ET_c:W₁、80%ET_c:W₂、100%ET_c:W₃,ET_c是作物蒸发蒸腾量)。结果表明,籽棉产量、水分利用效率和净收益的水肥耦合效应明显,60%ET_c灌水水平显著抑制籽棉产量并降低净收益,100%ET_c灌水水平能够显著提高籽棉产量和净收益,但水分利用效率低于60%ET_c灌水水平。2012年灌水量为100%ET_c且施肥量300-120-60 kg/hm²(N-P₂O₅-K₂O)时籽棉产量最高,但净收益并未增加,2 a灌水量为100%ET_c且施肥量250-100-50 kg/hm²(N-P₂O₅-K₂O)时的净收益最高。二次回归分析结果表明,3种组合方式均可用于水肥多目标优化,其中乘法组合方式2 a水肥投入量差异更小且各目标值变化也更小,2012年灌水量92%ET_c、施肥量278-111-56 kg/hm²(N-P₂O₅-K₂O)以及2013年灌水量90%ET_c、施肥量268-107-53 kg/hm²(N-P₂O₅-K₂O)可作为籽棉产量、水分利用效率和净收益综合效益最大化的水肥管理策略。

关键词: 棉花 水肥耦合 产量 水分利用效率 净收益

中图分类号: S562 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)12-0164-09

Effects of Water and Fertilizer Coupling on Cotton Yield, Net Benefits and Water Use Efficiency

Wu Lifeng¹ Zhang Fucang^{1,2} Fan Junliang¹ Zhou Hanmi¹ Liang Fei³ Gao Zhijian³

(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. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Institute of Water and Soil Fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

Abstract: The coupling effects of different water and fertilizer combinations on seed cotton yield, water use efficiency and net benefits under drip fertigation were studied in the field of Shihezi during the growing seasons in 2012 and 2013. Multivariate quadratic regression and normalization as well as three different target combinations were used and the optimal water and fertilizer combination that maximized the multi-objective benefits was explored. There were five N-P₂O₅-K₂O fertilizer application rates (150-60-30, 200-80-40, 250-100-50, 300-120-60, 350-140-70 kg/hm²; denoted as F₁₅₀, F₂₀₀, F₂₅₀, F₃₀₀ and F₃₅₀, respectively) and three irrigation levels (W₁: 60% ET_c; W₂: 80% ET_c; W₃:

收稿日期: 2015-04-27 修回日期: 2015-06-15

^{*} 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100504)、教育部高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12007)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130204110030)

作者简介: 吴立峰, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: china_sw@163.com

通讯作者: 张富仓, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

100% ET_c ; ET_c represents crop evapotranspiration). The results showed that the coupling of water and fertilizer had significant effects on seed cotton yield, water use efficiency and net benefits. The treatment with low irrigation level (60% ET_c) significantly inhibited seed cotton yield and net benefits, while the treatment with high irrigation level (100% ET_c) significantly increased seed cotton yield and net benefits, but caused lower water use efficiency than that of the treatment with low irrigation level. The combination of irrigation with 100% ET_c and fertilizer application rate of 300 – 120 – 60 kg/hm² (N – P₂O₅ – K₂O) in 2012 produced the highest seed cotton yield, but it did not increase the net benefits. Instead, the combination of irrigation with 100% ET_c and fertilizer application rate of 250 – 100 – 50 kg/hm² (N – P₂O₅ – K₂O) produced the highest net benefits in 2012 and 2013. The quadratic regression analysis showed that the multiplication combination exhibited much smaller differences in water and fertilizer inputs in 2012 and 2013 than other combinations. The combination of irrigation with 92% ET_c and fertilizer application rate of 278 – 111 – 56 kg/hm² (N – P₂O₅ – K₂O) in 2012, and the combination of irrigation with 90% ET_c and fertilizer application rate of 268 – 107 – 53 kg/hm² (N – P₂O₅ – K₂O) in 2013 could maximize the overall multi-objective benefits of seed cotton yield, water use efficiency and net benefits. The results can provide new ideas for the multi-objective management of water and fertilizer in cotton fields under drip fertigation.

Key words: Cotton Water and fertilizer coupling Yield Water use efficiency Net benefits

引言

棉花不仅是新疆播种面积最大的经济作物,更是一种对水肥要求较高的作物。近年来,由于棉花膜下滴灌技术的迅速发展,国内较多学者就滴灌条件下棉花水肥耦合效应进行了较多的研究。郑重等^[1]研究了滴灌条件下棉花的水氮耦合效应,认为在北疆棉区花铃期土壤水分应控制在田间持水率的 60% ~ 65%,以灌水定额 375 m³/hm²、灌水间隔 6 ~ 8 d 较为合理,最佳灌溉定额为 3 900 m³/hm²、施氮量为 270 kg/hm²;谢映周等^[2]认为,新疆滴灌棉田产量的逐步提高与棉花种植密度的增加、水肥后移、花期以后钾的施用量增加等栽培措施密切相关;李培岭等^[3-4]研究了甘肃棉区不同滴灌方式棉花水氮耦合效应,提出了有利于棉花生长和水氮高效利用的水肥耦合效应模式。陈碧华等^[5]对灌水量和施肥量进行两因素的二次回归分析,得出番茄果实品质和产量等各自单目标最优的水肥组合。Thompson 等^[6]通过二次回归建立了水氮投入与花椰菜产量、土壤硝态氮残留和净收益的函数关系,并通过空间分析方法得出了综合产量、土壤硝态氮残留和净收益的多目标适宜水氮区间。李新伟等^[7]建立了棉花冠层归一化植被指数的氮素追肥推荐模型。尽管有关棉花滴灌水氮方面的研究较多^[8-10],但大多研究中,磷、钾肥以充分供应为主,然而,磷、钾肥过多也可能造成化肥浪费和根区盐分累积的问题^[11-12]。此外,由于北疆地区碱性土壤居多,碱性土壤环境容易造成磷肥与土壤钙、镁离子结合,生成沉淀,降低

