

基于 1 : 5 万土壤数据库的福建省耕地 全氮储量动态变化研究*

焦闪闪^{1, 2} 张黎明^{1, 2†} 蒋 威^{1, 2} 郑巧丽^{1, 2} 龙 军^{1, 2} 陈翰阅^{1, 2}
邢世和^{1, 2}

(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)

摘 要 基于福建省 1982 年第二次土壤普查 2 021 个剖面点和 2008 年测土配方施肥 29 945 个样点耕层 (0 ~ 15 cm) 土壤属性数据建立的 1 : 5 万土壤数据库, 研究了近 30 多年来全省耕地的全氮密度和储量动态变化。结果表明, 1982 年福建省耕地土壤的全氮密度和储量分别为 0.258 kg m⁻² 和 4.26 Tg; 而 2008 年分别上升到 0.262 kg m⁻² 和 4.39 Tg, 近 30 年来全省耕地土壤全氮呈富集趋势。从不同地级市来看, 龙岩市全氮密度上升最多, 增幅为 0.036 kg m⁻², 而厦门市全氮密度下降最多, 降幅为 0.041 kg m⁻²。从不同土壤类型来看, 潮土土类和潜育水稻土亚类全氮密度上升最多, 增幅均超过 0.015 kg m⁻², 而石灰土土类和淹育水稻土亚类全氮密度下降最多, 降幅均超过 0.015 kg m⁻²。总体来看, 福建省耕地土壤近 30 年来的全氮密度空间动态变化差异很大, 今后根据不同耕地土壤类型和地级市的氮素富集程度, 制定氮肥优化管理措施是非常必要的。

关键词 全氮密度; 全氮储量; 福建省; 耕地; 1 : 5 万土壤数据库

中图分类号 S15 **文献标识码** A

氮素既是土壤肥力的重要指标, 也是陆地生态系统氮库的主要组成部分^[1]。耕地土壤中 95% 以上的氮以有机态氮形式存储, 它对人类活动和气候变化尤为敏感^[2-5]。有研究表明, 在陆地生态系统氮循环中, 耕地土壤中氮的储量约为植物中的 3 倍, 它的轻微改变可能导致生态系统氮“汇-源”的剧烈转换, 进而对全球变化产生影响^[6]。因此, 明确耕地土壤中氮储量的动态变化对了解陆地生物地球化学循环具有重要意义。

目前, 国内外学者对于不同区域尺度上的氮

储量进行了研究。全球尺度上, Post 等^[7]利用生命地带法和全球 3 100 个土壤剖面, 对全世界氮储量和密度进行了估算, 结果表明: 土壤表层的氮储量约为 95 Pg, 氮密度范围从温暖沙漠地带的 0.2 kg m⁻³ 到潮湿多雨苔原地带的 2 kg m⁻³。Batjes^[8]根据 1 : 500 万 FAO 土壤图和 4 353 个土壤剖面含氮量测定值, 估算出全球氮储量为 133 ~ 140 Pg。在国家尺度上, 刘纪远等^[9]基于 2 473 个土壤剖面实测资料和 20 世纪 80 年代末至 90 年代末陆地卫星 TM 影像, 分析了中国 1990—2000 年林地、草地、耕地

* 国家自然科学基金项目 (41001126)、福建省自然科学基金项目 (2015J01154) 和福建省教育厅科技项目共同资助
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41001126), the National Science Foundation of Fujian Province, China (No. 2015J01154), and the Science and Technology Foundation of the Education Department of Fujian Province, China (No. JA14126)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fjaulmzhang@163.com

作者简介: 焦闪闪 (1989—), 女, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事农业资源与 GIS 应用研究。E-mail: ssj1002@126.com

收稿日期: 2015-11-25; 收到修改稿日期: 2016-03-04; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-04-20

等土地利用变化对土壤氮蓄积量的影响,结果表明:中国耕地土壤的氮蓄积量在研究期内增加了 $9.0 \pm 0.7 \text{ Tg}$ 。林金石等^[10]基于1:100万土壤数据库和1490个水稻土剖面数据,在水稻土亚类和土壤大区水平上对中国水稻土氮密度和氮储量的空间变异特征进行研究;结果表明我国水稻土平均氮密度为 12.4 mg hm^{-2} ,储量为 569 Tg 。在区域尺度上,张春华等^[11]基于第二次土壤普查数据和1:50万土壤图,利用土壤类型法估算了松嫩平原玉米带土壤氮储量及其密度的空间分布特征,结果表明,该地区土壤氮储量为 $9.53 \pm 1.75 \text{ Tg}$,密度为 $0.37 \sim 0.80 \text{ kg m}^{-2}$ 。武俊喜等^[12]通过区域代表性样方资料和1965年前的土壤全氮历史数据,评估了1940—2002年长江中下游平原人口密集的乡村景观区域中耕地类型及其土壤全氮储量的变化;结果表明:60年间由于稻田面积的减少,可能导致全氮储量净减少 7.2 Tg 。在县域尺度上,王慧萍^[13]根据1984年盐亭县第二次土壤普查资料和2007年野外土壤采样数据,计算出两个时段23种土壤类型的全氮含量,结果表明:近20多年来该县土壤表层平均全氮含量大体呈上升趋势。王加恩等^[14]利用嘉善县20世纪80年代、2002年和2008年3次土壤调查数据,对该县表层土壤中氮含量及分布进行了研究;结果表明:全氮平均值从20世纪80年代至2002年呈下降趋势,2002—2008年则呈较快上升趋势。

但从现有的研究来看,我国大区域耕地全氮储量研究大多以某一时段静态研究为主^[15],而利用大量实测样点数据和较高精度空间数据库的省级尺度耕地土壤氮储量动态研究较少,致使目前我国大区域仍无法根据土壤氮含量的变化趋势来制定农田氮素的管理措施。福建省人多地少,人均耕地不足 0.04 hm^2 ,施用化肥等高强度集约化管理方式已成为提高农作物产量的必要手段^[16]。据统计,2014年福建省氮肥折纯施用量高达 $4.7 \times 10^5 \text{ t}$ ^[17]。氮肥的大量施用和该地区高温多雨的气候特点,可能导致土壤中氮素大量淋失,而引起水体富营养化等环境问题。为此,本研究以位于我国亚热带地区的整个福建省耕地为研究区,利用全省第二次土壤普查(1982年)和耕地测土配方施肥调查(2008年)样点分析数据资料建立的1:5万耕地土壤数据库,研究该地区耕地土壤氮素近30年的时空动态变化,并量化全省不同地级市和土壤类型的全氮密

度和储量动态变化,结果可为制定我国亚热带地区氮肥优化管理、农业面源污染控制和生态环境保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福建省位于我国东南沿海,地理坐标为 $23^{\circ}33' \sim 28^{\circ}20' \text{N}$, $115^{\circ}50' \sim 120^{\circ}40' \text{E}$,属亚热带海洋性季风气候,年日照时数为 $1700 \sim 2300 \text{ h}$,年均气温 $15.8 \sim 21.7^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $1015 \sim 1923 \text{ mm}$ 。全省耕地土壤以水稻土最多,面积达 146 万 hm^2 之多,占耕地总面积的88.19%;其次是赤红壤,面积约为 11 万 hm^2 ,占耕地总面积的6.48%;其他土壤类型(滨海盐土、潮土、风沙土、红壤、黄壤、石灰土和紫色土)面积较小^[18]。

