doi：10.11838/sfsc.1673-6257.19226

负压灌溉下施钾促进紫叶生菜生长和根际微生物多样性的研究

高　翔，张淑香*，龙怀玉

（中国农业科学院农业资源与农业区划研究所，北京　100081）

摘　要：在温室中利用负压灌溉装置进行盆栽试验，研究了施钾水平对紫叶生菜的产量、品质、养分吸收、钾肥利用效率、抗氧化能力和根际微生物多样性等指标的影响。结果表明：1）施用钾肥量为 300 kg/hm^2 时紫叶生菜的产量、品质和营养吸收量高于其他处理。2）施肥量 300 kg/hm^2 处理在钾肥贡献率、钾肥农学利用率和钾肥吸收利用率表现最佳。3）225 kg/hm^2 和 300 kg/hm^2 处理的抗氧化能力要高于其他处理。4）300 kg/hm^2 处理在 OTU、Chao 1 和香农指数数值最好，比 150 kg/hm^2 处理分别高出了 17%、16% 和 4%。综合各项指标考虑，在负压灌溉水肥一体化装置下钾肥施用量在 300 kg/hm^2 时，提高了紫叶生菜的产量和品质，促进养分的吸收和抗氧化能力，显著提高了钾肥的利用率和根际土微生物的多样性。

关键词：紫叶生菜；负压灌溉；钾肥；产量和品质；微生物多样性

紫叶生菜（*Lactuca sativa* L.）为菊科莴苣属草本植物，其富含维生素 A、维生素 C、花青素和食物纤维，以及碘和锌等多种营养元素和物质[1-2]。紫叶生菜适宜在湿润和肥沃的土壤中生长[1-2]。因此，为了保证作物在种植过程有充足的水分和养分，本研究选用负压灌溉水肥一体化系统进行种植紫叶生菜，其设备能持续不断的为作物供应适量的水分和养分，把出水器埋在作物根际周围，利用土壤的基质势来补充作物蒸腾所造成的水分损失，将土壤含水量保持在合理的范围之内，也避免了水分的无效蒸发和渗漏，从而提高作物的水分和养分利用效率，以及作物的产量和品质[3-4]。

钾是植物生长必需的三大元素之一，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[5]。钾肥不但能够增加作物产量，而且能够提高作物品质[6-7]。据研究报道，在西瓜、茄子、菠菜、黄瓜、豆角、番茄、大白菜上施用钾肥均能显著提高作物的产量和品质[3, 5]。但过量施用化学肥料，容易造成作物的产量和品质的降低，还会破坏土壤结构，以及造成环境的污染[3, 7]。

本研究以紫叶生菜为试验材料，利用负压灌溉水肥一体化系统，研究了不同钾肥施用量对紫叶生菜的产量和品质、养分的吸收、钾肥利用效率、抗氧化性及根际微生物多样性的影响，以期为负压灌溉下种植紫叶生菜和施用钾肥提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

土培盆栽试验于 2017 年 4 月至 6 月在中国农业科学院温室内进行，从播种到收获紫叶生菜共 40 d。供试土壤为砂壤质潮土，其基本理化性质：pH 值 7.56，容重 1.43 g/cm^3，有机质 1.73%，有效磷 13.8 mg/kg，速效钾 96.6 mg/kg，碱解氮 98.1 g/kg。选用紫叶生菜进行试验。试验装置采用负压灌溉水肥一体化系统（中国农业科学院农业资源与农业区划研究所专利，ZL201110093923.2）[3-4]。

1.2　试验设计

试验在种植盆（长 42 cm，宽 30 cm，高 26 cm）中进行，每盆装入 30 kg 土壤。共设 5 个钾水平，分别为无钾 K0（不施用钾肥），K150（钾肥施用量为 150 kg/hm^2），K225（钾肥施用量为 225 kg/hm^2），K300（钾肥施用量为 300 kg/hm^2），K450（钾肥施用量为 450 kg/hm^2），按照田间施钾量进行换算，每盆加入硫酸钾分别为 0、9.6、14.4、19.2、28.8 g。除

