

湘西喀斯特区植烟土壤有效磷时空变异及风险评估^①

李 强^{1,2}, 戴美玲², 向德明³, 黎 娟^{1*}, 周米良³, 田 峰³, 田明慧³, 张黎明^{1,3}

(1 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; 2 湖南农业大学烟草研究院, 长沙 410128;

3 湖南省烟草公司湘西州公司, 湖南吉首 416000)

摘 要: 为揭示典型喀斯特烟区土壤有效磷的时空变异特征, 为喀斯特地貌烟区合理施磷和控制磷素面源污染提供依据, 以湘西州 2000 年和 2014 年耕地土壤有效磷含量为研究对象, 利用空间自相关、半方差函数及分形维数等方法, 对县域内土壤速效养分时空变异特征和环境风险进行了评价。结果表明, 2014 年土壤有效磷平均含量增加了 30.89 mg/kg, 增幅达 425.48%; 土壤有效磷 Moran's I 指数标准化 Z 值下降, 分形维数和块金效应增加, 说明土壤有效磷空间结构减弱, 随机变异性增强。土壤有效磷“极高”、“很高”和“高”等级面积显著增加, 分别增加了 28.36%、26.89% 和 25.94%; 而“低”和“极低”等级面积分别下降了 57.45% 和 27.12%; 土壤有效磷含量与海拔、成土母质、土地利用类型、轮作模式及有机质含量关系密切; 2014 年湘西州有效磷含量超过风险临界值的概率大幅增加, 很高风险(概率>80%)、高风险(概率 60%~80%)和中等风险(概率 40%~60%)区域分别占研究区域面积的 1.77%、5.40% 和 13.96%。其中, 龙山县北部和永顺县东部应作为农业面源磷污染的重点控制区。

关键词: 喀斯特; 植烟土壤; 有效磷; 时空变异; 环境风险

中图分类号: S572.06 **文献标识码:** A

磷是烟草必需的大量元素之一, 一般占烟株干重的 0.15%~0.60%, 在光合作用、呼吸作用、Krebs 循环和氮代谢过程中起着重要的生理作用^[1-2]。土壤磷是植物磷素营养的主要来源, 其含量高低和有效性是衡量土壤肥力的主要指标之一, 对植物生长发育有重要影响。近 30 多年来, 我国磷肥投入大幅增加, 据报道从 1980 年到 2011 年, 我国磷肥消费量由 270 万 t 上升到 820 万 t, 增长了 3 倍, 中国土壤出现磷盈余, 磷盈余总量达 9.8×10^5 t, 磷盈余强度 2.5 kg/hm², 植烟区土壤磷素的供应能力大幅提高^[3-4]。由于烤烟特殊的施肥习惯, 一般常采取氮磷钾比例为 1:1~1.5:3.0, 加上烤烟的磷肥利用率较低, 导致植烟土壤比一般农田的磷素盈余更为严重^[5], 甚至造成一些烟区水体磷污染^[6]。此外, 当土壤磷素过高对烟叶品质也有不良影响, 如导致烟株早花, 叶脉突出、组织粗糙、弹性差、油分少、易破碎。中国烟草种植主要集中在南部和西南部, 地形多为山地和丘陵, 过多的磷素随雨水淋失的几率较大, 极易造成环境污染

风险。而有关喀斯特烟区土壤磷素环境风险的研究却鲜见报道。湖南湘西是典型的喀斯特地貌, 烤烟种植历史悠久, 过多的磷素极易随地表径流淋失。鉴于此, 本文拟采用地统计学、克里格插值法(Kriging)和概率克里格插值法(Probability Kriging), 研究典型喀斯特植烟区的磷素环境风险, 旨在为烟区烤烟磷素管理和环境保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 区域自然概况

湘西州位于湖南省西北部, 地处湘鄂黔渝 4 省市交界处, 是湖南省烤烟主产区之一, 位于 109°10'~110°22.5'E, 27°44.5'~29°38'N 之间, 全州东西宽约 170 km, 南北长约 240 km, 总面积 15 462 km²。湘西州地势由西北向东南倾斜, 平均海拔 800~200 m, 地貌形态的总体轮廓是一个以山原山地为主, 兼有丘陵和小平原, 并向北西突出的弧形山区地貌。西南石灰岩分布极广, 岩溶发育充分, 多溶洞、伏流; 西北

基金项目: 湖南省教育厅项目(CX2010B309), 湖南省烟草公司项目(2016-02)和湘西烤烟良好农业操作规范及推广应用研究项目(州烟司 2012-37)资助。

* 通讯作者(adalee619@163.com)

作者简介: 李强(1982—), 男, 江苏仪征人, 博士, 讲师, 主要从事烟草生理生化方面的研究。E-mail: zqiangli@126.com

石英砂岩密布,因地壳作用形成小片峰。东西部为低山丘陵区,平均海拔 200 ~ 500 m,溪河纵横其间,两岸多冲积平原。湘西州属亚热带季风湿润气候,具有明显的大陆性气候特征。年平均气温为 16.5 ~ 17.5 ℃,平均降水 1 290 ~ 1 600 mm,日照时数平均在 1 406 ~ 1 219 h。土壤类型有水稻土、潮土、红壤、黄壤、黄棕壤、石灰土和紫色土等。湘西州基本烟田 3.07×10⁵ hm²,其中水旱轮作烟田 1.32×10⁵ hm²,旱地烟田面积 1.75×10⁵ hm²,主要种植烤烟品种为云烟 87 和 K326,全州年均烟叶产量 2.25×10⁴ t,轮作模式主要为烤烟-绿肥-玉米-绿肥-烤烟和烤烟-绿肥-水稻-绿肥-烤烟,烤烟施肥采用基肥+追肥的管理模式。

