植物营养与肥料学报 2017, 23(5): 1238–1248
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.16391
http://www.plantnutrifert.org

水钾一体化对烤烟钾素吸收及生长的影响

丁亚会[1]，肖海强[1,2]，王大海[3]，管恩森[3]，龙怀玉[1*]
（1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所，北京 100081；2 湖南农业大学生物科技学院，湖南长沙 410128；
3 山东潍坊烟草有限公司，山东潍坊 262200）

摘要:【**目的**】研究负压灌溉下不同施钾模式对烟株生长发育、钾素吸收速率及水肥利用等方面的影响，探索负压灌溉下适合烤烟生长发育的施钾方式及施钾量，为建立作物水肥高效技术提供参考依据。【**方法**】选用烤烟 NC55 为供试品种，在温室中进行盆栽试验。采用–15 kPa 负压灌溉，施钾方式包括随水施钾 (W) 和钾肥一次性土壤基施 (S) 两种；施钾量以供试地区推荐施钾量 230 kg/hm^2 为 100%，设置该施钾量的 100% (K1)、75% (K2) 和 50% (K3) 三个水平；以常规灌溉、不施钾肥为 CK，共设置 SK1、SK2、SK3、WK2、WK3、CK 六个处理。测定了烟草农艺性状、干物质积累量、吸钾速率、钾肥利用率、水分利用效率等指标。【**结果**】团棵期，SK2、SK3 的株高、有效叶数、叶长、叶宽、叶面积等农艺性状指标均高于其他处理，但 WK2、WK3、SK2、SK3 的干物质积累总量分别为 31.16 、29.26 、29.92 和 28.37g，根干重分别为 12.40 、10.51 、11.91 和 10.20 g，叶干重分别为 17.05 、17.01 、15.67 和 16.12 g，均表现为 WK2 > SK2，WK3 > SK3；旺长期, WK2 的整株重、茎干重及叶干重均大于其他处理，分别为 99.18 、19.18 和 61.29 g；成熟期, 烤烟整株重及叶干重均表现出 WK2 > WK3 > SK1 > SK2 > SK3，这些处理的整株重依次为 139.27 、132.60 、124.50 、117.36 和 110.10 g，叶干重依次为 93.97 、87.35 、80.33 、78.56 和 74.80 g；全生育期的水分利用率同样表现为 WK2 > WK3 > SK1 > SK2 > SK3，分别为 3.78 、3.54 、3.41 、3.28 和 3.22 g/kg，表明随水施钾的水分利用率要明显高于常规土壤施钾，相同施钾方式下烟株水分利用效率随施钾量减少而降低；全生育期的钾肥利用率表现为 WK2 > WK3 > SK2 > SK1 > SK3，分别为 43.0%、42.6%、21.9%、20.0% 和 18.5%，其中 WK2 较 SK2，WK3 较 SK3 的钾素吸收量分别增加 53.85 kg/hm^2、34.65 kg/hm^2，表明随水施钾较常规土壤施钾有利于烟草对钾素的吸收；WK2、WK3 较 SK2 分别高出 21.1 和 20.7 个百分点，表明负压灌溉下随水施钾能显著提高烤烟的钾肥利用率；随水施钾模式下烟株整个生育期均能维持相对较高的钾素吸收速率，其最大值出现在旺长-平顶期，且显著高于常规土壤施钾。【**结论**】“水钾一体”施钾模式虽延缓了烟株团棵期长势形成，但促进了烤烟中后期生长发育、干物质积累和烟叶钾素吸收；明显地提高了水分利用效率和钾肥利用率；在烟株全生育期内均维持了较高的钾素吸收速率，尤其中后期钾素吸收速率明显高于常规施钾方式。

关键词: 烤烟；负压灌溉；施钾方式；施钾量；钾素吸收

Effect of potassium fertigation on potassium absorption and growth of flue-cured tobacco

DING Ya-hui[1], XIAO Hai-qiang[1,2], WANG Da-hai[3], GUAN En-sen[3], LONG Huai-yu[1*]
(*1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China;*
2 College of Biological Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;
3 Shandong Weifang Tobacco Corporation, Weifang, Shandong 261205, China)

Abstract:【**Objectives**】The objective of the experiment is to study effects of various potassium application models on growth, potassium absorption rate and water and fertilizer use efficiencies of flue-cured tobacco, to explore an optimum potassium application method and quantity under the negative pressure irrigation, and to provide some references for high efficient water and fertilizer utilization of flue-cured tobacco.【**Methods**】A pot

收稿日期：2016–10–14　　**接受日期**：2017–04–27
基金项目：国家高技术研究发展计划项目（2013AA102901）资助。
作者简介：丁亚会（1990—），男，山东济宁人，硕士研究生，主要从事农业节水技术方面的研究。E-mail：dingyahui00@163.com
* 通信作者 E-mail：hylong@caas.ac.cn

experiment was conducted using NC55 as plant material. Taking the recommended potassium application rate of 230 kg/hm^2 as 100%, the K application rates of 100% (K1), 75% (K2) and 50% (K3) were set up, and the designed potassium was once basally applied into soil (S) or applied with irrigation under the negative pressure irrigation of –15 kPa respectively. The potassium application methods included fertigation (W) and conventional soil fertilization (S). Taking the optimum dosage of potassium 230 kg/hm^2 under the conventional irrigation as 100%, three levels of potassium dosage, named 100% (K1), 75% (K2) and 50% (K3), were set up. The conventional irrigation without fertilization was chosen as CK, six treatments (SK1, SK2, SK3, WK2, WK3 and CK) were set up. The agronomic traits of tobacco were observed, and dry matter accumulation, potassium absorption rate, utilization rate of potash and water use efficiency (WUE) were determined.【**Results**】At the rosette stage, the plant height, efficient leaf number, leaf length, leaf width, leaf area and other agronomic character indices of the SK2 and SK3 were higher than those of other treatments. But the total dry matter accumulation amounts of the WK2, WK3, SK2 and SK3 were 31.16, 29.26, 29.92 and 28.37 g respectively, the root dry weights were 12.40, 10.51, 11.91 and 10.20 g respectively, and the leaf dry weights were 17.05, 17.01, 15.67 and 16.12 g respectively, all were in order of WK2 > SK2, WK3 > SK3. At the vigorous growing period, the plant weight, stem biomass and leaf dry weight of the WK2 were 99.18, 19.18 and 61.29 g respectively, which were higher than other treatments. At the mature stage, the whole plant weight and leaf dry weight were in order of WK2 > WK3 > SK1 > SK2 > SK3, the whole plant weights were 139.27, 132.60, 124.50, 117.36 and 110.10 g respectively, the leaf dry weights were 93.97, 87.35, 80.33, 78.56 and 74.80 g respectively. During the whole growth period, the WUE was in order of WK2 > WK3 > SK1 > SK2 > SK3, the WUEs were 3.78, 3.54, 3.41, 3.28 and 3.22 g/kg, respectively, indicating that the WUEs of potassium fertilization with water were higher than the conventional method, and the decrease of the dosages of potassium could reduce the WUEs of tobacco plants under the same method. During the whole growth period, the potash use rates were in order of WK2 > WK3 > SK2 > SK1 > SK3, with the values of 43.0%, 42.6%, 21.9%, 20.0% and 18.5% respectively, the potassium uptake of WK2 was 53.85 kg/hm^2 higher than that of SK2, and the potassium uptake of WK3 was 34.65 kg/hm^2 higher than that of SK3, showing that potassium fertilization with water was more beneficial to potassium absorption. The potassium utilization rates of WK2 and WK3 were 21.1 and 20.7 percentage points higher than SK2 respectively, indicating that potassium fertilization with water could significantly enhance the potassium absorption and utilization rates under the negative pressure irrigation. The maximum potassium absorption rate was observed at the vigorous growing to top plate period, and the tobacco could maintain relatively larger absorption rate during the whole growth period.【**Conclusions**】Potassium fertilization with negative pressure irrigation has obvious priorities in: 1) Delaying agronomic traits of tobacco at rosette stage, but promoting the growth at the vigorous growing stage and mature stage, thus increasing accumulation of dry matter and potassium uptake; 2) Improving water use efficiency and potash utilization rate; 3) Maintaining high potassium uptake rate in the whole growth stages of flue-cured tobacco, especially in the middle and later periods.

