

抚仙湖流域典型农田土壤质量状况及烟草种植障碍因素^①

徐勇贤¹, 梁强^{2,3}, 周勇¹, 陈志清¹, 王火焰², 黄标^{2,3*}

(1 云南省烟草公司玉溪市公司澄江分公司, 云南澄江 652500; 2 土壤与农业可持续发展重点实验室(中国科学院), 南京 210008; 3 中国科学院大学中丹学院, 北京 100190)

摘要: 以云南抚仙湖北岸澄江市约 1 130 hm²农田土壤为研究对象, 通过调查分析土壤物理、化学性质, 评价了研究区土壤质量状况, 并进一步利用空间分析、相关分析与主成分分析对研究区烟草种植的主要土壤障碍因子进行了分析。结果表明: 研究区土壤整体偏黏(平均黏粒含量 496.7 g/kg)、偏碱(pH 均值 7.45)、有机质含量较高(均值 28.55 g/kg)、大中微量元素有效态含量也整体偏高(水解性氮均值 119.10 mg/kg、有效磷均值 68.85 mg/kg、速效钾均值 208.44 mg/kg、有效锰均值 28.14 mg/kg), 但各土壤性质在空间上变异较大。土壤基础地力、人为施肥管理、质地、酸碱性、有效锰是影响该地区土壤肥力的主要障碍因素, 这些因素可通过有机质、速效钾、黏粒、pH、有效锰等指标进行评价, 并指导烟草种植的土壤管理。烟草种植过程中应根据土壤性质、烟草养分需求, 结合土壤养分空间变异采取相应的土壤改良措施。

关键词: 土壤肥力质量; 空间变异; 烟草种植; 土壤障碍因素

中图分类号: X825 文献标志码: A

Soil Quality and Constraint Factors for Tobacco Planting of Typical Farmlands in Fuxian Lake Watershed

XU Yongxian¹, LIANG Qiang^{2,3}, ZHOU Yong¹, CHEN Zhiqing¹, WANG Huoyan², HUANG Biao^{2,3*}

(1 Chengjiang Branch, Yuxi Company of Yunnan Province Tobacco Company, Chengjiang, Yunnan 652500, China; 2 Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In this study, about 1 130 hm² of farmland soils were selected as the study object in Chengjiang City at the north bank of Fuxian Lake, Yunnan Province, soil quality was evaluated by investigating and analyzing physical and chemical properties, and the main constraint factors for tobacco planting were further analyzed using spatial analysis, correlation analysis and principal component analysis. The results showed that soils were relatively clayey (mean clay content 496.7 g/kg), alkaline (mean pH 7.45), high nutrient contents (mean organic matter 28.55 g/kg, hydrolyzed nitrogen 119.10 mg/kg, available phosphorus 68.85 mg/kg, available potassium 208.44 mg/kg, and Mn 28.14 mg/kg), but soil properties varied greatly in space. Soil basic fertility, farming management, texture, acidity and alkalinity, and available Mn were the main constraint factors affecting soil fertility, these factors can be evaluated by indicators such as organic matter, available potassium, clay, pH, available Mn and so on, and can guide soil management for tobacco planting. The amelioration measures should be taken according to soil properties, nutrient requirements, and spatial variation in the management of tobacco planting soil.

Key words: Soil fertility quality; Spatial variation; Tobacco planting; Soil constraint factors

抚仙湖是中国最大的淡水蓄水湖泊, 对云南澄江市的调蓄灌溉、生态保护和运输旅游有着重要作用^[1]。抚仙湖北部澄江市是典型的农田种植区^[2], 蔬菜种植面积广, 化肥施用过量已造成土壤氮磷残余量

增加、流域面源污染严重等问题^[3]。为了保护抚仙湖流域水质, 同时充分利用耕地, 政府决定调整农业种植结构, 在抚仙湖流域种植烟草等氮磷需求量小的经济作物, 兼顾环境、经济、农业问题^[4]。土壤中适宜

①基金项目: 云南省烟草公司玉溪市公司科技计划项目(yxyc2022009)资助。

* 通讯作者(bhuang@issas.ac.cn)

作者简介: 徐勇贤(1982—), 男, 江苏扬中人, 硕士研究生, 主要从事土壤与环境污染研究。E-mail: 28400350@qq.com

的氮磷总量是获得优质烟草的必要基础,在合适的土壤氮磷总量范围内,烟草的品质和产量随着养分含量增加而增加^[5],土壤中氮磷过量则导致烟草品质下降以及农业面源污染等问题^[6]。因此,有必要明确抚仙湖流域烟田土壤质量状况,判断烟田种植烟草主要障碍因子,为当地烟草种植增效和保护抚仙湖水质提供参考。

