

DOI: 10.11766/trxb202011270652

张龙, 张忠启, 何轶, 彭华伟, 王美艳, 史学正, 孙维侠. 毕节植烟区炭基有机肥施用适宜性区划研究[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1397–1407.
ZHANG Long, ZHANG Zhongqi, HE Yi, PENG Huawei, WANG Meiyang, SHI Xuezheng, SUN Weixia. Study on Suitability Zoning of Biochar-based Organic Fertilizer Application in Bijie Tobacco Growing Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(5): 1397–1407.

毕节植烟区炭基有机肥施用适宜性区划研究*

张 龙¹, 张忠启^{2, 3†}, 何 轶¹, 彭华伟¹, 王美艳³, 史学正³, 孙维侠³

(1. 贵州省烟草公司毕节市公司, 贵州毕节 551700; 2. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏徐州 221116; 3. 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: 炭基有机肥在改善土壤环境方面的作用越来越受到重视, 不同土壤条件下炭基有机肥的施用分区研究对于区域土壤管理具有现实意义。选择贵州省毕节植烟区为案例区, 在对其土壤 pH 和酸碱缓冲潜力空间分异特征研究的基础上, 对该地区以改良酸化土壤为目的的炭基有机肥施用适宜性等级进行了区域划分。结果表明, 毕节烟区全部采样点的 pH 均值为 6.5, 其中大方县、七星关区和威宁县的 pH 均值较低, 分别仅为 6.2、6.3 和 6.3, 而织金县、金沙县和黔西县的 pH 均值超过了 7.0, 表现出较强的空间变异性; 土壤酸碱缓冲潜力在各县区之间也存在较大差异, 大方和威宁两县区的缓冲综合指数均仅为 0.96, 而织金县的缓冲综合指数达到了 1.23。各成土母岩和土壤类型的 pH 和酸碱缓冲潜力的综合分级表明: 砂岩、砂页岩和玄武岩土壤属于最适宜施用炭基有机肥来提升土壤 pH 的区域, 其次为砂页岩紫色土, 页岩黄壤、黄棕壤、紫色土, 以及碳酸盐岩黄棕壤和黄壤, 而碳酸盐岩粗骨土和石灰土则属于当前不宜施用炭基有机肥提升 pH 的区域。毕节烟区的全部乡镇中, 威宁、织金和赫章等县区的 82 个乡镇属于炭基有机肥重点施用乡镇, 大方县和七星关区为主的 144 个乡镇属于一般施用乡镇, 而黔西和金沙等县区中的 32 个乡镇属于当前不宜施用炭基有机肥的乡镇。研究结果不仅可对毕节烟区土壤的精准施肥和科学管理提供有益参考, 也可丰富烟区土壤管理分区的研究成果。

关键词: 土壤 pH; 炭基有机肥; 施肥分区; 毕节烟区

中图分类号: S159 文献标志码: A

Study on Suitability Zoning of Biochar-based Organic Fertilizer Application in Bijie Tobacco Growing Area

ZHANG Long¹, ZHANG Zhongqi^{2, 3†}, HE Yi¹, PENG Huawei¹, WANG Meiyang³, SHI Xuezheng³, SUN Weixia³

(1. Bijie branch of Guizhou Tobacco Company, Bijie, Guizhou 551700, China; 2. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: 【Objective】The role of biochar-based organic fertilizers in improving soil fertility and health, in general, has gained a lot of attention in recent times. It is the premise of scientific fertilization to make clear which planting areas are suitable for

* 贵州省烟草公司毕节市公司科技项目专项(2018520500240064)资助 Supported by the Science and Technology Special Project of Bijie Tobacco Company of Guizhou Province in China (No. 2018520500240064)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangzq128@126.com

作者简介: 张 龙(1987—), 男, 贵州威宁人, 农艺师, 硕士研究生, 主要从事土壤及烟叶品质分析与评估。E-mail: 281824960@qq.com.

收稿日期: 2020-11-27; 收到修改稿日期: 2021-05-31; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-08-10

applying biochar-based organic fertilizer and which areas are not. 【Method】Based on 2 059 soil samples in Bijie tobacco planting area of Guizhou Province, this study analyzed the distribution characteristics of soil pH and the spatial changes of soil properties, such as organic matter, available calcium, available magnesium, clay content and cation exchange capacity(CEC). Based on the overall consideration of soil pH and soil acid-base buffer potential, the suitability grade of biochar-based organic fertilizer application in the Bijie tobacco planting area was obtained. 【Result】The results showed that the average pH value of all sampling points in Bijie tobacco growing area was 6.5, which was weakly acidic. The average pH values of Dafang County, Qixingguan District and Weining County were only 6.2, 6.3 and 6.3, respectively, while those of Zhijin County, Jinsha County and Qianxi County were more than 7.0. The contents of organic matter, available calcium and magnesium, clay and CEC in tobacco planting soils in different counties were different, which led to the differences of soil acid-base buffer index between different counties. In all counties, the comprehensive index of acid buffer in Dafang and Weining was 0.96, while that in Zhijin was 1.23. Generally, there was a positive correlation between the pH value and the buffering potential of each parent rock soil type. The pH value of sandstone coarse bone soil and yellow soil was lower, and the value of the acid-base buffering potential index was also smaller. Also, the value of carbonate limestone soil with higher pH value was higher than that of other soil types. The suitability grade of biochar-based organic fertilizer calculated by pH value and acid-base buffer composite index showed that except for the purple soil of sand shale, the soil types derived from sandstone and sand shale were the most suitable application grade, and it was very necessary to apply a biochar-based organic fertilizer to improve soil pH value in these soil types. Carbonate and calcareous soils were not suitable for the application, which indicates that biochar-based organic fertilizer is not suitable for the two soil types without changing the current soil pH and acid-base buffer potential. The remaining soil types from other parent rocks belong to the suboptimal grade, and a certain amount of biochar-based organic fertilizer should be applied to these soil types to moderately increase the pH value, to keep the soil pH in a better state. 【Conclusion】From the township level, the town numbers of key application, general application, and unsuitable application grades were 82, 144, and 32 respectively. The key application towns of biochar-based organic fertilizer were mainly concentrated in Weining County, Zhijin County, and Hezhang County. The towns with general application grade were more, and most of them were distributed in Dafang County and Qixingguan District. The unsuitable application towns for biochar-based organic fertilizer are mainly concentrated in Qianxi County and Jinsha County. This study fully considered the effects of soil pH value and acid-base buffer potential on the suitability of biochar-based organic fertilizer, and identified the key application, general application and unsuitable application towns in the Bijie tobacco planting area. This study provides a scientific basis for the accurate application of biochar-based organic fertilizer in the Bijie tobacco planting area and also enriches the research connotation of soil management division in the tobacco planting area.