Key words: flue-cured tobacco; negative pressure irrigation; potassium application pattern; potassium application amount; potassium absorption

土壤中钾素含量一般为 1%～3%，虽显著高于氮和磷，但绝大部分不能被当季作物吸收利用，植物可吸收的有效钾一般不超过全钾量的 2%[1–2]，加之农作物高产品种推广、复种指数不断提高、长期重施氮磷肥、少施或不施钾肥等问题日益凸显，势必会引起土壤供钾能力显著下降和钾肥利用率降低。因此，作物钾素营养更应值得重视[3–4]。钾素是影响烟草生长的关键因子之一，烟叶中钾含量直接影响其燃烧性、焦油产生量、香气质、香气量和阴燃持火力，是衡量烟叶品质的重要指标[5–11]，优质烟叶的含钾量应达 2% 以上[12]，而我国烟叶含钾量一般在 2% 以下[13]，较低的含钾量成为制约我国烟叶质量进

一步提高的主要限制因素之一。近十多年以来，一种新型灌水技术—负压灌溉技术正在逐步形成和成熟，负压灌溉整个过程中土壤水分始终保持非饱和状态，供水强度和水分流动速度主要由植物蒸散活动决定，借助负压灌溉的水肥一体化施肥模式可同步满足作物对水分、养分的需求，更重要的是能降低水肥损失，显著提高水分及肥料利用率。因此，寻找负压灌溉下的烤烟钾肥高效施用模式，对提高烟叶钾素含量、钾肥利用率具有十分重要的意义。

关于烟草钾肥施用已有较多的研究报道。例如，吴玉萍等[14]和 Dunbar 等[15]研究表明，钾肥在烤烟吸钾高峰前期施入为宜，钾肥过量、过早施入会增多质地较重的土壤对钾的固定和质地较轻的土壤遇强降雨的流失，导致钾肥利用率降低；朱丽等[16]利用 Logistic 方程模拟不同时期及次数追施钾肥条件下的烟株钾素动态积累，结果显示烟株各部位钾素积累量随着钾肥施用次数的增加而增大，且烟草全生育期在施用 3 次钾肥后均处于良好的钾环境，尤其为快速增长期的钾肥供应提供了保障。与其他作物一样，水肥在烟草上也存在明显的耦合效应，罗慧等[17]研究了低肥和高肥条件下 3 种沟灌方式对烟草生长的影响，结果表明交替沟灌与低肥、高肥相结合下的烟叶产量分别提高 7.8% 和 8.5%，单位肥料烟叶生产量分别提高 7.9% 和 8.6%，且该处理下烟叶总糖、还原糖、氮、磷、钾及粗蛋白含量均有不同程度提高；韦歆娜等[18]通过盆栽试验分析了氮肥、磷肥、钾肥及灌水量对烤烟叶面积积累量的影响，并确立四种因素之间适宜的交互效应使烤烟叶面积积累量达到理想值。负压灌溉技术在烟草上已得到了初步应用，刘学勇等[19]采用新型负压灌水装置研究了不同土水势对烤烟干物质积累、根系活力等影响，初步推断烤烟全生育期最适水势范围约为–20～–12 kPa；肖海强等[20]探讨了负压灌溉对烤烟水肥利用率的影响，发现–20～–10 kPa 范围内烟株干物质量与耗水量随供水压力增大逐渐增加，水分利用率呈下降趋势，氮、磷吸收总量及利用率则随供水压力降低表现为先增加后降低。为提高钾肥和水分利用效率，我们研究了负压灌溉条件下减少施钾量对烤烟烟株生长及水肥利用效率的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

盆栽试验于 2014 年 5～9 月在山东省诸城市洛庄烟草试验站日光温室内进行，其温度、相对湿度变化情况如图 1 所示。可以看出，烤烟生育期内温室日平均温度介于 20.7～31.3℃，且在烟苗移栽后呈现逐渐升高的趋势，这表明温室可基本满足烤烟生长对温度的需求，有利于烤烟生长发育。温室内日平均相对湿度变化较大，其变化范围为 47.6%～94.3%，这是因为人工加湿降温措施增大了玻璃温室内相对湿度的变化幅度。

试验盆内径 33.0 cm、高 33.0 cm。供试土壤为当地农田耕层土壤 (0—30 cm)，土壤类型为褐土，土壤质地为粘壤土 (国际制)，砂粒含量为 38.8%、粉粒 29.1%、粘粒 32.1%。供试土壤 pH 为 6.52，有机质 7.44 g/kg、全氮 0.53 g/kg、全钾 24.46 g/kg、速效钾 93.00 mg/kg、有效磷 16.67 mg/kg。试验选用 NC55 烤烟品种。

1.2 试验设计与管理

烤烟不同生育期适宜水势范围约为–20～–10 kPa[19–20]，故本试验灌溉压力设为–15 kPa，负压灌溉

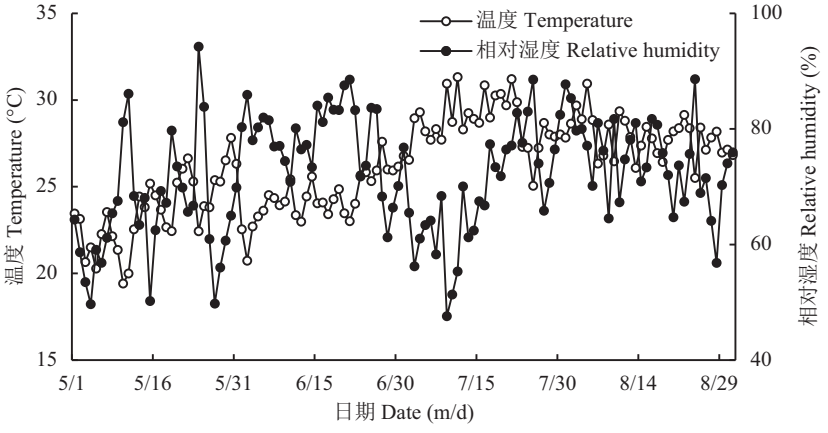
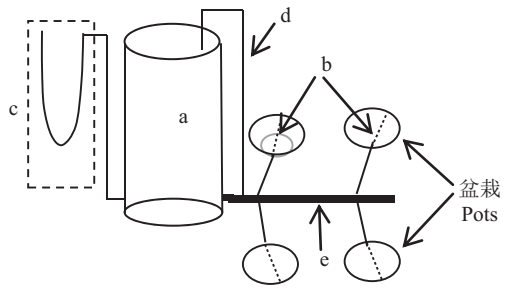


