

DOI: 10.11766/trxb201712120594

基于灰色关联-结构方程模型的土壤酸化驱动因子研究*

周碧青^{1, 2} 邱龙霞^{1, 2} 张黎明^{1, 2} 张秀¹ 陈成榕³ 邢世和^{1, 2, 3†}

(1 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

(2 土壤生态系统健康与调控福建省高校重点实验室, 福州 350002)

(3 School of Environment and Nature Science, Griffith University, Nathan 4111, Australia)

摘要 准确揭示区域耕地土壤酸化的关键驱动因素对于耕地土壤酸化调控和质量提升具有重要意义。以福建省为研究区域, 在利用1:5万省域耕地土壤类型空间数据库、1982年36 777个和2016年56 445个耕地表层调查样点土壤属性数据以及气象站点相关气候要素、酸雨监测点降水pH和化肥施用量等数据建立省域耕地土壤酸化及其可能影响因素空间数据库基础上, 借助灰色斜率关联和结构方程分析模型, 深入探讨1982—2016年间福建省耕地土壤酸化的关键驱动因素。灰色斜率关联分析结果表明, 年均单位面积施肥量、土壤阳离子交换量(CEC)、土壤黏粒、年均降水量、降水年均pH和土壤有机质等6个因子是福建省耕地土壤酸化的主要驱动因素; 结构方程模型分析进一步阐明大量施用化肥、多雨气候条件以及酸雨是加速福建省耕地土壤酸化的关键驱动因素。合理优化施肥结构实现科学减量施用化肥和严控工业酸性废气排放控制酸雨形成是减缓福建省耕地土壤酸化的必要途径。

关键词 GIS; 耕地; 土壤酸化; 驱动因素; 影响路径; 影响效应

中图分类号 S153.4 **文献标识码** A

土壤酸碱性是反映耕地质量的重要指标之一, 不同植物生长发育适宜的土壤酸碱性不同, 如棉花、甘蓝、大麦、玉米、小麦等作物适宜在中性至微碱性土壤环境下生长; 水稻、油菜、紫云英、花生等适宜偏酸性土壤环境生长; 而烟草、马铃薯等则适宜在酸性土壤环境下生长^[1]。土壤酸化是耕地质量退化的一个重要方面, 其实质是自然和人为因素共同作用导致土壤中盐基离子减少, H^+ 和 Al^{3+} 增加, 土壤盐基饱和度下降, 氢饱和度增加的过程^[2]。土壤酸化打破了原有的土壤生态平衡, 导致土壤理化和生化性质改变, 结构性变差, 微生物数量下降, 矿质养分失衡, 重金属等有毒元素活化, 土壤肥力降低, 进而对作物生长、品质和产

量产生不良影响^[3-4], 揭示区域耕地土壤酸化的主要驱动因素, 对于科学阻控区域耕地土壤酸化、提升区域耕地质量具有十分重要的理论和现实意义。土壤酸化及其防控已成为国内外广泛关注的研究热点, 国内外至今针对区域土壤pH变化与空间分异等方面的研究报道很多且较为深入^[5-10], 而有关土壤酸化影响因素的研究则主要采用常规统计分析或线性相关分析探讨单一因子与土壤酸化的关系^[11-15], 然而区域土壤酸化是诸多外在因素(如降水、施肥、酸雨等)和内在因素(如有机质、质地、阳离子交换量等)综合作用的结果, 不同因素对土壤酸化的影响路径和影响程度均各异, 因此现有的相关研究无法清晰地揭示区域土壤酸化的多因

* 国家农业农村部耕地质量监测与评价项目(2016FK0016)资助 Supported by the Project of Cropland Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of People's Republic of China (No. 2016FK0016)

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

作者简介: 周碧青(1963—), 女, 福建莆田人, 正高级实验师, 主要从事土壤环境监测评价与持续利用研究。E-mail: 1963zbq@163.com

收稿日期: 2017-12-12; 收到修改稿日期: 2018-01-31; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-04-11

素综合影响,也无法阐明区域土壤酸化影响因素的主次关系和影响程度。为此,本研究以福建省为研究区域,在利用1:5万省域耕地土壤类型空间数据库、1982年36 777个和2016年56 445个耕地表层(0~20 cm)调查样点土壤属性数据以及气象站点相关气候要素、酸雨监测点降水pH和化肥施用量等数据建立省域耕地土壤酸化及其可能影响因素空间数据库的基础上,以1982—2016年酸化耕地土壤pH变化量为母序列,以土壤酸化的可能影响因素为子序列,借助灰色斜率关联和结构方程分析模型,深入探讨1982—2016年间福建省耕地土壤酸化的关键驱动因素及其影响程度大小,旨在为区域耕地土壤酸化调控和土壤培肥保育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福建省地处我国东南沿海,介于 $23^{\circ} 33' \sim 28^{\circ} 20' N$, $115^{\circ} 50' \sim 120^{\circ} 40' E$;属亚热带海洋性季风气候,年均气温 $14.6 \sim 21.3^{\circ} C$,大于等于 $10^{\circ} C$ 年活动积温 $5\ 000 \sim 7\ 800^{\circ} C$,年均降水量 $1\ 037 \sim 2\ 051\ mm$;境内地形地貌复杂多样,以丘陵山地为主,平原、盆地兼之,水热条件垂直分异明显^[16]。2016年全省耕地总面积 $13\ 363\ km^2$,其