Key words: Soil pH; Biochar-based organic fertilizer; Fertilization zoning; Bijie tobacco growing area

良好的土壤生态环境是维持烟草产量和质量的重要前提^[1]。化肥的长期过度施用使得不少地区的植烟土壤生态受到破坏^[2]。生物质炭基肥作为一种新兴土壤肥料,因独特的物理化学性质有助于维持土壤生态系统的平衡,改善土壤的生态功能,对促进作物生长发育具有重要意义^[3-4]。在当前区域土壤环境保护和烟草生产可持续发展背景下,生物质炭及其衍生的炭基有机肥在提升烟草产量、品质和改善土壤环境方面,展现出优良的经济效益和环境效应^[5-6]。

生物质炭是由农作物废弃秸秆在完全或部分缺氧情况下,经热解炭化产生的一类高度芳香化的难

溶性固态物质,炭基有机肥是以生物质炭作为辅料生产出的有机肥^[7]。近几年,炭基有机肥施用对土壤环境的影响成为土壤学和环境科学的研究热点,一些学者对此问题开展研究并取得了一系列研究成果。首先,炭基有机肥可显著改变土壤物理性质。由于经过炭化,炭基有机肥通常具有巨大的比表面积和丰富的孔隙结构,其可利用自身的吸附性和高孔隙性增加土壤团聚体数量,降低土壤容重,增大孔隙度,使土壤结构得到有效改善,进而为作物根系的生长提供有利条件^[8];同时,炭基有机肥土壤孔径和分布改变了土壤水分的渗滤模式、停留时间和流动路径,可改善土壤保水能力,尤其对砂质土

壤的改良效果更为明显^[9]。其次，炭基有机肥对土壤化学性质具有重要影响。由于大多数生物质炭自身呈碱性，施用后能有效提升土壤 pH，在酸性较强的土壤中施用的效果更为明显^[1, 10]；由于炭基有机肥能提高土壤 pH，可进而降低重金属的活性，降低汞、铜、镉等重金属元素的危害^[11]；炭基有机肥中含有大量灰分元素，能大幅提高土壤溶液的盐基饱和度，增加土壤可溶性盐基离子的含量，进而对土壤电导率产生影响^[12]；生物质炭施入土壤后还能够增加土壤阳离子交换量，可间接改善土壤的保肥能力^[13-14]；由于炭基有机肥自身含有大量的养分元素，同时其表面含有大量的含氧官能团和电荷，使其对土壤中的 NH_4^+ 等离子具有较强的吸附性，从而减少土壤养分淋失，起到保持土壤养分和增加土壤固碳的效果^[15-16]。再者，炭基有机肥对土壤微生物的影响不容忽视。土壤微生物对环境变化的感受十分敏锐，对生物质炭施用的响应要较土壤理化性质的变化更快。一方面由于生物炭自身的孔隙结构会对水肥形成吸附作用，可形成适合土壤微生物生长的良好环境^[17]；另一方面由于生物炭自身具有较高的碳氮比，进入土壤后造成土壤体系碳氮比的改变，从而对土壤微生物的种群数量以及群落结构等产生较大影响^[18]。

已有研究表明，炭基有机肥对改善土壤生态环境作用明显，其效果在不同植烟区土壤得到证实^[5, 13, 17]。但需要指出的是，烟草最适宜生长的土壤 pH 为 5.5~7.0，炭基有机肥本身具有较强的碱性，应避免在 pH 偏高或很高的植烟区大量使用，以免造成土壤 pH 升至过高而对烟草生长产生不利影响。如何在土壤 pH 变幅较大地区科学确定炭基有机肥的施用区域和施用量是需要解决的现实问题。然而，已有研究多是基于定位试验的改良效果对比评价，针对特定土壤环境问题而施用炭基有机肥的区划研究报道甚少。毕节市烟草公司已建成了年产 10 万 t 的烟杆炭基有机肥生产基地，现在迫切需要明确该有机肥的适宜施用区。鉴于此，选择贵州省毕节植烟区土壤为研究对象，针对该烟区近几年大力推广烟杆炭基有机肥以改善土壤条件的现实需要，结合本烟区土壤酸化的空间分异特点，制定改良酸化土壤为目的的炭基有机肥施用管理分区，为该地区炭基有机肥的精准施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

毕节市位于贵州省西北部，地处 26°21'N~27°46'N、105°36'E~106°43'E 之间，面积约 26 900 km²，下辖威宁、赫章、七星关、纳雍、大方、织金、金沙和黔西 8 个县区。该市地处滇东高原向黔中山原过渡地带，地势呈西高东低，平均海拔 1 400 m。该市属北亚热带季风湿润气候，降雨量较为充沛，年均降水量 849~1 399 mm，多年平均温度 10~15℃，年日照数 1 096~1 769 h，无霜期为 245~290 d。该地区属于典型的岩溶山区，地形复杂，土壤类型多样，主要包括黄壤、黄棕壤、石灰土、紫色土、粗骨土等^[19]。毕节市是贵州省的主要烟草产区之一，以烟草种植为主，其他农作物主要有水稻、小麦、玉米和大豆等。

1.2 样品采集与处理

本研究在毕节植烟区共采集 2 059 个土壤样品，其主要母岩类型包括砂岩、砂页岩、页岩、碳酸盐岩和玄武岩。在 8 个县区中，威宁、赫章、七星关、纳雍、大方、织金、金沙和黔西的土壤样点数量分别为 958、168、143、129、309、81、98 和 173 个。土壤样品采集分别于 2018 年 11 月和 2019 年 11 月进行，采样时利用 GPS 定位仪记录采样点的经纬度和高程，并记录各采样点的土壤类型、地形地貌等相关环境信息。

1.3 测定项目与方法

根据研究的需要，本研究不仅对土壤 pH 进行测定，同时对与土壤酸碱缓冲潜力相关的土壤有机质、有效钙、有效镁、土壤黏粒和阳离子交换量（CEC）等指标进行测定。其中，土壤 pH 采用 pH 计法（水土比为 1:2.5）测定；土壤有机质含量采用重铬酸钾滴定法测定；土壤有效钙、有效镁含量通过乙酸铵交换—原子吸收分光光度法进行测定，土壤黏粒含量和 CEC 分别采用吸液管法（沉降法）和乙酸铵法测定，具体操作步骤参照土壤农化常规分析方法^[20]。

