

生物炭用量对土壤速效钾含量和烟叶钾吸收的长期效应

李彩斌¹, 张久权^{2*}, 何 轶¹, 周 翔³, 侯晓燕², 李鹏志¹, 王玉川¹

(1. 贵州省烟草公司毕节市公司, 贵州 毕节 551700; 2. 中国农业科学院烟草研究所, 山东 青岛 266101; 3. 湖北省烟草公司宜昌市公司, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 为了探明生物炭施用量对土壤和烤烟钾的长期效应, 在贵州省毕节市开展了5年的田间定位试验。采用单因素(生物炭用量0、5、15、20、40 t/hm²)随机区组设计, 结果表明: 生物炭施用后的首年对土壤速效钾含量的增加效果最大, 2种土壤上增幅分别为664.21%和223.09%, 随后趋于稳定, 5年平均增幅分别为82.36%和39.80%。当生物炭用量分别为15、20、40 t/hm²时, 两种土壤上速效钾含量5年平均分别显著提高72.2%和127.3%、251.1%和22.3%、31.9%和47.6%。同时, 烟叶钾含量也显著增加, 增幅分别为18.2%和18.4%。综合来看, 生物炭用量为15 t/hm²对提高土壤速效钾和初烤烟叶钾含量效果最佳。总之, 适量施用生物炭能显著提高土壤速效钾含量和增加初烤烟叶钾含量。

关键词: 生物炭; 烤烟; 钾; 黄壤; 黄棕壤

贵州省作为我国的贫困地区, 烤烟种植是其主要的经济收入来源。近年来, 由于控烟压力越来越大, 卷烟市场竞争越来越激烈, 卷烟企业对原料的质量要求越来越高。烟叶作为主要的卷烟原料, 其钾含量对烟叶质量发挥着重要作用, 如果钾含量低, 烟叶的燃烧性就很差^[1]。我国烟叶的钾含量普遍偏低, 人们一直在寻求可行的解决方案。最近, 许多学者报道生物炭能提高土壤肥力, 例如, 生物炭施入土壤能提高土壤肥力和增加细菌丰度^[2], 增加土壤有机碳含量^[3]和提高土壤有效养分含量^[4], 增加土壤有效钾含量^[5-6]。张红雪等^[7]在福建省开展的盆栽试验研究表明, 烟秆生物炭与化肥配施, 比化肥单施的处理土壤水溶性钾和交换性钾分别提升了4.09和6.21倍。Liu等^[8]的研究结果表明, 生物炭的施用可提高土壤有效钾含量高达66.6%。汪坤等^[9]的研究结果也表明, 施用生物炭后的土壤速效钾含量提高了98.1%。土壤中速效钾含量的增加能提高土壤对钾素的供应能力, 从而提高作物的产量和质量, 这在前人的研究^[10]中得到了证实。然而, 以往的研究结论并不完全一

致, 在生物炭对土壤养分有效性影响、对作物营养元素含量和吸收积累量等方面的影响存在很大差异^[11]。Dai等^[12]通过对153篇论文进行Meta分析后, 发现施用生物炭对作物产量的效应变异极大, 从减产31.8%至增产974%都有报道。另外, 目前的研究结果主要来源于室内培养和吸附实验、盆栽和短期的田间试验, 长期的大田试验数据十分匮乏, 结论缺乏说服力。因此, 为了进一步探究生物炭对土壤速效钾含量和烤烟钾素含量的影响, 提供更有力的数据支撑, 笔者开展了5年的不同生物炭用量田间定位试验, 以期生物炭在烟田中的大面积推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计与材料

试验于2018年开始, 分别在贵州省毕节市烟草公司威宁县黑石科技园和黔西市林泉科技园进行。两地的土壤类型分别为偏酸性的黄棕壤和中性黄壤。试验采用单因素(生物炭施用量)随机区组设计, 重复3次, 小区面积67 m², 行距1.1 m, 株距0.55 m, 每行种15株烤烟, 每小区105株烤烟。生物炭用量设0、5、15、20、40 t/hm², 共5个处理水平, 其中不施生物炭处理(0 t/hm²)为对照。生物炭采用烟秆在380°C限氧条件下炭化2 h而成, 由贵州金叶丰农业科技有限公司提供。生物炭于2018年5月起垄前均匀撒施到各

收稿日期: 2023-06-07; 录用日期: 2023-11-24

基金项目: 贵州省烟草公司毕节市公司项目(2022520500240197)。

作者简介: 李彩斌(1989-), 农艺师, 博士, 主要从事烟草栽培和生物炭方面的研究。E-mail: ynlcb2015@126.com。

通讯作者: 张久权, E-mail: zhangjiuquan@caas.cn。

小区, 旋耕入 20 cm 耕层土壤中, 以后未再施用。各小区用固定板永久性隔开, 区组间设保护行。试验区每年种植烤烟, 品种为云烟 87。依据土壤水分状况, 每年在 4 月 20 日—5 月 5 日移栽。移栽时施用烟草专用肥, 用量为 525 kg/hm², N : P₂O₅ : K₂O=9 : 13 : 22; 移栽后分两次追施专用肥, 分别为 37.5 kg/hm², N : P₂O₅ : K₂O=15 : 8 : 7; 300 kg/hm², N : P₂O₅ : K₂O=13 : 0 : 26。其他田间管理按当地优质烟叶生产要求进行, 冬季休闲。