1.2 样品采集和分析

土壤取样布点按基本烟田面积进行,第 1 次取样于 2000 年 12 月进行,每 20 ~ 33.33 hm² 布置 1 个样点,共采集 446 个土样(表 1);第 2 次取样于 2014 年 11—12 月进行,每 13.33 ~ 26.67 hm² 布置 1 个取样点,采集土样 1 242 个(表 1)。采集方法为在土壤冬翻前,选取 667 m² 以上的田块进行取样,用手持式 GPS 定位,记录田块中心的地理信息,采用五点取样法或“S”形取 0 ~ 20 cm 土样,每个田块确保 5 点以上,充分混匀后用四分法取大约 1 kg 土样。两期土样的有效磷均采用钼锑抗比色法测定^[7]。

表 1 土壤取样信息
Table 1 Information of soil samples

年份	数量(个)	种植模式	土壤母质	县区
2000	446	水田:115 个;旱地:331 个	坡积:319 个;冲积:39 个;残积:63 个;洪积:25 个	保靖县:32 个;凤凰县:85 个;古丈县:14 个;花垣县:38 个;泸西县:70 个;龙山县:121 个;永顺县:86 个
2014	1 242	水田:284 个;旱地:958 个	坡积:1 014 个;冲积:52 个;残积:130 个;洪积:46 个	保靖县:102 个;凤凰县:155 个;古丈县:95 个;花垣县:160 个;龙山县:300 个;泸西县:70 个;永顺县:360 个

1.3 土壤有效磷评价标准

土壤有效磷分级标准参考全国第二次土壤普查结果和文献[8]制定,将湘西植烟土壤有效磷含量分为极低(<5 mg/kg)、低(5 ~ 10 mg/kg)、适宜(10 ~ 20 mg/kg)、高(20 ~ 30 mg/kg)、很高(30 ~ 40 mg/kg)和极高(>40 mg/kg)(环境风险级)6 个等级。

1.4 数据分析

采用 SPSS17.0 进行描述性统计和 K-S 检验(Kolmogorov-Smirnov test)^[9]。实验半方差函数模型的计算和理论模型拟合采用 GS+9.0 软件完成^[10],克里格插值(Kriging)、概率克里格插值(Probability Kriging)、绘图及面积统计均在 ArcGIS 10.2.2 软件实现^[8,11-12]。

2 结果与分析

2.1 植烟土壤有效磷的基本统计特征及年代变化

2 个时期湘西州土壤有效磷含量列于表 2。14 年间有效磷含量发生巨大变化,2014 年土壤有效

磷含量平均值较 2000 年增加了 30.89 mg/kg,增幅达 425.48%,由“低”等级变为“很高”等级。有效磷的变异系数由 2000 年的 85.09% 上升到 2014 年的 90.06%,增加了 4.97%。极小值变化较小,而极大值则由 2000 年的 52.60 mg/kg 上升到 2014 年的 234.00 mg/kg,增加了 181.40 mg/kg。极差由 2000 年的 52.30 mg/kg 上升到 2014 年的 233.16 mg/kg,增加了 180.86 mg/kg。表明不仅有效磷的含量发生巨大变化,同时有效磷含量的变异也较大。进一步对湘西植烟土壤有效磷含量的等级分布情况进行分析(表 3),发现与 2000 年相比,2014 年土壤有效磷“极低”和“低”的样品比例分别下降了 37.60 和 26.16 个百分点,相应地“适宜”、“高”、“很高”和“极高”等级的样品比例分别增加了 3.40、15.18、11.97 和 33.21 个百分点。

2.2 植烟土壤有效磷时空变异特征

土壤养分变异来自结构因子和随机因子,结构因子包括土壤母质、地形、气候等非人为因素,随机因

表 2 不同时期湘西植烟土壤有效磷含量状况(mg/kg)
Table 2 Soil available phosphorus contents in 2000 and 2014 in Xiangxi

年份	均值(mg/kg)	标准差	变异系数(%)	极小值(mg/kg)	极大值(mg/kg)	极差(mg/kg)
2000	7.26	6.18	85.09	0.30	52.60	52.30
2014	38.15	34.36	90.06	0.84	234.00	233.16
2014 年较 2000 年增量	30.89	28.18	4.97	0.54	181.40	180.86

表 3 不同时期湘西州土壤样品有效磷等级分布及变化
Table 3 Grade distribution and changes of soil available phosphorus from 2000 to 2014

有效磷等级	有效磷分级(mg/kg)	样品比例(%)		2014 年较 2000 年增量(%)
		2000 年	2014 年	
极低	<5	43.72	6.12	-37.60
低	5 ~ 10	36.55	10.39	-26.16
适宜	10 ~ 20	15.92	19.32	3.40
高	20 ~ 30	2.69	17.87	15.18
很高	30 ~ 40	0.67	12.64	11.97
极高(环境风险级)	>40	0.45	33.66	33.21

