

DOI: 10.11766/trxb202201100014

张忠启, 祝亮, 王美艳, 史学正, 孙维侠. 基于土壤钙镁比的毕节植烟区镁肥施用分区研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1737–1748.
ZHANG Zhongqi, ZHU Liang, WANG Meiyang, SHI Xuezheng, SUN Weixia. Application Zoning of Magnesium Fertilizer in Bijie Tobacco Growing Area Based on Soil Calcium-Magnesium Ratio[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(6): 1737–1748.

基于土壤钙镁比的毕节植烟区镁肥施用分区研究*

张忠启¹, 祝亮¹, 王美艳², 史学正², 孙维侠²

(1. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏徐州 221116; 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: 当前植烟区土壤镁肥施用主要依据土壤有效镁含量水平及其空间分布特征确定, 但很少考虑到土壤钙镁比(有效钙含量/有效镁含量)对土壤镁素供应的现实影响, 这必然对镁肥施用效果产生不利影响。本研究以毕节植烟区为例, 基于大样本土壤采样数据, 综合考虑土壤有效镁含量水平、土壤钙镁比及两者的空间分布特征, 通过图形叠加和栅格运算, 科学划定植烟区土壤镁肥施用等级及分区。研究表明, 毕节植烟区土壤有效镁平均含量为 278.1 mg·kg⁻¹, 土壤钙镁比均值为 14.5, 空间上均呈现较强的波动性。从空间插值图看, 土壤有效镁含量以适宜等级为主, 占到毕节植烟区面积的 69%, 土壤钙镁比分布以 10~20 和 5~10 两等级为主, 且各等级交错分布。基于土壤有效镁含量和钙镁比获得的土壤镁肥施用等级图中, 适宜和较适宜施用镁肥面积分别为 69.0%和 10.5%, 不适宜施用面积为 19.0%, 而极适宜和极不适宜面积比例仅分别为 1.3%和 0.2%。若仅考虑土壤有效镁含量得到的施用等级分布与考虑钙镁比的施用等级分布存在很大差异, 这说明在制定镁肥施用方案时, 若不考虑钙镁比对土壤镁素供应的影响, 得到的镁肥施用等级分区会产生较大的偏差, 给植烟区土壤施肥带来不利影响, 而综合考虑土壤有效镁含量和钙镁比是科学制定区域镁肥施用方案的重要前提。

关键词: 土壤有效镁; 土壤钙镁比; 镁肥施用分区; 毕节植烟区

中图分类号: S159 文献标志码: A

Application Zoning of Magnesium Fertilizer in Bijie Tobacco Growing Area Based on Soil Calcium-Magnesium Ratio

ZHANG Zhongqi¹, ZHU Liang¹, WANG Meiyang², SHI Xuezheng², SUN Weixia²

(1. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Agricultural Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: 【Objective】A reasonable supply of magnesium is an important guarantee for high-quality tobacco production. The current soil magnesium fertilizer application in tobacco growing areas is mainly determined according to the level of soil available magnesium content and its spatial distribution. However, the practical impact of the ratio of soil available calcium content to available magnesium content (Ca/Mg ratio) on magnesium supply is rarely considered. 【Method】Taking Bijie tobacco growing area as an example, the level of available magnesium content, Ca/Mg ratio and spatial distribution contours were

* 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)

作者简介: 张忠启(1978—), 男, 江苏丰县人, 博士, 主要从事土壤资源与环境方面的研究。E-mail: zhangzq128@126.com

收稿日期: 2022-01-10; 收到修改稿日期: 2022-06-21; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-08-25

obtained based on a large number of soil samples. Then, the suitable grade zoning of magnesium fertilizer was delimited through graphic superposition and grid operation. 【Result】 The results showed that the average content of soil available magnesium in Bijie tobacco growing area was $278.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The content shows great fluctuation in space, which was caused by the parent rock, soil type, elevation and topographic location. Also, the average Ca/Mg ratio in this area was 14.5, and was at a high level. Moreover, the spatial fluctuation of the ratio was also large, and mainly related to the spatial distribution of soil-forming parent rock and soil types. From spatial interpolation contours of available magnesium content, the areas with high content were mainly concentrated in the east and southwest, while areas with low content were mainly distributed in the middle north and northwest. The available magnesium content was dominated by the suitable grade, which accounted for 69% of the whole area. Moreover, the area of lacking and rich grades accounted for 19.0% and 10.5% respectively, and the areas of extremely lacking and extremely rich grades were both small. From the distribution of soil Ca/Mg ratio, the study area was dominated by two grades of 10~20 and 5~10, while areas covering > 20 and < 5 were relatively small. On the whole, the Ca/Mg grades were characterized by interphase distribution in space. In the application grade map of soil magnesium fertilizer obtained from available magnesium content and Ca/Mg ratio, the most suitable application areas were mainly concentrated in the north-central, southeast and northwest regions. Also, the unsuitable grades were mainly distributed in some parts of the southwest and northeast, while the areas of extremely unsuitable grade were very small, and mainly scattered in the southwest. Among all the grades, the areas of suitable and more suitable grades of magnesium fertilizer application accounted for 69.0% and 10.5% respectively. The unsuitable application area accounts for 19.0%, while the proportion of extremely suitable and extremely unsuitable areas account for only 1.3% and 0.2% respectively. 【Conclusion】 The results indicate that the Ca/Mg ratio of soil is an important factor to be considered when formulating the application scheme of magnesium fertilizer. If the influence of the Ca/Mg ratio on soil magnesium supply is not considered, the appropriate grade zoning of magnesium fertilizer will have a large deviation, which will have an adverse effect on soil fertilization in tobacco growing areas. It can be seen that comprehensive consideration of soil available magnesium content and Ca/Mg ratio is an important prerequisite for scientifically formulating regional magnesium fertilizer application scheme.

Key words: Soil available magnesium ;Soil Ca/Mg ratio ;Zoning of magnesium fertilizer application ;Bijie tobacco planting area

镁是烟草生长发育必需的中量营养元素,对烟草生长和生理代谢的作用不可替代^[1-2]。镁供应不足可导致光合作用受阻,烟株矮小,而镁含量过高则致使烟叶燃烧性不足^[3-4]。因而适宜的镁素供应对于提升烟叶产量和品质具有重要意义。研究表明,烟叶中镁素主要来源于土壤,土壤镁素有效供应能力决定了烟叶中镁含量的高低^[5-6]。因此,精准查明镁素的有效供应能力,并在此基础上制定合理的施肥管理分区,对于区域烟草高质量生产至关重要。

由于镁素对于烟草生产的重要作用,很多学者对于区域土壤镁素空间特征、镁素供应影响因子和镁肥施用管理开展了相关研究,并取得了一定的研究成果。首先,查明土壤镁素空间分布特征是开展科学施肥的基础。El-Fouly等^[7]调查了埃及不同省份土壤镁素含量状况,发现各省份土壤镁含量差异较大,且各省均存在大面积地区镁含量下降的趋势。Staugaitis和Rutkauskienė^[8]通过调查采样发现立陶宛土壤中镁含量存在较强变异性,其变异性主要取

