

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.04.017

黄容, 王永豪, 王昌全, 等. 凉攀区植烟土壤酚酸类物质的含量分布和变异特征. 土壤, 2021, 53(4): 794–801.

凉攀区植烟土壤酚酸类物质的含量分布和变异特征^①

黄容¹, 王永豪¹, 王昌全¹, 石松柏², 陈玉蓝³, 李冰^{1*}, 王勇^{3*}

(1 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2 四川省烟草公司攀枝花市公司, 四川攀枝花 617099; 3 四川省烟草公司凉山州公司, 四川西昌 615000)

摘要: 以四川凉攀区植烟土壤为研究对象, 研究了不同海拔高度、土壤类型、植烟年限和前茬作物下植烟土壤酚酸类物质的含量分布和变异特征。结果表明: ①植烟过程显著增加了土壤酚酸类物质的累积, 变异系数均超过了 50%, 单类酚酸物质中以对羟基苯甲酸的含量最高(66.18 μg/g); ②除阿魏酸、肉桂酸外, 1 600~2 000 m 海拔高度的植烟土壤中酚酸类物质含量高于 1 200~1 600 m 海拔高度; 海拔高度超过 2 000 m 后, 土壤酚酸类物质(除水溶性酚外)的含量反而下降。③植烟水稻土酚酸类物质含量高于紫色土和红壤; 对同一土壤不同区域而言, 仁和区红壤的总酚和复合态酚平均含量和变异系数均明显高于盐源县, 平均含量增幅分别为 10.23% 和 20.51%。④植烟土壤酚酸类物质含量明显高于非植烟土壤, 除土壤水溶性酚以及会东县土壤的苯甲酸、肉桂酸平均含量的最大值均在植烟年限为 1~3 a 的土壤外, 该烟区土壤的酚酸类物质含量随植烟年限的增加呈增加趋势。⑤前茬未种植作物时(即冬闲), 植烟土壤酚酸类物质含量较高, 促进了酚酸类物质的累积; 光叶紫花苕为前茬作物时, 对植烟土壤酚酸类物质有一定的消解作用, 降低了土壤中酚酸类物质的累积, 尤其对总酚、复合态酚和对羟基苯甲酸的消解作用最为明显。总体上, 海拔高度较低、种植年限较短、前茬作物为光叶紫花苕的红壤中酚酸类物质含量较低, 因此在凉攀区, 在红壤中种植光叶紫花苕这类绿肥可以消减植烟土壤酚酸类物质的累积。

关键词: 植烟土壤; 化感作用; 酚酸类物质; 连作障碍

中图分类号: S15 **文献标志码:** A

Content Distributions and Variations of Phenolic Acids in Tobacco-planting Soils of Liangpan Region, Sichuan Province

HUANG Rong¹, WANG Yonghao¹, WANG Changquan¹, SHI Songbai², CHEN Yulan³, LI Bing^{1*}, WANG Yong^{3*}

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Panzhihua Branch of Sichuan Tobacco Corporation, Panzhihua, Sichuan 617000, China; 3 Liangshan Branch of Sichuan Tobacco Corporation, Xichang, Sichuan 615000, China)

Abstract: In this paper, the content distributions and variations of phenolic acids in tobacco-planting soils with different altitudes, planting years, soil types and preceding crops in Liangpan region in Sichuan Province were studied. The results showed that tobacco-planting significantly increased the contents of soil phenolic acids with the variation coefficients all high than 50%, and the content of hydroxybenzoic acid was the highest (66.18 μg/g) among all monomer phenolic acids. The contents of phenolic acids (except ferulic acid and cinnamic acid) in tobacco-planting soil at the altitude of 1 600–2 000 m were higher than those of 1 200–1 600 m. However, the contents of phenolic acids in tobacco-planting soils were reduced (except for water soluble phenolic) when the altitude was over 2 000 m. The average content of phenolic acids in paddy soil was higher than those in purple soil and red soil. The average contents and variable coefficients of total and compound phenols in red soil in Renhe District were significantly higher than those in Yanyuan County, 10.23% and 20.51% higher, respectively. The average contents of phenolic acids were significantly higher in tobacco-planting soils than non-tobacco-planting soils, and the contents of phenolic acids increased with tobacco-planting years (with few exceptions including water soluble phenolic, benzoic acid (Huidong County) and cinnamic acid (Huidong County)). The average content of phenolic acids was higher in tobacco-planting soils without preceding

①基金项目: 四川省科技厅应用基础重大前沿项目(2018JY0002)和四川省烟草公司科技项目(SYC201705; LSYC201801)资助。

* 通讯作者(benglee@163.com; 690467791@qq.com)

作者简介: 黄容(1989—), 女, 福建福州人, 博士, 讲师, 主要从事土壤质量与农产品安全方面的研究。E-mail: 277840241@qq.com

crop (i.e., winter fallow), which promoted the accumulation of phenolic acids in soils. However, vicia villosa as preceding crop consumed phenolic acids and therefore reduced the accumulation of phenolic acids in tobacco-planting soil, especially for the total phenols, compound phenols and hydroxybenzoic acid. Overall, red soil at lower altitude with shorter planting years and vicia villosa as preceding crop could result in lower contents of phenolic acids, therefore, tobacco should be planted in red soils with vicia villosa as preceding crop in Liangpan region.

