

DOI: 10.11766/trxb202008100447

陈中星, 张楠, 黄凯, 邱龙霞, 陈瀚阅, 邢世和, 沈金泉, 张黎明. 基于 1:5 万数据库的福建省土壤全氮密度及储量估算研究[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 688–698.

CHEN Zhongxing, ZHANG Nan, HUANG Kai, QIU Longxia, CHEN Hanyue, XING Shihe, SHEN Jinquan, ZHANG Liming. Estimation of Soil Total Nitrogen Density and Storage in Fujian Province by Using 1:50 000 Soil Database[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3): 688–698.

基于 1:5 万数据库的福建省土壤全氮密度及储量估算研究*

陈中星^{1, 2}, 张楠^{1, 3}, 黄凯^{1, 2}, 邱龙霞^{1, 2}, 陈瀚阅^{1, 2}, 邢世和^{1, 2}, 沈金泉⁴, 张黎明^{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; 3. 平顶山市种子管理站, 福建平顶山 467000; 4. 福建省农田建设与土壤肥料技术总站, 福州 350002)

摘要: 土壤全氮对于全球温室效应和水体富营养化具有重要的调控作用。基于福建省第二次土壤普查 3 082 个剖面数据和最新建立的 1:5 万大比例尺矢量土壤图, 对全省土壤全氮储量进行了估算。结果表明: 福建省土壤总面积为 $12.08 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 表层 (0~20 cm) 和剖面 (0~100 cm) 土壤的全氮密度分别为 $0.35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 储量为 42.06 Tg 和 116.83 Tg。全省土壤全氮密度整体呈自北向南逐渐递减的趋势, 且沿海低而内陆高。从不同土壤类型来看, 山地草甸土的表层和剖面全氮密度最高, 分别为 $0.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $2.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 而风沙土的表层和剖面全氮密度最低, 分别为 $0.11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从不同行政区来看, 南平市和龙岩市的表层土壤全氮密度最高, 分别为 $0.40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.39 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 而南平市和三明市的剖面土壤全氮密度最高, 分别为 $1.19 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1.11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。总体而言, 福建省土壤全氮密度和储量空间分布差异很大, 今后可依据不同行政区和土壤类型的全氮分布制定合理的施肥管理措施。

关键词: 福建省; 全氮密度; 全氮储量; 1:5 万土壤数据库

中图分类号: S15 **文献标志码:** A

Estimation of Soil Total Nitrogen Density and Storage in Fujian Province by Using 1:50 000 Soil Database

CHEN Zhongxing^{1, 2}, ZHANG Nan^{1, 3}, HUANG Kai^{1, 2}, QIU Longxia^{1, 2}, CHEN Hanyue^{1, 2}, XING Shihe^{1, 2}, SHEN Jinquan⁴, ZHANG Liming^{1, 2†}

(1. College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. University Key Lab of Soil

* 国家自然科学基金项目 (41971050)、福建省自然科学基金项目 (2019J01660) 和福建农林大学国际科技合作与交流项目 (KXGH17017) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41971050), the National Science Foundation of Fujian Province, China (No. 2019J01660), and the Project of International Cooperation and Exchange of Fujian Agriculture and Forestry University (No. KXGH17017)

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

作者简介: 陈中星 (1992—), 男, 安徽阜阳人, 博士研究生, 主要从事土壤碳氮循环与 GIS 应用研究。E-mail: miruo1203@163.com

收稿日期: 2020-08-10; 收到修改稿日期: 2020-12-15; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-03-10

Ecosystem Health and Regulation in Fujian, Fuzhou 350002, China; 3. Pingdingshan Seed Management Station, Pingdingshan, Fujian 467000, China; 4. Fujian Crop Land Construction and Soil and Fertilizer Station, Fuzhou 350002, China)

Abstract: 【Objective】 Soil total nitrogen (STN) plays an important role in terrestrial ecosystems, and hence is of great significance to mitigating the greenhouse effect and water eutrophication. Any slight changes in the STN pool will pose an important impact on global climate. It is, therefore, essential to make a precise estimation of STN density and storage in the effort to optimize nitrogen fertilizer management. However, so far most of the studies on estimation of STN have been done based on medium or small scale soil maps, and few have been reported to be based on provincial level detail soil databases. Consequently this study on STN estimation based on a provincial level soil database may help implement agricultural sustainable development with data support, and design agricultural management strategies. 【Method】 In this study, based on the most detailed soil database of Fujian Province, consisting of 3 082 sampling profiles and a 1: 50 000 soil map, analyses were carried out of spatial distributions of STN storage and density in the surface soil layer (0–20 cm) and soil profile (0–100 cm), in the bulk soil of the main types of soils of the Province as well as in the soils of different administrative divisions of the Province. The pedological knowledge based method, i.e. PKB, was used to correlate soil attributes with soil spatial data. So the 1: 50 000 scale soil map consisted of 247 969 soil patches and 3 082 soil profiles. 【Result】 Results show that Fujian province has a total of 12.08×10^6 hm^2 of soils. The STN density in the surface soil layer and soil profile of the province was averaged to be $0.35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ and $0.97 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively, while the STN storage was 42.06 Tg and 116.83 Tg, respectively. Analysis of the soils by prefecture shows that Nanping City was the highest, being $0.40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ and Longyan followed, being $0.39 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ in STN density in surface soil, whereas Nanping City was the highest, being $1.19 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ in and Sanming City followed, being $1.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ in STN density in profile soil. Zhangzhou City was the lowest, being $0.24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ and Xiamen City the next, being $0.27 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ in STN density in surface soil, whereas Zhangzhou City was the lowest, being $0.67 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ and Putian City the next, being $0.71 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ in STN density in profile soil. In terms of soil type, Mountain meadow soil was the highest, being $0.85 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ and Skeletal soil followed, being $0.57 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ in STN density in surface soil, whereas Mountain meadow soil was the highest, being $2.09 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ and Yellow soil followed, being $1.27 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ in STN in profile soil. Aeolian soil was the lowest, being by $0.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ and Latosolic red earth the next, being $0.17 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ in STN density in surface soil, whereas Aeolian soil was the lowest, being $0.27 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ and Latosolic red earth the next, being $0.53 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ in STN in profile soil. 【Conclusion】 Consequently, the STN density in the surface and profile soil of Fujian demonstrates a declining trend from north to south, and from inland to coastal area, too. To sum up, the STN in Fujian Province varies significantly in spatial distribution. The findings in this study may be helpful in designing agricultural management strategies and controlling non-point source N pollution in the province.