子主要包括施肥、耕作和灌溉等人为因素；前者引起系统变异，并使变量呈空间相关性，后者造成随机变异，表现为削弱变量的空间相关性^[13]。半方差函数用于描述区域化变量的空间变异，可避免样本方差的影响^[11,14]，本试验中分别用不同模型对土壤有效磷进行拟合，获取土壤有效磷的最优半方差函数模型及其相关参数(表 4)，RMSE 接近 1 且 MSE 接近 0，表明选取的模型具有很高的拟合精度，能够很好地反映土

壤有效磷的空间结构特征。2 个时期土壤有效磷最佳半方差函数模型均为指数模型，2000 年和 2014 年土壤有效磷的块金效应分别为 8.90% 和 65.66%，14 年间有效磷块金效应增幅较大，反映出结构性因素作用和随机性因素作用发生较大变化^[10,15]，表明在过去的 14 年间，植烟土壤有效磷的空间结构性减弱，随机变异性增强，这与磷肥、有机肥投入等随机因子对土壤有效磷含量影响程度增大有关。

表 4 土壤有效磷半方差函数模型及相关参数比较
Table 4 Semi-variogram models of soil available phosphorus and the parameters

年份	模型	块金值	基台值	块金效应	变程	分形维数	Moran's I	标准化	插值精度	
		C_0	C_0+C	$C_0/(C_0+C)(\%)$					RMSE	MSE
2000	Exponential	32.46	364.67	8.90	1.449	1.915	0.388	10.76	1.043	0.012
2014	Exponential	510.63	777.64	65.66	0.039	1.984	0.097	6.12	1.028	0.003

注：RMSE 为标准化均方根误差；MSE 为标准化平均误差。

此外，从 2000 年到 2014 年，土壤有效磷的 Moran's I 值由 0.388 变为 0.097。经标准化计算，两年 Moran's I 的标准化 Z 值均大于 2.58，说明 2 个时期耕地土壤有效磷含量在 0.05 统计水平下显著空间自相关，2014 年标准化 Z 值低于 2000 年，表明 14 年来土壤有效磷的空间自相关性在减弱，随机性因素的影响增强，与前文块金效应的分析一致。

除空间结构和空间自相关分析以外，进一步利用分形维数 D 对两个时期土壤有效磷的空间结构特点进行定量描述(表 4)。土壤有效磷的分形维数由 2000 年的 1.915 变为 2014 年的 1.984，升高了 0.069，14 年间研究区土壤有效磷呈现出更多较小尺度上的变异特点，其随机变异比例相对增加，这也印证了前文半方差变异函数和空间自相关的分析结果。

2.3 土壤有效磷时空分布变化

根据获取的半方差函数模型，利用普通 Kriging 最优内插法，按照分级标准绘制了两个时期土壤有效磷含量空间分布图(图 1)，并利用 ArcGIS 软件面积统计模块对绘制的有效磷空间分布图进行面积统计。两个时期

土壤有效磷含量空间分布规律均不明显，2014 年湘西植烟土壤有效磷含量分级面积比例与 2000 年相比有较大变化(图 1 和表 5)。2000 年有效磷含量总体较低，“低”和“极低”的植烟面积比例分别达 58.94% 和 27.12%，其中有效磷“低”等级在各个植烟县均有大面积分布，有效磷“极低”等级主要分布在中部和南部；有效磷“适宜”的植烟面积比例为 13.37%，主要分布在东部的永顺县和古丈县；有效磷“高”和“很高”等级仅零星分布在龙山县北部。2014 年植烟土壤有效磷含量较 2000 年有大幅增加，新增了 2000 年未出现的“极高”等级面积达 28.36%，“高”和“很高”等级亦由原来的零星分布分别增加至 26.46% 和 26.94%，“适宜”等级的面积增加至 16.75%，“低”等级面积下降至 1.49%，“极低”等级则完全消失。其中，“极高”等级在各植烟县均有分布，在北部和东部分布较为集中；“很高”和“高”等级的分布较为分散，呈小斑块状分布在各县；“适宜”等级以较大斑块状散落分布在各植烟县；“低”等级仅零星分布在古丈、保靖和龙山。从两个年份的变化来看，湘西植烟土

壤有效磷含量变化剧烈。可见,2014 年土壤有效磷“极高”等级、“很高”和“高”等级面积显著增加,分别增加了 28.36%、26.89% 和 25.94%;而“低”和“极

低”等级则大幅下降,分别比 2000 年下降了 57.45% 和 27.12%。14 年来湘西植烟土壤有效磷含量呈大幅增加趋势,这与磷肥的长期投入和逐年积累有关。