Key words: Tobacco-planting soil; Allelopathy; Phenolic acids; Successive cropping obstacle

酚酸类物质是单一连作根际分泌物中重要的化感物质,可通过直接的自毒作用或者间接的抑制作用或促进作用影响土壤微生物的群落结构,从而影响作物的生长^[1-2]。研究表明,连作条件下酚酸可以间接刺激土传病原微生物繁殖,增加植株发病率^[3-5]。目前对酚酸类物质的累积特征在水稻、大豆、花生、黄瓜等植物中已有研究^[6-9],而对连作植烟土壤中酚酸类物质种类和含量的研究较少。烤烟是典型的忌连作物,长期连作会严重影响烤烟的生长发育及产质量形成^[10-11],但目前烤烟作物连作现象仍旧普遍^[12]。烤烟连作会导致土壤中酚酸类物质累积、植烟土壤酸化和养分失衡^[13],同时也是引起青枯病爆发流行的原因之一^[14]。白羽祥等^[15]以不同连作年限的植烟土壤为研究对象,探讨了土壤主要环境因子对酚酸类物质的影响,表明连作植烟土壤酚酸类物质具有明显累积特征,且土壤理化性质、酶活性和细菌多样性对酚酸类物质的积累存在显著的影响,其中对羟基苯甲酸和阔马酸受到较大的影响。海拔高度、土壤类型、前茬作物等差异也会通过影响土壤生物环境,进而引起植烟土壤酚酸类物质的累积变化,但目前对此类环境因子影响的研究较少。因此,本研究以四川省烤烟主产区——凉攀区土壤为研究对象,探讨了不同海拔高度、土壤类型、种植年限、前茬作物下植烟土壤酚酸类物质的变化特征,旨在为研究酚酸类物质在连作障碍中的作用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以凉攀烟区三大典型生态烤烟种植区(凉山盐源县、凉山会东县、攀枝花仁和区)为研究区。其中,盐源县(100°42'~102°03' E, 27°06'~28°16' N)隶属凉山彝族自治州,位于青藏高原南缘,雅砻江下游西岸,地形以四周高山峡谷、中部丘陵盆地为主的总特征;海拔为1 200~4 393 m,属高寒气候区,受古气候影响,土壤风化较深,以高原红壤较为典型,年温差小,日温差大,全年无霜期201 d,最低温度-11.3℃;县境光照充足,雨热同期,春冬干旱少雨,夏秋雨量集

中,年均降水量855.2 mm,具有“一山分四季,十里不同天”的典型立体气候特征。会东县(102°13'~103°3' E, 26°12'~26°55' N)隶属凉山彝族自治州,位于四川省凉山彝族自治州南端,地处横断山脉南部褶皱山中切割地带,地形复杂,高差悬殊,整个地势中部高、西部缓展、北部绵延、东南陡峭;海拔为640~3 332 m,属亚热带季风性湿润气候,山地立体气候明显,河谷、山地气候差异显著,土壤风化较浅,日照充足,无霜期长,气候温和,雨热同季,多年平均气温16.2℃。仁和区(101°24'~101°56' E, 26°06'~26°47' N)地处康滇南北向构造带中段西侧、攀西大裂谷,位于川滇交界处;地势总体呈西北-东南倾斜,以山地为主,海拔最低为937 m;属南亚热带立体气候,土壤风化较深,气候干燥,日照时间长,四季不分明,昼夜温差大,年平均气温20.4℃,年积温达7 450℃,年日照时数达2 745 h,无霜期300 d以上。

1.2 样品采集

综合考虑土壤类型、地貌类型、海拔、前茬作物等因素对凉攀生态烟区进行土壤样点的布设,其中海拔高度涉及1 200~1 600、1 600~2 000、2 000~2 400 m;前茬作物涉及光叶紫花苕、大麦、黑麦草、油菜和冬闲;植烟年限涉及<1(即非植烟土壤)、1~3、4~6 a;土壤类型涉及红壤、水稻土和紫色土。

根据田块形状,采用“S”法或五点法,在同一采样单元内布设表层(0~20 cm)植烟土壤样点,同时每个区域采集非植烟土壤作为对照土壤,取5~8个点的土样混合成1个土样,分别在盐源县采集128个(其中,对照土壤5个)、会东县采集126个(其中,对照土壤12个)、仁和区采集81个(其中,对照土壤10个),共计335个土样,采样时同时记录样点详细信息。采集的土样一部分在4℃下保存鲜样,测定各单类酚酸含量;另一部分自然风干后,用于测定土壤总酚、水溶性酚、复合态酚含量。

1.3 测定项目及方法

土壤总酚、水溶性酚、复合态酚含量:称取风干土样,分别用H₂SO₄、无酚水、NaOH溶液提取土壤总酚、水溶性酚、复合态酚,采用福林试剂显色法,

测定土壤中酚类物质含量^[16]。

土壤单类酚酸含量：称取鲜样，用 NaOH 溶液提取后，采用高效液相色谱仪(美国 Waters)测定其含量^[17]。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2019、SPSS19.0、Origin 8.5 和 DPS v6.55 等软件进行数据处理、方差分析、相关性分析和回归分析。影响因素分析采用域值法将异常值的样点去掉，对剩余正常土壤样点数值进行分析。以土壤类型、地貌类型为定性分类变量，对海拔高度、

