

## 负压灌溉下不同钾水平对小油菜生长的影响

赵秀娟<sup>1</sup>, 宋燕燕<sup>1,2</sup>, 岳现录<sup>1</sup>, 张淑香<sup>1</sup>, 武雪萍<sup>1</sup>, 龙怀玉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; <sup>2</sup> 中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 【目的】负压灌溉是一种新型供水技术, 能显著节水节肥, 本文拟研究 5 个不同钾水平对小油菜生长的影响, 并比较负压灌溉下不同压力对黏壤土含水量的影响, 为小油菜钾肥的合理施用提供科学指导。【方法】以小油菜为研究对象, 设置 4 个供水处理 (0, -5, -10 和 -15 kPa) 和无钾 (K0)、1 倍钾 (K1, 150 kg·hm<sup>-2</sup>)、1.5 倍钾 (K1.5, 225 kg·hm<sup>-2</sup>)、2 倍钾 (K2, 300 kg·hm<sup>-2</sup>)、3 倍钾 (K3, 450 kg·hm<sup>-2</sup>) 5 个钾肥处理, 确定小油菜在负压灌溉下最佳施钾量和供水压力。【结果】(1) 负压灌溉不同压力下黏壤土含水量分别为 28.52%、22.45%、18.13%、15.4%, 其中 -5—-10kPa 供水压力范围内土壤含水量为 18.13%—22.45%, 较为适宜作物生长, 为最佳供水压力。(2) 不同钾水平对小油菜产量影响显著, 1.5 倍钾处理产量最高, 比 1 倍钾处理产量提高 16.9%, 但过量施钾产量反而显著下降。(3) 不同钾水平对油菜硝酸盐含量影响显著, 施钾显著降低硝酸盐含量, 1.5 倍钾处理硝酸盐含量比 1 倍钾低 26.3%。(4) 不同钾水平显著影响作物吸收氮磷钾的量, 1.5 倍钾吸收氮钾量比 1 倍钾处理分别高 15.8%、76.3%, 但吸收磷的量低于 1 倍钾。(5) 施钾能显著提高作物钾肥利用率和钾肥农学效率, 1.5 倍钾钾肥利用率和农学效率比 1 倍钾提高 173.32%和 83.9%。(6) 施钾比不施钾 POD, SOD 酶活提高 69.8%和 93%。不同钾水平显著影响抗氧化酶表达, 相比 1 倍钾, 1.5 倍钾显著提高了 POD、SOD、PP0、PAL 表达量, 但类黄酮和总酚表达与 1 倍钾处理无差异。【结论】负压灌溉下黏壤土最佳供水压力为 -10—-5 kPa。在此负压灌溉条件下, 从不同钾水平对小油菜生长、品质及养分吸收等指标来看, 1.5 倍钾处理为最佳钾肥施用水平。

**关键词:** 负压灌溉; 小油菜; 钾; 产量; 品质

## Effect of Different Potassium Levels on the Growth of Bok Choy Under Negative Pressure

ZHAO XiuJuan<sup>1</sup>, SONG YanYan<sup>1,2</sup>, YUE XianLu<sup>1</sup>, ZHANG ShuXiang<sup>1</sup>, WU XuePing<sup>1</sup>, LONG HuaiYu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;

<sup>2</sup>College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083)

**Abstract:** 【Objective】Negative pressure irrigation is a new type of water supply technology. In this paper, the effects of five different potassium levels on growth, quality, nutrient uptake, utilization ratio and antioxidant enzyme activity of bok choy were compared. 【Method】In this experiment, five K fertilizer treatments including K0, K1, K1.5, K2 and K3, and 4 water supply treatments including 0, -5, -10, and -15 kPa were designed to study the effects of different potassium levels on bok choy growth. 【Result】(1) The soil moisture in clay loam under different pressures of water, respectively, was 28.52%, 22.45% and 18.13%, 15.4%, and when water pressures were between -5 and -10 kPa, the soil moisture was 18.13%-22.45%, which was suitable for crop growth. (2) The effect of different potassium levels on bok choy yield was significant, and that in K1.5 treatment was the highest, and increased by 16.9% compared with K1. The yield in K3 treatment was significantly decreased. (3) The effect of different potassium levels on the nitrate content of bok choy was significant, and potassium could significantly reduce nitrate content, nitrate content in K1.5 treatment decreased by 26.3% compared with that in K1. (4) Different potassium levels significantly affected the amount of

收稿日期: 2016-07-21; 接受日期: 2016-11-29

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2013AA102901)、国家公益性行业(农业)科研专项(201503120)、国家自然科学基金(41471249)

联系方式: 赵秀娟, E-mail: c13311252363@126.com. 通信作者张淑香, E-mail: zhangshuxiang@caas.cn

nutrients uptake, nitrogen and potassium absorption of K1.5 were increased by 15.8% and 76.3% compared with that in K1. Phosphorus uptake in K1.5 treatment was less than that in K1. (5) K1.5 improved K utilization of crop by 173.32% compared with K1, and K1.5 significantly improved the agronomic efficiency of fertilizer, and increased by 83.9% compared with K1. (6) Compared to K1, K1.5 significantly increased the expression of the activities of POD, SOD, PPO, and PAL, but the flavonoid and total phenolic was not different with K1. 【Conclusion】 It was concluded that K1.5 was the best potassium application level. The optimum water supply pressure was -10--5 kPa for clay loam.

