基于主成分分析的豫中植烟土壤肥力综合评价

徐沛瑶[1],丁燕芳[1],胡婧棪[1],赵玲玲[2],赵敬[1],王海涛[1*]
(1 河南省农业科学院 烟草研究所,河南 许昌 461000;2 河南省烟草公司漯河市公司,河南 漯河 462300)

摘 要 为探明豫中植烟土壤养分特征及肥力,在许昌市(襄城、建安、禹州)、平顶山市(宝丰、汝州、叶县)、漯河市(临颍、舞阳、城区)共采集了231份典型烟田耕层(0~20 cm)土壤样品进行检测,并采用主成分分析法和聚类分析法,对土壤养分特征及综合肥力状况展开分析.结果表明:豫中植烟土壤呈弱碱性,其中有机质、碱解氮和有效磷含量处于中等水平,速效钾含量较为充足,水溶性氯离子含量则偏高.主成分分析结果显示:植烟土壤肥力整体处于中等偏下水平,各城市土壤综合肥力指数(IFI)排序为:平顶山(0.24)>漯河(0.21)>许昌(-0.31).采用聚类分析可将上述植烟土壤分为四类:Ⅰ类土壤:pH值偏中性,碱解氮、有效磷含量较高,水溶性氯离子略偏高;Ⅱ类土壤:呈弱碱性,土壤养分及氯离子含量均处于较高水平;Ⅲ类土壤:pH值较高,碱解氮含量较低;Ⅳ类土壤:速效钾含量与水溶性氯离子含量均较低.

关键词 植烟土壤;土壤养分;主成分分析;聚类分析;土壤肥力质量
中图分类号 S158 **文献标志码** A **文章编号** 1672-4321(2026)05-0577-10
doi:10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20260720

Assessment of soil fertility of tobacco-planting regions in central Henan based on principal component analysis

Xu Peiyao[1], Ding Yanfang[1], Hu Jingyan[1], Zhao Lingling[2], Zhao Jing[1], Wang Haitao[1*]
(1 Tobacco Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Xuchang 461000, Henan China;
2 Henan Luohe Tobacco Company, Luohe 462300, Henan China)

Abstract To investigate the nutrient characteristics and fertility of tobacco-planting soils in central Henan, a total of 231 typical surface soil samples (0-20 cm depth) were collected from tobacco fields in Xuchang City (Xiangcheng, Jian′an, Yuzhou), Pingdingshan City (Baofeng, Ruzhou, Yexian), and Luohe City (Linying, Wuyang, urban area) for testing. Principal component analysis and cluster analysis were employed to analyze the nutrient characteristics and comprehensive fertility of the soil samples. The results showed that the tobacco-planting soils in central Henan were weakly alkaline. Among the soil nutrients, the contents of organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen, and available phosphorus were at a medium level, the content of available potassium was relatively sufficient, while the content of water-soluble chloride ions was relatively high. Principal component analysis results indicated that the overall fertility of the tobacco-planting soils was at a medium-to-low level. The ranking of the Comprehensive Fertility Index (IFI) of soils in each city was as follows: Pingdingshan (0.24)>Luohe (0.21)>Xuchang (-0.31). Cluster analysis classified the aforementioned tobacco-planting soils into four categories: Category Ⅰ: Soil pH was near neutral, with relatively high contents of alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus, and slightly high content of water-soluble chloride ions; Category Ⅱ: Soil was weakly alkaline, with relatively high levels of both soil nutrients and chloride ions; Category Ⅲ: Soil had a relatively high pH value and a low content of alkali-hydrolyzable nitrogen; Category Ⅳ: Soil had low contents of both available potassium and water-soluble chloride ions.

Keywords tobacco-planting soil; soil nutrient; principal component analysis; cluster analysis; soil fertility quality

收稿日期 2025-08-06
***通信作者** 王海涛(1972-),男,研究员,博士,研究方向:烟叶质量评价, E-mail:wanght3231@163.com
基金项目 漯河市烟草公司科技攻关项目(2022411100270077)

土壤肥力是土壤能够供给作物生长的物质基础[1],土壤养分是构成土壤肥力的核心要素,其丰缺程度直接影响烟叶的生长发育,进而影响烟叶产量和品质[2-4].因此,充分了解植烟土壤养分状况并客观评价土壤肥力,在农业生产中具有重要意义.

目前,我国众多学者针对不同植烟区的土壤养分特征及肥力状况已进行相关研究.例如,徐露等[5]选取阳离子交换量、有机质、pH等8项评价指标,通过主成分分析得出,攀枝花和广元植烟区土壤有机质、速效钾、碱解氮含量均偏低;泸州植烟区除碱解氮外,其他营养成分含量均适中,适宜烟草生长,土壤肥力较高.唐佐芯等[6]选取pH、有机质、有效磷、有效钼等8个指标,通过主成分分析得出:红河州植烟土壤有效钼含量高,有效硼和水溶性氯含量低;土壤pH呈微酸性,有机质和有效磷含量中等,土壤养分整体属中等水平.李自林[7]等选用pH、全氮、有效钙等10个指标,采用模糊数学综合法对广西隆林县植烟土壤进行肥力评价,结果表明:隆林烟区土壤pH和全氮、有效磷、水溶性氯含量适宜,有机质、有效硼、有效镁含量偏低,速效钾含量中等,有效硫和有效钙含量偏高.段淑辉等[8]选取pH、水溶性氯、有效铁等15个指标,采用模糊函数方法对湖南浏阳植烟土壤肥力适宜性进行综合评价,结果显示:浏阳植烟土壤pH和有机质含量偏低,有效磷、有效铜和有效铁含量偏高,有效钼和水溶性氯较缺乏,其余养分较适宜,综合肥力处于较高和中等等级.