图 1 试验温室温度和湿度变化情况

Fig. 1 Changes of temperature and relative humidity in the greenhouse

装置如图 2 所示，包括五部分：储水器 (a)、负压渗水器 (b)、负压调节装置 (c)、导水管 (d) 及集气排气装置 (e)[21]。负压渗水器选用陶土渗水器，发泡点均超过 50 kPa。渗水器埋深至土壤表层 10 cm 处，并保持连接导水管一侧高于另一侧 1～2 cm，便于收集将从灌溉水中可能逸出的气体，防止管道气栓，保证负压灌溉顺利进行。钾肥用量参照山东诸城推荐的烟草钾肥用量 230 kg/hm^2 (约合 13.82 g/株)，设该施钾量的 100% (K1)、75% (K2)、50% (K3) 3 个水平，以不施钾作为对照 (CK)；施钾方法有土壤一次性基施 (S) 和钾水一体化 (W) 两种。共设置 SK1、SK2、SK3、WK2、WK3、CK 6 个处理。钾水一体化方法：将硝酸钾配成 0.05 mol/L 的钾肥溶液，从还苗期开始，钾肥溶液随负压灌溉连续施入土壤，根据灌溉量计算出实际施钾量，到设计施钾量时停止钾肥溶液灌溉，改为清水灌溉。负压灌溉技术下土壤水分呈非饱和运动状态，过多钾肥施用可能会引起局部钾离子浓度过高，导致烧苗，因此试验未设置随水施钾 + 100% 钾处理。每个处理重复 12 次。氮肥、磷肥按照施氮量 5.12 g/株、P_2O_5 7.17 g/株的标准，一次性均匀施入土壤。



a—储水器 Water receiver; b—负压渗水器 Negarive pressure permeator; c—负压调节装置 Negarive pressure regulating device; d—导水管 Water duct; e—集气排气装置 Air device for collecting and venting

图 2　负压灌溉装置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the negative pressure irrigation device

1.3　测试项目与方法

1.3.1 烤烟农艺性状　移栽后分别于团棵期、旺长期、成熟期等选取 3 株长势一致的烟株，测定其株高、有效叶数、最大叶长及叶宽等，并计算最大叶面积 (S) = 长 × 宽 × 0.6345，具体方法参照行业标准[22]。

1.3.2 干物质积累量　采用杀青烘干称重法，分别在团棵期、旺长期、成熟期进行破坏性取样，每个处理取 3 株长势一致的烟株，洗净、收集断根，并分根、茎、叶，将样品分别放入烘箱 105℃ 杀青 30 min，在 75℃ 下烘干至恒重，即为干物质积累量 (g)。

1.3.3 干物质氮磷钾含量　分别于团棵期、旺长期及成熟期采集根、茎、叶，按照干物质测定方法 (同上“烟株干物质的测定”) 收集待测样品。氮含量采用连续流动分析仪测定[24]，磷含量采用钼锑抗比色法[7]，钾含量采用火焰光度计法测定[7]。

1.3.4 钾素吸收速率的计算　取移栽期整株烟草含钾量为背景值，此后每隔一定时间取不同处理下烟草根、茎、叶测量相对含钾量，并根据干物质钾含量和干物质累积量计算整株钾吸收量。参照 Moustakasa 等[23]将各时期烟株体内钾素吸收总量在 Origin 软件中生成“S”形生长曲线方程；根据曲线方程的一阶导数计算该处理烟株钾素的瞬时吸收速率。其中，生长曲线方程为：

$$f_{(t)} = \frac{A}{1 - e^{(b-ct)}}$$

式中：$f(t)$ 表示移栽后 0～t d 时烟株的吸收钾量 (kg/hm^2)；A 表示最大吸收量 (kg/hm^2)；b 表示初始吸收量 (kg/hm^2)；c 为常数；t 为移栽后时间 (d)。

1.3.5 烟株耗水量计算　待负压装置安装且稳定运行后，每日 17:00 从储水桶直接读取水位高度，与上一次记录结果比较得到水位差值 (△h)，再乘以储水桶横截面面积 (S)，即可计算出灌溉水的体积。单株灌溉量即为单株耗水量 (ET)，用 kg 表示[25]。

1.3.6 水分利用效率计算　烟株消耗单位水量所积累的干物质量为烟株水分利用效率 (WUE)，计算公式为：

$$WUE = Y/ET$$

式中：WUE 为烟株水分利用效率 (g/kg)；Y 为烟株干物质量 (g)；ET 为烟株耗水量 (kg)。

1.3.7 肥料利用率计算

肥料利用率 = (施肥处理养分总吸收量 − 不施肥处理养分总吸收量)/施肥量 × 100%

1.4　数据分析

采用 Microsoft Excel 2010、SAS 8.0 软件进行数据统计与分析，用 Duncan 新复极差法进行显著性检验 ($P < 0.05$)，采用 Origin8.5 软件对分析数据进行绘图。

2　结果与分析

2.1　施钾方式对烤烟农艺性状的影响

从表 1 可以看出，团棵期 SK2、SK3 烤烟农艺性状各项指标均高于其他处理，说明常规土壤施钾

表 1 不同施钾模式下烤烟的农艺性状

Table 1 Agronomic traits of flue-cured tobacco under different treatments

生育期 Growth stage	处理 Treatment	株高 (cm) Plant height	有效叶数 Leaf number	茎围 (cm) Stem circumference	节距 (cm) Internodal length	最大叶 Largest blade		
						长 (cm) Length	宽 (cm) Width	面积 (cm^2) Area
团棵期 Resettling stage	SK1	17.7 bc	9.0 a			36.7 bc	16.4 b	381.3 bc
	SK2	20.4 a	9.6 a			41.2 a	18.0 a	473.1 a
	SK3	18.9 ab	9.2 a			42.1 a	18.2 a	488.8 a
	WK2	17.9 bc	9.1 a			34.8 c	16.3 b	359.2 c
	WK3	18.2 b	9.0 a			35.5 c	16.6 b	374.6 bc
	CK	16.4 d	7.9 b			39.6 ab	16.8 b	423.6 ab
旺长期 Vigorous growing stage	SK1	95.7 b	23.3 ab	4.8 b	3.0 c	59.2 a	23.8 cd	893.4 c
	SK2	91.9 c	23.3 ab	4.8 b	3.0 c	59.9 a	25.1 b	953.2 b
	SK3	90.4 c	23.3 ab	4.7 b	3.0 c	57.2 b	28.1 a	1018.1 a
	WK2	99.8 a	23.4 a	5.2 a	5.2 a	61.0 a	24.8 b	958.3 b
	WK3	91.6 c	22.3 b	4.8 b	4.8 b	59.1 a	24.1 bcd	904.6 b
	CK	84.1 d	22.3 b	4.7 b	2.8 d	56.6 b	23.4 cd	842.1 d
成熟期 Mature stage	SK1	111.9 ab	21.8 a	5.5 ab	3.8 b	59.2 b	28.0 a	1013.3 ab
	SK2	108.2 bc	21.2 ab	5.3 cd	3.8 b	58.2 b	26.9 ab	974.1 b
	SK3	104.8 c	19.8 c	5.2 d	3.7 b	58.1 b	27.9 a	1029.1 ab
	WK2	115.9 a	21.8 a	5.6 a	4.0 a	62.0 a	27.2 ab	1043.5 a
	WK3	108.1 bc	20.2 bc	5.4 bc	3.9 ab	61.5 a	26.7 ab	1017.7 ab
	CK	99.4 d	18.8 d	5.2 d	3.6 b	58.2 b	27.2 ab	962.6 b