黄棕壤的土壤 pH 值为 5.32 ± 0.35, 偏酸性, 土壤有机碳含量 (17.9 ± 1.1) g/kg, 铵态氮和硝态氮含量分别为 (9.21 ± 0.63) 和 (45.9 ± 3.1) mg/kg, 有效磷含量为 (25.5 ± 1.1) mg/kg, 速效钾含量为 (142 ± 6) mg/kg; 黄壤的土壤 pH 值为 6.39 ± 0.31, 中性, 土壤有机碳含量为 (20.1 ± 0.9) g/kg, 铵态氮和硝态氮含量分别为 (20.9 ± 1.5) 和 (34.4 ± 2.6) mg/kg, 有效磷含量为 (28.9 ± 1.5) mg/kg, 速效钾含量为 (381 ± 24) mg/kg^[13]。生物炭 pH 值为 9.50 ± 0.46, 总碳含量为 (602 ± 34) g/kg, 总氮、磷、钾含量分别为 (20.2 ± 1.2)、(3.08 ± 0.18)、(6.12 ± 0.25) g/kg, 碳氮比为 29.8 ± 1.7, 灰分为 (19.5 ± 1.1) %, 电导率为 (3.53 ± 0.22) μS/cm, 阳离子交换量 (CEC) 值为 (110 ± 6) cmol/kg^[13]。

1.2 田间取样与检测分析

分别在试验开始前取 0 ~ 20 cm 土层土壤和生物炭样品。在烤烟生长期和收获后, 分别在 2018 和 2019 年的 6、7、9 月, 2020 年的 7、10 月, 2021 年的 7、9 月, 2022 年的 6、10 月, 采用 5 点法用土钻取 0 ~ 20 cm 耕层土样, 每小区 1 kg。土壤样品风干、混匀, 过 2 mm 筛后用 1 N 50 mL NH₄OAc 浸提, 滤液用英国 Sherwood 公司的 M410 火焰光度计测定土壤速效钾含量。

于 2019 年 7 月 24 日 (现蕾期), 每小区选择有代表性的烟株 2 棵, 按根、茎、叶烘干后分别称重。粉碎过筛后用浓硫酸消煮, 稀释 10 倍后用英国 Sherwood 公司的 M410 火焰光度计测定钾含量。每小区的烤烟分别采收, 挂牌烘烤。烘烤结束后取有代表性的中桔三 (C3F) 和上桔二 (B2F) 烟叶样品, 测定全钾含量, 测定方法同上述植株样品。

1.3 统计分析

速效钾含量在 5 年间连续取样测定了 12 次, 存在对象内相关性, 属于典型的重复测量试验, 因此, 采用 SAS 9.4 广义线性混合模型的 Glimmix 程

序, 按照具有一个重复测量因素 (取样时间) 的单因素 3 次重复随机区组设计进行方差分析^[14-15]。分析时先确定最佳协方差结构, 然后进行方差分析和多重比较。分析时两种土壤类型分别进行, 其他数据按单因素 3 次重复随机区组设计进行方差分析, 并进行多重比较, 所有显著水平均为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 生物炭用量对土壤速效钾含量的长期效应

图 1 是烟田施用生物炭后, 土壤速效钾 5 年平均含量随生物炭用量的变化情况。可以看出, 不管是黑石偏酸性的黄棕壤, 还是林泉的中性黄壤, 土壤速效钾含量均随生物炭用量的增加而提高。在黑石上, 与不施生物炭的处理相比, 每公顷施用 5、15、20、40 t 生物炭后, 速效钾含量分别由 134.1 mg/kg 增加到 158.4、230.9、304.8、470.8 mg/kg, 增幅分别为 18.1%、72.2%、127.3%、251.1%; 在林泉上, 速效钾含量分别由 269.2 mg/kg 增加到 286.8、333.3、375.5、447.8 mg/kg, 增幅分别为 6.5%、22.3%、31.9%、47.6%。与不施生物炭的处理相比, 生物炭用量为 15 t/hm² 及以上时, 差异均达到 5% 显著水平。以上说明, 不管是偏酸性的黄棕壤还是中性黄壤, 施用生物炭都能显著增加土壤速效钾的含量, 且具有长期效应。