Key words: Fujian Province; Total nitrogen density; Total nitrogen storage; 1: 50 000 Soil database

氮 (N) 在陆地生态系统元素循环中起着重要作用, 它一方面是土壤肥力和土壤质量高低的决定因子, 另一方面也是大气污染和水体富营养化的主要来源。据报道空气中的氧化亚氮 (N_2O) 浓度以 0.2%~0.3% 的速率逐年递增, 目前已达到 $311 \times 10^{-6} \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, 而我国农业 N_2O 排放量约占全球排放量的 1%~1.5%^[1-3]。此外, 土壤全氮作为一种关键营养元素, 可以直接影响作物的养分循环^[4-6]。因此, 了解全氮在土壤中的含量及其空间分布对于减缓全球气候变化和农业可持续发展具有重要意义。

近年来国内外学者对土壤全氮进行了大量研究, 且涉及不同空间尺度。如 Soderlund 和 Svensson^[7]发

现陆地土壤中氮素主要来源于生物固氮和降雨, 并估算出全球土壤的氮储量为 3.5×10^{14} ~ $5.5 \times 10^{14} \text{ kg}$ 。Post 等^[8]基于 Holdridge 生命地带的 3 100 个土壤剖面数据, 估算出全球 1 m 全氮储量为 95 Pg (1 Pg = $1 \times 10^{15} \text{ g}$)。Batjes^[9]基于 4 353 个土壤剖面数据, 采用 FAO-UNESCO 土壤图估算出全球 1 m 全氮储量约为 133~140 Pg。国内研究大多以全国第二次土壤普查资料为基础, 并利用不同制图尺度土壤图估算出各个区域的全氮储量。Tian 等^[10]基于中国 2 480 个土壤剖面数据和 1: 100 万土壤图, 估算出我国全氮储量约为 8.29 Pg。Yang 等^[11]利用中国 2 473 个土壤剖面数据和 1: 400 万土壤图, 估算出我国 1 m 全

氮储量约为 7.4 Pg。林金石等^[12]基于 1:100 万土壤数据库和 1490 个水稻土剖面数据,估算出我国水稻土平均氮密度为 $12.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 储量为 569 Tg ($1 \text{ Tg} = 1 \times 10^{12} \text{ g}$)。李爽等^[13]根据吉林省 2010 年 6 169 个耕地表层土壤数据和 2003 年全省土壤图(包含 16 234 个图斑),估算出全省耕地表层土壤氮密度平均值为 $0.473 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 氮储量为 $2.90213 \times 10^6 \text{ kg}$ 。门明新等^[14]利用河北省 1:50 万土壤与地形数据库,得出全省土壤平均氮密度为 $1.07 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。肖飞和何霄嘉^[15]利用重庆市 1:100 万土壤图和 1411 个土壤剖面数据,得出全市 0~20 cm 与 0~100 cm 土层深度的全氮密度平均值分别为 $0.26 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.87 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

以上研究也可以看出,目前我国国家和省级尺度的土壤全氮储量研究大多基于 1:400 万、1:100 万和 1:50 万等中小比例尺土壤数据库,而在大区域上采用高精度大比例尺土壤数据库的研究较少。有学者指出由于不同制图比例尺数据库对土壤类型的概化程度不同,导致土壤数据估算过程中的误差会随比例尺减小而呈增大趋势^[16-17]。因此,在省级大区域尺度全氮储量估算中有必要采用高精度的土壤数据库,以提高估算的准确度。福建省作为我国典型的亚热带地区,人多地少,耕地面积小而利用强度大^[18]。据统计,福建省 2018 年氮肥施用量高达 $4.194 \times 10^5 \text{ t}$,氮肥的大量施用会导致土壤中氮素的淋失,从而引起水体富营养化等环境问题^[19];此外,该省的森林覆盖率位居全国第一,有研究表明森林系统中土壤氮储量约占整个生态系统的 90%~95%,明确全省土壤全氮储量对于准确评价我国陆地生态系统氮素循环有重要的意义。此外,尽管近些年我国在耕地土壤上进行了农业农村部测土配方施肥、生态环境部全国土壤污染状况调查和自然资源部全国耕地质量等级调查评价等重大国策,但从覆盖福建全省的土壤资源调查来看,1982 年第二次土壤普查的数据仍是至今为止最为全面和系统的资料,尤其该省“八山一水一分田”、耕地面积很少的情况下,这些资料是明确全省土壤背景值和制定管理措施的重要依据^[20-21]。基于此,本研究利用福建省第二次土壤普查 3 082 个剖面数据和最新建立的 1:5 万大比例尺矢量土壤图,估算出全省土壤表层和剖面的全氮密度及储量,并揭示它们的空间分布规律及其内在影响因素,一方面为我国亚热带地区土壤氮储量的准确评估提供基

准值,另一方面也为肥料减量化等重大国家政策的实施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福建省地处我国东南沿海,位于 $23^{\circ}33' \sim 28^{\circ}20' \text{N}$, $115^{\circ}50' \sim 120^{\circ}40' \text{E}$ 之间,属于暖热湿润的亚热带海洋性季风气候。根据 1973—2003 年共 31 年的全省 66 个气象站点统计分析表明,福建省年平均气温在 14.6 ~ 21.3 之间,年均降水量介于 1 037~2 051 mm 之间,气候温暖,热量资源丰富,雨量丰沛。全省土壤类型以红壤面积最大,达 $7.66 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全省土壤总面积的 63.41%;水稻土则是全省分布最广的耕作土壤,面积仅次于红壤,总面积为 $1.07 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全省土壤总面积的 8.71%;其他土壤类型(滨海盐土、潮土、风沙土、山地草甸土、石灰土、新积土等)的面积相对较小^[22]。

1.2 数据来源

本研究中所使用的福建省 1:5 万土壤数据库由空间数据库和属性数据库两部分构成。空间数据库是由全省各县(市、区)1:5 万土壤纸质图经扫描、配准和数字矢量化等过程建立,该数据库中 共有 12 个土类、23 个亚类和 83 个土属,划分图斑 247 969 个。属性数据库中的土壤样点信息主要来自于福建省第二次土壤普查中各县(市、区)调查样点资料,共计 3 082 个土壤剖面点(图 1)。属性数据库中包括各种土壤理化性质信息,如土壤类型名称、土层深度、剖面地点、有机质、全氮、全磷和全钾含量等字段。年均气温和降雨量数据主要来自福建省 66 个中国气象局站点记录的 1973—2003 年共 31 年气候数据资料,基于反距离权重插值方法建立全省年均气温和年降水量分布图。地形数据主要来自福建省 1:25 万数字高程模型。1:5 万土壤数据库中的属性数据与空间数据的融合采用 Shi 等^[23]提出的“土壤学专业知法”(Pedological Professional Knowledge Based method,简称“PKB 法”),该方法主要借助 ArcGIS 软件,将土壤剖面点位置与其分布区相邻或相同、成土母质相近或一致,以及土壤类型名称相似或一致作为基本原则,以“县”为基本控制单元将土壤剖面点属性信息连接到空间数据库中相对应图斑上。