注（Note）：同列数值后不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters indicate significant differences at the 0.05 level among the treatments at the same growth stage.

方式下适当减少施钾量能促进团棵期烟株生长，同时表明常规土壤施钾较随水施钾更有利于团棵期烟株长势的形成，可能因为烟株在大田生长前期需水量少，导致随水施钾模式下进入土壤中的钾肥减少，致使烟株得不到足够的钾素供应，从而影响了烟株生长发育。旺长期，SK3 处理下的烟株最大叶宽及叶面积优于其他处理，而有效叶数、茎围、节距均以 WK2 表现最佳，表明常规土壤施钾方式下旺长期适当减少施钾量有利于最大叶面积的形成，总体上是随水施钾 75% K 最有利于烟株旺长期生长发育。成熟期，以 WK2 处理长势最好，株高、有效叶数、节距、茎围、最大叶长及叶面积均表现为最佳，表明随水施钾 75% K 促进了烟株成熟期生长发育。

2.2 不同施钾模式对烤烟干物质积累的影响

从表 2 可看出，在不同生育期烟株干物质积累受不同施钾模式的影响。团棵期，烟株干物质积累总量、根干重及叶干重均表现为 WK2 > SK2，WK3 > SK3，而茎干重表现相反，说明相同施钾量下，随水施钾较常规土壤施钾更有利于促进烟株团棵期干物质的积累以及干物质向根、叶分配；在两种施钾方式下，烟株干物质积累量均随施钾量减少而下降，但各处理间叶干重差异性不显著。旺长期，各处理间根系干重无显著差异，但 WK2 处理整株重、茎干重及叶干重均大于其他处理，分别为 99.18、19.18 和 61.29 g，说明 75% 随水施模式促进了烟株生长发育和干物质由地下部向地上部的转移；此外，常规土壤施钾下烤烟整株重及叶干重随施钾量的减少而减少，表现为 SK1 > SK2 > SK3，表明常规土壤施钾方式下增加施钾量有利于烟株旺长期干物质积累。成熟期，烤烟整株重及叶干重均表现出 WK2 > WK3 > SK1 > SK2 > SK3，说明在两种施钾方式下，减少施钾量均不利于烟叶干物质积累；比较不同施钾方式下相同施钾量处理可发现，随水施钾能有效促进烟叶干物质的积累。

表 2　不同施钾模式下烟株根茎叶干物质积累及其在全株所占的百分比

Table 2　Dry matter accumulation in root, leaf and stem of flue-cured tobacco and their percentage in total plant under different treatments

生育期 Growth stage	处理 Treatment	总重 (g) Biomass	根 Root		茎 Stem		叶 Leaf	
			干重 (g) Dry weight	占比 (%) Percentage	干重 (g) Dry weight	占比 (%) Percentage	干重 (g) Dry weight	占比 (%) Percentage
团棵期 Resettling stage	SK1	30.36 ab	12.05 ab	39.69	2.14 b	7.05	16.17 b	53.26
	SK2	29.92 abc	11.91 ab	39.82	2.34 a	7.82	15.67 b	52.36
	SK3	28.37 c	10.20 c	35.95	2.05 b	7.23	16.12 b	56.83
	WK2	31.16 a	12.40 a	39.79	1.72 c	5.51	17.05 a	54.70
	WK3	29.26 bc	10.51 bc	35.91	1.75 c	5.97	17.01 a	58.12
	CK	23.76 d	7.74 d	32.57	2.01 b	8.44	14.02 c	58.98
旺长期 Vigorous growing stage	SK1	79.98 b	17.18 bc	22.09	11.02 b	13.78	51.29 b	64.13
	SK2	76.54 b	16.64 c	22.44	17.09 ab	22.32	42.28 c	55.24
	SK3	76.18 b	17.34 b	25.04	15.70 ab	22.68	41.71 c	52.28
	WK2	99.18 a	17.46 b	19.47	19.18 a	21.38	61.29 a	59.15
	WK3	85.08 b	18.18 ab	21.37	16.83 ab	19.78	50.07 bc	58.85
	CK	65.29 c	19.00 a	29.10	9.82 bc	15.05	36.46 d	55.85
成熟期 Mature stage	SK1	124.50 ab	18.47 b	14.83	25.70 ab	20.70	80.33 bc	64.47
	SK2	117.36 b	18.57 b	15.82	20.23 b	17.24	78.56 bc	66.94
	SK3	110.10 b	20.17 ab	18.32	21.97 b	19.95	74.80 bc	61.73
	WK2	139.27 a	21.55 ab	13.45	26.57 ab	19.08	93.97 a	67.47
	WK3	132.60 a	23.55 a	15.54	27.97 a	21.09	87.35 ab	63.37
	CK	84.97 c	12.73 c	14.99	21.50 b	25.30	50.73 c	59.71

注（Note）：同列数值后不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters indicate significant differences at the 0.05 level among the treatments at the same growth stage.