1.2 数据来源

本研究中1982年土壤空间数据库是由福建省各县(市、区)1:5万土壤图在ArcGIS软件支持下经数字化后汇总形成的,其中土壤样点属性数据来自全省第二次土壤普查的各县(市、区)调查样点资料,共计2021个耕地土壤剖面(图2a)。2008年耕地土壤空间数据库是从2008年福建省1:5万耕地地力调查数据库中提取的,共计462625个图斑;其中土壤样点属性数据来自全省各县(市、区)农业部测土配方施肥项目的29945个耕层样点分析资料(图2b)。氮肥施用量、降雨量和年均温数据分别来自福建省1982—2008年以县为统计单元的农村统计年鉴纸质档和国家气象局66个站点资料。由于1982—2008年全省耕地变化较大,为确保评价对象的可比性,以2008年耕地土壤空间数据库作为本研究的底图。

1.3 耕地土壤数据库的建立

本研究利用反距离权重插值(inverse distance weighing, IDW)法,该方法是基于相似原理的一种局部估计加权平均插值方法,权重与观测点和预测点之间的距离负相关^[19-20]。以ArcGIS 10.2为平台,以两期图斑的交集为评价底图,利用地统计模块(geostatistics),选取常用的反距离权重插值法(IDW),对1982年和2008年的耕地土壤有机质和全氮属性数据,以及近30年的年均降雨量和年均温数据进行插值,通过分区统计实现耕地土壤属性数据、年均降雨量和年均温数据与空间数据的融



图1 福建省地理位置
Fig. 1 Geographic location of Fujian Province

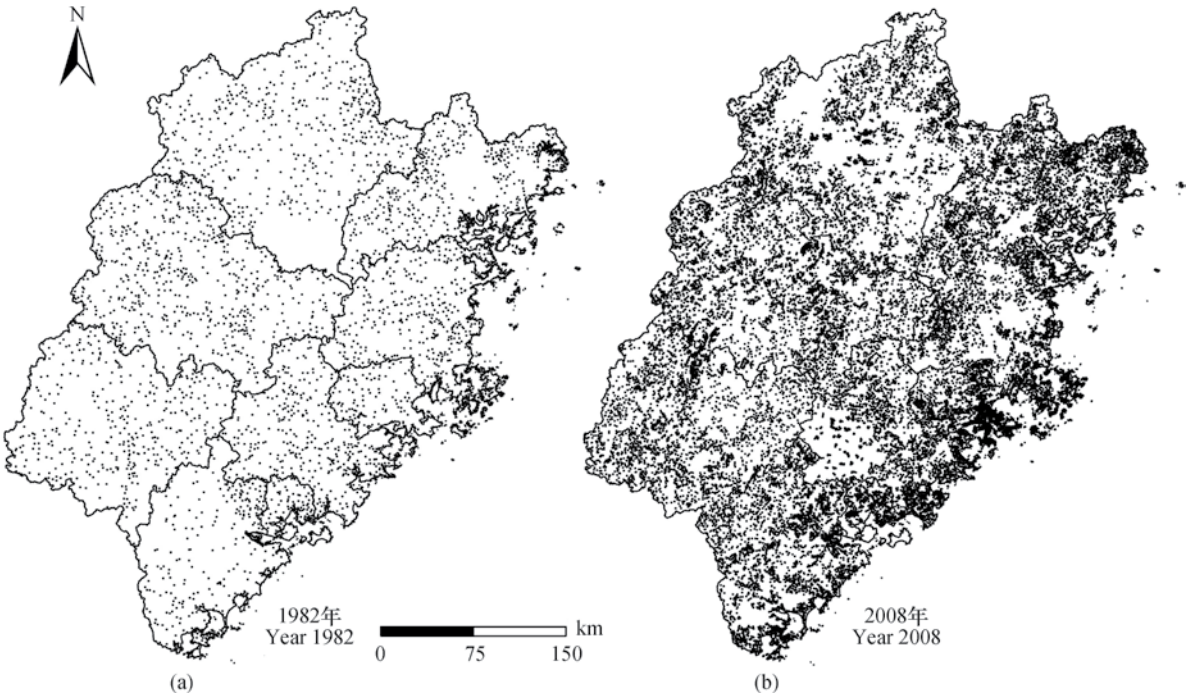


图2 1982年和2008年福建省耕地土壤样点分布图
Fig. 2 Distribution of sampling sites for farmland of Fujian Province in 1982 and 2008

合，形成福建省1982年和2008年两期1：5万制图尺度耕地土壤全氮及相关属性数据库。

1.4 耕层土壤氮密度及储量计算

全氮密度（soil total nitrogen density，STND）使用国际上通用计算模型^[21]，表达式为：

$$STND = \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \delta_i) \times \rho_i \times N_i \times T_i}{100} \quad (1)$$

式中，STND为土壤剖面的氮密度（kg m⁻²），δ_i为第*i*层>2 mm砾石含量（体积百分比，%），ρ_i为第*i*层土壤容重（g cm⁻³），N_i为第*i*层土壤全氮浓度（g kg⁻¹），T_i为第*i*层土层深度（cm），*n*为参与计算的土壤层次总数，本研究计算的是耕层土壤全氮密度（0~15 cm）。对于土壤普查资料中缺少土壤容重的数据，国内外学者大多通过影响土壤容重的相关因素建立回归模型^[22]。本研究采用Song等^[23]根据我国第二次土壤普查数据建立的土壤容重与有机碳含量的回归模型：*y*=1.377×e^{-0.0048×SOC}（R²=0.7 870，*p*<0.001，*n*=4 765），式中SOC代表土壤有机碳。

全氮储量（soil total nitrogen storage，STNS）计算表达式为^[24]：

$$STNS = \sum_{j=1}^n STND_j \times S_j \quad (2)$$

式中，STNS为土壤耕层（0~15 cm）的氮储量（kg），STND_{*j*}为第*j*个图斑的STND（kg m⁻²）；S_{*j*}为第*j*个图斑的面积（m²），*n*为参与计算的图斑总数。

1.5 数据统计分析

利用ArcGIS 10.2软件编制福建省氮密度分布图，并结合耕地土壤图斑面积计算每个图斑的氮储量，同时应用Excel 2010统计软件按照耕地土壤类型对耕地土壤氮密度和氮储量进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 福建省耕层土壤氮密度和氮储量动态变化

从表1可以看出，1982年和2008年福建省166×10⁴ hm²耕地土壤的面积加权平均全氮密度分别为0.258 kg m⁻²和0.262 kg m⁻²，近30年来上升了0.004 kg m⁻²；而全氮储量分别为4.26 Tg和4.39 Tg，近30年来增加了0.13 Tg。这一结果与很多研究者认为的“第二次土壤普查以来我国土壤表层全氮含量大体呈上升趋势”的观点相一致^[14, 25]。福建省

