

# 水氮供应对冬油菜氮素积累和产量的影响

谷晓博 李援农 杜娅丹

(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)

**摘要:** 通过2年桶栽试验,设置3个灌溉水平:低水(W0:(50%~60%)FC,FC为田间持水率,下同)、中水(W1:(60%~70%)FC)和高水(W2:(70%~80%)FC),3个施氮水平:不施氮(N0)、中氮(N1:施纯氮1.2g/桶,约合180kg/hm<sup>2</sup>)和高氮(N2:施纯氮2.4g/桶,约合360kg/hm<sup>2</sup>),研究不同灌溉和施氮水平对冬油菜生殖生长阶段地上部分生物量和氮素的积累、产量、耗水量和水分利用效率的影响。结果表明,中水中氮处理(W1N1)能显著增加冬油菜生殖生长阶段地上部分干物质质量和氮素积累量,显著提高冬油菜的产量和水分利用效率;过量灌溉或施氮处理(W1N2、W2N1和W2N2)的促进作用不显著。2年W2N1处理的产量最高,平均为38.4g/株;W1N1处理的水分利用效率最高,平均为1.07kg/m<sup>3</sup>;但W2N1和W1N1处理的产量和水分利用效率不存在显著差异,而W1N1处理的耗水量显著小于W2N1处理。另外,冬油菜的籽粒产量和水分利用效率与耗水量均呈显著的二次抛物线关系,冬油菜的水分-产量响应系数为1.36。全面考虑产量与节水节肥等因素,W1N1处理为该研究区较优的冬油菜灌溉水施氮策略。

**关键词:** 冬油菜;灌溉;施氮;产量;水分利用效率;水分-产量响应系数

**中图分类号:** S565.4; S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0271-08

## Effects of Irrigation and Nitrogen Regimes on Seed Yield and Nitrogen Accumulation of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.)

GU Xiaobo LI Yuannong DU Yadan

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

**Abstract:** In order to investigate the optimal scheme of irrigation and nitrogen application for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.), two-year (2013—2014 and 2014—2015) barrel experiments were conducted to evaluate the effects of different irrigation and nitrogen applications on aboveground dry matter and nitrogen accumulation during reproductive growth stage, seed yield, evapotranspiration (*ET*) and water use efficiency (*WUE*), and then determine the yield response factor ( $K_y$ ) of winter oilseed rape. The experiments included three irrigation levels (W0: (50%~60%)FC, FC denoted field capacity; W1: (60%~70%)FC; W2: (70%~80%)FC) and three nitrogen levels (N0: 0g; N1: 1.2g; N2: 2.4g). The results showed that W1N1 could obviously improve aboveground dry matter and nitrogen accumulation during reproductive growth phase, seed yield, and *WUE* of winter oilseed rape. However, excessive irrigation or nitrogen (W1N2, W2N1 and W2N2) would not significant increase the aboveground dry matter and nitrogen accumulation, seed yield, and *WUE* in comparison with W1N1. W2N1 achieved the highest seed yield across the two years, while W1N1 obtained the highest *WUE*. Though no significant differences of seed yield and *WUE* were found between W1N1 and W2N1, the *ET* in W1N1 was significantly lower than that in W2N1. In addition, seed yield and *WUE* were all showed a significant quadratic parabola relationship with *ET*, and the  $K_y$  of winter oilseed rape was 1.36. In comprehensive consideration of seed yield, water and fertilizer conservation, W1N1 treatment was recommended as an appropriate irrigation and nitrogen application schedule for winter oilseed rape in the study area.

**Key words:** winter oilseed rape; irrigation; nitrogen application; seed yield; water use efficiency; yield response factor

收稿日期: 2016-06-26 修回日期: 2016-07-27

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503105, 201503125)和国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100504)

作者简介: 谷晓博(1989—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: gxb123027@163.com

通信作者: 李援农(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与3S技术研究, E-mail: liyuannong@163.com

## 引言

我国目前是世界第一油菜种植大国,种植面积和总产量均居世界第一。油菜是我国主要的油料作物,根据联合国粮农组织(FAO)统计,2014年我国油菜收获面积达655万 $\text{hm}^2$ ,油菜籽总产量达1160万 $\text{t}^{[1]}$ 。菜籽油占我国油料作物产油量的57.2%,而当前我国油料作物自给率仅为40%<sup>[2]</sup>,因此发展油菜生产对促进国民经济发展和维持国家食用油安全具有重要意义。氮素是植物最重要的营养元素,是与油菜生长发育及其产量、品质密切相关的营养元素<sup>[3]</sup>。冬油菜是需氮量较多的作物,合理施氮可有效促进油菜的生长发育和产量形成,据统计,每形成1 $\text{t}$ 油菜籽大约需要60 $\text{kg}$ 的氮素,农民为获得高产,经常不合理地施用大量氮肥,导致氮肥利用效率和表观回收率很低,还引起环境污染和菜籽油品质下降<sup>[4]</sup>。

作物的施氮反应及其氮肥利用率不仅取决于施氮管理,还与水资源管理有关,二者对作物的生长过程是相互作用、相互影响的<sup>[5]</sup>。研究表明,限水条件下,水是限制氮肥肥效发挥的主要因素,通过改善水分条件可更有效地提高氮肥肥效<sup>[6]</sup>;而低氮条件下,水分不足的限制作用明显,高施氮量一定程度上能弥补水分的限制,促进作物生长<sup>[7]</sup>。因此,因地制宜进行灌溉和施氮,使其产生协同效应,达到“以水促肥”和“以肥调水”的目的,对节约水、肥资源和保护环境有重要意义。目前,国内外学者主要针对小麦<sup>[8]</sup>、玉米<sup>[9]</sup>、番茄<sup>[10]</sup>和黄瓜<sup>[11]</sup>等作物进行了大量的水氮耦合效应研究,但很少有针对冬油菜的研究<sup>[12]</sup>,而且关于水氮耦合对作物生殖生长阶段的生物量和氮素的累积效应鲜有报道。