磷肥利用率^[13]。滴灌施肥通过施入酸性肥料不但可以将水肥直接施入作物根区,还可以调节土壤 pH 值,有助于根系对氮、磷、钾肥的吸收。但滴灌施肥不当比常规施肥更容易加剧盐分流失或根区盐分累积。适宜的灌溉与氮、磷、钾肥配比不仅有助于保证作物产量又可以避免水和肥料浪费,减少多余肥料对环境的影响,但由于试验处理有限,所谓的适宜灌溉与施肥有可能在所设处理之外,且单一处理往往难以兼顾增产高效的多种目标,基于产量收益及环境效益等多目标的水肥管理优化方法还很匮乏。

本文以产量、水分利用效率和经济效益的综合提高为目标,利用膜下滴灌施肥技术,研究北疆大田棉花不同灌水量和不同肥料配比耦合对棉花产量、水分利用效率和净收益的影响,建立水肥投入与产量、水分利用效率和净收益的数量关系,并探讨基于产量、水分利用效率和净收益多目标下的适宜水肥管理策略,以期为北疆膜下滴灌棉花实施有效的水肥一体化管理提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2012、2013 年 4—10 月在新疆农垦科学院节水灌溉试验站进行,该试验站位于石河子市境内,属于温带大陆性干旱气候,全年无霜期 168 d,日照时数 2 770 h,大于 10℃ 积温 3 649℃,棉花生长季(5—10 月)年均降水量 121 mm,其中 2012 年和 2013 年降水量分别为 62 mm 和 123 mm。地下水埋深在 15 m 以下。试验区 0 ~ 30 cm 土壤为砂壤土,

土壤容重 1.51 g/cm³,田间持水率 0.32 cm³/cm³,土壤有机质质量比 18 g/kg,pH 值 7.8;30 ~ 100 cm 为粉质粘土,土壤容重 1.45 g/cm³,田间持水率 0.36 cm³/cm³,有机质含量 5 g/kg,pH 值 8.5。供试棉花为新陆早 33 号 (*Gossypium hirsutum* cv. Xinluzao 33),参照该地区地膜覆盖,矮杆密植,干播湿出的棉花种植模式,播种日期为 2012 年 5 月 1 日和 2013 年 4 月 27 日,采用一膜三带六行滴灌模式,即一膜种植 6 行棉花,行距依次为 20、55、20、55、20 cm,膜间裸地宽 60 cm,株距为 10 cm,小区长度为 15 m,宽度为 4.6 m。

1.2 试验设计

试验设滴灌灌水量和施肥量 2 个因素,以施肥量为主区,灌水量为副区。2 a 处理方式相同。有研究表明,施氮量在 300 kg/hm²以上时,棉花产量增加不明显^[14]甚至略有下降^[15],故本研究以施肥量 250 - 100 - 50 kg/hm² (N - P₂O₅ - K₂O) 为基础,设置 3 个减量施肥和 1 个增量施肥处理,共 5 个 N - P₂O₅ - K₂O 配比不同的施肥水平:150 - 60 - 30 (F₁₅₀)、200 - 80 - 40 (F₂₀₀)、250 - 100 - 50 (F₂₅₀)、300 - 120 - 60 (F₃₀₀)、350 - 140 - 70 (F₃₅₀) kg/hm²。此外,根据作物蒸发蒸腾量 (Crop evapotranspiration, ET_c),设 3 个灌水量水平:60% ET_c (W₁)、80% ET_c (W₂)、100% ET_c (W₃)。ET_c 计算式^[14]为

$$ET_c = E_p K_{CP} \tag{1}$$

其中 $K_{CP} = K_p K_C \tag{2}$

式中 E_p ——自由水面蒸发量,mm;在大田由直径为 20 cm 蒸发皿 (ADM7 型) 实测获得
 K_p ——蒸发皿系数 K_C ——作物系数
 K_{CP} ——棉花不同生育期蒸发皿-作物系数

根据文献 [16], K_{CP} 分别取 0.15 (苗期)、0.4 (现蕾期)、0.7 (开花期)、0.25 (吐絮期),由于该地区棉花农业生产中为了控制苗期过快生长,在苗期末期才开始灌水,加上该地区为井灌区,采取轮灌工作制度,灌水间隔为 10 d 左右,苗期取 0.15 时,低灌水水平 (W₁) 可能会使棉花产生严重的水盐胁迫,影响后期试验处理,因此本研究中苗期 K_{CP} 取 0.2。

降水量对蒸发量进行修正^[16]

$$\Delta E_p = 0.4 P_r / K_{CP} - 0.8 P_r \tag{3}$$

式中 ΔE_p ——允许蒸发量,mm

P_r ——降水量,mm

首先设定不考虑降水时的允许蒸发量,如果有降水发生,则按式 (3) 对设定的允许蒸发量进行修正^[16]。研究共 15 个处理,进行完全区组设计,每个处理设 3 次重复。各处理灌水日期相同,每年除灌活苗水 60 mm 外,6 月初开始灌水,8 月下旬结束灌

水,灌水间隔约为 10 d,遇到降水时灌水日期顺延,灌水量为 2 次灌水间隔的水面蒸发量,经式 (1) ~ (3) 计算整理获得。2012 年和 2013 年 3 个水平的灌水量分别为 291、368、445 mm 和 267、329、392 mm。

1.3 测定项目与方法

(1) 籽棉产量

于收获期分 2 次在小区中间 4 行、长度 5 m 区域内测定棉花籽棉产量,实收计产。拾棉日期分别为 2012 年 9 月 17 日和 10 月 10 日,2013 年 9 月 13 日和 10 月 5 日。

(2) 棉花耗水量及水分利用效率 (Water use efficiency, WUE)

