

DOI: 10.11766/trxb201809180422

# 基于 1:5 万土壤数据库的太湖地区水稻土全氮含量动态变化研究\*

袁平<sup>1,2</sup> 张黎明<sup>1,2†</sup> 乔婷<sup>1,2</sup> 谢安乾<sup>1</sup> 于东升<sup>3</sup> 史学正<sup>3</sup>  
邢世和<sup>1,2</sup> 陈翰阅<sup>1,2</sup>

(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 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘要** 准确评估农田土壤全氮含量变化是有效制定农业管理措施的基础。选择太湖地区 37 个县(市、区) 2.32 M hm<sup>2</sup> 水稻土为研究对象, 以 1982 年第二次土壤普查的 1 096 个和 2000 年“973”项目的 1 393 个表层样点建立 1:5 万高精度土壤数据库为基础, 定量化该地区近 20 年来水稻土全氮含量的动态变化。结果表明: 1982—2000 年太湖地区水稻土全氮含量上升了 0.21 g·kg<sup>-1</sup>, 氮素富集效应明显。其中, 脱潜型水稻土全氮含量上升最多, 增幅达 17.0%, 而潜育型水稻土有所下降, 降幅为 26.2%。从不同土区来看, 低山丘陵土区全氮含量上升最多, 增幅达 31.8%, 而太湖平原土区变化幅度最小, 增幅仅为 9.8%。从不同行政区来看, 安吉县、长兴县、川沙县、闵行区、余杭县和崇明县全氮含量增长幅度均超过 40%, 而吴县、青浦县、嘉善县和丹阳县均有所下降。总体来看, 太湖地区水稻土全氮含量空间动态变化差异很大, 今后根据不同土壤类型、土区和行政区氮素富集程度适当减少氮肥施用量, 以防止氮素流失造成的水体富营养化风险是十分必要的。

**关键词** 土壤全氮含量; 1:5 万土壤数据库; 水稻土; 太湖地区

**中图分类号** S15 **文献标识码** A

土壤氮库(N)是陆地生态系统养分库的重要组成部分, 它与有机碳库相辅相成, 在维持生态系统的组成、结构和功能中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。土壤中氮素由于植物生长、微生物活动、人为干扰及气候条件改变而发生转化, 氮素的气态损失和淋溶损失也严重影响着生态环境。有研究表明, 土壤氮素在反硝化作用下产生的各种含氮气体如一氧化二氮(N<sub>2</sub>O)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO<sub>2</sub>)等直接参与温室效应<sup>[2]</sup>。此外, 氮也是水体富营养化的重要伴随因子, 过量的氮素流入池塘、湖泊、河流和

海洋等会造成藻类种群大爆发<sup>[3]</sup>。与自然土壤相比, 农业土壤氮库受到人类活动的影响更大, 其可以在较短的时间内发生转化和迁移。因此, 明确农业土壤氮库的动态变化对研究陆地生态系统氮循环, 以及提高氮素利用率等问题的解决均具有重要的意义<sup>[4]</sup>。

当前, 基于数字化土壤图结合土壤普查资料进行氮素研究的方法越来越广泛。从全球尺度来看, Batjes<sup>[5]</sup>基于 1:500 万的世界土壤图和 4 353 个土壤剖面数据对全球氮储量进行了估算, 结果表明, 全

\* 中国博士后科学基金项目(2017M612109)、福建省自然科学基金项目(2015J01154)和安徽高校自然科学基金项目(KJ2017A521)共同资助 Supported by the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2017M612109), the National Science Foundation of Fujian Province, China (No.2015J01154) and the Natural Science Research Projects of Anhui Universities (No. KJ2017A521)

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

作者简介: 袁平(1992—), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事土壤碳氮循环与 GIS 应用研究。E-mail: 978315364@qq.com

收稿日期: 2018-09-18; 收到修改稿日期: 2018-11-25; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-12-11

球 1 m 土层土壤全氮储量为 133~140 Pg (1 Pg=10<sup>15</sup> g)。从国家尺度来看, Tian 等<sup>[6]</sup>基于 1:100 万全国土壤空间分布图和 2 480 个土壤剖面对我国氮库储量进行了研究, 结果表明, 全国土壤氮储量为 8.29 Pg。Lin 等<sup>[7]</sup>利用 1:100 万中国土壤图和全国第二次土壤普查 1 490 个水稻土剖面数据对我国水稻土全氮密度和储量进行了研究, 结果表明, 水稻土剖面 1 m 土层平均氮密度为 12.4 t·hm<sup>-2</sup>, 全氮储量为 569 Tg。从区域尺度来看, 焦闪闪等<sup>[8]</sup>基于福建省第二次土壤普查的 2 021 个采样点和 2008 年农业部测土配方施肥 29 945 个耕层样点对全省耕地全氮密度和储量动态变化进行了研究, 结果表明, 1982—2008 年该地区耕地土壤全氮密度和储量均为上升趋势。代子俊等<sup>[9]</sup>基于第二次土壤普查的 45 个剖面资料和 2015 年土壤调查的 61 个剖面数据研究了湟水流域土壤全氮的空间变异, 结果表明, 近 30 年来湟水流域土壤全氮呈现增长趋势。

但是从以上研究来看, 我国国家和区域尺度上的氮素研究多以中小比例尺数据库静态研究为主, 而结合高精度土壤数据库的两期大样本实测样点动态变化研究相对较少。水稻土作为我国农业土壤的重要组成部分, 耕作历史超过 10 000 年, 面积达 30 M hm<sup>2</sup>, 水稻产量约占我国粮食总产量的 1/2 以上<sup>[10-11]</sup>。为了获得作物高产, 农民往往加大氮肥的投入, 这也导致我国水稻田面临着高产和生态环境保护之间矛盾的多重挑战<sup>[3]</sup>。太湖地区作为我国主要水稻产区, 该地区高产稻田氮肥施用量已经达到 360 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮肥的大量施用和高温多雨的特点导致土壤氮素的大量淋失, 造成了该流域频繁的蓝藻爆发与水体富

营养化等环境问题<sup>[3-4]</sup>。基于此, 本研究选择太湖地区 37 个县(市、区)2.32 M hm<sup>2</sup> 水稻土为研究对象, 以 1982 年第二次土壤普查和 2000 年土壤质量演变与持续利用“973”项目采集的水稻土样点资料所建立 1:5 万大比例尺土壤数据库为基础, 揭示水稻土全氮含量的时空动态变化规律, 明确整个地区和不同土壤类型、土区及行政区的全氮含量动态变化差异的主控因子, 研究结果可为合理制定太湖地区 and 我国南方水稻田的农业管理政策提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

太湖地区 (118°50′~121°54′E, 29°56′~32°16′N) 包括江苏省镇江、无锡、常州和苏州, 浙江省嘉兴、湖州和杭州的一部分, 以及整个上海市, 共 37 个县(市、区), 流域总面积达 3.65 M hm<sup>2</sup> (图 1)<sup>[10]</sup>。气候类型为亚热带季风气候, 温和湿润, 光照充足, 生长季节较长, 干湿季明显, 年平均气温在 16℃左右, 年均降水量为 1 100~1 400 mm, ≥10℃的积温在 5 000℃左右, 日照时数为 1 870~2 225 h, 全年无霜期 230 d 以上<sup>[12]</sup>。

