

近 20 年来旱地耕层土壤全氮和 pH 的变化特征 ——以云南墨江县为例

赵吉霞^{1,5}, 和寿甲², 张庆², 郭应忠³, 刘刚才¹, 王应学², 何晓滨⁴, 朱红业^{2*}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 云南 昆明 650205; 3. 墨江县农业技术推广中心, 云南 墨江 654800; 4. 云南省土壤肥料工作站, 云南 昆明 650034; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为明确旱地耕层土壤全氮(TN)和 pH 含量的时空变异特征。研究基于云南墨江县 1985 年第二次土壤普查数据及 2006 年测土配方施肥农业项目调查数据,通过 spss17.0 和 ArcGIS10.1 等软件,采用数理统计和地统计相结合的方法,探讨了近 20 年土壤 TN 和 pH 的时空变异特征。结果表明:近 20 年来土壤 pH 和 TN 均有不同程度的变化,土壤 TN 有一定程度的增加,增幅达 3.45%,而土壤 pH 整体呈下降趋势,降幅达 7.56%;1985 年和 2006 年土壤 TN 含量分别为 $1.16 \pm 0.46 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $1.20 \pm 0.62 \text{ g kg}^{-1}$, 变异系数分别为 40.07% 和 51.35%, 两个时期 TN 变异函数均符合 Exponential 模型,块金系数分别为 61.36% 和 79.48%, TN 含量具有中等程度的空间相关性;2006 年墨江县坡耕地耕层 pH 为 5.01, 较 1985 年有了一定程度的降低,降幅达 7.56%,且土壤 pH 变异系数较小,分别为 10.78% (1985 年)和 12.20% (2006 年)。土壤 pH 变异函数理论模型分别符合 Gaussian (1985 年)和 Exponential (2006 年)模型,2006 年土壤块金系数 68.75% 较 1985 年的 53.33% 有了明显提高,土壤 pH 空间自相关程度降低。近年来,由于人为耕作活动、施肥结构变化及工业污染物排放等随机因素和气候变化的影响,旱地耕层土壤 TN 有所增加,土壤酸化比较明显。

关键词:墨江县;旱地;土壤全氮;土壤 pH;时空变异

中图分类号:S153.6 **文献标识码:**A **文章编号:**0564-3945(2016)04-0868-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2016.04.15

赵吉霞, 和寿甲, 张庆, 郭应忠, 刘刚才, 王应学, 何晓滨, 朱红业. 近 20 年来旱地耕层土壤全氮和 pH 的变化特征 - 以云南墨江县为例[J]. 土壤通报, 2016, 47(4): 868-875

ZHAO Ji-xia, HE Shou-jia, ZHANG Qing, GUO Ying-zhong, LIU Gang-cai, WANG Ying-xue, HE Xiao-bin, ZHU Hong-ye. Changes of Total Nitrogen and pH in Plough Layer of Dryland in Past 20 Years—A Case Study of Mojiang County, Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(4): 868-875

耕地作为农业的根本生产资料,其土壤质量的改善和提高是农业生产和粮食安全的基础。云南省坡耕地 $1.98 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占总耕地面积的 67.4%^[1]。旱地作为西南地区的主要耕地类型,其耕层结构的合理性是关系西南地区农作物高产稳产及可持续发展的关键因素。但由于本区坡耕地土层浅薄,一般不超过 50 cm,加上广种薄收,地面覆盖不够,水土流失严重,土地贫瘠,坡地土壤自然肥力逐年下降。且由于人为活动对耕地的连续高强度开发和不合理利用,特别是旱地的培肥与相关管理愈来愈弱,进一步加速了旱地的退化,特别是耕层的退化。但是,有关旱地耕层土壤退化特征和机理还尚未清楚。因此,迫切需要认识旱地的退化状况及其驱动因素。

土壤氮素和 pH 作为农业土壤肥力和基础地力的物质基础,也是反应人为活动对耕地土壤质量影响的

敏感性指标^[2-4]。增加氮肥的投入已成为近 30 年来云南旱地粮食增产的主要手段。但长期不合理施肥,一方面阻碍了施肥经济效益的发挥,另一方面加大氮素向水体的迁移,对各种生态过程产生影响^[5,6]。近年来,土壤氮素、氮密度的空间分布特征^[7,8]、土壤酸化^[9,10]等问题的研究已成为国内外广泛关注的研究重点。赵小敏等^[11]研究了江西省近 30 年来耕地土壤含量的时空变化特征,发现 2012 年耕地土壤整体 TN 含量较 1985 年提高了一个等级;郭志兴等^[9]通过研究广东省近 30 年来 pH 值的时空变化发现,全省 34.1% 的土壤 pH 值发生了酸化,且在酸化土壤中,近 85% 降低了一个级别;章明奎等^[10]研究发现从 20 世纪 80 年代初至 2008 年,浙江省耕作土壤 pH 普遍呈下降趋势。但这些研究主要基于对较大区域尺度,而我国耕地土壤类型和耕作方式特异性较大,大尺度范围内的估计方法和依据的相

收稿日期:2015-12-29;修订日期:2016-02-03

基金项目:公益性行业(农业部)科研专项“坡耕地合理耕层构建技术指标研究”(201503119)资助

作者简介:赵吉霞(1989-),女,云南大理人,博士研究生,研究方向为土壤侵蚀和水土保持。Tel: 15969518430;E-mail: zhaogixia@163.com