施钾模式对烟株干物质的分配亦有较大的影响。从表 2 中可以看出，根干重比 (占整株干重比例) 随着烟株生长发育不断减小，叶干重比则呈现不断增长趋势，而茎干重比由团棵期至旺长期明显增大，但从旺长期到成熟期略有下降，可见团棵期烟株以地下部生长为主，旺长期、成熟期以地上部生长为主。团棵期 SK1、SK2、WK2 的根干重比在 39.69%～39.82% 范围内，SK3 与 WK3 的根干重比分别为 36.0% 和 35.9%，而叶干重比呈现相反趋势，这表明在负压灌溉下，无论是随水施钾还是常规土壤施钾，当施钾量减少至 50%K 时，均不利于根系形态的建成，延缓根系伸长，增大叶干重比，不利于中烤烟后期生长发育；同时，随水施钾的团棵期茎干重比均显著低于常规土壤施钾，说明随水施钾不利于烟株团棵期茎的生长。旺长期，施钾量相同时，随水施钾的烟株茎、叶比重均高于常规土壤施钾，表明随水施钾促进了茎和叶的干物质积累。成熟期，SK1、SK2、SK3 根比重分别为 14.8%、15.8% 和 18.3%，表明常规土壤施钾下减少施肥量有利于根比重的提高；相同施钾量时，随水施钾模式下茎、叶干物质量比重均高于常规土壤施钾，说明采用随水施钾有利于烟株成熟期干物质向地上部分配，有提高烟叶产量的潜力。

2.3　不同施钾模式对烤烟水分和养分利用的影响

2.3.1　不同施钾模式对烤烟水分利用的影响　由图 3 可知，在烤烟全生育期内，各处理单株耗水总量表现为 WK3 > WK2 > SK1 > SK2 > SK3，但无显著差异。同一生育期单株耗水量在不同处理间表现不同，对于常规土壤施钾，除耗水量最少的团棵期外，其他两个生育期烟株耗水量均表现出 SK1 > SK2 > SK3，表明在常规土壤施钾下烤烟耗水量随施钾量的减少而减少；施钾量相同时，烟株耗水量在团棵期

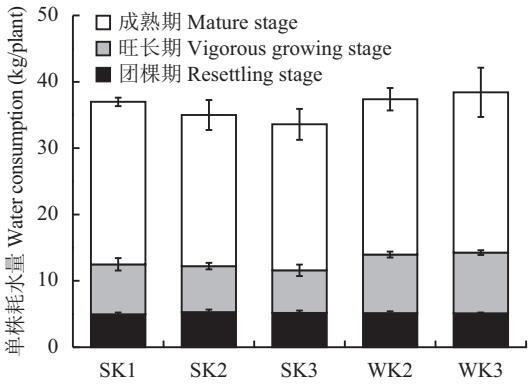


图 3 不同施钾模式下烤烟单株耗水量的变化

Fig. 3 Effects of different treatments on the water consumption of flue-cured tobacco

表现为 SK2 > WK2，SK3 > WK3，但旺长期、成熟期则相反，为 WK2 > SK2，WK3 > SK3，这表明较常规土壤施钾而言，随水施钾减少了烟株团棵期耗水量，增加了旺长期、成熟期的烟株耗水量，该耗水特性有利于烟株团棵期根系伸长和形态建成，也有利于旺长期与成熟期吸水、吸钾量的同步提升，有利于烟株产量和质量的提高。

烟株水分利用效率 (WUE) 是衡量烤烟水分利用程度的重要指标之一[24]。从表 3 可以看出，常规土壤施钾下烟株干物质增量随施钾量的降低而减小。施钾量相同时，随水施钾的烤烟耗水量和干物质增量均高于常规土壤施钾；虽然 WK2 处理的耗水量低于 WK3，但有更高的干物质增量。烟株 WUE 表现为 WK2 > WK3 > SK1 > SK2 > SK3，可见在两种施钾方式下 WUE 均随施钾量的增加而增大，随水施钾的 WUE 要高于常规土壤施钾，其中 WK2 的 WUE 较其他处理提高了 6.8%～17.4%。WK2 的 WUE 较 SK2 提高了 0.50 g/kg，约提高 15.2%，WK3 的 WUE 较 SK3 处理提高了 0.32 g/kg，约提高 9.9%。

表 3 不同施钾模式对烤烟水分利用效率的影响

Table 3 Water use efficiency of flue-cured tobacco as affected by different treatments

处理 Treatment	WC (kg/plant)	DMI (g/plant)	WUE (g/kg)
SK1	36.98 ± 0.65 a	124.50 ab	3.41
SK2	35.00 ± 2.01 a	117.36 b	3.28
SK3	33.59 ± 2.55 a	110.10 b	3.22
WK2	37.38 ± 2.36 a	139.27 a	3.78
WK3	38.42 ± 3.53 a	132.60 a	3.54
CK	55.5 a	84.97 c	1.53

注（Note）：WC—耗水量 Water consumption; DMI—干物质增量 Dry matter increment. 同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters indicate significant differences at the 0.05 level among treatments.

2.3.2 不同施钾模式对烤烟养分吸收及钾肥利用的影响 从表 4 可知，各处理烤烟氮、磷、钾养分吸收量受不同施钾模式的影响较大。常规土壤施钾下烤烟氮吸收总量、磷吸收总量及钾吸收总量均随施钾量的减少而显著减少。随水施钾下不同施钾量处理的烤烟氮吸收总量没有显著差异，但磷吸收总量随施钾量的减少而显著增加，钾吸收总量随施钾量的减少而显著降低。就不同施钾方法而言，在施钾量为 50%～75% 时，随水施钾的烤烟氮、钾吸收总量总是显著大于常规土壤施钾，其中 WK2 较 SK2、WK3 较 SK3 的钾素吸收量分别增加 53.85 kg/hm^2、34.65 kg/hm^2，增加幅度分别达 92.3% 和 82.3%。这表明在–15 kPa 的负压灌溉下，不论是随水施钾还是常规土壤施钾，烟株对氮、钾的吸收总量均随施钾量的减少而减少，随水施钾较常规土壤施钾能显著提高烟株对氮、钾的吸收总量。

表 4 不同施钾模式烤烟氮、磷、钾养分吸收量 (kg/hm^2)

Table 4 Total absorption of N, P and K of flue-cured tobacco under different treatments

处理 Treatment	N	P	K
SK1	34.95 a	10.95 a	68.55 c
SK2	31.20 b	9.60 b	58.35 d
SK3	25.95 c	7.05 c	41.85 e
WK2	34.35 a	9.45 b	112.20 a
WK3	33.45 a	11.55 a	76.50 b

注（Note）：同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters indicate significant differences at the 0.05 level among treatments.

肥料的吸收利用率是衡量施肥模式是否科学的指标之一。从表 5 中可知，在常规土壤施钾下的各处理钾肥利用率在 18.5%～21.9% 之间，仍处于较低水平，说明负压灌溉下的常规土壤施钾不能明显提高钾肥利用率。随水施钾的 WK2、WK3 处理的钾肥利用率得到有效提升，分别为 43.0% 和 42.6%，较常规土壤施钾处理中钾肥利用率最大处理 SK2 分别增加了 21.1 和 20.7 个百分点，表明负压灌溉下随水施钾方式能显著提高烤烟对钾肥的利用率。

2.3.3 不同施钾模式对烤烟养分吸收及钾肥利用的影响 Moustakas 等[23]研究发现烟株体内钾素的吸收积

表 5　不同施钾模式下烤烟不同生育期对钾肥的吸收量及钾肥利用率

Table 5　Potassium uptake and utilization by flue-cured tobacco at different stages under different treatments

处理 Treatment	吸收量 Uptake (kg/hm²)			KUE (%)
	RS	VGS	MS	
SK1	21.60 a	28.20 c	18.75 c	20.00
SK2	22.95 a	30.90 b	4.50 d	21.91
SK3	17.85 b	18.75 e	5.25 d	18.54
WK2	22.05 a	33.30 a	56.85 a	43.00
WK3	18.90 b	25.95 d	31.80 b	42.58

注（Note）：RS—团棵期 Resettling stage; VGS—旺长期 Vigorous growing stage; MS—成熟期 Mature stage; KUE—钾利用率 K use efficiency. 同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters indicate significant differences at the 0.05 level among treatments.