经过长期的耕作施肥, 太湖地区形成了以水稻土为主的土壤类型, 面积达到 2.32 M hm<sup>2</sup>, 占整个研究区土壤总面积的 66%<sup>[12]</sup>。该地区水稻土可划分为 6 个亚类(潴育型水稻土、淹育型水稻土、漂洗型水稻土、渗育型水稻土、潜育型水稻土和脱潜型水稻土)和 4 个土区(低山丘陵土区、太湖平原土区、冲积平原土区和低洼圩田土区)(图 1)。成土

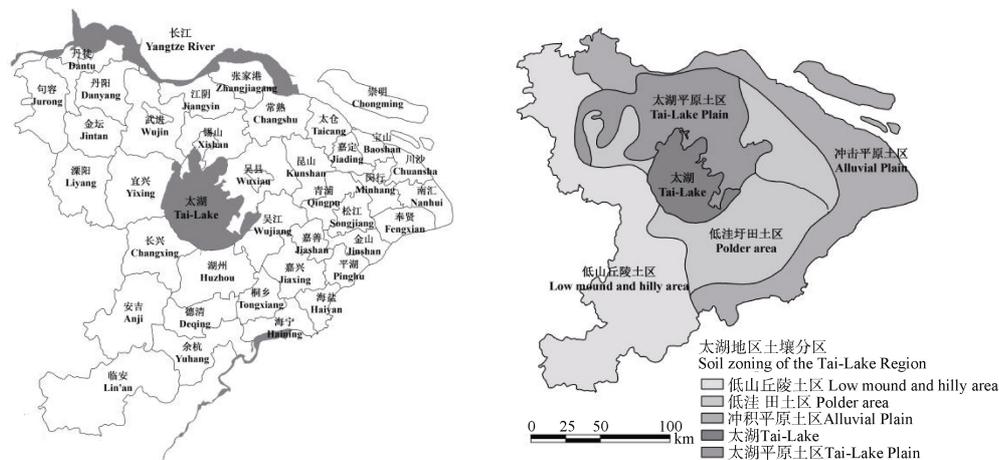


图 1 太湖地区地理位置和土区分布图

Fig. 1 Geographic location and paddy soil region map of the Tai-Lake Region, China

母质为黄土、冲积土和湖泊沉积物等为主。作物管理方式以水稻和冬小麦轮作为主,水稻于 6 月种植,10 月收获,小麦于 11 月种植,次年 5 月收割<sup>[11]</sup>。

### 1.2 数据来源

(1) 土壤数据。1:5 万土壤空间数据库所需基本图鉴来自于全国第二次土壤普查成果中太湖地区 37 个县(市、区)1:5 万土壤图,在 ArcGIS 支持下采用双标准纬线等积圆锥投影,对各个县(市、区)1:5 万纸质土壤图进行数字化、编辑和修改建成,共计水稻土图斑 52 031 个。土壤图的基本分类单元为土种,共计 622 个土种,分别归属 6 个亚类和 137 个土属,所有土壤图的制图单元均采用中国土壤发生分类系统(Genetic Soil Classification of

China, GSCC)<sup>[13]</sup>。

土壤属性数据库包括水稻土样点的位置描述、理化性质和肥力因子,如土壤类型名称、土层深度、剖面地点、全氮、有机质、全磷和全钾含量等,其中,土壤全氮采用重铬酸钾、硫酸硝化-蒸馏法测定(凯氏定氮法)。1982 年表层样点数据来自于太湖地区 37 个县(市、区)在《中国土种志》、《省级土种志》、《地市级土种志》和《县级土种志》中所记录的水稻土剖面资料,共计 1 096 个(图 2)。2000 年表层样点数据来自于土壤质量演变与持续利用“973”项目,共计 1 393 个(图 2)。空间数据和属性数据采用 Shi 等<sup>[14]</sup>提出的“PKB (Pedological Knowledge Based Method)”法<sup>[15-17]</sup>连接。

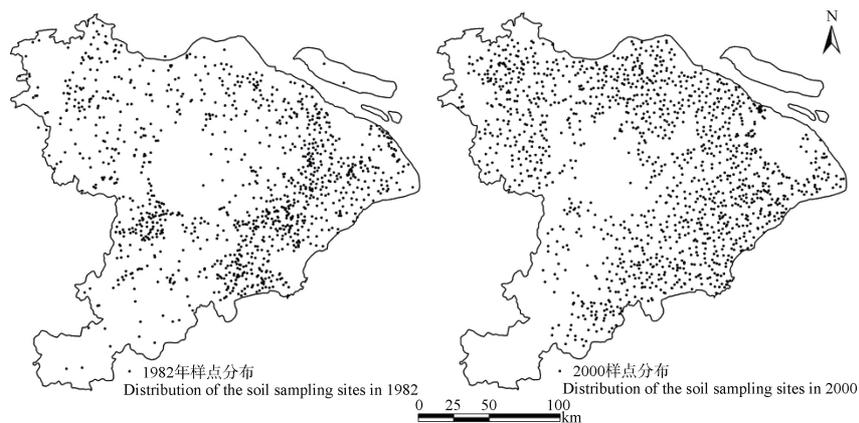


图 2 1982 年和 2000 年太湖地区水稻土样点分布图

Fig. 2 Distributions of paddy soil sampling sites in the Tai-Lake Region in 1982 and 2000

(2) 气象和施肥数据。气象数据来源于太湖地区 13 个国家气象站数据资料,包括 1982—2000 年逐日降雨量、最高和最低气温<sup>[18]</sup>。农作物管理数据来源于以县(市、区)为统计单元的农村统计年鉴,包括 1982—2000 年 37 个县(市、区)水稻土年均氮肥和农家肥施用量<sup>[19]</sup>。气象数据和施肥数据均以县(市、区)为最小统计单元连接到水稻土数据库中。

### 1.3 数据统计分析

不同土壤类型、土区和行政区面积加权平均全氮含量(STN, Soil Total Nitrogen Content,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、全氮含量变化量(VSTN, Variation of Soil Total Nitrogen,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和全氮含量变化幅度(VSTNC, Variability of Soil Total Nitrogen Content, %)计算公式如下:

$$\text{APS} = \sum_{i=1}^n \text{APS}_i \quad (1)$$

$$\text{STN}_f = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{STN}_i \times \text{APS}_i)}{\sum_{i=1}^n \text{APS}_i} \quad (2)$$

$$\text{VSTN} = \text{STN}_{2000} - \text{STN}_{1982} \quad (3)$$

$$\text{VSTNC} = \frac{\text{STN}_{2000} - \text{STN}_{1982}}{\text{STN}_{1982}} \times 100 \quad (4)$$

