

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.01.019

张龙, 刘燕翔, 彭华伟, 等. 毕节市植烟土壤耕层容重的空间特征及影响因素. 土壤, 2022, 54(1): 145–151.

毕节市植烟土壤耕层容重的空间特征及影响因素^①

张 龙¹, 刘燕翔¹, 彭华伟¹, 张雨禾², 庄舜尧^{2*}, 王美艳², 史学正²

(1 贵州省烟草公司毕节市公司, 贵州毕节 551700; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要: 土壤容重是影响作物生长的重要土壤属性, 也是土壤改良的重要依据, 对土壤容重空间分布及影响因素的了解有助于生产管理及土壤改良方案的实施。本研究通过系统采样, 测定了毕节市植烟区 653 个样点的土壤容重、机械组成及有机质含量, 分析了土壤容重的空间分布特征, 探讨了影响土壤容重的因素。结果表明: 毕节市植烟土壤容重平均为 1.20 g/cm³, 变异系数为 12.4%。在空间上, 土壤容重以西部为高, 中部略低。土壤母质及土壤类型对土壤容重影响较大, 其中, 红色风化壳及砂页岩类土壤容重较高, 而粗晶岩发育土壤容重最小; 土壤类型中, 以紫色土容重最高, 而水稻土最低。土壤有机质含量与土壤容重呈负相关($P < 0.01$)。依据植物生长特性, 结合土壤质地分级, 本研究给出了七星关与威宁的部分地区为土壤容重改良的重点区。

关键词: 植烟土壤; 土壤容重; 空间特征; 相关性分析

中图分类号: S572 文献标志码: A

Spatial Characteristics of Bulk Density and Related Influencing Factors of Bijie Tobacco-Planting Soils

ZHANG Long¹, LIU Yanxiang¹, PENG Huawei¹, ZHANG Yuhe², ZHUANG Shuniao^{2*}, WANG Meiyan², SHI Xuezheng²

(1 Bijie Tobacco Company Ltd., Bijie, Guizhou 551700, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Soil bulk density is not only an important soil attribute that affects crop growth, but also an important goal of soil improvement. The understanding of the spatial distribution of soil bulk density and its influencing factors is helpful to the implementation of production management and soil improvement. In order to explore the spatial distribution of soil bulk density in Bijie of Guizhou Province, in total 653 topsoil samples (0–20 cm) were collected systematically from the typical tobacco-planting fields and soil bulk densities and mechanical compositions of the topsoil samples were determined. The spatial characteristics of soil bulk density were analyzed and the influencing factors were discussed. The results showed that the average bulk density in Bijie was 1.20 g/cm³ with a variation of 12.4%. In spatial, soil bulk density was higher in the west and lower in the middle. Soil parent material and type had significant impacts on soil bulk density. Soil derived from red weathering crust and sandy shale had the highest bulk density while coarse crystal had the smallest. Bulk density of the purple soil was the highest while the paddy soil was the smallest. Analysis showed that soil organic content was negatively related to soil bulk density. According to the plant growth and soil texture, soil bulk density should be improved in areas of Qixingguan and Weining for tobacco production.

Key words: Tobacco-planting soil; Soil bulk density; Spatial characteristics; Relationship analysis

土壤容重是土壤的基本物理性质, 能表征土壤的紧实度、松紧度及孔隙度, 反映土壤的透水性、通气性及植物根系生长的阻力环境^[1-2], 因而会显著影响作物根系的生长发育和分布, 进而影响作物产质量^[3]。

近年来有不少关于植烟土壤质地、容重和通气孔隙等方面的研究。如, 宋莹丽等^[4]通过对全国 8 个省份植烟土壤质地与烟叶品质的调查, 发现适宜的高砂粒和低黏粒含量土壤有利于烟叶优良品质形成。胡伟^[5]发现, 土壤容重的增加会影响烟株的生长, 导

^①基金项目: 贵州省烟草公司毕节市公司科技项目(2018520500240064)和贵州烟草公司科技项目(201703)资助。

* 通讯作者(syzhuang@issas.ac.cn)