**Key words:** negative pressure irrigation; bok choy; potassium; yield; quality

## 0 引言

【研究意义】土壤水分是作物生长发育、产量和品质形成的基础。在目前的农业生产中,灌溉是一种间歇式的灌水方式,非常容易产生湿害或干旱胁迫,导致作物减产、品质变劣<sup>[1]</sup>。负压灌溉是一种新型的节水灌溉技术,其基本原理就是将灌水器埋入土壤中,植物利用基质势(土壤吸力)主动从灌水器的水源中吸收水分,整个过程无需外界加水设备<sup>[2-5]</sup>。负压灌溉平稳地维持土壤水分状况,作物全生育期生长在适宜的水分和养分状态下进行,从而显著提高作物产量和品质<sup>[6-8]</sup>。进一步研究负压灌溉下最适供水压力及不同养分对作物生长的影响具有重要意义。【前人研究进展】钾是植物生长必需的三大元素之一,是 60 多种酶的活化剂,能有效调节植物细胞的水势和气孔的开闭,促进光合作用和光合产物的运输<sup>[9]</sup>。研究表明,钾肥不但能够增加作物产量,而且能够提高作物品质。在西瓜、茄子、菠菜、黄瓜、豆角、番茄、大白菜上施用钾肥均有明显的增产效果,平均增产(16.6±10.8)%,同时降低硝酸盐的含量<sup>[10-11]</sup>。施钾可以显著增加作物养分的吸收。棉花施钾量小于 70 kg·hm<sup>-2</sup>,氮、磷吸收量随着钾施用量增加而增加,钾肥利用率也随之提高,过多的施用钾肥则养分吸收下降,钾肥利用率也下降<sup>[12-13]</sup>。研究表明,钾可以提高作物抗氧化酶活,施钾对作物 SOD、POD 抗氧化酶活也有一定效果,缺钾和过量施钾能导致油菜叶片 SOD 酶活下降,适量施钾则可以提高玉米 SOD 活性<sup>[14]</sup>。烟草感染烟草花叶病毒后,施钾处理中 POD 活性要显著高于没有施钾处理<sup>[15]</sup>。目前农业商品化的发展对农产品品质的要求越来越高,而钾肥的施用存在较多问题,钾肥施用不够重视、钾亏缺等问题严重地限制了农产品品质的改善。尤其在蔬菜上,钾肥施用配比不当对农产品品质有较为显著的影响<sup>[16]</sup>。【本研究切入点】在负压灌溉中添加营养液使负压灌溉系统成为一种持续的供水供肥系统,植物生长在一个稳定的适宜的养分水分环境中。小油菜,又称油白菜或小白菜,是十字花科植物

油菜的嫩茎叶,属十字花科白菜变种。目前关于不同钾水平在负压灌溉下对小油菜生长影响未见报道,因此进一步研究不同钾水平在负压灌溉下对小油菜的影响有重要意义。【拟解决的关键问题】本试验以小油菜为研究对象,研究负压灌溉下不同钾水平对小油菜产量、品质及养分吸收的影响,探索小油菜负压灌溉下菜最适施用钾水平,为负压灌溉下小油菜合理施肥提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置

1.1.1 水分运移试验装置 试验采用长 25 cm,宽 2 cm,高 60 cm 的平面式土箱,观测水分在垂直方向上的运动情况。储水器内径为 10 cm,负压发生器利用电磁阀和数显开关来控制压力,灌水器陶土头长 25 cm,外径 1.8 cm,固定在距土箱顶部 20 cm 处。

1.1.2 室外负压灌溉试验装置 本试验采用负压灌溉水肥一体化供水供肥(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所专利,ZL201110093923.2),由负压数显开关控制,装置由供肥桶和供水桶组成,中间由三通连接,负压值在换水换肥中不受到影响,保证了在生长过程中负压值的稳定。

### 1.2 试验设计

1.2.1 室内土柱运移试验 室内土壤水分运移试验于 2015 年 7 月在中国农业科学院农业资源与农业区划研究所实验室完成。试验设置 0、-5、-10、-15 kPa 4 个不同压力水平,记录累计入渗量、湿润锋运移情况和最大垂直湿润距离,并测其运移到土箱底端的土壤含水量。采集山东耕层(0—20cm)黏壤土(潮土)进行试验,土壤经过风干挑选出杂物后过 2mm 孔径筛,土壤的理化性质如表 1。

1.2.2 田间盆栽试验 在中国农业科学院网室内进行田间盆栽试验。供试土壤为山东耕层(0—20 cm)黏壤土。土壤经风干挑选出石粒等杂物,并过 2 mm 孔径筛,基本理化性质见表 1。供试作物为小油菜,品种为华绿。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

土壤质地	容重	有机质	有效磷	全氮	pH	黏粒
Soil texture	Bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	Organic matter (mg·kg <sup>-1</sup> )	Olsen-P(mg·kg <sup>-1</sup> )	Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )		Clay content (%)
黏壤土	1.68	7.44	16.67	0.53	6.52	32.09
Clay loam						

试验以负压灌溉水肥一体化进行, 共设置 5 个钾处理, 分别为无钾 (K0)、1 倍钾 (K1, 150 kg·hm<sup>-2</sup>)、1.5 倍钾 (K1.5, 225 kg·hm<sup>-2</sup>)、2 倍钾 (K2, 300 kg·hm<sup>-2</sup>)、3 倍钾 (K3, 450 kg·hm<sup>-2</sup>), 3 种肥料为尿素, 磷酸二铵, 硫酸钾, 肥料配方详见表 2。每个处理重复 3 次, 随机区组排列。根据室内土柱运移试验结果, 田间盆栽试验负压值设定值为 (-5±1) kPa。

表 2 不同钾水平试验设计 (负压设定为 (-5±1) kPa)

Table 2 Experimental design of different potassium levels (negative pressure (-5 ± 1) kPa)

处理	肥料配比	钾施用量
Treatment	Fertilizer ratio	Potassium application (kg·hm <sup>-2</sup> )
K0	N:P:K(10:5:0)+M	0
K1	N:P:K(10:5:10)+M	150
K1.5	N:P:K(10:5:15)+M	225
K2	N:P:K(10:5:20)+M	300
K3	N:P:K(10:5:30)+M	450