本文基于2年桶栽试验,通过分析比较不同水分处理和施氮水平对冬油菜生殖生长阶段地上部干物质质量和氮素积累、产量及水分利用效率的影响,以期确定冬油菜较优的灌溉和施氮水平,为实现冬油菜高产高效生产提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

2013—2014年和2014—2015年2年冬油菜桶栽试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室遮雨棚下进行。该区地处 $34^{\circ}20'N$ 、 $108^{\circ}24'E$ ,海拔高度521 $\text{m}$ ,无霜期210 $\text{d}$ ,年均日照时数2163.8 $\text{h}$ ,年均气温 $13^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量632 $\text{mm}$ ,年均蒸发量1510 $\text{mm}$ ,属大陆性暖温带季风气候区。供试土壤取自实验站农田0~20 $\text{cm}$ 耕层土壤,质地为壤土,干容重 $1.40\text{g}/\text{cm}^3$ ,田间持水率为24%(质量含水率,下同),凋萎含水率为8.5%。土壤经自然风干、磨细、过5 $\text{mm}$ 筛后备用。供试土壤基本理化性状为:有机质质量比11.36 $\text{g}/\text{kg}$ ,全氮质量比0.83 $\text{g}/\text{kg}$ ,硝态氮质量比60.27 $\text{mg}/\text{kg}$ ,速效磷质量比18.30 $\text{mg}/\text{kg}$ ,速效钾质量比135.73 $\text{mg}/\text{kg}$ , $\text{pH}$ 值8.13。

### 1.2 试验材料与设计

供试冬油菜品种为陕油107,由西北农林科技大学农学院提供。供试氮肥为尿素(含 $\text{N}$ 质量分数大于等于46%),磷肥为过磷酸钙(含 $\text{P}_2\text{O}_5$ 质量分数大于等于16%),钾肥为农业用硫酸钾(含 $\text{K}_2\text{O}$ 质量分数大于等于51%)。试验用塑料桶规格为:上边缘内径29.5 $\text{cm}$ ,下边缘内径22.5 $\text{cm}$ ,高25.2 $\text{cm}$ 。

试验设水分和氮肥2个因素。水分设全生育期低水(W0:土壤含水率保持在田间持水率(FC)的50%~60%)、中水(W1:土壤含水率保持在(60%~70%)FC)和高水(W2:土壤含水率保持在(70%~80%)FC)3个水平;氮肥设不施氮(N0)、中氮(N1:施纯氮1.2 $\text{g}/\text{桶}$ ,约合180 $\text{kg}/\text{hm}^2$ )和高氮(N2:施纯氮2.4 $\text{g}/\text{桶}$ ,约合360 $\text{kg}/\text{hm}^2$ )3个水平;共9个处理,各处理分别为12桶,随机区组排列。每桶另施0.67 $\text{g}$ 纯 $\text{P}_2\text{O}_5$ (约合100 $\text{kg}/\text{hm}^2$ ),施0.8 $\text{g}$ 纯 $\text{K}_2\text{O}$ (约合120 $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。各处理冬油菜全生育期的总灌水量如表1所示。

表1 各处理下单株冬油菜全生育期的总灌水量

Tab.1 Total irrigation amount during whole growth periods of winter oilseed rape under different treatments L

年份	W0N0	W0N1	W0N2	W1N0	W1N1	W1N2	W2N0	W2N1	W2N2
2013—2014年	25.78	31.45	30.82	29.71	35.82	36.98	35.06	41.22	42.21
2014—2015年	26.72	32.66	32.48	30.67	36.76	38.1	37.77	42.58	44.07

试验前在桶底部均匀打9个半径约0.5 $\text{cm}$ 的小孔,并在底部铺上纱网和500 $\text{g}$ 细砂,以调节下层土壤通气状况和水分条件。播种前2 $\text{d}$ 装土,每桶装土13 $\text{kg}$ ,装土时将60%氮肥和全部磷、钾肥与干

土混合均匀,控制土壤干容重 $1.35\text{g}/\text{cm}^3$ ,并在桶中插2根长20 $\text{cm}$ 、直径约1.5 $\text{cm}$ 的PVC管用于灌水,PVC管距桶底部约10 $\text{cm}$ ,管周围打有均匀小孔(孔直径5 $\text{mm}$ ,孔间距:横向1.5 $\text{cm}$ ,纵向3 $\text{cm}$ ),并

沿管壁裹一层网孔直径 1 mm 的纱网。装土后在各桶表面覆盖 500 g 蛭石防止土壤快速板结。在桶中心种植 1 窝油菜,播种深度 5 cm,为保证油菜正常出苗,播种后灌水至 90% FC,待冬油菜长出 3 片真叶后(2013 年 9 月 27 日、2014 年 9 月 30 日)定苗,每桶留壮苗 1 株。在冬油菜蕾薹期将剩余 40% 氮肥溶于水后施入。2013 年 9 月 11 日播种,2014 年 5 月 18 日收获;2014 年 9 月 20 日播种,2015 年 5 月 22 日收获。

### 1.3 测定项目与方法

土壤含水率:采用称量法确定灌水量和灌水时间,使土壤含水率控制在设定范围内。收获时,土壤含水率采用烘干法测定,每桶均匀选取 3 个测点,沿土壤深度方向每隔 5 cm 取一个土样,取至 20 cm。