由此可见,土壤肥力受地域环境等多种因素的综合影响,土壤养分含量的分布具有高度空间异质性,不同区域土壤养分含量的相关研究具有不可替代性[9-11].土壤中的氮、磷、钾及有机质含量与烟叶产量和品质密切相关[12-14];土壤氯离子含量过低不利于烟株生长,含量过高则会影响烟叶燃烧性,降低烟叶工业可用性[15];而土壤酸碱度与养分的有效利用存在密切联系[16].基于此,本文选用pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾和水溶性氯离子6个指标,应用主成分分析法对豫中植烟土壤养分特征及肥力质量状况进行评价,初步掌握豫中植烟土壤养分特征及肥力质量现状,以期为土壤合理施肥、养分管理和烤烟可持续生产发展提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

根据豫中烟区的烤烟分布情况,于2022年在整地起垄前开展土壤样品采集工作,采用网格式取样法,对许昌市(襄城、建安、禹州)、平顶山市(宝丰、汝州、叶县)、漯河市(临颍、舞阳、城区)共9个植烟县(区)的代表性地块采集土壤样品,取样点设置严格遵循均匀性、代表性原则.采样时,以网格点为圆心(避开沟边、肥堆、田埂、路边等特殊部位),在直径5 m的范围内采集0~20 cm的耕层土壤,混合后组成代表点的混合样品,共采集样品231个,单个样品采样量约1.0 kg.样品采回后,依次进行风干、研磨、过筛处理,随后开展相关指标测定.此外,采样过程中采用GPS定位技术记录各采样点的经纬度,并利用ArcGIS软件绘制采样点分布图,具体采样点分布如图1所示.

1.2 测定项目及方法

参照张甘霖[17]的方法对土壤6项指标(土壤pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、水溶性氯离子)进行测定.

1.3 植烟土壤养分适宜性评价

参照《中国植烟土壤及烟草养分综合管理》[18],并结合近几年豫中烟区烟叶生产实际和相关研究结果[19-20],权衡土壤养分状况与烟叶产、质量,建立豫中植烟土壤主要养分分级标准(表1),对豫中植烟土壤养分指标进行适宜性评价.

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2010和DPS21.05软件对实验数据进行描述性统计分析、主成分分析和聚类分析,利用RStudio软件开展热图绘制,借助ArcGIS 10.8软件进行地统计学分析.主成分分析具体操作步骤如下:首先,检验各变量之间的相关性,采用Z-Score标准化方法消除量纲影响,将所有变量标准化处理;其次,通过因子分析判定数据适用性,当KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)检验统计量>0.5,且巴特利特球形度检验显著性≤0.05时,表明所有数据满足主成分分析的前提条件,可用于后续主成分分析.

2 结果分析

2.1 豫中植烟区土壤养分的总体特征

2.1.1 土壤pH值

土壤酸碱度是影响土壤养分的有效性和存在形态的决定性因素之一,对烤烟的产量和品质具有重要影响.烟草对土壤酸碱度的适应幅度较宽,在pH值3.5~9.0的范围内均能生长,其最适宜生长的

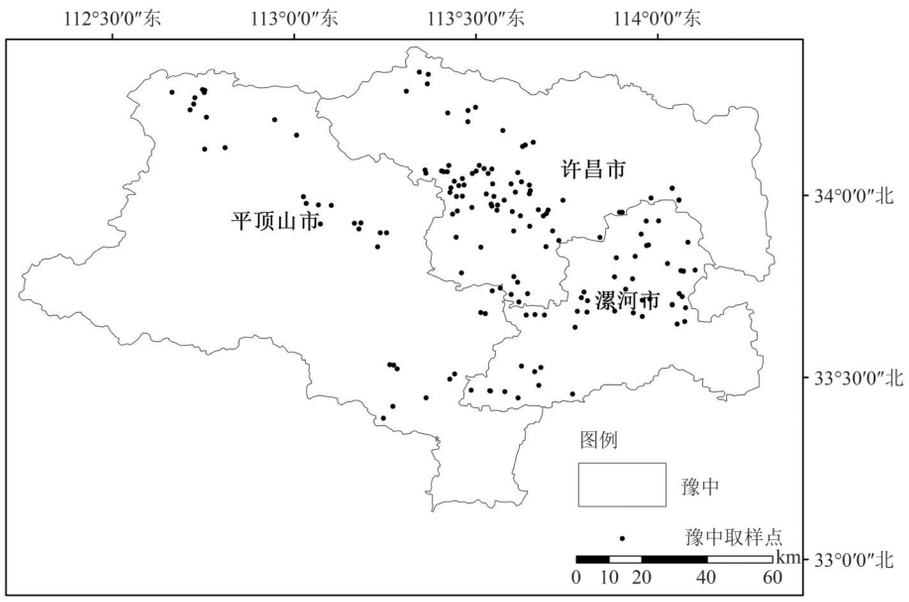


图1　豫中烟区采样点分布图

Fig. 1　Distribution map of sampling points in central Henan tobacco area

表1　豫中植烟土壤的主要养分等级评价标准

Tab. 1　Evaluation standard of main nutrient grade of tobacco planting soil in central Henan

指标	1(很高)	2(高)	3(中等)	4(低)	5(很低)
pH	>7.5	>7.0~7.5	>5.5~7.0	5.0~5.5	<5
有机质/(g·kg^{-1})	>40	>30~40	>10~30	6~10	<6
碱解氮/(mg·kg^{-1})	>150	>120~150	>60~120	30~60	<30
有效磷/(mg·kg^{-1})	>40	>20~40	>10~20	5~10	<5
速效钾/(mg·kg^{-1})	>200.0	>150~200	>100~150	50~100	<50
水溶性氯离子/(mg·kg^{-1})	>45	>30~45	>20~30	10~20	<10

pH值为5.5~6.5，即弱酸性土壤有利于烟株生长[21]. 根据表2数据可知，豫中植烟土壤pH变化范围为5.11~8.85，均值为7.66，变异系数为10.86%，这表明豫中地区土壤pH值分布水平较为集中，且有68.83%的样点pH值大于7.5；从区域对比来看，三市土壤pH值均在7.0以上，具体排序为：许昌>漯河>平顶山，仅平顶山叶县和漯河舞阳的均值小于7.0，分别为5.94、6.89，更接近烟草适宜生长的弱酸性范围.