作物耗水量计算公式^[17]为

$$ET = P_r + U + I - D - R - \Delta W \tag{4}$$

式中 ET ——作物耗水量,mm
 U ——地下水补给量,mm
 I ——灌水量,mm R ——径流量,mm
 D ——深层渗漏量,mm
 ΔW ——试验初期到末期土壤储水量的变化量,mm

棉花播种前和收获后,在每个小区内膜中、膜间和裸地 3 个位置分别用土钻取土 (0 ~ 140 cm),每 10 cm 取 1 次,采用干燥法,测定土壤含水率,取其平均值作为该小区的土壤含水率 (%)。由于试验区地下水埋藏较深,地势平坦且降水量较少,根据实测,生育期内 1 m 深土壤含水率变化不大,且滴灌湿润深度较浅,因此, U 、 R 和 D 均忽略不计,式 (4) 简化为

$$ET = P_r + I - \Delta W \tag{5}$$

水分利用效率 (kg/m³) 计算公式^[18]为

$$WUE = Y / ET \tag{6}$$

式中 Y ——籽棉产量,kg/hm²

(3) 净收益

净收益 (N_R , 元/hm²) 计算式为

$$N_R = G_R - P_W - I_W - F_W - O \tag{7}$$

式中 G_R ——毛收益,元/hm²
 P_W ——拾棉费,元/hm²
 I_W ——水费,元/hm²
 F_W ——肥料费用,元/hm²
 O ——其他投入,元/hm²

经调查,第 1 次拾棉劳务费定为 1.5 元/kg,第 2 次拾棉劳务费定为 2 元/kg。

2 结果与分析

2.1 不同滴灌施肥水平对棉花产量的影响

如图 1 所示 (数据为平均值 ± 标准差 ($n = 3$)),

不同处理间不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同),在平均施肥水平下,2 a 各灌水水平第 1 次拾棉的籽棉产量表现为 $W_1 > W_2 > W_3$,说明 40% 水分亏缺(W_1 处理)会使棉花提前成熟;而第 2 次拾棉的籽棉产量表现为 $W_1 < W_2 < W_3$,说明 40% 水分亏缺会显著降低籽棉产量,不利于棉花生产。与常规施肥(F_{250})相比,各灌水水平下低肥处理(F_{150})籽棉产量均有显著下降,而增加施肥处理

(F_{300} 、 F_{350})籽棉产量无明显增加,其中 2 a 的 $W_1 F_{150}$ 处理籽棉产量均处于最低水平(分别为 3 983、4 297 kg/hm²),2012 年 $W_3 F_{300}$ 处理籽棉产量最高(5 896 kg/hm²),2013 年 $W_3 F_{250}$ 处理产量最高(5 888 kg/hm²),但总体看 2 a 的 $W_3 F_{250}$ 、 $W_3 F_{300}$ 和 $W_3 F_{350}$ 处理均无显著差异。说明低肥明显抑制了籽棉产量,但高肥对籽棉产量的增加作用不明显。

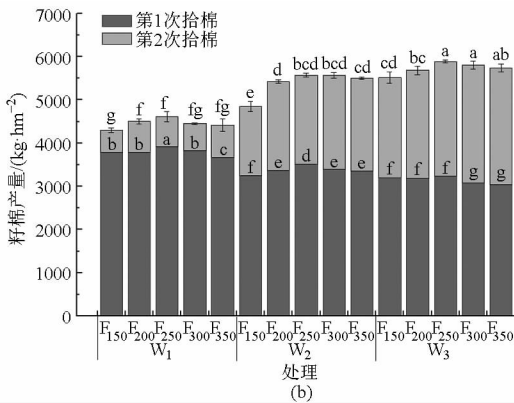
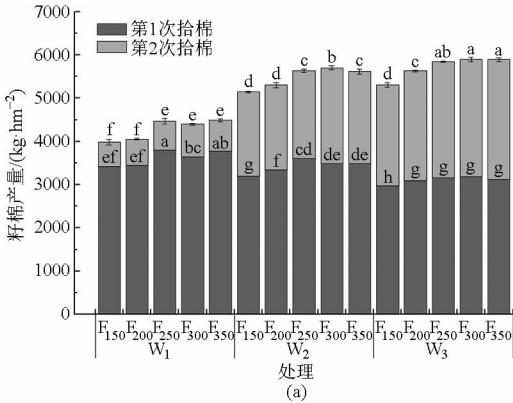


图 1 不同滴灌施肥水平对棉花籽棉产量的影响
Fig. 1 Effect of different fertigation levels on seed cotton yield
(a) 2012 年 (b) 2013 年

2.2 不同滴灌施肥水平对棉花水分利用效率的影响

在相同灌水水平下,棉花 WUE 随施肥水平呈抛物线变化趋势(图 2),其最高值出现在 F_{250} 或 F_{300} 处理。在相同施肥水平下,2012 年除 $W_1 F_{200}$ 处理外, W_1 、 W_2 与 W_3 处理相比 WUE 均有显著提高;2013 年增肥水平(F_{300} 和 F_{350})下, W_1 、 W_2 与 W_3 处理相比 WUE 均有显著提高,说明只有适宜的水肥处理才能提高水分利用效率。其中,WUE 最高的处理为 $W_2 F_{250}$,2 a 分别为 1.65、1.52 kg/m³。2 a 产量处于最高水平的 $W_3 F_{250}$ 处理 WUE 分别为 1.47、1.44 kg/m³, $W_2 F_{250}$ 处理与其相比产量平均下降约 5%,但 2 a 灌水量平均减少 70 mm(大于该地区棉花

