

DOI: 10.5846/stxb201308132068

龙军, 张黎明, 沈金泉, 周碧青, 毛艳玲, 邢世和. 福建省耕地土壤全氮密度和储量动态变化. 生态学报, 2015, 35(12): 3959-3969.

Long J, Zhang L M, Shen J Q, Zhou B Q, Mao Y L, Xing S H. Dynamic change of soil total nitrogen density and storage in cropland of Fujian Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 3959-3969.

福建省耕地土壤全氮密度和储量动态变化

龙 军¹, 张黎明¹, 沈金泉², 周碧青¹, 毛艳玲¹, 邢世和^{1,*}

¹ 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002

² 福建省农田建设与土壤肥料技术总站, 福州 350003

摘要:准确估算土壤全氮密度和储量的动态变化能为氮肥优化管理和水体富营养化防控提供重要依据。以位于福建省不同地区的闽侯县、同安区、武平县和永定县 1982 年 11087 个样点及 2008 年 1616 个样点建立的 1:5 万土壤数据库为基础, 利用尺度上推的方法分析了 1982—2008 年福建省耕地全氮密度和储量的动态变化。结果表明, 近 30 年来福建省耕地土壤氮素富集明显, 全氮密度和储量分别上升了 0.08 kg/m² 和 1.22 Tg, 但不同土壤类型差异较大, 紫色土土类、酸性紫色土亚类和猪肝土土属氮素富集最明显, 全氮密度均上升了 0.18 kg/m²; 赤红壤土类、淹育水稻土亚类和赤土土属氮素损失最多, 全氮密度均下降了 0.10 kg/m²。水稻土土类、渗育水稻土亚类和黄泥田土属全氮储量增加最多, 分别达 1.24、0.80 Tg 和 0.71 Tg; 赤红壤土类、赤红壤亚类和灰砂泥田土属下降最多, 分别达 0.13、0.13 Tg 和 0.08 Tg。因此, 在今后的福建省耕地管理中根据不同土壤类型氮素富集程度合理指导施肥, 以节约资源和减少氮素流失是十分必要的。

关键词:福建省; 耕地; 土壤类型; 全氮密度; 全氮储量

Dynamic change of soil total nitrogen density and storage in cropland of Fujian Province, China

LONG Jun¹, ZHANG Liming¹, SHEN Jinquan², ZHOU Biqing¹, MAO Yanling¹, XING Shihe^{1,*}

¹ Resource and Environment School, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

² Fujian Crop Land Construction and Soil and Fertilizer Station, Fuzhou 350003, China

Abstract: The dynamic change of soil total nitrogen density and storage is very important for optimization of nitrogen fertilizer management and water eutrophication. In this study, four counties, namely Minhou, Tongan, Wuping and Yongding, located in different areas of Fujian Province, China, were selected as typical study areas. Based on the data of field measurements at 11087 sampling sites in 1982 and 1616 sampling sites in 2008, scattered in these four counties, a 1:50000 soil database was carried out of dynamic changes in total nitrogen density and storage in the farmlands of Fujian Province during the 1982—2008 year, using the scaling up method. Results show that nitrogen was enriched obviously, with nitrogen density and nitrogen storage increased by N 0.08 kg/m² and 1.22 Tg in entire Fujian Province, respectively. The degree of N enrichment had a great discrepancy in different soil types. The increased of nitrogen density in purplish soil, acid purplish soil and liver soil was the highest in soil group, soil subgroup and soil genus, respectively, with total nitrogen density increased by N 0.18, 0.18 and 0.18 kg/m², respectively. By contrast, the decreased of nitrogen density in latosolic red soils, submergenic paddy soils and latosolic soil was the highest in soil group, soil subgroup and soil genus, respectively, with total nitrogen density decreased by N 0.01, 0.01 and 0.01 kg/m², respectively. The increased of nitrogen storage in paddy soils, percologenic paddy soils and yellow mud field was the highest in soil group, soil subgroup and soil

基金项目:教育部博士点基金(20103515120014); 福建省自然科学基金(2010J05090); 国家自然科学基金(41001126)

收稿日期:2013-08-13; **网络出版日期:**2014-10-13

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

genus, respectively, with total nitrogen storages increased by N 1.24, 0.80 and 0.71 Tg, respectively. By contrast, the decreased of nitrogen storage in latosolic red soils, latosolic red soils and grey sandy mud field was the highest in soil group, soil subgroup and soil genus, respectively, with total nitrogen storages decreased by N 0.13, 0.13 and 0.08 Tg, respectively. Therefore, it is necessary to help famers on scientific fertilization according to the enrichment of various soil type, and to save resources and reduce environmental problems caused by the nitrogen losses.

Key Words: Fujian Province; cropland; soil type; total nitrogen density; total nitrogen storage

土壤氮素是植物生长发育的必需营养元素,也是引发水体富营养化等水资源面源污染和温室效应的主要因素^[1]。大量研究表明,土壤氮储量约为 3.5×10^{14} — 5.5×10^{14} kg,是陆地生态系统中最大的氮库,且极易受到人为活动影响又可以在较短时间尺度内进行调节,其含量的轻微变化就可能使陆地生态系统从氮汇变成到氮源,从而对农学作物和生态环境产生巨大的影响^[2-3]。因此,准确掌握土壤氮含量的动态变化是十分重要的。

早期的氮储量主要通过土壤碳氮比法(C/N)估算,但不同研究者的结论差异很大。McElroy 等^[4]估算出全球土壤有机氮储量约为 70 Pg,而 Burns 等^[5]的研究结果为 550 Pg,两者相差 6 倍多。随着资料的日渐完善和计算机技术的不断进步,基于土壤数据库来估算全氮储量和密度的方法越来越普遍。Batjes^[6]利用 1:500 万土壤图和 4353 个剖面数据估算出全球氮储量为 133—140 Pg。林金石等^[7]利用 1490 个水稻土剖面 and 1:100 万土壤数据库估算出全国水稻土平均氮密度和储量分别为 1.24 kg/m^2 和 569 Tg。肖飞等^[8]利用 1:100 万土壤图、土地利用图和 1411 个土壤普查剖面资料算出重庆市表层土壤 0—20 cm 和 0—100 cm 的全氮密度均值分别为 0.26 kg/m^2 和 0.87 kg/m^2 ,低于全国平均水平。

