

周旭东,申云鑫,濮永瑜,等. 基于地统计学的植烟土壤碳氮含量空间变异性研究[J]. 江苏农业科学,2024,52(4):231-238.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.04.034

基于地统计学的植烟土壤碳氮含量空间变异性研究

周旭东^{1,2}, 申云鑫^{1,2}, 濮永瑜³, 沈广材³, 施竹凤¹, 何永宏², 杨明英¹, 杨佩文¹

(1. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 云南昆明 650205; 2. 云南农业大学植物保护学院, 云南昆明 650201;

3. 云南省烟草公司保山市公司, 云南保山 678000)

摘要:有机碳和全氮含量是影响土壤肥力与作物产量的重要土壤因子,区域内土壤碳氮含量的分布情况直接影响作物生产。通过解析云南省保山市烟区土壤碳氮含量空间分布情况,为区域植烟土壤肥力改良和优质烤烟生产提供科学依据和数据支撑。对保山市 5 县(区)72 个植烟土壤点进行采样,测定土壤容重、田间持水量、土壤含水量、土壤酸碱度、有效土层厚度、土壤全氮含量和土壤有机碳含量等 7 项指标,采用径向基函数神经网络模型和克里格法建立土壤碳氮含量与土壤理化因子间的相关关系,预测土壤有机碳含量和全氮含量的空间分布特征。土壤碳氮含量与理化指标间的相关性分析表明,土壤全氮含量与土壤容重、土壤 pH 值呈显著负相关关系($P < 0.05$),相关系数分别为 -0.235 、 -0.170 ;土壤有机碳含量与田间持水量、土壤含水量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),相关系数分别为 0.555 和 0.452 ;土壤有机碳含量与土壤 pH 值呈显著正相关关系,相关系数为 0.190 ;土壤有机碳含量与土壤容重呈极显著负相关关系,相关系数为 -0.636 ;土壤碳氮关系可用线性回归方程 $y = 10.69 + 4.37x$ ($r^2 = 0.137, n = 72$) 表示;土壤平均全氮含量 2.01 g/kg,土壤平均有机碳含量为 33.60 g/kg,土壤平均碳氮比为 16.71 。径向基函数神经网络模型较多元回归模型对验证样点土壤全氮含量和有机碳含量的预测值与实际观测值的相关系数分别提高 0.037 和 0.031 ,表明土壤理化因子与土壤碳氮含量之间的复杂关系能够通过径向基函数神经网络模型更准确地描述出来;47 个验证点预测结果误差分析表明,与普通克里格法和回归克里格法相比,径向基函数神经网络模型和普通克里格法相结合的方法明显减低了土壤有机碳和全氮含量预测结果的平均绝对误差、均方根误差和平均相对误差。保山市 5 县(区)土壤碳氮含量由北向南存在明显差异,相关性分析结果表明,植烟区内的土壤理化因子对土壤有机碳含量和全氮含量的影响较大。因此,在烤烟生产上,应根据预测结果因地制宜,针对不同区域制定施肥方案,合理调控有机肥和氮肥的施用,保障烤烟高质量生产。

关键词:地统计学;土壤碳氮含量;空间分布;径向基函数神经网络模型;变异性

中图分类号:S572.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)04-0231-08

土壤有机碳和全氮是土壤质量、土壤肥力的物质基础,是植物养分的重要来源和保障陆地生态系统可持续利用的关键因子^[1-3]。然而,气候变化、土地类型等自然条件以及土地利用、耕作管理等人为因素直接或间接地影响土壤碳氮的空间分布,导致土壤肥力区域分布不均匀、肥力指标区域间差异性大等问题,严重削弱了特定区域内土壤生产力的持续性^[4-5]。研究植烟区土壤碳氮空间变异规律,准确预测其空间分布特征,对指导植烟区土壤养分管

理,促进烟草产业持续健康发展具有重要意义。

随着地统计学的飞速发展,农业生态系统中土壤养分与土壤理化性质、地形气候条件等因素的相关性特征对全球碳氮循环的效应已成为当前研究热点之一。开展区域土壤质量评价,分析预测土壤碳氮空间分布的变异性是土地资源可持续利用的重要组成部分。利用样点数据进行空间插值分析,由于只考虑了土壤碳氮的空间自相关,不能很好地反映土壤碳氮与土壤物理指标和其他化学指标之间的关系,因而很难精确地揭示复杂环境下土壤碳氮的空间分布规律^[6-7]。例如,利用普通克里格法、回归克里格法和多元线性回归法等方法对土地碳氮空间变化进行了大量的分析研究,并将其与土壤的空间自相关性^[8-11]及土壤理化指标之间的异相关性^[8-11]进行分析。已有的研究结果显示,不同类型的土壤物理指标与 pH 值、土壤碳氮含量之间存在显

收稿日期:2023-08-17

基金项目:云南省烟草公司科技计划重点项目(编号:2020530000241021);