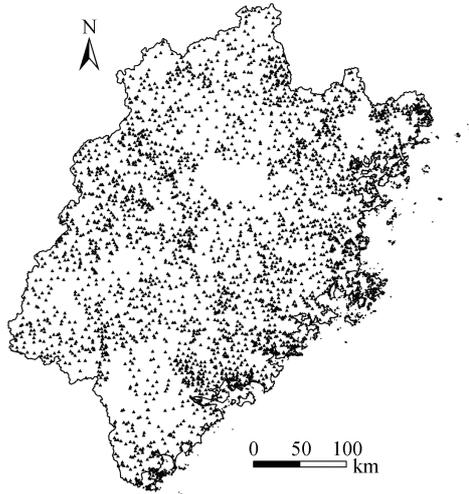


图 1 1982 年福建省土壤剖面样点分布图

Fig. 1 Distribution of soil profile samples in Fujian Province of year 1982

1.3 土壤全氮密度及储量计算

本研究采用土壤类型法估算福建省全氮储量,以表层 0~20 cm 和剖面 0~100 cm 土壤全氮密度及储量作为研究对象。

(1) 土壤全氮密度指单位面积一定深度土层中的土壤全氮储量。土壤全氮密度的计算公式为^[24]:

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

式中, STND 为土壤剖面全氮密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$); n 为参与计算的土壤层次总数; $G_i\%$ 为第 i 层 $> 2 \text{ mm}$ 砾石含量 (体积百分含量); B_i 为第 i 层土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); N_i 为第 i 层土壤全氮含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); T_i 为第 i 层土层厚度 (cm); 100 用于单位换算。由于 1982 年福建省土壤普查样点资料中缺少容重信息,因此本研究采用 Song 等^[25]基于第二次土壤普查建立的土壤容重与有机碳含量的回归模型。

(2) 土壤全氮储量指一定区域范围内一定剖面深度土层中所包含的全氮总量。土壤全氮储量的计算公式为^[24]:

$$STNS = \sum_{i=1}^n STND_i \times S_i \quad (2)$$

式中, STNS 为土壤剖面全氮储量 (kg); $STND_i$ 为第 i 个土壤图斑的全氮密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$); S_i 为第 i 个土壤图斑的面积 (m^2); n 为图斑数。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2018 和 SPSS 22.0 软件对土壤属性数据进行统计分析,利用 ArcGIS 10.4 软件绘制福建省土壤全氮密度分布图,并通过统计各个土壤图斑面积计算全氮储量。

2 结果与讨论

2.1 福建省全氮密度和储量的空间分布特征

以福建省最详细的 1 : 5 万数字化土壤图为基础,估算出全省土壤总面积为 $12.08 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 表层 (0~20 cm) 和剖面 (0~100 cm) 土壤的面积加权平均全氮密度分别为 $0.35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.97 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 全氮储量为 42.06 Tg 和 116.83 Tg。从表 1 可以看出,福建省表层和剖面土壤全氮密度均低于张春娜^[26]所估算的全国平均水平 ($0.54 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $1.13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$), 但高于邻近的浙江省^[27] ($0.30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.85 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)。若以张春娜^[26]估算的 $960.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 作为全国土壤总面积,以 $54.34 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $126.57 \times 10^8 \text{ t}$ 分别作为全国表层和剖面土壤全氮总储量,则福建省土壤面积占全国土壤总面积的 1.26%, 表层和剖面土壤全氮储量分别占全国的 0.77% 和 0.92%。

表 1 不同研究区域土壤表层和剖面全氮密度与储量

Table 1 Total nitrogen density and storage of soil in the surface and profile relative to study area

研究区域 Study area	表层土壤 Surface soil (0~20 cm)		剖面土壤 Profile soil (0~100 cm)	
	密度 Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	储量 Storage / Tg	密度 Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	储量 Storage / Tg
全国 ^[26] China	0.54	54.34×10^2	1.13	12.66×10^3
浙江 ^[27] Zhejiang Province	0.30	29.9	0.85	85.4
本研究 Fujian Province	0.35	42.06	0.97	116.83

表 2 福建省不同密度范围土壤全氮密度与储量分布

Table 2 Soil total nitrogen density and storage distribution relative to density range in Fujian Province

密度范围 Density range/ (kg·m ⁻²)	表层土壤 Surface soil (0~20 cm)				密度范围 Density range/ (kg·m ⁻²)	剖面土壤 Profile soil (0~100 cm)			
	面积/ (10 ⁴ hm ²)	百分比 Percentage/%	储量 Storage/Tg	百分比 Percentage/%		面积/ (10 ⁴ hm ²)	百分比 Percentage/%	储量 Storage/Tg	百分比 Percentage/%
<0.1	0.59	4.88	0.40	0.95	<0.4	1.36	11.26	3.70	3.17
0.1~0.3	5.65	46.77	12.28	29.19	0.4~0.8	4.42	36.59	26.65	22.81
0.3~0.5	4.15	34.35	16.00	38.03	0.8~1.2	3.49	28.89	33.91	29.03
0.5~0.7	0.89	7.37	5.15	12.24	1.2~1.6	1.45	12.00	20.14	17.24
0.7~0.9	0.42	3.48	3.30	7.84	1.6~2.0	0.55	4.55	9.91	8.48
>0.9	0.37	3.06	4.94	11.74	>2.0	0.81	6.71	22.51	19.27