1.4 土壤 pH 分级和酸碱缓冲潜力综合指数

首先，根据植烟区土壤 pH 的已有研究^[21-23]，结合毕节地区的烟草种植情况，将土壤 pH 划分为很低（pH<5.0）、偏低（5.0<pH<5.5）、适宜

($5.5 < \text{pH} < 7.0$)、偏高 ($7.0 < \text{pH} < 7.5$) 和很高 ($\text{pH} > 7.5$) 5 个等级^[1]。

其次, 本研究基于采样点土壤有机质含量、有效钙镁含量(有效钙和有效镁含量之和)、土壤黏粒含量和阳离子交换量等多因子的综合指数评价法对毕节植烟区土壤酸碱缓冲性能进行评价^[24]。在对不同因子进行标准化处理(式(1))的基础上, 采用标准差因子赋权法得到各因子的权重(式(2)和式(3))和酸碱缓冲潜力指数, 进而综合得出各类型区的酸碱缓冲潜力综合指数(SI)。

$$T_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j} (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (1)$$

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{ij} - \bar{T}_j)^2}{n}}, \quad \bar{T}_j = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ij}}{n} \quad (2)$$

$$W_j = \frac{S_j}{\sum_{j=1}^m S_j} \quad (3)$$

式中, T_{ij} 为指标的标准化值, $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$, x_{ij} 为 j 指标在 i 类型上的指标值, \bar{x}_j 为 j 指标的平均值; S_j 为 j 指标的标准差; 各因子的权重值之和为 1, 即 $W_1 + W_2 + \dots + W_m = 1$ 。土壤酸碱缓冲潜力综合指数的计算公式如下:

$$SI_i = V_1 \times W_1 + V_2 \times W_2 + V_3 \times W_3 + V_4 \times W_4 \quad (4)$$

式中, SI_i 表示 i 类型的酸碱缓冲潜力的综合指数值; 其中 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 分别为 i 类型的有机质、有效钙镁、黏粒和 CEC 含量的标准化数值, W_1 、 W_2 、 W_3 和 W_4 分别为有机质、钙镁、黏粒和 CEC 含量的权重值, $W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 1$ 。

1.5 炭基有机肥施用适宜性等级划分

吴甫成等^[25]在湖南 6 种土壤类型上, 通过 pH 定值回滴实验发现不同土壤类型 pH 及其酸碱缓冲性能存在较大差异, 并指出 pH 与酸碱缓冲能力均是优化调控酸化土壤时需充分考虑的重要因素。本研究基于毕节烟区 2 059 个土壤采样点数据, 通过图斑类型法得到土壤 pH、有机质、有效钙镁、黏粒

和 CEC 含量的空间分布图, 并基于采样点土壤有机质、有效钙镁、黏粒和 CEC 含量数值计算得到土壤酸碱缓冲潜力综合指数(SI)值, 进而根据每个类型的 pH 和 SI 对毕节烟区土壤炭基有机肥的施用适宜性等级进行区域划分。在确定炭基有机肥施用的适宜性等级时, pH 越低, 施用炭基有机肥的适宜性等级越高; SI 越低, 表明该土壤抵御进一步酸化的能力越弱, 则施用炭基有机肥的适宜性等级也越高。为统筹考虑 pH 和 SI, 并消除两指标数值之间较大差异带来的影响, 保证结果的可靠性, 本研究先对 pH 和 SI 通过均值标准化法进行处理, 分别得到 pH' 和 SI', 然后通过两者的乘积(Pv)来确定炭基有机肥施用的适宜性等级^[26], 乘积越小, 适宜性等级越高, 反之越低。为增强适宜性等级的实用性, 本研究综合考虑土壤 pH 和酸碱缓冲能力, 根据 Pv 将施炭基有机肥用适宜性等级分为最适宜 ($\text{Pv} \leq 0.8$)、次适宜 ($0.8 < \text{Pv} \leq 1.2$) 和不适宜 ($\text{Pv} > 1.2$) 三个等级。

此外, 为了更好地指导当地炭基有机肥的施用, 本研究依据各乡镇的最适宜、次适宜和不适宜等级的面积比例, 将毕节地区所有乡镇划分为重点施用乡镇、一般施用乡镇、不宜施用乡镇三种类型。若该乡镇的最适宜等级的面积超过 1/3, 且最适宜和次适宜等级的面积之和超过该乡镇的 2/3, 则将该乡镇确定为重点施用乡镇, 若不宜等级的面积比例超过 2/3, 则将该乡镇确定为不宜施用乡镇, 将以上两类之外的乡镇确定为一般施用乡镇。

2 结果与讨论

2.1 毕节烟区土壤 pH 统计特征

研究区全部土壤采样点 ($n=2\ 059$) 的 pH 统计结果如表 1 所示。全部采样点的 pH 变幅为 3.8~8.7, 均值为 6.5, 整体上呈弱酸性。土壤 pH 变异系数为 0.2, 为中等强度变异, 表明土壤 pH 存在较强的空间变异性。就植烟土壤 pH 等级划分而言, pH 处于适宜等级 ($5.5 < \text{pH} < 7.0$) 的样点比例为 43.0%, 不足全部采样点的 1/2。土壤 pH 偏低和很低的样点比例分别为 13.2% 和 8.4%, 两等级占全部采样点的比例为 21.6%, 而 pH 偏高和很高的比例分别为 14.8% 和 20.7%, 两等级的样点比例之和达到 35.5%。

表 1 毕节植烟区各县区土壤 pH 基本统计特征

Table 1 Basic statistical characteristics of soil pH in tobacco growing areas of Bijie

县区 County	样点数 Sample size	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	pH 各等级分布频率 Distribution frequency of pH levels/%				
							<5.0	5.0~5.5	5.5~7.0	7.0~7.5	>7.5
							很低 Very low	偏低 Slightly low	适宜 Suitable	偏高 Slightly high	很高 Very high
威宁 ^①	958	3.8	8.5	6.3	1.0	0.2	10.9	13.9	45.3	13.9	16.0
赫章 ^②	168	5.0	8.4	6.8	1.0	0.1	0.6	13.5	44.2	12.9	28.8
七星关 ^③	143	4.3	8.1	6.3	1.0	0.2	12.6	13.3	44.8	15.4	14.0
纳雍 ^④	129	4.5	8.7	6.6	1.0	0.1	3.1	12.4	51.2	13.2	20.2
大方 ^⑤	309	4.4	8.6	6.2	1.1	0.2	14.0	18.5	42.2	8.1	17.2
织金 ^⑥	81	5.1	8.4	7.1	0.9	0.1	0	7.4	34.6	16.0	42.0
金沙 ^⑦	98	4.8	8.4	7.0	0.8	0.1	2.0	7.1	30.6	29.6	30.6
黔西 ^⑧	173	4.9	8.4	7.0	0.9	0.1	1.2	6.4	34.3	25.0	33.1
总体 ^⑨	2 059	3.8	8.7	6.5	1.0	0.2	8.4	13.2	43.0	14.8	20.7

①Weining, ②Hezhang, ③Qixingguan, ④Nayong, ⑤Dafang, ⑥Zhijin, ⑦Jinsha, ⑧Qianxi, ⑨Total.