有关植烟土壤质量研究已有不少文献报道^[7-9]。包玲凤等^[10]通过主成分分析法与最小数据集法研究发现,云南省保山市种植烟草最主要的土壤障碍因子为田间持水量、碱解氮、pH 和有机质。Hermiyanto 等^[11]利用主成分分析法得到,印度尼西亚 Jember 地区种植烟草的土壤肥力关键因素为阳离子交换量、全氮、pH 和有效磷。由此可以看出,烟草种植地区土壤主要障碍因子有 pH、氮磷等因素。由于各个植烟区自然状况、田间管理等条件不同,影响烟草种植的关键土壤性质也各不相同,而土壤性状的全面性也影响土壤的综合质量及障碍因素的判断^[12]。针对抚仙湖流域烟田土壤质量评价,目前仅关注到相关土壤养分状况分析。李泉清等^[13]研究发现,抚仙湖北岸耕作土壤有效氮磷均处于高水平,其中 90% 以上的耕作土壤有效氮含量高于 100 mg/kg 以及有效磷含量高于 40 mg/kg。赵文军等^[14]测定了抚仙湖流域 4 种类型土壤(水稻土、冲积土、红壤、紫色土)的理化性状,发现土壤有效磷含量均较高,为 19.03~64.48 mg/kg。可见,目前关于抚仙湖流域烟田土壤质量和障碍因子分析的研究还相对较薄弱,有必要针对该地区土壤的基本理化性质以及大中微量元素等开展全

面综合的植烟土壤质量状况评价,并分析其土壤障碍因子。

基于以上,本研究选取抚仙湖流域澄江市右所镇和龙街镇典型农田作为研究对象,通过测定土壤颗粒组成(黏粒、粉粒、砂粒)、pH、有机质、全氮、水解性氮、有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁、有效硫、有效铁、有效铜、有效锌、有效锰 16 项指标,明确研究区土壤性质基本状况及其空间分布,确定影响植烟土壤肥力的关键指标,分析可能存在的障碍类型,并提出合理的改良意见,为抚仙湖流域烟田土壤烟草种植和养分管理提供重要的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省澄江市,位于抚仙湖北部,地处北亚热带低纬高原季风气候区,平均气温为 16.5 °C,常年日照时长为 2 141.8 h,常年降水量为 900~1 200 mm。澄江市主要有盆地、湖泊、河谷 3 种地貌,山区面积占 73.42%,水域面积占 18.16%,坝区占 7.97%,最高海拔为 2 920 m,最低海拔为 1 327 m,绝对高差近 1 500 m。土壤类型以红壤(55.32%)为主,其次为酸性紫色土(13.52%)、水稻土(7.29%)和棕壤(4.62%),少量红色石灰土(0.49%)和冲积土(0.14%)。本研究选择澄江市右所镇和龙街镇相对连片的区域作为研究对象(图 1),研究区面积约 1 130 hm²,土壤类型包括水稻土、紫色土和冲积土等,土地利用类型包括稻田、蔬菜地、林地、园地、旱地等。



图 1 研究区域与土壤样点分布图
Fig. 1 Study area and sampling sites

1.2 土样采集与分析

在研究区内,均匀布设了600多个样点,去除建设用地、水面、林地等样点,最终确定了502个样点进行样品采集(图1),于2022年7—8月完成样品采集和制备工作。采样时记录点位经纬度信息,在每个采样点周围采集4~5处表层土壤(0~20 cm),去除枯枝落叶、石块等后,混合均匀缩分取1~2 kg装袋,送回实验室风干磨碎后,常温保存待测。

土壤样品分析指标包括土壤机械组成(<2 μm 黏粒、2~50 μm 粉粒和 50~2 000 μm 砂粒)、pH、有机质、有效硫、全氮、水解性氮、有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁、有效铁、有效铜、有效锌、有效锰,测定方法参考《土壤农化分析》^[15]。其中,土壤 pH 测定采用电位法;有机质测定采用外加热重铬酸钾氧化滴定法;有效硫测定采用氯化钙溶液浸提-硫酸钡比浊法;土壤机械组成测定采用激光粒度仪法,并参考杨金玲等^[16]的方法将测得的体积百分含量换算为质量含量(g/kg);交换性钙和交换性镁测定采用乙酸铵浸提-电感耦合等离子光谱法;全氮测定采用重铬酸钾-硫酸消化法;水解性氮测定采用碱解扩散法;有效磷测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,有效钾测定采用乙酸铵浸提-火焰光度计法;土壤有效铁、锰、铜、锌测定采用二乙基三胺五乙酸(DTPA)浸提-电感耦合等离子体原子发射光谱法。

1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 21.0 软件对各土壤性质进行描述性统计,并做相关分析和主成分分析,确定影响土壤肥力的关键指标。采用 ArcGIS 10.2 软件绘制各土壤性质的空间分布图。

2 结果与讨论

2.1 土壤性质的描述性统计

研究区土壤基本性质见表1。研究区土壤黏粒含量较高,平均达495.1 g/kg,以黏性土壤为主,以黏粒含量>400 g/kg为黏土计,72%以上的土壤质地为黏土。研究区土壤pH变化范围较大,为5.03~8.19,均值7.45。pH<6.5的土壤样点仅34个,pH 6.5~7.5的土壤样点177个,pH>7.5的土壤样点291个,整体呈中碱性。土壤有机质含量变化范围也较大,为6.90~69.60 g/kg,平均达28.55 g/kg,其基本呈正态分布,变异系数、峰度和偏度均不高。整体上,研究区土壤有机质含量较高,25 g/kg以上的样点占66%,低于10 g/kg的土壤样点仅5个。