植烟年限进行分段，采用哑变量赋值，再用哑变量来区别需比较的不同组，拟合多重回归模型。

2 结果分析

2.1 不同区域植烟土壤酚酸类物质含量特征

从表 1 可以看出，凉攀烟区植烟土壤酚酸类物质的平均含量明显高于非植烟土壤，其中植烟土壤总酚含量是非植烟土壤的 4.2 倍，可见，植烟过程显著增加了土壤中酚酸类物质的累积。在单类酚酸中，对羟基苯甲酸的含量最高，植烟土壤为 66.18 $\mu\text{g/g}$ 。

表 1 凉攀烟区植烟土壤酚酸类物质含量特征
Table 1 Contents of phenolic acids in tobacco-planting soil of Liangpan area

土壤	指标	总酚	复合态酚	水溶性酚	对羟基苯甲酸	阿魏酸	苯甲酸	肉桂酸	香草酸
植烟土壤	平均值($\mu\text{g/g}$)	2 618.98	1 213.32	135.9	66.18	30.14	12.28	2.8	1.85
	CV(%)	84.12	78.21	71.3	58.93	73.99	54.99	50.27	68.54
非植烟土壤	平均值($\mu\text{g/g}$)	503.74	198.02	30.97	17.33	7.64	2.49	0.76	0.25
	CV(%)	55.73	47.55	60.72	43.88	38.69	50.31	32.9	21.8

在不同区域植烟土壤中(图 1A)，会东县的土壤总酚(2 521 $\mu\text{g/g}$ ，92.83%)、复合态酚(2 699 $\mu\text{g/g}$ ，80.04%)和水溶性酚(2 614 $\mu\text{g/g}$ ，74.32%)含量的平均值和变异系数均高于盐源县和仁和区，其中土壤总酚含量的最高值(4 463 $\mu\text{g/g}$)出现在盐源县，而最低值(527 $\mu\text{g/g}$)出现在会东县；土壤复合态酚含量的最高值和最低值均出现在盐源县，分别为 4 427 和 1 545 $\mu\text{g/g}$ ；土壤水溶性酚含量的最高值(311 $\mu\text{g/g}$)出现在仁和区，而最低值(54 $\mu\text{g/g}$)在盐源县。对单类酚酸物质而言(图 1B ~ 图 1F)，盐源县的的对羟基苯甲酸平均含量最高，为 67.28 $\mu\text{g/g}$ ，分别较仁和区和会东县增加了 4.93% 和 1.47%；仁和区的阿魏酸平均含量最高(37.10 $\mu\text{g/g}$)，且离散程度也高于其他两个县；会东县的苯甲酸平均含量和离散程度均最大，其中平均含量较最低的仁和区增加了 1.19 $\mu\text{g/g}$ ；3 个区域的肉桂酸和香草酸的平均含量差异并不显著，且离散程度较小。

2.2 不同海拔高度植烟土壤酚酸类物质含量特征

根据凉攀烟区的海拔高度情况，筛选相同土壤类型、植烟年限、前茬作物及不同海拔高度的样点进行分析，结果见表 2。从表 2 可以看出，在盐源县，随着海拔高度的增加，植烟土壤总酚、复合态酚、对羟基苯甲酸、甲苯酸和香草酸平均含量呈先增加后减少的趋势，均在海拔 1 600 ~ 2 000 m 处达到最高值，阿魏酸和肉桂酸随海拔高度的增加呈下降趋势，水溶性酚含量则呈相反的变化趋势。在会东县，海拔

1 200 ~ 1 600 m 处的植烟土壤酚类物质(总酚、复合态酚、水溶性酚)、对羟基苯甲酸、苯甲酸和香草酸平均含量低于海拔 1 600 ~ 2 000 m 处。在同一海拔高度段，盐源县 1 200 ~ 1 600 m 海拔处的土壤酚类物质平均含量均显著高于会东县($P < 0.05$)，对于单类酚酸，会东县 1 200 ~ 1 600 m 海拔处的香草酸平均含量较盐源县显著增加了 16.1%($P < 0.05$)，而其他单类酚酸不存在显著差异；在 1 600 ~ 2 000 m 海拔高度，除阿魏酸、肉桂酸和香草酸外，盐源县的土壤酚酸类指标的平均含量均高于会东县。

2.3 不同土壤类型植烟土壤酚酸类物质含量特征

筛选相同海拔高度、植烟年限、前茬作物及不同土壤类型的样点进行分析，结果见表 3。从表 3 可知，在盐源县，水稻土的总酚、复合态酚、对羟基苯甲酸、苯甲酸平均含量均高于红壤；除对羟基苯甲酸外，其他指标的平均含量在水稻土和红壤间差异均达到显著水平($P < 0.05$)。在仁和区，水稻土的总酚、复合态酚和对羟基苯甲酸平均含量高于红壤和紫色土，紫色土的水溶性酚、苯甲酸和肉桂酸平均含量高于水稻土和红壤，而阿魏酸和香草酸平均含量的最大值均出现在红壤，其次是水稻土和紫色土。对于不同区域同一土壤，仁和区红壤的总酚和复合态酚平均含量明显高于盐源县，增幅分别为 10.23% 和 20.51%($P < 0.05$)，而仁和区红壤的水溶性酚、阿魏酸和肉桂酸平均含量明显低于盐源县；水稻土酚酸类物质平均含量表现为盐源县 > 仁和区。