各县区采样点土壤 pH 存在较大差异。从 pH 均值看,大方县、七星关区和威宁县的 pH 较低,分别仅为 6.2、6.3 和 6.3;而织金县、金沙县和黔西县的 pH 均值超过了 7.0。各县区 pH 分段统计表明,纳雍县土壤 pH 处于适宜等级的比例最大,达到 51.2%,其次为威宁县、七星关区、赫章县和大方县,比例分别为 45.3%、44.8%、44.2%和 42.2%,而金沙、黔西和织金三县区的比例较低,分别为 30.6%、34.3%和 34.6%。大方、七星关和威宁三县 pH 处于偏低和很低等级的比例较高,两等级之和分别为 32.5%、25.9%和 24.8%,而织金县和金沙县的相应比例均低于 10%;相反地,金沙、织金和黔西三县土壤 pH 处于偏高和很高等级的比例均超过了 50%,而大方、七星关和威宁相应等级的比例远低于前者。数据统计表明,毕节烟区大方、七星关和威宁三县区的酸化土壤面积比例较大,而金沙、织金和黔西三县区酸化土壤面积比例较小。

2.2 毕节烟区土壤酸缓冲能力特征

土壤酸缓冲潜力是表征土壤抗衡酸碱物质以减缓 pH 变化的能力,使土壤酸度尽可能地维持在一定范围内,而不致产生剧烈变化。土壤有机质含量、有效钙镁含量、黏粒含量及 CEC 等指标可有效

反映土壤酸缓冲容量的大小^[27-29]。表 2 为毕节各县区植烟土壤的酸碱缓冲性综合指数分布情况,可以看出各县区植烟土壤的有机质、有效钙镁、黏粒、CEC 等含量存在差异,导致了不同县区之间的土壤酸碱缓冲综合指数 SI 存在不同程度的差异。大方和威宁两县区的缓冲综合指数值最低,SI 仅为 0.96,这主要与两县的土壤有机质和有效钙镁含量偏低有关;织金和赫章县的土壤有机质和有效钙镁含量均偏高,因此两县的 SI 较大,分别为 1.23 和 1.12。这说明了不同县区植烟土壤不仅 pH 存在差异,而且其土壤阻止酸化的能力也存在差异。王敬华和张效年^[30]在华南开展了土壤酸敏感性分区研究,并指出酸缓冲性是影响酸化土壤改良效果的重要指标。故考虑土壤酸碱缓冲潜力进行炭基有机肥施用分区研究是非常必要的。

2.3 毕节烟区炭基有机肥施用适宜性分区

已有研究^[31]表明,母岩类型和土壤类型是影响土壤 pH 和土壤酸碱缓冲能力的重要因素。本研究基于母岩和土壤类型对毕节烟区土壤 pH 及其缓冲能力进行分区,以便为该地区以提升酸化土壤 pH 为目标的炭基有机肥施用提供科学依据。表 3 为不同母岩发育的各种土壤类型的 pH 及其酸碱缓冲能

表 2 毕节市各县区植烟土壤的酸碱缓冲性综合指数

Table 2 Comprehensive index of acid-base buffer capacity of tobacco growing soil in Bijie City

县区 County	有机质 Organic matter / (g·kg ⁻¹)	有效钙镁 Available calcium and magnesium / (g·kg ⁻¹)	黏粒 Clay / (g·kg ⁻¹)	CEC / (cmol·kg ⁻¹)	酸碱缓冲综合指数 Acid-base buffer composite index (SI)
威宁 ^①	27.4	2.9	253.0	17.1	0.96
赫章 ^②	31.8	3.5	294.0	18.9	1.12
七星关 ^③	33.7	3.0	316.0	16.8	1.07
纳雍 ^④	29.9	2.5	340.0	17.6	1.03
大方 ^⑤	29.6	2.5	308.0	17.2	0.96
织金 ^⑥	37.4	3.9	287.0	18.3	1.23
金沙 ^⑦	29.4	3.1	295.0	13.7	1.00
黔西 ^⑧	28.3	3.3	278.0	14.8	1.03

①Weining, ②Hezhang, ③Qixingguan, ④Nayong, ⑤Dafang, ⑥Zhi jin, ⑦Jinsha, ⑧Qianxi.

表 3 不同母岩发育土壤的炭基有机肥施用适宜性等级

Table 3 Suitability grades of carbon-based organic fertilizer application in soils with different parent rocks

母岩 Parent rock	土壤类型 Soil type	pH	土壤酸碱缓冲能力 Soil acid-base buffer capacity				酸碱缓冲综合指数 SI Acid-base buffer composite index	pH'和 SI'乘积 (Pv) ¹⁾ Product of pH 'and Si'	适宜性 等级 Suitability level
			有机质 OM / (g·kg ⁻¹)	有效钙镁 Available Ca and Mg / (g·kg ⁻¹)	黏粒 Clay / (g·kg ⁻¹)	CEC / (cmol·kg ⁻¹)			
砂岩 ^①	粗骨土	4.9	24.4	3.3	167	12.8	0.7	0.56	最适宜
	黄壤	5.4	22.6	1.6	220	12.3	0.7	0.56	最适宜
	黄棕壤	5.3	26.6	2.2	234	14.4	0.8	0.67	最适宜
	紫色土	5.9	18.7	3.0	163	15.9	0.8	0.72	最适宜
砂页岩 ^②	粗骨土	5.4	24.7	1.6	266	14.3	0.7	0.61	最适宜
	黄壤	5.8	29.1	2.0	311	15.8	0.9	0.80	最适宜
	黄棕壤	5.7	30.8	2.2	299	16.3	0.9	0.79	最适宜
	紫色土	5.8	28.3	2.3	262	18.2	0.9	0.81	次适宜
页岩 ^③	黄壤	5.9	36.0	2.4	369	18.8	1.1	1.03	次适宜
	黄棕壤	5.8	41.4	2.7	375	19.0	1.2	1.05	次适宜
	紫色土	6.3	31.8	3.7	318	19.4	1.1	1.06	次适宜
碳酸盐岩 ^④	粗骨土	7.4	22.2	2.9	179	16.3	1.2	1.36	不适宜
	黄壤	6.6	31.5	3.5	300	19.5	1.1	1.09	次适宜
	黄棕壤	6.5	30.0	4.3	330	23.2	1.1	1.11	次适宜
	石灰土	7.5	30.6	4.7	286	18.2	1.3	1.50	不适宜
玄武岩 ^⑤	黄棕壤	5.4	34.5	2.3	227	22.0	1.1	0.87	次适宜