中水田、旱地和水浇地面积分别占83.00%、13.77%和3.23%,水田主要分布于宁德、福州、南平、三明、漳州和龙岩市,合计占水田总面积的85.98%;旱地主要分布于宁德、福州、莆田、泉州和漳州市,合计占旱地总面积的76.03%;水浇地主要分布于福州、莆田、泉州、厦门和漳州市,合计占水浇地总面积的88.15%。全省耕地土壤共分为9个土类(水稻土、滨海盐土、潮土、红壤、赤红壤、黄壤、风沙土、石灰土和紫色土)、15个亚类、31个土属和81个土种^[16]。

1.2 数据来源

从省农业厅、国土厅、环保厅、统计局和气象站等部门收集研究所需的福建省耕地、土壤等相关空间属性数据库及施肥量资料,包括:(1)2016年耕地利用-土壤类型数据库;(2)数字高程模型数据库(DEM);(3)各县(市、区)1982年36 777个和2016年56 445个耕地表层土壤调查样点数据库(图1a、图1b);(4)气象站点1982—2016年均温度和降水量数据库;(5)环境监测点1996—2016降水年均pH数据库;(6)各县(市、区)1982—2016年农作物年均单位面积施肥量数据资料。上述数据库资料比例尺均为1:5万、高斯-克吕格投影系、西安80坐标系和1956年黄海高程系。

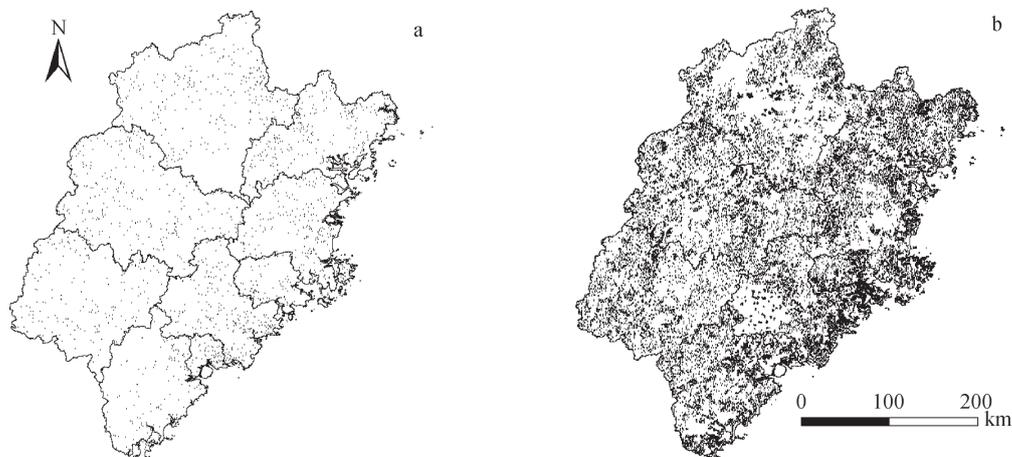


图1 研究区1982年(a)和2016年(b)耕地土壤调查样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the 1982 (a) and 2016 (b) surveys of cropland soils in Fujian Province

1.3 方法步骤

根据土壤酸化理论,初选福建省耕地土壤酸化可能影响因素包括年均温度、年均降水量、海拔、坡度、有机质、CEC、碱解氮、有效磷、砂

粒、粉粒、黏粒、降水年均pH和年均单位面积施肥量等。利用上述收集的相关数据库等资料,借助ArcGIS软件,采用普通克里格插值法^[17]进行土壤pH、有机质、CEC、碱解氮、有效磷、砂粒、

粉粒、黏粒和年均降水pH空间属性数据的点面推算,采用三维趋势面分析结合反距离权重插值残差订正法^[18]进行年均温度和年均降水量空间属性数据的点面推算,分别生成福建省1982年和2016年土壤pH以及相关属性2 mm×2 mm栅格数据库,采用数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据库生成福建省海拔和坡度2 mm×2 mm

栅格数据库。以2016年福建省耕地土种类型矢量图层分别掩膜上述属性栅格数据图层,并采用面积加权平均法分别计算并建立福建省耕地土壤酸化可能影响因素空间属性数据库,采用人机对话赋值法建立福建省耕地单元年均单位面积施肥量空间属性数据库。研究区耕地土壤pH及相关属性数据变化范围见表1。

表1 研究区耕地土壤pH及相关属性数据

Table 1 Data of pH and relative properties of cropland soil in Fujian Province

2016年pH	1982年pH	碱解氮 AN ^① / (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP ^② / (mg·kg ⁻¹)	有机质 OM / (g·kg ⁻¹)	CEC (cmol·kg ⁻¹)	砂粒 Sand /%	粉粒 Silt /%
3.04~8.42	3.09~8.59	7~608	3~449	1.81~60.10	4.78~27.36	0.20~99.88	0.12~79.86
黏粒 Clay /%	海拔 Altitude /m	坡度 Gradient /°	年均温度 AMT ^③ /°C	年均降水量 AMP ^④ /mm	降水年均pH AMRPH ^⑤	年均单位面积施肥量 AMFAR ^⑥ /(kg·hm ⁻²)	
0.00~64.82	10~1 418	0~36	11.6~21.3	1 037~2 051	4.17~6.97	258~1 980	

① AN: Alkalyzable nitrogen, ②AP: Available phosphrous, ③AMT: Annual mean temperature, ④AMP: Annual mean precipitation, ⑤AMRPH: Annaul mean pH of rainfall, ⑥AMFAR: Annaul mean fertilizer application rate per hectare