决于土壤质地,其中砂壤土中镁含量最低,而黏土中镁含量最高。白由路等^[9]对我国土壤有效镁含量的研究发现,我国54%的土壤因为有效镁含量低而需要不同程度补充镁肥,特别是我国南方酸性土壤地区,其原因是该地区湿热多雨以及不合理施用化肥导致土壤酸化,加剧了土壤中镁的淋失^[10]。曹榕彬^[11]在宁德地区的研究表明,海拔和成土母质是造成土壤镁含量强变异的主要原因。Frau等^[12]在瑞士弗里堡州研究发现土壤类型和地形对土壤镁素含量有重大影响。已有研究表明,土壤镁素含量通常存在较大空间变异性,土壤质地、pH、地形、成土母质和土壤类型等因子均可能是影响其变异性的因素。其次,土壤镁素有效供应能力直接影响烟叶镁素含量水平^[13]。Constantino等^[14]通过盆栽实验评估了施肥对土壤肥力的改变时发现土壤中钙与镁存在拮抗作用,会影响到土壤中镁素的有效供应。刘坤等^[15]在曲靖烟区研究了土壤和烟叶钙镁含量的关系,发现烟叶镁含量与土壤有效镁呈正相关,但同

时由于烟株在吸收土壤营养元素时，存在广泛的拮抗作用，土壤镁素的有效供应还与土壤钙镁比（土壤有效钙与有效镁含量比值）关系密切。李晓婷等^[16]研究指出土壤钙镁比处于 5~10 最为适宜，而钙镁比值大于 10 则会引起镁的潜在性缺乏，应适当补充镁。Osemwota 等^[17]在温室和大田条件下研究发现土壤钙镁比是作物植株镁营养的限制因素，当土壤钙镁比为 6:1 时对作物产量提升最为有利。已有研究表明，土壤镁素含量和土壤钙镁比均对土壤镁素有效供应产生重要影响。再者，近年来越来越多的学者认识到镁肥的重要性，一些学者对镁肥施用方案进行了研究。如冯小虎^[18]在江西省烟区植烟土壤镁素丰缺状况的基础上，根据不同土壤类型的土壤镁素含量，制定了平衡施肥方案，进行了测土配方施肥。王冰等^[19]基于盐源县植烟土壤交换性镁空间变异特征及影响因素的研究，建议依据各区域交换性镁的丰缺程度，有针对性地配施镁肥。周芳芳等^[20]在楚雄植烟区依据土壤镁素含量的空间分异特征，明确了不同地区的最佳施镁量，以指导烟草生产管理。植烟区镁肥施用方案在一定程度上提升了植烟区烟草品质。

已有研究表明，很多学者对烟区土壤镁素分布特征及镁素供应影响因子开展研究，并在此基础上制定了烟区镁肥施用方案。需要指出的是，尽管有

许多学者研究证实土壤有效钙与有效镁存在拮抗作用，土壤钙镁比会对土壤镁素供应产生实质影响，尤其在石灰性土壤地区表现明显，然而当前植烟区制定的镁肥施用分区及用量依然主要考虑土壤有效镁的含量水平及空间分布，未能充分考虑到土壤钙镁比对镁素供应的重要影响，这必然对烟区镁肥施用效果产生不利影响。鉴于此，本研究基于毕节植烟区大样本土壤采样点数据，在综合考虑土壤有效镁含量和钙镁比值空间分异的基础上，通过土壤有效镁和钙镁比空间插值图的叠加分析，获得镁肥宜施等级及其分区，以期为毕节烟区镁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

毕节植烟区位于贵州省西北部，川、滇、黔三省交汇处，面积约 26 900 km²，地处 26°21′—27°46′N、105°36′—106°43′E。毕节下辖威宁、赫章、纳雍、七星关、大方、织金、金沙和黔西 8 个县区（图 1）。该地区处在滇东高原向黔中山原丘陵过渡地带，地势呈西高东低，平均海拔 1 400 m，气候类型属于北亚热带季风性湿润气候，年平均降水量 849~1 399 mm，年均温度 10.5~15℃，年日照时数

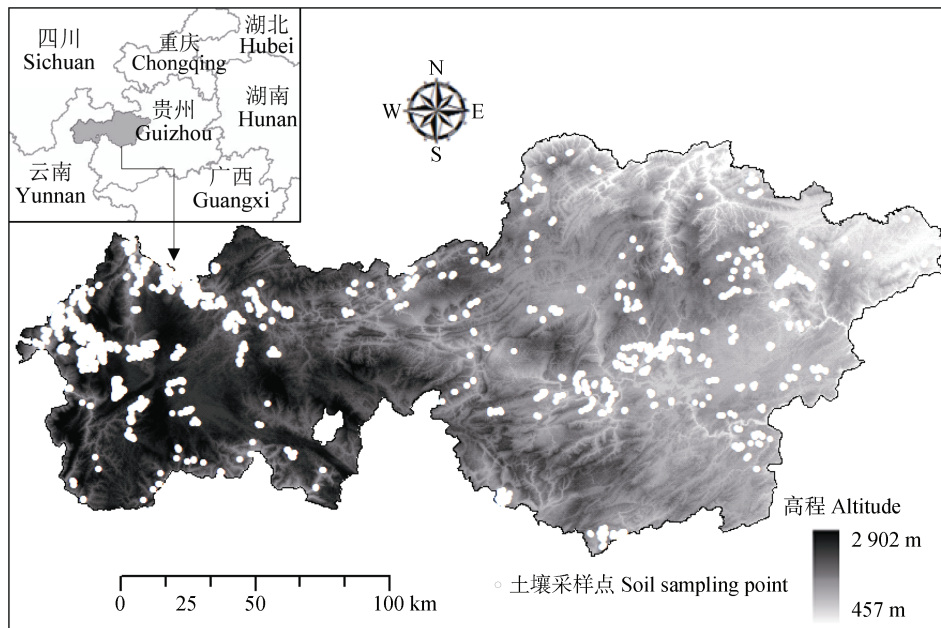


图 1 研究区位置及采样点分布图

Fig. 1 Location of study area and distribution of soil sampling points

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, 主要成土母岩有砂岩、砂页岩、页岩、碳酸盐岩和玄武岩等类型^[21]。毕节是贵州省主要烟草产区之一, 该地区农业以烟草种植为主, 其他农作物主要有水稻、小麦、玉米和大豆等。

1.2 土壤样品采集与处理

本研究在毕节植烟区共采集 2 059 个土壤样品, 采样时在每个样点 30 m 范围内的 5 个位置取土, 经混合后用四分法取 1 000 g 作为该样点的土壤样品。威宁、赫章、纳雍、七星关、大方、织金、金沙和黔西 8 个县区的土壤样点数量分别为 958、168、129、143、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。将土样剔除植物残体、石块等杂物后, 经风干、磨细、过筛等预处理, 制成土样。土壤有效镁和土壤有效钙含量通过 EDTA-乙酸铵浸提-原子吸收光谱法进行测定, 具体操作步骤参照土壤农化常规分析方法^[22]。