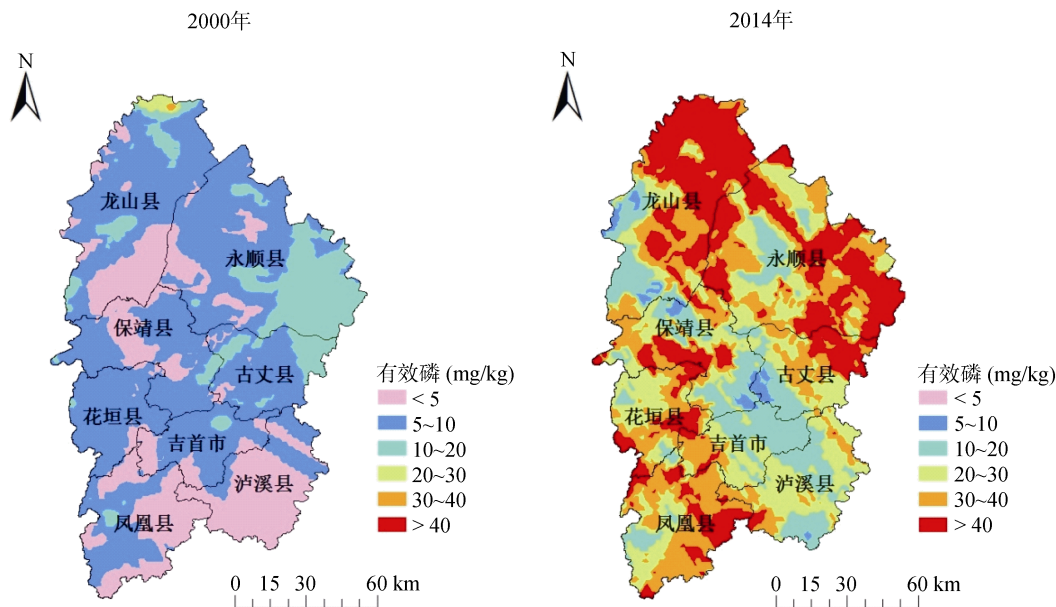


图 1 湘西植烟土壤磷素含量空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of soil available P in 2000 and 2014 in Xiangxi

表 5 不同时期土壤有效磷各等级面积统计及变化
Table 5 Area statistics and changes of soil available phosphorus under different grades in 2000 and 2014

有效磷等级	有效磷分级 (mg/kg)	面积比例(%)		2014 年较 2000 年增量 (%)
		2000 年	2014 年	
极低	<5	27.12	—	-27.12
低	5~10	58.94	1.49	-57.45
适宜	10~20	13.37	16.75	3.38
高	20~30	0.52	26.46	25.94
很高	30~40	0.05	26.94	26.89
极高(环境风险级)	>40	—	28.36	28.36

2.4 土壤有效磷的影响因素

2.4.1 海拔 湘西烟区从海拔 100 m 到 1 400 m 均有烤烟种植,土壤有效磷与海拔的相关分析表明,土壤有效磷含量与海拔呈极显著正相关关系($r = -0.254$, $P = 0.000$)。进一步采用决策树模型分析海拔高度对土壤有效磷含量的影响(图 2),结果表明海拔对土壤有机质含量影响的拐点为 467、839.7 和 1 023 m,3 个拐点将海拔划成 4 个分组: ≤ 467 m、467~839.7 m、839.7~1 023 m 和 $>1 023$ m,4 个海拔分组下土壤有效磷含量分别为 27.416、36.013、47.930 和 62.741 mg/kg,土壤有效磷在海拔分组间差异达到极显著水平,呈现随海拔升高有效磷含量快速升高的趋势。

2.4.2 成土母质 龙山植烟土壤主要成土母质为坡积物、洪积物、残积物和冲积物,有效磷含量在 4 种成土母质间存在极显著差异(表 6),由高到低依次

为坡积物、洪积物、残积物和冲积物,其中坡积物有效磷含量已基本达到淋失风险临界值,洪积物为很高等级,残积物和冲积物为高等级。从变异程度来看,坡积物、洪积物和冲积物为中等强度变异,残积物表现为强变异。

2.4.3 土地利用类型和轮作制度 湘西植烟土壤的利用类型为旱地和水田,土壤有效磷在 2 种土地利用类型间差异达极显著水平,旱地土壤有效磷含量平均为 40.76 mg/kg,水田土壤有效磷含量平均为 29.34 mg/kg(表 7)。湘西烤烟种植的轮作模式主要有烟-空闲、烟-玉米、烟-绿肥、烟-稻和烟-油菜,不同轮作模式土壤有效磷差异极显著,以烟-空闲-烟、烟-玉米-烟轮作模式下的土壤有效磷含量最高,显著高于烟-绿肥-烟、烟-稻-烟、烟-油菜-烟(表 8),这与烟-空闲-烟、烟-玉米-烟 2 种轮作模式的磷素投入较大有关。