土壤大中量营养元素中,全氮含量范围在0.50~

4.30 g/kg,平均值为1.79 g/kg,与土壤有机质含量分布相似,基本呈正态分布,变异系数、峰度和偏度均不高(表1)。水解性氮含量变化范围相对较宽,为23.10~563.10 mg/kg,高低相差1个数量级,平均值为119.10 mg/kg,含量主要集中在90~200 mg/kg,特别高含量的样点较少,导致峰度和偏度较高。有效磷含量也有较大的变化范围,为10.78~295.71 mg/kg,高低也相差1个数量级,平均值为68.85 mg/kg,明显高于其他类似地区的农田土壤^[17-21],变异系数不高,但峰度和偏度稍高。速效钾含量变化范围相对较小,为55.60~432.00 mg/kg,平均值为208.44 mg/kg,呈近正态分布,也要高于其他地区的农田土壤^[17-21]。

土壤交换性钙含量个别样点差异极大,变化范围为5.06~258.98 cmol/kg,平均值为25.69 cmol/kg(表1),但最高值的样点仅1个,剔除这一最高点,其变化范围则为5.06~81.90 cmol/kg,呈近正态分布。因这一最高点的影响,导致研究区土壤交换性钙含量峰度和偏度明显变大。土壤交换性镁含量有较宽的变化范围,在0.75~10.34 cmol/kg,平均值为5.04 cmol/kg,但标准差、峰度和偏度均不高,呈正态分布。土壤有效硫含量的变化范围更大,为7.06~3 291.28 mg/kg,呈数量级的差异,平均值为103.52 mg/kg,变异系数在2以上,但有效硫含量小于200 mg/kg的样点占比高于90%,分布较为集中,与最高值相差较大,因此,土壤有效硫的峰度和偏度均很高。

土壤微量营养元素中,土壤有效铜含量变化范围在0.50~27.60 mg/kg,平均值为4.35 mg/kg,有较宽的变化范围,但标准差、峰度和偏度均较高,分布有些偏态,相对含量较低的样点较多(表1)。土壤有效铁含量变化范围在7.23~233.93 mg/kg,平均值为43.89 mg/kg,与有效铜含量的情况类似,变化范围较宽,而标准差、峰度和偏度均较高,分布呈正偏态。土壤有效锰含量变化范围大,为3.85~304.50 mg/kg,平均值为28.14 mg/kg,其中较为特殊的是最高含量点位仅1个,其余样点含量在80 mg/kg以下,由此导致数据偏度极高,剔除这一样点,其分布特征与铜和铁类似,呈正偏态,含量较低的样点较多。土壤有效锌含量变化范围也大,为0.25~79.50 mg/kg,平均值为4.08 mg/kg。与有效锰一样,有效锌最高含量点位数很少,大于20 mg/kg的样点数仅3个,且集中于某个区域,其余样点含量在20 mg/kg以下,由此导致数据偏度极高,剔除3个高值样点,土壤有效锌含量的分布特征与其他微量元素类似,但其正偏态较其他微量元素更明显,含量较低的样点数比例更高。

表 1 土壤性质的描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of soil properties

指标	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数	峰度	偏度
黏粒(g/kg)	75.40	798.00	496.66	136.27	0.27	-0.68	0.12
粉粒(g/kg)	173.00	773.00	330.7	81.24	0.25	2.86	0.92
砂粒(g/kg)	28.36	626.03	172.7	102.33	0.59	1.24	0.94
pH	5.03	8.19	7.45	0.50	0.07	2.66	-1.51
有机质(g/kg)	6.90	69.60	28.55	9.45	0.33	0.42	0.30
全氮(mg/kg)	0.50	4.30	1.79	0.58	0.32	0.48	0.25
水解性氮(mg/kg)	23.10	563.10	119.10	59.67	0.50	11.34	2.17
有效磷(mg/kg)	0.25	79.50	68.85	44.15	0.64	2.97	1.59
速效钾(mg/kg)	55.60	432.00	208.44	67.97	0.33	-0.21	0.51
交换性钙(cmol/kg)	5.06	258.98	25.69	14.85	0.58	121.49	8.14
交换性镁(cmol/kg)	0.75	10.34	5.04	1.47	0.29	0.56	0.23
有效硫(mg/kg)	7.06	3 291.28	103.52	222.37	2.15	167.47	12.07
有效铜(mg/kg)	0.50	27.60	4.35	3.33	0.77	6.97	2.16
有效铁(mg/kg)	7.23	233.93	43.89	30.96	0.71	5.57	1.95
有效锰(mg/kg)	3.85	304.50	28.14	17.03	0.61	138.20	8.87
有效锌(mg/kg)	0.25	79.50	4.08	5.42	1.33	106.88	9.14

2.2 土壤性质空间分布及风险评价

从研究区土壤质地的分布来看(图 2A), 黏土质地主要分布在龙街镇的西部和右所镇的东部边缘, 黏壤土主要分布在右所镇中部和龙街镇北部局部地区, 其余质地类型(粉砂质黏土、粉砂质黏壤土、砂黏壤土、粉壤土、壤土和砂壤土)呈零散状分布于右所镇及龙街镇北部和西南角。土壤 pH 的分布分区较为明显(图 2B), 中性至酸性土壤($\text{pH} \leq 7.0$)分布范围主要在龙街镇的区域, 碱性土壤($\text{pH} > 7.0$)主要分布在右所镇的范围内。土壤有机质含量也有一定的局部分布特征(图 2C), 含量大于 40 mg/kg 的土壤主要分布在右所镇东部边缘的黏性土壤范围。龙街镇主要在中部局部地区有机质含量较高, 而西部大片黏土地块有机质含量并不高。