M: 微量元素 M: Micronutrient

试验播种前, 将土壤装入长 41.5 cm, 宽 26 cm, 高 26 cm 的塑料盆, 每盆装土 28 kg。肥料移栽后分四次随水施入, 每次施入量分别为 15%, 30%, 30%, 15%, 水溶性肥料施肥浓度为 0.15%。小油菜于 2015 年 8 月 14 日播种, 每盆 8 颗, 两叶一心期移栽, 于 2015 年 9 月 30 日收获, 生长期 46 d。小油菜生长期间的松土、病虫害防治等其他管理措施参照常规的油菜管理措施。

### 1.3 样品采集及测定方法

1.3.1 产量、品质及养分吸收的测定 收获时测定每盆产量 (鲜重), 之后用冰盒将新鲜植株样品带回实验室测定植株硝酸盐、可溶性糖及维 C。维生素 c 含量测定采用 2, 6-二氯酚靛酚法, 硝酸盐含量测定用水杨酸比色法, 可溶性糖的测定用蒽酮比色法。

将烘干的植株样品磨碎并过 0.25 mm 筛, 采用半微量凯氏法测定全氮含量, 钼锑抗比色法测定全磷含量, 原子吸收分光光度法测定全钾含量<sup>[5]</sup>。

各施肥处理吸氮 (磷、钾) 量=各施肥处理植株干重×植株全氮 (磷、钾) 量;

钾肥贡献率 (K contribution rate, KCR, %) = (施钾区产量-无钾区产量) / 施钾区产量 × 100<sup>[17]</sup>;

钾肥农学利用率 (K<sub>2</sub>O agronomic efficiency, KAE, kg·kg<sup>-1</sup>) = (施钾区产量-无钾区产量) / 施钾量;

钾肥吸收利用率 (K<sub>2</sub>O recovery efficiency, KRE, %) = (施钾区植株总吸钾量-无钾区植株总吸钾量) / 施钾量 × 100。

1.3.2 抗氧化酶的测定 酶液提取: 1 g 样品放入预冷的研钵中, 分次加入 4 mL 的 0.05 mol·L<sup>-1</sup>, pH 7.0 的磷酸缓冲液 (内含 1%PVP、1mmol·L<sup>-1</sup> EDTA 少许), 加入少量石英砂, 在冰浴中研磨成匀浆, 放入离心管。匀浆液于 4℃ 下低温离心机 10 000 r/min, 离心 20 min, 取上清液保存于 -80℃ 冰箱备用。上清液供以下项目测定。

超氧化物歧化酶 (SOD): 吸上述酶液 25 μL, 加入 3.9 mL 反应液 (50 mmol·L<sup>-1</sup>, pH 7.8 磷酸缓冲液, 内含 77.12 μmol·L<sup>-1</sup> NBT, 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> EDTA, 13.3 mmol·L<sup>-1</sup> 蛋氨酸) 和 0.1 mL 核黄素 (80.2 μmol·L<sup>-1</sup>)。混匀后, 在 4 000 Lx 日光下反应 20 min, 以缓冲液代替酶液为对照, 以不照光为空白, 测定样品在 560 nm 处的吸光度。以抑制 NBT 光化还原的 50% 为一个酶活性单位 (U·g<sup>-1</sup>·FW)。

过氧化物酶 (POD) 活性: 取酶液 50 μL 于试管中, 与 2.9 mL 含 18 mmol·L<sup>-1</sup> 愈创木酚的磷酸缓冲液 (0.1 mol·L<sup>-1</sup>, pH5.8) 混合, 在 30℃ 水浴保温 1 min 后, 加入 50 μL 2.5% (V/V) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 开始酶反应, 于 470 nm 波长下比色, 以相同体积缓冲液为空白对照。POD 活性以每分钟减少 0.01 个 A 值所需的酶量为一个活性单位 (U), 酶的活性以 (U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup> FW) 表示。

苯丙氨酸裂解酶 (PAL) 活性: 吸 1 mL L-苯丙氨酸 (0.02 mol·L<sup>-1</sup>) 和 2 mL Tris-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 缓冲溶液 (0.05 mol·L<sup>-1</sup>, pH 8.8) 置于试管中, 另取一支试管加 3 mL Tris-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 缓冲溶液作为空白, 置 30℃ 水浴保温 3 min (每一样品重复 2 组)。在各试管中加入 0.5 mL 待测

酶液，摇匀后（以空白做参比）立即在紫外分光光度计 290 nm 波长下测定起始 OD 值，并精确计时。将测定后的各试管放入 30℃ 水浴保温反应至 30 min，再次测定各管的 OD 值。酶的活性以 (U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup> FW) 表示。

多酚氧化酶 (PPO) 活性：取酶提液 0.2 mL 加入 2.8 mL 含 0.02 mol·L<sup>-1</sup> 邻苯二酚的磷酸缓冲液 (0.1 mol·L<sup>-1</sup>, pH 6.8 磷酸缓冲液) 混合。于 30℃ 水浴反应 2 min 后，记录 398 nm 处的吸光度，以相同体积提取缓冲液为空白对照。以每分钟 OD<sub>398</sub> 值变化 0.01 为 1 个酶活性单位 U，酶的单位以 (U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup> FW) 表示。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 SAS9.0 软件进行数据分析。湿润锋运移情况通过定时拍照并利用 GetData.Graph.Digitizer 软件处理照片取得。