关参数适用性较差,且基于较长时空尺度的人类活动影响下的西南地区旱地土壤 TN 和 pH 变化的研究还较缺乏,结果较为粗略。本研究以云南省墨江县旱地为研究对象,基于第二次土壤普查数据资料和墨江县 2006 年农业测土配方施肥旱地耕层土壤养分的数据,通过对比第二次土壤普查以来旱地耕层土壤 TN 和 pH 的变化特征,并运用地统计学和地理信息系统相结合的方法,精确估计近 20 年来土壤 TN 和 pH 变化及其空间分布格局。为扭转本区旱地的退化趋势和提高旱地生产力,提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

墨江哈尼族自治县位于云南省南部、普洱市东部,地理位置为东经 101°08'~102°04',北纬 22°51'~23°

59',地处云贵高原西南边缘、横断山系纵谷区东南段,境内山高谷深,海拔差异大(475~2278 m),气候垂直变异大,“立体气候”特征明显,具有南亚热带为主的半湿润山地季风气候特征。光照充足,全年日照时数达 2161.2 h,年日照率为 50%,年均气温 17.8 °C,年均降雨量 1388 mm,雨量充沛且分布不均,雨热同期,具有明显的干湿季分布特征。县内河流属红河水系,枯洪季节变幅大,雨后猛涨,枯季猛减,水土流失严重。

墨江县土地总面积 $5.307 \times 10^5 \text{ hm}^2$,山区面积占 99.98%,耕地面积 $7.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$,耕地多以山地为主,其中旱地面积 $5.72 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。据墨江县第二次土壤普查资料,旱地土壤呈明显的垂直带谱分布,海拔从高到低依次分布着黄棕壤、红壤、赤红壤和砖红壤,且土壤分布以砖红壤、赤红壤和红壤为主,共占土壤总面积的 85.53% 和耕地总面积的 71.12%。各土类的基本特征见表 1。

表 1 供试土壤的基本特征

Table1 Basic characteristics of the tested soil

中国土壤发生分类 (GSCC,1992)	国际土壤分类参比基础(WRB,1998)	成土母质 Parent material	海拔 Altitude/m	气候条件 Weather condition	土壤质地 Soil texture	种植制度 Cropping pattern
黄棕壤	Luvisols	泥质岩、普通石英质岩、细粒结晶岩(蛇纹岩)、红砂岩残坡积物、紫色砂页岩	1800 m 以上	北亚热带气候	质地为轻粘至重壤,以粒状结构为主,其次是核状和块状结构	一年一熟
红壤	Ferralsols	泥质岩、红砂岩、基性结晶岩、普通石英质岩和紫色岩等	1550 ~ 1800 m	中亚热生物气候带	质地为中壤至重壤,以粒状、核状和棱柱状结构为主	一年一熟或二年三熟
赤红壤	Ferralsols	紫色砂页岩、红砂岩、泥质岩、普通石英质岩、基性结晶岩、碳酸岩类风化物等	800 ~ 1500 m	南亚热带生物气候带	质地为中壤至重壤,以团粒、核状和粒状结构	一年两熟
砖红壤	Ferralsols	紫色砂页岩、泥质岩和普通石英质岩风化物	800 m 以下	北热生物气候带	质地为重壤至轻粘土,以核粒状结构为主,其次是单粒和棱柱状结构	一年二至三熟

1.2 数据来源

1985 年的数据来源于对全国第二次土壤普查成果资料数据的收集,根据《墨江土壤》选取了 56 个典型赤红壤、砖红壤、红壤和黄棕壤剖面,及耕层土壤 TN 和 pH 数据。2006 年的土壤 TN 和 pH 数据为国家测土配方施肥项目墨江县土壤基础养分数据。结合第二次土壤普查成果资料,采样点一般布置在原土壤普查点的地块,并根据《云南省测土配方施肥技术规程》进行采样。根据区域土壤类型、耕作方式等因素,进行采样单元的划分,并以各采样单位中心位置地块为基准进行“S”型布点,每 6.7~13.3 hm^2 采集一个混合耕层土样,并用 GPS 定位仪确定样点经纬度及海拔高度,在

全县范围内共采集赤红壤、砖红壤、红壤和黄棕壤耕层土样 410 个。将土壤及时带回实验室,剔除根系等杂物,进行土样的风干过筛处理,进行土壤肥力指标的测定^[12],测试方法与第二次土壤普查的一致。

1.3 数据处理与分析

采用 spss17 统计软件分别对 1985 年和 2006 年两期数据中同一点位、相同土种 TN 和 pH 的基本特征配对进行分析、检验数据的正态分布特征,并用 Paired T-test 检验两次配对土壤样品 TN 和 pH 的差异情况及相关性。通过 GS+9.0 和 ArcGIS10.1 软件的地统计模块相结合方法,对土壤 TN 和 pH 符合正态分布的数据进行半方差分析,以获取土壤 TN 和 pH 的最优理论