收稿日期：2019-05-24；**录用日期：**2019-06-22

基金项目：国家高技术研究发展计划项目（2013AA102901）。

作者简介：高翔（1983-），男，广西柳州人，助理研究员，博士，主要从事土壤生态学方面的研究。E-mail：gxkochung@163.com。

通讯作者：张淑香，E-mail：zhangshuxiang@caas.cn。

了钾素，其他营养液配方按照赵秀娟等[3]的方法配置，将配置好的营养液及不同浓度的钾肥一次性加入负压灌溉的储水器中，按照其系统原理可自动供水供肥，每天可记录储水罐中水分刻度的下降即为耗水量，通过统计，紫叶生菜的整个生育期共耗水 13 000 cm^3/盆。

1.3　测定项目与方法

植株产量、品质、养分吸收的测定：收获后，测定每盆紫叶生菜的总鲜重，为产量；然后分别测定植株的品质，维生素 C 含量测定采用 2，6- 二氯酚靛酚法，可溶性糖采用蒽酮比色法，花青素采用分光光度法（500 nm 处比色），硝酸盐含量测定采用水杨酸比色法；作物的氮磷钾含量的测定分别为：氮用 2300 自动定氮仪测定（Kjedahl 2300，FOSS，Sweden），磷用钼锑抗比色法测定，钾用火焰光度法测定。植物吸收的全氮、磷、钾量为植株干重乘以其植株氮、磷、钾的浓度[3]。

钾肥利用效率的分析[3]：钾肥贡献率（K contribution rate KCR，%）=（施钾处理产量 - 不施钾处理产量）/ 施钾处理产量 ×100；钾肥农学利用率（K_2O agronomic efficiency KAE，kg/kg）=（施钾处理产量 - 不施钾处理产量）/ 钾肥用量。钾肥吸收利用率（K_2O recovery efficiency，KRE，%）=（施钾处理植株总吸钾量 - 不施钾处理植株总吸钾量）/ 钾肥用量 ×100。

抗氧化酶和酚类的测定[3]：总酚和类黄酮：取 0.3 g 样品剪成 1 mm 的小块，加入 5 mL 含有 1% HCl 的甲醇溶液，提取 24 h，取 0.1 mL 提取液定容至 5 mL 摇匀。用分光光度计测定（总酚）280 nm，（类黄酮）325 nm 处 OD 值。抗氧化酶液提取及测定：1 g 样品放入预冷的研钵中，分次加入 4 mL 的 0.05 mol/L、pH 值 7.0 磷酸缓冲液（内含 1% PVP、1 mL mol/L EDTA），在冰浴中研磨成匀浆，放入离心管。匀浆液于 4ºC 下低温离心机 10 000 r/min 离心 20 min，保存于 -80ºC 冰箱备用。然后按照赵秀娟等[3]的方法测定超氧化物歧化酶（SOD）和苯丙氨酸裂解酶（PAL）。

土壤根际微生物多样性的测定：利用土壤微生物高通量测序技术，分析根际土壤中的多样性丰富度（OTU 和 Chao 1）和香农指数（Shannon diversity）。

1.4　数据分析

运用 Excel 2016 进行平均数和标准差计算，并且利用 SAS 9.0 软件对试验数据进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　负压灌溉下钾肥对紫叶生菜产量和品质的影响

负压灌溉下施钾肥显著提高了紫叶生菜的产量（表 1），K300 处理的产量最高，K225 和 K450 处理其次，不施钾肥的 K0 处理最低。其中，K300 比 K0 处理产量显著提高了 212.8%，且比施钾量最高的 K450 处理提高了 40.7%。说明在负压灌溉下施钾能提高紫叶生菜的产量，但施用的钾肥量不是越多越好。

在负压灌溉条件下，施钾肥显著提高了紫叶生菜的品质（表 1）。由表 1 可见，K300 处理的维生素 C、可溶性糖是最高的，不施钾肥的 K0 处理最低，K300 比 K0 处理的维生素 C 和可溶性糖分别提高了 16.5% 和 16.7%。花青素含量随着钾肥施用量的提高而增加，K450 最高，无钾肥施用的 K0 最低，但是 K225、K300 和 K450 三者之间差异不显著。在硝酸盐上，K300 处理的硝酸盐含量最低，比 K150 处理的硝酸盐含量降低了 30.5%。综合品质分析，K300 处理的品质最好，不施用钾肥的 K0 处理最差。