2.1.2　土壤有机质、碱解氮

土壤有机质是土壤肥力的物质基础，其含量高低直接影响土壤物理、化学性质和肥力水平，进而影响烟叶内在质量和可用性[9,22]. 北方烟区土壤有机质含量一般不高于20.0 g·kg^{-1}，其中以10.0~20.0 g·kg^{-1}

表2　豫中植烟土壤pH值含量的描述性统计

Tab. 2　Descriptive statistics of pH value content of tobacco planting soil in central Henan

指标	地区		样品数	变幅	均值±标准差	变异系数/%	适应性分布频率/%				
							1(很高)	2(高)	3(中等)	4(低)	5(很低)
pH	平顶山	汝州	36	6.47~8.64	7.91±0.51b	6.44	83.33	5.56	11.11	—	—
		叶县	14	5.16~7.26	5.94±0.64e	10.69	—	7.14	57.14	35.71	—
		宝丰	18	6.00~7.98	7.39±0.55c	7.47	55.56	22.22	22.22	—	—
		均值	68*	5.16~8.64	7.37±0.94	12.71	58.82	10.29	23.53	7.35	—
	漯河	临颍	18	8.15~8.78	8.52±0.18a	2.06	100.00	—	—	—	—
		舞阳	23	5.72~8.01	6.89±0.63d	9.09	17.39	26.09	56.52	—	—
		城区	24	6.12~8.85	7.82±0.81b	10.32	70.83	8.33	20.83	—	—
		均值	65*	5.72~8.85	7.68±0.9	11.69	60.00	12.31	27.69	—	—
	许昌	建安	26	7.70~8.36	8.15±0.14b	1.74	100.00	—	—	—	—
		禹州	36	5.11~8.28	8.04±0.52b	6.49	94.44	2.78	—	2.78	—
		襄城	36	5.30~8.20	7.44±0.75c	10.11	55.56	25.00	16.67	2.78	—
		均值	98*	5.11~8.36	7.85±0.64	8.13	81.63	10.20	6.12	2.04	—
	豫中		231*	5.11~8.85	7.66±0.83	10.86	68.83	10.82	17.32	3.03	—

注：*此处数值代表样品数的合计.

最为适宜[23].本文发现:豫中植烟土壤有机质变化范围为3.95~35.46 g·kg^{-1},平均值为18.27 g·kg^{-1},变异系数为27.01%,这表明豫中植烟土壤有机质分布水平相对集中,含量丰富和缺乏的土壤占比偏少;从区域差异来看,豫中3个主要植烟区土壤有机质平均含量表现为:漯河>平顶山>许昌,且3个植烟市的各辖县(区)的有机质含量基本处于烤烟生长的最适宜范围内.

氮素对烤烟生长发育及品质形成至关重要.研究表明:土壤氮素含量与土壤有机质含量、烤烟氮素含量之间存在正相关关系[24],但只有适宜的氮素供应才有利于烤烟品质的形成.由表3可知:豫中烟田土壤碱解氮含量范围为17.89~362.62 mg·kg^{-1},平均值为79.97 mg·kg^{-1},变异系数为49.43%,这表明土壤碱解氮含量分布较为不均,整体基本处于中等水平;从区域排序来看,各地区土壤碱解氮平均含量为:平顶山>许昌>漯河,其中平顶山各辖县土壤碱解氮含量主要处于中等偏上水平,而漯河和许昌的个别植烟县(区)土壤碱解氮含量则处于中等偏下水平.

表3 豫中植烟土壤有机质和碱解氮含量的描述性统计

Tab. 3 Descriptive statistics of organic matter and alkali-hydrolyzable nitrogen content in tobacco planting soil in central Henan

指标	地区		样品数	变幅	均值±标准差	变异系数/%	适应性分布频率/%				
							1(很高)	2(高)	3(中等)	4(低)	5(很低)
有机质含量/(g·kg^{-1})	平顶山	汝州	36	3.95~35.46	18.80±6.73b	35.77	—	5.56	86.11	—	8.33
		叶县	14	9.05~25.16	16.70±4.70bc	28.18	—	—	92.86	7.14	—
		宝丰	18	14.80~25.90	19.26±3.33b	17.29	—	—	100.00	—	—
		均值	68*	3.95~35.46	18.49±5.62	30.41	—	2.94	91.18	1.47	4.41
	漯河	临颍	18	14.18~23.63	19.36±2.92b	15.08	—	—	100.00	—	—
		舞阳	23	10.00~24.40	18.77±3.95b	21.06	—	—	100.00	—	—
		城区	24	13.51~33.57	22.75±5.72a	25.13	—	16.67	83.33	—	—
		均值	65*	10.00~33.57	20.40±4.77	23.36	—	6.15	93.85	—	—
	许昌	建安	26	9.57~21.30	15.54±2.86c	18.42	—	—	96.15	3.85	—
		禹州	36	8.90~22.30	15.27±3.13c	20.48	—	—	91.67	8.33	—
		襄城	36	12.63~34.17	19.00±4.29b	22.61	—	2.78	97.22	—	—
		均值	98*	8.90~34.17	16.71±3.92	23.46	—	1.02	94.90	4.08	—
	豫中		231	3.95~35.46	18.27±4.93	27.01	—	3.03	93.51	2.16	1.30
碱解氮含量/(mg·kg^{-1})	平顶山	汝州	36	19.27~147.94	92.34±31.69abc	34.31	—	16.67	69.44	8.33	5.56
		叶县	14	56.42~177.53	107.83±36.07a	33.45	14.29	28.57	50.00	7.14	—
		宝丰	18	44.09~362.62	105.70±68.19a	64.51	5.56	11.11	72.22	11.11	—
		均值	68*	19.27~362.62	99.07±44.82	45.24	4.41	17.65	66.18	8.82	2.94
	漯河	临颍	18	17.89~43.67	32.75±8.04d	24.56	—	—	—	61.11	38.89
		舞阳	23	33.03~143.12	96.76±22.92ab	23.69	—	8.70	82.61	8.70	—
		城区	24	30.96~196.79	73.37±41.13c	56.05	8.33	—	45.83	45.83	—
		均值	65*	17.89~196.79	70.40±38.18	54.23	3.08	3.08	46.15	36.92	10.77
	许昌	建安	26	75.00~136.24	105.62±15.51a	14.68	—	15.38	84.62	—	—
		禹州	36	23.39~79.82	42.62±11.77d	27.62	—	—	5.56	75.00	19.44
		襄城	36	40.60~173.40	80.01±25.37bc	31.71	2.78	—	72.22	25.00	—
		均值	98*	23.39~173.40	73.07±31.47	43.06	1.02	4.08	51.02	36.73	7.14
	豫中		231*	17.89~362.62	79.97±39.53	49.43	2.60	7.79	54.11	28.57	6.93

注:*此处数值代表样品数的合计.