从目前的研究来看,我国国家或区域尺度有关土壤全氮储量和密度的研究大多是基于第二次土壤普查的静态研究,而不同时期的动态变化研究相对缺乏,这也导致无法根据土壤氮含量的动态变化来制定农田土壤氮的管理措施。据统计,2008 年福建省氮肥施用量达 $1.71 \times 10^6 \text{ t}$,远远超过其他化肥,而过量氮肥易导致氮素淋失引起水体富营养化等环境问题^[9]。为此,本研究以位于福建省不同地区的闽侯县、同安区、武平县和永定县 1982 年 11087 个样点及 2008 年 1616 个样点建立的 1:5 万土壤数据库为基础,利用尺度上推的方法分析 1982—2008 年全省耕地全氮密度和储量的动态变化,旨在为全省氮肥优化管理和水体富营养化防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福建省位于我国东南沿海,属亚热带海洋性季风气候,年均气温 19.7°C ,年均降水量 1504.2 mm ^[10]。全省耕地土壤以水稻土最多,面积达 $1.07 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占耕地总面积的 82.63%;其次是赤红壤和红壤,分别为 $1.08 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $9.00 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占耕地总面积的 8.31% 和 6.95%;其他土壤类型(潮土、黄壤、滨海盐土和紫色土)面积较小^[11]。本研究以位于福建省不同地区的闽侯、同安、武平和永定 4 个县(区)作为典型研究区,其中闽侯县和永定县属中亚、南亚热带过渡气候区,分别隶属福州市和龙岩市;同安区属南亚热带气候区,隶属厦门市;武平县属中亚热带气候区,隶属龙岩市。4 个典型县的地理位置分布见图 1^[15]。

1.2 耕地土壤空间属性数据库的建立

1982 年土壤空间数据库是第二次土壤普查 1:5 万土壤图在 ArcGIS 支持下经数字化形成的,2008 年土壤空间数据库是从 2008 年 1:5 万土地利用现状图中提取的。由于 1982—2008 年耕地发生了较大变化,为保证评价对象的可比性,运用 Arc/GIS 中的“Intersect”命令将 4 个县(区)的土壤图与耕地利用类型图进行空间叠加,以两期图斑的“交集”作为评价底图。土壤数据库的属性数据主要包括样点描述、有机质含量、机械组成、氮、磷、钾等理化性质信息;其中 1982 年样点数据共计 11087 个,来自于第二次土壤普查样品分析的纸质记录

资料,2008 年样点数据共计 1616 个,来自于农业部测土配方施肥项目。两期的土壤采样点分布见图 2 和图 3。

1.3 土壤全氮密度及储量计算

一定剖面深度 D (cm) 的土壤,全氮密度 (STND, kg/m^2) 的计算公式如下^[12]:

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

式中, n 是土层数; $\delta_i\%$ 是第 i 层 >2 mm 砾石含量(体积百分含量), ρ_i 是第 i 层土壤容重(g/cm^3), N_i 是第 i 层土壤全氮浓度(g/kg), T_i 是第 i 层土层厚度 (cm),本研究计算表层土壤(0—15 cm)的全氮密度。在缺少容重数据的情况下,大多学者借助土壤容重影响因素来建立回归模型^[13]。Song 等^[14] 基于第二次土壤普查建立了土壤容重与有机碳含量 (SOC) 的回归模型: $y = 1.377 \times e^{-0.0048 \times \text{SOC}}$ ($R^2 = 0.7870, P < 0.001, n = 4765$),SOC 由 4 个典型县土壤数据库中的有机质含量乘以 0.58 (Bemmelen 系数)转换而来,由于福建省 1982 年和 2008 年的耕地土壤样点大部分容重缺乏,本研究以此作为土壤容重的推算模型。

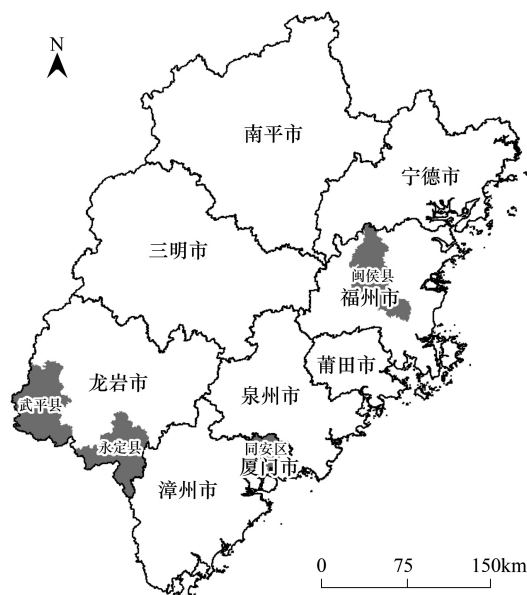


图 1 典型县地理位置图^[15]

Fig.1 Geographical location of the typical counties^[15]

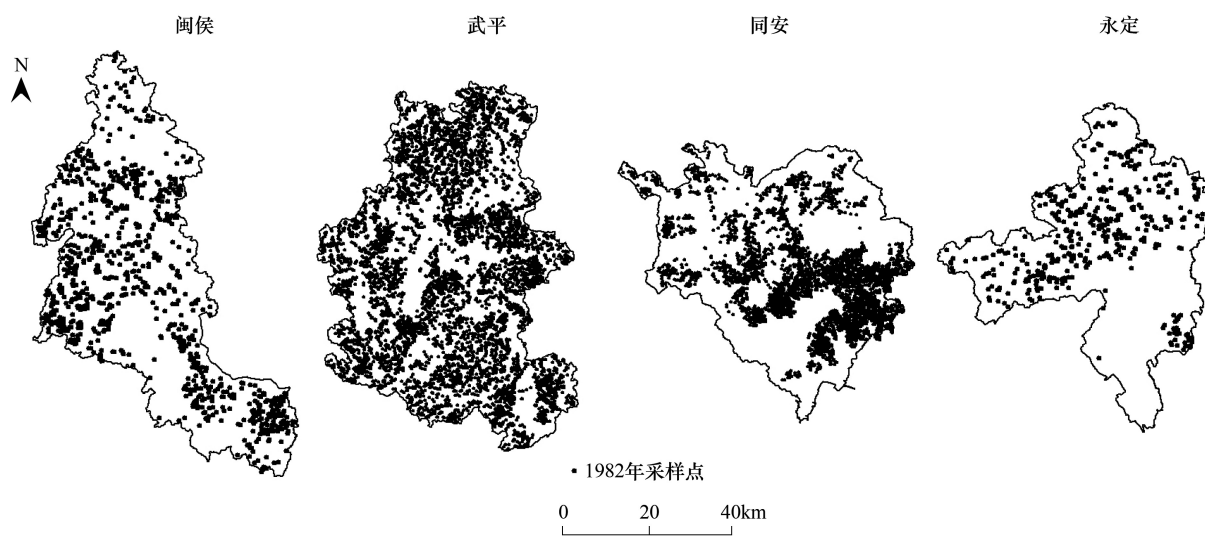


图 2 1982 年土壤采样点分布图

Fig.2 Distribution of sampling points in 1982

全氮储量 (STNS, kg) 计算公式如下^[16]:

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

式中, STND_j 为第 j 个图斑的全氮密度 (kg/m^2); S_j 为第 j 个图斑的面积 (m^2), n 为图斑数。

1.4 基于尺度上推实现四县向全省扩展

基于典型相似性的尺度上推方法,即将小尺度结果直接上推到较大尺度具有原理通俗易懂、计算简单方便的优点,一般应用于数据积累较少的地区^[17-18]。本研究中闽侯、同安、武平和永定 4 个典型县耕地的土壤