关于土壤大中量营养元素的空间分布, 绝大部分地区的全氮含量在 1~2 g/kg(图 2D), 其分布与有机质分布有类似之处, 在右所镇东部和龙街镇中部含量较高, 高于 2 g/kg。水解性氮的分布与全氮有相似之处(图 2E), 绝大部分地块的水解性氮含量超过 80 mg/kg, 属于烟草种植的中度适宜范围^[18-20], 可能会影响烟草的品质。值得注意的是, 研究区水解性氮含量整体偏高, 这一方面会影响烟草生产, 另一方面存在氮素流失风险, 会对当地的水环境产生一定影响。土壤有效磷含量在东部右所镇的地块尤其东部边缘地区的地块整体高于西部龙街镇的地块(图 2F)。其中, 东部地区有效磷含量大部分高于 60 mg/kg, 东部边缘甚至超

过 120 mg/kg, 应引起重视。一般认为, 土壤有效磷含量超过 60 mg/kg 开始出现淋溶或地表径流流失的风险, 而超过 120 mg/kg, 其风险已相当高^[22]。研究区土壤速效钾整体较高, 绝大部分含量超过 166 mg/kg(图 2G), 属于烟草种植最适宜的速效钾范围^[19-21,23]。在 pH 较高的东部地区地块土壤交换性钙含量均较高(图 2H), 高于烟草种植土壤的适宜要求($< 18 \text{ cmol/kg}$)^[19-20,23], 成为该地区烟草种植的一个限制因素。土壤交换性镁含量的空间分布与交换性钙有相似之处(图 2I), 同样大部分土壤的交换性镁含量高于适宜烟草种植的条件($< 3.2 \text{ cmol/kg}$)^[19-20,23], 也成为该地区烟草种植的一个限制因素。有效硫的空间分布以东部右所镇范围内的耕地含量较高为特征(图 2J), 该地区近一半面积土壤有效硫含量在 130 mg/kg 以上, 而西部龙街镇范围内的土壤大多在此含量以下。

关于土壤微量元素的空间分布, 有效铁的空间分布与其他养分元素的分布明显不同, 即东部右所镇土壤有效铁含量较低, 而龙街镇土壤有效铁含量较高(图 2K), 这可能与土壤酸碱性相关, 一般 pH 较低的条件下有效铁含量较高, 但也可能与土壤利用方式有关, 一般水田有效铁含量较高, 旱地则较低^[23]。有效锰与有效铁有相似之处, 但土壤有效锰含量的变化受土壤利用方式的影响更明显(图 2L), 水田土壤有效锰含量普遍高于旱地土壤。一般认为, 有效铁含量小于 2.5 mg/kg、有效锰含量小于 5 mg/kg 将会出现缺素的症状, 但该地区土壤均超过了这些限值^[18-20], 并