作者简介: 张龙(1987—), 男, 贵州威宁人, 硕士, 农艺师, 主要研究方向为烟草化学。E-mail: 281824960@qq.com

致根系向下伸展的能力减弱,烟草适宜生长的土壤容重介于 $1.12 \sim 1.27 \text{ g/cm}^3$ 。郝葳和田孝华^[6]研究表明,优质烟区适宜的土壤质地为砂壤土至中壤土,其中以砂砾质壤土最好,而质地黏重的烟田烤烟生长发育会受到一定程度抑制,并影响其烟叶产质量。王树会和李天福^[7]研究发现,在一定范围内,土壤黏重,容重增大,烟株生长发育延迟,株高和叶面积生长受到抑制。为使土壤容重达到适宜烟草生长条件,祖朝龙等^[8]在皖南烟区水稻土利用稻壳掺播方法,改变土壤质地,降低土壤容重,使烟株农艺性状得到显著提升。李云飞等^[9]对陕西宝鸡黏土烟区进行掺砂试验发现,黏土适当掺砂(30%),可改善土壤物理特性,提高烟株根系活力,改善烟叶氮、钾营养,有利于光合作用,提高烟叶产量。孙益权等^[10]在贵州毕节质地黏重植烟黄壤上添加 7.5%、15.0% 和 22.5% 的多孔改良剂进行试验,发现土壤通气孔隙度分别增加了 2.7%、8.6% 和 10.6%,多孔改良剂的体积比每增加 1%,土壤通气孔隙将增加 0.5%。钱壮壮等^[11]在黔西南的试验表明,多孔改良剂用量为 $75 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$ 时,可以提高烤烟均价及中上等烟比率。这些结果表明,降低土壤容重,增加土壤通气透水能力,对于烤烟生长有着重要的促进作用。

毕节是贵州和我国重要的烤烟生产基地^[12],烤烟种植面积为 3.73 万 hm^2 ,烤烟风格隶属西南高原生态区清甜香型和黔桂山地生态区蜜甜香型^[13]。研究毕节植烟土壤特性,尤其是土壤容重的空间分布特

征,可为毕节烟区植烟土壤的改良及烤烟优质高产提供决策依据。然而,目前尚缺乏这些方面的系统数据。因此,本研究通过毕节市典型植烟土壤的系统采样,分析土壤容重、颗粒组成及有机质含量,以了解烟区土壤容重的空间分布特征及影响因素,以为植烟土壤规划、决策、利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

毕节市位于川、滇、黔三省交界处,范围为 $103^{\circ}36' \sim 106^{\circ}43'E$ 和 $26^{\circ}21' \sim 27^{\circ}46'N$,属于典型喀斯特岩溶地貌。植烟土壤类型以黄壤为主,其次是石灰土、红壤和黄棕壤等^[14]。毕节市地形地貌东西区别显著,其地势西高东低,东部地区以金沙为例,水网发达、地表分割破碎、山地和丘陵地貌显著,适宜发展农业。西部威宁县等地山高坡陡、地势起伏大,是典型的山原山地地貌,林牧业发展潜力大,但水土流失严重。植烟土壤耕作方式主要以烤烟连作或烤烟与小麦、玉米、土豆、油菜等不定期轮作为主^[15]。

1.2 土样采集

2018—2019 年,依据空间均匀取样的原则并结合烟草种植情况,如图 1 所示,在毕节市共布设 653 个代表性烟田样点,并利用 GPS 定位仪记录点位的位置。在每个代表性样点,用 100 cm^3 的环刀采集 3 组耕层 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤,编号后用封口袋封装,然后再用塑料带包裹保存,同步采集分析用样品,送回实验室分析。