生长季降水量的 1/2),WUE 提高 6% ~ 12%。可见,在该地区通过试验的方法难以获得兼顾籽棉产量和 WUE 的处理。

2.3 不同滴灌施肥水平对棉花净收益的影响

从表 1 可以看出,2 a 毛收益介于 31 067 ~ 45 989 元/hm²和 33 517 ~ 45 926 元/hm²之间,2 a 最高与最低毛收益处理相比增幅 48% 和 37%;而净收益最低仅分别为 1 908、2 841 元/hm²,最高为 11 213、11 394 元/hm²,净收益差异达 1.9 ~ 4.9 倍,说明水肥管理不合理不但会影响毛收益,还可能增加水肥成本支出,使净收益成倍下降。2 a 的 W_1 处理水费支出比 W_3 处理仅分别节省 616、500 元/hm²,

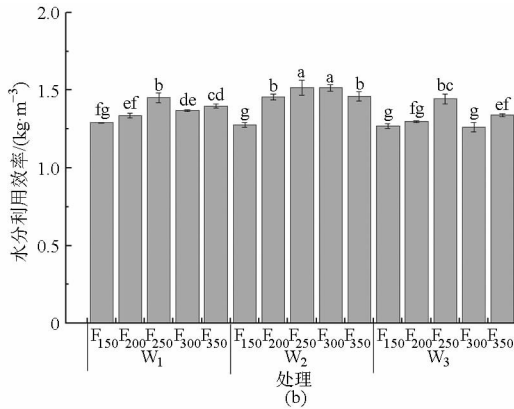
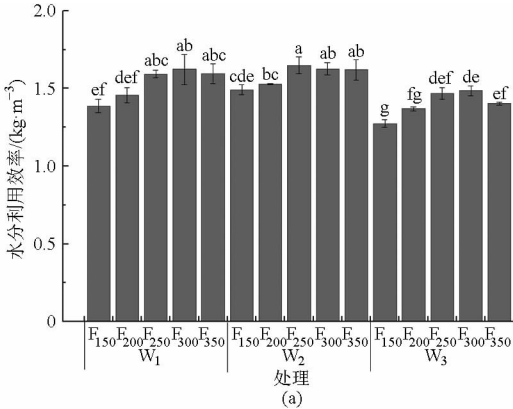


图 2 不同滴灌施肥水平对棉花水分利用效率的影响
Fig. 2 Effect of different fertigation levels on water use efficiency
(a) 2012 年 (b) 2013 年

表 1 不同滴灌施肥水平棉花每公顷投入与收益

Tab. 1 Investment and benefits of every hectare cotton under different fertigation levels		元/hm ²									
灌溉处理	施肥处理	2012 年					2013 年				
		拾棉费	水费	化肥投入	毛收益	净收益	拾棉费	水费	化肥投入	毛收益	净收益
W ₁	F ₁₅₀	5 911	1 164	1 084	31 067	1 908	4 039	1 068	1 084	33 517	3 661
	F ₂₀₀	6 042	1 164	1 446	31 629	1 977	4 867	1 068	1 446	35 116	4 488
	F ₂₅₀	6 663	1 164	1 807	34 882	4 247	5 214	1 068	1 807	35 958	4 822
	F ₃₀₀	6 604	1 164	2 169	34 297	3 359	3 876	1 068	2 169	34 718	3 493
	F ₃₅₀	6 716	1 164	2 530	35 014	3 604	3 207	1 068	2 530	34 437	2 841
W ₂	F ₁₅₀	8 383	1 472	1 084	40 162	8 223	6 667	1 316	1 084	37 814	6 342
	F ₂₀₀	8 600	1 472	1 446	41 356	8 838	9 715	1 316	1 446	42 307	9 379
	F ₂₅₀	9 106	1 472	1 807	43 953	10 567	10 313	1 316	1 807	43 477	9 962
	F ₃₀₀	9 322	1 472	2 169	44 499	10 536	9 854	1 316	2 169	43 438	9 514
	F ₃₅₀	9 143	1 472	2 530	43 805	9 660	9 060	1 316	2 530	42 892	8 725
W ₃	F ₁₅₀	8 829	1 780	1 084	41 387	8 693	10 248	1 568	1 084	43 009	9 928
	F ₂₀₀	9 404	1 780	1 446	43 922	10 292	10 869	1 568	1 446	44 343	10 551
	F ₂₅₀	9 798	1 780	1 807	45 599	11 213	11 718	1 568	1 807	45 926	11 394
	F ₃₀₀	9 882	1 780	2 169	45 989	11 158	10 815	1 568	2 169	45 326	10 507
	F ₃₅₀	9 909	1 780	2 530	45 950	10 731	10 049	1 568	2 530	44 811	9 745

注:2 a 其他投入均为 21 000 元/hm²。

水费支出在平均净收益中所占比例很小,但因灌水量减少造成的净收益损失则可能高达 6 000 元/hm²以上,这也是农户节水意愿不强的重要原因。

与 F₁₅₀处理相比,在低灌水水平下(W₁),2 a 增加施肥量可以使净收益平均提高 15%~59%;在中灌水水平下(W₂),净收益平均提高 25%~40%;在高灌水水平下(W₃),净收益平均提高 10%~21%。可以看出,从农户角度讲,尽管施肥量最高并不能获得最高的净收益,但与最低施肥量处理相比,仍可以至少增收约 10%以上。增加施肥量可以看作是农户降低减产减收风险的重要保证,但制造化肥需要消耗大量的能源和水资源,多余的化肥残留还会加剧农业面源污染的风险。2 a 拾棉劳务费介于 5 911~9 909 元/hm²和 3 207~11 718 元/hm²之间,这是由于各处理产量差异和成熟时间不同进而造成拾棉劳务费不同,由于 W₁处理棉花成熟较早,加上第 1 次拾棉成本低于第 2 次拾棉,从低水处理(W₁)到高水处理(W₃),拾棉成本增幅高于毛收益的增幅。

总体看,W₃F₂₅₀处理 2 a 净收益均最高,分别为 11 213、11 394 元/hm²,与水肥投入最高的 W₃F₃₅₀处理相比施肥量减少 40%,净收益增加 10.4%,可以看作经济效益最佳的水肥组合处理。