借助ArcGIS软件,将上述建立的2016年和1982年福建省耕地土壤pH矢量数据图层进行减法运算,生成各评价单元pH变化量(Δ pH)空间数据图层,将2016年土壤pH<6.5且 Δ pH<0的耕地土壤归为酸化土壤,建立1982—2016年福建省耕地土壤酸化空间数据库。在利用灰色斜率关联分析模型(Grey Slope Correlation Model, GSCM)确定耕地土壤酸化主要驱动因素的基础上,借助结构方程分析模型(Structural Equation Model, SEM)探讨福建省耕地土壤酸化主要驱动因素的影响路径和影响程度。

GSCM以关联度系数为衡量指标评判因素之间关系的密切程度,关联系数越高表明两者之间关系越密切^[19]。借助ArcGIS软件,从福建省1982—2016年耕地土壤酸化及其可能影响因素空间数据库中分别导出各酸化耕地土壤单元的 Δ pH及其相应单元的可能影响因素值,分别建立母序列和子序列数列。将母序列和子序列数据导入DPS V15.10软件中,借助GSCM分析模块计算酸化耕地土壤 Δ pH与可能影响因素的关联度系数,根据关联系数高低确定研究区耕地土壤酸化的主要驱动因素。

SEM有效地整合了因子分析、回归分析、路径分析等多种方法,通过假设影响路径,对复杂数据进行有效处理,进而揭示其因果关系^[20]。在

进行SEM拟合分析之前,必须验证供试耕地土壤 Δ pH及其主要驱动因素数据的可信度^[21],本研究借助Spss22.0软件的信度分析模块,对耕地土壤 Δ pH母序列与主要驱动因子子序列数据进行信度分析,结果表明这些数据的信度值为0.783,大于信度理想值标准(0.700)^[19],表明这些供试数据具有较好的一致性,可以直接采用SEM进行拟合分析。根据土壤酸化理论,可以假设年均单位面积施肥量、CEC、黏粒、年均降水量、降水年均pH、有机质等主要驱动因素对耕地土壤酸化影响包括以下路径:(1)CEC、降水年均pH、年均单位面积施肥量、黏粒、年均降水量、有机质对土壤 Δ pH有直接影响;(2)年均降水量通过影响土壤CEC、有机质、黏粒和年均降水pH而间接影响土壤 Δ pH;(3)黏粒通过影响土壤CEC和有机质而间接影响土壤 Δ pH;(4)有机质通过影响土壤CEC而间接影响土壤 Δ pH;(5)降水年均pH通过影响土壤有机质、CEC和黏粒而间接影响土壤 Δ pH;(6)年均单位面积施肥量通过影响土壤有机质、CEC、黏粒和降水年均pH而间接影响土壤 Δ pH。根据上述假设的6个影响路径,建立研究区耕地土壤酸化主要驱动因素平衡关系的初始模型,借助Amos21.0的SEM模块进行拟合分析,获得耕地土壤酸化主要驱动因素的标准化修正模型以

及各显变量之间的影响路径及其效应,分析探讨福建省耕地土壤酸化主要驱动因素的影响路径与影响程度。

2 结果

2.1 耕地土壤酸化与空间差异性

研究表明(表2),1982—2016年的34年间,福建省耕地土壤pH平均降幅达0.34个单位,其中pH降低0~0.3、0.3~1和大于等于1个单位的耕地土壤分别占耕地总面积的33.45%、31.79%和

5.43%;全省强酸性、酸性耕地土壤面积分别增加4.26%和2.00%,微酸性和中性耕地土壤面积分别减少5.46%和1.48%;全省有75.30%的中性耕地土壤转为微酸性、酸性和强酸性,55.72%的微酸性耕地土壤转为酸性和强酸性;耕地土壤pH降幅均值高于全省平均水平的有福州、龙岩、莆田、泉州和厦门市,酸化耕地面积较大的地级市包括福州、龙岩、南平、宁德、泉州和漳州市,合计占全省酸化耕地总面积的84.70%。可见,1982—2016年福建省有70.67%的耕地土壤发生不同程度酸化,且土壤酸化的区域差异较为明显。

表2 1982—2016年福建省耕地土壤 Δ pH均值和酸化面积

Table 2 Mean of Δ pH of cropland soil and area of soil acidification in Fujian Province during 1982 and 2016

行政区 Administrative region	pH变化量均值 Mean Δ pH	酸化面积Acidification areas/ 10^3 hm ²	行政区 Administrative region	pH变化量均值 Mean Δ pH	酸化面积Acidification areas/ 10^3 hm ²
福州 Fuzhou	-0.49	14.06	泉州 Quanzhou	-0.38	10.13
龙岩 Longyan	-0.53	14.62	三明 Sanming	-0.10	8.77
南平 Nanping	-0.30	19.28	厦门 Xiamen	-0.58	1.18
宁德 Ningde	-0.21	10.04	漳州 Zhangzhou	-0.33	11.86
莆田 Putian	-0.40	4.500	福建 Fujian	-0.34	94.44