表1 耕地土壤全氮密度统计

Table 1 Statistics of total nitrogen density in farmland of Fujian

年份 Year	最小值 Min	最大值 Max (kg m ⁻²)	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV (%)
2008	0.008	0.737	0.262	0.085	32.49
1982	0.013	0.704	0.258	0.076	29.67

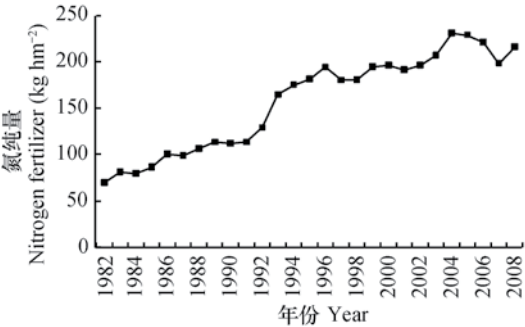


图3 1982—2008年福建省氮肥施用量年际变化

Fig. 3 Inter-annual variation of nitrogen fertilizer application rate during the period from 1982 to 2008 in Fujian

耕地氮素富集的主要驱动力是近30年来氮肥施用量的快速增加，1982年氮肥施用量为70 kg hm⁻²，而2008 年达216 kg hm⁻²，增幅达211%（图3）。此外，福建省耕地在不同时期的全氮密度空间差异也很大，1982年全省耕地全氮密度的最小值为0.008 kg m⁻²，最大值为0.737 kg m⁻²，二者相差9倍多；2008年全氮密度的最小值为0.013 kg m⁻²，最大值为0.704 kg m⁻²，二者相差5倍多，说明由于受生物积累、气候和农业施肥等因素的影响，全省不同时期耕地全氮密度和储量的空间差异较明显，且呈现出氮素在耕层富集的现象。

从空间分布图来看（图4），1982年全氮密度

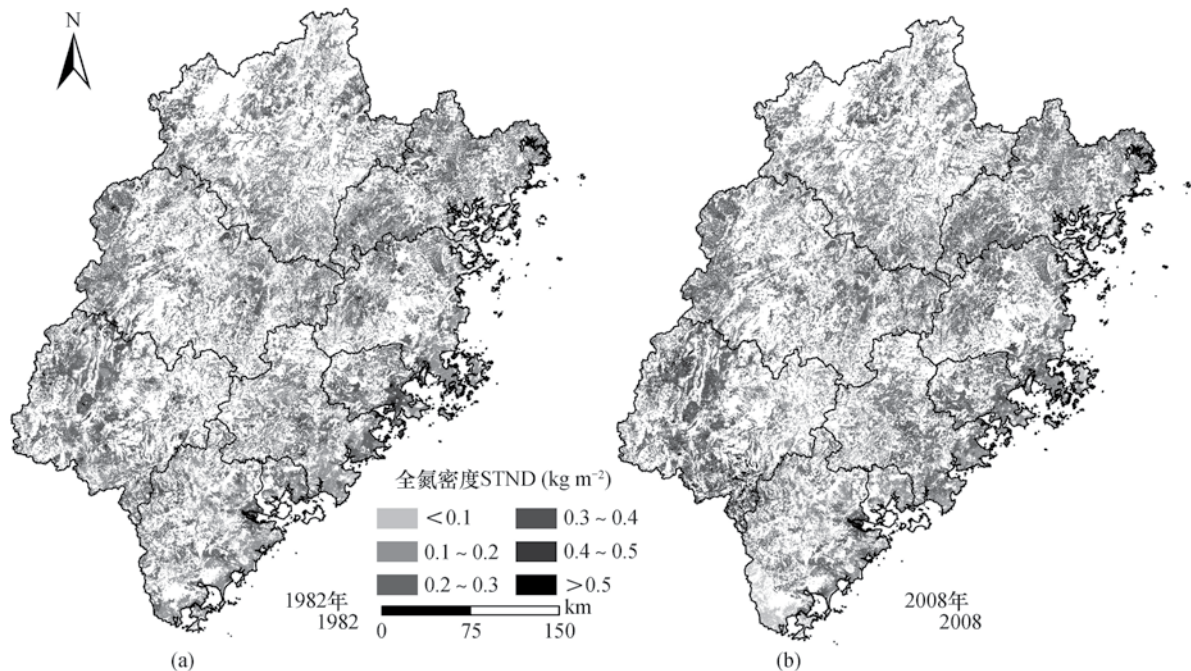


图4 1982年和2008年福建省耕层土壤全氮密度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil total nitrogen density in farmland of Fujian Province in 1982 and 2008

较高 ($\geq 0.4 \text{ kg m}^{-2}$) 的耕地主要分布在福建省北部、西部和东北部地区, 总面积为 $8.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全省耕地总面积的4.9%。这些地区主要由于福建省地形由西、中两列大山带构成, 地形抬升的作用, 使得西部和中部地区降水量较大, 温度较低, 而低温多雨利于有机质的积累。有研究表明, 有机质和土壤全氮呈极显著正相关关系^[26-27]。2008年全氮密度较高 ($\geq 0.4 \text{ kg m}^{-2}$) 的耕地主要集中在西南部和西北部, 总面积为 $6.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全省耕地总面积的4.2%, 主要原因是西南和西北部全年气候温和, 无霜期长, 雨量充沛, 是福建省主要粮食生产区, 由于生物积累和人为增施有机肥料的影响, 有机质含量丰富, 全氮密度较高。1982年全氮密度较低 ($< 0.1 \text{ kg m}^{-2}$) 的耕地土壤主要分布在东部沿海地区, 总面积 $1.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全省耕地总面积的1.2%; 2008年全氮密度较低 ($< 0.1 \text{ kg m}^{-2}$) 的耕地也主要分布在东部和东南部沿海, 总面积 $5.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全省耕地总面积的3.2%。由图5可以看出, 年均氮肥施用量呈现由东南向西北递减的趋势, 与全氮密度的变化趋势相反, 主要是因为全氮密度较低的地区, 农民会选择增施肥料来保证粮食产量, 所以沿海地区氮肥施用量较高; 但由于东部及东南沿海地区受副热带高压的影响, 降水量较少, 温度较高 (图6), 高温和少雨会导致

土壤水分不足, 土壤孔隙度大, 加速氮素矿化分解^[14, 28]。从近30年不同范围全氮密度的耕地面积变化来看, 全省全氮密度介于 $0.3 \sim 0.4 \text{ kg m}^{-2}$ 之间的耕地面积增幅最大, 新增面积达 $14 \times 10^4 \text{ hm}^2$, $\geq 0.5 \text{ kg m}^{-2}$ 的耕地面积有所增加, 增幅达 $0.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 而 $< 0.3 \text{ kg m}^{-2}$ 的耕地面积则有所下降, 减少面积为 $12 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 这主要与近30年来全省耕地的氮肥施用量呈明显增加, 导致土壤全氮密度升高有关。