2.4 籽棉产量、WUE 和净收益的水肥耦合效应

由表 2 可知,水肥投入作为自变量籽棉产量、WUE 和净收益的二元二次回归方程决定系数均在 0.8 以上,均达到显著水平。设定灌水量的上下限分别为 2 a W₁和 W₃处理的灌水量,施肥量的上、下限分别为 F₁₅₀和 F₃₅₀处理的施肥量,用 Matlab 软件

分别求解表 3 中各方程的最大值,可以计算得出 2012 年和 2013 年获得最大籽棉产量、WUE 以及净收益所需的水肥投入量(表 3)。经计算在 2012 年,获得最大籽棉产量所需的灌水量和施肥量分别为 425 mm 和 310~124~62 kg/hm²;获得最大 WUE 所需灌水量和施肥量分别为 345 mm 和 303~121~61 kg/hm²,但净收益仅为 8 902 元/hm²,与最大籽棉产量、最大净收益水肥组合相比分别减少了 2 481、2 561 元/hm²。在 2013 年,获得最大籽棉产量所需的灌水量和施肥量分别为 392 mm 和 281~112~57 kg/hm²;获得最大 WUE 所需灌水量和施肥量分别为 324 mm 和 280~112~56 kg/hm²,与最大籽棉产量、最大净收益水肥组合相比分别减少了 1 959、1 633 元/hm²,经济效益较差。2 a 最大净收益所需灌水量和施肥量分别为 418 mm、288~115~58 kg/hm²和 391.6 mm、261~105~52 kg/hm²,2 a 与最大籽棉产量水肥组合相比净收益相差仅为 80、326 元/hm²,但 2 a 可分别减少施肥量 30 kg/hm²以上。

从表 2 可以看出,籽棉产量、WUE 和净收益无法同时达到最大值,在实际棉花种植中必将有所取舍,因此需要进一步研究得出以产量、WUE 和净收益综合效益最大为目标的水肥投入组合。由于籽棉产量、WUE 和净收益难以同时达到最大值,且三者具有不同的量纲,不能直接比较,因此将籽棉产量、WUE 和净收益进行归一化处理,即各处理产量、WUE 和净收益分别除以其最大值,可以得到水肥投入与相对产量(Y_{SR})、相对水分利用效率(Y_{WR})和相对净收益(Y_{RR})的关系(图 3)。从图 3 可以看出,水

表 2 水肥投入与产量、WUE 和净收益的回归方程

Tab. 2 Regression equations of seed cotton yield, WUE and net benefits with water and fertilizer application rates				
年份	输出变量	回归方程	R^2	P
2012 年	籽棉产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	$Y_{\text{S}} = -10\,719.8 + 69.235I + 7.501F - 0.082I^2 - 0.008F^2 + 0.001IF$	0.991	<0.001
	水分利用效率/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$Y_{\text{W}} = -1.825\,6 + 0.014\,7I + 0.004\,1F - 2.02 \times 10^{-5}I^2 - 3.68 \times 10^{-6}F^2 - 1.54 \times 10^{-6}IF$	0.957	<0.001
	净收益/($\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$)	$Y_{\text{N}} = -82\,200 + 400.848I + 42.89F - 0.48I^2 - 0.047F^2 + 0.001IF$	0.987	<0.01
2013 年	籽棉产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	$Y_{\text{S}} = -7\,661.5 + 58.555I + 8.396F - 0.076I^2 - 0.011F^2 + 0.004IF$	0.947	<0.001
	水分利用效率/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$Y_{\text{W}} = -1.869\,9 + 0.015\,7I + 0.003\,8F - 2.38 \times 10^{-5}I^2 - 4.02 \times 10^{-6}F^2 - 6.11 \times 10^{-7}IF$	0.827	<0.05
	净收益/($\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$)	$Y_{\text{N}} = -61\,329 + 322.976I + 47.015F - 0.424I^2 - 0.067F^2 + 0.022IF$	0.965	<0.001

注： F 为施肥量， kg/hm^2 ； Y_{S} 为籽棉产量， kg/hm^2 ； Y_{W} 为水分利用效率， kg/m^3 ； Y_{N} 为净收益， $\text{元}/\text{hm}^2$ 。