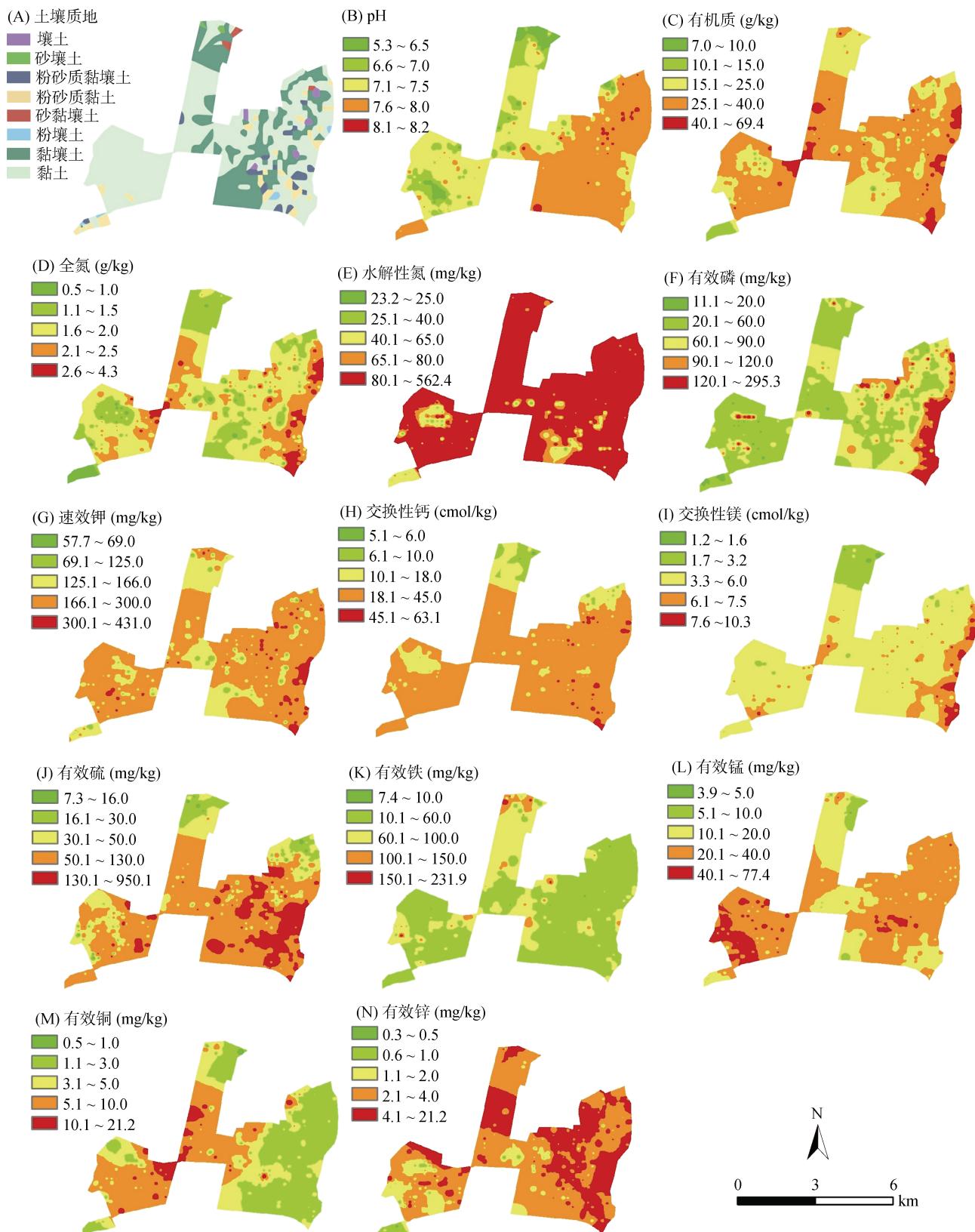


图 2 土壤性质的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of soil properties

无明显铁锰缺乏的情况。有效铜的空间分布与铁、锰接近(图 2M), 即在中酸性土壤上含量较高, 碱性土壤上含量较低, 但整体上均较高, 高于 0.2 mg/kg 的缺乏限值^[18-20], 不存在铜缺乏问题。有效锌的空间分布与其他几个微量元素明显不同, 受土壤 pH 影响不明显, 甚至在 pH 较高的碱性土壤分布区含量较高(图 2N), 其原因有待深入研究。值得注意的是, 尽管土壤有效锌含量整体较高, 但仍有部分地区土壤有效态锌含量小于 0.5 mg/kg 的缺乏限值^[18-20], 需要引起注意。

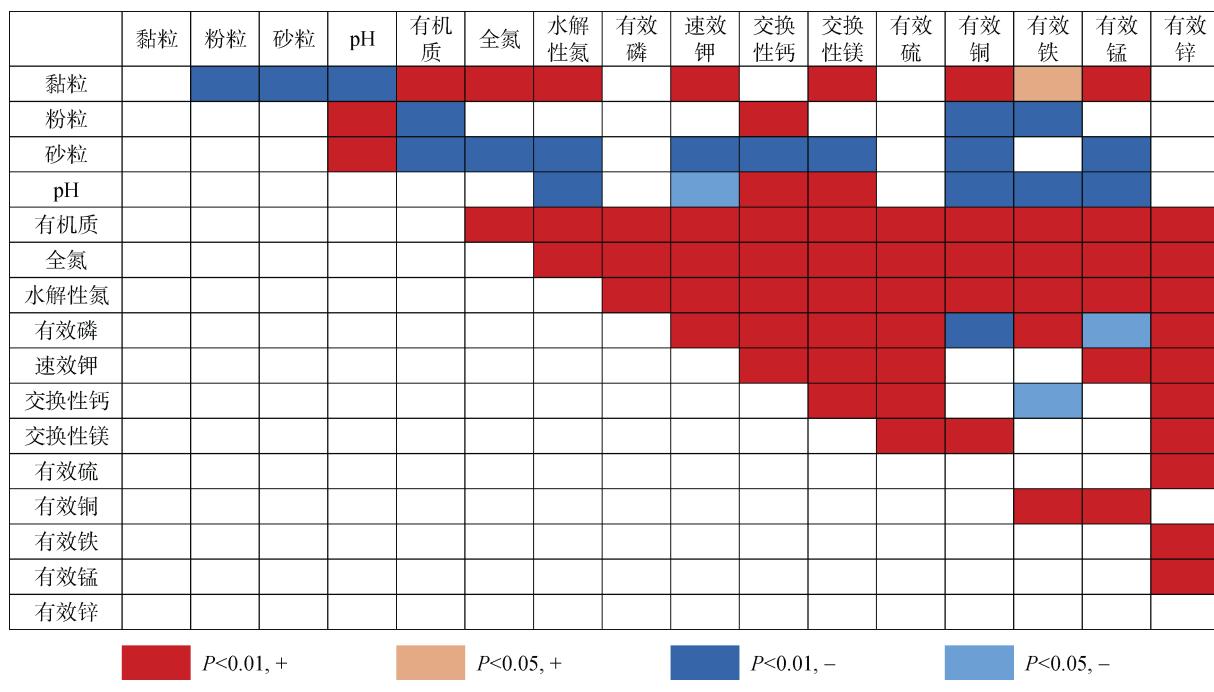


图 3 土壤性质相关性统计结果
Fig. 3 Correlation between soil basic properties

由于大部分土壤性质之间均有显著或极显著的相关性, 为了确定研究区影响烟草种植的关键因素, 本研究进一步进行了土壤性质间的主成分分析, 从结果(表 2)看, 共获得 5 个特征值大于 1 的主成分, 累计贡献率达 73.68%, 可以反映研究区土壤的基本状况, 表明研究区有 5 个关键因素影响着土壤肥力状况。