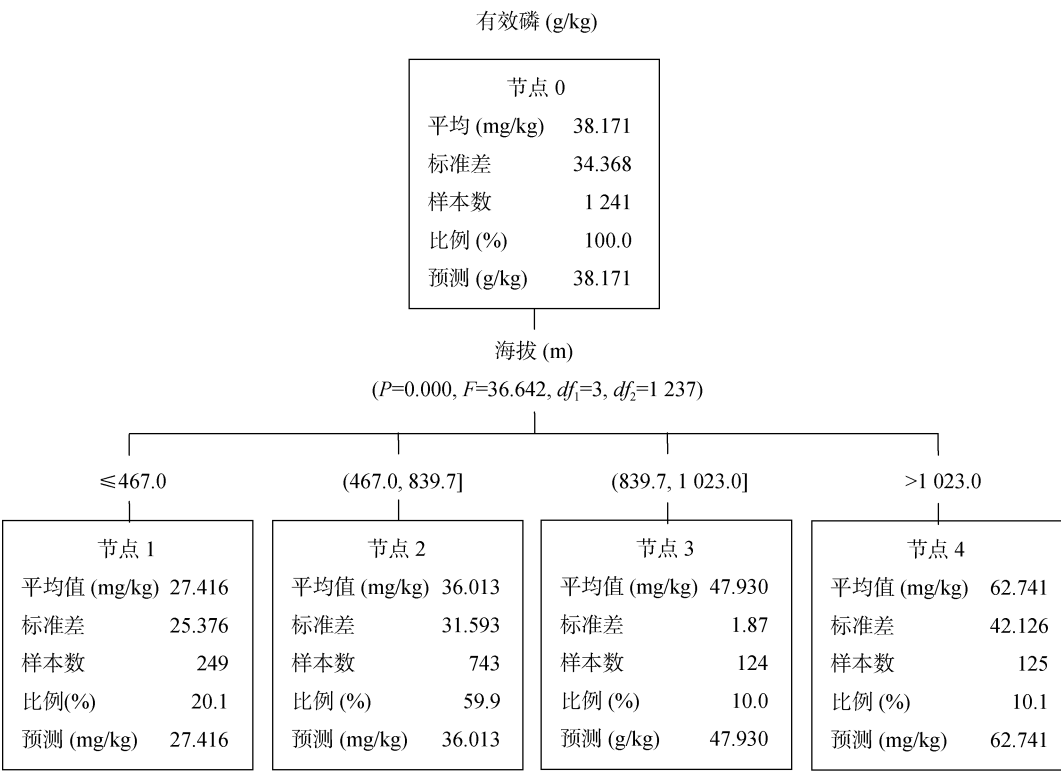


图 2 海拔高度对土壤有效磷含量影响的决策树分析

Fig. 2 Decision Tree Analysis of altitude effect on soil available phosphorus

表 6 湘西不同成土母质土壤有效磷含量(mg/kg)

Table 6 Soil available phosphorus contents under different parent materials in Xiangxi

母质	样本数	平均值	标准差	变异系数	最小值	最大值
坡积物	1 014	39.87 Aa	35.26	88.42	0.84	218.30
洪积物	46	36.54 Ab	30.31	82.94	2.49	138.80
残积物	130	29.84 Bc	29.98	100.45	0.89	234.00
冲积物	52	26.13 Bd	24.00	91.82	4.52	125.20

注：表中同列数据小写字母不同表示差异达到 $P<0.05$ 显著水平，大写字母不同表示差异达到 $P<0.01$ 显著水平，下同。

表 7 湘西不同土地利用类型土壤有效磷含量(mg/kg)

Table 7 Soil available phosphorus contents under different land use type in Xiangxi

土地利 用类型	样本数	平均值	标准差	变异系 数(%)	最小值	最大值
旱地	958	40.76 A	36.25	88.92	0.84	234.00
水田	284	29.34 B	25.17	85.78	0.89	156.30

2.4.4 有机质含量 湘西植烟土壤有机质含量平均为 28.55 g/kg，处于适宜烤烟生长的范围。土壤有效磷含量与有机质含量呈极显著正相关关系($r = 0.206$, $P = 0.000$)。进一步采用决策树模型分析土壤有机质含量对主要土壤养分指标的影响(图 3)，结果表明土壤有机质含量对有效磷影响的拐点为 16.5、22.50 和 27.00 g/kg，该拐点将有机质划成 4 个分组：

表 8 湘西不同轮作模式土壤有效磷含量(mg/kg)

Table 8 Soil available phosphorus contents under different rotation modes in Xiangxi

轮作制度	样本数	平均值	标准差	变异系数(%)	最小值	最大值
烟-空闲-烟	432	40.67 Aa	34.17	84.02	0.84	218.30
烟-空闲-玉米	483	40.61 Aa	36.74	90.47	1.08	234.00
烟-绿肥-烟	39	33.86 Bb	45.21	133.55	0.89	190.40
烟-稻-烟	274	30.85 Bb	27.48	89.05	0.99	178.00
烟-油菜-烟	14	30.57 Bb	21.01	68.72	3.69	66.50