2 结果

2.1 不同负压下黏壤土最佳供水压力确定

在不同负压水平下累计入渗量 Q 随时间 t 的变化如图 1 所示。压力值越大，水分运移到底部所需的入渗量越小，0 kPa 为 1 083 mL，-5 kPa 为 871 mL，-10 kPa 为 722 mL，-15 kPa 为 614 mL。不同负压水平下最大垂直湿润距离 Z 随时间 t 的变化如图 2 所示，压力值越大，Z 随时间增加的幅度越小；相同时间内，压力值越大，最大垂直湿润距离 Z 越小。不同负压水平下的土壤含水量如表 3 所示。从表中可看出，随着压力值的增加，土壤含水量呈减小趋势。供水压力范围为 -5—-10 kPa 时土壤含水量均值为 18.13%—22.45%，黏壤土田间持水量为 25% 左右，而小油菜、小白菜等蔬菜最佳土壤含水量为田间持水量的 85%，

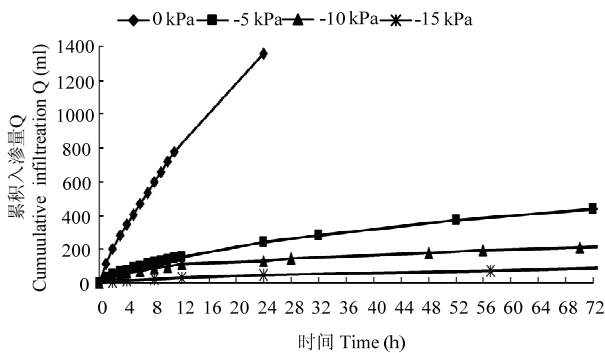


图 1 黏壤土不同压力水平下累积入渗量随时间的变化  
Fig. 1 Cumulative filtration with time under different pressures

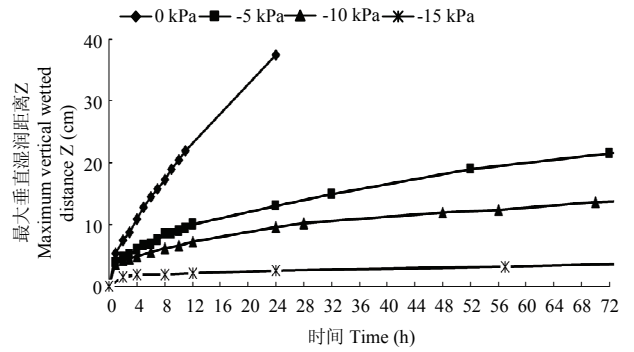


图 2 黏壤土不同压力水平下最大垂直湿润距离随时间的变化  
Fig. 2 Maximum vertical wetting distance with time under different pressure

表 3 黏壤土不同负压水平下的土壤含水量  
Table 3 Soil moisture content under different negative pressures in different soil layers (%)

负压 Negative pressure	土层 Layer (cm)			
	0-20	20-40	40-60	均值
0 kPa	30.53a	30.67a	24.36a	28.52a
-5 kPa	24.25b	22.87 b	20.24 b	22.45 b
-10 kPa	18.01c	19.76 c	16.61 c	18.13 c
-15 kPa	16.05d	16.16 d	14.01 d	15.4 d

不同小写字母表示差异显著。下同  
Different small letters within a column indicate significantly different at the 0.05 level. The same as below

因此土壤含水量在 20% 左右适合小油菜生长<sup>[19]</sup>，因此供水压力范围为 -5—-10 kPa 时为最佳含水量。

2.2 不同钾水平对小油菜产量和品质的影响

图 3 表明，施用相同氮磷量条件下，适量增施钾肥能够显著提高小油菜产量，1.5 倍钾处理比 1 倍钾提高产量 16.9%。2 倍钾产量与 1 倍钾相比无显著差异，3 倍钾产量显著低于 1 倍钾。

施用相同氮磷量条件下，施钾显著提高对小油菜可溶性糖含量影响，其中 1 倍钾小油菜可溶性糖含量最高，1.5 倍钾小油菜可溶性糖最低。施钾能够显著降低硝酸盐含量，1.5 倍钾肥处理硝酸盐含量比 1 倍钾处理低 26.3%，2 倍钾处理和 3 倍钾处理之间则无显著差异，施钾对小油菜维 C 含量则无显著影响 (图 4)。