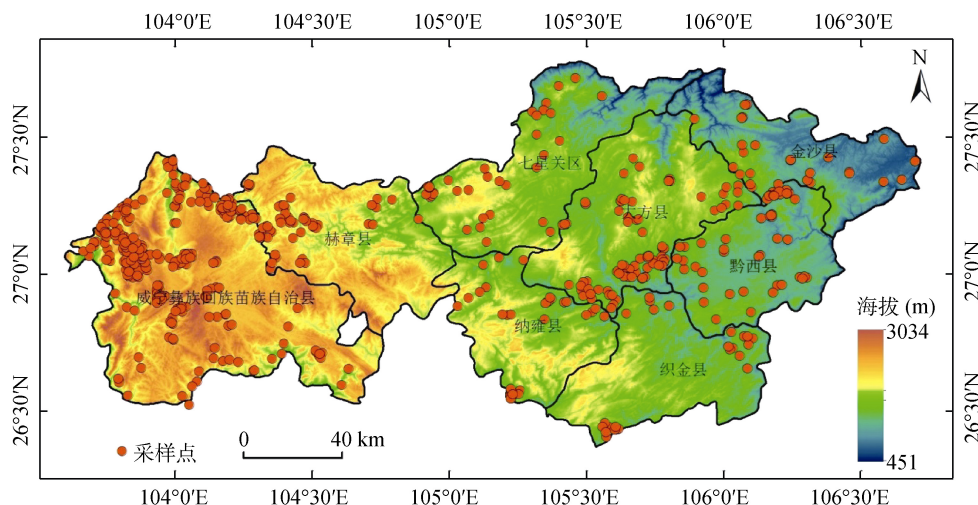


图 1 植烟土壤容重采样点空间位置

Fig. 1 Spatial distribution sampling sites of soil bulk density of tobacco-planting fields in Bijie

1.3 土样分析测定

土壤容重测定采用环刀法;粒径分析采用吸管法;有机质测定采用重铬酸钾氧化法^[15]。

1.4 数据处理与分析方法

试验数据用 IBM Statistics SPSS 22.0 软件进行正态分布检验和描述性统计分析,用 ArcGIS 10.2 中高斯

普通克里格法及半方差函数对土壤容重进行空间分布分析^[16],并利用Origin 8.0绘制土壤容重频数分布图^[17]。

2 结果与分析

2.1 植烟土壤容重统计特征

根据统计数据(表 1),毕节市植烟土壤耕层容重平均为 1.20 g/cm³,最小为 0.82 g/cm³,最大为 1.74 g/cm³,变异系数为 12.8%,为中等程度变异。将数据整理成频次图(图 2)后,可以更清楚地看到,毕节市植烟区耕层土壤容重以 1.10 ~ 1.20 g/cm³ 的样点数最多,其次是容重 1.00 ~ 1.10 g/cm³ 与 1.20 ~ 1.30 g/cm³ 两组样点数。从容重指标频次分布形态看,毕节市植烟土壤容重数据整体符合正态分布(通过 K-S 检验)。

表 1 毕节市不同区县植烟土壤耕层容重(g/cm³)
Table 1 Topsoil bulk densities of tobacco-planting fields in different counties of Bijie

区县	最小	最大	平均	变异系数(%)
七星关	0.95	1.44	1.16 bc	11.3
大方	0.82	1.52	1.17 b	10.3
金沙	1.03	1.30	1.15 bc	6.10
织金	0.96	1.30	1.14 c	6.70
黔西	0.92	1.43	1.15 bc	9.20
纳雍	0.97	1.33	1.14 c	8.31
赫章	0.96	1.50	1.17 b	9.40
威宁	0.93	1.74	1.25 a	13.8

注:平均值后不同小写字母表示不同区县间差异显著($P<0.05$)。

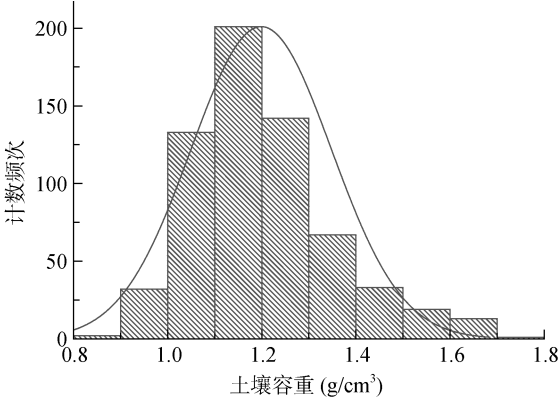


图 2 毕节市植烟土壤容重频数图
Fig. 2 Frequency distribution of soil bulk density of tobacco-planting fields in Bijie City