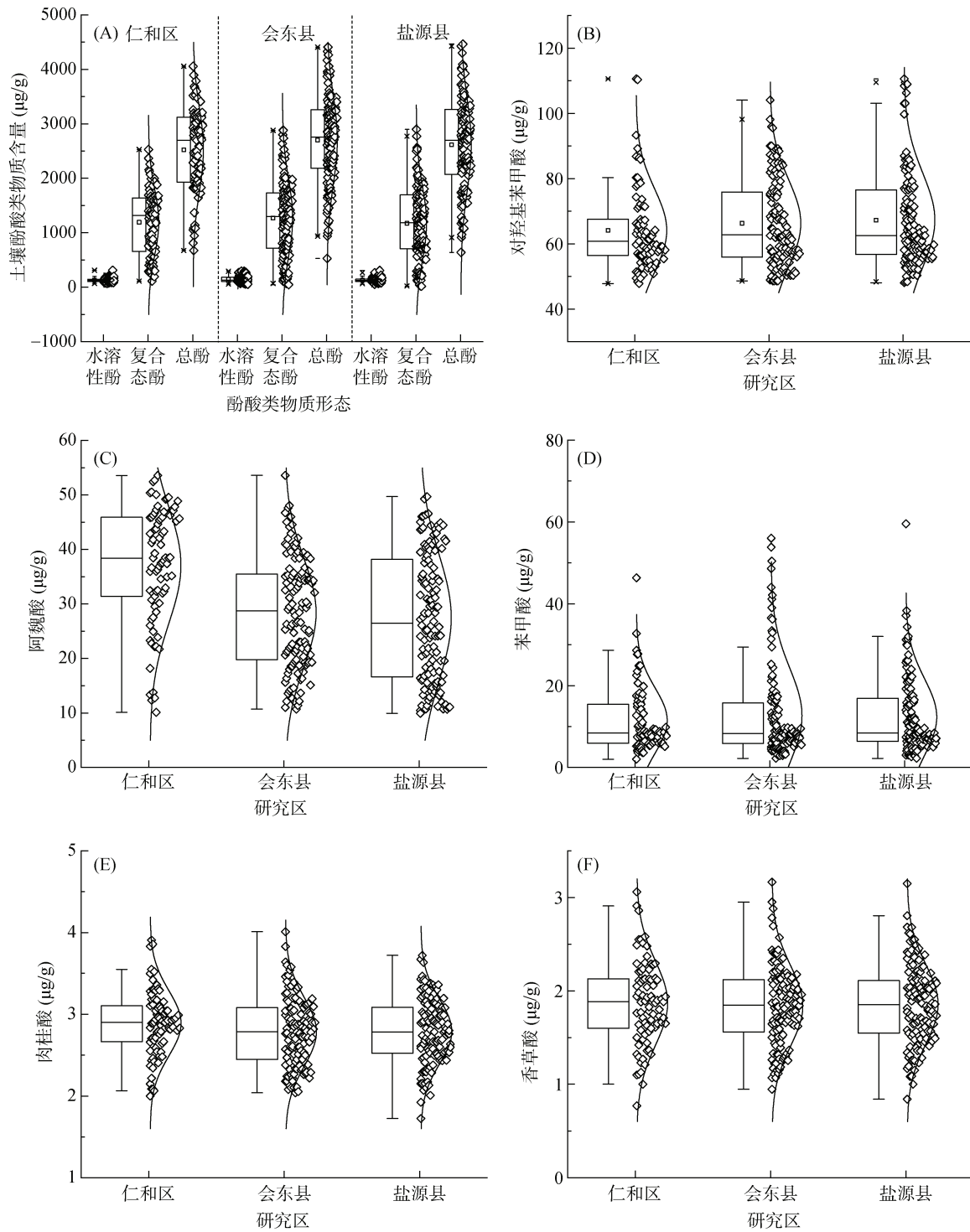


图 1 不同区域植烟土壤酚类物质和单类酚酸含量箱式图

Fig.1 Contents of phenolic acids and monomer phenolic acids in tobacco-planting soils in different regions

2.4 不同植烟年限植烟土壤酚酸类物质含量特征

通过筛选相同土壤类型、海拔高度、前茬作物及不同植烟年限的样点进行分析,发现非植烟土壤(植烟年限<1 a)酚酸类物质平均含量均显著低于植烟年限>1 a的植烟土壤($P<0.05$, 图 2);随着植烟年限的增加,会东县和仁和区的植烟土壤总酚、复

合态酚、对羟基苯甲酸、阿魏酸、香草酸平均含量呈增加趋势,且仁和区高于会东县。对于水溶性酚(图 2C),植烟年限为 1~3 a 的土壤水溶性酚平均含量均显著高于其他植烟年限,且植烟年限>1 a 的土壤水溶性酚表现为会东县>仁和区,增幅为 4.7%~8.5%。会东县的植烟土壤苯甲酸和肉桂酸平均含量

的最大值均在植烟年限 1~3 a, 分别为 12.06 $\mu\text{g/g}$ 和 3.21 $\mu\text{g/g}$; 而仁和区平均含量的最大值均在植烟

年限 4~6 a, 分别为 12.58 $\mu\text{g/g}$ 和 3.52 $\mu\text{g/g}$ (图 2F~图 2G)。

表 2 不同海拔下植烟土壤酚酸类物质含量($\mu\text{g/g}$)
Table 2 Contents of phenolic acids in different tobacco-planting soils at different altitudes