1.3 土壤有效镁含量和钙镁比分级

根据已有研究成果^[9, 13, 23], 结合毕节植烟区实际情况, 将土壤有效镁含量水平划分为极缺乏 (<60 mg·kg⁻¹)、缺乏 (60~120 mg·kg⁻¹)、适宜 (120~300 mg·kg⁻¹)、丰富 (300~600 mg·kg⁻¹) 和极丰富 (>600 mg·kg⁻¹) 5 个等级; 将土壤钙镁比 (有效钙含量与有效镁含量的比值) 分为偏低 (<5)、适宜 (5~10)、较高 (10~20) 和极高 (>20) 4 个等级。

1.4 空间插值方法

本研究中土壤有效镁含量和土壤钙镁比空间分布特征通过地统计克里格插值法得到。地统计学方法将土壤属性视为区域化变量, 以半方差函数为基本工具, 对既有随机性又具有结构性的土壤属性在空间上的分布进行研究。普通克里格是基于区域化变量理论, 通过空间相关的随机函数模型计算可获取变量的线性加权组合, 从而对待估点进行预测^[24-25], 其估计公式为:

$$\gamma_r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [r(x_{kj}) - r(x_{kj} + h)] \quad (1)$$

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2)$$

式中, $Z^*(x_0)$ 为待估点 x_0 处的估计值, $z(x_i)$ 为实测值, λ_i 为分配给每个实测值的权重, $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, n 为参与 x_0 点估值的实测值的数目。

1.5 镁肥施用适宜性等级划分

毕节植烟区土壤镁肥施用适宜性分级图由土壤有效镁含量和钙镁比分布图叠加并经栅格运算和等级划分得到。具体过程如下: 首先, 根据土壤有效镁含量等级, 将极缺乏 (<60 mg·kg⁻¹)、缺乏 (60~120 mg·kg⁻¹)、适宜 (120~300 mg·kg⁻¹)、丰富 (300~600 mg·kg⁻¹) 和极丰富 (>600 mg·kg⁻¹) 五个等级分别赋值 1、2、3、4 和 5 (图 2), 表示土壤镁素含量的丰富程度。其次, 将土壤钙镁比的偏低 (<5)、适宜 (5~10)、较高 (10~20) 和极高 (>20) 等级分别赋值 1、2、3 和 4, 此赋值越高, 表明土壤钙镁比越高, 越可能由于土壤有效钙的拮抗作用导致土壤有效镁供应不足。再者, 对于有效镁含量和钙镁比插值图的任一栅格而言, 有效镁含量等级赋值与钙镁比等级赋值的乘积表示在有效镁含量和钙镁比共同作用下的土壤缺镁程度, 进而得到镁肥施用适宜性程度高低。根据有效镁等级赋值与钙镁比等级赋值可知, 其乘积值处于 1~20, 本研究将此数值从小到大划分为 1~4、5~8、9~12、13~16 和 17~20 五个等级 (图 2), 分别标记为镁肥施用最适宜、较适宜、适宜、不适宜和极不适宜等级, 据此得到整个毕节植烟区土壤镁肥施用适宜性等级分布图。

2 结果与讨论

2.1 土壤有效镁含量统计特征

毕节植烟区全部土壤采样点 ($n=2 059$) 的有效镁含量统计结果如表 1 所示。土壤有效镁含量均值为 278.1 mg·kg⁻¹, 整体上处于适宜水平。全部样点的有效镁含量变异系数为 90%, 变幅为 20.0~2 120.0 mg·kg⁻¹, 最大值与最小值相差 100 余倍, 表明毕节植烟区土壤有效镁含量存在较强的空间变异性。依据植烟土壤有效镁含量等级划分, 处于适宜等级的样点比例为 49.5%, 约为全部采样点的 1/2; 丰富和极丰富等级的样点比例分别为 19.6% 和

有效镁含量 Available Mg/(mg·kg ⁻¹)	含量等级 Level	等级赋分 Level assignment	赋分相乘 Assignment multiplication	等级赋分 Level assignment	钙镁比等级 Ca/Mg ratio level	钙镁比值 Ca/Mg ratio	赋分乘积 Assignment product	乘积值分级 Product value level	分级代码 Grading code	镁肥宜施等级 Suitable level of Mg fertilizer
<60	极缺乏	1	→	4	偏低	<5	→	1~4	I	极适宜
60~120	缺乏	2		3	适宜	5~10		5~8	II	较适宜
120~300	适宜	3		2	较高	10~20		9~12	III	适宜
300~600	丰富	4		1	极高	>20		13~16	IV	不适宜
>600	极丰富	5						17~20	V	极不适宜

图 2 基于土壤有效镁含量和钙镁比的镁肥宜施等级划分方法

Fig. 2 Method of suitable application grading of magnesium fertilizer based on soil available magnesium content and Ca/Mg ratio

表 1 毕节烟区土壤有效镁含量描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics of soil available magnesium content in the Bijie tobacco area

县区 County	样点数量 Sample size	最小值 Min.	最大值 Max.	均值 Mean	方差 Std.	变异系数 数 CV/%	有效镁含量等级百分比 Effective magnesium content /%				
							<60	60~120	120~300	300~600	>600
							极缺乏	缺乏	适宜	丰富	极丰富
大方 ^①	309	40	1 240	194.1	140.9	70	5.8	28.2	51.1	12.9	1.9
赫章 ^②	168	60	890	252.8	150.6	60	1.8	17.3	51.2	25.6	4.2
金沙 ^③	98	40	1 030	236.0	182.2	80	3.1	24.5	50.0	16.3	6.1
纳雍 ^④	129	70	730	210.2	109.0	50	0.0	16.3	71.3	10.9	1.6
七星关 ^⑤	143	50	850	249.9	214.5	90	4.9	31.5	37.1	17.5	9.1
黔西 ^⑥	173	70	1 010	315.2	187.6	60	0.0	9.3	53.2	28.9	8.7
威宁 ^⑦	958	20	2 120	320.0	320.4	100	4.3	17.1	46.8	20.0	11.8
织金 ^⑧	81	20	960	284.6	196.8	70	3.7	11.1	50.6	28.4	6.2
全部 ^⑨	2 059	20	2 120	278.1	254.8	90	3.6	19.2	49.5	19.6	8.1

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

8.1%，两等级之和占全部采样点的比例为 27.7%，而缺乏和极缺乏的比例分别为 19.2%和 3.6%，两等级的比例之和达到 22.8%。从各县区看，黔西县和威宁县土壤有效镁含量较高，分别为 320.0 mg·kg⁻¹和 315.2 mg·kg⁻¹，处于较丰富等级，其余县区均处于适宜等级，大方县的有效镁含量最低，仅为 194.1 mg·kg⁻¹。各县区的分段统计表明，纳雍县有效镁处于适宜等级的比例最高，达到 71.3%，而七星关区的适宜等级比例最低，仅为 37.1%。土壤有效镁含量低于适宜等级比例较高的为七星关区和大方县，其极低和偏低等级的比例之和分别为 36.4%和 34.0%，而黔西县和织金县有效镁含量高于适宜