半方差模型和差数,并在半方差拟合模型的基础上,利用 ArcGIS10.1 软件地统计模块进行空间插值,获得研究区 1985 年和 2006 年 TN 和 pH 的空间分布图,分别与墨江县 1985 年和 2006 年耕地分布图进行叠加(数据来源“中国科学院成都山地灾害与环境研究所数字山地与遥感应用中心”),分别获得研究区 1985 年和 2006 年耕地 TN 和 pH 的空间分布图。其余图形用

sigmaplot10.0 进行绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤全氮和 pH 的统计特征值

研究区域 1985 年和 2006 年旱地耕层土壤 TN 和 pH 数据的统计特征如表 2 所示。

表 2 1985-2006 年耕层土壤 TN 和 pH 统计特征值

Table2 Statistical characteristics of soil TN and pH incultivated surface soil in 1985 and 2006

项目 Item	年份 Year	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均数 Average	标准误差 Standard error	变异系数 CV (%)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
TN (g kg ⁻¹)	1985	0.19	2.99	1.16	0.08	40.07	1.13	1.48
	2006	0.22	3.95	1.20	0.02	51.35	1.41	4.56
pH	1985	4.32	7.30	5.42	0.08	10.78	0.86	0.37
	2006	4.10	7.30	5.01	0.03	12.20	0.42	0.52

通过采用 SPSS17.0 对 1985 年和 2006 年研究区耕层土壤 TN 和 pH 含量数据进行单一样本 K-S 检验发现,2006 年土壤 TN 和 pH 的原始数据均不服从正态分布(sig.(2-tailed) < 0.05),1985 年数据虽服从正态分布,但是效果不显著,因此对所有的原始数据进行对数转换后(1985:sig.(2-tailed)TN = 0.418 > 0.05, sig.(2-tailed)pH = 0.708;2006:sig.(2-tailed)TN = 0.257 > 0.05, sig.(2-tailed)pH = 0.284 > 0.05),数据均服从正态分布,满足方差分析的前提条件。对耕层 TN 和 pH 数据进行统计分析,结果表明(表 2),2006 年墨江县耕层土壤 TN 含量为 0.22 ~ 3.95 g kg⁻¹,平均值为 1.20 ± 0.62 g kg⁻¹,根据第二次土壤普查的肥力分级标准^[13],TN 含量处于三级水平,且低于全国 TN 含量 1.54 g kg⁻¹的平均水平^[14];与第二次土壤普查(1985 年)的 TN 水平相比,平均值增加了 0.04 g kg⁻¹,增幅达 3.45%,对两期数据相同土种 TN 的配对 *t* 检验表明,TN 在 0.05 水平上差异不显著(*P* = 0.086);耕层土壤 pH 的情况则

有相反趋势:1985 年墨江县旱地耕层土壤 pH 平均值为 5.42,至 2006 年其平均值为 5.01,降幅达 7.56%,在 0.05 水平上差异接近显著(*P* = 0.067),由此可知,墨江县红壤旱地耕层土壤有了较明显的酸化,两个时期土壤 TN 和 pH 的变异系数并未呈现统一的变化规律,但各时期土壤 TN 的变异系数(40.07%、51.35%)明显高于土壤 pH 的变异系数(10.78%、12.20%),即土壤 TN 的空间变异程度明显高于土壤 pH,且 2006 年土壤 TN 和 pH 空间变异程度均较 1985 年有了一定程度的提高。

2.2 土壤 TN 和 pH 的空间变异结构变化

使用传统的数据统计分析方法对土壤 TN 和 pH 变化全局进行分析,仅能在一定程度上反应样本的总体情况,而土壤 TN 和 pH 分布的随机性和结构性、独立性与相关性不能得到体现^[15]。因此,本研究在常规统计分析的基础上,进一步利用 GS+ 地统计学方法对墨江县红壤旱地耕层土壤 TN 和 pH 空间变异结构进行分析。

表 3 土壤 TN 和 pH 含量的半方差函数理论模型和参数

Table3 Semivariance model and its parameters for soil TN and pH

项目 Item	年份 Year	最优模型 Model	块金值 Nugget <i>C</i> ₀	基台值 Sill <i>C</i> ₀ + <i>C</i>	块金值 / 基台值 (%) Nugget/Sill	变程 (km) Range	标准均方差预测误差 Forecast mean square error
TN (g kg ⁻¹)	1985	Exponential	0.189	0.308	61.36	3.391	0.933
	2006	Exponential	0.124	0.156	79.48	2.122	0.947
pH	1985	Gaussian	0.008	0.015	53.33	6.963	1.039
	2006	Exponential	0.011	0.016	68.75	2.867	1.040

通过对土壤 TN 的空间变异性进行分析(表 3),1985 年第二次土壤普查的土壤 TN 和 pH 半方差变异函数的最佳理论模型分别为 Exponential 模型和 Gaussian 模型,而 2006 年土壤 TN 和 pH 的含量的最优半方差模型均为 Exponential 模型。根据两个时期土

壤 TN 和 pH 含量的块金值(*C*₀)和基台值(*C*₀+*C*)发现,2006 年土壤 TN 的块金值和基台值分别为 0.124 和 0.156,均较 1985 年的 0.189 和 0.308 有所降低,说明土壤 TN 的结构变异与总体空间变异均有所降低;与 1985 年相比,2006 年土壤 pH 的块金值和基台值分别