表 2 土壤性质的主成分及特征值
Table 2 Principal components and eigenvalues of soil basic properties

主成分	特征值	贡献率(%)	累积贡献率(%)
1	4.93	30.80	30.80
2	2.87	17.96	48.76
3	1.78	11.14	59.90
4	1.16	7.23	67.13
5	1.05	6.55	73.68

2.3 土壤障碍因素分析

为了找出影响烟草种植的土壤主要障碍因子以及评价的关键指标, 本研究对各土壤性质进行了相关性分析(图 3), 结果显示, 所测定的指标间相关性均较高, 但土壤有效锌含量与 pH 无显著相关性, 这与一般规律不符, 而其与有机质及各种大中量营养元素含量均呈极显著的正相关关系, 这可能与研究区历史上蔬菜种植过程中大量施肥和施用含锌杀菌剂有一定关系, 从而导致该地区碱性土壤中有效锌含量反而明显偏高。

在第一主成分(F1)上, 因子载荷较高的土壤性质包括土壤有机质、全氮、交换性钙和交换性镁(表 3), 这一组合可能是土壤基础地力的表征, 因为在年均气温较高的高原地区, 土壤有机质和全氮含量相对较稳定, 土壤交换性钙镁含量在 pH 较高的碱性环境下也较稳定, 人为施肥管理对其影响不大。第二主成分(F2)中, 有效磷、速效钾、水解性氮、有效硫、有效锌均有较高的因子载荷, 同时, 有机质也有一定的载荷, 这可能与研究区历史上蔬菜种植过程中, 高量施用化肥和有机肥导致这些养分的有效性提高有关, 而有效锌含量的提高可能还与含锌杀虫剂的使用有关, 总之, 该因子是人为施肥管理的表征。第三主成分(F3)明显是土壤质地的表征, 因为载荷较高的土壤性质为黏粒、粉粒和砂粒含量, 且黏粒与粉粒和砂粒互为相反载荷。第四主成分(F4)中载荷较高的土壤性质包括

土壤 pH、有效铜、有效铁, 是土壤酸碱性的表征, 土壤 pH 与微量元素有效性互为正负, pH 越高微量元素越容易缺乏。第五主成分(F5)中高因子载荷的土壤性质主要为有效锰, 与土壤中有效锰含量的提高有关。

表 3 土壤性质在各主成分上的载荷

Table 3 Loadings of soil basic properties on each principal component

土壤性质	主成分载荷				
	F1	F2	F3	F4	F5
黏粒	0.23	0.00	-0.91	0.09	0.28
粉粒	0.20	-0.08	0.82	-0.30	0.20
砂粒	-0.47	0.07	0.56	0.12	-0.53
pH	0.30	-0.14	0.36	-0.67	-0.21
有机质	0.73	0.45	-0.10	0.35	0.05
全氮	0.73	0.50	-0.03	0.26	0.07
水解性氮	0.27	0.65	-0.04	0.14	0.30
有效磷	0.25	0.67	0.09	0.04	-0.19
速效钾	0.22	0.78	-0.04	-0.01	0.23
交换性钙	0.82	0.21	0.11	-0.18	-0.04
交换性镁	0.80	0.23	-0.16	-0.07	0.05
有效硫	0.15	0.62	-0.11	-0.19	-0.10
有效铜	0.30	-0.17	-0.37	0.63	0.26
有效铁	0.03	0.09	0.01	0.88	-0.07
有效锰	-0.04	0.08	-0.06	0.12	0.89
有效锌	0.05	0.71	0.04	0.15	-0.01

以上分析表明, 土壤基础地力、人为施肥管理、质地、酸碱性、有效锰是影响该地区土壤肥力的主要

障碍因素。考虑土壤性质在各主成分的载荷、主成分内高载荷性质之间的相关性, 土壤性质获取的难易程度, 各障碍因素的关键评价指标建议为: 有机质、速效钾、黏粒、pH、有效锰 5 个指标, 它们的变化反映了各自主成分内其余几个性质的变化, 因为这些指标在各自主成分内与其余高载荷的土壤性质均有极显著的相关性。

2.4 土壤障碍因素空间分布

为了显示研究区主要障碍因素的空间分布, 将每个样品的各个主成分因子载荷归一化后, 分为 4 个区间: [-1.00, 0.50]、[-0.49, 0.00]、[0.01, 0.50]、[0.51, 1.00], 分别反映 4 个障碍影响程度, 即明显负效应、一般负效应、一般正效应、明显正效应, 并将赋值制成空间分布图。

F1 正效应最明显的地区在右所镇的东部地区, 龙街镇的北部地区和右所镇的北部部分区域负效应最为明显(图 4A), 表明这些区域的地块土壤基础肥力较低。F2 负效应地区较明显, 在龙街镇最西南角一片地块存在最明显的有效氮磷钾硫的缺乏障碍, 其余地方大部分地区存在一定上述营养元素有效性低的情况(图 4B)。F3 的土壤质地障碍可能需要关注显著负效应的地区, 即龙街镇的西部和右所镇的东部边缘地区(图 4C), 这些地区质地异常黏重, 有可能影响烟草的种植, 成为这些地区的一个土壤障碍因素。F4 与土壤酸碱度以及相关微量营养丰缺有关, 整体上看, 西部右所镇的大部分碱性土壤出现微量营养元