等级的比例较高，其偏高和极高等级之和分别为 37.6%和 34.6%。

2.2 土壤有效钙及土壤钙镁比统计特征

毕节烟区土壤有效钙含量的平均值达到 2 684.7 mg·kg⁻¹，土壤有效钙含量的波动性较强，变化范围介于 87.5 mg·kg⁻¹~11 852.0 mg·kg⁻¹之间。土壤钙镁比的均值为 14.5，处于偏高等级。土壤有效钙和钙镁比的变异系数分别达到了 70%和 90%，说明毕节烟区的土壤有效钙和钙镁比均存在较强的变异性。土壤有效钙分级^[26-27]统计表明（图 3），各等级的比例很不一致，>2 000 mg·kg⁻¹和 1 200~2 000 mg·kg⁻¹两等级的样点比例分别为 57.4%和

28.3%，两等级占全部采样点的绝对比重。土壤钙镁比各等级中，10~20 和 5~10 两等级的比例较高，

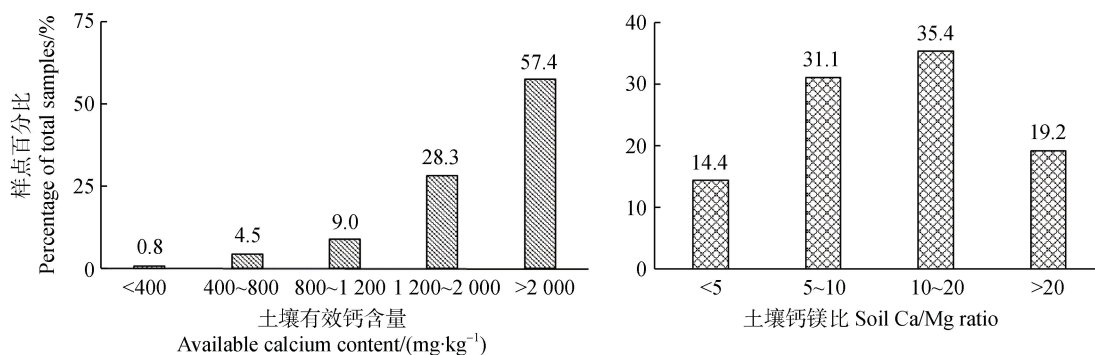


图3 土壤有效钙含量和土壤钙镁比分级统计柱状图

Fig. 3 Statistical histogram of soil available calcium content and Ca/Mg ratio

2.3 土壤有效镁及钙镁比的地统计特征

地统计分析是克里格插值的重要步骤，毕节烟区土壤采样点有效镁含量和钙镁比数据均不符合正态分布，通过对数转换后数据均符合正态分布。其中，转换后的土壤有效镁数据半方差函数最优拟合模型为指数函数，块金值为 0.073，基台值为 0.532，两者之比为 0.137，属于强空间自相关性，最大自相关距离为 12 600 m；转换后的钙镁比数据半方差函数最优拟合模型为球状模型，块金值和基台值分别为 0.184 和 0.693，两者之比为 0.266，属于中等强度空间自相关，最大自相关距离为 14 100 m。

2.4 土壤有效镁及钙镁比空间分布特征

土壤有效镁含量空间分布如图 4 所示。可以看出，土壤有效镁含量以适宜（120~300 mg·kg⁻¹）等级为主，面积分布最广。土壤有效镁含量较高的地区主要集中在东部和西南部地区，含量较低的区域主要分布在中北部和西北部地区。从县区分布看，黔西县大部 and 威宁县南部的土壤有效镁含量较高，而七星关区中北部、威宁县北部和大方县的中西部地区含量相对较低。毕节植烟区土壤钙镁比空间分布如图 5 所示，钙镁比以 10~20 和 5~10 两等级为主，且各等级交错分布，其中织金县东部、七星关区北部、大方县中部和威宁县中北部等地区的钙镁比含量较高，出现较大面积的钙镁比高于 20 的区域，而钙镁比较低的主要集中在威宁县南部，出现一定面积钙镁比低于 5 的区域。

2.5 毕节植烟区土壤镁肥适宜性等级分区

综合考虑土壤有效镁含量和钙镁比的土壤镁肥

分别达到 35.4%和 31.1%，钙镁比>20 的比例接近 20%，而<5 的比例仅为 14.4%。

宜施等级分布如图 6 所示。毕节植烟区土壤镁肥较适宜和适宜施用等级的面积较大且分布较广，最适宜施用的区域主要集中在中北部、东南部地区和西北部等地区，而不适宜等级主要分布在西南部和东北部的局部地区，极不适宜等级的面积很小，主要零星分布在西南部地区。从各县区看，大方、七星关、织金县和威宁县南部镁肥宜施等级较高，而金沙和黔西县大部、威宁县南部等区域的适宜性不高，多为不适宜施用等级。

3 讨论

3.1 土壤有效镁的空间变异性

毕节植烟区土壤有效镁含量具有较强的空间变异性。这与土壤有效镁的来源与流失强度存在密切关系。首先，由于成土母岩是土壤有效镁的重要来源，母岩类型的不同会造成土壤有效镁含量的较大差异^[28]，宋文静等^[6]在贵州中部植烟土壤中也发现交换性镁含量在不同成土母质间存在显著性差异。毕节植烟区发育于玄武岩和碳酸盐岩的土壤有效镁含量明显高于其他母岩类型（表 2）。从各种母岩发育的土壤类型看，紫色土有效镁含量最高，达到 473.9 mg·kg⁻¹，其次是粗骨土和石灰土，分别为 355.8 mg·kg⁻¹ 和 307.9 mg·kg⁻¹，这主要是因为成土母岩多为玄武岩和碳酸盐岩，而黄壤的有效镁含量最低，仅为 199.8 mg·kg⁻¹，主要发育于砂岩和砂页岩等母岩类型。其次，地形条件通过影响降水量等气候条件和土壤有效镁的淋失，进而影响到土壤有