2.2 耕地土壤酸化的主要驱动因素

以土壤pH变化量(Δ pH)为母序列,将可能的影响因子作为子序列进行GSCM分析,结果表明(表3),年均单位面积施肥量、CEC、黏粒与 Δ pH的关联程度最高,关联系数介于0.884~0.954,其次为年均降水量、降水年均pH、有机质、碱解氮及有效磷,与 Δ pH的关联系数绝对值|R|介于0.609~0.669,而砂粒、年均温度、坡度及粉粒与 Δ pH的关联程度相对较低,关联系数绝对值|R|介于0.561~0.596。其中年均单位面积施肥量、年均降水量、碱解氮、有效磷、砂粒、年均温度和坡度等对 Δ pH呈负向影响,即上述因素数值越大,耕地土壤酸化越严重;而CEC、黏粒、降水年均pH、有机质和粉粒等对 Δ pH呈正向影响,即上述因素数值越大,耕地土壤酸化越弱。由于耕地土壤碱解氮和有效磷含量与年均单位面积施肥量存在密切关系,故其对耕地土壤酸化的影响可以通过年均单位面积施肥量来反映。因此,可以确定关联系数绝对值|R|>0.620的年均单位面积施肥量、CEC、黏粒、年均降水量、降水年均pH、有机质等6个因子为福建省耕地土壤酸化的主要驱动

因子。

2.3 耕地土壤酸化主要驱动因素的影响路径

利用Amos 21.0软件对建立的研究区耕地土壤酸化主要驱动因素平衡关系的初始模型进行拟合,结果表明年均单位面积施肥量和降水年均pH对黏粒影响的P分别为0.06和0.08,表明这两条假设影响路径系数为零的概率达到了6%和8%,大于5%的显著性水平,即其显著性检验未通过,说明初始模型拟合指数较差,需要对模型进行修正。通过对这两条显著性较差的假设影响路径进行释放,然后对修正后的模型进行第二次拟合,获得平衡关系的标准化修正模型及其路径系数见图2。第二次拟合结果各驱动因素影响路径系数为零的概率均小于5%,表明修正模型的拟合效果达到显著性水平,其拟合指数见表4。从表4可见,修正模型的 χ^2/df 为0.569,相对应的P为0.451(>0.05),其他拟合指数也均符合评判标准,故认为该修正模型是合理的。

从修正模型的路径系数可见(图2),年均单位面积施肥量、年均降水量、降水年均pH、黏粒、有机质和CEC对土壤 Δ pH有直接影响,路

表3 福建省耕地土壤pH变化量 (Δ pH) 与可能影响因子的GSCM分析

Table 3 Grey slope correlation analysis between Δ pH and potential impact factor of the cropland soil in Fujian

排序 Order	可能影响因子 Potential impact factor	灰色关联系数 Grey correlation coefficient	影响类型 Impact type
1	年均单位面积施肥量 AMFAR	-0.954	负向 Negative
2	CEC	0.932	正向 Positive
3	黏粒 Clay	0.884	正向 Positive
4	年均降水量 AMP	-0.669	负向 Negative
5	降水年均pH AMRPH	0.626	正向 Positive
6	有机质 OM	0.623	正向 Positive
7	碱解氮 AN	-0.613	负向 Negative
8	有效磷 AP	-0.609	负向 Negative
9	砂粒 Sand	-0.596	负向 Negative
10	年均温度 AMT	-0.590	负向 Negative
11	坡度 Gradient	-0.575	负向 Negative
12	粉粒 Silt	0.561	正向 Positive

表4 平衡关系标准化修正模型拟合指数

Table 4 Fitting indices of the standardized modification model for balanced relation

模型拟合指数 Fitting index of model		评判标准 Evaluation criteria	修正模型拟合结果 Fitting result of modification model
绝对拟合指数 Absolute fitting index	χ^2 / df GFI ^①	< 2 ($P > 0.05$) > 0.9	0.569 ($P=0.451$) 1
相对拟合指数 Relative fitting index	RSMEA ^② NFI ^③ TLI ^④ CFI ^⑤	< 0.1, 越小越好 The smaller, the better > 0.9 > 0.9 > 0.9	0 1 0.999 1
信息指数 Information index	IFI ^⑥ ECVI ^⑦	> 0.9 越小越好 The smaller, the better	1 0.006

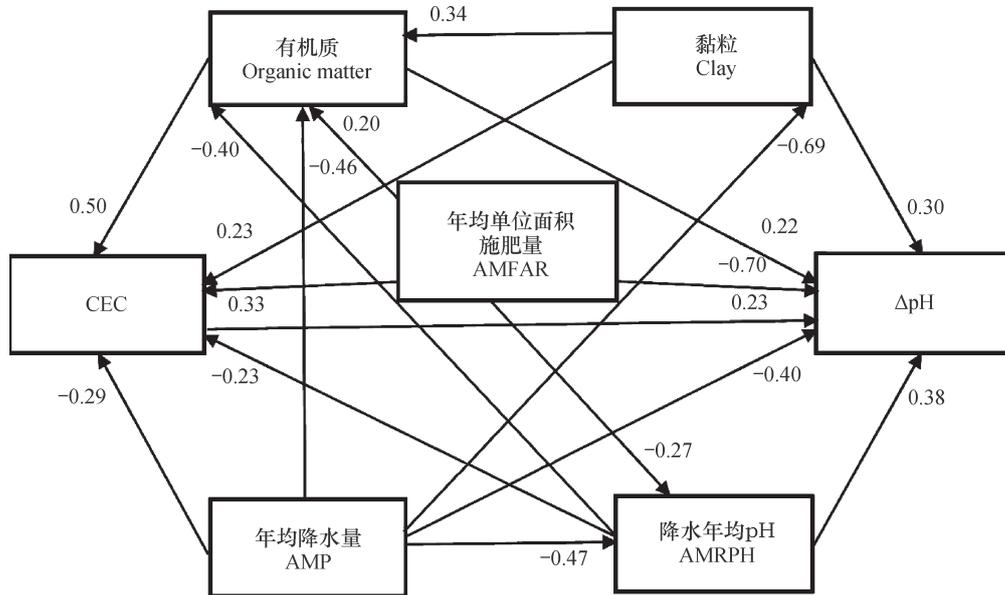
①GFI: Goodness of fitting index; ② RSMEA: Root square mean error of approximation, ③ NFI: Normed fitting index; ④ TLI: Tucker-Lewis index; ⑤ CFI: Comparative fitting index; ⑥ IFI: Incremental fitting index; ⑦ ECVI: Expected cross validation index