为 0.011 和 0.016, 均较 1985 年略有提高, 表明土壤 pH 的结构变异与总变异均有所提高。块金值(C_0)与基台值(C_0+C)的比表示由随机因素引起的空间变异程度大小, 分析结果表明, 1985 年和 2006 年两次土壤 TN 和 pH 分析结果的块金系数(C_0)/(C_0+C)均在 10% ~ 100% 之间, 表现为中等强度的空间相关性。Berndtson 等^[16]研究发现成土母质、土壤类型、地形因素等结构性因子使土壤养分具有较强的空间相关性, 姜勇等^[17]研究结果表明, 耕作活动、施肥、种植制度、田间管理等随机性因素会减弱土壤养分含量的空间相关性。因此, 从本次的研究结果可以看出, 影响土壤 TN 空间分布的总变异中, 随机因素是主要方面; 而土壤 pH 空间变异主要受结构因素和随机因素的共同影响。变程的大小反映区域变化量自相关范围的大小, 1985 ~ 2006 年土壤 TN 的变程分别为 3.391 km 和 2.122 km, pH 变程分别为 6.963 km 和 2.867 km, 对比 1985 ~ 2006 年变程值发现, 土壤 TN 和 pH 的变程值均存在明显的降低, 降幅分别为 37.42% 和 58.82%, 说明样本之间相关关系尺度缩小, 耕层 TN 和 pH 分布的均一性降低, 整体分布趋于复杂。

2.3 土壤 TN 和 pH 含量的空间格局演变

在 Arcgis10.1 软件中采用 ordinary Kriging 插值法分别对墨江县 1985 年和 2006 年旱地耕层土壤 TN 和 pH 进行空间插值, 并绘制出空间分布图(图 1、图 2)。

2.3.1 耕层土壤 TN 空间变化由 1985 年耕层土壤 TN 含量分布发现(图 1-1), 东部明显高于西部, 且以东南部最高, 空间连续性较好, 大部分区域土壤 TN 含量分布处中等水平 ($1 \sim 1.5 \text{ g kg}^{-1}$), 占整体耕地面积的 43.75%, 其中 TN 含量 $< 0.5 \text{ g kg}^{-1}$ 的仅占 0.69%, 主要分布在团田乡和景星乡的部分地区, TN 含量分布在 $0.5 \sim 1.0 \text{ g kg}^{-1}$ 之间, 占总面积的 42.85%, 而含量介于 $1.5 \sim 2 \text{ g kg}^{-1}$ 之间所占比例仅为 8.82%, 土壤 TN 含量的高值区 ($> 2 \text{ g kg}^{-1}$) 主要分布于东南部的龙坝乡和泗南江乡的部分地区, 占整体耕地面积的 3.89% (图 3-1)。2006 年研究区土壤 TN 含量总体上有了—定的提高(图 1-2), 分布格局较为复杂, 表现出较强的空间异质性, 62.71% 的区域含量 $> 1 \text{ g kg}^{-1}$ (图 3-1), 而 TN 低含量水平主要分布在西部的新抚乡和景星乡。对比两个时期土壤 TN 含量的变化可以发现, 近 20 年间, 旱地耕层土壤 TN 不同级别的分面积和区域都发生了一—定的变化, 其中以北部团田乡和南部的文武乡和龙潭乡增加明显, 而东南部龙坝乡有了一—定程度的降低。2006 年 TN 含量介于 $1 \sim 2 \text{ g kg}^{-1}$ 之间所占的面积较 1985 年有 8.04% 的提高, 而其余分布等级均较 1985

年有了一—定程度的降低, 降低幅度达 0.04 ~ 4.10%, 但土壤 TN 平均较 1985 年增加幅度达 3.45%。

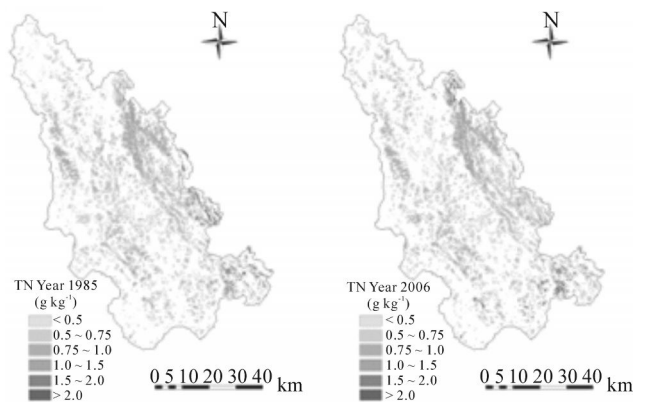


图 1 1985 年(1-1)和 2006 年(1-2)旱地耕层土壤 TN 含量空间分布图

Fig.1 Spatial distribution maps of TN content in cultivated surface soil of dryland