指标	盐源县			会东县	
	1 200~1 600 m	1 600~2 000 m	2 000~2 400 m	1 200~1 600 m	1 600~2 000 m
总酚	2 769.35 c	2 930.48 a	2 291.31 d	2 357.84 d	2 804.52 b
复合态酚	1 179.64 bc	1 346.08 a	1 276.35 b	854.97 d	1 045.27 c
水溶性酚	131.74 b	134.15 ab	149.23 a	114.62 c	125.76 bc
对羟基苯甲酸	61.97 bc	68.54 a	66.32 ab	56.09 c	66.07 ab
阿魏酸	38.51 ab	32.06 b	29.38 bc	40.32 a	34.47 b
苯甲酸	11.07 bc	14.28 a	13.75 ab	9.39 c	12.91 b
肉桂酸	2.86 ab	2.39 b	2.27 bc	3.21 a	2.51 b
香草酸	1.49 b	1.51 ab	1.24 bc	1.73 a	1.82 a

注: 表中同行不同小写字母表示同一指标含量在不同样点间存在显著差异($P<0.05$); 下同。

表 3 不同土壤类型下植烟土壤酚酸类物质含量($\mu\text{g/g}$)
Table 3 Contents of phenolic acids in different tobacco-planting soil types

指标	盐源县		仁和区		
	红壤	水稻土	红壤	水稻土	紫色土
总酚	2 142.37 c	2 885.39 a	2 386.57 b	2 754.26 ab	2 678.51 b
复合态酚	943.21 d	1 632.47 a	1 186.53 c	1 603.78 ab	1 254.78 b
水溶性酚	140.75 a	119.51 c	128.65 b	109.58 d	135.09 ab
对羟基苯甲酸	66.52 ab	68.74 a	63.14 bc	66.25 ab	62.39 c
阿魏酸	33.72 a	30.74 b	30.19 b	28.19 bc	28.06 c
苯甲酸	9.47 c	12.91 a	10.37 bc	11.37 b	11.58 b
肉桂酸	3.17 a	2.84 ab	2.69 c	2.75 bc	2.81 b
香草酸	1.97 ab	1.83 b	1.98 a	1.80 bc	1.74 c

2.5 不同前茬作物植烟土壤酚酸类物质含量特征

分别筛选相同海拔高度、土壤类型、植烟年限及不同前茬作物的样点进行分析, 结果如表 4 所示。盐源县的前茬作物主要为光叶紫花苜和大麦、会东县的前茬作物主要为黑麦草和冬闲类型、仁和区的前茬作物主要为光叶紫花苜和油菜。从表 4 可以看出, 在盐源县, 除肉桂酸外, 前茬作物为大麦的土壤酚酸类物质的平均含量均高于前茬作物为光叶紫花苜的土壤, 其中苯甲酸增加了 23.33%; 在会东县, 未种植作物(即冬闲)的土壤酚酸类物质的平均含量均高于前茬作物为黑麦草的土壤, 除对羟基苯甲酸含量二者差异未达显著水平外, 其他指标均存在显著差异($P<0.05$); 在仁和区, 除肉桂酸外, 前茬作物为油菜的土壤酚酸类物质的平均含量均高于前茬作物为光叶紫花苜的土壤。总体上, 土壤酚酸类物质(除对羟基苯甲酸外)平均含量的最高值均出现在前茬为冬闲的土壤, 而前茬作物为光叶紫花苜的土壤酚酸类物质的平均含量相对较低。