2.1.3 土壤有效磷、速效钾和水溶性氯离子

磷素不仅影响烟叶成熟进程与烟株根系发育,还对烟叶品质形成具有重要作用,而烤烟生长所需磷素主要来源于土壤本底磷素与外源施用肥料.由表4可知:豫中烟田土壤有效磷含量范围为3.24~117.29 mg·kg^{-1},平均值为21.44 mg·kg^{-1},含量变化幅度较大,变异系数达64.60%;整体来看,土壤有效磷含量处于适宜偏高水平,且各地区平均含量排序为:漯河>平顶山>许昌.需注意的是,约有12.55%的烟田土壤存在缺磷情况;从县域尺度分析,不同县区烟田土壤有效磷含量变幅均较大,其中许昌襄城县的变异系数最大,高达70.04%.

钾素是烤烟体内碳水化合物合成和转移的必需元素,其含量直接影响烟叶颜色、燃烧性和吸湿性,因此土壤中钾离子含量会对烟株生长发育产生直接影响[25].根据表4数据,豫中烟田土壤速效钾含量范围为49.00~704.57 mg·kg^{-1},平均含量为197.74 mg·kg^{-1},变异系数为39.88%,表明土壤速效钾含量相对分散.

表4　豫中植烟土壤有效磷、速效钾和水溶性氯离子含量的描述性统计

Tab. 4　Descriptive statistics of available phosphorus, available potassium and water-soluble chloride ion content in tobacco planting soil in central Henan

指标	地区		样品数	变幅	均值±标准差	变异系数/%	适应性分布频率/%				
							1(很高)	2(高)	3(中等)	4(低)	5(很低)
有效磷含量/(mg·kg^{-1})	平顶山	汝州	36	5.20~90.40	20.54±13.47bc	65.58	2.78	36.11	55.56	5.56	—
		叶县	14	11.40~61.00	28.54±15.06ab	52.76	28.57	28.57	42.86	—	—
		宝丰	18	13.80~52.80	22.64±9.66bc	42.68	5.56	33.33	61.11	—	—
		均值	68	5.20~90.40	22.75±13.12	57.68	8.82	33.82	54.41	2.94	—
	漯河	临颍	18	9.72~29.59	16.52±5.71c	34.54	—	22.22	72.22	5.56	—
		舞阳	23	4.00~40.20	23.7±10.05bc	42.39	4.35	65.22	21.74	4.35	4.35
		城区	24	13.39~117.29	35.15±21.14a	60.15	29.17	54.17	16.67	—	—
		均值	65	4.00~117.29	25.94±16.2	62.46	12.31	49.23	33.85	3.08	1.54
	许昌	建安	26	4.54~41.04	15.29±9.39c	61.45	3.85	19.23	50.00	19.23	7.69
		禹州	36	5.88~51.55	16.34±9.34c	57.12	2.78	25.00	47.22	25.00	—
		襄城	36	3.24~70.63	20.40±14.29bc	70.04	8.33	33.33	36.11	16.67	5.56
		均值	98	3.24~70.63	17.55±11.52	65.65	5.10	26.53	43.88	20.41	4.08
	豫中		231	3.24~117.29	21.44±13.85	64.60	8.23	35.06	44.16	10.39	2.16
速效钾含量/(mg·kg^{-1})	平顶山	汝州	36	97.90~428.62	241.31±72.88a	30.20	75.00	19.44	2.78	2.78	—
		叶县	14	108.81~328.31	182.38±70.01bc	38.39	28.57	28.57	42.86	—	—
		宝丰	18	109.70~455.18	237.73±108.49a	45.64	50.00	22.22	27.78	—	—
		均值	68	97.90~455.18	228.23±85.25	37.35	58.82	22.06	17.65	1.47	—
	漯河	临颍	18	133.78~313.27	221.64±43.16ab	19.47	66.67	27.78	5.56	—	—
		舞阳	23	104.10~331.30	176.67±51.89c	29.37	30.43	34.78	34.78	—	—
		城区	24	155.72~340.53	235.50±49.09a	20.84	83.33	16.67	—	—	—
		均值	65	104.10~340.53	210.84±54.47	25.83	60.00	26.15	13.85	—	—
	许昌	建安	26	118.06~308.86	187.33±51.73bc	27.61	23.08	46.15	30.77	—	—
		禹州	36	49.00~231.00	117.64±37.23d	31.65	5.56	5.56	52.78	33.33	2.78
		襄城	36	94.90~704.57	204.12±96.84abc	47.44	47.22	30.56	19.44	2.78	—
		均值	98	49.00~704.57	167.90±78.10	46.52	25.51	25.51	34.69	13.27	1.02
	豫中		231	49.00~704.57	197.74±78.85	39.88	45.02	24.68	23.81	6.06	0.43
水溶性氯离子含量/(mg·kg^{-1})	平顶山	汝州	36	11.70~225.15	41.56±38.91bc	93.61	16.67	38.89	22.22	22.22	—
		叶县	14	22.80~121.70	51.10±28.37b	55.53	42.86	28.57	28.57	—	—
		宝丰	18	19.75~146.05	69.20±36.38a	52.58	77.78	5.56	11.11	5.56	—
		均值	68	11.70~225.15	50.84±37.68	74.11	38.24	27.94	20.59	13.24	—
	漯河	临颍	18	6.40~40.20	23.03±8.69cde	37.74	—	22.22	38.89	33.33	5.56
		舞阳	23	3.10~66.80	30.27±14.57cd	48.12	17.39	30.43	39.13	4.35	8.70
		城区	24	13.20~251.00	74.27±61.64a	82.99	70.83	8.33	8.33	12.50	
		均值	65	3.10~251.00	44.51±44.64	100.30	32.31	20.00	27.69	15.38	4.62
	许昌	建安	26	9.45~41.50	19.88±8.36de	42.03	—	15.38	19.23	61.54	3.85
		禹州	36	1.10~23.69	7.60±6.39e	84.18	—	—	2.78	27.78	69.44
		襄城	36	11.50~93.90	33.19±21.46bcd	64.64	16.67	16.67	38.89	27.78	—
		均值	98	1.10~93.90	20.26±17.9	88.37	6.12	10.20	20.41	36.73	26.53
	豫中		231	1.10~251.00	36.08±35.98	99.71	22.94	18.18	22.51	23.81	12.55