累变化呈现“S”型生长曲线规律，可用 Logistic 方程来模拟。本试验取移栽期整株烟草含钾量为背景值，此后每隔 10 天取不同处理下初始长势相同烟株的根、茎、叶测量相对含钾量，并根据干物质量计算整株吸钾量，利用 Origin8.5 软件生成“S”型生长曲线，并以 Logistic 方程进行模拟。表 6 为不同施钾模式下钾素吸收积累的曲线方程参数，可以看出各处理钾素积累的曲线方程的决定系数 R^2 均大于 0.99，且在 $P < 0.01$ 水平显著相关，表明 Logistic 方程很好地拟合了本试验中烟株体内钾素的吸收积累变化情况。

图 4 是烟株体内钾素积累吸收的“S”型曲线。从中可以看出，随水施钾下的烟株钾素积累吸收量明显高于常规土壤施钾，说明随水施钾提高了烤烟对钾肥的吸收，有效提高了钾肥利用效率。相同施钾方式下，烟株的钾肥积累吸收量随施钾量的降低

表 6　Logistic 方程各参数值

Table 6　Parameters of the Logistic equation

处理 Treatment	a	b	c	R^2
SK1	70.119	2.513	0.057	0.995**
SK2	58.422	3.340	0.097	0.999**
SK3	41.938	2.517	0.074	0.998**
WK2	129.864	2.877	0.043	0.993**
WK3	83.112	2.608	0.046	0.994**

注（Note）：a、b、c 为参考系数 a, b and c mean reference coefficients. **—$P < 0.01$.

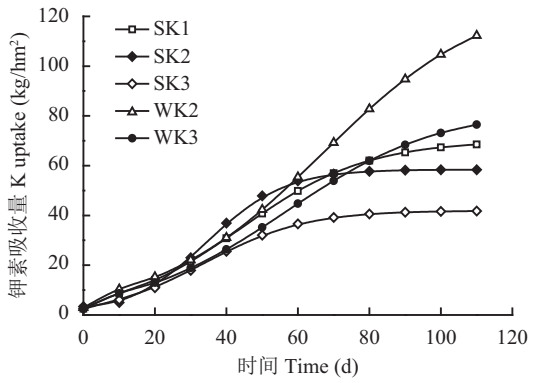


图 4　不同施钾模式下烤烟钾素吸收量

Fig. 4　K uptakes of flue-cured tobacco under different potassium treatments

而减小，90 天后常规土壤施钾的烤烟钾素积累吸收量基本保持不变，而随水施钾下仍有较多的增长，这对提高烤烟烟叶含钾量这一关键品质具有十分重要的意义。

生长曲线的一阶导数在数学意义上表示钾素瞬时吸收速率。从图 5 可以看出，常规土壤施钾方式下，最大吸收速率相对应的时间 (用移栽后的天数表示) 表现为 SK3 < SK2 < SK1，说明在常规土壤施钾下烟株最大吸钾速率相对应的时间随施钾量的减少而提前；SK2、SK3 处理烟株钾素吸收速率在达到最大值后迅速降低，而此时烟株恰好处于旺长期，对钾素需求量较大。因此，常规土壤施钾方式下减少施钾量，不利于烟株后期钾素的吸收和生长。随水施钾下烟株钾素最大吸收速率出现的时间较常规土壤施钾明显延后，且处在旺长-平顶期，为烟株后期钾素的吸收和生长提供了有利基础。从图 5 还可以看出，相同施钾方式下烟株对钾素最大吸收速率总体表现为随施钾量的增加而增加 (但 SK2 比 SK1 略

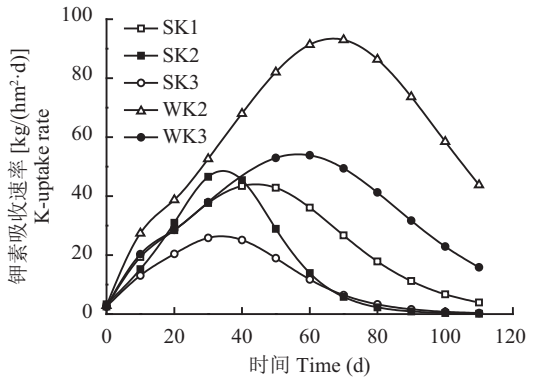


图 5　不同施钾模式下烤烟钾素吸收速率

Fig. 5　K-uptake rates of flue-cured tobacco under different potassium treatments

大)。随水施钾的烟株的最大吸钾速率较常规土壤施钾有明显提高，且整个生育期内均能维持相对较大的吸收速率。全生育期内，WK2 的烟株钾素吸收速率均明显大于其他处理，其最大值为 93.0 kg/(hm^2·d)，比 SK2 提高 99.6%，WK3 比 SK3 提高 108.6%，SK2 比 SK1 仅提高 7.2%，WK2 比 WK3 提高 72.6%，这均可以说明施钾方式对最大钾素吸收速率的影响明显大于施钾量的影响，施钾量提高最大吸钾速率的作用在随水施钾方式下更加明显。

3 讨论

水肥是影响烤烟生长发育的两大主要因子，也是控制烟叶生产的有效手段。水分和养分对烤烟生长的影响不是孤立的，而是相互影响的。在本研究中，常规土壤施钾方式下适当减少施钾量能促进烟株团棵期的生长和旺长期最大叶面积的形成 (表 1)，这可能是由于烤烟生长初期需钾量较少，试验中设置常规施钾的钾肥用量能够满足烟株的前期生长发育需要，而较高的钾肥浓度反而会抑制烟株的生长发育。随水施钾模式下由于烟株生长初期需水量较小引起进入土壤中的钾肥减少，导致土壤中钾肥浓度过低，烟株得不到充足的钾素供应，不利于此时期烟株长势形成。移栽一个月后，烟株生长进入旺长期，试验各处理下干物质积累量、农艺性状均有较大提高，随水施钾模式下烤烟吸钾量随耗水量的增加显著高于其他处理；移栽后两个月烟株进入成熟期至 110 天收获，各处理下烟叶干物质积累量占整株比重明显提高，WK2 处理下钾肥吸收速率与烟叶干物质量均显著高于其他处理，表明随水施钾更有利于烟株中后期生长和钾素吸收。李静等[27]通过适当提高钾肥在烤烟钾积累高峰期的施用比例进行优化施肥，并与常规施肥方式进行对比分析，研究发现在烤烟打顶后追施钾肥总量的 15%～20% 能减少烟株钾素外溢，并有效利用烤烟在中部叶成熟期出现的钾积累高峰期，促进烤烟中、后期生长和对钾的吸收，提高成熟烟叶产量及含钾量。张翔等[28]研究表明，在施钾量相同条件下，增加钾肥的追施比例和追施次数，使耕层土壤 (0—20 cm) 维持较高水平的供钾能力，减少钾的流失、下移，为烤烟中、后期生长发育提供了更为优越的钾营养环境，能提高钾肥利用率，并显著提高中部叶和上部叶的含钾量。可见，本研究结果与李静等、张翔等的研究结果相同。