2.2 福建省不同地级市耕地全氮密度和储量动态变化

福建省各地市耕地土壤全氮密度差异也很大, 1982年和2008年的全氮密度变异系数分别为11.02%和17.42% (表3)。1982年和2008年均以南平和龙岩市的耕地全氮密度最大, 这主要与二者背靠武夷山脉, 属于亚热带气候区有关。由于受地形和气候的影响, 南平和龙岩市的年均气温较低, 分别为 18.5°C 和 19.1°C , 而年均降水量较大, 分别为 $1\,731 \text{ mm}$ 和 $1\,713 \text{ mm}$, 有研究表明, 低温多雨有利于氮素的积累^[26]。1982年和2008年均以厦门市耕地的全氮密度最低, 这主要是因为该市属于亚热带海洋性季风气候, 年均气温达 20.8°C , 年均降水量 $1\,271 \text{ mm}$, 高温少雨的气候条件不利于有机质积累, 导致其全氮密度较低 (图6)。1982年

表2 不同全氮密度范围下的福建省耕地全氮面积和储量统计

Table 2 Statistics of total nitrogen storage in farmland and area of farmland relative to range of total nitrogen density						
密度 Density (kg m^{-2})	2008年 2008		1982年 1982		两期对比 Comparison	
	面积 Area ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	储量 Storage (Tg)	面积 Area ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	储量 Storage (Tg)	面积 Area ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	储量 Storage (Tg)
<0.1	5.3	0.03	1.9	0.02	3.4	0.014
0.1~0.2	28	0.46	38	0.63	-10	-0.17
0.2~0.3	79	1.99	84	2.10	-5	-0.115
0.3~0.4	47	1.58	33	1.13	14	0.450
0.4~0.5	5.1	0.22	6.4	0.28	-1.3	-0.06
≥ 0.5	1.8	0.11	1.7	0.10	0.1	0.01
总计Total	166	4.39	166	4.26	0.0	0.134

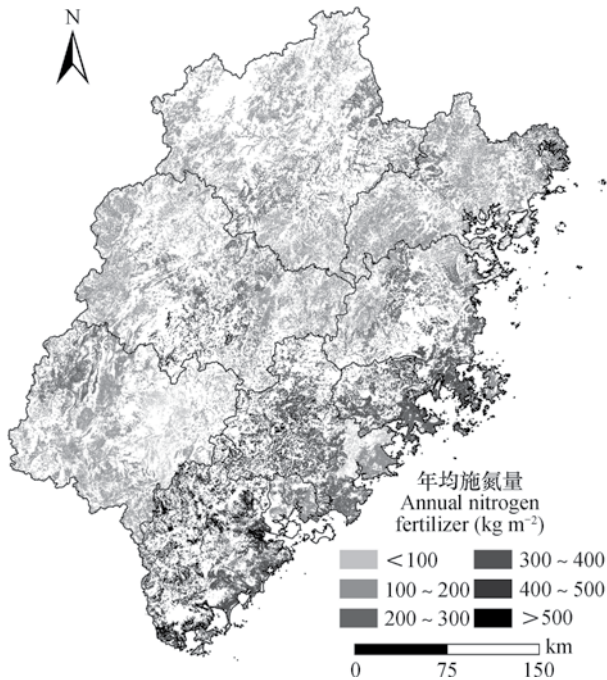


图5 1982—2008年福建省年均施氮量空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of average annual nitrogen fertilizer application rate during the period from 1982 to 2008

和2008年其他地级市的耕地的全氮密度分别介于0.20~0.28 kg m^{-2} 和0.17~0.29 kg m^{-2} 之间。

从近30年耕地全氮密度的变化来看,大部分地级市的耕地全氮密度均有所上升,其中龙岩市耕地全氮密度增幅最大,为0.036 kg m^{-2} ,这与该地区耕作历史悠久,施氮量较大有关系(图5)。龙岩市是福建省三大粮食重点产区之一^[29],耕地面积

为20.3 $\times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全省耕地总面积的12.2%, 据统计, 1982年和2008年龙岩市年均施氮量分别为129 kg hm^{-2} 和178 kg hm^{-2} , 生物物质的持续积累和肥料的增施为龙岩市的耕地土壤带来源源不断的新有机质源, 再加上龙岩市低温多雨的气候特点, 导致全氮密度的增幅较大。厦门、漳州和莆田市耕地的全氮密度近30年来均有所下降, 其中降幅最大的是厦门市, 达到0.042 kg m^{-2} 。据统计, 1982年和2008年厦门市平均施氮量分别为54 kg hm^{-2} 和247 kg hm^{-2} , 但高的氮肥增加量并未引起土壤全氮密度的上升, 其主要原因在于该地区气温(20.8℃)明显高于其他地区, 而降水量(1 271 mm)却较低, 高温少雨的气候条件加快了土壤有机氮的分解, 导致了全氮密度的下降^[30]。

1982年和2008年福建省各地市耕地的全氮储量受面积和密度的共同影响。其中, 南平市耕地的全氮储量在两期均最高, 分别占全省耕地氮总储量的16.9%和16.6%, 这一方面是因为该市的耕地面积较大, 为25 $\times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全省耕地总面积的15.2%; 另一方面两期的全氮密度分别为0.283 kg m^{-2} 和0.286 kg m^{-2} , 明显高于全省的平均水平。相反, 厦门市的全氮储量两期均最低, 分别占全省耕地全氮总储量的2.5%和1.8%, 这主要与该市耕地面积较小, 仅为4.8 $\times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全省耕地总面积的2.9%有关。从近30年来的耕地全氮储量变化来看, 龙岩市耕地全氮储量升幅最大, 达112 Gg, 占全省全氮储量总增幅的83.6%,