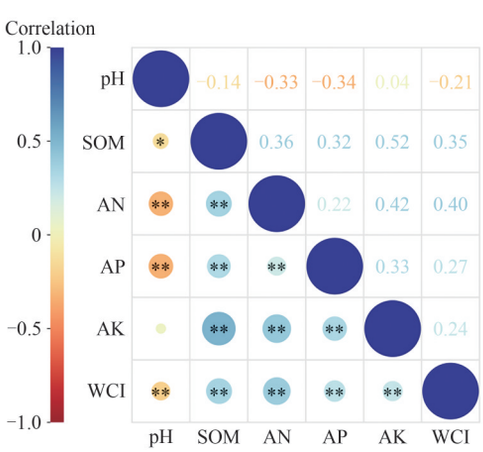
参照相关分级标准，速效钾含量达中等水平的烟田占比23.81%，达丰富水平的烟田土壤占69.70%，其中含量超过200 mg·kg^{-1}的土壤占45.02%，这说明豫中植烟土壤速效钾含量整体处于中等偏上水平，且各地区平均含量排序为：平顶山>漯河>许昌，其中，许昌禹州市、平顶山汝州两地土壤速效钾含量相对偏低，建议通过增加钾肥用量或改进施肥方法，进一步提高钾肥利用率，以满足烤烟生长需求.

氯是烤烟生长必需的营养元素之一，但烤烟也是一种忌氯作物.北方烟区土壤氯离子含量一般较高，过高的氯离子含量易导致烤烟叶片厚且脆，燃烧性变差，品质变劣.一般认为，烤后烟叶中氯素含量在0.3~0.8 mg·kg^{-1}时品质较好，土壤中水溶性氯离子含量小于30.0 mg·kg^{-1}为宜[15,26].表4显示：豫中烟田土壤水溶性氯离子含量范围为1.10~251.00 mg·kg^{-1}，平均含量为36.08 mg·kg^{-1}，变异系数为99.71%，这表明

豫中烟田土壤水溶性氯离子含量分布相对分散,且水溶性氯平均含量排序为:平顶山>漯河>许昌.其中,仅许昌市植烟土壤水溶性氯的平均含量小于30.0 mg·kg^{-1},处于生产优质烟叶的适宜范围内.

2.2 豫中植烟区土壤养分指标相关性分析

为明确各土壤养分指标之间的相关性,利用RStudio软件对数据进行相关性分析,并绘制相关性分析图(图2).结果表明:土壤pH与碱解氮、有效磷、水溶性氯离子呈显著负相关(P<0.05),与有机质呈负相关(未达显著水平);有机质与碱解氮、有效磷、速效钾、水溶性氯离子呈极显著正相关关系(P<0.01);碱解氮与有效磷、速效钾、水溶性氯离子呈极显著正相关关系(P<0.01);有效磷与速效钾、水溶性氯离子呈显著正相关关系(P<0.05);速效钾与水溶性氯离子之间显著正相关(P<0.05).上述养分指标间均在不同程度上呈现显著或极显著相关性,且大部分指标间的相关系数大于0.3,表明各个土壤养分之间存在相互关联,易导致不同养分指标所反映的信息出现重叠.基于此,可采用主成分分析方法对豫中植烟土壤养分状况进行综合评价,以减少信息冗余,提高评价结果的科学性.



SOM:有机质;AN:碱解氮;AP:有效磷;AK:速效钾;WCl:水溶性氯离子

图2 植烟土壤各项养分指标的相关热图

Fig. 2 Correlation heat map of various nutrient indexes of tobacco planting soil

2.3 豫中植烟土壤养分的主成分分析

土壤质量是土壤众多养分含量的综合反映,评价因子应尽量选取与肥力相关的指标[19].本文以9个植烟县(区)土壤为研究对象,选取pH值、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾和水溶性氯离子6个养分指标(下文图表及文中依次用1、2、3、4、5、6表示),对土壤养分指标进行主成分分析,并进一步计算各主成分的特征值、方差贡献率和累积方差贡献率(见表5、表6).由表5可知,KMO检验统计量>0.5,且巴特利特球形度检验显著性≤0.05,表明所选数据适合进行主成分分析.由表6可见,前4个主成分的累积方差贡献率达85.382%(>80%),说明通过分析这4个主成分,已能够反映豫中植烟区土壤肥力的基本信息.

表5 KMO和巴特利特检验

Tab. 5 Kaiser-Meyer-Olkin measure and Bartlett's test

KMO取样适切性量数		0.647
巴特利特球形度检验	近似卡方	286.043
	自由度	15
	显著性	0

表6 各主成分的特征值和贡献率

Tab. 6 Eigenvalue and contribution rate of each principal component

主成份	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	2.505	41.749	41.749
2	1.122	18.702	60.451
3	0.817	13.611	74.062
4	0.679	11.320	85.382
5	0.540	8.995	94.377
6	0.337	5.623	100.000

由表7和表8可知:第一主成分的贡献率为41.749%,碱解氮、有机质和速效钾3个指标因子在该主成分中起主要作用;第二主成分贡献率为18.702%,pH值和速效钾2个指标因子在该主成分中起主要作用;第三主成分贡献率为13.611%,有效磷和碱解氮2个指标在该主成分中起主要作用;第四主成分的贡献率为11.32%,水溶性氯离子是该主成分的主要影响指标.前4个主成分得分值分别用PC_1、PC_2、PC_3和PC_4表示,通过回归计算得到主成分得分系数矩阵,其得分函数表示为:

$$PC_1 = -0.276X_1 + 0.462X_2 + 0.454X_3 + 0.430X_4 + 0.392X_5 + 0.406X_6, \quad (1)$$

$$PC_2 = 0.759X_1 + 0.305X_2 - 0.071X_3 + 0.520X_4 - 0.215X_5 - 0.093X_6, \quad (2)$$

$$PC_3 = 0.045X_1 - 0.089X_2 + 0.480X_3 - 0.164X_4 - 0.720X_5 + 0.462X_6, \quad (3)$$