从表2可以看出,福建省表层土壤全氮密度在0~0.1 kg·m⁻²、0.1~0.3 kg·m⁻²、0.3~0.5 kg·m⁻²、0.5~0.7 kg·m⁻²、0.7~0.9 kg·m⁻²和>0.9 kg·m⁻²这6个范围之间的土壤面积分别为:0.59×10⁴ hm²、5.65×10⁴ hm²、4.15×10⁴ hm²、0.89×10⁴ hm²、0.42×10⁴ hm²和0.37×10⁴ hm²,分别占全省土壤总面积的:4.88%、46.77%、34.35%、7.37%、3.48%和3.06%;全氮储量分别为:0.40 Tg、12.28 Tg、16.00 Tg、5.15 Tg、3.30 Tg和4.94 Tg,分别占全省表层土壤全氮总储量的:0.95%、29.19%、38.03%、12.24%、7.84%和11.74%。由此可见,福建省表层土壤全氮密度主要集中在0.1~0.3 kg·m⁻²和0.3~0.5 kg·m⁻²之间,这两个范围内分布的面积占全省土壤总面积的81.12%。福建省剖面土壤全氮密度在0~0.4 kg·m⁻²、0.4~0.8 kg·m⁻²、0.8~1.2 kg·m⁻²、1.2~1.6 kg·m⁻²、1.6~2.0 kg·m⁻²和>2.0 kg·m⁻²这6个范围之间的土壤分布面积分别为:1.36×10⁴ hm²、4.42×10⁴ hm²、3.49×10⁴ hm²、1.45×10⁴ hm²、0.55×10⁴ hm²和0.81×10⁴ hm²,分别占全省土壤总面积的:11.26%、36.59%、28.89%、12.00%、4.55%和6.71%;全氮储量分别为3.70 Tg、26.65 Tg、33.91 Tg、20.14 Tg、9.91 Tg和22.51 Tg,分别占全省剖面土壤全氮总储量的3.17%、22.81%、29.03%、17.24%、8.48%和19.27%。这表明福建省剖面土壤全氮密度主要集中在0.4~0.8 kg·m⁻²和0.8~1.2 kg·m⁻²之间,这两个范围内分布的面积占全省土壤总面积的65.48%,储量之和占剖面土壤全氮总储量的51.84%。

从空间分布来看(图2a),福建省表层土壤全氮密度较高(>0.9 kg·m⁻²)的区域主要分布在北部、东北部和西部,面积为0.37×10⁴ hm²,占全省土壤

总面积的3.06%,这主要是因为研究区地形以山地丘陵为主,闽西、闽中两大山带均呈东北—西南走向,复杂的地形结构使全省气候、植被以及土壤等自然要素基本平行于海岸和山脉走向,西部和中部的气温低,且降水量大,而低温湿润的环境有利于植被生长和氮素积累^[28-29]。福建省表层土壤全氮密度较低(<0.1 kg·m⁻²)的区域主要分布在东南沿海地区,该区域温度高,降雨量少,不利于氮素累积;此外,沿海地区土壤砂粒含量也高,而砂粒和全氮通常呈负相关关系^[30-31]。从图2b可以看出,福建省剖面土壤中全氮密度较高(>2.0 kg·m⁻²)的地区也主要分布在北部、西部和东北部,这主要也是该区域低温多雨的气候环境造成的。福建省剖面土壤中全氮密度较低(<0.4 kg·m⁻²)的区域也主要分布在低纬度的沿海,这也与该地区高温少雨不利于氮素累积有关。总体来看,福建省土壤的全氮密度呈沿海低,而内陆高(特别是中低山地区)的趋势。

2.2 福建省不同土类全氮密度与储量分布

从表3可以看出,福建省表层土壤中全氮密度最高的是山地草甸土、粗骨土和黄壤,分别为0.85 kg·m⁻²、0.57 kg·m⁻²和0.52 kg·m⁻²,剖面土壤为山地草甸土、黄壤和水稻土,分别达到2.09 kg·m⁻²、1.27 kg·m⁻²和1.07 kg·m⁻²。山地草甸土主要分布在900~2 000 m的高海拔地区,气温低而降雨多,导致草甸植物残体富集而土壤氮素矿化速率慢^[28-29]。黄壤大多分布在海拔900~1 200 m之间的中山地带,年均温度和降水量分别为18.2℃、1 709 mm(表4),温度低且湿度大;此外,该土类分布区域自然植被茂盛,土壤表层积累了大量动植物残体,也增加了土壤中的氮素。粗骨土分布地区的平均温度为17.5℃,年

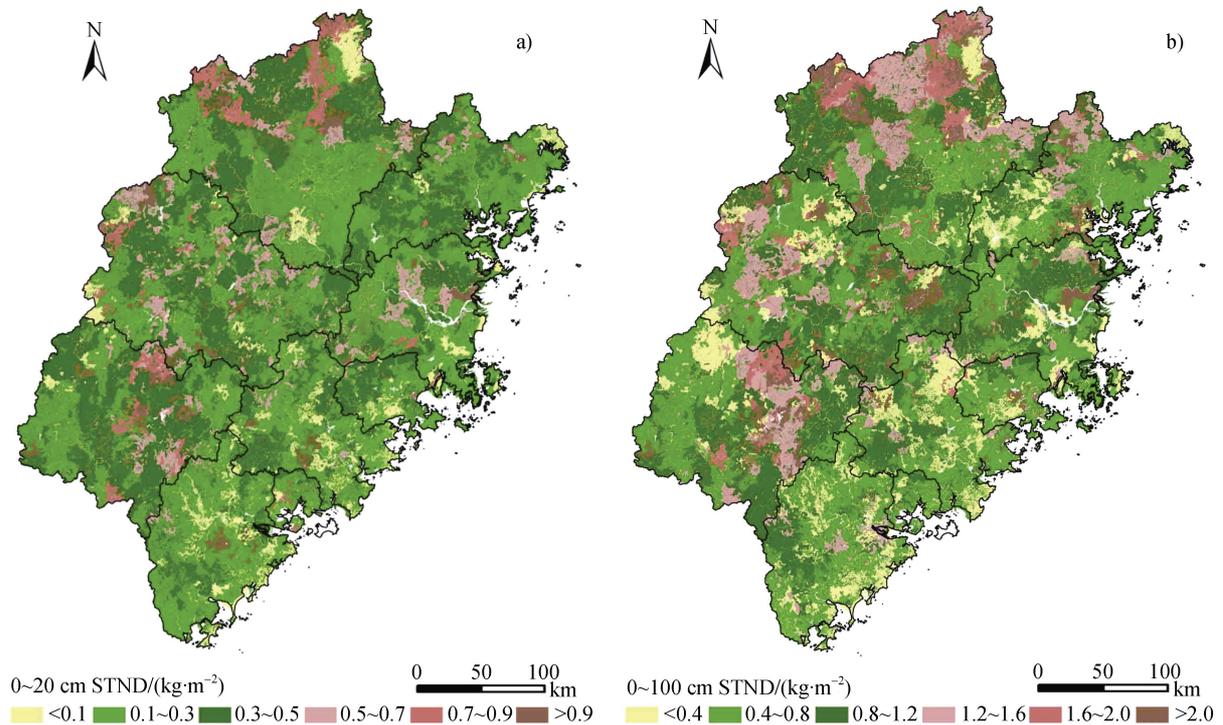


图 2 福建省 0~20 cm 表层土壤和 0~100 cm 剖面土壤全氮密度分布

Fig. 2 Spatial distribution of total nitrogen density in the soil surfaces (0~20 cm) and profiles (0~100 cm) of Fujian Province