2.3.2 耕层土壤 pH 空间变化 1985 年, 墨江县红壤旱地耕层土壤 pH 含量表现为与 TN 相似的规律(图 2-1), 墨江县旱地耕层土壤 pH 含量分布不均, 总体呈现东北高, 西南低的趋势, 具有较强的空间分布规律性。土壤 pH 集中分布在 4.5 ~ 6.5 的强酸性(pH:4.5 ~ 5.5)至酸性(pH:5.5 ~ 6.6)范围内, 占旱地土壤面积的 92.81%, 其中以酸性为主, 占整体耕地面积的 66.49% (图 3-2), 仅墨江县东南部的龙坝乡、雅邑乡和哪哈乡的部分地区 pH > 6.5 , 所占面积仅占耕地总面积的 6.36%; 对比 2006 年耕层土壤 pH 的分布状况发现(图 2-2), 经过近 20 年的耕作活动影响, 研究区旱地耕层土壤 pH 有了不同程度的变化, 土壤酸化程度增加。从西南到东北, 土壤 pH 基本呈现低—高一—低的阶梯状分布规律, 且 pH 值介于 4.5 ~ 5.5 之间的耕地增加显

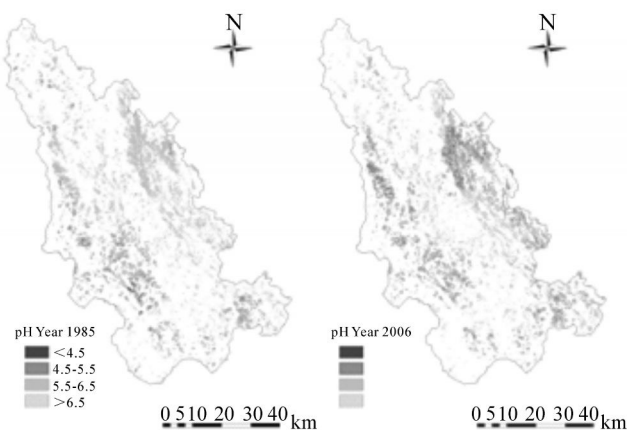


图 2 墨江县 1985 年(2-1)和 2006 年(2-2)pH 值空间分布图

Fig.2 Spatial distribution maps of pH value in cultivated surface soil of dryland

著,整体较 1985 年增加了 32.03%,而土壤 pH 值介于 5.5 ~ 6.5 的耕地较 1985 年降低了 29.09%;pH > 6.5 耕地土壤比例最小,仅占 4.02%(图 3-2),主要分布于忠爱桥乡和雅邑乡的部分地区。2006 年研究区耕层土壤 pH 较 1985 年强酸性土壤面积比例上升而酸性比例下降,说明近 20 年来土壤酸度的空间分布结构有了一定的变化。

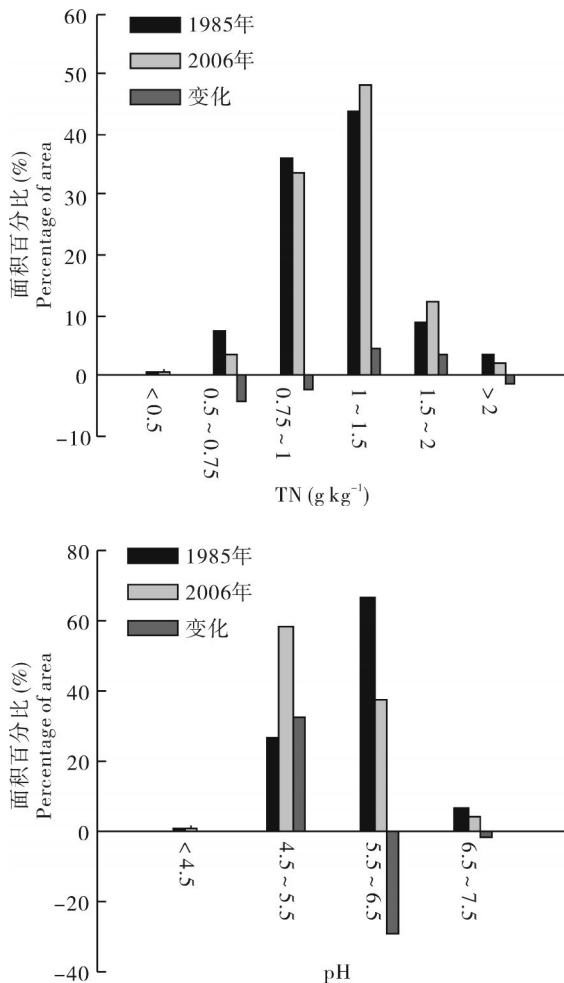


图 3 1985 年和 2006 年不同 TN(3-1)和 pH(3-2)含量等级的面积比及其变化率

Fig.3 Percentage of area at different grade in TN and pH and their changes in 1985 and 2006

3 讨论

3.1 土壤 TN 的变化

从 1985 年到 2006 年,墨江县旱地耕层土壤 TN 含量有了显著提高,平均含量从 1985 年的 $1.16 \pm 0.46 \text{ g kg}^{-1}$,提高至 2006 年的 $1.20 \pm 0.62 \text{ g kg}^{-1}$ 。近 20 年来,墨江县旱地耕层土壤 TN 含量虽略有上升但仍处于较低水平,这主要是由墨江县自北向南倾斜,地貌陡

峭,地形破碎,坡度在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 的耕地有 $5.27 \times 10^4 \text{ hm}^2$,坡度大于 25° 耕地有 $1.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$,耕层土壤受冲刷侵蚀严重,耕层厚度多居中薄水平。且由于地块零星分散,机械化耕作无法进行,始终保持着畜犁人挖整地的传统耕作模式,耕作活动改变了耕层原有的土壤性状,破坏土壤中大的团聚体,土壤稳定性变差,易遭侵蚀,作为土壤主要氮源的有机质失去附存的根基而损失,土壤 TN 含量增加不显著。