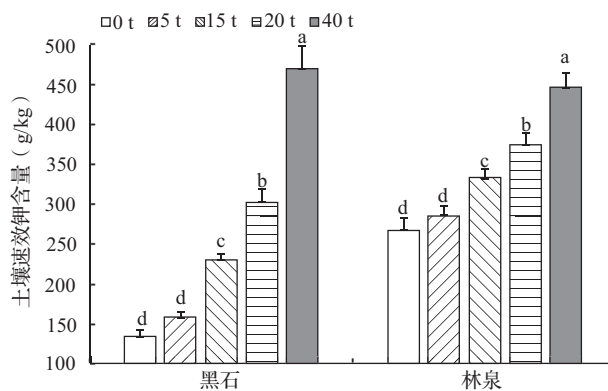


图 1 不同用量生物炭对土壤速效钾含量的增加效果

注: 数据为 5 年平均值。同一地点小写字母不同表示不同生物炭用量间差异显著 ($P < 0.05$)。图 4 同。

2.2 土壤速效钾含量随时间的变化

图 2 是生物炭在偏酸性的黄棕壤上施用后, 5 年间各处理土样速效钾含量的变化结果。从 2018 年 6 月到 2022 年 10 月底, 土壤速效钾含量不断波动, 并不是一个衡定的数值。一方面可能是与土壤生态条件, 如水分状况、温度等的变化有关

系；另一方面，作物对钾素的吸收和根系残留的钾素释放等也会产生影响。从图2还可以看出，生物炭用量越大，土壤速效钾含量越高，这种趋势一直保持5年之久。从方差分析和多重比较结果来看，生物炭用量较低的处理，如5 t/hm²，与对照相比，土壤速效钾含量无显著差异；当生物炭用量为15、20和40 t/hm²时，土壤速效钾含量显著高于对照，且随着用量的增加，速效钾含量增加幅度越大，在生物炭施用后的一年内这种增加效果最明显。据2018年6月13日取样测定，生物炭用量为0、5、15、20、40 t/hm²的处理，土壤速效钾含量分别为97.5、125.8、257.3、396.1、745.1 mg/kg，比对照分别增幅29.03%、163.90%、306.26%、664.21%；2019年6月后，这种增幅各处理均明显降低，且随后的增幅趋于稳定，各处理增幅均值分别为15.00%、52.70%、82.36%、154.61%。2019年7月24日取样时，生物炭用量为40 t/hm²的处理速效钾含量偏低，造成了各处理间差异不显著，可能与当时的天气情况有关，当时试验小区十分干旱，可能造成了生物炭不能发挥应有的作用，但具体作用机理有待进一步研究和证实。从2019年9月26日开始，随后的处理规律基本一致，用量40 t/hm²的处理比20 t/hm²处理的速效钾含量显著增加；而15和20 t/hm²的处理大多数情况下差异不显著，但显著高于5 t/hm²的处理。总之，在偏酸性的黄棕壤上，当炭用量为40 t/hm²时，速效钾提高幅度最大，生物炭施用的当年增幅为664.21%，1年后增幅下降且趋于稳定，其余4年增幅平均达82.36%。

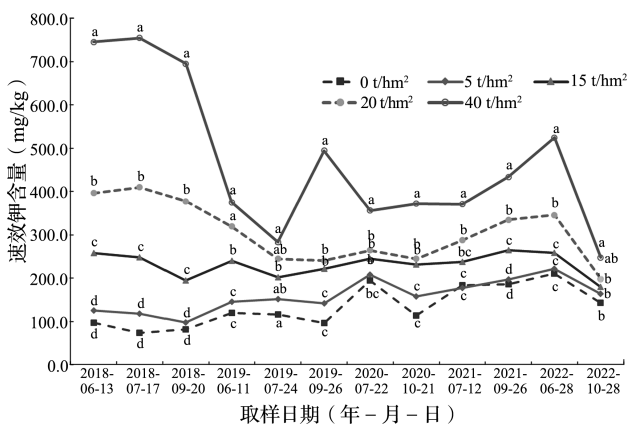


图2 生物炭施用后5年间土壤速效钾含量变化

注：数据为黑石科技园。同一时间小写字母不同表示不同生物炭用量间差异显著 ($P < 0.05$)。图3同。

图3是生物炭在中性黄壤上施用后，5年间各处理土样速效钾含量的变化结果。与黄棕壤的情况类似，从2018年6月到2022年10月底，由于受土壤水分、温度、作物对钾素的吸收和根系残留的钾素释放等的影响，土壤速效钾含量出现波动。从图3还可以看出，生物炭用量越大，土壤速效钾含量越高，这种趋势一直保持5年之久。同样地，生物炭用量5 t/hm²的处理与对照相比，土壤速效钾含量无显著差异。当生物炭用量为15、20和40 t/hm²时，土壤速效钾含量显著高于对照，且随着生物炭用量的增加，速效钾含量增加幅度越大，在生物炭施用后一年内这种增加效果最明显。2018年6月13日取样测定，生物炭用量为0、5、15、20、40 t/hm²的处理，土壤速效钾含量分别为192.3、241.4、339.6、483.2、621.3 mg/kg，比对照分别增幅25.53%、76.60%、151.27%、223.09%，总体来看，增幅比黄棕壤上的低。2019年6月后，这种增幅各处理均明显降低，且随后的增幅趋于稳定，4种生物炭用量处理增幅均值分别为4.18%、13.31%、23.30%、39.80%。在中性黄壤上，当炭用量为40 t/hm²时，速效钾提高幅度最大，生物炭施用的当年为223.09%，1年后增幅趋于稳定，最大增幅达39.80%。两种土壤比较，生物炭的增钾效应在偏酸性的黄棕壤上比中性黄壤上更好。