云南省科技计划重大科技专项(编号:202202AE090015)。

作者简介:周旭东(1999—),男,云南昆明人,硕士研究生,研究方向为资源利用与植物保护。E-mail:1018595481@qq.com。

通信作者:杨佩文,博士,研究员,主要从事土传病害防控技术研究。

E-mail:398036877@qq.com。

著相关关系,而采用克里格法和多元线性回归法无法较好地反映出不同的土壤物理指标与 pH 值、土壤碳氮含量之间的相互影响^[12-13]。因此,如何准确确定土壤碳氮分布和土壤物理指标及 pH 值的变化关系,还需要进行更深入的研究。径向基函数神经网络模型是一种基于计算机模拟生物机制的分析方法,该方法利用较强的非线性计算能力和详述性,建立并准确解释目标变量与多元环境因子间的复杂非线性映射关系,已在土壤养分空间分布特征规律分析预测中受到广泛应用^[5,8,14-15]。

目前,国内关于土壤碳氮空间分布的研究主要集中在湿地、森林、草原、平原、河谷等陆地生态系统,对区域尺度下的植烟土壤碳氮空间分布特征规律尚未有系统研究。为此,本研究以云南省保山烟区为研究对象,基于土壤碳氮空间分布的相关性特征,结合土壤理化因子,采用径向基函数神经网络模型和克里格法系统分析该区域土壤有机碳和全氮的空间分布格局,以期为区域植烟土壤合理施肥、优质烤烟种植及可持续发展奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

保山市位于云南省西部(98°25′~100°02′E, 24°08′~25°51′N),地势由西北向东南延伸倾斜,海拔 535~3 780 m,属低纬山地亚热带季风气候,具有独特的立体气候条件,年平均气温 15.5℃,年降水量 700~2 100 mm。土壤类型主要有红壤、紫色土、黄棕壤、石灰性土和水稻土,宜于优质烤烟生产。保山市是云南省重要的优质烟区之一,对于行业发展具有重要影响。据统计,2020 年全市烟草种植总面积约 2.83 万 hm²,收购烟叶总量 5.725 万 t。

1.2 土壤样品采集与分析测定

2021 年 4 月在云南省保山烟区的基本烟田采用全球定位系统(GPS)定位技术进行定位取样(98°28′42″~99°41′02″E,24°28′31″~25°33′06″N),采集点均种植烤烟达 5 年以上,共收集到代表性土壤样本 72 份,采样地海拔 1 120~2 030 m(图 1)。在冬季作物收获后采集土壤样本,选取的样本具有代表性和均匀性,并遵循全国耕地地力调查与质量评价相关操作技术规程。利用“Z”字形取样法采集田块 0~20 cm 的耕层土壤,每点取 1.0~1.5 kg 土样混匀,用四分法取 2 kg 土样装入取样袋送回。选

用规格为高 5 cm、容积 100 cm³ 的环刀在 0~20 cm 耕层土壤取样,每个取样点 5 次重复,环刀样加盖密封后带回实验室。

将取回的土壤样本登记编号,风干去除杂质,研磨过筛后进行土壤养分含量测定。土壤 pH 值、有机碳含量、全氮含量、容重、田间持水量和土壤含水量的分析方法参照文献[16]进行。

1.3 数据统计及研究方法

1.3.1 土壤碳氮储量计算方法 土体碳氮储量的计算公式为

$$N_{mass} = C \times B \times H \times 10^4. \quad (1)$$

式中: N_{mass} 表示土壤中全氮或有机碳储量, kg/hm²; C 表示土壤全氮或有机碳质量分数,%; B 表示土壤容重, kg/m³; H 表示土层厚度, m。

1.3.2 人工神经网络模型和地统计学方法 本研究以径向基函数神经网络模型为主要分析方法,径向基函数神经网络模型的输入端变量为土壤容重、田间持水量、土壤含水量、土壤酸碱度和有效土层厚度 5 个土壤理化因子,输出端变量为土壤有机质和全氮含量。以此来建立神经网络模型,分析土壤理化因子与土壤有机质含量、全氮含量的相关关系,并且确定神经网络模型各参数。

在回归克里格法的应用下,对神经网络模型的预测分析结果残差进行半方差分析,旨在得出半方差模型的最优组合。在 ArcMap 10.7 中利用普通克里格法进行神经网络模型预测结果的空间内插。将径向基函数神经网络模型预测结果与普通克里格法预测结果相叠加,得到土壤有机碳含量和全氮含量的空间分布预测结果。

1.3.3 对照方法 对照方法选用普通克里格法和回归克里格法,对植烟区土壤有机碳和全氮含量的空间分布进行预测。预测结果与神经网络模型和回归克里格法相加得到的预测结果作对比。

1.3.4 精度验证 土壤样点中验证点与建模点的抽取由 ArcMap 10.7 中的 Create Subsets 统计分析模块完成,随机抽取 30% 作为验证点,共 22 个,70% 作为建模点,共 50 个。选取平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)和均方根误差(RMSE)3 个评价分析指标,评价分析建模点和验证点的预测值与实际值。MAE、RMSE 和 MRE 这 3 个评价价值的大小直接决定预测结果的误差,误差越小、模拟精度越高,评价结果越精确。