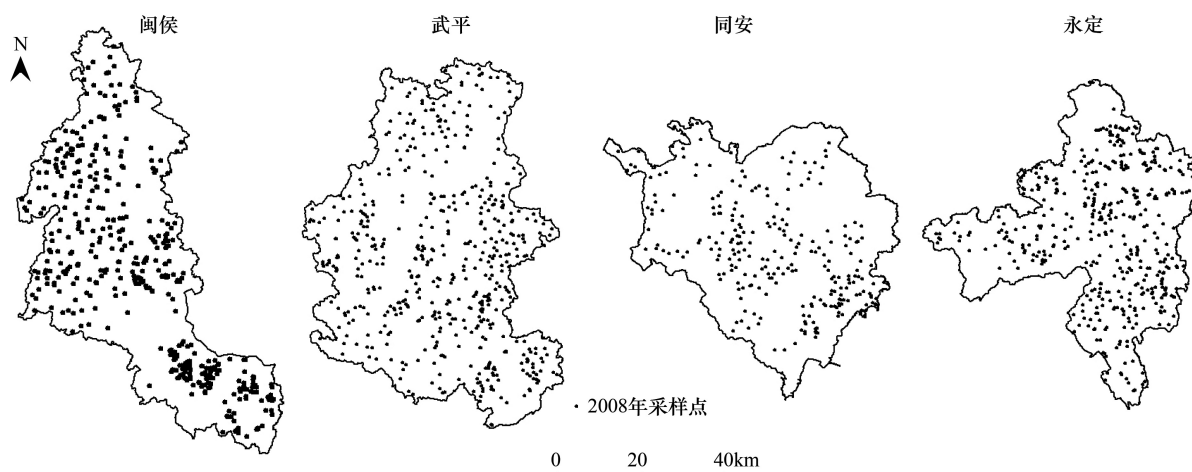


图3 2008年土壤采样点分布图

Fig.3 Distribution of sampling points in 2008

类型(滨海盐土、潮土、赤红壤、红壤、黄壤、水稻土和紫色土)囊括了福建省所有耕地土壤类型;另外,根据1:5万土壤图统计,这7种土壤类型面积分别占4个典型县耕地总面积的0.03%、1.33%、3.27%、5.06%、0.36%、89.91%、0.05%,与全省耕地土壤类型面积分布比例基本一致,这也为本研究使用尺度上推提供了依据。

本研究以闽侯、同安、武平和永定4个典型县面积加权计算的不同土壤类型全氮密度为基础,根据第二次土壤普查《福建土壤》中记录的1982年全省各农业土壤类型面积、比例及2007年福建省国土资源厅公布的《国土资源综合统计分析报告》中的各耕地利用类型面积数据,将4个典型县评价底图每个图斑的实体面积分别按土壤类型和利用类型平差转换成1982年和2008年全省耕地中所代表的土壤面积,从而实现4个县(区)向全省的有效扩展,然后估算出全省两期不同耕地土壤类型全氮密度和储量^[11,19]。

2 结果与分析

2.1 福建省耕地土壤全氮密度总体变化特征

从表1可以看出,福建省不同地区的闽侯、同安、武平和永定4个典型县(区)耕地土壤全氮密度空间变异很大。1982年全氮密度最大值出现在武平县,达 0.62 kg/m^2 ,最小值出现在闽侯县,仅 0.06 kg/m^2 ,二者相差9倍多;2008年全氮密度最大值出现在永定县,达 0.69 kg/m^2 ,最小值出现在闽侯县,为 0.13 kg/m^2 ,二者相差4倍多。从平均含量来看,1982年全氮密度均值最高的是永定县,为 0.33 kg/m^2 ,最低的是同安区,为 0.18 kg/m^2 ,2008年全氮密度分布特征与1982年基本一致,仍以永定县最高,同安区最低,但近30年来氮素富集明显,永定县和闽侯县全氮密度分别上升了 0.18 kg/m^2 和 0.14 kg/m^2 ,上升幅度达54.55%和73.68%。为更好地了解1982—2008年福建省耕地土壤全氮密度的总体变化情况,本研究通过尺度上推的方法将4个典型县向全省进行有效扩展。结果表明,1982年和2008年福建省耕地全氮密度的面积加权平均值分别为 $(0.25 \pm 0.08) \text{ kg/m}^2$ 和 $(0.33 \pm 0.15) \text{ kg/m}^2$,上升了 0.08 kg/m^2 ,全氮储量分别为3.18 Tg和4.41 Tg,增加了1.22 Tg。

2.2 福建省耕地不同土壤类型全氮密度和储量变化特征

2.2.1 不同土类的全氮密度和储量变化

从表2可以看出,1982年全氮密度最高的是水稻土,达 $(0.26 \pm 0.08) \text{ kg/m}^2$,最低的是紫色土,仅 $(0.15 \pm 0.03) \text{ kg/m}^2$,其他土类介于 $0.17—0.21 \text{ kg/m}^2$ 之间;2008年全氮密度最高的仍是水稻土,达 $(0.34 \pm 0.15) \text{ kg/m}^2$,最低的是赤红壤,为 $(0.17 \pm 0.02) \text{ kg/m}^2$,其他土类介于 $0.22—0.33 \text{ kg/m}^2$ 之间。从全氮密度的变化情况来看,近30年来福建省耕地除赤红壤全氮密度稍有下降以外,其他土类均有所升高,且以紫色土上升最多,增幅

达 116.57%,红壤、黄壤和潮土的全氮密度也上升较多,增幅均超过 0.10 kg/m^2 ,水稻土和滨海盐土全氮密度上升较少,增幅分别为 0.08 kg/m^2 和 0.04 kg/m^2 。

表 1 1982 年和 2008 年 4 个典型县土壤全氮密度分布特征

Table 1 Distribution of total nitrogen density in 1982 and 2008 in four typical counties

地区 Region	样点数 Sample number	1982 年				样点数 Sample number	2008 年			
		最小值 Minimum/ (kg/m^2)	最大值 Maximum/ (kg/m^2)	平均值 Mean/ (kg/m^2)	变异系数 Coefficient of variation/%		最小值 Minimum/ (kg/m^2)	最大值 Maximum/ (kg/m^2)	平均值 Mean/ (kg/m^2)	变异系数 Coefficient of variation/%
闽侯县	910	0.06	0.42	0.19 ± 0.05	26.65%	425	0.13	0.56	0.33 ± 0.05	15.16%
同安区	3460	0.07	0.35	0.18 ± 0.04	23.03%	257	0.13	0.26	0.18 ± 0.02	10.82%
武平县	6285	0.17	0.62	0.30 ± 0.06	19.25%	510	0.23	0.43	0.31 ± 0.04	12.78%
永定县	432	0.25	0.42	0.33 ± 0.03	9.69%	424	0.33	0.69	0.51 ± 0.10	19.54%