径系数分别为-0.70、-0.40、0.38、0.30、0.22和0.23；年均降水量通过影响土壤CEC、有机质和黏粒而间接影响土壤 Δ pH，路径系数分别为-0.29、-0.46和-0.29；黏粒通过影响有机质和CEC而间接影响土壤 Δ pH，路径系数分别为0.34和0.23；有机质通过影响CEC而间接影响土壤 Δ pH，路径系数为0.50；降水年均pH通过影响土壤有机质和CEC而间接影响土壤 Δ pH，路径系数分别为-0.40和-0.23；土壤黏粒含量通过影响土壤有机质和CEC而间接影响土壤 Δ pH，路径系数分别为-0.40和-0.23；年均单位面积施肥量通过影响土壤有机质、CEC和降水年均pH而间接影响土壤的 Δ pH，路径系数分别为0.20、0.33和-0.27。根

据结构方程模型路径系数分析的原则，在有显著性关系的前提下，路径系数绝对值大的数列代表外生显变量对内生显变量的影响程度较大，反之则小^[21]。可见，年均单位面积施肥量、年均降水量、降水年均pH和黏粒对福建省耕地土壤酸化具有较显著的直接影响；而年均降水量和黏粒通过影响有机质、有机质通过影响CEC、降水年均pH通过影响有机质以及年均单位面积施肥量通过影响CEC而对福建省耕地土壤酸化具有较显著的间接影响。

2.4 耕地土壤酸化主要驱动因素的影响效应

结构方程模型分析获得的耕地土壤酸化主要驱动因素的影响效应结果表明，年均单位面积施肥量对 Δ pH的直接效应最为显著，路径系数绝对值高



注：图中数据为驱动因素平衡关系修正模型的影响路径系数 Note: Data in the diagram are impact path coefficients of the modification model for balanced relations between key impact factors

图2 福建省耕地土壤酸化主要驱动因子平衡关系的标准化修正模型

Fig. 2 Standardized modification model for balanced relations between key impact factors of the cropland soil acidification in Fujian

达0.70，同时，大量施用化肥还会通过影响土壤有机质、CEC及降水pH等因素间接影响土壤 ΔpH ，其间接效应系数分别为0.20、0.33和-0.27，年均单位面积施肥量的总效应绝对值高达0.86，故长期持续大量施用尿素、氯化铵、硫酸铵和过磷酸钙等酸性或生理酸性肥料是造成福建省耕地土壤酸化的最主要人为因素。年均降水量对 ΔpH 的直接效应为-0.40，间接效应为-0.35，总效应绝对值也高达0.75，故多雨的气候条件是导致1982—2016年福建省耕地土壤酸化的最主要自然因素。降水年均pH对 ΔpH 的直接效应为0.38，间接效应为0.11，总效应达到0.49，故酸雨是导致福建省1982—2016年耕地土壤酸化的另一最主要人为因素。表7结果还表明，福建省耕地土壤 ΔpH 与黏粒、有机质和CEC的直接效应分别为0.30、0.22和0.23，间接效应分别为0.13、0.18和0，总效应分别为0.43、0.30和0.23，故黏粒、有机质和CEC是减缓2008—2016年福建省耕地土壤酸化的主要内在因子。

3 讨论

3.1 关键外在驱动因素对耕地土壤酸化的影响

Guo等^[9]研究指出大量施用化肥加速中国农

田土壤酸化进程，使过去20年来我国主要农田土壤pH均值下降约0.5个单位，相当于土壤酸量(H^+)在原有基础上增加2.2倍。长期以来，福建省单位面积化肥施用量一直位居全国前列，近31年来全省年化肥施用量持续增长，2016年化肥施用量为1985年的2.52倍，并以氮、磷肥占优势，分别占年化肥施用量的61%和17%，且以尿素、氯化铵、硫酸铵和过磷酸钙等生理酸性或酸性化肥为主。耕地土壤酸化面积较大的南平、泉州、龙岩和漳州等市年均单位面积施肥量介于508~1 980 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，是全省年均单位面积施肥量(434 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)的1.17倍~4.56倍^[22]，长期不合理施用酸性或生理酸性肥料，或直接向土壤输入磷酸而导致土壤酸化，或因植物喜好吸收 NH_4^+ 而使 SO_4^{2-} 在土壤中残留并与作物代换吸收释放出的 H^+ 结合形成硫酸而导致土壤酸化^[23]，或因 NH_4^+ 在土壤中发生硝化作用释放 H^+ 而加速土壤酸化^[24]，故年均单位面积施肥量必然对福建省耕地土壤酸化产生显著的直接影响，其直接影响效应高达-0.70。此外，有研究表明偏施化肥而忽视有机肥施用，造成土壤有机质含量下降以及盐基离子补充不足和淋失数量增加^[25]，并显著提高土壤铝、铁的活性及其含量^[26]，进而加剧土壤酸化；不合理施用氮肥所致的氮素反硝化作用，