采用 Excel 2016 进行数据统计整理,采用

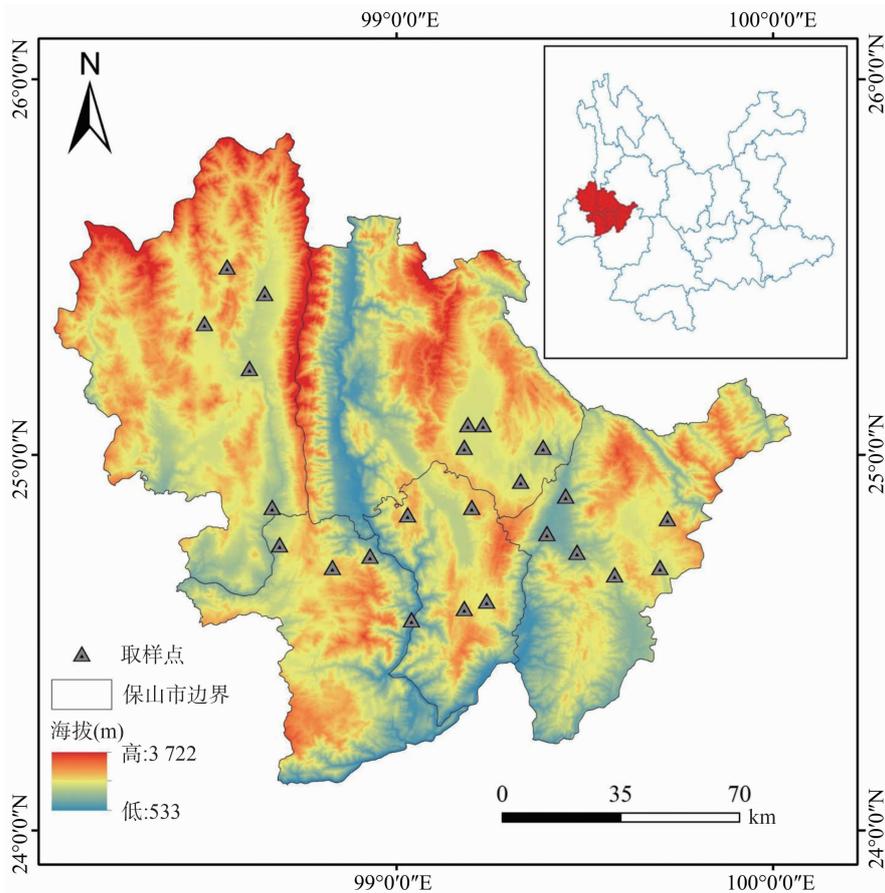


图1 保山市采样点分布

ArcMap 10.7 地统计软件进行土壤全氮含量和土壤有机碳含量空间预测, SPSS 22.0 进行数据分析, SigmaPlot 12.5 进行图形绘制。

计算公式如下:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Z}_i - Z_i|; \quad (2)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Z}_i - Z_i| \times 100\%; \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}_i - Z_i)^2}. \quad (4)$$

式中: \hat{Z}_i 表示第 i 个样点的预测值; Z_i 表示第 i 个样点的实际观测值; n 表示样点数。

2 结果与分析

2.1 植烟区土壤理化性质及土壤养分特征分析

保山烟区土壤理化性质概况具体如表 1 所示。其中, 土壤容重均值为 1.23 g/cm^3 , 值域范围 $0.86 \sim 1.50 \text{ g/cm}^3$; 田间持水量均值为 40.34% , 值域范围 $26.67\% \sim 67.51\%$; 土壤含水量均值为 18.68% , 值域范围 $6.91\% \sim 51.44\%$; 土壤 pH 值介

于 $4.40 \sim 8.32$ 之间, 土壤平均 pH 值为 6.37 ; 有效土层厚度均值为 19.27 cm , 值域范围 $10.00 \sim 32.50 \text{ cm}$ 。从 5 项土壤理化指标的变异程度看, 土壤容重、田间持水量、土壤 pH 值和有效土层厚度的变异系数小于 30.00% , 为低等变异性; 土壤含水量的变异系数为 49.13% , 介于 $30.00\% \sim 100.00\%$ 之间, 为中等变异性。土壤理化指标数据正态性检验结果发现, 土壤容重、田间持水量、土壤含水量、土壤酸碱度和有效土层厚度的偏度绝对值小于 3, 且峰度绝对值小于 10, 表明这 5 项土壤理化指标呈正态分布。

保山烟区土壤养分含量概况如表 2 所示, 土壤平均全氮含量为 2.01 g/kg , 值域范围 $0.69 \sim 4.77 \text{ g/kg}$, 极差为 4.08 g/kg ; 土壤平均有机碳含量为 33.60 g/kg , 值域范围 $7.80 \sim 105.80 \text{ g/kg}$, 极差为 98.00 g/kg ; 土壤平均碳氮比为 16.71 , 值域范围 $1.41 \sim 51.18$, 极差为 49.77 ; 土壤平均氮储量为 4.68 kg/hm^2 , 值域范围 $1.42 \sim 14.05 \text{ kg/hm}^2$, 极差为 12.63 kg/hm^2 ; 土壤平均碳储量为 45.08 kg/hm^2 , 值域范围 $11.89 \sim 138.96 \text{ kg/hm}^2$, 极差为 127.06 kg/hm^2 。从 5 项土壤养分指标的变异程度