表7 各指标在前4个主成分中的特征向量

Tab. 7 Feature vectors of each index in the first four principal components

指标	特征向量			
	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
pH值	−0.276	0.759	0.045	0.284
有机质	0.462	0.305	−0.089	0.024
碱解氮	0.454	−0.071	0.480	−0.481
速效钾	0.430	0.520	−0.164	−0.262
有效磷	0.392	−0.215	−0.720	0.237
水溶性氯离子	0.406	−0.093	0.462	0.751

表 8　豫中各烟区植烟土壤肥力评价表

Tab. 8　Evaluation table of soil fertility in tobacco planting areas of central Henan

地区		样品数	变幅	均值	占比/%				
					Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级
平顶山	汝州	36	−1.13~1.91	0.16bc	—	16.67	33.33	44.44	5.56
	叶县	14	−0.60~0.99	0.15bc	—	—	71.43	28.57	—
	宝丰	18	−0.20~1.90	0.47ab	—	11.11	72.22	16.67	—
	均值	68	−1.13~1.91	0.24	—	11.76	51.47	33.82	2.94
漯河	临颍	18	−0.74~0.11	−0.28d	—	—	16.67	83.33	—
	舞阳	23	−0.89~0.61	0.02cd	—	—	65.22	34.78	—
	城区	24	−0.43~4.63	0.77a	8.33	25.00	45.83	20.83	—
	均值	65	−0.89~4.63	0.21	3.08	9.23	44.62	43.08	—
许昌	建安	26	−0.83~0.48	−0.22d	—	—	19.23	80.77	—
	禹州	36	−1.17~0.17	−0.67e	—	—	2.78	91.67	5.56
	襄城	36	−0.81~2.07	−0.02cd	2.78	—	41.67	55.56	—
	均值	98	−1.17~2.07	−0.31	1.02	—	21.43	75.51	2.04
豫中		231	−1.17~4.63	0.00	1.30	6.06	36.80	54.11	1.73

$$PC_4 = 0.284X_1 + 0.024X_2 - 0.481X_3 - 0.262X_4 + 0.237X_5 + 0.751X_6, \quad (4)$$

式中，X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6为所选土壤样品的 6 个养分指标（pH 值、有机质、碱解氮、速效钾、有效磷、水溶性氯离子含量）标准化后的值.

2.4　豫中植烟区土壤肥力状况

根据前 4 个主成分的贡献率，构建主成分的综合得分（IFI）计算公式如下：$IFI=0.41749\times PC_1+0.18702\times PC_2+0.13611\times PC_3+0.11320\times PC_4$，基于该公式计算豫中烟区土壤养分综合得分，结果显示得分范围为−1.17~4.63. 参考《中国植烟土壤及烟草养分综合管理》《土壤质量指标与评价》等文献[27-28]，本文将豫中植烟区土壤肥力划分为以下 5 个等级：

Ⅰ级（优）：IFI≥2，土壤肥力水平很高，适宜作物生长；

Ⅱ级（良）：1≤IFI<2，土壤肥力水平较高，对作物生长较为有利；

Ⅲ级（中）：0≤IFI<1，土壤肥力水平一般，作物生长可能需要额外施肥；

Ⅳ级（低）：−1≤IFI<0，土壤肥力水平较低，对作物生长不利；

Ⅴ级（差）：IFI<−1，表示土壤肥力水平极低，不适宜作物生长.

由表 8 和图 3 可知，豫中植烟区土壤肥力综合

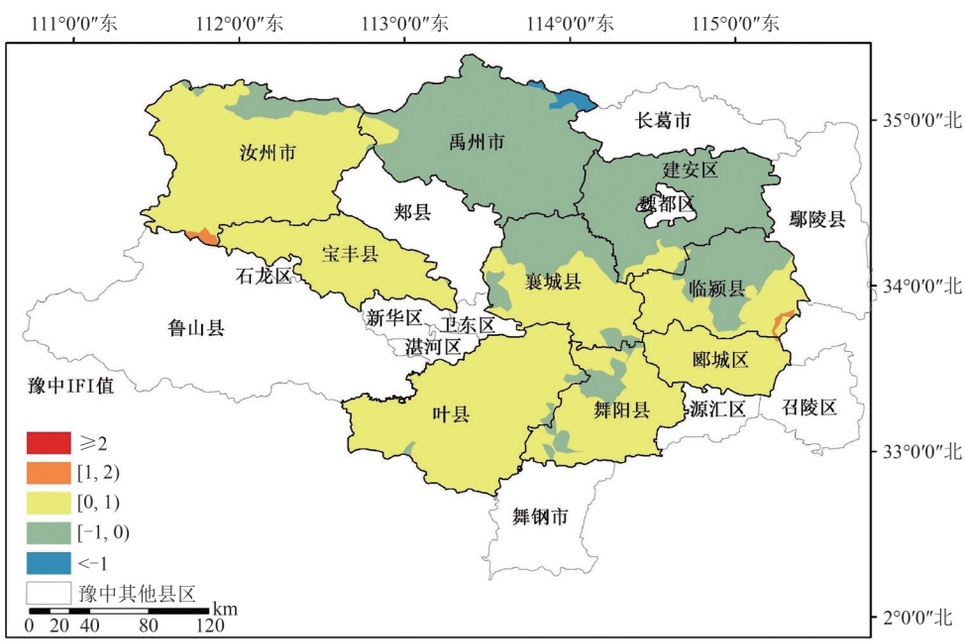


图 3　土壤肥力综合评价空间分布图

Fig. 3　Spatial distribution map of comprehensive evaluation of soil fertility

得分(IFI)范围为-1.17~4.63,整体处于中等偏下水平,且3个植烟市的土壤肥力水平存在明显差异:平顶山市土壤综合肥力水平最高,IFI平均值为0.24,对应肥力等级为Ⅲ级(中);漯河市其次,IFI平均值为0.21,对应肥力等级为Ⅲ级(中);许昌市最低,IFI平均值为-0.31,对应肥力等级为Ⅳ级(低).从县级(城区)尺度来看,宝丰县和漯河城区的植烟土壤综合肥力水平明显偏高,IFI平均值分别为0.47和0.77,均属于Ⅲ级(中);而禹州市的植烟土壤综合肥力水平明显偏低,IFI值为-0.67,属于Ⅳ级(低).究其原因,推测与禹州土壤中速效钾(第一主成分关键指标)含量最低、pH值(第二主成分关键指标)较高有关.