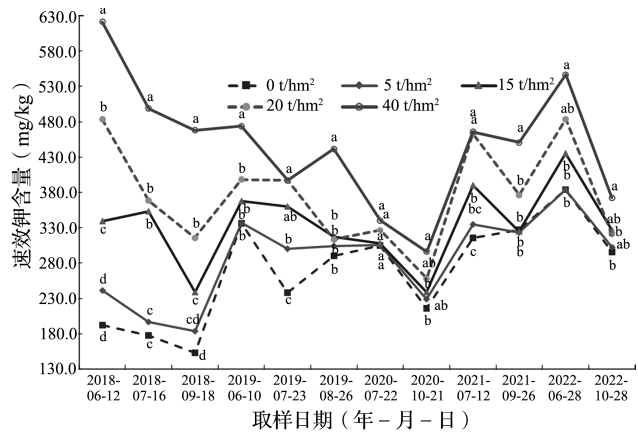


图3 生物炭施用后5年间土壤速效钾含量变化

注：数据为林泉科技园。

2.3 生物炭用量对烤烟生长的影响

表1是各生物炭用量处理下烤烟各部位干物质重量。可以看出，在偏酸性的黄棕壤上，随着生物炭用量的增加，烤烟根、茎、叶、地上部分、全

株、冠根比并无显著变化。在中性黄壤上，与对照相比，施用 5 和 15 t/hm² 生物炭的处理，烤烟根系干重显著增加，但当用量超过 20 t/hm² 时，干重与对照差异不显著。其他部位的干物质重，包

括茎、叶与对照差异不显著。以上说明，在中性黄壤上适量施用生物炭有促进烤烟根系发育的作用。

表 1 不同生物炭用量对烤烟各部位生物量的影响

试验地 土壤	炭用量 (t/hm ²)	干重 (g/株)					冠根比
		根	茎	叶	地上部	全株	
黑石黄棕壤	0	44.12 ± 0.73a	61.66 ± 2.84a	133.11 ± 13.18a	191.47 ± 17.35a	239.48 ± 16.09a	4.40 ± 0.30a
	5	44.29 ± 8.76a	52.63 ± 2.75a	144.48 ± 31.11a	196.41 ± 1.14a	240.69 ± 42.01a	4.51 ± 0.13a
	15	40.95 ± 2.24a	55.90 ± 8.81a	162.34 ± 10.40a	218.24 ± 17.49a	259.19 ± 19.72a	5.36 ± 0.47a
	20	46.21 ± 3.79a	56.60 ± 12.33a	161.47 ± 16.26a	218.07 ± 23.34a	264.28 ± 31.11a	4.68 ± 0.36a
	40	42.50 ± 3.20a	44.04 ± 6.04a	153.33 ± 26.15a	196.71 ± 10.16a	239.21 ± 29.21a	4.87 ± 1.10a
林泉黄壤	0	78.39 ± 3.48c	104.22 ± 10.12ab	256.76 ± 60.72a	358.98 ± 11.99a	439.37 ± 16.54a	4.62 ± 0.22a
	5	97.26 ± 14.25ab	112.79 ± 14.14a	259.12 ± 26.00a	369.90 ± 11.37a	469.17 ± 49.89a	3.99 ± 0.47ab
	15	99.96 ± 12.82a	113.19 ± 9.68a	250.45 ± 18.01a	363.64 ± 10.05a	463.60 ± 31.45a	3.73 ± 0.25b
	20	83.37 ± 10.83abc	92.81 ± 15.26b	257.70 ± 11.93a	350.51 ± 10.80a	433.88 ± 36.46a	4.32 ± 0.34ab
	40	79.94 ± 7.25bc	93.90 ± 6.77b	266.58 ± 17.58a	359.48 ± 15.36a	439.52 ± 28.12a	4.59 ± 0.39a

注：采样日期为 2019 年 7 月 24 日；表中数据为均值 ± 标准误；同一列同一土壤类型小写字母不同表示不同生物炭用量间存在显著差异 (P<0.05)。下同。

2.4 生物炭用量对烤烟不同部位钾吸收和积累的影响

烤烟根系钾含量和积累量结果见表 2。与对照相比，随着生物炭用量的增加，黄棕壤上种植的烤烟根系钾含量分别显著增加 0.13%、0.33%、0.60%、0.44%，增幅分别为 7.21%、18.41%、33.01%、24.28%。烤烟茎秆钾含量有增加的趋势，但未达到 5% 的显著水平。叶片钾含量显著增加，增加幅度分别为 9.69%、13.21%、19.42%、13.41%。钾的积累量

烤烟根系分别显著增加 8.24%、11.26%、39.28%、20.31%，叶片钾的积累量分别显著增加 16.16%、37.56%、44.61%、27.45%，根冠比各处理间差异未达到 5% 的显著水平。总之，在偏酸性的黄棕壤上施用生物炭，能显著增加烤烟根系对钾的吸收。当生物炭用量为 20 t/hm² 时，叶片钾含量和积累量增加幅度最大，分别为 19.42% 和 44.61% (表 2)。