1982 年和 2008 年全氮储量均以是水稻土最大,分别达 2.75 Tg 和 3.99 Tg, 占全省总储量的 86.22% 和 90.45%, 赤红壤、红壤和潮土的全氮储量也较大,1982 年分别为 0.20、0.19 Tg 和 0.02 Tg,2008 年分别达 0.07、0.27 Tg 和 0.07 Tg,全氮储量较小的是滨海盐土、黄壤和紫色土,1982 年分别为 0.01、0.02、0.0021 Tg,2008 年分别为 0.0014、0.01、0.01 Tg。从储量的动态变化来看,近 30 年来全氮储量上升最多的是水稻土,达 1.24 Tg,潮土、红壤和紫色土全氮储量上升幅度也较大,分别增加了 0.05、0.07 Tg 和 0.0031 Tg,黄壤、赤红壤和滨海盐土全氮储量略有下降,分别减小了 0.01、0.13 Tg 和 0.01 Tg。

2.2.2 不同亚类的全氮密度和储量变化

从表 3 可以看出,1982 年全氮密度高于 0.25 kg/m^2 的亚类有潜育水稻土、渗育水稻土和潴育水稻土,分别达 $(0.29 \pm 0.08) \text{ kg/m}^2$ 、 $(0.26 \pm 0.08) \text{ kg/m}^2$ 和 $(0.26 \pm 0.08) \text{ kg/m}^2$,最低的是酸性紫色土,全氮密度仅 $(0.15 \pm 0.03) \text{ kg/m}^2$,其他亚类介于 $0.17—0.24 \text{ kg/m}^2$ 之间。2008 年全氮密度高于 0.35 kg/m^2 的有潜育水稻土和渗育水稻土,分别达 $(0.36 \pm 0.13) \text{ kg/m}^2$ 和 $(0.36 \pm 0.16) \text{ kg/m}^2$,最低的是赤红壤,全氮密度仅 $(0.17 \pm 0.02) \text{ kg/m}^2$,其他亚类介于 $0.18—0.34 \text{ kg/m}^2$ 之间。近 30 年来福建省耕地土壤全氮密度上升最多的是酸性紫色土、红壤和灰潮土,增幅分别达到 0.18 kg/m^2 、 0.12 kg/m^2 和 0.13 kg/m^2 ,氮素富集比较明显;赤红壤和淹育水稻土氮素含量稍有下降,全氮密度均减少了 0.01 kg/m^2 ,其余土壤全氮密度有所上升,增幅介于 $0.02—0.10 \text{ kg/m}^2$ 之间。

1982 年全氮储量最大的是渗育水稻土和潴育水稻土,分别达 1.13 Tg 和 1.11 Tg,合计占全省总储量的 70.37%,滨海盐土和酸性紫色土全氮储量最小,分别仅 0.01 Tg 和 0.0021 Tg,合计占全省总储量的 3.18%,其余亚类介于 $0.02—0.36 \text{ Tg}$ 。2008 年全氮储量最大的仍是渗育水稻土和潴育水稻土,分别达 1.94 Tg 和 1.45 Tg,合计占全省总储量的 76.56%,酸性紫色土和滨海盐土最小,分别仅 0.01 Tg 和 0.0015 Tg,合计占全省总储量的 2.61%,其他亚类介于 $0.02—0.39 \text{ Tg}$ 。从储量的动态变化来看,近 30 年来全氮储量上升最多的是渗育水稻土和潴育水稻土,分别增加了 0.80 Tg 和 0.34 Tg,增幅达 70.80% 和 30.76%,赤红壤、滨海盐土、黄壤、漂洗水稻土和盐渍水稻土全氮储量有所下降,其中赤红壤下降的最多,达 0.13 Tg,降幅为 66.12%,其他亚类全氮储量增幅介于 $0.0013—0.13 \text{ Tg}$ 之间。

2.2.3 不同土属的全氮密度和储量变化

从表 4 可以看出,1982 年全氮密度较高的是石灰泥田和青泥田,分别达 $(0.33 \pm 0.03) \text{ kg/m}^2$ 和 $(0.31 \pm 0.06) \text{ kg/m}^2$,全氮密度最低的是猪肝土,仅 $(0.15 \pm 0.03) \text{ kg/m}^2$,其余土属介于 $0.16—0.29 \text{ kg/m}^2$ 之间。2008 年全氮密度最高的是石灰泥田,达 $(0.42 \pm 0.01) \text{ kg/m}^2$,较低的是埭田、赤土、红泥砂田和赤砂土,分别为 (0.19 ± 0.01) 、 (0.18 ± 0.03) 、 $(0.18 \pm 0.03) \text{ kg/m}^2$ 和 $(0.17 \pm 0.02) \text{ kg/m}^2$,其余土属介于 $0.20—0.38 \text{ kg/m}^2$ 之间。从全氮密度的动态变化来看,1982—2008 年只有赤土和赤砂土全氮密度稍有下降,分别减小了 0.01 kg/m^2 和 0.0013 kg/m^2 ,其余土属全氮密度均有所上升,其中猪肝土上升最多,增幅达 0.18 kg/m^2 ,耕作灰砂土、耕作砂泥土、红泥土、红泥砂土、黄泥田和黄泥土全氮密度也上升较多,增幅介于 $0.10—0.15 \text{ kg/m}^2$ 之间。

表 2 福建省不同土壤耕地土壤全氮密度和储量分布

Table 2 Distribution of total nitrogen storage in the different soil group

土类 Soil group	1982 年					2008 年					两期比较 Comparison			
	样点数 Sample number	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	面积 Area/ hm ²	密度 Density/ (kg/m ²)	储量/Tg Storage	样点数 Sample number	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	面积 Area/ hm ²	密度 Density/ (kg/m ²)	储量/Tg Storage	面积 Area/ hm ²	密度 Density/ (kg/m ²)	储量/Tg Storage	
滨海盐土 Coastal solonchaks	9	1.32	4148.07	0.17 ±0.01	0.01	5	1.33	708.71	0.20 ±0.00	1.45×10 ⁻³	-3439.36	0.04	-0.01	
湖土 Fluvo-aquic soils	24	1.23	11153.30	0.19 ± 0.06	0.02	4	1.28	21221.24	0.32 ±0.10	0.07	10067.94	0.13	0.05	
赤红壤 Latosolic red soils	550	1.32	107564.29	0.18 ± 0.04	0.20	39	1.32	38188.29	0.17 ±0.02	0.07	-69376.00	-0.01	-0.13	
红壤 Red soils	193	1.20	90022.70	0.21 ±0.08	0.19	49	1.27	80675.64	0.33 ±0.07	0.27	-9347.06	0.12	0.07	
黄壤 Yellow soils	31	1.13	10678.41	0.18 ±0.03	0.02	6	1.28	4263.24	0.28 ±0.05	0.01	-6415.17	0.10	-0.01	
水稻土 Paddy soils	10276	1.23	1070037.04	0.26 ±0.08	2.75	1508	1.28	1186461.45	0.34 ±0.15	3.99	116424.41	0.08	1.24	
紫色土 Purplish soils	4	1.00	1346.57	0.15 ±0.03	2.08×10 ⁻³	5	1.28	1557.11	0.33 ±0.02	0.01	210.54	0.18	0.0031	
总计 Total	11087	1.23	1294950.38	0.25 ±0.08	3.18	1616	1.28	1333075.67	0.33 ±0.15	4.41	38125.29	0.08	1.22	