2.6 植烟土壤酚酸类物质的影响因素

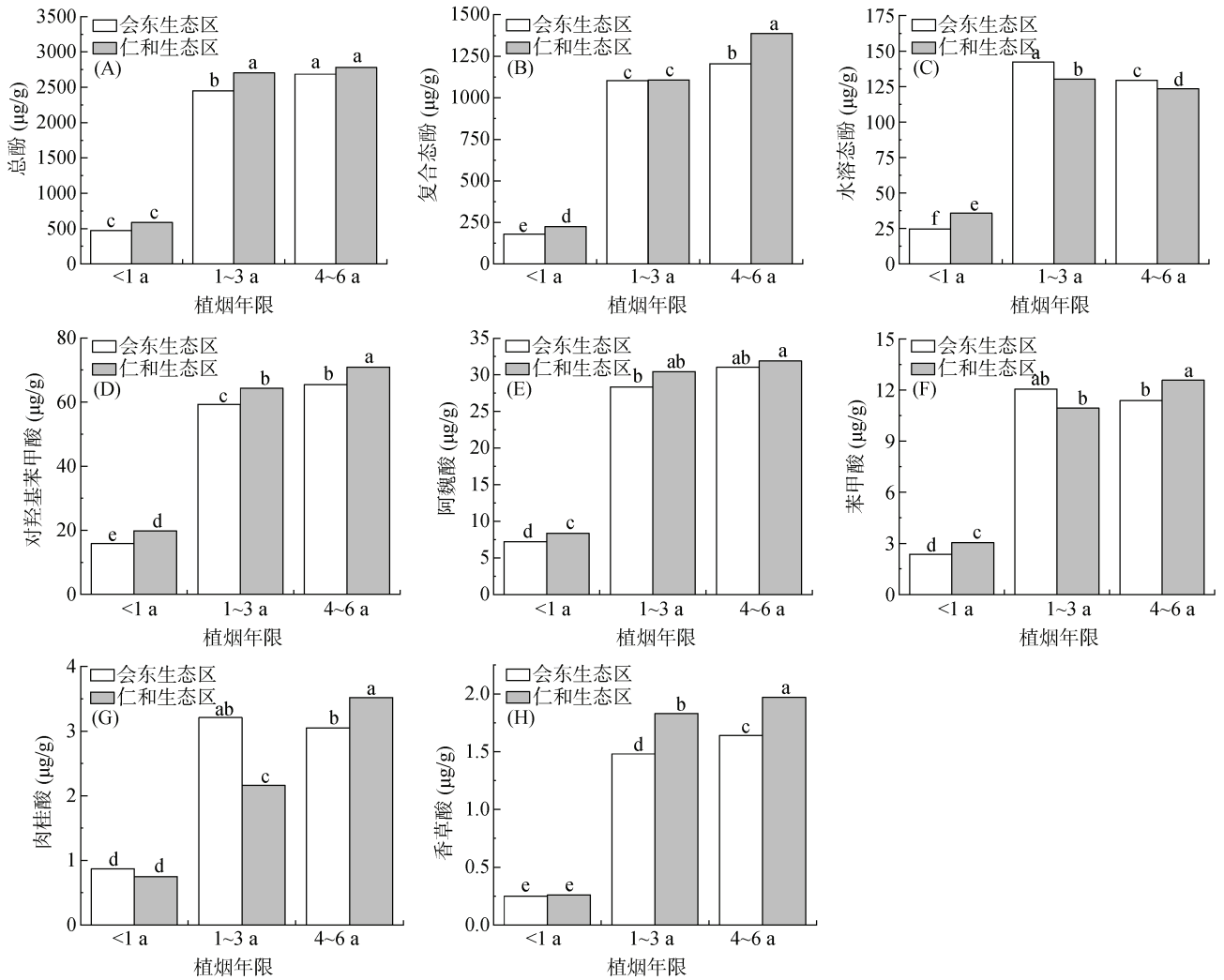
从表 5 可以看出, 植烟年限和前茬作物对土壤酚酸类物质各指标含量存在显著的影响($P<0.05$ 或 $P<0.01$), 其中植烟年限对对羟基苯甲酸含量的决定系数最高, 为 0.179, 前茬作物对肉桂酸的决定系数最高, 为 0.155; 海拔高度对除香草酸外的其他土壤酚酸类物质存在显著的影响; 土壤类型除对肉桂酸影响不显著外, 对其他酚酸类物质均存在显著的影响。

3 讨论

植物在生长发育过程中会产生酚酸类化感物质, 通过有效的途径进入土壤后产生化感作用, 从而改变土壤环境, 最终影响植物生长。已有研究表明, 光照和水分会影响植物化感物质的产生和传播途径, 通常高温、强光照增强了植物体内生理生化代谢, 促进了碳水化合物的代谢和酶活性的增加, 从而有利于化感物质的累积, 同时干旱环境会增强植物体内挥发性化感物质的释放, 而多雨环境则会增加化感物质的

淋溶^[18-19]。本研究中，凉攀三大植烟区土壤酚酸类化感物质含量存在差异，这可能是由不同环境特征所导致的。盐源县属高寒气候，呈冬春干旱、夏秋雨量集中、雨热同季、日照充足的环境特征，因此受到夏

秋季节高温、强光照的环境胁迫，在一定程度上促进了酚酸类物质的形成和累积，因此在盐源县应重视夏秋烟区管理，以减少植烟土壤酚酸类物质的释放，促进烤烟生长发育；仁和区属中亚热带季风气候，



(图中不同小写字母表示不同样点间差异显著($P < 0.05$))

图 2 不同植烟年限下植烟土壤酚酸类物质

Fig. 2 Contents of phenolic acids in tobacco-planting soils with different planting years

表 4 不同前茬作物下植烟土壤酚酸类物质含量($\mu\text{g/g}$)

Table 4 Contents of phenolic acids in tobacco-planting soils with different preceding crops

指标	盐源县		会东县		仁和区	
	光叶紫花苕	大麦	黑麦草	冬闲	光叶紫花苕	油菜
总酚	1 974.15 e	2 379.86 c	2 407.85 b	3 116.24 a	2 087.35 de	2 307.84 d
复合态酚	1 001.46 de	1 213.59 c	1 255.37 b	1 376.58 a	987.66 e	1 175.4 d
水溶性酚	105.37 e	117.08 c	115.32 cd	138.59 a	114.68 d	132.46 b
对羟基苯甲酸	55.06 d	62.73 c	68.35 b	68.96 b	58.42 d	72.54 a
阿魏酸	31.75 c	32.09 bc	28.64 d	36.95 a	30.54 cd	34.37 b
苯甲酸	10.59 d	13.06 b	12.09 c	14.65 a	11.09 cd	13.74 b
肉桂酸	3.06 ab	2.39 d	2.58 c	3.13 a	2.74 b	2.61 bc
香草酸	1.58 d	1.61 d	1.63 bc	1.94 a	1.67 c	1.74 b

表 5 不同影响因素对土壤酚酸类物质含量的决定系数
Table 5 Determine coefficients of different factors on soil phenolic acids

指标	海拔高度	植烟年限	土壤类型	前茬作物
总酚	0.021*	0.131**	0.116**	0.048*
复合态酚	0.073**	0.074**	0.127**	0.061**
水溶性酚	0.054**	0.028*	0.151**	0.093**
对羟基苯甲酸	0.085**	0.179**	0.101**	0.061**
阿魏酸	0.039*	0.094**	0.082*	0.132**
苯甲酸	0.025*	0.027*	0.049*	0.054*
肉桂酸	0.074**	0.009*	0.005	0.155**
香草酸	0.009	0.071**	0.093**	0.101**