由表 1 数据还可知,不同植烟区县以威宁县的土壤容重最大,平均为 1.25 g/cm³,显著高于其他区县;其他区县的土壤容重为 1.14 ~ 1.17 g/cm³,组间没有显著差异。从变异系数来看,以威宁县的 13.8% 为最高,七星关区 11.3% 次之,金沙县 6.10% 最小,说明不同区县土壤容重在空间的不均匀分布。

2.2 植烟土壤容重的空间特征

从毕节市植烟土壤容重的空间分布来看(图 3),土壤容重最高位于威宁县西部,其次是赫章县西部及七星关区大部,而七星关区与大方县交界处土壤容重相对较低。

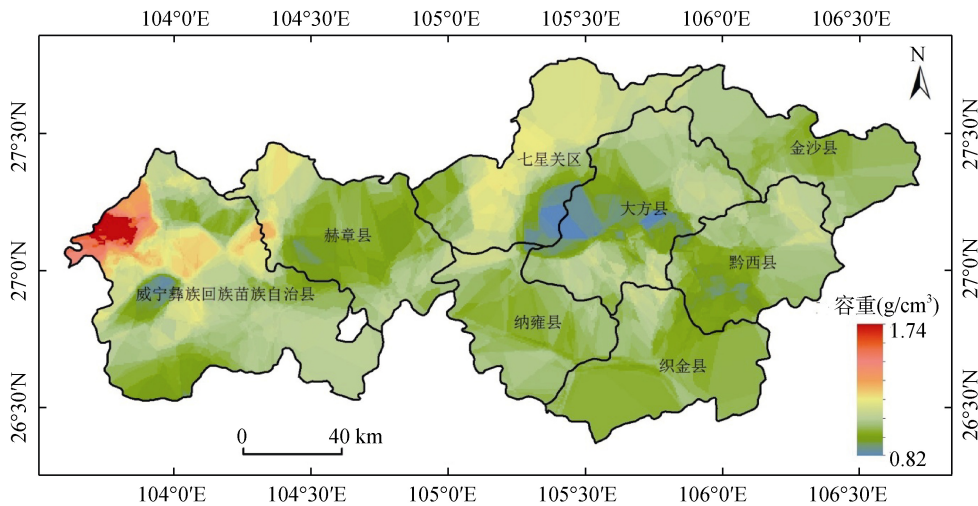


图 3 毕节市植烟土壤容重空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of soil bulk density of tobacco-planting fields in Bijie City

利用半方差函数进行分析,可以获得土壤容重的空间变异尺度和程度。由图 4 可知,土壤容重的空间变异半方差函数(Gaussian 模型最优)块金值(C_0)为 1.32×10^{-3} ,基台值(C)为 3.45×10^{-3} ,变程为 36 234 m;其中块金效应值(C_0/C_0+C)为 61.7%,表明土壤容重空

间相关性中等,受到空间的随机因素和结构因素共同影响;相对而言,随机因素对土壤容重的空间分异影响更大,包括耕作、施肥、种植等人为活动因素。

2.3 植烟土壤容重的影响因素

影响土壤容重的自然因素有土壤母质、类型、海

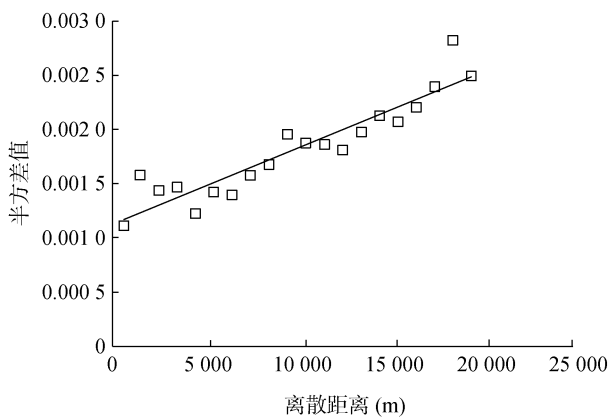


图 4 毕节市植烟区土壤容重的半方差函数
Fig. 4 Semivariance function of soil bulk density of tobacco-planting fields in Bijie