表 3 福建省不同亚类耕地土壤全氮密度和储量分布

Table 3 Distribution of total nitrogen storage in the different soil subgroup

亚类 Soil subgroup	1982 年					2008 年					两期比较 Comparison			
	样点数 Sample number	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	面积 Area/ hm ²	密度 Density/ (kg/m ²)	储量/Tg Storage	样点数 Sample number	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	面积 Area/ hm ²	密度 Density/ (kg/m ²)	储量/Tg Storage	面积 Area/ hm ²	密度 Density/ (kg/m ²)	储量/Tg Storage	
滨海盐土 Coastal solonchaks	9	1.32	4148.07	0.17 ±0.01	0.01	5	1.33	708.71	0.20 ±0.00	0.0015	-3439.36	0.04	-0.01	
赤红壤 Latosolic red soils	550	1.32	107564.29	0.18 ±0.04	0.20	39	1.32	38188.29	0.17 ±0.02	0.07	-69376.00	-0.01	-0.13	
红壤 Red soils	193	1.20	90022.70	0.21 ±0.08	0.19	49	1.27	80675.64	0.33 ±0.07	0.27	-9347.06	0.12	0.07	
黄壤 Yellow soils	31	1.13	10678.41	0.18 ±0.03	0.02	6	1.28	4263.24	0.28 ±0.05	0.01	-6415.17	0.10	-0.01	
灰潮土 Greyfluvo-aquic soils	24	1.23	11153.30	0.19 ±0.06	0.02	4	1.28	21221.24	0.32 ±0.10	0.07	10067.94	0.13	0.05	
漂洗水稻土 Bleached paddy soils	93	1.23	14751.33	0.24 ±0.06	0.03	14	1.28	10209.36	0.33 ±0.13	0.03	-4541.97	0.10	0.00	
潜育水稻土 Gleyed paddy soils	1122	1.21	123345.93	0.29 ±0.08	0.36	115	1.27	109424.13	0.36 ±0.13	0.39	-13921.80	0.06	0.03	
渗育水稻土 Percogenic paddy soils	4929	1.23	436201.59	0.26 ±0.08	1.13	849	1.27	538362.82	0.36 ±0.16	1.94	102161.23	0.10	0.80	
酸性紫色土 Acid purplish soils	4	1.00	1346.57	0.15 ±0.03	0.0021	5	1.28	1557.11	0.33 ±0.02	0.01	210.54	0.18	0.0031	
淹育水稻土 Submergenic paddy soils	539	1.31	11766.47	0.19 ±0.04	0.02	36	1.32	85784.82	0.18 ±0.04	0.16	74018.35	-0.01	0.13	
盐渍水稻土 Salinized paddy soils	215	1.31	50730.93	0.17 ±0.03	0.09	13	1.32	11866.18	0.19 ±0.01	0.02	-38864.75	0.02	-0.06	
潜育水稻土 Hydromorphic paddy soils	3378	1.22	433240.79	0.26 ±0.08	1.11	491	1.27	430814.14	0.34 ±0.14	1.45	-2426.65	0.08	0.34	
总计 Total	11087	1.23	1294950.38	0.25 ±0.08	3.18	1616	1.28	1333075.67	0.33 ±0.15	4.41	38125.29	0.08	1.22	

表 4 福建省不同土壤全氮密度和储量分布

Table 4 Distribution of total nitrogen storage in the different soil genus

土属 Soil genus	1982 年 Year 1982					2008 年 Year 2008					两期比较 Comparison		
	样点数 Sample number	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	面积 Area/ hm ²	密度 Density/ (kg/m ²)	储量/Tg Storage	样点数 Sample number	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	面积 Area/ hm ²	密度 Density/ (kg/m ²)	储量/Tg Storage	面积 Area/ hm ²	密度 Density/ (kg/m ²)	储量/Tg Storage
白蟾泥田 Whitish mud field	93	1.23	14751.33	0.24 ± 0.06	0.03	14	1.28	10209.36	0.33 ± 0.13	0.03	-4541.97	0.10	-0.001
潮砂田 Fluvo-aquic sandy field	823	1.24	52106.33	0.23 ± 0.07	0.12	105	1.29	58025.51	0.29 ± 0.11	0.17	5919.18	0.06	0.05
赤砂土 Latosolic sandy soil	515	1.32	74834.11	0.18 ± 0.04	0.13	34	1.32	34967.54	0.17 ± 0.02	0.06	-39866.57	0.0024	-0.07
赤土 Latosolic soil	35	1.31	32730.18	0.20 ± 0.04	0.06	5	1.32	3220.75	0.18 ± 0.03	0.01	-29509.43	-0.01	-0.06
埭田 Salt field	215	1.31	50730.93	0.17 ± 0.03	0.09	13	1.32	11866.18	0.19 ± 0.01	0.02	-38864.75	0.02	-0.06
耕作灰砂土 Cultivated grey sandy soil	19	1.23	9645.53	0.19 ± 0.06	0.02	1	1.28	17404.32	0.32 ± 0.10	0.06	7758.79	0.14	0.04
耕作砂泥土 Cultivated sandy mud soil	5	1.22	1507.77	0.19 ± 0.05	0.0029	3	1.28	3816.92	0.31 ± 0.05	0.01	2309.15	0.12	0.01
红泥砂田 Red sandy mud field	525	1.32	7903.20	0.18 ± 0.04	0.01	34	1.32	79026.37	0.18 ± 0.03	0.14	71123.17	0.0013	0.13
红泥砂土 Red sandy mud soil	33	1.12	17042.93	0.16 ± 0.08	0.03	11	1.28	18956.54	0.30 ± 0.07	0.06	1913.61	0.14	0.03
红泥土 Red mud soil	160	1.22	72979.77	0.23 ± 0.08	0.17	38	1.27	61719.09	0.34 ± 0.07	0.21	-11260.68	0.11	0.05
红土田 Lateritic field	14	1.29	3863.27	0.23 ± 0.05	0.01	2	1.30	6758.45	0.26 ± 0.11	0.02	2895.18	0.03	0.01
黄泥砂田 Yellow sandy mud field	1608	1.27	92447.13	0.24 ± 0.07	0.22	170	1.29	112384.43	0.29 ± 0.13	0.33	19937.30	0.05	0.10
黄泥砂土 Yellow sandy mud soil	10	1.28	904.12	0.18 ± 0.01	0.0017	2	1.31	610.90	0.22 ± 0.01	0.0013	-293.22	0.03	-0.0004
黄泥田 Yellow mud field	3171	1.22	324865.13	0.26 ± 0.08	0.86	660	1.26	413495.63	0.38 ± 0.15	1.57	88630.50	0.12	0.71
黄泥土 Yellow mud soil	21	1.12	9774.29	0.18 ± 0.03	0.02	4	1.28	3652.33	0.29 ± 0.06	0.01	-6121.96	0.11	-0.01
灰泥田 Grey mud field	1773	1.22	331399.33	0.26 ± 0.08	0.86	313	1.27	352855.74	0.35 ± 0.14	1.22	21456.41	0.09	0.36
灰砂泥田 Grey sandy mud field	656	1.24	27669.73	0.30 ± 0.07	0.08	51	1.28	871.28	0.32 ± 0.06	0.0028	-26798.45	0.02	-0.08
冷烂田 Cold rotten field	744	1.20	91114.13	0.29 ± 0.08	0.26	76	1.27	76830.63	0.35 ± 0.13	0.27	-14283.50	0.07	0.01
青泥田 Green mud field	378	1.23	32231.80	0.31 ± 0.06	0.10	39	1.27	32593.49	0.36 ± 0.12	0.12	361.69	0.05	0.02
砂埭土 Salt sandy field	9	1.32	4148.07	0.17 ± 0.01	0.01	5	1.33	708.71	0.20 ± 0.00	0.0015	-3439.36	0.04	-0.01
砂质田 Sandy mud field	57	1.29	6922.60	0.22 ± 0.06	0.01	2	1.30	8161.24	0.25 ± 0.10	0.02	1238.64	0.04	0.01
石灰泥田 Calcic mud field	2	1.27	196.93	0.33 ± 0.03	0.0007	1	1.23	253.43	0.42 ± 0.01	0.0011	56.50	0.09	0.0004
乌泥田 Black mud field	124	1.13	21868.47	0.19 ± 0.06	0.04	21	1.28	18808.17	0.29 ± 0.04	0.05	-3060.30	0.10	0.01
猪肝土 Liver soil	4	1.00	1346.57	0.15 ± 0.03	0.0021	5	1.28	1557.11	0.33 ± 0.02	0.01	210.54	0.18	0.0031
紫泥田 Purplish mud field	93	1.24	11966.73	0.28 ± 0.04	0.03	7	1.27	4321.52	0.37 ± 0.07	0.02	-7645.21	0.09	-0.02
总计 Total	11087	1.23	1294950.38	0.25 ± 0.08	3.18	1616	1.28	1333075.67	0.33 ± 0.15	4.41	38125.29	0.08	1.22