冬油菜全生育期耗水量的计算公式为

$$ET = M - W_1 \quad (1)$$

式中  $ET$ ——冬油菜全生育期耗水量, L/株

$M$ ——冬油菜全生育期灌水量, L/株

$W_1$ ——收获时的土壤贮水量, L/株

水分利用效率的计算公式为

$$WUE = Y/ET \quad (2)$$

式中  $WUE$ ——作物水分利用效率, kg/m<sup>3</sup>

$Y$ ——收获时的籽粒产量, g/株

地上部干物质质量:在初花期和收获时,分别选取 6 株冬油菜,齐地剪断,将各株冬油菜的茎、叶和角果分开,放入干燥箱,先于 105℃ 杀青 30 min 后,再于 70℃ 干燥至质量恒定后称量。地上部干物质质量等于各部分干物质质量之和。生殖生长阶段地上部干物质积累量等于收获时和初花期的地上部干物质质量之差。

植株含氮量测定:将各处理的干样分器官粉碎

后,过 0.5 mm 筛,用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后,各器官含氮量用凯氏定氮仪(FOSS 2300 型)测定<sup>[13]</sup>。各器官氮素积累量为器官含氮量与器官干物质质量的乘积,其单位为 mg/株。所有器官氮素积累量相加为植株地上部分氮素积累量,其单位为 mg/株。

籽粒产量和构成要素:待冬油菜收获时,分别测定每株冬油菜的一次有效分枝数、单株角果数和每角粒数,晒干后测定籽粒产量和千粒质量。

水分-产量响应系数的计算公式为

$$K_y = (1 - Y_a/Y_m)/(1 - ET_a/ET_m) \quad (3)$$

式中  $K_y$ ——水分-产量响应系数

$Y_a$ ——各处理籽粒子产量, g/株

$Y_m$ ——所有处理中最大的籽粒产量, g/株

$ET_a$ ——各处理耗水量, L/株

$ET_m$ ——所有处理中最大的耗水量, L/株

### 1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 软件处理试验数据;采用 PASW Statistics 18.0 软件进行方差分析,多重比较采用 Duncan 新复极差法,显著性水平为  $\alpha = 0.05$ ; OriginPro 8.5 软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水氮条件下冬油菜地上部干物质积累

在相同水分条件下, N1 和 N2 处理冬油菜初花期、生殖生长期和收获期的地上部干物质质量均显著大于 N0 处理,且 N1 和 N2 处理间不存在显著差异(表 2)。N1 和 N2 处理冬油菜的地上部干物质质量与 N0 处理相比,初花期分别增加 14.7% ~ 44.6% 和 23.2% ~ 52.0%,收获期分别增加 25.8% ~ 50.9% 和 22.7% ~ 47.6%,生殖生长阶段分别增加 35.2% ~ 59.5% 和 22.2% ~ 43.6%。

表 2 不同水氮条件下冬油菜初花期、生殖生长期和收获期地上部干物质质量

Tab. 2 Aboveground dry matter at beginning of flowering, harvest and reproductive growth stages of winter oilseed rape under different water and nitrogen conditions g/株

水分处理	施氮水平	2013—2014 年			2014—2015 年		
		初花期	生殖生长期	收获期	初花期	生殖生长期	收获期
W0	N0	20.4 <sup>d</sup>	22.0 <sup>d</sup>	42.4 <sup>c</sup>	21.2 <sup>d</sup>	22.8 <sup>d</sup>	44.0 <sup>c</sup>
	N1	28.9 <sup>c</sup>	35.1 <sup>bc</sup>	64.0 <sup>cd</sup>	27.6 <sup>c</sup>	33.4 <sup>c</sup>	61.0 <sup>cd</sup>
	N2	31.0 <sup>bc</sup>	31.6 <sup>c</sup>	62.6 <sup>d</sup>	28.6 <sup>c</sup>	29.2 <sup>c</sup>	57.8 <sup>d</sup>
W1	N0	30.3 <sup>bc</sup>	40.1 <sup>b</sup>	70.4 <sup>c</sup>	30.5 <sup>bc</sup>	40.3 <sup>b</sup>	70.8 <sup>c</sup>
	N1	42.6 <sup>a</sup>	55.3 <sup>a</sup>	97.9 <sup>a</sup>	44.1 <sup>a</sup>	57.2 <sup>a</sup>	101.3 <sup>a</sup>
	N2	45.0 <sup>a</sup>	51.2 <sup>a</sup>	96.2 <sup>a</sup>	45.9 <sup>a</sup>	52.2 <sup>a</sup>	98.1 <sup>a</sup>
W2	N0	36.6 <sup>b</sup>	42.9 <sup>b</sup>	79.5 <sup>b</sup>	38.8 <sup>b</sup>	45.4 <sup>b</sup>	84.2 <sup>b</sup>
	N1	43.5 <sup>a</sup>	60.0 <sup>a</sup>	103.5 <sup>a</sup>	44.5 <sup>a</sup>	61.4 <sup>a</sup>	105.9 <sup>a</sup>
	N2	46.4 <sup>a</sup>	53.9 <sup>a</sup>	100.3 <sup>a</sup>	47.8 <sup>a</sup>	55.5 <sup>a</sup>	103.3 <sup>a</sup>

注:同列数值后不同小写字母表示在  $P < 0.05$  水平差异显著,下同。

在相同施氮水平下,冬油菜初花期、生殖生长期和收获期的地上部干物质量均随灌水量的增加而增加。具体表现为:W1和W2处理冬油菜初花期、生殖生长期和收获期的地上部干物质量均显著大于W0处理,且W1和W2处理间不存在显著差异。W1和W2处理2年冬油菜的平均地上部干物质量与W0处理相比,初花期分别增加51.26%和63.3%,生殖生长期分别增加70.2%和83.3%,收获期分别增加61.2%和73.8%。