致使土壤向大气中排放的含氮化合物增加，大气氮沉降也成比例提高，也会加速土壤酸化^[12]，故大量施用化肥还会通过影响土壤有机质、CEC及降水pH等因素而间接影响土壤pH，其间接影响效应分别达0.20、0.33和-0.27，致使年均单位面积施肥量在耕地土壤酸化主要驱动因素中位居首位，总影响效应高达0.86。因此，长期持续大量施用尿素、氯化铵、硫酸铵和过磷酸钙等酸性或生理酸性肥料是福建省耕地土壤酸化首要的外在驱动因素。

福建省地处亚热带气候区，年均气温15.8~21.7℃，最热月均温28℃，年均降水量高达1 015~1 923 mm，大于等于10℃积温高达5 000~7 800℃^[16]。高温多雨的气候条件，致使全省土壤形成和发育过程脱硅富铝化作用和有机质矿化作用强烈，盐基物质大量淋失，有机质含量总体不高，阳离子代换量和盐基饱和度降低，氢饱和度上升；此外，多雨的气候条件易引发水土流失而使黏粒大量淋失，从而降低土壤对酸的缓冲性，故多雨的气候条件必然对耕地土壤酸化产生较显著的直接影响，并通过影响土壤有机质、CEC和黏粒而对耕地土壤酸化产生间接影响。本研究结果表明，福建省年均降水量对耕地土壤 Δ pH的直接影响效应为-0.40，间接影响效应为-0.35，总影响效应绝对值高达0.75，在耕地土壤酸化主要驱动因素中位居第二，致使降水量较大的闽北地区（南平市）发生酸化的耕地土壤面积较大，占全省酸化耕地土壤总面积的20.41%。因此，多雨的气候条件是福建省耕地土壤发生不同程度酸化主要的外在驱动因素。

人类生活、生产活动以及土壤氮素反硝化作用产生的SO₂、NO_x等酸性气体，在大气中经过一系列化学反应形成H₂SO₄和HNO₃，这些强酸随着降水（即酸雨）落到地表或渗入土壤，直接向土壤输入H⁺而加速土壤酸化^[27]。福建省属于全国的酸雨敏感区，酸雨较严重的区域主要位于闽北、闽西和闽南，其中龙岩、泉州等城市的酸雨频率均>50%^[28]。根据酸雨监测点资料，南平、泉州、漳州和福州等市的降水年均pH分别为5.2、5.1、4.6和4.7，较全省降水年均pH（6.0）低0.9~1.4个单位，故较强的酸雨必然对这些区域耕地土壤酸化产生较显著的直接影响，表现为福建省降水年均pH对耕地土壤 Δ pH的直接影响效应达0.38，致使南平、龙岩、泉州、漳州和福州等市的耕地土壤发生酸化

的耕地面积较大，合计占全省酸化耕地总面积的74.07%。有研究表明，模拟酸雨对有机碳矿化有激发作用而影响土壤有机质含量^[29]，且明显促进土壤矿物风化作用而影响土壤CEC^[30]，故酸雨通过影响土壤有机质和CEC可间接影响土壤酸化。本研究结果表明，福建省降水年均pH通过影响有机质和CEC而间接影响土壤 Δ pH的间接影响效应分别为-0.40和-0.23，致使降水年均pH对全省耕地土壤酸化的影响程度次于年均降水量而位居第三，总影响效应达0.49。因此，酸雨也必然成为福建省耕地土壤酸化的另一主要外在驱动因素。

3.2 关键内在驱动因素对耕地土壤酸化的影响

土壤抵抗酸碱变化的能力与土壤胶体数量、组成及CEC密切相关^[1]。有机质、黏粒和CEC高的耕地土壤对酸缓冲能力强，土壤越不易酸化，反之，则越易发生酸化。此外，土壤黏粒高低制约着土壤通气性和微生物活动，进而影响土壤有机质积累，而土壤CEC主要取决于黏粒和有机质含量与组成^[1]，故土壤黏粒、有机质和CEC必然对耕地土壤酸化产生较显著的直接影响，且黏粒通过影响有机质、有机质通过影响CEC也必然对耕地土壤酸化产生间接影响。本研究结果表明，福建省黏粒、有机质和CEC对耕地土壤 Δ pH的直接影响效应分别为0.30、0.22和0.23，黏粒和有机质对耕地土壤 Δ pH的间接影响效应分别为0.13和0.18，黏粒、有机质和CEC对耕地土壤酸化总影响效应分别为0.43、0.30和0.23，致使福建省耕地土壤发生酸化程度的高低因土壤黏粒、有机质和CEC不同而差异明显，如位于龙岩市西北部（长汀县）的耕地土壤CEC、黏粒和有机质含量均较低，分别为7.88 cmol·kg⁻¹、14.09%和28.02 g·kg⁻¹，致使该区域耕地土壤酸化较为严重，而位于三明市北部（沙县）的耕地土壤CEC、黏粒和有机质含量均较高，分别为9.23 cmol·kg⁻¹、15.64%和30.81 g·kg⁻¹，致使该区域耕地土壤酸化程度则相对较弱。因此，黏粒、有机质和CEC成为减缓福建省耕地土壤酸化最主要的内在驱动因素。