表 2 不同生物炭用量对烤烟各部位钾含量和积累量的影响

试验地 土壤	炭用量 (t/hm ²)	含量 (%)			积累量 (mg/kg)				根冠比
		根	茎	叶	根	茎	叶	整株	
黑石黄 棕壤	0	1.80 ± 0.10c	2.53 ± 0.14a	2.62 ± 0.02b	794 ± 32b	1481 ± 111a	3478 ± 401b	5753 ± 440b	0.163 ± 0.020a
	5	1.93 ± 0.08bc	2.69 ± 0.23a	2.87 ± 0.21ab	859 ± 87ab	1511 ± 172a	4040 ± 349ab	6410 ± 504ab	0.154 ± 0.006a
	15	2.14 ± 0.21abc	2.92 ± 0.15a	2.96 ± 0.13ab	883 ± 131ab	1644 ± 214a	4784 ± 223ab	7311 ± 492ab	0.138 ± 0.021a
	20	2.40 ± 0.12a	2.87 ± 0.09a	3.13 ± 0.27a	1106 ± 49a	1627 ± 130a	5029 ± 707a	7762 ± 873a	0.170 ± 0.018a
	40	2.24 ± 0.05ab	2.80 ± 0.33a	2.97 ± 0.01ab	955 ± 101ab	1299 ± 63a	4432 ± 320ab	6686 ± 352ab	0.166 ± 0.015a
林泉 黄壤	0	1.50 ± 0.09c	2.74 ± 0.24a	2.18 ± 0.04a	1186 ± 135b	2744 ± 221ab	5661 ± 348a	9591 ± 477a	0.144 ± 0.023a
	5	1.56 ± 0.13c	2.75 ± 0.19a	2.40 ± 0.38a	1513 ± 165ab	3117 ± 334a	6142 ± 937a	10772 ± 1411a	0.166 ± 0.013a
	15	1.72 ± 0.08b	2.75 ± 0.05a	2.49 ± 0.07a	1709 ± 37a	3110 ± 142a	6232 ± 131a	11050 ± 304a	0.183 ± 0.001a
	20	1.75 ± 0.08b	2.71 ± 0.23a	2.51 ± 0.03a	1454 ± 44ab	2475 ± 26b	6465 ± 146a	10394 ± 156a	0.163 ± 0.006a
	40	1.82 ± 0.08a	2.92 ± 0.11a	2.54 ± 0.13a	1453 ± 77ab	2700 ± 31ab	6751 ± 296a	10904 ± 309a	0.154 ± 0.009a

注：采样日期为 2019 年 7 月 24 日；表中数据为均值 ± 标准误。

与黄棕壤上的烤烟类似, 在黄壤上烤烟根系钾含量也是随生物炭用量的增加而提高。当生物炭用量分别为 5、15、20、40 t/hm² 时, 根系钾含量分别显著增加 0.06%、0.21%、0.25%、0.32%, 增幅分别为 3.67%、14.17%、16.50%、20.97%。茎、叶钾含量有增加的趋势, 但未达到 5% 的显著水平。钾烤烟根部积累量分别显著增加 27.52%、44.01%、22.59%、22.50%, 其他部位钾的积累量也有一定的变化趋势, 但未达到 5% 的显著水平。总之, 施用不同用量的生物炭, 在中性的黄壤上能显著增加烤烟根系对钾的吸收, 当生物炭用量为 15 和 20 t/hm² 时, 根系钾含量和积累量增加幅度最大, 但对其他部位的效果不明显。

2.5 生物炭施用量对提高初烤烟叶钾含量的效果

卷烟工业一般要求烟叶钾含量在 2.0% 以上。国外优质烟叶如津巴布韦的烟叶钾含量在 3.0% 以上。在一定范围内, 提高烟叶钾含量, 对改善烟叶品质更有利。图 4 显示了 2022 年烤后烟叶钾含量随生物炭用量的变化情况。可以看出, 在偏