表 3 福建省不同土类土壤全氮密度与储量分布

Table 3 Total nitrogen density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) and storage (Tg) in the soils of Fujian Province relative to soil type

土类 Soil type	面积 Area/ (10^5 hm^2)	百分比 Percentage/%	表层土壤 Surface soil (0~20 cm)			剖面土壤 Profile soil (0~100 cm)		
			储量/ Tg	百分比 Percentage/%	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	储量/ Tg	百分比 Percentage/%	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
滨海盐土 Coastal solonchak	1.16	0.96	0.26	0.61	0.22	0.89	0.76	0.76
潮土 Fluvo-aquic soil	0.20	0.17	0.05	0.12	0.25	0.11	0.09	0.54
赤红壤 Latosolic red soil	6.93	5.73	1.20	2.86	0.17	3.69	3.16	0.53
粗骨土 Skeletal soil	0.0011	9.07×10^{-4}	0.62×10^{-3}	1.47×10^{-3}	0.57	0.78×10^{-3}	6.67×10^{-4}	0.71
风沙土 Aeolian soil	0.53	0.43	0.06	0.13	0.11	0.14	0.12	0.27
红壤 Red soil	86.27	71.40	30.43	72.34	0.35	83.72	71.66	0.97
黄壤 Yellow soil	6.07	5.025	3.13	7.45	0.52	7.70	6.59	1.27
山地草甸土 Mountain meadow soil	0.085	0.07	0.07	0.17	0.85	0.18	0.15	2.09
石灰土 Lithosol	0.16	0.13	0.04	0.10	0.27	0.13	0.11	0.85
水稻土 Paddy soil	18.04	14.93	6.42	15.27	0.36	19.33	16.55	1.07
新积土 Neo-alluvial soil	0.034	0.029	0.01	0.03	0.40	0.02	0.02	0.72
紫色土 Purplish soil	1.35	1.12	0.38	0.90	0.28	0.92	0.79	0.68
总计 Total	120.83	100	42.06	100	0.35	116.83	100	0.97

表4 福建省不同土类气候和地形特征

Table 4 Climate and topography of Fujian Province relative to soil type

土类 Soil type	年均温度 / (°C) Annual mean temperature	年降水量/mm Annual mean precipitation	海拔/m Elevation	坡度 / (°) Slope
滨海盐土 Coastal solonchak	20.1	1 444	40	2.0
潮土 Fluvo-aquic soil	19.5	1 540	164	3.5
赤红壤 Latosolic red soil	20.7	1 427	76	4.0
粗骨土 Skeletal soil	17.5	1 720	308	2.8
风沙土 Aeolian soil	20.3	1 323	39	1.8
红壤 Red soil	18.5	1 665	448	12.8
黄壤 Yellow soil	18.2	1 709	1 118	17.6
山地草甸土 Mountain meadow soil	18.8	1 667	1 430	18.9
石灰土 Lithosol	19.7	1 586	298	7.1
水稻土 Paddy soil	18.8	1 645	419	10.3
新积土 Neo-alluvial soil	20.0	1 519	100	1.1
紫色土 Purplish soil	18.5	1 685	440	9.5
均值 Mean Value	18.8	1 638	414	10.5

降水量为1 720 mm, 平均海拔为308 m(表4), 较低的温度和丰富的降水也有利于氮素积累。水稻土由于长期处于淹水状态, 通气不良导致土壤中的有机物矿化速率弱, 同时水稻本身也具有一定的固氮作用^[32-33]; 因此该土类表层和剖面土壤全氮密度相对较高(表3)。福建省表层和剖面土壤全氮密度最低为风沙土, 分别为 $0.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.27 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。该土类主要分布在东南沿海地区, 平均海拔仅为39 m, 平均坡度为 1.8° , 年均温为20.3, 年降水量为1 323 mm(表4), 干旱少雨的环境不利于氮素积累; 此外, 风沙土中的砂粒含量也高, 有研究表明全氮密度与土壤砂粒含量呈负相关^[30-31]。其他土类表层土壤全氮密度介于 $0.17\sim 0.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 剖面土壤全氮密度介于 $0.53\sim 0.97 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间。

从全氮储量来看, 福建省表层和剖面土壤中储量均最高的为红壤和水稻土, 分别为30.43 Tg和83.72 Tg、6.42 Tg和19.33 Tg, 这两个土类的储量之和占全省表层和剖面土壤全氮总储量的87.61%和88.21%。这一方面与它们较大的分布面积有关, 红壤是全省分布面积最大的土类, 而水稻土则是全省耕地土壤中分布面积最大的土类, 二者面积之和占全省土壤总面积的86.33%; 另一方面与这两个土类

较高的全氮密度有关(表3)。福建省表层和剖面土壤全氮储量最低的是粗骨土, 分别为 $0.62\times 10^{-3} \text{ Tg}$ 和 $0.78\times 10^{-3} \text{ Tg}$ 。

2.3 福建省不同亚类全氮密度与储量分布

从表5可以看出, 福建省不同土壤亚类下表层和剖面全氮密度最高的为山地草甸土, 分别为 $0.85 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $2.09 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 该亚类分布在海拔较高的地区, 草甸植物生长茂盛, 腐殖质层厚达 $31\pm 4 \text{ cm}$, 氮素积累高^[18]。此外, 福建省潜育水稻土、粗骨土和黄壤性土三个亚类的表层土壤全氮密度也较高, 分别为 $0.59 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.57 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.52 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。这主要是因为潜育水稻土多分布在低洼地区, 排水不畅, 土体潮湿或水饱和, 故氮素分解缓慢, 利于累积^[34]; 粗骨土多分布于低温多雨地区, 也利于氮素累积; 黄壤性土分布区一般地势高而温度低, 有利于土壤有机质积累, 而有研究表明氮素含量与有机质成正比^[35]。福建省剖面土壤中咸酸水稻土和潜育水稻土亚类的全氮密度也较高, 分别为 $1.17 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $1.79 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 前者主要是因为土壤pH较低, 酸性会减弱微生物的矿化作用, 利于氮素积累^[28]; 后者主要分布在地势低的地区, 常年受潜水浸渍, 土壤有机质分解缓慢, 导致氮素含量也高。其他亚类土壤表层和剖