由表2分析还可知,W1N1、W1N2、W2N1和W2N2处理冬油菜初花期、生殖生长期和收获期的地上部干物质量不存在显著差异。可见,适量灌溉或施氮能有效增加冬油菜的地上部生物量,但过量灌溉或施氮不能大幅促进冬油菜地上部生物量的增长,造成资源浪费。

## 2.2 不同水氮条件下冬油菜地上部氮素积累量

不同水氮条件下初花期、生殖生长期和收获期冬油菜的地上部氮素积累量差异显著(表3)。在相同水分条件下,初花期冬油菜的地上部氮素积累量随施氮量的增加而增加,但除2013—2014年W0处理外,N2处理冬油菜初花期的地上部氮

素积累量与N1处理相比,不再显著增加。在相同施氮水平下,W1和W2处理冬油菜初花期的地上部氮素积累量显著大于W0处理,但W1和W2处理间无显著差异。冬油菜收获期的地上部氮素积累量随灌水和施氮水平的提高而增加,因此,W2N2处理冬油菜收获期的地上部氮素积累量最多;但W2N2与W1N1、W1N2和W2N1处理间不存在显著差异。可见,适量灌溉或施氮能显著促进冬油菜地上部氮素的积累,而过量灌溉和施氮的促进作用不显著。

在相同水分条件下(除2014—2015年W0处理外),N1和N2处理生殖生长期冬油菜的地上部氮素积累量显著大于N0处理,且N1和N2处理间无显著差异;N1和N2处理生殖生长期冬油菜的2年平均地上部氮素积累量分别比N0处理增加47.9%和50.1%。在相同施氮水平下(除2013—2014年N0处理外),W1和W2处理生殖生长期冬油菜的地上部氮素积累量显著大于W0处理,且W1和W2处理间不存在显著差异;与W0处理相比,W1和W2处理生殖生长期冬油菜的2年平均地上部氮素积累量分别增加34.1%和47.5%。

表3 不同水氮条件下冬油菜初花期、生殖生长期和收获期的地上部氮素积累量

Tab.3 Shoot nitrogen accumulation at beginning of flowering, harvest and reproductive growth stages of winter oilseed rape under different water and nitrogen conditions

水分处理	施氮水平	2013—2014年			2014—2015年		
		初花期	生殖生长期	收获期	初花期	生殖生长期	收获期
W0	N0	363.7 <sup>d</sup>	107.5 <sup>d</sup>	471.2 <sup>c</sup>	364.0 <sup>d</sup>	118.4 <sup>d</sup>	482.4 <sup>d</sup>
	N1	546.2 <sup>c</sup>	175.4 <sup>b</sup>	721.6 <sup>bc</sup>	554.8 <sup>bc</sup>	163.2 <sup>b</sup>	718.0 <sup>bc</sup>
	N2	614.3 <sup>b</sup>	180.9 <sup>b</sup>	795.2 <sup>b</sup>	616.7 <sup>b</sup>	147.3 <sup>c</sup>	764.0 <sup>b</sup>
W1	N0	458.2 <sup>d</sup>	128.4 <sup>c</sup>	586.6 <sup>d</sup>	442.7 <sup>c</sup>	178.5 <sup>b</sup>	621.2 <sup>c</sup>
	N1	703.9 <sup>a</sup>	215.6 <sup>a</sup>	919.5 <sup>a</sup>	683.3 <sup>ab</sup>	222.6 <sup>a</sup>	905.9 <sup>a</sup>
	N2	757.9 <sup>a</sup>	227.8 <sup>a</sup>	985.7 <sup>a</sup>	764.2 <sup>a</sup>	224.0 <sup>a</sup>	988.2 <sup>a</sup>
W2	N0	542.1 <sup>c</sup>	167.6 <sup>b</sup>	709.7 <sup>c</sup>	559.0 <sup>b</sup>	155.5 <sup>bc</sup>	714.5 <sup>bc</sup>
	N1	704.6 <sup>a</sup>	240.6 <sup>a</sup>	945.2 <sup>a</sup>	690.3 <sup>a</sup>	248.3 <sup>a</sup>	938.6 <sup>a</sup>
	N2	750.6 <sup>a</sup>	246.4 <sup>a</sup>	997.0 <sup>a</sup>	734.6 <sup>a</sup>	258.1 <sup>a</sup>	992.7 <sup>a</sup>

## 2.3 不同水氮条件下冬油菜产量构成、耗水量和水分利用效率

### 2.3.1 不同水氮条件下冬油菜产量构成

不同水氮供应对冬油菜的单株分枝数、单株角果数、每角粒数和千粒质量有显著影响(图1)。在相同水分条件下,N1和N2处理冬油菜的单株分枝数、单株角果数、每角粒数和千粒质量均显著大于N0处理。在相同施氮水平下,各水分条件下冬油菜的产量构成也存在明显差异。除2013—2014年N0处理外,W2和W1处理冬油菜的单株分枝数显著大于W0处理,且W2和W1处理间差异不显著。

在不施氮(N0)水平下,W2处理冬油菜的单株

角果数和每角粒数均显著大于W1和W0处理,且W1处理也显著大于W0处理;在N1和N2水平下(除2013—2014年N1水平的每角粒数外),W2和W1处理冬油菜的单株角果数和每角粒数均显著大于W0处理,且W2和W1处理间无显著差异。在N0和2013—2014年的N1和N2水平下,W2和W1处理冬油菜的千粒质量显著大于W0处理,且W2和W1处理间不存在显著差异。