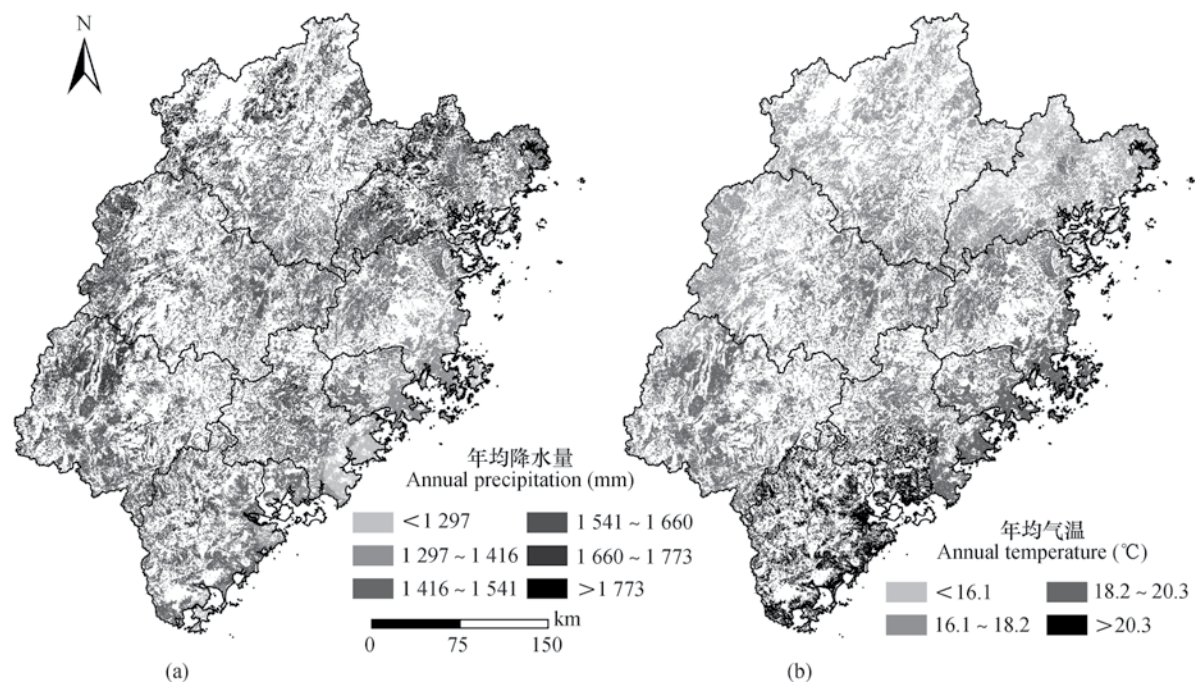


图6 福建省年均降水量（a）和年均气温（b）分布图

Fig. 6 Spatial distribution of mean annual precipitation (a) and mean annual temperature (b) in Fujian

表3 福建省不同地级市耕地土壤全氮密度和储量分布

Table 3 Distribution of total nitrogen density and storage in farmland relative to prefectural-level city							
地级市 Prefectural-level City	面积 Area (× 10 ⁴ hm ²)	2008年 2008		1982年 1982		两期对比 Comparison	
		密度	储量	密度	储量	密度	储量
		Density (kg m ⁻²)	Storage (Gg)	Density (kg m ⁻²)	Storage (Gg)	Density (kg m ⁻²)	Storage (Gg)
福州市 Fuzhou City	20.1	0.244	512	0.234	478	0.01	34
龙岩市 Longyan City	20.3	0.316	698	0.280	586	0.036	112
南平市 Nanping City	25.2	0.286	730	0.283	718	0.003	12
宁德市 Ningde City	20.1	0.270	554	0.269	559	0.001	-5
莆田市 Putian City	9	0.247	214	0.265	230	-0.018	-15
泉州市 Quanzhou City	21.8	0.244	530	0.221	481	0.023	49
三明市 Sanming City	20.5	0.284	597	0.278	600	0.006	-3
厦门市 Xiamen City	4.8	0.171	81	0.213	105	-0.042	-24
漳州市 Zhangzhou City	23.4	0.190	475	0.218	501	-0.028	-26
总计 Total	166	—	4391	—	4257	—	134
均值 Mean	—	0.250	488	0.251	473	-0.001	15
标准差 SD	—	0.044	201	0.028	180	0.023	42
变异系数 CV (%)	—	17.42	41.12	11.02	38.09	—	—

而漳州市和厦门市的降幅较大,分别为26 Gg和24 Gg,这主要与全氮密度的变化有关。据统计,龙岩市耕地近30年来的全氮密度增幅为 0.036 kg m^{-2} ,明显高于全省平均增幅水平,而漳州和厦门市全氮密度降幅分别为 0.028 kg m^{-2} 和 0.042 kg m^{-2} ,远大于全省平均降幅水平。

2.3 福建省不同土壤类型耕地的全氮密度和储量变化

2.3.1 不同土类全氮密度和储量变化 福建省耕地不同土类间的全氮密度差异也较大,1982年和2008年的耕地土壤类型全氮密度变异系数分别为20.84%和21.99% (表4)。1982年全氮密度最高的是紫色土,达 0.306 kg m^{-2} ,该土类由侏罗纪、白垩纪紫色砂岩、泥岩时代形成的紫色或紫红色砂岩、页岩风化形成,由于紫色土母岩疏松,易于崩解,矿质养分含量丰富,潜在肥力较高,后期的人为开垦和有机肥料的投入,增加了土壤有机质和全氮的含量;而全氮密度最低的是风沙土,仅为 0.133 kg m^{-2} ,这主要与该土类砂粒含量较高,风沙土的砂粒占85%以上,土壤容重在 $1.30 \pm 0.04 \text{ g cm}^{-3}$ 之间,氮素难以积累^[18, 31];其他土类的全氮密度介于 $0.20 \sim 0.30 \text{ kg m}^{-2}$ 之间。2008年全氮密度最高的是黄壤,达 0.284 kg m^{-2} ,这主要是因为该土类大多分布中亚热带地区,海拔高,年均气温低,湿度大,微生物活动性较弱,有利于有机质和氮素的积累;全氮密度最低的仍是风沙土,为 0.127 kg m^{-2} ,其他土类的全氮密度介于 $0.179 \sim 0.268 \text{ kg m}^{-2}$ 之间。从表4可以看出,水稻土作为福建省最主要的耕地土壤类型,1982年和2008年的全氮密度也较高,分别为 0.261 kg m^{-2} 和 0.267 kg m^{-2} ,这主要是由于该土类氮肥和有机肥施用量较大;且该土类多处于淹水缺氧状态,通气性不良也会导致土壤有机氮的矿化作用较弱而易于积累。

从全氮密度的变化情况来看(表4),近30年来滨海盐土、赤红壤、石灰土和紫色土全氮密度均有所下降,而其他土类均有所上升,其中以潮土的全氮密度增幅最大。滨海盐土有所降低主要是因为该土类分布于滨海垦区,地势低平,陆源物质夹带大量养分沉积,致使原始土壤全氮较高,但后期的开垦会迅速加快有机氮素的矿化,导致全氮密度下降。赤红壤和石灰土成土过程中生物物质循环旺盛,有机质等养分含量丰富,但后期的开垦也会导

致植被破坏,土壤有机质和氮素含量的降低。潮土近30年来上升幅度最大是由于该土类主要分布于江河中下游的冲积平原及部分山间盆地,由于交通和灌溉便利多辟为菜地,人为耕作和大量施肥下熟化度提高,导致全氮密度增加。

1982年和2008年福建省耕地土类均是水稻土的全氮储量最大,分别占全省耕地全氮总储量的90.14%和90.66%,这主要与该土类的面积和密度均较大密切相关。据统计,水稻土面积占全省耕地总面积88.2%,是福建省分布最广的耕作土壤;此外,该土类1982年和2008年的全氮密度也分别达 0.261 kg m^{-2} 和 0.267 kg m^{-2} ,导致其总储量最大。两期全氮储量最小的是石灰土和紫色土,虽然二者的全氮密度分别在 $0.24 \sim 0.31 \text{ kg m}^{-2}$ 之间,远高于全省平均水平,但面积仅占全省耕地总面积的0.001%和0.09%,故全氮储量最小。从全氮储量的动态变化来看,近30年来全氮储量上升最多也是水稻土,增幅达146 Gg,占全省上升总储量的109%,主要原因是水稻土作为全省最主要的耕地土壤类型,氮肥和有机肥施用较多,导致其全氮密度不断增加。其次,红壤和潮土的全氮储量增加也较多,分别为11 Gg和0.35 Gg;其他土类均有所下降,其中降幅最大的是赤红壤,达17 Gg。有研究表明,耕地土壤有机质与全氮密度达到极显著正相关^[32],据统计,赤红壤土类近30年来有机质含量下降了 3.7 g kg^{-1} ,致使其氮储量明显下降。