表 1　不同钾肥用量对紫叶生菜产量和品质的影响

钾处理	产量（g/盆）	维生素 C（mg/100g）	可溶性糖（mg/g）	花青素（mg/g）	硝酸盐（mg/kg）
K0	123.2 ± 5.2d	3.21 ± 0.19c	52.0 ± 1.2c	1.75 ± 0.06c	221.7 ± 19.1a
K150	168.3 ± 7.2c	3.33 ± 0.05bc	56.0 ± 2.4b	2.25 ± 0.23b	231.3 ± 17.3a
K225	289.3 ± 18.5b	3.66 ± 0.12ab	57.5 ± 6.0ab	3.05 ± 0.29a	168.0 ± 14.0b
K300	385.4 ± 14.7a	3.74 ± 0.09a	60.7 ± 1.6a	3.09 ± 0.30a	160.7 ± 5.3b
K450	273.9 ± 12.8b	3.45 ± 0.08bc	59.4 ± 3.2ab	3.14 ± 0.29a	168.0 ± 3.1b

注：测定指标的数值为 3 个重复的平均值 ± 标准误差，同列数据后不同字母表示处理间有显著性差异（$P<0.05$）。下同。

2.2　负压灌溉下钾肥对紫叶生菜养分含量的影响

负压灌溉条件下，当钾肥用量为 300 kg/hm^2 时，生菜对营养的吸收量最高。由表 2 可见，K300 处理植株对全氮磷钾的吸收量是最高的，不施钾肥的 K0 处理最低，K300 比 K0 处理的全氮磷钾吸收量分别提高了 255%、236% 和 1 036%。而当施肥量为 450 kg/hm^2 时，其植株对氮磷钾的吸收量对比 K300 处理反而降低，说明过量施用钾肥限制了植物对营养的吸收。

表 2　不同钾肥用量对紫叶生菜营养吸收的影响（mg/盆）

钾处理	全氮	全磷	全钾
K0	277.1 ± 8.7d	32.1 ± 2.8d	16.9 ± 1.2d
K150	371.9 ± 5.1c	44.6 ± 6.2cd	50.6 ± 1.2c
K225	588.2 ± 34.0b	63.2 ± 4.7b	87.9 ± 6.2b
K300	982.8 ± 48.8a	107.8 ± 7.3a	191.9 ± 8.8a
K450	523.0 ± 6.6b	55.4 ± 3.0bc	103.1 ± 6.3b

2.3　负压灌溉下钾肥利用率的分析

当钾肥用量为 300 kg/hm^2 时，其钾肥贡献率、钾肥农学利用率和钾肥吸收利用率均为最高，K225 处理其次（表 3）。K300 处理的钾肥贡献率、钾肥农学利用率和钾肥吸收利用率比 K150 处理分别提高 107%、230% 和 216%。同时，施肥量最高的 K450 处理，反而降低了钾肥对紫叶生菜的贡献率和利用率。

表 3　不同钾肥用量对紫叶生菜水分和钾肥利用率的影响

钾处理	钾肥贡献率（%）	钾肥农学利用率（kg/kg）	钾肥吸收利用率（%）
K0	—	—	—
K150	33.15	20.63	16.55
K225	55.60	51.94	18.57
K300	68.61	68.02	52.38
K450	36.63	24.21	44.05

2.4　负压灌溉下钾肥对紫叶生菜抗氧化酶和酚类的影响

在负压灌溉条件下，施钾肥显著提高了紫叶生菜的抗氧化酶和酚类的含量（表 4）。K300 处理在 SOD 和 PAL 指标上均表现出较高的抗氧化能力，显著高于 K0 和 K450 处理。例如 K300 处理在 SOD 上分别比 K0 和 K450 显著提高 10.6% 和 47.1%。在总酚和类黄酮指标上，施钾肥处理均高于无钾肥的 K0 处理，其中 K225 和 K300 的含量最高。