2.3 不同钾水平对小油菜养分吸收的影响

1.5 倍钾处理小油菜植株吸收氮、钾的含量显著高

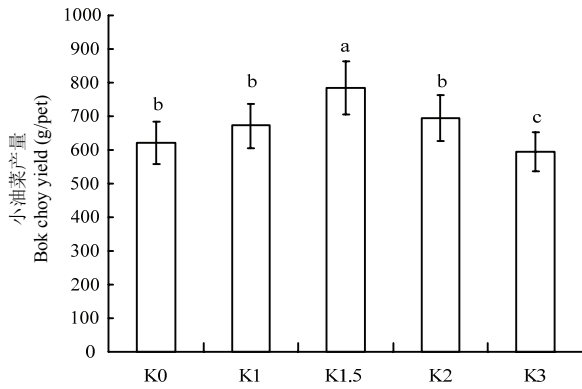


图3 不同钾水平对小油菜产量的影响

Fig. 3 Effect of different potassium levels on fresh weight of bok choy

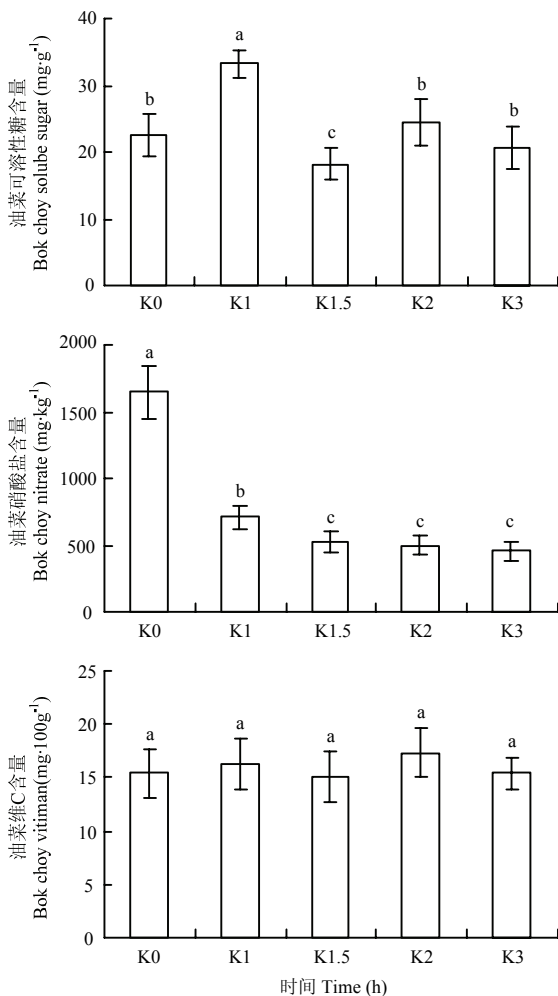


图4 不同钾水平对小油菜品质的影响

Fig. 4 Effects of different potassium levels on the quality of bok choy

于其他钾处理，比1倍钾处理分别高15.8%、76.3%，但磷的量低于1倍钾处理。3倍钾吸收氮量要小于2倍钾吸收氮量，表明增施适量钾有助于作物吸收养分，过量施钾则无助于养分吸收（表4）。

#### 2.4 不同施钾量对小油菜钾肥利用率的影响

研究表明，不同施钾量显著影响钾肥贡献率、钾肥农学效率及钾肥吸收利用率，1.5倍钾处理能显著提高钾肥贡献率，比1倍钾提高了173.32%。与1倍钾处理相比，2倍钾处理钾肥贡献率变化不显著，3倍钾则显著降低了钾肥贡献率。不同施钾量处理的钾肥农学效率不同，1.5倍钾能够显著提高钾肥农学效率，比1倍钾提高83.9%，2倍钾和3倍钾处理钾

表4 不同钾水平对小油菜养分含量的影响

Table 4 Effects of different potassium levels on nutrient uptake (mg·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	氮 N	磷 P	钾 K
K0	257.09c	56.95 b	90.99 d
K1	328.44 b	71.87 a	161.87 c
K1.5	380.75 a	64.42 ab	284.64 a
K2	313.00b	50.16 b	217.99 b
K3	265.15 c	51.84 b	218.06 b

肥农学效率显著低于1倍钾，表明适量增施钾肥能显著提高钾肥农学效率和钾肥贡献率，过量施钾反而会降低钾肥贡献率（表5）。

#### 2.5 不同施钾量对小油菜抗氧化酶活性的影响

研究表明，施钾可以显著提高小油菜抗氧化酶活性和抗氧化物质表达，K1处理POD、SOD酶活比K0提高69.8%和93%。与1倍钾相比，1.5倍钾显著提高了POD、SOD、PPO、PAL表达量，但类黄酮和总酚表达与1倍钾处理无显著性差异。2倍钾处理比1倍钾显著提高了POD、SOD、PPO含量，其

表5 不同钾水平对小油菜钾肥利用率的影响

Table 5 Effects of different potassium levels on the utilization ratio of potassium fertilizer

处理 Treatment	钾肥贡献率 K contribution rate (%)	钾肥农学利用率 K <sub>2</sub> O agronomic efficiency (kg·kg <sup>-1</sup> )	钾肥吸收利用率 K <sub>2</sub> O recovery efficiency (%)
K1	7.72b	41.17b	56.25b
K1.5	21.11a	75.71a	88.42a
K2	10.63b	23.59c	40.64bc
K3	-4.22c	-5.24d	31.27c

他抗氧化物质则无显著性差异。3 倍钾处理抗氧化酶活显著低于 1.5 倍钾和 2 倍钾处理, 表明只有适量增

施钾肥才能提高小油菜抗氧化酶活及抗氧化物质表达(表 6)。

表 6 不同钾水平对小油菜抗氧化酶活的影响

Table 6 Effects of different potassium levels on the activities of antioxidant enzymes

处理 Treatment	过氧化物酶 POD (U·h <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> ·FW)	超氧化物歧化酶 SOD (U·h <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> ·FW)	多酚氧化酶 PPO (U·h <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> ·FW)	苯丙氨酸裂解酶 PAL (U·h <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> ·FW)	类黄酮 Flavonoid (mg/100g)	总酚 Total phenol (mg·g <sup>-1</sup> )
K0	6.77c	0.86c	2.07b	0.18c	1.58b	3.08ab
K1	11.50b	1.61b	2.88b	0.48b	2.84ab	4.06a
K1.5	25.00a	2.47a	3.80a	0.75a	3.87a	4.76a
K2	21.28a	2.34a	3.25a	0.47b	2.98ab	3.75ab
K3	17.52b	1.56b	2.50b	0.21c	1.55b	2.77b

### 3 讨论

#### 3.1 黏壤土负压灌溉中最适供水压力的确定

负压灌溉装置能够持续、缓慢的供水, 将土壤的含水量保持于一个较为稳定的状态<sup>[18-20]</sup>。负压灌溉下作物的最适供水压力影响因素包括不同作物、不同土壤类型等。研究表明, 负压灌溉下小麦苗期的最佳压力为-(8—10) kPa, 菠菜为-(2—4) kPa, 大豆为-(5—7) kPa, 番茄-(4—7) kPa, 观赏辣椒-(5—7) kPa<sup>[21-23]</sup>, 黄瓜潮土下为-(3—5) kPa<sup>[24]</sup>。

本研究结果表明黏壤土条件下, -5 kPa 时土壤含水量为 22%左右, -10 kPa 为 18%左右, 初步得出小油菜最适供水负压为-(5-10) kPa, 较适合小油菜的生长。负压灌溉水肥一体化是一种较好供肥方式, 主要原因在于常规灌溉的营养液存在过多或过少的问题, 过少不能满足植株生长, 过多又会对植株产生伤害。负压灌溉水肥一体化能很好地解决这个问题, 植株生长与养分供应处于一个平衡的状态<sup>[25-26]</sup>。