拔、降水、光照等。本次采样所涉及的母质类型主要包括：碳酸盐岩、砂页岩、紫色岩、红色风化壳、基性岩、泥质岩、石英岩、新冲积物及粗晶岩类等，其中以碳酸盐岩、砂页岩、紫色岩 3 类母质为主，占有有效样点总数的 85.4%(表 2)。土壤容重以红色风化壳

及砂页岩类发育土壤为最高，平均为 1.25 ~ 1.27 g/cm³，主要分布于威宁与赫章县；粗晶岩发育土壤容重最小，但样点数少。

从土壤类型看，所采样点基本覆盖了毕节市主要土壤类型，包括黄壤、黄棕壤、棕壤、紫色土、石灰土、水稻土及粗骨土等土类(表 3)，其中土壤容重以大紫泥土(紫色土)最高，为 1.32 g/cm³，主要分布于威宁及赫章县；烂肉泥(水稻土)较低为 1.10 g/cm³，样点数较少，主要分布于纳雍与黔西县。可见，不同土壤类型的土壤容重是存在显著差异的。

土壤有机质是影响土壤容重的重要因素之一。从土壤容重与土壤有机质含量的关系可见(图 5)，两者呈显著负相关关系($r = -0.498\ 7$, $P < 0.01$)，说明土壤有机质含量的提高有助于降低土壤容重，这是土壤容重改良的一个重要途径。

3 讨论

土壤容重是土壤改良的重要指标，了解土壤容重

表 2 毕节市不同成土母质的土壤容重
Table 2 Soil bulk densities of different soil parent materials in Bijie

母质类型	有效样点数	有效样点数占比(%)	平均值(g/cm ³)	最大值(g/cm ³)	最小值(g/cm ³)	变异系数(%)
碳酸盐岩类	259	40.8	1.16 c	1.67	0.82	11.7
砂页岩类	199	31.3	1.25 a	1.74	0.95	17.1
紫色岩类	84	13.2	1.19 b	1.56	0.88	13.2
红色风化壳	37	5.83	1.27 a	1.68	0.91	19.5
基性岩类	28	4.41	1.19 b	1.56	0.94	13.9
泥质岩类	12	1.89	1.15 c	1.39	0.96	13.2
石英岩类	8	1.26	1.14 c	1.30	1.03	9.60
新冲积物	6	0.94	1.21 b	1.58	1.09	17.2
粗晶岩类	2	0.31	1.10 d	1.12	1.09	1.90

表 3 毕节市不同土壤类型的土壤容重
Table 3 Soil bulk densities of different soil types in Bijie

土类	土属	有效样点数	有效样点数占比(%)	平均值(g/cm ³)	最大值(g/cm ³)	最小值(g/cm ³)	变异系数(%)
黄棕壤	暗黄棕壤	159	25.0	1.23 b	1.68	0.82	16.4
黄壤	黄壤	149	23.5	1.16 c	1.52	0.88	11.5
水稻土	水稻土	85	13.4	1.18 c	1.57	0.91	12.4
棕壤	棕壤性土	84	13.2	1.17 c	1.67	0.96	13.2
紫色土	大紫泥土	46	7.24	1.32 a	1.74	1.02	19.9
粗骨土	粗骨土	40	6.30	1.24 b	1.69	0.93	14.7
石灰土	石质土	32	5.04	1.24 b	1.60	1.01	17.6
石灰土	大泥土	24	3.78	1.18 c	1.28	1.04	7.0
水稻土	烂肉泥	8	1.26	1.10 d	1.29	0.97	11.2
山地草甸土	草甸泥土	8	1.26	1.22 b	1.46	0.97	13.3