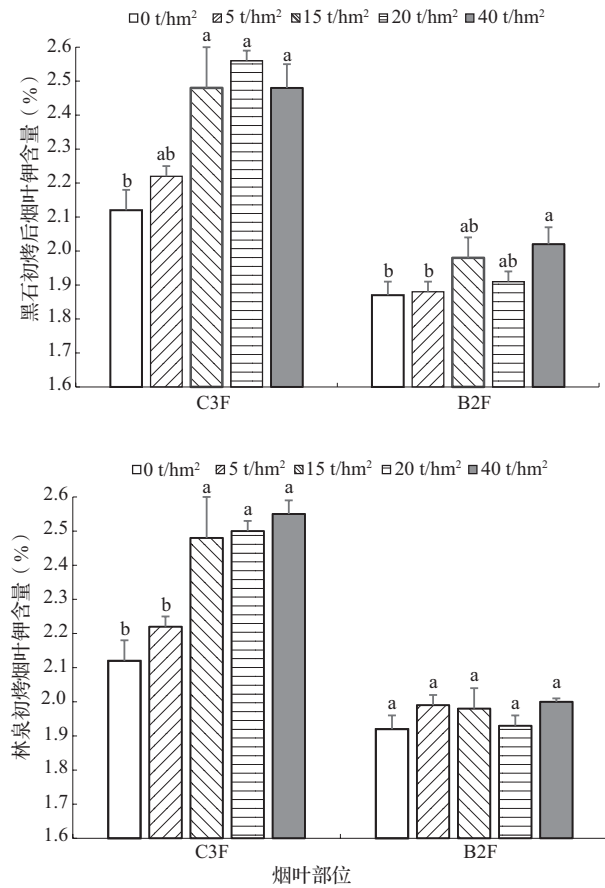


图 4 烤后烟叶钾含量随生物炭用量的变化

注: 数据为 2022 年。

酸性的黑石黄棕壤上, 施用生物炭显著提高了初烤烟叶钾含量。与对照相比, 当生物炭用量分别为 5、15、20、40 t/hm² 时, 中部叶 (C3F) 钾含量分别提高 0.10%、0.36%、0.44%、0.36%, 增幅分别为 4.72%、16.98%、20.75%、16.98%, 效果十分明显。当生物炭用量为 15 t/hm² 及以上时, 各处理间无显著差异, 与对照相比, 3 种生物炭用量处理中部叶 (C3F) 钾含量平均增加 0.39%, 增加幅度平均为 18.2%; 上部叶 (B2F) 钾含量也有一定增加, 但增幅不及中部叶 (C3F)。2019 年各用量处理烟叶中部叶 (C3F) 钾含量比对照分别增加 8.82%、6.62%、19.85%、16.91%; 2020 年分别增加 0%、3.14%、9.22%、1.76%; 2021 年分别增加 11.05%、13.68%、5.26%、14.74%, 3 年平均增幅分别为 6.17%、7.81%、11.44%、11.14%; 增幅趋势与 2022 年相同。

类似地, 在中性的林泉黄壤上, 与对照相比, 施用生物炭也显著提高了 2022 年初烤烟叶钾含量, 也是主要出现在中部叶 (C3F) 上, 烟叶钾含量在 3 种生物炭用量 15、20、40 t/hm² 处理间差异不显著。与对照相比, 3 种生物炭用量处理平均值, 中部叶钾含量也增加了 0.39%, 增加幅度平均为 18.4%; 上部叶 (B2F) 钾含量也有增加的趋势, 但未达到 5% 的差异显著水平。2019 年各用量处理烟叶 (B2F) 钾含量比对照分别增加 7.03%、10.16%、12.50%、21.88%; 2020 年增幅分别为 2.41%、0%、8.43%、7.83%; 2021 年增幅分别为 2.54%、1.18%、0.00%、2.54%, 3 年平均增幅分别为 3.99%、2.98%、6.98%、10.75%。2019 年各用量处理烟叶 (C3F) 钾含量比对照分别增加 1.79%、4.17%、6.55%、19.64%; 2020 年增幅分别为 8.18%、14.47%、20.75%、22.01%; 2021 年增幅分别为 3.74%、5.09%、10.78%、14.07%, 3 年平均增幅分别为 4.57%、7.91%、12.69%、18.58%, 总体增加幅度趋势与 2022 年类似。

总之, 在黄棕壤和黄壤上施用生物炭后, 初烤烟叶钾含量分别显著增加 0.390% 和 0.392%, 增幅分别为 18.2% 和 18.4%, 生物炭用量为 15、20、40 t/hm² 处理间无显著差异, 生产上为了节约成本, 生物炭用量为 15 t/hm² 较合适。

3 讨论

3.1 生物炭增加土壤速效钾含量及其机制

本研究表明, 随着生物炭用量的增加, 两种土

壤速效钾含量不断增加。这与笔者前期利用与本研究相同的生物炭,开展盆栽试验所得结果类似,发现在黄壤和黄棕壤上施用 1.0%、2.5%、5.0% 生物炭时,土壤交换性钾含量显著增加^[16]。类似的结果也有其他相关报道,包括土柱试验^[17]和长期定位田间试验^[18]。张红雪等^[7]在福建省红壤上将烟秆生物炭与化肥配施,发现土壤水溶性钾和交换性钾含量比单施化肥的处理分别提高 4.1 和 6.2 倍,这种效应可能与生物炭所带入的大量钾素有关。本研究所用的生物炭钾含量为 (6.12 ± 0.25) g/kg,按生物炭用量 15 t/hm² 计算,带入钾素为 (91.8 ± 3.8) kg/hm²。这些钾素大部分为可溶性和交换性钾,施用生物炭后它们会在短时间内释放^[19]进入土壤中。从机制上来看,土壤速效钾增加可能与生物炭表面特性有关。本研究所用的生物炭,CEC 高达 110 cmol/kg,再加上生物炭极其丰富的比表面,使大量的 K⁺ 被吸附积累,从而减少 K⁺ 的淋溶损失,使土壤速效钾含量明显增加;另外,高 CEC 可以增加土壤对 Al³⁺ 等阳离子的吸附,使得 K⁺ 进入层间穴位的更多,进而提高土壤速效钾含量^[20]。