#### 3.2 负压灌溉下不同钾水平对作物产量、品质及养分吸收的影响

钾是作物生长必需的大量营养元素之一, 施钾可以显著的增加作物产量, 改善作物品质, 缺钾会限制作物的生长<sup>[16]</sup>。但钾肥的施用有一定的阈值, 本研究的结果表明, 施钾可以显著增加小油菜的产量, 当钾肥用量为 1 倍和 1.5 倍钾时, 施钾能显著增加油菜产量; 当钾肥用量为 2 倍钾时, 产量没有显著增加, 当钾肥用量为 3 倍钾时, 产量随钾肥用量增加而下降。

因此, 在负压灌溉设定压力为-5 kPa 条件下, 施钾量为 1.5 倍钾左右时, 为最佳施钾量。

前人研究结果表明, 适量的施钾可以显著增加作物养分的吸收。如小麦施钾量小于 90 kg·hm<sup>-2</sup>时, 增施钾肥可以显著增加养分吸收, 但超过 90 kg·hm<sup>-2</sup>则养分吸收不再增加, 而施钾量小于 135 kg·hm<sup>-2</sup>时, 吸氮量随钾肥施用量的增加而增加, 超过 135 kg·hm<sup>-2</sup>氮吸收量下降<sup>[13]</sup>。本研究的结果表明, 小油菜施钾可以显著提高植株氮、磷和钾素的吸收, 但当施钾量达到一定水平后, 氮、磷和钾的吸收则保持稳定。而钾肥利用率及钾肥农学效率研究结果表明, 施钾量为 1.5 倍钾以内, 钾肥利用率及钾肥农学效率随着钾的施用量的增加而增加, 2 倍钾和 3 倍钾的钾肥利用率和钾肥农学效率显著下降。

许多研究表明, 施钾不仅可以提高作物的生长指标, 更可以提高作物的品质, 提高作物的含糖量, 降低硝酸盐含量。玉米和小麦的研究结果表明, 适量施用钾肥, 作物的可溶性糖含量随着钾肥的用量增加而增加, 过量的钾肥则有着相反的效果。本研究结果也表明, 增施钾肥能够显著提高油菜的品质, 这与前人研究结果一致。原因可能在于施钾可以提高作物蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 及籽粒的蔗糖合成酶 (SS) 和磷脂酸磷酸酯酶活性, 促进糖代谢<sup>[27-29]</sup>。

大量研究表明, 钾可以提高作物抗氧化酶活。施钾可以提高作物植株内酚类物质的含量, 如在油菜上施钾可以提高植株内酚类物质的含量<sup>[30]</sup>。施钾可以提高酚类物质代谢中关键酶 PAL 的活性, 烟草施钾处理

后,烟草植株内 PAL 活性持续高于不施钾处理<sup>[29]</sup>。施钾也可以提高 PPO 酶活, PPO 可以促进细胞木质化,能够提高作物抗病能力。在橡胶上增施钾肥可以提高橡胶 PPO 活性,降低橡胶流胶病的感染<sup>[31]</sup>。本研究结果也表明,施钾后小油菜抗氧化酶活显著增加,酚类物质活性也显著增加。适量增施钾肥后,抗氧化酶活性也显著增加,但过量施钾,酶活并没有显著增加,反而有所下降。

## 4 结论

研究表明,负压灌溉下施钾可以提高油菜产量,改善油菜品质,提高钾肥利用率,促进油菜抗氧化酶表达,但施钾量并不是越多越好,适量增施钾肥才能达到最佳效果,研究表明,1.5 倍钾(225 kg·hm<sup>-2</sup>)处理效果最好,超过 1.5 倍钾肥,产量有所下降。过量施钾(3 倍钾)时,产量和钾肥利用率则显著下降,因此,在负压灌溉设定压力为-5 kPa 条件下,1.5 倍钾肥(225 kg·hm<sup>-2</sup>)处理为小油菜最佳施钾量。

## References

- [1] KAUKORANTA T, MURTO J, TAKALA J, TAHVONEN R. Detection of water deficit in greenhouse cucumber by infrared thermograph and reference surfaces. *Scientia Horticulturae*, 2005, 106(4): 447-463.
- [2] 雷廷武, 江培福, 肖娟. 负压自动补给灌溉原理及可行性试验研究. 水利学报, 2005, 36(3): 98-302.  
LEI T W, JIANG P F, XIAO J. Principle of negative pressure difference irrigation system and feasibility experimental study. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 98-302. (in Chinese)
- [3] 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎, 耿伟, 李邵. 负水头灌溉原理与装置. 农业工程学报, 2007, 23(11): 17-21.  
ZOU C W, XUE X Z, ZHANG R D, GENG W, LI S. Principle and equipment of negative pressure irrigation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11): 17-21. (in Chinese)
- [4] 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 李霞, 陈菲. 负水头供水控水盆栽装置及灌溉系统的研究与应用. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2008, 26(5): 478-482.  
LI S, XUE X Z, GUO W S, LI X, CHEN F. Study and application of negative pressure water supplying, controlling pot device and irrigation system. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2008, 26(5): 478-482. (in Chinese)
- [5] 邹朝望. 负水头灌溉技术基础研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.  
ZOU C W. Fundamental research of negative hydraulic head irrigation technique[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. (in Chinese)
- [6] 刘明池. 负压自动灌水蔬菜栽培系统的建立与应用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2001.  
LIU M C. Development and application of a new auto-irrigating cultivation system with negative pressure[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2001. (in Chinese)
- [7] 江培福, 雷廷武, VINCENT F BRALTS, 刘汉. 土壤质地和灌水器材对负压灌溉出水量及土壤水运移的影响. 农业工程学报, 2006, 22(4): 19-23.  
JIANG P F, LEI T W, VINCENT F BRALTS, LIU H. Effects of soil textures and emitter material on the soil water movement and efficiency of negatively pressurized irrigation system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(4): 19-22. (in Chinese)
- [8] 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 张伟娟, 陈菲. 水肥耦合对温室盆栽黄瓜产量与水分利用效率的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 376-381.  
LI S, XUE X Z, GUO W S, ZHANG W J, CHEN F. Effects of water and fertilizer coupling on yield and water use efficiency in greenhouse potted cucumber. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 376-381. (in Chinese)
- [9] 胡笃敬, 董任瑞, 葛旦之. 植物钾营养的理论与实践. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1993.  
HU D J, DONG R R, GE D Z. *Theory and Practice of Potassium Nutrition in Plants*. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1993. (in Chinese)
- [10] 张漱茗, 阎华, 江丽华. 钾肥对蔬菜产量品质和硝酸盐含量的影响. 肥料与农业发展. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999: 482-486.  
ZHANG S M, YAN H, JIANG L H. Effects of potash fertilizer on yield and quality of vegetable and nitrate content influence. *Fertilizer and Agricultural Development*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 482-486. (in Chinese)
- [11] 白厚义, 陈佩琼, 顾明华. 氯化钾对旱藕产量及品质的影响. 肥料与农业发展, 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999: 552.  
BAI H Y, CHEN P Q, GU M H. Effects of potassium chloride on yield and quality of dry lotus effect. *Fertilizer and Agricultural*