4 结 论

采用灰色斜率关联分析和结构方程分析模型相结合的方法，可以清晰地揭示区域耕地土壤酸化的

多因素综合影响,且可以深入阐明区域耕地土壤酸化主要驱动因素及其影响路径和影响效应。年均单位面积施肥量、年均降水量、降水年均pH、有机质、黏粒和CEC对福建省耕地土壤酸化程度影响的总效应分别为-0.86、-0.75、0.49、0.43、0.30和0.23。可见,福建省耕地土壤酸化是自然和人为多种因素交互作用所致,其中长期大量施用酸性或生理酸性化肥、亚热带丰沛的年降水量和较严重的酸雨是加速福建省耕地土壤酸化的三大主要外因,而黏粒、有机质和CEC则是减缓福建省耕地土壤酸化的三大主要内因。

参考文献

- [1] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000
Huang C Y. Pedology (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [2] 王文娟, 杨知建, 徐华勤. 我国土壤酸化研究概述. 安徽农业科学, 2015, 43 (8): 54—56
Wang W J, Yang Z J, Xu H Q. Overview of soil acidification research in China (In Chinese). Journal of Anhui Agriculture Science, 2015, 43 (8): 54—56
- [3] Joris H A W, Caires E F, Bini A R, et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. Plant and Soil, 2013, 365 (1/2): 409—424
- [4] Shen C C, Xiong J B, Zhang H Y, et al. Soil pH drives the spatial distribution of bacterial communities along elevation on Changbai Mountain. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 204—211
- [5] Yang Y H, Ji C J, Ma W H, et al. Significant soil acidification across northern China's grasslands during 1980s-2000s. Global Change Biology, 2012, 18 (7): 2292—2300
- [6] Hui W, Xu R K, Ning W, et al. Soil acidification of Alfisols as influenced by tea cultivation in eastern China. Pedosphere, 2010, 20 (6): 799—806
- [7] Tong D, Xu R. Effects of urea and (NH₄)₂SO₄ on nitrification and acidification of Ultisols from Southern China. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24 (4): 682—689
- [8] 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. 环境科学, 2013, 34 (11): 4399—4404
Zhang M K, Chang Y C. Changing characteristics of soil organic matter and pH value of cropland in Zhejiang in past 50 years (In Chinese). Environmental Science, 2013, 34 (11): 4399—4404
- [9] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. Science, 2010, 327 (5968): 1008—1009
- [10] 郭治兴, 王静, 柴敏, 等. 近30年来广东省土壤pH值的时空变化. 应用生态学报, 2011, 22 (2): 425—430
Guo Z X, Wang J, Cai M, et al. Spatiotemporal variation of soil pH in Guangdong Province of China in past 30 years (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22 (2): 425—430
- [11] 朱小琴, 孙维侠, 黄标, 等. 长江三角洲城乡交错区农业土壤pH特征及影响因素探讨—以江苏省无锡市为例. 土壤学报, 2009, 46 (3): 594—602
Zhu X Q, Sun W X, Huang B, et al. pH characters of agricultural soil in peri-urban area of the Yangtze River delta region and their affecting factors—A case study of Wuxi City, China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (3): 594—602
- [12] Guyjd K, Path B, Rmurray L. Changes in soil pH across England and Wales in response to decreased acid deposition. Global Change Biology, 2010, 16 (11): 3111—3119
- [13] 侣国涵, 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. 中国农学通报, 2014, 30 (12): 151—155
- [14] Si G H, Wang R, Yuan J F, et al. Tendency of soil acidification in Shoueastern mountains region of Hubei Province (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30 (12): 151—155
- [15] Barak P, Jobe B O, Krueger A R, et al. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wiscons. Plant and Soil, 1997, 197 (1): 61—69
- [15] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的pH演变. 土壤学报, 2013, 50 (6): 1109—1116
Meng H Q, Liu J, Xu M G, et al. Evolution of pH in topsoils of typical Chinese cropland under long-term fertilization (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (6): 1109—1116
- [16] 福建省土壤普查办公室. 福建土壤. 福州: 福建科学技术出版社, 1991
Soil Survey Office of Fujian. Soil in Fujian (In Chinese). Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 1991
- [17] 龙军, 张黎明, 沈金泉, 等. 复杂地貌类型区耕地土壤有机质空间插值方法研究. 土壤学报, 2014, 51