本研究中,未施生物炭的对照黄棕壤和黄壤速效钾含量分别为 142 和 381 mg/kg,后者是前者的 2.68 倍,由于后者速效钾含量的本底更高,施用同样的生物炭,增加量就相对偏低。另外,黄棕壤上每株烤烟平均吸收钾元素 248.57 g,而黄壤上烤烟带走了更多的钾元素,平均每株 451.51 g (根据表 2 的数据计算),进一步造成了黄壤上各生物炭用量处理速效钾含量增幅较低。土壤速效钾含量随生物炭用量的增加而提高,从时间维度来看,在生物炭施用的当年效果最为明显。这可能与土壤对钾肥的最大吸附容量有关^[21]。在施用当年,从生物炭中释放的钾素,如果超过了最大吸附量,就容易被淋失掉。本试验中两种土壤速效钾提高程度不同,在偏酸性的黄棕壤上比中性的黄壤上提高幅度更大,这可能归因于土壤电荷特征,在偏酸性的黄棕壤中,表面带负电的离子更多^[22-23],吸附的钾离子也更多。

3.2 生物炭对烟叶的增钾效应及其机制

生物炭的施用显著提高了初烤烟叶的钾含量,使烟叶质量明显提高。这与柳开楼等^[24]的结论相似,在江西红壤上施用生物炭,烟叶钾含量增加 0.12% (绝对量),提钾效果较明显。这种效应主要与烤烟根系对钾素的吸收利用增强有关。王博等^[25]研究发现,生物炭使烤烟根系长度、根尖

数、表面积分别增加 31.1%、31.7%、56.0%;陈懿等^[26]也报道,烟田施用生物炭后,烤烟根系前期生长增强,根系体积和干质量显著提高。

生物炭的增钾效果在中部叶 (C3F) 和上部叶 (R2F) 的差异较大,中部叶效果更明显 (图 4)。究其原因,主要是烤烟中的钾主要是打顶后在根尖合成,运输到地上的不同部位^[1]。当中部叶采收时,烟叶已经充分成熟,积累了丰富的钾素^[27],因而中部叶钾含量较高。另外,中部叶生长和成熟的时间得到了保证,生物炭的增钾效果能得到充分体现,故各处理间差异明显;对上部叶而言,在贵州省毕节等南方烟区,往往由于天气原因,高温逼熟,烟农必须提前采收,生物炭的增钾效果不能充分体现,叶片未能充分吸收钾素,造成上部叶钾含量偏低,且处理间差异不明显的现象。

4 结论

(1) 在偏酸性的黄棕壤施用生物炭,当用量分别为每公顷 15、20、40 t 时,土壤速效钾含量 5 年平均分别显著提高 72.2%、127.3%、251.1%;在中性黄壤上分别显著提高 22.3%、31.9%、47.6%;

(2) 在偏酸性的黄棕壤上,生物炭施用的当年,当生物炭用量为 40 t/hm² 时,速效钾提高幅度最大,为 664.21%,1 年后增幅下降且趋于稳定,其余 4 年增幅平均达 82.36%;在中性黄壤上,当年增幅为 223.09%,1 年后增幅趋于稳定,平均增幅 39.80%。生物炭的增钾效应在偏酸性的黄棕壤上比中性黄壤上更明显;

(3) 生物炭的施用能显著增加初烤烟叶钾含量,两种土壤上增加幅度中部叶分别为 18.2% 和 18.4%;上部叶效果不及中部叶;

(4) 综合考虑,为了提高土壤速效钾和初烤烟叶钾含量,生物炭用量宜为每公顷 15 t。

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: 上海科技出版社, 2005.
- [2] 黄家庆, 叶菁, 陈彪, 等. 餐厨垃圾生物炭、炭基肥对种植芥菜土壤细菌群落结构的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022 (3): 182-192.
- [3] Dong X L, Singh B P, Li G T, et al. Biochar increased field soil inorganic carbon content five years after application [J]. Soil & Tillage Research, 2019, 186: 36-41.
- [4] 姚奇, 俞若涵, 张洪宇, 等. 生物炭施用对冬小麦农田土壤养分及作物产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022 (3): 68-74.
- [5] Agbede T M, Adekiya A O. Influence of biochar on soil