表1 植烟区土壤理化性质描述性统计特征

土壤理化指标	平均值	标准偏差	变异系数 (%)	最大值	最小值	偏度	峰度
土壤容重(g/cm ³)	1.23	0.12	10.08	1.50	0.86	-0.41	0.43
田间持水量(%)	40.34	7.26	17.87	67.51	26.67	1.17	2.74
土壤含水量(%)	18.68	9.24	49.13	51.44	6.91	1.63	2.60
土壤pH值	6.37	1.19	18.49	8.32	4.40	0.28	-1.29
有效土层厚度(cm)	19.27	5.23	26.96	32.50	10.00	0.72	-0.20

表2 植烟区土壤碳氮含量描述性统计特征

土壤养分指标	平均值	标准偏差	变异系数 (%)	最大值	最小值	极差	偏度	峰度
全氮含量(g/kg)	2.01	0.81	40.08	4.77	0.69	4.08	1.13	1.16
有机碳含量(g/kg)	33.60	9.60	42.16	105.80	7.80	98.00	1.66	3.47
碳氮比	16.71	6.93	64.00	51.18	1.41	49.77	3.53	16.89
氮储量(kg/hm ²)	4.68	2.24	47.84	14.05	1.42	12.63	1.89	5.70
碳储量(kg/hm ²)	45.08	23.40	51.90	138.95	11.89	127.06	1.54	3.16

看,土壤全氮含量、有机碳含量、碳氮比、碳储量和氮储量的变异系数均在35.00%~100.00%之间,为中等变异性。5项土壤养分数据正态性检验结果显示,土壤全氮含量、有机碳含量、碳储量和氮储量的偏度绝对值小于3且峰度绝对值小于10,表明这4项土壤养分指标呈正态分布,土壤碳氮比则呈偏态分布。

2.2 植烟区土壤碳氮相关性特征分析

植烟区土壤全氮含量和有机碳含量的分布频率如图2所示。可以看出,土壤全氮含量主要集中在

在0.69~2.73 g/kg,该含量范围内的土壤全氮占土壤总样本的61.24%,土壤全氮含量大于2.73 g/kg的土壤样本占13.89%;土壤有机碳含量主要集中在7.8~49.8 g/kg,该含量范围内的土壤有机碳占土壤总样本的63.18%,其中以有机碳含量介于21.8~35.8 g/kg的占比最高,为34.57%,土壤有机碳含量介于7.8~21.8 g/kg的土壤样本占14.37%,土壤有机碳含量大于49.8 g/kg的土壤样本占9.32%。

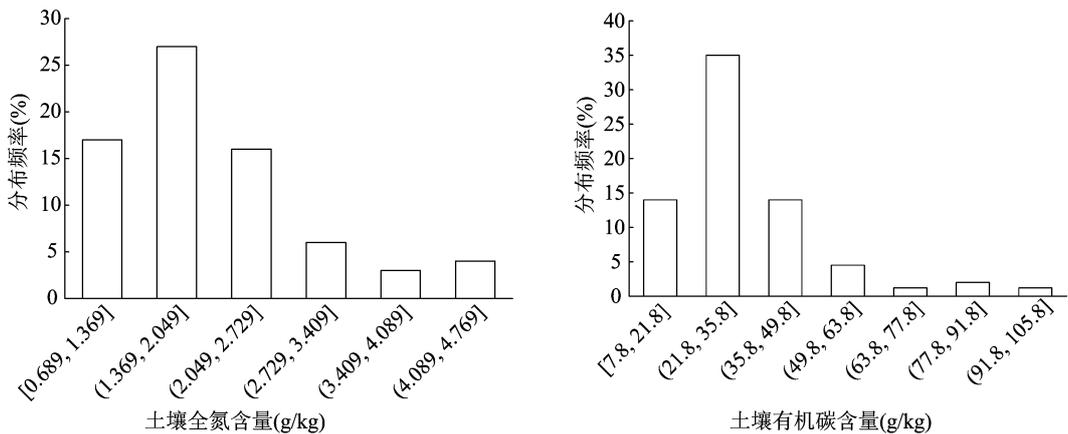


图2 植烟区土壤全氮含量和有机碳含量分布频率

根据土壤碳氮比高低,将土壤碳氮共济关系分成3种类型:5≤土壤碳氮比<12、12≤土壤碳氮比≤18、土壤碳氮比>18。将土壤碳氮比<9或>12作为土壤碳氮失衡类型,土壤碳氮比在9~12之

间作为土壤碳氮平衡类型。植烟区72个土壤样点数据中,土壤碳氮比小于12的有30个,大于18的有13个,分别占41.67%和18.06%,土壤碳氮比处于平衡类型的有29个,占40.28%。从土壤碳氮含

量的相关关系(图3)上看,土壤全氮含量和有机碳含量的关系呈显著线性正相关,用线性回归方程 $y = 10.69 + 4.37x$ ($r^2 = 0.137, n = 72, P < 0.05$) 表示。土壤全氮含量和土壤有机碳含量之间呈正相关关系,表明土壤全氮含量的变化规律总体上与有机碳含量相同,土壤碳氮含量之间出现协同变化关系。