面全氮密度分别介于 $0.17\sim 0.51\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.53\sim 1.27\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间。

从全氮储量来看(表5),红壤、黄红壤是福建省表层和剖面土壤中全氮储量最高的亚类,分别达到 21.78 Tg 、 59.64 Tg 和 6.52 Tg 、 17.18 Tg ,这两个亚类的储量之和分别占表层和剖面土壤全氮总储量

的 67.28% 、 65.76% 。这一方面是因为红壤在福建省分布面积最大,达到 $6.311\times 10^6\text{ hm}^2$,黄红壤次之,为 $1.702\times 10^6\text{ hm}^2$,两者面积总和占全省土壤总面积的 70.31% ;另一方面是由于这两个亚类所处的地区湿温同季,生物量大,土壤有机质含量丰富,导致全氮密度也高。粗骨土、咸酸水稻土是福建省表层

表 5 福建省不同亚类土壤全氮密度与储量分布

Table 5 Total nitrogen density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) and storage (Tg) in the soils of Fujian Province relative to soil type

亚类 Soil subtype	面积 Area (10^5 hm^2)	百分比 Percentage/%	表层土壤 Surface soil (0~20 cm)			剖面土壤 Profile soil (0~100 cm)		
			储量 Storage/Tg	百分比 Percentage/%	密度 Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	储量 Storage/Tg	百分比 Percentage /%	密度 Density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
滨海盐土 ^①	0.15	0.12	0.037	0.087	0.24	0.10	0.088	0.68
潮滩盐土 ^②	1.01	0.84	0.22	0.53	0.22	0.78	0.67	0.77
赤红壤 ^③	6.26	5.18	1.06	2.51	0.17	3.33	2.85	0.53
赤红壤性 ^④	0.67	0.56	0.15	0.35	0.22	0.36	0.31	0.54
冲积土 ^⑤	0.034	0.029	0.014	0.033	0.40	0.025	0.021	0.72
粗骨土 ^⑥	0.001 1	9.07×10^{-4}	0.000 62	0.001 5	0.57	0.000 78	0.000 67	0.71
红壤 ^⑦	63.11	52.23	21.78	51.77	0.35	59.64	51.05	0.94
红壤性土 ^⑧	6.13	5.08	2.13	5.06	0.35	6.89	5.90	1.12
黄红壤 ^⑨	17.02	14.09	6.52	15.51	0.38	17.18	14.71	1.01
黄壤 ^⑩	4.81	3.98	2.48	5.88	0.51	6.09	5.22	1.27
黄壤性土 ^⑪	1.26	1.04	0.66	1.57	0.52	1.60	1.37	1.27
灰潮土 ^⑫	0.20	0.17	0.049	0.12	0.25	0.11	0.092	0.54
漂洗水稻土 ^⑬	0.24	0.20	0.076	0.18	0.32	0.19	0.16	0.80
潜育水稻土 ^⑭	2.03	1.68	1.19	2.83	0.59	3.64	3.12	1.79
山地草甸土 ^⑮	0.085	0.071	0.073	0.17	0.85	0.18	0.15	2.09
渗育水稻土 ^⑯	8.64	7.15	2.75	6.555	0.32	7.96	6.81	0.92
酸性紫色土 ^⑰	1.35	1.12	0.38	0.90	0.28	0.92	0.79	0.68
咸酸水稻土 ^⑱	0.000 97	8.07×10^{-4}	0.000 32	0.000 77	0.33	0.001 1	0.000 97	1.17
淹育水稻土 ^⑲	0.19	0.16	0.029	0.069	0.15	0.13	0.11	0.66
盐渍水稻土 ^⑳	0.85	0.70	0.28	0.67	0.34	0.94	0.81	1.11
潜育水稻土 ^㉑	6.09	5.04	2.09	4.96	0.34	6.47	5.53	1.06
棕色石灰土 ^㉒	0.16	0.13	0.042	0.10	0.27	0.13	0.11	0.85
总计 ^㉓	120.83	100	42.06	100	0.35	116.83	100	0.97

①Coastal solonchaks, ②Coastal tideland solonchaks, ③Latosolic red soils, ④Weakly developed latosolic red soils ⑤Alluvial soils, ⑥Acid skeletal soils, ⑦Red soils, ⑧Weakly developed red soils, ⑨Yellowish red soils, ⑩Yellow soils, ⑪Weakly developed yellow-brown soils, ⑫Gray fluvo-aquic soils, ⑬Bleached paddy soils, ⑭Gleyed paddy soils, ⑮Mountain meadow soils, ⑯Percogenic paddy soil, ⑰Acid purplish soils, ⑱Acid sulfate paddy soils, ⑲Submergenic paddy soils, ⑳Salinized paddy soils, ㉑Hydromorphic paddy, ㉒Terra fusca, ㉓Total

和剖面土壤全氮储量最小的亚类,分别为0.000 62 Tg、0.000 67Tg和0.000 32 Tg、0.000 97Tg。粗骨土亚类一方面因为全氮密度较低,仅为 $0.57 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (0~20 cm)和 $0.71 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (0~100 cm),另一方面也是由于其分布面积小,仅为 110 hm^2 ,导致全氮储量低;咸酸水稻土亚类则是因为分别面积很小,所占福建省土壤总面积比例极低。

2.4 福建省不同行政区全氮密度与储量分布

福建省下辖1个副省级城市和8个地级市,由于这些行政区所处的地理位置不同,土壤全氮密度有很大差异。从表6可以看出,南平市和龙岩市的表层土壤全氮密度最高,分别为 $0.40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.39 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,而南平市和三明市的剖面土壤全氮密度最高,分别为 $1.19 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $1.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。这一方面是因为龙岩市、三明市和南平市背靠武夷山脉,平均海拔分别为498 m、501 m和 393 m,另一方面是由于这些地级市年平均温度低,分别为 19.5°C 、 18.5°C 和 18.0°C ,而年均降水量分别达 1649 mm 、 1673 mm 和 1722 mm ,低温多雨有利于氮素的积累^[13]。此外,福建省粮食生产主要集中在闽西北的三明、南平和龙岩等地^[36],长期施肥也提升了土壤全氮含量^[34]。福建省表层和剖面土壤中全氮密度最低的是漳州市,分别为 $0.24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.67 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,该地级市年均温居全省第一,达到 21.0°C ,而年均降水量为 1522 mm ,高温少雨的气候条件加速了全氮的矿化;