表 4　不同钾肥用量对紫叶生菜抗氧化酶和酚类含量的影响

钾处理	SOD（U/g FW）	PAL［U/（g · min FW）］	总酚（mg/g FW）	类黄酮（OD 325/g FW）
K0	13.90 ± 0.39b	76.23 ± 4.34b	1.29 ± 0.04b	1.65 ± 0.08b
K150	15.51 ± 0.40a	79.67 ± 0.58ab	1.43 ± 0.09ab	1.79 ± 0.06a
K225	15.40 ± 0.67a	86.87 ± 1.88a	1.52 ± 0.05a	1.81 ± 0.10a
K300	15.37 ± 0.25a	83.73 ± 3.58ab	1.52 ± 0.07a	1.82 ± 0.13a
K450	10.45 ± 1.50c	81.20 ± 1.11ab	1.37 ± 0.06b	1.81 ± 0.03a

2.5　负压灌溉下钾肥对紫叶生菜根际微生物多样性的影响

从表 5 可看出，施钾提高了紫叶生菜土壤根际微生物的多样性。在 Chao 1 指标上，K300 处理的数值是最高的，比 K0 和 K150 分别显著提高了 31% 和 17%，虽然 K450 的施钾量是最高的，但是 Chao 1 指数却比 K300 下降了 14%。OTU 和 Shannon 指标有相同的趋势，在 K300 处理上，比 K0 和 K150 的 OTU 分别显著提高了 23% 和 16%，而 K450 处理却显著降低。说明施用钾肥能增加紫叶生菜根际土壤的微生物多样性，但并不是施用钾肥越多，其微生物多样性就越高。

表 5　不同钾肥用量对紫叶生菜根际微生物多样性的影响

钾处理	Chao 1	OTU	Shannon
K0	1 778 ± 72c	1 575 ± 74c	8.16 ± 0.03d
K150	1 981 ± 120b	1 665 ± 62bc	8.30 ± 0.08c
K225	2 054 ± 59b	1 747 ± 69b	8.42 ± 0.04b
K300	2 326 ± 67a	1 931 ± 95a	8.67 ± 0.06a
K450	2 006 ± 99b	1 683 ± 60bc	8.48 ± 0.10b

3　讨论

3.1　负压灌溉下施钾促进紫叶生菜的生长

研究结果表明，利用负压灌溉水肥一体化系统种植紫叶生菜，施钾能显著提高其产量和品质，当施钾量为 300 kg/hm^2 时产量和品质最好，对养分的吸收量最高（表 1 和表 2）。本研究结果与赵秀娟等[3]的研究结果相符合，合理施钾提高了小油菜的产量和品质，这是由于钾是作物生长必需的大量营养元素之一，钾能提高光合效率，促进同化产物的运输，以及蛋白质和脂肪的合成，最终提高了作物干物质的积累[3, 8]。同时，钾在植物碳和氮代谢过程中起重要的调节作用，能提高作物的可溶性糖

和维生素 C 的含量，及对促进硝酸盐的还原，降低硝酸盐含量，从而提高作物的品质[8-10]。合理施用钾肥，能显著提高紫叶生菜对养分的吸收（表 2），这是由于合理施用钾肥可以提高作物对氮的吸收，但是过量施用钾肥后，植物对钾具有奢侈吸收的特点，这是由于高浓度的钾离子能使原生质胶体保持较高的水化度和粘滞性，从而抑制了植株对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的吸收，降低植株体内的代谢和生物合成[3, 8-9]。本研究也发现相同的趋势，当施钾量为 450 kg/hm^2 时，其产量、品质和营养吸收量反而比 300 kg/hm^2 有所下降，而且其钾肥的利用率显著低于 300 kg/hm^2 处理。