注：“*”和“**”分别表示不同因素对酚酸类物质的影响在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著。

气温高且降雨多，高温促进了酚酸类物质的形成，降雨产生的淋溶作用会促使酚酸类物质向土壤深层扩散，从而降低了根系主要生长区域的酚酸类物质含量^[20-21]；会东县属南亚热带季风气候，且地处河谷地带，相较于其他两个植烟区，气候和降雨相对稳定，因此会东县的土壤酚酸类物质累积不明显，且变异系数小。

海拔高度的变化会引起温度、降雨的变化，从而影响植烟土壤中酚酸类物质含量的变化。本研究中，在一定海拔高度范围内(1 200 ~ 2 000 m)，盐源和会东烟区土壤的总酚、复合态酚、水溶性酚、对羟基苯甲酸、苯甲酸和香草酸平均含量均随海拔升高而增加，这可能是因为海拔升高后，光照的增强促进了这类酚酸类物质的累积；而当海拔高度超过 2 000 m 时，隶属高寒气候的盐源县植烟土壤中总酚、复合态酚、对羟基苯甲酸、苯甲酸和香草酸平均含量开始降低，可见海拔超过一定高度后，不利于此类土壤酚酸类物质的形成和累积。此外，本研究中，阿魏酸和肉桂酸含量随着海拔的升高(1 200 ~ 2 400 m)呈下降趋势，而水溶性酚呈升高趋势，可见高海拔不利于阿魏酸和肉桂酸的积累，但有利于水溶性酚的积累。已有研究表明，随着连作年限的增加，酚酸类物质在烤烟土壤或水稻、黄瓜、花生等土壤中会表现出富集效应^[6, 8, 13]。白羽祥等^[15]利用高效液相色谱在不同种植年限的植烟土壤中检测出 8 种酚酸类物质，其中间苯三酚、阔马酸、对羟基苯甲酸、丁香酸、阿魏酸、香兰素的含量和酚酸类物质总含量均随着连作年限的延长而表现出增加趋势。本研究中，随着植烟年限的增加，植烟土壤总酚、复合态酚、对羟基苯甲酸、阿魏酸、香草酸平均含量呈增加趋势，这可能是因为长期的连作降低了微生物对这类酚酸物质的降解能力^[15]。但会

东县的苯甲酸和肉桂酸随着植烟年限的增加呈先增加后减少的趋势，这与白羽祥等^[15]研究结果类似，这可能是由于苯甲酸和肉桂酸在连作初期产生累积，随着连作时间的延长，微生物群落结构发生了改变，增加了降解这两种物质的微生物群落丰度和结构^[13]。

前人研究表明，土壤理化性状与酚酸类物质存在显著的相关关系^[15, 22]，不同土壤类型间的理化性状各异，势必也会影响土壤酚酸类物质的含量。本研究中，除肉桂酸外，土壤类型能显著影响植烟土壤酚酸类物质含量，且在盐源县，水稻土的总酚、复合态酚、对羟基苯甲酸、苯甲酸平均含量均高于红壤；在仁和区，水稻土的总酚、复合态酚和对羟基苯甲酸平均含量高于红壤和紫色土，这可能与不同土壤类型间的土壤 pH、土壤养分、酶活性和微生物活性存在差异有关^[13, 15, 23-25]。此外，水稻土生物量大，且水分含量高，加快了土壤中酚酸类物质的形成与累积；红壤风化程度深，植烟红壤中酚酸类化感物质形成与分解均较快，因此在凉攀植烟区不同土壤类型的土壤酚酸类物质的平均含量表现为水稻土 > 紫色土 > 红壤。在烤烟种植生产中，间作绿肥或与其他作物轮作是改善植烟土壤性状、调节养分供应、实现烤烟可持续生产的重要措施^[26-27]。在相同海拔、土壤类型和植烟年限的条件下，不同前茬作物的植烟土壤酚酸类物质含量存在显著差异(表 4)。本研究中，前茬作物为光叶紫花苕时，植烟土壤酚酸类物质各组分平均含量相对低于其他前茬作物，可见光叶紫花苕为前茬作物时，对植烟土壤酚酸类物质有一定的消减作用，降低了土壤中酚酸类物质对植株的毒害，这可能是因为光叶紫花苕根系发达，通过根瘤菌的作用固定空气中游离的氮素，促进活性氮的利用，增加土壤的有机质含量，改善植烟土壤理化性状，最终促进烟株生长和根系发育，提高烟株抗逆性^[24]，从而减少了酚酸类物质的积累。而前茬未种植作物时(即冬闲)，植烟土壤的酚酸类物质含量较高，促进了酚酸类物质的累积。因此，在烟区通过种植前茬作物，可以用来控制土壤酚酸类物质的形成和累积，提高土壤质量。

4 结论

凉攀三大烟区，植烟过程显著增加了土壤酚酸类化感物质含量；海拔高度、植烟年限、土壤类型和前茬作物对植烟土壤酚酸类物质的含量存在显著的影响。在一定海拔高度(1 200 ~ 2 000 m)范围内，海拔高度的升高会增加植烟土壤酚酸类物质(除阿魏酸和肉桂酸外)的累积；在凉攀植烟区不同土壤类型的酚