此外,该地级市多处于滨海地区,土壤砂粒含量高,养分难以保持,导致全氮含量也低^[28-29]。

从全氮储量来看(表6),南平市、三明市是福建省表层和剖面土壤全氮储量最高的,分别为 10.56 Tg 、 30.94 Tg 和 8.83 Tg 、 25.25 Tg ,这两个地级市的全氮储量之和分别占全省表层和剖面土壤全氮总储量的46.10%和48.09%。这主要是因为南平和三明是全省土壤面积最大的两个地级市,分别达到 $26.07\times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $22.71\times 10^5 \text{ hm}^2$,二者面积之和占全省土壤总面积的40.38%;此外,南平市、三明市表层和剖面土壤全氮密度分别为 $0.40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1.19 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.39 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,均明显高于全省平均水平($0.35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.97 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)。厦门市的表层和剖面土壤全氮储量为福建省各行政区中最低的,分别为 0.37 Tg 和 1.14 Tg ,均不足全省表层和剖面土壤全氮总储量的1%,主要是因为该市土壤全氮密度低且分布面积小(表6)。

3 结 论

福建省表层(0~20 cm)和剖面(0~100 cm)土壤全氮密度范围分别在 $0.008 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\sim 2.529 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.013 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\sim 11.02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,面积加权平均值分别为 $0.35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.97 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,全氮总储量分别为 42.06 Tg 和 116.83 Tg 。福建省全氮密度最高的土类为

表6 福建省不同行政区土壤全氮密度与储量分布

Table 6 Total nitrogen density and storage in the soils relative to administrative area in Fujian Province/ ($^\circ\text{C}$)

地级市 City	面积 Area / ($\times 10^5 \text{ hm}^2$)	百分比 Percentage /%	表层土壤 Surface soil (0~20 cm)			剖面土壤 Profile soil (0~100 cm)		
			储量 Storage/Tg	百分比 Percentage/%	密度 Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	储量 Storage/Tg	百分比 Percentage /%	密度 Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
福州 Fuzhou	11.91	9.86	3.78	8.99	0.32	10.26	8.78	0.86
龙岩 Longyan	18.87	15.62	7.41	17.62	0.39	19.04	16.30	1.01
南平 Nanping	26.07	21.58	10.56	25.11	0.40	30.94	26.48	1.19
宁德 Ningde	12.80	10.60	3.83	9.11	0.30	10.93	9.36	0.85
莆田 Putian	3.69	3.05	1.06	2.52	0.29	2.63	2.25	0.71
泉州 Quanzhou	10.91	9.03	3.18	7.56	0.29	8.31	7.11	0.76
三明 Sanming	22.71	18.80	8.83	20.99	0.39	25.25	21.61	1.11
厦门 Xiamen	1.37	1.14	0.37	0.88	0.27	1.14	0.98	0.83
漳州 Zhangzhou	12.50	10.34	3.05	7.25	0.24	8.33	7.13	0.67
总计 Total	120.83	100	42.06	100	0.35	116.83	100	0.97

山地草甸土、黄壤和粗骨土，而最低的为风沙土、赤红壤、滨海盐土，全氮密度在空间分布上整体呈由北到南逐渐减少的趋势。受土壤分布面积和全氮密度高低的影响，各土壤类型之间的全氮储量差异很大；其中，红壤、水稻土和黄壤三个土类的储量最高，合计占全省表层和剖面土壤全氮总储量的 95.06% 和 94.80%。福建省土壤全氮密度总体呈沿海城市低，而内陆城市高的分布格局；其中，龙岩市、三明市和南平市因背靠武夷山脉，土壤全氮密度较高，而漳州市处于低纬度地区，土壤全氮密度较低。土壤全氮储量最高的地级市为南平和三明，这两个地级市的全氮储量之和分别占全省表层和剖面土壤全氮总储量的 46.10% 和 48.09%。尽管本研究基于大样本土壤剖面数据和 1 : 5 万大比例尺土壤图对整个福建省的全氮储量进行了估算，但对土壤全氮密度及储量空间分布规律影响因素的分析仍不够深入，土壤全氮空间分布是多因素（如成土母质、植被、耕作方式和土地利用方式等）综合作用的结果，因此今后将进一步加强多种因素综合作用下土壤全氮空间分布规律影响因素及其内在作用机理的研究。

参考文献 (References)

- [1] Chen G C, Gan L, Wang S L, et al. Soil nitrogen and its environmental effects[J]. *Geology-Geochemistry*, 2001, 29 (1): 63—67. [陈刚才, 甘露, 王仕禄, 等. 土壤氮素及其环境效应[J]. *地质地球化学*, 2001, 29 (1): 63—67.]
- [2] 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[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (2): 279—283. [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[J]. *应用生态学报*, 2005, 16 (2): 279—283.]
- [3] Zhou W N. Nitrous oxide emission from Chinese agricultural system and emission reduction technologies[J]. *Agro-Environment and Development*, 1994, 11 (1): 27—31. [周文能. 中国农业氧化亚氮的排放量和减缓对策[J]. *农业环境与发展*, 1994, 11 (1): 27—31.]
- [4] Vesterdal L, Schmidt I K, Callesen I, et al. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255 (1): 35—48.
- [5] Stiles W A V, Rowe E C, Dennis P. Long-term nitrogen and phosphorus enrichment alters vegetation species composition and reduces carbon storage in upland soil[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 593/594: 688—694.
- [6] Fornara D A, Banin L, Crawley M J. Multi-nutrient vs. nitrogen-only effects on carbon sequestration in grassland soils[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19 (12): 3848—3857.
- [7] Soderlund R, Svensson B H. Nitrogen, phosphorus and sulphur-global cycles: The global nitrogen cycle[R]. *Scope 7 Report*. 1976.
- [8] Post W M, Pastor J, Zinke P J, et al. Global patterns of soil nitrogen storage[J]. *Nature*, 1985, 317 (6038): 613—616.
- [9] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47 (2): 151—163.
- [10] Tian H Q, Wang S Q, Liu J Y, et al. Patterns of soil nitrogen storage in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20 (1): 247—247.
- [11] Yang Y H, Ma W H, Mohammat A, et al. Storage, patterns and controls of soil nitrogen in China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17 (6): 776—785.
- [12] 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[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (4): 586—593. [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[J]. *土壤学报*, 2009, 46 (4): 586—593.]
- [13] Li S, Guo D, Dou S, et al. Distribution characteristics of soil nitrogen density and its influence factors in cultivated topsoil of Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48 (6): 1385—1391. [李爽, 郭聃, 窦森, 等. 吉林省耕地表层土壤氮密度分布特征及其影响因素[J]. *土壤通报*, 2017, 48 (6): 1385—1391.]
- [14] Men M X, Peng Z P, Liu Y H, et al. Spatial distribution of soil organic carbon and nitrogen in Hebei Province based on SOTER[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36 (4): 469—473. [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—473.]
- [15] Xiao F, He X J. Estimation terrestrial soil nitrogen pool and its distribution in Chongqing area, China[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19 (4): 535—542. [肖飞, 何霄嘉. 重庆市土壤氮库估算及其分布特征研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19 (4): 535—542.]
- [16] Chen Z X, Zhang N, Zhang L M, et al. Scale effects of estimation of soil organic carbon storage in Fujian Province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (3): 606—619. [陈中星, 张楠, 张黎明, 等. 福建省土壤有机碳储量估算的尺度效应研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (3): 606—619.]
- [17] Zhang L M, Zhuang Q L, Zhao Q Y, et al. Uncertainty of organic carbon dynamics in Tai-Lake paddy soils of China depends on the scale of soil maps[J]. *Agriculture*,