3.2　负压灌溉下适量施钾提高紫叶生菜的抗氧化能力

钾元素具有提高植物对抗逆境胁迫的能力[6, 11-12]。当植物受到生物或环境胁迫时，可通过调节自身的酚类代谢来抵御胁迫[6-7]。例如，喷施钾肥能显著提高小麦叶片中酚类物质的含量，从而降低小麦白粉病的发病率[11]；施钾能提高酚类物质代谢中关键酶 PAL 和 PPO 活性，而 PPO 可以促进细胞木质化，从而提高作物的抗病性[7, 13-14]。本研究发现，合理施用钾肥能显著提高植株中的抗氧化酶活性，以及总酚和类黄酮的含量，而当施钾量为 300 kg/hm^2 时，其活性和含量较高，但是过量施用钾反而降低了紫叶生菜的抗氧化能力（表 4）。

3.3　负压灌溉下合理施钾提高紫叶生菜根际微生物的多样性

根际微生物对作物的产量和品质形成有着密切的关系[15-17]，施钾肥还能提高作物根际土壤微生物的多样性，但是养分供应过量或不足，均影响微生物的正常生理活动[16-17]。赵秀娟等[17]研究发现，油菜的根际土壤微生物多样性与作物的产量呈正相关。本试验中发现，施用钾肥提高了根际土壤的微生物多样性，特别是在施钾肥量为 300 kg/hm^2 时多样性指数最高（表 5），这由于高质量的土壤通常表现出较高的微生物多样性[18]，同时由于适宜的钾肥供应，能满足作物根系和根际微生物对养分的需求，协同促进作物的生长。土壤根际微生物的种类复杂，施钾提高了哪类微生物类群的含量以及功能作用，仍有待深入探讨。

4　结论

本研究利用负压灌溉水肥一体化系统在不同钾肥用量下种植紫叶生菜，研究结果表明，当钾肥施用量为 300 kg/hm^2 时，能显著提高紫叶生菜的产量和品质，提高了植株的全氮磷钾含量和钾肥的吸收利用效率；也增加了抗氧化能力和根际微生物的多样性。但是钾肥施用量为 450 kg/hm^2 时，其产量和品质反而降低。因此，负压灌溉下适宜地施用钾肥能显著提高紫叶生菜的产量和品质，这为设施园艺的可持续性发展提供了科学依据。

参考文献：

[1] 余意，杨其长，刘文科. LED 短期连续光照与氮营养对水培生菜品质的影响［J］. 应用生态学报，2015，26（11）：3361-3366.

[2] 陈鹏涛，夏木凤，申宝营，等. 光质对不同紫叶生菜生长及光合色素的影响［J］. 浙江农业科学，2017，58（11）：1910-1912.

[3] 赵秀娟，宋燕燕，岳现录，等. 负压灌溉下不同钾水平对小油菜生长的影响［J］. 中国农业科学，2017，50（4）：689-697.

[4] 龙怀玉，张怀志，岳现录，等. 负压灌溉重液式负压阀设计与试验［J］. 农业工程学报，2018，34（1）：85-92.

[5] 丁亚会，肖海强，王大海，等. 水钾一体化对烤烟钾素吸收及生长的影响［J］. 植物营养与肥料学报，2015，23（5）：1238-1248.

[6] Wang M，Zheng Q，Shen Q，et al. The critical role of potassium in plant stress response［J］. International Journal of Molecular Sciences，2013，14（4）：7370-7390.

[7] Gao X，Zhang S X，Zhao X J，et al. Potassium-induced plant resistance against soybean cyst nematode via root exudation of phenolic acids and plant pathogen-related genes［J］. Plos One，2018，13（7）：e0200903.

[8] 邢英英，张富仓，张燕，等. 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［J］. 中国农业科学，2015，48（4）：713-726.

[9] Christian Z，Mehmet S，Edgar P. Potassium in agriculture-status and perspectives［J］. Journal of Plant Physiology，2014，171（9）：656-669.

[10] 赵秀娟，宋燕燕，张淑香，等. 黄瓜适宜的负压灌溉条件与养分配比研究［J］. 中国土壤与肥料，2017，（4）：689-697.

[11] 刘晓燕，何萍，金继运. 钾肥与植物病害研究进展［J］. 植物营养与肥料学报，2006，12（3）：445-450.