### 2.3.2 不同水氮条件下冬油菜产量、耗水量和水分利用效率

不同水氮条件下冬油菜的产量、耗水量和水分利用效率存在显著差异。2年W0N0处理的产量、

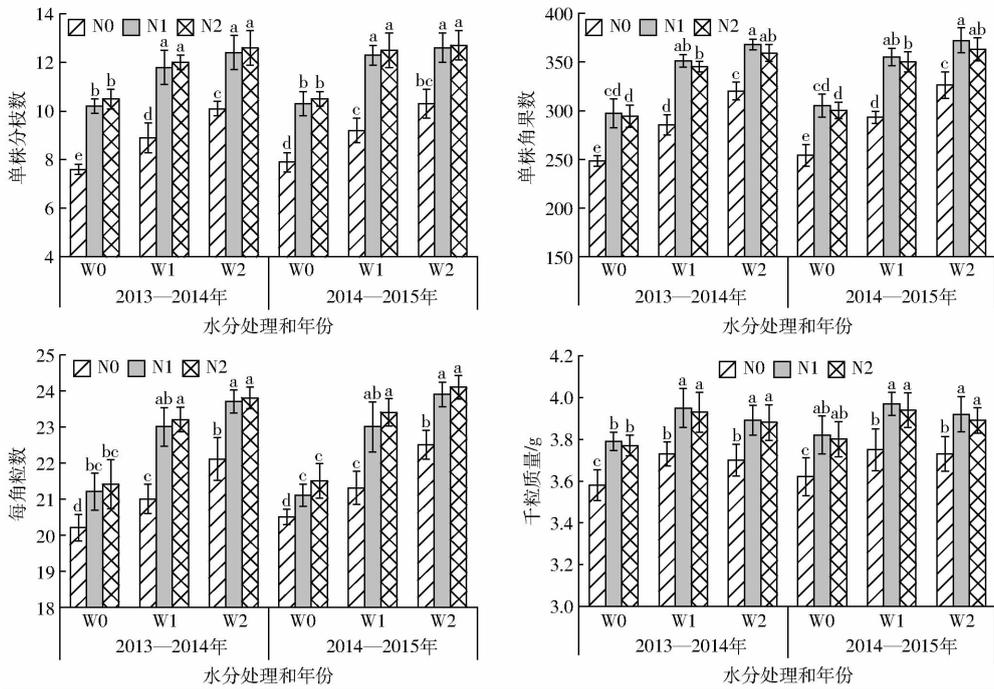


图 1 不同水氮条件下冬油菜的产量构成

Fig. 1 Yield components of winter oilseed rape under different water and nitrogen conditions

耗水量和水分利用效率均显著低于其他处理，W2N1 处理产量最高，W2N2 处理耗水量最多，W1N1 处理水分利用效率最大(表 4)。2 年 W1N1、

W2N1 和 W2N2 处理冬油菜的产量和水分利用效率均无显著差异,但 W1N1 处理冬油菜的耗水量显著小于 W2N1 和 W2N2 处理。

表 4 不同水氮条件下冬油菜的产量、耗水量和水分利用效率

Tab. 4 Seed yield, water consumption and water use efficiency of winter oilseed rape under different water and nitrogen conditions

水分处理	施氮水平	2013—2014 年			2014—2015 年		
		产量/ (g·株 <sup>-1</sup> )	耗水量/ (L·株 <sup>-1</sup> )	水分利用效率/ (kg·m <sup>-3</sup> )	产量/ (g·株 <sup>-1</sup> )	耗水量/ (L·株 <sup>-1</sup> )	水分利用效率/ (kg·m <sup>-3</sup> )
W0	N0	14.3 <sup>d</sup>	24.43 <sup>d</sup>	0.59 <sup>c</sup>	15.0 <sup>d</sup>	25.26 <sup>d</sup>	0.59 <sup>d</sup>
	N1	22.4 <sup>c</sup>	30.14 <sup>c</sup>	0.74 <sup>b</sup>	22.8 <sup>c</sup>	31.07 <sup>c</sup>	0.73 <sup>c</sup>
	N2	21.6 <sup>c</sup>	29.53 <sup>c</sup>	0.73 <sup>b</sup>	21.3 <sup>c</sup>	30.81 <sup>c</sup>	0.69 <sup>c</sup>
W1	N0	25.0 <sup>b</sup>	28.12 <sup>c</sup>	0.89 <sup>ab</sup>	24.8 <sup>bc</sup>	29.24 <sup>c</sup>	0.85 <sup>ab</sup>
	N1	36.7 <sup>a</sup>	34.27 <sup>b</sup>	1.07 <sup>a</sup>	37.4 <sup>a</sup>	35.36 <sup>b</sup>	1.06 <sup>a</sup>
	N2	35.6 <sup>a</sup>	35.52 <sup>ab</sup>	1.00 <sup>a</sup>	35.8 <sup>a</sup>	36.61 <sup>b</sup>	0.98 <sup>a</sup>
W2	N0	27.6 <sup>b</sup>	33.25 <sup>b</sup>	0.83 <sup>ab</sup>	29.0 <sup>b</sup>	36.20 <sup>b</sup>	0.80 <sup>b</sup>
	N1	38.2 <sup>a</sup>	39.48 <sup>a</sup>	0.97 <sup>a</sup>	38.6 <sup>a</sup>	40.96 <sup>a</sup>	0.94 <sup>a</sup>
	N2	36.3 <sup>a</sup>	40.56 <sup>a</sup>	0.89 <sup>ab</sup>	37.2 <sup>a</sup>	42.51 <sup>a</sup>	0.88 <sup>ab</sup>