式中,APS 为研究区水稻土总面积( $\text{hm}^2$ ), $\text{APS}_i$ 和 $\text{STN}_i$ 分别表示土壤数据库中每个图斑的面积( $\text{hm}^2$ )和表层水稻土(0~15 cm)全氮含量( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), $n$ 代表图斑数。 $\text{STN}_f$ 代表水稻土 1982 年或 2000 年土壤全氮含量( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), $f$ 代表年份( $f=1982, 2000$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 1982—2000 年太湖地区水稻土全氮含量变化

在 1:5 万土壤数据库下太湖地区水稻土图斑为 52 031 个, 总面积为 2.32 M hm<sup>2</sup>, 1982 年和 2000 年表层水稻土 (0~15 cm) 全氮含量分别为 1.58 g·kg<sup>-1</sup> 和 1.79 g·kg<sup>-1</sup>, 近 20 年的增幅为 13.3% (表 1), 这一结果与很多学者研究认为“第二次土壤普查以来我国表层土壤全氮含量呈上升趋势的结果一致”<sup>[8-10, 20-21]</sup>。水稻土全氮含量上升主要驱动因素为该地区氮肥和农家肥施用量的大幅度增加 (图 3)<sup>[4, 8, 21-22]</sup>。据统计, 1982 年太湖地区氮肥和农家肥平均施用量分别为 N 243 kg·hm<sup>-2</sup> 和 C 231 kg·hm<sup>-2</sup>, 而 2000 年为 345 kg·hm<sup>-2</sup> 和 270 kg·hm<sup>-2</sup>, 增幅分别达 37.66% 和 19.86%。此外, 气候因子也在长期的全氮含量变化中起着重要作用, 据统计, 1982 年和 2000 年太湖地区年均降雨量分别为 1 102 mm 和 1 175 mm, 该地区缓慢上升的年均降雨量有利于土壤氮素的积累<sup>[23]</sup>。

从全氮含量空间分布来看 (图 4), 1982 年太湖地区水稻土全氮含量总体由南向北递减, 南北差异明显。其中, 全氮含量较高 (>2.0 g·kg<sup>-1</sup>) 的水稻土主要分布在东部、东南部以及南部地区, 面积为 0.40 M hm<sup>2</sup>, 占太湖地区水稻土总面积的 17%, 这些区域

气候温和, 较低的温度和较高的降雨量有利于土壤全氮的积累 (表 2)。全氮含量较低 (<1.0 g·kg<sup>-1</sup>) 的水稻土主要分布在太湖地区西北部地区, 面积为 0.12 M hm<sup>2</sup>, 占水稻土的总面积的 5.1%, 这些区域整体温度较高, 且降水量偏少, 导致土壤水分不足, 加速了氮素的矿化分解 (表 2)<sup>[23-24]</sup>。2000 年太湖地区全氮含量空间分布格局与 1982 年基本相同, 但全氮含量较高 (>2.0 g·kg<sup>-1</sup>) 的水稻土面积增加到 0.61 M hm<sup>2</sup>; 此外, 全氮含量较低 (<1.0 g·kg<sup>-1</sup>) 的面积减少至 0.06 M hm<sup>2</sup>。从全氮含量变化量空间分布来看, 太湖地区 1982—2000 年不同区域差异也较大, 且增减趋势不一, 约 68% 面积水稻土表层全氮含量有所上升, 主要分布在该地区的西部、西北部和沿江流域, 32% 面积水稻土全氮含量有所降低, 主要分布在太湖地区的东部、东南部和中部地区。其中, 全氮含量上升范围在 0~0.5 g·kg<sup>-1</sup> 之间的最多, 面积达 0.92 M hm<sup>2</sup>, 主要分布在太湖地区北部和西北部, 而全氮含量下降主要集中在 -0.5~0 g·kg<sup>-1</sup> 范围内, 面积为 0.56 M hm<sup>2</sup>, 主要分布在太湖地区的东北部和东部区域。太湖地区水稻土近 20 年的全氮含量变化量与初始全氮、有机碳含量呈负相关 (表 2), 主要是因为全氮含量较低的区域, 农民会投入更多的肥料来提高作物产量, 而全氮含量较

表 1 太湖地区水稻土全氮含量统计

Table 1 Statistics of soil total nitrogen contents in paddy soils of the Tai-Lake Region, China

年份 Year	最小值 Min/ (g·kg <sup>-1</sup> )	最大值 Max/ (g·kg <sup>-1</sup> )	平均值 Mean/ (g·kg <sup>-1</sup> )	标准差 SD	变异系数 CV/%
1982	0.21	3.57	1.58	0.51	32.28
2000	0.36	4.28	1.79	0.60	33.52

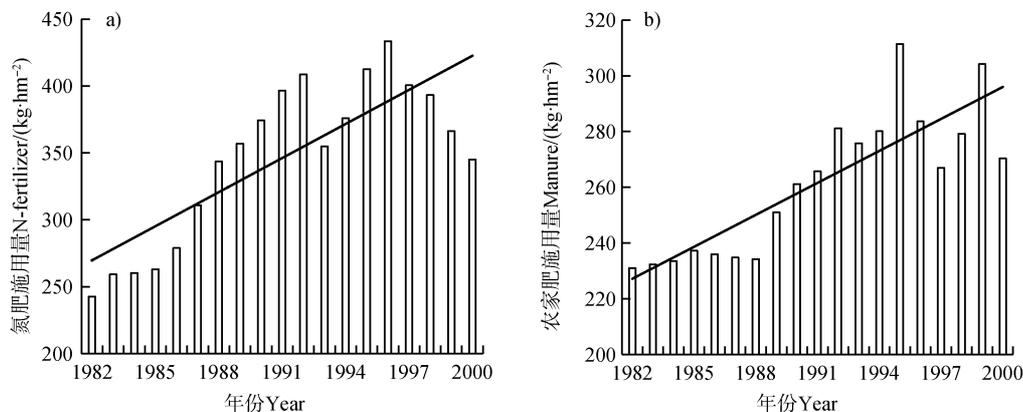


图 3 1982—2000 年太湖地区氮肥和农家肥施用量的年际变化

Fig. 3 Inter-annual variation of N-fertilizer (a) and manure (b) application rates during the period from 1982 to 2000 in the Tai-Lake Region