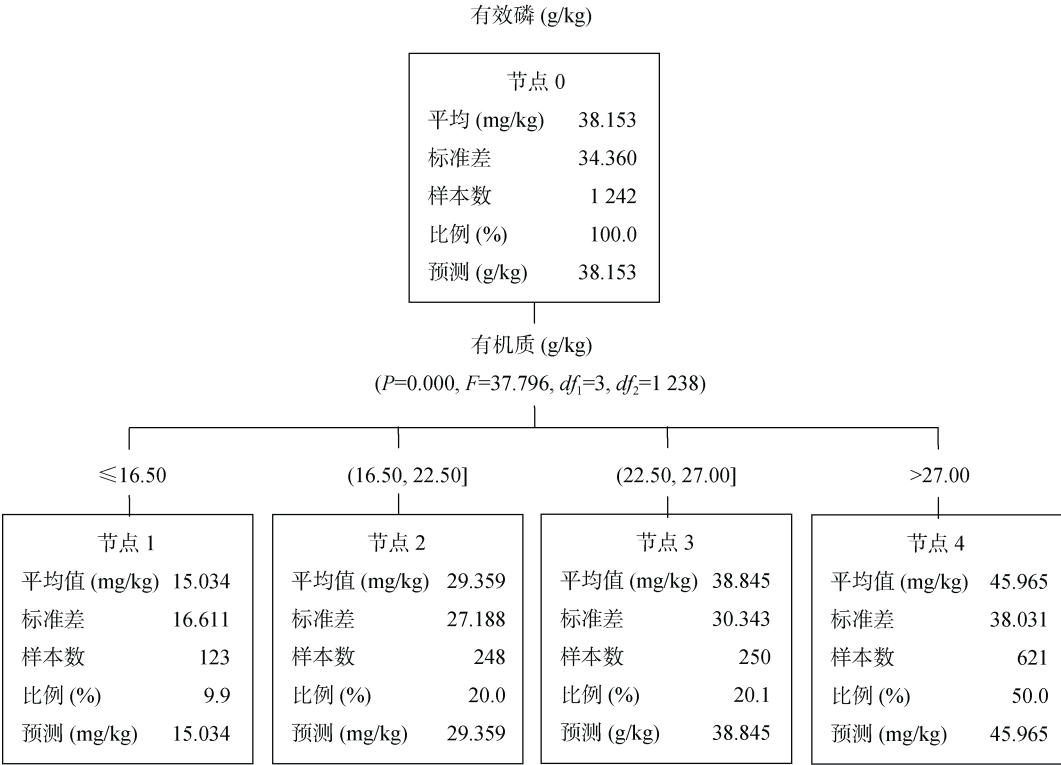


图 3 有机质对土壤有效磷含量影响的决策树分析

Fig. 3 Decision Tree Analysis of SOM effect on available phosphorus

≤16.5 g/kg、16.5 ~ 22.50 g/kg、22.50 ~ 27.00 g/kg 和 >27.00 g/kg, 4 组土壤有效磷含量分别为 15.034、29.359、38.845 和 45.965 mg/kg, 土壤有效磷在这 4 个分组间差异达到极显著水平, 呈现随有机质增加土壤有效磷含量快速升高的趋势。

2.5 土壤有效磷含量的环境风险评价

以上分析显示目前湘西植烟土壤磷素盈余较为严

重。磷素移动性较小, 且在土壤中易被固定, 盈余的磷素在耕层土壤中不断积累, 在地表径流和土壤侵蚀等因素的作用下, 其对水体污染的风险增大, 有研究发现土壤有效磷达 33 ~ 36 mg/kg 后, 土壤磷素便极易发生磷素淋溶^[16]。本文参照这一研究结果, 以 40 mg/kg 为磷素淋溶临界值, 采用概率克里格插值法对湘西植烟土壤有效磷含量的环境风险进行评价, 结果见图 4。

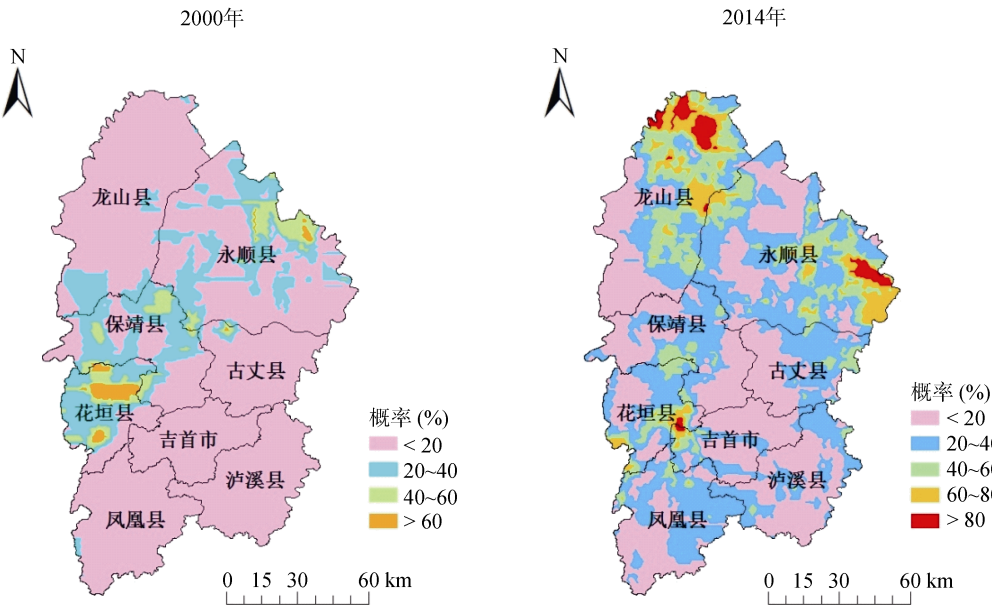


图 4 湘西植烟土壤有效磷含量超过环境临界值的概率

Fig. 4 Probabilities map of soil available phosphorus exceeding environmental critical value of 40 mg/kg in 2000 and 2014 in Xiangxi