2.3.2 不同亚类全氮密度和储量变化 1982年和2008年福建省不同耕地土壤亚类全氮密度变异系数分别达18.68%和21.90% (表5)。1982年全氮密度最高的是酸性紫色土和咸酸水稻土,分别为 0.306 kg m^{-2} 和 0.309 kg m^{-2} ,前者是因为土壤颗粒较细,物理黏粒含量达到 $40.3\% \pm 19.8\%$,质地多为黏壤土和壤质黏土,导致其有机质(29.2 g kg^{-1})和全氮含量相对较高;后者是由于该亚类主要分布在河口滨海平原的近期围垦(含有经树林残体)地段,质地剖面上黏下轻,全剖面有机质含量较高,为 21.4 g kg^{-1} ,导致全氮密度也较高。相对而言,成土时间短、有机质含量低的滨海风沙土全氮密度最低,仅为 0.133 kg m^{-2} ,其他亚类的全氮密度介于 $0.19 \sim 0.30 \text{ kg m}^{-2}$ 之间。2008年全氮密度最大的是潜育水稻土,为 0.296 kg m^{-2} ,由于该亚类多分布于山间谷地或平原低洼地,耕层较厚,粉黏比为1.67,多为黏壤土,导致耕层有机质、全氮含量较

表4 福建省不同土类耕地土壤全氮密度和储量分布

Table 4 Distribution of total nitrogen density and storage in farmland relative to soil group

土类 Soil group	面积 Area (× 10 ⁴ hm ²)	2008年 2008		1982年 1982		两期对比 Comparison	
		密度Density	储量Storage	密度Density	储量Storage	密度Density	储量Storage
		(kg m ⁻²)	(Gg)	(kg m ⁻²)	(Gg)	(kg m ⁻²)	(Gg)
滨海盐土 Coastal solonchaks	0.7	0.179	12	0.212	16	-0.033	-4
潮土 Fluvo-aquic soils	0.6	0.251	14.35	0.234	14	0.017	0.35
赤红壤 Latosolic red soils	10.8	0.183	197	0.207	214	-0.024	-17
风沙土 Aeolian sand	1.1	0.127	14	0.133	16	-0.006	-2
红壤 Red soils	5.9	0.268	158	0.258	147	0.010	11
黄壤 Yellow soils	0.3	0.284	9	0.280	10	0.004	-1
石灰土 Calcareous soils	0.001	0.243	0	0.295	0	-0.052	0
水稻土 Paddy soils	146.5	0.267	3983	0.261	3837	0.006	146
紫色土 Purplish soils	0.1	0.265	4	0.306	4	-0.041	0
总计 Total	166	—	4391	—	4257	—	134
均值 Mean	—	0.230	488	0.243	473	-0.013	15
标准差 SD	—	0.051	1238	0.051	1192	0.023	46
变异系数 CV (%)	—	21.99	254	20.84	252	—	—

表5 福建省不同亚类耕地土壤全氮密度和储量分布

Table 5 Distribution of total nitrogen density and storage in farmland relative to soil subgroup

亚类 Subgroup	面积 Area (× 10 ⁴ hm ²)	2008年 2008		1982年 1982		两期对比 Comparison	
		密度	储量	密度	储量	密度	储量
		Density (kg m ⁻²)	Storage (Gg)	Density (kg m ⁻²)	Storage (Gg)	Density (kg m ⁻²)	Storage (Gg)
滨海风沙土 Coastal Aeolian sand	1.1	0.127	14	0.133	16	-0.005	-2
滨海盐土 Coastal solonchaks	0.7	0.179	12	0.212	16	-0.033	-4
赤红壤 Latosolic red soils	10.8	0.183	197	0.207	214	-0.024	-16
红壤 Red soils	5.9	0.268	158	0.258	147	0.010	11
黄壤 Yellow soils	0.3	0.284	9	0.280	10	0.004	-1
灰潮土 Greyfluvo-aquic soils	0.6	0.251	14.35	0.234	14	0.017	0.35
漂洗水稻土 Bleached paddy soils	2.2	0.264	59	0.274	62	-0.010	-3
潜育水稻土 Gleyed paddy soils	11.7	0.296	348	0.278	334	0.018	14
渗育水稻土 Percogenic paddy soils	91.8	0.271	2541	0.263	2416	0.008	125
酸性紫色土 Acid purplish soils	0.1	0.265	4	0.306	4.12	-0.041	-0.12
咸酸水稻土 Salted-acid paddy soils	0.009	0.279	0.25	0.309	0.25	-0.030	0
淹育水稻土 Submergenic paddy soils	1.9	0.138	24	0.190	32	-0.052	-8
盐渍水稻土 Salinized paddy soils	4.9	0.225	117	0.232	116	-0.007	1
潜育水稻土 Hydromorphic paddy soils	34	0.256	894	0.256	876	0.000	18
棕色石灰土 Brown calcareous soil	0.001	0.243	0.02	0.295	0.04	-0.052	-0.02
总计 Total	166	—	4391	—	4257	—	134
均值 Mean	—	0.235	293	0.248	284	-0.013	9
标准差 SD	—	0.052	642	0.046	611	0.023	32
变异系数 CV (%)	—	21.90	219	18.68	215	—	—

丰富。2008年全氮密度最低的也是滨海风沙土, 仅为 0.127 kg m^{-2} , 其他亚类介于 $0.138 \sim 0.284 \text{ kg m}^{-2}$ 之间。由于受人为活动的影响, 近30年来潜育水稻土的全氮密度增加最多, 达 0.018 kg m^{-2} , 这主要也与该亚类通过施肥导致有机质等养分上升有关。据统计, 潜育水稻土1982年和2008年有机质含量分别为 29.7 g kg^{-1} 和 30.3 g kg^{-1} , 近30年增加了 0.6 g kg^{-1} 。灰潮土的全氮密度上升幅度也较大, 增幅为 0.017 kg m^{-2} , 由于该亚类细土层深厚, 有利于深耕和作物根系伸展, 在人为耕作施肥影响下, 随着熟化度提高, 盐基饱和度高达85%以上, 导致有机质大量积累和全氮密度升高, 1982年和2008年有机质含量分别为 24.4 g kg^{-1} 和 26.3 g kg^{-1} , 增加了 1.9 g kg^{-1} 。近30年全氮密度降幅最大的是淹育水稻土和棕色石灰土, 均下降了 0.052 kg m^{-2} ; 前者是由于水耕历史不长、淹灌时间较短, 干湿交替频繁, 有利于氮素的矿化; 后者虽然原始土壤腐殖质积累较多, 但是一旦耕作后土壤有机质会迅速分解, 导致其氮素含量降低。