[12] 李文娟，何萍，金继运. 氯化钾对玉米茎腐病抗性反应中酚类物质代谢的影响［J］. 植物营养与肥料学报，2008，14（3）：508-514.

[13] Dordas C. Role of nutrients in controlling plant disease in sustainable agriculture：A review［J］. Agronomy for Sustainable Development，2008，28（1）：33-46.

[14] Nicholson R L，Hammerschmidt R. Phenolic compounds and their role in disease resistance［J］. Annual Review of Phytopathology，1992，30：369-389.

[15] Wu K, Yuan S F, Wang L L, et al. Effects of bioorganic fertilizer plus soil amendment on the control of tobacco bacterial wilt and composition of soil bacterial communities [J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50 (6): 961–971.
[16] 贾志红，孙敏，杨珍平，等. 施肥对作物根际微生物的影响[J]. 作物学报，2004，30（5）：491–495.
[17] Zhao X J, Gao X, Zhang S, et al. Improving the growth of rapeseed (*Brassiva chinensis* L.) and the composition of rhizosphere bacterial communities through negative pressure irrigation [J]. Water Air Soil and Pollution, 2019, 230: 9.
[18] Chaparro J M, Sheflin A M, Manter D K, et al. Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility [J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 48 (5): 489–499.

Effects of potassium application on growth and rhizosphere microbial diversity of purple leaf lettuce under negative pressure irrigation

GAO Xiang, ZHANG Shu-xiang*, LONG Huai-yu (Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The pot experiments were conducted with a negative pressure irrigation (NPI) system in greenhouse, to study the effects of potassium (K) application levels on yield, quality, nutrient uptake, K fertilizer use efficiency, antioxidant capacity and rhizosphere microbial diversity of purple lettuce. The results showed that: 1) The yield, quality and nutrient uptake of purple lettuce were higher than those of other treatments when the application of K fertilizer was 300 kg/hm^2. 2) The 300 kg/hm^2 treatment showed that the best performance in K contribution rate, K agronomic utilization rate and K absorption and utilization rate. 3) The antioxidant capacity of 225 kg/hm^2 and 300 kg/hm^2 treatments was higher than that of other treatments. 4) The values of OTU, Chao 1 and Shannon index were the best in 300 kg/hm^2 treatment, which were 17%, 16% and 4% higher than 150 kg/hm^2 treatment, respectively. Considering various indicators, the application of 300 kg/hm^2 K fertilizer under NPI of integrated device of water and fertilizer is the optimal rate, which promotes the growth and quality of purple lettuce, uptakes nutrients and antioxidant capacity, the utilization rate of K fertilizer, and the diversity of microorganisms in rhizosphere soil.

Key words: purple leaf lettuce; negative pressure irrigation; potassium fertilizer; yield and quality; microbial diversity

[上接第 98 页]

was designed with four treatments: T (conventional tillage), NT (no-tillage), TS (conventional tillage with straw returned), and NTS (no-tillage with straw mulched). The main findings were summarized as follow: 1) Ascomycota and Basidiomycota were the main dominant groups of fungi accounting for 52.74% and 14.10%, respectively, of the total population of the soil fungal community. Treatment no-tillage with straw mulched increased the abundance of Basidiomycota by 15.01%, no-tillage increased the abundance of Ascomycota and Basidiomycota by 3.67% and 1.86%, respectively. 2) Conservation tillage improved fungal abundance index and diversity index in 0 ~ 30 cm soil layer to varying degrees, no-tillage straw mulching had the most obvious effect, but the effect was not significant among the treatments. Compared with conventional tillage, the endemic fungal OTU numbers under different treatments were NT>NTS>TS>T in the 0 ~ 30 cm soil layer. Treatment no-tillage with straw mulched, no-tillage increased the fungal OTU numbers by 8.07%, 12.41%, respectively. Therefore, conservation tillage practices such as no-tillage with straw mulching could improve the abundance and diversity of the soil fungal community in dry farming areas of central Gansu.

Key words: soil fungal community; tillage practice; straw retuning