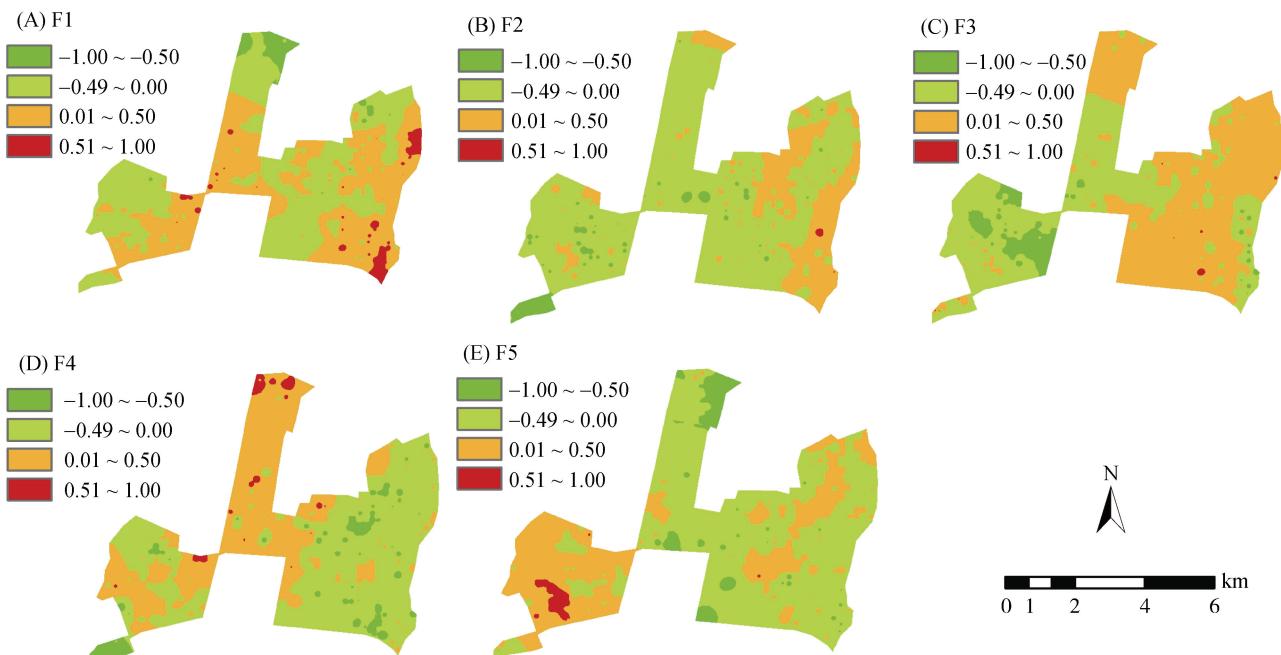


图 4 土壤障碍因素空间分布
Fig. 4 Spatial distributions of soil constraint factors

素缺乏的可能性较高，需要引起注意(图 4D)。F5 赋值较高的地区，主要分布在龙街镇中部和龙街镇西部，这些地方的土壤有效锰的含量较高，有可能对烟草种植和品质存在一定影响(图 4E)。

2.5 烟草种植过程中土壤肥力管理的思考

云南作为我国重要的烟草生产基地，有着得天独厚的气候优势，为优质烟叶的生产提供了重要的基础条件^[23]。但由于复杂的土壤形成条件、历史人为活动作用的影响，对烟草种植仍存在着一些肥力障碍因素，如何改良这些土壤障碍因素，是未来烟草生产中必须解决的问题。

首先，针对由土壤有机质反映的基础地力障碍，在研究区主要表现在土壤有机质含量过高，在有机质含量处于最适宜烟草种植范围($15 \sim 25 \text{ g/kg}$)^[19-20]的样点仅占总样点数的 24.5%，绝大部分田块土壤有机质均大于 25 g/kg (图 2C)。由于土壤大部分呈碱性，其中量营养元素交换性钙和镁含量也偏高。其次，研究区大部分田块历史上多年从事蔬菜种植，种植管理过程中肥料投入量大，作物吸收的养分远远小于投入，导致土壤养分大量积累，水解性氮和有效磷含量远远大于烟草种植的最适宜范围(水解性氮 80 mg/kg 、有效磷 20 mg/kg)^[18-20](表 1、图 2E、图 2F)。因此，在今后的养分管理中，控制养分投入是关键，应严格按照烟草生产的养分需求，充分利用土壤中的养分资源，精准施肥，一方面保证烟叶质量，另一方面也可减轻周边水体富营养化的压力。

另一个对烟草生产影响较大的障碍因素是土壤质地。如前所述，研究区大部分土壤的质地为黏土或黏壤土，仅西北角局部地区为壤土，因此，如何改善土壤的物理性能，是未来烟草生产管理中面临的另一个挑战。土壤物理性能改良以增加土壤有机质，提高土壤团聚性较为普遍，但考虑到研究区土壤有机质含量偏高，有机质含量过高会影响烟叶的品质，显然这不是一个合适的改良方法。因此，建议加强深耕，或在烟草根区添加一些砂性物质改良土壤的通透性，这应成为未来技术研发的重要课题。