1982年和2008年福建省耕地全氮储量最大的亚类是渗育水稻土和潜育水稻土, 这两个亚类1982年分别占全省总储量的56.8%和20.6%, 2008年分别占全省总储量的57.9%和20.4%。渗育水稻土和潜育水稻土储量高一方面是因为这两个亚类是福建省分布最广、面积最大; 另一方面也是由于这两个亚类水耕历史悠久, 土层深厚, 施肥和生物积累较多, 土壤有机质及矿物养分较为丰富, 全氮密度高。1982年和2008年全氮储量最小的亚类是咸酸水稻土和棕色石灰土, 合计仅占全省耕地全氮总储量的0.01%, 二者虽然密度均较大, 分别介于 $0.24 \sim 0.31 \text{ kg m}^{-2}$ 之间, 明显大于全省平均值 0.248 kg m^{-2} 和 0.235 kg m^{-2} , 但面积较小, 分别仅为 88.4 hm^2 和 10.5 hm^2 , 合计占全省耕地总面积的0.006%, 故二者全氮储量最小。从福建省全氮储量的动态变化来看, 近30年来全氮储量上升最多的亚类是渗育水稻土和潜育水稻土, 分别增加了125 Gg和18 Gg, 增幅达93.18%和12.88%; 其次, 红壤、灰潮土、潜育水稻土和盐渍水稻土, 增加量介于 $0.35 \text{ Gg} \sim 14 \text{ Gg}$ 之间; 其他亚类全氮储量均有所下降, 降幅最大的是赤红壤, 减少量达16 Gg, 该亚类多分布于低丘、台地, 利用开垦, 生产活动频繁, 自然植被破坏较甚, 水土流失亦较严重, 尤其是不合理开垦, 使得土壤有机质含量下降, 降幅

为 3.7 g kg^{-1} , 导致全氮密度降低。

3 结 论

福建省耕地近30年来的全氮密度空间动态变化差异很大, 在今后的耕地利用中, 根据不同地级市和土壤类型氮素富集程度合理调整氮肥施用量是十分重要的。尽管本研究基于1982年和2008年两期1:5万土壤数据库和大样本数据分析了福建省耕地土壤近30年来的全氮储量和密度的动态变化, 从空间和时间尺度上揭示了全省耕地土壤氮素的富集程度, 但对耕地土壤全氮储量和密度的差异仅局限于水平空间分异分析, 对耕地土壤全氮密度及其影响因素的分析也仅局限于一般性理论分析或单因素线性相关分析等, 而区域耕地土壤氮素动态变化是多因素综合作用的结果且在垂直空间上也可能存在差异。因此, 未来的研究应关注区域耕地土壤氮素动态变化的多因素综合影响的量化分析以及不同海拔下的全氮储量和密度垂直空间分布规律的分析探讨。

参 考 文 献

- [1] Tan Z X, Lal R. Carbon sequestration potential estimates with changes in land use and tillage practice in Ohio, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 111 (1): 140—152
- [2] Batjes N H, Dijkshoorn J A. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. *Geoderma*, 1999, 89 (3—4): 273—286
- [3] Ellis E C, Li R G, Yang L Z, et al. Changes in village scale nitrogen storage in China's Tai Lake region. *Ecological Applications*, 2000, 10 (4): 1074—1089
- [4] Parfitt R L, Scott N A, Ross D J, et al. Land-use change effects on soil C and N transformations in soils of high N status: Comparisons under indigenous forest pasture and pine plantation. *Biogeochemistry*, 2003, 66 (3): 203—221
- [5] Wang G X, Ma H Y, Qian J, et al. Impact of land use changes on soil carbon, nitrogen and phosphorus and water pollution in an arid region of northwest China. *Soil Use and Management*, 2004, 20 (1): 32—39
- [6] Holland E A, Guenther A, Lee-Taylor J, et al. Nitrogen science plan focuses collaborative efforts. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2005, 86 (27): 253—256
- [7] Post W M, Pastor J, Zinke P J, et al. Global patterns

- of soil nitrogen storage. *Nature*, 1985, 317: 613—616
- [8] Batjes N H. Carbon and nitrogen stocks in the soils of central and eastern europe. *Soil Use and Management*, 2002, 18: 324—329
- [9] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 等. 1990—2000 年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化. *地理学报*, 2004, 59 (4): 483—496
- Liu J Y, Wang S Q, Chen J M, et al. Storages of soil organic carbon and nitrogen and land use changes in China: 1990—2000 (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59 (4): 483—496
- [10] 林金石, 史学正, 于东升, 等. 基于区域和亚类水平的中国水稻土氮储量空间分异格局研究. *土壤学报*, 2009, 46 (4): 587—593
- Lin J S, Shi X Z, Yu D S, et al. Spatial patterns of nitrogen storage in paddy soils at regional and subgroups levels in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (4): 587—593
- [11] 张春华, 王宗明, 任春颖, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮储量的空间特征. *应用生态学报*, 2010, 21 (3): 631—639
- Zhang C H, Wang Z M, Ren C Y, et al. Spatial characteristics of soil organic carbon and nitrogen storages in Songnen Plain maize belt (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 (3): 631—639
- [12] 武俊喜, 焦加国, 肖红生, 等. 长江平原区乡村景观的结构、管理及其对土壤氮磷的影响. *生态学报*, 2008, 28 (8): 3606—3717
- Wu J X, Jiao J G, Xiao H S, et al. Landscape structure, management and soil total nitrogen, total phosphorus in the densely populated rural landscapes of China's Yangtze Plain (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (8): 3606—3717
- [13] 王慧萍. 川中丘陵区农田土壤有机碳氮储量及动态变化. 四川: 四川师范大学, 2008
- Wang H P. Soil organic carbon and nitrogen storage and the dynamic changes in hilly area of central Sichuan Basin (In Chinese). Sichuan: Sichuan Normal University, 2008
- [14] 王加恩, 郑洁, 康占军, 等. 浙北典型稻作区近 30 年表层土壤碳氮含量变化. *生态环境学报*, 2010, 19 (5): 1191—1196
- Wang J E, Zheng J, Kang Z J, et al. The content change of carbon and nitrogen in surface soil of typical rice area in Northern Zhejiang (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19 (5): 1191—1196
- [15] 程励励, 文启孝, 林心雄. 内蒙古自治区土壤中有机碳、全氮和固定态铵的贮量. *土壤*, 1994, 26 (5): 248—252
- Cheng L L, Wen Q X, Lin X X. The storage of soil organic carbon and total nitrogen and nonexchangeable-ammonium in Inner Mongolia (In Chinese). *Soils*, 1994, 26 (5): 248—252
- [16] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证——兼论确定作物氮肥推荐量的方法. *土壤学报*, 2015, 52 (2): 249—261
- Ju X T. Improvement and validation of theoretical N rate (TNR) -Discussing the methods for N fertilizer recommendation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (2): 249—261
- [17] 福建省统计局. 福建经济与社会统计年鉴. 福州: 福建人民出版社, 2015: 241
- Fujian Provincial Bureau of Statistics. *Fujian economic and social statistical yearbook* (In Chinese). Fuzhou: Fujian People's Publishing House, 2015: 241
- [18] 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: 287—289
- Soil survey office in Fujian Province. *Soils of Fujian* (In Chinese). Fuzhou: Fujian Science and Technology Publishing House, 1991: 287—289
- [19] 赵海东, 赵小敏, 谢林波, 等. 江西上饶市水稻肥料利用率的空间差异及其影响因素研究. *土壤学报*, 2014, 51 (1): 22—31
- Zhao H D, Zhao X M, Xie L B, et al. Spatial variation and its affecting factors of rice fertilizer use efficiency in Shangrao City of Jiangxi Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1): 22—31
- [20] 李增兵, 赵庚星, 赵倩倩, 等. 县域耕地地力评价中土壤养分空间插值方法的比较. *中国农学通报*, 2012, 28 (20): 230—236
- Li Z B, Zhao G X, Zhao Q Q, et al. Comparison of spatial interpolation methods for soil nutrients in cultivated land fertility evaluation (In Chinese). *Bulletin of Chinese Agricultural Science*, 2012, 28 (20): 230—236
- [21] 张黎明, 林金石, 史学正, 等. 中国水稻土氮密度变异性的幅度效应研究. *生态环境学报*, 2011, 20 (1): 1—6
- Zhang L M, Lin J S, Shi X Z, et al. The effect of different extents on variation of nitrogen density of paddy soils in China (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20 (1): 1—6
- [22] Tranter G B, Minasny A B, Mcbratney B, et al. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density. *Soil Use and Management*, 2007, 23 (4): 437—443