2006 年耕地土壤 TN 含量等级呈分散的斑块分布特点,但总体较 1985 年有了一定程度的增加,这与赵小敏等^[11]的研究结果相似,但陆访仪等^[18]研究发现近 30 年来,海伦市超过 60% 黑土耕地土壤 SOC 和 TN 含量下降,说明人为耕作活动的影响是促进农田土壤 TN 含量逐渐趋于动态平衡的过程。在耕作活动影响下,基础地力 TN 含量较高的土壤呈一定的下降趋势,而 TN 含量较低的土壤,则表现出一定的提升趋势。墨江县旱地土壤本底 TN 水平较低,且近 20 年来化肥的施用量明显增加,第二次土壤普查时墨江县旱地化肥的施用量仅为 $210 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (其中氮肥 $150 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,磷肥 $30 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,钾肥 $< 30 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$),且化肥的施用面积仅占播种面积的 1/6 左右,至 2006 年增加到 $540 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 左右(其中氮肥 $420 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,磷肥 $60 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,钾肥 $30 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。Harter 等^[19]研究发现化肥和有机肥的施用均能提高土壤的供氮能力;由于长期施用无机肥,尤其是无机氮肥施用量的明显增加,提高了植物通过根系和枯枝落叶归还土壤有机物数量^[20-22],进而增加了归还土壤的有机氮量。但墨江县近 20 年来土壤 TN 含量增幅仅为 3.45%,年均增长量为 $0.002 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$,这主要是由于长期以来墨江县旱地农业生产存在肥料养分单一、肥料结构和施肥方法不合理的等问题,重化肥而轻有机肥,有机肥的使用并未得到推广,仅少量耕地施用有机肥,重氮磷肥轻钾肥及中微量肥。此外,自第二次土壤普查以来,秸秆还田的保护性耕作措施得到重视,但是墨江县旱地秸秆主要以人为回收和田间焚烧为主,秸秆还田量不足耕地总量的 20%,且主要以不经处理的直接留茬还田为主,也不利于转化为腐殖质,导致墨江县旱地土壤 TN 含量增加不显著。且由于耕作活动、施肥、田间管理等随机因子的影响,使近 20 年旱地土壤 TN 的自相关性较弱。

由于气候与土壤关系的复杂性,气候变化对土壤的影响和土壤对气候变化的反馈作用是十分复杂的^[23]。近年来,由于全球变暖使厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)引起的干旱现象更加频繁^[24],云南省由于特殊的地理位置、地形复杂及海拔相对高差较大,同时受到西南季风

和东亚季风的共同影响,气候类型十分复杂。位于滇西南地区的墨江县,在 80 年代中期以前气温明显偏低,至 80 年代中期,区域气温又明显上升的趋势,特别是 1990 年代以后气温上升最快。而滇西南地区降水变化波动较明显,存在 10 年左右的变化周期,近 20 年来(1985 ~ 2006)区域降水呈现先增加后减少的趋势^[25,26]。吕国红等^[27]研究发现,农田土壤表层有机碳与年降水量呈极显著正相关关系($P < 0.01$)而与年平均气温呈显著负相关关系($P < 0.05$),墨江县近年来由于气温的持续上升,引起气候干旱,不仅限制了植物的净初级生产力,同时限制了雨养旱地土壤水分含量,土壤孔隙度大,促进了有机质的矿化分解,不利于土壤氮的积累。

3.2 土壤酸碱度的变化

自第二次土壤普查以来,墨江县旱地土壤始终呈酸性,这主要是由于本研究区土壤类型中 85.53% 的土壤以红壤、砖红壤、赤红壤为主的铁铝土,且在墨江县干湿交替的亚热带季风气候影响下,土体中铝硅酸盐矿物强烈分解,基岩淋失呈不饱和状态,土壤多为酸性至微酸性反应。

近 20 年来,墨江县旱地耕层土壤 pH 整体降低了 0.41 个单位,平均降幅达 7.56%,土壤 pH 下降区域主要集中在海拔较低,且地势较为平坦的西部地区,这暗示了农业活动愈强烈,土壤 pH 下降愈多。氮肥的施用对粮食产量方面起到重要作用,Erisman 等^[28]通过长期定位试验发现,化学氮肥在粮食增产中的作用达 30% ~ 50%,第二次土壤普查以来,为了旱地作物产量提高的需要,氮肥的施用量从 1985 年的 $150 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 增加至 2006 年的 $540 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,化肥投入量的增加导致墨江县旱地主要粮食作物玉米的年均产量由 1985 年 $1500 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,增加至 2006 年的 $6000 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,但大量化学氮肥的施用会导致土壤酸化,降低土壤质量^[29]。徐仁扣等^[30]通过长期试验发现,轮作、氮肥施用和残茬管理均使南澳大利亚 Taelee 地区土壤 pH 不同程度的降低,赵全桂等^[31]通过研究氮肥的施用对农田土壤酸化及养分变化影响发现,氮肥的过量使用是导致土壤酸化的主要原因。氮素的过量施用会导致土壤中过多的氮素残留,其经过硝化作用,增加了土壤中硝酸根含量,进而导致土壤酸化^[32]。通过对墨江县旱地土壤 TN 含量与 pH 含量的相关分析发现,两者呈负相关关系($R^2 = -0.1678$),尽管相关性不显著($P > 0.05$),也说明了研究区化肥施用量的增加是引起旱地土壤 pH 值下降的重要原因^[33]。同时,自 20 世纪 80 年代以来,伴随着墨江县工业建设取得迅猛发展,工业污染不断增加,通过对与墨江县毗邻的思茅地区近 20 年来酸雨及酸