注: 1) pH'和 SI'分别为 pH 和 SI 的均值标准化处理结果。Note: 1) pH' and SI' are the results of mean value normalization of pH and SI, respectively. ①Sandstone, ②Sand shale, ③Shale, ④Carbonate rocks, ⑤Basalt.

力分级,就全部母岩—土壤类型而言,砂岩、砂页岩和玄武岩土壤的 pH 整体较低,其中砂岩粗骨土的 pH 最低,仅为 4.9,其次是砂岩黄棕壤和黄壤、砂页岩粗骨土、玄武岩黄棕壤,其 pH 分别为 5.3、5.4 和 5.4。砂岩紫色土与砂页岩黄壤、黄棕壤、紫色土的 pH 较高,但均低于 6.0;而碳酸盐岩土壤 pH 整体较高,其中碳酸盐岩粗骨土和石灰土的 pH 分别达到了 7.4 和 7.5,为砂岩粗骨土的约 1.5 倍,碳酸盐岩黄壤和黄棕壤 pH 分别为 6.5 和 6.6,也全部高于其他母岩发育的土壤类型。各母岩—土壤类型的酸碱缓冲潜力大小与其 pH 高低大致呈正相关关系,砂岩粗骨土、黄壤的 pH 最低,其酸碱缓冲潜力指数 SI 也最小,而碳酸盐岩—石灰土的 pH 最高,其 SI 也远高于其他类型,这一趋势与李源环等^[28]在湘西地区的研究结果十分一致。通过 pH 和酸碱缓冲综合指数计算得到的炭基有机肥适宜性等级表明,除砂页岩紫色土外,砂岩和砂页岩发育的土壤类型均属于最适宜施用等级,这些土壤类型区域迫切需要通过施用炭基有机肥提升土壤 pH;而碳酸盐

粗骨土和石灰土属于不适宜施用等级,表明这两种土壤类型在不改变当前土壤 pH 及酸碱缓冲潜力的条件下,不宜施用炭基有机肥;其他母岩土壤类型均属于次适宜等级,这些土壤类型需施用一定量的炭基有机肥以适度提升 pH,以使其土壤 pH 保持在较优状态。

2.4 炭基有机肥优先施用等级的空间分布特征

图 1 为提升酸化土壤 pH 施用炭基有机肥的适宜性等级分布图。整体上,毕节烟区西部和南部地区的施用优先等级高于东部地区,这主要是因为东部地区以砂岩、砂页岩和碳酸盐岩发育的黄棕壤和黄壤为主,由于该地区处于亚热带海拔较高地区,降雨频繁,有利于土壤的累积黏化过程,同时具有硅、铁淋溶的富铝化特征,土壤多呈酸性至微酸性反应^[32],是适宜施用炭基有机肥的主要区域;而东部地区多为碳酸盐岩发育的石灰土,土壤溶液中的钙镁离子含量极高,土壤盐基饱和度大,土壤 pH 较高且酸碱缓冲潜力大,为当前不宜施用土壤炭基有机肥的区域。

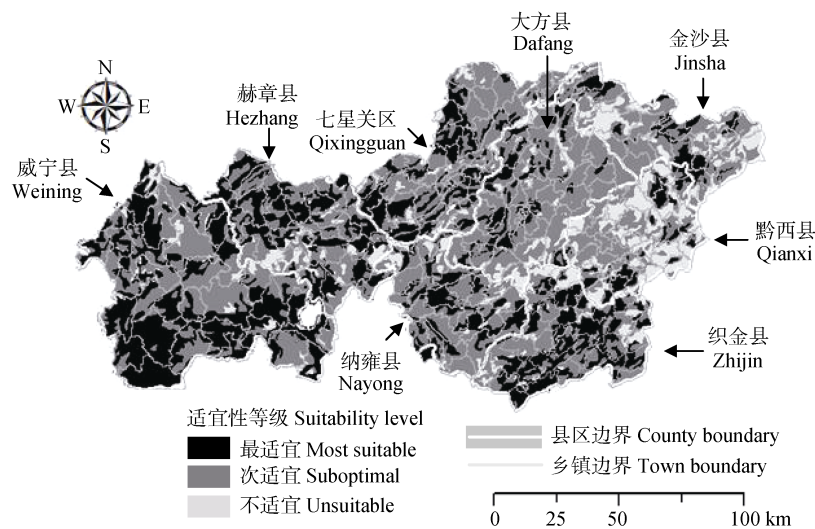


图 1 毕节烟区土壤炭基有机肥施用适宜性等级分布

Fig. 1 Distribution map of soil carbon-based organic fertilizer application suitability in Bijie tobacco growing area

整个毕节烟区和各县区炭基有机肥施用适宜性各等级的比例如表 4 所示。可以看出,毕节烟区最适宜、次适宜和不适宜施用炭基有机肥的面积比例分别为 22.1%、47.0%和 30.9%,其中最适宜和次适宜等级的面积之和超过整个毕节地区的三分之二以上。各县区中,织金县的最适宜等级面积比例最大,超过了全县的一半,其次是赫章和威宁两县,其面

积比例均超过了全县的 30%,而金沙、大方和黔西三县的最适宜等级比例最小,仅为 8.8%、6.2%和 4.6%,各县区之间差异性较大。就最适宜和次适宜两等级的面积之和而言,威宁县的比例超过 95%,而七星关、纳雍和赫章三县区的比例也达到或接近 90%,大方和织金两县的比例也超过了 70%,这些县区将是炭基有机肥施用的重点县区。