- Development*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 552. (in Chinese)
- [12] DONG H Z, KONG X Q, LI W J. Effects of plant density and nitrogen and potassium fertilization on cotton yield and uptake of major nutrients in two fields with varying fertility. *Field Crops Research*, 2010, 119(1): 106-113.
- [13] 王桂良, 黄玉芳, 叶优良. 不同钾肥品种和用量对小麦产量品质和养分吸收利用的影响. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(5): 35-40.
- WANG G L, HUANG Y F, YE Y L. Effects of different K sources and rates on grain yield, quality and nutrient absorption of wheat. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2009, 27(5): 35-40. (in Chinese)
- [14] 何萍, 金继运. 氮钾营养对春玉米叶片衰老过程中激素变化与活性氧代谢的影响. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(4): 289-296.
- HE P, JIN J Y. Effect of N and K nutrition on changes of endogenous hormone and metabolism of active oxygen during leaf senescence in spring maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(4): 289-296. (in Chinese)
- [15] 周冀衡, 李卫芳, 王丹丹, 余佳斌. 钾对病毒侵染后烟草叶片内源保护酶活性的影响. *中国农业科学*, 2000, 33 (6): 98-100.
- ZHOU J H, LI W F, WANG D D, YU J B. Effect of potassium on the activity of internal source protective enzyme in tobacco leaf infected with mosaic virus. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6): 98-100. (in Chinese)
- [16] 许前欣, 赵振达, 李季平. 钾肥对蔬菜产量品质及效应研究. *土壤肥料*, 1999(2): 23-25.
- XU Q X, ZHAO Z D, LI J Q. Study on the effect of potassium fertilizer on the yield and quality of vegetables. *Soil and Fertilizer*, 1999(2): 23-25. (in Chinese)
- [17] 曾德武, 刘强, 彭建伟. 不同稻田土壤钾素丰缺水平下施用钾肥的效应及对土壤肥力的影响. *湖南农业科学*, 2012(3): 37-40.
- ZENG D W, LIU Q, PENG J W. Effects of applying potassium fertilizer to paddy soil with different levels of potassium and impact of applying potassium fertilizer on soil fertility. *Hunan Agricultural Sciences*, 2012(3): 37-40. (in Chinese)
- [18] 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎. 基于负水头下土壤水分一维水平运动理论与实验研究. *土壤通报*, 2006, 37(5): 841-846.
- ZOU C W, XUE X Z, ZHANG R D. Hydraulic characteristics of one dimensional horizontal soil water flow. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5): 841-846. (in Chinese)
- [19] 辛琛, 王全九, 樊军. 负水头条件下的水平一维土壤水分入渗特性. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 20-26.
- XIN C, WANG Q J, FAN J. Characteristics of horizontal one-dimensional soil water in filtration under negative hydraulic head. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(9): 20-26. (in Chinese)
- [20] 万克江. 水分精确控制下小麦、黄瓜和菠菜若干生理指标的变化[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- WAN K J. The dynamics of some physiological characteristics of wheat, cucumber and spinach under water precision controlled[D]. Beijing: China Agriculture University, 2005. (in Chinese)
- [21] 耿伟, 薛绪掌, 王志敏. 不同供水吸力下豆角若干生理指标的变化. *中国农学通报*, 2006, 22(5): 206-210.
- GENG W, XUE X Z, WANG Z M. Changes of some physiological indices in common bean under water supply tension. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(5): 206-210. (in Chinese)
- [22] 耿伟, 万克江, 薛绪掌, 王志敏. 负压供水下菠菜某些生理指标的变化. *农业系统科学与综合研究*, 2006, 22(4): 248-251.
- GENG W, WAN K J, XUE X Z, WANG Z M. Variation of some physiological parameters under negative pressure water supply in spinach. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2006, 22(4): 248-251. (in Chinese)
- [23] 耿伟, 王春艳, 薛绪掌, 王卫光. 负压供水下盆栽大豆叶片的光合生理研究. *节水灌溉*, 2007, 12(1): 5-8.
- GENG W, WANG C Y, XUE X Z, Wang W G. Study on photosynthetic physiology of potted plant soybean leaves under negative pressure water supply. *Water Saving Irrigation*, 2007, 12(1): 5-8. (in Chinese)
- [24] 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 李霞, 陈菲. 供水吸力对温室黄瓜产量与水分利用效率的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(2): 337-345.
- LI S, XUE X Z, GUO W S, LI X, Chen F. Effects of water supply tension on yield and water use efficiency of greenhouse cucumber. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(2): 337-345. (in Chinese)
- [25] 李邵, 薛绪掌, 齐飞, 周长吉, 郭文善, 陈菲. 不同营养液浓度对温室盆栽黄瓜产量与品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(6): 1409-1416.
- LI S, XUE X Z, QI F, ZHOU C J, GUO W S, CHEN F. Effects of different nutrient solution contents on yield and quality of greenhouse potted cucumber. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(6): 1409-1416. (in Chinese)
- [26] 钟诚, 张军保, 韩晓明, 杜清胜. 不同土壤质地田间持水量实验成果分析. *东北水利水电*, 2014(5): 64-70.