沉降量的变化规律的研究可推测,墨江县近 20 年来降水酸化程度有所增加^[34],这在一定程度上促进了旱地耕层土壤的酸化。由于成土母质、自然气候条件及人为耕作措施等的影响,导致研究区旱地土壤 pH 含量存在中等程度的空间自相关性,但对比 1985 年与 2006 年土壤 pH 块系系数的变化发现,至 2006 年,土壤 pH 的空间自相关性有了一定程度的降低,说明施肥、耕作活动等随机因素对土壤 pH 变化的影响增大。

4 结论

通过对墨江县近 20 年来(1985 ~ 2006 年)旱地耕层土壤 TN 和 pH 的时空变化分析,可以得到以下结论:

(1)近 20 年来,墨江县旱地土壤 TN 含量总体水平较低,1985 年占整体坡耕地面积 43.35% 大部分区域土壤 TN 含量在 $0.5 \sim 1.0 \text{ g kg}^{-1}$ 之间,土壤 TN 含量呈东南高西北低的阶梯状分布,至 2006 年研究区土壤 TN 含量总体上有了一定的提高,但增幅仅为 3.45%,62.71% 的区域含量 $> 1 \text{ g kg}^{-1}$,呈现以斑块变异为主的较为复杂的空间变化格局,但 1985 年和 2006 年均存在较大的空间差异,且耕作管理、施肥活动等随机因素和气候变化是影响土壤 TN 变异的主要方面。

(2)墨江县旱地土壤总体呈酸性,且从 1985 ~ 2006 年,土壤 pH 值有不同程度的降低,整体降低了 0.41 个单位,平均降幅达 7.56%,其中强酸等级耕地面积增加了 32.03%,酸性等级面积降低了 29.05%,且自第二次土壤普查以来,研究区土壤 pH 值的空间自相关性减弱,空间分布格局有了明显变化,施肥、耕作活动、工业污染物排放等随机因素的影响,是导致土壤酸化加剧,空间自相关程度降低的主要原因。

参考文献:

- [1] 米艳华,潘艳华,沙凌杰,等. 云南红壤坡耕地的水土流失及其综合治理[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 17-21.
- [2] 俞海,黄季焜, SCOTT R, 等. 中国东部地区耕地土壤肥力变化趋势研究[J]. 地理研究, 2003, 22(3): 380 - 388.
- [3] 任意,张淑香,穆兰,等. 我国不同地区土壤养分的差异及变化趋势[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 13 - 17.
- [4] CAVIGELLI M A, TEASDALE J R, CONKLIN A E. Long-term agronomic performance of organic and conventional field crops in the mid-Atlantic region[J]. Agronomy journal, 2008, 100(3): 785 - 794.
- [5] 邢光熹,施书莲,杜丽娟,等. 苏州地区水体氮污染状况[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 540 - 545.
- [6] 徐国策,李占斌,李鹏,等. 丹江中游典型小流域土壤总氮的空间分布[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1547 - 1555.
- [7] 门明新,彭正萍,刘云慧,等. 基于 SOTER 的河北省土壤有机碳、