表 4 毕节市各县区土壤炭基有机肥施用适宜性等级统计

Table 4 Suitability grade statistics of soil carbon-based organic fertilizer application in Bijie City

县区 County	样点数量 Sample number	各适宜性等级面积比例 Area proportion of various suitability level/%		
		最适宜 Most suitable	次适宜 Suboptimal	不适宜 Unsuitable
威宁 ^①	958	32.3	63.6	4.1
赫章 ^②	168	33.7	52.5	13.8
七星关 ^③	143	24.8	65.2	10.0
纳雍 ^④	129	22.9	65.5	11.5
大方 ^⑤	309	6.2	70.3	23.5
织金 ^⑥	81	51.9	21.4	26.7
金沙 ^⑦	98	8.8	26.1	65.1
黔西 ^⑧	173	4.6	27.4	68.0
总体 ^⑨	2 059	22.1	47.0	30.9

①Weining, ②Hezhang, ③Qixingguan, ④Nayong, ⑤Dafang, ⑥Zhijin, ⑦Jinsha, ⑧Qianxi, ⑨Total.

根据各乡镇最适宜、次适宜和不适宜等级的面积比例, 将毕节市全部乡镇分为了重点施用、一般施用和不宜施用三种类型, 其乡镇数量分别为 82、144 和 32。在重点施用的乡镇中, 以威宁、织金和赫章等县区的乡镇为主, 代表性的乡镇如威宁县的中水镇和玉龙乡, 织金县的上坪寨乡和板桥乡, 以及赫章县的可乐乡和安乐溪乡等, 这些乡镇的土壤多是由砂岩或砂页岩发育而来, 土壤 pH 整体水平和酸碱缓冲能力均较低; 一般施用的乡镇数量较多, 多以砂页岩和页岩发育的土壤为主, 大方县和七星关区的乡镇数量相对较多, 如大方县的星宿乡和牛场乡, 七星关区的大屯乡和团结乡等; 当前不宜施用炭基有机肥的乡镇则主要集中在黔西县和金沙县, 如黔西县的铁石乡和大关镇, 金沙县的源村镇和桂花乡等, 这些乡镇土壤多为碳酸盐岩发育的石灰土为主, 土壤 pH 和酸碱缓冲潜力较高。

土壤酸碱状况对烟草生长发育和烟叶品质具有重要影响。已有的相关研究通常仅关注土壤 pH 这一指标, 较少考虑土壤酸碱缓冲能力这一重要指标。而仇荣亮等^[33]多位学者指出土壤酸碱缓冲能力反映了土壤 pH 改变的难易程度, 其对植物生境的影响不容忽视, 因此已有土壤 pH 空间变异研究对烟区土壤酸碱调控的指导意义受到影响。本研究充分考虑到土壤 pH 和酸碱缓冲潜力均对炭基有机肥的施用适宜性产生影响, 在提升土壤 pH 而施用炭基有机

肥时, 根据各乡镇的土壤 pH 及其酸碱缓冲能力的具体状况, 确定了施用炭基有机肥的适宜性等级, 以使毕节烟区土壤管理更加科学高效。此外, 研究烟区土壤属性的目的是服务于土壤生产条件的改善, 因而土壤制图应能更直接地指导农户管理和生产。然而, 一般的区域土壤属性特征图对农户的指导意义有限, 而明确、具体的管理措施更容易让农户接受。故本研究基于土壤 pH 和酸碱缓冲能力, 对毕节市各乡镇的炭基有机肥施用适宜性及制图做了初步尝试, 明确了每个乡镇施用炭基有机肥的适宜性等级, 以求更好地服务农户烟草生产。为使研究结果的指导意义更强, 今后尚需在更小的尺度上开展研究。

3 结论

通过毕节植烟区 2 059 个土壤采样点数据的分析表明, 该烟区 pH 平均值为 6.5, 整体上处于烟草生长的适宜等级, 但土壤 pH 存在较大分异, 大方县、七星关区和威宁县的 pH 较低, 而织金县、金沙县和黔西县的 pH 较高。就土壤酸碱缓冲潜力而言, 大方和威宁两县区的缓冲潜力最低, 而织金和赫章两县的缓冲潜力最强。根据各母岩及土壤类型的 pH 及其酸碱缓冲能力分级, 砂岩、砂页岩和玄武岩土壤属于最适宜施用炭基有机肥来提升土壤

表 5 毕节市各县区乡镇施用炭基有机肥的类型划分

Table 5 Classification of application types of carbon-based organic fertilizer in towns of Bijie City