- ZHONG C, ZHANG J B, HAN X M, DU Q S. Experimental results of field water holding capacity of different soil textures. *Northeast Water Conservancy and Hydropower*, 2014(5): 64-70. (in Chinese)
- [27] 王旭东, 于振文, 王东. 钾对小麦茎和叶鞘碳水化合物含量及子粒淀粉积累的影响. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 57-62.
- WANG X D, YU Z W, Wang D. Effect of potassium on carbohydrate contents in stem and sheath and starch accumulation of kernels in wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1): 57-62. (in Chinese)
- [28] BHASKAR C V, RAO G R, REDDY K B. Effect of nitrogen and potassium nutrition on sheath rot incidence and phenol content in rice (*Oryza sativa* L.). *Indian Journal of Plant Physiology*, 2001, 16(3): 254-257.
- [29] SHAARMA S R, KOLTE S J. Effect of soil applied NPK fertilizers on severity of black spot disease (*Alternaria brassicae*) and yield of oilseed rape. *Plant and Soil*, 1994, 167(2): 313-320.
- [30] 唐湘如, 官春云. 施钾对油菜酶活性的影响及其与产量品质的关系. *中国农学通报*, 2001, 17(3): 4-7.
- TANG X R, GUAN C Y. Effects of K supply on activity of several enzymes in the oilseed rape and their relationships to the yield and quality. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2001, 17(3): 4-7. (in Chinese)
- [31] 魏胜林, 秦焯南. 氮钾水平与多酚氧化酶活性对柠檬流胶病抗性的影响. *西南农业大学学报*, 1996, 18(1): 6-9.
- WEI S L, QING X N. Effects of nitrogen, potassium and the activity of polyphenol oxidase on the resistance of lemon gummosis. *Journal of Southwest Agricultural University*, 1996, 18(1): 6-9. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)

## 《中国农业科学》2016 年入选 F5000 论文名单 (2017 年颁发证书)

	代码	作者	单位	题目	年	卷	期	页码
1	H030201101006	白志英	河北农业大学	干旱胁迫对小麦代换系叶绿素荧光参数的影响及染色体效应初步分析	2011	44	01	47-57
2	H030201103011	侯红乾	江西省农业科学院	有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响	2011	44	03	516-523
3	H030201103013	齐明芳	沈阳农业大学	钙对亚高温下番茄幼苗叶片光合作用的调控作用	2011	44	03	531-537
4	H030201108006	戴明宏	北京市农林科学院	不同生态区和不同品种玉米的源库关系及碳氮代谢	2011	44	08	1585-1595
5	H030201203022	范存斐	甘肃农业大学	水杨酸对厚皮甜瓜采后病害及苯丙烷代谢的影响	2012	45	03	584-589
6	H030201204004	姚义	扬州大学	不同生态区播期对直播稻生育期及温光利用的影响	2012	45	04	633-647
7	H030201208007	张鹏	西北农林科技大学	秸秆还田对宁夏半干旱地区土壤团聚体特征的影响	2012	45	08	1513-1520
8	H030201209006	孙璐	沈阳农业大学	高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定	2012	45	09	1714-1722
9	H030201210005	霍治国	中国气象科学研究院	气候变暖对中国农作物病虫害的影响	2012	45	10	1926-1934
10	H030201302015	李文峰	陕西师范大学	紫薯气体射流冲击干燥效率及干燥模型的建立	2013	46	02	356-366
11	H030201303005	宁运旺	江苏省农业科学院	氮磷钾缺乏对甘薯前期生长和养分吸收的影响	2013	46	03	486-495
12	H030201303022	李华	中国农业科学院	深旋松耕作法对东北棕壤物理性状及春玉米生长的影响	2013	46	03	647-656
13	H030201304004	张洪程	扬州大学	“粘改粳”的生产优势及其形成机理	2013	46	04	686-704
14	H030201305010	陈晓芬	中国科学院南京土壤研究所	不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物	2013	46	05	950-960
15	H030201307003	李国辉	广东省农业科学院	施氮对水稻茎秆抗倒伏能力的影响及其形态和力学机理	2013	46	07	1323-1334
16	H030201402008	王婧	甘肃农业大学	巢式 PCR 快速检测西瓜细菌性果斑病菌	2014	47	02	284-291
17	H030201403009	陈欢	安徽省农业科学院	淮北砂姜黑土酶活性对长期不同施肥模式的响应	2014	47	03	495-502
18	H030201407004	张洪程	扬州大学	中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨	2014	47	07	1273-1289
19	H030201504009	邢英英	西北农林科技大学	滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响	2015	48	04	713-726
20	H030201505012	田平平	华南农业大学	采收后处理对杏鲍菇贮藏品质及抗氧化酶系统的影响	2015	48	05	941-951
21	H0302016**572	徐正进	沈阳农业大学水稻研究所	中国北方粳型超级稻研究进展	2016	49	02	239-250
22	H0302016**260	王敬国	中国农业大学	氮循环与中国农业氮管理	2016	49	03	503-517