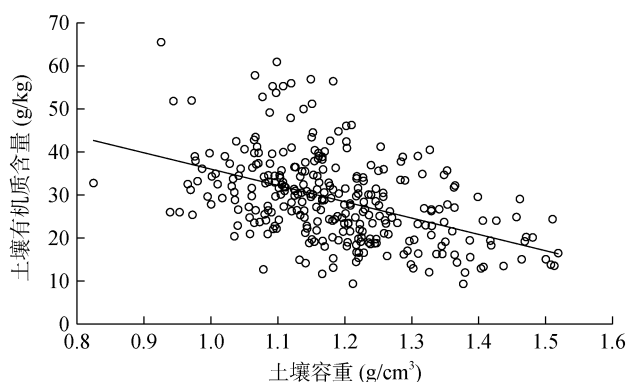


图5 土壤容重与有机质含量的关系

Fig. 5 Relationship between soil bulk density and soil organic matter content

的分布及影响因素是改良的重要基础。本研究空间分析结果发现, 毕节植烟土壤容重空间相关性中等, 受到空间的随机因素和结构因素共同影响。邱倩倩等^[18]对锡林郭勒草原土壤容重的空间变异性进行调查分析, 结果发现其呈现中等空间变异性。李晓晓等^[19]对西北干旱区县域农田表层土壤容重进行调查, 发现属于弱变异性, 但在空间上呈现由西向东逐渐减小的南北走向条带状分布格局, 本研究结果与之一致。

毕节市植烟区土壤容重存在显著的区域差异, 影响因素较多。郑纪勇等^[1]指出, 成土母质、成土过程、气候、生物作用以及耕作的影响使土壤容重具有非常大的变异。参考已有研究结果, 本研究认为影响毕节市植烟土壤容重的主要因素: 一是土壤母质及类型。本研究发现, 成土母质为碳酸盐岩、泥质岩及石英岩类时, 土壤容重较小, 而成土母质为红色风化壳及砂页岩类时, 则较高。类似地, 曹顺爱和李军^[20]研究发现, 成土母质为石英砂岩、花岗岩、砂页岩、泥质砂岩时, 发育的土壤良好, 容重较小, 这是由于花岗岩和砂页岩发育的土壤以砂粒为主, 而玄武岩发育的土壤以黏粒为主, 不同母质发育土壤的砂粒和黏粒的含量存在显著差异($P<0.05$)^[21]。二是耕作方式。邓永晟等^[22]研究发现, 垂直深旋耕可降低土壤容重 $0.11 \sim 0.12 \text{ g/cm}^3$, 提高土壤孔隙度 $4.66 \sim 6.81$ 个百分点。刘棋等^[23]探究了耕作方式对山地烟田土壤容重及烤烟根系的影响, 结果发现深耕、深松措施能有效改善山地烟田土壤容重和孔隙度等土壤物理性状, 优化植烟土壤环境, 促进烤烟根系生长发育。三是地形因素。王鑫等^[24]对毕节市植烟土壤的研究发现, 耕层厚度与高程显

著正相关; 赵晓雪等^[25]对不同地形位置的土壤物理性质进行分析, 结果发现, 土壤容重为坡中最大, 坡上次之, 坡下最小。四是有机质含量。大量研究表明^[26-29], 土壤容重与土壤有机质含量呈现显著的负相关关系, 这是由于土壤有机质对土壤团聚体和矿质结构、组成具有重要影响, 从而造成了不同土壤有机质含量间土壤容重的显著差异, 本研究结果与之一致。可见, 植烟土壤容重是各种因素综合作用的结果, 通过采用针对性的改良方法可以有效改变土壤容重。