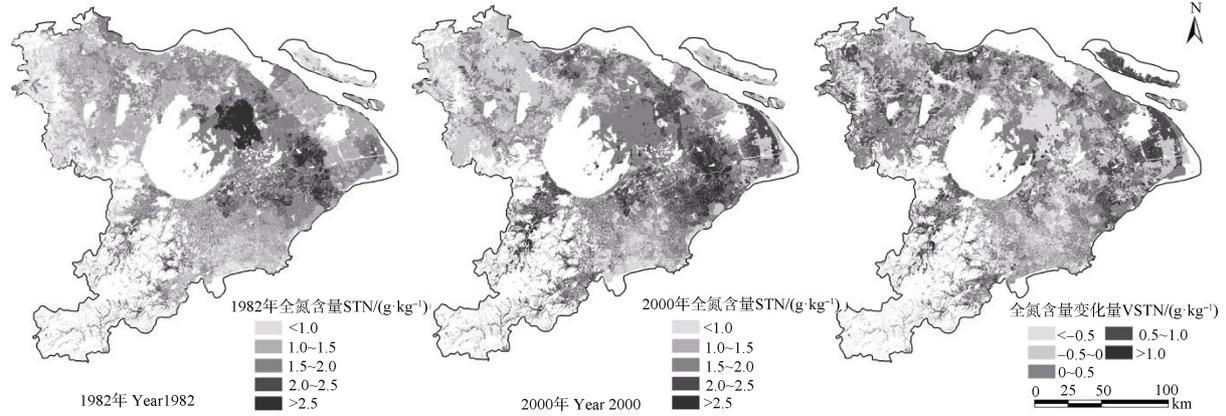


图 4 水稻土全氮含量及变化量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution map of paddy STN and its variation in the Tai-Lake Region, China

表 2 不同亚类、土区和行政区水稻土的初始土壤属性、气候和施肥数据统计

Table 2 Statistics of initial paddy soil properties, climate data and fertilization data relative to soil subgroup, sub-region and administrative area

分类 Classification	初始土壤属性 Initial soil properties				气候数据 Climate data		施肥数据 Fertilization data	
	土壤全氮 STN / (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤有机碳 SOC / (g·kg <sup>-1</sup> )	黏粒 Clay /%	pH	年均降雨量 Annual mean precipitation /mm	年均温度 Annual mean temperature /°C	氮肥 N-fertilizer / (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	农家肥 Manure / (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
亚类 Soil subgroup								
漂洗型水稻土 Bleached	1.18	10.35	16	6.1	1 153	16.4	303	205
潜育型水稻土 Gleyfied	2.33	23.68	35	7.1	1 203	16.7	380	225
渗育型水稻土 Percogenic	1.23	11.15	22	6.9	1 146	16.3	324	240
脱潜型水稻土 Degleyfied	1.91	19.10	30	6.5	1 256	16.7	386	267
淹育型水稻土 Submegegenic	1.00	10.20	15	6.8	1 080	16.1	310	239
潜育型水稻土 Hydromorphic	1.59	15.08	28	6.7	1 219	16.6	361	278
土区 Soil sub-region								
低山丘陵土区 Low mound and hilly area	1.38	13.20	22	6.0	1 217	16.1	318	235
太湖平原土区 Tai-Lake Plain	1.57	15.12	24	6.6	1 154	16.5	321	220
冲积平原土区 Alluvial Plain	1.45	13.19	27	7.2	1 213	16.7	378	330
低洼圩田土区 Polder area	1.83	17.94	30	6.5	1 241	16.7	385	249
行政区 Administrative area								
江苏省 Jiangsu Province	1.48	13.85	25	6.5	1 156	16.5	315	200
浙江省 Zhejiang Province	1.79	17.64	29	6.3	1 347	16.4	418	302
上海市 Shanghai City	1.64	15.78	26	7.4	1 189	16.8	398	392
太湖地区 Tai-Lake Region	1.58	15.11	26	6.7	1 207	16.5	355	261

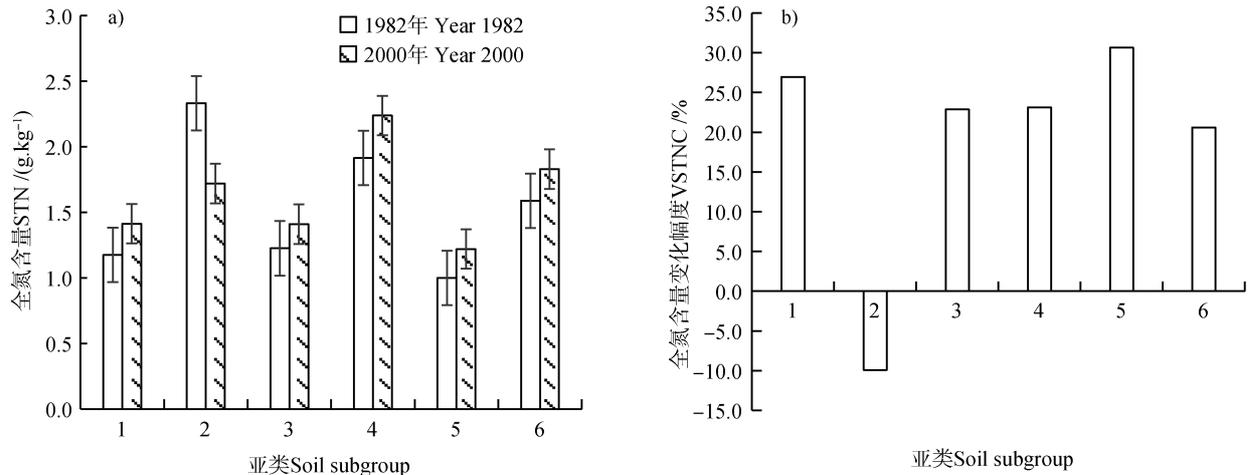
STN: 土壤全氮, soil total nitrogen content, SOC: 土壤有机碳, soil organic carbon content

高的区域农民往往会忽略培肥，影响氮素含量<sup>[25]</sup>。

## 2.2 太湖地区不同亚类水稻土全氮含量差异

从图 5 可以看出，太湖地区不同时期各亚类全氮含量及其变化量差异很大。潜育型水稻土是太湖地区分布区域最广的亚类，主要分布在太湖平原和丘陵地区，面积为 1.23 M hm<sup>2</sup>，占研究区水稻土总

面积的 52.8%。该亚类 1982—2000 年全氮含量由 1.59 g·kg<sup>-1</sup> 上升至 1.83 g·kg<sup>-1</sup>，增幅达 15.2% (图 5)，这主要与其较高的氮肥和农家肥施用量及较高的降雨量有关<sup>[25]</sup>。据统计，潜育型水稻土的氮肥和农家肥年均施用量分别达 N 361 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 和 C 278 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>，且年均降雨量超过 1 200 mm (表 2)。



1 漂洗型水稻土 Bleached, 2 潜育型水稻土 Gleyfied, 3 渗育型水稻土 Percogenic, 4 脱潜型水稻土 Degleyfied, 5 淹育型水稻土 Submegenic, 6 潜育型水稻土 Hydromorphic

图 5 表层水稻土 (0~15 cm) 各亚类全氮含量 (a) 及全氮含量变化幅度 (b)

Fig. 5 STN (a) and variability of STN (b) in the topsoil layer (0~15 cm) relative to subgroup of paddy soil in the Tai-Lake Region, China