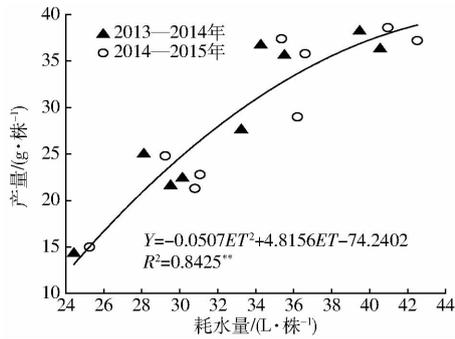
在相同水分条件下,冬油菜产量随施氮量的增加先增加后降低,具体表现为 N1 和 N2 处理冬油菜的产量显著大于 N0 处理,但 N1 和 N2 处理间差异不显著,N1 和 N2 处理 2 年冬油菜的平均产量分别比 N0 处理增加 44.5% 和 38.4%;在相同施氮水平下,冬油菜产量均随灌水量的增加而增加,具体表现为 W1 和 W2 处理冬油菜的产量显著大于 W0 处理,但 W1 和 W2 处理间差异不显著,W1 和 W2 处理 2 年冬油菜的平均产量分别比 W0 处理增加 66.4% 和 76.2%。

在相同水分条件下,2 年 N1 和 N2 处理冬油菜的耗水量均显著大于 N0 处理,且 N1 和 N2 处理不存在显著差异;N1 和 N2 处理冬油菜的 2 年平均耗水量分别比 N0 处理增加 19.7% 和 22.1%。在相同施氮水平下,耗水量随灌水量的增加而增加,具体表现为:W2 处理略大于 W1 处理,二者不存在显著差异,但均显著大于 W0 处理;W1 和 W2 处理冬油菜的 2 年平均耗水量分别比 W0 处理增加 18.6% 和 36.0%。

W1 和 W2 条件下(除 2014—2015 年 W2 处理外),3 个施氮处理的水分利用效率无显著差异;在

W0条件下,2年N1和N2处理冬油菜的水分利用效率均显著大于N0处理。在相同施氮水平下(除2013—2014年N2处理外),W1和W2处理冬油菜的水分利用效率均显著大于W0处理;W1和W2处理2年冬油菜的平均水分利用效率分别比W0处理增加40.0%和30.5%。

分别以产量( $Y$ )和水分利用效率( $WUE$ )为因变量,以耗水量( $ET$ )为自变量,建立二次多项式数学模型,拟合出的回归曲线方程如图2所示(图中\*\*



表示在  $P < 0.01$  水平显著,下同)。由图2可知,当冬油菜的耗水量为47.49 L/株时,冬油菜产量达到最大值40.11 g/株,此时水分利用效率为0.82 kg/m<sup>3</sup>;当冬油菜的耗水量为39.00 L/株时,冬油菜的水分利用效率达到最大值0.94 kg/m<sup>3</sup>,此时产量为36.45 g/株。

分别以产量( $Y$ )和水分利用效率( $WUE$ )为因变量,以收获时的氮素积累量( $N_a$ )为自变量,拟合出的回归方程如图3所示。

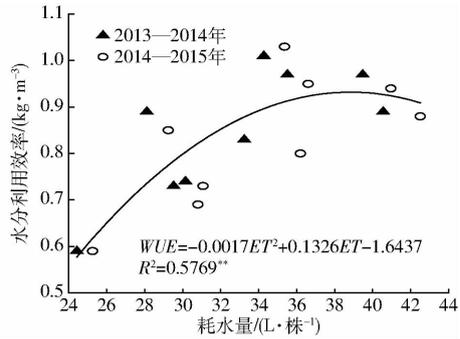


图2 冬油菜产量和水分利用效率与耗水量的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between seed yield, water use efficiency and water consumption of winter oilseed rape

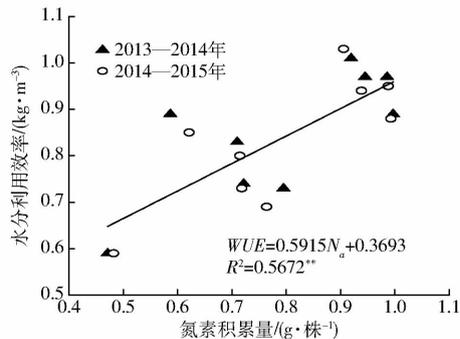
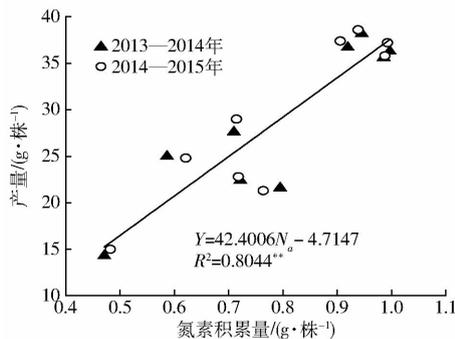


图3 冬油菜产量和水分利用效率与收获时氮素积累量的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between seed yield, water use efficiency and nitrogen accumulation amount at harvest of winter oilseed rape

## 2.4 冬油菜的水分-产量响应系数

水分-产量响应系数( $K_y$ )表示在降低单位耗水量的情况下作物的减产情况。本研究根据不同处理冬油菜的耗水量和籽粒产量,作出了冬油菜的水分-产量响应关系,如图4所示。由图4可以看出,冬油菜的 $K_y$ 为1.36,且拟合关系在 $P < 0.01$ 水平显著。