基于72个样点数据,分析植烟区土壤有机碳含量、全氮含量与土壤理化指标间的相关性(表3),结果发现,植烟区土壤全氮含量与土壤容重、土壤pH值呈显著负相关关系($P < 0.05$),相关系数分别为 -0.235 和 -0.170 ,表明土壤容重越大,土壤全氮含量越低,土壤pH值越低,土壤全氮含量越高;土壤有机碳含量与田间持水量、土壤含水量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),相关系数分别为 0.555 和 0.452 ,土壤有机碳含量与土壤pH值呈显著正相关关系,相关系数为 0.190 ,土壤有机碳含量与土壤容

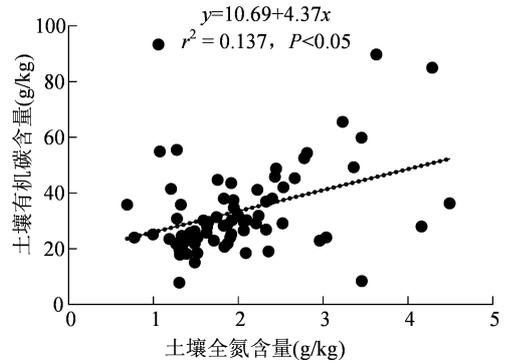


图3 植烟区土壤全氮含量和有机碳含量的相关关系

重呈极显著负相关关系,相关系数为 -0.636 ,表明土壤容重越大,土壤有机碳含量越低,土壤田间持水量、含水量和pH值越高,土壤有机碳含量越高。土壤全氮含量和土壤理化性质间的相关性与土壤有机碳含量存在较大差异。相关性分析结果表明,植烟区内的土壤理化因子对土壤有机碳和全氮的含量影响较大。

表3 植烟区土壤理化指标和土壤碳氮含量间的相关性

土壤养分指标	相关系数				
	容重	田间持水量	含水量	有效土层厚度	pH值
全氮含量	-0.235^*	0.156	0.114	-0.071	-0.170^*
有机碳含量	-0.636^{**}	0.555^{**}	0.452^{**}	0.100	0.190^*

注: * 表示相关性达显著水平($P < 0.05$); ** 表示表示相关性达极显著水平($P < 0.01$)。表4同。

2.3 土壤碳氮空间分布神经网络预测及回归预测

经逐步筛选,明确预测植烟区土壤全氮和土壤有机碳含量的最适网络隐层节点数分别为12、8,利用该参数完成对植烟区土壤全氮含量和有机碳含量空间分布的神经网络模型预测。同时,采用多元线性回归法对植烟区土壤全氮和有机碳含量分布进行回归预测,其中,土壤全氮含量线性回归方程可表示为 $STN = 8.279 - 3.809BD - 0.045FMC + 0.009WC - 2.135ETL + 0.073pH$ ($F = 1.419, P < 0.01$),土壤有机碳含量线性回归方程可表示为 $SOC = 64.827 - 39.792BD + 0.028FMC + 0.296WC - 8.396ETL - 0.233pH$ ($F = 11.688, P < 0.01$)。由表

4可知,将径向基函数神经网络模型和多元线性回归法对土壤全氮含量、有机碳含量的分析预测值与实际测定值进行相关性分析,结果表明,径向基函数神经网络模型对土壤有机碳含量、全氮含量的预测结果与实测结果的相关系数高于多元线性回归法的分析结果。具体来说,径向基函数神经网络模型相较于多元线性回归法,对土壤全氮含量和有机碳含量建模样点的预测值与实测值的相关系数分别增加了 0.059 、 0.051 ,验证样点的相关系数分别增加了 0.037 、 0.031 ;进一步表明径向基函数神经网络模型能更有效地阐述土壤养分指标与多种环境因子间的复杂相关关系。

表4 径向基函数神经网络模型和多元线性回归法预测值与实测值的相关性

土壤养分指标	相关系数			
	建模样点 ($n = 50$)		验证样点 ($n = 22$)	
	多元线性回归法	人工神经网络模型	多元线性回归法	人工神经网络模型
全氮含量	0.178^{**}	0.237^{**}	0.169^{**}	0.206^{**}
有机碳含量	0.225^{**}	0.276^{**}	0.198^{**}	0.229^{**}

2.4 土壤碳氮含量半方差分析结果

由表5可知,土壤有机质与全氮含量中各数据项模型为球状,决定系数都在0.81以上,说明该模型具有较好的拟合程度,能够准确体现各项指标的空间结构特征。从数据上可以直观看出,土壤有机质含量与全氮含量块金效应的平均值在0.78左右,

变程为6.50和6.00,这说明全氮含量与有机质含量这2个指标具有较好的空间相关性,有一定的空间自相关范围。回归方程和神经网络模型预测残差分析的半方差结果得出,2个指标残差的块金效应和变程较原变量略微下降,表明其相较于原变量的空间结构特征变化不明显。