脱潜型水稻土起源于潜育型水稻土，经过长期的耕作施肥和治水改土形成该亚类，面积为 0.41 M hm<sup>2</sup>，占研究区水稻土总面积的 17.7%。该亚类全氮含量变化量是各亚类中最高的，为 0.32 g·kg<sup>-1</sup>，这主要与脱潜型水稻土较高的黏粒含量、氮肥和农家肥施用量和年均降雨量有关<sup>[23-25]</sup>。据统计，脱潜型水稻土黏粒含量达 30%，氮肥和农家肥施用量分别为 N 386 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 和 C 267 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>，降雨量为 1 256 mm (表 2)。

渗育型水稻土多分布于地势较高的地区，耕作年限较短，面积为 0.37 M hm<sup>2</sup>，占研究区水稻土总面积的 15.9%，该亚类 1982—2000 年全氮含量由 1.23 g·kg<sup>-1</sup> 上升至 1.41 g·kg<sup>-1</sup>，增幅为 15.1%。尽管较高的温度 (16.3℃) 和较少的降雨量 (1 146 mm) 导致该亚类的 1982 年的土壤全氮含量较低<sup>[25-26]</sup>，但近 20 年较多的氮肥 (N 324 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 和农家肥施用量 (C 240 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 也使得该亚类全氮含量呈现缓慢增长趋势 (表 2)<sup>[24-25]</sup>。

漂洗型水稻土主要分布于低山丘陵的梯田，强

度淋洗作用导致黏粒淋失严重，该亚类太湖地区分布面积为 0.20 M hm<sup>2</sup>，占研究区水稻土总面积的 8.6%<sup>[27]</sup>。土壤砂粒多 (75%) 和黏粒少 (16%) 导致该亚类 1982 年全氮含量仅为 1.18 g·kg<sup>-1</sup>，但 1982—2000 年全氮含量上升了 0.24 g·kg<sup>-1</sup>，这与该亚类近 20 年氮肥 (N 303 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 和农家肥 (C 205 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 施用量相对较高有关<sup>[26]</sup>。

潜育型水稻土面积为 0.10 M hm<sup>2</sup>，占研究区水稻土总面积的 4.3%，是太湖地区唯一全氮含量下降的亚类。该亚类长期处于淹水还原状态，通气性不良导致土壤有机氮的矿化作用较弱而易于积累，1982 年的土壤全氮含量高达 2.33 g·kg<sup>-1</sup><sup>[24]</sup>。但 1982—2000 年全氮含量下降了 0.61 g·kg<sup>-1</sup>，变化幅度为 -26.3%，这主要与该亚类较高的初始有机氮含量、年均温度和较低的农业投入有关。据统计，该亚类有机肥施用量仅为 C 225 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>，年均温度高达 16.7℃ (表 2)<sup>[24-26]</sup>。

淹育型水稻土在太湖地区仅有 0.01 M hm<sup>2</sup>，主要分布在丘陵岗地的上部。1982 年该亚类全氮含量

较低为  $1.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，主要与其高温少雨的气候条件和土壤性质有关，据统计，该亚类温度和降雨量分别为  $16.1^\circ\text{C}$  和  $1\ 080 \text{ mm}$ ，黏粒含量仅为 15%。后期增加氮肥和农家肥的投入，2000 年全氮含量提高了  $0.22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  [25]。

### 2.3 太湖地区不同土区水稻土全氮含量差异

太湖地区是我国粮食高产地区，在因地制宜、合理布局方面有着丰富的经验，根据成土母质、土地利用方式、耕作制度和农业利用的特点分为 4 个土区：丘陵低山土区、太湖平原土区、冲积平原土区和低洼圩田土区 [12]。

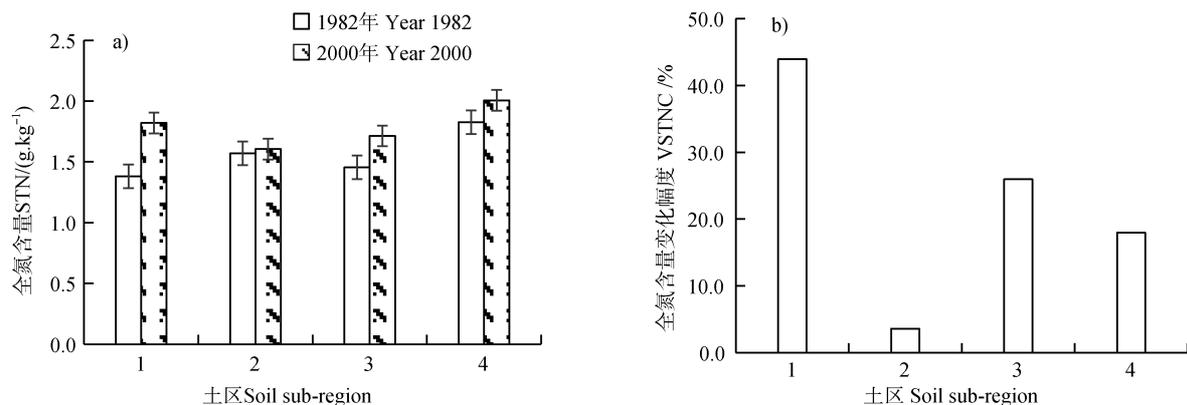
从图 6 可以看出，太湖地区不同时期各土区水稻土全氮含量及其变化量差异也很大。低洼圩田土区位于太湖地区西北部和南部，水稻土面积为  $0.69 \text{ M hm}^2$ ，主要土壤类型是潜育型水稻土和脱潜型水稻土，约占该土区水稻土总面积的 90%。1982 年和 2000 年土壤全氮含量均很高，分别为  $1.83 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $2.01 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，这主要是该地区较高的黏粒含量（31%）和氮肥、农家肥施用量（分别为  $\text{N } 385 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $\text{C } 249 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ）导致了全氮的富集（表 2） [8, 24, 29]。但 1982—2000 年间当地农民对该土区的潜育水稻土进行治水改土，使土壤的结构和肥力等发生了较大的变化，地下水位的降低、微酸性（6.6）和很高的初始全氮含量（ $1.83 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）降低了土壤全氮富集的速度，近 20 年全氮含量变幅在各土区中是最低的，仅为 9.8% [25, 27-28]。

冲积平原土区沿长江与钱塘江呈带状分布，水稻土覆盖面积为  $0.64 \text{ M hm}^2$ ，占研究区水稻土总面

积的 27.5% [13]。该土区内侧沿江过渡地区石灰性强，砂粒多，黏粒少，土壤空隙大，导致漏水漏肥较严重，初始全氮含量较低 [29]。1982—2000 年全氮含量富集较快，变化量为  $0.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，变化幅度为 17.9%。这主要与该土区较低的初始全氮含量及较高的氮肥和农家肥施用量有关，据统计，冲积平原土区水稻土初始全氮含量为  $1.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，氮肥和农家肥施用量分别达  $\text{N } 378 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $\text{C } 330 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ （表 2） [25]。