- Ecosystems & Environment, 2016, 222: 13—22.
- [18] Fujian Provincial Bureau of Statistics. Fujian Statistical Yearbook. 2019[EB/OL]. [Http: //www.stats-fj.gov.cn/tongjiniannian/dz2019/index-cn.htm](http://www.stats-fj.gov.cn/tongjiniannian/dz2019/index-cn.htm). [福建省统计局. 福建统计年鉴-2019[EB/OL]. [http: //www.stats-fj.gov.cn/tongjiniannian/dz2019/index-cn.htm](http://www.stats-fj.gov.cn/tongjiniannian/dz2019/index-cn.htm).]
- [19] Ju X T. Improvement and validation of Theoretical N Rate (TNR) —Discussing the methods for N fertilizer recommendation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (2): 249—261. [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[J]. 土壤学报, 2015, 52 (2): 249—261.]
- [20] Du S L, Zhao J. Construction of Heilongjiang soil species database-based on the second national soil survey[J]. Soils and Crops, 2019, 8 (4): 427—435. [杜书立, 赵军. 黑龙江土种数据库构建——基于第二次土壤普查数据[J]. 土壤与作物, 2019, 8 (4): 427—435.]
- [21] He X B, Li Q L, Duan Q Z, et al. Variation analyzing on fertilization and soil nutrients in Yunnan Province[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011 (3): 21—26. [何晓滨, 李庆龙, 段庆钟, 等. 云南省施肥及土壤养分变化分析[J]. 中国土壤与肥料, 2011 (3): 21—26.]
- [22] Soil Survey Office of Fujian Province. Fujian soil[M]. Fuzhou: Fujian Science & Technology Publishing House, 1991: 287—289. [福建省土壤普查办公室. 福建土壤[M]. 福建: 福建科学技术出版社, 1991: 287—289.]
- [23] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, et al. Soil database of 1: 1 000 000 digital soil survey and reference system of the Chinese genetic soil classification system[J]. Soil Survey Horizon, 2004, 45 (4): 129—136.
- [24] 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[J]. Ecology and Environment, 2011, 20 (1): 1—6. [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[J]. 生态环境学报, 2011, 20 (1): 1—6.]
- [25] Song G H, Li L Q, Pan G X, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. Biogeochemistry, 2005, 74 (1): 47—62.
- [26] Zhang C N. Study on terrestrial soil nitrogen pool in China[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2004. [张春娜. 中国陆地土壤氮库研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2004.]
- [27] Zhang C. Soil nitrogen stocks and its spatial distribution in Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. [张操. 浙江省土壤氮库估算及空间分布特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.]
- [28] Chen C H, Chen X Y, Niu J L, et al. Analysis of spatial distribution and main controlling factors of soil organic carbon content and total nitrogen content in Northeast China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29 (3): 108—114. [陈昌华, 陈锡云, 牛建利, 等. 东北地区土壤碳、氮含量空间分布特征及其主控因素辨析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29 (3): 108—114.]
- [29] Cao H J, Wang J K, Li S Y, et al. Effect of gradients of precipitation and temperature and fertilization on organic carbon and nitrogen of soils in northeastern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21 (4): 122—125, 149. [曹宏杰, 汪景宽, 李双异, 等. 水热梯度变化及不同施肥措施对东北地区土壤有机碳、氮影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21 (4): 122—125, 149.]
- [30] An G Y, Niu S Y, Chen Y E, et al. Discussion on the relationship between total nitrogen of soil organic matter and mechanical composition[J]. The Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 1993 (3): 46—48. [安国英, 牛三义, 陈玉娥, 等. 土壤有机质全氮与机械组成之间关系的探讨[J]. 河北林业科技, 1993 (3): 46—48.]
- [31] Zhu J H, Zhou Y M, Jing H C, et al. Discussion on the relationship between soil mechanical composition and soil nutrient status in Tianjin area in China[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 1994 (1): 1—3. [朱静华, 周艺敏, 景海春, 等. 天津地区土壤机械组成与土壤养分状况相关关系的探讨[J]. 天津农业科学, 1994 (1): 1—3.]
- [32] Pang S, Li T X, Wang Y D, et al. Spatial distribution pattern of soil nitrogen in croplands at county scale and related affecting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21 (6): 1497—1503. [庞夙, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤氮素空间分布特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2010, 21 (6): 1497—1503.]
- [33] Zhang M M, Liu Y, Sheng R, et al. Effects of rice straw returning on the community structure and diversity of nitrogen-fixing gene (*nifH*) in paddy soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24 (8): 2339—2344. [张苗苗, 刘毅, 盛荣, 等. 稻草还田对水稻土固氮基因 (*nifH*) 组成结构和多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24 (8): 2339—2344.]
- [34] Long J, Zhang L M, Shen J Q, et al. Dynamic change of soil total nitrogen density and storage in cropland of Fujian Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (12): 3959—3969. [龙军, 张黎明, 沈金泉, 等. 福建省耕地土壤全氮密度和储量动态变化[J]. 生态学报, 2015, 35 (12): 3959—3969.]
- [35] Wang D D, Shi X Z, Wang H J, et al. Scale effect of climate and soil texture on soil organic carbon in the uplands of Northeast China[J]. Pedosphere, 2010, 20 (4): 525—535.
- [36] Wang H P, Chen Z F, Xu B W, et al. Quantitative evaluation of food security in Fujian Province[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2015, 30 (12): 1207—1213. [王海平, 陈志峰, 许标文, 等. 福建省粮食安全及其评价研究[J]. 福建农业学报, 2015, 30 (12): 1207—1213.]

(责任编辑: 檀满枝)