- 氮密度的空间分布[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 469 - 472.
- [8] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2015, 26(2): 652 - 660.
- [9] 郭治兴, 王静, 柴敏, 等. 近 30 年来广东省土壤 pH 值的时空变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 425 - 430.
- [10] 章明奎, 常跃畅. 近 50 年浙江省耕作土壤有机质和酸碱度的变化特征[J]. 环境科学, 2013, 34(11): 4439 - 4404.
- [11] 赵小敏, 邵华, 石庆华, 等. 近 30 年江西省耕地土壤全氮含量的时空变化特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 723 - 730.
- [12] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范(2 版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [13] 云南省土壤肥料工作站, 云南土壤普查办公室. 云南土壤 [M]. 云南: 云南科技出版社, 1996.
- [14] 李启权, 岳天祥, 范泽孟, 等. 中国表层土壤全氮的空间模拟分析[J]. 地理研究, 2010, 29(11): 1981 - 1991.
- [15] 黄绍文, 金继运, 杨俐萍, 等. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 79 - 88.
- [16] BERNDTSSON R, BAHRI A, JINNO K. Spatial dependence of geochemical elements in a semiarid agricultural field: II. Geostatistical Properties[J]. soil science society of America journal, 1993, 57(5): 1323 - 1329.
- [17] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 沈阳市苏家屯区耕层土壤养分空间变异性研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1673 - 1676.
- [18] 陆访仪, 赵永寸, 黄标, 等. 近 30 年来海伦市耕地土壤有机质和全氮的时空演变[J]. 土壤, 2012, 44(1): 42 - 49.
- [19] HARTER T, DAVIS H, MATHEWS M, et al. Shallow groundwater quality on dairy farms with irrigated forage crops[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2002, 55(3/4): 287 - 315.
- [20] LEMKE R L, VANDENBYGAART A J, CAMPBELL C A, et al. Crop residue removal and fertilizer N: Effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on a UdicBoroll [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 135: 42 - 51.
- [21] MCLAUCHLAN K. The nature and longevity of agricultural impacts on soil and nutrients: A review [J]. Ecosystem, 2006, 9: 1364 - 1382.
- [22] RUSSEL A E, CAMBARDELLA C A, LAIRD D A, et al. Nitrogen fertilizer effects on soil carbon balances in Midwestern U S agricultural systems [J]. Ecological Applications, 2009, 19: 1102 - 1113.
- [23] Anderson J M. Soil and climate change[J]. Advances in Ecological research, 1992, 22: 188 - 210.
- [24] TIMMERMAN A, OBERHUBER J, BACHER A, et al. Increased EI Nino frequency in a climate model forced by future greenhouse warming[J]. Nature, 1999, 398:694 - 697.
- [25] 刘瑜, 赵尔旭, 黄玮, 等. 云南近 46 年降水与气温变化趋势的特征分析[J]. 灾害学, 2010, 25(1): 39 - 44.
- [26] 张雷, 王杰, 黄英, 等. 1961-2010 年云南省基于 SPEI 的干旱变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(5):141 - 146.
- [27] 吕国红, 王笑影, 张玉书, 等. 农田土壤碳氮及其与气象因子的关系[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1612 - 1617.
- [28] ERISMAN J W, BLEEKER A, GALLOWAY J, et al. Reduced nitrogen in ecology and the environment [J]. Environmental Pollution, 2007, 150(1): 140 - 149.
- [29] GUO J, LIU X, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327: 1008 - 1010.
- [30] 徐仁扣, COVENTRY DR. 某些农业措施对土壤酸化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2002, 21(5): 385 - 388.
- [31] 赵全桂, 卢树昌, 吴德敏, 等. 施肥投入对招远农田土壤酸化及养分变化的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1): 301 - 306.
- [32] 张学军, 赵营, 陈晓群, 等. 氮肥施用量对设施番茄氮素利用及土壤 NO₃-N 累积的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3761 - 3768.
- [33] ZHANG D, ZHOU ZH, ZHANG B, et al. Agricultural management effect on selected soil properties of the arable soils in Tibet, China [J]. Catena, 2012, 88(1): 1 - 8.
- [34] 韦霞, 潘月鹏, 竺夏英, 等. 云南思茅地区近 20 年(1993-2012)酸雨及酸沉降量变化规律[J]. 环境化学, 2014, 33(8): 1361 - 1365.

Changes of Total Nitrogen and pH in Plough Layer of Dryland in Past 20 Years —A Case Study of Mojiang County, Yunnan Province

ZHAO Ji-xia^{1,5}, HE Shou-jia², ZHANG Qing², GUO Ying-zhong³, LIU Gang-cai¹,
WANG Ying-xue², HE Xiao-bin⁴, ZHU Hong-ye^{2*}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science & Water Resources Ministry, Chengdu 610041, China; 2. Agricultural Environmental and Resources Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 3. Agricultural Techniques Extension Center of Mojiang County, Yunnan 650205, China; 4. Soil and Fertility Station of Yunnan Province, Kunming 650034, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This study aimed to explore the spatiotemporal variation characteristics of total nitrogen (TN) and pH in cultivated soil layer of dry land in Mojiang County, Yunnan Province of China from 1985 to 2006. The data were obtained from the second national soil survey (SNSS) in 1985 and the formula fertilization by soil testing carried by Mojiang Agriculture Bureau in 2006. Mathematical statistics and geo-statistics methods were used to analyze the data and the ordinary kriging method was applied to map the spatial patterns of TN and pH. The content of TN and pH value showed the different degrees of variation in the cultivated soil layer during the past 20 years. TN increased averagely by 3.45%, while pH decreased averagely by 7.56%. The mean of TN content increased from $1.16 \pm 0.46 \text{ g kg}^{-1}$ in 1985 to $1.20 \pm 0.62 \text{ g kg}^{-1}$ in 2006, and the variation of coefficient increased from 40.07% in 1985 to 51.35% in 2006. The Exponential model for semivariogram fitted these variation both in 1985 and 2006, which indicated that TN content had a moderate spatial dependence in the two sampling periods with the nugget-to-sill ratio of 61.36% in 1985 and 79.48% in 2006. The average pH values were decreased from 5.42 in 1985 to 5.01 in 2006, while its variation coefficient increased from 10.78% in 1985 to 12.20% in 2006. The variograms of pH fitted the Gaussian model (in 1985) and Exponential model (in 2006). And since the SNSS, the nugget-to-sill ratio increased from 53.33% in 1985 to 68.75% in 2006, which showed that spatial auto correlation of soil pH became weaker. The decrease of TN content and pH should be attributed to the effects of fertilization, cultivation, the discharge of industrial pollutant, together with climate and other random factors during the recent decades.

Key words: Mojiang County; Dryland; Soil total nitrogen; Soil pH; Spatiotemporal variation

[责任编辑: 张玉玲]