## 3 讨论

### 3.1 干物质和氮素积累

干物质和养分积累是作物器官分化和产量形成的前提。左青松等<sup>[14]</sup>和邹娟等<sup>[15]</sup>研究表明施氮处理显著影响冬油菜地上部的干物质和氮素积累;谷晓博等<sup>[12]</sup>研究表明蕾薹期不同灌水量也显著影响冬油菜地上部的干物质和氮营养指数;王丽梅等<sup>[16]</sup>试验结果表明施氮和充分供水均可显著提高

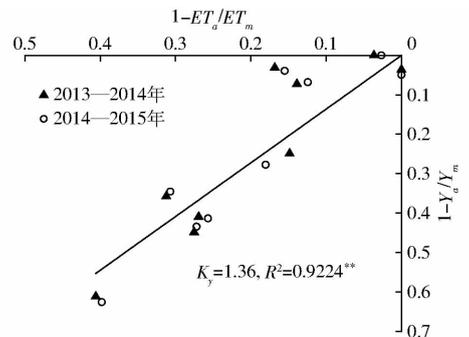


图4 冬油菜的水分-产量响应关系

Fig. 4 Yield response factor ( $K_y$ ) for winter oilseed rape

玉米冠层营养器官干物质及氮素积累,二者存在显著正交互效应。但目前关于水氮互作对冬油菜生殖生长阶段的氮素积累效应则未见报道。本研究中,水氮互作显著影响冬油菜初花期和收获时的地上部干物质和氮素积累,进而显著影响冬油菜生殖生长

阶段地上部的干物质和氮素积累,这与马耕等<sup>[17]</sup>在小麦的研究中基本一致。且在本研究中,中水中氮处理(W1N1)已能有效增加冬油菜生殖生长阶段的地上部生物量和氮素积累,而过量灌溉或施氮不能再大幅促进冬油菜地上部生物量的增长和氮素的积累,造成资源浪费。

### 3.2 产量和水分利用效率

RATHKE等<sup>[18]</sup>研究表明,在一定范围内油菜产量随氮肥用量的增加呈现增加趋势,达到一定值时,继续增加氮肥用量产量增加不明显或呈下降趋势,这与本研究结果一致,施氮量为1.2 g/桶(约合180 kg/hm<sup>2</sup>)(N1)时,冬油菜产量显著增加,而当施氮量为2.4 g/桶(约合360 kg/hm<sup>2</sup>)(N2)时,冬油菜籽粒产量略有下降。本研究中,N1施氮水平能显著提高冬油菜的水分利用效率,而N2施氮水平下冬油菜的水分利用效率较N1有所降低。这与对谷子<sup>[19]</sup>、大豆<sup>[20]</sup>等作物的研究结论一致。ISTANBULLUOGLU等<sup>[21]</sup>的试验结果表明,适量灌溉能显著提高冬油菜的产量和水分利用效率,而过量灌溉条件下,冬油菜的产量不会再显著增加,其水分利用效率却大幅降低,本研究也得到了相似的结果。

灌水量和施氮量对作物产量存在调控和互补效应。研究表明,小麦<sup>[8]</sup>、玉米<sup>[9]</sup>和甜瓜<sup>[22]</sup>的产量随灌水量和施氮量的增加而提高,但在高水和高氮条件下略有下降。本研究也证明水氮互作显著影响冬油菜的籽粒产量和水分利用效率,中水中氮处理(W1N1)的水分利用效率最高,而高水中氮处理

(W2N1)的产量最高,且W1N1和W2N1处理冬油菜的产量和水分利用效率均不存在显著差异,但W2N1处理冬油菜的耗水量却显著小于W1N1处理。在如今灌溉水资源严重紧缺的情况下,W1N1处理为冬油菜较优的灌水施氮方案。

### 3.3 水分-产量响应系数

ISTANBULLUOGLU等<sup>[21]</sup>研究表明,油菜的水分-产量响应系数为0.99,而本研究中冬油菜的水分-产量响应系数为1.36,造成这种差异的原因可能是试验品种、试验地的气候条件、土壤特性以及土壤水分的亏缺程度不同<sup>[23]</sup>。在当地气候条件下,若作物的水分-产量响应系数大于1,说明该种作物的产量对水分亏缺的响应很敏感<sup>[24]</sup>。因此,为获得高产,当遇长期或严重干旱气候时,必须对冬油菜进行适量灌溉。

## 4 结束语

全生育期中水(W1)和中氮(N1)处理能显著促进冬油菜生殖生长阶段地上部干物质和氮素的积累,显著提高冬油菜的产量和水分利用效率,而全生育期高水(W2)和高氮(N2)处理的促进作用不再显著。高水中氮(W2N1)和中水中氮(W1N1)处理分别得到最高的产量和水分利用效率,且二者的产量和水分利用效率均不存在显著差异,但是,W1N1处理的耗水量显著小于W2N1处理。全面考虑产量与节水节肥等多种因素,W1N1处理为该研究区较优的冬油菜灌水施氮策略。