表5 植烟区土壤SOM和TN含量最优半方差函数拟合参数

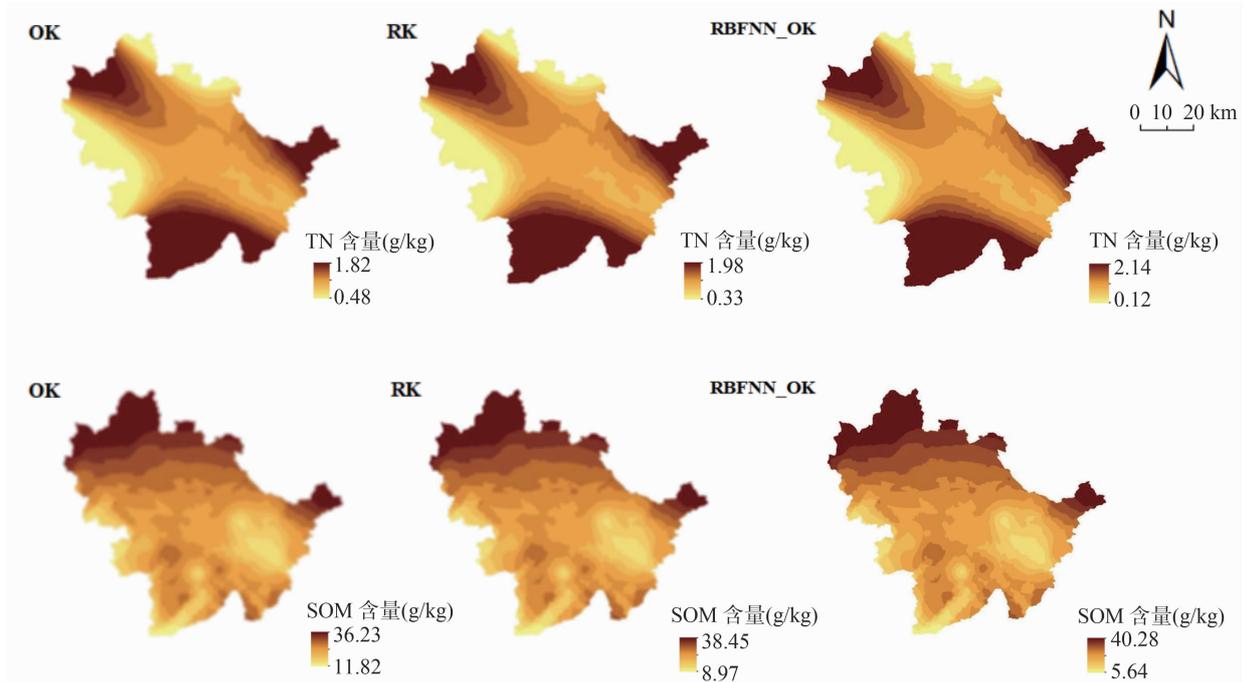
土壤养分指标	数据项	模型	块金值	基台值	块金效应	变程	决定系数	残差
有机质含量	ln SOM	球状	0.115	0.146	0.788	6.50	0.913	1.93×10^{-4}
	回归残差	球状	0.125	0.168	0.744	6.40	0.882	3.61×10^{-4}
	神经网络残差	球状	0.105	0.147	0.714	6.35	0.853	3.33×10^{-4}
全氮含量	ln TN	球状	0.111	0.142	0.781	6.00	0.899	3.31×10^{-4}
	回归残差	球状	0.157	0.213	0.737	5.90	0.812	9.37×10^{-4}
	神经网络残差	球状	0.113	0.149	0.758	6.00	0.863	4.75×10^{-4}

注:SOM表示土壤有机质,TN表示全氮。

2.5 土壤碳氮含量空间分布预测结果

从图4的预测结果可以看出,整个保山市土壤有机质含量分布呈现出由北向南逐渐减少的趋势,而土壤氮含量大致呈现出中间低,四周高的分布趋势。3种预测方法所得到的结果基本一致,有机质和全氮高含量区与低含量区的位置和分布情况大

致相同。使用普通克里格预测法(OK)预测有机质和全氮空间分布规律下,预测结果较为模糊,区域分布不明显。在与回归克里格法(RK)和径向神经网络模型结合普通克里格法(RBFNN_OK)相比较下,后者预测结果精确,区域有机质和全氮分布明显,较为准确地体现出土壤营养的变化分布规律。



OK—普通克里格法; RK—回归克里格法; RBFNN_OK—径向基函数神经网络与普通克里格相结合的方法

图4 植烟区土壤TN和SOM含量空间分布预测结果

2.6 精度评价分析结果

由精度评价分析结果可知,OK这一种预测方法劣于RK和RBFNN_OK方法,且RBFNN_OK法

对土壤有机质含量和全氮含量的预测精确度又明显高于OK和RK(表6)。从3种方法对土壤碳氮含量的建模点拟合结果来看,OK与RK这2种方法

对碳氮含量指标建模点的拟合误差明显高于 RBFNN_OK 法。从验证点的预测精确度来看,OK 与 RK 对土壤全氮含量预测结果的 *MAE*、*MRE*、*RMSE* 较 RBFNN_OK 分别上升 15.3%、6.8%、