与图 1 比较发现,有效磷含量高的区域其超过风险临界值的概率也较高,与空间分布的趋势基本一致。2000 年全市有效磷含量超过风险临界值的概率普遍较低,概率区间 60%~80%(高风险)的面积主要分布在花垣县,占研究区面积的 1.16%,概率区间 40%~60%(中等风险)的面积仅零星分布在永顺、花垣和保靖,占研究区面积的 4.41%;概率区间 20%~40%(低风险)主要分布在永顺、花垣和保靖,占研究区面积的 16.37%;概率小于 20%(无风险)的区域面积最大,占总面积的 78.06%,分布在全州各县。2014 年全市有效磷含量超过风险临界值的概率大幅增加,概率 >80%(很高风险)的区域以小斑块状分布龙山县、永顺县和花垣县,占研究区域面积的 1.77%;概率区间 60%~80%(高风险)的区域分散分布在全州 7 个植烟县中的 4 个,占研究区域面积的 5.40%;概率区间 40%~60%(中等风险)的区域在全州 7 个植烟县均有分布,占研究区域面积的 13.96%;低风险和无风险区在全州 7 个植烟县均有分布,分布占研究区域面积的 37.42% 和 41.44%;14 年来土壤磷素环境风险大幅增加,不同风险级别呈点状和片状同时发生,说明磷素环境风险的发生普遍存在。

3 讨论

2000 年到 2014 年湘西植烟土壤有效磷平均含量由 7.26 mg/kg 上升到 38.15 mg/kg,增加了 30.89 mg/kg,增幅高达 425.48%,整体上由“低”等级变为“很高”等级;从不同等级的面积变化来看,2014 年土壤有效磷“极高”、“很高”和“高”等级面积显著增加,分别增加了 28.36%、26.89% 和 25.94%;而“低”和“极低”等级则大幅下降,分别比 2000 年下降了 57.45% 和 27.12%;14 年间,研究区域土壤有效磷环境风险概率显著上升,其中中等风险区面积增加了 9.56%,高风险和很高风险区面积分别增加了 4.25% 和 1.77%,无风险区下降了 36.62%,低风险区增加了 21.05%。与他人关于我国很多农区土壤有效磷含量大幅增加的研究结果基本一致^[17-20]。烤烟对于磷素供应的要求是足而不过多,一般植烟土壤有效磷含量 10~20 mg/kg 即可满足烤烟生长。过多的磷素营养对于烟叶品质有显著的不利影响,研究中发现高磷土壤上种植烤烟,烟叶的木质素和细胞壁物质总量呈增加趋势^[21],而在高磷土壤上过量施用磷肥则会造成化学成分协调性变差,感官质量变差^[22]。

本文的研究结果显示海拔高度、土壤母质、土地利用类型、土壤轮作模式均会对土壤有效磷产生影

响。据文献报道,我国不少烟区土壤有效磷含量高于 30 mg/kg,甚至超过 40 mg/kg^[23-29],一方面与我国农业生产普遍磷肥投入较高有关,此外还与烤烟种植的特有施肥习惯关系密切,我国烤烟施肥普遍采取的氮磷钾比例为 1:1~1.5:3.0,而烤烟磷肥的当季利用率却仅为 15% 左右^[30]。据调查,湘西植烟土壤每 667 m² 投入磷素达 8~10 kg/a,外源磷的大量、长期投入是植烟土壤磷素过高的主要原因,文中不同轮作制度下土壤有效磷含量的差异有力支撑这一论点,这与前人的研究一致^[31-32]。据报道,在我国当前的烤烟生产中,磷肥的施用量已远远超过烤烟需要量,导致土壤磷素积累,增加土壤磷素的流失风险^[33-34]。当土壤磷素超过 32 mg/kg 时,施磷 4 kg/667 m²(约为当前常规施磷水平的一半),烟叶外观质量和内在质量均明显变差^[35],笔者在云南罗平烟区的调研有力支持了这一观点,当地部分植烟大户在有效磷 35 mg/kg 以上的植烟土壤上均不施用磷肥,但产值产量均和施用磷肥的没有区别。因此,针对当前研究区土壤磷素现状,建议适当控制磷肥用量,推行测土施肥技术,有效磷在 30 mg/kg 以上的烟田土壤可减少磷肥用量 50% 以上,有效磷在 40 mg/kg 以上的烟田土壤可尝试开展“启动性施磷”技术^[36]和隔年施磷技术^[37],以保护喀斯特区植烟生态环境和保障烟叶生产的可持续发展。

参考文献:

- [1] 王海英,许亦农. 缺磷胁迫下烟草叶片磷脂酰甘油(PG)含量降低的分子机理[J]. 植物生理与分子生物学报, 2006, 32(6): 643-648
- [2] 胡国松,郑伟,王震东,等. 烤烟营养原理[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 94-118
- [3] 曹志洪,周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012
- [5] 许自成,王林,肖汉乾. 湖南烟区烤烟磷含量与土壤磷素的分布特点及关系分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007, 33(3): 290-297
- [6] 褚利平,王克勤,宋泽芬,等. 烤烟坡耕地壤中流氮、磷浓度的动态特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1346-1354
- [7] 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
- [8] 王淑英,胡克林,路苹,等. 北京平谷区土壤有效磷的空间变异特征及其环境风险评价[J]. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1290-1298
- [9] 郝黎仁,攀元,郝哲欧. SPSS 实用统计分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 110-135
- [10] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 65-132