1982 年全氮储量最大的是灰泥田和黄泥田, 合计达 1.72 Tg, 占全省总储量的 54.11%, 最小的是石灰泥田, 仅 0.0007 Tg, 其它土属介于 0.0017—0.26 Tg 之间。2008 年全氮储量最大的是灰泥田和黄泥田, 合计达 2.79 Tg, 占全省总储量的 63.18%; 石灰泥田最小, 仅 0.0011 Tg; 其它土属介于 0.0013—0.32 Tg 之间。从储量的动态变化来看, 1982—2008 年全氮储量上升最多的是黄泥田和灰泥田, 分别增加了 0.71 Tg 和 0.36 Tg, 红泥砂田和黄泥砂田也上升较多, 分别增加了 0.13 Tg 和 0.10 Tg; 黄泥砂土、白鳞泥田、砂埭土、黄泥土、紫泥田、赤土、埭田、赤砂土和灰砂泥田全氮储量有所下降, 损失量介于 0.0004—0.08 Tg 之间。

3 讨论

从福建省不同典型县耕地土壤全氮密度均值来看(表 1), 近 20 多年来闽侯、同安、武平和永定 4 个县 83.56% 的耕地土壤全氮密度有所上升, 氮素富集明显, 这一结果与很多研究者的“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”观点相一致^[20-21]。福建省氮素富集的主要驱动力是氮肥的大量施用。1982 年闽侯、同安、武平和永定 4 个典型县的化学氮肥施用量分别仅为 137.57、86.68、111.10 kg/hm² 和 103.48 kg/hm², 而 2008 年分别达到 341.14、525.76、206.37 kg/hm² 和 252.06 kg/hm², 增幅达 147.97%、506.94%、85.76% 和 143.59% (图 4)。从图 4 也可以看出, 4 个典型县近 30 年化学氮肥投入量总体呈上升趋势, 这与全氮密度变化的规律基本吻合(同安区除外)。1982—2008 年同安区氮肥大量施用并未引起全氮密度明显上升是因为该地区年均气温普遍高于闽侯、武平和永定, 而降水量却整体低于这 3 个县(图 4), 高温少雨的气候条件加快了土壤有机氮的分解, 导致氮素难以积累^[22]。

从 4 个典型县尺度上推的福建省耕地全氮密度来看(表 2—表 4), 水稻土高于其他土类, 这主要与该土类受人为活动影响较大有关。一般情况下, 水稻土多分布于村镇附近, 氮肥和有机肥施用较多; 此外, 该土类长期处于淹水还原状态, 通气性不良导致土壤有机氮(有机态氮占土壤全氮总量的 95% 以上)的矿化作用较弱而易于积累。紫色土土类是由紫色砂砾岩风化发育而成, 土壤砂粒多, 黏粒少, 氮素难以持续积累, 导致全氮密度较低。福建省赤红壤主要分布在气温较高而降雨量较少的漳州、泉州和厦门等亚热带气候区, 根据第二次土壤普查结果, 这 3 个地级市的赤红壤面积占全省赤红壤总面积的 84.53%^[11]。本研究中 4 个典型县的赤红壤也集中分布在属于亚热带气候区的厦门市同安区, 该区 1982—2008 年年均气温为 20.68 °C, 高于闽侯的 20.20 °C、武平的 20.22 °C 和永定 20.21 °C, 而年均降水量(1341.05 mm)却低于这 3 县(闽侯为 1374.86 mm、武平为 1649.29 mm 和永定为 1668.47 mm)(图 4), 高温少雨的气候条件不利于氮素的积累, 所以全氮密度较低^[22]。在福建省主要耕地类型的水稻土亚类中, 潜育水稻土通常分布于地下水位较高的低洼地区, 土体长期处于水饱和状态导致氮素分解缓慢而全氮密度较高^[23]。潜育水稻土和潴育水稻土全氮密度也较高, 有研究表明^[24-25], 土壤表层中约有 80%—97% 的氮存在于有机质中, 1982 年这两类土壤的有机碳密度分别达到 3.02 kg/m² 和 2.89 kg/m², 2008 年达到 3.24 kg/m² 和 3.17 kg/m², 均明显高于全省平均水平, 故较高的有机碳含量也导致了全氮密度较大(图 5)。从土属来看, 石灰泥田主要分布在石灰岩盆地, 2008 年黏粒含量达 17.56%, 质地较为粘重, 氮素分解速度缓慢, 所以全氮密度高于其他土属^[26]。埭田、赤土、红泥砂田和赤砂土的砂粒含量较高, 分别达 63.95%、66.71%、68.49% 和 68.99%, 氮素分解速度较快, 所以全氮密度较低^[27]。

从近 20 多年来福建省不同土壤类型耕地的全氮富集程度来看(表 2—表 4), 紫色土土类、酸性紫色土亚类和猪肝土土属全氮密度上升最多, 而赤红壤土类、淹育水稻土亚类和赤土土属全氮密度下降最多, 这可能与有机碳密度变化有关。1982—2008 年紫色土、酸性紫色土和猪肝土的有机碳密度均上升了 0.63 kg/m², 明显高于全省平均增幅(0.24 kg/m²), 赤红壤、淹育水稻土和赤土有机碳密度降幅较大, 达到 0.11、0.33 kg/m² 和 0.11 kg/m², 这也与陈安磊等认为的“土壤全氮年际变化与土壤有机碳含量的年际变化趋势呈正相关关系”的规律相一致^[24, 28](图 5)。总体来看, 福建省耕地初始全氮含量较低的土壤类型氮素富集相对明显, 这可能与贫瘠土壤区往往需要投入更多的肥料和更加精细的管理才能保证粮食产量有关。