水分是土壤营养供给、烟株营养吸收、烟叶物质代谢的媒介，养分只有在良好的水分供应条件下才能被烟株正常吸收和利用。借助负压灌溉的随水施钾模式能较好地协调烟株水肥供应与管理难题。综合烟株耗水量与烟株水分利用效率等方面来看，在–15 kPa 负压灌溉条件下，减少常规土壤施钾方式下的施钾量虽然在一定程度上降低了烟株耗水量，但也降低了烟株水分利用效率，从而不利于烟株对水分的高效利用；相同施钾量时，随水施钾的烤烟单株耗水量略高于常规施钾方式，而烟株水分利用效率却得到不同程度的提高，其中 WK2 较 SK2 提高 15.2 个百分点，WK3 比 SK3 高 9.9 个百分点。本研究结果表明，–15 kPa 的负压灌溉条件下，随水施钾能有效促进烟株旺长期和成熟期对水分、钾素的同步吸收，达到“以肥调水”的效果，从而提高水肥利用效率，增加了烟叶产质量提升的潜力。

施钾模式的不同，会引起烟株同化物形成的速率不同，导致烟株干物质积累量也不相同，继而影响烟叶的潜在产量。Wang 等[29]通过研究发现，浙江东部地区烟株干物质积累高峰期出现在移栽后 35～65 d，在此时间范围内主要营养物质积累的顺序从高到低依次为 K > Ca > N > S > Cl > Mg > P，而此时期本试验中的 WK2 供钾能力正处于快速上升并达到顶峰期，由此保证了烤烟在钾素积累高峰期具有较高供钾能力，促进了干物质积累，有利于烤烟产量和质量的提高。张翔等[30]通过不同施肥处理烤烟氮磷钾吸收分配规律研究发现，利用后期追施钾肥技术保证后期钾素营养供给，能达到提高烟叶干物质积累和烟叶品质提升的目的。在本试验研究中，虽然随水施 75%K 的施钾模式在团棵期不利于烟株长势形成，烤烟株高、叶面积等均比常规土壤施钾方式表现稍差，但生长中、后期烟株吸水量与吸钾量同步增加，对烤烟旺长期、成熟期的生长、叶片发育、最大叶的形成等均具有较大的促进作用，烟叶干重占整株重比例由团棵期的 54.70% 提升至 67.47%，这表明在–15 kPa 的负压灌溉下，采用随水施钾方式、且施钾量减少至 75%K 时，能促进烟株干物质积累，较大程度上提高了干物质向收获物目标—叶器官转移的比例，有利于烤烟潜在产量的提高 (表 3)。

烤烟钾素的高效利用对烤烟植株生长发育及提高产量与产值，改善烤后烟叶品质具有重要的影响。本试验中，无论在钾素吸收速率还是持续吸钾能力方面，随水施钾的各处理均高于常规土壤施钾，究其原因，可能有以下两点：一是随水施钾能

够减少前期施入土壤中的钾而保证烟株生长中后期钾素的供应，从而满足烟草根系和烟叶需要在土壤钾离子浓度较大时才会吸收和积累钾素的要求；二是随水施钾的钾肥跟随灌溉水向根系持续定向流动，促进钾素向根际土壤的聚集，提高水分供应与钾素供应的同步性，同时减少了钾肥在土壤中的停留时间、降低土壤中的钾肥残留量，提高了钾肥吸收利用率，达到以水促肥的效果。肖海强等[20]研究发现，常规施钾条件下，–10 kPa 负压灌水较普通灌水方式烤烟钾肥吸收利用率提高 11.54 个百分点，并促进磷肥利用率有效提升了 1.8 个百分点。黄松青等[30]通过控释肥增加烤烟中、后期钾素供应，发现能改善相应时期光合特性，提高叶片叶绿素含量，提高旺长期烟叶净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度等，在施钾 180 kg/hm^2 和 300 kg/hm^2 条件下钾肥利用率分别提高 9.4 和 8.6 个百分点。本研究表明，随水施钾具有良好的“以水促肥”的作用，显著提高钾肥利用效率，随水施钾、施钾水平为 75%K 和 50%K 条件下，钾肥利用率分别为 43.0% 和 42.6%，较常规施钾处理 SK2(该施钾方式下钾肥利用率最大处理) 分别增加了 21.1 和 20.7 个百分点，说明当条件为随水施钾、75%K 施钾水平时，烤烟钾肥利用率较高，有促进光合作用、干物质积累和提高烟叶产质量的潜力。

4　结论

负压灌溉下随水施钾能有效促进烤烟植株对钾素的吸收和积累，提高灌溉水和钾肥利用效率，增加干物质向烟叶器官的存储比例，从而提高烟叶的产、质量。本试验条件下 (烤烟品种为 NC55，土壤质地为粘壤土，灌溉负压值为–15 kPa)，随水施钾，施钾量从常规的 230 kg/hm^2 减少至 172.5 kg/hm^2，为较优钾肥施用模式，具体表现为：

1) 随水施钾模式延缓了烟株团棵期长势形成，但促进了烤烟中后期生长发育、干物质积累、烟叶钾素吸收；

2) 随水施钾模式明显地提高了水分利用效率和钾肥利用率。随水施用常规钾量的 75%、50% 较常规土壤施钾的水分利用效率分别提高 10.9%、3.8%，钾肥利用率分别提高了 23.0 和 22.6 个百分点；

3) 随水施钾模式下全生育期烟株钾素吸收速率均维持在较高水平，尤其在中后期钾素吸收积累量显著高于相同施钾量的常规灌溉方式。

参 考 文 献：

[1] 中国农业科学院烟草研究所. 中国烟草栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005.
Institute of Tobacco Research of CAAS. Cultivation science of Chinese tobacco [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2005.

[2] 周冀衡, 朱小平, 王彦亭, 等. 烟草生理与生物化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996.
Zhou J H, Zhu X P, Wang Y T, *et al*. Tobacco physiology and biochemistry [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1996.

[3] 王通明, 陈伟, 潘文杰, 等. 有机肥和化肥对烟叶气体交换、叶绿素荧光特性及叶绿体超微结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 517–526.
Wang T M, Chen W, Pan W J, *et al*. Differences of leaf gas exchange traits, chlorophyll fluorescence characteristics and chloroplast ultrastructure of *Nicotianatabacum* L. K326 under organic fertilization and chemical fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 517–526.

[4] 赵军, 窦玉青, 宋付朋, 等. 有机和无机烟草专用肥配合施用对烟草生产效益和肥料氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 613–619.
Zhao J, Dou Y Q, Song F P, *et al*. Effect of combined application of biological organic fertilizer and inorganic compound fertilizer on the tobacco profit and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(3): 613–619.

[5] 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998: 69–85.
Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer problems of sustainable agricultural development in China [M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1998: 69–85.