2.5 聚类分析

以土壤养分综合得分作为新变量,以豫中9个植烟县(区)为分析个案,采用聚类分析法对各县(区)土壤养分开展聚类分析(见图4).

在平方欧氏距离为5.0处,可将9个植烟县(区)划分为4类:Ⅰ类:舞阳县、建安区、叶县和襄县;Ⅱ类:汝州市、宝丰县和漯河城区;Ⅲ类:临颍县;Ⅳ类:禹州市.各类别土壤养分的主要特点如表9所示:Ⅰ类土壤pH值偏中性,碱解氮、有效磷含量较高,水溶性氯离子含量略偏高;Ⅱ类土壤呈弱碱性,土壤养分(含碱解氮、有效磷、速效钾等)及氯离子含量均较高;Ⅲ类土壤pH值较高,碱解氮含量较低;Ⅳ类土壤速效钾含量、水溶性氯离子含量均较低.

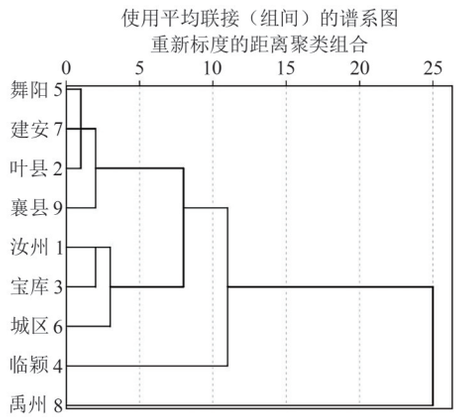


图4 9个县区聚类分析谱系图

Fig. 4 Pedigree diagram of cluster analysis of 9 counties

表9 各类区土壤养分含量情况

Tab. 9 Soil nutrient content in various areas

区类别	pH值	有机质含量/(g·kg^{-1})	碱解氮含量/(mg·kg^{-1})	有效磷含量/(mg·kg^{-1})	速效钾含量/(mg·kg^{-1})	水溶性氯离子含量/(mg·kg^{-1})
Ⅰ类	7.10	17.50	97.56	21.98	187.63	33.61
Ⅱ类	7.71	20.27	90.47	26.11	238.18	61.68
Ⅲ类	8.52	19.36	32.75	16.52	221.64	23.03
Ⅳ类	8.04	15.27	42.62	16.34	117.64	7.60

3 讨论

通过对豫中231个植烟土壤样本的养分指标的检测分析与评价可知,豫中植烟区大部分土壤pH值偏高,多呈弱碱性,这可能与该区域成土母质为富含碳酸钙的黄土物质有关[16,29].此类土壤具有较强的碱性缓冲能力,需采取适当改良措施:如通过秸秆堆肥、种植绿肥等方式补充腐殖酸,同时在生产中施用弱酸性或生理酸性肥料,以逐渐降低土壤pH值,改善土壤理化性状[30-31].

豫中植烟土壤有机质含量相对适宜且分布集中,利于烟株生长;碱解氮含量总体处于中等偏高水平;土壤有效磷含量中等或丰富,但变异系数较高、异质性较强,这一方面与成土母质原始磷含量有关,另一方面也受不同区域的施肥、耕作等农业管理措施差异的影响,导致有效磷的积累程度不同[32-33].此外,该区域植烟土壤速效钾含量较高,整体处于中等偏上水平;但水溶性氯离子整体偏高,易造成烟叶中氯离子含量超标,对烟叶燃烧性和评吸质量产生较大影响.这可能与豫中烟区长期实行麦-烟轮作[15]、采用地下水灌溉有关——前茬小麦种植中施用大量含氯肥料,且地下水本身氯含量也较高[34];同时,烟区常年降雨总量较小,蒸发作用对土壤深层氯离子的抽提作用较强[35],会进一步增加表层土壤氯素含量;而部分降雨量较大的年份,土壤及烤后烟叶中的氯含量则会显著降低.因此,生产中应优先选择河水等地表水灌溉,同时避免施用含氯肥料,防止土壤中氯离子过度积累.

本文借鉴李晓杰等[36]的烤烟土壤肥力质量评价方法,选取对烟株生长至关重要的土壤pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾和水溶性氯离子等肥力因子,开展主成分分析.结果显示,豫中植烟土壤综合肥力指数(IFI)平均值为0.00,对应肥力等级为Ⅲ级(中);其中44.16%的土壤肥力等级达到Ⅲ级及以上,表明该区域土壤整体肥力水平偏低,需采取针对性措施提升土壤质量、促进烟叶生长,这与谢小立等[37]

关于烤烟养分状况与烟叶品质关系的研究结果一致.通过聚类分析，将豫中植烟县（区）的土壤划分为4类，明确了养分含量和pH值的地域差异，此结论与陈家宙等[38]关于河南烟区土壤肥力质量评价的研究结论相符，证实豫中植烟土壤肥力存在显著区域差异.针对这些差异，应结合不同区域土壤特性制定改良措施，以实现提升烟叶质量提升的目标.

土壤肥力受土壤类型、利用方式、种植作物和人类活动等多种因素影响.本文选取的指标为土壤肥力评价的关键因子，直接关系到评价结果的客观性；但研究仍具有一定的局限性，未来需进一步纳入土壤全量元素、烟叶理化性质等关键指标，构建更全面的植烟土壤肥力评价体系.

4　结语

豫中烟区是河南省浓香型烟叶的主要产区之一，该区域土壤有机质、碱解氮和有效磷含量处于中等水平，速效钾含量充足，总体有利于优质烟叶生产；但土壤pH值偏高、水溶性氯离子含量超标，对肥料养分的利用率、烤后烟叶燃烧性和内在质量有一定负面影响.因此，需要通过增加酸性或生理酸性肥料施用、种植绿肥等措施改良土壤理化性质，同时优先选择低氯水源灌溉、禁用含氯肥料，或采取秸秆覆盖以减轻蒸发作用等方式降低烟叶氯含量，进一步提升烟叶品质.