低山丘陵土区主要分布在太湖地区的西部与北部，水稻田面积为  $0.39 \text{ M hm}^2$ ，占研究区水稻土总面积的 17.0% [13]。该土区受地形的影响导致水分流失与地表侧漏，土壤质地较粗，黏粒含量仅为 22%，氮素难以明显富集 [31]。1982 年土壤全氮含量仅为  $1.38 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，低于其他 3 个土区，而 2000 年土壤全氮含量提升至  $1.82 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，主要原因与该土区较低的年均温度以及较高的降雨量有关，据统计，1982—2000 年该土区的年均温度和降雨量分别为  $16.1^\circ\text{C}$  和  $1\ 217 \text{ mm}$ （表 2） [24-25]；此外，较低的初始全氮也导致后期氮肥和有机肥的大量投入，导致近 20 年间全氮含量增幅达 31.8%。

太湖平原土区位于太湖地区的东部和北部，水稻土面积为  $0.59 \text{ M hm}^2$ ，占研究区水稻土总面积的 25.5% [13]。该土区土壤类型以潜育型水稻土（ $0.28 \text{ M hm}^2$ ）和漂洗型水稻土（ $0.13 \text{ M hm}^2$ ）为主。1982—2000 年该土区年均气温和年均降水量分别为  $16.5^\circ\text{C}$  和  $1\ 154 \text{ mm}$ ，高温少雨的气候条件不利于氮素的富集，全氮含量仅上升  $0.04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  [24-26]。



1 低山丘陵土区 Low mound and hilly area, 2 太湖平原土区 Tai-Lake Plain, 3 冲积平原土区 Alluvial Plain, 4 低洼圩田土区 Polder area

图 6 表层水稻土 (0~15 cm) 不同土区全氮含量 (a) 及全氮含量变化幅度 (b)

Fig. 6 STN (a) and variability of STN (b) in the topsoil layer (0~15 cm) relative to soil sub-regions in the Tai-Lake Region, China

## 2.4 太湖地区不同行政区水稻土全氮含量差异

从太湖地区各省份表层水稻土全氮含量变化来看(表 3), 1982—2000 年江苏省、上海市和浙江省全氮含量均呈富集趋势。其中, 地处南部及西南部的浙江省水稻土全氮含量最高, 增幅最大, 由 1982 年的  $1.79 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  增长至 2000 年的  $2.22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 变化幅度达 24.0%; 而北部及西北部的江苏省水稻土全氮含量最低、增长幅度较小, 由 1982 年的  $1.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  增长至 2000 年的  $1.59 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 变化幅度仅为 7.4%; 上海市水稻土全氮含量及增长幅度位于浙江省与江苏省之间, 由 1982 年的  $1.64 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  增长至 2000 年

的  $1.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 变化幅度为 15.2%。浙江省水稻土氮素富集程度明显高于江苏省, 一方面由于该省份农业投入高, 据统计, 浙江省氮肥和农家肥施入量分别为  $\text{N } 418 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $\text{C } 302 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 而江苏省氮肥和农家肥投入量仅分别为  $\text{N } 315 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $\text{C } 200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ; 另一方面是因为二者年均降雨量和温度差异较大, 浙江省年均降雨量和温度分别为  $1\ 347 \text{ mm}$  和  $16.4^\circ\text{C}$ , 而江苏省分别为  $1\ 156 \text{ mm}$  和  $16.5^\circ\text{C}$ , 高温少雨的气候条件会导致土壤水分不足, 土壤孔隙度变大, 有利于氮素的矿化分解(表 2)。

表 3 太湖地区不同县(市)水稻土面积、土壤全氮含量、变化量及变化幅度分布

Table 3 Area of and soil total nitrogen content, variation of soil total nitrogen in content and variability of soil total nitrogen in content in paddy soil relative to administrative area in the Tai-Lake Region, China

行政区 Administrative area	面积 Area / ( $\times 10^4 \text{ hm}^2$ )	1982 年全氮含量 STN <sub>1982</sub> / ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	2000 年全氮含量 STN <sub>2000</sub> / ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	变化量 VSTN/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	变化幅度 VSTNC/%
江苏省 Jiangsu Province					
常熟 Changshu	7.55	1.64	1.82	0.18	11.0
丹徒 Dantu	5.07	1.33	1.43	0.11	8.3
丹阳 Danyang	9.58	1.36	1.36	-0.004	0.0
江阴 Jiangyin	8.69	1.43	1.81	0.38	26.6
金坛 Jintan	7.10	1.23	1.52	0.30	24.4
句容 Jurong	8.03	0.86	1.21	0.35	40.7
昆山 Kunshan	7.57	1.97	1.98	0.01	0.5
溧阳 Liyang	10.84	1.04	1.28	0.24	23.1
太仓 Taicang	6.14	1.48	1.59	0.11	7.4
吴江 Wujiang	9.79	1.75	1.96	0.21	12.0
吴县 Wuxian	14.78	2.18	1.77	-0.42	-19.3
武进 Wujin	14.85	1.31	1.41	0.10	7.6
锡山 Xishan	9.77	1.53	1.57	0.05	3.3
宜兴 Yixing	10.34	1.33	1.55	0.22	16.5
张家港 Zhangjiagang	2.54	1.37	1.58	0.21	15.3
总计 Total	132.63	1.48	1.59	0.10	7.4
上海市 Shanghai City					
宝山 Baoshan	3.13	1.28	1.43	0.15	11.7
崇明 Chongming	3.73	0.91	1.53	0.63	69.2
川沙 Chuansha	3.71	1.41	2.14	0.73	51.8
奉贤 Fengxian	5.87	1.42	1.58	0.15	10.6
嘉定 Jiading	4.29	1.36	1.65	0.29	21.3

续表

行政区 Administrative area	面积 Area / ( $\times 10^4 \text{ hm}^2$ )	1982 年全氮含量 STN <sub>1982</sub> / ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	2000 年全氮含量 STN <sub>2000</sub> / ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	变化量 VSTN/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	变化幅度 VSTNC/%
金山 Jinshan	5.63	2.08	2.27	0.18	8.7
南汇 Nanhui	4.11	1.70	1.75	0.05	2.9
青浦 Qingpu	5.68	1.98	1.95	-0.03	-1.5
闵行 Minhang	3.49	1.24	1.92	0.69	55.7
松江 Songjiang	5.90	2.29	2.32	0.03	1.3
总计 Total	45.55	1.64	1.89	0.25	15.2
浙江省 Zhejiang Province					
安吉 Anji	4.18	1.90	2.78	0.88	46.3
德清 Deqing	3.11	1.92	2.27	0.36	18.8
海宁 Haining	3.92	1.31	1.54	0.24	18.3
海盐 Haiyan	2.74	1.60	2.14	0.54	33.8
湖州 Huzhou	6.02	2.05	2.60	0.55	26.8
嘉善 Jiashan	4.13	2.17	2.16	-0.01	-0.5
嘉兴 Jiaxing	6.57	1.95	2.01	0.06	3.1
临安 Linan	3.06	2.14	2.60	0.45	21.0
平湖 Pinghu	4.81	1.61	2.05	0.43	26.7
桐乡 Tongxiang	4.42	1.48	1.75	0.27	18.2
余杭 Yuhang	5.27	1.55	2.19	0.64	41.3
长兴 Changxing	5.62	1.71	2.48	0.77	45.0
总计 Total	53.84	1.79	2.22	0.43	24.0