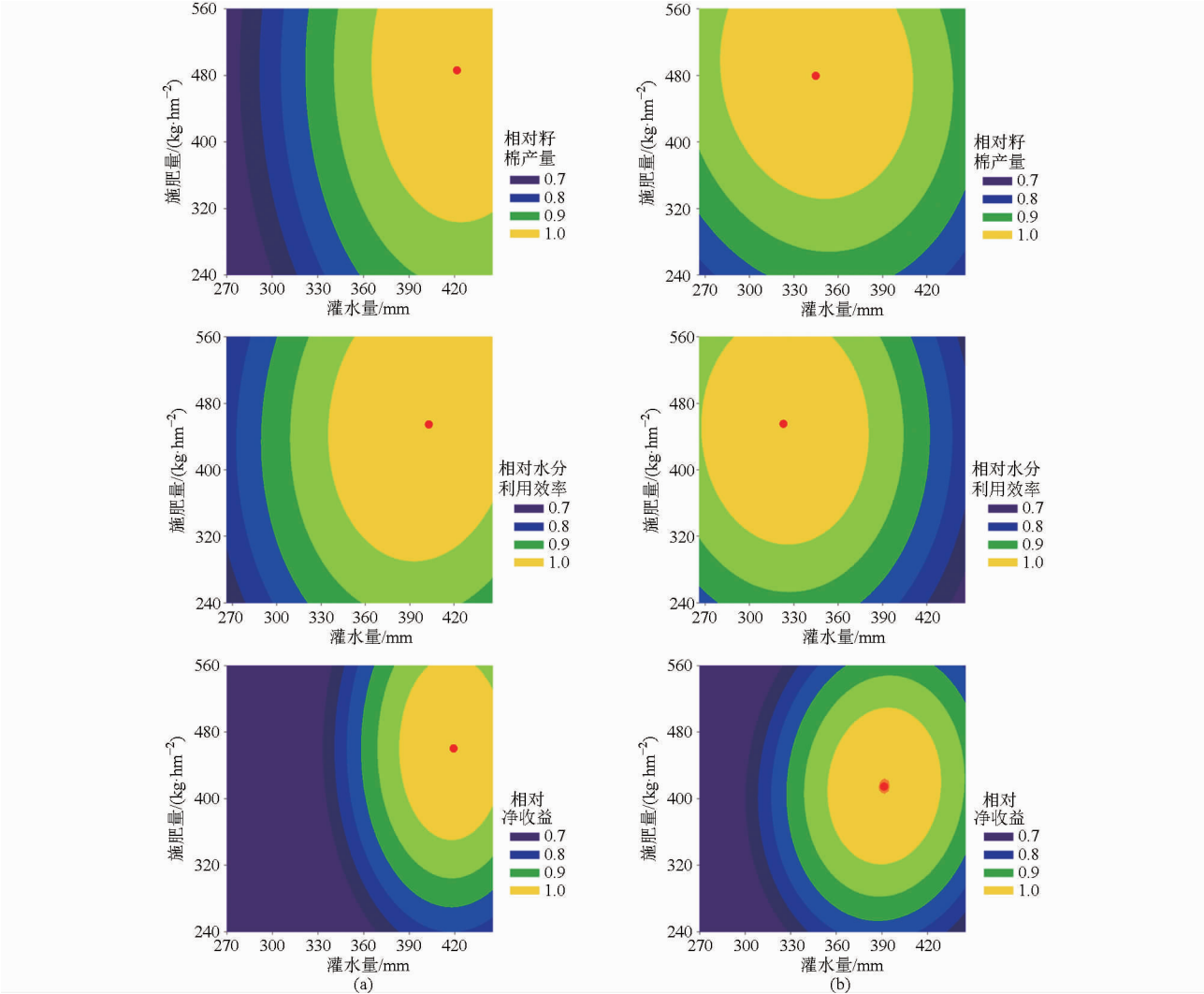


图 3 水肥投入与相对籽棉产量、相对 WUE 和相对净收益的关系(红点为区域内的最大值)

Fig. 3 Relationship between relative seed cotton yield, WUE, net benefits and irrigation, fertilizer application rates
(a) 2012 年 (b) 2013 年

肥投入与 Y_{SR} 、 Y_{WR} 和 Y_{RR} 的二次曲线的类型为一系
列中心为同一点的椭圆型曲线,椭圆的中心点为
 Y_{SR} 、 Y_{WR} 和 Y_{RR} 的最大值。

本研究中,参考了 He^[18] 在参数估计中所用的
似然函数组合方式,分别记为加法组合方式 C_1 、乘
法组合方式 C_2 和均方根组合方式 C_3 ,其组合计算

式为

$$C_1 = \frac{\sum_{i=1}^K Y_i}{K} \tag{8}$$

$$C_2 = \prod_{i=1}^K Y_i \tag{9}$$

$$C_3 = \left(\sum_{i=1}^K \frac{1}{K} Y_i^2 \right)^{1/2} \tag{10}$$

式中 Y_i ——相对产量、相对 WUE 或相对净收益
 K ——目标个数

3 种组合方式假定追求籽棉产量、WUE 和净收益的权重相同,可以得出水肥投入与产出 Y 的函数关系(图 3)。

从表 3 可以看出,3 种组合方式下所得籽棉产

量、WUE 和净收益差别不足 2%,说明 3 种组合方式均可用于水肥投入多目标优化。但 C_2 组合方式 2 a 施肥量差异更小,且在 2012 年比其余 2 种组合方式分别节省施肥量约 5%,即 2012 年和 2013 年灌水量分别为 412、353 mm,施肥量分别为 278 – 111 – 56 kg/hm²、268 – 107 – 53 kg/hm² (N – P₂O₅ – K₂O) 可以看作是综合籽棉产量、WUE 和净收益最优化的滴灌水肥投入量。

表 3 最大籽棉产量、最大水分利用效率和最大净收益及其所需灌水量和施肥量
Tab.3 Maximum seed cotton yield, WUE, net benefits and corresponding irrigation depths and fertilizer application rates

年份	目标	灌水量/mm	施肥量/ (kg·hm ⁻²)	籽棉产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)	净收益/ (元·hm ⁻²)
2012 年	最大籽棉产量	425	310 – 124 – 62	5 857	1. 58	11 383
	最大 WUE	345	303 – 121 – 61	5 335	1. 71	8 902
	最大净收益	418	288 – 115 – 58	5 843	1. 60	11 463
2013 年	最大籽棉产量	392	281 – 112 – 57	5 870	1. 42	11 574
	最大 WUE	324	280 – 112 – 56	5 468	1. 53	9 615
	最大净收益	392	261 – 105 – 52	5 856	1. 41	11 248
2012 年	C_1	407	294 – 118 – 59	5 825	1. 63	11 400
	C_2	412	278 – 111 – 56	5 824	1. 62	11 435
	C_3	398	292 – 117 – 58	5 789	1. 65	11 263
2013 年	C_1	353	270 – 108 – 54	5 724	1. 50	10 599
	C_2	353	268 – 107 – 53	5 723	1. 50	10 604
	C_3	347	275 – 110 – 55	5 684	1. 51	11 364

3 讨论

在一定水肥范围内,滴灌棉花产量随灌水量和施肥量的增加而增加,但超过一定阈值产量有下降趋势。适宜水肥条件下产量最高^[1],其他学者也得到了类似结论^[17,19–20]。本研究结果与之相似,2012 年 W_3F_{300} 处理籽棉产量最高,但产量最高时净收益并非最大,2 a 的 W_3F_{250} 处理净收益最高。