类型 Type	乡镇名称 Name of township
重点施用乡镇 Key fertilization towns (N=82)	威宁县: 中水镇、玉龙乡、黑土河乡、猴场镇、牛棚镇、龙场镇、草海镇、哈喇河乡、斗古乡、板底乡、海拉乡、金钟镇、炉山镇、么站镇、哲觉镇、麻乍镇、金斗乡、东风镇、二塘镇、岔河乡、黑石头镇; 赫章县: 可乐乡、安乐溪乡、古基乡、雉街乡、哲庄乡、威奢乡、罗州乡、城关镇、德卓乡、结构乡、六曲河镇、野马川镇、财神镇、朱明乡、辅处乡、平山乡; 七星关区: 青场镇、八寨镇、何官屯镇、梨树镇、千溪乡、小坝镇、撒拉溪镇、阴底乡、田坝桥镇、田坝镇、大银镇、杨家湾镇、放珠镇、对坡镇; 纳雍县: 龙场镇、文昌街道、居仁街道、水东乡、寨乐乡、雍熙街道、新房乡、勺窝乡、阳长镇; 织金县: 上坪寨乡、板桥乡、化起镇、金凤街道、以那镇、黑土乡、阿弓镇、牛场镇、绮陌街道、文腾街道、龙场镇、珠藏镇、猫场镇、少普乡、实兴乡、桂果镇、三甲街道、熊家场乡、白泥乡; 金沙县: 禹谟镇、五龙街道
一般施用乡镇 General fertilization town (N=144)	威宁县: 石门乡、小海镇、云贵乡、雪山镇、盐仓镇、羊街镇、兔街乡、龙街镇、观风海镇、新发乡、大街乡、迤那镇、秀水镇、双龙乡; 赫章县: 妈姑镇、水塘堡乡、古达乡、铁匠乡、双坪乡、兴发乡、松林坡乡、白果镇、达依乡、河镇乡、珠市乡; 七星关区: 大屯乡、团结乡、龙场营镇、大河乡、亮岩镇、市西街道、生机镇、普宜镇、清水铺镇、小吉场镇、层台镇、大新桥街道、阿市乡、观音桥街道、岔河镇、市东街道、燕子口镇、三板桥街道、海子街镇、洪山街道、碧阳街道、水箐镇、麻园街道、林口镇、朱昌镇、野角乡、鸭池镇、碧海街道、德溪街道、长春堡镇; 纳雍县: 老凹坝乡、百兴镇、乐治镇、沙包乡、曙光乡、化作乡、匡东关乡、董地乡、左鸠戛乡、张家湾镇、维新镇、锅圈岩乡、昆寨乡、姑开乡、中岭镇、猪场乡; 大方县: 星宿乡、牛场乡、黄泥塘镇、理化乡、雨冲乡、长石镇、大山乡、羊场镇、大水乡、黄泥乡、普底乡、马场镇、沙厂乡、慕俄格古城、凤山乡、六龙镇、三元乡、百纳乡、安乐乡、达溪镇、竹园乡、瓢井镇、果瓦乡、猫场镇、顺德街道、小屯乡、鼎新乡、兴隆乡、东关乡、对江镇、核桃乡、八堡乡、绿塘乡、红旗街道、文阁乡、响水乡、双山镇; 织金县: 自强乡、茶店乡、金龙乡、马场乡、八步街道、鸡场乡、官寨乡、中寨乡、三塘镇、后寨乡; 金沙县: 安洛苗族彝族满族乡、大田彝族苗族布依族乡、清池镇、安底镇、马路乡、岩孔街道、西洛街道、新化苗族彝族满族乡、太平彝族苗族乡、柳塘镇、鼓场街道; 黔西县: 定新乡、观音洞镇、林泉镇、雨朵镇、金碧镇、锦星镇、五里乡、水西办事处、洪水镇、仁和乡、文峰办事处、金坡乡、莲城办事处、红林乡
不宜施用乡镇 Unsuitable fertilization town (N=32)	七星关区: 田坎乡; 纳雍县: 羊场乡; 金沙县: 源村镇、桂花乡、后山乡、沙土镇、化觉乡、岚头镇、高坪乡、木孔乡、平坝镇、石场苗族彝族乡、茶园乡、长坝乡; 黔西县: 铁石乡、大关镇、素朴镇、钟山镇、甘棠镇、协和镇、太来乡、金兰镇、永荣乡、新仁乡、中坪镇、重新镇、花溪乡、中建乡、谷里镇、绿化乡

pH 的区域, 砂页岩紫色土、页岩发育的黄壤、黄棕壤和紫色土以及碳酸盐岩黄棕壤和黄壤等类型属于次适宜区域, 而碳酸盐岩粗骨土和石灰土则属于当前不适宜施用炭基有机肥提升 pH 的区域。对于毕节全部乡镇而言, 炭基有机肥重点施用、一般施用和不宜施用三种类型的乡镇数量分别为 82、144 和 32 个, 重点施用的乡镇多集中在威宁、织金和赫章等县区, 一般施用的以大方县和七星关区的乡镇居多, 而当前不宜施用炭基有机肥的乡镇主要集中在黔西和金沙两县。研究结果可对毕节烟区土壤的精

准施肥和科学管理提供参考。

参考文献 (References)

- [1] Chen J H, Liu J L, Li Z H. Integrated management of tobacco planting soil and nutrients in China[M]. Beijing: Science Press, 2008. [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.]
- [2] Chang D, Ma W H, Zhang K, et al. Effect of biochar fertilizer on microbial functional diversity in tobacco growing soil [J]. Chinese Journal of Tobacco, 2018, 24

- (6): 62—70. [常栋, 马文辉, 张凯, 等. 生物炭基肥对植烟土壤微生物功能多样性的影响[J]. 中国烟草学报, 2018, 24 (6): 62—70.]
- [3] Agegnehu G, Bass AM, Nelsen PN, et al. Biochar and biocharcompost as soil amendments: Effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical North Queensland, Australia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 213: 72—85.
- [4] Cao Z H. Biochar and remediation of contaminated soil and R & D Progress of tobacco industry[J]. *Acta Nicotiana Sinica*, 2019, 25 (3): 1—12. [曹志洪. 生物炭与污染土壤修复及烟草行业的研发进展[J]. 中国烟草学报, 2019, 25 (3): 1—12.]
- [5] Xu N, Tan G, Wang H, et al. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 74: 1—8.
- [6] Zhang Z L, Chen X M, Li X M, et al. Effects of biochar combined with fertilizer on cucumber yield and fertilizer use efficiency under continuous cropping[J]. *Soils*, 2021, 53 (1): 47—54. [张志龙, 陈效民, 李小萌, 等. 生物炭与化肥配施对连作黄瓜产量及肥料利用率的影响[J]. 土壤, 2021, 53 (1): 47—54.]
- [7] He X S, Geng Z C, She D, et al. Significance of biochar production and agriculture and its development at home and abroad[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (2): 11—17. [何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 11—17.]
- [8] Luo X Q, Hao X H, Chen T, et al. Effects of long-term different fertilization on microbial community functional diversity in paddy soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (2): 740—748. [罗希茜, 郝晓晖, 陈涛, 等. 长期不同施肥对稻田土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29 (2): 740—748.]
- [9] Xie Z B, Liu Q, Xu Y P, et al. Research progress and research direction of biochar[J]. *Soils*, 2011, 43 (6): 857—861. [谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. 土壤, 2011, 43 (6): 857—861.]
- [10] Dai Z M, Liu X M, Wu J J, et al. Characterization of basic properties of biochar for improving acid soil[C]. *Soil Science for the Future (Volume 1): Proceedings of the 12th National Congress of Soil Society of China and the 9th Cross Strait Soil and Fertilizer Symposium*. 2012. [戴中民, 刘杏梅, 吴建军, 等. 用于改良酸性土壤的生物炭基本性质的表征[C]. 面向未来的土壤科学(上册)—中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集. 2012.]
- [11] Liu C, Liu X W, Wu W C, et al. Effects of biochar and carbon based fertilizer on growth and heavy metal absorption of lettuce[J]. *Chinese Journal of Environmental Sciences*, 2016, 36 (10): 3064—3070. [刘冲, 刘晓文, 吴文成, 等. 生物炭及炭基肥对油菜菜生长及吸收重金属的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36 (10): 3064—3070.]
- [12] Xing Y, Li X Q, Wang B, et al. Effect of biochar on nitrogen leaching in yellow soil: indoor soil column simulation [J]. *Journal of Ecology*, 2011, 30 (11): 2483—2488. [邢英, 李心清, 王兵, 等. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响: 室内土柱模拟[J]. 生态学杂志, 2011, 30 (11): 2483—2488.]
- [13] Chen H X, Du Z L, Guo W, et al. Effects of biochar application on bulk density, cation exchange capacity and particulate organic matter content of farmland soil in North China Plain[J]. *Acta Applied Ecology*, 2011, 22 (11): 2930—2934. [陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930—2934.]
- [14] Zhang W M. Physical and chemical properties of biochar and its application in crop production[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012. [张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.]
- [15] Fan Y L, Liu X Z, Gao L. et al. Effects of fertility-building practices on soil organic carbon loss with sediment in sloping cropland of red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 638—649. [范亚琳, 刘贤赵, 高磊, 等. 不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56 (3): 638—649.]
- [16] LAN X F, Wang X T, Xu X P, et al. Effects of slag and biochar application on soil carbon pool and microorganism in paddy field[J]. *Acta Zoologica Sinica*, 2019, 39 (21): 7968—7976. [蓝兴福, 王晓彤, 许旭萍, 等. 炉渣与生物炭施加对稻田土壤碳库及微生物的影响[J]. 生态学报, 2019, 39 (21): 7968—7976.]
- [17] Chen K, Xu X N, Peng J, et al. Effects of biochar and carbon based fertilizer on soil microbial community structure[J]. *Chinese Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 51 (10): 1920—1930. [陈坤, 徐晓楠, 彭靖, 等. 生物炭及炭基肥对土壤微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51 (10): 1920—1930.]
- [18] Zhang Z H. Effects of biochar based fertilizer on soil microbial diversity and growth of flue-cured tobacco[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019. [张志浩. 生物炭基肥对三种类型植烟土壤微生物多样性及烤烟生长的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.]
- [19] Wang Y N, Xu M J, Dai M Y, et al. Spatial characteristics and influential factors of arable soil pH in Bijie, Guizhou [J]. *Soils*, 2018, 50 (2): 385—390. [王亚男, 徐梦洁, 代圆凤, 等. 毕节市耕地土壤 pH 的空间变异特征与影响因素[J]. 土壤, 2018, 50 (2): 385—390.]
- [20] Lu R K. Analytical methods for soil and

- agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [21] Tsadilas C D. Soil pH influence on cadmium uptake by tobacco in high cadmium exposure[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23 (8): 1167—1178.
- [22] Peng Y L, Zheng M Y, Liu M H, et al. Spatial distribution and evolution characteristics of soil pH in Zunyi Tobacco Field[J]. *Chinese Journal of Tobacco Science*, 2019 (3): 47—54. [彭玉龙, 郑梅迎, 刘明宏, 等. 遵义烟田土壤 pH 的空间分布与演变特征[J]. *中国烟草科学*, 2019 (3): 47—54.]
- [23] Wu J, Xu P F, Shi X J, et al. Suitability evaluation and variation analysis of tobacco planting soil nutrients in Fuling District of Chongqing[J]. *Soils*, 2020, 52 (1): 106—112. [吴杰, 李向鹏, 陈鑫, 等. 重庆市涪陵区植烟土壤养分的适宜性评价及变异分析[J]. *土壤*, 2020, 52 (1): 106—112.]
- [24] Li Z Y, Ding J. Principles and methods of environmental quality assessment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. [李祚泳, 丁晶. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.]
- [25] Wu F C, Wang X Y, Zou J, et al. A study on acidic buffering ability of soils in Hunan Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2001, 22 (1): 58—62. [吴甫成, 王晓燕, 邹君, 等. 湖南土壤酸缓冲性能研究[J]. *农业现代化研究*, 2001, 22 (1): 58—62.]
- [26] Xu J H. Quantitative Geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. [徐建华. 计量地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.]
- [27] Xu R K, Li J Y, Zhou S W, et al. Scientific Issues and Controlling Strategies of Soil Acidification of Croplands in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33 (2): 160—167. [徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33 (2): 160—167.]
- [28] Li Y H, Deng X H, Zhang Z W, et al. Acid base buffering characteristics and influencing factors of typical tobacco planting soils in Western Hunan[J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2019, 27 (1): 109—118. [李源环, 邓小华, 张仲文, 等. 湘西典型植烟土壤酸碱缓冲特性及影响因素[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27 (1): 109—118.]
- [29] Liu L, Xie D T, Li Z Y, et al. Cation exchange characteristics of acid purple soil and its effect on acid buffer capacity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 887—897. [刘莉, 谢德体, 李忠意, 等. 酸性紫色土的阳离子交换特征及其对酸缓冲容量的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (4): 887—897.]
- [30] Wang J H, Zhang X N. Study on sensitivity of red soils to acid rain in South China[J]. *Acta Pedologica Sinica*. 1994, 31 (4): 348—355. [王敬华, 张效年. 华南红壤对酸雨敏感性的研究[J]. *土壤学报*, 1994, 31 (4): 348—355.]
- [31] Wang Y N, Xu M J, Dai Y F, et al. Spatial variability and influencing factors of soil pH in Bijie City[J]. *Soils*, 2018, 294 (2): 164—169. [王亚男, 徐梦洁, 代圆凤, 等. 毕节市耕地土壤 pH 的空间变异特征与影响因素[J]. *土壤*, 2018, 294 (2): 164—169.]
- [32] Yang G H, Wang R, Yuan J F, et al. Study on soil acidification trend in mountainous areas of Southwest Hubei Province: a case study of Xuanen County, Enshi Prefecture[J]. *China Agronomic Bulletin*, 2014, 12: 161—165. [佘国涵, 王瑞, 袁家富, 等. 鄂西南山区土壤酸化趋势研究—以恩施州宣恩县为例[J]. *中国农学通报*, 2014, 12: 161—165.]
- [33] Qiu R L, Zhang Y N, Mo D L. Study on sensitivity of soil to acid deposition in South China: I. Factors affecting acid sensitivity of soil and their mathematical treatment[J]. *Acta Scientiarum Naturalium of Universitatis Sunyatseni (Natural Science Edition)*, 1997, 36 (5): 78—83. [仇荣亮, 张云霓, 莫大伦. 南方土壤酸沉降敏感性研究: I. 酸敏感性影响因子及其数学表征[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 1997, 36 (5): 78—83.]

(责任编辑: 陈荣府)