STN<sub>1982</sub>: 1982 年土壤全氮 Soil total nitrogen content in 1982, STN<sub>2000</sub>: 2000 年土壤全氮 Soil total nitrogen content in 2000, VSTN: 变化量 Variation of soil total nitrogen, VSTNC: 变化幅度 Variability of soil total nitrogen content

从太湖地区各县(市、区)表层水稻土全氮含量变化来看(表 3), 1982—2000 年间安吉县、长兴县、川沙县、闵行区、余杭县和崇明县全氮含量变化量大于  $0.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 变化幅度均超过 40%。这可能与闵行区、川沙县和余杭县初始土壤全氮含量较低有关, 分别仅为  $1.24$ 、 $1.41$ 、 $1.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 且安吉县、余杭县、长兴县、闵行区和川沙县年均降雨量超过  $1\ 200 \text{ mm}$ , 崇明县和长兴县年均氮肥施用量较高, 超过  $\text{N } 350 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。相反, 1982—2000 年间吴县、青浦县、嘉善县和丹阳县 4 个县(市、区)全氮含量有所下降, 变化量分别为  $-0.42$ 、 $-0.03$ 、 $-0.01$  和  $-0.004 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这可能与这 4 个县较高的初始全氮含量、初始有机碳含量及气候条件有关。据统计, 吴县、嘉善县、青浦县和丹阳县初始全氮含量分别为  $2.18$ 、 $2.17$ 、 $1.98$  和  $1.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 初始土壤有机碳

含量分别为  $23.45$ 、 $20.77$ 、 $20.50$  和  $11.59 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 且丹阳县年均降雨量仅为  $1\ 068 \text{ mm}$ , 年均温度达到  $16.2^\circ\text{C}$ 。有研究表明, 土壤全氮变化与土壤有机碳变化趋势呈正相关关系<sup>[30]</sup>。其他各县(市、区)全氮含量变化量介于  $0\sim 0.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 变化幅度介于  $1\%\sim 40\%$  之间。

总体来看, 太湖地区各省份和县(市、区)全氮含量变化一方面受到土壤属性及气候条件的影响<sup>[31]</sup>; 另一方面也受到化肥施用量的影响, 一般情况下高的化肥施用量会导致全氮含量快速富集。相关研究表明, 我国肥料利用率平均不到 30%, 低于世界平均水平, 而过量的肥料投入会通过地表进入水体, 增加水体营养化的风险<sup>[32]</sup>。因此, 在今后太湖地区水稻田管理过程中, 根据各个区域的土壤属性和肥料投入量制定适宜的农业管理措施十分重要。

### 3 结 论

准确评估太湖地区水稻土全氮含量动态变化及空间分布可为防控该流域水体富营养化等环境问题提供重要依据。从本研究来看, 1982—2000 年太湖地区表层水稻土全氮含量整体呈上升趋势, 平均增加了  $0.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 氮素富集明显。从不同水稻土亚类来看, 脱潜型、潜育型、漂洗性和淹育型水稻土全氮含量增长均超过  $0.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 而潜育型水稻土是唯一下降的亚类, 减少了  $0.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从不同土区来看, 低山丘陵土区和冲击平原土区水稻土全氮含量上升较多, 分别为  $0.44$  和  $0.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 而低洼圩田土区和太湖平原土区全氮含量增长缓慢, 分别为  $0.18$  和  $0.04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从不同行政区来看, 江苏省、上海市和浙江省太湖地区水稻土全氮含量均呈不同程度的富集。由于施肥、气候和土壤理化性质等因素的共同作用, 1982—2000 年太湖地区土壤全氮含量产生不同程度的变化, 不同亚类、土区和行政区全氮含量差异显著。因此, 在今后太湖地区水稻土种植管理中, 根据不同亚类、土区和行政区氮素富集程度适当减少氮肥施用量, 以防止氮素流失造成的水体富营养化风险是十分必要的。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70 ( 2 ): 153—226
- [ 2 ] 王敬国. 土壤氮素的转化过程中温室效应气体的释放和吸收. *环境科学研究*, 1993, 6 ( 5 ): 47—51  
Wang J G. Release and absorption of greenhouse gases during the transformation of soil nitrogen ( In Chinese ). *Research of Environmental Sciences*, 1993, 6 ( 5 ): 47—51
- [ 3 ] 刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 太湖地区氮肥减量对水稻产量和氮素流失的影响. *生态学杂志*, 2017, 36 ( 3 ): 713—718  
Liu H J, Guo Z, Zheng J C, et al. Effects of nitrogen reduction on rice yield and nitrogen loss in Taihu area ( In Chinese ). *Ecology*, 2017, 36 ( 3 ): 713—718
- [ 4 ] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响. *土壤学报*, 2016, 53 ( 2 ): 292—304  
Wang J, Cheng Y, Cai Z C, et al. Effects of long-term fertilization on key processes of soil nitrogen cycling in agricultural soil ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 ( 2 ): 292—304
- [ 5 ] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47: 151—163
- [ 6 ] Tian H Q, Wang S Q, Liu J Y, et al. Patterns of soil nitrogen storage in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20 ( 1 ): 1—9
- [ 7 ] Lin J S, Shi X Z, Yu D S, et al. Nitrogen storage and variability in paddy soils of China. *Biogeosciences Discussions*, 2010, 7 ( 1 ): 855—877
- [ 8 ] 焦闪闪, 张黎明, 蒋威, 等. 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. *土壤学报*, 2016, 53 ( 5 ): 1107—1119  
Jiao S S, Zhang L M, Jiang W, et al. Analysis of dynamics of deposit of total nitrogen in farmland of Fujian Province based on 1:50 000 soil database ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 ( 5 ): 1107—1119
- [ 9 ] 代子俊, 赵霞, 李德成, 等. 近 30 年湟水流域土壤全氮时空变异及影响因素. *土壤学报*, 2018, 55 ( 2 ): 338—350  
Dai Z J, Zhao X, Li D C, et al. Spatio-temporal variation of soil total nitrogen in Huangshui River Basin and its affecting factors in the past 30 years ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 ( 2 ): 338—350
- [ 10 ] 李庆远. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992  
Li Q K. Paddy soil of China ( In Chinese ). Beijing: Science Press, 1992
- [ 11 ] 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. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 222: 13—22
- [ 12 ] 徐琪, 陆彦椿, 刘元昌, 等. 中国太湖地区水稻土. 北京: 科学出版社, 1980  
Xu Q, Lu Y C, Liu Y C, et al. Paddy soil of Tai-Lake region in China ( In Chinese ). Beijing: Science Press, 1980
- [ 13 ] Soil Survey Staff in USDA. Keys to Soil Taxonomy, 11th ed. Washington: USDA-Natural Resources Conservation Service. 2010: 163—165
- [ 14 ] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, et al. Cross-reference system for translating between genetic soil classification of China and soil taxonomy. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 13—22
- [ 15 ] 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. *应用生态学报*, 2005, 16 ( 12 ): 2279—2283  
Yu D S, Shi X Z, Sun W X, et al. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:1 000 000 soil database ( In Chinese ). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 ( 12 ): 2279—2283
- [ 16 ] 李晓迪, 王淑民, 张黎明, 等. 土壤数据源和制图比例尺对旱地土壤有机碳储量估算的影响. *土壤学报*, 2016, 53 ( 1 ): 58—71