参　考　文　献

[1] 赵瑞芬，程滨，滑小赞，等.基于主成分分析的山西省核桃主产区土壤肥力评价[J].山西农业大学学报（自然科学版），2020，40(6)：61-68.

[2] 武德传，罗红香，宋泽民，等.黔南山地植烟土壤主要养分空间变异和管理分区[J].应用生态学报，2014，25(6)：1701-1707.

[3] 江厚龙，张保全，李钠钾，等.重庆植烟土壤有效养分含量及其影响因素[J].中国烟草科学，2014，35(5)：67-73.

[4] 杨继鑫，戴华伟，王英俊，等.淄博烟区土壤中微量元素特征及重金属风险评价[J].中国烟草科学，2020，41(6)：44-50.

[5] 徐露，张丹，蒋豪，等.四川省四大植烟区土壤肥力评价[J].湖南农业科学，2020，56(18)：58-61.

[6] 唐佐芯，李天壁，陈泽斌，等.基于主成分分析和聚类分析的红河州植烟土壤特性研究[J].西南农业学报，2019，24(7)：1607-1613.

[7] 李自林，陆亚春，赵磊峰，等.广西隆林县植烟土壤肥力评价[J].土壤通报，2020，51(5)：1042-1048.

[8] 段淑辉，刘天波，李建勇，等.湖南浏阳植烟土壤肥力评价及土壤养分变化[J].中国烟草科学，2017，38(2)：33-38.

[9] 张一扬，粟深河，林北森，等.靖西市植烟土壤有机质含量的时空变异特征[J].土壤，2020，52(1)：202-206.

[10] 邓小华，蔡兴，张明发，等.喀斯特地区湘西州植烟土壤pH分布特征及其影响因素[J].水土保持学报，2016，30(6)：1-6.

[11] 陈海生，王世界，赵玉明，等.豫中植烟区土壤速效养分的空间变异分析[J].水土保持研究，2014，21(4)：78-81.

[12] 杨林，曾江艳，张建华.土壤减氮对烟叶产量和品质的影响[J].现代农业科技，2018 (11)：1-2，13.

[13] 施锘，孔光辉，张光海，等.磷素胁迫对雪茄烟生长和干物质积累及磷素利用率的影响[J].山东农业科学，2025，57(3)：139-145.

[14] 王智英，徐靖，施剑飞，等.不同钾素水平对烤烟苗期生长发育及养分吸收的影响[J].安徽农业科学，2026，54(1)：148-152.

[15] 余雪洋，左伟标，李义强，等.大农业系统豫中烤烟氯离子调控研究[J].安徽农业科学，2024，52(22)：8-19.

[16] 丁燕芳，赵凤霞，米琳，等.豫中植烟土壤有效态微量元素与pH和有机质的关系[J].土壤，2022，54(1)：88-94.

[17] 张甘霖，龚子同.土壤调查实验室分析方法[M].北京：科学出版社，2012.

[18] 陈江华，刘建利，李志宏.中国植烟土壤及烟草养分综合管理[M].北京：科学出版社，2008.

[19] 郭东锋，张福建，张继光，等.基于云模型的皖南植烟土壤养分适宜性评价[J].烟草科技，2020，53(9)：18-24.

[20] 董昆乐，马宜林，赵世民，等.洛阳烟区土壤养分状况与分布特征分析[J].山东农业科学，2019，51(11)：114-117.

[21] 郭山虎，张锦涛，何志明，等.马龙植烟区土壤pH值和中微量元素的分布特征[J].湖南农业科学，2020(10)：58-61.

[22] 杜倩，王冰，李冰，等.凉山州植烟土壤养分与烟叶化学品质的相关性分析[J].农学学报，2021，11(11)：54-60.

[23] 胡国松，郑伟，王震东，等.烤烟营养原理[M].北京：科学出版社，2000.

[24] 刘青丽，张云贵，焦永鸽，等.西南烟区氮素供应与烤烟氮素吸收的关系[J].植物营养与肥料学报，2017，23(3)：757-764.

[25] 李健铭.不同有机肥料对烤烟生长、养分吸收与土壤碳氮矿化的影响[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2020

[26] 王亚宁,张翔,范艺宽,等.烟草氯素营养研究进展与展望[J].中国农学通报,2017,33(27):66-70.

[27] 王新修,苟剑渝,刘京,等.遵义市植烟土壤肥力综合评价及空间分布[J].中国土壤与肥料,2024(2):1-9.

[28] 徐建明,张甘霖,谢正苗,等.土壤质量指标与评价[M].北京:科学出版社,2010.

[29] 李春顺,胡俊杰,张莉,等.永州植烟土壤pH分布特征及其影响因素初探[J].湖南文理学院学报(自然科学版),2024,36(2):51-57,88.

[30] 孙奕荷,张凯,鲁琪飞,等.三个典型植烟生态区土壤养分适宜性评价[J].作物杂志,2023(1):115-121.

[31] 徐丹婕,平清伟,尚进,等.基于玉米秸秆乙酸法制浆废液的土壤改良剂研究[J].中国造纸,2025,44(8):33-41.

[32] 唐贤,黄伟濠,卢瑛,等.珠江三角洲平原不同母质土壤磷形态分布及其有效性[J].土壤通报,2019,50(4):861-869.

[33] Murphy P N C, Bell A, Turner B L. Phosphorus speciation in temperate basaltic grassland soils by solution 31P NMR spectroscopy[J].European Journal of Soil Science, 2009, 60(4): 638-651.

[34] 范艺宽,张翔,黄元炯,等.河南烟区土壤和灌溉水氯含量状况评价[J].烟草科技,2003(8):39-41.

[35] 关博谦,石孝均,霍沁建,等.重庆市烟区土壤-烤烟氯素含量及其变化研究[J].水土保持学报,2005(1):89-92.

[36] 李晓杰,王国平,张建民.烤烟土壤肥力质量评价方法与应用[J].土壤通报,2015,46(6):1365-1370.

[37] 谢小立,胡国松,王芳.烤烟土壤养分状况与烟叶品质的关系研究[J].中国烟草科学,2019,40(2):52-58.

[38] 陈家宙,赵文平,刘国顺.河南烟区土壤肥力质量评价及影响因素分析[J].中国烟草科学,2018,39(1):27-34.

(责编&校对 刘钊)