6.3% 和 7.6%、3.2%、4.1%;OK 与 RK 法对土壤有机质含量预测结果的 *MAE*、*MRE*、*RMSE* 较 RBFNN_OK 分别上升 8.2%、8.9%、8.1% 和 4.5%、2.7%、0.4%。

表 6 研究区不同土壤养分预测方法精度检验值

土壤养分指标	预测方法	建模点			验证点		
		<i>MAE</i>	<i>MRE</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>MRE</i>	<i>RMSE</i>
有机质含量	OK	4.456	27.457	5.522	4.996	31.178	6.159
	RK	4.125	24.987	5.211	4.825	29.397	5.723
	RBFNN-OK	4.088	24.258	5.187	4.616	28.626	5.699
全氮含量	OK	0.214	28.864	0.312	0.287	34.487	0.335
	RK	0.228	27.457	0.274	0.268	33.329	0.328
	RBFNN-OK	0.207	26.368	0.278	0.249	32.294	0.315

3 讨论

土壤有机碳和全氮在土壤肥效改良、土壤微生物群落调节、作物营养供给和生态环境改善等方面起着重要的作用。土壤 pH 值是影响土壤碳氮含量的指标之一,也是土壤质量变差的明显表现形式;土壤 pH 值决定了特定区域内农田土壤肥力的大小,直接影响着土壤环境质量的改善和土壤保蓄能力的维持^[16-18]。本研究中,不同区域尺度下植烟土壤 pH 值介于 4.40~8.32 之间,平均 pH 值 6.37;而 pH 值处于适宜烟草生长的 5.50~6.50 间的样本量仅占总样本的 31.94%,土壤 pH 值大于 7.0 的样本量占总样本的 38.89%。由表 3 可知,植烟区土壤 pH 值与土壤有机碳含量呈显著正相关关系($r=0.190$),但土壤 pH 值与土壤全氮含量呈显著负相关关系($r=-0.170$),这可能是由于施用的化学氮肥在硝化反应过程中产生了大量的 H^+ 和 NO_3^- ,从而降低了植烟区土壤的 pH 值^[19]。现代农业生产中,施肥被认为是影响土壤碳氮含量的主要因素之一,且不同植烟区域施用肥料的种类及数量差异较大,一定程度上增加了土壤碳氮素的空间变异度,使得植烟区土壤碳氮含量空间分布特征和动态变化规律更加复杂^[9,19]。有研究发现,由于绝大多数微生物对酸性较敏感,因而在某一特定区域内土壤微生物的各项生命代谢活动受土壤 pH 值高低的影响^[20]。例如,土壤中的细菌、放线菌适宜定殖在中性或略偏碱性的环境中,当土壤 pH 值较低时其代谢活性会受到抑制,导致土壤有机碳的矿化速率降低;与此同时,当 pH 值较低时土壤中硝化微生物的生长繁殖受到限制,土壤养分的硝化反应亦会受抑制,

影响土壤氮素循环^[2,21-23]。

气候环境条件在全球碳氮素生物地球化学循环过程中发挥着重要作用。一方面,全球气候变化影响着土壤碳氮素的转化和迁移,进而影响陆地生态系统植被的生物量和生产力,控制着土壤中碳氮素的持续输入;另一方面,气候环境通过调节土壤含水量、土壤温度来影响微生物对土壤碳氮素的分解和转化速率^[24-27]。因此,土壤含水量和土壤温度的综合影响,决定了植烟区土壤碳氮素分布的地带性特征。研究区植烟土壤田间持水量、土壤含水量均与土壤有机碳含量呈极显著正相关关系,可能是保山烟区受低纬山地亚热带季风气候影响,水热条件充沛,因而土壤碳素转化速率较快。研究表明,土壤团聚体和土壤有机碳含量受到土壤温度和土壤水分变化的影响,同时,土壤有机碳的丰富程度与土壤含水量成反比^[28]。汤洁等的研究也证明,土壤含水量的变化对土壤微生物的生物量和功能活性、维持土壤团聚体稳定性、改变土壤有机碳矿化速率等方面具有促进作用^[29]。此外,不同的地形地貌、土壤类型、土地利用方式等因素对土壤碳氮空间分布特征规律具有一定的影响,后续研究还应进一步探索验证,以实现提质增效和植烟土壤的可持续利用。

4 结论

从植烟区土壤全氮含量和有机碳含量关系上看,两者呈显著线性正相关关系,可用回归方程 $y=10.69+4.37x$ ($r^2=0.137, n=72$) 表示,土壤平均碳氮比 16.71,主要集中在 6.54~19.94 之间,占样本总量的 81.94%;土壤全氮平均含量 2.01 g/kg,值

域范围 0.69 ~ 4.77 g/kg, 土壤有机碳平均含量为 33.60 g/kg, 值域范围 7.80 ~ 105.80 g/kg, 土壤全氮和有机碳含量丰富。土壤碳氮含量与土壤理化性状相关性表明, 土壤容重越大, 土壤全氮含量越低, 土壤 pH 值越低, 土壤全氮含量越高; 土壤容重越大, 土壤有机碳含量越低, 土壤田间持水量、含水量和土壤 pH 值越高, 土壤有机碳含量越高。因此, 在烤烟种植生产上, 应当根据研究预测结果因地制宜, 针对不同区域制定合理有效的施肥方案, 合理调控有机肥和氮肥的施用。