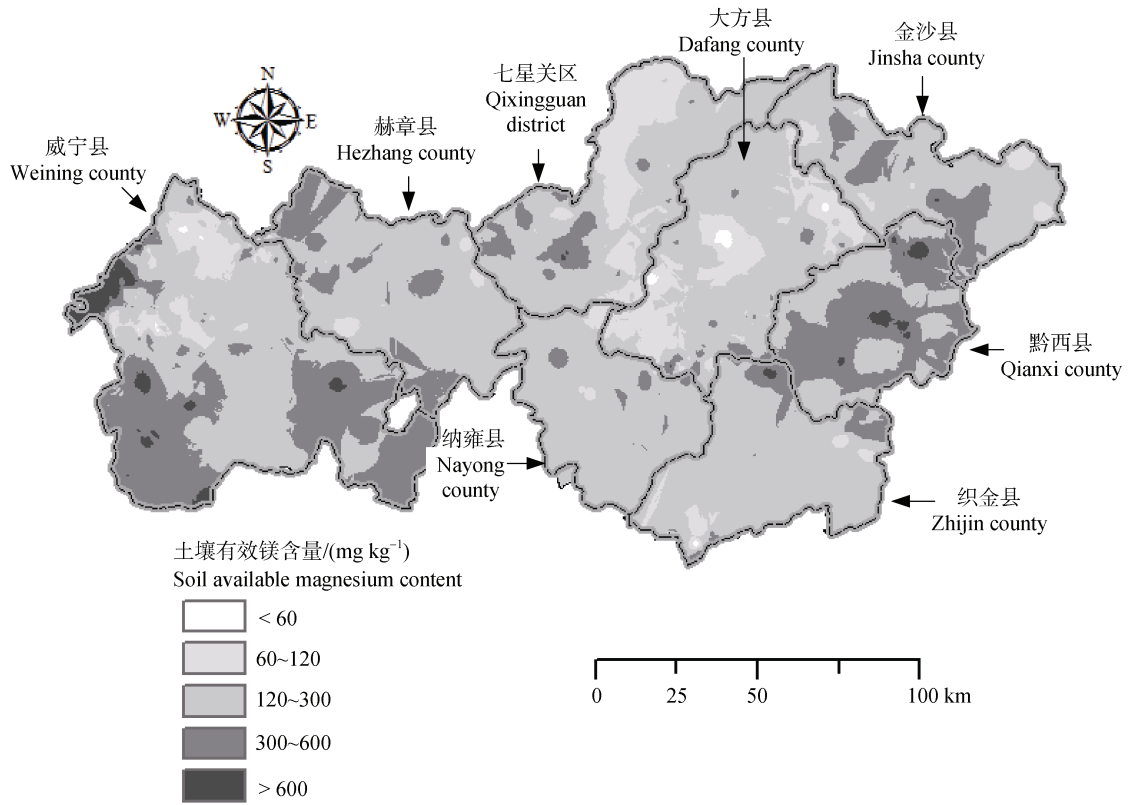


图 4 毕节植烟区土壤有效镁空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of soil available magnesium in the Bijie tobacco growing area

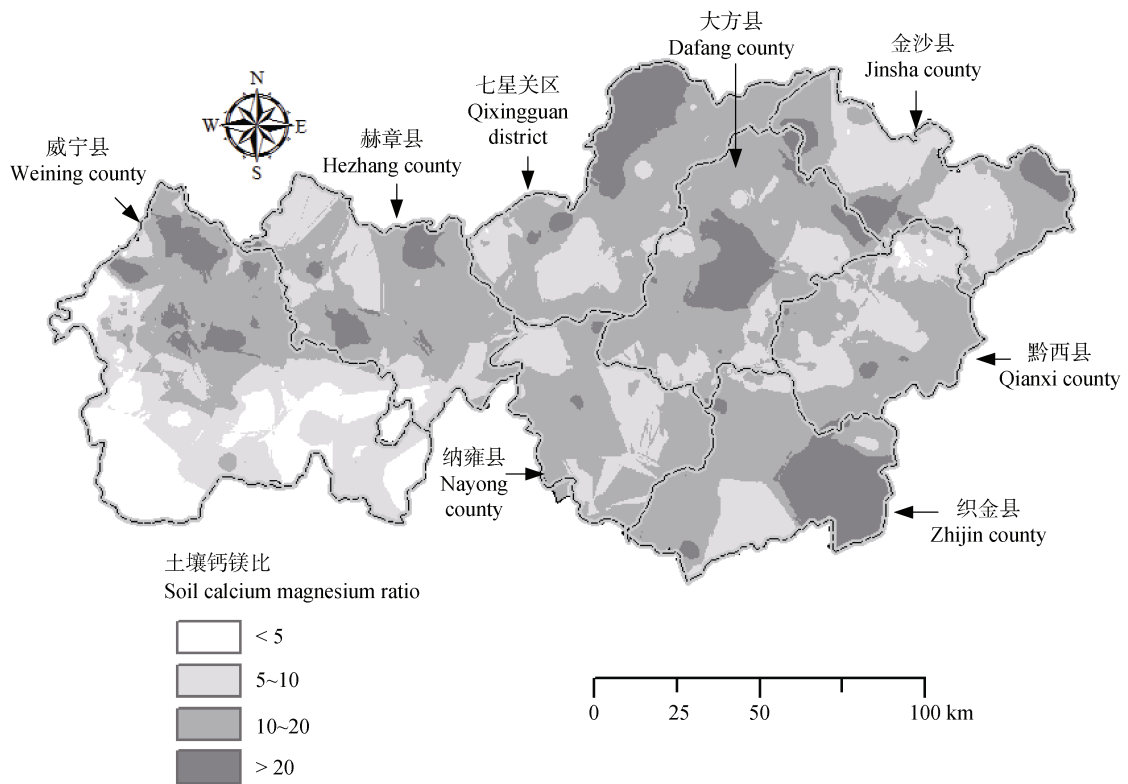


图 5 毕节植烟区土壤钙镁比空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution of soil Ca/Mg ratio in the Bijie tobacco growing area

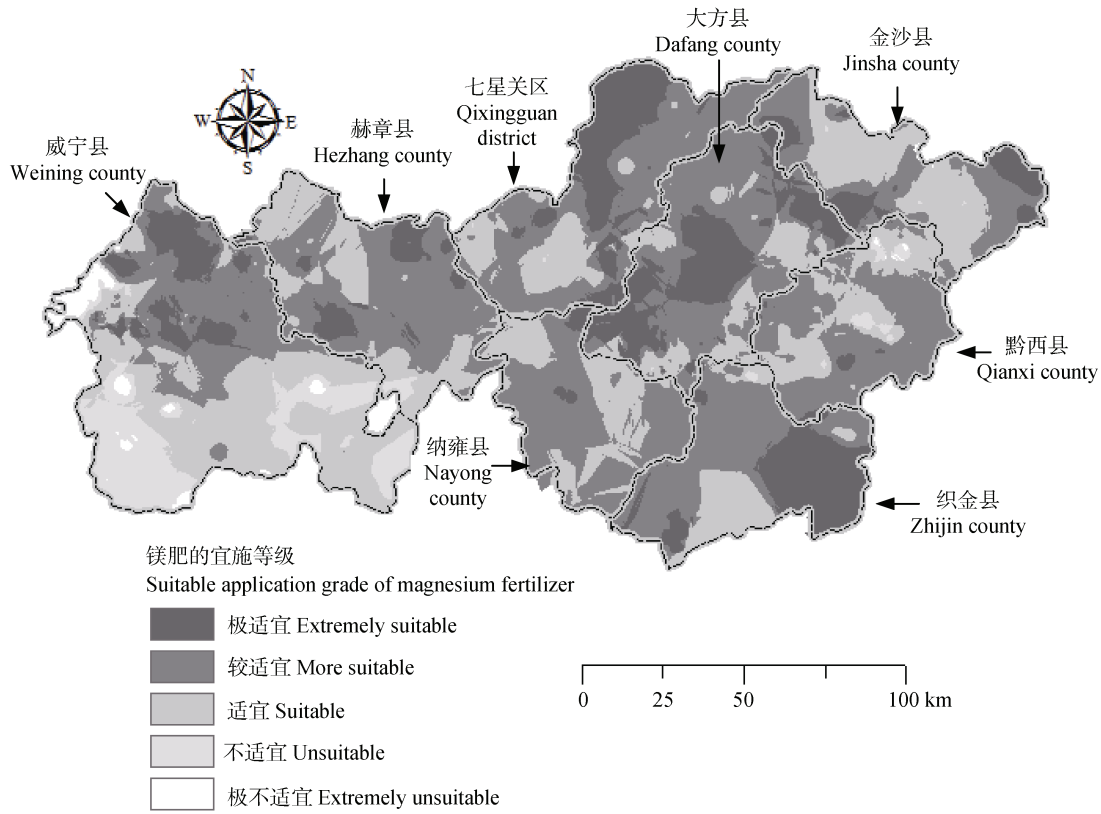


图 6 毕节植烟区土壤镁肥适宜等级分布图

Fig. 6 Distribution of suitable application grade of soil magnesium fertilizer in the Bijie tobacco growing area