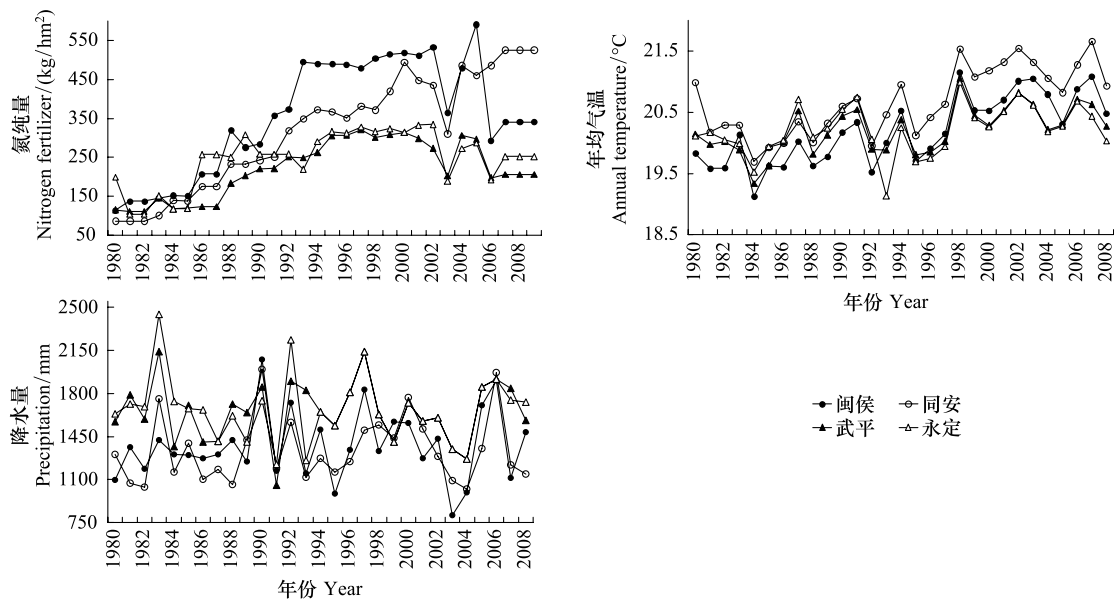


图4 1982—2008年4个典型县化学氮肥施用量、年均气温变化和降水量

Fig.4 Application rate of precipitation, chemical nitrogen fertilizer and changes of annual precipitation in four typical counties from 1982 to 2008

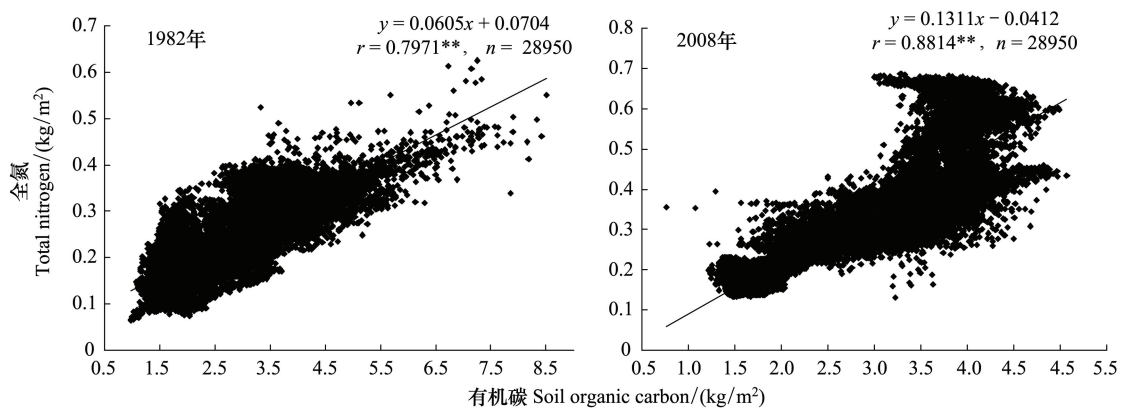


图5 1982和2008年4个典型县各图斑有机碳密度与全氮密度线性回归分析

Fig.5 Linear regression between organic carbon density and total nitrogen density in four typical counties in 1982 and 2008

从4个典型县尺度上推的福建省耕地全氮储量来看(表2—表4),全省耕地土壤全氮储量的高低由密度和面积决定,但主要受面积大小的控制,且在0.01水平(双侧)上与其成显著相关(图6)。1982年水稻土土类、渗育水稻土亚类、潴育水稻土亚类、黄泥田土属和灰泥田土属面积分别为 1.07×10^6 、 4.36×10^5 、 4.33×10^5 、 3.25×10^5 hm^2 和 3.31×10^5 hm^2 ,分别占全省耕地总面积的82.63%、33.68%、33.46%、25.09%和25.59%,且全氮密度均高于全省平均水平,所以全氮储量明显高于其他土壤类型;而滨海盐土、黄壤和紫色土面积较小,合计仅占耕地总面积的1.25%,所以全氮储量普遍较小;石灰泥田虽然全氮密度最高,达 0.33 kg/m^2 ,但分布面积最小,仅 196.93 hm^2 ,导致全氮储量最低。2008年各土壤类型的全氮储量分布规律与1982年基本一致。水稻土1982—2008年的全氮密度和面积分别增加了 0.08 kg/m^2 和 $1.16 \times 10^5 \text{ hm}^2$,所以储量上升最多。潮土和紫色土近20多年来面积和全氮密度分别增加了 10067.94 hm^2 和 0.13 kg/m^2 、 210.54 hm^2 和 0.18 kg/m^2 ,导致这2个土类的全氮储量均有所增加。红壤近20多年来尽管面积减小了 9347.06 hm^2 ,但全氮密度上升 0.12 kg/m^2 ,导致全氮储量有所增加。赤红壤面积和全氮密度近20多年来分别减少了 69376.00 hm^2 和 0.13 kg/m^2 ,所以全氮储量下降较多。黄壤和滨海盐土近20多年来面积减少了 6415.17 hm^2 和 3439.36 hm^2 ,导致全氮

储量有所下降。

特别注意的是,近 20 多年来黄泥田、灰泥田、红泥砂田、黄泥砂田、耕作灰砂土和潮砂田土属的面积增加幅度均超过 5000 hm^2 。黄泥田和灰泥田面积增加较多是因为这两个土属是福建省耕地分布面积最大且相对肥沃的土壤类型,近些年随着“沃土工程”等农业措施的实施,其他部分土类逐渐演变成这两个土属所致。红泥砂田、黄泥砂田、耕作灰砂土和潮砂田近 20 多年来面积增加较多可能是由于局部平原地区的农用地被转化为建设用地,基于“占补平衡”的需求很多分布在丘陵坡地和河流两岸(或山前平原)荒地开垦为这些土属,导致其面积增加较多。