本研究系统采样分析结果表明, 毕节市植烟土壤耕层容重平均为 1.20 g/cm^3 , 比较适合作物生长; 但由于存在空间变异, 容重大于 1.20 g/cm^3 的样点数为 270 个, 占总数的 43.2%; 大于 1.50 g/cm^3 的样点数为 33 个, 占 5.3%(图 2)。仅从土壤容重数据看, 容重大于 1.50 g/cm^3 的样点应着重改良。但从作物生长看, 土壤容重还应结合土壤质地才能确定是否需要进行土壤改良。对于砂质土壤, 土壤容重大于 1.80 g/cm^3 时, 植物根系无法穿透, 相应地, 砂壤为 1.60 g/cm^3 时, 壤质为 1.50 g/cm^3 时, 黏壤为 1.40 g/cm^3 时^[30]。如果按极限容重的 80% 作为合适植物生长的土壤容重, 那么砂质、砂壤、壤质及黏壤对应的土壤容重分别为 1.44 、 1.28 、 1.20 和 1.12 g/cm^3 , 这可以作为土壤容重改良的参考。据此, 本研究标记了毕节市植烟土壤容重大于该标准的区域, 以示重点改良区域(图 6), 可见, 威宁县及七星关区部分区域应为重点改良区(深色部分)。

土壤容重是土壤重要的物理特性, 与土壤的持水性、通气性及养分固持转化有着重要关系, 对作物生长起重要影响。烤烟为重要的经济作物, 其经济价值与品质密不可分^[31], 良好的生长环境是其品质的保证。因此, 明确植烟土壤改良区域, 通过合理的改良方法改善植烟土壤, 从而使之适合优质烤烟生产, 这是烤烟生产中的重要内容。

4 结论

毕节市植烟土壤容重平均为 1.2 g/cm^3 , 为中等变异性, 空间相关性中等, 受随机因素与结构因素共同作用; 其总体上呈近似由西北向东南逐渐减小的分布格局。土壤类型、有机质及母质对土壤容重影响较大, 威宁县及七星关区部分区域应是土壤改良的重点。

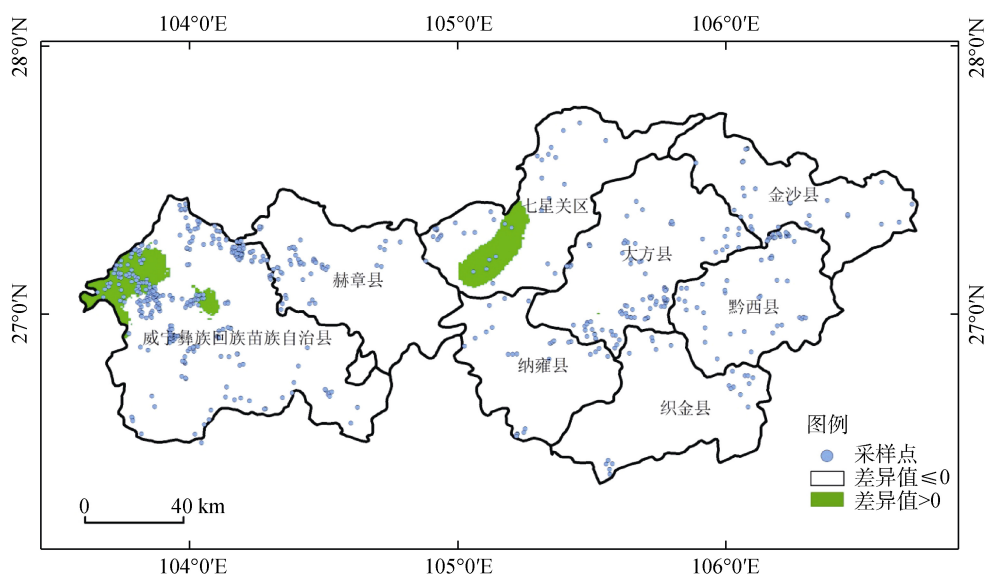


图 6 毕节市植烟土壤容重改良的重点区域

Fig. 6 Distribution of areas required improvement in soil bulk density in Bijie

参考文献:

- [1] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 53-56.
- [2] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [3] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227-241.
- [4] 宋莹丽, 陈翠玲, 焦哲恒, 等. 土壤质地分布与烟叶品质和风格特色的关系[J]. 烟草科技, 2014, 47(7): 75-78.
- [5] 胡伟. 土壤容重对烟草生长及植烟土化学性质影响的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [6] 郝葳, 田孝华. 优质烟区土壤物理性状分析与研究[J]. 烟草科技, 1996, 29(5): 34-35.
- [7] 王树会, 李天福. 土壤容重对烤烟生长及产量和品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2008, 10(5): 94-98.
- [8] 祖朝龙, 徐经年, 牛勇, 等. 稻壳掺播对土壤质地及烟叶生产的影响[J]. 土壤, 2011, 43(1): 107-112.
- [9] 李云飞, 张立新, 廖超英, 等. 粘土掺砂对烤烟氮、钾含量和光合特性及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(2): 85-89.
- [10] 孙益权, 王美艳, 黄化刚, 等. 新型多孔改良剂增强黄壤通气性能研究[J]. 土壤, 2019, 51(1): 121-126.
- [11] 钱壮壮, 邹焱, 董祥立, 等. 多孔改良剂对植烟土壤性状及烤烟产质量的影响[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(3): 35-38.
- [12] 亢贵霞, 徐宇航, 王玉川, 等. 毕节市植烟土壤分析与区划研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(20): 8496-8500.
- [13] 罗登山, 王兵, 乔学义. 《全国烤烟烟叶香型风格区划》解析[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(4): 1-9.
- [14] 周应书, 何兴辉, 谢永贵, 等. 毕节喀斯特山地植被恢复立地类型划分[J]. 林业科学, 2008, 44(12): 123-128.
- [15] 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.
- [16] 邓燕红. 不同地貌类型区表征土壤有机质空间变异的插值模型及尺度效应研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- [17] 刘妍月, 李军成. 长沙市大气中 PM_{2.5} 浓度分布的空间插值方法比较[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(2): 14-18.
- [18] 邱倩倩, 张卓栋, 孙传龙, 等. 锡林郭勒草地景观系统土壤容重空间变异及其与风蚀的关系[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 58-62, 66.
- [19] 李晓晓, 刘京, 赵世伟, 等. 西北干旱区区域农田表层土壤容重空间变异性特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 148-151.
- [20] 曹顺爱, 吕军. 土壤母质及其物理性状与茶叶品质关系[J]. 茶叶, 2003, 29(1): 13-16.
- [21] 姜坤, 秦海龙, 卢瑛, 等. 广东省不同母质发育土壤颗粒分布的分形维数特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 319-324.
- [22] 邓永晟, 张敏, 李伟, 等. 垂直深旋耕对植烟土壤理化性状和烤烟生长的影响[J]. 中国烟草科学, 2020, 41(6): 30-36.
- [23] 刘棋, 王津军, 封幸兵, 等. 耕作方式对山地烟田土壤物理性状及烤烟根系空间分布的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1673-1681.
- [24] 王鑫, 符德龙, 徐梦洁, 等. 毕节市植烟土壤耕层厚度空间分布及其与地形因子的相关性[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(2): 23-29.
- [25] 赵晓雪, 饶良懿, 申震洲. 砭砂岩区不同地形位置土壤物理性质分异特征[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6): 1359-1368.

- [26] 李冬初, 黄晶, 马常宝, 等. 中国农耕区土壤有机质含量及其与酸碱度和容重关系[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 252–258.
- [27] Benites V M, Machado P L O A, Fidalgo E C C, et al. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil[J]. Geoderma, 2007, 139(1/2): 90–97.
- [28] Adams W A. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils[J]. Journal of Soil Science, 1973, 24(1): 10–17.
- [29] Shi S W, Han P F. Estimating the soil carbon sequestration potential of China's Grain for Green Project[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2014, 28(11): 1279–1294.
- [30] Grant C D. The nature and properties of soils, 13th edition[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 95(1): 393–394.
- [31] 贾立华, 赵长星, 王月福, 等. 不同质地土壤对花生根系生长、分布和产量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(7): 684–690.