- (6): 1270—1281
Long J, Zhang L M, Sheng J Q, et al. Study on the best spatial interpolation method for arable soil organic matter in complex geomorphic area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (6): 1270—1281
- [18] 邢世和, 梁一池. 福建林地资源评价. 北京: 中国农业出版社, 2006
Xing S H, Liang Y C. Evaluation of forestry land resource in Fujian (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2006
- [19] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展. *系统工程理论与实践*, 2013, 33 (8): 1886—1890
Liu S F, Cai H, Yang Y J, et al. Advance in grey incidence analysis modelling (In Chinese). *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, 33 (8): 1886—1890
- [20] 李慧, 汪景宽, 裴久渤, 等. 基于结构方程模型的东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系研究. *生态学报*, 2015, 35 (2): 517—525
Li H, Wang J K, Pei J B, et al. Equilibrium relationships of soil organic carbon in the main croplands of northeast China based on structure equation modelling (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (2): 517—525
- [21] 吴明隆. 结构方程模型. 北京: 中国农业出版社, 2009
Wu M L. Structure equation modelling (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2009
- [22] 福建省统计局. 福建统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2017
Fujian Statistical Bureau. Statistical yearbook of Fujian (In Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2017
- [23] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 等. 土壤酸化危害及防治技术研究进展. *生态学杂志*, 2014, 33 (11): 3137—3143
Yu T Y, Sun X S, Shi C R, et al. Advance in soil acidification hazards and control techniques (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33 (11): 3137—3143
- [24] 汪吉东, 许仙菊, 宁运旺, 等. 土壤加速酸化的主要农业驱动因素研究进展. *土壤*, 2015, 47 (4): 627—633
Wang J D, Xu X J, Ning Y W, et al. Progresses in agricultural driving factors on accelerated acidification of soils (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (4): 627—633
- [25] 刘丽, 张玉龙, 虞娜, 等. 基于GIS的辽宁北部地区土壤酸化特征及其原因分析—以昌图县为例. *沈阳农业大学学报*, 2012, 43 (2): 173—178
Liu L, Zhang Y L, Yu N, et al. Soil acidification characteristics and causes analysis in Changtu region in Liaoning Province. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2012, 43 (2): 173—178
- [26] Adams S N. Some effects of lime, nitrogen and soluble and insoluble phosphate on the yield and mineral composition of established grassland. *Journal of Physical Chemistry C*, 1984, 102 (1): 219—226
- [27] Jaiyeoba I A. Changes in soil properties due to continuous cultivation in Nigerian semiarid Savannah. *Soil and Tillage Research*, 2003, 70 (1): 91—98
- [28] 赵卫红. 福建省城市酸性降水特征及变化趋势. *环境科学与技术*, 2006, 29 (9): 41—43
Zhao W H. The characteristics and tendency of acid rain in the city of Fujian (In Chinese). *Science and Technology of Environment*, 2006, 29 (9): 41—43
- [29] 高雅丽. 模拟酸雨对赤红壤有机质矿化及微生物种群结构的影响. 广州: 华南农业大学, 2011
Gao Y L. Effects of simulated acid rain on organic matter mineralization and microflora structure in Lateritic red soils (In Chinese). Guangzhou: South China Agricultural University, 2011
- [30] 徐亚莉. 模拟酸雨对土壤微形态的影响. *西南农业大学学报*, 1989, 11 (1): 22—25
Xu Y L. Effect of simulated acid rain on soil micromorphology (In Chinese). *Journal of Southwest Agricultural University*, 1989, 11 (1): 22—25

Study on Driving Factors of Soil Acidification Based on Grey Correlation-Structure Equation Model

ZHOU Biqing^{1,2} QIU Longxia^{1,2} ZHANG Liming^{1,2} ZHANG Xiu¹ CHEN Chengrong³ XING Shihe^{1,2,3*}

(1 College of Resources and Environment, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(2 University Key Laboratory of Soil Ecosystem Health and Regulation in Fujian, Fuzhou 350002, China)

(3 School of Environment and Nature Science, Griffith University, Nathan 4111, Australia)

Abstract 【Objective】 Soil pH is an important indicator of soil fertility and also a factor significantly impacting crop growth and production. Soil acidification, as a result of the joint effects of a number of external and intrinsic factors, has become an urgent problem to solve for sustainable development of agricultural production in China. How these factors affect soil acidification differ significantly in pathway and effect. It is, therefore, of critical significance to elucidate region-specific key driving factors of soil acidification to the control of soil acidification and improvement of soil quality. 【Method】 The study set Fujian Province as its research object. Based on the 1:50 000 spatial cropland and soil type databases of the province, the data of topsoil properties of the 36 777 sampling sites investigated in 1982 and the 56 445 sampling sites in 2016, and other relevant data including climate elements at the meteorological stations, pH of the precipitation at the acid rain monitoring points and fertilizer application rates from 1982 to 2016 in Fujian Province, a spatial database of cropland soil acidification and its potential affecting factors of the province was established. On such a basis, in-depth discussion was performed of key driving factors of cropland soil acidification in the province during the period from 1982 to 2016 with the aid of the grey slope correlation (GSCM)-structure equation (SEM) model. 【Result】 Results show that soil pH of the cropland had decreased on average by 0.34 unit and 70.67% of the cropland soils had been acidified in various degrees by 2016 in Fujian Province, and the acidification varied significantly and spatially in degree. GSCM analysis shows that the main driving factors of the cropland soil acidification in Fujian Province included annual mean fertilizer application rate, CEC, clay content, annual mean precipitation, annual mean pH of the precipitation and organic matter content. Grey correlation coefficient of their absolute values was higher than 0.620. The key driving factors of the cropland soil acidification illuminated by SEM included severe acid rain, high precipitation and high application rate of chemical fertilizers, reaching 0.38, -0.40 and -0.70 in direct effect, 0.11, -0.35 and -0.16 in indirect effect, and 0.49, -0.75 and -0.86 in total effect, respectively. 【Conclusion】 The model of SEM-GSCM proves to be a better method to explore for key driving factors of cropland soil acidification in different regions. An effective approach to control of cropland soil acidification in Fujian is to control acid rain through controlling the industry from emitting acidic exhaust gas, and optimize fertilizer management through extrapolating the use of organic manure to minimize chemical fertilizer application in agriculture.

Key words GIS; Farmland; Soil acidification; Impact factor; Influence path; Influence effect

(责任编辑: 檀满枝)