[6] 汪霄, 张过师, 陈防. 不同基因型作物及其根际钾素高效利用机理的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2011, (4): 660–664.
Wang X, Zhang G S, Chen F. Research advances on the mechanism of high K use efficiency of varied genotypes crops and their rhizospheres[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, (4): 660–664.

[7] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
Wang R X. Tobacco chemistry [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2003.

[8] 石屹, 牛佩兰, 窦玉清, 等. 培育富钾烟草品种降低烟叶焦油产生量[J]. 中国烟草科学, 1997, (4): 17–20.
Shi Y, Niu P L, Dou Y Q, *et al*. Breed potassium rich tobacco cultivar to decrease tar content in leaf[J]. Chinese Tobacco Science, 1997, (4): 17–20.

[9] 胡国松, 赵元宽, 曹志洪, 等. 我国主要产烟省烤烟元素组成和化学品质评价[J]. 中国烟草学报, 1997, (1): 36–44.
Hu G S, Zhao Y K, Cao Z H, *et al*. The evaluation of the chemical elements and some organic components in the flue-cured tobacco[J]. Acta Tabacaria Sinica, 1997, (1): 36–44.

[10] Subhasdini D V. Growth promotion and increased potassium uptake of tobacco by potassium-mobilizing Bacterium Frateuria aurantia grown at different potassium levels in Vertisols[J]. Soil Science and Plant Analysis, 2015, 46(2): 210–220.

[11] Zhang C, Kong F. Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants[J]. Applied Soil Ecology, 2014, (82): 18–25.

[12] Marchand M, Etoumeaud F, Bourrie B. 不同钾肥品种对烟草产量与化学成分的影响研究[J]. 中国烟草科学, 1997, (2): 6–11.
Marchand M, Etoumeaud F, Bourrie B. Effect of different potassium types on the yield and chemical components of tabacco[J]. Chinese Tobacco Science, 1997, (2): 6–11.

[13] 刘正日, 胡日生, 郭清泉. 烟草钾营养研究进展[J]. 作物研究, 2004, (2): 109–118.
Liu Z R, Hu R S, Guo Q Q. Research progress on tobacco potassium nutrition[J]. Crop Research, 2004, (2): 109–118.

[14] 吴玉萍, 杨虹琦, 徐照丽, 等. 重金属镉在烤烟中的累积分配[J]. 中国烟草科学, 2008, 29(5): 37–39.
Wu Y P, Yang H Q, Xu Z L, *et al*. Accumulation and distribution of cadmium in flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2008, 29(5): 37–39.

[15] Dunbar K R, Mclaughlin M J, Reid R J. The uptake and partitioning of cadmium in two cultivars of potato (*Solanum tuberosum* L.)[J]. Journal of Experimental Botany, 2003, 54(381): 349–354.

[16] 朱丽, 张军, 李朋彦, 等. 不同钾肥施用方式下烟草钾素积累动态模型与特征分析[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(9): 132–135.
Zhu L, Zhang J, Li P Y, *et al*. Dynamic model and feature analysis of potassium accumulation under different ways of potassium fertilizer application[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(9): 132–135.

[17] 罗慧, 李伏生, 韦彩会, 等. 灌水方式对不同施肥水平烤烟产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 173–179.
Luo H, Li F S, Wei C H, *et al*. Effect of irrigation method on yield and quality of flue-cured tobacco under different fertilization levels[J]. Scientia Agricultural Sinica, 2009, 42(1): 173–179.

[18] 韦歆娜, 姜俊红, 李就好, 等. 水肥耦合对烤烟叶面积积累量的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 85–90.
Wei X N, Jiang J H, Li J H, *et al*. Effect of water and fertilizer coupling on flue cured tobacco leaf area accumulation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(5): 85–90.

[19] 刘学勇, 赵松义, 龙怀玉, 等. 烟田适宜土壤水势指标研究[J]. 江西农业学报, 2013, 25(2): 5–9.
Liu X Y, Zhao S Y, Long H Y, *et al*. Research on suitable soil water potential index of tobacco field[J]. Acta Agricultural Jiangxi, 2013, 25(2): 5–9.

[20] 肖海强, 丁亚会, 黄楚瑜, 等. 负压灌溉对烤烟生长及水肥利用率的影响[J]. 中国烟草学报, 2016, 22(2): 52–60.
Xiao H Q, Ding Y H, Huang C Y, *et al*. Effect of negative-pressure irrigation on water fertilizer utilization and flue-cured tobacco growth[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2016, 22(2): 52–60.

[21] 龙怀玉, 雷秋良, 张认连. 应用于农业灌溉的恒负压灌水系统: 中国, 103548645A[P]. 2014-02-05.
Long H Y, Lei Q L, Zhang R L. Negative pressure irrigation system applied in agricultural irrigation: China, 103548645A[P]. 2014-02-05.

[22] YC/T142-2010, 烟草农艺性状调查测量方法[S].
YC/T142-2010, Investigating and measuring methods of agronomical character of tobacco [S].

[23] Moustakasa N K, Ntzanisb H. Dry matter accumulation and nutrient uptake in flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.)[J]. Field Crops Research, 2004, 94: 1–13.

[24] YC/T161-2002, 烟草及烟草制品总氮的测定连续流动法[S].
YC/T161-2002, Tobacco and tobacco products–Determination of total nitrogen–Continuous flow method [S].

[25] 王维, 陈建军, 吕永华, 等. 烤烟氮素营养诊断及精准施肥模式研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 77–84.
Wang W, Chen J J, Lü Y H, *et al*. Research on nitrogen nutrition diagnosis and precision fertilizing model for flue-cured tobacco[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(9): 77–84.

[26] 李静, 张锡洲, 李廷轩, 等. 钾肥运筹对烤烟钾吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 969–978.
Li J, Zhang X Z, Li T X, *et al*. Effect of potash management on potassium absorption and utilization of flue-cured tobacco[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4): 969–978.

[27] 张翔, 马聪, 毛家伟, 等. 钾肥施用方式对烤烟钾素利用及土壤钾含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012, (5): 50–53.
Zhang X, Ma C, Mao J W, *et al*. Effects of potassium fertilizer application methods on flue-cured tobacco potassium utilization and contents of soil potassium[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2012, (5): 50–53.

[28] Wang D H, Fu Y P, Huang R P, *et al*. Dry matter and main nutrient accumulation and distribution of oriental tobacco during growth in Zhejiang[J]. Acta Agricultural Zhejiangensis, 2012, 24(5): 53–57.

[29] 张翔, 毛家伟, 黄元炯, 等. 不同施肥处理烤烟氮磷钾吸收分配规律研究[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(1): 53–57.
Zhang X, Mao J W, Huang Y J, *et al*. Studies on laws of N, P, K uptake and distribution of flue-cured tobacco with different fertilizer treatments[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2012, 18(1): 53–57.

[30] 黄松青, 危跃, 屠乃美, 等. 控释肥对烤烟光合特性和产质量与氮钾利用率的影响[J]. 中国烟草科学, 2015, 21(1): 54–60.
Huang S Q, Wei Y, Tu N M, *et al*. Effect of controlled release fertilizer on photosynthetic characteristics, yield and quality and use efficiency of N and K of tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2015, 21(1): 54–60.