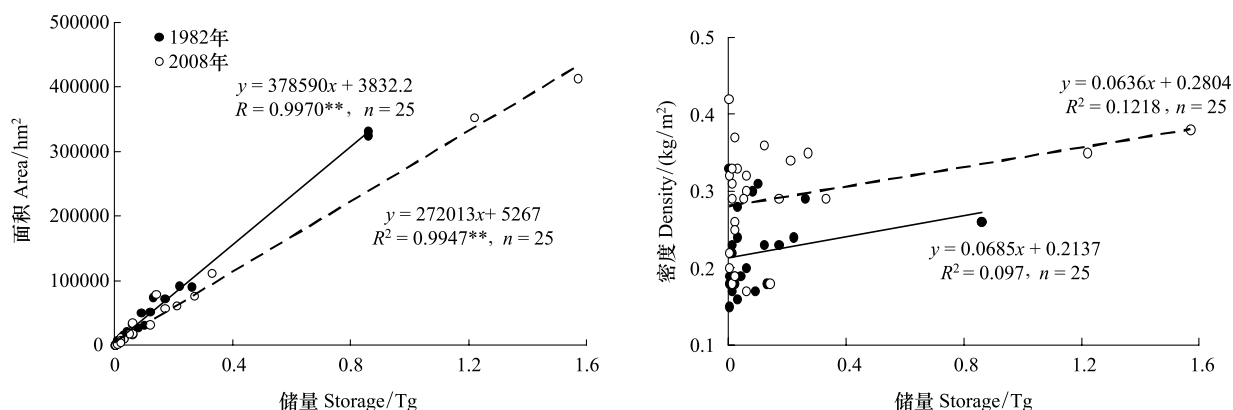


图 6 1982 和 2008 年 4 个典型县不同土属全氮储量与面积、密度线性回归分析

Fig.6 Linear regression between total nitrogen storage and area, total nitrogen density based on soil genus in four typical counties in 1982 and 2008

4 结论

(1) 近 30 年福建省耕地土壤氮素富集明显,全氮密度平均上升了 0.08 kg/m^2 ,但不同土壤类型的富集程度差异较大,其中紫色土土类、酸性紫色土亚类和猪肝土土属氮素富集最明显,全氮密度均上升了 0.18 kg/m^2 ;赤红壤土类、淹育水稻土亚类和赤土土属氮素损失较多,全氮密度均下降了 0.10 kg/m^2 。

(2) 近 30 年福建省耕地土壤全氮储量动态变化由密度和面积决定,但主要受面积控制,全氮储量总体增加了 1.22 Tg,其中水稻土土类、淹育水稻土亚类和黄泥田土属全氮储量增加最多,分别达 1.24、0.80 Tg 和 0.71 Tg;赤红壤土类、赤红壤亚类和灰砂泥田土属全氮储量下降最多,分别达 0.13、0.13 Tg 和 0.08 Tg。

因此,今后的农田氮素管理一方面要重点考虑面积较大的土壤类型,另一方面应根据不同土壤类型氮素富集程度指导农民科学施肥,以提高氮肥利用率并防止多余氮素流失而导致水体富营养化。

尽管本研究基于大样本采样数据和精度较高的 1:5 万数据库探讨了福建省不同耕地土壤类型氮素富集程度差异,但在影响土壤全氮密度变化的因素方面的分析还不够深入,基于地统计学的半方差函数模型和地理信息系统软件的空间分析扩展模块,并运用统计软件(如,SPSS)从人为活动影响(施肥、土地利用变化、农田管理措施)和自然环境条件(气温、降水量、海拔、地形)两个方面定量分析 1982—2008 年福建省耕地土壤全氮含量时空变异驱动力是今后研究的主要内容。

参考文献 (References):

- [1] Post W M, Pastor J, Zinke P J, Stangenberger A G. Global patterns of soil nitrogen storage. *Nature*, 1985, 317(6038): 613-616.
- [2] Wright A L, Hons F M. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 141-147.
- [3] Parfitt R L, Scott N A, Ross D J, Salt G J, Tate K R. 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.

- [4] McElroy M. Global Change: A Biogeochemical Perspective. US: Jet Propulsion Laboratory Publication, 1983: 83-51.
- [5] Burns R C, Hardy R W F. Nitrogen Fixation in Bacteria and Higher Plants. New York: Springer-Verlag, 1975.
- [6] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [7] 林金石, 史学正, 于东升, 王洪杰, 赵永存, 孙维侠. 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): 586-593.
- [8] 肖飞, 何霄嘉. 重庆市土壤氮库估算及其分布特征研究. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(4): 535-542.
- [9] 福建省统计局. 福建统计年鉴-2010. 北京: 中国统计出版社, 2010.
- [10] 邢世和. 福建耕地资源. 厦门: 厦门大学出版社, 2003: 1-1.
- [11] 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.
- [12] 张黎明, 林金石, 史学正, 于东升. 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.
- [13] Tranter G, Minasny B, Mcbratney A B, Murphy B, McKenzie N J, Grundy M, Brough D. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density. *Soil Use and Management*, 2007, 23(4): 437-443.
- [14] Song G H, Li L Q, Pan G X, Zhang Q. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation. *Biogeochemistry*, 2005, 74(1): 47-62.
- [15] 龙军, 张黎明, 沈金泉, 周碧青, 毛艳玲, 邱龙霞, 邢世和. 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.
- [16] 林金石. 中国水稻土氮磷空间分异及其影响因素研究 [D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2008.
- [17] Lal R. Offsetting China's CO₂ emissions by soil carbon sequestration. *Climatic Change*, 2004, 65(3): 263-275.
- [18] Batjes N H. Soil carbon stocks of Jordan and projected changes upon improved management of croplands. *Geoderma*, 2006, 132(3/4): 361-371.
- [19] 福建省国土资源厅. 福建省 2007 年国土资源综合统计分析报告. (2007-12-31) [2013-06-24]. <http://www.doc88.com/p-74787819588.html>.
- [20] 王加恩, 郑洁, 康占军, 胡艳华, 潘卫丰, 沈晓春, 来红. 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.
- [21] 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.
- [22] 王淑平, 周广胜, 高素华, 郭建平. 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.
- [23] 王果. 土壤学. 北京: 高等教育出版社, 2009: 242-248.
- [24] 龙军, 张黎明, 毛艳玲, 邢世和. 福建省不同耕地土壤和土地利用类型对“碳源/汇”的贡献差异研究. *土壤学报*, 2013, 50(4): 664-674.
- [25] 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.
- [26] 王玉印. 区域耕地耕层土壤氮磷储量及其价值时空变化研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [27] 张启新, 李洁. 土壤有机质与全氮相关关系分析. *硅谷*, 2010, (16): 122-162.
- [28] 陈安磊, 谢小立, 文苑玉, 王卫, 童成立. 长期施肥对红壤稻田氮储量的影响. *生态学报*, 2010, 30(18): 5059-5065.