- Li X D, Wang S M, Zhang L M, et al. Impacts of source of soil data and scale of mapping on assessment of organic carbon storage in upland soil ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 ( 1 ): 58—71
- [ 17 ] 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. *土壤学报*, 2018, 55( 3 ): 607—620  
Chen Z X, Zhang N, Zhang L M, et al. Scale effects of soil organic carbon storage in Fujian Province, China ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 ( 3 ): 607—620
- [ 18 ] China Meteorological Administration. China meteorological data daily value. China Meteorological Data Sharing Service System, Beijing, China. 2011, <http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp>
- [ 19 ] Tang H, Qiu J, Ranst E V, et al. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model. *Geoderma*, 2006, 134 ( 1/2 ): 200—206
- [ 20 ] 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 Environment Science*, 2010, 19 ( 5 ): 1191—1196
- [ 21 ] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 1980-2010 年安徽省耕地表层土壤养分变化特征. *土壤*, 2018, 50 ( 1 ): 173—180  
Zhao M S, Li D C, Zhang G L, et al. Changes of soil nutrient contents of cultivated lands in Anhui Province from 1980 to 2010 ( In Chinese ). *Soils*, 2018, 50 ( 1 ): 173—180
- [ 22 ] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影 响. *土壤学报*, 2003, 40 ( 3 ): 426—432  
Wang D J, Lin J H, Sun R J, et al. Optimum nitrogen rate for a high productive rice-wheat system and its impact on the groundwater in the Taihu Lake area ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 ( 3 ): 426—432
- [ 23 ] Marcos F, Paulo P, Meritxell A, et al. Impact of an intense rainfall event on soil properties following a wildfire in a Mediterranean environment ( North-East Spain ). *Science of the Total Environment*, 2016, 572 ( 1 ): 1353—1362
- [ 24 ] 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
- [ 25 ] 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. *生态学报*, 2015, 35( 12 ): 3959—3969  
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 ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 ( 12 ): 3959—3969
- [ 26 ] 陈安磊, 谢小立, 文菀玉, 等. 长期施肥对红壤稻田氮储量的影响. *生态学报*, 2010, 30( 18 ): 5059—5065  
Chen A L, Xie X L, Wen Y Y, et al. Effect of long term fertilization on soil profile nitrogen storage in a reddish paddy soil ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 ( 18 ): 5059—5065
- [ 27 ] 王志刚, 赵永存, 廖启林, 等. 近 20 年来江苏省土壤 pH 值时空变化及其驱动力. *生态学报*, 2008, 28 ( 2 ): 720—727  
Wang Z G, Zhao Y C, Liao Q L, et al. Spatio-temporal variation and associated affecting factors of soil pH in the past 20 years of Jiangsu Province, China ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 ( 2 ): 720—727
- [ 28 ] 张继宗, 张维理, 雷秋良, 等. 太湖平原农田区域地表水特征及对氮磷流失的影响. *生态环境学报*, 2009, 18 ( 4 ): 1497—1503  
Zhang J Z, Zhang W L, Lei Q L, et al. Surface water characteristics of farmlands area and the impact of nitrogen and phosphorus losses from farmland in Taihu Lake region ( In Chinese ). *Ecology and Environment*, 2009, 18 ( 4 ): 1497—1503
- [ 29 ] 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
- [ 30 ] 胡嗣佳, 邓欧平, 张世熔, 等. 四川盆地水稻土有机碳与全氮的时空变异及影响因素研究. *土壤*, 2016, 48 ( 2 ): 401—408  
Hu S J, Deng O P, Zhang S R, et al. Spatial-temporal variability of soil organic carbon and total nitrogen in paddy soils in Sichuan Basin ( In Chinese ). *Soils*, 2016, 48 ( 2 ): 401—408
- [ 31 ] Durán J, Morse J L, Groffman P M, et al. Climate change decreases nitrogen pools and mineralization rates in northern hardwood forests. *Ecosphere*, 2016, 7 ( 3 ): 1—13
- [ 32 ] Tayefeh M, Sadeghi S M, Noorhosseini S A, et al. Environmental impact of rice production based on nitrogen fertilizer use. *Environmental Science & Pollution Research*, 2018, 25 ( 16 ): 1—11

## Research on Dynamics of Total Nitrogen in Tai-Lake Paddy Soils of China Based on 1 : 50 000 Soil Database

YUAN Ping<sup>1,2</sup> ZHANG Liming<sup>1,2†</sup> QIAO Ting<sup>1,2</sup> XIE Anqian<sup>1</sup> YU Dongsheng<sup>3</sup>  
SHI Xuezheng<sup>3</sup> XING Shihe<sup>1,2</sup> CHEN Hanyue<sup>1,2</sup>

(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)

(3 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract** Accurately assessing changes in soil total nitrogen content (STN) in farmland soil is the basis for effective field management. In this study, an area of 2.32 M hm<sup>2</sup> of paddy soils, or 37 counties (or cities) of in the Tai-Lake Region, was delineated as study zone. The 1 : 50 000 high accuracy paddy soil database developed and based on the analysis of the 1 096 samples of topsoil collected during the Second National Soil Survey in 1982 and the 1 393 samples of topsoil collected during the “973” Project in 2000 in this region was used as the basis for quantifying dynamic changes in STN in the paddy soils of the region over the past 20 years. Results show that STN in the paddy soils increased by 0.21 g·kg<sup>-1</sup> in the period from 1982 to 2000, displaying a significant accumulating trend, especially in degleyfied paddy soil, in which STN increased the most significantly or by as high as 17.0%. But in gleyfied paddy soils, it decreased by 26.2%. The dynamics of STN also varied with landform. In the low mound and hill areas it increased significantly or by 31.8%, while in the Tai-Lake plain region and polders it increased slowly up or by only 9.8%. Moreover, the dynamics of STN varied, too, with administrative zone, the mean STN of Anji, Changxing, Chuansha, Minhang, Yuhang and Chongming increased by more than 40%; while that of Wu, Qingpu, Jiashan and Danyang decreased somewhat. It is quite clear that as a whole, the soil total nitrogen in paddy soil of the Tai-Lake Region varied sharply with area, so it is imperative to reduce field fertilization, case-specifically in the light of soil subgroups, sub-regions and regional nitrogen enrichment degree so as to prevent soil nitrogen loss and water eutrophication.

**Key words** Soil total nitrogen content; 1 : 50 000 soil database; Paddy soil; Tai-Lake Region

(责任编辑：檀满枝)