- physicochemical properties, erosion potential, and maize (*Zea mays* L.) grain yield under sandy soil condition [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, 51 (20): 2559–2568.
- [6] 史思伟, 姜翼来, 杜章留, 等. 生物炭的10年土壤培肥效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2018 (6): 16–22.
- [7] 张红雪, 吴凤英, 陈宇琳, 等. 烟秆生物炭对土壤不同形态钾含量及烟草光合特性的影响[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2022, 51 (4): 468–477.
- [8] Liu X Y, Ye Y X, Liu Y M, et al. Sustainable biochar effects for low carbon crop production: A 5–crop season field experiment on a low fertility soil from Central China [J]. *Agricultural Systems*, 2014, 129: 22–29.
- [9] 汪坤, 魏跃伟, 姬小明, 等. 生物炭基肥与哈茨木霉菌剂配施对烤烟和植烟土壤质量的影响[J]. *作物杂志*, 2021 (3): 106–113.
- [10] 张会民, 吕家珑, 李菊梅, 等. 长期定位施肥条件下土壤钾素化学研究进展[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35 (1): 155–160.
- [11] Hussain M, Farooq M, Nawaz A, et al. Biochar for crop production: potential benefits and risks [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17 (3): 685–716.
- [12] Dai Y H, Zheng H, Jiang Z X, et al. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: A meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136635.
- [13] Zhang J Q, Li C B, Li G T, et al. Effects of biochar on heavy metal bioavailability and uptake by tobacco (*Nicotiana tabacum*) in two soils [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2021, 317: 107453.
- [14] 张久权, 闫慧峰, 储继登, 等. 运用广义线性混合模型分析随机区组重复测量的试验资料[J]. *作物学报*, 2020, 47 (2): 294–304.
- [15] Littell R C, Milliken G A, Stroup W W, et al. SAS for Mixed Models [M]. Gary, NC, USA. SAS Institute Inc. 2006.
- [16] 李彩斌, 张久权, 何轶. 不同类型土壤上施用生物炭对烤烟氮钾养分积累的影响[J]. *农学学报*, 2023, 13 (9): 54–62.
- [17] Hossain M Z, Bahar M M, Sarkar B, et al. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant [J]. *Biochar*, 2020, 2 (4): 379–420.
- [18] Wang X B, Song D L, Liang G Q, et al. Maize biochar addition rate influences soil enzyme activity and microbial community composition in a fluvo-aquic soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 96: 265–272.
- [19] 丛铭, 张梦阳, 夏浩, 等. 施用生物炭对红壤中不同形态钾含量及小白菜生长的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39 (4): 22–28.
- [20] 梁成华, 魏丽萍, 罗磊. 土壤固钾与释钾机制研究进展[J]. *地球科学进展*, 2002 (5): 679 – 684.
- [21] 彭启超, 刘小华, 罗培宇, 等. 不同原料生物炭对氮、磷、钾的吸附和解吸特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (10): 1763–1772.
- [22] 廖丽霞, 胡红青, 贺纪正. 中南地区几种地带性土壤表面电荷特性与pH的关系[J]. *华中农业大学学报*, 2005, 24 (1): 29–32.
- [23] 王代长, 蒋新, 贺纪正, 等. 应用 Multi-Langmuir 模型评价土壤的表面电荷特性[J]. *土壤学报*, 2009, 46 (4): 611–616.
- [24] 柳开楼, 胡惠文, 叶会财, 等. 红壤区施用稻草源生物炭对烟叶钾含量的影响[J]. *热带作物学报*, 2018, 39 (12): 2350–2354.
- [25] 王博, 刘扣珠, 任天宝, 等. 减氮条件下生物炭对烤烟根系发育及土壤微生物群落的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021 (3): 45–50.
- [26] 陈懿, 陈伟, 高维常, 等. 烟秆生物炭对烤烟根系生长的影响及其作用机理[J]. *烟草科技*, 2017, 50 (6): 26–32.
- [27] 赵正雄, 杨宇虹, 张福锁, 等. 不同顶端调控措施对烟株内钾素积累和分配规律的影响[J]. *烟草科技*, 2002 (6): 37–39.

Long term effects of biochar rate on soil available potassium content and potassium uptake in tobacco leaves

LI Cai-bin¹, ZHANG Jiu-quan^{2*}, HE Yi¹, ZHOU Xiang³, HOU Xiao-yan², LI Peng-zhi¹, WANG Yu-chuan¹ (1. Bijie Tobacco Company of Guizhou Province, Bijie Guizhou 551700; 2. Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qingdao Shandong 266101; 3. Yichang Tobacco Company of Hubei Province, Yichang Hubei 443000)

Abstract: In order to investigate the long-term effects of biochar application rate on soil available potassium and tobacco potassium contents, two 5-year positional experiments were conducted in Bijie City, Guizhou Province. A randomized block design with single factor (biochar application rate at 0, 5, 15, 20, 40 t/hm²) was used in this study. The results showed that the increment in soil available potassium content was the highest in the first year after biochar application, which was 664.21% and 223.09% in two soils, respectively, and then stabilized, with a 5-year average of 82.36% and 39.80%, respectively. Compared with the control (no biochar), 5-year average increase of available potassium content was 72.2% and 127.3%, 251.1% and 22.3%, 31.9%, 47.6% for the two soils, respectively, when the biochar application rate was 15, 20 and 40 t/hm². In the meantime, total potassium content in tobacco leaves increased by 18.2% and 18.4% for the two soils, respectively. The results of these 5-year field experiments showed that the best biochar application rate was 15 t/hm² for these two soils in order to increase the soil available potassium content and cured leaf potassium content. In conclusion, the application of biochar could significantly increase the soil available potassium content and cured leaf potassium content.

Key words: biochar; tobacco; potassium; yellow soil; yellow-brown soil