表 2 毕节植烟区不同类型划分下的土壤有效镁含量

Table 2 Statistics of soil available magnesium content in different types in the Bijie tobacco growing area

类型划分		样点数量	均值	标准差	最小值	最大值	变异系数
Classification		Sample size	Mean	Std.	Min.	Max.	CV/%
/ (mg·kg ⁻¹)							
母岩类型 Parent rock	砂岩	310	291.4	293.4	28.0	1 711.5	100
	砂页岩	611	206.6	174.4	21.5	1 889.2	80
	页岩	190	244.3	223.8	51.5	1 750.5	90
	碳酸盐岩	909	318.0	265.7	44.0	2 002.0	80
	玄武岩	39	524.7	448.2	159.4	2 116.0	90
土壤类型 Soil type	粗骨土	107	355.8	355.9	22.0	2 116.0	100
	黄壤	489	199.8	155.6	21.5	1 276.0	80
	黄棕壤	481	214.4	187.4	32.2	1 713.5	90
	石灰土	794	307.9	244.7	44.0	2 002.0	80
海拔 Altitude/m	紫色土	188	473.9	403.8	41.8	1 921.5	90
	<1 200	145	292.6	201.8	51.5	1 027.0	70
	1 200~1 600	690	224.8	159.2	21.5	1 238.5	70
	1 600~2 100	794	329.4	336.4	47.7	2 116.0	100
	>2 100	430	263.7	195.2	22.0	1 889.2	70

续表

类型划分	样点数量	均值	标准差	最小值	最大值	变异系数	
Classification	Sample size	Mean	Std.	Min.	Max.	CV/%	
—————/(mg·kg ⁻¹) —————							
地形	坝地	472	313.6	285.8	51.4	2 116.0	90
Terrain	坡地	1 587	267.4	243.9	21.5	2 002.0	90
坡地部位	坡顶	151	285.8	359.7	28.0	1 956.5	130
Slope position	上坡	413	261.8	239.1	21.5	1 750.5	90
	中坡	515	270.6	247.5	41.8	1 921.5	90
	下坡	390	272.9	230.4	32.2	1 583.5	80
	坡底	590	297.3	254.3	45.5	2 116.0	90

效镁含量。海拔高度在 1 200~1 600 m 之间的地区含量最低，这主要是因为气流自东部海拔较低地区进入，到达此高度时产生的地形雨降水量较多，使土壤有效镁淋溶最强^[26]；而随着海拔的升高，降水量减弱，有效镁淋失量减小，故海拔位于 1 600~2 100 m 的区域有效镁含量最高；超过 2 100 m 的地区主要位于西部的威宁县内，该地区的成土母岩多为砂岩、砂页岩和页岩，而石灰岩分布较少，因而该海拔高度的有效镁含量反而偏低。从坡地和坝地两种地形位置看，坝地的土壤有效镁含量略高于坡地，这主要是由于坡地有效镁淋失相对较多所致，王亮^[29]在三峡库区柑橘园的研究也表明，坡地存在严重的土壤交换性镁流失，造成坡地镁含量偏低。从坡地的不同坡位也可以看出，位于坡地的上、中、下坡位置由于有效镁易于流失，造成其土壤有效镁含量略低于坡顶和坡底位置。这与李强等^[26]在云南曲靖植烟区的研究结果较为一致。

3.2 影响土壤钙镁比空间变异的原因

烟草根系对有效镁的吸收受土壤钙镁比的影响较大，土壤钙镁比空间变异的揭示对于镁肥施用具有重要意义。基于相同的采样点，成土母岩、土壤类型、海拔高度、地形部位和坡地位置 5 个因子的土壤 pH 方差分析表明，不同因子对土壤钙镁比变异的影响存在较大差异，成土母岩、土壤类型、海拔高度和地形位置对 pH 的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)，而坡地部位的影响为显著水平 ($P < 0.05$)。从方差分析的 F 值看，成土母岩和土壤类型对钙镁比空间变异的影响远大于其他因子，这表明土壤钙镁比的差异主要由成土母质和土壤成土过程决定

的。姜勇等^[30]对沈阳郊区耕地土壤的研究发现土壤钙镁比主要受母质等成土因素的影响，而杨用钊等^[31]在淮安市清浦区的研究表明土壤类型是土壤钙镁比空间分异的制约因素。碳酸盐岩发育的土壤中，虽然土壤有效镁含量较高，但同时土壤有效钙含量更高，导致其土壤钙镁比含量大部分超过 10，甚至在有效镁淋失的一些坡地位置上钙镁比超过 20^[28, 32]。李晓婷等^[16]研究指出土壤钙镁比大于 10 则会引起镁的潜在性缺乏，因而尽管碳酸盐岩发育的土壤有效镁含量很高，由于土壤中钙、镁元素之间的拮抗作用，仍然可能出现土壤镁素的失调，必须适当补充镁素。而发育自砂岩、砂页岩等成土母岩的土壤类型，其形成过程不同于碳酸盐岩土壤，在土壤形成过程中淋溶作用活跃，可溶性盐及金属离子大量淋失，土壤溶液呈微酸性或酸性，盐基饱和度低，各土壤类型的耕层土壤钙和镁的交换量差异不大，使得各土壤类型的钙镁比远小于碳酸盐岩土壤^[30]。由于不同母岩发育土壤钙镁比差异较大，同时受地形、气候等环境因素的影响，导致各土壤类型钙、镁元素的拮抗作用差别明显。因此，不仅需要根据土壤有效镁含量的实际情况，制定施肥措施，而且应在有效钙含量较高的区域，适当增施镁肥，以降低土壤钙镁比，进而使土壤钙镁比处于适宜状态，这对于优质烟叶的生产具有重要意义。

3.3 镁肥适宜性等级划分方法对区域施肥的影响

土壤有效镁含量和土壤钙镁比均会对烟草根系镁素吸收产生影响^[23, 33]。毕节植烟区土壤有效镁含量的空间分布特征如图 4 所示，若直接根据土壤有效镁含量确定镁肥的施用等级，则有效镁含量