参考文献:

- [1] Wang X Y, Yu D S, Wang C, et al. Variations in cropland soil organic carbon fractions in the black soil region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 93 - 99.
- [2] Kuypers M M M, Marchant H K, Kartal B. The microbial nitrogen - cycling network[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16: 263 - 276.
- [3] 李亚林, 张旭博, 任凤玲, 等. 长期施肥对中国农田土壤溶解性有机碳氮含量影响的整合分析[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(6): 1224 - 1233.
- [4] 余 道, 刘子琦, 喻阳华, 等. 黔西南石漠化区不同群落土壤碳氮磷垂直分异及化学计量特征[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(10): 2231 - 2239.
- [5] 李启权, 王昌全, 张文江, 等. 基于神经网络模型和地统计学方法的土壤养分空间分布预测[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 459 - 466.
- [6] 徐剑波, 宋立生, 彭 磊, 等. 土壤养分空间估测方法研究综述[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(增刊2): 1379 - 1386.
- [7] 杨奇勇, 杨劲松, 刘广明. 土壤速效养分空间变异的尺度效应[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 431 - 436.
- [8] 李启权, 王昌全, 岳天祥, 等. 基于神经网络模型的中国表层土壤有机质空间分布模拟方法[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(2): 175 - 184.
- [9] 付传城, 章海波, 涂 晨, 等. 滨海苹果园土壤碳氮空间分布及动态变化研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(4): 857 - 867.
- [10] Meersmans J, van Wesemael B, Gojts E, et al. Spatial analysis of soil organic carbon evolution in Belgian croplands and grasslands, 1960 - 2006[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 466 - 479.
- [11] 邱乐丰, 杨 超, 林芬芳, 等. 基于环境辅助变量的拔山茶园土壤肥力空间预测[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3099 - 3104.
- [12] 杨煜岑, 杨联安, 王 晶, 等. 基于多元线性回归模型的土壤养分空间预测: 以陕西省蓝田县农耕区为例[J]. *土壤通报*, 2017, 48(5): 1102 - 1113.
- [13] Umali B P, Oliver D P, Forrester S, et al. The effect of terrain and management on the spatial variability of soil properties in an apple orchard[J]. *CATENA*, 2012, 93: 38 - 48.
- [14] Zhao Z Y, Yang Q, Benoy G, et al. Using artificial neural network models to produce soil organic carbon content distribution maps across landscapes[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, 90(1): 75 - 87.
- [15] 王 慧, 郭月峰, 姚云峰, 等. 不同土地利用方式下土壤碳氮磷化学计量特征[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(5): 995 - 1000.
- [16] 李 倩, 李晓秀, 吴会军, 等. 不同气候和施肥条件下保护性耕作对农田土壤碳氮储量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1539 - 1549.
- [17] 李 涛, 于 蕾, 万广华, 等. 近 30 年山东省耕地土壤 pH 时空变化特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 180 - 190.
- [18] 高 琳, 龙怀玉, 陈晓远, 等. 基于中国土壤系统分类大纲的河北省土壤有机碳和氮含量与密度对比分析[J]. *江苏农业学报*, 2022, 38(3): 657 - 665.
- [19] 张顺涛, 任 涛, 周橡棋, 等. 油/麦 - 稻轮作和施肥对土壤养分及团聚体碳氮分布的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(1): 194 - 205.
- [20] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 238 - 244.
- [21] 刘 霜, 张心昱, 杨 洋, 等. 温度对温带和亚热带森林土壤有机碳矿化速率及酶动力学参数的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(2): 433 - 440.
- [22] Moreau D, Bardgett R D, Finlay R D, et al. A plant perspective on nitrogen cycling in the rhizosphere[J]. *Functional Ecology*, 2019, 33(4): 540 - 552.
- [23] 张维理, Kolbe H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317 - 331.
- [24] 李 森, 李 玲, 樊 华, 等. 川西北高寒沙地不同生态治理模式下土壤碳氮磷储量及生态化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2567 - 2573.
- [25] 张旭博, 孙 楠, 徐明岗, 等. 全球气候变化下中国农田土壤碳库未来变化[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(23): 4648 - 4657.
- [26] 仝金辉, 胡业翠, 杜章留, 等. 广西喀斯特移民迁入区土地利用变化对土壤有机碳和全氮储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(9): 2890 - 2896.
- [27] 妥 彬, 田文斌, 郭 超, 等. 中国东部海岛森林和灌丛土壤碳氮磷养分库的纬度变化[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2631 - 2638.
- [28] 马 芬, 马红亮, 邱 泓, 等. 水分状况与不同形态氮添加对亚热带森林土壤氮素净转化速率及 N₂O 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 379 - 387.
- [29] 汤 洁, 娄 云, 李 娜, 等. 冻融作用下盐碱水田土壤含水率和氮素对有机碳影响研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(4): 620 - 623.