- [11] 路鹏, 彭佩钦, 宋变兰, 等. 洞庭湖平原区土壤全磷含量地统计学和 GIS 分析[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1204-1212
- [12] 吴秀芹, 张洪岩, 李瑞改, 等. ArcGIS9 地理信息系统应用与实践(下册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 463-517
- [13] 张久明, 宿庆瑞, 迟凤琴, 等. 嫩江县土壤速效养分差异性分析[J]. 黑龙江农业科学, 2010(3): 38-40
- [14] 苑小勇, 黄元仿, 高如泰, 等. 北京市平谷区农用地土壤有机质空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 70-76
- [15] 郑海龙, 陈杰, 邓文靖, 等. 城市边缘带土壤重金属空间变异及其污染评价[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 39-45
- [16] McDowell R W, Sharpley A N. Approximating phosphorus release from soil to surface drainage[J]. Journal of Environmental Quality[J]. 2001, 30: 508-520
- [17] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 63-67
- [18] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4-8
- [19] 金明清, 彭月月, 王佩. 四川省盐源县植烟土壤氮磷钾空间变异特征及影响因素[J]. 土壤, 2016, 48(5): 984-991
- [20] 吴晓妮, 付登高, 刘兴祝, 等. 柴河流域典型景观类型土壤氮磷含量的空间变异特征[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1210-1215
- [21] 王艳丽. 豫中褐土区磷肥用量对烤烟生长发育和产质量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2005
- [22] 章新, 李明, 杨硕媛, 等. 磷素水平对烟叶化学成分和感官评吸质量的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(10): 5091-5093, 5109
- [23] 武德传, 罗红香, 宋泽民, 等. 黔南山地植烟土壤主要养分空间变异和管理分区[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1701-1707
- [24] 李强, 周冀衡, 杨荣生, 等. 曲靖植烟土壤养分空间变异及土壤肥力适宜性评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 950-956
- [25] 高博超, 娄翼来, 金广远, 等. 基于 GIS 和地统计学的植烟土壤养分空间分析[J]. 中国烟草学报, 2009, 15(1): 35-38
- [26] 黄瑾, 林北森, 周文亮, 等. 广西百色植烟土壤主要养分特征及施肥策略[J]. 中国烟草科学, 2010, 31(4): 33-38
- [27] 杨美仙, 亚平, 何元胜, 等. 临沧植烟土壤养分丰缺状况分析[J]. 云南农业大学学报, 2014, 29(2): 269-277
- [28] 江厚龙, 张保全, 李钠钾, 等. 重庆植烟土壤有效养分含量及其影响因素[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(5): 67-73
- [29] 宋淑芳, 周冀衡, 邓小华, 等. 大理植烟土壤养分含量及其对烟叶生产的适宜性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2012, 38(1): 16-21
- [30] 李洪斌, 张杨珠, 黄运湘, 等. 不同施肥条件对烟草施肥效应及肥料利用率的影响[J]. 湖南农业科学, 2013, 29(13): 48-52
- [31] 刘建玲, 李仁岗, 廖文华, 等. 白菜-辣椒轮作中磷肥的产量效应及土壤磷积累研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1616-1620
- [32] 李中阳, 徐明岗, 李菊梅, 等. 长期施用化肥有机肥下我国典型土壤无机磷的变化特征[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1434-1439
- [33] 王艳玲, 何园球, 李成亮, 等. 长期施肥对红壤磷素持续供应能力的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 503-507
- [34] 颜晓, 王德建, 张刚, 等. 长期施磷稻田土壤磷素累积及其潜在环境风险[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(4): 393-400
- [35] 周冀衡, 朱小平, 王彦亭, 等. 烟草生理与生物化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996: 192-193
- [36] 柏兆海, 万其宇, 李海港, 等. 县域农田土壤磷素积累及淋失风险分析——以北京市平谷区为例[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1853-1860
- [37] 王海波, 胡军, 李致新, 等. 三门峡市主要烤烟产区土壤养分含量分析[J]. 江西农业学报, 2010, 22(1): 33-36

Temporal and Spatial Variability Risk Assessment of Soil Phosphorous in Karst Tobacco-planting Region of Xiangxi, Hunan

LI Qiang^{1,2}, DAI Meilin², XIANG Deming³, LI Juan^{1*}, ZHOU Miliang³, TIAN Feng³,
TIAN Minghui³, ZHANG Liming^{1,3}

(1 College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2 Tobacco Research Institute, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3 Xiangxi Branch of Hunan Provincial Tobacco Company, Jishou, Hunan 416000, China)

Abstract: Based on methods of spatial autocorrelation, semi-variance function and the fractal dimension as well as the data of soil available phosphorus in 2000 and 2014, the spatiotemporal variation and environmental risks of soil available phosphorus in Karst tobacco-planting region in Xiangxi of Hunan were studied. The results showed that, during the 14 years, soil available phosphorus content increased by 30.89 mg/kg; the Z scores of soil available phosphorus index decreased, fractal dimension and the nugget effect increased, indicating a weaker spatial structure and stronger stochastic variability; the areas of ‘extremely high’, ‘very high’ and ‘high’ levels were increased by 28.36%, 26.89% and 25.94%, while the areas of ‘low’ and ‘very low’ levels decreased by 57.45% and 27.12%, respectively; There were significant correlation between soil available phosphorus and elevation, soil parent material, land use type, rotation mode and SOM content; Probability of soil available phosphorus content exceed the risk critical value increased greatly, the total areas of very high risk (probability >80%), high risk (probability 60%–80%) and medium risk (probability 40%–60%) accounted for 1.77%, 5.40% and 13.96% of the total study area, respectively. North of Longshan and east of Yongshun are the key regions to control agricultural non-point pollution of phosphorus.

Key words: Karst area; Tobacco-planting soil; Available phosphorus; Spatiotemporal variation; Environmental risk