- [23] Song G H, Pan G X, Zhang Q. Topsoil SOC storage of China agricultural soils and its loss by cultivation. *Biogeochemistry*, 2005, 74: 47—62
- [24] 林金石. 中国水稻土氮磷空间分异及其影响因素研究. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2008
Lin J S. Spatial distribution and its affecting factors of paddy soils nitrogen and phosphorus (In Chinese). Nanjing: Institute of Soil Science, China Academy of Sciences, 2008
- [25] 张树清, 孙小凤. 甘肃农田土壤氮磷钾养分变化特征. 土壤通报, 2006, 37 (1): 13—18
Zhang S Q, Sun X F. Characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients of arable soil in Gansu (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37 (1): 13—18
- [26] 杨东, 刘强. 河西地区土壤全氮及有机质空间变异特征分析. 干旱地区农业研究, 2010, 28 (4): 183—187
Yang D, Liu Q. Characteristics of spatial distribution of soil organic matter and total nitrogen in Hexi Area (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28 (4): 183—187
- [27] 赵小敏, 邵华, 石庆华, 等. 近30年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征. 土壤学报, 2015, 52 (4): 723—730
Zhao X M, Shao H, Shi Q H, et al. Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi Province in the past 30 years (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4): 723—730
- [28] 张金屯. 全球气候变化对自然土壤碳、氮循环的影响. 地理科学, 1998, 18 (5): 463—471
- [29] 龙岩市经贸委. 龙岩市农业概况. 2011—04—21 [2015—10—25]. <http://www.fjiyagri.gov.cn/nygk/201104/t20110421-173134.htm>
Longyan City Economic and Trade Commission. Longyan City agriculture overview (In Chinese). 2011—04—21 [2015—10—25]. <http://www.fjiyagri.gov.cn/nygk/201104/t20110421-173134.htm>
- [30] 王淑平, 周广胜, 高素华, 等. 中国东北样带土壤氮的分布特征及其对气候变化的响应. 应用生态学报, 2005, 16 (2): 279—283
Wang S P, Zhou G S, Gao S H, et al. Gradient distribution of soil nitrogen and its response to climate change along the Northeast China Transect (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (2): 279—283
- [31] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1978: 382—383
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soils of China* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1978: 382—383
- [32] 张如龙, 秦晓燕, 巴建文. 张掖市北郊湿地土壤有机质与全氮、全磷的相关性分析. 地下水, 2010, 32 (4): 29—31
Zhang R L, Qin X Y, Ba J W. Correlation analysis of soil organic matter and total nitrogen, total phosphorus in the wetland of the northern suburbs in Zhangye City (In Chinese). *Groundwater*, 2010, 32 (4): 29—31

Analysis of Dynamics of Deposit of Total Nitrogen in Farmland of Fujian Province Based on 1 : 50 000 Soil Database

JIAO Shanshan^{1, 2} ZHANG Liming^{1, 2*} JIANG Wei^{1, 2} ZHENG Qiaoli^{1, 2} LONG Jun^{1, 2}
CHEN Hanyue^{1, 2} XING Shihe^{1, 2}

(1 College of Resource and Environment Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

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

Abstract 【Objective】 Soil nitrogen is an important indicator of soil fertility of farmland, and also an important component of the nitrogen pool in the terrestrial ecosystem. It is of great significance to exploration of nitrogen circulation in the terrestrial ecosystem and its effect on the environment to study dynamics of the soil nitrogen deposit in farmland. So far, much has been reported both at home and abroad on soil nitrogen deposits on a varying scale, but most of the studies on deposit of total nitrogen in farmland on a regional scale focus on static status of nitrogen deposit of a certain time period, and little has been done on dynamics

of soil nitrogen deposit in farmland on a provincial scale based on large volumes of data gathered from huge numbers of sampling sites and spatial database relatively high in accuracy. As a result, it is still very hard for the country to work out proper measures for management of farmland nitrogen on a regional scale in line with variation trend of soil nitrogen content. **【Method】** In this research project, with the aid of the ArcGIS 10.2 software and the inverse distance weighting interpolation (IDW) method, based on the data of topsoil attributes collected from 2 021 sample soil profiles during the second soil survey in 1982 and 29 945 sampling sites in extrapolation of soil surfaces of soil testing and fertilizer recommendation in 2008, and the data of average annual nitrogen application rate fertilizer, average annual temperature and average annual precipitation of the past 30 years of Fujian Province, a 1 : 50 000 high accuracy mapping scaled farmland soil total nitrogen and relevant attribute database of the province was established. This database, containing a total of 462 630 patches, was used to study dynamic changes in soil total nitrogen density and storage in the farmland of the province in the past 30 years. **【Result】** Results show that the soil total nitrogen density and storage in the farmland of Fujian Province was 0.258 kg m^{-2} and 4.26 Tg respectively, in 1982, and rose to 0.262 kg m^{-2} and 4.39 Tg, respectively, in 2008, which indicates that soil total nitrogen in the farmland of the province was on a rising or enriching trend. Analysis on a prefectural-level city scale shows that the soil total nitrogen density rose the most or by 0.036 kg m^{-2} in Longyan City, but dropped the most or by 0.041 kg m^{-2} in Xiamen City. In terms of soil type, it rose the most or by more than 0.015 kg m^{-2} in soils of the group of fluvo-aquic soil and the sub-type of gleyed paddy soil, and dropped the most or by more than 0.015 kg m^{-2} in soils of the group of calcareous soil and the sub-types of submergenic paddy soil. It is quite clear that as a whole, in the past 30 years, the soil total nitrogen in the farmland of the province varied sharply in density spatially. **【Conclusion】** Consequently, the province should work out site-specific optimal nitrogen fertilizer management programs for its management of farmland soil nitrogen in future in the light of soil types of the farmland and the degree of nitrogen enrichment in farmland on a prefecture-level city scale. The programs are essential to the control of agricultural non-point source N pollution, protection of eco-environment and realization of agricultural sustainable development.

Key words Soil total nitrogen density; Soil total nitrogen storage; Fujian Province; Farmland; The 1 : 50 000 soil database

(责任编辑: 檀满枝)