增加产量^[21]、适宜灌水量^[22] 和适宜的施氮量^[16, 23] 均可以增加棉花 WUE。本研究结果与之相似,在不同灌水水平下, F_{250} 处理 WUE 均最高, W_2F_{250} 处理 WUE 最高,且 2 a 都与 W_2F_{300} 处理差异不显著,说明适宜的灌水量和施肥量能增加 WUE。

使用多元二次回归建立水肥等资源投入与产量、品质等的目标函数关系已有较多报道^[24–25]。有不少学者通过多元回归与空间分析相结合的方法,通过各个目标的最低下限来获得多目标的重叠区域,但各自目标下限为主观设置且各不相同,如最低需达到最大值的 95%^[6]、85%^[26] 等。本研究中,通过将各目标函数进行归一化,以及借鉴似然函数的不同组合方式获得了多目标回归方程,3 种组合方

式均可用于获得产量、WUE 和净收益多目标综合效益最大化的棉田滴灌水肥用量。

4 结论

(1) 籽棉产量、水分利用效率和净收益的水肥耦合效应明显,60% ET_c 低灌水水平明显抑制了肥效的发挥,100% ET_c 灌水水平能够明显提高籽棉产量和净收益,但水分利用效率较低。

(2) 2 a 灌水水平为 100% ET_c 且施肥量为 300 – 120 – 60 kg/hm² (N – P₂O₅ – K₂O) 时籽棉产量最高,但增产并未增收,2 a 灌水水平为 100% ET_c 且施肥量为 250 – 100 – 50 kg/hm² (N – P₂O₅ – K₂O) 时的净收益最高,且每年可减少施肥量 16. 7%。

(3) 多元二次回归分析结果表明,3 种组合方式所得籽棉产量、WUE 和净收益的差异在 2% 以内,但乘法组合方式 2 a 水肥投入量和年际变化均最小。因此,2012 年灌水量 92% ET_c 、施肥量 278 – 111 – 56 kg/hm² (N – P₂O₅ – K₂O) 以及 2013 年灌水量 90% ET_c 、施肥量 268 – 107 – 53 kg/hm² (N – P₂O₅ – K₂O) 时可以使籽棉产量、水分利用效率和净收益的综合效益最大化。

参 考 文 献

- 1 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.
Zheng Zhong, Ma Fuyu, Mu Zixin, et al. Study of coupling effects and water-fertilizer model on mulched cotton by drip irrigation [J]. Cotton Science, 2000, 12(4): 198-201. (in Chinese)
- 2 谢映周,黄建军.北疆膜下滴灌高产棉花灌溉和施肥模式的初探[J].中国农学通报,2010,26(4):109-112.
Xie Yingzhou, Huang Jianjun. Research the mode of irrigation and fertilization about under-mulch-drip irrigation in high-yield cotton of north Xinjiang [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(4): 109-112. (in Chinese)
- 3 李培岭,张富仓.根系分区交替滴灌下水氮耦合对棉花氮素利用效率的影响[J].农业工程学报,2012,28(25):112-116.
Li Peiling, Zhang Fucang. Effects of water and nitrogen coupling on cotton nitrogen absorption and utilization under alternate root partition drip[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(25): 112-116. (in Chinese)
- 4 李培岭,张富仓.不同滴灌方式下棉花生物量和产量的水氮调控效应[J].应用生态学报,2010,21(11):2814-2820.
Li Peiling, Zhang Fucang. Regulation effect of water and nitrogen on cotton biomass and yield under different drip irrigation patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11): 2814-2820. (in Chinese)
- 5 陈碧华,郜庆炉,孙丽.番茄日光温室膜下滴灌水肥耦合效应研究[J].核农学报,2009,23(6):1082-1086.
Chen Bihua, Gao Qinglu, Sun Li. Effects of water and fertilizer coupling under drip fertirrigation covered with film sheet on tomato growth in solar greenhouse[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2009, 23(6): 1082-1086. (in Chinese)
- 6 Thompson T L, Doerge T A, Godin R E. Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower: II. agronomic, economic, and environmental outcomes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1): 412-418.
- 7 李新伟,吕新,张泽,等.棉花氮素营养诊断与追肥推荐模型[J].农业机械学报,2014,45(12):209-214.
Li Xinwei, Lü Xin, Zhang Ze, et al. Diagnosis of nitrogen nutrition and recommended model of topdressing for cotton [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 209-214. (in Chinese)
- 8 Janat M. Response of cotton to irrigation methods and nitrogen fertilization: yield components, water-use efficiency, nitrogen uptake, and recovery[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, 39(15-16): 2282-2302.
- 9 Veeraputhiran R, Kandasamy O S, Singh S D, et al. Influence of drip irrigation and nitrogen fertigation on growth and yield of hybrid cotton[J]. Journal of Ecobiology, 2005, 17(4): 329-335.
- 10 Veeraputhiran R, Kandasamy O S, Singh S D, et al. Effect of drip irrigation and fertigation on yield, quality and nutrient uptake of hybrid cotton[J]. Journal of Ecobiology, 2005, 17(5): 421-428.
- 11 Aujla M S, Thind H S, Buttar G S. Cotton yield and water use efficiency at various levels of water and N through drip irrigation under two methods of planting[J]. Agricultural Water Management, 2005, 71(1): 167-179.
- 12 Dougherty M, AbdelGadir A H, Fulton J P, et al. Subsurface drip irrigation and fertigation for north Alabama cotton production [J]. Journal of Cotton Science, 2009, 13(4): 227-237.
- 13 Enciso-Medina J, Colaizzi P D, Multer W L, et al. Cotton response to phosphorus fertigation using subsurface drip irrigation[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2007, 23(3): 299-304.
- 14 侯秀玲,张炎,王晓静,等.新疆超高密度棉田氮肥运筹对产量和氮肥利用的影响[J].棉花学报,2006,18(5):273-278.
Hou Xiuling, Zhang Yan, Wang Xiaojing, et al. Effect of different nitrogen fertilization on yield and nitrogen using of super high-density cotton system[J]. Cotton Science, 2006, 18(5): 273-278. (in Chinese)
- 15 邓忠,白丹,翟国亮,等.膜下滴灌水氮调控对南疆棉花产量及水氮利用率的影响[J].应用生态学报,2013,24(9):2525-2532.
Deng Zhong, Bai Dan, Zhai Guoliang, et al. Effects of water and nitrogen regulation on the yield and water and nitrogen use efficiency of cotton in south Xinjiang, Northwest China under plastic mulched drip irrigation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2525-2532. (in Chinese)
- 16 张寄阳,段爱旺,申孝军,等.基于蒸发量的膜下滴灌棉花灌溉预警装置设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(9):56-59.
Zhang Jiyang, Duan Aiwang, Shen Xiaojun, et al. Design and experiment of scheduling irrigation device based on pan evaporation for drip-irrigated cotton under plastic mulch [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 56-59. (in Chinese)
- 17 Oweis T Y, Farahani H J, Hachum A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1239-1248.
- 18 He J. Best management practice development with the CERES-Maize model for sweet corn production in North Florida [D]. Gainesville, FL: University of Florida, 2008.
- 19 岳文俊,张富仓,李志军,等.水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J].农业机械学报,2015,46(2):88-96,119.
Yue Wenjun, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 88-96, 119. (in Chinese)