酸类物质平均含量表现为水稻土>紫色土>红壤;植烟年限>1 a 的植烟土壤的酚酸类物质平均含量明显高于非植烟土壤(植烟年限<1 a),且随着植烟年限的增加,植烟土壤酚酸类物质(除土壤水溶性酚以及会东县的土壤苯甲酸、肉桂酸外)的含量呈增加趋势;前茬未种植作物时(即冬闲),植烟土壤的酚酸类物质含量较高,促进了酚酸类物质的累积,光叶紫花苕为前茬作物时,降低了土壤中酚酸类物质的累积。因此,在凉攀烟区,选择在前茬作物为光叶紫花苕的红壤中种植烤烟可以消减植烟土壤中酚酸类物质的积累。

参考文献:

- [1] 田给林, 毕艳孟, 孙振钧, 等. 酚酸类物质在作物连作障碍中的化感效应及其调控研究进展[J]. 中国科技论文, 2016, 11(6): 699-705.
- [2] Yu J Q, Ye S F, Zhang M F, et al. Effects of root exudates and aqueous root extracts of cucumber (*Cucumis sativus*) and allelochemicals, on photosynthesis and antioxidant enzymes in cucumber[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2003, 31(2): 129-139.
- [3] 肖靖秀, 郑毅, 汤利, 等. 间作小麦蚕豆不同生长期根际有机酸和酚酸变化[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 685-693.
- [4] Zhou X G, Wu F Z. P-Coumaric acid influenced cucumber rhizosphere soil microbial communities and the growth of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum* Owen[J]. PLoS One, 2012, 7(10): e48288.
- [5] Zhou X G, Jia H T, Ge X, et al. Effects of vanillin on the community structures and abundances of *Fusarium* and *Trichoderma* spp. in cucumber seedling rhizosphere[J]. Journal of Plant Interactions, 2018, 13(1): 45-50.
- [6] Liu P, Liu Z H, Wang C B, et al. Effects of three long chain fatty acids present in peanut (*Arachis hypogaea* L.) root exudates on its own growth and the soil enzymes activities[J]. Allelopathy Journal, 2012, 29(1): 13-24.
- [7] Liu P, Wan S B, Jiang L H, et al. Autotoxic potential of root exudates of peanut (*Arachis hypogaea* L.)[J]. Allelopathy Journal, 2010, 26(2): 197-206.
- [8] Qu X H, Wang J G. Effect of amendments with different phenolic acids on soil microbial biomass, activity, and community diversity[J]. Applied Soil Ecology, 2008, 39(2): 172-179.
- [9] 张宁, 张如, 吴萍, 等. 根系分泌物在西瓜/旱作水稻间作减轻西瓜枯萎病中的响应[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 585-593.
- [10] 张继光, 姚忠达, 张忠锋, 等. 皖南地区不同烤烟种植模式的土壤环境及经济效益分析[J]. 土壤, 2016, 48(3): 553-558.
- [11] 谭慧, 彭五星, 向必坤, 等. 炭化烟草秸秆还田对连作植烟土壤及烤烟生长发育的影响[J]. 土壤, 2018, 50(4): 726-731.
- [12] 张继光, 申国明, 张久权, 等. 烟草连作障碍研究进展[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(3): 95-99.
- [13] 白羽祥, 杨焕文, 徐照丽, 等. 连作植烟土壤中酚酸物质与土壤因子的关系分析[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(11): 1907-1914.
- [14] 刘艳霞, 李想, 蔡刘体, 等. 烟草根系分泌物酚酸类物质的鉴定及其对根际微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 418-428.
- [15] 白羽祥, 杨成翠, 史普酉, 等. 连作植烟土壤酚酸类物质变化特征及其与主要环境因子的 Mantel Test 分析[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(3): 369-379.
- [16] 杨梅, 谭玲, 叶绍明, 等. 桉树连作对土壤多酚氧化酶活性及酚类物质含量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 165-169.
- [17] 马云华, 魏珉, 王秀峰. 日光温室连作土壤酚类物质变化及其对黄瓜根系抗病性相关酶的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 79-82.
- [18] 张继光, 郑林林, 石屹, 等. 不同种植模式对土壤微生物区系及烟叶产量与质量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 93-102.
- [19] 赵财, 柴强. 不同供水水平下丁香酚和间作蚕豆对小麦光合特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(4): 88-93.
- [20] Singh H P, Batish D R, Kohli R K. Autotoxicity: concept, organisms, and ecological significance[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1999, 18(6): 757-772.
- [21] 孙海兵, 毛志泉, 朱树华. 环渤海湾地区连作苹果园土壤中酚酸类物质变化[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 90-97.
- [22] 李亮亮, 李天来, 张恩平, 等. 四种酚酸物质在土壤中降解的研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1460-1465.
- [23] Li X G, Ding C F, Hua K, et al. Soil sickness of peanuts is attributable to modifications in soil microbes induced by peanut root exudates rather than to direct allelopathy[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 78: 149-159.
- [24] 妙佳源, 李夏, 周达, 等. 连作对谷子土壤酶活性及养分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 123-126, 152.
- [25] 王延平, 王华田, 杨阳, 等. 外源酚酸在杨树人工林土壤中的吸附与滞留动态研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 251-256.
- [26] 寇玲玲. 光叶紫花苕子种植技术及其与化肥配施对烟草养分吸收和碳氮代谢的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [27] 刘国顺, 罗贞宝, 王岩, 等. 绿肥翻压对烟田土壤理化性状及土壤微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 95-98.