## 参 考 文 献

- 1 FAO statistical databases [DB]. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, 2016.
- 2 王汉中. 我国油菜产业发展的历史回顾与展望[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(2): 300-302.  
WANG Hanzhong. Review and future development of rapeseed industry in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2010, 32(2): 300-302. (in Chinese)
- 3 李志玉, 郭庆元, 廖星, 等. 不同氮水平对双低油菜中双9号产量和品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(2): 78-82.  
LI Zhiyu, GUO Qingyuan, LIAO Xing, et al. Effects of different amount of nitrogen on yield, quality and economics of Zhongshuang No. 9[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(2): 78-82. (in Chinese)
- 4 RATHKE G W, BEHRENS T, DIEPENBROCK W. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review[J]. Agriculture, Ecosystem & Environment, 2006, 117(2-3): 80-108.
- 5 王小彬, 代快, 赵全胜, 等. 农田水氮关系及其协同管理[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 7001-7015.  
WANG Xiaobin, DAI Kuai, ZHAO Quansheng, et al. Opinions on water-nitrogen relations and their synergic management[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 7001-7015. (in Chinese)
- 6 吕丽华, 董志强, 张廷廷, 等. 水氮对冬小麦-夏玉米产量及氮利用效应研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3839-3849.  
LÜ Lihua, DONG Zhiqiang, ZHANG Jingting, et al. Effect of water and nitrogen on yield and nitrogen utilization of winter wheat and summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(19): 3839-3849. (in Chinese)
- 7 田亚芹, 冯利平, 邹海平, 等. 不同水分和氮素处理对寒地水稻生育及产量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(23): 6864-6871.  
TIAN Yaqin, FENG Liping, ZOU Haiping, et al. Effects of water and nitrogen on growth, development and yield of rice in cold area of Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(23): 6864-6871. (in Chinese)

- 8 姜东燕,于振文,许振柱. 灌溉量和施氮量对冬小麦产量和土壤硝态氮含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 364-368.  
JIANG Dongyan, YU Zhenwen, XU Zhenzhu. Effects of irrigation amount and nitrogen fertilization rate on wheat yield and soil nitrate content[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 364-368. (in Chinese)
- 9 谢英荷,栗丽,洪坚平,等. 施氮与灌水对夏玉米产量和水氮利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1354-1361.  
XIE Yinghe, LI Li, HONG Jianping, et al. Effects of nitrogen application and irrigation on grain yield, water and nitrogen utilizations of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(6): 1354-1361. (in Chinese)
- 10 刘世全,曹红霞,杨慧,等. 水氮供应与番茄产量和生长性状的关联性分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(22): 4445-4452.  
LIU Shiquan, CAO Hongxia, YANG Hui, et al. The correlation analysis between tomato yield, growth characters and water and nitrogen supply[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(22): 4445-4452. (in Chinese)
- 11 李银坤,武雪萍,吴会军,等. 水氮条件对温室黄瓜光合日变化及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊1): 122-129.  
LI Yinkun, WU Xueping, WU Huijun, et al. Effects of water and nitrogen conditions on the diurnal variation of photosynthesis and yield of cucumber in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 1): 122-129. (in Chinese)
- 12 谷晓博,李援农,杜娅丹,等. 水氮耦合对冬油菜氮营养指数和光能利用效率的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 122-132. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160217&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160217&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.017.  
GU Xiaobo, LI Yuannong, DU Yadan, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen nutrition index and radiation use efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 122-132. (in Chinese)
- 13 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- 14 左青松,杨海燕,冷锁虎,等. 施氮量对油菜氮素积累和运转及氮素利用率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(3): 511-518.  
ZUO Qingsong, YANG Haiyan, LENG Suohu, et al. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen use efficiency in rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(3): 511-518. (in Chinese)
- 15 邹娟,鲁剑巍,陈防,等. 冬油菜施氮的增产和养分吸收效应及氮肥利用率研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 745-752.  
ZOU Juan, LU Jianwei, CHEN Fang, et al. Study on yield increasing and nutrient uptake effect by nitrogen application and nitrogen use efficiency for winter rapeseed[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(4): 745-752. (in Chinese)
- 16 王丽梅,李世清,邵明安. 水、氮供应对玉米冠层营养器官干物质和氮素积累、分配的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(13): 2697-2705.  
WANG Limei, LI Shiqing, SHAO Ming'an. Effects of N and water supply on dry matter and N accumulation and distribution in maize (*Zea mays* L.) leaf and straw-sheath[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(13): 2697-2705. (in Chinese)
- 17 马耕,张盼盼,王晨阳,等. 高产小麦花后植株氮素积累、转运和产量的水氮调控效应[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6): 798-805.  
MA Geng, ZHANG Panpan, WANG Chenyang, et al. Regulation effect of irrigation and nitrogen on post-anthesis nitrogen accumulation, translocation and grain yield of high-yield wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(6): 798-805. (in Chinese)
- 18 RATHKE G W, CHRISTEN O, DIEPENBROCK W. Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations[J]. Field Crops Research, 2005, 94(2-3): 103-113.
- 19 张亚琦,李淑文,付巍,等. 施氮对杂交谷子产量与光合特性及水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1119-1126.  
ZHANG Yaqi, LI Shuwen, FU Wei, et al. Effects of nitrogen application on yield, photosynthetic characteristics and water use efficiency of hybrid millet[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5): 1119-1126. (in Chinese)
- 20 孙继颖,高聚林,吕小红. 施氮量对大豆抗旱生理特性及水分利用效率的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26(4): 517-522.  
SUN Jiying, GAO Julin, LÜ Xiaohong. The effects of nitrogen on physiological indexes of drought tolerance and water use efficiency in soybean[J]. Soybean Science, 2007, 26(4): 517-522. (in Chinese)
- 21 ISTANBULLUOGLU A, ARSLAN B, GOCMEN E, et al. Effects of deficit irrigation regimes on the yield and growth of oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(3): 388-394.
- 22 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/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 88-96. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150214&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150214&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.014.  
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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 88-96. (in Chinese)
- 23 PECTU E, SCHITEA M, CIRSTEVA V E. The effects of water stress on cuticular transpiration and its association with alfalfa yield [J]. Romanian Agricultural Research, 2009, 26: 53-56.
- 24 DOORENBOS J, KASSAM A H. Yield response to water [M] // JOHI S S. Irrigation and agricultural development. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33, 1979: 257-280.