至于土壤的酸碱性障碍，主要表现在研究区分布有大片的碱性土壤，尤其在西部的龙街镇，大部分土壤 $\text{pH} > 7$ (图 2B)，勉强适宜烟草种植。建议对于 pH 较高(> 8)的区域，烟草种植时，应考虑施用一些生理酸性肥料，适当降低土壤 pH ；而对弱碱性的土壤，在种植烟草一定年限后，土壤 pH 会有所下降，可能对烟草的生长和品质影响不大。碱性土壤伴随的微量元素缺乏问题在研究区并不普遍，这一情况只在龙街

镇的北部地区存在，这一地区正好也是有机质含量较低的低基础地力区，可以考虑施用一定量的有机肥，补充部分微量元素。而研究区土壤有效锰的累积是由于土壤淹水稻引起，一旦稻田改种烟草，土壤通透性增加，锰的有效性降低，障碍也就自然消除。

3 结论

云南澄江市抚仙湖沿岸地区，受土壤本身特性和人为因素影响，导致土壤偏碱、偏黏，而长期养分高投入的蔬菜种植，导致氮、磷、钙甚至部分微量元素等土壤养分整体明显偏高，给研究区烟草种植带来一定的土壤障碍。整体上，土壤基础地力、人为施肥管理、质地、酸碱性、有效锰是限制研究区土壤肥力的主要障碍因素，且这些障碍因素在空间分布上存在明显变异。在未来烟草种植的土壤管理中，应重点关注养分积累和土壤质地障碍，注重养分精准调控，充分利用土壤本身养分资源。建议采用深耕或添加土壤物理改良材料，改善土壤的通透性。同时在空间上，根据各个障碍因素的空间变异采取差异化管理和改良措施，保障烟草产量，提高烟草品质。

参考文献：

- [1] 陈相标, 丁文荣. 滇中高原湖泊流域土地利用变化及生态系统服务功能[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 205-212.
- [2] 杨绍聪, 张钟, 吕艳玲, 等. 不同施肥技术对蔬菜后作水稻产量及养分积累的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(10): 2402-2410.
- [3] 杨绍聪, 吕艳玲, 沐婵, 等. 抚仙湖北部农田区不同施肥对水稻产量、氮素吸收及利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(15): 1-6.
- [4] 史任芬, 资静云, 吴金花. 抚仙湖流域农业面源污染防治和转型发展分析[J]. 农村实用技术, 2022(7): 123-124.
- [5] 谢新乔, 陆俊平, 田育天, 等. 玉溪市 100 m 级植烟土壤质地品质的区划研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1113-1122.
- [6] 杜彩艳, 吴迪, 李家连, 等. 施氮量对抚仙湖流域烟田氮磷流失及氮素利用的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(3): 80-87.
- [7] 杨树明, 余小芬, 邹炳礼, 等. 曲靖植烟土壤 pH 和主要养分空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1299-1308.
- [8] 时仁勇, 王昌军, 闫静, 等. 武陵秦巴山区不同母质植烟土壤抗酸化性能研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(2): 367-377.
- [9] 张红雪, 朱巧莲, 郭力铭, 等. 烟秆生物质炭与化肥配施对植烟土壤有机碳组分及微生物的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1149-1156.
- [10] 包玲凤, 杨明英, 尹兴盛, 等. 基于最小数据集的保山市植烟土壤质量评价与障碍诊断[J]. 西南农业学报, 2023, 36(3): 612-622.

- [11] Hermiyanto B, Winarso S, Kusumandaru W. Soil chemical properties index of tobacco plantation land in jember district[J]. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2016, 9: 181–190.
- [12] 樊亚男, 姚利鹏, 瞿明凯, 等. 基于产量的稻田肥力质量评价及障碍因子区划——以进贤县为例[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1157–1169.
- [13] 李泉清, 钱荣青, 沐婵, 等. 抚仙湖北岸耕作土壤有效养分含量状况分析[J]. *云南农业科技*, 2015(6): 9–11.
- [14] 赵文军, 田阳阳, 常立, 等. 抚仙湖流域植烟土壤养分特征及烟叶综合质量对比[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(5): 513–518.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 杨金玲, 张甘霖, 李德成, 等. 激光法与湿筛-吸管法测定土壤颗粒组成的转换及质地确定[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 772–780.
- [17] 梁红. 重庆植烟土壤肥力特征及评价[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [18] 秦建成. 土壤适宜性评价方法研究——以重庆市彭水县植烟土壤为例[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [19] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [20] 苏德成. 烟草栽培[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2000.
- [21] 王子芳, 高明, 魏朝富, 等. 植烟土壤养分的空间变异特征及适宜性评价——以重庆市彭水县为例[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2008, 30(1): 98–103.
- [22] Zhang G L, Burghardt W, Yang J L. Chemical criteria to assess risk of phosphorus leaching from urban soils[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(1): 72–77.
- [23] 李建伟, 郑少清, 唐远驹, 等. 我国南北烟区烤烟产量和营养特性研究[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 35(1): 94–100.