- 20 周罕觅,张富仓,Kjelgren R,等. 苹果幼树生理特性和水分生产率对水肥的响应研究[J]. 农业机械学报,2015,46(4):77-87.
Zhou Hanmi, Zhang Fucang, Kjelgren R, et al. Response of physiological properties and crop water productivity of young apple tree to water and fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 77-87. (in Chinese)
- 21 周罕觅,张富仓,李志军,等. 桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应研究[J]. 农业机械学报,2014,45(12):171-180.
Zhou Hanmi, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Response of water demand signal, yield and fruit quality of peach tree to soil moisture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 171-180. (in Chinese)
- 22 Pandey R K, Maranville J W, Chetima M M. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment: II. shoot growth, nitrogen uptake and water extraction[J]. Agricultural Water Management, 2000, 46(1): 15-27.
- 23 刘小刚,张岩,程金焕,等. 水氮耦合下小粒咖啡幼树生理特性与水氮利用效率[J]. 农业机械学报,2014,45(8):160-166.
Liu Xiaogang, Zhang Yan, Cheng Jinhuan, et al. Biochemical property and water and nitrogen use efficiency of young arabica coffee tree under water and nitrogen coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 160-166. (in Chinese)
- 24 赵锴,李瑾,徐宁,等. 氮磷钾配施对洋葱产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(3):558-563.
Zhao Kai, Li Jin, Xu Ning, et al. The effects of combined application of N, P and K on the yield and quality of onion[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(3):558-563. (in Chinese)
- 25 李培岭. 不同灌溉方式下民勤荒漠绿洲区棉花水氮耦合效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- 26 邢英英,张富仓,吴立峰,等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊):110-121.
Xing Yingying, Zhang Fucang, Wu Lifeng, et al. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.): 110-121. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 156 页)

- 11 吴亚坤,刘广明,杨劲松,等. 基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J]. 农业工程学报,2013,29(3):100-106.
Wu Yakun, Liu Guangming, Yang Jingsong, et al. Interpreting method of regional soil salinity 3D distribution based on inverse distance weighting[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(3):100-106. (in Chinese)
- 12 刘广明,吴亚坤,杨劲松,等. 基于电磁感应技术的区域三维土壤盐分空间变异研究[J]. 农业机械学报,2013,44(7):78-82.
Liu Guangming, Wu Yakun, Yang Jingsong, et al. Regional 3D soil salt spatial variability based on electromagnetic induction technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(7): 78-82. (in Chinese)
- 13 Corwin D L, Lesch S M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. II. Case study [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2005,46(1-3):135-152.
- 14 姚荣江,杨劲松,邹平,等. 基于电磁感应仪的田间土壤盐渍度及其空间分布定量评估[J]. 中国农业科学,2008,41(2):460-469.
Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Zou Ping, et al. Quantitative evaluation of the field soil salinity and its spatial distribution based on electromagnetic induction instruments[J]. Scientia Agricultura Sinica,2008,41(2):460-469. (in Chinese)
- 15 Doolittle J A, Brevik E C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies[J]. Geoderma,2014, 223-225(7): 33-45.
- 16 辛明亮,何新林,吕廷波,等. 土壤可溶性盐含量与电导率的关系实验研究[J]. 节水灌溉,2014(5):59-61.
Xin Mingliang, He Xinlin, Lü Tingbo, et al. Experimental research on relationship between content soluble salt in soil and electric conductivity[J]. Water Saving Irrigation,2014(5):59-61. (in Chinese)
- 17 Franke R, Nielson G. Smooth interpolation of large sets of scattered data[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,1980,15(11):1691-1704.
- 18 Slavich P G. Determining ECa-depth profiles from electromagnetic induction measurements [J]. Australian Journal of Soil Research,1990,28(3):443-452.
- 19 阿布都热合曼·哈力克. 新疆岳普湖县土壤盐分空间变异及其分布特征研究[J]. 水土保持研究,2011,18(1):97-100.
Abdirahman Halik. Spatial variability and distribution characteristics research of the soil salinity Yuepuhu County in Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation,2011,18(1):97-100. (in Chinese)
- 20 新疆维吾尔自治区农业厅,新疆维吾尔自治区土壤普查办公室. 新疆土壤[M]. 北京:科学出版社,1996:52.
- 21 Heil K, Schmidhalter U. Characterization of soil texture variability using the apparent soil electrical conductivity at a highly variable site[J]. Computers & Geosciences,2012,39(2):98-110.