<60 mg·kg⁻¹、60~120 mg·kg⁻¹、120~300 mg·kg⁻¹、300~600 mg·kg⁻¹和>600 mg·kg⁻¹的区域分别对应于镁肥的极适宜、较适宜、适宜、不适宜和极不适宜施用区域,从各适宜等级来看,镁肥适宜施用等级的面积比例最大,占到毕节植烟区的69%(图7),其次是不适宜和较适宜等级,面积比例分别为19.0%和10.5%,而极适宜和极不适宜两等级的面积很小,分别占1.3%和0.2%。当前我国土壤镁肥施用等级主要是基于土壤有效镁含量的多少确定的,如王冰等^[19]对于盐源县植烟土壤镁肥施用分区;陈星峰等^[34]在福建烟区土壤镁肥适宜性分区。图6综合考虑了土壤有效镁含量和土壤钙镁比的镁肥施用等级分布图,可以看出该图与图4存在较大不同,镁肥各施用等级与图4均差异较大,统计数据表明(图7),在镁肥施用各等级中,较适宜等级的面积比例最大,为46.7%,其次是适宜和极适宜等级,分别为29.3%和17.2%,而不适宜和极不适宜等级面积比例最小,分别仅占5.8%和1.0%。可以发现,两种镁肥施用适宜性等级划分方法的结果之间差异很大,使得制定的镁肥施用方案截然不同,进而对区域土壤镁肥施用效果产生巨大影响,这也凸显了合理施肥分区方法的重要性。我国当前植烟区土壤镁肥施用大多数是基于土壤有效镁含量及其空间分布特征,较少地考虑土壤钙镁比给烟草根系镁素吸收带来的重要影响,因而在制定镁肥施用分区时未能充分考虑土壤钙镁比及其空间变异特征,导致当前土壤有效镁施肥方案存在较大的局限性,对区域烟草高质量生产带来不利影响。只有在既考虑到土壤有效镁含量水平,又充分考虑高钙镁比造成的烟草缺镁这一现实状况,才能科学精准地制定区域植烟土壤镁肥施用方案。

4 结论

基于毕节植烟区大样本土壤采样点数据,得到土壤有效镁含量均值为278.1 mg·kg⁻¹,尽管该均值处于有效镁含量的适宜等级,但分段统计表明,全部样点中处于适宜等级(120~300 mg·kg⁻¹)的比例仅为49.5%,在空间上表现为较强的变异性。植烟区土壤钙镁比的均值为14.5,处于偏高等级,土壤钙镁比各等级统计表明,10~20和5~10两等级的比例较高,分别达到35.4%和31.1%,钙镁比>20和

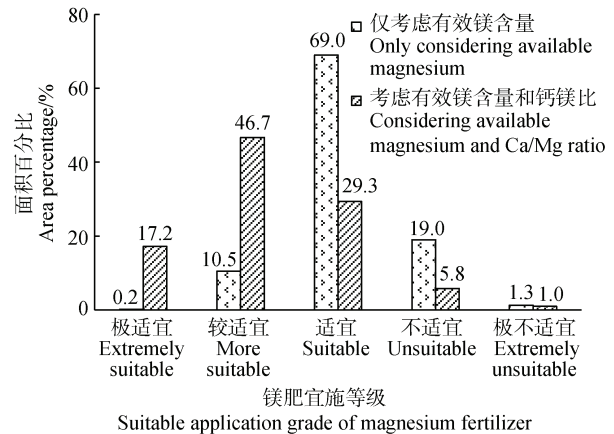


图7 基于不同划分方法的土壤镁肥施用等级面积比例

Fig. 7 Proportion of suitable application grade area of soil magnesium fertilizer based on different division methods

<5 的比例分别为19.2%和14.4%,同样呈现较强的空间变异性。毕节植烟区镁肥施用等级的划分若仅考虑土壤有效镁含量水平,得到的各镁肥施用等级中,镁肥适宜施用等级面积比例最大,占到毕节植烟区的69%,较适宜和极适宜等级面积比例分别为10.5%和1.3%,而不适宜和极不适宜等级面积比例分别为19.0%和0.2%。鉴于土壤钙镁比对土壤镁素有效供应的重要影响,本研究综合考虑土壤有效镁含量和钙镁比共同影响而得到了土壤镁肥施用等级分布图中,其较适宜等级的面积比例最大为46.7%,其次是适宜和极适宜等级,分别为29.3%和17.2%,而不适宜和极不适宜等级面积比例分别仅占5.8%和1.0%。可见仅考虑有效镁含量制定的镁肥施用方案与植烟区土壤镁素有效供应之间具有较大偏差,而综合考虑土壤有效镁含量和土壤钙镁比是科学精准施用镁肥的重要前提,对于提升毕节植烟区烟叶质量具有重要意义。

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] Evans H J, Weeks M E. The influence of nitrogen, potassium, and magnesium salts on the composition of burley tobacco[J]. Soil Science Society of America Journal, 1948, 12 (C): 315—322.
- [3] Cai L, Liu M H, Liu Z W, et al. MgONPs can boost plant growth: Evidence from increased seedling growth, Morpho-physiological activities, and Mg uptake in

- tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) [J]. *Molecules*, 2018, 23 (12): 3375.
- [4] Yu X F, Li J Y, Han X N, et al. Study on characteristics between exchangeable calcium, magnesium and related soil properties of tobacco-growing soil in Qujing[J]. *Soils*, 2019, 51 (6): 1240—1245. [余小芬, 李军营, 韩小女, 等. 云南曲靖植烟土壤交换性钙、镁与关联土壤属性的特征研究[J]. *土壤*, 2019, 51 (6): 1240—1245.]
- [5] Yin Y Q, He M X, Wei Z Y, et al. Advance in research of magnesium nutrition on tobacco[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2009, 40 (1): 60—66. [尹永强, 何明雄, 韦峥宇, 等. 烟草镁素营养研究进展[J]. *广西农业科学*, 2009, 40 (1): 60—66.]
- [6] Song W J, Meng L, Wang C D, et al. Distribution characteristics of exchangeable calcium and magnesium in tobacco growing soil in mountainous areas of Central Guizhou[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43 (3): 334—337. [宋文静, 孟霖, 王程栋, 等. 贵州中部山区植烟土壤交换性钙镁含量分布特征[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43 (3): 334—337.]
- [7] El-Fouly M M, Rezk A I, Abou El-Nour E A A. Depletion of magnesium in Egyptian soils, its content in crops and estimated needs[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2010, 5 (10): 1060—1067.
- [8] Staugaitis G, Rutkauskienė R. Effect of magnesium fertiliser on spring barley plants grown in different types of soil[J]. *Zemes Ukio Mokslai*, 2012, 27 (4): 257—267.
- [9] Bai Y L, Jin J Y, Yang L P. Study on the content and distribution of soil available magnesium and foreground of magnesium fertilizer in China[J]. *Soils and Fertilizers*, 2004 (2): 3—5. [白由路, 金继运, 杨俐苹. 我国土壤有效镁含量及分布状况与含镁肥料的应用前景研究[J]. *土壤肥料*, 2004 (2): 3—5.]
- [10] Jiang Y N, Zhang Y D, Yang W H, et al. Study on migration and leaching of magnesium in soil treated by magnesium fertilizer and additives[J]. *Soils*, 2021, 53 (1): 80—87. [姜亚男, 张亚东, 杨文浩, 等. 镁肥与添加剂施用后土壤镁迁移与淋洗特征研究[J]. *土壤*, 2021, 53 (1): 80—87.]
- [11] Cao R B. Spatial distribution characteristics and influencing factors of exchangeable calcium and magnesium data in cultivated land of Ningde City[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2018, 52 (3): 437—444. [曹榕彬. 宁德市耕地土壤交换性钙镁数据空间分布特征及影响因素分析[J]. *河南农业大学学报*, 2018, 52 (3): 437—444.]
- [12] Frau L J, Libohova Z, Joost S, et al. Regional investigation of spatial-temporal variability of soil magnesium - A case study from Switzerland[J]. *Geoderma Regional*, 2020, 21: e00278.
- [13] Mao H, Wu Z K, Qing X T, et al. Spatial distribution of exchangeable calcium and magnesium contents of tobacco-growing soil in Longshan and its influencing factors[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2017, 43 (1): 19—25. [毛辉, 吴志科, 卿湘涛, 等. 湖南龙山县植烟土壤交换性钙镁的空间分布及影响因素[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 43 (1): 19—25.]
- [14] Constantino V, Motta A C V, Barbosa J Z, et al. Fertilization with nitrogen, phosphorus, and potassium affects composition of *Araucaria angustifolia* needles, branches and stem[J]. *Floresta e Ambiente*, 2021, 28 (1): 1—15.
- [15] Liu K, Zhou J H, Li Q, et al. Tobacco planting soil of calcium and magnesium content exchange and influence on calcium and magnesium content in tobacco leaves[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30 (9): 2065—2070. [刘坤, 周冀衡, 李强, 等. 植烟土壤交换性钙镁含量及对烟叶钙镁含量的影响[J]. *西南农业学报*, 2017, 30 (9): 2065—2070.]
- [16] Li X T, Zhang J, Lin Y P, et al. Distribution and correlation of calcium and magnesium contents in tobacco-growing soil and tobacco leaves in Baoshan, Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50 (1): 131—136. [李晓婷, 张静, 林跃平, 等. 云南保山烟区土壤与烟叶钙镁含量分布特征及相关性[J]. *土壤通报*, 2019, 50 (1): 131—136.]
- [17] Osemwota I O, Omueti J A I, Ogboghodo A I. Effect of calcium/magnesium ratio in soil on magnesium availability, yield, and yield components of maize[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38 (19/20): 2849—2860.
- [18] Feng X H. Study on assessment of soil magnesium condition and magnesium supply technology in tobacco plant area in Jiangxi[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009. [冯小虎. 江西烟区植烟土壤镁素丰缺状况评价及施镁技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.]
- [19] Wang B, Feng L, Li Q Q, et al. Spatial variability and influencing factors of exchangeable calcium and magnesium in Yanyuan tobacco-growing soil[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2017, 50 (10): 8—15. [王冰, 冯浪, 李启权, 等. 盐源县植烟土壤交换性钙镁空间变异特征及其影响因素[J]. *烟草科技*, 2017, 50 (10): 8—15.]
- [20] Zhou F F, Cai X J, Long W, et al. Effect of application amounts of magnesium fertilizer on yield and quality of tobacco in Chuxiong tobacco region[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50 (1): 96—101. [周芳芳, 蔡宪杰, 龙伟, 等. 镁肥施用量对楚雄烤烟产量及品质的影响[J]. *山西农业科学*, 2022, 50 (1): 96—101.]
- [21] Zhang L, Zhang Z Q, He Y, et al. Study on suitability zoning of biochar-based organic fertilizer application in Bijie tobacco growing area[J]. *Acta Pedologica Sinica*,

- 2022, 59 (5): 1397—1407. [张龙, 张忠启, 何轶, 等. 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.]
- [22] 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: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [23] Lu Y, Zheng B, Duan Z Y, et al. Effects of Ca/Mg regulation on the flue-cured tobacco yield, chemical quality and magnesium uptake[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(11): 69—74. [鲁耀, 郑波, 段宗颜, 等. 钙镁比调控对烟叶产量、化学品质及镁吸收的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(11): 69—74.]
- [24] Shen Y Y, Zhang Z Q, Xue Y. Study on the new dynamics and driving factors of soil pH in the red soil, hilly region of South China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193 (5): 304.
- [25] Ramzan S, Nazir S, Ashraf I, et al. Management zone delineation and spatial distribution of micronutrients in cold-arid region of India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193 (7): 1—16.
- [26] Li Q, Zhou J H, Li D Q, et al. Spatial variability and influencing factors of soil available secondary elements in Qujing tobacco area, China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2011, 25 (3): 540—547. [李强, 周冀衡, 李迪秦, 等. 曲靖烟区土壤有效中量元素的空间变异特征及影响因子研究[J]. 核农学报, 2011, 25 (3): 540—547.]
- [27] Huang Y Z, Yang Y, Liu G R, et al. Characteristics of exchangeable calcium and magnesium in tobacco-growing soil in Zhaotong City[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34 (8): 1675—1681. [黄云志, 杨拥, 刘光锐, 等. 昭通市植烟土壤交换性钙镁特征分析[J]. 西南农业学报, 2021, 34 (8): 1675—1681.]
- [28] Hu G S, Zheng W, Wang Z D, et al. Nutritional principle of flue-cured tobacco[M]. Beijing: Science Press, 2000. [胡国松, 郑伟, 王震东, 等. 烤烟营养原理[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [29] Wang L. Study on spatial variability of partial nutrients in hilly *Citrus* orchard[D]. Chongqing: Southwest University, 2011. [王亮. 山地柑橘园部分主要养分空间变异研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.]
- [30] Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J, et al. Ratios of exchangeable calcium and magnesium in cultivated soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34 (5): 414—417. [姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 耕地土壤交换性钙镁比值的研究[J]. 土壤通报, 2003, 34 (5): 414—417.]
- [31] Yang Y Z, Zhang J, Song W P, et al. Study on acidic soil exchangeable Ca and Mg contents and Ca/Mg ratio in Qinpu District, Huai'an[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2016, 57 (4): 29—30. [杨用钊, 张杰, 宋文萍, 等. 淮安市清浦区酸性土壤交换性钙镁含量及比值研究[J]. 宁夏农林科技, 2016, 57 (4): 29—30.]
- [32] Manimel Wadu M C W, Michaelis V K, Kroeker S, et al. Exchangeable calcium/magnesium ratio affects phosphorus behavior in calcareous soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77 (6): 2004—2013.
- [33] Xu Z C, Li Y Y, Xiao H Q, et al. The contents of exchangeable calcium and magnesium in Hunan tobacco-growing soils and their effects on tobacco quality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (11): 4425—4433. [许自成, 黎妍妍, 肖汉乾, 等. 湖南烟区土壤交换性钙、镁含量及对烤烟品质的影响[J]. 生态学报, 2007, 27 (11): 4425—4433.]
- [34] Chen X F, Zhang R J, Li C Y, et al. The status of magnesium nutrition and its rational application in Fujian tobacco-growing areas[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22 (5): 261—263. [陈星峰, 张仁椒, 李春英, 等. 福建烟区土壤镁素营养与镁肥合理施用[J]. 中国农学通报, 2006, 22 (5): 261—263.]

(责任编辑: 檀满枝)